

第4章 3年間のまとめ

第1節 航空レーザ計測を用いた森林解析

第1項 森林資源解析

1 モデル地区の概要

モデル地域として、岐阜県中津川市の苗木財産区有林を設定した。

- ① 場所：岐阜県中津川市苗木
- ② 森林所有者：苗木財産区
- ③ 森林組合：中津川森林組合
- ④ 面積：487.44ha

うち人工林 316.3ha（ヒノキが84%）

2 航空レーザ計測データを用いた森林資源解析結果

岐阜県より、当該地の航空レーザ測量データ（計測密度 4/m²）を借受け、これを用いて、森林資源解析を実施した。

- ① レーザ林相図を作成
- ② ヒノキ人工林について、本数、一本ごとの樹高、胸高直径、材積を算出
現地調査との比較では、本数は、0.96、樹高は 0.96、材積は 0.86 の精度となった。

表 4.1 現地調査本数とレーザ解析樹木本数の比較表

	現地調査 樹木本数	レーザ解析 樹木本数	精度
Plot1	38	36	95%
Plot2	28	34	121%
Plot3	30	30	100%
Plot4	26	26	100%
Plot5	21	21	100%
Plot6	22	21	95%
Plot7	31	31	100%
Plot8	32	32	100%
Plot9	39	40	103%
Plot10	46	46	100%
平均	31.3	31.7	101%
		R	0.96
		RMSE	2.0

表 4.2 現地調査樹高とレーザー解析樹高の比較表

	現地調査 樹高 (m)	レーザー解析 樹高 (m)	精度	補正後の 樹高 (m)	精度
Plot1	20.2	20.3	100%	21.5	106%
Plot2	18.3	17.5	95%	18.5	101%
Plot3	19.5	18.2	93%	19.3	99%
Plot4	15.6	15.0	97%	15.9	102%
Plot5	16.7	15.7	94%	16.7	100%
Plot6	17.6	16.6	95%	17.6	100%
Plot7	21.9	20.5	94%	21.7	99%
Plot8	19.2	18.1	94%	19.1	100%
Plot9	17.7	16.0	90%	16.9	95%
Plot10	21.1	19.5	93%	20.7	98%
平均	18.8	17.7	94%	18.8	100%
		R	0.96	R	0.96
		RMSE	1.1	RMSE	0.5

表 4.3 現地調査材積とレーザー解析材積の比較表

	現地調査 材積 (m ³)	レーザー解析 材積 (m ³)	精度	補正樹高 材積 (m ³)	精度
Plot1	16.8	15.4	92%	16.5	98%
Plot2	11.5	12.6	109%	13.4	117%
Plot3	13.6	11.8	87%	12.6	93%
Plot4	8.6	8.3	96%	8.8	102%
Plot5	10.5	8.0	76%	8.6	81%
Plot6	9.6	8.5	89%	9.1	95%
Plot7	16.9	13.3	78%	14.2	84%
Plot8	16.3	12.7	78%	13.6	84%
Plot9	15.3	11.5	75%	12.2	80%
Plot10	16.4	16.3	100%	17.4	106%
平均	13.6	11.8	88%	12.6	94%
		R	0.86	R	0.86
		RMSE	2.3	RMSE	1.8

③ ヒノキ総本数 377,365 本 総材積 130,335 m³となった。

④ ②を基に、小班単位でくくった、立木密度分布図、平均樹高分布図、収量比数分布図、平均胸高直径分布図、材積分布図を作成

第2項 木材供給量情報整備

1 実施内容

上記地区において、間伐を実施し、実際に出材した量と、航空レーザ計測データによる森林資源解析結果を用いて予測した出材量との比較検証を行った。

予測手法としては、過去の実績から推計する方式と、細りを考慮して機械的に採材する方式を実施した。

① 過去の実績から推計する方式

平成 24 年度に岐阜県林政部県産材流通課と岐阜県森林研究所が開発した「品質別木材生産割合の推計式」を使用した。航空レーザ計測データから把握した間伐実施区域内のヒノキ材積、本数、平均胸高直径、平均樹高を式に当てはめ算出した。

② 細りを考慮して機械的に採材する方式

岐阜県作成の相対幹曲線式（細り表）を用いて、航空レーザ計測データから把握した間伐実施区域内のヒノキ立木について、3m 材を機械的に採材し、丸太本数、材積を算出した。

ABC 材の仕訳は難しいため、合算した。

③ 市売り実績

最寄の市場に出荷し、販売した。

ABC 区分は、販売価格により推計し区分した。

④ 結果

以下の表のとおりとなった。

なお、伐採立木材積は、航空レーザ計測を用いた森林解析により算出した間伐実施区域内の立木材積に間伐率を乗じて算出した。

表 4.4 平成 26 年度 ABC 材の区分結果

単位：m³

	過去の実績	細り表	実績
A	76.0	132.1	56.0
B	9.8		73.5
C	55.8		13.3
小計	141.6	132.1	142.8
残置材量	47.2	56.7	46.0
伐採立木材積	188.8	188.8	188.8

表 4.5 平成 27 年度 ABC 材の区分結果

単位：m³

	過去の実績	細り表	市売り実績
A材	235.5	406.7	238.0
B材	138.1		103.4
C材	66.6		61.7
小計	440.2	406.7	403.1
残置材量	110.1	143.6	147.2
伐採立木材積	550.3	550.3	550.3

表 4.6 平成 28 年度 ABC 材の区分結果

単位：m³

	過去の実績	細り表	市売り実績
A材	293.6	685.2	363.9
B材	102.2	—	157.0
C材	185.2		40.0
小計	581.0	685.2	560.9
残地材量	145.2	41.0	165.3
計	726.2	726.2	726.2

⑤ 課題

A、B、C材の合計では、市売り実績に対し、過去の実績では88.5%～108.8%、細り表では92.5%～122.2%と推定精度としては十分な結果となった。

しかし、A、B、C材の内訳については、1本の立木をどのように伐採して、どの部分をどのように造材して出材するかが、その時々市場動向、現場事情、作業員の技量、意識により変動することから、これらの影響をどう反映させるか引き続き検討する必要がある。

第3項 補完的手法

1 SfM 技術による森林資源解析

(1) SfM 技術について

Structure from Motion (SfM) は複数の画像から撮影位置と姿勢の解析を行い、画像と画像との対応関係を解析し三次元空間を推定する技術である。特別な計測機材を必要とせず手持ちカメラで撮影した画像を解析に使用でき、解析ソフトもフリーソフトから100万円ほどであることから比較的簡単に誰でも行うことができる計測手法である。

(2) SfM 解析による 3D モデル化と立木本数

現地調査において円形プロットの中の樹木の画像を撮影し SfM 解析を行い、3D モデルを作成した。立木本数の算出は 3D モデル化した樹幹の本数を確認することで算出した。現地調査の結果 4 ロットの合計 104 本に対し 3D モデルでは 102 本となった。

(3) 胸高直径の推定

3D モデルより単木の胸高断面を抽出し、胸高直径を円推定により推定した。現地調査結果の平均胸高直径 22.9cm に対し、3D モデルの平均胸高直径は 25.2cm となり RMSE は 3.0cm であった。さらに単木の地上高 7～8m ほどまで 3D モデル化できたため、枝条の影響の少ない 5m ほどまでは胸高断面以外にも円推定を行った。撮影方法や現地調査方法、円推定の方法には見当が必要であることが分かった。

(4) 3D モデルと航空レーザ計測の比較

3D モデルと航空レーザ計測の結果より樹木位置を比較した。航空レーザ計測は間伐前、3D モデルは間伐後であるため、相違を確認し森林資源情報の更新について検討した。現地調査結果の間伐率が 31.1% であるのに対し、3D モデルと航空レーザ計測の比較では 26.6% となった。3D モデルと航空レーザ計測を比較するうえで地上での森林情報（立木本数、樹木位置）と上空からの森林情報には違いがあるという課題があった。今後、航空レーザ計測と UAV 計測（レーザ、写真）や地上レーザ計測と組合せ、どの計測手法が森林資源情報の更新に相応しいか検討していく。

2 UAV 写真計測を用いた森林資源解析

(1) UAV 写真計測の特徴

UAV による計測については、

- ① 地上調査に比べ立ち入りや地形上の制約が少ない
- ② 機動的な実施が可能である。
- ③ 広範囲（数十 ha）に効率的な計測が可能である。

等の利点があることから、労働者が減少している林業界での活用が期待される。

さらに、**Structure from Motion (SfM)** 技術を使用することにより、森林の 3 次元情報を取得できるため、樹高、毎木位置図を正確に計測でき現地調査を飛躍的に効率化できると期待されている。

(2) 対象地の計測

本調査では、国内で一般的に使用されている Phantom4 を使用した。写真機は Phantom 4 に標準搭載されているものを使用した。

平成 28 年度間伐実施箇所 9ha について、間伐実施前と間伐実施後の状況を、対地高度 50m と 100m の 2 パターンで計測をした。

作業人員は、操従者と補助者の 2 名で実施した。

計測は、自動飛行で行い、計測時間、写真枚数は、対地高度 50m で 39 分、412 枚、対地高度 100m で 22 分、279 枚となった。

(3) UAV 写真計測による森林解析結果

1) 位置精度

撮影時に GPS より位置情報が画像情報として示されている EXIF だけでは、航空レーザ計測の位置とは合わない。このため、GIS 上に GCP を設置し位置の補正を行うことが必要である。これにより高さの誤差が 2 m 以内となった。

2) 点群

航空レーザに比べ樹冠形状の再現性が乏しく、樹頂点数が少なくなる傾向にあり、このため、本数精度は低くなった。

3) オルソ

解像度が細かく、枝まで識別でき、森林の状況確認には、十分使用できる。

4) 森林解析

樹高は使用できるが、本数については、現在のところ使用できない。

このため、総体積法による林分材積の算出は可能である。

第4項 林道の路線計画

1 目的

航空レーザ計測から作成した詳細な地形図を利用することにより、林道の路線計画に関する机上検討の精度が格段に向上し、現地で確認することが難しかった崩壊危険地や開設に適した緩傾斜地などを容易に見つけることができるようになり、現地踏査作業の効率性を大きく向上することができるようになった。

また、航空レーザ計測により作成された地形図等の上で林道の路線計画を作成するための林道設計システムが開発されている。

このシステムは、地形図等の上でルートを選定し、そのルートにカーブの曲率半径、路面の縦断勾配を設定しつつ調整し、平面計画を作成する。また、このルートの縦断図、横断図が自動的に作成できる。これに、道路幅、切り土、盛り土の法勾配を設定すれば土量計算を行うことができる。

本章では、路網計画における航空レーザ計測データの有効性を確認するため、このデータから求めた土工量精度を検証する。なお、土工量は設計書類の値を真として精度検証することとし、土工

量の算出は設計書で用いられている方法を採用する。また、精度検証結果から、航空レーザ計測データを活用方法に関する考察を行った。

路網計画業務において、開設前に机上で精度よく土工量を推定することができれば、構造物の設置を抑えた経済的な路線の検討に有効である。さらに、作業道などの低規格路線で特に重要となる切盛均衡の検討や、残土処理計画などに活用することも可能となる。このように、土工量の推定は業務の効率化や低コスト化に貢献するもので、航空レーザ計測データの効果的な活用方法の一つといえる。

2 土工量の算出

1) 開設した林道の実施設計数量等

岐阜県中津川市下野字岩須地内に開設された林業専用道高鳥屋 1 線を対象として検討を行った。路線の主な規格を以下に示す。砂質土のため、切土のり面勾配はすべて 6 分になっている。また、幅員が 3.0m、左右の路肩がそれぞれ 0.25m で全幅員が 3.5m の一般的な林業専用道である。路線延長は 343.5m、起点、終点間の標高差が約 32m であり、路線全体の平均的な縦断勾配は約 9% となっている。

林道名	高鳥屋 1 線
林道区分	林業専用道
級別	2 級
延長	343.5m
全幅員	3.5m
切土量	1796.5 m ³
盛土量	1306.5 m ³

2) 航空レーザ計測データを用いた土工量の算出

土工量の算出には、航空レーザデータから作成した 0.5mDEM (Digital elevation model) をもとにした TIN を使用した。

これに、林道設計システムを用いて、林道を設計し、これに伴う切土、盛土の量を算出した。当初、路面高および幅員を測点ごとに修正せず、路面高については全ての測点で変更量を±0.0m として土工量を算出した。その結果、実際の土工量に対し、切土量で 13%、盛土量で 44%となった。

本線は林業専用道であるため、走行の快適性などを考慮して縦断勾配の変化点を少なく、なるべく一定勾配になるように路線を計画していること、また、カーブでは、幅員を拡張していることから、これに合わせて修正した結果、切土量で 111%、盛土量で 114%となった。

これは、実施設計の際の横断測量が、ポールを用いて測っていることを考慮すれば十分信頼できる精度である。

3) 結果

近年、航空レーザだけでなく、地上レーザや多視点からのステレオ写真測量 (SfM : Structure from Motion), UAV 撮影による DSM 作成など種々の技術が出てきている。特に写真を用いた測量では、植生などによって地面が写らない状態では、欲しい地形情報が得られないという課題は残るものの、これまで得られなかった微地形を得られるようになれば、今後の林道設計に有用な道具となる。また、DEM などの立体モデルの利用がさらに進めば、設計段階から土工量算出などに活用することが考えられる。従来の土工量は、測点ごとの横断測量から得た離散的な地形情報から求めていたが、正確な DEM によって開設前後の地形を比較すれば、実際の工事で取り扱った正確な土工量を求めることができ、設計業務が大きく変わることも考えられる。一般道ではそのための検討も始まったところであり (重高ら, 2012), 路線設計分野での航空レーザ計測データの有効性は今後ますます大きくなっていくものと思われる。

第2節 地上レーザ計測による森林資源解析

1 地上レーザの特徴

地上レーザは、センサーを林内に設置してデータを取得するため、取得される3次元データは樹冠下部からのレーザ反射が多い。森林内部の詳細な状況が計測できるため、幹部を容易に計測できる。さらに、非破壊で森林の3次元構造を計測できるため、樹高、胸高直径、毎木位置図を正確に計測でき毎木調査等で行われている現地調査を飛躍的に効率化できると期待されている。

2 対象地の計測

本研究では、国内で最も安いレーザースキャナーの一つである LMS511 (SICK 社製) を使用した。計測可能距離は 50m である

地上レーザセンサーの設置方法は、調査プロットの中心に1箇所まず設置し、水平方向で全方位(360度)のデータを取得し、さらに、調査区画のコーナーに4箇所設置し、プロット全体のデータを取得した。本研究で使用したレーザセンサーの性能である最大照射距離を考慮し、それ以上の大きさのプロットにならないように気をつけなければならない。

3 地上レーザ計測結果を用いた森林解析

地上レーザから幹部の樹木位置図を作成する。作成した樹木位置(幹部)の場所を基準に、地上レーザを胸高の高さ(1.2m)で切り出し、その幹直径を自動計測した。樹高は、切り出した単木単位のレーザ点群の最大の高さとした。

レーザによる3次元データから幹を計測する解析手法として、円を当てはめて幹直径を推定する方法が主流であるが、ニューラルネットワークの手法を応用し、複雑な幹形状をそのまま正確に計測できるアルゴリズムを開発した。その結果、人が現場で計測するのと同じ精度で計測ができるようになった。

さらに、本研究では、樹木の曲がり进行评估するために、幹部の中心位置を高さ1m間隔でレーザデータを抜き出し、中心位置を自動で把握した。

4 結果

精度进行评估するために各結果から平均二乗誤差を樹高と胸高直径で計算してみたところ、樹高では1.38mで、胸高直径では2.13cmの誤差で計測できていることがわかった。これらの結果より人が計測するのと同等の正確性で材積进行评估するために必要な樹高と胸高直径が計測できた。

また、曲がりに関しても樹冠下までは幹の曲がり自動で計測することができることがわかった。これらの情報をもとに、材質进行评估するABC材等の評価に結果を反映したい。

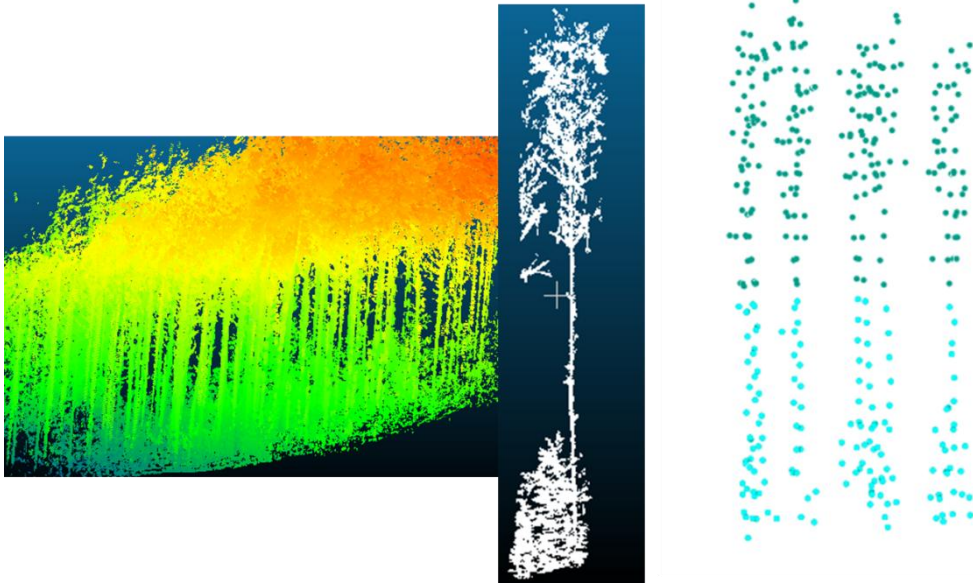


図 4.1. Plot 1 での対象木の曲がり評価（左図：Plot 1 全体の 3 次元データ、中図：単木で抜き出したデータ、右図：複数の樹木を対象に、曲がり进行评估するために幹中心位置を自動判別した結果）

第3節 今後の課題

1 森林資源の状況の把握

航空レーザ計測による、森林資源状況の把握については、良好な結果を得ることができ、個々の解析技術については、問題ないことが確認できた。

今後は、この膨大な森林資源情報を、どう現場で使っていくか、実際の事業現場の要望に基づいたシステムを検討していくことが重要である。

航空レーザ計測は、大面積に森林情報を把握する手法としては有利であるが、トータルコストが高くなる。

このため、ドローンを使った簡易な計測手法との組み合わせを検討する必要がある。

2 出材予想等木材供給量情報管理システム

(1) 出材量について

出材量の予測については、航空レーザ計測のデータを使用し、① 岐阜県で過去の実績を基に作成した「品質別木材生産割合の推計式」と、② 単木解析結果と細り表を使用する方法の2つの方法を検討した。

結果は、委託生産を実施するときに、森林所有者に対して示している受託林産事業予算書の基となる出材量としては十分使用できるものである。

今回は、ヒノキ林の間伐を対象として検証を行ったが、今後は、優勢木と被圧木の差が大きいと思われるスギ林についても検証する必要がある。

また、今後は、資源の充実に伴い皆伐が増加することから、皆伐についても検証が必要である。

(2) A,B,C 区分について

航空レーザ計測では、立木の曲がりについては、計測することができない。このため、A,B,C 区分については、過去の出材割合等から推測することとなる。

今後、地上レーザ計測により把握される曲がりに関する詳細なデータと航空レーザ計測で把握される単木ごとのデータと組み合わせ、より精度の高い A,B,C 区分予測手法の開発が望まれる。

3 効率的な路網計画を立てる支援システム

航空レーザ計測のデータを使った林道等の路網計画については、計画レベルでは効率的に作成できることが、確認できた。

現在、国交省を中心にして、i-Construction が推進されている。これは、調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までの、建設生産プロセスに ICT を活用しようというものであり、一般道路では、検証がすすめられている。

今後、林道についても、検証を進めていくことが必要である。