

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20580153

研究課題名（和文） 樹木根重の共通相対成長式

研究課題名（英文） A common allometric equation for root weight

研究代表者

小見山 章 (KOMIYAMA AKIRA)

岐阜大学・応用生物科学部・教授

研究者番号：60135184

研究成果の概要（和文）：

我が国の温帯林を構成する樹木について、場所や樹種による分離が少ない相対成長関係が存在するかどうかを検討した。岐阜県の冷温帯林 2 カ所で、1990 年から 2010 年にかけて 19 種 81 本の樹木を伐倒して地上部重を調べ、それらを含む 11 種 19 本について根系を掘って根重を求めた。他の研究者が公表した他の森林における地上部重と根重を解析に用い、汎用性の高い共通式を誘導した。広域かつ多様な樹種による共通式の相対誤差は、通常の相対成長式を使う場合より小さく、推定値の再現性を高める有効な共通式が得られた。

研究成果の概要（英文）：

Allometric relationships are the powerful tool for estimating forest biomasses. However, these relationships often show the segregation among forest types and tree species. For establishing them in fields, laborious works are necessary, and so common equations based on some biological laws are awaited for applying them to various types of forest stands. In this study, the pipe model and static model of plant forms are used for establishing allometric relationships on the above-ground weight and root weight of trees, based on the individual tree weights of cool-temperate and warm-temperate forests. The relative errors of determined common equations were 13.84% and 19.00% respectively for above-ground and root weights. These relative errors were less than those of ordinary allometric relationships used for estimations. These common equations will become a powerful tool for estimating biomasses in temperate forests.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000

2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：現存量，地上部重，根重，静力学モデル，冷温帯林，暖温帯林

1. 研究開始当初の背景

地球規模の温暖化現象などに関係して、森林の炭素機能に関する社会の関心が高まっていた。林学者や生態学者が、森林の成長量、枯死量、土壌呼吸量などの研究を横断的にまとめて、森林が大気環境に対して、どのような働きを持つかを、広域で調べ始めていた。ところが、森林が大型の樹木で構成されているために、場所間で共通的に使用できる相対成長関係がないために、この種の研究は大きな制約を受けていた。

私たち岐阜大学森林生態学研究室では、10年来、樹木個体重のデータを集め、相対成長関係の研究を行っている。本研究を開始して、大型の樹木のデータが収集できれば、共通式の構築が可能な段階にあった。この研究期間中には、ミズナラの大径木（直径 61cm）をはじめとして、大型の落葉広葉樹等計 5 個体の根系と地上部データを採取することにした。とくに既存データの少ない根重とともに地上部重をも視野に入れて、林分間で共有できる相対成長関係の構築をめざしていた。

2. 研究の目的

森林は、木材生産や環境保全など、重要な機能を果たしている。これらの機能は、主に樹木資源の量的規模とその蓄積過程、すなわち森林の現存量と一次生産量の把握によっ

て、定量的に評価することが可能となる。樹木個体重は、森林の現存量の推定にとって必須の項目である。その個体重は、樹木が大型の生物であるために直接測定は不可能な場合が多い。通常は、幹の直径や高さなど比較的容易に測定できる寸法を独立変数として、相対成長関係（Huxley, 1931）がその推定に使われている。

ところが、この相対成長関係を使用するとき、いくつか実用上の問題が発生する。最も大きな問題は、樹木の相対成長関係が、林分および樹種によって分離しやすいことである。一つの森林で、個体重と幹直径などに関する相対成長式を作成するには、数十個体のサンプルが必要であるため、林分分離が生じる場合には、個々の林分で非常に煩雑な野外作業を行わないと相対成長式が得られない。また、相対成長式は基本的に内挿の範囲で使用しなければならない。したがって、成熟した森林を扱うには、大型の樹木サンプルを伐倒もしくは掘り取って、膨大な量の試料を秤量してその個体重を求めなければならない。

樹木の形状に関する法則性を量的に表現したモデルに、パイプモデル（Shinozaki *et al.*, 1964ab）とそれを発展させた静力学モデル（Oohata and Shinozaki, 1979; Chiba, 1990, 1991）がある。とくに、樹木の根系は、

パイプモデルに非常に良く適合することが知られている。Chiba(1998)は、静力学モデルに注目して、樹木個体の幹基部の断面積が地上部重と関係すること、森林の断面積合計が特定条件下で現存量と関係することを実証している。これらの研究は、多くの樹木に共通する樹形法則のもとに、林分や樹種による分離がない共通相対成長式を組み立てることができることを示している。また、生物則の上に組み立てられた相対成長関係は、以前に使われていた経験則に基づく相対成長関係 (Komiyama *et al.*, 2002) とは異なり、求められた樹木個体重の推定値の妥当性がその式の上で評価できるという利点を持つだろう。

最近、森林の資源量に関する関心が再び高まり、広域の森林に実用できる相対成長関係を作ろうとする研究が行われている (Komiyama *et al.*, 2005; Chave *et al.*, 2005)。マングローブ林を扱う前者は静力学モデルに基づく方法で、熱帯林を扱う後者は相対成長式の推定精度を独立変数別に比較する方法で、共通相対成長式を決定している。興味深いのは、方法の違いがあるにも関わらず、両者とも静力学モデルが予測する関数を共通式に選んでいることである。場所間や樹種間で共通性が高い相対成長関係は、パイプモデルや静力学モデルなど広い範囲の樹木の形態に通用する生物則を基盤にしたものであることが考えられる。ただし、我が国で広い面積を占めている温帯林に関しては、共通相対成長式を検討した研究例はほとんど見られない。

本研究では、岐阜県の落葉広葉樹林で樹木の地上部と地下部に関する個体重のデータを収集したうえで、それを我が国の温帯にある落葉広葉樹林、常緑広葉樹林およびスギ・ヒノキ・カラマツ造林地で採取された他の場

所のデータと比較する。場所・樹種の違いによる相対成長関係の推定誤差を評価したうえで、温帯林に存在するできるだけ多くの樹種に対して、樹木の地上部と地下部の個体重を推定できる共通式を提案する。

3. 研究の方法

本研究の基本とする樹木個体重のデータは、1990年から2010年にかけて、岐阜大学の森林生態学研究室が、岐阜県の落葉広葉樹林で調査したものである。また、相対成長関係を場所間で比較するために、1960~70年代に行われた国際生物学事業 (四大学農学部林学教室, 1963, 1965) による資料等に記載のデータを使った (四大学農学部林学教室, 1963, 1965; 末田・下川, 2001; 丹下・小嶋, 2010)。これらの資料には、ブナ林 (ブナ、イタヤカエデ、ミズキ)、スギ人工林、カラマツ人工林、照葉樹林 (アラカシ、ウラジロガシ、ウバメガシ、ツバキ、コジイ、タイミンタチバナ、タブノキ、シキミ、ヤブニッケイ) で調べた個体重のデータが公表されている。このうち、亜高山帯樹種であるカラマツは、植栽場所が冷温帯にあると考えられるので使用した。

岐阜県の調査地 (Komiyama *et al.*, 2002) は、高山市荘川町のミズナラ・カエデ類・シナノキなどが混交する落葉広葉樹林、および下呂市萩原町の岐阜大学演習林にあるイヌブナ林、ヒノキ林、およびミズナラ等が混交する落葉広葉樹林である。地上部重を調べた試料木の種数と総個体数は19種81本 (ミズナラ、コナラ、ブナ、イヌブナ、ヤマモミジ、イタヤカエデ、コハウチワカエデ、クリ、アカシデ、シナノキ、ウワミズザクラ、コシアブラ、アズキナシ、ホオノキ、ミズメ、シラカンバ、ウダイカンバ、ヤマハンノキ、ヒノキ) で、胸高直径 (*DBH*) の最大値はミズナ

ラの 61.9 cm である。岐阜大学演習林で、2000 年から 2010 年にかけて、地下部の根重を調べた試料木は 11 種 19 本あり、*DBH* の最大値はヒノキの 72.3 cm である。ただし、これら試料木のうち 12 個体（ヒノキ 4 本、ミズナラ 2 本、ホオノキ、コナラ、ミズキ、ウダイカンバ、ヒバ、アカマツ各 1 本；*DBH* 17.8~72.3 cm）は、地下部の根重のみを調べたものである。

個体重（単位kg、乾燥重量）を計測する方法として、幹の地際直径（ D_0 ）、*DBH*、枝張りの長さなどをあらかじめ測定した。ついで、樹木を地際部で伐倒し、幹を長さ 1m の層に分割した。それぞれの層で、幹直径のほか幹重・枝重・葉重・果実重を求め、れらを合計して地上部重（ W_{Top} ）とした。また、層別の幹直径から、スマリアン式を用いて皮付きの幹材積（ V_S ）を計算した。根重（ W_R ）については、根株から下のすべての根（細根を除く）を土壌より掘り出し、水洗後に生根を選別して秤量した。大型の試料木の場合は、根の掘り出しに重機を使う場合もあった。いずれの器官についても、500g 程度のサンプルを適宜とって、通風型乾燥器で完全に乾燥して乾重/生重比を求めた。以後の重量に関する議論は、すべて乾重で行う。なお、相対成長関係を比較する他の場所でも、個体重を調べる際に上述とほぼ同じ方法が採られている。

樹木個体の地上部重に関する相対成長共通式を、静力学モデル（Oohata and Shinozaki, 1979; Chiba, 1990）により組み立てることができる。このモデルによると、幹に上部よりかかる応力が垂直方向で一定となることにより、最終的に式 1 の関数を得る（Chiba, 1998）。ここで、 $T(z)$ は z 層より上部にあるすべての器官の重量を、 b は比例定数を、 ρ は幹の比重を、 $As(z)$ は z 層における幹の断面積を示している。

$$T(z) = b \rho As(z) \quad (1)$$

この式は、 z が地際にあるとき地上部重 W_{ag} が地際直径 D_0 の自乗と比例関係にあることを示している（式 2）。

$$W_{Top} = b \rho D_0^2 \quad (2)$$

ただし、樹木の幹の根元は、その外周形状がきわめて不規則になることが多い。そのために、現場で地際直径を精度良く測定することは、ほとんど不可能である。本研究では、現場での実際面を考慮して、地際直径の代わりに胸高直径（*DBH*）を独立変数に採用した。

$$W_{Top} = b \rho DBH^c \quad (3)$$

式 3 を決定するうえで、個体毎に、層別に測定した幹直径を使って皮付きの幹材積を求め、その値で幹重量を割った値を幹の比重 ρ とした。ただし、根重を測定した個体の中に、地上部重が未測定の試料木が少数あり、それらについては同種他個体で測定した ρ で代用した。

樹木個体の根重（ W_R ）については、パイプモデル（Shinozaki *et al.*, 1964b）にしたがって、共通式を組み立てた。このモデルによると、もし個々の根を強い力で仮想的に束ねると、樹木の根系全体の形状は円柱体となる。この仮説による式 4 は、地上部重に関する式 3 と、結果として同じ関数形となる。ただし、共通式の作成に当たっては、地上部重の場合と同じ理由で *DBH* を独立変数に採用し、比重 ρ も式 3 の決定に用いた値を採用した。 d は、主に根の深さに関係する定数である。

$$W_R = d \rho DBH^f \quad (4)$$

本研究で提案する共通式を導く手順を次のようにした。相対成長関係に樹種あるいは地域差が存在するかを調べるために、場所別に試料木をまとめて、式 3, 4 を対数変換することにより定数 b, c, d, f を一次回帰にかけて決定した。このとき、同式を変形して従属変数に $W_R / \rho / 1000$ を、独立変数に *DBH* をとつ

て回帰分析を行った。そして、場所毎に決定した相対成長式が互いに同一とみなせるかを、共分散分析による解析により判定した。また、実際の資料木の W_{Top} とそれぞれの相対成長式で推定した w_{Top} の間で、相対誤差 RE を n 本分について式 5 で求めた (Overman *et al.*, 1994)。

$$RE = (100/n) \sum | (W_{Top} - w_{Top}) | / W_{Top} \quad (5)$$

共分散分析と相対誤差による分析結果を検討したうえで、試料木データをまとめて最終的な共通式とした。なお、比較のために、従来から使われてきた式 4 の右辺に比重項を含まない相対成長式についても、同じ手順で定数と決定係数 R^2 を決定した。

4. 研究成果

(1) 地上部重の共通相対関係

岐阜県の落葉広葉樹林における 19 種 81 本について、当地で求めた地上部重の相対成長式は高い決定係数 ($R^2=0.9824$) を示した。他の 6 場所でそれぞれ求めた相対成長式も、0.9515 以上の決定係数を示した。いずれの場合も、材比重を媒介変数に持つ相対成長関係 (式 3) が、高い有意水準 ($p<0.01$) で成立することを示している。相対誤差 (RE) をみると、岐阜県で作成した相対成長式を、その地の試料木に適用した場合の RE は 13.22% であった。同様にみて、当地の試料木に対して、他の 6 場所の相対成長式の RE は 7.06~15.35% を示した。当地で作成した相対成長式が、他地で作成した相対成長式より、当地のデータに対して相対的に低い RE を示す傾向があった。

式 3 に基づいて、全場所のデータを用いて作った共通式は、高い決定係数 ($R^2=0.9834$) を示した。共通式を 7 場所すべてのデータに適用すると RE は 13.84% であった。個々の場所のデータに対する共通式の RE をみると、

新潟県のブナ林のみが 24.78% という RE を示したほかは、10% 台の値であった。

(2) 根重の相対成長関係

樹木の根重に関しては、相対成長関係を組むに至った測定例が少なく、岐阜県で調べたデータが比較できたのは愛媛県の 1 場所 (末田・下川, 2001) だけであった。岐阜県の落葉広葉樹林における 11 種 19 本について、当地で求めた根重に関する相対成長式は高い決定係数 ($R^2=0.9745$, $p<0.01$) を示した。また、愛媛県のブナ林の 3 種 16 本についても、当地の相対成長関係の決定係数は高かった ($R^2=0.9735$, $p<0.01$)。

全場所のデータを用いて作った共通式は、高い決定係数 ($R^2=0.9821$, $p<0.01$) を示した。この共通式を二つの場所すべての試料木に適用すると RE は 19.00% であった。また、この共通式の岐阜県データに対する RE は 27.03%、愛媛県データに対しては 19.25% であった。

(3) 共通式の検討

以上のように、樹木個体の地上部重と根重に関して、静力学モデルとパイプモデルに基づく式 3,4 が、本研究の 7 つの場所データに良く適合すること、それらをまとめたデータ全体に適合する共通式が存在する可能性がわかった。Chiba(1998)は、静力学モデルに基づいて熱帯の急成長樹種の造林地について解析し、林分あたりの胸高断面積合計と幹材積合計の間に林分分離しない相対成長関係をみいだしている。もし、これらの造林地を構成する樹種が、同じ幹比重と樹形法則を持つとすれば、この林分あたりの関係を、個体あたりの関係に置き換えることができるだろう。本研究で、式 3,4 が 7 つの場所と 29 樹種に適用できて、高い有意性をもつ地上部重に関する共通式が成立したことは、この置き換えが可能であること示している。式 3,4

に組み込まれている幹比重が、媒介変数として地上部重をそれに相当する容積に変換し、この結果として、樹種または場所による相対成長関係の分離が緩和されたものと考えられる。

温帯林樹木の地上部重[kg]に関する共通式として式 5 を、根重[kg]に関する共通式として式 6 を示す。これらの式は、前述のように、冷温帯の落葉広葉樹とその林分に生える針葉樹（ヒノキ・アカマツ）、冷温帯の人工林（スギ・カラマツ）、および照葉樹のデータを基本としている。また、相対成長式の使用は内挿の範囲で行わねばならないが、これらの共通式に使用した個体の *DBH* の最大値は式 5 で 61.9 cm、式 6 で 72.3 cm である。これら共通式を用いて個体重を推定する場合の *RE* は、地上部重で 13.84%、根重で 19.00%であった。これらは、参考として示す比重項を含まない通常の相対成長式を持つ *RE* より小さかった。

$$W_{Top} = 0.0001995 \rho DBH^{2.452} \quad (6)$$

$$W_R = 0.00009651 \rho DBH^{2.223} \quad (7)$$

式 5,6 の巾乗数は、静力学モデルとパイプモデルが予測する 2.0 より少し大きな値となった。これらの式を適用したときに、巾乗数が同程度に大きくなる現象が、マングローブ林 (Komiyama *et al.*, 2005) および熱帯林 (Chave *et al.*, 2005) でも認められている。この原因として、式に実際に使用した *DBH* とモデルによる *D₀* の間の関係が、個体の大きさによって変化することによる可能性があげられる。しかし、基本的に *D₀* は、根張りの影響等で正確に測定できない寸法であるため、前述のことを実証することはできなかった。

本研究の共通式の ρ には、個体毎に実測した幹重/幹容積による比重を使用した。幹比重の最大はウラジログシの 0.8805、最小はスギの 0.3524 となり、樹種間でみると幹比重に

2.5 倍程度の差が認められた。ほとんどの樹種で比重の標準偏差は大きくないので、同種の個体間では幹比重の差は顕著でないとみてよいであろう。本研究で用いた ρ のうち複数の個体を計測した 18 種について、貴島ら (1986) による材の絶乾比重と比較したところ、高い相関 (*t* 検定, $p < 0.01$) が認められた。

結論として、本研究で提案する共通式 (式 6, 7) は、樹木個体重の相対成長式が存在しない温帯林で、現存量や成長量を求める際に、有力な手段になることが考えられる。これらの共通式を使用するには、幹の比重を求めねばならない。とくに、本研究の試料木にない樹種を扱うときには、成長錐などを使い比重を調べる必要がある。このような煩雑さはあるが、大がかりな伐倒調査を免除されること、推定値の再現性を高めることで、共通式は大きな利点を持つと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 小見山章・中川雅人・加藤正吾「冷温帯構成種の共通相対成長関係」中部森林学会, 2010 年 10 月 16 日 [三重大学]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小見山 章 (KOMIYAMA AKIRA)
岐阜大学・応用生物科学部・教授
研究者番号：60135184

(2) 研究分担者

加藤正吾 (KATO SHOGO)
岐阜大学・応用生物科学部・助教
研究者番号：20324288