

論文

航空機 LiDAR の高密度点群データのメッシュ化に関する一考察^{*1}高橋與明^{*2}・山川博美^{*2}・近藤雅信^{*3}

高橋與明・山川博美・近藤雅信：航空機 LiDAR の高密度点群データのメッシュ化に関する一考察 九州森林研究 69：19 - 22, 2016

スギ列状間伐林分を対象に、航空機 LiDAR の高密度の点群データをメッシュ化することで高さのパーセンタイル値に生じる変化を分析した。約 42 点/m² の点群データから樹冠高を表す Canopy Height Model (CHM) を作成し、CHM をメッシュ化して 25 cm と 50 cm メッシュの Digital Canopy Height Model (DCHM) を作成した。コードラート内で DCHM と CHM のそれぞれから 1~100 パーセンタイル値を算出し、両者の線形関係と差分値 (DCHM - CHM) について調べた。その結果、低いパーセンタイルを除けば、各コードラートの立木サイズとは無関係に一定のバイアスが存在することがわかり、そのバイアスは 25 cm にメッシュ化した場合 (元データの容量の 1/2.63 倍) は 20 cm ~ 30 cm 程度、50 cm にメッシュ化した場合 (元データの容量の 1/10.5 倍) は 40 cm ~ 70 cm 程度であった。これらのバイアスが無視できる場合は高密度の点群データのメッシュ化の利点は大きく、無視できない場合は各メッシュサイズに対してバイアス補正の検討が必要になることがわかった。

キーワード：航空機 LiDAR, レーザ, リモートセンシング, 点群, メッシュ

I. はじめに

航空機からのレーザ距離計測の技術として現在広く普及している small-footprint 型の航空機 LiDAR は、森林域の林木の樹冠の表面や内部、樹冠下の地面部などの三次元位置座標を面的に取得できる有用なリモートセンシング技術である (Hyypä and Inkinen, 1999)。単位面積当たりに照射されるレーザパルス数 (点/m²) をレーザ計測密度やレーザ点密度と呼ぶが、航空機 LiDAR を利用した樹高や材積などの林分因子の推定に関する研究は、レーザ計測密度が例えば約 1 点/m² 以下 (Næsset, 2004 a,b; Popescu *et al.*, 2004; Bollandås and Næsset, 2007; Packalén and Maltamo, 2007; Hopkinson *et al.*, 2008; Montagni, 2013) のデータを利用したものから、約 2 点/m²~3 点/m² (Lim and Treitz, 2004; Popescu and Zhao, 2008; Yu *et al.*, 2010; Stephens *et al.*, 2012), 約 4 点/m² (Erdody and Moskal, 2010; Vauhkonen, 2010; Gonçalves-seco *et al.*, 2011), 約 5 点/m²~6 点/m² (Maltamo *et al.*, 2006; Lin *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012; Peduzzi *et al.*, 2012), 約 7 点/m² (Salas *et al.*, 2010; Ene *et al.*, 2012), 約 8 点/m²~10 点/m² (Hyypä and Inkinen, 1999; Maltamo *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2006; Lindberg *et al.*, 2010; González-Ferreiro *et al.*, 2013; Bian *et al.*, 2014; Bouvier *et al.*, 2015), 約 12 点/m² 以上 (Gleason and Im, 2012; Packalén *et al.*, 2013; Swetnam and Falk, 2014; Zhen *et al.*, 2015) のものまで様々にある。これらの既存研究を時系列で眺めると、LiDAR センサ等の性能の向上によって高密度でのレーザ計測がしやすくなっていったことで、より高密度なデータを扱う研究に移行しているように見受けられる。ところで、林分因子の推定に関するこれらの既存研究の提案

手法の多くは、ランダムな点群データをそのまま用いてプロットレベルで林分因子を推定する手法 (例えば Næsset, 2004 a,b) と、点群データをメッシュ化 (ラスター化) したデータを用いて個体レベルで林分因子を推定する手法 (例えば Hyypä and Inkinen, 1999) の二つに大別される。前者はレーザ計測密度が約 2 点/m² 以下のデータに対して多く行われ、後者はレーザ計測密度が約 4 点/m² 以上のデータに対して行われることが多いが、メッシュ化するか否かは必ずしもレーザ計測密度に依存しているわけではなく、対象林分の林分因子を単木レベルで推定可能な高密度データであっても、エリアベースの手法を開発・適用している研究もある (Bouvier *et al.*, 2015)。このように主に欧米諸国を中心にさまざまなレーザ計測密度のデータを用いた手法を開発する研究が広く進められていることがわかるが、例えば高密度の点群データをメッシュ化した後にエリアベースの手法を適用するといった手法を提案した研究は国内外問わずほとんど見当たらない。仮に、航空機 LiDAR のレーザ計測密度の高密度化が今後さらに進んだ場合、例えば大容量の高密度の点群データをメッシュ化しておくことで、容量が大きく減らされ扱いやすくなる利点や、一般的な GIS・画像解析ソフトウェアなどにある豊富なラスター解析ツールを利用して効率的にデータを処理できるようになる利点や、新たな林分因子推定手法の開発につながる可能性などが考えられる。しかし、メッシュ化によって情報量を減らすために元データの統計量に変化が生じることが予想されるため、その変化に関する知見を得ておくことは必要である。そこで本研究では、平坦な地形のスギ列状間伐林分を高密度にレーザ計測したデータを利用して、メッシュ化の前後でデータの統計量がどのように変化するかを調べ、その結果を考察することを目的とした。

*1 Takahashi, T., Yamagawa, H. and Kondo, M.: A study on creation of raster data from high sampling density airborne LiDAR point cloud data

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

*3 中日本航空株式会社 Nakanihon Air Service Co., Ltd., Nishikasugai, Aichi 480-0202, Japan

II. 材料と方法

1. 対象地

研究対象地は、鹿児島県霧島市の国有林内の38年生(2013年度)スギの列状間伐林分(1伐5残で、不良木の除間伐ありの平坦な地形の林分)である。図-1に示すように、林分内に伐採方向を短辺とする33.3m×66.6mの矩形プロット(内部を11.1m×11.1mの18個のコドラートに区切った)を設置し、プロット内の全立木の樹高と胸高直径を測定した結果、プロット内の平均樹高は17.7m、平均胸高直径は26.3cm、形状比は67、立木密度は1087本/haであった(図-1)。

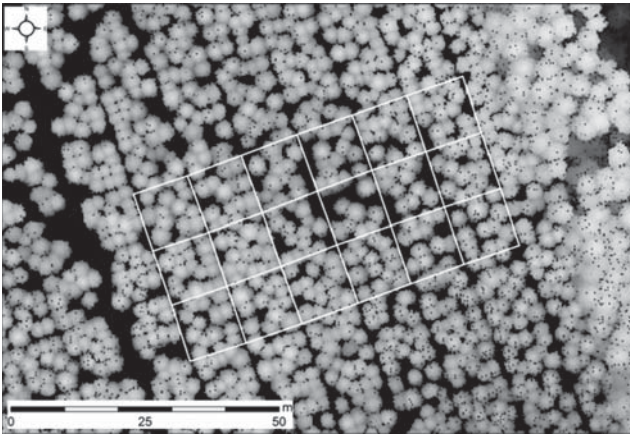


図-1. スギ列状間伐林分の25 cm メッシュのLiDAR画像

2. 航空機LiDAR計測とLiDARデータ

航空機LiDAR計測は2013年12月12日に中日本航空(株)が行った。LiDARセンサはRIEGL社製のLMS-Q560を利用し、基準となるある地点から対地高度450mに設定し、レーザスキャン方向が列状間伐林分の伐採方向にある程度平行になるような5コースとそれに直交する1コースの合計6コースのレーザ計測を回転翼で行った。各コースの計測設定は共通とし、飛行速度は100km/h、レーザの発射頻度は100,000Hz、スキャン角度は±30度、ビームの拡がり角は0.3mrad、回転翼の進行方向および直行方向のレーザ計測点の間隔はそれぞれ0.48mと0.47m(レーザ計測密度は4.37点/m²)の設定であった。データ解析を行うプロット内における1コースあたりの実際の平均レーザ計測密度は約7点/m²であった。DEMの作成のためのノイズフィルタリングにはTerrasolid社製のTerraScanを利用し、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盤面反射データからTINを生成し、線形補間で標高値を決定したDEMを準備した。

次に、本研究における語句の定義をする。まず、レーザの反射が最初に返ってくるものをファーストリターン、最後に返ってくるものをラストリターン、ファーストリターンとラストリターンの間に複数検出されたものを中間リターンと定義する。また、ファーストリターンとラストリターンが同一の場合はシングルリターンと定義する。本研究ではファーストリターンとシングルリターンのデータをDEMからの比高にした点群データをCanopy Height Model (CHM) と定義する(例えばNæsset, 2004 a,b)。

そして、CHMをメッシュ化したデータを本研究ではDigital Canopy Height Model (DCHM) と定義する。

3. データ統計量の比較分析

本研究で分析対象とする統計量は、既存研究で最もよく用いられる統計量の一つであるパーセンタイル値にした(例えばNæsset, 2004 a,b)。CHMとDCHMの統計量は、図-1に示されているコドラート単位で算出し、両者の統計量の比較を行った。下層植生や地盤面の影響を除外するための閾値を2mとして、閾値以上の高さのデータをパーセンタイル値の計算に使用した(例えばNæsset, 2004 a,b)。メッシュ化ではメッシュ内の点群データの最大値を割りあてた(例えばHyypä and Inkinen, 1999)。メッシュサイズは、既存研究を参考にして25cmの場合(例えばLindberg *et al.*, 2010; Gleason and Im, 2012; González-Ferreiro *et al.*, 2013)と50cmの場合(例えばGonçalves-seco *et al.*, 2011; Packalén *et al.*, 2013; Zhen *et al.*, 2015)を考え、それぞれのメッシュサイズのDCHMと点群データであるCHMのパーセンタイル値を1~100まで算出し、(1)両者の線形関係と(2)差分値についてそれぞれPassing-Bablok回帰分析(誤差項に等分散性・正規性などの仮定を置かないノンパラメトリックな回帰分析手法の一つ)(Passing and Bablok, 1983)と箱ひげ図を利用して調べた。

III. 結果

分析(1)の結果の例として、1, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 90, 100パーセンタイルについて、CHMと25cmメッシュDCHMの関係を図-2に、CHMと50cmメッシュDCHMの関係を図-3にそれぞれ示す。25cmメッシュの場合(図-2)、回帰直線の傾きとデータのばらつきに着目すると、1パーセンタイル値では、傾きが1より小さくばらつきも大きい、5パーセンタイル値以上になれば傾きはほぼ1とみなされ、なおかつばらつきはパーセンタイルの上昇とともに小さくなっていく様子がわかる。50cmメッシュの場合(図-3)も25cmメッシュの場合と似た傾向を示すことがわかるが、傾きの変動とデータのばらつきは25cmメッシュの場合に比べるとやや大きいことがわかる。

分析(2)の結果を図-4(25cmメッシュ)および図-5(50cmメッシュ)に示す。25cmメッシュの場合、パーセンタイルが上昇するにつれて多少の増減はあるものの、差分値(DCHM-CHM)は緩やかに減少する傾向があり、50パーセンタイル付近の差分値は30cm前後、99パーセンタイル付近で20cm前後の値になっている様子がわかる。50cmメッシュの場合も25cmメッシュの場合と似た傾向を示すことがわかるが、50パーセンタイル付近の差分値は70cm前後、99パーセンタイル付近で40cm前後であることから、この差分値の減少率(パーセンタイルの増加量に対する差分値の減少量の比率)は25cmメッシュの場合の減少率と比べて3倍程度大きいことがわかる。

IV. 考察

分析 (1) の結果 (図 - 2, 3) では, 1 パーセント付近では CHM と DCHM の線形関係がやや不明瞭であるが, パーセントが上昇するにつれて線形関係は極めて明瞭になることがわかる。これは, パーセントが低いデータは立木の樹冠下部 (樹冠底の付近 ≒ 樹冠領域の境界付近) を表現し, それよりパーセントが高いデータは樹冠のより上部を表現することを考えれば, 樹冠下部では樹冠上部よりもメッシュ化の際のメッシュ内の点群データの高さにばらつきが大きいことに納得がいく。また, 低いパーセントを除き, 回帰直線の傾きはどのパーセントでもほぼ 1 でありなおかつ回帰直線の切片が 0 ではないことは (理論的に 100 パーセントの時のみ切片が 0), 各コードラートの立木サイズとは無関係に一定のバイアスが DCHM と CHM の間に存在することを意味している。さらにこのことは, 分析 (2) の結果 (図 - 4, 5) の各パーセントにおける差分の中央値 (箱の中の黒い横線) が分析 (1) の回帰直線の切片の大きさとほぼみなせることを示唆している。したがって, 分析 (2) の結果において 25 cm メッシュの場合は差分値 (≒ バイアス) の減少率が緩やかでなおかつ高いパーセント (例えば 50 パーセント以上 100 パーセント未満) では DCHM と CHM の差はおおよそ 20 cm ~ 30 cm の間であるため, DCHM のパーセント値から単純に 25 cm 程度引くことで CHM のパーセント値に近づけることができる。

一方, 50 cm メッシュの場合は, 差分値 (≒ バイアス) の減少率が比較的大きく (25 cm メッシュの場合の減少率の 3 倍程度) なおかつ高いパーセントでは DCHM と CHM の間に 40 cm ~ 70 cm 程度の違いがあることから, この大きさのバイアスが無視できない場合は補正式を作成して DCHM のパーセント値を補正することになるであろう。しかしながら, 25 cm にメッシュ化した場合 (20 cm ~ 30 cm 程度の差) は元データの容量の $1/2.63$ 倍, 50 cm にメッシュ化した場合 (40 cm ~ 70 cm 程度の差) は元データの容量の $1/10.5$ 倍にそれぞれ減らされることから, 各メッシュサイズでのバイアスが無視できる場合は, 高密度点群データのメッシュ化の利点は大きいといえる。

本研究では, スギのある列状間伐林分を対象に高さのパーセント値に着目した分析を行い, DCHM と CHM の間に一定の正のバイアスが生じること, またメッシュサイズによってそのバイアスの大きさが異なることが示された。バイアスが正であることは, メッシュ化の際にメッシュ内の点群データの最大値を割り当てていることに起因する。25 cm メッシュと 50 cm メッシュとでバイアスの大きさが異なるのは, メッシュサイズをより大きく設定することで 1 メッシュあたりに含まれる点群データ数が増加しその中のより高い値で DCHM が構成されることに起因する。メッシュサイズによるバイアスの違いは, 樹冠頂角が本研究で対象としたスギ林分より小さいスギ林分ではより顕著になると予想され, 逆に樹冠頂角がより大きい他のスギ林分あるいは樹冠頂角がスギよりも大きな樹種の林分では, より隠微になると予想されるが, その実証は今後必要であろう。

レーザ計測密度の高密度化は現在の技術水準では時間的・金銭的成本の増大につながるため, 研究レベルではなく実務レベル

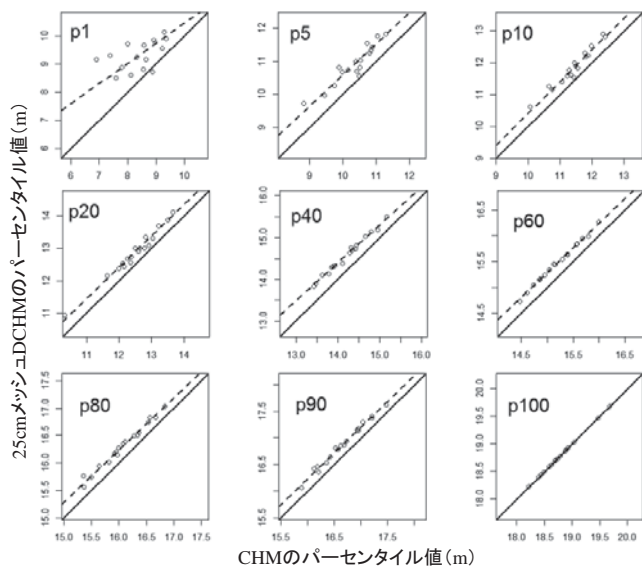


図 - 2. CHM のパーセント値と 25 cm メッシュ DCHM のパーセント値の関係 (点線は回帰直線)

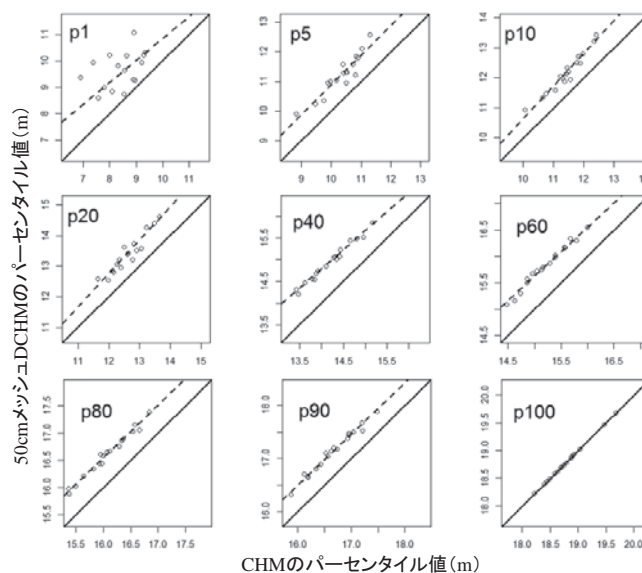


図 - 3. CHM のパーセント値と 50 cm メッシュ DCHM のパーセント値の関係 (点線は回帰直線)

で林分因子推定のためだけに航空機 LiDAR を利用する場合に, 高密度化が今後どこまで進むかはわからないが, 例えばスウェーデンでは 10 万 ha 以上の森林を対象に 10 点/m² 以上の航空機 LiDAR 計測を行って林分因子を推定する商業プロジェクトが少なくとも 5 年以上前から行われている (Lindberg *et al.*, 2010)。また, 近年急速に発展している UAV-LiDAR を利用した Wallace ら (2012) の研究では, 使用した UAV の飛行可能時間は 3~5 分程度と短いシステムではあるものの, 約 5,000-6,000 m² のエリアを約 36 点/m² ~ 約 63 点/m² のレーザ計測密度で LiDAR 計測することが技術的に可能であることが示されている。これらのことから, 航空機 LiDAR や UAV-LiDAR の計測技術が今後さらに発展することで, 大容量の高密度の点群データを我々エンド

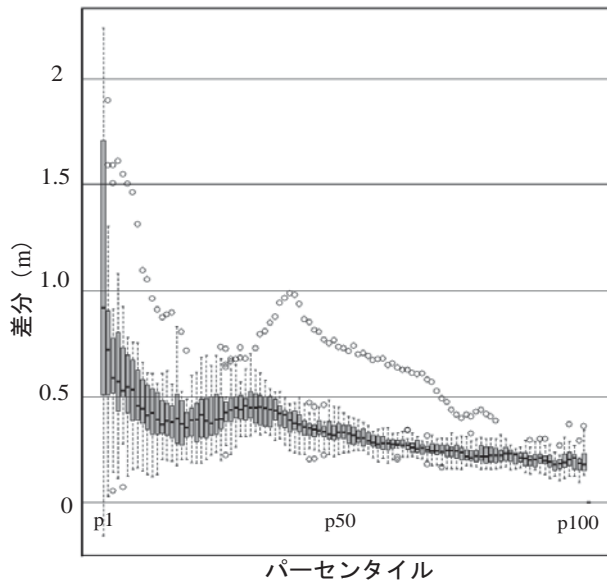


図-4. 25 cm メッシュ DCHM のパーセンタイル値と CHM のパーセンタイル値の差分 (DCHM-CHM)

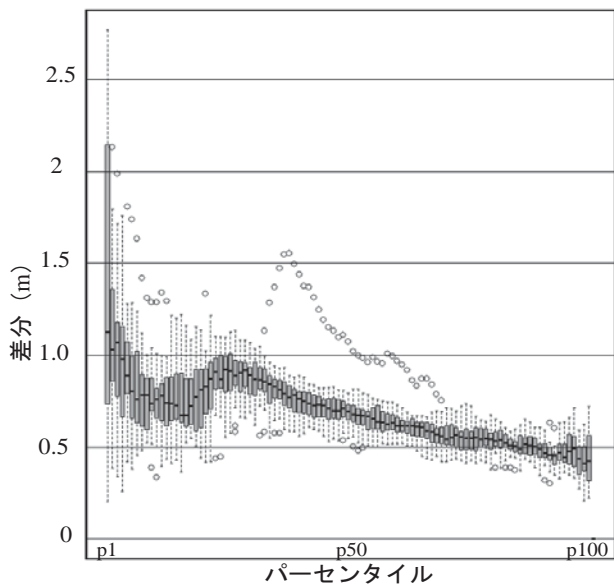


図-5. 50 cm メッシュ DCHM のパーセンタイル値と CHM のパーセンタイル値の差分 (DCHM-CHM)

ユーザが扱う場面が増える可能性が考えられる。本研究で得られた知見がその際に有益な情報になるかもしれない。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (15 K 07499) の助成を受けて行った。

引用文献

Andersen HE *et al.* (2006) *Can J Rem Sens* 32: 355-366
 Bollandsås OM and Næsset E (2007) *ScandJ For Res* 22: 33-47
 Bouvier M *et al.* (2015) *Rem Sens Environ* 156: 322-334
 Bian Y *et al.* (2014) *Can J Rem Sens* 40: 152-163
 Chen Q *et al.* (2006) *Photogramm Eng Rem Sens* 72: 923-932
 Erdody TL and Moskal LM (2010) *Rem Sens Environ* 114: 725-737
 Ene L *et al.* (2012) *Int J Rem Sens* 33: 5171-5193
 Gleason CJ and Im J (2012) *Rem Sens Environ* 125: 80-91
 Gobakken T and Næsset E (2005) *ScandJ For Res* 20: 490-502
 Gonçalves-Seco L *et al.* (2011) *Int J Rem Sens* 32: 9821-9841
 González-Ferreiro E *et al.* (2013) *Int J Rem Sens* 34: 7671-7679
 Hopkinson C *et al.* (2008) *Rem Sens Environ* 112: 1168-1180
 Hyypä J and Inkinen M (1999). *Photogramm J Fin* 16: 27-42
 Lim KS and Treitz PM (2004) *Scand J For Res* 19: 558-570
 Li W *et al.* (2012) *Photogramm Eng Rem Sens* 78: 75-84
 Lin C *et al.* (2011) *Photogramm Eng Rem Sens* 77: 241-249
 Lindberg E *et al.* (2010) *Int J Rem Sens* 31: 1175-1192
 Maltamo M *et al.* (2004) *Can J For Res* 34: 1791-1801
 Maltamo M *et al.* (2006) *Scand J For Res* 21: 231-238
 Montagni A (2013) *Can J Rem Sens* 39: 152-173
 Næsset E (2004 a) *Rem Sens Environ* 91: 243-255
 Næsset E (2004 b) *ScandJ For Res* 19: 164-179
 Næsset E and Gobakken T (2005) *Rem Sens Environ* 96: 453-465
 Næsset E (2011) *Int J Rem Sens* 32: 473-501
 Packalén P and Maltamo M (2007) *Rem Sens Environ* 109: 328-341
 Packalén P *et al.* (2013) *Int J Rem Sens* 34: 5154-5165
 Passing H and Bablok W (1983) *J Clin Chem Clin Biochem* 21: 709-720
 Peduzzi A *et al.* (2012) *For Ecol Manage* 270: 54-65
 Popescu SC *et al.* (2004) *For Sci* 50: 551-565
 Popescu SC and Zhao K (2008) *Rem Sens Environ* 112: 767-781
 Salas C *et al.* (2010) *Rem Sens Environ* 114: 1277-1285
 Stephens PR *et al.* (2012) *Rem Sens Environ* 117: 348-357
 Swetnam TL and Falk DA (2014) *For Ecol Manage* 323: 158-167
 Vauhkonen J (2010) *Int J Rem Sens* 31: 1213-1226
 Wallace L *et al.* (2012) *Rem Sens* 4: 1519-1543
 Yu X *et al.* (2010) *Rem Sens* 2: 1481-1495
 Zhen Z *et al.* (2015) *Int J Rem Sens* 36: 1965-1993
 (2015年11月20日受付; 2016年2月2日受理)