

理論的材積式のカラマツへの適用

井上昭夫*・光田 靖**・王 賀新***

Application of Theoretical Volume Equation to *Larix leptolepis* Gordon

Akio INOUE *, Yasushi MITSUDA ** and WANG Hexin ***

要 旨

九州大学農学部附属北海道演習林（北海道）、東京大学農学部附属富士演習林（富士）、鳥取大学農学部附属蒜山演習林（蒜山）および中国遼寧省（中国）において収集された合計299本のカラマツに対して理論的材積式を適用し、その正確度（相対誤差）と精度（標準誤差）を地域単位で経験的に作成された二変数材積式（経験的材積式）と比較した。理論的材積式によって推定された幹材積の平均相対誤差と標準誤差は、北海道で11.400%と0.067m³、富士で2.636%と0.062m³、蒜山で-0.311%と0.013m³、中国で3.591%と0.080m³であった。正確度と精度のいずれに関しても、理論的材積式と経験的材積式との間で優劣はつけられなかった。比較に用いた経験的材積式が広く実用されている現状から判断すると、理論的材積式はカラマツに対して実用に耐えられる正確度と精度を備えていると考えられる。この結果は、理論的材積式の普遍性と適合性を支持しているといえよう。

キーワード：カラマツ、経験的材積式、理論的材積式

Summary

We applied the theoretical volume equation (TVE) to 299 *Larix leptolepis* Gordon sample trees. The sample trees were collected from four different regions: Kyushu University Forest in Hokkaido, northern Japan (Hokkaido), University Forest at Yamanakako of the University of Tokyo, central Japan (Yamanakako), Hiruzen Experimental Forest of Tottori University, western Japan (Hiruzen) and Liaoning of China (China). The accuracy (mean relative error) and precision (standard error) of stem volume estimated by TVE were as follows: 11.400% and 0.067 m³ (Hokkaido), 2.636% and 0.062 m³ (Yamanakako), -0.311% and 0.013 m³ (Hiruzen) and 3.591% and 0.080 m³ (China). For best evaluation, we also compared the accuracy and precision of TVE with those of empirical volume equations for each region (EVE). It could not be judged which volume equation, TVE or EVE, had higher accuracy and precision. Since the EVE is one of the most widely used volume equation, it is considered that the TVE can be practically applied to *L. leptolepis* with better accuracy and precision. In conclusion, the result of the current study will support the universality and goodness of fit of the TVE.

Key words: empirical volume equation (EVE), *Larix leptolepis* Gordon, theoretical volume equation (TVE)

*鳥取大学農学部生物資源環境学科森林科学講座（〒680-8553 鳥取市湖山町南4丁目101）

Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan

**九州大学大学院農学研究院生物資源環境科学府森林資源科学部門（〒812-8581 福岡市東区箱崎6丁目10-1）

Department of Forest and Forest Products Sciences, Faculty of Agriculture, Graduate School of Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

***信州大学農学部森林科学科森林生産利用学講座（〒399-4598 長野県上伊那郡南箕輪村8304）

Department of Forest Resources Management and Wood Science, Faculty of Agriculture, Shinshu University, Nagano 399-4598, Japan

I. 緒 言

森林経営において、幹材積を正確に把握することは重要である。しかし、立木のままで直接的に幹材積を測定することは困難である。そこで、立木のままで比較的容易に測定できる樹高と胸高直径から間接的に幹材積を推定できるように、地域単位で主要な樹種ごとに二変数材積式が作成されている（例えば、林野庁計画課，1970a, 1970b）。しかし、さまざまな地域、樹種および成育段階の立木に対して適用できる普遍的な二変数材積式は、現在のところほとんどみられない。

井上・黒川（2001）は、まず、樹高、胸高直径（あるいは胸高断面積）および幹材積から、Kunze型の相対幹曲線式における係数を推定する2つの方法を示した。次いで、これらの方法によって推定される係数が互いに等しいと仮定することによって、新しい二変数材積式を理論的に誘導した（以下、理論的材積式と記す）。そして、誘導した理論的材積式を鳥取大学農学部附属蒜山演習林において収集したスギ（*Cryptomeria japonica* D. Don）とヒノキ（*Chamaecyparis obtusa* Endl.）各50本の試料木に適用し、この材積式が実用に耐えられる正確度と精度を備えている可能性を示した。理論的材積式の最も優れた利点としては、経験的に定まる係数を含んでいないため、さまざまな地域の針葉樹に適用できる可能性が高いことが挙げられる。しかし、他の地域や樹種に理論的材積式を適用した研究は、現在のところ全く行われていない。他の地域や樹種に対して理論的材積式を適用した場合、どの程度の誤差を示すのかについては明らかではない。

そこで本研究では、4つの異なる地域（九州大学農学部附属北海道演習林，東京大学農学部附属富士演習林，鳥取大学農学部附属蒜山演習林および中国遼寧省）において収集された合計299本のカラマツ（*Larix leptolepis* Gordon）の試料木に対して理論的材積式を適用し、その正確度（相対誤差）と精度（標準誤差）を地域単位で経験的に作成された二変数材積式と比較した。その結果、理論的材積式の普遍性と適合性を支持する有益な知見が得られたので報告する。

II. 試 料

九州大学農学部附属北海道演習林，東京大学農学部附属富士演習林，鳥取大学農学部附属蒜山演習林および中国遼寧省において収集された合計299本のカラマツを試料木として用いた。試料木の概要を表1に示す。

1. 九州大学農学部附属北海道演習林

九州大学農学部附属北海道演習林（以下、北海道と記す）のカラマツ人工林において、36本の試料木を伐倒した。各試料木について、樹高を0.1m括約で、地上高0 m, 0.3m, 0.8mおよび1.3m（胸高）より1.0m間隔での直径を0.1cm括約でそれぞれ測定した。得られた測定値をもとに、区分求積法によって試料木の現実幹材積を求めた。

2. 東京大学農学部附属富士演習林

東京大学農学部附属富士演習林（以下、富士と記す）のカラマツ人工林において、台風による被害木を含む105本の試料木が伐倒された。各試料木について、樹高が1.0cm括約で、地上高0 mと1.3m（胸高）および梢端からの相対高0.15, 0.35, 0.55, 0.75, 0.95の位置における

表1 試料木の概要
Table 1 General description of sample trees

Region		Mean	S.D.	Maximum	minimum	Median
Hokkaido	Tree height(m)	25.1	2.9	30.6	16.3	25.4
	DBH(cm)	22.8	3.2	31.6	15.9	22.6
	Age(year)	41.6	3.6	51	36	40
Yamanakako	Tree height(m)	13.9	5.5	22.5	3.9	15.8
	DBH(cm)	21.7	11.1	47.6	4.4	21.9
	Age(year)	-	-	-	-	-
Hiruzen	Tree height(m)	15.4	3.0	22.0	7.1	15.5
	DBH(cm)	16.3	5.1	26.5	7.4	16.0
	Age(year)	33.0	3.0	36	30	33
China	Tree height(m)	19.9	5.3	32.9	9.8	19.9
	DBH(cm)	20.8	7.2	47.3	8.5	20.0
	Age(year)	31.6	13.3	57	12	29

富士における試料木の樹齢は不明である。
The age of sample trees in Yamanakako is unknown.

直径が0.1cm括約でそれぞれ測定された。得られた測定値をもとに、数値積分による求積法 (Maezawa and Haga, 1982) によって試料木の現実幹材積が求められた (前沢ら, 1985)。

3. 鳥取大学農学部附属蒜山演習林

鳥取大学農学部附属蒜山演習林 (以下, 蒜山と記す) のカラマツ人工林2林分において, 0.0225m²の方形プロットを1つずつ設定した。プロット内に生存する全てのカラマツ (いずれのプロットも28本) を試料木として伐倒した。各試料木について, 樹高を0.1m括約で, 地上高0mと0.2mおよび1.2m (胸高) より2.0m間隔での直径を0.1cm括約でそれぞれ測定した。得られた測定値をもとに, 区分求積法によって試料木の現実幹材積を求めた (王・魚住, 2001)。

4. 中国遼寧省

中国遼寧省の東部と北部 (以下, 中国と記す) のカラマツ人工林77林分において, 102本のカラマツを試料木として伐倒した。各試料木について, 樹高を0.1m括約で, 地上高0mと1.3m (胸高) より2.0m間隔での直径を0.1cm括約でそれぞれ測定した。得られた測定値をもとに, 区分求積法によって試料木の現実幹材積を求めた (王ら, 1998)。

Ⅲ. 解析方法

まず, 樹高 h と胸高直径 d_b の値より, [1] 式に示す理論的材積式によって各試料木の幹材積 v を推定した。

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

ここで, h_b は胸高であり, 蒜山では1.2m, その他の地域では1.3mとなる。なお, 理論的材

積式の誘導方法については既報（井上・黒川，2001）を参照されたい。

次いで，地域単位で樹種ごとに作成されている経験的な二変数材積式（以下，経験的材積式と記す）によって，各試料木の幹材積を推定した。各地域のカラマツを対象とした経験的材積式は，それぞれ次式によって与えられる。

北海道（林野庁計画課，1970a）

$$[2] \quad 11.1\text{cm} \leq d_b \leq 21.0\text{cm} \quad \log v = -4.335395 + 1.903051 \log d_b + 1.025410 \log h$$

$$[3] \quad 21.1\text{cm} \leq d_b \leq 31.0\text{cm} \quad \log v = -4.441199 + 1.853014 \log d_b + 1.166956 \log h$$

$$[4] \quad d_b \geq 31.1\text{cm} \quad \log v = -4.332596 + 1.848675 \log d_b + 1.088954 \log h$$

富士（前沢ら，1985）

$$[5] \quad \log v = -4.1683 + 1.7914 \log d_b + 1.0538 \log h$$

蒜山（林野庁計画課，1970b）

$$[6] \quad 5.1\text{cm} \leq d_b \leq 11.0\text{cm} \quad \log v = -4.134795 + 1.835981 \log d_b + 0.939368 \log h$$

$$[7] \quad 11.1\text{cm} \leq d_b \leq 41.0\text{cm} \quad \log v = -4.097423 + 1.871126 \log d_b + 0.863667 \log h$$

中国（田ら，1995）

$$[8] \quad \log v = -3.989577 + 1.799455 \log d_b + 0.856374 \log h$$

そして，理論的材積式と経験的材積式によって推定した幹材積 v_e の現実幹材積 v_a に対する誤差を，正確度（相対誤差 Re ）と精度（標準誤差 Se ）によって比較した。

$$[9] \quad Re = 100(v_e - v_a)/v_a$$

$$[10] \quad Se = \sqrt{\sum (v_e - v_a)^2/n}$$

ここで， n は標本数である。

さらに，推定した幹材積と現実幹材積との間の有意差をpaired t 検定によって解析した。

IV. 結果と考察

理論的材積式と経験的材積式によって推定した幹材積と現実幹材積との関係ならびに推定した幹材積の相対誤差と標準誤差を図1と表2にそれぞれ示す。理論的材積式によって推定された幹材積の相対誤差（平均±標準偏差）は，北海道で $11.400 \pm 7.318\%$ ，富士で $2.636 \pm 9.898\%$ ，蒜山で $-1.091 \pm 5.723\%$ ，中国で $3.591 \pm 9.045\%$ となった。理論的材積式による推定幹材積と現実幹材積との間で，蒜山では有意差が認められなかったが（ $p=0.440$ ），その他の地域では認められた（ $p<0.01$ ）。これに対し，経験的材積式によって推定された幹材積の相対誤差は，北海道で $7.597 \pm 7.196\%$ ，富士で $0.403 \pm 9.157\%$ ，蒜山で $-6.773 \pm 6.055\%$ ，中国で $-6.030 \pm 9.381\%$ であった。経験的材積式による推定幹材積と現実幹材積との間で，富士では有意差が認められなかったが（ $p=0.864$ ），その他の地域では認められた（ $p<0.01$ ）。富士において有意差が認められなかったのは，本研究で用いた試料木の測定値によって経験的材積式（[5]式）が作成されているためと考えられる。蒜山と中国では理論的材積式が，北海道と富士では経験的材積式が，それぞれ相対的に小さい相対誤差を示した。したがって，本研究の結果からは，理論的材積式と経験的材積式の正確度について優劣はつけられない。

理論的材積式によって推定された幹材積の標準誤差は，北海道で 0.067m^3 ，富士で 0.062m^3 ，蒜山で 0.013m^3 ，中国で 0.080m^3 となった。これに対し，経験的材積式による推定幹材積の標準誤差は，北海道で 0.052m^3 ，富士で 0.046m^3 ，蒜山で 0.027m^3 ，中国で 0.080m^3 であった。蒜山では理論的材積式が，北海道と富士では経験的材積式が，それぞれ相対的に小さい標準誤差を示

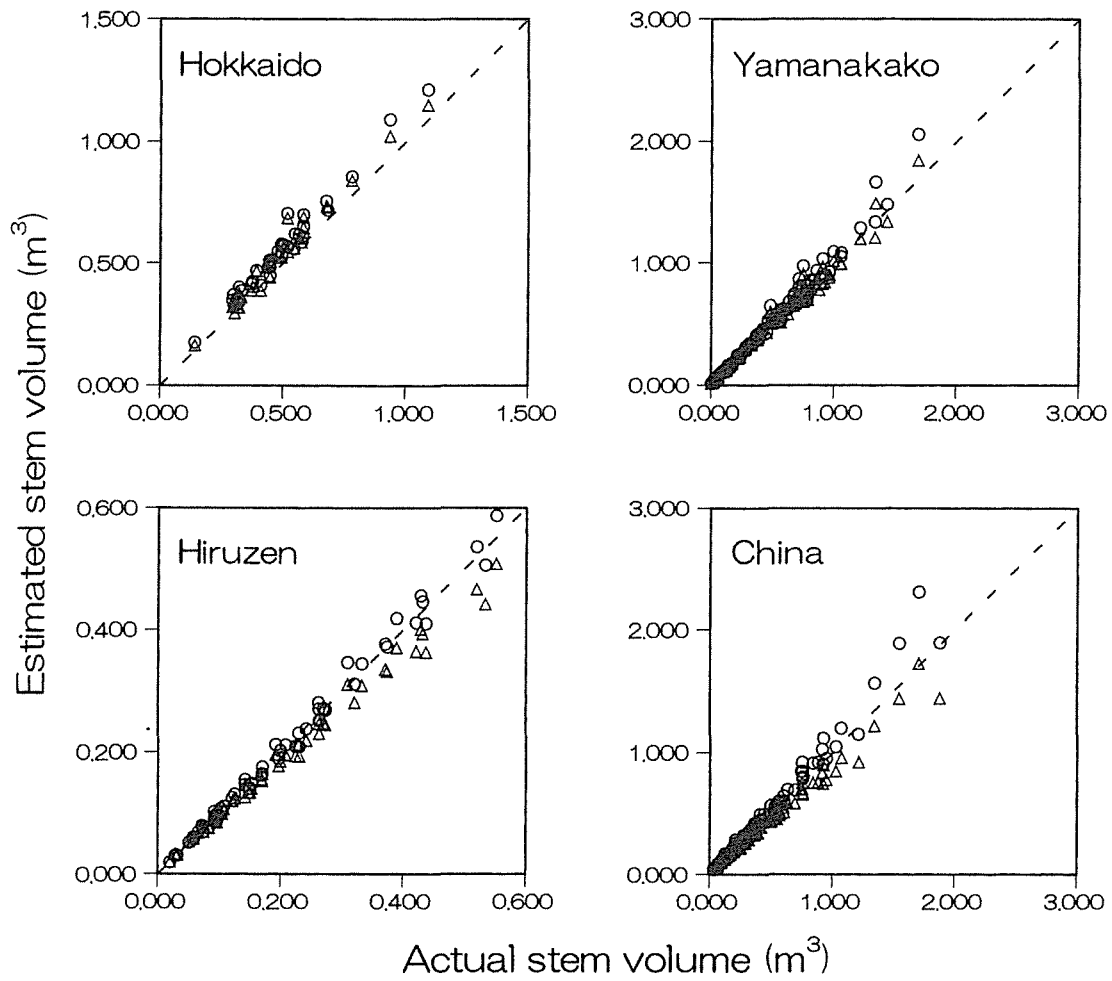


図1 理論的材積式と経験的材積式によって推定した幹材積と現実幹材積との関係
 Fig. 1 Relationships of actual stem volume to estimated stem volumes by theoretical and empirical volume equations
 ○と△はそれぞれ理論的材積式と経験的材積式によって推定した幹材積を示す。
 The circle and triangle indicate the stem volumes estimated by theoretical and empirical volume equations, respectively.

表2 推定した幹材積の相対誤差と標準誤差
 Table 2 Relative and standard errors of estimated stem volume

	Theoretical volume equation		Empirical volume equation	
	Mean relative error(m³)*	Standard error(m³)	Mean relative error(m³)*	Standard error(m³)
Hokkaido	11.400±7.318	0.067	7.597±7.196	0.052
Yamanakako	2.636±9.898	0.062	0.403±9.157	0.046
Hiruzen	-1.091±5.723	0.013	-6.773±6.055	0.027
China	3.519±9.045	0.080	-6.030±9.381	0.080

*; 平均±標準偏差

*; mean ± S.D.

し、中国ではほぼ等しい標準誤差を示した。したがって、本研究の結果からは、理論的材積式と経験的材積式の精度についても優劣はつけられないであろう。比較に用いたカラマツの経験的材積式が各地域において実用されている現状から判断すると、以上の結果は、カラマツに対して理論的材積式が実用に耐えられる正確度と精度を備えていることを示唆していると考えられる。このことは、理論的材積式の普遍性と適合性を支持しているといえよう。

井上・黒川(2001)は、鳥取大学農学部附属蒜山演習林において収集したスギとヒノキ各50本の試料を用いて、理論的材積式と経験的材積式(林野庁計画課, 1970b)によって推定される幹材積の現実幹材積に対する誤差を、相対誤差と標準誤差によって比較した。その結果、理論的材積式による推定幹材積の相対誤差(平均±標準偏差)と標準誤差は、スギで $1.543 \pm 7.114\%$ と 0.028m^3 、ヒノキで $8.402 \pm 7.300\%$ と 0.025m^3 となった。また、スギに対しては理論的材積式が、ヒノキに対しては経験的材積式が、それぞれ相対誤差と標準誤差のいずれにおいても相対的に小さい値を示した。そして、この結果から、正確度と精度のいずれにおいても、理論的材積式と経験的材積式との間で優劣はつけられないと結論した。

以上のような検証結果から判断すると、理論的材積式によって推定される幹材積の平均相対誤差は、地域や樹種の違いとは関係なく、最大でも±10%前後だといえそうである。この平均相対誤差の大きさが、実用上どのような意味を持つのかは明らかでない。しかし、本研究において比較に用いた経験的材積式の中でも、北海道、蒜山および中国における材積式は、各地域の森林経営の現場において広く実用されている現状にある。また、既報(井上・黒川, 2001)で比較に用いたスギとヒノキの経験的材積式も広く実用されている。このような経験的材積式と理論的材積式との間で、正確度と精度のいずれにおいても優劣がつけられないということは、幹材積の推定に用いる二変数材積式を現在の経験的材積式から理論的材積式へと変更しても、実用上特に大きな問題は生じない可能性を示唆する。さまざまな地域、樹種および成育段階の針葉樹に対して普遍的に適用できる可能性のある理論的材積式の方が、限られた地域の限られた樹種を対象として作成されている経験的材積式よりも有用であろうと筆者らは考える。さらには、経験的な材積式では、最小自乗法によって経験的に決定される係数を含むため、式の両辺で次元に矛盾が生じたり、樹高と胸高直径との間に多重共線関係がある場合には係数の分散が大きくなるといった論理的な問題が生じる場合がある(高田, 1987)。これに対し、理論的材積式は経験的に決定される係数を含むことなく理論的に誘導されているため、[1]式から分かるように式の両辺で次元が整合しており、また、多重共線関係の問題が生じることもない。以上のことより、針葉樹の幹材積を推定する上で、理論的材積式は最も有効な材積式の1つであると考えられる。

V. 結 言

本研究では、4つの異なる地域において収集された299本のカラマツに対し、既報(井上・黒川, 2001)において誘導した理論的材積式を適用し、その正確度と精度を検証した。その結果、理論的材積式はカラマツに対して実用に耐えられる正確度と精度を備えていると考えられた。このことは、理論的材積式の普遍性と適合性を支持する有益な知見だと考える。

材積式に関する研究は、古くから測樹学(森林計測学)の分野における最も重要な課題の1つであった。しかし、従来の研究では、誤差の大小が主として重視されており、普遍的な材積式を得ようとする研究はほとんど行われなかった。これに対し、既報(井上・黒川, 2001)に

において誘導した理論的材積式は、様々な地域の針葉樹に対して適用しても、経験的に得られた材積式との間で優劣をつけられない程度の正確度と精度を示す可能性がある。このような普遍性と適合性から判断すると、理論的材積式は、材積式に関する研究の歴史に一石を投じるものといえよう。今後は、さらに異なる地域や異なる樹種についても試料木を収集することによって、理論的材積式の普遍性と適合性を証明していきたい。

引用文献

- 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. 日林誌 83: 130-134.
- Maezawa, K. and Haga, T. (1982) Measurement of stem volume based on numerical integration (I) A study on the weight coefficient of integration. J. Jpn. For. Soc. 64: 382-389.
- 前沢完次郎・八木喜徳郎・永島初義 (1985) 富士演習林カラマツ立木幹材積表. 演習林 (東大) 24:1-11.
- 林野庁計画課 (1970a) 立木幹材積表—東日本編. 333pp, 日本林業調査会, 東京.
- 林野庁計画課 (1970b) 立木幹材積表—西日本編. 319pp, 日本林業調査会, 東京.
- 高田和彦 (1987) 材積式再考. 林統研誌 12: 1-4.
- 田 志和・董 健・王 喜武・黄 国瑞 (1995) 日本落葉松育林学. 192pp, 北京農業大学出版社, 北京.
- 王 賀新・魚住脩司 (2001) カラマツ人工林における林分内の相対幹形と正形数の変動. 日林誌 83:197-203.
- 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. 森林計画誌 31: 29-35.

(2002年2月13日受理)