

標準地法による林分材積推定における UAV-SfM 法活用の有効性

鶴崎 幸*・桑野泰光¹⁾・檜崎康二¹⁾

主伐予定地などで林分材積を推定する場合、一般に標準地法により収穫調査が行われるが、調査者の経験や主観によつては正確度が低下する。収穫調査に UAV-SfM 法から作成した DSM と ALS 由来の DTM を利用することにより、対象地全体の樹高や立木材積をいつでも簡易かつ正確に計測できる可能性がある。しかし、UAV-SfM 法による森林計測では、地上計測による樹高計測値との間に数メートル単位の誤差が含まれることから、誤差を許容しつつ収穫調査に活用することが望ましい。そこで本研究では、標準地法による林分材積推定の精度向上を目的として、標準地調査結果を面積拡張して全体の材積を推定する際、対象地全域の高さ情報やその空間分布が把握できる UAV-SfM 法により得た樹高または材積値により補正する手法を考案し、補正前後を比較検証した。ALS から算出した林分材積を検証の真値と定義し、ALS に基づく標準地調査結果について補正なし、UAV 樹高補正、UAV 材積補正別に各 10 万回試行した結果、UAV 材積補正が標準地法による林分材積推定の精度向上に寄与した。

[キーワード：標準地法、収穫調査、UAV-SfM 法、材積補正]

Effectiveness of the Unmanned Aerial Vehicle-Structure from Motion (UAV-SfM) Method for the Estimation of Stand Volume. TSURUSAKI Yuki, Yasumitsu KUWANO and Koji NARAZAKI, (Fukuoka Agriculture and Forestry Research Center, Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan) *Bull. Fukuoka Agric. For. Res. Cent.* 11 : 30 - 37 (2025)

Selective sampling has been widely adopted for stand-volume estimation. However, the accuracy of this method is low, owing to the variability of the investigator's experience and subjectivity. To address this limitation, we developed a new method for stand-volume estimation by correcting the selective sample method based on the data of the tree height and determining the spatial distribution of each tree in the forest stand by using unmanned aerial vehicle-structure from motion (UAV-SfM) images. We selected a Sugi plantation to test the effectiveness of the new method for stand-volume estimation. Furthermore, the stand-volume was calculated from the LiDAR data of the region. A 3D model was constructed based on UAV images; the mean tree height and stand-volume were also determined from these images. The stand-volume estimated using the selective sampling method was corrected using the data obtained from the UAV-SfM images. The improvement rate of the estimation accuracy was defined as the percentage of the interval of stand-volume estimation compared to the interval considered for the selective sample method; the estimations conducted using the selective sample method were corrected for the mean tree height and stand volume derived from UAV-SfM images. The new method improved the accuracy of the stand-volume estimations; notably, the accuracy of the estimations conducted using the data corrected based on the stand-volume was higher than that based on the mean tree height.

[Keywords: selective sampling, stand-volume estimation, UAV-SfM, volume correction]

緒 言

福岡県では、県産木材の供給力強化や森林資源の循環利用を図るため、主伐の推進に取り組んでおり、令和 4 年度の原木生産量はこの取組をはじめて以来最高値となつた（福岡県 2023）。主伐などを行う前に、伐採木の樹種や立木材積、品質などを調べることを収穫調査という（細田・家原 2014）。毎木調査法による収穫調査は、すべての立木を対象とするため林分面積が大きくなるにつれて調査に要する時間と経費が増大する（大隅ら 1976）。これに対し標準地法は、対象林分から一定の面積の代表的（平均的）部分を抽出し、その代表部内ののみ調査を行い、結果を面積比によって林分全体に拡張する調査法で（大隅ら 1976, 細田ら 2012），実行が容易であることから、収穫調査などの森林調査で広く用いられる方法である。しかしながら、林分内において個々の立木の成長や空間分布は多様であるため、対象地全域を代表する標準地の設定は難しく、調査結果の正確度は調査者の経験や主観に左右

されるという欠点が指摘されている（細田ら 2012）。したがって、標準地法の容易性と、調査者に依存しない高い客観性を兼ね備えるとともに、対象地全域の複雑な林況を正確に捉えられる手法の確立が求められている。

リモートセンシング技術は人工林の現況を把握する上で極めて有効なツールであり（村上・高橋 2012），上空から撮影できる機器を利用してありのままの森林の様子を面として捉え、解析にコンピュータを利用することで巨視的な特性把握、客観性、再現性のある結果が得られる（加藤 2014）。特に、UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 無人航空機) を用いた近接リモートセンシングは、利便性が高く、比較的安価に実施できることから、近年、様々な分野で利用されている（鄧ら 2018）。UAV が注目を集めようになつたのは、異なる方向から撮影した複数のステレオ写真を用いて撮影位置と対象物の 3 次元構造を復元する SfM (Structure from Motion) 技術（田村ら 2015）の急速な普及が大きく関与している（村上 2018）。つまり、UAV で対象地の画像を撮影し、SfM 处理まで実行するこ

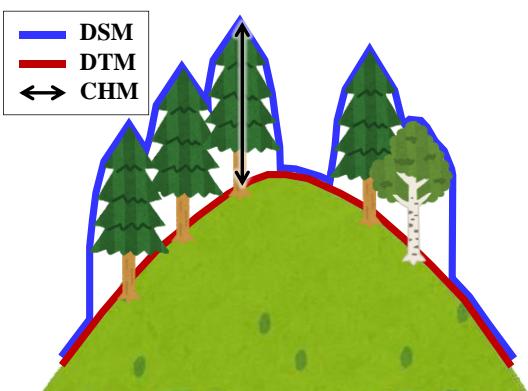
*連絡責任者（福岡県筑後農林事務所 : tsurusaki-y8998@pref.fukuoka.lg.jp）受付 2024 年 7 月 19 日；受理 2024 年 11 月 7 日
1) 森林林業部

と（以降、UAV-SfM 法）により、これまで航空会社が高価な機材を使用して撮影した空中写真から作成せざるをえなかった詳細な DSM (Digital Surface Model : 数値表層モデル)などを調査者自身が作成でき（竹島 2014），手軽に撮影対象物の高さ情報や空間分布を把握できるようになった。

森林計測では、DSM と DTM (Digital Terrain Model : 数値地表モデル) の差分から求められる CHM (Canopy Height Model : 林冠高モデル) が地表面からの高さを表すことから（第 1 図），森林資源解析へ広く利用されている（福士ら 2008）。DTM を整備できる ALS (Airborne Laser Scanning : 航空レーザ測量) は、1 点/m² 以上の密度で公共測量の成果として全国の約 53% の森林において計測されており（国土交通省 2018），今後も実施率は伸びていくことが予想される。収穫調査に UAV-SfM 法から作成した DSM と，ALS 由来 DTM (以降、ALS.DTM) を利用することにより、対象地全体の樹高や立木材積をいつでも簡易かつ正確に計測できる可能性があることから、収穫調査に適応できる技術の開発が期待されている。

しかし、森林計測の研究事例の中では樹高について、地上計測値と、UAV-SfM 法から作成した DSM と ALS.DTM の差分処理による CHM から得た計測値（UAV-SfM 法による樹高）が完全に一致せず、数メートル単位の誤差が含まれることが明らかにされている（田村ら 2015, 矢田ら 2018, 鄧ら 2018）。したがって、UAV-SfM 法により得た樹高値をそのまま、スギ・ヒノキ人工林の収穫調査の樹高や材積の絶対値として利用することは難しい。一方で、標準地法により部分的に現地調査を実施した場所の材積や樹高の絶対値を入手することと併せて、UAV-SfM 法により広域の画像範囲内から対象地全域および標準地調査を実施した場所の高さ情報やその空間分布を把握し、対象地全体に対して標準地調査を実施した場所の樹高や材積を評価することができれば、現地調査で得た結果を面積比により林分全体に拡張する際の補正值として利用できるため、林分材積推定の精度が向上すると考えられる。

そこで本研究では、標準地法による林分材積推定結果



第 1 図 解析対象の空中写真

- 1) CHM = DSM - DTM
- 2) DSM と DTM は標高値であり、CHM は地表面からの高さを示す値である

を、UAV-SfM 法から得た樹高または材積情報で補正する手法を開発し、補正前と比較して、どの程度精度が向上するのかを検証する。

なお、標準地法は通常、標準地内の現地調査により輪尺を用いた胸高直径と測高器を用いた樹高の計測が行われる。しかし、本研究のように精度を検証する場合、対象林分に存在する全ての立木を対象に計測し、立木位置情報も測量する必要があるため、膨大な労力がかかってしまう。ALS を利用した既往の研究について整理すると、Takahashi *et al.* (2005a), 平田 (2005a) がスギ林、平田 (2005b) がヒノキ林を対象としてそれぞれ樹高を推定しており、いずれも高い推定精度があることが報告されている。また、材積推定については Takahashi *et al.* (2005b) がスギ林、伊藤ら (2011) がスギおよびヒノキ林の立木幹材積を精度よく推定している。よって本報では、ALS により得た林分情報を真値として位置づけ、ALS により得た樹高、立木位置およびこれらをもとに算出した立木材積について、標準地法のシミュレーションを行い、現地調査の代替とした。

材料および方法

1 対象地

研究対象地は、福岡県朝倉市黒川に位置する人工林 (130° 45' 34.5204" E, 33° 25' 43.6548" N ~ 130° 45' 42.9804" E, 33° 25' 37.4268" N) である。対象地の面積は約 2.7ha (東西 200m, 南北 160m) で、標高の分布範囲は 160~260m である。1952 年にスギが植栽された林分で、UAV による調査を実施した時点で 67 年生であった。

2 解析方法

解析のフローチャートを第 2 図に示す。解析は、以下の手順で構成される。(1) 検証の真値とした ALS による林分材積の算出、(2) 標準地法による林分材積の推定、(3) UAV-SfM 法による標準地調査の補正用 UAV 調査平均樹高・材積の算出、(4) UAV-SfM 法による標準地調査の補正、(5) 精度検証である。まず、(1) 対象地の林分材積をあらかじめ把握し、真値と位置付けた。(2) 標準地法で推定した林分材積と、(3) および (4) UAV-SfM 法による補正值を比較し、(5) 精度が向上するのかを明らかにする。

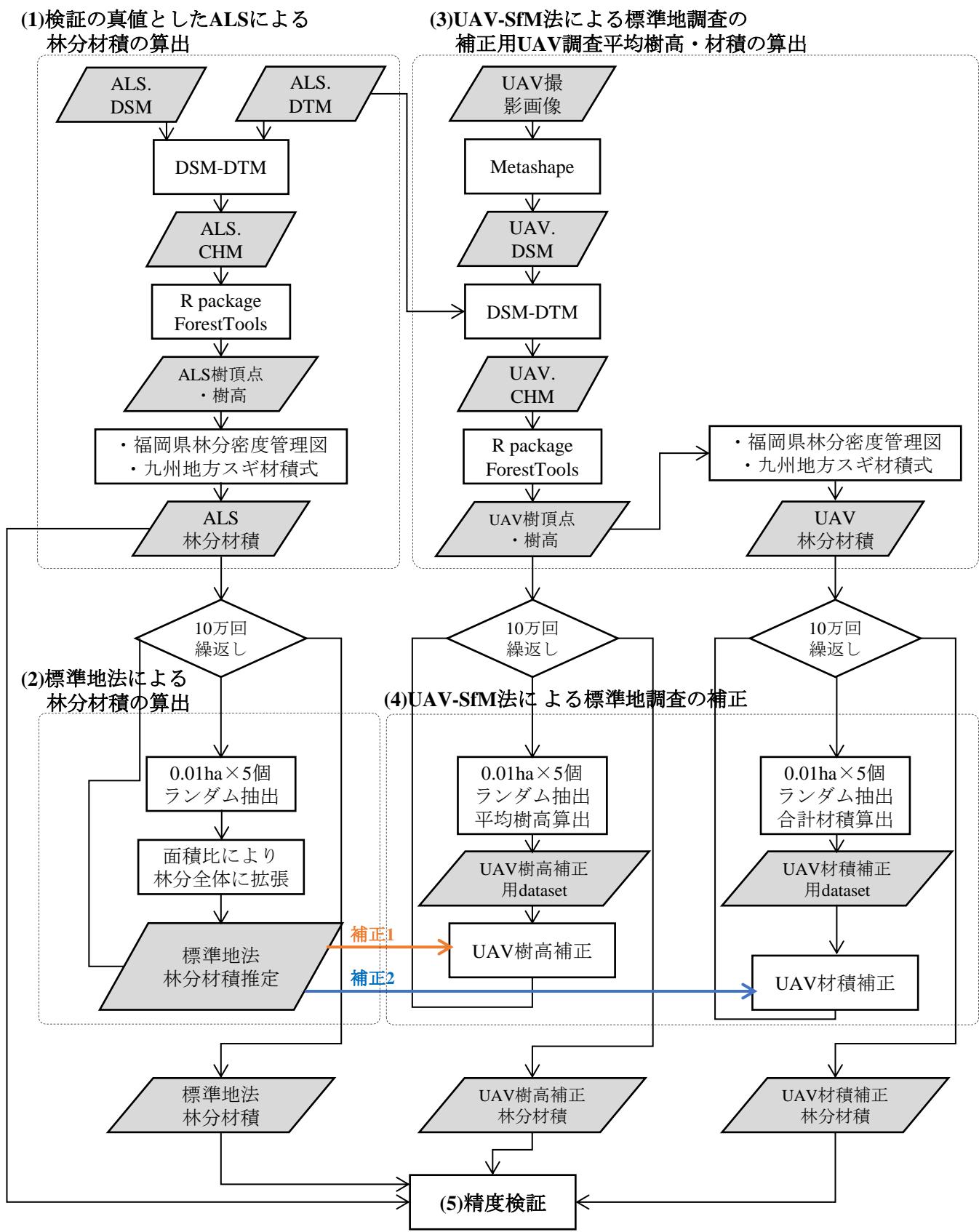
(1) 検証の真値とした ALS による林分材積の算出

ア 使用したデータ

本研究の真値である対象地の林分材積は、ALS から求めた値とした。解析に使用した ALS データは、2017 年 7 月 13 日から 8 月 2 日にかけて航空機により対地速度 93 ~ 222km/h, パルスレート 80.0 ~ 165.4kHz, スキャン角度 ±30 度の設定で計測された。得られた点群データから 1m グリッド形式で DSM (以降、ALS.DSM), DTM (ALS.DTM) を算出した。

イ 樹頂点の抽出と樹高値の算出

樹頂点の抽出には、R version3.6.3 (R Core Team 2020) のパッケージ ForestTools (Plowright and Roussel 2018) を用いた。これは、CHM 上で可変のフィルタを走査し、フ



第2図 解析のフローチャート

ィルタ内で最も高いピクセルを樹頂点と定義するものである。フィルタサイズ (lin) は CHM の値 (x) により変化し、(1) 式により定義した。

$$\text{lin} = 0.03x + 0.6 \quad (1)$$

解析に供した CHM は、ALS.DSM から ALS.DTM を減算して作成し、抽出した樹頂点の位置座標における CHM の値を単木樹高 (H) とした。

ウ 単木材積の算出

立木の単木材積 (v) は、(2) 式に示す九州地方スギ材積式 (林野庁計画課編 1970) から求めた。

$$v = 10^{-5} + 0.796182 + 1.8196290 \log(\text{DBH}) + 1.0257380 \log(H) \quad (2)$$

ここで、単木胸高直径 (DBH) は、福岡県林分密度管理図 (檜崎ら 2015) に既定される (3) 式により求めた。

$$\text{DBH} = \frac{\left(\frac{0.0498 H^{1.32613} + 773.4629 H^{2.27465}}{N} \right)^{-1}}{\sqrt{\frac{2.35638 + 0.26154 H + 0.26166 \sqrt{N}}{\pi N}}} \quad (3)$$

ここで、N は林分における ha あたり立木本数である。

単木材積の算出結果は、単木材積値として樹頂点データに追加で保存した。

エ 標準地データセットと真値の算出

標準地法の実行にあたり、対象地内に一辺 10m の方形区を敷き詰め、エリア内に完全に含まれるもののみを抽出し、230 個の方形区を配置した (第 3 図)。方形区ごとに、樹頂点の合計数 (以降、ALS 調査本数)、単木樹高値の算術平均により平均樹高 (以降、ALS 調査平均樹高)、単木材積値の総和により方形区内の材積 (以降、ALS 調査材積) を算出した。これにより、方形区について方形区 ID (1~230)、ALS 調査本数、ALS 調査平均樹高、ALS 調査材積をもつ標準地データセットを作成した。標準地データセット 230 個の ALS 調査材積の総和を、本研究における林分材積の真値とした。

(2) 標準地法による林分材積の推定

標準地法による林分材積の推定値 (V) は、通常の標準地法を想定し、230 個の標準地データセットの中から無作為に抽出した 5 個の方形区について、(4) 式により求めた。

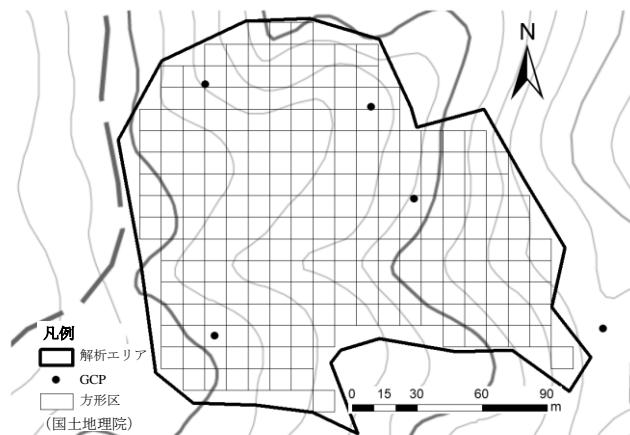
$$V = \frac{230}{5} \sum_{i=1}^5 V_{l,p_i} \quad (4)$$

ここで、 V_{l,p_i} は抽出した各方形区の ALS 調査材積である。

(3) UAV-SfM 法による標準地調査の補正用 UAV 調査平均樹高・材積の算出

ア UAV による空撮

空撮に使用した UAV は、Phantom4 Pro (DJI 社製) である。空撮用のカメラは、本機器に標準搭載されている高画質小型軽量カメラ (35mm 換算での焦点距離 24mm、有効画素数 2,000 万画素) を用いた。空撮は、マニュアル操作とし、南西から北東へと一定の高度で UAV を往復飛行させ、真下向きに固定したカメラによりインターバル撮影間隔 2 秒で実施した。この際、樹高計測で推奨される撮影条件として、撮影高度は撮影対象物からの高度 30~60m (小林 2020)、撮影された写真のオーバーラップ率は



第 3 図 対象地に配置した GCP (地上基準点) および方形区

85%以上 (加治佐ら 2017) となるよう留意した。

撮影は、2019 年 1 月 20 日に行った。天候は曇り、風速はほぼ無風であった。撮影時のカメラ設定は、オートとした。撮影高度は、地上高度平均 56.3m であった。

イ SfM 处理

UAV による空撮で得た 320 枚の画像を SfM 处理し、対象地の DSM を作成した。SfM ソフトウェアは Metashape version1.6.2 (Agisoft 社製、以降 Metashape) を用いた。Metashape の処理は大きく分けて 3 つの工程 (①Align Photo, ②Build Dense Cloud, ③Build Mesh) から成り、いずれも処理の Quality を「High」に設定した。GCP (Ground control point : 地上基準点) は、撮影範囲内にある道路端などの上空から位置を確定できる場所に 5 点配置し、ALS.DTM から緯度、経度、標高を読み取った (第 3 図)。

以上の設定により、Metashape から DSM および正射投影写真 (以降、オルソ写真) を出力した。GCP による位置情報の補正効果を確認するため、GCP の配置前後で移動した位置座標の距離を、経度方向、緯度方向、高さ方向別に算出した。解析に使用したコンピュータは、CPU:Intel (R) Core (TM) i7-4790@3.60GHz, メモリ:24GB, GPU: GeForce GTX970 である。

ウ 樹頂点の抽出、単木材積の算出

Metashape で作成した DSM はピクセルサイズが 2.92cm であった。これを空間情報の解析ソフトウェア ArcGIS10.5 (ESRI 社製) に取り込み、BILINEAR 法でピクセルサイズ 1m にリサンプルしたのち、DSM から ALS.DTM を減算して CHM を算出した。

2 (1) イおよびウに記載の方法で、CHM から樹頂点を抽出し、単木樹高と単木材積を算出した。

エ 补正用データセット

第 3 図に示す方形区ごとに、UAV-SfM 法により求めた樹頂点の合計数 (以降、UAV 調査本数)、単木樹頂点データに含まれる樹高値から算術平均法により平均樹高 (以降、UAV 調査平均樹高)、単木材積値の総和により方形区内の材積 (以降、UAV 調査材積) を算出した。これにより、方形区について方形区 ID (1~230)、UAV 調査本数、

UAV 調査平均樹高, UAV 調査材積をもつ補正用データセットを作成した。

(4) UAV-SfM 法による標準地調査の補正

ア 補正 1 : UAV 調査平均樹高による標準地法の補正

UAV-SfM 法による樹高推定の結果に基づき, (5) 式のとおり標準地法による林分材積 (V) を補正した林分材積 (V_{cH}) を求めた。本補正是、対象地全体の平均樹高に対して抽出した標準地の平均樹高の大小を評価したものである。

$$V_{cH} = \frac{H_{all}}{\bar{H}} V \quad (5)$$

ここで, H_{all} は 230 個すべての方形区の UAV 調査平均樹高を算術平均した樹高 (m), \bar{H} は抽出した 5 つの方形区の UAV 調査平均樹高の算術平均値 (m) である。

イ 補正 2 : UAV 調査材積による標準地法の補正

UAV-SfM 法による材積推定の結果に基づき, (6) 式のとおり標準地法による林分材積 (V) を補正した林分材積 (V_{cV}) を求めた。本補正是、対象地全体の林分材積に対して標準地の林分材積の大小を評価したものである。

$$V_{cV} = \frac{5}{230} \frac{Vu_{all}}{\sum_{i=1}^5 Vu_{pi}} V \quad (6)$$

ここで, Vu_{all} は 230 個の方形区の UAV 調査材積の総和 (m^3), Vu_{pi} は抽出した各方形区の UAV 調査材積 (m^3) である。

(5) 精度検証

ア 標準地データセットと補正用データセットとの関係

精度を検証するにあたりまずは、同一方形区における標準地データセット (ALS 由来) と補正用データセット (UAV 由来) との関係を評価した。本数については、ALS 調査本数と UAV 調査本数との差分をとり、ALS 計測本数に対する UAV 調査本数の増減を算出した。平均樹高または材積については、ALS 調査分を目的変数、UAV 調査分を説明変数とした単回帰分析を行うとともに、RMSE (Root Mean Squared Error : 二乗平均平方根誤差) を算出した。

イ 林分材積の精度検証

精度を評価する指標には、真値にどれだけ近い値であるかを示す正確度 (Accuracy) と、複数回の測定間での相互のばらつきの程度を示す精密度 (Precision) を使用した。

まずは (4) 式による標準地法、(5) 式による補正 1 (標準地法を UAV 調査平均樹高により補正)、(6) 式による補正 2 (標準地法を UAV 調査材積により補正) を各 10 万回試行し、それぞれの結果として 10 万個の林分材積推定値を得た。正確度は、真値と各林分材積推定値の中央値との差分とした。これは、値が 0 に近いほど正確度が高いことを意味する。精密度は、各林分材積推定値の標準偏差とした。これは、標準偏差の絶対値が小さいほど、精密度が高いことを意味する。

結 果

1 UAV-SfM 法による画像処理

GCP を配置して作成した DSM の位置は、GCP を配置

しなかった場合の UAV に内蔵された GNSS (Global Navigation Satellite System ; 全地球航法衛星システム) で単独測位した位置から作成した DSM に対し、東経方向に 1.3m、北緯方向に 2.9m、高度は下方向に 57.8m 移動した。

UAV-SfM 法により作成した CHM と、樹頂点の抽出結果を第 4 図に示す。CHM の値は -8m から 33m の値に分布しており、樹冠の凸凹が表現されていた。オルソ写真を用いて目視で確認した結果、UAV-SfM 法により抽出した樹頂点は各スギの樹頂の位置を捉えていた。

2 標準地データセットと補正用データセットとの関係

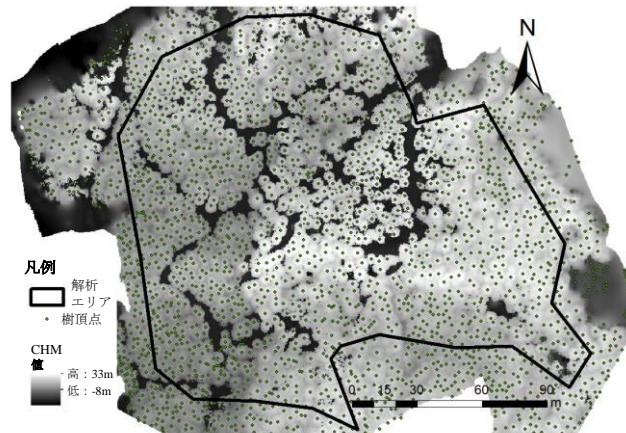
ALS 調査本数に対する UAV 調査本数の差を第 1 表に示す。本数が一致した方形区の割合が 28%, 誤差 1 本の割合が 41% で、両者の合計が全体の 69% を占めた。

ALS 調査平均樹高と UAV 調査平均樹高の散布図を第 5 図に示す。UAV 調査平均樹高に対する ALS 調査平均樹高の回帰直線結果について、傾き 0.99, 切片 1.73 であり、UAV 調査平均樹高は ALS 調査平均樹高に対して 1.73m 低く推定された。

ALS 調査材積と UAV 調査材積の散布図を第 6 図に示す。ALS 調査材積と UAV 調査材積との間に正の相関関係 ($R^2=0.50$) が認められたものの、樹高 (第 5 図) ($R^2=0.92$) と比較して相関が低かった。

3 林分材積の精度検証

ALS 調査材積の総和より求めた本研究における林分材積の真値は $885.8m^3$ であった。標準地材積、UAV 樹高補正材積、UAV 材積補正材積の正確度は、順に $-5.8m^3$,



第 4 図 UAV (無人航空機) 撮影画像から作成した CHM (林冠高モデル) と樹頂点

第 1 表 ALS に対して UAV 撮影画像由来の CHM (林冠高モデル) から求めたスギ本数の差

	本数 (本)				
	±0	±1	±2	±3 以上	合計
プロット数	64	94	48	24	230
割合	28%	41%	21%	10%	100%

-28.3m³, 2.4m³ であった。また、精密度は、標準地材積、UAV 樹高補正材積、UAV 材積補正材積の順に 158.0m³, 136.9m³, 126.6m³ であった（第 7 図）。

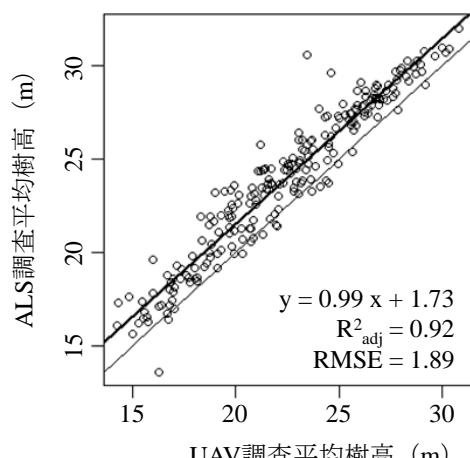
考 察

1 GCP の設定による位置精度の向上

通常、スギは約 2m 間隔で植栽されるため、単木樹高を算出するためには、DSM と DTM の位置情報の誤差を少なくとも 2m 以内に収める必要があるだろう。本報において、UAV-SfM 法により作成した GCP 補正前の DSM は、xyz 方向に 1.3m~57.8m 移動しており、位置情報の誤差が大きかった。DSM と DTM との差分である CHM から樹高を算出する手法では、場所や地形により標高や起伏が細かく変化している山地の場合、両者の位置が正確に重なり合わないと、誤った樹高情報が得られてしまう。DSM と DTM の計測由来が異なる場合、位置補正することなく 3 次元モデルを作成すると林分構造推定を行えないことが、過去にも報告されている（小川ら 2017）。したがって、正確に樹高を計測するには、GCP の設定や RTK-UAV（Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System 搭載型 UAV：リアルタイムキネマティック GNSS 搭載型 UAV）の利用により DSM と DTM の正確な位置合わせが必要不可欠と考えられる。

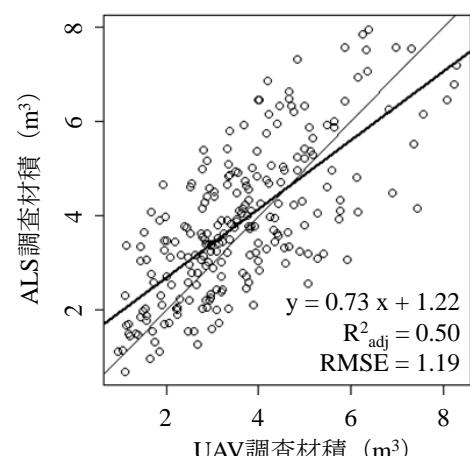
2 UAV 調査結果の補正值としての利用

設定した方形区ごとの UAV 調査平均樹高と ALS 調査平均樹高から得た単回帰結果において、傾きがほぼ 1 に近かったことから（第 5 図）、本研究で行った UAV-SfM 法を用いて作成した DSM の樹頂点周辺の推定は、真値と位置付けた ALS 調査と同等程度に推定できた。植生の 3 次元モデルの測量精度や再現性が落ちるのは、樹冠の影の部分がデータとして欠損することが原因であり（酒井ら 2016），本研究では曇天日に樹木の梢端の影を極力抑えて撮影できたことが、樹頂点周辺の樹高を良好に推定できた要因と考えられた。一方、切片が 1.73、すなわち UAV



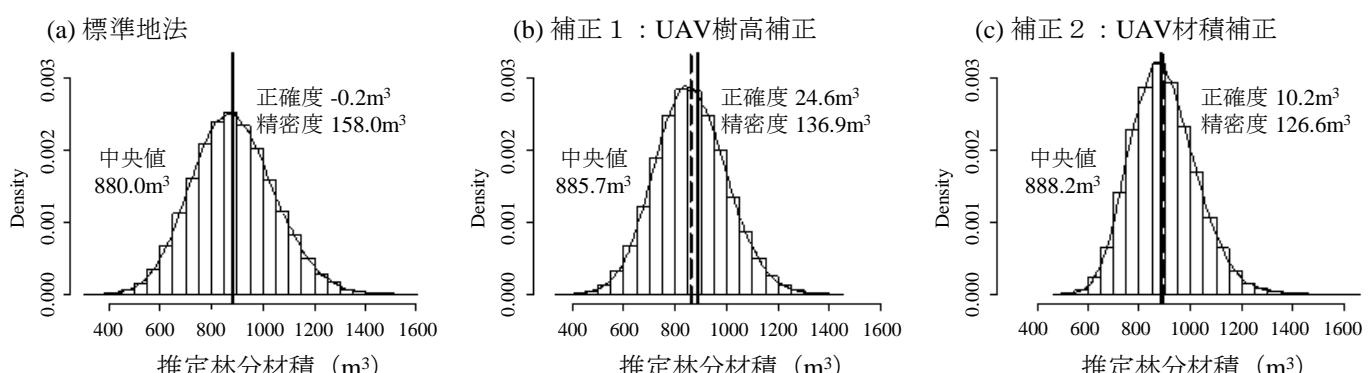
第 5 図 方形区ごとの UAV（無人航空機）調査平均樹高と ALS 調査樹高の関係

- 1) 細い実線は、y=x の直線を示す
- 2) 太い実線は、単回帰分析結果を示す



第 6 図 方形区ごとの UAV（無人航空機）調査材積と ALS 調査材積の関係

- 1) 細い実線は、y=x の直線を示す
- 2) 太い実線は、単回帰分析結果を示す



第 7 図 標準地法、UAV 樹高補正、UAV 材積補正による林分材積推定値の分布

- 1) 実線は、真値（885.8m³）を示す
- 2) 点線は、それぞれの方法において林分材積推定を 10 万回繰り返して得た結果の中央値を示す
- 3) 正確度は、真値から林分材積推定値を減算した値である
- 4) 精密度は、林分材積推定値の標準偏差である

調査平均樹高に対して ALS 調査平均樹高の方が総じて 1.73m 高かった結果（第 5 図）は、UAV-SfM 法により得た DSM が実際の樹冠高よりも高度方向に-1.73m 平行移動して作成されたことを意味する。UAV-SfM 法による 3 次元計測では、標高に関しての信頼性は低く、撮影高度や撮影位置によって予測精度に違いが生じるもの、形状はよくとらえられる（上野 2016）。矢田ら（2018）は、8か所のスギ人工林において樹高の地上計測値に対する UAV 計測の RMSE を求めた結果、1.4~4.4m と比較的大きかったことを報告した。このように、UAV-SfM 法による樹高計測は誤差を伴うものであり、どの程度の誤差が生じるのかをあらかじめ予測できるものでもない。しかしながら、UAV-SfM 法により得た樹高のサイズ分布を絶対値ではなく相対値として利用することは標準地法の精度向上のための選択肢のひとつになり得ると考えられる。

一方、ALS 調査材積と UAV 調査材積の関係について（第 6 図）、傾きは正の値であり、ALS 調査材積が大きい場所は UAV 調査材積も大きいという傾向が得られた。そのため、UAV 調査材積も相対値として利用することは検討に値すると考えられる。ただし、樹高（第 5 図）と比較して材積（第 6 図）のばらつきが大きかった。これは、樹高は各方形区の平均値であるのに対し、材積は単木材積の累積値であることに起因すると考えられる。すなわち、各方形区に含まれるスギの本数は、ALS 調査と UAV 調査において 72% の方形区で一致しなかったこと（第 1 表）、両者の本数が異なる場合、樹高は平均化されるため影響は少ないが、材積は方形区に含まれる立木の単木材積の総和であり、立木 1 本ごとのカウント誤差が累積されることから、材積のばらつきが大きくなった可能性がある。ALS 調査と UAV 調査で各方形区の本数が異なった原因は、SfM 処理時に生じる歪みにより、ALS と UAV で樹頂点の位置情報に誤差が生じ、方形区の境界付近に位置する立木が各調査で異なる方形区に振り分けられたことが考えられる。山手ら（2020）は、ALS と UAV の樹頂点の水平位置について精度を検証し、最大誤差 1.53m、RMSE 0.74m であり、樹頂点同士の比較である点を考慮するとかなり良好な結果であったと考察していることから、既往の研究において樹頂点の位置にはサブメーター級の誤差が伴うことが明らかとなっている。また、UAV 調査樹高よりも ALS 調査樹高の方が 1.73m 高いため、常に UAV 調査材積よりも ALS 調査材積の方が大きいことが予想されたが、結果は材積 5m³ 付近を境に、UAV 調査材積の方が ALS 調査材積よりも大きくなった（第 6 図）。これは、材積が 5m³ より大きな範囲においてデータ数が少ないと、その要因を考察するのは今後の課題とする。

3 UAV-SfM 法を用いた標準地調査の精度向上

今回提示した UAV-SfM 法を用いた標準地調査法の補正では、標準地法と比較して UAV 調査平均樹高を用いることで正確度は低く、精密度は高くなった一方、UAV 調査材積を用いることで正確度は同等、精密度は高くなつた（第 7 図）。この結果から、収穫調査を標準地法で実施する場合、単に標準地法を実施するよりも UAV 調査材積を

用いた補正を行う方が、精度向上に寄与することが示唆された。

一般に人工林は、植栽当初は一定の間隔で植栽されるが、林分の成長に応じて除間伐等の育林作業が進められ、第 4 図のように本数や個体サイズが不均質な林分に変化する。そこで、標準地法を補正するためには、この不均質性を反映できる補正值が必要であり、UAV 調査材積による補正は、この点で UAV 樹高補正よりも優れた補正であったといえる。航空写真から林分材積を推定する航空林分材積式に関する研究では、樹高が最も強い影響を持つ（今永 1973）とされており、本研究でも実際に UAV 調査平均樹高補正により、材積推定の精密度向上に寄与した。しかし、正確度は低下しており、樹高の大小だけでは対象地内の材積分布の不均質を表現することは不十分であった。今回設定した方形区（標準地）のように、局所的な範囲内における立木材積を把握するためには、区内に含まれる立木本数は重要な要素である。実際に今永（1973）は、これまでに発表された航空林分材積式は 2 つの変数を用いるものが多く、林分材積と強い関係を持つものは樹高に次いで立木本数であることを報告した。UAV 調査材積補正是樹高と立木本数の 2 因子が加味されるため、精度向上に寄与したと考えられる。

本研究で提唱した手法は、UAV-SfM 法により、対象地全体に植栽木がどのように配置され、どのような材積分布であるのかを把握し、標準地調査の結果を補正するハイブリッド方式である。たとえ設定した標準地が林分の平均的な材積を持つ場所ではなかったとしても、真の林分材積に近い結果に補正できるため、経験の浅い調査者ほど、本手法の導入効果は大きいと考えられる。

4 まとめ

本研究では、標準地法による収穫調査の精度向上のため、UAV-SfM 法による材積補正值の使用を提案し、正確度および精密度が向上するという結果が得られた。しかし、皆伐前の林地では周辺の樹木の高さが高く、目視内飛行により対象地全域を撮影することが困難な林地が多い。また、皆伐予定の林分の樹冠はうつ閉しており、上空からは地表面が確認できることも多く、GCP を設置できないことも想定される。今後は、このような現場で生じる問題を解決していくことが重要である。

引用文献

- 福岡県（2023）福岡県農林水産業・農山漁村の動向—令和 4 年度 農林水産白書—
- 福士亮太・小熊宏之・米 康充・鈴木恵一・岡野哲郎・藤沼康実（2008）高解像度デジタル航空写真と LiDAR データによる DTM を組み合わせたカラマツ林の現況推定. 日林誌 90 (5) : 297-305.
- 平田泰雅（2005a）航空機 LiDAR を用いたスギ・ヒノキ人工林の森林計測. 森林とリモートセンシング 44 : 14-17.
- 平田泰雅（2005b）航空機レーザースキャナデータを用い

- たヒノキ人工林における樹高と地形との関係. 日林誌 87 : 497-503.
- 細田和男・高橋與明・北原文章 (2012) 標準地法における調査区の大きさと形状の再検討. 日林誌 94 (3) : 105-111.
- 細田和男・家原敏郎 (2014) 国有林における外部委託による収穫調査費用の現状. 関東森林研究 65 (1) : 73-74.
- 今永正明 (1973) 航空林分材積表に関する研究. 山形大学紀要 6 (4) : 57-125.
- 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 (1) : 18-26.
- 加治佐剛・鎌田侑成・寺岡行雄 (2017) UAV を用いた SfM による単木 3D モデリング—画像オーバーラップ率が 3D モデルの精度に与える影響—. 九州森林研究 70 : 157-159.
- 加藤正人 (2014) 森林リモートセンシング第 4 版—基礎から応用まで—. 第 1 章 森林リモートセンシング. 日本林業調査会, 東京, p.13-28.
- 小林裕之 (2020) 撮影高度と DTM の違いが UAV-SfM による森林計測に及ぼす影響. 森林計画誌 53 (2) : 69-79.
- 国土交通省 (2018) 公共測量による航空レーザ計測成果の林業への活用可能性について 未来投資会議 構造改革徹底推進会合「地域経済・インフラ」会合 (農林水産業) (第 9 回) 配布資料. <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshiikaigi/suishinkaigo2018/nourin/dai9/siryous5.pdf> (2021 年 3 月 16 日調査).
- 村上拓彦 (2018) UAV を利用した森林リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌 38 (3) : 258-265.
- 村上拓彦・高橋雅博 (2012) スギ人工林の密度推定を行うために局所最大値フィルタ法を GeoEye-1 パンクロマチックデータに適用した研究. 新潟大学農学部研究報 65 (1) : 49-55.
- 檜崎康二・前田 一・佐々木重行 (2015) 福岡県版システム収穫表作成のためのスギ林分密度管理図および地位指標曲線の調整. 福岡県農林総試研報 1 : 38-43.
- 小川みゆき・太田徹志・溝上展也・吉田茂二郎 (2017) UAV と SfM を用いた森林計測における位置精度の検証. 九州森林研究 70 : 145-147.
- 大隅眞一・北村昌美・菅原 聰・大内幸雄・梶原幹弘・今永正明 (1976) 森林計測学. 株式会社養賢堂, 東京, p.1-319.
- Plowright A, Roussel J (2018) Package ‘ForestTools’, <https://cran.r-project.org/web/packages/ForestTools/index.html> (cited 17 March 2020)
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- 林野庁計画課編 (1970) 立木幹材積表—西日本編—. 日本林業調査会, 東京, p.1-319.
- 酒井健吾・山本遼介・長谷川宏一・泉 岳樹・松山 洋 (2016) 小型 UAV から撮影された直下視画像と斜め視画像を用いた森林樹冠の DSM 作成. 日本リモートセンシング学会誌 36 (4) : 388-397.
- Takahashi T, Yamamoto K, Senda Y, Tsuzuki M (2005a) Estimating individual tree heights of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR. J. For. Res. 10 : 135-142.
- Takahashi T, Yamamoto K, Senda Y, Tsuzuki M (2005b) Predicting individual stem volumes of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airbone LiDAR. J. For. Res. 10 : 305-312.
- 竹島喜芳 (2014) 森林リモートセンシング第 4 版—基礎から応用まで—. 第 7 章空中写真 8.3 D ソフト—日本林業調査会, 東京, p.124-125.
- 田村太壱・加藤 順・小花和宏之・吉田俊也 (2015) 小型 UAV による空撮と SfM を用いた樹高計測. 日本緑化工学会誌 41 (1) : 163-168.
- 鄧 博慶・福丸裕樹・張 煙・青野光子・清水 康・細井文樹・大政謙次 (2018) 小型 UAV を用いたカラマツ林の 3 次元リモートセンシングとその精度評価. Eco-Engineering 30 (1) : 1-6.
- 上野裕介 (2016) 自然環境分野における UAV (ドローン) を用いた簡易 3 次元計測技術の適用可能性と課題の検討. 応用生態工学 19 : 91-100.
- 矢田 豊・木村一也・渥美幸大・青木充弘・山路佳奈・川崎萌子・白井教男・三谷典夫 (2018) 石川県のスギ人工林における UAV を用いた林分材積の推定: 2017 年版材積推定モデルの検証. 中部森林研究 66 : 81-82.
- 山手規裕・長谷川尚史・小路丸未来 (2020) UAV 計測における位置決定手法の違いに注目した樹高, 樹木位置の精度比較. 写真測量とリモートセンシング 59 : 112-124.