

論文

航空機 LiDAR によるスギ・ヒノキ林分の平均樹高推定^{*1}

— レーザ点密度を変えた場合の事例 —

高橋與明^{*2}・粟屋善雄^{*3}・田中真哉^{*4}

高橋與明・粟屋善雄・田中真哉：航空機 LiDAR によるスギ・ヒノキ林分の平均樹高推定—レーザ点密度を変えた場合の事例— 九州森林研究 66：6－9，2013 林分特性が様々に異なる樹冠閉鎖したスギ・ヒノキ人工林を対象に、約 64 点/m² という超高密度で航空機 LiDAR 計測されたデータからレーザ点密度が異なるシミュレーションデータを作成し、各プロット内の DEM を共通にした場合の平均樹高推定値の精度を検証することを最終目的とした。まず、林分の平均樹高を統計的に適切に表現しうる Canopy Height Model (CHM) の 1～100 パーセンタイル値を Passing-Bablok 法による回帰分析で探索した結果、CHM の 80 パーセンタイル値が平均樹高を統計的に最も適切に表現できると考えられた。次に、CHM の 80 パーセンタイル値を平均樹高の推定値とみなした場合の誤差を調べた結果、全 41 プロットにおける二乗平均平方根誤差は 1m 未満であることがわかった。以上の結果から、少なくともレーザ点密度が約 0.5 点/m² 以上確保されれば、航空機 LiDAR によってある地域のスギ・ヒノキ林の平均樹高をモデル調整を必要としないで高精度に直接的に決定できる可能性が示唆された。

キーワード：航空機 LiDAR, レーザ, リモートセンシング, 平均樹高, Passing-Bablok 法

I. はじめに

林分の平均樹高は森林の現存量や林分材積を説明するための極めて有用な林分因子であることが広く知られている。本稿において平均樹高とは、例えば標準地法のようにある林分の平均的な林相を想定した場合にその調査区内で決定される平均樹高を指すことにする。林分の平均樹高や単木の樹高を高精度になおかつ客観的に推定可能なリモートセンシング技術に航空機 LiDAR がある。これは、回転翼や固定翼などの航空機に搭載した LiDAR (ライダー) と呼ばれるスキャン型のレーザ測距儀を利用して樹木の樹冠表面や樹冠下の地面の三次元位置座標 (X, Y, Z) を面的に計測する技術である (Næsset 1997; Hyypä *et al.* 1999)。この技術では、単位面積当たり照射するレーザパルス数 (以後、レーザ点密度 (点/m²) と称す) を増やすことで空間分解能を上げることが可能となり、例えば単木の樹冠形状が明瞭にわかるほどのレーザ点密度であれば、簡単な画像解析を適用して単木認識を行った後で梢端 (あるいはその付近) の標高と梢端直下の地面の標高の比高を樹高推定値とみなす方法でも、推定誤差は平地でも (例えば Hyypä *et al.* 2001) 急峻な地形 (例えば Takahashi *et al.* 2005) でも二乗平均平方根誤差 (RMSE) で 1m 程度であることが報告されている。

金銭的成本や時間的成本などの効率性を重視した実践的な航空機 LiDAR 計測を想定した場合、航空機の数や対地高度を上げることでより短時間に広範囲を計測することが望ましいが (Næsset 2008)、その反面、レーザ点密度が下がることが避けられない。レーザ点密度が下がることは樹木の梢端部 (あるいはその付近) の補足率が下がることを意味し、林冠層のレーザデータ

の大部分が樹冠の肩や樹冠縁などの情報で構成されることになる。この場合、単木レベルの樹高を推定するより、林分レベルの平均樹高を推定することが自然であり、方法として例えばプロット内のレーザデータの比高 (地盤面からの比高) の統計量 (例えばパーセンタイル値や平均値) で平均樹高を推定することが一般的である。例えば、オウシュウトウヒヤオウシュウアカマツが優占する林分では比高のパーセンタイル値を説明変数とした単純な単回帰モデルで林分の平均樹高 (正確には胸高断面積で重み付けした平均樹高) を高精度に推定できることが既存研究で報告されている (例えば Næsset 2004, 2008)。しかし、国内の代表的な造林樹種であるスギ・ヒノキ林を対象とした航空機 LiDAR データによる平均樹高推定の研究事例は少なく (Yamamoto *et al.* 2011)、さらに、レーザ点密度と平均樹高推定精度の関係を詳細に調べた国内の研究は見あたらない。

ところで、単木樹高でも平均樹高でも、航空機 LiDAR データによる推定の原理から考えると推定精度に極めて大きな影響を与える要因の一つに地盤面の標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) が挙げられる (Takahashi *et al.* 2008)。航空機 LiDAR データから作成される DEM の精度は、単純にレーザ点密度に依存すること (空間分解能の観点) の他に、樹冠のレーザ透過率の影響を受けると考えられるが (レーザ透過率が低ければ地盤面からの反射パルス数が少ないという理由)、その他にも樹冠下の地形や下層植生の有無・量・種類など、さまざまな複合的要因に依存すると考えられる。したがって日本のように地形の起伏が激しい山岳域に多く造林されているスギ・ヒノキ林では、航空機 LiDAR 計測の仕様が同じであっても林分ごとに DEM の精度は大きく変動する可能性があり、また、同じ林分でも航空機

^{*1} Takahashi, T., Awaya, Y. and Tanaka, S.: Estimation of mean tree height using small-footprint airborne LiDAR in Japanese cedar and hinoki cypress stands - A case study of varying laser point density -.

^{*2} 森林総合研究所九州支所, Kyushu Res. Ctr., For & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860 - 0862, Japan.

^{*3} 岐阜大学流域圏科学研究センター, River basin Res. Ctr., Gifu Univ., Gifu 501 - 1112, Japan.

^{*4} 森林総合研究所, For & Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba 305 - 8687, Japan.

LiDAR 計測の仕様が異なれば DEM の精度は変動することが予想される。

以上をふまえ、本稿では精度の良い DEM が存在することを前提条件とした場合にレーザ点密度の違いが主に樹冠部のレーザデータの統計量に与える影響に焦点を当てることにする。具体的には、スギ・ヒノキ林を対象に約 64 点/m² という超高密度で計測された航空機 LiDAR データからレーザ点密度が異なるシミュレーションデータを作成し、各プロット内の DEM を共通にした場合の平均樹高推定値の精度を検証することを目的とした。

II. 材料と方法

1. 林分調査

研究対象地は、茨城県石岡市にある筑波共同試験地 (217 林班) である。林分調査は 2011 年 6 月から 7 月にかけて行った。林分特性が様々に異なる樹冠閉鎖したスギ・ヒノキ林分に 0.04ha の円形プロットをそれぞれ 22 個、19 個設置し、プロットの中の座標をディファレンシャル GPS 測量で決定した。プロット内の胸高直径 (DBH) が 4cm 以上の全立木について輪尺で二方向から DBH を計測し、立木本数の 50% 程度の樹木の樹高をバーテックスで計測した。樹高未測定木については、プロットごとに樹高計測木の樹高と DBH からネスルンドの樹高曲線を調整してその樹高を推定した。最後に、全立木 (DBH ≥ 4 cm) の樹高を相加平均して林分の平均樹高と定義した。全 41 プロットの林分特性を図-1 (頻度分布) に示す。

2. 航空機 LiDAR 観測

航空機 LiDAR 観測は 2010 年 8 月 31 日に朝日航洋 (株) が行った。LiDAR 機器は Optech 社の ALTM 3100 (最大 4 パルス取得可能) を利用し、パルスの発射頻度は 100,000 Hz、スキャン角度は ± 8 度 (± 11 度で 64% サイドラップしたデータの両端 3 度分のデータをカット)、ビームの拡がり角は 0.31mrad の仕様で、回転翼で地形の起伏にある程度沿いながら対地高度 500m で計測した。計測範囲内の平均レーザ点密度は、約 64 点/m² となった。計測範囲内の DEM の作成のためのノイズフィルタリングには朝日航洋 (株) のローラー法 (横田ほか 2006) を用いた。技術者の目視によるノイズのチェックも同時に行い、フィルタリング後の地表面反射パルスデータからプロット内の 25cm メッシュの DEM を Natural Neighbor 法を用いて作成し、この DEM を以後のデータ解析で利用した。

3. データ解析

各プロット内のレーザの点群データの中から、ファーストパルス (反射レーザパルスの中で、LiDAR センサで最初に検知される反射パルス) のデータのみを取り出し、DEM との比高のデータである Canopy Height Model (CHM) を作成した。CHM のアスキーデータをレーザスキャン方向にシステムティックに繰り返し二分していき、約 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1, 0.5 点/m² の計 8 種類のレーザ点密度のシミュレーションデータをそれぞれ 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 セット作成した。

次に、CHM からパーセンタイル値を計算する際に、計算に使

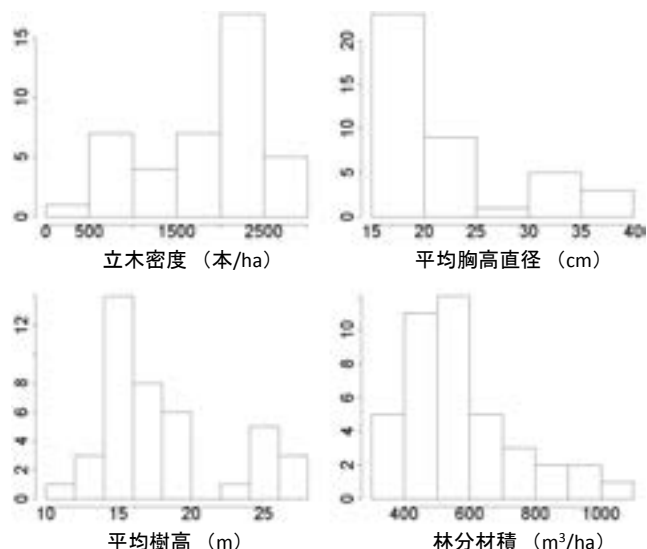


図-1. スギ・ヒノキ林の林分特性 (全 41 プロット)

用するデータの選別方法の違いの比較を行うことにした。CHM には樹冠層以外のデータ (例えば、地盤面と樹冠基部の間の空間に存在する幹・枝および下層植生等からの反射パルスデータに相当する) も混在するため、ある高さの閾値を設け、閾値より高いデータを選別してパーセンタイル値の計算に使用することである (以後、この選別作業を前処理と称す)。閾値を 0m (全データを利用することを想定) と 2m (下層植生などの平均高を想定, cf. Næsset 2004) の固定閾値の場合と、CHM の平均値 (μ) と標準偏差 (σ) をプロット毎に計算して $\mu - 3\sigma$ m, $\mu - 2\sigma$ m, $\mu - 1\sigma$ m, の可変閾値の場合を考え、全 5 種類の前処理を行い、全てのデータセットについて 1% 刻みで CHM の 1~100 パーセンタイル値を計算したのち、以下の二つの分析を行った。

(1) 各パーセンタイル値とプロットの平均樹高の関係を Passing-Bablok 法 (Passing and Bablok 1983) による回帰分析で調べ、回帰直線の切片と傾きを算出した。この二つのパラメータの計算の実装は、<http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/R/PassingBablok.html> を参照して行った。

(2) 全てのデータセットについて各パーセンタイル値と平均樹高の差 (以後、樹高推定の系統誤差と称す) を全てのプロットに対して計算した。そして、(1) の回帰分析の結果と樹高推定の系統誤差の両方から判断して樹高推定に最適と考えられるパーセンタイルの一つを決定し、本研究ではその値を最良の樹高推定値とみなして、平均樹高との RMSE を 8 種類の各データに対して計算した。

III. 結果

分析 (1) の結果を図-2 と 3 に示す。図-2 では、約 64 点/m² の CHM (閾値が $\mu - 3\sigma$ の場合) の 1 から 100 パーセンタイル値のうち、例えば 5, 80, 100 パーセンタイル値と平均樹高との関係を散布図で示している。図-3 では、図-2 の赤の直線で示したような回帰直線の切片と傾きを約 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1, 0.5 点/m² の CHM のシミュレーションデータ (それぞれ 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 セット) の 1~100 パーセンタイル値

(1% 刻み) に対して導出した結果を、各レーザ点密度別に色分けした箱ひげ図で表現している (ただし、64 点/m² のデータは 1 セットしか存在しないため、×印で表現してある)。図-3 では、CHM データの前処理のうち、例えば閾値が (a) 2m の固定閾値の場合と (b) $\mu-3\sigma$ の可変閾値の場合を示している。パーセンタイルが上昇するにつれて、回帰直線の切片は若干の増減はあるものの例えば 75~85 パーセンタイル値では概ね -0.5~0.5 の間に収まっており、この傾向は全ての閾値の場合で共通していた。また、回帰直線の傾きは低いパーセンタイルで若干の増減はあるもののパーセンタイルが上昇するにつれて単調に減少していき、図-2 に示されているように 80 パーセンタイルの場合に約 1.0 となり、この傾向は全ての閾値の場合で共通していた。

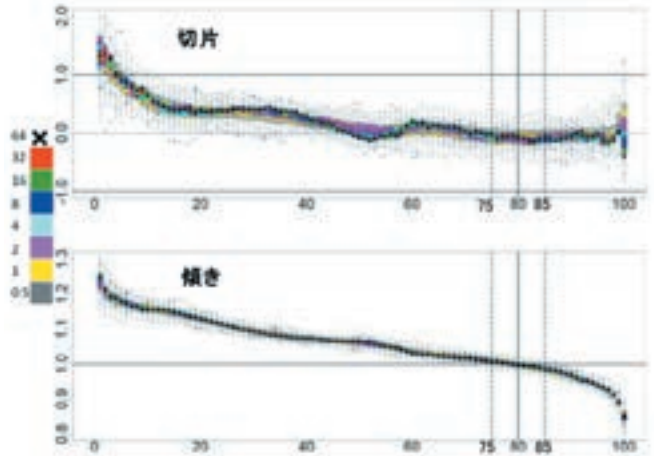
分析 (2) の結果を表-1 に示す。分析 (1) の結果から、CHM の 80 パーセンタイル値が平均樹高を最も適切に表現する可能性が高いと判断されたため、表-1 には CHM の 80 パーセンタイル値をそのまま樹高推定値とみなした場合の RMSE を示した。この表からわかるように、どのレーザ点密度の場合も、どの閾値の場合も、RMSE は 1m 未満であった。

IV. 考察

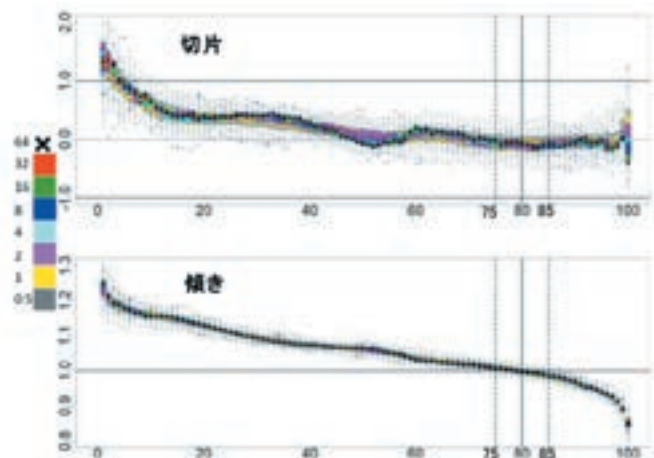
分析 (1) では、CHM のどのパーセンタイルが林分の平均樹高を統計的に適切に表現しうるのかを探索的に調べた。誤差項に正規分布を仮定する最小乗法による通常の単回帰分析では、説明変数には誤差がないと仮定することもあり、本研究の目的には必ずしも適切でないと考え、Passing-Bablok 法による回帰分析を行った。すなわち、バーテックスなどの測器によるプロット調査の平均樹高 (本研究では、樹高曲線も利用している) と航空機 LiDAR データによる推定樹高は、どちらが真値より近いのかは明確に断定できないため、両者の関係をノンパラメトリックな回帰分析で調べるほうがより適切と考えた。本研究の分析結果から、CHM の 80 パーセンタイル値では回帰直線の切片に多少のばらつき (バイアス) があるものの、概ね ± 0.5m 以内に収まっていることがわかり、さらに傾きがほぼ 1 であることから、CHM の 80 パーセンタイル値が平均樹高を統計的に最も適切に表現できると考えられた。

分析 (2) では、分析 (1) の結果をふまえて CHM の 80 パーセンタイル値を平均樹高の推定値とみなした場合に、その誤差がどれほどなのかを調べた。その結果、RMSE は 1m 未満であることがわかり、この程度の誤差は例えば林分材積の簡易査定には実用上問題ないほどの大きさだと考えられる。つまり、分析 (1) お

よび (2) の結果は、少なくともレーザ点密度が約 0.5 点/m² 以上確保されれば、航空機 LiDAR によってある地域のスギ・ヒノキ林の平均樹高をモデル調整を必要としないで (つまり現地調査のトレーニングデータが不要) 高精度に (RMSE < 1m) 直接的に決定できる可能性があることを示唆している。モデル調整が不



(a) 閾値が 2 m の場合



(b) 閾値が $\mu-3\sigma$ の場合

図-3. レーザ点密度の異なる CHM のシミュレーションデータについて、1~100 パーセンタイル値と平均樹高との関係を Passing-Bablok 回帰分析して得られた回帰直線の切片および傾き (横軸はパーセンタイルを表し、縦軸は回帰直線の切片と傾きを表す。また、箱ひげ図の色分けはレーザ点密度の違いを表す)

表-1. 全 41 プロットにおける CHM の 80 パーセンタイル値と平均樹高の二乗平均平方根誤差 (RMSE) (各データセットの RMSE の平均値を示す)

レーザ点密度 (点/m ²)	データ セット数	閾値 (m)				
		0	2	$\mu-3\sigma$	$\mu-2\sigma$	$\mu-1\sigma$
64	1	0.897	0.895	0.896	0.898	0.921
32	2	0.897	0.895	0.896	0.898	0.920
16	4	0.897	0.895	0.896	0.898	0.920
8	8	0.897	0.894	0.896	0.898	0.921
4	16	0.898	0.895	0.897	0.898	0.921
2	32	0.900	0.897	0.898	0.900	0.922
1	64	0.902	0.900	0.901	0.903	0.925
0.5	128	0.908	0.906	0.908	0.909	0.930

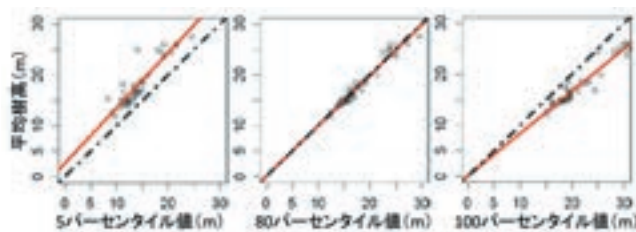


図-2. 約 64 点/m² の CHM (閾値が $\mu-3\sigma$ の場合) の 5, 80, 100 パーセンタイル値と平均樹高との関係 (黒線は 1:1 の直線、赤線は Passing-Bablok 回帰直線をそれぞれ表す)

要という結果は Yamamoto *et al.* (2011) の結果と同じであり、スギ・ヒノキ林での平均樹高推定に対する航空機 LiDAR の利点がさらに支持されることとなった。ただし、本研究の結果は、あくまで精度の良い DEM がある（本研究では DEM の精度評価は行っておらず、約 64 点/m²ほどのデータから作成した DEM は精度が高いとみなしての話である）ことを前提としていることに注意しなければならない。逆に言えば、精度の高い DEM がなんらかの手段で一度整備されてしまえば、例えば一定期間に数メートル以上の平均樹高成長がある林分であれば、約 0.5 点/m²という計測コストを抑えた仕様の航空機 LiDAR 観測データであっても、平均樹高成長をモニタリングできる可能性があると考えられる。

また本研究では、CHM の前処理方法の違いが平均樹高推定値にどの程度違いをもたらすのかということと比較検討した結果、少なくともスギ・ヒノキ林に対してファーストパルスデータのみを利用する場合には前処理の有無や違いによらずに安定した精度で平均樹高を推定できる可能性があることが示唆された。表-1 を細かく見ると、2m という固定閾値の場合に RMSE が最も小さいことがわかるが、2m という閾値は林分調査時に目測等で記録した下層植生の平均的な高さであり、現地調査に行けない場合はそのような値を明確に設定することは出来ないことを考えると、CHM データ依存の可変閾値を採用した方が適切だと考えられる。表-1 から、閾値を $\mu - 1\sigma$ m にした場合は他の閾値の場合と比較すると若干 RMSE が大きいことから、可変閾値としては、 $\mu - 3\sigma$ m（あるいは $\mu - 2\sigma$ m）にすることで誤差の小さい推定が行えると考えられる。

本研究では、スギ・ヒノキ林における航空機 LiDAR の平均樹

高推定精度の高さと推定能力の安定性の両面を改めて示す結果となった。繰り返しになるが、いくつかの前提条件を設けての結果であることに留意すべきであるが、本研究結果が過去に様々な計測仕様で取得された航空機 LiDAR データの使い道や今後の新規観測の仕様を決める際の参考になれば幸いである。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (22780155, 24780163) の助成を受けて行った。また、森林総合研究所の松浦俊也氏と鳥山淳氏には林分調査にご協力いただいた。ここに厚くお礼を申し上げる。

引用文献

- Hyypä, J. *et al.* (2001) IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 39: 969-975.
- Hyypä, J. *et al.* (1999) . Photogramm. J. Fin. 16: 27-42.
- Næsset, E., (1997) ISPRS Photogramm. Rem. Sens. 52: 49-56.
- Næsset, E., (2004) Rem. Sens. Environ. 91: 243-255.
- Næsset, E., (2008) Rem. Sens. Environ. 13: 148-159.
- Passing, H. and Bablok, W. (1983) J. Clin. Chem. Clin. Biochem. 21: 709-720.
- Takahashi, T., *et al.* (2005) J. For. Res. 10: 135-142.
- Takahashi, T., *et al.* (2008) Photogramm. J. Fin. 21: 86-96.
- Yamamoto, K. *et al.* (2011) J. For. Res. 16: 425-431.
- 横田宏行ほか (2006) 写真測量とリモートセンシング 45: 18-20.
(2012年11月9日受付; 2013年2月17日受理)