
原著論文

複数の簡易地上 3 次元計測技術で推定した溪流内流木量の比較

Comparative estimates of quantities of woody debris in mountain streams
using simplified 3-D ground-based measurement島田博匡^{1)*}Hiromasa Shimada^{1)*}

要旨：効率的かつ非接触で安全に溪流内流木量を調査するために、3通りの簡易な機器を用いた地上 3 次元計測技術の流木量調査への活用の適否について検討を行った。3カ所の溪流で各方法により 3 次元点群データを取得し、点群処理ソフトを用いて目視で溪流内にみられる流木を検出して直径と長さを推定した。同時に人力での実測調査を実施して結果を比較した。森林 3 次元計測システム OWL のデータは点群密度が低く、流木の検出精度が低かった。iPad Pro 搭載 LiDAR、ジンバルカメラで撮影した 4K 動画の SfM-MVS 解析のデータは点群密度が高く、本数検出率はそれぞれ 83.3～86.9%、86.9～100%、材積検出率は 68.3～74.7%、68.6～93.6%であったが、後者はデータ取得作業が煩雑で実用性が低かった。

キーワード：SfM-MVS, LiDAR, 流木災害, 3 次元点群データ, 4K 動画

Abstract: This study evaluated the effectiveness of three simplified three-dimensional (3-D) ground-based measurement methods for efficient and safe assessment of woody debris quantities in mountain streams. 3-D point cloud data were obtained from three mountains streams using each method. The woody debris present in the mountain streams was detected visually using point cloud processing software to estimate its diameter and length. Concurrently, a manual survey was conducted, and the results were compared with those obtained using the three methods. The forest 3-D measurement system OWL produced data with low point cloud density, which decreased the accuracy of woody debris detection. By contrast, the iPad Pro LiDAR and SfM-MVS analysis of 4K video captured by a gimbal camera yielded high point cloud density, with number detection rates ranging from 83.3 to 86.9% and 86.9 to 100%, respectively, and volume detection rates of 68.3 to 74.7% and 68.6 to 93.6% respectively. However, between the two, the latter method is less practical owing to its complex data-acquisition process.

Key words: SfM-MVS, LiDAR, Woody debris Disaster, 3-D point cloud data, 4K video

はじめに

溪流内には、風倒や溪岸侵食などに由来する倒流木が滞留しており（島田 2023）、これらは豪雨による出水時に流下して下流域に流木被害をもたらす可能性がある。三重県では「みえ森と緑の県民税」を財源とする「災害緩衝林整備事業」により、土砂や流木が発生しにくい森林への誘導を目指す森林整備を行っているが、その一環として、溪流部では豪雨時に流出する恐れのある溪流内の流木や倒木などを除去している（島田 2020）。この除去効果を明らかにするために、事

¹⁾ 三重県林業研究所

Mie Prefecture Forestry Research Institute

* E-mail : shimah03@pref.mie.lg.jp

業実施後の溪流部における倒流木の再発生状況を調査しているが（島田 2023）、溪流内流木の人力によるサイズ計測には多大な労力を要するうえに、危険を伴うケースもある。そのため、効率的かつ非接触で安全に流木量が調査できる技術が求められている。これまでに、UAV 空撮から得られたオルソ写真を用いて流木量を計測した事例はあるが（Tsunetaka *et al.* 2021, Koi *et al.* 2022）、本事業地の大半は樹冠下にあることから、空撮では溪床を撮影することができず、レーザ機器などを用いた地上 3 次元計測の活用が望ましい。

近年、建設分野では地上を移動しながらレーザスキャンを行い、3 次元点群データを取得できる SLAM（Simultaneous Localization And Mapping）LiDAR の導入が進んでいるが、これらは一般的に高価である。また、溪流の歩行は危険が多く、歩行時の転倒による機器の損傷、水没リスクがあり、高価な機器の導入は難しい。一方、2020 年以降、iPhone Pro, iPad Pro に LiDAR 機能が搭載され、毎木調査（Tastumi *et al.* 2023）、面積測量（及川ら 2023）など森林計測にも適用されるようになっている。そのほか、ビデオカメラで撮影した 4K 動画から切り出した連続的な静止画の SfM-MVS 解析で簡易的に 3 次元点群データを取得し、作業道の出来形測量を試行した事例も報告されている（瀧ら 2020）。これらのような比較的、安価で入手しやすい簡易な機器による 3 次元計測で溪流内流木を検出することができれば、流木量調査に有効に活用できる可能性がある。

また、これまで森林計測に用いられてきた地上型レーザスキャナ（TLS）は約 400 万円から 1,000 万円とされており（檜原・長島 2020）、そのなかで比較的簡易な測域センサを搭載した森林 3 次元計測システム OWL（Optical Woods Ledger）は安価で、森林調査用に開発されたものである。これまでに多くの導入事例があり（塩沢ら 2022）、森林・林業分野では森林資源調査（山田 2020, Shimizu *et al.* 2022, 塩沢ら 2022）を中心に、治山堰堤の形状測定（小川ら 2021）など様々な用途で使用されているが、これまでに流木量調査に活用した事例は報告されていない。

そこで、本研究では、iPad Pro 搭載 LiDAR, 4K 動画の SfM-MVS 解析、森林 3 次元計測システム OWL を用いて溪流内の流木量計測を行い、簡易な地上 3 次元計測技術の流木量調査への活用の適否について検討を行った。

調査地と方法

1. 調査地

調査地は三重県津市白山町（以下、津）、伊賀市上阿波（以下、伊賀）、亀山市加太神武（以下、亀山）に位置する計 3 カ所の溪流とした。津は水平距離 75 m、流路幅 1.5~4 m の狭い溪流で、平均勾配は 27%だが、調査範囲の中央付近で大きく勾配が変化し、中央付近より上流が 42%、下流側が 17%であった。溪流の周囲はスギ人工林、トチノキ人工林、広葉樹二次林がみられる。2016 年 2 月にスギ人工林の間伐で発生した間伐木が溪流内に多数あり、溪流内の一部には流木が積み重なった状態で堆積している。調査時には流水はみられなかった。伊賀は水平距離 150 m、流路幅 2~3 m 程度、平均勾配 10%で、流路幅の狭い緩傾斜の溪流である。調査時にはわずかな流水がみられた。溪流の周囲はスギ人工林であり、溪流内には間伐木由来の流木が少数みられるが、数年内に堆積したと推測される堆積土砂が部分的に多く、一部が土砂に埋没している流木が多かった。亀山は、水平距離 130 m、流路幅 8~12 m、平均勾配 8%で、流路幅が比較的広い緩傾斜の溪流である。溪流内には径 50~200 cm 程度の転石が多数みられ、調査時には流水量が多かった。溪流の周囲はスギ人工林であり、溪流内には上流から流下してきたと推定される流木が少数みられた。

2. 計測方法

2024年7月下旬～8月上旬、3カ所の調査地それぞれで、3通りの簡易な地上3次元計測を行い、流木量を計測した。iPad Pro搭載のLiDARによる方法では、iPad Pro 11インチ 第3世代(Apple社)に搭載されたLiDARを使用した。iPad ProのLiDARの技術の詳細は公表されていないが、3次元計測対象が最大5mまでとなっている(坂本2022)。近距離しか計測できないので、調査ではiPad Proを両手で持ち、LiDARを斜め下方に向けてゆっくりと歩き、iPad Proにインストールしたmapry林業(マプリィ社)を用いて計測対象の溪床全体を計測して3次元点群データ(以下、iLiDAR)を取得した。iLiDARには座標が付与されており、そのままサイズ計測に活用することができる。精度確認のため、計測の際には計測範囲の起点と終点付近にそれぞれ2mポールを置いて計測に含め、後述するサイズ推定時に適切な精度が得られていることを確認した。なお、伊賀と亀山では取得した点群データ量が多く、1つの点群データとして保存できる容量を超えたため、計測途中で一度計測を終了、保存してから、新たな点群データとして計測を継続し、2つの点群データを得た。これらは、のちに3次元点群処理ソフトウェアTREND-POINT Ver.11.1(福井コンピュータ社)の位置合わせ機能を用いて1つの点群データに結合した。

森林3次元計測システムOWL(アドイン研究所社)は設置型TLSであり、本調査ではAME-OL106型カメラ付モデルを使用してカラー点群データを取得した。本モデルの測域センサは43,200点/秒のレーザ照射が可能である。一脚に取り付けた本器を用いて計測対象範囲内の複数点で1地点あたり45秒の計測で1,944,000点/計測のデータを取得し、専用の解析ソフトウェアOWL Manager version 1.7.8.0により、立木を目印に複数点の計測データを合成して計測対象全体の3次元点群データが生成できる。このとき、計測時には測域センサの上部270°の範囲のレーザ計測が横方向に180°回転することで1地点の計測が完了するため、計測地点を中心に半径2m程度の点群データがほとんど得られない範囲が生じる。本調査ではおおむね10m程度の間隔の計測地点(津9地点、伊賀15地点、亀山15地点)での計測データを合成し、3次元点群データ(以下、OWL)を生成した。OWLについても座標が付与されており、iLiDARと同様の精度確認を行った。

動画から連続的に切り出した静止画のSfM-MVS解析から得た3次元点群データについては、手ぶれを軽減するためにジンバルカメラOsmo Pocket 3(DJI社)を用い、撮影した動画の画質が鮮明なほど3次元点群データも鮮明になるため、画質を4Kに設定してiLiDARと同様の方法で計測対象の溪床全体を撮影した。撮影した動画はSfM-MVS解析ソフトウェアTerra Mapper Desktop ver. 2.17.0(テラドローン社)による静止画の切り出しとSfM-MVS解析に供し、3次元点群データ(以下、SfM)を生成した。解析はTerra Mapper Desktop操作マニュアル「動画から点群データ作成編」の推奨設定に従って、フレームレート2(2枚/秒)で静止画を切り出し、バンドル調整(カメラ位置調整)の設定は「モード」ハイブリッド、「検出特徴点最大数」40,000、「特徴抽出モード」高、「ペア選択モード」全体を基本とした。しかし、伊賀ではフレームレート2(2枚/秒)で静止画651枚の静止画を切り出し、この推奨設定で成功したものの、津、亀山では不調であったため、フレームレートやバンドル調整設定を変えて解析が成功するまで再解析を繰り返した。その結果、津ではフレームレート4(4枚/秒)で静止画666枚、バンドル調整の設定が「モード」高速、「検出特徴点最大数」20,000、「特徴抽出モード」ノーマル、「ペア選択モード」汎用、亀山はフレームレート4(4枚/秒)で静止画1,880枚、バンドル調整は推奨設定で3次元点群データを得ることができた。また、点群生成密度はいずれも最高に設定した。

各調査地の各方法で得られた3次元点群データはTREND-POINT Ver.11.1を用いて、適宜、点

群の間引きやフィルタリングを行ったうえで、目視で流木を検出し、計測機能を用いて各流木のサイズ推定を行った。このとき、推定対象の流木は中央付近の直径が 10 cm 以上かつ長さ 1 m 以上のものとし、中央付近の流木断面の最大幅を計測して直径 ED (cm)、流木の両端間の距離を計測して長さ EL (m) を得た。なお、SfM の 3 次元点群データは位置情報を持たないため、サイズ計測には座標付けを行う必要がある。本研究では、計測対象内に対空標識を複数設置して標定点とし、各標定点の GNSS 測位座標をもとに座標付けを試みたものの不調であった。そのため、津では iLiDAR と共通する特徴点に複数の標定点を設定して、iLiDAR の座標値を用いて TREND-POINT Ver.11.1 によって座標変換を行い、起終点付近にそれぞれ設置した 2 m ポールで適切に変換されていることを確認した。伊賀と亀山では同様の変換を行うと起点と終点の 2 m ポールのサイズに差異が発生したため、変換を行わずに直径と長さの計測を行い、2 m ポールに対する実サイズ (2 m) を計測サイズで除した係数を各計測値に乗じてサイズ推定を行った。なお、変換で発生した起終点のポールサイズの差異は iLiDAR で 2 つの点群を結合していることが関係していると考えられる。

各流木の単木材積 EVi (m^3) は (1) 式で算出した。

$$EVi = (ED/100/2)^2 \times \pi \times EL \quad (1)$$

また、同時に各調査地では、人力による流木の実測を行い、輪尺で直径 RD 、箱尺で長さ RL 、Trupulse 360R (Leser Teck 社) で流木位置を測定した。実測単木材積 RVi は 3 次元点群データ推定値に対する算出式である (1) 式を実測値に置き換えて求めた。

3. 解析方法

人力による実測の流木本数 RN 、直径 RD 、長さ RL を真値とし、各 3 次元点群データから推定した結果を調査地ごとに比較した。

3 次元点群データから検出した流木本数 EtN のうち、実測した流木の位置と 3 次元点群データから検出した流木の位置関係から、正しく検出した流木と誤検出を判断し、正しく検出した流木本数 EcN を求めた。(2) 式により本数検出率 (%), (3) 式より本数正確率 (%) を算出した。

$$\text{本数検出率 (\%)} = EcN / RN \times 100 \quad (2)$$

$$\text{本数正確率 (\%)} = EcN / EtN \times 100 \quad (3)$$

次に、単木単位で直径と長さの推定値から実測値の差を誤差値とし、調査地ごとに各方法の誤差値の大きさを比較した。また、各方法の RMSE を算出した。

3 次元点群データから正しく検出した流木の単木材積 EVi の和を測定材積計 EVt とし、実測材積計 RVt に対する材積検出率 (%) を (4) 式で算出した。

$$\text{材積検出率 (\%)} = EVt / RVt \times 100 \quad (4)$$

結果と考察

1. 各計測方法で得られた 3 次元点群データ

図-1 に各調査地で得られた 3 次元点群データの一例を示す。点密度 (点/ m^2) は津では iLiDAR 51,714 点, OWL 7,177 点, SfM 190,842 点, 伊賀では iLiDAR 51,995 点, OWL 6,092 点, SfM 64,203 点, 亀山は iLiDAR 45,669 点, OWL 4,680 点, SfM 101,257 点であった。いずれの調査地でも点群密度の高い iLiDAR と SfM では比較的、鮮明な画像が得られたが (図-1a, b, c), SfM ではノイズが多数みられ、フィルタリングで完全に除去することができなかつたため、サイズ計測でノイズを拾わないように注意する必要がある。OWL はいずれの調査地でも流木が不鮮明であった

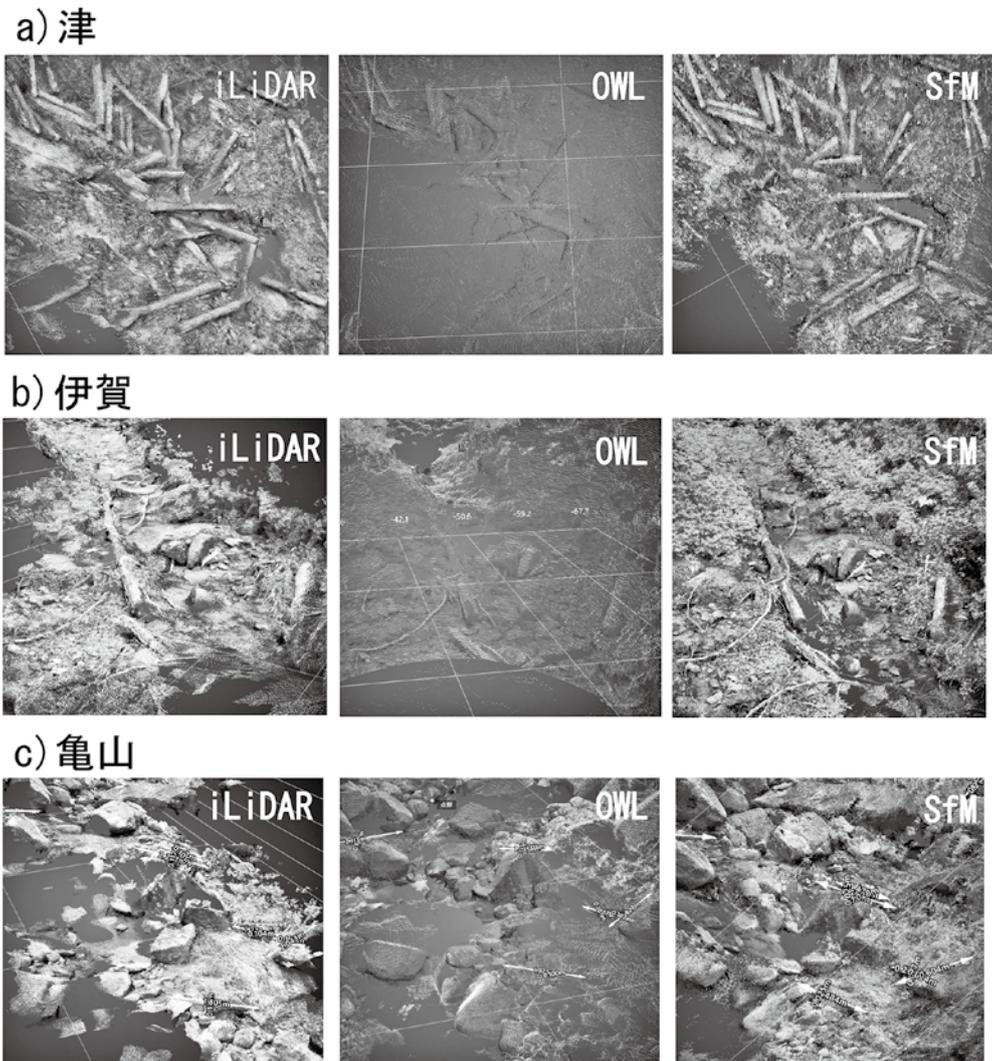


図-1. 各調査地において各方法で得られた3次元点群データの比較. 各図は同一範囲を表示している.

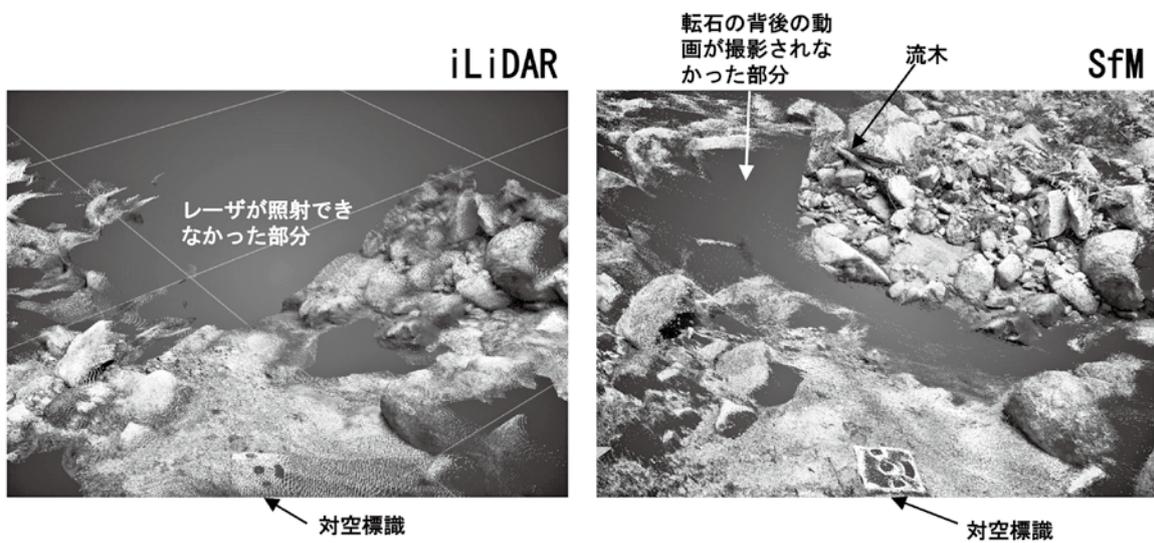


図-2. 亀山における iLiDAR と SfM の比較. 両図は同一範囲を表示している.

(図-1a, b, c). なお, 亀山の SfM では静止画の結合の連続性が途切れる部分がみられたが, 亀山は流水量と転石が多いことから, 移動時のアップダウンでジンバルカメラの動きが不規則になる部分が多くなるなど, 良好な動画が撮影できなかった可能性がある. また, 亀山の iLiDAR と SfM では, 点群データにムラが多い傾向がみられたが, これには流路幅が広いことや, 転石の背後のレーザ不到達域あるいは動画が撮影されない領域が多いなどの要因が考えられる (図-2).

OWL のデータ取得に要した OWL Manager での解析時間は, CPU Intel Core i7-7700(3.60 GHz), メモリ 32 GB, グラフィックボード NVIDIA GeForce GTX 1050(4 GB)を搭載したノートパソコンで津 187 秒, 伊賀 244 秒, 亀山 177 秒であり, いずれもわずかな時間で計測対象の 3 次元点群データを取得することができた. SfM-MVS 解析のために取得した 4K 動画の撮影時間は津 166 秒, 伊賀 325 秒, 亀山 469 秒であった. また, Terra Mapper Desktop での SfM-MVS 解析に要した時間 (静止画切り出し, バンドル調整, 点群生成) は, CPU Intel Core i9-9920X (3.50 GHz), メモリ 128 GB, グラフィックボード NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER(8 GB)を搭載したデスクトップパソコンで津が 7 時間 5 分, 伊賀が 9 時間 39 分, 亀山が 83 時間 12 分であり, 特に亀山では相当の時間を要した. なお, 推奨設定の解析が不調であった津, 亀山では, この時間に解析が成功するまで再解析を繰り返した時間は含まれていない. 亀山は水平距離 130 m の調査であったが, これまでに行われた実際の溪流部の調査では平均 548 m, 最大 2,015 m の調査が行われていることから (島田 2023), 実際の調査に活用する際には, さらに多くの解析時間を要すると予想される. なお, 瀧ら (2020) は作業道の 3 分程度のビデオカメラ動画データからフレームレート 1 で切り出した静止画をもとに所要時間約 3 時間で 3 次元点群データを生成したが, 本研究でもフレームレート 1 で解析を試行したものの, 解析結果は不調であった. この原因は, 作業道では整地された歩きやすい路面であることに対して, 渓床は凹凸や水流の状況に合わせて歩く必要があること, 流木を探しながら歩くことから, ジンバルカメラの動きが速くなる, 不規則になるなどの状況がみられたためと考えられる.

2. 流木検出精度の比較

表-1 には各計測方法で検出された流木の検出精度を示す. 実測本数は津が 61 本で多く, 伊賀

表-1. 各調査地における計測方法ごとの流木の検出精度

a) 本数検出率 (%)

調査地	津	伊賀	亀山
実測本数	61本	18本	14本
iLiDAR	86.9	83.3	85.7
OWL	73.8	66.7	85.7
SfM	86.9	88.9	100.0

b) 本数正確率 (%)

調査地	津	伊賀	亀山
iLiDAR	96.4	88.2	100.0
OWL	90.0	100.0	92.3
SfM	96.4	94.1	100.0

と亀山がそれぞれ 18 本, 14 本で少なかった. これに対して各調査地の本数検出率は点群密度が高い iLiDAR は 83.3~86.9%, SfM は 86.9~100%で, ともに高い検出率を示していたが, やや SfM の方が高い傾向があった (表-1a). 点密度の低い OWL では, 実測本数が多い津で 73.8%と低く, 実測本数が少ない伊賀, 亀山ではバラついたが, 伊賀では 66.7%と低くなった (表-1a). OWL は点群密度が低く, 点群画像が不鮮明であり (図-1), 流木の検出が困難であった. iLiDAR と SfM で検出できなかった流木の多くは, ほかの流木や堆積土に大半が埋没していたものであり, このようなものを除き, 点群データが鮮明な iLiDAR, SfM を用いることで, 多くの流木が検出可能であると考えられた.

また, 本数正確率について, いずれの方法でも誤検出がみられたが (表-1b), これらは直径 10 cm 未満の流木を過大に評価したものや, iLiDAR, SfM では 1 つの流木が計測異常で 2 重になった点群を誤検出したものであった.

3. 得られた 3 次元点群データと流木サイズ推定値の比較

図-3 に津の計測方法ごとの誤差を比較した結果を, 図-4 には実測値と推定値の関係を示す. 同様に図-5, 図-6 には伊賀, 図-7, 図-8 には亀山の結果を示す.

津の誤差は直径, 長さともに計測方法間でほとんど差はなく (図-3), 有意差はみられなかった (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$). また, いずれの方法でも過小評価された流木が多い傾向がみられた (図-3, 4). 伊賀については, 直径, 長さともにやや OWL の誤差が大きいものの (図-5), 計測方法間で有意差はみられなかった (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$). いずれも過小評価傾向であったが (図-5, 6), SfM の直径誤差の中央値は 0 付近であった (図-5). 亀山は, 直径では計測方法間で差が小さく, 長さでは SfM の誤差が他の方法よりも小さかったが (図-7), 直径, 長さともに有意差はみられなかった (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$). 推定値は過小傾向であった (図-7, 8). なお, 伊賀, 亀山の iLiDAR, OWL では実測値が長い流木をかなり短めに推定したものが散見されたが (図-6, 図-8), 長い流木は部分的に埋まっているもの, 一端が溪床に接地せずに浮いた状態になっている流木に対して浮いている部分の点群が得られなかったものがあり, それらを短く評価していた. 直径, 長さの推定精度は材積の推定精度に大きく関係するものであり, 今後,

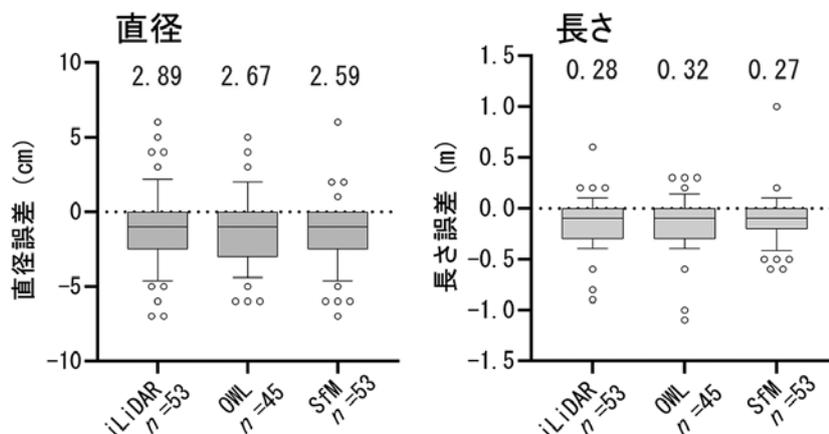


図-3. 津における計測方法ごとの誤差比較. 箱の上端は 75 パーセントイル, 下端は 25 パーセントイル, 箱中の横線は中央値を示す. 箱から上に伸ばしたひげは 90 パーセントイル, 下に伸ばしたひげは 10 パーセントイルを示す. 白抜き丸は外れ値を示す. 図中箱上の数値は RMSE を示す.

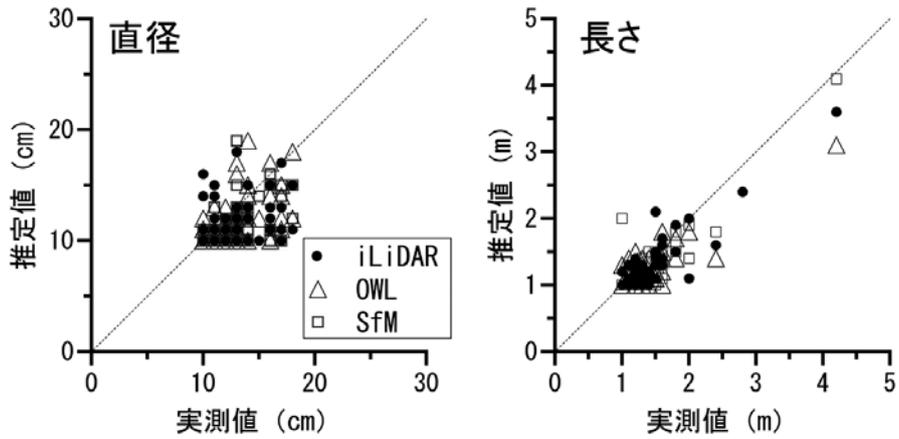


図-4. 津における実測値と推定値の比較

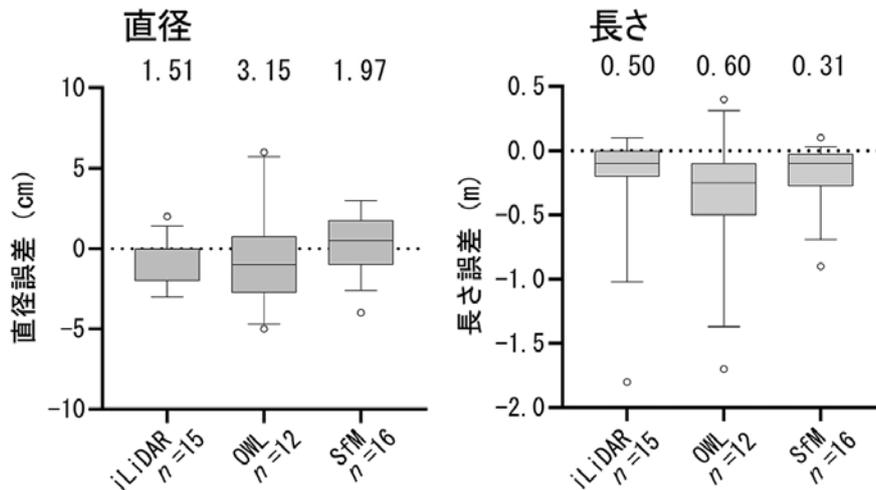


図-5. 伊賀における計測方法ごとの誤差比較. 図の読み方は図-3と同じである.

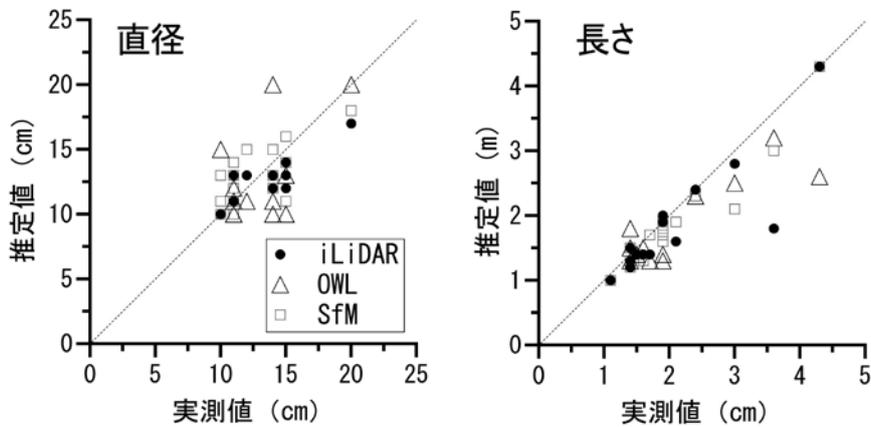


図-6. 伊賀における実測値と推定値の比較

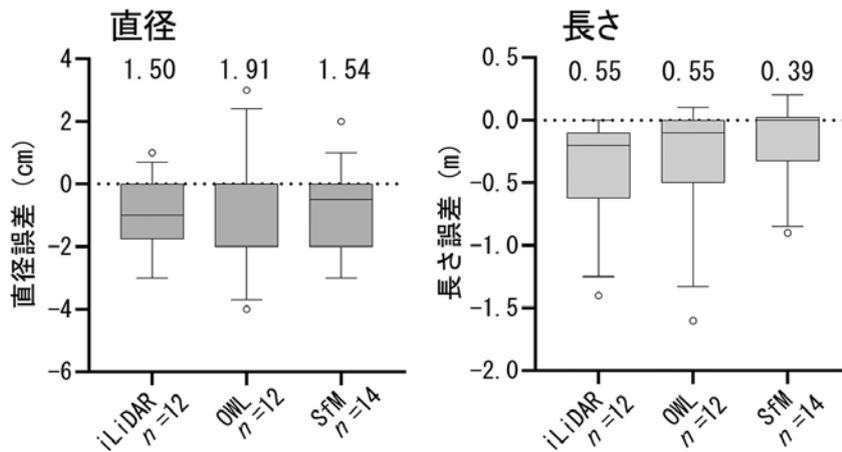


図-7. 亀山における計測方法ごとの誤差比較. 図の読み方は図-3と同じである.

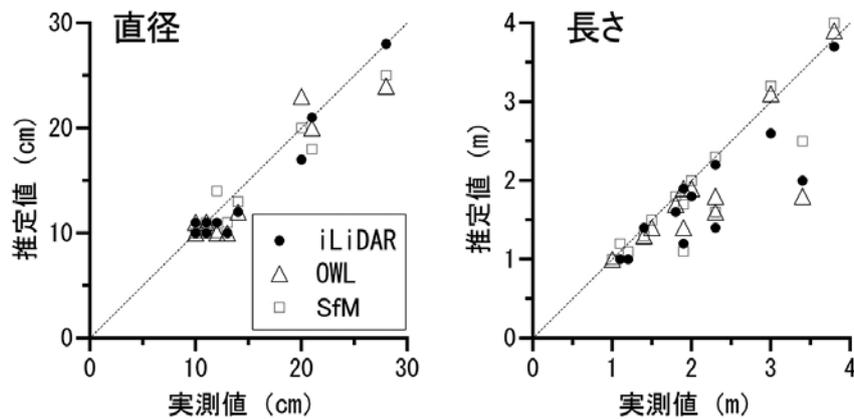


図-8. 亀山における実測値と推定値の比較

推定精度を高める必要がある. そのために, 直径の推定精度向上には, 立木 (関ら 2018) や倒木 (Yrttimaa *et al.* 2019) の幹直径推定で使用されている幹断面点群に円形状を当てはめ, その円直径を直径とする方法などを検討していく必要がある. また, iLiDAR, SfM では溪流での計測方法あるいは撮影方法を工夫することで, より鮮明でブレが少ない点群データが得られる可能性があり, これにより推定精度も改善され, 誤検出も減少すると考えられる. そのため, 流路幅, 溪床勾配, 石礫の径などの条件が様々に異なる溪流において, さらに計測を行い, 最適な計測方法を検討していく必要がある.

4. 流木材積検出精度の比較

表-2 には各計測方法で検出された流木材積検出精度を示す. 実測材積計は津 1.15 m³, 伊賀 0.47 m³, 亀山 0.49 m³であった. これに対して, iLiDAR は 68.3~74.7%, OWL は 57.8~72.0%, SfM では津 68.6%, 亀山 78.5%で iLiDAR とおおむね同程度であったが, 伊賀では 93.6%の高い材積検出率であった. 伊賀の SfM を除き, 材積検出率は本数検出率 (表-1a) よりも低い傾向があったが, このことには, 大半の試験地と計測方法で直径, 長さの推定値が実測値よりも小さい傾向がみられたことから (図-3~8), 推定単木材積が実測単木材積より小さくなったことが関係してい

表-2. 各調査地における計測方法ごとの流木材積の検出精度

材積検出率(%)			
調査地	津	伊賀	亀山
実測材積計	1.15 m ³	0.47 m ³	0.49 m ³
iLiDAR	68.3	74.7	69.6
OWL	57.8	69.3	72.0
SfM	68.6	93.6	78.5

る。伊賀の SfM では、単木サイズの誤差値は、ほかの計測方法と比較して小さくはないものの、直径誤差の中央値が 0 付近であり、長さの誤差もわずかな過小傾向であったことから (図-5)、結果としては推定材積計の値が実測材積計に近くなっていた。今後、誤差値を小さくすることで、安定して材積検出率が高くなるように検討していく必要がある。

5. 流木量調査に最適な計測方法の検討

本研究で計測を行った 3 通りの 3 次元点群計測技術のうち、溪流の流木量調査に最適な方法を考察する。本数検出率は、iLiDAR が 83.3~86.9%、SfM が 86.9~100% であり、OWL ではこれらよりも劣っていた (表-1)。点群密度の高い iLiDAR、SfM を用いることで、ほかの流木や堆積土に大半が埋没した流木を除き、多くの流木が検出可能であることがわかった。これら 2 つの計測方法の単木のサイズ推定誤差は同程度で (図-3~8)、材積検出率も伊賀の SfM を除いて 68~79% 程度でおおむね同等であった (表-2)。本数検出率は SfM の方がやや高いものの、最適な方法の選定には、さらに計測方法の特徴をふまえて、より効率的かつ確実にデータを取得可能な方法を選ぶ必要がある。各計測方法の「強み」と「弱み」は以下のようにまとめられる。

(1) iLiDAR

「強み」・・・鮮明な点群データが得られ、後処理無しで直接、流木計測に使用可能である。

「弱み」・・・レーザ計測可能距離が 5 m と短く、広い溪流、長大な倒流木の計測には不向きである。

(2) OWL

「強み」・・・レーザ計測可能範囲が 30 m 程度であることから、広い溪流でも細かく歩きまわることなく、計測が可能である。点群データは後処理無しで直接、流木計測に使用可能である。

「弱み」・・・本来は森林調査用に開発された機器であるため、流木調査に十分な点群密度が得られない。計測地点を中心に半径 2 m 程度の点群データがほとんど得られない範囲が生じる。周囲に十分な数の立木が無い溪流では、各計測地点で得られた点群データ合成のために反射材付きの杭を設置する必要がある。

(3) SfM

「強み」・・・解析が成功すれば、鮮明な点群データが得られる。

「弱み」・・・撮影動画の SfM-MVS 解析にはスペックの高いパソコンと高価な解析ソフトが必要である。解析にはかなりの長時間を要し、不調となってデータが得られないケースも多い。生成された点群データにノイズが多い。広い溪流、調査距離の長い溪流への適用は撮影、解析の困難さから不向きである。点群データに座標付けを行う必要がある。

以上の特徴をふまえると、SfM は弱みが多く、実用性が低いと判断されることから、iLiDAR

と SfM では、iLiDAR の方が流木調査に適していると考えられる。本数検出率、材積検出率ともに、さらに改善する必要があるものの、事業実施効果の評価において、事業の実施前後や溪流間での相対的な比較に活用することは可能だろう。しかし、レーザ計測可能距離が短いことから、流路幅の広い溪流や長大な倒流木が多い溪流への適用は不適である。そのため、様々なタイプの溪流で適用可能とするには、より広範囲まで計測することが可能な移動式 TLS の使用を検討する必要がある。最近では、安価な SLAM LiDAR が発売されるようになってきていることから、今後はこれらの流木量調査への使用可否についても検討したい。

謝辞

本研究の実施にあたり、調査地の使用をご許可いただいた森林所有者様、調査にご協力いただいた竹内春仁氏をはじめ三重県林業研究所の職員に対して深く謝意を表します。

引用文献

- Koi T, Hotta N, Tanaka Y, Katsura S (2022) Generation and subsequent transport of landslide-driven large woody debris induced by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake. *Frontiers in Earth Science* 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.769061>
- 檜原幸子・長島啓子 (2020) BLK360 による森林調査手法とその精度. *森林計画会誌* 54: 23- 29
- 小川泰浩・村上 亘・玉井幸治 (2021) 携帯型地上レーザースキャナによる木製治山堰堤の形状測定手法. *日緑工誌* 471: 165-168
- 及川 希・木村徳志・羽塚冬馬・鈴木智之 (2023) iPhone LiDAR を林業に活用する試み 地拵え地の区画測量から植栽予定区域の面積を算出する事例. *北森研* 71: 31-34
- 坂本静生 (2022) ゼロからわかる 3次元計測-3D スキャナ, LiDAR の原理と実践-. 東京: オーム社
- 関 才門・坪内孝司・皿田 滋・原 祥堯 (2018) 平地林での 3次元地図生成による立木位置と胸高直径の連続移動計測. *日本機械学会論文集* 84: 17-00379, <https://doi.org/10.1299/transjsme.17-00379>
- 島田博匡 (2020) 災害に強い森林づくりの推進と効果検証. *森林科学* 90: 32-35
- 島田博匡 (2023) 倒流木を除去した溪流区間における倒流木の再発生量と発生要因. *三重県林業研報* 13: 1-10
- Shimizu K, Nishizono T, Kitahara F, Fukumoto K, Saito H (2022) Integrating terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry to estimate individual tree attributes in managed coniferous forests in Japan. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 106: 102658
- 塩沢恵子・望月寿彦・佐々木浩二 (2022) 上空リモートセンシング立木データと森林内 Lidar 計測立木データとの結合による森林資源データの精密化. *日本リモートセンシング学会誌* 42: 29-35
- 瀧 誠志郎・中澤昌彦・斎藤仁志・大野勝正・鈴木秀典・吉田智佳史・千原敬也・関子光太郎 (2020) 動画データによる作業道の三次元点群データの構築. *森利誌* 35: 203-208
- Tatsumi S, Yamaguchi K, Furuya N (2023) ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR - equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution* 14: 1603-1609

Tsunetaka H, Mtibaa S, Asano S, Okamoto T, Kurokawa U (2021) Comparison of length and transport of entrapped woody debris in coniferous and broadleaf forests based on mapping using ortho-photographs acquired by uncrewed aerial vehicle. *Progress in Earth and Planetary Science* 8: 22. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00419-6>

山田隆信 (2020) ICT を活用した林業経営の効率化. *森林応用研究* 29: 19–22

Yrttimaa T, Saarinen N, Luoma V, Tanhuanpää T, Kankare V, Liang X, Hyypä J, Holopainen M, Vastaranta M (2019) Detecting and characterizing downed dead wood using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 151: 76–90