

# 針葉樹における幹部バイオマスの推定に関する理論的研究

井上 昭夫 (熊本県立大学 環境共生学部)

iakio@pu-kumamoto.ac.jp

## 要 約

幹形に関する法則を基礎として、針葉樹における幹部バイオマス（幹材積）の推定モデルを誘導した。様々な地域における針葉樹の試料を用い、誘導したモデルの適合度を検証した結果、実用に耐えうる適合度をもって幹材積を推定できることがわかった。「理論的材積式」と名付けられたこのモデルは、世界の針葉樹林における資源量と二酸化炭素固定量を統一的な手法によって評価することを可能にする。

## はじめに

森林を管理するためには、主な利用の対象となる幹部のバイオマス（幹材積: 幹の体積）を測る必要がある。幹材積を測ることで、森林を管理する者は管理の対象となる森林の資源量を把握できるとともに、森林を育てていく上で必要となる間伐の実施時期と強度を決定できる。また、森林における二酸化炭素の固定量と吸収量は、幹材積とその変化量（成長量）に炭素含有率などの係数を乗じることでそれぞれ推定できる。つまり、幹材積を測ることで、森林における二酸化炭素の固定と吸収の機能を定量的に評価できるようになる。これらの点からみて、幹材積を測ることは、林業的な面と環境的な面のいずれにおいても大切だといえる。しかし、樹木は私たち人間よりもはるかに大きい植物であるため、その幹材積を立木のままの状態ですら直接に測ることは現実的には不可能である。また、樹木を伐採すれば幹材積を正確に測定できるが、その後の時間の経過にともなう幹材積の変化を調べられなくなってしまう。したがって、直接の測定に代替するような方法が必要だといえる。

このような背景から、幹材積の推定は、林学における最も主要な研究テーマの 1 つとして位置づけられ、古くから数多くの研究が行われてきた。幹材積を推定するために最も広く用いられている方法は、比較的簡単に測定できる胸高直径（胸の高さでの幹の直径）や樹高から幹材積を間接的に推定する方法である。胸高直径だけの測定値から幹材積を推定するモデルを一変数材積式、胸高直径と樹高の測定値によるモデルを二変数材積式と呼ぶ。幹材積の推定に材積式というモデルが用いられるようになっておおよそ 1 世紀の間、世界中の数多くの研究者達によって様々なモデルが提案され、地域や樹種ごとにモデルのパラメータが求められてきた。しかし、これまでの研究は、限られた地域や樹種の試料から、最小自乗法のような統計手法を用いて、いかにして当てはまりの良いモデルを得るのかという議論であったといえる。また、これまでに提案されてきた中で最も広く用いられているモデルは、1933 年に Schumacher と Hall によって提案された二変数材積式であるが、そのパラメータの値を検討すると、実際の森林あるいは樹木の成長と論理的に矛盾する場合が少なくない（井上, 2002）。様々な地域や種類の樹木に対して適用でき、森林あるいは樹木の成長と矛盾のない普遍的・理論的なモデルについては、ほとんど研究が行われていない。

針葉樹の幹形については、地域、樹種、成育段階、密度管理などの要因とは無関係に成り

立つ法則がある。この法則を基礎とすれば、様々な針葉樹に適用できる普遍的なモデルが得られる可能性がある。そこで本研究では、針葉樹の幹形に関する法則をもとにして、幹材積を推定するためのモデルを理論的に誘導した。そして、様々な地域における針葉樹の試料を用いて、この「理論的材積式」と名付けられたモデルの適合度を検証した。

## 理論的材積式の誘導

### 1. 諸定義と準備

まず、樹木個体の大きさの違いによる影響をなくして幹形を表すために、次のような相対化を考える。すなわち、梢端からの距離を樹高で相対化することによって、梢端を 0、地際を 1 とする「相対高」として樹幹上での任意の高さを相対的に表す。また、相対高 0.9 の位置における樹幹直径によって、樹幹上のすべての位置での樹幹半径を相対化する（以下、相対半径と記す）。このようにして相対化された幹の形のことを「相対幹形」という。

次に、幹形を表現するための測度の 1 つである「正形数」について説明する。対象とする樹木の樹高と等しい高さを持ち、ある高さにおける幹の直径（以下、基準直径と記す）と等しい太さを持つ円柱（以下、比較円柱と記す）を考える。このとき、幹材積と比較円柱の体積との比が正形数となる。基準直径をとる高さによって、正形数の値は無数に考えられるが、十分位の相対高（0.1, 0.2, ..., 1.0）について正形数を求める場合が一般的である。

### 2. 材積式の誘導

いま、横軸に相対高  $x$ 、縦軸に相対半径  $y$  をそれぞれとった直交座標上において、次式によって与えられる相対幹曲線式（Kunze 式）によって相対幹形を表現するものとする。

$$y^2 = ax^b$$

ここで、 $a$  と  $b$  は係数である。このとき、相対幹形の定義より、上式は必ず点（0.9, 0.5）を通る。また、針葉樹の場合、地域、樹種、成育段階、密度管理などの違いに関係なく、相対高 0.7 と 0.5 の位置における正形数は、おおむね 0.7 と 1.0 でそれぞれ安定していることが知られている。このような正形数の安定性については、世界中の針葉樹において成り立つことが確認されている（例えば、王ら, 1998）。これらの条件をもとにして数式を展開していくと、樹高、胸高直径および幹材積の値から相対幹形（相対幹曲線式の係数）を推定する 2 つのモデルが誘導できる。これら 2 つのモデルによって推定される相対幹形が互いに等しいと仮定すると、幹材積  $v$  を推定するモデルとして次式を得る。

$$v = \frac{\pi d_b^2 h}{4[2(1-h_b/h)]^{1.060}}$$

ここで、 $d_b$  は胸高直径、 $h$  は樹高、 $h_b$  は胸高（= 1.2 m あるいは 1.3 m）である。この式に樹高と胸高直径の測定値を代入することによって、幹材積を推定できる。このモデルは幹形に関する法則をもとにして理論的に誘導されており、限られた地域や樹種の試料をもとにして、最小自乗法のような統計手法を用いて経験的に決定しなくてはならないパラメータは含まれていない。このことより、誘導したモデルのことを「理論的材積式」と名付けた（井上・黒川, 2001）。

## 理論的材積式の適合度と特徴

以上のようにして誘導した理論的材積式によって、どのくらいの適合度をもって針葉樹の幹材積を推定できるのだろうか？ 海外も含めた様々な地域において収集された針葉樹（スギやヒノキなど）の試料を用いて検証してみた(井上・黒川, 2001; 井上ら, 2002; Inoue, 2006)。その際、限られた地域や樹種を対象として経験的に調製され、従来から広く用いられている二変数材積式（以下、経験的材積式と記す）を比較に用いた。すなわち、胸高直径と樹高の測定値を理論的材積式と経験的材積式の両方にあてはめ、幹材積の値をそれぞれ推定し、実際に樹木を伐倒して正確に測定した幹材積の値と比較した。そして、これら2つの材積式の誤差を正確度（偏り）と精度（ばらつき）の2つの観点から評価した。その結果、理論的材積式と経験的材積式との間で誤差の大小に優劣はつけられないことがわかった。

誘導したモデルによると、胸高形数 $f$ （胸高直径を基準直径とする形数）を樹高 $h$ のみの関数として記述できる。

$$f = \frac{1}{[2(1 - h_b/h)]^{1.060}}$$

この式によると、胸高形数の値は樹高10 m前後までは樹高が高まるにつれて急激に低下するが、その後においては安定し、 $h \rightarrow \infty$ とした場合の極限值（0.480）に漸近するような形で緩やかに低下していく。このことは、実際の針葉樹における胸高形数の成長にともなう変化に整合しており、理論的材積式の妥当性を支持しているといえる。

以上の結果は、幹材積の推定に用いるモデルを現行の経験的材積式から理論的材積式へと変更しても、実用上、大きな問題は生じないことを示唆している。むしろ、地域や樹種によってパラメータを変える必要のない点において、経験的材積式よりも理論的材積式の方が便利だと考える。このような特徴により、理論的材積式は、世界の針葉樹林における資源量と二酸化炭素固定量を統一的な手法によって評価することを可能にする。およそ1世紀の間、世界中の多くの研究者達が取り組んできた「いかにして幹材積を推定するのか？」という問いに対し、理論的材積式は1つの理論解を示したと言っても過言ではなからう。

## 今後の展望

本研究において示したモデル（理論的材積式）は、針葉樹を対象として誘導されている。このモデルは、針葉樹と幹（稈）の形の似ているタケや枝分かれした幹をもつ広葉樹に対しても適用できるのだろうか？ また、適用できないとすれば、どこをどのように改良すれば、適用できるようになるのだろうか？ さらに、胸高直径は手元で容易かつ正確に測定できるのに対し、樹高の測定は三角法の応用による間接測定に頼らざるを得ないため煩雑であり、しばしば不正確になりがちである。したがって、幹材積を推定するモデルとしては、二変数材積式よりも一変数材積式の方が便利である。どのようにすれば、ここで誘導した二変数の理論的材積式を一変数の理論的材積式へと改良できるのだろうか？ 今後の課題である。

## おわりに

科学の理論は数学的な言語（数式）によって表現され、その記述は単純であればあるほど美しい。雑誌「数学セミナー」に載っていた言葉であり、私の理想とする研究スタイルを上

手く説明しているように思う。もちろん、森林・樹木のような自然を相手にしながら、そのすべてを数式によって説明しようとするのはナンセンスであろう。しかるに、ある程度のところまでは数式で説明できるのではないだろうか？ 複雑な数式よりも簡単な数式による方がモデルとしては正鵠を得ているのではないだろうか？ このようなスタンスをもって、これまで研究を進めてきた。本研究において誘導した理論的材積式も、その成果の一部である。森林を研究する者の一人として、これからも簡単な数式をペンにして、論文という名のキャンパスに森や木のことをスケッチしていきたい。私の描く拙いスケッチが、林業・林産業の発展や林学の進歩に少しでも資するようであれば幸いである。

## 謝 辞

日本農学進歩賞の受賞にあたっては、日本森林学会から御推薦いただきました。日本森林学会の宝月岱造 会長、小池孝良 副会長をはじめとする関係の先生方に対し、心より御礼申し上げます。本研究は、鳥取大学農学部在職中に行ったものです。鳥取大学在職中においては、直属の上司であった小笠原隆三 名誉教授ならびに故 黒川泰亨 名誉教授より、常に恵まれた研究環境を与えていただくとともに、暖かい励ましの御言葉をいただきました。また、鳥取大学農学部附属フィールドサイエンスセンター森林部門（旧 農学部附属蒜山演習林）の職員の方々ならびに森林計画学研究室の学生諸氏には、森林調査において多大な御協力をいただきました。鳥取大学大学院連合農学研究科の王 賀新 博士（現 中国大連大学 教授）と九州大学大学院農学研究科の光田 靖 博士（現 森林総合研究所四国支所 主任研究員）には、共同研究者として研究の一部に加わっていただきました。高知大学農学部の坂本 格 名誉教授と岩神正朗 名誉教授ならびに九州大学農学部の今田盛生 名誉教授（現 九州共立大学工学部 特任教授）、吉田茂二郎 教授および溝上展也 准教授をはじめとする恩師の先生方には、研究者の道へと進むきっかけを与えていただくとともに、大学奉職後においても学生時代と変わらぬ御指導と御鞭撻をいただきました。以上の方々に対し、厚く御礼申し上げます。

## 引用文献

- 王 賀新・小笠原隆三・井上昭夫（1998）中国遼寧省におけるニホンカラマツの相対幹形と正形数. 森林計画学会誌 31: 29-35.
- 井上昭夫・黒川泰亨（2001）針葉樹における二変数材積式の理論的誘導. 日本林学会誌 83(2): 130-134.
- 井上昭夫・光田 靖・王 賀新（2002）理論的材積式のカラマツへの適用. 鳥取大学農学部演習林研究報告 27: 23-29.
- 井上昭夫（2002）現行の二変数材積式における問題点について. 鳥取大学農学部研究報告 55: 1-4.
- Inoue, A. (2006) Application of theoretical volume equation to Japanese cedar. Applied Forest Science 15(1): 33-36.

## **Theoretical studies on the estimation of stem volume for coniferous tree species**

Akio INOUE

(Faculty of Environmental and Symbiotic Sciences, Prefectural University of Kumamoto)

iakio@pu-kumamoto.ac.jp