

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モデルの開発—

**The development of stand volume estimation model using
airborne LiDAR for Hinoki (*Chamaecyparis obutsusa*)
and Sugi (*Cryptomeria japonica*)**

竹島 喜芳
Kiyoshi TAKEJIMA
中部大学

「写真測量とリモートセンシング」 Vol. 54, No. 4, 2015
Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing

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モデルの開発 —

The development of stand volume estimation model using airborne LiDAR for Hinoki (*Chamaecyparis obutsusa*) and Sugi (*Cryptomeria japonica*)

竹島 喜芳*

Kiyoshi TAKEJIMA

Abstract: I developed a model to estimate stand volumes using LiDAR data. Stand volumes (v) are often estimated by linear regression model using spatial volume (V), $v=aV$ or $v=aV+b$, where a and b as constant. This method is easy to apply, but its accuracy is known to be low. Belief of taking “ a ” as constant may worth for reconsideration. The concept of “Stock Ratio (s)” -defined as $s=v/V$ is newly proposed in this study. I focused on five representative stand characters-species, diameter of breast height, slope, height to diameter ratio and Hart-Becking index and examined the relation between these factors and Stock Ratio using 6,000 trees data obtained in field measurements. The results strongly suggested that species and Hart-Becking index have an apparent relation with Stock Ratio. Hence, it is clear that Stock Ratio will differ among species and Hart-Becking index. The relation can be modeled as $s=B_s e^{(-A_s \times S_r)}$ where S_r is Hart-Becking index and, A_s and B_s are the constant by species. Introducing the estimation of Stock Ratio with above two factors which is proposed in this study will improve the accuracy of the estimation for the stand volume (*i.e.* $v=sV=B_s e^{(-A_s \times S_r)} V$) than conventional methods.

1. はじめに

日本は第二次世界大戦後の拡大造林政策によって、広葉樹の林をヒノキ・スギ主体の林に作り変えてきた(林野庁, 2013)。これまで保育中心だったそれらの広大な森林も、近年では利用可能な状態に成熟してきたため、これを原資とした国産材利用推進及び産業振興のための政策が「森林・林業再生プラン」としてまとめられた(林野庁, 2010)。現在その実現に向け官民一体となった取組が推進され、国内の森林資源への感心が高まっている。また、福島原発事故以来加速した、再生可能なエネルギー源として国内の森林資源への期待も高い(林野庁, 2013; 梶山, 2013)。そこで、森林の公益的機能を維持・向上させながら同時に産業振興を実現する、実効性のある森林資源管理計画は欠かせない。このときに最も基礎的な情報となるのは、森林の蓄積と成長量である。

日本の森林の蓄積や成長量は、森林簿(民有林)、森林調査簿(国有林)によって把握することができる。しかし、その中身は現況と乖離していると言われており(例えば松下ら, 1998; 松下ら, 1997)、その乖離の程度は森林蓄積では現況の半分しかない可能性があるとも指摘されている(熊崎, 2012)。いずれにせよ、森林簿などを元にした森林資源管理計画では、計画と実行との間に大きな齟齬が生じ、実効性ある計画立案は不可能に近い。

そこで、森林簿に替わる、あるいは森林簿を更新する手段としてリモートセンシング技術を使った森林資源量把握への期待は高い(例えば加藤, 2010)。なかでも、航空レーザーは、光学衛星や空中写真などとは異なり、広域を比較的均一な精度でデータ計測ができるため、データ計測コストの問題は残るが、広域森林資源量把握に向け期待は高い(竹島ら, 2005)。

こうした航空レーザーを用いた森林資源量把握のうち、森林蓄積推定はこれまで2つのアプローチで行われてきた。ひとつは単木単位材積を推定し、それらを集計することで間接的に森林の蓄積を推定する方法(例えば Nelson, 1988; Hyypä et al., 2001; Taka-

*中部大学

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 54, NO. 4, 2015

hashi et. al., 2005a; 松英ら, 2006; 伊藤ら, 2011), ひとつは単木材積を経由せずに林分単位で直接推定する方法である (例えば Næsset, 1997; 米, 2008; Tsuzuki et. al., 2008; 小谷ら, 2013; Hayashi et. al., 2013)。

前者の手法によって, 航空レーザー技術の可能性について様々な知見が得られてきている。しかし, ここで問題としている広域森林資源計画での利用において, その手法の実用化はいまのところ現実的ではない。単木の抽出には詳細な点密度のデータが必要なうえ (例えば 平田, 2005a; Næsset et. al., 2002; Hyypä, 2001), コストをかけた詳細な点密度のデータでも樹高計測誤差は避けられない (例えば Hyypä et. al., 2008; Takahashi et. al., 2005b; 平田, 2005b; Gaveau et. al., 2003)。加えて, 樹冠が上層木に被圧された樹木は航空レーザーから抽出されない (例えば 伊藤ら, 2009; 平田, 2005b)。つまり, 現在までのところ推定誤差が必ず発生する。しかも, 木材価格は材積によって一意に決まるのではなく, 曲がり, 樹木の腐り・食害の有無, 年輪の間隔, マーケット動向などによって総合的に決まり, 木材価格は常に変動リスクを抱えている。したがって, 資源量把握 (木材在庫把握) にコストをかければかけるほど, かけたコストの収支 (木材販売価格-木材在庫把握コスト) が負になるリスクが高まる。そのため, よりコストがかかる高密度な航空レーザーは実効性のある広域の森林資源管理計画用途に使用し難い。さらに, 森林の成長量を把握する上で時系列データは欠かせないが, 日進月歩の航空レーザー技術の進展に依存するこうした解析手法 (点密度や, ファーストパルス・セカンドパルスなどの反射の種類や反射強度等) は, そこから得られる最新手法を過去のデータに適用することができなく, データの実利用は限定的なものにならざるを得ない。以上, 推定誤差, 費用対効果, 過去のデータとの連続性 (成長量計測) の3点から, 国内の森林を対象とした, 広域で実効性のある森林資源管理計画立案のための蓄積推定・成長量推定には, 単木材積を集計する方法は不向きである。

林分単位で森林の蓄積を直接推定する方法には, 航空レーザーの点群を, 空間的なメッシュ単位で集計した指標から森林蓄積を推定するアプローチ (例えば, Næsset, 2002; 小谷, 2013) や, DCHM (Digital Canopy Height Model) から集計した樹冠面と地面に

より規定される森林空間の体積との回帰分析によって森林蓄積を推定するアプローチ (例えば 米, 2008; Tsuzuki et. al., 2008) がある。このうち Næsset et. al. (2002) や小谷ら (2013) などのアプローチは, 研究対象地が異なると, 航空レーザーの点群から作成した指標と森林蓄積との関係が異なる可能性があり (小谷ら, 2013), 喫緊の森林資源管理計画作成のための広域森林蓄積把握手法とするには更なる検討が必要である。一方, 空間体積から森林蓄積を推定するアプローチ (例えば 小谷ら, 2013; 米, 2008; Tsuzuki et. al., 2008) はシンプルであり実用的であるが, そこから推定される森林蓄積の精度は他の手法に劣る (小谷ら, 2013)。

そこで本研究では, 空間体積から森林蓄積を推定する手法をいま一度見直し, シンプルで実用的な蓄積推定モデルの開発を目指す。

2. 手 法

2.1 蓄積推定モデル開発コンセプト

いま空間体積と蓄積との比を, 図1のように蓄積比 (Stock Ratio) とする。

このとき蓄積比 s は, 蓄積を v (m^3/ha), 空間体積を V (m^3/ha) とすれば,

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

と表せる。そしてこの式は

$$v = sV \quad (2)$$

と変形することができる。これは, 蓄積が未知な林分でも V, s が既知であれば蓄積が推定できることを示している。

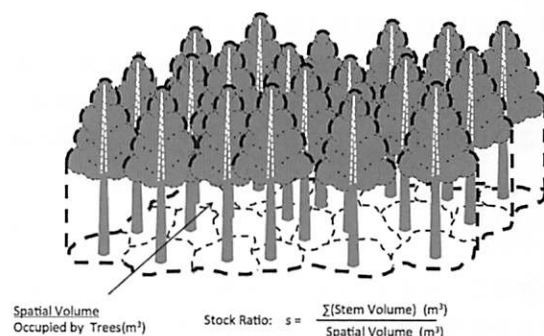


図1 蓄積比 (Stock Ratio) 概念図

一般に、空間体積は航空レーザーによって直接計測可能であり、既知とすることができる。ところが蓄積比は直接計測できず、未知である。そのため、式(2)を使って蓄積を推定することはできない。しかし、蓄積比と直接計測可能な林分特性を $x, y, \dots$ としたとき、

$$s = f(x, y, \dots) \quad (3)$$

のような関係を見出すことができれば、蓄積比は間接的に既知となり、式(2)を適用して蓄積を推定することができるようになる。

そこで本論では、蓄積比とそれに影響を与えるであろう林分特性との関係を、航空レーザー計測と林分調査によって精査し、蓄積比と林分特性とを定量化することで、蓄積比を使った森林蓄積推定モデルの開発を試みる。

なお、既往の研究で使われてきた、プロット調査による実測蓄積 v と空間体積 V との関係を、切片 0 の 1 次関数 $v = s'V$ によって回帰分析する手法 (小谷ら, 2013; 米, 2008; Tsuzuki et. al., 2008) は、蓄積比がどの林分でも同様であることを前提としており、回帰分析によって求める 1 次関数の傾き s' が蓄積比である、と解釈できなくもない。しかし最小自乗法によって求められる s' は、プロットの識別番号を i とすれば、 v_i を観測値、 $s'V_i$ を期待値としたとき、 $(v_i - s'V_i)$ の平方和を最小とするよう求められ、その値は

$$s' = \frac{\sum_{i=1}^n v_i V_i}{\sum_{i=1}^n v_i V_i} \quad (4)$$

となる。これは V や v の大きな林分、すなわち実測した林分の中で相対的に蓄積が多い林分の値が、 s' の決定に大きな影響を与え、蓄積の少ない林分の値は埋没することになる。つまり空間体積を使った既往の蓄積推定モデルでは、調査した林分が異なれば回帰係数の傾き (蓄積比) が容易に変わってしまう。そのため、たとえ回帰式の適合度が高くとも、調査地を選んだ時点で作為が入ることになる。もし、どのような林分でも蓄積比が一様として式(2)を適用するなら、蓄積比は

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{V_i}}{n} \quad (5)$$

とすることが妥当である。これならばどのような林分でも蓄積比は同じ重みで計算され、作為が入ることはない。

また、なかには蓄積と空間体積との関係を切片が 0 ではない 1 次関数で回帰することもあるが、いずれの手法も、適合度を優先した手法でしかなく、蓄積比に着目した本研究とは本質的に異なる。

2.2 着眼した林分特性

平田 (2005a) は樹種によって航空レーザーの透過率に違いがあると指摘しており、そのことが樹種によって空間体積を変化させ、蓄積比に影響を与えている可能性がある。また、樹高が同じでも胸高直径や本数密度が違えば蓄積は異なり、それが蓄積比に影響を与えているかも知れない。あるいは、平田 (2005b) や Takahashi, et. al. (2005b) は、樹木は斜面に対し常に垂直に生育しているとは限らないため LiDAR から算出される樹高は実際の樹高とは異なる場合があると指摘しており、傾斜が空間体積と蓄積との関係を変化させる可能性もある。

以上を勘案し、蓄積比に影響を与えと考えられる林分特性として①樹種、②胸高直径③生育地の傾斜、④形状比、⑤樹木の混み具合の 5 因子を選び、林分特性と蓄積比との関係を精査することとした。

なお樹種については、林業振興、森林・林業再生プランなどで重要となるヒノキ・スギに限定した。

また、プロット内の樹木の混み具合を示す指標には、収量比数、相対幹距比などがあるが、今回は航空レーザーから直接計測可能な樹高や本数密度などから計算できる可能性のある相対幹距比 (隣の木との間隔が樹高に対してどれほどかを示す指標: Hart-Becking index) を樹木の混み具合を表す指標として採用した。

3. テストサイト及び使用データ

3.1 テストサイト

テストサイトは、図 2 の岐阜県長良川流域で設定した。調査林分の選定にあたっては、0.5ヘクタール以上まとまりのある候補地を選出し、候補地を踏査することで、候補地間の林分特性が異なることを確認しながら絞り込んだ。ただし、スギの林分については、近年スギの植林が少なくなったため、若齢林が確保できなかった。表 1 にテストサイトの林分の概況を示す。

なお、樹木サイズや傾斜、形状比、相対幹距比や空間体積などは、現地調査を実施する林分の大きさによって変わり、解析結果が林分の設定法に影響される

表1 テストサイト概要

Species	Site Name	Site Location		Plot Size	Number of Plots	Ownership	Date of Field Work
Hinoki (<i>Chamaecyparis obtusa</i>)	SITE H1	35.5516	136.9259	20m×20m	14	Prefecture	2005.5
	SITE H2	35.5621	136.9258	20m×20m	8	Private	2005.5
	SITE H3	35.5936	135.8951	20m×20m	3	National	2006.4
	SITE H4	35.5253	136.8666	20m×20m	16	Private	2006.5
	SITE H5	35.6586	136.9351	20m×20m	6	Private	2006.3
Sugi (<i>Cryptomeria japonica</i>)	SITE S1	35.5506	136.9247	20m×20m	12	Prefecture	2005.5
	SITE S2	35.5602	136.9252	20m×20m	3	National	2006.4
	SITE S3	35.5591	136.9283	20m×20m	5	National	2006.5
	SITE S4	35.9344	136.9315	20m×20m	15	Private	2009.5
	SITE S5	35.9405	136.9415	20m×20m	13	Private	2009.4
	SITE S6	35.9420	136.9380	20m×20m	14	Private	2009.5

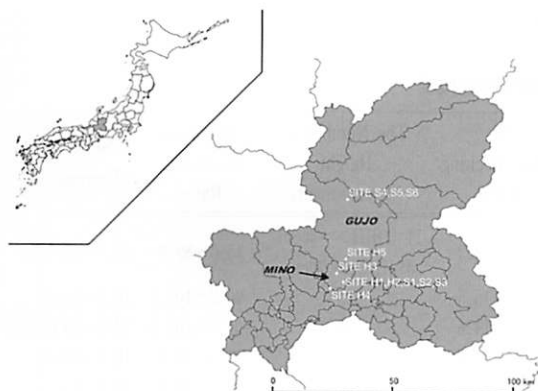


図2 テストサイト位置

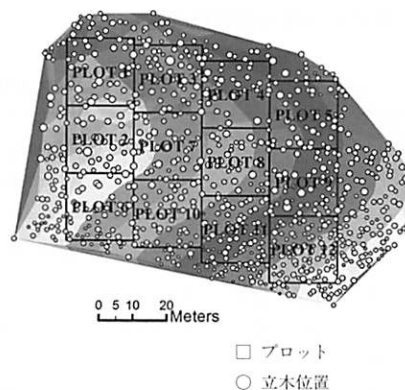
ことも考えられる。さらには、林相が均一と考えられる林分でも設けるプロットの位置により、それぞれの林分特性が微妙に変わることも考えられる。そこで、本研究ではそういった林分ごとの違いをも観察できるよう、まず0.5ヘクタール以上の同質と思われる林分(植栽年などが同じ: SITE)の立木位置を全て測量し、GISで林分の中に20m四方のプロット(PLOT)を設定して、林分内における蓄積比の違いを表出させやすいようにした。図3に林分(サイト)とプロットとの関係を示す。

3.2 林分データ

林分調査は、2004年～2009年に行った。

林分調査にあたっては、まず対象林分の周囲を閉合トラバース測量した後、閉合トラバース時の測点から視準可能な立木の位置を放射測量によって計測し、林分全ての立木の相対位置と胸高直径を計測した。

各立木の絶対座標を求めるにあたっては、林分近く



(○の大きさは胸高直径の相対的なサイズの違いを示す)

図3 林分(SITE)とプロット(PLOT)との関係例(SITE S1内のPLOT1～12)

の開けた場所でTrimble社Pathfinder Proによって2分間以上の測位を行い、測位のバラ付きが1m以内のデータを、後処理によって補正したものを基準点とし、その座標値を使って全立木位置の絶対座標を算出した。

樹高は、林分内で胸高直径と樹高を計測したサンプルから樹高曲線を調整し、樹高を計測していない立木の樹高を胸高直径から推定した。一般に樹高は、同一胸高直径であっても地位によって大きく違うため、胸高直径・地位の状況を見ながら林分内万遍なくサンプルを選んだ。なお、樹高曲線は1つの林分に対して1本の樹高曲線を調整することとしたが、SITE H1は抜き切りが行われた後に植林を行なった林分であるため、大径木(胸高直径30cm以上)とそうでない樹木があることから、樹高曲線は別々に調整した。

材積は、大隅(1995)にもとづき、平均的な式(6)によって計算した。

$$v' = \frac{2}{5} D^2 H \quad (6)$$

ここで v' は単木材積 (m^3)、 D は胸高直径 (m)、 H は樹高 (m) である。

なお、航空レーザー計測時期と林分調査時期の間には数年の差があり、厳密には Takahashi ら (2005) のように樹冠解析等を行い、樹木の状態を航空レーザー計測時に同期させて解析を進める必要があるが、この種の調査には、樹高計測誤差や樹高曲線による樹高推定などによる誤差が既に含まれており、それら誤差は航空レーザー計測時期と林分調査時期との違いよりも大きいと考え、航空レーザーの計測時期に合わせた林分材積の同期補正は行っていない。

表2にテストサイトの林分特性概要を示す。

表2 テストサイト林分特性概要

Site Name	Number of Plots	Diameter of Mean (cm)	Breath Height Standard Diviation (cm)	Density (Trees/ha)	Sr (Hart-Becking index)	The Number of Height Measurements	Height to Diameters Ratio	Slope (Degrees)
SITE H1	14	17.1~23.8	7.2~13.5	1050~1625	15.3~19.3	11 (DBH>=30cm) 34 (DBH<30cm)	75.3~89.9	34.7~40.4
SITE H2	8	15.7~17.5	3.3~5.0	1675~2375	13.2~15.5	20	90.2~100.1	13.5~16.8
SITE H3	3	16.5~17.1	2.2~3.6	1725~1700	14.2~14.6	20	101.2~107.5	22.4~29.6
SITE H4	16	14.1~16.6	2.3~3.2	1300~2275	20.4~24.8	25	67.0~73.1	16.5~39.4
SITE H5	6	15.7~17.5	3.4~4.1	2325~2600	12.6~13.2	40	90.1~99.4	37.4~43.7
SITE S1	12	19.4~26.9	4.0~5.7	750~1875	11.5~16.2	10	84.5~103.5	26.7~41.2
SITE S2	3	20.2~23.1	4.6~5.4	1050~1425	15.1~17.2	23	79.9~86.7	24.8~25.5
SITE S3	5	23.7~25.6	4.0~5.1	1025~1200	13.8~15.0	24	81.9~86.6	14.8~22.9
SITE S4	15	27.9~35.6	4.0~7.1	750~1075	14.4~17.0	38	65.1~71.4	12.4~26.6
SITE S5	13	26.0~30.8	4.1~7	750~1175	16.4~19.8	40	61.5~68.1	13.5~30.4
SITE S6	14	28.1~36.2	4.9~8.5	650~1100	14.5~19.8	27	60.1~70.5	10.4~26.6

表3 使用した航空レーザーデータ諸元

Test Sites	Sites	SITE H1~H5 SITE S1~S3	SITE S4~S6
	Town	Mino, Minami	Takasu
Operation	Month, Year	April, 2004	Oct. 2003
	Corporation	KOKUSAI KOGYO CO., LTD.	PASCO CORPORATION
Aircraft	Altitude (m)	2000	1830
	Speed (km/h)	200	200
Laser	System	RAMS systems (Azimuth)	RAMS systems (Azimuth)
	FOV (degree)	22	16
	Rate of pulse emission (Hz)	15000	15000
Data Profile	Foot print size (cm)	50~60	50~60
	Density (Points/m ²)	0.25~0.16	0.25~0.16

3.3 航空レーザーデータ

空間体積は、2003年から2004年にかけて航空レーザーで岐阜県全域を計測したものより算出した。

このときの発注者である岐阜県に納品されたデータには、航空レーザーによって計測された全ての点群と、データ計測会社によって2mグリッドに加工された地盤高 (DTM: Digital Terrain Model) の二種類がある。そこで今回は、対象地の点群を地上分解能2mのDTMに合わせ、樹冠表層高 (DSM: Digital Surface Model) を作成し、DSMとDTMとを減算することでDCHM (Digital Canopy Height Model) を作成し、プロットの空間体積を計算した。

航空レーザーの諸元およびデータ計測時期は表3の通りである。

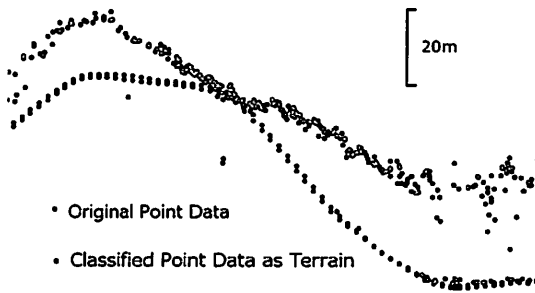


図4 SITE H5縦断面

DSMの作成にあたっては、Terra Solid社のTerraScanを使った。点群から2mグリッドのDSMへの加工は、グリッドに含まれる点群の最高値をDSMの値とした。

なお、SITE H5については図4のようにDTMが適切に抽出されていなかったため、今回の解析対象から除外した。

4. 結果

4.1 樹種と蓄積比

プロット毎に式(1)を使い蓄積比を求め、樹種別に集計した。その結果、ヒノキ・スギを区別しない場合の平均蓄積比は、0.0035(標準偏差0.0013, 変動係数0.37)であったのが、樹種毎に集計すれば、平均蓄積比はヒノキ0.0021(標準偏差0.0004, 変動係数0.17), スギ0.0045(標準偏差0.0008, 変動係数0.17)となった。これをヒストグラムで表現すると図5のようになる。蓄積比は樹種によって2倍以上違い、どの樹種も蓄積比が一定と考えると蓄積推定精度にばらつきが大きくなることがわかる。

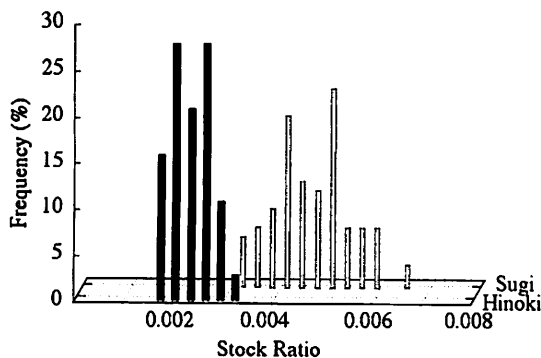


図5 ヒノキ・スギ別蓄積比ヒストグラム

4.2 胸高直径と蓄積比

樹種別の平均胸高直径と蓄積比との関係は図6のようになった。

スギは胸高直径の小さな林分がなかった(近年植林が減っているため)。ヒノキは胸高直径の大きな林分がなかった(スギよりも成長が遅いため)。そのため、データに偏りがあるが、樹種別か否かにかかわらず平均胸高直径と蓄積比の間には正の相関があるようにみえる。しかし、同一林分内の異なるプロットのデータのバラ付きに着眼し、表4のように林分別の平均胸高直径と蓄積比との相関を確認してみると、平均胸高直径と蓄積比の間には無相関(例えば、SITE H2, SITE S6), あるいは負の相関(例えば、SITE H4, SITE S5)の林分も見受けられる。このことから、今回のデータだけでは、平均胸高直径と蓄積比との関係性については明瞭な判断ができないと思われる。

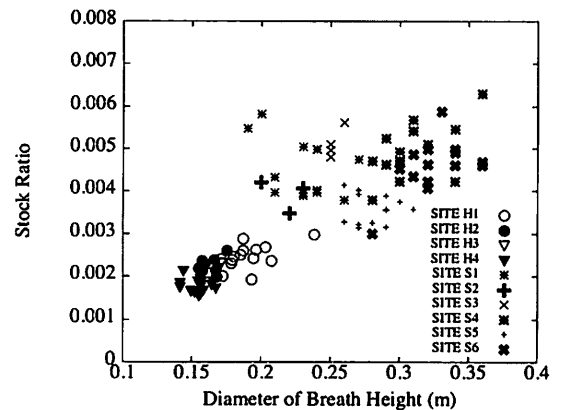


図6 DBH(平均胸高直径)と蓄積比との関係

表4 テストサイト別平均胸高直径と蓄積比との相関概要

Site Name	Observations -Number of Plots in the Site	Regression Line		Coefficient of Determination
		Slope	Intercept	
SITE H1	14	0.00009	0.00077	0.291
SITE H2	8	0.00010	0.00064	0.130
SITE H3	3	0.00020	▲0.00050	0.959
SITE H4	16	▲0.00002	0.00210	0.012
SITE S1	12	▲0.00013	0.00754	0.203
SITE S2	3	▲0.00089	0.00585	0.123
SITE S3	5	0.00032	▲0.00278	0.525
SITE S4	15	0.00016	0.00002	0.326
SITE S5	13	▲0.00001	0.00385	0.002
SITE S6	14	0.00015	▲0.00031	0.281

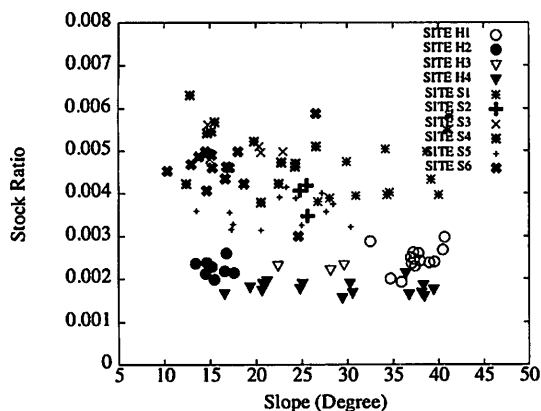


図7 平均傾斜と蓄積比との関係

4.3 斜面傾斜と蓄積比

プロットの平均傾斜と蓄積比との関係性は、図7の通りであった。プロットの平均傾斜は航空レーザーによるDTMではなく、毎木調査で測量した立木位置の高低差から計算している。そのため、下層植生（たとえば、航空レーザーが透過しにくいと考えられる群生する笹やシダなど）は完全に除去している。

図7より、図4と同様、樹種別(SITE H1~H4はヒノキ, SITE S1~S6はスギ)に蓄積比が2倍近く違うことがわかるが、生育地の傾斜と蓄積比の間には積極的な関係がないことがわかった。

4.4 形状比と蓄積比

形状比を式(7)で計算し、形状比と蓄積比との関係性を調べたところ図8の通りとなった。

$$HD_r = \frac{\bar{H}}{\bar{D}} \quad (7)$$

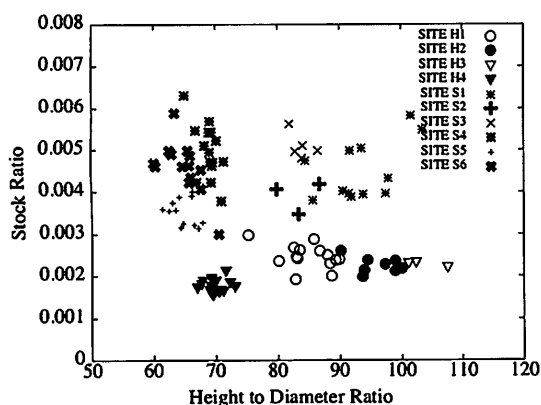


図8 形状比と蓄積比との関係

ここで、 HD_r は形状比、 $\bar{H}$ はプロットの平均樹高(m)、 $\bar{D}$ はプロットの平均胸高直径(m)である。

同一樹高でも胸高直径の違いによって幹材積は異なる。蓄積は、その幹材積を集積したものである。したがって樹高の割には太い(形状比が小さい)林分の蓄積比は、樹高の割には細い(形状比が大きい)林分の蓄積比に比べ、大きいように思われる。すなわち、蓄積比と形状比との間には負の相関があると考えるのが妥当である。しかし、図8より、そういった負の相関はみられないことがわかった。

4.5 相対幹距比と蓄積比

相対幹距比(S_r)を式(8)によって計算し、相対幹距比と蓄積比との関係性を調べたところ図9の通りとなった。

$$S_r = \frac{\sqrt{\frac{10000}{N}}}{\bar{H}} \times 100 \quad (8)$$

ここで、 N はプロットの本数密度(本/ha)である。図9より、ヒノキ・スギともに、相対幹距比が大きくなる(疎になる)に従い蓄積比が減少する傾向があることがわかる。ここで特徴的なのは、相対幹距比と蓄積比との関係が樹種によって異なることである。ヒノキは相対幹距比が異なっても蓄積比はあまり変わらないが、スギは相対幹距比の違いによって蓄積比が大きく異なる。

4.6 林分特性と蓄積比まとめ

蓄積比は樹種と相対幹距比によって明確に異なることが分かった。また、平田(2005b)やTakahashi et.

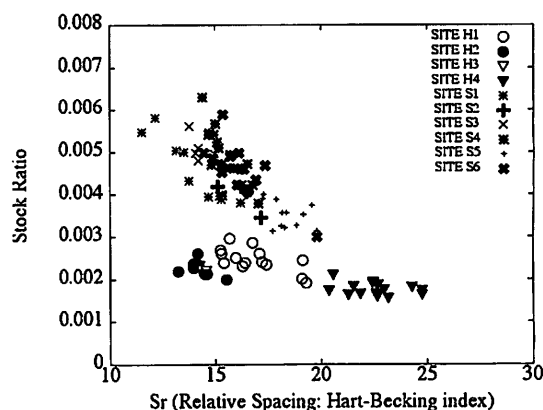


図9 相対幹距比と蓄積比との関係

al. (2005b) が単木抽出の時に問題にした個別樹高の誤差も、今回の対象サイトに限れば、図9の各サイト内のデータ分布で、突出した異常点も見いだせないことから、20m 四方のプロット単位で考えれば、個別樹高の誤差は蓄積推定に顕著な影響を与えないことが示唆された。加えて、形状比と蓄積比とは積極的な因果関係がないことも示された。ただ、今回のデータだけでは平均胸高直径と蓄積比との間に因果関係が有るか無いかを断定するのは難しく、さらなる検討が必要であらう。

以上より、現時点では蓄積比は樹種と相対幹距比の関数であると考えることが妥当であり、空間体積を活用して蓄積を推定するには、樹種、相対幹距比を考慮する必要があるといえる。

5. 林分特性に応じた蓄積比を使った蓄積推定モデルの開発

蓄積比は樹種によって2倍以上の差が見られ、蓄積比と相対幹距比との間には因果関係が見られた。そこで樹種毎に蓄積比を相対幹距比の関数としてモデル化することができれば、式(2)を使い、林分特性に応じた蓄積を推定することが可能となる。そこで図9をいま一度注視し、相対幹距比と蓄積比との関係を見出すことにする。

図9では、ヒノキ・スギともに相対幹距比の増加に伴い蓄積比が線形に減少しているが、相対幹距比と蓄積比との関係が線形であるとするれば、ある相対幹距比のときに蓄積比が0となる。これでは、相対幹距比と蓄積比との関係を示すモデルとして適切ではない。そこで改めて相対幹距比と蓄積比の因果関係について検討し両者のモデル化を試みた。

本数密度と相対幹距比との間には式(8)の関係がある。そこから、相対幹距比がa倍異なる林分は、本数密度は $(1/a)^2$ 倍違うことになる。一方、空間体積は相対幹距比が大きく変化しても樹冠が閉じた林分なら、空間体積は蓄積の変化ほど大きく変わらないと考えられる。蓄積比は式(1)で空間体積に占める蓄積の割合と定義したものである。そこから蓄積比と相対幹距比との関係は、相対幹距比の増加に従い、式(1)の分母は小さく減少するなかで、分子は大きく減少することとなるため、相対幹距比が大きくなればなるほど、蓄積比は小さくなりつつ、次第にその減少量は小さくなると

考えられる。そこで蓄積比と相対幹距比との関係を式(11)に設定した。

$$\frac{ds_s}{dSr} = -A_s S_s \quad (11)$$

これを解き、 Sr が ∞ のとき蓄積比は0として係数を調整すれば式(12)を得る。

$$s_s = B_s e^{-A_s S_r} \quad (12)$$

このとき、 s_s は樹種別蓄積比、 S_r は相対幹距比、 A_s 、 B_s は樹種別定数である。

以上より、式(12)を式(2)にあてはめた式(13)が本論の結論、林分特性の違いを考慮した蓄積推定モデルとなる。

$$v_s = B_s e^{-A_s S_r} V \quad (13)$$

ここで、 v_s は樹種別蓄積である。

なお、式(12)を使い、相対幹距比と蓄積比との関係を回帰したところ、樹種、相対幹距比、蓄積比との関係として式(14-1)、式(14-2)を得た。

$$\text{ヒノキ} : s = 0.0041 e^{(-0.0365 S_r)} \quad (14-1)$$

$$\text{スギ} : s = 0.0155 e^{(-0.0795 S_r)} \quad (14-2)$$

それを図9に示せば図10のようになる。

このとき、式(14-1)、式(14-2)から推定できる蓄積比の期待値と観測値との標準偏差を求めると、ヒノキ0.0002、スギ0.0005となった。先の樹種別蓄積比の期待値(平均蓄積比)と観測値とのばらつきを計算した前述4.1では、標準偏差はヒノキ0.0004、スギ0.0008であった。以上より、蓄積は相対幹距比を考慮することで、より現状に則した蓄積が得られるといえよう。

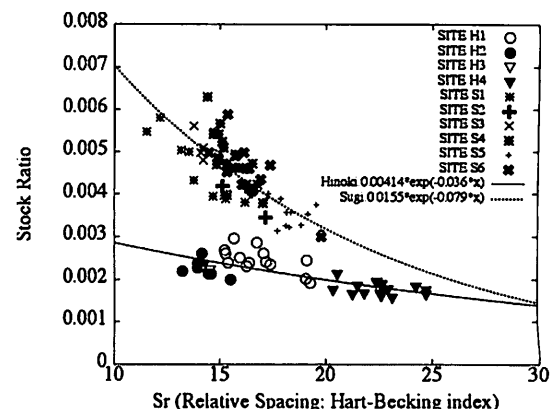


図10 樹種別相対幹距比に対する蓄積比の回帰

6. 考 察

樹種によって平均蓄積比は2倍以上異なることが示されたが、その原因は樹種固有の樹形にあると思われる。スギは遠方から目視すると1本1本が際立っているが、ヒノキは間伐が行き届いた林分以外では、1本1本が分別しにくい。このことはスギの樹冠表面が凸凹な一方、ヒノキのそれは比較的平らであることを示している。本論で議論している空間体積は、平均樹冠高に樹冠投影面積を乗じて求めたものと等しい。そのことから、例えば樹高や胸高直径、本数密度が同じ（蓄積が同じ）でも、スギとヒノキとでは、樹冠形状の違いによって平均樹冠高が異なってくるはずである。以上より、スギでは図11のように平均樹冠高は低いいため、たとえスギとヒノキで蓄積が同じでも、空間体積に占める蓄積の割合（蓄積比）は、ヒノキのそれに比べ大きくなっていると思われる。

混み具合の指標である相対幹距比と蓄積比との間の因果関係は、改めて考えれば道理である。混み合えば混みあうほど（ S_r が小さくなるほど）、空間体積はさほど増えないものの単位空間体積に占める蓄積の量は増える。つまり蓄積比は増加する。逆に疎になればなるほど（ S_r が大きくなるほど）、蓄積は減少し蓄積比は小さくなる。したがって空間体積から蓄積を推定するとき、相対幹距比は蓄積推定精度に大きく影響を与える因子となる。

今回、林分の傾斜・形状比・平均胸高直径と蓄積比

との間には、明瞭な関係を見いだせなかった。しかし、それを普遍的な結論とするのは今回の解析だけでは不十分としたい。なぜなら、樹高の計測では、実測といえども誤差が伴わざるをえないことに加え、プロット内の蓄積は計測誤差を含んだ樹高を使って調整した樹高曲線から樹高を推定した上、どの林分にも式(6)の材積式を適応している。つまり実測とはいえ、相応の誤差を含んでいる。しかも林分調査した蓄積は、航空レーザー計測時に同期処理させていない。したがって今回のデータでは、蓄積比に顕著な影響をあたえる林分特性を抽出することしかできないからである。

なお、今回の結論である式(13)は、ギャップが少ない（林分の樹冠が閉鎖している）林分に於いてのみ適用可能なものであることには注意が必要である。間伐直後の林分では、樹冠が閉鎖しておらず、空間体積と林分蓄積との関係が今回仮定している設定には当てはまらないからである。しかし、現在、我が国の森林資源管理計画において最もその量の把握が必要なのは、戦後の拡大造林によって植林され、その後の林業低迷によって間伐が遅れ、高密度になっている人工林である。そういった森林はギャップが少ないため、我が国において喫緊の課題であるヒノキ・スギの蓄積推定では、本研究の成果は適用可能と思われる。さらに、過去の航空レーザーデータにも適用可能なこの手法は成長量解析や間伐実績などの解析にも適用可能である。

しかしながら、今回の結論を活用し現実の森林蓄積を推定するためには、推定対象の林分の樹種と相対幹距比が既知でなければならないが、樹種についてはと

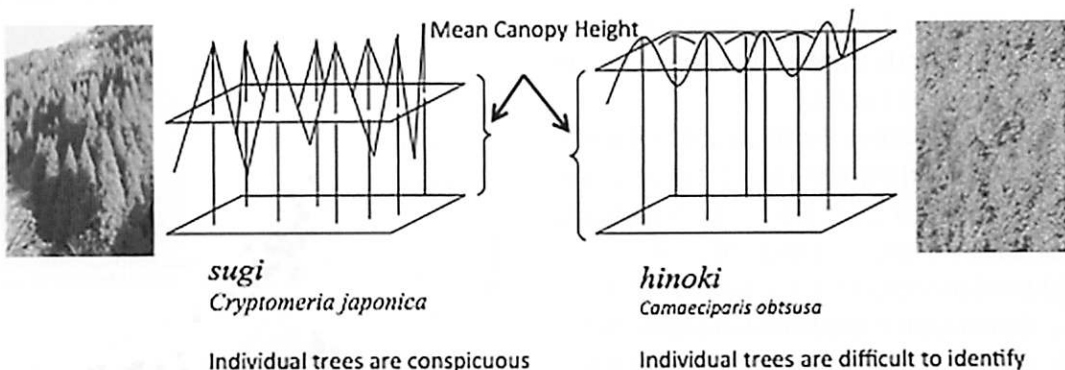


図11 樹形と空間体積との関係

もかく、相対幹距比は式(8)で求めることから、本数密度と平均樹高が既知である必要がある。しかし本研究で想定している航空レーザーデータは単木抽出できる高密度のものではない。従って、この手法を活用するためには、今後低密度の航空レーザーデータあるいは低コストで利用可能な他センサー情報（衛星画像・空中写真等）の併用により、相対幹距比を推定する手法の開発が必要となる。また式(14-1)、式(14-2)のパラメータがどの地域のヒノキやスギにも適用可能か検証も必要である。今後は、航空レーザーあるいはそれに替わる情報を使った樹種情報や、相対幹距比の抽出法を検討するとともに、今回得られたパラメータの汎用性について検討していきたい。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、中部電力研究所「バイオマス賦存量調査」より2005年～2007年まで助成をいただき、2009年から2010年には中部経済同友会「林業再生プロジェクト」より助成をいただいた。また航空レーザーデータについては岐阜県より提供いただいた。立木位置測量の生産性向上のためツール開発については㈱センスウェアに協力頂いた。また本論を執筆するにあたり愛媛大学大学院元教授末田達夫氏にも有益なアドバイスをいただいた。ここに感謝申し上げる。

(受付日2015.5.8, 受理日2015.7.10)

参考文献

- 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.
- 伊藤拓弥, 松英恵吾, 執印康裕, 内藤健司, 2011. 本数密度の異なるスギ・ヒノキ林における航空 LiDAR による単木の立木幹材積推定. 写真測量とリモートセンシング, 50(1), pp.18-26.
- 大隅眞一, 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, 1-25pp.
- 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, 443pp.
- 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.
- 竹島喜芳, 森 勝, 2005. LiDAR データを活用した産学官連携による森林行政データ更新プロジェクトの取組. 写真測量とリモートセンシング, 44(6), pp.44-47.
- 林 真智, 山形与志樹, 平 春, 哈斯巴干, 鈴木力英, 三枝信子, 2013. 写真測量とリモートセンシング, 52(6), pp.306-315.
- 平田泰雅, 2005a. 航空レーザースキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響. 森林計画学会誌, 39(2), pp.81-95.
- 平田泰雅, 2005b. 航空機レーザースキャナーデータを用いたヒノキ人工林における樹高と地形の関係. 日本森林学会誌, 87(6), pp.497-503.
- 松英恵吾, 伊藤拓弥, 内藤健司, 2006. 航空機 LiDAR による森林資源量推定—密度の異なるスギ・ヒノキの林分パラメータ推定—. 写真測量とリモートセンシング, 45(1), pp.4-13.
- 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, 76pp.
- 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, 88pp.
- 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, 2013. 平成25年版 森林・林業白書, 全国林業改良普及協会, 東京, 300pp.
- 林野庁, 2011. 平成23年版 森林・林業白書, 全国林業改良普及協会, 東京, 192pp.
- Gaveau, D.L.A., Hill, R.A., 2003. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. Canadian Journal of Remote Sensing, 29(5), pp.650-657.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu,

- X., Maltamo, M., 2008. Review of methods of small footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5), pp.1339-1366.
- Hyyppä J, Kelle O, Lehtikoinen M, Inkinen M., 2001. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Trans Geoscience Remote Sensing*, 39, pp.969-975.
- Nelson, R., Krabill, W., Tonelli, J., 1998. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 19(2), pp. 164-179.
- Næsset E., Øklandb, T., 2002. Estimating tree height laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment*, 79(1), pp.105-115.
- Næsset, E., 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 61(2), pp.246-253.
- Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y. and Tsuzuku, M., 2005a. Predicting individual stem volumes of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR. *Journal of Forest Research*, 10, pp. 305-312.
- Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y. and Tsuzuku, M., 2005b. Estimating individual-tree heights of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR. *Journal of Forest Research*, 10, pp. 135-142.
- Tsuzuki, H., Nelson, R. and Sweda, T., 2008. Estimating timber stock of Ehime prefecture, Japan using airborne laser profiling. *Journal of Forest Planning*, 13, pp.259-265.