

降雨遮断による土壌の乾燥がスギ成木の葉の水利用特性に与える影響

井上裕太¹・荒木眞岳¹・釣田竜也¹・阪田匡司¹・田中憲蔵¹・北岡哲¹・韓慶民¹・齊藤哲¹

1 森林総合研究所

要旨：土壌の乾燥にともなうスギ成木の葉の水利用特性の変化を評価するため、スギ人工林内に屋根を設置し、降雨遮断による土壌乾燥処理を2018年5月末から3カ月間行った。乾燥処理区の土壌水ポテンシャルは徐々に低下し、8月末に対照区で約-0.02 MPaだったのに対し乾燥処理区では-0.40 MPaを下回った。しかし、期間を通じて、夜明け前の葉の水ポテンシャルに乾燥の影響はみられなかった。8月末に、各区1個体について葉のガス交換特性と水ポテンシャルの日変化を調べた。午後には乾燥処理個体の方がやや気孔を閉じている傾向が認められたものの、葉の水ポテンシャル、光合成速度および蒸散速度の日変化パターンに明瞭な処理間差はみられなかった。以上のように、スギ成木は、3ヶ月間の降雨遮断による土壌の乾燥に対して葉の水利用特性をほとんど変化させていなかった。

キーワード：乾燥ストレス、気孔コンダクタンス、降雨遮断実験、光合成、葉の水ポテンシャル

Leaf water use characteristics in mature Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) trees in responses to artificial soil drought by throughfall exclusion experiment

Yuta INOUE¹, Masatake G. ARAKI¹, Tatsuya TSURITA¹, Tadashi SAKATA¹, Tanaka KENZO¹, Satoshi KITAOKA¹, Qingmin Han¹, Satoshi SAITO¹

Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, Japan

Abstract: Unusual drought induced by climate change may cause increasing mortality of trees and decreasing productivity in diverse forest types. Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) is widely planted for timber production in Japan. Thus, it is important to predict to what extent drought will affect productivity of Sugi stands. In order to understand responses of leaf water use characteristics to soil drought in mature Sugi trees, we conducted throughfall exclusion experiment (TEE) from 20 May to the end of August, 2018. We established two plots in a 40-year-old sugi stand: one with roof to exclude throughfall (dry plot, 10×10 m); another without roof (control plot). Soil water potential in the dry plot was 0.40 MPa lower than that in the control plot (-0.02 MPa) at the end the experiment. However, there was no significant difference in predawn leaf water potential between trees growing in the dry and control plots during the TEE. Moreover, patterns of diurnal change in leaf water potential and leaf gas exchange at the end of August were almost identical between the two plots. These results indicated that drought achieved by the TEE within three months had less effect on leaf water use characteristics in mature Sugi trees.

Key-word: drought stress, leaf water potential, photosynthesis, stomatal conductance, throughfall exclusion experiment

I はじめに

近年の気候変動によって降水パターンの極端化や気温上昇に伴う乾燥化が予測され、様々な森林帯において樹木の成長低下や枯死が起こることが懸念されている(1)。乾燥が樹木に及ぼす影響は、水消費量の多さ、高い樹高による水輸送距離の増大により、小径木よりも林冠を構成する大径木においてより大きいことが報告されている(3)。スギは日本の主要な造林樹種であり、現在スギ人工林面積の約半分は10歳級以上と成熟段階にある(11)。そのため、将来の気候変動によるスギ人工林への影響、

特に木材生産機能の低下が懸念される。

乾燥がスギ人工林に与える影響については、九州地方では、無降水日が春・夏期で30日以上、冬期で40日以上になると、スギの成長低下や枯死が生じることが報告されている(10)。また、関東地方におけるスギ大径木の衰退現象は、大気乾燥化や水分条件の悪化による水ストレスが原因である可能性が指摘されている(8)。そのため、日本において将来的に無降水日の増加によって土壌の乾燥が起こった場合、スギの成長低下や枯死が起こる可能性がある。しかし、土壌の乾燥に対するスギ成木

の生理生態学的応答を評価した例は限られており（9）、葉の水利用特性、すなわち葉の水ポテンシャルやガス交換特性が、どの程度の土壌の乾燥で影響を受けるのかは不明な点が多い。

本研究は、スギ人工林に屋根を設置した乾燥処理区と設置していない対照区を設け、2018年5月末から8月末まで降雨遮断実験を行った。実験期間における夜明け前の葉の水ポテンシャルの変化、および8月末における葉のガス交換特性と水ポテンシャルの日変化パターンを測定した。これらを処理区間で比較することで、土壌の乾燥がスギ成木の葉の水利用特性に及ぼす影響を評価した。

II 調査地と方法

1. 調査地 森林総合研究所千代田苗畑（茨城県かすみがうら市、36°10'N, 140°13'E）の約40年生のスギ人工林を調査地とした。この林分の立木密度は2650本/ha、平均樹高は20.8m、平均胸高直径は21.7cmであった。調査地内に、降雨遮断のための屋根を地上高約4mに設置した乾燥処理区（10×10m）と、隣接して屋根を設置しない同サイズの対照区を設定した。乾燥処理区の周囲に、深さ約40cmまでプラスチック製の波板を埋め込み、処理区外からの土壌水分の流入を防いだ。屋根が設置された2018年5月20日を、降雨遮断開始日とした。

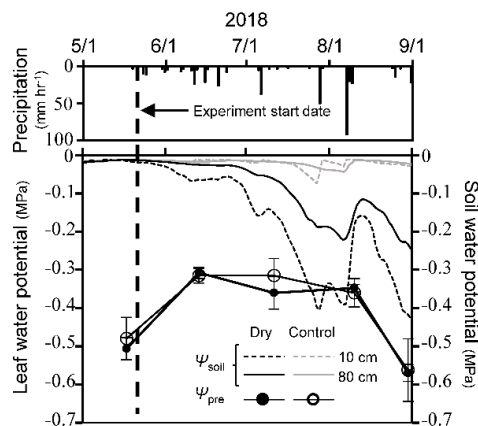


図-1.降雨遮断期間中における降水量、土壌水ポテンシャル、および夜明け前の葉の水ポテンシャルの変化

Fig. 1 Changes in precipitation, predawn leaf and soil water potential during the throughfall exclusion experiment.

2. 土壌水ポテンシャルと雨量測定 乾燥処理区と対照区それぞれにおいて、2018年5月1日から2018年8月31日まで土壌水ポテンシャルを測定した。各処理区の中央付近にセンサー（MPS-6, Decagon Devices）を2深度（10, 80 cm）に埋め込み、各深度3センサーを用いて20分毎にデータロガーに記録した。降水量は、千代

田苗畑内の転倒ます型雨量計を用い、10分毎にデータロガーに記録した。

3. 夜明け前の葉の水ポテンシャル 夜明け前の葉の水ポテンシャルを、2018年の5月から8月にかけて5回測定した。各処理区3～4個体から樹冠上部（高さ約21m）のシュートを夜明け前に1本ずつ採取し、プレッシャーチャンバー（Model 600, PMS instruments）を用いて葉の水ポテンシャルを測定した。

4. 葉のガス交換特性と水ポテンシャルの日変化 2018年8月23日（降雨遮断開始後95日目）に、各処理区1個体について、樹冠上部の当年葉を対象として、ガス交換特性の日変化を測定した。針葉樹チャンバー（Li-6400-05, Li-cor）を備えた携帯型光合成蒸散測定装置（Li-6400XTR, Li-cor）を2台用いて、外気条件下の着葉状態における葉の光合成速度、蒸散速度、および気孔コンダクタンスを5:00から18:00まで概ね3分毎に測定した。光量子センサー（LI-190R）で光合成光量子束密度を測定した。同日の6:00から18:00の間、1～2時間毎に計7回、各処理区3～4個体から樹冠上部のシュートを1本ずつ採取し、葉の水ポテンシャルを測定した。

III 結果

1. 土壌水ポテンシャル 対照区の土壌水ポテンシャルは、実験期間を通じて10, 80 cm深度でそれぞれ-0.07, -0.04 MPa以上であった（図-1）。一方、乾燥処理区の土壌水ポテンシャルは、降雨遮断開始から徐々に低下し、7月28日と8月7日の台風による雨の吹き込みにより一時的に増加したものの、8月31日には10, 80 cm深度でそれぞれ-0.43, -0.24 MPaまで低下した。

2. 夜明け前の葉の水ポテンシャル 夜明け前の葉の水ポテンシャルは、実験期間を通じて-0.31から-0.57 MPaの範囲にあり、いずれの月においても乾燥処理区と対照区間で差がみられなかった（図-1）。

3. 葉の水ポテンシャルとガス交換特性の日変化 降雨遮断開始から95日後の、葉の水ポテンシャル、気孔コンダクタンス、光合成速度および蒸散速度のいずれにおいても、日変化パターンに明瞭な処理間の差はみられなかった（図-2）。光合成・蒸散速度と気孔コンダクタンスは、夜明け後の光合成光量子束密度の上昇に対応して増加し、9時頃に最大値に達した（図-2）。この間、葉の水ポテンシャルは、-0.5 MPaから-1.5 MPa程度まで低下した。11時頃には、光合成・蒸散速度と気孔コンダクタンスは最大値の60～70%程度まで低下した。葉の水ポテンシャルは、12時頃に-1.8 MPa程度

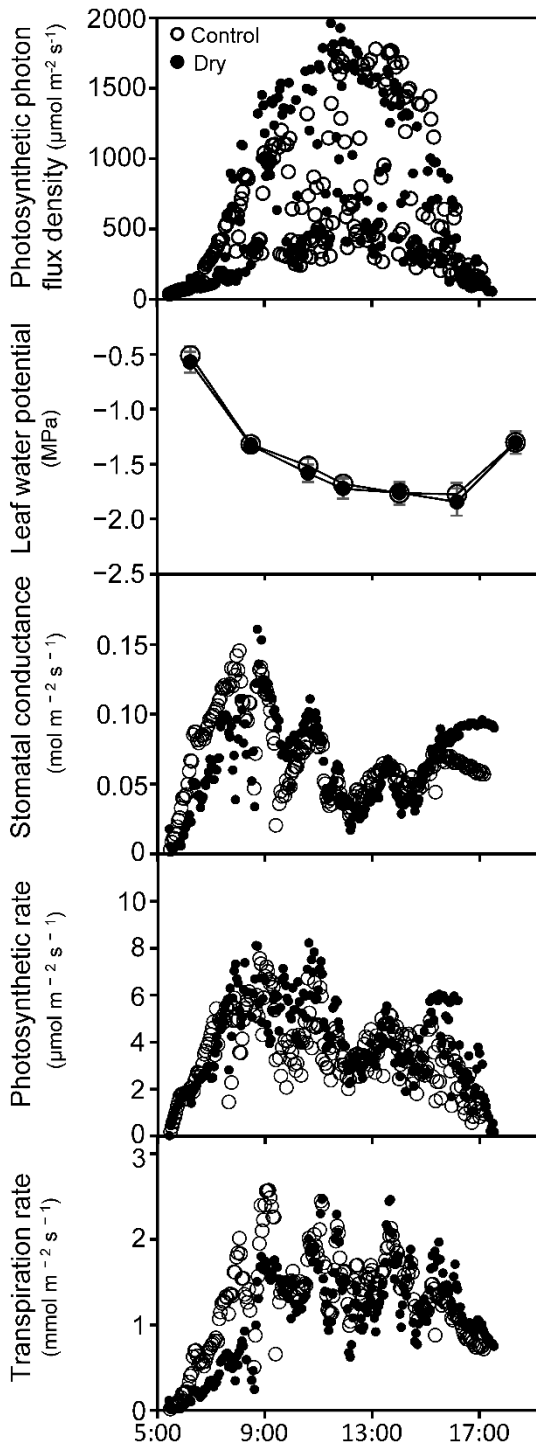


図-2. 2018年8月23日(降雨遮断開始後95日目)における光合成量子束密度, 葉の水ポテンシャル, 気孔コンダクタンス, 光合成速度, および蒸散速度の日変化

Fig. 2 Diurnal changes in light, leaf water potential, stomatal conductance, photosynthetic and transpiration rates at 95 days after the beginning of throughfall exclusion experiment.

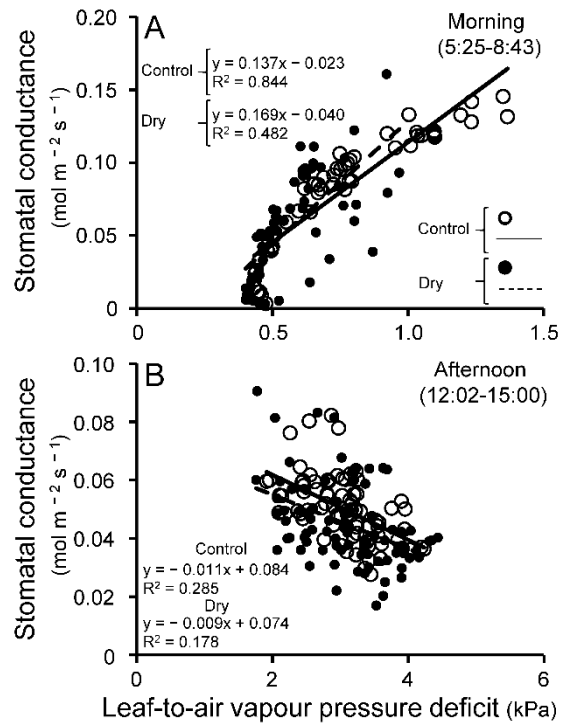


図-3. 気孔コンダクタンスと葉-大気水蒸気圧差の関係 (A:午前, B:午後)

Fig. 3 Relationships between stomatal conductance and leaf-to-air vapour pressure deficit (A: morning, B: afternoon).

まで低下した後15時までほぼ横ばいであった。

夜明けからガス交換特性値が最大となる時間帯(午前: 5:25-8:43)と葉-大気水蒸気圧差(leaf-to-air vapour pressure deficit: LVPD)が高く葉の水ポテンシャルがほぼ最低であった時間帯(午後: 12:02-15:00)とに分けると, LVPDと気孔コンダクタンスとの間に午前は正の, 午後には負の有意な直線関係が, 乾燥処理区と対照区の個体それぞれで得られた(図-3)。回帰直線を処理区間で比較した結果, 午前では差はみられなかったが, 午後では乾燥処理個体で切片が有意に小さかった($P < 0.001$, 共分散分析)。蒸散速度についても同様の結果が得られた。

IV 考察

本研究では, 降雨遮断による土壌の乾燥により処理区間の土壌水ポテンシャル差が -0.4 MPa以上に達したにも関わらず, スギ成木の葉の水利用特性に明瞭な処理間差がみられなかった。

作物や苗木に影響を与える土壌の乾燥程度の指標として, 植物の成長阻害水分点(土壌水ポテンシャル: -0.1 MPa)と初期萎凋点(同: -0.61 MPa)がある(4)。本実験期間中, 対照区の土壌水ポテンシャルは -0.1 MPaを下回ることはなかった。一方, 乾燥処理区では, 10cm深度

で -0.43 MPa に達しており、初期萎凋点には及ばないものの成長阻害水分点よりかなり低下した。本調査地では、2017年6月に無降水日が17日続き、自然条件下で10cm深度の土壌水ポテンシャルが -0.17 MPaになったことが観察されている(2)。すなわち、降雨遮断によって、比較的強い土壌の乾燥処理ができたと考えられる。

実験期間を通じて、夜明け前の葉の水ポテンシャルに処理間差はなかった。また、これらの値は、同調査地のスギ成木について自然条件下で調べた5-8月における値(-0.3 から -0.6 MPa)(6)と、ほぼ同等であった。したがって、夜明け前の葉の水ポテンシャルは、土壌の乾燥の影響を受けていなかった。実験開始前に細根分布を調べた結果、土壌深層にも約2割の細根が存在した(未発表)。深層からの吸水により、葉の水ポテンシャルが維持されていた可能性も考えられる。

8月末に観察された葉のガス交換特性や水ポテンシャルの日変化パターンに、明瞭な処理間差はみられなかった。また、葉のガス交換特性は、午前中に最大に達した後、葉の水ポテンシャルの低下やLVPDの増加に伴い日中低下が生じるという、夏季のスギを含む針葉樹で報告されている典型的な日変化パターン(6, 7)を示した。したがって、葉のガス交換特性や水ポテンシャルの日変化にも、顕著な土壌乾燥の影響は認められなかった。特に、午前には、気孔コンダクタンスとLVPDの関係に処理間差がみられなかったことから、乾燥処理個体も対照個体と同程度に気孔を開いて葉のガス交換を維持していた。一方、午後の日中低下時には、土壌乾燥条件下で乾燥処理個体はより気孔を閉じることで蒸散を抑制している可能性が示された。同様の土壌の乾燥に対する気孔制御応答は、広葉樹でも報告がある(5, 12)。

以上のことから、スギ成木は、降雨遮断による土壌の乾燥に対して、夜明け前の葉の水ポテンシャル、葉のガス交換特性と水ポテンシャルの日変化のいずれにおいても明瞭な応答を示さなかった。今後は、土壌の乾燥に対するスギ成木の生理的応答だけでなく、形態や成長への乾燥の影響を調べることで、気候変動にもなう乾燥化がスギ人工林へ及ぼす影響を予測するための基礎データを提供できると考えられる。

謝辞：本研究は、農林水産省戦略的プロジェクト研究推進事業「森林・林業、水産業分野における気候変動適応技術の開発」の支援を受けた。調査を行うにあたり、森林総合研究所の皆様にご協力頂いた。ここに厚くお礼申し上げます。

引用文献

- (1) Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, et al. (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecol Manag* 259: 660-684
- (2) 荒木眞岳・釣田竜也・阪田匡司・齊藤哲 (2018) 茨城県のスギ人工林における林分蒸散量に及ぼす飽差と土壌水分条件の影響. *関東森林研究* 69 (1) : 97-98
- (3) Bennett AC, McDowell NG, Allen CD, Anderson-Teixeira KJ (2015) Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. *Nature Plants* 1: 15139
- (4) Dou DQ・増田拓郎・守屋均 (2001) 水ストレスが数種の常緑広葉樹の光合成・蒸散活動に及ぼす影響. *日緑誌*, 26: 300-308
- (5) Inoue Y, Ichie T, Kenzo T, Yoneyama A, Kumagai T, Nakashizuka T (2017) Effects of rainfall exclusion on leaf gas exchange traits and osmotic adjustment in mature canopy trees of *Dryobalanops aromatica* (Dipterocarpaceae) in a Malaysian tropical rain forest. *Tree Physiol* 37: 1301-1311
- (6) 井上裕太・北岡哲・荒木眞岳・田中憲蔵・齊藤哲 (2018) スギ成木の樹冠上部の葉の水ポテンシャルと光合成・蒸散速度の季節変化. *関東森林研究* 69: 19-22
- (7) Kenzo T, Yoneda R, Ninomiya I (2018) Seasonal changes in photosynthesis and starch content in Japanese fir (*Abies firma* Sieb. et Zucc.) saplings under different levels of irradiance. *Trees* 32: 429-439
- (8) 松本陽介・丸山温・森川靖 (1992) スギの水分生理特性と関東平野における近年の気候変動動一樹木の衰退現象に関連して一. *森林立地* 34: 2-13
- (9) 長倉淳子・重永英年・三浦覚 (2011) 異なる土性のライシメータに植栽されたスギ、ヒノキ成木における降雨遮断による乾燥害症状. *森林総合研究所研究報告* 10: 263-279
- (10) 小河誠司 (1996) 九州地方におけるスギ ヒノキの乾燥被害 (干害). *森林防疫ニュース* 45: 62-69
- (11) 林野庁 (2016) 平成 28 年度森林及び林業の動向. 林野庁, 東京: 236pp
- (12) Santos VAHFD, Ferreira MJ, Rodrigues JVFC, Garcia MN, Ceron JVB, Nelson BW, Saleska SR (2018) Causes of reduced leaf-level photosynthesis during strong El Niño drought in a Central Amazon forest. *Glob change biol* 24: 4266-4279