短 報

BLK360による森林調査手法とその精度

檜 原 幸 子¹・長 島 啓 子^{2,*}

Forest measurement by using BLK360 and its accuracy

Yukiko Narahara¹ and Keiko Nagashima^{2,*}

檜原幸子・長島啓子：BLK360による森林調査手法とその精度，森林計画誌54：23～29，2020 本研究では京都府立大学生命環境学部附属大枝演習林にて TLS の中で特に安価であり軽量の Leica 社の BLK360 を用いた毎木調査手法の検討を目的とした。半径11.3mの円形プロットに4箇所，7箇所，12箇所の3パターンで BLK360 を設置・計測し，毎木調査データと比較することで，立木本数，胸高直径，樹高の精度検証を行った。その結果，立木本数は高い精度で抽出され，胸高直径はプロットの外周7箇所から BLK360 で計測を行うことで，市場における丸太の単位寸法の2cm以下の誤差となり，十分な精度が得られた。一方，樹高は BLK360 の設置箇所を増やしても誤差が約-2.0m と十分な精度が得られず，今後の精度向上が課題となった。

Yukiko Narahara and Keiko Nagashima: Forest measurement by using BLK360 and its accuracy. Jpn. J. For. Plann. 54: 23~29, 2020 This study aims to identify a forest measurement method using BLK360, which is one of the most low-priced and lightest terrestrial laser scanners (TLS); furthermore, it aims to investigate its accuracy. Using the scan data of BLK360, three patterns of cloud data were established for an 11.3 m radius circular plot, using the scanning data of 4, 7, and 12 installation locations. Tree numbers, diameter at breast height (DBH), and tree height were calculated based on the established cloud data and compared with the data obtained by a field survey. As a result, the number of trees was extracted with high accuracy. The DBH error was less than 2 cm using the cloud data established from the scanning data of more than 7 installation locations. However, the tree height error was approximately -2 m even if the number of installation locations increased. Improving tree height accuracy is, therefore, an issue that needs to be solved to use BLK360 for forest measurement.

I. はじめに

日本の人工林は，その半数が一般的な主伐期である50年生を越え，本格的な利用期を迎えており，森林の有する多面的機能を将来にわたって発揮させていくためには循環利用していくことが重要である（林野庁，2018a）。林業経営において，施業計画，経営計画立案には，森林の詳細な情報を得る必要があり，特に伐期を迎える林分について，単木単位での立木幹材積

や位置情報等，詳細な情報が得ることが出来れば，伐採・搬出にかかるコストと収益を算出することが可能となり，より確実な計画が立案できる（伊藤ら，2011）。しかしこのような林分の詳細な情報はこれまで毎木調査又は標本調査等により計測しており，多大な労力とコストを要してきた。

このような中，近年では地上レーザーや航空レーザーによる計測技術が導入されてきている（林野庁，2017）。航空レーザースキャナ（以下 ALS）は上

* 連絡先（Corresponding author）E-mail: nagakei@kpu.ac.jp

1 京都府立大学生命環境科学部森林科学科（606-8522 京都府京都市左京区下鴨半木町1-5）

Department of Forest Science, Faculty of Life and Environmental Sciences, Kyoto Prefectural University, 1-5 Hangi-cho, Shimogamo, Sakyo-ku, Kyoto 606-8522, Japan

2 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

空から広範囲のデータを取得できるが、データから計測できる森林情報は樹冠形状や樹高、単木位置（本数）などに限られる。一方で地上型レーザースキャナ（以下 TLS）は航空機より計測範囲は狭いがレーザーの密度は高く、単木位置、幹の形状、胸高直径、樹高が計測でき、毎木調査の代わりに導入し省力化する試みが行われている。例えば、山口県のスマート林業実践対策地域協議会では協議会員の事業地11.2haを、OWL（アドイン㈱）を用い計測したところ、毎木調査より2.7倍の作業効率であったとされている（林野庁，2019a）。現在までに林内で計測に使われた TLS には森林計測に特化していない TLS のほかに、森林計測用に開発された OWL，3DWalker（㈱woodinfo）などがある。表-1 は林野庁が調査した代表的な TLS の一覧である。OWL や 3DWalker は森林計測の課題であった足場の悪い傾斜地への適応，人力で運ぶための軽量化，難しい専門知識なしに扱えることを解決するために開発されている。

しかしながら林業の現場における TLS の利用は未だ一般的ではない。現在利用されている TLS が高価であることも普及していない 1 つの要因である。森林計測に用いられる TLS は約400万円から1000万円とされている（林野庁，2019b）。本研究では現在発売されている TLS の中で特に安価である Leica 社の BLK 360を用いて、森林計測手法を検討することを目的とした。BLK360は従来の TLS の価格の半額から3分の1程度の価格であり、重量も1kgと軽量である。これは軽量化を目指した OWL の3.7kgと比べてもかな

り軽く、サイズはペットボトルより少し太い程度である。また計測に必要な機材（三脚・バッテリー・iPad）のすべてを合わせても十分に1人で運ぶことが可能と考えられる。BLK360の利用が可能になれば毎木調査の代わりとしての TLS の利用がより普及すると期待できる。本研究では効率的かつ必要な精度が確保できる計測手法を検討するため BLK360の設置箇所数を変化させ、本数密度・直径・樹高の計測精度を調べた。

Ⅱ. 研究対象地および使用したレーザースキャナとソフト

1. 調査地

調査は京都府立大学の大枝演習林内の40年生ヒノキ林に半径11.3mの円形プロットを1つ設置し調査を行った（図-1）。当演習林は京都府京都市西京区大枝沓掛町の標高130mから330mにあり、面積は116.32haである。地質は秩父古生層で気象条件は平均気温15.7度、降水量1650mmである（京都府立大学生命環境学部附属演習林，2019）。なおプロットの林床には伐倒後の丸太が散在し、部分的に下層植生（約2m

図-1 京都府立大学大枝演習林 プロット設置箇所

表-1 地上レーザー計測器一覧

機器名	メーカー	最大計測距離 (m)	稼働時間 (hour)	重量 (kg) (バッテリー無)
FOCUS ^{S350}	FARO	350	4.5	—
FOCUS ^{S150}	FARO	150	4.5	—
FOCUS ^{S350}	FARO	70	4.5	—
FOCUS ^{3D X330HDX}	FARO	330	4.5	5.2
FOCUS ^{3D X130HDX}	FARO	130	4.5	5.2
BLK360	Leica	60	—	1
ScanStation C10	Leica	300	3.5	13
Pegasus : Backpack	Leica	100	3	20
VZ-400i	RIEGL	800	—	9.7
VZ-400	RIEGL	600	—	9.6
GLS-2000	TOPCON	500	2.5	10
GLS1500	TOPCON	500	4	16
TX 8	Trimble	120	2	10.7
TX 6	Trimble	80	2	10.7
OWL	アドイン研究所	30	4.0～6.0	3.7
3DWalker	(株)woodinfo	100	1.5～3.0	5

※本表は林野庁（2018，2019b）に基づき作成したものである。

以下) がある状態であった。

2. 使用した TLS

BLK360 (Leica 社) は小さく軽量で、安価なイメージングレーザースキャナーであり、諸元は表-2に示す。販売価格は約250万円である。屋内、半屋外を想定して作られ、森林での使用を想定しておらず、森林計測を目的とした利用は十分に試されていない。

表-2 TLS の諸元
Leica BLK360

計測精度 測距精度	4 mm@10m/ 7 mm@20m
計測精度 座標制度	6 mm@10/ 8 mm@20m
スキャンレンジ	0.6~60m
測定点数	36万点/秒
スキャン範囲	水平: 360° 鉛直: 300°
点密度	Low: 20mm@10m Normal: 10mm@10m High: 5 mm@10m
レーザ波長	830nm
寸 法	直径: 165mm/幅100mm
重 さ	1 kg

※本表は Leica (2019) を基に作成したものである。

Ⅲ. 研究方法

1. 研究の流れ

TLS を毎木調査の代わりに採用するためには効率的かつ必要な精度を確保できる方法が必要である。そのためプロットに対し、なるべくスキャン箇所を減らしつつ、必要な精度を保つことが必要である。本研究ではプロットに対し、BLK360の設置箇所が4箇所のパターン1、7箇所のパターン2、12箇所のパターン3を用意し、それぞれのパターンから得られた抽出本数と胸高直径、樹高の精度を比較し、BLK360による毎木調査手法について考察した (図-2)。

図-2 研究の流れ

2. TLS データの取得

2019年8月8日に大枝演習林内に設置した半径11.3mの円形プロットにおいてBLK360を用いて計測を行った。計測にはBLK360のほか、30m メジャーと

自作のターゲットを使用した。ターゲットは本研究ではBLK360で計測したスキャンデータを相互に合成する際に位置関係を把握するための目印であり、赤白ボールに直径8cmのカラーボールをさしたものを使用した (図-3)。手動で合成するため、それぞれターゲットが判別できるようにすべて異なる色のボールを使用した。始めに30mのメジャーを十字にはり、目安とした。更にプロット内にターゲットを6本、なるべくすべてのBLK360設置予定箇所から見える場所に設置した (図-4)。図-4に示すように、BLK360をプロット内に5箇所、プロット外周から2mほど外側に8箇所設置した。また図-4の数字の順に中心から外周へと計測を行った。1箇所ごとのスキャン時間についても測定した。BLK360の操作はiPadのアプリLeica BLK360 ver. 1.2.2を用いて行った。点密度をhigh, normal, lowの3段階に調節できるが (表-2)、今回はnormalのみで計測を行った。当アプリには自動合成機能があったが、今回は林内で自動合成に必要な特徴を抽出できず自動合成ができなかった。

図-3 BLK360 (左) とターゲット (右)

図-4 半径11.3mのプロット

3. TLS データの合成

取得した点群データは調査地から持ち帰り、インポートした。その際図-4の⑨はインポートすることができなかったため、以後使用していない。インポートした点群データはCyclone REGISTER360 1.5.0 (Leica

社)を用いて手動で合成した。Cyclone REGISTER360は3次元点群データ処理ソフトである(Leica Geosystems, 2019)。手動合成は2箇所から取得した点群データを合成し、またそこに別箇所の点群データの合成を繰り返すという形で行った。12箇所計測した点群データのうち、図-3の6, 8, 10, 12の4箇所を合成したパターン1と6, 7, 8, 10, 11, 12, 13の7箇所を合成したパターン2, 1から13すべて(⑨を除く)の12箇所を合成したパターン3の3つを作成した。初めにデータ同士の垂直方向の高さを大まかに合わせ、プロット内に設置したターゲットを指定し、合成した。合成できた点群データはptxの形式でエクスポートし、CloudCompare 2.8を用いてDigital Forest 1.0.1.0(以下DF, (株)woodinfo)に対応したxyzの形式に変換した。Cloud Compareは公式ホームページから無償でインストールできる3次元点群データ処理ソフトである(Cloud Compare, 2019)。またDFは点群データから森林情報(地形, 流木情報, 径級, 樹高, 曲り, 幹材積)を生成することを目的として開発されたソフトである(中村ら, 2013)。

4. TLS データから立木情報の推定

得られたxyz形式のデータからDFを用いて胸高直径および樹高を算出するとともに立木位置図を作成した。DFでは「木と判断するための条件」というパラメータを設定し、条件を変えて立木情報を解析することが出来る。「DEM(地表面)からの高さ」は6レベルの高さで幹を探索することができる。例えば①2.00m, ②4.00m, ③6.00m, …というように設定できる。その設定した①~⑥のそれぞれの高さからの任意の垂直方向の範囲を「高さ範囲」で設定し、その範囲に任意の「点数」以上の点群があることで幹を判定している。この際、立木モデルとして①~⑥のどの高さレベルを用いて立木と判断するかを示すのが「木作成レベル」である。また「立木の最大直径」では、水平方向に連なる点群を探索する範囲を任意の小メッシュの個数までと設定できる(株)woodinfo, 2016)。なお、DFでは点群の連なりを任意の大きさの小メッシュ単位で解析を行っている。本研究ではパラメータはすべてデフォルトで行い、デフォルト値は「DEMからの高さ」が①2.00m ②2.50m ③3.00m ④3.50m ⑤4.50m ⑥6.00m, 「点数」が4点以上, 「高さ範囲」0.05mである。この場合、垂直方向に点群を探す範囲は①~⑥の各々の「DEMからの高さ」の上下0.05m, すなわち0.1mの範囲である。そして、この範囲に4点以上の点群があればそれを幹として判定される。

5. 現地毎木調査

BLK360で計測を行ったプロットにおいて2019年9月11日に3人で毎木調査を行った。上述のTLSデータからDFを用いて作成した立木位置図を用いてそれぞれの立木の位置を照合しながら、胸高直径と樹高を計測した。毎木調査の開始と終了の時刻からおおよその調査の時間を算出した。

6. 精度検証

DFを用いてTLSの点群データから作成した立木位置図をもとに現地毎木調査で立木本数を照合した。そして、立木位置図に示された立木本数(抽出本数)、現地にあるが立木位置図に存在しなかった本数(未抽出本数)、現地にはないが立木位置図に載っていた本数(過剰抽出本数)を把握した。また胸高直径、樹高についてはDFを用いてTLSデータから算出した値を計測値、現地毎木調査で計測した値を実測値として散布図の作成および切片を0に固定し回帰分析を行った。さらに計測値から実測値を引いた値である誤差を箱ひげ図を作成して把握するとともに、RMSE(平均二乗誤差平方根)を算出した(式1)。

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

式中のNは全立木本数、 y_i はTLSの計測値、 $\bar{y}_i$ は実測値とする。RMSEは真値からの誤差を示すものであり、0に近い値であればあるほどTLSの計測精度が高いと判断できる(大野ら, 2011)。

IV. 結 果

1. 立木本数の照合

抽出本数はパターン1で29本、パターン2で27本、パターン3で28本であった。未抽出本数は0本のため、現地で確認された立木のすべてが抽出されていた。過剰抽出本数がパターン1で3本、パターン2で1本、パターン3で2本であった(表-3)。

表-3 抽出本数

	パターン1	パターン2	パターン3
全立木本数	26	26	26
抽出本数	29	27	28
未抽出本数	0	0	0
誤抽出本数	3	1	2

2. 胸高直径

パターン1, 2, 3で胸高直径の実測値と計測値の散布図を作成し、回帰分析を行った結果、パターン1

で傾きが0.8996, $R^2=0.9670$, パターン2で傾きが0.9467, $R^2=0.9884$, パターン3で傾きが0.9616, $R^2=0.9910$ であった(図-5)。スキャン地点が増えるほど傾きは1に近づき, 精度が高くなった。RMSEはパターン1で3.5cm, パターン2で1.9cm, パターン3で1.4cmであった。実測値と計測値の誤差の中央値はパターン1が-3.5cm, パターン2が-1.6cm, パターン3が-1.3cmであり(図-6), どのパターンも胸高直径は過小評価されていた。さらにスキャン地点を増やすほど, 誤差が小さくなることが分かった。

図-5 実測値と計測との関係を示したグラフ(胸高直径)

図-6 各パターンにおける胸高直径の誤差
※箱の中心が中央値, 箱の上端が第3四分位数, 下端が第1四分位数である。

3. 樹高

パターン1, 2, 3で樹高の実測値と計測値の散布図を作成し, 回帰分析を行った結果, パターン1で傾きは0.9265, $R^2=-1.0381$, パターン2で傾きは0.9427, $R^2=-0.8695$, パターン3で傾きは0.9515, $R^2=-0.6819$ であった(図-7)。スキャン地点が増えるごとに傾きは1に近づいているが, R^2 値はマイナスの値をとって

おり近似式の適合度は極端に低かった。一方ですべてのパターンで同じ立木が過大評価されていた。RSMEはパターン1で2.8m, パターン2で2.6m, パターン3で2.5mであった。誤差の中央値はパターン1で-2.3m, パターン2で-2.0m, パターン3で-1.8mであり(図-8), どのパターンにおいても樹高は過小評価されていた。スキャン地点を増やすほど, 誤差が小さくなるが, その減少割合は胸高直径と比べて小さかった。

図-7 実測値と計測との関係を示したグラフ(樹高)

図-8 各パターンにおける樹高の誤差
※箱の中心が中央値, 箱の上端が第3四分位数, 下端が第1四分位数である。

4. 調査時間

BLK360による計測は2人で行い, プロット作成は10分, 1回のスキャン時間は約3分弱であった。よってプロット作成時間とスキャン時間を合わせた調査時間がパターン1では22分ほど, パターン2では31分ほど, パターン3では46分ほど必要であった。胸高直径の精度が十分に保てたパターン2での調査時間は約1人時であった。これに対して現地毎木調査は3人で45分程度, 約2.25人時であり, BLK360の方が調査人数, 調査時間ともに縮小することができた。

V. 考 察

1. 立木本数

すべてのパターンで抽出本数は26本、未抽出本数は0本であり、現地の立木のすべてを抽出できていた。このため、立木本数はBLK360の設置箇所が4点以上で十分に抽出できることが分かった。一方で、過剰抽出された立木があった位置は、タケニグサ（最大高さ約2m）が繁茂しており、タケニグサの上空に周辺の木の枝が入ることで立木として抽出されていた（図-9a）。TLSによる計測の際には下草を除去しておくことが一般的であるが、DFで「木と判断するための条件」を操作することで改善できると思われる。例えば「点数」をデフォルトの4点から10点に変えたり、「高さ範囲」を0.05mから0.25mに変えることで、立木の探索条件が厳しくなり、過剰抽出を減らすことができると考えられる。

図-9 過剰抽出された立木 (a) と過大評価された立木 (b) の点群データ

2. 胸高直径

回帰分析の結果、スキャン地点が増えるごとに傾きは1に近づいた（図-5）。RMSEもパターン1が3.5cm、パターン2が1.9cm、パターン3が1.4cmであった。また、箱ひげ図からもBLK360の設置箇所が増えるごとに誤差の幅が小さくなっていった（図-6）。このことから、スキャン位置が増えるほど幹の全周にレーザーが当たる確率が増すため、BLK360の設置箇所数を増やすことで胸高直径の測定精度が向上すると考えられる。パターン1とパターン2の精度の差が大きく、BLK360の設置箇所が外周7箇所に増えると誤差は3.5cmから2.0cm未満になり、特に良くなることが分かった。市場における丸太の単位寸法は2cmである（農林水産省、2007）ため、毎木調査の代わりにTLSを利用する場合、胸高直径は誤差が2cm以下であることが望ましい。また林野庁（2018b）の報告書によると森林計測用TLS（OWLを含む）によって取得した森林情報の精度は胸高直径で平均誤差は2cm

以下である。よって、0.04haの円形プロットの森林計測を行った本事例研究の結果、BLK360による計測ではプロット外周に7箇所以上に設置すれば、現在使われている森林計測用TLSの精度と比べても劣らず、胸高直径は十分に計測できると考えられた。

3. 樹高

樹高の平均誤差はパターン1で-1.8m、パターン2で-1.4m、パターン3で-1.1mとすべてのパターンで樹高は低く計測された。過小評価の原因は樹高が高くなるとレーザーが枝葉に遮られ、梢端まで届かず計測が出来ないためと考えられる。一方、BLK360での計測値の方が大きく計測されている外れ値もみられた（図-8）。過大評価になっている立木はすべてのパターンで同じ立木であった。DFで樹高が過大評価された立木の点群を切り取った像（図-9b）を確認したところ、過大評価は隣接する立木の上端の一部を含んでいることが原因であった。林野庁（2018b）によると、森林計測用TLSによって得られる樹高の平均誤差は0.5~1.0mである。しかし、RMSEはパターン1で2.8m、パターン2で2.6m、パターン3で2.5mのため誤差は小さくなっているが大きな差はなく、BLK360の設置箇所を増やすだけでは樹高計測の精度は十分に向上しないことが明らかになった。

IV. おわりに

以上よりプロット外周の7箇所にBLK360を設置することで、胸高直径では十分な精度を保てたが、樹高では従来の森林計測用TLSほどの精度が得られなかった。しかしDFのパラメータを設定しなおすことで、精度が向上する可能性がある。樹高の精度が改善されれば、森林内でBLK360を利用することで、他のTLSより初期費用を抑えて毎木調査の効率化や機器の軽量化により人員削減が可能になると考えられる。

謝 辞

本研究は(株)パスコとの共同研究「森林地域等における三次元空間解析技術に関する高度化研究」の一環として実施したものである。

引用文献

- Cloud Compare, Cloud Compare 公式ホームページ (<http://www.danielgm.net/cc/>), 2019/10/4 現在.
- 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巻1号. 18-26.
- (株)woodinfo (2016) 地上型レーザスキャナによる森林デジタルドキュメント化, 第5版.
- 京都府立大学生命環境学部附属演習林, 演習林の紹介, (http://uf.kpu.ac.jp/kpu_uf/syoukaiall/gaiyou.html), 2019/10/4 現在.
- Leica Geosystem, Leica Cyclone REGISTER 360-3 D レーザスキャン点群データ合成処理ソフトウェア (<https://leica-geosystems.com/ja-jp/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register-360>), 2019/10/4 現在.
- 中村裕幸・石井彰・平岡裕一郎・高橋誠 (2013) 地上型レーザスキャナによる森林情報のデジタルドキュメント化. 精密工学会秋季学術講演会講演論文集. 643-644.
- 農林水産省 (2007) 素材の日本農林規格 (http://www.maff.go.jp/j/jas/jas_kikaku/pdf/kikaku_55.pdf) 2019/10/20現在.
- 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 (<http://www.lib.kobe-u.ac.jp/repository/81003311.pdf>) 2019/10/20現在.
- 林野庁 (2017) 第1部 第I章 第2節 林業の新たな技術の導入(2) (http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/28_hakusyo_h/all/nhap_1_4.html) 2019/10/21現在.
- 林野庁 (2018a) 高精度な森林情報の整備・活用のためのリモートセンシング技術やその利用に関する手引き (http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/smartforest/attach/pdf/smart_forestry-20.pdf), 2019/10/11現在.
- 林野庁 (2018b) 第I章今後の森林の経営管理を支える人材. 平成30年度森林・林業白書. 14-15.
- 林野庁 (2019a) 平成30年度スマート林業構築普及事業事例集 (http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/smartforest/attach/pdf/smart_forestry-17.pdf) 2019/10/29現在.
- 林野庁 (2019b) 平成30年度森林資源情報整備技術実証事業 (国有林). (https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/seika_H_30/ippan/attach/pdf/index-171.pdf https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/seika_H_30/ippan/attach/pdf/index-66.pdf) 2020/02/16現在.

(2019年10月31日受付)

(2020年3月27日受理)