

空間体積・幹材積のモデルを用いた航空レーザに基づく
森林蓄積推定法の汎用化に関する研究
－岐阜県におけるスギ・ヒノキを例として－

**A study of the generalization of the stand volume estimation
method based on airborne LiDAR using models
of spatial volume and stem volume
－A case study of Sugi and Hinoki in Gifu prefecture－**

竹島 喜芳

Kiyoshi TAKEJIMA

中部大学中部高等学術研究所

「写真測量とリモートセンシング」 Vol. 56, No. 3, 2017
Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing

空間体積・幹材積のモデルを用いた航空レーザに基づく 森林蓄積推定法の汎用化に関する研究 —岐阜県におけるスギ・ヒノキを例として—

A study of the generalization of the stand volume estimation method based on airborne LiDAR using models of spatial volume and stem volume —A case study of Sugi and Hinoki in Gifu prefecture—

竹島 喜芳*

Kiyoshi TAKEJIMA

Abstract : The empirical model for estimating stand volume from LiDAR was developed by Takejima (2015). The study introduced new concept of Stock Ratio, the ratio of the stand volume in the spatial volume occupied by trees. The analysis of field data of over 6,000 trees revealed that Stock Ratio can be described by species and Hart-Becking index (Sr). However, the model had a problem for practical use, because of its adaptability since the base parameter was relying on the particular field data. To solve this problem, Stock Ratio simulation was adopted in this study. It was realized by calculating stem volume and spatial volume from virtual tree model. As a result, the generalized stand volume estimation functions were established. Functions are $v = \{0.0270e^{(-0.2140 \times Sr)} + 0.00217\} V$ (Sugi: *Cryptomeria Japonica* stand) and $v = \{0.0226e^{(-0.2485 \times Sr)} + 0.00207\} V$ (Hinoki: *Chamaecyparis Obutsusa* stand) where v as stand volumes, V as spatial volume calculated from LiDAR data. With the use of these functions, the stand volume of Sugi and Hinoki can be appropriately estimated without field data, which was essential in conventional methods.

1. 背景と目的

日本には国内の木材需要を賄う森林の生長量があると言われる。しかし国産材率は近年増加してきたとはいえ30%程度で(林野庁, 2016), 多くの木材を海外に依存している。ところが近年, 国際九太市場における需給の変化, 再生可能エネルギー普及にともなう木材チップ需要の増加(例えば, 梶山, 2013), 国策による公共建築物木造化の推進(林野庁, 2016)など, 国内木材資源に従来以上の需要が生じてきた。こうした需要に応えつつ, 資源・環境の保全を実現するには, 森林資源の把握は欠かせない。

我が国の森林資源は森林簿・森林調査簿によって把握されている。しかし, そこに記載された情報は実情と乖離している(例えば, 松下ら, 1998; 松下ら, 1997;

熊崎, 2012)。そのため, リモートセンシングによる森林資源把握への期待は高い(例えば, 加藤, 2010)。なかでも航空レーザは, 光学衛星画像で問題となる太陽高度による地形や地物の影等の影響を受け難いことから, 広域森林資源量把握に優れた手法となり得る。しかし, これまで費用対効果の点から広域森林資源把握で活用されることは限定的であった。ところが近年, 公共測量によって得られた航空レーザ・データが, 国土交通省への申請により無償で利用可能になり, 航空レーザによる広域森林資源把握の実現に向けた環境が整いつつある。そうした中, 航空レーザによって取得される点群データから地盤と樹冠表面を分離し, 両者から樹木が占有する空間の体積を求め, 現地調査で計測した森林蓄積と空間体積との関係を線形回帰することで, 現地調査を行っていない林分の森林蓄積を推定する(例えば, 米, 2008; 小谷ら, 2013)方法(以下, 空間体積法)は, データ処理がシンプルであり, スキャナタイプの航空レーザ・センサであれば広く適用可能であることから, 特に広域の森林蓄積把握や時系列

*中部大学中部高等学術研究所

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 56, NO. 3, 2017

データを活用した生長量把握において期待できる技術となる。

ところが、推定される森林蓄積の精度が他の手法に比べ低いという問題がある(小谷ら, 2013)。加えて、回帰式を最小自乗法によって導くことから、特に、森林蓄積の大きな林分が回帰式のパラメータ決定に強い影響を与える問題があるうえ、使用するモデルにも定めがないという問題もある(竹島, 2015)。空間体積法は、実用的ではあるものの、あくまで統計的な適合度を優先した手法であった。

それらの問題を解消するため竹島(2015)は、樹木が占有する空間に占める森林蓄積の割合を蓄積比と定義し、蓄積比と林分特性との関係を調査して空間体積法の改良を試みた。具体的には、岐阜県のスギとヒノキを対象に合計約6,000本の樹木位置と材積を計測して、航空レーザから計量される空間体積と森林蓄積との比、すなわち蓄積比と、林分特性との関係を整理した。その結果、蓄積比は、樹種によって異なり(スギとヒノキでは約2倍異なる)、樹木の混み具合が増すほど大きくなることを見出した。そこで両者を加味し、従来の適合度優先の手法とは異なる空間体積法を提案した。

しかし、その推定モデルやパラメータは、特定林分のデータを使って実証的に見出したものに過ぎない。ゆえに、モデルやパラメータは他の林分での適用が担保されているわけではなく、実用の際は、現地調査によって調製・確認する必要があった。加えて、新たに樹種や樹木の混み具合を示す情報が必要となり、その手法は推定精度が向上するとはいえ、空間体積法の強みであるシンプルさに欠けたものであった。

そこで本研究では、蓄積比と樹種、樹木の混み具合との関係を、空間体積モデルや幹材積モデルなどを使って系統的に調べ、竹島(2015)が現地データから実証的に導いた森林蓄積推定法(モデル及びパラメータ)を検証し、空間体積法の強みを活かした汎用的な森林蓄積推定法について考察する。

2. 方 法

本研究は、岐阜県に生育するスギ・ヒノキを対象に、以下の3つの課題を解決することによって遂行する。4節の「蓄積比のシミュレーション」、5節の「森林蓄積推定モデルの改良」、6節の「実用に向けた森林蓄積

推定法の考察」である。

4節の「蓄積比のシミュレーション」は次の5つの手順に従い実施する。①複雑な林分構造を同一形状の樹木が規則的に生育している集合体として考え、林分の蓄積比を単木の蓄積比と読み替える。②単木の蓄積比を、樹冠形状に基づいた空間体積モデルと幹材積モデルを使って数式で表し、両者により蓄積比モデルを構築する。③そのモデルのパラメータを、岐阜県に生育するスギ・ヒノキの実測データを使って調製する。④調製されたパラメータで蓄積比と樹種・樹木の混み具合との関係を数値計算によってシミュレーションする。⑤シミュレーション結果と竹島(2015)の実測データとを比較し、単木の蓄積比によって林分の蓄積比が説明可能か精査し、蓄積比の汎用的特性を議論する。つまり4節で、蓄積比の特性を議論する方法論を岐阜県のスギ・ヒノキを素材にして確立する。

5節の「森林蓄積推定モデルの改良」では、4節で得られた知見をもとに、竹島(2015)の森林蓄積推定モデルを改良し、岐阜県において最も適切と思われるスギ・ヒノキの森林蓄積推定モデル及びそのパラメータを議論する。

6節の「実用に向けた森林蓄積推定法の考察」では、航空レーザ・データから空間体積を使って森林蓄積を推定する際、5節のモデルで使用する変数が常に自明と限らないことから、それらの変数が不明な時の森林蓄積推定法を、4節で得られた知見に基づいて考察する。

3. 竹島(2015)の森林蓄積推定モデル概要

各論に入る前に、本論文で検証対象とするモデル(竹島, 2015)の概要を以下にまとめた。

まず、林分で樹木が占有する空間の体積 $V(\text{m}^3/\text{ha})$ に占める森林蓄積 $v(\text{m}^3/\text{ha})$ の割合を式(1)のように蓄積比 s と定義した。

$$s = \frac{v}{V} \quad (1)$$

この蓄積比を、実測した森林蓄積と航空レーザによって計量した空間体積から求め、蓄積比と林分特性との関係を精査した。その結果、スギとヒノキの蓄積比は平均値が2倍近く異なっていた(スギ: 0.00446 ($\sigma=0.000764$, $n=62$), ヒノキ: 0.00214 ($\sigma=0.000370$, $n=41$))。加えて、蓄積比は樹木の混み具合

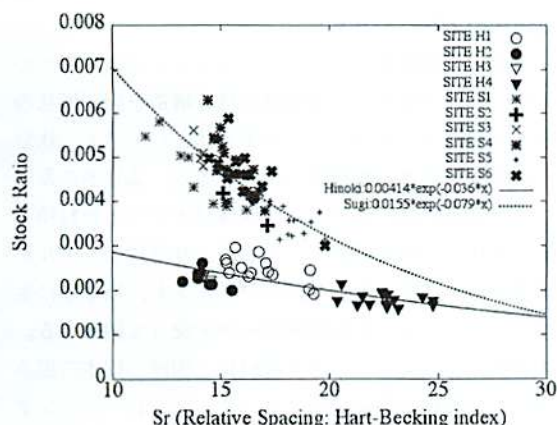


図1 スギ・ヒノキ別相対幹距比に対する蓄積比

合の指標である相対幹距比 Sr が大きくなるに従い小さくなる傾向があった(図1)。これにより空間体積法は、樹種や相対幹距比を考慮することで森林蓄積推定精度が向上することが示唆された。

ここで、相対幹距比 Sr は樹高を H (m)、樹木間隔を L (m) としたとき、式(2)で表される樹木の混み具合を示す指標である。

$$Sr = \frac{L}{H} \times 100 \quad (2)$$

そこで、樹種や相対幹距比 Sr を考慮した森林蓄積推定モデル構築のため、図1より、蓄積比と相対幹距比の関係として式(3)を設定した。

$$\frac{ds_s}{dSr} = -A_s s_s \quad (3)$$

このとき、 s_s は樹種別蓄積比、 A_s は樹種別定数である。

式(3)を解き、 Sr が ∞ のとき蓄積比が0として係数を調整し、蓄積比モデルとして式(4)を導いた。

$$s_s = B_s e^{-A_s Sr} \quad (4)$$

ここで、 B_s は樹種別定数である。

そして式(4)を式(1)に代入した式(5)を、空間体積を使った森林蓄積推定モデルとした。

$$v_s = B_s e^{-A_s Sr} V \quad (5)$$

ここで、 v_s は樹種別森林蓄積である。

このモデルに対して現地調査データを当てはめ、スギ・ヒノキの森林蓄積推定モデルとして式(6-1)、式(6-2)を導いた。

$$\text{スギ: } v = sV = 0.015 e^{(-0.079 \times Sr)} V \quad (6-1)$$

$$\text{ヒノキ: } v = sV = 0.0041 e^{(-0.036 \times Sr)} V \quad (6-2)$$

4. 蓄積比シミュレーション

4.1 蓄積比の読み替え

本研究の主テーマの1つである竹島(2015)の検証は、蓄積比が樹種や相対幹距比によってどのように変わるかをシミュレーションし、3節の知見を検証することである。それには蓄積比を目的変数、樹種・相対幹距比を説明変数にした蓄積比モデルの構築は欠かせない。ところが林分に存在する立木の樹高や樹冠、樹幹の形状は様々で、立木の配置も不規則である。よって、蓄積比の林分単位でのモデル化は非常に複雑なものとなる。そこで、現実の森林を図2のように幹を芯とした回転体が規則的に配列すると単純化したうえで、成長段階が異なっても樹の形状はそれぞれ相似と考え、特定樹高(20m:現在の日本に多く存在すると言われる収穫時期を迎えたスギ・ヒノキ人工林の樹高)の1本の樹木に着目し蓄積比 s' のモデル化を考える。つまり林分の蓄積比 s を単木の蓄積比 s' で読み替え、まずは蓄積比 s' のモデル化を試みる。

4.2 蓄積比モデルの構築

4.2.1 空間体積モデル

1本の樹木が占有する空間体積は、樹木が間隔 L (m) で等間隔に配置しているとき図3で示す、樹冠縦断面形状関数 $F(r)$ 、 H 、 Sr を使って求めることができる(r (m) は樹幹中心の任意の点から樹冠表面への水平

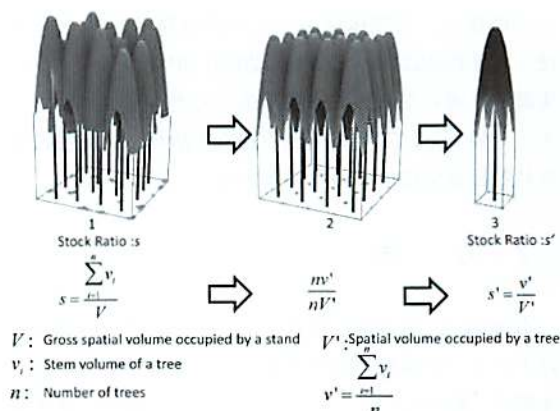


図2 蓄積比の読み替え

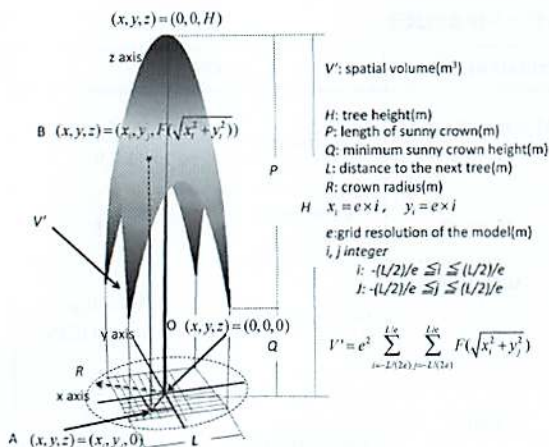


図3 空間体積のモデル化

距離である)。以下に空間体積モデル構築の手順を示す。

いま、幹の接地部分を点 $O(0, 0, 0)$ とする。そして、 L を十分小さな幅 e (m) で分割する。このとき、任意の格子中心を点 $A(x_i, y_j, 0)$ とすれば、点 A を通る地面の垂線と樹冠表面との接点 B は $(x_i, y_j, F(\sqrt{x_i^2 + y_j^2}))$ と表せる。こうして計算される樹冠高と格子面積を掛け合わせて体積を計算し、それを合計することで、式(7)によって空間体積 V' (m²) を求める。

$$V' = e^2 \sum_{i=-L/(2e)}^{L/(2e)} \sum_{j=-L/(2e)}^{L/(2e)} F(\sqrt{x_i^2 + y_j^2}) \quad (7)$$

ここで、 i, j は整数で、それぞれ $-L/(2e)$ から $L/(2e)$ の間の値をとる。

今回、 H を20mと固定していることから、式(7)において L を変化させれば、式(2)の L と Sr との関係から、同じ樹冠形状に対して Sr の異なる空間体積を計算できることになる。

なおこのモデルは、樹冠形状と L の条件によっては、樹冠が地面に接地する場合がある。しかし、そのような形状をした樹木は林内には存在し難い。そこで最低陽樹冠高 Q (m) (幾何学的に光があたる樹冠面のもっとも低い高さ) の最低値を樹高の15%と設定し、樹木が占有する空間に限界を設けた。これにより、樹木と樹木の間隔が広がったときのギャップを表現できるようにした。

4.2.2 材積モデル

材積は、一般に材積式によってモデル化されている。本研究では大隅 (1995) に基づいた式(8)の2変数材積式を使用する。

$$v' = 0.4H \times D^2 \quad (8)$$

ここで、 D は胸高直径 (m) である。

式(8)から v' は、樹種や相対幹距比と独立したものと考えられがちである。しかし、実際は相互に関係している。一般に、樹高と胸高直径の比であり樹幹の大きな形を表す形状比 HDR は、式(9)で定義され、林分の密度管理 (林分の混み具合を表す指標 Sr 等を使った立木本数の管理) によって人為でコントロールできるとされている (例えば林野庁監修 (1998))。これは、 HDR と Sr が式(10)のように関数 $G(Sr)$ で表せることを示唆している。

$$HDR = H/D \quad (9)$$

$$HDR = G(Sr) \quad (10)$$

このことから式(8)は、式(9)、式(10)を使って式(11)と変形できる。

$$v' = 0.4 \frac{H^3}{\{G(Sr)\}^2} \quad (11)$$

つまり、 v' は相対幹距比を説明変数とした関数となり得る。

以上により蓄積比 s' は、式(7)と式(11)を使って式(12)としてモデル化できることになる。

$$s' = \frac{e^2 \sum_{i=-L/(2e)}^{L/(2e)} \sum_{j=-L/(2e)}^{L/(2e)} F(\sqrt{x_i^2 + y_j^2})}{0.4 \frac{H^3}{\{G(Sr)\}^2}} \quad (12)$$

4.3 モデルの樹種別パラメータの調製

蓄積比のシミュレーションには、具体的にスギ・ヒノキ毎の関数 $F(r)$ やそれらのパラツキ、さらには関数 $G(Sr)$ やそれらのパラツキを定める必要がある。そこで、関数 $F(r)$ や $G(Sr)$ は次のようにして調製した。

4.3.1 樹種別樹冠形状モデルの調製

これまで樹冠形状を扱った様々な研究が行われてきた。例えば、Nelson (1997)、梶原 (2000)、Sheng et al., (2001)、Lovell et al., (2005)、伊藤ら (2008)、Kato et al., (2009)、田口ら (2009)、Frazer et al., (2011) などである。しかしながら既往研究には、関数 $F(r)$ の係数とそのパラツキ (形状のパラツキ) を調査した、本研究で利用可能な成果はなかった。その為、今回ドローン空撮によって樹冠形状を立木のまま計測し、ス

表1 空撮および点群データ作成の諸元

Environment		Flight information		DSM	
Site location	35 33 33N, 136 22 22E KIYOMI, TAKAYAMA, GIFU	Software for flight plan	Mission Planner 1.3.19	Software	Agisoft Photoscan 1.2.0
Flight date	12-Nov-15	Flight plan setting	Manual	Processing method	SfM
Weather	Cloudy	Flight method	Auto Pilot	Geo-reference	Flight log -without GCPs
Wind speed (Average)	2.6m/s	Flight speed	8m/s		
Drone	Hexacopter (DJI F550 with 3DR Pixhawk)	Altitude	150m	Resolution of point cloud	520~640 pixel/m ²
Camera	Ricoh GR	Shutter control	Interval shooting 1 shoot/2second		

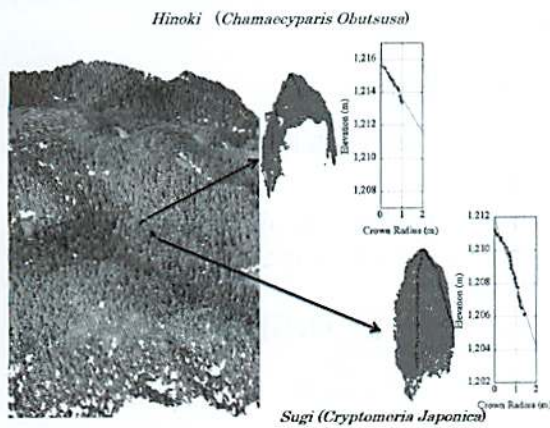


図4 点群データからの樹冠縦断面形状の求め方

ギとヒノキの樹冠形状の違いや個体の違いによる形状のバラツキを独自に調査した。

空撮は、岐阜県高山市清見の国有林(緯度: 36°1'28", 経度: 137°3'46" 周辺) にて実施した。使用したドローン・カメラ・点群処理ソフトなど樹冠形状測定に関する諸元は表1の通りである。

樹冠の縦断面形状は、空撮最後の処理によって得られた点群データから、スギ・ヒノキに当たる部分を各10本抜き出し、それぞれを4方向から図4のように切り出し、直線: $ax+b$, 二次放物線: $a'x^2+b'$, 指数関数: $e^{ax}+b''$ をその縦断面に当てはめ、最も適合度の高いものが多かった関数をその樹種を代表する樹冠縦断面形状関数 $F(r)$ として求めた。その結果、表2のようにスギ・ヒノキともに樹冠縦断面は直線が最も適合

表2 樹冠縦断面形状
(形状別適合度の高かった数)

		<i>Chamaecyparis</i> <i>Obtusa</i> -Hinoki-	<i>Cryptomeria</i> <i>Japonica</i> -Sugi-
Type of function	Linear	13	19
	Parabola	8	9
	Exponential	10	12
Total (number of samples)		31	40

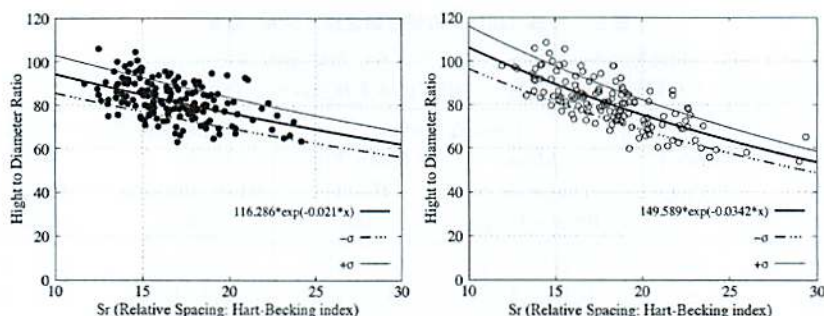
Hinoki10本のうち4本(合計9方向)は、隣接木との距離が近いなどしていたため断面形状が計測できなかった。

表3 樹冠縦断面形状のパラメーター(直線の傾き)とそのバラツキ

	<i>Chamaecyparis</i> <i>Obtusa</i> -Hinoki-	<i>Cryptomeria</i> <i>Japonica</i> -Sugi-
Mean	-2.7	-4.3
Standard Deviation	0.9	0.8
Maximum	-4.5	-6.1
Minimum	-1.3	-3.3

していた(残差自乗和が小さかった)。これは、ヒノキのほうがスギより樹冠形状がなだらかであるという経験知に一致する一方、丸みを帯びていると考えていたヒノキの樹冠形状は経験知に反した結果となった。

なお、樹冠形状の勾配をきめる直線の傾きは、樹種毎に表3の通りとなった。



1 Sugi (*Cryptomeria Japonica*) 2 Hinoki (*Chamaecyparis Obutsusa*)

若齢林分では樹木が隣接木と樹冠を接していないため Sr と HDR は独立した関係であること、また Sr が極端に大きい林分は特殊な密度管理を行う森林の可能性があることから、野帳データのうち林齢が15以下及び Sr が30以上は除外した。

図5 相対幹距比と形状比との関係：岐阜県林政部（1992a, 1992b）より

表4 蓄積比が取り得る値（上限・下限）と樹幹形状、樹冠形状の設定

v' (m ³) Stem volume	 more thin than typical stem shape : (+σ)	 typical stem shape	 more thick than typical stem shape : (-σ)
V' (m ³) Spatial volume	 more round than typical crown shape : (+σ)	 typical crown shape	 more sharp than typical crown shape : (-σ)
$\frac{v'}{V'}$ Stock Ratio	Lower	Typical	Upper

なお、 v' のバラツキは図5の Sr に対する形状比の標準偏差 σ で上限下限を設定し、 V' のバラツキは表3の樹形の傾きの標準偏差 σ によって上限下限を設定した。

4.3.2 形状比と相対幹距比との関係を表すモデルの調製

関数 $G(Sr)$ は、岐阜県が平均的な県内森林の把握のために行った野帳データ（岐阜県林政部，1992a；岐阜県林政部，1992b）から見出した。図5に野帳データをもとにした相対幹距比 Sr と形状比 HDR との関係を示す。図5より、 Sr と HDR との間には、スギとヒノキで傾向が異なるものの、どちらも Sr が大きくなる、すなわち立木密度が疎になるに従い、 HDR が小さくなることが確認できた。そこで、式(10)の Sr と HDR との関係を樹種別に式(13-1)、式(13-2)のようにモデル化した。

$$\text{スギ: } HDR = 116.286e^{(-0.0210 \times Sr)} \quad (13-1)$$

$$\text{ヒノキ: } HDR = 149.589e^{(-0.0342 \times Sr)} \quad (13-2)$$

それぞれの決定係数は0.2374, 0.4904であった。式(13-1)の決定係数は統計的に相関が希薄であることを

示しているが、図5を見る限り、ヒノキと同様、相対幹距比が大きくなるに従い形状比が小さくなっていることが分かる。したがって決定係数の低さは、相対幹距比と形状比との緩やかな関係性によって統計的に決定係数が小さくなった結果であり、関係性を否定するものでないと考え、式(13-1)を採用した。

4.4 蓄積比シミュレーション

ところで、同一樹種でも樹冠形状にはバラツキがある。また、形状比と相対幹距比との関係にもバラツキがある。そのため両者の平均的なもののみを取り上げて蓄積比をシミュレーションしても得られる知見は少ない。そこで任意の Sr で取り得る蓄積比の上限、下限の値を、樹冠や樹幹の形状のバラツキ (σ) を考慮し設定した。各設定は表4の通りである。

以上により、式(12)の e を L に比べて十分小さい0.01 (m) として任意の Sr における蓄積比の平均・上

表5 竹島 (2015) の現地調査地 (Site) 概要

Site H1, H2, H3, H4はヒノキ, Site S1, S2, S3, S4, S5, S6はスギ
地形等の影響調査のため同一林分内 (Site) の中に plot を複数設定している。

Site Name	Number of Plots	Ground Survey		Characteristics of Sites	
		Mean Diameter of Breath Height	Mean Tree Height (m)	Sr (Hart-Becking index)	HDR (Height to Diameters)
SITE H1	14	0.171~0.238	14.9~17.9	15.3~19.3	75.3~89.9
SITE H2	8	0.157~0.175	15.5~15.8	13.2~15.5	90.2~100.1
SITE H3	3	0.165~0.171	13.2~13.2	14.2~14.6	101.2~107.5
SITE H4	16	0.141~0.166	10.2~11.2	20.4~24.8	67.0~73.1
SITE S1	12	0.194~0.269	20.0~22.7	11.5~16.2	84.5~103.5
SITE S2	3	0.202~0.231	17.5~18.5	15.1~17.2	79.9~86.7
SITE S3	5	0.237~0.256	20.5~21.8	13.8~15.0	81.9~86.6
SITE S4	15	0.279~0.356	19.9~23.2	14.4~17.0	65.1~71.4
SITE S5	13	0.260~0.308	17.7~19.0	16.4~19.8	61.5~68.1
SITE S6	14	0.281~0.362	19.8~21.8	14.5~19.8	60.1~70.5

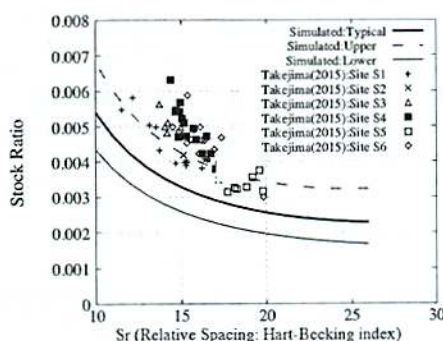
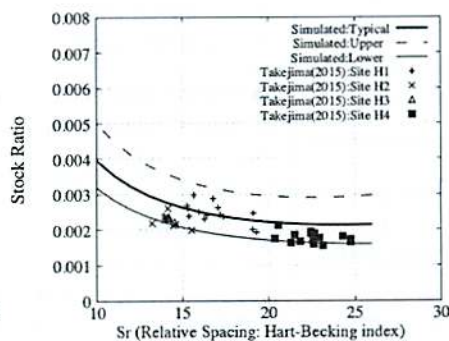
1 Sugi (*Cryptomeria Japonica*)2 Hinoki (*Camaecyparis Obutsusa*)

図6 蓄積比のシミュレーション結果と実測値 (竹島, 2015) との比較

限・下限をシミュレーションし、表5の竹島 (2015) の実測データと重ねたところ、図6を得た (なお、竹島 (2015) では、林相が同質と思われる現地調査対象林分を Site と呼び、Site の中に20m 四方の Plot を複数設定している)。

4.5 蓄積比シミュレーション結果の検証

4.5.1 スギの蓄積比と相対幹距比

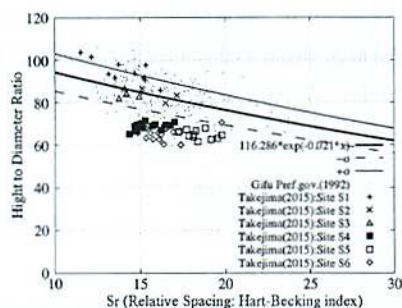
図6-1では、実測値は全てシミュレーションによって想定される平均値より大きく、上限として想定したものより大きいものが70%ほどあった。とりわけ Site4, Site6では顕著であった。

その原因を岐阜県林政部 (1992a, 1992b) データと竹島 (2015) の実測値との関係と比較した図7-1で確認した。その結果、Site4, Site5, Site6は形状比が想定

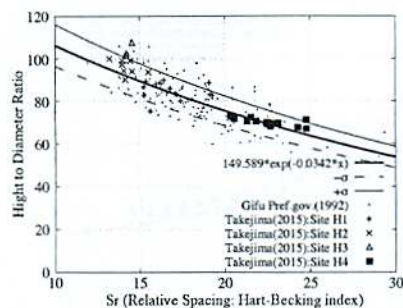
外に小さい、つまり樹高の割に太い樹木で構成される林分であることが分かった。そのためこの3つの Site では式(1)の分子が大きくなり、蓄積比が大きくなりやすい。ところが、Site5では蓄積比は想定内に収まっているものも多い。その理由は、図7の横軸から読み取る Site4, Site6と Site5との本数密度の違いにあると思われる。Site5は Site4, Site6より Sr が大きい、すなわち疎な林分 (本数が少ない) である。こうした単木材積と本数密度との効果によって、結果として図6-1のようになったと考えられる。

4.5.2 ヒノキの蓄積比と相対幹距比

図6-2では、実測値がシミュレーションで想定される平均的な値よりやや低いものが多いものの、ほぼ全ての実測値はシミュレーションの想定内であった。



1 *Sugi (Cryptomeria Japonica)*



2 *Hinoki (Chamaecyparis Obtusata)*

図7 相対幹距比と形状比との関係における岐阜県林政部 (1992a, 1992b) 野帳データと実測値 (竹島, 2015) との比較

実測値がやや低い理由は、岐阜県林政部 (1992a, 1992b) データと竹島 (2015) の実測値との関係を比較した図7-2によって以下のように説明できる。実測した林分の Sr に対する形状比を、図7-2で示される式(13-2)と比べると、実測した林分の、ある Sr に対する形状比は、式(13-2)で想定したものよりも比較的大きいものが多い。このことは実測した林分は、モデルで想定している林分に比べ、樹高の割に材積が小さい(細い)樹木で成立している林分(蓄積が小さい)が多いことを示している。そのため、式(1)の分子が小さくなり、想定された平均的な蓄積比より低めになった。

蓄積比 g' のシミュレーション値と実測値との間に差異はあったものの、その差異は合理的に説明できるものであった。よって、今回のシミュレーションから得られた蓄積比 g' の挙動は、竹島 (2015) の実測によって得られた知見を包含しており、林分単位の蓄積比 s の挙動と解釈しても問題ないと考え、以下に議論を進める。

5. 森林蓄積推定モデルの改良

5.1 樹種と蓄積比との関係

竹島 (2015) は、スギとヒノキで蓄積比は約2倍異なるとしていた。今回のシミュレーションによって、確かにスギとヒノキでは同じ Sr に対して蓄積比が異なることが示された。しかし、両者の差は約2倍ではなく、図6から分かるように岐阜県内でよく見られる Sr が15~25という範囲において、本来両者は漸近するものであることが分かった。

5.2 蓄積比と相対幹距比との関係

竹島 (2015) は、 Sr が大きくなる(林分の立木密度が疎になる)に従い、蓄積比は小さくなる傾向があるとした。今回のシミュレーションによって、確かに、スギ・ヒノキともに、 Sr の増加に伴って蓄積比が減少する傾向があることが示され、両者の関係は普遍的であると考えられる。しかし、シミュレーションによって示された Sr と蓄積比との関係は、竹島 (2015) が想定したものとは異なっていた。特に、スギにおいて顕著であった。原因は蓄積推定モデルのパラメータを調製する際に使用した林分が、岐阜県における標準的な林分とかけ離れた状態だったことによる。

以上により、経験的に導かれたモデル、すなわち式(6-1)、式(6-2)のパラメータは、岐阜県という限定した地域でさえ、汎用的なスギ・ヒノキの森林蓄積推定式として適当でないことが分かった。

5.3 蓄積比を使った広域森林蓄積推定モデルの改良

次にモデルの適否について検討する。

4節4で計算されたスギ・ヒノキの平均的な値を使い、式(4)に対して最小自乗法により樹種別定数を調製し図示した結果、図8を得た。 Sr が大きくなるに従いモデルの適合度が悪くなる傾向が見られ、モデルとして改善の余地があるように思われる。しかし、式(3)の関係は図6でも成立している。そこで今回、竹島 (2015) でモデルを導いた際の、 Sr が ∞ で蓄積比が0になるとした条件を見直し、式(3)の解を式(14)とする。

$$s_s = B_s e^{-A_s Sr} + C_s \quad (14)$$

ここで C_s は樹種別定数である。

式(14)に対し、4節4で計算されたスギ・ヒノキの平

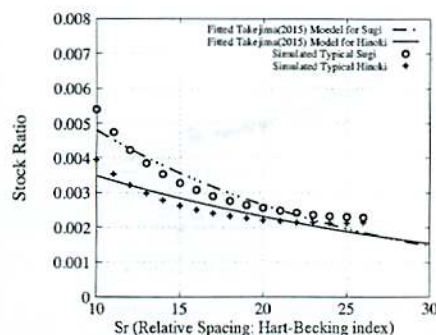


図8 シミュレーション結果の竹島(2015)蓄積推定モデルへの当てはめ

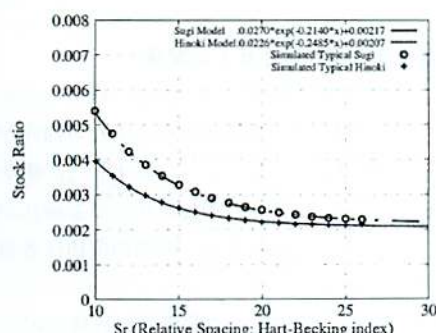


図9 シミュレーション結果の改良型モデルへの当てはめ

均的な値を当てはめ、式(14)を調製した結果、スギ・ヒノキの蓄積比は式(15-1)、式(15-2)となった。これを図示すると図9のようになる。図8と図9のモデルの適合度を残差自乗和で比較すると、スギは $22,038 \times 10^{-9}$ から 4×10^{-9} 、ヒノキは $3,530 \times 10^{-9}$ から 3×10^{-9} となり、適合度は明らかに向上していることが分かる。

$$\text{スギ} : s = 0.0270e^{(-0.2140 \times Sr)} + 0.00217 \quad (15-1)$$

$$\text{ヒノキ} : s = 0.0226e^{(-0.2485 \times Sr)} + 0.00207 \quad (15-2)$$

以上により、岐阜県のスギ・ヒノキの森林蓄積は、樹冠形状や樹幹形状に起因する誤差を含むものの、式(16-1)、式(16-2)を使って現地調査を行うことなく推定可能となった。

$$\text{スギ} : v = sV = \{0.0270e^{(-0.2140 \times Sr)} + 0.00217\} V \quad (16-1)$$

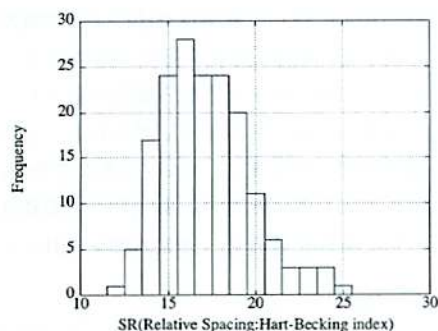
$$\text{ヒノキ} : v = sV = \{0.0226e^{(-0.2485 \times Sr)} + 0.00207\} V \quad (16-2)$$

6. 実用に向けた森林蓄積推定法の考察

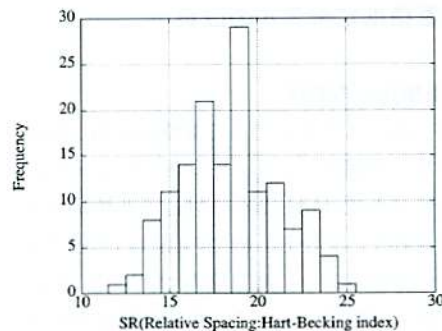
式(16-1)、式(16-2)による森林蓄積推定では、樹種とSrが自明でなければならない実用上の問題が存在している。そこで最後に、樹種やSrが不明時の対処について検討したい。

まず、Srが不明な場合を考える。

図10-1から分かるように、岐阜県内のスギ林分のSrは17.0を平均として11.7から21.7の間(2σ相当)が大半である。ヒノキ林分のSrは図10-2より、17.9を平均として12.5から23.3の間(2σ相当)が大半である。そこで式(15-1)、式(15-2)を使い、それぞれのSrでの蓄積比を計算した。その結果、スギの場合はSrが11.7(-2σ)のとき蓄積比は0.004374、21.7(+2σ)のとき0.002430で、両者の差は80%であった。一方、ヒノキはSr 12.5(-2σ)のとき蓄積比が0.003089、23.3(+2σ)のとき0.002134であった。両者の差は約45%である。この差は、平均的なSr(スギ:17.0、ヒノキ:17.9)における、樹冠形状や樹幹形状のパラツキによる蓄積比の上限下限の差(スギ:0.003652~0.002119(72%)、ヒノキ:0.003107~0.001790(70%))と同程度である。それを考慮すれば、Srが自明のときに比べ精度は低下するが、蓄積比は樹種によって一定



1 Sugi (Cryptomeria Japonica)



2 Hinoki (Cryptomeria Obtusa)

図10 岐阜県林政部(1992a, 1992b)野帳データの相対幹距比ヒストグラム

(ヒノキ林分の平均的な Sr 17.9のときの蓄積比 0.002342, スギ林分の平均的な Sr 17.0のときの蓄積比 0.002902を採用)と考えることが受け入れ可能なケースもあり得る。例えば、地域の資源を俯瞰し、林業を行う施業地をゾーニングする場合には、そうした誤差も許容できよう。

次に、樹種も Sr も不明な場合を考える。

樹種や Sr を入手するには、調査や解析に手間がかかり、それは森林蓄積推定コストに反映する。収益を上げることすら容易でない林業活動では、森林蓄積推定にコストをかけられない実情もある。その場合、費用対効果を考え、国土地理院から無償で提供される航空レーザ・データから計量できる空間体積に、先に述べたスギ・ヒノキの蓄積比の平均値である0.002622を乗じて推定される森林蓄積でも、土地勘のない地域の森林資源の俯瞰には十分利用可能な情報と言えよう。

7. おわりに

今回、岐阜県の一部の林分でドローン空撮による樹冠形状計測によって $F(r)$ を求め、過去に岐阜県で行われた林分調査結果を利用して $G(Sr)$ を求めた。これにより県内に生育するスギ・ヒノキの蓄積比と Sr との関係を演繹的に導いた。ところが、使用したデータは、空間や時間等の点から、現在の岐阜県の平均的なものとは言えない可能性もある。そのため実用の際には、モデルのパラメータの再調製も必要となろう。しかし、4節で明らかになったように蓄積比は、樹種固有の樹冠形状と樹幹形状によってモデル化できることから、今後、様々な林分で樹冠形状計測を行い、より新しい現地調査結果を用いれば、現実的な精度で森林蓄積も推定可能となる。さらには岐阜県以外に、日本全国で地域や樹種固有の樹冠形状の計測が行われ、収穫表のようなデータベースとして樹冠や樹幹の形状情報が整備されれば、全国の森林蓄積を自動推定することも可能である。このことは現在、現実と乖離していると言われる我が国の森林資源情報を記した森林簿・森林調査簿を、実現可能なコストで継続的にモニタリングすることも可能にする。

空間体積法は、衛星画像、空中写真やドローン空撮によって作り出される3次元データへも展開可能な方法である。今後は、様々なデータソースから計量される空間体積の特性について比較検討しつつ、そうした

データを使った自動樹種判別や Sr の自動計測を試みたい。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、岐阜大学流域圏科学研究センター栗屋善雄教授より貴重なアドバイスをいただいた。ここに記して感謝の意を表する。なお本研究は、農林水産省「農林水産業・食品産業科学技術推進事業」の「高精度森林資源情報を活用した森林経営計画策定支援システムの構築と検証(24020)」(平成24年から26年)で実施した。

(受付日2016.7.7, 受理日2017.5.15)

引用文献

- 石田 仁, 直井 聡, 渡辺将康, 都竹彰則, 2012. 樹高と胸高直径のみによる相対幹曲線の推定法の実用性評価—飛騨地方50-67年生スギ, ヒノキ造林木の事例—, 日本森林学会誌, 94(4), pp.188-191.
- 伊藤拓弥, 松英恵吾, 内藤健司, 2009. 航空機 LiDAR による樹冠の再現性, 日本森林学会誌, 91(5), pp. 326-334.
- 大隅真一, 1995. 森林計測学講義 第4版, 養賢堂, 東京, 287pp.
- 梶山恵司, 2013. 木質バイオマスエネルギー利用の現状と課題, 研究レポート, No. 409, 富士通総研経済研究所, pp. 1-25.
- 梶原幹弘, 2000. 樹冠からみた林木の生長と形質—密度管理と林型による異同, 森林計画学出版会, 東京, 139pp.
- 加藤正人編, 2010. 森林リモートセンシング 第4版, 日本林業調査会, 東京, pp.443.
- 岐阜県林政部, 1992a. ヒノキ人工林 林分収穫表・林分密度管理図, 岐阜県林政部, 26pp.
- 岐阜県林政部, 1992b. スギ人工林 林分収穫表・林分密度管理図, 岐阜県林政部, 22pp.
- 熊崎 実, 2012. 混迷を深めるわが国の森林資源統計—モニタリング調査をなぜ活用しないのか—, 山林, 1540, pp. 2-10.
- 小谷英司, 栗屋善雄, 2013. 低密度 LiDAR データによる人工針葉樹林の林分パラメータの推定, 写真測量とリモートセンシング, 52(2), pp.44-55.
- 田口 仁, 遠藤貴宏, 安岡善文, 2008. LiDAR 点群デー

- タを用いた樹冠形状に基づく単木抽出および樹高推定, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 28(4), pp. 331-340.
- 竹島喜芳, 2015. 航空レーザーによるヒノキ・スギの森林蓄積推定—林分特性の違いを考慮した蓄積推定法の開発—, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 54(4), pp.178-188.
- 松下幸司, 吉田茂二郎, 1998. 民有林に関する森林ミクロデータの有効利用に関する研究, 平成9年度科学研究補助金(重点領域研究)研究成果報告書, 76 pp.
- 松下幸司, 吉田茂次郎, 1997. 私有林に関する森林ミクロデータの有効利用に関する研究, 平成8年度科学研究補助金(重点領域研究)研究成果報告書, 88 pp.
- 米 康充, 2008. 航空機および地上リモートセンシングを用いた北方林広域森林バイオマス計測に関する研究, 北海道大学演習林報告, 65(1), pp.61-131.
- 林野庁監修, 1998. 林業技術ハンドブック, 全国林業改良普及協会, 東京, 1969pp.
- 林野庁, 2015. 平成27年版 森林・林業白書, 全国林業改良普及協会, 東京, 302pp.
- Akira Kato, L. Monika Moskal, Peter Schiess, Mark E. Swanson, Donna Calhoun, Werner Stuetzle, 2009. Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data, Remote Sensing of Environment. 113, pp.1148-1162.
- G.W. Frazer, S. Magnussen, M.A. Wulder, K.O. Niemann, 2011. Simulated impact of sample plot size and co-registration error on the accuracy and uncertainty of LiDAR-derived estimates of forest stand biomass, Remote Sensing of Environment. 115, pp.636-649.
- J.L. Lovell, D.L.B. Jupp, G.J. Newham, N.C. Coops, D.S. Culvenor, 2005. Simulation study for finding optimal lidar acquisition parameters for forest height retrieval, Forest Ecology and Management. 214, pp.398-412.
- Ross Nelson, 1997. Modeling Forest Canopy Heights: The Effects of Canopy Shape, Remote Sensing of Environment. 60, pp.327-334.
- Yongwei Sheng, P. Gong, and G.S. Bigin, 2001. Model-Based Conifer-Crown Surface Reconstruction from High-Resolution Aerial Images, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 67, No. 8, pp.957-965.