

令和 3 年度

UAVレーザを活用した人工林の林分内容解析手法等

検討委託事業

報告書

令和 4 年 3 月

林野庁

目次

1 事業概要	1
(ア) 背景及び目的	1
① 事業名	1
② 事業目的	1
③ 事業の成果	1
(イ) 事業工期・工程表	2
(ウ) 法令遵守・安全管理	2
(エ) 実施体制	3
2 UAVレーザ計測及び人工林の林分内容解析等	4
(ア) 既存の手法や技術・知見の収集と分析	4
(イ) 多種多様な林況・地形の調査地を対象としたUAVレーザ計測	6
① 使用機器（レーザ、GNSS/IMU、カメラ、UAV）及びUAVレーザ計測仕様	6
② 計測地区とその特性及び計測実績	9
(ウ) レーザ計測で取得した3次元点群データを用いた林分内容解析	13
(エ) 林分内容解析結果の精度検証	20
① 現地調査方法	20
② 現地計測結果と解析結果の照合方法	25
③ 精度検証結果	27
(オ) UAVレーザによる林分内容解析推奨仕様	33
3 立木の位置情報等から任意に設定した区域の再現手法の検討・検証	36
(ア) 区域の再現方法の検討	36
(イ) 区域の再現可能性の検証	37
4 UAV計測により得られる情報等の活用	40
(ア) 立木位置情報及び樹高の活用	40
(イ) 地形情報の活用	42
(ウ) オルソ画像	44
(エ) GISによる管理	45
5 検討委員会の設置・運営	46
(ア) 委員会の構成	46
6 まとめ	47

1 事業概要

(ア) 背景及び目的

① 事業名

令和3年度UAVレーザを活用した人工林の林分内容解析手法等検討委託事業

② 事業目的

国有林野事業においては、利用期に達した人工林を伐採し、将来的に均衡のとれた齢級構成に誘導するとともに、国産材の安定的・効率的な供給体制の構築に貢献するため、国有林材の供給量を増加させていくこととしている。このような中、限られたマンパワーに対応しつつ、リモートセンシング技術等を活用して立木調査を効率的かつ適切に実施していくことが求められている。

「令和元年度リモートセンシング技術を活用した収穫調査の効率化手法検討委託事業」において、UAVレーザで計測した樹冠形状等から立木本数や胸高直径を推定したところ、一定の精度で林分材積を把握することができ、立木調査の効率化の可能性が示された。一方、樹冠形状等から間接的に立木を検出する方法では、林分の上層を覆う樹冠の下部に隠れる林木（以下「被圧木」という。）を把握することができず、林況や地形の違いによって林分の立木本数や平均胸高直径の推定精度が低下してしまうことが示唆された。また、実際に収穫調査業務においてUAVレーザで計測したデータを活用するためには、UAVレーザで広範囲に計測した個々の立木データを現地の調査区域と結びつけて抽出するための効率的な手法の更なる検討が求められる。本事業は、上空からのUAVレーザで、被圧木も含め、より直接的に個々の立木を計測する新たな技術について、国有林野のフィールドを活用して検証を行うとともに、UAVレーザ計測で得られる様々な地物データを用いた調査区域の現地での再現手法の検討・検証等を行うものである。

③ 事業の成果

間伐前計測、搬出材積見積もり等を目的とした国有林野事業における収穫調査として、今回実施したUAVレーザ測量が有効であることが以下の内容から確認できた。

- 1) 今回の計測調査対象森林においては、被圧木を含む平均99%以上の立木の幹が確認でき、同94%以上の直径計測・確認することができた。
- 2) 胸高直径については、従来の人が輪尺を用いて単木毎に測定する方法の値と比較して、顕著な差異は認められないことが確認できた。
- 3) 総材積については、開空度4%以上のスギ及びヒノキまたは複数の樹種が混交する率が少ない林分において、±15%以内の精度が期待できる。
- 4) 林内の地形については、微地形等の詳細なデータを取得することができた。

併せて、UAVレーザによる計測の仕様を明らかにすることができた。

さらに、得られたデータについては、以下の活用方法も考えられる。

- ・地図上の任意のエリア内の立木の総材積、収量比数、相対幹距比を把握することで、当該エリアに係る施業計画を立てられる
 - ・地位の推定や崩壊危険箇所の推定の可能性がある
 - ・路網設計の効率化が図られ、路網開設時には林業ICT建機の自動施工用データを提供できる
- なお、広大な森林で一定の精度を確保しながら効率的かつ安全に配慮した計測をするためには、以下の要素が重要となる。
- ・積載量（ペイロード）：複雑な地形に追従するための飛行能力を維持するために、積載するセンサー類に対して余裕を持ったペイロードが必要。
 - ・耐風性：森林の吹上や吹きおろしに耐性のある機体（可変ピッチ等）
 - ・滞空時間：広大かつ離着陸位置が限られる環境では、必要な計測時間に対して余裕を持った滞空時間が必要

(イ) 事業工期・工程表

事業項目	計画	実績	2021年7月	2021年8月	2021年9月	2021年10月	2021年11月	2021年12月	2022年1月	2022年2月	2022年3月	備考
計画準備												
(1) 事業の実施												
ア.既存成果のレビュー												
イ.UAVレーザ計測												
ウ.林分内容解析												
エ.精度検証												
オ.微地形解析												
カ.林分内容解析仕様の整理												
(2) 検討委員会の設置・運営												
ア.検討委員会の設置												
イ.検討委員会の運営												第1回：令和3年9月1日 第2回：令和4年1月20日
(3) 報告書の作成												
ア.取りまとめ・報告書作成												納期：令和4年3月3日

(ウ) 法令遵守・安全管理

本事業を行う上で、関連法規を順守すること及び作業安全を徹底することを、一貫して実施した。内容は以下のとおり。

〔航空法 132 条その他法律の順守〕

- ・全エリアにおいて国交省への申請（FISS 申請、DIPS 要否確認等）を実施(図 1-1)

〔日本産業用無人航空機工業会（JUAV）規程の順守〕

- ・機材の定期点検実施確認 UAV 定期点検有効期限の確認（2022 年 3 月）
- ・運行前後の点検実施 無人ヘリ点検シート(図 1-2)

〔災害防止及び発生時に関する対策〕

- ・運行計画書による作業計画と確認を実施

速軽町生田原 国有林 FISS ドローン情報基盤システム（飛行情報共有機能）

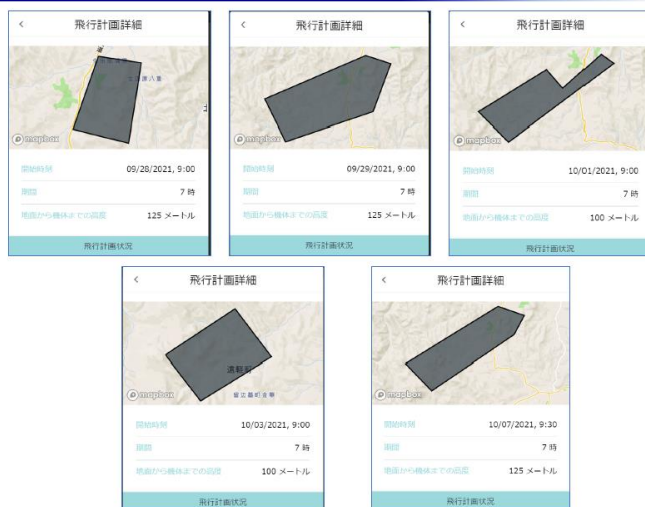


図 1-1.FISS 申請サンプル

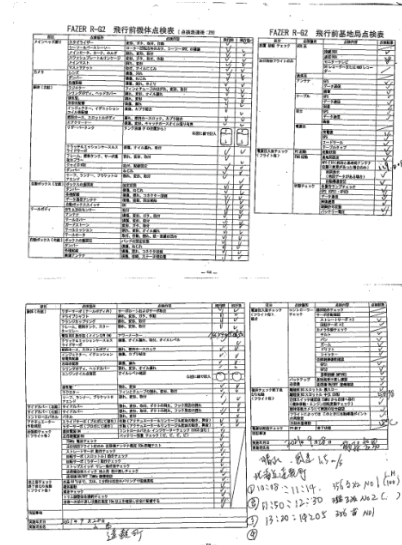


図 1-2.無人ヘリ点検シートサンプル

(エ) 実施体制

事業実施者

ヤマハ発動機株式会社 ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 森林計測部

・ 事業管理責任者

加藤 薫 (ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 森林計測部 部長)

・ 主任技術者(総括、精度検証、仕様の整理)

矢嶋 準 (ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 森林計測部 ソリューション開発グループ 主務)

・ 担当技術者(UAV レーザ計測)

梅林 岩男(ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 森林計測部 計測サービスグループ 上級工師)

・ 担当技術者(林分内容解析)

ザン ペイイ(ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 森林計測部 ソリューション開発グループ 担当)

・ 担当技術者(微地形解析)

原田 丈也(ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 森林計測部 ソリューション開発グループ 主管)

・ 担当技術者(林分内容解析結果の精度検証)

矢嶋 準 (前掲)

2 UAVレーザ計測及び人工林の林分内容解析等

(ア) 既存の手法や技術・知見の収集と分析

事業実施内容は、UAV やレーザ計測といった新技術を用いるものであることから、手法検討に反映させることを目的として、UAV レーザを用いた計測・解析に有効な既存情報を集めて分析し、以下の状況を確認できた。

- ・森林上空からの UAV レーザ計測は、樹幹情報を得ることができる有効な手法である。
- ・UAV を用いたレーザ計測により樹幹を直接計測するための重要な項目について、以下のとおり明らかになった。

① 計測対象地区の特性

森林上空からのレーザ計測には一定の開空度が必要である。

開空度は、季節や立木密度（特に間伐等施業の実施状況）等に依存する。

② UAV の搭載重量、飛行時間

林内に到達するレーザの数を増やすため、時間あたりのレーザ発射回数が多い比較的重量のある機材を搭載する必要がある。また、照射数は時間に比例することから、面積あたりの飛行時間を長くすることも有効な手段となる。

③ 計測条件

林内まで到達するレーザ数を可能な限り増加させるためには、レーザの照射角度を垂直下方向から水平方向へと極力広くすることが重要である。そのため、飛行高度、航路設計、コース幅などの設定が重要である。

調査内容：

樹冠からでは検出できない被圧木に対して有効な手段としてのレーザ計測技術

調査文献：

- ・平成 29 年度国有林材の販売に係る収穫調査等の効率化手法検討委託事業報告書
- ・上記事業が実施された後の平成 30 年から現在までの査読されている論文（学会誌等）

検索用語

国内）レーザ計測、UAV、樹冠、樹幹、胸高直径、矢高

海外）UAV and TLS and DBH、UAV and ITD、LiDAR and DBH

*UAV(Unmanned Aerial Vehicle：無人航空機)、TLS(Terrain Laser Scanning:地上レーザ計測)、DBH (Diameter at Brest Height:胸高直径)、ITD (Individual Tree Detection：単木検出)

検索手段：

手段は以下 3 つの方法で行った。

① 学術団体の論文調査

- ・対象学会は下記とする

日本森林学会、森林計画学会、日本リモートセンシング学会、日本写真測量学会

② 関係団体の論文調査

- ・日本森林技術協会（森林技術）

③ 海外論文調査

- ・Research Gate 検索エンジンを用いて検索

調査結果の概要

各手法の特徴に関する内容を表 2-1 にまとめる。

なお、特徴欄に関しては英語の翻訳以外は原文のまま引用しているため言葉のゆらぎがある。

表 2-1.各手法の特徴

計測手法	特徴	出典
航空レーザー計測	航空機レーザー計測は地上レーザー計測のように <u>直接直径を計測しているのではなく、樹高や立木密度、樹冠投影面積等から推定式を作成することにより得られる値です。</u>	鹿又秀聡：よい見積もりは、良い情報から．森林技術 ,933.pp20-21.2019
	<u>直径は実測できない</u>	林野庁：平成 29 年度国有林材の販売に係る収穫調査等の効率化手法検討委託事業報告書.2018
UAV レーザ計測	植生繁茂期間に、樹冠により閉鎖された森林の樹幹をセグメント化する際に限界があることを指摘する。したがって、この季節の間は、樹幹上の点密度を最大にするために、 <u>広い走査角度範囲からの照射が推奨</u> される。	Yuanshuo Hao : Individual Tree Diameter Estimation in Small-Scale Forest Inventory Using UAV Laser Scanning.Remote Sensing 13(13).2020
	<u>搭載重量の制約/飛行時間の制約</u>	林野庁：平成 29 年度国有林材の販売に係る収穫調査等の効率化手法検討委託事業報告書.2018
地上レーザー計測	TLS は 50m 間隔で移動し、位置合わせして 1 つの点群の集合体にする。 <u>1-2ha/日。</u>	中村裕幸：3 次元レーザスキャナによる森林計測と小規模溪流調査への適用.日本リモートセンシング学会誌.40（1）.pp49-55.2020
	地上レーザスキャナによる森林計測では、 <u>樹高が過小に評価される</u> 。TLS によって樹高を直接に計測するのではなく、TLS によって正確に計測できる可能性の高い枝下以下の樹幹形をもとに、 <u>樹高を間接的に計測（推定）</u> しうる方法を開発することが望ましい。	越河 一樹，太田 徹志，溝上 展也，山本 一清，井上 昭夫：地上レーザスキャナによる樹高推定のための望高法の改良.日本森林学会誌.102(2).pp133-138.2020

(イ) 多種多様な林況・地形の調査地を対象としたUAVレーザ計測

① 使用機器(レーザ、GNSS/IMU、カメラ、UAV)及びUAVレーザ計測仕様

レーザ計測・使用機材

機材の一覧を表 2-2 に示す。

3次元計測には、計測精度や照射数、スキャン数、到達距離、重量等も考慮し、総合的にみて最も性能が高い Riegl-VUX1 をセンサ部に搭載した Phoenix 社製 Ranger LR を採用した。

その他、高精度な立体写真計測を可能とするカメラとして Sony 社製 α7R を搭載し、樹種界判定に必要なオルソ画像作成に用いるための写真撮影を行った。

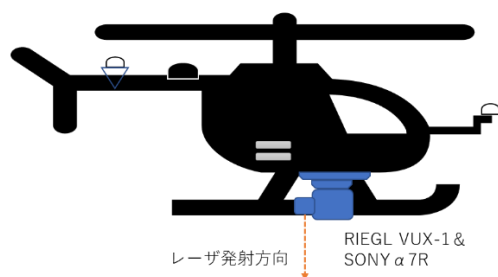
搭載するセンサは総重量が 8 kg 強と比較的重く、起伏の多い森林に特有の複雑な気流の中で立木計測に適した仕様を明らかにするための飛行は長時間にわたるため、当社で長年の実績を有するエンジン駆動、上昇気流及び下降気流に強い可変ピッチの UAV を用いた。

表 2-2.使用機材一覧

レーザスキャナ		
種別	ロングレンジスキャナ	
機器名	VUX-1LR	
会社名	RIEGL	
主なスペック	到達距離：1350m@60%反射 有効計測レート：最大 750kHz 強度：Class1、マルチパルス 重量：約 4 kg 駆動用バッテリー重量：約 3 kg	
参考 URL	http://www.riegl-japan.co.jp/product/pdf_1/RIEGL_VUX-1LR_Datasheet_2019-11-29.pdf	
カメラ		
種別	デジタル一眼カメラ	
機器名	α 7R	
会社名	ソニー	
主なスペック	撮像素子：35mm フルサイズ CMOS イメージセンサ レンズ焦点距離：15 mm 重量：約 1.2 kg	
参考 URL	https://www.sony.jp/ichigan/lineup/	
計測機体		
種別	産業用無人ヘリ 自動機	
機器名	FAZER R G2	
会社名	ヤマハ発動機	
主なスペック	最大積載重量 35kg 最大離陸重量 110kg 最大高度 2,800m 最大速度 72km/h 航続距離 90km	
参考 URL	https://www.yamaha-motor.co.jp/ums/solution/fazer_r_g2.html	

計測システムの搭載概念図を図 2-1 に示す。

側面図



正面図

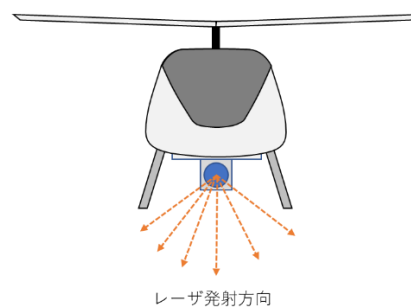


図 2-1.計測システムの搭載概念図

② 計測仕様

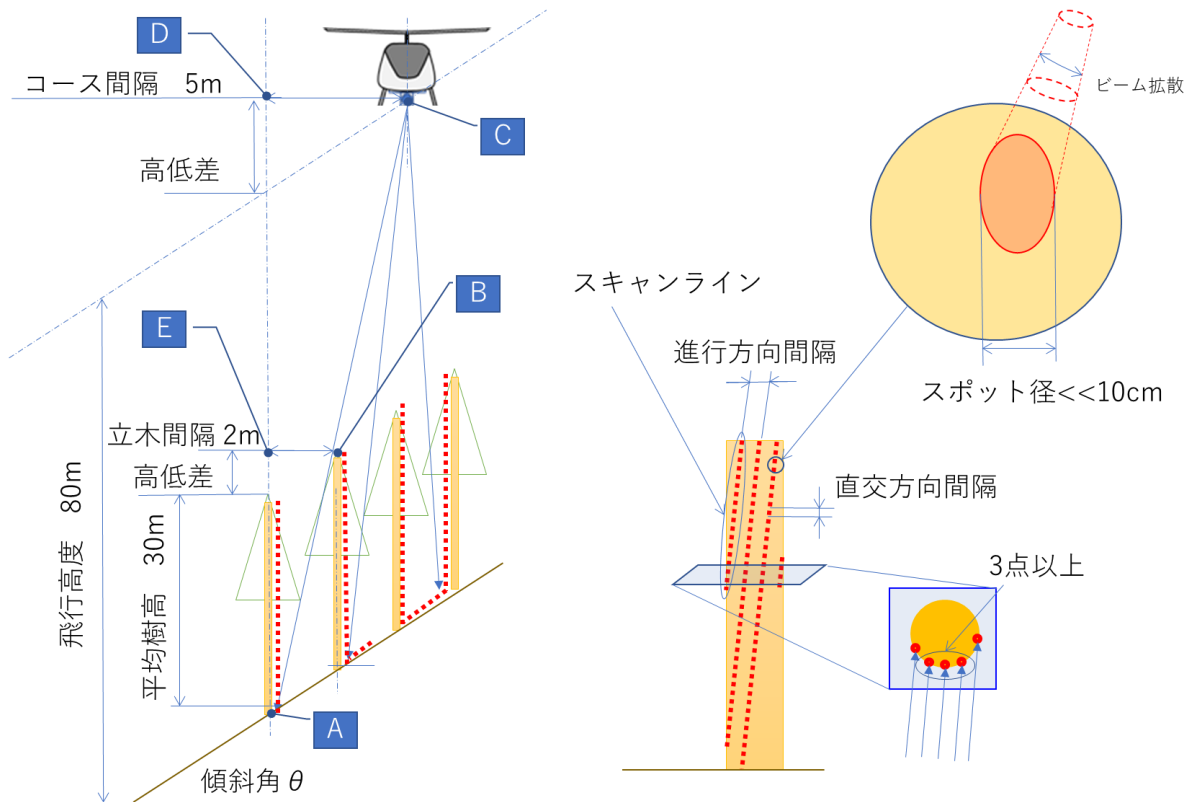
森林環境による計測及び解析の限界を検証するために複数地区を計測するが、まずは森林環境を図 2-2(a)のような単純化したモデルとして、今回の事業での検証に用いた計測仕様を表 2-3 のとおり定めた。

対地高度は、前提条件として、スギやヒノキの最大樹高 40m、樹頂点との最低距離 20m に山林で発生する乱気流などの影響を考慮し、その倍の 40m 間隔を安全のために確保し、80m に設定した。

表 2-3.計測仕様

分類	項目	単位	条件	
LiDAR 設定	照射レート	Hz	600,000	
	FOV(計測角度範囲)	度	最大 330(性能)	
	照射数	回/秒	550,000	
	回転数	回転/秒	60	
	有効照射距離(設定値)	m	150	
	角度分解能	deg	0.036	
計測条件	航行速度	m/s	2	
	対地高度	m	80	
	計測対象物(幹)高さ	m	3	
	計測距離	m	77	
	(参考)最大計測範囲角	deg	118	
	計測幅	m	257	
分解能			最大 (航路直下)	最小 (有効照射距離)
	計測分解能	照射/m ²	620	318
	進行方向照射分解能	照射/m	30.0	←
		cm/照射	3.3	←
	横方向照射分解能	照射/m	20.7	10.6
		cm/照射	4.8	9.4
	スポット径	cm	3.9	7.5
	インターバル	m	5	
	サイドラップ率	%	98%	
	オーバーラップ時点群密度	点/m ²	約 30,000	

上記の条件を与えるための考え方は、図 2-2 に基づいた以下の項目とした。



(a)森林環境の単純なモデル

(b)単純なモデルにおける計測結果

図 2-2.森林環境簡易モデル

・スポット径:

幹直径 10cm より十分小さい 4cm～6cm。照射距離により変化するため幅を持っている。
(垂直方向は楕円形状となるが、直径計測への影響は少ないため無視する)

・コース間隔:

図 2-2(a)に示した簡易モデルから下記計算により、立木の根元までをスキャンできる最大間隔を求め、5m に設定した。

(コース間隔求め方)

2m 離れた隣の木の頂点(B)と対象木の根元(A)を結ぶ直線が 80m の飛行高度と交わる位置(C)を根元まで計測できる最大の飛行間隔(CD)とする場合、図の三角形 ABE と三角形 ACD は相似となり、下記の式から CD を求めることができる。

$$CD:2=AD:AE$$

$$CD \cdot AE = 2 \cdot AD$$

$$CD \cdot (30 + 2 \tan \theta) = 2(80 + CD \cdot \tan \theta)$$

$$CD = 160 / 30 = 5.33 \text{ m}$$

・進行方向間隔:

10cm の幹に平均 3 スキャンライン以上が当たるよう、3.3cm 間隔とした。

樹冠など遮蔽物の影響で、ひとつのスキャンラインから十分な点が得られなかった場合の対応を目的とした。

・直交方向間隔:

ひとつのスキャンラインの高さ方向 2m 幅で、エッジに当たる等の精度の悪い点群を除き 3 点以上が幹に当たるように、間隔は 5～10cm とした。照射距離により変化するため幅を持っている。
直径の解析精度を高めるため、連続して計測された点群を得ることを目的とした。

② 計測地区とその特性及び計測実績

多種多様な樹種・地形・地域等の異なる条件において検証を行うため、複数の条件で計測を実行した。

まず、国内において主要な 4 樹種の人工林を対象とする。スギに関しては、地域の特性による違いを検証するために秋田県大館市のスギと静岡県浜松市(天竜)のスギを個々に調査対象とした。

さらに、それぞれの樹種に対して、開空率に影響があると考えられる斜面条件 2 通り、伐期条件 2 通り(カラマツを除く)を対象とし、合計 18 の地区を計測した。計測地区の詳細を表 2-3 に示す。また、図 2-3、図 2-4、図 2-5 にて計測地区を地図上に示す。

なお、北海道の調査では当初対象地としていた生田原の国有林地内において間伐期のカラマツを主とする林地が現況存在しなかったため、調査対象地から除外した。

表 2-3.計測地区の詳細

北海道紋別郡遠軽町生田原

樹種	傾斜	伐期	林班	小班	計画図での樹種	現況	計測日
トドマツ	緩	間伐期 (43 年生)	356	う	トドマツ	トドマツ 59%、残り広葉樹	9/28,29
トドマツ	急	間伐期 (41 年生)	344	ぬ	トドマツ	トドマツ 76%、残り広葉樹	10/3
トドマツ	緩	主伐期 (56 年生)	342	へ	トドマツ	トドマツ 95%、残り広葉樹	9/29
トドマツ	急	主伐期 (61 年生)	343	は	トドマツ	トドマツ 66%、カラマツ 3%、残り広葉樹	10/7
カラマツ	緩	主伐期 (53 年生)	356	る	カラマツ	カラマツ 64%、残り広葉樹	9/28
カラマツ	急	主伐期 (57 年生)	344	ひ	カラマツ	カラマツ 61%、残り広葉樹	10/3

秋田県大館市早口

樹種	傾斜	伐期	林班	小班	計画図での樹種	現況	計測日
スギ	緩	間伐期 (41 年生)	2257	に	スギ	スギ 84%、マツ 3%、残り広葉樹 13%	10/14
スギ	急	間伐期 (40 年生)	2299	よ	スギ	スギ 100%	10/14
スギ	緩	主伐期 (54 年生)	2289	そ	スギ	スギ 67%、残り広葉樹 33%	10/14
スギ	急	主伐期 (65 年生)	2257	つ	スギ	スギ 67%、残り広葉樹	10/14

静岡県浜松市天竜区龍山町瀬尻

樹種	傾斜	伐期	林班	小班	計画図での樹種	現況	計測日
スギ	緩	間伐期 (35 年生)	864	ち	スギ	スギ 100%	11/2
スギ	急	間伐期 (35 年生)	864	ち	スギ	スギ 100%	11/2
スギ	緩	主伐期 (53 年生)	862	い	スギ	スギ 100%	11/5
スギ	急	主伐期 (53 年生)	862	い	スギ	スギ 78%、ヒノキ 22%	11/5
ヒノキ	緩	間伐期 (51 年生)	872	は	ヒノキ	ヒノキ 100%	11/3
ヒノキ	急	間伐期 (35 年生)	878	ろ	ヒノキ	ヒノキ 99%、スギ 1%	11/3
ヒノキ	緩	主伐期 (51 年生)	861	に	ヒノキ	ヒノキ 100%	11/2
ヒノキ	急	主伐期 (66 年生)	880	ほ	ヒノキ	ヒノキ 65%、スギ 24%、残り広葉樹	11/3

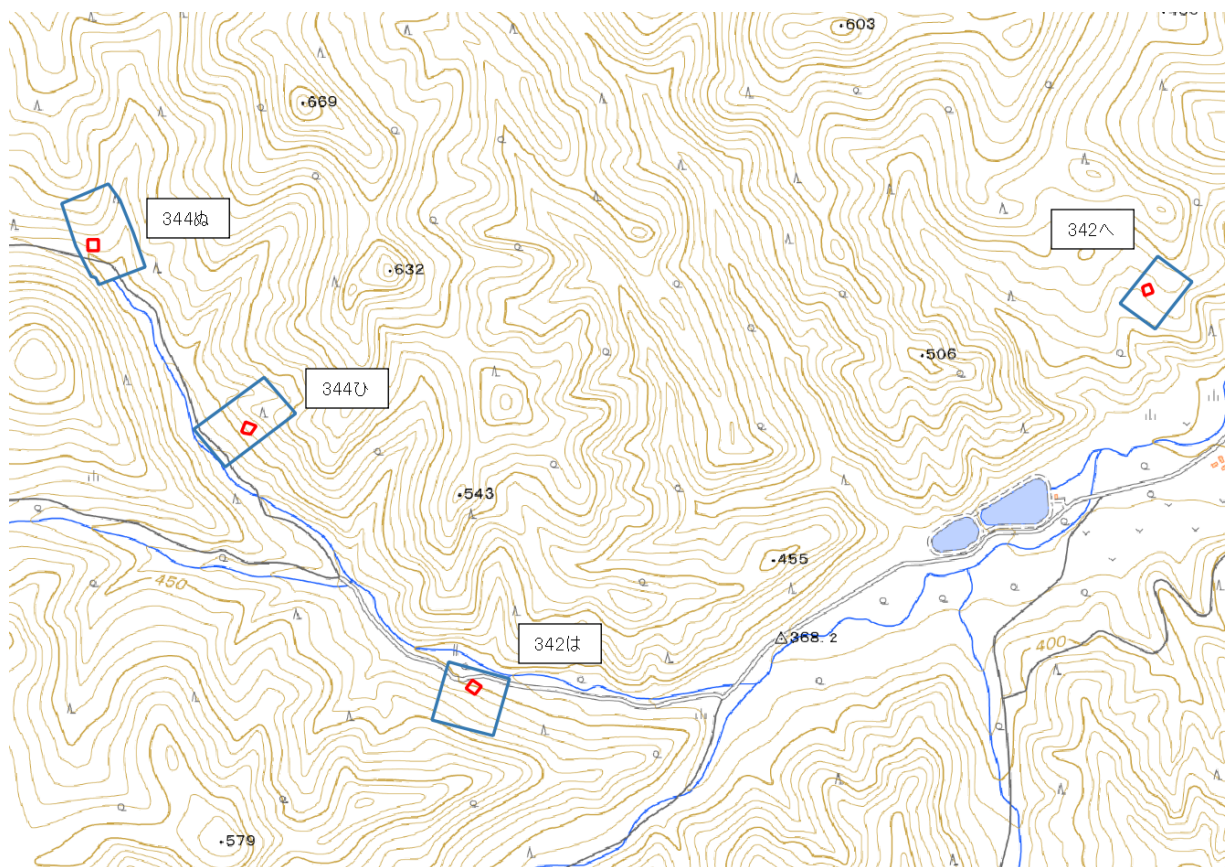


図 2-3. 北海道紋別郡遠軽町生田原

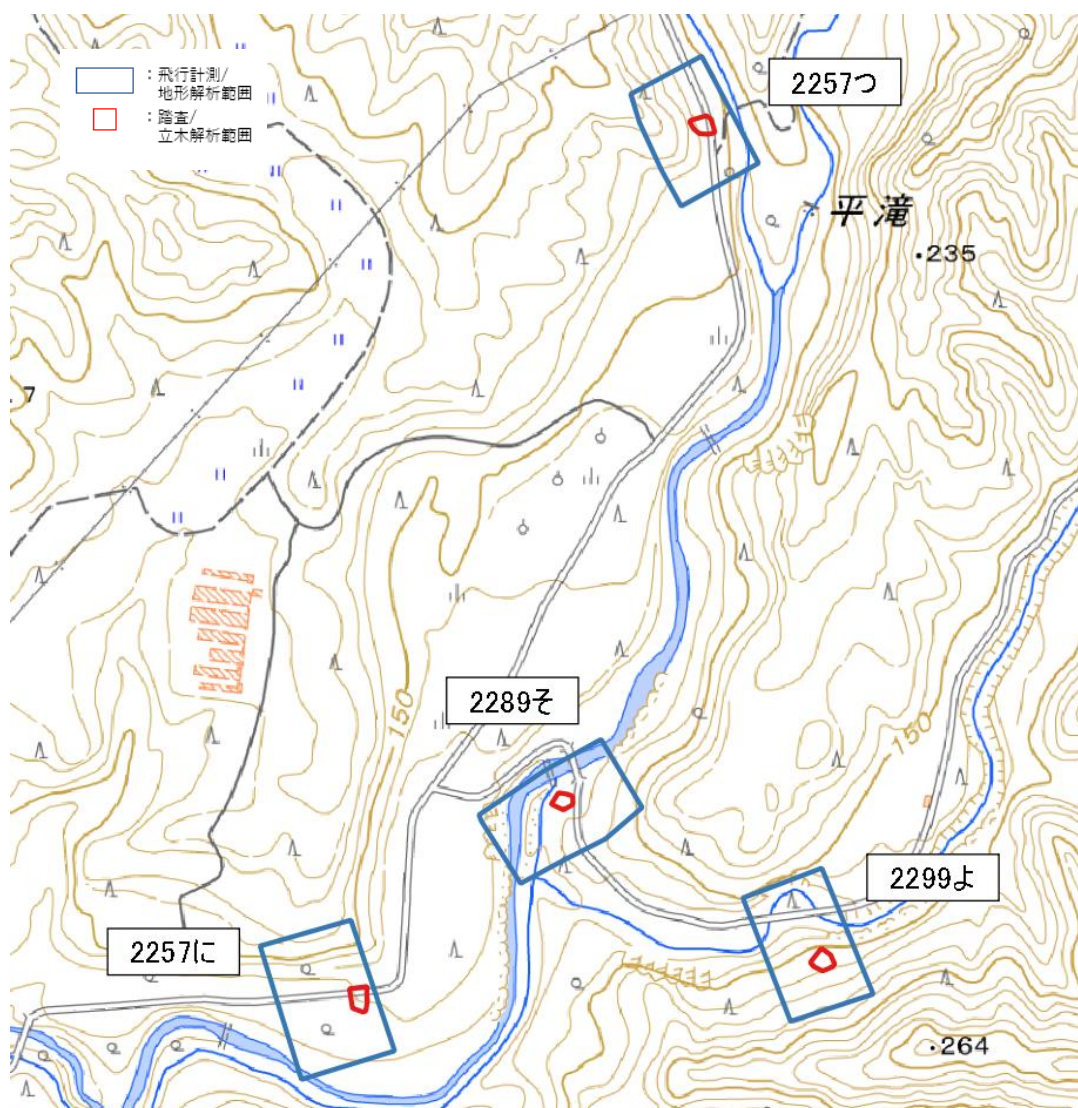


図 2-4. 秋田県大館市早口

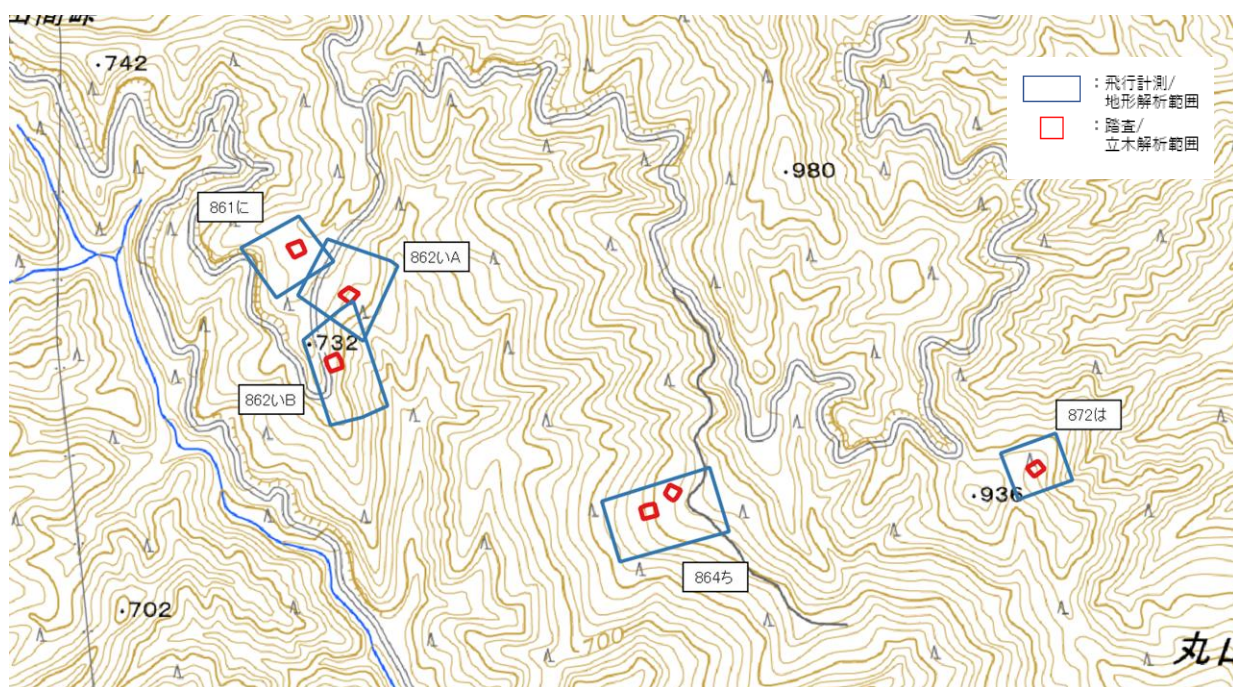


図 2-5. 静岡県浜松市天竜区龍山町瀬尻

(ウ) レーザ計測で取得した3次元点群データを用いた林分内容解析

林分内容解析は、立木の樹冠及び樹幹に到達した3次元点群データから、立木本数、樹高、胸高直径、樹幹形質、樹冠長、位置等を対象とした。

■解析条件の設定

解析においては、下記2つの目的に基づき条件を設定した。

1. 本計測手法の限界精度検証

- ・コース間隔: 5m

計測飛行した全てのコースデータを用いた。

2. 効率的な計測条件における精度検証

- ・コース間隔: 25m

今後の計測における費用対効果を考慮し、5m 間隔で計測したコースを 1/5 に間引いたデータを用いた。これは、できる限り効率的に計測するため、すべての樹木に入射角 20 度で照射可能な最大の間隔として設定したものであり、開空度が大きい照射角の範囲が 25 度からであるとの報告[1]に基づき、それを十分下回る条件とした。(図 2-6)

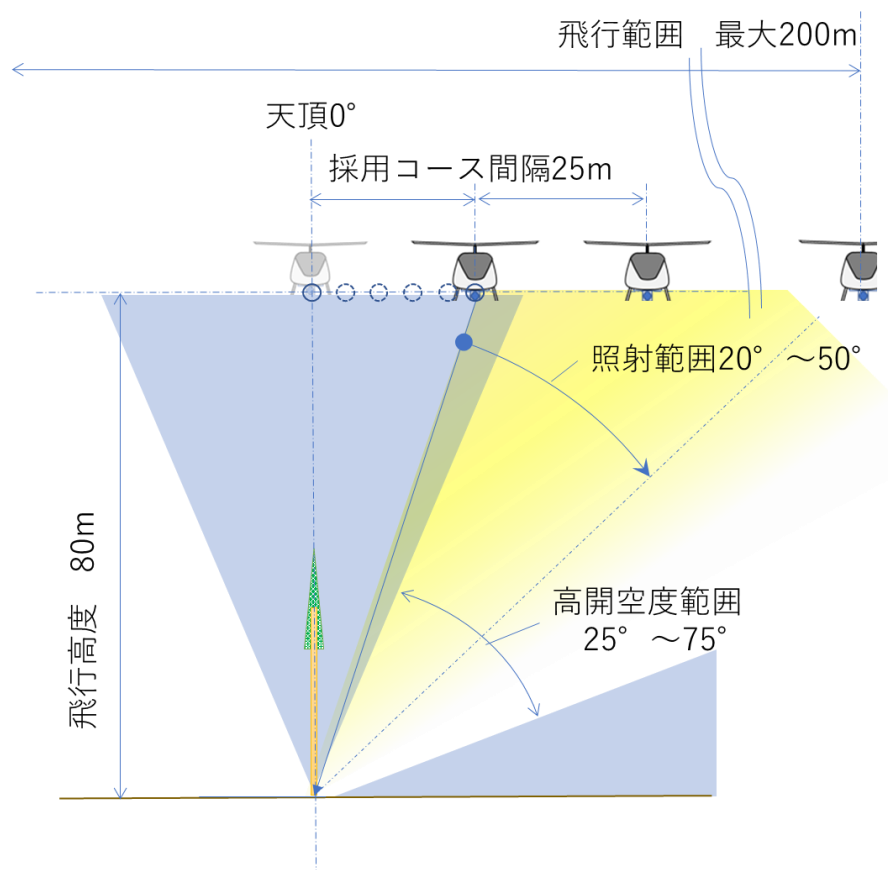


図 2-6. 効率的な計測条件

■参考文献：

[1] 星川 健史 ほか：UAV-LiDAR における樹冠の計測効率の定量化 日本写真測量学会 令和3年度年次学術講演会, 39-40.

■解析方法

① 単木抽出

レーザ計測で取得した 3 次元点群データから単木を抽出する工程を以下のとおり示す。

i. 地面データ分類 (図 2-7)

まず始めに全体を格子状に分割し、それぞれの格子内において抽出した最下点を大まかな地面を表す点 (シードポイント) とした。次に、シードポイントから TIN を作成し、TIN から大きく離れた点を取り除いた。これにより 3 次元点群から地表面及び地表面付近に絞り込んだ 3 次元点群を抽出した。さらに、抽出した 3 次元点群に対し、TIN を構成する個々の三角形毎に三角形の面との鉛直距離が十分小さくかつ尖った三角錐とならない点を抽出し、これらを加えた新たな TIN を作成した。この新たな TIN を作成する処理を、尖った三角錐が出来なくなるまで繰り返し、その結果を地面データとした。

ii. 平面化 (図 2-8)

i で計算した地表面の点群を使用して、各点に対して、その点に最も近い地表面の点を発見し、2 点間の標高差を求め、その値を新たな高さとして各点の高さから引くことにより平面化した。

iii. 幹データ分類 (図 2-9)

z 方向に連続的な点群を幹として検出した。

iv. 単木データ分類 (図 2-10)

まず各点から付近の樹幹までの最短距離をダイクストラ法によって求めた。次に、樹冠が物質輸送距離を小さくするように成長するという特徴を考慮し、求めた最短距離を樹幹直径の $2/3$ 乗でスケーリングした。このスケーリングされた最短距離が最も小さい樹木にその点が属するとして、点群を単木ごとに分類した。

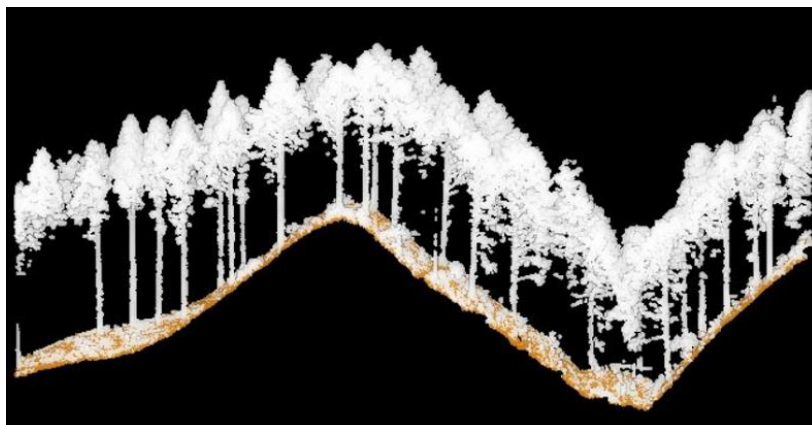


図 2-7. i. 地面データ分類

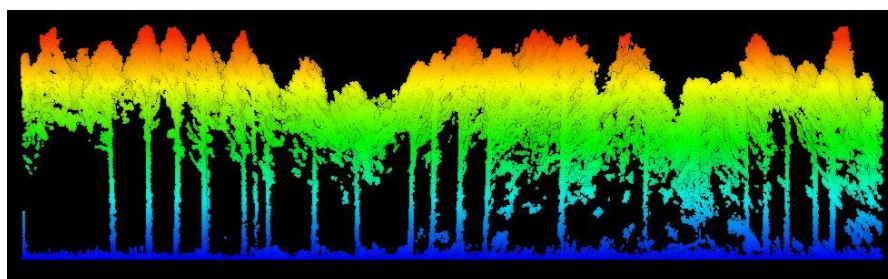


図 2-8. ii. 平面化

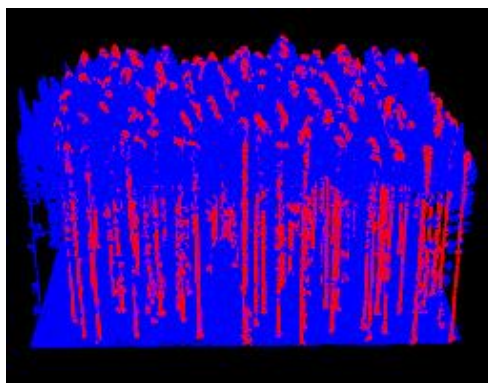


図 2-9. iii. 幹データ分類

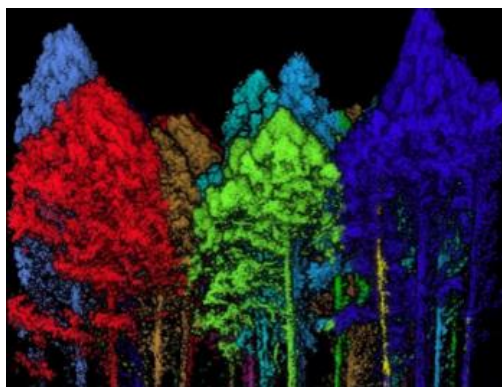


図 2-10. iv. 単木データ分類

② 材積推定

図 2-11 に示すように、立木には複数の航路上からレーザが照射されているが、そのレーザの中には樹幹部分にまで到達するものが存在する。それらのレーザにより樹幹部分から計測された 3 次元点群データによって導き出された任意の高さの直径と樹高をもとに、表 2-5 に示す計算式を使用して DBH を推計し、これらの結果から森林総合研究所「幹材積計算プログラム」を用いて材積を算出した。但し、地上 1.2m で十分なデータが取れた任意の立木に関しては、観測値を DBH とした。樹高は、樹冠データ分類後の最も高い位置の点群の高さの値を推定値とした。

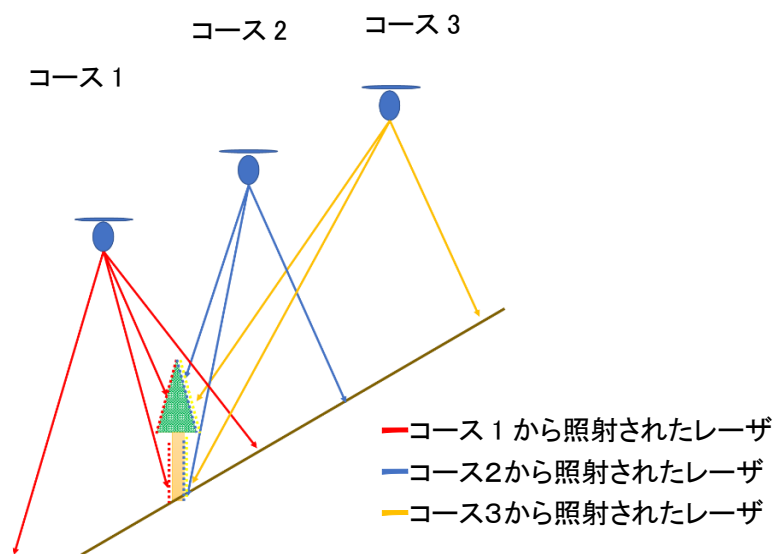
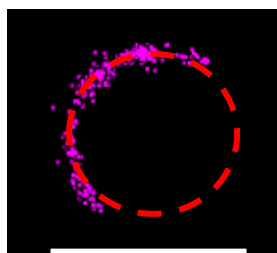


図 2-11. レーザ照射の概念図

表 2-5. DBH 解析に使用した幹曲線式

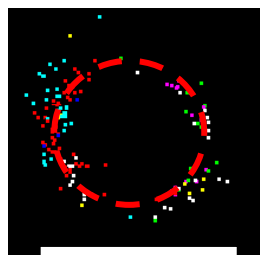
使用した式	
カラマツ	吉田式（岐阜県スギ） $y=1.4021x^3-2.7861x^2+2.4885x$
トドマツ	吉田式（岐阜県スギ） $y=1.4021x^3-2.7861x^2+2.4885x$
秋田スギ	吉田式（岐阜県スギ） $y=1.4021x^3-2.7861x^2+2.4885x$
天竜スギ	立木 15 本のレーザ計測結果から導出した幹曲線式(*) $y=1.2436x^3-2.6203x^2+2.4395x$
ヒノキ	立木 15 本のレーザ計測結果から導出した幹曲線式(*) $y=1.3911x^3-2.8743x^2+2.5691x$
補足	(*)立木 15 本それぞれ高さ 0.5m 幅毎の点群から求めた直径を 吉田式に当てはめて下記文献を参考に回帰係数を求めた。 参考文献:大洞智宏（2010）岐阜県版スギ・ヒノキ細り表の作成. 岐阜県森林研究所研究報告 39：1-18.
パラメータ	$x = (H-h_i) / H$ $y = d_i/d_{0.9}$ H：樹高(m) h_i ：任意の高さ（ i 位置） d_i ：任意の高さ（ i 位置）での幹の直径 $d_{0.9}$ ：梢端から 0.9H の位置での幹の直径

また、直径の解析は図 2-12、図 2-13、図 2-14 の 3 つのパターンに対して以下に示す方法で求めた。



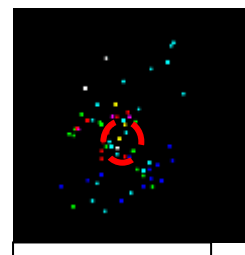
水平方向断面図

図 2-12.
連続的な点群からの円弧推定

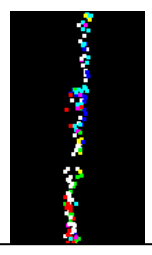


水平方向断面図

図 2-13.
断続的な点群からの円弧推定



水平方向断面図



垂直方向断面図

図 2-14.
断続的な点群による幹検

- ・単独コースによる点群から幹の円弧が十分計測された場合（図 2-12）

連続的に幹に照射された計測点を使用して DBH（以後、解析 DBH とする）を計算した。これによって、GNSS 測位の相対精度が高い点群が利用できる。また、樹幹上でのフットプリントの拡がりが大きくなっていると判断された計測点を除外することを想定していたが、遮蔽物の影響により想定よりも点群が少ないことに加え、幹周辺のノイズとの区別が困難なため、幹に当たっていると思われるすべての点を用いた。鉛直方向から見て、樹幹と思われる円形の箇所を目視で確認し、その円形の箇所を対象に最小二乗法によるフィッティングを行い、樹幹の位置と直径を求めた。楕円の直径は、 $\sqrt{\text{長軸} \times \text{短軸}}$ によって求めた。

- ・複数コースによる点群から幹の円弧を推測（図 2-13）

単独コースによる点群が不十分な場合、複数のコースで幹に照射された断続的な計測点を使用して解析 DBH を計算した。GNSS 測位の誤差が累積してしまうが、より多くの点群を用いることで直径推定を可能とした。複数航路からのデータにずれが認められる場合は、ずれの少ないコースからの点群のみを選択し、前述のフィッティングを行った。

- ・複数コースによる点群でも幹の円弧が確認できない場合（図 2-14）

複数のコースから幹に照射された断続的な計測点を使用して、幹の本数を検出した。また、解析 DBH を求められなかった立木については、前述の 2 つの立木群のデータ（樹高及び解析 DBH）をもとに、以下の方法によって DBH（以後、推定 DBH とする）を計算した。

Step1)

解析 DBH を計算できた立木群を、その樹高をもとに、一定の樹高間隔でグルーピングした。以下、樹高間隔 4m での計算を例示する。立木グループ名は、樹高 10m 以上 14m 未満の中央樹高値を使って H_{12} 、樹高 14m 以上 18m 未満のものを H_{16} 、以下、 H_{20} 、 H_{24} …として表す（図 2-15）。

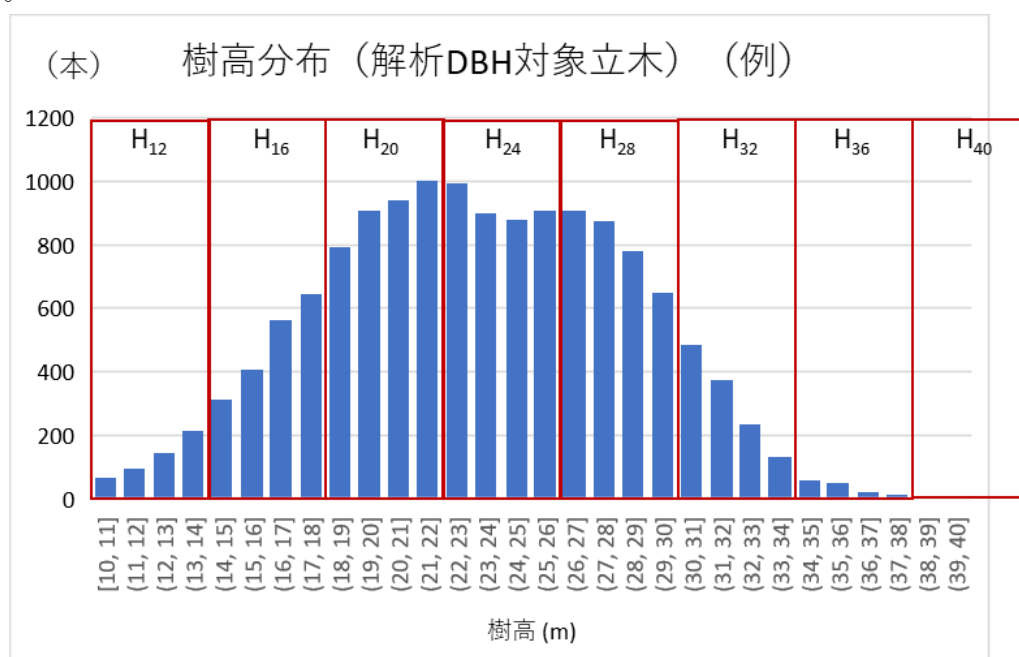


図 2-15. 解析 DBH 対象立木の樹高分布と立木グループ（例）

Step2)

各立木グループに属する対象立木の解析 DBH の平均値を計算した。 H_{12} の平均解析 DBH を D_{12} 、 H_{16} の平均解析 DBH を D_{16} 、以下、 D_{20} 、 D_{24} …として表す。

Step3)

幹の円弧が確認できなかった立木の樹高を X とした場合、この立木の DBH を推定するために用いる下層グループと上層グループを以下のように決めた。

下層グループ： $\text{floor}(X / 4, 0) * 4$ （floor は切捨て）

上層グループ： $\text{ceil}(X / 4, 0) * 4$ （ceil は切上げ）

対象となる立木の樹高が 19.5m の場合、以下ようになる（図 2-16）。

下層グループ= $\text{floor}(19.5 / 4, 0) * 4 = 16 \dots H_{16}$

上層グループ= $\text{ceil}(19.5 / 4, 0) * 4 = 20 \dots H_{20}$

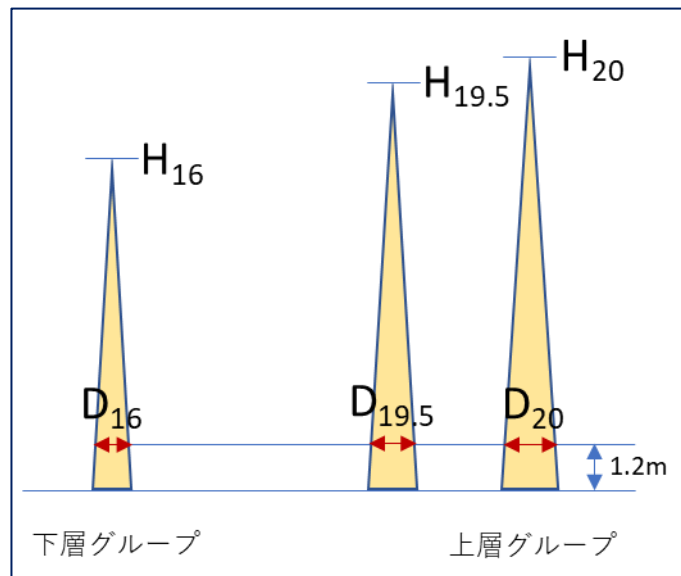


図 2-16. 下層グループと上層グループとの関係（イメージ）

Step4)

Step3 で決めた 2 つの立木グループの中央樹高値との距離による比例計算で、対象となる立木の推定 DBH を求めた。

対象となる立木の樹高が 19.5m の場合、

$$\Delta H1 = H_{19.5} - H_{16} = 3.5$$

$$\Delta H2 = H_{20} - H_{19.5} = 0.5$$

$$D_{19.5} = D_{16} * (4 - \Delta H1) / 4 + D_{20} * (4 - \Delta H2) / 4$$

例えば、 $D_{16} = 31.0\text{cm}$ 、 $D_{20} = 33.0\text{cm}$ の場合、

$$D_{19.5} = 31.0 * (4 / 3.5) / 4 + 33.0 * (4 - 0.5) / 4 = 32.75$$

以上より、樹高 19.5m の立木の推定 DBH は 32.75cm と計算される。

補足) 例えば、解析 DBH 対象立木群の最低樹高が 10m、最高樹高が 40m の場合においては、幹の円弧が確認できなかった樹高 9.5m（あるいは樹高 40.5m）の立木に対しては下層グループ：H₈（上層グループ：H₄₄）が存在しないため、D₈（あるいは D₄₄）が未定義となり、D_{9.5}（あるいは D_{40.5}）の推定が不能となってしまう。この解決策として、立木グループの中央樹高値と Step2 で得た平均解析 DBH の散布図から相関式（図 2-17）を求め、解析 DBH 対象立木が存在しなかった立木グループの平均解析 DBH（例えば D₈や D₄₄）を推定し、Step4 での比例計算を可能にした。

・立木の幹材積計算

森林総合研究所「幹材積計算プログラム」を使用して計算。その際、カラマツ、トドマツ、スギ（秋田）、スギ（天竜）及びヒノキの 4 グループそれぞれにおいて、DBH の輪尺計測とレーザ解析結果の平均値の差を系統誤差として一律補正した補正後 DBH を用いた。

補正式)

(補正後 DBH)_i=

$$(\text{解析 DBH})_i - [(\text{グループの解析 DBH 平均値}) - (\text{グループの輪尺計測 DBH 平均値})]$$

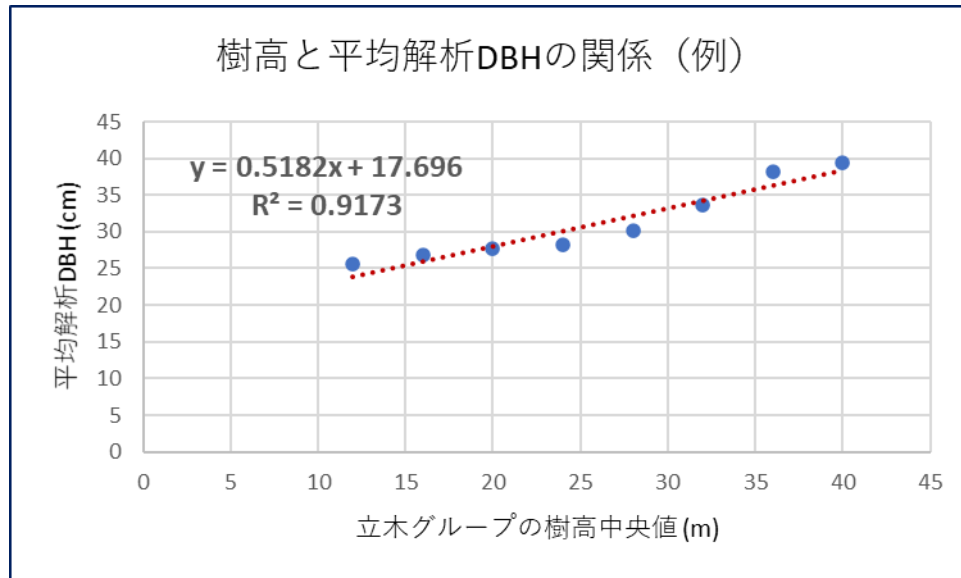


図 2-17. 立木グループの樹高中央値と平均解析 DBH の相関式（例）

③ 被圧木の確認

被圧木を明確に定義することが困難であること、また、今回の結果においては、検出率が 99%以上ということを踏まえ、樹高のヒストグラムに現れる低層木の分布を以て、被圧木が存在することの確認とした。

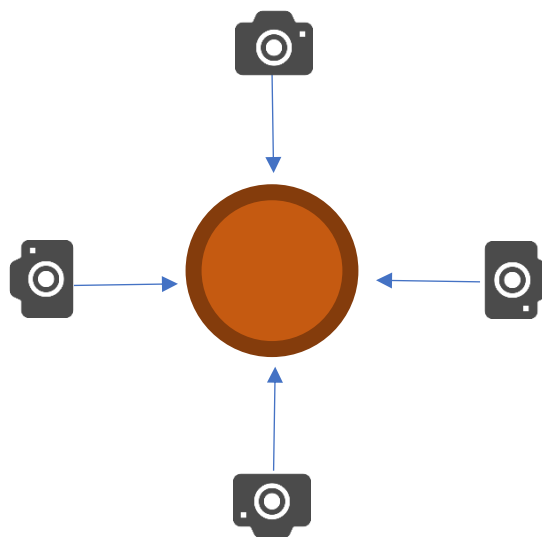
(エ) 林分内容解析結果の精度検証

① 現地調査方法

本事業で使用する UAV レーザ計測条件、計測結果及び林分内容解析の仕様が適切であったかについて各地域の検証地（20m×20m プロット）を対象に確認した。調査項目と方法を表 2-6 に示す。

表 2-6.林分内容の調査項目と方法

項目	方法
立木本数	目視確認により 10cm 以上の立木にエリアごとの ID を付与
胸高直径	ID を与えた立木について、輪尺で 2 方向計測し、平均値を 0.5cm 刻みで記録
樹幹形質	目視により、幹形、幹の直進性及び根本曲がりのある立木を ID とともに記録 また、蔓性植物が幹を這っているなど表皮の状態を写真撮影
樹高	ID を与えた立木について、樹頂と根元が同一地点から観測できる任意の立木について、レーザ測距計を用いて計測
位置	それぞれのエリアに基準木 2 本を設定し、GNSS レシーバーで位置を決定し、レーザ測距計を用いて ID を与えた立木を三辺測量
開空度	それぞれのエリアで任意の立木の周囲東西南北の 4 方向で鉛直上方を魚眼レンズで図 2-18 の条件で撮影し、空の見える領域の割合を図 2-19 のように解析し開空度とした



- ・調査対象：標準地調査範囲内の樹木
- ・撮影高さ：調査対象樹木、地上約 2m
- ・撮影方向：各樹木に対し東西南北の 4 方向から天空を撮影
- ・撮影画角：185°

図 2-18.開空度調査

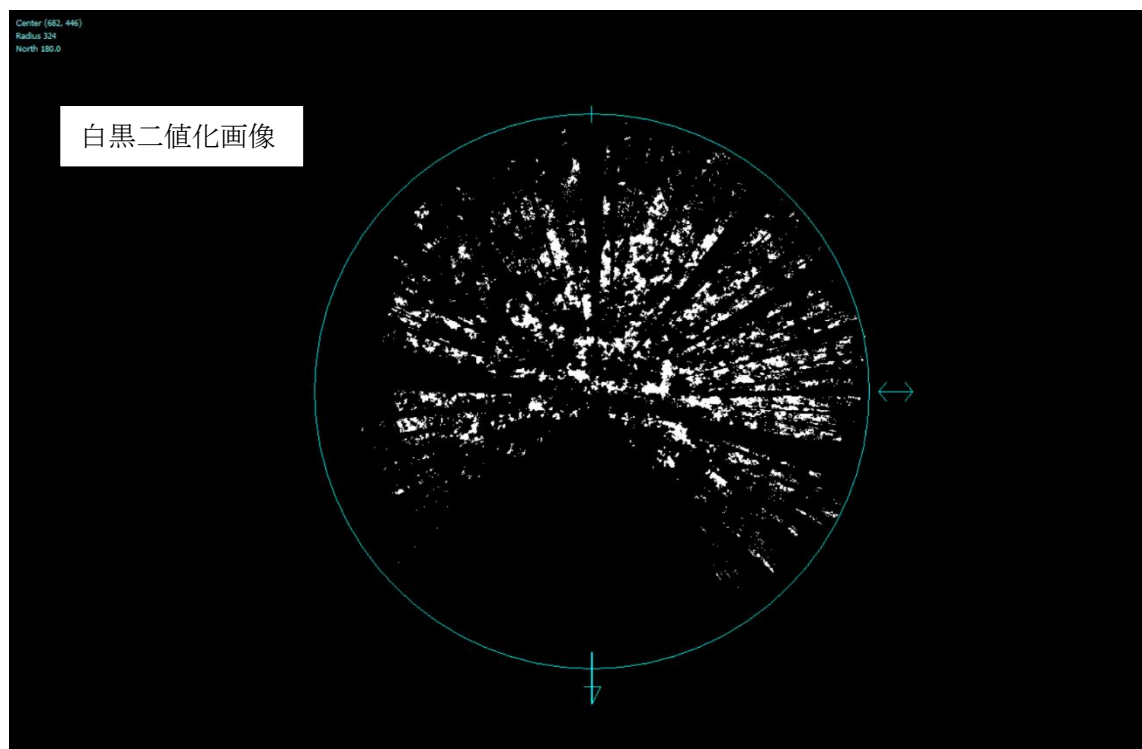
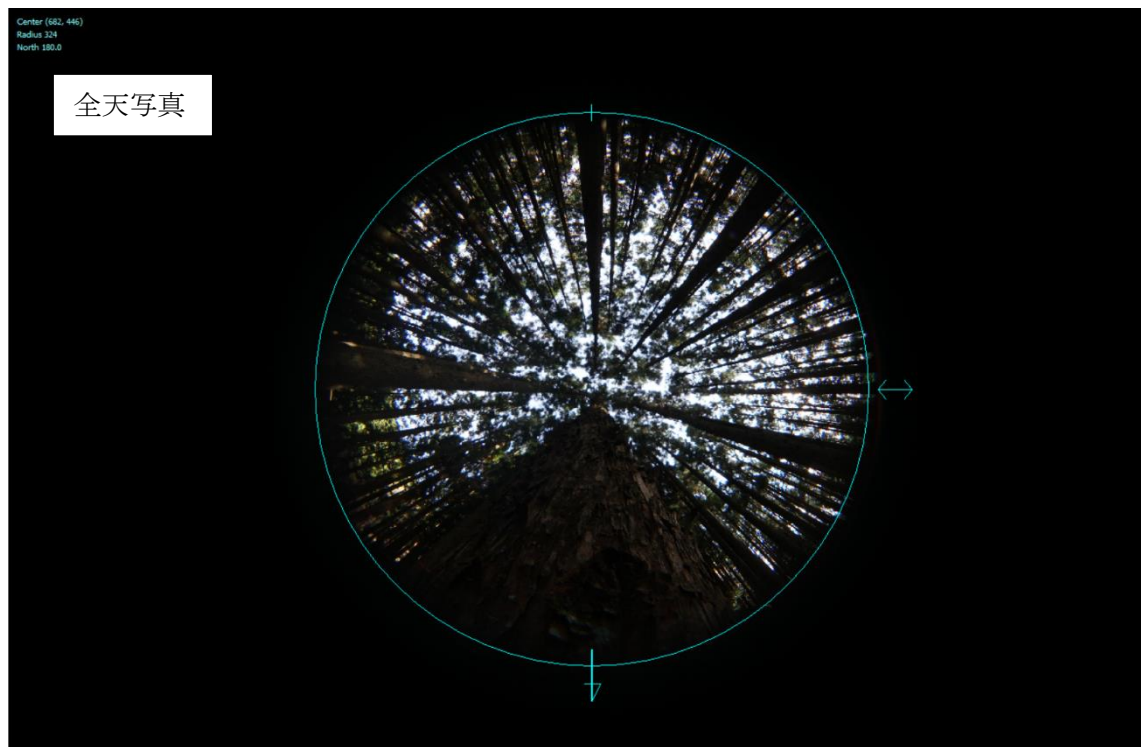


図 2-19.開空度調査解析方法

- ・撮影した画像を白黒二値化し、開空部分が白色、樹幹及び樹冠が黒色となるように写真の輝度を調整
- ・白色となった部分より開空度を算出、計測範囲の最大値である天頂角 50 度以上（図 2-20）を対象とした。

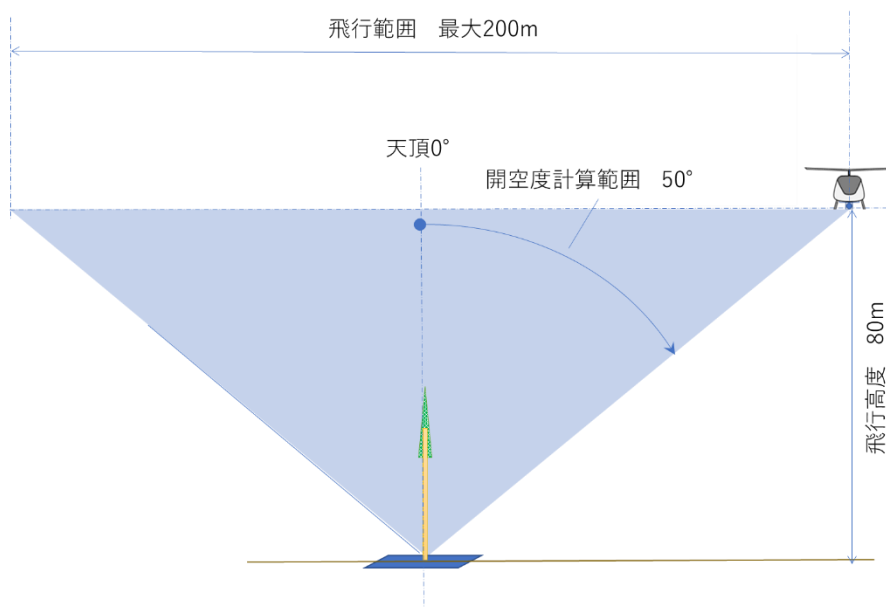


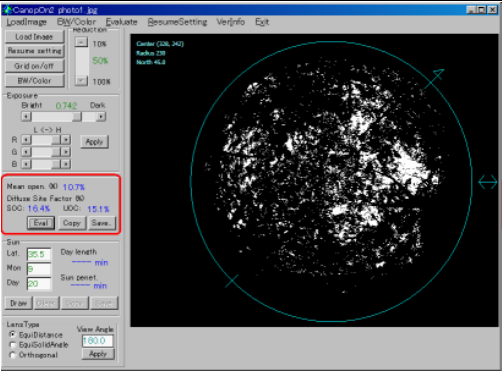
図 2-20.開空度解析範囲

検証に使用した機材の仕様は下記のとおり

表 2-7.踏査使用機材

種別	全天写真撮影装置	 メーカーHP より引用
機器名	オプトキャノピー180	
会社名	クリマテック株式会社	
主な スペック	射影方式：等距離射影 魚眼レンズ画角 185°	
参照 URL	https://www.weather.co.jp/catalog_html/C-OptoCanopy.html	

種別	デジタルカメラ	 メーカーHP より引用
機器名	α 6500	
会社名	SONY	
主な スペック	画像素子：APS-C サイズ 有効画素数：約 2420 万画素 焦点距離：18～200 mm (18 mm固定で使用) F 値：3.5～6.3	
参考 URL	https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-6500/ https://www.sony.jp/ichigan/products/SEL18200/	

種別	全天写真解析プログラム	
名称	Canopon 2	
作成者	竹中明夫（国立環境研究所）	
主な機能	全天写真の画像イメージを細かく区画分けし、それぞれの区画ごとの空隙率を出力する。	
参考 URL	http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/	

作者 HP より引用

種別	レーザ距離計	
機器名	TruPulse200L	
会社名	LASER TECHNOLOGY INC	
主な スペック	測定可能距離：0～1750m 精度：0.5～1m （目標物の反射率による） 傾斜精度：±0.5° 測定モード：直線距離、水平距離、垂直距離、傾斜角度、目標物の高さ	
参考 URL	https://www.hanshinco.com/trupulse.html	

メーカーHP より引用

メーカーHP より引用

種別	GNSS レシーバー	
機器名	DG-PRO1RWP	
会社名	ビズステーション株式会社	
主な スペック	捕捉衛星：GPS、GLONASS、 Galileo、QZSS 単独測位精度：1.5m	
参考 URL	メーカーHP より引用 https://www.bizstation.jp/ja/drogger/package_index.html?tab=rwp	

メーカーHP より引用

表 2-8. 現地調査記入表（野帳）サンプル

地区名	大館市早口2289号		計測範囲が1→2に対して			側（逆側は反転が必要）
ID	反転あり	1との距離	2との距離	DBH	樹種	メモ
1			19.1	40.5	スギ	10系(38144.9,-35979.0)
2		19.1		34.5	スギ	10系(38161.4,-35966.7)
3	Y	15.8	3.9	35	スギ	
4	Y	13.7	6.6	50.5	スギ	
5	Y	12.2	8.2	35.5	スギ	
6	Y	12.6	6.1	31.5	スギ	
7	Y	15.1	3.7	20.5	スギ	
8		12.3	6.3	43.5	スギ	
9		15.3	3.7	30.5	スギ	
10		16.4	3.2	15.5	スギ	
11		17.2	4.6	28	スギ	
12		10.9	8.6	20	広葉樹	
13		7.3	11.6	30.5	スギ	
14		5.3	13.4	17	広葉樹	
15		4.8	14	20.5	広葉樹	
16		6.9	12.7	15	広葉樹	
17		9.7	10.9	31	スギ	
18		11.2	9.9	16.5	スギ	
19		12.7	8.5	26	スギ	
20		19.4	6.5	18	スギ	
21		16.2	10.6	36	スギ	
22		11.9	13	36	スギ	楕円
23		10.9	13.6	8	広葉樹	
24		6.4	15.1	19.5	スギ	根曲り
25		2	18.6	22.5	スギ	
26		2.6	20	23	スギ	
27		3.2	18.6	12.5	スギ	
28		3.9	18.2	9	広葉樹	
29		5	19.9	34	スギ	曲り
30		6.7	18	8	広葉樹	
31		10	16.2	36.5	スギ	
32		19.8	13.9	30	スギ	
33		14.6	15.1	7.5	広葉樹	二又
34		14.4	14.9	9.5	広葉樹	二又

② 現地計測結果と解析結果の照合方法

現地計測結果と解析結果とは、下記の手順で ID 付与したすべての立木 1 本 1 本について突合した。

点群から幹の位置を抽出

点群の中で垂直に連続する点群を幹として特定し、できるだけ胸高に近い高さで幹の位置を記録した。(図 2-21)

点群で確認可能な立木全数を記録するが、特に北海道でみられた細い雑木が多い検証地では、踏査結果と照合しやすいよう、主に直径 10cm 以上と思われる幹のみを検出した。直径 10cm 以下と考えられる細い木は後述の④踏査立木位置合わせ後に ID 付与された解析対象立木のみ追加で記録した。

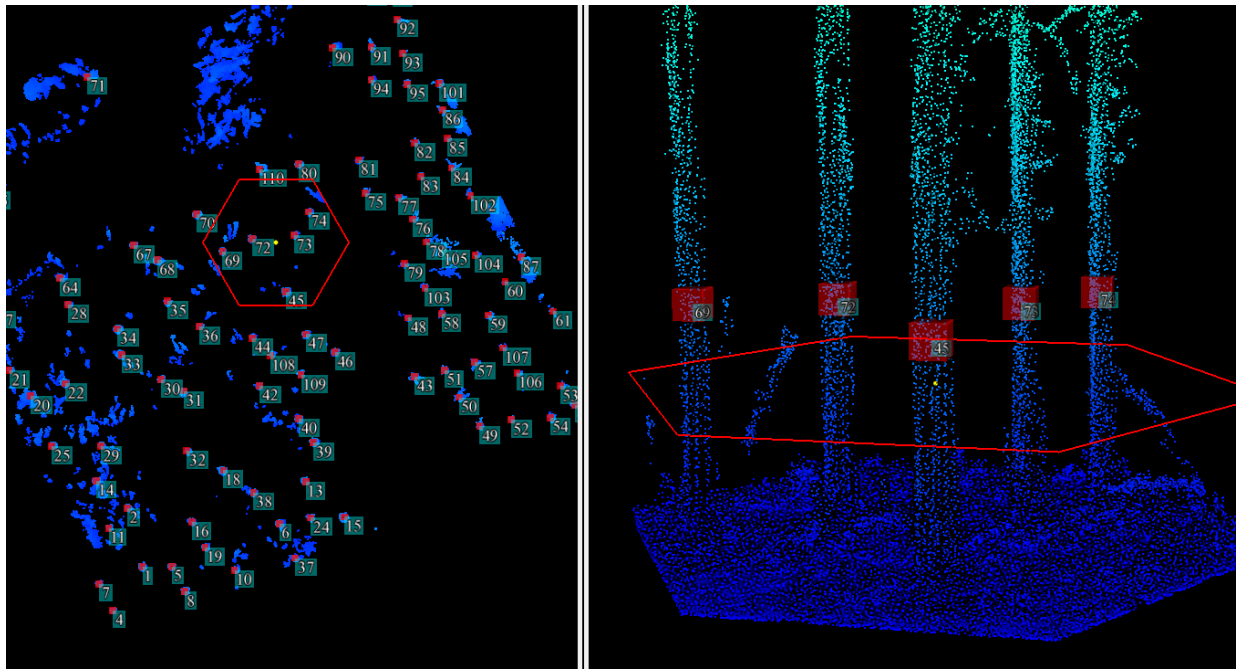


図 2-21. 幹検出方法

踏査結果から位置を算出

個々の立木について、GNSS レシーバーで座標を検出した 2 本の基準木との距離から、三辺測量の原理で基準木との相対位置を算出した。

GIS 上で樹木の位置を比較

踏査立木位置と、点群から求めた解析立木位置とを重ね合わせた。(図 2-22)

この際、GNSS 精度を起因として、位置及び方位のずれが存在する。

(平均的なずれは、水平方向 2~3m、回転±2~5° 程度)

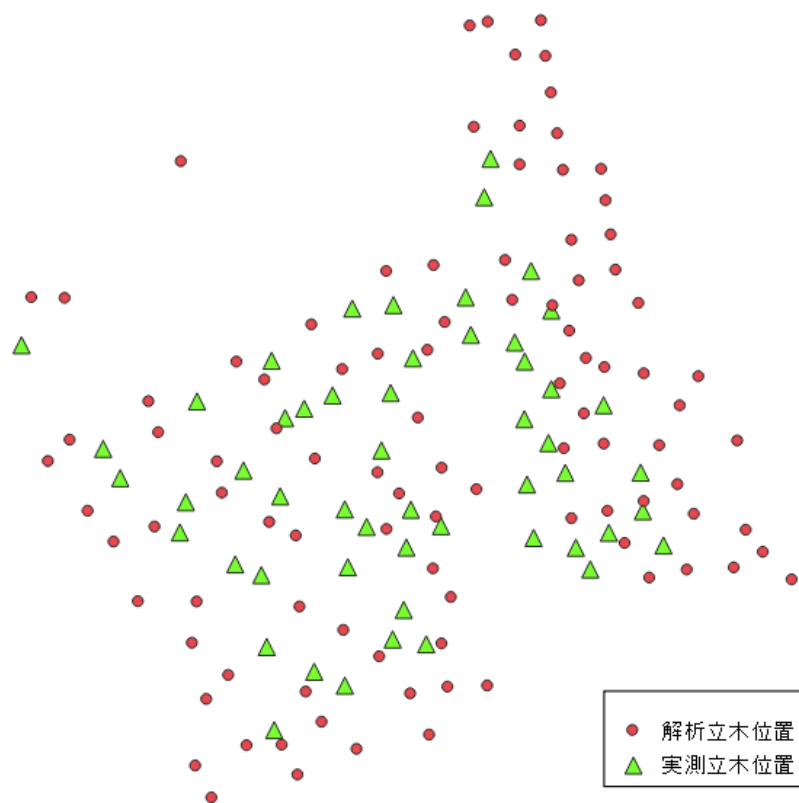


図 2-22.プロット調査立木と点群から抽出された幹位置(調整前)

踏査立木位置の調整

樹木の並び方の特徴を用いて、踏査結果と解析結果の相対的な位置を調整した。三辺測量による誤差が生じることもあるため、必要に応じて、点群と立木写真も使用し、特徴がある木の特定と位置調整を行った（図 2-23）。

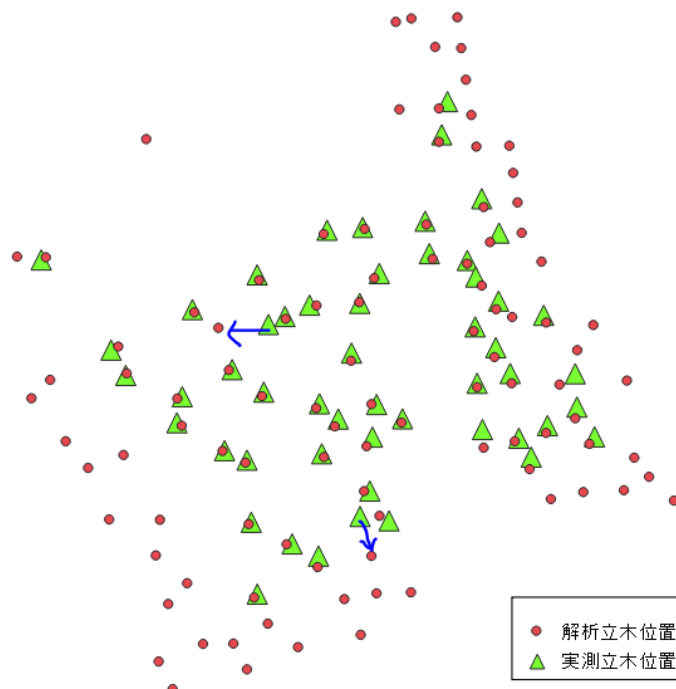


図 2-23. プロット調査立木と点群から抽出された幹位置(調整後)

③ 精度検証結果

概要

林分内容の検証方法と結果を表 2-9 にまとめた。

また、結果の詳細は、別添資料 1 にまとめた。

立木検出は 99%以上であり、被圧木も十分含まれていると判断できる。

個々の立木に対する直径解析の可否を示す直径解析率とその精度を示す二乗平均平方根誤差 (RMSE)はエリアごとにばらつきがあることが確認された。詳細は、本計測手法の適用について、後述の計測仕様の提案に記載する。

立木検出率や直径解析率の低下要因は、伐期、樹種、傾斜及び開空度に加え、枯れ枝や下層植生など、幹まわりのノイズの影響が大きいことが分かった。

表 2-9. 検証方法と結果

検証項目	検証方法	検証結果
幹検出本数	輪尺計測 10cm 以上の幹検出数を全エリアの総数で評価	5m 間隔：検出 1093 本 /1094 本 25m 間隔：検出 1089 本 /1094 本
	被圧木検出は、上記未検出数として評価（被圧木の存在有無については樹高ヒストグラムで確認）	上記結果より、一定数含まれる被圧木（図 2-25 参照）も検出できている。
胸高直径 任意高さ直径	解析による直径検出率を評価	47～100%とエリアによりばらつきあり。詳細は次項の検証結果詳細で後述。
	輪尺の値に対する直径平均値誤差及び、個々の立木誤差の RMSE で評価（細り率による換算式を使用）	RMSE0.02～0.09m とエリアによりばらつきあり。上記同様、詳細は別途。
	直径階別の本数分布の比較	いずれの林地においても推定 DBH は踏査の分布とピーク位置や値の広がりなど同様の傾向を確認できた（資料 1 の 15～17 項）。
	近畿中国森林管理局 森林技術・支援センターによる地上レーザ計測結果が存在する 4 エリアで RMSE を比較	地上計測(0.02～0.08m)と比較した結果、平均 RMSE で約 1cm 程度の違いであった。
材積	輪尺計測 DBH と解析 DBH または推定 DBH を用いて森林総研「幹材積計算プログラム」で計算した値を比較	踏査結果との平均値の差により補正した DBH を用いることで、踏査に対して平均 0.9%の誤差だった。 広葉樹の混交率が 20%以上のエリア、及び開空度が 1%程度のエリアを除くと、13%以内だった。
樹幹形質	主伐期で根曲りの大きい任意の立木に関して検出可否を確認	根曲り検出可能。サンプル図 2-26 参照。
樹高	現地調査結果と比較する。 (UAV で用いた LiDAR は、踏査で用いたレーザ測距計と計測原理が同じでありながら、搭載している慣性計測ユニット:IMU が高性能なためより精度が高いことが明白)	バーテックス計測結果と十分な相関が得られ、計測結果の信頼性が確認できた。(図 2-24)

① 検証結果詳細

検証結果詳細を表 2-10 にまとめた。

- ・収量比数 0.96 という過密な林分を含む検証エリアでも、立木をほぼ全数（平均 99%以上）検出することができた。
- ・直径検出率は全域平均 94%を検出することができた。効率的な飛行条件で最も厳しい条件のエリアでも、推定 DBH を求めるに十分な 45%以上を検出できた。
- ・DBH の精度を示す RMSE は 2cm～7cm とエリアごとにばらつきがある。これについては、収穫調査の計測方法に即し、2cm 括約に換算しても同様の結果となった。このばらつきは、当初想定していた樹種、伐期、傾斜などに起因する開空度とともに、幹周辺に存在する枯れ枝や下層植生などが大きく影響することが確認できた。これらは、幹の検出時に点群ノイズの原因となり、幹の検出の妨げや、直径計測精度の低下を招く場合がある（表 2-11）。

また、以下の方法で、精度を向上できることを確認した。

- ① DBH を求める際に用いる幹曲線を、計測地ごとに独自に作成することにより、精度が向上することを確認した。これは、植栽された地位及び苗木の特性による樹木形状の違いを反映できるためであると推測する。
 - ② DBH を 9~30mm 小さく補正することで、精度向上が期待できる。これは、輪尺計測時は樹皮の浮き上がりを物理的な測定圧で押さえられることに対して、レーザはそのようなことがないという差を補正できるということが理由の一つである。
- ・樹高計測については、現地踏査のバーテックスと比較し、十分な相関があることが確認できた。（図 2-24）
 - ・材積精度については、計測エリアの総材積の誤差が 1%以下という結果が得られた。エリアごとでは最大 24%の誤差があるが、開空度が 1%程度のエリアで精度が低下していることが確認できた。

なお、直径検出できなかった立木について、既述の推定 DBH を用いて材積計算することにより、材積精度が向上した。

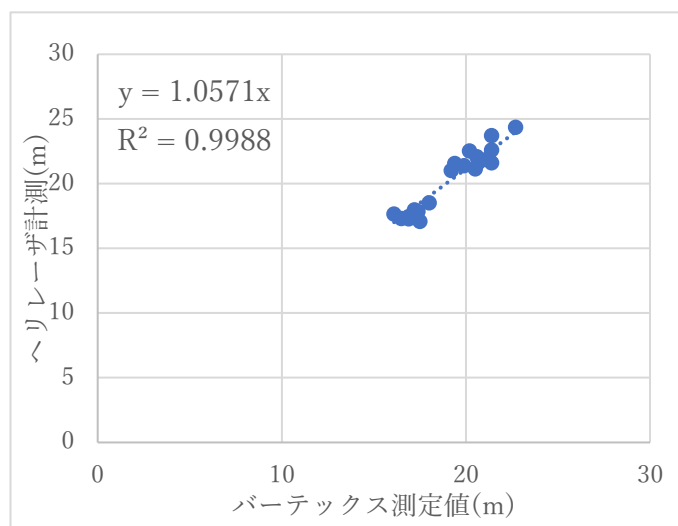
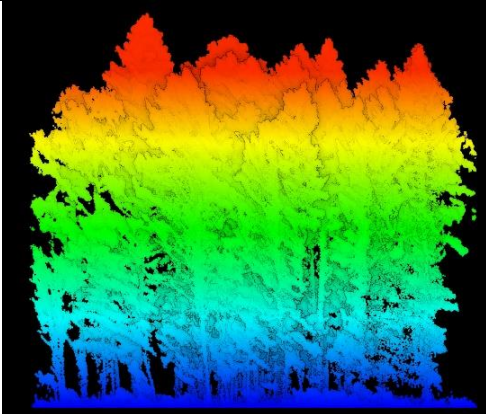
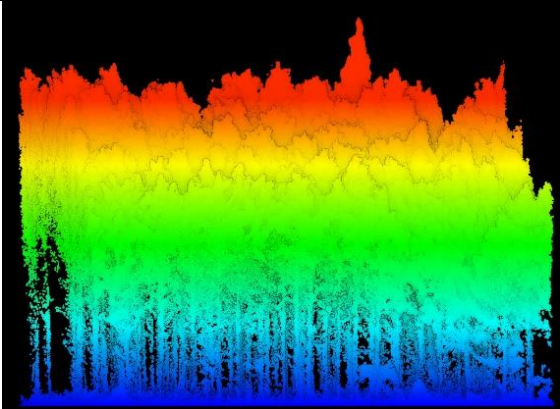


図 2-24.天竜瀬尻 861 に における樹高計測結果の比較

表 2-10. 検証結果総表

地域		北海道 遠軽町生田原						秋田県 大館早口				静岡県 天竜瀬尻								平均/合計
林班		356 う	344 ぬ	342 へ	343 は	356 る	344 ひ	2257 に	2299 よ	2289 そ	2257 つ	864 ちB	864 ちA	862 いA	862 いB	872 は	878 ろ	861 に	880 ほ	
樹種		トドマツ	トドマツ	トドマツ	トドマツ	カラマツ	カラマツ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	ヒノキ	ヒノキ	ヒノキ	ヒノキ	
(樹種割合)		59%	76%	95%	66%	64%	61%	84%	100%	67%	67%	100%	100%	78%	100%	100%	99%	100%	65%	
伐期		間	間	主	主	主	主	間	間	主	主	間	間	主	主	間	間	主	主	
傾斜		緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	
収量比数		0.74	0.81	0.70	0.66	0.63	0.73	0.78	0.86	0.74	0.59	0.96	0.97	0.79	0.79	0.77	0.85	0.81	0.88	
開空度 (50度以下)		4.8%	10.5%	4.1%	4.2%	11.3%	9.2%	8.3%	6.0%	5.0%	5.1%	6.9%	9.1%	3.8%	5.5%	1.3%	1.0%	4.1%	6.9%	
立木本数 (調査地内)		57	74	48	49	32	35	69	70	50	26	110	102	39	52	65	83	53	80	
立木密度(本/ha)		1,142	1,535	1,212	836	623	639	922	1,036	973	393	1,906	2,208	620	994	1,392	1,501	936	1,556	
立木 検出	5m	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99.9% 平均
	25m	100%	99%	98%	100%	100%	100%	99%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	99.5% 平均
直径 検出	5m	95%	62%	58%	92%	100%	100%	97%	100%	96%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	98%	100%	98%	94.1% 平均
	25m	72%	51%	50%	61%	84%	91%	96%	93%	86%	92%	97%	96%	95%	100%	86%	45%	91%	75%	81% 平均
読取值 RMSE (m)	5m	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.04	0.05	0.02	0.03	0.07	0.06	0.03	0.04 平均
	25m	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.04	0.06	0.05	0.07	0.06	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.09	0.06	0.04	0.06 平均
2cm括約 RMSE (m)	5m	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.04	0.05	0.02	0.03	0.07	0.05	0.03	0.04 平均
	25m	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.04	0.05	0.05	0.07	0.06	0.04	0.04	0.08	0.05	0.04	0.09	0.05	0.04	0.06 平均
材積 (m³)	輪尺	48.0	29.5	18.4	33.2	18.3	23.2	58.6	51.8	32.2	61.3	56.0	44.4	34.8	41.8	20.6	26.1	29.2	27.0	654.4 合計
	UAVレーザ	48.9	25.1	18.4	36.4	21.4	23.5	56.2	55.7	31.7	58.6	56.9	47.7	34.0	39.6	16.2	31.7	33.0	25.3	660.3 合計
	誤差	2%	-15%	0%	10%	17%	2%	-4%	8%	-2%	-4%	2%	7%	-2%	-5%	-22%	21%	13%	-6%	0.9%
OWL調査RMSE(m)															0.08	0.04	0.02		0.03	0.03 平均

表 2-11. 精度低下の状況が確認できた調査対象地の点群断面図（抜粋）

	北海道 遠軽町生田原 343 は	静岡県 天竜瀬尻 878 ろ
立木密度	836 本/ha	1501 本/ha
直径検出率	5m : 92% / 25m : 61%	5m : 98% / 25m : 45%
DBH RMSE	5m : 0.05 / 25m : 0.06	5m : 0.07 / 25m : 0.09
材積推定誤差	10%	21%
点群状況 (平面化後)		
単木状況写真		
精度低下要因	下層植生の繁茂による幹回りのノイズ	立木密度過多に加え、枝が多い

② 被圧木の検出

UAV レーザ計測では、前述のとおり立木のほとんどを検出できている。したがって、林分に存在する被圧木についても、すべて検出できていると考えられる。

そのことを証明するため、計測対象地の 1 か所の樹高ヒストグラム（図 2-25）を用いて検証した。

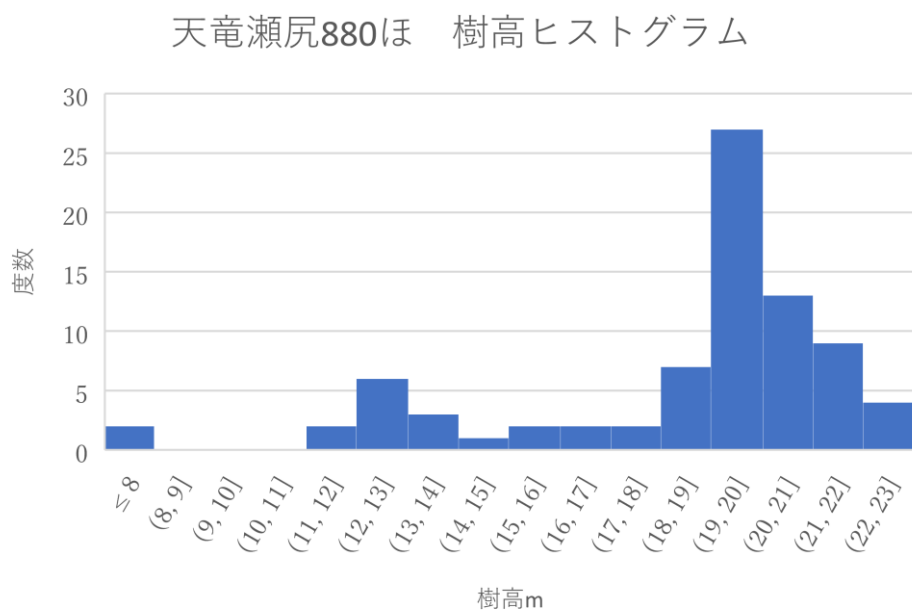


図 2-25. 樹高ヒストグラムのサンプル

図 2-25 より、樹高 20m 前後に大きな山があり、樹高 13m 前後にも比較的小さな山が存在することが分かる。前者は高層木であり、後者はこの高層木の下に樹冠部を持つ樹木であることから、後者をこの林地における被圧木として位置付けることができる。

この図 2-25 のヒストグラムに示される樹木は全て UAV レーザで検出できているため、この林地においては被圧木を検出できたことになる。

他の林地も同様であるため、今回の対象林地ではほとんどの被圧木を検出できていると考える。

③ 樹幹形質の検出

今回の検証においては、対象地の計測条件により図 2-26 に示すような根曲りを検出できる事例も確認できた。

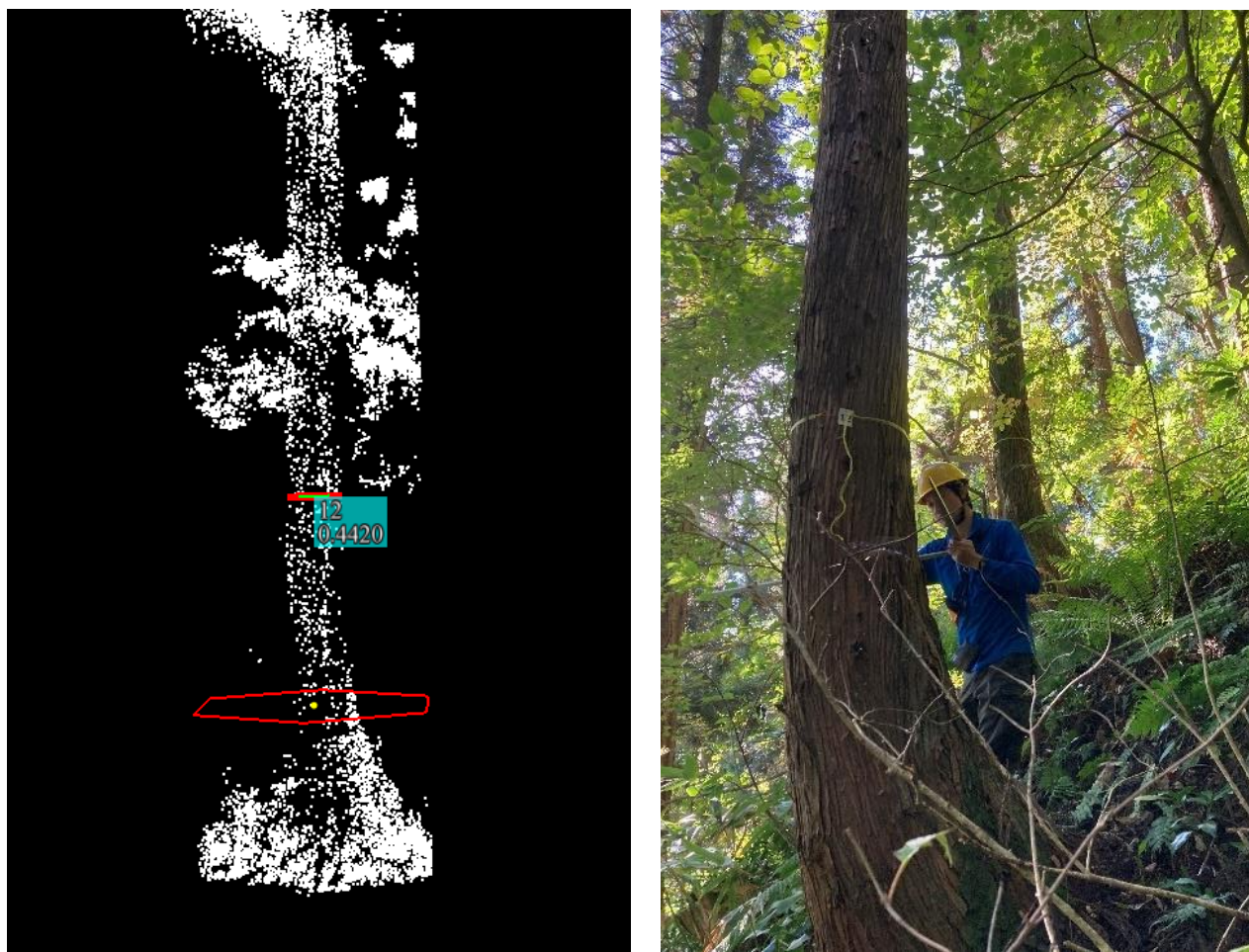


図 2-26.確認された根曲り 早口 2257 つ

(オ) UAVレーザによる林分内容解析推奨仕様

まず、本手法と既存手法について、その特性を以下の表 2-12 に整理した。

表 2-12. 既存手法と UAV レーザ調査手法の特性

	踏査（既存の手法）		UAVレーザ調査（提案手法）	
	毎木調査	標準値調査	A：詳細調査	B：効率的調査
本数	◎	△	◎	○
	誤差は数え漏れのみ	標準地の偏りの影響あり	95%以上の検出率	90%以上の検出率
材積	◎	△	○	△
	推定樹高による算出	標準地の偏りの影響あり	材積誤差 ～20%	過密林分では誤差大きい
形質	○	△	△	△
	定積的な把握が可能	全域の把握不可能	曲りなど定量化可能	←
樹種	◎	△	△	△
	樹皮による判断が可能	全域の把握不可能	オルソ写真による目視判断	←
立木位置	×	×	◎	◎
	位置情報なし	位置情報なし	cm級の精度で把握可能	←
収量比数/ 相対幹距比	○	△	○	○
	樹高は推定による	全域の把握不可能	DBH推定精度の影響あり	DBH推定精度の影響あり
地形	×	×	◎	◎
	定量的な記録不可	定量的な記録不可	微地形計測可能	微地形計測可能
記録化	△	△	◎	◎
	野帳のみ	野帳のみ	デジタル記録	デジタル記録
適合用途	主伐前調査、分収林調査	均一林分の調査	木材販売目的の施業前調査	切り捨て間伐前調査
	木材販売予算作成			

上記の結果と、森林経営の目的を鑑みて、本解析の適用について下記を提案する。

林分内容解析の適用について

森林経営としては、大きく分けると主伐期と間伐期とで、伐採をどのように行うかが重要になる。そのため、下記 A と B の 2 通りに分け、各々において適した計測方法をまとめた（表 2-13）。

A. 木材の販売に向けた施業を前提とした林分：

下層植生が少ない、枝打ちもされている針葉樹人工林。

立木本数と樹種に加え、個々の材積もわかるため、収量把握に基づいた工数見積もりと予算作成が可能。

B. 切り捨て間伐を前提とした林分：

下層植生の繁茂や、枝残りが多くなど、十分な手入れがされていない針葉樹人工林。

立木本数と位置、樹種と樹高に加えて、微地形を明らかにすることで、間伐計画が可能。

表 2-13. 適用目的と計測要件

		A：木材販売目的の施業前調査	B：切り捨て間伐前調査
主な目的		樹種と材積による収量見積もり	現状収量比数算出 間伐後収量比数シミュレーション
適用条件		下層植生が少ない、枝打ちもされている針葉樹人工林	下層植生の繁茂や、枝残りが多い針葉樹人工林
要求項目	立木検出	90%以上	90%以上
	樹高検出	90%以上	50%以上
	DBH 検出	50%以上	30%以上
計測要件	レーザ入射角	25° ～50° を含む	(左同)
	点群密度	10,000 点/m ² 以上	2,000 点/m ² 以上
	その他		

UAVレーザ計測の仕様（案）

上記要件を達成させる標準的な性能要件の事例として、本事業での計測仕様を表 2-14 に本事業での UAV レーザによる林分内容解析の標準的な条件（案）としてまとめた。

表 2-14. 本事業での UAV レーザによる林分内容解析の標準的な条件 (案)

種別	項目	内容
計測対象	林分状況	針葉樹/人工林/単層林
	立木密度	スギ：2,200 本/ha 以下 ヒノキ：1,600 本/ha 以下 トドマツ：2,200 本/ha 以下 カラマツ：(*注記参照)
	幹周り	幹直径 10cm 以上 枝残りが少ない、1m を超える下層植生が少ない
UAV	積載重量	16kg 以上：機材 8kg×安全率 2.0
	航続時間	75 分以上 (機材キャリブレーションと往復時間 10 分 +2ha×20 分/ha) ×安全率 1.5
	速度	幹直径に 4 スキャン以上が得られる速度
	耐風性	10m/sec 以上で飛行可能。 山頂からの吹き下ろしや谷底からの上昇気流等に耐えられるよう、可変ピッチ翼が望ましい。
	耐水性	水による錆や漏電に対する耐性
レーザ	計測精度	1σ 2cm 以下
	計測距離	150m 以上
	拡がり角	1mrad 以下
	照射数	600kHz 以上
カメラ	固体撮像素子	3640 万画素以上 フルサイズセンサ
	焦点距離	18mm～600mm
	歪曲収差	立体写真計測(SfM)が可能なレンズ歪み量
GNSS	位置精度	0.30m 以下
	基線解析	キネマティック解析にて基線ベクトル解析ができること
	受信間隔	1Hz 以上
IMU	姿勢精度	ローリング角・ピッチング角：0.015°、ヘディング角 0.035°
	計測間隔	100Hz 以上
キャリブレーション	較正精度	計測精度を満たすために必要な GNSS、IMU、レーザプロファイラ及びカメラの位置と姿勢の関係精度
計測方法	航路	コース間隔 5m または 25m
	照射数	600kHz
	スキャン数 (センサ部 回転数)	飛行速度と合わせ、連続するスキャンラインの隣接する計測点で幹周りの寸法が解析できる数
	入射角	25°～50°を含む範囲
	スポット径	幹直径 10cm よりも十分小さい値
	気象	レーザ光を遮る水分の状況(雨・雪だけでなく霧・霞等)を避ける
推定方法	データ区分	LAS 形式 3 次元点群データ
	樹頂点	CSP アルゴリズムによる点群分類から抽出
	樹幹	垂直に連続な成分の検出
	地形	IPTD アルゴリズム

注) 間伐期のカラマツ林の計測を今回実施できなかったため、計測条件を明確にする事を避けた。なお、今回計測を実施した主伐期のカラマツ林は、650 本/ha だった。

3 立木の位置情報等から任意に設定した区域の再現手法の検討・検証

(ア) 区域の再現方法の検討

UAV レーザで計測した個々の立木の形状や位置情報、相対的な位置関係、微地形等のデジタル化された森林情報を基準として GIS 上で任意の区域を設定し、設定した区域を現地で再現するには、GIS に現地の基準座標と方位を与える必要がある。

基準座標を与える方法として以下の手法を比較検討した。
結果を表 3-1 に示す。

表 3-1.各手法の比較

方法	メリット	デメリット
ハンディ GNSS 受信機による方法	機材が安価、軽量	森林内では GNSS の電波が届きにくい
近傍の基準点からのコンパス測量	機材が安価、軽量	計測に技術が必要 近傍に基準点があることが前提となる
近傍の基準点からの SLAM 測量	点群データから正確な位置を把握できる	機材が高価 SLAM 処理時にずれを生じる可能性がある 近傍に基準点があることが前提となる
GNSS 受信機を搭載した UAV から写真を撮影して座標を読み取る RTK_UAV 写真撮影方法	視覚的にデータを確認できる	UAV を離陸させる場所がない場合適用できない 写真から基準木を見つけるのが困難な場合がある
AR (拡張現実) 技術を用いて撮影した写真と解析データを重ねる方法	視覚的にデータを確認できる	絶対位置を決定するためには基準となる位置があることが前提となる AR 画像処理時にずれを生じる可能性がある

上記検討結果より、森林内での GNSS 受信状況が改善できれば、GNSS 受信機を用いた方法が簡便かつ高精度な位置情報を得ることができると考えられる。また UAV レーザ計測の計測結果から、立木の配置を確認できる。したがって、通常のハンディ GNSS 受信機より受信可能衛星を増加させた高性能 GNSS 受信機と、UAV レーザ計測によって得られた現地の立木の配置から区域を再現するハイブリッド手法を用いて検証を行った。

また、高性能 GNSS 受信機を用いても、林内では GNSS 受信状況が著しく悪くなることが想定される。したがって、AR 技術を用いて、UAV レーザ計測によって得られた立木の配置と現地の立木の配置状況をマッチングさせることにより、GNSS の受信状況が良好でない箇所においても、自己位置を推定して区域を再現する手法も併せて検証を行った。

(イ) 区域の再現可能性の検証

検証は下記の内容で実施した。

①検証場所: 静岡県浜松市天竜区龍山町大嶺(図 3-1)

* 積雪の影響で、当初実施予定の静岡県天竜瀬尻で実施できなかったため、代替地で検証

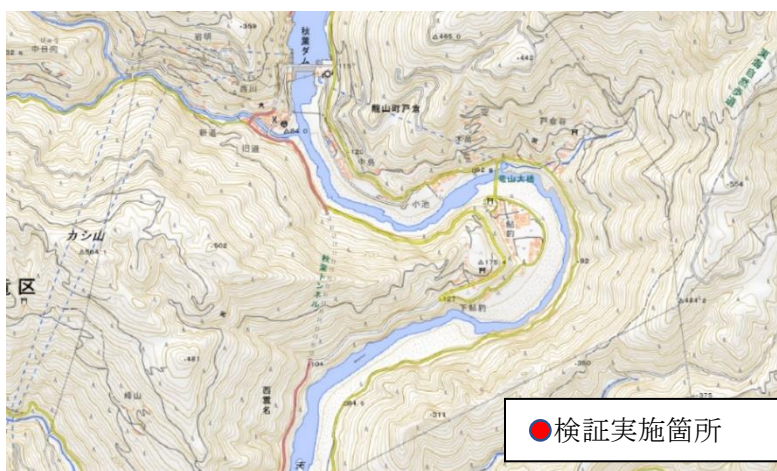


図 3-1. 再現可能性の検証場所

②検証実施日: 2022 年 2 月 16 日

③使用機材: 表 3-2 のとおり。

表 3-2. 高性能 GNSS 受信機及び高精度屋外 AR システム

種別	高性能 GNSS 受信機	
機器名	CHCNAV X900	
会社名	CHC	
主なスペック	捕捉衛星：GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou 単独測位精度：1.5m	

種別	高精度屋外 AR システム	
機器名	SiteVison	
会社名	Trimble	
主なスペック	捕捉衛星：GPS、GLONASS、Galileo、QZSS、SBAS ・GNSS 位置精度スペック： 水平 1cm、鉛直 1cm (※高精度 GNSS 位置情報が取得できる場所の場合) ・高精度位置情報が取得しにくい場所の場合 測位精度：0.2~10m AR 位置精度：0.1~10m	
参考 URL	https://www.sitech-japan.com/stj/solution/detail/34.html	

メーカー HP より引用

※サイテックジャパン株式会社様より借用

④検証方法

- ・高性能 GNSS 受信機を用いた方法

- i .立木の位置情報及び設定した区域情報を端末上に表示
- ii .高性能 GNSS 受信機から生成される現在位置情報を端末上に表示
- iii .設定した区域の端点に端末上に表示される現在位置情報を利用して移動し、地形図・立木の配置状況から区域の端点に正しく移動できているかを確認

- ・AR システムを用いた方法

- i .立木の位置情報及び設定した区域情報を端末上に表示
- ii .GNSS 電波の良好な場所で衛星測位を行い、自己位置を決定
- iii .決定した自己位置から AR システムの画像による SLAM 処理により、自己位置推定しながら、検証位置まで移動
- iv .カメラ画像への樹木モデル投影で位置ずれを確認
- v .立木の配置状況から、位置ずれを修正し、正確な自己位置を決定
- vi .決定した自己位置から、区域を再現できるかを確認

⑤検証結果

- ・高性能 GNSS 受信機を用いた方法

本検証で使用した GNSS 受信機では、林内で位置情報を取得することができなかった。
理由として下記の内容が考察される。

- ・上空の開空度が不足しているため、測位に十分な GNSS 電波を受信できなかった。
- ・GNSS 受信機が高精度を担保するため、状態の悪い GNSS 電波を除外しており、測位に必要な衛星数を確保できず位置情報を取得できなかった

本検証で使用した GNSS 受信機は、測量用タイプの GNSS 受信機であった。しかし、GNSS 測量においては、高精度を担保するため、様々なフィルタ処理が行われているケースが多い。そのため、森林内など開空度の低い箇所では測位に必要な衛星数を確保できず、測位不能となったと考えられる。いわゆるハンディ型GNSS受信機(Garmin など)やスマートフォンなどは状態の悪い衛星からの情報も利用し測位を行う傾向にあるため、位置の誤差は大きくなるが測位できる可能性がある。

•AR システムを用いた方法

AR システムを用いて立木の配置状況をカメラ画像に投影させ、立木情報をもとに基準位置と方位を与えることができた。これに、区域データを同時に取り込むことにより、設定した区域に到達できる可能性を確認した。



図 3-2. 高精度屋外 AR システムの使用例

但し、本検証では、代替地に UAV レーザ由来の精緻な立木位置情報がなかったため、現地立木実体とシステム内に表示される AR モデルとの照合ができず、区域の再現に至らなかった。

⑥考察

GNSS 電波が届きにくい林内においては、測位できない可能性を想定して使用する必要がある。GNSS 測位で高精度を実現するためにはネットワーク型 RTK-GNSS 測位 (VRS 方式) を活用する方法が考えられる。しかし、この方法はインターネットに接続できる環境があることが使用の前提となるため、携帯電話の電波が届きにくい林内において利用が難しい。したがって、GNSS 単独ではなく SLAM 技術を用いた AR システムを併用することにより、簡便かつ高精度な基準位置と方位を決定することが可能になると考えられる。

4 UAV 計測により得られる情報等の活用

UAV を用いたレーザ計測結果のデータに加え、同時に撮影した画像データを活用することによって、従来の踏査では得られなかった情報を得ることが可能である。その情報と活用方法について以下にまとめた。

(ア)立木位置情報及び樹高の活用

- ・計測エリア全域の相対幹距比図作成による間伐目安指標の提供

UAV レーザ計測により、計測対象エリア内の立木について、立木本数、個々の立木の位置及び樹高を精度よく捕捉することができる。この計測結果データを用いることにより、従来は標準地調査（100 m²ないしは 200 m²）で行っていた相対幹距比の把握を、計測エリア全域について任意のメッシュサイズ（例えば 20m x 20m）で行うことが可能となる。この相対幹距比図により、広域な森林（主に針葉樹林）に対して間伐等の手入れが必要な箇所を抽出することが容易となるとともに、標準地調査の候補場所選定を客観的に行うための参考情報になり得る。（図 4-1）

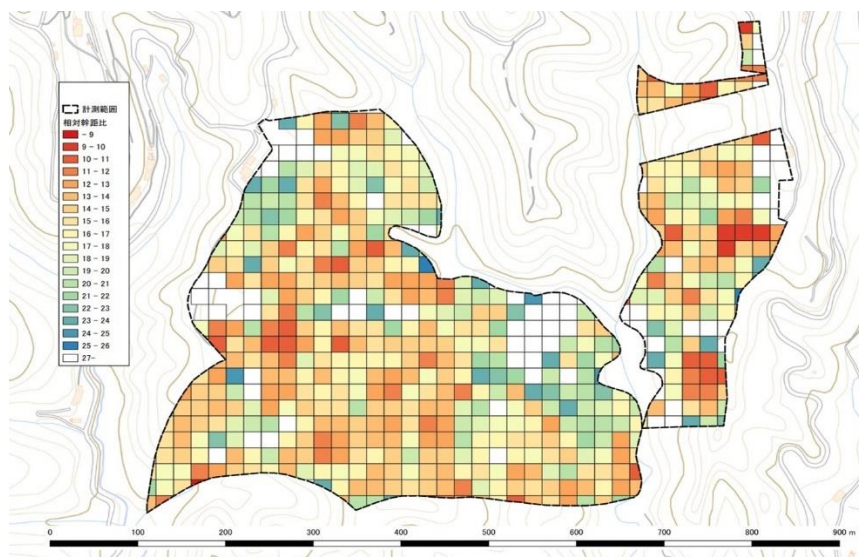


図 4-1. 相対幹距比（サンプル）

- ・計測エリア全域の立木材積の推計

広域な森林の立木総材積の推計は、標準地調査の結果を用いて行うことが一般的だが、選択する標準地調査場所の妥当性によって推計精度は大きく左右される。一方、UAV レーザ計測では計測対象エリア内の立木（被圧木を含む）の本数及び樹高を精度よく把握でき、また、適正な細り表を用いることにより胸高直径を推計把握できるため、踏査に比べてより高い精度での立木総材積推計が可能となる。

- ・立地級区分調査への参考情報の提供

立地級区分調査要領（昭和 39 年 10 月 1 日 39 林野計第 537 号、最終改正：平成 25 年 3 月 5 日）では、『国有林における林地の森林生産力を的確に把握し、立地条件に応じた施業方法を採用することにより、森林施業の適正化を図るための国有林の地域別の森林計画の対象森林に対して、立地級の調査が行われる。計画対象森林について、小班ごとに地位及び地利の調査を行い、地位級と地利級を組合せることによって立地級区分を行うものとする。地位の等級区分は、当該林分の主林木の平均樹高を求め、これを収穫表の同一林齢の主林木の平均樹高の範囲を比較することによって

行うものとし、これによりがたい場合には、土地調査により総合的に地位指数を判定して行うことができる。』と規定されている。また、農林水産省資料においては、『地位指数については、当該樹種の基準林齢（カラマツにあつては 35 年、その他の樹種にあつては 40 年）における主林木の平均樹高』と整理されている。

UAV レーザによって得られた計測対象エリア内の立木位置情報や樹高情報をもとに、同エリア内の平均樹高分布図を作成、提供することが可能となる。平均樹高分布図の表示は、

①計測対象エリア内の小班毎の平均樹高

②計測対象エリア内の任意サイズ（例えば 20m メッシュ）毎の平均樹高

等が考えられる。更に、計測対象エリア内の林齢情報を得ることができれば、平均樹高を基準林齢相当に調整することによって地位指数図として扱うことも可能になる。

計測対象エリア全体の地位指数が分かれば、今後の施業、育林の計画を立てる際の参考とすることができるため、有用な情報となる。

参考文献：

・「立地級区分調査要領（昭和 39 年 10 月 1 日 39 林野計第 537 号、最終改正：平成 25 年 3 月 5 日）」

・「スマート林業推進に向けた成長予測モデルの整備」：

https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/R1itaku/R1ippan/attach/pdf/index-77.pdf

(イ) 地形情報の活用

・崩壊危険地推定に役立つデータの提供

表層崩壊危険地には 3 つの特徴がある（静岡県立農林環境専門職大学：逢坂教授）。

- 1) 急斜面である
- 2) 集水地形である
- 3) 表層土層が厚い

1, 2) は、UAV レーザ計測により、直接的にデータを入手する事ができる。3) の土層厚は、そこに根ざしている立木の生育状態から推定できる可能性がある。例えば、尾根部と比較して谷部で生育状況が良好な要因は、水も豊富で養分を多く含む事によると考えられているが、根を広げやすい厚い土層となっている可能性がある。

従って、崩壊危険地の推定に役立つ情報として、計測対象エリア内の精細な地表面の情報（微地形データ）や立木の成長に関する情報を取得し、提供することができるため、将来的にはこれらを生かして危険地の推定に役立てられると考える。

微地形表現例：

CS 立体図 (0.25m メッシュ/0.5m メッシュ/1m メッシュ)：CS 立体図は長野県林業総合センターが考案した微地形表現図。航空レーザ測量結果をもとに、森林総合研究所大丸氏が作成した「CS Map Maker」を使用して作製。複数の解像度の CS 立体図を併用することにより、集水地形や 0 次谷（凹地形）など、表層崩壊の発生源になり得る箇所の発見が容易になる可能性がある（図 4-2、図 4-3、図 4-4）。

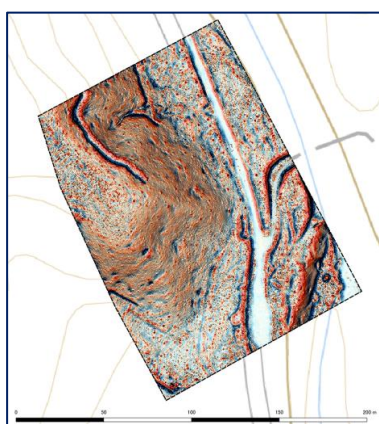


図 4-2. CS 立体図
0.25m メッシュ

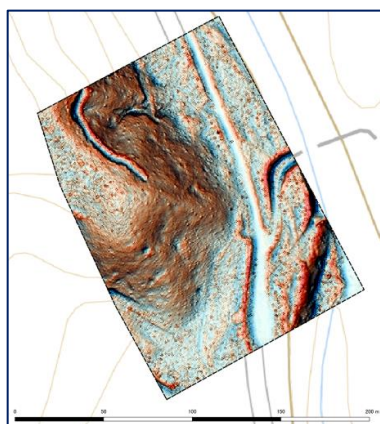


図 4-3. CS 立体図
0.5m メッシュ

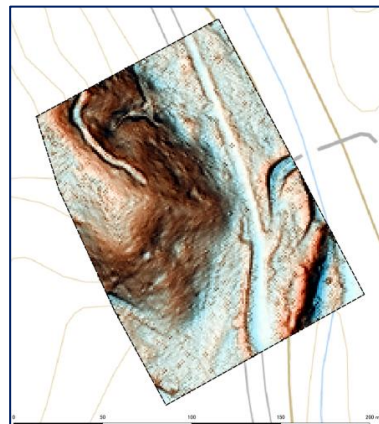


図 4-4. CS 立体図
1m メッシュ

なお、今回の検証では、三次元計測データの再現性が最も高いと想定される TIN (Triangulated Irregular Network：不正三角形網) を用いて地形モデルを構築し、森林総合研究所 大丸氏が作成した「CS Map Maker」を使用して CS 立体図を作成している。

- ・路網設計に役立つ精緻な地形データの提供

林業専用道や森林作業道などの路網整備の計画に際しては、対象地の精緻な地形データ・地質・土質などの情報収集が必要とされる。土質に関しては前述の崩壊危険地推定と同様の情報を活用できる可能性があるが、地形データについては以下の情報の提供が可能である。

① 傾斜分布図（0.25m メッシュ）：

地形傾斜によって想定される作業システムが異なるため、路網整備の候補エリアの微細な地形傾斜（緩傾斜地、中傾斜地、急傾斜地、急峻地）区分が地図上に可視化されることにより、整備計画の候補地選定に役立つ可能性がある。

（図 4-5）

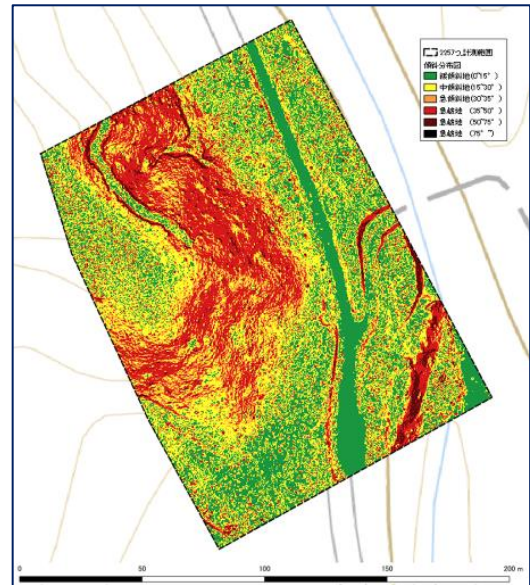


図 4-5. 傾斜分布図

② 精緻な数値標高モデル（0.25m メッシュ）：

計測によって得られた 3 次元点群データのうち、地表面を捉えたデータ（数値標高モデル（DEM）：図 4-6）を路網作成支援ソフト（FRD/Forest Road Designer：住友林業株式会社製）に取込むことにより、良好な路網設計ができることが確認された（本ページ下部記載の参考文献参照）。FRD は航空レーザ計測によって得られた地形情報（数点/㎡）を用いることを前提としているが、航空機よりも低空かつ低速での飛行が可能な UAV で計測された高密度な微地形情報（数千点/㎡）を用いることにより、従来にも増して実際の地形に即した路網設計が可能になる。

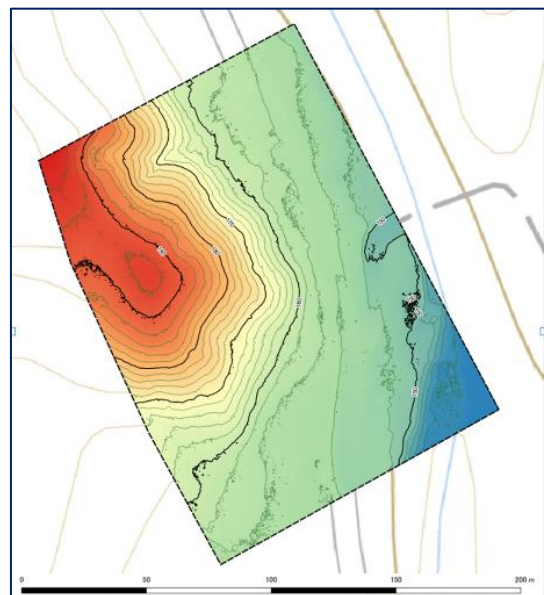


図 4-6. 数値標高モデル（DEM）

- ・林業 ICT 建機に役立つ精緻な地形データの提供

UAV レーザ計測によって得られた精緻な地形データを ICT 建機に取り入れることにより、予め設計された路網（作業道など）の開設作業を安全に自動施工することが可能になる。また、施工前に排出土量のシミュレーションが可能になり、工期見積・経費算定の精度向上が期待できる（コマツ製作所 ICT 建機）。

参考文献：

- ・「令和 3 年度静岡県森林・林業技術研究発表会 小型無人ヘリレーザ計測成果を活用した木材生産適地の把握について」：<http://www.pref.shizuoka.jp/sangyou/sa-610/documents/r3seikasyu2.pdf#page=13>

(ウ) オルソ画像

・オルソ画像の提供

UAV レーザ計測と同時に計測対象エリアの上空から撮影した写真（2 秒毎に 1 枚撮影）を正射変換し、繋ぎ合わせることで、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像（オルソ画像）を作成、提供することができる。この画像により、計測時点での計測対象エリアの全体像を高精細な写真で俯瞰確認することが可能になる。

・樹種判定への活用

オルソ画像を拡大表示し、樹冠の輪郭、樹冠部の葉の形状、枝の張り方などの特徴を確認することで、目視による林相境界の判定が可能になる。本手法については、計測対象エリアの森林簿等の情報と照合することにより、判定の精度を上げることができると思われる。ただし、画像データを用いるため、UAV 計測実施日の天候や日照度合いによる明度・彩度の違い、影、季節による紅葉・落葉の影響を受ける。

以下に樹種判定の実例を示す。

①取得した写真を用いて、SfM または写真測量によるオルソ画像を作成する。（図 4-7）

②目視で林相の境界を判別し範囲を指定。指定した範囲ごとに樹種を特定し、その範囲の単木に樹種情報を付与する。（図 4-8、図 4-9）

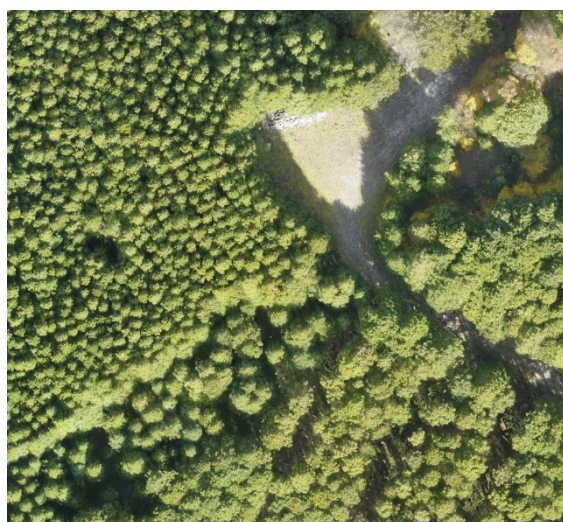


図 4-7.オルソ画像の例

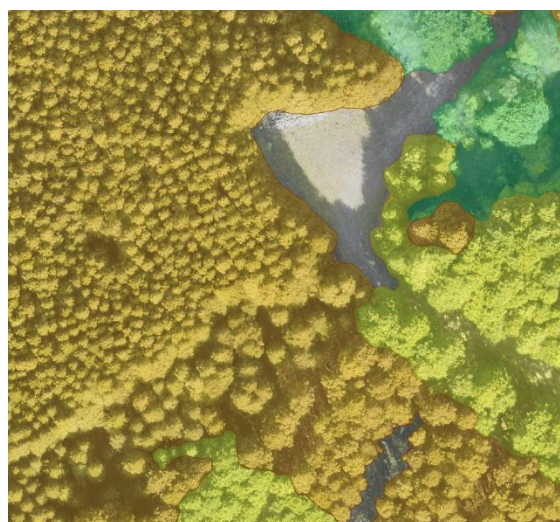


図 4-8.林相界の例

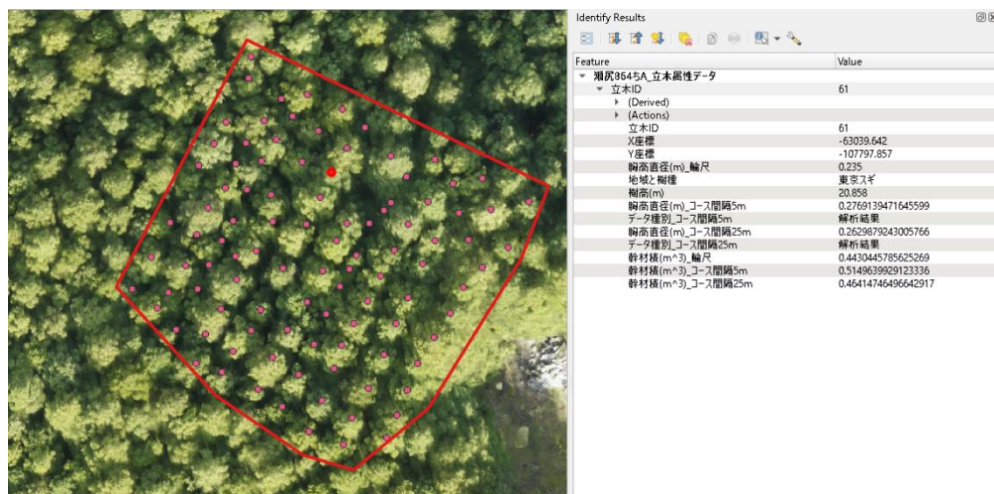


図 4-9.単木への情報付与例

- ・その他の画像の応用

今回は、一般的なデジタルカメラを用いた画像であるが、マルチスペクトルカメラなどのセンサを用いた計測により、病害検出などに応用することも可能となる。

(エ) GIS による管理

- ・計測及び解析結果はすべてデジタルデータであり、容易に地理情報システム（GIS）上で表示、閲覧することができる。

5 検討委員会の設置・運営

本事業の実施に当たっては、「令和3年度 UAV レーザを活用した人工林の林分内容解析手法等検討委員会」（以下「検討委員会」という。）を以下のとおり設置し、技術的指導及び助言を受け、検証方法、検証結果の分析評価を行った。

委員は UAV レーザによる森林計測に関する学識経験者が含まれるよう構成した。

（ア）委員会の構成

委員）

信州大学農学部農学生命科学科 加藤 正人 教授（委員長）

近畿大学農学部環境管理学科 井上 昭夫 教授

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 鹿又 秀聡 主任研究員

三重大学工学研究科 松岡 真如 准教授

オブザーバー）

林野庁森林整備部研究指導課 細田 和男 首席研究企画官

静岡県立農林環境専門職大学 短期大学部 星川 健史 講師（第2回のみ）

・第1回委員会

開催日：令和3年9月1日

議題：

既存の手法や技術・知見の収集と分析について

UAV レーザ計測及び林分内容解析について

区域の再現手法の検討・検証について

・第2回委員会

開催日：令和4年1月20日

議題：

UAV レーザ計測及び林分内容解析結果

区域の再現手法の検討・検証方法及び地形情報の活用検討

UAV レーザ計測データの活用について

6 まとめ

国有林野事業における収穫調査の効率化を図るため、現在、収穫調査の方法として採用されている毎木調査や標準地調査の代替手法として想定される UAV レーザ計測による調査手法の検証を行った。

その結果、UAV レーザによる上空からのレーザ計測により、被圧木を含めほぼすべての立木を検出できることを確認した。

さらに、幹の直径についても平均数%程度の精度で計測ができることを証明した。

一方、幹回りに枯れ枝や下層植生が存在する林分の計測においては、直径検出率及び精度が低下してしまうという課題も明らかになった。これは、発射したレーザが幹に届く前の障害物で減衰、または、検出可能なパルス数を超えてしまうことが要因と考えられるため、使用した UAV レーザの検出パルス数を上げるか、ウェーブフォームを用いることで、改善できる可能性がある。

なお、これらの計測結果を用いて材積も算定したところ、開空度が低く直径検出率が低下した箇所を含めても約 20%程度の精度で算出が可能であることが確認できた。

これは、レーザ計測の特徴として、直径が大きめに出る系統誤差が影響しているものと考えられ、今後検証を重ねることで補正による精度向上が期待される。

また、針広混交林では、単木樹種判定技術の導入により、精度向上の可能性はある。

以上から、従来の毎木調査や標準地調査など現場へ赴き実施していた調査の代表的な目的に応じた代替手法の仕様案を作成した。

なお、様々な計測の目的に応じて、コース間隔や飛行速度を調整することで、ニーズに合った計測条件を定めていくことも可能になる。

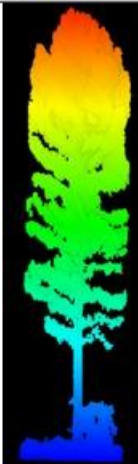
さらに、この手法により、従来の踏査では実現することができなかった位置情報を含む個々の立木情報及び微地形情報のデジタル記録により、今後のスマート林業を強く推進することができることも大きなメリットとなる。

以上

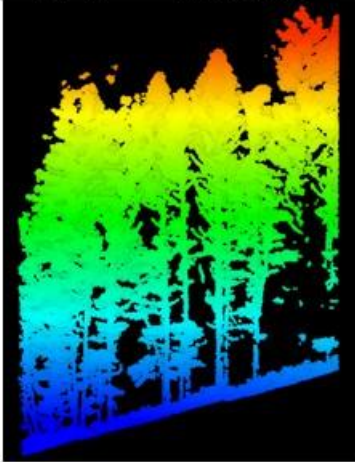
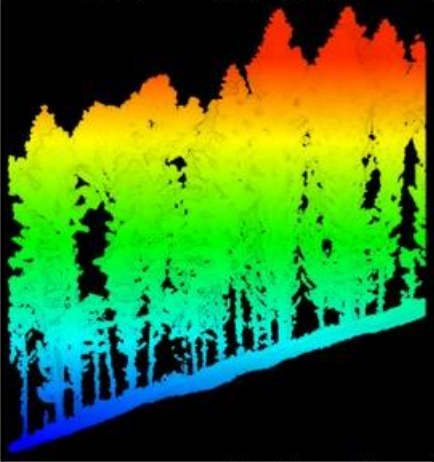
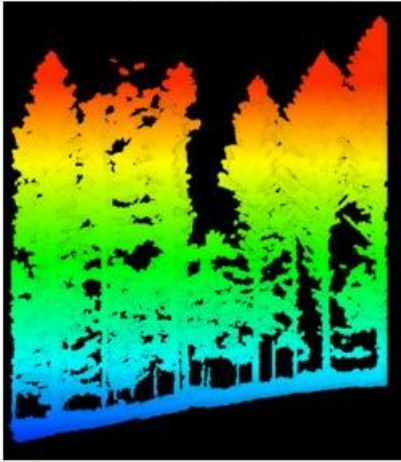
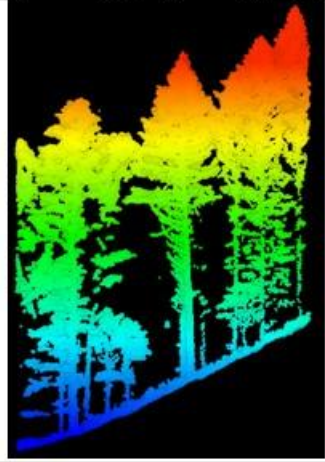
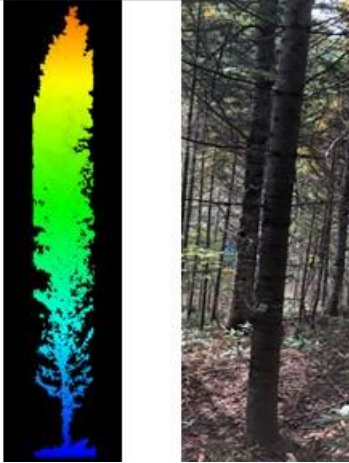
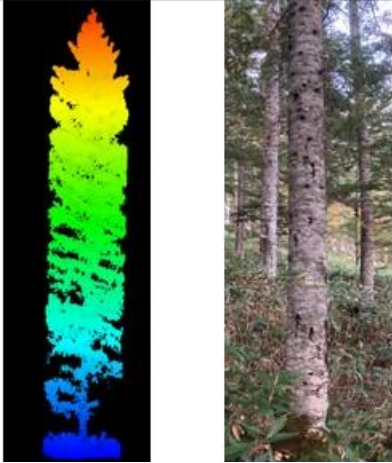
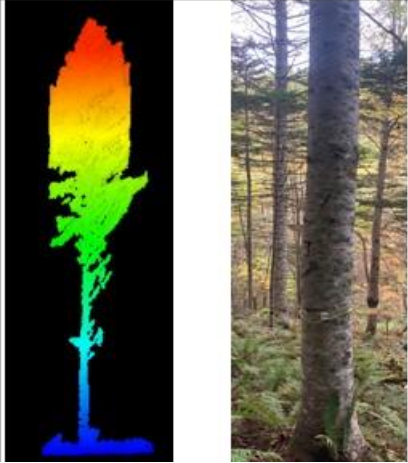
資料 1

検証結果資料

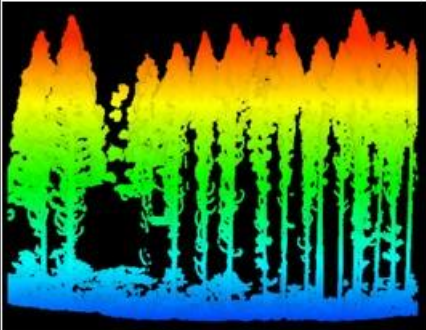
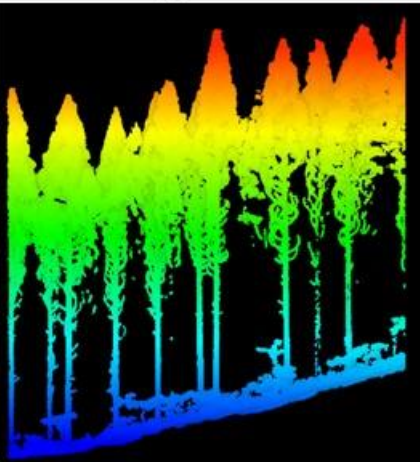
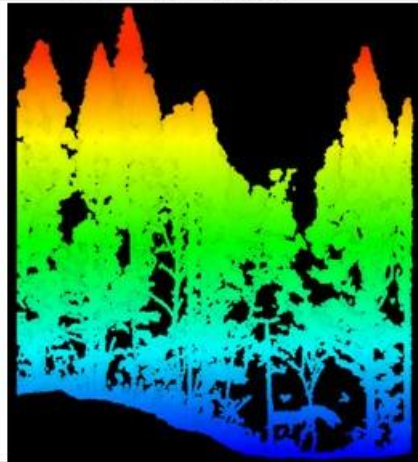
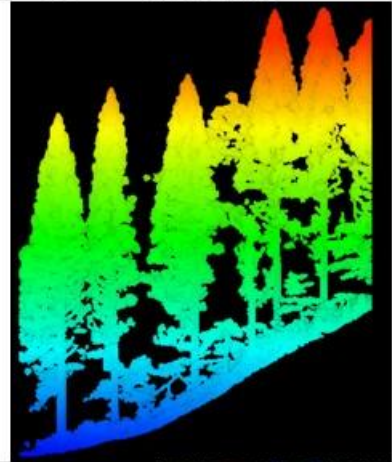
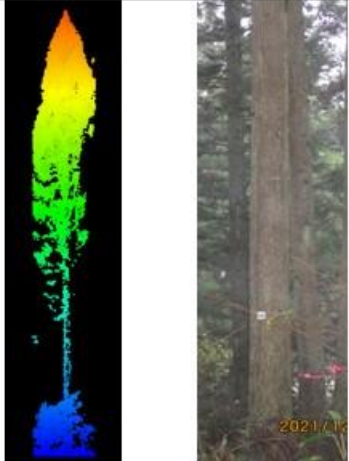
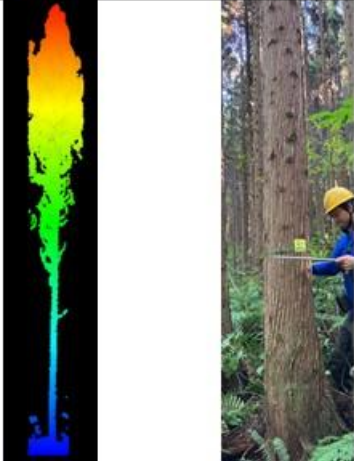
取得した点群と現況 北海道生田原 カラマツ

	生田原 ***	生田原 ***	生田原 356る	生田原 344ひ
樹種/伐期/地面傾斜	カラマツ / 間伐期 / 緩斜面	カラマツ / 間伐期 / 急斜面	カラマツ / 主伐期 / 緩斜面	カラマツ / 主伐期 / 急斜面
20m四方内の立木本数			32本	35本
現況			カラマツ64%、残り広葉樹	カラマツ61%、残り広葉樹
断面点群データ				
点群データと立木写真			 	 

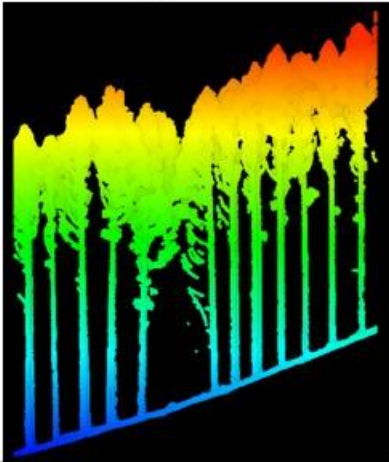
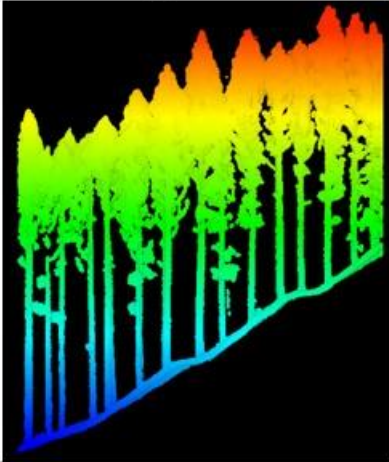
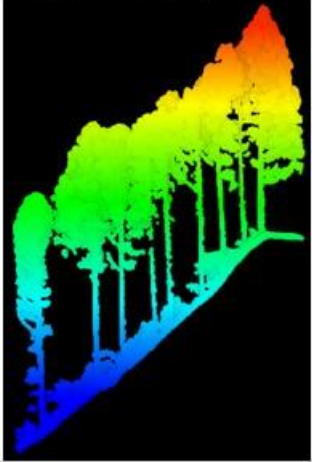
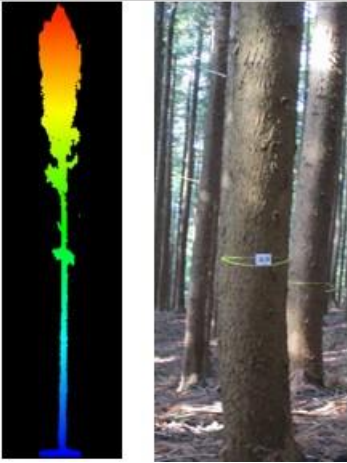
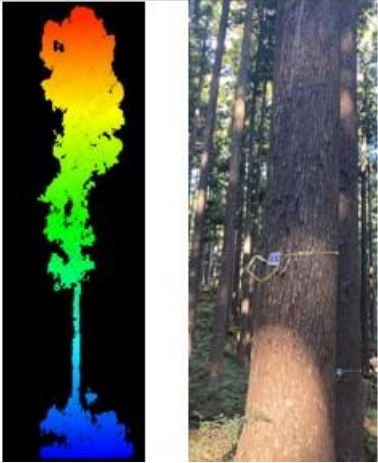
取得した点群と現況 北海道生田原 トドマツ

	生田原 356う	生田原 344ぬ	生田原 342へ	生田原 343は
樹種/伐期/地面傾斜	トドマツ / 間伐期 / 緩斜面	トドマツ / 間伐期 / 急斜面	トドマツ / 主伐期 / 緩斜面	トドマツ / 主伐期 / 急斜面
20m四方内の立木本数	57本	74本	48本	49本
現況	トドマツ59%、残り広葉樹	トドマツ76%、残り広葉樹	トドマツ95%、残り広葉樹	トドマツ66%、カラマツ3%、残り広葉樹
断面点群データ				
点群データと立木写真				

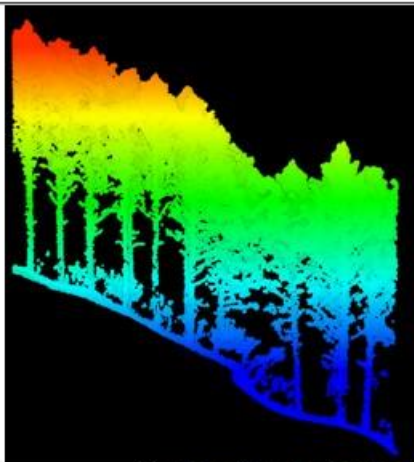
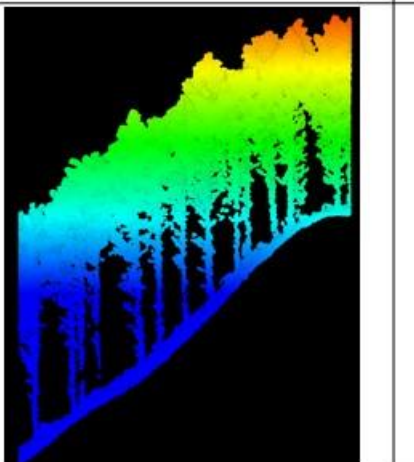
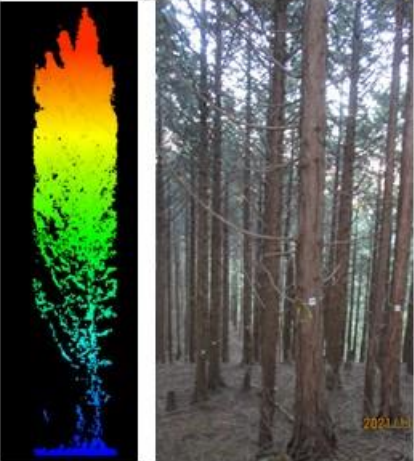
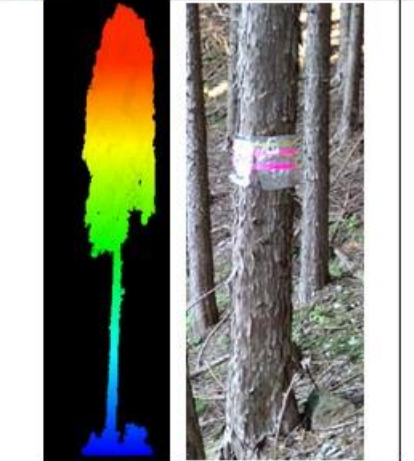
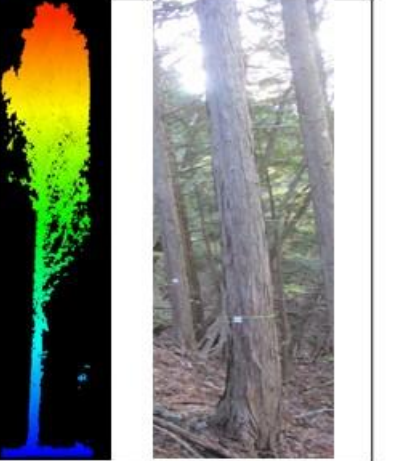
取得した点群と現況 秋田大館 スギ

	秋田大館 2257に	秋田大館 2299よ	秋田大館 2289そ	秋田大館 2257つ
樹種/伐期/地面傾斜	スギ / 間伐期 / 緩斜面	スギ / 間伐期 / 急斜面	スギ / 主伐期 / 緩斜面	スギ / 主伐期 / 急斜面
20m四方内の立木本数	69本	70本	50本	26本
現況	スギ84%、マツ3%、残り広葉樹13%	スギ100%	スギ67%、残り広葉樹33%	スギ67%、残り広葉樹33%
断面点群データ				
点群データと立木写真				

取得した点群と現況 静岡天竜 スギ

	静岡 天竜瀬尻 864ちB	静岡 天竜瀬尻 864ちA	静岡 天竜瀬尻 862いA	静岡 天竜瀬尻 862いB
樹種/伐期/地面傾斜	スギ / 間伐期 / 緩斜面	スギ / 間伐期 / 急斜面	スギ / 主伐期 / 緩斜面	スギ / 主伐期 / 急斜面
20m四方内の立木本数	110本	102本	37本	52本
現況	スギ100%	スギ100%	スギ100%	スギ78%、ヒノキ22%
断面点群データ				
点群データと立木写真				

取得した点群と現況 静岡天竜 ヒノキ

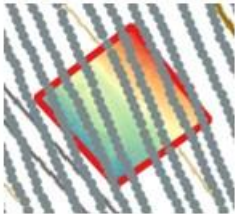
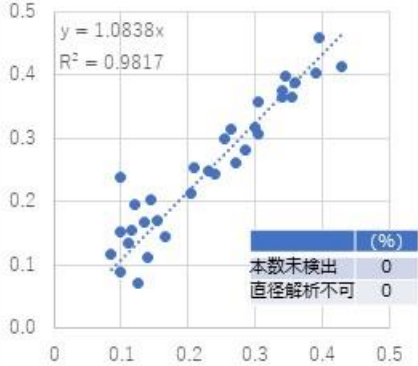
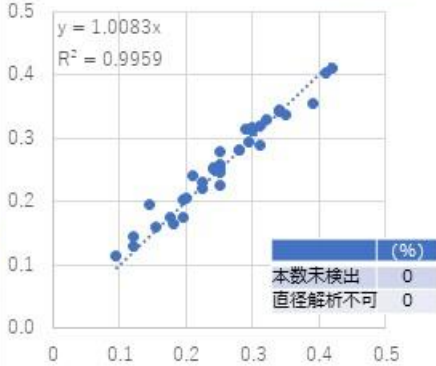
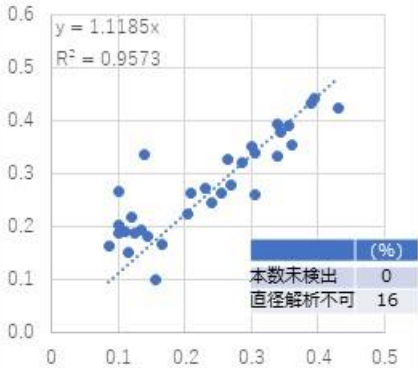
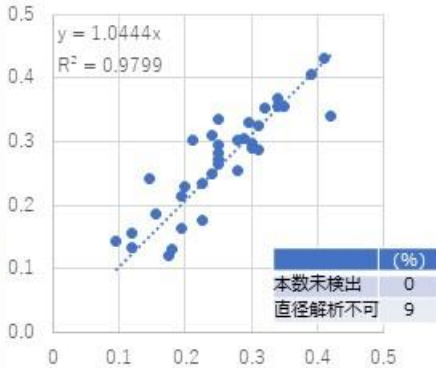
	静岡 天竜瀬尻 872は	静岡 天竜瀬尻 878ろ	静岡 天竜瀬尻 861に	静岡 天竜瀬尻 880ほ
樹種/伐期/地面傾斜	ヒノキ / 間伐期 / 緩斜面	ヒノキ / 間伐期 / 急斜面	ヒノキ / 主伐期 / 緩斜面	ヒノキ / 主伐期 / 急斜面
20m四方内の立木本数	65本	83本	53本	80本
現況	ヒノキ100%	ヒノキ99%、スギ1%	ヒノキ100%	ヒノキ65%、スギ24%、残り広葉樹
断面点群データ				
点群データと立木写真				

各調査対象地での立木検出結果

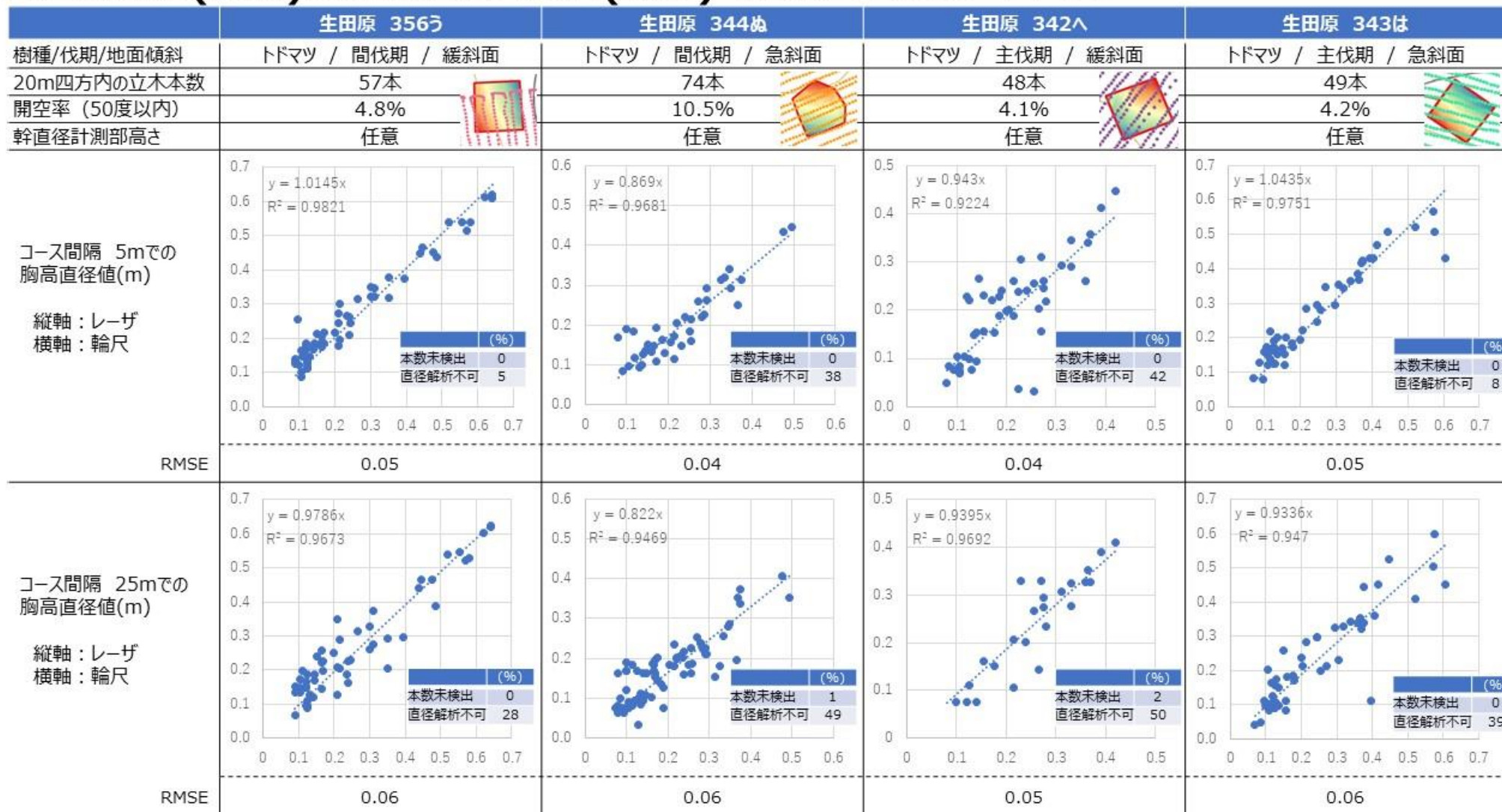
- ✓ 18エリア合計1,094本の立木を、コース間隔5mでは1本の見逃し、25mでは5本の見逃しとなった
- ✓ 18エリア合計1,094本の立木を、コース間隔5mでは94%、25mでは81%で幹の直径を計測できる事が分かった

地域		北海道 遠軽町生田原						秋田県 大館早口				静岡県 天竜瀬尻								平均/合計	
林班		356 う	344 ぬ	342 へ	343 は	356 る	344 ひ	2257 に	2299 よ	2289 そ	2257 つ	864 ちB	864 ちA	862 いA	862 いB	872 は	878 ろ	861 に	880 ほ		
樹種		トドマツ	トドマツ	トドマツ	トドマツ	カラマツ	カラマツ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	ヒノキ	ヒノキ	ヒノキ	ヒノキ		
(樹種割合)		59%	76%	95%	66%	64%	61%	84%	100%	67%	67%	100%	100%	78%	100%	100%	99%	100%	65%		
伐期		間	間	主	主	主	主	間	間	主	主	間	間	主	主	間	間	主	主		
傾斜		緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急	緩	急		
収量比数		0.74	0.81	0.70	0.66	0.63	0.73	0.78	0.86	0.74	0.59	0.96	0.97	0.79	0.79	0.77	0.85	0.81	0.88		
開空度 (50度以下)		4.8%	10.5%	4.1%	4.2%	11.3%	9.2%	8.3%	6.0%	5.0%	5.1%	6.9%	9.1%	3.8%	5.5%	1.3%	1.0%	4.1%	6.9%		
立木本数 (調査地内)		57	74	48	49	32	35	69	70	50	26	110	102	39	52	65	83	53	80		
立木密度(本/ha)		1,142	1,535	1,212	836	623	639	922	1,036	973	393	1,906	2,208	620	994	1,392	1,501	936	1,556		
立木 検出	5m	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99.9%	平均
	25m	100%	99%	98%	100%	100%	100%	99%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	99.5%	平均
直径 検出	5m	95%	62%	58%	92%	100%	100%	97%	100%	96%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	98%	100%	98%	94.1%	平均
	25m	72%	51%	50%	61%	84%	91%	96%	93%	86%	92%	97%	96%	95%	100%	86%	45%	91%	75%	81%	平均
読取值 RMSE (m)	5m	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.04	0.05	0.02	0.03	0.07	0.06	0.03	0.04	平均
	25m	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.04	0.06	0.05	0.07	0.06	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.09	0.06	0.04	0.06	平均
2cm括約 RMSE (m)	5m	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.04	0.05	0.02	0.03	0.07	0.05	0.03	0.04	平均
	25m	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.04	0.05	0.05	0.07	0.06	0.04	0.04	0.08	0.05	0.04	0.09	0.05	0.04	0.06	平均
材積 (m³)	輪尺	48.0	29.5	18.4	33.2	18.3	23.2	58.6	51.8	32.2	61.3	56.0	44.4	34.8	41.8	20.6	26.1	29.2	27.0	654.4	合計
	UAVレーザ	48.9	25.1	18.4	36.4	21.4	23.5	56.2	55.7	31.7	58.6	56.9	47.7	34.0	39.6	16.2	31.7	33.0	25.3	660.3	合計
	誤差	2%	-15%	0%	10%	17%	2%	-4%	8%	-2%	-4%	2%	7%	-2%	-5%	-22%	21%	13%	-6%	0.9%	
OWL調査RMSE(m)															0.08	0.04	0.02		0.03	0.03	平均

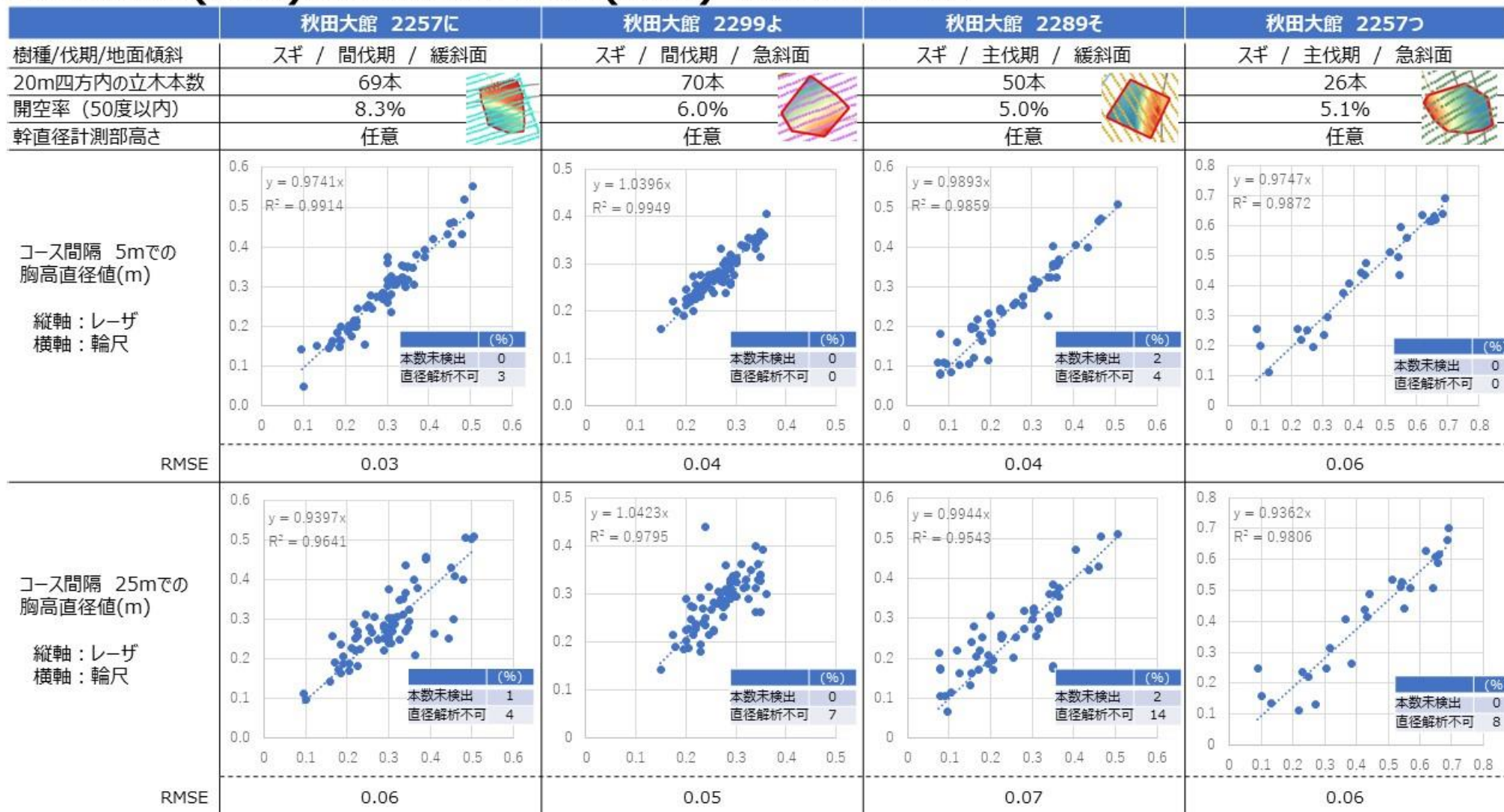
直径実測値(横軸)と点群解析直径値(縦軸) 北海道生田原 カラマツ

	生田原 ***	生田原 ***	生田原 356る	生田原 344ひ
樹種/伐期/地面傾斜	カラマツ / 間伐期 / 緩斜面	カラマツ / 間伐期 / 急斜面	カラマツ / 主伐期 / 緩斜面	カラマツ / 主伐期 / 急斜面
20m四方内の立木本数			32本	35本
開空率 (50度以内)			11.3%	9.2%
幹直径計測部高さ			任意	任意
コース間隔 5mでの 胸高直径値(m) 縦軸：レーザ 横軸：輪尺	【図の見方】  赤枠：調査対象地 赤枠内の配色 ：標高 (赤：高、青：低) 赤枠上の各色の線 ：ヘリ飛行航路		 0.05	 0.02
RMSE				
コース間隔 25mでの 胸高直径値(m) 縦軸：レーザ 横軸：輪尺			 0.07	 0.04
RMSE				

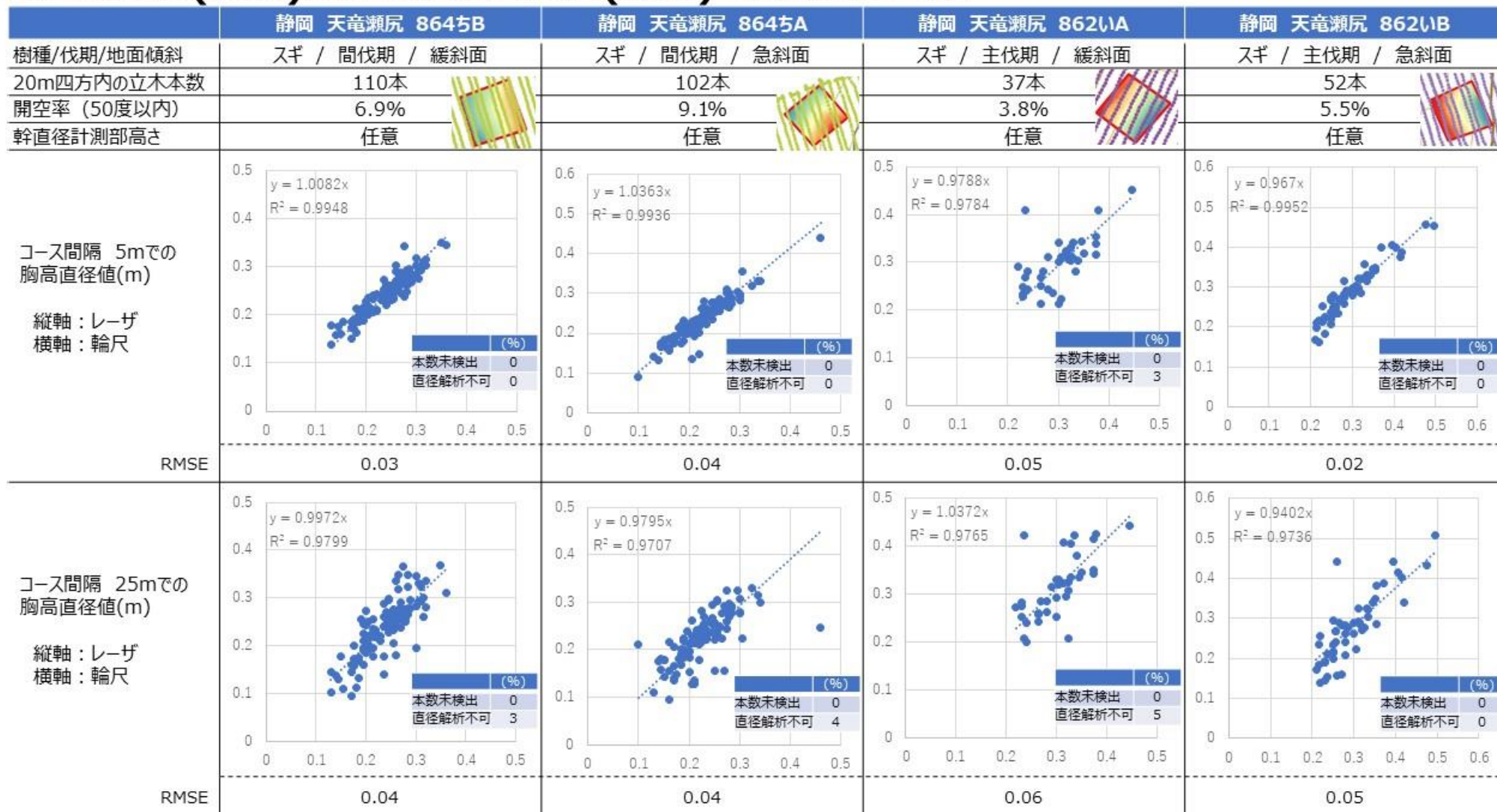
直径実測値(横軸)と点群解析直径値(縦軸) 北海道生田原 トドマツ



直径実測値(横軸)と点群解析直径値(縦軸) 秋田大館 スギ



直径実測値(横軸)と点群解析直径値(縦軸) 静岡天竜 スギ



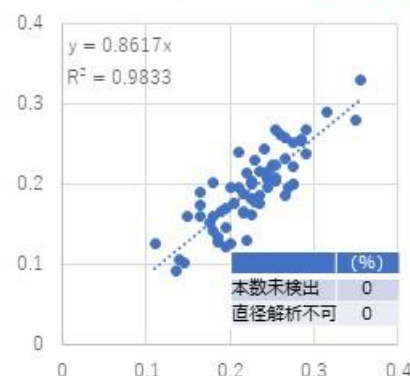
直径実測値(横軸)と点群解析直径値(縦軸) 静岡天竜 ヒノキ

	静岡 天竜瀬尻 872は	静岡 天竜瀬尻 878ろ	静岡 天竜瀬尻 861に	静岡 天竜瀬尻 880ほ
樹種/伐期/地面傾斜	ヒノキ / 間伐期 / 緩斜面	ヒノキ / 間伐期 / 急斜面	ヒノキ / 主伐期 / 緩斜面	ヒノキ / 主伐期 / 急斜面
20m四方内の立木本数	65本	83本	53本	80本
開空率 (50度以内)	1.3%	1.0%	4.1%	6.9%
幹直径計測部高さ	任意	任意	任意	任意

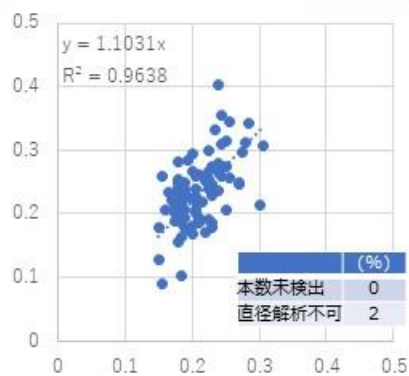
コース間隔 5mでの
胸高直径値(m)

縦軸：レーザ
横軸：輪尺

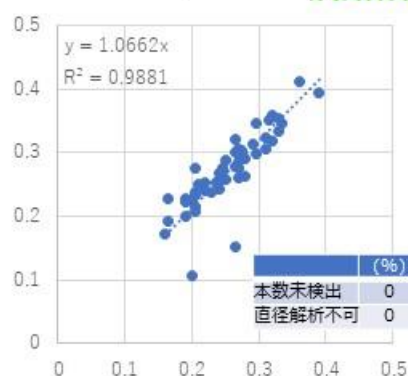
RMSE



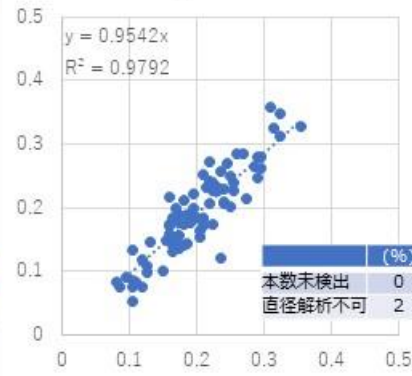
0.03



0.07



0.06

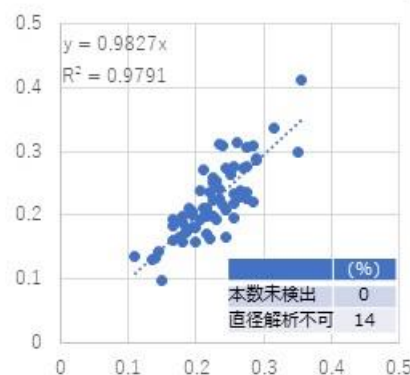


0.03

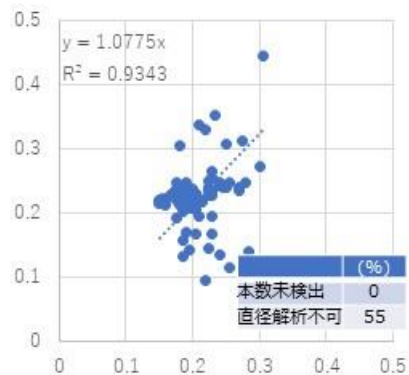
コース間隔 25mでの
胸高直径値(m)

縦軸：レーザ
横軸：輪尺

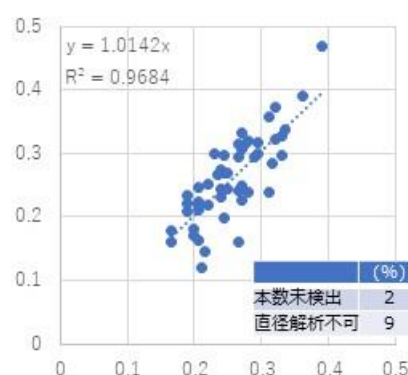
RMSE



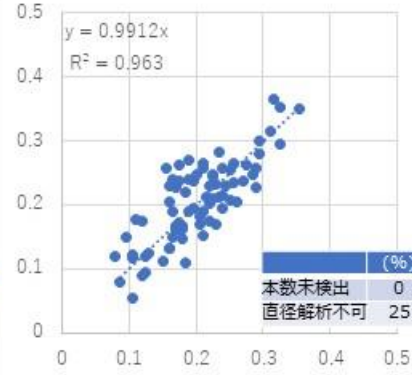
0.04



0.09



0.06



0.04

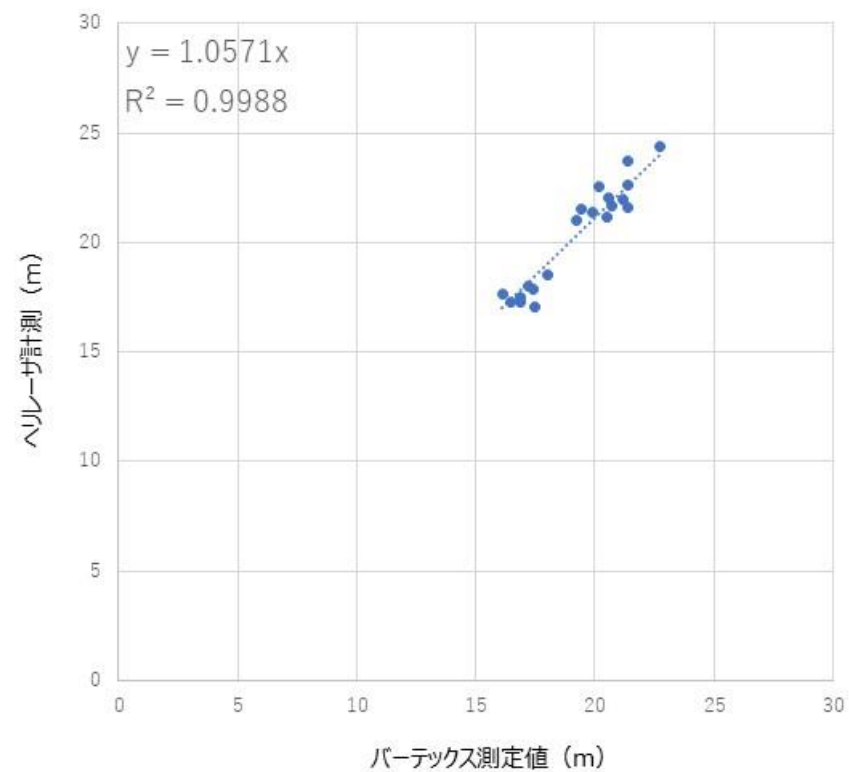
実測 vs OWL vs ヘリレーザ 相関関係確認

- ✓ 実測値との比較評価では、ヘリレーザ(航路間隔5m)はOWLに対してばらつきは大きい(平均RMSE≒0.5)が、相関関係を持っている。
- ✓ OWLでも、ヘリレーザでも、僅かだが見逃しが存在した。

	静岡 天竜瀬尻 880ほ	静岡 天竜瀬尻 878ろ	静岡 天竜瀬尻 872は	静岡 天竜瀬尻 862いB
樹種/林齢/地面傾斜	ヒノキ / 主伐期 / 急斜面	ヒノキ / 間伐期 / 急斜面	ヒノキ / 間伐期 / 緩斜面	スギ / 主伐期 / 急斜面
20m四方内の立木本数	80本	83本	65本	52本
開空率	6.9%	1.0%	1.3%	5.5%
胸高直径(cm) 横軸：輪尺 縦軸：OWL				
胸高直径(cm) 横軸：輪尺 縦軸：ヘリレーザ				
胸高直径(cm) 横軸：ヘリレーザ 縦軸：OWL				

樹高

- ✓ バータックスによる実測値とヘリレーザ計測値では1:1の相関関係はある。
- ✓ 計測値のばらつきも小さく、ヘリレーザ計測の樹高の値は十分な品質を保つ事ができ、実用に耐えうると考えられる。

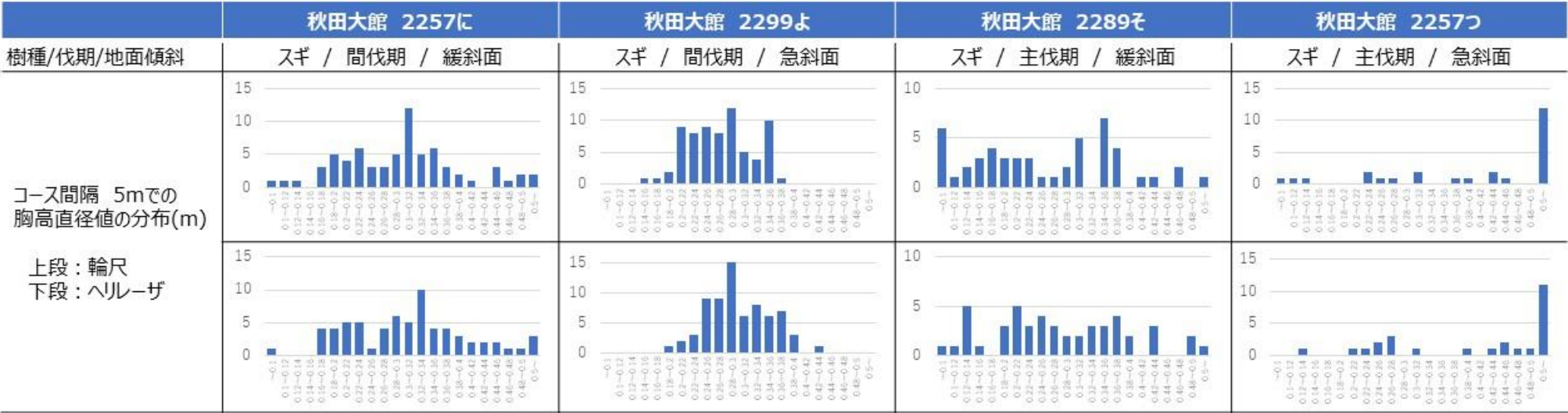


輪尺とヘリレーザでの胸高直径の分布 北海道生田原 カラマツ・トドマツ

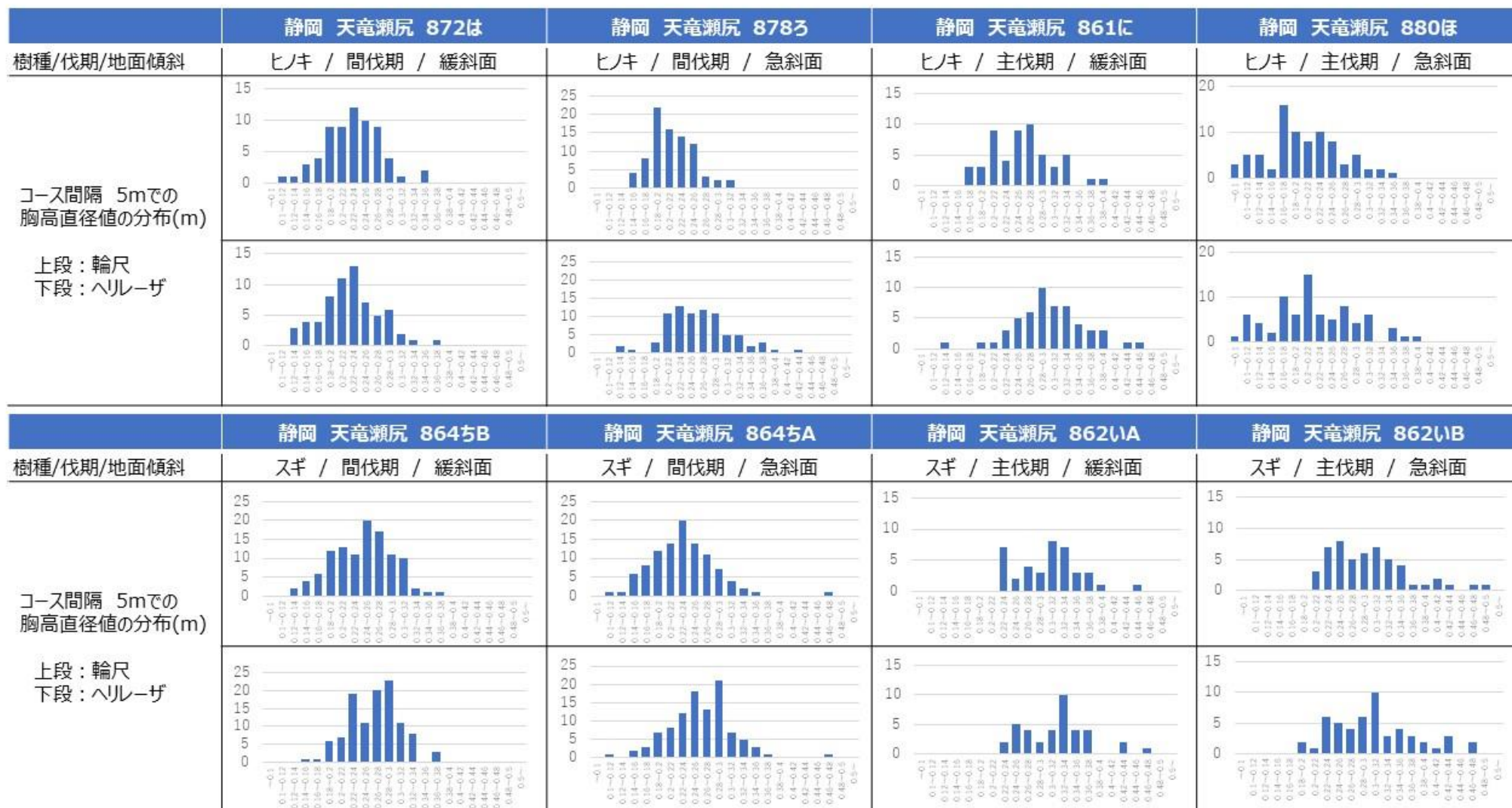
	生田原 ***	生田原 ***	生田原 356る	生田原 344ひ
樹種/伐期/地面傾斜	カラマツ / 間伐期 / 緩斜面	カラマツ / 間伐期 / 急斜面	カラマツ / 主伐期 / 緩斜面	カラマツ / 主伐期 / 急斜面
コース間隔 5mでの 胸高直径値の分布(m)	【考察】 どの林地でも、値の広がりやピーク位置に大きな違いはない			
	生田原 356う	生田原 344ぬ	生田原 342へ	生田原 343は
樹種/伐期/地面傾斜	トドマツ / 間伐期 / 緩斜面	トドマツ / 間伐期 / 急斜面	トドマツ / 主伐期 / 緩斜面	トドマツ / 主伐期 / 急斜面
コース間隔 5mでの 胸高直径値の分布(m)				

輪尺とヘリレーザでの胸高直径の分布 秋田大館 スギ

【考察】
どの林地でも、値の広がりやピーク位置に大きな
違いはない



輪尺とヘリレーザでの胸高直径の分布 静岡天竜 ヒノキ・スギ



資料 2

検討委員会議事録

第 1 回検討委員会議事録

(内容)

1. 出席者

委員) 信州大学農学部農学生命科学科森林計測・計画学 教授 加藤 正人 様
近畿大学農学部環境管理学科農学研究科アグリ技術革新研究所 教授 井上 昭夫 様
国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 主任研究員 鹿又 秀聡 様
三重大学工学研究科 准教授 松岡 真如 様
オブザーバー) 林野庁森林整備部研究指導課 首席研究企画官 細田 和男 様
林野庁) 林野庁国有林野部業務課 課長 長崎屋 圭太 様
林野庁国有林野部業務課 企画官 善行 宏 様
林野庁国有林野部業務課 課長補佐 川原 聡 様
林野庁国有林野部業務課 供給計画係長 尾近 茂 様
林野庁国有林野部業務課 供給係 長岡 圭祐 様
事務局) ヤマハ発動機株式会社 UMS 事業推進部事業開発部 部長 加藤 薫
ヤマハ発動機株式会社 UMS 事業推進部事業開発部森林計測 G 主務 矢嶋 準
ヤマハ発動機株式会社 UMS 事業推進部事業開発部森林計測 G 主管 原田 丈也

2. 議事

- 1) 開会
- 2) 林野庁挨拶 (長崎屋課長より)
- 3) 委員長選任 (信州大学教授 加藤様を選任、加藤様に就任をご快諾いただきました)
- 4) 議題について事務局からの説明および質疑応答

議題 1) 検討委員会の実施内容について： 特になし

議題 2) 既存の手法や技術・知見の収集と分析について

(⇒：委員・オブザーバー・林野庁出席者からのご意見・ご回答、 →：事務局からの回答等)

- UAV レーザ活用の取組みの方向性の説明が胸高直径に偏重しているような感じがする。林分内容解析はもっと広い意味だと思うが、事業の目指すところと合致しているか (加藤委員長)
⇒ 林分内容解析手法の検討は収穫調査の効率化が発端。これまで UAV レーザによる計測は樹冠が主で樹冠下は難しかったが、幹まで見えるように進歩してきている。収穫調査がメインなので、幹だけでなく、森林資源の把握をいかに効率的に出来るかがポイント (林野庁：尾近氏)
⇒ 収穫調査ということであれば、幹だけでなく、樹高、胸高直径の把握、幹の曲がりにも言及する可能性も含め、広く見ていくようにして頂きたい (加藤委員長)
→ 幹をしっかり見ることは重要だが、林分をどこまでしっかり見られるようにするかを意識して取組む (事務局：加藤)
⇒ 去年は列状間伐後の林分の内容調査が対象。今年度の取組みは林内計測ではなく上空からの調査 (伐採前の調査) との位置付けで良いか (加藤委員長)
⇒ 収穫調査を目的に、上空からの UAV レーザで従来は見えなかった被圧木がどこまで見えるか調べる (林野庁：尾近氏)
● 斜めからのレーザ照射が使える UAV レーザに期待しているが、どういう場所では使える、どういう場所ではうまく行かないといった条件も整理して欲しい。前回事業でも間伐が必要な 1000-1500 本/ha のレベルでは把握が難しかった。適応可能な条件を付けて報告して欲しい。
(鹿又委員)
→ 場所の条件としては開空率を指標にしていく予定 (事務局：矢嶋)

議題 3) UAV レーザ計測及び林分内容解析について

資料 3-1) 使用機器及び UAV レーザ計測仕様（案）について

●使用するレーザスキャナ、カメラ、機体の金額はいくら位か。森林計測目的で操作するためにはどの程度の技術が必要なのか、素人が研修を受ければできるのか。（林野庁：長崎屋氏）
→レーザスキャナ（VUX-1）：約 3,000～4,000 万円、カメラ：30 万円、無人ヘリ：農業用ヘリ 1,300 万円で販売しているものをベースにしている。最終報告で最適なものの条件を提案する。農薬散布目的に使用されている方（日本には 1 万人程度）は、免許があれば一般向けに販売している農業用ヘリの操作は可能。今回使用する自動航行機能を持つ無人ヘリは専門の講習の受講や訓練が必要である。レーザの使用方法は 1 日程度で習得できる（事務局：矢嶋）

●レーザスキャナのデータの反射強度は計測できるのか（松岡委員）

→計測できる。波長は近赤外。対象物による反射強度の違いは確認できる（事務局：矢嶋）

●1 回の飛行では樹幹の太さだけを計測しているのか、その他の情報も計測しているのか（幹だけの計測であれば真横から計測するのが最適だと思う）（松岡委員）

→幹がしっかりと計測できるように留意しているが、同時に樹高、樹冠、地形も計測しており、本件では角度を付けての計測手法は採用していない（事務局：矢嶋）

●今回のシステムでは 1 日あたり何 ha が計測できるのか（鹿又委員）

→飛行条件次第なので一概には言えないが、弊社での実績では 1 日あたり 50ha 前後は計測できている。計測可能面積の制約は、飛行性能よりも目視内飛行を行っていることに因る場合が多い（事務局：矢嶋）

資料 3-2) 計測地区とその特性及び計測予定について

●北海道の対象樹種は（エゾマツではなく）カラマツとトドマツ（林野庁：尾近氏）

→訂正します（事務局：矢嶋）

●計測精度は立木本数による影響が大きい。立木密度が低いと精度が高く、立木密度が高いと精度が低くなる。今回の計測地区の選定には立木密度を考慮したか（林野庁：長崎屋氏）

⇒立木密度を確認しての選定ではないが、計測地区（立木密度）は間伐期と主伐期で大きく分けて設定している（林野庁：尾近氏）

●調査地の資源内容（林分内容の違い、林齢、太さの情報）を事前に入手できれば、より具体的な意見を専門家からもらえと思う（加藤委員長）

→具体的な対象地を選定中。現地情報が揃い次第委員の方々に共有する（事務局：加藤）

●ヤマハの角度を付けたレーザ計測の可能性を極める意味はあるが、一般にはマルチロータ＋垂直タイプのドローンレーザ計測が主流。ドローンタイプとの比較、応用の可能性も検討してもらいたい（加藤委員長）

→本事業では汎用性のある垂直タイプのレーザ計測を行う予定である（事務局：加藤）

●急斜面、緩斜面はプログラミングして自動計測が主流。目視外、プログラミング飛行計測の可能性、対地高度 50/100/150m などでの検証も期待したい（加藤委員長）

→（プログラミング飛行、対地高度の条件を加味した計測を行う予定です：事務局追記）

●資料 3-1 の図 1 はレーザ照射や幹周辺の点群獲得について誤解を招く可能性がある。機体の下方から 330 度の広角照射であることを示すと良いかもしれない（加藤委員長）

資料 3-3) レーザ計測で所得した 3 次元点群データを用いた林分内解析について

●図 6（オルソ画像の例）と図 7（林相界の例）が逆でした。修正します（事務局：矢嶋）

●被圧木本数の検出方法（幹による検出結果と樹頂点による検出結果の差）というのはわかりやすい。ただし、毎木調査で見つかった木でも幹による検出ができない木があるというのはどういう場合なのか（林野庁：長崎屋氏）

→毎木調査の対象の幹直径が何 cm なのかに因る。例えば 4cm のような細い木も毎木調査では対象となるとレーザ計測では検出できない可能性がある（事務局：矢嶋）

→また、下層植生との混在、開空率が少ない条件等の場合も検出できない幹が存在する可能性もある（事務局：加藤）

●林相界を作ってから単木を調べる手順とのことだが、林相内には複数の樹種が入り込むことがあり得る。単木毎にも樹種を見るのか（鹿又委員）

→樹種が混ざっているところは混在として示すことを考えている。画像での単木毎での樹種判定は考えていない。同じ林相界に含まれているものには同じ属性を付ける。どのような分けをするのが適しているのか、別途ご教示いただきたい（事務局：矢嶋）

●図2のコース1からの照射が最も幹の形が分かるということか（オブザーバー：細田氏）

→基本的にそのとおり。間に林道が入っているような場合にはコース3からの方が見えることもある。最もうまく入ったレーザのデータを活用している（事務局：矢嶋）

⇒横から照射された点群を多く取るためには飛行高度を下げることも考えられる（オブザーバー：細田氏）

→地形に沿った高度で安全を確保しつつ、極力低空で飛行し計測する（事務局：矢嶋）

→20度～50乃至60度の角度の照射が一番効果的であることを把握している（事務局：加藤）

●各々のパルスに角度のデータも付いているのか、フィルタリングできるのか（オブザーバー：細田氏）

→パルスに角度データは付いており、フィルタリングも可能（事務局：矢嶋）

●目的に応じた使い分けが必要だと思う。UAVで広範囲を計測し、樹幹が見えたところから全体を把握するのか、調査範囲の全域を計測する計画なのか、条件によって両者を使い分ける指針等はあるのか（松岡委員）

⇒用途としては収穫調査なので、径級10cm以上が検出できればOK。別の森林調査への応用の可能性もあるが、どこまで検出できるかを見極めてから用途を考えたい（林野庁：尾近氏）

資料3-4) 精度検証方法(案)について

●胸高直径の検証について資料3-3と併せて考えると、計測結果の誤差なのか、細り表による換算結果の誤差なのかが判別できないのではないかと危惧する（井上委員）

→判別できないのはご指摘のとおり。他の方法を見出せていない。胸高直径というのは過去からの現地調査で標準的にやれる方法。将来、UAV計測が主流になった場合には、例えば地表から8m位の高さが目安になるということも有り得る（事務局：矢嶋）

●UAVでの計測は任意の高さでの直径なので、精度検証のためにはその高さの直径（実測）と比較するのが適している。例えばOWLでの計測結果と比較するなど。細り表での換算値と輪尺との比較は適切なのか（林野庁：長崎屋氏）

⇒航空レーザでも同じ議論をしている。都道府県から航空レーザ計測の精度についての問合せが多数ある。航空レーザだと全体の誤差。UAVであれば単木誤差が出せるかもしれないが、方法は決まっていない。OWLとの比較も航空レーザでは行っているが、どう扱うかは見えていない。目的によつての使い方ガイドを付けて納品すべきかもしれない（鹿又委員）

●上部直径の精度について、地上レーザでの結果を使うのはかなり手間がかかる。UAVレーザからの直径推定は、場所によっては1.2-1.3mも計測も可能なのか（オブザーバー：細田氏）

→下層植生が繁茂しているところでは困難。計測地の条件によっては胸高での直径を直接測れる立木もあり得る（事務局：加藤）

●航空機レーザで4点/m²以上であれば単木把握の可能性はあるが、全数調査（樹高、樹頂点、位置）を把握できるのがUAV計測（100点以上/m²）のメリット。角度や時期を選ぶことによって幹情報も直接（乃至は推定）把握できる可能性がある。樹頂点（樹高）はカメラで求める提案だが、ドローンレーザのデータを使ってダイレクトな把握の検討をしてもらいたい。カメラからの樹高は季節・天候の影響によるバラつきが大きい。（加藤委員長）

→樹頂点が見えない場合の樹高の調べ方として、資料の方法を提示している。SfMよりも精度を高めるために写真測量を想定している（事務局：矢嶋）

⇒樹高については SfM よりも点群密度の高いレーザの方が精度は圧倒的に高い（加藤委員長）
→検証というより比較対象の真値をどうやって出すか。レーザの方が正しいということの立証が不要であれば、この検証自体を外すか（事務局：矢嶋）
⇒樹高の検証を外すことはあり得ないが、地形（DEM）がきちんをとれていればレーザが正しい。現地で通常国有林の樹高を調べる際に使われているバーテックス（超音波樹高測定器）などの計測結果との比較であればサンプリングでも良いと思う。（鹿又委員）
⇒現行の樹高計測方法での結果との比較で精度検証はできる。皆伐する場所が決まっていれば、UAV 計測の結果と、伐採後の実測とを比較する方法もある（松岡委員）

資料 3-5) 微地形解析方法（案）について： 特になし

資料 3-6) UAV レーザ計測による林分内容解析仕様の項目（案）について

- 項目数が多いので、優先順位を付けて取組むように（松岡委員）

議題 4) 区域の再現手法の検討・検証について： 特になし

議題 5) 地形情報等の活用について

- 地形情報の活用について、ご意見を伺うべき方をご紹介します（事務局：矢嶋）

その他)

- 第 2 回委員会は林分内容の解析が終了した後の令和 4 年 1 月中旬を予定（事務局：矢嶋）
- 事業の仕様書を共有するように（加藤委員長）

加藤委員長より）収穫調査への UAV レーザの活用については大きな期待が寄せられている。取組み内容が多く、仕事量が多いが、出来る範囲で取り組んで成果を挙げて欲しい。

以 上

第 2 回検討委員会議事録

(内容) 日時：令和 4 年 1 月 20 日 (木) 10:00～11:55

1. 出席者

委員) 信州大学農学部農学生命科学科 教授 加藤 正人 様

近畿大学農学部環境管理学科農学研究科アグリ技術革新研究所 教授 井上 昭夫 様

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 主任研究員 鹿又 秀聡 様

三重大学工学研究科 准教授 松岡 真如 様

オブザーバー) 林野庁森林整備部研究指導課 首席研究企画官 細田 和男 様

静岡県立農林環境専門職大学 短期大学部 講師 星川 健史 様

林野庁)林野庁国有林野部業務課 課長 長崎屋 圭太 様

林野庁国有林野部業務課 企画官 善行 宏 様

林野庁国有林野部業務課 課長補佐 近藤 昭夫 様

林野庁国有林野部業務課 供給計画係長 尾近 茂 様

林野庁国有林野部業務課 供給係 長岡 圭祐 様

林野庁国有林野部経営企画課 技術開発調査官 宇山 雄一 様

事務局)ヤマハ発動機株式会社 UMS 事業推進部森林計測部 部長 加藤 薫

ヤマハ発動機株式会社 UMS 事業推進部森林計測部 主務 矢嶋 準

ヤマハ発動機株式会社 UMS 事業推進部森林計測部 主事 瀬口 栄作

ヤマハ発動機株式会社 UMS 事業推進部森林計測部 担当 ザン ペイイ

ヤマハ発動機株式会社 UMS 事業推進部森林計測部 主管 原田 丈也

2. 議事

1) 開会

2) 林野庁挨拶 (林野庁 長崎屋課長より)

3) 議題

3-1) UAV レーザ計測および林分内容解析結果

3-2) 区域の再現手法の検討・検証方法および地形情報の活用検討

3-3) UAV レーザ計測データの活用について

4) 委員長挨拶

5) 閉会

議題 3-1) UAV レーザ計測および林分内容解析結果

(⇒：委員・オブザーバー・林野庁出席者からのご意見・ご回答、 →：事務局からの回答等)

資料 2-1) 初回報告からの変更点のみを説明。質疑は特になし。

資料 2-2) 計測対象林分毎の特徴 (現況) を説明。質疑は特になし。

資料 2-3) 林分内容解析について、計測手法 (コース間隔 5m および 25m)、DBH および材積推定方法、樹種判定方法、被圧木本数の検出について説明。

●P4 の図 4～図 6 について、それぞれの実際の木の太さとの関係はどうか。図 4 の方が正確に判るのか (林野庁：宇山氏)

→3 種での比較はしていないが、コース間のずれが少なければ、複数の方向からの幹点群を取得できた方が正確 (矢嶋)

●任意高さで DBH を把握するとのことだが、複数個所で幹が見えた場合はどれを選択するのか (林野庁：宇山氏)

→より明瞭に見えた場所、その中でも極力胸高に近い高さの値を採用する (矢嶋、加藤)

資料 2-4) 現地調査方法および解析結果と現地計測結果の比較について説明。質疑は特になし。
資料 2-5) 精度検証結果、被圧木の検出、樹幹形質の検出について説明。質疑は特になし。
資料 2-6) 微地形解析方法については前回から記載内容に変更がないため説明割愛。

議題 3-2) 区域の再現手法の検討状況を説明。

資料 4) 計測手法の検討状況、考え方を説明。質疑は特になし。

第 2 回検討委員会報告書)

●UAV レーザで抽出された立木本数の精度が 100%に近いと記述されているが、その結果が得られるためには前提条件があるはず。広葉樹、下層木の状態、立木密度、笹で埋もれてしまう・蔓が多いところ・未整備林などの林相によっては、そこまでの本数精度を得ることは無理なのではないか。今回の対象地での立木本数精度は 100%だったかもしれないが、これらの前提条件を付記すべき (加藤委員長)

→100%の前提条件はまとめの中で表現していく (事務局：加藤)

●点群から胸高直径を求める際、楕円・正円フィッティングなど、どういう方法を使ったのか (加藤委員長)

→それなりの数の点が幹上に落ちるので、円筒形に見えた場所を選んでサークルフィッティングをしている (事務局：加藤)

●曲りが検出されているものもあったが、50cm 刻みで幹をスライスした円盤を描き、円盤の中心点を繋ぐとどこでどの程度曲がっているかがわかる。そのような方法を検討されると良いと感じた (加藤委員長)

→曲りの可視化については地上レーザ計測であれば可能なレベルの点群が取れるが UAV レーザ計測ではそこまで十分な点群が取れない、計測密度が高まれば (条件を整えば) 曲りの可視化にも挑戦していきたい (事務局：加藤)

●飛行計測した面積は 20m 四方だけなのか。どのくらいの広さの CS 立体図が作れるのか (林野庁：長崎屋氏)

→今回、飛行計測した面積は 1 箇所あたり 2ha であり、その分の地形データは計測できている (事務局：矢嶋)

⇒報告書の中に 2ha の CS 立体図を入れて欲しい。これからの収穫調査は材積確定だけでなく、皆伐が主体になるので、伐採を避ける箇所を明らかにすることも重要。現地にいかなくても危険地形 (伐採すると危険である箇所) が分かることは UAV レーザを使うメリットのひとつである (林野庁：長崎屋氏)。

→CS 立体図は微地形活用のところで掲載する (事務局：矢嶋)

●樹高について、バーテックスでの計測結果との比較グラフがありバーテックスの数値がおかしいとしていたが、「測桿」で測るなど正確な樹高との比較があると良い (林野庁：長崎屋氏)

⇒レーザ計測であっても、樹頂点と根本のズレがあると（斜めになっていると）樹高に誤差が入るので注意が必要。また、経験的には、バーテックスの計測値がこれほど大きくずれるということもないように思う。（鹿又委員）

●「実測」とは何を指すのか。輪尺もレーザも実測。「輪尺による測定値」、「OWLでの測定値」のように書くべき。単に「実測と解析の比較」という表現は避けたい。（林野庁：長崎屋氏）

⇒何で測った値、という書き方に揃えるのが良いだろう（鹿又委員）

→報告書の記載表現を整える（事務局：矢嶋）

●20m四方の中での計測は、現場調査の事情に即して行ったもの。UAVレーザの利点を生かした広範囲の計測や、現地調査では得られない情報についても報告書に入れてもらえると、他への広がり期待出来る（松岡委員）

⇒林齢と樹高により地位指数を出すことができるため、UAVレーザ計測の特徴として、地位の良いところを把握することができることも挙げられる（鹿又委員）

→森林の地位についての情報をいただけると有難い（事務局：加藤）

●既存の細り率を使うのではなく、計測対象の林分の特徴から導出する方法もあるのではないか（林野庁：宇山氏）

→その方法も含めて検討を進めていく（事務局：加藤）

⇒細り率による換算によって得られたDBHがOWLでの計測値と比べて10%（スギ）、15%（ヒノキ）の差があったが、これを材積に換算するとその差はかなり大きなものになる（鹿又委員）

議題 3-3) UAVレーザ計測データの活用について

参考資料)「国有林野事業における収穫調査について」林野庁：尾近氏から説明

●レーザは樹高と本数は正確だがDBHの精度には課題がある。人力による毎木調査は本数とDBHは正確だが樹高の精度に課題がある（鹿又委員）

●DBHのバラつきをどう評価すればよいのか。出てきたデータを活用する際のアイデアも伺いたい。例えば、同じ樹高の中ではばDBHの傾向が揃めるのであれば、その値を用いて計測できなかった立木のDBHを埋めることもできると思う（鹿又委員）

●輪尺は元々の精度が2cm括約。輪尺との比較について、レーザとかOWLの値を輪尺換算（2cm刻み）にしても良いのではないかと（鹿又委員）

●標準地調査（4%）は、実施の負荷を考慮して林道から近いところを選ぶ傾向にある。レーザ計測のメリットは全域を調査できること。現地調査をなるべく省くために毎木の位置、樹高、DBHをレーザ計測で獲得したい。また、CS立体図は作業道、土場の設計に活用できる。今後、出来るだけ現地調査を省いていく、機械に置き換えて可能な部分は置き換えていくことを目指したい。そういった方向性で取り纏められると良い（加藤委員長）

→空からのアプローチは全数取れることが強み。また、現地調査では地形は把握できない。こんな活用方法があるという提案をまとめに含むように努める（事務局：加藤）

●国有林の実態として、毎木調査は皆伐の立木販売で使われることが多く、標準地調査は間伐の製品生産請負事業で使われることが多い。それぞれで求められる精度が違うので、出口を考慮して精度の評価や調査方法の選択をすべき（林野庁：宇山氏）

→UAVレーザによる調査も出口に合わせた提案ができるようにしたい（事務局：加藤）

●今後知見が増えてくると新たなメリットが生まれてくるだろう。4%に限られる標準地計測による結果は誤差が大きい。対象全域の毎木調査が出来れば尚良い。現場からの意見としては、本数が一番欲しい情報であり、それを達成できる意味は大きい。(鹿又委員)

●収穫調査のやり方は変えていく必要がある。毎木調査と標準地調査のカテゴリを無くすことを検討している。標準地調査のまずいのは調査箇所を人間が選んでいること。報告書内で国有林の調査方法に触れる場合は、現在の方法を正しく分析・分解して記述すること、そうであれば今後に繋がる。UAV レーザ計測を使うことになっても職員が林内を歩かないという選択肢はない。標準地調査のためだけに林内に入るのではなく、全体俯瞰できるコースを歩くとか危険箇所をチェックするとか、もっと意味を持つ入り方になる(林野庁：長崎屋氏)

●UAV レーザ計測により、条件が悪いところでも半分程度の直径が計測できているのは素晴らしい。残りの立木については樹高から胸高直径を推定する方法でも良いと思われる。一方、材積については高田式ではなく、林野庁で用いている材積表・材積式を使う方が良い。将来的なことになるかもしれないが、UAV レーザ計測の結果から林分固有の幹曲線を導き出していけると良いと思う(井上委員)

→林野庁でお使いの材積表を使わせていただく(事務局：加藤)

●現地調査は現地での作業は大変だが、まとめる作業は簡単。レーザ計測は計測後の解析作業にも時間・コストがかかるのではないかと。後工程の情報も提供してもらえると良い。どんな形でも UAV を飛ばせば良いというものではないので、計測データ品質(点群数など)の情報も付記して欲しい(松岡委員)

→一般の民有林の計測の場合、計測コストよりも解析コストの方がやや掛かっている。計測データ品質については、獲得点群密度は 5m 航路間隔で 2~3 万点/m²、25m 航路間隔ではその 5 分の 1 程度。報告書に記載する(事務局：加藤)

●従来の人手による調査の精度はほぼ均一であるが、UAV レーザ計測の場合、仕様を揃えて行かないと精度が保証できず、発注者としても安心して発注できない。レーザ計測の利用を拡大していくためには、業界がまとまってレベルを上げていく必要があり、今回の調査についても技術のオープン化が必要。具体的な仕様を含めて報告書に記載していただけるように(林野庁：宇山氏)

→計測の条件、精度、解析の概要など発注の仕様となるようなデータを報告書に付記する(事務局：加藤)

以 上

