

秋田地方のスギにおける樹高を用いた一変数材積式の検討

Evaluation of one-way volume equation as a function of tree height for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) trees in Akita district, Northeastern Japan西園朋広*¹・細田和男*¹・富村洋一*¹・佐野真琴*¹・小谷英司*²Tomohiro NISHIZONO*¹, Kazuo HOSODA*¹, Yoichi TOMIMURA*¹, Makoto SANNO*¹ and Eiji KODANI*²

*1 森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki 305-8687

*2 森林総合研究所東北支所

Tohoku Res. Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Morioka 020-0123

要旨：秋田地方のスギを対象として、樹高を独立変数とする一変数材積式の利用可能性を検討した。まず、既存の二変数幹材積式を調製するために得られたデータを用いて、樹高を独立変数とする一変数材積式を調製した。調製した一変数材積式において、推定誤差のバイアスは小さかったが、ばらつきは大きかった。次に、収穫試験地の長期モニタリングデータに、既存の二変数材積式と今回調製した一変数材積式の両者を適用した。一変数材積式で推定した林分材積は、二変数材積式で推定した林分材積と比べて過大であった。調製データでは、収穫試験地データに比べて、同程度の樹高における胸高直径が大きい個体が多かった。このデータの偏りが過大推定の原因だと推察された。樹高を用いた一変数材積式の推定精度は調製データの偏りに強く影響されることがわかった。また、上層樹高・収量比数が大きいほど過大推定の程度は大きくなることが示唆された

キーワード：一変数材積式、スギ、樹高、リモートセンシング、収穫試験地

Abstract: We evaluated one-way volume equation as a function of tree height for *Cryptomeria japonica* trees in Akita district, Northeastern Japan. The one-way volume equation was developed using the tree data for development of the existing two-way volume equation in Akita district. The bias of estimation error of the equation was small. However, the dispersion of estimation error was large. The both one-way and two-way equations were applied to long-term monitoring data. The estimated stand volumes by one-way equation were greater than those by two-way equation. The range of DBH was narrower and the minimum of DBH was greater in the dataset used for development of the equation than in dataset from long-term monitoring, when we compared the DBHs of trees with equivalent tree height among the datasets. These results indicate that the overestimation of stand volume resulted from the biased dataset, and estimation accuracy of volume using one-way equation is strongly affected by bias of dataset. In addition, the degree of overestimation was increased with increasing dominant tree height and relative yield index.

Key words: one-way volume equation, Japanese cedar, tree height, remote sensing, long-term monitoring experiments

I はじめに

立木の幹材積を把握したい場合、対象木の直径と樹高を測定して、二変数材積式(5)を用いて材積を推定するのが一般的である。また、直径のみを測定して、直径を独立変数とする一変数材積式から材積を求める方法も検討されてきた(例えば、2)。ここで、直径のみを測定するのは、従来の方法では、直径の測定と比べて樹高の測定には労力がかかり、また測定の精度が悪いためである。しかし、近年のデジタル空中写真やLiDAR等のリモートセンシング技術の発達によって、樹高を簡単に、また比較的高精度に測定できる可能性が出てきた(1)。以

上から、本研究では、樹高を独立変数とする一変数材積式の利用可能性を検討した。まず、秋田地方のスギの二変数幹材積式を調製するために得られたデータ(4)を用いて、樹高を独立変数とする一変数材積式を調製した。次に、秋田県の国有林における地上調査データに、既存の二変数材積式と今回調製した一変数材積式の両者を適用し、推定値を比較検討した。

II 資料

1. 個体の幹材積測定データ 一変数材積式を調製するために、秋田地方のスギ人工林で得られたデータを資

料（以下、資料1と記す）として用いた。資料1は、二変数材積式（4）を調製するために、旧秋田営林局管内のスギ人工林から収集されたものである。調査は、主要樹種立木材積表調製要綱（5）に基づいて実施された。スギ個体の胸高直径・樹高・枝下高等が測定され、また、幹材積を推定するために、胸高から2m間隔の高さにおける幹直径が測定された。調査結果は、個体ごとに1枚の紙製カードに記録されており、このカードが森林総合研究所に保管されていた。カードの記載値を電子化して解析に用いた。総個体数は2894本である。なお、（4）に記載されているサンプル数とカードを整理して得られたサンプル数は完全には一致しなかった。また、（4）に記載されているデータ収集の林小班とカードに記載された林小班が一致しない場合があった。本研究ではカードに秋田局管内の林小班が記載されていた個体の全てを解析の対象とした（表-1）。胸高直径、樹高、測定高および各測定高における直径を解析に用いた。

2. 林分の毎木調査データ 調製した一変数材積式を現実林に適用するために、秋田地方の国有林内に設置された収穫試験地の長期モニタリングデータ（以下、資料2と記す、表-2）を用いた。試験区数は29である。各試験区で8～13回の調査が実施されており、全試験区における調査回数合計は280回である。個体の胸高直径と樹高を解析に用いた。くわえて、各林分で測定時ごとに計算した収量比数および上層樹高（樹高で上位100本の個体の平均樹高）を解析に用いた。試験地と調査方法の詳細については、（3）を参照されたい。

III 方法

1. 一変数材積式の調製 まず、各測定高の直径値から、区分求積（5）により各資料木の実測材積を求めた。次に、個体の樹高 H (m) と幹材積 V (m³) との関係は次式によって近似し、材積式を調製した。

$$V = aH^b \quad (1)$$

ここで、 a と b は係数である。この式を資料1に回帰し、係数を推定した。回帰には非線形最小2乗法を用いた。

既存の二変数材積式（4）では、すべてのデータ範囲を単一の式で表現するのではなく、データ範囲を直径階で複数に分割して、複数の式によって材積式が構成されている。本研究でも、この考えに従い、複数の樹高階に分割して、複数の式で材積を推定することを検討した。具体的には、まず、データ数を考慮して樹高階を10m未満、10m以上15m未満、15m以上20m未満、20m以上25m未満、25m以上の5つに分割した。次に、すべてのデータ範囲を単一の式で表現する場合、および樹高階ごとに5つの

式で表現する場合について、（1）式の係数を求めた。さらに、この5つの樹高階のいくつかを併合して、2～4個の式で材積を表現する場合について（1）式の係数を求めた。このとき、併合可能な全ての樹高階の組み合わせについて、（1）式の係数を求めた。適切な分割数と閾値を知るために、AICを算出し比較した。AICが最小の分割数と閾値の組み合わせを用いて材積式を調製した。

材積式の推定精度を評価するために、推定誤差（=推定材積-実測材積）を計算し、推定誤差の平均と標準偏差を調べた。あわせて、既存の二変数材積式について同じ統計量を計算し、一変数材積式の推定精度と比較した。

2. 一変数材積式の現実林分への適用 調製した一変数材積式を用いて、資料2の全個体について材積を推定した。試験区内の全個体の材積を積算して、林分材積 V_1 を推定した。また、既存の二変数材積式を用いて、同様に林分材積 V_2 を推定した。一変数材積式と二変数材積式を比較するために、両者の差 V_{diff} ($=V_1 - V_2$) を求めた。

林分構造が V_{diff} に与える影響を把握するために、上層樹高・収量比数と V_{diff} との関係について、単相関分析を行った。また、より複雑な構造を調べるために、樹形回帰分析を行った。樹形回帰分析には、R 3.1.0のrpartパッケージを用いた。回帰樹の終端に含まれるデータの最小数は28（全数の1割）に設定した。one-standard-deviation ruleにしたがって、回帰樹を剪定した。

IV 結果

1. 一変数材積式の調製と精度評価 AICの比較結果に基づいて、3つの樹高階に分割し、3つの式を用いて材積式を構成することとした（表-3の複数次式）。一変数材積式の推定誤差の平均は0.0014 m³であり、二変数材積式のそれ（0.0025 m³）よりも小さかった。しかし、一変数材積式の推定誤差の標準偏差（0.2244 m³）は二変数材積式のそれ（0.0580 m³）と比べて大きかった。すなわち、一変数材積式の誤差について、バイアスは小さいがばらつきが大きいといえる（図-1）。

2. 一変数材積式の現実林分への適用 V_1 と V_2 との間には強い相関 ($r = 0.9655$, $p < 0.001$, 図-2) が認められた。しかし、林分材積が500 m³/haを超える範囲で、 V_1 は V_2 よりも大きかった。このため、大部分（84.6%）の V_{diff} は正の値を示し、その平均値は163.58 m³/haであった。つまり、 V_1 と V_2 は一致していなかった。

上層樹高が大きいほど V_{diff} は大きくなった ($r = 0.5097$, $p < 0.001$, 図-3)。収量比数が大きいほど V_{diff} は大きくなった ($r = 0.6328$, $p < 0.001$, 図-3)。樹形回帰分析により（図-4）、 V_{diff} は4つの集団に分かれた。

最も V_{diff} が大きかったのは、収量比数が 0.91 以上の林分集団 A であった。つまり、過密林では V_{diff} が大きいといえる。最も V_{diff} が小さかったのは、収量比数が 0.91 未満で、上層樹高が 23.2m 未満の林分集団 D であった。対象林分において上層樹高 23.2m に達するのは、林齢 40 年～60 年であり、平均的には林齢 50 年程度であった（結果は示していない）。つまり、過密林でない限り、林齢 50 年未満の林分では V_{diff} が小さいといえる。収量比数が 0.91 未満で上層樹高が 23.2m 以上の林分のうち、収量比数が 0.74 以上の林分集団 B では V_{diff} が 2 番目に大きかった。収量比数が 0.91 未満で上層樹高が 23.2m 以上の林分のうち、収量比数が 0.74 未満の林分集団 C では V_{diff} が 2 番目に小さかった。つまり、林齢 50 年以降の林分でも林分密度が低い場合には V_{diff} が小さいが、林分密度が高い場合には V_{diff} が大きいといえる。

収穫試験地データにおける全個体の樹高一直径関係と調製データの樹高一直径関係を比較すると（図-5）、前者のデータ範囲は後者のそれに比べて広がった。また、樹高 20m 以上の範囲において、調製データは直径の大きな範囲に偏って分布していた。

V 考察

既存の二変数材積式では推定誤差のバイアスとばらつき両方が小さかった（図-1）。一方、今回調製した一変数材積式は、推定誤差のバイアスは小さかったが、ばらつきは大きかった（図-1）。誤差のばらつきが大きいことから、個体レベルでの材積推定の精度は二変数材積式よりかなり劣るといえる。一方、バイアスが小さいことから、複数個体の推定値を平均・積算して求める林分統計量については、誤差が相殺され、ある程度、推定の精度が高いのではないかと予想できる。

V_{diff} は正の大きな値を示しており（図-3）、 V_1 は V_2 と異なっていた。二変数材積式の推定精度は、一変数材積式と比べてかなり高いから（図-1）、以下では、二変数材積式による推定材積を真値とみなす。そうすると V_{diff} は一変数材積式による林分材積の推定誤差を意味している。よって、一変数材積式は林分材積を過大推定しているといえる。この結果は、林分統計量については高い精度が期待できるという上記の予想と一致しない。

この不一致は、調製データの偏りに起因すると思われる。一変数材積式を調製するのに用いたデータは、収穫試験地のデータと比べて、樹高が 20m を超える範囲において、胸高直径が大きい範囲に偏って分布していた（図-5）。この偏りが材積の過大推定につながったと考える。例えば、上層樹高が 23.2m に達していない林分では、デ

ータ範囲に偏りが少ないので（図-5）、一変数材積式による推定誤差は小さかった（図-3、4のD）と推察できる。このことから、調製データの偏りがなければ、一変数材積式によって適切な推定が可能だと考えられる。また、上層樹高が 23.2m に達している林分においても、林分密度が低い場合には推定誤差は小さかった（図-3、4のC）。低密度の林分では直径成長が促進され、胸高直径が大きく、胸高直径のサイズが調製データのデータ範囲と似ていたのではないかと推察できる。

以上より、今回調製した樹高を用いた一変数材積式を利用して材積を推定すると、二変数材積式で推定した場合と比べて、過大推定となる可能性が高い。そのため、十分な精度を期待することは難しい。本研究の結果は、一変数材積式がデータの偏りに強く影響されることを示している。したがって、秋田地方のスギにおいて、一変数材積式によって適切な材積推定を行うには、調製データを追加し、偏りのないデータセットを整備する必要がある。また、 V_{diff} の大きさは、林分の発達段階（上層樹高）と林分の混み具合（収量比数）を使って説明できそうである（図-3、4）。したがって、リモートセンシング技術によって入手可能な林分の発達段階と込み具合に関する林分構成値を利用することで、一変数材積式で適切に材積を推定できるかもしれない。例えば、林分状態（上層樹高など）に応じて一変数材積式の係数を変化させるような推定モデルを構築することが考えられる。推定の改善方法の検討については、今後の課題としたい。

本研究は農林水産省プロジェクト研究「低コストな森林情報把握技術の開発」の一環として実施した。

引用文献

- (1) BI, H. et al. (2012) Evaluation of nonlinear equations for predicting diameter from tree height. *Can. J. For. Res.* **42**:789-806
- (2) 稲田充男 (1986) 長柱の座屈理論に基づく樹高曲線式の検討 第2報 材積式の誘導とその適合性. 島根大農研報 20:47-51
- (3) 西園朋広ら (2008) 秋田地方のスギ人工林における林分材積成長量の経年推移. *日林誌* **90**:232-240
- (4) 林野庁 (1957) 秋田営林局スギ人工林立木材積表調製説明書. 林野庁, 東京: 41pp
- (5) 林野庁計画課 (1970) 立木幹材積表東日本編. 日本林業調査会, 東京: 333pp

表-1. 材積式調製データの概要

Table 1 Summary of sample trees

統計量	林齢* (年)	樹高 (m)	直径 (cm)	材積 (m ³)
平均	45.4	16.3	23.7	0.55
標準偏差	13.2	6.6	12.1	0.69
最大	66.0	34.9	63.0	3.77
最小	19.0	3.7	5.4	0.01

*772個体の林齢は不明であった。4個体の林齢は100年以上であった(132年が1個体、110年が2個体)。他の個体のデータ範囲から大きく外れていたため、これらの4個体を除外して計算した統計量を示した。Ages for 772 trees were not available. Ages of four trees were greater than 100 years (132 years for one tree, 110 years for three trees). Ages for these four trees are outliers. Statistics were calculated from the data except for these 4 trees.

表-2. 収穫試験地データの概要

Table 2 Summary of long-term monitoring plots

統計量	林齢 (年)	上層樹高 (m)	平均樹高 (m)	平均直径 (cm)	林分材積 (m ³ /ha)	本数密度 (本/ha)	収量比数
平均	60.7	26.3	23.6	33.0	752.7	860.1	0.77
標準偏差	20.1	6.2	7.0	10.9	342.0	460.3	0.10
最大	104.0	41.5	40.4	65.0	1726.4	2645.0	1.01
最小	27.0	11.4	8.4	11.7	111.6	204.3	0.54

表-3. 材積式の係数と AIC

Table 3 Estimated coefficients and AIC of volume equations

モデル	樹高階	a	b	AIC
単一式	分割なし	0.000052	3.1570	-378.539
	15m未満	0.000097	2.8931	
複数式*	15m以上 20m未満	0.000010	3.6966	-423.455
	20m以上	0.000108	2.9406	

*AICの最も小さいモデルのみを示した。The value of AIC for the model shown here was the smallest of those of the candidate models.

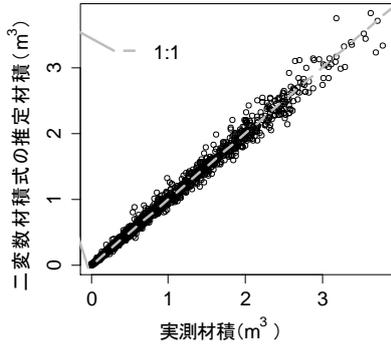


図-1. 調製データにおける実測材積と推定材積との関係

Fig. 1 Relationships between measured and estimated volumes in training data

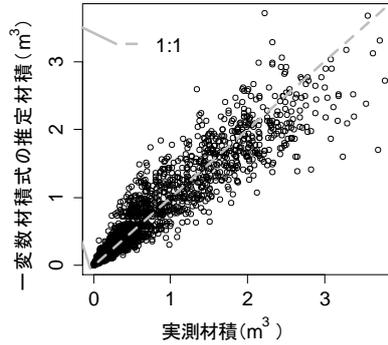


図-2. V2とV1との関係

Fig. 2 Relationship between V2 and V1

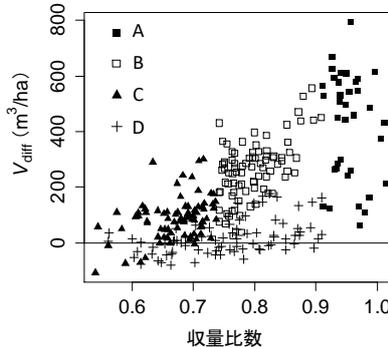
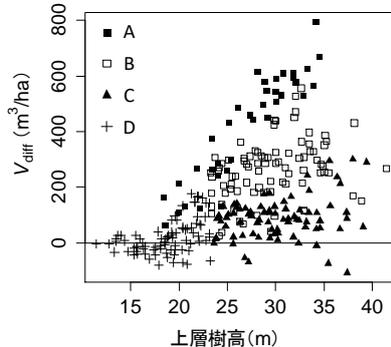


図-3. 上層樹高・収量比数と Vdiff との関係 凡例の文字は図-4と合致している。

Fig. 3 Relationships of dominant tree height and relative yield index to Vdiff

Alphabets in the legends correspond to those in Fig. 4.

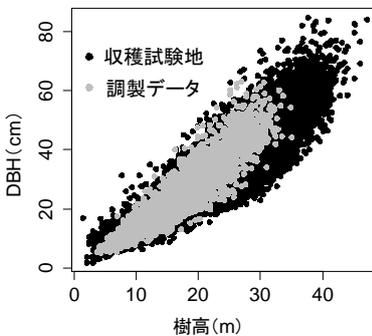
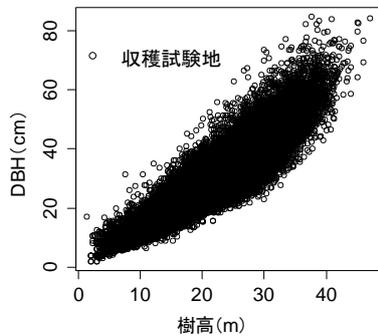


図-5. 調製・収穫試験地データにおける樹高と胸高直径との関係

Fig. 5 Relationships between tree height and DBH for trees in training data

and long-term monitoring data

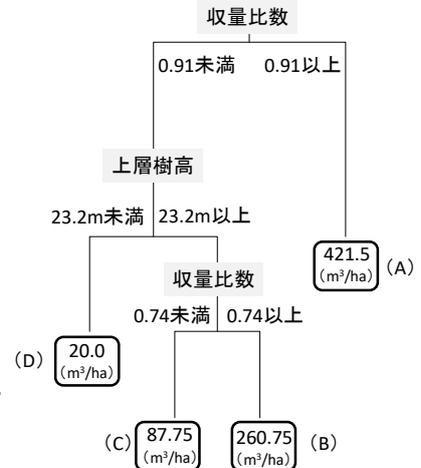


図-4. 上層樹高・収量比数と Vdiff との関係を示す回帰樹

末端節の数値は各クラスにおける Vdiff の平均値を示す。

Fig. 4 Regression tree showing the relationships of dominant tree height and relative yield index to Vdiff. Values in terminal nodes represent mean value for Vdiff of plots grouped within the cluster.