

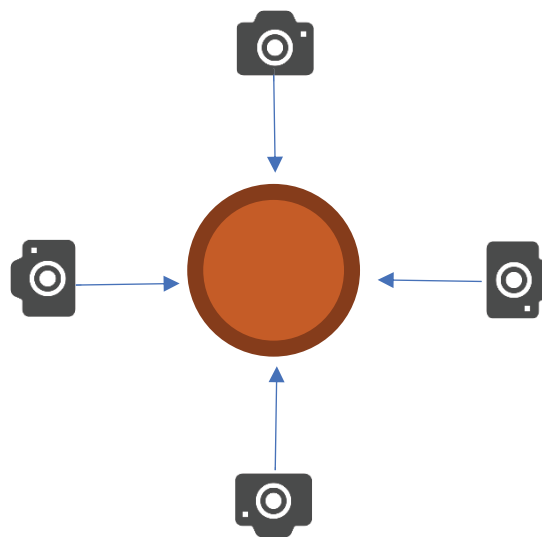
(エ) 林分内容解析結果の精度検証

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

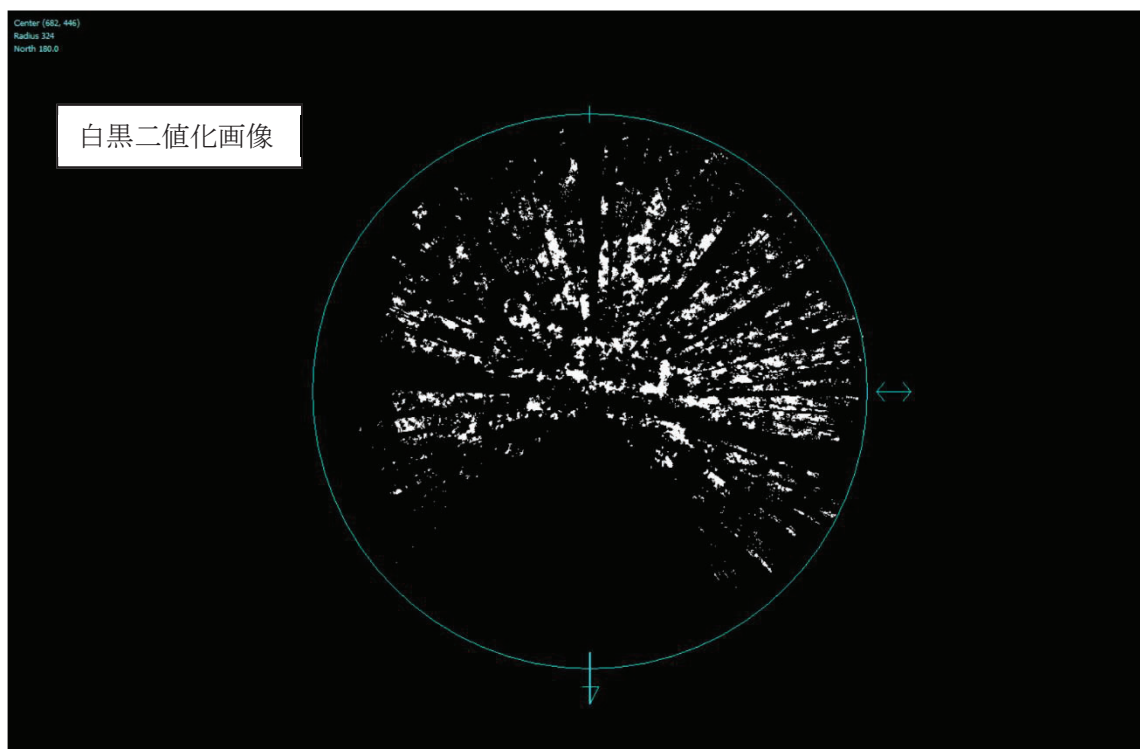
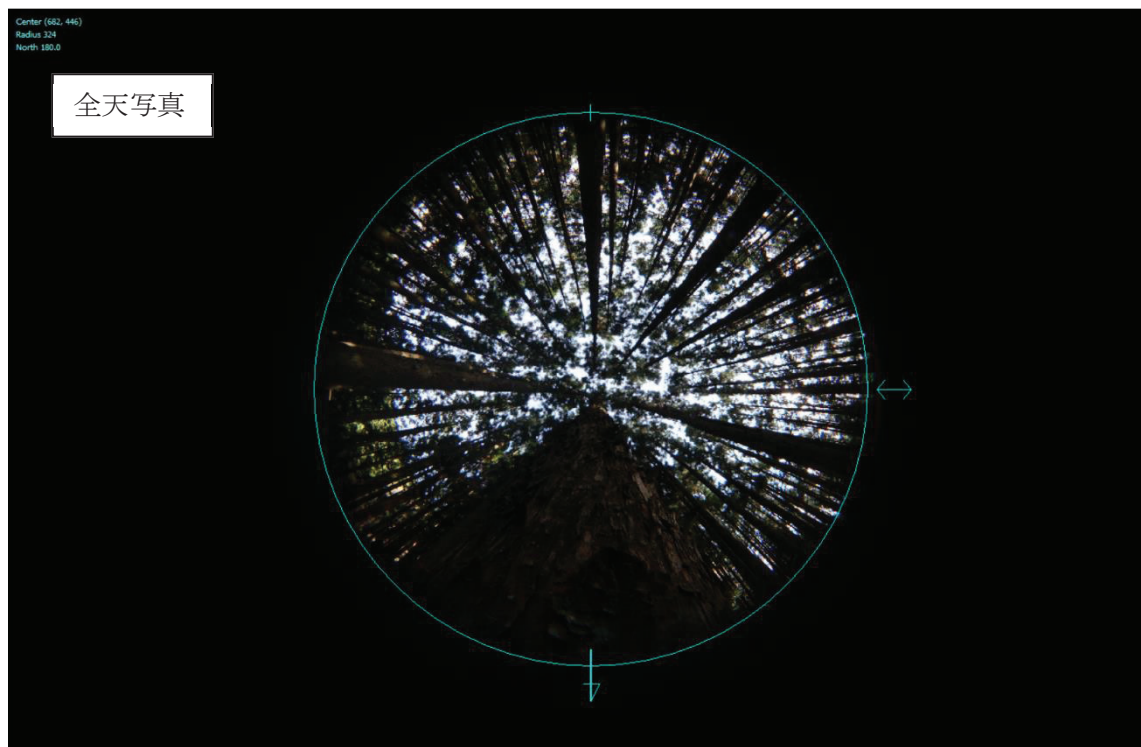


図 2-19.開空度調査解析方法

- ・ 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。

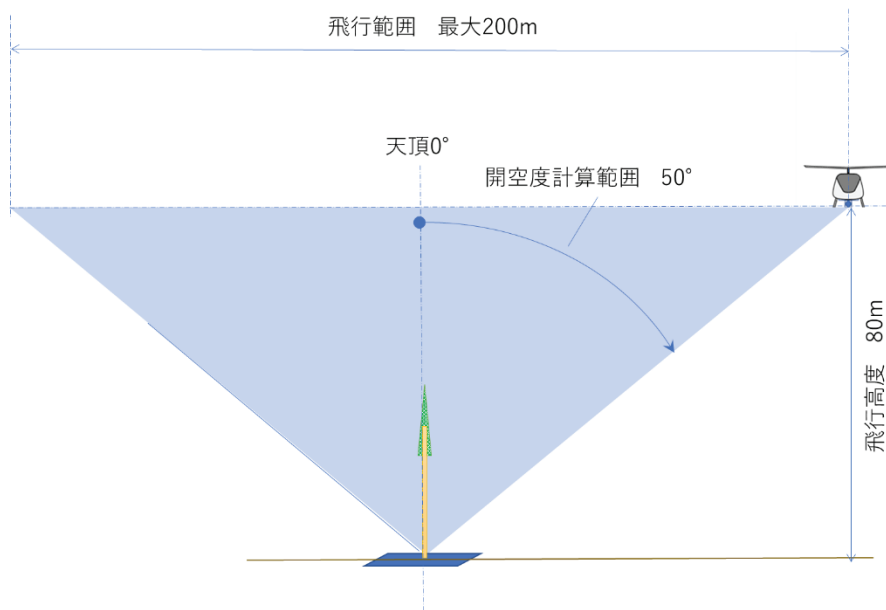


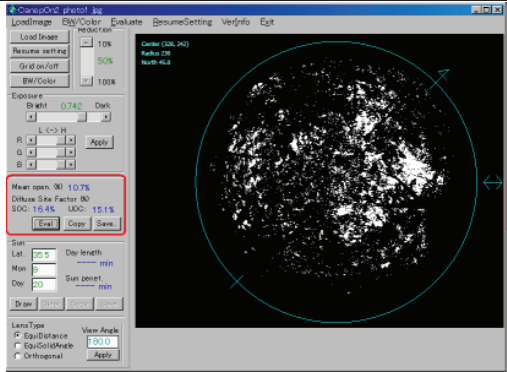
図 2-20.開空度解析範囲

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	 <p>メーカーHP より引用</p>
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	<a href="https://www.weather.co.jp/catalog_html/C-OptoCanopy.html">https://www.weather.co.jp/catalog_html/C-OptoCanopy.html</a>	

種別	デジタルカメラ	 <p>メーカーHP より引用</p>
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	<a href="https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-6500/">https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-6500/</a> <a href="https://www.sony.jp/ichigan/products/SEL18200/">https://www.sony.jp/ichigan/products/SEL18200/</a>	

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	<a href="http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/">http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/</a>	

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	<a href="https://www.hanshinco.com/trupulse.html">https://www.hanshinco.com/trupulse.html</a>	

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	<a href="https://www.bizstation.jp/ja/drogger/package_index.html?tab=rwp">https://www.bizstation.jp/ja/drogger/package_index.html?tab=rwp</a>	

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そ		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。

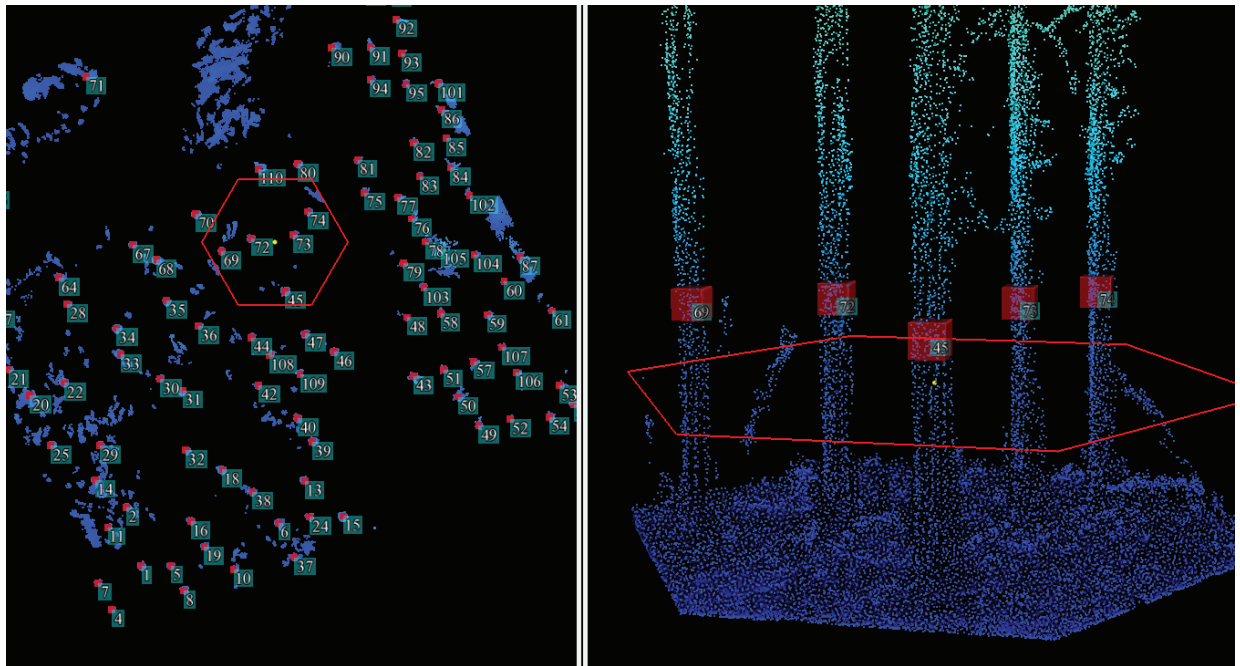


図 2-21. 幹検出方法

### 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)

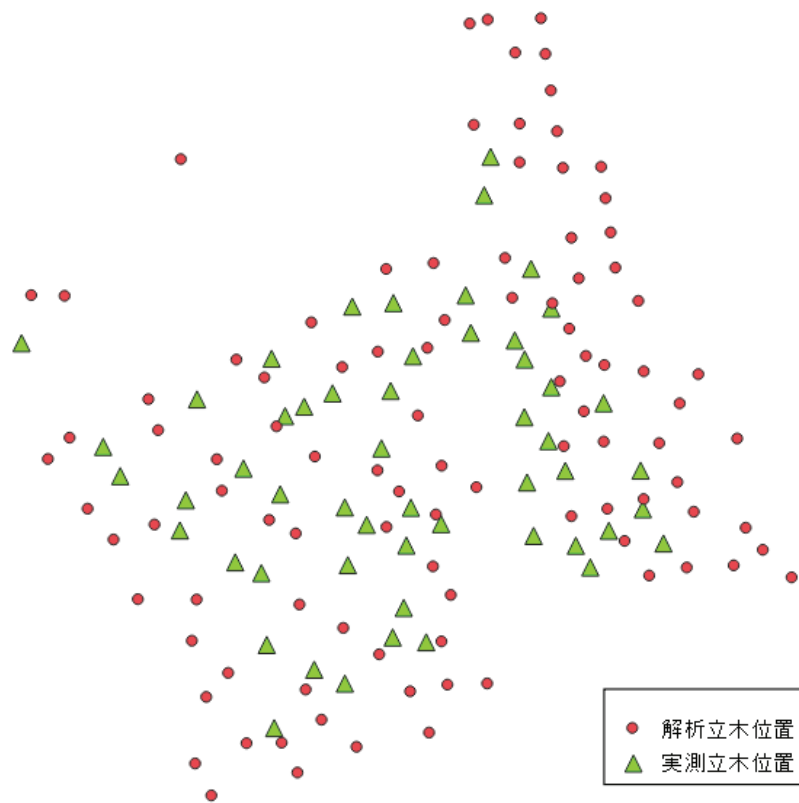


図 2-22.プロット調査立木と点群から抽出された幹位置(調整前)

#### 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)。

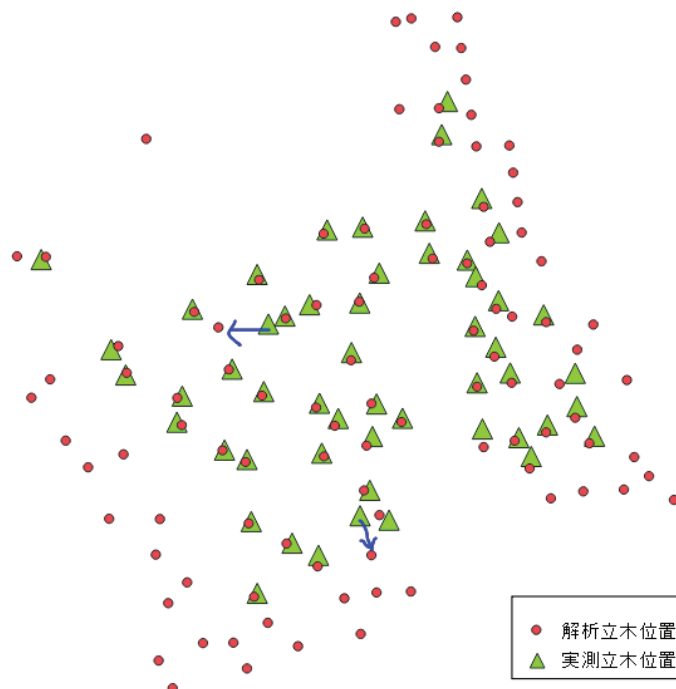


図 2-23. プロット調査立木と点群から抽出された幹位置(調整後)

### 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	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。
任意高さ直径	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。

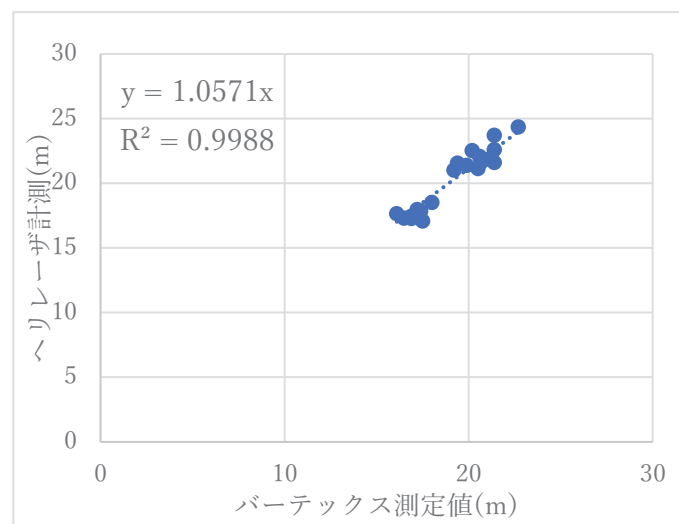
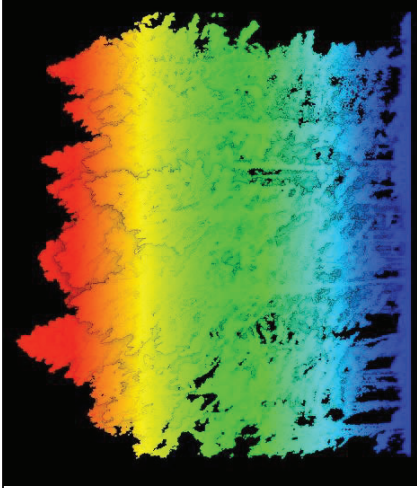
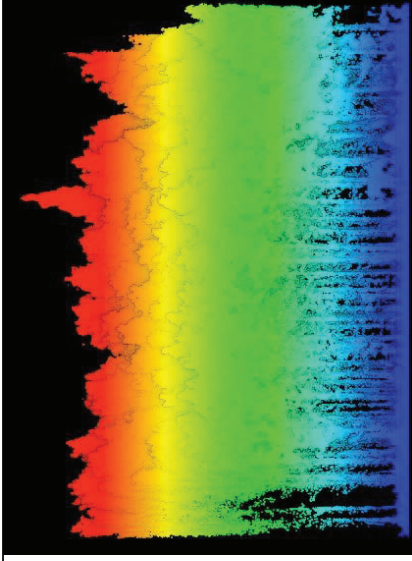
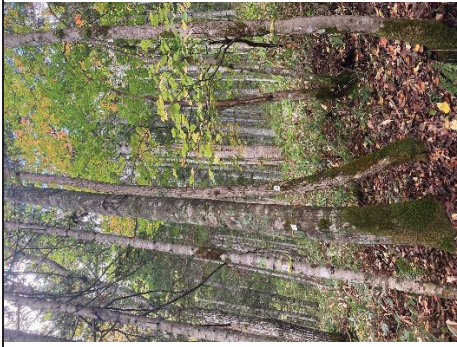
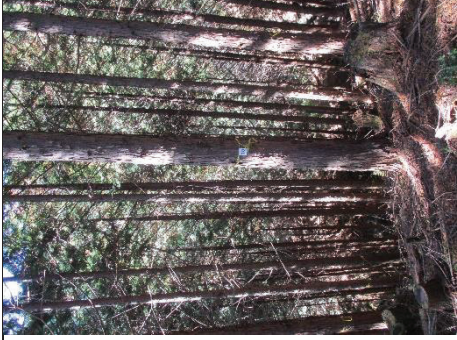


図 2-24.天竜瀬尻 861 に おける樹高計測結果の比較

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

表 2-11. 精度低下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 号	静岡県 天竜瀬尻 878 号
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。

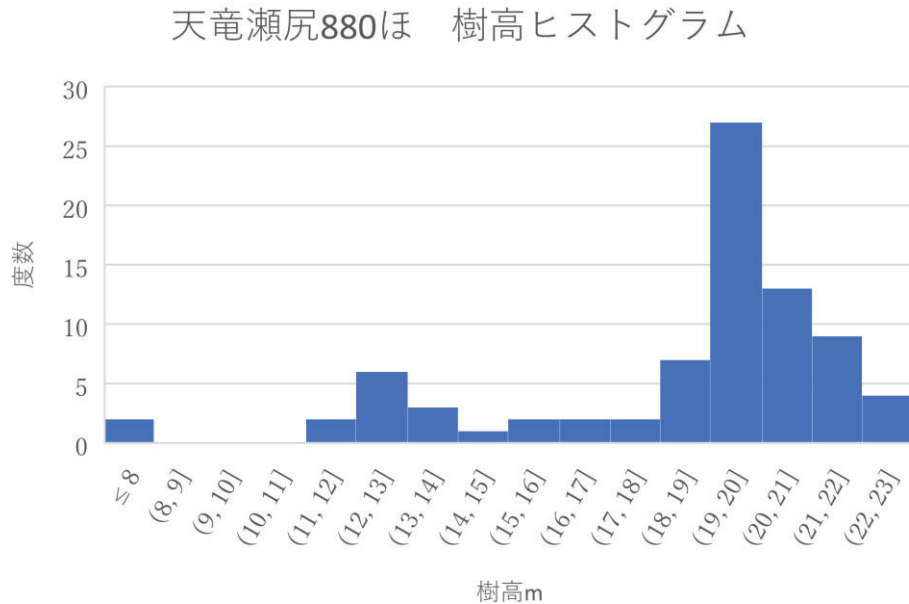


図 2-25. 樹高ヒストグラムのサンプル

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。

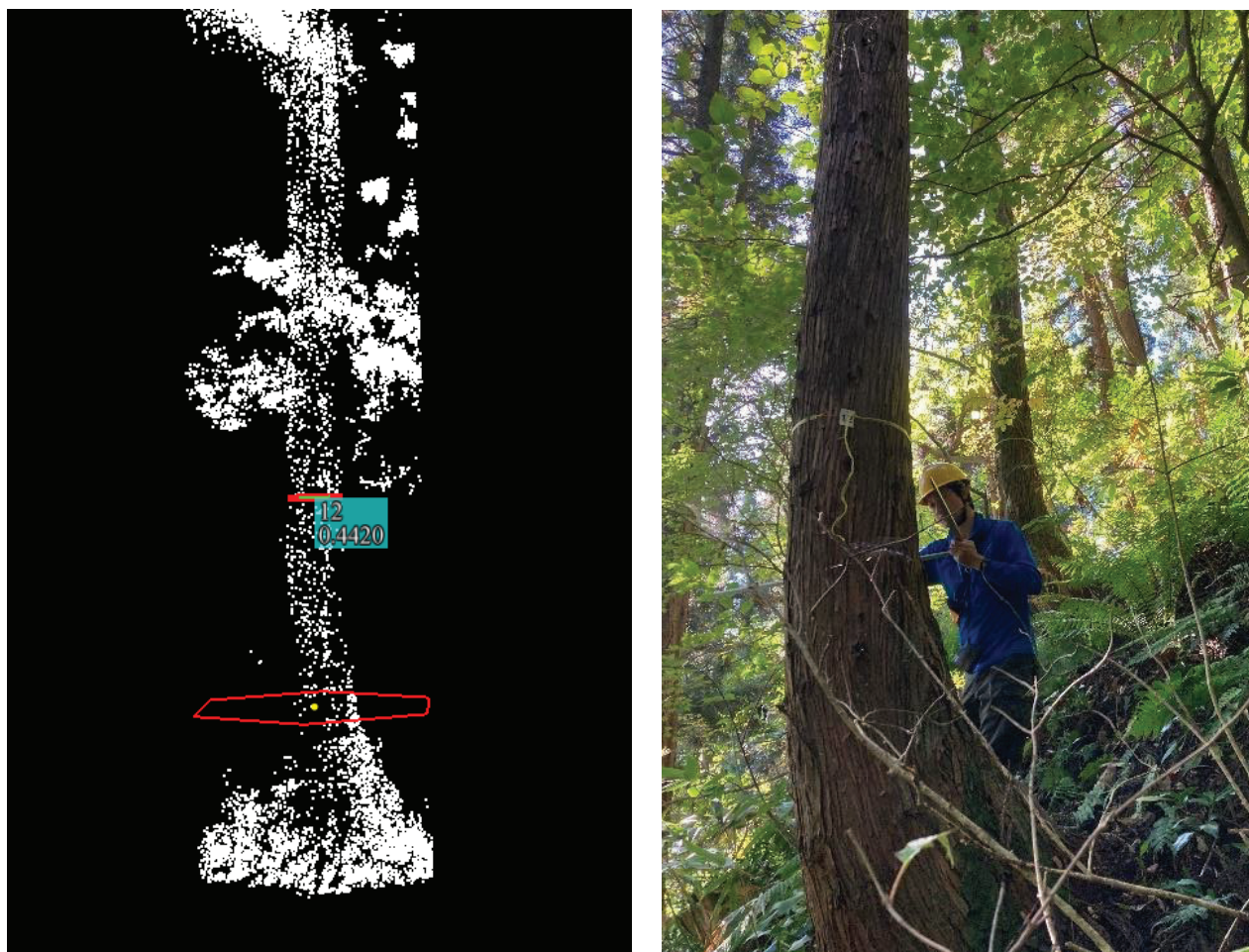


図 2-26.確認された根曲り 早口 2257 つ

(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)	
	標準値調査	A: 詳細調査	B: 効率的調査
本数	毎木調査	◎	◎
	誤差は数え漏れのみ	△	95%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	△	90%以上の検出率
形質	推定樹高による算出	◎	◎
	標準地の偏りの影響あり	△	過密林分では誤差大きい
樹種	定量的な把握が可能	◎	△
	全域の把握不可能	△	←
立木位置	樹皮による判断が可能	◎	△
	樹皮による判断が可能	△	←
収量比数/ 相対幹距比	位置情報なし	×	◎
	位置情報なし	位置情報なし	cm級の精度で把握可能
地形	樹高は推定による	◎	◎
	樹高は推定による	△	DBH推定精度の影響あり
記録化	定量的な記録不可	×	◎
	定量的な記録不可	定量的な記録不可	微地形計測可能
適用途	野帳のみ	野帳のみ	デジタル記録
	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
	木材販売予算作成		切り捨て間伐前調査

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	レーザー入射角	25° ~50° を含む	(左同)
	点群密度	10,000 点/m <sup>2</sup> 以上	2,000 点/m <sup>2</sup> 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。