

スギ一次枝の天頂角および方位角の変化とその要因

齊藤哲・川崎達郎 (森林総研)

要旨: 本研究は、個体の樹木構造の再現モデル作成のためのスギの一次枝の分枝パターンを定量的に表現することを目的とした。各一次枝の枝元直径 d_n 、枝長 L_n を測定し、天頂角 α_n や方位角 θ_n との関係解析した。 α_n は枝サイズと関係すると考えられ、 d_n や L_n などとの関係を調べた結果、 α_n は枝サイズの増加と共にはじめ急増し、後に頭打ちになる関係を示した。既報の樹冠深度で α_n を表現した場合と比べて同様の傾向で精度も大きな改善はみられなかった。したがって α_n を表現するには樹冠深度や枝サイズなど使いやすい指標を使えばよいと判断した。また、続けて出るふたつの一次枝の方位角の格差 $\Delta\theta_n$ は、いずれの個体もひと山型の頻度分布を示し、Weibull 分布で表される確率密度の当てはまりが最もよかった。主幹先端部における新しい一次枝の方位角に関する分枝パターンはジベレリン処理の有無の間や、樹齢の差によっても大きな違いは見られず、こうした要因の影響をあまり受けないと考えられた。樹冠構造のモデル化では、本研究のように重要な要因のみを反映させある程度のばらつきをもった確率分布を用いる方法が現実的なアプローチといえる。

キーワード: 枝サイズ, 確率密度, 方位角, 天頂角

Abstract: In this study, we aimed to quantify the characteristic of branching pattern of first-order branch of *Cryptomeria japonica* to establish the simulation model of crown structure. We recorded zenith angle α_n , azimuth angle θ_n , diameter of branch base d_n and branch length L_n , and analyzed the relationship among them. The relation between α_n and branch size (d_n , L_n or $d_n^2L_n$) could be approximated by a rectangular hyperbola. These relation were same as that between α_n and crown depth and their fitting were not improved so much. This suggests that we can use one of them (crown depth or branch size) as independent valuable to express change of α_n . Difference of θ_n between successive branches $\Delta\theta_n$ showed one-modal distribution for all trees analyzed in this study. The distribution of $\Delta\theta_n$ for almost trees can be expressed by Weibull distribution. This distribution patterns were not different between treatment by gibberellin and non-gibberellin, or between different tree ages. This indicates that branching pattern, as regards θ_n , is influenced little by chemical or tree age. This study shows that it is important to reflect only important factor, considering the stochastic fluctuation, to simulation models.

Keywords: azimuth angle, probability density, size of branch, zenith angle

I はじめに

近年の日本の林業の低迷により、森林管理をいかに省力的に行うかが模索されている。そのため、森林の施業法や保育の仕方でも従来の理論に沿った定性間伐をくり返すもののみでなく、列状間伐(4)や将来木施業(5)など多様な施業法の導入が試みられている。

森林経営を行う上で林分の成長予測は不可欠であるが、このような多様な施業法に対しても従来の理論に沿って林分の成長を予測している事例が多々みられる。しかし、従来の成長予測がこうした多様な施業法に対しても有効かどうかの検討が十分なされないまま適用されている。例えば、密度管理図(1)は個体間競争の理論を応用し、森林を均質的なまとまりと見なした下層間伐を念頭に置いた管理指針である。従って列状間伐のように機械的に林内に空間を作るケースに当てはめるには理論的に無理がある。そのため、こうした多様な森林施業にも対応しうる森林の成長予測が求められている。樹木・森林の成長予測に関しては、群落全体を均

一的なまとまりとするのとらえ方よりも、個々の樹木や枝葉などのモジュールの集合体として森林が形成されているととらえた方が、森林の非均質性を的確に表現できる。

著者らはそうした森林を個体やモジュールの集合体ととらえて森林の成長を予測することを念頭において、個々の樹木や枝の空間配置を決めるための一次枝の分枝の特徴の概要について報告した(6)。そこでは一次枝の天頂角について、その枝がついている枝元の樹冠深度とともに増大していることを指摘している。その要因は、理論的にみると、樹冠深度が直接関係しているよりも、成長による枝の自重の増大が天頂角の広がりに影響していると著者らは考える。

また、枝の方位角については、ひとつ前に出た枝からある程度ずれた角度で出ており、そのずれは $140\sim 160^\circ$ の範囲が最も多いひとやま型の確率分布にそっている点を指摘した(6)。しかし、そこでは、おおよそ正規分布を想定して解析しているが、データの最頻値は $140\sim 160^\circ$ となっており、中央値である 180° とは異なる。従って正規分布以外の確率

分布を適用した方がよりよい可能性がある。

森林を個体やモジュールの集合体としてとらえる方法では、樹木個体を仮想空間上に再現させて相互の位置関係などを基礎情報として個々の樹木の成長を予測する。そのため樹木個体の枝の出方に関する情報は重要になる。本研究では、このような天頂角の増大や方位角の出方に影響する要因に関するデータを整理し、樹木個体を再現に向けた一次枝の出方をモデル化するための基礎情報を提供することを目的とする。

II 調査方法

1. 野外測定 調査対象木は森林総合研究所千代田苗畑（茨城県かすみがうら市）の17年生スギ人工林から6本（ θ ）、および森林総合研究所構内苗畑（つくば市）のスギ稚樹6本（2年生苗植栽後1および2年経過した稚樹各3本、それぞれ3年生稚樹、4年生稚樹とよぶ）とした。構内苗畑の稚樹は花粉対策用試験の材料となっているものを利用しており、4年生稚樹3本は4年間毎年7月下旬から8月上旬にかけてジベレリン処理を施してある。

まず17年生スギについて、対象木の主幹の頂部から数えて n 番目に分枝している一次枝の枝元の天頂角 α_n （度）および方位角 θ_n （度）を記録した。方位角は最初の枝をある向きで固定させ（0度とする）、時計回りで0~360度の範囲で記録した。また、枝サイズの指標として一次枝の枝元直径 d_n （mm）、枝元から枝先端までの長さである枝長 L_n （cm）を測定した。3および4年生稚樹については、同様の方法で一次枝の方位角 θ_n のみを測定した。

2. 解析 まず、測定データをもとに天頂角 α_n と枝のサイズを表す指標との関係を解析した。枝サイズの指標として d_n 、 L_n および $d_n^2L_n$ の3つを用いた。既報同様、両者の関係を式（1）で表される直角双曲線で近似した。

$$\alpha_n = a * \text{Size} / (b - \text{Size}) \quad (1)$$

Sizeは d_n 、 L_n または $d_n^2L_n$ 、 a 、 b は定数。

つぎに方位角の解析では、ひとつ下の枝との方位角の格差 $\Delta\theta_n$ （ $0 \leq \Delta\theta_n < 360$ 度）を式（2）により算出した。

$$\begin{aligned} \Delta\theta_n &= \theta_n - \theta_{n-1} \quad (\theta_n - \theta_{n-1} \geq 0 \text{ のとき}) \\ &= \theta_n - \theta_{n-1} + 360 \quad (\theta_n - \theta_{n-1} < 0 \text{ のとき}) \end{aligned} \quad (2)$$

方位角較差の算出の際、林冠閉鎖などによる途中の枝の枯死の影響がみられないようにするため、17年生スギでは樹冠深度（主幹先端からの距離）300cm未満までの枝のみを、3および4年生稚樹では2年生までの主幹に出た枝のみを対象として $\Delta\theta_n$ を算出した。そして $\Delta\theta_n$ の頻度分布を求め正規分布、対数正規分布、Weibull分布、ガンマ分布の4タイプの分布型にあてはめ、赤池情報量基準（AIC）を用いて最適な確率密度曲線を探した。さらにジベレリン処理と非処理間、および17年生と稚樹間の分布の違いを比較した。分布のあてはめやAICの計算

は統計解析ソフト JMP8.0.2 (SAS Institute Inc.) を用いた。

III 結果

1. 枝の天頂角 天頂角 α_n 、枝元直径 d_n 、枝長 L_n および $d_n^2L_n$ の最大値はそれぞれ、130（度）、32.7（mm）、245（cm）、2417（ cm^3 ）であった。

α_n と d_n 、 L_n および $d_n^2L_n$ との関係を図-1に示す。近似式の定数および決定係数 R^2 は d_n : $a = -97.8$, $b = -5.34$, $R^2 = 0.524$, L_n : $a = -98.7$, $b = -43.6$, $R^2 = 0.542$, $d_n^2L_n$: $a = -72.8$, $b = -502.9$, $R^2 = 0.565$ であった。

2. 枝の方位角 個体別にみると全12個体のうち8個体はWeibull分布を当てはめたときのAICが最小であった。ほかの4個体のうち3個体のWeibull分布のAICは、AIC最小値と2以内の差であった。

ジベレリン処理をしていない3年生稚樹と処理をした4年生稚樹の θ_n をそれぞれまとめた場合の頻度分布を図-2に示す。

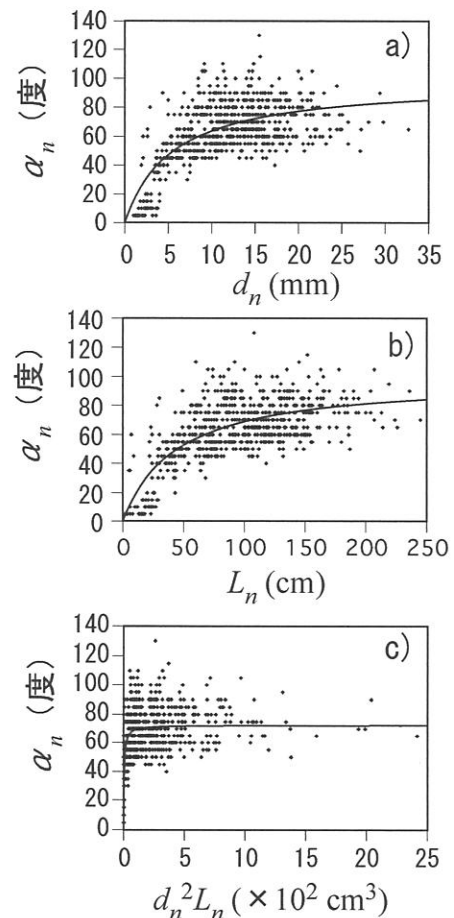


図-1. 天頂角 α_n と a) 枝元直径 d_n , b) 枝長 L_n および、c) $d_n^2L_n$ との関係

Fig-1. Relationship between α_n and a) d_n , b) L_n or c) $d_n^2L_n$.

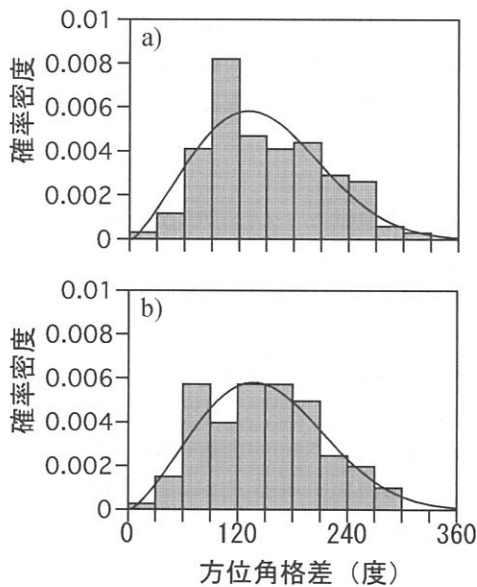


図-2. 方位角格差の頻度分布と確率密度曲線. a): 3年生稚樹 (ジベレリン非処理), b): 4年生稚樹 (ジベレリン処理)

Fig-2. Frequency distribution of α_n and its probability density curve. a): 3-year-old saplings (without gibberellin) and b): 4-year-old saplings (with gibberellin).

いずれも Weibull 分布の AIC が最も小さかった (表-1)。Weibull 分布に近似したとき分布の尺度パラメータ a は 3年生, 4年生

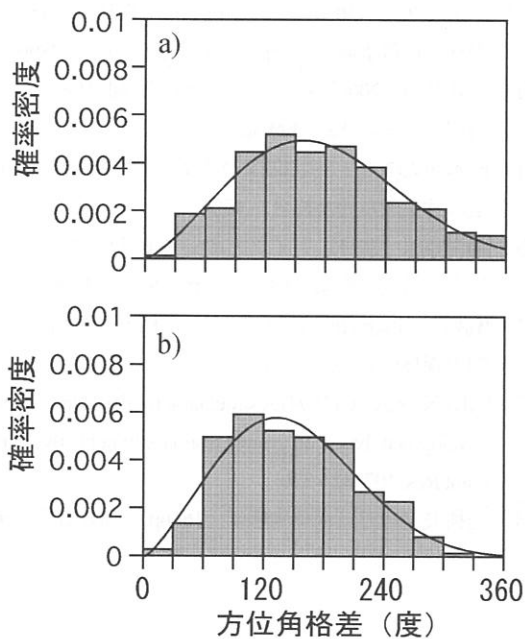


図-3. 方位角格差の頻度分布と確率密度関数. a): 17年生スギ, b): 3および4年生稚樹

Fig-3 Frequency distribution of θ_n and its probability density curve. a): 17-year-old trees and b): 3- or 4-year-old saplings.

表-1. a) : ジベレリン非処理と処理, およびb) : 17年生スギと3または4年生稚樹の方位角較差の頻度分布に各種確率密度分布を当てはめたときのAICの値. 太数字が最小値.

Table-1. The values of AIC when each probability density function was fitted to the frequency distribution. a) Between with and without gibberellin, b): Between 17-year-old trees and saplings.

Bold indicate the minimum value.

a)		
	3年生稚樹 (非ジベレリン)	4年生稚樹 (ジベレリン)
正規分布	1265.0	1482.4
対数正規分布	1265.5	1491.1
Weibull 分布	1257.6	1475.5
ガンマ分布	1258.3	1479.9
b)		
	17年生スギ	(3or4年生) 稚樹
正規分布	3089.3	2747.4
対数正規分布	3111.8	2756.6
Weibull 分布	3071.4	2733.2
ガンマ分布	3083.1	2738.2

でそれぞれ 164.3, 164.7, 同じく形状パラメータ b はそれぞれ 2.53, 2.59 であった。両者とも確率密度曲線のピークは 120~150 度の間にみられた。

次に樹齢の異なる 17 年生スギと稚樹 (3 年生, 4 年生稚樹の合計) の θ_n をそれぞれまとめた場合の頻度分布を図-3 に示す。この場合も両者とも Weibull 分布の AIC が最も小さかった (表-1)。Weibull 分布に近似したとき分布の尺度パラメータ a は 17 年生スギ, 稚樹でそれぞれ, 193.6, 164.5, 同じく形状パラメータ b はそれぞれ 2.46, 2.56 であった。両者とも確率密度曲線のピークは 120~180 度の間にみられた。

IV 考察

1. 枝の天頂角 一次枝の天頂角の変化は, 枝サイズの小さい範囲では枝サイズの増大と共に急速に広がるが, 枝サイズがある程度まで達すると頭打ちになる傾向がみられた。枝サイズの指標を d_n, L_n または $d_n^2 L_n$ にするかで多少の曲線形の違いはあるものの頭打ちになる傾向は共通していた。筆者らは前報において, 便宜的に樹冠深度を独立変数として天頂角の変化を調べたところ, 同様の傾向であった (6)。枝の天頂角の広がりに関しては樹冠深度よりも論理的に枝の自重が直接的に関係するであ

ろう。そのため枝サイズを表す d_n , L_n または $d_n^2 L_n$ が独立変数としてはより適切と考えられる。しかし今回の枝サイズを用いた場合の決定係数は 0.524-0.565 の範囲となり、樹冠深度を用いた場合の決定係数は 0.652 であったのに対し、当てはまりの良さに大きな改善はみられなかった。これは、樹冠深度と枝サイズとの間に強い相関関係があることが一因である。例えば、今回解析に用いた枝長と樹冠深度とは 0.789 の相関係数をもつ (未発表)。こうした強い相関が、表す独立変数を枝サイズから樹冠深度に置き換えた場合でも天頂角の広がり方を十分説明できるのであろう。したがってサイズの広がり方をモデルで表現する場合、樹冠深度や枝サイズのうち使いやすい変数を用いればよいと考える。

2. 枝の方位角 方位角関する枝の出方は Weibull 分布に従う確率密度曲線を用いてモデル化できるであろう。今回の解析では 4 個体を除いたすべての個体、あるいはジベレリン処理・非処理でまとめた場合、17 年生スギ・稚樹でまとめた場合のいずれも Weibull 分布の当てはまりが最適であった。他の分布型が最適であった 4 個体のうち 3 個体についても AIC の値の差が 2 以内であることから Weibull 分布を当てはめても大きな問題はないと考える。分布のモードが 180 度から少しずれたところに現れていることから正規分布ではなく、そのずれを表現出来る Weibull 分布の方が適したのであろう。このずれは、ひとつ前に出た枝の正反対の方位以外から高い頻度で次の枝が出ることを意味している。方位角に関して多様な分枝パターンとなる一因であると考えられる。こうした分布型のあてはめには論理的な根拠があるわけではないが、現実的な当てはまりの良さから、一次枝の分枝パターンを表現するモデルには有効であろう。

このような主幹頂部における方位角に関する分枝パターンは、薬剤処理や樹齢とは関係なく、スギの特徴といえるであろう。図-2 や図-3 において、両者の分布形は多少異なるものの、モードの現れる角度や確率密度はある同じ幅の中にある結果であったことから、方位角分布パターンは薬剤処理や樹齢の影響を大きく受けていないと考えられた。すなわち、ジベレリンは成長促進作用があるが (2)、枝が出る方位角には関係しないと考えられる。樹木個体は樹齢の増加と共に個体間競争がみられるようになり (8)、枝の成長等に影響が現れる。しかし、樹齢が増しても主幹先端部は隣接個体とも十分な間隔がある。そのため植林されたスギのように、上層に被圧するものがなければ主

幹先端部の一次枝分枝パターンに樹齢はあまり影響していないものとする。同様に考えると、極端な密植でなければ、この分枝パターンは個体密度や植栽密度にも影響されないであろう。

V. まとめ

本研究では、枝葉モジュールから樹冠の再現を念頭において、一次枝の分枝パターンをモデル化する基礎情報を提供した。個体レベルの成長予測には個体・樹冠を再現させるシミュレーションモデルが有効である (3, 7)。しかし実際の樹木は様々な要因の影響により複雑な分枝構造となっており、理論から外れた分枝パターンも多くみられる。全ての要因を理論的に組み込んだモデルの構築は実質的に不可能であり、本研究で示した確率分布のようにある程度のばらつきをもった確率分布を用いて表現する方が現実的なアプローチといえる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、森林総合研究所交付金プロジェクト「人工林施業の長伐期化に対応した将来木選定の指針策定」、および科学研究費補助金基盤(C) No. 23580202 「地形と林分構造の複雑性が森林内風環境に及ぼす影響。施業シナリオへの CFD の応用」による援助を受けた。

引用文献

- (1) 安藤貴 (1982) 林分の密度管理. 126pp., 農林出版, 東京.
- (2) 伊ヶ崎知弘 (2009) 成長制御 (*In*: 森林総合研究所編, 森林大百科事典. 626pp, 朝倉書店, 東京) 289p.
- (3) 石井弘明 (2006) 樹木生理と森林群落動態をつなぐ樹型研究. 日林誌 88 : 290-301.
- (4) 植木達人 (2007) 列状間伐の考え方とその実践. 205pp., 全国林業改良普及協会, 東京.
- (5) 藤森隆郎 (2011) ドイツ・オーストリアのフォレスターによる将来木施業の検討. 山林 1523 : 21-28.
- (6) 齊藤哲・川崎達郎 (2011) スギ一次枝の分枝角度の特徴. 関東森林研究 62 : 99-102.
- (7) TAKENAKA, A. (1994) A simulation model of tree architecture development based on growth response to light environment. J. Plant Res. 107: 321-330.
- (8) 堤利夫 (1993) 森林生態学. 166pp., 朝倉書店, 東京.