ISSN1881-9273

関 東 森 林 研 究

第 76 巻

Kanto Journal of Forest Research Vol. 76

関 東 森 林 学 会

2025 年 3 月

関東森林研究　第 76 巻

目　　次

論　　文

日本の生物圏保存地域における特徴とみなかみ町による里山保全への活用実態
松本創平・山下詠子……1

林業作業者における安全行動と技術習得に関する意識
田中　亘・笹田敬太郎・猪俣雄太・高山範理・御田成顕・片田　陽・山口広子・都築伸行……5

野外教育研究者がみる演習林の活用方法－日本大学藤沢演習林の事例－
杉浦克明・大石康彦・山田　亮……9

航空機 LiDAR データによる林分平均形状比・収量比数・相対幹距の推定に関する検討　－茨城県・福岡県の一部地域の事例－
西園朋広・田中真哉・高橋與明・齋藤英樹・福本桂子……13

航空機 LiDAR データによる樹冠長の推定に関する検討　－福岡県久留米市の事例－
齋藤英樹・田中真哉・高橋正義・西園朋広・高橋與明……17

環境情報と空間解析によるヤナギ超短伐期施業の適地評価　－千葉県印西市，宮崎県都農町のポテンシャルと課題－
髙橋正義・北原文章・鄭　峻介・早舩真智・大森　聡……21

71 年生アカマツ人工林の成長経過と間伐の影響
細田和男・西園朋広・北原文章・田中真哉・小谷英司……25

福島県相馬地方の放置林における間伐の実施とその後の植生変化
上原　巌……29

早生樹ウラジロエノキに対する穿孔性被害の発生について：石垣島の事例
竹中浩一・数井　宏……33

コナラ苗におけるツリーシェルターの効果
百田楓太・山嵜　俊・安部哲人……37

ツリーシェルターによるクヌギへの成長促進効果の検討とコナラとの比較
山嵜　俊・百田楓太・安部哲人……41

半島マレーシアに植栽された 10 樹種の成長と木部形質の関係
田中憲蔵・河合清定・米田令仁・Alias Mohamad AZANI・Zamah Shari NUR HAJAR……45

サクラ挿し木の生存および発根に対する二酸化炭素施用の効果
岩本宏二郎・勝木俊雄……49

緩効性肥料の施用位置がスギ実生コンテナ苗の生育に及ぼす影響
阿部森也……53

ヤマグワの水挿しにおける底部の処理条件の違いが発根におよぼす影響の検討
戸田翔子・田中 恵・上原 巌……57

養分不足のスギコンテナ苗に対する秋施肥が耐凍性に及ぼす影響
飛田博順・原山尚徳・上村 章・香山雅純・齋藤隆実……61

クマイチゴが繁茂したスギ大苗造林地における薬剤を利用した省力的な下刈り方法の検討
飯田玲奈……65

皆伐再造林地における獣害防止ネットの管理方法の確立
山田勝也……69

関東育種基本区のマツノザイセンチュウ抵抗性クロマツの着花量および早晩性
大平峰子・木村　恵……73

森林樹木における葉の他感作用が植物実生の成長に及ぼす影響
丸山真依・田中 恵・上原 巌……77

半島マレーシアにおいて分布降水量が異なるフタバガキ科稚樹 8 種における土壌乾燥応答と形質の関係
河合清定・Kevin Kit Siong NG・Soon Leong LEE……81

個体ベースモデルを用いたマレー半島におけるフタバガキ人工林の初期生残率のシミュレーション
諏訪錬平・Mohammad S. H. MANDAL・田中憲蔵・野口正二・大谷達也・星野大介・Zamah Shari NUR HAJAR
……85

落葉広葉樹二次林における枯死木の動態
長池卓男……89

九州南部の常緑広葉樹二次林の林齢による林分構造および種組成の変化
五十嵐哲也・佐藤 保……93

連年施肥を受けたウダイカンバ・トドマツ林における葉の炭素・窒素安定同位体比の経時変化
長倉淳子・古澤仁美・中下留美子・伊藤江利子・橋本 徹……97

本川の水位変動が支川流域の内水特性に及ぼす影響　－筑後川と寒水川の関係を事例として－
本田尚正・堀 佑菜……101

広葉樹林における火災発生危険度の特性
玉井幸治・後藤義明……105

流木の停止条件式を用いた数値シミュレーション手法の開発
鈴木拓郎・經隆 悠……109

流木混じり土石流を捕捉するスギ林における間伐の影響の検討
岡田康彦・長井 斉・丸田龍一郎……113

東京農業大学奥多摩演習林狩倉沢流域における表層土壌の透水性と植生および地形との関係
佐藤貴紀・酒井美瑳・橘 隆一……117

対照流域法で必要な基準期間の年数について －釜淵森林理水試験地を事例として－
久保田多余子・阿部俊夫・小田智基……121

冷温帯と暖温帯に植栽されたブナ個葉のガス交換特性の環境応答
山田 陸・小坂 泉・佐々木大和・鈴木実蓉・千本松武秀・早川 大・前野遥希・岡 優太・瀧澤英紀……125

群馬県における確率年を用いた降雨評価による過去 19 年間の林道災害分析
有賀一広・渡部逸晴・小林 諒……129

モンゴルにおける欧州型 CTL 導入による枯死木未利用材利用可能量推計
高木幹太・有賀一広・池田勇太・石栗 太・白澤紘明・Biligt BATTUVSHIN・Ganbaatar CHULTEM……133

機械学習による森林バイオマス安定供給のための伐採計画手法の構築に関する検討
王 煒恒・金 鉉倍・吉岡拓如……137

グラフ畳み込みネットワークを用いた森林の空間特性解析に基づくグループ化した林分伐採手法に関する研究
尤 陽宇・金 鉉倍・吉岡拓如……141

伐木作業における熱中症リスクの評価手法の検討
中田知沙・板谷明美・野田晋一・渡邉由一・櫻木隆満・山口浩和・猪俣雄太……145

山梨県の亜高山帯針葉樹林におけるコメツガ稚樹へのニホンジカの摂食の影響
林 耕太……149

菌従属栄養植物ギンリョウソウモドキの鱗片葉に内生する菌類群集
松倉君予・深谷美羽・上村真由子・太田祐子……153

異なる菌根タイプの根圏および周辺土壌における放線菌の出現傾向
田中 恵・小山純平……157

菌性冬虫夏草類ハナヤスリタケ（*Tolypocladium ophioglossoides*）の培養特性
佐藤大樹……161

トリュフ菌共生苗木の植栽において苗木の定着に必要な管理条件の検討
古澤仁美・仲野翔太・中村慎崇・野口享太郎・山中高史……165

コナラおが粉を培地基材としたナメコ菌床栽培におけるコーンコブミール培地のエノキタケ廃菌床による培地基材置換率の検証
清水達哉・島津桃子……169

速　報

ふもとっぱらにおけるブッシュクラフトイベントの可能性 ー東京農業大学学生対象のアンケートを事例としてー
佐藤孝吉・竹田悠悟……173

デジタル航空写真によるスギ林の林分パラメータの広域推定手法の開発
小谷英司・田中真哉……175

スギ特定母樹の自然交配種子から育成した苗木の植栽後の生育特性
前川直人・宇都木景子・鈴木孝典……177

仕様の異なるカメムシ防除袋がスギ種子の発芽率に与える影響
室　紀行……179

1 年生コンテナ苗の生産に向けた培土と肥料の検討
向井愛美……181

スギコンテナ苗生産におけるスギ材粉砕チップの代替培土としての利用可能性
飯泉佳世……183

簡易なニホンジカ捕獲技術の実証試験
松山元昭……185

Kanto Journal of Forest Research Vol.76

CONTENTS

Article

Biosphere Reserves in Japan and their actual use in Satoyama conservation by Minakami Town
Sohei MASTUMOTO, Utako YAMASHITA……1

Forestry workers' awareness of safe behavior and technical acquisition
Wataru TANAKA, Keitaro SASADA, Yuta INOMATA, Norimasa TAKAYAMA, Nariaki ONDA, Haruna KATADA, Hiroko YAMAGUCHI, Nobuyuki TSUZUKI……5

The use of university experimental forests by outdoor education researchers: A case study of the Fujisawa Experimental Forest, Nihon University
Katsuaki SUGIURA, Yasuhiko OISHI, Ryo YAMADA……9

Airborne LiDAR-based estimation of average height-diameter ratio, relative yield index, and relative spacing index: A case study in selected areas of Ibaraki and Fukuoka prefectures
Tomohiro NISHIZONO, Shinya TANAKA, Tomoaki TAKAHASHI, Hideki SAITO, Keiko FUKUMOTO……13

Study on estimation of tree canopy length by aircraft LiDAR data -Case study of Kurume City, Fukuoka Prefecture, Japan-
Hideki SAITO, Shinya TANAKA, Masayoshi TAKAHASHI, Tomohiro NISHIZONO, Tomoaki TAKAHASHI……17

Assessment of suitable sites for willow short rotation coppice with environmental information and spatial analysis -Potential and challenge in Inzai City, Chiba and Tsuno Town, Miyazaki
Masayoshi TAKAHASHI, Fumiaki KITAHARA, Shunsuke TEI, Masatomo HAYAFUNE, Satoshi OMORI……21

Growth and thinning effect of 71-years-old Japanese red pine plantation
Kazuo HOSODA, Tomohiro NISHIZONO, Fumiaki KITAHARA, Shinya TANAKA, Eiji KODANI……25

Thinning and subsequent vegetation changes in abandoned forests in the Soma region of Fukushima Prefecture
Iwao UEHARA……29

A wood-boring beetle infestation of *Trema orientalis*: First report from Ishigaki Island
Koichi TAKENAKA, Hiroshi KAZUI……33

Effects of tree shelter on *Quercus serrata* seedlings
Futa MOMOTA, Suguru YAMAZAKI, Tetsuto ABE……37

Effects of tree shelter on growth of *Quercus acutissima* seedlings and comparison with the effects on *Q. serrata*
Suguru YAMAZAKI, Huuta MOMOTA, Tetsuto ABE……41

Relationships between growth and wood traits of ten tree species planted in Peninsular Malaysia
Tanaka KENZO, Kiyosada KAWAI, Reiji YONEDA, Alias Mohamad AZANI, Zamah Shari NUR HAJAR……45

The effects of carbon dioxide addition on the survival and rooting of cherry tree cuttings
Kojiro IWAMOTO, Toshio KATSUKI……49

Effect of application placement of a slow release fertilizer on the growth of *Cryptomeria japonica* containerized seedlings
Shinya ABE……53

Examination of the effect of different bottom treatment conditions on rooting on wood scion in the water of *Morus australis*
Shoko TODA, Megumi TANAKA, Iwao UEHARA……57

Effect of fall fertilization on cold tolerance of nutrient-deficient *Cryptomeria japonica* container seedlings
Hiroyuki TOBITA, Hisanori HARAYAMA, Masazumi KAYAMA, Takami SAITO……61

Examination of the labor-saving method of weeding using herbicide in the large size Japanese cedar seedlings plantation where *Rubus crataegifolius* have overgrown
Reina IIDA……65

Establishment of management methods for deer prevention nets in clear-cut reforestation areas
Katsuya YAMADA……69

Flower production and floral phenology of Japanese black pine resistant to pine wood nematode in Kanto breeding region
Mineko OHIRA, Megumi KIMURA……73

Effects of leaf allelopathy on plant seedling growth of forest trees
Mai MARUYAMA, Megumi TANAKA, Iwao UEHARA……77

Relationships between plant traits and responses to soil drought in saplings of eight dipterocarp species with varying distributions along a rainfall gradient in Peninsular Malaysia
Kiyosada KAWAI, Kevin Kit Siong NG, Soon Leong LEE……81

Simulation of the initial survival rate of dipterocarp plantation forests in the Peninsula Malay using an individual-based model
Rempei SUWA, Mohammad S. H. MANDAL, Tanaka KENZO, Shoji NOGUCHI, Tatsuya OHTANI, Daisuke HOSHINO, Zamah Shari NUR HAJAR……85

Dynamics of dead trees in a secondary deciduous broadleaf forest
Takuo NAGAIKE……89

Changes in stand structure, species diversity, and species composition depending on forest age in secondary evergreen broad-leaved forests in southern Kyushu
Tetsuya IGARASHI, Tamotsu SATO……93

Long-term changes in carbon and nitrogen stable isotope ratios in leaves of Monarch birch and Todo fir stands that have received repeated fertilization
Junko NAGAKURA, Hitomi FURUSAWA, Rumiko NAKASHITA, Eriko ITO, Toru HASHIMOTO……97

Influence of water level change of main river on inundation characteristics of tributary - Relationship between Chikugo River and Syozu River as an example -
Naomasa HONDA, Yuna HORI……101

Characteristics of fire occurrence risk in broad-leaved forest
Koji TAMAI, Yoshiaki GOTO……105

Numerical simulation method introducing a condition equation for the stopping of large woody debris
Takuro SUZUKI, Haruka TSUNETAKA……109

Influence of thinning in Japanese cedar stands on woody-debris flow trap
Yasuhiko OKADA, Hitoshi NAGAI, Ryuichiro MARUTA……113

Relationship between permeability of surface soil, vegetation and topography in Karikurasawa Watershed, Okutama Experimental Forest, Tokyo University of Agriculture
Takanoari SATO, Misa SAKAI, Ryuichi TACHIBANA……117

The number of years of control period required for the paired watershed method - A case study of the Kamabuchi experimental watershed
Tayoko KUBOTA, Toshio ABE, Tomoki ODA……121

Environmental responses of leaf gas exchange traits in *Fagus crenata* planted in cool- and warm-temperate zones
Rikuto YAMADA, Izumi KOSAKA, Yamato SASAKI, Mihasu SUZUKI, Takehide SENBONMATSU, Dai HAYAKAWA, Haruki MAENO, Yuta OKA, Hideki TAKIZAWA……125

Analyses on forest road damages over the past 19 years using rainfall evaluation with return periods in Gunma Prefecture
Kazuhiro ARUGA, Issei WATANABE, Ryo KOBAYASHI……129

Estimating available unused dead wood materials in Mongolia by Introduction of European-type CTLs
Kanta TAKAGI, Kazuhiro ARUGA, Yuta IKEDA, Futoshi ISHIGURI, Hiroaki SHIRASAWA, Biligt BATTUVSHIN, Ganbaatar CHULTEM……133

Harvesting planning method for stable biomass supply using machine learning
Weiheng WANG, Hyun-Bae KIM, Takuyuki YOSHIOKA……137

Study on grouped forest stand harvesting methods based on spatial characteristic analysis of forests using graph convolutional networks
YangYu YOU, Hyun-Bae KIM, Takuyuki YOSHIOKA……141

Development of an evaluation method for heat stroke risk in logging operations
Chisa NAKATA, Akemi ITAYA, Shinichi NODA, Yoshikazu WATANABE, Takamitsu SAKURAGI, Hirokazu YAMAGUCHI, Yuta INOMATA……145

Impact of bark stripping by sika deer on *Tsuga diversifolia* saplings survivorship at a subalpine forest in Yamanashi Prefecture
Kohta HAYASHI……149

Community composition of endophytic fungi isolated from the scale leaves of a mycoheterotrophic plant, *Monotropa uniflora*
Kimiyo MATSUKURA, Miu FUKAYA, Mayuko JOMURA, Yuko OTA……153

Trends of actinobacterial occurrence in rhizosphere and bulk soil with different mycorrhizal types
Megumi TANAKA, Junpei OYAMA……157

Cultural characteristics of *Tolypocladium ophioglossoides*, a fungal parasite of hypogeous fungi
Hiroki SATO……161

Examination of managements for establishment of saplings infected with *Tuber japonicum*
Hitomi FURUSAWA, Shota NAKANO, Noritaka NAKAMURA, Kyotaro NOGUCHI, Takashi YAMANAKA……165

Investigation of the replacement rate of corn cob meal medium by waste enokitake (*Flammulina velutipes*) mushroom substrate for *Quercus serrata* sawdust nameko (*Pholiota microspora*) cultivation
Tatsuya SHIMIZU, Momoko SHIMADZU……169

Letter

Possibilities for bushcraft events in Fumotoppara: A case study of Tokyo University of Agriculture students
Takayoshi SATO, Yugo TAKEDA……173

Developing a large-scale estimation method for Sugi forest stand parameters using digital aerial photography
Eiji KODANI, Shinya TANAKA……175

Post-outplanting growth of *Cryptomeria japonica* saplings produced from open pollinated seeds of specified mother trees
Naoto MAEKAWA, Keiko UTSUGI, Takanori SUZUKI……177

The effect of different protect bags on germination rate of *Cryptomeria japonica*
Noriyuki MURO……179

Consider of soil and fertilizer for production of 1-year-old container-grown seedlings
Manami MUKAI……181

Possibility of using crushed cedar wood chips as an alternative soil for containerized cedar seedling production
Yoshitoshi IIIZUMI……183

Demonstration test of simple sika deer capture technology
Motoaki MATSUYAMA……185

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

日本の生物圏保存地域の特徴とみなかみ町による里山保全への活用実態

松本創平[1]・山下詠子[1]

[1]東京農業大学地域環境科学部

要旨：ユネスコ MAB 計画の保護地域制度である生物圏保存地域(以下，BR)は，その機能に持続可能な発展が含まれている点から，農林業分野での効果が期待されている。本研究では日本の BR における特徴と里山保全活動の事例の分析から，里山保全に向けた BR の活用のあり方を考察する。群馬県みなかみ町では，自伐型林業と BR の理念が合致することから，自伐型林業の推進が開始された。それに伴い，自治体の林業振興に係る職員数を増加させ，BR の登録が自治体内での森林・林業の位置づけを変えたことが分かった。BR の登録のみでは地域への恩恵は限定的であり，自治体が BR の理念を踏まえてどのような施策を選択するのかが重要になる。その際に，地域内での里山保全の位置づけを改めさせる大義名分として BR を活用できる可能性があると考えられた。

キーワード：生物圏保存地域，ユネスコエコパーク，里山保全，自伐型林業

Biosphere Reserves in Japan and their actual use in Satoyama conservation by Minakami Town

Sohei MASTUMOTO[1], Utako YAMASHITA[1]

[1]Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

Abstract: Biosphere Reserves (BRs), protected area systems under the UNESCO MAB program, are expected to be effective in agriculture and forestry, in that its functions include sustainable development. This study examines the use of BRs in Satoyama conservation, based on an analysis of the characteristics of Japanese BRs and from the case study of Satoyama conservation activities in Minakami Town, Gunma Prefecture. In Minakami Town, the promotion of small-scale forestry was initiated, and the principles of small-scale forestry and BRs fit well together. The number of staff involved in forestry promotion in Minakami Town increased accordingly, and it was found that the registration of BRs led to a change in the positioning of forests and forestry in the town. BR registration alone has only limited benefits for a region, and what measures the town chooses is an important question, based on BR principles. In this case, it was indicated that a BR could be used to change the positioning of Satoyama conservation within the town.

Keywords: Biosphere Reserves, UNESCO Eco Park, satoyama conservation, small-scale forestry

I　はじめに

生物圏保存地域（Biosphere Reserves : 以下 BR と略記）とは, ユネスコの「人間と生物圏(Man and Biosphere)計画」の一事業として 1976 年に登録が始まった国際的な自然保護地域制度である。日本国内では 2010 年からユネスコエコパークと愛称されている。BR は生態系の保全と持続可能な利活用の調和を目的とし, 生物多様性の保全, 学術的研究の支援，経済と社会の発展という 3 つの機能を有し，これらの機能を発揮するために核心地域，緩衝地域，移行地域の 3 つの地域区分が設定される。核心地域は厳格な保護が求められ，指定にあたっては法的な保護担保措置を要する。緩衝地域は核心地域に影響を及ぼさない程度の環境教育やエコツーリズムなどが行われる地域である。移行地域は人々の生活地を含み，農林業等の人と自然の調和した経済活動の発展を実現する場となっており，BR に特徴的な地域区分である。また，BR では登録申請から登録後の管理運営まで，関係自治体によってなされる。世界自然遺産は政府が，国立公園は環境省が保全管理を行うのに対して，BR は基礎自治体である市町村が中心となって地域の様々なステークホルダーが管理運営に参画することとなる。

当初の BR の機能は，生物多様性の保全と学術的研究の支援のみであった。この枠組みの下で日本では 1980 年に屋久島，大台ヶ原・大峰山，白山，志賀高原の 4 地域が国主導で BR に登録された。その後，1995 年の第 2 回生物圏保存地域大会で策定されたセビリア戦略にて, BR の 3 つ目の機能である経済と社会の発展の場という方向性が示され，BR の地域区分に移行地域が新たに設けられた。セビリア戦略は BR 制度の性質を大きく変えた転換点となり，その後に綾，只見，南アルプス，祖母・傾・大崩，みなかみ，甲武信の 6 地域が BR に登録された。

BR に関する先行研究は，観光まちづくりについて論

（受理日 2025 年 1 月 16 日）

じる研究(*4*)，BR に対する地域住民の認識に関する研究(*6*)，「人口」「観光客数」「ふるさと納税額」の，3 つの指標から BR による地域活性化や経済効果の検証を試みた研究(*5*)等がある。一方，農林業に対する BR の影響に焦点を当てた研究は少ない。海外では，BR のロゴマークを作成し，農産物のブランド化が行われた地域の事例があるが(*1*，*3*)，日本における BR を用いた農林業分野への活用の事例報告は少ない。

そこで本研究では，まず国内の 10 地域の BR における運営体制，取組内容を整理する。その上で，BR の登録を契機に自伐型林業の推進を始めた群馬県みなかみ町の事例から，同事業の中で BR であることがどのように活用されたのか，また地域の林業への影響を明らかにする。

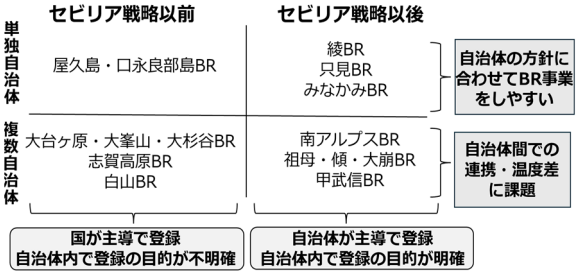
研究方法は，文献調査，及び（公財）日本自然保護協会，大台町，みなかみ町，利根沼田森林組合，みなかみ町内の自伐型林業の活動者にヒヤリング調査を実施した。

Ⅱ　日本における BR の特徴

1. 管理体制からみた BR の類型[1)]　セビリア戦略策定後，2010 年代まで停滞していた国内の BR の活動だったが，綾 BR の登録を目指す過程で再び活発化し始め，国内における審査基準と申請手続きが定められた。持続可能な発展を目指すことから，手続きなどは基礎自治体である市町村が主体となって取り組むことが決まった。

そのため，日本の BR では，セビリア戦略より前に登録されたか，以後に登録されたかによって，登録に至る経緯に違いがでる。セビリア戦略以後に登録された BR は自治体が主体となって登録しているため，登録の目的が自治体の施策に位置づけられている。しかしセビリア戦略以前に登録された BR は，国主導で登録されたため，現在は自治体で管理を行っているものの，BR 登録の目的が自治体の施策で位置づけられていなかった。

また，BR のほとんどにおいてエリアが複数自治体にまたがるため，中心的な 1 つの自治体が管理するか，複数自治体が連携して管理していくかでも管理運営体制は大きく異なる。特に難しいのは後者で，山岳地域には自治体の境界線が引かれていることも多く，核心地域の設定の段階で既に複数自治体にまたがっていることが多い。南アルプス BR は 10 市町村にまたがるが，文化や風土が多様であり，地理的な距離も遠いため各自治体担当者が集まりづらく，合意形成には相当な時間や労力がかかる。また，7 市町村から成る大台ヶ原・大峯山・大杉谷 BR では，十津川村と五條市はもともと BR への関心が低く，それぞれ 2022 年，2023 年に大台ヶ原・大峯山・大杉谷 BR 協議会から脱退している。以上より，登録時期と管理運営体制によって BR は 4 つに類型化される（図-1）。



図–1.　登録時期と管理体制による BR の 4 類型

Fig. 1 The four types of BR according to registration period and management system

2. 活動報告書から見た BR の取組の傾向　BR の取組については，日本ユネスコエコパークネットワーク(JBRN)の HP に掲載されている各 BR の活動報告書から分析した[2)]。この活動報告書は 2019 年に開かれた JBRN 大会における各 BR の報告資料である。

BR 登録後の自治体の新たな取組としては，大学との連携や，地域の小中学校を対象とした BR を関連させた環境教育，ユネスコスクールへの登録の推進など，学術的研究や環境教育への取組が多い傾向がみられた。一方で農林業の推進や里山保全などの取組の報告は少なかった。例えば只見 BR では，生物多様性の保護・保全や地域の伝統産業や文化の発展に資する活動などを対象として補助金を出しており，その一部に地場産業の育成を目的とした支援が含まれていた。

III　みなかみ BR における事例研究

1. みなかみ町の概要　みなかみ町（人口 1 万 7053 人，2024 年）は群馬県北部に位置し，2005 年に月夜野町，水上町，新治村の 3 町村が合併して誕生した。利根川でのラフティングやキャニオニング，登山やスキー等のアクティビティを有し，年間約 400 万人の観光客が訪れるアウトドア産業が盛んな地域である。

みなかみ町の林野率は約 9 割で，その 8 割を国有林が占め，民有林の約 7 割は広葉樹天然林である。私有林の平均所有山林面積は 1 ha 程だが，大規模所有者を除くと大部分の所有者が 0.2~0.3 ha と小規模零細な所有構造であり，BR 登録以前は小規模私有林の整備が進んでいない状況にあった。

2. BR 登録の経緯　みなかみ町が BR の登録を目指したきっかけとなったのは，同町の国有林で行われていた官民協働による赤谷プロジェクトのメンバーで MAB 計画委員でもあった土屋俊幸氏からの提案であった。その後，赤谷プロジェクトのメンバーで綾 BR への視察が行われた。当時の町づくりのテーマであった「みなかみ水・

環境力宣言」の主旨とも合致しており，3 町村の合併により町の方向性が定まらない中で，国際的な機関であるユネスコからの評価を得ることは町としての一体感を高めるものとして期待された。2014 年に町の産業振興に取り組むまちづくりビジョン策定委員会において BR 登録の提案がなされ，翌年の中間報告会では BR の登録と理念をまちづくりの核とすることが発表され，BR が町の総合戦略の中心に位置づけられた。そこから，BR の申請や手続きの業務を行うエコパーク推進室が町役場内に設置され，登録に向けた動きが本格的に始まった。以上の経緯を表-1 に示した。

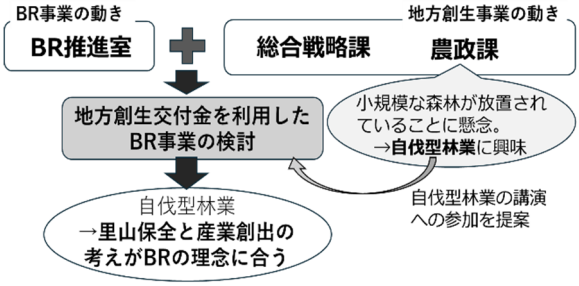
表–1. みなかみ BR の登録までの経緯

Table 1. Background to the registration of Minakami BR

年	月	内容
2012	10	土屋氏よる BR の紹介を受け，BR の検討を開始
	12	町の産業振興の取組に向けた機関である「まちづくりビジョン策定委員会」の設置
2014	3	まちづくりビジョン策定委員会において BR を提案し，まちづくりの核としていくことが賛同される
	7	BR 登録に向けた手続きなどを開始するため，町役場内にエコパーク推進室を設置
2015	8	日本ユネスコ国内委員会へ意思表明及び概要申請書を提出
2016	3	BR 推進のために具体的な事業計画等の検討をすすめる（→自伐型林業の推進へ）
	6-8	日本ユネスコ国内委員会へ申請書を提出
	8	日本ユネスコ国内委員会による国内審査
	9	日本ユネスコ国内委員会よりユネスコ本部へ推薦
	12	みなかみ BR の具体的な推進体制，事業の提示
2017	3	BR 国際諮問委員会による審査
	4	町役場内にエコパーク推進課の設置
	6	BR 登録

3. 自伐型林業の推進　2015 年度より開始された「まち・ひと・しごと創生総合戦略」により，2016 年には当時の総合戦略課と農政課とで地方創生事業の検討が始まっていた。そこに BR 登録後の取組を準備するエコパーク推進室が加わり，地方創生交付金を利用した BR 事業の検討が始まった。町の手入れ不足の森林を問題に感じていた農政課の担当職員が，総合戦略課，エコパーク推進室に対して BR 事業として自伐型林業を提案し，自伐型林業推進協議会の中嶋健造氏の講演を聞きに行った。講演を聞き，自伐型林業が里山保全と新たな産業創出につながる点から BR の理念との親和性を感じ，自伐型林業を推進する取組を開始することになった(図-2)。

2016 年 8 月には中嶋氏を町に招き，自伐型林業フォーラムを開催した。山林所有者や地域住民，林業関係者など 120 名がフォーラムに参加し，アンケートにて参加者の 5 割が「自伐型林業に挑戦したい」と答えるなど，町民の賛同の声も多かった。同年 10 月から 12 月の自伐型林業の研修には 46 名が参加し，翌年からは複数の自伐型林業グループが結成され，活動が展開された。



図–2. 自伐型林業推進の経緯

Fig 2. Background of the promotion of small-scale forestry

自伐型林業グループは 2017 年の 4 グループから 2024 年現在は 15 グループに増え，合計で 123 人が活動している。多くの人が自伐型林業の活動に副業として取り組んでおり，本業はアウトドアガイドや公務員，建築土木関係者などである。特にアウトドアガイドについては，ガイドの休業期に自伐型林業に取り組めるなど，職業として相性が良い部分もある。多くのグループが薪づくりや里山整備を目的として活動を行っている。

自伐型林業への町からの支援施策には，①国の森林・山村多面的機能発揮対策交付金に対する町からの上乗せ補助（地域環境保全タイプの 16 万円/ha に 4 万円/ha 上乗せ)，②自伐型林業に必要となる安全講習や技能講習の受講費補助，③町が所有する作業車等の資機材の貸し出し，④追加研修や安全講習等の情報提供などがある。

さらに町は 2018 年からは国産材家具メーカーのオークヴィレッジ株式会社と包括連携協定を結び，自伐型林業で伐り出された広葉樹を活用している。2021 年には 17 ㎥，2022 年には 21 ㎥，2023 年には 43 ㎥の木材が活用された。両者の HP ではそれぞれに，この協定が BR の理念をもとに里山整備や地域材を活用した 6 次産業のモデル化を目指すと説明されている。里山整備という環境保全のストーリーが商品の付加価値になっている。しかし，協定を結ぶきっかけは，オークヴィレッジの担当者がみなかみ町を訪れた際に広葉樹林資源に魅力を感じたためで，BR に魅力を感じてのものではなかった。

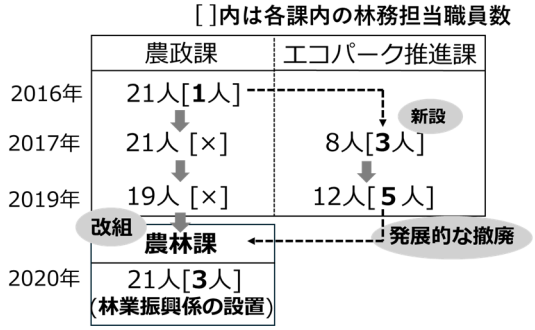
また，2022 年からは株式会社カインズとの協定も結び，自伐型林業で伐り出された薪がカインズ店舗で販売されている。2022 年には 6.6 ㎥が，翌年には 61 ㎥の薪が販売された。外国産の薪に比べて価格は高いものの，自伐型林業の説明やその活動が環境保全に繋がっていることがポスターで説明されている。一方，BR に関する説明は記述されていなかった。

町によるオークヴィレッジ，カインズとの連携において，両企業ともに環境保全型の産業への支援を商品への付加価値としていたが，協定を結ぶきっかけに BR が魅

力となって働いたわけではなかったといえる。

4. 自治体の改組　BR の登録申請をした翌年の 2017 年 4 月，町役場組織内に BR 登録を見据えた事業を展開するためにエコパーク推進課が設置された。同課の事業の一つに林業の振興が掲げられ，農政課の職員 21 人中 1 人のみだった林務担当職員がエコパーク推進課に移り，エコパーク推進課には林務担当職員が 3 人配属された。さらに 2019 年には 5 人に増員された。

2020 年には部署に限らず全庁的にエコパークの理念を共有し，それぞれの取組に BR の理念を組み込んで推進していくために，エコパーク推進課は発展的に撤廃される。それに伴い，農政課は農林課に改められ，農林課内に林業振興係が新設され，3 人が配属された(図-3)。町役場組織内の林務担当職員が増え，BR の登録を契機に森林林業に係る体制が拡充されたといえる。



図–3.　BR 登録による自治体の改組

Fig 3. Reorganization of municipalities through BR registration

Ⅳ　考察

みなかみ町では，BR が自伐型林業の推進の後ろ盾となったことや，自治体林政の体制が拡充されたことから，BR の登録により町における森林林業政策の位置づけが変化したことが分かった。しかしながら木材の販路拡大につながった外部企業との連携において，企業側にとって BR の魅力が連携のきっかけとなったわけではないが，BR の理念が結果として商品への付加価値に繋がっている。また，従来の人工林林業には変化がなかった。

BR は法的拘束力が弱く，日本ではまだ知名度が低いため，BR 登録そのものだけでは，地域への恩恵は少ないことが考えられる。しかし，みなかみ町では BR をまちづくりの方向性として活用し，BR 登録は自治体が地域の自然との関わりを再認識する機会となった。このように，自治体が BR を地域振興にどのように位置づけるか，その上でどのような地域の課題に目を向けるかが重要になると考えられる。一方で，みなかみ BR は登録申請の準備段階から自治体が主導したセビリア戦略後の単独自治体型の BR であるため，まちづくりの方向性と合わせて事業を展開しやすかったと考えられる。

現状の BR では地域そのものにかかる付加価値としての機能は限定的であるが，地域の課題の発見を促す「レール」としての機能があると考えられた。BR という「レール」に乗ったことをきっかけに，BR として何をするべきかを考え，その結果，里山保全や自伐型林業の推進に至った。また，薪の販売や町の自伐型林業への支援継続の要望も，BR が大義名分として活用されていた[3)]。自治体だけでなく地域住民も BR を活用して町づくりに参加することにつながり，自治体が BR の理念から外れそうな施策をした際に，その脱線を防ぐ機能も期待できる。

謝辞：みなかみ町役場農林課，企画課をはじめ調査にご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。

注

1）松田裕之・佐藤哲・湯本貴和 (2019)「ユネスコエコパーク」京都大学学術出版会　を参照して記述。

2) 活動報告書の他に，管理運営計画書や申請書もあるが，より具体的な活動が分かる活動報告書を閲覧した。

3）2024 年 10 月 9 日，自伐型林業の活動者へのヒヤリングによる。

引用文献

(1) 比嘉基紀・若松伸彦・池田史枝 (2012) ユネスコエコパーク (生物圏保存地域) の世界での活用事例. 日本生態学会誌 62: 365–373

(2) 松田裕之・佐藤哲・湯本貴和 (2019) ユネスコエコパーク. 京都大学学術出版会, 343pp

(3) 文部科学省 (2021) アジア太平洋地域のユネスコエコパークでエコラベルを活用するための優良事例. 第 46 回日本ユネスコ国内委員会科学小委員会人間と生物圏(MAB)計画文科会 配布資料

(4) 篠岡果・金度源・大窪健之 (2023) 三重県多気郡大台町における生物圏保存地域の自然資源利用を目標とする観光まちづくりの現状評価–関係者へのヒヤリング調査と類型化を通して–. 都市計画報告集 22 (2) : 392–339

(5) 朱宮丈晴・河野円樹・河野耕三・石田達也・下村ゆかり・相馬美佐子・小此木宏明・道家哲平 (2016) ユネスコエコパーク登録後の宮城県綾町の動向–世界が注目するモデル地域–. 日本生態学会誌 66: 121–134

(6) 戸田恵美・加藤和弘・古市武史 (2021) 屋久島・口永良部ユネスコエコパーク対する地域住民の認識に関する研究. 野生生物と社会 9: 1–13

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

林業作業者における安全行動と技術習得に関する意識

田中亘[1]・笹田敬太郎[1]・猪俣雄太[1]・高山範理[1]・御田成顕[1]・片田陽菜[2]・山口広子[2]・都築伸行[3]
[1]森林総合研究所・[2]筑波大学・[3]林野庁

要旨：本研究では，林業作業者における現場での安全行動に関する意識づけ，および技術習得のためのマニュアル類の活用状況を明らかにするために林業作業者へアンケート調査を実施した。林業作業者が安全でない行動を取りうる状況としては，現場の作業条件が厳しいときを挙げる者が最も多かった。また，経験年数が短い者は疲労がたまっているとき，一方で経験年数が長い者は経験則から判断するときを多く挙げる傾向が確認された。技術習得マニュアルの活用頻度については，年間で 1〜数回と回答する者が過半を占めることが確認された。また，マニュアル活用の頻度は一般班員において低い傾向が確認された。上記の結果から，安全行動と技術習得の意識向上に関しては属性等を考慮した適切な働きかけが有効であることが示唆された。
キーワード：林業作業者，アンケート調査，マニュアル，ガイドライン

Forestry workers' awareness of safe behavior and technical acquisition

Wataru TANAKA[1], Keitaro SASADA[1], Yuta INOMATA[1], Norimasa TAKAYAMA[1], Nariaki ONDA[1], Haruna KATADA[2], Hiroko YAMAGUCHI[2], Nobuyuki TSUZUKI
[1]Forestry and Forest Products Research Institute; [2]University of Tsukuba; [3]Forestry Agency

Abstract: In this study, a questionnaire-based survey was conducted among forestry workers to clarify their awareness of safe behavior during work and of their use of manuals for technical acquisition. When asked about situations in which forestry workers may behave unsafely, the most common answer was "when the working conditions in the field were harsh". In addition, it was confirmed that forestry workers with less experience tend to behave dangerously when they are tired, while those with more experience tend to behave dangerously when judging based on past experience. Regarding the frequency of use of technical acquisition manuals, it was confirmed that the majority of respondents replied that they use them once or several times a year. It was also confirmed that the frequency of manual use tends to be low among general team members. The above results suggest that appropriate efforts that take attributes of forestry worker into account are effective in raising awareness of safe behavior and technical acquisition.
Keywords: forestry worker, questionnaire survey, manual, guidelines

I　はじめに

林業における死傷者（休業 4 日以上）数は長期的に減少傾向にあり，2003 年で 2,874 人だったが 2023 年では 1,140 人となっている(*4*)。しかし，近年は減少傾向が鈍化する状況にある。また，他産業と比較しても受傷率が高いことには変わりがない。このような状況に対して，林野庁および厚生労働省は林業労働安全衛生対策として，マニュアル作成や伐木作業に関わるガイドラインの普及・定着による安全確保と技術習得を推し進めている(*2, 3, 5*)。

林業における労働災害に関する研究では，猪俣ら（2022）が 60 歳以上高齢層と 20 歳未満層の発生率が高いというように年齢との関係を指摘している(*1*)。他方で山田（2016）は経営主らによる巡視頻度の高い事業体では死傷災害が発生する確率が低くなるというデータを紹介し，従業環境の重要性を指摘している(*6*)。

本研究ではアンケート調査の結果を基に，林業作業者における現場での安全行動に関する意識づけ，および技術習得のためのマニュアル類の活用状況を明らかにする。特に後者において，林業作業者の属性等との関係を明らかにして，労働安全対策に関わる有効な働きかけ方について考察を加える。

II　調査方法

林業・木材製造業労働災害防止協会の林業部門の全 3,715 会員（個人と団体を含む）を対象としたアンケート調査を 2023 年 12 月〜2024 年 1 月に実施した。WEB フォーム，郵便および FAX を通じて，1,034 人から回答を

（受理日 2024 年 12 月 23 日）

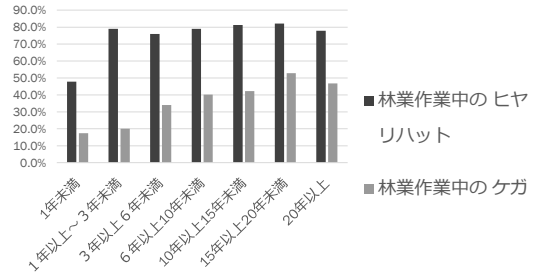
得た。質問項目は回答者個人の属性（年齢・林業経験年数・役職など），安全行動に関わる意識，マニュアル・テキスト類の活用状況，およびガイドラインの認知状況である。本稿では，安全行動指針や技術向上のための指導書・教科書・解説書類一般を「マニュアル」，厚生労働省の定める「チェーンソーによる伐木等作業の安全に関するガイドライン」を「ガイドライン」として記述する。

III　結果と考察

1. 回答者の属性　回答者の年齢は，10 歳代 1%，20 歳代 13%，30 歳代 23%，40 歳代 31%，50 歳代 20%，60 歳代 9%，70 歳代以上 3%であった。40 歳代以下が約 3 分の 2 を占めており，同 46%の林業従事者全体（2020 年国勢調査）と比較すると，若年層の割合が高くなっている。居住地は北海道 10%，東北 14%，関東 10%，中部 25%，近畿 9%，中国 13%，四国 4%，九州 15%であった。林業の経験年数は 1 年未満 2%，1 年以上 3 年未満 10%，3 年以上 6 年未満 13%，6 年以上 10 年未満 21%，10 年以上 15 年未満 18%，15 年以上 20 年未満 14%，20 年以上 22%であった。

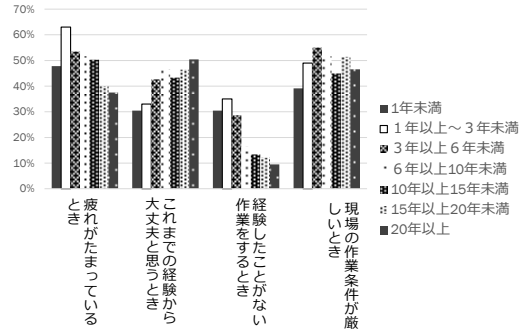
2. 安全行動に対する意識　ケガおよびヒヤリハット（災害には至らなかった危険事例）の経験について尋ねたところ，54%がケガの経験あり，75%がヒヤリハットの経験ありと回答した（図–1）。これを経験年数別で見ると，ケガは経験年数が増えるにつれて漸増していくことが分かる。一方，ヒヤリハットについては 48%が経験ありと回答する経験 1 年未満を除いて，いずれも 8 割前後が経験ありと回答している。つまり，ヒヤリハットの場面は経験年数が比較的浅い者でも多くが遭遇している状況がうかがえる。

不安全な行動を取りうる状況について尋ねたところ，「現場の自然条件（傾斜や足場が悪いなど）が厳しいとき」と回答した者が 49%，「疲れがたまっているとき」が 48%，「これまでの作業経験から，大丈夫と思うとき」が 45%，「経験したことがない作業をするとき」が 17%であった（図–2）。これを経験年数別で見ると，「現場の自然条件が厳しいとき」については顕著な傾向が見られない。しかし，「疲れがたまっているとき」および「経験したことがない作業に向き合うとき」については経験年数の短い者が多く回答する一方，「これまでの作業経験から，大丈夫と思うとき」については経験年数の長い者が多く回答しており，現場経験を積むにしたがって，不安全な行動を取りうる状況に対する見方に変化が生じている様子がうかがえる。



図–1.　ケガおよびヒヤリハットの経験

Fig.1 Respondent's experience of injury and near miss



図–2.　不安全な行動をとる可能性のある状況（複数回答）

Fig.2 Situations in which respondents may behave unsafely (multiple answers)

不安全な行動の見直しや安全作業に対する意識向上につながるきっかけについて複数回答で尋ねたところ，「自分のヒヤリハット経験」を挙げた者は 64%と最も多かった（表–1）。次いで，「他人のケガをみて」46%，「他人のヒヤリハットをみて」39%，「自身のケガ」38%，「安全講習・研修」36%となっていた。安全講習・研修の効果は一定程度認められるものの，それよりも自身や同僚のケガ，ヒヤリハットの経験が意識の変化により大きな影響を与えていることがうかがえる。

3. マニュアルの確認およびガイドラインの認知　マニュアル類の活用状況に関わり，どのような場面で見直すか尋ねたところ，「安全大会・講習・研修のとき」や「職

表–1.　不安全な行動を見直すきっかけ（複数回答）

Table 1 Opportunity to reconsider unsafe behavior (multiple answers)

自身のケガ	他人のケガをみて	自分のヒヤリハット経験	他人のヒヤリハットをみて	褒められた経験
38%	46%	64%	39%	3%

先輩・同僚の技術をみて	先輩・同僚からの指摘・注意	安全講習・研修	安全パトロール	これまでない
25%	28%	36%	9%	1%

場外の講習･研修のとき」という回答が多かった(表–2)。現場での確認や他人への指導時というように現場で日常的に活用されているというよりむしろ現場外での特別な講習・研修時に活用されている状況にある。

マニュアル類の改善すべき点としては,「実際の現場に合ったものにする」ことが最も多く挙げられたほか，重要なポイントの強調，図やイラストの利用などが挙げられた（表–3)。上記の設問の回答傾向と合わせると，既存のマニュアル類が現場に即していないと捉えられているために現場での活用が進んでいないという見方もできる。

以下では，マニュアル類の確認頻度およびガイドラインの認知状況と回答者の属性等について，クロス集計およびカイ二乗検定を行った結果を示す。マニュアル類の確認頻度およびガイドラインの認知状況とケガの経験との関係では，ケガの経験がない者の方がマニュアル類の確認頻度が高い傾向が示された（図–3，P<0.01)。同様にケガの経験がない者の方がガイドラインの「内容把握，その通りに作業」とする回答割合が高いというように認知が高い傾向が示された（P<0.01)。

マニュアル類の確認頻度と経験年数との関係では，優位な差は確認されなかった（図-4)。また同様にマニュアル類の確認頻度と林業に関わる教育・研修歴についてクロス集計したところ，優位な差は確認されなかった（図–5)。つまり，「緑の雇用」を含む各種の研修経験がマニ

表–2. マニュアル類を見直す場面（複数回答）

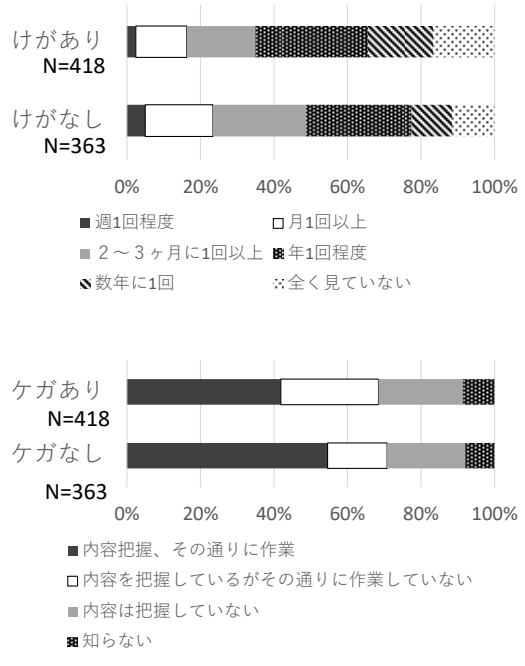
Table 2 Reviewing the manuals (multiple answers)

安全大会・講習・研修のとき 54%	職場外の講習・研修のとき 39%	現場で効率性を確認したいとき 12%	現場で安全性を確認したいとき 27%
技術的に難しい伐採をするとき 16%	現場で伐倒に失敗したとき 9%	他人に伐倒作業を指導するとき 25%	法例・制度を確認したいとき 20%

表–3. マニュアル類で改善すべきと考える点（複数回答)

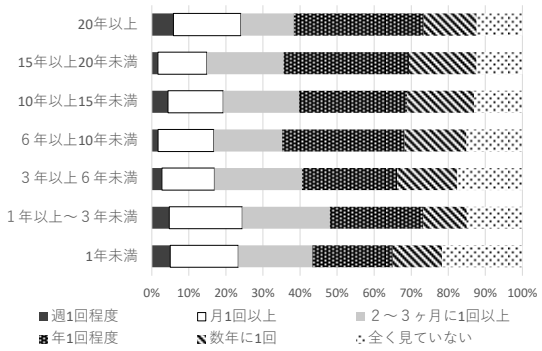
Table 3 Points that should be improved in the manuals (multiple answers)

文章を短くする 13%	図やイラストを多くする 33%	重要なポイントを強調する 35%	実際の現場状況に合ったものにする 44%
手順だけでなく異常時の措置を示す 26%	動画により具体的な説明や危険ポイントを明示する 23%	改善点はない 11%	



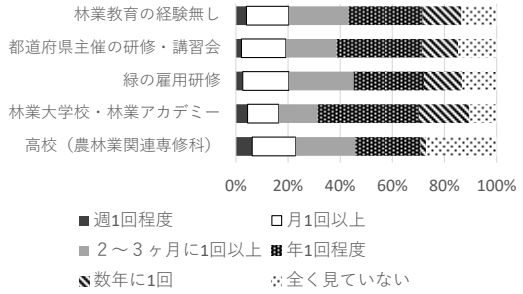
図–3. マニュアル類の確認頻度およびガイドラインの認知状況とケガの経験

Fig.3 Cross tabulation on frequency of checking the manual, awareness of the guidelines, and injury experience



図–4. マニュアル類の確認頻度と林業経験年数

Fig.4 Cross tabulation on frequency of checking manuals and years of forestry experience

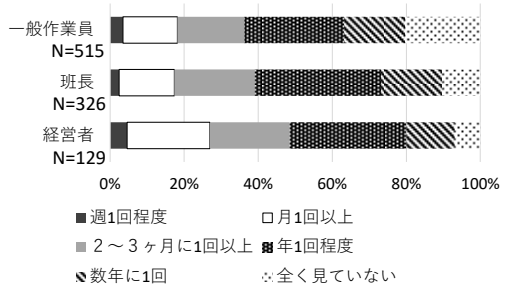


図–5. マニュアル類の確認頻度と林業教育・研修経験

Fig.5 Cross tabulation on frequency of checking manuals and forestry education/training experience

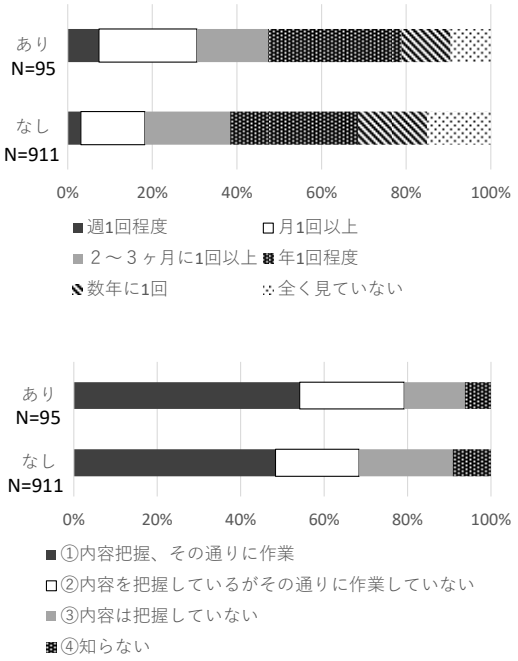
ュアルに対する意識を特段に高めているわけではないという状況がうかがえる。

マニュアル類の確認頻度と事業体における役職についてクロス集計したところ，経営者が比較的頻度高くマニュアル類を確認する一方，一般作業員は確認する頻度が低く（P<0.01），「全く見ていない」という者も 2 割を超えている（図–6）。経営者は事業体を安定的に運営しようとする観点から，より安全に対する意識が強く働くものの，一般作業員まで同様の意識が共有されていないというギャップがうかがえる。



図–6. マニュアル類の確認頻度と役職

Fig.6 Cross tabulation on respondent's position within the company



図–7. マニュアル類の確認頻度およびガイドラインの認知状況と安全確保にともなう報酬制度

Fig.7 Cross tabulation on frequency of checking the manual, awareness of the guidelines, and reward system for ensuring safety at the respondent’s company

マニュアル類の確認頻度およびガイドラインの認知状況と所属事業体における安全確保にともなう報酬制度（無事故報酬等）の有無をクロス集計したところ，報酬制度がある事業体に所属する者は，制度がない事業体に所属する者に比べて，マニュアル類の確認頻度が高いことが示された（図–7，P<0.01）。同様に，報酬制度がある事業体に所属する者は，制度がない事業体に所属する者に比べて，ガイドラインについて認知する度合いが高いことが示された（P<0.01）。つまり，事業体における報酬制度はマニュアル確認やガイドライン把握といった安全な行動を心がけるインセンティブとして働いている可能性があると考えられる。

Ⅳ　おわりに

アンケート調査の結果から，林業作業者の多くがヒヤリハットの経験があり，それが安全な行動を心がける契機の一つとなっていること，不安全な行動をとりうる状況には経験年数で差が見られること，マニュアル類の確認頻度とケガの経験の有無には一定の関連があると考えられることが示された。マニュアル類の確認頻度が高いことが即ケガの回避につながるとまではいえないものの，効果があることが推測される。また，マニュアル類の確認頻度と役職，表彰制度・報酬制度の有無には関連があるが，教育・研修歴，経験年数は関連が強くないことが示された。

以上の観点から，安全な行動と結びつくマニュアルやガイドラインをより深く現場に浸透させていくためには，林業作業者の経験年数や役職といった属性に応じた働きかけ，それに加えてインセンティブの導入が有効と考えられる。

引用文献

(1) 猪俣雄太・山口浩和・中田知沙羽 (2022) 年齢別の林業労働災害発生率の特徴. 森林利用学会誌 37(1): 67-76

(2) 厚生労働省 (2020) チェーンソーによる伐木等作業の安全に関するガイドライン.

(3) 森林環境リアライズ (2021) チェーンソーを用いた伐木作業安全マニュアル. 厚生労働省, 東京: 92pp

(4) 林業・木材製造業労働災害防止協会: 林業における死傷者数の推移. (2024.11.5 参照)
https://www.rinsaibou.or.jp/disaster/assets/11rin01_4.pdf

(5) 林野庁 (2024) 令和 5 年度 森林・林業白書. 東京, 215pp

(6) 山田容三 (2016) 林業事業体の労働安全衛生対策と労働災害の特徴. 森林科学 78: 19-21

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

野外教育研究者がみる演習林の活用方法―日本大学藤沢演習林の事例―

杉浦克明[1]・大石康彦[2]・山田亮[3]

[1]日本大学生物資源科学部・[2]森林総合研究所多摩森林科学園・[3]北海道教育大学

要旨：2024 年 6 月に日本大学生物資源科学部にて，日本野外教育学会のエクスカーションを実施した。その中で，野外教育研究者が藤沢演習林を視察し，この演習林で何をしたいかをテーマとするワークを行った。本研究では，このワークから，森林科学ではない体育・スポーツ科学の野外教育研究者が演習林をどのように捉え，どのように活用できると考えるのかを明らかにした。方法は，演習林を 1 時間ほど見学した後，活用方法を一人 3 枚程度の制限を設けてカードに記入してもらった。その結果，キャンプ，泥遊び，木登り等のふれあい活動群が 16 件，観察等の自然環境活動群が 3 件，林業体験等の森林資源活動群が 2 件となった。よって，野外教育研究者はふれあい活動に属する活動を志向する傾向が強いことが明らかになった。

キーワード：演習林，野外教育，森林環境教育，森林科学，研究者

The use of university experimental forests by outdoor education researchers: A case study of the Fujisawa Experimental Forest, Nihon University

Katsuaki SUGIURA[1], Yasuhiko OISHI[2], Ryo YAMADA[3]

[1]College of Bioresource Sciences, Nihon University; [2]Tama Forest Science Garden, Forestry and Forest Products Research Institute; [3]Hokkaido University of Education

Abstract: In June 2024, the Japan Outdoor Education Society held an excursion at the College of Bioresource Sciences, Nihon University. During this event, participants visited the Fujisawa Experimental Forest to explore potential activities that outdoor education researchers might conduct within this environment. This study aimed to identify how outdoor education researchers in physical education and sports science, who are not forest scientists, perceive and envision the utilization of the forest. The methodology involved one-hour visit to the training forest, after which the participants were asked to fill out up to three cards per person detailing possible uses for the forest. As a result, there were 16 activities in the interaction category, such as camping, playing with mud, and tree climbing; 3 activities in the natural environment category, such as observation; and 2 activities in the forest resource category, such as forestry experiences. Thus, it is clear that outdoor education researchers have a strong preference for activities within the “interaction” category.

Keywords: university experimental forest, outdoor education, forest and environment education, forest science, researcher

I　はじめに

日本は国土の約 7 割が森林であるにもかかわらず，多くの人の森林･林業への認識や関心は高くない。そこで，森林・林業の学びの機会を創出するため，様々な主体によって森林環境教育の実践が行われている。なお，森林環境教育は森林教育と同義で用いられることもあるが，本研究では一貫して森林環境教育を用いる。

森林環境教育の活動場所は，森林を主とするが，森林に限定されるものではなく公園や博物館なども含まれる(*7*)。プログラム内容も，自然観察，植樹，下草刈り，枝打ちなのどの森林管理作業，キャンプ，登山などの野外運動，炭焼きといった地域文化など多様である(*7*)。特に，森林環境教育では，技術職員による木登りや伐倒などの実際の作業を見せることが重要との指摘もある(*1*)。

森林環境教育の目的は，森林・林業についての認識や理解を深めるために，主に森林内での体験を通じて育む人材の育成をしていくことである(*7*)。森林内での体験や活動というと，森林環境教育の他にも体育・スポーツ科学を中心とした野外教育がある(*9*)。

野外教育とは，小森(*4*)によると自然の中で組織的・計画的に一定の教育目標をもって行われる野外活動・自然体験活動の総称であり，自然，他存在，自己についての創造的，調和的な理解と実践について直接体験を通して育む統合的・全人的な教育とされている。

野外教育の自然体験活動には，キャンプ，登山，沢登り，野外炊事といった野外活動，自然・環境学習活動，

（受理日 2025 年 1 月 16 日）

文化・芸術活動，林業・農業体験などが含まれる(*9*)。

森林環境教育と野外教育は，活動の場や活動内容に共通項が多い。しかしながら，2 つの教育の主目的は異なっている。このため，それぞれの実践・研究者の森林内での活動内容といった視点が異なる可能性がある。これを解明できれば，森林や演習林の活用方法の検討材料に加えることができる。

そこで，本研究の目的は，体育・スポーツ科学を主軸として実践と研究を行っている野外教育研究者が，森林科学の実践・研究に用いられている大学演習林でどの様な活動ができると考えているのか，その視点の違いを検証することである。

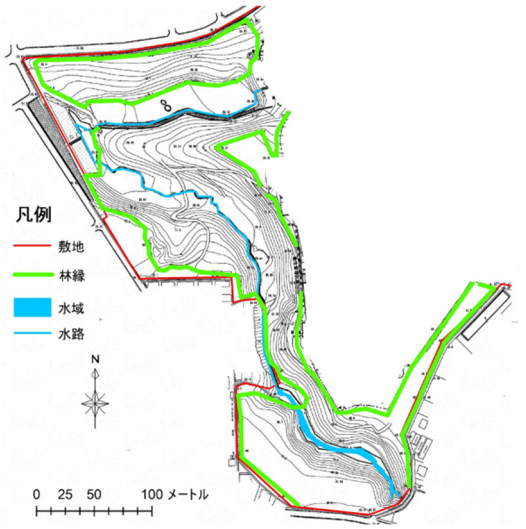
II　方法

1. 調査対象　2024 年 6 月 28 日から 6 月 30 日に日本野外教育学会第 27 回大会（日本女子体育大学）が開催された。日本野外教育学会は，野外教育を学際領域として位置づけ，自然，人，体験を柱としており，野外活動，自然体験，冒険教育，環境教育，森林・林業教育，博物学など自然を活用した観光や地域振興等に携わる実践者・研究者で構成されている(*5*)。所属している研究者の多くは，体育・スポーツ科学を主とした研究者で構成されている。第 27 回の日本野外教育学会大会においてはエクスカーションとして 3 つのコースが用意された。

A コースの「森林教育プログラム体験」は，2024 年 6 月 28 日の 12 時 30 分から 17 時の予定で日本大学生物資源科学部にて開催され，7 名の参加者があった。当日の天候は雨天であったが，室内でのオリエンテーション，大学における森林科学教育・研究紹介と屋外での演習林視察および森林教育プログラム体験を行った。本研究は，A コースに参加した野外教育研究者 7 名を対象とした。

2. 演習林の概要　エクスカーションで視察した日本大学生物資源科学部の藤沢演習林は，住宅地や小学校の他，畑と隣接した大学キャンパスに併設されており，標高は 30m で，面積は約 5 ha である。コナラを主体とした広葉樹二次林で，ムクノキ，ミズキ，シラカシ等が見られる。演習林を縦断するように谷地形になっており，中央は水域になっている（図–1）。一部には，スギやヒノキが植栽されている。

3. 分析手法　エクスカーションの中で演習林の視察を約 60 分間行った後に，演習林利用に関する制約は考えずに，演習林で何をしたいのかをテーマとしたワークショップを行った。参加者に白紙のカードに演習林でしたいことについて想定する対象者と内容を記入してもらった。なお，カードの枚数は一人 3 枚程度の制限を設けた。記入されたカードの内容について，大石・井上(*6*)によって整理された森林体験活動の 40 項目と照合し，その内容をさらに井上・大石(*3*)の森林体験活動の 4 つの活動群(森林資源，自然環境，ふれあい，地域文化)に整理した。



図–1.　日本大学藤沢演習林の地形

Fig.1 Topography of the Fujisawa experimental forest of Nihon University

III　結果と考察

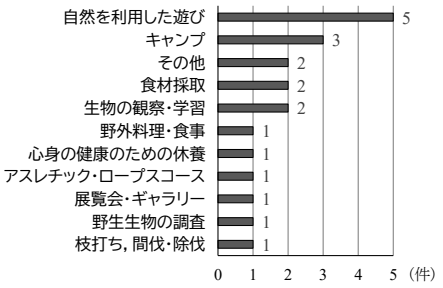
7 名の参加者から 18 枚のカードを集めることができた。一枚のカードに 2 つの内容を含む場合も分析の対象とした。カードに記入された内容は表–1 の通り，20 個の内容が示された。表–1 の左列の番号は任意の番号である。プログラム内容を見ると，「林業キャンプ」，「のこぎり体験」，「森の動物足跡さがし」等であり，森林環境教育の内容(*7*)にも含まれるものが多く見られた。一方で，「森のレストラン」，「森の飲み会」，「沢の中での泥んこ遊び」，「森の運動会」，「昼寝の場所捜し」などもあった。なお，「森のレストラン」とは，実際の野外炊事ではなく，自然のものにふれ，使って，イメージし，自然のものを食材に見立てて料理を作るアクティビティのことである。対象者については，幼児から大人までのものが見られた。

記入されたカードの内容について，大石・井上(*6*)によって整理された森林体験活動の 40 項目と照合した結果が図–2 である。40 項目のうち 11 項目に分類され，自然を利用した遊びが 5 件，キャンプが 3 件と続いた。カードに記入された「キャンプファイヤー」と「焚火」については，40 項目に該当するものがなかったので，その他として取り扱った。なお，「のこぎり体験」については，具体的な内容が不明であったため，枝打ちと間伐・除伐

の 2 項目を併せて取り扱った。

表–1.　カードに記入されたプログラム内容と対象者
Table 1 Program content and target participants as indicated on the card

	プログラム内容	対象
1	林業キャンプ	大学生以上
2	のこぎり体験	小学校5年～中学3年
3	森の動物の足跡さがし	小学校高学年
4	自然観察会	小学生
5	同じ樹皮の木探し	小学生
6	漢方デトックスデイキャンプ	青年以上
7	キャンプファイヤー	ファミリー
8	森林サイエンスキャンプ	小学校5年～中学3年
9	森の飲み会	40歳から
10	森の美術館	大人
11	焚火	幼児から
12	森のレストラン	幼児から
13	ツリークライミング	小学校5年から
14	木登り	未記入
15	沢の中での泥んこ遊び	幼児から
16	森の運動会	小学生
17	森の隠れ家づくり	小学校4年～6年
18	昼寝の場所捜し	大学生
19	山菜採り	大人
20	きのこ狩り	大人



図–2.　森林体験活動 40 項目に分類した結果
Fig.2 Results categorized into 40 forest experience activities

野外教育の自然体験活動には，野外活動，自然・環境学習活動，文化・芸術活動，林業・農業体験など(*9*)があるが，今回の結果から，野外教育研究者は森林を林業体験の場ではなく野外活動の場として捉える傾向が強いものと考えられた。森林環境教育プログラム実践の多くは林業体験や林産物加工が多い(*7*)ことから，森林科学の研究者との視点の違いが明らかとなった。

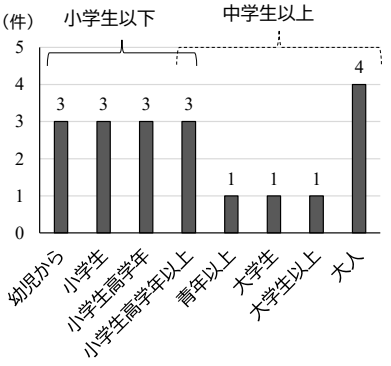
次に，40 項目に分類した内容を，さらに井上・大石(*3*)の森林体験活動の 4 つの活動群(森林資源，自然環境，ふれあい，地域文化)に整理した。その結果が表–2 である。表–2 の最初に出てくる「林業キャンプ」は，キャンプ的な要素の他に，林業の要素も含まれていたので，活動群に分類する際には「ふれあい」と「森林資源」の 2 つを含むものとした。

表–2 の活動群を見ると，ふれあい活動群が 16 件，自然環境活動群が 3 件，森林資源活動群が 2 件となった。一般に実施されている森林環境教育プログラムの多くは，森林資源活動群である(*7*)のに対し，野外教育研究者はふれあい活動群に属する活動を志向する傾向が強いと考えられた。

表–2.　プログラム内容の整理と分類
Table 2 Organize and categorize program content

プログラム内容	項目	活動群
林業キャンプ	キャンプ	ふれあい　森林資源
のこぎり体験	枝打ち、間伐・除伐	森林資源
森の動物の足跡さがし	野生生物の調査	自然環境
自然観察会	生物の観察・学習	自然環境
同じ樹皮の木探し	生物の観察・学習	自然環境
漢方デトックスデイキャンプ	キャンプ	ふれあい
キャンプファイヤー	その他	ふれあい
森林サイエンスキャンプ	キャンプ	ふれあい
森の飲み会	野外料理・食事	ふれあい
森の美術館	展覧会・ギャラリー	ふれあい
焚火	その他	ふれあい
森のレストラン	自然を利用した遊び	ふれあい
ツリークライミング	アスレチック・ロープスコース	ふれあい
木登り	自然を利用した遊び	ふれあい
沢の中での泥んこ遊び	自然を利用した遊び	ふれあい
森の運動会	自然を利用した遊び	ふれあい
森の隠れ家づくり	自然を利用した遊び	ふれあい
昼寝の場所捜し	心身の健康のための休養	ふれあい
山菜採り	食材採取	ふれあい
きのこ狩り	食材採取	ふれあい

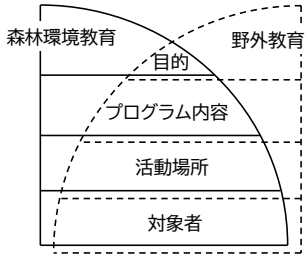
さらに，想定する対象者について整理した結果が図–3 である。なお，未記入の 1 件は除いた。まず，幼児から小学校高学年までが 9 件で，青年期以上が 7 件であった。その中間に当たる小学校高学年以上が 3 件であった。小学生までを対象としているものがやや多かったものの，青年期以降を対象としているものも約半数見られた。この結果から，森林環境教育実施の対象者の多くは児童や



図–3.　想定する対象者の年代
Fig.3 Age of expected participants

親子を対象としている(*8*)のに対し，野外教育研究者は青年期以降のプログラムも想定している傾向が強いと考えられた。その理由として，野外教育研究者はキャンプを中心とした野外活動プログラムを志向する傾向があるが，それらの活動が必ずしも児童だけを対象としたものではないことが推察された。このように，対象者をとっても野外教育研究者と森林科学研究者との違いが明らかとなった。

以上，本研究の結果や既往研究から図–4 のような教育の関係性があると考えられた。まず，対象者であるが，どちらの教育も共通している。しかし，一般向けの森林環境教育の多くは児童や親子向けが多く(*8*)，野外教育分野は子供から大人まで幅広いため，重点が置かれている対象者が異なっている。活動場所であるが，前述した通り森林環境教育も野外教育も森林で行われるものが多い(*7*, *9*)が，野外教育は森林に限らない。プログラム内容についても本研究の結果や既往研究から共通性は高い(*7*, *9*)ものの，両者で志向傾向が異なる。森林環境教育と野外教育の目的はそれぞれ異なるが，一部で共通性が見られる。つまり，下部の項目ほど共通性が高く，上部の項目ほど共通性が低くなると考えられた。



図–4. 森林環境教育と野外教育の関係

Fig.4 Relationship between forest and environmental education and outdoor education

IV おわりに

本研究は，日本野外教育学会のエクスカーションの一つとして行った森林教育体験プログラム体験に参加した野外教育研究者を対象としているため，他の野外教育研究者よりも森林･林業に対する認識は高いと考えられる。その様な参加者であっても，本研究の結果から，野外教育研究者は大学演習林を林業体験の場というよりも野外教育の場として捉えており，ふれあい活動群に属する活動を志向する傾向が強いと考えられた。

また，演習林を活用したプログラムの検討において，想定する対象者が小学生以下に偏っていなかった。よって，森林環境教育で課題となっている青年期以降の対象者向けプログラム(*8*)を検討する際には野外教育研究者の考え方を参考にできる可能性がある。そういったことから，森林環境教育研究者と野外教育研究者が連携する意義があるのではないだろうか。

全国の国公立大学の演習林では，公開森林実習という形を取って単位互換協定の実施を行い，演習林の相互利用が行われている(*10*)。枚田ら(*2*)によると，森林をはじめとするフィールドへのニーズは高く，大学関係者だけでなく市民のためにも大学演習林を教育施設として体制を確立する必要性を指摘している。しかし，演習林を市民へ開放するには，安全管理や教育研究の活動場所の維持等を考慮した場合，多くの課題が残る。

本研究の結果から，演習林を所有する大学や演習林の場所によって，利用の制約等は無視できないものの，演習林の今後の活用方法を考えるにあたり，森林科学研究者以外の視点を取り入れながら連携する意義もあると思われる。

今回の調査では対象者が少ない中で，野外教育研究者と森林科学研究者との違いが明らかになったが，今後はさらなる既往研究を整理し，改めて論証できる実験や調査を企画する必要があるだろう。

引用文献

(1) 原島幹典 (2007) 林業と森林教育. 森林科学 49: 24-27

(2) 枚田邦宏・大畠誠一・中島皇 (2000) 大学演習林の森林教育活動―公開講座参加者アンケート調査結果―. 応用森林研究 9(2): 105-109

(3) 井上真理子・大石康彦 (2010) 森林教育が包括する内容部の分類. 日本森林学会誌 92: 79-87

(4) 小森伸一 (2010) 野外教育理論の再考 I ―「三大学習観点」の提言から―. 東京学芸大学紀要 芸術・スポーツ学系 62: 39-46

(5) 日本野外教育学会: 設立趣意・学会のあゆみ. https://joes.gr.jp/?page_id=272 (2024.11.11 参照)

(6) 大石康彦・井上真理子 (2012) 森林体験活動の体系的整理―実践者の認識に基づく分類―. 野外教育研究 15: 1-12

(7) 大石康彦・井上真理子 (2015) 森林教育. 海青社, 滋賀, 239pp

(8) 杉浦克明 (2015) 発達段階に応じた森林環境教育の実施の必要性. 日本森林学会誌 97: 107-111

(9) 山田亮 (2024) 野外教育と森林教育. (森林教育学. 井上真理子・杉浦克明編, 海青社, 滋賀, 361pp) 51-58

(10) 全国大学演習林協議会: 2024 年度　公開森林実習. https://www.fsc.miyazaki-u.ac.jp/foe/ (2024.11.5 参照)

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

航空機 LiDAR データによる林分平均形状比・収量比数・相対幹距の推定に関する検討

－茨城県・福岡県の一部地域の事例－

西園朋広[1]・田中真哉[1]・高橋與明[2]・齋藤英樹[1]・福本桂子[2]

[1]国立研究開発法人　森林研究・整備機構　森林総合研究所

[2]国立研究開発法人　森林研究・整備機構　森林総合研究所九州支所

要旨：茨城県と福岡県の一部地域で取得された航空機 LiDAR データを用いて，林分平均形状比・収量比数・相対幹距を推定した。航空機 LiDAR データから得られた本数密度・上層樹高・平均枝下高を説明変数として，平均形状比・相対幹距・収量比数の 3 指標を推定する重回帰式を作成した。推定した 3 つの指標間で比べると収量比数・相対幹距は平均形状比よりも良好に推定できた。この方法で相対幹距・収量比数の広域マッピングを行い，活用する場合には，決定係数で 0.50 程度の推定であることを許容する必要がある。

キーワード：航空機 LiDAR，形状比，収量比数，相対幹距，マッピング

Airborne LiDAR-based estimation of average height-diameter ratio, relative yield index, and relative spacing index: A case study in selected areas of Ibaraki and Fukuoka prefectures

Tomohiro NISHIZONO[1], Shinya TANAKA[1], Tomoaki TAKAHASHI[2], Hideki SAITO[1], Keiko FUKUMOTO[2]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute, [2]Kyusyu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: We estimated average height-diameter ratio, relative yield index, and relative spacing index, using airborne LiDAR data, in the selected areas of Ibaraki and Fukuoka prefectures. Multiple regression equations were developed to estimate the three indices, using the stem density, upper tree height, and average branch height obtained from the airborne LiDAR data as explanatory variables. Comparing the estimated three indexes, the relative yield index and the relative spacing index were estimated more accurately than the average height-diameter ratio. When conducting wide-area mapping of relative yield index and relative spacing index, for forest management, using airborne LiDAR data, it is necessary to accept an estimation with a coefficient of determination of approximately 0.50.

Keywords: airborne LiDAR, average height-diameter ratio, relative yield index, relative spacing index, wide-area mapping

I　はじめに

形状比は樹木形状の指標であり，太さ（直径）に対する高さ（樹高）の比を意味している。収量比数と相対幹距は林分密度の指標であり，樹高と本数密度から算出できる。林分密度が高いと，林分内で形状比が高い個体が増加し，風雪害を受けやすいと予想される。このことから，これらの指標は気象害リスクと関連が深いとされる。もし，航空機 LiDAR データからこれらの指標を林分ごとに推定し，広域でマッピングできれば，気象害リスクを考慮して森林を適切に管理していく上で有用な情報となる。

本研究では，茨城県と福岡県の一部地域を対象として，航空機 LiDAR データから，林分平均形状比（以下，平均形状比と記す）・収量比数・相対幹距を推定し，妥当な推定が可能かどうか検討した。

II　材料と方法

1．データ　茨城県が 2019 年度に民有林を対象として計測した LiDAR データを解析に利用した。このデータでは，レーザパルスの照射密度が対象範囲全体で 1 m^2 あたり 10 点以上となるように設計されていた。また，対象範囲のスギ・ヒノキ一斉人工林に設置されたプロットの調査データを資料として用いた。プロット調査は 0.04 ha の円形プロットで行われ，直径 6 cm 以上の個体について毎木の胸高直径と樹種が記録されていた。また，各プロットで直径階に偏りがないように 10 本のサンプル木が抽出され，樹高が計測された。未測定木の樹高は樹高曲線式（ネスルンド式）によって胸高直径から推定した。プロット数はスギで 59，ヒノキで 64 である。

福岡県が 2020 年度に同県久留米市の森林を対象として計測した LiDAR データを解析に利用した。このデー

（受理日 2025 年 2 月 28 日）

タでは，レーザパルスの照射密度が対象範囲全体で 1 m^2 あたり 4 点以上となるように設計されていた。また，茨城と同様のプロット調査が実施されており，このデータも用いた。プロット数はスギで 26，ヒノキで 31 である。

2．データ集計　LiDAR データを用いて樹頂点抽出を行い，調査プロット内の樹頂点の数・地面からの高さを用いて本数密度・上層樹高を算出した。Chamberlain et al. の方法(*1*)により個体の枝下高を推定し，この値からプロットごと平均枝下高を算出した。まず，クリギング補間を行って 50 cm 解像度の DTM（Digital Terrain Model）を作成した。これを利用して，すべての点群を地盤面からの高さに正規化した CHM（Canopy Height Model）を得るとともに，ラスタ形式の CHM を 50 cm 解像度で作成した。次に，可変エリアの局所最大値フィルタリング法で樹頂点を抽出した。さらに，樹頂点をマーカーとした Watershed 法によって領域分割を行い，分割された個々の樹冠セグメントに含まれる点群データを用いて，Chamberlain et al.の方法で，枝下高を推定した。なお，両処理ではファーストパルスのみを利用した。LiDAR データの処理の詳細は，田中・高橋(*3*)を参照されたい。

地上調査データから個体ごとに形状比（樹高÷直径）を計算して，この値をプロットごとに平均し，平均形状比を算出した。プロットごとに Lorey の平均樹高(*2*)を算出し，これを上層樹高とした。得られた上層樹高と本数密度を用いて（表 1），相対幹距・収量比数を算出した。

3．解析　一般に航空機 LiDAR 計測では，樹高の計測精度は高い。また，対象林では平均枝下高も精度よく推定できた(*3*)。一方，一般に本数の推定は，高密度では適切な推定が困難であり，過小になると考えられる(*4*)。実際に，今回推定した本数密度においてもこの傾向が認められ，本数密度が 750 本程度を越えると著しく過小になった（田中、未発表）。相対幹距・収量比数は，上層樹高と本数密度から計算されるので，適切に本数密度を推定できれば，上層樹高・本数密度の推定値から定義式で算出できるはずである。ただし，上記のように，航空機 LiDAR 計測で算出される本数密度 N_L は不確実性が高く，定義式から推定することは困難であった。とはいえ，N_L は本数密度との間に相関を持つことは確かであるため，本数密度に関してある程度の情報を持っていると考えられる。そこで，本研究では，航空機 LiDAR データから得られた本数密度 N_L・上層樹高 H_L・平均枝下高 BH_L を説明変数とする重回帰式を作成し，平均形状比 *H/D*・相対幹距 *Sr*・収量比数 *Ry* を推定する手法を検討した。

説明変数 2 つ以上の組み合わせの全てについて（1：H_L・BH_L，2：H_L・N_L，3：BH_L・N_L，4：H_L・BH_L・N_L），交互作用項を持つ重回帰式を回帰して（モデル 1～4 と記す），*H/D*・*Sr*・*Ry* を推定した。当てはまりの妥当性を把握するために，一つ抜き交差検証法（LOOCV）を用いて決定係数を計算して，比較した。解析には、統計ソフト R の caret パッケージ（train 関数）を用いた。

III　結果と考察

表 2・図 1 に地域・樹種ごとに，各モデルによって得られた決定係数を示した。全般的に，スギよりもヒノキの決定係数が大きかった。この種間差の要因は不明である。また，茨城よりも福岡の決定係数が大きかった。地上調査データにおける *Ry*・*Sr* のレンジが茨城（*Ry* : 0.55-1.00，*Sr* : 9.61-23.66）より福岡（*Ry* : 0.35-0.98，*Sr* : 10.36-35.90）で大きかったことが影響しているかもしれない。

茨城データについて，従属変数（*H/D*・*Sr*・*Ry*）間で比較すると，*H/D* の決定係数の最大値はスギで 0.34，ヒノキで 0.35 であり，*Sr*（スギで 0.51，ヒノキで 0.65）・*Ry*（スギで 0.60，ヒノキで 0.66）より小さかった。福岡データにおいても，*H/D* の決定係数（スギで 0.36，ヒノキで 0.78）は，*Sr*（スギで 0.70，ヒノキで 0.82）・*Ry*（スギで 0.56，ヒノキで 0.85）より小さかった。特に，スギでは 0.35 程度であることから，*H/D* については，適切な推定は困難だと考えられる。よって，今回対象とした従属変数の中では，*Sr*・*Ry* の方がより妥当な推定が可能だといえる。なお，*Sr*・*Ry* について，推定が良好なモデルの決定係数は 0.51～0.85 であった（図 2・3 に，最良モデルによる *H/D*・*Sr*・*Ry* の推定結果を示す）。つまり，今回の方法で航空機 LiDAR データから *Sr*・*Ry* の広域マッピングを行い，森林管理のための情報として活用する場合には，決定係数で 0.50 程度の推定を許容する必要がある。

Sr・*Ry* について，モデル間で比較すると，地域・樹種によって良好なモデルは異なっていた。例えば，全般的にモデル 4 の決定係数は大きかったが，福岡スギではモデル 4 はほとんど説明力がなかった（表 2・図 1）。この原因は，若齢林における N_L の推定誤差が著しく過小であったことであった。地域・樹種に依存しない統一的なモデル式が得られると実用的には便利であるが，現段階では対象となる地域・樹種・従属変数ごとに適切なモデル式の種類を検討する必要がある。

謝辞：データ・文献をご提供頂いた茨城県・福岡県および小谷英司博士に感謝申し上げる。本研究は農林水産省委託プロジェクト研究「管理優先度の高い森林の抽出と管理技術の開発」（JPJ009840）の補助を受けた。

引用文献

(1) Chamberlain CP, Meador AJS, Thode AE (2021) Airborne lidar provides reliable estimates of canopy base height and canopy bulk density in southwestern ponderosa pine forests. For Ecol Manage 481: 118695

(2) 細田和男・福本桂子・山田祐亮・北原文章・西園朋広・髙橋正義・齋藤英樹 (2020) 同齢単純林における上層樹高の量的意義. 関東森林研究 71: 13-16

(3) 田中真哉・高橋與明（2022）航空機 LiDAR によるスギ・ヒノキ林の平均生枝下高の推定. システム農学会 2022 年度大会講演要旨集: 63-64

(4) Vauhkonen J, Ene L, Gupta S, Heinzel J, Holmgren J, Pitkänen J, Solberg S, Wang Y, Weinacker H, Hauglin KM, Lien V, Packalén P, Gobakken T, Koch B, Næsset E, Tokola T, Maltamo M (2012) Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. Forestry 85: 27-40

表1　プロットの林分構成値（地上調査データから集計）

Table 1　Stand attribute for test plots

地域	樹種	上層樹高（m）			平均直径（cm）			本数密度（本/ha）		
		最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大
茨城	スギ	14.0	25.6	35.9	15.4	32.6	53.6	250	899	2800
	ヒノキ	10.6	18.3	25.6	13.7	24.0	46.6	325	1521	2900
福岡	スギ	6.7	20.9	29.5	10.3	28.5	41.1	200	1019	1975
	ヒノキ	8.5	17.0	26.4	13.4	26.3	41.8	250	949	2000

表2　LOOCVで求めた重回帰式の決定係数

Table 2　Coefficient of determination of multiple regression equation obtained by LOOCV

地域	樹種	*H/D*				*Sr*				*Ry*			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
茨城	スギ	0.33	**0.34**	0.32	0.29	0.29	0.46	**0.51**	0.51	0.40	0.54	0.57	**0.60**
	ヒノキ	**0.40**	0.25	0.24	0.35	**0.67**	0.37	0.52	0.65	**0.66**	0.37	0.51	0.64
福岡	スギ	0.04	**0.36**	0.29	0.00	0.45	**0.70**	0.65	0.11	0.27	**0.56**	0.54	0.21
	ヒノキ	0.57	0.55	0.63	**0.78**	0.65	0.77	**0.82**	0.74	0.71	0.79	**0.85**	0.80

注：1～4はモデル1～4（Ⅱ章3節）を示す。
　　太字は該当の従属変数・地域・樹種のモデル間で最も大きい決定係数を示す。

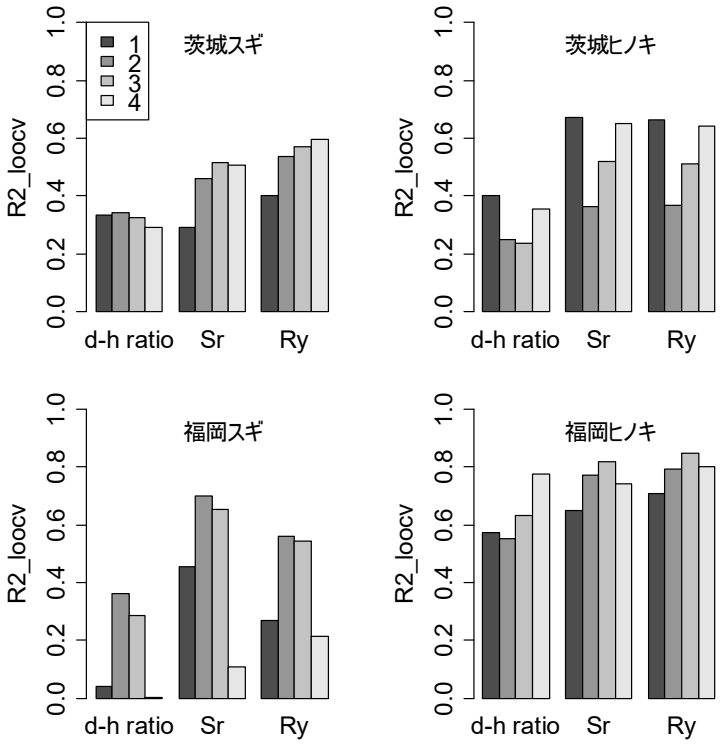


図1　推定モデルの決定係数の比較

Fig. 1 Comparison of the coefficient of determination for the estimated models

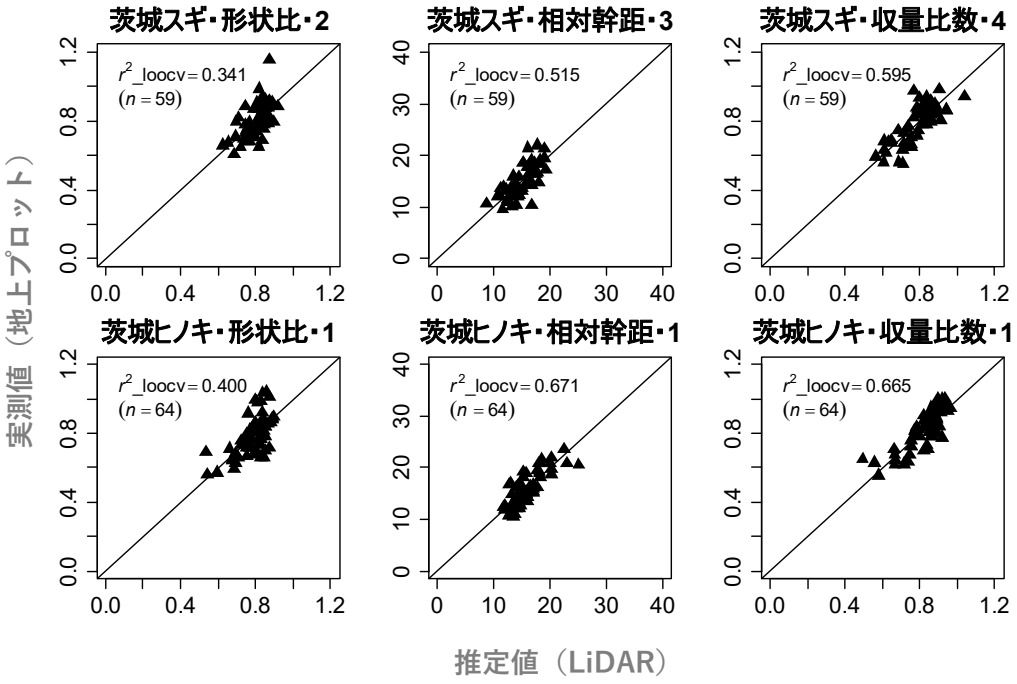


図2　最良モデルによる推定値と実測値（茨城）
タイトルの数字は最良モデルの番号を示す。
Fig. 2 Estimated and measured indexes by best model for Ibaraki. The number in the title indicates the number of the best model.

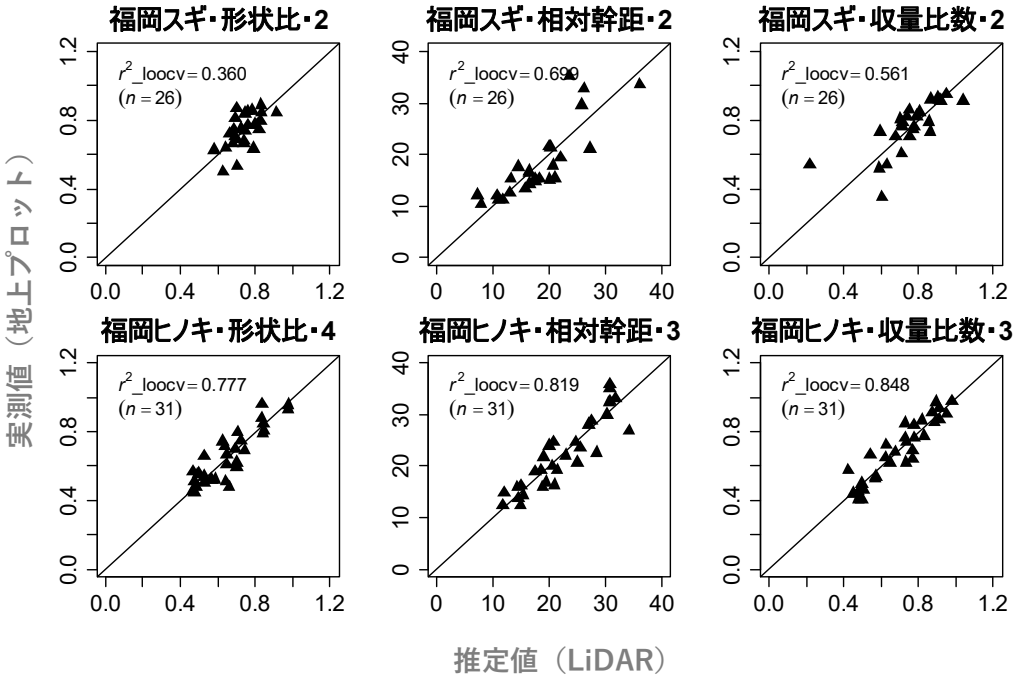


図3　最良モデルによる推定値と実測値（福岡）
タイトルの数字は最良モデルの番号を示す。
Fig. 3 Estimated and measured indexes by best model for Ibaraki. The number in the title indicates the number of the best model.

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

航空機 LiDAR データによる樹冠長の推定に関する検討

－福岡県久留米市の事例－

齋藤英樹[1]・田中真哉[1]・高橋正義[1]・西園朋広[1]・高橋與明[2]

[1]森林総合研究所・[2]森林総合研究所九州支所

要旨：本研究は航空機 LiDAR データから簡便な方法を用いてスギ，ヒノキ林の樹冠長を広域で推定することを目的とする。樹冠長は樹高と枝下高の差分であり，樹木の成長や健康状態を示す指標として用いられる。しかし広域にわたる森林で樹冠長を面的に測定し評価することは容易ではない。そこで航空機 LiDAR データを利用して樹冠長を面的に推定した。研究対象地は福岡県久留米市内の森林地帯である。航空機 LiDAR データと地上で取得されたプロットデータを利用して樹高と枝下高を推定する線形回帰モデルを作成し，樹高，枝下高を推定した。最後に対象地全体に対してメッシュ単位で点群の z 値の統計量を求め，先のモデルを利用して樹高と枝下高を面的に推定し，その差分を計算して樹冠長の推定マップを作成した。

キーワード：森林構造，エリアベース解析，スギ，ヒノキ，リモートセンシング

Study on estimation of tree canopy length by aircraft LiDAR data
-Case study of Kurume City, Fukuoka Prefecture, Japan-

Hideki SAITO[1], Shinya TANAKA[1], Masayoshi TAKAHASHI[1], Tomohiro NISHIZONO[1], Tomoaki TAKAHASHI[2]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute; [2]Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: The objective of this study is to estimate the canopy length of cedar and cypress forests over a wide area using a simple method based on aircraft LiDAR data. Crown length is the difference between the tree height and the crown base height, and is used as an indicator of tree growth and health. However, it is not easy to measure and evaluate crown length over a wide area in a forest. Therefore, we used aircraft LiDAR data to estimate tree crown length in an areal manner. The study area was a forested area in Kurume City, Fukuoka Prefecture. A linear regression model was created to estimate tree height and crown base height using aircraft LiDAR data and plot data acquired on the ground. Finally, the statistics of the z-values of the point cloud were obtained for the entire target area in mesh units, the tree height and crown base height were estimated using the previous model, and the difference between the two was calculated to create an estimated map of the crown length.

Keywords: Stand structure, Area base analysis, Cedar, Cypress, Remote sensing

I　はじめに

樹冠長とは，樹高から枝下高を引いた値である。樹冠とは，樹木の枝葉が広がる部分のことで，樹冠長は樹冠の長さを表す指標である。枝下高とは，樹冠の一番下にある枝の基部までの高さである。樹高と枝下高の差を計算することにより樹冠長を推定することができる。樹冠長は，樹木の成長や健康状態を示す指標として用いられる。樹冠長が長いほど，樹木は光合成を行うことができ，栄養分を吸収することができるため，成長が良好であると考えられる。また，樹冠長が長いほど，風害や冠雪害に対する抵抗力も高くなる。樹冠長は樹種や林齢，立木密度などによって影響を受ける。一般的に，樹種によって樹冠長には差があり，針葉樹は広葉樹よりも樹冠長が長くなる。森林管理においては，樹冠長を適切に保つことが重要である。そのため，間伐や下刈りなどの施業によって，樹冠長を適切に保つことが求められる。樹冠長の測定は，森林の管理や研究において重要な作業であるが，地上調査で広域の樹冠長を求めるのは容易ではない。

近年，航空機 LiDAR を利用することにより，樹冠面と地表面の高さを利用して樹高を容易に求めることができるようになった。一方で，枝下高は上空から直接観測できない。このため枝下高を求めるためにいくつかの推定

（受理日 2025 年 2 月 18 日）

手法が提案されている。枝下高の推定手法には，大きく分けて樹冠の形状を詳細に表現できる手法と処理が簡単で計算コストが低い手法の 2 つに分けられる。

樹冠の形状を詳細に表現できる手法には，voxel-based method と nonlinear regression-based method がある。voxel-based method は，樹冠を立方体（voxel）に分割して，各 voxel の高度から枝下高を推定する。nonlinear regression-based method は，樹高プロファイルと枝下高の関係を非線形回帰モデルでモデル化して，枝下高を推定する。これらの手法は，樹冠の形状を詳細に表現できるため，精度の高い枝下高推定が可能である。しかし，処理が複雑で計算コストがかかる。

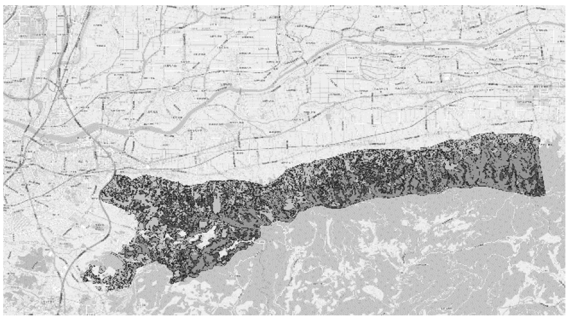
処理が簡単で計算コストが低い手法には，spline curve-based method，inflection point-based method，crown ratio-based method がある。spline curve-based method は，樹高プロファイルからスプライン曲線をフィッティングして，枝下高を推定する。inflection point-based method は，樹高プロファイルの屈曲点から枝下高を推定する。crown ratio-based method は，樹冠比から枝下高を推定する。これらの手法は，処理が簡単で計算コストが低いため，大規模なデータセットの処理に適している。しかし，樹冠の形状を詳細に表現できないため，精度が低下する可能性がある。

近年，深層学習を用いた手法も提案されている。この手法は，樹高プロファイルから枝下高を推定する深層学習モデルを学習することで，精度の高い枝下高推定が可能である。しかし，モデルの学習に大量のデータ量が必要である。多源データ融合を用いた手法も研究されている。この手法は，LiDAR データだけでなく，他のセンサーデータ（画像データ，気象データなど）も用いて，枝下高を推定する。単一センサーデータよりも精度を向上させられる可能性がある。しかし，データの収集や処理が複雑になる。

このように，枝下高の推定手法には，それぞれに利点と欠点がある。本研究の目的は航空機 LiDAR データから簡便な方法を用いてスギ，ヒノキ林の樹冠長を広域で推定することである。

II 材料と方法

1. 研究対象地 研究対象地は，福岡県久留米市のスギ，ヒノキ林とした（図–1）。久留米市の総面積は 22,996 ha であり，そのうち森林は 3,348 ha と総面積の 15%を占めている。森林面積のうちスギ，ヒノキを主体とする人工林面積は 2,477 ha であり，人工林率は約 74%である(*2*)。久留米市の年平均気温は 16.8℃, 年間降水量は 1938.4 mm, 日照時間は 1963.9 時間となっている(*1*)。梅雨にあたる 6 月と 7 月は月間 300 mm 以上の降水量があり，特に 2019 年 7 月 21 日には 1 日で 323.5 mm の雨量を記録する(*1*)など集中豪雨による被害が，台風による強風の被害とともに懸念される地域である。



図–1. 研究対象地（福岡県久留米市森林域）
Fig.1 Study area (Forest area in Kurume City, Fukuoka, Japan)

2. 地上調査データ プロットデータは，久留米市により「令和３年度久留米市森林経営管理制度推進業務」として業務委託の中で，森林資源解析を行うために測定されたものである。プロットデザインは，半径 11.28 m の円形プロットで面積は 0.04 ha である。プロット中心位置はスマート測量ポール（パスコ社）により測定された。調査対象木はスギとヒノキである。胸高直径は，5 cm 以上の樹木すべてを山側斜面の地上 1.2 m の位置を，直径巻き尺を用いて計測した。樹高と枝下高はプロットごとに 10 本程度を，超音波樹高測定器バーテックス IV（HAGLOF 社スウェーデン）を用いて測定した。プロット数はスギ 29 プロット，ヒノキ 31 プロットである。樹高と枝下高が未測定の樹木については，それぞれについて以下の方法で推定した。樹高については，スギ，ヒノキそれぞれについて，樹高と胸高直径の関係を示すネズルンド式：H ~ (1.2 + (DBH^2 / (a + b * DBH)^2))を用いて推定した。パラメータ a, b については，ランダム効果を設定するかの検討を行い，赤池情報量規準 AIC を用いて最適なモデルを選択した。枝下高については，樹種を分けずに枝下高と胸高直径の線形式を用いて推定した。単木データはプロットごとに集計を行い，ローレイの平均樹高，平均枝下高，平均胸高直径を算出した。これらの解析および以下の航空機 LiDAR データの解析には，R および lidR パッケージを用いた(*3*, *4*, *5*)。

スギ，ヒノキ合わせて 60 プロットに通し番号を付けた上で，偶数，奇数のグループに分けて，それぞれモデル作成用，検証用のデータとした。

3．航空機 LiDAR データ 本研究で用いた航空機

LiDARデータは，福岡県の「令和2年度福岡県森林航空レーザ測量等業務委託」により2020年11月17日～12月2日に取得された。仕様上の点密度は，4点／m^2である。観測には回転翼のAS350Bが使用され，対地高度は700 m，飛行速度は20 m/sであった。使用されたレーザスキャナは,ニコントリンブル社製Harrier68iである。

4. 航空機LiDARデータからの統計量

航空機LiDARデータの解析は，単木の形状を再現して解析する単木単位の解析と単位面積での点群の統計値を用いるエリアベースの解析に分けられる。本研究ではエリアベースの解析を行った。統計値を計算する前に，点群のz値から標高値を引いてz値から地形の影響を取り除いた。また最初の反射であるファーストパルス以外の点群は解析対象から外した。さらに下層植生の影響を除去するため，地上から2 m以下の点群も解析対象から外した。統計値を計算する単位は地上調査プロットの大きさに合わせて直径11.28 mの円とし，この内部の点データのz値（高さ）の最大値，最小値，平均値，標準偏差,パーセンタイル値などの基本的な統計量を計算した。

5. ローレイの平均樹高，枝下高の推定

プロットごとの統計量から平均樹高を推定する手法としては，z値の80パーセンタイル値が統計的に平均樹高を適切に表現できるとの先行研究がある(*6*)。このため本研究では，z値の80パーセンタイル値（以後zq80）に加え，75パーセンタイル値（以後zq75），85パーセンタイル値（以後zq85），z値の最大値（以後zmax），z値の平均値（以後zmean）について，モデル作成用データを用いて線形回帰モデルを作成し，それを検証用データに当てはめRMSEを計算することで検討を行った。この際，単回帰モデルの他に標準偏差（以後zsd）を加えた重回帰モデルの結果についても同様に検討した。枝下高についても，zq60，zq65，zq70，zmeanの単回帰モデルとzsdを加えた重回帰モデルについて検討を行った。

6. 樹冠長のマッピング

対象地域の樹冠長をマッピングするため，航空機LiDARデータ取得地域を20 m×20 mのメッシュに分けて，その内部の統計量を計算した。それぞれのメッシュについて，5.で選択されたモデルを用いてローレイの平均樹高と枝下高を推定し，その差分を計算することで樹冠長を求め，久留米市内の森林域の樹冠長を求めた。

III 結果と考察

1. ローレイの平均樹高推定

表–1はローレイの平均樹高推定の回帰分析における修正決定係数とRMSEを示す。パーセンタイル値を利用した単回帰分析の結果では，zq75を説明変数としたときに一番RMSEが小さくなった。単回帰と重回帰ではzsdを加えた重回帰分析のほうがややRMSEが小さくなった。zmax，zmeanを使った単回帰ではRMSEが2前後とパーセンタイル値を使った推定よりもRMSEが大きくなった。zmeanでは，zsdを加えた重回帰にすることでRMSEは改善した。スギ，ヒノキの樹種の違いも検討したが顕著な違いはなかった。

2. 枝下高の推定

表–2はローレイの枝下高推定の回帰分析における修正決定係数とRMSEを示す。枝下高の推定では,zmaxを使った単回帰およびzmaxにzsdを加えた重回帰でRMSEが2.8以上と大きくなったが，それ以外ではRMSEは，2弱で大きな違いはなかった。またzmaxのとき以外はzsdは有意な変数とはならなかった。スギ，ヒノキの樹種の違いも検討したが顕著な違いはなかった。

表–1. ローレイの平均樹高推定の回帰分析における修正決定係数とRMSE

Table 1 Adjusted R-square and RMSE in Regression Analysis of Lowrey's Mean Tree Height Estimation

	Adjusted R-squere	RMSE (m)
zq75	0.953	1.832
zq75+zsd	0.955	1.751
zq80	0.955	1.847
zq80+zsd	0.956	1.783
zq85	0.956	1.868
zq85+zsd	0.955	1.829
zmax	0.884	1.957
zmax+zsd	0.888	2.092
zmean	0.934	2.023
zmean+zsd	0.958	1.766

表–2. 枝下高推定の回帰分析における修正決定係数とRMSE

Table 2 Adjusted R-square and RMSE in Regression Analysis of Crown Base Height Estimation

	Adjusted R-squere	RMSE (m)
zq60	0.983	1.899
zq60+zsd	0.983	1.943
zq65	0.982	1.925
zq65+zsd	0.983	1.973
zq70	0.981	1.951
zq70+zsd	0.983	2.001
zmax	0.963	2.800
zmax+zsd	0.972	2.970
zmean	0.985	1.926
zmean+zsd	0.984	1.946

3. 樹冠長のマッピング

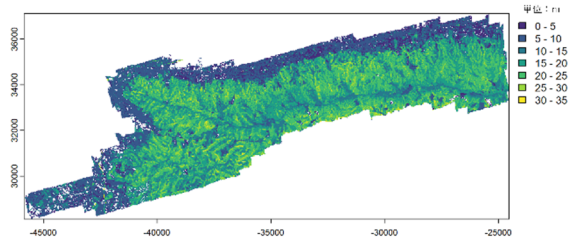
樹高や枝下高を推定する際に，パーセンタイル値を利用することにより RMSE が小さいモデルを作成できることが明らかとなったが，パーセンタイル値を利用する場合には探索的に最適なパーセンタイル値を選ぶ手間が生じる。このため，本研究では最適なパーセンタイル値を利用するのと遜色な結果を出した zmean 値と zsd 値を利用したモデルでマッピングを行った。この際，利用したモデルは以下の通りである。

$$LH \sim zmean + zsd \quad (1)$$

$$HB \sim zmean \quad (2)$$

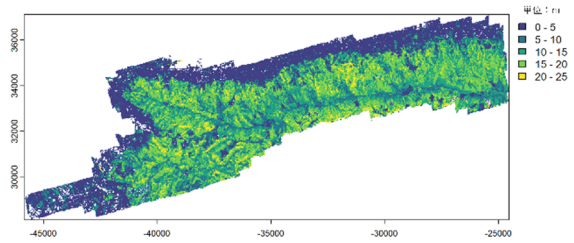
ここで，LH はローレイの平均樹高，HB は枝下高を示す。

図–2 は推定されたローレイの平均樹高，図–3 は推定された枝下高，図–4 は推定された樹冠長を示す。



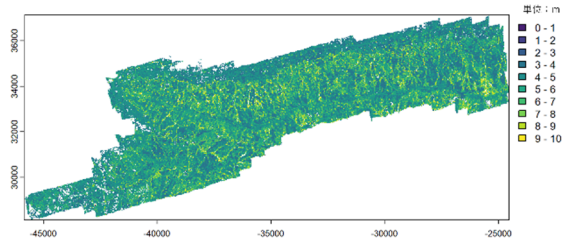
図–2. 推定されたローレイの平均樹高

Fig. 2 Estimated Lorey's Height



図–3. 推定された枝下高

Fig. 3 Estimated Crown Base Height



図–4. 推定された樹冠長

Fig. 4 Estimated Crown Length

本研究の結果より航空機 LiDAR データからからローレイの平均樹高と枝下高を推定し，樹冠長を広域で推定することが可能であることが示された。しかし，求めた樹冠長を検証したところ，その推定精度は低く，実際の樹冠長との乖離があることが明らかとなった。航空機 LiDAR データ解析における平均樹高，枝下高と樹冠長との関係については今後も検証を進める必要がある。また解析に用いたプロットデータは，樹高と枝下高についてはプロット内の代表木のみ測定されており，未測定のデータはネズルンド式などで推定された値からプロットの平均値として求めている。こうしたことも解析に影響を与えている可能性がある。今後，毎木の測定データが得られる地域で本研究結果の適用性を検証していく必要がある。

謝辞：本研究は，農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究「管理優先度の高い森林の抽出と管理技術の開発」の一環として実施された。

引用文献

(1) 気象庁：「過去の気象データ検索＞平年値」等 https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_amd_ym.php?prec_no=82&block_no=0790&year=&month=&day=20&view= (2024.11.11 参照)

(2) 久留米市：久留米市の森林 https://www.city.kurume.fukuoka.jp/1090sangyou/2070nourin/3033shinrin/index.html (2024.11.11 参照)

(3) R Core Team (2020) R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Found. Stat. Comput, Vienna

(4) Roussel JR, Auty D (2023). Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications. R package version 3.1.0. https://cran.r-project.org/package=lidR

(5) Roussel JR, Auty D, Coops NC, Tompalski P, Goodbody TRH, Meador AS, Bourdon JF, De Boissieu F, Achim A (2021) lidR : An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. Remote Sensing of Environment, 251 (August), 112061

(6) 高橋與明・栗屋善雄・田中真哉 (2013) 航空機 LiDAR によるスギ・ヒノキ林分の平均樹高推定―レーザ点密度を変えた場合の事例―. 九州森林研究 66: 6-9

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

環境情報と空間解析によるヤナギ超短伐期施業の適地評価

－千葉県印西市，宮崎県都農町のポテンシャルと課題－

髙橋正義[1]・北原文章[1]・鄭峻介[2]・早舩真智[3]・大森聡[4]

[1]森林総合研究所・[2]森林総合研究所北海道支所・[3]森林総合研究所関西支所・[4]筑波大学

要旨：FIT 制度導入などを背景に，燃料用木質バイオマス材の需要が急速に高まっており，新たな供給方法として，ヤナギ超短伐期施業による木質バイオマス生産に注目が集まっている。NEDO・エネルギーの森事業においてヤナギ超短伐期施業による木質バイオマス生産の実証試験を開始した千葉県印西市，宮崎県都農町を対象に，現存植生図や土壌分類図などの環境情報と GIS を用いた空間解析により，ヤナギ超短伐期施業の適地を評価した。印西市は，ヤナギ超短伐期施業の適地である耕作放棄地や平地林が市全域にあるのに対し，都農町の適地は東部の平野に限られていた。

キーワード：ヤナギ，超短伐期施業，適地評価

Assessment of suitable sites for willow short rotation coppice with environmental information and spatial analysis
-Potential and Challenge in Inzai City, Chiba and Tsuno Town, Miyazaki

Masayoshi TAKAHASHI[1], Fumiaki KITAHARA[1], Shunsuke TEI[2], Masatomo HAYAFUNE[3], Satoshi OMORI[4]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute; [2]Forestry and Forest Products Research Institute Hokkaido Research Center; [3]Forestry and Forest Products Research Institute Kansai Research Center; [4]University of Tsukuba

Abstract: Demand for woody biomass for fuel is increasing rapidly accelerating the introduction of the FIT system. Huge attention is being drawn to the willow short rotation coppice (SRC) as a new supply method for fuel wood. The assessment of suitable sites for willow SRC in Inzai City, Chiba Prefecture, and Tsuno Town, Miyazaki Prefecture is done, where demonstration trials for woody biomass production using willow SRC were started supported by the NEDO Energy Forest Project. Environmental information such as vegetation maps and soil classification maps were used for spatial analysis using GIS. In Inzai City, abandoned agricultural lands and lowland forests, which are suitable areas for willow SRC, are located throughout the city. Whereas suitable areas in Tsuno Town are limited to the eastern plains.

Keywords: Willow, Short Rotation Coppice, Assessment of Suitable sites

I　はじめに

日本国内に約 30 種あるヤナギは，穂木で容易に植栽が可能で初期成長に優れる。萌芽再生する樹種を用いることで，2 - 5 年程度の短伐期での伐採と萌芽再生を繰り返すことで木質バイオマスを生産する超短伐期施業（Short Rotation Coppice）が可能である。欧米ではすでに実用化されており，日本国内でも旺盛な需要によって不足する木質の燃料用材の新たな供給源として注目を集めている。超短伐期施業に関する国内での研究は北海道を中心に行われてきており，1,5 万本/ha の穂木を植栽し，伐期 3 年，萌芽更新による 7 回の収穫を繰り返す施業体系の提示(5)や，北海道におけるバイオマス生産に適したヤナギ 2 種の優良系統の選抜(*6*)などが行われている。近年では関東地方でもヤナギのバイオマス生産に向けた樹種と施肥効果に関する研究(*4*)などが進められており，ヤナギによる日本国内でのバイオマス生産は技術的に可能と考えられる。

ヤナギを用いた商用規模でのバイオマス生産には，大

（受理日 2025 年 1 月 31 日）

面積でヤナギを植栽する必要があることから，その栽培適地についても検討が必要である。伊藤ら(*2*)は，環境情報を用いて北海道内におけるヤナギ超短伐期施業の可能性を評価した。さらに北海道下川町を対象にした研究として，環境情報を用いたヤナギ施業適地の抽出(*3*)や土地利用，農機利用，運材距離などを想定した栽培適地評価(*1*)を行っており，地域におけるヤナギバイオマス生産の定量的なポテンシャルを理解するために必要な情報を取得する試みがなされている。

著者らが参画する研究グループは，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）新たな燃料ポテンシャル（早生樹等）を開拓・利用可能とする“エネルギーの森”実証事業の支援を受け，ヤナギ超短伐期施業技術を活用した木質バイオマス燃料用材の生産実証を開始した。そこで，実証地が位置する宮崎県都農町および千葉県印西市を対象として，ヤナギ超短伐期施業による木質バイオマス生産のポテンシャルを評価することを目的として，ヤナギ超短伐期施業の適地を分析，評価し，ポテンシャルと課題を明らかにした。

II　対象地，資料と方法

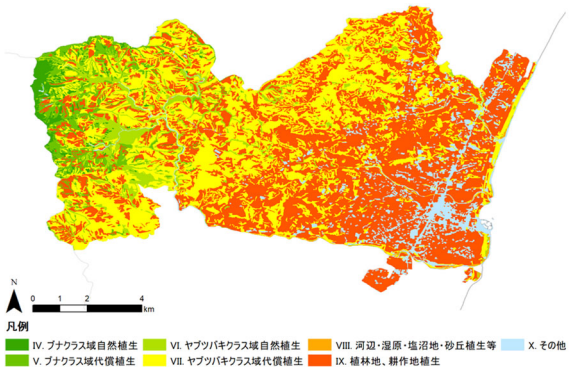
1．対象地　対象地は NEDO 実証事業でヤナギの栽培実証地が位置する宮崎県都農町と千葉県印西市とした。

宮崎県都農町は，人口約 10 千人の町で，宮崎県北部の日向灘に面し，面積は 10,211 ha である。そのうち耕地は 1,400 ha，林野面積は 6,854 ha である。千葉県印西市は，千葉県北部に位置し，北側は利根川に接する，人口約 103 千人の市である。面積は 12,379 ha で，そのうち耕地は 4,130 ha で，林野は 2,475 ha である。

2．資料および方法　先行研究である伊藤ら(*3*)および古家ら(*1*)を参考に，環境情報として，第 6 回・第 7 回自然環境保全基礎調査植生調査のうち現存植生図（環境省），国土数値情報（国土交通省）のうち自然保護地域図，土壌分類図，土地分類調査のうち 250 m メッシュ傾斜角図を用いた。対象自治体が含まれるデータをそれぞれの公開サイトからダウンロードし，現存植生図は，先行研究における土地利用／被覆カテゴリを参考に，凡例を再分類し，土地利用／被覆図を作成した（図–1）。土壌分類図も同様に先行研究のカテゴリを参考に再分類した（図–2）。土地利用被覆図および土壌分類図から，先行研究でヤナギの施業適地とされる区分を抽出し，適度に応じたカテゴリ分けを行った。

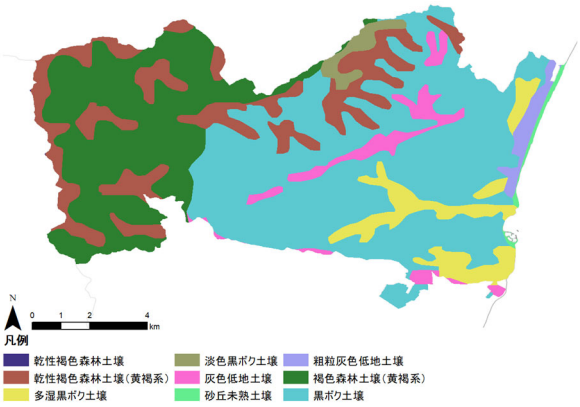
傾斜角図は，農機利用を想定したカテゴリに再分類（図–3）し，農機利用を想定した傾斜 15 度以下のエリアをさらに抜き出した。

さらに，農地の区画情報である農林水産省の筆ポリゴンデータ（令和 6 年データ，図-4）を利用してその土地が農地であるかをオーバーレイ解析によって分析した。



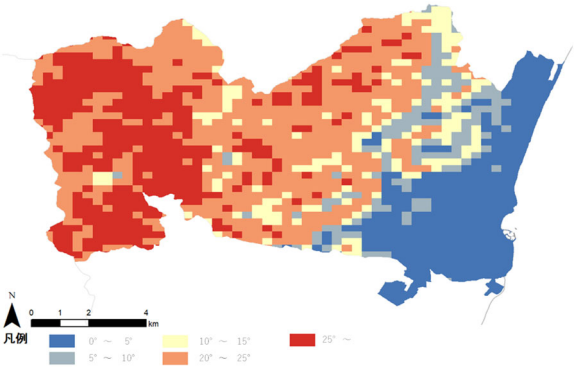
図–1.　宮崎県都農町の土地利用被覆図

Fig.1 Land use and Land cover map of Tsuno town, Miyazaki.



図–2.　宮崎県都農町の土壌分類図

Fig.2 Soil type map of Tsuno town, Miyazaki.

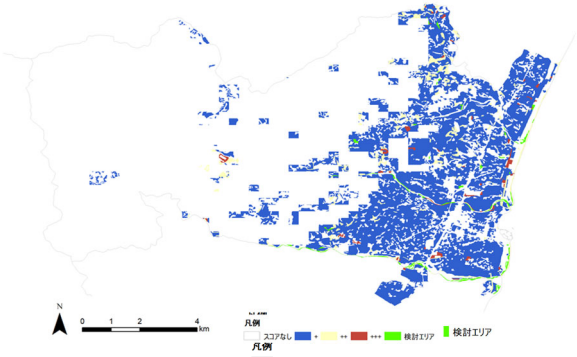


図–3.　宮崎県都農町の傾斜区分図

Fig.3 Slope map of Tsuno town, Miyazaki.

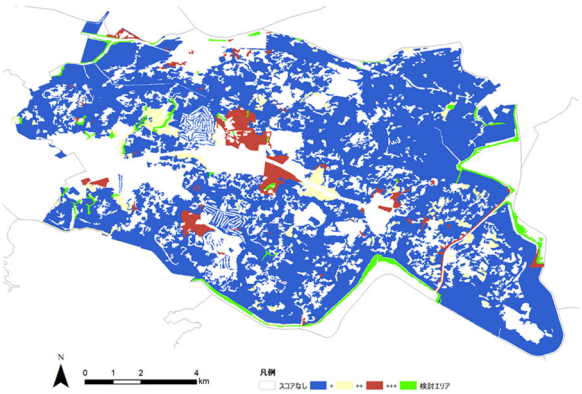
図–4.　宮崎県都農町の筆ポリゴン図

Fig.4 Agricultural land map of Tsuno town, Miyazaki.



図–5.　宮崎県都農町のヤナギ施業適地評価図

Fig.5 Willow SRC potential map of Tsuno town, Miyazaki.



図–6.　千葉県印西市のヤナギ施業適地評価図

Fig.6 Willow SRC potential map of Inzai city, Chiba.

ヤナギの施業適地について，先行研究（*1*, *3*)と同様に，農機利用が可能な平坦な場所で，ヤナギの生育，栽培が可能な土地利用被覆および土壌条件が重なる場所とした。傾斜条件は傾斜角 15° 以下を農機利用が可能な平坦地とし，それ以上の傾斜は不適とした。土地利用被覆は，耕作放棄地や雑草群落などヤナギの施業によって土地利用の有効活用にもつながる適地スコア+++とし，伐跡群落等を適地スコア++に，場合によっては転換の可能性がある農耕地，植林地などは潜在適地として適地スコア+とした。土壌条件はヤナギ生育可能性の工程に基づく土壌分類群 5 区分を踏まえ，褐色森林土壌を適地スコア+とした。土地利用被覆ではヨシ群落など，土壌分類では砂丘未熟土壌などの先行研究で分類が示されていない条件は要検討エリアとして適地スコアを付与しなかった。

III　結果と考察

図-5 に宮崎県都農町の適地区分図を示した。都農町の施業適地は町の東部に集中していた。都農町西部は主として山間部の森林地帯で，傾斜が緩やかな植林地などがわずかに散在する程度であった。都農町は，ほとんどの場所では適地スコア＋であり，最も適するとされるスコア+++に分類される土地は極めて少ないことが明らかになった。

図-6 に千葉県印西市のヤナギの施業適地評価図を示した。印西市には傾斜 15 度以上の傾斜条件の場所が存在せず，市全域にヤナギ施業が可能な土地利用が広がっていた。印西市でも都農町と同様，適地スコア+が最も多かったが，適地スコア+++に分類される場所が市中央部に見られたことが異なっていた。適地スコア+++の多くはニュータウン開発に伴う造成地が広がるエリアで，都市開発にとっても適している場所であり，他の土地利用との競合が避けられない場所と考えられる。土地利用被覆に用いた現存植生図が作成されてからやや時間が経過しており，現地踏査から，適地スコア+++に区分された場所の多くはすでに都市的土地利用（物流・商業施設，データセンター，太陽光発電所）などに利用されていたことから，印西市で適地スコア+++の場所が大面積でヤナギの超短伐期施業に活用される可能性は低いと考えられる。

表-1 に印西市および都農町のヤナギ施業適地評価と農地区画の割合との関係を示した。印西市の適地は約 5,100 ha で，市の面積の約 4 割が適地と判定された。一方，都農町でヤナギの適地と判定された面積は 1,800 ha，町の面積の約 18 %であった。また，都農町は適地と判定された場所の約 89 %が農地の区画であった。これはヤナギの栽培に適した土壌，土地利用の場所で比較的平坦で農機利用が可能なエリアはほぼ農地であったことを表す。したがって都農町でヤナギの超短伐期施業は耕作に使われていない農地，すなわち耕作放棄地が最も有力であるといえる。一方で，印西市はヤナギ施業適地に占める農地の割合が約 68 %と都農町より低い傾向にあり，施業適

表–1. 適地評価と農地区画の割合

Table.1 Cross table of Area, Agricultural land and Willow SRC potential categories

適地スコア	印西市		都農町	
	面積(ha)	割合(%)	面積(ha)	割合(%)
スコアなし	899.06	5.30	507.12	9.30
+	4075.02	55.47	1216.74	44.92
++	72.16	3.98	66.80	7.69
+++	29.56	1.84	18.91	16.84
検討エリア	26.79	1.51	12.35	9.78
合計	5102.59	68.10	1821.91	88.53

地の約 3 割が農地以外の土地利用であった。筆ポリゴンは衛星画像等のリモートセンシングデータを元に作成されているため，長年耕作放棄され林地化した場所は含まれていないものと考えられる。また，筆ポリゴンには平地林は含まれないことから，印西市では低利用の平地林もヤナギ超短伐期施業に適用できる場所があることが示唆された。

ヤナギの施業適地に関する先行研究を参考に，現存植生図や国土数値情報，筆ポリゴンといった公開の環境情報と空間解析によって千葉県印西市と宮崎県都農町のヤナギ超短伐期施業の適地を評価し，両自治体がヤナギ施業のポテンシャルをどの程度有しているかを定量的に示せた。使用した環境情報はいずれも全国でデータが整備されていることから，今回示した方法は，全国の他の自治体でも直ちに適用でき，ヤナギの超短伐期施業のポテンシャルを知る最初の一歩としての情報を得ることが可能である。筆ポリゴンを用いた解析を行うことで，ヤナギの施業適地と土地利用の中でも大きな面積を有する農地との関係を示し，ヤナギ超短伐期施業による耕作放棄地の解消に役立つ可能性を定量的に把握できる。

一方で，今後検討すべき課題がいくつか明らかになった。全国で簡便に適用可能であることを念頭に，全国データが公開されている 250 m の傾斜区分図としたが，これは先行研究よりも解像度が劣る。農機利用評価の観点からは，より精細な地形データを用いることがのぞましい。ヤナギの施業をより具体的に検討する段階で，精細な地形データによる地形解析と再評価をすることが望ましい。大規模なヤナギ栽培を想定する場合，道路のアクセス度は重要な要素の一つであるが，今回示した方法は道路のアクセス度は考慮しなかった。また，古家ら(*1*)が示した，栽培・収穫したヤナギを木質バイオマス発電所等の需要サイドへ運搬するコストを考慮した評価も重要である。加えて，使用した環境情報が作成されてからや時間の経過したものも含まれていた。無人航空機を用いた空中写真等のより鮮度の高いデータを用いることで，より精緻な適地評価が可能になると考えられる。ヤナギ超短伐期施業の実用化とその普及を図るためにも，引き続きヤナギ超短伐期施業の適地評価手法の改良に取り組む必要がある。

謝辞：本研究は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業（JPNP21002）の支援を受けて実施した。

引用文献

(1) 古家直行・伊藤江利子・髙橋正義・松井哲哉 (2015) GIS 空間解析による木質バイオマス生産のためのヤナギ潜在栽培適地評価. 森林計画学会誌 49(1): 21-26

(2) 伊藤江利子・髙橋正義・松井哲哉・古家直行・上村章・宇都木玄 (2012) GIS 環境情報を用いた北海道内におけるヤナギ栽培可能性の評価. 北方森林研究 60: 17-20

(3) 伊藤江利子・古家直行・髙橋正義・松井哲哉 (2014) GIS 環境情報を用いた下川町におけるヤナギ栽培敵地の抽出. 北方森林研究 62: 39-42

(4) Kayama M, Kikuchi S, Uemura A, Takahashi M (2023) Growth Characteristics of Seven Willow Species Distributed in Eastern Japan in Response to Compost Application. Forests 14(3). https://doi.org/10.3390/f14030606

(5) 上村章・原山尚徳・宇都木玄 (2014) 北海道におけるエネルギー作物「ヤナギ」の生産の可能性. 森林総合研究所北海道支所, 札幌, 15pp

(6) 矢野慶介・田村明・花岡創・加藤一隆 (2022) 木質バイオマス生産量の大きいヤナギ品種の開発. 森林総合研究所研究報告 21(1): 61-72

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

71 年生アカマツ人工林の成長経過と間伐の影響

細田和男[1]・西園朋広[1]・北原文章[1]・田中真哉[1]・小谷英司[1]

[1]森林総合研究所

要旨：アカマツ人工林としては全国で唯一現在でも調査を継続している浅間山麓の収穫試験地について，71 年生までの成長経過を整理した。意図的に間伐を行っていない比較区はもちろん，弱度の下層間伐が繰り返されてきた間伐区も収量比数 0.8 を上回る高い密度を保っているが，上層樹高や幹材積合計は高齢になっても頭打ち傾向が弱く，直線的に増加していた。間伐区と比較区の総粗成長量はほぼ一致し，最終収量一定の法則に従っていた。

キーワード：収穫表，相対幹距，収量比数，総成長量，平均成長量

Growth and thinning effect of 71-years-old Japanese red pine plantation

Kazuo HOSODA[1], Tomohiro NISHIZONO[1], Fumiaki KITAHARA[1], Shinya TANAKA[1], Eiji KODANI[1]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: The growth process of the 71-years-old Japanese red pine plantation was summarized. Both thinned and un-thinned plot maintained high densities, with relative yield index exceeding 0.8. The increase in the top height and the stand volume did not slow down as they aged, but continued to increase linearly. The total gross increment of the thinned and un-thinned plot was almost the same, and it followed the law of constant final yield.

Keywords: yield table, relative spacing, relative yield index, total increment, mean annual increment

I　はじめに

森林総合研究所は森林管理局と共同で全国の国有林に収穫試験地と称する長期固定試験地を設定し，主として人工林の成長量や林分構造の推移を長期間にわたって調査してきた(*6*)。収穫試験地の樹種は現在スギ，ヒノキ，カラマツまたはトドマツがほとんどである。樹種別人工林造林面積に占めるマツ類（アカマツ，クロマツ，リュウキュウマツ）の割合は，現在は 1%程度に過ぎないが，1970 年度までは 10%以上で，ヒノキあるいはカラマツを上回っていた年度もあり(*7*)，かつてはアカマツも主要造林樹種のひとつであった。このため，アカマツについても関東森林管理局管内に 7 か所，中部森林管理局管内に 4 か所の人工林収穫試験地が設定された。しかし，松くい虫被害を受けてほとんどの試験地が順次廃止となった。本稿では，全国で唯一現在でも調査を継続している貴重なアカマツ人工林収穫試験地について，2024 年 6 月に定期調査を行ったので，これまでの成長経過や間伐区と無間伐区の違いについて報告する。

II　資料と方法

報告する高峰アカマツ人工林収穫試験地は，中部森林管理局東信森林管理署管内，長野県小諸市高峰国有林に所在する。浅間山の山頂から西南西に約 7 km の山腹緩斜面に位置し，標高は約 1,200 m，傾斜 5～12°，斜面方位は南～南西向き，土壌型は BD である。西側は防火線を挟んで民有林，南側はカラマツ人工林，その他はアカマツ人工林に隣接している。

1953 年の春，アカマツ林の伐採跡地に ha あたり約 3,000 か所の播種穴を設け，周辺林分から採取したアカマツ種子の人工播種が行われた。播種後 1955 年まで毎年 1 回，計 3 回の下刈りが実施されている。1959 年 12 月に 0.238 ha の標準地（間伐区）が設定された。また 1964 年，意図的に間伐を行わない 0.1 ha の無間伐区（比較区）が追加設定された。以後 2～7 年間隔で計 13 回（比較区は 11 回）の定期調査が行われた。その間，間伐区では計 8 回の下層間伐が実施され，材積間伐率は 12～24 %であった。

定期調査での調査内容は，個体識別のうえ胸高直径と樹高の全数測定，寺崎式樹型級区分，被害の有無等である。胸高直径は，ペンキで印づけられた毎回同じ胸高位置を輪尺によって 0.1 cm 刻みで 2 方向測定した平均である。樹高は年代により測高ポール，ブルーメライス測高器，バーテックス測高器によって 0.1 m 括約で全て実測されてきた。

試験地の成長経過の特徴をみるため，早尾(*1*)に収録されている「長野，新潟県地方あかまつ収穫表」（1944 年 7

（受理日 2024 年 12 月 23 日）

月，林業試験場技師 麻生誠調製，前橋営林局発表）の主林木（間伐木以外の生立木）の平均値や合計値を比較対象とした。また本数密度の指標として，試験地の各時点の上層樹高と ha あたり本数密度から，相対幹距と収量比数を算出した。相対幹距は，上層樹高に対する平均樹木間距離の百分率であり，平均樹木間距離は「10000÷本数密度」の平方根で計算した。当地方の国有林アカマツに特化した密度管理図は作成されていないため，収量比数は「関東・中部地方アカマツ林分密度管理図」（1973 年 3 月，日本林業技術協会調製，林野庁監修）によって求めた(5)。間伐区，比較区ともに枯死木は平均値や合計値の計算に加えなかった。ただし，幹材積の総粗成長量には枯死木も加算した。なお上層樹高については，試験地では樹型級区分も行われてきているので上層木のみの平均樹高を算出することもできたが，個人差のない，より客観的な評価のために Lorey の平均樹高（胸高断面積を重みとする加重平均樹高）をもって上層樹高とした。Lorey の平均樹高は，目視での階層区分による上層樹高に近いことが細田ら(2)によって確かめられている。

III　結果と考察

1. 上層樹高の推移と樹高地位　前述のとおり，間伐区では弱度の下層間伐が繰り返された一方，比較区は意図的に間伐が行われなかった。このため比較区には被圧木が多数混在しているが，上層樹高で比較すると両区はおおむね同じ経過で，特に 56 年生まではほぼ一致，61 年～71 年生では比較区の方がやや高く，その差は 1.0～1.6 m であった（図–1）。両区は同一の平衡緩斜面に設定され，緩衝帯を挟んで等高線方向に隣接しており，上層樹高の推移を考え合わせると，両区の地位はほぼ同等と判断される。

収穫表と比較すると，試験地は調査開始当初，地位 3 等に相当していたが，その後地位 2 等相当，51 年生以降は地位 2 等と 1 等の中間程度で推移している（図–1）。収穫表と比べて，試験地は加齢に伴う樹高成長の頭打ち傾向が弱く，60 年生を超えた現在も比較的直線的に樹高が増加していることが見てとれる。

杉田(9)は岩手県のアカマツ天然林の個体の成長経過を樹幹解析によって分析し，樹高成長が停止するのは樹齢 80～120 年であったと報告している。場所の違い，人工林と天然林との違いはあるが，本試験地の樹高成長も当面の間，あまり頭打ちにならずに持続する可能性が高いと考えられる。

2. 本数密度の推移　前述のとおり，本試験地では ha あたり 3,000 か所の播種穴を設けて播種が行われたが，

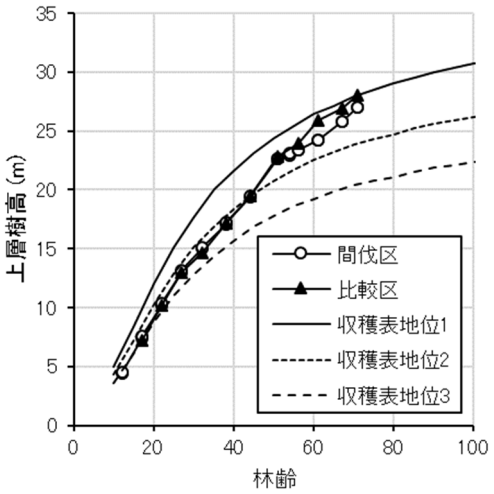


図-1. 上層樹高の推移
Fig. 1 History of top height

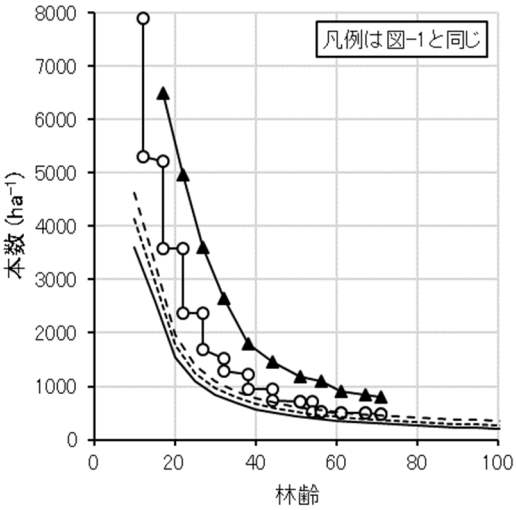


図-2. 本数密度の推移
Fig. 2 History of stand density

ひとつの穴に複数の種子を播いた結果，初期には 3,000 本/ha を大きく上回る立木が成立していた。試験地として設定された 7 年生当初，ひとつの播種穴から 1～12 本，平均 4～5 本のアカマツが発生している，との観察記録が残っている。71 年生現在でも，比較区においては 1 か所に 2～3 本が群状に残存していることは少なくない。この結果，図–2 に示すとおり，両区ともに収穫表 3 等を上回る本数密度で推移し，特に比較区は収穫表 3 等の 2 倍を上回っていた。なお図–2～4, 6 において，間伐区の同一林齢で結ばれた 2 点は間伐の前後の値を示している。

3. 相対幹距と収量比数の推移　間伐区の 22 年生以降の相対幹距はおよそ 16～20%，収量比数はおよそ 0.8～0.9 で（図–3，図–4），弱度の間伐を繰り返しながら高い密度で管理されてきた。間伐区では間伐による本数減少

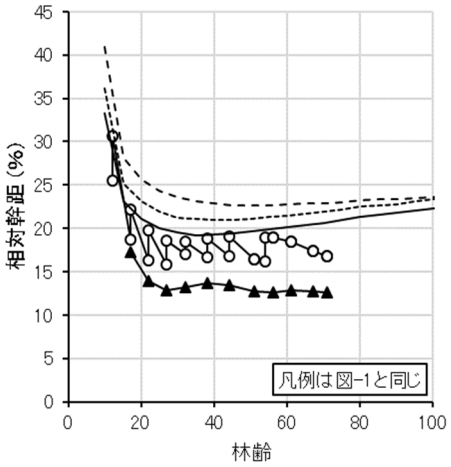


図-3. 相対幹距の推移

Fig. 3 History of relative spacing

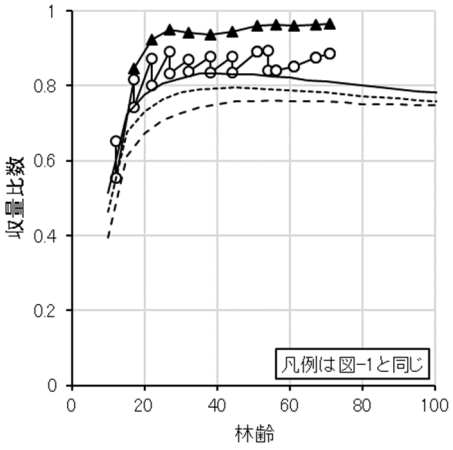


図-4. 収量比数の推移

Fig. 4 History of relative yield index

以外にも，競争による自然枯死が定期調査のたびに数本ずつ確認されてきた。國崎(*4*)は，岩手県内で自己間引きが生じているアカマツ人工林の相対幹距の上限が 19.1%であることを報告し，自己間引きが発生しやすい，混みすぎの基準として相対幹距 20%を提案した。本試験地の間伐区でも自然枯死が生じていることは，國崎の提案に合致しているといえる。

比較区の 22 年生以降の相対幹距はおよそ 12～14%，収量比数はおよそ 0.95 前後で自己間引きを起こしながら，密度管理図の最多密度曲線に沿って推移してきた（図–3，図–4）。最多密度曲線の切片が妥当であるという前提に立てば，比較区が収量比数 1.0 よりもやや低い密度で推移しているのは，群状に成立している立木があるから，という解釈ができるかもしれない。林分内に均等に残存しているよりも，群状の方がより隣接木との競争が激しいと考えられるからである。

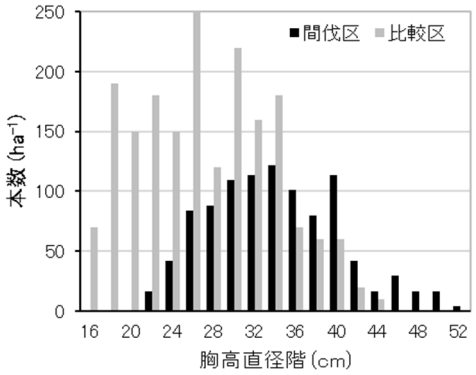


図-5. 71 年生時点の胸高直径分布

Fig. 5 DBH distribution in 71-years-old

4. 胸高直径の比較　本数密度が異なる結果，71 年生現在の平均胸高直径は間伐区が 37.4 cm に対して，比較区は 30.3 cm と明らかに小さかった。比較区のなかでは 27 cm 未満の割合が多く，比較区の平均胸高直径を引き下げている一方，35 cm 以上の範囲では比較区よりも間伐区の本数が多かった（図–5）

5. 幹材積合計，総成長量，平均成長量の推移　比較区は平均胸高直径が小さいが本数密度が高いので，現存する幹材積合計では間伐区を大きく上回っている（図–6）。また，比較区は初期から一貫して，また間伐区は 51 年生以降おおむね収穫表 1 等を上回っている。幹材積合計に過去の間伐量を加算した総純成長量で比較すると（図–7），逆に間伐区のほうが比較区よりも明らかに多い。さらに過去の枯死量を加算した総粗成長量で比較すると，間伐区と比較区はほぼ一致し，最終収量一定の法則に従っていることが確認された。

総純成長量をその時点の林齢で除した平均純成長量は，伐期の選択に関わる重要な指標である。収穫表の平均純成長量は 40 年生前後でピークとなるが（図–8），本試験地は間伐区，比較区ともに，51 年生以降平均純成長量はおおむね一定であり，明らかなピークが認められないことが特徴的である。なお，30～44 年生で間伐区の平均純成長量の増加が停滞，比較区では減少しているのは，台風の影響と思われる枯死が一時的に増えたためと考えられる。

Ⅳ　おわりに

これまでスギ，ヒノキ，カラマツの収穫試験地については，既存の収穫表と比較して高齢になっても樹高成長や幹材積成長が衰えないことが多いことが確認されている(*3*)。上に述べたとおりアカマツについても 1 例ではあるが，スギなどと同様の傾向にあることが初めて分かっ

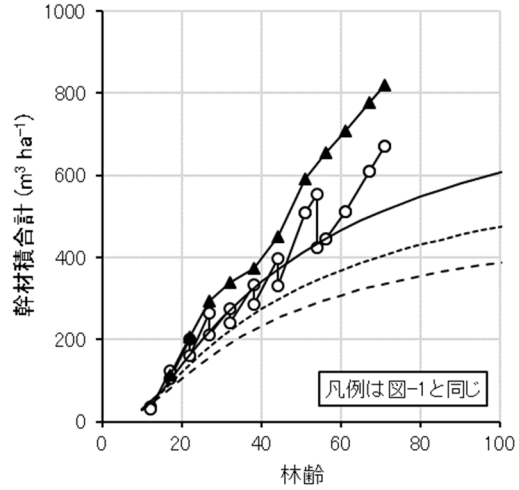


図-6. 幹材積合計の推移

Fig. 6 History of stand volume

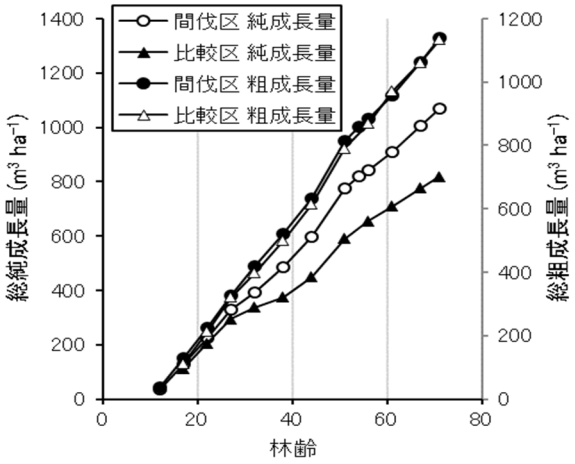


図-7. 幹材積成長量の推移

Fig. 7 Total increment of stand volume

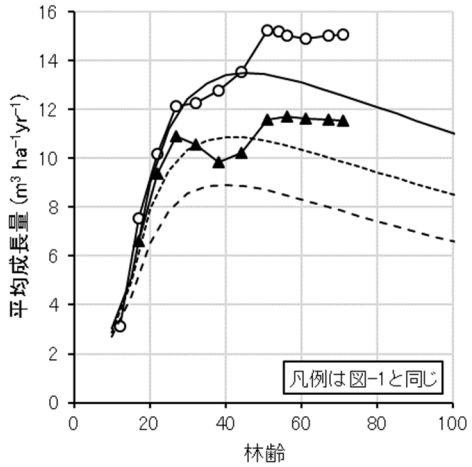


図-8. 幹材積平均成長量の推移

Fig. 8 Mean annual increment of stand volume

た。

1783 年の浅間山噴火後に成立した当地のアカマツ天然林は「霧上の松」とも呼ばれ(*8*)，一部は中部森林管理局により希少群落保護林や特別母樹林に指定されている。報告した試験地は天然林ではなく播種造林による人工林であるが，種子は周辺林分から採取されたもので，遺伝的には天然林と同一と考えられる。標高が高く，幸いにして現在までのところ松くい虫の被害を免れており，アカマツ人工林の成長経過や間伐効果を記録する貴重な事例として，今後も定期的な追跡調査を行っていく必要がある。

謝辞：本報告にあたり，当試験地の維持管理にご高配をいただいている中部森林管理局技術普及課ならびに東信森林管理署の各位に謝意を表します。また，著者以外に過去の定期調査を担当した森林総合研究所 家原敏郎, 齋藤英樹，髙橋正義，古家直行，山田祐亮，福本桂子，大道一浩（現林野庁），光田　靖（現宮崎大学）の各氏，とりわけ試験地設定後間もなくから 2000 年度まで長年にわたって担当された元森林総合研究所木曽試験地主任（故）原光好氏に深く敬意を表します。

引用文献

(1) 早尾丑麿 (1971) 日本主要樹種林分収穫表 再々改版. 林業経済研究所, 東京, 235 pp

(2) 細田和男・福本桂子・山田祐亮・北原文章・西園朋広・髙橋正義・齋藤英樹 (2020) 同齢単純林における上層樹高の量的定義. 関東森林研究 71 (1): 13-16

(3) 細田和男・西園朋広・家原敏郎・佐野真琴・光田靖 (2013) 固定試験地による関東地方，富士・箱根地方および大井・天竜地方ひのき林林分収穫表の検証. 関東森林研究 64 (1): 13-16

(4) 國崎貴嗣 (2014) 過密なカラマツ，アカマツ人工林における簡便な密度管理指標の探索. 岩大演報 45: 25-36

(5) 日本林業技術協会 (1999) 人工林林分密度管理図 全 22 図（復刻）. 日本林業技術協会, 東京, 15 pp

(6) 西園朋広ほか (2023) 平成 28～令和 2 年度に調査した収穫試験地等固定試験地の経年成長データ（収穫試験報告 第 27 号）. 森林総合研究所研究報告 22 (3): 141-190

(7) 林野弘済会 (1982) 林業統計要覧 時系列版. 林野弘済会, 東京, 133 pp.

(8) 四手井綱英 (1963) アカマツ林の造成－基礎と実際－. 地球出版, 東京, 321 pp.

(9) 杉田久志 (1984) 岩手地方のアカマツ林の成立過程. 岩大演報 15: 51-66

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

Thinning and subsequent vegetation changes in abandoned forests in the Soma region of Fukushima Prefecture

Iwao UEHARA[1]
[1]Tokyo University of Agriculture

Abstract: Since the 2011 of the Pacific coast of Tohoku Earthquake, many abandoned forests remain in Fukushima Prefecture. In this research, I aimed to thin abandoned Japanese cedar and cypress forests and secondary broadleaf forests in the Soma region, one of the areas severely contaminated by radioactive fallout, observe the subsequent vegetation recovery, and make recommendations regarding future operations in the area. The research method was to thin 50% of the trees in each study stand from 2019 to 2022, compare the relative light intensity before and after thinning, and conduct a vegetation survey from June to October 2024 in four study areas of 10 m x 10 m (1 are). Although seedlings of 30 to 50 tree species were found in each stand, their top growth was low, and the coverage of the forest floor was also low in Japanese cedar and cypress stands. The main reason for this was thought to be low light intensity due to canopy closure, and additional thinning was considered necessary.
Keywords: relative illuminance, forest floor vegetation, coverage, seedlings, 50% thinning

福島県相馬地方の放置林における間伐の実施とその後の植生変化

上原巌[1]
[1]東京農業大学

要旨：2011 年 3 月の東日本大震災の発生以来，福島県内の各地にはいまなお放置された状態の山林が数多く存在している。本論文では，放射性降下物の汚染が甚大であった地域の一つである相馬地方のスギ，ヒノキの放置林および広葉樹二次林を対象地とし，それぞれ間伐をおこない，その後の植生回復を観察し,今後の当地における施業について提言することを目的とした。研究の方法は，各調査林分において 50%の本数間伐を 2019 年～2022 年に実施し，間伐前後の相対照度を比較し，それぞれ 10 ｍ×10ｍ（１a）の調査区を 4 か所ずつ設けて，2024 年 6～10 月に植生調査をおこなった。各林分では 30～50 樹種前後の実生が見出されたものの，その上長成長は低く，スギ，ヒノキ林分においては林床の被覆度も低かった。その主な理由には林冠閉鎖による低照度が推察され，追加の間伐が必要と考えられた。
キーワード：相対照度，林床植生，被覆度，実生，50%間伐

I . Introduction

Since the Great East Japan Earthquake and the serious nuclear accident in March 2011, many abandoned forests remain in Fukushima Prefecture. I have been continuously monitoring radioactive cesium in abandoned forests in the Soma region, which suffered the most damage, since the earthquake in 2011 (*1*, *4*, *5*). After the half-life of cesium-134 passed, a decrease in radioactive cesium concentrations was observed from around 2018, so thinning was started and implemented in 2019 (*6*, *7*). There have been several reports on the difficulties of thinning and subsequent vegetation recovery in abandoned artificial forests, particularly in cypress forests (*2*, *3*, *8*, *9*). The purpose of this study is to investigate the recovery of vegetation after thinning in these forests.

II. Research Methods

The subjects of the study were 4 forest stands: ① 36-year-old Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) stand: tree density 3000　trees / ha, average tree height 11 m, average DBH 20 cm (Imada district, Soma City); ②30-year-old Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) stand tree density 3500 trees / ha, average tree height 12 m, average DBH 15 cm (Haramachi district, Minamisoma City); ③ 20-year-old Japanese cypress stand: tree density 2000 trees / ha, average tree height 8 m, average DBH 14 cm (Odaka district, Minamisoma City); ④ Broadleaf secondary forest mainly composed of tall trees such as *Quercus serrata* and *Castanea crenata:* tree density 3500 trees / ha, average tree height 17 m, average DBH 25 cm

（受理日 2025 年 12 月 10 日）

(Tamano district, Soma City).

The research method was to thin 50% of the trees in each forest stand in December 2019 in the cedar forest (①), in 2020 in the cypress forest (②), in 2021 in the broadleaf forest (④), and in 2022 in the cypress forest (③). Relative light intensity was measured again six months after the thinning, and a comparison was made before and after thinning. The relative illuminance was measured using an illuminometer, ANA-F11, manufactured by Tokyo Koden Co., Ltd. Twenty-five meshes, each 2 m x 2 m, were set in each plot, and measurements were taken at the center of each mesh, 2 m above ground level. However, relative light intensity was not measured in the broadleaf secondary forest. From June to October 2024, four survey areas of 10 m x 10 m (1are) were set up in each forest stand, and a vegetation survey of the forest floor was conducted. The vegetation survey investigated the seedling tree species, tree height, and coverage. Neither area is home to wild deer and is surrounded by animal fences.

III. Results and Discussion

1. Change in relative light intensity before and after thinning The change in relative light intensity before and after thinning is shown in Table 1. In all cases, thinning was carried out at a 50% thinning rate, but there was variation in the improvement in relative light intensity. In particular, in the 30-year-old Hinoki forest, the relative light intensity after thinning remained below 20%. However, in the 20-year-old Hinoki forest, a large improvement in relative light intensity was observed. This suggests that early thinning is desirable.

Table 1: Change in relative light intensity before and after thinning in each forest stand (%)

Survey stand	Before thinning	After thinning
Cedar 36-year stand	7.4 (±13.8)	26.8 (±5.4)
Cypress 30-year stand	0.7 (±0.2)	18.9 (±4.6)
Cypress 20-year stand	6.2 (±4.8)	37.0 (±26.6)
Broadleaf secondary forest	Not measured	

2. Changes in forest floor vegetation The changes in forest floor vegetation before and after thinning in each surveyed stand are shown below.

① 36-year-old Japanese cedar stand Before thinning, *Acer palmatum, Cerasus jamasakura, Pinus densiflora*, *Quercus serrata*, *Lindera umbellata*, *Neolitsea sericea*, *Aria japonica*, *Toxicodendron trichocarpum* , *Fraxinus lanuginose, Buckleya lanceolate, Abies firma* , *Ilex crenata*,,*Kalopanax septemlobus, Orixa japonica, Rhaphiolepis indica, Viburnum dilatatum, Viburnum phlebotrichum, Akebia trifoliata* were confirmed on the stand floor. Table 2 shows the tree species found on the forest floor in September 2024. A total of 31 tree species were confirmed, most of which were less than 1 m in height. The only two tree species that were more than 1 m in height were *Buckleya lanceolate* and *Callicarpa japonica.* Many of the tree species were intolerant and many were wind- or bird-dispersed species.

Table 2: Tree species identified on the forest floor of a 36-year-old cedar stand after thinning (September 2024)

<Deciduous broad-leaved trees>

Stachyurus praecox , *Buckleya lanceolate, Kalopanax septemlobus, Toxicodendron trichocarpum, Ilex macropoda, Fraxinus sieboldiana, Lindera umbellate, Callicarpa mollis, Callicarpa japonica, Pertya glabrescens, Acer palmatum var.matsumurae, Acersieboldianum, Acer crataegifolium, Acer palmatum, Philadelphus satsumi*, *Hamamelis japonica*, *Neillia incisa*, *Viburnum dilatatum, Quercus serrata, Castanea crenata*, *Clethia barbinervis*, *Rhododendron kaempferi*, *Carpinus laxiflora, Carpinus tschonoskii, Magnolia obovata*

<Evergreen broad-leaved trees>

Rhaphiolepis indica, Ilex crenata

<Evergreen conifer>

Pinus densiflora, Abies firma Cryptomeria japonica, Chamaecyparis obtusa

② 30-year-old Japanese cypress stand Next, the tree species of the forest floor vegetation after thinning in a 30-year-old cypress stand are shown in Table 3. Before thinning, the relative light intensity in the forest was less than 1%, and therefore there was almost no vegetation on the forest floor. However, after thinning, 45 tree species were confirmed (October 2024). However, the vegetation height was low, with most trees less than 50 cm tall, and no seedlings over 1 m were observed. In addition, the coverage of the forest floor was low. Many of the tree species were thought to be bird-dispersed or wind-dispersed, and many creeping plants were also seen. Rare tree species included *Ginko biloba* and *Actinidia chinensis*, as well as *Cornus kousa*, but these are thought to be seeds dispersed by raccoon dogs that ate the fruit in garden trees or

outdoors near the surveyed sight.

Table 3. Tree species confirmed on the forest floor of a 30-year-old cypress stand after thinning (October 2024)

＜Deciduous broad-leaved tree＞
Celastrus orbiculatus, *Toxicodendron trichocarpum*, *Mallotus japonicus*, *Acer sieboldianum*, *Chengiopanax sciadophylloides*, *Acer subsp. pictum*, *Lindera umbellata*, *Callicarpa japonica*, *Callicarpa mollis*, *Morus australis*, *Berchemia racemosa*, *Carpinus tschonoskii*, *Acer palmatum*,, *Acer crataegifolium*, *Populus tremula*, *Cornus kousa*, *Cornus controversa*, *Hamamelis japonica*, *Zanthoxylum schinifolium*, *Celtis jessoensis*, *Lespedeza bicolor*, *Carpinus laxiflora*, *Cleradendrum trichotomum*, *Quercus serrata*, *Viburnum dilatatum*, *Philadelphus satsuma*
＜Climbing woody plant＞
Wisteria floribunda, *Smilax china*, *Trachelospermum asiaticum*, *Akebia trifoliata*, *Vitis coignetiae*, *Actinidia arguta*, *Stauntonia hexaphylla*, *Actinidia chinensis*
＜Evergreen broadleaf tree＞
Eurya japonica var. japonica, *Rhaphiolepis indica*, *Pieris japonica subsp. japonica*, *Ilex crenata*, *Camellia sinensis*
＜Evergreen Conifer＞
Abies firma, *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa*
＜Deciduous conifer＞
Gingko biloba

③ 20-year-old Japanese cypress stand The 20-year-old cypress stand was young and had a low tree density, so the illuminance within the forest was higher than in the 30-year-old cypress stand reported above, and 15 tree species were identified before thinning. After thinning, the relative illuminance increased to 37%. The vegetation after thinning is shown in Table 4. The coverage of the forest floor was higher than in the 30-year-old cypress stand, but the vegetation height was still low, and the only tree species over 1 m in height were chestnut and magnolia.

Table 4. Tree species identified on the forest floor of a 20-year-old cypress forest after thinning (September 2024)

<Deciduous broad-leaved tree>
Toxicodendron trichocarpum, *Lespedeza bicolor*, *Fraxinus sieboldiana*, *Viburnum dilatatum*, *Styrax japonica*, *Acer crataegifolium*, *Rhododendron kaempferi var. kaempferi*, *Akebia trifoliata*, *Abelia spathulata*, *Cerasus jamasakura*, *Clethra barbinervis*, *Kalopanax septemlobus*, *Pertya scandens*, *Magnolia obovata*, *Ilex macropoda*, *Alnus firma*, *Viburnum phlebotrichum*, *Quercus serrata*, *Quercus crispula*, *Acer rufinerve*, *Castanea crenata*, *Carpinus japonica*, *Smilax china*, *Chengiopanax sciadophylloides*, *Wisteria floribunda*, *Lonicera gracilipes var. glabra*, *Lindera praecox*, *Lyonia ovalifolia var. elliptica*, *Lindera umbellata*, *Acer subsp.dissectum*
＜Evergreen broad-leaved tree>
Ilex crenata, *Eurya japonica var. japonica*, *Camellia sinensis*, *Quercus myrsinifolia*, *Ardisia japonica*, *Osmanthus heterophyllus*, *Pieris japonica subsp. japonica*
＜Evergreen conifer>
Cryptomeria japonica, *Chamaecyparis obtuse*, *Pinus deinsiflora*

④ Broadleaf secondary forest The vegetation after thinning of the broadleaf secondary forest is shown in Table 5. The coverage of the forest floor was the highest in the forest stands surveyed this time. The number of tree species found was also the highest, at 55. This included rare trees such as *Acer maximowiczianum*. Most of the trees were dispersed by birds or by nature, and many cherry and maple species were found. However, most of the trees were less than 1 m tall, and only five species were found to be over 1 m tall: *Castanea crenata*, *Cerasus jamasakura*, *Quercus serrata*, *Magnolia kobus*, and *Magnolia.ovobata.*

Table 5. Tree species confirmed on the forest floor of the broadleaf secondary forest after thinning (September 2024)

＜Deciduous broad-leaved tree>
Rubus palmatus var. coptophyllus, *Padus grayana*, *Styrax japonica*, *Stephanandra incisa*, *Euonymus sieboldianus var. sieboldianus*, *Euonymus sieboldianus var. sieboldianus*, *Chengiopanax sciadophylloides*, *Ilex macropoda*, *Cornus controversa var. controversa*, *Buckleya lanceolata*, *Ilex serrata*, *Smilax china*, *Castanea crenata*, *Magnolia kobus*, *Symplocos sawafutagi*, *Akebia trifoliata*, *Viburnum erosum*, *Corylus sieboldiana*, *Pourthiaea villosa*, *Viburnum phlebotrichum*, *Callicarpa japonica*, *Callicarpa dichotoma*, *Hamamelis japonica*, *Fraxinus sieboldiana*, *Acer amoenum var.anoenum*, *Lindera umbellata*, *Lindera umbellata var. membrancea*, *Cerasus apetala var. tetsuyae*, *Magnolia obovata*, *Cerasus jamasakura*, *Actinidia arguta*, *Kalopanax septemlobus*, *Philadelphus satsumi*, *Acer rufinerve*, *Acer crataegifolium*, *Berchemia racemosa*, *Viburnum dilatatum*, *Eleutherococcus spinosus*, *Viburnum sieboldii*, *Rosa multiflora*, *Acer palmatum*, *Carpinus laxiflora*, *Carpinus tschonoskii*, *Acer pictum subsp. dissectum*, *Staphylea bumalda*, *Aralia elata*, *Cornus macrophylla*, *Acer maximowiczianum*, *Quercus crispula*

＜Evergreen broad-leaved tree＞

Ilex crenata， *Eurya japonica var. japonica*，， *Trachelospermum asiaticum*

＜Evergreen conifer＞

Abies firma，*Cryptomeria japonica*，*Chamacyparis obtusa*

3. Comparison of vegetation in each forest stand To summarize the results of this survey, after 50% thinning in all forest stands, 31 species were identified in the 36-year-old Japanese cedar forest, 45 species in the 30-year-old Japanese cypress forest, 41 species in the 20-year-old Japanese cypress forest, and 52 species in the secondary forest. In each forest stands, there are many pioneer species such as *Toxicodendron trichocarpum* and intolerant trees. It suggests that these stands progress in early stages of succession. Those species are characterized by a large number of bird- and wind-dispersed tree species. There are also many seedlings of *Rosaceae*, *Acer*, and climbing woody plants. In addition, the vegetation coverage was 10 to 25% in the *Cryptomeria japonica* and *Chamecyparis obtusa* forests, and 25 to 75% in the secondary broadleaf forests. However, in all forest stands, the top growth of the seedlings was mostly less than 1 m. These results suggest that in artificial coniferous forests that have been left unattended for more than 30 years, a single thinning attempt is effective in promoting the germination of a certain number of tree species, but the effect on their growth is still low.

4. Future forest treatment guidelines From above results, although new tree species were found on the forest floor, their heights and floor coverage were still low, therefore it seems that further thinning is necessary in the *Cryptomeria japonica* and *Chamecyparis obtusa* forests. Furthermore, in the case of *Chamaecyparis obtusa* forests, due to the characteristic crown formation, it seems that control by the actual canopy and proper arrangement of the crown is more important than simple thinning rate. For the time being, it seems advisable to carry out this thinning to open up spaces in the canopy and between trees, to encourage wind and bird dispersal, and to promote the germination of buried seeds.

In terms of vegetation, many useful broadleaf trees including medical plants were found, so it would be advantage to cultivate them in the future, especially medicinal and special-purpose trees, and to make effective use of the forest floor vegetation.

Ⅳ. Conclusion

Although seedlings of 20-40 tree species were found in each stand, their top growth was low, and the coverage was also low in the *Cryptomeria japonica* and *Chamecyparis obtusa* stands. The main reason for this is thought to be the low light intensity caused by the still-closed canopy, and further thinning was deemed necessary.

Acknowledgment

All thinning work was outsourced to the Soma Regional Forestry Association. Author would like to appreciate them.

References

(1) Nakamura Y, Obuchi K, Nishino F, Uehara I (2016) Changes in vegetation and landscape in Minamisoma and its surrounding areas after the Great East Japan Earthquake. Ecological Environment Research 23: 51-77

(2) Noguchi M, Sakai A, Okuda S, Inagaki Y, Fukada H (2009) Changes in forest floor vegetation six years after thinning in a Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) plantation in the Shikoku region. Japanese Journal of Forest Environment 51: 127-136

(3) Shirota T, Morimoto T, Maruyama K, Okano T (2012) Changes in species composition of forest floor plants 14 years after intensive thinning in a mature Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) plantation. Shinshu University AFC 10: 27-37

(4) Tokyo University of Agriculture (2021) A model for supporting agricultural recovery from the Great East Japan Earthquake: A 10-year history of Tokyo University of Agriculture. pp.140-153. Gyosei. Tokyo

(5) Uehara I (2020) The Columbus Egg of Forests and Forestry. pp.82-95. Riko Tosho. Tokyo

(6) Uehara I (2022) Possibility of abandoned forest regeneration by thinning and monitoring and radioactive cesium for 10 years in Fukushima forest. Journal of Forest and Human Health Promotion Research 3: 11-18

(7) Uehara I (2024) Thinning and subsequent vegetation changes in abandoned cypress forests in Minamisoma City, Fukushima Prefecture. Kanto Forest Research 75: 52-55

(8) Yamagishi K, Ito T, Hirata R (2022) The effect of understory vegetation mowing during thinning of Hinoki (Cypress) plantations on the development of forest floor vegetation. Japanese Journal of Forest Environment 64: 13-21

(9) Watanabe H, Yokoi S, Ikawahara K (2011) Changes in species composition and vegetation coverage of understory vegetation 5 years after thinning in Hinoki (Cypress) plantations with declining understory vegetation. Gifu Prefectural Forest Research Institute Research Bulletin 40: 1-13

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

早生樹ウラジロエノキに対する穿孔性被害の発生について：石垣島の事例

竹中浩一[1]・数井宏[2]

[1]国際農研センター農村開発・[2]個人

要旨：近年，全国的に早生樹造林の推進気運が高まっている。沖縄県では，均質かつ急成長が特徴のウラジロエノキに関する研究が推進されている。当センターでは，沖縄県石垣島の亜熱帯環境下で，早生樹ウラジロエノキ及びセンダンの植栽を実施した。先行例では，センダンに対するカミキリムシ科昆虫による穿孔が報告されているが，ウラジロエノキへのこのグループによる被害は軽微なものを除き見当たらない。本調査では，前例のないウラジロエノキに対するタイワンゴマダラカミキリの穿孔被害を報告する。センダンと隣接して植栽されたウラジロエノキには本種による被害が確認され，またウラジロエノキではセンダンと比較して外観からの判別が困難であった。そのためセンダンのような既知の被害樹種と隣接した植栽は避けることが望ましく，また被害の早期発見のためには幹に加えて根元周囲などの定期的な確認が必要である。

キーワード：病害虫，食害嗜好性，リスク軽減，多目的利用

A wood-boring beetle infestation of *Trema orientalis*: First report from Ishigaki Island

Koichi TAKENAKA[1], Hiroshi KAZUI[2]

[1]Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Rural Development Division; [2]Field Naturalist/Self-employed

Abstract: In recent years, there has been a growing momentum nationwide to promote fast-growing tree plantations. In Okinawa Prefecture, research on the afforestation of *Trema orientalis* (L.) Blume (charcoal tree) has been widely conducted because of its rapid growth and potential as a high-quality wood for school desks. In this study, we planted *T. orientalis* with *Melia azedarach* L. (chinaberry), another promising fast-growing tree species, in a field on Ishigaki Island, Okinawa Prefecture. Previous studies have reported boring damage by several species of the Cerambycidae family on *M. azedarach*. However, reports of such damage to *T. orientalis* are scarce, except for minor incidents. This study reports a previously undocumented case of boring damage by *Anoplophora macularia* (Thomson), the white-spotted longhorn beetle, in *T. orientalis*. The damage caused by *A. macularia* was confirmed in *T. orientalis* planted adjacent to *M. azedarach*, and the damage was more difficult to identify on *T. orientalis* than on *M. azedarach* by appearance. Consequently, it is recommended to refrain from planting trees in close proximity to this known host tree species. To detect damage to the trees at an early stage, it is necessary to regularly check the base of the tree as well as the trunk.

Keywords: Pests and diseases, feeding preference, risk reduction, multi-purpose use

I　はじめに

石垣島のウラジロエノキ（*Trema orientalis* (L.) Blume）植栽地において，これまで同樹種に対する情報のなかったタイワンゴマダラカミキリ（*Anoplophora macularia* (Thomson)）による穿孔被害が発生したので報告する。

近年，全国的に早生樹造林の推進気運が高まっている(*7*)。また，沖縄県においてはウラジロエノキがその有望樹種のひとつとして採用され(*10*)，旺盛な成長と学習机など用材としての期待から，沖縄県機関を中心として先進的な研究が実施されている(*10*)。著者らは，2022 年から石垣島の圃場においてウラジロエノキとセンダン（*Melia azedarach* L.）を隣接植栽し，それぞれの成長を観察してきた。これまで，植栽直後よりセンダンに対しては，新梢，成葉，樹幹に対して複数の虫害が発生し，一方，ウラジロエノキに対しては被害種が少なく，かつ，被害程度も軽微であった。このことからウラジロエノキの方がセンダンに比べ，用材をはじめとする生産対象として，病虫獣害による材質低下の危険性が少ないのではないかと評価したところである(*9*)。しかしながら，その後のウラジロエノキの観察において，樹木の外見からは判別困難なタイワンゴマダラカミキリによる穿孔が明らかとなり，また，その様相はセンダンに対するそれとは異なるものであった。先行研究において，センダンに対するゴマダラカミキリ（*Anoplophora malasiaca* (Thomson)）他穿孔性害虫の危険性は既に報告されている(*2*)。一方，ウラジロエノキに対するカミキリムシ科昆虫による穿孔

（受理日 2025 年 3 月 17 日）

害は，米国ハワイ州においてビロウドカミキリの一種（*Acalolepta aesthetica* (Olliff)）の宿主となる可能性が唯一指摘されているのみであり，かつ被害は軽微である(*4*)。本調査では，石垣島においてこれまで報告例のない，在来樹ウラジロエノキに対する移入種タイワンゴマダラカミキリによる穿孔被害の事例を報告し，沖縄県内ひいては熱帯地域における同樹木の利用における病害虫管理の情報提供に資することを目的とする。

II 材料と方法

1. 調査地 本調査は，沖縄県石垣市，国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼研究拠点（24°22'42"N 124°11'42"E）に設置する早生樹植栽試験地において行った。市街地の気象は，年平均気温 24.5℃，最低及び最高平均気温はそれぞれ 18.9℃（1 月），29.6℃（7 月）を示し，年平均降水量は 2096 mm（1991–2020 年, 30 年間平均）である(*1*)。当センターでは，亜熱帯気候の環境を利用した早生樹の植栽試験として，A 区（区域面積 280 m^2, センダン 40 本，ウラジロエノキ 40 本，2022 年 2 月植栽），B 区（同 96 m^2，ウラジロエノキ 24 本，2022 年 4 月植栽），C 区（同 720 m^2，ウラジロエノキ 72 本，2022 年 10 月植栽），D 区（同 400 m^2，ウラジロエノキ 64 本，2023 年 2 月植栽），計 4 区画を設定した。これらの植栽区ではそれぞれの区で，植栽の苗列間を 1 m, 2 m, 3 m, 2 m 間隔とした。また，各区の計測時（A, C, D 区：2024 年 4 月 12 日，B 区：間伐実施のため伐倒前の 2024 年 2 月 13 日）における月齢，平均根元直径，平均樹高は表−1 のとおりである。

表–1. 調査対象地の植栽木の平均根元直径(D_0)及び樹高(H)，（平均値±標準偏差）

Table 1 Mean basal diameter (D_0) and height (H) of planted trees in the study area (values: mean ± standard deviation)

Plot	sp.	Month-old	n	D_0 (cm)	H (m)
A	*M. azedarach*	27	38	6.9 ± 2.1	3.2 ± 0.9
	T. orientalis	27	40	13.0 ± 3.0	3.5 ± 0.7
B	*T. orientalis*	22	24	16.4 ± 3.9	5.1 ± 3.6
C	*T. orientalis*	19	72	13.3 ± 3.4	2.4 ± 0.7
D	*T. orientalis*	14	64	7.1 ± 1.2	1.6 ± 0.3

本試験地では，2024 年 4 月下旬及び 6 月中旬の 2 回に分けて，A 区においてバイオマス計測のためウラジロエノキ 40 本を伐採した。また，2024 年 2 月，B 区において個体間競争緩和と萌芽育成試験のため，本数率 50%（24 本中 12 本を地上 20 cm の高さで伐採）の間伐を実施した。

2. 被害発生経緯 まず A 区では，植栽直後の 2022 年 5 月頃，試験区内でゴマダラ模様の鞘翅が既に発見されていた。その後段階的にセンダン 2 個体の幹に裂傷が生じ，傷口からフラスが排出されていたことから穿孔性害虫の存在が疑われた。フラスの排出は 2024 年 5 月頃まで続いた。しかし，A 区では，センダンと共に同じ試験地に植栽していたウラジロエノキにはセンダンと同じ外傷が見られなかったため，2024 年 4 月にバイオマス調査を行うまでの間，センダンのみがカミキリムシに潜入されていると認識していた。B 区では，2024 年 2 月 19 日の間伐までの間，24 本のウラジロエノキに葉及び樹皮よりフラス（虫糞や木くず）排出などの外見的異常は見られなかった。しかし，伐採ののち，間伐木のうち 3 本の切り株断面にフラスの充満した孔が現れた。その後，4 月 5 日朝，B 区の間伐木一本の切り株側面に高さ 15 cm の位置に直径 11 mm の孔が生じ，カミキリムシ成虫が樹幹から脱出し飛翔する状況を目撃した。このとき，ウラジロエノキへのカミキリムシによる穿孔害を初めて認識した。その後 A 区においても 2024 年 4 月及び 6 月の伐採過程で幹内部の状態が明らかとなったことにより，ウラジロエノキへのカミキリムシの穿入があったことが確認された。

3. 被害調査 センダン及びウラジロエノキの双方にカミキリムシによると思われる穿孔被害が認められたため，植栽木の外傷やフラス排出の有無を A 乃至 D 区において 2024 年 4 月から 9 月の毎月中旬に計数した。また，全伐を行った A 区及び間伐を行った B 区では，脱出孔が認められた植栽木について 2024 年 4 月 22 日に孔の直径と地上からの高さを計測し，さらに，切り株断面に孔が認められた伐採木の材サンプルを 2024 年 7 月 19 日に採集した。

4. 加害虫の同定 被害調査により採集したカミキリムシを顕微鏡により観察し，鞘翅の斑紋等の形態的特徴をもって，本州のゴマダラカミキリと近縁種を区別するため槇原(*3*)が作成した分類図およびその他形態的な特徴を説明する資料に照らし，種同定を行った(*5, 8*)。

5. 他の穿孔虫の確認 2024 年 4 月，カミキリムシが初めて植栽木から脱出した後，他に穿孔している可能性のある個体を脱出時に確認するため粘着式害虫捕獲シート（カミキリホイホイ，アース製薬株式会社，東京都）を 4 月 22 日，6 月 11 日の 2 回，未伐採の B 区ウラジロエノキ 12 本に貼付し脱出する本種成虫の捕獲を試みた。シートはそれぞれ 6 月 11 日及び 7 月 17 日に回収し，付着生物を確認した。

III 結果と考察

1. 加害虫の同定 試験地植栽木より採集した計 4 頭

のカミキリムシの形態を観察した。一頭はセンダンの梢端を摂食中，二頭はウラジロエノキ伐倒後に切株から捕獲, 残る一頭は羽化前の蛹状で幹内の蛹室から摘出した。これらを顕微鏡観察したところ，前胸背の斑紋，中胸腹板突起，及び触角の特徴が既存の分類基準(*3, 5, 8*)に合致し，蛹 1 頭についても中胸腹板突起が確認されたことから，両樹種から採集された当該昆虫のすべてをタイワンゴマダラカミキリであると判定した。なお，成虫はオス 1 頭（体長 34 mm），メス 2 頭（体長 34, 37 mm），蛹は性別不明 1 頭（体長 37 mm）であった。以上の結果から，この調査地で発生した穿孔被害は，すべてタイワンゴマダラカミキリによるものと推定した。

2. 被害発生状況　試験区別, 樹種別に穿孔性被害が認められた樹木数は表-2 のとおりである。A 区のセンダン植栽木 2 本に発生した樹皮上の外傷は，2022 年 5 月中旬に確認され，フラスは 2024 年 4 月に脱出孔が確認されるまで排出された（図-1）。しかし，その後同様の症状は他のセンダン個体には見られなかった。一方，ウラジロエノキは，2024 年 4 月上旬，B 区の間伐木切株から脱出中のタイワンゴマダラカミキリを目撃の後，A 区において，同月下旬に新たな脱出孔の発生を確認した。

表–2.　試験区別･樹種別穿孔性被害の樹木本数（括弧内の値は，各区の合計植栽本数）

Table 2 Number of trees damaged by wood-boring insects in each plot (values in parentheses are total numbers of trees)

Plot \ sp.	*M. azedarach*	*T. orientalis*	Total
A	2 (40)	4 (40)	6 (80)
B	-	7 (24)	7 (24)
C	-	0 (72)	0 (72)
D	-	0 (64)	0 (64)
Total	2 (40)	11 (200)	13 (240)

その後，バイオマス調査のため行った伐倒の結果，材内部の蛹室の存在を確認した立木も含め，ウラジロエノキへの穿孔被害は合計 11 本となった。続いて，C 区，D 区において, 根元直径の計測に併せて外見を確認したが，樹皮の外傷やフラスの排出など，異常は認められなかった。結果，本試験地では複数種のゴマダラカミキリ類 (*Anoplophora* 属)により宿主とされるセンダンよりウラジロエノキの被害数がより多かった*(2, 11, 12)*。

3. 脱出孔の計測　次に，センダンとウラジロエノキに生じた外傷の範囲，脱出孔の直径及び地上高を求めた。センダン被害木 2 本の内一本には脱出孔が認められ，その直径は 12.0 mm，高さ 108 cm，外傷は高さ 70～88 cm の位置にあった。他方は脱出孔痕が既に不明瞭でその直径は計測困難であったが，外傷は高さ 55～80 cm にあった。両センダンに生じた幹上の外傷は幹途中から生じ徐々に上部へ移動していた。ウラジロエノキでは，被害木 11 本の内 6 本に 9 個の脱出孔を確認した。一本の樹木から複数の脱出孔が生じた場合があった。脱出孔は平均直径 13.1 mm（最小 12.0 mm～最大 15.0 mm），開孔位置の平均高さは 12.7 cm（最小 7.0 cm～最大 20.0 cm）と低い位置にあり, また心材を中心に穿孔するなど（図-2），センダンへの加害と比べ異なる様相が見られた。沖縄県内のゴマダラカミキリの被害では地表から高さ約 10 cm 内の樹幹に傷を付けて産卵することが多く，地表面に露出した根に産卵する場合もあるとされている(*6*)。今回の調査では産卵による傷は確認されなかったが，センダンでは比較的高い位置に幼虫の食害による外傷が観察され早期の確認が可能であった。一方, ウラジロエノキでは，センダンに見られた外傷が観察されないため脱出孔の出現まで被害が確認できず，また脱出孔が低い位置にあることから, 確認はセンダンと比較してより困難であった。

4. 捕虫シートの貼付　さらに，2024 年 4 月上旬に初めての成虫個体を確認した後，同月中に粘着シートを用い，新たな成虫の捕獲を試みた。結果，2 回の貼付を行ったものの，小型マイマイや土壌動物が捕獲されたのみで対象虫は捕獲できなかった。しかし，樹木へのシートの有無にかかわらず，2024 年 9 月末までの間，すべての植栽木に新たな脱出孔は発見されていない。

5. タイワンゴマダラカミキリの発生時期　調査地において脱出孔の発生は 4 月に集中しており，タイワンゴマダラカミキリは 4 月に羽化脱出すると考えられる。また 5 月中旬より樹皮上の外傷が観察されていることから，この時期までに産卵をしていると考えられる。沖縄県内ではゴマダラカミキリが 3 月中旬から 7 月にかけて羽化し，4 月から 8 月頃まで産卵が行われることが知られている(*6*)。これらと比較して今回のタインワンゴマダラカミキリでは脱出及び産卵時期が短いが，観察例が少ないためより正確なこれらの時期の特定にはさらに調査が必要である。またゴマダラカミキリでは幼虫で越冬することが知られているが(*6*)，7 月に蛹が採集されたにも関わらず，9 月まで成虫の捕獲や新たな脱出孔の発生がなかったことから，一部が蛹で越冬する可能性がある。

6. まとめ　今回の調査では, センダンと比較してウラジロエノキでは外観からのタイワンゴマダラカミキリによる被害の確認が難しいことが示唆された。

一般的にゴマダラカミキリ類の被害では，早期に発見し資材設置による捕獲や薬剤による殺虫などの方法により被害拡大の軽減に努めることが必要とされるが*(2, 6, 8)*, ウラジロエノキに対するタイワンゴマダラカミキリの被

害を早期に発見するためには，センダンでは被害が確認可能な幹の観察を行うとともに，地際から侵入する可能性があることを考え根元周囲のより低い位置を注意深く継続的に観察することが必要と考えられる。また，今回の調査地では既知の被害樹種であるセンダンとウラジロエノキが隣接して植栽されており，このような植林が被害を助長する可能性も考えられる。この可能性については今後調査が必要であるが，当面センダンやカンキツ類などの既知の被害樹種(*2*, *6*)が既に近隣に植栽されていることが明らかな場合は，隣接地への植栽を避けることが望ましい。

図–1.　センダン試験木の幹上外傷とフラス排出（2023年11月，石垣市内国際農研，数井宏撮影）

Fig. 1 External damage to the trunk of a *Melia azedarach* test tree (November 2023, Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Ishigaki, by Hiroshi KAZUI)

図–2.　ウラジロエノキ切株に見られるタイワンゴマダラカミキリの蛹室（左：切株下部0–10 cmの地面側断面，右：同一株の高さ10–20cmの地面側断面，両サンプルは連続した切株であり，右図の孔のみ幹上の脱出孔に接続，2024年4月，石垣市内国際農研）

Fig. 2 Pupal chambers of *Anoplophora macularia*, the white-spotted longhorn beetle, found in the stump of a *Trema orientalis* tree. Left picture: ground side of stump 0–10 cm high, right picture: ground side of stump 10–20 cm high. Both wood samples are from the same stumps; a hole in the right picture connects to an exit hole on the trunk (April 2024, Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Ishigaki)

謝辞：本調査の実施にあたり，アース製薬株式会社チャネル戦略事業部より防除資材の提供がありました。ここに深く感謝を申し上げます。

引用文献

(1) 気象庁: 過去の気象データ・ダウンロード (石垣島, 1991-2020年). https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=91&block_no=47918 (2024.9.17参照)

(2) 熊本県林業研究指導所 (2010) 広葉樹造林地の害虫と防除対策のしおり. 熊本県林業研究指導所, 18pp.

(3) 槇原寛 (2000) 東アジア産主要ゴマダラカミキリ類の分類と分布. 森林防疫 49 (10): 2-16

(4) Matsunaga JN, Chun GS (2018) *Acalolepta aesthetica* (Olliff), a longhorned beetle. New Pest Advisory 18(2): 1-4

(5) 松村雅史 (2022) 沖縄甲虫図鑑. 沖縄時事出版, 那覇, 320pp

(6) 沖縄県 (2024) かんきつにおけるゴマダラカミキリ類の防除対策について. 病害虫発生予察技報第11号: 2pp

(7) 林野庁 (2022) 早生樹利用による森林整備手法ガイドライン (令和3年度改訂). 林野庁, 東京, 45pp

(8) 林野庁: 外来種ツヤハダゴマダラカミキリの被害モニタリング等について https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/higai/sonota_R3.html (2024.9.20参照)

(9) 竹中浩一 (2024) 石垣島における早生樹2樹種の若齢木に対する虫害等の被害状況について. 関東森林研究 75: 21-24

(10) 玉城雅範・井口朝道 (2019) 早生樹の活用に関する基礎的技術開発事業－ウラジロエノキにおける若齢林の樹高と土壌環境との関係について. 沖縄県森林資源研究センター業務報告, 31

(11) 農林水産省 (2005) 輸入貨物の木材こん包材に関する病害虫危険度解析報告書 https://www.maff.go.jp/pps/j/konpozai/pdf/inwoodpra01.pdf

(12) Samuelson GA (1965) The Cerambycidae (Coleopt.) of the Ryukyu Archipelago II, Lamiinae. Pacific Insects 7(1): 82-130

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

コナラ苗におけるツリーシェルターの効果

百田楓太[1]・山嵜俊[1]・安部哲人[1]

[1] 日本大学生物資源科学部

要旨：ツリーシェルターは幼齢木への獣害を防止する目的で活用されている。しかし，国内における広葉樹に対する知見は依然として少ないため，二次林における代表的な広葉樹であるコナラにおけるツリーシェルターの効果を明らかにすることを目的とした。樹高と地際直径を 2023 年 12 月から 2024 年 10 月まで毎月測定し対照区と比較するとともに，ツリーシェルター内外の温度を 1 時間毎に測定した。樹高，地際直径ともに夏季から成長を始め，樹高はシェルター区の成長量が有意に大きく，地際直径は対照区の成長量が有意に大きくなった。温度はツリーシェルター内側が高く，特に冬季に外側との温度差が大きくなった。こうした温度の高さは，防風効果とともにコナラ苗の成長に影響を及ぼしているものと考えられた。

キーワード：温室効果，樹高成長，積算温度，成長促進，直径成長

Effects of tree shelter on *Quercus serrata* seedlings

Futa MOMOTA[1], Suguru YAMAZAKI[1], Tetsuto ABE[1]

[1]College of Bioresource Sciences, Nihon University

Abstract: Tree shelters are used to prevent animal damage to young trees. Since the effects of tree shelters on broad-leaved tree in Japan is not yet well known, we aimed to clarify the effects on *Quercus serrata*, which is a broad-leaved tree. Tree height and diameter were measured monthly from December 2023 to October 2024 and compared with the control area, as well as hourly temperatures inside and outside the tree shelter. Both the height and diameter of the seedings began to grow in the summer, height growth was larger in the tree shelter treatment, while the diameter growth was larger in the control. The temperature inside the tree shelter was higher, especially in winter. The high temperature inside the tree shelter, along with the wind break, were thought to have affected the growth of *Quercus serrata* seeding.

Keywords: greenhouse effect, height growth, cumulative temperature, accelerated growth, diameter growth

I　はじめに

ツリーシェルターとはシカなどの野生動物による食害を防止する目的で苗木に被せる筒である。良い点は獣害の防止のほか，幼齢木への成長促進，下刈り時の誤伐防止効果が知られている(*4*, *6*)。一般的なシカの対策である防鹿柵は定期的なメンテナンスが必要なうえ，一ヶ所でも壊れていると林地全体への侵入を防ぐことができなくなる。これに対してツリーシェルターでは 1 本ごとに保護することで植栽地全体が被害を受けるリスクを減らすことができる(*3*)。また，柵が設置しにくい林地の形状や地形でも設置可能である。一方で，資材の価格の高さや設置が難しい立地では倒伏しやすいことが欠点とされる(*5*)。

日本ではスギ、ヒノキなどの針葉樹に主に使われていることから，針葉樹のツリーシェルターに関する知見は多いが，広葉樹に対する知見は依然として少ない。一方で，増加したシカによる森林被害は広葉樹を主体とした天然林でも報告されている。このことから，ツリーシェルターが広葉樹においても効果があることが示すことができれば森林生態系の復元や緑化にとって有意義と考えられる。そこで本研究では，広葉樹であるコナラ苗の成長におけるツリーシェルターの効果を明らかにすることを目的とした。

II　材料と方法

1．調査地　調査は神奈川県藤沢市に位置する日本大学の苗畑で行った（図-1）。当地域は相模湾に面しており，暖流の影響を受けるため，夏は涼しく冬は比較的温暖である。降水量は夏に多く，冬に少ない太平洋型気候である。苗畑はフェンスに囲まれているため，シカやウサギといった草食動物による食害はない。夏は雑草が生育するため，計測時に妨げになる大きな雑草を 8 月と 9 月に取り除いた。潅水，施肥は行わなかった。

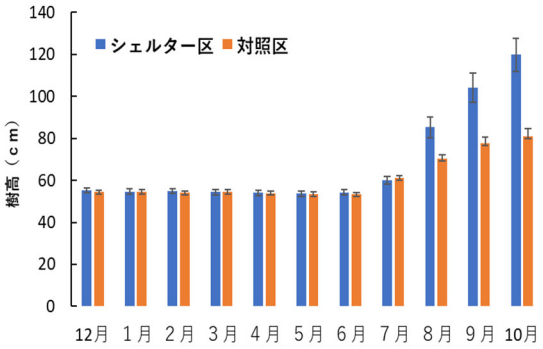
（受理日 2025 年 1 月 8 日）

図−1. 調査地の 8 月の様子

2. 調査方法　広さ約 10 m×10 mの範囲に 1 m 間隔でツリーシェルターを被せた 25 本（シェルター区），ツリーシェルターを被せない 25 本（対照区）を交互に植えた。ツリーシェルターはポリプロピレン製の高さ 140 cm，幅 9 cm のものを用いた。2023 年 12 月から 2024 年 10 月まで毎月中旬に樹高と地際直径を測定した。地際直径は 1 回測ってから 90° 向きを変え，2 回測定した平均値を苗のサイズとした。また，気温は 2023 年 12 月から 2024 年 10 月までツリーシェルター内側と外側の温度を高さ 80 cm の位置で「おんどとり」を用いて測定した。期間を通じて 1 時間のインターバルで計測した測定データをウェブ上で公開されている「おんどとり Accumulator213」で集計し，解析した。2024 年 10 月に昆虫による食害の有無を調査した。1 枚でも食害されている葉があれば，その苗は「食害あり」と判定した。本調査期間中にシェルター区，対照区ともに枯死した苗木はなかった。

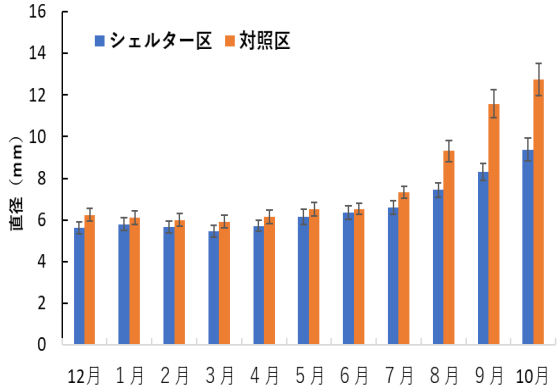
III　結果と考察

1. 樹高　苗を植栽した 2023 年 12 月から 2024 年 7 月までシェルター区，対照区ともに樹高 55 cm 前後のままほとんど成長が見られなかった。8 月以降に急激に樹高が高くなり，シェルター区の方が高くなった。植栽直後の 12 月は最低 45 cm，最大 70 cm であったが，10 月は対照区で最低 58 cm，最大 121 cm となり，シェルター区は最低 67 cm，最大 204 cm となった。12 月から 10 月までの総成長量の平均はシェルター区 64 cm，対照区 27 cm となり，シェルター区が対照区より 2 倍以上成長していた（図-2）。シェルターの高さを超えた苗は 8 月 2 本，9 月 5 本，10 月 8 本となった。



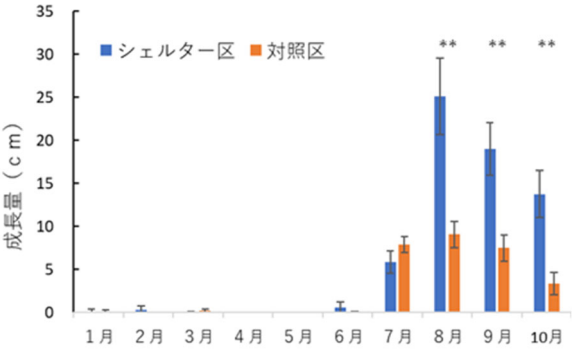
図−2. 12 月から 10 月の樹高の推移（エラーバーは標準誤差）

2. 地際直径　地際直径も 12 月から 7 月までシェルター区，対照区ともに 6 mm 前後のまま成長しなかった。8 月以降は太くなり，特に対照区の方が大きく成長した。植栽直後の 12 月は最低 3.0 mm，最大 10.7 mm，平均 5.9 mm であったが，10 月は最低 5.9 mm，最大 19.9 mm，平均 11.0 mm となった。12 月から 10 月までの総成長量の平均はシェルター区 3.7 mm，対照区 6.5 mm であった。対照区がシェルター区より約 1.7 倍成長していた（図-3）。



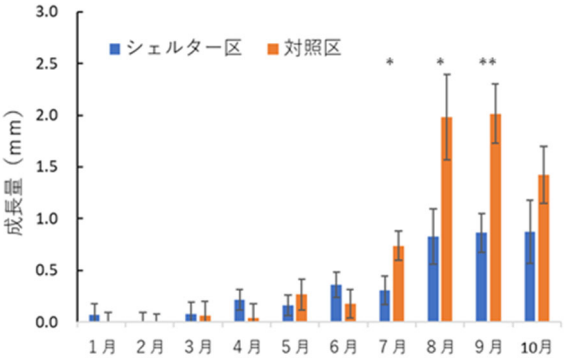
図−3. 12 月から 10 月の地際直径の推移（エラーバーは標準誤差）

3. 月成長量　樹高成長は 1 月から 6 月まではほとんど確認できなかった。7 月から伸長成長を始め 9 月からは成長量が小さくなった。8 月，9 月，10 月はシェルター区が対照区より有意に成長量が大きくなった（t 検定，$p < 0.01$，図-4）。最も成長量が多い月は 8 月のシェルター区が 25cm，対照区が 9 cm であった。



図−4. 樹高の月成長量（エラーバーは標準誤差　t 検定　**: p < 0.01）

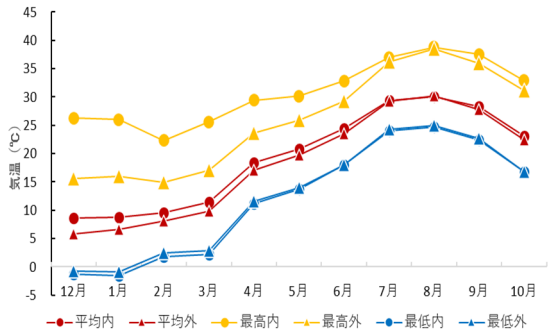
地際直径は 3 月から 6 月まではほとんど成長が見られなかったが，7 月以降に成長量が大きくなった。6 月，7 月，8 月は対照区の成長量が有意に大きくなり（t 検定 $p<0.05$），同様に 9 月も有意に対照区が大きくなった（$p<0.01$）。それ以外の月は直径成長に有意な違いは見られなかった。最も成長量が大きい月は 9 月のシェルター区で 0.8 mm，対照区で 2.0 mm であった（図-5）。なお，これらの計測は毎月半ばに行ったため，樹高，地際直径とも成長量は前の月の後半からの月の前半までの値である。



図−5. 地際直径の月成長量（エラーバーは標準誤差　t 検定　**: p < 0.01, *: p < 0.05）

4．昆虫による食害率　昆虫による食害の発生はシェルター区 3/25 本（食害率 12%），対照区は 13/25 本（食害率 52%）であった。計測時にコナラの苗にガやチョウが止まっていることを確認できたため，その幼虫による食害と推測された。食害は葉の葉柄側に多く，葉先になるにつれて少なくなっていた。ただし，目視で食害面積が多い苗でも，健全なものと成長量が変わらなかったため，苗の生存や成長に深刻な影響は与えていないと考えられた。ツリーシェルターの高さを超えた苗では 8 本中 1 本食害が見られたが，対照区と比較すると食害率に差がみられたためツリーシェルター内にある苗は防虫効果を期待できることが示唆された。

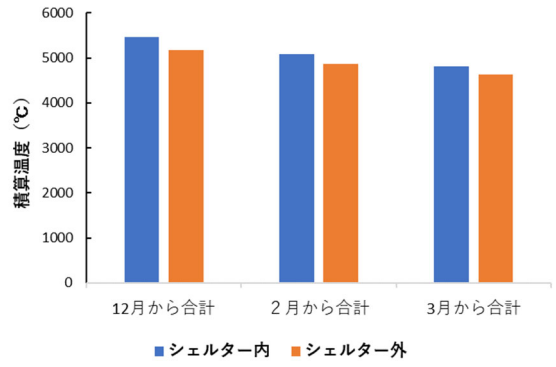
5．気温　気温の測定結果を図-6 に示す。このうち，12 月は温度計設置後の 10 日分，10 月はデータを 16 日に回収したため 16 日分のデータをそれぞれその月の代表値として使用した。12 月と 1 月の平均最高気温はシェルター内側が外側より 10.7℃高く，4 月と 5 月は約 5.8℃高かったが，7 月と 8 月は内外の温度差がほとんどなかった。コナラが成長し始めた 7 月は 35℃であった。月平均の日平均気温は 12 月，1 月にシェルター内側が外側より 2.8℃高く，年間を通してシェルター内側が高くなっていたが，最高気温ほど温度差がなかった。最低気温は冬季には 0℃以下になったがシェルター内外の温度差はほとんど見られなかった。最高気温は夏季のシェルター内側が高くなると予想されたが，外側と近い温度になった理由は，外側の温度計に囲いをせず直射日光を受けた可能性が考えられる。このため，内外の気温差がある冬季には成長が見られず，気温差がない夏季に成長差が大きくなった。シェルター内の高温が成長に与える効果を厳密に検証するためには，今後の継続測定において直射日光が当たらない仕様に改善する必要がある。



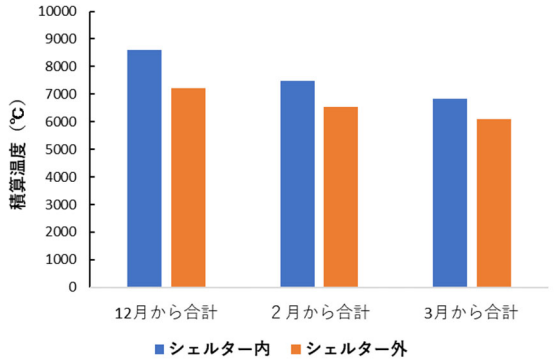
図−6. 各月の気温

積算温度は 12 月から 10 月，2 月から 10 月，3 月から 10 月までをそれぞれ算出した。1 月から 10 月までの積算温度は 12 月からの積算温度と大差ない（12 月は 10 日分の測定値しかない）ため、ここでは示していない。平均積算温度はシェルター内外で温度差は少なかった（図-7）が，最高積算温度は 12 月からの内側の方が 2000℃近く高くなり，2 月から，3 月からの積算温度も高かった（図-8）。これらの結果はツリーシェルターに温室効果があることを示唆する。こうした温度環境の違いと既往研究により知られているツリーシェルターの防風効果(2)

がコナラ苗の成長に影響したと考えられる。



図−7. 平均積算温度



図−8. 最高積算温度

Ⅳ　まとめ

ツリーシェルターはコナラ苗に対して樹高成長の促進と直径成長の抑制という影響を与えることが示された。この結果はこれまでの多くの研究結果を支持するものである(*1*)。シェルター内部の積算温度は外部より高くなっており，こうした温室効果と，既往研究より指摘されている防風効果がコナラ苗の樹高成長を促進した可能性が高いと考えられる。

ただし，気温と成長の関係については，温度センサーの設置不備のため温室効果と成長の関係を厳密に検証することはできなかった．この点は今後の課題である。また，本研究は植栽して 1 年未満の時点での結果であるため，ほとんどの苗がシェルター内部にある状態のものである。苗がシェルター高を超えるのが植栽後 2〜3 年と考えられることから，森林復元や緑化においてシカ食害を回避するためには，この後の成長過程も明らかにしていくことがこれから先の重要な課題である。同様に今後の課題として，既往の研究でも知見が少ない葉の成長や葉面積の変化なども，ツリーシェルターによる苗への効果をより詳細に解明する手がかりになると考えられる。

謝辞：本研究では、森林生態学研究室のゼミ生一同に植栽，設置をご協力いただきました。また，苗畑職員の後藤一雄氏には苗畑の使用に関してお世話になりました。

引用文献

(1) Abe T (2002) Effects of treeshelter on seeding performance: a meta-analysis. J For Res 27: 171-181

(2) Coutand C, Dupraz C, Jaouen G, Ploquins S, Adam B (2008) Mechanical stimuli regulate the allocation of biomass in trees: Demonstration with young *Prunus avium* trees. Ann Bot 101: 1421-1432.

(3) 森林総合研究所九州支所 (2007) 第 4 期中長期計画成果 40（持続的林業−7）

(4) 森一生・高橋昌隆・井坂利章 (1999) ニホンジカの生息動態と森林被害防除に関する調査（第 4 報）．徳島県林業総合技術センター研究報告 36: 11-16

(5) 住吉博和・田實秀信 (2002) 鹿児島県におけるシカ被害防除資材の検討. 鹿児島県林業試験場研究報告 7: 23-29

(6) 矢部浩・前田雄一・西信介 (2006) ブナ植栽木におけるツリーシェルターの効果．森林応用研究 15: 1-6

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

ツリーシェルターによるクヌギへの成長促進効果の検討とコナラとの比較

山嵜俊[1]・百田楓太[1]・安部哲人[1]

[1] 日本大学生物資源科学部

要旨：ツリーシェルターによるクヌギ苗の成長に対する効果を調べるとともにコナラ苗への効果との比較を行った。両樹種は 2023 年 12 月にそれぞれ 50 本を苗畑に植栽し，25 本ずつシェルターを設置した。2024 年 10 月まででクヌギ苗はシェルター区では樹高成長が対象区より有意に高く，直径成長は抑制された。これらの効果はコナラ苗でも同様に確認された。2 樹種のサイズはクヌギの方が樹高が大きく，直径成長もコナラよりやや大きくなった。昆虫による葉の食害率はクヌギの方が全般に高くなり，両種ともシェルター区の食害率が低かった。

キーワード：ツリーシェルター，成長量，クヌギ，コナラ

Effects of tree shelter on growth of *Quercus acutissima* seedlings and comparison with the effects on *Q. serrata*

Suguru YAMAZAKI[1], Huuta MOMOTA[1], Tetsuto ABE[1]

[1] College of Bioresource Sciences, Nihon University

Abstract This study examined the effects of tree shelters on the growth of *Quercus acutissima* seedlings and compared them to the effects on *Q. serrata* seedlings. Both species were planted in the nursery in December 2023 with 50 trees each, and tree shelters were installed on 25 seedlings each. By October 2024, *Q. acutissima* seedlings had significantly higher height growth in the tree shelter than in the control, while diameter growth was suppressed in the tree shelter. These effects were also observed in *Quercus serrata* seedlings. *Q. acutissima* became taller and had slightly larger diameter than *Q. serrata*. Leaf damage rates by insects were generally higher on *Q. acutissima* and lower on both seedlings in tree shelter.

Keywords: Tree shelter, hardwood, *Quercus acutissima*, *Quercus serrata*

I　はじめに

ツリーシェルターは国内では主に造林地でのシカ食害防止に使用されているが，食害防止効果の他にも成長促進効果，誤伐防止効果があるとされている(*5*, *7*)。また，ツリーシェルターは海外では山地における造林だけでなく，砂漠緑化(*3*)や絶滅危惧種の保全(*2*)など，幅広く活用されている。

国内におけるツリーシェルターの活用事例は造林地でのスギ，ヒノキを中心とした針葉樹に多いが，海外では広葉樹にも多く用いられており，さまざまな角度から研究が行われている(*6*)。その結果，苗の成長特性に関しては針葉樹よりも広葉樹において効果が高く，例外はあるものの概ね樹高成長を促進することが知られている(*1*)。一方で，国内ではツリーシェルターを用いた広葉樹に対する効果の研究は必ずしも十分な蓄積があるとは言えない。そこで本研究では，ツリーシェルターの広葉樹苗に対する有効性を明らかにすることを目的として，クヌギ苗の成長への効果を調べるとともに，同時期に同じ場所で調査したコナラ苗でツリーシェルターの効果(*3*)との比較も試みた。

II　調査地と方法

1. 調査地　本調査は神奈川県藤沢市にある日本大学の苗畑で行った。藤沢市の年平均気温は 16.8℃，夏場は 30℃を超える日が多く猛暑日になる日も多く，冬場は 5℃程まで温度が下がることもある。この苗畑は周囲をフェンスで囲われているため，シカをはじめとする野生動物による食害の可能性はない。

2. 方法　調査は 2023 年 12 月から 2024 年 10 月に行った。2023 年 12 月に，調査地の苗畑でおおよそ 10 m×10 m の空間にクヌギの苗 50 本とコナラの苗 50 本を等間隔に混植し，そのうち 25 本に通気口のないプラスチック製白色ツリーシェルター（高さ 140 cm）を設置した。ツリーシェルターは高さ 150 cm の園芸用の支柱に結束バンドで固定した。

ツリーシェルターの内外の温度を比較するため，データロガーの「おんどとり」（T＆D 社製）を設置し，1 時間毎に温度の計測を行った。

樹高は頂芽の位置の高さをメジャーで計測した。地際直径は植栽した 2023 年 12 月時に地面から約 10 cm の高さにマジックでマークし，その位置をノギスにより計測

（受理日 2025 年 2 月 3 日）

した。これらの計測は毎月中旬に行った。従って以下では，例えば 4 月の成長量は 3 月後半から 4 月前半にかけての期間の成長量である。

昆虫による食害は 10 月に調査した。葉の一部にでも食痕（葉の穴や不自然は欠け）が見られたら，その苗は「食害あり」と判定した。加害種の同定はできなかった。

III　結果

1. クヌギの樹高の推移　植栽した 2023 年 12 月時点の平均樹高は 58 cm，最小は 47 cm，最大は 69 cm であり，シェルター区と対照区でほぼ同じであった。2024 年 10 月の平均樹高はシェルター区で 151 cm，対照区で 83 cm，最小樹高はシェルター区で 55 cm，対照区で 56 cm，最大樹高はシェルター区で 208 cm，対照区は 165 cm となった。

月ごとの推移では，シェルター区は 7 月後半から 8 月前半にかけて急激に成長し，対照区でも成長量は小さいものの同様に 7 月後半から 8 月前半にかけて樹高が増加した（図-1）。その後，8 月，9 月と樹高は増加したが，10 月に樹高に変化が見られなくなった。最終的にシェルター区の 10 月時点の平均樹高は 151 cm となり，対象区（83 cm）の 2 倍近くまで成長した。その結果，10 月時点で 25 本中 19 本がツリーシェルターの高さを超えた。

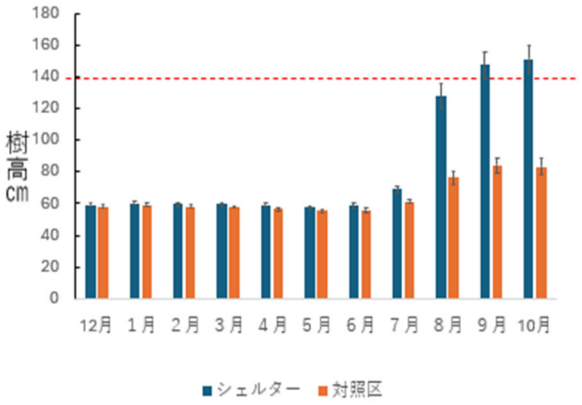


図-1. 毎月の平均樹高（赤い破線はシェルター高）

2. クヌギの月樹高成長量　月ごとの樹高成長量を図-2 に示す。樹高は 2023 年 12 月～5 月までの間はほとんど成長が見られず，6 月～7 月にかけて樹高成長が始まった。最も樹高が成長した 7 月後半から 8 月前半にかけての 1 ヶ月間には平均 59 cm の樹高成長が確認された。この期間の樹高成長量を対照区と比較すると 43 cm の差があり，その前後の期間とともにツリーシェルターが有意に樹高成長を促進していた。しかし 8 月以降は成長量が徐々に下がっていた。

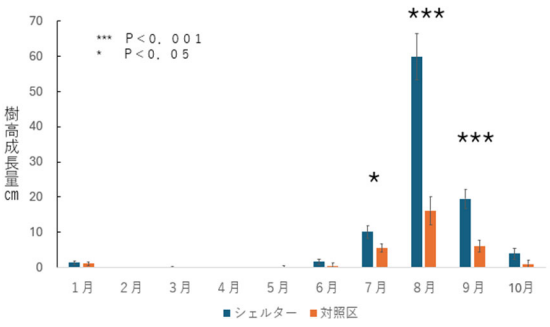


図-2. 月樹高成長量（*は t 検定の有意差）

3. クヌギの直径の推移　植栽した 2023 年 12 月時点の平均直径は 7.2 mm，最小は 4.7 mm，最大は 11.3 mm であり，シェルター区と対照区でほぼ同じであった。最終計測を行った 10 月の平均直径はシェルター区で 11.5 mm，対照区で 16.8 mm，最小直径はシェルター区で 7.3 mm，対照区は 9.2 mm，最大直径はシェルター区で 16.0 mm，対照区 25.2 mm であった。

月ごとの推移では，12 月から 4 月までは直径にそれほど変化が見られなかったが，8 月から 9 月かけては顕著に差が見られ，対照区の方が直径は大きくなった（図-3）。12 月の平均直径はシェルター区，対照区ともに 7.3 mm であったが，10 月にはシェルター区の平均直径が 11.5 mm に対して対照区は 16.8 mm と大きなサイズ差となった。

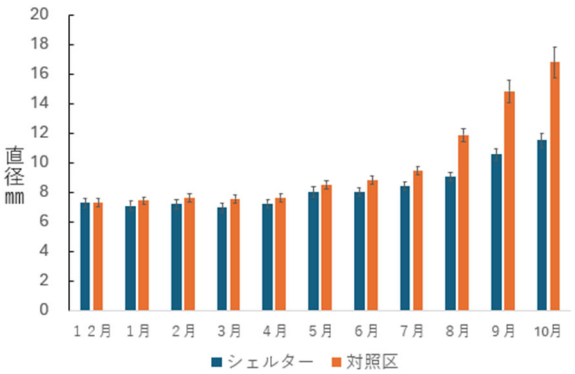


図-3. 毎月の平均直径

4. クヌギの月直径成長量　シェルター区と対照区における月直径成長量は 9 月にかけて最も大きくなった。最も直径成長した 9 月はシェルター区で 1.4 cm，対照区で 2.9 cm となり，その前月とともにシェルターの有無で有意な差が見られた（図-4）。それ以外の月でも統計的に

有意ではなかったものの，多くの月でシェルター区よりも対照区で月直径成長量が大きい値を示した。

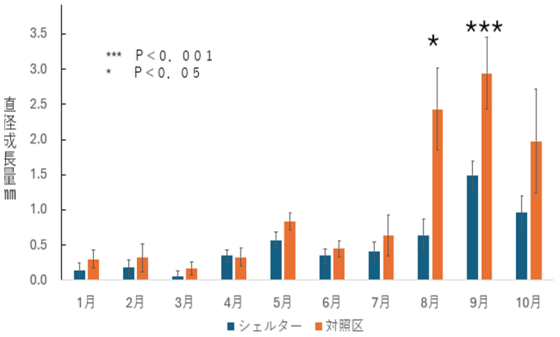


図-4. 月直径成長量（*は t 検定の有意差）

5. コナラとの比較　クヌギの成長量をコナラと比較すると，2024 年 10 月の樹高成長量はシェルター区でクヌギ（92 cm）がコナラ（65 cm）より 27 cm 大きく，対照区はクヌギ（25 cm）とコナラ（27 cm）でほとんど変わらなかった（図-5）。また，2024 年 10 月の直径成長量はシェルター区でクヌギ（4.2 mm）がコナラ（3.7 mm）より 0.5 mm 大きく，対照区でもクヌギ（9.5 mm）がコナラ（6.5 mm）より 3.0 mm 大きかった（図-6）。

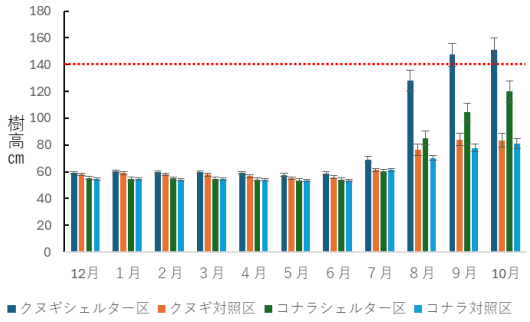


図-5　クヌギとコナラの樹高の推移の比較
（赤い破線はシェルター高）

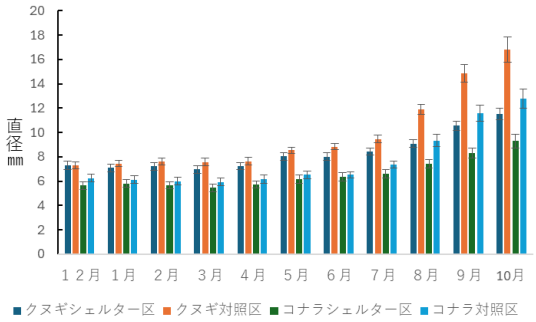


図-6　クヌギとコナラの直径の推移の比較

6. 気温　2023 年 12 月から 2024 年 10 月にかけてのツリーシェルター内部の気温は平均で 19.3℃，最高が 30.8℃となり，それぞれ外部の気温より 1.1℃，5.0℃高くなった（表-1）。特に冬季の最高気温はシェルター内外の気温差が大きく，最も差が見られた 1 月 15 日はツリーシェルター内部が 33.8℃，外部が 17.1℃となり，内部が 16.7℃も高くなった。

表-1. ツリーシェルター内外の気温の推移

	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
シェルター内							
平均	8.6	8.8	9.5	11.5	18.4	20.8	24.4
最高	26.3	26.0	22.3	25.6	29.4	30.2	32.8
最低	-1.2	-1.6	1.8	2.3	11.2	13.7	17.9
シェルター外							
平均	5.9	6.6	8.1	9.8	17.1	19.8	23.4
最高	15.6	16.0	15.0	17.1	23.7	25.8	29.3
最低	-0.7	-0.9	2.4	2.9	11.6	13.9	18.0

7月	8月	9月	10月	期間平均
29.3	30.1	28.3	23.0	19.3
37.0	38.8	37.5	32.9	30.8
24.1	24.8	22.4	16.7	12.0
29.2	30.1	27.8	22.4	18.2
36.3	38.5	35.9	31.1	25.8
24.3	25.0	22.7	16.8	12.4

7. 昆虫による食害　ガの幼虫による食害は 7 月の計測時に初めて確認された。10 月時点の食害率はシェルター区で 25 本中 18 本に食害が見られ，シェルター高（140 cm）を超えて外部に露出した苗の食害率は 89%（19 本中 17 本）であった。対照区は 25 本中 21 本に食害が見られ，食害率 84%となった（表-2）。しかし，食害があっても死亡した個体は見られなかった。

表-2. クヌギ苗とコナラ苗の昆虫による食害率の比較

	コナラ	クヌギ
シェルター区	12%（3/25本）	72%（18/25本）
対照区	52%（13/25本）	84%（21/25本）

Ⅳ　考察

クヌギ苗はツリーシェルターを設置することによって樹高成長が促進され，直径成長は抑制された。これは海外を含む多くの研究結果(*1*)を支持する結果である。これはツリーシェルターの内部では風を遮ることができるため内部の対流が妨げられて温度が高く維持されやすいこと，苗が風に揺られることがないため直径成長よりも

樹高成長に資源を配分しやすいことが原因と考えられる。

コナラの苗への効果(*4*)と比較すると，樹高成長量はクヌギの方が 27 cm 大きく，ツリーシェルターの効果がより大きく発揮されていた。野外における実生の成長速度もコナラと比べてクヌギの方が高い成長を示す研究事例もある(*8*)ことから，本研究のクヌギとコナラの成長量の関係は一般的なものであり，ツリーシェルターを設置した場合でもクヌギの高い成長速度は維持・促進されると考えられた。クヌギの旺盛な成長特性は育苗という視点からは好ましいが，ツリーシェルターの高さを超えた後はシカの生息地では高さ 140 cm のツリーシェルターではシカによる食害を受ける可能性が高まる。このため，シェルター高を超えた後でもシカが食害可能な範囲を超えるまで早い樹高成長を維持できるかどうかが重要となる。また，直径成長においてもコナラよりクヌギの方がやや早い傾向が見られた。一般に苗サイズが大きくなったときにツリーシェルターを撤去すると，ツリーシェルターの効果で徒長気味の苗では倒伏しやすいことが知られている。しかし，クヌギは直径成長も早そうなので，コナラと比べてツリーシェルターを撤去可能なタイミングが早くなる可能性を示唆される。このことはシカ食害地における森林管理を考える上でも重要な知見である。

昆虫による食害率をコナラと比較すると，コナラのシェルター区は 12%，対照区は 52%クヌギのシェルター区は 72%, 対照区は 84%と大きな差が見られた（表-2)。シェルター区を比較するとクヌギの方が食害が多いのはクヌギの成長が良く，シェルター高（140 cm）を超えた苗が多かったことが原因の一つと考えられた。コナラにおいても食害率はシェルター区より対照区の方が高かったことから，ツリーシェルターは虫による食害に対しても防御効果がある可能性がある。今回の調査は死亡した個体がなかったものの，サイズが小さい段階での食害は死亡率やその後の成長に悪影響を与える可能性がある。従って，昆虫類による食害防止の意味でもツリーシェルターは苗に対する正の効果をもつと考えられる。また，今回苗畑にいる加害種を特定することはできなかったが，対照区の食害率もクヌギの方が高かったことから，コナラよりもクヌギに対する選好性が高いことが推測された。

本研究では，枯死した個体がなかったため，ツリーシェルターが死亡率に与える効果は検証できなかった。また，クヌギはシェルター高を比較的早期に超えることが明らかになったが，その後の成長特性は未解明である。これらが今後の研究課題と考えられるが，本研究を数年継続することで明らかにすることができると期待される。

V　結論

クヌギはツリーシェルター設置の効果により樹高成長が増加し，直径成長は抑制された。コナラと比較するとクヌギは樹高成長が大きく，直径成長はややコナラより大きかった。シカ食害の可能性を考慮すると，シェルター高を超えたあとの苗の成長特性を解明することが今後の大きな課題である。

謝辞：日本大学生物資源科学部演習林職員の後藤一雄氏には苗畑使用に関してお世話になった。また，苗の植栽には森林生態学研究室のゼミ生一同にご協力いただいた。ここに記してお礼申し上げます。

引用文献

(1) Abe T (2022) Effects of treeshelter on seedling performance: a meta-analysis. Journal of Forest Research 27: 171-181

(2) Acevedo M, Álvarez C, Cartes E, Dumroese RK, González M (2020) Production and establishment techniques for the restoration of *Nothofagus alessandrii*, an endangered keystone species in a Mediterranean forest. New Forests 51: 159-174

(3) Clary RF Jr, Slayback RD (1983) Plant materials and establishment techniques for revegetation of California desert highways. Transportation Research Record 969: 24-26

(4) 百田楓太, 山嵜俊, 安部哲人 (2025) コナラ苗におけるツリーシェルターの効果．関東森林研究（投稿中）

(5) 森一生，高橋昌隆，井坂利章 (1999) ニホンジカの生息動態と森林被害防除に関する調査（第 4 報）．徳島県林業総合技術センター研究報告 36: 11-16

(6) Potter MJ (1991) Treeshelters. Forest Community Handbook No.7, 48pp

(7) 矢部浩, 前田雄一, 西信介 (2006) ブナ植栽木におけるツリーシェルターの効果．森林応用研究 15: 1-6

(8) 吉野豊，谷口真吾 (1993) 広葉樹苗木の成長の季節変化．兵庫県立林業試験場研究報告 40: 1-6

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

半島マレーシアに植栽された 10 樹種の成長と木部形質の関係

田中憲蔵[1]・河合清定[1]・米田令仁[2]・Alias Mohamad AZANI[3]・Zamah Shari NUR HAJAR[4]
[1]国際農林水産業研究センター・[2]森林総合研究所・[3]マレーシアプトラ大学・[4]マレーシア森林研究所

要旨：多様な熱帯雨林樹種がどのような成長特性を持つのか簡便に知ることができれば，植栽後の収量予測などに役立つ。本研究ではマレー半島の約 20 年生の林分で林冠樹種 10 種の在来樹種の木部形質と直径成長との関係を解析した。木部形質として，材密度，含水量，道管の直径と密度，道管面積率を調べた。直径成長と材密度には負の相関が，道管直径や道管面積率には正の相関がみられた。材密度が高いほど単位材体積あたりの炭素資源投資量が増えるため，直径成長が低下したと考えられた。また葉が高い光合成を行うためには，高い蒸散速度を支えるための高い通水能力が必要になるため，道管の形質と成長に関係があったと考えられた。以上から，材密度や道管の特性は種間での植栽後の成長予測の指標として利用できると考えられた。
キーワード：機能形質，材密度，道管サイズ，熱帯林，フタバガキ

Relationships between growth and wood traits of ten tree species planted in Peninsular Malaysia

Tanaka KENZO[1], Kiyosada KAWAI[1], Reiji YONEDA[2], Alias Mohamad AZANI[3], Zamah Shari NUR HAJAR[4]
[1] Japan International Research Center for Agricultural Sciences; [2] Forestry and Forest Products Research Institute; [3]Universiti Putra Malaysia, [4]Forest Research Institute Malaysia

Abstract: In this study, we analyzed the relationships between wood traits and diameter growth of 10 native tree species in about 20-year-old plantations in the Malay Peninsula. The traits examined here were wood density, moisture content, vessel diameter and density, and vessel area ratio. A negative correlation was observed between diameter growth and wood density, while a positive correlation was found between vessel diameter and vessel area ratio. High wood density indicates higher carbon investment to construct wood and leads to growth limitation. In addition, to perform high photosynthesis, a high water-transport capacity is required to support a high transpiration rate, thus it was thought that growth rate was positively related with vessel diameter and area ratio. From the above, it was thought that wood density and vessel characteristics related with water conductivity could be used as indicators for predicting diameter growth rate among tropical rainforest trees.
Keywords: dipterocarp tree, functional trait, tropical forest, vessel size, wood density

I　はじめに

材密度や道管サイズなど木部の様々な特性は木部形質と呼ばれ，樹種間で大きな違いがある(*3*, *8*, *9*)。例えば，バルサでは材密度が 0.1 g cm^{-3} と軽いが，シタンやリグナムバイタでは 1.0 g cm^{-3} を超え，その違いは 10 倍以上になる。木部形質は道管の形態などを通して樹木の通水能力など生理的な機能とも関係し，樹木の成長速度や乾燥耐性など様々な生態特性を反映すると考えられている(*3*)。そのため，木部形質が成長速度の指標になる可能性について議論がなされ，特に，材密度については，成長速度との間に負の相関があることが分かっている(*3*)。

熱帯雨林は樹種の多様性が高く，木材生産のための有用樹種も多いが，過度の伐採などにより資源の劣化が進んでいる(*1*, *6*, *7*)。そのため有用樹種を植林し資源の回復が図られているが，樹種が多様であるために植栽後の成長特性が不明な樹種が多く，資源量の回復や収穫予測の障害になっている(*1*)。湿潤熱帯域の天然林では，低木や林冠樹種など様々な生活型を含む樹種の成長速度と材密度に負の相関が報告されているが，個々の生活型内の比較は少ない (*3*, *8*)。また林冠樹種を対象とした人工林でも天然林同様に材密度と成長に相関がみられるのか不明な点も残されている。さらに，乾燥熱帯林では材密度より通水に関する木部形態の方が成長予測に有用であるとの意見もある(*5*)。本研究では，半島マレーシアの人工林を対象に，成長との関係について，材密度だけでなく含水率や道管形態など樹木の水利用に関する木部形質も加えて解明することを目的とした。

II　材料と方法

1. 調査地と対象樹種　調査はマレーシアペラ州のチ

（受理日 2024 年 12 月 24 日）

クス森林保護区の約 20 年生の人工林で行った。対象個体の直径は 15〜50 cm，樹高は 10〜35 m に達し，林冠はほぼ閉鎖していた。この植林地は，天然林伐採後に植栽されたアカシアや二次林を伐開しフタバガキ科などの郷土樹種の植栽が行われている(*4*, *11, 13*)。植栽地の年降水量は約 3000 mm，年平均気温は 26.8 度である。林冠樹種 10 種を対象とした（表–1)。10 種中，5 種がフタバガキ科，3 種がマメ科で，残りはウルシ科とジンチョウゲ科の樹木である。いずれの樹種もマレーシアやインドネシアなど東南アジアで木材利用され，特にフタバガキ科やマメ科の樹種は主要な商業伐採対象である(*1*, *6*)。

表–1. 調査樹種

Table 1 Studied species

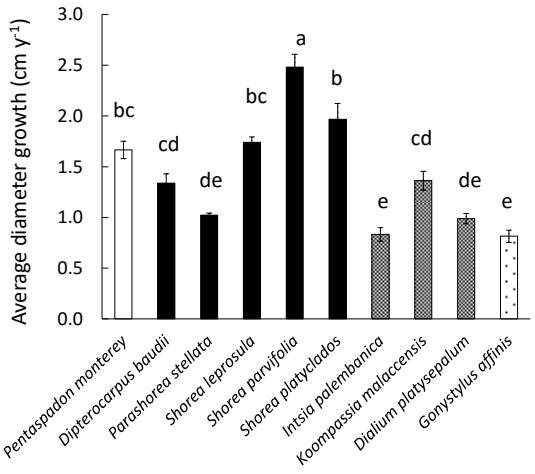
Species	Family
Pentaspadon monterey	Anacardiaceae（ウルシ科）
Dipterocarpus baudii	Dipterocarpaceae（フタバガキ科）
Parashorea stellata	Dipterocarpaceae
Shorea leprosula	Dipterocarpaceae
Shorea parvifolia	Dipterocarpaceae
Shorea platyclados	Dipterocarpaceae
Intsia palembanica	Leguminosae（マメ科）
Koompassia malaccensis	Leguminosae
Dialium platysepalum	Leguminosae
Gonystylus affinis	Thymelaeaceae（ジンチョウゲ科）

2. 調査項目　対象樹種から 5 個体を選び胸高直径を測定した。年平均直径成長量は胸高直径を植栽年数で割った値とした。直径約 5 mm の成長錘で長さ約 10cm の木部コアを午前中に採取し，生重と体積を計測後，単位体積当たりの含水量（以降含水率）を計算した(*9*)。その後，60 度のオーブンで乾燥後，生材体積当たりの乾重を材密度とした(*9*)。コアの内，16 mm^2 を対象に顕微鏡観察し，道管の直径や密度，単位面積当たりに占める道管面積率を測定した(*5*, *14*)。

III　結果と考察

1. 種間での成長や木部形質の違い　年平均直径成長量は樹種間で約 3 倍の違いがあり，同じ科内でも有意差がみられた（図–1)。直径成長量はフタバガキ科の *S. parvifolia* で最も高く，マメ科の *I. palembanica* やジンチョウゲ科の *G. affinis* で低い傾向があった。また同じフタバガキ科内でも差があり，*Dipterocarpus* 属や *Parashorea* 属に比べ，*Shorea* 属の 3 種の成長が良かった。対象とした *Shorea* 属はすべてレッドメランティと呼ばれる成長の比較的早い樹種グループに属しており，過去の研究例とも矛盾しなかった(*1*)。なお近年ではこのグループは *Rubroshorea* 属に再分類されるという意見もある(*2*)。さらに *Shorea* 属の間でも，有意な成長量の差があり，*S. parvifolia* に比べ *S. leprosula* や *S. platyclados* の成長が遅かった（図–1)。

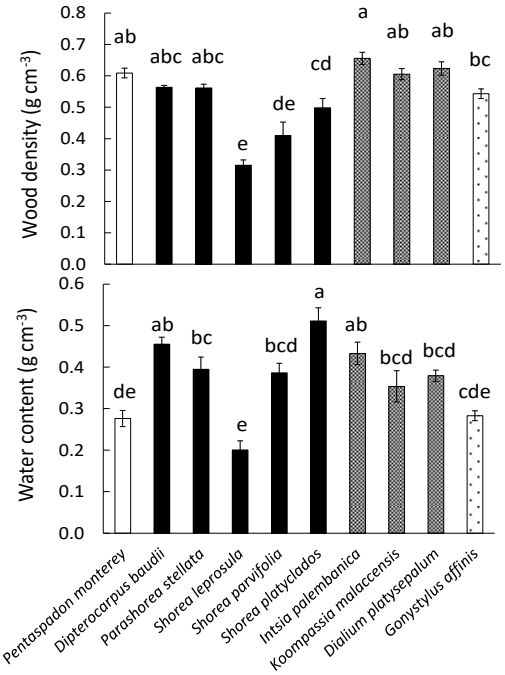
木部形質にも種間差がみられ，例えば材密度は種間で 2 倍の違いがあり，*S. leprosula* では 0.3 g cm^{-3} 程度であったがマメ科の 3 種やウルシ科の *P. monterey* では 0.6 g cm^{-3} を超えていた（図–2)。木部の含水率も樹種間で有意な差があり，近縁種間でも *S. leprosula* に比べ *S. platyclados* では 2 倍以上高かった（図–2)。木部の水は乾燥ストレス時の水供給のバッファーになる可能性があり，同一樹種でも乾燥ストレスがかかる立地で含水率が増加することが報告されている(*9*)。*S. platyclados* は乾燥ストレスを受けやすい尾根部を中心に分布するが，*S. leprosula* は湿った谷部に多く，近縁種間での含水率の違いは両種が分布する立地を反映している可能性がある(*12*)。道管直径にも種間差があり，*Shorea* 属の 3 種では 0.2 mm 前後の値であったが，*D. platysepalum* や *G. affinis* では 0.1 mm 程度と半分以下の値であった（図–3)。また，道管密度にも有意差があり，*P. monterey* や *D. baudii* では 10 no. mm^{-2} 程度と多かったが，マメ科の 3 種や *G. affinis* では 4 no. mm^{-2} 以下と少なかった（図–3)。



図–1. 樹種間での成長量の違い 異なるバーの表示は科の違いを示し，アルファベットは Tukey 法による多重比較結果を表す（$P < 0.05$）

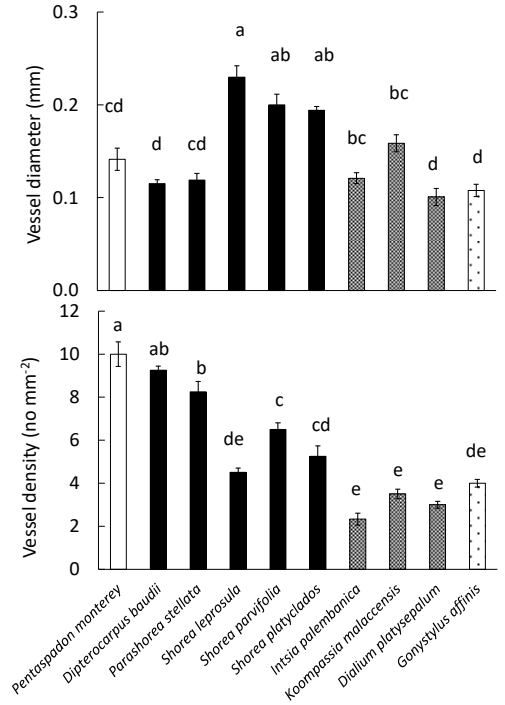
Fig. 1 Growth rates among species. Different bars indicate different families and letters indicate significant differences ($P < 0.05$, Tukey's multiple comparison test)

2. 種間の成長や木部形質の違い　直径成長と木部形質の関係について回帰分析を行ったところ，材密度との間に有意な負の相関がみられたが（$P < 0.05$），含水率との間には有意な相関は無かった（$P > 0.05$, 図–4)。材密度と成長の負の相関は，熱帯雨林の低木樹種から林冠樹種までを対象とした研究でも報告があり矛盾しない(*8*)。



図–2. 樹種間での材密度と含水率の違い アルファベットは Tukey 法による多重比較結果を表す（$P < 0.05$）

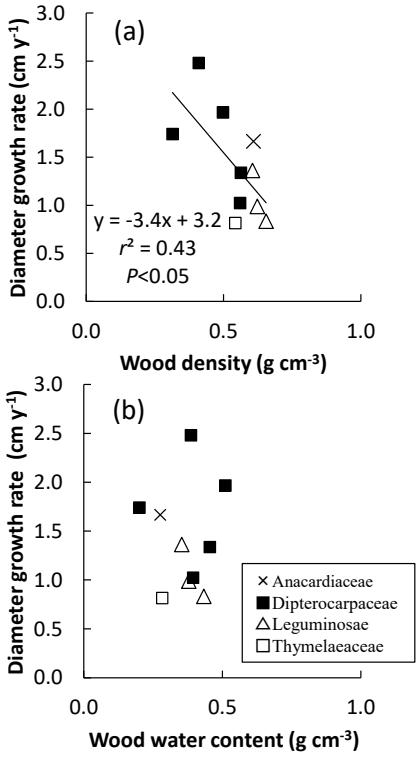
Fig. 2 Wood density and water content among species. Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$, Tukey's multiple comparison test)



図–3. 樹種間での道管径と道管密度の違い アルファベットは Tukey 法による多重比較結果を表す（$P < 0.05$）

Fig. 3 Vessel diameter and vessel density among species. Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$, Tukey's multiple comparison test)

この負の相関は，各生活型に特有な生態特性との関連が指摘されている。例えば，林冠樹種はコストが低い低材密度の幹を持つことで早く成長でき，光獲得に有利になることに対し，低木種は成長が遅いが，材密度が高いことで幹の強度が増加するため落枝や病害虫による損傷に強く，暗い林床での耐陰性を高めることができると考えられている(*3*, *8*)。また，材密度が高い樹種は光合成速度が低いという報告もある(*3*, *10*)。本研究では既報と異なり，人工林の林冠樹種を対象としたが，材密度は成長予測の指標として人工林でも役立つことが分かった。

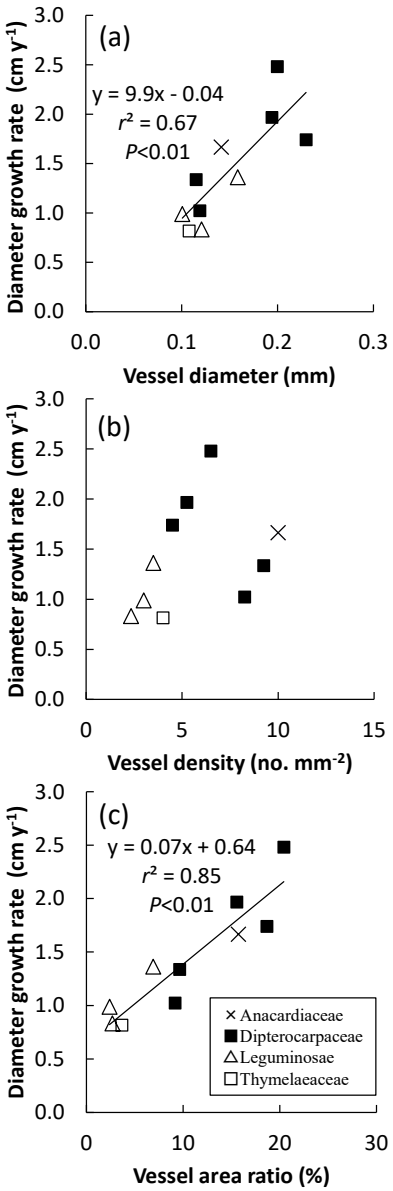


図–4. 直径成長と(a)材密度，(b)含水率の関係

Fig. 4 Diameter growth rate in relation to wood density (a) and water content (b)

直径成長と道管径，道管面積率との間には正の相関がみられたが（$P < 0.01$），成長と道管密度の間には有意な相関が無かった（図–5）。道管径や道管面積率が大きいと木部の通水能力が増加するため蒸散活動を高めることが可能になる(*5*, *14*)。高い光合成を行うためには，気孔コンダクタンスを高め CO_2 を葉内に取り込む必要があるが，同時に蒸散により大量の水が葉から失われるため，木部には高い通水能力が不可欠である(*14*)。中国の熱帯季節林を対象とした研究では，今回の研究と同様に木部の通水に関する形質と成長に高い正の相関が得られている(*5*)。また，今回の研究では，直径成長と通水能力に関す

る相関係数は材密度の関係より高く，*P*-値も低いことから，直径成長の指標として予測精度が高いと考えられた。



図–5. 直径成長と道管径，道管密度，道管面積率の関係
Fig. 5 Diameter growth rate in relation to vessel diameter, vessel density and vessel area ratio

3. まとめ マレーシアに植栽された高木樹種の直径成長と木部形質の関係から，材密度が負の相関を，通水能力に関する形質が正の相関を持つことが分かった。材密度は過去のデータ蓄積があるため，簡便な成長予測の指標になるが，通水に関する木部形質の方がより予測精度が高い可能性が高く，今後熱帯雨林の他の樹種でも通水との関係を検討する必要があると考えられた。

引用文献

(1) Appanah S, Weinland G (1993) Planting quality timber trees in Peninsular Malaysia, FRIM, 221pp

(2) Ashton PS, Heckenhauer J (2022) Tribe Shoreae (Dipterocarpaceae subfamily Dipterocarpoideae) finally dissected. Kew Bulletin 77: 885-903

(3) Chave J, Coomes D, Jansen S, Lewis SL, Swenson NG, Zanne AE (2009) Towards a worldwide wood economics spectrum. Ecology Letters 12: 351-366

(4) Emori K, Fujihira Y, Honma T, Nagai H (2002) Record of multi-storied forest management project in Malaysia (photographs and growth data). Forestry Department Peninsular Malaysia, Perak State Forestry Department, Japan International Cooperation Agency, Kuala Lumpur, 215pp

(5) Fan Z, Zhan S, Hao G, Silik JWF, Cao K (2012) Hydraulic conductivity traits predict growth rates and adult stature of 40 Asian tropical tree species better than wood density. Journal of Ecology 100: 732-741

(6) Ghazoul J (2016) Dipterocarp biology, ecology, and conservation. Oxford University Press, 307pp

(7) Hattori D, Kenzo T, Kendawang JJ, Ninomiya I, Sakurai K (2013) Rehabilitation of degraded tropical rainforest using dipterocarp trees in Sarawak, Malaysia. International Journal of Forestry Research. Article ID 683017

(8) Iida Y, Poorter L, Sterck FJ, Kassim AR, Kubo T, Potts MD, Kohyama TS (2012) Wood density explains architectural differentiation across 145 co-occurring tropical tree species. Functional Ecology 26: 274-282

(9) Kenzo T, Sano M, Yoneda R, Chann S (2017) Comparison of wood density and water content between dry evergreen and dry deciduous forest trees in central Cambodia. Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ 51: 363-374

(10) Kenzo T, Yoneda R, Matsumoto Y, Azani AM, Majid MN (2011) Growth and photosynthetic response of four Malaysian indigenous tree species under different light conditions. Journal of Tropical Forest Science 23: 271-281

(11) 大谷達也 (2011) 半島マレーシア低地における複層林造成技術の評価．海外の森林と林業 82: 33-37

(12) Symington CF (2004) Foresters' manual of Dipterocarps. Forest Research Institute Malaysia, 519pp

(13) 田中憲蔵・大谷達也・星野大介・Nur Hajar ZS (2023) 植栽後 20 年以上経過したマレーシアのフタバガキ科樹木の成長特性．関東森林研究 74: 33-36

(14) Tyree MT, Zimmermann MH (2002) Xylem Structure and the Ascent of Sap. Springer, 283 pp

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

サクラ挿し木の生存および発根に対する二酸化炭素施用の効果

岩本宏二郎[1]・勝木俊雄[2]

[1]森林総合研究所多摩森林科学園・[2]森林総合研究所九州支所

要旨：サクラ挿し木における CO_2 施用の効果を明らかにするため，多摩森林科学園に植栽された 16 個体のサクラについて挿し木試験を行い，CO_2 施用区と対照区で挿し穂の生存期間および発根率を比較した。CO_2 は，重曹にクエン酸水溶液を滴下することにより発生させた。挿し木試験の結果，CO_2 施用の有無による生存曲線の差が有意（p<0.01）で，生存時間は CO_2 施用により延長されると考えられた。一方，発根率については，CO_2 施用区でやや高い傾向が見られたが，両試験区とも発根しないで枯死した個体も多く，差は明確ではなかった（p>0.01）。今回用いた簡易的な実験装置は，温度や CO_2 濃度の制御が十分でなく，今後詳細な検討が必要であるが，CO_2 施用はさし木技術の向上に有望であると考えられた。

キーワード：サクラ，挿し木，二酸化炭素，生存曲線，発根

The effects of carbon dioxide addition on the survival and rooting of cherry tree cuttings

Kojiro IWAMOTO[1], Toshio KATSUKI[2]

[1]Tama Forest Science Garden, Forestry and Forest Products Research Institute; [2]Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: This study aimed to clarify the effect of CO_2 application on cherry tree cuttings. We conducted cutting experiments on 16 cherry trees planted in Tama Forest Science Garden, comparing the survival time and rooting rate between elevated CO_2 and control groups. CO_2 was generated by dripping citric acid solution onto baking soda. Results showed a significant (p<0.01) difference in survival curves with CO_2 application, suggesting that survival time was extended by CO_2 application. However, while the rooting rate tended to be slightly higher in the elevated CO_2 group, many cuttings in both groups did not root and died, indicating no significant (p>0.01) difference. The simple experimental apparatus used did not sufficiently control temperature and CO_2 concentration, requiring further detailed study. Nevertheless, the improvement of cutting propagation techniques through CO_2 application is considered promising.

Keywords: flowering cherry, cutting, CO_2, survival curve, rooting

I　はじめに

観賞用のサクラは，遺伝的特性を保つために，主に接ぎ木や挿し木の方法でクローン増殖されている。現在，サクラの苗木生産では接ぎ木が一般的であり，挿し木は接ぎ木の台木苗の生産など，限られた用途に使用されている。接ぎ木で増やしたサクラの苗木では，接ぎ口からの折損や台木からの萌芽枝と接ぎ穂の混同が頻繁に発生する。また，長期間植栽する場合，地上部よりも先に台木の根系が枯死する可能性がある。一方，挿し木は保存すべき個体のみを増やすことができ，苗木は実生苗と同様に扱える。このため，遺伝資源の保存の目的では、挿し木が適切な増殖手法である。しかし，サクラ類の挿し木増殖は，種類や手法によって活着率が異なり，広く適用できる増殖技術は確立されていない（*3, 8*）。また，挿し付け後発根までに長期間を要することが多く，成功率向上のためには，生存時間を延長させ，発根までの期間の枯損を減らすことが必要である。一方，農業における二酸化炭素（以下 CO_2）施用の効果が示され，実用化されてきている（*7*）。CO_2 濃度変化に対する植物の短期的応答として，光合成速度の上昇や気孔開度の減少・蒸散速度の低下が示されており（*1*），ハウスでのパプリカ促成栽培において，400 ppm～1000 ppm 程度の CO_2 施用で収量の増加が示されている（*4*）。また，いくつかの種類のサクラにおいて，高 CO_2 下での組織培養や挿し木における成功率向上が示されている（*2*, *6*）。本研究では，サクラ挿し木における CO_2 施用の効果を明らかにするため，多摩森林科学園に植栽された 16 個体のサクラについてさし木試験を行い，CO_2 施用区と対照区で挿し穂の生存期間および発根率を比較した。

なお，多摩森林科学園サクラ保存林では，由来の異な

（受理日 2024 年 12 月 16 日）

るサクラを管理する基本単位として「栽培ライン」を用いており（*9*），本研究でもこれを用いた。

II　材料と方法

1．実験装置　2つのガラス水槽を用いて，CO_2濃度が異なる2つの試験区（CO_2施用区，対照区）を設置した。ネット上の記事(熱帯魚工作箱：自作 CO_2 発生器（https://blog.goo.ne.jp/mizuwarabi）を参考にして，耐圧ペットボトル内で重曹とクエン酸水溶液を反応させてCO_2を発生させる装置を作成しCO_2濃度の調整に用いた。この装置は，電動エアポンプを稼働させることでクエン酸水溶液容器の内圧を高め，重曹を入れた反応容器内に滴下して発生した二酸化炭素をチューブで水槽へ送るものである。エアポンプには２つの排気口があり，一方をCO_2発生装置へ，もう一方を対照区水槽への給気に用いた。水槽の上面にLEDライトを設置した。エアポンプおよびLEDライトは，タイマーにより一日13時間稼働させた。温度は室温とした。

2．実験および解析　2024年5月から6月上旬に，サクラ保存林に植栽された16栽培ライン各1個体の当年枝を採取し，挿し木を行った（表–1，表–2)。管理上増殖が必要なラインをおもに対象としており，分類群などは考慮されていないが，比較的挿し木が容易とされる監物台真桜や困難な菊咲奥丁子桜(*3*)など様々な特性を持つラインを含んでいる。当年枝を採取後，2，3枚の葉を残して切断，数時間から1日水に浸したのち，ポリエチレンポットに鹿沼土を入れ挿し付けた。挿し付け直前に，切り口をオキシベロン液剤4倍溶液に約5秒浸した。挿し木本数は，各サクラで7から25本とし，CO_2施用区と対照区それぞれにほぼ半数ずつとなるよう設置した（表–2)。挿し付け後は，土が乾かないよう潅水し，霧吹きで水の散布を行った。数日おきに観察し，枯死数を記録した。挿し穂の生死については，軸が褐変し，葉が褐変または落葉したものを掘り上げ，切り口または形成されたカルスの変色・腐朽が見られるものを枯死と判別した。30日以上生存した挿し穂については，観察時に掘り上げて発根の有無を観察し，発根がみられたものは培養槽から除き，残りは元のポットに戻して観察を続けた。観察は8月末まで行った。

挿し穂の生存日数について生存時間解析の手法を用いて解析した。CO_2施用区と対照区の生存曲線の差について，栽培ラインを層別変数とする層別Log-rank検定を行った。挿し木の成功率（発根した苗の割合）のCO_2施用区と対照区の差については、応答変数（成功数，失敗数）をCO_2添加の有無の固定効果と採取個体のランダム効果で説明するモデルのあてはめにより解析した

3．実験区の環境　水槽内のCO_2濃度，気温，湿度について測定，記録を行った。CO_2濃度は，CO_2センサーモジュール(Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. Ltd. MH–Z19C，秋月電子通商扱）およびシングルボードコンピューターRaspberry Pi 3 ，公開されたプログラムライブ

表–1.　試験に用いたサクラ

Table 1 Cultivated lines of cherries that have tested in this study

栽培ライン[*1] Cultivated line[*1]	分類群名[*2] Scientific name[*2]
菊咲奥丁子桜	*Cerasus apetala* var. *pilosa* 'Multipetala' チョウジザクラ‘雛菊桜’
宿木桜	*C. jamasakura* var. *jamasakura* ヤマザクラ
望月桜	*C.* ×*sacra* ヤマザクラ×エドヒガン
片丘桜	*C. leveilleana* 'Norioi' カスミザクラ‘片丘桜’
監物台真桜	*C.* Sato-zakura Group 'Multiplex' サトザクラ‘真桜’
太田桜	*C.* Sato-zakura Group 'Ohta-zakura' サトザクラ‘太田桜’
七沢の猩々	*C.* Sato-zakura Group 'Kirin' サトザクラ‘麒麟’
高台寺	*C.* Sato-zakura Group サトザクラ
小木の御所桜	*C.* Sato-zakura Group サトザクラ
火打谷菊桜	*C.* Sato-zakura Group サトザクラ
龍谷寺の盛岡枝垂	*C.* 'Morioka-pendula' サクラ‘盛岡枝垂’
川崎の水玉	*Cerasus* sp. サクラ
三島の勝道桜	*Cerasus* sp. サクラ
伊東の河津桜	*C.* ×*kanzakura* 'Kawazu-zakura' カンヒザクラ×オオシマザクラ‘河津桜’
オカメ	*C.* 'Okame' カンヒザクラ×マメザクラ‘オカメ’
古里桜	*C.* ×*introrsa* 'Hina-zakura' カラミザクラ×オオシマザクラ‘雛桜’

[*1]　多摩森林科学園における管理上の基本単位。導入元の名称および導入時の名称から名付けられた

[*2]　3種以上の雑種はサクラとし、ヤマザクラ×オオシマザクラの栽培品種グループであるサトザクラは種名扱いとした

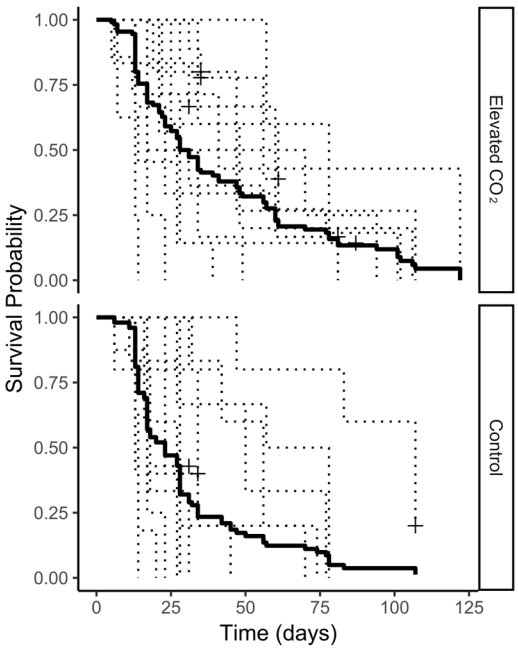
[*1] Strain names in the Tama Forest Science Garden, which were given based on their local names and origins

[*2] Hybrids of three or more species are denoted as *Cerasus* sp., and the cultivar group Sato-zakura, hybrids between *C. jamasakura* and *C. spaciosa*, is treated as a species

ラリ（https://github.com/UedaTakeyuki/mh-z19）を利用して10 分間隔で記録した。CO_2 センサーの測定範囲は，400～5000 ppm である。水槽内の温度および湿度は測定器（T&D corporation RTR–53）を用いて 30 分間隔で記録した。観測期間における水槽内の日平均気温は 22.0 ℃から 34.9 ℃であった。湿度は観測開始から 7 月中旬までは 80 %以上で推移したが，以降は徐々に低下した。これは，槽内の苗数の減少により湿度が維持できなかったと推察された。CO_2 濃度は，センサーのトラブルなどにより一部の期間（CO_2 施用区：6/12 ～7/15，対照区：6/12 ～6/27）しか測定ができなかったが，CO_2 施用区ではポンプが稼働している間は測定センサーの上限である 5000 ppm を超えることが多かった。夜間は 400 ppm まで徐々に低下した。対照区では 400～600 ppm で推移した。両区ともセンサーの測定下限値（400 ppm）以下となっていた可能性はあるが測定できなかった。

III　結果

CO_2 施用区および対照区におけるサクラ挿し穂の生存日数および供試数，発根苗数を表–2 に示した。生存日数中央値は，7 栽培ライン（宿木桜，望月桜，七沢の猩々，火打谷菊桜，川崎の水玉，伊東の河津桜，オカメ）で対照区よりも CO_2 施用区で大きく，3 栽培ライン（菊咲奥丁子桜，監物台真桜，龍谷寺の盛岡枝垂）で対照区の方が大きかった。挿し木後の日数における生存曲線を図-1 に示した。CO_2 の添加の有無により生存曲線に違いがあるかについて，栽培ラインを層別変数とし，層別 Log-rank 検定を行ったところ，生存時間は CO_2 添加により有意に変化し（$p = 0.006$），生存時間は CO_2 添加により延長されると考えられた。



図–1.　試験区におけるサクラ挿し穂の生存曲線
点線は各栽培ライン，実線は各栽培ラインをプールした生存曲線を示す。＋は発根した苗を示す。

Fig. 1 Survival curves of cuttings in elevated CO_2 and control groups. Dotted lines indicate individual cultivated lines, and solid lines represent pooled data of the lines in each group. "+" denotes censored cuttings that have rooted.

16 栽培ラインのうち，6 ラインで発根が認められた（表–2）。うち 4 ラインでは CO_2 施用区のみ発根がみられ，1 ラインを除くと CO_2 施用区の方が発根した苗数が多かった。しかし，二項分布に従う応答変数（成功数，失敗数）を固定効果 CO_2 添加の有無と採取個体のランダム効果で説明するモデルのあてはめにより，CO_2 処理の有無が成功率に与える影響を評価したところ，効果は有意とは言えなかった（$p = 0.05$）。

IV　考察

実験を行った 16 栽培ラインのうち 6 ラインで発根が認められた（表–2）。岩本ら（*3*）では 83 ラインでさし木を行った結果 57 ライン（69 %）で発根が認められたのと比較して割合は小さかった。岩本ら(*3*)では一つの種類について 20～40 本の挿し木を行ったのに対して今回の挿木数は少なく，発根率の低い種類で検出ができなかった可能性がある。また，水槽内の日平均気温が 30 ℃を超えることが多かったなど挿し穂の生育に不適な条件となっていた可能性がある。

CO_2 の添加により，挿し穂の平均的な生存期間は対照区と比較して長くなったと考えられた（図–1）。CO_2 濃度変化に対する植物の短期的応答として，光合成速度の上昇や気孔開度の減少・蒸散速度の低下が示されている（*1*）。また，サクラ挿し木の成功率向上のためには，挿し穂の蒸散量を抑えることが重要であり，密閉差しやミストによる散水などの手法が用いられる（*5*）。挿し穂の生存期間延長の生理的メカニズムについては今回の結果だけでは明らかでないが，CO_2 濃度の上昇により，呼吸消費や蒸散量が減少し，根を持たず土からの給水に限りがある挿し穂の生存に効果があったのかもしれない。また，密閉されたハウスでの野菜栽培では CO_2 が不足するため CO_2 施用が収量増に効果があると考えられている（*7*）。今回の結果も，水槽の閉ざされた環境で CO_2 濃度が低下し，CO_2 添加することで生育が改善された可能性もある。挿し穂の発根については，有意ではなかったものの，CO_2

施用区でやや発根率が大きい傾向がみられた。一方, CO_2 施用区，対照区ともに発根が見られなかったサクラも多く，挿木増殖が困難な種類のサクラの発根率を高める効果は認められなかった。CO_2 施用区で発根率が高かったのは，生存期間が延長されたことにより発根前に死亡する挿し穂数が減少したためと推察された。

今回の試験では，簡易的な実験装置により培養槽内の CO_2 濃度を高めることができた。しかしながら，培養槽内の CO_2 濃度の制御を行うことができず，実験中濃度は大幅に上昇した。このような高濃度の CO_2 が植物の成長に与える影響については報告が少ないが，長期間の CO_2 施用（*1*）や 5000 ppm に達するような高濃度の CO_2 の施用（*10*）で光合成速度は低下することが報告されており，今後はガス流量などを直接制御するなどより詳細な実験を行い，適切な施用条件を明らかにする必要がある。

引用文献

(1) 彦坂幸毅・寺島一郎 (2013) 植物と二酸化炭素. 科学と生物 51: 250256

(2) 石井克明・細井佳久・松浦邦昭 (2005) 樹木の発根への炭酸ガスの影響. 日本林学会大会発表データベース 116: 637

(3) 岩本宏二郎・勝木俊雄・古市優子 (2015) サクラ挿し木における分類群ごとの発根の季節特性. 関東森林研究 66: 119–122

(4) 高知県農業技術センター (2012) 炭酸ガス施用による促成パプリカの増収技術. 高知の農業新技術平成 23 年度 https://www.nogyo.tosa.pref.kochi.lg.jp/info/dtl.php?ID=5701（2024.12.10 参照)

(5) 森下義郎・大山浪雄 (1972) 造園木の手引き　さし木の理論と実際. 地球出版，東京：367pp

(6) 岡田恭一 (2003) 入浴剤から発生させた二酸化炭素を添加したサクラ小植物体のシュート伸長，発根率の検討. 植物工場学会誌 15: 39–42

(7) 生物系特定産業技術研究支援センター (2021) 炭酸ガス施用でハウス作物が増収.成果事例こぼれ話 24 https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/contents/fukyu/episode/episode_list/141171.html (2024.12.10 参照)

(8) 清水 淳子・綾部充 (2011) サクラ属 15 分類群の挿し木増殖法の検討. 樹木医学研究 15: 113–115

(9) 森林総合研究所多摩森林科学園編 (2014) サクラ保存林ガイドーDNA・形質・履歴による系統保存ー. 多摩森林科学園，東京：112pp

(10) 白旗学・橘本良二 (1992) 通常濃度～5000 ppm までの二酸化炭素濃度に対する数種針葉樹の光合成反応. 日林論 103: 415–416

表–2.　試験区と対照区における各栽培ラインの生存日数，挿し穂供試数および発根数

Table 2 Survival days, number of cuttings tested, and number of cuttings rooted in the experimental groups

栽培ライン Cultivated line	挿木日 Cutting date	CO_2 施用区 Elevated CO_2			対照区 Control		
		生存日数* Survival days	供試数 N. of samples	発根数 N. of rooting	生存日数* Survival days	供試数 N. of samples	発根数 N. of rooting
菊咲奥丁子桜	5/22	47(19-107)	5	1	95(47-107)	5	0
宿木桜	5/24	60(28-81)	6	0	28(17-45)	5	0
望月桜	5/27	78(57-102)	5	0	67.5(32-78)	6	0
片丘桜	6/4	17(7-23)	8	0	17(6-23)	8	0
監物台真桜	5/10	35(31-56)	9	6	56(31-74)	5	0
太田桜	5/28	13(13-14)	13	0	13(13-14)	12	0
七沢の猩々	5/23	61(25-106)	5	1	18(11-31)	6	0
高台寺	5/28	14(13-101)	11	0	14(13-20)	11	0
小木の御所桜	5/30	28(12-39)	6	0	28(11-28)	6	0
火打谷菊桜	5/24	48(34-81)	5	0	34(28-45)	5	0
龍谷寺の盛岡枝垂	6/11	24(21-27)	7	0	27(16-27)	5	0
川崎の水玉	5/28	22(13-31)	6	4	13(13-13)	7	3
三島の勝道桜	5/24	17(17-60)	6	2	17(17-28)	6	0
伊東の河津桜	5/7	122(22-122)	4	0	50(27-77)	3	0
オカメ	6/4	43.5(17-94)	4	0	17(6-70)	5	0
古里桜	6/4	23(6-49)	6	0	23(23-23)	5	2

* 中央値（最小値-最大値）を示す。発根した苗，調査終了まで生存した苗は除く

* Median (minimum-maximum) values of survival days, excluding censored cuttings that have rooted or survived until the end of the observation period

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

緩効性肥料の施用位置がスギ実生コンテナ苗の生育に及ぼす影響

阿部森也 [1]

[1] 茨城県林業技術センター

要旨：緩効性肥料の施用位置がスギ実生コンテナ苗の生育に及ぼす影響を明らかにするための栽培試験を行った。緩効性肥料を均一に培地に混合した混合施肥の他，プラグ苗の移植時に苗の直下へ局所的に緩効性肥料を施用した植穴施肥，混合施肥と植穴施肥を半分ずつ行った併用施肥の 3 条件で栽培したコンテナ苗の成長量を比較した。苗高は，混合施肥より植穴施肥，併用施肥で高くなり，地際直径は混合施肥に対して併用施肥で大きかった。また，コンテナ苗の生存率は，いずれの施肥条件でも 9 割以上であり，施用位置による肥料の濃度障害の影響は見られなかった。

キーワード：基肥，プラグ苗，植穴施肥，生育促進，濃度障害

Effect of application placement of a slow release fertilizer on the growth of *Cryptomeria japonica* containerized seedlings

Shinya ABE[1]

[1] 1Ibaraki Prefecture Forestry Research Institute

Abstract: We investigated the effect of the application placement of a slow release fertilizer on the growth of *Cryptomeria japonica* containerized seedlings. The growth of containerized seedlings grown under three different fertilization conditions were compared: uniform fertilization, in which slow release fertilizer was mixed evenly into the medium; planting hole fertilization, in which slow release fertilizer was applied locally directly below the plug seedlings when they were transplanted; and combined fertilization, in which half of the fertilizer mixed into the medium and the other half applied to the planting hole. Seedling height was greater with planting hole fertilization and combined fertilization than with uniform fertilization, and ground diameter was greater with combined fertilization than with uniform fertilization. Furthermore, the survival rate was over 90% in all fertilization conditions, and no adverse effects were observed due to changes in the application placement.

Keywords: basal application, plug transplant, planting hole fertilization, growth promotion, growth disorders

I　はじめに

近年，人工林の多くが主伐期を迎えており，今後はこれら充実した森林資源の利用が進むことが予想される。一方，森林の持つ公益的機能を将来にわたり発揮するためには，資源利用後の伐採跡地において確実に再造林を行う必要があるが，日本では立木の販売収入に対し，地拵えから植栽，下刈りまでの造林初期費用が高く，これが再造林意欲の低下に繋がっている。造林初期費用を低減させる方法には，森林経営の集約化，スマート林業機器の導入，成長に優れる苗木の活用，一貫作業システムの導入など様々な取組が提案されているが，苗木生産の分野では，一貫作業システムに有効なコンテナ苗の安定生産が求められている。

現在，実生コンテナ苗の生産方法は，幼苗移植法，プラグ苗移植法，毛苗移植法，直接播種法の 4 つが確立されている(*8*)。このうち，プラグ苗移植法は，移植苗の生産に畑を必要とせず，幼苗移植法と比べて苗の移植が容易であり，育苗期間も短縮できる等の利点がある。一方で，プラグ苗移植法では，幼苗移植法よりも移植苗のサイズが小さいため，1 成長期で出荷規格を満たす苗を生産するためには，移植後の肥料の作用が重要となる。

日本にコンテナ苗が導入し始めた 2009 年に作成されたマニュアルでは，肥料の施用方法として，成分の溶出が緩やかな緩効性肥料を用いること，コンテナ苗では根がキャビティの隅々まで広がるので肥料を均一に培土に混合することが記載されている(*1*)。その後，全国のコンテナ苗生産者に対し行われたアンケート調査の中では基肥と追肥の実施状況が調べられたが，ここでは，基肥は，培地に肥料を混和する方法として記載されている(*5*)。2022 年に林野庁により作成された「コンテナ苗生産の手引き(*8*)」でも，コンテナ苗の基肥は，培地に緩効性肥料を配合するとされており，現在の生産現場では，緩効性肥料を培地に混合する方法が一般的であると考えられる。

一方で，農業分野では，肥料の施用位置が作物の根の

（受理日 2025 年 1 月 15 日）

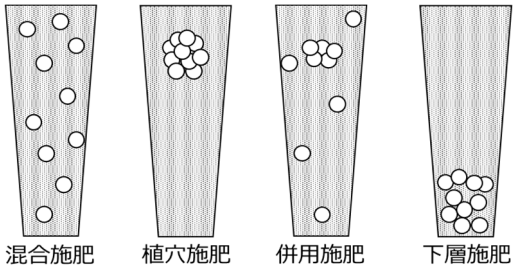
生育に影響することが報告されており(*2*)，根域への局所的な施肥が根の窒素吸収量を高めること(*6*)や，根系発達が抑制されている条件下では，深層よりも表層への施肥が有効であること(*11*)などがわかっている。このことから，コンテナ苗の場合も，培地への混合とは異なる施肥方法を導入することで生育を促進できることが考えられる。特に，コンテナ苗でも，プラグ苗移植直後は根がキャビティ全体に展開していないため，混合施肥ではキャビティの下層に存在する肥料の利用効率が低くなっていることも考えられ，根域へ局所的に施肥を行うことでこれを改善できる可能性も考えられる。一方で，養分溶出が緩やかな緩効性肥料であっても，局所的な施用は濃度障害のリスクもある。そこで，本研究では，緩効性肥料の施用位置の違いがスギ実生コンテナ苗の生育に及ぼす影響を明らかにするための栽培試験を行った。

II　材料と方法

1．2022 年予備試験　2022 年に予備試験として以下の栽培試験を行った。2 月に，茨城県林業技術センター(以下「センター」とする)の少花粉スギ採種園産の種子を農業用セルトレイ(288 穴)に播種して育成したプラグ苗を，4 月にコンテナ(MT-150-40P，東北タチバナ，スリット有)へ移植した。移植時には，基肥として，培地(ヤシ殻破砕物)に緩効性肥料(N:P:K=15:9:12，肥効期間 5～6 カ月)を均一に混合した混合施肥区，プラグ苗移植時の植穴の下(培地表面から深さ 4cm 付近)に集中して施肥した試験区(植穴施肥区)，キャビティの下部 1/3 の培地に肥料を混合した下層施肥区の 3 条件を設定した(図–1)。肥料の量は，すべての試験区で 1.5 g/苗(10g/L に相当)とし，各試験区で 1 コンテナ，40 本の苗を供試した。移植後 2 週間は温室内で管理し，それ以降は野外で管理した。潅水はスプリンクラーによって，9 月までは毎日夕方に 20～40 分間，10 月以降は培地の乾燥状態を見ながら適宜行った。12 月に苗高と地際直径，生存率を計測した。また，2023 年 3 月にコンテナから苗を抜き取り，デジタルカメラで根鉢の前後両面を撮影した。撮影した写真を画像解析ソフトに取り込み，根鉢表面に占める根の割合を前後それぞれで算出した後，平均化した値を根鉢の根被覆率とした。

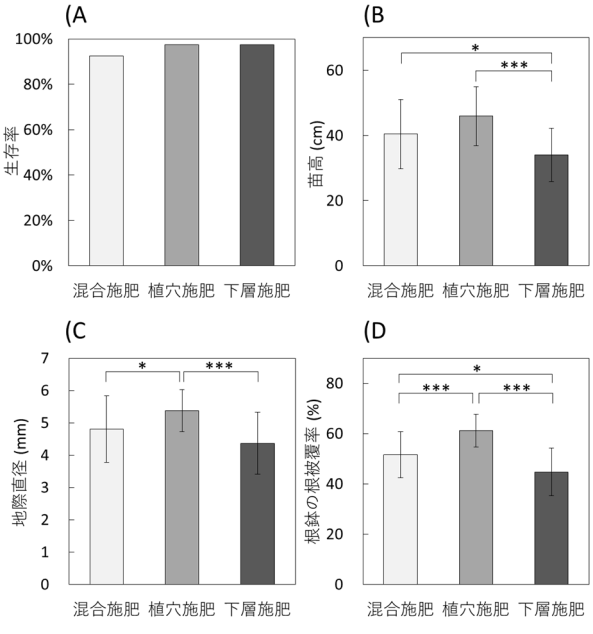
2．2023 年栽培試験　予備試験の結果を踏まえ，2023 年に以下の栽培試験を行った。センターの少花粉スギ採種園産の種子を，2023 年 2 月に農業用セルトレイ(288 穴)に播種して育成したプラグ苗を，4 月にコンテナ(JFA-150，全国山林種苗協同組合連合会，スリット無し)へ移植した。基肥として，培地に緩効性肥料を均一に混合した混合施肥区，プラグ苗の移植穴に集中して施肥した植穴施肥区の他，混合施肥と植穴施肥を半分ずつ行った併用施肥区の 3 条件を設定した(図–1)。使用した培地や肥料，肥料の量及び移植後の管理方法は予備試験と同様とし，各試験区で 80 本の苗を供試した。2023 年の 5,7,9,11 月に苗高を，7,9,11 月に地際直径を計測した。また，11 月に苗の生存率を調査した。あわせて，コンテナから苗を抜き取り，根鉢の両面それぞれの根の発達状態を，予備試験で撮影した指標となる写真と照らし合わせながら，目視により 5 段階(1: 0-20 %, 2:20-40 %, 3: 40-60 %, 4: 60-80 %, 5: 80-100 %)で評価し，両面の値の平均値を根鉢の発達状態とした。

以上により計測した苗高・地際直径・根鉢の発達状態について，施肥条件間の差を Kruskal-Wallis 検定で解析し



図–1．肥料の施用方法のイメージ

Fig. 1 Image of how to apply fertilizer



図–2．2022 年の予備試験における生存率(A)，苗高(B)，地際直径(C)，根鉢の根被覆率(D)

Fig. 2 Survival rate (A), seedling height (B), ground diameter (C), and root coverage rate of the root ball (D) in the preliminary test in 2022

た。この解析で施肥条件間に差がみられた場合は，Steel-Dwass 検定により多重比較を行った。以上の解析には，統計ソフトウェア R 4. 3. 0 (7)を用いた。

III　結果と考察

1. 2022 年予備試験　生存率は，1 成長期が経過した 12 月時点でどの試験区でも 90 %を上回っており(図–2A)，肥料の施用位置を変えることによる濃度障害の影響は見られなかった。地際直径及び根鉢の根被覆率は，混合施肥に対し，植穴施肥で大きかった(図–2C, D)。このことから，植穴施肥は，苗が効率良く肥料を利用できるようになり，肥大成長，根系成長を促進させるうえで有効である可能性が示唆された。一方で，下層施肥では，苗高と根鉢の根被覆率が混合施肥よりも小さく(図–2B, D)，キャビティの下部にある肥料を苗は利用しにくいこと，あるいは根が伸長するまではこれらを利用できないことが考えられた。

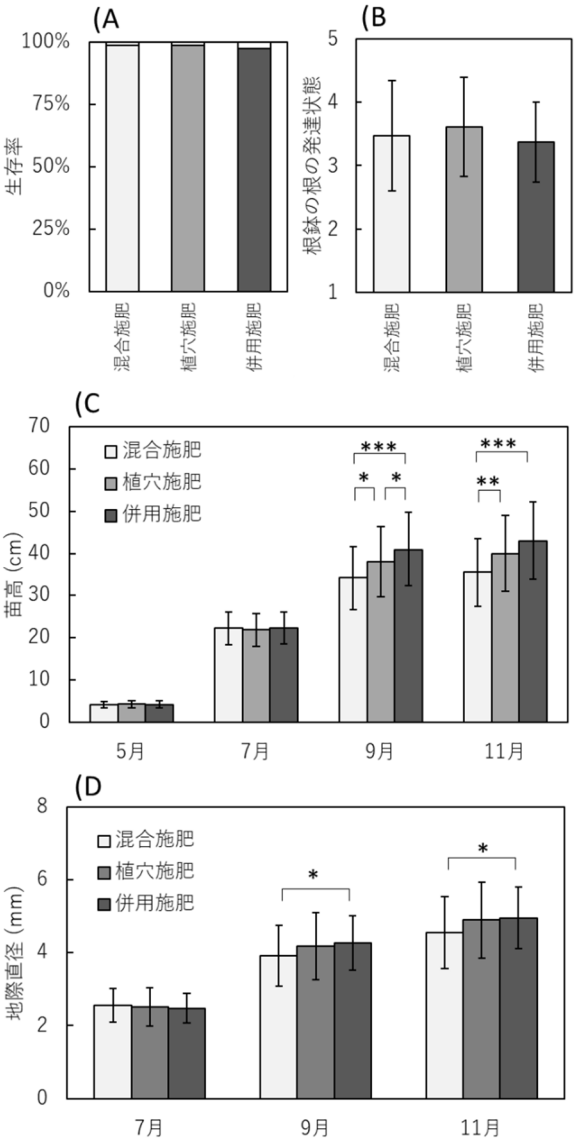
2. 2023 年栽培試験　生存率については，いずれの施肥条件でも 11 月時点で 90 %を上回っており(図–3A)，予備試験と同様に緩効性肥料を局所施用したことによる濃度障害は確認されなかった。デントコーンでは，緩効性肥料を種子と接触させて栽培した場合でも濃度障害が起こりにくかったことが報告されており(*3*)，緩効性肥料では，即効性肥料を用いた場合に比べて極端な濃度上昇が生じにくいと考えられる。窒素系の即効性肥料に対して濃度障害を受けやすいスギの幼苗の場合(*9*)も，1.5 g/苗の緩効性肥料を植穴に局所施用する条件では濃度障害は起こりにくいことがわかった。

図–3C に 5,7,9,11 月の苗高を示した。Kruskal-Wallis 検定では，9 月と 11 月に有意差があり(表–1)，多重比較の結果，9 月は全ての施肥条件間に，11 月は併用施肥と混同施肥，植穴施肥と混合施肥の間に有意な差が確認された。7,9,11 月の地際直径については，Kruskal-Wallis 検定では，7 月以外に有意差が認められ(表–1)，多重比較では，9 月，11 月とも併用施肥と混合施肥の間に有意差がみられた(図–3D)。以上の結果から，植穴施肥では，夏期の伸長成長が促進されること，植穴への局所施肥と培地への

表–1. 2023 年の栽培試験における苗高，地際直径，根鉢の根の発達状態に関する Kruskal-Wallis 検定の結果

Table 1. Results of the Kruskal-Wallis test for seedling height, ground diameter, and root development in the root ball in the 2023 cultivation experiment

		χ^2	p	
苗高				
	5月	1.11	0.573	ns
	7月	2.01	0.366	ns
	9月	27.30	<0.001	***
	11月	29.04	<0.001	***
地際直径				
	7月	1.60	0.449	ns
	9月	7.54	0.023	*
	11月	8.05	0.018	*
根鉢の根の発達状態		4.72	0.094	ns



図–3. 2023 年の栽培試験における生存率(A)，根鉢の根の発達状態(B)，苗高(C)，地際直径(D)

Fig. 3 Survival rate (A), root development in the root ball (B), seedling height (C), and ground diameter (D) in the cultivation test in 2023

混合施肥を併用した場合は，伸長成長がより旺盛になることに加えて，肥大成長も促進されることがわかった。一方で，11 月の根鉢表面の根の発達状態は，Kruskal-Wallis 検定において処理区間差は認められず（表–1，図–3B），予備試験とは異なり，肥料の施肥位置による差は見られなかった。

田中ら(*10*)は，ダイズを用いた試験において，土壌溶液中の濃度が極端に高くない限り，窒素肥料を施用した部位で細根が増大したことを報告している。その一方で，同じダイズでも，接触施肥によって根の生育が抑制された報告もあり(*4*)，局所的な施肥に対する反応は，植物種や肥料濃度によっても異なると考えられる。本試験においては，スギのプラグ苗をコンテナに移植し，1.5 g/苗の濃度で緩効性肥料を施用する場合，施用量の半分を局所的に植穴へ施用することで苗高や地際直径の生育をより促進できる可能性が示唆された。一方で，大量の培地を処理する場合は，従来のように肥料を混合させたほうが効率性は高い。そのため，以上の成果を生産現場に適用するには，今後，プラグ苗の移植作業と組み合わせて植穴に緩効性肥料を添加できる機械あるいは器具の開発が必要になる。

引用文献

(1) 遠藤利明・山田健 (2009) JFA-150 コンテナ苗育苗・植栽マニュアル. 林野庁, 東京: 17pp

(2) 石塚喜明・田中栄・林満 (1963) 畑作物に対する施肥位置に関する研究 (第 2 報) －施肥位置及び肥料濃度と根の張り方との関係－. 日本土壌肥料学雑誌 34 (2): 44-48

(3) 菅野均志・庄子貞雄・伊藤豊彰 (1993) 肥効調整型肥料を用いたデントコーンへの接触施肥法. 川渡農場報告 9: 23-29

(4) 二瓶直登・丹治克男 (2004) 肥効調整型肥料の全量基肥施用に対するダイズの収量と根の反応. 日作紀 73 (1) : 18-22

(5) 小笠真由美・藤井栄・飛田博順・山下直子・宇都木玄 (2021) 山林用針葉樹コンテナ苗における育苗方法の現状と課題－全国のコンテナ苗生産者に対するアンケート調査より－. 日林誌 103: 105-116

(6) Randall, G. W. and Hoefit, R. G. (1988) Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizer. A review. J. Prod. Agric. 1: 70-79

(7) R Core Team (2023) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

(8) 林野庁 (2022) コンテナ苗生産の手引き. 林野庁, 東京: 78pp

(9) 千木容 (1989) スギ幼苗に対する緩効性肥料の効果について－播種床への施用効果－. 石川林試研報 19: 1-4

(10) 田中明・斎藤豊 (1981) 根箱を用いたダイズに対する窒素肥料施肥位置の研究. 日本土壌肥料学会誌 52 (6): 469-474

(11) 谷俊男・林元樹・遠藤征馬・三屋史朗・林智仁・山内章 (2015) コムギ湿害対策のための肥効調整型肥料の基肥時土壌表層施用ならびに即効性窒素追肥の効果. 日作紀 84 (3): 256-263

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

ヤマグワの水挿しにおける底部の処理条件の違いが発根におよぼす影響の検討

戸田翔子[1]・田中恵[2]・上原巌[2]

[1] 東京農業大学大学院地域環境科学研究科・[2] 東京農業大学地域環境科学部

要旨：挿し木は鹿沼土などに挿しつける方法が主流であるが，土でなく水に挿す水挿しの方法もある。水挿しでは水に挿しつけて発根が見られる植物で行われるが，酸素の供給が充分でないため，発根が遅れたり，根が軟弱になりやすいとされている。また，実際に育てる上では，挿し穂の安定を図る必要がある。そこで本研究は，先行研究で発根が見られたヤマグワを用いて,鹿沼土に挿したものと 3 種類の水挿しを行ったものを準備し,育成を行った。生存率，成長量ともに鹿沼土に挿しつけたものが良好であった。水挿しにて挿し穂のまわりに空間を作ることで生存率が改善された。成長量は土に挿しつけたものが圧倒的に高かったため, 水中の空気の循環などをする必要があると考えられる。

キーワード：水挿し，ヤマグワ，発根，生存率，挿し床

Examination of the effect of different bottom treatment conditions on rooting on wood scion in the water of *Morus australis*

Shoko TODA[1], Megumi TANAKA[2], Iwao UEHARA[2]

[1] Graduate School of Regional Environment Sciences, Tokyo University of Agriculture

[2] Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

Abstract: Main of cutting is that insert into the soil, but there is a method wood scion in the water that insert into the water. Wood scion in the water seems to be used for plants that root when they in the water, but due to insufficient oxygen supply, it is reported that delay root development and cause soft roots. When we grow wood scion in the water, we have to stabilize the cuttings. In this study, we use *Morus australis*, which had shown rooting by wood scion in the water in a previous study, was used to prepare and grow two types of plants, one inserted in Kanuma soil and the other in three different types of wood scion in the water. Survival rate and growth rates were higher for those inserted into the Kanuma soil than into water. Survival rates were improved by creating space around the cuttings bases in wood scions in the water. Since the amount of growth is by far the highest for those inserted in soil, it is considered necessary to circulate air, etc. in the case of wood scion in the water.

Keywords: wood scion in the water, *Morus australis*, rootage, survival rate, cutting media

I　はじめに

挿し木は植物の一部を用いた無性繁殖法の 1 つであり，その成長や生存のために水分管理が重要である。現在は鹿沼土などといった土に挿す方法が大半を占めているが，水挿しの方法もある。

水挿しとは，水にさしつけてよく発根するもので行われる方法である。スギでも発根力の強い品種系統のものなどで水挿しできる場合があるが，根が軟弱になりやすい(*3*)。酸素の供給が十分でないので発根が遅れ,全ての植物でできるとは限らない(*1*)。水耕法は比較的簡易であり，均一な材料が得られることなど利点が多いとされている(*4*)ため，水挿しでも同じような利点があると考える。水挿しを行った先行研究はヤマグワを用いてクロムなどの毒性について調べた研究(*9*) や観葉植物での水挿し試験(*2*)等が挙げられる。ヤマグワの水挿しでは大山・間の実験により発根後の成長などについては報告されているが(*4*, *5*) ，発根前からの水挿しや土に挿した場合の成長の違いや水挿し時の環境の違いによる影響は未だ明確ではない。

また，本研究で用いるヤマグワは先行研究にて水挿しでの発根が確認されている(*4*)。ヤマグワはその樹皮を乾燥させたものを桑白皮と呼び，消炎，咳止めなど，熟した果実を日干ししたものを桑椹と呼び，不眠症，冷え性などへの薬効成分があるとされている(*7*)。したがって，水挿しでの発根が確認されたヤマグワを用いて水挿しでの発根状態や成長量を比較することは，木材生産以外の目的で育成する他の樹種にも応用できる方法を模索する上で重要だと考える。

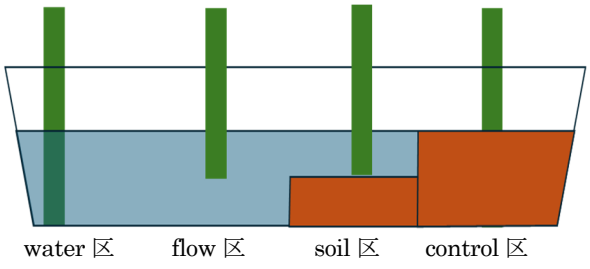
本研究では，水挿しと土に挿しつけた場合の活着率の違いや成長量の違いを比較するため, ヤマグワを用いて，

（受理日 2025 年 2 月 27 日）

条件ごとの活着率と成長量の違いについて調べた。また，植物体の健全度を非破壊で調べるため，SPAD 値を測定し，その値についても比較した。水挿しの際，基部の周辺環境の違いにより活着率に違いが出ると予想されたため，ただ水に挿すだけでなく，基部が底に触れないように工夫して，挿し木の育成を行い，成長量の違いについて調べた。

II　材料と方法

1．実験方法　東京農業大学世田谷キャンパス内の樹高 5.0 m，DBH 8.6 cm のヤマグワ（*Morus australis*）から 2024 年 4 月 3 日に葉が展葉したばかりの枝を採取した。挿し穂は全て 16 cm に揃え，切り口を斜めに切ったものを条件ごとに 20 本ずつ，計 80 本準備した。挿し床の条件は比較用に鹿沼土に挿し付けたもの（以下「control 区」とする）と，3 種類の水挿しを準備した。容器は全て同じプランターを用い，水挿しの場合は排水口に栓をして水が抜けないようにした。水挿しおよび潅水には水道水を用い，育成時に挿し穂が不安定にならないようにプラスチック板に穴をあけてその穴に挿し穂を挿した。水挿しの種類は水位 6 cm ほどでプランターの底に挿し穂基部が触れるようにしたもの（以下「water 区」とする），プラスチック板の穴を小さくし，輪ゴムを挿し穂に巻いて基部が底に触れないように浮かせたもの（以下「flow 区」とする），プランターの底に 2 cm ほど鹿沼土を敷き，水をいれたもの（以下「soil 区」とする）の 3 種類を準備した（図–1）。育成は東京農業大学世田谷キャンパス内の C1 温室内にて行った。週に 2 回ほど観察を行い，水挿しは水位の調整と水温の測定，土に挿したものは pF メータの値を元に潅水を行った。挿し木は全て 2024 年 4 月 3 日に挿しつけ，同年 9 月 5 日までに全て掘り取り，2.の項目について計測を行った。flow 区の 2 個体で結実が見られた。うち 1 個体は実が熟したのちに枯死した。もう 1 個体は実が熟さず萎んだ。



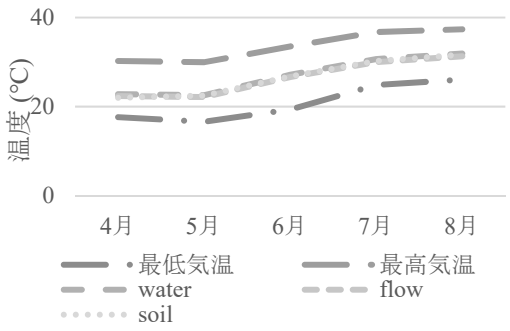
図–1.　条件ごとの挿し穂の様子

Fig. 1 State of cuttings by condition

2．計測項目　掘り取り後に生存個体数と発根やカルスの有無を確認した。掘り取り時に葉が全てしおれている個体を枯死個体，葉がしおれていない個体を生存個体，葉が萎れておらず，発根がみられた個体を活着個体と定義した。また，SPAD 計（ミノルタ社葉緑素計 SPAD-502）を用いて茶色く変色しておらず，かつ萎れていない葉のみ SPAD 値を計測し，挿し穂ごとに計測した葉の枚数で割り，挿し穂ごとの平均 SPAD 値を算出し，その挿し穂の SPAD 値とした。SPAD 値，各器官の重量を計測したのは生存個体，活着個体のみで枯死個体は計測しなかった。その後，60℃に設定した恒温機内にて 72 時間以上乾燥させ，全体，葉，根の乾燥重量を計測した。なお，葉は落葉した葉や枯死した個体は基部ごとの重量を計測していない。条件ごとの生存率と活着率を比較するために，生存個体数と活着個体数について Fisher の正確確率検定を用いて比較を行った。個体の成長量の実験条件による差を明らかにするために，葉乾重と根乾重について Steel-Dwass 法を用いて多重比較を行った。植物の健全度について，条件による差を明らかにするために SPAD 値について Steel-Dwass 法を用いて多重比較を行った。葉と根の成長量，根と SPAD 値の関係を調べるために，散布図と回帰直線を R ver.4.2.0 を用いて作成した。

III　結果と考察

1．温室の気温と水温　育成期間中の温室の気温と水挿しの条件ごとの水温の月平均気温を図–2 に示す。育成期間中は気温の上昇を防ぐために換気と扇風機による送風を行った。水挿しの条件ごとに水温の明確な温度差はなかった。

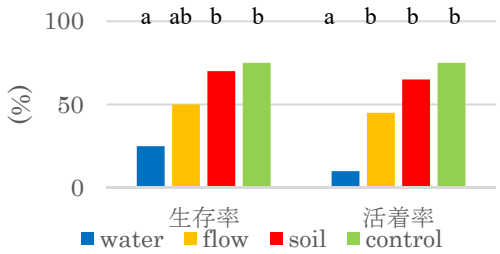


図–2.　温室の気温と条件ごとの水温

Fig. 2 Greenhouse temperatures and water temperatures per conditions

2．生存率，活着率　生存率と活着率を図–3 に示す。生存率は water 区と soil 区，control 区，活着率は water 区

と他の条件で有意な差がみられた。どの条件でも根は下方向に伸長し，soil 区では挿し穂を安定させるためか水に沈めた鹿沼土に潜るように根が伸長しており（図–4），水挿しでは発根してそれほど時間のたっていない根は脱落しやすいことが観察された。基部が底についた water 区の場合，発根するスペースがないために活着率が低下したことが推察された。本研究では，水挿しはプラスチック板を用いて挿し穂を安定させようと試みたが，鹿沼土を使っていない条件にて，育成途中に挿し穂が斜めになったことや，それにより葉が水に浸かってしまうこともあり，必ずしも挿し穂が安定していたとは言えない状態であった。生存率なども低いため，水挿し環境はヤマグワの生育にとって不適である可能性が考えられる。



図–3.　条件ごとの挿し穂の生存率と活着率

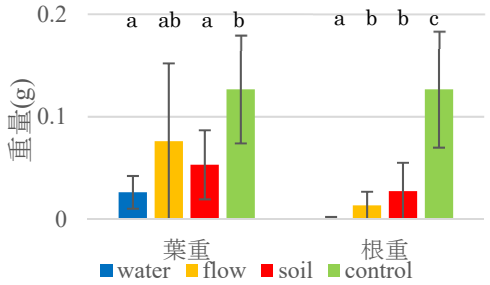
Fig. 3 Survival and rootage rate per conditions

アルファベットは異なる処理区間にて Fisher の正確確率検定にて危険率 5%で有意な差がみられたことを示している。

図–4.　soil での根の様子

Fig. 4 State of root grow by “soil”

3. 葉重，根重　葉重，根重を図–5 に示す。大山・間(*4*)によるヤマグワを用いた水挿しの先行研究によると，成長量は挿しつけ後 30 日後にて新しょう重（乾物）が 639mg，根重（乾物）が 28mg であった。新しょう重と葉重，根重同士を比較すると，葉重は先行研究より少ない一方，根重は soil 区では同程度，control 区では圧倒的に多い結果となった。育成日数や育成環境が異なるため一概には言えないが，葉の成長には培養液を用いることが有効である一方で，根の成長量は水挿しで抑制される可能性がみられた。

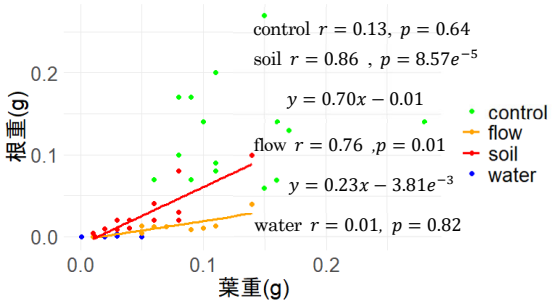


図–5.　条件ごとの葉乾重，根乾重

Fig. 5 Leaf dry weight and root dry weight per conditions

アルファベットは異なる処理区間で Steel-Dwass 法による多重比較により危険率 5%で有意な差がみられたことを示している。なおエラーバーは各条件での標準偏差を示す。枯死個体は含めていないため，条件ごとの個体数は water 区は 5 個体，flow 区は 10 個体，soil 区は 14 個体，control 区は 15 個体である。

また，図–6 に条件ごとの葉重と根重の散布図および回帰直線を示す。回帰直線の傾きが flow 区に比べて soil 区は大きくなったため、基部付近に鹿沼土があったことが結果として発根を促した可能性が考えられるが、本研究ではその要因は明らかにならなかった。水挿しでは control 区に比べて根の生長が抑制されたが、水挿しの条件を変えることで根の生長量を増加させることができると考えられた。control 区でばらつきが大きかったのは、個体によって根の伸長方向が水平方向か下方向かで分かれており、下方向に伸びていた個体の方が根の生長量が多かったことが要因として考えられる。

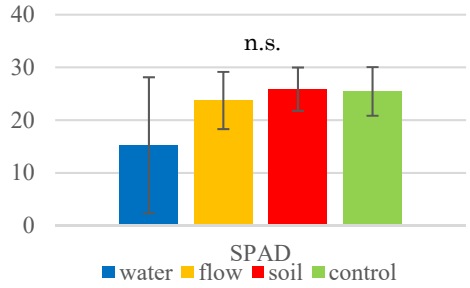


図–6.　葉乾重と根乾重の散布図

Fig. 6 Scatter plots of leaf dry weight and root dry weight

相関係数および p 値は上から control 区，soil 区，flow 区，water 区になっている。なお、soil 区と flow 区では有意な相関がみられたため、回帰直線の式も合わせて示した。

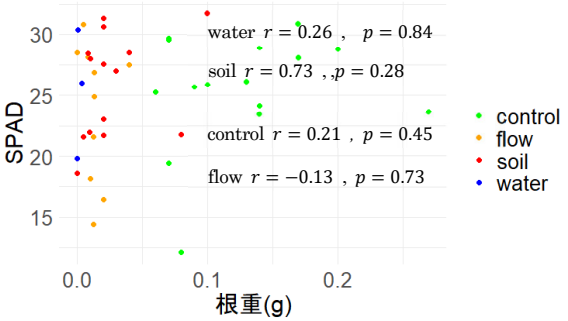
4. SPAD　条件ごとの SPAD 値を図–7 に示す。SPAD を測定した個体はほぼ全て活着していた。クワの苗を用いた先行研究では，窒素無施用の場合でも SPAD 値は 23.9 を示した(*6*) 。本研究では，water 区で 23.9 よりも低い結果となったが，他の条件では 23.9 よりも高い結果となった。水挿しであっても，挿し木の健全度は低くならない可能性がある。先行研究により，窒素を施用するほど SPAD 値が高くなることや(*6*) ，発根後に水ではなく養液に移すことで成長量が増加する(*5*)ことが示されているため ,水道水ではなく液肥などを用いることで成長を促進できる可能性がある。クロモジを用いた先行研究では SPAD 値と発根数などで相関がみられた(*8*)。そのため，条件ごとの根の乾重と SPAD 値の相関関係について調べた（図–8)。その結果、どの条件でも有意な相関がみられなかったため、本研究では SPAD 値と根重の関係は明らかにはならなかった。測定した葉の SPAD 値が高くても葉重が少ない水挿しでは、挿し穂の健全度が低かった可能性が考えられる。



図–7.　条件ごとの SPAD 値

Fig. 7 SPAD value per conditions

なおエラーバーは各条件での標準偏差を示す。枯死個体は含めていないため，条件ごとの個体数は water 区は 5 個体，flow 区は 10 個体，soil 区は 14 個体，control 区は 15 個体である。



図–8.　SPAD 値と根重量の散布図

Fig. 8 Scatter plots of SPAD value and root weight

相関係数および p 値は上から water 区，soil 区，control 区，flow 区になっている。

IV　まとめ

本研究は，ヤマグワを用いて水挿しを行い，土に挿した場合との成長の比較と，水挿しでの基部付近の環境による生存と成長について調べた。生存率や活着率は水挿しでは低くなったが，基部付近に空間をつくることで，改善がみられた。成長量は土に挿した場合で明らかに多かったが，水挿しでは，根の成長が悪く，全体の成長量が減少した可能性があるが，水挿しにより根の成長は抑制されない可能性がみられたため，水挿しによる成長の影響は明らかにはならなかった。ディーフェンバキアなどでは水挿しした個体の発根量が多いため(*2*) ，樹種の特性により成長が異なる可能性が考えられる。先行研究によると(*5*)，発根後に水ではなく養液に移すことで成長量が増加するため，水道水ではなく，液肥を用いることで挿し木の成長を促進し，土に挿した場合と同程度の成長量を得られる可能性もある。水挿しの利点として，地下部の成長を直接確認できることがあるが，ヤマグワの場合，生えたばかりの根は少しの刺激で脱落しやすいため，確認の際は注意が必要である。

引用文献

(1) 町田英夫 (1974) さし木のすべて. 誠文堂新光社, 東京. 6, 12pp

(2) 森岡公一・杉山義忠・米村浩次 (1990) 観葉植物の水挿し繁殖. 愛知県農業総合試験場研究報告 22: 199–203

(3) 森下義郎・大山浪男 (1972) 造林木の手引:さし木の理論と実際. 地球出版株式会社, 東京. 21pp, 253pp

(4) 大山勝夫・間和夫 (1964) クワの古条さし木による水耕法について. 蚕糸研究 51: 28-32

(5) 大山勝夫・間和夫 (1964) クワの水耕さし木苗の初期乾物生長 ―とくに剪根との関係―. 蚕糸研究 51: 33–36

(6) 鈴木誠・高橋恭一 (1995) 葉緑素計による桑樹の簡易栄養診断. 神奈川県蚕業センター試験研究報告 23: 1–7

(7) 田中つとむ (2010) 増補改訂フィールドベスト図鑑 15 日本の薬草. 学研出版株式会社, 東京. 165pp

(8) Uehara I (2017) Cuttings of *Lindera umbellata* Thunb. and *Lindera umbellata* Thunb. var. membranacea. 中部森林研究 65: 11–14

(9) 張建強・久野勝治 (1999) 水耕栽培におけるクワ苗の生長に対する 3 価クロムと 6 価クロムの影響. 日本蚕糸学雑誌 68 (4) : 295–300

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

養分不足のスギコンテナ苗に対する秋施肥が耐凍性に及ぼす影響

飛田博順[1]・原山尚徳[1]・香山雅純[1]・齋藤隆実[1]

[1]国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

要旨：育苗時の追肥は，量や時期によっては苗の耐凍性を低下させるおそれがある。本研究では，前年 12 月までの追肥がスギコンテナ苗の翌年 3 月の耐凍性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。9 月，10 月，11 月，12 月に追肥する 4 処理を設定し，12 g/L 相当量（5–6 ヶ月間肥効，3.6 g/個体）を施用した。翌 3 月に−15 ˚C から−30 ˚C における二次枝の電解質漏出率を測定し，50%漏出時の温度 (LT50) により耐凍性を評価した。9 月から 12 月の追肥処理区の LT50 は，−29.3 ˚C から−28.1 ˚C で，追肥をしない対照区の−24.0 ˚C に比べて低かった。追肥時期の違いによる耐凍性の低下は認められず，9 月から 12 月の追肥により 3 月の耐凍性が高くなることが示された。

キーワード：F_v/F_m，浸透ポテンシャル，相対成長速度，窒素含量，電解質漏出率

Effect of fall fertilization on cold tolerance of nutrient-deficient *Cryptomeria japonica* container seedlings

Hiroyuki TOBITA[1], Hisanori HARAYAMA[1], Masazumi KAYAMA[1], Takami SAITO[1]

[1] Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: Fertilizer application during seedling cultivation can potentially reduce seedling cold tolerance, depending on the amount and timing. The aim of this study was to determine the effect of fertilizer application up to December on the cold tolerance of *Cryptomeria japonica* container seedlings in March. In each month from September to December, fertilizer was applied at a rate equivalent to 12 g L^{-1} (effective for 5−6 months, 3.6 g per plant). In the following March, electrolyte leakage rates of shoots at −15 ˚C to −30 ˚C were measured, and cold tolerance was assessed by temperature at 50% leakage (LT50). LT50 in each fertilizer treatment from September to December ranged from −29.3 ˚C to −28.1 ˚C, lower than the −24.0 ˚C of the unfertilized control. No reduction in cold tolerance was observed at different times of fertilizer application, suggesting that fertilizer application between September and December increased cold tolerance in March.

Keywords: F_v/F_m, Electrolyte leakage, Nitrogen content, Osmotic potential, Relative growth rate

I　はじめに

秋施肥とは，成長終了期ごろに行う追肥で，当年の成長には寄与せず，芽の大きさや翌年の成長に寄与しうるものである(*1*)。再造林において出荷時に規格未達の残苗を次回出荷時まで育苗して活用する場合，施肥により樹高が高くなり過ぎて規格外になることが懸念されるが，秋施肥であれば徒長を抑えつつ翌春の苗の養分状態を改善させ，植栽後の成長促進が期待できる。実際，スギコンテナ苗では，育苗時の 9 月上旬や 10 月上旬の追肥により，翌春に植栽した後の 1 年間の成長に促進効果が見られた(*8*)。一方，育苗時に，成長期間中の施肥が多すぎると，遅い時期まで成長が続く徒長を示し，休眠開始や耐凍性獲得が遅れ，霜害や出荷・保管時の低温被害のリスクが高くなる(*1*)。針葉樹では 9 月ごろの秋施肥により耐凍性が高まることが多く報告されているが，秋施肥やより遅い時期の施肥に対する耐凍性の反応は，種特異的であり，施用量や施用時期，評価するタイミングによっても異なる可能性がある(*1, 3, 4*)。先行研究で，養分不足状態のスギコンテナ苗について，耐凍性獲得に及ぼす追肥時期の影響を調べた(*9*)。その結果，1）8 月から 11 月の追肥（6 g/L 相当）により，1 月の針葉の耐凍性が上がること，2）11 月の追肥では 8 月から 10 月の追肥に比べて，耐凍性向上の程度が少なく，耐凍性獲得の遅延の可能性があること，3）追肥の翌年の成長には 11 月の追肥による負の影響は見られなかったことを示した(*9*)。本研究では，先行研究に引き続き，残苗の利用を想定して，養分不足状態のスギコンテナ苗を対象に，育苗時のより遅い時期の 12 月の追肥が，二次枝の耐凍性に及ぼす影響と，追肥翌年の植栽後の成長に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。本研究では，追肥量を先行研究の 2 倍に設定し，耐凍性が十分高まった 3 月に耐凍性を測定した。

II　材料と方法

（受理日 2025 年 1 月 31 日）

1. 調査地と材料　森林総合研究所（茨城県つくば市）構内の実験林内で育苗と植栽試験を行った。2023 年 1 月に購入したスギ挿し木コンテナ苗（県姶良 20 号, 150 cc）を 150 cc コンテナ (JFA–150) に移し，ビニールハウス内で，施肥をせず，潅水のみで育苗を続けた。9 月に単体のコンテナ (330 cc，HSK330) に移植した。根鉢と容器の間に生じた隙間の培地にはヤシ殻破砕物（ココピートオールド，トップ（株），東京）を用いた。

2. 追肥処理　追肥前の苗高は 66.2 ± 0.8 cm（平均 ± 標準誤差，n = 99）であった。2023 年 9 月から時期を変えて 1 回のみ追肥を行い，以下の 4 つの追肥処理区を設定した (n = 20) : 9 月 6 日 (SEP)，10 月 6 日 (OCT)，11 月 8 日 (NOV)，12 月 8 日 (DEC)。追肥を行わない対照区 (CON, n = 19) も設定した。追肥は，先行研究の 2 倍の量に設定し(*9*)，根鉢表面に Osmocote Exact Standard High K（N-P-K 11-11-18，肥効期間 5–6 ヶ月）を 3.6 g/本与えた（12 g/L 相当）。育苗期間中の 5 月と翌 4 月に苗高と地際直径の測定を行い，相対成長速度 (RGR) を算出した。

3. 測定項目　追肥した翌年の 3 月に，各処理 5 個体の上部の二次枝を対象に，耐凍性や耐寒性に関連する生理特性を測定した。2024 年 3 月 5 日に，一般的な手法である電解質漏出率による耐凍性の評価を行った(*4*, *7*)。早朝に各個体から二次枝を 6 本採取し，2 ml の超純水を入れた試験管に枝の切り口を浸して，プログラムフリーザー (ESPEC, MC-711) 内で 4 段階の低温処理を行った。後述の 2 処理を含め温度処理は 5 個体まとめて行い（試験管 30 本 ; 6 温度処理 × 5 追肥処理），その後の処理は二次枝ごとに行った（試験管 150 本 ; 6 温度処理 × 5 個体 × 5 追肥処理）。−2 ˚C に 1 時間置いた後に植氷を行い，さらに−2 ˚C で 30 分間置いた後，0.2 ˚C/分の速度で冷却した。−15，−20，−25，−30 ˚C の各設定温度で対象サンプルを取り出し，4 ˚C の冷蔵庫内に安置した。翌日，試験管内の枝から先端と水に浸かっていた部分を除き, 5 mm 長の試料を 3 本切り出し，2 ml の超純水を入れた試験管に移した。室温下 (21 ˚C) において振盪機で 3 時間撹拌した後，電気伝導度 (*EC-l*) を測定した(LAQUA twin COND, Horiba)。その後，オートクレーブで処理し（121 ˚C で 20 分），振盪機で 1 時間撹拌した後，電気伝導度 (*EC-d*) を測定した。低温処理をせずに 4 ˚C に保管した枝と，液体窒素 10 分間と自然解凍の処理を 2 回繰り返した後，4 ˚C に保管した枝についても，同様の手順で電気伝導度を測定した（それぞれ n = 25 ; 5 個体 × 5 追肥処理）。以上より各設定温度での電解質漏出率 (EL) を以下の式から算出した。

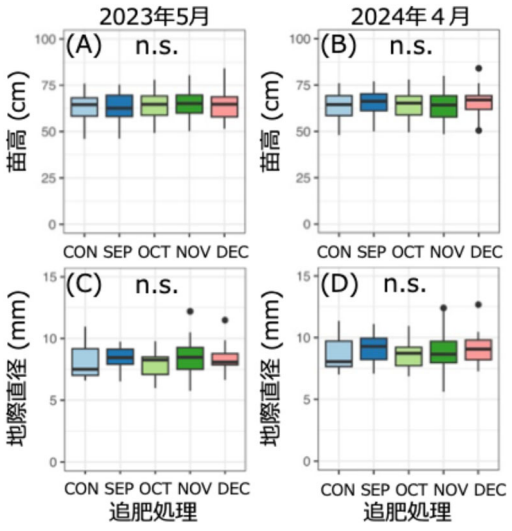
$$EL = EC\text{-}l \,/\, EC\text{-}d \times 100$$

各温度での相対電解質漏出率 (REL) を，4 ˚C 保管の枝の EL 値を 0%，液体窒素処理枝の EL 値を 100%として換算した。ロジスティック回帰モデルのカーブフィットにより，REL が 50%になる温度 (LT50) を算出し，耐凍性の指標に用いた(*7*)。

耐凍性測定の 1 週間後に，耐凍性測定に使用した枝と同等の位置の枝を対象に，強光と低温のストレスの指標として夜明け前の光合成の最大光量子収率 (F_v/F_m) (Mini- PAM II, Walz) と，浸透調節の指標として浸透ポテンシャル (VAPRO 5520, Wescor) を測定した。測定の前日に十分根鉢に給水した。F_v/F_m を測定した枝を採取し，投影面積をスキャンした後 70 ˚C で 72 時間乾燥させ，投影面積あたりの乾燥重量 (LMA) を測定した後，窒素含量を分析した（NC22F, 住化分析センター）。

追肥の翌 5 月に処理個体を苗畑に植栽した。追肥を根鉢表面に施したため，植栽時にはそのほとんどが脱落した。植栽時と 7 月，10 月に樹高を測定し，伸長開始前の 4 月から 7 月と，7 月から 10 月のそれぞれの期間の相対成長速度 (RGR) を算出した。

4. 解析　各測定パラメータを目的変数，追肥処理を固定効果，個体位置（育苗時のコンテナの違いと，植栽時の場所の違い）をランダム効果とした一般化線形混合モデル (GLMM) を作成し，固定効果について尤度比検定



図–1.　スギコンテナ苗の 5 月と翌 4 月の苗高 (A, B) と地際直径 (C, D)。n.s. は処理区間で有意な差がなかったことを示す (Tukey, $p > 0.05$, n = 19–20)。

Fig.1 Height (A, B) and diameter (C, D) at May and next April *Cryptomeria japonica* container seedlings. n.s. indicate no significant differences among treatments (Tukey, $p > 0.05$, n = 19–20).

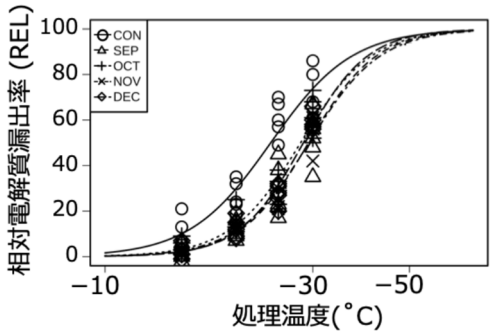
を行った (Rver. 4.3.1)。追肥処理の効果が有意な場合は，多重比較を行った。REL の LT (50) の算出では drc package の drm 関数でカーブフィットを行った。

III　結果と考察

1. 育苗中のコンテナ苗の成長　追肥処理前の 5 月の苗高と地際直径は処理間で有意差がなかった (図–1A, C)。5 月から翌 4 月までの苗高の RGR は処理間で有意差があり ($p = 0.005$)，9 月追肥区が対照区と 10 月追肥区に比べて高かったが，処理間差は小さく，翌 4 月の苗高は処理間で有意差がなかった (図–1B)。翌 4 月の地際直径 (図–1D) と 5 月から翌 4 月までの地際直径の RGR は処理間で有意差がなかった。本研究の追肥は，育苗期間中の成長に対してほとんど影響を及ぼしていなかった。これまでの報告(*8, 9*)と比べて，10 月以降の追肥で徒長が生じない点は同様の結果であったが，翌春までの肥大成長が促進されなかった点は異なった。

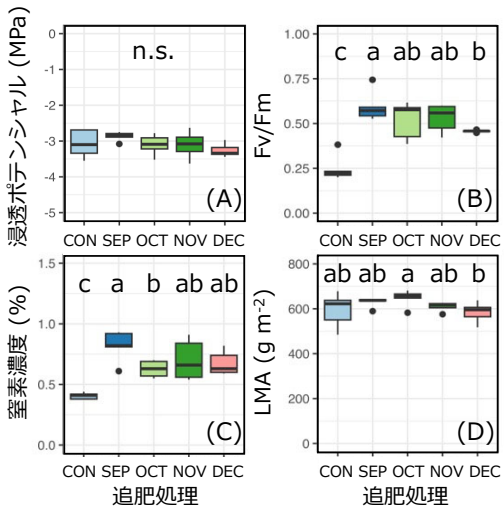
2. コンテナ苗の耐凍性　二次枝の−15 ˚C から−25 ˚C における REL は，対照区が最も高かった ($p < 0.001$，図–2)。追肥処理区間では有意な差がなかった。−30 ˚C での REL は，対照区が 9 月追肥区より高かった ($p = 0.013$)。LT(50) は，対照区が−24.0 ± 2.7 ˚C で，9 月から 12 月の追肥区が，−29.3 ± 3.9 ˚C，−28.1 ± 3.5 ˚C，−29.4 ± 4.1 ˚C，−28.5 ± 3.4 ˚C であった。追肥処理区の LT (50) は対照区に比べて低いことから，9 月から 12 月の追肥により翌 3 月の耐凍性が高くなることが示唆された。この結果は，窒素不足による耐凍性の低下(*6, 9*)を支持する結果であった。また，追肥処理区間で LT (50)に差がなかったことから，12 月の追肥でも 3 月の耐凍性に他の時期の追肥と差がないことが示された。

二次枝の浸透ポテンシャルは処理間で有意差がなく (−3.26 ± 0.09〜−2.87 ± 0.06 MPa)，追肥処理によらず浸透調節が十分なされていた (図–3A)。夜明け前の F_v/F_m は，処理間で有意差があり ($p < 0.001$)，対照区が他の追肥処理区に比べて大幅に低かった (0.25 ± 0.03，図–3B)。追肥処理区間では，9 月追肥区が 12 月より有意に高い値を示した。二次枝の窒素濃度は，処理間で有意差があり ($p < 0.001$)，F_v/F_m と同様に対照区で非常に低く (0.41% ± 0.01)，追肥処理区間では，9 月追肥区 (0.82% ± 0.06) が 10 月に比べて有意に高かった (図–3C)。LMA は，12 月追肥区が 10 月に比べて有意に低く ($p = 0.038$，図–3D)，投影面積あたりの窒素含量は，10 月と 12 月追肥区が 9 月に比べて有意に低かった ($p < 0.001$)。既報の針葉の窒素濃度は，0.45 から 4.43%の範囲で，平均値が 1.38%であった(*5*)。対照区の二次枝の窒素濃度はこの既報値の最低値と同等であり，窒素不足で低温と強光によるストレスを受けていることが示唆された。一方，追肥区の窒素濃度も最大で 0.82%で，既報値の平均値に比べて低い値であることから，本研究の追肥処理は過剰な窒素施肥ではないと判断できる。



図–2.　追肥時期の異なるスギコンテナ苗二次枝の 4 つの設定温度における 3 月の相対電解質漏出率 (REL)。曲線は，ロジスティック回帰モデルを使ってカーブフィットした結果を示す。

Fig.2 Electrolyte leakage from *Cryptomeria japonica* shoots frozen to four different temperatures in March.



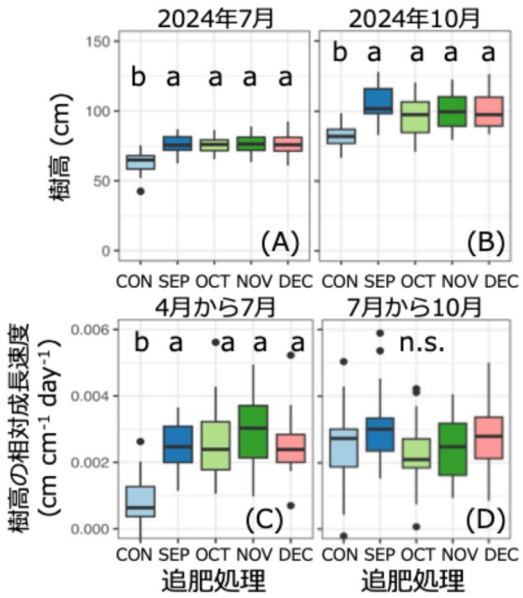
図–3.　追肥の翌 3 月のスギコンテナ苗二次枝の浸透ポテンシャル (A)，夜明け前の F_v/F_m (B)，窒素濃度 (C)，LMA (D)。異なるアルファベットは処理区間の有意差を示す (Tukey, $p < 0.05$, n = 5)。

Fig.3 Osmotic potential (A), predawn F_v/F_m (B), nitrogen concentration (C), and LMA (D) in shoots of *Cryptomeria japonica* container seedlings at March following fertilization. Different alphabets indicate significant differences among treatments (Tukey, $p < 0.05$, n = 5).

3．追肥の翌年の樹高成長　植栽後の 7 月と 10 月の樹高は，対照区より追肥処理区で有意に高かった（$p < 0.001$，図–4A, B）。樹高の RGR は，伸長開始から 7 月までは，対照区より追肥処理区で有意に高かったが（$p < 0.001$，図–4C），7 月から 10 月の期間では，処理間差がなかった（$p = 0.22$）。翌年の樹高成長への追肥の効果は，春から初夏にかけて顕著に生じることが示唆された。9 月から 12 月の追肥時期の違いによる追肥翌年の樹高成長への影響は見られなかった。先行研究(*9*)でも，8 月の追肥では，9 月から 11 月の追肥に比べて翌年 9 月までの樹高の RGR が低下したが，9 月から 11 月の追肥では差がなかったことから，本研究でも同様の結果が得られたと考えられる。

本研究の追肥量は，先行研究(*9*)の 2 倍の 12 g/L 相当に設定したが，12 月に追肥した場合でも，3 月の耐凍性への負の影響は確認できなかった。針葉樹では秋施肥により耐凍性が高まる報告例が多いが(*3, 4*)，樹種によっては過剰な追肥により耐凍性が低下する場合がある(*6*)。例えば、*Picea abies* の実生では，秋施肥量の違いにより針葉の窒素濃度が 1.0%の個体より 1.8%の個体で霜害の感受性が高まった(*2*)。本研究の二次枝の窒素濃度は最大でも 0.82%であり，本実験の追肥量が過剰な量ではなかったことが示唆された。今後，養分状態の良い苗で，追肥の量と時期が耐凍性に及ぼす影響を調べる必要がある。12 月の追肥では，9 月追肥区に比べて F_v/F_m が低く，二次枝の窒素濃度が低い傾向を示したことから，肥料切れした苗木への遅い時期の追肥は，葉の窒素濃度の増加が不十分で冬期に強光低温ストレスにさらされる可能性があることを示唆しており，今後検討が必要な課題と考える。

謝辞：本研究は（国研）森林研究・整備機構森林保険センターによる所内委託プロジェクト「気象害の発生プロセス解明に基づく気象害リスク評価手法の高度化」の支援を受けて行われた。



図–4.　スギコンテナ苗の追肥の翌年の 7 月と 10 月の樹高 (A, B) と，期間ごとの樹高の相対成長速度 (RGR) (C, D) (n = 19–20)。

Fig.4 Height at July and October (A, B), and RGR of height from April to July (C) and from July to October (D) of *Cryptomeria japonica* container seedlings (n = 19–20).

引用文献

(1) Duryea ML (1984) Nursery Cultural Practices: Impacts on Seedling Quality. In: Duryea ML, Landis TD, Perry CR (eds) Forestry Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings. Forestry Sciences, vol 11. Springer, Dordrecht

(2) Fløistad IS, Kohmann K (2004) Influence of nutrient supply on spring frost hardiness and time of bud break in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) seedlings. New For 27: 1–11

(3) Hawkins BJ, Davradou M, Pier D, and Shortt R (1995) Frost hardiness and winter photosynthesis of *Thuja plicata* and *Pseudotsuga menziesii* seedlings grown at three rates of nitrogen and phosphorus supply. Can J For Res 25: 18–28

(4) Islam MA, Apostol KG, Jacobs DF, Dumroese RK (2009) Fall fertilization of *Pinus resinosa* seedlings: nutrient uptake, cold hardiness, and morphological development. Ann For Sci 66: 704

(5) Osone Y, Hashimoto S, Kenzo T (2021) Verification of our empirical understanding of the physiology and ecology of two contrasting plantation species using a trait database. PLoS ONE 16(11): e0254599

(6) Smiley ET, Shirazi AM (2003) Fall fertilization and cold hardiness in landscape trees. J Arboriculture 29(6): 342–346

(7) Thalhammer A, Pagter M, Hincha DK, Zuther E (2020) Measuring Freezing Tolerance of Leaves and Rosettes: Electrolyte Leakage and Chlorophyll Fluorescence Assays. Hincha DK, Zuther E (eds.) Plant Cold Acclimation: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology, vol. 2156: 9–21

(8) 飛田博順・上村章・大平峰子・山野邉太郎・才木真太朗・香山雅純・原山尚徳 (2021) スギコンテナ苗の成長に及ぼす育苗時の追肥の影響. 関東森林研究 72(1): 53–56

(9) 飛田博順・原山尚徳・上村章・香山雅純・齋藤隆実・矢崎健一・奥田四郎 (2024) 秋施肥がスギコンテナ苗の耐凍性に及ぼす影響. 関東森林研究 75(1): 52–55

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

クマイチゴが繁茂したスギ大苗造林地における薬剤を利用した省力的な下刈り方法の検討

飯田玲奈[1]

[1]群馬県林業試験場

要旨：クマイチゴが繁茂したスギ大苗造林地において，クマイチゴを早期に衰退させるため，薬剤を利用した省力的な下刈り方法を検討した。塩素酸ナトリウム系及びフェノキシ酸系薬剤を用いて除草試験を行った結果，植付け 1 年目だけ下刈りをし，植付け 2 年目及び 3 年目は薬剤散布を行う方法でクマイチゴを早期に衰退させることができた。植栽したスギと雑草木との競合状態及びスギの樹高から，植付け 4 年目のスギは競合植物にほとんど被圧されていないと判断された。フェノキシ酸系薬剤はクマイチゴに対する薬効は高かったが，薬剤散布後のスギへの薬害及び薬効度の低い植物の繁茂に留意する必要があった。塩素酸ナトリウム系薬剤は，フェノキシ酸系薬剤よりクマイチゴに対する薬効はやや劣ったが，スギへの薬害は認められず植付け 4 年目の樹高はやや高かった。

キーワード：クマイチゴ，下刈り，薬剤による除草

Examination of the labor-saving method of weeding using herbicide in the large size Japanese cedar seedlings plantation where *Rubus crataegifolius* have overgrown

Reina IIDA[1]

[1] Gunma Prefectural Forestry Experiment Station

Abstract: To investigate the labor-saving weeding method that would quickly cause the decline of *Rubus crataegifolius* in the large size Japanese cedar seedlings plantation where *R. crataegifolius* was overgrown, we conducted the weeding experiments using sodium chlorate and phenoxy acid herbicide. As a result, it was possible to quickly cause the decline of *R. crataegifolius* by weeding only in the first year of planting and spraying the herbicide in the second year and the third year after planting. From the results of the competitive status between the Japanese cedar trees and vegetation as well as height growth of the Japanese cedar trees, it was found that the Japanese cedar trees four years after planting showed little suppression by competing vegetation. The phenoxy acid herbicide was effective against *R. crataegifolius*, but it was necessary to pay attention to the damage of the Japanese cedar trees caused by spraying the herbicide. The sodium chlorate herbicide was slightly less effective against *R. crataegifolius* than the phenoxy acid herbicide, but the damage to the Japanese cedar trees was not observed and the tree height of Japanese cedar trees was relatively high in the fourth year after planting.

Keywords: *Rubus crataegifolius*, weeding, weed control using herbicide

I　はじめに

クマイチゴ（*Rubus crataegifolius*）は，北海道から九州の温帯に自生し，山地の林縁，伐採跡地等にやや普通に見られる木本類である(*2*)。日本のキイチゴ属の中で最も大きく成長する種であり，地上茎は最大で 3 m を超える(*8*)。地上茎は成長すると太く丈夫で，鋭い鈎状のトゲがあるため，その群落は容易に入り込むことはできない(*8*)。また，クマイチゴは先駆的な陽光性のキイチゴであり，開放的な環境のもとでは地下分枝により旺盛にクローン成長を行い，密度の高い群落を形成する(*8*)。このため，皆伐後に数年間造林がされずクマイチゴが優占した土地においては，再造林後もクマイチゴが旺盛にクローン成長を続けることが予想され, 刈払いに労力を必要とする。下刈りの省力化手法として薬剤散布があるが(*3,6,7,9,10)*, 有用な除草効果を評価するためには，数種の除草剤を比較した試験の設定が必要となってくる(*1*)。そこで本研究では，クマイチゴが繁茂したスギ大苗造林地において，2 種類の除草剤を用いた薬剤散布試験を行い，クマイチゴを早期に衰退させ下刈り労力を軽減できる手法について検討した。

II　材料と方法

（受理日 2025 年 2 月 17 日）

1. 調査地及び薬剤による除草方法　調査地は群馬県高崎市倉渕町岩氷地内の造林地 0.47 ha とした（図-1）。現地は皆伐後 2 年経過しており，クマイチゴ及びクサギが優占していた。2021 年 4 月に刈払機による地拵えを行い，苗長 75 cm 上のスギ特号裸苗を ha あたり 1,700 本植栽した。植付け 1 年目の下刈りは，スギの被圧が確認された 10 月に行い，電動バリカンによる坪刈り，刈払機による筋刈りまたは全刈りを行った。植付け 2 年目及び 3 年目は下刈りを実施せず，薬剤散布区を設置し(表-1)，年 1 回薬剤散布を行った。デゾ区は，デゾレート AZ 粒剤（塩素酸ナトリウム系，有効成分:塩素酸ナトリウム，以下，塩素酸系薬剤）を用い，規定量上限である 10 a あたり 20 kg を背負式動力散粒機で土壌に全面均一散布した。アミン区は，ザイトロンアミン液剤（フェノキシ酸系，有効成分:トリクロピル，以下，フェノキシ酸系薬剤）を用い，規定量である 10 a あたり 350 ml を背負式動力噴霧機で雑草木に茎葉散布した。植付け 4 年目は下刈り及び薬剤散布は行わなかった。

2. 調査項目　薬剤による林床植生の抑制効果を調査するため，試験区全域を対象に，主な林床植生の種名，被度（表–2），薬効度（表–3，今野(*6*)参照）を目視観察し，平均的な植物高を測定した。調査時期は，植付け 1 年目の下刈り前（2021 年 9 月上旬～10 月上旬），植付け 2 年目の薬剤散布後（2022 年 7 月上旬～9 月上旬），植付け 3 年目の薬剤散布後(2023 年 6 月下旬)，植付け 4 年目(2024 年 10 月上旬）とした。植付け 2 年目及び 3 年目の薬剤散布後にスギへの薬害(変色等)について目視観察した。

植栽木の調査については，植付け 4 年目にスギと雑草木との競合状態を C1～C4 のカテゴリ(*11*)に C0（雑草木がスギの高さの 1/4 以下）を加えて調査した。また，植付け 1～4 年目の成長期末に樹高を計測し，各年の樹高に試験区間で差があるかを一元配置の分散分析で検定した。調査対象はデゾ区 30 個体，アミン区 60 個体とした。

薬剤の流出状況を調べるため，薬剤散布前後，第 1 降雨後，第 2 降雨後に造林地の中央に位置する沢から採水し(図–1)，渓流水中の塩素酸及びトリクロピルについて，含有試験を行った。採水地点は常時，水が流れ，デゾ区中心部から斜距離で約 75 m，アミン区中心部から斜距離で約 55 m 離れており，流路幅は 2.8 m である。塩素酸はイオンクロマトグラフ法により（株）群馬分析センターが分析し，トリクロピルは固相抽出–LC/MS 法により（株）環境技研が分析した。

III　結果と考察

1．各薬剤による林床植生の抑制効果及びスギへの薬害　植付け 2 年目の薬剤散布の結果，デゾ区，アミン区ともにクマイチゴ及びその他キイチゴ類に対して薬効度が高く，被度が+に低下した（表–4，5）。特にアミン区においてキイチゴ類への薬効が高く，植付け 3 年目には試験区内にキイチゴ類がほとんど見られなかった（表–5）。デゾ区は，植付け 3 年目の薬剤散布後において，キイチゴ類への薬効度が，植付け 2 年目よりも劣ったが（表–4)，これは薬剤の散布ムラ等が一因であると考えられた。植付け 4 年目のキイチゴ類の被度は両区で 1～2 となり（表–4，5），植物高が高い傾向であった（図–2，3）。これは斜面下部の薬剤散布をしていない箇所に生育していた群落高の高いキイチゴ類が地下分枝の再生によって試験区内に侵入したことによるものと考えられた。

植付け 2 年目，3 年目ともに薬効度が 0 または 1 と低かった植物種が見られ，デゾ区ではススキ，ムラサキシキブ，落葉低木類，アミン区ではササ類，ムラサキシキブ，シダ類が該当し（表–4，5），これらの植物種は植付け 4 年目の植物高が高い傾向であった（図–2，3）。雑草木の高さが薬剤散布者の身長を越すものに対して薬剤処理することは困難であり，残存したものは枯殺されることなくさらに大きくなることから(*3*)，植栽木の成長を阻害する雑草木が点在する場合は，部分的な刈払いまたは薬剤散布と刈払いとを併用した管理(*3,9*)を検討する必要がある。

スギへの薬害は，デゾ区ではほとんど確認されなかった。しかし，植栽木に誤って付着させた場合には，薬害が現れることがあるため(*10*)，散布時は注意する必要がある。アミン区は，植付け 2 年目は薬害がほとんど確認されなかったが，植付け 3 年目は本数の 1～2 割程度，梢端が褐変する薬害が認められた。これは一部のスギに薬剤が多くかかってしまったことによるものと考えられた。

2．スギと雑草木との競合状態　全ての試験区において，植付け 4 年目のスギは，競合状態 C2 以下が 90%以上を占め，スギの梢端部が雑草木に完全に覆われている状態（C4）は見られなかった（図–4）。このことから，植付けから 3 年間で下刈りは終了して良いと判断された。

アミン区は，競合状態 C0 の占める割合がデゾ区よりも高かった（図–4）。これはフェノキシ酸系薬剤が，キイチゴ類及びタケニグサに高い薬効を示し，これらの被度を低下させた結果，薬効が低くかつ植物高の低いササ類が代わりに優占したことによると考えられた（表–5，図–3）。デゾ区は競合状態 C0 の占める割合が低い傾向であったが，これは，ススキの被度が低下せずかつ植物高が高く推移したことによると考えられた（表–4，図–2）。

3．スギの樹高成長　スギの樹高は，植付け 4 年目にお

いて，デゾ区とアミン区との間に有意な差が認められ，デゾ区で高かった（図–5, 一元配置の分散分析, $p<0.01$）。アミン区は，植付け 3 年目の薬剤散布後に一部のスギに薬害が生じており，このことが樹高成長に影響した可能性がある。

4. 薬剤の流出状況　渓流水中の薬剤含有量は，全ての調査時点において，塩素酸は水道法第 4 条に基づく水質基準項目(*5*)の基準値（塩素酸 0.6 mg/ L 以下(*4*)）を下回り，トリクロピルは水質管理目標設定項目(*5*)15 農薬類の目標値（トリクロピル 0.006 mg/ L (*4*)）未満であった（表–6）。

Ⅳ　おわりに

クマイチゴが繁茂した造林地において，植付け 1 年目に刈払いを行い，植付け 2 年目及び 3 年目に塩素酸系またはフェノキシ酸系薬剤の散布を行うことで，クマイチゴを早期に衰退させることができた。本試験では，薬剤散布を連年行ったが，いずれの薬剤も散布 1 回目でキイチゴ類に対して薬効が認められたため，2 回目以降の薬剤散布の要否については，抑制したい植物種の被度を予め確認したうえで判断すれば良いと考えられる。フェノキシ酸系薬剤は，植栽木への薬害によって樹高成長に影響が出る可能性があることや，広葉雑草木に効果が高いことから，植生の単一化を誘導する可能性がある点に留意する必要がある。塩素酸系薬剤は，フェノキシ酸系薬剤と比較してキイチゴ類への薬効がやや劣ったが，スギの薬害が少なかったことから樹高成長は優れていた。

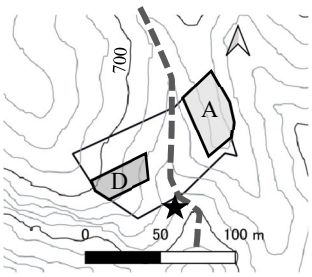
薬剤散布の作業時間（移動時間を除く）は，ha あたり 3 人作業でデゾ区が約 3.8 時間，アミン区が約 6.7 時間であった。薬剤費は，デゾ区が約 10 万円/ ha，アミン区が約 3 万 7 千円/ ha であり，人件費を含めるとアミン区の方が ha あたり約 3 万 8 千円安価であった。ただし，アミン区の薬剤散布には 300 L/ ha の水の運搬が必要であるため, 作業性等を考慮のうえ薬剤を選択する必要がある。

いずれの薬剤散布においても背負式動力散布機を用いたが，作業に伴う身体的負担が大きく，急傾斜地では転倒や熱中症などの危険性も考慮する必要がある。そのため，均一な薬剤散布，身体負荷の軽減，作業コストの低下などを考慮し，UAV による薬剤散布について，検証し実用化する必要がある。

謝辞：本研究は磯村産業（株）との共同研究により実施した。薬剤含有試験については涌井明氏から助言を賜った。調査には土屋啓介氏及び当場職員に協力いただいた。

引用文献

(1) 浅沼晟吾 (1991) 林地除草剤の利用技術の現状と問題点. 林業と薬剤 118: 13–20
(2) 林将之 (2014) 樹木の葉. 山と渓谷社, 東京, 760pp
(3) 伊藤昌樹・原弘・児玉重信 (1983) 除草剤を取り入れた下刈の体系化. 林業と薬剤 83: 11–15
(4) 環境省: 水質基準項目と基準値（51 項目）. https://www.env.go.jp/water/water_supply/kijun/kijunchi.html#02 (2022.5.20 参照)
(5) 環境省: 水道水質基準について. https://www.env.go.jp/water/water_supply/kijun/index.html (2022.5.20 参照)
(6) 今野敏雄 (1969) 林地除草剤の利用に関する研究–効果のあらわれかたと薬剤の選択について–. 林業と薬剤 28: 6–12
(7) 森林総合研究所東北支所 (2019) 低コスト再造林に役立つ"下刈り省略手法"アラカルト. 森林総合研究所東北支所, 岩手, 37pp
(8) 鈴木和次郎 (2021) キイチゴの世界. (株)日本林業調査会, 東京, 278pp
(9) 高木武夫・池本彰夫 (1974) 下刈期間短縮試験 (3) . 群馬県林業試験場報告 13: 25-31
(10) 豊岡洪・横山喜作 (1967) 造林地の下刈りに関する研究（第 7 報）. 林業と薬剤 23: 1–5
(11) 山川博美・重永英年・荒木眞岳・野宮治人 (2016) スギ植栽木の樹高成長に及ぼす期首サイズと周辺雑草木の影響. 日林誌 98: 241–246



図–1.　試験地

Fig. 1 Test site

注）A はアミン区，D はデゾ区，破線は沢，★は採水地を示す。

表–1.　試験区の概要

Table 1 Outline of test areas

試験区	面積 (ha)	標高 (m)	斜面方位	斜面傾斜	植栽年月	下刈り年月	薬剤散布年月 1回目	薬剤散布年月 2回目
ﾃﾞｿﾞ区	0.05	690	NE	32°	2021.4	2021.10	2022.6	2023.5
ｱﾐﾝ区	0.12	690	SW	30°	2021.4	2021.10	2022.5	2023.5

表–2.　被度

Table 2 Coverage

被度	植被率
5	75%超
4	50-75%
3	25-50%
2	10-25%
1	10%以下
＋	5%以下,個体数が極めて少ない

表–3.　薬効度

Table 3 Medicinal efficacy

指数	薬効
0	反応抑制効果がない
1	若干の変色のみで成長抑制効果は少ない
2	落葉し成長抑制効果がある
3	植物体の上部1/3以上が枯死する
4	地上部全体が枯死する

表–4.　主な林床植物の被度及び薬効度（デゾ区）

Table 4 Coverage and medicinal efficacy of major plants (Sodium chlorate strewed area)

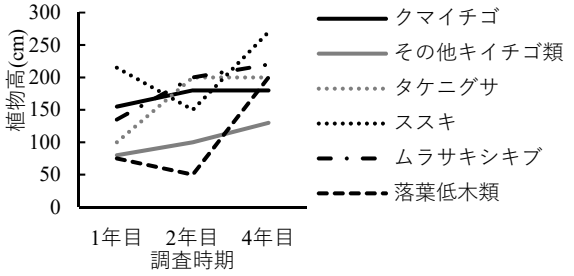
	植付け1年目 下刈り前 2021.9-10	植付け2年目 薬剤散布後 2022.7-9		植付け3年目 薬剤散布後 2023.6	植付け 4年目 2024.10
主な植物	被度	薬効度	被度	薬効度	被度
クマイチゴ	4	4	＋	1-4	2
その他キイチゴ類	3	4	＋	2-4	2
タケニグサ	2	1-2	3	2	1
ススキ	3	1-2	3	1	3
ムラサキシキブ	2	1	2	0-1	1
落葉低木類	1	0-2	1	0-1	2

表–5.　主な林床植物の被度及び薬効度（アミン区）

Table 5 Coverage and medicinal efficacy of major plants (Phenoxy acid liquid sprayed area)

	植付け1年目 下刈り前 2021.9-10	植付け2年目 薬剤散布後 2022.7-9		植付け3年目 薬剤散布後 2023.6	植付け 4年目 2024.10
主な植物	被度	薬効度	被度	薬効度	被度
クマイチゴ	5	4	＋	-	2
その他キイチゴ類	3	4	＋	-	1
タケニグサ	3	4	1	4	＋
ササ類	2	0	4	1	5
ムラサキシキブ	2	1-4	2	1-2	2
シダ類	＋	0-1	＋	0-1	1

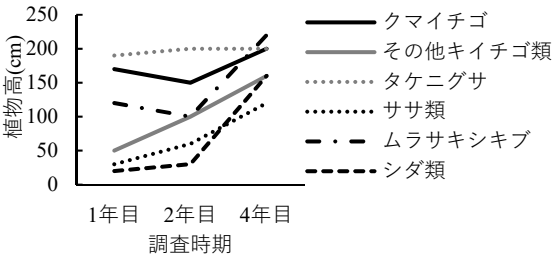
注）–は散布範囲内にほぼ確認されなかったことを示す。



図–2.　主な林床植物の高さ（デゾ区）

Fig. 2 Height of major plants (Sodium chlorate strewed area)

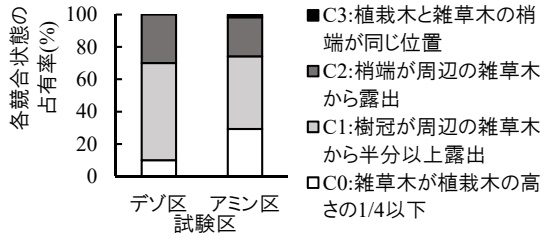
注）調査時期は植付け 1 年目，2 年目，4 年目を示す。



図–3.　主な林床植物の高さ（アミン区）

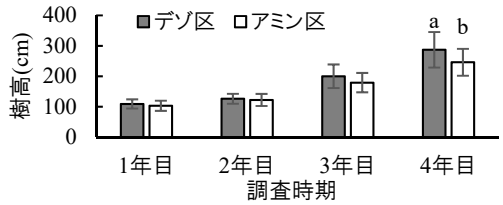
Fig. 3 Height of major plants (Phenoxy acid liquid sprayed area)

注）調査時期は植付け 1 年目，2 年目，4 年目を示す。



図–4.　植付け 4 年目におけるスギと雑草木との競合状態

Fig. 4 Competitive status between Japanese cedar trees and competitive plants in the fourth year after planting



図–5.　スギの樹高成長

Fig. 5 Height of Japanese cedar trees

注）調査時期は植付け 1 年目，2 年目，3 年目，4 年目を示す。エラーバーは標準偏差を示す。各時期において異なるアルファベット間は有意差があったことを示す。

表–6.　沢水中の薬剤含有量

Table 6 Herbicide content in stream water

a.塩素酸

散布前	散布1日後	第1降雨後	第2降雨後
2023.5.15	2023.5.16	2023.5.23	2023.5.31
0.06未満	0.06未満	0.06未満	0.06未満

b.トリクロピル

散布前	散布直後	散布1日後	第1降雨後	第2降雨後
2022.5.24	2022.5.24	2022.5.25	2022.5.27	2022.5.31
0.00005未満	0.00046	0.003	0.001	0.00016

注）単位 mg/L。結果の未満表示の数値は定量下限値を示す。塩素酸は植付け 3 年目，トリクロピルは植付け 2 年目の結果。

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

皆伐再造林地における獣害防止ネットの管理方法の確立

山田勝也[1]

[1]群馬県林業試験場

要旨：獣害防止ネットの防除効果を維持するには，点検や補修といった維持管理が必須である。維持管理にあたり，下草やつる類の管理が重要であると考えた。そこで，ネット沿いの下草を管理することで視認性を維持し，人が踏査できる道を設置することを目的に，除草剤を用いた方法を検証した。試験結果から，グリホサートカリウム塩液剤を年1回7～8月に散布することが，視認性の維持に有効であることが確認された。また，ジェネリック農薬との比較により，コスト削減の可能性も示された。

キーワード：獣害防止ネット，皆伐再造林地，除草剤，下草管理

Establishment of management methods for deer prevention nets in clear-cut reforestation areas

Katsuya YAMADA[1]

[1]Gunma Prefecture Forestry Experiment Station

Abstract: To maintain the effectiveness of deer prevention nets, regular inspections and repairs are essential. The weeding management of undergrowth and vine plants is considered important for this maintenance. Therefore, this study examined the use of herbicides to manage undergrowth along the nets, aiming to maintain visibility and create walkable paths. The test results confirmed that spraying glyphosate potassium salt once a year in July to August is effective in maintaining visibility. Additionally, a comparison with generic pesticides indicated the cost reduction.

Keywords: deer prevention net, clear-cut reforestation area, herbicide, undergrowth management

I　はじめに

皆伐再造林地におけるシカなどの獣害対策として，獣害防止ネット（以下，ネット）が広く使用されている。ネットに破損が生じると獣類が侵入し，森林被害が発生する恐れがあることから，ネットの防除効果を維持するための点検や補修といった維持管理は必須であり，管理に要するコストは重要な課題である(*6*)。ネットの点検や踏査を効率的に行うために刈払いの必要性が指摘(*5*)されている一方，ネットの破損要因として下刈に伴う切断が約4割を占める報告(*7*)があるなど，効率的にネットを管理するためには，下草の適切な管理方法が必要である。

本研究では，ネットの点検管理の課題解決にあたり，ネット沿いの下草やつる類の管理が重要であると考え，ネットを切断する恐れのない除草剤を用いた方法を検証した。ネット沿いの下草を管理することで視認性を維持しつつ，点検や補修を行うために人が踏査できる道（以下，管理道）を設置することにより，効率的に点検し，獣類が侵入した場合でも早期に発見し補修できる技術とすることを目指した。

II　材料と方法

1．調査地　倉渕試験地（群馬県高崎市，標高約700 m）と長野原試験地（群馬県吾妻郡長野原町，標高約930 m）の2箇所で行った。両試験地には，2021年にステンレス線入りポリエチレンネット（ソリッドン，㈱ヤマイチネット）を造林地外周に設置した。

2．調査項目　除草剤ごとの散布によるネットの視認性の経過及びコストについて比較し，ネットの管理に適する除草剤を検討するための試験を行った。

除草剤は，塩素酸塩粒剤（以下，塩粒剤。デブレートAZ粒剤，㈱カーリット）とグリホサートカリウム塩液剤（以下，カリウム塩液剤。ラウンドアップマックスロード，日産化学㈱）を使用した。散布範囲は，ネット沿いの内側から幅約1.8 m（ネット外側の約0.3 mを含む）とし，各試験地のおよそ半周ずつ（対照区を除く）散布した。塩粒剤は手撒きで15 kg/10 a，カリウム塩液剤は50倍希釈とし，手動噴霧器または動力噴霧器により50 L/10 aで散布した。除草剤の散布は，初年度の2021年は年1回夏期（7～8月）の散布とし，2022年は試験地及び除草剤ごとに視認性の状況から年1回以上の散布を行った上

（受理日2024年12月11日）

で，2023 年夏期までの 2 年間のネットの視認性の経過を調査した。2023 年は夏期まで無処理とし，前年の散布による抑制効果を調査した。

ネットの視認性については，獣類の潜り込みの有無やそれに伴うアンカーの抜けを点検するため，地際まで視認できることが必要である。そこで，各試験地において除草剤ごとに植生や傾斜などの環境が異なる調査地点を 5 か所ずつ設け，ネット沿いの地際に 50 cm 四方の方形枠を垂直に立てて設置し，方形枠からネット内側に 1 m の地点からネットの視認性を定点調査した。方形枠は 10 cm 四方の 25 ブロックに区分けし，すべてのブロックでネットが視認できる状況を 100%，下草に覆われて全く視認できない状況を 0%として記録した（図-1）。

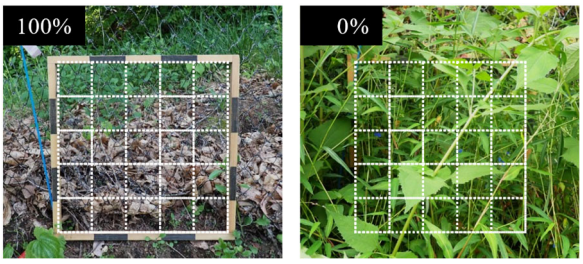


図-1.　ネットの視認性の記録方法

Fig.1 Method for recording nets visibility

次に，薬剤費がより安価なジェネリック農薬との効果を比較した。倉渕及び長野原試験地において，植生の状況が同等になるよう散布範囲を再設定し，調査地点も同様に除草剤ごとに 5 か所ずつ設けた。試験は，カリウム塩液剤と，同じく有効成分グリホサートのジェネリック農薬であるグリホサートイソプロピルアミン塩液剤（以下，アミン塩液剤。サンフーロン，大成農材㈱）の 2 剤について，2023 年夏期から 2024 年夏期の 1 年間において，希釈倍率や散布方法を同条件のもとネットの視認性を定点記録した。

散布にかかるコストは，年間あたりの 100 m あたりの薬剤費及び人件費を積算した。人工は，散布に要した時間（薬剤の準備を含む）を現地計測し，平均から算出した。人件費には，群馬県基礎単価表（2024.10）の普通作業員 23,700 円/日を使用した。また，下刈コストについても令和 6 年度群馬県民有林造林補助事業予定標準単価(*3*)から除草剤と同じ面積分を算出し，比較した。

また，塩粒剤とカリウム塩液剤の比較試験により，ネットの管理に適すると判断された除草剤について，植生ごとの薬剤効果を判定した。薬剤効果は，表-1 の効果判定基準(*4*)に従い，効果が一定でない場合は分数表記で分母に範囲を，分子には最頻値を記録した（例：2/1-3）。

表-1.　薬剤効果の効果判定基準

Table 1 Criteria for determining herbicide effectiveness

記号	薬剤効果	
	反応	抑制
0	全然反応のないもの	
1	葉斑，黄変，白変や葉先又は芽のちぢれ等が認められる	同下が，1/2以下のもの
2	上記の反応が進み褐変，奇形，委凋等が認められる	対象植生の高さの層が，その1/2程度に抑制されたもの
3	大部分の葉が落葉し，又は植物体の大部分が変色委凋甚しく枯死寸前のもの	同上が，1/2以上のもの
4	地上部の枯死を指す	

III　結果と考察

1．塩液剤とカリウム塩液剤の比較　塩粒剤による視認性の経過を図-2 に示す。倉渕試験地では，2022 年春期の視認性の低さから一度散布したが，夏期に再度視認性が低下したため年 2 回の散布を必要とした。長野原試験地は，比較のため前年同様年 1 回夏期の散布としたが，安定した視認性を維持することは困難であった。両試験地とも，視認性のばらつきが大きく，十分な視認性を確保するには年 2 回以上の散布が必要であることが分かった。また，2023 年の夏期に視認性が急激に低下したことから，散布翌年の抑制効果は薄いと判断された。

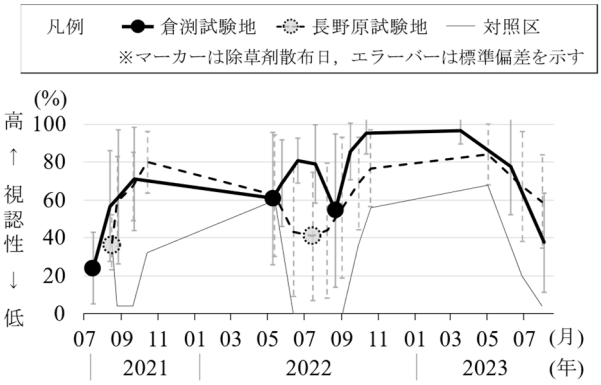


図-2.　塩粒剤処理による視認性の経過

Fig.2 Changes in visibility due to chlorate granules treatment

次に，カリウム塩液剤の結果を図-3 に示す。2021 年夏期の散布後，両試験地とも散布後翌夏まで 90%以上の高い視認性を維持できることが確認された。また，2022 年及び 2023 年においても，両試験地とも 2022 年の年 1 回夏期の散布により，2021 年と同様の高い視認性を安定して維持できた。この結果から，カリウム塩液剤は，年 1 回 7～8 月の散布で視認性を維持できることが明らかとなった。

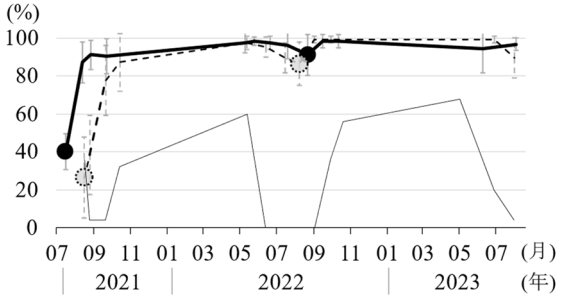


図-3. カリウム塩液剤処理による視認性の経過。凡例は図-1 と同様。

Fig.3 Changes in visibility due to glyphosate potassium salt treatment. Legend as in Fig.1.

2. ジェネリック農薬との比較 2023 年夏期から年 1 回散布によるネットの視認性の経過を図-4，5 に示す。

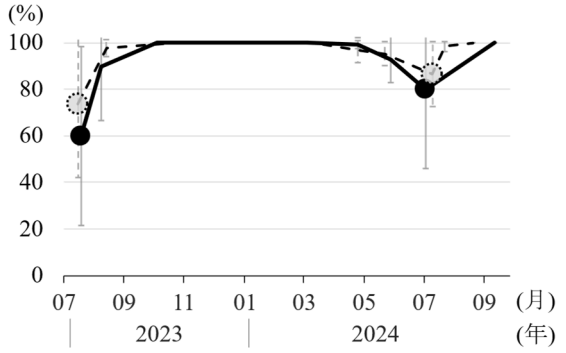


図-4. カリウム塩液剤処理による視認性の経過。凡例は図-1 と同様。

Fig.4 Changes in visibility due to glyphosate potassium salt treatment. Legend as in Fig.1.

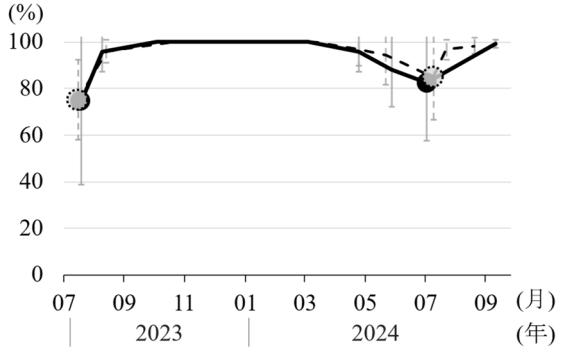


図-5. アミン塩液剤処理による視認性の経過。凡例は図-1 と同様。

Fig.5 Changes in visibility due to glyphosate isopropylamine salt treatment. Legend as in Fig.1.

結果，2 剤ともに年 1 回の散布で同等の高い視認性を維持できることが確認された。散布後の経過も同様の傾向であり，散布後は翌年の春期までは高い視認性が維持された。初夏以降，アシボソなどが繁茂し，一時的にネットの視認性が大きく低下した地点もあったが，夏期の年 1 回散布により 2 剤ともネット沿いの管理道を維持することができた。

3. 除草剤の散布コスト 散布コストを表-2 に示す。比較すると，カリウム塩液剤及びアミン塩液剤は塩粒剤の 1/2 以下のコストとなった。塩粒剤は，散布の人件費では優位だが，薬剤費に加え，散布が年 2 回必要であることからコストが高くなった。カリウム塩液剤とアミン塩液剤を比較すると，人件費が同等であることから，薬剤費が安価であるアミン塩液剤が 100 m あたり 160 円ほどコストを削減できることが分かった。

また，ネット沿いは皆伐地と条件が異なるため，造林補助事業予定標準単価を基に算出した本研究におけるネット管理のための下刈コストは参考値であるが，カリウム塩液剤及びアミン塩液剤による管理は年 1 回の下刈よりも安価に実施できる可能性が示唆された。

表-2. 除草剤散布コスト（100 m あたり）

Table 2 Herbicide application cost (per 100 m)

除草剤	薬剤使用量	薬剤費	人件費（人工）	散布コスト	備考
塩素酸塩粒剤	3.6 kg/1.8 a	1,685円	948円 (0.04)	5,266円	年2回
グリホサートカリウム塩液剤	180 ml/1.8 a（希釈後9 L）	442円	1,659円 (0.07)	2,101円	年1回
グリホサートイソプロピルアミン塩液剤	180 ml/1.8 a（希釈後9 L）	282円	1,659円 (0.07)	1,941円	年1回
（参考）下刈	1.8 a（1.8 m×100 m）あたり			3,348円	年1回

4. 除草剤の比較結果 散布による効果や持続性，コストの結果から，除草剤によるネットの管理にはカリウム塩液剤またはアミン塩液剤が適すると判断した。

なお，コストの比較ではアミン塩液剤がより安価ではあるが，アミン塩液剤が散布後 6 時間以内の降雨により効果が劣る場合があるのに対し，カリウム塩液剤は散布後 1 時間経過すれば降雨があっても効果を発揮するといった違いがある点を補足しておく。

5. 植生ごとの薬剤効果 カリウム塩液剤について，散布後約 1 ヵ月時点（倉渕試験地 2023 年 9 月 7 日，長野原試験地 2023 年 9 月 12 日）における薬剤効果を表-3,

4 に示す。両試験地とも植生に対する薬剤効果は同様の傾向となり，単子葉類，双子葉類ともにススキを除く草本類及びつる類で高い反応・抑制効果が確認された。

木本類及び一部反応や抑制が低い株については，葉の萎凋や落葉により視認性は大幅に改善された。

ササ類及びススキに対しては，薬剤効果のばらつきが大きく，特にササ類は反応が薄い株も散見された。今回の試験地では視認性及び管理道に影響しなかったが，ササ類がネット沿いに広く占有する造林地では，複合的な管理や別の除草剤の検討を視野に入れる必要がある。

また，地拵えから時間が経過し，木質化が進んだ木本類やつる類及び大型化したササ類やススキなどに対しては薬剤効果が低下することを確認している（山田，未発表）。そのため，ネット設置から 1 年以内に管理を開始することが重要となる。

表-3. 倉渕試験地の薬剤効果

Table 3 Herbicide effectiveness at Kurabuchi test site

植生		主な種類	効果判定 反応	効果判定 抑制
単子葉類	ササ類		1 1-2	2 0-3
単子葉類	草本類	アシボソ	4	2
単子葉類	草本類	ススキ	2 1-3	1 0-2
双子葉類	草本類	タケニグサ, メナモミ ヒメムカシヨモギ	3 3-4	3 1-3
双子葉類	木本類	クマイチゴ, タマアジサイ, ニガイチゴ, ムラサキシキブ	3 2-4	2 1-3
つる類		フジ, サルトリイバラ, ヘクソカズラ, アカネ	3 2-4	3 2-3
シダ類		ワラビ	2 1-3	1

表-4. 長野原試験地の薬剤効果

Table 4 Herbicide effectiveness at Naganohara test site

植生		主な種類	効果判定 反応	効果判定 抑制
単子葉類	ササ類		2 1-3	2 0-3
単子葉類	草本類	チヂミザサ, アシボソ	4	2 2-3
単子葉類	草本類	ススキ	2 2-3	1 0-2
双子葉類	草本類	タケニグサ, ウド, イタドリ, キツリフネ, アオミズ	3 3-4	3 1-3
双子葉類	木本類	クマイチゴ, ガマズミ, クサギ, タラノキ	3 2-4	2 1-3
つる類		ウチワドコロ, ボタンヅル, クマヤナギ, マタタビ	3 2-4	3 2-3
シダ類		ゼンマイ	2 2-3	2

IV おわりに

本研究により，ネット沿いの内側から幅約 1.8 m の範囲に 50 倍希釈のグリホサートカリウム塩液剤またはグリホサートイソプロピルアミン塩液剤を年 1 回 7～8 月に散布することで，長期的にネットの視認性を維持し，管理道を設置する管理方法が示された。この方法は，下刈によるネットの切断の課題を解消するだけでなく，コストも削減できるものである。散布距離は，希釈後 10 L あたり約 110 m となる。注意点としては，2 剤とも非選択性のため，散布時に苗木に付着すると薬害が生じること，植生が衰退し地表が露出するため，急傾斜地では踏査時に滑りやすくなることが挙げられる。薬剤の環境影響や残留性については，農薬抄録(*2*)を参考されたい。

近年では，人力の踏査による点検だけでなく，ドローンの自動飛行による管理方法(*1*)も検証されており，ネットの視認性を維持することの重要性が高まっている。本研究が，ネットの効率的な維持管理に寄与することに期待する。

謝辞：本研究は，倉渕試験地の試験にあたり磯村産業㈱との共同研究により実施した。試験にあたっては，当場職員にご協力をいただいた。厚く御礼申し上げる。

引用文献

(1) 荒井亮一・三浦晃 (2021) ドローンの自動飛行による防鹿柵管理手法の検証. 令和 2 年度森林・林業技術等交流発表集 64: 37-40

(2) 独立行政法人農林水産消費安全技術センター: 農薬抄録及び評価書 グリホサート農薬抄録. https://www.acis.famic.go.jp/syouroku/glyphosate/index.htm (2024.11.8 参照)

(3) 群馬県環境森林部森林局林政課: 森林整備への支援『造林補助制度』. https://www.pref.gunma.jp/page/9008.html (2024.10.17 参照)

(4) 星沢正男 (1963) 国有林における林地除草剤の導入試験について. 林業と薬剤 6: 5-8

(5) 菊地朋子 (2022) シカ害防護柵の維持管理について～防護柵点検簿の分析～. 令和 3 年度森林・林業技術等交流発表集 65: 31-33

(6) 日本林業技術協会 (2022) 令和 3 年度皆伐再造林促進に向けたシカ被害対策検討事業報告書. 林野庁, 39pp

(7) 三枝道生 (2023) 林内に設置された侵入防止柵の管理技術の検討(2). 岡山県農林水産総合センター森林研究所研究報告 38: 30-36

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

関東育種基本区のマツノザイセンチュウ抵抗性クロマツの着花量および早晩性

大平峰子[1]・木村恵[2,1]

[1]森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター・[2]秋田県立大学

要旨：マツノザイセンチュウ抵抗性クロマツで構成された採種園から採れる種子の生産量を向上するため，関東育種基本区の抵抗性クロマツの着花量および開花の早晩性を評価した。着花量を 2021 年から 2024 年にかけて 6 段階で指数評価した。早晩性については，2022 年から 2024 年の開花期に時系列で開花区分を 4 段階で指数評価した。着花量および早晩性ともに大きなクローン間差が認められ，観察期間中全く雌花あるいは雄花を着けない 3 クローンがある一方，毎年多量の雄花を着けるクローンもあった。また，最も開花が早いクローンと遅いクローンでは開花期が 7 日程度異なったが，自然交配は可能であると考えられた。これらの形質情報は，採種園の設計や改良だけでなく，次世代の抵抗性クロマツを開発するための交配計画にも活用できると考える。

キーワード：着花性，開花フェノロジー，採種園，マツ材線虫病

Flower production and floral phenology of Japanese black pine resistant to pine wood nematode in Kanto breeding region

Mineko OHIRA[1], Megumi KIMURA[2,1]

[1] Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute; [2]Akita Prefectural University

Abstract: In order to improve the production of seeds collected from seed orchards of Japanese black pine (*Pinus thunbergii*) resistant to pine wood nematode, we evaluated the male and female flower production and floral phenology of resistant Japanese black pine in Kanto breeding region. The amount of flowering on the clones was rated on a 6-point index scale from 2021 to 2024, and the floral phenology of each clone was evaluated on a 4-point index scale from 2022 to 2024. Large inter-clonal differences were observed in both flower production and floral phenology. Three clones produced no female or male flowers during the observation period, while others produced large quantities of male flowers each year. The earliest and latest flowering clones were 7 days apart in flowering time, but it was considered that natural mating was possible. These results could be used not only to design and improve seed orchards, but also in breeding programs to develop the next generation of resistant Japanese black pine.

Keywords: flower production, floral phenology, seed orchard, pine wilt disease

I　はじめに

マツ材線虫病はマツノザイセンチュウ（*Bursaphelenchus xylophilus*）によって引き起こされる病害である。この病害による 2022 年度の国内での被害材積は 24.9 万 m^3 であり，1979 年度のピーク時の 10 分の 1 程度と減少しているが，依然として日本最大の森林病虫害被害であり，継続的な対策が必要である（*5*）。林木育種センターでは，マツ材線虫病に対する育種的対策として，本病に対して抵抗性の高い品種の開発を進めており，関東育種基本区では 2023 年度までにマツノザイセンチュウ抵抗性クロマツ（*Pinus thunbergii*）（以下，抵抗性クロマツとする）を 32 クローン開発している（*4*）。

開発された抵抗性クロマツはつぎ木によって増殖され，一般造林用の種子を生産する採種園用に供給されている。採種園では抵抗性だけではなく，種子生産性に関する形質として雌雄花の着生量や開花の早晩性が重要である。着花量については，西南日本の抵抗性クロマツで年次間の変動が調査されており，環境条件や着花の周期性にも影響されるが，クローンの遺伝的特性にも影響を受けること，着花量が少ないクローンがあることが指摘されている（*7*）。開花の早晩性については，採種園を構成するクローンの開花期間が一致することで，種子生産性が高くなることが報告されている（*1*）。抵抗性クローンの着花量や早晩性を総合的に評価できれば，採種園の種子生産性を向上させることができると考えられる。

そこで本研究は，関東育種基本区の抵抗性クロマツを対象に複数年にわたる調査を行い，クローンごとに雌雄花の着生量および開花の早晩性について評価することを目的とした。

（受理日 2024 年 12 月 2 日）

II 材料と方法

1. 材料 材料として，林木育種センター（茨城県日立市）構内の試験園に植栽した抵抗性クロマツを使用した。この試験園には，抵抗性クロマツが開発され次第つぎ木苗を 5 m × 2.5 m 間隔でクローンあたり 3〜12 本植栽している。最も早く開発されたクローンを 2011 年 7 月，最も遅く開発されたクローンを 2024 年 4 月に植栽した。樹高を制限するために高さ約 1.6〜1.8 m で断幹し，樹冠幅を制限するために 2022 年春までは毎年枝を剪定していた。剪定により着花が制限されると考え，2022 年 12 月から植栽木を毎年 1/3 ずつ（1 クローン 6 本の場合 2 本）順に剪定した。植栽して間もないクローンは樹体のサイズが小さいため正確な着花量の評価が困難であると考え，植栽して 3 年以上経過した個体を着花量の評価の対象とした。なお，関東育種基本区の抵抗性クロマツ 27 クローンのほか，同じ試験園に植栽している東北，関西および九州育種基本区の抵抗性クロマツ（それぞれ 3, 6 および 2 クローン）も併せて調査した。

2. 調査方法 着花量については，2021 年から 2024 年にかけて，個体ごとの開花期の雌雄花の着生量を目視で調査し，6 段階で指数評価した（表–1）。また，早晩性については，斎藤らの報告（*6*）を参考に雌雄花の開花区分を 4 段階で指数評価した（表–2）。開花区分の調査を 2022 年には 4 月 20 日，25 日，28 日および 5 月 2 日，2023 年には 4 月 12 日および 20 日，2024 年には 4 月 15 日，17 日，19 日，22 日，24 日，26 日および 30 日に行った。

表–1. 着花量の指数評価の基準

Table 1 Criteria for index evaluation of flowering production

指数	着生量
0	全くなし
1	1 つ以上着生,
2	樹冠の一部に着生
3	樹冠の 1/4~1/2 に着生
4	樹冠の半分以上に着生
5	樹冠の半分以上に着生，かつシュートあたりに高密度で着生

3. 解析方法 着花量，早晩性に対する抵抗性クロマツの影響を評価するため，順序ロジスティック回帰による分析を行った。目的変数が雌雄花の着生量の場合，説明変数はクローン，観察した年次および前年の剪定の有無とした。なお，着生量の解析では前年に剪定を行った波方 37 の 2021 年の調査結果を切片として用いた。波方 37 は，1978〜1985 年に行われたマツノザイセンチュウ抵抗性育種事業で開発された抵抗性クロマツであり，過去の調査から雌雄花の着生量が 5 段階のうちそれぞれ 3 と評価されている（*2*）。目的変数が雌雄花の早晩性の場合，説明変数はクローンおよび調査年月日とした。なお，早晩性の解析では，波方 37 の 2022 年 4 月 20 日調査結果を切片として用いた。波方 37 の早晩性は，雌花で 5 段階のうち 3，雄花で 5 段階のうち 4（やや遅い）と評価されている（*2*）。解析は R version 4.4.1（*3*）の環境下で行い，順序ロジスティック回帰の分析では polr 関数, msummary 関数を用いた。

表–2. 開花区分の指数評価の基準

Table 2 Criteria for index evaluation of flowering progress

雌雄花別	指数	開花区分	区分内容
雌花	1	未開花	雌花が保護鱗片に覆われている
	2	開花開始	保護鱗片を破り、雌花の一部が外部に見える
	3	開花盛期	雌花の半分以上〜全体が外部に見える
	4	開花終了	種鱗が肥厚し、鱗片の隙間が無くなり包鱗が外部から見えなくなる
雄花	1	未開花	雄花から花粉が飛散していない
	2	開花開始	花粉が飛散し始めるが、飛散していない雄花もある
	3	開花盛期	ほとんどの雄花から花粉が飛散している
	4	開花終了	花粉が飛散し終わり、ほとんど花粉が飛散しない

III 結果

着花量の解析結果を表–3 に示した。切片に対し雌雄花ともに有意に異なるクローンおよび年次があった（順序ロジスティック解析，それぞれ $p < 0.05$）。また，調査の前年に剪定をしなかった採種木は，剪定した採種木より有意に多く雌雄花が着生した（順序ロジスティック解析，それぞれ $p < 0.01$）。雌花の着生量の係数が高いクローンとその係数は, 高い順で小高 203 (3.37), いわき 27 (2.42) および富浦 7（2.24）であった。雌花の着生量の少ないクローンとその係数は，低い順で大須賀 12（-17.79），大須賀 23（-3.70）および岡崎 1（-3.66）であり，大須賀 12 では全ての調査年で雌花が着生しなかった。また，関西育種基本区の網野 31 および浜田 12 でも，調査期間中雌花が着生しなかった。雄花の着生量の係数が高いクローンとその係数は，高い順で小高 203（18.47），富浦 7 (4.36) および岡崎 34（2.16）であり，小高 203 は全ての調査年で着花指数が 5，富浦 7 は 4 以上であった。雄花の着生

量の係数が低いクローンとその係数は，低い順で岡崎 10（-22.50），岡崎 1（-22.07），岡崎 35（-6.17）および田原 34（-6.17）であり，岡崎 10 および岡崎 1 は 4 年間の観察中に一度も雄花が着生しなかった。

開花の早晩性の解析結果を表–3 に示した。切片とした波方 37 に対して，雌雄花の開花区分の指数が有意に異なるクローンがあった（順序ロジスティック回帰分析，$p < 0.05$）。雌花の早晩性の係数が高いクローンとその係数は，高い順に田原 1（3.18），小高 203（3.11）および小高 37（2.34）であった。雌花の係数が低いクローンとその係数は，低い順に白子 1（-4.67），岡崎 22（-3.58）および大須賀 31（-3.21）であった。一方，雄花の早晩性の係数が高いクローンとその係数は，高い順に田原 1（5.90），岡崎 34（5.20）および小高 203（5.19）であった。雄花の早晩性の係数が低いクローンとその係数は，低い順に白子 1（-0.15），大須賀 12（0.72）および富浦 7（1.53）であった。推定された雌雄花の早晩性の係数と 2024 年の開花の推移を表–4 に示した。係数が最も高く開花が早いと評価された田原 1 は，雌花の開花期間が 4/15～4/24，雄花の開花期間は 4/15～4/26 であった。一方，係数が最も低く開花が遅いと評価された白子 1 の開花期間は，雌雄花ともに 4/22 以降であった。両者の間には，雌雄花の開花開始日で 7 日間のずれがあったが，4/22～4/24 の間には両者ともに雌花が受粉可能で，かつ花粉が飛散していた。また，田原 1 と白子 1 以外のクローンでは，4/22～4/26 にかけて全てのクローンの雌花が受粉可能な状態にあたり，同時に全てのクローンの花粉が飛散していた。

VI　考察

順序ロジスティック分析の結果により，関東育種基本区の抵抗性クロマツの着花量には，雌雄花ともにクローン間差があることが示された（表–3）。多くの林業対象樹種において着花量にはクローン間で変動があることが報告されており（*1*），本研究でもこれを支持する結果が得られた。調査した 27 クローンのうち，4 年間の調査期間中全く雌花あるいは雌花の着生がなかったものが 3 クローンみられた。採種園の種子生産性は，採種園を構成するクローンの着花量に左右される。具体的には，雌花の着生量は直接種子生産量に，雄花の着生量は種子の充実率や球果の結果率に影響する。今回得られたクローンの評価結果から，着花が少ないクローンについては着花促進処理を行う，あるいは着花が多いクローンと植え替えることで採種園全体の種子生産を向上することができると考える。また，着花量や早晩性を育種対象形質と捉えることにより，種子生産性および抵抗性が高い次世代抵抗性クロマツの開発が可能になると考える。

関東育種基本区の抵抗性クロマツの開花の早晩性には，クローン間差があることが示された（表–3）。戸田ら（7）はクロマツの開花早晩性にクローン間の差があることを報告しており，本研究でもこれを支持する結果が示された。最も開花が早いと評価された田原 1 と，最も開花が遅いと評価されたのは白子 1 の間には，雌花の開花開始日で 7 日間のずれがあるが，開花期間がそれ以上に長いため，自然交配が可能であると考えられる。田原 1 と白子 1 以外のクローンでは，4/22～4/26 にかけて全てのクローンの雌花が受粉可能な状態であり，かつ全てのクローンの花粉が飛散している状態であったため，少なくともこの年には早晩性を評価した 27 クローンについては，採種園での自然交配ができないほど早晩性が異なるクローンはないか，わずかであると考えられた。ただし，年によって開花期間がより長くなる場合があるため，開花が早いまたは遅いクローンについては，開花期間が他のクローンと一致するのかを継続して観察する必要がある。

今回，関東育種基本区の抵抗性クロマツ 32 クローンのうち 27 クローンの着花量および開花の早晩性を評価したが，植栽して間もないクローンを除外したため，今後これらのクローンの評価を行う必要がある。また，今回は樹高や樹冠幅を制限した試験園で調査を行ったため，より樹高が高い採種園に比べると，着花量を過小評価している可能性がある。そのため，今後は採種園での評価を併せて行う必要がある。

引用文献

(1) Funda T, El-Kassaby YA (2012) Seed orchard genetics. CAB Reviews 7 (13): 1–23

(2) 九州地区林業試験研究機関連絡協議会 (1999) ヒノキ精英樹・抵抗性マツ特性表. 九州地区林業試験研究機関連絡協議会, 58pp

(3) R Core Team (2024) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

(4) 林木育種センター: 林木育種センター年報 令和 6 年報. https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/issue/nenpou/2024/documents/zentaiban.pdf (2024.11.28 参照)

(5) 林野庁: 令和 5 年度森林・林業白書. https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r5hakusyo/index.html (2024.9.12 参照)

(6) 斎藤幹夫・山本千秋・荻原訓・河野耕蔵・下平勝三 (1979) クロマツ雌球花の開花と受粉の適期. 林業試験場研究報告 302: 79–96

(7) 戸田忠雄・田島正啓・西村慶二・竹内寛興 (1993) 九州におけるマツノザイセンチュウ抵抗性育種–抵抗性クローンの選抜後の研究経過–. 林木育種センター研究報告 11: 37–87

表–3. 抵抗性クロマツの雌花・雄花着生量および早晩性の順序ロジスティック回帰の分析結果

Table 3 Results of ordinal logistic regression of female and male flower production and flowering phenology in resistant Japanese black pine

要因	育種基本区	雌花着生量[1]	P値[3]	雄花着生量[1]	P値[3]	雌花早晩性[2]	P値[3]	雄花早晩性[2]	P値[3]
いわき27	関東	2.42	**	−2.32	**	1.40		2.09	**
内原5	関東	−1.30		−0.66		−0.30		4.34	***
大須賀5	関東	0.04		−2.46	**	1.23		3.38	***
大須賀6	関東	−0.21		−3.53	***	1.32		3.26	***
大須賀12	関東	−17.79	***	−3.55	***			0.72	
大須賀15	関東	0.00		−2.22	**	1.10		3.45	***
大須賀23	関東	−3.70	***	−2.90	***	0.96		4.52	***
大須賀31	関東	−2.82	**	−4.26	***	−3.21	***	3.85	***
岡崎1	関東	−3.66	***	−22.07	***	1.11			
岡崎10	関東	−1.38		−22.50	***	−0.51			
岡崎16	関東	1.62	*	−3.84	***	0.18		2.69	***
岡崎22	関東	−1.45		−1.29		−3.58	***	1.93	*
岡崎25	関東	0.21		−1.12		−1.19		2.45	***
岡崎34	関東	−1.01		2.16	**	1.71		5.20	***
岡崎35	関東	−0.78		−6.17	***	−0.64		2.39	**
小高37	関東	0.61		−1.49	*	2.34	***	3.41	***
小高203	関東	3.37	***	18.47	***	3.11	***	5.19	***
白子1	関東	−0.64		−2.91	***	−4.67	***	−0.15	
田原1	関東	1.21		−3.02	***	3.18	***	5.90	***
田原5	関東	−1.35		−4.49	***	−1.93		2.46	**
田原34	関東	−0.12		−6.17	***	1.52		2.44	**
田原40	関東	1.16		−3.62	***	1.38		2.18	**
富浦7	関東	2.24	**	4.36	***	−0.80		1.53	*
富山4	関東	−0.27		−5.33	***	−0.09		2.49	***
成東11	関東	−0.63		−1.48		−0.69		2.23	**
浜松16	関東	1.27		0.98		0.60		2.91	***
鉾田58	関東	1.79		−2.12	*	1.89	*	3.89	***
鳴瀬6	東北	3.55	**	2.39		−4.37	***	−1.58	
村上16	東北	1.80		−1.96		−3.70	**	3.42	***
遊佐72	東北	6.17	***	1.88		3.64	***	2.05	*
土佐清水63	関西	−1.05		−2.88	**	2.20	*	1.09	
波方73	関西	−0.13		0.71		−0.10		1.50	
三崎90	関西	0.81		1.61		0.16		2.84	***
網野31	関西	−16.66	***	−2.71	*			3.68	***
丹後64	関西	3.69	***	−0.42		2.49	**	4.58	***
浜田12	関西	−16.79	***	−5.31	***				
志摩64	九州	−0.49		−1.07		−0.26		2.04	**
津屋崎50	九州	−1.16		−0.59		1.65		2.79	***
前年剪定なし		0.72	***	0.93	**				
2022年		1.75	***	−0.07					
2023年		2.38	***	1.15	***				
2024年		1.19	***	1.93	***				
2022.4.25調査						4.92	***	1.82	***
2022.4.28調査						9.83	***	4.55	***
2022.5.2調査						11.10	***	8.54	***
2023.4.12調査						3.91	***	−3.20	***
2023.4.17調査						6.88	***	4.20	***
2024.4.15調査						−1.06	*	−5.22	***
2024.4.17調査						2.33	***	−3.32	***
2024.4.19調査						4.44	***	−1.67	***
2024.4.22調査						6.58	***	1.14	***
2024.4.24調査						7.68	***	3.64	***
2024.4.26調査						9.42	***	4.45	***
2024.4.30調査						14.10	***	7.86	***

1:順序ロジスティック回帰分析によって推定されたクローンの雌雄花の着生量の係数である。
なお、着生量の解析の切片は，波方37・前年剪定あり・2021年調査である。
2:順序ロジスティック回帰分析によって推定されたクローンの雌雄花の早晩性の係数である。
なお、早晩性の解析の切片は，波方37・2022.4.20調査である。
3:各記号の有意水準を * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ として示した。

表–4. 2024 年の抵抗性クロマツの雌花・雄花の開花推移

Table 4 Flowering progress throughout 2024 of female and male flowers, resistant Japanese black pine

抵抗性クロマツ	育種基本区	雌花係数[1]	開花区分 4/15	4/17	4/19	4/22	4/24	4/26	4/30
田原1	関東	3.18	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0
小高203	関東	3.11	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0
小高37	関東	2.34	1.3	2.0	2.3	2.8	3.0	3.5	4.0
鉾田58	関東	1.89	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0
田原34	関東	1.52	1.0	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	4.0
いわき27	関東	1.40	1.0	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0	3.5
田原40	関東	1.38	1.5	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0
大須賀6	関東	1.32	1.0	2.0	2.0	2.5	3.0	3.0	4.0
大須賀5	関東	1.23	1.0	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	4.0
大須賀15	関東	1.10	1.0	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.5
浜松16	関東	0.60	1.0	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0	4.0
岡崎16	関東	0.18	1.0	1.0	2.0	2.0	2.5	3.0	3.5
波方37	関西	0.00	1.0	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0	4.0
富山4	関東	−0.09	1.0	1.3	1.8	2.3	2.3	2.8	3.3
岡崎10	関東	−0.51	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	3.0	4.0
岡崎35	関東	−0.64	1.0	1.0	1.7	2.0	2.7	3.0	3.0
成東11	関東	−0.69	1.0	1.5	2.0	2.5	2.5	2.5	3.0
富浦7	関東	−0.80	1.0	1.0	1.5	1.5	2.0	2.5	3.0
岡崎25	関東	−1.19	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	3.0
田原5	関東	−1.93	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	2.0	3.5
大須賀31	関東	−3.21	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	3.0
白子1	関東	−4.67	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	2.0	2.5

抵抗性クロマツ	育種基本区	雄花係数[1]	開花区分 4/15	4/17	4/19	4/22	4/24	4/26	4/30
田原1	関東	6.55	1.3	2.3	3.0	3.0	3.7	3.7	4.0
小高203	関東	5.42	1.0	1.7	2.7	3.0	3.0	3.0	3.7
岡崎34	関東	5.00	1.3	2.3	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0
内原5	関東	4.33	1.5	2.0	2.5	3.0	3.0	3.0	4.0
大須賀23	関東	4.30	1.0	1.5	2.5	3.0	3.0	3.5	4.0
鉾田58	関東	4.21	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	4.0
大須賀15	関東	3.61	1.3	1.7	1.7	2.3	3.0	3.0	3.7
小高37	関東	3.58	1.0	1.3	1.8	2.5	3.0	3.0	4.0
大須賀5	関東	3.56	1.0	1.0	1.5	2.5	3.0	3.0	4.0
大須賀31	関東	3.53	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0
岡崎35	関東	3.49	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0
大須賀6	関東	3.38	1.0	1.5	2.0	2.0	2.5	3.0	3.5
富山4	関東	3.18	1.0	1.0	1.0	1.5	2.5	3.0	3.5
浜松16	関東	3.02	1.0	1.0	1.5	2.5	3.0	3.0	3.5
岡崎16	関東	2.94	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	3.5
岡崎25	関東	2.88	1.0	1.0	1.0	1.7	2.7	3.0	3.3
田原5	関東	2.81	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0
いわき27	関東	2.68	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	2.5	3.5
田原34	関東	2.50	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	4.0
成東11	関東	2.42	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	3.5
田原40	関東	2.25	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	4.0
岡崎22	関東	2.03	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0
富浦7	関東	1.55	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0
大須賀12	関東	0.55	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	3.5
波方37	関西	0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0
白子1	関東	−0.24	1.0	1.0	1.0	1.3	1.7	2.3	3.3

[1]順序ロジスティック回帰分析によって推定されたクローンの雌雄花の早晩性の係数である。
グレーで示した部分は、開花中であることを示す。
開花指数が1.3以上2.0未満:
開花指数が2.0以上2.7未満:
開花指数が2.7以上4.0未満:

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

森林樹木における葉の他感作用が植物実生の成長に及ぼす影響

丸山真依[1]・田中恵[2]・上原巌[2]
[1]東京農業大学大学院地域環境科学研究科・[2]東京農業大学地域環境科学部

要旨：植物には，他植物に成長抑制や促進をもたらす他感作用があると言われている。発現の経路には，揮発や溶脱など複数あることが分かっているものの，木本植物を対象とした研究は少なく，他感作用物質の特定に至っているものも少ないのが現状である。そこで，本研究では森林樹木 6 種において，樹種間にみられる他感作用の傾向とその要因を探り，基礎的データの蓄積をすること目的とした。他感作用の指標として揮発と溶脱成分によるレタス実生の成長動向を測定した。その結果，全体的に成長抑制がみられたものの樹種間で差はみられず，生葉と落葉の差も樹種によって異なった。また，サンドイッチ法における成長抑制は，比較的安定した物質による作用の可能性が考えられた。
キーワード：他感作用，サンドイッチ法，ディッシュパック法，森林樹木

Effects of leaf allelopathy on plant seedling growth of forest trees

Mai MARUYAMA[1], Megumi TANAKA[2], Iwao UEHARA[2]

[1]Graduate School of Regional Environment Sciences, Tokyo University of Agriculture
[2]Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

Abstract: The plants have been reported to have allelopathic effects that inhibit or promote the growth of other plants. Although it is known that there are several pathways for their expression, such as volatilization and dissolution, few studies have focused on the allelopathic effects of trees, and also few have been able to identify the allelopathic substances. This study aimed to investigate the inclination and factors of allelopathic effects at six forest tree species, and to accumulate basic data. Growth indicators of lettuce seedlings due to volatilization and leached components were measured. The results showed that although growth suppression was observed overall, there were no differences among species. The difference between fresh and defoliated leaves also differed among tree species. The growth inhibition in the Sandwich method may be due to the action of relatively stable substances.
Keywords: Allelopathy, Sandwich method, Dish pack method, Forest trees

I　はじめに

樹木には他感作用があるとされている。他感作用とは，ある植物から放出される化学物質が，他の植物や微生物に何らかの影響を及ぼす現象(*2*)と定義されている。発現の経路は，揮散，根からの滲出，雨水での滲出，残渣の分解がある(*13*)。他感作用に関する研究としては，草本植物では，遷移前の植物に遷移後の植物の物質を添加すると，成長阻害が見られた報告(*12*)がある。また，森林での他感作用を調べることで，生物由来の除草剤やマルチ技術の開発(*18*)や，林床植物の管理，混交林における樹種選定，人工林における林地設定にも役立つ可能性がある(*9*)。

しかし，木本植物の他感作用に関する研究は農作物や雑草といった草本植物の研究よりも少ない。その理由としては，除草剤等の農作物での応用を想定して行われた研究が多いこと，また森林での他感作用の実証が困難であることがあげられている(*17*)。また，そもそも他感作用が樹種更新や植生遷移への直接的な影響を及ぼしているのかどうかも明らかにされてはいないのが現状である。さらに，林地での実験では，発生した現象が他感作用によるものだと証明するには，ユーカリやスズカケノキの先行研究の例(*13*)のように，環境要因を排除した実験を行う必要がある。

そこで本研究は，供試葉に条件を設定することで，樹種による他感作用の強さとその要因や特性を明らかにし，実験室レベルでの樹木における他感作用の基礎的データの蓄積を目的とした。

II　材料と方法

1. 実験概要　他感作用を及ぼす物質として，揮発性のものをディッシュパック法（以下 DP 法）(*3*)，溶脱性のものをサンドイッチ法（以下 SW 法）(*5*)で調べた。樹種間での比較は，従来の実験方法と同様に DP 法を無乾燥

（受理日 2025 年 2 月 28 日）

処理，SW 法を乾燥処理にて行った。

設定条件について，コナラ/アカマツ/クスノキでは落葉の分解に伴い他感作用が弱くなるとあったこと(*10*, *15*)，また揮発/溶脱の経路共に生葉と落葉のいずれも関与している可能性があることから，陽樹陰樹の双方を含む針葉樹にて，生葉/落葉を設定条件に加えた。落葉は地上に落下して褐変した葉で，折り曲げても割れない程度の葉とした。さらに，SW 法開発者が無乾燥葉の物質は不安定で実際の作用性は低い(*2*)と考えているものの，DP 法では無乾燥葉を用いていること，また高温乾燥により変化する可能性のある物質が，「雨水によって葉からリーチングされる成分」(*7*)に含まれていることから，"供試葉の乾燥が他感作用に及ぼす影響の有無"を明らかにするため乾燥処理の有無を設定条件に加えた。乾燥処理は 60 ℃で 1 昼夜，また乾燥処理を行った葉の供試量は，採取した葉の乾燥前後の質量から推測した含水率から算出した。

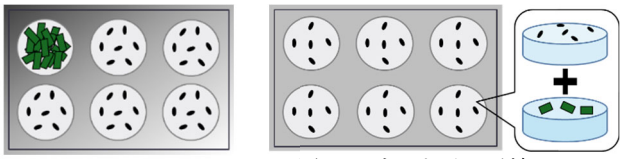
2. 供試樹木　供試樹木の選定基準は，針葉樹では他感作用が強く，ブナ等の落葉広葉樹では弱いことが示されている点(*1*)，沼田(*12*)にて示唆されている，草本植物の他感作用が植生遷移に関わっている可能性と同様の傾向が，木本植物においても確認されると考え，陽樹で針葉樹のアカマツ（*Pinus densiflora*），陰樹（半陰樹）で針葉樹のヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）とスギ（*Cryptomeria japonica*），陽樹で広葉樹のコナラ（*Quercus serrata*）とムラサキシキブ（*Callicarpa japonica*），陰樹で常緑広葉樹のヒサカキ（*Eurya japonica*）とした。採取は 2024 年の 9~10 月にかけて行った。

3. 実験方法　採取した葉は，手で軽くこすり水洗いした後ペーパータオルで水分を拭き取り，5 mm ~ 1 cm 程度になるようハサミで裁断した。他感作用を受ける側の検定植物として，レタス（グレートレーク種）を用い，25 ℃に設定したインキュベータ内の暗所で培養した。

3.1　DP 法　6 穴マルチディッシュの左上端のウェルに 2 g の葉を入れ，他のウェルには滅菌ろ紙を敷いた（図–1）。滅菌水 600 µl を添加し，その上にレタスの種子 7 粒を播種した。対照区には，左上端のウェルに葉を入れずレタスのみを播種した。

3.2　SW 法　6 穴マルチディッシュ 1 穴につき 50 mg ずつ葉を入れ，滅菌した 0.5 %の寒天を 5 ml ずつ分注し，固化後，再度 5 ml ずつ分注した。固化後，レタス種子を 1 穴につき 5 粒播種し，3 繰り返しとした（図–2）。対照区には，レタスのみを播種した。

4. 評価方法　レタス実生の伸長量は，播種 3 日後の幼根と下胚軸の長さとした。DP 法は，康(*8*)と本研究の結果にて，葉を入れたウェルからの距離で成長に差が見られていたことを受けて，葉を入れたウェルから最短距離のウェル 2 つの実生を対象として解析に用いた。



図–1.　ディッシュパック法　図–2.　サンドイッチ法

Fig.1 Dish pack method　　Fig.2 Sandwich method

検定は，処理区と対照区の実測値を，一元配置分散分析及び Tukey-Kramer 法にて行った。対照区と処理区との間に，$p < 0.05$ で有意に差が認められたものについて“他感作用有り”とした。

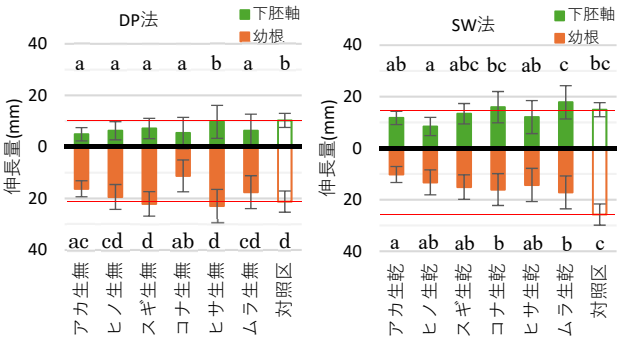
III　結果と考察

処理区の表記について，アカマツの例を用いて説明する。本研究では，本来（アカマツ生葉無乾燥/アカマツ生葉乾燥/アカマツ落葉無乾燥/アカマツ落葉乾燥）と表記すべきであるが，図中では（アカ生/アカ生乾/アカ落/アカ落乾）と簡略化する。また，エラーバーは標準偏差，赤線は対照区の平均伸長量を示す。

1. 樹種間　6 樹種の生葉で比較した結果を図–3 に示す。異なるアルファベット間で有意な差がみられた。DP 法，SW 法とも有意であった他感作用の全てが成長抑制となった。

DP 法において，下胚軸ではヒサカキ以外の樹種は他感作用が見られた。一方，幼根で他感作用が見られた樹種はアカマツとコナラのみであった。SW 法において，下胚軸で他感作用が見られた樹種はヒノキのみであった。幼根では全ての樹種で他感作用が見られた。これら全てで樹種間における極端な他感作用の強弱は見られなかった。

陽樹よりも陰樹で他感作用が強いと予想したが，全体



図–3.　樹種間での比較

Fig. 3 Comparison of allelopathic effects among tree species.

的に抑制傾向は見られたものの，樹種間による明確な差は見られなかった。この結果は，6~8 月に供試葉を採取した研究(*6*)と，（乾燥）SW 法のコナラの幼根，ヒノキの幼根/下胚軸とは抑制傾向という点で同様であった。一方で，10~12 月に供試葉を採取した研究(*11*)とは，（乾燥）SW 法のアカマツでみられた成長抑制が異なった。先行研究と一部異なる値が出たが，クスノキにおいて観測されている供試葉の採取時期の違いが他感作用の強さに影響している可能性(*4*, *14*)を 1 つの要因と考えた。

また，成長抑制の傾向はあるものの，極端な差がみられなかったことから推測すると，森林に生育する樹木の多くが成長抑制作用を兼ね備えており，他植物に対して何らかの影響を及ぼしている可能性があると考えた。

2. 生葉落葉の差　針葉樹 3 樹種で比較した結果を図–4 に示す。

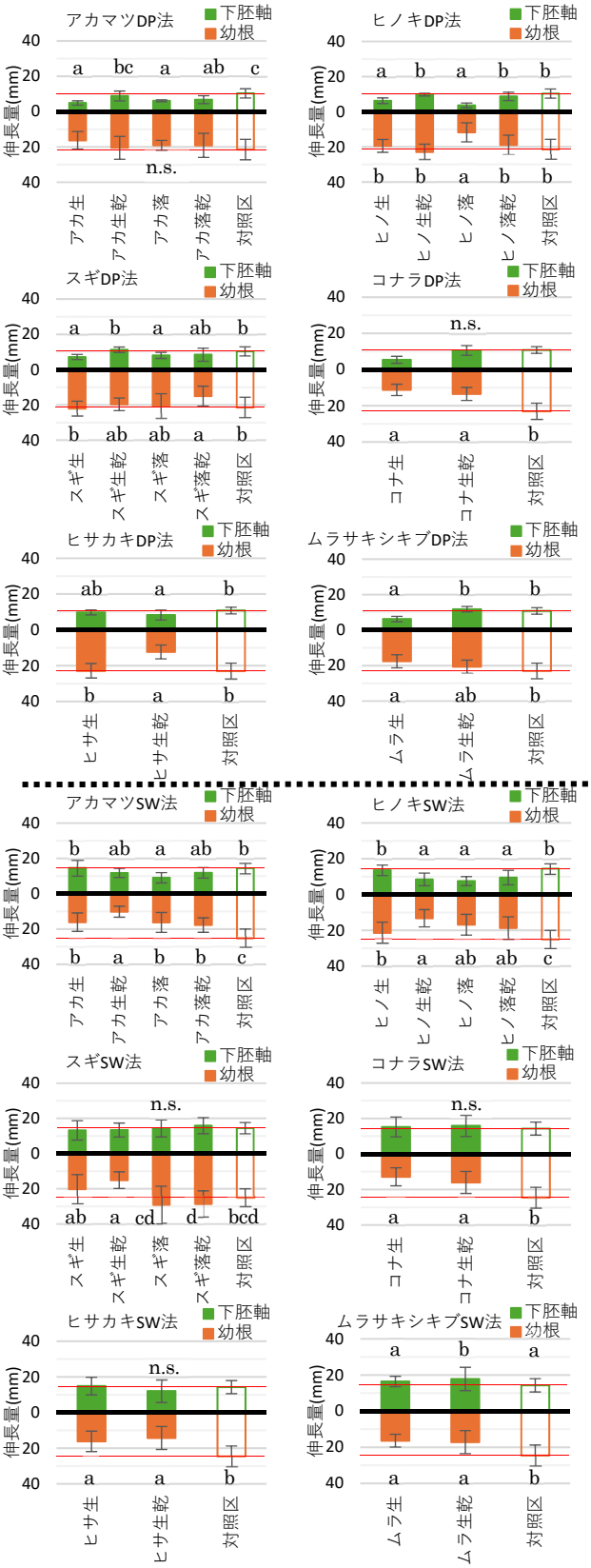
DP 法において，ヒノキの幼根では落葉の方が成長抑制が強かった。SW 法において，アカマツ及びヒノキの下胚軸では落葉の方が，アカマツ乾燥及びスギ乾燥の幼根では生葉の方が成長抑制が強い結果となった。その他の樹種では，生葉落葉間で差は見られなかった。

DP 法，SW 法のいずれでも，生葉落葉間で確認された差に一定の傾向はみられなかった。桑原(*10*)にて，腐葉と落葉では落葉の方が強い成長抑制が確認されたことから，生葉落葉間では福井ら(*4*)と同様に鮮度のより高い生葉で強い他感作用がみられると予想した。しかし，大きな偏りはみられず樹種によって傾向が異なった。本研究の結果と福井ら(*4*)の結果を合わせて考えると，樹木の他感作用の強さは生葉と落葉で一様に傾向が見られるのではなく，樹種によって異なるものと推測した。実験の過程において，落葉の鮮度を一定にできていなかった点も完全には否定できないため，条件を一定にできるような何らかの基準が必要である。

3. 乾燥処理の有無　6 樹種で比較した結果を図–4 に示す。

DP 法において，条件間で有意な差が見られた 7 組のうち，ヒサカキ生葉の幼根以外の 6 組では無乾燥の方が成長抑制が強かった。SW 法において，アカマツ生葉の幼根及びヒノキ生葉の幼根下胚軸では，乾燥の方が成長抑制が強かった。その他の樹種では，乾燥処理の有無で差は見られなかった。

DP 法 SW 法共に無乾燥の方が乾燥よりも成長抑制が強いと予想したが，この傾向が表れたのは DP 法のみであった。揮発の経路で供試葉の乾燥時に他感作用が弱くなる傾向は，手法は異なるが Silva *et al.*(*16*)でも確認されており，本研究でも同様の結果が得られたと考えられる。



図–4.　設定条件(生葉落葉/乾燥無乾燥)での比較
(上:DP 法，下:SW 法)

Fig. 4 Comparison of allelopathic effects at setting condition(fresh and deciduous leaves/drying treatment).
(Above: DP method, Below: SW method)

DP 法で，乾燥の有無が成長差をもたらす要因として，乾燥により水分と共に他感作用物質が飛んだ可能性が考えられた。このことから，従来通り，DP 法では葉を乾燥させずに実験に用いることが推奨される。

一方 SW 法は，乾燥により水分が失われても成長抑制がみられた。このことから溶脱で発現する成長抑制は，乾燥の影響を受けず，寒天中の水分により他感作用物質が拡散されると推測した。藤井(*2*)は，乾燥無しでは成分変化を最小限に抑えた実験を，また乾燥有りでは比較的安定した物質での検証が可能と考えている。本研究で用いた 6 樹種のうち 4 樹種では，乾燥時も無乾燥時も伸長量に変化がなかった。この結果を，藤井(*2*)の考えと合わせると，乾燥時と無乾燥時のいずれにおいても変わらぬ成長抑制がみられるのは，藤井(*2*)の考える”比較的安定した物質”が作用しているためと推測した。

今後の展望として，スギ・コナラ・ヒサカキ・ムラサキシキブを供試葉として SW 法を行う際は，乾燥の有無が他感作用に影響を及ぼさないため，一度に複数種の葉を採取して乾燥させることにより，複数日にわたって少量ずつ実験を行う等，効率化と基準化が可能であると推測した。

IV　まとめ

森林に生育する樹木のうちアカマツ/ヒノキ/スギ/コナラ/ヒサカキ/ムラサキシキブの 6 種では，揮発と溶脱共に成長抑制の傾向を示すものが多く確認された。これは，何らかの化学物質による影響と推測される。溶脱の経路では，比較的安定性の高い物質が作用している可能性が示された。

木本植物を対象とした研究例は依然として少ないため，今後は，ある程度の傾向を掴むためにもより多くの樹種で実験を行う必要がある。またその際，樹木によっては，乾燥保存による作業効率化も可能と考えられる。

引用文献

(1) 藤井義晴・渋谷知子 (1991) 寒天培地を用いた他感作用検定手法(1)落葉・落枝の滲出物による他感作用の検索. 雑草研究 36: 150-151

(2) 藤井義晴 (2000) アレロパシー-他感物質の作用と利用-. 農山漁村文化協会，東京, 230pp

(3) 藤井義晴・松山稔・平舘俊太郎・中谷敬子 (2000) 揮発性他感物質の検定法と作用成分の分析法の開発. 雑草研究 45: 80-81

(4) 福井大介・中邑祐子・猪谷富雄 (2007) クスノキのアレロパシーに関する研究. 日本作物学会中国支部研究集録 48: 32-33

(5) 猪谷富雄・平井健一郎・藤井義晴・神田博史・玉置雅彦 (1998) サンドイッチ法による雑草および薬用植物のアレロパシー活性の検索. 雑草研究 43: 258-266

(6) 猪谷富雄・青木祥子・叶英樹・井原直幸・黒柳正典・佐野俊和 (2000) 樹木葉がもつアレロパシー活性の検定法による比較. 日本作物学会中国支部研究集録 41: 19-20

(7) 木村和義 (1997) 作物にとって雨とは何か-「濡れ」の生態学-. 農山漁村文化協会，東京, 197pp

(8) 康高娃 (2021) 薬用植物のアレロパシー活性の検定と高活性植物トウシキミの作用物質の同定. 東京農工大学大学院 連合農学研究科 生物生産科学専攻. 博士学位論文. 博農甲第 1426 号. 2021-05-10. 東京農工大学学術機関リポジトリ

(9) 小島康夫（1995）森林におけるアレロパシー(1):林業ならびに生態系におけるアレロパシーの役割. 日本林学会北海道支部論文集 43: 1-3

(10) 桑原大 (2013) 山梨県東部のアカマツ林とコナラ林における他感作用の強度と発現要因. エクメーネ研究 2: 57-71

(11) 森田沙綾香・伊藤扇帆・藤井義晴・原田二郎 (2001) 木本植物の植物生長抑制作用. 雑草研究 46: 134-135

(12) 沼田真 (1977) 植物群落と他感作用. 化学と生物 15: 412-418

(13) Rice EL 共訳:八巻敏雄・安田環・藤井義晴 (1991) アレロパシー. 学会出版センター，東京, 488pp

(14) 坂元尚樹・津村武典・地川侑希・前川俊清・猪谷富雄 (2013) クスノキのアレロパシー活性の季節変動および検定植物によるカンファー感受性の差異. 日本作物学会中国支部研究集録 53: 47-48

(15) 佐藤大地・高橋和成 (2009) 里山と校庭の樹木落葉のアレロパシー. Naturalistae 14: 1-7

(16) Silva ER, Overbeck GE, Soares GLG (2014) Phytotoxicity of volatiles from fresh and dry leaves of two Asteraceae shrubs: Evaluation of seasonal effects. South African Journal of Botany 93: 14-18

(17) 高橋輝昌・鷲辺章宏・浅野義人・小林達明（1998）木本類における他感作用. ランドスケープ研究 62: 525–528

(18) Zeng RS, Mallik AU, Luo SM (2008) Allelopathy in sustainable agriculture and forestry. Springer: 411pp

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

半島マレーシアにおいて分布降水量が異なるフタバガキ科稚樹 8 種における土壌乾燥応答と形質の関係

河合清定[1]・Kevin Kit Siong NG[2]・Soon Leong LEE[2]

[1] 国際農林水産業研究センター・[2] マレーシア森林研究所

要旨：東南アジア林業の気候変動適応に向け，同地域において重要な木材資源であるフタバガキ科稚樹 8 種を対象に，光合成特性ならびに個体形態の土壌乾燥への応答を調べ，これらの応答と関係する形質を探索した。樹種によらず，土壌乾燥に伴い，まず気孔コンダクタンスが，続いて電子伝達速度が低下し，強い乾燥下で最大量子収率の低下と葉の萎れが進行した。一方で，これらの特性の土壌乾燥に対する応答には種間差があり，水利用に関わる形質の違いと対応していた。特に脱水時に乾燥ストレスを回避できる葉を持つ種ほど，強い乾燥下でも光合成活性を維持し，萎れを回避できることがわかった。以上より個葉の乾燥回避特性を調べることで，フタバガキ科樹種の土壌乾燥に対する応答を予測できることが示唆された。

キーワード：乾燥耐性，気候変動適応，東南アジア，土壌乾燥，フタバガキ科樹木

Relationships between plant traits and responses to soil drought in saplings of eight dipterocarp species with varying distributions along a rainfall gradient in Peninsular Malaysia

Kiyosada KAWAI[1], Kevin Kit Siong NG[2], Soon Leong LEE[2]

[1] Japan International Research Center for Agricultural Sciences; [2] Forest Research Institute Malaysia (FRIM)

Abstract: Towards climate change adaptations in forestry across Southeast Asia, we evaluated the responses of photosynthetic parameters and wilting stage to soil desiccation and examined the relationships between these responses and plant traits, using saplings of eight dipterocarp species. Regardless of the differences in species, along the soil desiccation, the decline of stomatal conductance occurred first, followed by that of electron transport rate, and that of maximum quantum efficiency and leaf wilting occurred finally under strong soil desiccation. These responses were significantly different among species and were associated with species' water-use traits. Particularly, species capable of avoiding drought stress at leaf level under desiccating conditions could maintain photosynthetic metabolism and prevent the wilting progression under more severe soil desiccations. These results suggest that leaf-level drought avoidance capacity can predict responses to soil drought in dipterocarp species.

Keywords: Drought tolerance, Climate change adaptation, Southeast Asia, Soil drought, Dipterocarps

I　はじめに

東南アジア熱帯林は高いバイオマスと生産性を有し，世界でも有数の木材生産を誇る。同地域においては気候変動に伴う干ばつの頻度や強度の増加により，林業生産が将来的に不安定化することが危惧されており，乾燥耐性が高い樹種への転換など，適切な適応策の実施が求められている。熱帯樹種は土壌乾燥に対し，多様な応答を示すことが知られている(*8, 12*)。したがって，気候変動適応策を考慮するにあたり，多様な林業樹種を対象に，乾燥に対する応答を記述し，メカニズムを解明し，予測に活用することが重要である。しかし東南アジアの林業樹種においては研究例が少なく不明な点が多い(*6*)。

熱帯樹種は多様な形質(形態的・生理的な特徴)を示し，それらの形質は必須資源である光や水の利用様式を反映している(*11*)。例えば葉の萎れ点の水ポテンシャル(Ψ_{tlp})が低いほど，より強い乾燥ストレス下でも光合成を維持できることがわかっている。また材密度は木部の水切れ耐性と正に関係する(*5*)。このように，水利用に関わる形質を評価することで，樹種ごとの土壌乾燥に対する応答を予測できる可能性がある。

そこで本研究では，東南アジアの主要な木材資源であるフタバガキ科樹種を対象に，光合成特性および個体形態の土壌乾燥に対する応答を評価し，その応答と関わる水利用形質を探索した。また異なる特性の応答を比較することで，個葉の生理的なプロセスと個体の萎れがどの順番で起こるかを調べた。熱帯樹種において分布する水

（受理日 2024 年 12 月 27 日）

表–1. フタバガキ科稚樹 8 種の半島マレーシアにおける分布降水量および気孔コンダクタンス(g_s)，電子伝達速度(ETR)，最大量子収率(F_v/F_m)が初期値の 50%に低下する土壌水ポテンシャル，葉で萎れが起こる土壌水ポテンシャル
Table 1 Eight studied dipterocarps species, their abbreviations, distribution along a rainfall gradient in Peninsular Malaysia, soil water potentials inducing 50% loss of initial values of stomatal conductance (SWP_{gs50}), electron transport rate (SWP_{ETR50}), maximum quantum yield in photosystem II (SWP_{FvFm50}) and wilting stage 3 where leaf wilting initiates (SWP_{wlt3})

Species	Abbreviation	MAP_5 (mm)	MAP_{50} (mm)	SWP_{gs50} (MPa)[1]	SWP_{ETR50} (MPa)[1]	SWP_{FvFm50} (MPa)[1]	SWP_{wlt3} (MPa)[1]
Dipterocarpus baudii	DB	1851	2445	-0.21 ± 0.03[a]	-0.75 ± 0.12[ab]	-0.95 ± 0.12	-0.88 ± 0.10[ab]
Dipterocarpus costulatus	DC	2150	2504	-0.38 ± 0.12[ab]	-0.91 ± 0.20[ab]	-1.32 ± 0.33	-1.22 ± 0.35[ab]
Hopea nervosa	HN	2129	2813	-0.22 ± 0.06[ab]	-0.38 ± 0.05[a]	-0.84 ± 0.14	-0.68 ± 0.22[a]
Hopea odorata	HO	1068	1858	-0.67 ± 0.01[ab]	-1.00 ± 0.09[ab]	-1.34 ± 0.05	-1.18 ± 0.03[ab]
Richetia multiflora	RM	2033	3119	-0.26 ± 0.14[ab]	-1.14 ± 0.13[b]	-1.34 ± 0.02	-1.17 ± 0.15[ab]
Shorea glauca	SG	1973	2555	-0.25 ± 0.08[ab]	-0.99 ± 0.17[ab]	-1.54 ± 0.10	-1.58 ± 0.07[b]
Vatica bella	VB	2261	2782	-0.37 ± 0.06[ab]	-1.06 ± 0.04[b]	-1.26 ± 0.02	-1.16 ± 0.04[ab]
Vatica odorata	VO	1376	2414	-0.70 ± 0.18[b]	-0.92 ± 0.17[ab]	-1.04 ± 0.12	-1.18 ± 0.13[ab]
Mean[2]		-	-	-0.38 ± 0.07[A]	-0.75 ± 0.12[B]	-0.95 ± 0.12[C]	-0.88 ± 0.10[C]

In SWP_{gs50}, SWP_{ETR50}, SWP_{FvFm50}, and SWP_{wlt3}, mean ± se are shown (n =3). MAP_5 and MAP_{50}: 5th and 50th percentiles in mean annual precipitation, respectively

[1] Different lowercase alphabets indicate significant difference between species ($P< 0.05$)

[2] Different uppercase alphabets among SWP_{gs50}, SWP_{ETR50}, SWP_{FvFm50}, SWP_{wlt3} indicate significant difference between them ($P< 0.05$)

分環境と水利用形質には一般に相関が見られ(*1*)，適応策として乾燥地に分布する樹種の導入も検討されることから，本研究では分布する降水量が大きく異なる樹種を対象とし，フタバガキ科樹木における土壌乾燥応答の多様性を包括的に評価することを目指した。

II 材料と方法

1．調査地と対象種 本研究はマレーシア森林研究所(FRIM, 3.2337°N, 101.6330°E)で行い，同研究所の樹木園で採取された種子由来のフタバガキ科 8 種の稚樹(表–1)を実験に供した。半島マレーシアにおけるそれぞれの種の分布とその地点における年降水量(MAP)を，GBIF (https://www.gbif.org) および WorldClim (https://worldclim.org)からそれぞれ抽出し，種が分布する降水量の下限と中央値として MAP の 5 パーセンタイルおよび 50 パーセンタイル点を求めた。

2．土壌乾燥実験 各種につきサイズと葉の枚数が同程度の 6 個体の稚樹を選び，これらの個体を 12 時間毎の昼間/夜間サイクル(7:00~19:00 昼間，19:00~翌 7:00 夜間)，気温 29°C/26°C(昼間/夜間)，相対湿度 70%，昼間の光合成有効光量子束密度(PPFD)を 200 μmol m^{-2} s^{-1} に設定した人工気象室(Model PGC-15, Percival Scientific)に入れた。そして 3 個体ずつを対照区(C)と乾燥区(D)とし，C 個体に対しては 1 日 50 mL の灌水を行い，D 個体に対しては灌水を行わず土壌を乾燥させた。各個体につき無傷な成熟葉 1~2 枚選び，実験開始始後毎日もしくは 1 日おきに，ポロメーター(LI-600PF, Li-Cor)を用い，6:00~7:00 の暗黒下において，光化学系Ⅱの最大量子収率を表すF_v/F_m値を，9:00~10:00 の明条件において気孔コンダクタンス(g_s)と光化学系Ⅱの量子収率(Φ_{PSII})を測定した。さらに個体の萎れ度合いを，0(萎れが起きていない)，1(一部の葉が主軸に向かって倒れる)，2(全ての葉が倒れる)，3(一部の葉が萎れる)，4(全ての葉が萎れる)の 5 ステージで評価した(*12*)。実験開始時に葉緑素計(SPAD-502, KONICA MINOLTA)を用いて葉のクロロフィル含量の指標値を求め，経験式(*7*)を使って光吸収率(Abs)を推定した。そして電子伝達速度(ETR)を以下の式で算出した。

$$ETR = Abs \times 0.5 \times \Phi_{PS\,II} \times PPFD \quad (1)$$

PPFD は LI-600PF の光量子センサーにより求めた。これらの測定が終わった 10:00~11:00 に土壌水分センサー(Teros-10, Meter)を用いて，各個体のポットの土壌含水率を求めた。予備試験時に，土壌の乾湿度合が異なるフタバガキ科樹木の苗木 15 本を用意し，夜間の蒸散を停止させた翌日の夜明け前に，葉水ポテンシャルを測定し，土壌水ポテンシャル(SWP)の値とした。同時に，前述の方法で土壌含水率を測定し，ここから得られた土壌含水率と土壌水ポテンシャルの関係式を用い，土壌含水率を土壌水ポテンシャルに変換した。

3．水利用形質の測定 既存研究(*1, 9*)から乾燥耐性や乾燥回避に関わるとされる 7 形質を測定した(表–2)。各種につき 3-4 個体を対象として，暗黒下で一晩給水させた後に，オズモメーター法(*2*)を用いて Ψ_{tlp} を求めた。また同じ個体の別な葉を用い，葉面積当たりの乾重(LMA)を計算した。さらに乾燥回避戦略の定量のために，前述の人工気象室を用い，1 種につき 10 個体を対象に，飽水状態の葉を 2 時間脱水させ，その時の生重と乾重から，脱水 2 時間後の相対含水率(RWC_{2h})を計算した。そして各種についてP–V カーブ法より相対キャパシタンスを計算し(*3*)，この値と RWC_{2h} から脱水 2 時間後の葉水ポテンシャル(Ψ_{2h})を求めた。さらに乾燥実験に使ったものと同サイズの個体を各種につき 5 個体収穫し葉面積比(LAR)，根重量比(RMR)，材密度(WD)を求めた。

表–2. 測定した形質
Table 2 Measured traits

Trait	Symbol	Unit	Min–mean–max (CV)
Leaf			
Water potential at turgor loss	Ψ_{tlp}	MPa	-1.68–-1.55–-1.39 (8.0)
Relative water content after two-hour dehydration	RWC_{2h}	-	0.49–0.69–0.88 (22.8)
Water potential after two-hour dehydration	Ψ_{2h}	MPa	-7.74–-4.14–-1.09 (47.6)
Dry mass per area	LMA	g m^{-2}	49.1–61.2–70.6 (11.9)
Whole plant			
Leaf area ratio	LAR	cm^2 g^{-1}	27.2–49.0–99.8 (47.1)
Root mass ratio	RMR	g g^{-1}	0.18–0.24–0.33 (25.4)
Wood density	WD	g cm^{-3}	0.55–0.65–0.77 (11.1)

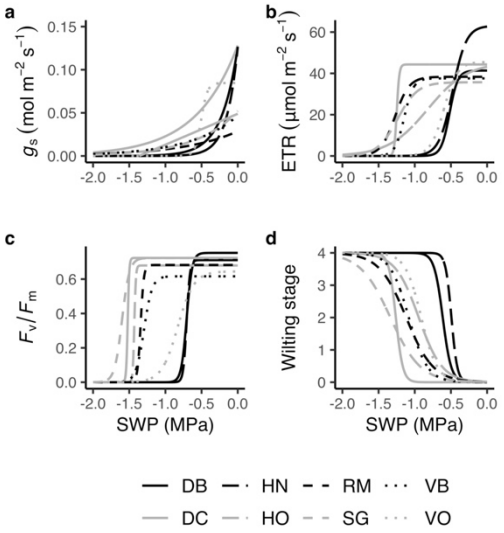
CV: coefficient of variation

4. 解析　解析は R(version 4.2, (*10*))で行った。C 区では g_s，ETR，F_v/F_m，萎れ度合いが実験期間中変化しなかったが，D 区では g_s，ETR，F_v/F_m については実験開始時に最大値を取り(萎れ度合いについては最小値)，実験が経過するにつれ減少(萎れ度合いは増加)した。したがって D 区におけるこれらの特性の変化は土壌乾燥によるものだとみなした。そして D 区の個体毎に，これらの 4 つの特性の SWP に対する応答を直線，指数関数，ロジスティック関数で近似し，AIC が最も低い関数を選択してモデル化した。そして土壌乾燥応答を表す指標として g_s, ETR, F_v/F_m については初期値の 50%に低下する SWP（それぞれ SWP_{gs50}，SWP_{ETR50}，SWP_{FvFm50}）を，萎れ度合いについては葉が萎れるステージ 3 に達した時の SWP(SWP_{wlt3})を推定した。指数関数が選択された個体においては，SWP が 0.0 MPa の時の値を初期値とした。そして分散分析によりこれら 4 つの指標における種間差を調べ，有意に異なった場合(P <0.05)，Tukey 法による事後比較を行った。さらにこれらの指標の大小関係を，種をランダム効果とした線型混合モデルで検討し，指標間の差を Tukey 法により調べた。最後にこれら指標と水利用形質との関係を Pearson の相関係数を用い検討した。

III　結果と考察

1. 土壌乾燥に対する光合成特性と個体形態の応答

フタバガキ科 8 種において土壌乾燥に伴う光合成特性の低下と萎れの進行には有意な種間差が認められた(表–1，図–1)。一方で SWP_{FvFm50} には有意差が認められず，樹種によらず土壌乾燥が進むと，ある段階で光化学系 II の活性が大きく低下することがわかった。この傾向はボルネオ島のフタバガキ科 6 種の実生で得られたものと一致した(*6*)。g_s に関しては指数関数，ロジスティック関数，直線が選択された個体が 24 個体中それぞれ 18 個体，3 個体，3 個体であり，ETR に関してはロジスティック関数が選択されたものが 22 個体，F_v/F_m と萎れ度合いに関しては全ての個体でロジスティック関数が選択された。ここから，同じ光合成特性でも g_s と光化学系の土壌乾燥への応答は異なり，特に g_s において種間で多様な応答を示すことがわかった。SWP_{gs50}, SWP_{ETR50}, SWP_{FvFm50}, SWP_{wlt3} を比較すると，高い順から SWP_{gs50}, SWP_{ETR50}, SWP_{wlt3}, SWP_{FvFm50} となり，SWP_{wlt3} と SWP_{FvFm50} の間には有意差がなかった(表–1)。ここから，土壌乾燥に対しまず g_s が低下し，次に ETR が下がり，葉の萎れと F_v/F_m の低下はほぼ同じタイミングで起こることがわかった。また SWP_{ETR50}, SWP_{wlt3}, SWP_{FvFm50} の間には種間で有意な相関



図–1. フタバガキ科稚樹 8 種における g_s，ETR，F_v/F_m，萎れ度合いの土壌乾燥に対する変化(各種の中で代表的な 1 個体の結果を示す)

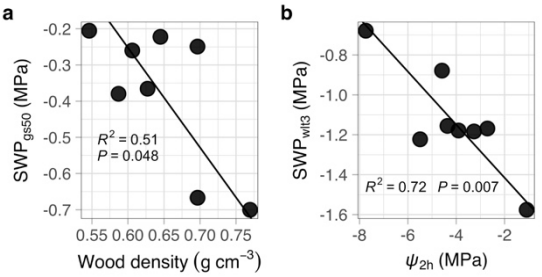
Fig.1 Modelled responses of (**a**) stomatal conductance (g_s), (**b**) electron transport rate (ETR), (**c**) maximum quantum yield in photosystem II (F_v/F_m), and (**d**) wilting stage to soil dehydration for one representative individual per each of eight dipterocarp species

があり(r = 0.77~0.92; P<0.03), 乾燥下で葉が萎れない種ほど，光化学系の活性も低下しないことがわかった。一方で，SWP_{gs50} はこれらの指標と関係せず，g_s は他の生理プロセスとは独立に制御されている可能性が示唆された。

2. 土壌乾燥応答と水利用形質の関係

乾燥応答と同様に，水利用形質にも種間差が認められた(表–2)。乾燥応答の指標(SWP_{gs50}, SWP_{ETR50}, SWP_{FvFm50}, SWP_{wlt3})は，個体形質とは有意に関係しなかったものの、葉と茎の形質とは関係した(図–2)。材密度と SWP_{gs50} には負の関係があり，

重い材を持つ種ほど，土壌乾燥下でも幹部の通水性を維持することで，気孔開度を保てていると推察された。乾燥ストレス回避に関わる Ψ_{2h} は SWP_{ETR50}，SWP_{FvFm50}，SWP_{wlt3} と負に相関し，葉レベルで乾燥時に乾燥ストレスを回避できる種ほど，強い土壌乾燥下でも光合成活性を維持し，萎れの進行を回避できることがわかった。乾燥下で葉が萎れにくい種ほど，乾燥時に高い生存率を示すことから(*4*)，Ψ_{2h} が高い種は乾燥時の生存率も高い可能性がある。Ψ_{2h} を高める要因としては，気孔閉鎖後のクチクラ蒸散の小ささや高い水分貯留能が考えられる。一方で MAP_5 や MAP_{50} といった，種が分布する降水量は乾燥応答とは関係せず，今回用いた種については乾燥応答の予測に使えないことがわかった。



図–2. フタバガキ科稚樹 8 種における水利用形質と乾燥応答の関係：(**a**)材密度と SWP_{gs50}，(**b**)脱水 2 時間後の葉水ポテンシャル(Ψ_{2h})と SWP_{wlt3}

Fig.2 Relationships between traits and drought responses, including (**a**) wood density and SWP_{gs50} and (**b**) Ψ_{2h} and SWP_{wlt3} among eight dipterocarp species

IV まとめ

東南アジア林業の気候変動適応に向け，同地域で重要な木材資源であるフタバガキ科樹種の土壌乾燥応答を調べ，乾燥応答と関連する水利用形質を探索した。特に脱水時の葉水ポテンシャルは，光合成活性と個体形態の土壌乾燥応答と関係し，この特性を調べることで，フタバガキ科樹種の土壌乾燥への応答を予測できることが示唆された。

謝辞：本研究は，マレーシア森林研究所(FRIM)との共同研究契約に基づき，国際農林水産業研究センター交付金プロジェクト「熱帯林遺伝資源の特性評価による生産力と環境適応性の強化」で行われた。研究実施にあたり，FRIM のスタッフと小林正樹主任研究員(国際農研)のご支援を頂いた。

引用文献

(1) Baltzer JL, Davies SJ, Bunyavejchewin S, Noor NSM (2008) The role of desiccation tolerance in determining tree species distributions along the Malay–Thai Peninsula. Funct Ecol 22: 221–231

(2) Bartlett MK, Scoffoni C, Ardy R, Zhang Y, Sun S, Cao K, Sack L (2012) Rapid determination of comparative drought tolerance traits: using an osmometer to predict turgor loss point. Methods Ecol Evol 3: 880–888

(3) Bartlett MK, Scoffoni C, Sack L (2012) The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: a global meta-analysis. Ecol Lett 15: 393–405

(4) Engelbrecht BMJ, Tyree MT, Kursar TA (2007) Visual assessment of wilting as a measure of leaf water potential and seedling drought survival. J Trop Ecol 23: 497–500

(5) Hacke UG, Sperry JS, Pockman WT, Davis SD, McCulloh KA (2001) Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. Oecologia 126: 457–461

(6) Ichie T, Igarashi S, Tanimoto T, Inoue Y, Mohizah M, Kenzo T (2023) Ecophysiological responses of seedlings of six dipterocarp species to short-term drought in Borneo. Front Forest Glon Change 6: 1112852

(7) Ishida A, Diloksumpun S, Ladpala P, et al (2006) Contrasting seasonal leaf habits of canopy trees between tropical dry-deciduous and evergreen forests in Thailand. Tree Physiol 26: 643–656

(8) Manzi OJL, Bellifa M, Ziegler C, et al (2022) Drought stress recovery of hydraulic and photochemical processes in Neotropical tree saplings. Tree Physiol 42: 114–129

(9) Poorter L, Markesteijn L (2008) Seedling traits determine drought tolerance of tropical tree species. Biotropica 40: 321–331

(10) R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

(11) Reich PB (2014) The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. J Ecol 102: 275–301

(12) Tyree MT, Engelbrecht BM, Vargas G, Kursar TA (2003) Desiccation tolerance of five tropical seedlings in panama. Relationship to a field assessment of drought performance. Plant Physiol 132: 1439–1447

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

個体ベースモデルを用いたマレー半島における フタバガキ人工林の初期生残率のシミュレーション

諏訪錬平[1]・Mohammad S. H. MANDAL[1]・田中憲蔵[1]・野口正二[1]・大谷達也[2]・星野大介[2]・Zamah Shari NUR HAJAR[3]

[1]国際農林水産業研究センター・[2]森林総合研究所・[3]マレーシア森林研究所

要旨：マレーシアのペラ州にあるチクス森林保護区では，1992 年に *Acasia magnium* の若い林分において，異なる列幅で *A. mangium* が伐採されてフタバガキ科樹種が植林された。本研究では，植栽樹種から *Neobalanocarpus heimii* について，異なる伐採幅で見られる初期生残率の違いは光環境に依存していると仮説を立て，個体ベースの森林動態モデルである SEIB-DGVM を用いて，初期生残率の違いを再現することを試みた。モデル適用にあたり，チクス森林保護区付近の気候パラメータや，樹形，材密度，葉の生理的形質などの樹種固有のパラメータを用いた。各個体の死亡率は葉面積あたりの純生産量に依存する初期設定に加えて，*N. heimii* 個体の初期死亡率については個体の光環境に依存する機能をモデルに加えた。構築したモデルを用いて，異なる列幅（2 列，4 列，8 列）の伐採区における植栽後 6 年間の生残率をシミュレーションした結果，予測値は観察値と似た傾向を示した。

キーワード：アカシア，個体ベースモデル，チェンガル，熱帯林，フタバガキ

Simulation of the initial survival rate of dipterocarp plantation forests in the Peninsula Malay using an individual-based model

Rempei SUWA[1], Mohammad S. H. MANDAL[1], Tanaka KENZO[1], Shoji NOGUCHI[1], Tatsuya OHTANI[2], Daisuke HOSHINO[2], Zamah Shari NUR HAJAR[3]

[1]Japan International Research Centre for Agricultural Sciences; [2]Forestry and Forest Products Research Institute; [3]Forest Research Institute Malaysia

Abstract: In the Chikus Forest Reserve in Perak, Malaysia, different cutting row numbers (rows 1, 2, 4, 8, and 16) of *A. mangium* trees were arranged for planting Dipterocarpaceae species. The Dipterocarpaceae species exhibited different growth patterns depending on the cutting row number, especially that the initial survival rate increased significantly with increasing the cutting row number. It was hypothesized that the differences in initial survival observed in *Neobalanocarpus heimii* plantations at different cutting row number are light environment dependent, and attempted to reproduce the differences of initial survival of *N. heimii* by modifying the SEIB-DGVM, an individual-based forest dynamics model. We used climatic parameters near the study site and species-specific parameters such as morphological parameters of tree architecture, wood density, and physiological leaf traits. In addition to the initial setting where the mortality of each individual depends on the net production per leaf area, we constructed a model where the initial mortality depends on the light environment. The constructed model was used to simulate survival rates in different cutting row numbers (2, 4, and 8 rows) for 6 years after planting, and the predicted values showed a similar trend to the observed values.

Keywords: Acasia, Individual based model, Chengal, Tropical forests, Dipterocarp

I　はじめに

東南アジアにおける人間活動による森林劣化・減少は著しく進み，二酸化炭素の吸収機能や生物多様性の劣化・消失に歯止めをかけるために，熱帯林の保全・再生は喫緊の課題となっている。フタバガキ科樹種は東南アジアの熱帯林における優占種であり，その植林手法の開発は

（受理日 2025 年 2 月 4 日）

熱帯林の保全・再生のために必要である。そのような背景の下，半島マレーシアのペラ州にあるチクス森林保護区では，1992 年に外来の早生樹種である *Acacia mangium* の若い林分に，在来のフタバガキ科樹種の樹下植林が行われた。異なる列幅（1，2，4，8，16 列）で *A. mangium* が伐採されてフタバガキ科樹種のポット苗が植栽されたのち，その成長調査がおこなわれている（*1, 2, 8*）。先行研究では，植栽されたフタバガキ科樹種である *Hopea odorata* および *Dryobalanops aromatica* において，伐採列幅が増えると生残割合が下がる傾向が報告されている（*1*）。同様に，植栽されたフタバガキ科樹種である *Shorea parvifolia* と *N. heimii* において，伐採列幅が増えると生残割合が下がる傾向が報告されている（*2*）。また，植栽後 22 年経過した *N. heimii* と *Shorea leprosula* の生残率が調べられ，アカシアの被陰によるナースツリー効果のために，これら 2 種の生残率が上昇した可能性が報告されている（*8*）。なお，ナースツリーとは，一般的に植栽苗の上層に樹冠を広げ強光などのストレスを緩和し苗を保護する樹木を指す。

本研究では，これまでに報告されてきた *A. mangium* のナースツリー効果によるフタバガキ科樹種の生残率の上昇を検証するために，熱帯林への適用実績のある森林シミュレーター SEIB-DGVM（Spatially Explicit Individual Based Dynamic Vegetation Model，（*6, 7*））に，強光ストレスによる死亡率決定モデルを組みこみ，*N. heimii* の生残率の再現を試みた結果を報告する。

II 材料と方法

1．調査地 調査地は半島マレーシアのペラ州にあるチクス森林保護区である（北緯 4 度 5 分 30 秒，東経 101 度 11 分 42 秒）。チクス森林保護区で B 地区とよばれる *A. mangium* の若い林分で *N. heimii* が樹下植栽された区画のデータを用いた（*2*）。この B 地区においては，異なる方角と伐採幅で *N. heimii* が植栽されたが，本研究では東西植えの 1 列，4 列，8 列幅伐採区における植栽後 6 年間のデータを用いた（*2*）。

2．解析方法 個体ベースの森林シミュレーターである SEIB-DGVM を用いた。本研究では過去にマレーシアのフタバガキ林のシミュレーションに用いられた ver 2.4 を基盤として解析を行った（*7*）。調査地の緯度経度をもとに，グローバルモデルである National Center for Environmental Prediction（NCEP）Reanalysis Project（*3*）から気温，地温，降水量，湿度，風速，雲量などの必要となる気候パラメータを抽出した（SEIB-DGVM のウェブサイト参照：https://seib-dgvm.com/en/）。また，樹高の限界値を決める幹直径と樹高の双曲線モデルのパラメータである HGT_{max} と HGT_s は *A. mangium* 17 個体と *N. heimii* 73 個体（異なる樹齢での同一個体の繰り返し測定を含む）について，幹直径と樹高を測定し，非線形最小二乗法によって決定した（表１）。材密度（ALM_3）は，*A. mangium* 5 個体と *N. heimii* 5 個体について，成長錘を用いてコアを採取し決定した。比葉面積（*SLA*）は *A. mangium* 5 個体と *N. heimii* 5 個体について，個葉を採取して決定した。

SEIB-DGVM において，太陽光は直達光と散乱光に分けられる。各個体の葉群の形状は円柱として定義づけられ，その円柱は厚み 10 cm の円盤に分割される。この各円盤について，南中時の直達光の自己遮光と他個体による遮光プロセスの両方が考慮されて，各円盤についての相対光（PAR_direct_rel）が計算される。本研究では，各個体の円盤の PAR_direct_rel の平均値（mean_PAR_direct_rel）を個体ごとに計算した。初期設定においては，小個体においては光環境の計算が簡略化されるため，本研究では全ての個体において同じ計算方法が適用されるようにしている。

個体の死亡は SEIB-DGVM に装備されている *Mort_total* によって決まる。*Mort_total* は 0～1 の範囲を持ち，1 に近づくと死亡リスクが高まる。*Mort_total* は *mort greff* と新たに開発付加した *mort_solar* の和として，以下の式で決定される：

$$Mort_Total = mort_greff + mort_solar \quad (式\,1)$$

なお，*Mort_Total* > 1 の場合は *Mort_Total* = 1 とする。

mort_greff は昨年の葉面積当たりの純年間生産量 *ANPP*（kg m^{-2}）によって以下の式で決定される：

$$mort_greff = M_1 / (M_2^{ANPP}) \quad (式\,2)$$

ここで M_1 と M_2 は係数で，手動で任意に決定されるチューニングパラメーターとして扱った（表-1）。なお，本モデルにおいては，個体ごとに葉群が受けた光が光合成に変換されることで総光合成生産量が計算され，総光合成生産量から各器官の呼吸（維持呼吸と成長呼吸の和）が差し引かれて *ANPP* が計算される。

新規に導入した *mort_solar* は *mean_PAR_direct_rel* によって以下のべき乗式で決定される：

$$mort_solar = M_{3_sol}(mean_par_direct_rel)^{M_{4_sol}} \quad (式\,3)$$

ここで M_{3_sol} と M_{4_sol} は係数で，手動で任意に決定されるチューニングパラメーターとして扱った（表-1）。なお，*mort_solar* は樹齢が 4 齢以下の *N. heimii* において適用

され，それ以外の条件では *mort_solar* = 0.0 とする．

他の入力パラメータについては，SEIB-DGVM の初期設定値を用いた。*N. heimii* については林冠優占種タイプ（canopy），*A. mangium* については先駆種タイプ（pioneer）の初期設定値を用いた（*7*）。

表–1. 各樹種に特異的なパラメータの値

Table 1 Parameter specific to each species

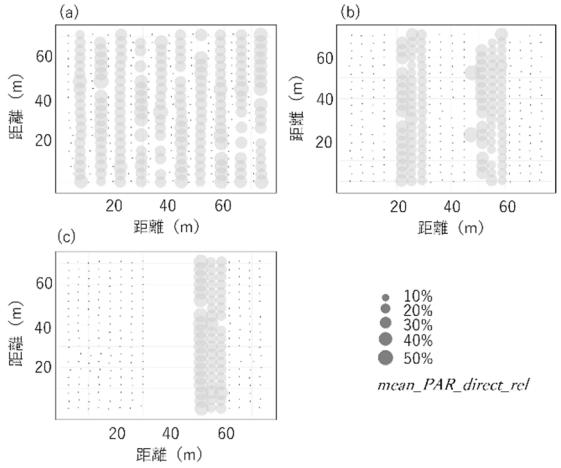
	N. heimii	*A. mangium*
SLA ($m^2\ g^{-1}$)	0.013	0.008
Alm_3 ($g\ cm^{-3}$)	0.75	0.43
HGT_{max} (m)	20.0	31.9
HGT_s ($m\ m^{-1}$)	99.0	157
M_1 (dimensionless)	0.03	0.03
M_2 ($1^{-ANPP\ kg\ m^{-2}}$)	1.5	1.5
M_{3_sol} (dimensionless)	40	n.a.
M_{4_sol} (dimensionless)	5.5	n.a.

III 結果と考察

図-1 は構築したモデルによって出力された異なる伐採幅で植林された *N. heimii* 植林地の光環境のシミュレーション結果の例である。1 列伐採区と比べると 8 列伐採区において枯死（空白地帯）が多いことは明らかである。特に 8 列伐採区では，南側のアカシアに隣接した 3 列に植栽された個体の生存率が高いことがわかる。生存個体では，*mean_PAR_direct_rel* が約 40%以下に抑えられていることがわかる。図-2 は式（3）と表－1 にある M_3 と M_4 の値によって決まる *mean_PAR_direct_rel* に沿った mort_solar の軌跡であり，*mean_PAR_direct_rel* が 40%を超えると mort_solar が急激に上昇するモデルの傾向を示しており，生存個体の *mean_PAR_direct_rel* が約 40%以下に抑えられている出力結果（図－1）と一致していることがわかる。

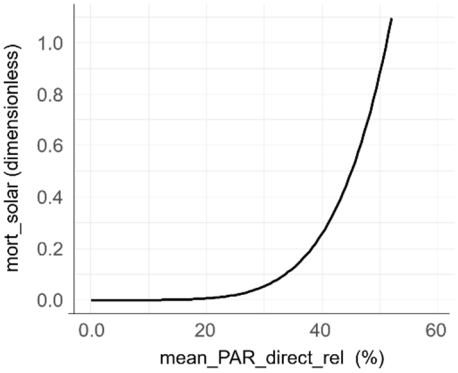
区画全体の生残率の経年変化の予測値と野外調査によって得られた観察値を表-2 に示す。6 年目の 1 列伐採区の生残率の観測値は 81%，4 列伐採区では 53%，8 列伐採区では 21%に達している。一方で，予測値においては，6 年後には，1 列伐採区では 80%，4 列伐採区では 54%，8 列伐採区では 28%に達している。8 列伐採の 1 年目と 2 年目において予測値が観察値を下回っていることを除くと，概ね再現できていると結論付けられた。

構築されたモデルでは，*mean_PAR_direct_rel* が約 40%を超えると死亡する設定が組み込まれたが，林床の積算相対照度を 40% 程度にすることで，下木の初期の生残割合を高く保てることが同調査地において報告されている（*2*）。また，全天開空度が 40%を超えると *N. heimii* の植栽苗の葉の光合成機能が強光阻害を受けることがクロロフィル蛍光測定によって明らかにされている（*4, 5*）。本研究で計算された *mean_PAR_direct_rel* と積算相対照度（2）および全天開空度（*4, 5*）は測定方法が異なる光環境の指標であり，単純な比較はできないことに注意すべきである。



図–1. 光環境のシミュレーション結果の例。植栽後 1 年目の（a）1 列伐採区、(b) 4 列伐採区および（c）8 列伐採区の *N. heimii* 生残個体の *mean_PAR_direct_rel* をバブルプロットで示している。黒い点は *A. mangium* の生残個体の樹冠位置。

Fig.1 Examples of light environment simulation results. *Mean_PAR_direct_rel of N. heimii* surviving individuals are shown with are shown in bubble plot for (a) 1-row cutting, (b) 4-row cutting and (c) 8-row cutting in the first year after planting. The black dots indicate the canopy position of surviving *A. mangium* individuals.



図–2.　キャリブレーションされた式 3 に沿った *mean_PAR_direct_rel* に対する *mort_solar* の軌跡。
Fig.2 Trajectory of *mort_solar* to *mean_PAR_direct_rel* along the calibrated equation 3.

表–2.　異なる伐採列幅における植栽後 6 年間の生残率（%）の観察値と予測値
Table 2 Observed and predicted survival rate (%) for 6 years after planting in different cutting row numbers

経過年数	観察値 %			予測値 %		
	1 列	4 列	8 列	1 列	4 列	8 列
1	97	70	59	91	70	36
2	91	63	44	89	65	33
3	88	60	30	87	63	31
4	88	56	23	86	58	31
5	86	53	21	82	55	28
6	81	53	21	80	54	28

本研究では異なる伐採幅で植栽された *N. heimii* の生残率の違いを強光ストレスによる死亡率の増加を仮定することで再現することに成功した。しかしながら，SEIB-DGVM の光環境のシミュレーションは南中時をもとにして行われており，光環境の日変化は考慮されていないため，南北に沿って植栽された場合などのシミュレーションには不向きな可能性があることには注意が必要である。SEIB-DGVM においては，個体ごとの光環境の計算に最も計算量を要するため，日変化のシミュレーションを組み入れることでシミュレーションに要する計算量が大幅に増大することが予想されるが，日変化を考慮することでより柔軟な植栽パタンのシミュレーションを実施することができる可能性が本研究によって示唆された。

謝辞：SEIB-DGVM の開発者である佐藤永博士には，SEIB-DGVM のウェブサイト（https://seib-dgvm.com/en/）を通じて，多大な支援をいただいた。マレーシア森林研究所，ペラ州森林局のスタッフには現地調査において多大な支援をいただいた。JICA 複層林プロジェクト関係者からは，様々なデータの提供をいただいた。

引用文献

(1) 大谷達也（2011a）半島マレーシア低地における複層林造成技術の評価 ―ビドー JICA プロジェクト試験地の 17 年後 前編―. 海外の森林と林業 81: 8–13
(2) 大谷達也（2011b）半島マレーシア低地における複層林造成技術の評価―ビドー JICA プロジェクト試験地の 17 年後 後編―. 海外の森林と林業 82: 33–37
(3) Kalnay E, et al (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, B. Am Meteorol Soc 77: 437-471
(4) Kenzo T, Yoneda R, Matsumoto Y, Mohamad Azani A, Nik Majid M (2008) Leaf photosynthetic and growth responses on four tropical tree species to different light conditions in degraded tropical secondary forest, Peninsular Malaysia. Japan Agricultural Research Quarterly 42: 299-306
(5) Kenzo T, Yoneda R, Matsumoto Y, Mohamad Azani A, Nik Majid M (2011) Growth and photosynthetic response of four Malaysian indigenous tree species under different light conditions. Journal of Tropical Forest Science 23: 271-281
(6) Sato H, Itoh A, Kohyama T (2007) SEIB-DGVM: a new Dynamic Global Vegetation Model using a spatially explicit individual-based approach. Ecol Model 200: 279–307
(7) Sato H (2009) Simulation of the vegetation structure and function in a Malaysian tropical rain forest using the individual-based dynamic vegetation model SEIB-DGVM. Forest Ecology and Management 257: 2277-2286, doi:10.1016/j.foreco.2009.03.002
(8) 田中憲蔵, 大谷達也, 星野大介, Zamah Shari NUR HAJAR (2023) 植栽後 20 年以上経過したマレーシアのフタバガキ科樹木の成長特性. 関東森林研究 74: 33–36

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

落葉広葉樹二次林における枯死木の動態

長池卓男[1]

[1]山梨県森林総合研究所

要旨：山梨県北部のミズナラやシラカンバにより構成される落葉広葉樹二次林の 20 年間の調査から，生立木から枯死木（枯立木，倒伏木）へのプロセスや，枯立木から地面への供給された材積などについて明らかにした。立木密度，胸高断面積合計ともにシラカンバからミズナラに優占種が交代していた。胸高断面積成長は，ミズナラがシラカンバを大きく上回っていた。各調査期間中に発生した枯死木の多くをシラカンバが占め，発生した枯死木のほとんどは枯立木であった。各調査時のシラカンバの枯立木サイズは，樹高，胸高直径ともに大きくなっており，材積も増加していた。枯立木は，立ち枯れ後に高さを減じながら地面に供給されることが多かった。枯立木から地面に供給された材積は，1 年あたり，概ね 3.5 m^3/ha 程度であった。

キーワード：枯死木，枯立木，シラカンバ

Dynamics of dead trees in a secondary deciduous broadleaf forest

Takuo NAGAIKE[1]

[1]Yamanashi Forest Research Institute

Abstract: A 20-year survey of a deciduous broadleaf secondary forest in northern Yamanashi Prefecture, consisting of *Quercus crispula* and *Betula platyphylla*, revealed the process from live trees to dead trees (fallen trees and snags) and the volume of wood supplied from snags to the ground. The dominant species shifted from *B. platyphylla* to *Q. crispula* in terms of both tree density and total basal area at breast height. In terms of basal area growth at breast height, *Q. crispula* far exceeded *B. platyphylla*. *B. platyphylla* accounted for most of the dead trees that occurred during each survey period, and most of the dead trees that occurred as snags. The size of *B. platyphylla* snags at each survey period had increased in both tree height and diameter at breast height, and the snag volume had also increased. Snags were often supplied to the ground after dying, decreasing in height. The volume of wood supplied to the ground from snags was approximately 4 m^3/ha per year.

Keywords: *Betula platyphylla*, Dead trees, Snags

I　はじめに

枯死木は，生物相のハビタットや炭素循環のソースなど，生態的に重要な役割を果たしている（*8*）。枯死木は，「枯立木」と「倒伏木」に大きく二分され，それぞれの生態的機能も異なる（*6*）。前者に比較して，後者は地面に接しているために腐朽速度が速く，樹体からの炭素放出が速いとされる（*3, 10, 14*）。

また，枯立木も，枯死からの時間経過後，腐朽や物理的な損傷による折損や倒伏が生じ，地面に接することとなる。近年の気候変動，特に乾燥化は，枯立木の地際部を弱めることから倒伏を早めているとされ，枯立木の減少が炭素放出を加速化させることも指摘されている（*1*）。

森林の枯死量として，落葉・落枝量の定量化は進んできたが，幹部の枯死量や地面への供給速度などについてはまだ不明な点が多い（*12, 15*）。枯死木の林分内での枯立木の蓄積やサイズ構造（*5*），枯立木となってから倒伏までの期間（*11, 13*）などに関する研究は蓄積されてきた。しかしながら，枯立木は突然倒伏する場合もあれば，その高さを減じながら地面に供給される場合もある（*2*）が，枯立木の動態についてのデータはまだ多くはない。

本研究では，山梨県北部のミズナラやシラカンバにより構成される落葉広葉樹二次林の 20 年間の調査から，生立木から枯死木（枯立木，倒伏木）へのプロセスや，枯立木から地面への供給された材積などについて明らかにした。

II　材料と方法

1．調査地　山梨県北杜市の標高 1330 m に位置する山梨県有林において調査を行った。当該地は，2003 年にシラカンバ観賞用の景観伐採（低木の伐採）が実施された。2024 年には，約 1km 離れた場所でミズナラへのナラ枯れが確認されたが本調査地では確認されていない。

（受理日 2024 年 12 月 24 日）

2. 調査項目　2004 年、30×150 m の調査区を設定し，胸高直径 3 cm 以上の生立木の毎木調査を実施した。その後，5 年ごと（2009，2014，2019，2024 年）に再測し，胸高直径 3 cm 以上の生立木・枯立木の毎木調査を実施した。2004 年以降発生した枯死木について，形態（倒伏木、枯立木）と，枯立木の樹高を記録した。2004 年当時の林齢は約 50 年生とされている。枯立木は，胸高直径 3cm 以上で樹高 1m 以上を対象とした。枯立木について，前回調査よりも樹高が減じていた場合，減じた部分が地面に供給されたとした。

枯立木および枯立木から地面に供給された材積は，(直径)^2×長さ（*15*）で求めた。

III　結果と考察

調査区は，立木密度，胸高断面積合計ともに 2004 年にはシラカンバが優占していたが、2024 年にはミズナラが優占していた（表–1）。平均胸高直径においても，ミズナラの方がシラカンバよりも大きくなっていた。長池（*9*）は，この調査地の 2014 年時点でウワミズザクラやヒトツバカエデにニホンジカの剥皮が増加していることを示しているが，その後の剥皮の増加は顕著ではなかった。

表–1.　調査地の林分構造の概要

Table 1 Outline of stand structure in the study plot

立木密度（生立木）/ha

	2004	2009	2014	2019	2024
シラカンバ	484.4	411.1	286.7	237.8	144.4
ミズナラ	237.8	237.8	233.3	228.9	224.4
その他	157.8	153.3	226.7	231.1	280.0
合計	880.0	802.2	746.7	697.8	648.9

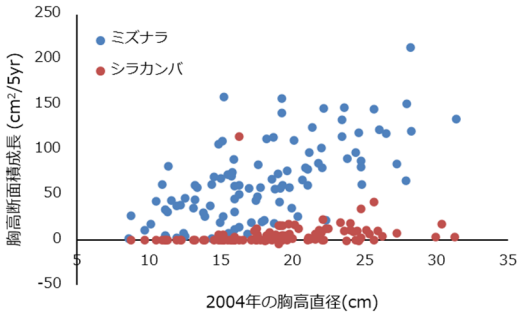
胸高断面積合計（生立木）m^2/ha

	2004	2009	2014	2019	2024
シラカンバ	13.3	12.3	9.9	9.1	6.2
ミズナラ	6.3	7.4	8.4	9.6	10.9
その他	5.2	5.7	6.2	6.3	6.9
合計	24.9	25.4	24.4	25.0	24.1

平均胸高直径（生立木）cm

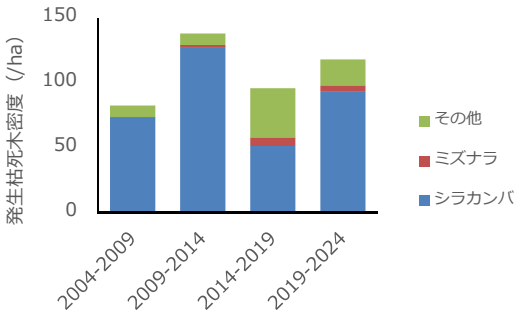
	2004	2009	2014	2019	2024
シラカンバ	18.2	19.0	20.5	21.6	23.0
ミズナラ	17.6	19.1	20.5	22.1	23.9
その他	16.0	17.7	16.7	13.8	15.5
全体	18.0	19.0	18.6	19.3	19.0

胸高断面積成長で見ると，ミズナラがシラカンバを大きく上回っていた（図–1）。各調査期間中に発生した枯死木は，ほとんどをシラカンバが占めており（図–2），また，発生した枯死木のうち，ほとんどは枯立木であった。これらのことから，遷移初期種であるシラカンバの衰退と遷移後期種であるミズナラの発達（*7*）がこの林分では見られていた。



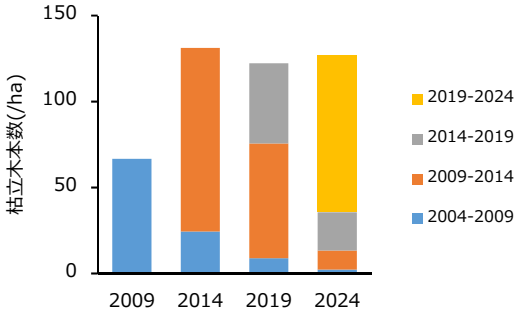
図–1.　ミズナラとシラカンバの 2019-2024 年の胸高断面積成長

Fig.1 Basal area growth of *Quercus crispula* and *Betula platyphylla* between 2019 and 2024



図–2.　各調査期間に発生した枯死木密度

Fig.2 Density of newly occurred dead wood in each census period

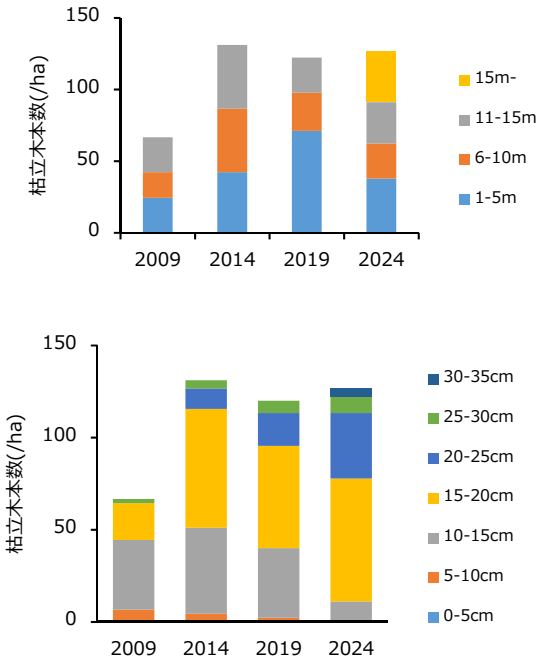


図–3.　各調査時における発生時別の枯立木本数（シラカンバ）

Fig.3 Snags density of *Betula platyphylla* by time of occurrence in each census time

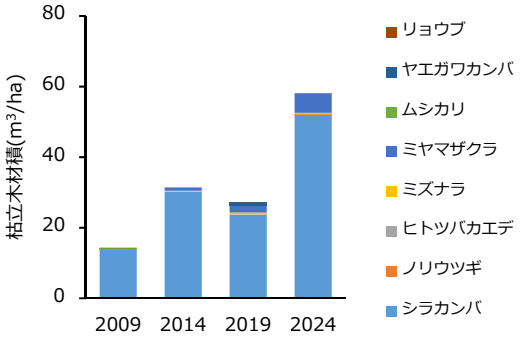
各調査時における発生時別のシラカンバ枯立木本数は，2014，2019，2024 年とも，ha あたり約 140 本程度であった（図–3）。各調査時の枯立木は，発生時期が異なる枯立木で構成されており，発生からの年数が経過するほど減少していたが，新たに発生した枯立木が加わっていた。

シラカンバの枯立木サイズは，樹高，胸高直径ともに大きくなっており（図–4），調査初期では小径被圧木の枯死であったものが，上層でのミズナラとの競争による枯死に推移してきたものと思われる。サイズの増大化に伴い，枯立木の材積も増加していた（図–5）。



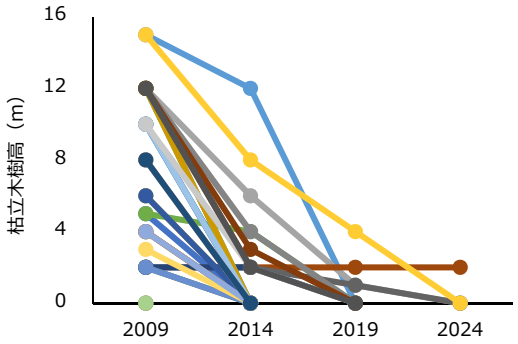
図–4.　各調査時の枯立木の樹高と胸高直径（シラカンバ）

Fig.4 Height and diameter at breast height of snags of *Betula platyphylla* in each census time



図–5.　各調査時の枯立木材積

Fig.5 Stem volume of snags

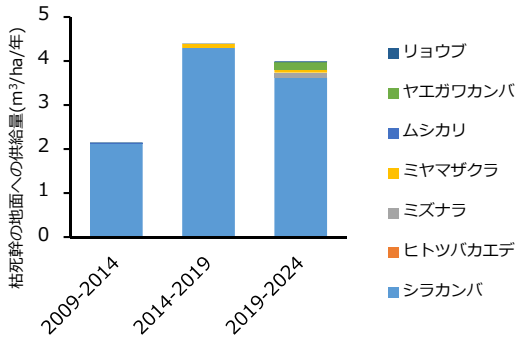


図–6.　2009 年に発生していた枯立木樹高の変化（シラカンバ）

Fig. 6 Changes of height of *Betula platyphylla* snags occurred in 2009

発生した枯立木は，樹高を減じながら地面に供給されていた（図–6）。枯死後すぐに倒伏するも見られるが，立ち枯れ後に高さを減じながら地面に供給される枯立木が本調査地では多かった。

枯立木から地面に供給された材積は，1 年あたり，概ね 3.5 m^3/ha（平均±標準偏差：3.5±1.2 m^3/ha）程度であることが明らかとなった（図–7）。本研究では，地面に供給された幹の腐朽度を調べていないため，枯立木から地面への炭素供給量を計算できないが，材積としての供給量を概算することができた。一方，本研究では枯死木として遷移初期種であるシラカンバを中心として解析したが，枯立木へのなりやすさや枯立木の倒伏しやすさは樹種により異なる（*2, 13*）。今後は，他樹種と比較することで，枯立木の森林生態系での役割のさらなる解明につながるものと思われる。



図–7.　各調査期間に枯立木から地面に供給された材積

Fig. 7 Volume provided on ground surface from snags in each census period

引用文献

(1) Aakala T, Storaunet KO, Jonsson BG, Korhonen KT (2024). Drivers of snag fall rates in Fennoscandian boreal forests. Journal of Applied Ecology 61: 2392–2404

(2) Barrett TM (2014) Storage and flux of carbon in live trees, snags, and logs in the Chugach and Tongass national forests. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station General Technical Report PNW-GTR-889. https://www.fs.usda.gov/pnw/pubs/pnw_gtr889.pdf (2024.11.1 参照)

(3) Hararuk O, Kurz WA, Didion M (2020) Dynamics of dead wood decay in Swiss forests. Forest Ecosystems 7: 36

(4) Kawanishi A, Sakai Y, Ishizuka S, Hashimoto S, Komatsu M, Imaya A, Yamashita N, Hirai K, Furusawa H, Aizawa S (2024) Increased deadwood carbon stocks through planted forestry practices: insights from a Forest Inventory Survey in Japan. Carbon Management 15: 2315087

(5) Lutz JA, Struckman S, Germain SJ, Furniss TJ (2021) The importance of large-diameter trees to the creation of snag and deadwood biomass. Ecological Processes 10: 28

(6) McComb W, Lindenmayer D (1999) Dying, dead, and down trees. In Maintaining biodiversity in forest ecosystems. Cambridge Univ. Press 335-372 Edited by Hunter ML.

(7) 溝口康子・山野井克己・宇都木玄 (2021) 老齢シラカンバを含む落葉広葉樹林の枯死率の変化-個体数及び現存量をもとにした枯死率の違い. 日本森林学会誌 103: 291-296

(8) 長池卓男 (2014) 森林生態系の多様性維持における枯死木の役割と管理. 樹木医学の基礎講座　海青社　60-65　樹木医学会編

(9) 長池卓男 (2015) 整理伐されたシラカンバ二次林における 10 年間の林分動態. 山梨県森林総合研究所研究報告 34: 5-8

(10) Oberle B, Ogle K, Zanne AE, Woodall CW (2018) When a tree falls: Controls on wood decay predict standing dead tree fall and new risks in changing forests. PLoS ONE 13(5): e0196712

(11) Oettel J, Zolles A, Gschwantner T, Lapin K, Kindermann G, Schweinzer KM, Gossner MM, Essl F (2023) Dynamics of standing deadwood in Austrian forests under varying forest management and climatic conditions. Journal of Applied Ecology 60: 696–713

(12) 大塚俊之 (2005) 生態学的手法による植物の生産と枯死の定量. 日本生態学会誌 55: 117-124

(13) Onodera K, Tokuda S (2015) Do larger snags stand longer? –snag longevity in mixed conifer–hardwood forests in Hokkaido, Japan. Annals of Forest Science 72: 621-629

(14) Strukelj M, Brais S, Quideau SA, Angers VA, Kebli H, Drapeau P, Oh SW (2013) Chemical transformations in downed logs and snags of mixed boreal species during decomposition. Canadian Journal of Forest Research 43: 785-798

(15) 依田恭二 (1971) 森林の生態学. 築地書館, 東京, 331pp

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

九州南部の常緑広葉樹二次林の林齢による林分構造および種組成の変化

五十嵐哲也[1]・佐藤保[1]

[1]国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

要旨：林分構造の複雑さは生物多様性と相関することが知られているが，樹木種の多様性や組成との関係については研究例が少ない。そこで本研究では九州南部の常緑広葉樹二次林の林齢 27 年から 168 年の常緑広葉樹二次林５林分に７プロットを設置し，FHD (Foliage Height Diversity)と，林齢，樹木種の種多様性および種組成との関係を解析した。一般に FHD の高さは生物多様性と正の相関を持つとされるが，本調査では逆の傾向が見られた。また，FHD と極相種の割合との間に高い正の相関が見られた。この結果から，FHD は，林分の遷移段階を推定する指標として広域での推定へ繋がる可能性がある。

キーワード：暖温帯，常緑広葉樹二次林，種多様性，遷移段階, FHD

Changes in stand structure, species diversity, and species composition depending on forest age in secondary evergreen broad-leaved forests in southern Kyushu

Tetsuya IGARASHI[1], Tamotsu SATO[1]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: The complexity of forest structure is known to be correlated with biodiversity. However, there are few studies on the relationship between forest structure and species diversity/composition of tree species. Therefore, in this study, we placed 7 plots for 5 stands of evergreen broad-leaved secondary forests (27yr to 168yr old) in southern Kyushu. We estimated the relationship between FHD (Foliage Height Diversity) and parameters about age, species diversity, and species composition of tree species. In general, the high level of FHD has a positive correlation with diversity. Nevertheless, the opposite trend was found in this survey. In addition, there is a strong correlation between FHD and the proportion of climax species. Based upon these results, we may be able to use FHD as an indicator of the successional stage of forests, and applicable to the wide-area estimation.

Keywords: Warm temperate, secondary evergreen broad-leaved forests, species diversity, successional stage, FHD

I　はじめに

林分構造の複雑さは生物多様性と相関することが知られているが，樹木種の多様性や組成との関係については研究例が少ない。林分構造，特に階層構造と種多様性，種組成との関係を明らかにすることで，将来的には種多様性や種組成を広域推定することが可能になる可能性がある。林分の階層構造の複雑さを表す指標の一つに FHD（Foliage Height Diversity）がある。FHD は森林の各階層の葉群密度に Shannon の多様度指数を当てはめて算出するもので，鳥類などの種多様性と相関を持つことが知られている（*1*, *7*）。しかし，樹木の種多様性や種組成との関係については未だ情報が少ない（*1*）。そこで本研究では, 暖温帯の常緑広葉樹林二次林を対象として, 林齢，階層構造の複雑さ，種多様性，および種組成の間の関係を明らかにすることを目的とした。

II　材料と方法

1. 調査地　鹿児島県伊佐市の国有林の 27 年生（O27），31 年生（O31），42 年生（O42），および 168 年生（O168a, O168b）の 4 林分に 5 プロット，熊本県水俣市の IBP 試験地の 106 年生林分（M106a，M106b）に 2 プロットを設置し計 7 プロットとした。いずれのプロットでも優占種はコジイ，カシ類，タブノキ，イスノキなどの常緑広葉樹であった（表–1）。

表–1.　BA%による優占種リスト（BA で10%以上の種）
Table 1 List of dominant species by percentage of BA (Only species that accounted for 10% or more of the total BA).

種名	O27	O31	O42	M106a	M106b	O168a	O168b	遷移タイプ	生活型	常緑・落葉
コジイ	17	42	90	0	3	0	0	極相種	高木	常緑
タブノキ	0	13	1	4	59	17	13	極相種	高木	常緑
ウラジロガシ	0	9	0	58	27	2	3	極相種	高木	常緑
イスノキ	0	1	1	2	0	38	25	極相種	高木	常緑
イチイガシ	2	3	0	2	2	0	41	極相種	高木	常緑
ツクバネガシ	0	0	0	2	0	24	0	極相種	高木	常緑
シロダモ	19	0	1	0	0	0	1	二次林種	高木	常緑
シラカシ	0	18	0	0	0	0	0	極相種	高木	常緑
ミミズバイ	12	0	0	0	0	0	0	極相種	亜高木	常緑

（受理日 2025 年 1 月 8 日）

2. 調査項目　半径 15m の円形プロットを設置し，プロット内の胸高直径（DBH）が 5cm 以上の個体の毎木調査を行い，DBH と樹種を記録した。また，DBH 最小の個体と最大の個体を含む 10 個体を抽出して樹高を測定し，DBH と樹高とのアロメトリー式を作成して全個体の樹高を推定した。また，円形プロットの直径（30m）ライン上の葉群の位置をレーザー樹高測定器によって測定した。森林の縦断面を 1m 角のピクセルに分割し，高さ 1m ごとの各階層で葉が出現したピクセルの割合を葉群密度の代用として FHD を計算した（*3*）。

3. 解析　林分構造パラメータとして，毎木調査の結果から平均樹高（m），最大樹高（m），平均 DBH（cm），最大 DBH（cm），立木密度（本/ha），胸高断面積合計（m^2/ha）を算出した。種多様性のパラメータとしては，プロット内に出現した種数（SR），シャノンの多様度指数 H’，およびシンプソン多様度の逆数 (inverse Simpson) 1/D をプロット内の出現種の個体数から算出した。林分の遷移段階については，出現種を図鑑の記載（*5*, *6*）と過去の報告（*2*）を参考に，主に出現する森林の遷移段階によって人工林や二次林に多く見られるアラカシやエゴノキなどの二次林種（遷移初期種・中期種）と原生林や極相林に多く見られるウラジロガシやイスノキなどの極相種（遷移後期種）に分け，極相種の本数割合を極相種率（Climax species rate）とした。変数間の相関の有意性検定には Spearman の順位相関係数を用いた。ただし，林齢と FHD の関係については最小二乗法を用いて対数曲線で近似した。

表–2.　間接傾度分析に用いた変数リスト（林齢，立地，種多様性，FHD，林分構造，および極相種率）

Table 2 List of variables used in the indirect slope analysis (forest age, site, species diversities, FHD, forest structures, and climax species rate)

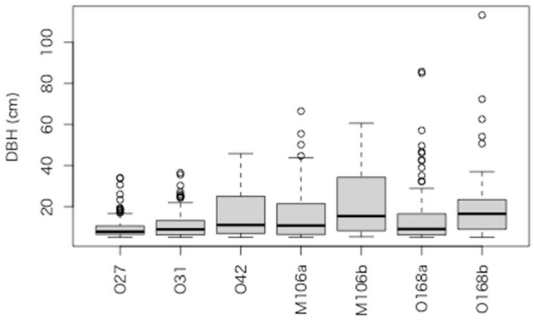
site	age	Elevation (m)	Slope (degree)	SR	H'	1/D	FHD	Mean Height (m)	Max Height (m)	Mean DBH (cm)	Max DBH (cm)	Density (no./ha)	BA (m^2/ha)	Climax Species rate
O27	27	484	4.5	20	10.84	7.51	2.44	10.2	19.6	9.6	34.1	2,137	19.6	0.43
O31	31	445	23.5	15	10.87	9.40	2.63	10.9	20.4	11.3	36.4	2,576	35.8	0.75
O42	42	457	14.9	19	7.94	3.93	2.76	12.8	23.4	16.4	45.8	1,699	50.2	0.81
M106a	106	542	27.8	17	8.86	5.87	2.89	12.0	28.6	16.1	66.5	1,104	37.0	0.94
M106b	106	581	35.3	14	7.09	4.98	3.16	15.0	27.5	22.8	60.6	1,076	66.8	0.99
O168a	168	476	2.3	17	8.23	5.33	2.87	11.6	31.4	15.9	85.8	1,203	48.2	0.95
O168b	168	502	7.9	15	8.42	5.65	3.04	13.9	34.1	21.0	113.3	694	45.2	0.92

林分構造と種多様性，種組成の関係を推定するため，種ごとの胸高断面積合計をアバンダンスとして各プロット間の種組成の類似度を算出し，類似度が高いプロットが近傍に配置されるように NMDS（非計量多次元尺度構成法）を用いて 2 次元プロット上に配置した。各プロットの種多様性，出現種ごとの個体数，各種林分構造パラメータを環境変数（表–2）として間接傾度分析を行い，有意な相関が見られた方向を NMDS プロット上に矢印で示した。すべての統計解析は R 言語（version 4.4.0）を用いて行った。

III　結果と考察

1. 種組成と優占種　全プロット合わせて 42 種の樹木が出現し，常緑樹が 29 種，落葉樹が 13 種，高木種が 21 種，亜高木種が 21 種，二次林種（遷移初期種・中期種）が 19 種，極相種（遷移後期種）が 23 種であった。優占種はいずれのプロットでも常緑広葉樹であったが，コジイは若齢林で多かった。一方高齢林ではタブノキ，ウラジロガシ，イスノキなどが多かったが，優占種は調査地ごとに異なっていた。これらの優占種の違いは立地や発達段階に応じたものと考えられる。（表–1）。これらの違いは先行研究の，コジイは常緑広葉樹の中では耐陰性が低く，二次遷移の初期に優占する（*10*），タブノキは鳥散布種子によって林内に多くの稚樹が更新する（*9*），イスノキは耐陰性が高く，林内での稚樹の生残性が高い（*9*）などの報告と矛盾しないことから，これらの林分が暖温帯の常緑広葉樹二次林として一般的な遷移過程にあると推察した。

2. 林齢と林分構造の関係　最大胸高直径は林齢とともに大きくなっている（図–1）が，平均胸高直径（箱ひげ図の枠内の水平の実線）は林齢が上がってもあまり大きくならず，サイズの小さな個体の林床への新規加入が続いていることを示す。



図–1.　各プロットの胸高直径（cm）の箱ひげ図

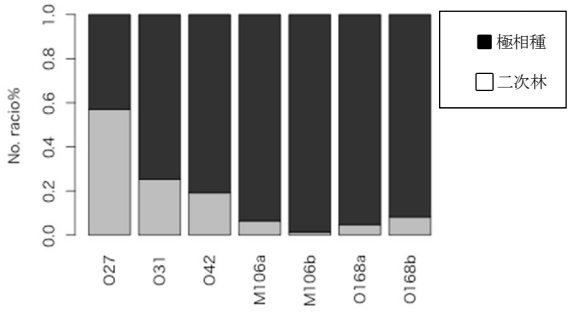
Fig. 1 Box-and-whisker plot of DBH (cm) for each plot

樹高についても同様の傾向であった。立木密度 (N/ha) は若齢林で高く，高齢林で低かった（表–2）。31 年生の O31 では 2500 本を越えていたが，168 年生の O168b で

は 700 本を下回っていた。林木の成長に伴う競争によって密度が下がっていることに加え，大径木が空間を占有していることによる個体密度の減少も影響していると見られる。

BA（m^2/ha）の若齢の 3 プロット（O27, O31, O42）から，M106b（106 年生）にいたる増加（20m^2/ha→67m^2/ha）が撹乱のない場合の BA の成長と見られる（表–2）。M106a （106 年生）は 1993 年の台風による撹乱，O168a および O168b（168 年生）では河畔の立地による河川由来の撹乱によって，それぞれ BA が M106b と比べて小さかったと推察した。

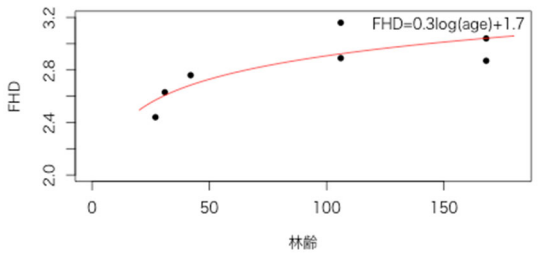
3. 林齢と種多様性および遷移段階の関係　林齢と種数の関係は，やや減少傾向だが，相関は低く（$p = 0.45$, $r = 0.31$），有意ではなかった。出現種の遷移段階では，二次林種（遷移初期種・中期種）の本数割合が 27 年生の 2039ne では 50%を超えるが，林齢とともに減少し，M106b（106 年生）では 1%まで減少していた（図–2）。M106a, O168a, O168b では 5%前後の二次林種が見られたが，これは前述の台風や河川による撹乱の影響と考えられる。以上より，林齢の増加とともに，単純な種数の増加や減少ではなく，二次林種から遷移後期種への種の交代が起きていることが明らかになった。



図–2.　植生遷移上の位置づけによる種の組成の違い
Fig. 2 Differences in species composition with respect to position on vegetation succession

4. 林齢と FHD の関係　高齢林で FHD が高い傾向があった（図–3）。最小二乗法で推定した対数近似曲線のパラメータはいずれも当てはまりが 5%有意だった。

林齢の増加によって,初期には樹高成長によって，高齢林ではギャップ形成に伴う下層への稚樹の侵入によって，林分構造は複雑化し，FHD が増加するものと推察した。

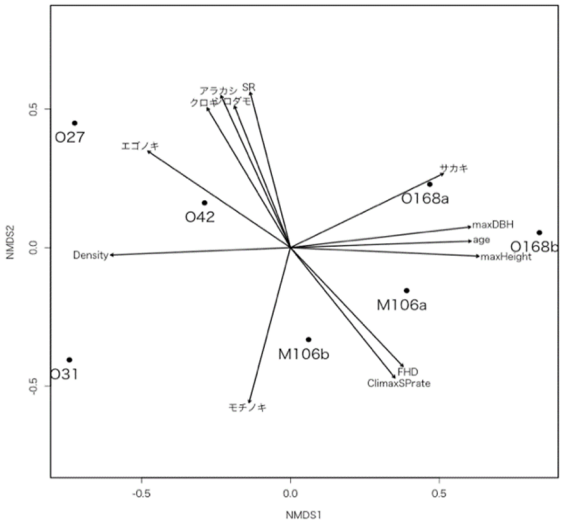


図–3.　林齢と FHD の相関
Fig. 3 Correlation between forest age and FHD

5. NMDS プロットと間接傾度分析　NMDS プロットと間接傾度分析の結果を図–4 に示した。

NMDS による布置によって，若齢林（O27, O31, O42）がプロットの左に，高齢林（M106a-b, O168a-b）が右に配置された。林齢（age），最大樹高（maxHeight），最大胸高直径（maxDBH）との相関を示す矢印も林齢と同様に右向きであり，密度（Density）が林齢と逆の左方向で高かったことから，プロットの横軸が林齢またはサイズを表していると推察した。

プロットの左上方向で種数（SR）が多く，同じく左上方向で本数の多い種として，アラカシ，シロダモ，クロキ，エゴノキの 4 種が検出された。これらはいずれも二次林や造林地などでよく見られる二次林種的な性質を持った種である（*2*）。また，種数や二次林種とは逆の右下方向で FHD と極相種の割合（ClimaxSPrate）が高かった。以上より，FHD の高い林分ほど種数と二次林種の割合が少なく，極相種の割合が高い傾向があることが明らかになった。

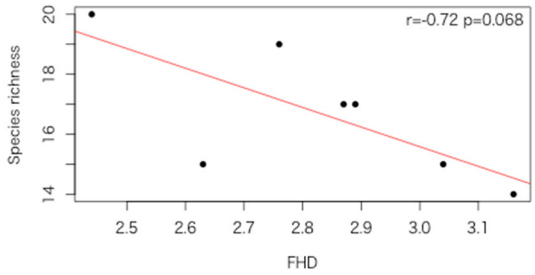


図–4.　NMDS プロットと間接傾度分析
Fig. 4 NMDS plot and Indirect Gradient Analysis

暖温帯照葉樹林と多くの共通種を持つ亜熱帯照葉樹二次林では,萌芽能力の高い種が多いため，伐採後に種数の減少が起こりにくい（*8*, *11*）。そのため，伐採後いち早く成長する萌芽個体に加えて，埋土種子や散布種子から二次林種（遷移初期種・中期種）が侵入して種多様性の高い若齢林を形成する（*11*）。本研究の調査地でも同様のプロセスで伐採直後に種多様性が高まったものと推察する。

その後，萌芽個体によって構成された閉鎖樹冠に被陰された二次林種が減少した後に，競争による萌芽個体の単幹化とギャップ形成によって下層の極相種が成長して階層構造を複雑化し，FHD が高まったとみられる(4)。また,極相種の多くが重力散布種で散布距離が短いことから，新たな加入が少ないことが，FHD の高い高齢林分で種数が少ない傾向が見られる理由と推察した。

間接傾度分析で FHD との関係が見られた種数，および極相種の割合との相関有意性を Spearman の順位相関係数を用いて検定した。FHD と種数の直接の相関は有意ではないが（p＝0.068），間接傾度分析の結果同様，FHD が大きいほど種数が少ない傾向(r = -0.72)があった（図–5）。



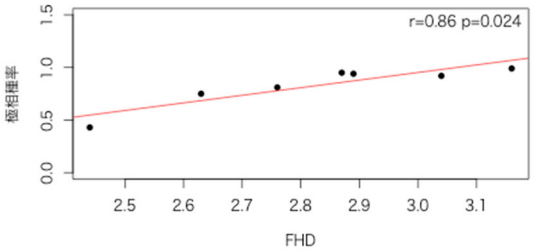
図–5.　FHD と種数の相関

Fig. 5 Correlation between FHD and species richness

また，FHD と極相種の割合との間には間接傾度分析の結果同様，強い相関（r＝0.9，p＝0.005）が見られた（図–6）。そのため，FHD は暖帯の常緑広葉樹林においては，種多様性の高さを示す指標としては適さないが，林分の遷移段階を表す指標として利用できる可能性がある。

IV　まとめ

九州南部の広葉樹二次林では FHD が高いほど二次林種の本数割合が小さく，全種数が少ない傾向があった。FHD と極相種（遷移後期種）の割合の間に高い正の相関があり，林分の遷移段階を推定する指標として利用できる可能性がある。この結果を広域での遷移段階の推定へ応用するためには,様々な森林タイプでのより広い範囲での検証が必要と考える。



図–6.　FHD と極相種率の相関

Fig. 6 Correlation between FHD and climax species rate.

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP23K23657 の助成を受けたものです。

引用文献

(1) Coverdale TC, Davies AB (2023) Unravelling the relationship between plant diversity and vegetation structural complexity: A review and theoretical framework. Journal of Ecology 111: 1378–1395

(2) 服部保・南山典子・武田義明 (2005) 綾南川上流域における照葉原生林と二次林・人工林の種組成および種多様性の比較. 人と自然 15: 1–8

(3) 五十嵐哲也 (2019) 森林の垂直構造の簡易な定量的測定法の開発. 関東森林研究 70: 61–64

(4) 井藤宏香・伊藤哲・塚本麻衣子・中尾登志雄 (2008) 照葉樹二次林における林冠構成萌芽株集団の動態が林分構造の変化に及ぼす影響. 日本森林学会誌 90: 46-54

(5) 北村四郎・村田源 (1971) 原色日本植物図鑑木本編(I). 保育社

(6) 北村四郎・村田源 (1979) 原色日本植物図鑑木本編(II). 保育社

(7) MacArthur RH, MacArthur JW (1961) On bird species diversity. Ecology 42: 594–598

(8) 新里孝和・西端統宏・呉立潮 (2002) 西表島における天然林皆伐 13 年後の二次遷移. 琉球大学農学部学術報告 49: 231–239

(9) Sato T, Tanouchi H, Takeshita K (1994) Initial regenerative processes of *Distylium racemosum* and *Persea thunbergii* in an evergreen broad-leaved forest. Journal of Plant Research 107: 331–337

(10) 佐藤保・山川博美・野宮治人・安部哲人・齊藤哲・大寺義宏 (2021) 照葉樹老齢二次林の 21 年間にわたる林分構造の変化. 森林総合研究所研究報告 20: 37–47

(11) 高橋玄・新里孝和・高嶋敦史 (2008) 亜熱帯照葉樹林における皆伐 14 年後の二次遷移. 日本森林学会大会発表データベース 119: 535

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

連年施肥を受けたウダイカンバ・トドマツ林における葉の炭素・窒素安定同位体比の経時変化

長倉淳子[1]・古澤仁美[1]・中下留美子[1]・伊藤江利子[2]・橋本徹[3]

[1]森林総研・[2]森林総研関西・[3]森林総研北海道

要旨：樹木の水ストレスの程度や利用する窒素の給源は，林齢や施肥の有無によって変動すると予想される。炭素安定同位体比（$\delta^{13}C$）を水ストレスの指標，窒素安定同位体比（$\delta^{15}N$）を樹木が利用する窒素の指標として，1978 年から現在まで連年施肥を受けているウダイカンバ林とトドマツ林から経時的に採取した葉について炭素・窒素安定同位体比を測定した。林齢の増加に伴って $\delta^{13}C$ は低下する傾向がみられた。ウダイカンバでは $\delta^{13}C$ が施肥区でやや大きかったが，両樹種とも処理による差は小さかったことから，樹木の水ストレスの程度への施肥の影響は小さいと考えられた。ウダイカンバの $\delta^{15}N$ は処理区間で違いがみられなかったが，トドマツの $\delta^{15}N$ は無施肥区より施肥区で高かったことから，トドマツはウダイカンバより肥料の窒素に依存していると考えられた。

キーワード：$\delta^{13}C$，$\delta^{15}N$，水ストレス，施肥，林齢

Long-term changes in carbon and nitrogen stable isotope ratios in leaves of Monarch birch and Todo fir stands that have received repeated fertilization

Junko NAGAKURA[1], Hitomi FURUSAWA[1], Rumiko NAKASHITA[1], Eriko ITO[2], Toru HASHIMOTO[3]

[1] Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI); [2] Kansai Research Center, FFPRI; [2] Hokkaido Research Center, FFPRI

Abstract: It is expected that the degree of water stress in trees and the sources of nitrogen utilized by trees will change depending on stand age and the presence or absence of fertilization. Using the carbon stable isotope ratio ($\delta^{13}C$) as an indicator of water stress and the nitrogen stable isotope ratio ($\delta^{15}N$) as an indicator of the nitrogen used by trees, we measured the carbon and nitrogen stable isotope ratios in leaves collected over time from Monarch birch and Todo fir stands that have been receiving annual fertilization since 1978. There was a tendency for $\delta^{13}C$ to decrease with increasing forest age. In the case of Monarch birch, $\delta^{13}C$ was slightly higher in the fertilized plot, but the difference between the treatments was small, so it was thought that the effects of fertilization on the water stress of both tree species were small. Although there was no difference in $\delta^{15}N$ between the treatments for Monarch birch, $\delta^{15}N$ for Todo fir was higher in the fertilized plots than in the unfertilized (Control) plot, suggesting that Todo fir is more dependent on the nitrogen in the fertilizer than Monarch birch.

Keywords: δ13C, δ15N, water stress, fertilization, forest age

I　はじめに

林地への施肥は，幼齢時は植栽木の林冠閉鎖を早めるため，林冠閉鎖後は林地の生産性を高めるために行われる(*11*)。しかし，成木に対して継続的に施肥が行われることは少ない。森林総合研究所北海道支所羊ヶ丘実験林の土壌環境長期モニタリング試験林では，施肥や酸性降下物が樹木と土壌に及ぼす影響を検証するため，1978 年から現在（本報告では 2023 年）まで連年施肥が継続されている。施肥による樹木の成長促進効果は若齢期にはみられたが(*1*)，現在では明瞭な効果は認められていない(*2*)。しかし、施肥区で土壌 pH の低下，可給態 P と交換性 Al の増加，交換性 Ca, Mg の低下(*7*)，葉の Mn 濃度の増加がみられる(*6*)。窒素の供給量が増加すると，一般に植物は蒸散量が増加し，地上部／地下部比も増加するため(*9*)，施肥によって水ストレスを受けやすくなると考えられる。一方で，林齢が高くなると，樹高の増加により樹冠部への水分輸送が困難になり，水ストレスを受けやすくなると考えられる(*4*)。また、ヒノキは林齢 30 年を超えると土壌表層の窒素をより多く吸収することが報告されている(*3*)。このように、林齢によって，樹木の利用する窒素の供給源は変化する可能性がある。

本研究では，１）林齢の増加や施肥によって樹木の受ける水ストレスの程度は大きくなるのか，２）林齢の増加や施肥によって樹木の利用する窒素の給源は変動する

（受理日 2025 年 1 月 21 日）

のか，３）これらの応答は樹種によって異なるのか，を検証することを目的とした。水ストレスの指標として葉の炭素安定同位体比（$\delta^{13}C$），樹木が利用する窒素の指標として葉の窒素安定同位体比（$\delta^{15}N$）を用いた。$\delta^{13}C$ は，水利用効率の指標であり，気孔開度が低下する（水ストレスが強い）と高くなる。葉の $\delta^{15}N$ は，主に植物が利用している窒素供給源の $\delta^{15}N$ を反映し，土壌中の窒素の $\delta^{15}N$，共生する菌根の種類等が影響する。土壌の $\delta^{15}N$ は土壌が深いほど高く，窒素無機化によって高くなる(*7*)。

II　材料と方法

1978 年から現在まで連年施肥が行われているウダイカンバとトドマツから経時的に採取した葉について，$\delta^{13}C$ と $\delta^{15}N$ を測定し，$\delta^{13}C$ と $\delta^{15}N$ の経時変化と降水量や施肥との関係を調べた。

1. 調査地　森林総合研究所北海道支所（北海道札幌市）構内の土壌環境長期モニタリング試験林（北緯 43° 00′，東経 141° 23′）のウダイカンバ林とトドマツ林を調査地とした。1973 年 9 月に火入れ地拵えした後，トドマツは同年 10 月に，ウダイカンバは 1974 年 4 月に植栽された。1978 年には無施肥区（Cont），窒素・リン・カリウムの 3 要素施肥区（NPK），窒素・リンの 2 要素施肥区（NP）の 3 種類の処理区を設定し，以後毎年 1 回春（5 月下旬から 6 月上旬）の施肥が行われている。NPK 区では林業用複合肥料，NP 区では硫酸アンモニウムと過リン酸石灰を肥料として用いた(*1*)。林業用複合肥料は該当肥料の製造中止に伴い 3 回変更しており，2019 年までは窒素が尿素系だったが，2020 年以降は硫安が使われている。残存していた林業用複合肥料と硫安について，窒素安定同位体比を測定した（表–1）。降水量は気象庁札幌観測所データを用い，各年 5 月 1 日から 10 月 31 日の合計降水量を成長期降水量とした。

2. 試料　葉試料はウダイカンバについては 10 月下旬から 11 月上旬にかけての新鮮落葉を，トドマツは成長休止期の 10 月下旬から 12 月下旬にかけての当年葉を採取した。トドマツ当年葉は 1978 年から 1995 年に採取したものは各区 9 本から採取し，まとめて 1 サンプルとし，2014 年から 2022 年にかけて採取したものは各区 3〜5 本から採取した。トドマツ当年葉のうち、2018 年の Cont 区と NP 区，2020 年の全処理区は木登りにより林冠部から葉試料を採取した。

3. 分析　葉試料は 70 ℃で 48 時間以上乾燥後微粉砕し，分析に供した。元素分析計（FlashEA1112,Thermo Fisher Scientific）を接続した質量分析計(Delta V, Thermo Fisher Scientific）にて，炭素・窒素安定同位体比（$\delta^{13}C$，$\delta^{15}N$）を測定した。葉の $\delta^{13}C$ は、大気中 CO_2 の $\delta^{13}C$ が 1978 年は−7.37、2023 年は−8.64 として、大気中 CO_2 の $\delta^{13}C$ の低下分を補正した（*5*)。両樹種の各区について、葉の $\delta^{13}C$ と採取年との相関分析を行った。また、成長期降水量を独立変数、葉の $\delta^{13}C$ を従属変数として回帰分析を行った。ウダイカンバの Cont 区，NPK 区 には，2011 年に他の試験用に重窒素が散布されたため，2011 年以降の $\delta^{15}N$ データは除外した。

III　結果と考察

1. ウダイカンバ落葉の $\delta^{13}C$　ウダイカンバ落葉の $\delta^{13}C$ は林齢の増加によって低下する傾向がみられた（図–1 上段、P 値は Cont : 0.064，NPK : 0.015，NP : 0.032）。林齢の増加に伴い、吸収根が水分条件の良い深い土壌に伸長し、水ストレスが緩和されたと考えられる。また、成長期降水量が少ないと $\delta^{13}C$ が高い傾向がみられた（P 値は Cont : 0.027, NPK : 0.010, NP : 0.001）。施肥区（NPK, NP）は無施肥区（Cont）より $\delta^{13}C$ がやや高い年が多かった。これらのことから，ウダイカンバでは林齢の増加で水ストレスが小さくなり，施肥区は無施肥区より水ストレスが大きい可能性があると考えられた。

2. トドマツ当年葉の $\delta^{13}C$　トドマツ当年葉の $\delta^{13}C$ も林齢の増加によって低下する傾向がみられた（図–1 下段、P 値は Cont : 0.213，NPK : 0.066，NP : 0.093）。また、$\delta^{13}C$ と成長期降水量に明瞭な関係はみられなかった（P 値は Cont : 0.070，NPK : 0.028，NP : 0.070）。$\delta^{13}C$ に明瞭な処理間差はみられなかった。これらのことから，トドマツでは林齢の増加で水ストレスが小さくなるが，施肥が水ストレスにおよぼす影響は小さいと考えられた。林冠部から葉試料を採取した 2018 年の NP 区と Cont 区，2020 年の全処理区の $\delta^{13}C$ は，2014〜2017 年と比較して高かった。樹冠の辺縁部と内部では大気 CO_2 の同位体比が異なる(*10*)ことが影響した可能性がある。

3. ウダイカンバ落葉の $\delta^{15}N$　1978〜1995 年はウダイカンバ落葉の $\delta^{15}N$ に処理間で大きな違いはなかった（図–2 上段）。また、Cont 区の $\delta^{15}N$ が 1978〜1995 年には 0 前後で推移していた。これらのことから、ウダイカンバは林齢 20 年程度までは窒素利用において肥料にあまり依存しておらず、窒素供給源は林齢で大きく変化しないと考えられる。

4. トドマツ当年葉の $\delta^{15}N$　トドマツ当年葉の $\delta^{15}N$ は施肥当年から Cont 区と施肥区で大きく異なった（図–2 中段）。トドマツは窒素利用において肥料への依存度が高いと考えられる。Cont 区の $\delta^{15}N$ が初期に大きく低下した後，増加して−1 前後で推移し，2017 年から 0 前後に

なった。トドマツは窒素の供給源が林齢によって変化するといえる。

5. NPK 区の肥料と葉の $\delta^{15}N$ 1978～1995 年はウダイカンバ，トドマツ共に $\delta^{15}N$ は葉より肥料で低かった（図–2 下段）。2020 年春からの肥料変更により肥料の $\delta^{15}N$ が大きく低下したが，トドマツ当年葉の $\delta^{15}N$ は変更当年秋には変化せず，変更翌々年の 2022 年には低下がみられた。トドマツは成長当年以前に吸収した窒素を主に利用していると考えられる。

6. まとめ 樹木の受ける水ストレスの程度は，本試験地では，林齢の増加に伴いウダイカンバ，トドマツともに小さくなったと考えられる。また，ウダイカンバについては施肥によってやや水ストレスを受けやすくなる可能性はあるものの，両樹種とも処理による差は小さかったことから，樹木の水ストレスの程度への施肥の影響は小さいと考えられた。ウダイカンバは $\delta^{15}N$ に林齢による変化は小さかったが，トドマツは林齢の増加に伴って $\delta^{15}N$ が高くなっており，応答に樹種間差がみられた。土壌の $\delta^{15}N$ は一般に土壌が深いほど高いとされていることから(*8*)，トドマツは林齢が高くなると深い土壌から窒素を吸収している可能性がある。ヒノキでは林齢が増えると土壌表層の窒素をより多く吸収すると報告されていることから(*3*)，林齢と樹木が利用する窒素の土壌深度との関係は樹種によって異なるといえる。また，無施肥区の葉の $\delta^{15}N$ はウダイカンバは若齢時から 0 前後だったのに対し，トドマツは若齢時は–4～–1 だったことからもウダイカンバとトドマツは利用する窒素の給源が異なり，ウダイカンバは若齢時からトドマツよりも深い土壌から窒素を利用している可能性がある。施肥の有無による葉の $\delta^{15}N$ の違いはウダイカンバでは小さく，トドマツでは大きかったことから，トドマツはウダイカンバより肥料の窒素に依存していると考えられた。施肥によって利用する窒素の給源が変動しやすいのはトドマツだといえる。これらのことから，林齢の増加や施肥が樹木の水ストレスの程度や樹木が利用する窒素の給源に及ぼす影響は，樹種によって異なることが明らかになった。樹種間差が特に明瞭だったのは窒素利用様式だった。ウダイカンバとトドマツの窒素利用様式の違いには，共生している菌根の種類や菌根への依存度，土壌微生物叢等の違いが影響している可能性があり，今後の課題である。

謝辞：本研究の実施にあたり，現地調査や分析，データ共有等で森林総研北海道支所および森林総研の方々にご協力いただいた。お礼を申し上げる。本研究は JSPS 科研費 21K05678 の助成を受けて行われた。

引用文献

(1) 相澤州平・伊藤江利子・橋本徹・阪田匡司・酒井寿男・田中永晴・高橋正通・松浦陽次郎・真田勝 (2012) トドマツ，エゾマツ，アカエゾマツおよびウダイカンバ人工林の 37 年間の成長経過と施肥の影響．北森研 60:93-99

(2) 橋本徹・梅村光俊・今村直広・伊藤江利子・長倉淳子 (2024) トドマツ，エゾマツ，アカエゾマツ，ウダイカンバ人工林の樹高成長に対する長期連年施肥の影響．北方森林研究 72:29-32

(3) Inagaki Y, Miyamoto K, Sakai A (2022) Age-related changes in water and nitrogen utilization in crop trees and understory vegetation in a hinoki cypress plantation forest in Kochi City, southern Japan. Nitrogen 3: 247–259

(4) 石井弘明・東若菜・新良貴歩美・黒田慶子 (2017) 高木の通水構造と機能．日林誌 99:74-83

(5) McCarroll D, Loader NJ (2004) Stable isotopes in tree rings. Quaternary Science Reviews 23: 771-801

(6) 長倉淳子・古澤仁美・相澤州平・伊藤江利子・橋本徹 (2019) 施肥開始から 18 年間のトドマツ針葉とウダイカンバ落葉の養分濃度変化．関東森林研究 70:73-76

(7) 長倉淳子・古澤仁美・伊藤江利子・橋本徹・梅村光俊 (2021) 連年施肥 40 年目のウダイカンバ林とトドマツ林の土壌養分状態．関東森林研究 72:201-204

(8) 小川奈々子・木庭啓介・高津文人・和田英太郎 (1997) 自然生態系における炭素・窒素安定同位体比．RADIOISOTOPES 46: 632–644

(9) Pallardy SG (2007) Physiology of woody plants. Academic Press, New York, 454pp

(10) Schleser GH, Jayasenkera R (1985) $\delta^{13}C$-variations of leaves in forests as an indication of reassimilated CO_2 from the soil. Oecologia 65: 536–542

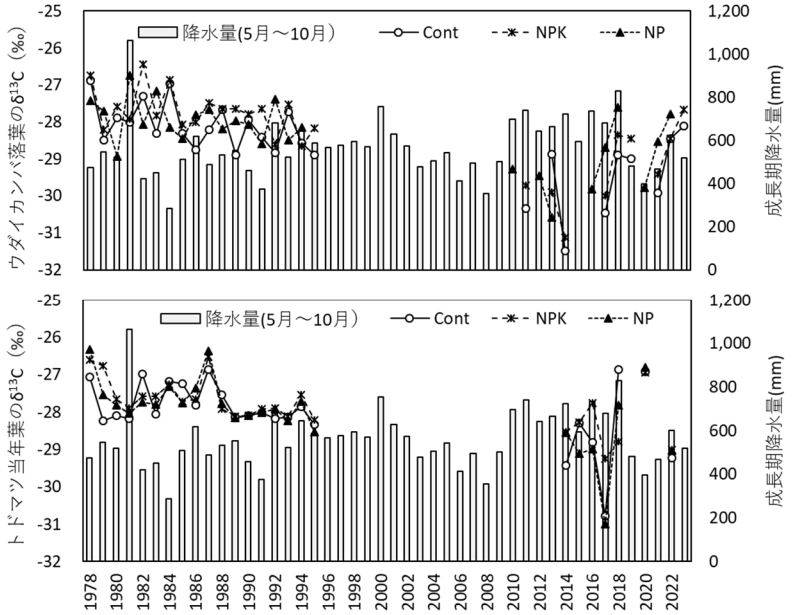
(11) 芝本武夫 (1977) 森林の土壌と肥培．農林出版株式会，東京, 142pp

表–1. 各肥料の窒素安定同位体比とその使用期間

Table 1 The $\delta^{15}N$ of each fertilizer and its duration of use

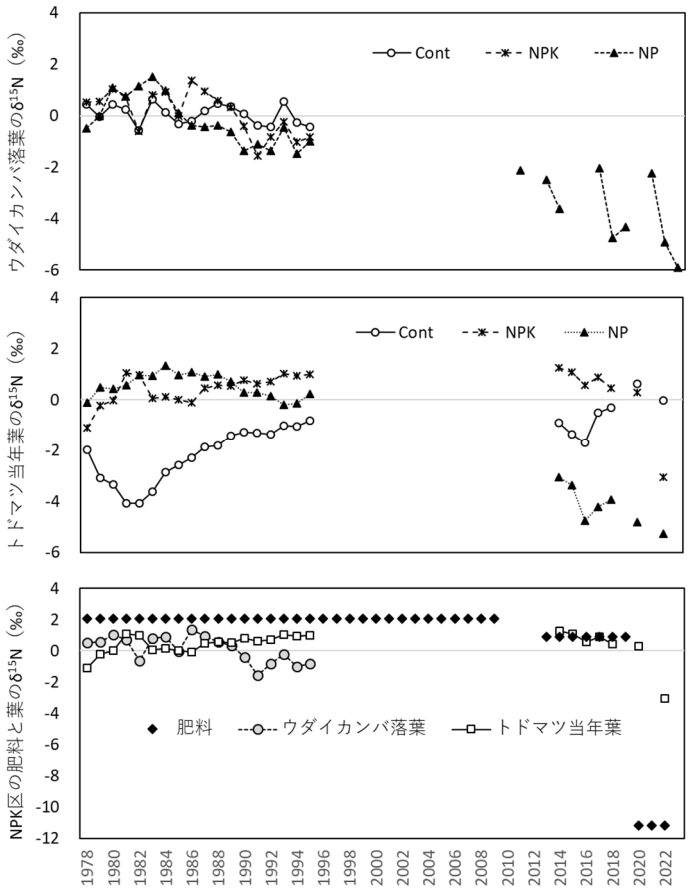
肥料名	生産年月	$\delta^{15}N$	処理区	使用期間
マルリンスーパー1号	不明	2.1	NPK	1978－2008
マルリン新特号	不明	ー	NPK	2009－2012
マルモリ森林肥料特号	2018/01産	0.9	NPK	2013－2019
マルモリ森林肥料1号	2019/04産	-11.2	NPK	2020－
硫安	2017/06産	-7.9	NP	不明
硫安	2018/03産	-7.4	NP	不明
硫安	2020/03産	-7.4	NP	不明

※過去の硫安は現存していないため未測定。2007年以前の硫安は製造メーカーが異なり、δ15N値が高かった可能性がある。



図–1.　ウダイカンバ落葉とトドマツ当年葉の $\delta^{13}C$ と成長期（5～10 月）降水量の経年変化

Fig.1 Changes in δ13C of birch fallen leaves and fir current-year needles, and precipitation during the growing season (May to October)



図–2.　ウダイカンバ落葉とトドマツ当年葉および NPK 区の肥料と葉の $\delta^{15}N$ の経年変化

Fig.2 Changes in $\delta^{15}N$ of birch fallen leaves, fir current-year needles, and fertilizer and leaves in NPK plots

論　文

関東森林研究　76-1(2025)

本川の水位変動が支川流域の内水特性に及ぼす影響
― 筑後川と寒水川の関係を事例として ―

本田尚正[1]・堀佑菜[1]
[1]東京農業大学　地域環境科学部

要旨：本研究では筑後川とその支川である寒水川を対象に，豪雨時における本川の水位変動が支川流域の内水特性に及ぼす影響について考察した。寒水川流域で最近発生した 2 つの豪雨イベントについて，流域内外雨量および本支川水位の時系列的な変化，浸水発生状況等を比較した結果，寒水川の水位上昇とそれに伴う越水・浸水被害発生の要因には，流域内の豪雨発生と，筑後川本川からの背水の影響の大きく 2 つが挙げられた。そのため，豪雨時には流域内外の降雨状況と本支川の水位変動に同時に着目して，越水・浸水の危険性をいち早く察知しなければならない。
キーワード：本川，支川，水位変動，背水，内水特性

Influence of water level change of main river on inundation characteristics of tributary
― Relationship between Chikugo River and Syozu River as an example ―

Naomasa HONDA[1], Yuna HORI[1]
Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture 1

Abstract: A purpose of the present study is to examine the influence of the water level change of a main river basin on the inundation characteristics of a tributary basin in a heavy rainfall, targeting at Chikugo River and Syozu River which is the tributary of Chikugo River. Concretely, focus on two heavy rainfall events that occurred recently in Syozu River basin. The precipitations in the inside and outside of tributary basin, temporal changes of the water levels of the main river and the tributary, and the inundation occurrence in the tributary basin are compared. According to the results, the factor of the rise in water level of Syozu River is greatly two, one is the heavy rainfall occurrence in the basin, and the other is the influence of the backwater from Chikugo River. It is very important that we pay attention to the rainfall situation inside and outside the basin, temporal changes of the water levels of the main river and the tributary at the same time. We must also sense the overflow and inundation risk quickly.
Key-word: Main river, tributary, water level change, backwater, inundation characteristics

Ⅰ　はじめに

一般に大河川 (本川) に流入する中小河川 (支川) では，本川水位の上昇に伴う支川への背水の影響により，支川に流入する水路等が排水不良を引き起こして内水浸水被害が発生する (*1*)。その後も流域の内外で強雨が続けば，支川からの越水や破堤による洪水被害へと発展する (*2*)。支川流域の地形が概して低平な場合には，本川からの背水の影響は中・上流域にまで遡上する (*3*)。

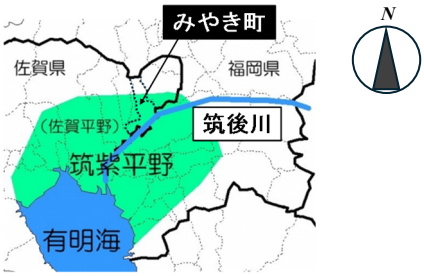
本研究では北部九州の大河川である筑後川とその支川の寒水川を研究対象とし，寒水川流域で最近発生した 2 つの豪雨について，流域内外での雨量と本支川水位の時系列的変化，流域内の浸水状況等を比較する。それらをもとに本川の水位変動が支川流域の内水特性に及ぼす影響を考察し，洪水対策策定上の留意点についてまとめる。

Ⅱ　検討対象河川の概要

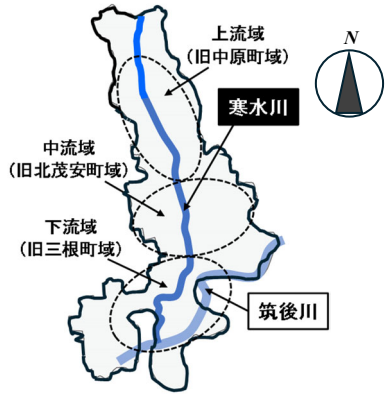
筑後川は阿蘇地方の瀬の本高原を源流とし，熊本・大分・福岡・佐賀の 4 県を跨いで有明海に注ぐ幹線流路延長 143 km，流域面積 2,860 km^2，流域内人口約 110 万人に及ぶ九州最大の一級河川である。その水位変動は，支川である寒水川に大きな影響を及ぼす (図–1 (a)，(b))。

寒水川は佐賀県みやき町北部の脊振山脈を源流とし，同町を南北に縦断して筑後川に合流する流路延長 14.9 km，流域面積 16.1 km^2 の一級河川である。流域は同町のほぼ全域を占め，2005 年の 3 町合併以前の旧中原町域が急峻な上流域，旧北茂安町域が川幅の狭い中流域，旧三根町域が低平な下流域に概ね該当する (図–1 (b))。中・下流域では洪水浸水が想定されており (*4*)，旧北茂安町域の南端では堤防からの越水による浸水被害がしばしば発生する。

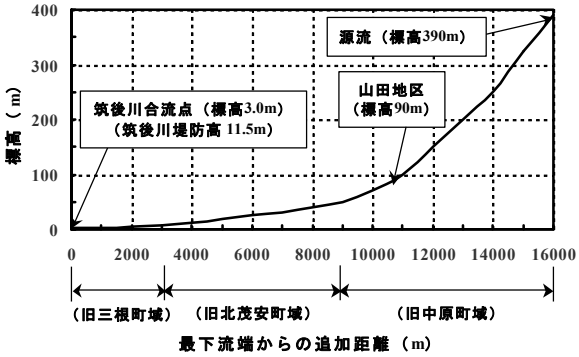
（受理日 2025 年 1 月 15 日）



(a) みやき町位置図
(a) Location of Miyaki town



(b) 寒水川流域図
(b) Syouzu River basin



(c) 寒水川河床縦断面図
(c) River-bed profile of Syozu River

図–1. 寒水川の概要
Fig.1 Outline of Syozu River

Ⅲ　検討手順および手法

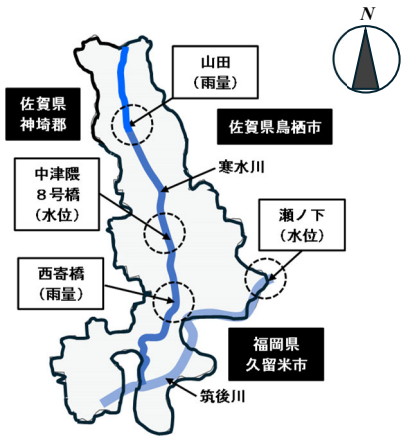
1．寒水川下流部の流下能力の算定　寒水川の流下能力　(流量) を調べるにあたり，ここではエネルギー勾配 (水面勾配) の影響は考慮せず，次に示す Manning 式を用いて最下流端から上流に向かって単距離 100 m ごとに簡易的に算定する (図-1 (c))。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

$$Q = Av \tag{2}$$

ここに，v：流速，n：Manning の粗度係数，R：径深，i：河床勾配，Q：流量，A：流水断面積である。n は自然河川の標準値 0.030 を使用する。A は左右岸の護岸法肩間距離を上底，法尻間距離を下底，現況堤防高と最深河床高の差を最大水深とする台形に近似して決定する。なお，式(1)によれば，$i<0$ (逆勾配) の場合には計算不能となるため，そのときの流下能力は便宜上 0 とする。

2．寒水川の内水特性と筑後川との関係　2019 年 7 月 (7/20～7/23) と 2020 年 7 月 (7/6～7/9) の 2 つの豪雨を対象に，寒水川上流域の山田地点，下流域の西寄橋地点 (図–2)，筑後川中流部の朝倉地点　(寒水川流域外，福岡県域) における降雨の時間変化，寒水川中流域の中津隈 8 号橋地点，寒水川合流点上流に位置する筑後川の瀬ノ下地点 (図–2) の河川水位の時間変化を比較考察する。



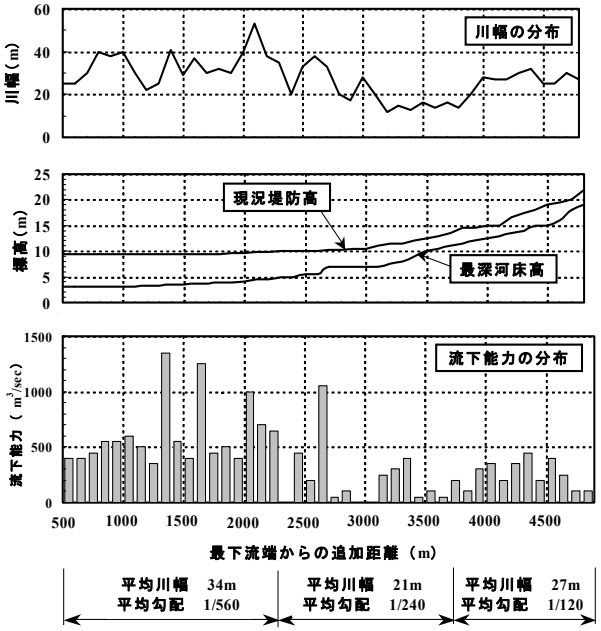
図–2. 雨量および河川水位観測地点
Fig.2 Obsearvation points of rainfall and riber water level

Ⅳ　結果および考察

1．寒水川下流部の流下能力　図–3 に寒水川下流部の流下能力の分布を示す。同図中で流下能力が 0 の地点は現況の河床勾配が逆勾配であることによる。同図には川幅 (左右岸の護岸法肩間距離)，現況堤防高および最深河床高の分布も併記した。現況堤防高は最下流端から 2,600 m 付近まで標高 10 m 程度であり，筑後川から背水を考慮して堤防高が確保されている。

図–3 中，最下流端から 2,300 m～3,800 m の約 1.5 km にわたり，流下能力の小さい区間がある。これは上下流に比べて川幅が狭いことに加え，下流に比べて最大水深が小さいことから流水断面積が小さく，上流に比べて河床勾配が緩いことに起因する。実際，この区間は旧北茂安町域の南端に相当し (図–1 (c))，前述のとおり，堤防からの越水による浸水被害がしばしば発生している。

2．寒水川の内水特性と筑後川との関係　図–4 に寒水川流域内外の降雨と河川水位の関係，表-1 に連続雨量を

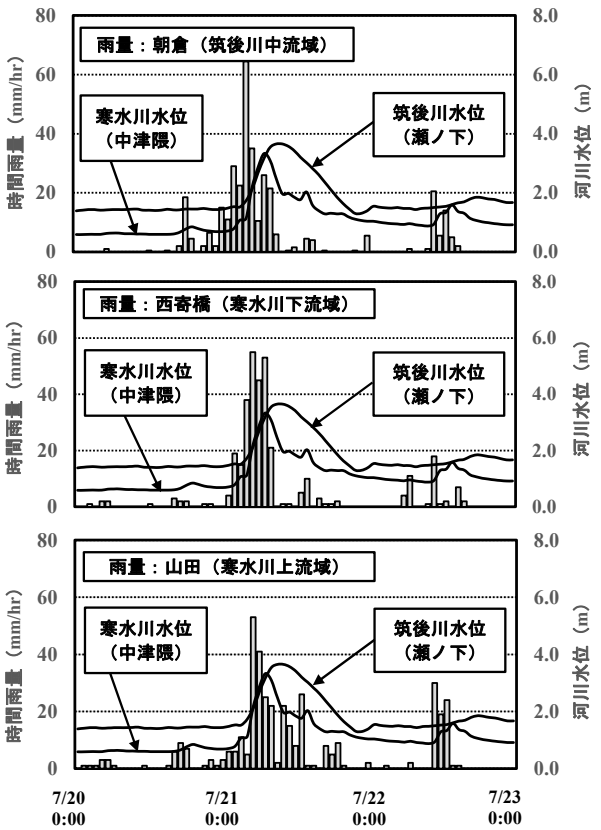


図–3. 寒水川下流部の流下能力
Fig.3 Flow capacity of Shozu River downstream

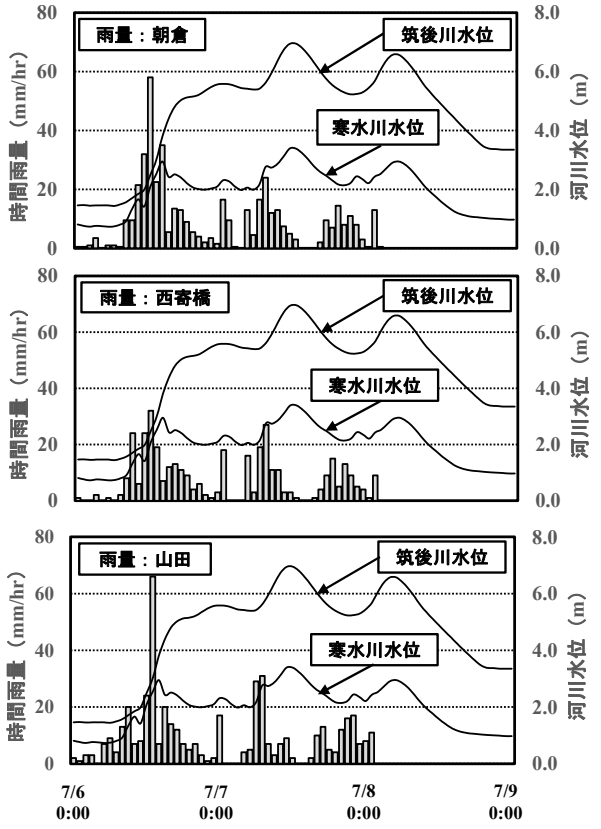
それぞれ示す。それらの図表をもとに寒水川の内水特性と筑後川との関係を考察すると、次のとおりである。

(1) 2019 年 7 月豪雨 (7/20～7/23) の場合　図–4 (a)と表–1 から，この降雨は流域内外で時間最大雨量 55～65 mm 程度の短期集中豪雨だったことがわかる。時間最大雨量の生起時刻は流域内では上下流で一致しており，流域外の朝倉地点との時間差は 1 時間である。24 時間連続雨量も流域内外でほぼ等しいことから，この豪雨は流域内外で時空間的に同規模だったと推察される。ちなみに，筑後川上流域の日田雨量観測所 (大分県域) では時間最大雨量 20 mm，24 時間連続雨量 50 mm であり，筑後川中・下流域の水位上昇に影響を及ぼさない規模だった。

河川水位に着目すると，両河川の観測地点でほぼ同時刻の 7/21 3:00 前後に上昇が始まった。それらの時刻の前後に生起した時間雨量 20 mm 程度以上の強雨をみると，筑後川中流域では朝倉地点で 1:00～2:00 に 29 mm，寒水川では上流域の山田地点で 4:00～5:00 に 53 mm，同下流域の西寄橋地点で 1:00～2:00 に 19 mm の時間雨量がそれぞれ発生した。そのため，寒水川中流域に位置する



(a) 2019 年 7 月の豪雨イベント
(a) heavy rainfall event of July in 2019



(b) 2020 年 7 月の豪雨イベント
(b) heavy rainfall event of July in 2020

図–4. 降雨と河川水位の関係
Fig.4　Relationship between rainfall and river water level

表–1. 連続雨量
Table 1 Consecutive precipitations

降雨イベント	雨量観測所	1時間最大雨量	6時間連続最大雨量	24時間連続最大雨量
2019年7月豪雨 (7/20～7/23)	朝倉　（筑後川中流域）	64.5 mm（7/21 3:00～4:00 ）	187.5 mm（7/21 1:00～7:00）	285.5 mm（7/20 17:00～7/21 17:00）
	西寄橋（寒水川下流域）	55.0 mm（7/21 4:00～5:00 ）	227.0 mm（7/21 2:00～8:00）	276.0 mm（7/20 16:00～7/21 16:00）
	山田　（寒水川上流域）	53.0 mm（7/21 4:00～5:00 ）	165.0 mm（7/21 4:00～10:00）	275.0 mm（7/20 20:00～7/21 20:00）
2020年7月豪雨 (7/6～7/9)	朝倉　（筑後川中流域）	58.0 mm（7/6 11:00～12:00 ）	178.5 mm（7/6 8:00～14:00）	332.5 mm（7/6 8:00～7/6 8:00）
	西寄橋（寒水川下流域）	32.0 mm（7/6 11:00～12:00 ）	112.0 mm（7/6 8:00～14:00）	267.0 mm（7/6 8:00～7/6 8:00）
	山田　（寒水川上流域）	66.0 mm（7/6 12:00～13:00 ）	138.0 mm（7/6 7:00～13:00）	302.0 mm（7/6 7:00～7/6 7:00）

中津隈 8 号橋地点での河川水位の上昇開始は，流域内降雨による自己流量だけでなく，始点水位である筑後川本川の水位上昇の影響を強く受けている可能性がある。

その後，豪雨は短時間で終了し，筑後川の最大水位は 3.65 m にとどまった。一方，寒水川の水位は上流域の降雨の時間変化に呼応して変動し，筑後川の水位がピークを迎える前から減少し始めた。それらから，寒水川では水位上昇の開始時こそ筑後川の影響を受けたが，その後はもっぱら自己流量によって変動したと推察される。

なお，この豪雨により，流下能力が最も小さく算定された旧北茂安町域で実際に越水・冠水被害が発生した。

(2) 2020 年 7 月豪雨 (7/6～7/9) の場合　図–4 (b)と表–1 から，時間最大雨量に差はあるものの，流域内外で降雨分布や時間最大雨量の生起時刻に大きな差は見られない。

時間雨量 20 mm 以上の強雨は，筑後川中流域の朝倉地点で 7/6 9:00～10:00 に 21.5 mm，寒水川上流域の山田地点で同 8:00～9:00 に 20 mm，同じく下流域の西寄橋地点で同 8:00～9:00 に 24 mm がそれぞれ発生した。一方，河川水位の上昇は，両河川の観測地点でほぼ同時刻の 7/6 9:00 前後から始まっており，時間雨量 20 mm 以上の強雨が発生した時刻とほぼ同時刻か，1 時間程度の遅れであった。このとき筑後川上流域の日田雨量観測所では，朝倉・西寄橋・山田の 3 地点に時間最大雨量が生起した 7/6 12:00 頃以前にまとまった雨はなく，それらが中・下流域の水位上昇に影響したとは考えにくい。さらに河川水位の時間変化に着目すると，次の 2 点の特徴に気づく。

・降雨規模は時間雨量，連続雨量ともに 2019 年 7 月豪雨と大きな差がないにもかかわらず，筑後川では最高水位が 2019 年 7 月豪雨時を大幅に上回る 6.95 m に達した。

・筑後川，寒水川ともに，水位上昇の山と谷は概ね 6 時間（1/4 日間）程度で調和的に上下動を繰り返している。

ちなみに，筑後川河口部の有明海に面する大牟田地点 (福岡県域) の当時の潮位記録 (5) によれば，「7/6 干潮時刻 3:48 と 15:56，満潮時刻 9:28 と 22:32」であり，両河川の水位上昇が始まる 7/6 9:00 前後は，有明海の潮位が干潮から満潮に向かう時間帯に含まれていた。

以上より，筑後川本川の急激な水位上昇は自己流量だけでなく，筑後川の河口部である有明海の潮位変動の影響をも強く受けており，それがさらに支川への背水となって寒水川の水位変動を誘発したものと推察される。

なお, この豪雨では寒水川下流域で内水浸水したほか, 筑後川の急激な水位上昇に対して下流域の支流水門に付帯する排水ポンプの一時停止が検討された。ポンプの停止による内水浸水の拡大化に備え，みやき町では住民に対する避難指示発令を検討したが，その後，筑後川の水位が低下したため, いずれも実行されず, 事なきを得た。

V　おわりに

豪雨時には流域内外の降雨と本支川の水位変動に同時に着目して越水・浸水の危険性をいち早く察知することが重要である。とくに感潮河川では，降雨とともに潮位の変動が本支川の水位変化に及ぼす影響も考慮しなければならない。今後は実務者向けに，本支川の降雨・水位データに関する解釈のポイントを整理したい。

謝辞　本研究を遂行するにあたり，佐賀県東部土木事務所ならびにみやき町役場には数多くの資料をご提供いただいた。ここに記して心から感謝申し上げます。

引用文献

(1) 石川忠晴ほか (2023) 本川の超過洪水に伴う支川背水の影響に関する調査～高梁川支川新本川を対象として～. 河川技術論文集 29: 407–412

(2) 島田友典ほか (2019) 背水影響が堤防決壊拡幅現象に与える影響. 土木学会論文集 B1 (水工学) 75 (2): 1405–1410

(3) 見上哲章ほか (2021) 利根川上流域の本・支川を一体とした洪水流解析－流域治水への活用に向けて－. 土木学会論文集 B1 (水工学) 77 (2): 427–432

(4) 佐賀県河川砂防課 (2019) 筑後川水系寒水川洪水浸水想定区域図.　佐賀県の洪水浸水想定区域図

(5) 気象庁潮位表 https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/suisan/index.php (2025.1.3 参照)

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

広葉樹林における火災発生危険度の特性

玉井幸治[1]・後藤義明[1]

[1]森林総合研究所

要旨：青森県から熊本県にかけて 5 試験地，総計 17 林分を対象に，1 年間での林床面日射量観測値と降水量データから年間での林野火災発生危険日数を算出した。年間での危険日数は 6〜146 日と林分間で大きく変動した。危険日数が最大となった月は，落葉樹を含んだ 13 林分では展葉前の 2〜5 月であったが，常緑樹のみで構成されている 4 林分では月降水量が顕著に少なかった月であった。林分内の胸高断面積合計が少ない林分ほど，年間での林野火災発生危険日数が増加する傾向が，ばらつきが大きいながらも認められた。その傾向は，常緑樹と落葉樹を合わせた胸高断面積合計よりも常緑樹のみの胸高断面積合計とのほうがより強かった。林野火災発生危険日の多くが，落葉樹の展葉前である 2〜5 月に発生するためと考えられた。

キーワード：林床可燃物の含水状態，火災発生危険日数，林床面日射量，降水量

Characteristics of fire occurrence risk in broad-leaved forest

Koji TAMAI[1], Yoshiaki GOTO[1]

[1] Forestry & Forest Products Research Institute

Abstract: The number of fire occurrence risk day was calculated with observed solar radiation on forest floor and precipitation in one year at 17 stands in 5 broad leaved forest. The number of fire occurrence risk day was varied in 6 – 146 days year^{-1} between stands. Most frequent month of fire occurrence risk day was from February to May, before leafing in the stands including deciduous tree species and the month with extremely few of precipitation in the stands consisted with only evergreen tree species. The number of fire occurrence risk day in one year is more in stands with fewer basal area. The stronger relation is recognized between the number of fire occurrence risk day in one year and basal area of only evergreen tree species than both of evergreen and deciduous tree species. The cause is thought that many fire occurrence risk day was appeared from February to May, before leafing of deciduous tree species.

Keywords: Moist condition of fuels on forest floor, Number of fire occurrence risk day, Solar radiation on forest floor, Precipitation

I　はじめに

2021 年 2 月に栃木県足利市の広葉樹林で発生し，167 ha を焼損した林野火災では周辺住民は避難を強いられ，鎮火まで 23 日間を要した。このように広葉樹林で発生した火災であっても社会的影響は大きい。しかしながらスギ林やヒノキ林に比べて，広葉樹林における林野火災の発生危険度については未解明な部分が多い。例えば玉井(*2*)はスギ・ヒノキ林を対象に降水量と林床面日射量データから，林床可燃物が乾燥して可燃状態であると推定された火災発生危険日数を算出し，胸高断面積合計との関係を報告している。しかし広葉樹林を対象とした報告例は無い。そこで本研究では，玉井(*2*)と同様な方法で広葉樹林における林野火災発生危険日数を算出し，胸高断面積合計との関係などを明らかにする。

II　方法

1．試験地と方法　林床面日射量(S_f)の観測を行った試験地と林分，それぞれで 1 年間となる観測期間を表–1 に示す。これらは，玉井・後藤(*3*)と同じ 5 試験地 17 林分である。胸高断面積合計は，胸高直径が 3 cm 以上の幹を対象にして算出した。

日射センサー(Onset 社製, S-LIB-M003)による値をデータロガー(Onset 社製, H21-002)によって 10 秒間隔で測定し，1 時間平均で記録した。降水量には，各試験地の最寄りの地方気象台やアメダス(表–2)による観測データを用いた。

2．林野火災発生危険日の判定方法　林床可燃物の含水状態を推定するモデルの概要を説明する。林床可燃物層をバケツに見立てる。降雨時には雨水がバケツに溜まる。バケツが満水状態の時には，余剰水が土壌層に溢れ

（受理日 2025 年 1 月 9 日）

表–1. 観測林分の概要と算出された林野火災発生危険日数

Table 1 Outline of observation forest stand and calculated number of fire occurrence hazardous date

試験地名	観測林分番号	代表的な樹種	胸高断面積合計 ($m^2\ ha^{-1}$)			期間	林野火災発生危険日数				
			全木	うち、常緑樹	うち、落葉樹		最大月	最大月での日数	年間での日数（a）	2〜5月での日数（b）	（b）／（a）
熊本市立田山	1	マテバシイ	21.67	21.67	0.00	2006年7月〜2007年6月	10月	11	18	0	0%
	2	クヌギ	17.76	0.00	17.76	2006年7月〜2007年6月	3月	19	118	50	42%
	3	イチイガシ	30.95	30.95	0.00	2006年7月〜2007年6月	10月	17	61	18	30%
	4	コジイ・アラカシ	38.89	38.89	0.00	2006年7月〜2007年6月	10月	6	6	0	0%
	5	タラヨウ	50.09	50.09	0.00	2006年7月〜2007年6月	10月	14	33	9	27%
岡山市竜ノ口山	1	コナラ	20.48	4.28	16.20	2004年11月〜2005年10月	4月	10	28	18	64%
	2	コナラ	28.49	14.70	13.79	2004年11月〜2005年10月	4月	8	23	11	48%
	3	コナラ	33.48	3.27	30.21	2004年11月〜2005年10月	4月	19	62	43	69%
	4	コナラ・ソヨゴ	32.45	7.73	24.72	2004年11月〜2005年10月	4月	18	74	44	59%
	5	リョウブ・クスノキ	41.65	20.28	21.37	2004年11月〜2005年10月	4月	16	39	28	72%
	6	コナラ	19.71	2.90	16.81	2004年11月〜2005年10月	4月	12	45	26	58%
	7	アカメガシワ・ナナミノキ	10.09	4.95	5.14	2004年11月〜2005年10月	4月	17	52	34	65%
	8	ノグルミ・アカメガシワ	23.77	3.25	20.52	2004年11月〜2005年10月	4月	13	80	47	59%
京都府木津川市山城	1	コナラ	34.72	1.22	33.50	2000年4月〜2001年3月	2月、4月	それぞれで21	146	70	48%
	2	ソヨゴ・ヒノキ	22.15	17.14	5.01	2000年4月〜2001年3月	4月	8	23	17	74%
茨城県石岡市筑波山		カツラ	40.60	0.00	40.60	2008年9月〜2009年8月	4月	23	51	47	92%
秋田県大館市長坂		コナラ・ミズナラ	60.46	0.00	60.46	2011年1月〜12月	5月	15	71	25	35%

る。無降雨時には，バケツ内の水量と S_f から蒸発量を算出し，その分バケツ内の水量が減る。計算は 1 時間単位で行う。バケツ内の水量が含水比 20%に相当する水量未満である日を可燃とし，日最低含水比が 20%以下である日を林野火災発生危険日と判定する。詳しくは玉井(*2*)を参照されたい。

表–2. 降水量データの観測地点

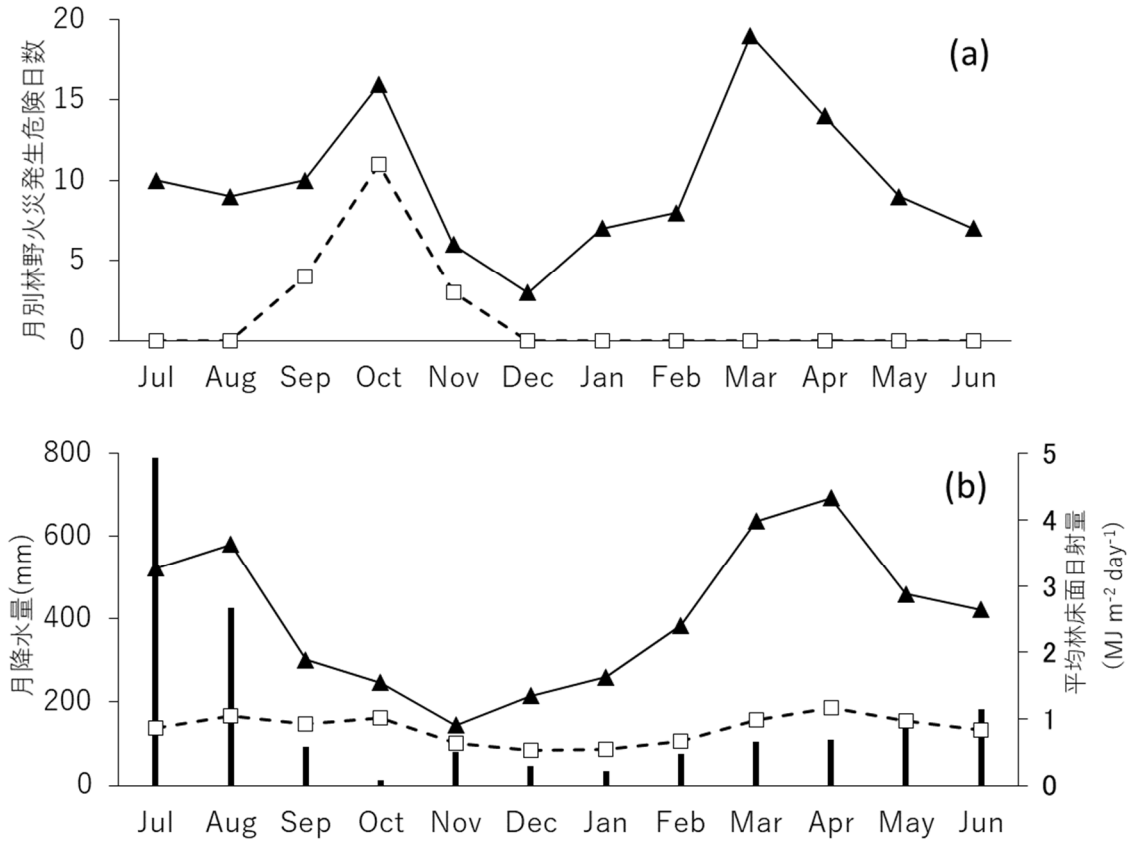
Table2 Location of observation place for precipitation

試験地	北緯	東経	最寄りの地方気象台もしくはアメダス	北緯	東経
立田山	32度49分	130度44分	熊本地方気象台	32度49分	130度42分
竜ノ口山	34度42分	133度58分	岡山地方気象台	34度41分	133度56分
山城	34度47分	135度51分	京田辺アメダス	34度50分	135度46分
筑波	36度10分	140度11分	つくばアメダス	36度3分	140度8分
長坂	40度16分	140度24分	鷹巣アメダス	40度14分	140度22分

III 結果と考察

1. 林野火災発生危険日数と最大月　判定された火災発生危険日数などを表– 1 に示す。年間での危険日数は 6〜146 日と林分間で大きく変動した。危険日数が最大となった月は，多くの林分では 4 月であったが，山城試験地では 4 月と同日数で 2 月，立田山試験地では 3 月，長坂試験地では 5 月に最大となった林分もあった。林野火災の最頻発生月が 2〜5 月にかけて日本列島を次第に北上する(*1*)ことと合致する。しかし 17 林分のうち，常緑樹のみで林分が構成されている立田山試験地の 4 林分では，火災発生危険日が最大となったのはいずれも 10 月であった。

2. 常緑林と落葉林の比較(熊本市を例に)　立田山試験地 5 林分のうち常緑樹のみで構成されている林分 1 と落葉樹のみで構成されている林分 2 での月別火災発生危険日数の季節変化を図–1a に示す。林分 2 では 10 月と 3 月の 2 回で極大であるのに対し，林分 1 では 10 月の 1 回



図–1. 立田山試験地の林分 1 と林分 2 において算出された月別林野火災発生危険日数と月降水量，月別平均林床面日射量；(a) 月別林野火災発生危険日数 （破線と□；林分 1，実線と▲；林分 2)，(b) 月降水量（棒グラフ）と月別平均林床面日射量 （破線と□；林分 1，実線と▲；林分 2)

Fig.1 Monthly number of calculated forest fire occurrence hazardous date (a), monthly precipitation and monthly averaged solar radiation on forest floor in stand 1 and 2, Tatsutayama observation site.

のみであった。図–1b に，林分 1 と林分 2 における S_f と立田山試験地から西に約 1 km にある熊本地方気象台における月降水量を示す。

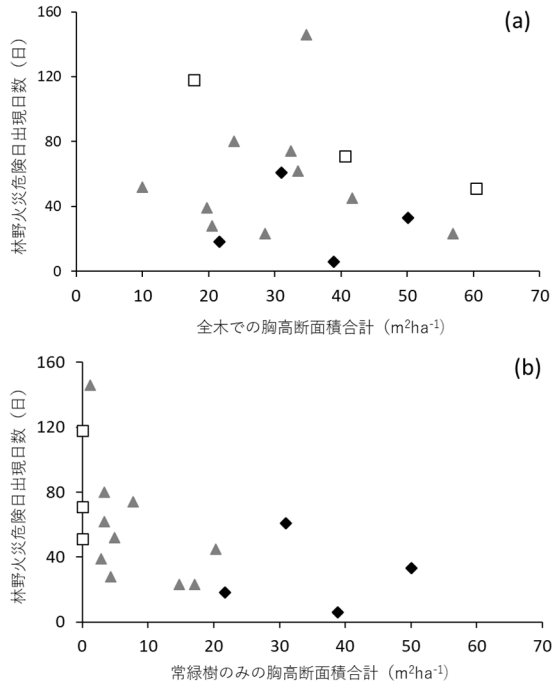
林分 1 における S_f の日平均値は 1 年を通して 1.2 MJ m^{-2} day^{-1} 以下と，林分 2 に比べて大きな変動はなかった。この傾向は，常緑林のみで構成されている他の林分も同様な傾向にあると考えられる。常緑林のみで構成されている 4 つの林分で発生危険日数が 10 月で最大となったのは，10 月における極端に少ない降水量に起因する。

林分 2 で火災発生危険日数が 10 月に極大を示したのは，10 月における極端に少ない降水量に起因する。その他に 3，4 月にも林野火災発生危険日数が多かったのは，落葉樹の展葉前で，S_f が大きくなったことに起因する。

S_f が大きいほど，林床可燃物の乾燥速度が速い。3，4 月に林分 2 では火災発生危険日数が多くなったのに対し林分 1 では火災発生危険日が無かったのは，林分 2 では可燃物の乾燥速度が早かったのに対し，林分 1 では可燃物の乾燥速度が遅く，可燃状態となるまでに降水によって湿潤になったためと考えられる。

火災発生危険日の発生要因は常緑樹のみで構成されている林分では主に降水の多寡と言える。それに対し落葉樹のみで構成されている林分では降水の多寡の他に，葉量の季節変動に起因する S_f の多寡も要因に加わり，そのため展葉前の 3，4 月に火災発生危険日が増加すると考えられる。

落葉樹の展葉前であり，林野火災発生の多い 2〜5 月(*1*)での火災発生危険日数が年間での日数に占める割合(表–1)は，常緑樹のみで構成されている 4 林分では 30%以下であったが，その他の 13 林分全てで 35%以上であった。立田山試験地以外で落葉樹が含まれている林分でも，程度の違いはあるものの，葉量の季節変動による S_f の増加が発生危険日数を増やしていることが認められる。



図–2. 年間での林野火災発生危険日数と胸高断面積合の関係(□；落葉林, ▲；混交林, ◆；常緑林)
(a) 全木での胸高断面積合計との比較　(b) 常緑樹のみの胸高断面積合計との比較
Fig.2 Relations between annual number of forest fire occurrence hazardous date and basal area

3. 林分間での胸高断面積との関係　スギ林やヒノキ林を対象に，胸高断面積合計から年間での林野火災発生危険日数の大まかな推定が可能であることが示されている(*2*)。そこで本研究でも同様に，表–1 に示された 17 林分における胸高断面積合計と年間での林野火災発生危険日数の関係を調べる。落葉樹が含まれている林分では林野火災発生危険日数の多くは落葉期に発生していることから，胸高断面積合計の値には常緑樹・落葉樹を含めた値と常緑樹のみの値それぞれを用いた(図–2a，b)。

ばらつきが大きいものの，胸高断面積合計と火災発生危険日数の間には右下がりの傾向が読み取れる。図–2a よりも図-2b のほうが，その傾向がより強かった。また点の分布範囲も図の原点付近に集中するように移動しており，ばらつきの度合いも図–2b のほうがより小さいといえる。林野火災発生危険日の多くが，落葉樹の展葉前である 2～5 月に発生するためであろう。そのため胸高断面積合計からおおよその火災発生危険日数を推定するには，常緑樹・落葉樹を含めた値よりは常緑樹のみの値を用いた方が良い。しかし，玉井(*2*)にて示されている胸高断面積合計と火災発生危険日数のスギ林・ヒノキ林での関係に比べると，本研究における図–2a，b での関係は弱い。林野火災発生危険日数は，樹冠や樹幹に遮られずに林床まで到達する日射量の影響を大きく受ける(*2*)。広葉樹林は，多様な樹種によって構成されているため，樹冠による日射遮蔽効果と樹幹による効果の比率は個々の林分による種構成に応じて様々に異なるであろう。それに対しスギ林やヒノキ林は，それぞれ単一の樹種によって構成されているため，林分が異なっても樹冠による効果と樹幹による効果の比率の差異は，広葉樹林に比べると小さいであろう。そのため広葉樹林における胸高断面積合計と火災発生危険日数の関係性は，スギ林やヒノキ林によるそれよりは弱いのであろう。そのため広葉樹林において胸高断面積合計のみから推定される火災発生危険日数の精度は，スギ林やヒノキ林におけるそれよりも低いと考えられる。

引用文献

(1) 森林火災対策協会 (2020) 林野火災対策の解説. 林野弘済会, 東京, 214pp
(2) 玉井幸治 (2018) 林床可燃物含水状態の推定モデルによる森林火災発生危険度の評価. 山林 1614: 18–26
(3) 玉井幸治・後藤義明 (2022) 広葉樹林における相対日射率の特性. 関東森林研究 73: 97–100

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

流木の停止条件式を用いた数値シミュレーション手法の開発

鈴木拓郎[1]・經隆悠[1]

[1]森林総合研究所

要旨：土石流に伴う流木の捕捉には透過型堰堤が有効であるが，既設の不透過型の堰堤においても流木が捕捉される場合がある。施設による流木対策を効率的に進めるためには，既存の不透過型堰堤の捕捉効果を適切に評価することが重要である。そこで本研究では，流木が受ける摩擦抵抗力と土石流流体力の関係から流木の停止条件式を開発し，既存の数値シミュレーション手法に導入した。流木の停止角度には既往研究による調査結果となる 35 度を用いた。開発した手法を用いて，流木混じり土石流の堆積過程に関する水路実験の再現計算を実施したところ，摩擦係数の大きい流木はより上流側に堆積し，後続流による再移動が生じにくいという実験結果を良好に再現し，本手法の有効性が示された。

キーワード：流木，停止条件，数値シミュレーション

Numerical simulation method introducing a condition equation for the stopping of large woody debris

Takuro SUZUKI[1], Haruka TSUNETAKA[1]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: Open-type check dams are effective in capturing large wood associated with debris flows, but large woody debris (LWD) can also be captured by existing closed-type check dams in some cases. To efficiently enhance LWD management using such structures, it is essential to accurately evaluate the trapping efficiency of existing closed-type check dams. In this study, we developed a condition equation for the stopping of LWD, based on the relationship between the frictional resistance acting on the wood and the fluid forces from the debris flow, and integrated this into an existing numerical simulation method. A stopping angle of 35 degrees, as reported in previous studies, was used. Using the developed method, we conducted simulations to replicate flume experiments on the deposition process of debris flows mixed with LWD. The results successfully reproduced the experimental findings, showing that LWD with higher friction coefficients tends to deposit further upstream and is less likely to be remobilized by subsequent flows, thereby demonstrating the effectiveness of the proposed method.

Keywords: large woody debris, condition equation for the stopping, numerical simulation

I　はじめに

極端豪雨による流木災害の被害防止・軽減には，流下する流木を治山ダムによって捕捉することが有効である。一般的に，透過型の構造物をもつ流木捕捉式治山ダムの設置が推進されている。一方で，既に設置された不透過型のダムによって流木が捕捉される場合(*1*)や，地形条件によって流木が自然に堆積する場合もある。現況の地形，施設条件による流木堆積・捕捉能力を適切に評価し，新たな施設を計画することが効率的であると考えられる。

流域における流木堆積・捕捉能力を評価するためには数値シミュレーションが有効な手段である。鈴木(*2*)は，土石流中の流木量を流木濃度で表現し，土石流先端部への集積過程を再現するための流木輸送濃度式を導出し，土石流の数値シミュレーションの支配方程式に組み込んだ。鈴木ら(*4*)は，平成 30 年 7 月豪雨の東広島市の事例を対象として，不透過堰堤の堆砂敷における流木の停止角度（流下方向に対する角度）が平均で約 35 度であることを示した。

そこで本研究では，流木の停止・移動条件式を流木が底面から受ける摩擦抵抗力と土石流から受ける流体力の関係から導出し，数値シミュレーションの支配方程式に導入した。そして，流木の停止過程に関する水理模型実験の再現計算を実施し，その適用性を検証した。

II　数値計算方法

1. 支配方程式　鈴木(*2*)の手法を用いた。浅水流方程式に基づいた基本的な支配方程式に以下の流木の連続式を加えたものとなる。なお，簡略のため 1 次元の式を記載しているが，計算では２次元に拡張している。

$$\frac{\partial(\bar{c}_{wd}h)}{\partial t}+\frac{\partial(Qc_{twd})}{\partial x}=E_{wd} \qquad (1)$$

（受理日 2025 年 1 月 9 日）

ここでtは時間，xは流下方向の軸，$\bar{c}_{wd}$は流木体積濃度，hは土石流水深，Qは土石流単位幅流量，c_{twd}は流木輸送濃度，E_{wd}は流木侵食速度である。支配方程式中の河床面せん断応力τ_0，砂礫の輸送濃度c_tは以下の式となる。

$$\tau_0 = \rho K(c) r (\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w)^{-2} \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} U^2 \quad (2)$$

$$c_t = c_s \frac{\varphi_s}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad (3)$$

$$\varphi_s = \frac{4}{15} r_s^{-2} \left[\frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_s - \frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_w r_s + r_w^{\frac{5}{2}} - r^{\frac{5}{2}}\right] \quad (4)$$

$$\varphi_i = \frac{2}{3} r_s^{-1} \left[r^{\frac{3}{2}} r_w - r_w^{\frac{5}{2}}\right] \quad (5)$$

$$\varphi_w = \frac{1}{\kappa}\sqrt{K(c)} \left(\frac{h}{d}\right)^{-1} r_w^{\frac{1}{2}} \left[\left(r_w + \frac{\eta_0}{h}\right) ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h}}{\frac{\eta_0}{h}} - r_w\right] \quad (6)$$

$$K(c) = K_s + K_d + K_f \quad (7)$$

$$K_s = \frac{\frac{\bar{c}^{\frac{1}{5}}}{c_*}}{1 - \frac{\bar{c}^{\frac{1}{5}}}{c_*}} k_g e^2 \frac{\sigma}{\rho} \bar{c}^{\frac{1}{3}} tan\phi_s \quad (8)$$

$$K_d = k_g (1 - e^2) \frac{\sigma}{\rho} \bar{c}^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

$$K_f = k_f \frac{(1 - \bar{c})^{\frac{5}{3}}}{\bar{c}^{\frac{2}{3}}} \quad (10)$$

$$\eta_0 = \sqrt{k_f} \left(\frac{1 - c_s}{c_s}\right)^{\frac{1}{3}} d \quad (11)$$

$$r = 1 + \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)\bar{c}, r_s = 1 + \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)c_s, r_w = 1 - \frac{\bar{c}}{c_s} \quad (12)$$

ここに，Uは断面平均流速，σは 砂礫密度，ρは水の密度，c_tは土砂輸送濃度，$\bar{c}$は土砂堆積濃度，c_sは土砂層濃度($=0.5c_*$)，c_*は堆積層濃度，ϕ_sは砂礫の摩擦角，k_gは土石流構成則の定数で 0.0828，eは反発係数，η_0は粒子間隙スケール，k_fはその係数で 0.16，dは粒径，κはカルマン定数である．φ，$K(c)$，K，rは計算上の係数であり，添え字w，s，iは水流層，土砂層，境界を表す。

流木層濃度は表面から一定濃度（c_{swd}）で分布すると仮定し，その下部境界値の位置をz_{wd}とする。流木の輸送濃度c_{twd}の式は，z_{wd}が砂礫層高さh_sより上か下かで式を切り替え，以下のようになる。添え字wdは流木を表す。

$$z_w > h_s: \; c_{twd} = c_{swd} \frac{\varphi_i \frac{r_{wd}}{r_w} + \varphi_{w,wd}}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad (13)$$

$$z_w \le h_s: \; c_{twd} = c_{swd} \frac{\varphi_{s,wd} + \varphi_i + \varphi_w}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad (14)$$

$$\varphi_{s,wd} = \frac{4}{15 r_s} \left[\frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_s - \frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_w r_s + r_w^{\frac{5}{2}} - \frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_s \frac{z_{wd}}{h} - \left(r - r_s \frac{z_w}{h}\right)^{\frac{5}{2}}\right] \quad (15)$$

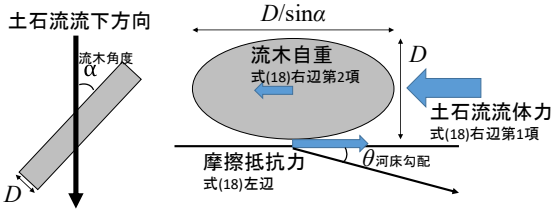
$$\varphi_{w,wd} = \frac{1}{\kappa}\sqrt{K(c)} \left(\frac{h}{d}\right)^{-1} r_w^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\left(r_w + \frac{\eta_0}{h}\right) ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h}}{r_w + \frac{\eta_0}{h} - r_{wd}} + r_{wd} \left(ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h} - r_{wd}}{\frac{\eta_0}{h}} - 1\right)\right] \quad (16)$$

$$r_{wd} = 1 - \frac{z_{wd}}{h} \quad (17)$$

2. 流木の停止条件式　本研究では流木の停止条件式を新たに構築する。図–1 のように流木の停止条件を考える。流木が移動しようとする力（流下方向への自重と土石流から受ける流体力）より，流木が受ける底面との摩擦抵抗力が大きい場合に流木の停止条件を満たすとする（式(18)）。この条件を満たしたときに，既往研究の方法(*5*)で流木を堆積させることとした。

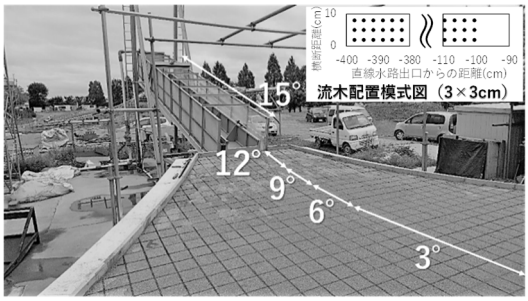
$$\rho_{wd} g D \cdot \frac{D}{\sin\alpha} \cos\theta \, \mu > \rho_m h U^2 + \rho_{wd} g D \cdot \frac{D}{\sin\alpha} \sin\theta \quad (18)$$

ここで，ρ_{wd}は流木の密度，μは摩擦係数，αは流木角度，Dは流木直径である。なお，本停止条件は主に土石流の先端部や流れの境界部分において流木が底面と接する状態を主に想定したものであるため，浮力は考慮していない。浮力が生じるような流動深の場合は流体力も大きくなるため，本条件に包含されると考えられる。



図–1.　流木の停止条件の模式図

Fig.1 Schematic of large wood stopping conditions



図–2.　実験水路(*5*)

Fig.2 Experimental flume (*5*)

III　水路実験と再現計算

1．水路実験　鈴木ら(*5*)による水路実験を検証対象とした。以下に，概要を示す。

実験は 1/50 スケールを想定し，建設技術研究所の実験水路（図–2）を用いた。幅は 0.1 m，長さは 6 m，勾配が 15° の直線水路と扇状地水路から構成されている。扇状地水路の縦断勾配は上流から 1.0 m 毎に 12 °，9 °，6 °，3 °と変化し，それ以降は下流端まで 3 °である。直線水路内には，直径が約 2.6 mm，密度 2.6 g/cm^3 の土砂を高さ 20 cm で下流端から 4.0 m の長さで容積濃度 0.65 で均一に堆砂させた（80 L）。流木は丸棒と自然木の 2 種類を十分に湿潤した状態で用いた。丸棒は直径 5.0 mm，長さ 8.0 cm ，湿潤比重 0.98 のラミン材丸棒である．自然木にはスギの落枝を用い，直径は約 4.0 mm～6.0 mm の範囲で長さは 8.0 cm，湿潤比重 1.11 である。流木は堆積土砂の上流側から設置間隔を 3.0×3.0 cm の等間隔で自立する深さ 2.0 cm まで垂直に差し込んだ（図–2）。横断方向に３本，縦断方向に 100 列の計 300 本である。

堆積土砂への浸透水の影響がないよう実験開始まで堆積土砂に散水して概ね飽和状態を保ち，上流端から流量 3.0 L/s の水を 60 秒間供給することで土石流を発生させた。浸透の影響が小さいことは実験と計算の比較により確認されている(*5*)。扇状地水路の上部からはデジタルカメラで 1.0 秒ごとに撮影を行い，流木混じり土石流が扇状地水路に到達した時点を 0 秒として，10 秒，20 秒時点における各メッシュ内の流木本数を画像から読み取った。

2．再現計算条件　メッシュ間隔は 5 cm とし，基本的に実験条件の値を適用した。自然木の直径は，大きめの材料が多かったことや湾曲を考慮して 6 mm とした（5 mm でも実施し，後述の結果とほぼ同様の結果が得られたが，6 mm の方が少し再現精度が高かったため，6 mm の結果を示す）。流木と底面との摩擦係数は 0.1 刻みで感度分析したフィッティングパラメータとし，自然木は土砂の摩擦係数と同程度の 0.9（内部摩擦角 42 度に相当），丸棒には転がり摩擦の場合もあり，転がり摩擦係数は静止摩擦係数の 1/10 程度となることから，0.5（≒(0.9+0.09)/2）とした。また，流木の停止角度は 35 度とした(*4*)。

IV　結果と考察

図–3, 4 には，扇状地水路に流出して 20 秒後の実験結果，計算結果を丸棒，自然木それぞれについて示している。実験結果では土砂の堆積範囲を点線で示し，計算結果では土砂の堆積深をコンターで示している。また，計算結果の図では流木堆積深（単位面積当たりの流木体積(cm)を，白（0 cm）から黒（0.05 cm）のグラデーションで示している。なお，流木堆積深 0.05 cm とは実験結果で示される 1 メッシュ（20×20 cm）に，流木が 12.7 本存在することに相当する。

実験結果では土砂の堆積範囲は縦断方向 300 cm 付近まで到達しているが，数値計算では 230 cm 程度の到達距離で，その分だけ横断方向の拡がりが大きい。土砂堆積の再現性は堆積速度などの問題が考えられ(*3*)，今後の課題が残るが，湿潤比重の小さい流木は水流とあるいは単体で移動し，土砂堆積箇所の外側で流木が堆積するため，流木の堆積箇所に焦点を絞って検討を進める。

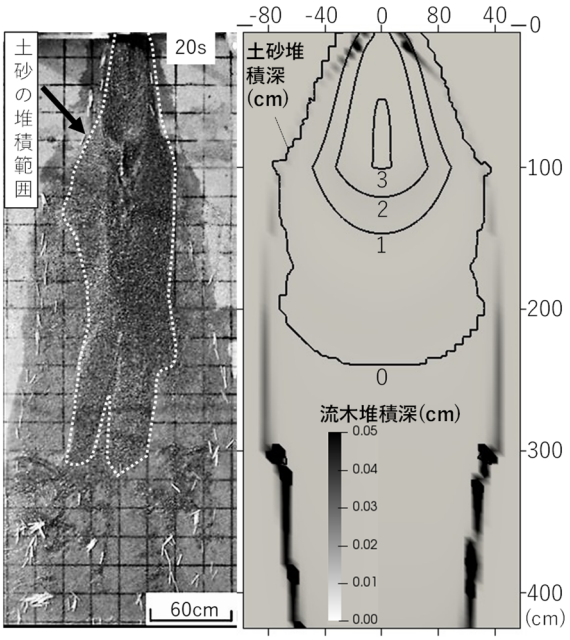
流木の堆積範囲は，丸棒は土砂堆積の外側の外縁部に堆積しているが，自然木はそれよりも内側で土砂堆積部分の周辺に多く堆積していることがわかる。これは自然木の摩擦抵抗力が大きいからである。数値計算結果では，主に摩擦係数によって流木材料の違いを設定することで，同様の結果が再現できていることがわかる。数値計算結果の方が横断方向の拡がりが少し大きいのは土砂堆積の違いの影響であり，実験結果に比べて堆積箇所のばらつきが小さいのは流木の停止角度を一律 35 度で評価しているからだと考えられる。

ここで，時間経過に伴う流木堆積箇所の違いの変化を検証するために，10, 20 秒後の流木の縦断方向の堆積箇所を分析した。図–5, 6 には直線水路からの縦断距離と流木の累積百分率の関係を実験結果，計算結果のそれぞれについて示している。この曲線の傾きが大きい箇所で流木が多く堆積していることになる。丸棒と自然木の実験結果を比較すると，摩擦抵抗力の小さい丸棒の方がより下流側まで流下していることがわかる。また，10 秒後から 20 秒後の間の下流側への再移動量は丸棒の方が大きく，自然木は概ね 10 秒後の堆積箇所を維持している。これは丸棒は表面摩擦力が小さいことに加え，断面が円形のために転がり状態になりやすいため，流木の再移動が生じやすかったからであると考えられる。数値計算結果をみると，流木停止角度を一律 35 度としているため，全体的な堆積箇所のばらつきが実験結果よりもやや小さいものの，丸棒がより下流側に流下していることや，自然木が再移動しにくいことなど，実験結果を概ね再現できているといえる。以上により，本研究で開発した流木停止条件式を用い，適切なパラメータを設定することにより流木の堆積過程を再現可能であることが示された。

V　まとめ

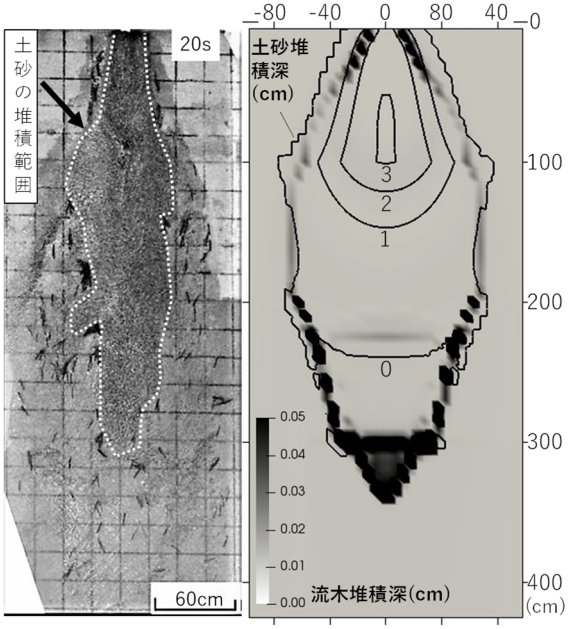
本研究では，流木が底面から受ける摩擦抵抗力と土石流から受ける流体力の関係から，流木の停止条件式を開

発した。開発した式を既存の数値シミュレーション手法に導入し，流木混じり土石流の氾濫堆積の水路実験の再現計算を実施した。開発した数値シミュレーション手法は，摩擦抵抗力の大きい流木が上流側に堆積しやすいこと，再移動しにくいことなど，実験結果を良好に再現可能であることが示された。



図–3. 土砂，流木の堆積結果（丸棒）

Fig.3 Results of sediment and large wood deposition (cylindrical timber)



図–4. 土砂，流木の堆積結果（自然木）

Fig.4 Sediment and large wood deposition results (branch wood)

謝辞：本研究は，本研究は JSPS 科研費 JP23K03511 の助成を受けたものです。ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

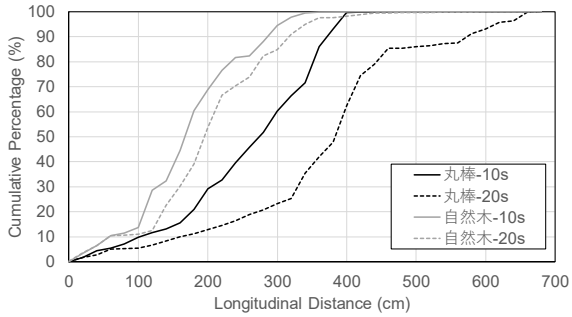
(1) 土井康弘・南哲行・山田孝・天田高白 (2000) 満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉機構に関する実験的研究. 砂防学会誌 52(6): 49–55

(2) 鈴木拓郎 (2022) 流木の土石流先端部集積過程を再現するための数値シミュレーション手法. 関東森林研究 73: 109–112

(3) Pudasaini SP (2012) A general two-phase debris flow model, Journal of Geophysical Resesrch 117, F03010, doi:10.1029/2011JF002186

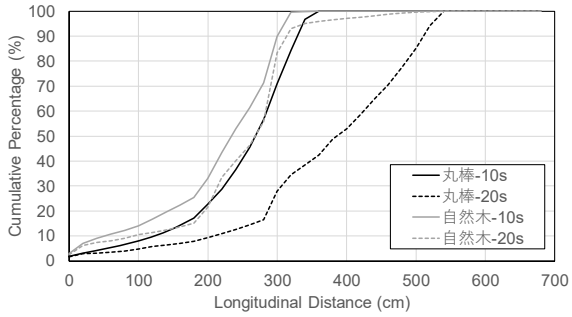
(4) 鈴木拓郎・經隆悠・浅野志穂 (2023) 不透過型堰堤の堆砂敷における流木の停止過程. 関東森林研究 74: 85–88

(5) 鈴木拓郎・劒持嵩之・經隆悠・浅野志穂 (2022) 流木混じり土石流の氾濫・堆積過程に関する水路実験と数値計算. 土砂災害に関するシンポジウム論文集 11: 95–100



図–5. 縦断距離と流木堆積量の累加百分率の関係（実験）

Fig.5 Relationship between longitudinal distance and cumulative percentage of large wood deposition (Experiments)



図–6. 縦断距離と流木堆積量の累加百分率の関係（計算）

Fig.6 Relationship between longitudinal distance and cumulative percentage of large wood deposition (Calculation)

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

流木混じり土石流を捕捉するスギ林における間伐の影響の検討

岡田康彦[1]・長井斎[2]・丸田龍一郎[2]

[1]国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所・[2]株式会社ＣＴＩリード

要旨：流木を含む土石流をスギ林が捕捉して下流域の被害を軽減する効果を調べるために，模型を用いた水路実験（縮尺は 1/20）を実施した。川砂を洗って粒度調整した飽和供試体を流下させ，流走域を移動中に計 32 本の流木を与えることにより，流木混じりの土石流を発生させた。下流の堆積域には，所定の転倒抵抗モーメントを有したスギ立木を所定の本数密度で与えておき，流木混じりの土石流がこの部分を通過する際に生じる相互作用を調べた。本数密度が大きく細い林分構造から，間伐を実施して本数密度を減らすとともに太く立木を生長させると，あるいは，同じ立木本数密度であるならば立木が太い場合に、流木が下流へ流下する距離および立木が傾倒、流出する面積が減少する結果が得られ，下流域の被害を軽減する効果が期待できることが示された。

キーワード：流木，スギ，土石流，間伐

Influence of thinning in Japanese cedar stands on woody-debris flow trap

Yasuhiko OKADA[1], Hitoshi NAGAI[2], Ryuichiro MARUTA[2]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute; [2]CTI REED Co., Ltd.

Abstract: Flume experiments were conducted to examine the influence of thinning in Japanese cedar stands on woody-debris flow trap, in which water-saturated specimens mixed with driftwood flowed down the slope. On the deposition area of gentle slopes, standing trees set at a certain stand density and critical turning moment trapped woody debris. A stand at low density with thicker trees reduced the run-out distance of driftwood and damaged area of standing trees than a stand at high density with thinner trees. When stand densities were equal, a stand with thicker trees reduced the run-out distance of driftwood and damaged area than a stand with thinner trees, indicating that an appropriate thinning to grow trees could be effective for woody debris disaster mitigation.

Keywords: Driftwood, Japanese cedar, debris flows, thinning

I　はじめに

森林が有する公益的機能のうち，山地を保全し山崩れや洪水などの災害を防止することに対する国民からの期待は大きい状態が長期間に渡り維持されている(*1*)。気候変動の影響もあってか毎年のように激しい豪雨が発生しており，これに合わせて各地で甚大な土砂災害が引き起こされている。山地は斜面から成り立つことから，重力の影響を受けて常に下方へ移動するポテンシャルを有しており，豪雨などの誘因に対しては，如何にその下方への移動を食い止め，また，移動土砂の氾濫を最小限に抑えるのかが重要な課題となる。森林は，斜面の崩壊を防止し下方への移動の発生を妨げているほか，崩壊して下方へ移動する流木混じりの土砂を捕捉して被害を軽減する機能を有しており，この機能を最大限発揮させるためには，どのような林分構造に誘導することが適切なのかの解明が喫緊の課題となっている。

崩壊の発生防止機能については，潜在的なすべり面に位置するスギ根の本数と太さを求め，また，別途，生長する根および伐採された根株の腐朽により弱る根の引抜抵抗力と根の直径の関数を調べることにより，新規植栽から 50 年までにスギが発揮する表層崩壊防止機能の動態が示されている(*3*)など，これまでの研究成果も認められる。他方，立木が流木混じりの流下土砂を捕捉し下流域の保全対象を災害から守る機能については，研究がやや遅れている。水路を用いた模型実験も一部実施されているが(*4*)，そこでは立木の転倒抵抗力のモーメントが正確に与えられておらず、立木の機能を実証的に検証する模型実験の実施が課題となっていた。

本稿は，縮尺 1/20 を想定した水路実験を通じて，スギ立木が流木混じりの流下土砂を捕捉する機能の実態を調べることとし，特に，森林施業で一般的に実施される間伐の効果を検証した結果について報告する。

II　材料と方法

1．供試砂　川砂を洗って粒度調整した試料を供試砂とした（平均粒径 D_{50} は 0.6 mm，均等係数 U_c は 3.4，曲

（受理日 2024 年 12 月 27 日）

率係数 U_c'は 0.66)。供試体は水路最上端部に設置した止水ゲートの背後に作製することとし，実験 1 回につき 2.0 $\times10^{-2}$ m^3 を使用し，これに水 2.55$\times10^{-2}$ m^3 をゆっくりと供給して飽和させた。供試体のサイズは実寸大では 160 m^3 であり，これは，幅 15 m 程度，長さ 20 m 程度，最大深さ 0.7 m 程度の山地斜面で通常認められる表層崩壊の規模から逆算して決定したものである。実験では，止水ゲートを手動で一気に引き抜くことにより，飽和供試砂を下流へ一気に流下させた。

2. 流木　幹の部分として丸棒（直径 10 mm，長さ 375 mm）を使用し，これに対して枝として直径 1.5 mm，長さ 100 mm のナイロン 16 本，根として直径 1.0 mm，長さ 50 mm のナイロン 8 本を丸棒に放射状に均等に付加することにより，幹だけの通直な形状よりも実物の形状により近い条件を与えた。枝や根については，本数や形状の複雑さ，表面摩擦力など多くの項目があり正確な再現は容易ではないが，枝，根それぞれが発揮する曲げ剛性については，フルードの相似則（縮尺 1/20）に従うとして，スギ枝および根の実物とほぼ同程度の大きさになるようにナイロンを選択した。スギの針葉を模型で表現することはさらに困難であるが，実際の土石流発生現場で立木により土砂が捕捉されている様子を確認すると，幹や枝，根などが複雑に絡み合うことの他に，葉が隙間を埋めることにより土砂の捕捉が促進されているように認められることから，ここでは，塩化ビニリデンと塩化ビニルの合成高分子化合物で編んだ網（60 メッシュ，目の開き 0.30 mm）を，各々の枝に対して幅 70 mm で与えることとし，枝ナイロンで網を縫うような処理をすることにより両者を一体とした。なお、立木については通直の丸棒を使用した。

3. 水路実験　縮尺 1/20 の水路模型は，流走域の全長 2.75 m（実寸大では 55.0 m），立木を設置し流木との相互作用を検証する堆積域は同 2.42 m（同 48.4 m）で与えた。流走域 2.75 m は，上流側から勾配 30 度（幅 0.15 m，長さ 1.55 m），勾配 20 度（幅 0.15 m，長さ 0.80 m），勾配 15 度（幅 0.15 m，長さ 0.40 m）を連結してあり，最上端部に止水ゲートを設けてある。この流走域中，勾配 15 度の部分では，高さ 0.01 m，長さ 0.01 m，幅 0.15 m の瓦桟を 0.1 m 間隔で設置して粗度調整を行うと共に 4.0$\times10^{-3}$ m^3 の砂を水路底面に敷き詰めた。その下流の堆積域 2.42 m は，勾配 15 度（長さ 0.91 m），勾配 10 度（長さ 1.51 m）を連結してあり，この部分に立木を所定の密度で設置する仕様とした。堆積域は平板の他に，左右両側方に 20 度の傾斜を与えた条件を設定した。後者については，通常は水が必ずしも流れているわけではないが，上流に位置する斜面が崩壊して土石流が生じたような場合に，土砂が流下する経路（写真–1）を想定したものである。立木を設置する堆積域に関して，15 度勾配部の幅は，上流側が 0.6 m，下流側が 1.2 m で，10 度勾配部は幅 1.2 m で一定である。

写真–1.　水路実験の堆積域のモデルとした斜面
Photo. 1 A slope targeted for flume experiments

流木は，模型水路のスペースとの兼ね合いで、15 度勾配の流走域に実験前にあらかじめ 16 本を立て掛けておき土石流が流下する際に巻き込むようにした。また、土石流がこの流走域を通過している最中に，根が下流側を向くように 16 本上方から置くように落下させて与えた。なお、根が下流側になるように調整したのは、立木の転倒抵抗モーメントを調べる研究(*2*)のきっかけとなった現場で、流木は根が下流側に向かって捕捉されていたことによる。スギ立木が発揮する最大の転倒抵抗モーメントは，現地での立木引き倒し実験から次の関係式が導出されている(*2*)。

$$Mc = 2090.3 \times DBH^{2.58}$$

ここで，Mc は現地引き倒し実験より導出した最大抵抗モーメント(kNm)，DBH は胸高直径(m)。現地引き倒し実験で導出された最大抵抗モーメントに対し，縮尺 1/20 の

表–1.　水路実験の諸元
Table 1 Experiment identification and conditions

	本数密度 (本/ha)	立木直径(m)	立木面積率 (%)	収量比数	側方傾斜
Ex-A	1,000	0.12	0.113	–	なし
Ex-B	1,800	0.12	0.203	0.48	なし
Ex-C	2,700	0.12	0.305	0.70	なし
Ex-D	1,000	0.20	0.314	0.59	なし
Ex-E	1,800	0.20	0.565	0.88	なし
Ex-F	1,000	0.30	0.707	0.88	なし
Ex-G	1,000	0.12	0.113	–	あり
Ex-H	1,800	0.12	0.203	0.48	あり
Ex-I	2,700	0.12	0.305	0.70	あり
Ex-J	1,000	0.20	0.314	0.59	あり
Ex-K	1,800	0.20	0.565	0.88	あり
Ex-L	1,000	0.30	0.707	0.88	あり

フルード則に従って強度を発揮させるため，粘土材料と丸棒の根入れ深さを種々に与えて抵抗モーメントを調べる予備実験を繰り返して、丸棒の直径と最大抵抗モーメントの設定条件を決定した。立木本数密度(本/ha)は，比較的密度の高い 2,700，比較的密度の小さい 1,000，そして，その間となる 1,800 に設定した。スギ立木の実寸大の胸高直径(m)は，立木本数密度が 2,700 のときの枯死線に接近する限界胸高直径となる 0.12，立木本数密度が 1,800 および 1,000 の時に収量比数（森林が最も密に生育している場合の蓄積量に対する現実の森林の蓄積量の割合）が約 0.88 となる 0.20 および 0.30 を選択した(*5*)（表–1）。また，新植時から低本数密度で森林を育てるケースを想定して，立木本数密度が 1,000 の時に実寸大胸高直径が 0.12 および 0.20，立木本数密度が 1,800 の時に実寸大胸高直径が 0.12 の条件も合わせて検討した。

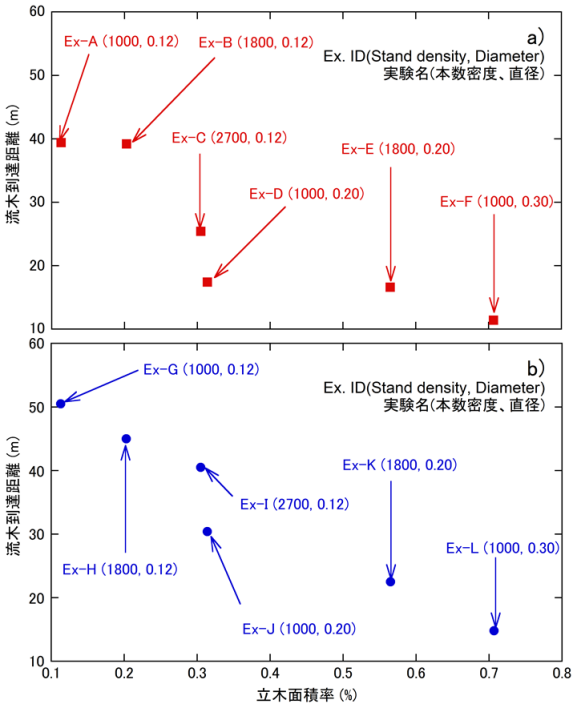
実験は，流走域の下端部を土砂が通過する時を初期条件として，土石流フロント部の波高および流速が概ね 0.07 m（実寸大では 1.4 m），1.1 m/s（同 4.9 m/s）になるように調整して実施した。同じ条件の実験を最低 2 回繰り返しその平均の物理値で分析を進めることを基本としたが、ばらつきが大きなケースについては、3 回以上行ってその平均値を求めた。

写真–2.　立木により捕捉された流木
Photo. 2 Driftwood-jam trapped by standing trees

III　結果と考察

一般に，林分の混み具合は立木本数密度を用いた検討がなされるが，仮に立木の本数が同じでも立木自体が太くなれば一定面積内に占める立木の面積が大きくなる。そのため，ここでは合計 12 条件の実験結果を，一定面積に占める立木胸高面積の率（立木面積率とする）により評価を試みる。

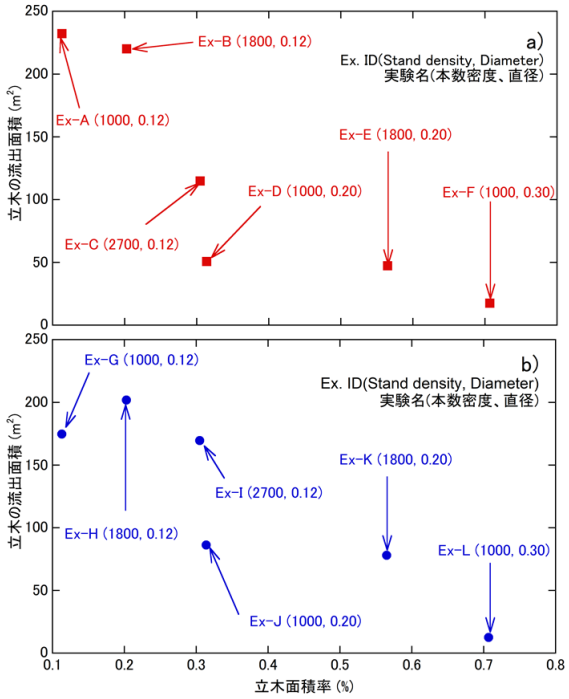
流木を含む土石流が立木を与えた想定堆積域に流入してくると，一部の立木は傾倒または流出して土石流に取り込まれるが，土石流の勢いが減勢してくるとともに土石流中に含まれる流木が立木に絡まりあうようにして，最終的にはビーバーダムのような形状で停止した（写真–2）。流走域の下端から流木が立木により捕捉されて停止



図–1.　流木の到達距離と立木面積率の関係.
a) 平板, b) 側方が傾斜
Fig. 1 Relationship between run-out distance of driftwood and area ratio of standing trees.
a) flat plate, b) plate with lateral inclines

した位置までの到達距離と立木面積率の関係（図–1）を見ると，胸高直径が小さい場合に流木の到達距離が大きく，胸高直径が大きくなるに従って到達距離は減少する結果が得られた。これは，堆積域が平坦な場合においても側方に 20 度の傾斜を与えた場合においても，同様であることがわかった。立木本数密度が 2,700 で枯死線に接近する胸高直径の条件を与えた Ex-C および Ex-I，本数密度が 1,800 で収量比数が大きな Ex-E および Ex-K，そして本数密度が 1,000 で収量比数が大きな Ex-F および Ex-L を基礎条件として捉えた場合（以下，同様），植栽時に高密度で植えられた林分に対して，その後，適切な時期に保育間伐を実施して立木の本数密度を減らして立木の生長を促し，再度適切な時期に間伐を実施してさらなる生長を促進するという通常の施業を実施することにより，流木を含む土石流の流下距離が 50%以上減少して被害の程度を軽減したことを示す。間伐を実施すると残った立木同士の間隔が大きくなり隙間という観点からするとより危険側に近づくようにも感じられるが，流木長が 7.5 m の条件で実施した今回の実験では，立木同士の間隔が 3.0 から 3.5 m 程度になる立木本数密度が 1,000 の実験においても，流木を捕捉する機能について負の側面は認められない結果となった。

同じ本数密度で太さの異なる実験を比較すると，立木



図–2.　立木の流出面積と立木面積率の関係.
a) 平板, b) 側方が傾斜
Fig. 2 Relationship between damaged area in forest stand and area ratio of standing trees.
a) flat plate, b) plate with lateral inclines

本数密度が 1,000 で胸高直径が 0.30 の Ex-F および Ex-L に較べて，胸高直径の小さな Ex-A，Ex-C，Ex-G および Ex-J は，流木の到達距離が大きくなっている。立木本数密度が 1,800 のケースも同様である。これらから，本数密度が同じで立木同士の間隔がほぼ同じである場合，各々の立木が有する転倒抵抗モーメントが大きくなる太い立木は流木を含む土石流の捕捉に有効に機能することが示された。

また，同じ胸高直径で立木本数密度が異なる条件を比較しても，胸高直径が 0.12 m の場合は立木本数密度が 1,000，1,800，2,700，胸高直径が 0.20 m の場合は立木本数密度が 1,000，1,800 と大きくなるにつれて流木の到達距離は減少しており，各々の立木が有する転倒抵抗モーメントが同じであるならば，多数の立木が存在することにより，結果として林分が発揮する土石流捕捉機能が大きくなることがわかった。

続いて，条件として与えていた立木が流木を含む土石流により完全に傾倒もしくは流出した範囲の面積と立木面積率の関係（図–2）を見ると，こちらについても，３つの基礎条件を与えた実験で比較した場合，高密度で細い立木の林分条件に較べて，低密度ながら太い立木の林分になると，立木流出面積が 15%以下まで小さくなる結果が認められた。立木流出面積は土石流により被災した箇所の面積を示すことから，こちらの結果からも，植栽時に高密度で植えられた林分に対して，適切な時期に保育間伐を実施して立木の本数密度を減らして立木の生長を促し，再度適切な時期に間伐を実施してさらなる生長を促進するという通常の施業を実施することにより，土石流による被害を軽減することが示された。

同じ立木本数密度で胸高直径の異なる条件を比較した場合についても，流木到達距離の結果と同様，胸高直径が大きくなるに従い，流木流出面積は小さくなることが示された。

一方で，同じ胸高直径で立木本数密度が異なる条件を比較した場合は，側方に傾斜を与えた斜面ではこれまでと同様の傾向から外れる結果も生じ，胸高直径が 0.12 m で立木本数密度が 1,000 の Ex-G は，同じ胸高直径で立木本数密度がより大きな 1,800 の Ex-H よりも立木流出面積は小さくなった。他方，平坦斜面で実施した同条件の結果は，同じ胸高直径であるならば立木本数密度が大きな実験で立木の流出面積は小さくなる結果がえられていることから，Ex-G の結果については，再実験を実施するなどして検証することが必要と考えている。

これらの実験結果から，立木本数密度が 2,700 から 1,000 の間については，適切な時期に保育間伐を実施して立木の生長を促進し胸高直径を大きくすることにより，流木を含む土石流が流下する距離や，土石流により立木が流出する面積が低減することがわかり，防災機能発現に対し正の効果があることわかった。

謝辞：本研究は，農林水産省委託プロジェクト「管理優先度の高い森林の抽出と管理技術の開発」JPJ009840 の補助を受けて実施した。

引用文献

(1) 内閣府: 森林と生活に関する世論調査(令和 5 年 10 月). https://survey.gov-online.go.jp/r05/r05-sinrin/gairyaku.pdf (2024.11.1 参照)

(2) Okada Y (2019) Measuring critical turning moment of the Japanese cedar (Cryptomeria japonica) in situ. Journal of Forest Research 24(3): 168–177

(3) Okada Y, Cai F, Kurokawa U (2023) Changes in slope stability over the growth and decay of Japanese cedar tree roots. Forests 14, 256: https://doi.org/10.3390/f14020256

(4) 藤堂千景，杉山和史，山背敬太郎，溝口裕也，長井斎 (2017) 平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集，92-93

(5) 東京農工大学 (1987) 林業実務必携第 3 版. 朝倉書店, 東京: 607pp

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

東京農業大学奥多摩演習林狩倉沢流域における表層土壌の透水性と植生および地形との関係

佐藤貴紀[1]・酒井美瑳[1]・橘隆一[1]

[1]東京農業大学地域環境科学部

要旨：森林斜面において土壌の浸透能を上回る強度の降水が発生した場合，ホートン型表面流が発生し，流域からの洪水流出量に影響を与える。そのため，森林流域における土壌透水性の評価は，流域の降雨流出特性を知るうえで重要である。そこで本研究は，東京農業大学奥多摩演習林狩倉沢流域を対象として 40 地点の表層土壌を採取し，定水位飽和透水試験によって飽和透水係数を求めた。その結果，いずれの地点も飽和透水係数が 10^{-2}～10^{-1} cm s^{-1} と高いことが明らかとなった。また，植生と地形のデータを詳細に解析したところ，地形としては谷地形および緩斜面において飽和透水係数が高い傾向が見られ，そのような場所にオオバアサガラが優占していた。しかし，同じ地形条件の広葉樹林では透水係数が低く，シカの踏圧や下床植生欠如など食害の影響が考えられた。

キーワード：土壌サンプリング，飽和透水係数，地形，植生，シカ食害

Relationship between permeability of surface soil, vegetation and topography in Karikurasawa Watershed, Okutama Experimental Forest, Tokyo University of Agriculture

Takanoari SATO[1], Misa SAKAI[1], Ryuichi TACHIBANA[1]

[1]Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

Abstract: Horton–type overland flow occurs on forested slopes when rainfall intensity exceeds the infiltration capacity of the soil, affecting the amount of flood runoff from the watershed. Therefore, to understand the rainfall–runoff characteristics of a forested watershed, it is important to evaluate soil permeability throughout the watershed. We collected surface soil samples from 40 locations in the Karikurasawa watershed of the Okutama Practice Forest at the Tokyo University of Agriculture, and conducted saturated hydraulic conductivity tests based on a constant water table. The saturated hydraulic conductivity was high at all sampling locations, ranging from 10^{-2} to 10^{-1} cm s^{-1}. Detailed analyses using the vegetation and topography data showed that saturated hydraulic conductivity tended to be higher in valleys and on gentle slopes, as well as in areas dominated by *Pterostyrax hispidus* than in those dominated by other vegetation.

Keywords: soil sampling, saturated hydraulic conductivity, topography, vegetation, deer overbrowsing

I　はじめに

森林斜面において土壌の透水性を上回る強度の降水が発生した場合にホートン型表面流が発生し，流域からの洪水流出に影響を及ぼす(*5*)。従って，森林における表層土壌の透水性の評価は，森林の洪水緩和機能を定量的に明らかにするために重要である。

森林における表層土層の透水性についてはこれまでに樹種間比較(*1*)，林床被覆(*1*, *4*)および地形(*1*, *6*)が表層土層の透水性に与える影響などが明らかにされている。しかし，同一流域内において表層土壌の透水性を多点で測定し，それと植生や地形との関係を明らかにした研究例は少ない。例えば平岡ら(*4*)は林床被覆の影響を明らかにするために，同一流域内において草本植生が生育している中腹斜面において調査プロットを設定している。また，Miyata *et al.* (*6*)は調査流域内において尾根，中腹，谷といった地形と透水性との関係について明らかにしているが，その調査は 1 ライン上でのみ行われた結果である。Miyata *et al.* (*5*)はモデル計算により，流域内における透水性の空間分布が降雨流出特性に与える影響について評価している。すなわち，流域における表層土壌の透水性が降雨流出特性に与える影響を評価するためには，流域内において多点高密度での表層土壌の透水性の調査を行い，それと植生および地形との関係を明らかにすることが必要である。

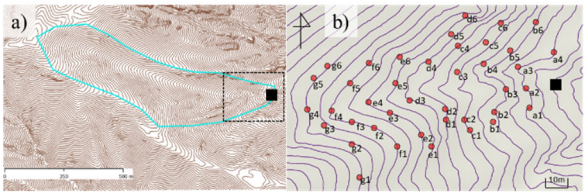
そこで本研究は，東京農業大学奥多摩演習林狩倉沢流域を対象として，表層土層の透水性を多点高密度で測定

（受理日 2025 年 1 月 24 日）

し，かつ植生および地形との関係を明らかにすることを目的とした。

II　調査概要

1. 調査地　調査地は，東京農業大学奥多摩演習林にある狩倉沢流域（以下，調査流域）である（図–1a）。標高は 990～1,452 m であり，流域面積は 16.7 ha，地質は地質図 Navi (*8*)によると中生代，後期ジュラ紀から前期白亜紀の付加体であり，調査流域の周辺には石灰岩が露出しているところも見られるなど，非常に複雑な地質となっている。調査流域から南西およそ 2 km 離れている小河内アメダス（標高 530 m）における年降水量の平年値（1991～2020 年）は 1,608.0 mm であり，年平均気温の平年値（1991～2020 年）は 12.3℃である。調査流域内の植生はスギ人工林が主であり，一部ヒノキ人工林，ミズナラ，キハダ，クリ等から成る広葉樹林も存在する。そしてギャップにはオオバアサガラが優占している。



図–1.　狩倉沢流域の地形図(a)と土壌サンプリングポイント(b)。(a)の点線領域が土壌サンプリングポイント(b)を示す。図中の四角印が量水堰を，丸印がサンプリングポイントを示す

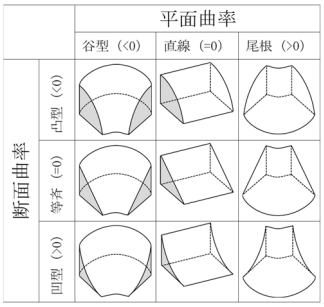
Fig.1 Topographic map of Karikurasawa Watershed (a) and soil sampling point (b). Dotted square area in (a) indicates the sampling area (b). A square symbol and circle symbols indicate gaging weir and sampling point, respectively

2. 土壌サンプリングと飽和透水試験　調査流域の最末端には量水堰が設置されており，その周辺に 40 地点のサンプリングポイントを設定した（図–1b）。土壌サンプリングには内径 50 mm，容量 100 ml のステンレス製採土管を用いて不撹乱で行った。まず，サンプリングポイントの表面に堆積する落葉落枝などの A_0 層を取り除き，A 層から下の層に向かって垂直方向に採土円筒を差し込み，土壌表面から 0–5 cm の土壌を採取した。1 ポイントにつき 3 サンプル，合計で 120 サンプルを採取し，持ち帰った。

持ち帰ったサンプルは 24 時間以上浸水させて飽和状態にしたのち，土壌透水性測定器（DIK–4012, 大起理化）を用いた定水位飽和透水試験を行った。測定器に 4 つのサンプルを設置し，1 試験の測定時間を 30 秒として，その間に流出した水量を測定した。その測定を 1 サンプルにつき 3 回行い，その平均値をそのサンプルの飽和透水係数とした。

3. 植生調査　植生調査は，サンプリングポイント周辺の植生を目視にて主要な優占樹種の確認を行い，スギ人工林，ヒノキ人工林，広葉樹林，オオバアサガラの 4 パターンに分類をした。その結果，40 地点のうちスギ人工林が 18 地点，ヒノキ人工林が 5 地点，広葉樹林が 9 地点，オオバアサガラが 8 地点であった。

4. 地形データ　本研究では，東京都が公開している 0.5 mDEM を用いた(*10*)。ArcGIS Pro を用いてサンプリングポイントごとの傾斜角と曲率を抽出した。曲率とは斜面の凹凸を示す指標であり，斜面の断面の凹凸を表す断面曲率，平面の凹凸を表す平面曲率，それらの平均である平均曲率の 3 つから成る。さらに，本研究では遠山ら(*11*)に従い，断面曲率と平面曲率から図–2 のような 9 パターンの地形区分に分類をした。その結果，7 つの地形区分に分類された。



図–2.　平面曲率と断面曲率による地形区分。遠山ら(*11*)をもとに作成

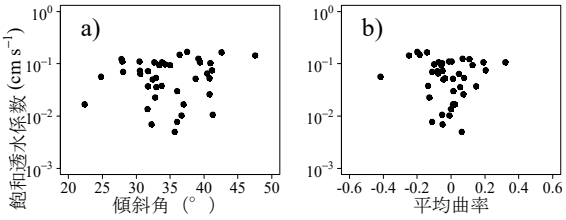
Fig.2 Topographic classification by plane curvature and cross–sectional curvature, based on (*11*)

5. 地形データ　本研究では 4 つの植生パターンおよび 7 つの地形区分と飽和透水係数とを比較し，グループ間で統計的に優位であるかどうかを示すために，ウィルコクソンの順位和検定を行い，ボンフェローニ法による p 値の補正を行った。この統計解析には統計解析ソフト R Ver. 4.1.0 (*7*)を用いた。

III　結果

1. 傾斜角および平均曲率と飽和透水係数との関係

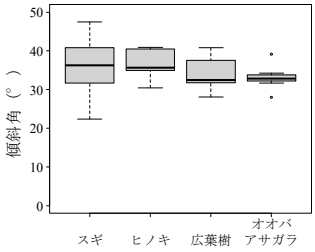
図–3 は傾斜角(a)および平均曲率(b)と飽和透水係数との関係を示している。いずれも縦軸は対数軸となっている。傾斜角および平均曲率ともに飽和透水係数との間に明瞭な関係が見られず，飽和透水係数は 10^{-2}～10^{-1} cm s^{-1} の範囲であった。



図–3. 飽和透水係数と傾斜角(a)および平均曲率(b)との関係

Fig.3 The relationship between saturated hydraulic conductivity and slope angle (a) and average curvature (b)

2. 各植生が生育する地形と飽和透水係数 図–4 は各植生パターンにおける傾斜角の箱ひげ図である。いずれの植生も中央値が 30° 以上であり，急峻な斜面となっているが，広葉樹林およびオオバアサガラは他の植生に比べて傾斜が緩やかであった。また，表–1 は分類された地形区分を，さらに植生ごとに集計したものである。これによると広葉樹林とオオバアサガラは谷型地形（凸型谷型，等斉谷型）において多く存在していた。



図–4. 各植生パターンが生育する傾斜角

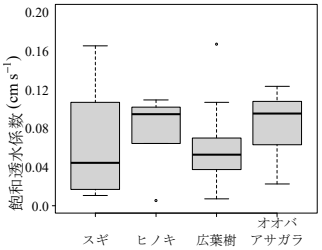
Fig.4 Slope angle of each vegetation pattern

表–1. 各植生パターンにおける地形区分のポイント数

Table 1 Number of points of topographic classification in each vegetation pattern

	スギ	ヒノキ	広葉樹	オオバアサガラ
凸型谷型	3		2	1
等斉谷型	2		3	4
凹型谷型	1	1	1	
凸型直線型	3	1		
等斉直線型	6	1		
等斉尾根型	2	1	1	3
凹型尾根型	1	1	2	

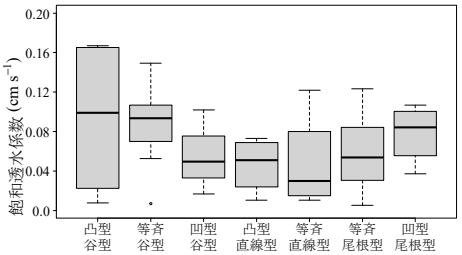
図–5 は各植生パターンにおける飽和透水係数の箱ひげ図である。統計解析の結果，いずれの組み合わせにおいても統計的優位さは見られなかった（$p>0.05$）が，オオバアサガラの飽和透水係数が他の植生に比べて高く，一方，広葉樹林は他の植生に比べて飽和透水係数が低い傾向が見られた。



図–5. 各植生パターンにおける飽和透水係数

Fig.5 Saturated hydraulic conductivity in each vegetation pattern

3. 地形区分における飽和透水係数 図–6 は各地形区分における飽和透水係数の箱ひげ図である。統計解析の結果，いずれの組み合わせにおいても統計的優位さは見られなかった（$p>0.05$）が，谷型地形（凸型谷型，等斉谷型，凹型谷型）において，他の地形区分と比べて飽和透水係数が高く，また凹型尾根でも飽和透水係数が高い傾向が見られた。すなわち，比較的谷型の地形，または凹型の地形において飽和透水係数が高い傾向が見られた。



図–6. 各地形区分における飽和透水係数

Fig.6 Saturated hydraulic conductivity in each vegetation pattern

Ⅳ 考察

東京農業大学奥多摩演習林にある狩倉沢流域の量水堰付近において，表層土壌の透水性を調べた結果，飽和透水係数が 10^{-2}～10^{-1} cm s^{-1} の範囲であり，透水性が非常に高いことが明らかとなった。しかし，植生や地形のデータを用いて詳細に解析したところ，いくつかの特徴が明らかとなった。

1. オオバアサガラの生育適地と透水性 植生と飽和透水係数との比較により，他の植生パターンに比べてオオバアサガラの飽和透水係数が高い傾向が見られた。菅原・河原(*9*)は本研究と同じ東京農業大学奥多摩演習林においてカラマツ林，サワグルミ林を対象として，その下層に生育するオオバアサガラの生育状況を調べた。その結果，地形条件としては谷地形，緩斜面において生育が良好であったことを示している。図–4 よりオオバアサガ

ラは他の植生パターンに比べて傾斜が緩やかな場所，表–1 より地形区分としては谷型地形に多く生育していた。これは菅原・河原(*9*)が指摘した，オオバアサガラの生育適地と一致している。従って，オオバアサガラの生育地において透水性が高かった理由は，谷地形かつ緩斜面の場所に生育していたためと考えられる。

2．地形による透水性の違い　図–6 より調査流域では谷型地形において，さらにオオバアサガラが主に生育する緩斜面において飽和透水係数が高かったことが明らかとなった。阿部ら(*1*)は北海道東部の常呂川・網走川流域を対象として浸透能を調べ，平坦および急斜面に比べて緩斜面において浸透能が大きかったことを報告している。その理由として，緩斜面では膨潤した崩積土の堆積が起きやすいためであると考察している。当調査流域の，とくに土壌サンプリングを行った量水堰付近では，クラックが入った基岩が露出している場所が多数あり，崩落した礫や土砂が谷底に堆積していた。そのため，当調査流域においても谷地形および緩斜面において透水性が高い傾向を示したと考えられた。

3．調査流域内におけるシカ食害の影響　オオバアサガラと同じく緩斜面に生育していた広葉樹林において，図–4 に示す通り，他の植生に比べて飽和透水係数が低かった。その原因として，奥多摩地方のシカ食害の影響が考えられる。新井ら(*2*)によると，奥多摩地方では近年，シカの生息数が増加している。調査流域内の広葉樹林では下床植生はほとんど見られず，かつ斜面に生育しているためリターの堆積も見られず，土壌がむき出しの状態であった。このような状態では土壌の透水性が低下することが報告されている(*4*)。一方，オオバアサガラはスギ人工林近くのギャップに優先していることが多く，スギのリターに覆われていた。シカ食害を受けた場所の植生は，シカ不嗜好性のオオバアサガラが優占する植生へ変化することが報告されている(*3*)。調査流域においてギャップにオオバアサガラが優占していた理由も，シカ食害による植生の変化が原因であると考えられた。以上の理由から，同じような地形に生育していた広葉樹林において，オオバアサガラと比較して透水性が低くなったと考えられた。

V　結論

東京農業大学奥多摩演習林狩倉沢流域において，表層土層の透水性を調べた結果，飽和透水係数は 10^{-2}～10^{-1} cm s^{-1} の範囲であり，透水性が非常に高いことが明らかとなった。植生や地形データを用いてより詳細に解析した結果，谷型地形および緩斜面において，他の地形に比べて透水性が高い傾向が見られ，そのような場所にオオバアサガラが優占していた。しかし，同じ地形条件の広葉樹林では透水係数が低く，シカの踏圧や下床植生欠如など食害の影響が考えられた。このような情報は，シカ食害を受けた森林流域における表層土壌の透水性を検討する上で，非常に有益な情報であると筆者らは考える。

謝辞：本研究は科学研究費補助金 基盤研究（C）19K06345（代表：橘 隆一）の援助を受けて実施されたものである。

引用文献

(1) 阿部友幸・佐藤弘 (2008) 北海道東部における林相，斜面地形，下層植生が 森林土壌の浸透能に及ぼす影響. 日本森林学会誌 90(2): 84–90

(2) 新井一司・久保田将之・中村健一 (2022) 東京都多摩地域におけるシカ生息分布の推移. 73: 125–128

(3) 福島慶太郎・立岩沙知子・高柳敦・吉岡崇仁 (2015) 京都府生研究林におけるニホンジカによる植生被害と森林生態系への影響. 水利科学 345: 65–83

(4) 平岡真合乃・恩田裕一・加藤弘亮・水垣滋・五味高志・南光一樹 (2010) ヒノキ人工林における浸透能に対する下層植生の影響. 日本森林学会誌 92(3): 145–150

(5) Miyata S, Gomi T, Sidle RC, Hiraoka M, Onda Y, Yamamoto K, Nonoda T (2019) Assessing spatially distributed infiltration capacity to evaluate storm runoff in forested catchments: Implications for hydrological connectivity. Science of the Total Environment 669: 148–159

(6) Miyata S, Kosugi K, Nishi Y, Gomi T, Sidle RC (2010) Spatial pattern of infiltration rate and its effect on hydrological processes in a small headwater catchment. Hydrological Processes 24: 535–549

(7) R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

(8) 産総研地質調査総合センター：地質 Navi. https://gbank.gsj.jp/geonavi/ (2024.11.10 参照)

(9) 菅原泉・河原輝彦 (2012) 人工林内の下層におけるオオバアサガラの生長と立地条件. 東京農業大学集報 56(4): 269–274

(10) 東京都: 東京都デジタルツイン多摩地域点群データ. https://catalog.data.metro.tokyo.lg.jp/dataset/t000029d0000000020 (2024.11.10 参照)

(11) 遠山貴之・吉原哲 (2020) 平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂崩壊地と地形・植生の関係について. 応用生態工学 23(1): 197–205

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

対照流域法で必要な基準期間の年数について

―釜淵森林理水試験地を事例として―

久保田多余子[1]・阿部俊夫[1]・小田智基[1]

[1]森林総研

要旨：対照流域法では，基準期間（森林の伐採や植栽をする前の期間のこと）の対照流域と処理流域の流出量の関係（回帰直線）を正確に決定する必要がある。本研究では，釜淵森林理水試験地において行った対照流域法による皆伐試験の年流出量データをもとに，対照流域法に必要な基準期間の年数について考察した。基準期間を変化させることにより，皆伐後の流出量の変化量がどのように変化するかを調べるとともに，回帰直線の 95%信頼区間を基にその変化が統計的に有意であるか否かを判定した。この結果，皆伐後の流出量の変化量は，基準期間が短いほどばらつき，5 年以上でほぼ一定値となった。また，基準期間が 6 年以上で皆伐後の流出量変化に統計的な有意性が示された。このことから，基準期間を 6 年以上取ることが望ましいことが示された。

キーワード：対照流域法，基準期間，信頼区間，釜淵森林理水試験地

The number of years of control period required for the paired watershed method - A case study of the Kamabuchi experimental watershed

Tayoko KUBOTA[1], Toshio ABE[1], Tomoki ODA[1]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: In the paired watershed method, it is necessary to accurately determine the relationship (regression line) between the runoff volume of the control and the treatment watershed during the control period (the period before logging or planting). In this study, we examined the number of years required for the control period in the paired watershed method, based on annual runoff data from a clear-cutting experiment conducted at the Kamabuchi experimental watershed using the paired watershed method. By changing the control period, we investigated how the amount of change in runoff after clear-cutting would change, and also determined whether or not this change was statistically significant based on the 95% confidence interval of the regression line. As a result, the amount of change in runoff volume after clear-cutting varied depending on the length of the control period, and after 5 years or more, it became almost constant. In addition, the change in runoff volume after clear-cutting was statistically significant when the control period was 6 years or more. This indicates that it is desirable to take a control period of 5 years or more.

Keywords: paired watershed method, control period, confidence interval, Kamabuchi experimental watershed

I　はじめに

対照流域法は森林の伐採や植栽が河川の流出量へ及ぼす影響を定量的に推定するための方法である。この方法では，基準期間（森林の伐採や植栽をする前の期間のこと）に対照流域（森林に手を加えない流域）と処理流域（伐採や植栽をする流域）の流出量の，信頼できる関係式を決定する必要がある。対照流域法が盛んに行われていた 1990 年代以前は，基準期間を 7-8 年設けている試験が多いが(*2,3*), 1990 年代以降に開始された試験(例えば *4, 5, 6, 9*)では基準期間は 1-6 年と，短く設定されているものが多い。これまで，基準期間は長くとるほど良いと考えられていたため，何年必要であるかあまり検討されてこなかった。そこで，本研究では対照流域法によって，森林伐採後の流出量の変化量を正確に推定するために必要な基準期間の長さについて考察する。

II　材料と方法

1．調査地　調査地は，対照流域法が実施された，森林総合研究所の釜淵森林理水試験地である(*8*)。ここでは試験地内の 1 号沢と 2 号沢において，1939 年から流出観測が開始された。1947 年 12 月-1948 年夏にかけて，1 号沢を対照流域として残し，2 号沢を処理流域として皆伐が行われた。その後 2 号沢では，1949-1952 年は 6 月と 9 月に後生樹草の全刈払いが行われ，1953-1960 年には 4 月

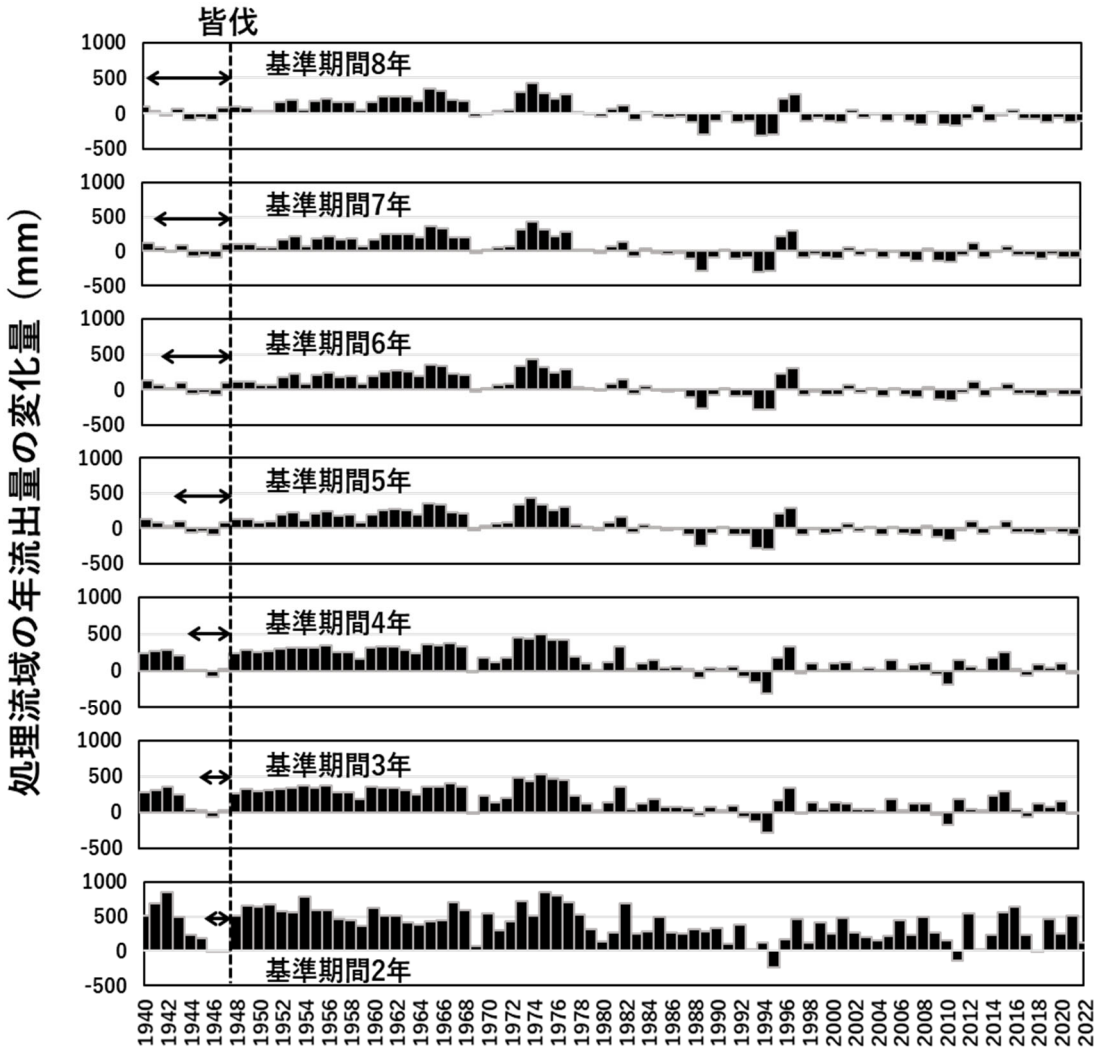
（受理日 2024 年 12 月 27 日）

末から 5 月初めにかけて火入れが行われた。1958 年には 4 月の火入れの後，さらに夏までに地際から全刈払いが行われた。しかし，雪崩が発生したため，1960 年に雪崩防止階段工を設置した後，スギが植栽された。そして，その後も両流域で現在まで流出量観測が継続されている。

2．解析方法　解析には釜淵森林理水試験地の 1 号沢と 2 号沢の年流出量データを使用した。この試験地では冬季に積雪があるため，降雪が始まる 11 月を水年の区切りとしている。例えば，1940 水年とは 1939 年 11 月 1 日から 1940 年 10 月 31 日までのことである。この対照流域法では，基準期間を 1940-1947 年までの 8 年間設けている。この基準期間を 1946-47 水年の 2 年間，1945-47 水年の 3 年間・・・8 年間と変化させて，それぞれ両流域の流出量の関係式（回帰直線）を求めた。両流域の流出量の関係は，もし皆伐が行われなければ，皆伐前の関係がずっと続くと考えられることから，皆伐による流出量の変化量は，処理流域の流出量の実測値から，同じ年の対照流域の流出量を回帰直線に代入して求められる流出量の推定値との差によって求められる。そして，流出量の変化量が基準期間を変化させると，どのように変化するかを調べるとともに，回帰直線の 95%信頼区間を基に統計的に有意か否かを判定した。

III　結果と考察

1．皆伐による流出量の変化量　流出量の変化量の年変化を図–1 に示した。基準期間が 8 年の場合を見ると，皆伐によって処理流域の流出量は増加し，1968 年頃一度伐採前の水準に回復し，再び増加して，1983 年以降は伐採前の水準か少し減少する傾向があった。このようにこの皆伐試験では，皆伐後 30 年以上，1960 年にスギを植

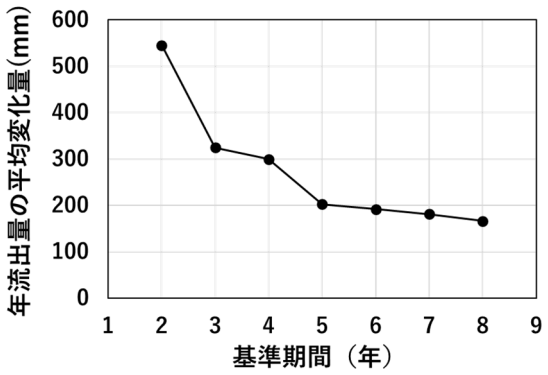


図–1.　皆伐による処理流域の年流出量の変化量

Fig.1 Change in the annual runoff volume in the treatment watershed due to clear-cutting

栽してから 20 年以上，皆伐や下刈り・火入れの影響が続いた(*1,10*)。皆伐による流出量の変化量は，基準期間が 5-8 年では同様の変化量と変動をしているが，基準期間が 5 年未満では流出量の変化量は大きく見積もられた。基準期間 2 年では流出量が皆伐前の状態に戻ることはなかった。

次に，皆伐後流出量が増えて，一度元の水準に戻るまでの 1948-1968 水年の流出量の平均変化量を基準期間に対して示した（図–2)。流出量の平均変化量は基準期間が 5 年未満では変動が大きいが，5 年以上ではほぼ一定値になった。



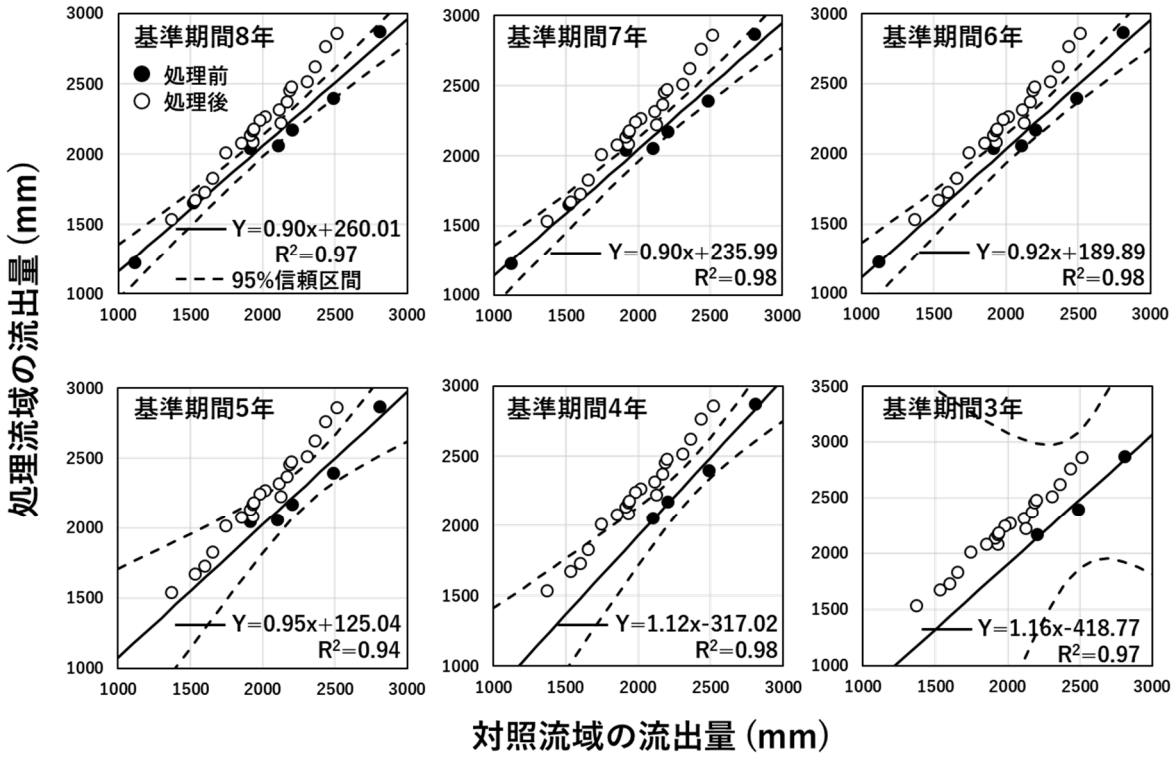
図–2. 基準期間と年流出量の 1948-1968 水年の平均変化量

Fig.2 Relationship between the control period and the average change in annual runoff volume from 1948 to1968 water year

2．統計的な有意性　基準期間の対照流域と処理流域の流出量の回帰直線とその 95%信頼区間，および 1948-1968 水年の両流域の流出量の実測値を基準期間の年数ごとに図–3 に示した。一般的に信頼区間の幅はプロットされた点の平均値付近で狭く，そこから離れるほど広くなる。また，信頼区間の幅はデータ数が増えるほど狭くなる。本研究では，信頼区間の幅は基準期間 3 年で広く，基準期間が長くなるほど狭くなる傾向があり，基準期間 6-8 年ではあまり違いがみられなかった。基準期間 3 年の場合は，流出量が 2000 mm 以上の比較的多い時のデータに偏っている。このため，流出量が 2000 mm 以下での信頼区間の幅が広く，基準期間 3 年では，流出量の変化量が過大に見積もられているにも関わらず，統計的に有意な差として検出されない。基準期間 5 年の場合に，基準期間 4 年の場合よりも信頼区間の幅がやや広い。これは基準期間 4 年の場合は，回帰直線の決定係数が R^2=0.980 と高いが，基準期間を 5 年にしたときに，やや精度が悪いと考えられるデータがプロットされ，回帰直線の決定係数が下がったためと考えられる。基準期間が 6-8 年になると流出量が 1500 mm 以下のデータもプロットされ，信頼区間の幅が狭くなり，信頼できる回帰直線が得られたと考えられる。基準期間が 6-8 年では回帰直線の傾きや切片の数値も似ている。また，基準期間が 6-8 年とすると，皆伐後の多くの流出量が 95%上側信頼区間の外側にプロットされ，流出量の変化量が 5 %の水準で統計的に有意であると判断された。基準期間 6-8 年で信頼区間の外側にプロットされない点が 6 点ある。まず，流出量 2000 mm 付近の点は 1948 水年のデータである。この年は皆伐の年であり，皆伐の影響がまだ流出量に反映されていないと考えられる。また，流出量 1500 mm 付近にある 4 点は，皆伐 2-4 年後の 1949-1951 水年および皆伐 7 年後の 1954 水年のデータである。これらの年は他の年と比べて植生の状態が大きく異なるとは考えられないため，流出量の変化量が少ないのは，林況以外の影響と考えられる(*7*)。これらの年は年間降水量が少ない年であったことと，かつ，30 mm 以下の降雨の回数は他の年と大差がないのに対して，50 mm 以上の降雨の回数が他の年と比べ少なかったためと考えられている(*7*)。2100 mm 付近の点は 1959 水年のデータである。この年は火入れと下刈りを行っており，流出量が同程度の年と比較して流出量の変化量が小さい原因は不明である。

Ⅳ　まとめ

釜淵森林理水試験地の年流出量データを用いて，対照流域法に必要な基準期間の年数について検討した結果，基準期間が 4 年以下の場合は，皆伐後の流出量の変化量が過大評価になり，かつ 5 年以下の場合は，統計的に有意な差として検出されなかった。このことから，釜淵森林理水試験地の事例では，対照流域法によって伐採による流出量の変化量を正確に見積もり，かつ統計的に有意な差として検出するためには，基準期間を 6 年以上とすることが望ましかった。本研究では，基準期間における対照流域と処理流域の流出量の信頼できる回帰直線を得るためには，決定係数が高いだけでは不十分であり，雨の多い年，少ない年の大小さまざまな流出量データをまんべんなく取得する必要があることが示された。基準期間を短くすると，伐採後に何年観測を継続しても，流出量の変化量を正確に推定できない可能性が高い。一方で，伐採の流出量への影響は比較的速やかに現れる。このことから，近年は短期間で成果を求められ，長期の試験の実施が難しいかもしれないが，研究期間のできるだけ後半に伐採を実施し，基準期間を長期に確保するべきである。



図–3.　対照流域と処理流域の流出量の実測値と基準期間の両流出量の回帰直線およびその 95%信頼区間

Fig.3 Measured values of runoff in the control and treatment watersheds, regression lines for both runoff values in the control period, and their 95% confidence intervals

謝辞 : 本研究は，森林総合研究所一般研究費によって実施しました。

引用文献

(1) 阿部俊夫･久保田多余子･野口正二･細田育広　(2023) 釜淵森林理水試験地における皆伐とその後の植生の回復が融雪流出に及ぼす影響. 日林誌 105: 1-10

(2) Bosch JM, Hewlett JD (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. J Hydrol 55: 3-23

(3) Brown AE, Zhang L, McMahon TA, Western AW, Vertessy RA (2005) A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. J Hydrol 310: 28-61

(4) Dung BX, Gomi T, Miyata S, Sidle RC, Kosugi K, Onda Y (2012). Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest. J Hydrol 444-445: 51-62

(5) Kubota T, Tsuboyama Y, Nobuhiro T (2018) Effects of thinning on canopy interception loss, evapotranspiration, and runoff in a small headwater *Chamaecyparis obtusa* catchment in Hitachi Ohta Experimental Watershed in Japan. Bulletin of FFPRI 17: 63-73

(6) 真板英一･鈴木雅一 (2007) 千葉袋山沢流域における伐採による月流出量変化. 日林誌 89: 278–287

(7) 中野秀章・菊谷昭雄・森沢万佐男 (1963) 林況変化，とくに伐採が渓流流出に及ぼす影響（Ⅰ）―水年・豊水・平水・低水・渇水各流出量への影響―. 林試研報 156: 1-84

(8) 農林産省林業試験場 (1961)森林理水試験地観測報告(日降水量・日流出量)，農林産省林業試験場，東京, 225pp

(9) 白木克繁・金澤悠花・工藤司・片岡宏介・ウジムセ・内山佳美（2020）簡易架線集材による森林整備が流出浮遊土砂量と流域流出量に与える影響. 水・水会誌 33: 47-55

(10) 玉井幸治 (2021) 森林の伐採などが最大・最小日流出量（無雪期）に及ぼす影響―釜淵と竜ノ口山の両森林理水試験地の事例から―. 水・水会誌 34: 243-253

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

冷温帯と暖温帯に植栽されたブナ個葉のガス交換特性の環境応答

山田陸[1]・小坂泉[1]・佐々木大和[1]・鈴木実蓉[1]・千本松武秀[1]・早川大[1]・前野遥希[1]・岡優太[1]・瀧澤英紀[1]

[1]日本大学生物資源科学部

要旨：冷温帯の水上試験地と暖温帯の藤沢試験地に植栽されたブナの個葉のガス交換と生理的な環境応答特性を明らかにするため，2024 年 8 月から 10 月にかけて両試験地において光合成速度と気孔コンダクタンス(g_s)の日変化を測定し，水利用効率(iWUE)と葉面飽差(VPD_L)に対する g_s の感度について調べた。水上試験地および藤沢試験地において日中平均した iWUE の季節変化は測定期間において不明瞭であった。2024 年 8 月および 9 月において，両試験地の g_s は VPD_L の増加に伴い低下したが，VPD_L に対する g_s の感度は藤沢試験地より水上試験地でやや高かった。このことから，藤沢試験地より水上試験地のブナが VPD_L の増加に対して敏感に応答することが示唆された。

キーワード：ブナ，ガス交換，水利用効率，気孔コンダクタンス，葉面飽差

Environmental responses of leaf gas exchange traits in *Fagus crenata* planted in cool- and warm-temperate zones

Rikuto YAMADA[1], Izumi KOSAKA[1], Yamato SASAKI[1], Mihasu SUZUKI[1], Takehide SENBONMATSU[1], Dai HAYAKAWA[1], Haruki MAENO[1], Yuta OKA[1], Hideki TAKIZAWA[1]

[1]College of Bioresource Sciences, Nihon University

Abstract: We investigated the leaf gas exchange and physiological environmental responses of *Fagus crenata* planted in the cool-temperate Minakami experimental forest (hereafter, Minakami) and the warm-temperate Fujisawa experimental forest (Fujisawa) in Japan. We measured the diurnal changes of leaf photosynthetic rate and stomatal conductance of water vapor (g_s) at both sites over August–October 2024, to determine their intrinsic water use efficiency (iWUE) and the sensitivity of g_s to leaf-to-air water vapor deficit (VPD_L). Seasonal changes in midday mean values of iWUE at Minakami and Fujisawa were unclear during the measurement period. In August and September 2024, g_s decreased with increasing VPD_L at both sites but to a slightly greater degree at Minakami than at Fujisawa. This suggests that *F. crenata* was more sensitive to increases in VPD_L at Minakami than at Fujisawa.

Keywords: *Fagus crenata*, gas exchange, intrinsic water use efficiency, stomatal conductance, leaf-to-air water vapor deficit

I　はじめに

日本の冷温帯を代表する樹種であるブナ(*Fagus crenata*)は，温暖化の影響で大幅に減少する予測が報告され(*5*)，温暖化に対するブナの脆弱性が懸念されている。一方，先行研究である畑岸ら(*2*)によれば，冷温帯の水上試験地と暖温帯の藤沢試験地に植栽されたブナ成木の水利用効率は同程度であり，暖温帯に生育するブナの水利用効率が，冷温帯のものに比べ低下しない可能性を示すが，畑岸ら(*2*)のデータセットは 2023 年のみであるため，2024 年も継続測定し検証する必要がある。

そこで本研究では，冷温帯の水上試験地と暖温帯の藤沢試験地に植栽された単木のブナ成木のガス交換と生理的な環境応答特性を明らかにするため，畑岸ら(*2*)と同様の方法で 2024 年 8 月から 10 月において個葉の光合成速度および気孔コンダクタンスを測定し，両試験地におけるブナの水利用効率と，生理的な環境応答特性の 1 つである飽差に対する気孔コンダクタンスの感度を比較した。

II　材料と方法

1. 調査地　冷温帯の調査地は，群馬県利根郡みなかみ町に位置する水上試験地(36°47′40″N，138°59′13″E，標高 540 m)である。水上試験地から約 10 km 北東方向に位置する藤原 AMeDAS (36°51′48″N，139°03′30″E，標高 700 m)の気象データを用いて求められた 2004 年から 2023 年の年平均降水量と年平均気温は，それぞれ 1,750 mm と 9.4 ℃であった。

暖温帯の調査地は，神奈川県藤沢市に位置する藤沢試験地(35°22′42″N，139°28′08″E，標高 40 m)である。藤沢試験地から約 6.5 km 南方向に位置する辻堂 AMeDAS (35°19′12″N，139°27′00″E，標高 5 m)の気象データを用いて求められた 2004 年から 2023 年の年平均降水量と年平均気温は，それぞれ 1,558 mm と 16.5 ℃であった。

(受理日 2025 年 3 月 6 日)

2. 調査概要　水上試験地での測定対象木は，水上実習所の玄関付近に植栽された樹齢 66 年，樹高 17.7 m，胸高直径 36.0 cm の単木のブナ(産地: 水上)である。藤沢試験地での測定対象木は，森林科学研究センターの玄関付近に植栽された樹齢 46 年，樹高 9.7 m，胸高直径 27.1 cm の単木のブナ(産地: 水上)である。測定実施日は，水上試験地では 2024 年 8 月 1 日，9 月 6 日および 10 月 11 日であり，藤沢試験地では 2024 年 8 月 22 日，9 月 11 日および 10 月 14 日であり，9 時から日の入りまで 1 時間に 1 回程度の頻度で行った。

個葉の光合成および蒸散速度の測定は，携帯型光合成蒸散測定装置(LI-6400, LI-COR)を用いて，対象木に隣接する施設の屋上から行われた。水上試験地では地上から 5 m 付近の南側の樹冠部において 9 枚，藤沢試験地では地上から 6 m 付近の東側，南側および西側の樹冠部において，それぞれ 3 枚ずつ計 9 枚を対象とし，日当たりのよい枝の先端部の葉を選定した。この装置で計測される項目は，光合成有効光量子束密度(*PPFD*)，葉温に対する飽和水蒸気圧から水蒸気圧の差である葉面飽差(VPD_L)，葉温(T_{leaf})，光合成速度(*A*)，蒸散速度(*E*)および気孔コンダクタンス(g_s)である。本研究では，g_s に対する *A* の比(A/g_s)を水利用効率(iWUE; intrinsic Water Use Efficiency)とし，測定葉のクロロフィル量の指標として SPAD 値を測定した(SPAD-502, Minolta)。測定方法の詳細は，矢ヶ崎ら(*7*)にしたがった。

個葉のガス交換観測当日における林床土壌の乾燥を表す指標として，(1)式で定義される先行降雨指数(API; Antecedent Perception Index)を算出した(*1*)。

$$\mathrm{API} = \sum_{k=1}^{n} (P_k / k) \qquad (1)$$

k は個葉のガス交換観測日の k 日前，P_k はその日の日降水量(mm)を表す。本研究では福井ら(*1*)と同様に，観測日の 30 日前まで降水を対象($n = 30$)に API を算定した。

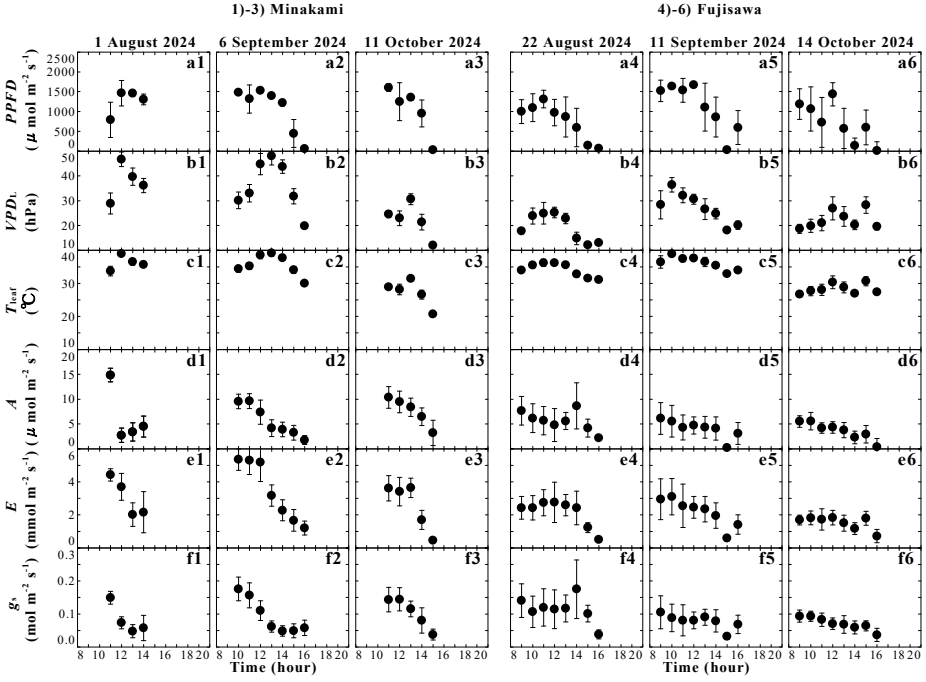
本研究では，葉の生理的な環境応答特性を示す指標の 1 つである VPD_L に対する g_s の感度を評価するため，Oren *et al*. (*6*)が提案した次式を適用した。

$$g_S = -m \cdot \ln VPD_L + b \qquad (2)$$

ここで，m と b は回帰分析から求められるパラメータであり，m は VPD_L に対する g_s の感度を表し，b は VPD_L = 1 kPa のときの g_s である。本研究における統計解析には，R コマンダーを拡張した EZR ver. 1.68 (*4*)を用いた。

III　結果と考察

1. 各測定項目の日変化　図–1 に *PPFD*，VPD_L，T_{leaf}，



図–1.　水上試験地および藤沢試験地における 2024 年 8 月から 10 月の a) 光合成有効光量子束密度(*PPFD*)，b) 葉面飽差(VPD_L)，c) 葉温(T_{leaf})，d) 光合成速度(*A*)，e) 蒸散速度(*E*) および f) 気孔コンダクタンス(g_s)の日変化

Fig. 1 Diurnal changes in (a) photosynthetic photo flux density (*PPFD*), (b) leaf-to-air water vapor deficit (VPD_L), (c) leaf temperature (T_{leaf}), (d) photosynthetic rate (*A*), (e) transpiration rate (*E*), and (f) stomatal conductance of water vapor (g_s) over August–October 2024 at the Minakami and Fujisawa experimental forests. Error bars indicate standard deviations.

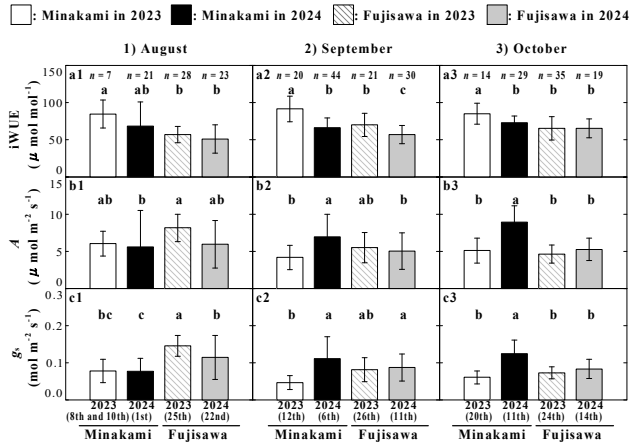
A，E および g_s の日変化を示す。図中の黒点は，9 枚の葉をチャンバーで挟んだ際に測定された各測定項目の平均値を示し，エラーバーはそれらの標準偏差を示す。日中の *PPFD* について，1,000 μmol m^{-2} s^{-1} 以上を示すデータが多くみられた(図-1 a1～a6)。日中の VPD_L について，水上試験地では 30 hPa 以上のデータが多く(図-1 b1～b6)，藤沢試験地より水上試験地で大気が乾燥していたと考えられる。日中の T_{leaf} は，各月とも両試験地で概ね同程度であった(図-1 c1～c6)。A，E および g_s は，両試験地とも測定期間を通じて午前に高く，午後に低下する傾向を示し，各月の A，E および g_s の最大値は，藤沢試験地より水上試験地でやや大きかった(図-1 d1～f6)。

2. iWUE，A および g_s の季節変化　水上試験地および藤沢試験地において，2023 年と 2024 年 8 月，9 月および 10 月で実施した個葉のガス交換観測日から 30 日前の降水を対象とした API を表–1 に示す。両試験地における各月の API は，2023 年より 2024 年で高かった。このため，両試験地における個葉のガス交換観測当日の土壌について，2023 年では乾燥の程度が高く，2024 年では比較的湿潤な状態であったと考えられる。

表–1.　水上試験地と藤沢試験地の先行降雨指数(API)

Table 1 Antecedent precipitation index over August–October 2023 and 2024 at the Minakami and Fujisawa experimental forests

Site	Antecedent precipitaion index (Observation day)					
	August		September		October	
	2023	2024	2023	2024	2023	2024
Minakami	5.3 (8th)	35.1 (1st)	7.6 (12th)	16.3 (6th)	17.1 (20th)	23.9 (11th)
Fujisawa	8.3 (25th)	22.6 (22nd)	12.1 (26th)	28.3 (11th)	9.0 (24th)	20.1 (14th)



図–2.　日中の光飽和時(*PPFD* ≥ 1,000 μmol m^{-2} s^{-1})における a) 水利用効率(iWUE)，b) 光合成速度(A)および c) 気孔コンダクタンス(g_s)の平均値

Fig. 2 Mean values of (a) intrinsic water use efficiency (iWUE), (b) photosynthetic rate (A), and stomatal conductance of water vapor (g_s) under light-saturated conditions (*PPFD* ≥ 1,000 μmol m^{-2} s^{-1}). Error bars represent standard deviations. Different letters indicate significant differences among observations within each panel (Tukey, $p < 0.05$). The data for August–October 2023 in Figures are from Hatagishi *et al*. (2024).

図–2 は，2023 年と 2024 年の 1) 8 月，2) 9 月および 3) 10 月において *PPFD* が 1,000 μmol m^{-2} s^{-1} 以上の条件で得られた日中(10 時～14 時)のデータを平均した a) iWUE，b) A および c) g_s の季節変化を示し，図中の縦棒およびエラーバーは，それらの平均値および標準偏差を示す。各図の横軸の左側および右側 2 項目は，それぞれ水上試験地および藤沢試験地の 2023 年と 2024 年のデータを示す。

図–2 a1～a3 において，両試験地における 2023 年および 2024 年の iWUE の季節変化は不明瞭であったが，水上試験地における 2023 年 8 月, 9 月および 10 月の iWUE は，藤沢試験地における 2023 年および 2024 年の同時期のものに比べ高かった。一方，水上試験地における 2024 年 8 月，9 月および 10 月の iWUE と，藤沢試験地における 2023 年および 2024 年の同時期のものに有意な差はみられない場合が多かった(2024 年 9 月 11 日以外)。

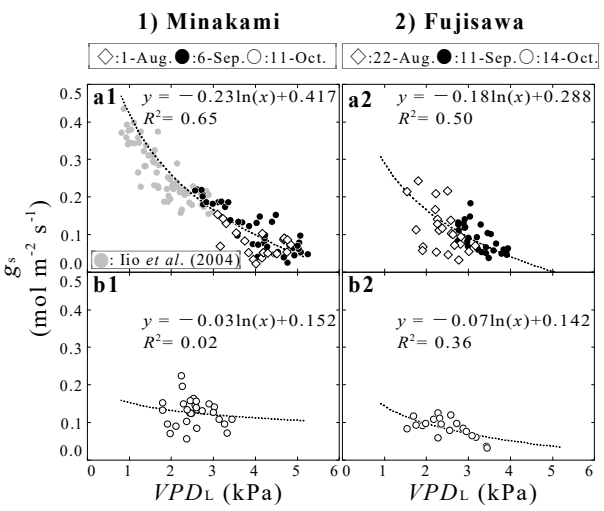
水上試験地における 2023 年と 2024 年の同時期の iWUE に着目すると，2024 年(湿潤年)より 2023 年(乾燥年)で高い値を示し，9 月および 10 月で有意差が認められた(図–2 a2 および a3)。水上試験地において，2023 年 9 月および 10 月の日中平均した A(4.17 および 5.11 μmol m^{-2} s^{-1})は，2024 年の同時期のもの(6.92 および 8.92 μmol m^{-2} s^{-1})に比べ 4 割程度低いが(図–2 b2 および b3)，2023 年 9 月および 10 月の日中平均した g_s(0.05 および 0.06 mol m^{-2} s^{-1})は，2024 年の同時期のもの(0.11 および 0.12 mol m^{-2} s^{-1})に比べ 5 割程度低く(図–2 c2 および c3)，A より g_s の低下の程度が大きかった。よって，9 月および 10 月のガス交換観測日において，水上試験地に植栽されたブナは 2024 年(湿潤年)より 2023 年(乾燥年)で気孔開度をより小さくしながらも，光合成速度をあまり低下させないようにふるまった結果，水利用効率が 2024 年より 2023 年で高くなったと考えられる。しかしながら，水上試験地における 8 月の iWUE, A および g_s について, 2023 年と 2024 年で有意な差はみられなかった(図–2 a1，b1 および c1)。この原因について，現時点では分からないが，図示されたガス交換観測日の中で 2024 年 8 月 1 日の VPD_L が最も大きく(日中平均値: 4.1 kPa)，大気側の乾燥の影響を強く受けたかもしれない。

藤沢試験地における同時期の iWUE，A および g_s について，2023 年(乾燥年)と 2024 年(湿潤年)で有意な差はみられない場合が多かった(図–2 a2 および c1 を除く)。この要因として，藤沢試験地に植栽されたブナは，水上試験地のものに比べ葉面積を半分程度小さくし, LMA(Leaf

Mass per Area)を 1.72 倍大きくすることで (*2*)，耐乾性をもつように葉の形態を適応させ，乾燥年でも湿潤年と同程度のガス交換速度を維持していた可能性があるが，土壌水分や水ポテンシャルなどの実測データに基づき，土壌乾燥に伴う水ストレスに対するブナ成木のガス交換および生理的な環境応答特性を検証する必要がある。

3. g_s と VPD_L の関係　図–3 は，1) 水上試験地と 2) 藤沢試験地における日中(10 時～14 時)のデータで *PPFD* が 1,000 μmol m^{-2} s^{-1} 以上の条件で得られた g_s と VPD_L の関係を示し，上段に 8 月および 9 月のデータを，下段に 10 月のものを示す。図–3 a1 および a2 において，g_c は VPD_L の増加に伴い低下する傾向がみられ，両者を(2)式で回帰分析した結果，図中に示された近似式を得た。VPD_L に対する g_s の感度を表す *m* および *b* の値は，藤沢試験地より水上試験地でやや大きく，*m* については水上試験地と藤沢試験地で有意な差が認められた(ANCOVA, $p < 0.01$)。このことは，藤沢試験地より水上試験地のブナが VPD_L の増加に対して敏感に応答することを示唆する。但し，図-3 a1 および a2 における VPD_L の分布範囲は，水上試験地では 3～5 kPa，藤沢試験地では 2～4 kPa であり，測定期間において藤沢試験地よりも水上試験地で大気が乾燥した条件であったことが影響しているかもしれない。

図–3 a1 に，新潟県苗場山(標高 550 m)に生育する樹齢 150 年以上，樹高 30 m のブナの樹冠において 8 月の光飽和時に得られたデータ(*3*)を灰色丸印で示す。苗場山のデータについて，g_s は 0.2～0.4 mol m^{-2} s^{-1}，VPD_L は 1～3 kPa に多く分布し，g_s と VPD_L の関係は図–3 a1 で図示された近似曲線と概ね一致している。このことは，立地環境，対象木の樹齢や樹高などが異なるものの，水上試験地と苗場山で対象としたブナの VPD_L に対する g_s の応答性は類似する可能性を示す。大気の乾燥の程度が苗場山より水上試験地で大きいことから，水上試験地のブナは過剰な蒸散を避けるために気孔開度がより低下した結果，iWUE が苗場山のもの(32.1 μmol mol^{-1})に比べ高くなったと考えられる。



図–3.　水上試験地と藤沢試験地における日中(10 時～14 時)の気孔コンダクタンス(g_s)と葉面飽差(VPD_L)の関係
Fig. 3 Midday relationship between stomatal conductance of water vapor (g_s) and leaf-to-air water vapor deficit (VPD_L) under light-saturated conditions (*PPFD* ≥ 1,000 μmol m^{-2} s^{-1}) over August–October 2024 at the (1) Minakami and (2) Fujisawa experimental forests. Data for the gray circles in Figure (a1) are from Iio *et al*. (2004).

図–3 b1 および b2 に示された 10 月の g_s と VPD_L の関係は，両試験地ともに不明瞭であった。9 月および 10 月の SPAD 値の平均値と標準偏差は，水上試験地では 45.2±1.9 および 41.8±2.5，藤沢試験地では 41.1±1.8 および 40.2±1.8 であり，SPAD 値の著しい低下はみられず，外見上で葉の形状の変化はあまりみられなかった。10 月の VPD_L に対する g_s の応答が 8 月や 9 月と異なったのは，葉の老化や低温など他の要因であると考えられる。

引用文献

(1) 福井佑介・小杉緑子・松尾奈緒子・高梨聡・谷誠 (2007) 生育地，生活形態の多様な樹種における水利用様式の比較. 水・水会誌 20(4): 265–277

(2) 畑岸萌香・小坂泉・白井琴乃・松倉君予・太田祐子・瀧澤英紀・阿部和時 (2024) 冷温帯および暖温帯に植栽されたブナのガス交換と葉の特徴. 関東森林研究 75: 69–72

(3) Iio A, Fukasawa H, Nose Y, Kakubari Y (2004) Stomatal closure induced by high vapor pressure deficit limited midday photosynthesis at the canopy top of *Fagus crenata* Blume on Naeba mountain in Japan. Trees 18: 510–517

(4) Kanda Y (2013) Investigation of the freely available easy-to-use software 'EZR' for medical statistics. Bone Marrow Transplant 48: 452–458

(5) 松井哲哉・田中信行・八木橋勉・小南裕志・津山幾太郎・高橋潔 (2009) 温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価. 地球環境 14(2): 165–174

(6) Oren R, Sperry JS, Katul GG, Pataki DE, Ewers BE, Phillips N, Schäfer KVR (1999) Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. Plant Cell Environ 22: 1515–1526

(7) 矢ヶ崎真衣・小坂泉・大庭流維・中井涼介・瀧澤英紀・阿部和時 (2022) 太平洋側の温暖な低地に生育するブナの光合成および蒸散速度の測定. 関東森林研究 73: 93–96

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

群馬県における確率年を用いた降雨評価による過去 19 年間の林道災害分析

有賀一広[1]・渡部逸晴[1]・小林諒[1]

[1]宇都宮大学農学部

要旨：本研究では群馬県庁より得ることができた 2001～2019 年度の 19 年間の林道災害における国庫補助復旧費用・件数と，林道災害時の土壌雨量指数，3 段タンクモデル貯留量の確率年に関して分析を行った。サンプル数を増やし，常用対数で回帰することにより，全体的に有意な関係が多く見られた。土壌雨量指数や 3 段ダンクモデル貯留量の確率年が増加することにより，路線延長・開設費用あたり復旧費用が増加することが確認された。復旧件数に関しては，復旧費用に比べて，全体的に有意な関係が少なかった。舗装・改良・改築費用を含めた解析に関しては，開設費用のみの場合とほぼ同様な結果であった。日雨量の確率年に関しても，1%または 5%有意となり，日雨量が増加すると，路線延長・開設費用あたり復旧費用・件数が増加する傾向が見られた。気候変動による豪雨の頻発に伴い，林道災害の増加が懸念されるため，災害に強い林道の整備が求められることが確認された。

キーワード：土壌雨量指数，3 段タンクモデル，路線延長，開設費用，復旧費用

Analyses on forest road damages over the past 19 years using rainfall evaluation with return periods in Gunma Prefecture

Kazuhiro ARUGA[1], Issei WATANABE[1], Ryo KOBAYASHI[1]

[1] School of Agriculture, Utsunomiya University

Abstract: This study analyzed the governmental subsidy recovery costs and number of forest road damages over the 19 years from 2001 to 2019, which were obtained from the Gunma Prefecture, as well as the return periods on soil water index and the three-layer tank storages. By increasing the number of samples and regressing with common logarithms, significant relationships were observed overall. It was confirmed that the recovery costs per forest road length or per construction cost increases as the return periods on soil water index and the three-layer tank storages increase. Regarding the number of recoveries, there were a fewer significant relationships overall compared to the recovery costs. Regarding the analysis including pavement, improvement, and renovation costs, the results were almost similar to that including only construction costs. The return periods on daily rainfall were also significant at 1% or 5%, and there was a tendency for the recovery cost and number per forest road length or per construction cost to increase as the daily rainfall increases. It was implied that the increase in forest road damages was a concern due to the frequent occurrence of heavy rains due to climate change, and the establishment of disaster-resistant forest roads was required.

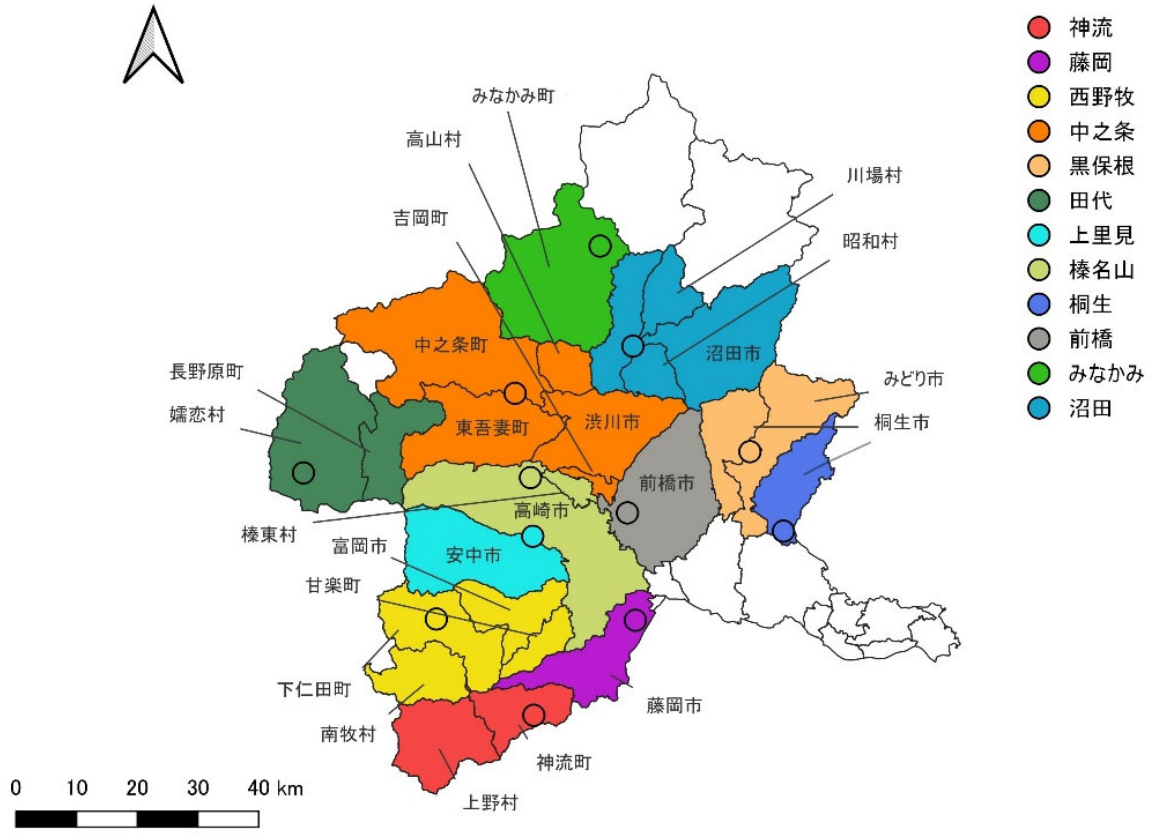
Key-word: Soil water index, three-layer tank model, forest road length, construction cost, recovery cost

Ⅰ　はじめに

近年，前線や台風等に伴う豪雨の頻発に伴い，山地災害が激甚化・多様化し，民有林林道においても被害が多発し，被災した林道の路線数，延長，金額がいずれも増加傾向で，林道の開設延長よりも被災している延長の方が多くなっている(*9*)。林道の被災状況の特徴として，河川沿い林道の路体の崩落や路面の洗堀など，既存施設の排水機能を超える降雨量に起因する被災が挙げられており，これらに対応するための排水施設等の改良による機能強化や林道技術基準の見直しが急務となっている(*9*)。

そこで，松岡ら(*6*)は林道排水施設設置基準をもとに安全率を計算し，排水施設の大きさや種類が林道被害へ与える影響を検討した。渡部ら(*11*)は群馬県庁より 2001～2019 年度の 19 年間の林道災害における国庫補助復旧費用を得，令和元(2018)年 10 月台風第 19 号により被害が大きかった群馬県西部を対象に，雨量と路線延長・開設費用あたり復旧費用に関して分析を行った。本研究では，復旧費用・件数を対象とするとともに，開設費用に加えて，林道台帳に記載のある舗装・改良・改築費用も含めた解析も行ったので報告する。

（受理日 2024 年 12 月 17 日）



図–1.　群馬県アメダス観測所対象地域

Fig. 1 AMeDAS stations in Gunma prefecture

Ⅱ　材料と方法

渡部ら(*11*)同様，群馬県の河川整備計画(*2*)によって定められている集水域を参考に，AMeDAS 観測所ごとに市町村を配分した(図–1)。渡部ら(*11*)は，群馬県西部に位置する神流，藤岡，西野牧，田代の 4 観測所を対象としたが，本研究では，2001～2019 年度の 19 年間に国庫補助復旧事業があった中之条，黒保根，上里見，榛名山，桐生，前橋，みなかみ，沼田を追加した 12 観測所を対象とした。群馬県においては 2001，2007，2019 年度に比較的大きな国庫補助復旧費用が掛かっていた一方，2004, 2008, 2012, 2014, 2018 年度は国庫補助復旧事業が無かった(*11*)。

雨量の分析は，3 段タンクモデルを使用する土壌雨量指数(*4, 10*)の確率年を用いた。路線延長が異なる対象地，開設費用が異なる路線ごとの比較を行うため，路線延長・開設費用で除した路線延長・開設費用あたり復旧費用を算出した。路線延長は，群馬県統計情報提供システムの森林林業統計書の値を使用した(*3*)。開設費用は，群馬県庁の林道台帳の値を使用し，国土交通省の建設工事費デフレーターを使用し，費用の調整を行った(*5*)。渡部ら(*11*)は確率年と路線延長・開設費用あたり復旧費用を線形回帰したが，宗岡ら(*8*)によると「データのばらつきに正規分布を仮定して線形回帰を行っているため，関係が見えにくかった可能性がある」ため，本研究では常用対数で回帰し(図－2～5)，相関係数を算出，*t* 検定を行い，算出した相関係数が有意であるかを確認した。

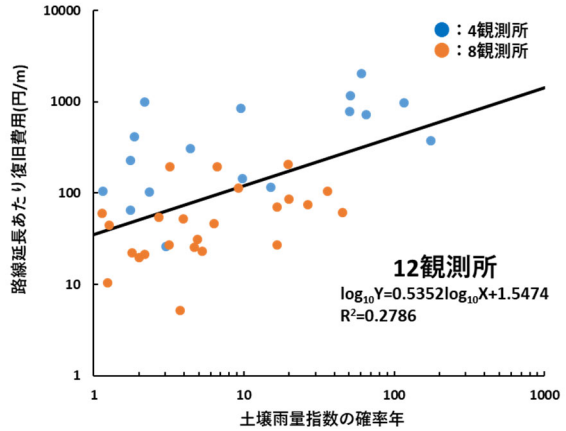
また，宗岡ら(*7，8*)は最大 24 時間雨量を用いた林道施設災害発生個所数を分析している。本研究においては，日雨量と復旧件数で代用して解析に加えるとともに，林道台帳に記載のある舗装・改良・改築費用も解析に含めた。

Ⅲ　結果と考察

線形回帰から(*11*)，常用対数で回帰することにより，全体的に有意な関係が多く見られた(表－1)。また，サンプル数を増やすことにより，5%から 1%有意の結果が増えた。したがって，土壌雨量指数や 3 段ダンクモデルの確率年が増加することにより，路線延長・開設費用あたり復旧費用が増加することが確認された。路線延長あたり

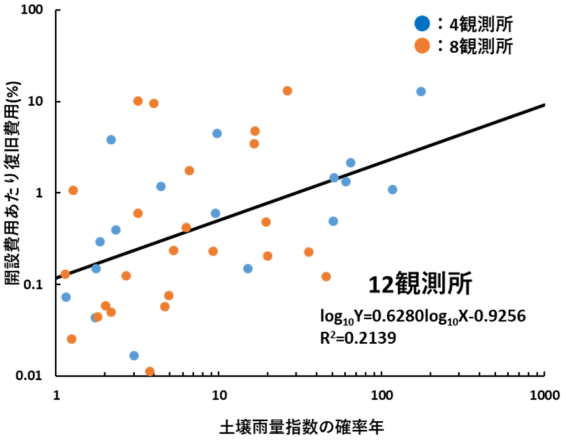
復旧費用は(図－2)，渡部ら(*11*)の 4 観測所に対して，本研究で追加した 8 観測所が低い傾向が見られたが，これは渡部ら(*11*)の 4 観測所は，比較的，復旧費用が高かった群馬県西部を対象としたためと推測される。開設費用あたり復旧費用は(図－3)，4 観測所と 8 観測所ともにばらついており，これは宗岡ら(*7*, *8*)が指摘している通り，様々な規格・構造・工法により林道が開設されるため，開設費用に応じて災害復旧時の費用が掛かっているためと推測される。今後は，林道台帳に記載がある幅員や林道建設からの経過年なども考慮して解析する必要がある。

復旧件数(表－1)に関しては，復旧費用に比べて，全体的に有意な項目が少なかった。また，舗装・改良・改築費用(表－2)を含めた解析に関しては，開設費用のみの場合とほぼ同様な結果であったが(図－3，4)，1 段目タンクのみ，開設費用のみの場合は 1%であったものが，舗装・改良・改築費用を含めた場合は 5%となった。



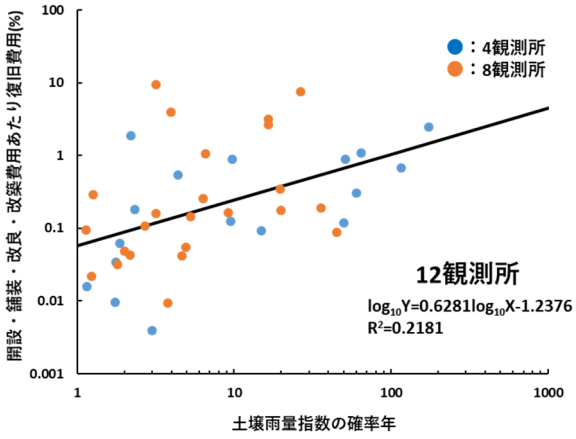
図–2. 土壌雨量指数の確率年と路線延長あたり復旧費用

Fig. 2 Return period of soil water index and recovery costs per forest road length



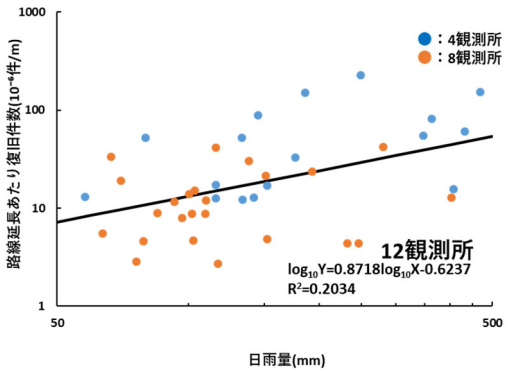
図–3. 土壌雨量指数の確率年と開設費用あたり復旧費用

Fig. 3 Return period of soil water index and recovery costs per construction cost



図–4. 土壌雨量指数の確率年と開設・舗装・改良・改築費用あたり復旧費用

Fig. 4 Return period of soil water index and recovery costs per construction/pavement/improvement/renovation cost



図–5. 日雨量と路線延長あたり復旧件数

Fig. 5 Daily rainfall and the number of recovery per forest road length

日雨量の確率年に関しては(表－1)，1%または 5%有意となり，日雨量が増加すると，路線延長・開設費用あたり復旧費用・件数が増加する傾向が見られた。宗岡ら(*7*)は富山県民有林において「最大 24 時間雨量 100mm 以上 150mm 未満の降雨イベント 1 回の発生下における 1km 林道区間被災箇所数の期待値は 10^{-3} のオーダー(1,000km に数箇所程度)であるが，300mm 以上 350mm 未満の降雨イベント発生下では 10^{-1} のオーダーまで増加する」と推定している。本研究は日雨量，復旧件数で宗岡ら(*7*)とは解析対象が異なるが(図－5)，本研究の対象地である群馬県では 100mm 以上 150mm 未満の日雨量で 1m あたり 1.0×10^{-5}(1km あたり 1.0×10^{-2})，300mm 以上 350mm 未満で

1m あたり 4.0×10^{-5}(1km あたり 4.0×10^{-2})程度であった。

表–1. 確率年と路線延長・開設費用あたり復旧費用・件数の相関係数

Table 1 Correlation coefficient between return period and recovery costs, numbers of recovery per forest road length or per construction cost

	復旧費用	復旧費用	復旧件数	復旧件数
観測所数	4	12	4	12
サンプル数	17	41	17	41
路線延長				
土壌雨量指数	0.59	0.53	0.48	0.43
1 段目タンク	0.54	0.48	0.33	0.26
2 段目タンク	0.62	0.52	0.46	0.37
3 段目タンク	0.53	0.57	0.52	0.55
日雨量	0.57	0.50	0.38	0.32
開設費用				
土壌雨量指数	0.60	0.46	0.56	0.34
1 段目タンク	0.59	0.40	0.48	0.21
2 段目タンク	0.60	0.45	0.52	0.30
3 段目タンク	0.58	0.42	0.61	0.34
日雨量	0.55	0.39	0.44	0.21

青：5%有意，赤：1%有意

表–2. 確率年と開設・舗装・改良・改築費用あたり復旧費用・件数の相関係数

Table 2 Correlation coefficient between return period and recovery costs, numbers of recovery per construction/pavement/improvement/renovation cost

	復旧費用	復旧件数
観測所数	12	12
サンプル数	41	41
土壌雨量指数	0.47	0.33
1 段目タンク	0.38	0.18
2 段目タンク	0.46	0.30
3 段目タンク	0.40	0.31

青：5%有意，赤：1%有意

Ⅳ　おわりに

本研究では土壌雨量指数の確率年や日雨量を用いて，雨量の増加による林道災害復旧費用の増加を確認した。今後は林道台帳を遡って，2001 年以前のデータも含めて分析するとともに，林道台帳に記載がある幅員や建設からの経過年などにより，路網の構造や老朽化についても分析することにより，災害に強い林道整備に資する提言をまとめる予定である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 23K21785，23K25054，24K03148 の助成を受けたものである。調査資料を提供いただいた群馬県林政課に感謝いたします。

引用文献

(1) Aruga K, Sekiguchi T, Sato T, Shuin Y (2022) Evaluation of forest road damages using return periods caused by heavy rains in Kanuma and Nikkko cities of Tochigi prefecture, Japan. Forestist 72: 29–40

(2) 群馬県 (2022) 河川整備計画(圏域毎).オンライン https://www.pref.gunma.jp/06/h4010093.html. (2022 年 2 月 14 日参照)

(3) 群馬県 (2022) 森林林業統計書.オンライン https://toukei.pref.gunma.jp/ringyo/. (2022 年 2 月 14 日参照)

(4) 気象庁 (2022) 土壌雨量指数.オンライン https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/dojoshisu.html . (2022 年 2 月 14 日参照)

(5) 国土交通省(2022)建設工事費デフレーター.オンライン https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/jouhouka/sosei_jouhouka_tk4_000112.html. (2022 年 2 月 14 日参照)

(6) 松岡佑典・林崎美穂・有賀一広 (2020) 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による栃木県の林道被害分析. 関東森林研究 71: 157–160

(7) 宗岡寛子・白澤紘明・図子光太郎・鈴木秀典 (2021) 降雨強度に応じた単位延長あたり林道施設災害発生個所数の期待値. 森林利用学会誌 36: 43–50

(8) 宗岡寛子・白澤紘明・図子光太郎・鈴木秀典 (2023) 降雨因子に応じた林道災害発生頻度モデルのベイズ推定－空間的・時間的解像度が低い林道台帳等のデータからの推定手法－. 日本森林学会誌 105: 298–305

(9) 林野庁 (2021) 今後の路網整備のあり方検討会報告書.オンライン https://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/sagyoudo/attach/pdf/kentokai-25.pdf (2024 年 8 月 8 日参照)

(10) 執印康裕・堀田紀文・鈴木雅一 (2019) 斜面崩壊発生時刻に影響を与える降雨条件の確率年を用いた評価について. 砂防学会誌 72: 3–11

(11) 渡部逸晴・小林諒・有賀一広 (2023) 群馬県西部における確率年を用いた降雨評価による過去１９年間の林道災害分析. 関東森林研究 74: 109–112

モンゴルにおける欧州型 CTL 導入による枯死木未利用材利用可能量推計

高木幹太[1]・有賀一広[1]・池田勇太[1]・石栗太[1]・白澤紘明[2]・Biligt BATTUVSHIN[3]・Ganbaatar CHULTEM[3]
[1]宇都宮大学農学部・[2]森林総合研究所林業工学研究領域・[3]モンゴル科学技術大学

要旨：本研究ではモンゴルにおける欧州型 CTL を導入した場合の枯死木未利用材利用可能量推計を行った。対象小班 96,379 のうち, 最適な集材方法が欧州型 CTL となった小班の数は 96,224 であり, 集材コストを削減可能と推察された。土場から subprovince center までの運搬速度を時速 30 km/h と，オフロード走行を想定した時速 5 km/h に変更した場合の推計を行った。時速 30 km/h の場合，従来型と欧州型 CTL を導入した場合で利用可能量の差が見られなかったが, 時速 5 km/h の場合だと従来型の枯死木利用可能量は 69,892,461 m^3 に対し，欧州型 CTL を導入した場合の枯死木利用可能量は 74,621,631 m^3 となり，欧州型 CTL を導入することで利用可能量増加の可能性が示唆された。
キーワード：モンゴル，枯死木，未利用材，ハーベスタ，フォワーダ

Estimating available unused dead wood materials in Mongolia by introduction of European-type CTLs

Kanta TAKAGI[1], Kazuhiro ARUGA[1], Yuta IKEDA[1], Futoshi ISHIGURI[1], Hiroaki SHIRASAWA[2], Biligt BATTUVSHIN[3], Ganbaatar CHULTEM[3]

[1]School of Agriculture, Utsunomiya University; [2]Forestry and Forest Products Research Institute; [3]Mongolian University of Science and Technology

Abstract：This study estimated the potential utilization of previously unused dead wood material in Mongolia when implementing European-type Cut-To-Length (CTL) logging systems. Out of the 96,379 target sub-compartments, European CTL was found to be the optimal logging method for 96,224 sub-compartments, resulting in reduced logging costs. Estimates were made by changing the speed of transportation from landings to subprovince centers with 30 km/h and 5 km/h. In the case of 30 km/h, there was no difference in the amount of dead trees available between the conventional type and the European type CTL, but in the case of 5 km/h, the amount of dead trees available with the European type CTL was 74,621,631 m^3 compared to 69,892,461 m^3 with the conventional type, suggesting that the introduction of the European type CTL may increase the amount of dead trees available.
Keyword: Mongolia, Dead wood, Unused wood, Harvester, Forwarder

I　はじめに

モンゴルの森林は全体的に高齢化しており，それによって大量の枯死木が発生，蓄積されている。ヨーロッパでは，枯死木は生物多様性のために林地に残しておくべきという見解に対して，モンゴルでは，枯死木は森林火災や虫害のリスクを高めて森林劣化を促進する原因になるため，積極的に除去するべきと考えられている(*1*)。したがって，モンゴルでは枯死木利用の促進が求められている。

そこで，Ikeda ら(*4*)では保護状態，集材方法，地形，樹種などの諸条件を考慮して，モンゴル国内に蓄積している枯死木を対象に，未利用材の利用可能量を推計することで，モンゴルにおける木質バイオマスの熱利用可能性を検証した。その結果，利用可能率は小班の数・小班面積・材積ともに 99.9%で素材生産コスト（伐採コスト・集材コスト・土場から Subprovince center までの運搬コスト・荷積み下ろしコスト・マーキングコスト・立木価格の合計）は 13.4 USD/m^3 （1 USD=2,665.5 MNT として約 33,000 MNT/m^3）であった。しかしながら Glauner ら(*3*)の研究では素材生産コストは 40 USD/m^3（約 100,000 MNT/m^3）との指摘があり, 素材生産コストを 40 USD/m^3 にした計算では利用可能率は 4%となった。

この素材生産コストの差の原因として，Ikeda ら(*4*)は運搬速度を Nakahata ら(*5*)のデータをもとに 30 km/h として計算していたことと，伐採時の造材コストの生産性がなかったために造材コストを計上せずに試算していることを挙げている。本研究では現地の状況からオフロードのトラック運搬速度を 5 km/h に変更し，運搬コストを時

（受理日 2025 年 2 月 10 日）

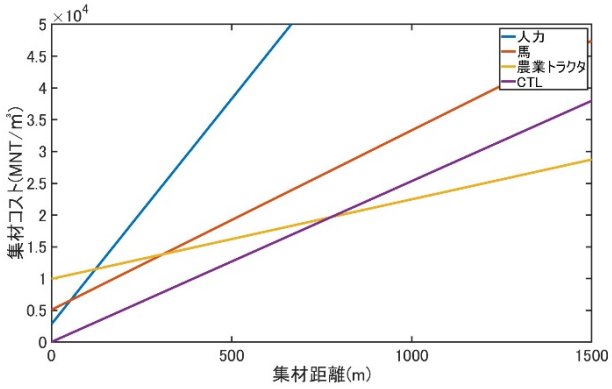
速 30 km/h の 6 倍として計算した。また，造材コストについてはチェーンソーを使用して薪として適当な長さに玉切る作業（薪材加工）の生産性(*4*)が，藤井ら(*2*)が用いているチェーンソーの造材生産性と大きく違わなかったことから，薪材加工コスト 4,172 MNT/m^3 を造材コストとして設定した。なお，トラック運搬速度や造材コスト等試算のための諸条件ついては，さらなる現地調査により，今後，モンゴル各地域に適した値を明らかにしていきたいと考えている。

さらに，ホイール式ハーベスタ・フォワーダを用いた欧州型 CTL（Cut To Length）と呼ばれる短幹状態で集材を行う作業システムは高い生産性と労働安全性から北欧やロシアで普及している。藤井ら(*2*)は，従来の 10 t トラックから 20t セミトレーラを導入した場合のコスト低減量，従来型（クローラ型）CTL から欧州型 CTL を導入した場合のコスト低減量を算出し，これらの導入によって高い効果が得られると推測される北海道を対象として，森林資源利用可能量増加の可能性を検討した。本研究ではモンゴルに近いロシアで欧州型 CTL が普及していることから，モンゴルで欧州型 CTL を導入した場合の枯死木を対象とした利用可能量の推計も加えて行った。

II　材料と方法

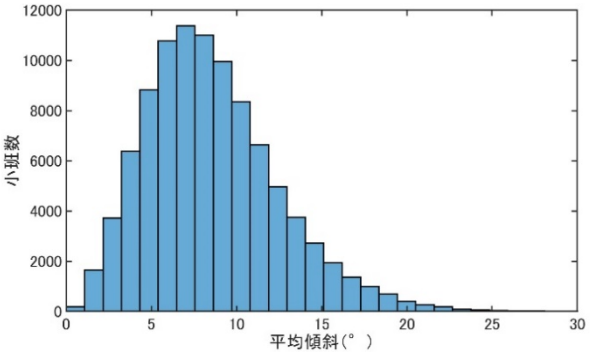
本研究では Ikeda ら(*4*)が使用したモンゴル国より，森林簿(小班面積・樹種・蓄積量)，小班 shape データ，道路データ，出荷先座標データを，米国航空宇宙局 NASA の Earthdata より，全球三次元地形データのバージョン，3（ASTER GDEM）を使用した。シベリアカラマツ（*Larix sibirica*），ヨーロッパアカマツ（*Pinus sylvestris*），シラカンバ（*Betula platyphylla*）といったモンゴルの主要 3 樹種のうち，いずれかの枯死木が存在するモンゴル国内の小班 96,379（2,979,027 ha）を対象地とした。対象小班の多くはモンゴル北部に集中しており，枯死木資源の分布に偏りがある。またモンゴルの森林はすべて国有林である。

モンゴルの森林簿上には商業枯死倒木･通常枯死倒木･枯死立木の 3 種類の枯死木が存在する。伐倒造材コストについては枯死立木と枯死倒木に分け，枯死立木がある小班には伐倒造材コスト，枯死倒木がある小班には造材コストを計上した。Ikeda ら(*4*)が設定した枯死木区分ごとに製材用材・薪材・未利用材の材積利用割合から森林簿にある小班ごとに算出した傾斜と集材距離をもとに，各集材方法（人力集材・馬集材・農業トラクタ集材・欧州型 CTL）の適用条件を満たす集材方法のなかで，最も低コストなものを，その小班の最適な集材方法として選択している（図－1）。欧州型 CTL の適応条件は農業トラクタ(*4*)と同様に平均傾斜，平均集材距離ともに条件なしとした。理由は傾斜が 7～8° の小班が最も多く平均傾斜が 8.6° と全体的に傾斜が緩く，傾斜が大きい小班でも 30° を超える小班がないためである（図－2）。また，モンゴルの森林法によって 30° を超える傾斜地での伐採は制限されている。欧州型 CTL の集材コストは藤井ら(*2*)のデータを使用している。



図－1. 集材距離と集材コスト

Fig. 1 Skidding distance and cost



図－2. 平均傾斜の分布

Fig. 2 Mean slope distribution

各小班の重心から最も近い道路を探し，迂回率を考慮して，土場から最も近い道路までの距離を搬出距離として算出した。製材用材と一部薪材の出荷先を，各小班から最も近い subprovince センターを経てそこから最も近い province センターに設定した。一方，未利用材は subprovince の地域熱供給に利用する想定で，未利用材と薪材の出荷先を，各小班から最も近い subprovince センターに設定した。なお，province センターとは日本でいう都道府県庁，subprovince センターとは日本でいう市町村の役場に相当する。道路データとダイクストラ法を使って，すべての出荷先への運搬距離を算出し，最も短い運搬距離をその小班の運搬距離とした。

製材用材・薪材・未利用材による総売り上げと，7 種類のコストからなる支出（チェーンソーによる伐倒造材コスト，集材コスト，グラップルによる荷積み下ろしコスト，小班の重心から出荷先までの運搬コスト，税金として国へ納める立木価格，製品の加工コスト，伐採前のマーキングコスト）をもとに，枯死木区分ごとに分けないで小班ごとに収支を計算した。そして収支がプラスになった小班を利用可能とし，その小班の収穫量を利用可能量とした。

Ⅲ 結果と考察

欧州型 CTL を導入した場合，対象小班 96,379 小班のうち 96,224 小班で欧州型 CTL が選択され，残りの小班が農業トラクタとなった。欧州型 CTL を導入した場合，従来の集材方法の集材コストと比べると平均集材コストが 11,926 MNT/m^3 から 6,390 MNT/m^3 に減少した（図－3，4）。対象となった小班の集材距離は 240～250 m が最も多く，全体の平均値は 251 m であった（図－5）。Glauner ら(*3*)によると，モンゴルの集材距離は一般的に 70～250 m の範囲にあるが，今回算出した集材距離が 250 m より大きい小班は 45,820（47.5%）であった。本研究では一つの小班に一つの土場で統一しているが，面積の大きい小班の場合は複数の土場があることのほうが現実的であり，それに従って集材距離は減少すると考えられる。

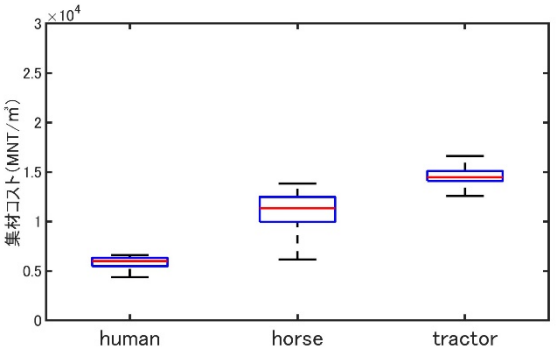
利用可能量はトラック運搬速度 30 km/h の場合は従来と欧州型 CTL を導入した場合でほとんど違いがみられなかったが，トラック運搬速度が 5 km/h の場合には従来型と欧州型 CTL を導入した場合で差がみられ，欧州型 CTL を導入した場合のほうが，利用可能量が多くなった（表－1）。このような結果となった理由はトラック運搬速度 5 km/h の場合はトラック運搬速度 30 km/h の場合と比べ収支が 0 付近の小班が多く，少しでもコストが小さくなると，利用可能量が大きく増加するためである（図－6～9）。

表－1. 条件別利用可能量

Table 1 available volume by condition

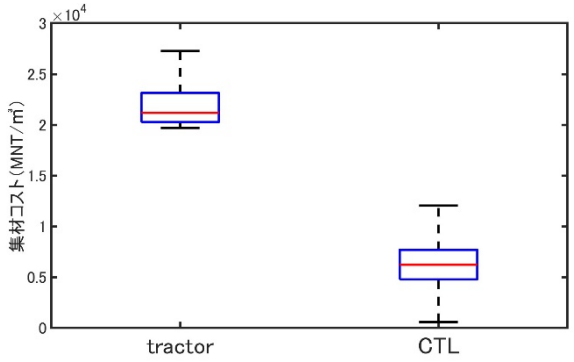
	利用可能小班	利用可能面積(ha)	利用可能材積(m^3)
1	96,212	2,972,137	93,912,408
2	96,310	2,975,336	93,973,043
3	71,130	2,164,642	69,892,461
4	76,795	2,328,832	74,621,631
5	96,379	2,979,027	94,067,412

1：従来型運搬速度 30 km/h，2：CTL 運搬速度 30 km/h
3：従来型運搬速度 5 km/h，4：CTL 運搬速度 5 km/h
5：供給ポテンシャル



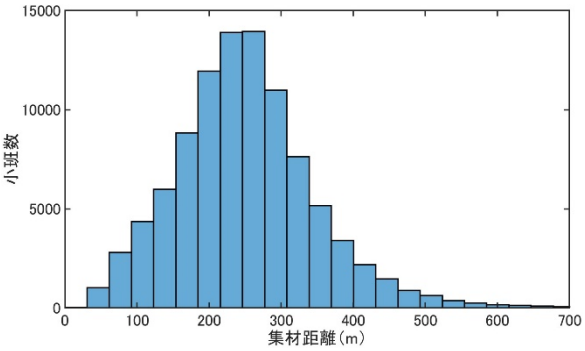
図－3. 従来型集材方法別の集材コストの分布

Fig. 3 Distribution of skidding costs by conventional skidding method



図－4. CTL を導入した場合の集材方法別の集材コストの分布

Fig. 4 Distribution of skidding costs by skidding method with CTL



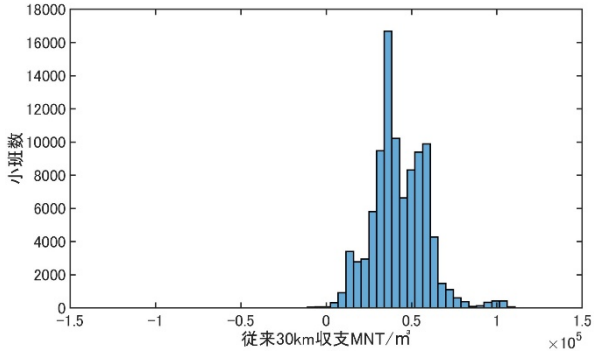
図－5. 集材距離の分布

Fig. 5 Distribution of skidding distance

Ⅳ おわりに

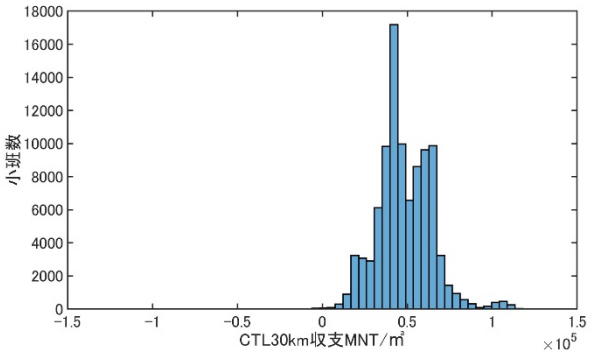
欧州型 CTL を導入した場合は，集材コストが減少し，収支が向上した。特にモンゴルのオフロードを考慮したトラック運搬速度 5 km/h に設定した場合は，欧州型 CTL を導入することにより，利用可能量が増加し，欧州型

CTL を導入する効果が大きいと考える。本研究で使用した Ikeda ら(*4*)のデータはコロナ禍のため，聞き取り調査を基にしたものである。聞き取り調査は主にモンゴルで一番森林が豊富な Khuvsgul province において，forest unit の職員，森林に関する民間企業のエンジニアを対象におこなったため，モンゴル全域の事情に合っていない可能性がある。この点については今後の現地調査を踏まえて，より正確に推計する予定である。



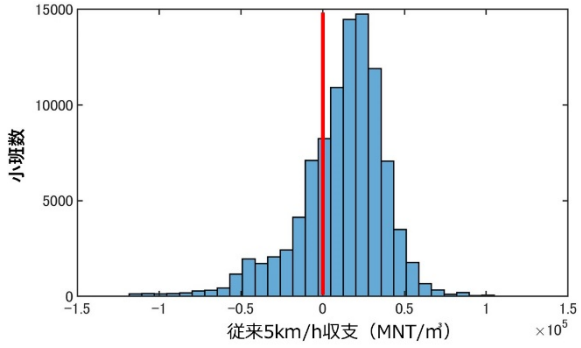
図－6. 従来型運搬速度 30 km/h の収支

Fig. 6 Balance with conventional methods and transportation speed of 30 km/h



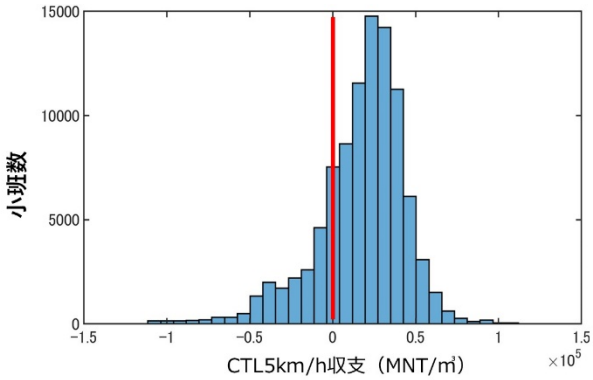
図－7. CTL 運搬速度 30 km/h の収支

Fig. 7 Balance with CTL and transportation speed of 30 km/h



図－8. 従来型運搬速度 5 km/h の収支

Fig. 8 Balance with conventional methods and transportation speed of 5 km



図－9. CTL 運搬速度 5 km/h の収支

Fig. 9 Balance with CTL and transportation speed of 5 km

謝辞：本研究は JSPS 科研費 23K21785，23K25054，24K03148，M-JEED の助成を受けたものである。

引用文献

(1) Altrell D (2019) Multipurpose National Forest Inventory in Mongolia, 2014-2017 -A tool to support sustainable forest management. Geography, Environment, Sustainability 12: 167-183

(2) 藤井絢弓・武田愛子・長沢翔太・松岡佑典・有賀一広・斎藤仁志・酒井明香・白澤紘明・鈴木保志 (2022) 北海道におけるセミトレーラと欧州型 CTL 導入を考慮した利用可能量推計. 関東森林研究 74: 52-55

(3) Glauner R, Dugarjav D (2018) Assessment of wood product value chains and recommendations for the Mongolian wood-processing industry. オンライン https://reddplus.mn/eng/wp-content/uploads/2018/09/UNDP-Wood-Product-Value-Chains.pdf (2024 年 8 月 30 日参照)

(4) Ikeda Y, Shirasawa H, Battuvshin B, Chultem G, Ishiguri F, Aruga K (2022) Effects of site conditions on costs and profitability in the extraction and use of dead trees in Mongolia. European Journal of Forest Engineering 8: 11-25

(5) Nakahata C, Aruga K, Uemura R, Saito M, Kanetsuki K (2014) Examining the optimal method to extract logging residues from small-scale forestry in the Nasunogahara Area, Tochigi Prefecture, Japan. Small-scale Forestry 13: 251-266

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

機械学習による森林バイオマス安定供給のための伐採計画手法の構築に関する検討

王煒恒[1]・金鉉倍[1]・吉岡拓如[1]

[1] 東京大学大学院農学生命科学研究科

要旨：カーボンニュートラルの目標を達成するため，バイオマスがクリーンエネルギーとして段階的に熱供給や発電に利用され始めている。しかし，樹種や伐採林齢などの要因によって，毎年のバイオマス供給量には大きな変動があり，バイオマス発電所の規模を最適化する際に困難が生じている。本研究では，静岡県富士地区を試験地とし，樹種はスギとヒノキに限定し，林種は育成単層林，森林区分は普通林，地位は中程度といった条件で選別した 74,500 個の小班を対象とした。本研究では多エージェント強化学習を用い，アクション次元を減少させるアプローチを採用し，ニューラルネットワークで最適伐採林齢層を予測し，毎年の木材およびバイオマスの生産量を最大化すると同時に，毎年のバイオマスの産出量と伐採面積のバランスを取ることを目的とした。

キーワード：カーボンニュートラル，バイオマス，シミュレーション，強化学習，MAPPO アルゴリズム

Harvesting planning method for stable biomass supply using machine learning

Weiheng WANG[1], Hyun-Bae KIM[1], Takuyuki YOSHIOKA[1]

[1] Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

Abstract: To achieve carbon neutrality goals, biomass is increasingly being utilized as a clean energy source for heat supply and power generation. However, factors such as tree species and harvesting age cause significant annual fluctuations in biomass supply, creating challenges in optimizing the scale of biomass power plants. This study targets the Fuji area in Shizuoka Prefecture, focusing on 74,500 forest compartments, selecting Sugi (Japanese cedar) and Hinoki (Japanese cypress) as species, limiting to even-aged forests with moderate productivity in general forest categories. This study adopts a multi-agent reinforcement learning approach to reduce the action dimensionality. By using neural networks to predict the optimal age class for harvesting, the method aims to maximize the annual production of timber and biomass while balancing the biomass yield and harvested area each year.

Keywords: Carbon Neutrality, Biomass, Simulation, Reinforcement Learning, MAPPO Algorithm

I　はじめに

バイオマスを発電の供給源として利用する際，年間を通じて安定した供給を確保することが必要である。しかし，黒田らをはじめとする多くの研究は，バイオマス量が毎年の実際の需要を満たすことを保証できないと指摘している(*2*)。本研究は動的な森林成長環境におけるバイオマス発生量の不均衡の問題を解決するため，強化学習を活用し，バイオマスの産出量を最大化すると同時に，毎年の発生量の均衡を図ることを目指す。

従来の強化学習手法（DDPG，SARSA，PPO など）は，状態の多次元性による「次元の呪い」という課題を抱えているが(*1*)，本研究では分散部分観測マルコフ決定過程（Dec-POMDP）として伐採問題をモデル化し，各エージェントが独自の観測に基づいて行動を最適化することでこの課題を克服する。本研究が示す MARL の適用例は，森林資源管理における新たな可能性を示唆している。

II　方法

1．森林伐採におけるマルコフ過程　本研究における森林伐採の最適化を目標とし，MARL のアルゴリズムのフローチャートを作った（図–1）(*7*)。

問題定義：本研究は面積 28,063.55 ha の森林で 60 年間の伐採を行う。最適化の目標は，累積のバイオマス収穫量を最大化及び均衡化することである。各小班は伐採後，翌年には植林をするうえで材積成長関数に従って成長する。本研究では，計算量を減らすため，間伐によって発生するバイオマスは計算しないこととした。

2．目標行動と約束　行動選択が最適であるほど，報酬（reward）が増加し，最適な行動とは，報酬を最大化する行動である（式(1)）。報酬の設置条件を式(2) (3) (4) に示す。発生量が均衡するほど，報酬が大きくなる。

$$a^* = arg\max_a Reward_a\ , \qquad a = (a_1, a_2, \dots, a_N) \quad (1)$$

（受理日 2025 年 1 月 8 日）

$$Reward_a = Reward_{weight} \cdot Reward_{balance} \quad (2)$$

$$Reward_{weight} = \varphi \cdot Biomass_t(a_n) \quad (3)$$

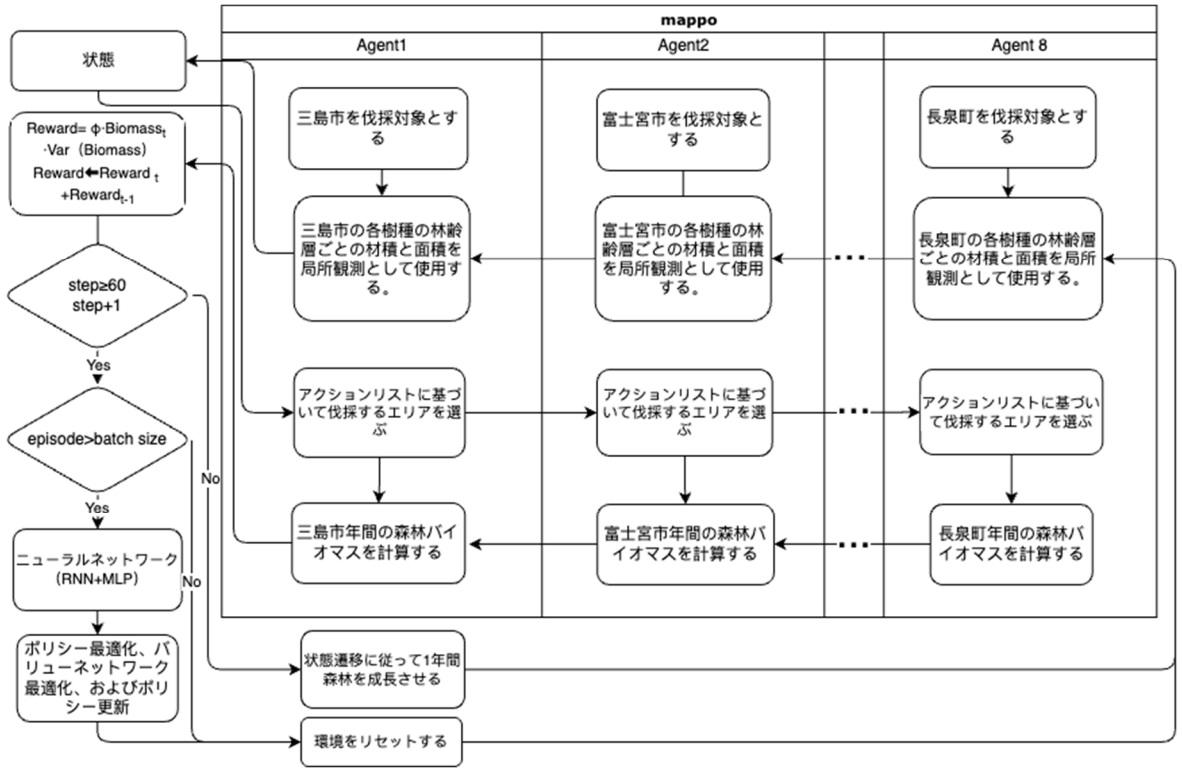
$$Reward_{balance} = min\left(\left(\frac{\sum_{n=1}^{N} Biomass_t(a_n)}{\overline{Biomass}}\right)^{\phi}, \left(\frac{\overline{Biomass}}{\sum_{n=1}^{N} Biomass_t(a_n)}\right)^{\phi}\right) \quad (4)$$

a^*を最適な行動，$Reward_a$をアクションaで得られる総報酬，$Reward_{weight}$をバイオマス総発生量の報酬，$Reward_{balance}$を毎年のバイオマス収穫の均衡度の報酬，φ，ϕを制約関数とする。

3. シミュレーション対象地処理　本研究は，静岡県富士地区の森林を対象とした。富士地域は静岡県の東部に位置し，沼津市，三島市，富士宮市，富士市，御殿場市，裾野市，清水町，長泉町，小山町の 6 市 3 町を含む区域である。森林面積は 79,124 ha で，区域面積の 57%を占めている。本実験における樹種はスギとヒノキに限定し，林種は育成単層林，制普別は普通林，地位は中であることを条件とした。該当する小班の総数は 74,500，小班の面積は 28,063.55 ha である。その内訳は，スギの面積が 8,391.09 ha, ヒノキの面積が 19,672.46 ha である。データの選別を行った結果，清水町内には選別条件に該当する森林が存在しないことが判明した。したがって，エージェントの担当区域は，沼津市，三島市，富士宮市，富士市，御殿場市，裾野市，長泉町，および小山町とする。

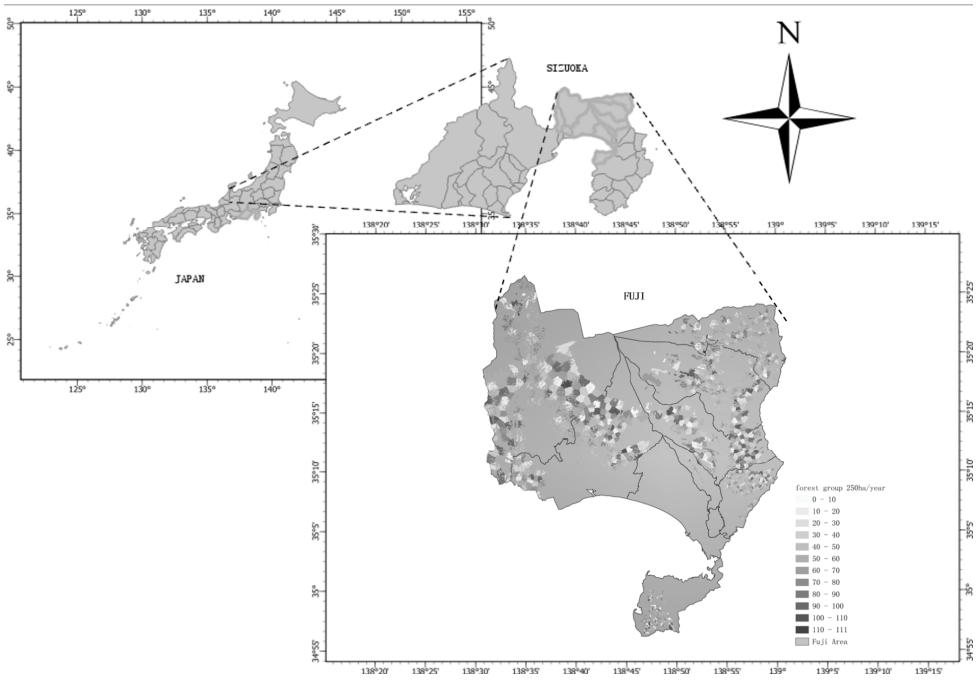
本研究では，毎年の労働力が一定であることを考慮し，60 年の伐採サイクル終了時において，林齢 60 年以内の各林齢層の林分面積が均等に保たれるよう，毎年の伐採面積を近似的に設定した。伐採後の林分は元の樹種で再植され，毎年ほぼ同じ面積が植栽されるため，計画期間終了後には林齢に応じた均等な分布が実現する。また，富士森林計画書の伐採計画に基づき，毎年の伐採面積が 236～445ha である点を踏まえ，本実験では各市合計で年間 250ha を伐採面積と設定した（図-2）(*4*)。

本研究では，地理情報の処理に QGIS Ver.3.36 を使用し，富士地域の森林情報は静岡県の公開データベース，森林計画図を使用した。行政区画情報は国土地理院から提供されたものである。バイオマスの発生量の計算方法は，森林総合研究所のバイオマス拡大係数の方法を採用し(*6*)，計算を行った。シミュレーションおよび強化学習の訓練環境は主に PyCharm を使用した。



図–1. MARL モデルのフローチャート

Fig.1 Flowchart of the MARL model



図–2. 伐採の区域分割

Fig.2 Logging area segmentation

4. 材積成長推定　伐採前の成長予測は静岡県が提供する 2020 年と 2022 年の森林簿データを使用する(*5*)。施業履歴のない地位Ⅲのデータを選別し，個別の例を除外した後，成長量を面積で割ることで，各樹種の各林齢における材積成長率を求める。伐採後の成長予測は林野庁が公表したリチャーズ式にフィットした成長データを使用した(*3*)。スギとヒノキの成長公式をそれぞれ式(5)(6)に示す。

スギ　$Vf = Vs \cdot K \cdot A = \alpha \cdot A \cdot \delta \cdot$

$$\left[\left(\frac{1}{32.81\left(1 - EXP(-0.024 \cdot t)\right)^{0.672} - 1.2} - \frac{1}{c}\right)^{\frac{-1}{b}} \cdot \left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{1}{b}}\right]^{\gamma-\beta} \quad (5)$$

ヒノキ　$Vf = Vs \cdot K \cdot A = \alpha \cdot A \cdot \delta \cdot$

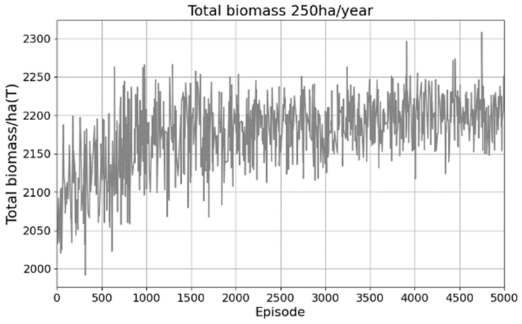
$$\left[\left(\frac{1}{32.81\left(1 - EXP(-0.024 \cdot t)\right)^{0.672} - 1.2} - \frac{1}{c}\right)^{\frac{-1}{b}} \cdot \left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{1}{b}}\right]^{\gamma-\beta} \quad (6)$$

Vfを林分材積，Kを ha あたり本数，Aを林分面積，$a, b, c, \delta, \gamma, \alpha, \beta$ を樹種係数とする。

III　結果

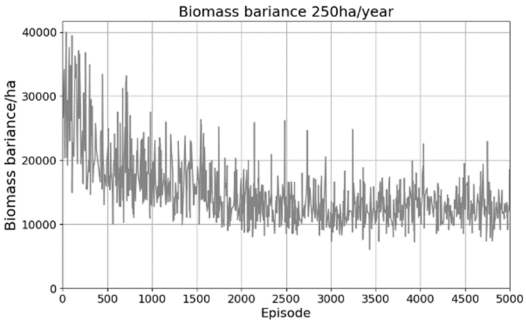
1. 各 episode のバイオマス収穫総量と毎年分散の変化

バイオマスの収穫量と分散は，報酬の別の指標である。計算リソースの制約や計算量の多さから，収束の程度を考慮し，学習は 5000 エピソードに設定された。図–3 は episode ごとのバイオマスの総収穫量を示している。episode が増えるにつれて，バイオマスの総収穫量は安定して上昇傾向を示している。5000 episode 後，バイオマス総収穫量の最大値は 2307.96 t/ha となった。



図–3. 各 episode の ha あたりバイオマス総発生量

Fig.3 Biomass generation per hectare for each episode



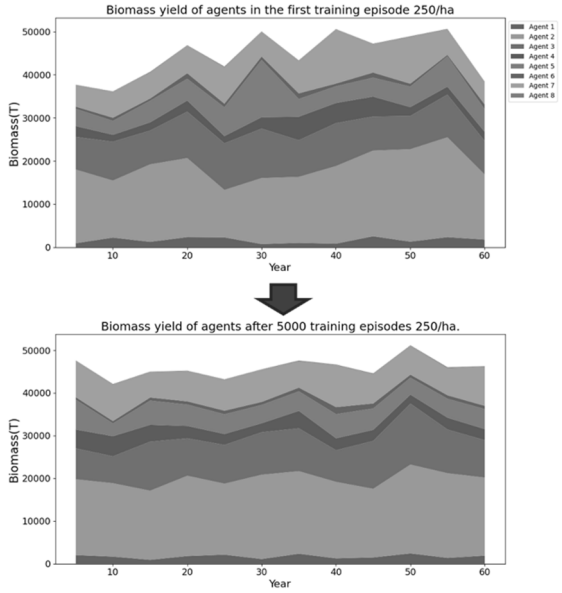
図–4. 各 episode の ha あたり発生量の分散

Fig.4 Biomass variance per hectare for each episode

図–4 は episode ごとの 60 年間バイオマスの分散を示し, episode が増えるにつれて, 分散が小さくなった。5000 episode 後, ha あたり分散の最小値は 6071.66 t となった。

2. 学習前後の 5 年ごとのバイオマス量　学習前後のバイオマス発生量の比較結果を以下に示している（図–5）。学習 1 episode における 5 年ごとのバイオマス合計値の変動を表す分散は 26,100,140.40 で, 60 年間におけるバイオマスの総発生量は 532,639.49 t であった。一方, 学習 5000 episode における 5 年ごとのバイオマス合計値の変動を表す分散は 4,937,739.25（81.08%の減少）で，60 年間におけるバイオマスの総発生量は 550,855.23 t（3.42%の増加）であった

これらの結果から，学習後においてバイオマスの発生量がより均衡し，総発生量が増加していることが確認された。



図–5. 学習前後バイオマス発生量の比較図

Fig.5 Comparison of biomass generation before and after learning

Ⅳ　おわりに

本研究は，静岡県の森林成長モデルと実際の森林簿データを用いて森林成長をシミュレーションし，多エージェント強化学習（MAPPO）アルゴリズムを適用することで，バイオマスの伐採量における不均衡問題の解決および伐採期間中のバイオマス収穫量の最大化を試みた。シミュレーションの結果，以下の結論が得られた。

- 森林伐採計画の最適化を Dec-POMDP（分散部分観測マルコフ決定過程）としてモデル化し，強化学習アルゴリズムを用いて解決した。
- 学習 5000 episode における 5 年ごとのバイオマス合計値の変動を表す分散は 4,937,739.25（81.08%の減少）で，60 年間におけるバイオマスの総発生量は 550,855.23 t（3.42%の増加）であった。
- 学習回数の増加に伴い, バイオマスの総収穫量が増加し, 年間収穫されるバイオマスの分散は減少する傾向が確認された。また，それぞれの収束値は，ha あたりの総収穫量が 2,307.96 t，分散が ha あたり 6,071.66 であった。
- 報酬，バイオマス総量，年間バイオマス発生量の分散を総合的に評価すると, 多エージェント強化学習による伐採計画の最適化が達成された。

謝辞: 本研究の一部は, JSPS 科研費（課題番号: 20K06121）の支援を受けて行われた。

引用文献

(1) Khodayar M, Liu G, Wang J, and Khodayar M E (2021) Deep learning in power systems research: A review. CSEE J. Power Energy Syst. 7(2): 209–20.

(2) Kuroda K, Kim H, and Yoshioka T (2024) Forest resource distribution and transport cost optimization-based economic evaluation of gasification and steam-turbine biomass power generation systems. Renew. Energy Focus. 50: 100595.

(3) 林野庁 (2022) 令和３年度 国有林野成長予測モデル整備事業. pp. 109‐119. https://www.rinya.maff.go.jp/j/kokuyu_rinya/attach/pdf/keikakuseido-53.pdf (2024 年 11 月 1 日参照).

(4) 静岡県経済産業部 (2021) 富士地域森林計画書（富士森林計画区編）. https://www.pref.shizuoka.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/026/799/02r2huji.pdf (2024 年 11 月 1 日参照).

(5) 静岡県森林計画課（2022）令和４年度森林簿. https://opendata.pref.shizuoka.jp/dataset/9583.html (2024 年 11 月 1 日参照).

(6) 渡辺大詞 (n.d.) 木質バイオマス利用に向けての一考察. 林野庁. https://www.rinya.maff.go.jp/j/kensyuu/pdf/watanabe.pdf (2024 年 11 月 1 日参照).

(7) Yu C, Velu A, Vinitsky E, Gao J, Wang Y, Bayen A, Wu Y, and Shanghai Qi Zhi Institute (2022) The surprising effectiveness of PPO in cooperative multi-agent games. Adv. Neural Inf. Process. Syst. 35: 24611–24.

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

グラフ畳み込みネットワークを用いた森林の空間特性解析に基づくグループ化した林分伐採手法に関する研究

尤陽宇[1]・金鉉倍[1]・吉岡拓如[1]

[1] 東京大学大学院農学生命科学研究科

要旨：本研究では，持続可能な森林経営における伐採計画の改善を目的とし，空間解析とグラフ畳み込みネットワーク（Graph Convolutional Network, GCN）を統合した新たな手法を提案した。GCN はデータの間にある関係性をグラフという形で表現し，その構造を学習するための機械学習モデルである。この手法により，従来の最適化手法では十分に考慮されていなかった林道からの距離と傾斜の地形条件や林分の空間的関係性を反映させるため，西川林業地を対象に，通路網と林分の空間的関係に基づいて単結合の林分連結モデルを構築した。分析の結果，モデルは道路との関係性を重視し，地利条件の影響を強く反映することで，林分の特徴量をより適切に表現した。これにより，グルーピングされた林分単位での伐採計画立案が可能となり，より効率的で持続可能な森林管理への道が開かれた。

キーワード：グラフ畳み込みネットワーク（GCN），空間的関係性，林分連結モデル，グループ化林分管理

Study on grouped forest stand harvesting methods based on spatial characteristic analysis of forests using graph convolutional networks

YangYu YOU[1], Hyun-Bae KIM[1], Takuyuki YOSHIOKA[1]

[1] Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

Abstract: In this study, we proposed a new method that integrates spatial analysis and graph convolutional network (GCN) to improve harvesting plans in sustainable forest management. GCN is a machine learning model that expresses the relationships between data in the form of a graph and learns its structure. Using this method, we constructed a selective stand connection model based on the spatial relationship between the road network and the stands in the Nishikawa forest area to reflect the topographical conditions of distance from forest roads and slope and the spatial relationship of stands, which were not fully considered in conventional optimization methods. As a result of the analysis, the model emphasized the relationship with the road and strongly reflected the influence of topographical conditions, thereby more appropriately expressing the features of the stands. This made it possible to formulate harvesting plans for grouped stands, opening the way to more efficient and sustainable forest management.

Keywords: Graph Convolutional Network (GCN), Spatial relationships, Stand connection model, Grouped stand management

I　はじめに

日本の人工林の林齢は老齢化が進んでおり，バランスのとれた齢級構成を実現するために不可欠な若齢級の森林は少なくなっている(*4*)。しかしながら，持続可能な森林経営を目指すためには，毎年一定量の木材を永続的に提供し続ける，いわゆる法正林の状態が必要である。

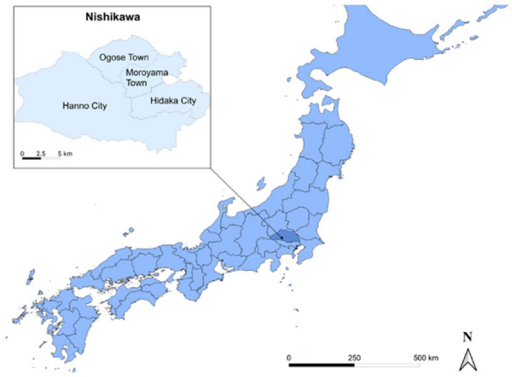
従来の研究では，持続的な木材供給のために，線形計画法(*7*)、目標計画法(*1*)、ヒューリスティックアルゴリズム(*6*)などの手法を用いて，経済的および生態学的な利益の視点から最大化するための多目的な状況下での最適解を探索することが一般的だが，傾斜や路網状況などの道路条件と林分間の関係を無視してしまっていた。これらの空間的要因を考慮せずに伐採計画を立てると，地理的条件が悪くて伐採が困難な林分の材積も過大に見積もってしまい，実行可能性や経済性の面で問題が生じる可能性が高い。

本論では，以上の問題を解決するために，空間解析とグラフ畳み込みネットワーク（Graph Convolutional Network, GCN）を統合した新たなアプローチを提案する。GCN は複雑なグラフ構造を持つデータを効率的に処理できる特徴を持ち，森林の空間的特性を考慮した分析に適している。この理論を基に，通路網と林分の空間的関係に基づき，単結合モデルを構築することで，グループ化された林分の伐採手法を提案し，持続可能な森林経営のための新たな伐採計画の基盤を築く。

（受理日 2025 年 2 月 18 日）

II　材料と方法

1. 調査地　本論のモデルは埼玉県飯能市，日高市，毛呂山町，越生町からなる西川林業地の地理情報システムと森林簿データを使用する（図–1）。

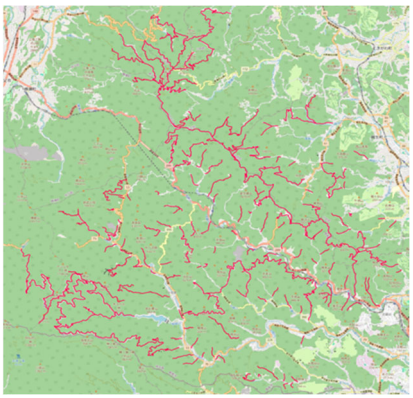


図–1.　西川林業地域

Fig.1 Nishikawa forest area

総面積は 20,147 ha，小班は 34,344 個，森林簿から取得した平均林齢は 65 年，総材積は 6,862,115 m^3 である。この中で，飯能市の森林はスギまたはヒノキを主な樹種とする 80%以上の人工林である(*5*)。

2. 通路網の構築　グラフを構築するには，連結性を考慮しなければならない。もし林分と路網が十分離散している場合，情報伝達の制限や集約情報の多様性不足といった問題が発生し，空間的な特徴を失ってしまう。この故に，GCN グラフを構築前に，離散道路がある西川林道 GIS データを処理してネットワークにする必要がある（図–2）。



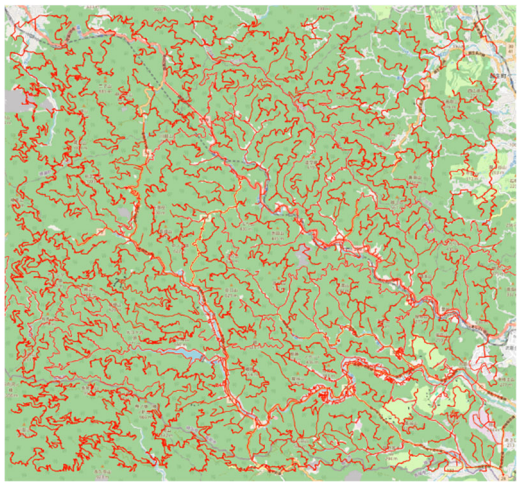
図–2.　西川林道 GIS データ

Fig.2 Nishikawa forest road GIS data

林道データの離散性は，都市道路網との非連続性に起因することが観察により明らかになった。この課題に対処するため，以下の方法論を採用した：

1. QGIS のプラグインである QuickOSM を利用し，OpenStreetMap から地理データを簡単に抽出できるこのプラグインを用いて，飯能市の道路データを取得する。
2. 研究対象外となる高密度市街地の道路を削除する。
3. 林道データと OpenStreetMap から抽出したデータ間の空間的偏差に対処するため，QGIS のバッファ機能を適用し，偏差がある林道セグメントを除去した。
4. 残存する非連続セグメントに関しては，Python を用いて道路連結グラフを構築し，最大連結成分を基準とした手動補正を実施し，通路網の完全性を確保した。

最後，Kaneko ら(*2*)の作業道路網生成モデルを使用し，連結道路の通路網上に森林施業ための作業道を生成し，最終的な通路網を完成させる（図–3）。



図–3.　連接している通路網

Fig.3 Connected road network

3. 単結合連接モデル　前節で構築された通路網はすでに密集しているが，チェーンソーで樹木を伐採して，タワーヤーダやスイングヤーダなどの架線系機械を使用して集材する作業システムが一般的である。ゆえに，林分は必ずしも道路でつながっているわけではなく，連結方法を考慮する必要がある。

ゆえに，単結合連接モデルを構築し，以下の通り定義する：

- 互いに通路を持ち隣接する林分は両者の重心と連結する。
- 道路がない林分は最も近い道路のある林分の重心と連結する。

通路を持ち隣接する林分には良好な到達性があるため，そのエッジに 1.0 の重みを付与する。一方，道路がない林分には，最も近い道路林分との傾斜および距離に基づいて対応する重みを付与する。公式は，式（1）および式（2）に示される。

$$E_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & v, \\ 0 & \neg v. \end{cases} \quad (1)$$

$$w_{(i,j)} = \begin{cases} 1.0 & p, \\ \dfrac{1}{1 + \dfrac{|e_i - e_j|}{\mathrm{d}(F_i, F_j)} + \dfrac{\mathrm{d}(F_i, F_j)}{100}} & q. \end{cases} \quad (2)$$

ここで，$E_{(i,j)}$は林分の隣接行列，$w_{(i,j)}$はエッジの重み行列，Fは林分集合である。pとqは以下のように定義される。

- pは $(F_i \cap R \neq \emptyset) \wedge (F_j \cap R \neq \emptyset) \wedge (F_j \in C_i)$の条件を表し，これは林分$F_i$と$F_j$の両方が道路$R$と交差し，かつ F_j が F_i の隣接林分の集合 C_i に属することを示す。
- qは$(F_i \cap R = \emptyset) \wedge (F_j \cap R \neq \emptyset) \wedge \min\left(\mathrm{d}(F_i, F_j)\right)$の条件を表し，これは林分 F_i が道路Rと交差せず，F_j が道路と交差し，かつ $\mathrm{d}(F_i, F_j)$ がF_iとF_jの間の最小距離であることを示す。

vはpとqの論理和，Rは道路集合，C_iはF_iの隣接する林分集合，$\mathrm{d}(F_i, F_j)$はF_i, F_j林分の間の距離である。

距離が特徴量に与える影響を調整する距離因子として，スイングヤーダの平均集材距離を 100 m と想定し，その値を採用した。距離因子により，地利の悪い林分の特徴を顕著に減少させ，その材積が過大にならないようにし，実際の採伐の範囲に含まれないようにすることができる。

4. GCN　GCN の公式により(3)，ノード全体の特徴量を入手することができる。

$$H^{(l+1)} = \sigma\left(\tilde{D}^{-\frac{1}{2}}\tilde{A}\tilde{D}^{-\frac{1}{2}}H^{(l)}W^{(l)}\right) \quad (3)$$

ここで，$H^{(l)}$ は l^{th} のレイヤの特徴行列，$W^{(l)}$ は l^{th} のレイヤの重みパラメータ，σ は活性化関数，$\tilde{A}$ は単位行列に加える隣接行列，$\tilde{D}$ は各ノードの次数を構築する行列である。

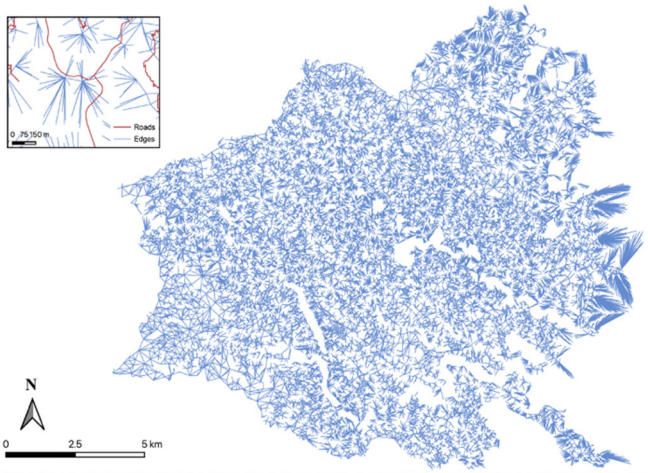
本モデルは予測や分類のなどのタスクがなくかつ各エッジに独自の重みが割り当てられているため，ニューラルネットワークの重みパラメータをエッジの重みに置き換える。修正後の公式は，式（4）に示される。

$$H^{(l+1)} = \sigma\left(\tilde{D}^{-\frac{1}{2}}(\tilde{A} \odot W)\tilde{D}^{-\frac{1}{2}}H^{(l)}\right) \quad (4)$$

ここで，⊙はアダマール積，Wはエッジの重み行列である。すなわち，レイヤごとに各林分の特徴を繋がっている林分数を行列にスーケルして重みを乗じ，活性化関数に活性化し，各林分の特徴量を全体に伝播することを実現する。

III　結果

単結合モデルで連結された林分を図 5 に示す。この図では，赤い線は道路を示し，青い線は林分同士の論理接続線を示している。道路がある林分の重心から，付近の道路がない林分の重心と接続されている放射状の形が見て取れる。



図–4.　単結合林分連結図

Fig.4 Selective connection diagram for forest stands

表–1. オリジナルな林分の特徴量

Table 1 Original forest features

	林齢（年）	材積（m³）
平均	64.07	216.58
合計	1865938	6307597
最大値	215	8377
標準偏差	17.85	327.95

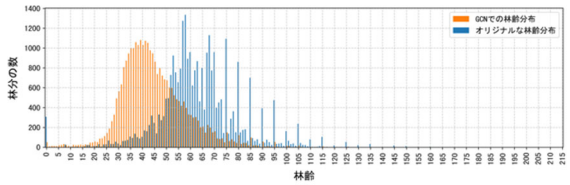
表–2. GCN で統合した特徴量

Table 2 Forest features using GCN

	林齢（年）	材積（m³）
平均	45.50	168.88
合計	1325087	4918313
最大値	117.73	3145.43
標準偏差	15.02	196.92

もともとの林分の特徴（表–1）と GCN 適用後の結果（表–2）を比較すると，GCN が林分の特徴に顕著な影響を与えたことが明らかになった。具体的には，平均林齢は29.0%減少し64.07年から45.50年に，平均材積は22.0%減少し 216.58 m^3 から 168.88 m^3 となった。林齢と材積の総和もそれぞれ 29.0%、22.0%減少した。特筆すべきは，材積の最大値が 62.4%減少し，標準偏差が 39.9%減少した一方で，林齢の最大値は 45.2%減少し，標準偏差も15.9%減少したことである。これらの変化は，GCN が空間情報を統合する際に，個々の林分特徴だけでなく周辺林分の影響も考慮し，より包括的で均衡のとれた林分特徴分布を導出したことを示唆している。

もともとの林分の不均一な林齢分布に対して，単結合モデルによる GCN の適用後，林齢構成はより規則的になり，若齢林に偏向する傾向が観察された（図–5）。この変化は，単結合モデルが道路近接性を重視し，アクセスの良い若齢林の特徴をより強く反映した結果と解釈できる。



図–5. 林齢分布の変化

Fig.5 Change in forest age distribution

IV　考察

GCN の適用により，林分特徴と周辺林分の特性を地理空間的に統合することが可能となり，これはグルーピング林分伐採の理論的基盤を提供する。

実際の森林施業において，類似の特性を持つ林分をグループ化し，一つの作業単位として管理することで，作業効率と経済性の大幅な向上が期待できる。林分間の空間的関係と全体的特徴を考慮することで，伐採戦略を最適化し，持続可能な森林経営を実現することができる。

29,123 個の林分に対して，単結合連接モデルでは 5,628 個のグループが形成され，各グループの平均林分数は 4.6 個，平均面積は 2.5 ha であった。

このグルーピング林分伐採手法は，一回の伐採効率を高めるだけでなく，長期的な視点から森林資源の利用を最適化し，長期的な森林管理戦略の策定に有力な支援を提供する。

V　結論

本論で提案した空間解析と GCN を統合したアプローチは，従来の最適化手法では十分に考慮できなかった地形条件や林分の空間的関係性を伐採計画に反映させることを可能にした。この手法の主要な成果と意義は以下のようにまとめられる。

1. 林分の空間的特徴の定量化

GCN を用いることで，林分間の特徴や道路との関係性を考慮して定量的に評価することが可能となった。これにより，従来の手法では捉えきれなかった林分間の空間的つながりを考慮した伐採計画が可能になった。

2. グルーピング林分伐採の提案

本手法を用いることで，林分を地理や路網といった条件に基づきグループ化し，効率的な伐採計画を立案するための枠組みを提供した。これにより，作業効率の向上した伐採計画の立案が可能になる。

3. 持続可能な森林管理へのアプローチ

本論は，持続可能な森林経営を目指す新たな伐採計画の基盤となりうる。地理条件に即した伐採が実現され，長期的な森林資源の管理においても経済性と効率性の両立が期待される。

引用文献

(1) Gómez T, Hernández M, León MA, Caballero R (2006) A forest planning problem solved via a linear fractional goal programming model. For Ecol Manage 227: 79–88

(2) Kaneko S, Kim HB, Yoshioka T (2024) Method of designing forest road construction scenario with GIS-based calibration using sustainable forestry model. Results in Engineering 24: 103078

(3) Kipf TN, Welling M (2016) Semi-supervised classification with graph convolutional networks. arXiv preprint arXiv: 1609.02907

(4) 林野庁 (2017) 平成 29 年 森林・林業白書. https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/29hakusyo/attach/pdf/zenbun-23.pdf (2024.7.12 参照)

(5) 茂木もも子・立花敏 (2019) 西川林業地における木材取引情報の非対称性の把握. 林業経済研究 65(3): 19–26

(6) Serrano-Ramírez E, Valdez-Lazalde JR, de los Santos-Posadas HM, Mora-Gutiérrez RA, Ángeles-Pérez G (2021) A forest management optimization model based on functional zoning: A comparative analysis of six heuristic techniques. Ecol Inform 61: 101234

(7) Zhang Y (1996) An integrated management planning system for multiple-use of forests. Journal of the Japanese Forestry Society 78: 319–326

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

伐木作業における熱中症リスクの評価手法の検討

中田知沙[1]・板谷明美[2]・野田晋一[3]・渡邉由一[3]・櫻木隆満[3]・山口浩和[1]・猪俣雄太[1]

[1]森林総合研究所・[2]三重大学・[3]森林技術総合研修所林業機械化センター

要旨：林業は足場の悪い山の中で伐採木など重量物を取り扱うため，身体的負担が大きく体温が上昇しやすい。とくに，伐木作業は長袖・長ズボン（防護衣），ヘルメット・イヤマフ，安全靴，防振手袋などを着用することから，熱ストレスを受けやすい。本研究では，伐木作業中の熱中症リスクの評価手法を検討することを目的に，3 名の被験者を対象に伐木試験を行った。被験者らの伐木時の心拍数増加率はそれぞれ最大で 32.26%～134.72%であった。また，被験者らの伐木時の最大 RMR（作業強度）は 3.34～9.26 であった。試験日の最大 WBGT（熱中症指数）は 23.8℃（7 月 17 日），24.5℃（7 月 18 日）と高くはなかったものの，衣服の組み合わせにより WBGT 値に加えるべき補正値を考慮すると，許容される WBGT を超える作業が生じていた可能性がある。

キーワード：伐木，心拍数増加率，暑さ指数，熱中症指数

Development of an evaluation method for heat stroke risk in logging operations

Chisa NAKATA[1], Akemi ITAYA[2], Shinichi NODA[3], Yoshikazu WATANABE[3], Takamitsu SAKURAGI[3], Hirokazu YAMAGUCHI[1], Yuta INOMATA[1]

[1] Forestry and Forest Products Research Institute; [2] Mie University, [3]Forestry Mechanization Center Forest Training Institute of Forestry Agency

Abstract: Forestry work involves handling heavy objects, such as felled trees, in steep, uneven terrain, which places significant physical demands on workers and can lead to elevated body temperatures. In particular, felling tasks pose a high risk of heat stress, as workers are required to wear long-sleeved protective clothing, helmets, earmuffs, safety boots, and vibration-resistant gloves. This study aimed to develop a method to evaluate the risk of heat-related illness during felling operations by conducting felling trials with three subjects. The maximum heart rate increase observed during the tree-felling ranged from 32.26% to 134.72%, while their RMR (Relative Metabolic Rate) values reached up to 3.34 to 9.26. Although the maximum WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) on the test days was not particularly high–23.8°C on July 17 and 24.5°C on July 18–considering the necessary correction factor due to clothing, it is possible that the work exceeded the acceptable WBGT limits.

Keywords: tree felling, the rate of increase in heart rate, Wet Bulb Globe Temperature

I　はじめに

気候変動により地球温暖化が進むと，熱ストレスに晒されることで労働衛生環境が悪化し，労働災害のリスクが高まる(*2*, *10*)。日本国内では，熱中症による労働災害が増加傾向にあり，2023 年の死傷者数（死亡者数）は 1,106 人（31 人）であった(*6*)。とくに，足場の悪い山の中で伐採木など重量物を取り扱う林業では，身体的負担が大きく体温が上昇しやすく(*16*)，実際に林業従事者の 3 人に 1 人が熱中症を経験している(*9*)。また，林業作業の中でも，伐木作業時は安全のため長袖・長ズボン（防護衣），ヘルメット・イヤマフ，安全靴，防振手袋などの保護具を着用することから熱ストレスを受けやすい。既往研究では，森林内は蒸発散の効果や日射の遮断により夏季の気温上昇が抑制されるといわれるが(*1*, *11*, *13*)，多様な気象条件（気温，湿度，日射量，風速等）を示す森林環境を考慮して熱中症リスクを計測した研究は少ない。一方で，心拍数はウェアラブルデバイスで簡易に計測でき，深部体温の予測に効果的であることから，熱中症リスクの計測にも活用されつつある(*7*, *8*, *15*)。

そこで，本研究では，ウェアラブルデバイスで取得した心拍数の結果から伐木作業中の熱中症リスクを計測する手法を検討することを目的とした。

II　材料と方法

1．試験概要　試験は 2024 年 7 月 17 日～18 日に，林野庁森林技術総合研修所林業機械化センター（群馬県）で実施した。当日の気象条件は，7 月 17 日は曇り～小雨（平均気温 23.1℃，最大 28.0℃），7 月 18 日は曇り（平

（受理日 2024 年 12 月 20 日）

均気温 22.1℃，最大 25.5℃）であった。作業現場は林冠の閉鎖した林内であった。作業内容は，計 6 本の立木の伐倒作業であった。解析対象としたのは，安全確認（草刈り等の準備を含む），受け口切り，追い口切り，クサビ打ち，安全確認，（次の立木への）移動の一連の伐木作業であった。被験者 1 は 6 本目，被験者 2 は 2，3 本目，被験者 3 は 4 本目にかかり木が発生した。かかり木処理の工程は解析に使用しなかった。被験者 1 はスギの定性間伐，被験者 2 および 3 はヒノキの列状間伐を行った。被服条件について，1〜3 本目は通常の伐木時の装備，4〜6 本目はファン付き作業着で実施した。

2．試験概要　本研究は，国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所倫理審査委員会の審査・承認を得て実施した。試験を始める前に，被験者に対して試験の目的や手順などに関する説明を十分に行い，試験参加に対する同意を得た。被験者は，主に教育指導目的で林業作業を行う，林野庁森林技術総合研修所林業機械化センターの機械化指導官 3 名（30〜50 代，全員男性）であった（表-1）。

表–1.　被験者の特性

Table 1 Subject characteristics

被験者	性別	年齢（歳）	身長（cm）	体重（kg）	経験年数（年）
1	男性	53	179	79	27
2	男性	37	166	68	5
3	男性	49	180	70	9

3．評価指標　Japan Society for Occupational Health(*4*)は，作業強度（RMR，後述）に応じて許容される暑熱環境の指標として熱中症指数（WBGT，後述）を示している（表-2）。これは，連続 1 時間または断続 2 時間の作業ができる許容基準である。本研究では，心拍数から RMR を推定し，許容 WBGT の基準値と比べることで熱中症リスクを計測した。

表–2.　職場における暑熱環境の許容基準

Table 2 Occupational exposure limits for heat stress

作業強度 RMR	許容温度条件 WBGT
1以下（極軽作業）	32.5℃以下
2以下（軽作業）	30.5℃以下
3以下（中等度作業）	29.0℃以下
4以下（中等度作業）	27.5℃以下
5以下（重作業）	26.5℃以下
6以上	値無し

Japan Society for Occupational Health (*4*)を改変

4．熱中症指数　計測には熱中症指数データロガー（AD-5695DL，エー・アンド・ディー社）を用い，Yaglou and Minaed(*18*)による以下の式から WBGT（℃，Wet-Bulb Globe Temperature，湿球黒球温度指数）を計測した。

$$WBGT = 0.7WB + 0.2TG + 0.1TA$$

ただし，*WB* は湿球温度(℃)，*TG* は黒球温度(℃)，*TA* は乾球温度(℃)を示す。WBGT を用いたのは，気温だけでなく湿度や風速，輻射熱も考慮した総合的な熱中症リスクの指標(*16*)とするためである。

5．作業強度　胸部装着型の心拍センサ（WHS-1，ユニオンツール社）を用いて心拍数（HR，bpm）を計測した。計測した心拍数は 10 秒間の移動平均とし，解析周期を 5 秒間隔とした。心拍数増加率（$HR_{increase}$）は，以下の式により求めた。

$$HR_{increase} = (HR_{work} - HR_{rest})/HR_{rest} \times 100$$

ただし，$HR_{increase}$ は心拍数増加率(%)，HR_{work} は作業中の心拍数(bpm)，HR_{rest} は安静時心拍数(bpm)とした。安静時心拍数は作業前に設けた安静時 5 分間の平均値とした。被験者 1 の安静時心拍数は 105 bpm, 被験者 2 は 72 bpm, 被験者 3 は 84 bpm であった。

作業強度（RMR，Relative Metabolic Rate，エネルギー代謝率）は，$HR_{increase}$ から今冨(*3*)による近似式により求めた。

$$RMR = 0.068 \times HR_{increase} + 0.1$$

RMR は，作業の身体に与える強度を示す値で，林業を含む作業の生理負担の指標として広く活用されてきた。RMR は活動時代謝量から基礎代謝量を割ったものであるが，本研究においては上記の近似式を用いることで，心拍数増加率から推定した。なお，RMR は体格，性別，年齢などが考慮された基礎代謝量にもとづくが，本試験は心拍数増加率から算出しているため，これらを考慮していない。

Ⅲ　結果と考察

被験者らの心拍数増加率の推移を図-1 に示す。被験者らの伐木時の平均心拍数増加率（± SD）は，23.64% ± 3.46%（被験者 1），91.59%± 17.77%（被験者 2），37.05% ± 12.29%（被験者 3）であった。また，伐木時の最大心拍数増加率はそれぞれ 32.26%（被験者 1），134.72%（被験者 2），66.55%（被験者 3）であった。伐木時以外も含めた被験者らの平均心拍数増加率（± SD）は，16.69% ± 9.99%（被験者 1），56.68%± 34.03%（被験者 2），25.59% ± 17.78%（被験者 3）であった。被験者 2 の心拍数増加率が高くなった要因として，年齢による影響やかかり木が発生して作業が長時間化したことが考えられた。

図-2 に RMR と許容 WBGT を示す。本研究では，箱ひげ図の実線は中央値を示し，点は外れ値を示す。ボックスの上下はデータの第 1 四分位数(Q1)と第 3 四分位数

(Q3)，つまりデータの 50%が含まれる範囲を示す。エラーバーは Q1 から 1.5×四分位範囲(IQR), および Q3 から 1.5×IQR までの範囲を示す。被験者らの伐木時の平均 RMR ± SD（最大）は 2.22 ± 0.40（3.34，被験者 1），6.33 ± 1.21（9.26，被験者 2），2.62 ± 0.84（4.63，被験者 3）であった。被験者 1 と 3 は，平均 RMR（2.22 および 2.62）に対応して許容される WBGT（表–1）が 29.0℃以下である一方で，作業現場は林冠が閉鎖しており，試験時の最大 WBGT は，7 月 17 日は 23.8℃，7 月 18 日は 24.5℃と高くはなかったことから，WBGT 許容値から判断される熱中症リスクは低かった。一方で，被験者 2 は平均 RMR が 6.33 と最も高く，許容 WBGT の基準値外の作業強度（RMR6 以上）となる場合がみられたことから熱中症リスクが懸念された。また，被験者は全員保護具を着用しており，衣服により差し引きが必要な許容 WBGT への補正値（マイナス 0〜11℃，中央労働災害防止協会(*18*)）を考慮すると，許容される WBGT は低くなり，基準値を超える状況での作業が生じていた可能性がある。伐木作業は既往研究でも高負荷（平均 RMR は間伐が 2.39〜5.74，主伐が 3.1〜11.6, (*12*, *16*)）となることが指摘されており，今後は，林業の高負荷の作業強度に応じた許容 WBGT を設けることや適切な休憩をとることで平均 RMR を低減することが必要であると考えられる。

図-3 にファン付き作業着の有無による心拍数増加率の違いを示す。いずれの被験者もファン付き作業着の有無により心拍数増加率が有意に異なり（$p<0.001$，Welch's test），被験者 2 と 3 はファン付き作業着ありで有意に心拍数増加率が高かった。ファン付き作業着は有効といわれるが(*14*, *17*)，本試験ではファン付き作業着による試験を後半に行ったことや，通常の作業着に重ねて着用したことなどから，作業負荷や熱ストレスが高まり，ファン付き作業着によって除去できる作業負荷を超えしまった可能性がある。

Ⅳ　おわりに

本研究によって，WBGT とウェアラブルデバイスで得られる心拍数が熱中症リスクの評価にある程度有用であることが示された。一方で，WBGT は風速への反応性の低さが指摘されることから(*5*)，下層木の繁茂により風が通らず，日差しがあたらなくとも高湿度になりやすいなど，林内に特有の暑熱環境を適切に計測できているか検証していく必要がある。また，本研究では防護衣を装着して試験を行ったが，林業作業時の衣内環境を計測することで許容 WBGT の適切な補整値が得られるだろう。今後は，評価手法を改良していくことで，リアルタイムで得られた生体情報をもとに熱中症リスクを共有したり警告するシステムの構築につながることが期待される。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 23K053030K の助成を受けた。

引用文献

(1) De Frenne P, Zellweger F., Rodríguez-Sánchez F., Scheffers BR, Hylander K, Luoto M, Vellend M, Verheyen K, Lenoir J (2019) Global Buffering of Temperatures Under Forest Canopies. Nature Ecology & Evolution 3(5): 744–749

(2) Gariazzo C, Taiano L, Bonafede M, Leva A, Morabito M, Donato F, Marinaccio A (2023) Association between extreme temperature exposure and occupational injuries among construction workers in Italy: An analysis of risk factors. Environment International 171 (107677) https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107677

(3) 今冨裕樹 (1997) 労働科学的視点を考慮したトラクタ集材路の幾何構造と路網密度に関する研究. 森林総研研報 373: 1–71

(4) Japan Society for Occupational Health (2021) Recommendation of Occupational Exposure Limits (2001-2022). Environ Occup Health Practice 2021 3: 1–34

(5) Kong Q, Huber M (2024) A New, Zero‐Iteration Analytic Implementation of Wet-Bulb Globe Temperature: Development, Validation, and Comparison With Other Methods. GeoHealth 8 (10): 1–17

(6) 厚生労働省: 令和５年 職場における熱中症による死傷災害の発生状況. https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_37998.html (2024.11.5 参照)

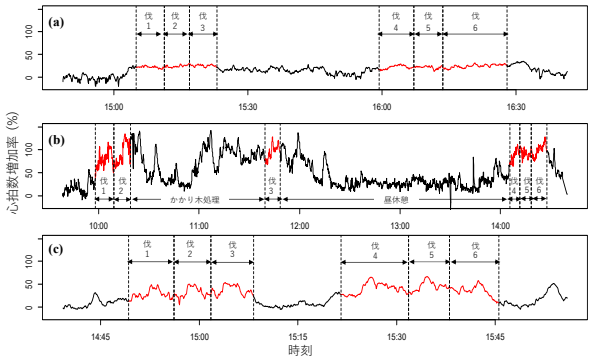
(7) Lin SS, Lan CW, Hsu HY, Chen ST (2018) Data Analytics of a Wearable Device for Heat Stroke Detection. Sensors 18 (12): 4347.

(8) 前田俊輔・伊達豊・西村貴孝・新村美帆・林政伸・青柳潔・澤田晋一・前田享史 (2018) 暑熱環境下における漸増負荷運動時の深部体温と生理情報との関連 －熱中症予防のための基礎的検討－. 日本生理人類学会誌 23 (4): 155–163

(9) Maeda T, Kaneko S, Ohta M, Tanaka K, Sasaki A, Fukushima T (2006) Risk Factors for Heatstroke among Japanese Forestry Workers. Journal of Occupational Health 48(4): 223–229

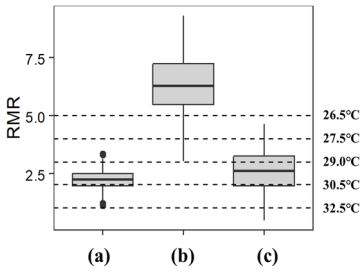
(10) Marinaccio A, Scortichini M, Gariazzo C, Leva A, Bonafede M, De'Donato FK, Francesco U. Stafoggia M, Viegi G, Michelozzi P (2019) Nationwide epidemiological study for estimating the effect of extreme outdoor temperature on

occupational injuries in Italy. Environment international 133: 105176
(11) 宮田正史・池田駿介・佐々木 哲也 (1994) 歩森林と草地の夏期の熱環境について. 水工学論文集 38: 407–412
(12) 村上文美・山口麻衣子・有賀一広・仲畑 力・伊藤 要・斎藤仁志・田坂聡明・斎藤忠信・大森伸也 (2011) 高機能繊維を使用した暑熱対策用林内作業服の衣服内気候の分析. 宇都宮大学農学部演習林報告 47: 71–76
(13) 大石康彦・田口春孝・村井宏 (1994) ヒトの活動環境としての森林環境の温熱指標による評価. 森林立地 36 (2): 1–14
(14) 榊原康生・栗原浩平・染谷俊介・山崎慶太・傳法谷郁乃 (2024) 歩行時に長袖ファン付き作業服を着用すると生理・心理負担が軽減される温熱環境. 日本建築学会環境系論文集 89 (820): 332–339
(15) 栗原浩平・濱田靖弘・窪田英樹 (2017) ウェアラブル端末を利用した熱中症リスク評価に関する研究（第 3 報）任意の体力的疲労度に達する時間の心拍数に基づく推定. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2017: 185–188
(16) 末永和・板谷明美・中田知沙 (2024) 暑熱環境の許容基準にもとづいた森林作業の分類. 中部森林研究 72: 1–4
(17) 鈴木英悟・樫村修生・高橋弘彦・南和広・中井誠一 (2012) 衣服内空気循環が夏季暑熱環境下農作業時の体温調節反応に及ぼす影響. 日生気誌 49 (2): 83–92
(18) Yaglou CP, Minaed D (1957) Control of Heat Casualties at Military Training Centers. Arch. Indust. Health 16: 302–3



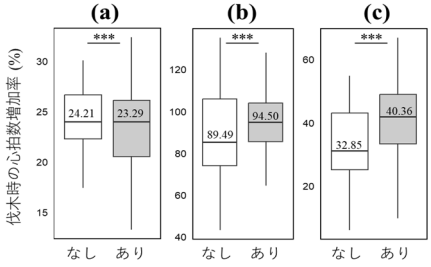
図–1. 心拍数増加率の時系列推移 (a)は被験者 1，(b)は被験者 2，(c)は被験者 3 の結果を示し，赤は伐木時，点線は伐採木ごとの区切りを示す

Fig.1 Time series trend of the rate of increase in heart rate: (a) shows the results for Subject 1, (b) for Subject 2, and (c) for Subject 3. Red indicates the tree-felling phases, and dotted lines mark the separation between each felled tree.



図–2. RMR の結果 (a)は被験者 1，(b)は被験者 2，(c)は被験者 3 の結果，点線は許容 WBGT を示す

Fig.2 The results of RMR: (a) represents the results for Subject 1, (b) for Subject 2, and (c) for Subject 3. The dotted line indicates the permissible WBGT.



図–3. ファン付き作業着の有無による心拍数増加率の違い (a)は被験者 1，(b)は被験者 2，(c)は被験者 3 の結果を示す 白はファン付き作業着なし，グレーはファン付き作業着ありの結果，数値は平均値を示す（***: $p < 0.001$）

Fig.3 Differences in heart rate increase with and without fan-equipped workwear are shown. (a) represents the results for Subject 1, (b) for Subject 2, and (c) for Subject 3. White indicates results without fan-equipped workwear, and gray indicates results with fan-equipped workwear. The values represent the mean. (***: $p < 0.001$).

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

山梨県の亜高山帯針葉樹林におけるコメツガ稚樹へのニホンジカの摂食の影響

林耕太[1]

[1]山梨県森林総合研究所

要旨：増加したニホンジカによる森林植生への影響が日本各地で生じている。その影響は高標高域においても例外ではなく，シラビソやオオシラビソといった亜高山帯針葉樹林を構成する樹木で樹幹剥皮が顕在化している。一方でコメツガはシラビソやオオシラビソと比較すると樹幹剥皮の嗜好性は高くなく，比較的軽微な影響で留まっていた。しかし，近年コメツガの稚樹に立ち枯れが多くみられるようになり，ニホンジカの影響が疑われた。そこで本研究では，山梨県南アルプス市の櫛形山において，コメツガ稚樹の立ち枯れとニホンジカによる摂食の関係を調査した。その結果，幹の剥皮率が高いほど生存率が低いことがわかり，ニホンジカによる剥皮の影響が考えられた。

キーワード：ニホンジカ，コメツガ，剥皮，亜高山帯針葉樹林

Impact of bark stripping by sika deer on *Tsuga diversifolia* saplings survivorship at a subalpine forest in Yamanashi Prefecture

Kohta Hayashi[1]

[1]Yamanashi Forest Research Institute

Abstract: The increasing population of sika deer has had a significant impact on forest vegetation in Japan. This impact is no exception in high-elevation areas, where bark stripping has become prevalent in *Abies veitchii* and *A. mariesii* in subalpine coniferous forests. On the other hand, *Tsuga diversifolia* had been less preferred for bark stripping compared to *A. veitchii* and *A. mariesii*, resulting in a relatively minor impact from deer on this species. However, increased mortality in *T. diversifolia* saplings has become evident and the involvement of sika deer was suspected. In this study, I investigated the relationship between mortality and stem bark stripping of *T. diversifolia* saplings at a subalpine forest in Mt. Kushigata in Minami-alps city, Yamanashi Prefecture. As a result, I found that the higher mortality rate was observed in saplings with higher bark stripping rate, suggesting the influence of bark stripping by sika deer.

Keywords: Sika deer, *Tsuga diversifolia*, Bark stripping, Subalpine coniferous forest

I　はじめに

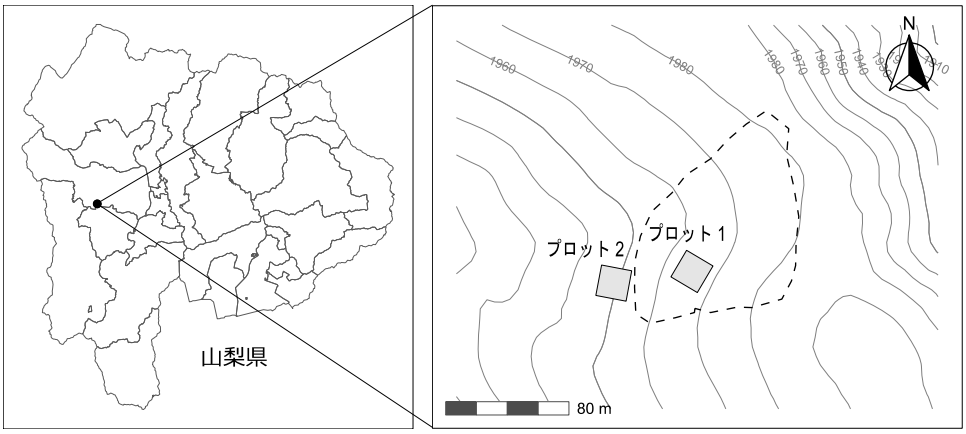
ニホンジカの生息個体数の増加や分布の拡大により，下層植生の衰退や更新阻害，立木の樹幹剥皮などの森林への影響が各地で顕在化している(*5*)。増加したニホンジカは高標高にも多く出没するようになり，亜高山帯針葉樹林においてもニホンジカによる樹幹の剥皮が顕在化している(*4*, *14*, *16*)。シラビソやオオシラビソは，比較的胸高直径の小さい個体を中心に多くの個体が剥皮されており，林分構成の変化が懸念されている(*1*, *4*, *8*, *9*)。一方で，亜高山帯針葉樹林のもう 1 つの主要な樹種であるコメツガへの樹幹剥皮の選好性は高くなく(*12*)，シラビソやオオシラビソと比べるとニホンジカの影響は限定的であった(*3*, *4*, *7*)。

しかし近年，山梨県内の南アルプスなどの亜高山帯針葉樹林において，コメツガの稚樹の立ち枯れが目立つようになった（図–1）。コメツガの稚樹には幹を剥皮された個体も認められることから，剥皮による枯死への影響が疑われるが，その関係性は明らかになっていない(*3*, *7*)。

図–1.　立ち枯れたコメツガの稚樹

Fig. 1. Died *Tsuga diversifolia* saplings

（受理日 2025 年 2 月 13 日）



図–2.　本研究で用いた 20 m × 20 m 調査区の位置。右図の点線は調査 2 ヵ月前に設置された植生保護柵の位置を示す

Fig. 2. Location of 20 m × 20 m plots. A dotted line in the right-hand figure indicates the fence installed two months prior to the investigation to protect vegetation

そこで本研究では亜高山帯針葉樹林におけるコメツガ稚樹の立ち枯れの発生状況を把握し，立ち枯れと剥皮の関係を明らかにすることを目的とした。

II　材料と方法

1．調査地　調査地は山梨県南アルプス市上市之瀬に位置する櫛形山の亜高山帯針葉樹林で，標高は 1950～1970 m である（図–2）。櫛形山では，アヤメの群生地として有名であるが，ニホンジカによってその開花が激減し(*6*)，草原植生が大きく変化するなど(*10*)，2000 年代後半からニホンジカの強い影響が報告されている。一方で，森林内のコメツガ稚樹の枯死は，筆者らの観察ではここ数年で目立つようになってきた。

2023 年 12 月，コメツガが優占する林内に 20 × 20 m の調査区を 2 つ設置した。両プロットは約 30 m 離れている。東側の調査区（プロット 1）はプロット設置の約 2 か月前に南アルプス市が設置した植生保護柵内に位置し，西側の（プロット 2）は柵外に位置する。

2．調査項目　調査区内の地際直径（D0）1 cm 以上で，樹高 1.3 m 未満，若しくは胸高直径（DBH）1 cm 未満の立木を稚樹とし，樹種，幹の生死，D0，剥皮率を記録した。D0 はノギスで 2 方向の直径を測定し（0.1 mm 単位），平均した。死亡している幹は，立ち枯れた状態で幹が根元から残っている場合には対象とした。剥皮率は幹の断面のうち剥皮された周囲の割合とし，10%単位で 0～100 %の間で記録した。

DBH 1 cm 以上の立木は成木とし，樹種，幹の生死，胸高周囲長（GBH）もしくは DBH，剥皮率を記録した。GBH はスチールメジャーで地上高 1.3 m の周囲長を測定し（0.1 cm 単位），円周率で除して DBH に変換した。GBH の測定が困難なものはノギスで DBH を 2 方向測定し（0.1 cm 単位），平均した。成木については DBH から樹種毎に胸高断面積合計を計算した。

コメツガ稚樹の幹の生死への影響要因を，一般化線形モデル（GLM）を用いて解析した。応答変数に幹の生死，説明変数にプロット，D0，剥皮率を用いた。誤差分布は二項分布，リンク関数はロジットとした。各説明変数の有意性は尤度比検定により評価した。解析には R 4.2.2 (*11*)を用いた。

III　結果と考察

調査した 2 つの試験区は，死亡幹を除く成木の胸高断面積合計の 78%と 92%をコメツガが占めており，生存する稚樹の本数も 98%と 97%がコメツガであった（表–1）。成木のコメツガは大径木から小径木まで存在し，稚樹は小さいクラスに集中していた（図-3）。ニホンジカの影響が顕著になる前の 1970 年の調査地周辺の森林は，コメツガが優占した林に，ダケカンバなどの落葉広葉樹が混じる林相だったという植生調査の記録があり(*15*)，当時から高木層の構成の大きな変化は起きていないと考えられた。

剥皮は，出現した樹種のうちダケカンバを除く他の全ての樹種で生じていた。コメツガでは，成木で剥皮された幹の割合は 14%と 16%と両プロットともそれほど高くないのに対して，稚樹では 57%と 51%であり，稚樹で剥皮が多く生じていた。コメツガ成木の剥皮された幹も 5

表–1.　調査地の出現樹種の構成と，成木と稚樹の生存率及び剥皮された幹の割合

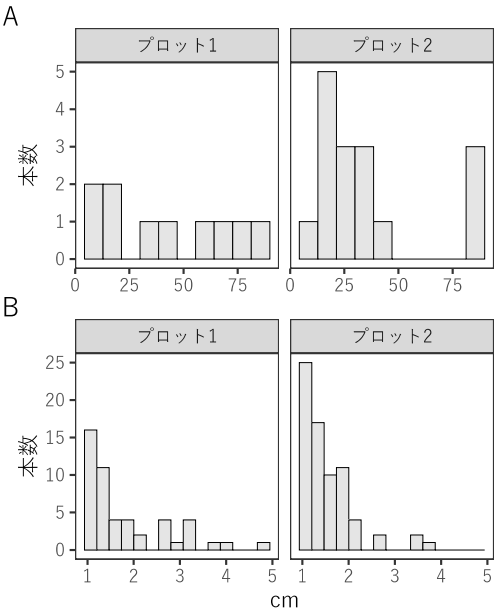
Table 1. Composition of tree species, survival rate, and debarking rate of stands in the study plots

樹木種	成木				稚樹		
	本数[a]	胸高断面積合計 (m^2/0.04ha)	生存率	剥皮幹率[b]	本数[a]	生存率	剥皮幹率[b]
プロット1							
コメツガ	14	1.96 (78%)	71%	14%	86	63%	57%
オガラバナ	9	0.18 (7%)	67%	78%	−	−	−
ダケカンバ	2	0.36 (14%)	100%	0%	−	−	−
シラビソ	1	0.01 (0%)	100%	100%	−	−	−
ウラジロモミ	−	−	−	−	1	100%	0%
広葉樹[c]	1	−	0%	不明	−	−	−
針葉樹[c]	1	−	0%	不明	−	−	−
プロット2							
コメツガ	19	2.49 (92%)	84%	16%	115	65%	51%
オガラバナ	5	0.15 (6%)	80%	20%	−	−	−
ダケカンバ	1	0.05 (2%)	100%	0%	−	−	−
シラビソ	−	−	−	−	1	0%	100%
ウラジロモミ	−	−	−	−	3	67%	33%
広葉樹[c]	2	0	0%	不明	−	−	−

a, 既に枯死しているが死亡幹が残存しているものを含む本数

b, 樹皮の剥皮が認められた幹の割合。死亡幹を含むが、腐朽等で剥皮の判別不能だった幹は除く。

c, 枯死後時間が経過しており、樹種の判別が不能だったもの。



図–3.　コメツガ成木の胸高直径 (A) と稚樹の地際直径 (B) のサイズ構成

Fig 3. Size structure of diameter at breast height of adult trees (A) and diameter at ground height of saplings (B) of *T. diversifolia*

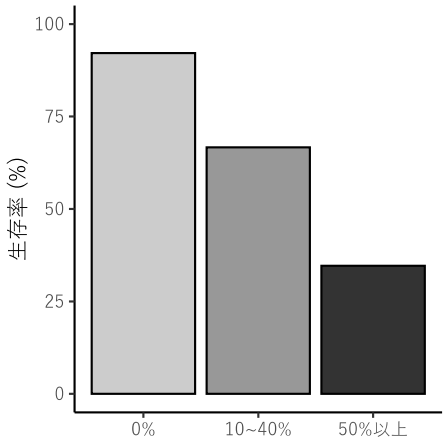
本中 3 本が DBH 6 cm 未満であり，サイズの小さい幹が剥皮の被害に遭いやすい傾向が認められた。剥皮された箇所には歯型の食痕が残っているものがあったことや，樹皮が繊維状にめくれた痕跡は認められなかったことから，オスのニホンジカによる角研ぎではなく，摂食によって生じたものと考えられた。またニホンジカは稚樹の枝葉も摂食し，大きな影響を与えることが知られているが(*13*)，調査地周辺では顕著な枝葉の摂食は見られておらず，剥皮が主な被害となっていた。

コメツガの稚樹の生存率は 63%と 65%であり，両プロットとも対象とした幹のうち 4 割弱が既に死亡していた。コメツガ稚樹の幹の生死へ影響した要因では，プロット間や地際直径には有意な違いが認められなかったのに対して，剥皮率に有意な効果が認められた（$p < 0.001$，表–2)。幹の剥皮率が高いほど生存率が低い傾向が認められ，剥皮されていない幹では 92%が生きていたのに対して，幹の周囲を 50%以上剥皮された幹のうち生きていた幹は

表–2.　一般化線形モデルにおけるコメツガ稚樹の生死に対する各説明変数の尤度比検定の結果の要約。

Table 2. Summary of the results of likelihood ratio test in GLM for the survival of *T. diversifolia* saplings

説明変数	自由度	χ^2	p
プロット	1	0.576	0.448
地際直径	1	0.384	0.535
剥皮率	1	70.966	<0.001



図–4.　コメツガ稚樹の剥皮率と生存率の関係。プロット間に有意差が認められていないことから両プロットのデータを合計して用いた

Fig 4. Relationship between bark stripping rate and survival rate of *T. diversifolia* saplings. The data from the two study plots were combined as no significant difference was found

35%のみであった（図–4）。今回の調査では既に死亡している幹の剥皮の程度を測定しているため，死亡後に剥皮が生じた可能性や，樹皮が腐朽等により剥落した可能性も否定できないものの，剥皮がコメツガ稚樹の死亡率に関係があることが示唆された。

先行研究ではニホンジカの剥皮がコメツガ稚樹の生残に及ぼす影響は認められておらず，本研究と異なっていた。長池(*7*)による富士山麓の亜高山帯針葉樹林における研究では，シラビソやオオシラビソの稚樹の剥皮率が生残に影響する主要因となっていたのに対して，コメツガ稚樹では剥皮率が生残に影響している傾向は認められなかった。また，平岡らによる北八ヶ岳での研究(*3*)では，コメツガ稚樹は，剥皮の高い累積被害割合を示す一方で，生残割合は他樹種と比較して高く，剥皮を受けても枯死率は低い可能性が示された。これらの研究ではそれぞれ樹高 2 m と 1.3 m 以上を対象としていたのに対して，本研究で扱った稚樹で樹高 1.3 m に達していたのは 1 本のみであった。そのため，剥皮の生残への影響は胸高に達する前の小さいサイズにおいて生じやすいのかもしれない。ただし，本研究では稚樹の幹の生残に対してサイズ（地際直径）の有意な効果は認められておらず，より幅広いサイズ構成を対象とした調査が必要である。

ニホンジカの嗜好性は状況によって変化し，これまであまり食べられなかった植物が，強い採食圧を受けるようになる事例が報告されている(*2*)。コメツガの稚樹もこれまで強い採食圧を受けていなかったところから，強い採食圧を受けるように変化した可能性がある。稚樹の枯死の増加は森林の将来的な種構成に影響を及ぼすことが懸念されるため，今後の変化を注視していく必要がある。本研究の調査地周辺には，調査の 2 ヵ月前に南アルプス市が植生保護柵を設置しており，プロット 1 は柵内，プロット 2 は柵外に設定されている。今後両プロットを追跡調査して比較することで，ニホンジカによる剥皮が稚樹の生残に与える影響と，その時間変化を明らかにすることが期待される。

謝辞：山梨県森林総合研究所の長池卓男氏には研究のきっかけや多くの助言をいただきました。また玉田勝也氏には厳冬期の調査にご助力いただきました。感謝申し上げます。

引用文献

(1) Akashi N, Nakashizuka T (1999) Effects of bark-stripping by sika deer (*Cervus nippon*) on population dynamics of a mixed forest in Japan. Forest Ecology and Management 113: 75-82

(2) 藤木大介 (2017) 兵庫県におけるニホンジカの嗜好性植物・不嗜好性植物リスト. 兵庫ワイルドライフモノグラフ9: 118-134

(3) 平岡裕一郎・西村尚之・小山泰弘・岡田充弘・柳澤賢・鈴木智之・新其楽図 (2023) 北八ヶ岳における亜高山帯針葉樹林に及ぼすニホンジカの影響―20年間の観測に基づく森林動態―. 日本森林学会誌105: 216-224

(4) Iijima H, Nagaike T (2015) Susceptible conditions for debarking by deer in subalpine coniferous forests in central Japan. Forest Ecosystems 2: 33

(5) 梶光一・飯島勇人 (2017) 日本のシカ―増えすぎた個体群の科学と管理. 東京大学出版会，東京, 272pp

(6) 長池卓男・大津千晶・飯島勇人 (2016) ニホンジカの影響を受けた山梨県形山の半自然草原における植生復元. 水利科学347: 109-120

(7) Nagaike T (2020) Bark Stripping by Deer Was More Intensive on New Recruits than on Advanced Regenerants in a Subalpine Forest. Forests 11: 490

(8) Nagaike T (2020) Effects of heavy, repeated bark stripping by Cervus nippon on survival of *Abies veitchii* in a subalpine coniferous forest in central Japan. Journal of Forest Research 31: 1139-1145

(9) Nagaike T (2023) Bark stripping by deer disturbs regeneration in a *Larix–Abies* subalpine forest. Forests 14: 369

(10) 大津千晶・星野義延・末崎朗 (2011) 秩父多摩甲斐地域を中心とする山地帯・亜高山帯草原に与えるニホンジカの影響. 植生学会誌28: 1-17

(11) R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria

(12) Takarabe K, Iijima H (2019) Contrasting effect of artificial grasslands on the intensity of deer browsing and debarking in forests. Mammal Study 44: 173-181

(13) Takatsuki S (2009) Effects of sika deer on vegetation in Japan: a review. Biological Conservation 142: 1922-1929

(14) Takeuchi T, Kobayashi T, Nashimoto M (2011) Altitudinal differences in bark stripping by sika deer in the subalpine coniferous forest of Mt. Fuji. Forest Ecology and Management 261: 2089-2095

(15) 山梨県立巨摩高等学校 (1976) 櫛形山の自然. 270pp.

(16) Yokoyama S, Maeji I, Ueda T, Ando M, Shibata E (2001) Impact of bark stripping by sika deer, *Cervus nippon*, on subalpine coniferous forests in central Japan. Forest Ecology and Management 140: 93-99

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

菌従属栄養植物ギンリョウソウモドキの鱗片葉に内生する菌類群集

松倉君予・深谷美羽・上村真由子・太田祐子
日本大学生物資源科学部

要旨：ギンリョウソウモドキは，根で共生する外生菌根菌に養分を依存する菌従属栄養性の植物である。一般に，陸上の緑色植物の葉には多様な菌類が病徴を示さずに内生することが知られるが，菌従属栄養植物の地上部組織における内生菌の存在や生態的機能は未解明である。本研究は，ギンリョウソウモドキの鱗片葉に内生する菌類群集の特徴を明らかにすることを目的とした。群馬県で採集したギンリョウソウモドキの鱗片葉から内生菌を分離し，rDNA ITS 領域の塩基配列情報に基づき分類群を推定した結果，8 属から成る 30 菌株が分離された。*Colletotrichum* 属菌が分離総数の 63%を占め，本植物の鱗片葉における主要な内生菌であることが示された。今後，菌従属栄養植物における内生菌の生態的機能や宿主との相互作用の解明が求められる。
キーワード：内生菌，植物病原菌，コレトトリカム属，真菌類，植物病害

Community composition of endophytic fungi isolated from the scale leaves of a mycoheterotrophic plant, *Monotropa uniflora*

Kimiyo MATSUKURA, Miu FUKAYA, Mayuko JOMURA, Yuko OTA
College of Bioresource Sciences, Nihon University

Abstract: *Monotropa uniflora* is a mycoheterotrophic plant that relies on ectomycorrhizal fungi to obtain carbon hydrates. In general, almost all terrestrial photosynthetic plants are colonized by a variety of endophytic fungi in their leaves, but little is known about the endophytic fungi associated with mycoheterotrophic plants. This study aims to elucidate the fungal community composition of endophytic fungi isolated from the scale leaves of *M. uniflora*. Fruiting plants were collected in Gunma Prefecture, and pure cultures were isolated from the scale leaves and assigned to the taxon based on the nucleic acid sequence of the rDNA ITS region. As a result, 30 isolates of fungal endophytes were obtained and assigned to eight genera. *Colletotrichum* spp. was the most dominant comprising 63 % of the total isolates, suggesting that it is an important taxon of endophytic fungi of *M. unitropa*. In further studies, we hope to clarify the ecological functions of these fungal genera isolated from *M. uniflora* and their associations with host plants.
Keywords: endophytic fungi, phytopathogenic fungi, *Colletotrichum*, fungi, plant disease

I　はじめに

陸上植物の多くは緑色の葉を有し光合成によって養分を生産するが，一部には共生する菌類に栄養の調達を依存する菌従属栄養性の種が知られる(*19*)。菌従属栄養植物は光合成能力を失っており，緑色ではない体色と，地上部組織が退化した特異な形態を示す種が多い。菌従属栄養植物と菌類の共生関係に関する研究はこれまで根などの地下部組織を対象として進められており(*18*)，地上部組織における菌類との関わりは未解明である。

陸上に生育するあらゆる植物の葉には，内生菌（本研究では「生活環のある時期において，明らかな病徴を表すことなく，生きた植物の組織内に生息する生物(*9*)」のうち真菌類と定義する）が生息することが知られる(*1*)。内生菌は分類群や感染経路、定着する植物器官などに基づきグループに分けられ，特に植物の芽や葉に定着する群集は非常に多様な分類群で構成される(*12*)。

葉に生息する内生菌の生態的機能や宿主植物に及ぼす影響については, 未解明の点が多い。一部の内生菌では，宿主植物に対して病害への抵抗性などの利益をもたらすことが知られている(*2*)。一方で内生菌として健全な葉から分離された菌株であっても，接種試験により病原性が確認される例(*10*)が報告されている。多様な内生菌類の大部分は，植物病原菌や腐生菌が一時的に潜伏している状態であると考えられている。

ギンリョウソウモドキ（*Monotropa uniflora*）は菌従属栄養植物の一種で，ツツジ科シャクジョウソウ亜科シャクジョウソウ属に属する草本類である（図–1）。本種は広葉樹林のやや暗い林床などに生育し，8～10 月頃に地上部に茎を伸ばして開花する。本種の植物体は全体が白色で光合成を行わず，外生菌根性のベニタケ科菌類に養分

（受理日 2024 年 12 月 10 日）

を依存している(*18*)。光合成を行わないため葉は退化し，長さ 1 cm 前後の鱗片葉をまばらにつける（図–1）。

本研究はギンリョウソウモドキを対象として，菌従属栄養性植物の鱗片葉に内生する菌類群集の特徴を明らかにすることを目的とした。内生菌の分類群は分離菌株の塩基配列情報に基づいて属レベルで推定した。

図–1. 林床に生育するギンリョウソウモドキ
Fig.1 Flowering plant body of *Monotropa uniflora* growing on the forest floor. Sl: scale leaf.

II 材料と方法

1. 調査地および試料採集 試料の採集は群馬県利根郡みなかみ町に位置する日本大学生物資源科学部付属水上演習林で行った。同演習林はブナやミズナラが優占する落葉広葉樹林であり，気候区分は冷温帯に位置づけられる。2021 年 9 月 24 日、林床に発生したギンリョウソウモドキの植物体の地上部を 5 本採集した。採集した植物体は 20 cm 程度であり，蒴果を形成していた。採集後は茎の切断面を水に浸した状態で実験室に持ち帰った。

2. 菌株の分離培養 植物体 1 本につき健全な鱗片葉を 4 枚選別し，葉の中心を滅菌したコルクボーラー（直径 7 mm）でくり抜き葉片を作成した。葉の表面に付着した菌類を除去するため，葉片を 70%エタノールに 1 分，15%過酸化水素水に 30 秒，70%エタノールに 1 分ずつ浸漬して表面殺菌処理を行い(*6* の改変法)，滅菌水で洗浄した後に滅菌ろ紙上で約 1 時間乾燥させてから 1/2 ポテトデキストロース寒天（以下，PDA）平板培地上に静置した。室温で 7 日間培養し，葉片から伸長した菌糸を順次 PDA 平板培地上に移植して菌株を単離した。

3. 菌株の同定 分離菌株の菌糸を滅菌した柄付針で切り取り、DNeasy Plant Mini Kit（Qiagen）を用いて菌体から DNA を抽出した。抽出した DNA を鋳型としてプライマーITS5 および ITS4 (*17*)を用いた PCR 反応を行い，5.8S を含む rDNA ITS1 および ITS2 領域（以下，ITS 領域）を増幅し，サンガーシーケンスによって塩基配列を決定した。塩基配列は NCBI ホームページの GenBank データベースを対象とした BLAST（Basic Local Alignment Search Tool）検索を行い(*8*)，分類群を推定した。一致率が高い種が複数示された場合には属までの同定に留めた。

10 菌株以上が分離された *Colletotrichum* 属菌には，分類学的な種の境界が不明確な種複合体が多数含まれることが知られる(*4, 7*). 本研究では，同属の 19 分離菌株の塩基配列と Liu et al. (*7*) で示された 16 種複合体の代表種の登録配列, BLAST 検索において上位に示された 5 種の登録配列を MAFFT(*5*)でアライメントした後に， MEGA ver. 11(*15*)で曖昧な配列やギャップを削除して最尤法で系統樹を作成し，菌株に近縁な種複合体を推定した。

III 結果と考察

ギンリョウソウモドキの鱗片葉 20 片から合計 30 菌株が分離された（表–1）。葉片数に対する分離率は 80%を示し，すべての植物体上において内生菌の定着が確認された。このことから，菌従属栄養植物の鱗片葉においても内生菌が高頻度に定着していることが明らかとなった。

表–1. 植物体ごとの分離状況
Table 1 Summary of isolates for each plant body.

宿主植物個体番号	供試鱗片葉数	菌が分離された鱗片葉数	分離菌株数	菌類の属数
No. 1	4	4	7	4
No. 2	4	2	3	1
No. 3	4	3	5	3
No. 4	4	4	9	3
No. 5	4	3	6	4
合計	20	16	30	8

各菌株の ITS 領域を対象とした BLAST 検索の結果に基づき，30 菌株は 8 属（*Annulohypoxylon*，*Aspergillus*，*Calonectria*, *Colletotrichum*, *Daldinia*, *Diaporthe*, *Penicillium*, *Umbelopsis*）に分類された（表–2）。このうち *Umbelopsis* を除く 7 属はいずれも緑色植物の葉においても内生菌として生息することが報告されており(*11*)，菌従属栄養植物と緑色植物の葉に定着する内生菌の分類群の多くは共通すると推定された。*Umbelopsis* sp. は通常森林土壌や植物の根の内生菌として検出されることが多い属であり(*11*)，植物の地上部組織から分離された例は稀である。

一般に樹木の葉に生息する内生菌では，飛散した胞子が気孔や宿主表皮から宿主体内に侵入し，細胞間隙などで休眠する例が数多く知られている(*13, 14*)。ギンリョウソウモドキでは鱗片葉の下面に気孔が観察されているが(*3*)，内生菌の感染との関係は明らかではない。今後，本研究で分離された菌類の感染経路や宿主体内での挙動を

表–2.　分離菌株の同定結果

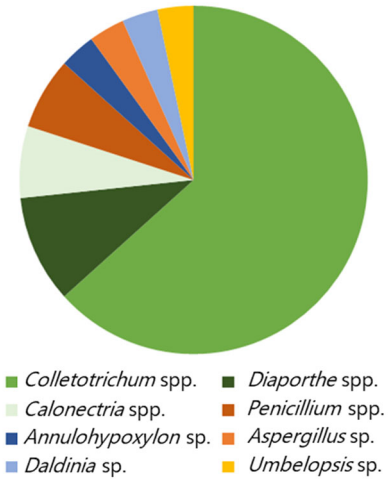
Table 2 Results of taxon assignment based on BLAST search for each fungal isolate.

菌株番号	本研究で推定した分類群	Accession	BLAST検索で最も上位に示された登録配列情報		
			登録配列の分類群	一致率(%)	Accession
FM002	*Aspergillus* sp.	LC851066	*Aspergillus restrictus*	99.8	OW982848
FM003	*Colletotrichum* sp. 1（*C. acutatum* 種複合体）	LC851067	*Colletotrichum lupini*	100.0	LC206489
FM004	*Diaporthe* sp.	LC851068	*Diaporthe* sp.	99.8	LC719212
FM005	*Colletotrichum* sp. 1（*C. acutatum* 種複合体）	LC851069	*Colletotrichum godetiae*	100.0	OK336107
FM006	*Daldinia* sp.	LC851070	*Daldinia eschscholtzii*	99.8	MK334010
FM007	*Colletotrichum* sp. 4（*C. gloeosporioides* 種複合体）	LC851071	*Colletotrichum siamense*	99.8	JQ894661
FM008	*Colletotrichum* sp. 1（*C. acutatum* 種複合体）	LC851072	*Colletotrichum nymphaeae*	100.0	OK036664
FM009	*Colletotrichum* sp. 1（*C. acutatum* 種複合体）	LC851073	*Colletotrichum nymphaeae*	100.0	OK036664
FM010	*Colletotrichum* sp. 4（*C. gloeosporioides* 種複合体）	LC851074	*Colletotrichum jiangxiense*	100.0	MW217262
FM012	*Colletotrichum* sp. 1（*C. acutatum* 種複合体）	LC851075	*Colletotrichum* sp.	99.7	LC435462
FM013	*Diaporthe* sp.	LC851076	*Diaporthe eres*	99.8	MZ078590
FM014	*Colletotrichum* sp. 2（*C. dematium* 種複合体）	LC851077	*Colletotrichum* sp.	100.0	MZ078540
FM015	*Colletotrichum* sp. 1（*C. acutatum* 種複合体）	LC851078	*Colletotrichum lupini*	100.0	LC206489
FM017	*Annulohypoxylon* sp.	LC851079	*Annulohypoxylon truncatum*	96.6	JQ303335
FM018	*Colletotrichum* sp. 2（*C. dematium* 種複合体）	LC851080	*Colletotrichum jinshuiense*	99.8	CP150811
FM019	*Colletotrichum* sp. 2（*C. dematium* 種複合体）	LC851081	*Colletotrichum* sp.	99.8	MZ078540
FM020	*Diaporthe* sp.	LC851082	*Diaporthe cotoneastri*	99.7	KJ609008
FM021	*Colletotrichum* sp. 3（*C. gigasporum* 種複合体）	LC851083	*Colletotrichum taiwanense*	99.8	MK311287
FM023	*Colletotrichum* sp. 2（*C. dematium* 種複合体）	LC851084	*Colletotrichum* sp.	99.8	MZ078540
FM024	*Penicillium* sp.	LC851085	*Penicillium echinulatum*	99.8	LT558919
FM025	*Colletotrichum* sp. 2（*C. dematium* 種複合体）	LC851086	*Colletotrichum* sp.	100.0	MW774960
FM027	*Colletotrichum* sp. 1（*C. acutatum* 種複合体）	LC851087	*Colletotrichum nymphaeae*	99.6	PP809335
FM028	*Colletotrichum* sp. 3（*C. gigasporum* 種複合体）	LC851088	*Colletotrichum taiwanense*	99.6	MK311287
FM029	*Colletotrichum* sp. 3（*C. gigasporum* 種複合体）	LC851089	*Colletotrichum gloeosporioide*	99.8	MK311219
FM030	*Colletotrichum* sp. 1（*C. acutatum* 種複合体）	LC851090	*Colletotrichum nymphaeae*	99.4	PP809335
FM031	*Calonectria* sp.	LC851091	*Calonectria* sp.	100.0	KP972551
FM032	*Calonectria* sp.	LC851092	*Calonectria colhounii*	98.3	JF742647
FM034	*Umbelopsis* sp.	LC851093	*Umbelopsis ramanniana*	99.2	MN218796
FM035	*Colletotrichum* sp. 1（*C. acutatum* 種複合体）	LC851094	*Colletotrichum nymphaeae*	99.7	OK036664
FM036	*Penicillium* sp.	LC851095	*Penicillium lenticrescens*	100.0	MZ687466

調べることで，内生菌と菌従属栄養植物の間の相互作用の仕組みや光合成を行う緑色植物との相違点を明らかにすることができると考えられる。

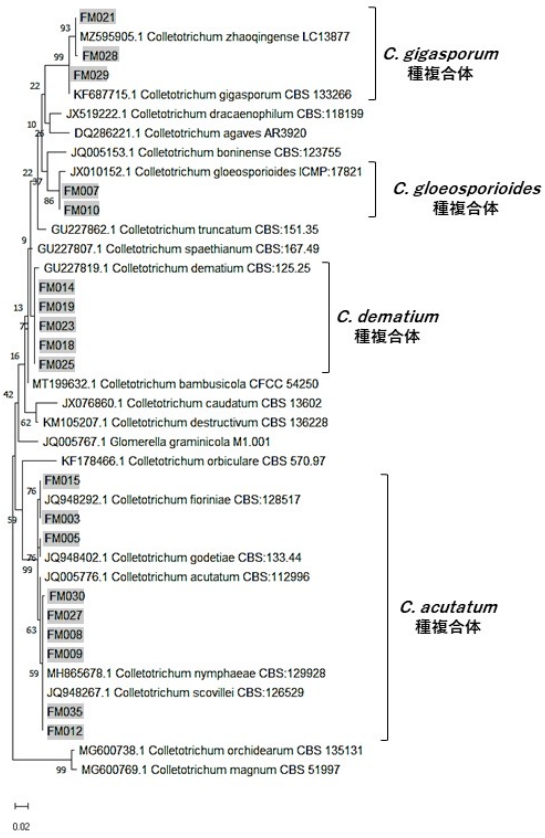
本研究における各属の相対的割合を示すと，*Colletotrichum* spp.（19 株）が分離菌株の総数の 63%を占め，ギンリョウソウモドキの鱗片葉において主要な分類群であることが示された（図–2）。続いて *Diaporthe* spp. が 10%（3 菌株），*Calonectria* spp. および *Penicillium* spp. が 7%（各 2 菌株）であった。その他の 4 属は 1 菌株のみが分離された。*Calonectria* spp.，*Colletotrichum* spp.，*Diaporthe* spp. は森林に生育する多様な植物の内生菌(*11*)や病原菌（*4, 16*）として知られるが，これら 3 属で分離株総数の 80%（24 菌株）を占めた。今回採集した植物体には目立った病徴は確認されなかったことから，ギンリョウソウモドキの葉には周辺に生育する植物種の病原菌が潜在感染している状態であると推測された。

Colletotrichum spp. 19 菌株について同属内における種複合体を推定したところ，*C. acutatum* 種複合体に近縁な菌株が 9 株，*C. dematium* 種複合体に近縁な菌株が 5 株，*C. gigasporum* 種複合体に近縁な菌株が 3 株，*C. gloeosporioides* 種複合体に近縁な菌株が 2 株であり，4 つの種複合体で構成されることが示された（図–3）。これらの種複合体には内生菌，病原菌，腐生菌として宿主植物と密接に関わる種が多いため，本研究で内生的に分離された菌株の種レベルでの同定を進め，生態的機能や宿主



図–2.　ギンリョウソウモドキの鱗片葉から分離された内生菌群集の組成

Fig.2 Community composition of endophytic fungi isolated from the scale leaves of *Monotropa uniflora*.



図–3. rDNA ITS 領域の最尤法系統樹に基づく *Colletotrichum* 属菌株の種複合体の推定

Fig.3 Assignment of species complexes for isolates belonging to *Colletotrichum* by phylogenetic tree (rDNA ITS sequences, maximum likelihood tree). Grey meshes represent fungal isolates obtained in this study.

植物との相互作用関係を解明する必要がある。

引用文献

(1) Arnold AE, Lutzoni F (2007) Diversity and host range of foliar fungal endophytes: Are tropical leaves biodiversity hotspots? Ecology 88: 541-549

(2) Arnold AE, Mejía LC, Kyllo D, Rojas EI, Maynard Z, Robbins N, Herre EA (2003) Fungal endophytes limit pathogen damage in a tropical tree. Proceedings of the National Academy of Sciences (USA) 100:15649-15654

(3) Bergman HF (1920) Internal stomata in ericaceous and other unrelated fruits. Bull Torrey Bot Club 47: 213-221

(4) Cannon PF, Johnston PR, Weir BS (2012) *Colletotrichum*–current status and future directions. Studies in Mycology 73: 181-213

(5) Katoh K, Rozewicki J, Yamada KD (2019) MAFFT online service: multiple sequence alignment, interactive sequence choice and visualization. Brief Bioinform 20: 1160-1166

(6) Kinkel LL, Andrews HJ (1988) Disinfestation of living leaves by hydrogen peroxide. Notes and brief articles 91: 523-528

(7) Liu F, Hou LW, Diao YZ, Wu WP, Damm U, Song S, Cai L (2022) Updating species diversity of *Colletotrichum*, with a phylogenomic overview. Studies in Mycology 101: 1-56

(8) National Center for Biotechnology Information: Basic Local Alignment Search Tool (Nucleotide BLAST). https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi?PAGE_TYPE=BlastSearch (2024.10.28 参照)

(9) Petrini O (1991) Fungal endophytes of tree leaves. In: Andrews JH, Hirano SS (eds), Microbial ecology of leaves. Springer-Verlag, New York, 179-197

(10) Photita W, Lumyong S, Lumyong P, McKenzie EHC, Hyde KD (2004) Are some endophytes of *Musa acuminata* latent pathogens? Fungal Diversity 16: 131-140

(11) Rashmi M, Kushveer JS, Sarma VV (2019) A worldwide list of endophytic fungi with notes on ecology and diversity. Mycosphere 10: 798-1079

(12) Rodriguez RJ, White Jr JF, Arnold AE, Redman RS (2009) Fungal endophytes: diversity and functional roles. New Phytol 182: 314-330

(13) Schulz B, Boyle C (2005) The endophytic continuum. Mycol Res 109: 661-686

(14) Stone JK, Bacon CW, White Jr JF (2000) An overview of endophytic microbes; endophytism defined. In: Bacon CW, White Jr JF (eds), Microbial endophytes. Marcel Dekker, New York, 3-29

(15) Tamura K, Strecher G, Kumar S (2021) MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11. Mol Biol Evol 38: 3022-3027

(16) Udayanga D, Castlebury LA, Rossman AY, Chukeatirote E, Hyde KD (2014) Insights into the genus *Diaporthe*: phylogenetic species delimitation in the *D. eres* species complex. Fungal Diversity 67: 203-229

(17) White TJ, Bruns TD, Lee SB, Taylor JW (1990) Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ (eds), PCR protocols: A guide to methods and applications. Academic Press, 315-322

(18) Yang S, Pfister DH (2006) *Monotropa uniflora* plants of eastern Massachusetts form mycorrhizae with a diversity of russulacean fungi. Mycologia 98: 535-540

(19) 遊川知久 (2014) 菌従属栄養植物の系統と進化. 植物科学の最前線 5: 85-92

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

異なる菌根タイプの根圏および周辺土壌における放線菌の出現傾向

田中恵・小山純平
東京農業大学地域環境科学部

要旨：菌根は外生菌根，アーバスキュラー菌根などのタイプがあり，その根圏には周辺土壌とは異なる微生物相が形成されている。また，菌根タイプの違いも根圏微生物相に影響を及ぼす可能性が示唆されている。根圏微生物の中でも放線菌の出現は菌根タイプの違いに影響を受けるのかを明らかにするために，外生菌根性のアカマツ，アーバスキュラー菌根性のヒノキを用い，成木の根圏と周辺土壌を採取し，分離株の種レベルの推定と抗菌活性の有無を調べた。その結果，菌根タイプの違いは培養可能なバクテリアの密度には大きく影響しないが，*Streptomyces* 属の種組成に影響を及ぼす可能性が示唆された。また，希少放線菌の出現や抗菌活性効果が根圏の一部株にみられたことから，根圏は放線菌の生息環境としても特殊な環境である可能性が考えられた。
キーワード：*Streptomyces*，外生菌根，アーバスキュラー菌根，アカマツ，ヒノキ

Trends of actinobacterial occurrence in rhizosphere and bulk soil with different mycorrhizal types

Megumi TANAKA, Junpei OYAMA
Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

Abstract: Mycorrhizal types include ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal, and their rhizospheres have a microbiota that differs from that of the surrounding bulk soil. It has been suggested that differences in mycorrhizal types may also affect the rhizosphere microbiota. To clarify whether the occurrence of actinomycetes among rhizosphere microbiota is affected by differences in mycorrhizal types, we collected rhizosphere and surrounding bulk soil samples from mature trees of ectomycorrhizal Japanese red pine and arbuscular mycorrhizal Japanese cypress to estimate the species level of isolates and to determine whether they have antibacterial activity. Results suggest that differences in mycorrhizal type do not significantly affect the density of culturable bacteria but may influence the species composition of genus *Streptomyces*. The occurrence of rare actinomycetes and the antibacterial activity effect of some strains isolated from the rhizosphere suggested that the rhizosphere may also be a habitat for actinomycetes.
Keywords: *Streptomyces*, ectomycorrhiza, arbuscular mycorrhiza, *Pinus densiflora*, *Chamaecyparis obtusa*

I　はじめに

根圏とは植物細根の周辺を含む空間のことを指す。根圏には根から放出される糖やアミノ酸，有機酸などを養分とするバクテリアや糸状菌などの微生物が集まってくる(*9*)。根圏に存在する微生物の中でもバクテリアは特定の分類群が優占する傾向があり，門レベルにおいてはProteobacteria，Firmicutes，Actinobacteria などの培養可能なバクテリアがよく出現し，これらが優占しやすいとされている(*3*)。また，根圏の中でも特に菌根の周辺，すなわち菌根圏は樹木や菌根菌の滲出物による影響を受けた周辺の空間のことを指し，そこでは局所的に特異な微生物群集が創出されることがわかってきている(*10*)。

菌根共生には様々なタイプがあり，外生菌根とアーバスキュラー菌根はいずれも森林樹木において最も普遍的にみられる共生タイプである(*12*)が，その感染様式は大きく異なっている。外生菌根は根端表面に厚く菌鞘を形成するため，根圏バクテリアの生息幅が比較的大きい。これに対してアーバスキュラー菌根は菌糸が細胞内に入り込むタイプで，菌鞘のような物理的表面構造を持たないため，根圏バクテリアの生息範囲も狭い(*5*)。

これまでの研究で菌根圏，なかでも外生菌根圏では *Rhizobium* や *Burkholderia*，*Paraburkholderia* に属するProteobacteria，*Bacillus* に代表される Firmicutes がよく検出され，樹種や共生する菌根菌種による群集構造の違い，あるいは周辺土壌の物理化学性との関連が研究されている(*11*，*13*)。一方，広い宿主範囲を持つアーバスキュラー菌根圏では *Burkholderia* や *Bacillus* など，外生菌根性樹種と類似したバクテリア群集が構成されるが，その種数は少なく，比較的単純なバクテリア群集を持つ可能性が示唆されている(*2*)。

根圏に存在する門のひとつとして Actinobacteria がある。Actinobacteria は放線菌ともよばれ，グラム陽性で GC

（受理日 2025 年 2 月 19 日）

含量が高く，基底菌糸や気菌糸を伸長し増殖すること，糸状菌に類似した形態分化をし，胞子を形成するなど他のバクテリアとは異なる特徴を有している(*4*)。また，多様な生理活性物質を生産し，ストレプトマイシン，カナマイシン，イベルメクチンなど多くの抗生物質を生み出すことから産業面においても非常に重要な分類群であり，根圏から有用な放線菌を探る研究も進められている(*8*)。

しかしながら，菌根圏における Actinobacteria については出現頻度が Proteobacteria や Firmicutes と比較すると相対的に低く(*2*，*11*)，詳細な種組成はあまりわかっていない。このため，放線菌のみを選択的に検出する手法を用いることで根圏の微生物群集，特に菌根タイプの違いが放線菌の出現傾向にも影響を及ぼすのかを明らかにするために，異なる菌根タイプの樹種の根圏，並びに根圏の影響が及ばない周辺土壌から希釈平板法を用いて放線菌を分離し，種組成および放線菌の基本的な性状のひとつとして抗菌活性効果を調べた。

II　材料と方法

1. 試料採取　試料採取は東京都青梅市の市有林「青梅の森」（35° 47′ 40″ N，139° 16′ 07″ E）で行った。アカマツ広場およびその周辺において外生菌根性のアカマツ（*Pinus densiflora*）とアーバスキュラー菌根性のヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）成木を選び，いずれも地際付近から生えている根をたどることで土壌の付着した根系（長さ 20 cm 程度）を採取した。周辺土壌は根系を採取した地点から 5 m 程度離れ，かつ根系がほぼ存在しない箇所の土壌を採取し，いずれもクーラーバッグで冷やした状態で大学に持ち帰った。試料採取は 2023 年 7 月 22 日に行った。

2. バクテリアの分離および種推定　採取した根系は実体顕微鏡下で 4 根系から同所に存在しかつ形態の類似した根端から土壌が付着した状態で各 5 根端を採取し，滅菌水 1 mL 中で磨砕した根圏の懸濁液を 1 次希釈とした。また，周辺土壌は 100 mg を滅菌水 1 mL 中に懸濁させたものを 1 次希釈とした。懸濁液は 10 倍ずつ希釈したものをそれぞれ 4 次希釈まで作成し，コロニー計数用として Yeast Glucose 培地（YG 培地），放線菌選択培地として腐植酸-ビタミン寒天培地（HV 培地）の 2 種類の培地にシャーレ 1 枚あたり 100 µL ずつ塗布した。繰り返しは 3 とし，暗黒下 25 ℃で培養した。YG 培地に出現したバクテリアコロニーは培養開始 3 日目に計数を行った。HV 培地は 14 日間培養し，出現した放線菌と思われるコロニーについて画線移植による単離を行った。

アカマツ根圏，ヒノキ根圏，アカマツ周辺土壌，ヒノキ周辺土壌から 48 コロニーずつ，合計 192 コロニーを単離し Yeast Starch 培地（YS 培地）で継代を行った。得られた株はコロニーダイレクト PCR による 16S rRNA のサンガーシークエンス（平均 537 bp）を行い，99 %の相同性を種とする推定を行った。

3. 大腸菌に対する抗菌活性試験　単離した 192 株を用いて，agar-piece 法による抗菌活性試験を行った。

大腸菌（*Escherichia coli* NRIC1023 株）は LB 培地で前培養し，対数増殖期の菌体を用いて OD_{600} を 0.05 に濁度調整した分散液を作成した。標準寒天培地に 1 シャーレあたり 50 µL をコンラージ棒でまんべんなく塗り広げ，シャーレ中央に単離株を培地ごと 1 cm 角に切り出し置床した。暗黒下 25 ℃で培養し，培養開始から最大 3 日間まで観察を続け，単離株周辺の阻止円形成の有無を判定した。

III　結果と考察

根圏および周辺土壌から YG 培地を用いて培養したバクテリアのコロニー数を図–1 に示す。根圏は 3 次希釈のもの，周辺土壌はコロニー数が多いことから 4 次希釈のものを使用した。根圏においてはアカマツ，ヒノキの培養可能なコロニー数に有意な差は見られなかった。また，周辺土壌においてはアカマツよりもヒノキで有意にコロニー数が大きくなった。土壌は極めて不均質な性質をもつため，採取場所のわずかな差が影響したことが考えられる。一方，根圏は外生菌根性，アーバスキュラー菌根性による差異は認められなかったことから，根圏において培養可能なバクテリアは菌根タイプの違いによって大きく影響されることはないことが伺えた。

単離された放線菌と思われる 192 株についてシークエンスを行った結果，シークエンスに成功した株はアカマツ根圏で 37 株，ヒノキ根圏で 42 株，アカマツ周辺土壌で 42 株，ヒノキ周辺土壌で 38 株であった。シークエンスに成功した株は全体で 159 株，シークエンス成功率は 83 %となった。種推定ができた株について放線菌とそれ以外のバクテリアの出現割合を図–2 に示す。放線菌の割合は全体で 70-90 %となり，平均では 83 %（131/159 株）となった。また，菌根タイプの違いに関わらず周辺土壌由来のサンプルで放線菌の割合が比較的高い結果となった。本研究で用いた HV 培地は放線菌を選択的に分離するための培地であり，利用可能な炭素源は腐植酸のみであることから，比較的高い割合で放線菌を単離することに成功している。一方で，特に根圏において放線菌以外のバクテリアを比較的多く単離していることから，根圏においては腐植酸を資化可能な放線菌以外のバクテリア

も存在することが考えられた。

次に，出現した放線菌を属レベルに分けた結果を図–3に示す。出現した放線菌は 131 株中 *Streptomyces* 属が 122 株で大半を占めた。特にヒノキ周辺土壌では出現した放線菌のすべてが *Streptomyces* 属であった。一方，ヒノキ根圏では *Streptomyces* 属が占める割合は 84 %であり，その他の属が他のものよりも多くみられる傾向があった。*Streptomyces* 属以外の放線菌としては, アカマツ根圏およびアカマツ周辺土壌で *Kitasatospora* 属，アカマツ周辺土壌で *Actinacidiphila* 属，ヒノキ根圏で *Nonomuraea* 属，*Nocardia* 属などの属が検出された。*Streptomyces* 属以外の放線菌は希少放線菌とされており(*14*)，本研究においては周辺土壌よりも根圏においてこれらの属が比較的多く検出された。

検出された *Streptomyces* 属を種レベルに分けた結果を図–4 に示す。*Streptomyces* 属の推定種数はアカマツ根圏で 11 種, ヒノキ根圏で 7 種, アカマツ周辺土壌で 12 種, ヒノキ周辺土壌で 12 種となった。このうち，*S. hundungensis* は全ての区分において共通して出現した唯一の種で，特にヒノキ根圏では 70 %，ヒノキ周辺土壌で 43 %と他の種よりも優占して検出された。また, *S. paludis* は根圏に共通して出現しており，特にアカマツ根圏では全体の 20 %以上を占めていた。一方で，それぞれの区分にのみ出現した種は 4 から 5 種であり，菌根タイプや根圏・周辺土壌による特定の種の出現に傾向はみられなかった。*S. hundungensis* のタイプ株は土壌から単離され，様々な植物病原菌に対する抗菌活性を有する他，インドール酢酸やシデロフォアの産生も確認されている(*7*)。また *S. paludis* のタイプ株も土壌から単離され，様々な炭素源を利用可能であるとされている(*15*)ことから，本研究の分離株においても詳しい性状を調べることで，これらのタイプ株と同様の有用性を示す可能性が示唆された。

分離株の大腸菌に対する抗菌活性試験の結果，アカマツ根圏由来の 1 株，ヒノキ根圏の 1 株で阻止円の形成が認められた（図–5）。抗菌活性が認められた 2 株のうち，アカマツ根圏由来株は種推定ができなかったが，ヒノキ根圏由来株は *S. albospinus* であった。この株はヒノキ根圏からのみ検出され，他の区分では認められなかった。一方，周辺土壌由来の株はいずれも抗菌活性がみられなかった。*S. albospinus* はフェナミドやフェネルファマイシン G・H などの抗生物質を産生する(*1, 6*)ことが知られており，本研究の阻止円はそれらもしくはそれに類する抗生物質が大腸菌に対して働いた可能性が考えられた。

以上のことから，菌根タイプの違いは培養可能なバクテリアの密度には大きく影響しないが，放線菌，特に *Streptomyces* 属の種組成に影響を及ぼす可能性が示唆された。また，希少放線菌の出現や抗菌活性効果が根圏の一部株にみられたことから，根圏は放線菌の生息環境としても特殊な環境である可能性が高いことがわかった。

引用文献

(1) Brötz E, Kulik A, Vikineswary S, Lim CT, Tan GYA, Zinecker H, Imhoff JF, Paululat T, Fiedler HP (2011) Phenelfamycins G and H, new elfamycin-type antibiotics produced by *Streptomyces albospinus* Acta 3619. J Antibio 64: 257-266

(2) 後藤花織・上原巌・田中恵 (2017) 根圏バクテリア群集決定要因の検討:微小環境の違いが及ぼす影響. 第 128 回日本森林学会大会学術講演集 L8

(3) Hacquard S, Garrido-Oter R, González A, Spaepen S, Ackermann G, Lebeis S, McHardy AC, Dangl JL, Knight R, Ley R, Schulze-Lefert P (2015) Microbiota and host nutrition across plant and animal kingdoms. Cell Host & Microbe 17: 603-616

(4) 浜田盛之 (2015) 放線菌の系統分類―過去，現在，未来―. Microb Resour Syst 31: 43-49

(5) Kuzyakov Y, Razavi BS (2019) Rhizosphere size and shape: temporal dynamics and spatial stationarity. Soil Biol Biochem 135: 343-360

(6) Makkar NS, Nickson TE, Tran M, Biest N, Miller-Wideman M, Lawson J, McGray CI, Stonard R (1995) Phenamide, a fungicidal metabolite from *Streptomyces albospinus* A19301 Taxonomy, fermentation, isolation, physico-chemical and biological properties. J Antibio 48: 369-374

(7) Nimaichand S, Tamrihao K, Yang LL, Zhu WY, Zhang YG, Li L, Tang SK, Ningthoujam DS, Li WJ (2013) *Streptomyces hundungensis* sp. nov., a novel actinomycete with antifungal activity and plant growth promoting traits. J Antibio 66: 205-209

(8) Oberhofer M, Hess J, Leutgeb M, Gössnitzer F, Rattei T, Wawrosch C, Zotchev SB (2019) Exploring actinobacteria associated with rhizosphere and endosphere of the native alpine medicinal plant *Leontopodium nivale* subspecies *alpinum*. Front Microbiol 10: 1-13

(9) Philippot L, Raaijmakers JM, Lemanceau P, van der Putten WH (2013) Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. Nat Rev Microbiol 11: 789-799

(10) Sakoda S, Aisu K, Imagami H, Matsuda Y (2019) Comparison of Actinomycete community composition on the surface and inside of Japanese black pine (*Pinus thunbergii*) tree

roots colonized by the ectomycorrhizal fungus *Cenococcum geophilum*. Microbial Ecol 77: 370-379

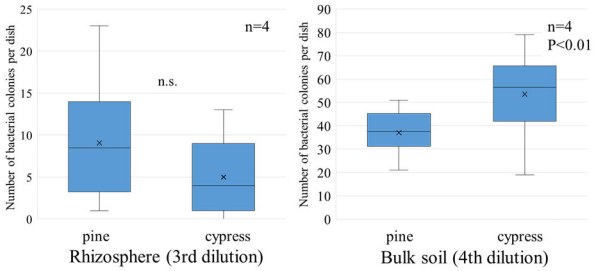
(11) Shirakawa M, Uehara I, Tanaka M (2019) Mycorrhizosphere bacterial communities and their sensitivity to antibacterial activity of ectomycorrhizal fungi. Microbe Environ 34: 191-198

(12) Smith SE, Read DJ (2008) Mycorrhizal Symbiosis, 3rd edn. Academic Press, London, UK

(13) Tanaka M, Nara K (2009) Phylogenetic diversity of non-nodulating *Rhizobium* associated with pine ectomycorrhizae. FEMS Microbiol Ecol 69: 329-343

(14) Tiwari K, Gupta RK (2012) Rare actinomycetes: a potential storehouse for novel antibiotics. Critical Rev Biotech 32(2): 108-132

(15) Zhao J, Tang X, Li K, Guo Y, Feng M, Gao J (2020) *Streptomyces paludis* sp. nov., isolated from an alpine wetland soil. Int J Syst Evol Microbiol 70: 773-778



図–1. バクテリアコロニー数(左:根圏　右:周辺土壌)
Fig. 1 Number of culturable bacterial colonies per dish

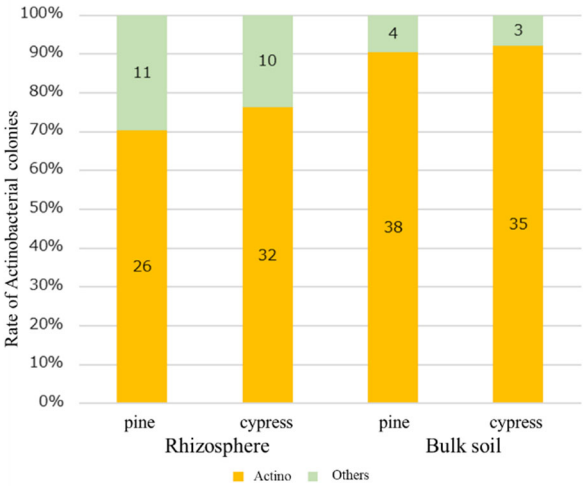


図-2. シークエンス成功株における放線菌の出現割合
Fig. 2 Proportion of Actinobacterial colonies among sequenced strains

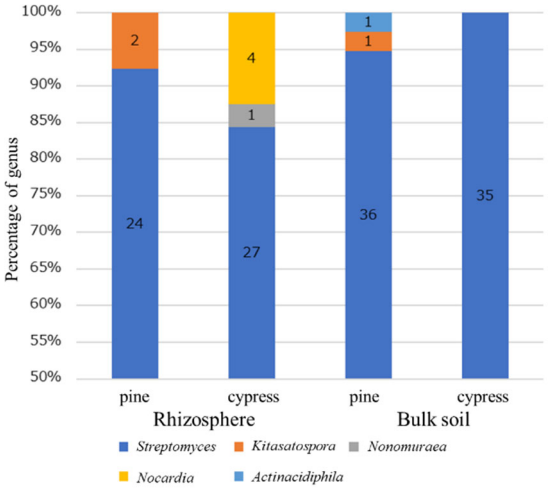


図-3. シークエンス成功株における放線菌各属の割合
Fig. 3 Percentage of each genus of Actinomycetes among sequenced strains

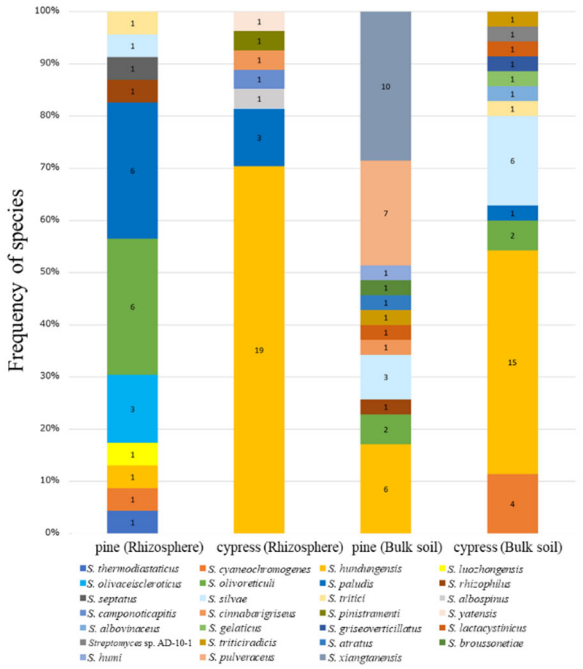


図-4. *Streptomyces*属における各種の出現割合
Fig. 4 Species frequency among genus *Streptomyces*

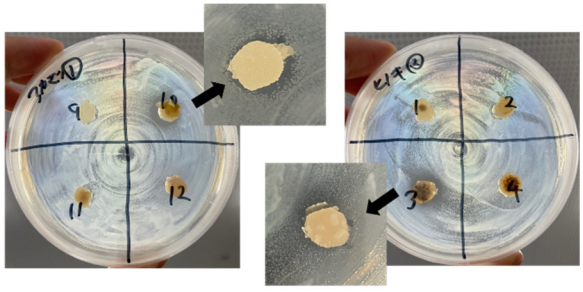


図-5. 大腸菌に対する阻止円形成の様子
(左:アカマツ根圏由来不明株　右:ヒノキ根圏由来*S. albospinus*)
Fig. 5 Antibacterial activity occurrence isolated from rhizoshere
(Left: Unidentified strain isolated from pine rhizosphere　Right: *S. albospinud* isolated from cypress rhizosphere)

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

菌生冬虫夏草類ハナヤスリタケ（*Tolypocladium ophioglossoides*）の培養特性

佐藤大樹[1]

[1]森林総合研究所

要旨：ハナヤスリタケの子嚢胞子発芽至適温度および培養至適温度を調査した。鹿児島県奄美市で採集した本菌の子嚢胞子を 10, 15, 20, 25, 30 ℃，全暗条件下，酵母抽出物加用 Sabouraud 寒天培地（SDY 培地）で発芽させた。20 ℃における発芽までの平均時間は 20 ℃で 62.2–64.4 時間，15 ℃では 86.3–89.4 時間であった。25 ℃では発芽速度が鈍り，30 ℃では 120 時間後でも約 6 割の発芽率であった。菌株の培養温度について，コロニーは SDY 培地，ポテトデキストロース培地(PDA)共に 25 ℃までは良好に成長し，特に PDA の方で成長が早かったがどちらの培地でも 30℃では著しく成長が劣った。本菌の分離培養には PDA を用い 15–20 ℃で行うのが良いと考えられた。

キーワード：発芽，ツチダンゴ属菌，菌根菌，奄美大島

Cultural characteristics of *Tolypocladium ophioglossoides*, a fungal parasite of hypogeous fungi

Hiroki SATO[1]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: The optimum temperatures for ascospore germination and incubation of *Tolypocladium ophioglossoides* were investigated. Ascospores of this fungus collected in Amami City, Kagoshima Prefecture, were germinated on Sabouraud dextrose agar with yeast extract (SDY) at 10, 15, 20, 25, and 30 °C under dark conditions. The average time to germination at 20 °C was 62.2–64.4 hours, and at 15 °C was 86.3–89.4 hours. The germination was slow at 25°C, and at 30°C the germination rate was about 60% even after 120 hours. Colonies grew well up to 25°C on both SDY and Potato dextrose agar (PDA), especially on PDA, but growth was significantly poor at 30°C on both media. It was considered that the best method to isolate and culture this fungus was at 15–20°C using PDA.

Keywords: germination, *Elaphomyces* spp., mycorrhizal fungi, Amami Island

I　はじめに

冬虫夏草類は昆虫に感染して殺し，その後子実体を形成する子嚢菌類ボタンタケ目に属する菌類のグループである。冬虫夏草という言葉は厳密には，コウモリガの仲間の幼虫から発生する中国産の *Ophiocordyceps sinensis* 一種のみを指すが，日本では昆虫から発生するきのこ類を指して冬虫夏草と呼ぶことが多い。ここでは冬虫夏草類と記述する。この仲間は，チョウ目，カメムシ目，コウチュウ目などをはじめ多くの宿主昆虫から記録されている。日本では，冬虫夏草生態図鑑(*2*)に未記載種も含め 230 種以上が掲載されている。

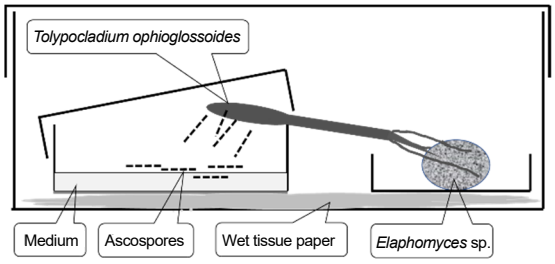
一方，その中には昆虫以外に土中のきのこを宿主として発生する冬虫夏草類の一群がある。ハナヤスリタケ(*Tolypocladium ophioglossoides*)は地中に形成されるツチダンゴ属（*Elaphomyces* spp.）の子実体を宿主として発生する菌生冬虫夏草類である。国内でも各地から発生記録があり、東日本では夏から秋、西日本では冬から春に発生する(*2*)。菌生冬虫夏草類の中には，地中生活性の昆虫を宿主にする冬虫夏草類と分子系統上同じクレードに含まれる種があり(*3*)，昆虫から菌類へと宿主の乗り換えという進化の解明のための一つの視点として菌生冬虫夏草類の昆虫への接種試験が考えられる。冬虫夏草類の特にサナギタケでは，温度特性についての情報が報告されている(*4*)。一方，菌生の冬虫夏草類の生理的な特性は不明な点が多い。そこで，今回，鹿児島県奄美大島において採集したハナヤスリタケを用いて培養条件の検討を行い，その胞子の発芽と栄養菌糸成長の培養温度特性を明らかにしたので報告する。

II　材料と方法

1．採集地　材料となるハナヤスリタケは奄美大島奄美市内で 2007 年 2 月 21 日に採集した。研究室において子実体を、酵母抽出物加用 Sabouraud 寒天培地（組成：ブドウ糖 20 g，ペプトン 10 g，酵母抽出物 10 g，寒天粉末 20 g，蒸留水 1000 ml，以降 SDY と略）の上にかざして子嚢胞子を射出させて分離を行った（図–1）。

（受理日 2025 年 2 月 6 日）

2. 調査項目　発芽までの時間を測定するために，分離時と同様の方法で子嚢胞子を射出させた。その際，胞子ができるだけ重ならずに寒天上に散らばるようにシャーレを一定時間ごとに回転させ着地点をずらした。寒天上の子嚢胞子を一定時間ごとにランダムに 200 個観察し発芽時の形態変化を 24 時間後から 120 時間後まで 6 時間または 12 時間毎に調査した。一次胞子に由来する二次胞子のいずれかに発芽菅が見られた場合を発芽と判定した。



図–1．分離作業模式図.
大型のプラスチック容器の中で保湿して行う
Fig. 1. Isolation diagram.
In a large plastic box with keeping moisture.

得られた菌株 7B2 および 2B5 を SDY 培地で前培養し，3 mm 角のブロックをポテトデキストロース培地（以降 PDA と略）（日水製薬株式会社），SDY 培地を流し込んだ 9 cm シャーレ中央に接種した。培養温度として 5，10，15，20，25，30 ℃を設定し，24 時間暗条件で 14 日間培養し，コロニー直径をシャーレにつき菌糸伸長が最も早い部分と遅い部分の 2 か所測定した。各温度条件でシャーレ 3 枚を用いた。

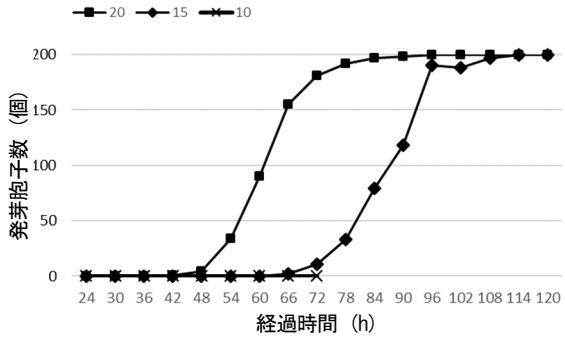
採集地の気象条件について，気象庁のウェブページ「各地の過去の気象データ」(*1*)より 1998 年から 2007 年の 1 月から 3 月までの鹿児島県名瀬の気温を参照した。

III　結果と考察

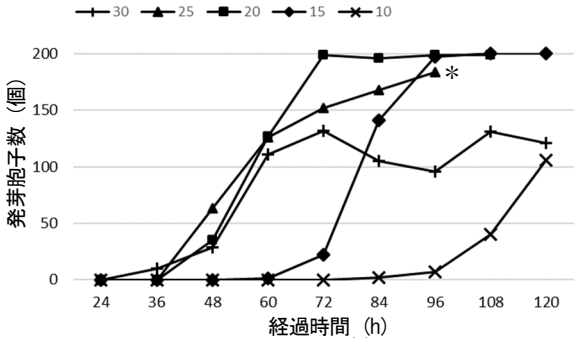
本種の子嚢胞子は糸状であり多数の隔壁を持ち，射出後縦一列の珠数状に多数の二次胞子に分裂する。さらに個々の二次胞子の給水により一直線の状態からジグザグ状態に屈曲する。さらに個々の胞子が膨潤した後に発芽菅を形成する。

1 回目の発芽実験の結果を図–2 に示した。20 ℃の時 42 時間後に発芽菅を初めて確認し発芽と判断した。最終的に 96 時間後に全胞子が発芽した。15 ℃の時，発芽開始は 66 時間後，発芽終了は 102 時間後だった。10 ℃では 78 時間後まで発芽が見られず以降の観察を取りやめた。

2 回目の発芽実験の結果を図–3 に示した。発芽は 30, 25, 20, 15, 10 ℃の順に開始までの所要時間が短かった。発芽は 30 ℃が最も早く 36 時間で開始したが，その後の胞子の発芽数は頭打ちとなり最大で 132 個程度（66%）の発芽状態となった。なお，時間経過の後半の数値が下がっているのは，同じ胞子の継続観察ではなく，ランダムに 200 個の胞子を観察したためである。



図–2．子嚢胞子の発芽試験 1 回目（10, 15, 20 ℃）.
Fig. 2. Number of ascospores germinated in trial 1 (10, 15, 20 ℃). X-axis: time after inoculation. Y-axis: Number of the germinated spores.

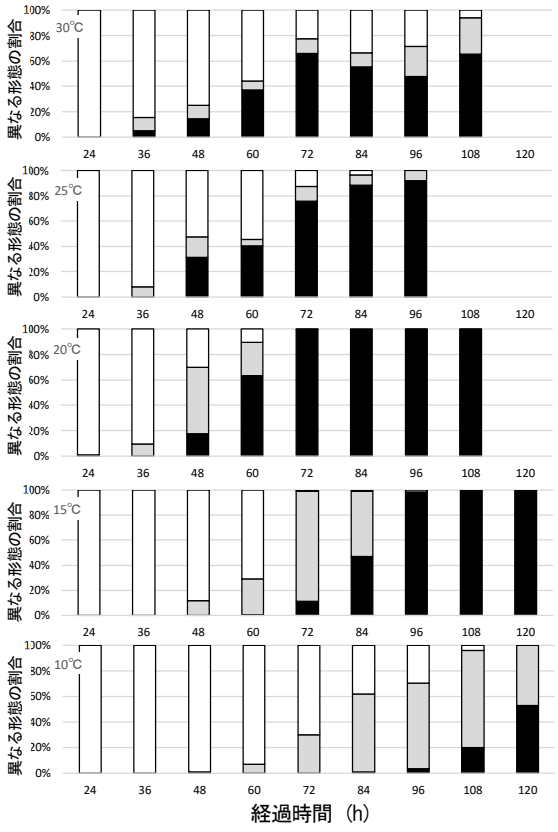


図–3．子嚢胞子の発芽試験 2 回目（10, 15, 20, 25, 30 ℃）.
*: 108 時間以降はコロニーの融合のため計数できず.
Fig. 3. Number of ascospores germinated in trial 2 (10, 15, 20, 25, 30 ℃). X-axis: Time after inoculation. Y-axis: Number of the germinated spores. *: Due to colony fusion, counting is not possible after 108 hours.

25 ℃と 20 ℃では 48 時間後に共に発芽が認められたが発芽数は 25 ℃の方が多かった。一方，25 ℃ではその後の発芽速度が低下し，60 時間後以降になると 20 ℃の発芽数が勝っていた。20 ℃では 72 時間後は 199 個の胞子が発芽していたが，25 ℃では 108 時間後も発芽数は 184 個であった。15 ℃では発芽は 60 時間後から始まり 96 時間後には 197 個の胞子が発芽した。グラフの形態は 20 ℃と同様 S 字状であった。10 ℃では発芽開始は 84 時間後であった。120 時間経過後も 106 個の発芽状態であった。

2 回目の発芽実験時の胞子の状態変化を図–4 に示した。状態を屈曲, 膨張, 発芽菅の 3 段階に分割して記録した。30 ℃，25 ℃等の高温条件では膨張状態を示す灰色の部分が小さいが，20 ℃以下ではより低い温度ほど膨張状態の部分が大きく，併せてそこに至るまでの時間も長いことが示された。

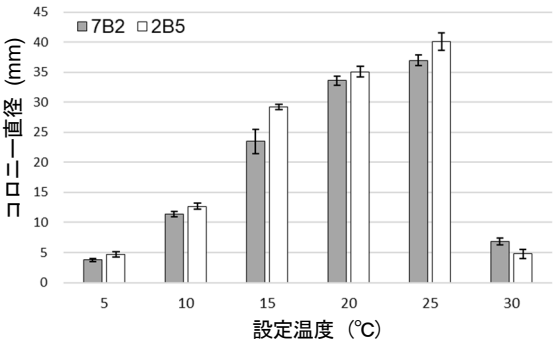
発芽した胞子の度数と所要時間の積を経過時間ごとに足し上げた後，発芽した全胞子数で除して，発芽までの平均所要時間を求めた。また、平均所要時間と実験条件温度の積を計算した。時間単位で測定したため単位を「時間度」とした。 1 回目の発芽実験時 20 ℃では 64.4 時間（1288 時間度），15 ℃では 89.4 時間（1341 時間度），2 回目の時 20 ℃では 62.2 時間（1245 時間度），15 ℃では 86.3 時間（1295 時間度）であった。条件温度が等しければほぼ同じ所要時間で発芽し、条件温度が異なっても 4 回の試行の積は皆近い数値（1300 時間度前後）となった。



図–4. 時間経過に伴う各温度下の子嚢胞子の状態変化
白色：屈曲．灰色：膨張．黒：発芽． グラフの欠落部分は菌糸が互いに融合したため計数できなかった部分.

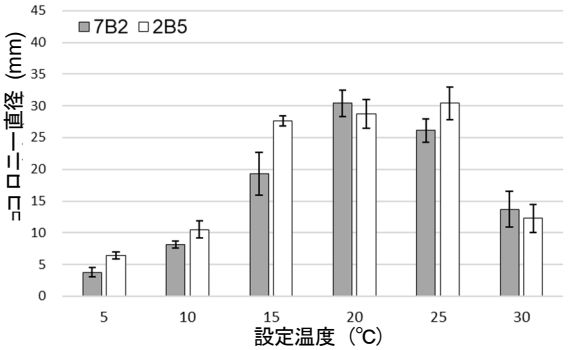
Fig. 4. Changes in ascospore morphology over time. White: Bending. Gray: Expanding. Black: Germinating. X-axis: Elapsed time from the inoculation. Y-axis: Proportion of different forms. The missing parts in the graphs mean the spore morphology could not be observed due to the colony fusion.

条件を変えた培養時のコロニー成長の結果を図–5，6 に示した。得られた 2 菌株（7B2 株, 2B5 株）のコロニー直径はどちらも PDA を用いた方が SDY 培地の場合よりも大きかった。培養温度を変えた場合，PDA では 25 ℃の時に最大成長を示したが，SDY 培地では菌株により最大成長を示す温度が 20 ℃または 25 ℃と異なった。一方，30 ℃ではどちらの培地の場合も生育は著しく劣った。



図–5. PDA 培地における各温度のコロニー直径
菌株：7B2, 2B5. シャーレ 3 枚の平均 ± SD

Fig. 5. Colony diameter at each temperature on PDA medium Isolates: 7B2, 2B5. Average ± SD from three Petri dishes. X-axis: Temperature. Y-axis: Colony diameter.



図–6. SDY 培地における各温度のコロニー直径
菌株：7B2, 2B5. シャーレ 3 枚の平均 ± SD

Fig. 6. Colony diameter at each temperature on SDY medium Isolates: 7B2, 2B5. Average ± SD from three Petri dishes. X-axis: Temperature. Y-axis: Colony diameter.

奄美市名瀬の 2007 年 2 月の平均, 最高, 最低気温はそれぞれ 16.0 ℃, 19.6 ℃, 12.7 ℃であり，1998 年から 2007 年まで 10 年間の平均, 最高, 最低気温はそれぞれ 15.6 ℃, 19.6 ℃, 11.3 ℃であった(*1*)。

以降すべての結果について、温度に対する本種の発芽と成長特性を考察する。発芽は 10 ℃以上であれば起きるが，高温側の条件になると本菌は生理的に対応できな

くなると考えられた。25 ℃，30 ℃条件で発芽が迅速に起きたのは形態形成に必要な反応が高温で速まったことが考えられる。しかし，負荷がかかり反応できる胞子は限られているようである。発芽開始は 30 ℃の方が早いが発芽した胞子数では 48 時間後以降は 25 ℃の方が大きい。25 ℃では発芽数の増加は緩やかであるが 108 時間後は 180 個以が発芽している。一方，30 ℃では発芽数は 120–130 個前後で停滞し，明らかにこの温度では生理的に影響を受けていることが示唆される。それに対して 20 ℃以下の場合には温度に対応した代謝により発芽が進んだと考えられる。

発芽までの平均所要時間と実験条件温度の積の値より本菌の発芽にはおよそ 1300 時間度が必要だと考えられた。30 ℃では 43.3 時間後に 1300 時間度に達する。30 ℃の時 48 時間で発芽している胞子はあるものの，この時点以降 20 ℃条件の発芽数の方が多く，30 ℃では最終的に全体の 3 割を超える胞子の発芽が起きていない。次に 25 ℃では 52 時間後に 1300 時間度を迎える。発芽実験では 48 時間後から発芽が上昇し最終的には 9 割を超えることから，本種が生理的に対応可能な温度であると考えられた。しかし，60 時間後以降では，より低い 20 ℃条件の発芽数に劣っている。菌糸の培養試験においても 30 ℃の生育は著しく悪い。25 ℃では本菌は培地上で良好に生育することから，25 ℃は本菌が対応できる高温側の限界に近い温度であり，30 ℃は明らかにこの菌の生育には適していないと考えられた。

ハナヤスリタケは西日本では冬から春に発生する(*2*)ことから上述の特性は本菌の発生する 2 月の奄美の気温とも合致した生理的性状であると考えられ，分離および培養時には PDA 培地を用いて 15 ℃または 20 ℃で行うことが適していると考えられた。

謝辞 ：現場をご案内いただい藤本勝典氏（鹿児島森林管理署名瀬森林管理事務所）に感謝する。

引用文献

(1) 気象庁：過去の気象データ検索. https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/ (2024.11.26 参照)

(2) 日本冬虫夏草の会編著 (2014) 冬虫夏草生態図鑑. 誠文堂新光社, 304pp

(3) Nikoh N, Fukatsu T (2000) Interkingdom host jumping underground: Phylogenetic analysis of entomoparasitic fungi of the genus *Cordyceps.* Molecular Biology and Evolution 17: 629-638 https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a026341

(4) Sato H, Shimazu M (2022) Stromata production for *Cordyceps militaris* (Clavicipitales: Clavicipitaceae) by injection of hyphal bodies to alternative host insects. Applied Entomology and Zoology 37: 85-92

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

トリュフ菌共生苗木の植栽において苗木の定着に必要な管理条件の検討

古澤仁美[1]・仲野翔太[2]・中村慎崇[3]・野口享太郎[1]・山中高史[4]

[1]森林総合研究所・[2]元森林総合研究所・[3]森林総合研究所九州支所・[4]森林総合研究所東北支所

要旨：ホンセイヨウショウロ（*Tuber japonicum*）菌を共生させた苗木の植栽において，植栽初期の苗の定着に必要な管理条件を検討した。ホンセイヨウショウロ菌を根に共生させたコナラ苗木を植栽し，苗木の周囲に不織布シート，稲わら，木材チップをそれぞれ敷設した各処理区と対照区を設定し，苗木の成長，葉の SPAD 値，地温，土壌の窒素無機化速度を測定した。その結果，木材チップ区は他の区より日最大地温が低く環境ストレスを緩和する機能があったものの，苗木葉の SPAD 値が低く，12 か月後までに 3 区中 2 区で苗が枯死した。窒素無機化速度の測定では木材チップ区では無機化・硝化が生じていなかったことから，窒素不足が苗木定着を阻害した一因と考えられた。

キーワード：地温，窒素無機化速度，苗木，ホンセイヨウショウロ，木材チップ

Examination of managements for establishment of saplings infected with *Tuber japonicum*

Hitomi FURUSAWA[1], Shota NAKANO[2], Noritaka NAKAMURA[3], Kyotaro NOGUCHI[1], Takashi YAMANAKA[4]

[1]Forestry and Forest Products Research Institute, [2]Formerly of Forestry and Forest Products Research Institute, [3]Kyusyu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, [4]Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: In order to clarify management necessary for the establishment of saplings with *Tuber japonicum*, we examined mulch managements for establishment of saplings in the initial planting period. *Quercus serrata* saplings infected with *Tuber japonicum* were planted, and non-woven fabric sheets, rice straw, and wood chips were placed around each plot. Saplings without mulch were also set up as controls. The woodchip plot had the ability to alleviate environmental stress with a lower daily maximum soil temperature than the other plots, but the SPAD values of the sapling leaves were lower, and at the end of 12 months the seedlings had died in two of the three plots. Mineralization rate measurements showed that the woodchip plot did not undergo mineralization or nitrification, suggesting that nitrogen deficiency was one of the factors that prevented seedlings from establishing.

Keywords: Soil temperature, Net potential nitrogen mineralization rate, Saplings, *Tuber japonicum*, Wood chip

I　はじめに

日本国内に生息する *Tuber* 属のうち，ホンセイヨウショウロ（*Tuber japonicum*）は 2016 年に新種記載された日本固有の白トリュフで，マツ科やブナ科など多くの樹種と共生が可能であり，栽培に適すると考えられている。そこで，ホンセイヨウショウロについて人工栽培の試みが行われており，これまでに生息地の土壌特性，菌の培養条件，苗木への菌の接種方法について検討され，菌を共生させた苗木の試験的な植栽が実施されている(*4*)。

室内環境で育てたトリュフ菌共生苗木にとって野外の環境では温度変化も大きいなど厳しい環境であると予想される。まずは苗木が生育すること，そしてホンセイヨウショウロ菌が共生を継続することが必要で，そのための管理条件を明らかにする必要がある。ホンセイヨウショウロは国内で見つかった新種であり，新たに検討をする必要がある。そこで，苗木と菌の定着に必要な管理条件を検討した。

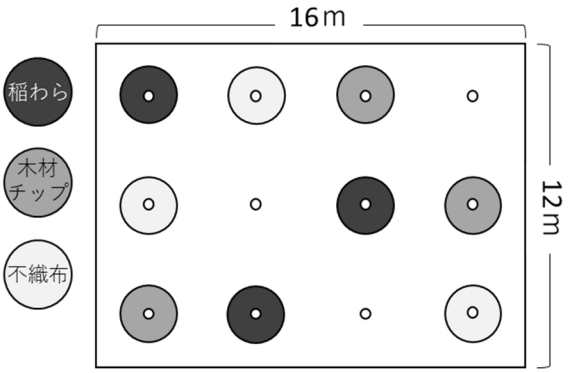
II　調査地と方法

1. 調査地　茨城県内に植栽試験地（縦 12 m × 横 16 m）を設定した（図–1）。試験地付近の 2017 年の平均気温は 15.0℃，年降水量は 1304 mm である。試験地の場所は平坦で日当たりはよい。

この試験地に，2017 年 10 月に胞子接種によりホンセイヨウショウロ菌を根に共生させた当年生のコナラ苗木を 12 本植栽し，環境の急激な変化の緩和のために苗木の周囲に不織布シート，稲わら，木材チップをそれぞれマルチングした区と対照区（マルチなし）の合計 4 処理区を設定した（各処理区 3 反復）。

不織布は白色で，ホームセンターで購入したものを用いた。稲わらは稲作農家からいただいた。木材チップについては，樹種はコナラであり，立木を伐倒して幹材をチッパーでチップにした。チップ粒径はおよそ 8 mm である。不織布シート，稲わら，または 木材チップ（コナラチップ）を苗の周囲 1 m の範囲で敷設した。不織布区

（受理日 2025 年 1 月 14 日）



図–1. 植栽試験地の植栽とマルチングの概要

Fig.1 Outline of planting and mulching at the experimental site

では，半径 1 m の円状に切り抜いた不織布を敷いた。稲わら区では，地表を被覆するよう均等に稲わらを敷設した。木材チップ区では，チップを土壌の表面に厚さ約 5 cm 程度堆積するように敷いた。植栽後に苗に対して施肥や潅水は行わなかった。

2. 調査項目　2017 年 10 月の植栽時，およびその約 1 年後の 2018 年 10 月に苗木の樹高を測定した。2018 年 6 月に苗木葉の葉緑素を葉緑素計（コニカミノルタ，SPAD-502Plus）で測定した。各苗木の日光が当たる葉を 3 枚選んで，1 枚当たり 5 箇所で SPAD 値（葉緑素の指標値）を測定して平均した。苗木の根系の一部を 2018 年 10 月に採取しトリュフ菌根の有無を Kinoshita et al. (*3*) に従って外生菌根の形態と rDNA の ITS 領域の塩基配列に基づいて確認した。

2018 年 4 月からマルチの直下に地温計（Onset，ティドビット V2）を各区に 1 個埋設した。対照区は地表面付近に埋設して軽く覆土した。各区の地温を 1 時間に 1 回計測し，日平均地温を計算した。

窒素無機化については 2018 年 8 月 16 日から 9 月 6 日に埋設バッグ法(*1*, *2*, *5*, *7*)で測定した。0–20 cm の土壌を採取して 2 つに分け，一方の土壌サンプルをポリエチレンの袋（厚さ 0.08 mm）にいれて密封して採取した穴に戻した。もう一方の土壌サンプルは直ちに研究室に持ち帰り，採取時含水率を測定するとともに，土壌：2N KCl 溶液比 1：5 で振とう抽出してろ過した。ろ液についてオートアナライザーでアンモニア態窒素濃度と硝酸態窒素濃度を定量し初期値とした。3 週間後の 9 月 6 日にポリエチレン袋ごとサンプルを回収し，初期値の分析と同様の方法でアンモニア態窒素濃度と硝酸態窒素濃度を測定した。各処理区 3 反復で実施したが，不織布区の 1 つでポリエチレン袋が破れて雨水がはいってしまって測定しなかったことから 2 反復となった。3 週間後と初期値の差分から，正味の窒素無機化速度と硝化速度を計算した。

表–1. 各処理区の苗木の樹高

Table 1 Height of saplings in each plot

	2017年10月		2018年10月	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
対照区	9.1	±1.4	32.6	±11.2
不織布区	10.8	±4.1	35.5	±20.6
稲わら区	6.2	±1.4	57.2	±15.0
木材チップ区	6.1	±0.8	7.5	

単位：cm

敷設して 1 年 1 か月後の 2018 年 11 月に木材チップと稲わらを一部採取して，風乾・粉砕後に乾式燃焼法（住化分析センター，NC-TR22）で炭素窒素含有率を測定し，C/N 比を算出した。

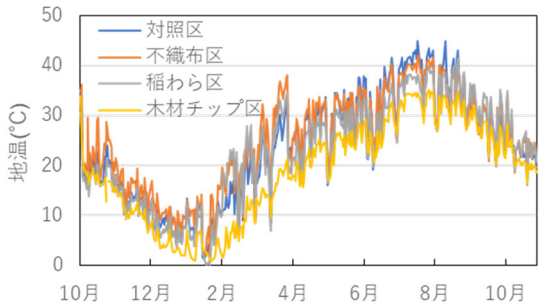
統計解析は，苗木の樹高，土壌水分，窒素無機化ポテンシャルについて R を使って Kruskal-Wallis の検定を行ってマルチ処理の影響を検討した。

III 結果と考察

1. 苗木の成長経過　植栽時の 2017 年 10 月において，苗の樹高は Kruskal-Wallis の検定では処理による有意な差は認められなかった。木材チップ区以外では苗の成長不良や枯死は認められず 1 年後まで生存・定着した。木材チップ区については 3 区中の 1 区で SPAD 値測定時の 2018 年 6 月時点で苗木は枯死し，2018 年 10 月までにさらにもう 1 区で苗木が枯死したので 3 区中 1 区だけ苗木が定着した。2018 年 10 月木材チップ区以外の 3 つの処理区では樹高は平均値で 32.6-57.2 cm であり，処理による有意な差は認められなかった（表–1）。そして，これら生存していた苗木ではすべての処理区においてトリュフ菌根の存在を確認した(*6*)。

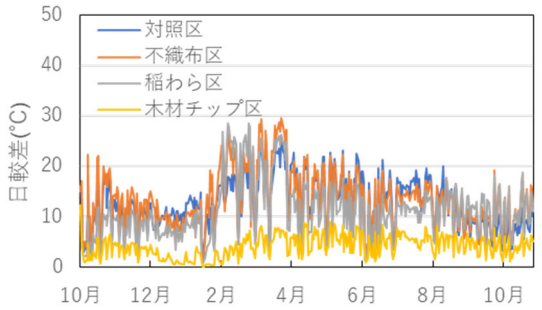
2. 地温　各処理区における 2017 年 10 月～2018 年 10 月の日最高地温と日較差を図–2，3 に示す。木材チップ区は他の処理区より日最高地温が低く，日較差も小さかったことから，木材チップ敷設は温度変化のストレスを緩和する機能があったといえる。木材チップ区以外の処理区では夏季の日最高地温が 35－45 ℃と高い環境であり（図–2），さらに日較差が大きかった（図–3）。このような環境は苗木にとってストレスがかかると予想されたが，この状況下でも苗木は枯死しなかったことから，この温度環境は苗木の定着には問題ないと考えられた。

3. 土壌水分　窒素無機化試験のために採取した土壌サンプルの採取時含水率（重量含水率）は，対照区が最



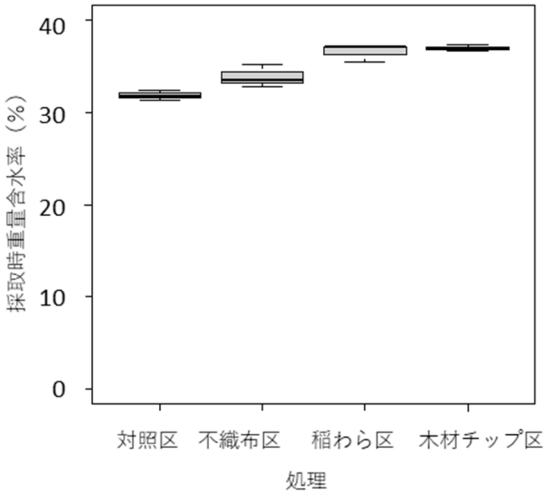
図–2.　各処理区の日最高地温

Fig.2 Maximum daily soil temperatures in each plot



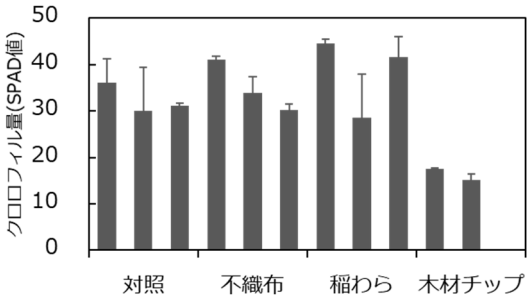
図–3.　各処理区の日較差（日最高地温－日最低地温）

Fig.3 Daily disparity in soil temperature in each plot



図–4.　各処理区の窒素無機化速度測定時の土壌の含水率

Fig.4 Soil moisture content at the time of sampling of measuring nitrogen mineralization rate in each plot



図–5.　各区の苗木葉の SPAD 値の平均値

Fig.5 Mean SPAD values of sapling leaves in each plot

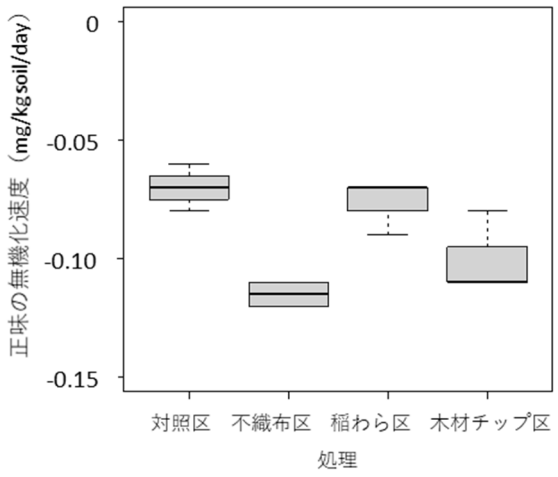
も低く，稲わら区と木材チップ区で高い傾向があった（図–4）。処理区の影響が統計的に有意であった（$p=0.025$）。土壌水分の測定はこの 1 回のみであり，採取時含水率は気象条件で変わるので不確実であるが，木材チップや稲わらマルチは土壌乾燥を抑制する効果があった可能性がある。

4. SPAD 値　2018 年 6 月の苗木葉の SPAD 値は木材チップ以外の区では 30-40 の範囲にある一方，木材チップ区で 20 以下であり，ほかの区より低い傾向であった（図–5）。

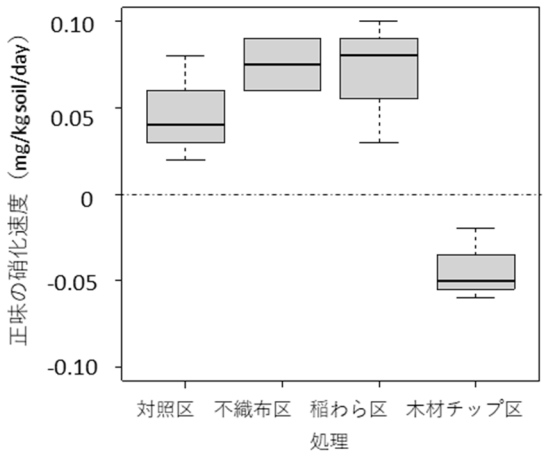
5. 窒素無機化ポテンシャル　正味の無機化速度はマイナス，つまりアンモニア量が培養後に培養前より減少した（図–6）。アンモニア減少の多くは硝化により硝酸になった。木材チップ区では無機化だけでなく硝化も生じていなかった（図–7）。

一般に C/N 比が高い有機物を施用すると，微生物が無機態窒素を有機化して不動化する「窒素飢餓」が生じることが知られている。微生物による無機態 N の有機化は C/N 比が 20～60 になるまで生じるとされている（*8*）。本研究では敷設して 1 年 1 か月後（2018 年 11 月）の C/N 比は 205 だったので，今回敷設した木材チップにより窒素飢餓が生じてアンモニア態窒素が有機化されて減少したと考えられた。稲わらについては敷設して 1 年 1 か月（2018 年 11 月）の C/N 比は 63 であり，稲わら区でも窒素の有機化が生じていた可能性はあるが，木材チップ区より顕著でなかったと考えられる。

窒素無機化速度の測定では木材チップ区では無機化・硝化が生じていなかった。また，木材チップ区では SPAD 値が低い傾向にあった。サンプルサイズが少なくて統計処理ができない条件であるため不確実性が高いものの，これらの測定結果から窒素不足の状態にあったと考えられ，窒素不足が苗木成長を阻害して枯死に至らしめた一因と考えられた。



図–6.　各処理区の窒素無機化速度
Fig.6 Nitrogen mineralization rate of each plot



図–7.　各処理区の硝化速度（硝酸態窒素の変化速度）
Fig.7 Nitrification rate of each plot

トリュフを共生させた苗木の植栽においても，窒素飢餓を招くような有機質資材の施用方法は適切ではないといえる。高い C/N 比の有機質資材の使用を検討する際には十分な注意が必要である。

謝辞：本研究は，農林水産省農林水産技術会議事務局の委託を受けての研究プロジェクト「高級菌根性きのこ栽培技術の開発（2015 年度～2019 年度）」および生物系特定産業技術研究支援センター（生研支援センター）によるイノベーション創出強化研究推進事業研究課題「国産トリュフの林地栽培に向けての技術体系の構築（2022 年度～2024 年度）」にて取り組んできている。森林総合研究所の根本美千代氏，勝井祥江氏，竹内菜穂子氏に実験のご協力を賜った。本研究の一部は日本森林学会大会で発表した。

引用文献

(1) Eno CF (1960) Nitrate production in the field by incubating the soil in polyethylene bags. Soil Science Society of America Journal 24: 277-279

(2) Gordon AM, Tallas M, Vancleve K (1987) Soil incubations in polyethylene bags - Effect of bag thickness and temperature on nitrogen transformations and CO_2 permeability. Canadian Journal of Soil Science 67: 65-75

(3) Kinoshita A, Obase K., Yamanaka T (2018) Ectomycorrhizae formed by three Japanese truffle species (*Tuber japonicum*, *T. longispinosum*, and *T. himalayense*) on indigenous oak and pine species. Mycorrhiza 28: 679–690

(4) 木下晃彦・小長谷啓介・山中高史 (2021) 国産トリュフの栽培に向けた研究と今後の展望. JATAFF ジャーナル 9(12): 7-11

(5) 村上雅志・武田博清・岩坪五郎 (1990) スギ，ヒノキ人工林における土壌の窒素無機化量の季節変化．京都大学農学部演習林報告 62: 44-54

(6) 仲野翔太・古澤仁美・木下晃彦・中村慎崇・野口享太郎・山中高史 (2019) ホンセイヨウショウロを感染させたコナラ苗木を植栽した 1 年後の菌根の生残．日本森林学会大会発表データベース 130: 473

(7) 高橋輝昌・生原喜久雄・黒田孝一 (1994) ポリエチレンシートを用いた森林土壌の窒素無機化量の測定法の検討．森林立地 36: 60-62

(8) 武田博清 (1994) 森林生態系において植物・土壌系の相互作用が作り出す生物多様性．日本生態学会誌 44: 211-222

論　文

関東森林研究　76-1 (2025)

コナラおが粉を培地基材としたナメコ菌床栽培における コーンコブミール培地のエノキタケ廃菌床による培地基材置換率の検証

清水達哉[1]・島津桃子[1]

[1]新潟県森林研究所

要旨：ナメコ菌床栽培におけるコーンコブミール培地のエノキタケ廃菌床（以下廃菌床）による培地基材置換率の検証を 2 つの栽培試験で行った。一つ目はコナラおが粉が培地基材の培地を対照群，培地基材を廃菌床により 6 通りの置換率で置換した培地を実験群とした。二つ目は，一つ目と同様の対照群と，対照群に炭酸カルシウム（以下炭カル）を 1 供試ビンあたり約 2 g 添加したもの，そして，培地基材を廃菌床により 5 通りの置換率で置換し，炭カルを 1 供試ビンあたり約 2 g 添加したものを実験群とした。栽培試験の結果，対照群と比較し，置換率 10，20%では大幅に収量が増収した。一方で，置換率 55，75%では大幅に減収し，75%では収穫に至らないものが多数存在した。また廃菌床で置換した実験群における炭カルの添加による効果は一定でなかった。

キーワード：ナメコ，菌床栽培，エノキタケ廃菌床，培地基材

Investigation of the replacement rate of corn cob meal medium by waste enokitake (*Flammulina velutipes*) mushroom substrate for *Quercus serrata* sawdust nameko (*Pholiota microspora*) cultivation

Tatsuya SHIMIZU[1], Momoko SHIMADZU[1]

[1]Niigata Prefectural Forest Research Institute

Abstract: Two cultivation trials were conducted to evaluate the replacement rate of corn cob meal medium with waste enokitake mushroom substrate in the cultivation of nameko mushrooms. In the first trial, the control group used *Quercus serrata* sawdust as the medium base, while the experimental groups replaced the sawdust base with spent enokitake mushroom substrate at six different replacement rates. In the second experiment, a control group as in the first experiment, a control group to which approximately 2 g of calcium carbonate was added per bottle, and an experimental group to which approximately 2 g of calcium carbonate was added per bottle after the substrate was replaced by waste beds at five different replacement rates. The results showed that compared to the control group, the yield increased significantly at 10% and 20% replacement rate. On the other hand, the replacement rate of 55% and 75% resulted in a significant decrease in yield, and many of the fruiting bodies were not harvested at 75%. In addition, the effect of the addition of calcium carbonate was not constant in the experimental group that was replaced with waste beds.

Keywords: Nameko mushroom, sawdust-based cultivation, Enokitake mushroom waste bed, substrate

I　はじめに

菌床栽培による食用きのこの生産が増えるにしたがい，大量の廃菌床の排出問題が生じている(*4*)。これら廃菌床の一部は有機肥料などとして再利用されているが，多くが廃棄物として処理されており，有効な用途開発が望まれている(*4*)。また廃菌床を菌床栽培に再利用できれば，おが粉などの原材料費のコストダウンにつながる(*9*)。

廃菌床を菌床栽培に利用した報告はいくつか存在する(*9*)が，コナラおが粉を培地基材としたナメコ菌床栽培において，コーンコブミールを培地基材としたエノキタケ廃菌床を培地基材と置換して利用可能か検証した研究はみられない。そこで本研究では，コナラおが粉を培地基材としたナメコ菌床栽培におけるコーンコブミールを培地基材としたエノキタケ廃菌床による培地基材の置換率の検証を二つの栽培試験で行い，エノキタケ廃菌床の培地基材としての利用可能性について検討した。

II　材料と方法

1. 供試菌　KX-N008 号（株式会社キノックス）を使用した。

2. 培地資材　培地基材には，2023 年 11 月 26 日に購入後，屋根付きの小屋で常温保管したコナラおが粉（以下おが粉）を使用した。おが粉の粒度ごとの質量割合は，2.8 mm 以上が 5.5%，2.0 mm 以上から 2.8 mm 未満は

（受理日 2025 年 1 月 14 日）

21.7%，1.4 mm 以上から 2.0 mm 未満は 60.5%，1.4 mm 未満が 12.3%だった。培地基材の置換材のエノキタケ廃菌床（コーンコブミール主体，以下廃菌床）は，2024 年 3 月 12 日に新潟県内の菌床エノキタケ生産施設から掻き出し直後に収集した。廃菌床の粒度は未測定だが，指でつぶすと泥状になった。廃菌床は，約 3 時間常温で輸送後，室温約 2 ℃ の暗所で培地調整まで保管した。栄養材には，特ふすま（かちどき製粉株式会社，20 kg 袋入り）を使用した。添加材には，炭酸カルシウム（有恒鉱業株式会社，飼料用 30 kg 入り，以下炭カル）を使用した。

3. 培地調整と種菌の接種　栽培試験は 2 つ行った。一つ目の栽培試験は 2024 年 3 月 25 日に培地調整，26 日に接種した。培地基材がおが粉で構成された培地を対照群（以下 0%置換），培地基材のおが粉の容積率 10, 20, 30, 40, 55, および 75%を廃菌床で置換した実験群（以下 x%置換と表記：x は置換率）の合計七つの試験培地を設定した（表–1）。栄養材の特ふすまは，1 供試ビンあたりの混合量を乾燥質量 45.74 g に揃えた。培地の含水率（湿量基準）は，計算上の値が 62.0%に揃うように水分量を調整した。二つ目の栽培試験は 2024 年 4 月 8 日に培地調整，9 日に接種した。一つ目の栽培試験と同様に 0%置換の対照群と，0%置換に炭カルを 1 供試ビンあたり乾燥質量 2.03 g 添加したもの，そして，培地基材のおが粉の容積率 10，20，30，40，および 55%を廃菌床で置換したうえ，炭カルを 1 供試ビンあたり乾燥質量 2.03 g 添加したものを実験群（以下 x%置換&炭カルと表記：x は置換率）とし，合計七つの試験培地を設定した（表–1）。

培地調整については，各試験培地をミキサー（協全商事株式会社）で攪拌後，800 mL の P.P ビン（ホクト産業株式会社）に手詰めした。供試ビンは各試験培地あたり 32 本作製し，16 本ずつコンテナに格納後（4 行×4 列），瓶詰め機（田中技研工業株式会社）で接種孔を 1 か所成形した。培地調整と瓶詰め作業後，高圧殺菌釜（株式会社千代田製作所，TFK-T06 W-C）で高圧殺菌（119 ℃，60 分）した。高圧殺菌後，半日程度室温 17.0 ℃ に設定されたクリーンルーム内で放熱し，手作業でおが粉種菌を約 10 g 接種した。

4. 栽培条件と子実体の収穫　接種後，試験培地ごとに供試ビンの管理位置が偏らないように，一つのコンテナ内に各試験培地あたり 2 もしくは 3 本ずつ格納した。

接種後の培養は，室温 17.0 ℃，湿度 70%，CO_2 濃度 2,000 ppm 以下になるように設定した暗黒条件下の培養室内で 56 日間行った。培養は台車に載せたまま行った。

培養完了後，菌掻機（ホクト産業株式会社）を使用して発生処理を行った。発生処理は「ひら掻き」で行い，常温下で 2 時間程度水道水を注水後，ビンを倒立させビン内の余剰水を排出した。余剰水の排出後はビンを正立に戻した。

芽出し工程は，室温 16.0 ℃，湿度 96%以上，CO_2 濃度 2,000 ppm 以下に設定した暗黒条件下の部屋で管理した。発生処理面が乾燥しないよう，原基形成が完了するまで水道水で湿らせた厚さ 8 mm の軟質ポリウレタンフォームで被覆した。なお，原基形成が完了するまでに要する期間が各供試ビンで異なったことから，原基形成完了後は，成長速度が類似する供試ビンごとにコンテナに格納して管理した。

原基形成後は，軟質ポリウレタンフォームを除去し，室温 16.0 ℃，湿度 96%以上，CO_2 濃度 2,000 ppm 以下に設定した部屋で管理し，白色蛍光灯で 1 日あたり 8 時間照射した。白色蛍光灯の照度は，部屋中央で約 100 lx，各コンテナ上で約 30 lx となるように調整した。

発生した子実体がマッチ棒の頭の大きさ程度になった時点で室温 14.0 ℃，湿度 96%以上，CO_2 濃度 2,000 ppm 以下に設定した部屋に移動させて管理した。収穫適期の 2，3 日前には，室温 12.0 ℃，湿度 96%以上，CO_2 濃度 2,000 ppm 以下に設定した部屋に移動させて管理した。

子実体の収穫は，子実体の内皮膜が破れる直前に行った。調査は 1 番収穫までとし，ビンの口より上部の生質量を 0.1 g 括約で測定し，これを 1 供試ビンあたりの収量として記録した。併せて，発生処理から収穫までの日数（以下生育日数）を記録した。

5. 培地調整と種菌の接種　各試験培地の殺菌前と殺菌後の培地 pH を測定した。試験培地ごとに栽培試験の供試ビン 32 本のほかにサンプルを用意した。サンプルから培地を 100 mL コニカルビーカーに 10 g 秤量し，そこに蒸留水を 50 mL 加え，5 分間ホットプレートスターラーで攪拌し，室温で 60 分間静置した後，上澄み液の pH を pH メーター（株式会社堀場製作所, LAQUA F-72）で測定した（表–1）。

6. 統計解析　廃菌床による培地基材の置換率がナメコの 1 供試ビンあたりの収量に与える効果を評価するため，一般化線形モデル（以下 GLM）で解析した。GLM 解析のパラメータはベイズ推定した。なお，炭カル添加の有無と栽培試験の実施日の違いが交絡していることから，解析は二つの栽培試験ごとに行った。応答変数には害菌による汚染等の被害がなく，収穫に至った供試ビンの，1 供試ビンあたりの収量を使用した。説明変数には試験培地の違い（一つ目の栽培試験：0，10，20，30，40，55，および 75%置換の 7 区分の質的データ，二つ目の栽培試験：0%置換，0，10，20，30，40，および 55%置換

&炭カルの 7 区分の質的データ）を使用した。

ベイズ推定の MCMC のサンプリング設定は，バーンイン回数を 1,000 回，乱数生成の繰り返し数を 2,000 回，チェーン数を 4 本, 事前分布には無情報分布を適用した。また，応答変数の誤差構造は正規分布，リンク関数は identity とした。モデルの収束判断は収束指標である Rhat が 1.1 未満であることにより行った。なお，説明変数の効果は，95%信用区間にゼロを含まない場合に統計学的に有意であると判断した。

7. 使用した統計解析ソフトウェア　GLM 解析は R version 4.4.0(*6*)の brms パッケージの brms 関数(*2*)で行い，Stan version 2.23(*8*)を使用してベイズ推定した。

表–1.　栽培試験の培地条件（上：一つ目，下：二つ目）
Table 1 Conditions for cultivation trials (top: 1st test, bottom: 2nd test)

試験培地	培地基材 (g, 乾燥質量)		栄養材 (g, 乾燥質量)	添加材 (g, 乾燥質量)
	コナラ	エノキタケ廃菌床	特ふすま	炭酸カルシウム
0%置換 (対照群)	157.56	0.00	45.74	0.00
10%置換	141.80	18.64	45.74	0.00
20%置換	126.05	37.29	45.74	0.00
30%置換	110.29	55.93	45.74	0.00
40%置換	94.53	74.57	45.74	0.00
55%置換	70.90	102.54	45.74	0.00
75%置換	39.39	139.83	45.74	0.00
0%置換 (対照群)	157.56	0.00	45.74	0.00
0%置換&炭カル	157.56	0.00	45.74	2.03
10%置換&炭カル	141.80	18.64	45.74	2.03
20%置換&炭カル	126.05	37.29	45.74	2.03
30%置換&炭カル	110.29	55.93	45.74	2.03
40%置換&炭カル	94.53	74.57	45.74	2.03
55%置換&炭カル	70.90	102.54	45.74	2.03

試験培地	水道水 (g)	充填量 (g)	含水率 (%, 湿量基準)	培地pH		*n*
				殺菌前	殺菌後	
0%置換 (対照群)	331.70	535	62.00	5.516	5.132	32
10%置換	336.41	543	62.00	5.763	5.710	32
20%置換	341.12	550	62.00	5.728	5.646	32
30%置換	345.84	558	62.00	5.688	5.603	32
40%置換	350.55	565	62.00	5.635	5.555	32
55%置換	357.61	577	62.00	5.558	5.527	32
75%置換	367.04	592	62.00	5.562	5.555	32
0%置換 (対照群)	331.70	535	62.00	5.414	5.131	32
0%置換&炭カル	335.02	540	62.00	6.229	5.969	32
10%置換&炭カル	339.73	548	62.00	5.720	5.779	32
20%置換&炭カル	344.44	556	62.00	5.461	5.646	32
30%置換&炭カル	349.15	563	62.00	5.467	5.574	32
40%置換&炭カル	353.86	571	62.00	5.445	5.586	32
55%置換&炭カル	360.93	582	62.00	5.357	5.584	32

III　結果

1. 栽培試験の結果　一つ目の栽培試験における 1 供試ビンあたりの収量は，10%置換で最も大きく，次いで 20，30，40，0，55，75%置換の順に大きかった（表–2）。生育日数は，30%置換で最も短く，次いで 20，10，40，0，55，75%置換の順に短かった（表–2）。二つ目の栽培試験における 1 供試ビンあたりの収量は，20%置換&炭カルで最も大きく，次いで 10，0，30，40%置換&炭カル，0%置換，55%置換&炭カルの順に大きかった（表–2）。生育日数は，10%置換&炭カルで最も短く，次いで 20，0，30，40%置換&炭カル，0%置換，55%置換&炭カルの順に短かった（表–2）。

2. GLM 解析の結果　GLM 解析の Rhat はすべてのモデルで 1.1 未満であり，MCMC は収束したと判断した。

一つ目の栽培試験における収量を応答変数とした GLM 解析の結果，10，20，30，および 40%置換は，0%置換に対して有意な正の効果があった。一方で，55，および 75%置換は, 0%置換に対して有意な負の効果があった（表–3）。二つ目の栽培試験における収量を応答変数とした GLM 解析の結果，0，10，20，30，および 40%置換&炭カルは，0%置換に対して有意な正の効果があった。一方で，55%置換&炭カルは，0%置換に対して有意な負の効果があった（表–3）。

IV　考察

二つの栽培試験ともに，0%置換に対して，置換率 10，20，30，および 40%は有意に収量が大きく（表–3），特に置換率 10，および 20%は，二つ目の栽培試験の 0%置換&炭カルよりも収量が大きいうえ，生育日数にほとんど違いがなかった（表–2）。一方で, 二つの栽培試験ともに，0%置換に対して，置換率 55%は有意に収量が小さく（表–3），一つ目の栽培試験の 75%置換においては，収穫に至らない供試ビンが多数存在した（表–2）。各試験培地の

表–2.　各試験培地の収量と生育日数（上：一つ目，下：二つ目）
Table 2 Yield and number of growing days for each test medium (top: 1st test, bottom: 2nd test)

試験培地	収量 (g/ビン)		生育日数 (日)		*n*
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
0%置換 (対照群)	111.37	4.37	16.09	0.39	32
10%置換	164.18	7.58	15.34	0.48	32
20%置換	161.98	10.25	15.32	0.48	31
30%置換	142.98	14.07	15.23	0.43	31
40%置換	128.31	12.21	15.74	0.44	31
55%置換	81.08	15.57	16.44	0.72	32
75%置換	39.39	6.91	20.55	1.57	11

試験培地	収量 (g/ビン)		生育日数 (日)		*n*
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
0%置換 (対照群)	116.18	4.42	16.28	0.46	32
0%置換&炭カル	158.49	9.76	15.25	0.44	32
10%置換&炭カル	165.27	5.08	15.00	0.00	32
20%置換&炭カル	171.17	7.47	15.09	0.47	32
30%置換&炭カル	152.54	10.76	15.31	0.47	32
40%置換&炭カル	133.99	15.15	16.03	0.69	32
55%置換&炭カル	67.83	11.59	18.94	2.83	32

20，30，40%置換の各 1 供試ビンは，培地調整時の培地充填量が設計より多いと考えられたためデータから除外した。
One sample each of 20, 30, and 40% replacement rate was excluded from the data because it was considered that the amount of medium filled during medium preparation was higher than designed.

殺菌後の pH はすべて，ナメコの菌糸成長に好適な範囲（4.6～6.0）内であった。また本研究で使用した廃菌床の主原料であるコーンコブミールは，ナメコ菌床栽培において，培地基材の容積率 25，および 50%で置換するとわずかに増収し，一方で，75，および 100%で置換すると減収した(*1*)との報告がある資材である。

廃菌床の置換率 10，および 20%で大きく増収した理由として，他の置換率の試験培地よりも廃菌床に残っていた栄養を利用しやすかった可能性がある。コーンコブミールを培地基材としたエノキタケ菌床栽培において，コーンコブミールはエノキタケが培地内に生産したセルラーゼやキシラーゼによりコーンコブミールが分解されることで，培地基材の役割だけでなく栄養源として利用される(*7*)との報告がある。しかしながら，エノキタケは栽培日数の短いきのこのひとつであり，本研究に使用した廃菌床には，エノキタケが利用できなかったコーンコブミール由来の栄養が残っていたと考えられる。

一方で，廃菌床の置換率が 20%から大きくなるにつれて減収した理由として，高圧殺菌後，廃菌床が膨張し，培地の空隙が小さくなったことが影響した可能性がある。本研究で使用したものと同じ廃菌床をエノキタケ菌床栽培の培地基材として利用できるか検証した際，培地基材のスギおが粉の 100%を廃菌床で置換したところ，高圧殺菌後に接種孔が塞がるほど膨張した(清水私信)。培養工程において，栽培ビン内の煙突効果によりビン内部と外部の空気が循環する(*5*)が，置換率が大きくなると廃菌床が膨張したことによって培地の空隙が小さくなり，栽培ビン内の空気の循環が十分にされず，ナメコの菌糸成長が阻害され，減収につながった可能性がある。

ナメコ菌床栽培において，消石灰や炭カルなどの添加により増収効果が認められており(*3*)，本研究においても炭カル添加の効果を検証した。その結果，0%置換と比較し，0%置換&炭カルでは約 40 g 増収したものの，他の試験培地では増収したり減収したりと炭カル添加の効果が一定でなかった。このため，炭カルの添加量の調整により増収するかどうか検証することが今後の課題である。

以上のことから，コナラおが粉を培地基材としたナメコ菌床栽培において，コーンコブミール培地のエノキタケ廃菌床は，置換率 10，20，30，および 40%であれば利用でき，特に置換率 10，および 20%だと有用な置換材として利用できることがわかった。

謝辞：エノキタケ廃菌床を提供いただいた有限会社マッシュ小林には，この場を借りて深く感謝申し上げる。

引用文献

(1) 阿部一好・本間広之 (2001) ナメコ菌床栽培技術の改善（I） - 培地基材としてコーンコブミールの検討 - . 新潟森林研報 43: 61-63

(2) Bürkner PC (2017) brms: An R package for Bayesian multilevel models using Stan. J Stat Softw. 80: 1-28

(3) 木村栄一 (2014) ナメコ栽培の Q&A. 改訂版最新きのこ栽培技術（大橋等編）: 310-315. 株式会社プランツワールド

(4) 村上重幸 (2014) 近年のきのこ栽培品種開発の方向. 改訂版最新きのこ栽培技術（大橋等編）: 18-22. 株式会社プランツワールド

(5) 中村公義 (2000) エノキタケ. きのこハンドブック（衣川堅二郎，小川眞編）: 68-76. 朝倉書店

(6) R Core Team (2024) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria

(7) 城石雅弘・西澤賢一・野﨑功一・天野良彦・神田鷹久 (2005) エノキタケの栽培と子実体特性に及ぼす培地成分の影響. J. Appl. Glycosci. 52: 133-136

(8) Stan Development Team (2020) Stan: A C++ Library for Probability and Sampling, Version 2.23

(9) 寺嶋芳江 (2014) 多様化する培地材料の特徴と利用. 改訂版最新きのこ栽培技術（大橋等編）: 29-36. 株式会社プランツワールド

表–3. 各試験培地の収量を応答変数とした GLM 解析の結果（上：一つ目，下：二つ目）

Table 3 Results of GLM with yield of each test medium as response variable (top: 1st test, bottom: 2nd test)

項目	事後期待値	事後標準偏差	95%信用区間 下限	95%信用区間 上限
Intercept (0%置換)*	111.28	2.04	107.35	115.38
10%置換*	52.90	2.91	47.19	58.77
20%置換*	50.71	2.93	44.92	56.62
30%置換*	31.72	2.91	25.83	37.49
40%置換*	17.05	2.87	11.47	22.77
55%置換*	-30.20	2.85	-35.70	-24.55
75%置換*	-71.91	3.95	-79.79	-64.18

項目	事後期待値	事後標準偏差	95%信用区間 下限	95%信用区間 上限
Intercept (0%置換)*	116.17	1.76	112.68	119.59
0%置換&炭カル*	42.34	2.42	37.63	47.06
10%置換&炭カル*	49.08	2.49	44.15	54.08
20%置換&炭カル*	55.00	2.45	50.30	59.70
30%置換&炭カル*	36.35	2.50	31.48	41.27
40%置換&炭カル*	17.80	2.48	12.88	22.78
55%置換&炭カル*	-48.35	2.49	-53.25	-43.38

単位は g。
*が付いた項目は，95%信用区間にゼロを含まないことを示す。
Units are in g.
Items marked with * indicate that the 95% CI did not include zero.

速　報

関東森林研究　76-1 (2025)

ふもとっぱらにおけるブッシュクラフトイベントの可能性

－東京農業大学学生対象のアンケートを事例として－

佐藤孝吉[1]・竹田悠悟[1]

[1]東京農業大学地域環境科学部

要旨：ふもとっぱらは，静岡県富士宮市麓に位置し，年間 20 万人以上が訪問する体験型宿泊施設である。本論文は，ブッシュクラフトによる森林空間の活用を検討するために，ふもとっぱらを訪問した森林総合学科 1 年生 146 名にアンケート調査を実施した。キャンプへの興味「あり」，「なし」で分類し比較検討した。キャンプに興味「あり」の回答者は，「なし」の回答者よりブッシュクラフトによる野外活動へと展開する可能性があると判断した。

キーワード：ブッシュクラフト，ふもとっぱら，アンケート調査，イベント

Possibilities for bushcraft events in Fumotoppara: A case study of Tokyo University of Agriculture students

Takayoshi SATO[1], Yugo TAKEDA[1]

[1]Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

Keywords: Bush craft, Fumotoppara, Questionnaire survey, Event

Ⅰ　はじめに

ブッシュクラフトは，「ブッシュ＝やぶ」と「クラフト＝工芸」を組み合わせた造語で，「ブッシュクラフト＝生活の知恵，森と生きる知恵」（技術）とし，より自然と一体になれるアウトドアのスタイル（考え方や活動そのもの）である(*1*)。森林空間はブッシュクラフトの活動の場として最適であり，キャンプ活動との親和性も強い。しかしながら，山火事や立木の損傷など，生産機能や公益的機能への悪影響をおよぼすことなく活用するためには，一定のルールを作成し，遵守するようなシステムが必要不可欠である。イベントは，出来事や事柄，様々な種類の催し物を意味し，ここではキャンプ場で実施する催し物とする。ブッシュクラフトのイベントは，限られた道具を活用した自然との共生のための手法や技術を習得することであり，森林を活用したアウトドアスタイルへと展開すると考えた。本論文では，キャンプ場におけるブッシュクラフトに注目し，イベントの可能性についてアンケート調査により検討することにした。

Ⅱ　調査地および調査方法

ふもとっぱらは，静岡県富士宮市麓に位置し，年間 20 万人以上が訪問する「毛無山の多様な森林と富士山を望む美しい風景に恵まれた広大なキャンプフィールドをベースとした体験型宿泊施設である」(*4*)。林業という生業を主軸としながら，木材生産，木質エネルギー利用，農業，ジビエ，森林空間を利用したキャンプ場運営などを行っている(*3*)。2005 年に法人化し，2006 年にキャンプ場を開設，2019 年には木質バイオマスボイラーやシカ肉処理場を導入するなどしている。

ふもとっぱらの土地利用形態は，入退場など管理可能な平坦な場所にキャンプ場があり，その周りが人工林（250 ha），比較的急傾斜地は，天然林（440 ha）となっている。森林空間利用のイベントは，登山，マウンテンバイクなどが実施されている。

ふもとっぱらに学外研修で訪問した東京農業大学森林総合科学科 1 年生 146 名を対象にアンケート調査を実施し，142 名（回答率 97.3%）から回答が得られた。学科の特徴から回答者は森林に興味「あり」とし，キャンプへの興味の有無でさらに分類した。

ブッシュクラフトのマニュアル(*3*)を参照し，イベントを基礎編（ナイフワーク，火おこし，ロープワーク），発展編（シェルターづくり，薪割り，カラトリーなど道具の制作），応用編（生活へと応用した焚火料理，食料確保，水の確保），知識編（情報として不可欠な野外生活や動植物の特徴や同定）として質問項目を設定した。

Ⅲ　調査結果

１．キャンプへの興味による分類　回答者のキャンプ

（受理日 2025 年 1 月 6 日）

の実施状況により，キャンプに「興味あり」33 名（全体の 23.2%），「興味なし」109 名（76.8%）とした（表-1）。

表-１．キャンプへの興味について

興味	キャンプ実施	N	%	N	%
あり	はい	9	6.3	33	23.2
	ときどき	24	16.9		
なし	めったに	36	25.4	109	76.8
	いいえ	73	51.4		
合計		142	100	142	100

２．イベントの展開過程　イベント参加への回答（表－2）は，焚火料理（67.6%），動植物の特徴や行動（50.0%），火起こし（48.6%），薪割り（47.9%），食料になる動植物の同定（40.1%）が多かった。動植物の特徴や行動，動植物の同定など知識編については，キャンプへの興味の有無にかかわらず多かった。キャンプに興味「あり」の回答者は，全般的に積極的に参加する傾向であり，ロープワーク，水の確保，シェルターづくり，ナイフワークなどブッシュクラフトの応用編への回答が比較的多かった。キャンプに興味「なし」の回答者は，森林の知識と関連する動植物の特徴・行動（52.3%）への回答が多かったが，比較的消極的な参加傾向であった。

３．イベントの実施方法　イベントの実施方法は，友人同士（68.3%），できるだけ少数（48.6%）か入退場自由（37.3%），2 時間（23.9%）から半日程度（25.4%），金額は，無料（39.4%）や 1,000 円（38.7%）への回答が多かった。実施場所は，歩きやすい平地（41.5%）や植生が多く繁茂（24.5%）が多かった。できるだけ労働力や費用をかけずに実施するのが現実的であると判断した。

Ⅳ　まとめ

イベントの実施は，火起こし，薪割り，道具の制作など全般的に興味のある内容を導入編とし，ロープワーク，ナイフワーク，シェルターづくりなどブッシュクラフトの基本編へと展開するのが良いと考える。水や食料の確保や焚火料理の応用編をとおして野外での生活へと展開するのが適当ではないかと考察した。野外生活の基本，動植物の特徴や行動や同定などの知識編は，ブッシュクラフトにかかわらず森林全般の理解へとつながると考えた。いくつかの段階を考慮すると，参加者のニーズによっていろいろなイベントを計画することになる。

イベントを通して，ブッシュクラフトというスタイルのアウトドアを知ってもらう機会の創出することで新しい森林空間利用の具体的な方法へとつながる。実施方法は，キャンプ施設の労働力，予算の余裕があるときが現実的で，内容は地域の特徴や経営方針によって異なると思われ，今後の課題とする。

謝辞：本調査にご協力いただいた株式会社ふもとっぱらおよびアンケート回答者にお礼申し上げる。

引用文献

(1) ブッシュクラフト株式会社：ブッシュクラフトとは. https://bushcraft.co.jp/ (2024 年 9 月参照)
(2) ふもとっぱら：ふもとっぱらについて. https://fumotoppara.net/about/ (2024 年 9 月参照)
(3) 川口拓 (2016) ブッシュクラフト. 大人の野遊びマニュアル: 4-20
(4) 松崎誠司 (2022) キャンプ場から拡がる新しい森林利用の可能性. 山林 1661: 26-33

表-2.「ふもとっぱら」で参加したい自然体験イベント

（複数回答）

分類	内容	キャンプ興味あり N	キャンプ興味あり %	キャンプ興味なし N	キャンプ興味なし %	合計 N	合計 %	% (あり-なし)	χ^2
基礎編	①火起こし	18	54.5	51	46.8	69	48.6	7.8	0.61
	②ナイフワーク	16	48.5	39	35.8	55	38.7	12.7	0.17
	③ロープワーク	13	39.4	24	22.0	37	26.1	17.4	3.97 *
発展編	④道具の制作（ｶﾗﾄﾘｰ、ﾍﾞﾝﾁ）	14	42.4	37	33.9	51	35.9	8.5	0.79
	⑤薪割り	18	54.5	50	45.9	68	47.9	8.7	0.76
	⑥シェルターづくり	10	30.3	18	16.5	28	19.7	13.8	3.04
応用編	⑦焚火（たきび）料理	25	75.8	71	65.1	96	67.6	10.6	1.02
	⑧食料確保の方法	13	39.4	32	29.4	45	31.7	10.0	1.18
	⑨水の確保	13	39.4	27	24.8	40	28.2	14.6	2.68
知識編	⑩野外生活の基本	12	36.4	33	30.3	45	31.7	6.1	0.43
	⑪動植物の特徴・行動	14	42.4	57	52.3	71	50.0	-9.9	0.09
	⑫食料になる動植物同定	14	42.4	43	39.4	57	40.1	3.0	0.17
	⑬その他	1	3.0	1	0.9	2	1.4	2.1	

速　報

デジタル航空写真によるスギ林の林分パラメータの広域推定手法の開発

小谷英司[1]・田中真哉[1]
[1]森林総合研究所

要旨：低コストな森林資源量の広域把握のために，デジタル航空写真によるスギ林の林分パラメータの広域推定手法を開発した。対象地は青森県深浦町とし，プロット30箇所を計測し，平均樹高等の林分パラメータを集計した。デジタル航空写真を写真測量解析して表面高を算出し，航空レーザ計測による地盤高との差分から，林冠高を作成した。林冠高による平均，最大，標準偏差の指数と，林分パラメータとを回帰分析した。決定係数から最も当てはまりの良い指数は，平均樹高，林分材積，平均直径，炭素蓄積量に対しては林冠高平均であった。
キーワード：デジタル航空写真，スギ林，林分パラメータ，広域推定

Developing a large-scale estimation method for Sugi forest stand parameters using digital aerial photography

Eiji KODANI[1], Shinya TANAKA[1]
[1]Forestry and Forest Products Research Institute

I　はじめに

国内の針葉樹人工林は成熟し，森林管理や収穫調査のために，森林資源量について様々な計測手法の開発が行われている。近年，航空レーザ計測による森林資源把握が，国や多くの地方自治体で行われており、民有林の 3 割に達している(*3*)。しかし，航空レーザ計測は非常に高額であるために，特に航空レーザ計測後に低コストな森林情報の更新手法開発が社会的に要望されている。

本論の目的は，デジタル航空写真によるスギ林の林分パラメータの広域推定手法の開発と，航空レーザ計測との比較によるデジタル航空写真の特徴の把握，とした。

II　材料と方法

1．対象地と地上調査　対象地は青森県深浦町とした。県有林のスギ林に半径 12 m の円形プロット 30 箇所を設定し，直径と樹高を計測し，プロット単位で平均樹高，林分材積，炭素蓄積量等の林分パラメータを集計し，炭素蓄積量は京都議定書での算定式により算出した（*2*; 表-1）。プロットの中心位置は，GNSS の Mobile Mapper120（Spectra 社）により測量した。

表–1.　調査プロットの概要（n=30）

	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	林分材積 (m^3/ha)	本数密度 (本/ha)	炭素蓄積量 (ton/ha)
平均	32.6	23.7	999	1095	250
最大	45.8	30.9	1421	2236	355
最小	16.6	11.4	337	464	84.4

2．航空レーザ計測　青森県の砂防事業における精密地形計測のために，「砂基委第 1-4 号 令和 2 年度 土砂災害防止法に基づく基礎調査航空レーザ測量業務委託」により取得されたデータを用いた。この中から，地盤高 DTM（Digital Terrain Model）とレーザ計測の点群データを用いて表面高 DSM（Digital Surface Model）を作成し，その差分から，航空レーザの林冠高 DHM（Digital Height Model）を算出した。

3．写真測量による解析　青森県のマツ枯れ対策のために「R01 年度深浦鯵ヶ沢地区デジタルオルソ作成業務」で撮影されたデジタル航空写真を用いた。GNSS で撮影位置が測量されたデジタル航空写真を，写真測量ソフトウェア Metashape（Agisoft 社）で解析し，表面高 DSM を算出した。航空レーザ測量の地盤高 DTM と，航空写真の表面高 DSM の差分から，航空写真の林冠高 DHM を作成した。

航空写真の林冠高 DHM と，地上プロット調査を重ね合わせて目視判読した。この結果，地上プロット内において，単木判読が一部の高齢林では可能だが，大多数の若齢林や壮齢林では難しいと評価した。このため単木単位ではなく，林分単位の分析方法を採用した。

4．林分単位での分析法　航空レーザと航空写真の林冠高 DHM から，一般的な GIS によりプロット単位で集計できる指数として，平均，最大，標準偏差を算出した(*1*)。これらの指数と林分パラメータの決定係数から，最も当てはまりのよい指数を選択して，広域推定に用いた。

III　結果と考察

1．林分パラメータに対する航空レーザと航空写真の

（受理日 2025 年 1 月 17 日）

林冠高指数の決定係数　林分パラメータに対して航空レーザと航空写真の林冠高指数を回帰分析した決定係数を表にまとめ（表-2），最も決定係数が大きい指数を選択した。航空レーザの決定係数は，平均樹高，林分材積および炭素蓄積量に対して，指数の林冠高平均が最も大きく，一方で，平均直径と本数密度に対しては，指数の林冠高最大が最も大きかった。航空写真も，航空レーザとほぼ同様の結果であるが，平均直径に対しては指数の林冠高平均の決定係数が最も大きい点のみが異なった。

林分パラメータの中で重要な平均樹高について，最も決定係数の大きい航空写真の林冠高平均との散布図を示した（図-1）。回帰式と林冠高データから，平均樹高の広域推定地図を作成した（図-2）。

表–2.　林分パラメータに対する航空レーザと航空写真の林冠高指数の決定係数

(a) 航空レーザ指数			
指数	最大	平均	標準偏差
平均直径(cm)	**0.761**	0.656	0.639
平均樹高(m)	0.769	**0.846**	0.497
林分材積(m^3/ha)	0.426	**0.631**	0.189
本数密度 (本/ha)	**0.807**	0.642	0.642
炭素蓄積量 (ton/ha)	0.426	**0.631**	0.189
(b) 航空写真指数			
指数	最大	平均	標準偏差
平均直径(cm)	0.767	**0.772**	0.308
平均樹高(m)	0.795	**0.917**	0.131
林分材積(m^3/ha)	0.507	**0.631**	0.065
本数密度 (本/ha)	**0.746**	0.741	0.288
炭素蓄積量 (ton/ha)	0.507	**0.631**	0.065

＊決定係数が最も大きい指数を太字にした

航空レーザ指数の林冠高平均は単純な指数であるが，林分材積や平均樹高などの推定に有効であり(*1*)，本論でも航空レーザと航空写真の分析で有効である（表-2）。まとめると，航空レーザ計測と航空写真という異なる計測手法であっても，林冠高という森林の高さを用いる分析は有効であり，汎用性が高い。

2. 航空レーザ計測と航空写真の比較　国内では，航空レーザ計測による森林資源把握が各自治体で進められているが(*3*)，航空レーザ計測は高額であるために，森林資源情報の更新が今後大きな問題となる。本論の分析方法は林分単位であるけれども，航空レーザ計測と航空写真とで回帰分析した結果の決定係数は，ほぼ同程度である（表-2）。航測会社等からの聞き取り調査によると，航空レーザ測量の地形計測は 10-20 万円/km^2 であり，一方で，デジタル航空写真撮影は 8 千円/km^2 と航空レーザ測量の 1/10 以下である。ただし，航空写真は地盤高 DTM が把握できないので，撮影前に航空レーザによる正確な地盤高 DTM の計測完了が，本論のような林冠高 DHM の分析の前提条件となる。これらの条件と本論の結果を総合的に検討すると，特に航空レーザ計測が行われた箇所で，広域での低コストな森林資源情報の更新に，デジタル航空写真は非常に有効であると結論する。

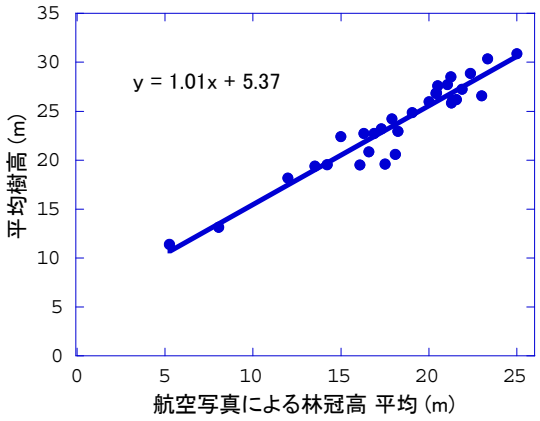


図-1.　航空写真の林冠高平均と平均樹高の散布図

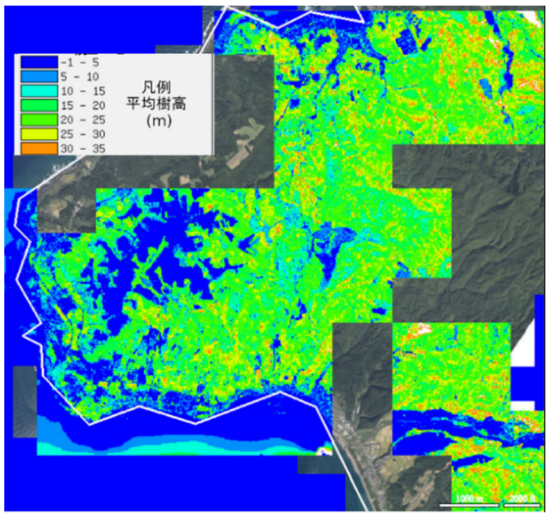


図-2.　航空写真の林冠高平均による平均樹高の推定地図 (地盤高が未計測のためブロック単位で一部欠ける)

謝辞：本研究の一部は，青森県の委託研究「低コストな森林計測手法の確立」により実施した。

引用文献

(1) 小谷英司, 栗屋善雄 (2013) 低密度 LiDAR データによる人工針葉樹林の林分パラメータの推定. 写真測量とリモートセンシング 52(2): 44-55.

(2) 日本国 (2009) 京都議定書３条３および４の下での LULUCF 活動の補足情報に関する報告書, 日本国, 東京, 66pp.

(3) 林野庁 (2021) 林業白書. 林野庁，東京，331pp.

速報

スギ特定母樹の自然交配種子から育成した苗木の植栽後の生育特性

前川直人[1]・宇都木景子[1]・鈴木孝典[1]
[1]茨城県林業技術センター

要旨：スギ特定母樹の種子を育成した苗木（特定苗木）の生育特性を明らかにするため，茨城県常陸太田市，石岡市及び高萩市の試験地に特定苗木と少花粉品種由来の苗木（対照）を植栽し，植栽木の成長量と下草との競合状態を調査した。常陸太田市の試験地では，特定苗木の樹高成長量は対照より良好であったが，石岡市及び高萩市の試験地で有意な差は見られなかった。原因として，石岡市の試験地は特定苗木の生育に適していなかった可能性があること，高萩市の試験地は植栽木が下草に被圧され，特定苗木の生育特性が発揮されないことが考えられた。
キーワード：造林，特定母樹，特定苗木，競合植生

Post-outplanting growth of *Cryptomeria japonica* saplings produced from open pollinated seeds of specified mother trees

Naoto MAEKAWA[1], Keiko UTSUGI[1], Takanori SUZUKI[1]
[1]Ibaraki Prefectural Forestry Research Institute

I　はじめに

茨城県の民有林における人工林の約 7 割が 11 齢級以上の主伐期に達しており，本格的に利用期を迎えている(*1*)。次世代への持続的な林業の継承を考えると，伐採跡地への再造林は不可欠である。そのためには，再造林の各工程等に要する費用の大きな割合を占め，非常に過酷な作業でもある下刈作業の省力化・軽労化を進めることで，費用や労働力の負担軽減を図ることが急務である(*2*)。このような中，特定母樹から採取された種穂から育成された苗木は従来の苗木と比べて成長などに優れることから，下刈期間の短縮による育林費用の削減が期待されており(*3*)，本県では，全国に先駆けてスギ特定母樹採種園を整備するとともに，自然交配種子を育成した苗木(以下，特定苗木)を 2021 年に初出荷し，山林への植栽を始めている。その一方で，特定苗木の生育特性に関する知見は少ない。そこで，本研究では特定苗木を山林へ植栽した際の生育特性を明らかにするため，生育状況調査を行った。

II　調査の概要

1. 試験地　試験地を茨城県常陸太田市，石岡市及び高萩市（以下，常陸太田試験地，石岡試験地及び高萩試験地）に設定した。試験地の概要は表–1 に示すとおりである。なお，年平均気温，年平均降水量は最寄りの気象観測所（石岡試験地：アメダス土浦観測所，常陸太田試験地及び高萩試験地：アメダス大子観測所)のものである。各試験地において特定苗木を植栽するとともに，対照として，県内で広く普及しているスギ少花粉品種の種子を育成した苗木（以下，少花粉苗木）を植栽した。常陸太田試験地では，特定苗木と少花粉苗木の 2 つの試験区（3,000 本/ha）を，石岡試験地，高萩試験地では試験地内に植栽密度の異なる複数の試験区 (特定苗木：3,000 本/ ha，2,000 本/ ha，1,500 本/ ha，1,000 本/ ha 少花粉苗木: 3,000 本/ ha，2,000 本/ ha）を設置し，試験区毎に 36 本の調査対象木を選定した。なお，石岡試験地，高萩試験地では苗木の種類による差以外の要因を可能な限り排除するため, 植栽環境が比較的近い試験区間で比較を行った。

表–1.　試験地の概要

場　所	標　高	年平均気温	年平均降水量	植栽年月
常陸太田市	約 650 m	12.6 ℃	1,451.3 mm	2021 年 3 月
石　岡　市	約 250 m	14.8 ℃	1,229.3 mm	2021 年 3 月
高　萩　市	約 720 m	12.6 ℃	1,451.3 mm	2022 年 3 月

2. 調査項目　毎年，成長停止期の 12 月に樹高を計測し，その結果から年間成長量を算出した。有意差検定は Welch の t 検定により行った。また，競合植生調査について，植栽木 1 本ごとに山川ら(*4*)の判定基準を基に C1~C4 で評価し, C4 の割合を下草による被圧度合いの基準として用いた。

(受理日 2024 年 12 月 16 日)

III　結果と考察

1. 常陸太田試験地　植栽 3 年目において，特定苗木は少花粉苗木と比較し，成長量が良好であった（図-1）。また，全体的に C4 率は低く，被圧による影響は小さい状態であった。本試験地の前生樹種はスギであり，下草は 1 m 前後のキイチゴ類や草本類等の草丈が低いものが多く，苗木が被圧を受けにくい状態であった。本試験地は一貫作業システムにより植栽されており，皆伐，地拵え，植栽が同時に行われたため，下草が繁茂する前に植栽することができ，結果として特定苗木の生育特性が発揮され，苗木が良好に生育したと考えられる。

2. 石岡試験地　植栽 3 年目において，特定苗木，少花粉苗木間の成長量に有意な差は見られなかった。また，全体的に C4 率は低く，被圧の影響は小さい状態であった（図–2）。本試験地の前生樹種はヒノキであり，周辺環境もヒノキ林である。前生樹種がヒノキの場合，前生樹種がスギの場合と比較して植栽したスギの苗木の成長が悪いことが最近の研究で示唆されており(5)，本試験地で 2 種間の成長量に差が生じなかった原因の 1 つではないかと考えられる。また，本試験地では，下草は 1 m 前後のキイチゴ類や木本類が多く，草丈は全体的に低い傾向にあった。ヒノキの適地は全体的に乾燥気味であることから，そのことにより下草の生育が抑えられ，全体的に草丈が低めであったと考えられる。

3. 高萩試験地　植栽 2 年目において，特定苗木，少花粉苗木間の成長量に有意な差は見られなかった。また，全体的に C4 率は高く，被圧の影響は大きい状態であった（図–3）。本試験地の前生樹種はスギであり，特定苗木の生育適地である可能性が高いと考えられるものの，一貫作業システムによる植栽ではないため，下草は草丈 2 m を超える広葉草本類が優占しており，植栽木が被圧を受けやすい状態であった。このことから，一貫作業システム等により初期に下草の繁茂を防げなかった場合は，スギの生育適地であっても下草の被圧を受け，特定苗木の特性が発揮されないことがあると考えられる。

引用文献

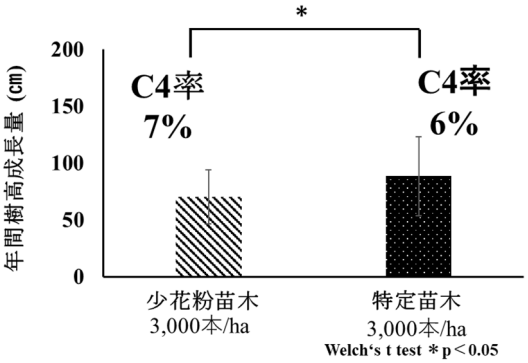
(1) 茨城県: 茨城県森林・林業の動き. https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/rinsei/kikaku_index/shinrin-ringyou/index.html (2024 年 11 月 10 日参照)

(2) 林野庁: 令和 5 年度森林・下刈作業省力化の手引き-下刈機械の導入と大苗植栽の視点から-. https://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/houkokusho/attach/pdf/syokusai-17.pdf (2024 年 11 月 11 日参照)

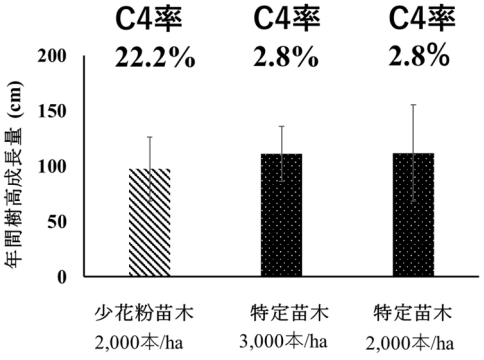
(3) 林野庁: 令和 5 年度森林・林業白書.https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r4hakusyo/attach/pdf/zenbun-41.pdf (2024 年 11 月 11 日参照)

(4) 山川博美・重永英年・荒木眞岳・野宮治人 (2016) スギ植栽木の樹高成長に及ぼす期首サイズと周辺雑草木の影響. 日林誌 98: 241-246

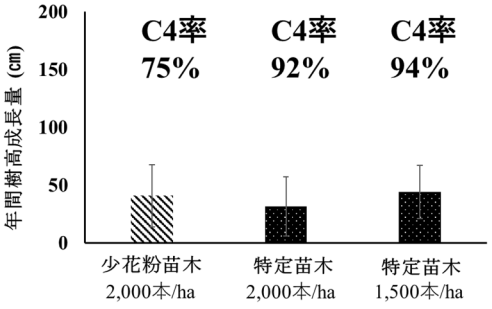
(5) 山野邉太郎・大平峰子・千葉一美・永野聡一郎・坪村美代子・高島有哉・宮下久哉・楠城時彦・加藤一隆・高橋誠 (2022) スギの第二世代精英樹候補木を母樹とするコンテナ苗の初期成長に及ぼす出荷規格の影響. 関東森林研究 73: 49-52



図–1. 常陸太田試験地の植栽 3 年目の樹高成長量と C4 率



図–2. 石岡試験地の植栽 3 年目の樹高成長量と C4 率



図–3. 高萩試験地の植栽 2 年目の樹高成長量と C4 率

速　報

関東森林研究　76-1 (2025)

仕様の異なるカメムシ防除袋がスギ種子の発芽率に与える影響

室紀行[1]

[1]埼玉県寄居林業事務所森林研究室

要旨：スギ種子の発芽率はカメムシ害により低下するが，その防除のために防除袋を施用すると夏季の高温により発芽率が低下する場合がある。そこで仕様の異なる 3 種類の防除袋をスギ採種木に施用し，発芽率への影響を評価した。その結果，発芽率を上昇させる効果は不織布袋より 1.0 mm 目の袋で大きかった。カメムシ害と高温環境を同時に防除するためには，適切な防除資材を使用する必要があると考えられる。

キーワード：ミニチュア採種園，球果，害虫，チャバネアオカメムシ，高温

The effect of different protect bags on germination rate of *Cryptomeria japonica*

Noriyuki MURO[1]

[1]Saitama Prefecture Yorii Forestry Office Forest laboratory

I　はじめに

スギ種子の発芽率は種子食性カメムシの吸汁加害により低下する(*1*)。その防除手法として枝の袋がけ処理が知られているが，枝の袋がけ処理には夏季の枝温度を上昇させる作用があり，この高温が原因と考えられる種子発芽率の低下が観察された事例がある(*2*)。枝温度の上昇の程度は防除袋の仕様により異なるが(*3*)，袋の仕様の相違による種子発芽率の変化は直接調べられていない。そこで本研究では，既往研究の少ない防除袋の仕様と枝温度との関係について追加調査を行うともに，防除袋の仕様が発芽率に与える影響を評価した。

II　材料と方法

1. 調査地　本研究は，埼玉県寄居林業事務所上の原採種園（埼玉県大里郡寄居町鉢形地内，標高約 120 m）のスギミニチュア採種園で実施した。

2. 試験区配置　採種木 3 個体を利用し，球果が着生した供試枝を 40 本選定した。供試木は 19 年生接ぎ木個体であり，クローンはすべて群馬 4 号とし，供試枝は西面，南面および東面から選定した。2023 年 5 月 10 日に 3 種類の仕様が異なる防除袋を各 10 本計 30 本の供試枝に施用し，残る 10 本の枝は袋を施用せず無処理とした。使用した袋資材はポリエチレン製不織布袋（20 cm×40 cm，モリフジ有限会社製，以下不織布袋）およびポリエチレン製ネット（目合い 0.4 mm および 1.0 mm，日本ワイドクロス株式会社製）を 20 cm×40 cm の袋状に加工したもの（以下 0.4 mm 目，1.0 mm 目）である。

3. 袋仕様と枝温度の関係の調査　各供試枝にボタン型温度ロガー（株式会社 KN ラボラトリーズ製）を枝の下面に密着させて固定した。枝温度の測定期間は同年 7 月 21 日から 9 月 1 日，測定間隔は 30 分とし，ロガーは球果の収穫時に回収した。各供試枝について日最高枝温度の平均値を算出し，Kruskal-Wallis 検定により差の有無を評価した。解析には R ver. 4.1.2 の標準パッケージおよび追加パッケージ Rcmdr の追加機能 EZR を利用した。

4. 袋仕様と種子発芽率の関係の評価　同年 10 月 2 日から 3 日にかけて各供試枝の球果を収穫し，乾燥脱粒した種子を-13℃で保存した。2024 年 5 月から 7 月にかけて種子発芽率を測定した。種子の供試数は各枝 100 粒 3 反復とし，シャーレ内に濾紙を敷きベンレート水和剤を添加した蒸留水で湿らせたのち，無作為に選出した種子を播種した。シャーレは 25℃全暗条件に置き，28 日後に発根済み種子の数を目視で計数した。また播種前に種子の重量を計測した。統計解析には一般化線形モデルを利用した。応答変数を種子発芽率，説明変数を袋仕様 4 水準，種子重量，枝方位 3 水準および供試ラメット 3 水準とし，統計モデルとして誤差構造を二項分布としたロジスティック回帰を仮定した。カテゴリー型の説明変数のうち効果が有意であったものについては，Tukey 法による多重比較を行った。解析には R ver. 4.1.2 の標準パッケージおよび追加パッケージ multcomp を利用した。

III　結果と考察

最高枝温度に対する Kruskal-Wallis 検定の結果，処理区間には有意な差が認められなかった（$p = 0.52$，図–1）。これは室(*3*)における結果と異なる。その理由として，本

（受理日 2024 年 12 月 16 日）

研究の供試木は一部の枝で立ち上がり角度が既往研究より大きい傾向があったことから，防除袋への直射日光の当たり方に既往研究と差異が生じた，または目合いが大きい袋を設置した枝のロガーにのみ直射日光が当たり正確な測定ができなかった可能性が挙げられる。

一般化線形モデルによるモデル推定の結果，袋の仕様3 処理，種子重量および西側の枝に有意な効果が認められた（$p<0.05$，表–1，図–1, 2）。多重比較の結果，袋仕様では無処理と他の 3 処理との間（それぞれ $p<0.01$）および 1.0 mm 目と不織布の間（$p<0.05$）で，枝方位では西と他の 2 方位との間（それぞれ $p<0.01$）で有意な差が認められた（図–1, 2）。このことから各袋資材には発芽率を向上させる効果があり，1.0 mm 目は不織布と比べてその効果が大きいと考えられた。種子重量の係数は正であり，これは大きく充実した種子ほど発芽率が高いという一般的な理解と矛盾しない結果であった。また枝方位については西側でのみ有意に発芽率が高かったが，この原因は現時点では不明である。種子形成期の環境要因だけでなく，花粉飛散期の風向き等が影響している可能性も考えられ，この点の評価には更なる調査が必要である。

以上の結果から，発芽率の向上のためには目合いサイズが大きい防除袋がより効果的であることが示唆された。一方，袋の目合いサイズが大きいほどカメムシ幼虫の侵入リスクは増大すると考えられる。したがって，発芽率を向上させる最適な目合いサイズがあると考えられ，その評価のためには更なる研究が必要である。また本研究では，袋の仕様が枝温度に与える影響が既往研究と異なった。枝温度は微環境により大きく変化すると考えられる。本研究や既往研究では標本数が小さくかつ条件が均一でなかった可能性があるため，袋の仕様が枝温度に与える影響を正確に評価するためには，改めてサンプルサイズの大きい実験を行う必要があると考えられる。

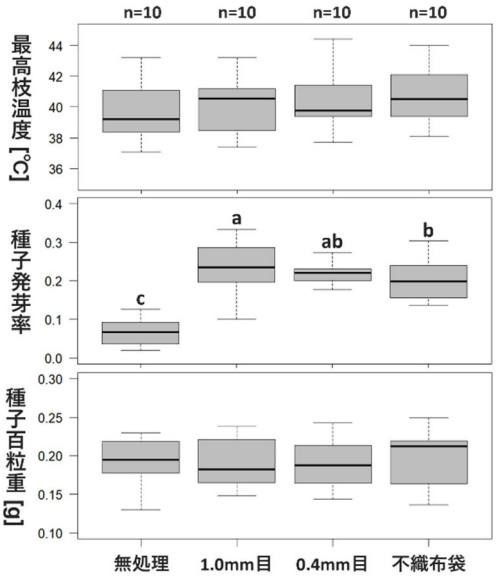
謝辞：本研究の実施にあたり，埼玉県寄居林業事務所の職員諸氏には有益な助言を賜った。また赤岩利行氏，新井秀郎氏，鎌田智裕氏，星野恵美子氏には発芽率測定作業の多大なる補助を賜った. ここに深く御礼申し上げる。

引用文献

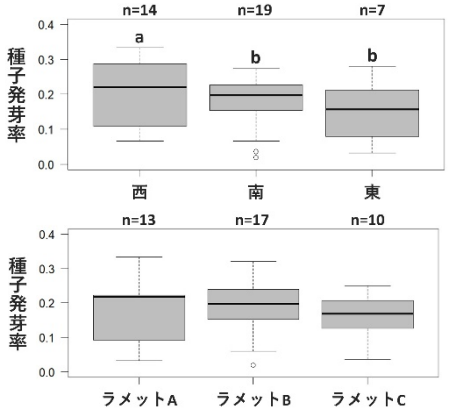
(1) 小林一三・横山敏孝 (1984) カメムシ類の加害によるスギ種子の発芽率低下. 林木の育種 133: 16-19

(2) 室紀行 (2022) 高温とカメムシ吸汁害がスギ種子発芽率に与える影響. 関東森林研究 73: 65-68

(3) 室紀行 (2023) カメムシ防除袋の仕様がスギ採種木の夏季の枝温度に与える影響. 関東森林研究 74: 147-148



図–1. 袋仕様 4 処理区における各変数の分布　符号が異なる群間に有意差あり。



図–2.　枝方位および各ラメットにおける種子発芽率の分布　符号が異なる群間に有意差あり。

表–1. 一般化線形モデルによるモデル推定の結果
切片は無処理区・枝方位東・ラメット A を表す。

説明変数	係数	標準誤差	t 値	p 値
切片	-3.07	0.19	-15.85	< 2e-16 ***
1.0 mm 目	1.43	0.08	17.01	< 2e-16 ***
0.4 mm 目	1.36	0.09	15.91	< 2e-16 ***
不織布	1.25	0.09	14.55	< 2e-16 ***
種子重量	1.70	0.84	2.02	0.04 *
枝方位：南	0.09	0.07	1.20	0.23
枝方位：西	0.33	0.08	4.09	4.35e-05 ***
ラメット B	-0.05	0.06	-0.82	0.41
ラメット C	-0.07	0.08	-0.88	0.38

*: 有意水準 5%で有意差あり，***: 有意水準 0.1%で有意差あり

短　報

関東森林研究　76-1（2025）

1年生コンテナ苗の生産に向けた培土と肥料の検討

向井愛美[1]

[1]千葉県農林総合研究センター森林研究所

要旨：近年，千葉県ではスギ非赤枯性溝腐病や松くい虫などの病虫害や自然災害によって被害を受けた森林の早期復旧のために苗木の需要が見込まれている。現在，苗木は活着が良く植栽適期が長いコンテナ苗が主流になりつつあるが，コンテナ苗は裸苗よりも価格が高い。そこで，本研究では，育苗期間を短縮してコストを削減することを目的として，培土及び肥料の条件を検討することで1年で山行き規格を満たすコンテナ苗を生産する技術の開発に取り組んだ。

キーワード：コンテナ苗，スギ，ヒノキ，クロマツ

Consider of soil and fertilizer for production of 1-year-old container-grown seedlings

Manami MUKAI[1]

[1]Chiba Prefectural Agriculture and Forestry Research Center, Forestry Research Institute

I　はじめに

近年，千葉県では非赤枯溝腐病やマツノザイセンチュウなどによる病虫害被害，台風などの自然災害によって被害を受けた森林を早期に再生させるため，スギ・ヒノキ・クロマツ苗木の需要が見込まれている。現在，苗木は活着が良く植栽適期が長いコンテナ苗が主流となりつつあるが，従来の裸苗と比較して価格が高く，出荷に2年程度かかる(*1*)。

そこで，本研究ではコンテナ育苗用の培土の種類，肥料（元肥及び追肥）の量や種類を変え育苗し，上記3樹種に適した条件について検討した。

II　材料と方法

1. 供試樹種　樹種はスギ・ヒノキ・クロマツとした。スギ及びヒノキは150cc コンテナ容器（1つにつき40本育苗可能），クロマツは300cc コンテナ容器（1つにつき24本育苗可能）を使用した。各樹種とも2反復行った。

2. 育苗管理　2023年2月にスギ及びヒノキの種子をセルトレーに複数粒播種し，3月に培土と元肥を充てんしたコンテナに1本ずつ移植した。クロマツは2023年3月に培土を充てんしたコンテナ容器に複数粒を直接播種した。発芽後，1本になるよう除去した。

3樹種とも移植後は温室で管理し，4月に日よけのあるさし床へ移動させた。6月に屋外の育苗施設に移動させ11月まで育苗し，苗高及び根元径を測定した。

3. 培土と施肥条件　コンテナ培土の種類は表1のとおりである。ココピートに鹿沼土又は珪藻土を体積比で混合した。

肥料について，スギ及びヒノキは2020年の試験で良好な成長を示した緩効性肥料のスーパーエコロング413-100（ジェイカムアグリ株式会社）と緩効性肥料のエコロング413-180（ジェイカムアグリ株式会社）を9:1（体積比）で混合した肥料（以下，混合肥料）を元肥に使用した。クロマツは，混合肥料とハイコントロール650-180E（ジェイカムアグリ株式会社，以下，ハイコン）を元肥に使用し成長を比較した。元肥は各肥料10 g/L となるように1苗ずつ施用した。追肥には，ハイコンを使用し施用量及び施肥方法は元肥と同様である。

表-1.　培土と肥料の条件

試験区	樹種	培土	肥料
①	スギ・ヒノキ・クロマツ	ココピートのみ	混合肥料
②		ココピート80%　鹿沼土20%	
③		ココピート60%　鹿沼土40%	
④		ココピート80%　珪藻土20%	
⑤		ココピート60%　珪藻土40%	
⑥	クロマツ	ココピートのみ	ハイコン
⑦		ココピート80%　鹿沼土20%	
⑧		ココピート60%　鹿沼土40%	
⑨		ココピート80%　珪藻土20%	
⑩		ココピート60%　珪藻土40%	

4. 苗木の測定　11月に苗高をメジャーで，根元径をデジタルノギスで測定した。千葉県ではコンテナ苗の出荷規格（山行き規格）が定められていないため，今回は本県の県有林事業等で使用される千葉県土木資材単価表（2024年1月）に記載の規格を基準とした(2)。コンテナ苗のスギとクロマツは，苗高15 cm 以上かつ根本径3 mm 以上となっている。ヒノキコンテナ苗は，同単価表に記載がないためスギコンテナ苗の規格を準用した。

（受理日2024年11月28日）

III　結果と考察

表-3 に育苗したコンテナ苗の結果を示した。

表-3.　各樹種の育苗数と得苗率

樹種	試験区	育苗本数（本）	残存苗木（本）	得苗数*（本）	得苗率**（%）
スギ	①	80	44	17	37.8
	②	80	47	20	41.7
	③	80	45	36	80.0
	④	80	62	51	82.3
	⑤	80	54	24	44.4
ヒノキ	①	80	73	18	24.7
	②	80	48	8	16.7
	③	80	60	31	51.7
	④	80	62	18	28.1
	⑤	80	68	26	38.2
クロマツ（混合肥料）	①	48	19	6	31.6
	②	48	8	1	12.5
	③	48	19	13	68.4
	④	48	18	11	61.1
	⑤	48	27	21	77.8
クロマツ（ハイコン）	⑥	48	34	12	35.3
	⑦	48	40	26	65.0
	⑧	48	44	38	86.4
	⑨	48	45	41	91.9
	⑩	48	44	38	86.4

*：残存苗木は測定時に生存していた苗木の本数

**：土木資材単価表の規格を満たした苗の本数

***：得苗率（%）＝（得苗数／残存苗木）×100

1. スギ　育苗の結果，スギでは③と④の条件で成長が良好で，得苗率が 80%以上であった。また，それぞれの条件で平均苗高が③31.9（±7.9）cm（±SD），④30.3（±7.0）cm，平均根元径が③4.0（±1.0）mm，④3.9（±0.9）mm と他の試験区より大きく，規格を満たしており有意差がみられた（図-1）。また，得苗率は③80.0 %，④82.3 %と高く，スギの 1 年生コンテナ苗の育苗に適した条件である可能性がある。

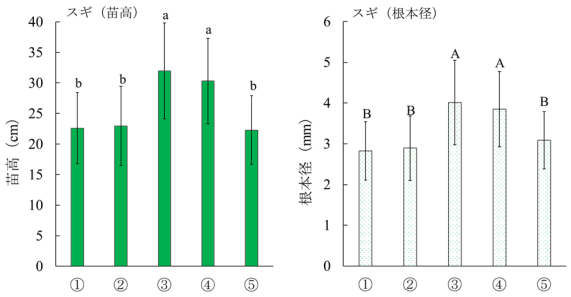


図-1.　スギ 1 年生コンテナ苗の育苗結果

注 1）①～⑤は表-3.のとおり

2）検定は Tukey-Kramer 法による多重比較検定。異なるアルファベット間で 5%有意差あり

3）エラーバーは標準偏差

2. ヒノキ　ヒノキは，②以外の条件で平均苗高が規格を満たしていたが，根元径が小さく③の条件のみが規格を満たしていた（表-3）。また，平均苗高と平均根元径は，得苗率の低かった②では 14.0（±4.7）cm，2.2（±0.8）mm，得苗率の高かった③では 22.7（±6.3）cm，3.1（±1.0）mm と有意差がみられた（図-2）。

しかし，ヒノキはスギと比較してすべての条件で得苗本数及び得苗率が低く 1 年で規格を満たす苗木を十分に育苗できなかった。ヒノキ 1 年生コンテナ苗育苗にはさらなる探求が必要と考える。

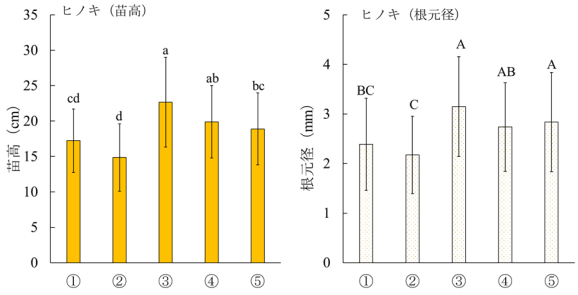


図-2.　ヒノキ 1 年生コンテナ苗の育苗結果

注 1）①～⑤は表-3.のとおり

2）検定方法はスギと同様

3）エラーバーは標準偏差

3. クロマツ　育苗の結果，クロマツではハイコンを元肥に使用した試験区で成長が良好で，混合肥料の試験区と比較して残存本数が多く，得苗率も高かった（表-3）。また，ハイコンの試験区は⑥以外で規格を満たしており，試験区ごとに有意差がみられた（図-3）。ハイコンの試験区の得苗率は⑧86.4 %，⑨91.9 %，⑩86.4 %と高くクロマツ 1 年生コンテナ苗の育苗に適している可能性がある。

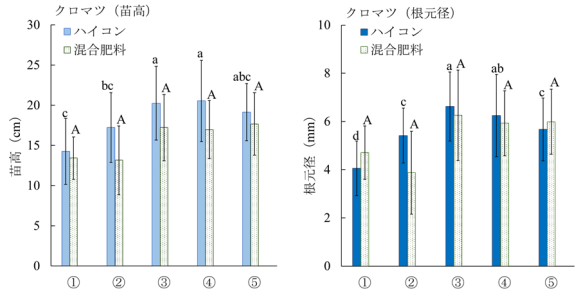


図-3.　クロマツ 1 年生コンテナ苗の育苗結果

注 1）①～⑤は表-3.のとおり

2）検定方法はスギと同様

3）エラーバーは標準偏差

引用文献

(1) 荒木功介 (2016) 肥効期間の長い緩効性肥料を用いた追肥をしないクロマツ 1 年生コンテナ苗の育苗方法. 関東森林研究 67(1):133-136

(2) 千葉県農林水産部森林課 (2023) 千葉県森林土木資材単価表（令和 6 年 1 月 4 日適用） https://www.pref.chiba.lg.jp/shinrin/documents/20240104shinrindobokushizaitanka.pdf （2023 年 5 月閲覧）

速　報

関東森林研究　76-1 (2025)

スギコンテナ苗生産におけるスギ材粉砕チップの代替培土としての利用可能性

飯泉佳世[1]
[1]埼玉県寄居林業事務所森林研究室

要旨：コンテナ苗生産者の多くは培土基材としてヤシ殻培地を利用している。しかし，ヤシ殻培地は海外輸入品であり，今後も安定的に供給され続ける保証はない。そこで国内生産可能なスギ材を粉砕して作成したスギチップをコンテナ苗生産における培土基材として利用できないかと考えた。スギ実生苗をスギチップで育苗した場合とヤシ殻培地で育苗した場合とを比較したところ，生存個体数には差がなかったものの苗高と地際径についてはスギチップで育苗した苗の方が有意に小さかった。

キーワード：スギチップ，未分解チップ，ヤシ殻ピート，ココナツハスク，ココナツピート

Possibility of using crushed cedar wood chips as an alternative soil for containerized cedar seedling production

Yoshitoshi IIIZUMI[1]
[1]Saitama Prefecture Yorii Forestry Office Forest laboratory

I　はじめに

造林用苗木の生産現場においては，コンテナ容器を用いた生産手法を採用する生産者が多くなっている。コンテナ苗生産には培土基材が必要であり，多くの生産者はヤシ殻培地を用いている。全国のコンテナ苗生産者に対して行われたアンケート調査では，回答者の 8 割以上が培土基材としてヤシ殻培地を利用すると回答している(*2*)。日本国内で流通するヤシ殻培地は主にスリランカから輸入されており，国内では生産されていない。このように海外輸入に依存した状態で今後，安定的に供給され続けるのか不安がある。そこでヤシ殻培地の代替として利用可能な国内生産できる培土基材の模索が課題となっている。針葉樹の樹皮を堆肥化あるいは自然養生した上で培土基材として用いるとスギ苗木等の育苗が可能であるとの報告がある(*1*, *3*)。一方で材を丸ごと利用した事例はみられず，また樹皮を用いた検証についてはいずれも数年かけて堆肥化するなど, 長い準備期間を要している。そこで今回はスギ材を粉砕して作成したスギチップを発酵などの下処理をせずに培土基材として用い，スギ実生コンテナ苗生産が可能であるか検証を行った。

II　材料と方法

1. 培土基材の準備　本試験では, 培土基材としてヤシ殻培地とスギチップの 2 種類を用いた。ヤシ殻培地はトップココピートオールド(株式会社トップ)を使用した。スギチップは次の手順で作成した。2023 年 1 月に埼玉県寄居林業事務所山の神採種園内で 15 年生スギ立木を伐倒し, 直後にチッパシュレッダ SR3000-1 (ハスクバーナ・ゼノア株式会社）により粉砕してチップ化した。このスギチップは育苗試験を開始する直前までの 3 ヶ月間，採種園内にブルーシートで覆った状態で静置した。

2. コンテナ苗の作成　2023 年 4 月，ヤシ殻培地とスギチップをそれぞれ小粒鹿沼土と体積比 4 : 1 で混合し，緩効性肥料ハイコントロール 085　180 日タイプ（ジェイカムアグリ株式会社）をそれぞれの培土 1 リットルあたり 5 g 添加した。これらを十分に攪拌した後，インナーポット及びスペーシングトレイ（谷口産業株式会社）で構成されたコンテナ容器に 1 ポットあたり 300 ml ずつ充填した。これを各培土で 280 ポットずつ作成した。種子は 2022 年 10 月に埼玉県寄居林業事務所上の原採種園内で採種した自然交配スギ種子 4 系統（母樹は多賀 2, 南那須 2，比企 13，久慈 17）を使用した。育苗手法は幼苗移植法と直接多粒播種法の 2 通りとした。まず，2022 年 11 月に多賀 2 及び南那須 2 の種子を小粒鹿沼土で満たした育苗トレイ 2 つにそれぞれ播種した。次に 2023 年 4 月にトレイから成立した 2 系統の幼苗を各培土のコンテナ容器にそれぞれ 70 ポットずつ移植した。また，同時に比企 13 及び久慈 17 の種子を各培土のコンテナ容器 70 ポットずつにそれぞれ直接播種した。播種数は 1 ポットあたり 9 粒とした。なお，複数本の苗が成立したポットについては 2023 年 10 月に苗高が最も大きい苗 1 本を残す間引き作業を実施した。2024 年 4 月にプロフェッショナルハイポネックス　20-20-20（株式会社ハイポネックスジャパン）の 2000 培希釈液による追肥を実施した。以

（受理日 2024 年 12 月 18 日）

上のとおり，培土 2 種類，種子 4 系統で計 8 処理区を設けた。これらは上の原採種園内にあるガラス温室において，頭上潅水により育苗した。

3. 調査及び解析　全処理区の苗木について，2024 年 5 月に苗高, 地際径の測定及び苗木生存数の計数を行った。なお，直接播種した処理区において，苗が全く発芽しなかったポットについては生存していないものとして扱った。調査で得られた苗高と地際径のデータについて，培土組成以外の条件が同一である 2 処理区間を welch の t 検定により解析した。なお，検定を複数回実施したことによる多重性を考慮し, bonferroni 法による有意水準補正を行った。解析には R version 4.4.0 の標準パッケージ及び追加パッケージ MASS を用いた。

III　結果と考察

生存個体数は，どの系統においても培土の違いによる差がほとんど見られなかった。なお，直接播種した比企 13 の生存個体数が少ないのは，種子の発芽率が低く，苗が 1 本も発芽しなかったポットが複数あったためである。苗高及び地際径は，南那須 2 以外の 3 系統において，スギチップを用いた処理区はヤシ殻培地を用いた処理区より有意に小さかった。

これらのことから, スギ実生コンテナ苗生産において，スギチップを培土基材として用いた場合，ヤシ殻培地で育苗した場合と比べて，苗木の生長量が小さくなることが明らかとなった。

本試験では堆肥化処理をしていない未分解のチップを用いたため，チップを分解する微生物の活動により培土中の窒素が不足した状態であったと予想され，それが原因で苗木の生長量が小さくなったと考えられる。2024 年 4 月に筆者が各処理区の苗木を観察したところ，培土基材としてスギチップを用いた処理区の苗木の一部に葉色の黄化が認められた。これは窒素飢餓により葉緑素の生産量が減少したことによるものと考えられる。堆肥化処理をしていないスギチップを培土基材として用いるには，窒素肥料を特に多く添加するなどの工夫が必要となるだろう。

謝辞：埼玉県寄居林業事務所森林研究室の職員諸氏にはコンテナ苗作成及び生長量調査の際に補助していただいた。本報執筆に際して，同研究室の室紀行氏には有益な助言をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

表-1. 各処理区（n = 70）における苗木の生存個体数

培土組成	多賀2	南那須2	比企13	久慈17
ヤシ殻培地×鹿沼土	69	70	60	70
スギチップ×鹿沼土	70	70	61	69

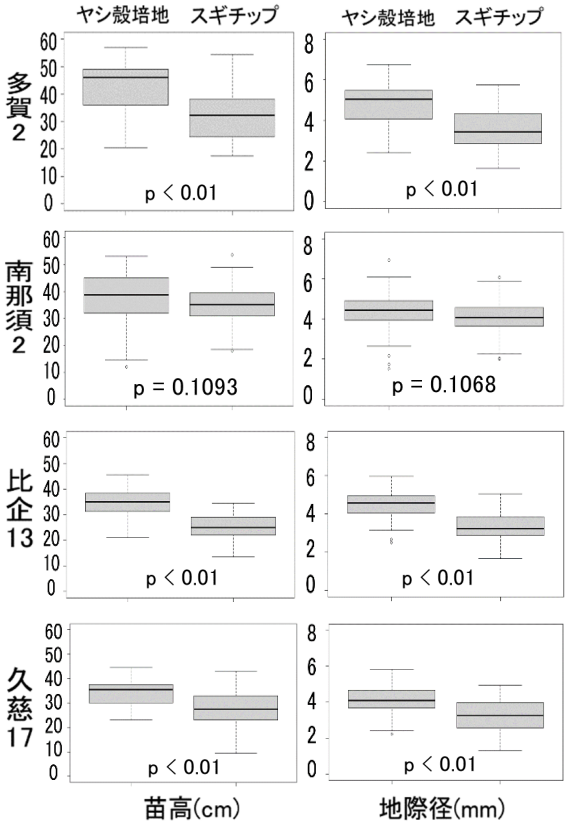


図-1. 各処理区における苗高及び地際径の分布

引用文献

(1) 日本森林技術協会 (2022) 令和 3 年度コンテナ苗生産技術等標準化に向けた調査委託事業報告書. https://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/syubyou/attach/pdf/kontena03-12.pdf（2024 年 11 月 13 日確認）

(2) 小笠真由美・藤井栄・飛田博順・山下直子・宇都木玄 (2021) 山林用針葉樹コンテナ苗における育苗方法の現状と課題－全国のコンテナ苗生産者に対するアンケート調査より－. 日林誌 103: 105-116

(3) 田中賢治・岡村怜美・中村干城・志々目道夫・柳田力男・垣内文昭・平岡直樹・竹内真一 (2016) 自然養生バークを利用したスギ育苗の試み. 日緑工誌 42: 244-247

速　報

簡易なニホンジカ捕獲技術の実証試験

松山元昭[1]
[1]埼玉県寄居林業事務所森林研究室

要旨：埼玉県が開発したニホンジカ捕獲技術「スリット式ワンウェイゲート」を活用し，ニホンジカの被害が発生している造林地において捕獲技術の実証試験を行った。現地での作業性及び経済性を考慮すると罠の小型化が必須であったが，罠の小型化は捕獲個体による罠への集中的なアタックを誘発した。この対策として，罠内にもう一つ小部屋（以降「内罠」という。）を設置した。この内罠に誘導することで捕獲個体の動きは制御され罠の耐久性は格段に向上し捕獲率の向上につながった。

キーワード：スリット式，ゲート，捕獲試験，囲い罠，内罠

Demonstration test of simple sika deer capture technology

Motoaki MATSUYAMA[1]
[1] Saitama Prefecture Yorii Forestry Promotion Office Forest laboratory

I　はじめに

ニホンジカによる広範囲の農林業被害を軽減・防止するためには，森林所有者や林業事業体が狩猟者に協力して捕獲を進めていく必要がある。深刻な被害が想定される造林地において罠の作成までを造林者側が行うことで狩猟者は捕獲だけに集中することが可能となる。これにより，効率的な捕獲作業が可能となり捕獲頭数の増加が期待できる。埼玉県では，簡易で経済的な方法で捕獲を促進するため「スリット式ワンウェイゲート」(*1*)を開発し，造林木が成長したため役目を終えたシカ柵と組み合わせた囲い罠による捕獲試験を行ってきた。令和 4 年度からは，被害が発生している造林地においても効率的な捕獲を可能とするため，罠の設置や資材の運搬及び維持管理に便利な作業道等を活用して捕獲試験を行った。さらに，現地における作業性及び設置コストを考慮し罠の小型化を行った。この試験ではニホンジカの捕獲状況に加え罠の耐久性・構造上の弱点を把握するため，捕獲個体を長時間罠に閉じ込める方法で観察を行った。観察を続ける中，助走をつけて行う強力なアタックによってゲートや網が破損し脱走されることが度々起きた。この対策として，罠の奥側に内罠を設置し捕獲個体が助走できる空間をなくすことで動きを止める方法を考案した(*2*)。内罠の導入により罠の耐久性及び捕獲効率が格段に向上したのでその手法を紹介する。

II　材料と方法

1. 試験地　県立長瀞玉淀自然公園（埼玉県秩父市大字定峰地内）カラマツ造林地内の作業道上に囲い罠を 2 基設置した。（標高 650 m～700 m）。

2. 材料と道具　本試験で設置した囲い罠は，外周柵，ゲート及び内罠から構成される（図–1）。

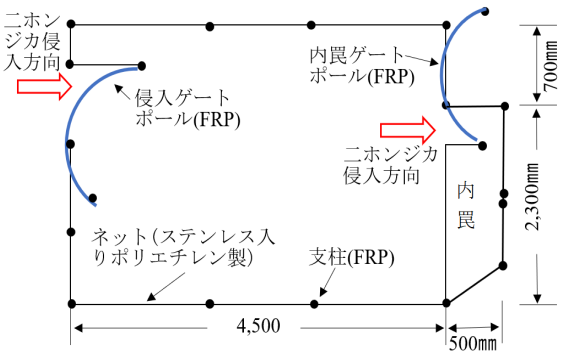


図-1. 囲い罠の構造

罠の主な材料はシカ柵として一般に使用されているもので，具体的には FRP 支柱（直径 38 mm，全長 2,700 mm），ステンレス入りポリエチレンネット（網目 50 mm，高さ 2,000 mm），ポリエチレンロープ（直径 8 mm，4 mm），固定具としてプラスチックアンカー（全長 400 mm），マイカー線（幅 10 mm），結束バンドを使用した。侵入ゲート及び内罠ゲートについては，スリット式ワンウェイゲートの改良型ゲートを導入した。構造はシカ柵をベースにゲート開閉のためのばね材として FRP ポール（直径 5 mm，全長 2,400 mm）を横方向に 2 本，縦方向に 1 本使用する仕組みとした（図–2）。また，捕獲状況の観察のためそれぞれの罠の両端にセンサーカメラを設置した。試験の方法は，ゲートを開放し罠内の餌に慣れさせることからはじめた。次に餌の摂食状況を観察しながらゲート

（受理日 2024 年 11 月 26 日）

の開口部の幅を徐々に狭め，侵入時ゲートが体に触れることに慣れさせた後，侵入ゲート及び内罠ゲートを閉じて捕獲試験を開始した。

週に 2 回程度の罠の巡視により捕獲状況を確認し，捕獲個体があればその都度放逐した。また，センサーカメラの動画映像の解析を行い，侵入状況，罠内の行動，罠の耐久性等の観察及び罠内での滞在時間，内罠での滞在時間を計測した。

図-2.　シカ柵を利用した改良型ゲート

III　結果と考察

本試験の画像解析結果から，ニホンジカはゲートから侵入した後も暴れだすことはなく，餌を摂食し，休憩をとり，最後は出口を探して柵沿いを歩き回ることが確認できた。一方，捕獲された個体は人の気配など異変を感じた時は，急に罠内を走り回り，ゲートや柵に体当たりを続けることも確認できた。捕獲個体の内罠への侵入は，多くの場合異変を感じるなどパニック状態になった時に行われるが，出口を探す行動の中で侵入することもある。この場合，捕獲個体は内罠内でも暴れだすことなく，落ち着いた状態が維持されることも確認できた（図–3）。

図-3. 平穏状態における内罠への侵入の様子（2 頭）

令和 4～5 年度に実施した囲い罠 2 基による捕獲状況は，延べ 88 頭が罠に侵入し罠内の滞在時間は平均で 24 時間 26 分であった（表–1）。捕獲した個体のうち 52 頭が逃走しているが，これは捕殺せず放逐しているため，侵入ゲートのすり抜け方を学習した個体が幾度も侵入・逃走したことが影響している。なお、これらの個体についても改良型ゲートの導入により逃走数は大きく減少した。内罠に侵入した個体数は 28 頭で，内罠での平均滞在時間は 32 時間 25 分であった。また，内罠に侵入した個体の逃走数はわずか 3 頭であり，内罠に入った個体の脱出は困難で罠の損傷を十分抑えられることが確認できた。なお内罠についても改良型ゲートの導入により性能が向上し逃走数は 0 となった。

表–1. ニホンジカ捕獲状況

年度	捕獲数（頭）	平均滞在時間（時：分）	逃走数（頭）
令和4年度	38	28：00	22
令和5年度	50	21：30	30
計	88	24：26	52

内罠侵入数（頭）	平均内罠滞在時間（時：分）	内罠逃走数（頭）
6	33：37	0
22	32：04	3
28	32：25	3

ここで，内罠から捕獲個体を逃がさないための最重要ポイントを示す（図–4）。捕獲された個体は出口を探すためどんな狭い隙間にも入り込もうとする習性がある。このため構造は侵入後の動きを止めることを優先した仕様とした。ゲートエリアⒶは，捕獲個体が捕獲エリアⒷからゲート裏に侵入できないように幅を 500 mm 以下とし、エリアⒶからエリアⒷへの通路幅は 100 mm 程度とする。

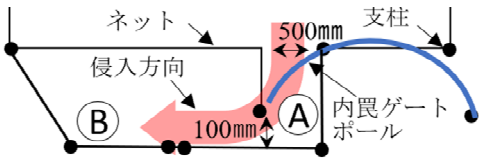


図-4. 内罠作成時の重要ポイント

今後は，本試験結果を踏まえ被害地の造林者が罠を作成できるよう技術提供を行うとともに，作成した罠を狩猟者が利用してニホンジカの捕獲・処分を行うモデルの実証試験を予定している。

引用文献

(1) 森田厚 (2020) スリット式ワンウェイゲートによるニホンジカ捕獲マニュアル. 埼玉県寄居林業事務所 HP https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/40332/nihonjikahokakumanual.pdf (最終検索日:2024 年 11 月 11 日)

(2) 埼玉県寄居林業事務所森林研究室 (2023) ニホンジカ捕獲技術の実証試験について. 全国林業試験研究機関協議会会誌 57: 20

関東森林研究　第 75 巻
2025 年 3 月 31 日発行

編集者：「関東森林研究」編集委員会
安部哲人（委員長）、瀧澤英紀、太田祐子、吉村充則、杉浦克明、上村真由子、小坂泉、園原和夏、松倉君予
発行者：関東森林学会（会長 有賀一広）
発行所：宇都宮大学農学部森林科学科内
関東森林学会事務局
〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350