短 報

ヤマハンノキの一斉林における地上型レーザースキャナを使用した
樹高推定嶋田 知 帆^{1,*}・長 島 啓 子¹Estimation of tree height using terrestrial laser scanning at a mono-layered
Alnus hirsuta forestChiho Shimada^{1,*} and Keiko Nagashima¹

嶋田知帆・長島啓子：ヤマハンノキの一斉林における地上型レーザースキャナを使用した樹高推定，森林計画誌54：31～36, 2020 本研究では，高密度なヤマハンノキの一斉林を対象に，地上型LSを使用して樹高の単木レベルの推定を試みた。得られた点群データから，①幹の中心を推定し，中心点から発生したバッファ内の最高Z値を樹高として推定する方法と，②局所最大値法によって樹高を推定する方法の2つの方法で樹高の推定を行った。この結果，両方法とも単木レベルでは現地の実測樹高との相関はなく，樹冠上部のノイズの除去や幹の曲がりへの対応を行うことで，精度の向上が期待された。一方，実測樹高と方法②の平均樹高の間に有意差はなかったことから，林分の平均樹高を推定する上では，方法②が有効である可能性がある。

Chiho Shimada and Keiko Nagashima: Estimation of tree height using terrestrial laser scanning at a mono-layered *Alnus hirsuta* forest. Jpn. J. For. Plann. 54: 31~36, 2020 To estimate the tree height at a single tree level by using a terrestrial laser scanning, we scanned a high-density mono-layered *Alnus hirsuta* forest. Using the point cloud data generated from this scan, tree height was estimated by two methods: (1) extracting the maximum Z height inside the buffer height from the center of the stem, and (2) extracting tree height data using the local maximum filtering (LMF) method. The results of method (1) and (2) showed no correlation in the height among the investigated trees, where the improvement of accuracy at a single tree level was expected by removing the noise above the tree crown and that corresponding to bent stems. On the other hand, no significant difference in mean height was found among the investigated trees by using method (2). Therefore, there is a possibility that method (2) is effective for estimating mean tree height.

I. はじめに

近年，全国的に広葉樹の資源量を把握する機運が高まっており，その理由の一つが，再生可能エネルギーへの注目の高まりを受けたバイオマス発電への期待である（高田ら，2018）。さらに，バイオマス発電に限らず，広葉樹資源の有効利用を進めるために，多様な用途を想定して，利用可能な広葉樹の資源量を把握す

る必要がある（奥田ら，2017）。また，広葉樹林再生を実施した造成斜面や伐採後の裸地斜面において，モニタリング調査を実施することは，再生手法の有効性を検証する上で重要な意味を持つ。そのような中，森林内の情報を取得する新たな手法として，地上型レーザースキャナ（以下，地上型LS）への注目が高まっている。地上型LSとは，機器から照射されたレーザーパルスのうち，物体から反射されたレーザーパル

* 連絡先（Corresponding author）E-mail: chiho.s.466@gmail.com

1 京都府立大学大学院生命環境科学研究科（606-8522 京都府京都市左京区下鴨半木町1-5）

Graduate school of Life and Environmental Sciences, Kyoto Prefectural University, 1-5 Hangi-cho, Shimogamo, Sakyo-ku, Kyoto 606-8522, Japan

スを取得する計測機器であり、これにより対象範囲の3次元座標データ（点群データ）を得ることができる。この技術により、植生を破壊することなく現地調査を効率化し、計測誤差を軽減することが期待されている（加藤ら, 2014b）。これまで、地上型LSから取得した点群データを使用して、資源量を把握する際や、モニタリングを実施する際の調査項目である樹高や胸高直径を推定した研究例は多くある（Hopkinson et al., 2004; 加藤ら, 2014b; Király and Brolly, 2007; Tansey et al., 2009; 戸田ら, 2009; Watt and Donoghue, 2005）。しかし、これらの研究は梢端が広葉樹林と比べると明瞭である針葉樹林や、広葉樹林であっても立木同士の樹冠の間に空間のある低密度な森林を中心に行われており、高密度な広葉樹林において樹高や胸高直径を単木レベルで把握した例はない。このことから、本研究では、立木密度が4,000本/haを超える高密度なヤマハンノキの一斉林を対象に、地上型LSを使用して単木レベルでの樹高推定を試みた。

II. 研究対象地

研究対象地は、標高約1,300mに位置する1割8分勾配の岐阜県高山市あかんだな駐車場道路法面である（図-1）。高山市は寒冷多雪地であり、1981年から2010年の年平均気温は11.0℃、年平均降水量は1,699mmである（気象庁, 2019）。あかんだな駐車場は安房峠道路事業の一環として1997年に開通した安房トンネルの岐阜県側に位置し、トンネルの開通に伴い造成された駐車場であり、一年を通して多くの観光客や登山客が利用する。1990年5月、駐車場の道路法面を緑化する目的で、研究対象とした斜面には播種工が導入され、イタチハギ（*Amorpha fruticosa* L.）、カヤ（*Torreya nucifera* (L.) Siebold et Zucc.）、メドハギ（*Lespedeza juncea* (L. f.) Pers. var. *subsessilis* Miq.）、オーチャードグラス（*Dactylis glomerata* L.）、チモシー（*Phleum*

図-1 研究対象地（髙田ら（2015）を改変）

pratense L.), ヤマハンノキ (*Alnus hirsuta* Turcz. var. *sibirica* (Fischer) C. K. Schn.), ヨモギ (*Artemisia princeps* Pamp.) の計7種類の植物が吹き付けられた。髙田ら（2015）の報告によると、2013年に研究対象地において行われた調査から、吹き付けられた7種類の植物のうちヤマハンノキ以外は消失しており、下層に高茎草本群落が優占するヤマハンノキの一斉林が成立していた。

III. 方法

1. 現地調査

1.1 毎木調査

法面に10m×10mのプロットを連続して4つ設置し、その内部で調査を行った。0.5m以上の木本植物を対象に、コンパス測量により位置図を作成し、樹高(m)及び根元を起点とした8方向の樹冠幅を測定した。位置図の作成は2012年6月、樹冠幅の測定は2013年6～8月、樹高の測定は2016年7～8月に行った。樹高はVertex 4（Haglof社）を用いて計測した。なお、位置図の作成及び樹冠幅の測定は著者らが過去に実施したものであり（髙田ら, 2015）、樹高及び地上型LSの調査時期（1.2）と異なるが、2012年作成の位置図で示された個体の生存及びその位置に変化がないことを2016年調査時に確認しており、本研究の解析に影響はないものと判断した。

毎木調査の結果、16種、166本（4200本/ha）の木本植物が確認され、平均樹高は9.2mであった。このうち、ヤマハンノキは89本確認され、平均樹高は14.7mであった。また、9.0m以上の個体はすべてヤマハンノキであり、高木層をヤマハンノキが優占していた。

1.2 地上型LSによる測量

使用した地上型LSはFOCUS^{3D} X330（FARO社製）である（表-1）。2016年8月、プロットの全体を外周するように、林内の見通しがきく任意の16か所の測点から、表-1の設定に基づき地上型LSによる測量を実施した。取得した点群データは、点群データ処理ソフトウェアであるTrimble RealWorksに読み込み、まずは不要な点群データの処理（研究対象地の範囲外の点や重複した点の処理）を行った。次に、基準球（スフィア）を基に点群データを合成し、既知の座標を利用して合成後の点群データを公共座標に合わせた。なお、実際の測量と点群データの処理は西尾レントオール(株)へ委託し、本研究では処理後の点群データ（83, 236, 337点）を使用した（図-2）。

表-1 FOCUS^{3D} X330の諸元と計測時の設定

諸元	計測範囲 (m)	0.6~330
	垂直視野角	300°
	水平視野角	360°
	計測精度 (mm)	± 2
	レーザークラス	クラス 1
	レーザー波長 (nm)	1,550
	ビーム幅 (mrad)	0.19
計測時の設定	分解能	1 / 4
	品質	4 x
	露出測定モード	水平加重測定

図-2 点群データにRGBを割り当てた図

2. 解析方法

2.1 樹高推定

点群データから樹高を推定するまでの手順を図-3に示す。本研究では、①幹の中心を推定し、中心点から発生したバッファ内の最高Z値を樹高として推定する方法(図-3, 1-(a)~(e))と、②局所最大値法により樹高を推定する方法(図-3, 2-(a), 2-(b))の2つを試みた。なお、図-3における「ArcGIS」はGISソフトウェアArc GIS 10.7(ESRI社)を、「Fusion/LDV」はLiDAR (Light Detection And Ranging) デー

タの解析用フリーソフトウェア Fusion/LDV 3.8のことを指す。

まず、①の方法では、1.1に記載した現地調査から取得した樹高をもとに樹高階別本数分布図を作成した。分布図は二山分布を示したことから、低い方の山の最高値(山の右端)である5.5mを低木層の上限値とし、高木層に優占するヤマハンノキの樹幹を抽出するために、幹の太さを最も確保できる範囲である5.5mから5.6mの範囲で点群データを抽出した(図-3, 1-(a))。抽出された点群データのうち、円形を示し、明らかに幹であると認識できる点群に対して円の中心にポイントを目視で設置したところ(図-3, 1-(b))、50個体分のポイントが設置された。これらのポイントの位置を、1.1で作成した位置図と照らし合わせた結果、50個体分のポイントのうち、35個体分のポイントが現地の調査対象木と同一個体であると推定できた。このため、②の方法を含め、以後の解析はこの35ポイントを対象に実施した(図-3, 1-(c))。1.1の現地調査から、ヤマハンノキの樹冠幅(半径)の平均値が1.58mであったことから、各ポイントから半径1.5mのバッファを発生させ(図-3, 1-(d))、バッファ内の最高Z値を推定樹高とした(図-3, 1-(e))。

②の方法では、Fusion/LDVに装備されている局所最大値法を使用して樹頂点を抽出した(図-3, 2-(a))。コマンド名はCanopyMaximaであり、任意のフィルターの種類やウィンドウサイズ、セルサイズで作成された数値表層モデル(DSM)または数値樹冠高モデル(DCHM)を対象に実行される。本研究における最適な組み合わせを検討した結果、現地に存在する10m以上のヤマハンノキの本数(72本)と最

図-3 解析の手順

も近い本数である84本を抽出した組み合わせのDSMを採用した。なお、このDSM作成にあたっての組み合わせは、フィルターの種類が中央値フィルター、ウィンドウサイズが10ピクセル、セルサイズが0.1mであった。また、局所最大値法のセルサイズはDSMと同様に0.1mであり、ウィンドウサイズは各セル内の表層高に基づきFusion/LDVによって自動的に決定される。抽出された84本の樹頂点うち、①の方法で使用した35個体の位置と最も距離の近い樹頂点を同一個体として扱い、樹頂点の高さを推定樹高とした(図-3、2-(b))。

2.2 精度評価

方法①と②それぞれの35個体の推定樹高と、これらと同一個体であるとみなした調査対象木の実測樹高とを対応させ、相関係数を算出した(図-3、3-(a)、3-(b))。また、方法①と②の間の相関係数も算出し(図-3、3-(c))、加えて方法①と②の推定樹高とそれぞれ対応する実測樹高との間で差分を求め、差分同士の相関係数を算出した(図-3、3-(d))。さらに、実測樹高との誤差を評価するために、方法①と②で推定された樹高のRMSE(式(1))をそれぞれ算出した。RMSEは真値からの誤差を示すものであり、値が0に近いほど推定精度が高いと判断できる(大野ら、2011)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1)$$

ただし、N：全立木本数、 y_i ：個体*i*の実測樹高、 $\bar{y}_i$ ：個体*i*の推定樹高である。

また、現地の実測樹高と方法①、②の3者の平均樹高に有意差があるかどうかを検証するために、これまでの解析で使用した35個体を対象に、Scheffeの多重比較を行った。

IV. 結果と考察

現地調査で確認されたヤマハンノキの本数は89本である一方、方法①において円形として認識でき、幹として抽出した個体は50本であった。本研究のように点群データを断面状に抽出する報告例はあるが(遠藤ら、2012; Hopkinson et al., 2004)、照射されたレーザーが樹幹の全方向にあたっていないことや、側枝や低木層の影響により点群データが円形として抽出されない場合があり、本研究も同様の理由により全個体が抽出できなかったと考えられる。

現地の実測樹高と、方法①と②の推定樹高の相関係数はそれぞれ-0.22 ($P=0.20$)、-0.19 ($P=0.28$)

であり、方法①、②ともに実測樹高との間に有意な相関関係はなかった(図-4-(a)、(b))。さらに、両方法ともに実測樹高との樹高差が0mであることを示す $y=x$ から正負それぞれの方向に大きくばらついており、RMSEを算出した結果、実測樹高と方法①の間で3.68m、方法②との間で3.39mと、両方の方法で3.0mを超えていた(図-4-(a)、(b))。この理由として、幹の傾きの影響が挙げられる。方法①と②の両方で、実測樹高との差が大きかった個体をみると、5.6m以上の高さで幹が曲がり、斜面上部の個体が本来抽出すべき個体を被覆しているものが見受けられた(図-5-(a))。つまり、方法①と②では、樹高を実測した個体(幹の中心点を推定した個体)を被覆している斜面上側の個体の樹頂点が誤って抽出される場合があると考えられた。齋藤ら(2015)は幹の垂直性を前提とした幹の抽出方法の問題点を指摘しており、その問題点を解決するためにワイヤーフレーム法で幹の形状を再現している(齋藤ら、2016)。しかし、本研究で対象としたような高密度の広葉樹林で同様の手法を試した例はなく、今後の課題として挙げられる。このとき、特に落葉広葉樹林の場合は、加藤ら(2014a)が述べているように、落葉期にレーザー測量を実施するなどの工夫が、推定精度を向上する上で重要になると言える。

一方、方法①と②の間には0.89と有意に高い相関が確認された($P<0.01$)(図-4-(c))。さらに、現地の実測樹高と方法①と②の各推定樹高との間の差分を求め、差分同士の相関係数を算出した結果、0.99と有

図-4 樹高推定結果

(a) Relationship of investigated trees and method (1), (b) Relationship of investigated trees and method (2), (c) Relationship of method (1) and (2), (d) Differences between the investigated trees.

(a) 上部の個体が被覆しているタイプ (b) 樹頂点がバッファ内に収まっているタイプ

図-5 方法①により抽出した2タイプの個体(1)

(a) Investigated tree covered by the tree at the upper side, (b) Tree top inside the buffer.

意に高い相関が確認された ($P < 0.01$) (図-4-(d))。これらのことから、方法①と②のそれぞれで同じ樹冠を捕捉している可能性が示された。実際に、方法①で使ったバッファの中心点(推定した幹の中心点)と、方法②で抽出した樹頂点の距離の平均値は 0.98 ± 0.48 m であり、方法②で抽出した樹頂点は方法①で使ったバッファサイズ(1.5m)内に収まっていると考えられた。このため、方法①と②で捕捉している樹冠は同一であり、図-5-(b)のように両者の樹頂点は近距離にあると考えられる。

現地の実測樹高と方法①、②の三者の平均樹高を使用して Scheffe の多重比較を行った結果、方法①の平均推定樹高(18.24m)が実測樹高(16.97m)と方法②(17.17m)の平均推定樹高より有意に高かった(表-2)。方法①の平均推定樹高が実測樹高より高かった理由として、単木レベルでの樹高推定に与えた影響と同様、幹の曲がりやが挙げられる。樹高を実測した個体を被覆し、推定樹高として誤抽出された斜面上側の個体の最高Z値の方が、本来抽出すべき個体の実測樹高と比べ全体的に高く、このことが平均樹高を高くした可能性が高い。他の理由として、樹冠上部の点群であるノイズの影響が挙げられる。方法①ではバッファ内の最高Z値を抽出していることから、図-5-(b)のように樹冠上部のノイズのうち、最高Z値をもつ点のZ値が推定樹高とみなされ、このことが平均樹高の高さに少なからず影響を与えた可能性はある。そのため、手動での除去を含めた樹冠上部のノイズの処理は、方法①による樹高の精度を上げることに寄与すると考えられる。実際に、Hopkinson et al. (2004)も樹高を推定する方法として、点群データの

表-2 多重比較検定の結果

組み合わせ		P 値
実測樹高	方法①	0.04*
実測樹高	方法②	0.98
方法①	方法②	0.03*

* : $P < 0.05$

最高Z値を使用しているが、処理の過程でノイズを手動で除去しており、戸田ら(2009)も同様に手動でノイズの処理を行っている。

一方、実測樹高と方法②の平均樹高の間に有意差はなかった($P = 0.98$) (表-2)。方法②も方法①と同様、幹の曲がりの影響を受けているものの、方法②ではDSMを作成する過程で樹冠上部のノイズが処理されるため、方法①より平均樹高が小さく算出されたと考えられる。実際に、方法②の方が方法①と比べて全体的に樹高が低い傾向であった(図-4-(c))。このように、単木レベルで精度を向上させるためには幹の曲がりが課題となるが、林分全体の平均樹高を予測するという点においては、方法①よりも現地を反映し、解析の手順も少ない方法②が有効である可能性が示唆された。今後、林分全体の平均樹高を推定する上で方法②の有効性が示されれば、方法②はFusion/LDVというフリーソフトを使用していることから、簡便でより安い価格で林分の平均樹高を推定するという点においても、方法①より優位性が高くなる可能性がある。

以上のことから、本研究の方法を用いて、単木レベルで高密度な広葉樹林の樹高を推定することの難しさが示されたが、林分全体の平均樹高を推定する上での方法②の有効性までは否定できない。しかし、方法①において樹冠上部のノイズの除去を、また、方法①と②の両者において幹の抽出方法の改善を行うことで、精度の向上が期待された。さらに、今後はより多くの樹種で構成される複層林においても樹高推定の有効な手法を検討することで、地上型LSを使用した広葉樹林の樹高推定に寄与できると考えられる。

引用文献

- 遠藤貴宏・中村裕幸・澤田義人・沢田治雄(2012) 地上LiDARによる樹幹太さの推定に関する研究。生産研究64(4), 585-589.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C. and Treitz, P. (2004) Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. Can. J. For. Res. 34(3), 573-583.
- 加藤顕・石井弘明・榎木勉・大澤晃・小林達明・梅木清・佐々木剛・松英恵吾(2014a) レーザーリモー

- トセンシングの森林生態学への応用. 日林誌 96, 168–181.
- 加藤顕・安藤祐樹・吉田俊也・梶原康司・本多嘉明・小林達明 (2014b) 簡易型地上レーザーを用いた毎木調査法. 日緑工誌40(1), 136–141.
- Király, G. and Broly, G. (2007) Tree height estimation methods for terrestrial laser scanning in a forest reserve. IAPRS. 36 (3/W 52), 211–215.
- 気象庁. “過去の気象データ検索”. 気象庁ホームページ. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照: 2019年10月1日).
- 奥田史郎・山下直子・中尾勝洋・諏訪鍊平・田中真哉・高橋裕史・加藤顕・宮浦富保 (2017) 滋賀県落葉広葉樹二次林に優占するコナラの用途別材積の推定. 日本森林学会大会発表データベース128(0), 556.
- 大野恭兵・香西克俊 (2011) 合成開口レーダ・散乱計及びメソ気象モデルを用いた洋上風力資源評価法に関する文献レビュー. 神戸大学大学院海事科学研究科紀要8, 59–65.
- 齋藤和人・丹羽健・増田宏 (2015) 三次元大規模点群に基づく樹木の形状再構成. 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会公演論文集, 65–66.
- 齋藤和人・増田宏・平岡裕一郎・松下通也・高橋誠 (2016) 三次元大規模点群に基づく樹木の形状再構成第3報. 2016年度精密工学会秋季大会学術講演会公演論文集, 489–490.
- 寫田知帆・榊原菜々・長島啓子・高田研一・田中和博 (2015) 播種工と自然配植技術による植栽工が20年間で形成する群落構造の違い. 日緑工誌40(4), 547–554.
- 高田秀之・望月亜希子・中西修一・土肥哲哉 (2018) 森林資源調査による小規模バイオマス発電プロジェクトの可能性. 環境情報科学学術研究論文集 32, 67–72.
- Tansey, K., Selmes, N., Anstee, A., Tate N. J. and Denniss, A. (2009) Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data. Int. J. Remote. Sens. 30 (13), 5195–5209.
- 戸田健太郎・中村彰宏・大藪崇司・前中久行 (2009) 地上型レーザスキャナを用いた3次元環境計測における樹高の推定. 日緑工誌35(1), 69–74.
- Watt, P. J., Donoghue, D. N. M. (2005) Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. Int. J. Remote. Sens. 26(7), 1437–1446.

(2019年10月31日受付)

(2020年3月9日受理)