

熱帯林の炭素固定機能の解明と森林修復技術の開発

田中憲蔵（森林総合研究所）

mona@affrc.go.jp

熱帯林は巨大な炭素蓄積機能を持ち、地球規模での気候変動の緩和に貢献しているが、その詳細は未知の部分が多い。本研究では、熱帯林を構成する高木から低木までの様々な樹木について、葉の二酸化炭素固定能力を正確に評価し、森林単位での二酸化炭素収支の解明に不可欠な知見を集積するとともに、劣化した熱帯林の地下部を含むバイオマス推定モデルを開発し、劣化してからの炭素蓄積量の回復過程を解明した。また、劣化した熱帯林に様々な郷土樹木の植林試験を行い、葉の環境順応特性から適地適木を選抜する簡便な指標を見出し、適切な植林技術を開発した。

はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)による国際的な二酸化炭素排出削減において、東南アジア熱帯林は重要な炭素貯蔵源と位置付けられ、森林の炭素固定能力の解明や劣化した森林の修復が急務となっている。しかし、東南アジア地域の熱帯林の炭素蓄積量や二酸化炭素吸収能力に関する科学的な知見は不足しており、その解明が求められている。一方、東南アジア地域では人為的な開発圧が高く、原生的な熱帯林の60%以上がすでに破壊され、劣化した森林に変化している。これら劣化した森林の炭素蓄積量の推定技術や、劣化からの回復過程に関しては不明な点が多い。また、こうした劣化した熱帯林へ郷土樹木を植林し、森林を修復しようとする試みも行われているが、多様な郷土樹木の適地適木判定が難しく、現地では簡便な植栽適地の判定技術や植栽技術が求められている。これらの背景から、(1)原生的な熱帯林での林床から林冠層に至る葉の二酸化炭素固定能力の解明、(2)劣化した熱帯林の地下部も含む炭素蓄積量の推定技術の開発と回復過程の解明、(3)劣化した熱帯林への郷土樹木を使った森林修復技術の開発を目的に研究を進めた。以下にそれらの成果を概説する。

森林の林床から林冠層に至る炭素固定能力

熱帯林の炭素固定能力の解明には、林分レベルの葉の光合成能力の知見が不可欠である。しかし、樹高が50mを越える原生的な熱帯林の林冠表層から林床まで森林の鉛直方向の葉の光合成能力の測定はアクセスの難しさから困難であった。そこで、林冠クレーンや梯子を用いて様々な樹高の樹木に直接アクセスし、葉の機能を測定する手法を用いて林分レベルでの葉の光合成能力の把握に成功した^{1,2,3)} (図1)。一般的に、温帯樹木の光合成能力は樹高に伴って低下するが、熱帯樹木では樹高により直線的に増加し、巨大高木では低木の5~8倍高い光合成能力を示すことを明らかにした^{1,4)}。これら新知見



図1 森林の鉛直方向へのアクセス手法
左図：林冠クレーンとゴンドラ、右図：梯子によるアクセス（矢印は人を示す）

を用いて作成した炭素収支モデルは、森林階層別に実測した二酸化炭素フラックスとの整合性も良く、森林レベルでの高精度な炭素収支の予測が可能になると考えられた⁵⁾。

劣化した熱帯林の炭素蓄積量の推定技術の開発と回復過程の解明

原生的な熱帯林の60%以上が人為的に劣化し、これら劣化した熱帯林（二次林）の炭素蓄積量の解明が急務である。森林の炭素蓄積量を調べるためには、地下部（根系）も含めた正確な樹木の乾燥重量（現存量）を、樹木の幹の直径や樹高から推定する式（アロメトリー式）が必要となる⁶⁾。しかし、これまでの推定式の多くは原生的な熱帯林の地上部のデータに基づいたもので、劣化二次林を対象とした式は少なく、地下部まで考慮したものは皆無であった。そこで、マレーシアの様々な二次林を構成する樹木の掘り取り調査を行い、地上部と地下部を含む現存量推定式を作成した⁷⁾。この推定式は、相関係数が0.9以上の高い精度で、樹種に関係なく適用できた（図2）。一方、原生的な熱帯林由来の推定式を二次林に用いると、現存量を数倍に過大評価してしまうことも明らかになった^{6,7)}。また、世界各地の熱帯地域の二次林のデータを集め、森林の地上部から地下部現存量を推定するモデルを作成し、既存の推定式より推定精度を50%近く高めることに成功した⁸⁾。さらに、約20年間の劣化した二次林の炭素蓄積量の回復過程を調べた

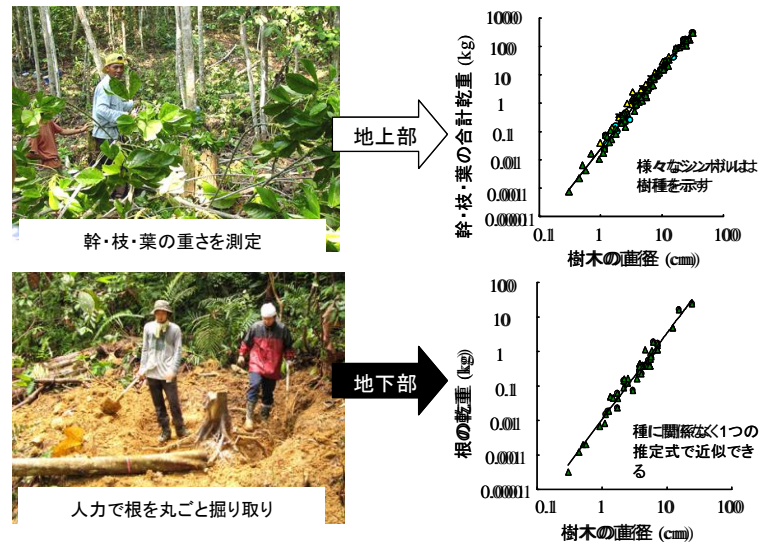


図2 劣化した二次林樹木の直径から地上部と地下部の現存量を高精度で推定するアロメトリー式の開発
二次林樹木を掘り取り、幹・枝・葉・根の重量を測定し推定式を作成。樹種に関係なく1つの式で現存量を推定できた。

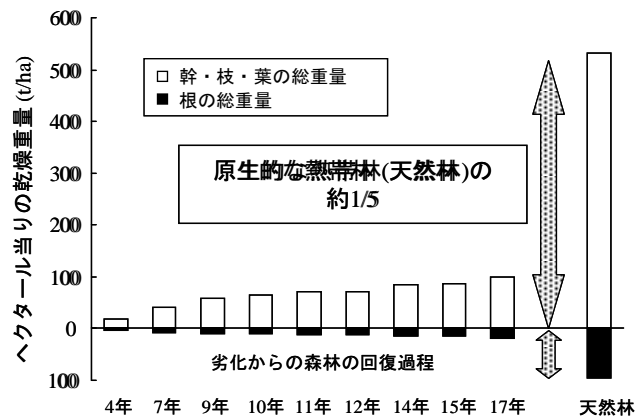


図3 劣化した熱帯林の地下部と地上部の回復過程
焼畑による劣化後17年で総現存量は120t/haに回復したが、天然林の約1/5の値でしかなく、二次林の炭素蓄積量の回復には時間がかかる。

ところ、樹高の低い二次林樹木では現存量の回復に限界があることが明らかになり（図3）、炭素蓄積能力を高めるには天然林に生育する樹木を用いた森林修復が有効であると考えられた⁸⁾。

劣化した熱帯林の修復技術の開発

劣化した二次林の炭素蓄積量を高めるためには、樹高が50mに達する巨大高木になる郷土樹

木を植林する必要がある。郷土樹木を闇雲に植えても生育不良などが起こるため、適切な植林技術の開発が必要である。そこで、劣化強度が異なる様々な環境の森林にフタバガキ科樹木を中心とした多様な郷土樹木を植林し、葉の形態や生理機能の環境順応能力を調べた^{9,10,11,12}。その結果、植栽木の材の密度(比重)が高い樹木ほど成長速度が遅く、最適な植栽光環境が暗くなることが明らかになった^{9,10}。また、単位葉面積当りの葉重(葉重/葉面積比)が大きく、葉脈網が発達した樹木で乾燥耐性が高くなることが分かった^{11,13}(図4)。これらの成果は、現地の人々が簡便に適地適木を選抜するための指標として利用でき、郷土樹木を使った植栽技術の向上に貢献できると期待される。

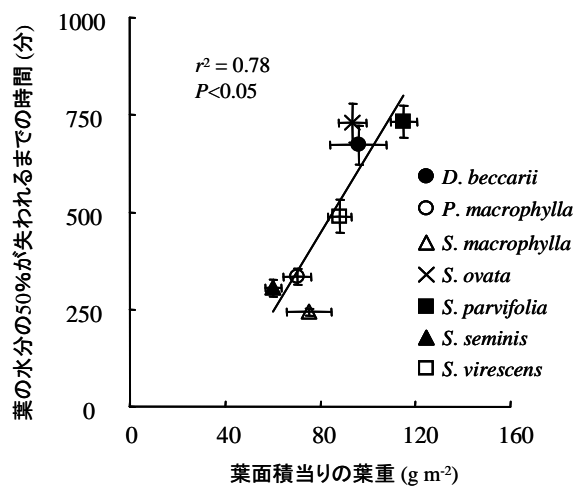


図4 葉面積当りの葉重を指標とした乾燥耐性の評価
様々なフタバガキ科樹木(郷土樹木)で調べた結果、葉が分厚い(葉面積当りの葉重が大)樹種ほど、乾燥環境下での葉の水分が失われにくく乾燥耐性が高い。

今後の展望

森林生態学は、熱帯林の炭素貯蔵量の正確な評価や森林修復技術の向上を通して、国際的な二酸化炭素排出削減の取り組みや、熱帯諸国の森林修復に向けた施策に貢献することが期待される。IPCCの予測では、温暖化の影響を受け、熱帯林地域の更なる高温化や雨量の大幅な変動が警告されている。東南アジアでも、エルニーニョが原因とされる大干ばつが1990年代後半に発生し、樹高40mを超える大木までもが大量に枯死した¹⁴。今後予想されるような気候の変化に対して、熱帯林の樹木はどのような反応を示すのか、本研究で行ったような樹木の生理生態学的な環境順応能力の評価から取り組むべき課題である。一方、枯死などによる森林の大規模な変化が起きた際には、樹種構成や炭素蓄積量がどのように変化するか推定するための技術開発が必要となるだろう。

謝辞

本受賞にあたって、一般社団法人日本森林学会から推薦を頂きました。関係する諸先生方にお礼申し上げます。また、この研究を行うに当たって様々な方のご協力、御教授を頂きました。特に、森林総合研究所、愛媛大学、高知大学、北海道大学、マレーシアプトラ大学、サラワク森林局の共同研究者、学生、現地に住むイバン族の皆様には厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) **Kenzo, T.,** Ichie, T., Watanabe, Y., Yoneda, R., Koike, T., Ninomiya, I. (2006) Changes in photosynthesis and leaf characteristics with height from seedlings to mature canopy trees in five dipterocarp species in a tropical rain forest. *Tree Physiology* 26: 865-873.
- 2) **Kenzo, T.,** Ichie, T., Yoneda, R., Kitahashi, Y., Watanabe, Y., Koike, T., Ninomiya, I. (2004) Interspecific variation of photosynthesis and leaf characteristics in five canopy trees of Dipterocarpaceae in a tropical

- rain forest. *Tree Physiology* 24: 1187-1192.
- 3) **Kenzo, T.**, Ichie, T., Koike, T., Ninomiya, I. (2003) Photosynthetic activity in seed wings of Dipterocarpaceae in a masting year: does wing photosynthesis contribute to reproduction? *Photosynthetica* 41: 551-557.
 - 4) Tanaka-Oda, A., **Kenzo, T.**, Koretsune, S., Sasaki, H., Fukuda, K. (2010) Ontogenetic changes in water-use efficiency ($\delta^{13}\text{C}$) and leaf traits differ among tree species growing in a semiarid region of the Loess Plateau, China. *Forest Ecology and Management* 259: 953-957.
 - 5) Kumagai, T., Ichie, T., Yoshimura, M., Yamashita, M., **Kenzo, T.**, Saitoh, T.M., Ohashi, M., Suzuki, M., Koike, T., Komatsu, H. (2006) Modeling CO₂ exchange over a Bornean tropical rainforest using the measured vertical and horizontal variations in leaf-level physiological parameters and leaf area densities. *Journal of Geophysical Research* 111: D10107.
 - 6) **Kenzo, T.**, Furutani, R., Hattori, D., Kendawang, J.J., Tanaka, S., Sakurai, K., Ninomiya, I. (2009) Allometric equations for accurate estimation of above-ground biomass in logged-over tropical rainforests in Sarawak, Malaysia. *Journal of Forest Research* 14: 365-372.
 - 7) **Kenzo, T.**, Ichie, T., Hattori, D., Itioka, T., Handa, C., Ohkubo, T., Kendawang, J.J., Nakamura, M., Sakaguchi, M., Takahashi, N., Okamoto, M., Tanaka-Oda, A., Sakurai, K., Ninomiya, I. (2009) Development of allometric relationships for accurate estimation of above- and below-ground biomass in tropical secondary forests in Sarawak, Malaysia. *Journal of Tropical Ecology* 25: 371-386.
 - 8) **Kenzo, T.**, Ichie, T., Hattori, D., Kendawang, J.J., Sakurai, K., Ninomiya, I. (2010) Changes in above- and belowground biomass in early successional tropical secondary forests after shifting cultivation in Sarawak, Malaysia. *Forest Ecology and Management* 260, 875-882.
 - 9) **Kenzo, T.**, Yoneda, R., Matsumoto, Y., Alias, M.A., Muhamad, N.M. (2011) Growth and photosynthetic response of four Malaysian indigenous tree species under different light conditions. *Journal of Tropical Forest Science* 23: 271-281.
 - 10) **Kenzo, T.**, Yoneda, R., Matsumoto, Y., Azani, M.A., Majid, N.M. (2008) Leaf photosynthetic and growth responses on four tropical tree species to different light conditions in degraded tropical secondary forest, Peninsular Malaysia. *JARQ - Japan Agricultural Research Quarterly* 42: 299-306.
 - 11) **Kenzo, T.**, Ichie, T., Ozawa, T., Kashimura, S., Hattori, D., Irino, K.O., Kendawang, J.J., Sakurai, K., Ninomiya, I. (2007) Leaf physiological and morphological responses of seven dipterocarp seedlings to degraded forest environments in Sarawak, Malaysia: A case study of forest rehabilitation practice. *Tropics* 17: 1-16.
 - 12) Hattori, D., **Kenzo, T.**, Kendawang, J.J., Irino, K.O., Tanaka, S., Ichie, T., Ninomiya, I., Sakurai, K. 2009. Effects of Light Intensity and Soil Physico-chemical Properties on Seedling Mortality and Growth of Six Dipterocarp Species Planted for Rehabilitation of Degraded Grassland, Secondary Forest and Logged Forest in Sarawak, Malaysia. *Japanese Journal of Forest Environment* 51: 105-115.
 - 13) **Kenzo, T.**, Ichie, T., Watanabe, Y., Hiromi, T. (2007) Ecological distribution of homobaric and heterobaric leaves in tree species of Malaysian lowland tropical rainforest. *American Journal of Botany* 94: 764-775.
 - 14) Hiromi, T., Ichie, T., **Kenzo, T.**, Ninomiya, I. (2011) Interspecific variation in leaf water use associated with drought tolerance in four emergent dipterocarp species of a tropical rain forest in Borneo. *Journal of Forest Research* in press. DOI 10.1007/s10310-011-0303-4.

Studies on carbon fixation and development of rehabilitation techniques in tropical rainforest

Tanaka Kenzo (Forestry and Forest Products Research Institute)

mona@affrc.go.jp