

# モバイル型レーザを用いた幹曲線式の作成

信州大学	学部 4 年	○光門	舞花
	教授	加藤	正人
	特任准教授	鄧	送求
	修士 2 年	殷	暁
	修士 1 年	唐澤	亮

## 要旨

森林の資源情報の正確な把握を目的に、モバイル型レーザを用いて幹曲線式を作成し、幹直径および立木幹材積の推定と精度検証を行いました。その結果、モバイル型レーザを用いた幹曲線式では樹高の6割の高さまで誤差±2 cm以内で幹直径を推定することができました。また、立木幹材積は現行の立木幹材積表を用いた推定よりも誤差率を10ポイント程度抑えられることが確認できました。モバイル型レーザを用いた幹曲線式は森林の資源情報の正確な把握に寄与し、国産材丸太の商取引の信頼性を向上させることに期待ができます。

## はじめに

国産材の供給・利用量を増加させるために、川上から川下までの需給情報の連携を強化することが期待されています。そのためには供給元である森林の資源情報の正確な把握が必要ですが、目視や立木幹材積表を用いた調査では実際の伐出量との差が大きいのが現状です。幹の細りをモデル化した幹曲線式は任意の高さの幹直径の推定に有用であることが既存研究から分かっていますが、作成にかかる労力が大きく、式の整備は進んでいません。そこで林内の幹情報を取得できるモバイル型レーザ計測に着目しました。本研究では、モバイル型レーザを用いて幹曲線式を作成し、幹直径および立木幹材積の推定と精度検証を行うことで、モバイル型レーザを用いた幹曲線式の有用性を検討しました。

## 1 研究の対象地と方法

本研究の対象地は和歌山県にしむらぐんしらほまちょうしおつやま西牟婁郡白浜町塩津山にある約70年生のヒノキ・スギ人工林としました。対象範囲を0.36haに設定し、約300本のヒノキを対象に研究を行いました。まず、実測およびモバイル型レーザ計測、ドローン計測を行い、幹曲線式の試料を取得しました。次に、幹曲線式を実測値から1種類（実測式Cm）、モバイル型レーザデータから2種類（モバイル式Cb, モバイル式Cs）作成し、作成した式から幹直径および立木幹材積を算出しました。最後に、A)では実測値、B)では実測式Cmを真値として精度検証を行い、モバイル式の有用性を検討しました。

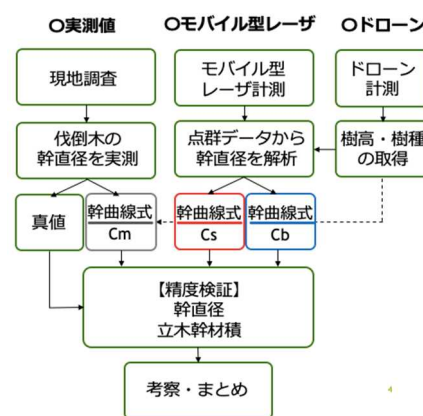


図 1：研究の流れ

## 2 計測

### (1) 実測

対象範囲からヒノキ15本を標本木として選抜しました。伐倒前には、直径巻尺を用いて胸高直径を、レーザコンパスを用いて立木位置を計測しました。伐採後には、林業巻尺(ロガーテープ)および輪尺を用いて高さ40cm毎の幹直径および高さ、標本木の切り株の高さを計測しました。



図 2-1: 実測のイメージ

### (2) モバイル型レーザ計測

モバイル型レーザ計測することにより、対象範囲ヒノキ90本からの幹の3D点群データを取得しました。3D点群データをMATLABの円フィッティングのアルゴリズムを用いて解析し、10cm毎の幹直径および高さを取得しました。ドローン計測も行い、対象範囲内の全木に対して樹高と樹種を取得しました。計測の概要は次の通りです。

#### <モバイル型レーザ計測>

計測日 : 2022年6月2日

使用機材 : Hovermap (Emesent社)

計測方法 : 歩行

計測時間 : 15分

コース間隔 : 15m

使用データ : 10cm毎の幹直径および高さデータ(対象範囲ヒノキ90本分)



図 2-2: モバイル型レーザ

#### <ドローン計測>

計測日 : 2022年6月1日

使用機材 : Matrice 600 Pro (DJI社)

Yellowscan Surveyor Ultra (Yellowscan社)

計測方法 : 自動飛行

計測時間 : 20分/9.4ha

撮影高度 : 80m

使用データ : 樹種データ(対象範囲全立木)

樹高データ(対象範囲全立木)



図 2-2-2: ドローン

## 3 幹曲線式の作成

### (1) 選木

実測式Cmには対象範囲で幹直径を実測した標本木13本を用いました。

モバイル式Cb、Csにはモバイル型レーザ計測したヒノキ90本の中から、それぞれに15本を抽出して用いました。まず、胸高直径20cmを境界に2グループに分類し(胸高直径20cm以上が59本、20cm未満が31本)、それぞれのグループから、ランダムに各グループから15本を選木する試行を3回ずつ行いました。胸高直径20cm以上のグループから作成した式をモバイル式Cb、胸高直径20cm未満のグループから作成した式をモバイル式Csとしました。後の過程で幹曲線式のパラメータを決定する際には、3試行分の選木から算出したパラメータの平均値を採用しました。

## (2) 試料の相対化

対象範囲の立木の幹の細りをただ1つの数式で統一的に表現するため、基準値を設け高さや直径の値を相対化しました。

まず、高さの基準は樹高とし、樹頂点が0、地際が1となるように相対高さを次式で計算しました。

$$\text{相対高さ} = \frac{\text{樹高} - \text{地面からの高さ}}{\text{樹高}}$$

実測式Cmではドローンレーザで取得した樹高を、モバイル式Cb、Csにはモバイル型レーザとドローンレーザで取得したレーザ点群から合算して取得した樹高を用いました。いずれもドローンを用いた信頼できる値であると判断しました。

次に、幹直径の基準は地際から樹高の1割の高さの幹直径とし、相対幹直径を次式で計算しました。

$$\text{相対幹直径} = \frac{\text{幹直径}}{\text{樹高の1割の高さの幹直径}}$$

相対幹直径の基準値の取得には回帰モデルを作成する手法を用いました。すなわち、実測式Cmには実測値を、モバイル式Cs、Cbにはモバイル型レーザ計測値を用いて、(x, y)=(高さ, 幹直径)とし、立木毎に3次の多項式回帰モデルを作成しました。作成した回帰モデルに[樹高×0.1]高さの値を代入することで基準直径を算出しました。地際から樹高の1割の高さから幹直径を直接抜き出すのではなく、回帰モデルから間接的に値を算出することで、幹直径基準値に局所的な幹の変形や節の影響を受けた異常値を使用するリスクを回避することができました。

## (3) パラメータの決定

本研究では幹曲線式のなかでも適合度が高いとして現在も使用されている3次多項式を回帰モデルとして採用しました。樹頂点位置での幹直径を0とするため、原点を通る曲線としました。(x, y)=(相対高さ, 相対幹直径)とした試料をMATLABで読み込み、関数fitlmを使用して3次多項式のパラメータを取得しました。モバイル式Cs、Cbにおいては式作成用立木の選木を3試行繰り返し、得られた3つのパラメータの平均値を式のパラメータとして決定しました。作成した幹曲線式を以下に示します(式3)(表3)。散布図および回帰モデルを以下に示します(図3-1)(図3-2)。

$$y = ax^3 + bx^2 + cx \quad (\text{式3})$$

表3: 幹曲線式のパラメータ

幹曲線式	計測方法	3次の係数	2次の係数	1次の係数	RSME
Cm	実測	2.0189	-3.4082	2.5531	0.96
Cs	モバイル	3.9105	-6.7799	4.0506	2.65
Cb	モバイル	2.8522	-4.8318	3.1489	1.62

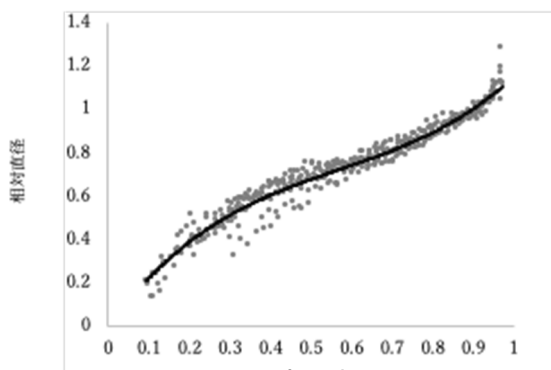


図3-1: 実測式 Cm

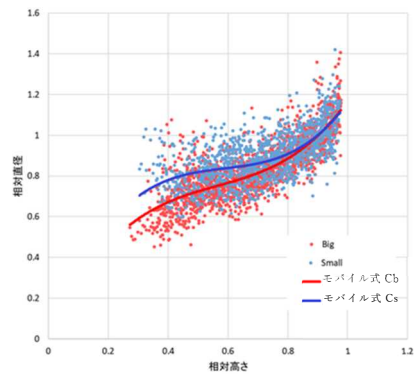


図3-2: モバイル式 Cb, Cs

## 4 結果

### (1) 幹直径の精度検証

推定したい幹直径位置の相対高さを幹曲線式に代入し相対幹直径を取得しました。相対幹直径に基準幹直径を乗じ、目的の高さの幹直径値を算出しました。精度検証の真値は標本木の40cm毎に取得した幹直径の全実測値としました。実測式Cmに対しては式作成用立木12本を除いた標本木3本全101試料を用いて、モバイル式Cb、Csに対しては標本木15本全534試料を用いて精度検証を行いました。

[幹曲線式から算出した幹直径(cm)]- [実測の幹直径(cm)]を誤差とし、幹曲線式Cm、Cs、Cbによる算出幹直径誤差を比較しました。結果は実測式Cmで誤差の平均値が最も小さく、次にモバイル式Cb、モバイル式Csの順となりました(表4-1)。

つづいて、幹の高さと誤差の関係を比較しました(図4)。まず、実測式Cmでは高さによる誤差の変動は小さく、全ての高さで誤差±2cm未満となりました。一方で、モバイル式Cb、Csでは幹の上層に行くにつれて誤差が大きくなりました。モバイル式Cbでは樹高の6割の高さまで、モバイル式Csでは樹高の4割の高さまでが誤差±2cm未満となりました。さらに、モバイル式Cbは樹高の4割の高さまでは実測式Cmと誤差がほぼ同等であることが分かりました。

表4-1: 誤差の統計値

	平均値	中央値	標準偏差
Cm	0.33	0.42	0.90
Cs	2.24	1.96	2.06
Cb	1.04	0.85	1.30

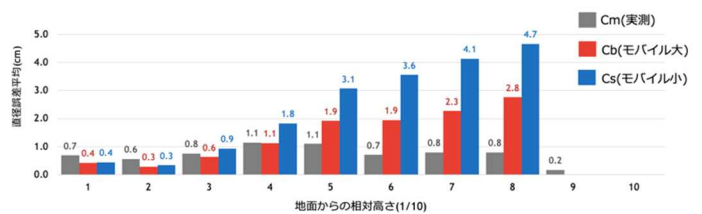


図4: 高さとの誤差の関係

### (2) 立木幹材積の精度検証

立木幹材積は幹曲線式をそれぞれ積分することで計算しました。4-(1)の結果より、実測式Cmの精度が高いことが確認できたため、実測式Cmから算出した立木幹材積を精度検証の真値としました。モバイル式の精度比較には立木材積表(林野庁)を使用しました。標本木15本の立木幹材積を単木毎に算出し平均誤差を次式から算出しました。[誤差平均(m<sup>3</sup>/本)] = {[15本の立木幹材積(m<sup>3</sup>)] - {[15本の立木幹材積真値(m<sup>3</sup>)]} / [15(本)]

平均誤差率は次式より算出しました。[誤差率(%)] = [誤差平均(m<sup>3</sup>/本)] / [立木幹材積の真値(m<sup>3</sup>/本)] × 100

結果はモバイル式Cbで誤差率が最も低く2.2%、立木材積表で最も高く12.1%でした(表4-2)。その差は10ポイントとなりました。

表4-2: 立木幹材積

	15本の立木幹材積 (m <sup>3</sup> )	立木幹材積 (m <sup>3</sup> /本)	誤差平均 (m <sup>3</sup> /本)	平均誤差率 (%)
真値	Cm	7.39	0.49	-
検証値	Cb	7.49	0.50	0.01
	Cs	7.72	0.51	0.02
	立木材積表	8.24	0.55	0.06

## 5 考察

まず幹直径について、樹高20mの立木を想定すると、モバイル式Cbでは12mの高さまで2cm未満の誤差で推定可能となります。12m以上の幹上層部はバイオマス材となることが多いため、モバイル式Cbは製材丸太の幹直径の推定に利用できる可能性があると考えられます。

次に立木幹材積について、モバイル式Cbと立木幹材積表の誤差率には約10ポイントの差がありました。ここで、面積1ha、立木密度1000本/haの林分を仮定し、モバイル式Cbと立木幹材積表の結果から1haあたりの丸太資産額を試算しました。この時、令和3年度の森林・林業白書を参考に、ヒノキの丸太価格を18,000円/m<sup>3</sup>、立木幹材積に対する丸太利用率を50%と仮定しました。すると、1haあたりの丸太資産額はモバイル式Cbで450万円、立木幹材積表で495万円となり、その差額は45万円となりました。この差

額は現状の丸太の商取引に悪影響を及ぼしていると考えられます。モバイル式を使うことで、森林の資源情報の推定結果がより実際の値に近いものとなり、森林の供給情報の信頼性を高めることができると考えます。

## おわりに

本研究では実測値およびモバイル型レーザ計測値を用いて幹曲線式を作成し、それぞれの式から算出した幹直径および立木幹材積の精度検証を行うことで、モバイル型レーザを用いた幹曲線式の有用性を検討しました。その結果、モバイル型レーザを用いた幹曲線式では地際から樹高の6割の高さまでの幹直径を誤差2cm未満の精度で推定できることが明らかになりました。立木幹材積については、立木材積表と比較して10ポイント程度推定精度が上回る事が分かりました。モバイル型レーザは伐採や実測による試料の取得を必要としない幹曲線式の作成方法であり、この方法を森林調査に活用することで、森林資源情報の正確な把握が促進できる可能性が示されました。今後の課題としては、式の適応範囲についての検討と、幹直径推定精度の向上が挙げられます。複数の対象地での適応性の検討やモバイル型レーザやドローンのデータから取得できる立木の形状比、樹冠サイズ、樹高などを元にした試料の分類と複数タイプの幹曲線式の作成による精度向上に期待します。

## 参考文献

- 1) 林野庁(2021)：令和3年度森林・林業白書
- 2) 中村裕幸, 野城智也(2009)：国内人工林再生のための品質・商流・物流マネジメントの普及・展開その1) オンデマンド型木材流通システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北). pp.1563-1564
- 3) 林実穂(2021)：在来軸組工法のパネル化における木材寸法の最適化が歩留まりに及ぼす影響, 早稲田大学修士学位論文
- 4) 野上啓一郎, 西沢正久(1979)：幹形に関する若干の考察, 日本林学会九州支部研究論文集. No. 32, pp83-84
- 5) 樋渡ミヨ子(1986)：幹曲線式による利用可能材積の推定方法, 林業試験場研究報告(農林水産省林業試験場). 337号, pp29-67
- 6) P. Rönnholm, X. Liang, A. Kukko, A. Jaakkola, J. Hyyppä (2016)：Quality Analysis And Correction of Mobile Backpack Laser Scanning Data, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume III-1, pp41-47
- 7) Yin Xiao (2022)：Stem Diameter Correction and Timber Simulation Using Terrestrial Laser Scanning and Mobile Laser Scanning Data, Shinshu University Master's thesis
- 8) 南雲秀次郎, 田中万里子(1981)：相対幹曲線式を用いた材積表の調整, 日本森林学会誌. 63巻8号, pp278-286,
- 9) 農林水産省(2022年改定)：日本農林規格一素材, 農林水産省