

## 可搬型レーザー計測装置による森林調査の計測精度

## Measurement accuracy of forest survey using mobile laser scanning system

千葉幸弘\*<sup>1,2</sup>Yukihiro CHIBA\*<sup>1,2</sup>

\* 1 森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687

\* 2 現所属：株式会社アドイン研究所

Present address: ADIN Research Inc., 3-6 Kojimachi, Chiyoda, Tokyo 102-0094

**要旨：**胸高直径や樹高の計測を行う毎木調査は、林業経営や森林資源管理での基本情報を得るための作業である。しかし調査面積にもよるが、こうした調査は労力・時間・経費等の面からより効率的な方法が求められている。レーザー計測で森林内部をスキャンする可搬型の地上 LiDAR 装置(MLS 法)を用いて、スギ、ヒノキ、カラマツの人工林を対象に、従来の毎木調査と比較して、計測精度等を検討した。中下層木等が幹の胸高位置を覆っている場合などは MLS 法での DBH 計測値が過大となるが、そうした異常値を除けば、スギ、ヒノキ、カラマツともに平均二乗誤差 RMSE は 2cm 以下であった。MLS 法による樹高計測については、林冠が込んでいる場合に、劣勢木の樹高が高めに計測される傾向があるが、ある程度林冠が空いている一般的な人工林であれば林冠高をおおむね再現できると考えられた。様々な林分状況に応じた MLS 法の精度検証が必要だが、実用的には現状で活用可能と判断される。

**キーワード：**毎木調査, DBH, 樹高, 人工林, 地上 LiDAR

**Abstract:** Forest survey to measure DBH and tree height of forest trees is necessary for the fundamental information for forest management. Depending on the survey area, however, some improvement is required for more effective methodologies in terms of labor, time, expenses, etc. Employing a mobile laser scanning system of terrestrial LiDAR equipment (MLS), the measurement accuracy was examined for DBH and tree height of sugi (*Cryptomeria japonica*), hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), karamatsu (*Larix kaenferi*) plantation forests. In case that stems at around breast height were covered with lower to medium layer trees, DBH by MLS method was overestimated. Except for such outliers, RMSE (root mean square error) of the measured DBHs were under 2cm for all tree plantations. Concerning the tree height measured by MLS method, when the canopy is crowded, it is tended that tree heights of suppressed trees were to be higher. For moderately thinned plantation forests with adequate gaps in the canopy, the canopy height could be properly measured by MLS method. Although more verification of the accuracy of MLS method according to various forest conditions, the device of laser scanning system can be fully utilized even at present.

**Key-word:** forest survey, DBH, tree height, plantation forest, terrestrial LiDAR

## I はじめに

森林施業を行う場合、あるいは森林動態を研究する場合など、森林に関わる様々な業務で対象林分の状況を把握・記録するために毎木調査が行われる。収穫調査は、間伐や主伐における収穫量を把握することが目的だが、径級区分や品等区分なども求められる。森林の詳細な資源量を把握する場合などには、立木位置や微地形等を計測することもある。しかしこうした毎木調査は、時間と労力だけでなく必要経費も発生するため、特に林業経営では、可能な限り簡略化して、効率的に調査することが

求められる(2, 3)。

広域の森林資源を把握する方法として、衛星リモートセンシングや航空機 LiDAR が行われ、最近ではドローン等の UAV による調査が試みられ、さらにレーザー計測機器の開発が進み、地上 LiDAR による調査事例も増えつつある(1, 2, 4, 6)。しかし多くの場合、こうした最新技術では調査費用がかさみ、収穫調査に代わる技術としては採用しづらいのが実態である。

そうした中、地上 LiDAR のひとつである可搬型のレーザー計測装置が開発され、人工林の毎木調査での活用

が期待される。この装置は、斜面の傾斜がきつく足場の悪い林内でも容易に設置することができ、簡便な操作で林内をレーザースキャンし、毎木調査と同様のデータが迅速に出力される(2, 7)。

本研究では、地上 LiDAR 装置を用いて、スギ、ヒノキ等の人工林を調査し、胸高直径の計測精度について、従来用いられる巻尺や輪尺による計測値と比較検証するとともに、樹高の計測値についても従来法との比較検証を行った。また、この装置では対象林内の立木位置や地形等も計測されることから、こうした計測データを有効に活用する見通し等についてもあわせて考察した。

## II 材料と方法

**1. 調査地** スギ、ヒノキ、カラマツの人工林に20m×20cmの調査プロットを設定して、従来の毎木調査およびレーザー計測による DBH(山側の地上高 1.2m)および樹高等の計測を行った。調査林分の林分密度、平均 DBH、平均樹高はそれぞれ以下のとおりである。

スギ人工林(茨城県) : 1150 本/ha, 22.9cm, 18.4m

ヒノキ人工林(岡山県) : 925 本/ha, 24.2cm, 19.2m

カラマツ人工林(山梨県) : 975 本/ha, 22.5cm, 19.4m

**2. 使用機器の概要** 使用した計測装置は、株式会社アドイン研究所製の可搬型レーザー計測装置(商品名"OWL")。以下、本装置を MLS(mobile laser scanning system)と呼ぶ。MLS は、レーザーセンサーを含む計測機と一脚を組み合わせた簡便な構造となっており、一脚を含めた全重量は 3.6kg、林内のレーザースキャンする操作はボタン操作ひとつのみであり、計測時は MLS を片手で支えておくだけでよく、現地調査での操作性は容易である。なお、本装置 OWL の規格・仕様・計測条件等についてはウェブサイト(7)、また本装置によるレーザー計測の方法論等については、坪内ら(10)、千葉(2)の解説がある。

MLS による森林計測では、約 10m 間隔で移動しながら、1 箇所ごとに約 45 秒間で林内スキャンを繰り返し、林内の全立木の計測を行う。全地点の計測が終了したら、付属解析ソフト(OWL Manager)で全計測地点のデータが合成され、当該林分の 3 次元構造のデータ化、立木の DBH、樹高立木位置などが半自動的に出力される。

樹形情報の算出方法は概略次のとおりである。レーザー計測で得られる点群データから、立木ごとに、胸高 1 の樹幹断面を円近似して直径を算出して胸高直径とする。樹高については、当該位置の最上部の点座標をもって樹高とする。枝下高については、樹幹部位の点群データを地上高ごとに層化して、鉛直方向の点群密度の濃淡が変

化する位置を特定して枝下高を算出する。

**3. 調査データの比較** MLS で計測した立木の DBH および樹高の計測結果を比較検証するため、調査対象木について、胸高位置の幹周をスチール巻尺で計測して幹直径に換算し、また樹高についてはトゥルーパルス(Laser Technology 社製)により 0.1m 単位で計測した。以下、スチール巻尺およびトゥルーパルスによる計測方法を"従来法", MLS での計測を MLS 法と呼ぶ。

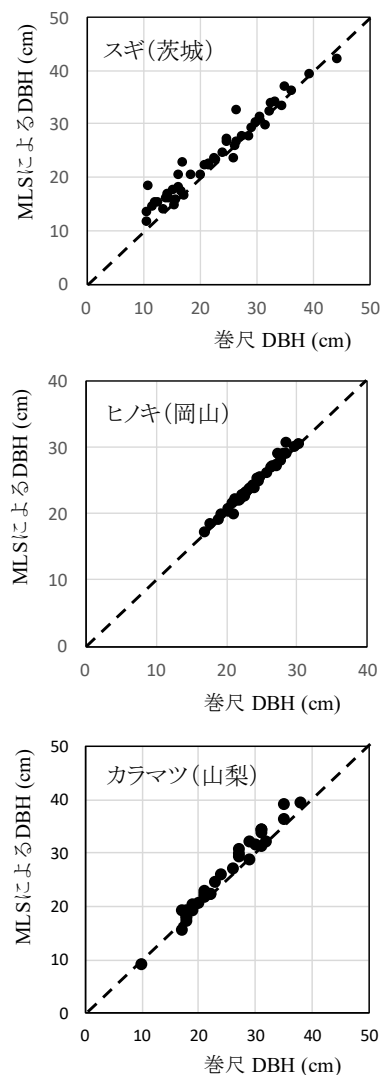


図-1 レーザー計測(MLS法)および巻尺(従来法)による DBH 計測値の比較

Fig.1 Comparisons of DBH values by MLS method and ordinary method of tape measure

III 結果と考察

1. 胸高直径の計測精度 スギ、ヒノキ、カラマツ人工林において、MLS法および従来法で計測したDBHを比較した(図-1)。全体にMLS法のDBHがやや大きい値になった。ただ、スギ林については、植栽後の除間伐がほとんど行われず、アオキやヒサカキ等がスギの根元付近から胸高部分にかけて幹を覆っている場合があったほか、スギと同程度の直径の広葉樹がスギの樹幹に密着している場合があったため、特にスギ小径木でMLSの計測値が過大になったものである。ヒノキについては、林内に下層植生がなかったこともあり、ALSの計測精度は良好であった。カラマツでは、径級の大きいものほどALSの計測値が大きいが、全体的に巻尺の計測値と大差ない結果がえられた。

毎木調査におけるDBHの計測精度に関しては、収穫調査規程等で許容誤差が明記されているわけではないが、一般的には±2cm以内を求められることが多い。図-2は、MLS法と従来法で得られた計測値の差がDBHとどのような関係にあるか比べたものである。ヒノキについては、ほとんどが計測差±2cm以内であった。しかし、下層植生や広葉樹の侵入木があったスギでは、20cm以下の小径木で計測差が大きくなり、カラマツでも20cm以上の径級で計測差が2cm以上となった。今回の調査林分では、下層木等によってMLSの計測に支障が生じた林木も含まれているが、許容誤差を±3cm以内と言えるので

あれば、スギ、ヒノキ、カラマツのDBH計測値は極端なものを除いて許容範囲内と言える。

ただ、DBHの計測誤差を一律に±2cmや±3cm以内とする根拠はなく、むしろ統計学的にはDBHの大きさに対する相対誤差として評価するのが適当であろう。図-2の灰色の領域は、DBHに対する相対誤差が±10%以内を示す。スギでDBHが20cm以下ではこの許容範囲を超えるものがあるが、ヒノキではすべが、カラマツでも一部を除いてほとんどが誤差±10%以内になる。

巻尺や輪尺によるDBHの計測では、誤差が生じにくいと考えがちであるが、計測者の経験や技量等によって計測の誤差・過誤が意外に生じる(5)。今回実施した検証作業でも計測者4名の測定結果に疑義が生じるケースがあり再計測せざるを得ないことがあり、従来の計測手法でも計測精度が万全でないことに留意が必要である。

地上LiDARであるレーザー計測装置FAROを用いたDBHの計測については、RYDING et al.(6)やBAUWENS et al.(7)の報告があり、計測精度を平均二乗誤差(RMSE: Root Mean Squared Error)を用いて論じている。それによるとDBH10cm以上の林木に限るとRMSEは1.5cm以下で計測できたと報告している。レーザー計測装置自体の違いや調査林分の違いがあるので、これらの報告と同列で比較はできないが、本研究で調査したスギ、ヒノキ、カラマツのDBHもほぼ10cm以上であり、MLSによる計測値のRMSEはそれぞれ2.35cm、

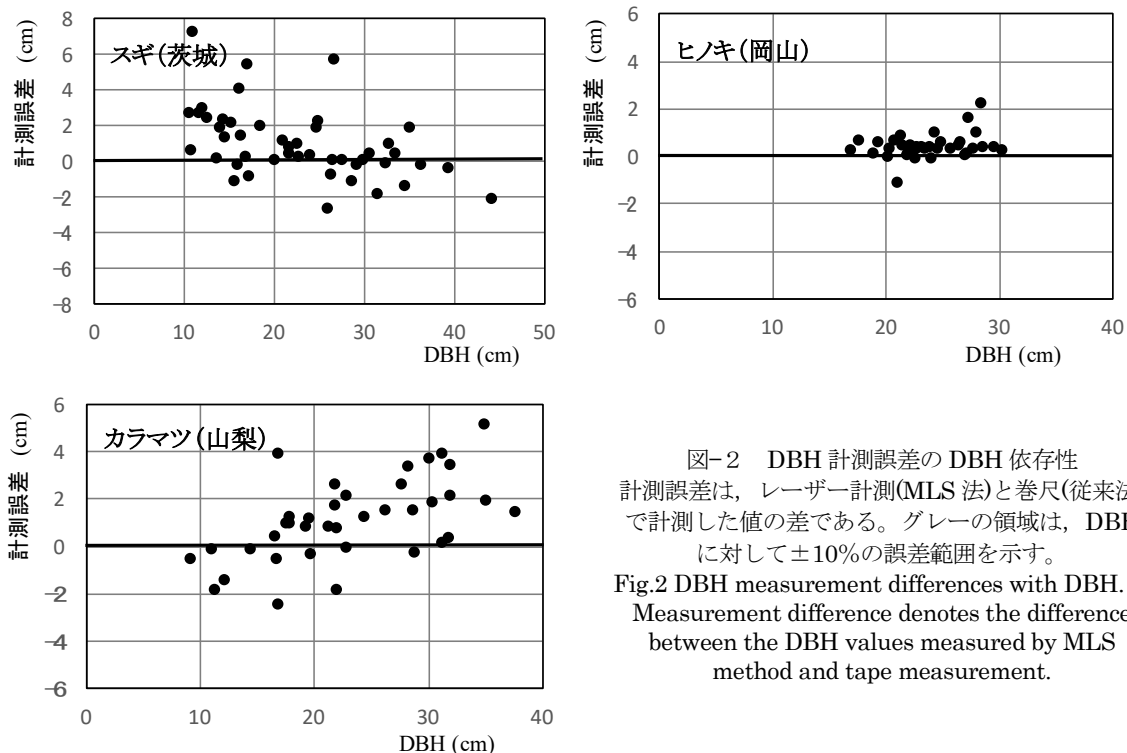


図-2 DBH計測誤差のDBH依存性  
計測誤差は、レーザー計測(MLS法)と巻尺(従来法)で計測した値の差である。グレーの領域は、DBHに対して±10%の誤差範囲を示す。  
Fig.2 DBH measurement differences with DBH. Measurement difference denotes the difference between the DBH values measured by MLS method and tape measurement.

0.64cm, 1.97cm であった。すでに述べているようにスギ林ではレーザー計測の障害となる下層木の影響があったが、そうした悪条件がなければ、MLS を用いた DBH の平均的な計測誤差としてはおおむね 2cm 以下であったと判断される。

**2. 樹高の計測** 林冠が閉鎖した森林では、レーザー光が林冠で遮られるため、樹高計測が難しくなることは否めない。図-3 は、ヒノキ林で計測した従来法と MLS 法による樹高を比較したものである。全体的には、両方の計測値がほぼ一致しており、林冠高がよく再現できている。ただ、一般的には劣勢木ほど樹高が低くなるはずだが、図-3 では MLS 法で計測した DBH20cm 以下の小径木でも樹高が高めになっているのがわかる。その理由は、劣勢木の場合、それに隣接する優勢木の樹冠が覆い被さっているため、MLS では覆い被さっている優勢木の枝葉を劣勢木の樹高と誤認するためである。

一方、林冠が極端に込んでいる場合は、レーザー光が林冠を透過できなくなり、林冠層の途中でレーザーが反射してしまうため、すべての林木の樹高が低くなることもある。立木本数が多い場合や樹高が低い若い林分などでの MLS による樹高計測には注意が必要である。

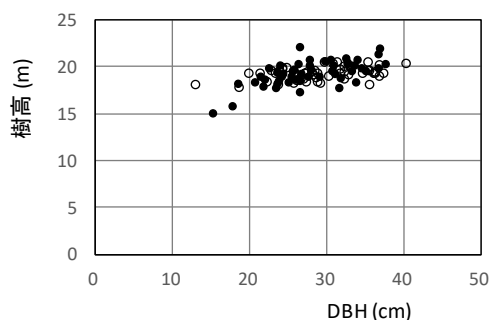


図-3 MLS 法(○)および従来法(●)による樹高計測値の比較

Fig.3 Comparison of tree heights measured by MLS method (○) and tape method (●)

**3. MLS 法の利便性** 直接データは示さなかったが、OWL による MLS 法では調査林分内の立木位置図、幹曲りを示す矢高などのデータも解析されて、現地で直ちに確認することができる。千葉(2)が指摘しているように、従来の毎木調査であれば現地での DBH や樹高の計測のほか、コンパス測量等を数人で行った後で、それら計測データの入力や集計・解析をしなければならないが、MLS 法では、現地で計測をすればそれだけでほぼすべての作業が完了する。そういう意味では、労力、時間、経費が削減されるなど、林業経営上のメリットは大きい。森林内部をスキャンすることで森林構造が三次元デー

タ化されて、林地の地形や林床植物の情報も同時に得ることができるので、従来の森林調査とは比較にならない豊富な森林情報を取得できることも大きなメリットである。こうしたレーザー計測装置を効果的に活用するためには、従来の収穫調査規程に沿った調査方法や計測内容を改めて見直して、より効率的な調査業務、より効果的な森林情報の活用を展開できるよう工夫していくことが望まれる。

**謝辞:** 本研究は、株式会社アドイン研究所および株式会社森林再生システムとの共同で実施された。現地調査およびデータ解析等でご協力いただいた塩沢恵子、佐久田誠、会田拓己、加賀谷廣代の各氏に謝意を表す。

#### 引用文献

- (1) BAUWENS, S., BARTHOLOMEUS, H., CALDERS, K., LEJEUNE, P. (2016) Forest inventory with terrestrial LiDAR: a comparison of static and handheld mobile laser scanning. *Forests* 7, 127; doi:10.3390/f7060127
- (2) 千葉幸弘 (2017) 地上レーザー計測による森林調査のこれから. *森林科学* 80: 32-35
- (3) 千葉幸弘, 速水亨, 佐々木浩二 (2014) レーザ計測装置による森林スキャンと林業経営への活用. *森林技術* 871: 26-29
- (4) 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: 585-589
- (5) 北原文章・溝上展也・吉田茂二郎 (2008) 森林調査における直径・樹高測定 of 正確度・精度に関する研究. *九州森林研究* 61: 176-178
- (6) RYDING, J., WILLIAMS, E., SMITH, M.J., EICHHORN, M.O. (2015) Assessing handheld mobile laser scanners for forest surveys. *Remote Sensing* 7: 1095-1111
- (7) 森林 3 次元計測システム <https://www.owl-sys.com>
- (8) Tsubouchi, T., Asano, A., Mochizuki, T., Kondou, S., Shiozawa, K., Matsumoto, M., Tomimura, S., Nakanishi, S., Mochizuki, A., Chiba, Y., Sasaki, K., Hayami, T. (2013) Forest 3D mapping and tree sizes measurement for forest management based on sensing technology for mobile robots. Yoshida, K & Tadokoro, S. Eds, *Fields and Service Robotics* 92, 357-368, Springer