

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レーザー計測	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される。</u>	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)する</u> 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。

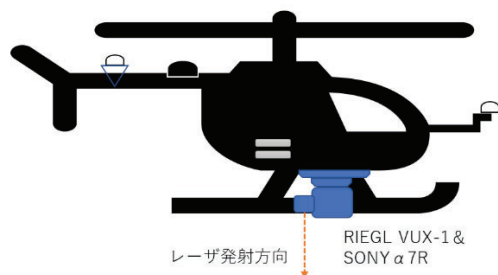
搭載するセンサは総重量が 8 kg強と比較的重く、起伏の多い森林に特有の複雑な気流の中で立木計測に適した仕様を明らかにするための飛行は長時間にわたるため、当社で長年の実績を有するエンジン駆動、上昇気流及び下降気流に強い可変ピッチの UAV を用いた。

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

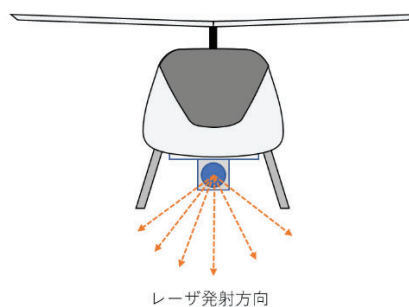


図 2-1.計測システムの搭載概念図

② 計測仕様

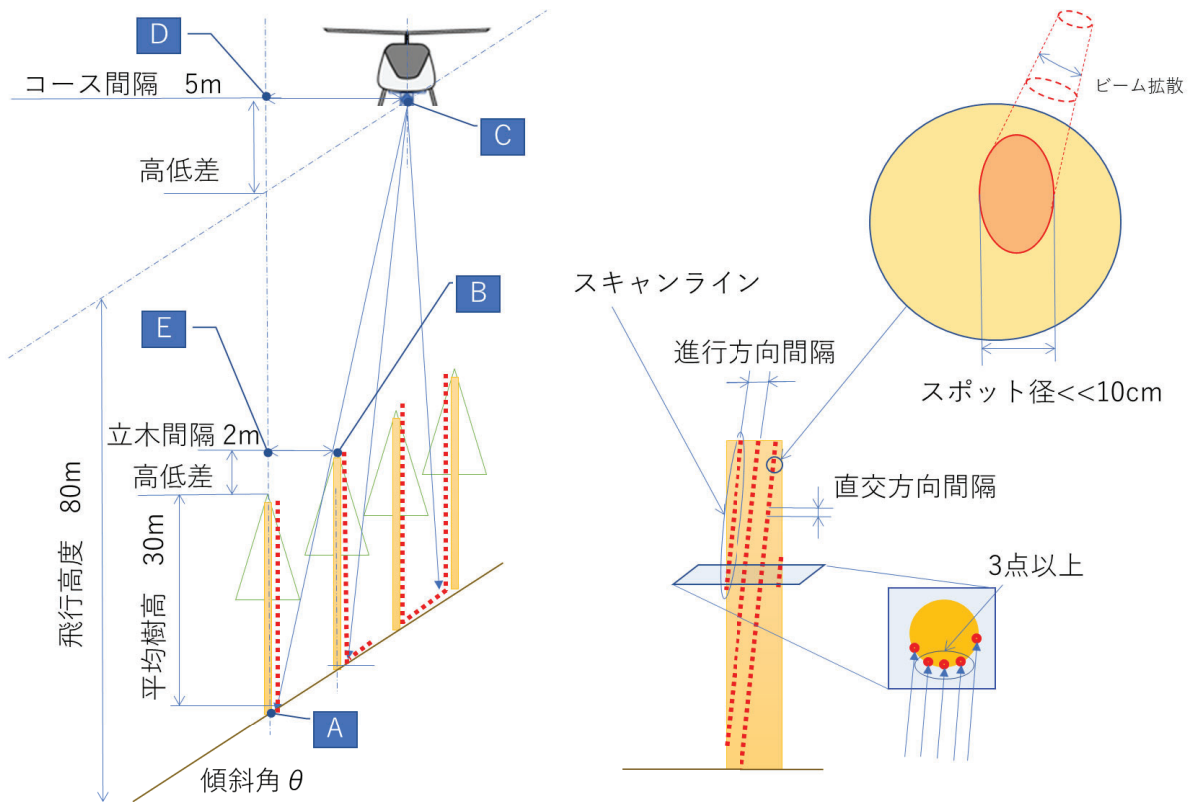
森林環境による計測及び解析の限界を検証するために複数地区を計測するが、まずは森林環境を図 2-2(a)のような単純化したモデルとして、今回の事業での検証に用いた計測仕様を表 2-3 のとおり定めた。

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。

$$\begin{aligned} CD:2 &= AD:AE \\ CD \cdot AE &= 2 \cdot AD \\ CD \cdot (30 + 2 \tan \theta) &= 2(80 + CD \cdot \tan \theta) \\ CD &= 160 / 30 = 5.33 \text{ m} \end{aligned}$$

・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:

一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

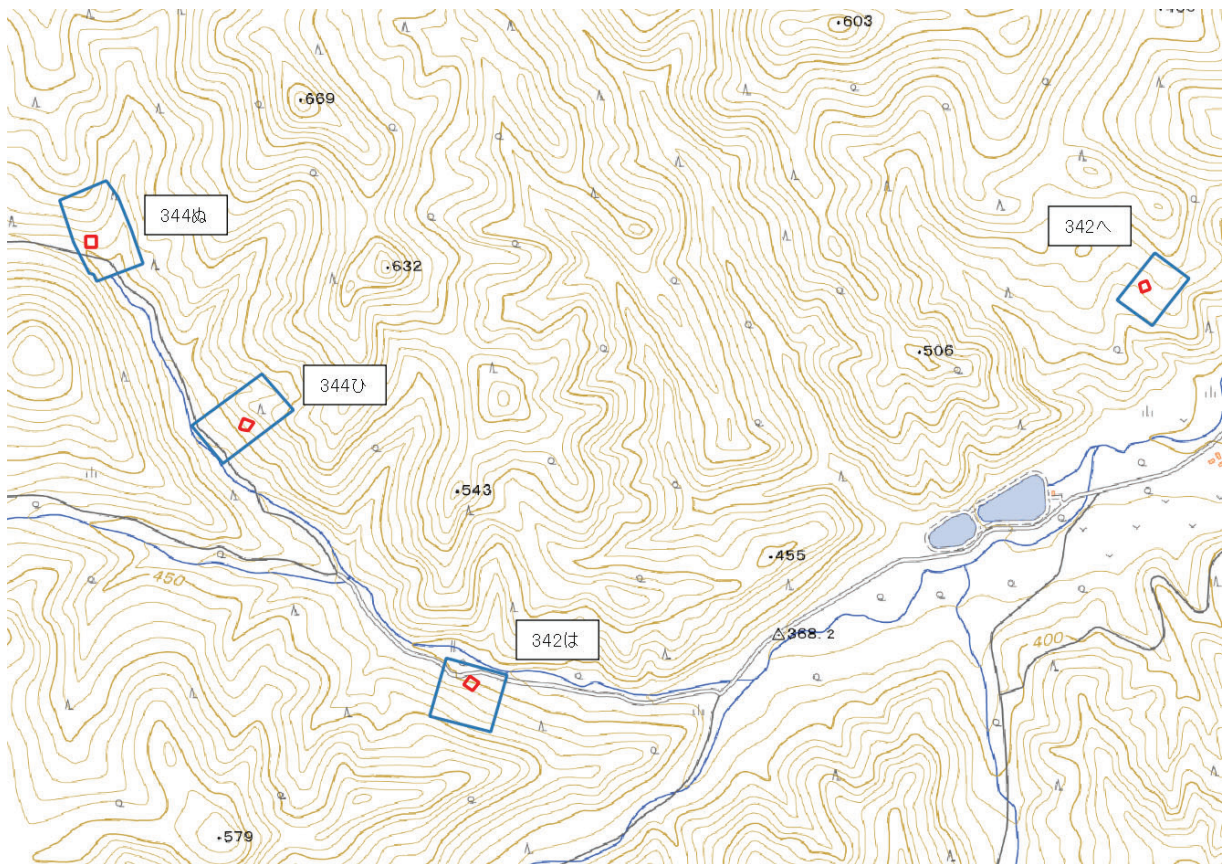
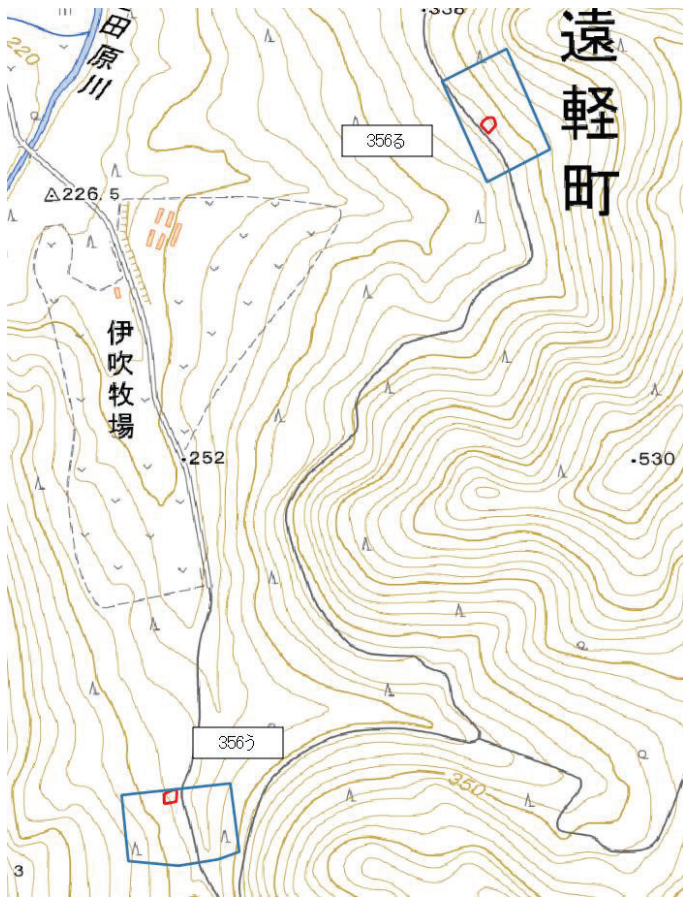


図 2-3. 北海道紋別郡遠軽町生田原

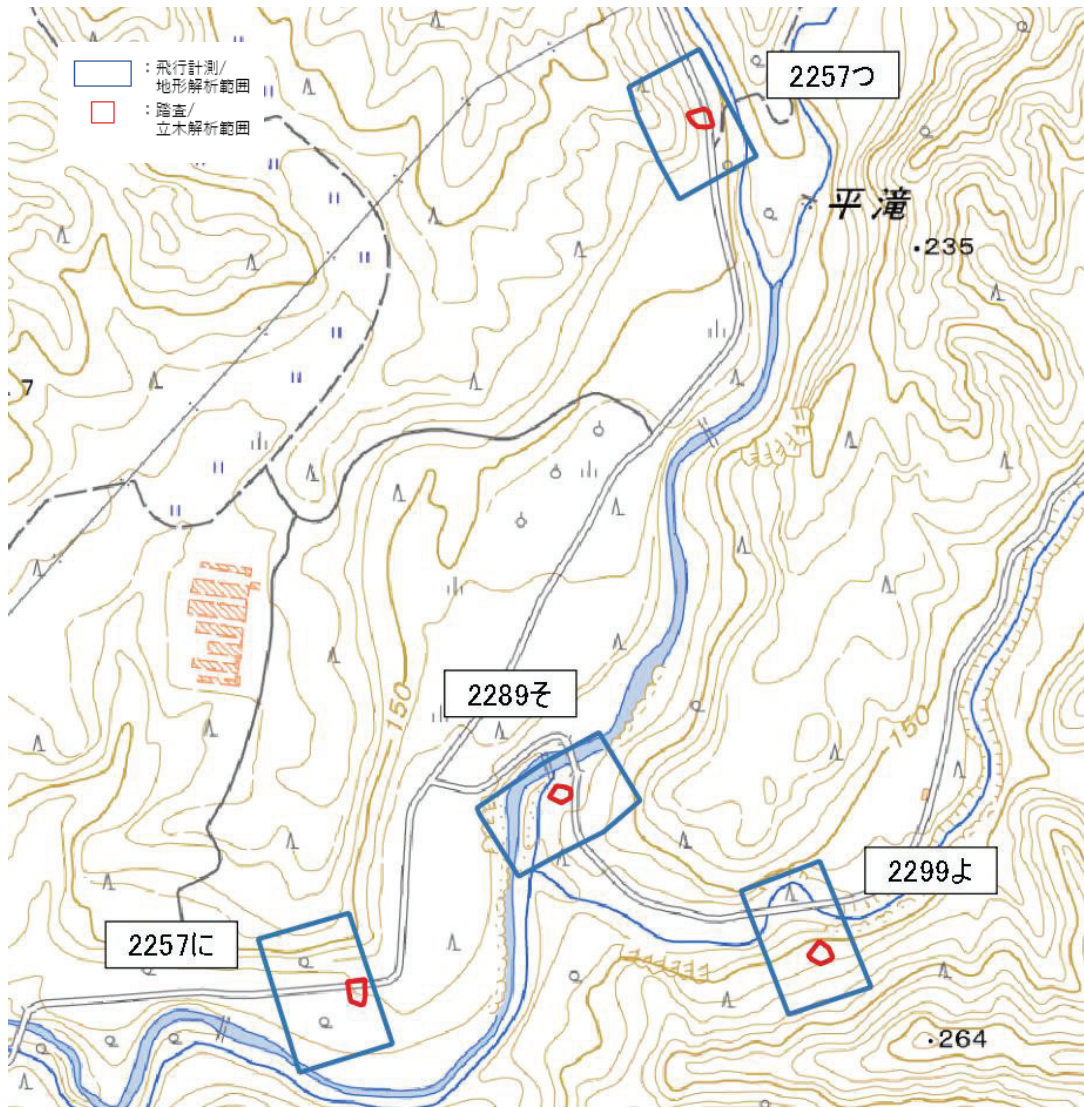


図 2-4. 秋田県大館市早口

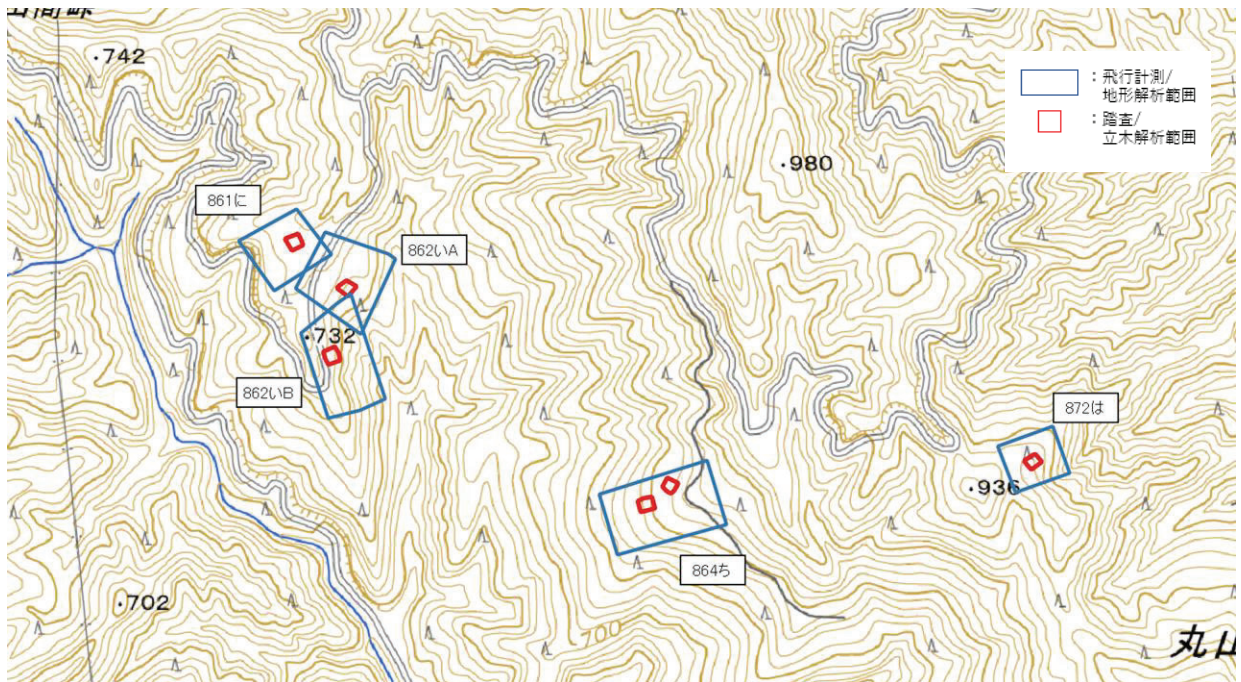


图 2-5. 静岡県浜松市天竜区龍山町瀬尻

(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)

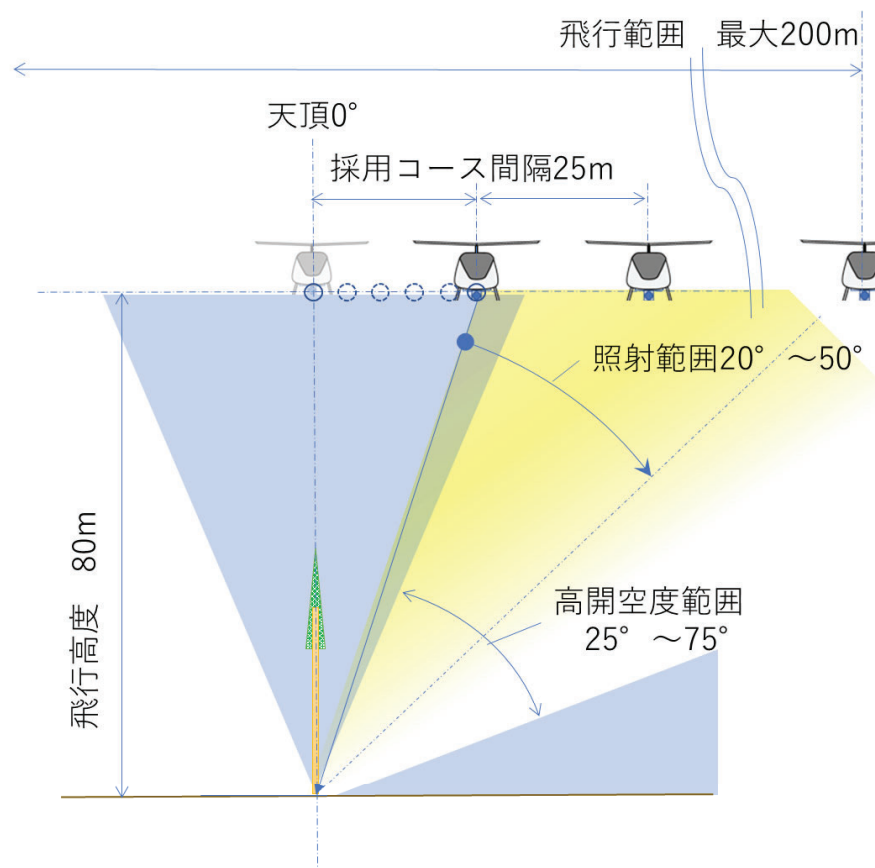


図 2-6. 効率的な計測条件

■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。

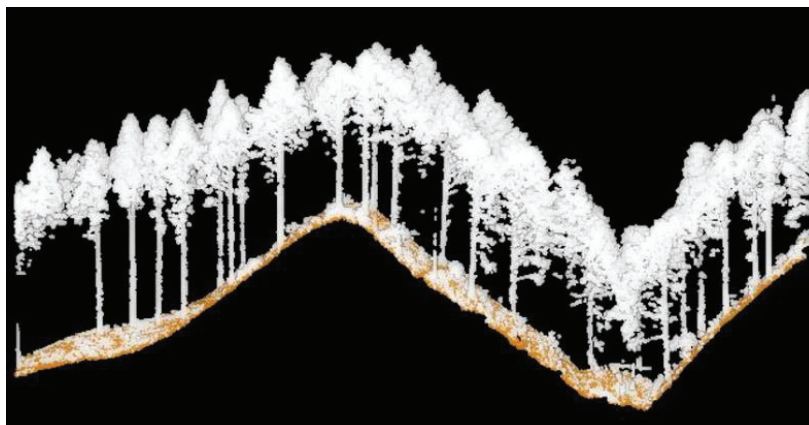


図 2-7. i. 地面データ分類

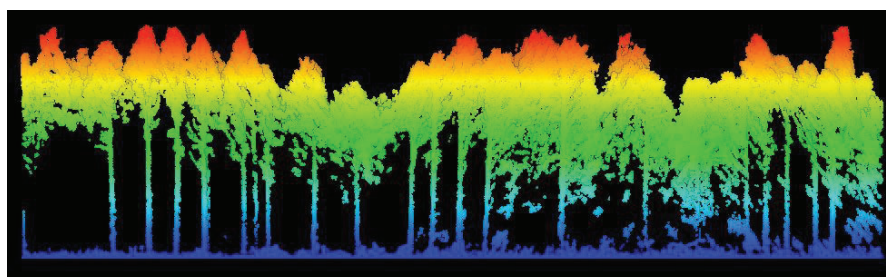


図 2-8. ii. 平面化

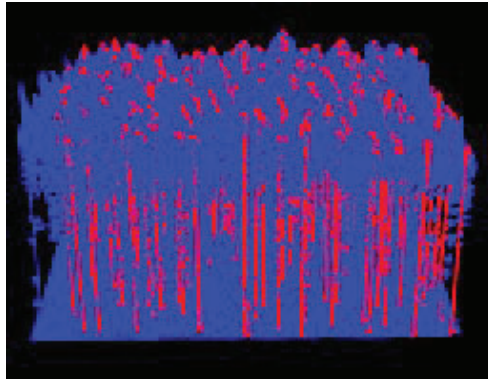


図 2-9. iii. 幹データ分類

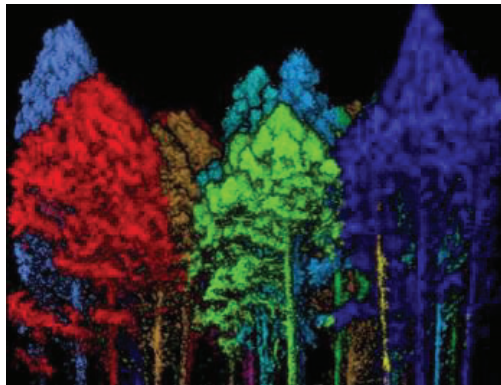


図 2-10. iv. 単木データ分類

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。

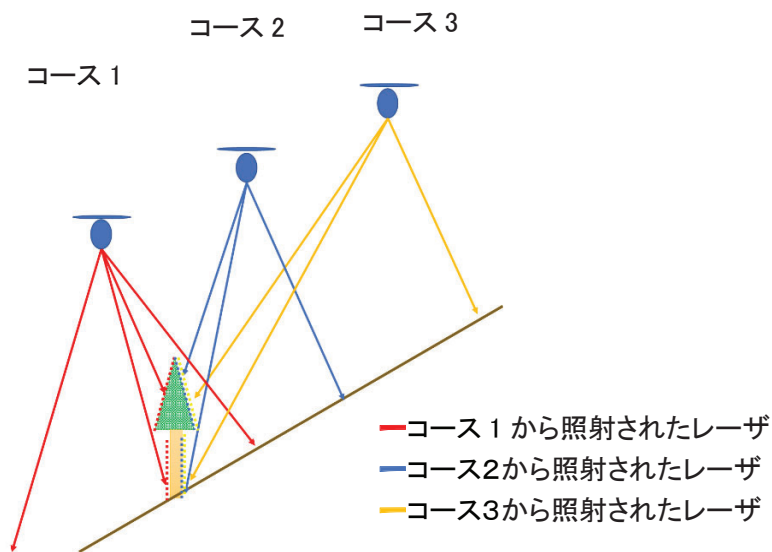
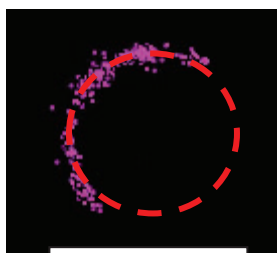


図 2-11. レーザ照射の概念図

表 2-5. DBH 解析に使用した幹曲線式

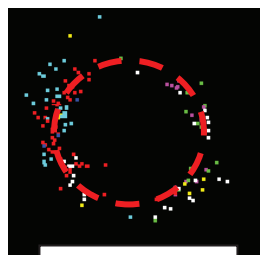
使用した式	
カラマツ	吉田式 (岐阜県スギ) $y=1.4021x^3-2.7861x^2+2.4885x$
トドマツ	吉田式 (岐阜県スギ) $y=1.4021x^3-2.7861x^2+2.4885x$
秋田スギ	吉田式 (岐阜県スギ) $y=1.4021x^3-2.7861x^2+2.4885x$
天竜スギ	立木 15 本のレーザ計測結果から導出した幹曲線式(*) $y=1.2436x^3-2.6203x^2+2.4395x$
ヒノキ	立木 15 本のレーザ計測結果から導出した幹曲線式(*) $y=1.3911x^3-2.8743x^2+2.5691x$
補足	(*)立木 15 本それぞれ高さ 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。



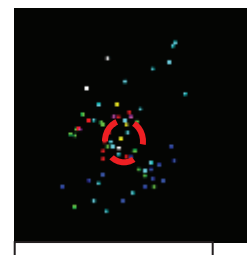
水平方向断面図

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 H₁₂、樹高 14m 以上 18m 未満のものを H₁₆、以下、H₂₀、H₂₄…として表す (図 2-15)。

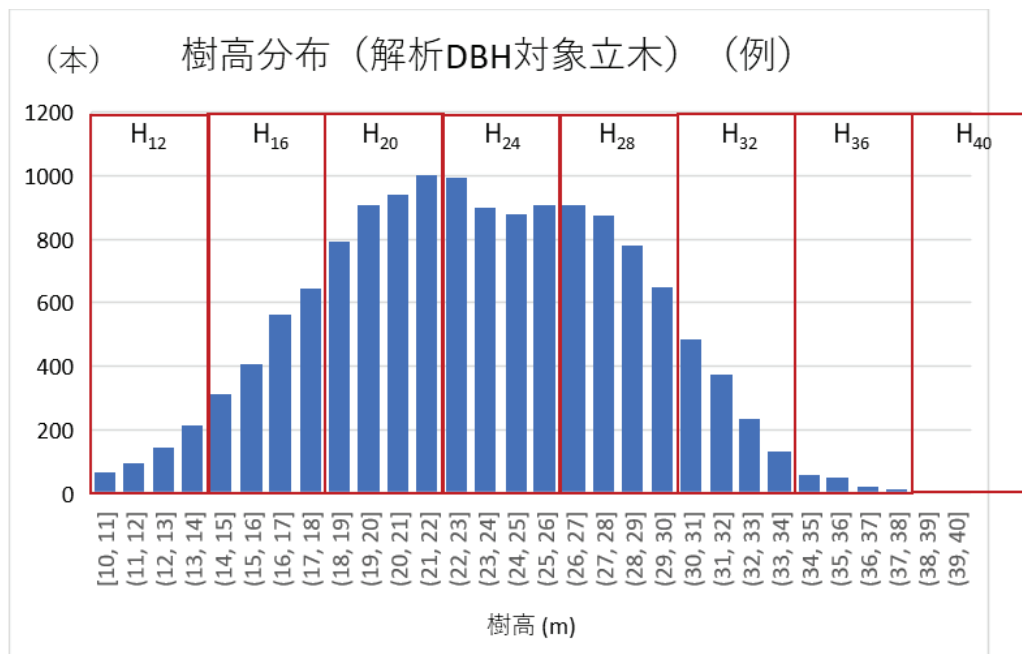


図 2-15. 解析 DBH 対象立木の樹高分布と立木グループ (例)

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。H₁₂ の平均解析 DBH を D₁₂、H₁₆ の平均解析 DBH を D₁₆、以下、D₂₀、D₂₄…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、以下のようになる (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 = $\text{ceil}(19.5 / 4, 0) * 4 = 20 \dots H_{20}$

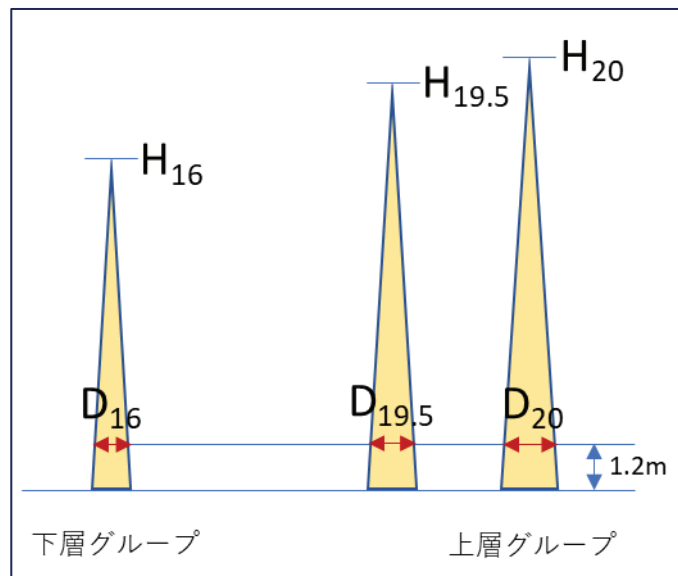


図 2-16. 下層グループと上層グループとの関係 (イメージ)

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 : H_8 (上層グループ : H_{44}) が存在しないため、 D_8 (あるいは D_{44}) 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います。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 D_8 や D_{44}) 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)

$$(\text{補正後 DBH})_i =$$

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

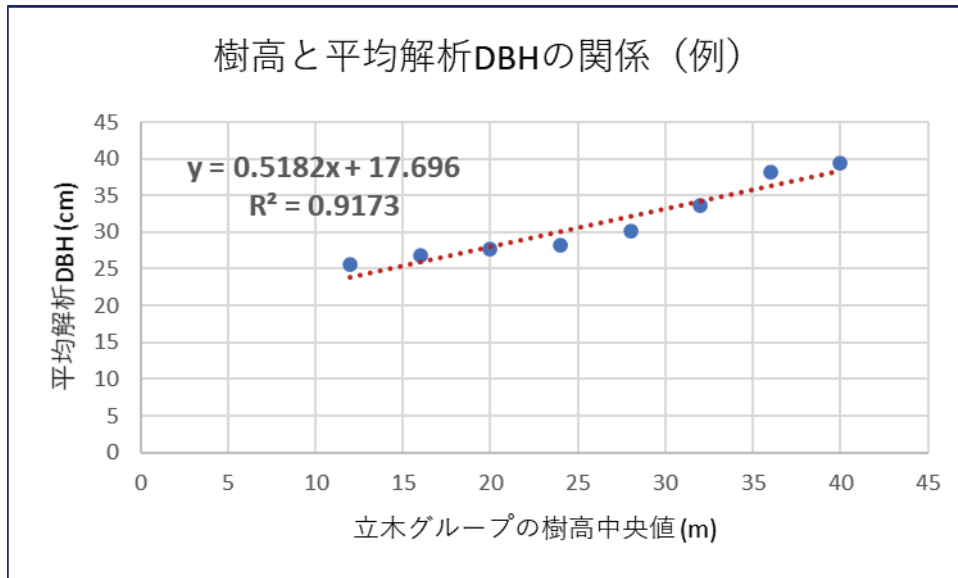


図 2-17. 立木グループの樹高中央値と平均解析 DBH の相関式 (例)

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。