航空機レーザー測量を用いた異なるスケールアプローチでのスギ・ヒノキ林材積の推定

根本 光^{*1)}・加藤 顕¹⁾・小林達明¹⁾

1) 千葉大学大学院園芸学研究科 Graduate School of Horticulture, Chiba University

摘要: 航空機レーザーデータから得られた変数を用いて林分単位及び単木単位における材積回帰モデルを構築した。林分単位における材積回帰モデルは、現地調査で把握した調査区単位における材積を目的変数、航空機レーザーデータから算出した各種変数を説明変数とし、ステップワイズ法による変数選択を行ない、材積回帰に有効なモデルを構築した。単木単位における材積回帰モデルは、航空機レーザーデータから推定した樹高と樹冠直径を用いた拡張相対成長式を構築した。両者の手法を比較した結果、単層林であり、なおかつ立木密度が疎である林分においては、単木単位における材積回帰モデルの精度が良いことが分かった。

キーワード: 航空機レーザー測量, 材積推定, 拡張相対成長式, 数値地形モデル, 数値樹冠モデル

NEMOTO, Akira, KATO, Akira and KOBAYASHI, Tatsuaki: **Estimating stand volume in Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) plantation with different scale approaches using airborne LiDAR.**

Abstract: This study aimed at estimating stand volume with plot based approach and single tree level approach using airborne LiDAR (Light and Detection and Ranging). In plot based approach, the objective variable was stand volume in plot scale, the explanatory variables derived from airborne LiDAR were calculated. The best prediction model was determined to choose variables by stepwise method. In single tree level approach, generalized allometric function using tree height and crown diameter estimated from airborne LiDAR was constructed. Comparing with both methods, single tree level approach was better in sparse forest with single layer.

Key words: Airborne LiDAR (Light Detection and Ranging), Estimating stand volume, Generalized allometric function, Digital Terrain Model, Digital Canopy Model

1. 研究の背景と目的

近年、地球規模での気候変動への懸念から森林の二酸化炭素吸収源としての機能が着目され、炭素蓄積量を把握する方法論やモニタリング手法の構築が一層重要視されている。炭素蓄積量を算出する上では材積が重要な変数として用いられており、材積の算出方法の一つに、樹種ごとに調製された材積式により算出する手法が用いられている。しかし、現地調査に要する労力や炭素蓄積量の広域的な測定の必要性といった観点から、リモートセンシングによる簡便かつ詳細な材積推定の構築が求められている^{1,6)}。

リモートセンシングの中でも、航空機レーザー測量 (Airborne LiDAR, Light Detection and Ranging) が着目されている。航空機レーザー測量は、航空機に搭載されたレーザーキャナーからレーザーを照射し、対象物の物理構造を把握する。また計測の際に、GPS (Global Positioning Systems) 及び INS (Inertial Navigation Systems) を搭載しており、対象物の正確な位置情報を取得することが可能で

ある。

航空機レーザー測量は森林域での計測にも用いられてきている。近年では full waveform のセンサーが用いられるようになり、従来までのセンサーと比較し、より高密度の3次元点データを取得できるようになった。これにより、対象物の詳細な構造を把握することが可能となった。航空機レーザー測量は対象物の構造を把握することが可能であるため、林分単位や単木単位での樹高や枝下高、樹冠体積といった森林の物理量を把握する事例が多くみられる^{2,11,12)}。このような森林の物理量を用いて材積の推定がなされているが、単一の樹種のみを対象としている事例や、単層林のみを対象にしている事例など、材積の把握はある限定された条件下で行われているものが多い^{8,9,14,15)}。特に、単木単位での材積推定は、樹冠の表層の情報を表したモデルである DCM (Digital Canopy Model, 以下 DCM とする) から目的変数を算出する事例が報告されているが、下層木の情報を抽出出来ず、複層林では不適であることが予想される。しかし、実際には複層林や混交林など様々な林分が成立していることから、樹種

* 連絡先著者 (Corresponding author): E-mail: nemo2565@yahoo.co.jp

〒183-0006 東京都府中市緑町 2-21-1 2-21-1 Midoricho, Futuyuu-shi, Tokyo, 183-0006, Japan

や林分の構造によらず材積を推定することが必要である。また、材積の推定は、単木単位におけるアプローチ以外にも林分単位（プロット単位）によるアプローチがあるが、両方の手法を比較検討した事例はほとんどみられない。よって本研究では、full waveform のセンサーを搭載した航空機レーザー測量により得られたデータから算出した変数を用い、壮齢期から高齢期にかけた針葉樹を対象としたより拡張性の高い材積回帰モデルを構築すること、プロットベースによる手法と単木ベースによる手法を比較検討することを目的とした。

2. 研究方法

2.1 現地調査及び位置情報の算出

本研究の対象地は、千葉県山武市における壮齢期から高齢期にかけたスギ及びヒノキ人工林である。本研究では、拡張性の高い材積回帰モデルを構築することを目的としているため、純林だけではなく、スギとヒノキが混交している林分も対象地に選定した。また、対象地の地形は平坦地または緩傾斜地である。対象地において 20 m×20 m の調査区を 27 ヶ所設置し、毎木調査を行なった。調査項目は樹種、胸高直径、樹高、枝下高である。樹高及び枝下高の測定は、Haglof 社製の測高機 vertex III を用いた。各調査区における平均樹高の最小値は 17.1 m（標準偏差 9.1 m）、最大値は 30.9 m（標準偏差 1.4 m）、立木密度の最小値は 1ha あたり 225 本、最大値は 1ha あたり 2,025 本となっており、性質の異なる林分を含んでいる。

現地調査で測定した胸高直径、樹高を基に樹種ごとに調製された材積式を用いて単木の材積を算出した。調査区の四隅、立木の正確な位置は、GPS（Trimble 社製 Geo XT）とトータルステーション（Ushikata 社製 TEO-RAY 130）を用いて測定した。取得したデータを Arc GIS ver9.2（ESRI 社製）で X、Y、Z 座標を含むポイントデータとして地図化した。

2.2 航空機レーザーデータとその処理

航空機レーザーによる計測は、中日本航空株式会社所有の full waveform である Riegl 社 LMS-Q560 センサーを使用した。2010 年 7 月 18 日に計測を行い、平均点密度は 20 点/m² である。計測したデータは Arc GIS に取り込み、調査区の四隅を基点とした調査区内の点データを抽出した。抽出した点データからノイズを除去した後、地表面に反射した点データのみを用いて TIN（Triangle Irregular Network）を作成した。その後、内挿法により、植生などの構造物を除去した地表面のみの情報を表すモデルである数値地形モデル（Digital Terrain Model、以下 DTM とする）を作成した。次に各点データの Z 座標から対応する DTM のピクセルの標高値を減算することにより、地表面からの高さに補正し、樹木の高さや樹冠の形状を表すモデルである数値樹冠モデル DCM の作成を行った。まず、0.5 m サイズのグリッドを作成し、その中にある点データの内、地表面からの高さが最も高い点データのみを抽出した。その後、それらの点のみを用いて TIN を

作成し、内挿法により DCM を作成した。この処理により作成した DCM のセルサイズは 0.5 m であるが、林分の詳細な構造を把握するため、0.1 m のセルサイズの DCM の作成を行った。DCM を一度ポイントデータに変換し、内挿法により 0.1 m セルサイズでの DCM の作成を行った。この理由は、調査区によっては航空機レーザーで取得した総点数に大きな差があるため、0.1 m サイズのグリッドではサイズが小さすぎて、グリッド内における最大の高さを持つ点を抽出することが出来ない可能性がある。また、抽出出来たとしても局所的な値を含み、その結果いびつな形状の DCM が作成されてしまう。このため、全ての調査区間で条件が同じになるよう、一度 0.5 m サイズの DCM を作成した後、0.1 m セルサイズでの DCM を作成することとした。

3. 林分単位における材積回帰モデルの構築手法とその結果

3.1 説明変数の算出とモデルの構築手法

林分単位での材積回帰モデルを構築する変数の候補として、立木の高さを表す変数、林分の構造を表す変数、樹冠の量を表す変数をそれぞれ算出した。

立木の高さを表す変数は、地表面からの高さが 0.5m 以上の点群を立木に反射した点とみなし、地表面からの高さのパーセンタイル値（ h_{10} , h_{20} , h_{30} , h_{40} , h_{50} , h_{60} , h_{70} , h_{80} , h_{90} , h_{max} ）を候補とした。現地調査で把握した林分単位での平均樹高及び平均枝下高、樹高の最大値と最も相関の高いパーセンタイル値を求め、モデルに組み込む変数を選別した。その結果、 h_{70} , h_{80} , h_{max} をそれぞれ林分の平均枝下高、平均樹高、樹高の最大値を表す変数として採択した。決定係数はそれぞれ、0.60, 0.52, 0.70 であった。また、森林の物理量を推定する既往研究においてモデルに多く選択されている変数である変動係数（ h_{cv} ）^{2,11,12)} を候補に加えた。

林分の構造を表す変数としては、DCM から目視により判読した立木本数及び林分のギャップ面積を算出した。ギャップ面積の算出は、DCM の値が 5 m 未満のピクセル数を Arc GIS のラスタ演算によって求め、ピクセルの縦・横の大きさを掛けることにより算出した。

樹冠の量を表す変数として、樹冠横断面積及び樹冠体積を算出した。樹冠横断面積は、DCM から h_{70} 以上の面積をギャップ面積と同様の手法で求めた。樹冠体積の算出は、まず点群データを FUSION（USDA Forest Service）に取り込み、ヒストグラムの立ち上がりから樹冠部分の区分値を設定し、点群を区分値からの高さに補正した。その後 1 m×1 m のグリッドを作成し、その中における区分値からの高さの最大値を求め、それを 1 m×1 m のグリッドにおける体積をとした。調査区内全てのグリッドに対してこの処理を行い、その体積を合算することで調査区における樹冠体積とした。

現地調査により調査区単位で算出した材積を目的変数、算出した 8 つの変数を説明変数とし、ステップワイズ法による変数選択を行い最適なモデルを構築した。まず全ての変数を

入れた回帰式を構築し、その後 AIC (Akaike's information criterion) を基準に変数を 1 つずつ除去していく変数減少法 (backward elimination method) を行った。なおステップワイズ法は、フリーソフトである R ver2.14.1 (R Development Core Team, 2011) を用いて行った。

3.2 構築したモデルの精度と有効性の検証

ステップワイズ法による変数選択の結果、 h_{70} 、 h_{80} 、DCM から判読した立木本数、ギャップ面積、樹冠体積が選択された。モデルの決定係数は 0.81、モデルの予測値と実測値との平均的な誤差を表す指標である二乗平均平方誤差 (Root Mean Square Error, 以下 RMSE とする) は、 400 m^2 あたり 3.91 m^3 であった。また、構築されたモデルは 1 % の有意水準で有意であった。次に得られたモデルの有効性を検証するため、 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ の調査区を検証用プロットとして別途 12 ヶ所設置し、現地調査により調査区ごとの材積を算出し、航空機レーザーデータからモデルに選択された各変数を算出した。検証用プロットにおける平均樹高の最小値は 16.4 m (標準偏差 7.8 m)、最大値は 24.0 m (標準偏差 1.3 m)、立木密度の最小値は 1 ha あたり 450 本、最大値は 1 ha あたり 1,475 本である。算出した変数を構築した林分単位での材積モデルに代入し、材積の予測値と現地調査 (材積式から算出) で把握した材積の関係をみたところ (図-1)、決定係数は 0.83、 400 m^2 あたりの RMSE は 4.55 m^3 であった。RMSE は若干高く評価されているものの、モデルを構築した際の精度と同程度であり、構築したモデルを他地域に対して適応可能であることが示唆された。

4. 単木単位における材積回帰モデルの構築手法とその結果

4.1 DCM と現地調査立木との対応関係

現地調査で取得した立木の位置情報から Arc GIS を用いて、樹高、胸高直径、材積を含むポイントデータを作成し、DCM との対応を行った (図-2)。DCM と対応出来た立木本数は 750 本であり、対応が出来なかった立木本数は 129 本であった。DCM からの判読率は 85.3 % であった。判読出来なかった立木の特徴として、樹高が低いことが挙げられる。 15 m 未満の立木については、全 144 本中、対応出来たのはわずかに 7 本で、DCM からはほとんど対応出来なかった。これは隣接する樹高の高い立木に被圧され、DCM から樹冠部分を判読することが出来なかったためと考えられる。

4.2 樹高と樹冠直径の推定

ポイントデータを DCM と対応させた後、樹冠部分のポリゴンを作成し、ポリゴン内の DCM の内、最も高いセル値を Arc GIS のゾーン統計により求め、これを航空機レーザーデータから推定した樹高とした。現地調査で測定した樹高との対応関係をみたところ (図-3)、両者の間に高い正の相関関係がみられ (決定係数 0.84)、航空機レーザーデータから樹高を比較的高い精度で把握することが示された。さらに RMSE を算出したところ、 1.56 m であった。

材積式は、樹高と胸高直径の 2 変数を用いて単木の材積を算出するが、航空機レーザー測量からは胸高直径を直接的に計測することはできない。既往研究では、樹冠直径または樹冠径と胸高直径との間には正の相関があるとする報告^{10,13)}や樹種によってその相関の強さは異なる⁵⁾との報告がある。このため、航空機レーザーデータから推定した樹冠直径と胸高直径の係数関係を明らかにした。まず作成した樹冠ポリゴンの樹冠面積を算出し、次に樹冠の形状が円形であると仮定し、樹冠直径を算出した。現地調査ではシラカシやスダジイなどの常緑広葉樹もわずかに確認出来たが、サンプル数が十分でないことと、樹冠の広がり針葉樹とは異なることから、今回の解析ではスギとヒノキの常緑針葉樹のみを対象とした。現地調査で測定した胸高直径との対応関係をみたところ (図-4)、両者の間には正の相関関係がみられたが (決定係数 0.74)、誤差の大きい立木もみられた。この理由として、隣接する立木の樹冠によって、立木の一部の樹冠部分しか把握することが出来なかったこと挙げられる。樹冠直径を推定するために用いた DCM は、あくまで樹冠の表層部分のみを表したモデルである。このため、立木が隣接している場合、樹冠の表層下の部分を DCM から判読することが出来ず、実際の樹冠直径よりも過小評価している可能性が考えられる。

4.3 樹高と樹冠直径を用いた拡張相対成長式の構築

航空機レーザーデータから推定した樹高と樹冠直径の 2 変数を用いて拡張相対成長式 (generalized allometric function) を構築した。既往研究では、材積を目的変数とした場合、胸高直径の二乗と樹高の積を説明変数にとることにより、高い精度で材積を推定することが出来るとの報告¹⁶⁾がある。しかし、材積は他の生物量と同様、成長には上限があることから、単純成長式ではなく拡張相対成長式を用いることとし、航空機レーザー測量から直接計測することの出来ない胸高直径の代わりに樹冠直径を用いることとした。また、本研究の対象地は、スギとヒノキが混交している林分を含んでいる。相対成長式は一つの樹種に対して一つの式を構築するのが望ましいが、リモートセンシングによってスギとヒノキを区分する手法が確立されていないため、スギとヒノキを含めた拡張相対成長式を算出した (図-5)。材積式から算出した材積と予測値の誤差の二乗値の和が最小になるよう、Excel 2007 のソルバーを用いて各パラメータを推定した。得られた拡張相対成長式の決定係数は 0.80 であった。しかし、材積の大きい個体ではモデルの予測値と実測 (材積式から算出) との誤差が大きい個体もみられた。樹高の推定誤差及び胸高直径の推定誤差が大きかった立木が含まれており、拡張相対成長式を構築した際にそれらの誤差が影響したためと考えられる。

4.4 単木単位で推定した材積をプロットベースで合算した際の比較

構築した拡張相対成長式から推定した単木単位での材積をプロットベースに合算し、現地調査で得られた調査区単位で

の材積と比較を行なった。拡張相対成長式の構築は針葉樹のみを対象としているので、本解析では広葉樹が含まれている調査区は対象から除外した。図-6 に拡張相対成長式を用いて推定した材積をプロットベースで合算した材積と現地調査（材積式）から算出した調査区単位での材積の関係を示す。その結果、単木単位で推定した材積をプロットベースに合算した際に、決定係数が 0.8 から 0.73 と低くなるという結果が得られた。つまり、スケールを変化させた際に、材積回帰の精度は一定ではなく、変化することが示唆された。この要因としては、材積回帰における誤差が蓄積したためと考えられる。このため、立木密度ごとの拡張相対成長式から推定した材積の合算値と現地調査で把握した材積の RMSE の関係をみた（図-7）。その結果、立木本数が増えるほど、RMSE が大きくなる傾向がみられた。さらに DCM から立木の判読率が高い場合は、RMSE は小さくなる傾向がみられた。複層林が成立している調査区では、樹冠の表層を表すモデルである DCM から下層木を判読できず、判読率は低い値を示す。立木密度が 750-1,125 本の林分では、RMSE は最も高い値を示したが、これは DCM からの判読率が最も低い (76.9 %) ためであると考えられる。また、算出した RMSE を林分単位での材積回帰モデルから算出した RMSE (400 m² あたり 4.55 m³) と比較したところ、本研究の対象地では、立木密度が 375 本/ha 未満の林分では単木単位での回帰結果の方が良い (400 m² あたり RMSE が 2.72 m³) ことが示された。これらの林分では DCM からの判読率も高い (98.6 %) ことから、立木密度が小さく単層になっている林分においては、単木単位での材積回帰モデルは林分単位での材積回帰モデルと比較し、有効であることが示された。

図-1 林分単位における材積回帰モデルによる材積の予測値と現地調査（材積式）により把握した材積の関係

Fig. 1 The relationship between predicted stand volume in plot scale and stand volume measured by field survey

図-2 樹高階ごとの DCM から対応立木と非対応立木の本数

Fig. 2 The number of stands corresponding to DCM and non corresponding to DCM in tree height class

図-3 航空機レーザーデータから推定した樹高と現地調査（測高機）で計測した樹高の関係

Fig. 3 The relationship between tree height estimated from airborne LiDAR and tree height measured by filed survey

図-4 航空機レーザーデータから推定した樹冠直径と胸高直径の関係

Fig. 4 The relationship between crown diameter estimated from airborne LiDAR and DBH

図-5 拡張相対成長式から推定した材積と材積式から算出した材積の関係

Fig. 5 The relationship between predicted stand volume using generalized allometric function and stand volume calculated by volume equation

図-6 拡張相対成長式をプロットベースで合算した材積と現地調査(材積式)から算出した調査区単位の材積の関係

Fig. 6 The relationship between stand volume in plot scale derived from generalized allometric function and stand volume measured by field survey

図-7 立木密度ごとの拡張相対成長式から算出した調査区単位の材積の合算値と現地調査から把握した材積との RMSE 及び DCM からの判読率の関係

Fig. 7 The RSME calculated from stand volume in plot scale estimated from generalized allometric function and stand volume measured by field survey in stand density and correspondence rate from DCM

5. 考察

本研究では航空機レーザーデータから得られた変数を用いて、プロット単位、単木単位の両方の手法で、壮齢期・高齢期のスギ及びヒノキを対象とした材積回帰モデルを構築することが出来た。モデルの精度は、林分単位、単木単位ともに既往研究における材積回帰モデルの精度(決定係数 0.75-0.85)^{4, 7, 8, 9, 14, 15)}と比較し同程度であった。

林分単位における材積回帰モデルでは、既往研究で示されたパーセンタイル以外の変数として、林分のギャップ面積や DCM から判読した立木本数といった林分の構造を表す変数を用いることでモデルの精度を向上させることが示された。また、樹冠の量に関する変数では、2次元の量である樹冠横断面積ではなく、3次元の量である樹冠体積がモデルに選択された。これは伊藤ら⁹⁾が指摘しているように、材積推定における説明変数として、平面的な情報を表す変数ではなく、樹冠体積といった立体的な情報を表す変数を用いるべきであることが重要である。また本研究では、より高密度で点群データを取得できる full waveform のセンサーを使用し、林分単位での樹冠体積を算出した。これにより樹冠部分を明瞭に把握することが出来るので、林分単位での材積推定における full waveform のセンサーの有用性が示されたといえる。

単木単位における材積回帰モデルは航空機レーザーデータから推定した樹高と樹冠直径を用いた。現地調査で計測した

値との対応結果では、樹高については精度良く推定することが出来た。しかし、胸高直径については航空機レーザーデータから推定した樹冠直径との間に相関はみられるものの、その対応関係は良いとはいえない。DCM はあくまで樹冠の表層のみを表したモデルであるので、隣接する立木との物理的な距離といった点を考慮し、対応関係の悪い立木については誤差を修正する必要があるといえる。また、単木単位での材積回帰結果をプロットベースにスケールアップした際に、精度は一定ではなく変化することが示された。このことはスケールを考慮し、モデルの精度を評価する必要があることを示している。本研究では、調査区によっては、林分単位での材積推定結果と単木単位での材積推定結果が異なることが示され、単純に1つのスケールでの推定結果だけでなく、複数のスケールでの推定結果を比較することが重要であるといえる。また、立木密度が小さく単層になっている林分においては、単木単位での材積回帰モデルの方が林分単位での材積回帰モデルよりも有効であるということが示唆された。航空機レーザーデータから単層や複層といった林分の構造を把握することが可能である³⁾ので、まず対象地における林分の構造を把握し、それに応じた材積回帰の手法を用いるべきである。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、千葉大学大学院園芸学研究科再生生態学研究室の皆様には有益なご助言を賜った。また査読者、編集委員の皆様には有益なご指摘を賜った。ここに厚く御礼申し上げる。

引用文献

- 1) 天野正博 (2005) 小特集 LIDAR による森林・樹木の計測 1. 京都議定書からみた LIDAR による森林計測への期待, 写真測量とリモートセンシング 44 (6) : 7-9.
- 2) Andersen, H-E., McGaughey, R. J., Reutebuch, S. E. (2005) Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data, Remote Sensing of Environment 94:441-449.
- 3) Falkowski, M. J., Evans, J. S., Martinuzzi, S., Gessler, P. E., Hudak, A. T. (2009) Characterizing forest succession with lidar data: An evaluation for the Inland Northwest, USA, Remote Sensing of Environment 113:946-956.
- 4) García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., Danson, F. M. (2010) Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data, Remote Sensing of Environment 114:816-830.
- 5) Hemery, G. E., Savill, P. S., Pryor, S. N. (2005) Application of the crown diameter relationship for different species of broadleaved trees, Forest Ecology and Management 215:285-294.
- 6) 平田泰雅 (2010) REDD+におけるリモートセンシングの役割, 森林科学, 60 : 10-13.
- 7) Ioki, K., Imanishi, J., Sasaki, T., Morimoto, Y., Kitada, K. (2010) Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR : plot-based approach, Landscape Ecological Engineering 6 (1) : 29-36.
- 8) 伊藤拓弥・松英恵吾・内藤健司 (2008) 航空機 LiDAR による森林資源量推定・スギ・ヒノキの樹高・樹冠量による立木幹材積推定式の検討, 写真測量とリモートセンシング 47 (1) : 26-35.
- 9) 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機 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) : 18-26.
- 10) 梶原幹弘 (2006) 樹冠と幹の成長との関係, 森林技術 770 : 32-34.
- 11) Næsset, E. Bjerknes, K-O. (2001) Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data, Remote Sensing of Environment 78:328-340.
- 12) Næsset, E., Økland, T. (2002) Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve, Remote Sensing of Environment 79:105-115.
- 13) 島田博匡 (2011) 三重県の高齢人口林における胸高直径、樹高、樹冠幅の関係-大径材生産を目指した密度管理技術の検討-, 三重県林業技術研究所研究報告 (3) 2011 : 19-26.
- 14) Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y., Tsuzuku, M. (2005) Predicting individual stem volumes of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR, Journal of Forest Research 10 (4): 305-312.
- 15) 米康充・小熊宏之・山形与志樹 (2002) 京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発-航空機 lidar によるカラマツ林の樹冠計測と材積・炭素重量計測精度の検証-, 日本リモートセンシング学会誌 22 (5) : 531-543.
- 16) 四大学 (京大・東大・北大・大阪市大) および信州合同調査班 (1966) 森林の生産力に関する研究第3報. スギ人工林の物質生産について. 林業技術協会.

(2012.6.29 受理)