

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 助教
石井弘明

Hiroaki ISHII

Assistant Professor, Graduate School of Agricultural Science, Kobe University

研究の大要

大気中のCO₂濃度の上昇による地球温暖化への対策として森林の炭素固定機能が注目されている。森林は陸域生態系のなかで最も炭素蓄積量が多い。天然林や人工林の炭素蓄積量を正確に把握し、森林の炭素固定速度を促進することで大気中のCO₂濃度を削減できることが期待される。しかし、世界規模で進む土地開発による森林消失によって地球上の森林面積は急激に減少しており、陸域生態系における炭素固定量の低下が危惧されている。失われた森林面積を回復し、植林地の炭素固定機能を促進するためには、炭素固定能の高い有用樹種の開発が必要となる。本研究では炭素固定能の高い造林樹種を開発するために、造林木として有用な針葉樹の光合成速度を規定する形質を特定する。本研究では葉やシュートの光獲得効率（いかに無駄なく光を利用しているか）に注目する。窒素や酵素を生成するには代謝コストがかかるが、その配分や形態を変化させることは比較的容易である。よって、申請者らは葉やシュートの構造および樹形などの形態的形質や養分・酵素の配分を変化させることによってより樹木の光合成を促進できると考えた。また、光合成を促進する形質に関する可塑性の高い品種を開発することによって、造林地の炭素固定量を高めることができると考えた。

Abstract

Carbon sequestration by forest ecosystems is anticipated as a measure against global warming by offsetting the increase in atmospheric CO₂ concentration. Of the various terrestrial ecosystems, forests hold the largest carbon store. Atmospheric CO₂ concentration could potentially be reduced through accurate estimation of carbon stores in natural and artificial forests, and by accelerating carbon uptake by forest ecosystems. However, due to world-wide deforestation, forested areas are being lost at alarming rates. This has led to concerns that carbon sequestration by terrestrial ecosystems may decrease. Development of new tree varieties with high photosynthetic capacities could potentially increase carbon uptake through reforestation. The present study aims to specify phenotypic characteristics that control photosynthetic rates of plantation conifer species in order to develop varieties with high carbon sequestration capabilities. We will especially focus on light interception efficiency of conifer leaves and shoots, i.e. how well light is utilized without loss. While, synthesis of nutrients and enzymes involve metabolic costs, altering their allocation through morphological plasticity incurs less cost to the plant. We postulated that photosynthetic capacity of trees could be increased by altering morphological characteristics and allocation pattern of nutrients and enzymes. Carbon sequestration of plantation forests could be increased by developing tree varieties with high plasticity in phenotypic characteristics that promote photosynthesis.

1. 研究目的

樹木の葉に到達する光の量は林冠の上部から下部にかけて指数関数的に減少する。これにともなって、針葉樹では針葉一枚一枚の形態からシュート（葉と枝軸を含む単位）内における針葉の3次元的な配置、シュートの樹冠内における配置、樹木全体の樹形に至るまで、様々なレベルにおいて形態が多様に変化する。光が豊富な林冠の上部では、針葉が厚く、柵状組織が発達しており、葉緑体は何層にも重なり合っている。また、シュートにおける針葉の配置は3次元的で、様々な角度から太陽光を受けて高い光合成速度を実現できる構造をしている。一方、光が少ない林冠下部では、葉が薄く、シュート内における針葉の配置は平面的で、少ない光を効率的に捉えて低い光強度でも高い光合成速度を実現できる構造をしている。光環境に応じた形態的变化と同時に養分や酵素の配分も変化する。葉の重量あたりの窒素やルビスコ、クロロフィル（光合成を担う酵素）量は林冠の上部で下部よりも少ないものの、葉面積あたりの量は逆に多い。針葉樹は落葉樹と比べて葉面積指数（単位土地面積あたりの葉面積）が高く、林冠が深い（低いところまで葉がついている）という特徴をもっている。針葉樹は林冠の上部から下部にかけて減少する光を効率的に捉え、光を無駄なく利用することによって広葉樹よりも高い成長量を実現している。本研究の達成目標は針葉樹の光合成能を促進する形態的・生理的形質を明らかにすることである。

本研究では葉やシュートの光獲得効率（いかに無駄なく光を利用しているか）に注目する。窒素や酵素を生成するには代謝コストがかかるが、その配分や形態を変化させることは比較的容易である。よって、申請者らは葉やシュートの構造および樹形などの形態的形質や養分・酵素の配分を変化させることによってより樹木の光合成を

促進できると考えた。また、光合成を促進する形質に関する可塑性の高い品種を開発することによって、造林地の炭素固定量を高めることができると考えた。

2. 研究経過

今年度は北海道およびアメリカ、カリフォルニア州において、針葉樹の光合成に関する調査を行った。北海道では森林総合研究所北海道支所において、エゾマツとアカエゾマツのシュート形態と光合成を測定した。カリフォルニア州では体積世界最大の樹木であるジャイアントセコイアの調査を行った。

3. 研究成果

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。針葉樹の樹冠では明るい上部から暗い下部にかけて、光環境に応じてシュート構造が変化する（図1）。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2）。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



図1：エゾマツの陽樹冠（左）から陰樹冠（右）へのシュート形態の変化。

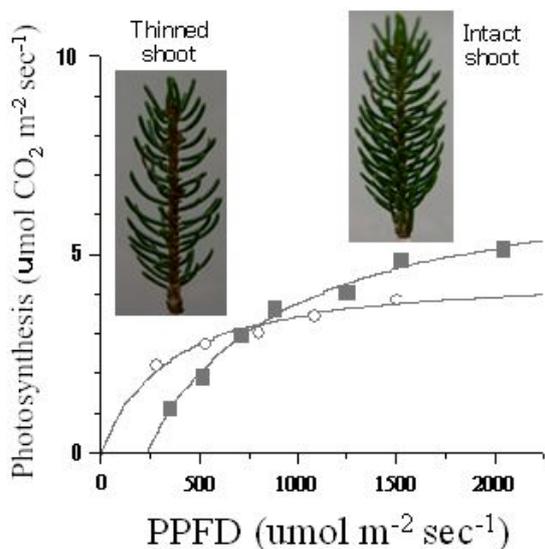


図2：アカエゾマツの光-光合成曲線。陽樹冠シュートの針葉を間引くと陰樹冠シュートに似た光合成特性を示す。

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。

今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。

4. 今後の課題と発展

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3)。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3のエゾマツ)。

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

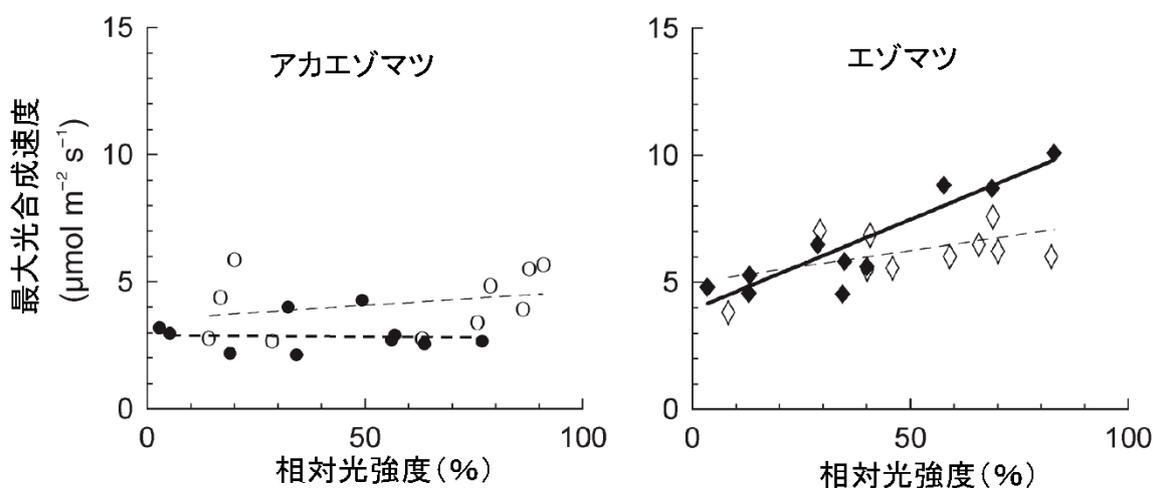


図3：アカエゾマツおよびエゾマツの1年生シュートの最大光合成速度と相対光強度の関係。黒：森林土；白：火山灰土

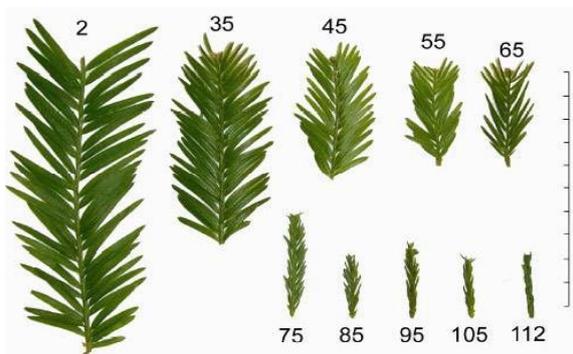


図4：セコイアメスギのシュート構造の垂直的变化

けて、葉の形態が大きく変化する(図4, Ishii et al. In press)。弱光条件において葉の相互被陰を減らすことができる樹種は、暗い光領域まで無駄なく光を利用していると考えられる。

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、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検証し、これらの形質を支配する遺伝的要因について明らかにしていきたい。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。

5. 発表論文リスト (印刷中も含む)

Ishii, H.T., Kitaoka, S., Fujisaki, T., Maruyama, Y., Koike, T. (2007) Plasticity of shoot and needle morphology and photosynthesis of two *Picea* species with different site preferences in northern Japan. *Tree Physiology* 27: 1595–1605.

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* In press.