

図 2-47 広葉樹の断面図

(4) 点群計測方法

1) 胸高直径の計測

現地調査で胸高直径を計測した箇所に反射テープを巻いた。計測データでも反射強度よりテープ位置が分かるため、同じ位置で胸高直径を計測した。



図 2-48 反射テープ（左図：現地写真、右図：点群状況）

胸高直径は cm 単位での計測となるため、林内 UAV に搭載していたレーザ機器のもつ±3cm の測定精度を考慮し、ばらつきのある点群より計測する必要があった。実際に樹幹の断面を図 2-49 のように拡大すると 3cm ほどの幅があることが確認できた。そのため、図 2-48 のような断面をとり、点群の端から端までを計測すると 3cm 過大な結果になると考えられた。

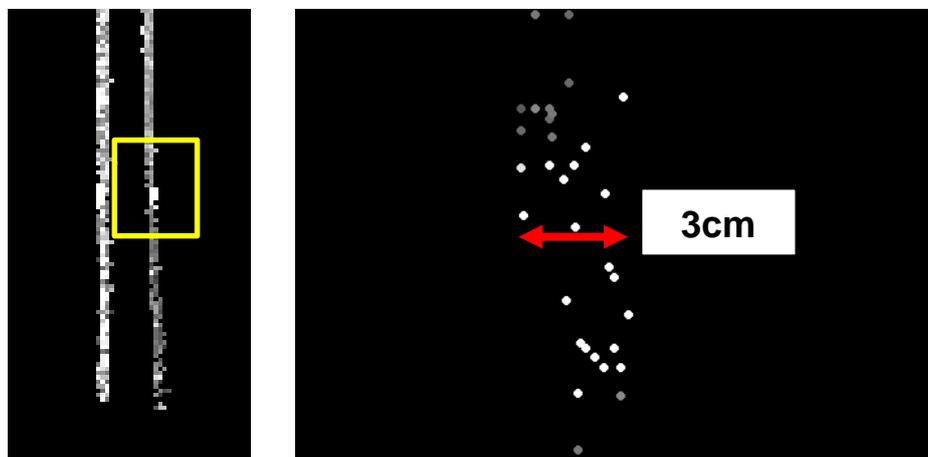


図 2-49 点群のばらつきの状況

そのため、反射テープの箇所(point群)のみを抽出し、水平断面を確認し、図 2-50 に示すようにばらついている点群の中心を通るような真円を描画し、直径を算出し、胸高直径とした。反射テープの巻いてあることが確認できた樹木すべてについて胸高直径の計測を行った。

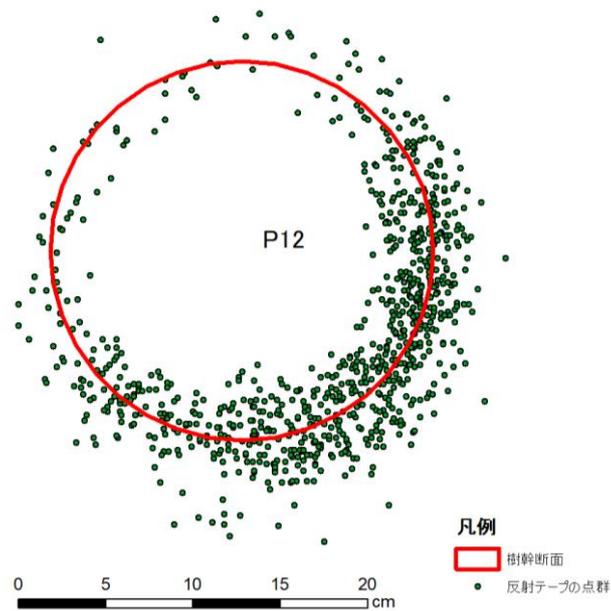


図 2-50 胸高直径の計測状況

2) 樹高の計測

点群の断面を表示し、画面上で地面から樹頂点と思われる点群までの距離を計測した。胸高直径と同様に反射テープの巻いてあることが確認できた樹木すべてについて樹高の計測を行った。

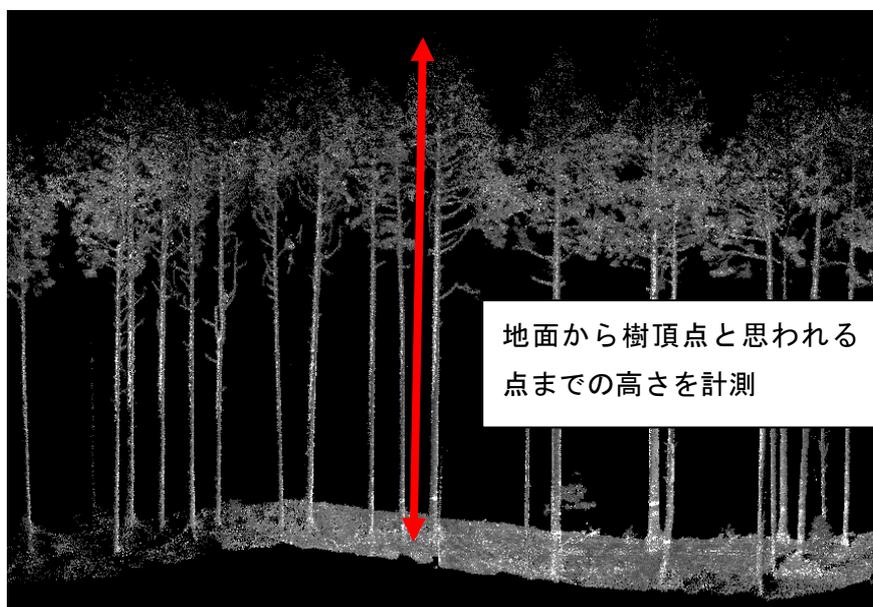


図 2-51 樹高の計測状況

レーザスキャン角が水平方向に対して $\pm 15^\circ$ であるため、樹冠部の点群が少なくなることが予想されたため、プロット外の樹高の計測状況についても確認した。図 2-52 の上部（黄丸）では林道脇に常緑広葉樹があったため、レーザが遮蔽されたため、樹頂付近の点群が比較的少なくなっている。一方で斜面下（青丸）では林内 UAV が標高に沿って高度を下げながら計測できたため、レーザスキャン角の内に樹頂付近がはいったため、比較的計測点群が多くなっている。ただし、計測の対象外となっていたため、地盤面の点群がなく樹高の計測することはできなかった。

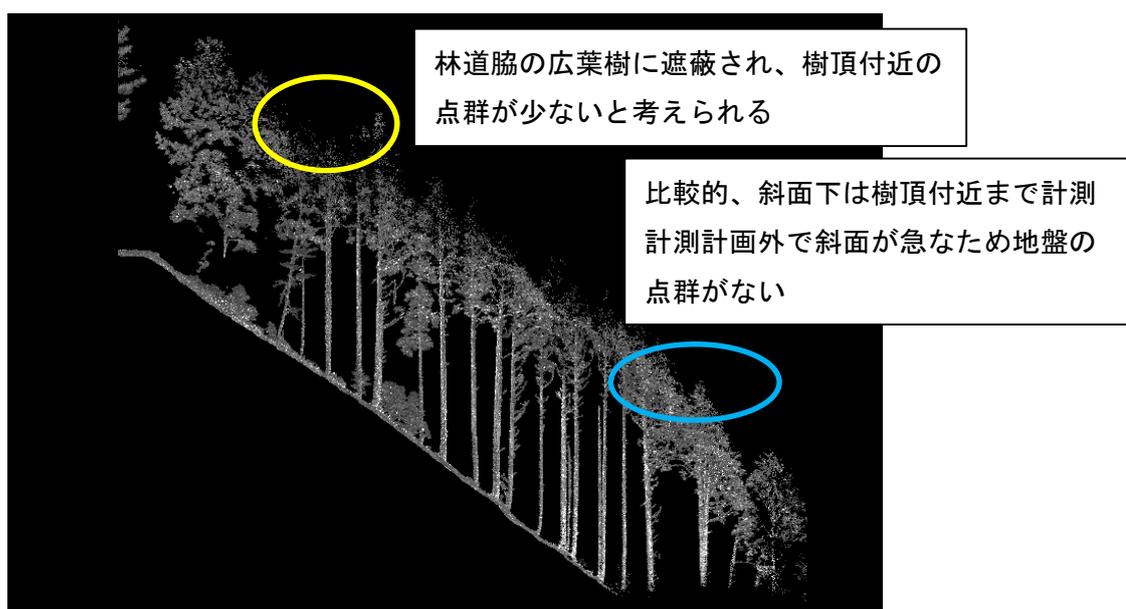


図 2-52 樹冠部の計測状況

(5) 現地比較結果

林内 UAV により取得した樹木の本数、胸高直径、樹高と現地調査の比較を行った。比較した表及び相関図を表 2-9 及び図 2-53 に示す。本数については、反射テープを巻き現地調査した樹木については全て林内 UAV で確認することができた。平均樹高は現地調査に比べ林内 UAV が 0.6m 低くなっており、誤差は 2.2m ほどであるが相関は 0.34 と低く、すべての樹木が正確に計測できていない可能性があった。平均胸高直径の誤差は 1.9cm で相関も 0.95 と高精度に算出できていることが分かる。二変数材積式により算出した材積の誤差は 1.9%程度であった。

表 2-9 林内 UAV と現地調査の比較

	林内 UAV	現地調査	RMSE
合計本数	34 本	34 本	-
平均樹高	17.9m	18.5m	2.23m
平均 DBH	26.1cm	25.5cm	1.90cm
合計材積	16.948 m ³	17.281 m ³	0.089 m ³

※RMSE・・・二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error)。解析結果が現地調査結果からどの程度乖離しているかを示す。0 に近い値であるほど誤差が少ない。平均誤差率が相対的な誤差の率を表しているのに対し、RMSE は誤差の絶対値を示している。(例：すべての現地調査プロットで、レーザ計測による推定樹高と現地調査樹高の差が 2(m)の場合、RMSE=2 と表される。)

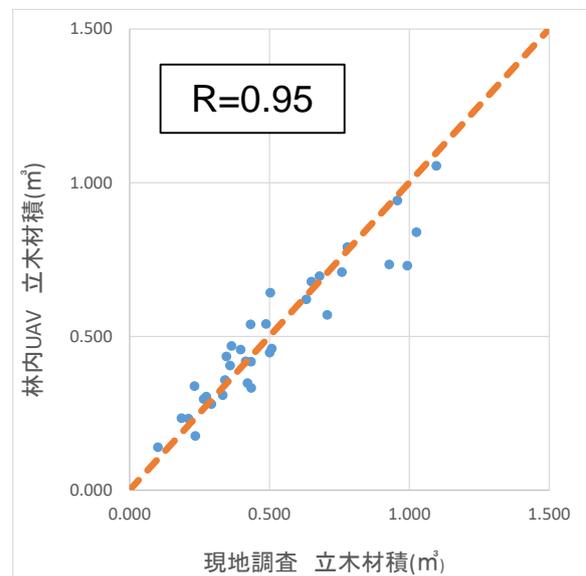
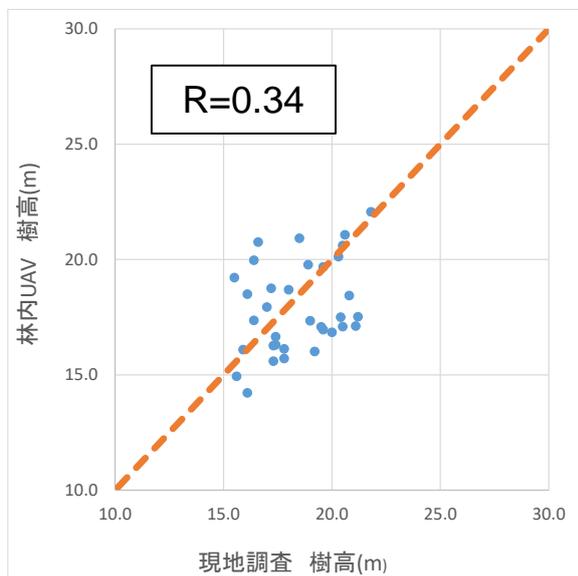
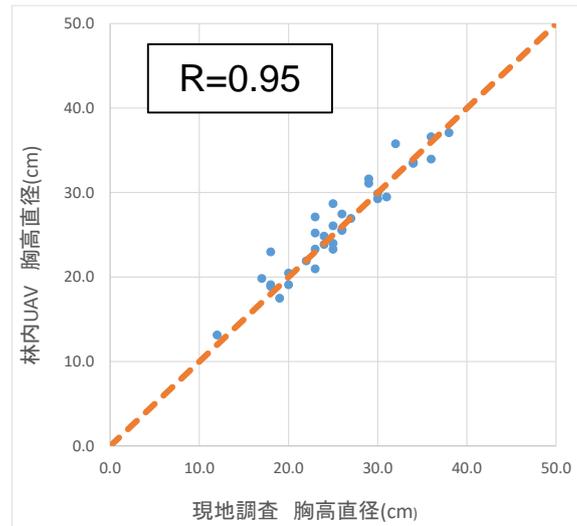


図 2-53 林内 UAV と現地調査の各比較
 (上：胸高直径、左下：樹高、右下：立木材積)

2.4.4 林内 UAV の実現可能性について

今回の実証においては、列状間伐した林分で伐採後の列間を林内飛行させ、樹幹を主とする三次元情報を取得することができた。レーザ SLAM システムを搭載することで、非 GNSS 環境下でも、樹幹や枝葉、下層植生などの障害物を認識し、手動ではあるが、障害物を回避しながら林内を計測する可能性を示すことができた。林内での UAV レーザ計測にあたり、飛行時に問題となった事項はなく想定内の動作をした。取得したデータについては、胸高直径を高精度に計測できた他、地上レーザのように樹幹形状を詳細にとらえることができた。

一方で課題も明らかとなった。今回は列状間伐後の林分であったが、そうでない林分となると 800 本/ha 以下の立木密度の林分に限られる可能性があり、また、UAV を運ぶための車両が走行できる林道が整備されていることが必要であることから、現状では飛行エリアが限定的であることが分かった。次に計測時間に 45 分/0.05ha (15 時間/ha) を要しており、効率性の課題が挙げられた。また、今回使用したレーザについては、その照射角が±15 度であったため、それを超える斜面での自律飛行はできず手動による飛行となった他、樹高の計測精度や事前の現地確認の必要性などの課題が明らかとなった。さらに運用面で最も課題となるのは電源に依存した稼働時間であり、現在の電池の性能では 10 分程度の計測時間となっており、広い範囲を連続的に計測することが難しいことが分かった。

上記の課題は明らかとなったものの、地上レーザのように人が林内を歩き持ち運ぶ必要がないため急斜面など人が行きにくい林分で効率的に計測することが可能となるなど期待を持てることが分かった。今後、機体の小型化や障害物の検知範囲を小さくすることで適用範囲が広がる可能性がある他、レーザ照射角の角度改善により全方位の計測ができるようになれば、急傾斜地における自律飛行が可能となること及びより高い箇所での樹冠データ取得も可能となることが考えられる。また、レーザ照射距離を踏まえた効率的な飛行ルートの設定や座標値の事前設定による自動飛行が可能となれば計測の効率性向上につながると考えられる。

なお、今回使用したレーザ SLAM の非 GNSS 環境下で計測できるというメリットを活かし、森林調査以外でも林道の点検や治山施設などの点検、出来高管理を行うなどの利用可能性がある。

2.5 各計測手法の比較整理

2.5.1 上空からの UAV レーザ計測と林内飛行の UAV レーザ計測の統合

GNSS 環境下で計測した上空 UAV の点群データに、非 GNSS 環境下で計測した林内の点群データを合わせ、絶対座標を付与した。計測時に現場に対空標識を設置し、その位置をもとに点群を合わせこんだ。図 2-54 に現地に設置した対空標識を示す。



図 2-54 現地での対標設置状況