

航空レーザ計測データによる 河道内に繁茂する竹林の体積推定法の検討

ESTIMATING VOLUME OF A RIVERINE BAMBOO FOREST USING AIRBORNE LASER SCANNING DATA

溝口裕太¹・手塚透吾²・斉藤展弘³・崎谷和貴⁴
Yuta MIZOGUCHI, Togo TEZUKA, Nobuhiro SAITOU and Kazutaka SAKIYA

¹正会員 博(工) 土木研究所流域水環境研究グループ(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 修(獣保) 土木研究所流域水環境研究グループ(同上)

³非会員 学(工) 国土交通省中国地方整備局浜田河川国道事務所
(〒697-0034 島根県浜田市相生町3973)

⁴正会員 修(工) 土木研究所流域水環境研究グループ(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

モウソウチク林を対象に、河道内植生管理の基礎情報である稈密度(立竹位置)と体積を推定するため、航空レーザ計測データの解析手法の構築を試みた。稈密度を計算する上で前提になる樹頂点抽出に関しては、その精度を意味するF値は最大で0.60、また、稈密度については、推定値と実測値の比は1.01倍になるなど既往研究と比較して高い精度が確認された。竹林の体積は、実測値と比べて1.68~1.70倍ほど過大に推定されたが、これは、数値表層モデルから求まる稈長の過大な推定が主因であることがわかった。一般には、植物の本数を精度よく推定するために樹頂点抽出手法の開発に焦点が当てられるが、モウソウチクの体積を求める上では、稈長を精度よく捉えることの相対的な重要性が示唆された。

Key Words: individual tree detection, local maximum filtering, airborne laser scanning data, volume, *Phyllostachys pubescens*

1. 序論

気候変動にともない水災害が激甚化・頻発化する昨今、流水抵抗となる河道内植生、とりわけ、樹木群の管理が治水上の課題として広く認識されている。その一方で、我が国の財政事情、将来にわたる労働力人口の減少など維持管理をとりまく現状を鑑みると、DX(Digital Transformation)の推進による植生管理の効率化、なかでも、現況を把握するためのモニタリング技術に対する期待が大きい。

近年の航空レーザ計測(Airborne Laser Scanning; 以下、ALS)技術の発展は目覚ましく、河川分野では、地形の把握を主目的とした定期縦横断測量への導入が直轄管理区間で進んでいる。他方、林業分野では、針葉樹人工林の資源管理におけるALS技術の活用が進み、樹木1本ごとの位置や樹高を推定する局所最大値フィルタリング(Local Maximum Filtering; 以下、LMF)など樹頂点位置の抽出手法の開発が行われている¹⁾。樹冠の最高点が

明瞭な針葉樹かつ間伐され密度が調整された人工林では、高い抽出精度が期待できるものの¹⁾²⁾、様々な樹種が存在し、密生する河道内樹木群への適用は容易ではない。なかでも、四国、九州地方の1級河川に繁茂する樹木の4割以上を占めるなど西日本を中心にみられるタケ類(水文学的な挙動を考慮し、本報では樹木として扱う。)は、旺盛な成長速度を持つため、定期的に伐採が必要な樹木として管理対象になりやすい³⁾。そこで本報では、ALSデータによる河道内植生モニタリングの第一歩として、竹林を対象に、河道の流下能力と伐採に係る維持管理費を計算する上での基礎情報となる稈密度(立竹位置)と体積を推定するための解析技術を構築することを目的とする。

2. 材料と方法

(1) 概要

現地では、検証データであるタケ1本ごとの基礎情報の記録と、体積推定の入力情報を取得するためにALSを

実施した。その後の解析では、ALSデータから生成した数値表層モデル (Digital Surface Model ; 以下, DSM) に、樹頂点抽出手法を適用し、単木情報 (1本ごとの立竹位置、稈長など) を求めた上で、アロメトリー式 (2. (4)) から体積に換算した。その後、ALSデータに基づく推定体積と、現地調査に基づく実測体積との比較から精度検証を行うとともに、DSMと樹頂点抽出手法から求まる稈長と稈密度の精度が体積の推定に及ぼす影響を感度分析から明らかにした。

(2) 現地調査

a) 立竹調査

江の川水系江の川 (43kp) の竹林に設定した2箇所の方形区 (10m×10m) を調査地とし、立竹位置の調査 (2021年12月21～22日)⁴⁾と、伐採後の稈長の計測 (2022年2月15日～22日) を実施した。調査地は、モウソウチク (*Phyllostachys pubescens*) が優占し、積極的な管理がされずに稈密度が高まった竹林であった。

立竹位置の調査では、UAV空撮画像から生成したオルソ画像とALSデータ (2. (2) b) との空間情報の整合を図るため、Geo 7 X (Trimble社製) を用いてネットワーク型RTK-GNSSとオフセット観測の併用による高精度な測量を実施し、調査地の座標を取得した⁴⁾。ここでは、調査地内に根本のあるすべてのタケにナンバリングを施した上で、林冠を構成するタケとそれ以外 (林冠下のタケ) において立竹位置と胸高直径を記録した。また、林冠を構成するタケは、調査地で取得したオルソ画像⁴⁾との整合に留意してタケごとの樹冠形状を描写し、これを樹頂点抽出 (2. (3) c) における精度検証に用いた。

また、稈長は、伐採したタケを林外に搬出した上で、横にした状態の稈長を巻尺で計測し、ナンバリングされたタケごとに記録した。なお、本報では、稈長と胸高直径をアロメトリー式に代入することで求まる体積を実測体積とし、精度検証に用いた (2. (4) a) 。

b) 航空レーザ計測 (ALS)

樹頂点抽出 (2. (3)) と体積推定 (2. (4)) の入力情報を取得するために2021年11月18日にALSを実施した。使用した機材は、Chiroptera II (Leica Geosystems社製) であり、パルスレートを148kHz、スキャン角度を40° とし、500mの対地高度から地上での計測範囲の重複が50%となるように飛行経路を設定した。なお、陸部におけるALSデータの点密度の平均は26.5点/m²であった。

(3) 樹頂点抽出

a) 数値表層モデル (DSM)

本報では、樹頂点抽出手法のうちLMFを適用する。LMFの入力情報であるDSMは、R ver. 4.1.2のパッケージであるlidRを用いて^{5,6)}、点 (3次元の空間情報) の集合であるALSデータから、空間解像度0.1m/pixelのDSMを生成した。このとき、1つのpixelに1つ以上の点を含む場

合にはその中の最高点の標高を、点を含まない場合には点群から生成したTIN (Triangulated Irregular Network) が内挿補間した標高を用いた。また、数値標高モデル (Digital Elevation Model ; 以下, DEM) は、公共測量の作業規程の準則⁷⁾にしたがってALSデータにフィルタリングを施し、植生などの地表面以外の情報を取り除くことで生成した。なお、精度検証では、水平および垂直較差の標準偏差が、それぞれ0.05m、0.30m以下であることを確認している。

b) 局所最大値フィルタリング (LMF)

LMFは、DSMの極大値を樹頂点として抽出する手法である。具体には、極大値を抽出する探索範囲 (Window Size ; 以下, WS) を設定した上で、入力情報の全メッシュに対して、円形WSの中心にDSMの最大値を持つメッシュを探索するものである⁸⁾。WSは、樹頂点の抽出精度を左右する重要なパラメータである⁹⁾。本報では、樹冠直径の平均と同程度のWSであったときに高い抽出精度が認められた既往研究¹⁰⁾を参考にWSを設定した。ここでは、樹冠面積を求め、その形状を円と仮定したときの直径を樹冠直径とし、調査地における平均値を計算した。その上で、平均樹冠直径の±0.2mの範囲を対象に、0.1mごとの5つのWSを設定してLMFを実行し、抽出精度を意味するF値 (2. (3) c) が最大となるWSを求め、それを次節の体積推定に用いた。なお、LMFによる樹頂点抽出は、R ver. 4.1.2のパッケージであるlidRを用いて実行した^{5,6)}。

c) 抽出精度

LMFによる樹頂点の抽出精度は、既往研究^{4),11),12)}に基づき再現率 (r) と適合率 (p) の調和平均であるF値から評価した (式1～3)。なお、抽出 (True Positive : TP) は、樹冠1つにLMFによる樹頂点が正しく1つ抽出されたタケ、未抽出 (False Negative : FN) は、樹冠1つに樹頂点が1つも抽出されなかったタケである。また、樹冠1つに複数の樹頂点が抽出された場合は、最も高い樹頂点を抽出 (TP) とし、その他の樹頂点は誤抽出 (False Positive : FP) とした。

$$r = TP / (TP + FN) \quad (1)$$

$$p = TP / (TP + FP) \quad (2)$$

$$F = (2 \times r \times p) / (r + p) \quad (3)$$

c) 稈密度

稈密度は、LMFにより抽出された誤抽出を含む樹頂点の総数 (TP+FP) を調査地の面積で除すことで100m²あたりの稈本数として求めた。

(4) 体積推定

a) 実測体積 (実測稈長・本数)

本報では、2つのアプローチによる推定体積と実測体積を比較することで、DSMによる稈長とLMFによる樹頂点の推定結果が、タケの体積の推定精度に与える影響

表-1 調査地におけるタケの生育状況の実測値と推定値

	実測（現地調査）		DSM推定 ^{c,d}		DSM・LMF推定 ^{c,e}
		林冠	林冠下		
稈長 ^a [m]	15.6 ± 2.4	16.3 ± 1.9	13.2 ± 2.8	18.0 ± 1.4	18.0 ± 1.2
胸高直径 ^a [cm]	12.3 ± 1.9	12.8 ± 1.5	10.5 ± 1.9	15.6 ± 3.3	15.6 ± 3.1
樹冠直径 ^a [m]	1.4 ± 0.6	1.4 ± 0.6	—	—	—
稈体積 ^a [dm ³] ^b	83.9 ± 30.4	92.0 ± 26.7	54.0 ± 24.2	156.0 ± 84.5	154.1 ± 80.0
総本数 [本]	146	115	31	115	116
稈密度 [本/100m ²]	73.0	57.5	15.5	57.5	58.0
総体積 [m ³ /100m ²]	6.1	5.3	0.8	9.0	8.9

a 平均 ± 標準偏差
b 1 dm³ = 0.001 m³
c DSMおよびDSM・LMF推定の対象は林冠を構成するタケ

d LMFによる全樹頂点の抽出を仮定した推定
e LMFによる樹頂点の抽出結果に基づく推定

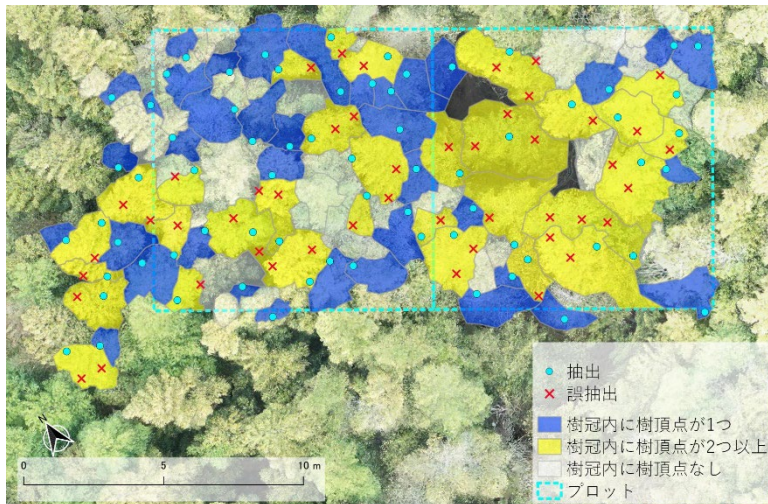


図-1 LMFの適用による樹頂点の抽出（探索範囲 WS = 1.3m）

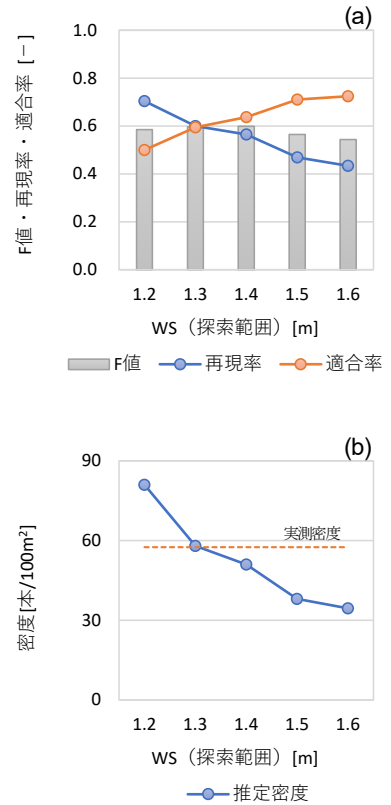


図-2 (a)樹頂点抽出精度および(b)推定密度と探索範囲WSとの関係

を検討した。実測体積は、計測した稈長と胸高直径を式4¹³⁾に代入し、タケごとに求めた体積の調査地における総和とした。なお、タケの体積には、中空部分を含む見かけの体積を意味する稈材積（Apparent culm volume）と中空部分を除く体積である実材積（Wood volume）の2つがある¹³⁾が、本報における体積は稈材積とする。

b) DSM推定体積（DSM稈長・実測本数）

DSM推定体積は、現地調査で記録した樹冠ごとに、DSMの最高点の座標を手作業で取得し、同座標のDEMを差し引くことでタケごとに稈長を求め、これを式4、5^{13),14)}のアロメトリー式に代入して得られるタケごとの体積の総和とした。これは、推定体積に与えるDSMの影響に焦点をあてるために、過不足なく、林冠を構成するすべてのタケを正しく抽出できたと仮定（樹頂点の抽出精度であるF値が1.0の状態）して求めた体積である。

c) DSM・LMF推定体積（DSM稈長・LMF本数）

DSM・LMF推定体積は、LMFをDSMに適用することで機械的に求まる体積である。DSM稈長を用いることに加え、LMFによる樹頂点抽出では誤抽出を含むため、DSM稈長とLMF本数の推定値は実測値との間に齟齬が生じる。なお、DSM・LMF推定体積は、取得した樹頂点の座標からDEMを差し引くことでDSM稈長を求め、前項と同様に、式4、5^{13),14)}から求めた。

$$v = 0.908\pi d^2 h / (4((1 - 1.2/h)/0.6)^{1.742}) \quad (4)$$

$$d = 1 / (1 / (3.068h) + 1 / 29.311) \quad (5)$$

ここに、 v : 体積、 d : 胸高直径、 h : 稈長である。

(5) 感度分析

DSMから推定される稈長と、LMFから推定される稈本数が推定体積に及ぼす影響を明確にするために感度分析を実行した。具体的には、DSMとLMFのパラメータであるWSについて、推定稈長の平均値または、最大のF値となるWSを基準に、それぞれ±10%ずつ変化をさせて体積を求め、稈長と稈本数の変化に対するタケの体積の応答を分析した。

3. 結果と考察

(1) 樹頂点抽出

a) 現地調査

ここでは、検証データである調査地における竹林の特徴を整理した後に、LMFによる樹頂点の抽出精度と、調査地における稈密度について論じる。

実測の稈本数は、林冠を構成するものが115本、林冠

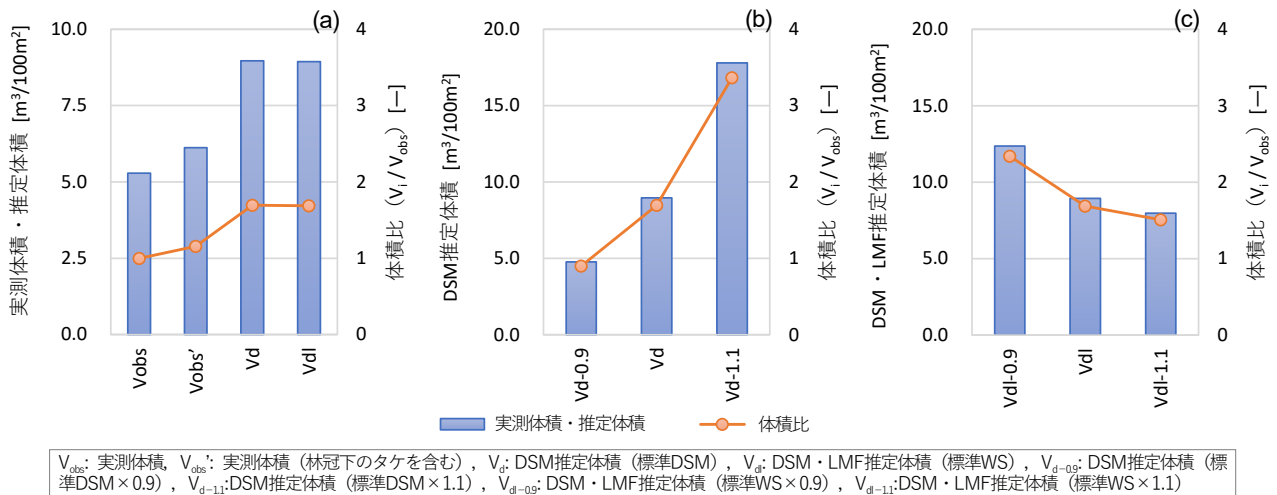


図-3 (a)実測もしくは推定された調査地の総体積および(b)DSMと(c)LMFにおけるWSが推定体積に与える影響の感度分析

下が31本であり、また稈密度は、それぞれ57.5本/100 m^2 、15.5本/100 m^2 となった(表-1)。間伐が実施されるなど管理されたモウソウチク林の稈密度は20~26本/100 m^2 、管理されていないと44~56本/100 m^2 程度との報告があることから¹⁰⁾、調査地の稈密度は比較的高いことがわかる。以降は、樹頂点抽出の精度検証という趣旨から、特段の記載がない限り、林冠を構成するタケを対象とする。図-1は、オルソ画像に現地調査で記録した樹冠を描き、LMFから抽出した樹頂点を図示したものである。ここでは、樹頂点の抽出精度が最も高まったWSが1.3mの結果を示しており、1つの樹冠に抽出された樹頂点数に応じて、樹冠内に樹頂点が1つ、樹頂点が2つ以上、樹頂点を含まないものの3つにわけて示している。図-1から、樹冠が大きいタケほど誤抽出を含むことがわかり、この結果は、既往研究^{9),11)}と同様な傾向である。

b) 精度検証

WSと樹頂点の抽出精度との関係を論じる。図-2(a)には、WSとF値、再現率および適合率との関係を整理している。本報では、調査地におけるタケの樹冠直径の平均が1.4m(表-1)であることを参考に、その±0.2mの範囲でWSを0.1mごとに変化させた。本報で設定したWSにおいてF値は0.54~0.60の範囲となり、WSが1.3~1.4mのとき最大のF値である0.60となった。ここでは、最大のF値を認めた1.3~1.4mのWSのうち、再現率と適合率の差が最小である1.3mを最も抽出精度の高いWSとして採用した。これは、樹冠直径の平均と同程度のWSのときに樹頂点の抽出精度が高まったとする既往研究を支持する結果である¹⁰⁾。また、樹頂点の抽出精度を既往研究と比較すると、針葉樹人工林では、樹形や間伐による密度の調整が有利に働いたため、本報の結果を上回る0.85というF値が報告されている²⁾。モウソウチク林(約50本/100 m^2)では0.23程度の再現率が報告されており¹⁰⁾、それよりも

密度の高い竹林を対象としたが本報では0.60を上回る再現率を得た。

c) 稈密度

WSと樹頂点抽出による稈密度との関係を論じる。ここでは、LMFによる抽出だけでなく誤抽出を含む、すべての樹頂点を対象とする。1.2~1.6mのWSの範囲では、林冠を構成するタケの稈密度は34.5~81.0本/100 m^2 であり、WSが大きいくほど推定稈密度は減少する(図-2(b))。実測稈密度である57.5本/100 m^2 に最も近いのはWSが1.3mのときの58.0本/100 m^2 であり、推定値と実測値の比は1.01となった。これは、LMFによる誤抽出と未抽出の数が、調査地においてほとんど等しいことを意味する。また、このときのWSは最大のF値を取るWSと一致する。既往研究^{9),11)}でも、稈密度の推定精度は、樹冠を検証単位とする樹頂点位置の評価指標のF値よりも高まりやすいこと、実測値に推定値が最も近づくWSは、最大のF値を取るWSと一致することを報告しており、本報でも同様な傾向である。このほか、推定値と実測値の比は、タケの種によって異なるが、0.86~0.93と報告されており⁹⁾、本報では、同等以上の推定精度が得られた。

(2) 体積推定

a) 現地調査

ここでは、調査地でのタケの総体積について実測値と推定値を比較するとともに、DSMとLMFにおけるWSが推定体積に及ぼす影響を感度分析に基づき明確にする。

実測体積は、稈長と胸高直径から求める。調査地において林冠を構成するタケと林冠下のタケの稈長は、それぞれ平均が16.3m、13.2m、胸高直径の平均は12.8cm、10.5cmとなった(表-1)。体積の計算に用いた式4は、既往研究において稈長および胸高直径の平均と標準偏差が、それぞれ13.0±3.0m、8.1±3.0cmの300本のモウソウ

チクが対象とされたが¹³⁾、それと比較して調査地のタケの稈長と胸高直径の実測値はやや大きい。また、稈長と胸高直径から計算されるタケ1本ごとの体積は、平均と標準偏差を $47 \pm 29 \text{dm}^3$ と報告する既往研究¹³⁾と比べて調査地のタケの方が大きく、林冠を構成するタケと林冠下のタケは、それぞれ平均が 92dm^3 、 54dm^3 となった(表-1)。また総体積は、林冠を構成するタケ(V_{obs})では $5.3 \text{m}^3/100 \text{m}^2$ 、林冠下を含むすべてのタケ($V_{\text{obs}'}$)では $6.1 \text{m}^3/100 \text{m}^2$ となり(表-1, 図-3(a))、林冠を構成するタケの1.15倍が調査地に存在するすべてのタケの体積である。この結果は、モウソウチク林で報告された $4.3 \sim 6.7 \text{m}^3/100 \text{m}^2$ の範囲にある¹⁵⁾。

b) 精度検証

実測体積(V_{obs})と、過不足なく、林冠を構成するすべてのタケを正しく抽出できたと仮定して求めたDSM推定体積(V_d)およびLMFをDSMに適用することで機械的に求めたDSM・LMF推定体積(V_{dl})を比較する(表-1, 図-3(a))。DSM推定体積とDSM・LMF推定体積は、それぞれ 9.0 、 $8.9 \text{m}^3/100 \text{m}^2$ となり、実測値の $5.3 \text{m}^3/100 \text{m}^2$ と比べて1.68~1.70倍の過大な推定となった。DSM推定体積とDSM・LMF推定体積では、ほとんど同じ推定結果になったが、その理由として次の2点が考えられる。一つは、前述のようにLMFによる稈密度の推定が実測値と同程度であること、もう一つは、DSM推定とDSM・LMF推定による稈長が、どちらも平均 18.0m として推定されたことである(表-1)。LMFによる稈密度は実測値と近いものの、抽出された全稈本数の4割ほどは正しい立竹位置とは異なる誤抽出を含んでいる。しかしながら、DSM推定とDSM・LMF推定による稈長の平均と標準偏差に差異が小さいことから、DSMの空間的なばらつきは少なく、LMFによる未抽出と誤抽出のタケの稈長、さらには体積が同程度になったために、立竹位置が推定体積に与える影響は小さかったと考えられる。これは、最大で 1.0m/day に達する成長速度を持ち、2~4ヶ月程度で林冠を形成するまでに成長するタケ類の特徴¹⁶⁾¹⁷⁾だと推察され、他の樹種では同様な結果を得られない可能性に留意する必要がある。

図-4のようにDSMから推定された稈長は、実測値と比べて平均で 1.7m ほど長く、それが胸高直径、さらにはタケ1本ごとの体積を過大に推定する主因である。広葉樹の場合には、樹冠の最高点が根元の位置からずれるために、針葉樹と比べて樹高に誤差を含みやすいこと、とりわけ、急傾斜地での樹高の過大な推定が報告されている¹⁸⁾。本報が対象とするモウソウチクは、タケ類の中でも梢端が垂れやすい。調査地の西側に位置する方形区は緩やかな斜面であり、梢端が谷方向に傾いたために、樹冠が大きくなったタケが多く存在する(図-1)。これが本報において、稈長を実測値よりも大きく推定した一因だと推察される。この他、樹冠の小さなタケの一部にも、稈長が過大に推定される傾向を認めた。レーザ反射の最

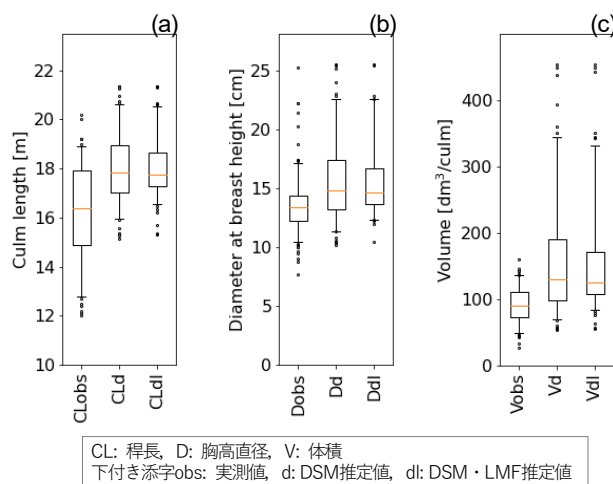


図-4 (a)稈長, (b)胸高直径, (c)体積の実測値 (n=115), DSM推定値 (n=115) およびDSM・LMF推定値 (n=116)

高点を含むように生成されるDSMの特性からみて、樹冠が大きく稈長の長い周囲の優勢なタケの影響を受けた可能性が考えられる。しかしながら、植物の最高点を捉えることが困難なレーザの性質上、針葉樹や広葉樹では、樹高は過少に推定されやすい¹⁸⁾。本報のような稈長の過大な推定は、一般的な知見とは異なるため、さらなる検討が必要である。

c) 感度分析

DSMとLMFにおけるWSが推定体積に及ぼす影響を明らかにするために感度分析を実行した。DSMは推定稈長の平均である 18.0m 、WSはF値が最大になる 1.3m を標準とし、それぞれ $\pm 10\%$ ずつ変化させて体積を推定した。なお、標準DSMの 10% は推定稈長の標準偏差 $\pm 1.4 \text{m}$ 、推定稈長と実測稈長の平均値の差である 1.7m と同程度の 1.8m であり、標準WSの 10% はLMFのパラメータ設定の観点から 0.1m とした。平均稈長が 16.2m (標準DSM $\times 0.9$)、 18.0m (標準DSM)、 19.8m (標準DSM $\times 1.1$)のときの推定体積を図-3(b)に、WSが 1.2m (標準WS $\times 0.9$)、 1.3m (標準WS)、 1.4m (標準WS $\times 1.1$)のときの推定体積を図-3(c)に示す。両者の比較から、WSの変化よりもDSMから推定される稈長の変化に対する感度が高く、稈長の正確さが体積の推定精度を左右することがわかる。具体的には、標準WSの 0.9 、 1.1 倍のWSでの推定体積は、標準WSと比べてそれぞれ 1.38 、 0.89 倍となる一方、標準DSMの 0.9 、 1.1 倍のDSMでは、標準DSMと比べて 0.53 、 1.98 倍となった。このように、本報で対象としたWSとDSMの $\pm 10\%$ という範囲では、WSの変化は本数を介して線形的に、DSMは稈長を介して指数的に総体積に影響を及ぼした。一般には、樹頂点の抽出精度の向上を目的とした様々な研究開発が進められているが、本報では、モウソウチクの体積の推定においては、稈長を精度よく捉えることの相対的な重要性が示された。

4. 結論

本報では、積極的な管理がされずに稈密度が高まった河道内のモウソウチク林を対象に、河道の流下能力と伐採に係る維持管理費を計算する上での基礎情報となる稈密度（立竹位置）と体積を推定するためのALSデータの解析手法の構築を試みた。

稈密度を計算する上で前提になる樹頂点抽出は、ALSデータから生成したDSMにLMFを適用することで実行した。抽出精度を意味するF値は最大で0.60となり、既往研究¹⁰⁾と比較して高い抽出精度を得た。このとき、LMFの重要なパラメータであるWSは樹冠直径の平均と同程度の1.3mとなり、これは、平均樹冠直径と同程度のWSを設定することで抽出精度が高まったとする既往研究¹⁰⁾を支持する結果であった。また、稈密度は、様々なWSによる推定のうち、実測値である57.5本/100m²に最も近い推定値は58.0本/100m²になった。このとき、推定値と実測値の比は1.01倍であった。稈密度の精度は、樹冠を検証単位とする樹頂点位置の評価指標のF値よりも高まりやすいこと、実測値に推定値が最も近づくWSは、最大のF値を取るWSと一致することが報告されており、それと同様な傾向を本報でも確認することができた。

タケの体積は、8.9~9.0m³/100m²と推定され、実測値と比べて1.68~1.70倍ほど過大に推定する結果になった。これは、DSMから求まる稈長の過大な推定が主因であり、この理由には、梢端が垂れやすいモウソウチクの特徴や、レーザ反射の最高点を含むように生成されるDSMの特性が考えられた。最後に、DSMと樹頂点抽出手法から求まる稈長と稈密度の精度が体積の推定に及ぼす影響の明確化を試みた。DSMとWSの標準値から、それぞれ±10%ずつ変化させた感度分析に基づくと、WSの変化は本数を介して線形的に、DSMは稈長を介して指数的に体積に影響を及ぼした。そのため、モウソウチクの体積の推定においては、稈長を精度よく捉えることの相対的な重要性が示唆された。

参考文献

- 1)林真智: 森林バイオマス推定のリモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, 40, pp.2-12, 2020.
- 2)Mohan, M. *et al.*: Individual Tree Detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Canopy Height Model in an Open Canopy Mixed Conifer Forest, *Forests*, 8, pp.340, 2017.
- 3)佐貫方城, 大石哲也, 三輪準二: 全国一級河川における河道内樹林化と樹木管理の現状に関する考察, 河川技術論文集, 16, pp.241-246, 2010.
- 4)手塚透吾, 溝口裕太, 斉藤展弘, 崎谷和貴: UAV 空撮画像と樹頂点位置の抽出技術による河道内に繁茂する竹林の密度

- 推定法の検討, 土木学会論文集B1(水工学), 78, pp.I_853-I_858, 2022.
- 5)R Development Core Team: R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021.
 - 6)Roussel, J.-R. *et al.*: lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data, *Remote Sensing of Environment*, 251, pp.112061, 2020.
 - 7)国土交通省: 作業規程の準則, 国土交通省告示, 第461号, 187p, 2020.
 - 8)平田泰雅: 航空機レーザー扫描仪を用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響, 森林計画学会誌, 39, pp.81-95, 2005.
 - 9)Popescu, S. C., Wynne, R. H.: Seeing the Trees in the Forest: Using Lidar and Multispectral Data Fusion with Local Filtering and Variable Window Size for Estimating Tree Height, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, pp.589-604, 2004.
 - 10)Nagashima, K., Kinami, Y., Tanaka, K.: Classifying Managed and Unmanaged Bamboo Forests using Airborne LiDAR Data, *J. For. Plann.*, 21, pp.13-20, 2016.
 - 11)手塚透吾, 溝口裕太, 中村圭吾: UAV 空撮画像を活用した河道内に繁茂する竹林の樹頂点の抽出, 土木学会論文集G(環境), 78, pp.II_175-II_182, 2022.
 - 12)Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M. K., Kelly, M.: A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78, pp.75-84, 2012.
 - 13)Inoue, A., Sakamoto, S., Suga, H., Kitazato, H., Sakuta, K.: Construction of one-way volume table for the three major useful bamboos in Japan, *J. For. Res.*, 18, pp.323-334, 2013.
 - 14)Suga, H., Inoue, A., Kitahara, F.: Derivation of two-way volume equation for bamboo, *Phyllostachys pubescens*, *J. For. Res.*, 16, pp.261-267, 2011.
 - 15)加久美雪, 藤原道郎, 大藪崇司, 澤田佳宏, 山本聡: 兵庫県淡路島における竹稈量の推定にもとづく持続的な竹稈の燃料利用と竹林管理の可能性, 環境情報科学論文集, 28, pp.19-24, 2014.
 - 16)Buckingham, K. *et al.*: The Potential of Bamboo is Constrained by Outmoded Policy Frames, *Ambio*, 40, pp.544-548, 2011.
 - 17)Chang, S.-T., Wu, J.-H.: Green-color conservation of ma bamboo (*Dendrocalamus latiflorus*) treated with chromium-based reagents, *J. Wood Sci.*, 46, pp.40-44, 2000.
 - 18)岡谷隆基, 乙井康成, 中埜貴元, 小荒井衛: 新潟県出雲崎地区における航空レーザー計測データによる森林の3次元要素の抽出, 写真測量とリモートセンシング, 52, pp.56-68, 2013.

(2023. 3. 24受付)