

地上レーザとドローンを組み合わせた森林資源の把握

—北信州森林組合の管轄地を調査地として—

張 桂安・加藤正人（信州大学山岳科学研究所）

航空レーザスキャナは広範囲の計測ができるが、コストが高い上に、林内の情報が不足しているため、森林資源の把握と実際の間伐などの作業計画に限界がある。そこで、本研究は地上レーザスキャナと安価なドローンを組み合わせて単木レベル情報の把握に取り組んだ。地上レーザスキャナは立木の抽出率が高く、DBH を精度よく把握できるが、樹頂に点群が届きにくいいため、樹高が過小評価になる欠点がある。一方、ドローンは林冠をよく撮影できるが、森林内の情報が乏しい。両者を組み合わせれば、高い精度で森林資源が把握でき、単木レベルの間伐計画作成に貢献できると考えられる。

キーワード：地上レーザ、ドローン、組み合わせ、単木レベル

I はじめに

現在の日本では間伐遅れの人工林が数多いが、森林組合は効率的な間伐作業ができていない。本研究の調査地である北信州森林組合は航空レーザスキャナ（ALS）技術を用いて間伐作業の効率化を図っているが、ALS は高価であるため、どの森林組合でも入手できるものではない。

そこで本研究は地上レーザスキャナ（TLS）とドローンを組み合わせて森林資源を高い精度で把握し、単木レベルの間伐計画作成に貢献することを目的とする。更に、研究で得た技術の普及を図るとともに、大学と森林組合が技術連携で間伐計画を進めることを目指す。

II 方法

1. 調査対象地

調査地は北信州森林組合の管轄地で、場所は長野県山ノ内町角間のスギ人工林である。人工林の林齢は48年と59年である。調査地で平坦地プロット、緩傾斜プロット、急傾斜プロットの3つのプロットを設定した。各プロットの大きさは80m x 80mの正方形である。平均傾斜はそれぞれ、11.8度、15.2度、25.7度である。

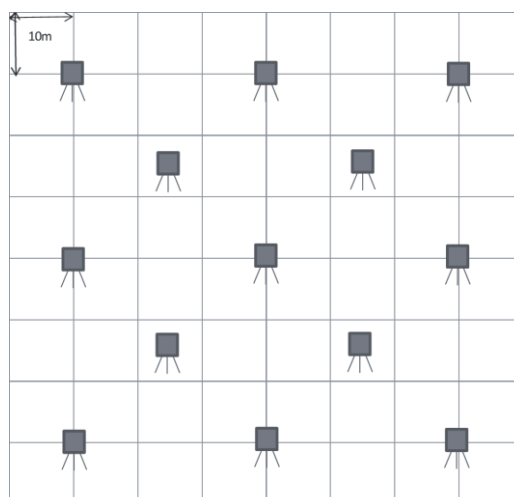
2. 研究の流れ

TLS 計測で本数と DBH を推定する。一方、TLS にとって難題と言われている樹高はドローンで空撮し、SfM 画像処理により推定する。本数と DBH はそれぞれ現地調査データとの比較により精度検証を行う。更にプロット間の推定精度の比較により、推定における傾斜の影響を検証する。一方、樹高は ALS データと比較して精度検証をする。

3. TLS の計測方法

本研究で用いた TLS は Laser Scanner Focus3D X 130

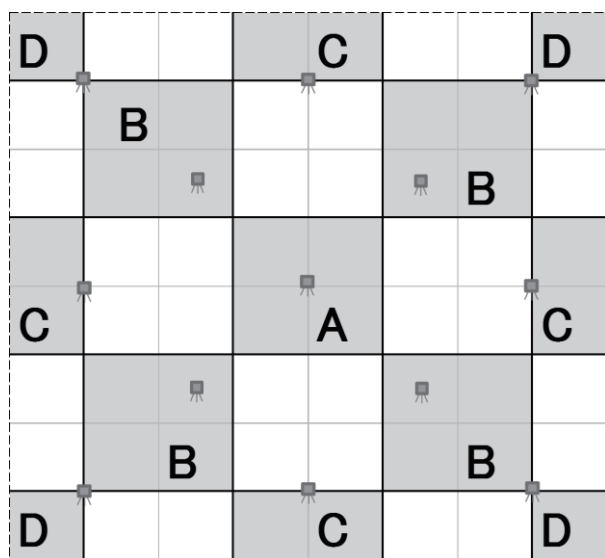
（FARO 社：アメリカ）で、点群データの解析ソフトウェアは SCENE 5.2（FARO 社：アメリカ）と Digital Forest（woodinfo 社：日本）である。各プロットで図-1のように合計13箇所 TLS 計測を行った。前報（1）では、TLS による立木本数の抽出率は、40m 間隔の測定で9割であった。本研究はより高い精度を求めて30m 間隔で計測することとした。TLS データを解析する際、測定位置が異なる点群をモザイク接合する必要がある。そのために、接合の基準となるものが必要となる。本研究では直径145mmの発砲スチロールの球を使用した。直径145mmの球を使用する場合、スキャナまでの距離を18m以下に設定したほうが認識されやすいため（2）、本研究は30m 間隔の正方形の中央にもう一箇所計測点を追加した。なお、TLS の測定は2016年8月に行われた。



■ TLS 計測点

図-1. 各調査プロットの TLS 計測点の配置

更に各プロットを図-2のように区分けをした。A区は中央の20m x 20mのエリアである。B区はA区の隅と接する20m x 20mのエリアで、合計4箇所ある。C区はプロットの外縁の中央に位置する10m x 20mのエリアで、合計4箇所ある。D区はプロットの四隅に位置する10m x 10mのエリアで、合計4箇所ある。点群密度は、順にA区、B区、C区、D区と小さくなる。また、C区とD区の立木は片側測定しかない。プロットを点群密度で区分することで点群密度と、抽出率、誤抽出、DBH誤差との関係性を比較・検証した。



■ 〆 TLS 計測点

図-2. 点群密度の違いによる各調査プロットでの区分け

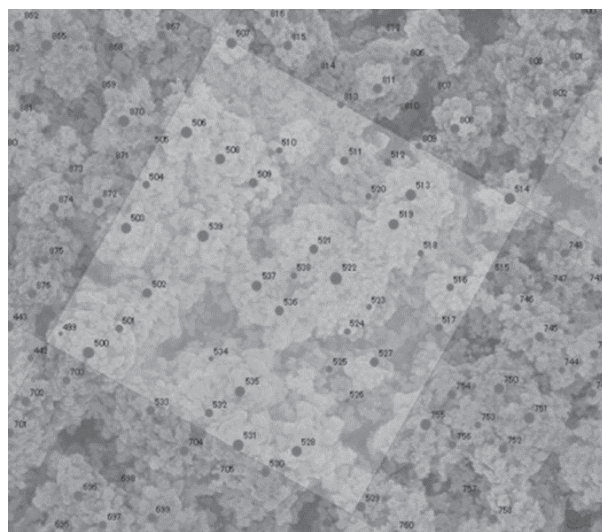
4. ドローンの計測方法

本研究で用いたドローンは Phantom 3 Professional (DJI 社：中国) で、解析ソフトウェアは PhotoScan Professional (Agisoft 社：ロシア) である。プロットの近くの上空の空けた場所でドローンを飛行させ、それぞれのプロットを 75m の対地高度で空撮した。なお、ドローンの測定は 2016 年 8 月に行われた。

5. 組み合わせの方法

本研究では立木の DBH 推定に TLS データを、立木の樹高推定にドローンデータを用いた。ドローンで撮影し、PhotoScan Professional (Agisoft 社：ロシア) で作成した DSM 画像を ArcGIS 10 (ESRI ジャパン社) に表示させ、樹頂点が見やすいように DSM を凡例で色分けした。次に、TLS で計測した立木の位置を DSM 画像の樹冠に合うように幾何補正した(図-3)。一方、TLS の点群データから、TerraScan (TerraSolid 社：フィンランド) と TerraModeler (TerraSolid 社：フィンランド) を用いて DEM を作成した。DEM の解像度は 50cm に設定した。そして、ドローンの DSM と TLS

の DEM の差分から DCHM を得た。最後に、TLS データの立木位置を DCHM に重ねて立木の樹高を得た。



● TLS で計測した立木
図-3. 組み合わせ法を示す例

6. 現地調査方法

本研究では比較データとして各プロットで本数と DBH の毎木調査を行った。DBH は巻尺を用いて 0.1cm 単位で計測した。また、TLS とドローンの標高値測定に誤差があるので、両方を組み合わせた後の樹高推定にはこの誤差を補正する必要がある。本研究では各プロットで樹頂点の確認できた立木を 10 本選木し、Vertex IV (ハグロフ社：スウェーデン) を用いて樹高を現地実測した。

7. 樹高の比較方法

本研究の組み合わせ法で推定した樹高を比較するために ALS データを使用した。ALS の測定とデータの作成は 2013 年 5 月 20 日から 2013 年 11 月 30 日まで行われた(3)。ALS の樹高推定はアジア航測株式会社が行い、その樹高値 (ALS 抽出木) を使用した。組み合わせ法はドローンの DSM と TLS の DEM の差分で作成した DCHM より樹高 (TLS 抽出木) を推定した。

樹高の比較について、まず ALS 抽出木と TLS 抽出木のマッチングを行う。マッチングの基準は三つある。一つ目は立木位置の距離で、二つ目は周辺の立木の位置パターンで、三つ目は DBH である。本研究は三つの基準を総合判断し、立木のマッチングを実行した。マッチングができない立木は樹高の比較から除外した。

III 結果

1. 抽出率

A, B, C, D 区と、点群密度の低下とともに、抽出率も低下した(表-1)。また、急傾斜プロットの抽出率は平坦地や緩傾斜プロットより低かった。また、誤抽出は B 区に集中していた。

表-1. 各プロットの本数抽出率の比較

平坦地プロット	点群密度の違い	多 ← → 小			
		A区	B区	C区	D区
一致本数		34	113	62	36
TLS抽出本数		33	110	58	32
未抽出本数		1	3	4	4
抽出率(%)		97.1	97.3	93.5	88.9
誤抽出本数		1	6	2	1
緩傾斜プロット					
		A区	B区	C区	D区
一致本数		39	161	80	37
TLS抽出本数		39	160	79	34
未抽出本数		0	1	1	3
抽出率(%)		100.0	99.4	98.8	91.9
誤抽出本数		0	3	0	0
急傾斜プロット					
		A区	B区	C区	D区
一致本数		24	102	58	31
TLS抽出本数		23	93	51	29
未抽出本数		1	9	7	2
抽出率(%)		95.8	91.2	87.9	93.5
誤抽出本数		0	9	0	0

2. DBH

点群密度の低下とともに、DBH 計測値は過小になる傾向があった。同様に、傾斜の増加とともに、DBH 計測値は過小となる傾向があった。また、点群密度の低下とともに、DBH 計測の精度も低下した (表-2)。

表-2. 各プロットのDBH精度比較

平坦地プロット	点群密度の違い	多 ← → 小			
		A区	B区	C区	D区
DBH誤差	比較本数	33	110	58	32
	平均値(cm)	0.4	0.1	-0.7	-0.6
	最小値(cm)	-1.3	-4.6	-9.8	-7.4
	最大値(cm)	2.6	5.0	4.2	4.6
	RMSE(cm)	1.1	1.5	2.2	2.0
緩傾斜プロット					
		A区	B区	C区	D区
DBH誤差	比較本数	39	160	79	34
	平均値(cm)	0.6	0.3	-0.9	-2.7
	最小値(cm)	-5.3	-4.1	-6.4	-10.2
	最大値(cm)	4.6	7.7	5.2	4.4
	RMSE(cm)	1.9	1.4	2.1	3.8
急傾斜プロット					
		A区	B区	C区	D区
DBH誤差	比較本数	23	93	51	29
	平均値(cm)	-0.3	-0.3	-2.5	-2.9
	最小値(cm)	-12.8	-7.5	-15.0	-17.0
	最大値(cm)	4.6	13.0	6.2	5.8
	RMSE(cm)	3.3	2.9	4.8	6.0

DBH 誤差は現地の DBH 実測値と TLS の DBH 推定値の差分である。-は TLS の DBH 推定値が現地の DBH 実測値より小さいことを意味する。

図-4, 5, 6 は各プロットの DBH 誤差を示す。図中で、▲は現地実測の DBH より 3cm 以上小さい立木、○は現地実測の DBH より 3cm 以上大きい立木である。DBH が現地実測より小さい立木はプロット外側の C 区と D 区 の TLS の片側測定しかないところに多かった。また、急傾斜になるほど、立木の DBH 推定精度が低下した。

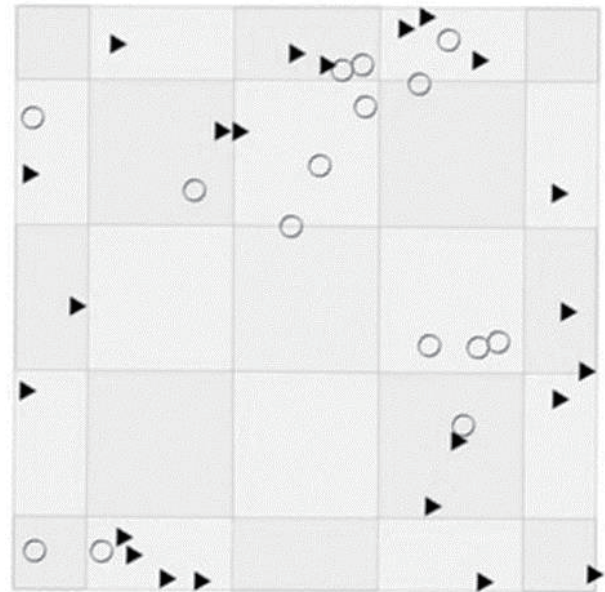


図-4. 平坦地プロットの立木の DBH 誤差分布

▲：現地実測より 3cm 以上小さい立木
○：現地実測より 3cm 以上大きい立木

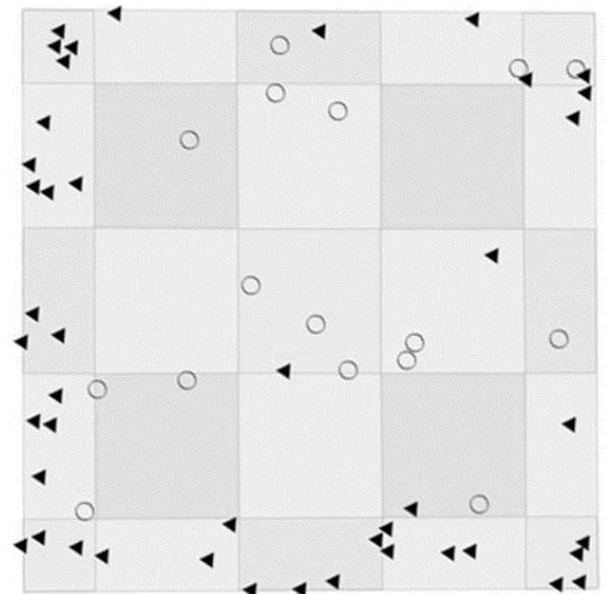


図-5. 緩傾斜プロットの立木の DBH 誤差分布

▲：現地実測より 3cm 以上小さい立木
○：現地実測より 3cm 以上大きい立木

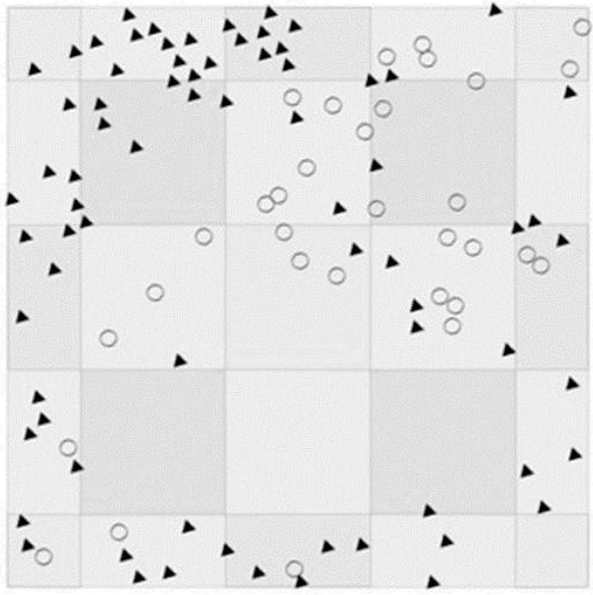


図-6. 急傾斜プロットの立木のDBH誤差分布

- ▲：現地実測より3cm以上小さい立木
- ：現地実測より3cm以上大きい立木

3. DCHM

図-7はTLSとドローンの組み合わせ法で作成した補正前のDCHMである。樹高として用いるには過大である。その理由はTLS測定時の高度(Z)値は気圧に基づいて計算されるため、気圧により実際の標高とは誤差が生じる。しかし、TLSの高度値は最初の計測時だけであり、それ以降の高度値はTLSの移動量に基づいて計算されるため、高度値の相対差は気圧に影響されない。本研究はこの特徴を利用して各プロットで立木を10本現地実測し、DCHM値の補正を試みた。樹高の実測値と、DCHMから得た立木の樹高推定値の差分を平均した値を、プロットの全立木に内挿して補正した(図-8)。

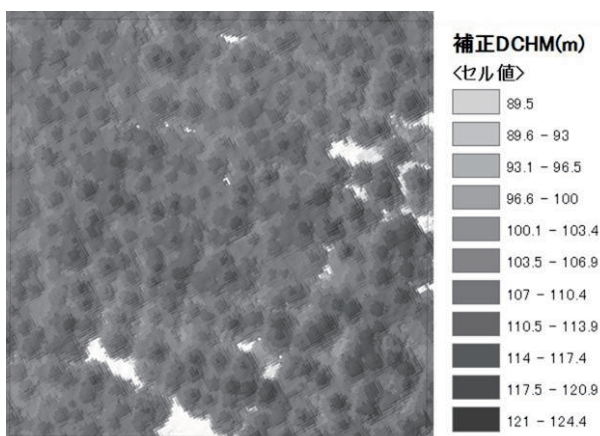


図-7. TLSとドローンの組み合わせの方法で作成した補正前のDCHM

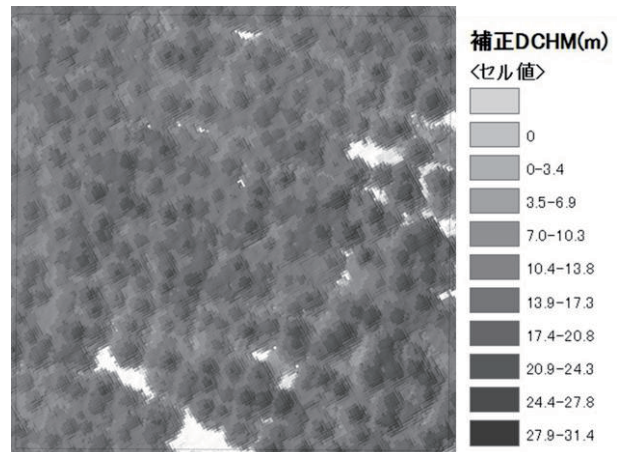


図-8. 補正したDCHM

4. 単木レベルの樹高比較

図-9~11では、ALS抽出木の樹高値をもとに左側から昇順にした。ALS抽出木の樹高が最も低い立木に番号1として、樹高順でラベル番号とした。ALS抽出木に対応するTLS抽出木、組合せ抽出木にも同じ番号をつけてそれぞれ別の線で樹高の推移を示した。比較本数は平坦地プロットでは349本、緩傾斜プロットでは421本、急傾斜プロットでは288本である。平坦地プロットと緩傾斜プロットでは、組合せ抽出木の樹高は全体的に樹高順に推移していたが、緩傾斜プロットでは、組合せ抽出木の樹高がALS抽出木より高く推定された。急傾斜プロットでは、組合せ抽出木とALS抽出木の樹高値に誤差が大きい立木が多かった。これはTLSデータからDEMを作成するためのデータが欠落していることが原因であった(図-12)。その部分は、TLS計測を行った際に、レーザパルスが手前の立木に遮られたため、直線上の奥に位置する立木の点群が取得できなかった。一方、ドローンのDSMを用いなかったTLSの樹高推定値は、ALSの樹高推定値と比較したところ、どのプロットでも過小の傾向が見られた。また、誤差が大きい立木も多かった。

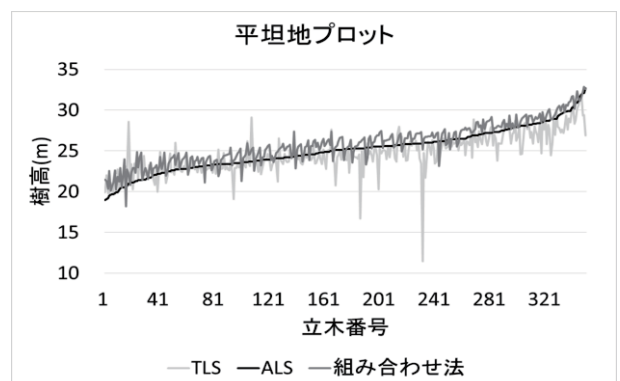


図-9. 平坦地プロットでのTLSとALSと組み合わせ法による単木レベルの樹高比較

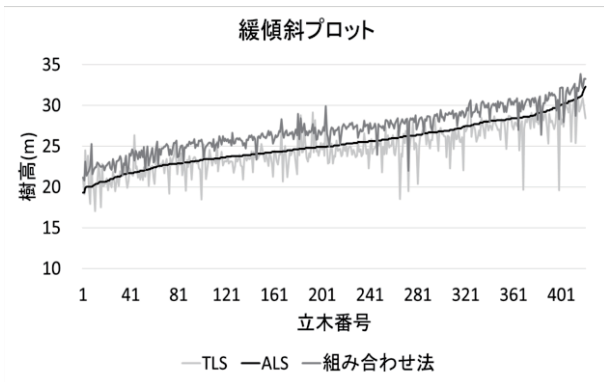


図-10. 緩傾斜プロットでの TLS と ALS と組み合わせ法による単木レベルの樹高比較

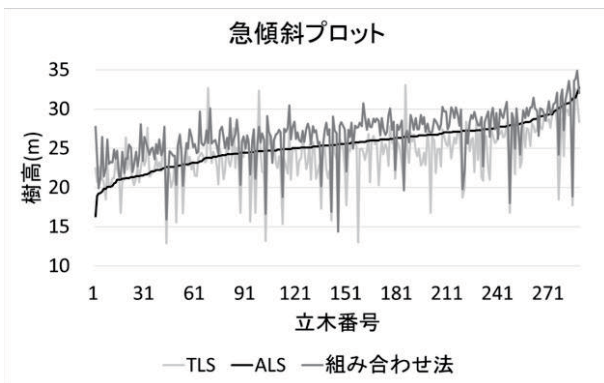


図-11. 急傾斜プロットでの TLS と ALS と組み合わせ法による単木レベルの樹高比較

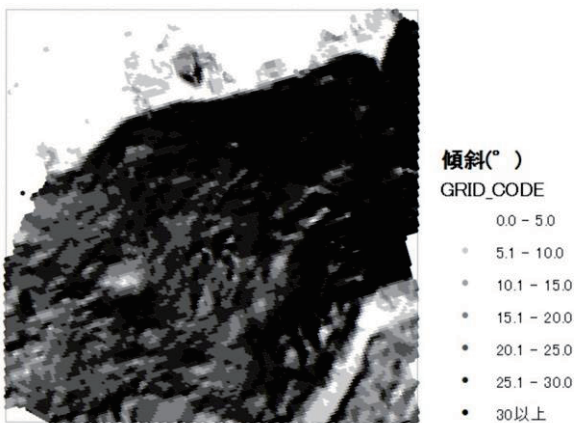


図-12. 急傾斜プロットの DEM 画像
画像上部にデータが欠落しているところが見られる。

5. プロットレベルの樹高比較

プロット全体の TLS, ALS, 組み合わせ法の樹高比較を表-3 に示す。TLS で得た樹高が最小であった。これは計測時に点群が樹頂に届いていなかったためだと考えられる。一方、組み合わせ法の樹高推定値は最大であった。DCHM 補正のために、現地で立木を 10 本選木し、Vertex IV を用いて樹高を計測した。現地実測の平均樹高とそれに対応する ALS 抽出木の平均樹

高を比較した (表-4)。どのプロットにおいても、現地実測の平均樹高が ALS 抽出木の平均樹高より高かった。

表-3. TLS と ALS と組み合わせ法の樹高比較

平坦地プロット		TLS	ALS	組み合わせ法
比較本数		349	349	349
樹高(m)	平均	24.7	25.1	25.9
	最小値	11.4	19.0	18.2
	最大値	31.9	32.7	32.8
	標準偏差	2.4	2.6	2.5
緩傾斜プロット		TLS	ALS	組み合わせ法
比較本数		421	421	421
樹高(m)	平均	24.7	25.3	27.0
	最小値	17.0	19.3	20.8
	最大値	30.9	32.3	33.8
	標準偏差	2.7	2.7	2.6
急傾斜プロット		TLS	ALS	組み合わせ法
比較本数		288	288	288
樹高(m)	平均	24.1	25.4	26.7
	最小値	12.9	16.3	14.4
	最大値	33.0	32.7	34.8
	標準偏差	3.3	2.7	3.1

表-4. ALS と現地実測の樹高比較

		ALS	現地実測
平坦地プロット	比較本数	9	9
	平均樹高(m)	25.1	26.0
緩傾斜プロット	比較本数	10	10
	平均樹高(m)	24.8	26.4
急傾斜プロット	比較本数	9	9
	平均樹高(m)	25.1	26.2

平坦地プロットと急傾斜プロットについては、ALS の未抽出木が一本あるため、比較は9本になった。

IV 考察

1. 抽出率

抽出率について、どのプロットにおいても、点群密度が低下すると、抽出率が低下する傾向があった。急傾斜プロットの抽出率がもっとも低いため、傾斜による点群密度の低下が考えられる。図-13 では、TLS と立木の水平距離が同等の場合、急傾斜でのレーザの進行距離が平坦地より長い。点群密度がレーザの進行距離の増加とともに低下するので、傾斜の増加とともに点群密度が低下した。

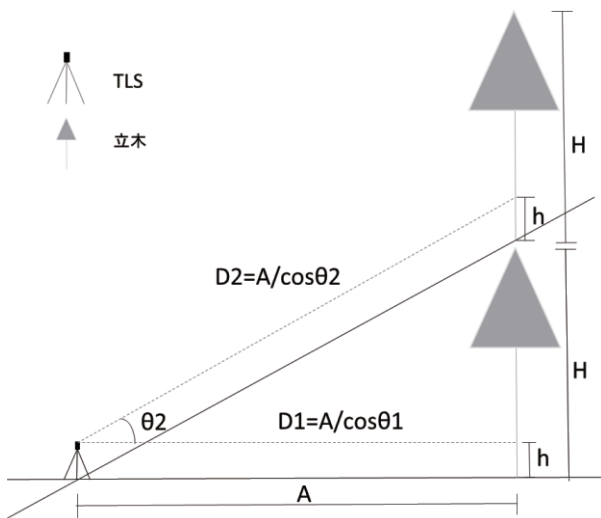


図-13. 急傾斜による点群密度の低下

D1：平坦地でのレーザーの進行距離

D2：急傾斜でのレーザーの進行距離

$\theta 1$ ：平坦地でのレーザーの垂直照射角度
(上例では $\theta 1=0$)

$\theta 2$ ：急傾斜でのレーザーの垂直照射角度

A：TLS と立木の水平距離

H：立木の高さ

h：レーザーが立木に到達する高度

2. DBH

急傾斜になるほど、TLS と組み合わせ法の DBH 推定精度は低下した。また、傾斜あるいは TLS の C 区、D 区の計測配置による点群密度の低下とともに、DBH 推定精度が低下した。本研究で使用した TLS データの解析ソフトウェアの Digital Forest は立木の DBH を推定する際、まず立木の幹に当たっている円状の点群を探索し、厚さ 10cm の円状（リング）を作成する。一つの幹には数多くのリングが作成されるが、地面と認識された点群より 1.3m 上にあるリングだけが抽出され、立木の DBH の推定値となる（4）。しかし、もし点群が不足すると、地面より高さ 1.3m にあるリングが実際より大きかったり小さかったりし、大きな誤差をもたらすこともある。（図-14）。DBH 精度を高めるには、解析に十分な点群密度を保持する必要がある。高い測定精度を求める場合、立木を全方向から計測できるように、TLS の計測配置をすべきである。また、急傾斜地では、TLS の計測配置の間隔を狭くするべきである。

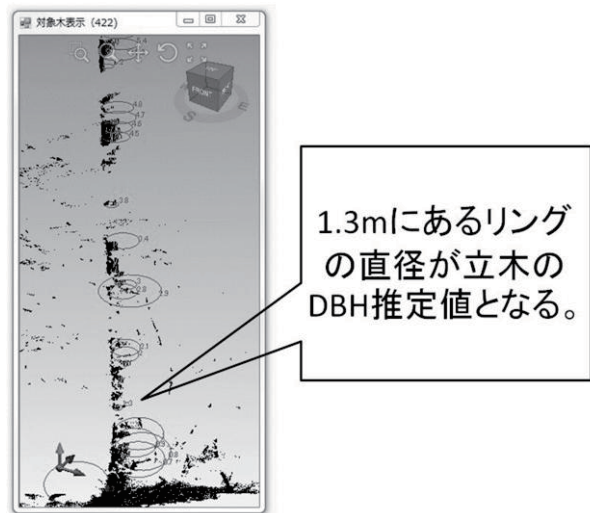


図-14. 点群の不足により生じた DBH の誤差

3. 樹高

TLS データのみの樹高推定だけでは樹頂の情報取得できないこともあり、ALS と比較して過小であった。組み合わせ抽出木の樹高値を現地実測の樹高値を参照して補正することで、ALS の樹高値に近似した。しかし、現地実測の樹高値は対応の ALS の樹高値より高かったため、補正した推定樹高値も ALS の樹高値より高かった。誤差の原因として、二つあげられる。一つは測定年の差異である。TLS 計測と ALS 計測に 3 年の差異があり、立木の樹高がその間高くなったことが考えられる。もう一つは現地実測の精度によると考えられる。

まとめると、組み合わせ法は以下の精度が得られた。立木本数では、9 割以上の抽出率が得られた。DBH では、A 区と B 区のように十分な点群密度が得られる場合には RMSE が 2cm 以下の測定精度が得られた。樹高では、ALS に近い精度が得られた。したがって、TLS とドローンの組み合わせ法を用いることで、単木レベルの間伐計画作成に十分貢献できると考える。

引用文献

- (1) 張桂安・井辻康大・市川栞・加藤正人 (2016) 信州大学構内演習林における高密度複層林への地上レーザーの適用. 日本森林学会第 127 回大会セッション ID: P1-035
- (2) FARO 社 (2013) FARO Laser Scanner Focus 3D X 330 マニュアル. FARO Technologies, Inc. 123 pp
- (3) 長野県林務部森林づくり推進課治山係 (2013) 地理空間データ製品仕様書長野県森林航空レーザー測量. 28pp
- (4) 中村裕幸 (2013) 地上型レーザーキャナによる森林情報のデジタルドキュメント化. 2013 年度精密工学会秋季大会セッション ID: L20