

森林の光合成・炭素固定能の促進を目指した樹木生理学的研究

Tree Physiology Research for Increasing the Carbon Sequestration and Photosynthetic Capacity of Forest Ecosystems

神戸大学大学院農学研究科 准教授
石井弘明

Hiroaki ISHII

Associate Professor, Graduate School of Agricultural Science, Kobe University

研究の概要

明るい光領域から暗い光領域まで、樹木はどこまで無駄なく光を利用できるのか？本研究では、樹木による光の利用効率を高め、光合成を促進する形態・生理的形質を特定することを目的とした。また、これらの形質を改良し、光利用効率の高い品種を開発することで、森林によるCO₂吸収を促進できると考えた。これまでの研究成果から、シュート内における針葉の配置や樹冠内におけるクロロフィルの分配が、樹木の光利用効率を規定する重要な形態・生理的形質であることが示された。光利用効率の高い品種を開発すれば、造林地の光合成生産および炭素吸収量を高めることができる。延長研究では、有用樹種の光合成特性の調査データにもとづいた樹木の光合成モデルを開発し、葉の配置やクロロフィルの分配といった形質がどの程度まで光合成を促進できるのかを理論的に検証する。また、これらの形質を支配する遺伝的要因を明らかにし、品種改良研究に応用する。

Abstract

Of the various terrestrial ecosystems, forests hold the largest carbon store. Atmospheric CO₂ concentration could potentially be reduced by accelerating carbon uptake by forest ecosystems. Development of new tree varieties with high carbon sequestration capabilities could potentially increase carbon uptake through reforestation. We have identified several phenotypic characteristics that could potentially increase tree photosynthesis. Plasticity of needle morphology and their arrangement on twigs, as well as the allocation of chlorophyll and other enzymes within the crown are important characteristics that allow trees to capture light efficiently. The present study aims to apply these findings to develop tree varieties with high photosynthetic capacities. Our goal is to elucidate the contribution of morphological and allocational plasticity toward increasing photosynthetic capacity and to elucidate the quantitative genes that determine these traits.

1. 研究目的

明るい光領域から暗い光領域まで、樹木はどこまで無駄なく光を利用できるのか？本研究では、樹木による光の利用効率を高め、光合成を促進する形態・生理的形質を特定することを目的とした。また、これらの形質を改良し、光利用効率の高い品種を開発することで、森林によるCO₂吸収を促進

できると考えた。

まず、光合成速度を規定する形態的形質を特定するため、針葉樹のシュート構造を操作する実験を行った。陽樹冠シュートの針葉を間引いた実験では、葉量が半減しているにも関わらず、光合成速度が全体的に低下するのではなく、暗い光領域では逆に間引き前よりも高い光合成速度を示した

(図1)。これは、間引きによりシュート内における針葉どうしの重なり合い（相互被陰）が減少したためである。間引き後の光—光合成曲線は間引き前と比べて補償点が低く、弱光領域での光合成速度が高かった。これは、樹冠下部の暗い光環境に順化した陰樹冠シュートが示す光合成特性と同じである。このことから、シュート内における針葉の配置が陽樹冠から陰樹冠への光合成特性の変化に寄与する重要な要因であることが示された。

また、光合成速度を規定する様々な生理的形質を調査した結果、針葉の面積あたりのクロロフィル含有量は樹冠上部で最大であったが、重量あたりのクロロフィル量は逆に樹冠下部で最大となった。これは、樹冠下部の暗い光環境において、物質投資量あたりのクロロフィル含有量が最も高く、光合成における光利用効率が高いことを示している。

平成20年度の研究成果から、シュート内における針葉の配置や樹冠内におけるクロロフィルの分配が、樹木の光利用効率を規定する重要な形態・生理的形質であることが示された。樹冠の上部から下部にかけての光の減少に対する形態・生理的反応性は樹種によって異なる(Ishii et al. 2007, 図2)。また、反応性の高い樹種であっても土壌養分が不足すると、反応性が鈍る(図2)。

光強度の変化に対する形態・生理的形質の可塑性が高い樹種ほど光を無駄なく利用し、高い光合成生産を実現できると考えられる。たとえば、世界一樹高が高く、地上部現存量が多い北米のセコイアメスギでは、100mを超える樹冠上部から地上付近にかけて、葉の形態が大きく変化する(Ishii et al. 2008)。光の勾配に応じて葉の配置やクロロフィルの分配を変化させることは、太陽光発電にたとえると、一定量のソーラーパネルやその材料であるシリコンをいかに効率的に配置・分配して発電量を最大にするか

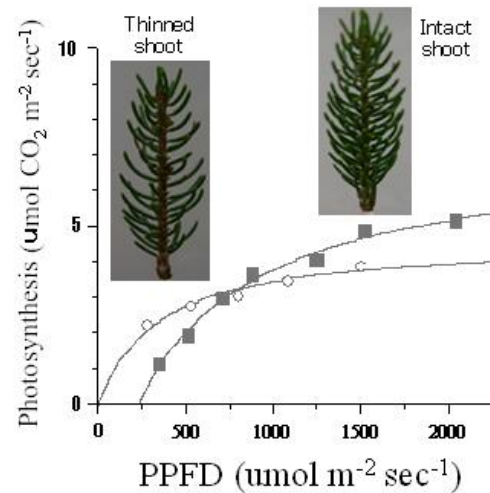


図1：アカエゾマツの光—光合成曲線。陽樹冠シュートの針葉を間引くと陰樹冠シュートに似た光合成特性を示す。

ということになる。したがって、効率的な配置や分配を実現できる品種を開発すれば、造林地の光合成生産および炭素吸収量を高めることができると考えられる。

そこで、今後は光合成能の高い品種の開発を目指して、スギ・ヒノキの人工林を中心に葉の垂直分布やクロロフィルの分配といった形質がどの程度まで光合成を促進できるのかを検証することを目的とした。

2. 研究経過

延長研究では国内（京都、兵庫、宮崎、鹿児島）のスギ・ヒノキ人工林において、針葉樹の樹冠内における葉の分布と光合成に関する調査を行った。京都、宮崎、鹿児島ではスギ林を対象とし、京都では90年生のヒノキ林を対象として調査を行った。

3. 研究成果

兵庫県における研究成果から、スギ6品種のシュート光利用効率と成長量の間、正の相関を得た(図3)。さらに、京都の90年生ヒノキ林では、樹冠内の光エネルギーの勾配に応じた葉の垂直分布パターンが

明らかになった (図4)。シュート内の針葉の重なりあいを減らして、葉の相互被陰を少なくできる樹種ほど樹冠が深くなり、単位土地面積あたりの葉量 (葉面積指数) が高くなることから、弱光条件において葉の相互被陰を減らすことができる品種は、暗い光領域まで無駄なく光を利用することで、高い成長量を実現していると考えられる。

4. 今後の課題と発展

本研究の成果から、樹木の葉の形態・生理機能は樹冠内における光の分布様式に対応しており、針葉樹では光合成における光エネルギー利用効率と林分成長量に高い正の相関があることが明らかになった。造林木として選抜された針葉樹種では、葉の形態を多様に変化させて樹冠全体で光を効率よく利用する機構が発達していることが示唆された。

一方、本研究の期間内では当初予定していた遺伝子解析まで研究を進めることができなかった。その理由として、遺伝子レベルの解析に見合うレベルまで光合成に関する生理・形態的形質を絞り込めなかったこ

べルの解析にかけられるような、詳細な生理・形態的形質の特定することである。

本研究から得られた成果により、針葉樹の光合成の促進に寄与する形態・生理的形質が明らかになる。これらの形質を可塑的に変化させ、高い光獲得効率を実現できる樹種を開発すれば、光合成・炭素固定能の高い造林木を作り出すことができる。改良された樹種を新たな人工林の造成に用いれば、木材生産の増加とともに森林による炭素固定量の増加が期待できる。

樹冠内における光の勾配に応じて葉の形態・生理機能を変化させ、光合成における光利用効率を高めることは、太陽光発電にたとえると、利用波長や性能の異なるソーラーパネルをいかに効率的に配置・分配して発電量を最大にするかということと同じである。したがって、本研究の成果は、森林の炭素固定機能の促進だけでなく、樹木の光利用を参考にした、新しい太陽光発電システムの開発につながる可能性があることから、CO₂の吸収固定およびクリーンエネルギーの開発の両側面から地球環境問題に貢献できる。

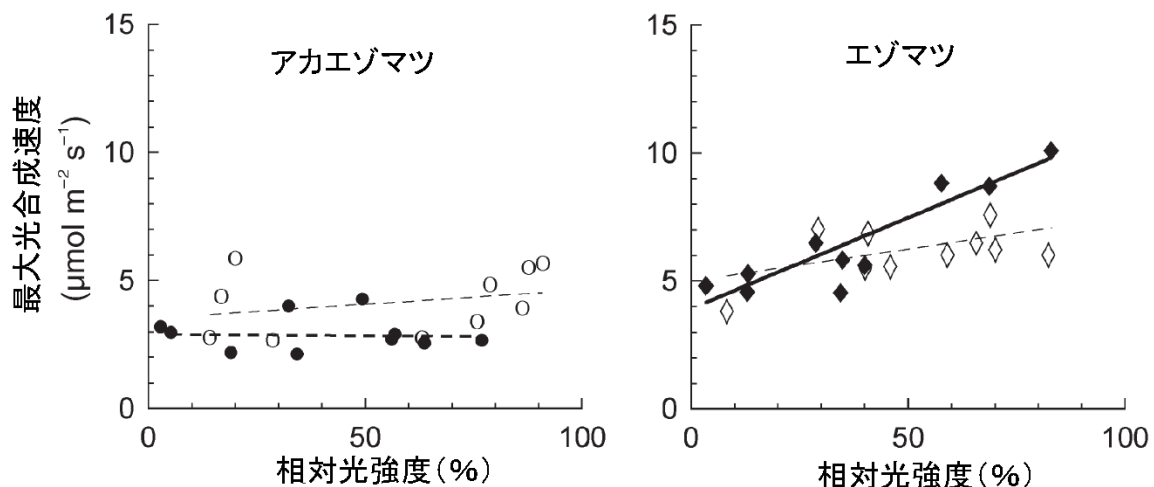


図 2 : アカエゾマツおよびエゾマツの 1 年生シュートの最大光合成速度と相対光強度の関係。黒：森林土；白：火山灰土

とが挙げられる。今後の課題は、遺伝子レ

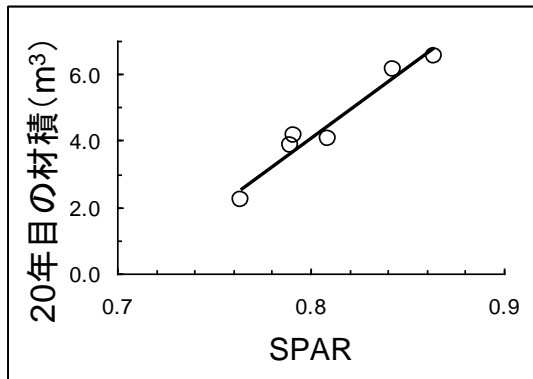


図 3 : 兵庫県におけるスギ 6 品種のシュート内受光効率 (SPAR) と成長量の関係。

5. 発表論文リスト

- Ishii, H., Takashima, A., Makita, N., Yoshida, S. (2010) Vertical stratification and effects of crown damage on maximum tree height in mixed conifer-broadleaf forests of Yakushima Island, southern Japan. *Plant Ecology*: DOI: 10.1007/s11258-010-9768-z
- Dolezal, J., Ishii, H., Kyncl, T., Takahashi, K., Vetrova, V.A., Homma, K., Sumida, A., Hara, T. (2010) Climatic factors affecting radial growth of *Betula ermanii* and *Betula platyphylla* in Kamchatka. *Canadian Journal of Forest Research*: 40: 273-285
- 杉元貴信・石井弘明・千葉幸弘・金澤洋一 (2010) 90年生ヒノキ高齢林における枝・葉現存量および垂直分布の推定. *日本森林学会誌* 92: 63-71
- Ishii, H., Yoshimura, K., Mori, A. (2009) Convergence of leaf display and photosynthetic characteristics of understory *Abies amabilis* and *Tsuga heterophylla* in an old-growth forest in southwestern Washington State, USA *Tree Physiology* 29: 989-998
- Otoda, T. Ishii, H. (2009) Basal reiteration improves the hydraulic functional status of mature *Cinnamomum camphora* trees. *Trees* : 23:317-323.
- Ishii, H.T., Jennings, G.C., Sillett, S.C., Koch, G.W. (2008) Hydraulic constraints on morphological exploitation of light in tall *Sequoia sempervirens* trees. *Oecologia* 156(4): 751 - 763
- Inoue, S., Shirota, T., Mitsuda, Y., Ishii, H., Gyokusen, K. (2008) Effects of individual size, local competition and canopy closure on the stem volume growth in a monoclonal Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation. *Ecological Research* 23:953-964

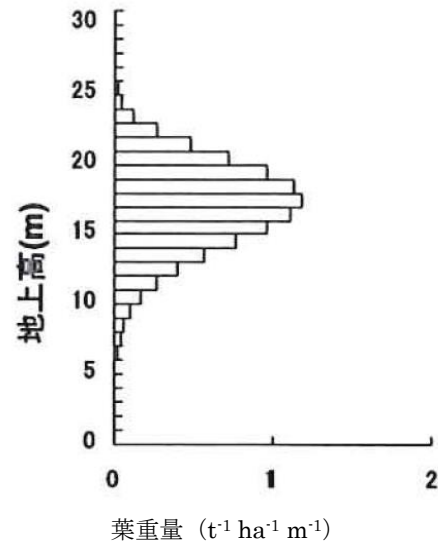


図 4 : 京都の 90 年生ヒノキ人工林における葉量の垂直分布。