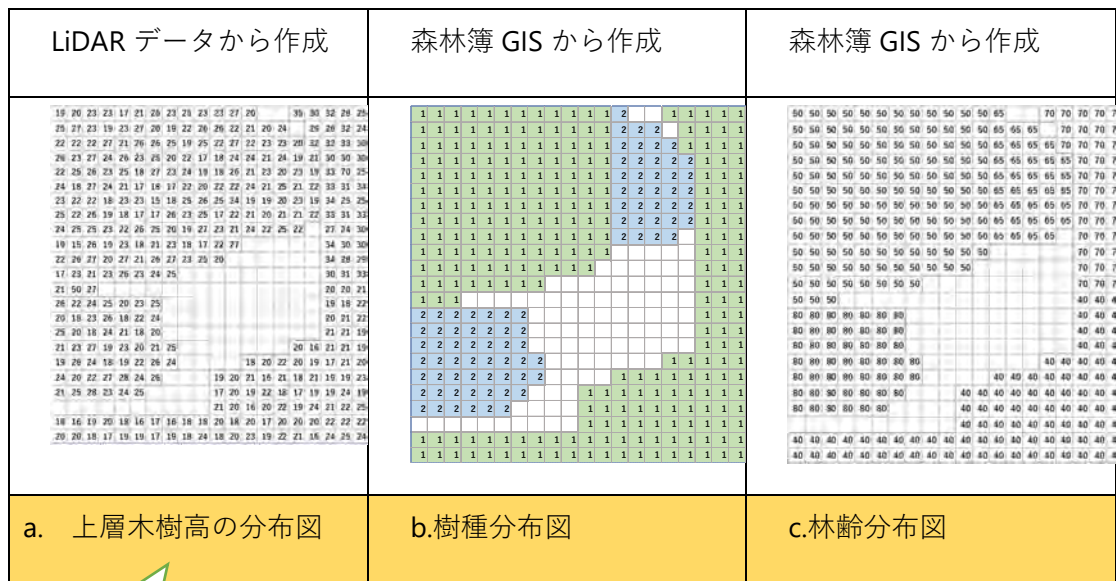




① 方法論を検討

② LiDAR 計測点密度 1 点/m² データの利用

樹種別の地位指数曲線を

適用

③ LiDAR 計測データを使った地位指数曲線の作成を検討

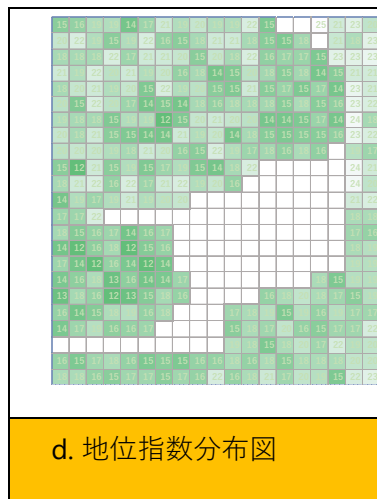


図 3 地位指数分布図作成のながれ

本手法では各 a、b、c それぞれの分布図、地位指数曲線の作成が必要になり、a. 上層木平均樹高分布図については航空 LiDAR データで得られる高さ情報から、b. 樹種分布図と c. 林齢分布図は森林簿 GIS ポリゴンから作成する。地位指数曲線の成長モデル式及び係数については、都道府県が既に作成している式と係数を使うか、LiDAR 計測データの高さ情報をサンプリングして新規に作成する方法を想定した。

上層木平均樹高分布図については①方法論検討に加えて、全国的に計測面積が多い低密度計測データが使えるか（②LiDAR 計測点密度 1 点/m² データの利用可能性）を検討するとともに、地位指数曲線に関しては、新規に作成したい自治体向けに③③ LiDAR 計測データを使った地位指数曲線の作成を検討した。

各検討項目について、①については徳島県における実証調査、②については茨城県における実証調査、③については徳島県および茨城県の実証調査にて分析した（図 4）。加えて新潟県については地域性の検討を目的として調査した。

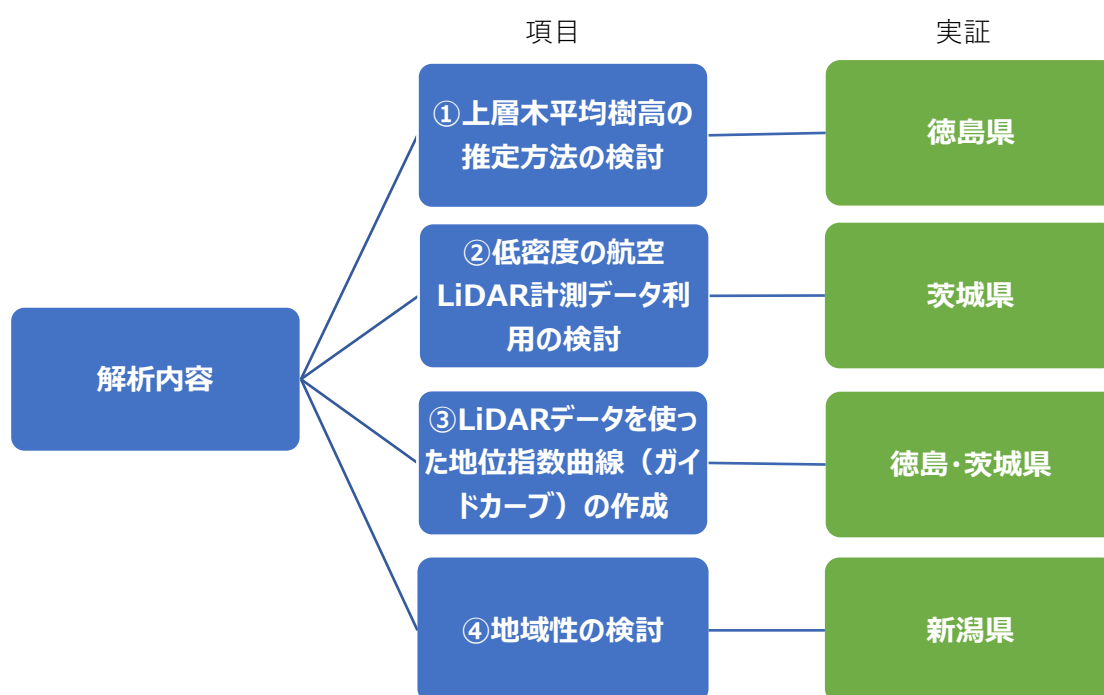


図 4 本事業における解析項目および実証調査サイト

2.3.2.2. 実証サイトの概要

本業務における新しい調査手法の実証にあたり、実施段階での汎用性の確保のため、徳島県および茨城県を対象とした。また、新潟県については地域性の検討を目的として実証サイトとして選択した。

徳島県と茨城県の実証調査の対象面積は各県につき 100～200km² とした。実証県の選定に際しての具体的な条件は、以下 2 点である。

- ・ 地形および樹高情報を得るための航空計測データ計測成果について、複数の計測点密度による比較ができること

- ・現行で運用されている森林簿および森林計画図が標準仕様と異なること

調査手法の実証に際し、表 5 に示したとおり、実証都道府県のデータを収集・準備した。

表 5 収集資料一覧

項番	項目	形式
1	徳島県 森林計画図データ	Shape
2	徳島県 森林簿データ	CSV
3	徳島県 航空レーザ計測成果	---
4	茨城県 森林計画図データ	Shape
5	茨城県 森林簿データ	CSV
6	茨城県 航空レーザ計測成果	---
7	新潟県 森林計画図データ	Shape
8	新潟県 森林簿データ	CSV
9	新潟県 航空レーザ計測成果	---

各実証サイトの範囲と LiDAR 計測の撮影状況を以下に示す。

(1) 徳島県

徳島県では那賀町の東部において 2019 年および 2020 年に照射密度 4 点/m² の航空 LiDAR 計測を実施しており、当該業務成果を用いて実証調査を行った。航空 LiDAR 計測データの整備範囲を示す（図 5）。



図 5 徳島県那賀町における航空 LiDAR 計測範囲(約 183 km²)

なお、徳島県実証サイトでは、上層木樹高方法論の検討のため、樹高計測および現地概況確認調査を 2021 年 11 月および 2022 年 1 月に実施した。

(2) 茨城県

茨城県では大子町において 2018 年に照射密度 10 点/m² の航空 LiDAR 計測を実施している。また同範囲では、2013 年に国土交通省による 1 点/m² の航空 LiDAR 計測がなされており、これらを用い実証調査を行った。航空 LiDAR 計測データの整備範囲を示す（図 6）。

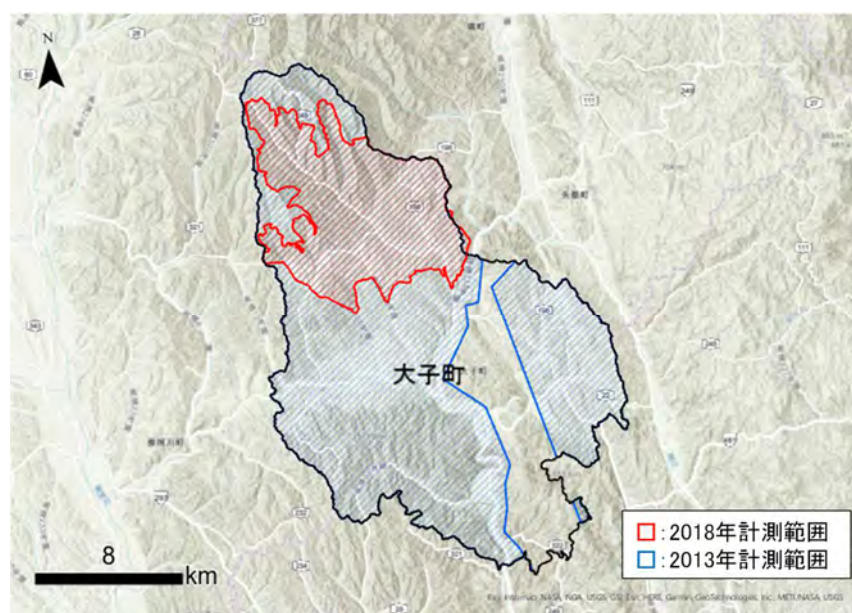


図 6 茨城県大子町における航空 LiDAR 計測範囲(約 280km²)

(3) 新潟県

新潟県では新潟市および村上市の一部において 2020 年に照射密度 4 点/m² の航空 LiDAR 計測を実施しており、日本海と隣接する地区であることから当該業務成果を用い、試行調査を行った。航空 LiDAR 計測データの整備範囲を示す（図 7）。



図 7 新潟県における航空 LiDAR 計測範囲(約 230km²)

2.3.2.3. 航空機 LiDAR データを用いた上層木平均樹高の推定方法の検討

上層木平均樹高は上層木のみの樹高を平均した値である。現地調査で上層木平均樹高を算出する場合は、地上で毎木調査して単木樹高を得たのちに上層木を抽出し平均する。航空機 LiDAR データから上層木平均樹高を計算する場合、DCHM から単木の樹高を抽出することは可能ではあるが、樹頂点を抽出せずとも直接的に上層木の樹高または樹高に近いデータが得られる。この DCHM データそのものを活用することが効率的かつ容易であると考えられる。

DCHM から直接的に上層木平均樹高を算出する方法として、最大値を使う方法やパーセンタイル値（データを昇順で並べ替え小さいほうから数えて任意の％に位置する値）を使う方法があるが、本事業では GIS ソフトで容易に作業ができる最大値を使う方法を検討することとした。

上層木平均樹高の推定方法の検討においては、図 8 に示した 2 つの方法 A. DCHM から抽出された樹頂点樹高、および B. DCHM から得られた最大値それぞれから推定した上層木平均樹高の精度を比較し、DCHM 最大値による方法の利用可能性について徳島県実証サイトを対象に検討した。

各 A と B の手法で上層木平均樹高を推定する作業手順を以下に示す。

A. 樹頂点法

STEP1：DCHM から局所最大値抽出法といった計算プロセスを経て対象エリア全域の樹頂点を全部抽出し樹高ポイントデータを作成（徳島県実証サイトでは既に作成済みの樹頂点の樹高データを用いた）

STEP2：メッシュ内で上層木を抽出して樹高を平均

B. DCHM 最大法

STEP1：DCHM から一定区画内の最大値を抽出して上層木平均樹高とする

A の方法での STEP1 は作業手順が多く技術を要し、また単木ポイントデータでの作業となり作業に時間を要する。また単木レベルの解析となり、照射密度 4 点/m² 以上の LiDAR 計測データ利用が必要となる。

B の方法は、計算プロセスは容易でデータ処理時間も A の方法よりも短時間で済むが、メッシュ内の最大値を抽出するため、上層木平均樹高が過大になりやすい傾向がある。

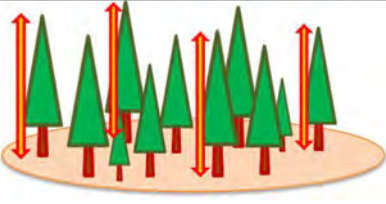
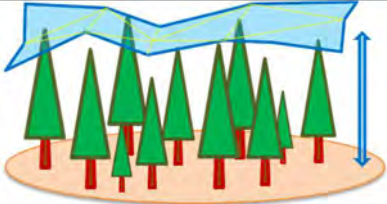
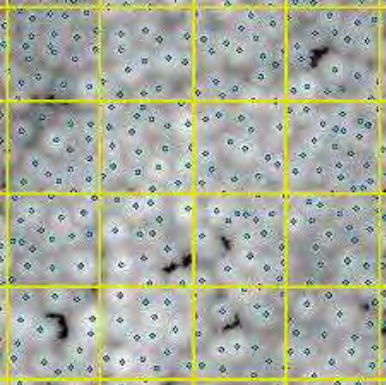
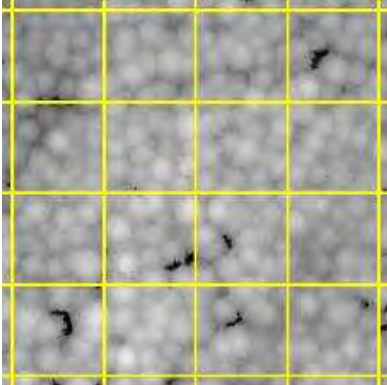
A. 樹頂点法	B. DCHM 最大値法
	
	
20m メッシュ：黄色線 樹頂点：青点 DCHM 画像：白が樹高が高く、黒が低い	
樹頂点位置の DCHM の値のうち上層木を選び 20m メッシュ単位で平均	20m メッシュごとに最大値を取得
メリット：より真値に近い上層木平均樹高の取得が期待できる デメリット：データの処理に技術と時間を要する	メリット：データの処理が容易 デメリット：メッシュ内の最大値を抽出するため、上層木平均樹高ではなく最大樹高をとりやすい傾向がある

図 8 方法論の検討① 樹高推定の 2 つの方法

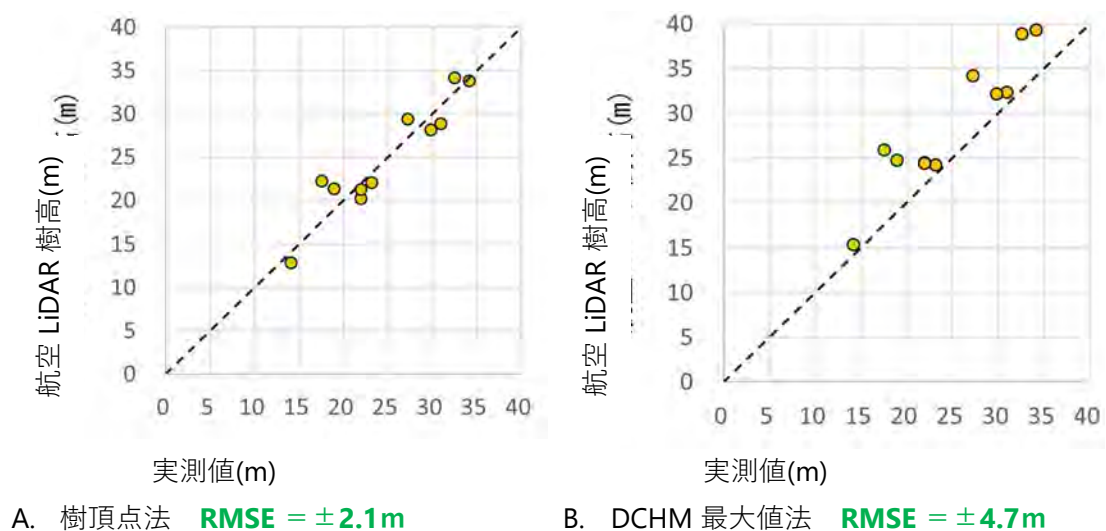


図 9 樹頂点と DCHM 最大値法による上層木平均樹高と実測値との比較

方法論の比較には徳島県実証サイトのデータを使用した。20mメッシュで計算した A. 樹頂点法と B. DCHM 最大値法による各上層木平均樹高と、現地での標本木樹高計測値と比較した結果を図 9 に示す。A. 樹頂点法を使った手法に対して、B. DCHM 最大値法は過大傾向を示しており RMSE も 4.7 m と大きい。また、調査地点によっては 10m 近い差がある箇所もあった。

ここで、A と B 法の両者のメリットとデメリットを合わせた方法として、20mメッシュをさらに細分化して各メッシュの最大値を抽出したうえで、20mメッシュで平均するという方法も加えて方法論を比較した（図 10）。検討では 5m メッシュに細分化し、各細分化メッシュの最大値を抽出して、20m メッシュで平均した。

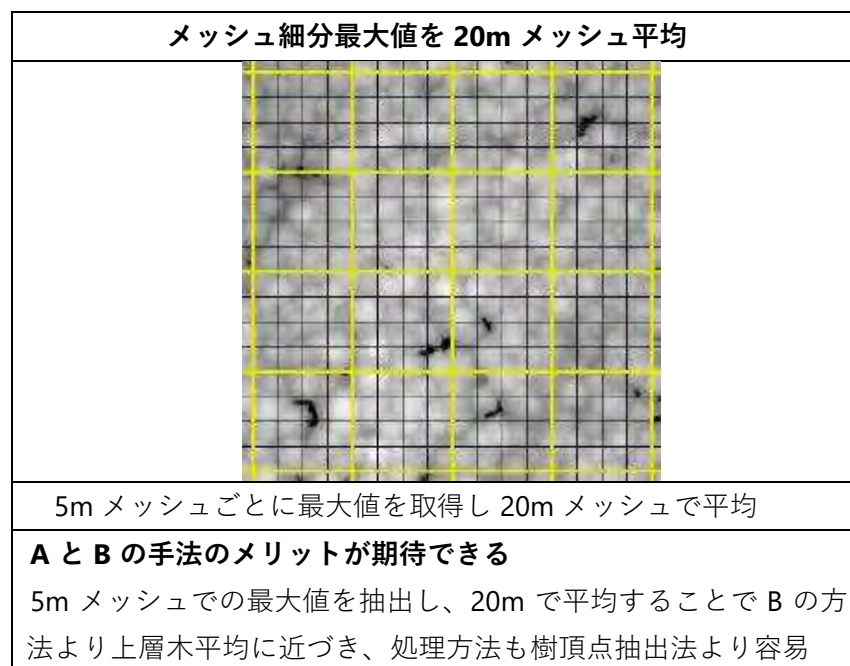
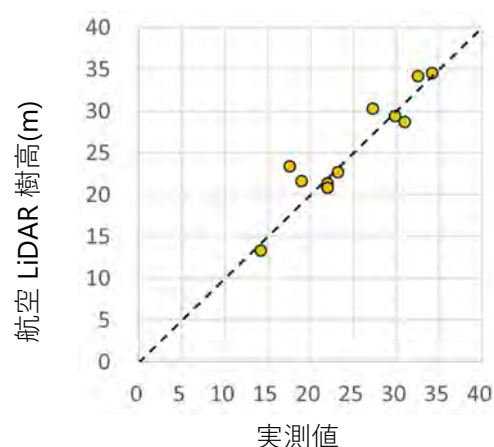


図 10 方法論の検討① 高精度かつ容易な上層木平均樹高の推定方法の検討



RMSE = ±2.4m

図 11 現地調査樹高と細分化メッシュ最大値の平均による LiDAR 計測樹高の比較

その結果、DCHM5m メッシュ最大値を 20m メッシュ平均した値は、実測値に対して $RMSE = \pm 2.4 \text{ m}$ と A. 樹頂点手法の $RMSE = \pm 2.1 \text{ m}$ と同程度の精度が得られた。また、一部過大な地点はあるが、全体的な過大傾向はみられなかった。この結果から、20m メッシュ範囲内でいくつかの細分化メッシュを設置したうえでメッシュ内の最大値を抽出し、それを 20m メッシュで平均する手法を適用することとした。

次に細分化のメッシュサイズについて検討した。地位指数算出に用いる上層木樹高は、1ha の林分当たり樹高の上位 100 本の値を用いることから、通常の毎木調査により得られる樹高とは異なる。そこで、樹頂点から得られる樹高は上層木平均樹高の推定精度が高かったことから（図 9）、樹頂点の樹高を正として上層木平均樹高の評価を行った。評価単位が 20m メッシュであるため、1ha の林分当たり樹高の上位 100 本の定義から、20m メッシュ内の上位 4 本の LiDAR 単木樹高を抽出し、正のデータとした。これに対して、先の解析で利用した 5m メッシュ、10m メッシュ、20m メッシュサイズから得られる上層木平均樹高を算出し、3 者を比較した（図 12）。

- 5m メッシュ (20m メッシュ 16 分割)
- 10m メッシュ (20m メッシュ 4 分割)
- 20m メッシュ

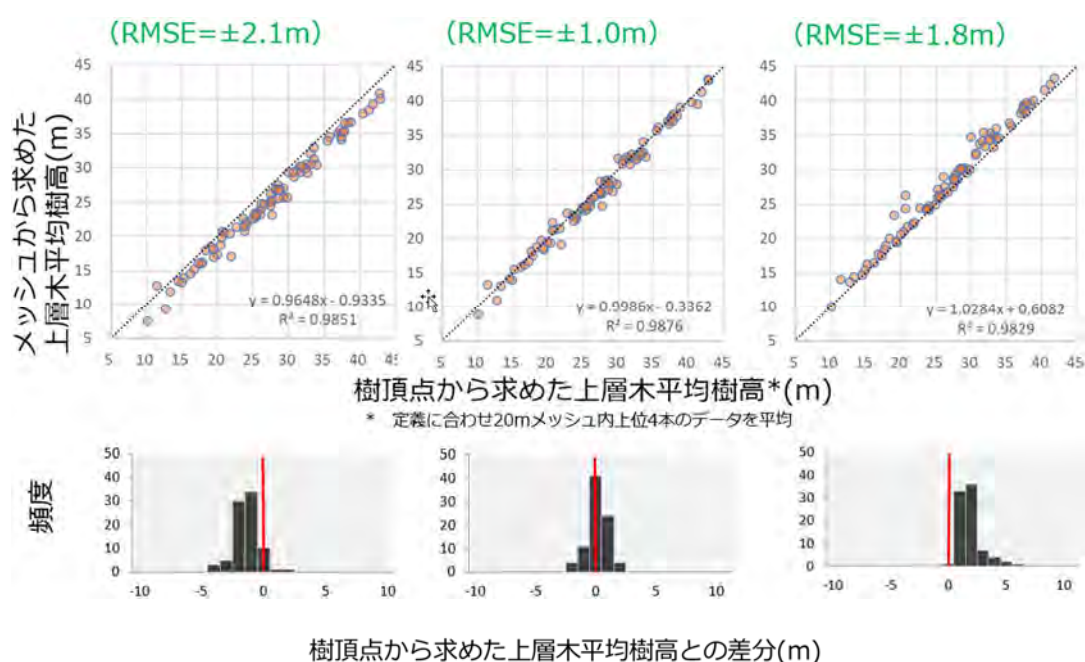


図 12 各手法で算出した上層木樹高の精度評価結果

上層木樹高の比較の結果、10m メッシュ最大値抽出が地位指数算出における上層木樹高として最適であった。この結果は、先に述べた上層木樹高の定義である 1ha に 100 本の値、10m 四方であれば 1 本に相当し、定義に一致したメッシュサイズと考えられる。

以上の結果から、本事業では、航空機 LiDAR データを用いた上層木平均樹高の推定方法として、10m メッシュでまず最大値を抽出し、20m メッシュ内で平均する手法を選択することとした。

2.3.2.4. 低密度の航空機 LiDAR 計測データの利用可能性

航空 LiDAR 計測データの整備状況は各都道府県によって異なり、地域によってはアーカイブデータがレーザ照射点密度 1 点/m² と低密度計測データのみということも想定される。そこで、点密度 1 点/m² のデータの利用可能性を検討するため、点密度 10 点/m² を真値と仮定し、点密度 1 点/m² と 4 点/m² で推定した上層木平均樹高を比較した。

分析の対象とした実証サイトは茨城県の大子町である。上層木平均樹高の算出における航空 LiDAR 計測の照射点密度の影響を考慮するため、2018 年に撮影された照射密度 10 点/m² の航空 LiDAR 計測成果を用い、機械処理的に点を間引くことで異なる照射密度を再現した（図 13）。なお、1 点/m² での仕様で計測されるデータは、1 点/m² 以上となるように実際は計測されているため、本検討材料のデータに比べより点密度が高い場合が多いと推定される。

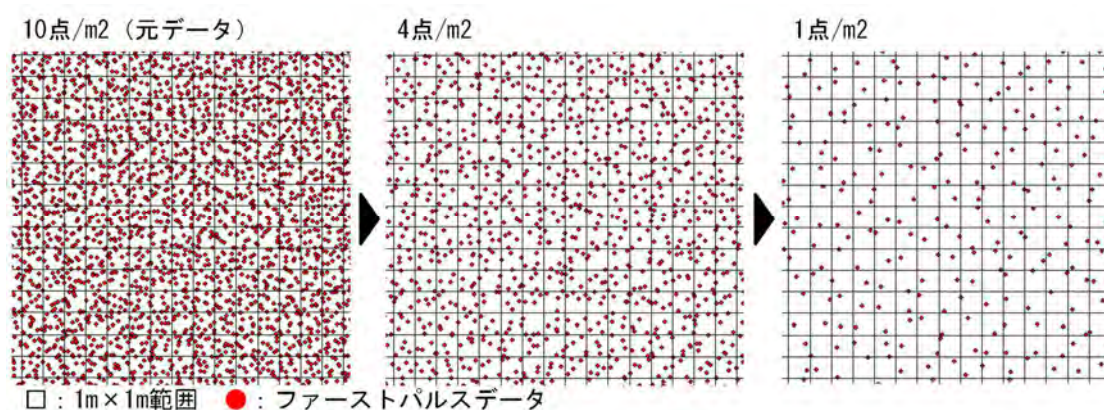


図 13 点密度の間引き処理の概念図

間引き処理は、1m×1m 区画内にレーザ照射が 10 点、4 点、1 点となるようランダムに間引き処理をまず行った。残ったレーザ照射データのうち、ファーストパルスを選択して DCHM を作成、グラウンドデータを選択して DEM を作成した。作成した DCHM および DEM の例を示す（図 14、図 15）。

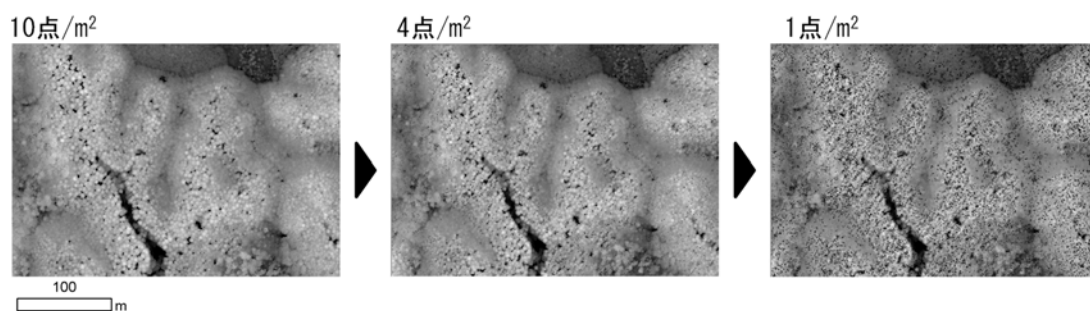


図 14 点密度の間引き処理による DCHM の変化

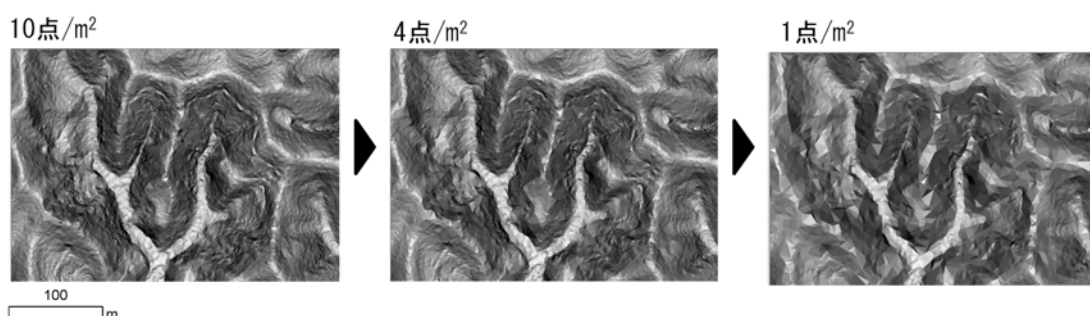


図 15 点密度の間引き処理による DEM の変化

点密度の間引き処理による DCHM の変化として、10 点/m² や 4 点/m² では確認できた単木の樹冠が 1 点/m² では視認が困難となった。また DEM の変化としては 1 点/m² は作業道が確認できなくなるほか、尾根や谷地形の形状が一部劣化することが確認できた。

しかし、上層木樹高の比較においては、点密度を間引いて算出した場合においても 10 点/m² で算出した上層木樹高から大きな差は生じなかった（図 16）。

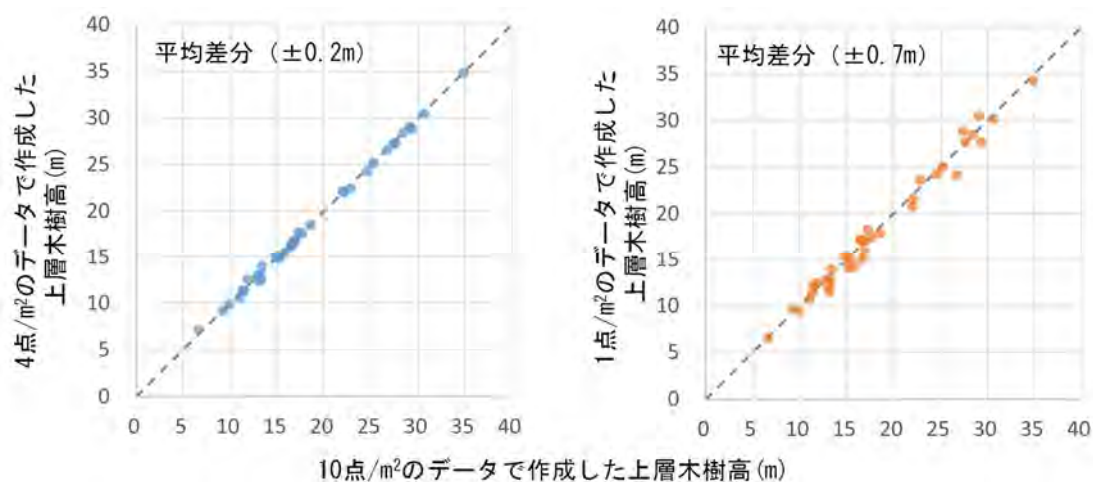


図 16 点密度の間引きによる上層木樹高の精度変化（左：4 点/m²、右：1 点/m²）

上述の結果から、航空 LiDAR 計測の照射点密度が 1 点/m² 以上であれば、算出される上層木樹高に大きな差はなく、地位指数の算出において使用できるとの結論を得た。補足として、1 点/m² 程度の航空 LiDAR 計測成果を使用する際には、一部の地形において樹高の誤差が生じやすいため注釈を設ける（図 17）。

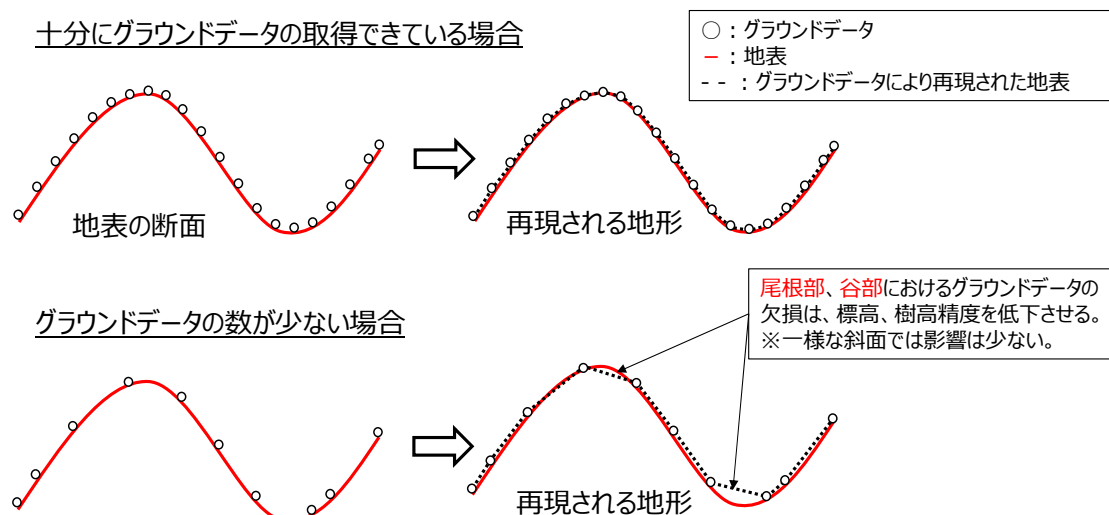


図 17 低密度の航空 LiDAR 計測データを使用する際の、樹高誤差の概念図

点密度が少なくなることによって尾根部や谷部において標高誤差が大きくなりやすく、結果として樹高誤差が生じやすいと考えられる。照射点密度が 10 点/m² の場合と 1 点/m² の場合における標高差分を示す（図 18）。

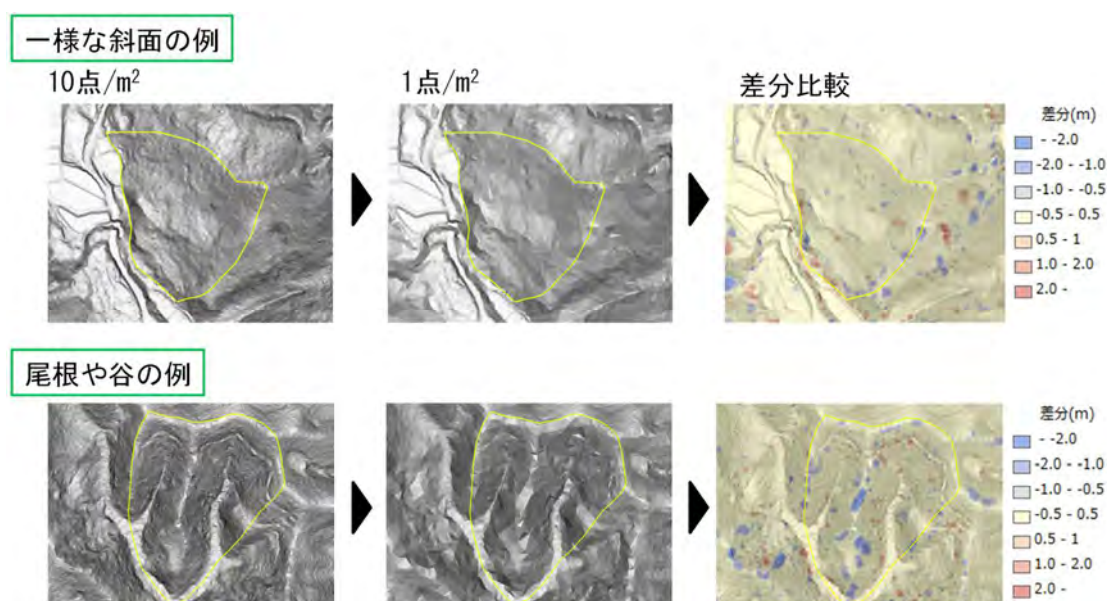


図 18 照射点密度が 10 点/m² の場合と 1 点/m² の場合における標高差分

標高差分の検証では、傾斜が一様な斜面においては、点密度による差は生じにくい、尾根部や谷部、また作業道上においては、誤差が生じやすい事が確認された。

以上の結果から、点密度 1 点/m² の航空機 LiDAR 計測の場合、4 点/m² よりも尾根や谷といった地形的な誤差が生じやすいため、局所的な生産量の把握には十分ではなく、新規撮影する場合は 4 点/m² を推奨する。

2.3.2.5. 航空機 LiDAR データを使った地位指数曲線作成の検討

都道府県の担当者が自ら地位指数曲線（ガイドカーブ）を作成することを想定し、航空機 LiDAR データを活用して地位指数曲線を作成する方法について検討した。

検討に使用した成長曲線

地位指数のガイドカーブには、一般的に使用される以下 3 種の成長関数について、LiDAR データから取得する上層木平均樹高と森林 GIS から取得する林分情報をもとに最小二乗法によりパラメータをそれぞれ決定し、精度指標として赤池情報量規準（Akaike's Information Criterion; AIC）が最も低いものを選択した。使用した成長関数を以下に示す。

- 上層樹高 = $K \times A^{\exp(-B \times \text{林齢})}$ （ゴンペルツ式）
- 上層樹高 = $K \times (1 - A \times \exp(-B \times \text{林齢}))$ （ミッチャーリッヒ式）
- 上層樹高 = $K \times (1 - \exp(-A \times \text{林齢}))^B$ （リチャーズ式）

ガイドカーブ作成のためのサンプリング

上層木平均樹高については上述で検討した 10m メッシュ最大値を 20m メッシュで平均して求めた値、林齢と樹種については上層木平均樹高の計算で用いた 20m メッシュに森林簿 GIS 情報を付与したものを用いた。なお、森林簿の林齢は、平成 31 年時点の数値であるため航空 LiDAR 計測時点に揃えた。サンプリング地点を抽出する際、20m メッシュデータと森林計画図を GIS 上で重ね合わせ、20m メッシュが小班に完全に含まれるものから選択した（図 19）。

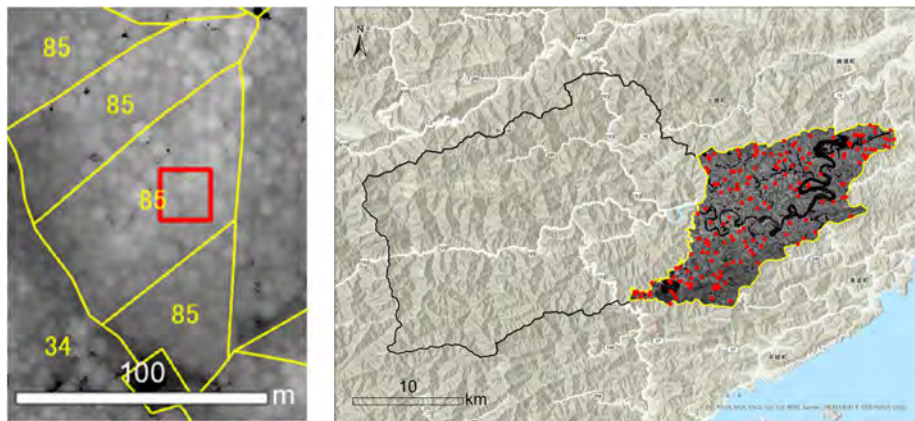


図 19 小班と 20m メッシュの重ね合わせの例（赤い点がサンプリング地点）

サンプリング地点にあたっては、特定の林齢や特定の地域にデータが偏ることを防ぐため、年齢ごとに 10 サンプル、3 年齢級から 20 年齢級までの計 180 サンプルを取得した（図 20）。

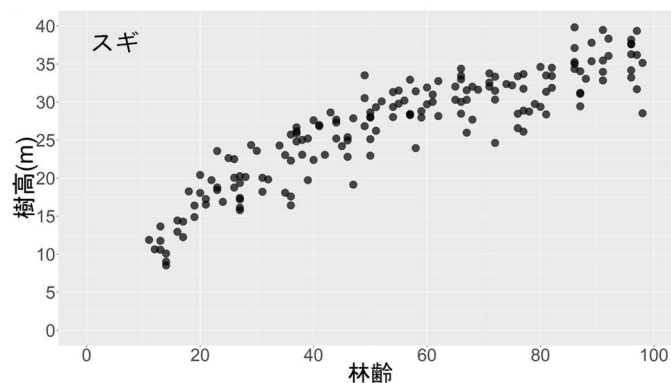


図 20 林齢と上層木樹高の対応したデータセットの例

以上の林齢・樹高サンプルデータセットから、樹種別の地位指数曲線のガイドカーブを作成する。

サンプリングにおける注意点

サンプリング地点の選定について、収穫表調査のようにいくつかの条件を設定したうえでの無作為抽出することが望ましい。例えば、平成 16 年度森林吸収源データ緊急整備事業調査報告書に添付の調査方法マニュアル（[独立行政法人森林総合研究所, 2005]）では、収穫予想表作成を前提とした調査方法として以下のような調査地数値・配分および選定方法が記載されている。

- ✓ 信頼性の高い収穫予想表の作成には相当数のデータが必要
- ✓ 各樹種・地域の種類で、それぞれ 100 地点以上