

Eucalyptus camaldulensis の現存量推定手法の提案 —オーストラリア半乾燥とベトナム熱帯 モンスーンのデータを用いて—

宇都木玄*¹・菅沼秀樹*²・山ノ下（山田）麻木乃*³・田内裕之*⁴・
相川真一*⁴・小島紀徳*²・森川 靖*³

I はじめに

Eucalyptus 属は世界に約 600 種以上あり、そのほとんどがオーストラリア大陸もしくはタスマニア島に自生する。特に *Eucalyptus camaldulensis* (River Red Gum) は、湿度の高いオーストラリア東～南西海岸沿いを除き、オーストラリア国内に広範に分布する。本樹種はアルカリ化、塩類集積および乾燥化した土壌にも生育し、森林火災や高温、湛水にも高い耐性を示す。また冬季の気温が 3～5°C の場所まで生育できる。立地条件によらず、高い光合成能力や可塑性のある水利用効率を維持できることも特徴である¹⁾。通常の植栽林では平均成長量は 15～40 m³/ha・年であり、*Eucalyptus* 属の中では決して大きいほうではない²⁾。しかし優れた荒廃立地への適応能力から、オーストラリア国内だけではなく、広く東南アジア地域、北米、南米、地中海沿岸部、アフリカ大陸などで早生樹として植林されている。用途として枕木、フェンス用支柱、またその赤い色調から家具にも利用されている。さらに高比重のため薪や炭材にも適している。

近年二酸化炭素の貯留源として森林に対する期待が高まっており³⁾、A/R CDM（新規植林・再植林クリーン開発メカニズム）における植林事業の展開もその表れである。こうした事業の展開においては、

植林地内の土壌も含めた 5 種の炭素プール（地上部・地下部・リター・枯死木・土壌）中の炭素変化量を把握する必要がある。そのため森林による二酸化炭素吸収量を正しく評価することが求められ、樹種毎の環境条件と成長量に関する基礎データを蓄積することが重要となる。

一般に現存量調査には相対成長関係が用いられる。これは調査者が比較的簡単に測定できる樹木の胸高直径や樹高といった変数と、樹木の現存量の関係を通常対数軸上で解析し、定式化（相対成長式）する手法である。

葉量や枝量は空間の占有量に限界があるため、同一樹種であっても密度や林分状況によって相対成長関係が大きく異なる。またオーストラリアの科学・工業研究機構では、論文として報告されていない相対成長式を収集する作業をおこない、葉や枝も含めて精度の高い現存量推定式を研究している。このように正確な現存量の予測には林分・立地条件ごとに相対成長式を作成することが必要で、そのための破壊的データ収集に多くの時間と労力が割かれる。しかし樹木の現存量の大部分を占める幹量に関しては、同一樹種内で相対成長関係が大きく変化しない可能性が示唆されている。従って既存の相対成長関係の比較検討を図ることは、この破壊的データ収集に係る労力を大幅に減少させることができよう。そ

Hajime Utsugi, Hideki Suganuma, Makino Yamanoshita (Yamada), Hiroyuki Tanouchi, Shin-ichi Aikawa, Toshi-nori Kojima and Yasushi Morikawa : General Allometric Equations for *Eucalyptus camaldulensis* —Using Data Taken from a Semi-Arid Area of Australia and a Tropical Monsoon Area of Viet Nam—

*¹ (独)森林総合研究所北海道支所, *² 成蹊大学理工学部物質生命理工学科, *³ 早稲田大学人間科学部人間環境科学科,

*⁴ (独)森林総合研究所

の結果、地域が異なっても同一の相対成長関係で現存量推定が可能となれば、より多くの国で現存量調査を迅速に実施できる。本稿では *E. camaldulensis* について、オーストラリア内陸部の乾燥地に生育する個体と、山田ら⁴⁾ が発表したベトナム熱帯モンスーンに植栽された個体について相対成長関係を比較し、タイでおこなわれた Thoranisorn *et al.* の研究成果⁵⁾ も参考にしながら、簡便な地上部現存量の推定式を提示したいと思う。

II 調査地と方法

1998年～2001年にかけて、西オーストラリア州内陸部にある Leonora (28°53'S, 121°45'E) 近隣の乾燥地で調査をおこなった⁶⁾。Leonora は西オーストラリアの首都パースから北東に 800 km ほど内陸にあり、1900年初頭から金鉱山の開発基地として発展してきた。ここは年間降水量が 200 mm, 年平均気温は 21°C, 気温の日較差は 15～20°C, 平均湿度は 43% であり、乾燥地として区分される。1月の日最高気温平均値は 37°C になり、非常に乾燥した地域である。

Leonora 近郊のワジ周辺に自生する *E. camaldulensis* 9本と同地の植栽地で育成した3年生の *E. camaldulensis* 2本について伐倒調査をおこなった。伐倒調査時点での自生地における地上部現存量は約 20 ton/ha であり、植栽地の2本は樹高が 3.6 m と 6 m の個体であった。自生地での立木密度は 220～292 本/ha, 植栽地における2個体は十分に孤立しており、相互被陰の無い状態であった。各個体を伐倒し、小型個体は全量について、幹・枝・葉に分離して乾燥重量を測定した。大型個体は伐倒直後に幹・枝・葉の全重量を測定し、一部のサンプルを実験室で乾燥させて水分含有量を計算し、各部位の乾燥重量を推定した。乾燥温度は 80 度とし、葉については 2 日間、幹・枝は 1 週間乾燥した。

熱帯モンスーンのデータとして、王子製紙(株)がベトナム、ソンベ省フータン地区 (11°30'N, 106°50'E ホーチミン市から北方約 120 km) に設定した試験林において、山田ら⁴⁾ が伐倒調査した6年生の *E.*

camaldulensis 4本についての結果を用いた。フータン地区は熱帯モンスーン気候にあたり、年間降水量は 1,900 mm, 平均最高気温は 31～35°C, 平均最低気温は 21～25°C で気温の年較差は小さい。試験林の植栽密度は 1,089 本/ha, 土壌は暗灰色土である。伐倒後の処理はオーストラリアと同様である。伐倒調査時点での地上部現存量は 61 ton/ha であった。

Thoranisorn *et al.*⁵⁾ は熱帯モンスーンに位置するタイ国カラシン県 (16°40'N, 103°30'E バンコク市から北東約 510 km) において、植栽密度を変えた *E. camaldulensis* の植栽試験を報告している。カラシン県付近は熱帯常緑季節林であり、焼畑農業が盛んな地域である。この論文では2年生から5年生にわたり、胸高直径を独立変数とした幹重量・枝重量・葉重量に関する相対成長式が作成されており、本研究における比較検討の補助資料とした。この試験地の植栽密度は 625～40,000 本/ha, 平均 10,923 本/ha であり、年間降水量は 1,200 mm, 年間平均気温は 26.2°C である。ここで発表された2年生から5年生までの4齢(それぞれ幹・枝・葉)別、合計12式の相対成長関係に対し、オーストラリアで得られた11個体の胸高直径をあてはめて、幹重量、枝重量、葉重量の推定値を計算し、タイにおける個体データとした(Thoranisorn *et al.*⁵⁾ では個体データが無く、相対成長式のみ記載されている)。

相対成長式は $[W = a \cdot S^h]$ のようにあらわされる。 W は樹木器官の乾燥重量、 S は測定部位のサイズ、 a と h は相対成長式の係数である。係数の推定は非線形回帰分析を用いた。オーストラリアのデータから得られた前式で表される相対成長関係の予測範囲に、ベトナムの各個体データが含まれるか検討するために、相対成長式の予測区間を求めた。ここでオーストラリアの相対成長関係の99%の予測区間(図2の点線)にベトナムのデータが存在すれば、ベトナムのデータはオーストラリアのデータから得られた相対成長式から推定可能であると判断した。タイの相対成長式から求めた個体データも同様に、オーストラリアの相対成長関係の99%の予測区間内にあるかどうか検討した。

Ⅲ 結果と考察

オーストラリアの試験地（以降オーストラリア）及びベトナムの試験地（以降ベトナム）で得られたデータについて、胸高直径と樹高の値を散布図にプロットした（図1）。この関係を見ると、ベトナムで胸高直径に対する樹高が高いことがわかる。このことはベトナムでは植栽密度が高いため、直径成長が抑制された結果と考えられる。したがって同じ胸高直径・容積密度であれば、オーストラリアの個体よ

りもベトナムの個体の幹重量が重い事が考えられる。次にオーストラリア、ベトナム、およびオーストラリアとベトナムの両データを統合した場合の相対成長関係を調べた（表1）。幹重量及び幹重量+枝重量を良好に推定するには、“胸高直径”のみを独立変数とするよりも、“胸高直径の二乗×樹高”を独立変数にした方が良い。一方枝重量及び葉重量に関して同様な比較をおこなうと、“胸高直径”を独立変数とした方が相対成長式の決定係数は高くなった。幹重量を精度良く表すためには、相対成長式の独立変

表1 オーストラリア、ベトナム、両国のデータを統合した場合の、相対成長関係の係数一覧

国名	従属変数		独立変数		関数	係数		r^2	n
	Y	単位	X	単位		a	h		
オーストラリア						0.3375	1.9722	0.938	11
ベトナム	幹重量	kg	胸高直径	cm ²		0.0427	2.8174	0.997	4
オーストラリア+ベトナム						0.4745	1.8813	0.938	15
オーストラリア						0.0567	0.8997	0.991	11
ベトナム	幹重量	kg	胸高直径の二乗×高さ	cm ² ×m		0.0151	1.0518	0.998	4
オーストラリア+ベトナム						0.0501	0.9119	0.992	15
オーストラリア						0.0003	3.7794	0.970	11
ベトナム	枝重量	kg	胸高直径	cm ²		0.0163	2.5559	0.917	4
オーストラリア+ベトナム						0.0005	3.6162	0.971	15
オーストラリア						0.0009	1.2605	0.945	11
ベトナム	枝重量	kg	胸高直径の二乗×高さ	cm ² ×m		0.0066	0.9499	0.911	4
オーストラリア+ベトナム					Y=aX ^h	0.0004	1.3396	0.947	15
オーストラリア						0.1907	1.4417	0.942	11
ベトナム	葉重量	kg	胸高直径	cm ²		0.0024	2.7760	0.945	4
オーストラリア+ベトナム						0.0770	1.6848	0.935	15
オーストラリア						0.2400	0.5017	0.869	11
ベトナム	葉重量	kg	胸高直径の二乗×高さ	cm ² ×m		0.0009	1.0347	0.937	4
オーストラリア+ベトナム						0.0415	0.6720	0.825	15
オーストラリア						0.1461	2.3299	0.967	11
ベトナム	地上部非同化部重量	kg	胸高直径	cm ²		0.0561	2.7804	0.995	4
オーストラリア+ベトナム						0.2185	2.2223	0.968	15
オーストラリア						0.0317	1.0045	0.998	11
ベトナム	地上部非同化部重量	kg	胸高直径の二乗×高さ	cm ² ×m		0.0202	1.0374	0.995	4
オーストラリア+ベトナム						0.0221	1.0397	0.997	15

r^2 は決定係数, nはサンプル数である

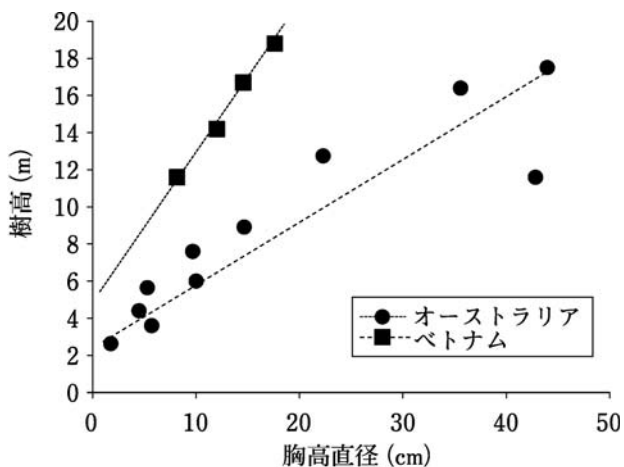


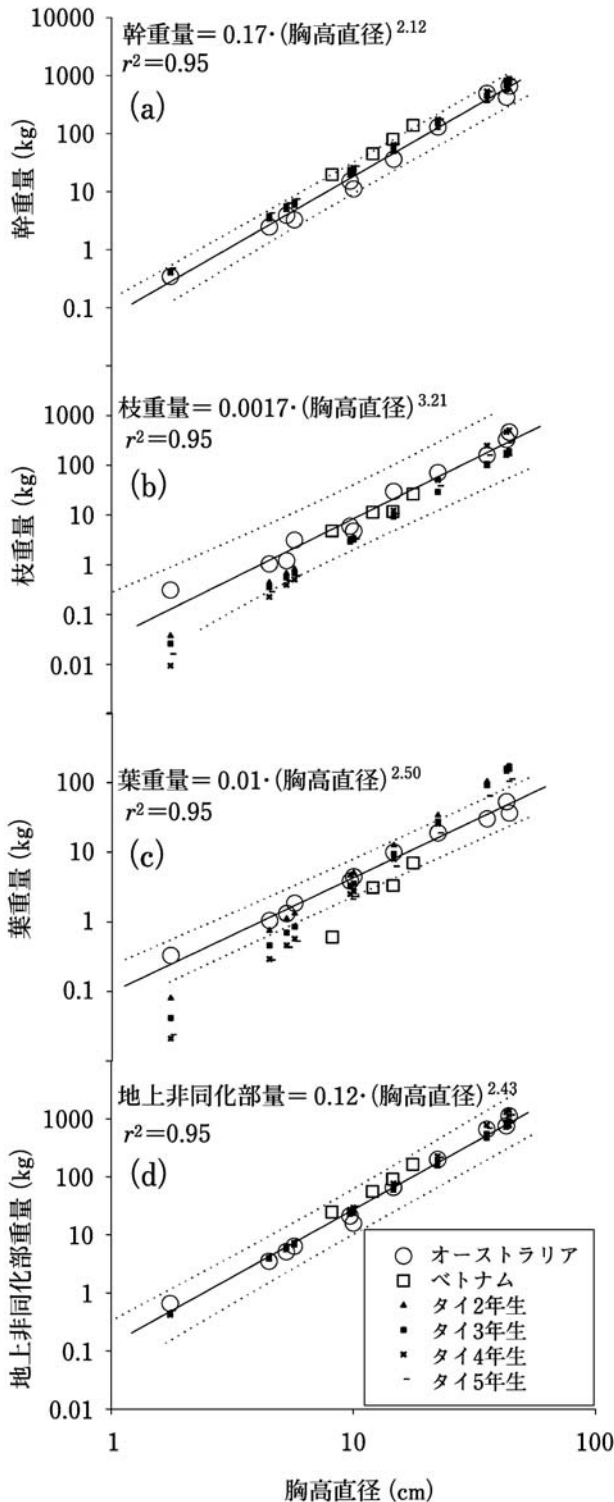
図1 オーストラリアとベトナムの供試木における胸高直径と樹高の関係。図中の破線はそれぞれの関係の回帰直線である。両者の関係は明らかに異なる。(胸高直径は地上高1.3mで測定した値である)

数として“胸高直径の二乗×樹高”を用いると良いことがわかった。

このことは両国で胸高直径と樹高の関係は異なるが(図1)、幹の容積は“胸高直径の二乗×樹高”にほぼ比例し(樹幹形状が相同)、また幹容積密度に差が存在しなかったことが原因であろう。しかし樹高の測定は困難を伴うことが多く、筆者の経験上、樹高が4-5mを超えただけで測定誤差が大きくなる。また海外における定期調査や、長期間の継続調査では毎回測定調査者が変わる場合が多く、高精度の樹高測定は困難である。そこで“胸高直径”のみを独立変数とした相対成長関係を詳細に検討してみよう。“胸高直径”を独立変数とした幹重量は、オーストラリアに比べてベトナムの方が若干大きかった(図2a)。これは前述の胸高直径と樹高の関係において、ベトナムの樹高がオーストラリアの樹高より高いことに原因がある。しかしベトナムで得られた3個体の幹重量はオーストラリアで得られた相対成長関係の99%予測区間にあり、また最大の個体の幹重量は99%予測区間より若干大きい程度であった。さらに両国のデータを統合した場合の相対成長関係は、幹重量の変動の94%を説明した。

一方、表1から明らかなように樹高を正確に測定できる場合、幹重量については“胸高直径の二乗×樹高”を独立変数とすることが望ましいが、実用的には“胸高直径”のみを用いた幹重量に関する相対成長式でも十分であると考えられた。Thoranisorn *et al.*⁵⁾による相対成長式を用いた幹重量推定値(タイ2年生~4年生)を図2aに併記した。タイの試験地(以降タイ)で得られた林齢の異なる試料木の相対成長関係の差は小さく、またこれらのデータはオーストラリアで得られた相対成長関係の99%予測区間にあった。ここでこれらすべてのデータを統合した場合の相対成長関係の決定係数は0.95であり、表1に示したオーストラリアとベトナムを統合したデータから得られた相対成長関係の決定係数(0.94)とほぼ同様であった。これらのことは、“胸高直径”を独立変数とした *E. camaldulensis* の幹重量推定相対成長式(表1)の妥当性を支持するものと考えられる。

枝重量に関して“胸高直径の二乗×樹高”よりも“胸高直径”を独立変数にした相対成長関係の精度が高かった(表1)。オーストラリアとベトナムのデータを統合した場合も、“胸高直径”を独立変数とした相対成長関係の決定係数が最も高くなった。ベトナムで得られた4個体の枝重量のデータは、オーストラリアで得られた相対成長関係の99%予測区間にあり、また幹重量とは逆にオーストラリアの枝重量に比べてベトナムの枝重量の方が若干小さかった。これはベトナムでの植栽密度が高く、1個体の枝の占有空間が小さかったためであろう。Thoranisorn *et al.*⁵⁾の枝重量に関する相対成長式から、幹重量と同様すべてのデータを統合して枝重量を推定した場合、決定係数は0.81であった。これは幹重量の相対成長関係の決定係数(0.95)にくらべて大幅に低い値であり、特に小さい胸高直径の個体で枝重量のばらつきが増大した(図2b)。枝は樹冠層を保持するために横に広がる傾向があり、その現存量は林分密度(個体間距離)に大きく影響される。ベトナムやタイの林分で胸高直径に対する枝重量が少ないのは(図2b)、オーストラリアに比べて立木密度



が高いからであると考えられる。このことからオーストラリアとベトナムの両データを統合した枝重量に関する相対成長関係の誤差は大きく、一般化は困難であると考えられた。

葉重量に関してもやはり“胸高直径の二乗×樹高”よりも“胸高直径”を独立変数にした相対成長関係の当てはまりが良かった(表1)。しかし幹重量や枝重量に比べて相対成長関係の決定係数は低く、また同じ胸高直径であればベトナムの葉重量はオーストラリアの葉重量に比べて明らかに小さかった(図2c)。さらにベトナムで得られた3個体の葉重量はオーストラリアで得られた相対成長関係の99%予測区間下限よりも小さくなっていった。このことから枝重量と同様、ベトナムでの植栽密度が高いため個体あたりの葉重量が少なくなり、植栽条件によって葉量の相対成長関係が異なるというこれまでの知見と一致した。さらに Thoranisor *et al.*⁵⁾ のデータを当てはめると、広範囲の胸高直径にわたって相対成長関係がばらつき(図2c)、多くのデータがオーストラリアで得られたアロメトリーの99%予測区間から下方に外れていた。しかしながら樹高10m以上の個体では葉重量が地上非同化部重量の10%以下と小さいこと、また葉は生態系の中で比較的回転速度が高く、炭素の貯留源としての価値が小さいことから、森林炭素プール全体を評価する上で葉量推定誤差は大きな問題とならないであろう。

“胸高直径”を独立変数とした地上非同化部重量(幹重量+枝重量)に関する相対成長関係を見ると、ベトナムでは決定係数が幹重量と同様、またオース

図2 胸高直径と幹重量、枝重量、葉重量、地上非同化部現存量のアロメトリー関係。それぞれ●はオーストラリア、■はベトナム、その他の凡例はタイのデータである。破線はオーストラリアのデータに対する上部及び下部の99%予測区間である。タイのデータは2年生から5年生までのデータを含んでいる(凡例参照)。直線は3カ国を含んだデータで作成した相対成長関係であり、図中の式で示される。

トラリア及び両国のデータを統合した場合、決定係数は幹重量以上に高かった(表1)。ベトナム得られた4個体全ての地上非同化部重量のデータは、オーストラリアで得られた相対成長関係の99%予測区間内であった。同じ胸高直径であればベトナムの幹重量がオーストラリアに比べて大きく(図2a)、枝重量ではその逆のことが生じた結果(図2b)、地上非同化部重量に関する相対成長式の精度が高まったと考えられる。さらにThoranisorn *et al.*⁵⁾によるタイのデータを加えると、決定係数は0.94と幹重量と同様に高い値を示した(図2d)。またタイの地上非同化部重量のデータは、全てオーストラリアで得られた相対成長関係の99%予測区間内であった。

図2に示されたThoranisorn *et al.*⁵⁾から引用したデータは、著者らが相対成長式から各胸高直径に対する器官重量を再計算した結果であり、個体の生データを利用しているわけではない。しかし幹重量や地上非同化部重量(幹重量+枝重量)と胸高直径の相対成長関係は、生育環境が大きく異なる地域から得たデータにも拘らず、十分有意な相関関係を示していると考えられる(図2a, d)。森林の炭素プールとして最も重要な器官は「幹」であり、*E. camaldulensis*の幹重量と“胸高直径”または“胸高直径の二乗×樹高”の相対成長関係は、表1に示した係数、または図2aに示した式が利用可能であろう。単独の枝重量や葉重量の推定に関しては、多くの場所で利用できる統一的な相対成長関係を得ることが

できないと考えられる。また地上非同化部重量(幹重量+枝重量)の相対成長関係は、更なる試料の蓄積が必要ではあるが、本研究によって広範囲での利用可能性が示唆されたと考えている。なお、本稿の詳細は沙漠研究 Vol. 20-1(日本沙漠学会)に掲載されている。あわせてそちらも参考にされたい。

〔引用文献〕 1) Utsugi H., Tanouchi H., Hamano H., Takahashi N. (2006): The difference in leaf morphological and photosynthetic ability of *Eucalyptus camaldulensis* between natural growth and planted trees in desert Western Australia. *J. of Arid Land Studies* 15: 271-274. 2) 齊藤昌宏・平松直樹・河原崎里子・相川真一・宇都木玄・田内裕之 (2008): 早成樹種の成長量を最大にする造林方法(2) 密度と栽培期間. 海外の森林と林業 71: 19-24. 3) 森川 靖 (2004): 森林のCO₂吸収源としての評価と問題点. 環境資源工学 51: 228-233. 4) 山田麻木乃・鶴見和恒・原口直人・川添哲也・山ノ下卓・丹下 健・森川 靖 (2000): 産業植林早生樹種の炭素固定量評価. 熱帯林業 47: 33-39. 5) Thoranisorn S., Sahunalu P., Yoda K. (1990): Density effects and self-thinning in even-aged pure stands of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. *Bot. Mag. Tokyo* 103: 283-295. 6) Kojima T., Hamano H., Abe Y., Tanouchi H., Egashira Y., Saito M., Law J., Takahashi N., Yamada K. (2006): Basic data of research project on large scale afforestation of arid land for carbon fixation near Leonora in Western Australia. *J. of Arid Land Studies* 16: 167-174.