

令和3年度
リモートセンシング技術等を用いた
森林の機能別調査の手法に関する
調査事業

報 告 書

令和4年3月

林野庁

目次

第1章 事業概要.....	1
1.1. 本業務の目的	1
1.2. 事業の背景と課題.....	1
1.2.1. 森林の機能別調査の状況.....	1
1.2.2. 高精度・高解像度の地位情報の必要性.....	2
1.2.3. LiDAR 計測データを用いた地位推定方法について.....	3
第2章 事業の実施内容.....	4
2.1. 検討委員会の設置・運営	4
2.2. 都道府県の現状調査・整理.....	5
2.2.1. 徳島県の事例	5
2.3. 調査手法の開発・実証.....	9
2.3.1. 前提条件	9
2.3.1.1. 対象者	9
2.3.2. LiDAR データを使った地位指数分布図の作成.....	10
2.3.2.1. 地位指数分布図作成のながれ.....	10
2.3.2.2. 実証サイトの概要	12
(1) 徳島県	13
(2) 茨城県	14
(3) 新潟県	14
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	15
2.3.2.4. 低密度の航空機 LiDAR 計測データの利用可能性.....	20
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.....	23

2.3.2.6.	地域性の比較	25
2.3.3.	実証調査地での開発手法の適用結果	26
2.3.3.1.	実証調査地における地位指数曲線および地位指数分布図	26
2.3.3.2.	徳島県における結果	26
2.3.3.3.	茨城県における結果	36
2.3.3.4.	新潟県における結果	38
2.3.3.5.	実証サイトの比較	41
2.3.4.	まとめ	42
2.3.5.	地位指数分布図の活用例：実務での活用	43
2.4.	調査手法の普及	45
2.4.1.	地位指数分布図作成の手引き	45
2.4.2.	手引きを使った講習会の実施	46
第3章	今後の課題	47
3.1.	上層木平均樹高推定における精緻化	47
3.2.	林齢の不確実性に対する検討	47
3.3.	実証サイトにおけるより詳細な検討	48
第4章	引用文献	49

第1章 事業概要

1.1. 本業務の目的

森林の機能別調査は、地域森林計画において属地的森林の整備目標等を定めるために必要な客観的資料を得ることを目的として都道府県が実施するものであり、森林計画制度の適正な運用を図るための重要な調査である。本事業では、近年データの整備が進んでいる航空機 LiDAR 計測データを活用し、森林の機能別調査のうち、木材等生産機能の評価に必要な地位級等の因子を簡易に求める手法の開発に向けた調査を行うものである。

1.2. 事業の背景と課題

1.2.1. 森林の機能別調査の状況

本事業の調査対象である森林の機能別調査は、「森林の機能別調査実施要領の制定について」（昭和 52 年 1 月 18 日 52 林野計第 532 号林野庁長官から各都道府県あて）により実施要領が定められ、各都道府県において実施されてきた。この実施要領によれば、森林の有する機能は「木材等生産機能」「水源涵養機能」「山地災害防止機能」「快適環境形成機能」「保健・レクリエーション機能」の 5 機能に区分され、各機能と関連性が高いと思われる評価因子について、多次元解析や数量化理論等の統計的手法を用いて数値化し、これを各機能のポテンシャル（機能発揮の可能性の大きさ）として評価区分するものである。

ただし、木材生産機能については、これ以前に全国で実施されていた地位級等林地生産力に関する調査の結果等に基づいて機能の評価区分を行うこととされている。立地級調査は、「立地級調査について」（「地域森林計画及び地域別の森林計画に関する事務の取り扱いの運用について」（平成 12 年 5 月 8 日付 12 林野計第 188 号林野庁長官通知）の付録第 5 号別添）の「第 1 立地級調査要領」（以下「立地級調査要領」）に基づいて行われるもので、森林計画区内の民有林について森林施業の適正化を図るため、当該地域森林計画樹立に際し地位、地利等の立地条件を客観的に把握することを目的として実施される。ここで立地級とは、地位級と地利級を組み合わせで表されるもので、地位級とは主要樹種別の伐期総平均成長量を m^3 単位の等級に区分したもの、地利級は樹種別、現在・将来別に、当該林分における $1m^3$ あたりの立木価格の 1000 円単位の数値、と定義されている。

立地級調査要領によれば、地位級は主林木の平均樹高を直接法及び間接法により求め、地位判定基準図より伐期平均成長量を求めることとなっている。直接法は、現地調査により現地に生育する主林木の平均樹高と林齢から地位級を求めるものである。間接法は該当樹種が現地に存在しない、あるいは幼齢林で直接法を行うことが適当でない場合等に実施するもので、ここで主林木の伐期平均樹高は、上記「立地級調査について」の「第 2 地位指数調査要領」に（以下「地位指数調査要領」）において対象箇所立地条件（気象、標高、地形、地質等の因子）から、数量化理論等の統計的手法により地位指

数（基準林齢（カラマツ 35 年、その他樹種 40 年）における当該樹種の主林木平均樹高）を算出し、これから推定することとされている。

都道府県における実際の地位級に関する調査は、これらの要領が制定された昭和 40-50 年代に集中的に実施され、その成果は森林簿の中では林小班情報と紐づけられて格納されている。調査の実施後 40 年以上が経過し、当時は存在していなかった高齢級林分が増えていること等を踏まえると、必要に応じて新たな情報を効率的に用いて機能別調査の結果を更新することが求められている状況になりつつあるといえる。

1.2.2. 高精度・高解像度の地位情報の必要性

林地の生産力を示す指標として、ある林齢における主林木平均樹高など樹高が尺度として用いられているのは、直径成長と比較して樹高成長が本数密度の影響を受けにくいという性質に基づいている。特に、ある基準林齢における樹高として表現される地位指数は、「上・中・下」等の相対的な基準ではなく、絶対的な評価基準として利用可能なものであり、地位級等の基準情報ともなっている。

一方、都道府県の森林簿に適用されている地位級の情報について、実態としてどのような運用がされているのかについては、都道府県によりかなり差異があると思われる。いくつか公表されている情報等から判断すると、実際に適用されている地位級は、市町村や流域単位などかなりマクロな空間スケールで適用されている場合が多いことがうかがわれる。

そもそも林地生産力は、地質や地形、土壌といった環境要因によって決定づけられると考えられ、例えば尾根部では相対的に生産力が低く、沢筋では高いといった具合に、実際には局所的な空間スケールで差異が大きいことが経験的に知られているが、これまでは利用可能な情報、とくに地形情報の解像度が低く、局所的な地位に関する情報は、利用可能な状態となっていなかった。

我が国の人工林資源が充実し本格的な利用期を迎えている中で、持続的な林業を経営するためには、国土保全及び木材利用の観点から踏まえながら、主伐・再造林適地を判別し、効率的・効果的に森林施業を実施していくことが重要である。市町村森林整備計画の策定や、森林経営管理制度における森林の経済性の判定など、市町村が地域の実情に合わせたきめ細かいゾーニングが必要になってきている。そのためには、林小班～林分スケールでの生産力に関する高精度・高解像度な情報の重要性が高まっている（図 1）。

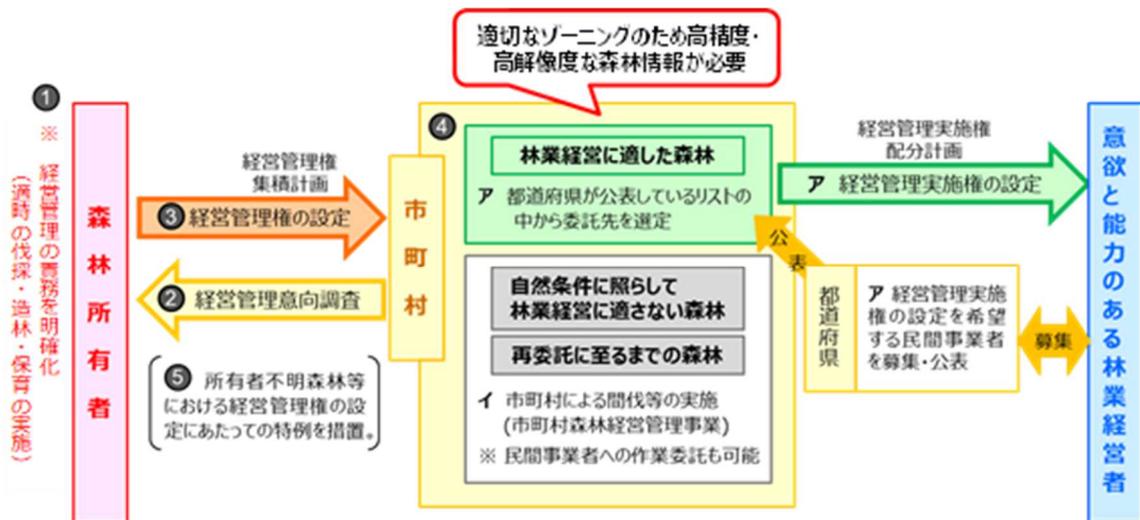


図1 森林経営管理制度における詳細森林情報の必要性

1.2.3. LiDAR 計測データを用いた地位推定方法について

LiDAR 計測データからは、高精度の地表面データ（DEM）と林冠表層データ（DSM）を得ることができ、この差分を取ることによって林冠高（DCHM）を算出することができる（図2）。DCHM は、主林木平均樹高や上層樹高を直接示すものではないが、両者には強い正の相関があると考えられることから、簡易な補正等により DCHM から主林木平均樹高等を推定することが可能である。航空機 LiDAR データを用いて樹高や材積、土地生産力を推定する試みについては、既に様々な研究がある。

航空機等による既存の LiDAR 計測データについては、公益財団法人日本測量調査技術協会の「航空測量データポータルサイト」（<https://sokugikyo.or.jp/laser/>）を見てもわかるように、全国的な整備が進みつつある。しかしながら、計測された年度や計測スペック（照射点密度）については様々であり、これらの計測スペックに違いのある LiDAR データを用いて、地位判定に必要な主林木平均樹高（≒上層樹高）がどの程度の精度で取得可能であるかについて、技術的な整理・評価を行う必要がある。

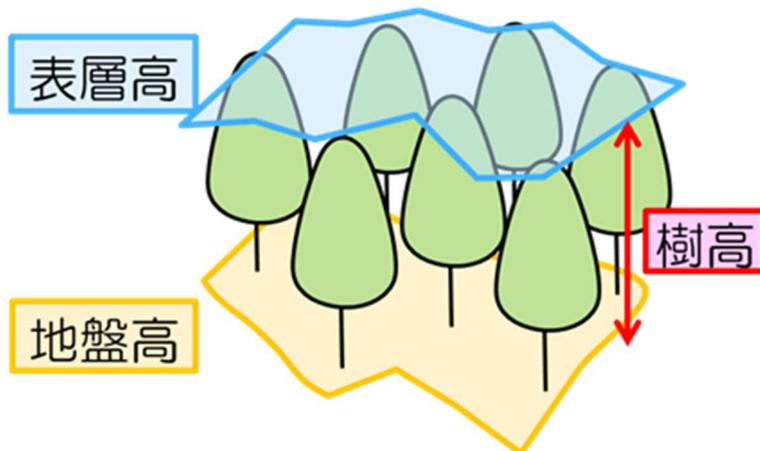


図2 LiDAR 計測データから得られる情報

第2章 事業の実施内容

2.1. 検討委員会の設置・運営

事業の実施に当たっては、検討委員会を設置し、技術的指導や助言を受けるものとする。なお検討委員会の開催スケジュール及び各委員会に置ける検討内容、及び委員は表1及び表2に示すとおりである。

検討委員会の開催にあたり、委員との連絡調整、謝金支払い、資料作成印刷、会場手配等を行った。なお新型コロナウイルスの感染状況等に応じ、Web形式で委員会を開催した。

表1 委員会の開催スケジュールおよび検討内容

回	時期	検討概要
第1回	令和3年 9月1日	調査手法開発の基本方針の確認・検討
第2回	令和3年 10月22日	開発手法の進捗状況、現地実証の方針及び手法決定等
第3回	令和3年 12月14日	開発手法の実証、必要に応じた見直し、普及の方針等
第4回	令和4年 2月22日	とりまとめ報告

表2 検討委員

氏名	所属、役職	専門分野、実績等
戸田 堅一郎	長野県庁 林務部 信州の木活用課 林業経営支援係 係長	リモートセンシング、 市町村森林整備計画
藤井 栄	徳島県立農林水産総合技術支援センター 資源環境研究課 研究係長	造林、森林計画
光田 靖	宮崎大学 農学部 森林緑地環境科学科 教授	資源解析、森林計画
村上 拓彦	新潟大学 自然科学系（農学部） 准教授	GIS、リモートセンシング、 森林計画

敬称略

2.2. 都道府県の現状調査・整理

2.2.1. 徳島県の事例

本事業の実証サイトの一つである徳島県の森林情報に係る現状と課題についてヒアリングした結果を示す。森林情報の現状について表 3 に示す。地位指数の更新については、初期に設定されて以降、長期間に渡って更新されていなかったが、平成 23 年頃、森林生態系多様性基礎調査や吸収源関連の毎木調査によるデータから、高齢級林分の調査結果を反映した樹高曲線に修正されている。

表 3 徳島県の森林情報の現状

項目	内容
森林計画区	2 区
森林調査区	5 区
	5 年に 1 回、調査区の更新を行い、2 年もしくは 3 年に 1 回、地域森林計画の樹立を実行
森林計画図の構成	林班 (30-100ha)
	小班群 (5-30ha) ※地位指数は小班群単位で指定
	小班 (1-5ha) ※境の基本は所有単位、枝番で樹種、林齢を区分
地位指数クラス	2 つの階層があり 9 段階に区分
	① 調査区単位で上中下に区分
	② 調査区内で上中下に区分
地位指数の更新	初期に設定されて以降、長期間に渡って更新されていなかった。
	平成 23 年頃、森林生態系多様性基礎調査（当時のモニタリング調査）や吸収源関連の毎木調査によるデータから、高齢級林分の調査結果を反映した樹高曲線に修正

現在の地位に関する課題と航空機 LiDAR 計測への期待について県職員の方から頂いた回答を抜粋する。

地位指数の問題点

- 地形、斜面の向き、標高に大きな変化があると想定される小班群(5-30ha)単位で指定されている。
- 9 段階の地位指数は高齢級林分に配慮した樹高曲線に更新したのみで、環境因子との関係は初期設定以降更新されていない。

(航空レーザ計測データから計算した材積と森林簿の材積を比較した場合、調査区単位で過剰な場合と過小な場合がある→調査区単位で地位を指定していることが原因か?)

今回業務に期待すること

- 全体的に航空レーザ計測が完了しつつあるが、得られたデータに違いがある。
- ① 4点/m²(DEM DSM DCHM)+森林資源データ
- ② 4点/m²(DEM DSM DCHM)
- ③ 1点/m²(DEM DSM DCHM)
- ・ ①の区域では森林資源データを活用できるが、他の区域では従来通り、森林簿や人力による標準地調査が実施されている。②や③の区域においても高精度の森林資源データが必要。
- ・ ①の区域においても、森林資源データを活用している林業事業者は一部。広く活用するためには高精度森林簿整備が望ましい。
- ・ 航空レーザ計測は今後、繰り返し実施されるものではないと想定される。技術的にはシステム収穫表を使えば良いが、広く活用するためには高精度な森林簿の整備が望ましい。
- ※ 高精度森林簿：局地的な地位が反映した小班(1-5ha 程度)単位の森林資源データを整備した森林簿とする。
- 森林経営管理制度において経営管理が行われていない森林の集積・配分を進めているところであり、効率的な業務推進には高精度森林簿が必要。
- Jクレジットをはじめ、森林簿の資源量は林務行政の基本であることから、現実に合った資源量を森林簿として整備すべき。
- 現状の森林簿の資源量には問題があり、その大きな要因が整備当初から更新されておらず、小班群レベルで設定されている地位指数である。
- 一方で新たな森林経営管理制度により、施業実施林分レベルでの資源量を把握することが重要となっている。
- このような中、航空レーザ計測による高精度データが整備されつつあることから、施業実施林分レベルでの地位指数整備は技術的に可能と想定される。

- しかし、本県を含む一部の都道府県では試験場がこのような課題に取り組んでおらず、地域に林業を専門としたコンサルタントも不在であることが多く、自力での航空レーザデータ活用による地位指数等の更新が困難である地域も少なくないと想定されることから、課題解決に本業務を期待する。

本事業における地位指数推定は、高精度かつ高解像度を目指しており、方法論が開発されれば施業スケールの資源量把握に繋がり、都道府県の森林計画・管理に貢献できると考えられる。

ここ数年で LiDAR 計測の整備が進みつつあり、また LiDAR データに対する期待があることから、都道府県職員が自ら実施できるような簡単で方法であれば活用が進むと考えられる。

2.3. 調査手法の開発・実証

「立地級調査要領」には、いくつかのステップがあるが、基本的な出発点は、当該箇所における地位指数の算出である。地位指数は基準林齢における上層樹高であることから、これを収穫表における林齢－樹高の関係式（樹高曲線）と紐づけ、収穫表を用いて伐期齢における材積を求め、それを伐期齢で除したものが伐期平均成長量すなわち地位級となる。なお、委員会等での議論を踏まえ、本調査では「地位指数分布図」までの作成を目標とする。

地位指数の推定方法としては、数量化理論に基づき地質、地形、土壌等の環境要因からスコア値を集計するスコア表法、現地調査に基づき局所的な環境因子と地位指数の関係を重回帰分析により地位指数式を求める方法、[竹下, 1964]が考案した地形因子のみから推定する方法、[光田, 鹿又, 松本, 2013]が考案した気象因子、地形因子、森林生態系多様性基礎調査の実測値から推定する方法などが知られている。これらの手法によって得られる地位指数の地理空間的な解像度は、得られる情報の地理空間的な解像度に依存している。例えば利用可能な地形データの解像度が 50m であれば、それ以上に詳細な空間解像度での地位指数区分はできない。

近年、都道府県等での航空レーザ計測データのアーカイブの蓄積が進んでおり、都道府県または市町村レベルでの利用が可能になってきた。そこで、LiDAR 計測データから樹高を推定し、当該林分の林齢情報から樹高曲線により直接地位指数を推定する方法（[福井, 2019]）を適用し、広域かつ高精度な地位指数をより簡易な手法で算定する方法について検討した。ただし、この方法においては、森林簿林齢の不確実性に留意する必要がある。

2.3.1. 前提条件

2.3.1.1. 対象者

本事業で開発する手法の前提条件を表 4 に示す。

表 4 本事業で開発する手法に係る前提条件

項目	内容
地位指数算出作業を想定している利用者	都道府県や市町村の計画担当者
必要なデータセット	1. 樹種と林齢情報が格納されている GIS ポリゴン 2. 航空機 LiDAR 計測データ
対象とする林相	スギ人工林とヒノキ人工林
空間スケール	20mメッシュ

本事業で開発する手法について、まず利用対象者としては、都道府県の計画担当者や市町村の担当者を想定している。GIS ソフトや Microsoft Excel を使用したことがあれば地位指数分布図を作成できるような簡単な手法とする。

必要なデータセットは2つあり、一つは林齢と樹種が格納されている GIS ポリゴンで、都道府県で整備されている森林簿 GIS の利用を想定している。もう一つは航空機 LiDAR 計測データで、LiDAR 計測時の仕様によるが照射密度 4 点/m² 以上のデータを前提としている。LiDAR データの種類として林冠高データ (DCHM) が必要だが、入手できなければ DTM(digital terrain model, 地盤高)と DSM (digital surface model, 表層高) の差分から計算可能である。

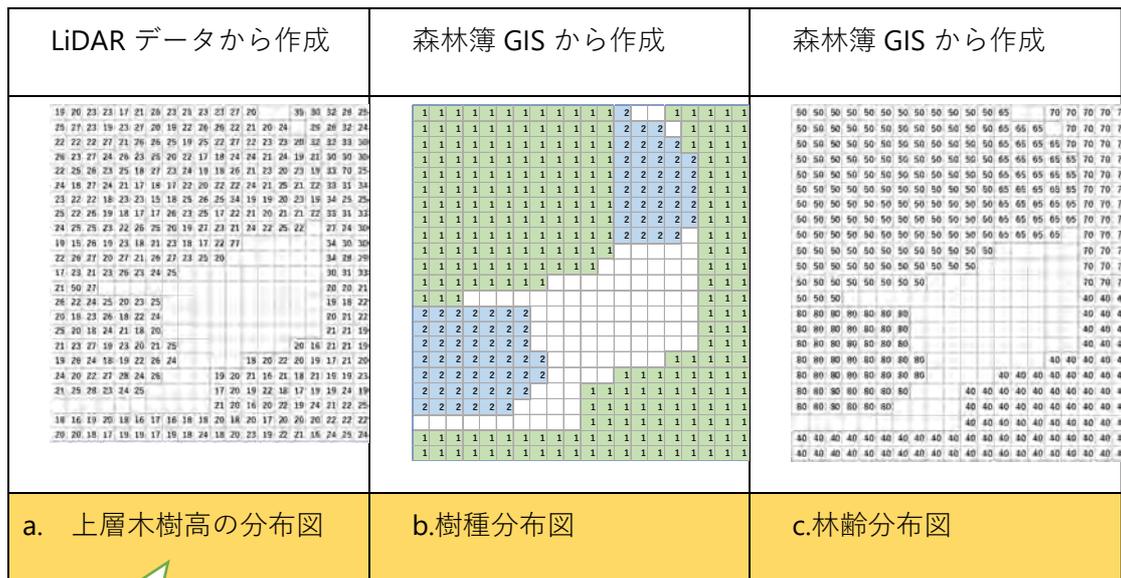
本事業で検討した林相は主体としてスギ人工林である。

作成される分布図の空間精度については 20m メッシュで設計した。これは、「令和 3 年度林業イノベーション推進総合対策のうち ICT 生産管理推進対策のうちレーザ計測による森林資源データの解析・管理の標準化事業」で森林資源データ解析・管理標準仕様案の森林資源量集計メッシュポリゴンと一致させるためである。森林資源量集計ポリゴンには、今回使用する樹種や樹高情報も含まれること、またメッシュサイズを統一しておけば、森林資源集計ポリゴンと地位指数の情報の連携が一对一ででき、管理のしやすさが期待できる。

2.3.2. LiDAR データを使った地位指数分布図の作成

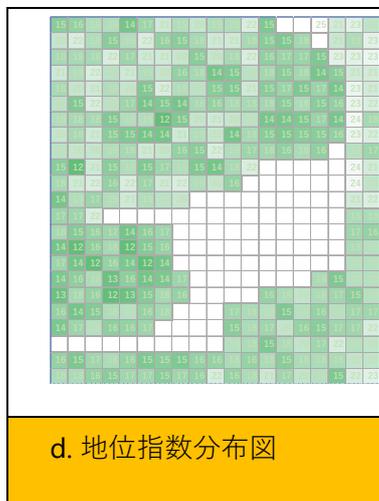
2.3.2.1. 地位指数分布図作成のながれ

地位指数分布図の作成手法の開発では、図 3 に示したように、まず a.上層木平均樹高の分布図、 b.樹種分布図, c.林齢分布を作成し、これらに樹種別 (必要であればさらに地域別) の地位指数曲線を作成し、各メッシュの地位指数を決定数する方法を検討した。



- 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。

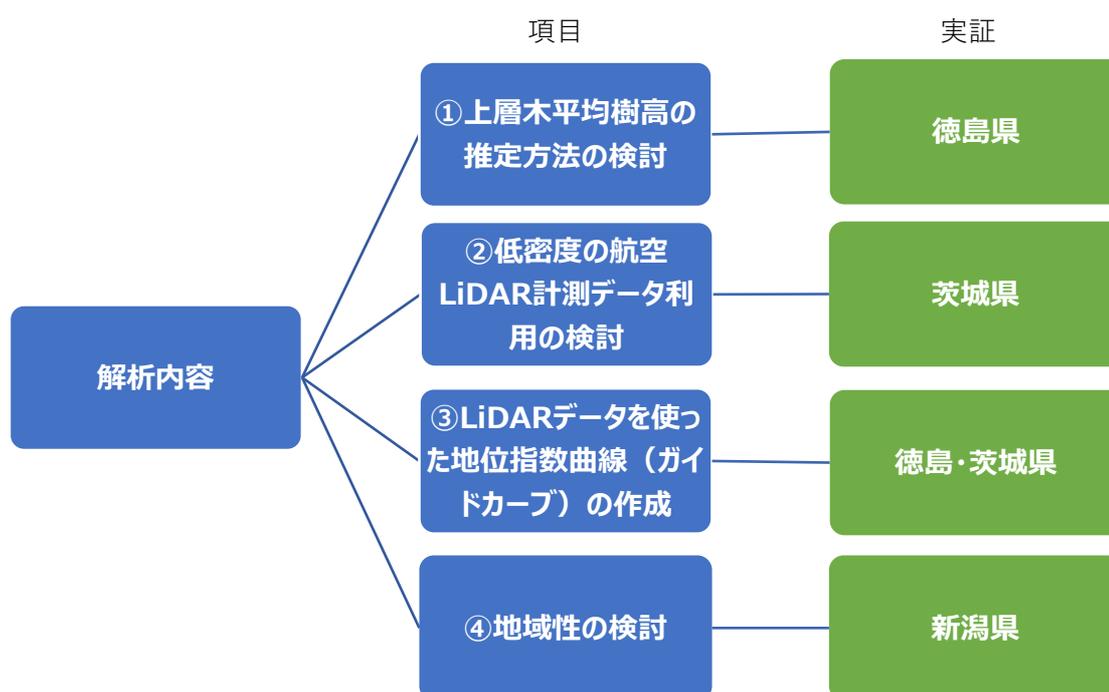


図 4 本事業における解析項目および実証調査サイト

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)。

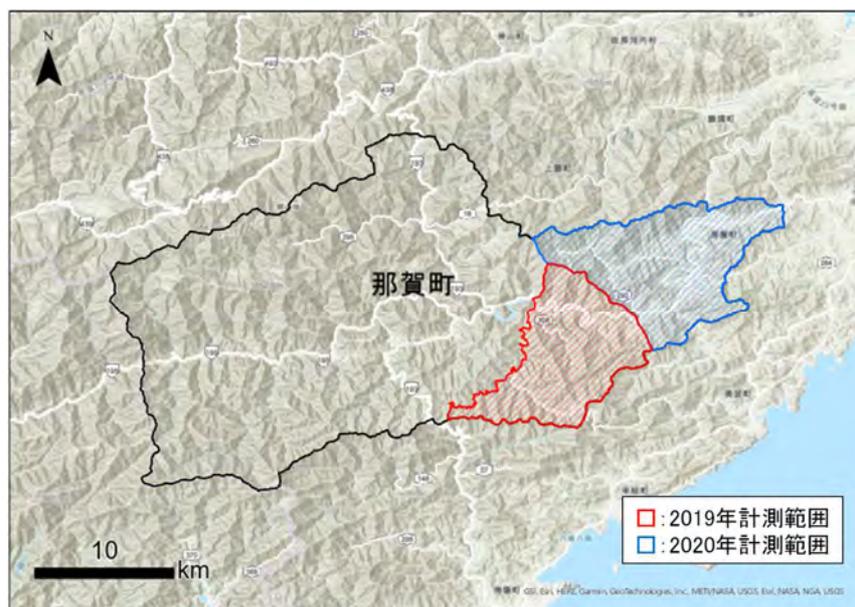


図 5 徳島県那賀町における航空 LiDAR 計測範囲(約 183 km²)

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)。

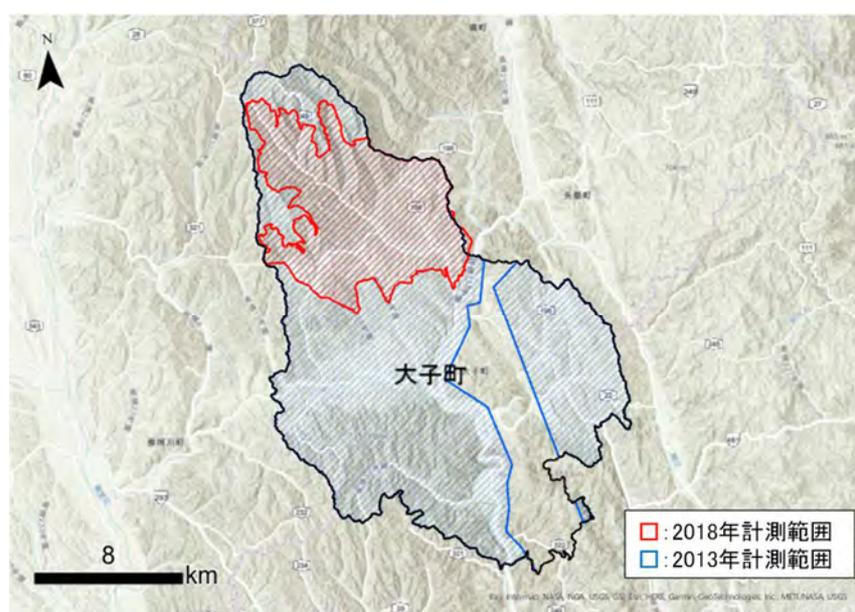


図6 茨城県大子町における航空LiDAR計測範囲(約280km²)

(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。

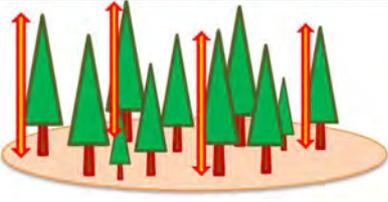
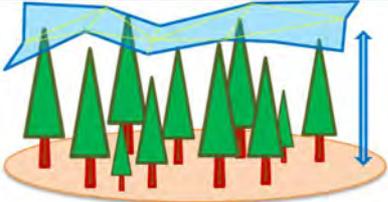
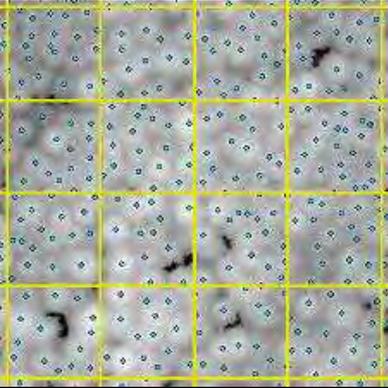
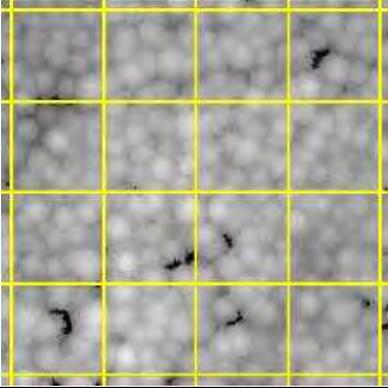
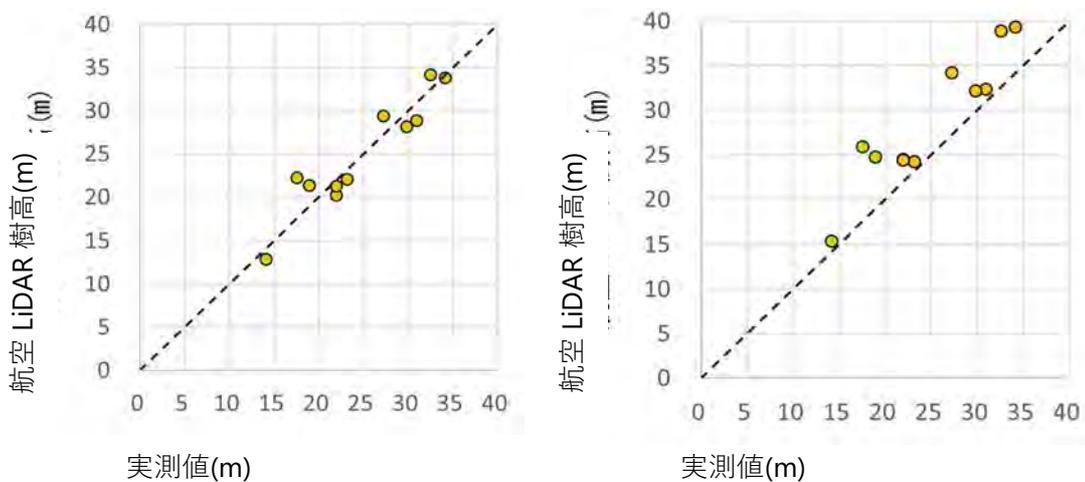
A. 樹頂点法	B. DCHM 最大値法
	
	
<p style="text-align: center;">20m メッシュ：黄色線 樹頂点：青点 DCHM 画像：白が樹高が高く、黒が低い</p>	
<p>樹頂点位置の DCHM の値のうち上層木を選び 20m メッシュ単位で平均</p>	<p>20m メッシュごとに最大値を取得</p>
<p>メリット：より真値に近い上層木平均樹高の取得が期待できる デメリット：データの処理に技術と時間を要する</p>	<p>メリット：データの処理が容易 デメリット：メッシュ内の最大値を抽出するため、上層木平均樹高ではなく最大樹高をとりやすい傾向がある</p>

図 8 方法論の検討① 樹高推定の 2つの方法



A. 樹頂点法 **RMSE = ±2.1m**

B. DCHM 最大値法 **RMSE = ±4.7m**

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。

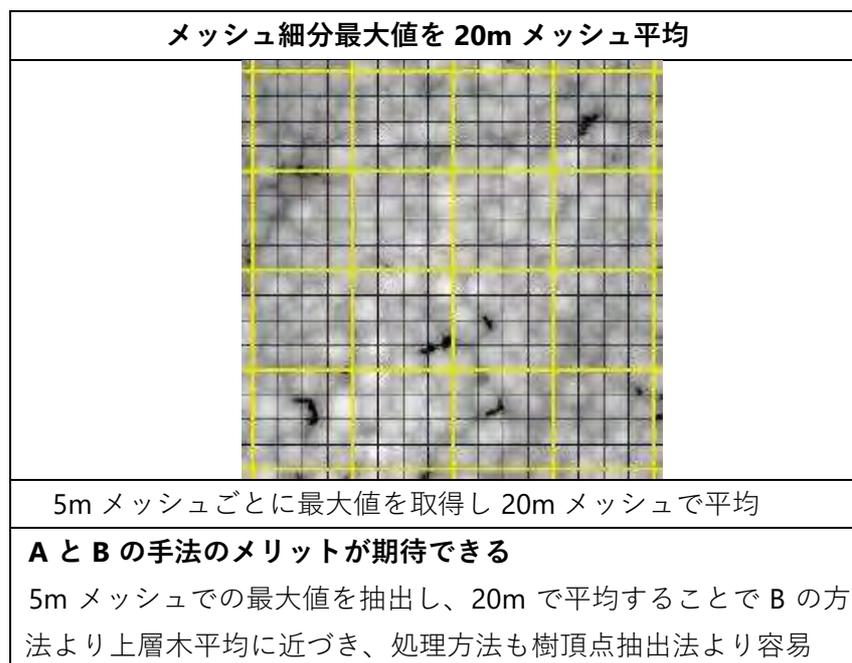


図 10 方法論の検討① 高精度かつ容易な上層木平均樹高の推定方法の検討

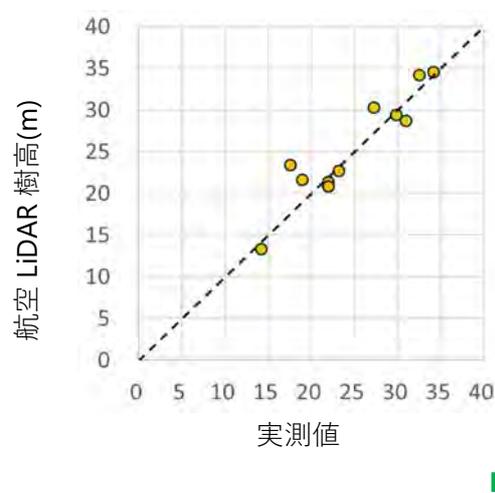


図 11 現地調査樹高と細分化メッシュ最大値の平均による LiDAR 計測樹高の比較

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=±2.4 m と A. 樹頂点手法の RMSE=±2.1 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

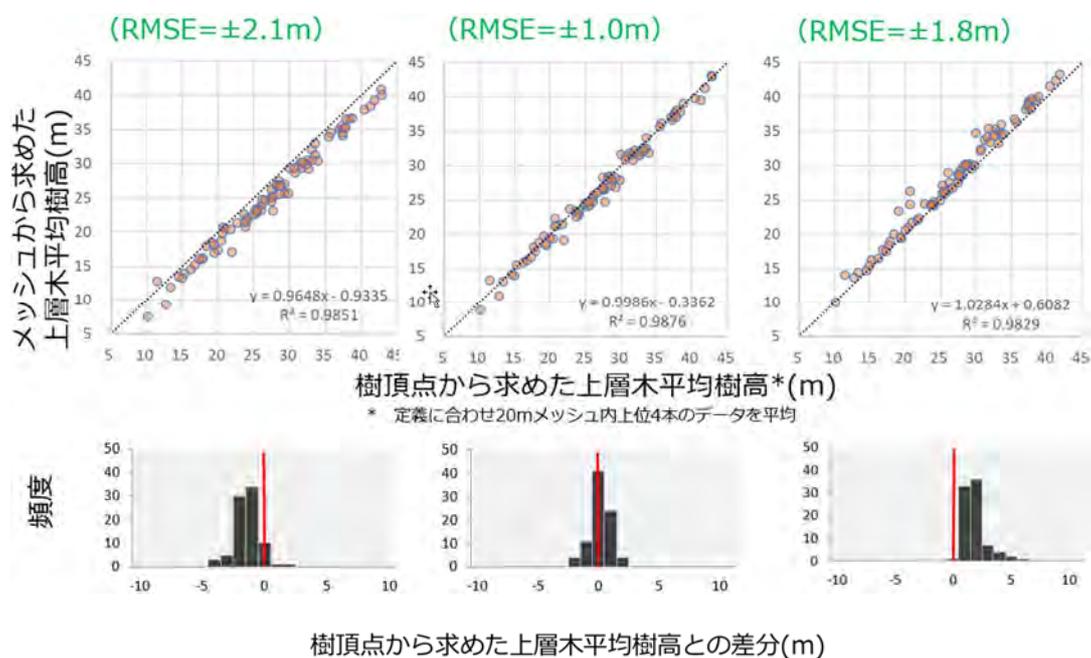


図 12 各手法で算出した上層木樹高の精度評価結果

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。

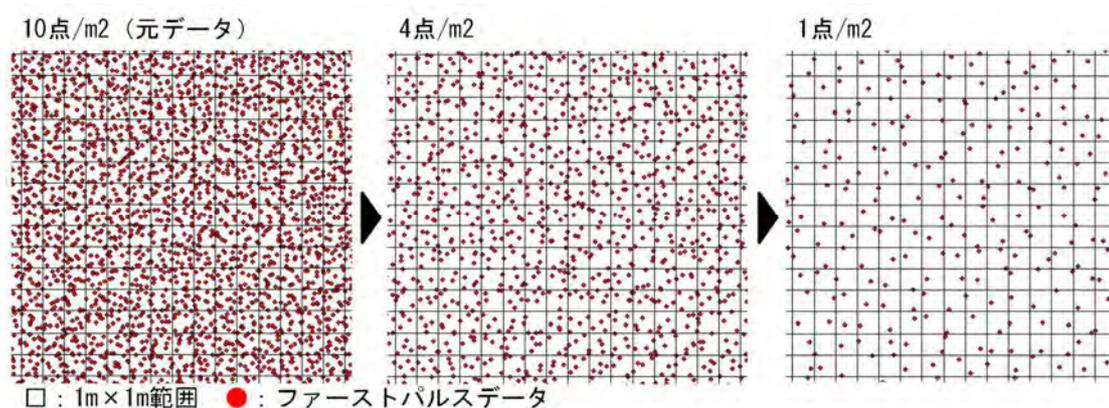


図 13 点密度の間引き処理の概念図

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）。

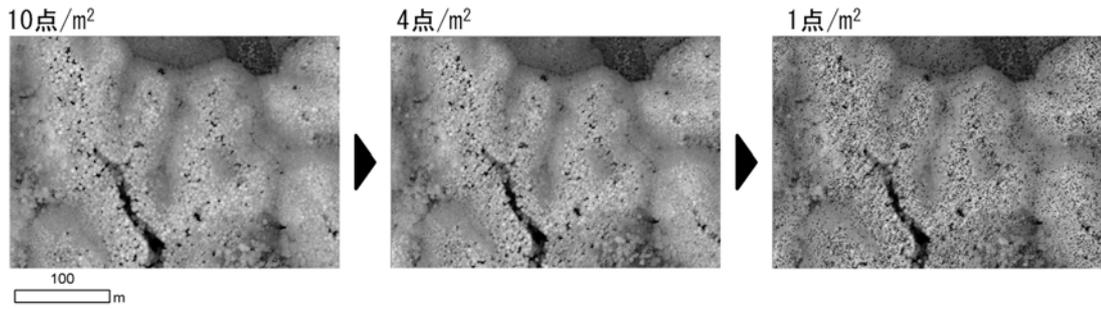


図 14 点密度の間引き処理による DCHM の変化

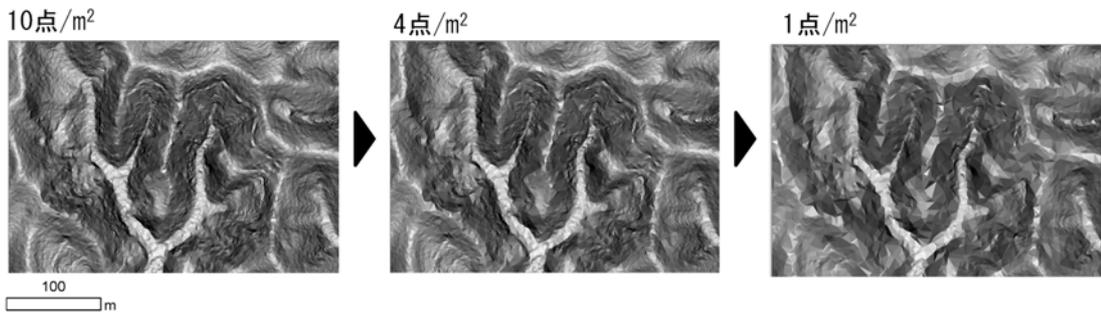


図 15 点密度の間引き処理による DEM の変化

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）。

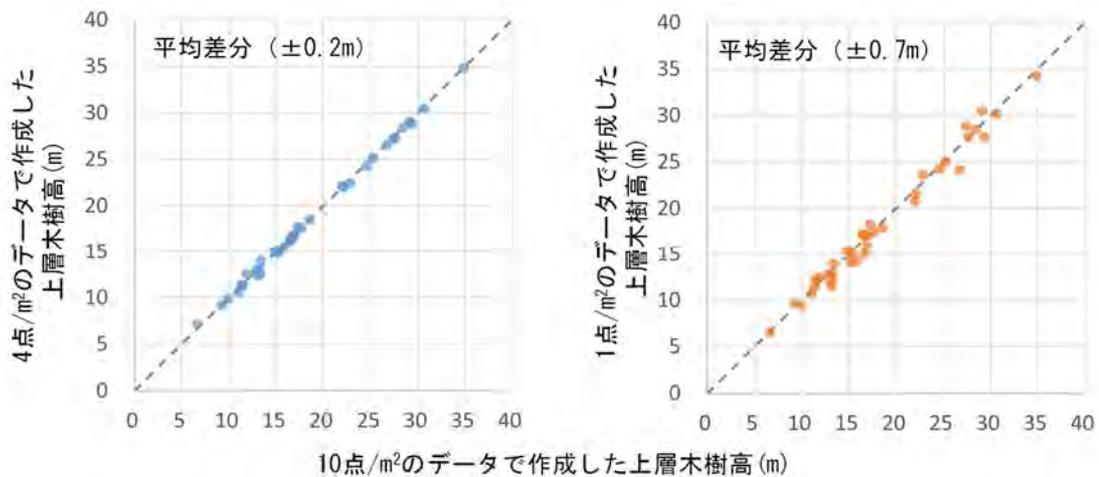


図 16 点密度の間引きによる上層木樹高の精度変化（左：4 点/m²、右：1 点/m²）

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）。

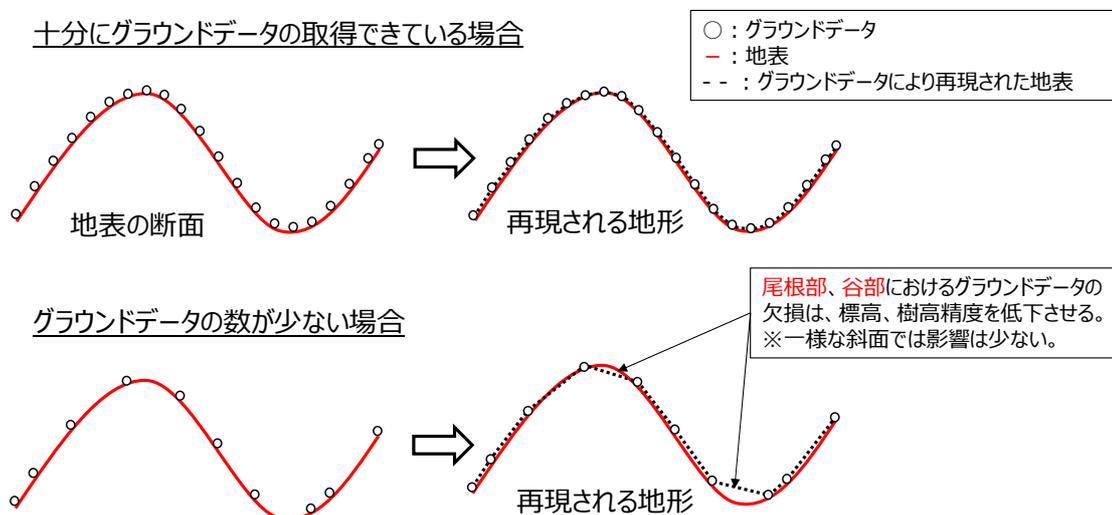


図 17 低密度の航空 LiDAR 計測データを使用する際の、樹高誤差の概念図

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）。

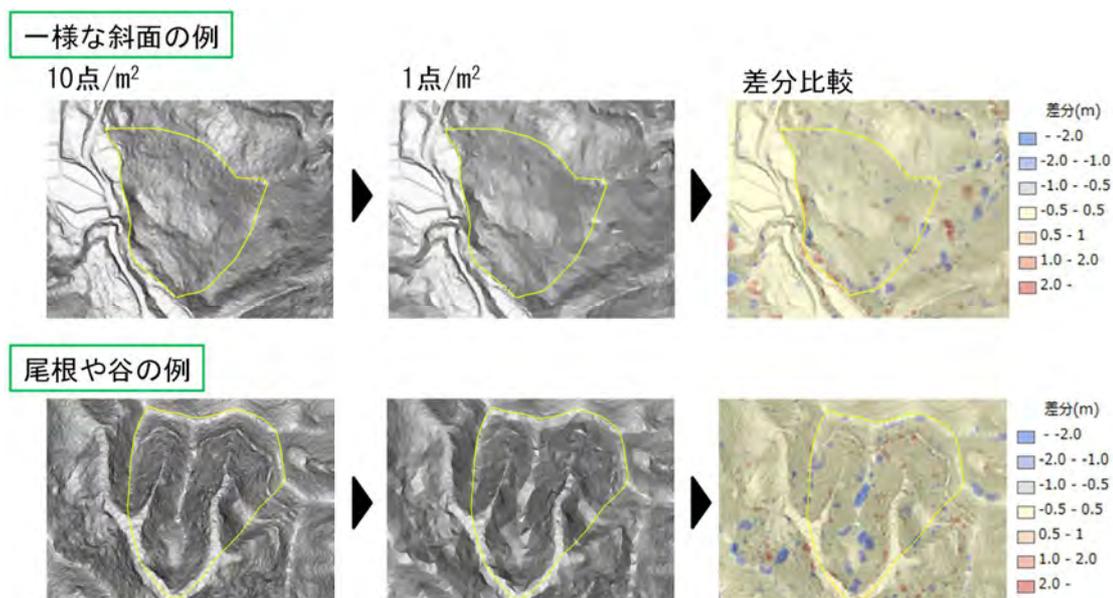


図 18 照射点密度が 10 点/m² の場合と 1 点/m² の場合における標高差分

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 よりも尾根や谷で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 = $K \times A^{\wedge} \exp(-B \times \text{林齢})$ （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 = $K \times (1 - \exp(-A \times \text{林齢}))^{\wedge} B$ （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）。

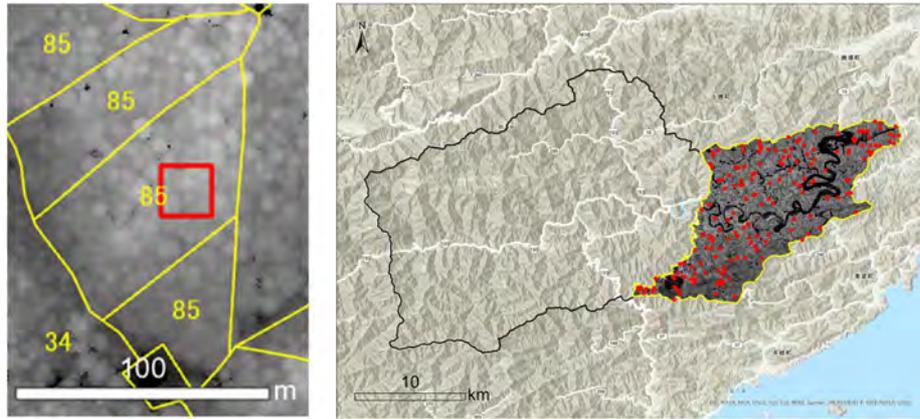


図 19 小班と 20m メッシュの重ね合わせの例（赤い点がサンプリング地点）

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 年齢から 20 年齢までの計 180 サンプルを取得した（図 20）。

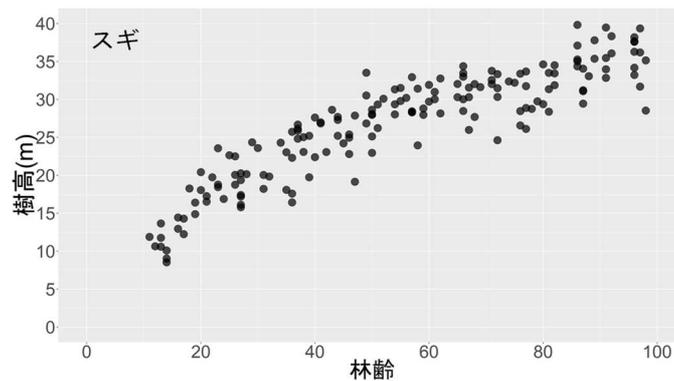


図 20 林齢と上層木樹高の対応したデータセットの例

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

- ✓ 齢級別に地点を割り当て など
- ✓ 育成単層林で、面積 1 ha 以上の小班
- ✓ 対象エリアの一か所に偏らず、全域からまんべんなく抽出

これに加えて、以下の点に注意して選定する必要がある。

- ✓ 林齢が確実であろう箇所（特に重要）
- ✓ 林縁は取らない
- ✓ 小班の中で代表性がある地点
- ✓ 谷部や尾根部を避ける

特に林齢については、樹高成長曲線の重要なパラメータであるため、明らかに林齢と実態とが異なるような地点を選択することは避ける必要がある。しかし、林齢が確実であろう箇所が現実的には少ないと想定されることから、無作為抽出できる数量がない可能性もある。その場合は、林齢情報と LiDAR の DCHM 画像とを比較参照しながらサンプリング地点を選択することや、Google Map など外部ツールも活用することが推奨される。

谷部や尾根を避ける必要がある理由として、前述したように低密度（1点/m²）の航空 LiDAR 計測では、谷部は過大、尾根部は過小になる可能性がある。また、谷部は生育が良い場合もあるため樹高が局所的に高い場合があることに注意する必要がある。

2.3.2.6. 地域性の比較

本事業で提案する手法はどの地域でも使えることが望ましい。このことから、太平洋側に位置する徳島県、茨城県、日本海側に位置する新潟県それぞれの実証サイトについて、地位指数曲線および分布図について比較することとした。

2.3.3. 実証調査地での開発手法の適用結果

2.3.3.1. 実証調査地における地位指数曲線および地位指数分布図

徳島県、茨城県、新潟県を対象とした実証調査サイトについて、上述の手法により作成した地位指数曲線（ガイドカーブ）と地位指数分布図の結果をそれぞれ示す。

2.3.3.2. 徳島県における結果

(1) 地位指数曲線（ガイドカーブ）

作成したガイドカーブを示す（図 21）。

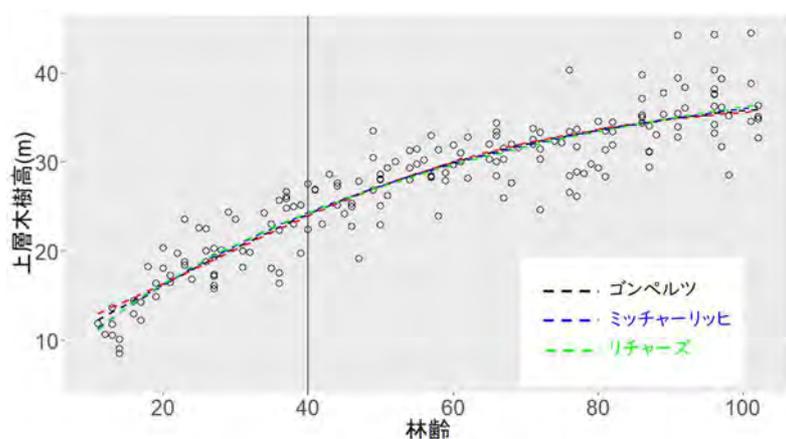


図 21 作成したガイドカーブ

3種のガイドカーブはほぼ同様の軌跡となったが、リチャーズ式が最も AIC が低い結果となった。各成長関数の AIC はゴンベルツ：919.3、ミッチャーリッヒ：914.8、リチャーズ：912.4であった。

作成したガイドカーブと、徳島県で使用されている既存の林分収穫表との比較を示す（図 22）。

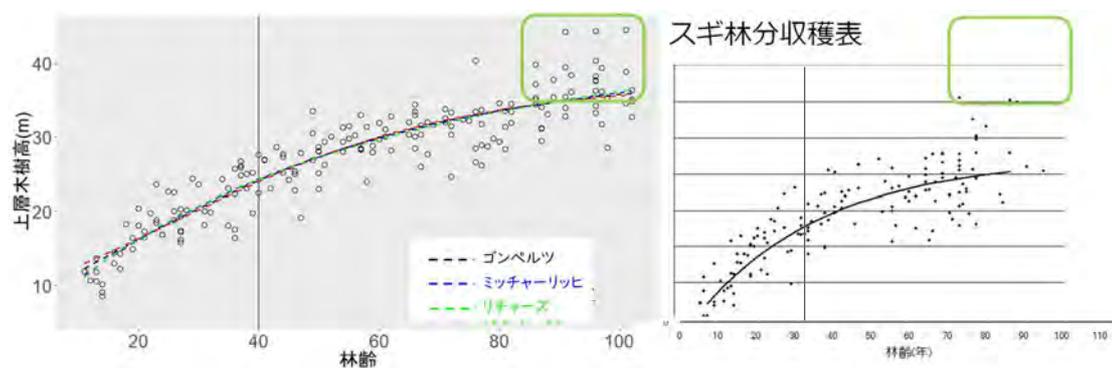


図 22 作成したガイドカーブ（左）と既存の林分収穫表（右）【徳島県農林水産部林業飛躍局林業戦略課, 2012】

作成したガイドカーブは 40 年生時点の樹高が 24.1m となり、既存の林分収穫表の 17.9m と比べ、樹高が高い傾向があった。

また、高齢級では樹高が 40 m 以上の箇所もあり、航空機 LiDAR 計測データから得られる DCHM が高すぎるといふ LiDAR 計測の精度に対する懸念が生じたため、現地検証を実施した。検証方法及び結果については、(3) 現地調査による検証で後述する。

(2) 地位指数分布図

作成したガイドカーブをもとに、20m メッシュ単位での地位指数図を作成した (図 23、図 24)。

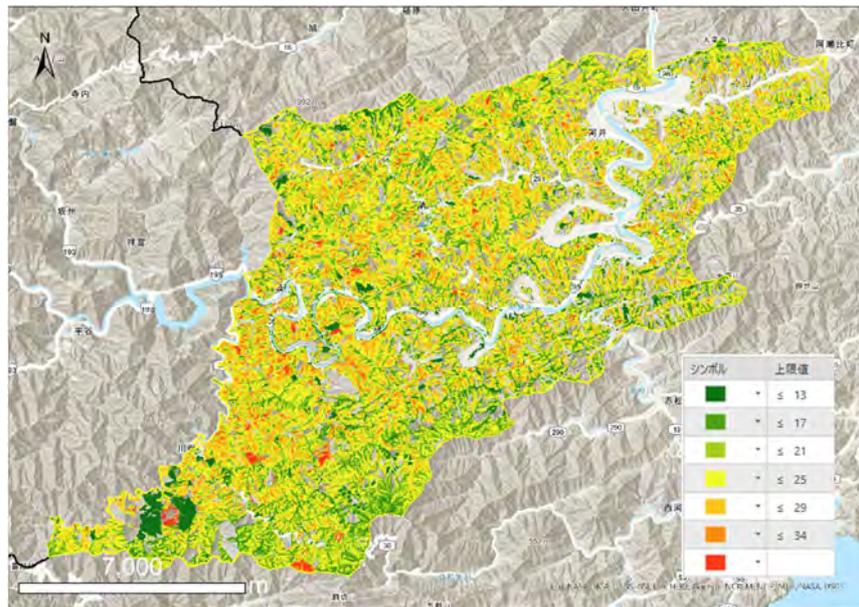


図 23 作成した地位指数図 (全域)

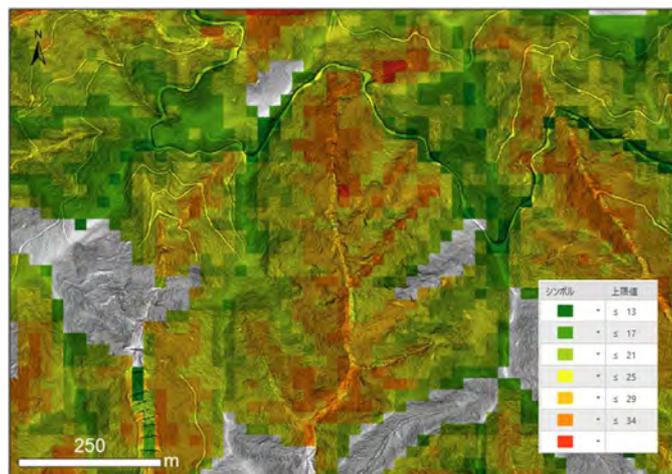


図 24 作成した地位指数図の拡大例

作成した地位指数図について、広域的には南部側に地位指数の低い区域がまとまって分布しており地域的な地位の高低を確認できるとともに、局所的には谷部で地位指数が大きく尾根部で小さくなるといった地形に応じた傾向が表現される結果となった。

一部、局所的に地位指数が極端に高いまたは低いといった、明らかな外れ値が疑われる箇所が示されたため現地検証を実施した。検証方法及び結果については、(3) 現地調査による検証において記述する。

(3) 現地調査による検証

① LiDAR の DCHM が高い箇所を対象とした現地検証

地位指数のガイドカーブ作成において、取得したサンプルの一部の高齢級林分で LiDAR の上層木平均樹高が 40m 以上の箇所が示されており、このような林分が存在するのか、または LiDAR 計測誤差なのかを確認する必要がある。計測誤差により DCHM が実態よりも高い場合、地位指数分布図が全体的に高くなる、また LiDAR データを使った地位指数曲線が高くなるという影響が生じる。

DCHM が高くなる箇所の傾向を図 25 に示す。赤い線は DTM から作成した流路で谷部を表している。DCHM 画像は低いほど黒、高いほど白色で示している。DCHM は同じ小班内でも総じて谷で高い傾向がみられ、場所によっては 50m に達している箇所もある。

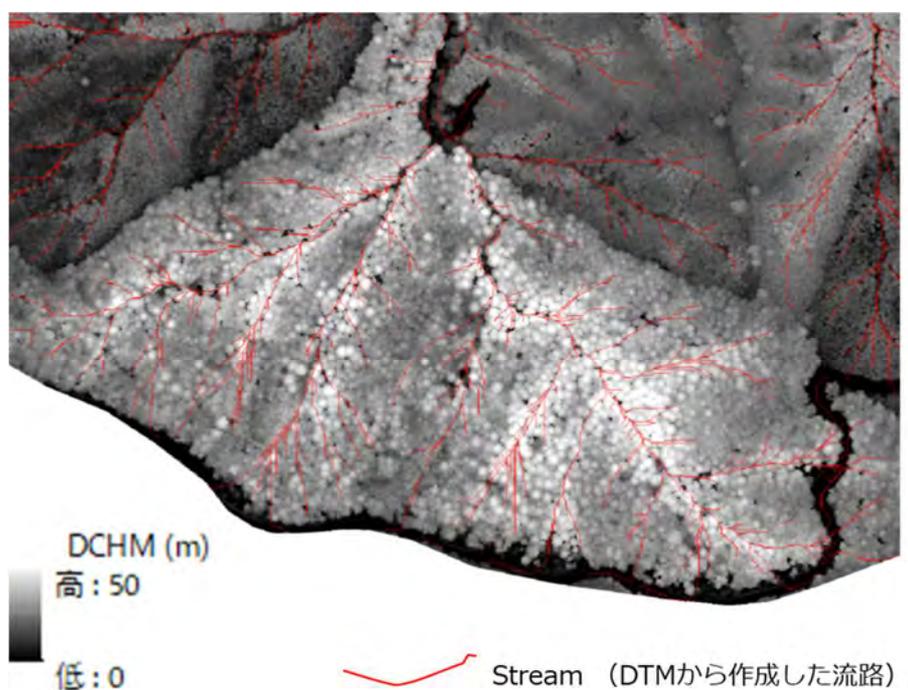


図 25 DCHM が高い箇所の特徴

樹高 50m クラスの樹木は、寺社林以外では一般的に稀であり、谷部でこのように DCHM が高い仮説として、谷部の DTM がえぐれるように作成されている可能性や樹木が斜立しており樹頂点の位置が根元よりも谷側に位置がずれている可能性などが想定された。

そこで現地の確認をするため、対象エリアのうち、DCHM40m 以上が集中しているエリアを対象として樹高を確認した。現地では、半径 8m~11m の小面積プロットを設置し、上層木を全木計測した。

現地調査の結果を表 6 に示す。調査地点は 4 ヶ所で、谷部の樹高が高いエリア (PLOT NO 100 番台) に加えて同じ小班内の代表的な林相と思われる山腹平衡斜面エリア (PLOT NO 200 番台) も調査した。POINT27 については、参考のため樹高が最も高い樹木個体のみを計測結果である。実測樹高および調査プロット内 LiDAR DCHM のそれぞれの最大値を比較すると、その平均差は谷部で 1.3m、山腹で 2.6m、全体で 2.0m と大きな差はない。両者の比較を図 26 に示す。実測の最大樹高に対して、DCHM のプロット内最大値は高い一致を示している。

以上の現地調査の結果から、樹高 40m を超える木は局所的に多く存在すること、また 50m を超える樹木も存在すること、また LiDAR DCHM と比較してもその差は 2m 程度あることから、LiDAR DCHM と実際の樹高に大きな乖離があるわけではないと考えられる。

表 6 調査地点の樹高計測結果および LiDAR による高さ計測情報

POINT	PLOT NO	林齢 (2017.4.1時点)	計測本数	上層木最大樹高 (m)	上層木平均樹高 (m)	樹高の標準偏差 (m)	LiDAR DCHM 調査プロット最大値 (m)	実測と LiDAR DCHM 最大値の差(m)
1	101	71	10	47.4	34.2	5.2	49.0	-1.6
	201	71	17	27.1	22.9	2.3	30.8	-3.7
3	103	68	10	39.5	37.0	2.0	40.6	-1.1
	203	68	17	24.5	21.2	2.0	26.2	-1.8
9	109	116	10	51.9	44.1	4.9	50.0	1.8
	209	116	6	39.6	34.3	3.5	42.8	-3.2
10	110	86	15	49.4	41.6	4.0	50.0	-0.6
	210	86	14	28.7	25.3	2.4	30.5	-1.8
27	127	116	1	48.9	48.9		50.0	-1.2
	全木		100	51.9				

(注)PLOT 127 は樹高最大の個体のみを参考のため計測

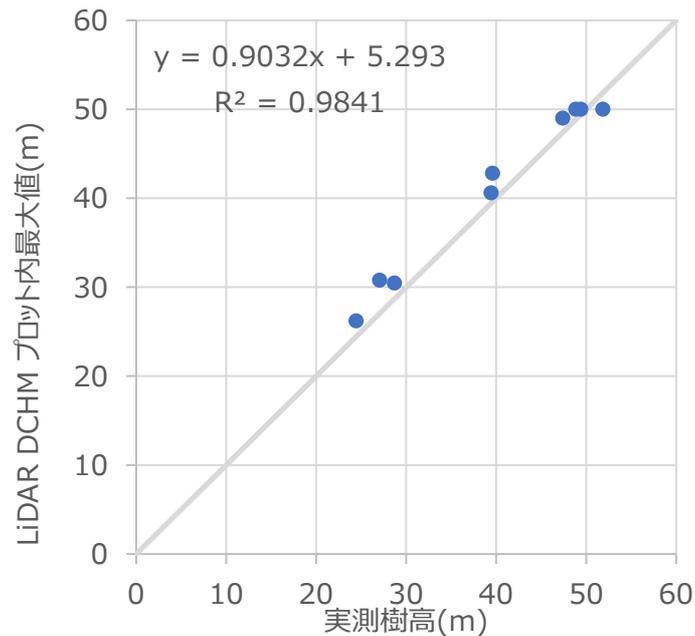


図 26 プロット調査エリアの計測最大樹高と DCHM 最大値の比較

また、現地調査で得られた傾向として、谷部の局所的巨木エリアは山腹平衡斜面に比べると樹高のばらつきが大きいことを示した。最大樹高 50mを超えるプロット（PLOT NO 109）の詳細を表 7 に、調査地点の林内写真と DCHM 画像を図 27 に示す。上層木樹高のうち最小樹高は 38.3m、最大樹高は 51.9m と樹高差が 13.6mと大きく、樹高 38~40m が 3 本、40~50m が 5 本、50~52m が 2 本で標準偏差が 4.9m（表 6）と同齢人工林としてはばらつきが大きい。

表 7 最大樹高 50m以上を有する調査地点の樹高計測結果

No.	樹種	DBH(cm)	樹高(m)
1	スギ		38.3
2	スギ	48.6	41.6
3	スギ	66.0	39.3
4	スギ	52.6	40.0
5	スギ	57.5	39.5
6	スギ	55.0	43.0
7	スギ	94.7	49.2
8	スギ	82.4	47.8
9	スギ	95.2	51.9
10	スギ	100.0	50.3
	平均	72.4	44.1

樹高のばらつきが大きい場合の影響として、樹高が高い箇所の地位指数が過大推定になる可能性があることに留意しておく必要がある。本事業で提案している DCHM による上層木平均樹高の計算では、10m メッシュ内の DCHM 最大値を抽出して 20m メッシュで平均化する。DCHM 最大値と実際の上層木平均樹高の差が大きければ、DCHM による上層木平均樹高は過大になりやすく、このような林相では上層木平均樹高を使って計算する地位指数分布図が過大推定となる可能性がある。

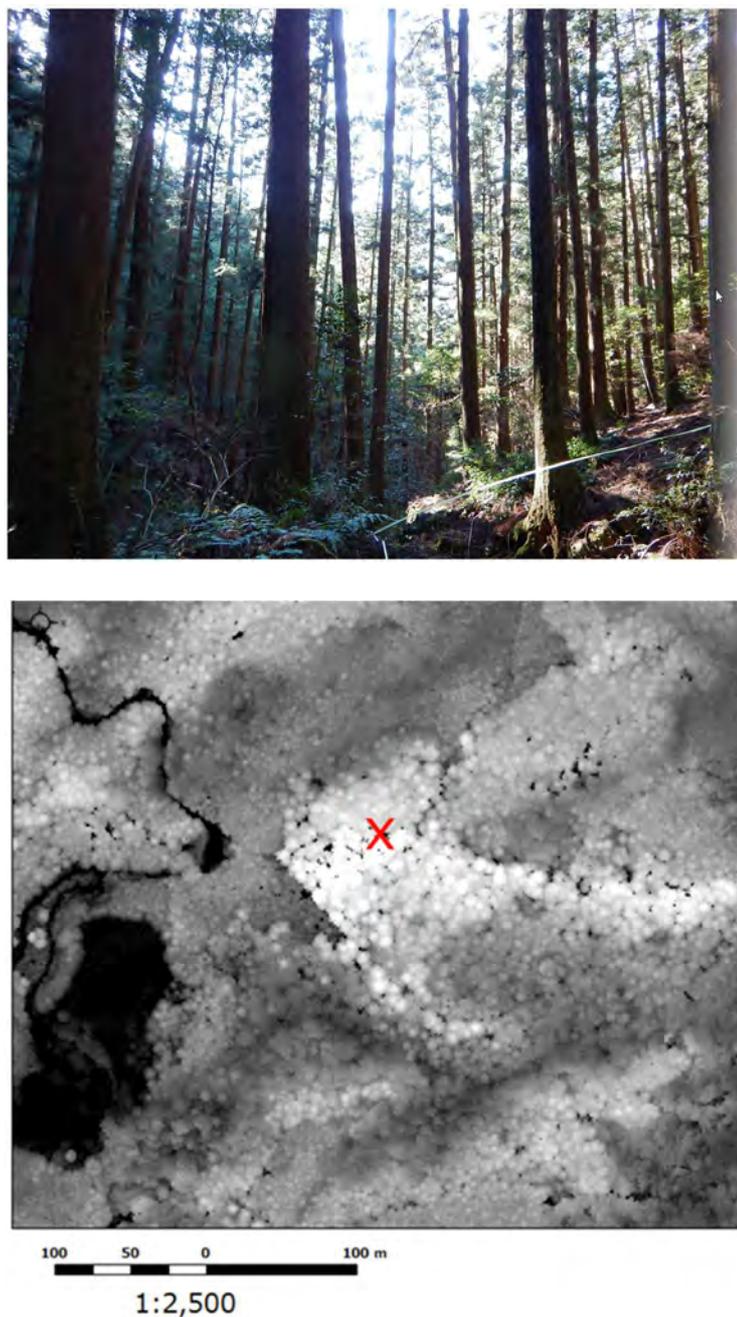


図 27 最大樹高 50m以上を有する調査地点の林内写真と DCHM 画像

単木の樹形については、厳密な計測は行ってはいないが、根曲型、斜立型、両者が組み合わさったタイプの3種類があることを現地で確認した(図28)。このような根曲がりや斜立木は、傾斜が急になるほど、また樹高が高くなるほどDCHMが過大になりやすい。

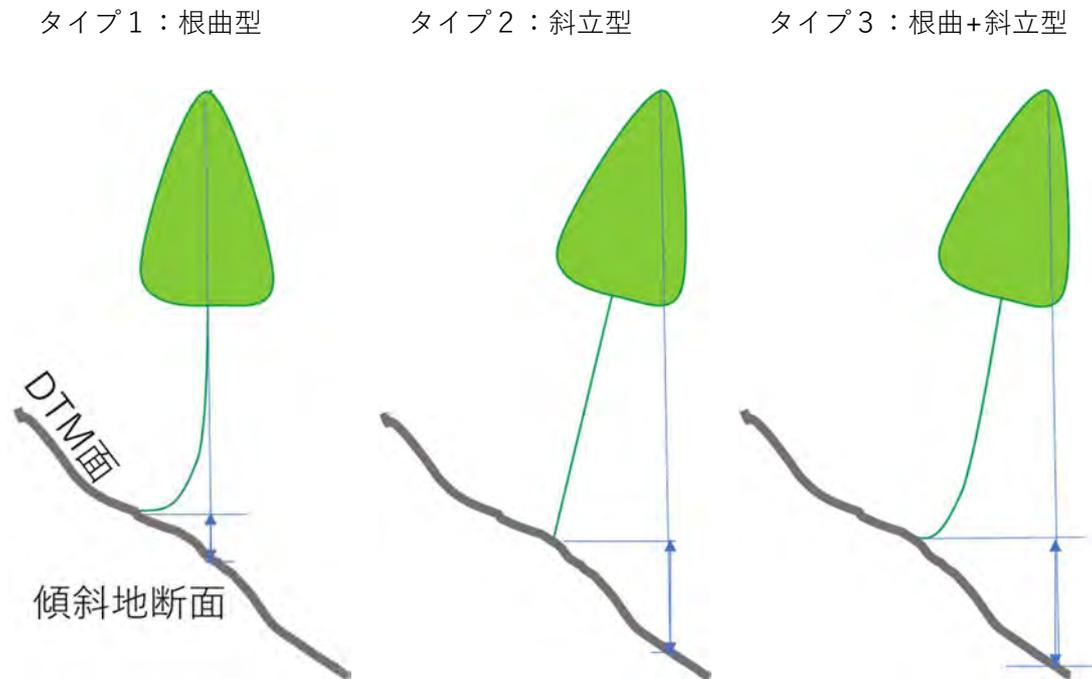


図28 斜立木と根曲木のイメージ

② 地位指数分布図における外れ値を対象とした現地検証

地位指数分布図を作成した結果、地位指数が徳島県作成の地位区分最大・最小よりも大幅に過大・過小となる外れ値が一部の箇所を示された(図29)。地位指数の外れ値の原因として、森林簿GISポリゴンの林齢と実態の林齢が異なるケースや森林簿ポリゴンの位置が実際の林相とずれているケース、LiDAR計測精度が低いケースが考えられる。

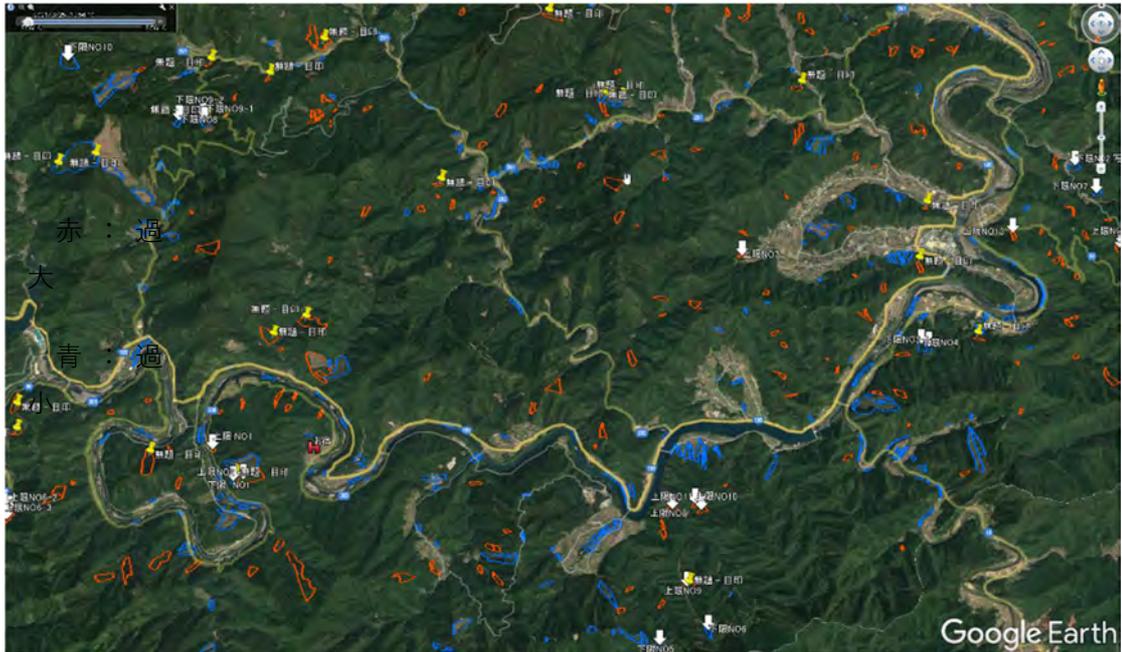


図 29 地位指数が過大および過小な箇所の分布

これら外れ値を示す箇所から 9 ヶ所を選定して、現地の状況を確認した。各地点では標準的な上層木の樹高を 5 本計測し、微地形の記録、およその林齢を記録した。

現地調査の結果から得られた地位指数の外れ値が生じる原因について表 8 に示す。過小推定・過大推定において、実態の林齢と森林簿の林齢が異なるケースが多く、その他、林相が異なるケースや、森林簿 GIS ポリゴンが施業後に分割されず同一ポリゴンを利用して情報のみ更新されるケースなどがあつた。

表 8 地位指数の外れ値が生じる要因

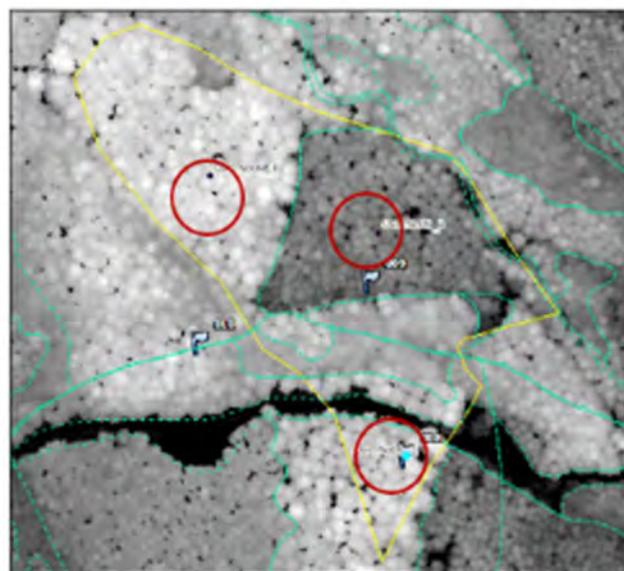
地位指数	原因	箇所数
過小推定	林齢が森林簿より低い	2
	一部土捨て場になっているため過小となった	1
	主伐の未更新	1
	林相が森林簿と異なる	1
過大推定	林齢が森林簿より高い	3
	実際の林相は複数に分割されているが、ポリゴンの形状がもとの 1 つであるため地位指数が突合できない（同じ形状の複数ポリゴンが重なっている）	1

森林簿の林齢と異なるケースでは、例えば森林簿では林齢 23 年であるが、森林実態は 50-60 年生程度（図 30）と森林簿より林齢が高かったため地位指数が過大推定となった。



図 30 地位指数が過大なエリアの林内(森林簿 23 年生)

林相が異なるケースでは、一つの GIS 小班ポリゴンの中に実際は三つの林相が含まれているのにも関わらず、林相に合わせてポリゴンが分割されていないという例もあった(図 31)。このケースでは、林相が分かれる前であろうポリゴンを使って施業後の情報が入力されていると考えられ、結果として同一形状・位置のポリゴンが3つオーバーレイしている状態になっている。



黄色線：森林簿 GIS

水色線：LiDAR データを使った林相ポリゴン

図 31 森林簿 GIS と実際の林相が異なるケース

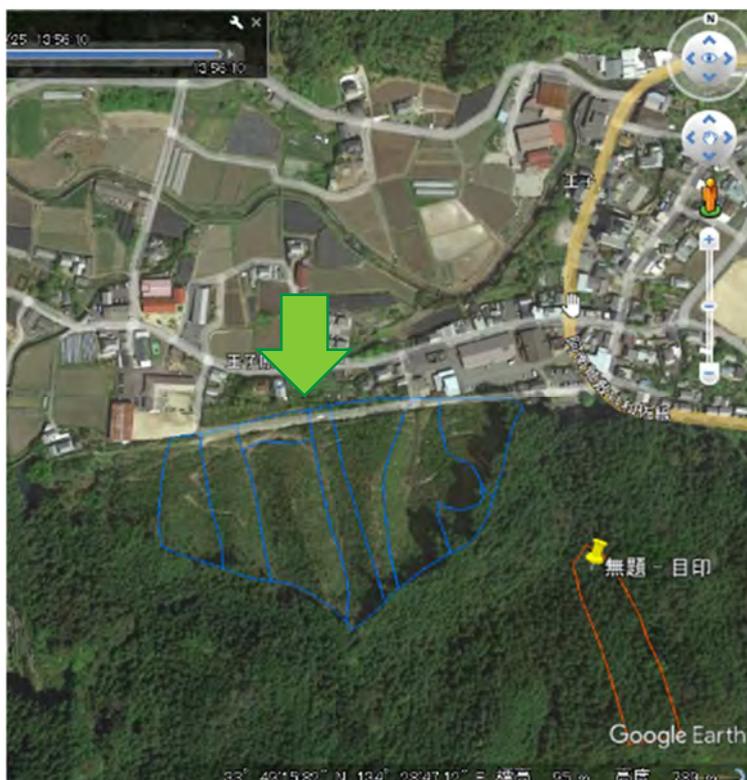
LiDAR 計測の大きな誤差については、本調査では示されなかった。

過小なケースのうち地位指数がほぼ 0 という極端に過小な箇所については、Google Earth による画像と現地を合わせて確認した（図 32）。その結果、過小な地位指数箇所では皆伐直後が多く、主伐情報が森林簿に反映されていないと考えられる。



青い線で示したエリア
で地位指数がほぼ 0

画像は Google Earth



画像は Google
Earth

図 32 地位指数が極端に過小なエリア

2.3.3.3. 茨城県における結果

(1) 地位指数曲線（ガイドカーブ）

地位指数の算出のために林齢と上層木樹高の対応したデータセットを作成し3つの成長モデルを当てはめた。徳島県での実証と同様に、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。3種のガイドカーブともほぼ同様の軌跡となったが、リチャーズ式が最もAICが低い結果となった（図33）。

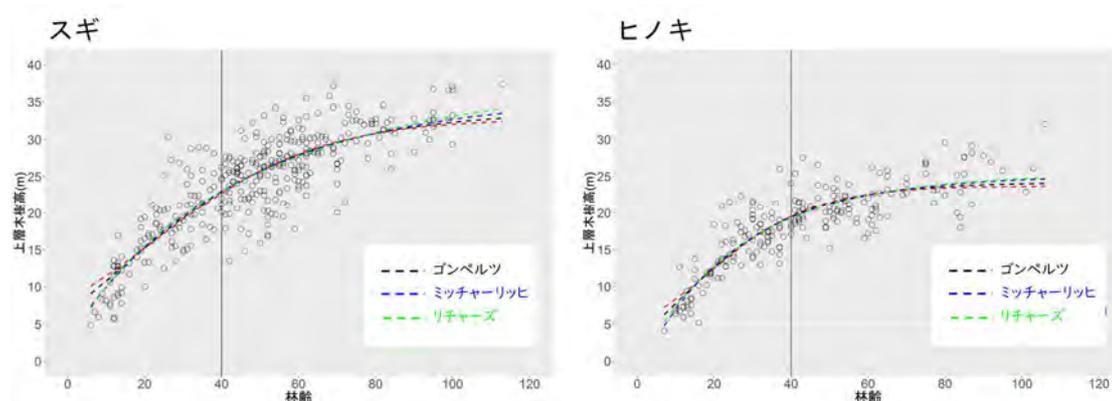


図33 作成したガイドカーブ(右：スギ、左：ヒノキ)

スギ林について作成したガイドカーブと、茨城県で使用されている既存の林分収穫表との比較を示す（図34）。

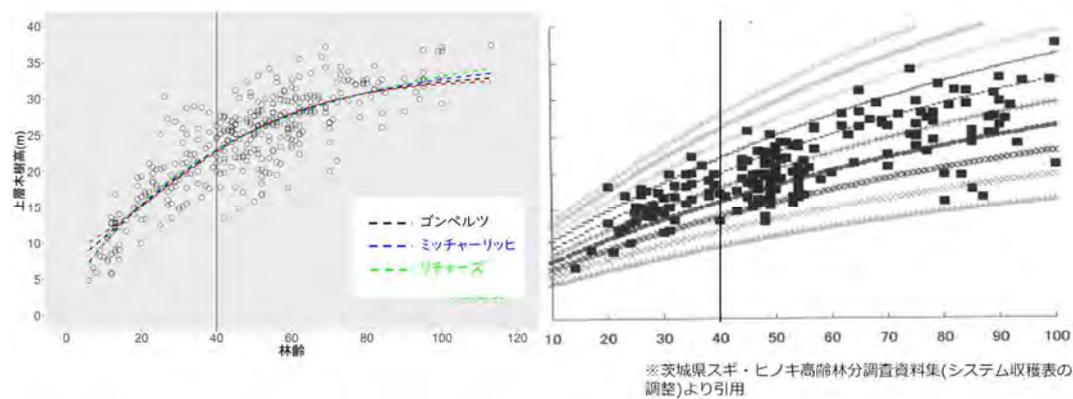


図34 作成したガイドカーブ（左）と既存のスギ林分収穫表（右）

作成したガイドカーブは40年生時点の樹高が21.4mとなり、既存の林分収穫表と比べ、樹高がやや高い傾向であった。

(2) 地位指数分布図

作成したガイドカーブをもとに、20m メッシュ単位での地位指数図を作成した（図 35、図 36）。

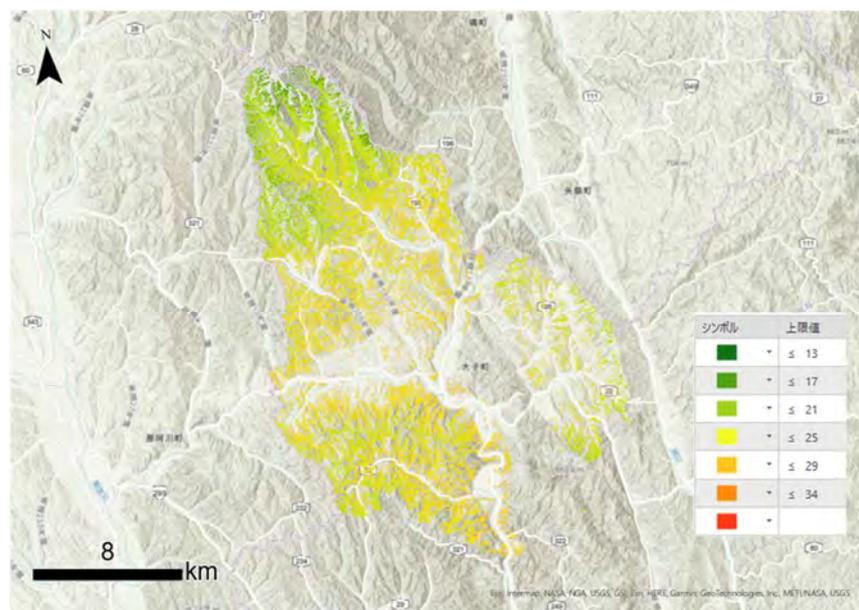


図 35 作成した地位指数図（全域）

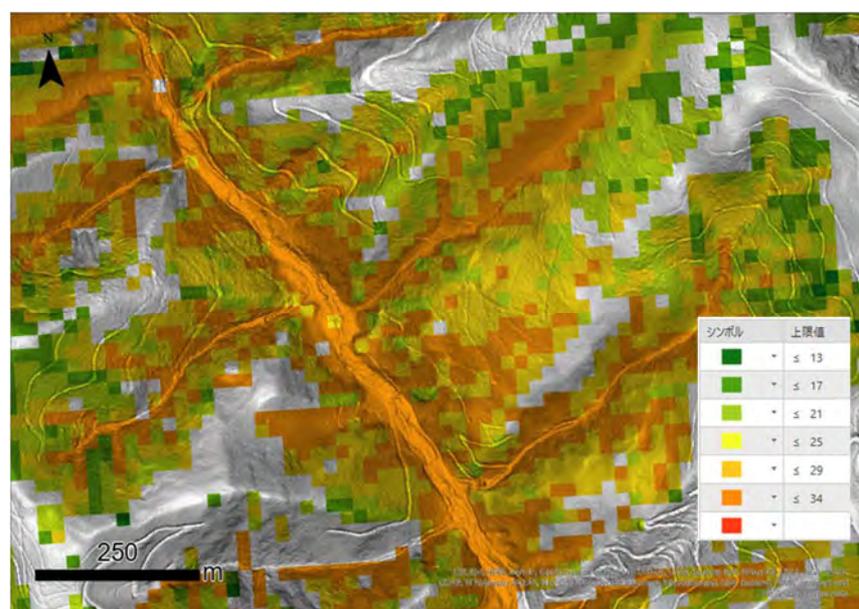


図 36 作成した地位指数図（拡大）

作成した地位指数図について、広域的には、南部から北部へと標高が高くなるに従い地位指数が低くなる傾向が確認できるとともに、狭域的には、谷部で地位指数が大きくなるといった詳細な傾向が表現される結果となった。

2.3.3.4. 新潟県における結果

(1) 地位指数曲線（ガイドカーブ）

新潟県においても、3つの成長モデルを当てはめた。地位指数の算出のために林齢と上層木樹高の対応したデータセットを作成した（図 37）。ここでも、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、齢級ごとに 10 サンプル、3 齢級から 20 齢級までの計 180 サンプルを取得した。サンプリング結果を図 38 に示す。

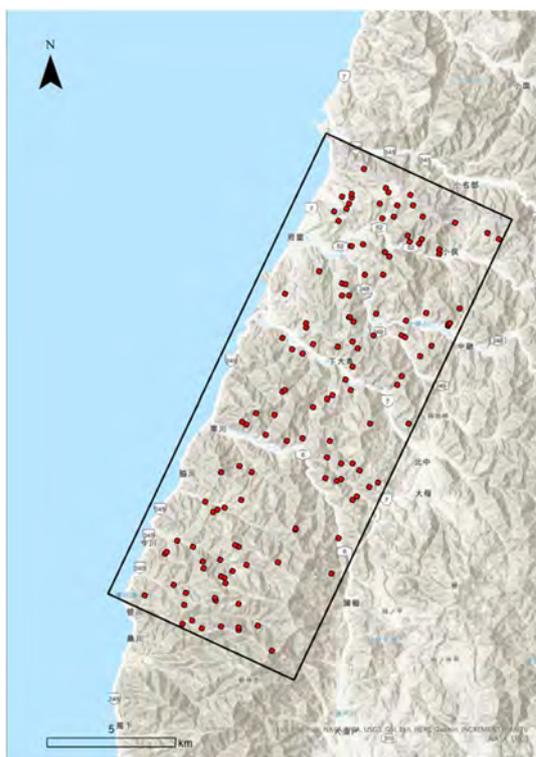


図 37 樹高データセットのサンプリング地点

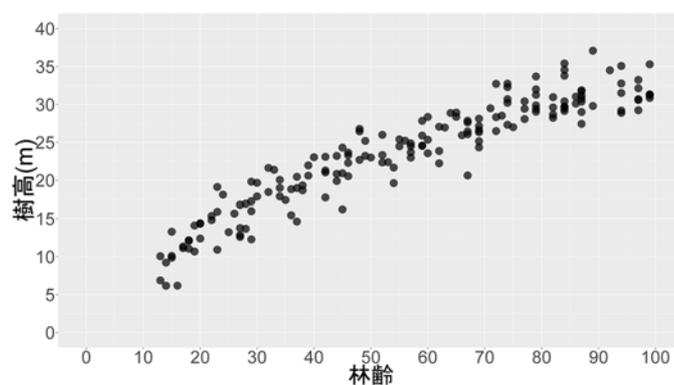


図 38 林齢と上層木樹高の対応したデータセット

他 2 県の実証サイトの結果と同様、3 種のガイドカーブはほぼ同様の軌跡となり、リチャーズ式が最も AIC が低い結果となった。作成したガイドカーブと、新潟県で使用されている既存の林分収穫表との比較を示す（図 39）。

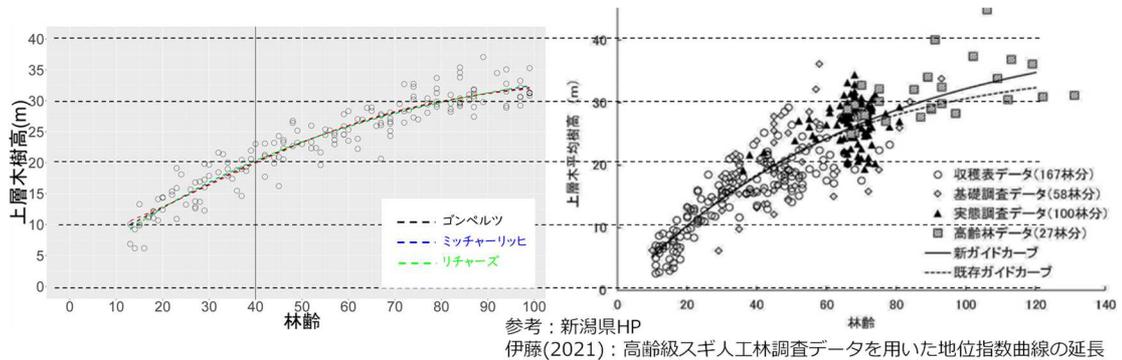


図 39 作成したガイドカーブ（左）と既存の林分収穫表（右）

作成したガイドカーブは 40 年生時点の樹高が 20.1m となり、既存の林分収穫表の約 18m と比べ、樹高がやや高い傾向であったが、高齢級となっても成長が衰えないなどの共通点がみられた。

(2) 地位指数分布図

作成したガイドカーブをもとに、20m メッシュ単位での地位指数図を作成した（図 40）。

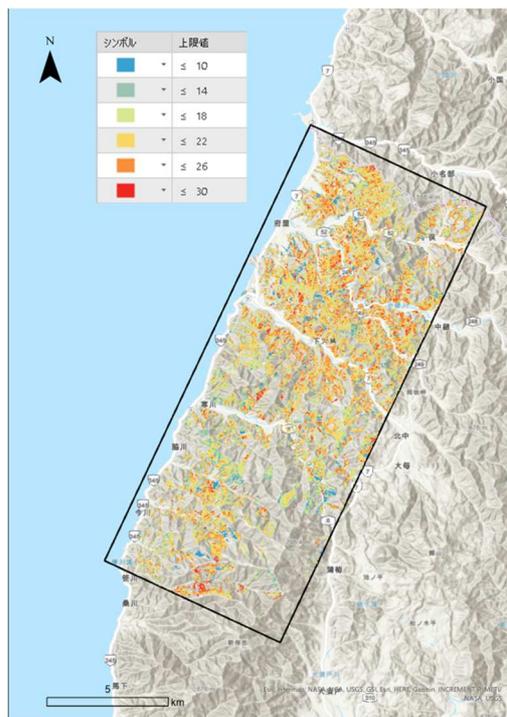


図 40 作成した地位指数図（村上地区）

作成した地位指数図は、現行の森林簿の地位と比較すると、村上地区における北部の値がより高い傾向を同様に示していた（図 41）。

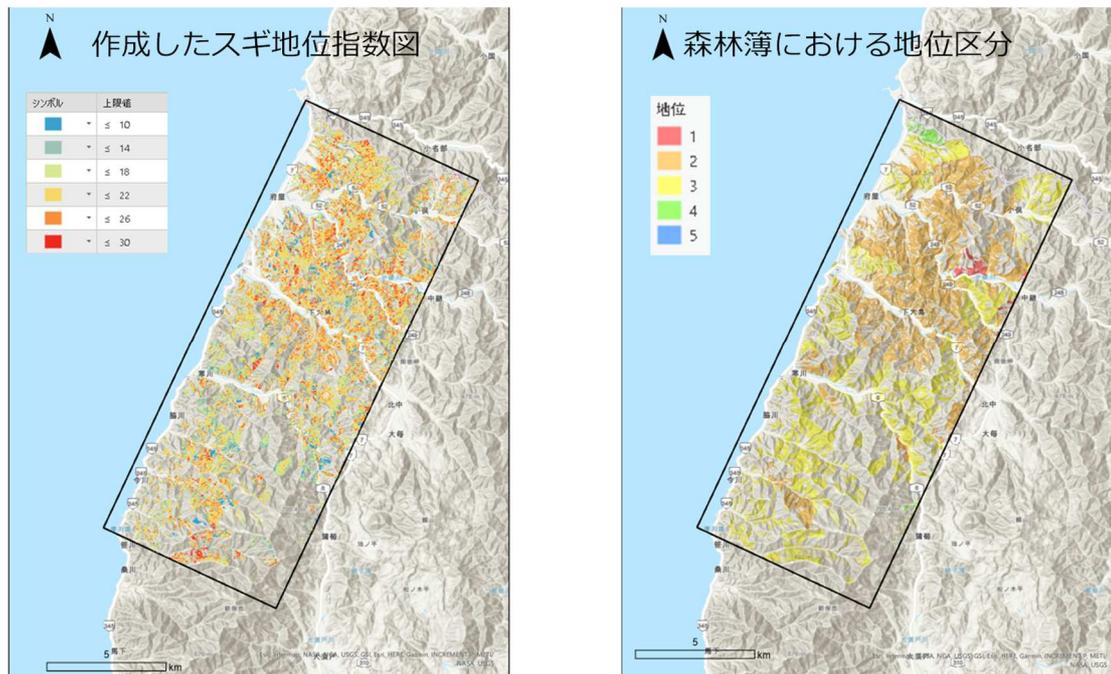


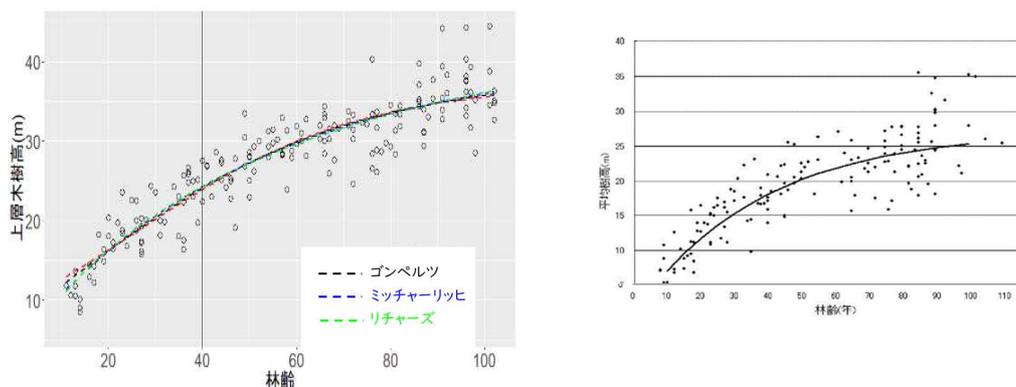
図 41 作成した地位指数図と森林簿地位区分の比較

2.3.3.5. 実証サイトの比較

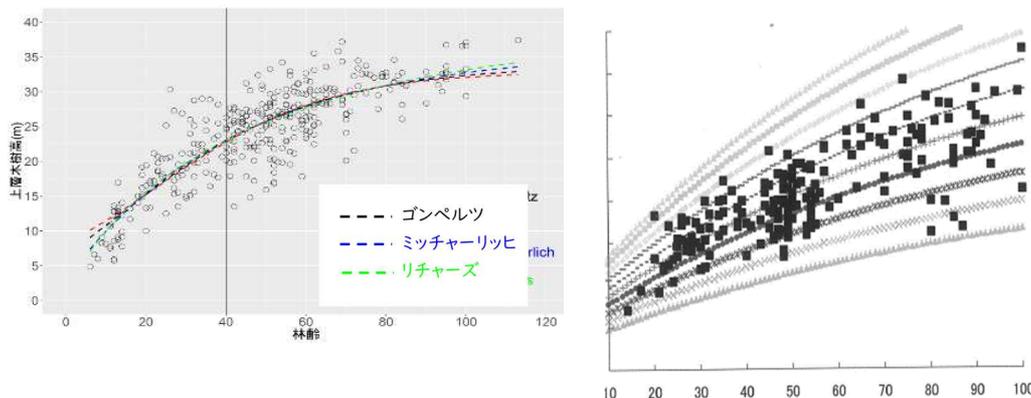
本事業で実証調査したサイト3県について、地位指数曲線を比較すると（図42）、新潟県実証サイトにおいて作成した地位指数曲線は徳島県および茨城県の実証サイトの事例と比べると、以下のような特徴が見られた。

- ・新潟県の地位指数曲線は初期成長が比較的遅い
- ・新潟県の地位指数曲線は高齢級（80年生以上）でも樹高成長の鈍化がみられない

1. 徳島県実証サイト



2. 茨城県実証サイト



3. 新潟県実証サイト

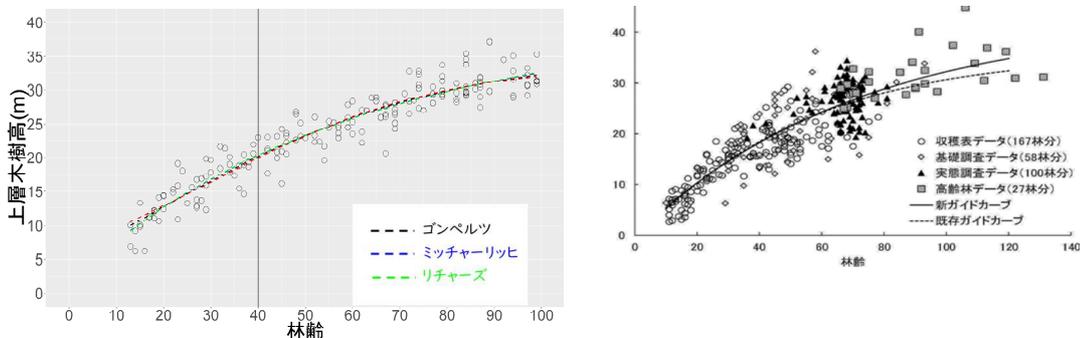


図42 実証サイトにおける地位指数曲線の比較（左図：航空機 LiDAR 計測データをサンプリングして作成、右図：既存の地位指数曲線）

こうした傾向は、日本海側人工林の初期成長が遅い特徴を反映していると言え（[Nishizono, ほか, 2018]）、異なる地域特徴においても、本実証の手法が有効と考えられる。

試行的に航空機 LiDAR データをサンプリングして作成した地位指数曲線については、いずれの事例においても既存の収穫表と比較し地位指数が高くなる傾向があるが、地域的な地位の高低や、地形による地位の変化は十分に反映できている結果となった。

2.3.4. まとめ

調査手法の開発・実証における検討課題から以下の結果が得られた。

- ① 上層木平均樹高の推定方法：10m細分化メッシュの最大値を抽出し、20mメッシュで推定。精度が高く容易な方法である。
- ② LiDAR 計測点密度 1 点/m² データの利用：による地位指数分布図の作成は可能である。ただし、谷や尾根などの地形が急に変わる箇所では DTM の再現が不十分である可能性があるため地位指数が過大・過小に推定される点に留意する必要がある。
- ③ 航空機 LiDAR データを使った地位指数曲線（ガイドカーブ）の作成：上層木平均樹高及び森林簿 GIS 情報をもとにサンプリングすることで作成可能である。サンプリングでは、まずスクリーニングが必要で、そのあとで無作為サンプリングする。スクリーニングでは特に齢級ごとに満遍なく抽出する。

2.3.5. 地位指数分布図の活用例：実務での活用

航空機 LiDAR のデータから地位指数分布が作成できれば、森林簿とそれに付随する森林計画図に地位指数を関連付けることで、森林簿の地位の精度を向上させ、より実態を反映した森林計画及び森林施業の実施につながると考えられる。本節では地位指数の森林簿及び森林計画図との情報結合の方法について検討した。主な流れを以下に示す（図43）。

- ① 森林ポリゴンと LiDAR の地位指数メッシュを空間結合する。各都道府県の森林簿或いは森林計画図を森林簿ポリゴンとして管理されている GIS の空間結合機能を通して両者の位置関係が特定する。
- ② LiDAR メッシュの森林簿ポリゴンの林小班単位の最多地位指数を算出する。都道府県の管理上の最小単位は小班より詳細な枝番等に細分することも想定されるが、使用しやすい単位で算出して良い。また、林小班的代表地位指数を算出する際に、メッシュの平均値を使用することも想定されているが、同じ林小班に尾根、谷が入る場合に、単純平均すると、実情を反映しない恐れがある。
- ③ 上記の②で計算された地位指数を属性として森林簿ポリゴンに付与する。森林簿にある地位と地位指数との結合度の分析で、森林簿の地位の適切性判断の材料として使用できる。森林簿上の地位と LiDAR による地位指数との乖離の程度により森林簿のほかの属性（例えば林齢）を確認するか、地位指数を採用して森林簿の地位を更新するかが選択できる。

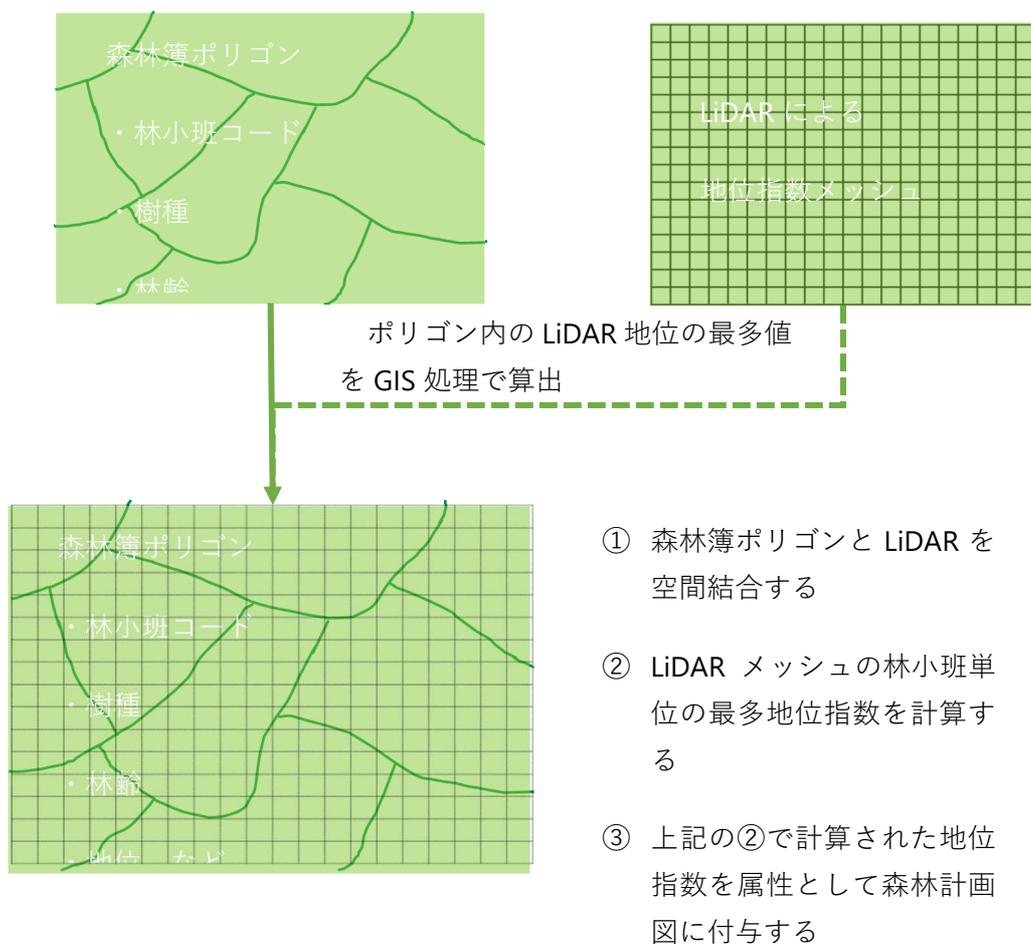


図 43 森林簿に地位指数を反映するイメージ

※ 1 森林簿は、林班や小班単位とし、樹種・林齢・面積・材積・成長量・地位等の森林資源情報を取りまとめた帳簿

※ 2 森林計画図は、森林計画界・林班界・小班界等を記入した図面

2.4. 調査手法の普及

2.4.1. 地位指数分布図作成の手引き

本事業での成果を普及するため、都道府県の計画担当者や市町村担当者の利用を想定した「航空機 LiDAR データを使った地位指数分布図の作成の手引き」を作成した。表紙のイメージ図を図 44 に示す。手引き本体は、巻末資料として添付する。

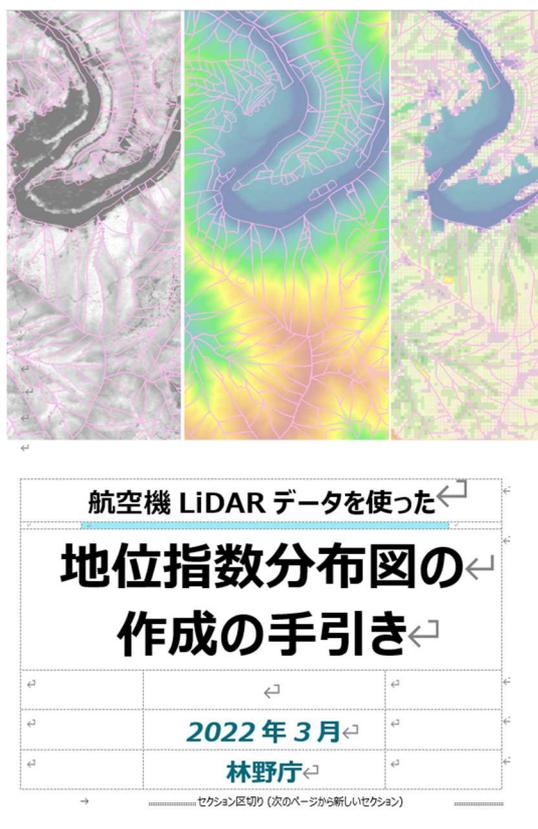


図 44 手引きの表紙

都道府県によって、データの所持状況や今後の航空機 LiDAR 計測の有無、地位指数曲線の更新の希望など状況が異なることを想定し、なるべく要望に沿えられるよう作成した。

具体的なソフトウェアの操作方法もマニュアル形式で掲載している。使用するソフトウェアは無料の GIS ソフト QGIS (Version 3.16 の安定版) と EXCEL である。

2.4.2. 手引きを使った講習会の実施

徳島県職員対象の講習会を令和4年（2022年）3月11日に Web 形式で実施した（図45）。徳島県からは GIS ソフトを使用したことがある4名の職員にご参加いただいた。



図 45 Web 形式での航空機 LiDAR データを用いた地位指数分布図作成に係る講習会

研修では手引きに掲載した下の作業のうち、特に重要な作業 02、05、07、08 に絞り、地位指数分布図の作成方法について実習形式で説明した。

手引き記載の作業	使用するソフト
作業01：20mメッシュ必要なエリアを抜き出し	QGIS
作業02：DCHMから上層木平均樹高を計算	QGIS
作業03：DSMとDTMの差分	QGIS
作業04：TIF画像への変換	QGIS
作業05：GISの樹種・林齢を20mメッシュで作成	QGIS
作業06：樹高成長曲線作成のためのサンプリング	QGIS、ほか
作業07：樹高成長曲線を作成	Excel
作業08：地位指数曲線式の適用	QGIS

手引きの活用として、徳島県内のいくつかの地方事務所管轄エリア内で、広い面積で航空機 LiDAR 計測が実施されており、事務所職員を対象とした利用を想定しているとのことであった。

手引きに記載した地位指数分布図の作成の作業については、GIS の操作そのものについては難しい部分はないとのことであった。本事業での対象者は地位指数をある程度利用されている職員を想定していたが、地位指数を普段使っていない職員の地位指数分布図の作成を想定されているとのことで、手引きを今後改訂する場合は、地位指数そのものの詳細な説明に加え、各作業で求める数値などの補足説明を加えることが勧められる。

処理時間について、参加者はノート PC であったが対象エリア約 183 km² 処理において、各プロセスで最も処理時間を要した作業では 10 分程度であったため、現在の一般的なノート PC でも耐えうる作業と考えられる。

第3章 今後の課題

本事業では、近年データの整備が進んでいる航空機 LiDAR 計測データを活用し、森林の機能別調査のうち、木材等生産機能の評価に必要な地位指数の分布を簡易に求める手法の開発に向けた調査を行った。今後、より高精度な地位指数推定手法を検討するならば、①樹高推定の精緻化、②林齢の不確実性に対する検討、③実証サイトの拡大の3つの項目について調査されることが望ましい。

3.1. 上層木平均樹高推定における精緻化

今回提案した上層木平均樹高の推定では、林冠高 DCHM の 10m メッシュ最大値を抽出して 20m メッシュで平均する手法を用いているが、徳島県実証サイトの現地調査で述べたように、樹木サイズが不均一な林相では最大値を使うことで過大に地位指数を推定する可能性がある。

上層木平均樹高を精緻化する方法の一つとして、メッシュ内の適したパーセンタイル値（全体を 100 として小さい方から数えて何番目になるのかを示す数値）を抽出する方法があげられる。パーセンタイル値を算出する作業手順が難易であるため本事業ではこの手法を検討していないが、容易な作業手順が開発されれば、この方法を検討し精緻化に繋げることが可能と考えられる。[高橋, 栗屋, 田中, 2013]らによれば、超高密度での航空機 LiDAR 計測では 80 パーセンタイル値が適しているという報告があるが、より一般的な点密度の 1 点/m² や 4 点/m² における適切なパーセンタイル値を検討し、それを実装することでより精度が高い上層木樹高の推定が期待できる。

3.2. 林齢の不確実性に対する検討

本事業における地位指数の推定は林齢に依存する手法である。林齢は森林簿といった帳簿から参照するが、林齢精度が不確実である場合も多い。この課題について、林齢情報の更新、または林齢を使わない手法による対応が考えられる。

前者については、過去の空中写真や衛星画像を使った主伐時点の情報を入手し、現時点のより正確な林齢を得るという手法が考えられる。衛星画像を使った過去の伐採履歴については、図 46 に示したように Google Earth Engine にて Landsat 画像を用いた方法が開発されており、1980 年代からの伐採履歴情報を入手することができる（[Shimizu Saito, 2021]）。

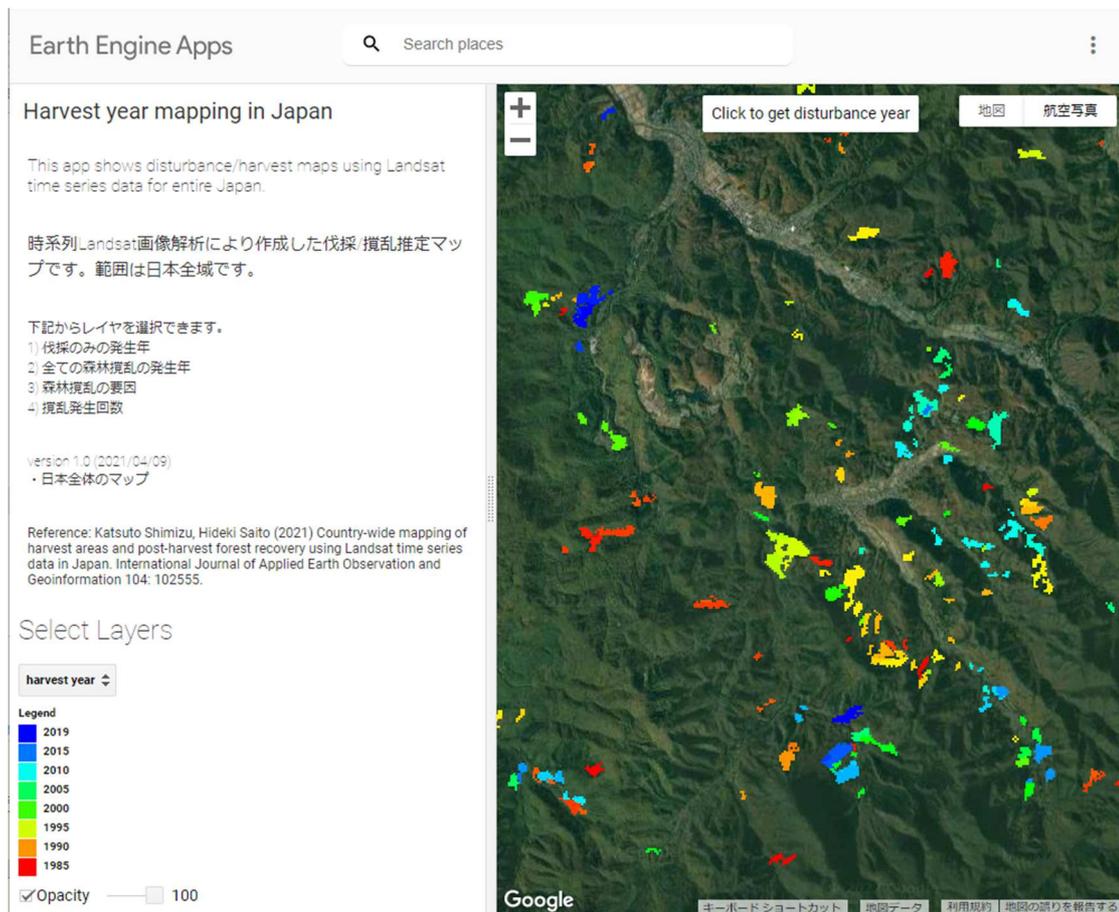


図 46 [Shimizu Saito, 2021]らによる Google Earth Engine を使った主伐地の抽出

3.3. 実証サイトにおけるより詳細な検討

試行した地位指数分布図に対して、徳島県や新潟県でのヒアリングにより妥当であろうという回答は得ているが、詳細な精度検証は実施していない。現地での地位指数の精度評価には相応の時間を要するが、どのような方法での精度を評価できるのかの検討があれば、都道府県担当者も作成された地位指数分布図の評価がしやすいと考えられる。

また、実証エリアについては、徳島県、茨城県、新潟県の3県であったが、より多くの都道府県に拡大とすることで本事業の方法論を評価でき、また普及にもつながると考えられる。

第4章 引用文献

NishizonoTomohiro, ZushiKotaro, HiroshimaTakuya, ToyamaKeisuke, KitaharaFumiaki, TeradaFumiko, . . . SaitoSatoshi. (2018). Latitudinal variation in radial growth phenology of *Cryptomeria japonica* D. Don trees in Japan. *Forestry*, 91, 206 – 216. doi:10.1093/forestry/cpx055

ShimizuKatsuto, SaitoHideki. (2021). Country-wide mapping of harvest areas and post-harvest forest recovery using Landsat time series data in Japan. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104. doi:10.1016/j.jag.2021.102555

伊藤幸介, 塚原雅美. (2021). 高齢級スギ人工林調査データを用いた地位指数曲線の延長. 新潟県森林研究所研究報告(61), 28-31.

光田靖, 鹿又秀聡, 松本光朗. (2013). 森林炭素動態シミュレーションシステムを用いた気候変動が森林炭素吸収量に及ぼす影響評価の試行. *統計数理*, 61(2), 181 - 188.

高橋與明, 栗屋善雄, 田中真哉. (2013). 航空機 LiDAR によるスギ・ヒノキ林分の平均樹高推定— レーザ点密度を変えた場合の事例 —. *九州森林研究*, 66, 6-9.

大分県. (2019). 大分県収穫表改訂調査報告書.

竹下敬司. (1964). 山地の地形形成とその林業的意義. *福岡県林業試験場時報*, 17, 2-109.

徳島県農林水産部林業飛躍局林業戦略課. (2012). 徳島県スギ林分収穫表. 徳島県.

徳島県農林水産部林業飛躍局林業戦略課. (2013). 徳島県ヒノキ林分収穫表. 徳島県.

独立行政法人森林総合研究所. (2005年3月). 平成16年度森林吸収源データ緊急整備事業調査報告書. 39.

日本林業技術協会. (1999). 林野庁監修 人工林林分密度管理図解説書.

標準化事業検討委員会, 解析・管理分科会, 計測分科会. (2022). 森林資源データ解析・管理標準仕様書案 Ver1.2.

福井翔宇. (2019). 低密度航空レーザ計測データによる地位指数の推定とその課題. 第130回日本森林学会大会学術講演集原稿, 130, 110. doi:10.11519/jfsc.130.0_110

令和 3 年度

リモートセンシング技術等を用いた森林の機能別調査の手法に関する調査事業

報告書

令和 4 年 3 月

業務受託：一般社団法人日本森林技術協会

〒102-0085 東京都千代田区六番町 7 番地 TEL：03-3261-5281（代表）

担当者 金森匡彦