

公益社団法人 国土緑化推進機構

「緑と水の森林ファンド」事業助成

森林調査等におけるレーザ計測(航空・地上)活用手法  
の開発に関する調査研究

平成28年度報告書

平成 29 年 6 月

公益社団法人 森林保全・管理技術研究所

## は じ め に

本報告書は、森林保全・管理技術研究所のレーザ計測活用手法の開発部会の活動として、平成26年度から28年度までの3年間実施した「森林調査等におけるレーザ計測（航空・地上）活用手法の開発」について取りまとめたものです。

我が国の森林については、1000万haを超える人工林の半数以上が利用期を迎えて、この森林資源を有効に活用し、林業を成長産業とすることが大きな課題となっています。

日本の森林については、基本的には、国有林、民有林とも、全ての森林について、森林GISにより、森林簿（森林調査簿）の情報と森林基本図が結びつけられており、何処に、どのような森林が分布しているかを、容易に把握できるようになっています。

しかし、森林簿情報、森林基本図の精度がそれほど高くなく、実際に伐採計画、路網計画等を作成する場合には支障がでているのが現状です。

今後、林業活動を活性化させ、成長産業とするためには、森林情報を正確に把握し、効率的な事業を行うことが出来るようにする必要があります。

一方で、近年、レーザ計測技術を用いて森林を効率的かつ高精度に計測するとともに、これらデータを林業へ活用する技術が開発されてきています。

本調査では、このレーザ計測技術を使った、森林資源解析、出材量予測、路網計画への活用手法について開発調査し、まとめたものです。

本調査に当たり、森林を使用させていただくとともに、当該森林から搬出された木材の市売リデータを利用させていただいた岐阜県中津川市苗木財産区及び当該地域の航空レーザ計測データを貸付していただいた岐阜県林政部の皆様に感謝申し上げます。

平成29年6月

公益財団法人森林保全・管理技術研究所

レーザ計測活用の活用部会

## 目 次

第 1 章 調査の概要 .....	1
第 1 節 調査の目的 .....	1
第 2 節 調査体制 .....	1
第 1 項 委員会、WG 委員 .....	1
第 2 項 委員会、WG 開催状況 .....	1
第 3 節 調査結果の概要 .....	4
第 1 項 森林資源解析 .....	4
第 2 項 木材供給量情報整備 .....	5
第 3 項 林道の路線計画 .....	6
第 4 項 補間的手法 .....	7
第 5 項 地上レーザ計測による森林資源解析 .....	8
第 2 章 航空レーザ計測を用いた森林解析 .....	11
第 1 節 航空レーザ計測の現状 栗屋善雄 .....	11
第 2 節 森林資源解析 .....	13
第 1 項 航空レーザ計測の紹介 .....	13
第 2 項 苗木財産区での森林資源解析結果 大野勝正 .....	15
第 3 節 木材供給量情報整備 中島義雄、日比野基宏、北林拓 .....	36
第 1 項 概要 .....	36
第 2 項 平成 26 年度実施内容 .....	36
第 3 項 平成 27 年度実施内容 .....	56
第 4 項 平成 28 年度実施内容 .....	64
第 5 項 まとめ .....	81
第 4 節 航空レーザ計測を利用した路網計画 鈴木秀典 .....	82
第 1 項 路網計画への航空レーザ計測の活用 .....	82
第 2 項 図上路網選定への航空レーザ計測の利用 .....	83
第 3 項 航空レーザ計測を利用した土工量の算出の推定 .....	84
第 4 項 航空レーザ計測を利用した自動設計 .....	84
第 5 項 開設路線および開設地の概要 .....	85
第 6 項 土工量の算出 .....	89
第 7 項 結果と考察 .....	91

第5節 補完的手法 北林拓 .....	96
第1項 手持ちカメラを用いた森林資源解析 .....	96
第2項 UAV 写真計測を用いた森林資源解析 .....	111
 第3章 地上レーザ計測を用いた森林資源解析 加藤顕 .....	191
第1節 はじめに .....	191
第2節 解析方法 .....	192
第1項 地上レーザー .....	192
第2項 研究対象地 .....	193
第3項 現地計測 .....	194
第3節 結果と考察 .....	199
まとめ .....	202

## 第1章 調査の概要

### 第1節 調査の目的

国内人工林資源が利用期に達するに伴い効率的な木材生産システムの確立を通じた林業の再生が喫緊の課題となっている。

このためには、森林資源の量・質を正確に把握するとともに、路網計画を策定するためのより詳細な地盤情報を把握する必要がある。

一方で、レーザ計測のデータ解析技術は進歩しており、森林・林業分野への活用が期待されている。

このため、レーザ計測（航空・地上）により、林分ごとの資源状況を把握し、出材予想等木材供給量情報管理システム、効率的な路網計画を立てる支援システムを確立する。

### 第2節 調査体制

#### 第1項 委員会、WG 委員

##### 1. 委員会委員

岐阜大学流域圏科学研究センター教授	栗屋善雄
森林総合研究所森林路網研究室主任研究員	鈴木秀典
岐阜県林政課技術総括監（平成 26 年度）	高井峰好
岐阜県林政課技術総括監（平成 27 年度）	久松一男
岐阜県林政課技術総括監（平成 28 年度）	寺田秀樹
岐阜県森林組合連合会代表理事副会長	正村洋一郎
千葉大学園芸学研究科助教	加藤顕
アジア航測株式会社総括技師長	矢部三雄

##### 2. ワーキンググループ委員

岐阜県森林組合連合会	中島義雄
岐阜県森林組合連合会	廣田智行
岐阜県森林組合連合会	日比野基宏
岐阜県森林組合連合会	富常 覚
グリーン航業株式会社	後藤智哉
（アジア航測株式会社）	矢部三雄

#### 第2項 委員会、WG 開催状況

##### 1. 平成 26 年度

###### (1) 第 1 回 WG の開催

- 1) 日時 平成 26 年 11 月 11 日、12 日
- 2) 参加者 岐阜県森林組合連合会 中島、廣田、日比野  
アジア航測株式会社 大西、大野、和智  
計 6 名
- 3) 場所 岐阜県中津川市苗木財産区有林
- 4) 調査内容

- ① 対象区の概況踏査
- ② 0.04ha の円形プロット 12 箇所において、下記事項調査
- ③ 胸高直径・・・毎木
- ④ 樹高・・・・・・10 本
- ⑤ 下層植生の状況等調査

- (2) 第1回委員会及び第2回WGの開催
- 1) 日時 平成27年3月2日
  - 2) 参加者 委員 栗屋、高井、正村、矢部  
WG 中島、廣田、日比野  
アジア航測 大西、大野、黒澤  
計 10名
  - 3) 場所 岐阜県岐阜市岐阜森林文化センター
  - 4) モデル地区における航空レーザ計測データを利用した森林情報解析結果

- (3) 第2回委員会及び第3回WGの開催
- 1) 日時 平成27年6月17日
  - 2) 参加者 委員 栗屋、鈴木、高井、正村、矢部  
WG 中島、廣田、日比野  
アジア航測 大西、大野、黒澤  
計 11名
  - 3) 場所 岐阜県岐阜市岐阜森林文化センター
  - 4) 航空レーザ計測データを利用した森林情報解析結果からの出材量予測手法の検討

2. 平成27年度
- (1) 第1回WGの開催
- 1) 日時 平成27年12月7日
  - 2) 参加者 岐阜大学 栗屋  
千葉大学 加藤、多賀  
岐阜県森林組合連合会 中島  
アジア航測株式会社 大西、大野  
計 6名
  - 3) 場所 岐阜県中津川市苗木財産区有林
  - 4) 調査内容  
間伐実施予定地において、地上レーザ計測を実施

- (2) 第1回委員会及び第2回WGの開催
- 1) 日時 平成28年3月22日
  - 2) 参加者 委員 栗屋、高井、鈴木  
WG 中島、廣田、日比野、後藤、田村  
アジア航測 大西、大野、黒澤  
計 11名
  - 3) 場所 岐阜県岐阜市岐阜森林文化センター
  - 4) 内容
    - ① 26年度実施結果及び27年度業務の概要
    - ② 地上レーザと無人飛行機(UAV)を用いた森林資源モニタリング説明
    - ③ 航空レーザ解析報告(間伐予定箇所)

- (3) 第3回WGの開催
- 1) 日時 平成28年4月20日
  - 2) 参加者 WG 日比野、後藤  
アジア航測 大西、大野、北林  
計 5名
  - 3) 場所 岐阜県中津川市苗木財産区有林
  - 4) 内容 間伐実施後の残存木調査
- (4) 第2回委員会及び第4回WGの開催
- 1) 日時 平成28年6月14日
  - 2) 参加者 委員 栗屋、加藤、久松、正村、矢部  
WG 中島、日比野、後藤  
アジア航測 大西、大野、北林、黒澤  
計 13名
  - 3) 場所 岐阜県岐阜市岐阜森林文化センター
  - 4) 内容
    - ① 地上レーザ計測による森林解析結果
    - ② レーザ解析によるABC材の出材量予測手法
    - (ア) 対象地での間伐実施状況
    - (イ) 過去の実績から推計する方法
    - (ウ) 細り表から機械的に採材する方法
    - ③ SfM技術による森林計測

### 3. 平成28年度

- (1) 第1回WGの開催
- 1) 日時 平成28年11月28日
  - 2) 参加者 グリーン航業株式会社 後藤  
岐阜県森林組合連合会 日比野  
アジア航測株式会社 大西、大野、和田  
計 5名
  - 3) 場所 岐阜県中津川市苗木財産区有林
  - 4) 調査内容  
間伐前の状況について
    - ① 無人飛行機(UAV)により写真計測
    - ② プロット調査

- (2) 第1回委員会及び第2回WGの開催
- 1) 日時 平成29年4月12日
  - 2) 参加者 委員 鈴木、寺田、正村、矢部  
WG 中島、日比野、後藤  
アジア航測 大西、大野、北林  
計 10名
  - 3) 場所 岐阜県岐阜市岐阜森林文化センター
  - 4) 内容
    - ① 27年度実施結果及び28年度業務の概要

- ② 無人飛行機（UAV）を用いた森林資源解析結果
- (3) 第3回WGの開催
- 1) 日時 平成29年4月28日
- 2) 参加者 グリーン航業株式会社 後藤  
岐阜県森林組合連合会 日比野  
アジア航測 大西、大野、金  
計 5名
- 3) 場所 岐阜県中津川市苗木財産区有林
- 4) 内容 間伐実施後の  
① 残存木調査  
② UAV写真計測

- (4) 第2回委員会及び第4回WGの開催
- 1) 日時 平成29年5月31日
- 2) 参加者 委員 粟屋、鈴木、寺田、正村、矢部  
WG 中島、日比野、後藤  
アジア航測 大西、大野、北林、黒澤  
計 12名
- 3) 場所 岐阜県岐阜市岐阜森林文化センター
- 4) 内容  
① レーザ解析によるABC材の出材量予測手法  
(ア) 対象地での間伐実施状況  
(イ) 過去の実績から推計する手法  
(ウ) 細り表から機械的に採材する手法  
② 森林レーザ計測及びUAV写真計測による森林解析結果  
③ 航空レーザ計測データを用いた林道の路線計画

### 第3節 調査結果の概要

#### 第1項 森林資源解析

##### 1. モデル地区の概要

モデル地域として、岐阜県中津川市の苗木財産区有林を設定した。

- ① 場所：岐阜県中津川市苗木  
② 森林所有者：苗木財産区  
③ 森林組合：中津川森林組合  
④ 面積：487.44ha  
うち人工林 316.3ha (ヒノキが 84%)

##### 2. 航空レーザ計測データを用いた森林資源解析結果

岐阜県より、当該地の航空レーザ測量データ（計測密度 4/m<sup>2</sup>）を借受け、これを用いて、森林資源解析を実施した。

- ① レーザ林相図を作成  
② ヒノキ人工林について、本数、一本ごとの樹高、胸高直径、材積を算出  
現地調査との比較では、本数は、0.96、樹高は0.96、材積は0.86の精度となった。  
ヒノキ総本数 377,365 本 総材積 130,335 m<sup>3</sup>となった。

- ③ ②を基に、小班単位でくくった、立木密度分布図、平均樹高分布図、収量比数分布図、平均胸高直径分布図、材積分布図を作成

## 第2項 木材供給量情報整備

### 1. 実施内容

上記地区において、間伐を実施し、実際に出材した量と、航空レーザ計測データによる森林資源解析結果を用いて予測した出材量との比較検証を行った。

予測手法としては、過去の実績から推計する方式と、細りを考慮して機械的に採材する方式を実施した。

#### ① 過去の実績から推計する方式

平成24年度に岐阜県林政部県産材流通課と岐阜県森林研究所が開発した「品質別木材生産割合の推計式」を使用した。航空レーザ計測データから把握した間伐実施区域内のヒノキ材積、本数、平均胸高直径、平均樹高を式に当てはめ算出した。

#### ② 細りを考慮して機械的に採材する方式

岐阜県作成の相対幹曲線式（細り表）を用いて、航空レーザ計測データから把握した間伐実施区域内のヒノキ立木について、3m材を機械的に採材し、丸太本数、材積を算出した。

ABC材の仕訳は難しいため、合算した。

#### ③ 市売り実績

最寄の市場に出荷し、販売した。

ABC区分は、販売価格により推計し区分した。

#### ④ 結果

以下の表のとおりとなった。

なお、伐採立木材積は、航空レーザ計測を用いた森林解析により算出した間伐実施区域内の立木材積に間伐率を乗じて算出した。

表 1-1 平成26年度ABC材の区分結果

	過去の実績	細り表	実績
A材	76.0	132.1	56.0
B材	9.8		73.5
C材	55.8		13.3
小計	141.6	132.1	142.8
残置材量	47.2	56.7	46.0
伐採立木材積	188.8	188.8	188.8

単位 : m<sup>3</sup>

表 1-2 平成27年度ABC材の区分結果

	過去の実績	細り表	市売り実績
A材	235.5	406.7	238.0
B材	138.1		103.4
C材	66.6		61.7
小計	440.2	406.7	403.1
残置材量	110.1	143.6	147.2
伐採立木材積	550.3	550.3	550.3

単位 : m<sup>3</sup>

表 1-3 平成 28 年度 ABC 材の区分結果

	過去の実績	細り表	市売り実績
A 材	293.6	685.2	363.9
B 材	102.2		157.0
C 材	185.2	—	40.0
小計	581.0	685.2	560.9
残地材量	145.2	41.0	165.3
計	726.2	726.2	726.2

単位 : m<sup>3</sup>

### 第3項 林道の路線計画

#### 1. 目的

航空レーザ計測から作成した詳細な地形図を利用することにより、林道の路線計画に関する机上検討の精度が格段に向上了し、現地で確認することが難しかった崩壊危険地や開設に適した緩傾斜地などを容易に見つけることができるようになり、現地踏査作業の効率性を大きく向上することができるようになった。

また、航空レーザ計測により作成された地形図等の上で林道の路線計画を作成するための林道設計システムが開発されている。

このシステムは、地形図等の上でルートを選定し、そのルートにカーブの曲率半径、路面の縦断勾配を設定しつつ調整し、平面計画を作成する。また、このルートの縦断図、横断図が自動的に作成できる。これに、道路幅、切り土、盛り土の法勾配を設定すれば土量計算を行うことができる。

本章では、路網計画における航空レーザ計測データの有効性を確認するため、このデータから求めた土工量精度を検証する。なお、土工量は設計書類の値を真として精度検証することとし、土工量の算出は設計書で用いられている方法を採用する。また、精度検証結果から、航空レーザ計測データを活用方法に関する考察を行った。

路網計画業務において、開設前に机上で精度よく土工量を推定することができれば、構造物の設置を抑えた経済的な路線の検討に有効である。さらに、作業道などの低規格路線で特に重要な切盛均衡の検討や、残土処理計画などに活用することも可能となる。このように、土工量の推定は業務の効率化や低コスト化に貢献するもので、航空レーザ計測データの効果的な活用方法の一つといえる。

#### 2. 土工量の算出

##### 1) 開設した林道の実施設計数量等

岐阜県中津川市下野字岩須地内に開設された林業専用道高鳥屋 1 線を対象として検討を行った。路線の主な規格を以下に示す。砂質土のため、切土のり面勾配はすべて 6 分になっている。また、幅員が 3.0m、左右の路肩がそれぞれ 0.25m で全幅員が 3.5m の一般的な林業専用道である。路線延長は 343.5m、起点、終点間の標高差が約 32m であり、路線全体の平均的な縦断勾配は約 9% となっている。

林道名	高鳥屋 1 線
林道区分	林業専用道
級別	2 級
延長	343.5m
全幅員	3.5m
切土量	1796.5 m <sup>3</sup>
盛土量	1306.5 m <sup>3</sup>

## 2) 航空レーザ計測データを用いた土工量の算出

土工量の算出には、航空レーザデータから作成した 0.5mDEM (Digital elevation model) をもとにした TIN を使用した。

これに、林道設計システムを用いて、林道を設計し、これに伴う切土、盛土の量を算出した。

当初、路面高および幅員を測点ごとに修正せず、路面高については全ての測点で変更量を±0.0m として土工量を算出した。その結果、実際の土工量に対し、切土量で 13%、盛土量で 44% となった。

本線は林業専用道であるため、走行の快適性などを考慮して縦断勾配の変化点を少なく、なるべく一定勾配になるように路線を計画していること、また、カーブでは、幅員を拡張していることから、これに合わせて修正した結果、切土量で 111%、盛土量で 114% となった。

これは、実施設計の際の横断測量が、ポールを用いて測っていることを考慮すれば十分信頼できる精度である。

## 3) 結果

近年、航空レーザだけでなく、地上レーザや多視点からのステレオ写真測量 (SfM : Structure from Motion)、UAV 撮影による DSM 作成など種々の技術が出てきている。特に写真を用いた測量では、植生などによって地面が写らない状態では、欲しい地形情報が得られないという課題は残るもの、これまで得られなかつた微地形を得られるようになれば、今後の林道設計に有用な道具となる。また、DEM などの立体モデルの利用がさらに進めば、設計段階から土工量算出などに活用することが考えられる。従来の土工量は、測点ごとの横断測量から得た離散的な地形情報から求めていたが、正確な DEM によって開設前後の地形を比較すれば、実際の工事で取り扱った正確な土工量を求めることができ、設計業務が大きく変わることも考えられる。一般道ではそのための検討も始まったところであり（重高ら、2012）、路線設計分野での航空レーザ計測データの有効性は今後ますます大きくなっていくものと思われる。

### 第4項 補完的手法

#### 1. SfM 技術による森林資源解析

##### (1) SfM 技術について

Structure from Motion (SfM) は複数の画像から撮影位置と姿勢の解析を行い、画像と画像との対応関係を解析し三次元空間を推定する技術である。特別な計測機材を必要とせず手持ちカメラで撮影した画像を解析に使用でき、解析ソフトもフリーソフトから 100 万円ほどであることから比較的簡単に誰でも行うことができる計測手法である。

##### (2) SfM 解析による 3D モデル化と立木本数

現地調査において円形プロットの中の樹木の画像を撮影し SfM 解析を行い、3D モデルを作成した。立木本数の算出は 3D モデル化した樹幹の本数を確認することで算出した。現地調査の結果 4 プロットの合計 104 本に対し 3D モデルでは 102 本となった。

##### (3) 胸高直径の推定

3D モデルより単木の胸高断面を抽出し、胸高直径を円推定により推定した。現地調査結果の平均胸高直径 22.9cm に対し、3D モデルの平均胸高直径は 25.2cm となり RMSE は 3.0cm であった。さらに単木の地上高 7~8m ほどまで 3D モデル化できたため、枝条の影響の少ない 5m ほどまでは胸高断面以外にも円推定を行った。撮影方法や現地調査方法、円推定の方法には見当が必要であることが分かった。

##### (4) 3D モデルと航空レーザ計測の比較

3D モデルと航空レーザ計測の結果より樹木位置を比較した。航空レーザ計測は間伐前、3D モデルは間伐後であるため、相違を確認し森林資源情報の更新について検討した。現地調査結果の間伐率が 31.1%

であるのに対し、3D モデルと航空レーザ計測の比較では 26.6% となつた。3D モデルと航空レーザ計測を比較するうえで地上での森林情報（立木本数、樹木位置）と上空からの森林情報には違いがあるという課題があつた。今後、航空レーザ計測と UAV 計測（レーザ、写真）や地上レーザ計測と組合せ、どの計測手法が森林資源情報の更新に相応しいか検討していく。

## 2. UAV 写真計測を用いた森林資源解析

### (1) UAV 写真計測の特徴

UAV による計測については、

- ① 地上調査に比べ立ち入りや地形上の制約が少ない
- ② 機動的な実施が可能である。
- ③ 広範囲（数十 ha）に効率的な計測が可能である。

等の利点があることから、労働者が減少している林業界での活用が期待される。

さらに、Structure from Motion (SfM) 技術を使用することにより、森林の 3 次元情報を取得できるため、樹高、毎木位置図を正確に計測でき現地調査を飛躍的に効率化できると期待されている。

### (2) 対象地の計測

本調査では、国内で一般的に使用されている Phantom4 を使用した。写真機は Phantom4 に標準搭載されているものを使用した。

平成 28 年度間伐実施箇所 9ha について、間伐実施前と間伐実施後の状況を、対地高度 50m と 100m の 2 パターンで計測した。

作業人員は、操縦者と補助者の 2 名で実施した。

計測は、自動飛行で行い、計測時間、写真枚数は、対地高度 50m で 39 分、412 枚、対地高度 100m で 22 分、279 枚となった。

### (3) UAV 写真計測による森林解析結果

#### 1) 位置精度

撮影時に GPS より位置情報が画像情報として示されている EXIF だけでは、航空レーザ計測の位置とは合わない。このため、GIS 上に GCP を設置し位置の補正を行うことが必要である。これにより高さの誤差が 2m 以内となった。

#### 2) 点群

航空レーザに比べ樹冠形状の再現性が乏しく、樹頂点数が少なくなる傾向にあり、このため、本数精度は低くなった。

#### 3) オルソ

解像度が細かく、枝まで識別でき、森林の状況確認には、十分使用できる。

#### 4) 森林解析

樹高は使用できるが、本数については、現在のところ使用できない。

このため、総体積法による林分材積の算出は可能である。

## 第5項 地上レーザ計測による森林資源解析

### 1. 地上レーザの特徴

地上レーザは、センサーを林内に設置してデータを取得するため、取得される 3 次元データは樹冠下部からのレーザ反射が多い。森林内部の詳細な状況が計測できるため、幹部を容易に計測できる。さらに、非破壊で森林の 3 次元構造を計測できるため、樹高、胸高直径、毎木位置図を正確に計測でき毎木調査等で行われている現地調査を飛躍的に効率化できると期待されている。

## 2. 対象地の計測

本研究では、国内で最も安いレーザースキャナーの一つである LMS511 (SICK 社製) を使用した。計測可能距離は 50m である。

地上レーザーセンサーの設置方法は、調査プロットの中心に 1 箇所まず設置し、水平方向で全方位(360 度) のデータを取得し、さらに、調査区画のコーナーに 4 箇所設置し、プロット全体のデータを取得した。本研究で使用したレーザーセンサーの性能である最大照射距離を考慮し、それ以上の大きさのプロットにならないように気をつけなければならない。

### 3. 地上レーザ計測結果を用いた森林解析

地上レーザから幹部の樹木位置図を作成する。作成した樹木位置（幹部）の場所を基準に、地上レーザを胸高の高さ（1.2m）で切り出し、その幹直径を自動計測した。樹高は、切り出した単木単位のレーザ点群の最大の高さとした。

レーザによる 3 次元データから幹を計測する解析手法として、円を当てはめて幹直径を推定する方法が主流であるが、ニューラルネットワークの手法を応用し、複雑な幹形状をそのまま正確に計測できるアルゴリズムを開発した。その結果、人が現場で計測するのと同じ精度で計測ができるようになった。

さらに、本研究では、樹木の曲がりを評価するために、幹部の中心位置を高さ 1m 間隔でレーザデータを抜き出し、中心位置を自動で把握した。

### 4. 結果

精度を評価するために各結果から平均二乗誤差を樹高と胸高直径で計算したみたところ、樹高では 1.38m で、胸高直径では 2.13cm の誤差で計測できていることがわかった。これらの結果より人が計測するのと同等の正確性で材積を評価するために必要な樹高と胸高直径が計測できた。

また、曲がりに関しても樹冠下までは幹の曲がりを自動で計測することができる事がわかった。これら情報をもとに、材質を評価する ABC 材等の評価に結果を反映したい。



## 第2章 航空レーザ計測を用いた森林資源解析

### 第1節 航空レーザ計測の現状

レーザ計測は英語では Light Detection And Ranging(LiDAR)と呼ばれ、カタカナでライダーと表記されることも多い。航空レーザ計測の技術は 1960 年代に地盤高の計測などを目的として開発され(Remple & Parker 1964, Jensen 1967)、航空レーザ測量を利用して森林を含む地表面の起伏を表現できることが明らかにされた(Schreier ら 1985)。この頃のレーザ測器は航空機の直下だけを計測するプロファイラだったが、樹冠の形状などを正確に記録できる技術として画期的だった。その後、走査のメカニズムを備えたレーザスキャナが開発されて計測範囲が線から面へ広がるとともに、航空機の位置や姿勢を計測する GPS と慣性計測装置 (IMU) が登場して、レーザパルスの反射点の緯度、経度および標高を正確に計測できるようになった。

北米では航空レーザ計測の技術は 1980 年代から森林の計測に活用され始めたが(Schreier ら 1985, Nelson ら 1988)、日本での森林への利用は 1990 年代の後半に航空レーザ計測が一般的になってから始まった(大政ら 2000)。森林への利用は単木抽出や樹高推定(平田 2005, 田口ら 2008)、樹種分類など多岐に及ぶが、林分あるいは単木の材積推定が最大の目的で、諸外国でも数多くの研究例が報告されている(Nilson 1996, Næsset 1997, 都築ら 2006, 松英ら 2006, Takahashi ら 2010)。とくに都築ら(2006)は、レーザ計測により計算できる、樹冠が構成する空間体積と材積の関係を理論的に導いており、レーザ計測に基づく材積推定の基本概念として意義深い。

航空レーザ計測による地表面の位置の測定精度は、GPS や IMU の計測結果から推定される航空機の位置および姿勢の精度と、レーザで計測される標高の測定精度に大別される。個々の機器についての公称精度(カタログスペック)では、水平方向および垂直方向ともに位置精度は 10cm 未満であるが、航空測量を行った場合、計測値の精度は機器の公称精度より下がる。標高の測定精度は飛行高度が高いほど低下するが、一昔前の航空レーザスキャナでも対地高度 2,000m で観測した場合、10~25cm 程度とされている(日本測量調査技術協会 2008)。このように、航空レーザ計測による樹冠表面高の計測精度が非常に高いのに対して、森林の場合、地面の標高(地盤高)の精度は、樹冠を通り抜けて地面に到達するレーザビームの数に依存する。地面に到達したビームを選択して、内挿によって地盤高モデル(DTM)を作成するからである。2000 年代前半にレーザ計測で作成された DTM は、密林ではレーザビームが樹冠上部で反射されて地面に到達せず、樹冠表面を地面と判定して作成されていた。2010 年頃に作成された DTM でも、頻度は少ないが樹冠上面を地面として DTM を作成している箇所が認められた。森林計測の精度は DTM の精度に依存すると言って過言ではないが、森林域の DTM 作成について、観測スペックなどの明確な指針は示されていない。

ところで、初期の航空レーザスキャナは 1 ビームを照射し、地表で反射された 1 パルスのみを記録したが、近年はスキャナが高性能化して 1 ビームに対して複数の箇所で反射されたパルスを記録できる機材がある。また、戻ってきたパルスから標高を算出するだけではなく、パルスの強度を記録する波形レーザと呼ばれるレーザスキャナも登場して、航空レーザ計測の可能性が一段と広がっている。

航空レーザ計測と光学センサによる衛星リモートセンシングを比較すると、前者は直接計測であるのに対して、後者は間接推定である。光学センサでは観測されたスペクトル(色)情報と樹種や材積などの関係を類推して森林を解析する。物理的な根拠はあるものの、大気や地形の影響、および季節変化などのために物理的推定と言うより類推に近く、解析結果は不安定で精度が悪い。航空レーザ計測では高さという物理量を高精度で直接計測できる。樹木の各部位のサイズは概ね比例することから、樹冠高の情報から様々なバイオマスに関する情報を推定することが可能である。航空レーザ測量の計測精度は、地上での樹高測定の精度を超えていると考えられ、今後は樹冠高や胸高直径および材積の推定精度の安定化と精度向上を図って実用化を目指すとともに、新たな用途を開拓する時代に入っていると言えよう。

<参考文献>

- 平田泰雅, 2005. 航空機レーザースキャナーデータを用いたヒノキ人工林における樹高と地形との関係. 日林誌, 87(6):497-503.
- Jensen,H., 1967. Performance of an airborne laser profiler. Proc. Airborne Photo-optical Instrumentation Symp., Feb. 20-21, 1967, Cocoa Beach, FL, USA.
- 松英恵吾・伊藤拓弥・内藤健司, 2006. 航空機 LiDAR による森林資源量推定—密度の異なるスギ・ヒノキの林分パラメータ推定—. 写真測量とリモートセンシング, 45(1):4-13.
- Næsset, E. 1997. Estimating timber volume with laser scanner data. Remote Sens. Environ. 61:246-253.
- Nelson,R., Swift R., Krabill, W., 1988. Using Airborne Lasers to Estimate Forest Canopy and Stand Characteristics. Journal of Forestry, 86(10):31-38.
- Nilsson,M. 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. Remote Sens. Environ. 56:1-7.
- 日本測量調査技術協会編, 2008. 図解 航空レーザ計測 基礎から応用まで. 日本測量調査技術協会, 東京, 208pp.
- 大政兼次, 秋山幸秀, 石神康弘, 吉見健司, 2000, ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムによる樹冠高の3次元リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌, 20(4):34-46.
- Remple, R.C., Parker, A.K., 1964. An information note on an airborne laser terrain profiler for micro-relief studies, pp.321-337 in Proc. 3rd Symp. on Rem. Sens. of Env., U. of Michigan Inst. of Science and Technology, USA.
- Schreier, H., Lougheed, J., Tucker, C., Leckie, D., 1985. Automated measurements of terrain reflection and airborne infrared laser system. INT. J. Remote Sensing, 6(1):101-113.
- 田口仁・遠藤貴弘・安岡善文, 2008. LiDAR 点群データを用いた樹冠形状モデルに基づく単木樹冠抽出および樹高推定. 写真測量とリモートセンシング, 28(4):331-341.
- Takahashi, T., Awaya, Y., Hirata, Y., Furuya, N., Sakai, T., Sakai, A., 2010. Stand volume estimation by combining low laser-sampling density LiDAR data with QuickBird panchromatic imagery in closed-canopy Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations. International Journal of Remote Sensing, 31(5):1281–1301.
- 都築勇人, 日下部朝子, 末田達彦, 2006. 航空レーザー測距法によるカナダ西部亜寒帯林の広域森林蓄積推定. 日林誌, 88(2):103-113.

## 第2節 森林資源解析

### 第1項 航空レーザ計測の紹介

#### 1. 航空レーザ計測の概要

航空レーザ計測というのは、航空機から、地上に向かってレーザを照射し（7万発/秒以上）、反射してくれるパルスを計測することにより、地上の情報を得る方法である。この時、GPS（全地球測位システム）とIMU（慣性計測装置）により、航空機の位置及び姿勢を把握することができるため、レーザ測距装置によりレーザ発射方向、対象物までの距離を計測することができ、反射パルスの1発ごとの地理座標（X、Y）、標高（Z）を精確に算出することが出来る。

また、地盤解析、森林解析の際に参考とするため、一般的にレーザ計測と同時に簡易オルソ写真も撮影している。



図 2-1 航空レーザ計測の概要

2. 三次元計測データ作成及びオリジナルデータ作成  
 航空レーザ計測で取得したデータの照射角、ジャイロ回転角、加速度、空中GNSS情報及び地上GNSS情報を統合させ、各計測ポイントの3成分(XYZ)を解析し三次元計測データを作成する。  
 オリジナルデータは、三次元計測データから作成し、ノイズ(異常標高値)の除去を行う。  
 航空レーザ計測で同時に取得したデジタル空中写真から、航空レーザ用写真地図データ(地上解像度25~50cm/pixel)を作成する。
3. グラウンドデータ作成  
 オリジナルデータからフィルタリング処理を行い、地表面の高さを示すデータを作成する。自動フィルタリングを行い、その後に手動フィルタリングを行う。手動フィルタリングでは陰影図などの地形表示を行っており、現手法で地盤面形状の確認を行い精度向上に努めるものとする。
4. グリッド(標高)データ作成  
 グリッドデータは、グラウンドデータから内挿補間により0.5mグリッドで作成するものとする。
5. 等高線データ作成  
 グリッドデータを用いて、1m間隔の等高線データを作成する。
- (1) 森林分野における航空レーザ計測の特徴
- 地形解析の特徴
    - ・広域の荒廃状況(位置、規模、形状等)を正確に把握できる。
    - ・樹木下の微細な地形を把握できる。
    - ・多時期のデータがあれば、地形や土砂の変動量を把握できる。
    - ・既施工地(山腹工、渓間工、路網等)の位置、規模を正確に把握できる。
    - ・任意の場所での縦横断図を作成し、計画の概略を作成できる。
    - ・鳥瞰図の作成など各種説明用に活用できる。
- (2) 成果品例  
 地形図(平面図)、オルソフォト画像、微地形立体地図、鳥瞰図、ビューワなど

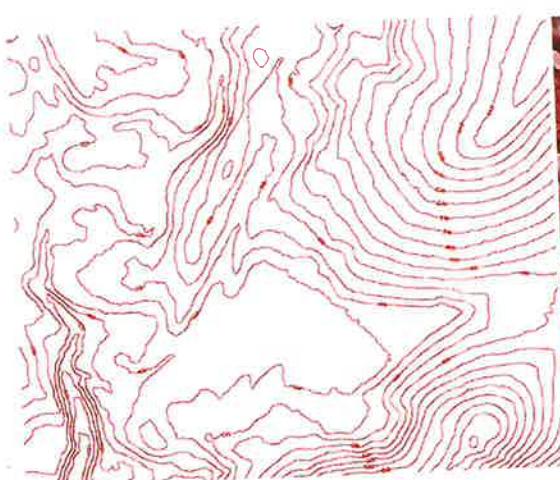


図 2-2 地形図



図 2-3 微地形判読図

- 樹木解析の特徴
- ・センサーデータであるため、地形や雲など影の影響を受けない。
  - ・レーザデータなので倒れ込みがなく、不可視領域がない。
  - ・空中写真で生じる接合部の色調の違いが生じない。

- 森林レーザ解析で得られる情報(4点/m<sup>2</sup>の場合)
  - ・樹高(小班単位、単木レベル)
  - ・立木密度
  - ・胸高直径(樹冠面積からの推定)
  - ・材積(小班単位、単木レベル)、収量比数
  - ・樹冠長(率)(長伐期施業対象林分)
  - ・荒廃林の分布把握
  - ・林分垂直構造の把握

## 6. まとめ

- ・現地調査では得ることの難しい多様な情報を取得できる。  
(詳細地形図(地盤図)を現地に持参することにより現地作業の効率化が可能)
- ・入山困難箇所の情報を取得できる。
- ・短期間で大面積の森林(地形)情報を一定精度で面的に把握可能。
- ・地理・地形データ情報も GIS で一元管理が可能。
- ・解析データだけでなく、現地調査データ、地理・地形データ情報も GIS で一元管理が可能。
- ・解析データだけでなく、現地調査データ、地理・地形データ情報も GIS で一元管理が可能。
- ・レーザ計測データは3次元情報データであるため、鳥瞰図作成など説明資料に使える。

## 第2項 苗木財産区での森林資源解析結果

### 1. モデル地区の概要

- 場所：岐阜県中津川市苗木
- 森林所有者：苗木財産区
- 管轄森林組合：中津川森林組合
- 森林概況：約 490ha=SGEC 森林認証、J-クレジット制度認証地



図 2-4 中津川市苗木地区の位置

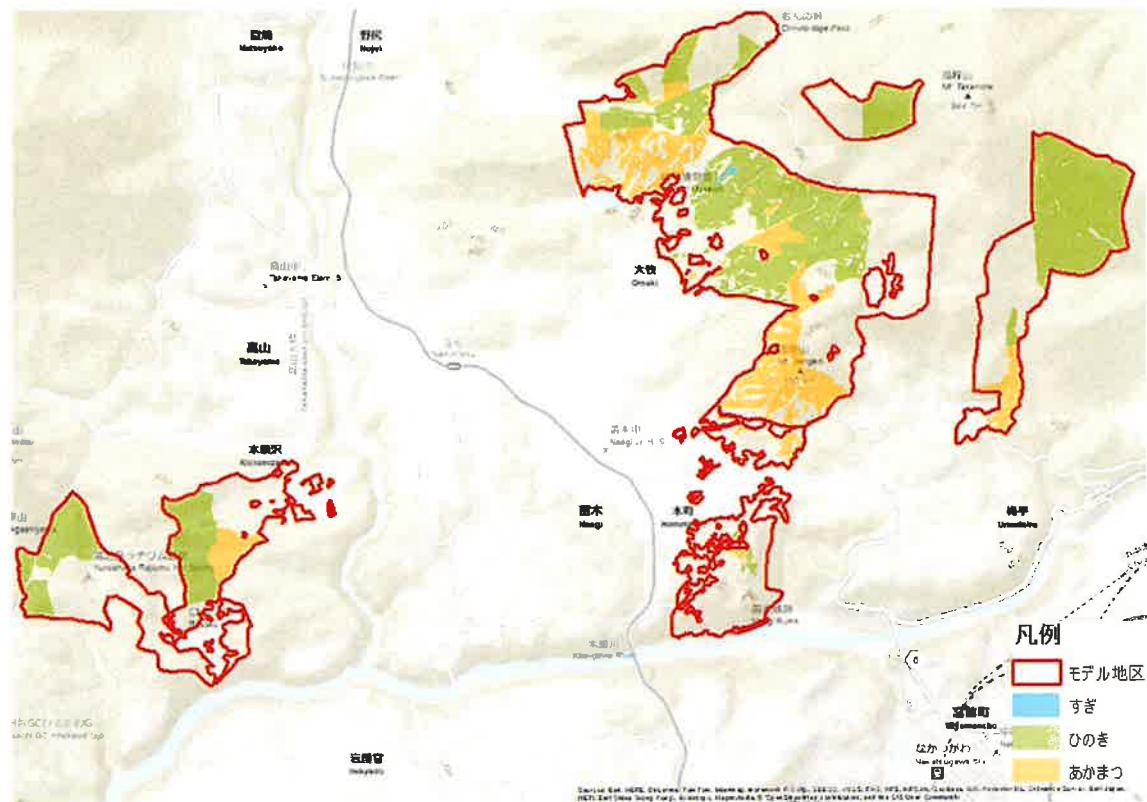


図 2-5 モデル地区の位置

表 2-1 種別・齢級別面積

齢級	人工林				天然林			未立 木地等	総計
	スギ	ヒノキ	マツ類	計	針葉樹	広葉樹	計		
5			0.26	0.26					0.26
6		0.41	0.09	0.50					0.50
7		16.55	0.34	16.89					16.89
8	0.14	25.02	0.17	25.33					25.33
9	0.52	15.99	0.36	16.87		0.50	0.50		17.37
10		25.67	4.20	29.87					29.87
11		183.59	42.99	226.58	147.92	6.16	154.08		380.66
総計	0.66	267.23	48.41	316.30	147.92	6.66	154.58	16.56	487.44

単位:ha

表 2-2 路網整備状況（認証対象森林について）

	路網密度 (m/ha)
基幹路網（林道等）	41.69m/ha
細部路網（作業道）	65.78m/ha

表 2-3 素材生産量

総出荷量 (m <sup>3</sup> )	材積 (m <sup>3</sup> )	主な出荷先
H24	421.357	加子母森林組合
H25	573.952	加子母森林組合

#### 選定理由

- ① CO<sub>2</sub> 吸収量は J-VER 制度で計算済み
- ② 苗木財産区が独自に胸高直径等を継続調査中
- ③ 中津川森林組合が主体となって、今年度から森林経営計画を樹立予定
- ④ 中津川インターから 20 分で到達、林内路網密度が高くアクセスが容易
- ⑤ 岐阜県森連が全面的にバックアップしており、協力が得られやすい

#### 2. 森林資源解析結果

森林資源分析は「平成 25 年度 公共予防治山事業 航空レーザ計測業務」で取得された航空レーザ計測データ（2013 年 11 月～2014 年 1 月計測、4 点/m<sup>2</sup> の計測密度）を利用した。

#### 3. レーザ林相図の作成

森林資源の分布を把握するために、樹種の分布を正確に把握することが求められる。一般的には林相判読にオルソ画像や空中写真が用いられるが、これらの情報には以下ののような問題があることから、林相判読において誤判読が発生する場合がある。

- 撮影時の太陽光の状況（晴れや曇りなどの天候）で写真的色合いが異なる。
- 植生域は緑色系で表現され、樹種を識別するための情報が少ない。
- 地形の影響により谷部では影になり、影の範囲の判読が困難になる。
- 樹木の倒れ込みにより、判読した境界線に誤差が生じる。

このような問題を解決するため、アジア航測が開発したレーザ林相図（特許第 5592855 号）を作成した。レーザ林相図は以下の 3 つの構成要素から作成される。

- 樹冠高データ (DCHM)
- 樹冠高データから作成される樹冠形状（樹冠の凹凸）
- レーザの反射強度

上記の構成要素を図 2-6 に示す。右図は反射強度を画像化した結果である。照射されるレーザ波長は 1,064nm の近赤外波長であることから、反射したときに取得される反射強度は植生の違いを把握する指標に適している。

オルソ画像と作成したレーザ林相図を図 2-7～図 2-10 に示す。図 2-7 のオルソ画像中央部は影になっていて、樹種の識別が困難であるが、レーザ林相図では樹種の分布状況が明瞭に識別できる。また、オルソ画像では緑色系のみで表現される植生がレーザ林相図では複雑な色調で表現できることから、精度の良い林相判読が可能となる。

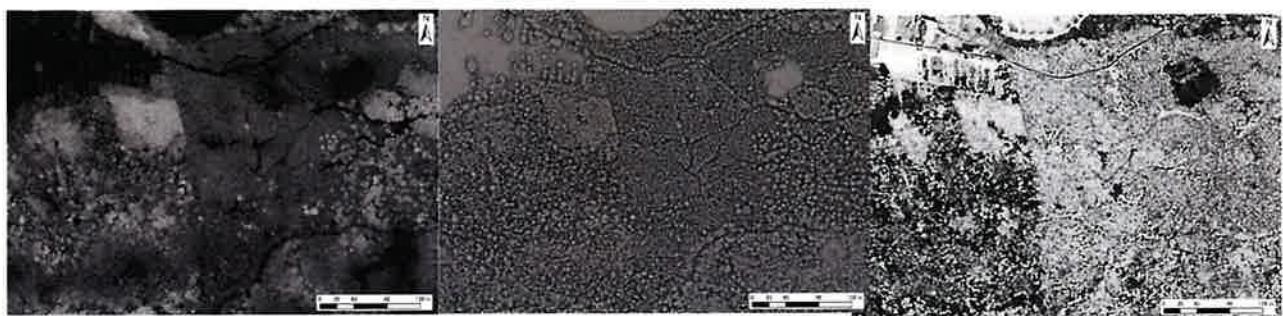


図 2-6 レーザ林相図の構成要素  
(左図：樹冠高データ画像、中図：樹冠形状画像、右図：反射強度画像)

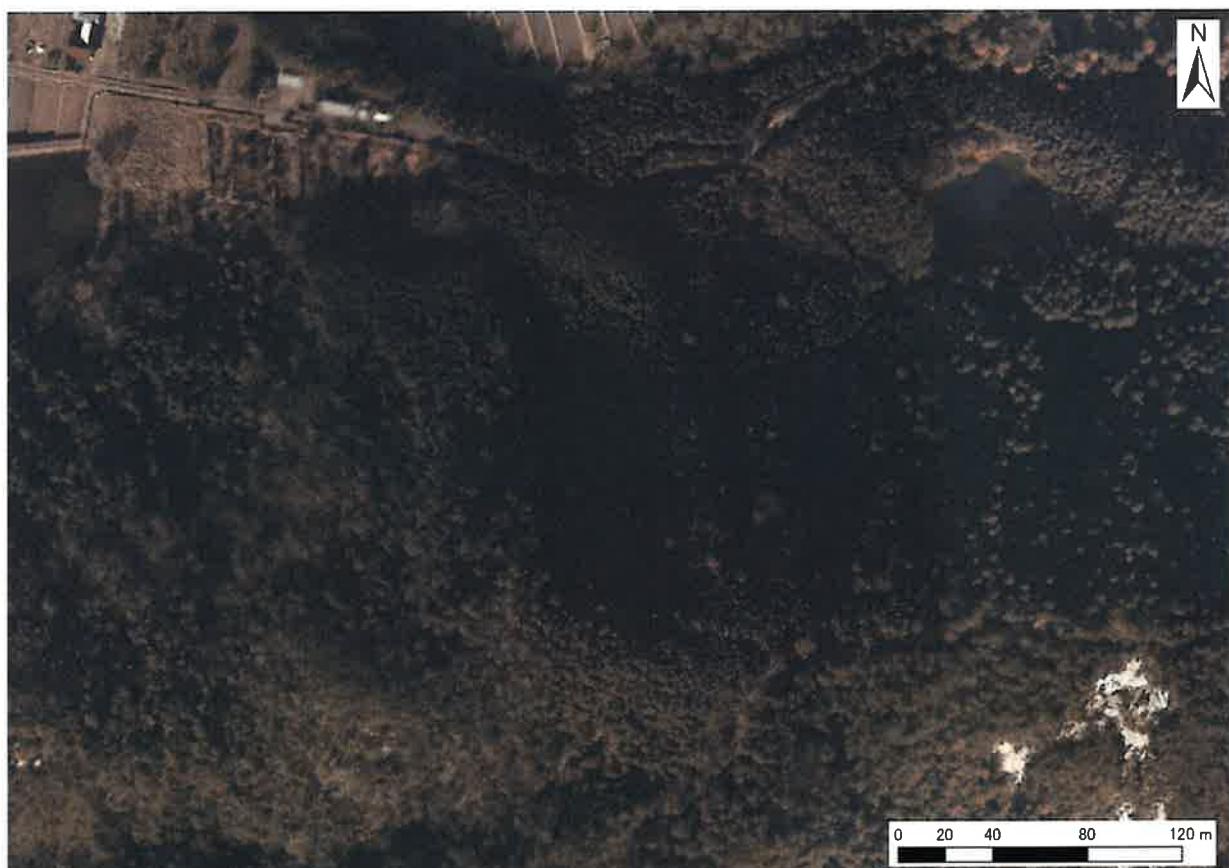


図 2-7 オルソ画像



図 2-8 レーザ林相図

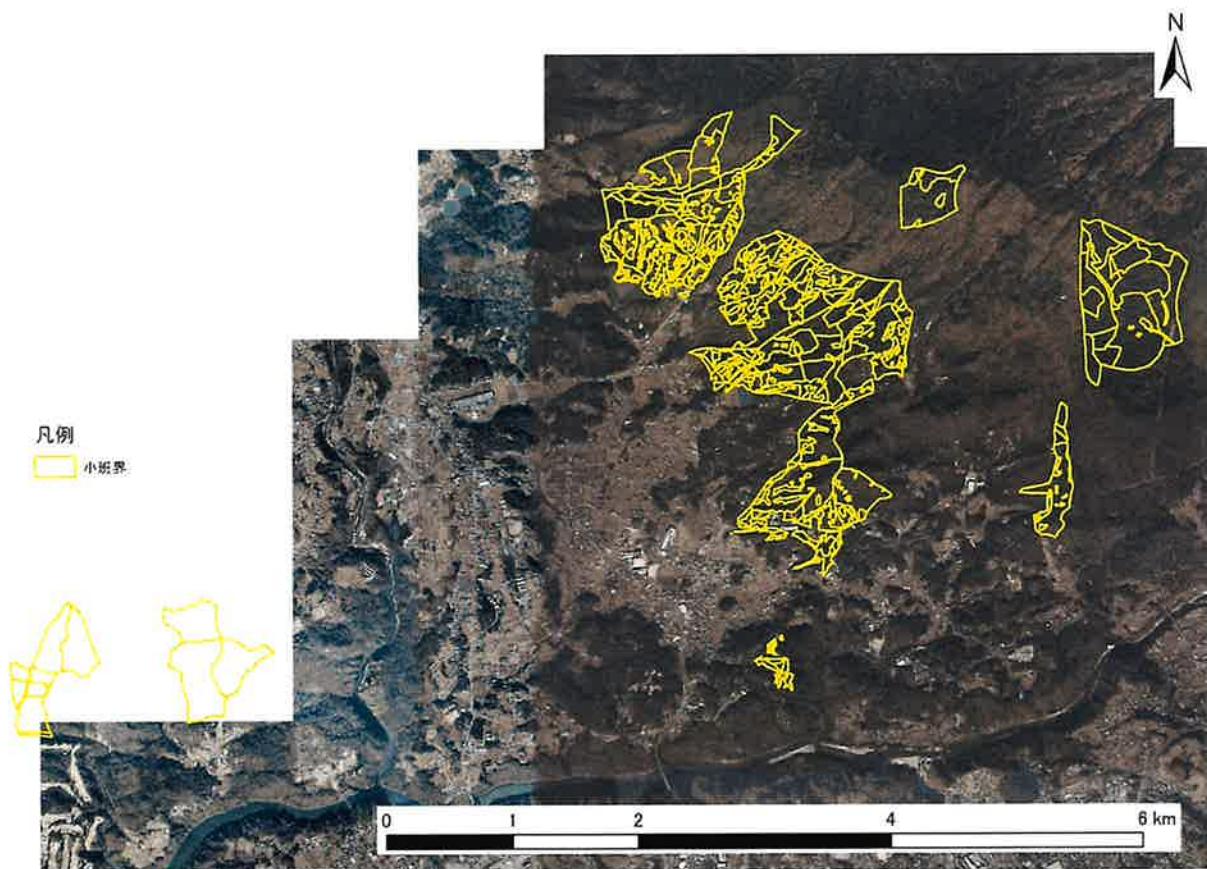


図 2-9 オルソ画像 全域

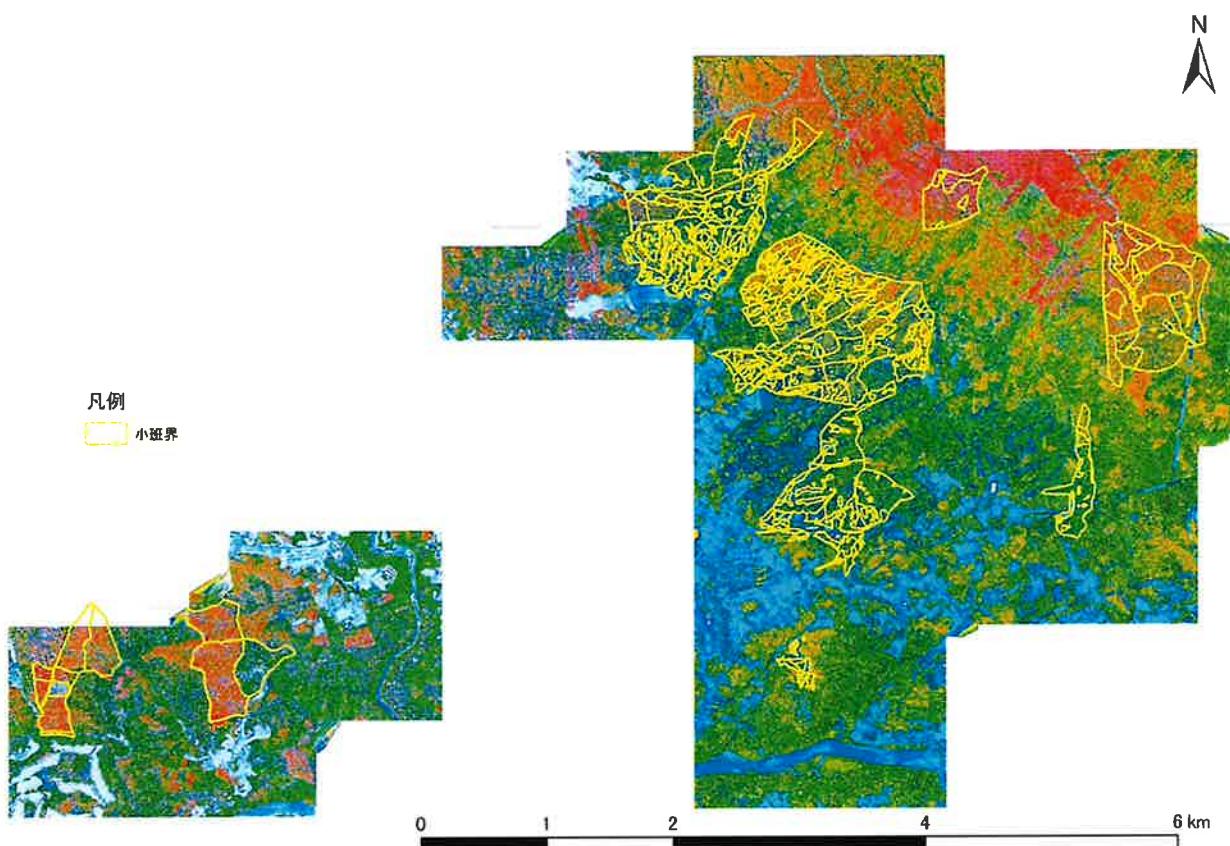


図 2-10 レーザ林相図 全域

#### 4. ヒノキ林のレーザ解析

苗木財産区に分布するヒノキ林を対象にレーザ解析による森林資源の把握を行った。レーザ解析により把握する森林資源の情報は、立木密度、樹高、胸高直径、材積、収量比数、樹冠長率である。単木単位で資源情報を解析し、小班界で資源情報を集計した。苗木財産区の小班分布を図 2-11 に示す。

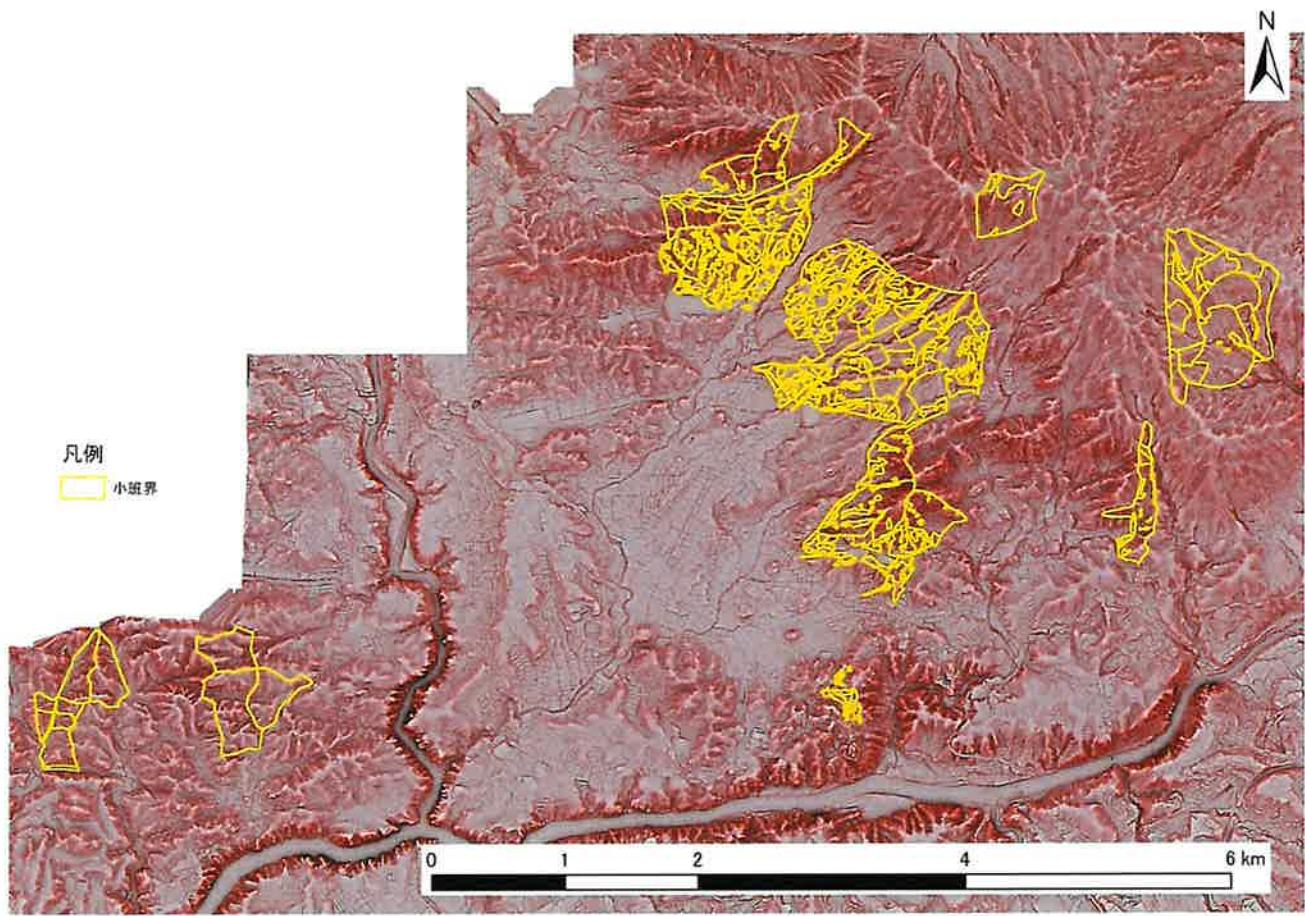


図 2-11 苗木財産区の小班分布

### (1) 立木密度と樹高情報の解析

ヒノキの樹木本数および樹高を把握するため、東京電力株式会社とアジア航測株式会社が共同で開発した樹頂点抽出技術（特許第4279894号）を用いて解析を行った。解析のフローは図2-12に示した①～④のステップで行う。初めに樹冠高データを角度情報の樹冠形状指数に変換する。樹冠高で樹頂点の位置を把握する場合、樹頂点の高さは林齡で異なり、一定の高さで樹頂点の位置を把握することは困難である。一方で、角度情報の樹冠形状指数は樹頂点の凸部の形状を角度で表現するため、樹高に関わらず、一定の値となる。①と②の画像を比べるとこの違いが分かる。①の樹冠高画像では樹頂点の高さが異なるため、樹高に応じて画像の明度（樹高）が異なるが、②の樹冠形状指数では樹頂点は凸部が一定の明度（角度）を持ち、樹冠の凹凸を均質に表現している。次に、この樹冠形状指数を用いて、樹冠部を抽出する。樹冠部は一定の値以上のまとまりを解析して抽出される。この樹冠部の抽出により、一つの樹冠に複数の凸部がある場合の過剰抽出を避けることができる。最後に、樹冠部の中で最も樹冠高が高い位置を樹頂点として抽出する。

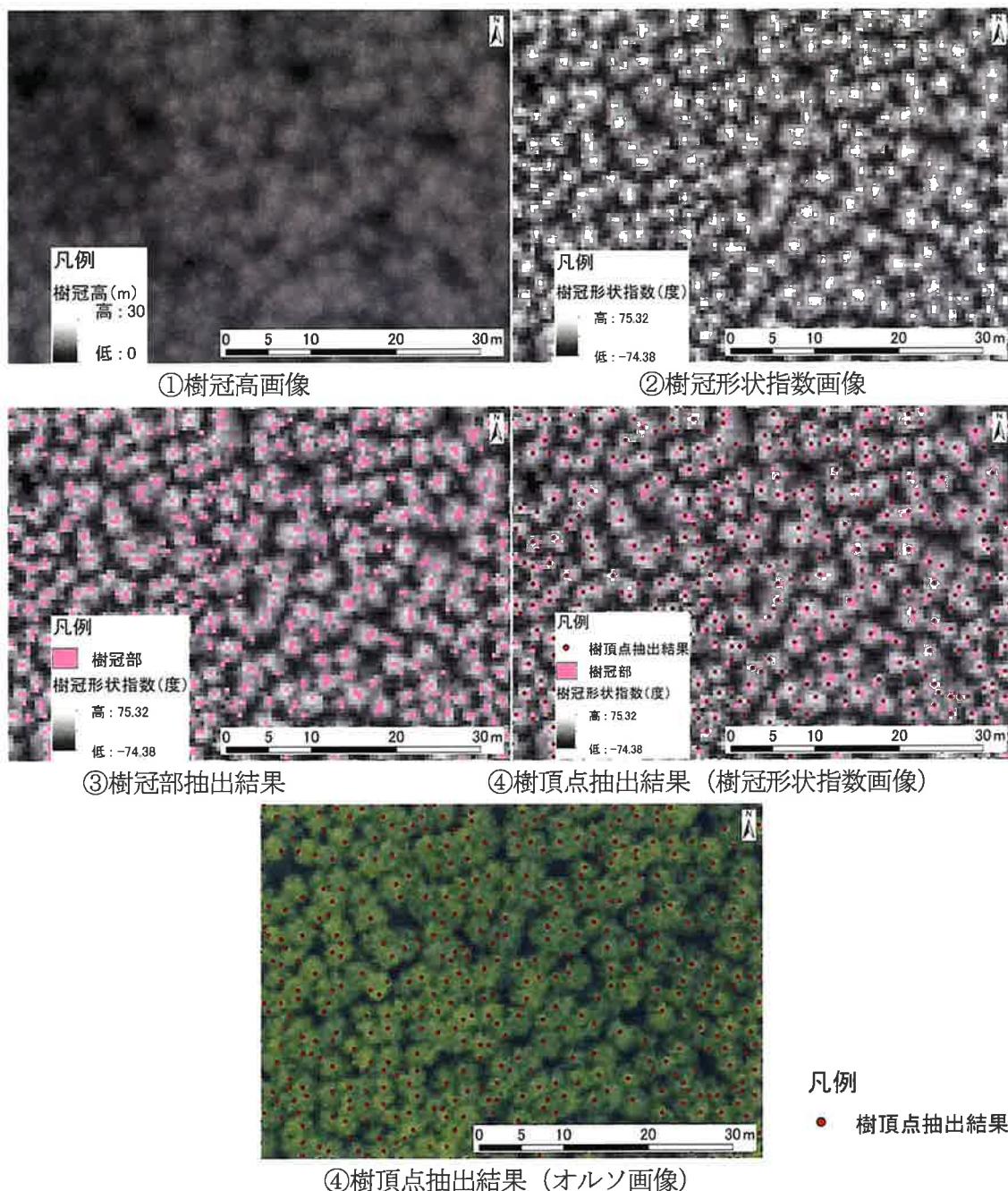


図 2-12 樹頂点抽出の流れ

抽出した樹頂点の数と現地調査の樹木本数を比較した結果が表 2-4、図 2-13 である。精度検証の結果、平均抽出精度は 101%、相関係数 R は 0.96、RMSE※は 2.0 となった。これらの結果から、非常に高い精度で樹頂点を抽出できていることが分かる。

※RMSE (Root Mean Squared Error) : 二乗平均平方根誤差

解析結果が現地調査結果からどの程度かい離しているかを示す精度評価指標の一であり、0 に近い値であるほど誤差が少ないことを示す。計算式は下記のとおりである。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (X - x_i)^2}$$

ここで、N は現地調査プロット数、X は現地実測値、xi はレーザ解析値である。

表 2-4 現地調査本数とレーザ解析樹木本数の比較表

	現地調査 樹木本数	レーザ解析 樹木本数	精度
Plot1	38	36	95%
Plot2	28	34	121%
Plot3	30	30	100%
Plot4	26	26	100%
Plot5	21	21	100%
Plot6	22	21	95%
Plot7	31	31	100%
Plot8	32	32	100%
Plot9	39	40	103%
Plot10	46	46	100%
平均	31.3	$\sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (X - x_i)^2}$	101%
		R	0.96
		RMSE	2.0

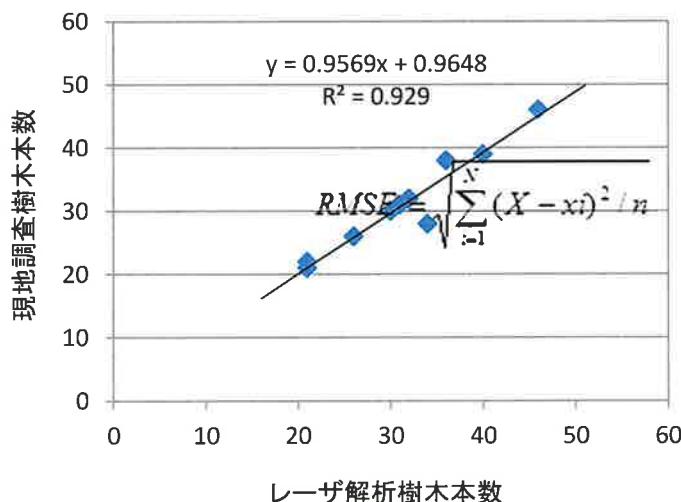


図 2-13 現地調査本数とレーザ解析樹木本数の比較結果

抽出した樹頂点を小班で集計し、立木密度区分毎に面積を計算した結果が表 2-5、図 2-14 である。また、小班で集計した立木密度分布図を図 2-15 に示す。なお、小班に含まれるヒノキの本数は 377,364 本であった。

表 2-5 立木密度分布一覧表

600未満(本/ha)		600以上 700未満(本/ha)		700以上 800未満(本/ha)		800以上 900未満(本/ha)		900以上 1432以下(本/ha)		総計
面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)
116.48	205.80%	119.41	210.97%	121.67	214.96%	122.65	216.70%	56.60	10.54%	536.81

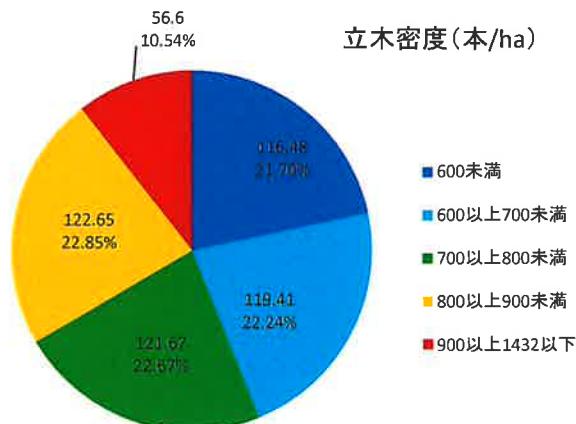


図 2-14 立木密度分布集計結果

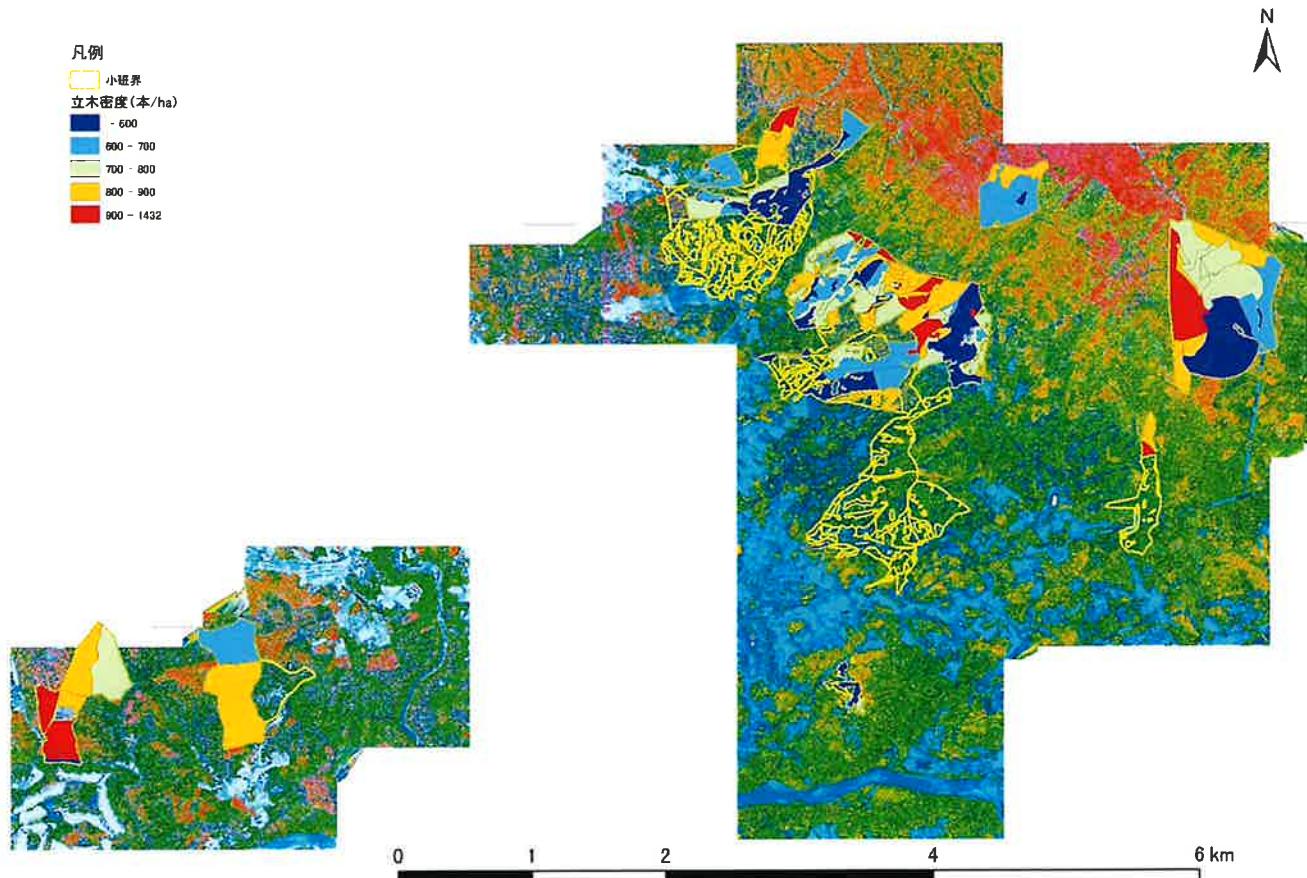


図 2-15 立木密度分布

次に、抽出した樹頂点の樹高と現地調査の樹高を比較した結果を表 2-6、図 2-16 に示す。精度検証の結果、平均抽出精度は 94% で、樹高が過小に計測される傾向にあった。また、これまでの事例でレーザ

計測の樹高計測は現地調査樹高に比べて過小に計測されると言わわれていることから、全ての樹高に 1.058 を乗じ、レーザ計測の樹高を補正した。相関係数 R は 0.96、RMSE は 1.1（補正前）、0.5（補正後）となった。これらの結果から、高い精度で樹高を計測できていることが分かる。

表 2-6 現地調査樹高とレーザ解析樹高の比較表

	現地調査 樹高 (m)	レーザ解析 樹高 (m)	精度	補正後の 樹高 (m)	精度
Plot1	20.2	20.3	100%	21.5	106%
Plot2	18.3	17.5	95%	18.5	101%
Plot3	19.5	18.2	93%	19.3	99%
Plot4	15.6	15.0	97%	15.9	102%
Plot5	16.7	15.7	94%	16.7	100%
Plot6	17.6	16.6	95%	17.6	100%
Plot7	21.9	20.5	94%	21.7	99%
Plot8	19.2	18.1	94%	19.1	100%
Plot9	17.7	16.0	90%	16.9	95%
Plot10	21.1	19.5	93%	20.7	98%
平均	18.8	17.7	94%	18.8	100%
	R	0.96	R	0.96	
	RMSE	1.1	RMSE	0.5	

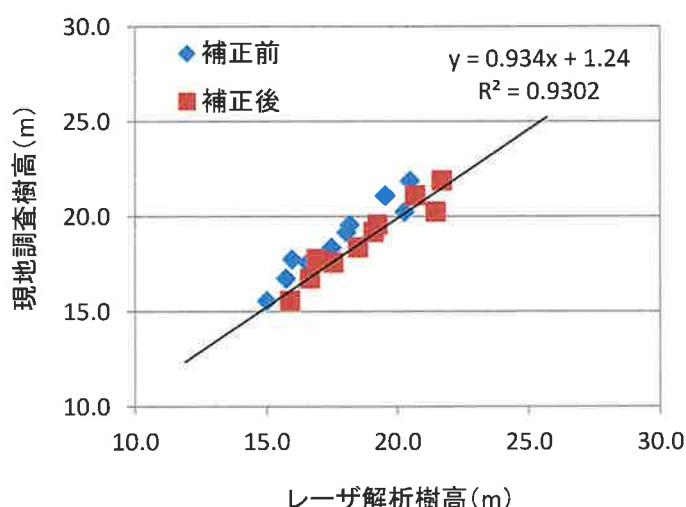


図 2-16 現地調査樹高とレーザ解析樹高の比較結果

抽出した樹頂点の樹高を小班で集計した結果が 2-7、図 2-17 である。また、樹高の分布を図 2-18 に示す。樹高の集計結果から、対象地には 17~19m の樹高のヒノキが多く、43.56%を占めていることが分かった。

2-7 樹高分布一覧表

13m未満		13m以上15m未満		15m以上17m未満		17m以上19未満		19m以上23m以下		総計
面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)
2.20	0.41%	126.06	23.48%	90.10	16.78%	233.86	43.56%	84.59	15.76%	536.81

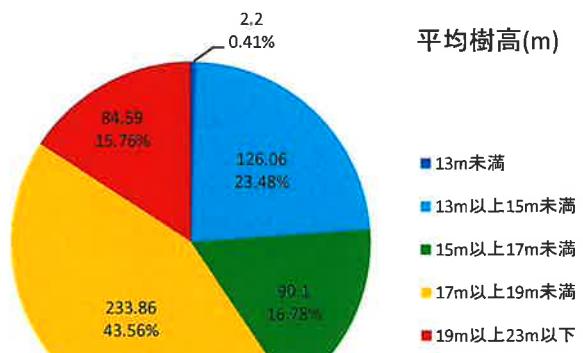


図 2-17 樹高分布集計結果

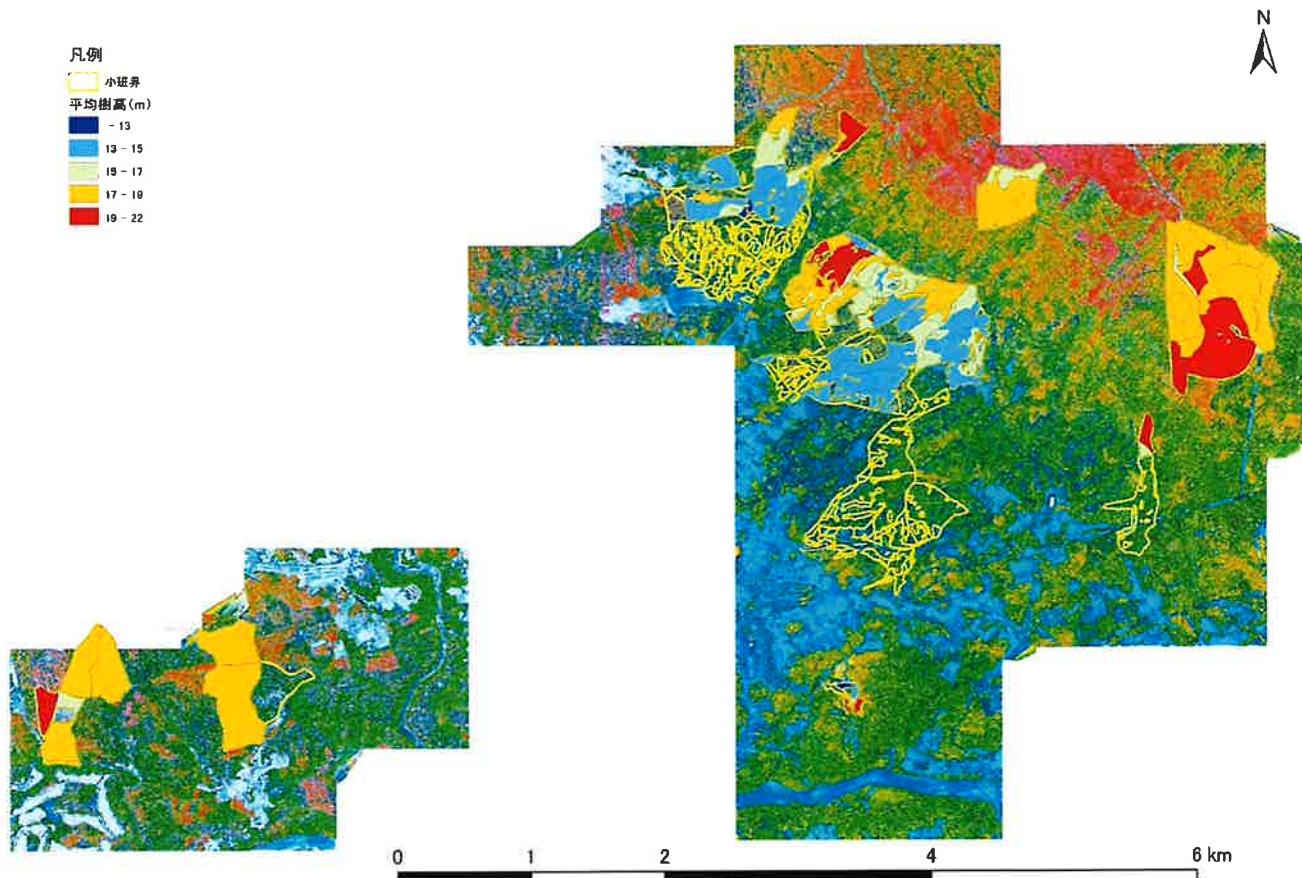


図 2-18 樹高分布図

## (2) 胸高直径の解析

樹冠の大きさと胸高直径には相関があることは広く知られている。ここでは、その相関を利用し、樹冠投影面積、樹冠表面積、樹冠体積をそれぞれ変数として、現地調査の胸高直径との相関を調べ、樹冠の大きさから胸高直径を推定する手法について検討した。樹冠の大きさは watershed アルゴリズムにより求めることができる。樹冠ポリゴンを作成した例を図 2-19 に示す。作成した樹冠ポリゴンの面積を樹冠投影面積として考えることができる。また、樹冠の形を円錐と仮定し、樹冠投影面積の円形を想定し、レーザ解析から得られる樹冠長から樹冠表面積と樹冠体積を計算した。プロット毎に平均値を計算し、それぞれの変数を横軸に、現地調査の胸高直径を縦軸にして回帰式を作成した結果が図 2-20 である。

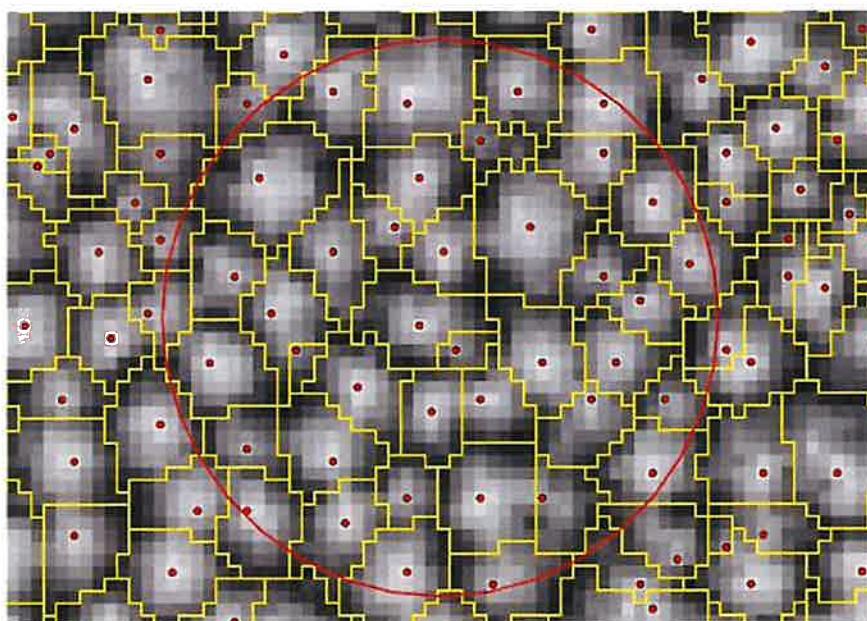


図 2-19 watershed アルゴリズムによる樹冠ポリゴンの作成例

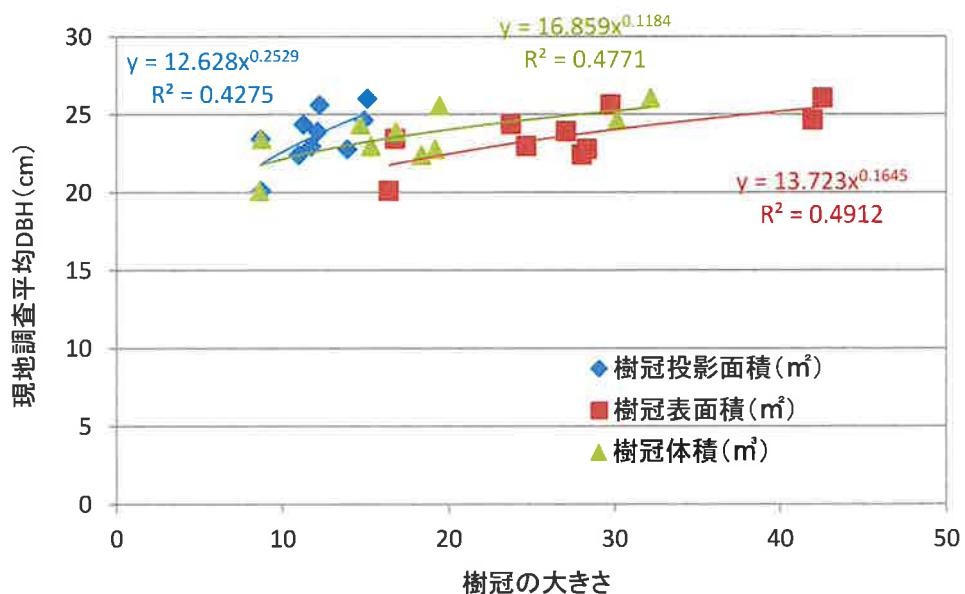


図 2-20 樹冠の大きさと現地調査平均胸高直径との相関

決定係数 ( $R^2$ ) が最も高かった樹冠投影面積 (0.4912) の下記の回帰式を用いて単木レベルで胸高直径を推定した。

$$DBH = 13.723 X^{0.1645}$$

ここで、Xは樹冠表面積 (m<sup>2</sup>) である。

上記の式を用いて毎木の胸高直径を推定した結果と現地調査の胸高直径を比較した結果を表 2-8、図 2-21 に示す。精度検証の結果、平均推定精度は 98%、相関係数は 0.7、RMSE は 1.3 となった。これらの結果から、比較的良い精度で胸高直径を推定できていると分かる。

表 2-8 現地調査胸高直径とレーザ解析胸高直径の比較表

	現地調査 胸高直径 (cm)	レーザ解析 胸高直径 (cm)	精度
Plot1	22.9	22.7	99%
Plot2	22.4	23.0	103%
Plot3	23.9	23.2	97%
Plot4	22.8	23.2	102%
Plot5	26.0	24.7	95%
Plot6	24.6	25.0	101%
Plot7	24.4	22.5	92%
Plot8	25.6	23.5	92%
Plot9	23.4	21.2	90%
Plot10	20.1	21.2	105%
平均	23.6	23.0	98%
	R	0.70	
	RMSE	1.3	

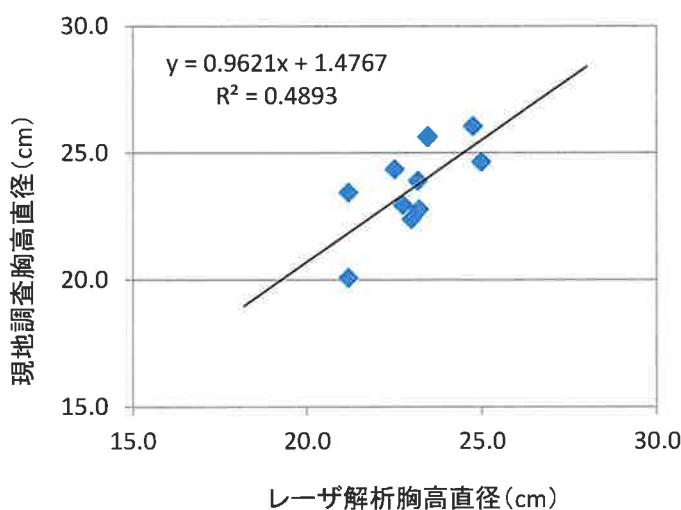


図 2-21 現地調査胸高直径とレーザ解析胸高直径の比較結果

推定した胸高直径を小班毎に集計した結果が表 2-9、図 2-22 である。また、胸高直径の分布を図 2-23 に示す。胸高直径の集計結果から、対象地には胸高直径 22~24cm のヒノキが多く、80.01%を占めていたことが分かった。

表 2-9 胸高直径分布一覧表

20cm以上22cm未満		22cm以上24cm未満		24cm以上26cm以下		総計
面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)
42.29	7.88%	429.48	80.01%	65.04	12.12%	536.81

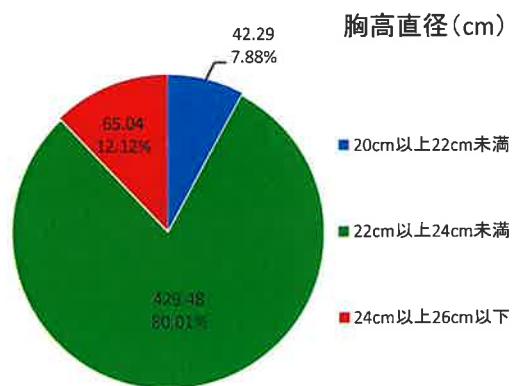


図 2-22 胸高直径分布集計結果

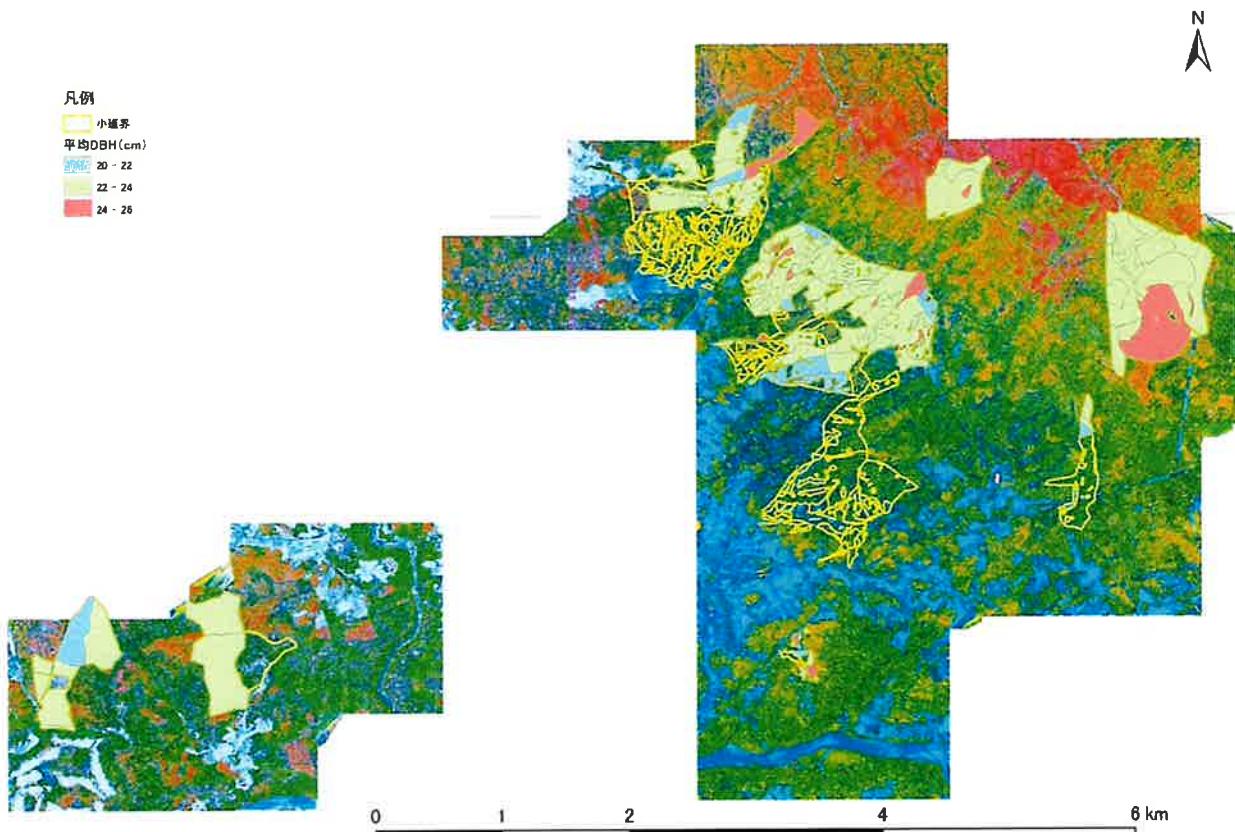


図 2-23 胸高直径分布図

### (3) 材積の解析

これまでの解析により単木の樹高と胸高直径を得た。これらと下記の材積式を用いて単木の材積を算出した。

表 2-10 ヒノキ材積式

直径範囲 (cm)	材 積 式
6~10	$\log v = 5.658496 + 2.009104 \log d + 0.929831 \log h$
12~20	$\log v = 5.583947 + 1.909076 \log d + 1.097628 \log h$
22~40	$\log v = 5.729152 + 1.756400 \log d + 1.166107 \log h$
42 以上	$\log v = 4.243210 + 1.370193 \log d + 1.239011 \log h$

抽出した樹頂点の補正前の樹高と補正した樹高を用いた 2 種類の材積と現地調査の材積を比較した結果を表 2-11、図 2-24 に示す。精度検証の結果、平均推定精度は 88%（樹高補正前）、94%（樹高補正後）、相関係数 R は 0.86、RMSE は 2.3（樹高補正前）、1.8（樹高補正後）であった。樹高補正により、推定精度が向上していることが分かる。これらの結果から良い精度で材積を推定できていると考えられる。

表 2-11 現地調査材積とレーザ解析材積の比較表

	現地調査 材積 (m <sup>3</sup> )	レーザ解析 材積 (m <sup>3</sup> )	精度	補正樹高 材積 (m <sup>3</sup> )	精度
Plot1	16.8	15.4	92%	16.5	98%
Plot2	11.5	12.6	109%	13.4	117%
Plot3	13.6	11.8	87%	12.6	93%
Plot4	8.6	8.3	96%	8.8	102%
Plot5	10.5	8.0	76%	8.6	81%
Plot6	9.6	8.5	89%	9.1	95%
Plot7	16.9	13.3	78%	14.2	84%
Plot8	16.3	12.7	78%	13.6	84%
Plot9	15.3	11.5	75%	12.2	80%
Plot10	16.4	16.3	100%	17.4	106%
平均	13.6	11.8	88%	12.6	94%
	R	0.86	R	0.86	
	RMSE	2.3	RMSE	1.8	

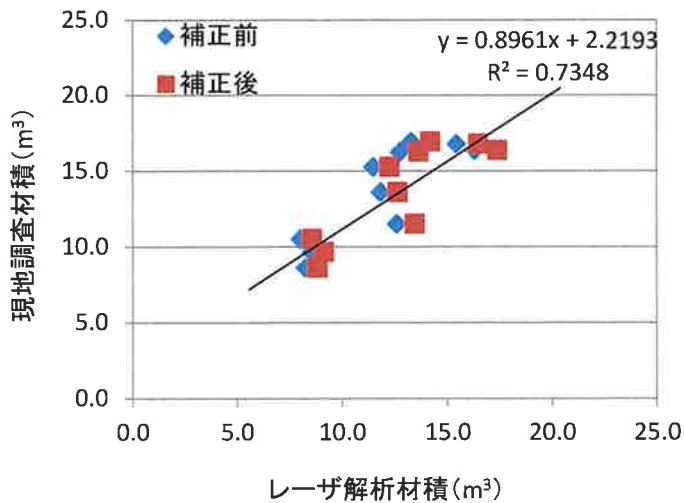


図 2-24 現地調査材積とレーザ解析材積の比較結果

抽出した樹頂点の材積を小班毎に集計した結果が表 2-12、図 2-25 である。また、材積の分布を図 2-26 に示す。材積の集計結果から、材積 250~300 m<sup>3</sup>/ha の区分の割合が多く、34.93%を占め、次に 300 ~400 m<sup>3</sup>/ha の区分が 33.62%を占めていることが分かった。また、ヒノキの合計材積は 139,105.2 m<sup>3</sup>であった。

表 2-12 材積分布一覧表

150未満(m <sup>3</sup> /ha)		150以上 200未満(m <sup>3</sup> /ha)		200以上 250未満(m <sup>3</sup> /ha)		250以上 300未満(m <sup>3</sup> /ha)		300以上 400以下(m <sup>3</sup> /ha)		総計
面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)
34.58	6.44%	71.04	13.23%	63.22	11.78%	187.51	34.93%	180.46	33.62%	536.81

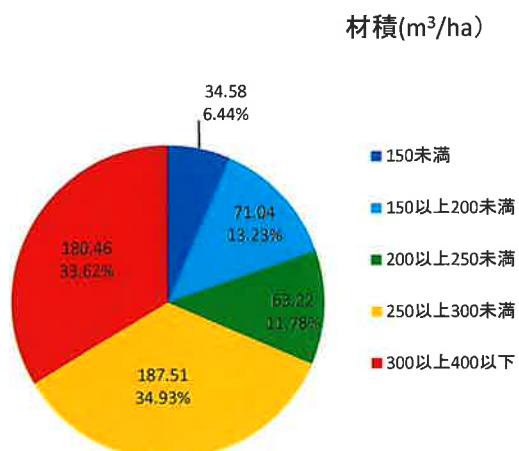


図 2-25 材積分布集計結果

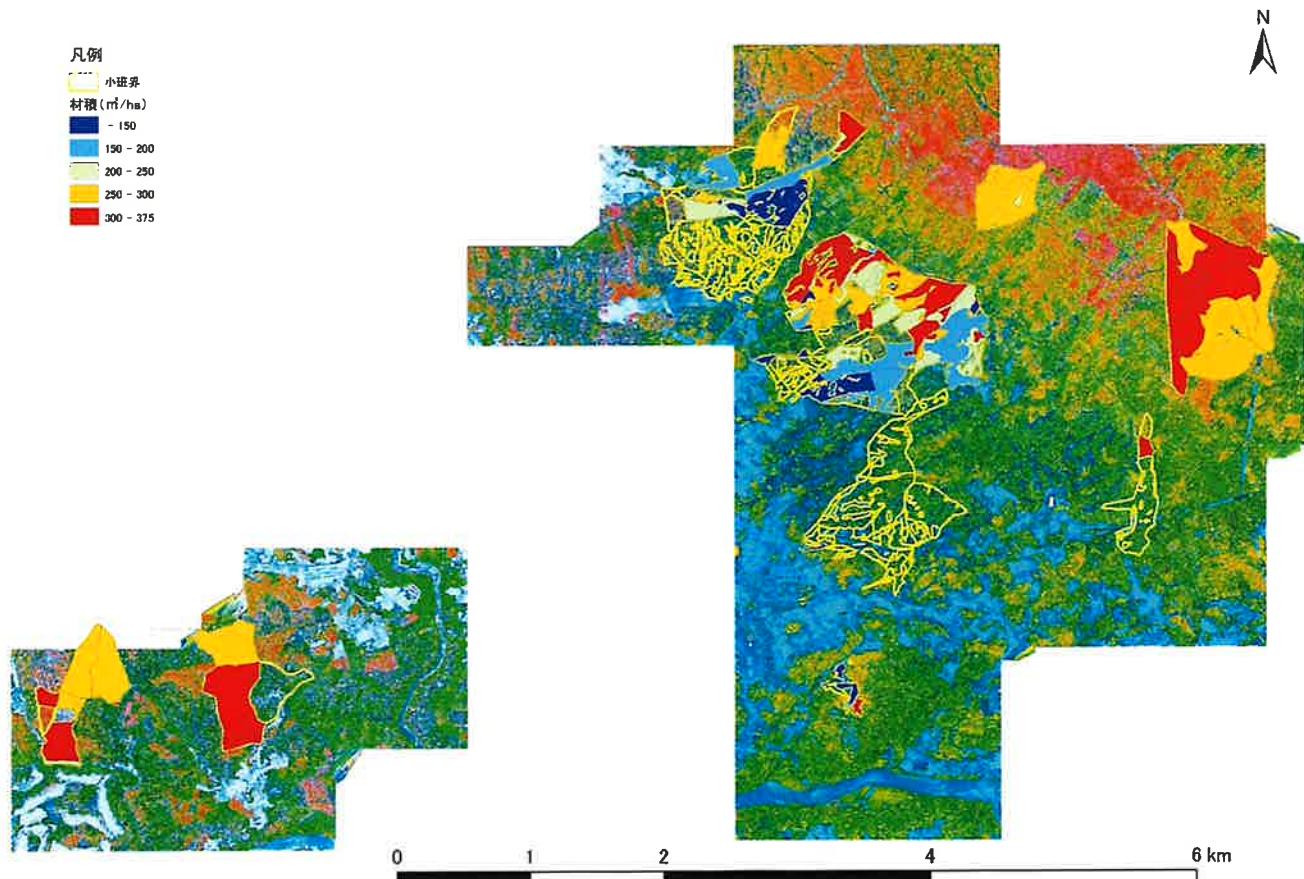


図 2-26 材積分布

#### (4) 収量比数の算出

森林の過密状況を把握するため、小班ポリゴンで集計した立木密度と平均樹高を用いて、密度管理図の以下の式から流量比数を算出した。

$$Ry = V / V_{Rf}$$

$$V_{Rf} = (0.0351470 H^{-1.080773} + 4711.2 H^{-2.922894} / N_{Rf})$$

$$\log N_{Rf} = 5.7384 - 1.842121 \log H$$

ここで、Ry は収量比数、VRf は最多密度における ha 当たり材積 (m³/ha)、NRf は最多密度における ha 当たり本数 (本/ha) である。

小班毎に収量比数を集計した結果を表 2-13、図 2-27 に示す。また、収量比数の分布図を図 2-28 に示す。収量比数の集計結果から、0.65～0.70 の区分が最も多く、26.13%を、次いで 0.70～0.80 の区分が 17.55%を占めていることが分かった。一方で、0.65 以下の林分が 55%であり、十分に密度管理されていることが分かる。

表 2-13 収量比数分布一覧表

0.55未満		0.55以上0.6未満		0.60以上0.65未満		0.65以上0.70未満		0.70以上0.80以下		総計
面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)
127.50	23.75%	80.84	15.06%	93.96	17.50%	140.29	26.13%	94.22	17.55%	536.81

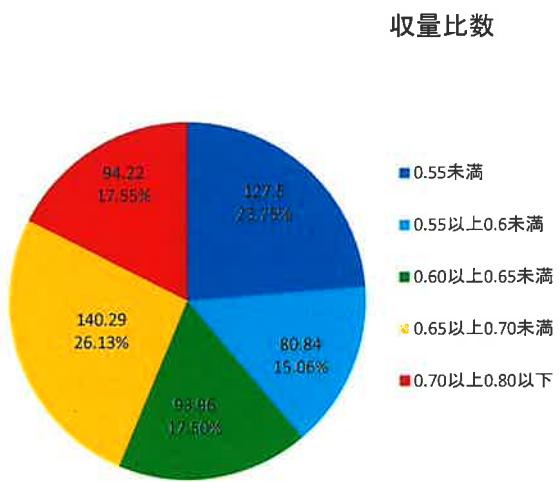


図 2-27 収量比数分布集計結果

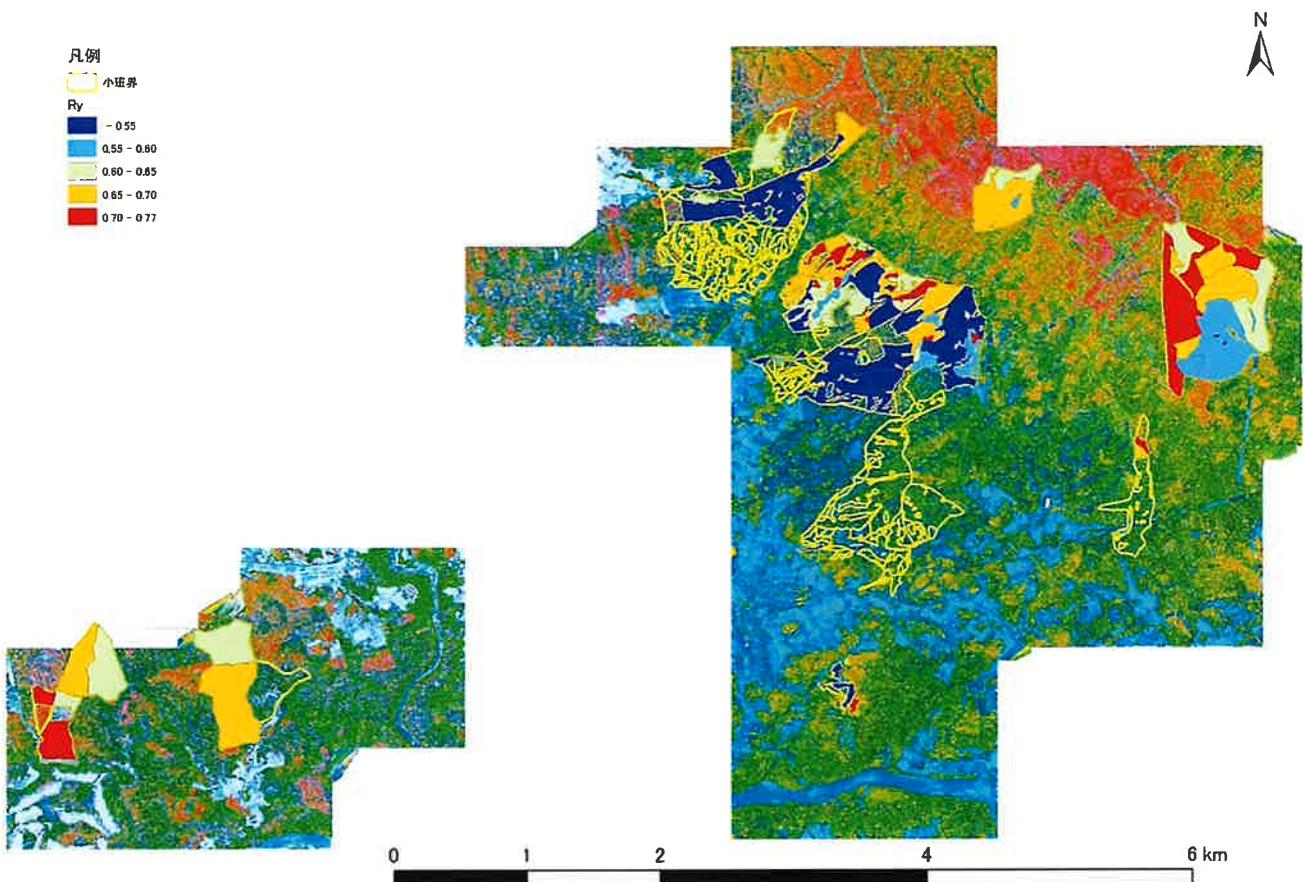


図 2-28 収量比数分布図

### (5) 樹冠長率の解析

Watershed アルゴリズムにより作成した樹冠ポリゴンに含まれる DCHM の最大値と最小値の差分から得られた樹冠長率を毎木算出し、小班で集計した結果を表 2-14、図 2-29 に示す。また、樹冠長率の分布を図 2-30 に示す。

注) 胸高直径推定で使用した樹冠投影ポリゴンと樹高データ（DCHM）を用いて毎木の樹冠長率を推定する。樹冠長率の計算式は以下に示す。

$$Cp = (H_{max} - H_{min}) / H_{max}$$

ここで、Cp は樹冠長率、H<sub>max</sub> は樹冠投影ポリゴン内の最大樹高、H<sub>min</sub> は樹冠投影ポリゴン内の最小樹高である。

樹冠長率の集計結果から、樹冠長率 25~30%区分が最も多く、43.6%を占めていることが分かる。一方で、樹冠長率 20%未満の林分が少ないことから、風雪害に弱い林分は少ないと考えられる。

表 2-14 樹冠長率分布一覧表

20未満		20以上25未満		25以上30未満		30以上35未満		35以上		総計
面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)	割合	面積(ha)
11.14	2.08%	188.94	35.20%	234.07	43.60%	92.10	17.16%	10.56	1.97%	536.81

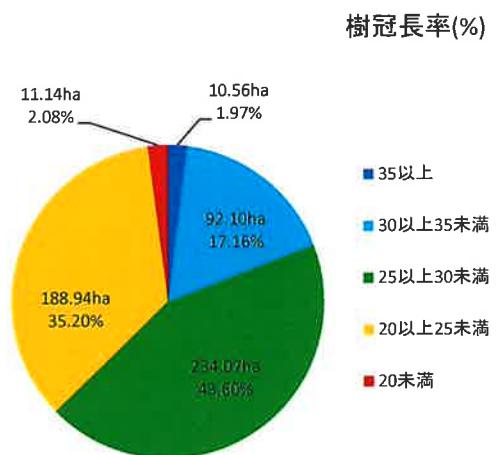


図 2-29 樹冠長率分布集計結果

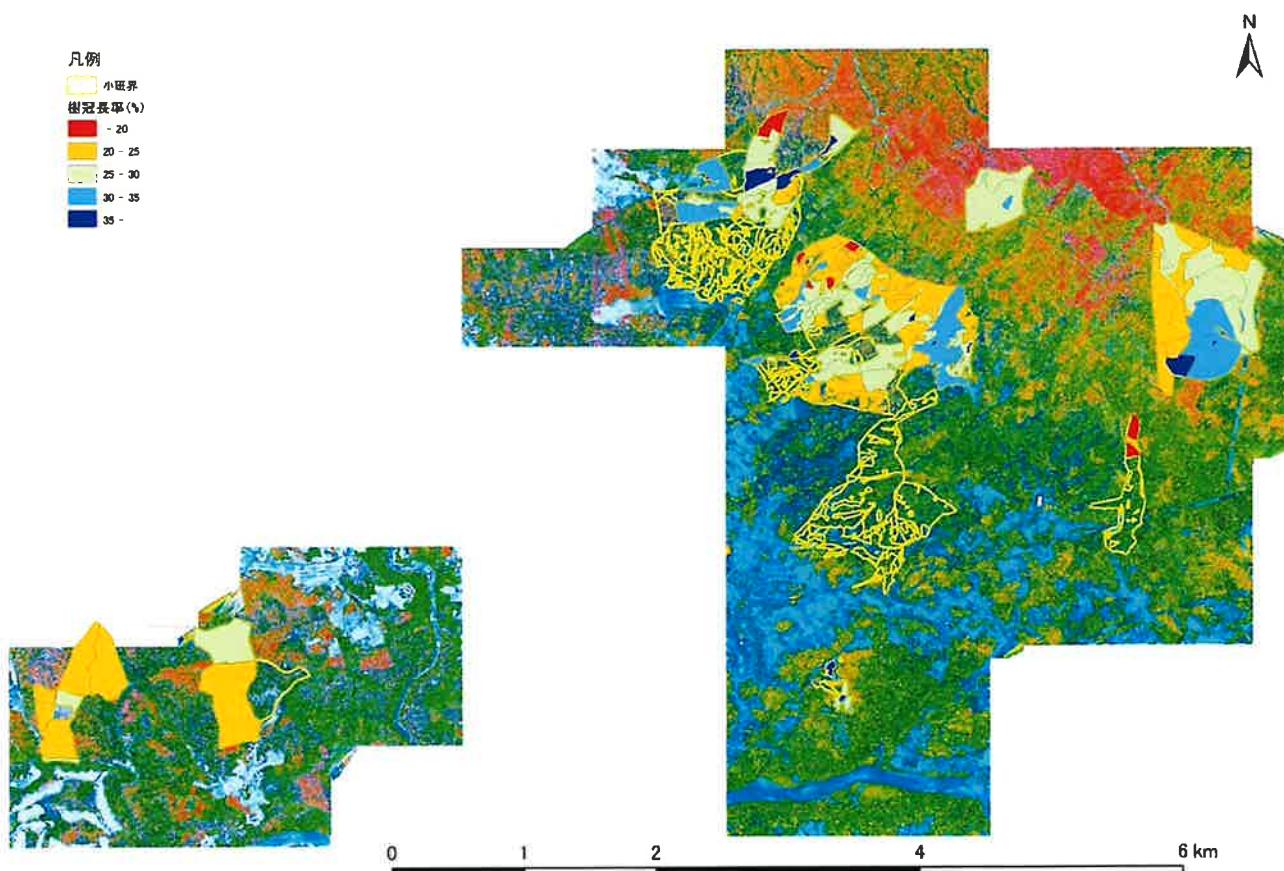


図 2-30 樹冠長率分布図

### 第3節 木材供給量情報整備

#### 第1項 概要

上記地区において、間伐を実施し、実際に出材した量と、航空レーザ計測データによる森林資源解析結果を用いて予測した出材量との比較検証を行った。

予測手法としては、過去の実績から推計する方式と、細りを考慮して機械的に採材する方式を実施した。

##### ① 過去の実績から推計する方式

平成24年度に岐阜県林政部県産材流通課と岐阜県森林研究所が開発した「品質別木材生産割合の推計式」を使用した。航空レーザ計測データから把握した間伐実施区域内のヒノキ材積、本数、平均胸高直径、平均樹高を式に当てはめ算出した。

##### ② 細り表により機械的に採材する方式

岐阜県作成の相対幹曲線式（細り表）を用いて、航空レーザ計測データから把握した間伐実施区域内のヒノキ立木について、3m材を機械的に採材し、丸太本数、材積を算出した。ABC材の仕訳は難しいため、合算した。

##### ③ 市売り実績

間伐材は、最寄の市場に出荷し、販売した。

ABC区分は、販売価格により推計し区分した。

### 第2項 平成26年度実施内容

#### 1. 間伐の実施状況

対象地は、岐阜県中津川市の苗木財産区所有地内で、苗木高峰地区の 13 林班・ロ・3 の一部と、13 林班・ロ・5 の一部である。

小班面積 13.7181ha のうち 1.9424ha を対象地として間伐施業を行った。対象地は標高 780～840m で傾斜 25° 南向き斜面のヒノキ人工林地である。

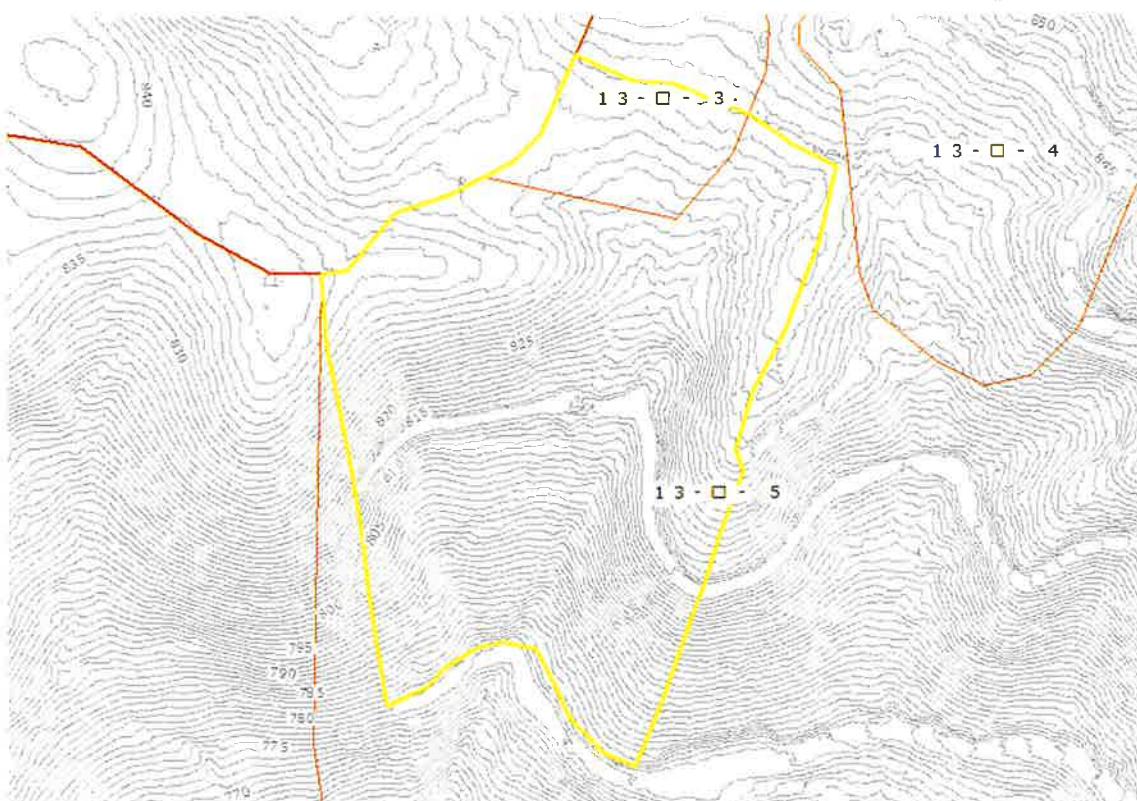


図 2-31 対象地域

既存の森林簿データの概要は以下のとおりである。

表 2-15 森林簿データ概要

林小班	林種	樹種	林齡	齡級	蓄積	成長量	面積
13-ロ-3	人工林	ヒノキ	42	9	162	3	0.67
13-ロ-5	人工林	ヒノキ	86	18	5,289	29	13.05

## 2. 市売り実績

対象地は、実際に平成 26 年 12 月～1 月にかけて施業され、最寄りの木材市場に出荷された。このときに市売り販売された実績は次表のとおりである。

ABC 区分は、販売価格により推計し区分した。

表 2-16 品質別の市売り実績

品質別	本数 (本)	材積(m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup> 当たり単価 (円)	金額 (円)
A 材	551	55.988	14,309	801,151
B 材	1,372	73.470	7,050	518,021
C 材	263	13.263	4,702	62,373
計		142.721		1,381,545

### 3. 過去の実績から出材量予測

#### (1) 予測手法

平成24年度に岐阜県森林研究所と岐阜県森林組合連合会が協働して作成したヒノキの品質別(ABC材)生産割合推計式を使って予測する。

岐阜県森林組合連合会は間伐事業地の状況調査及び利用材積調査を行って木材生産に影響する各種因子やA～C材の生産傾向を情報収集し、その情報を基に岐阜県森林研究所がデータを分析して推計式を作成したものである。

出材量予測は、調査地の航空レーザ解析結果から林分蓄積量を得て、これに伐採率を乗じた生産量に品質別生産割合推定式を適用する。

出典：岐阜県林政部県産材流通課

ヒノキの林分情報等からA材、B材、C材の割合を推計する  
**「品質別木材生産割合の推計式」を作成しました**

事前に木材生産地毎にA材、B材、C材の生産可能量の推計が可能であれば、木材需要に対応した木材生産、安定供給できる体制を構築できます。そこで、県産材流通課では岐阜県森林組合連合会及び森林研究所と連携して、林分情報等から品質別の木材生産可能割合を推計する手法を作成したので、その成果を紹介します。

**事業概要**  
 岐阜県の木材生産の代表樹種である、スギとヒノキについて調査、分析を行いました。  
 平成23年度はスギの推計式を作成(詳細は、森林のたより2012年9月号参照)、平成24年度はヒノキの推計式を作成しました。  
 岐阜県森林組合連合会に委託して間伐事業地の林況調査及び利用材積調査を行い、木材生産に影響する各種因子やA材、B材、C材の生産傾向を情報収集し、その情報を基に森林研究所に依頼してデータの分析、推計式の作成を行いました。  
 平成24年度の事業の成果である、ヒノキの品質別木材生産割合の推計式は下記のとおりです。各アイテムの情報を調査し、該当するカテゴリ数値を推計式に当てはめることで、A材、B材、C材の生産割合が推計できます。

**品質別木材生産割合の推計式(ヒノキ人工林)**

**A材、B材生産割合の推計式**  
 $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n$   
 y : A材、B材生産割合  
 x : 説明変数  
 b<sub>0</sub> : 定数項  
 b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, ..., b<sub>n</sub> : 各アイテムにおけるカテゴリ数値

**C材生産割合の推計式**  
 $C\text{材生産割合} = 100 - (A\text{材生産割合} + B\text{材生産割合})$

**推計式の計算例(ヒノキ人工林)**

事業地の調査データ(例)	
面積	2.5ha
蓄積(立方メートル)	5,065
調査木数	5,065
平均木積	10.034
直径	8.427
年齢	少々ない
中	0.355
多く	-0.156
年生	-1.467
老生	1.671
風損傷	0.257
少ない	0.607
中	-0.626
多	0.615
平均胸高直径(cm)	16
胸高直径(cm)	16
20	-1.0643
22	-2.877
24	0.054
26	19.775

A材生産割合の推計式	
面積	2.5ha
蓄積	5,065
平均木積	10.034
直径	8.427
年齢	少々ない
中	0.355
多く	-0.156
年生	-1.467
老生	1.671
風損傷	0.257
少ない	0.607
中	-0.626
多	0.615
平均胸高直径(cm)	16
胸高直径(cm)	16
20	-1.0643
22	-2.877
24	0.054
26	19.775

B材生産割合の推計式	
面積	2.5ha
蓄積	5,065
平均木積	10.034
直径	8.427
年齢	少々ない
中	0.355
多く	-0.156
年生	-1.467
老生	1.671
風損傷	0.257
少ない	0.607
中	-0.626
多	0.615
平均胸高直径(cm)	16
胸高直径(cm)	16
20	-1.0643
22	-2.877
24	0.054
26	19.775

C材生産割合の推計式	
面積	2.5ha
蓄積	5,065
平均木積	10.034
直径	8.427
年齢	少々ない
中	0.355
多く	-0.156
年生	-1.467
老生	1.671
風損傷	0.257
少ない	0.607
中	-0.626
多	0.615
平均胸高直径(cm)	16
胸高直径(cm)	16
20	-1.0643
22	-2.877
24	0.054
26	19.775

■算出結果  
 A材生産割合 = (4.0303) + (-5.095) + (6.427) + (1.677) + (-6.906) + (-0.004) = 55.560%  
 B材生産割合 = (2.577) + (-5.887) + (6.258) + (-5.702) + (4.769) + (8.106) = 33.432%  
 C材生産割合 = 100 - (55.560 + 33.432) = 11.008%  
 ■算出結果  
 基礎地からのA材生産割合 = 55.560%  
 基礎地からのB材生産割合 = 33.432%  
 基礎地からのC材生産割合 = 11.008%  
 ■算出結果  
 基礎地の成長は三者割合の割合です。林分蓄積や伐採率を保証すれば、品質別生産割合も正確な値になります。  
 上記の基礎地で、面積 1ha、蓄積 430m<sup>3</sup>、割合 (対標準 30%) と仮定した場合、430 ÷ 30% × 0.65 (A材率) = 54 m<sup>3</sup> (A材生産量)  
 基礎地からのA材生産割合 = 54 m<sup>3</sup> × 55.560% = 47 %  
 基礎地からのB材生産割合 = 54 m<sup>3</sup> × 33.432% = 28 %  
 基礎地からのC材生産割合 = 54 m<sup>3</sup> × 11.008% = 9 % と算計できます。

[県産材流通課 大島晃彦] ●詳しい内容を知りたい方は TEL 058-272-8487 県産材流通課まで

<http://www.pref.gifu.lg.jp/sangyo-koyo/ringyo-mokuzai-sangyo/ringyo-shinko/abc-wariai>

38

○ 品質別木材生産割合の推計式（ヒノキ人工林）

■ A材、B材生産割合の推計式

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \cdots + b_px_p$$

y : A材、B材生産割合

x : 説明変数

b<sub>0</sub> : 定数項

b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, …, b<sub>p</sub> : 各アイテムにおけるカテゴリ変数

■ C材生産割合の推計式

$$C\text{材生産割合} = 100 - (A\text{材生産割合} + B\text{材生産割合})$$

表 2-17 生産割合のカテゴリ数値

アイテム	カテゴリ	カテゴリ数値	
		A材	B材
定数項		49.203	25.877
選木方針	優勢木&劣勢木	5.065	-5.867
	劣勢木	-25.325	29.334
腐り	ゼロ	6.427	6.256
	少ない	-0.302	1.228
	中	-2.156	-7.424
枝虫	あり	-1.467	4.989
	ゼロ	1.677	-5.702
	ゼロ	2.257	16.362
風雪害	少ない	0.907	-2.962
	中	-6.906	4.759
	16	-0.610	-2.283
平均胸高直径 (cm)	18	-1.375	-2.887
	20	-10.943	9.792
	22	-2.877	-5.671
	24	0.094	8.109
	26	19.775	-4.149

表 2-18 A 材推計式のカテゴリ変数

■A 材、B 材生産割合の推計式のカテゴリ変数

A 材 (定数項 49.203)										
選木方針		腐り			枝虫		風雪害			カテゴリ 数値計
優勢 ・劣勢	劣勢木	ゼロ	少ない	中	あり	ゼロ	ゼロ	少な い	中	
5.065		6.427			-1.467		2.257			61.485
5.065		6.427			-1.467			0.907		60.135
5.065		6.427			-1.467				-6.906	52.322
5.065		6.427				1.677	2.257			64.629
5.065		6.427				1.677		0.907		63.279
5.065		6.427				1.677			-6.906	55.466
5.065			-0.302		-1.467		2.257			54.756
5.065			-0.302		-1.467			0.907		53.406
5.065			-0.302		-1.467				-6.906	45.593
5.065			-0.302			1.677	2.257			57.900
5.065			-0.302			1.677		0.907		56.550
5.065			-0.302			1.677			-6.906	48.737
5.065				-2.156	-1.467		2.257			52.902
5.065				-2.156	-1.467			0.907		51.552
5.065				-2.156	-1.467				-6.906	43.739
5.065				-2.156		1.677	2.257			56.046
5.065				-2.156		1.677		0.907		54.696
5.065				-2.156		1.677			-6.906	46.883
	-25.325	6.427			-1.467		2.257			31.095
	-25.325	6.427			-1.467			0.907		29.745
	-25.325	6.427			-1.467				-6.906	21.932
	-25.325	6.427				1.677	2.257			34.239
	-25.325	6.427				1.677		0.907		32.889
	-25.325	6.427				1.677			-6.906	25.076
	-25.325		-0.302		-1.467		2.257			24.366
	-25.325		-0.302		-1.467			0.907		23.016
	-25.325		-0.302		-1.467				-6.906	15.203
	-25.325		-0.302			1.677	2.257			27.510
	-25.325		-0.302			1.677		0.907		26.160
	-25.325		-0.302			1.677			-6.906	18.347
	-25.325			-2.156	-1.467		2.257			22.512

A材(定数項 49.203) 続き										
選木方針		腐り		枝虫		風雪害		選木方針		カテゴリ 数値計
優勢 ・劣勢	劣勢木	ゼロ	少ない	中	あり	ゼロ	ゼロ	少ない	中	
-25.325				-2.156	-1.467			0.907		21.162
-25.325				-2.156	-1.467				-6.906	13.349
-25.325				-2.156		1.677	2.257			25.656
-25.325				-2.156		1.677		0.907		24.306
-25.325				-2.156		1.677			-6.906	16.493

表 2-19 B材推計式のカテゴリ変数

B材 (定数項 : 25.877)										カテゴリ 数値計	
選木方針		腐り		枝虫		風雪害					
優勢木	劣勢木	ゼロ	少ない	中	あり	ゼロ	ゼロ	少ない	中		
-5.867		6.256			4.989		16.362			47.617	
-5.867		6.256			4.989			-2.962		28.293	
-5.867		6.256			4.989				4.759	36.014	
-5.867		6.256				-5.702	17.362			37.926	
-5.867		6.256				-5.702		-1.962		18.602	
-5.867		6.256				-5.702			5.759	26.823	
-5.867		6.256				-5.702				44.589	
-5.867			1.228		4.989		18.362			25.265	
-5.867			1.228		4.989			-0.962		32.986	
-5.867			1.228		4.989				6.759	34.898	
-5.867			1.228			-5.702	19.362			15.574	
-5.867			1.228			-5.702		0.038		23.295	
-5.867			1.228			-5.702				37.937	
-5.867				-7.424	4.989		20.362			18.613	
-5.867				-7.424	4.989			1.038		26.334	
-5.867				-7.424	4.989					28.246	
-5.867				-7.424		-5.702	21.362			8.922	
-5.867				-7.424		-5.702		2.038		16.643	
-5.867				-7.424		-5.702				88.818	
	29.334	6.256			4.989		22.362			69.494	
	29.334	6.256			4.989			3.038		77.215	
	29.334	6.256			4.989				10.759	79.127	
	29.334	6.256				-5.702	23.362			59.803	
	29.334	6.256				-5.702			4.038	67.524	
	29.334	6.256				-5.702			11.759	85.790	
	29.334		1.228		4.989		24.362			66.466	
	29.334		1.228		4.989			5.038		74.187	
	29.334		1.228		4.989				12.759	76.099	
	29.334		1.228			-5.702	25.362			56.775	
	29.334		1.228			-5.702		6.038		64.496	
	29.334		1.228			-5.702			13.759	79.138	
	29.334			-7.424	4.989		26.362			59.814	
	29.334			-7.424	4.989			7.038			

(注) 数値に訂正あり、著者に確認のこと

B 材 (定数項 : 25.877) 続き										
選木方針		腐り			枝虫		風雪害			カテゴリ 数値計
優勢木	劣勢木	ゼ ロ	少 ない	中	あり	ゼ ロ	ゼ ロ	少 ない	中	
	29.334			-7.424	4.989				14.759	67.535
	29.334			-7.424		-5.702	27.362			69.447
	29.334			-7.424		-5.702		8.038		50.123
	29.334			-7.424		-5.702			15.759	57.844

(注) 数値に訂正あり、著者に確認のこと

表 2-20 A材生産割合 早見表

カテゴリ				上段：DBH の階級 下段：カテゴリ数値 表数字単位は (%)						
選木方針	腐り	枝虫	風雪害	16cm	18cm	20cm	22cm	24cm	26cm	
				-0.610	-1.375	-10.943	-2.877	0.094	19.775	
優勢&劣勢	ゼロ	あり	ゼロ	60.875	60.110	50.542	58.608	61.579	81.260	
優勢&劣勢	ゼロ	あり	少ない	59.525	58.760	49.192	57.258	60.229	79.910	
優勢&劣勢	ゼロ	あり	中	51.712	50.947	41.379	49.445	52.416	72.097	
優勢&劣勢	ゼロ	ゼロ	ゼロ	64.019	63.254	53.686	61.752	64.723	84.404	
優勢&劣勢	ゼロ	ゼロ	少ない	62.669	61.904	52.336	60.402	63.373	83.054	
優勢&劣勢	ゼロ	ゼロ	中	54.856	54.091	44.523	52.589	55.560	75.241	
優勢&劣勢	少ない	あり	ゼロ	54.146	53.381	43.813	51.879	54.850	74.531	
優勢&劣勢	少ない	あり	少ない	52.796	52.031	42.463	50.529	53.500	73.181	
優勢&劣勢	少ない	あり	中	44.983	44.218	34.650	42.716	45.687	65.368	
優勢&劣勢	少ない	ゼロ	ゼロ	57.290	56.525	46.957	55.023	57.994	77.675	
優勢&劣勢	少ない	ゼロ	少ない	55.940	55.175	45.607	53.673	56.644	76.325	
優勢&劣勢	少ない	ゼロ	中	48.127	47.362	37.794	45.860	48.831	68.512	
優勢&劣勢	中	あり	ゼロ	52.292	51.527	41.959	50.025	52.996	72.677	
優勢&劣勢	中	あり	少ない	50.942	50.177	40.609	48.675	51.646	71.327	
優勢&劣勢	中	あり	中	43.129	42.364	32.796	40.862	43.833	63.514	
優勢&劣勢	中	ゼロ	ゼロ	55.436	54.671	45.103	53.169	56.140	75.821	
優勢&劣勢	中	ゼロ	少ない	54.086	53.321	43.753	51.819	54.790	74.471	
優勢&劣勢	中	ゼロ	中	46.273	45.508	35.940	44.006	46.977	66.658	
劣勢木	ゼロ	あり	ゼロ	30.485	29.720	20.152	28.218	31.189	50.870	
劣勢木	ゼロ	あり	少ない	29.135	28.370	18.802	26.868	29.839	49.520	
劣勢木	ゼロ	あり	中	21.322	20.557	10.989	19.055	22.026	41.707	
劣勢木	ゼロ	ゼロ	ゼロ	33.629	32.864	23.296	31.362	34.333	54.014	
劣勢木	ゼロ	ゼロ	少ない	32.279	31.514	21.946	30.012	32.983	52.664	
劣勢木	ゼロ	ゼロ	中	24.466	23.701	14.133	22.199	25.170	44.851	
劣勢木	少ない	あり	ゼロ	23.756	22.991	13.423	21.489	24.460	44.141	
劣勢木	少ない	あり	少ない	22.406	21.641	12.073	20.139	23.110	42.791	
劣勢木	少ない	あり	中	14.593	13.828	4.260	12.326	15.297	34.978	
劣勢木	少ない	ゼロ	ゼロ	26.900	26.135	16.567	24.633	27.604	47.285	
劣勢木	少ない	ゼロ	少ない	25.550	24.785	15.217	23.283	26.254	45.935	
劣勢木	少ない	ゼロ	中	17.737	16.972	7.404	15.470	18.441	38.122	
劣勢木	中	あり	ゼロ	21.902	21.137	11.569	19.635	22.606	42.287	
劣勢木	中	あり	少ない	20.552	19.787	10.219	18.285	21.256	40.937	

カテゴリ				上段：DBH の階級 下段：カテゴリ数値 表数字単位は (%)					
選木方針	腐り	枝虫	腐り	16cm	18cm	20cm	22cm	24cm	26cm
				-0.610	-1.375	-10.943	-2.877	0.094	19.775
劣勢木	中	あり	中	12.739	11.974	2.406	10.472	13.443	33.124
劣勢木	中	ゼロ	ゼロ	25.046	24.281	14.713	22.779	25.750	45.431
劣勢木	中	ゼロ	少ない	23.696	22.931	13.363	21.429	24.400	44.081
劣勢木	中	ゼロ	中	15.883	15.118	5.550	13.616	16.587	36.268

表 2-21 B 材生産割合 早見表

カテゴリ				上段 : DBH の階級 下段 : カテゴリ数値 表数字単位は (%)						
選木方針	腐り	枝虫	風雪害	16cm	18cm	20cm	22cm	24cm	26cm	
				-2.283	-2.887	9.792	-5.671	8.109	-4.149	
優勢&劣勢	ゼロ	あり	ゼロ	45.334	44.730	57.409	41.946	55.726	43.468	
優勢&劣勢	ゼロ	あり	少ない	26.010	25.406	38.085	22.622	36.402	24.144	
優勢&劣勢	ゼロ	あり	中	33.731	33.127	45.806	30.343	44.123	31.865	
優勢&劣勢	ゼロ	ゼロ	ゼロ	35.643	35.039	47.718	32.255	46.035	33.777	
優勢&劣勢	ゼロ	ゼロ	少ない	16.319	15.715	28.394	12.931	26.711	14.453	
優勢&劣勢	ゼロ	ゼロ	中	24.040	23.436	36.115	20.652	34.432	22.174	
優勢&劣勢	少ない	あり	ゼロ	42.306	41.702	54.381	38.918	52.698	40.440	
優勢&劣勢	少ない	あり	少ない	22.982	22.378	35.057	19.594	33.374	21.116	
優勢&劣勢	少ない	あり	中	30.703	30.099	42.778	27.315	41.095	28.837	
優勢&劣勢	少ない	ゼロ	ゼロ	32.615	32.011	44.690	29.227	43.007	30.749	
優勢&劣勢	少ない	ゼロ	少ない	13.291	12.687	25.366	9.903	23.683	11.425	
優勢&劣勢	少ない	ゼロ	中	21.012	20.408	33.087	17.624	31.404	19.146	
優勢&劣勢	中	あり	ゼロ	35.654	35.050	47.729	32.266	46.046	33.788	
優勢&劣勢	中	あり	少ない	16.330	15.726	28.405	12.942	26.722	14.464	
優勢&劣勢	中	あり	中	24.051	23.447	36.126	20.663	34.443	22.185	
優勢&劣勢	中	ゼロ	ゼロ	25.963	25.359	38.038	22.575	36.355	24.097	
優勢&劣勢	中	ゼロ	少ない	6.639	6.035	18.714	3.251	17.031	4.773	
優勢&劣勢	中	ゼロ	中	14.360	13.756	26.435	10.972	24.752	12.494	
劣勢木	ゼロ	あり	ゼロ	86.535	85.931	98.610	83.147	96.927	84.669	
劣勢木	ゼロ	あり	少ない	67.211	66.607	79.286	63.823	77.603	65.345	
劣勢木	ゼロ	あり	中	74.932	74.328	87.007	71.544	85.324	73.066	
劣勢木	ゼロ	ゼロ	ゼロ	76.844	76.240	88.919	73.456	87.236	74.978	
劣勢木	ゼロ	ゼロ	少ない	57.520	56.916	69.595	54.132	67.912	55.654	
劣勢木	ゼロ	ゼロ	中	65.241	64.637	77.316	61.853	75.633	63.375	
劣勢木	少ない	あり	ゼロ	83.507	82.903	95.582	80.119	93.899	81.641	
劣勢木	少ない	あり	少ない	64.183	63.579	76.258	60.795	74.575	62.317	
劣勢木	少ない	あり	中	71.904	71.300	83.979	68.516	82.296	70.038	
劣勢木	少ない	ゼロ	ゼロ	73.816	73.212	85.891	70.428	84.208	71.950	
劣勢木	少ない	ゼロ	少ない	54.492	53.888	66.567	51.104	64.884	52.626	
劣勢木	少ない	ゼロ	中	62.213	61.609	74.288	58.825	72.605	60.347	
劣勢木	中	あり	ゼロ	76.855	76.251	88.930	73.467	87.247	74.989	
劣勢木	中	あり	少ない	57.531	56.927	69.606	54.143	67.923	55.665	

(注) 数値に訂正あり、著者に確認のこと

カテゴリ				上段：DBH の階級 下段：カテゴリ数値 表数字単位は (%)					
選木方針	腐り	選木方針	腐り	16cm	18cm	20cm	22cm	24cm	26cm
				-0.610	-1.375	-10.943	-2.877	0.094	19.775
劣勢木	中	あり	中	65.252	64.648	77.327	61.864	75.644	63.386
劣勢木	中	ゼロ	ゼロ	67.164	66.560	79.239	63.776	77.556	65.298
劣勢木	中	ゼロ	少ない	47.840	47.236	59.915	44.452	58.232	45.974
劣勢木	中	ゼロ	中	55.561	54.957	67.636	52.173	65.953	53.695

(注) 数値に訂正あり、著者に確認のこと

## (2) 品質別木材生産量の推定結果

胸高直径を除く各アイテムのカテゴリ数値は以下の通り。

表 2-22 品質別木材生産量の推定 (過去の実績から推計)

アイテム	対象地のデータ	備考
選木方針	優勢木&劣勢木	定性間伐、聞き取り
腐り	少ない	プロット箇所で視認
枝虫	ゼロ	プロット箇所で視認
風雪害	少ない	プロット箇所で視認
胸高直径	22.43cm	レーザ解析結果、早見表は 22cm 欄参照
対象地内推定材積	629.3m <sup>3</sup>	レーザ解析結果
〃 本数	1,791 本	レーザ解析結果
〃 平均樹高	17.36m	レーザ解析結果
伐採率	30%	聞き取り
伐採材積	188.8m <sup>3</sup>	$629.3 \times 30\% = 188.8 \text{ m}^3$
利用率	75%	聞き取り
出材推定材積	141.6m <sup>3</sup>	$188.8 \times 75\% = 141.6 \text{ m}^3$



品質別	生産割合(%)	生産材積(m <sup>3</sup> )	備考
A 材	40.0	76.0	$141.6 \text{ m}^3 \times 53.7\% \text{ (早見表)}$
B 材	5.2	9.8	$141.6 \text{ m}^3 \times 6.9\% \text{ (早見表)}$
C 材	29.6	55.8	$100 - (53.7 + 6.9) = 39.4\%$
C 材(D)	25.0	47.2	残置材
計		188.8	

A・B 材の生産割合は、それぞれの早見表を参照

#### 4. 細り表による機械的な出材量予測

苗木財産区の13林班・ロ・3と13林班・ロ・5の一部で行われた間伐施業の範囲を対象に、レーザ解析から抽出された樹頂点は1,791本であった。これらの樹頂点の分布を図2-32に示す。

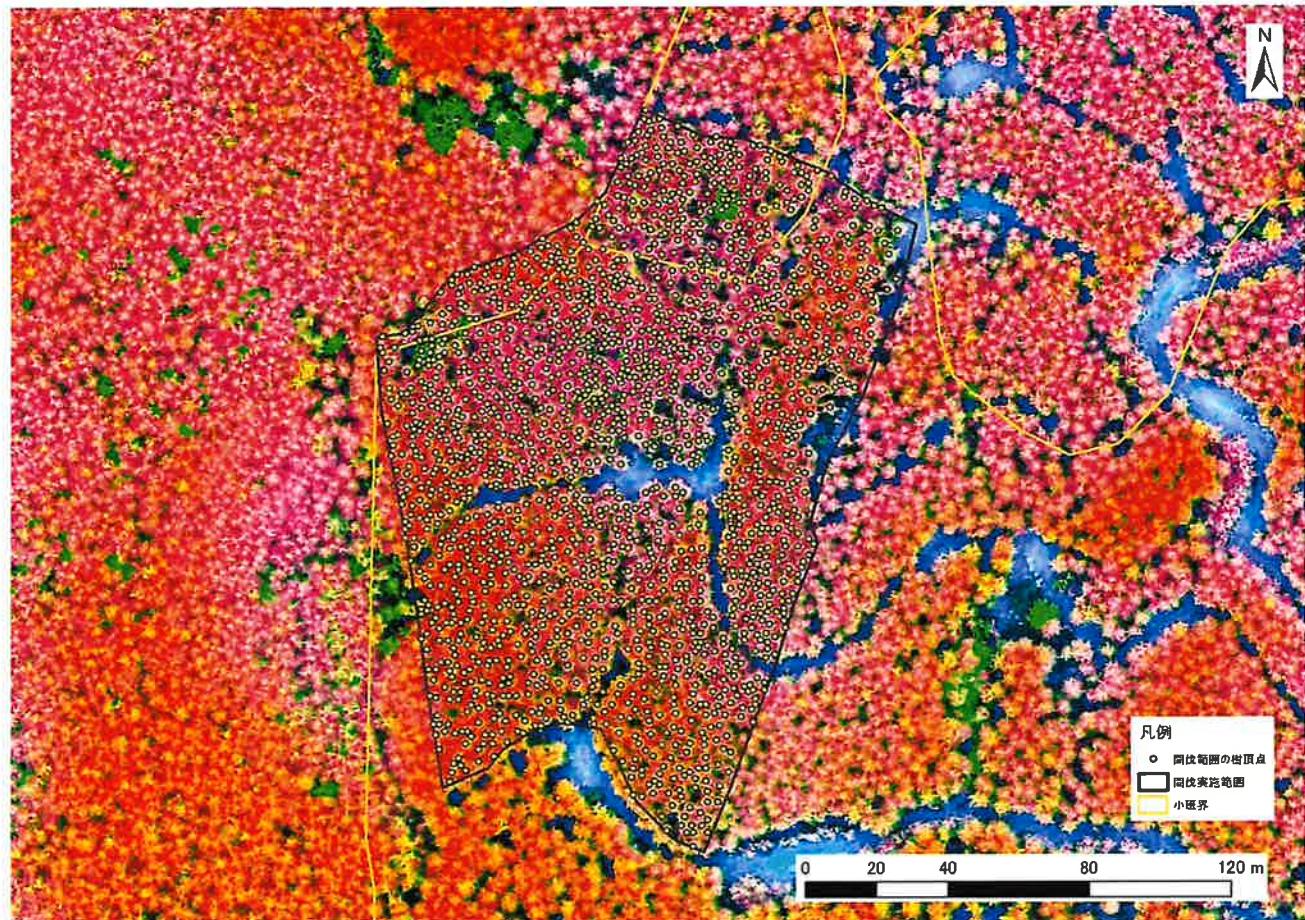


図2-32 間伐施業範囲の樹頂点分布

全ての樹頂点にその樹木の樹高、胸高直径、材積の情報がレーザ解析により把握されている。この情報を用いて、定性間伐に合うように単木材積の値が少ない方から順に30%に達するまでの樹木を伐採すると仮定し、伐採する樹木の本数を決定した。本間伐対象地では合計材積が $629.3\text{m}^3$ であり、30%の間伐では伐採量は $188.8\text{m}^3$ となる。単木材積を少ない方から $188.8\text{m}^3$ に達するまで単木材積を積み上げ、伐採する樹木の本数を決定した。このように計算した結果、756本が間伐対象樹木となった。

次に岐阜県版の細り表<sup>1</sup>を用いて756本の樹木の樹高、胸高直径から細りを求め、丸太本数と材積を求めた。丸太本数は1番玉と2番玉を3mで、3番玉以降を4mで取る設定として、丸太本数の計算を行った(図2-33)。その結果、丸太本数は1,993本となり、計算された丸太の材長と末口径から末口二乗法で全ての丸太の材積を計算した。

<sup>1</sup>岐阜県版スギ・ヒノキ細り表の作成 大洞智宏 岐阜県森林研研報39(2010)

## 設定値入力シート

相対幹曲線式係数 $y=ax+bx^2+cx^3$			
スギ	a	b	c
	2.4885	-2.7861	1.4021
ヒノキ	a	b	c
	2.4972	-2.6493	1.2358

樹種
ヒノキ

採材パラメータ	元玉	末玉				
玉切り	1番玉	2番玉	3番玉	4番玉	5番玉	6番玉
材長(m)	3	3	4	4	4	4
地上高(m)	3.3	6.4	10.5	14.6	18.7	22.8
根株(cm)	20					
余尺(cm)	10					
最小径(cm)	4					
材積間伐率(%)	30					
列状間伐率(%)		30				

図 2-33 丸太本数の計算設定

表 2-23 ヒノキ細り表(胸高直径 16cm)

樹高(m)	地上高(m)																							
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
14	14	13	13	12	11	11	10	9	7	6	4	2												
15	14	13	13	12	12	11	10	9	8	7	5	4	2											
16	14	14	13	12	12	11	10	10	9	8	6	5	3	1										
17	14	14	13	12	12	11	11	10	9	8	7	6	5	3	1									
18	14	14	13	13	12	12	11	10	10	9	8	7	6	4	3	1								
19	14	14	13	13	12	12	11	11	10	9	9	8	7	5	4	3	1							

表 2-24 ヒノキ細り表(胸高直径 18cm)

樹高(m)	地上高(m)																							
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
14	16	14	14	14	13	12	11	10	8	7	4	2												
15	16	14	14	14	13	12	11	10	9	8	6	4	2											
16	16	14	14	14	13	13	12	11	10	9	7	6	4	2										
17	16	14	14	14	14	13	12	11	11	10	8	7	5	4	2									
18	16	14	14	14	14	13	12	12	11	10	9	8	7	5	3	1								
19	16	16	14	14	14	13	13	12	11	11	10	9	8	6	5	3	1							
20	16	16	14	14	14	13	13	12	12	11	10	9	8	7	6	5	3	1						
21	16	16	14	14	14	14	13	13	12	11	11	10	9	8	7	6	4	3	1					

表 2-25 ヒノキ細り表(胸高直径 20cm)

樹高(m)	地上高(m)																								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
14	18	16	16	14	14	13	12	11	9	7	5	2													
15	18	16	16	16	14	14	13	12	10	9	7	5	2												
16	18	16	16	16	14	14	13	12	11	10	8	6	4	2											
17	18	16	16	16	14	14	14	13	12	11	9	8	6	4	2										
18	18	16	16	16	14	14	14	13	12	11	10	9	7	6	4	2									
19	18	16	16	16	14	14	14	14	13	12	11	10	9	7	5	4	1								
20	18	16	16	16	16	14	14	14	13	12	11	11	9	8	7	5	3	1							
21	18	16	16	16	16	14	14	14	13	13	12	11	10	9	8	6	5	3	1						
22	18	18	16	16	14	14	14	14	13	12	12	11	10	9	8	6	5	3	1						
23	18	18	16	16	16	14	14	14	14	13	13	12	11	10	9	8	7	6	4	3	1				
24	18	18	16	16	16	16	14	14	14	14	13	12	12	11	10	9	8	7	6	4	3	1			

表 2-26 ヒノキ細り表(胸高直径 22cm)

樹高(m)	地上高(m)																								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
14	20	18	18	16	16	14	14	12	10	8	6	3													
15	20	18	18	16	16	14	14	13	11	10	8	5	2												
16	20	18	18	16	16	16	14	14	12	11	9	7	5	2											
17	20	18	18	18	16	16	14	14	13	12	10	9	7	5	2										
18	20	18	18	18	16	16	14	14	14	13	11	10	8	6	4	2									
19	20	18	18	18	16	16	16	14	14	13	12	11	9	8	6	4	2								
20	20	18	18	18	16	16	16	14	14	14	13	12	10	9	8	6	4	2							
21	20	18	18	18	16	16	16	14	14	13	12	11	10	9	7	5	4	1							
22	20	18	18	18	18	16	16	16	14	14	14	13	12	11	10	8	7	5	3	1					
23	20	18	18	18	18	16	16	16	14	14	14	13	12	12	10	9	8	7	5	3	1				
24	20	18	18	18	18	16	16	16	14	14	14	13	12	11	10	9	8	6	5	3	1				
25	20	18	18	18	18	18	16	16	16	14	14	14	13	13	12	11	10	9	7	6	5	3	1		

表 2-27 ヒノキ細り表(胸高直径 24cm)

樹高(m)	地上高(m)																								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
14	22	20	20	18	16	16	14	13	11	8	6	3													
15	22	20	20	18	18	16	16	14	13	10	8	6	3												
16	22	20	20	18	18	16	16	14	14	11	9	8	5	2											
17	22	20	20	18	18	16	16	14	14	12	10	10	7	5	2										
18	22	20	20	18	18	18	16	16	14	13	11	11	9	7	5	2									
19	22	20	20	18	18	18	16	16	14	13	12	12	10	9	7	4	2								
20	22	20	20	20	18	18	18	16	16	14	13	13	11	10	8	6	4	2							
21	22	20	20	20	18	18	18	16	16	14	13	13	12	11	10	8	6	4	2						
22	22	20	20	20	18	18	18	16	16	14	14	14	13	12	11	9	8	6	4	2					
23	22	20	20	20	18	18	18	18	16	14	14	14	14	13	12	10	9	7	6	4	1				
24	22	20	20	20	18	18	18	18	16	14	14	14	14	13	12	11	10	9	7	5	3	1			
25	22	20	20	20	20	18	18	18	16	14	14	14	14	13	12	11	10	8	7	5	3	1			

表 2-28 ヒノキ細り表(胸高直径 26cm)

樹高(m)	地上高(m)																								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
14	22	22	20	20	18	18	16	14	12	10	7	3													
15	24	22	20	20	18	18	16	14	14	12	9	6	3												
16	24	22	22	20	20	18	18	16	14	13	11	9	6	3											
17	24	22	22	20	20	18	18	16	16	14	12	10	8	6	3										
18	24	22	22	20	20	18	18	16	16	14	14	12	10	8	5	2									
19	24	22	22	20	20	18	18	16	16	14	13	11	9	7	5	2									
20	24	22	22	20	20	18	18	16	16	14	14	12	11	9	7	5	2								
21	24	22	22	20	20	18	18	18	16	16	14	13	12	10	9	7	4	2							
22	24	22	22	22	20	20	18	18	16	16	14	14	13	12	10	8	6	4	2						
23	24	22	22	22	20	20	18	18	18	16	16	14	14	13	11	10	8	6	4	2					
24	24	22	22	22	20	20	18	18	18	16	16	14	14	13	12	11	9	8	6	4	2				
25	24	22	22	22	20	20	18	18	18	16	16	14	14	13	12	10	9	7	6	4	1				

表 2-29 ヒノキ細り表(胸高直径 28cm)

樹高(m)	地上高(m)																								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
14	24	24	22	22	20	18	16	16	13	11	7	4													
15	24	24	22	22	20	20	18	16	14	13	10	7	3												
16	24	24	22	22	20	20	18	18	16	14	12	9	6	3											
17	26	24	22	22	20	18	18	16	14	13	11	9	6	3											
18	26	24	22	22	20	20	18	18	16	14	13	11	8	6	3										
19	26	24	22	22	20	20	18	18	16	16	14	12	10	8	5	2									
20	26	24	22	22	20	20	18	18	16	14	14	12	10	8	5	2									
21	26	24	22	22	22	20	20	18	18	16	16	14	13	11	9	7	5	2							
22	26	24	22	22	22	20	20	18	18	16	14	14	13	11	9	7	5	2							
23	26	24	22	22	22	20	20	18	18	16	16	14	14	12	10	9	7	4	2						
24	26	24	24	22	22	20	20	18	18	18	16	16	14	13	12	10	8	6	4	2					
25	26	24	24	22	22	20	20	18	18	18	16	16	14	14	13	11	10	8	6	4	2				

表 2-30 ヒノキ細り表(胸高直径 30cm)

樹高(m)	地上高(m)																								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
15	26	26	24	24	22	20	20	18	16	14	11	7	4												
16	26	26	24	24	22	22	20	18	16	14	13	10	7	3											
17	26	26	24	24	22	22	20	20	18	16	14	12	10	7	3										
18	26	26	24	24	22	22	20	20	18	16	16	14	12	9	6	3									
19	26	26	24	24	24	22	20	20	18	16	14	13	11	9	6	3									
20	28	26	26	24	24	22	22	20	20	18	18	16	14	13	11	8	5	2							
21	28	26	26	24	24	22	22	20	20	18	16	16	14	12	10	8	5	2							
22	28	26	26	24	24	22	22	20	20	18	18	16	14	13	12	10	7	5	2						
23	28	26	26	24	24	24	22	22	20	20	18	16	16	14	13	11	9	7	5	2					
24	28	26	26	24	24	24	22	22	20	20	18	18	16	16	14	13	11	9	7	4	2				
25	28	26	26	24	24	24	22	22	20	20	18	18	16	16	14	14	12	10	9	7	4	2			
26	28	26	26	24	24	24	22	22	20	20	18	18	16	16	14	13	12	10	8	6	4	2			

表 2-31 ヒノキ細り表(胸高直径 32cm)  
地上高(m)

樹高(m)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
15	28	28	26	24	24	22	20	18	16	14	12	8	4											
16	28	28	26	26	24	22	22	20	18	16	14	11	7	4										
17	28	28	26	26	24	24	22	20	18	18	14	13	10	7	3									
18	28	28	26	26	24	24	22	22	20	18	16	14	12	10	7	3								
19	28	28	26	26	24	24	22	22	20	20	18	16	14	12	9	6	3							
20	28	28	26	26	26	24	24	22	22	20	18	16	16	14	11	9	6	3						
21	28	28	28	26	26	24	24	22	22	20	20	18	16	14	13	11	8	6	3					
22	28	28	28	26	26	24	24	22	22	20	20	18	18	16	14	13	10	8	5	2				
23	30	28	28	26	26	24	24	24	22	22	20	20	18	16	16	14	12	10	8	5	2			
24	30	28	28	26	26	24	24	24	22	22	20	20	18	18	16	14	13	12	10	7	5	2		
25	30	28	28	26	26	26	24	24	22	22	22	20	20	18	16	16	14	13	11	9	7	5	2	
26	30	28	28	26	26	26	24	24	24	22	22	20	20	18	18	16	16	14	13	11	9	7	4	2

航空レーザ計測データで把握した、間伐実施区域内の立木データから商品価値のある 3m、4m 材を優先して機械的に採材すると、次の結果となった。

表 2-32 定性間伐（材積）率 30%時の採材結果

丸太本数 (本)	材 長(m)				材積(m <sup>3</sup> )	材 長(m)				
	6	4	3	2		6	4	3	2	
末口徑(cm)	10	0	324	43	0	10	0.0	13.0	1.3	0.0
	12	0	160	191	0	12	0.0	9.2	8.3	0.0
	14	0	0	473	0	14	0.0	0.0	27.8	0.0
	16	0	0	391	0	16	0.0	0.0	30.0	0.0
	18	0	0	306	0	18	0.0	0.0	29.7	0.0
	20	0	0	99	0	20	0.0	0.0	11.9	0.0
	22	0	0	6	0	22	0.0	0.0	0.9	0.0
	24					24				
	26					26				
	28					28				
	30					30				
	32					32				
	34					34				
	36					36				
	38					38				
	40					40				
	42					42				
	44					44				
	46					46				
	48					48				
	50↑					50↑				
小計	0	484	1509	0	小計	0.0	22.2	109.9	0.0	
合計	1,993				合計	132.1				

表 2-32 定性間伐（材積）率 30%時の採材結果から、生産材積は 132.1 m<sup>3</sup> となった。ただし、ABC 材の生産割合は、販売先によって受け入れ規格が異なり、また市況によって変化するので、ここでは表 2-33 に示す平均的なグレードで分けることとする。

表 2-33 ヒノキのグレーディング基準

グレード	受入長(表中数字は径級 cm)				販売流通方式
	2.0m	3.0m	4.0m	6.0m	
A 材		14-20	16-20		直送
B 材	14-50	14-40	14-60		直送
C 材	すべて受け入れ				直送

その結果、表 2-34 品質別木材生産量の推定（機械的に採材）からは、次表のとおり推定した。

表 2-34 品質別木材生産量の推定（機械的に採材）

品質別	生産割合(%)	生産材積(m <sup>3</sup> )	備考
A 材	53.1	100.3	A 材・B 材のグレーディング基準が重複しているため合算にて試算
B 材			
C 材	16.8	31.8	残置材含まない
小計		132.1	
C 材(D)	30.1	56.7	残置材
計		188.8	

## 5. 各手法結果の比較

市売り実績、過去実績からの推計、細り表を使用した機械的推計手法の結果をまとめると以下に表の通りとなる。

表 2-35 推計、細り表を使用した機械的推計手法の結果

	過去の実績	細り表	市売り実績
A	76.0	100.3	56.0
B	9.8	31.8	73.5
C	55.8		13.3
小計	141.6	132.1	142.8
残置材量	47.2	56.7	46.0
伐採立木材積	188.8	188.8	188.8

単位 : m<sup>3</sup>

各種法による推定結果から、市売り材積を予想するのに“市売り係数”を設けたところ、次表のとおりとなつた。

表 2-36 推計方式別の市売り係数

品質別	a. 過去実績推定方式		b. 機械的採材方式	
	生産材積(m <sup>3</sup> )	市売り係数	生産材積(m <sup>3</sup> )	市売り係数
A 材	76.0	0.74	100.3	1.29
B 材	9.8	7.50		
C 材	55.8	0.24	31.8	0.33
C 材(D)	47.2		56.7	

※ 市売り係数=予想される市売り材積／推定生産材積

今般の標本データは1箇所のみであるが、今回の対象地以外でも、航空レーザー解析で得られたデータから机上で推計した値に上表の”市売り係数”を乗じると、A～C 材の市売り材積を予想できる、という仕組みを作りたい。

一般に、1本の立木をどのように伐採して、どの部分をどのように造材して出材するかは、その時々の市場動向によって方針が変わり、伐採・造材の実作業においては現場事情や作業員の技量、意識によるところが大きい。よって、厳密にはこれら人為的な出材事情も含めて数値化すべきものであるが、それらを全部ひっくるめて過去の実績から推計したものが、上表の a. 過去実績推定方式 であり、純粋に市場での販売価格が有利になるよう機械的に元玉から 3m または 4m で採材したのが、b. 機械的採材方式 である。

実際に作業した造材作業員にインタビューしたところ、A 材の係数が 1 を下回り、B 材の係数が 2 倍以上となっているのは、「高齢級の林地ではあるが、全体に細くて小曲り材が多く、良質材生産は厳しい」と判断した

こと、また、C材の係数が推計材積の1/3程度と低いのは、材積の最も大きい端ころ部分を根株として切り残すことや、材が細いために梢端部分が出材されなかつたことが原因のひとつとして推測されるが、検証には至っていない。また、いわゆる過去の実績データから推計する方法についても様々な状況下でのケースを網羅し切れていないこと、十分な事例数から作成されていないなどの問題点がある。

### 第3項 平成27年度実施内容

#### 1. 間伐の実施状況

##### (1) 実施状況

対象地は、岐阜県中津川市苗木字高峰の苗木財産区有林で、11林班・ホ-1-2～1-7、11林班・ト-1-6～1-8の全体もしくは一部で、岐阜県の森林簿によるとヒノキ48年生である。平均傾斜は20%程度の緩やかな南東向き斜面である。

区域内には幅員4mの作業道が通っており、その作業道まで木寄せ可能な区域のみを施工区域としている。コンパスによる実測で区域面積5.687ha、作業道518m×4m=0.207haを控除して施工面積は5.48haである。間伐は中津川市の補助を受けて行われた。

対象地での搬出はグラップルで作業道への引き出しを行った。一部の緩斜面ではグラップルが斜面へ侵入することにより搬出可能範囲を拡大している。搬出車両が2tダンプであることから、3.0mへの造材が中心となっている。

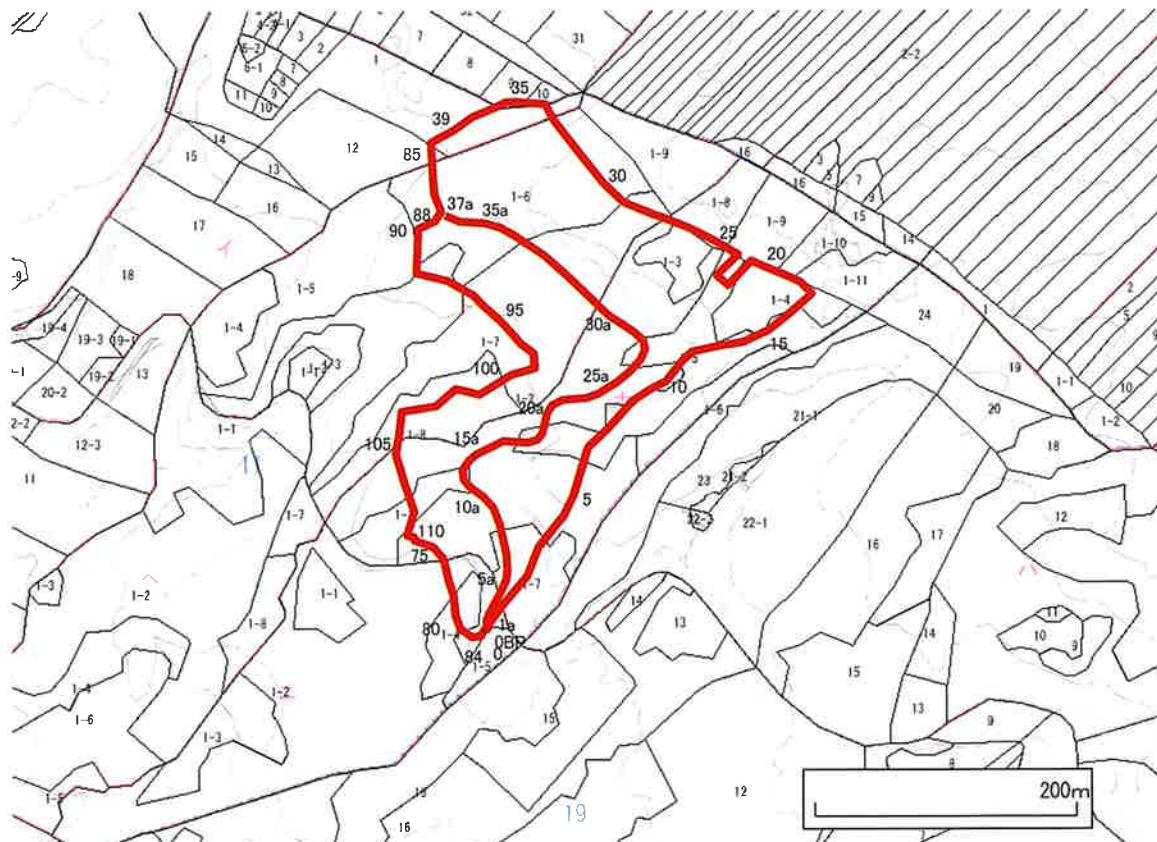


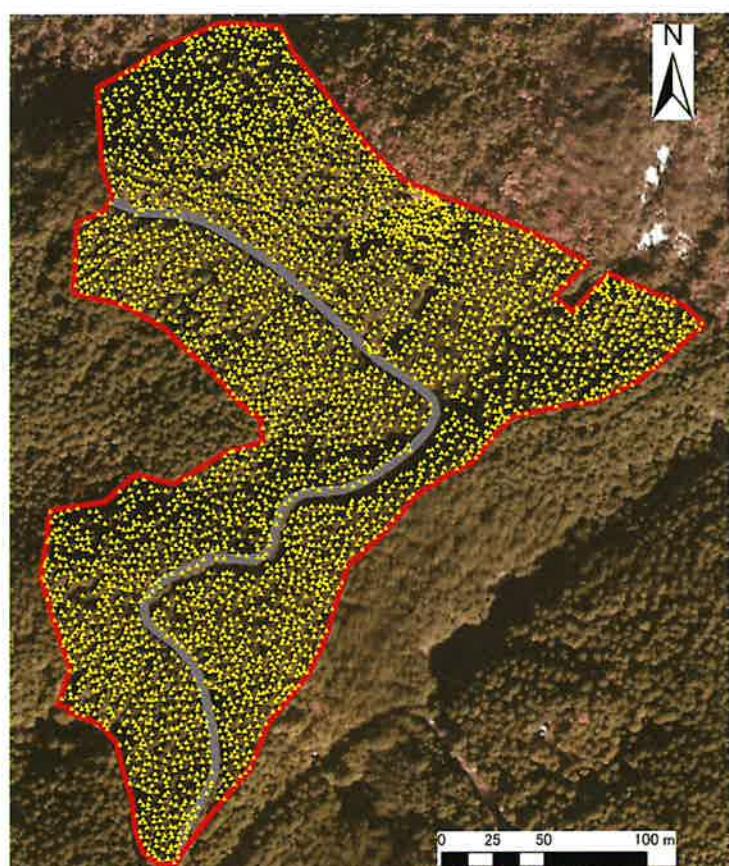
図 2-34 岐阜県域統合型 WebGIS ぎふふおれナビに投影

## (2) 間伐地の資源状況

平成 26 年度の航空レーザ計測では樹冠表層で反射したレーザパルスと地盤面に反射したレーザパルスよりそれぞれ樹冠表層モデルと地盤高モデルを作成した。樹冠表層モデルと地盤高モデルを差分解析し樹冠高モデルを作成した。樹冠高モデルを凹凸の情報に変換した樹冠形状指数画像を作成し樹頂点を明確にすることで樹頂点抽出を行い、立木本数と樹高を算出している。胸高直径は water-shade 法により個々の樹冠を分割し算出した樹冠投影面積と現地調査により取得した胸高直径の相関式を作成し、推定した。単木材積は樹頂点抽出により取得した樹高と相関式により推定した胸高直径より立木幹材積表を用いることで算出した。

施行区域は 5.687ha であり範囲内の立木本数は 4,116 本、平均樹高は 19.6m、平均胸高直径は 23.7cm、合計材積は 1,762m<sup>3</sup> であった。

表 2-37 対象区域森林資源情報



森林資源情報		集計結果
範囲面積 (ha)		5.688
立木本数 (本)		4116
立木密度 (本/ha)		724
樹高 (m)	最小	7.6
	最大	27.3
	平均	19.6
胸高直径 (cm)	最小	12.3
	最大	34.1
	平均	23.7
単木材積 (m <sup>3</sup> )	最小	0.052
	最大	1.024
	平均	0.428
合計材積 (m <sup>3</sup> )		1762.534
ha材積 (m <sup>3</sup> /ha)		309.869

図 2-35 樹頂点データ

### (3) 現地調査結果

実出材量と採材シミュレーション結果を比較するために、実際の本数間伐率を求めることした。そのため間伐後に現地調査を行った。現地調査は平成 28 年 4 月 20 日に岐阜県中津川市苗木字高峰の苗木財産区有林に間伐実施箇所にて行った。現地調査では 400m<sup>2</sup> の円形プロットを間伐施業箇所に 4 箇所設置し、プロット調査を行った。

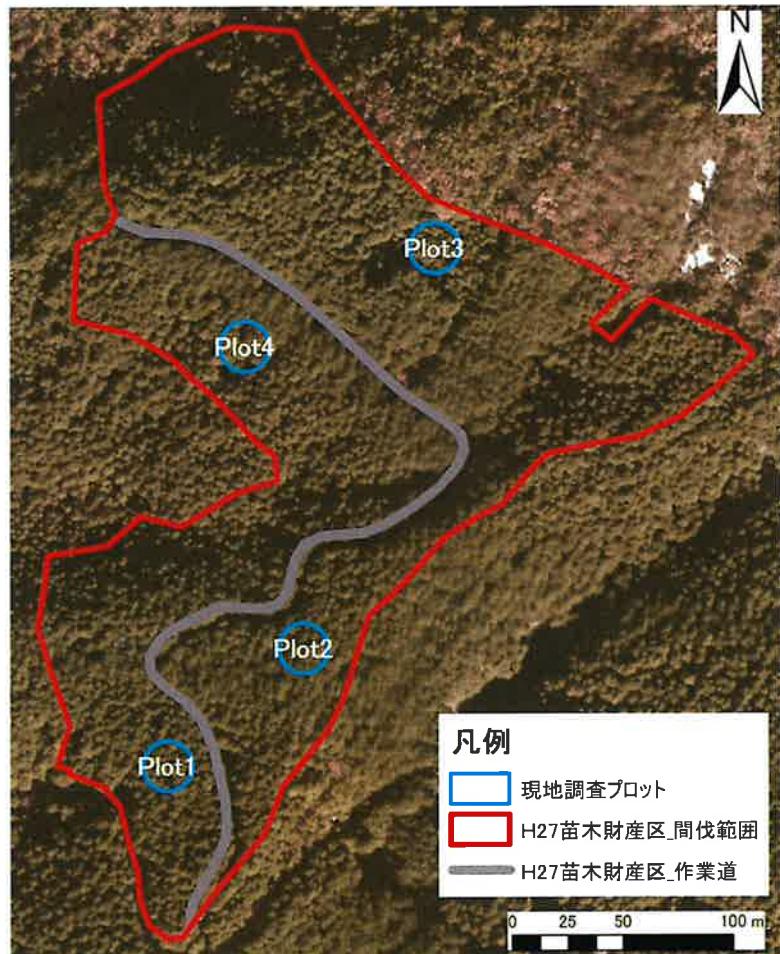


図 2-36 現地調査位置

プロット調査では円形プロットに含まれる樹木の本数、胸高直径、代表的な樹木（各プロット 10 本程度）の樹高、切り株の本数を調査した。また、SfM 解析用の写真の撮影も行った。調査結果は以下に示すとおりになり、4 プロットの平均胸高直径は 24.6cm、平均樹高は 19.0m、本数間伐率は 31.1% となった。

表 2-38 現地調査結果一覧

	立木本数 (本)	切り株 (本)	間伐前本数 (本)	間伐率	平均DBH (cm)	平均樹高 (m)	合計材積 (m <sup>3</sup> )
Plot1	25	10	35	28.6%	27.2	22.9	17.562
Plot2	20	8	28	28.6%	28	19.5	12.18
Plot3	40	22	62	35.5%	15.6	12.9	5.044
Plot4	19	7	26	26.9%	27.4	20.6	11.953
平均	26	11.75	37.75	31.1%	24.6	19.0	11.685

現地でPlotを設定した箇所について、伐採前の航空レーザ測量で把握した立木位置に対し、伐採後のSfMによる3次元モデルによる立木位置から、伐採木を割出すと以下のようになる。

表 2-39 SfMによる3次元モデル

調査 Plot No.	立木本数			材積		
	レーザ (伐採前)	モデル (伐採後)	伐採率	間伐前	間伐後	伐採率
Plot1	27	21	22.2%	13.01	11.74	9.7%
Plot2	29	20	31.0%	12.10	9.09	24.9%
Plot3	61	33	45.9%	11.40	6.83	40.1%
Plot4	22	17	22.7%	10.75	9.14	15.0%
合計	139	91	34.5%	47.26	36.80	22.1%

Plotによって本数伐採率、材積伐採率ともにばらつきがある結果となった。

## 2. 市売り実績

対象地は実際に施業され、最寄りの木材市場に平成27年1月～2月に出荷された。市場動向としては、平成26年12月に県内に大型バイオマス発電所が稼働し始めたため、平成27年度はC材の単価が上昇している。また、A材は4.0mよりも3.0mの引き合いが強い傾向にあり、径級や曲り等の状況にもよるが3.0m造材が多くなっている。当対象地の状況としては、搬出が2tダンプであるため3.0m造材が多く、昨年度より梢端部の出材が多かった模様である。ただし小径木に関しては、木材市場から引き合いのない3.0mではなく4.0m造材への依頼があったという。

市売り販売された実績は次表のとおりである。

表 2-40 品質別の市売り実績

品質別	丸太本数	材積 (m <sup>3</sup> )	材積割合 (%)	m <sup>3</sup> 当たり 単価(円)	金額(円)
A材	216	237.991	59.05	13,593	3,235,204
B材	81	103.421	25.66	9,347	966,691
C材	37	61.650	15.30	5,776	356,146
計	334	403.062			4,558,041

### 3. 過去の実績からの出材量予測

平均胸高直径を除く各アイテムのデータは以下の通りである。

表 2-41 アイテムデータ

アイテム	対象地のデータ	備考
選木方針	優勢木&劣勢木	定性間伐、聞き取り
腐り	少ない	聞き取り
枝虫	あり	聞き取り
風雪害	少ない	聞き取り、プロット箇所で視認
胸高直径	23.7cm	レーザ解析結果、早見表は 24cm 欄参照
対象地内推定積	1,762.5m <sup>3</sup>	レーザ解析結果
〃 本数	4,116 本	レーザ解析結果
〃 平均樹高	19.6m	レーザ解析結果
伐採材積	550.3m <sup>3</sup>	レーザ解析結果
利用率	80%	聞き取り
出材推定材積	440.2m <sup>3</sup>	550.3 × 80% = 440.2m <sup>3</sup>

※枝虫はスギノアカネトラカミキリの虫害

平成 26 年度に記載の早見表より、生産割合は A 材が 53.500%、B 材が 33.374% と求められるので、出材推定材積より、品質別木材生産量は以下のように推定できる。平均胸高直径以外のカテゴリ変数の数値小計は早見表の次頁に資料として示す。

伐採材積については、Plot のデータは材積伐採率のばらつきが大きかったため、後述の機械的に採材する方法によって、全立木に対してランダムに選木した場合の結果を用いた。

表 2-42 品質別木材生産量の推定

品質別	生産割合 (%)	生産材積 (m <sup>3</sup> )	備考
A 材	42.8	235.5	440.2m <sup>3</sup> × 53.500% (早見表)
B 材	25.1	138.1	440.2m <sup>3</sup> × 33.374% (早見表)
C 材	12.1	66.6	440.2 - (235.5+138.1)
残地材	20.0	110.1	550.3-440.2
計		550.3	

### 4. 細り表による機械的な出材量予測

#### (1) 予測手法

相対幹曲線と航空レーザ計測の解析より取得した胸高直径と樹高より機械的な採材シミュレーションを行い、出材丸太本数と出材積を推定した。相対幹曲線は  $y=0.4291x^3-1.2116x^2+1.8215x$  を使用した。本数間伐率は現地調査結果より 31.1% となった。また、市売り結果より材長は 1m が 7 本、2m が 359 本、3m が 3,687 本、4m が 840 本であり 3m の丸太が大部分を占め、一番玉、二番玉等による材長の偏りがないため、採材シミュレーションでは材長は一律 3m とした。最小末口径も同様に市売り結果より 8cm が適当と判断した。根株 (0.2m)、余尺 (0.1m) を考慮した。そのため採材する丸太は地上高 0.3~3.3m、3.4~6.4m、6.5~9.5m … の部分となる。採材は地上高 3.3m、6.4m、9.5m … において相対幹曲線式より直径を求め、直径が 8cm 以

上では採材し、8cm 未満である場合には採材せず残地材となる。丸太材積は相対幹曲線式から求めた直径より末口二乗法により算出した。

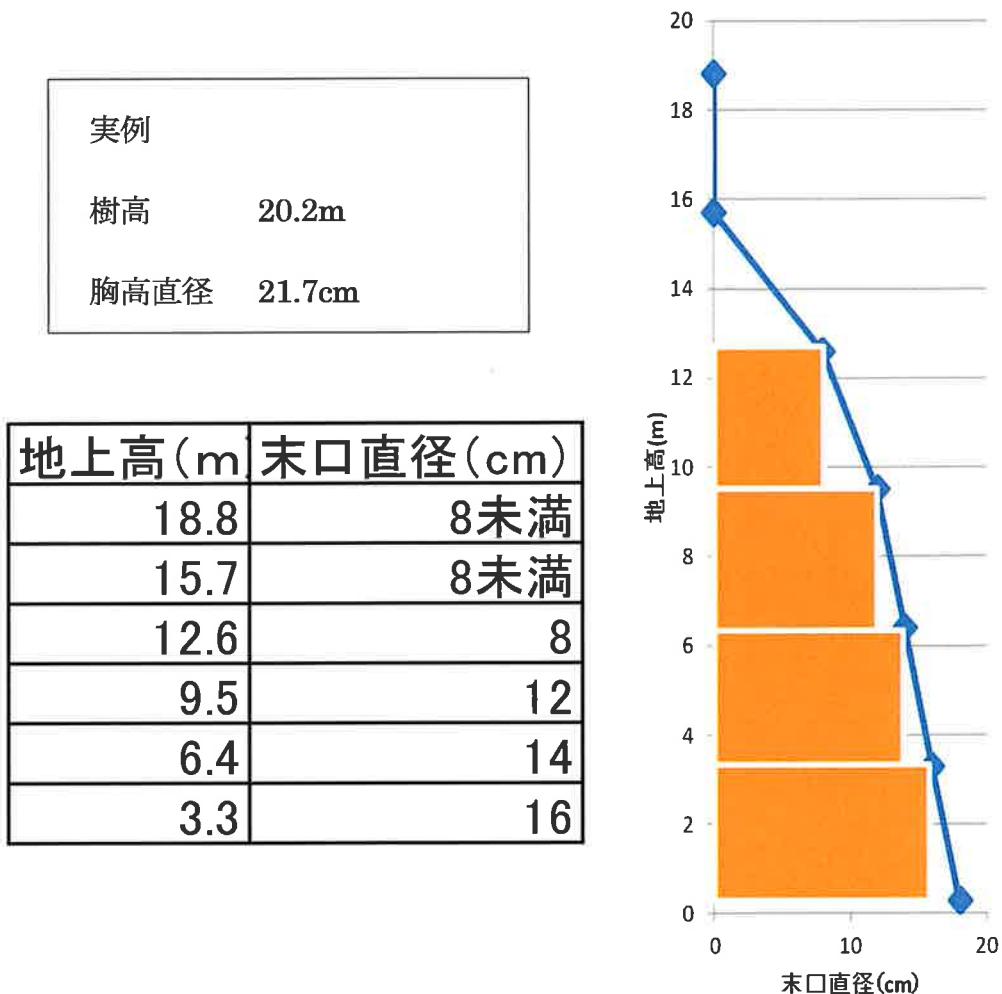


図 2-37 相対幹曲線式による採材例

採材シミュレーションでは本数間伐率より単木データで伐採する樹木をランダムに選択した。伐採本数は1280 本となり、その時の合計材積は 550.309m<sup>3</sup> となった。合計材積は全立木材積の 31.1%ではなく伐採する単木の材積の合計であり、材積間伐率は 31.2% となる。採材シミュレーション結果の丸太本数は市売り結果 4,893 本に対し 5,334 本となった。誤差は 441 本多く、誤差率は 9% であった。末口径が 8~12cm では丸太本数は過大に算出され、20cm~では過小な傾向が見られる。市売り結果より丸太の平均材長は 3.1m であったこと、現場作業で材の質が悪く搬出コストに見合わない場合にはその部分は搬出せず残地材となることが考えられるため、過大に算出する傾向は現状に即している。市売り結果の丸太本数は材 1m~4m の丸太の合計であるため一律 3m で算出した採材シミュレーション結果と単純に比較することはできない。

表 2-43 出材丸太本数の比較表

丸太本数 (本)	H27出材量				レーザ出材量 (長級は3m)	誤差		
	長級(m)							
	1	2	3	4				
末口径 (cm)	6				17	-17		
	8		92	477	569	85		
	10		323	131	454	293		
	12	1	378	80	459	340		
	14	35	738	27	800	86		
	16		947	3	950	-112		
	18	18	178	10	206	500		
	20	7	117	684	28	427		
	22		100	143	15	-79		
	24		54	151	24	-161		
	26		23	38	12	-57		
	28		6	10	9	-12		
	30		4	4	6	-13		
	32		1		1	-2		
	34					0		
	36			1	1	-1		
小計		7	359	3687	840			
合計				4893	5334	441		

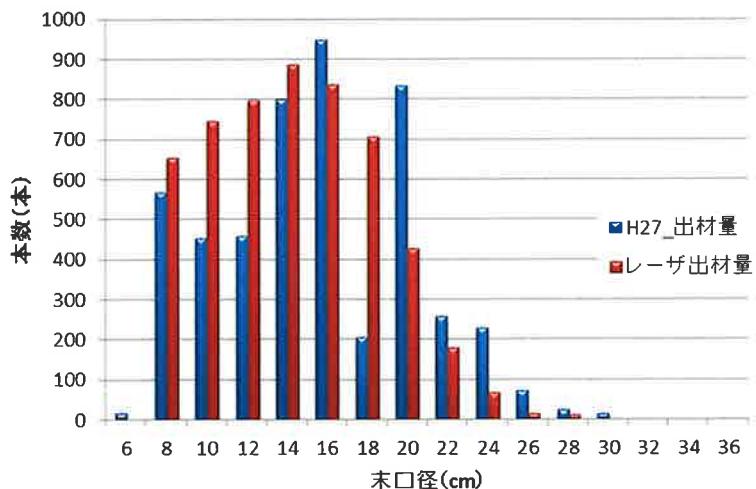


図 2-38 出材丸太本数の比較結果

採材シミュレーション結果の材積は  $350.116\text{m}^3$  となった。市売り結果の合計材積は  $403.062\text{m}^3$  であったため、 $52.95\text{m}^3$  過小となり誤差は 13% であった。また、伐採木の立木材積は  $550.309\text{m}^3$  であり、歩留りは 64% となつた。誤差の要因としては胸高直径の推定が過小であったこと、相対幹曲線式が現状に即していなかったことが考えられる。相対幹曲線式について作成されてから年月が経ち、作成当時から施業方法の変化しているはずであり、作業方法の変化に伴い樹幹形も当時から変化していることが推測できる。また、近年では長伐期化が進んでおり、50 年伐期を想定している相対幹曲線式では林齢 50 年以上の樹木の樹幹形については勘案されていない。採材のシミュレーション精度を向上させていくためには現状に適応した相対幹曲線式の作成が不可欠である。また、立木密度等の樹幹形に影響を与える要素ごとに場合分けした相対幹曲線式の作成によりさらに信頼性の高い採材シミュレーションを行うことができると言える。しかし、機械的に採材シミュレーションを行うと曲がり等が考慮されないため、現状と一致することはなくある程度の誤差は必ずある。であるからし

て機械的に採材するシミュレーションに求める精度を検討していく必要がある。また、間伐施業に対して機械的に採材するシミュレーションを行ったが間伐率は4プロットから求めた数値であるとともに、5haの範囲で機械的に採材するシミュレーションを行ったが間伐率は4プロットから求めた数値であるとともに、5haの範囲の評価中で一様な伐採率でないことが考えられる。そのため、今後の機械的に採材するシミュレーションの精度評価を行う場合には誤差の要因を低減するために皆伐し出材量の精度を検証する必要がある。

表 2-44 出材材積の比較表

材積(m <sup>3</sup> )		H27出材量				レーザ出材量 (長級は3m)	誤差		
		長級(m)							
		1	2	3	4				
末口径(cm)	6				0.334	0.334	-0.334		
	8			2.563	19.072	21.635	-9.078		
	10			9.507	3.726	13.233	9.177		
	12		0.034	18.238	4.986	23.258	11.259		
	14		1.701	46.368	2.322	50.391	1.7058		
	16			80.553	0.334	80.887	-16.53		
	18		1.17	17.335	1.33	19.835	48.788		
	20	0.358	8.914	83.204	4.218	96.694	-45.45		
	22		9.506	20.763	2.852	33.121	-7.13		
	24		6.21	26.603	5.72	38.533	-26.78		
	26		3.105	7.714	3.24	14.059	-10.81		
	28		0.942	2.35	2.826	6.118	-3.06		
	30		0.72	1.08	2.16	3.96	-3.69		
	32		0.205		0.41	0.615	-0.615		
	34			0.389		0.389	-0.389		
	36						0		
小計		0.358	32.507	316.667	53.530	403.062	350.116		
合計							-52.95		

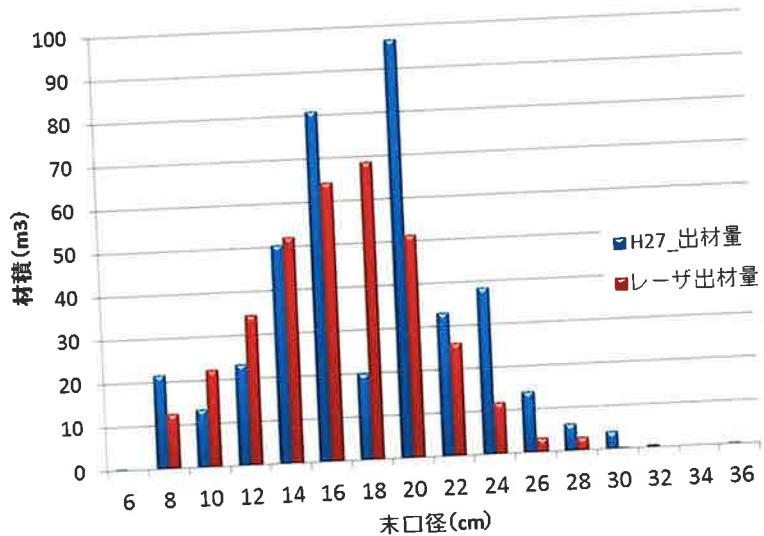


図 2-39 出材材積の比較結果

5. 各手法結果の比較  
市売り実績、過去実績からの推計、細り表を使用した機械的推計手法の結果をまとめると以下に表の通りとなる。

表 2-45 平成 27 年度 ABC 材の区分結果

	過去の実績	細り表	市売り実績
A 材	235.5	406.7	238.0
B 材	138.1	—	103.4
C 材	66.6	—	61.7
小計	440.2	406.7	403.1
残置材量	110.1	143.6	147.2
伐採立木材積	550.3	550.3	550.3

単位 : m<sup>3</sup>

#### 第4項 平成 28 年度実施内容

##### 1. 間伐の実施状況

対象地は、岐阜県中津川市苗木字瀬戸入会峠の苗木財産区有林で、43 林班・イ・1-1、1-6 及び 1-7 の全体もしくは一部で、岐阜県の森林簿によると 1-1 はヒノキ 61 年生、1-6 及び 1-7 はヒノキ 53 年生である。平均傾斜は 30% 程度の南向き斜面である。

当区域は林道高峯線に沿った尾根沿いで、標高差 150m の縦長の区域である。区域内には幅員 3.6m の作業道が等高線に沿って 30m 間隔で数多く通っており、その作業道からほぼ全区域が木寄せ可能な区域となっている。コンパスによる実測で区域面積 9.08ha、作業道 2039m × 3.6m = 0.73ha を控除して施工面積は 8.35ha である。

対象地での搬出はグラップルもしくはウインチで作業道への引き出しを行っている。一部の緩斜面ではグラップルが斜面へ侵入することにより搬出可能範囲を拡大している。フォワーダで林道へ搬出し、2t ダンプもしくは 4t トラックで輸送している。

間伐方法は定性間伐としているが、材の引き出しのために、多少列状な選木となっている。採材については、柱取りを主として 3m での造材を中心とし、大径木で可能な場合は 4m での造材としている。林地には元口 10cm 程度から先の梢端部が残材として残されている。

なお、平成 26 年度からの 3 カ年の作業班は同じである。

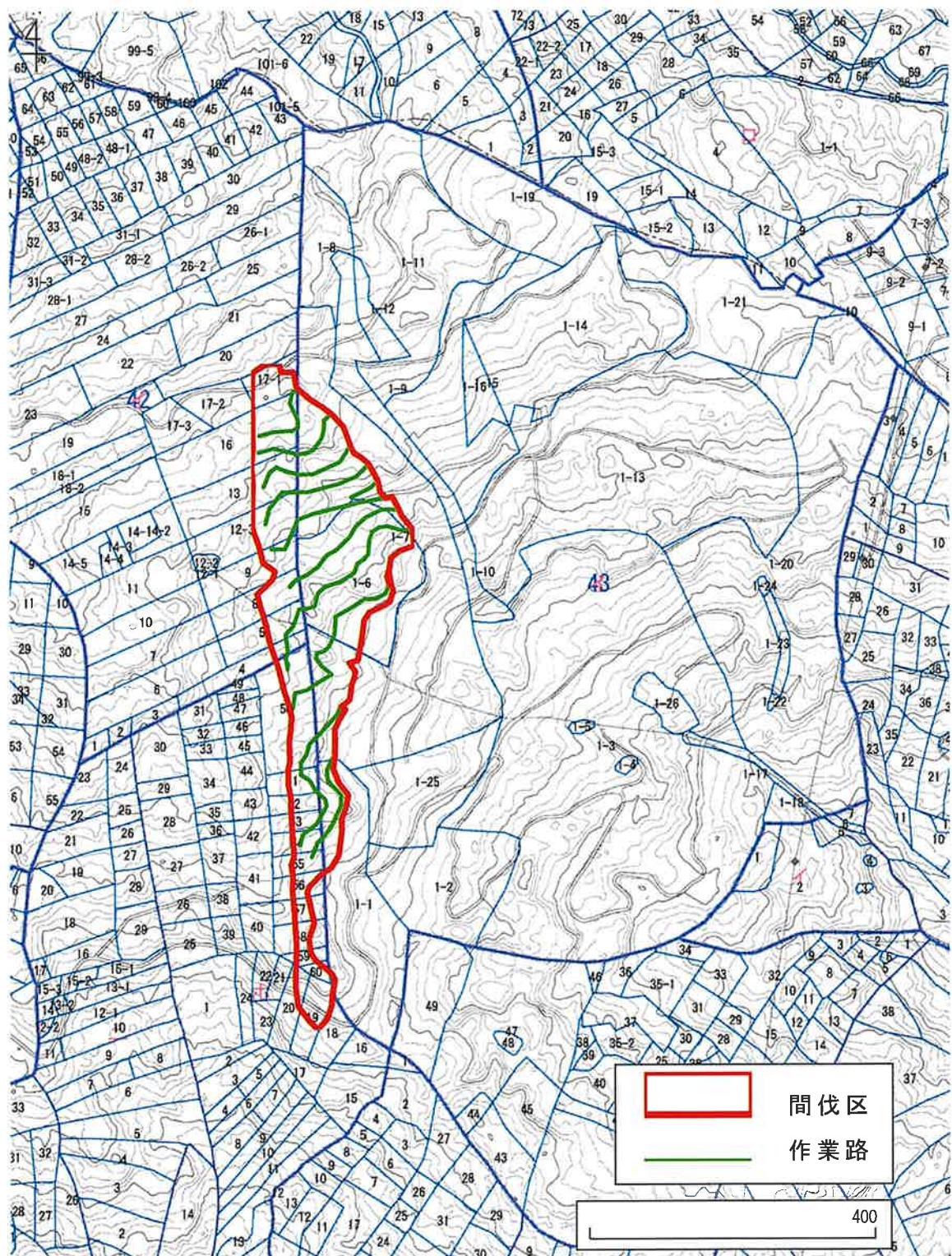


図 2-40 岐阜県域統合型 WebGIS ぎふふぉれナビに投影

### (1) 間伐地の資源状況

施行区域は 9.08ha であり範囲内の立木本数は 8,668 本、平均樹高は 18.2m、平均胸高直径は 22.4cm、合計材積は 3,213m<sup>3</sup> であった。

表 2-46 対象区域森林資源情報

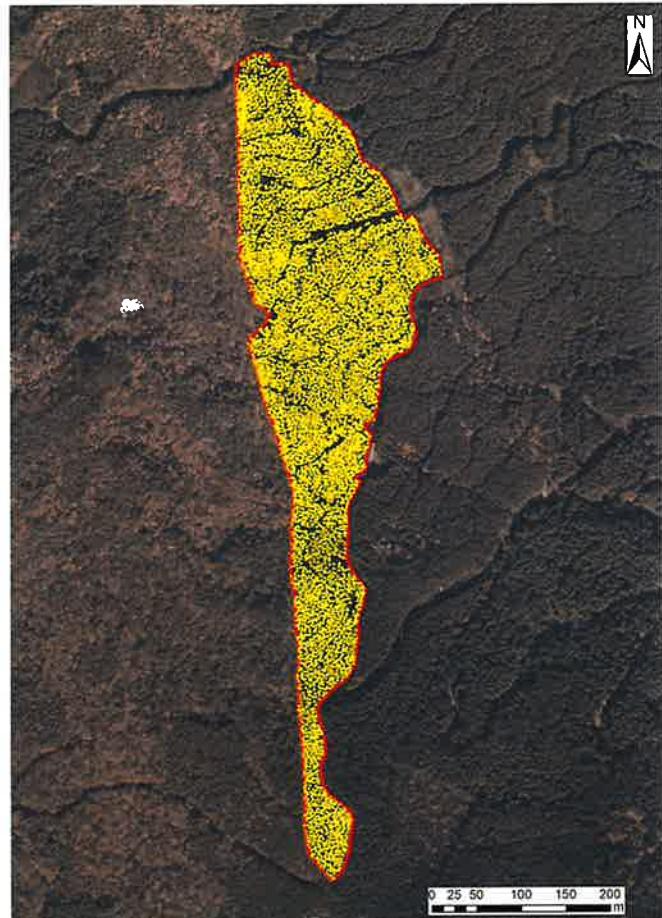


図 2-41 樹頂点データ

### 森林資源情報 集計結果

範囲面積(ha)	9.08
立木本数(本)	8668
立木密度(本/ha)	955
樹高(m)	最小 10.7 最大 25.7 平均 18.2
胸高直径(cm)	最小 12.4 最大 31.4 平均 22.4
単木材積(m <sup>3</sup> )	最小 0.082 最大 0.964 平均 0.371
合計材積(m <sup>3</sup> )	3213.149
ha材積(m <sup>3</sup> /ha)	353.871

### (2) 現地調査結果による森林資源情報の精度検証

#### ① 立木本数精度の検証

平成 28 年度間伐範囲のヒノキ林内で現地調査を 3 箇所実施した。航空レーザ計測による樹頂点抽出では、上空から計測した樹冠部の形状を用いるため、樹頂点が林分の上層に達している上層木の本数が抽出される。そのため、上層樹冠に到達していない立木が多い林分では全木本数と航空レーザ計測による推定本数に相違が生じるため、解析結果の利用に注意が必要である。なお、プロット内の全木を現地調査する際に、頂点が周囲の樹木の力枝より低い樹木は樹冠未到達木、それ以外は上層木と記録した。ヒノキの現地調査の立木本数の比較結果を示す。誤差率の平均は 1.1% であった。RMSE は平均 46 本に対し 1.15 本であった。

表 2-47 現地調査本数

Plot_ID	現地調査 本数	レーザ解析 樹木本数	現地比	誤差率
P1	58	56	97%	3%
P2	43	43	100%	0%
P3	38	38	100%	0%
平均	46.3	45.7		1.1%
		R	1.00	
		RMSE	1.15	

### ② 樹高精度の検証

航空レーザ解析結果から樹頂点が抽出され、同時に抽出樹頂点の樹高も計測した。精度の確認のため現地調査の結果との比較を行った。誤差率の平均は 0.8% であり、RMSE は 0.17m であった。

表 2-48 現地調査樹高とレーザ解析樹高の比較

Plot_ID	現地調査 樹高(m)	レーザ解析 樹高(m)	現地比	誤差率
P1	17.0	16.9	99%	1%
P2	17.8	17.6	99%	1%
P3	19.8	19.7	99%	1%
平均	18.2	18.1		0.8%
		R	1.00	
		RMSE	0.17	

### ③ 胸高直径精度の検証

現地調査の平均胸高直径と比較を行った。現地調査平均胸高直径とレーザ解析平均胸高直径の比較を表 2-48 に示す。平均誤差率は 4.3% であった。RMSE は 1.03cm であった。現地の平均胸高直径が 19.6cm であったプロット P1 では推定結果が 21.2cm (現地比 8% の誤差)、P2 では現地の平均胸高直径 22.4cm に対し、推定結果は 22.0cm (現地比 2% の誤差) となった。

表 2-49 現地調査胸高直径とレーザ解析胸高直径の比較

Plot_ID	現地調査 胸高直径 (cm)	レーザ解析 胸高直径 (cm)	現地比	誤差率
P1	19.6	21.2	108%	8%
P2	22.4	22.0	98%	2%
P3	23.0	22.3	97%	3%
平均	21.7	21.8		4.3%
		R	0.99	
		RMSE	1.03	

### ④ 材積精度の検証

ヒノキの材積は富山・岐阜・愛知地方の材積式（林野庁計画課編 立木幹材積表・西日本編）を用い、単木の樹高と胸高直径から算出した。使用したヒノキの材積式を以下に示す。

・ヒノキ（人工林、昭和34年調整）

$$\log V = -5 + 0.658496 + 2.009104 \log d + 0.929831 \log h \quad (d: 6 \sim 10 \text{ cm})$$

$$\log V = -5 + 0.583947 + 1.909076 \log d + 1.097628 \log h \quad (d: 12 \sim 20 \text{ cm})$$

$$\log V = -5 + 0.729152 + 1.756400 \log d + 1.166107 \log h \quad (d: 22 \sim 40 \text{ cm})$$

$$\log V = -4 + 0.243210 + 1.370193 \log d + 1.239011 \log h \quad (d: 42 \text{ cm} \sim)$$

上記の二変数材積式を用いてヒノキの材積を推定した。まず、現地調査プロット内の樹木の合計材積、平均単木材積とレーザ解析による合計材積、平均単木材積との比較を行った。

現地調査による合計材積とレーザ解析により推定された合計材積では平均誤差率は7.4%であり、プロット平均合計材積15.9 m<sup>3</sup>に対して、RMSEは1.18 m<sup>3</sup>となった。

また、平均単木誤差においても誤差を評価した。現地調査による平均単木材積とレーザ解析により推定された平均単木材積では平均誤差率は8.7%であった。

表 2-50 現地調査単木材積とレーザ解析材積の比較  
(合計材積) (平均単木材積)

Plot_ID	現地調査 合計材積 (m <sup>3</sup> )	レーザ解析 合計材積 (m <sup>3</sup> )	現地比	誤差率
P1	15.5	16.8	108%	8%
P2	15.9	14.7	93%	7%
P3	16.4	15.4	94%	6%
平均	15.9	15.6		7.4%
	R	-0.61		
	RMSE	1.18		

Plot_ID	現地調査 平均単木材積 (m <sup>3</sup> )	レーザ解析 平均単木材積 (m <sup>3</sup> )	現地比	誤差率
P1	0.27	0.30	112%	12%
P2	0.37	0.34	93%	7%
P3	0.43	0.40	94%	6%
平均	0.36	0.35		8.7%
	R	0.97		
	RMSE	0.03		

##### ⑤ 間伐率把握のための現地調査

実出材量と採材シミュレーション結果を比較するために実際の本数間伐率を求める必要があり、間伐前後に現地調査を行った。間伐前の現地調査は2016年11月28日、間伐後の現地調査は2017年4月28日に岐阜県中津川市苗木字高峰の苗木財産区有林に間伐実施箇所内において行った。現地調査では400m<sup>2</sup>の円形プロットを間伐施業箇所に3箇所設置し、プロット調査を行った。間伐前後で現地調査地点は同じである。



図 2-42 現地調査位置

間伐前のプロット調査では円形プロットに含まれる樹木の本数、樹木位置、胸高直径、樹高を調査し、間伐後のプロット調査では間伐前の樹木位置図をもとに切り株の本数を調査した。間伐前の 3 プロットの平均樹高は 18.2m、平均胸高直径は 21.7cm、合計材積 48.165 m<sup>3</sup>であった。間伐後では平均樹高は 18.4m、平均胸高直径は 22.8cm、合計材積 37.307 m<sup>3</sup>であった。間伐率は本数間伐率が 31.9%、材積間伐率は 22.6%となつた

表 2-51 現地調査一覧

	間伐前					
	全木本数	上層木本数	平均樹高	平均DBH	合計材積	上層木材積
P1	60	58	17.0	19.6	15.686	15.526
P2	44	43	17.8	22.4	15.994	15.900
P3	39	38	19.8	23.0	16.485	16.402
平均	48	46	18.2	21.7	16.055	15.943
合計	143	139			48.165	47.828

	間伐後						間伐率	
	全木本数	上層木本数	平均樹高	平均DBH	合計材積	上層木材積	本数	材積
P1	37	37	17.1	21.0	11.335	11.335	38.3%	27.7%
P2	30	30	18.1	23.5	12.312	12.312	31.8%	23.0%
P3	29	29	19.9	24.0	13.660	13.660	25.6%	17.1%
平均	32	32	18.4	22.8	12.436	12.436	31.9%	22.6%
合計	96	96			37.307	37.307		

現地で Plot を設定した箇所については以下の通りである。

表 2-52 Plot を設定した調査箇所一覧

調査 Plot NO.	伐採前			伐採後			本数伐採率	材積伐採率
	立木本数 (本)	平均 DBH (cm)	材積 (m3)	立木本数 (本)	平均 DBH (cm)	材積 (m3)		
Plot1	60	19.6	15.69	37	21.0	11.34	38.3%	27.7%
Plot2	44	22.4	15.99	30	23.5	12.31	31.8%	23.0%
Plot3	39	23.0	16.49	29	24.0	13.66	25.6%	17.1%
平均	47.7	21.39	16.06	32.0	22.69	12.44	32.9%	22.5%

立木本数に多少ばらつきがあったが、本数伐採率に連動して材積伐採率も増減し、材積伐採率は本数伐採率より 10%弱少ない結果となった。多くの劣勢木が伐採されたことが示唆されるが、優勢木も含めた選木となっていることから、伐採後の平均 DBH の増加量はさほど大きくない。

## 2. 市売りの実績

対象地は実際に施業され、最寄りの 2 か所の原木市場に平成 28 年 12 月～平成 29 年 2 月に出荷された。市場動向としては、平成 26 年 12 月に県内に大型バイオマス発電所が稼働し始めたため、平成 27 年度から C 材の単価が上昇している。当施工地の状況としては、昔ながらの一連な採材を行っている作業班に対し、原木市場の方から販売に有利な採材指導が積極的に行われた。また、市場によっては小径木も垂木等の建築用材として販売できるよう仕分けを行っている。

市売り販売された実績は次表のとおりである。

表 2-53 市売り販売された実績

品質別	丸太本数	材積 (m <sup>3</sup> )	材積割合 (%)	m <sup>3</sup> あたり 単価	金額 (円)
A 材	5,225	363.941	64.89	13,181	4,797,136
B 材	2,661	156.971	27.99	7,514	1,179,620
C 材	833	39.985	7.13	4,580	183,139
計	8,719	560.897			6,159,895

## 3. 過去の実績からの出材量予測

平均胸高直径を除く各アイテムのデータは以下の通りである。

表 2-54 アイテムデータ

アイテム	対象地のデータ	備考
選木方針	優勢木&劣勢木	定性間伐、聞き取り
腐り	少ない	聞き取り
枝虫	あり	聞き取り
風雪害	少ない	聞き取り、プロット箇所で視認
胸高直径	21.4cm	レーザ解析結果、早見表は22cm 棚参照
対象地内推定材積	3,213.1m <sup>3</sup>	レーザ解析結果
" 本数	8,668 本	レーザ解析結果
" 平均樹高	18.2 m	レーザ解析結果
伐採材積	726.2m <sup>3</sup>	レーザ解析結果
利用率	80%	聞き取り
出材推定材積	581.0m <sup>3</sup>	726.2×80% = 581.0m <sup>3</sup>

※枝虫はスギノアカネトラカミキリの虫害

平成 26 年度の早見表より、生産割合は A 材が 50.529%、B 材が 17.594% と求められるので、出材推定材積より、品質別木材生産量は以下のように推定できる。平均胸高直径以外のカテゴリ変数の数値小計は早見表の次頁に資料として示す。

伐採材積については、Plot のデータは材積伐採率に多少のばらつきがあったため、後述の機械的に採材する方法によって、全立木に対してランダムに選木した場合の結果を用いた。

表 2-55 過去の実績を用いた品質別木材生産量の推定

品質別	生産割合(%)	生産材積(m <sup>3</sup> )	備考
A 材	40.4	293.6	581.0m <sup>3</sup> ×50.529% (早見表)
B 材	14.1	102.2	581.0m <sup>3</sup> ×17.594% (早見表)
C 材	25.5	185.2	581.0 - (293.6+102.2)
残地材	20.0	145.2	726.2-581.0
計		726.2	

過去の実績による出材量予測と市売り実積の比較は次表の通り。

表 2-56 品質別の市売り実績

品質別	過去の実績による推定		市売り実績	
	割合(%)	材積(m <sup>3</sup> )	割合(%)	材積(m <sup>3</sup> )
A材	50.53	293.6	64.89	363.941
B材	19.59	113.8	27.99	156.971
C材	29.88	173.6	7.13	39.985
小計	100.0	581.0	100.0	560.897
残地材		145.2		

(注) 数値に訂正あり、著者に確認のこと

総出材材積は 20 m<sup>3</sup>ほど下回ったが、ほぼ推定通りと言える。それに対し、品質別割合は A 材の割合が高く、B、C 材の割合が低い結果となった。このことは、上記の A 材で販売できるように現場や原木市場での努力の結果が表れていると言える。

平成 27 年度の分析では、品質別出材推定材積と市売り実績材積がかなり近かった。しかし、高齢級高齢級ながら全体に細くて小曲りの立木が多かった平成 26 年度の分析では、出材推定総材積は市売り実績総材積と近かったが、品質割合が大きく異なった。2 カ年の分析の結果、過去の実績を用いた品質別出材推定材積推定には曲りの要素が欠けていると推察している。

今年度の施工地では小曲りの立木は多くない。そのため、過去の実績を用いた品質別出材推定材積を補正する必要はない判断できる。

以下に、平成 28 年度から平成 26 年度の各アイテムのデータと、平成 26 年度と平成 27 年度の品質別生産材積と市売り実績について表に示す。

表 2-57 平成 28 年度から平成 26 年度の各アイテムのデータ比較

アイテム	平成 28 年度施工地	平成 27 年度施工地	平成 26 年度施工地
選木方針	優勢木&劣勢木	優勢木&劣勢木	優勢木&劣勢木
腐り	少ない	少ない	少ない
枝虫	あり	あり	ゼロ
風雪害	少ない	少ない	少ない
胸高直径	21.4cm	23.7cm	22.4cm
出材推定材積	581.0m <sup>3</sup>	440.2m <sup>3</sup>	141.6m <sup>3</sup>

表 2-58 平成 26 年度と平成 27 年度の品質別生産材積と市売り実績

年度	品質別	過去の実績による推定		市売り実績	
		割合(%)	材積(m <sup>3</sup> )	割合(%)	材積(m <sup>3</sup> )
H26 年度	A 材	53.7	76.1	39.2	55.988
	B 材	9.9	14.0	51.5	73.47
	C 材	36.4	51.5	9.3	13.263
	小計	100	141.6	100	142.721
H27 年度	A 材	53.5	235.5	59.0	237.991
	B 材	33.4	146.9	25.7	103.421
	C 材	13.1	57.8	15.3	61.65
	小計	100	440.2	100	403.062

(注) 数値に訂正あり、著者に確認のこと

#### 4. 細り表による機械的な出材量予測

出材量を予測する採材量シミュレーションの検証のため、以下の項目を実施した。

- ① 航空レーザ計測による森林資源解析
- ② 間伐率取得、解析精度確認のための現地調査
- ③ 採材量シミュレーションの実施
- ④ 採材量シミュレーションの精度検証

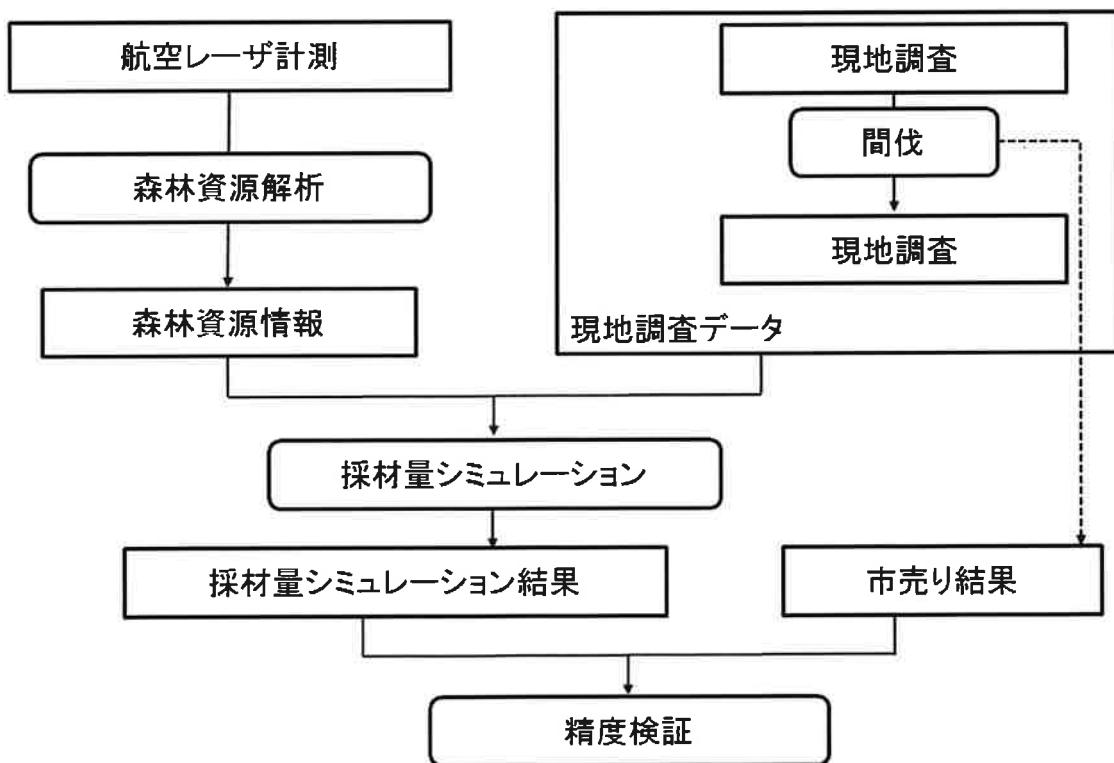


図 2-43 採材量シミュレーション検討フロー

なお、平成 27 年度に行った採材量シミュレーションを受けて、本年度は相対幹曲線式を変更したため、平成 27 年度に検討した箇所についても本検討において再び採材量シミュレーションを行った。

### (1) 航空レーザ解析による森林資源解析

航空レーザ計測を行い、レーザ解析により単木情報を取得し、単木の樹高と胸高直径を入力値として採材量シミュレーションを行った。ここでは平成 26 年度検討で行った航空レーザ計測の森林資源解析を基に、平成 27 年間伐箇所、平成 28 年間伐箇所について単木情報を集計した結果を示す。航空レーザ計測は 2013 年 11 月から 2014 年 1 月に行い、計測密度は 4 点/m<sup>2</sup>である。航空レーザ計測から森林資源情報の解析を行うフローを

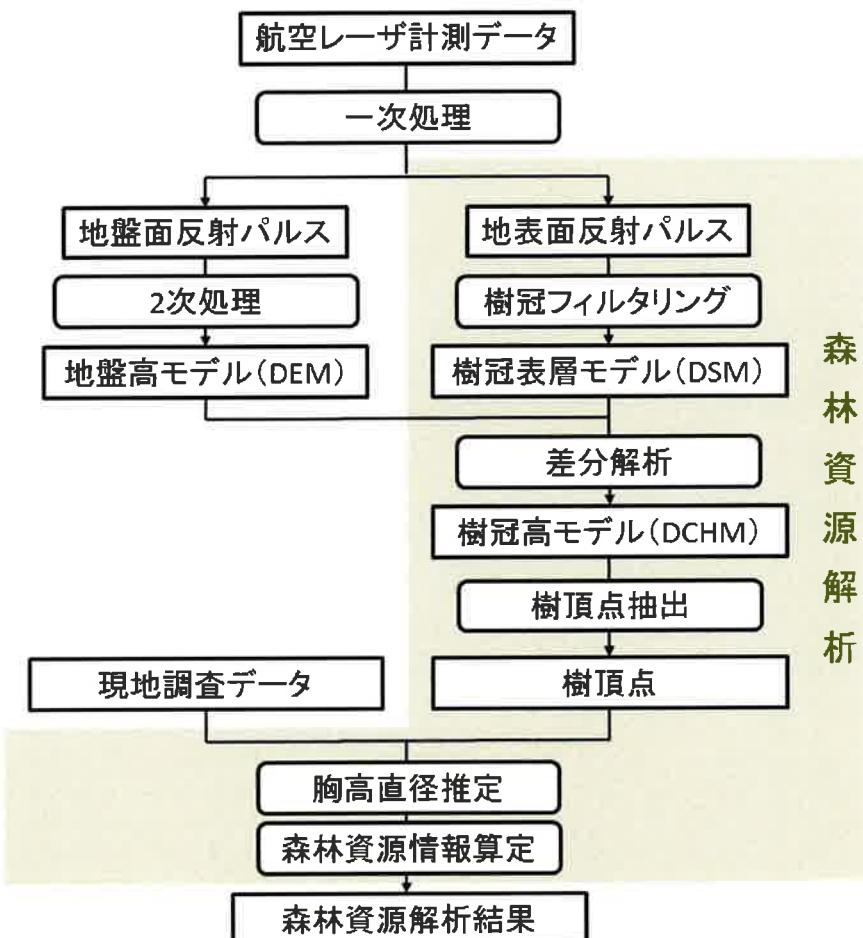


図 2-44 森林資源解析フロー

## (2) 採材量シミュレーションの検討

相対幹曲線式と航空レーザ計測の解析より取得した胸高直径と樹高より採材量シミュレーションを行い、出材丸太本数と出材積を推定した。本検討では採材量シミュレーション結果の精度を評価するために採材シミュレーション結果と実材量を比較・検討した。採材量シミュレーション結果の精度は以下の4項目に影響されることが考えられる。

- ⑤ 選木方法
- ⑥ 単木情報（レーザ解析精度）
- ⑦ 使用する相対幹曲線式
- ⑧ 採材方法（材長など素材生産方法）

それぞれの項目についてもっとも適したパラメータを考慮し採材量シミュレーションを行った。

### 1) 選木方法

選木方法については劣勢間伐、優勢間伐、ランダムに3パターンについて行えるようにした。今年度の間伐は劣勢木を伐採する傾向があると考えられるものの優勢木も伐採しており、搬出のしやすさを考慮した列状間伐に近い定性間伐を行っている。そのため、選木方法についてはランダムを選択した。なお、ランダムに選木する場合、選木結果が劣勢木（または優勢木）に偏ることも考えられるため、採材量シミュレーションを数回を行い結果が大きく違わないことを確認した。

間伐率は平成27年度年間伐箇所では本数間伐率31.1%、平成28年度間伐箇所では材積間伐率22.6%、本数間伐率31.9%のどちらについても検証を行った。

### 2) 単木情報の精度

森林資源情報は『現地調査結果による森林資源情報の精度検証（P2-56）』に示したデータを使用した。単木材積の平均誤差率は8.7%であった。

### 3) 相対幹曲線式

相対幹曲線式は直径および樹高を相対的な値に置き換え、3次の多項式とし樹幹の形を表現するものである。多くの相対幹曲線式は梢端から樹高の9/10の位置の直径を基準としている。しかし、取得したデータは樹高と胸高直径であるため、胸高直径が基準となっている相対幹曲線式を使用する必要があった。昨年度の検討では胸高直径を基準として作成している山口県のヒノキの相対幹曲線式、 $y=0.4291x^3-1.2116x^2+1.8215x$ を使用した（長伐期施業に対応する森林管理技術の開発－山口県スギ・ヒノキ人工林樹幹細り表の作成－、佐渡靖紀、2005）。しかし、地域によって樹幹形は異なるため岐阜のヒノキより作成された相対幹曲線式を適用する必要があると昨年度の委員会において提言された。そのため、9/10基準の相対幹曲線式を胸高直径基準の式に変換した。岐阜県のヒノキの9/10基準の相対幹曲線は岐阜県森林研研究報告より引用した。

$$y = 1.2358x^3 - 2.6493x^2 + 2.4972x$$

（岐阜県版スギ・ヒノキ細り表の作成、大洞智宏、2010）

胸高直径基準に変換した式を以下に示す。

$$y = 1.20257x^3 - 2.57805x^2 + 2.43004x$$

相対幹曲線式を変更したため、平成27年度採材量シミュレーションの結果についても変わることから平成27年度についても再度シミュレーションを行った。

#### 4) 採材方法

採材シミュレーションは間伐計画を立案する際に用いるものであり、搬出される材（材長、最小末口径）の出材量を想定するものである。材長、最小末口径については市売り結果より現状に即した値を使用した。

市売り結果の長級ごとの集計より 2m 未満が 15 本、2m が 337 本、3m が 6,059 本、4m が 2,308 本であり 3m の丸太が 70% 近くを占め、一番玉、二番玉等による材長の偏りがないため、採材シミュレーションでは材長は一律 3m とした。

表 2-59 長級ごとの市売り結果の集計

長級	本数	割合
2m未満	15	0.2%
2m	337	3.9%
3m	6059	69.5%
4m	2308	26.5%
合計	8719	

最小末口径は市売り結果よりヒノキの最小末口径が 8cm となっていたため、8cm とした（ヒノキ以外の樹種では 5cm が最小末口径）。実作業では根株を残し、伐倒するため根株分 0.2m、また、チェンソーにより造材する際に木口が丸太に対し垂直にならないことがあるため余尺 0.1m を考慮した。そのため採材する丸太は地上高 0.3~3.3m、3.4~6.4m、6.5~9.5m … の部分となる。採材は地上高 3.3m、6.4m、9.5m … において相対幹曲線式より直径を求め、直径が 8cm 以上では採材し、8cm 未満である場合には採材せず林地残材とした。丸太材積は相対幹曲線式から求めた直径より末口二乗法により算出した。

材長 3m、最小末口径 8cm、根株 0.2m、余尺 0.1m としたがこれは平成 27 年度、平成 28 年度とも同じである。

実例	
樹高	20.2m
胸高直径	21.7cm

地上高(m)	末口直径(cm)
18.8	8未満
15.7	8未満
12.6	8
9.5	12
6.4	14
3.3	16

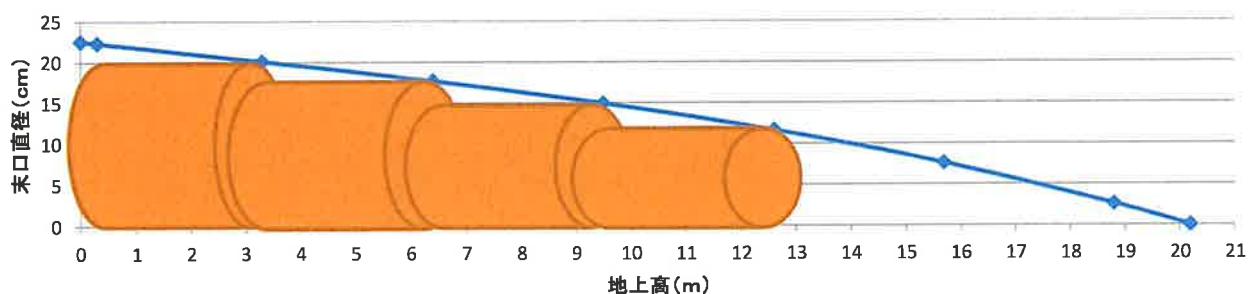


図 2-45 相対幹曲線式による採材例

### 5) 機械的な採材シミュレーションの結果

採材量シミュレーションは平成 27 年度の本数間伐率、平成 28 年度の本数間伐率、材積間伐率の 3 パターンについてシミュレーションを行った。なお、平成 27 年度の材積間伐率については、間伐後の現地調査時で伐採本数のみの調査であり、間伐材積量を特定できなかつたためシミュレーションは実施していない。

### 6) 平成 27 年度採材量シミュレーション結果

採材量シミュレーションでは本数間伐率より単木データで伐採する樹木をランダムに選択した。全立木は 4,116 本であり、本数間伐率 31.1% では伐採本数は 1,280 本となり、その時の伐採される樹木の合計材積は 406.679m<sup>3</sup> となった。

表 2-60 平成 27 年度シミュレーション結果

末口径 (cm)	材積(m <sup>3</sup> )		
	市売り結果	前回結果	今回結果
6	0.334		
8	21.635	12.557	11.808
10	13.233	22.410	21.540
12	23.258	34.517	40.176
14	50.391	52.097	57.859
16	80.887	64.358	77.875
18	19.835	68.623	81.745
20	96.694	51.240	61.320
22	33.121	25.991	31.363
24	38.533	11.750	12.096
26	14.059	3.245	7.098
28	6.118	3.058	3.528
30	3.960	0.270	0.270
32	0.615		
34			
36	0.389		
38			
40			
合計	403.062	350.116	406.679

末口径ごとの材積を比較する分布の傾向は市売り結果と採材量シミュレーション結果はほぼ同じであった。末口径 18cm と 20cm で極端に差があるがこれは需要に合わせた採材を行ったためであると考える。また、末口径が大きな丸太の材積については差が大きくなっていることがわかる。

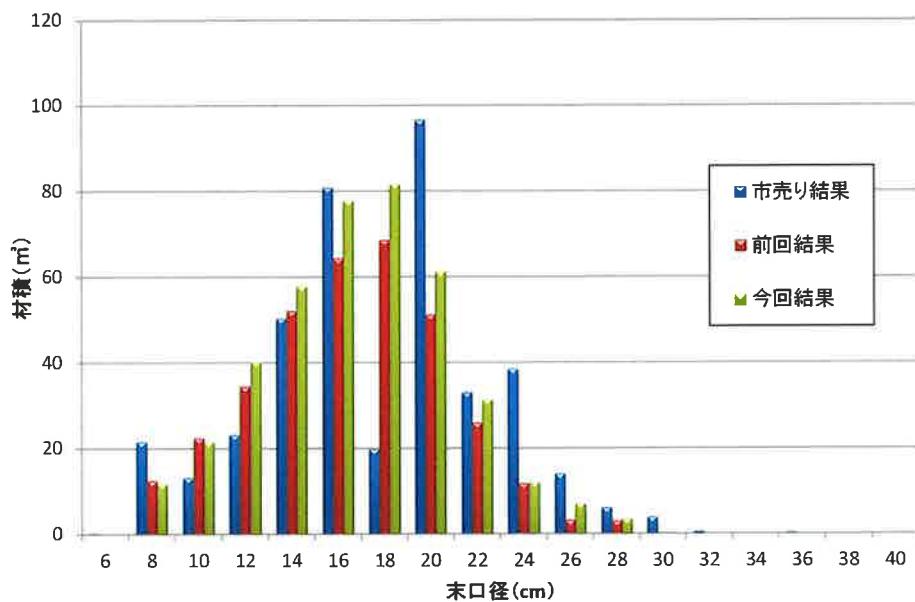


図 2-46 末口径ごとの材積

#### 7) 平成 28 度本数間伐率での採材量シミュレーション結果

平成 28 年度間伐範囲の立木本数は 8,668 本、合計材積は 3,213 m<sup>3</sup>であった。本数間伐率は 31.9% であったため、ランダムに 2,765 本を選木した結果、伐採される樹木の合計材積は 685.231 m<sup>3</sup>となった。

表 2-61 平成 28 年度シミュレーション結果（本数間伐率）

		材積(m <sup>3</sup> )			
		市売り結果	シミュレーション結果	誤差	誤差率
末口径 (cm)	6	1.028	-	1.028	100%
	8	25.993	26.688	-0.695	-3%
	10	77.241	48.240	29.001	38%
	12	62.452	84.154	-21.702	-35%
	14	108.391	122.010	-13.619	-13%
	16	118.803	146.918	-28.115	-24%
	18	39.074	130.248	-91.174	-233%
	20	61.534	75.600	-14.066	-23%
	22	27.082	36.445	-9.363	-35%
	24	29.172	13.306	15.866	54%
	26	6.636	1.622	5.014	76%
	28	2.039	-	2.039	100%
	30	0.990	-	0.990	100%
	32	-	-	-	-
	34	0.462	-	0.462	100%
	36	-	-	-	-
	38	-	-	-	-
	40	-	-	-	-
合計		560.897	685.231		
合計誤差率				122%	
平均誤差率				67%	
RSME				28.246	

シミュレーション結果の合計材積は市売り結果の合計材積の 122% となった。全体的に市売り結果よりも多く出材材積が推定されていた。誤差が最も大きかったのは末口径 18cm であり、誤差率は 233% であった。

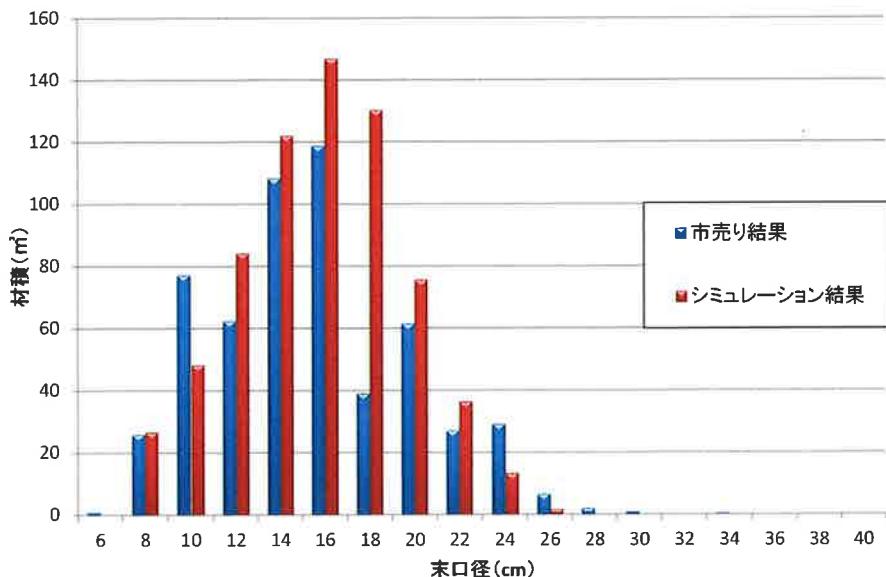


図 2-47 末口径ごとの材積

#### 8) 平成 28 年度材積間伐率での採材量シミュレーション結果

立木本数 8,668 本、合計材積 3,213 m<sup>3</sup>の間伐箇所において材積間伐率 22.6%としランダムに選木し、採材量シミュレーションを行った。選木された樹木は 1,940 本となり、出材材積は 480.685 m<sup>3</sup>であった

表 2-62 平成 28 年度シミュレーション結果 (材積間伐率)

末口径 (cm)	材積(m <sup>3</sup> )			
	市売り結果	シミュレーション結果	誤差	誤差率
6	1.028	-	1.028	100%
8	25.993	18.874	7.119	27%
10	77.241	33.930	43.311	56%
12	62.452	59.011	3.441	6%
14	108.391	85.554	22.837	21%
16	118.803	103.834	14.969	13%
18	39.074	90.396	-51.322	-131%
20	61.534	52.200	9.334	15%
22	27.082	26.136	0.946	3%
24	29.172	9.331	19.841	68%
26	6.636	1.420	5.216	79%
28	2.039	-	2.039	100%
30	0.990	-	0.990	100%
32	-	-	-	-
34	0.462	-	0.462	100%
36	-	-	-	-
38	-	-	-	-
40	-	-	-	-
合計	560.897	480.685		
合計誤差率		86%		
平均誤差率			59%	
RSME			20.412	

シミュレーション結果の合計材積は市売り結果の合計材積の 89%となった。シミュレーションした出材材積は全体的に市売り結果よりも少なくなった。ただし、誤差が最も大きかったのは末口径 18cm であり、誤差率は 131%で市売り結果よりも過大に算出していた。

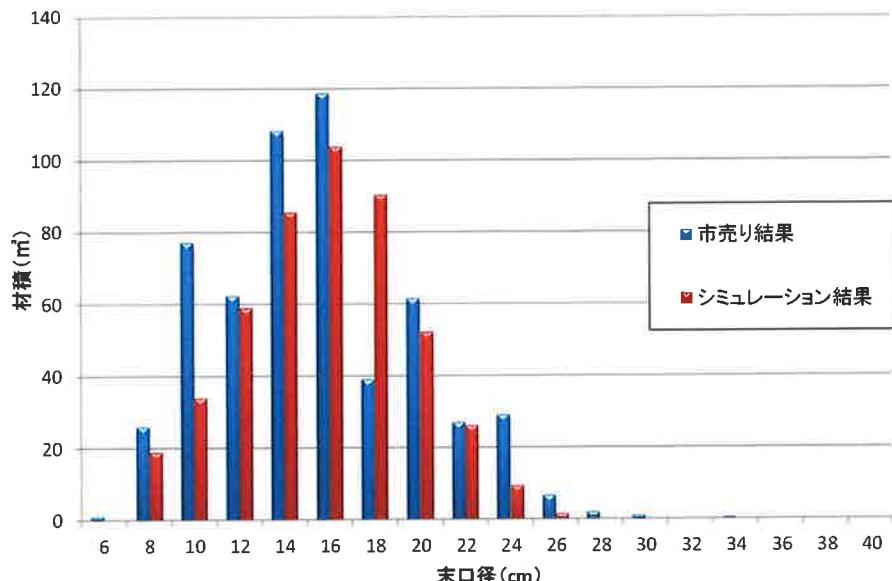


図 2-48 出材丸太本数の比較結果

### 9) まとめ

本検討により採材量シミュレーション結果は実際の出材量と比較した場合には 20%程度の誤差となる可能性があることが分かった。

表 2-63 採材量シミュレーション結果

市売り結果	H28		市売り結果	H27	
	採材量シミュレーション結果 本数間伐率	材積間伐率		採材量シミュレーション結果 本数間伐率	材積間伐率
A材	363.9	-	238.0	-	-
B材・C材	197.0	-	165.1	-	-
計	560.9	685.2	403.1	406.7	1%
誤差率	-	22%	-	-	-
伐採材積	-	1035.3	726.2	-	551.63
歩留り	-	66.2%	66.2%	-	73.7%

本検討で相対幹曲線式を変更したことにより平成 27 年度採材量シミュレーション結果は 13% の誤差から 1% の誤差に精度が向上した。シミュレーションを行う地域の相対幹曲線を用いることで高精度になることが本検討箇所では検証できた。

今後の課題は次の 2 点である。

- ⑨ 末口径ごとの丸太材積分布の精度向上
- ⑩ A 材、B 材、C 材の仕分け

シミュレーション結果の末口径ごとの丸太材積と実際の出材量の分布の傾向は同じであるため、合計材積だけではなく内訳についてもおおよそ推定することが可能であると考える。しかし、末口径 18cm で誤差が大きくなることからもわかるように、木材の需要により必要な木材の末口径が変わり、それに合わせて採材の方法も変わる。そのため、シミュレーションを行う地域での木取りの方法や木材需要に合わせ、優先する材長や末口径を考慮することでより実情に合ったシミュレーション結果を得ることができるを考える。

また、航空レーザ計測では樹幹形状を直接計測することができないことから曲がりの情報がなく、A 材、B 材、C 材の区別を考慮した採材量シミュレーションができない。そのため、『 過去の実績から出材量を予測す

る方法』で検討したような推定式と採材量シミュレーションを組み合わせて使用することにより A 材、B 材、C 材の材積を推計できると考える

### 5. 各手法結果の比較

市売り実績、過去実績からの推計、細り表を使用した機械的推計手法の結果をまとめると以下に表の通りとなる。

表 2-64 平成 28 年度 ABC 材の区分結果

	過去の実績	細り表	市売り実績
A 材	293.6	685.2	363.9
B 材	113.8		157.0
C 材	173.6		40.0
小計	581.0	685.2	560.9
残地材量	145.2	41.0	165.3
計	726.2	726.2	726.2

単位 : m<sup>3</sup>

### 第5項 まとめ

3 年間の調査結果をまとめると、以下の表のとおりとなる。

なお、伐採立木材積は、航空レーザ計測を用いた森林解析により算出した間伐実施区域内の立木材積に間伐率を乗じて算出した。

表 2-65 平成 26 年度 ABC 材の区分結果

	過去の実績	細り表	実績
A	76.0	132.1	56.0
B	14.0		73.5
C	36.4		13.3
小計	126.4	132.1	142.8
残置材量	62.4	56.7	46.0
伐採立木材積	188.8	188.8	188.8

単位 : m<sup>3</sup>

表 2-66 平成 27 年度 ABC 材の区分結果

	過去の実績	細り表	市売り実績
A 材	234.6	406.7	238.0
B 材	146.3		103.4
C 材	57.6		61.7
小計	438.5	406.7	403.1
残置材量	111.8	143.6	147.2
伐採立木材積	550.3	550.3	550.3

単位 : m<sup>3</sup>

表 2-67 平成 28 年度 ABC 材の区分結果

	過去の実績	細り表	市売り実績
A 材	293.6	685.2	363.9
B 材	113.8		157.0
C 材	173.6		40.0
小計	581.0	685.2	560.9
残地材量	145.2	41.0	165.3
計	726.2	726.2	726.2

単位 : m<sup>3</sup>

### 1. 課題

総出材材積（A、B、C 材の合計）では、市売り実績に対し、過去の実績では 88.5%～108.8%、細り表では 92.5%～122.2% と推定精度としては十分な結果となった。

レーザ計測結果を用いた 3 年間の分析では、ヒノキ林分では総出材材積はほぼ推定通りの結果を得ることができた。

また、品質別の出材量予測については、各アイテム以外の大きな要素がなければ 10% 程度の誤差の範囲に収まっている。出材量の予測は、かなりの経験と勘を必要としていたが、レーザ計測結果を用いることによって、ある程度までは容易に把握することができると言える。

しかし、A、B、C 材の内訳については、1 本の立木をどのように伐採して、どの部分をどのように造材して出材するかが、その時々の市場動向、現場事情、作業員の技量、意識により変動することから、これらの影響をどう反映させるか引き続き検討する必要がある。

## 第4節 航空レーザ計測を利用した路網計画

### 第1項 路網計画への航空レーザ計測の活用

林業専用道や森林作業道などの路線ごとに規格や指針などが定められているが、実際の開設にあたっては、開設コストの低減、走行や林業作業の効率・安全性、林地保全、周辺環境への影響低減など多岐にわたるポイントを考慮しなければならない。そのためには、路網を開設する場所の自然・気象・社会条件などを十分に調査する必要がある。特に、地形、地質などの自然条件が路網計画に与える影響は大きいが、これらは現地調査によらなければ精確な情報を得ることができない。現地調査で重要な地形・地質情報が見落とされてしまうと、豪雨災害や地すべりなどによる路体崩壊につながってしまうこともあるため、路網計画では、十分な経験や知識を持った技術者が入念な調査を行う必要がある。

しかし、近年では航空レーザ計測によって精確な地形データを入手することができるようになり、これまで現地で行っていた地形情報の把握に関して、その一部を机上で行うことが可能となってきた。当然、これまでにも 1/5000 地形図などで現地地形の概要を把握してから現地調査を行っており、図面から得る地形情報は小さくなかったが、航空レーザ計測から得られる情報は、従来の紙図面と比べて情報量が格段に大きくなったことが特徴といえる。例えば、地下水位の高いことを示す湧水地点は、開設における要注意点となるだけでなく、維持管理においても高コストとなる可能性があるため、路線を避けるべきポイントの一つといえる。長野県林務部、長野県森林整備加速化・林業再生協議会路網整備部会（2014）によれば、航空レーザ計測データを活用することで、1/5000 の森林基本図では確認することができなかった湧水箇所を特定することができたとされている。このように航空レーザ計測データを活用することで、現地に行かなければ得られなかつた情報を机上で得られることができるようになってきた。以下では、路網計画において航空レーザ計測データを活用することの利点について解説する。

## 第2項 図上路線選定への航空レーザ計測の利用

路網計画においては、崩壊などの危険性や、開設コストなどから判定される開設の適地・不適地を見極めることが重要となる。しかし、路網開設地をくまなく踏査することには多大な労力を必要とするため、現地踏査ですべてを判断することには限界がある。そこで、機上検討にて適・不適地のおおよその見当をつけておくことが重要となる。この機上検討には、従来、地形図や航空写真などが利用されてきたが、地形図では、詳細な微地形は表現されていない。また、通常の森林においては地表が樹冠に覆われているため、航空写真から詳細な地形情報を読み取ることもできない。しかし、レーザ計測から作成した詳細な地形図が利用できるようになると、機上検討の精度が格段に向上し、現地で確認することが難しかった崩壊危険地や開設に適した緩傾斜地などを容易に見つけることができるようになり、現地踏査作業の効率性を大きく向上することができるようになった。

航空レーザ計測データからは、崩壊跡地、堆積地形、0次谷や湧水点などを示す凹地形、谷の形状（V字谷・U字谷）から推定される谷の侵食／堆積過程などを確認することができる。これらの情報は、主として通過を避けるべきポイントとして、もしくは谷を渡る際の工法選択のための情報として非常に有用となる。また、土工量や開設コストが小さくなるだけでなく、土場などとしての利用価値の高い緩傾斜地についても、高精度に判読することができ、通過すべきポイントも同時に抽出することができる。これらの情報から、路線選定の経験が少ない非熟練者であっても、地形に適合した適正なルート選択が可能となる。

その他の利点として、既存路網の把握が容易になる点が挙げられる。これまでの間伐などの際に整備された森林作業道は、森林基本図などに反映されていないことが多い、既存路網の把握には現地を主に徒歩で移動しながら確認する必要があった。一方、航空レーザ計測データでは、作業道程度の路網であれば、人工改変された地形として道を認識できることが多く、既存路網の把握を机上で行うことができる。参考として、図 2-49 に各メッシュサイズで算出した傾斜分布図を示す。図では、色が濃くなるほど急傾斜を表す。50m、10mDEM

(digital elevation model) から算出した傾斜分布図からは確認できないが、2mDEM 傾斜分布図では既存路網を確認することができる。ただし、通行車両の目安となる幅員や縦断勾配、通行可否を判断するための路面状態の確認は難しく、使用前にはこれまでどおり現地での確認が必要となる。

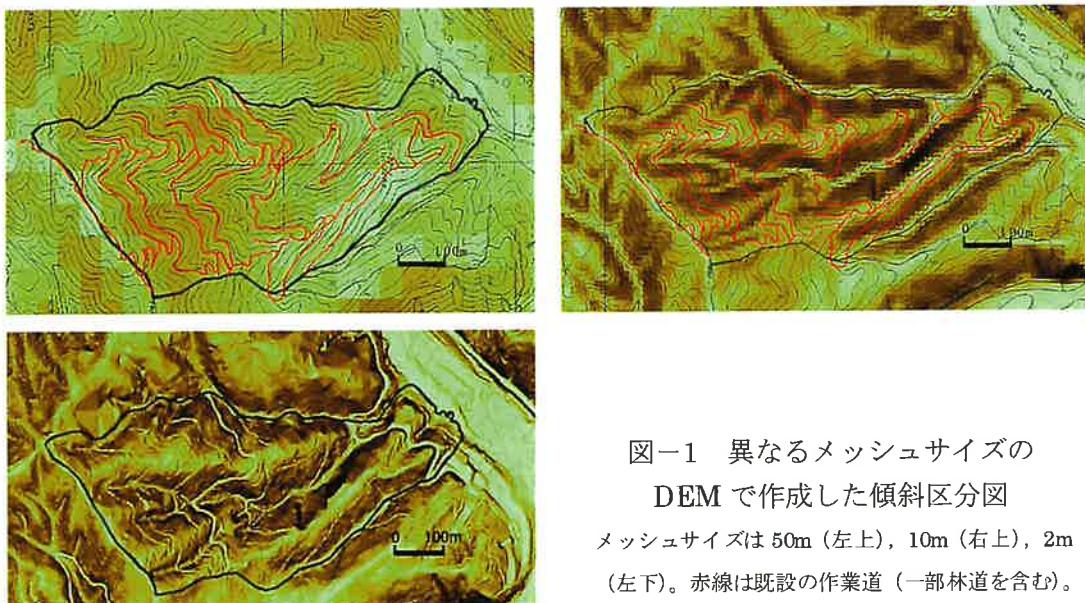


図2-49 異なるメッシュサイズの

DEM で作成した傾斜区分図

メッシュサイズは 50m (左上), 10m (右上), 2m

(左下)。赤線は既設の作業道 (一部林道を含む)。

図 2-49 異なるメッシュサイズの DEM で作成した傾斜区分図

### 第3項 航空レーザ計測を利用した土工量の推定

斎藤（2012）は航空レーザを利用した土工量推定方法の有効性を確認するため、航空レーザ計測データから作成した1mDEMと、1/5000森林基本図から作成した10mDEMを用いて、現地測量結果から算出した土工量との比較を行った。路線長200mの林道を対象に計算した結果、航空レーザ計測から算出した土工量の誤差が2.67%（現地測量結果に対して2.67%過大）であったのに対し、10mDEMから算出した土工量の誤差は199%（同199%過大）であった。このことから、航空レーザ計測から算出した土工量の精度が10mDEMと比べて著しく高いことを示すとともに、本手法による机上土工量推定を実務上使える可能性が高いことを示した。

Arugaら（2005）は、航空レーザ計測データを利用して、パソコンによる路線の自動設計を行っている。設計では手動でIP点を設定した後、路線の平面配置および地盤高の算出をコンピュータが行い、次に、縦断勾配変化点の位置と高さを変化させながら開設費および維持管理費が最小になるよう探索を行った。探索手法は、タブサーチと呼ばれる発見的解法の一種を用いている。土工量の精度について検討した結果、直線区間では横断面間隔が3m以下ならば誤差が10%以下に収まる高精度の算出結果が得られたとしている。

ただし、航空レーザ計測データを用いた土工量推定の実務上の有効性に関しては、土工量の推定をどのような目的で使用するかによって異なる点に留意する必要がある。例えば、林業専用道などの設計図面を必要とする路線の場合には、航空レーザ計測データから推定した土工量（および本データから作成した縦断面図・横断面図）をそのまま設計資料に用いるには精度上の問題が残ると考えられる。一方、設計図を作成しない森林作業道などの場合には、路線選定を検討することができる精度を有していると考えられる。また、林業専用道などの路線であっても、複数の比較ルートから最適なルートを選定するための検討資料として使用する場合には、十分な精度を有すると考えられる。

### 第4項 航空レーザ計測を利用した自動設計

航空レーザから得た地形情報の精度が高ければ、この情報を利用した机上での路線配置計画も有効となる。例えば、斎藤（2012）の検討では、航空レーザ計測結果を用いて、開設費を最小とする林道の自動路線設計を検討している。さらに、詳細な地形情報から土層厚を簡易に推定する手法を用いた崩壊危険度判定を行い、林道の自動設計に適用している。土層厚は、崩壊危険度の指標となるだけでなく、岩切り取りの有無を判断する指標ともなるため、林道設計においては重要な項目となる。しかし、土層厚を広域にわたって調査することは、莫大な時間と手間を要するため、実際の設計業務では通常調査されることはなかった。しかし、航空レーザ計測によって詳細な地形情報を得ることで、地形傾斜と集水域平均奥行きから土層厚の推定が可能になるとしている。

林道以外の一般道への航空レーザ計測結果の適用例（吉川ら、2001）を見ると、データ精度に関しては、樹木密集地での標高値誤差（RMS誤差）が0.64mと、国土交通省の公共測量作業規定で定める1/1000地形図の水平誤差0.3m以内よりも大きくなり、現地補備測量を行う必要があるとしている。しかし、本手法による道路設計業務によって、等高線作成にかかる工期を従来の4~5分の1に短縮することができ、予備設計段階での現地地形への信頼性が大きく向上し、その後の大幅な設計変更がなくなるなどの利点を挙げている。

### 引用文献

- 路網部会有識者会議編（2014）『長野県型立体地形図=CS立体図』を用いた林内路網の路網配置検討手順. 長野県林務部, 長野県森林整備加速化・林業再生協議会路網整備部会.
- 斎藤仁志（2012）LiDARデータを用いた林道設計手法と作業道配置手法の開発. 宇都宮大学農学部演習林報告刷, 48, 71-110.
- Kazuhiro Aruga, John Sessions, Abdullah E. Akay (2005) Application of an airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes. J. For. Res. 10, 113-123.
- 吉川由里子, 沼田洋一, 大堂伸二, 原田政司 (2001) 道路設計業務におけるレーザプロファイラの利用. 先端測量技術, 79(8), 67-74.

路網計画における航空レーザ計測データの有効性を確認するため、このデータから求めた土工量精度を検証

する。なお、土工量は設計書類の値を真として精度検証することとし、土工量の算出は設計書で用いられている方法を採用する。また、精度検証結果から、航空レーザ計測データの活用方法に関する考察を行った。

路網計画業務において、開設前に机上で精度よく土工量を推定することができれば、構造物の設置を抑えた経済的な路線の検討に有効である。さらに、作業道などの低規格路線で特に重要な切盛均衡の検討や、残土処理計画などに活用することも可能となる。このように、土工量の推定は業務の効率化や低コスト化に貢献するもので、航空レーザ計測データの効果的な活用方法の一つといえる。

## 第5項 開設路線および開設地の概要

### 1. 地形と地質

土工量精度の検証を行う路線について、開設地周辺の地形図（図 2-50）と赤色立体図（図 2-51 左図）を示す（図 2-50、図 2-51 は同じ範囲を表示）。全体的に緩傾斜な地域で比較的比高は小さいものの、等高線が細かく入り出するしわの多い斜面が多いことが分かる。また、谷に近い斜面は一部で急傾斜になっており、路網開設には不向きな斜面と思われる。路線の開設箇所を拡大すると（図 2-51 右図）、谷底が広く、谷床が発達していることが確認できる。谷の一部では河川の下刻力の復活による谷中谷の発達が確認でき、周辺山地の比高は小さく、起伏に乏しい老年期的地形である。

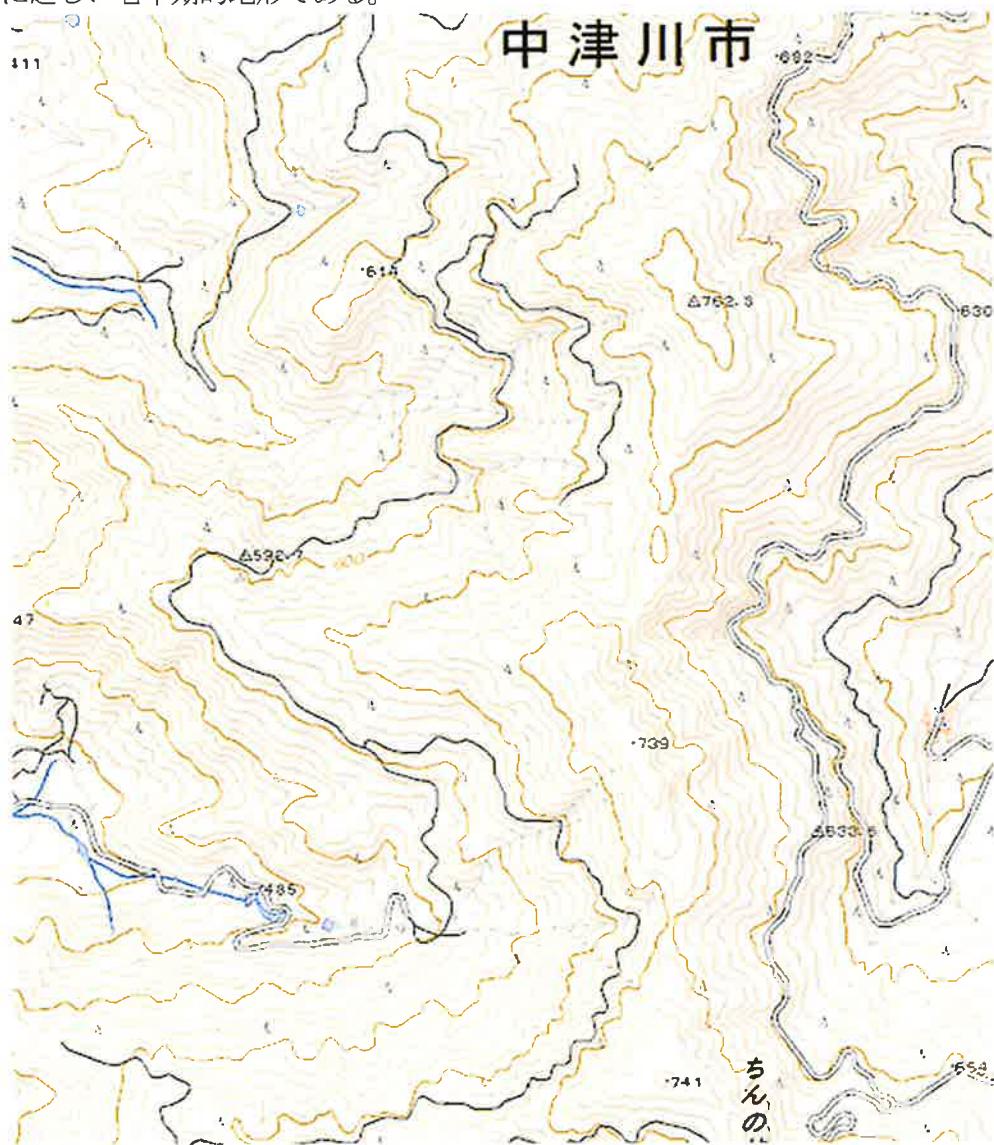


図 2-50 検討路線開設地周辺の地形図

図 2-52 に周辺の地質を示す。後期白亜紀（約 1 億年前～6500 万年前）に噴火した火山岩（ディサイト・

流紋岩類：図 2-52 の 93)、後期白亜紀にマグマが地下の深いところで冷えて固まった花崗岩質の深成岩（図 2-52 の 129)、後期白亜紀に川や湖で形成（非海成）された堆積岩類（図 2-52 の 173) などで構成され、周辺を阿寺断層、赤河断層などが囲む。

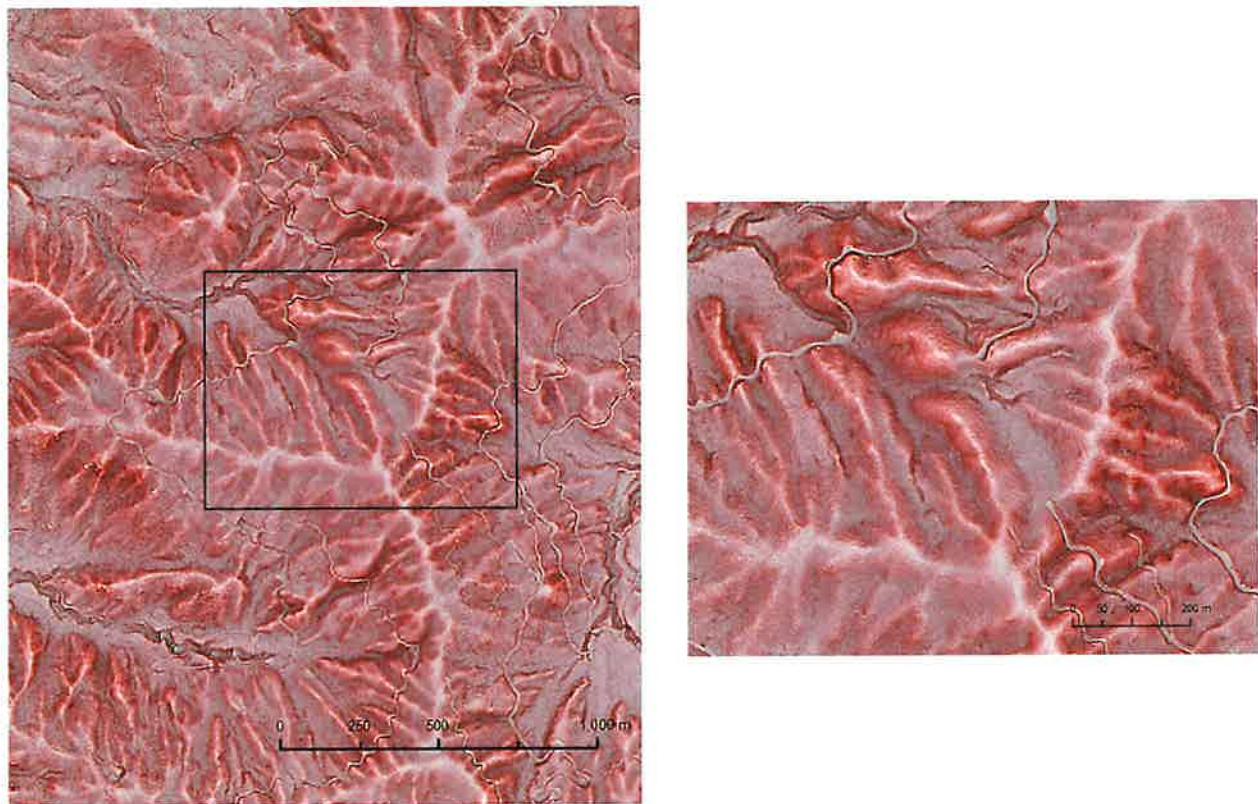


図 2-51 検討路線開設地周辺の赤色立体図  
右図は左図枠内の拡大図



図 2-52 検討路線開設地周辺の地質図

## 2. 路線規格と土工量

土工量精度の検証を行うのは、岐阜県中津川市下野字岩須地内に開設された林業専用道高鳥屋 1 線である。路線の主な規格を表 2-68 に示す。砂質土のため、切土のり面勾配はすべて 6 分になっている。また、幅員が 3.0m、左右の路肩がそれぞれ 0.25m で全幅員が 3.5m の一般的な林業専用道である。路線延長は 343.5m、起点、終点間の標高差が約 32m であり、路線全体の平均的な縦断勾配は約 9% となっている。

各測点の位置を図 2-53 に、開設前の各測点の状況を図 2-54 に示す。測点 20 および 26 で谷を横断する線形であり、これらの谷はヒューム管で渡河する計画となっている。

表 2-68 開設路線の主な規格

幅員	全幅員	切土勾配	盛土勾配
3.0m	3.5m	6 分	1 割 2 分



図 2-53 路線平面図と測点の位置



図 2-54 各測点の状況

本路線の数量計算書から得られる土工量（切土量、盛土量）を表 2-69 に示す。開設区間での切・盛土量がそれぞれ  $1,796.5\text{m}^3$ 、 $1,306.5\text{m}^3$ 、単位距離あたりの値が  $5.2\text{m}^3/\text{m}$ 、 $3.8\text{m}^3/\text{m}$  である。

表 2-69 土量計算表による開設路線の土工量

切土量	盛土量	土工量
1, 796.5m <sup>3</sup>	1, 306.5m <sup>3</sup>	3, 103.0m <sup>3</sup>
5.2m <sup>3</sup> /m	3.8m <sup>3</sup> /m	9.0m <sup>3</sup> /m

## 第6項 土工量の算出

### 1. ソフトウェアの特徴

土工量の算出に使用するソフトウェアは、マウス操作で路線を描画し、縦・横断面図の表示や土工量を算出するものである。経験を要する路線計画業務を効率化、簡易化することを目的に開発したもので、GIS 環境で稼働する。

道路を設計するためのソフトとしては、3 次元 CAD ソフトが各種販売されている（重高ら、2012）が、今回の検討で使用するソフトは GIS 環境で使用するため、路線選定に必要な情報を重ねて表示することができる。今回の検討では線形が既に決まった路線の土工量を算出しているためこの機能は使用しないが、赤色立体図、傾斜分布図、等高線の屈曲を示す図や、各種森林情報、航空写真などから地形情報や林分情報などを抽出し、避けるべき地点や開設適地などを検討することができる。

本ソフトの画面構成を図 2-55 左に示す。路線を描画したり、平面線形を修正したりするための路線計画画面、横断面図・縦断面図を表示する画面、計算された土工量の表示や、表示させたい横断面の指定などを行うコントロール画面で構成される。また、計算条件設定画面（図 2-55 右）で、幅員、切・盛土勾配、路面高さの変更を行う。

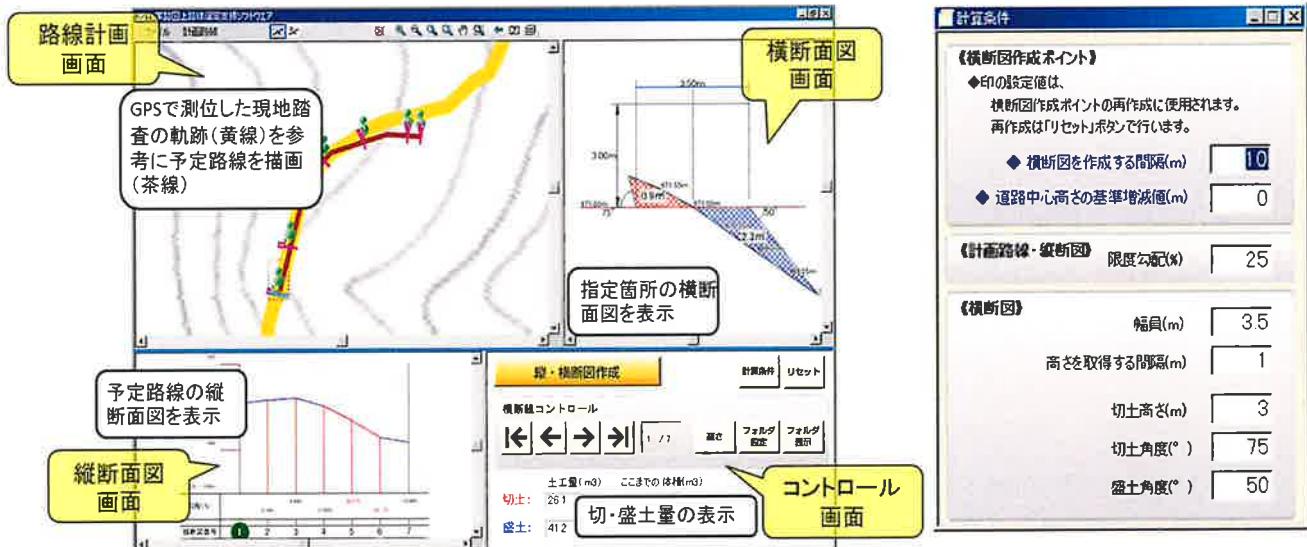


図 2-55 森林作業道支援ソフトの画面構成

## 2. 土工量および横断面積の算出

土工量は以下の式で表される平均断面法によって切土、盛土別々に求めている。

$$V = {}_p L_{p+1} \sum_{p=1}^{q-1} \left( \frac{A_p + A_{p+1}}{2} \right)$$

ただし、 $V$ : 土工量 ( $\text{m}^3$ )、 ${}_p L_{p+1}$ : 横断面 (測点)  $p$  から  $p+1$  までの距離 (m)、 $q$ : 路線に設定された横断面数、 $A_p$ 、 $A_{p+1}$ : 横断面  $p$  および  $p+1$  の切土もしくは盛土部分の面積とする。ソフトの通常の計算では、横断面の作成間隔が一定 (ただし計算ごとに任意の値に設定することは可) となる。しかし、実際の土工量計算では、測点の間隔は一定ではないため、実際の測点がある箇所にソフト上で測点を設置することができない。そこで、ソフトでは細かい間隔で測点を作成し、実際の測点箇所に最も近い測点の横断面積を取り出して計算に用いることとした。今回の検証では、1m ごとに測点を作成し、実際の測点位置に最も近いものを土工量計算に採用している。このとき、 ${}_p L_{p+1}$  (横断面  $p$  から  $p+1$  までの距離) には、設計書中の単距離を用いることとし、曲線部では設計書中の修正距離を用いている。

## 3. 土工量の算出と計算条件の設定

今回の検討にあたっては、まず、路線平面線形の GIS データを背景にして開設路線と同じ線形の路線をソフト内に描画した。この線形は GPS 測位によって得たものである。次に、図 2-55 の計算条件設定画面において、表 2-68 開設路線の主な規格にある各路線規格を設定した。しかし、幅員、のり勾配については、一つの路線 (一回の計算) につき一つの値しか設定することができない。今回の路線では、拡幅された曲線部や待避所などで幅員が大きくなっているが、これをソフトで求める横断面積に反映することができない。そこで、拡幅量に応じた幅員をそれぞれ設定して土工量計算を行い、拡幅された測点の横断面積を得てから、上述の方法によって土工量を計算した

また、路面の高さ (地盤高からの相対的な変化量) についても、設計書の値を用いてソフトの横断面積に反映させることとした。路面高さの変更は測点ごとに行っており、設計書における実際の形状にかなり近づけることができる。

## 4. 土工量算出に使用する地形情報

土工量の算出には、航空レーザデータから作成した 0.5mDEM (Digital elevation model) をもとにした TIN を使用する。TIN (Triangulated irregular network) とは、不整三角網などと呼ばれるもので、様々な形状の三角形の集合で地表面の形状を表現するデータのことである。一般には、点を規則的に配置する DEM よりも地形を表す点の数を減らすことができる。三角網を構成する点が地形変化点に配置されれば地形の再現性は高くなるが、ずれた場合には TIN が持つ標高値の誤差となる。TIN の作成には ArcGIS のエクステンション 3DAnalyst にある [ラスター → TIN (Raster to TIN)] を用いる。今回使用した TIN 作成ツールでは、TIN の Z 値 (標高値) と、もとの DEM の標高値との間に生じる最大誤差 (許容誤差) を設定することができる。今回は、許容誤差を 1m として TIN を作成した。

## 第7項 結果と考察

### 1. 土工量比較結果

路面高および幅員を測点ごとに修正せず、路面高については全ての測点で変更量を±0.0m とし、その他は表 2-68 の値を用いて土工量を算出（計算 1）した。その結果、切土量 238.4m<sup>3</sup> (0.69m<sup>3</sup>/m)、盛土量 574.1m<sup>3</sup> (1.67m<sup>3</sup>/m)、土工量 812.5m<sup>3</sup> (2.37m<sup>3</sup>/m) となった。これを設計書の値（以下、真値）と比較すると、全体的に過少であり、路網計画に使用できる精度を有していないといえる。次に、路面高を測点ごとの個別値で修正して土工量を算出（計算 2）すると、それぞれ 1619.9m<sup>3</sup> (4.72m<sup>3</sup>/m)、1211.6m<sup>3</sup> (3.53m<sup>3</sup>/m)、2831.5m<sup>3</sup> (8.24m<sup>3</sup>/m) となった。切土・盛土とも真値に対して 1 割程度少ないものの、計算 1 と比較すると精度は大きく向上した。さらに、路面高に加え幅員の値も個別に変更して算出（計算 3）すると、1994.1m<sup>3</sup> (5.81m<sup>3</sup>/m)、1485.0m<sup>3</sup> (4.32m<sup>3</sup>/m)、3479.1m<sup>3</sup> (10.13m<sup>3</sup>/m) となった（図 2-56）。今度は逆に、真値に対して 1 割程度多くなり、精度としては計算 2 とほぼ同様といえる。ここで、以下の式で定義される誤差率で比較すると、計算 2 の方がやや精度が高く（図 2-57）、幅員に個別の値を適用したことによる土工量の精度向上効果が出ていないといえる。

$$\varepsilon = \frac{|a - A|}{A} \times 100$$

ただし、 $\varepsilon$ ：誤差率、 $A$ ：土工量の真の値、 $a$ ：ソフトで算出した土工量とする。

まず、大きく精度が向上した計算 2 について検討を加える。路面高の修正によって切・盛土の横断面積が真値に近づいた測点の例を図 2-58 に示す。設計書類中の横断面積が切土で 6.3m<sup>2</sup> であったのに対し、路面高を修正しない状態では、切・盛土それぞれ 0.7m<sup>2</sup>、1.0m<sup>2</sup> であったものが、路面高修正後には、切土 6.1m<sup>2</sup> と大きく精度が向上していることが分かる。

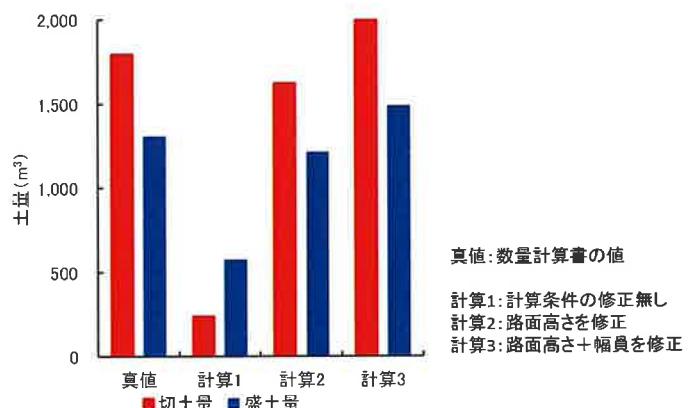


図 2-56 各計算方法による土工量算出結果

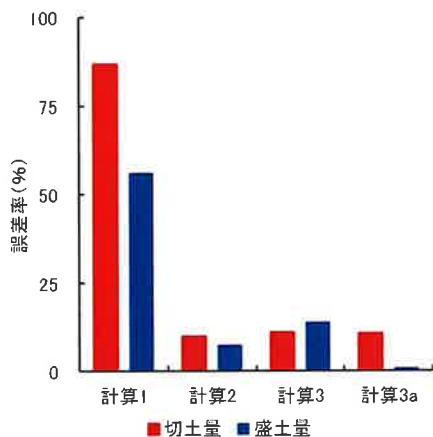


図 2-57 誤差率の比較

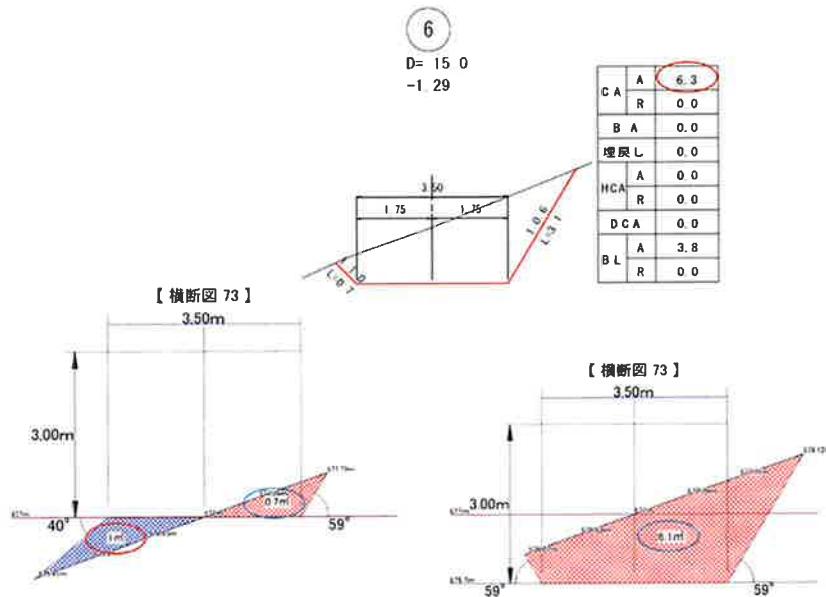


図 2-58 路面高さの修正による横断面積算出精度向上  
上：設計書の横断面図、下左：路面高修正前の横断面図、  
下右：路面高修正後の横断面図

本線は林業専用道であるため、走行の快適性などを考慮して縦断勾配の変化点を少なく、なるべく一定勾配になるように路線を計画していると思われる。そのため、地盤高と路面高の差が大きくなり、全切りや全盛りによって作設される測点がほとんどを占め、半切り半盛りで作設される測点が極めて少ない。地盤高と路面高の差が大きい路線では、土工量を高精度に算出するためには路面高の修正が必須といえる。なお、路面高の修正値は設計書類中の値を参照したが、本ソフトで設定できる値は小数点第 1 位までであるので、設計書にある小数第 2 位までの値を四捨五入した値を用いて路面高を修正している。

次に、幅員も修正した計算 3において、横断面積の精度が向上した測点の例を図 2-59 に示す。設計書類中の横断面積が盛土で  $16.7\text{m}^2$  であったのに対し、路面高の修正のみ（幅員は初期値  $3.5\text{m}$  のまま）では、盛土面積が  $11.8\text{m}^2$  であったものが、幅員を  $5.8\text{m}$  に修正した後には、 $16.4\text{m}^2$  と大きく精度が向上している。なお、幅員についても指定できる値が小数点第 1 位までであるので、設計書に指定されている幅員を四捨五入した値によって幅員を修正している。

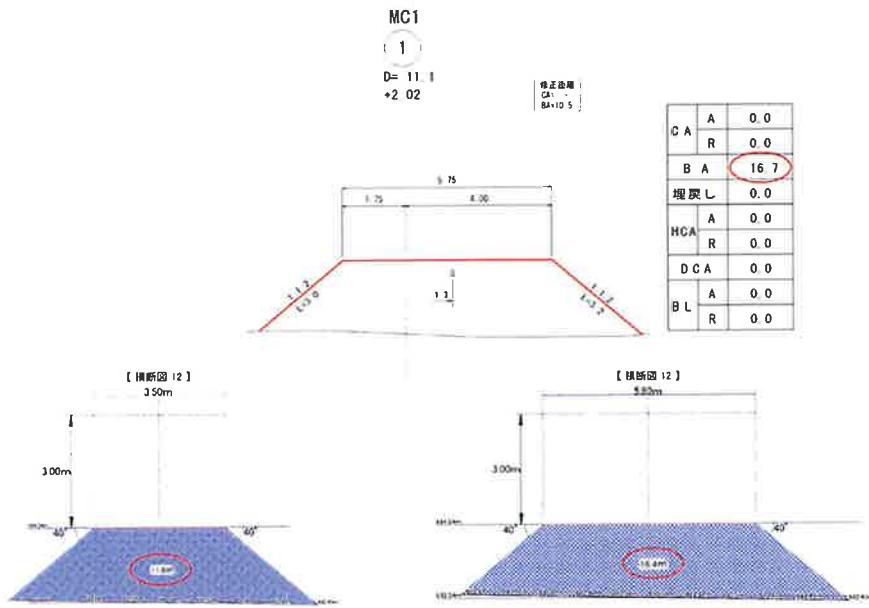


図 2-59 幅員の修正による横断面積算出精度向上  
上：設計書の横断面図、下左：幅員修正前の横断面図、  
下右：幅員修正後の横断面図

これらの測点では、路面高および幅員を個別に修正することで横断面積の精度が向上した。一方で、路線全体の土工量では、計算 2、3 とも 10%程度の誤差率を有し、計算 3 の方が若干悪い精度となつた（図 2-57）。この検討を行うにあたつて、まず、測点ごとの斜面傾斜を比較する。

航空レーザ計測データの精度検証を行う上で、路線位置や幅員などの路線規格などが正確であれば、土工量の誤差は斜面傾斜の違いによって生じるといえる。そこで、設計図の横断面図から分度器で読み取った斜面傾斜と、航空レーザデータから作成した TIN における傾斜を同一測点において比較した結果を図 2-60 に示す。

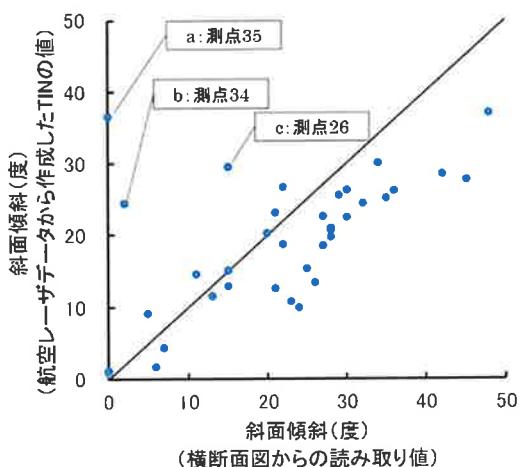


図 2-60 斜面傾斜の比較

点分布の特徴として、横軸（横断面図からの読み取り値）と縦軸（航空レーザデータから作成した TIN の値）の等值直線から下側に分布している点が多く、航空レーザデータから作成した斜面の方が小さな傾斜になる傾向が確認できる。これは、TIN 作成時に傾斜の変曲点などがつぶれてしまい、エッジのとれたなめらかな形状になったことによると思われる。一方、横軸に対して縦軸の値が極端に大きくなる例として、図中の a から c で示した点がある。a、b では、横断面図からの読み取り値がほぼ 0 度であるのに対し、航空レーザデータの

TIN では、25 度ないし 35 度程度になっている。これらに対応する測点は、終点周辺の No35 および 34 であった。この周辺は、接続する既設路線の形状が航空レーザデータにも現れている。測点 34 について設計図とソフトによる横断面図をそれぞれ確認すると（図 2-61）、新たに開設する路線中心位置がずれているために、既設路線位置と重なっておらず、結果的に斜面傾斜の誤差が大きくなっていることが分かった。また、c に対応する測点 26 においても、谷に設定されているはずの測点が、谷からややすれていたために、斜面傾斜が実際と異なっていた（図 2-62）。これらののような路線位置のズレは、傾斜が変化しない一様斜面では誤差の原因とならないが、傾斜が急激に変化する遷急線、遷緩線の周辺ではきわめて大きな誤差となってしまう。よって、既設路網などの人工改変地形や、谷・尾根の周辺などではこの点に注意することが必要である。

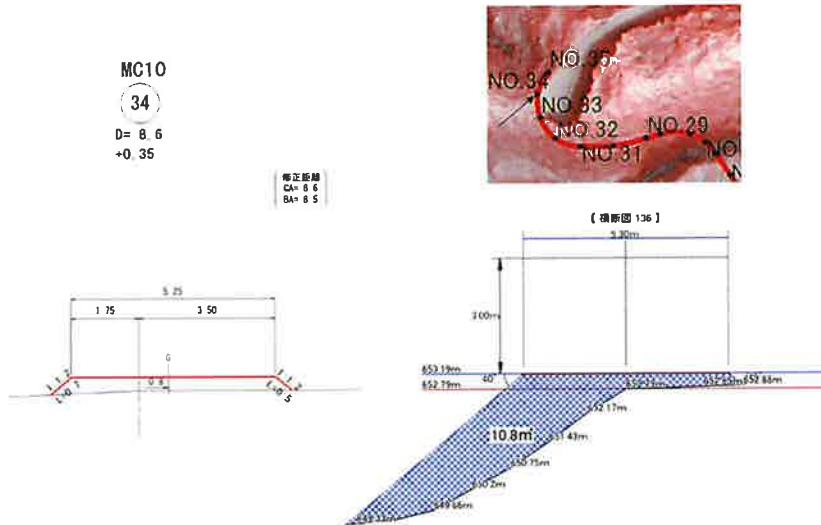


図 2-61 斜面傾斜誤差の大きい測点における横断面図の比較（測点 34）  
上：赤色立体図における測点位置（矢印）、下左：設計書の横断面図、  
下右：ソフトにおける横断面図

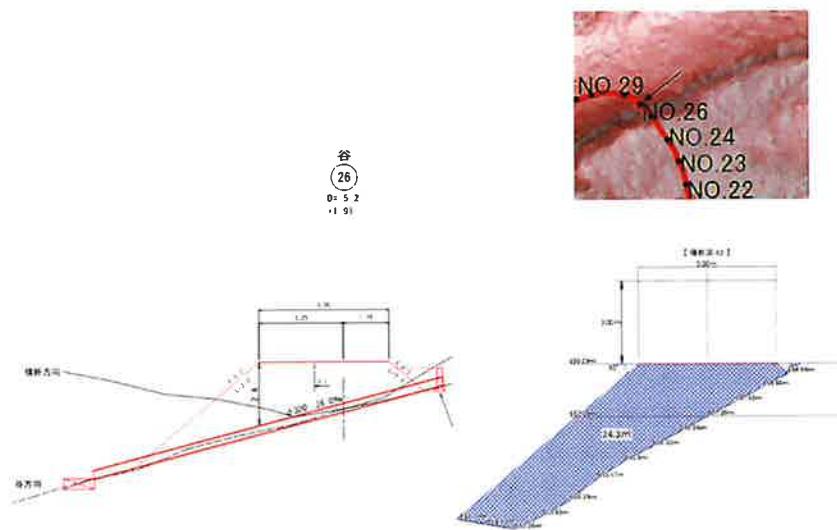


図 2-62 斜面傾斜誤差の大きい測点における横断面図の比較（測点 26）  
上：赤色立体図における測点位置（矢印）、下左：設計書の横断面図、  
下右：ソフトにおける横断面図

次に、いま見てきたような斜面傾斜誤差の原因から、計算 2 と 3 での計算精度に関する考察を加える。理論上、実際の計算条件に近い計算 3 の方が高精度となるはずだが、上述の理由によって、測点 26、34、35 では

横断面積の誤差が大きくなつた。計算3では幅員が実際の値に近づき、それぞれ大きくなつた（ソフトではそれぞれ5.0、5.3、4.1mに設定）ため、斜面傾斜の違いによる横断面積誤差がより大きくなり、計算3の土工量精度が悪くなつたものと思われる。そこで、仮にこれら3つの測点で正しい値の横断面積が得られたと仮定して土工量を算出（計算3a）すると、切土量、盛土量、合計の土工量がそれぞれ $1987.7\text{m}^3$ （ $5.79\text{m}^3/\text{m}$ ）、 $1297.3\text{m}^3$ （ $3.78\text{m}^3/\text{m}$ ）、 $3285.0\text{m}^3$ （ $9.56\text{m}^3/\text{m}$ ）となつた。切土量の精度は計算2と同等だが、盛土量で非常に高い精度が得られ、土工量でも精度の向上が見られた（図2-57）。つまり、今回は遷急線などを含み傾斜が複雑に変化する場所（具体的には既設路線と谷）において路線位置がずれていたため、より幅員の大きな測点で横断面積（斜面傾斜）の誤差が大きくなり、計算3での土工量精度向上につながらなかつたといえる。

## 2. 土工量精度に関する検討

航空レーザの精度についてはこれまでいくつかの報告があり、概ね高い精度が報告されている（斎藤、2012）。上述したとおり、得られた土工量の誤差については、その原因をいくつか挙げることができ、①TINが持つ誤差、②横断面作成位置の誤差（GPSの測位誤差）、③路線横断面形状（幅員や路面高の修正値など）の誤差に区分することができる。このうち、①については、航空レーザ計測データ自身が持つ誤差の他に、TINを作成する際に発生する誤差もある。しかし、航空レーザ計測データから得たDTM（Digital Terrain Model：樹木など地表にある物を取り除き、地表面の標高からなる三次元データ）を直接TINに加工すれば、DTMからDEM作成、DEMからTIN作成時にそれぞれ発生する誤差の影響がなくなるため、TINの精度を向上することができると思われる。②については、航空レーザデータの精度には起因しないものであるが、路線開設による土工量を算出する際には、この影響を検討しなければならない。今回のように計画中の道をGISなどのPC環境に取り込む際だけでなく、本ソフト上で検討した線形をGPSで現地に測設する際にも影響する誤差である。③については、幅員および路面高さを個別に適用することにより、影響を極力小さくして土工量の比較を行つた。しかし、これは本ソフトの機能制約上生じた誤差であり、航空レーザデータの精度には起因しないものである。異なるソフトを使用するなど、今後の技術発展によって、誤差の影響が小さくなっていくと考えられる。

## 3. まとめ

航空レーザデータを使用した土工量精度について検討を行つた。土工量算出で生じる誤差については、地形データの誤差以外にいくつかの要因が考えられ、それらの影響を完全に分けて考えることができなかつたが、概ね10%程度以下の誤差率で土工量を算出できると考えられる。

また、路線設計を行う現場からは、平均断面法から算出した土工量と、工事の際に取り扱つた実際の値との乖離を小さくしたいとの要望がある。近年、航空レーザだけでなく、地上レーザや多視点からのステレオ写真測量（SfM：Structure from Motion）、UAV撮影によるDSM作成など種々の技術が出てきている。特に写真を用いた測量では、植生などによって地面が写らない状態では、欲しい地形情報が得られないという課題は残るもの、これまで得られなかつた微地形を得られるようになれば、今後の林道設計に有用な道具となる。また、DEMなどの立体モデルの利用がさらに進めば、設計段階から土工量算出などに活用することが考えられる。従来の土工量は、測点ごとの横断測量から得た離散的な地形情報から求めつたが、正確なDEMによつて開設前後の地形を比較すれば、実際の工事で取り扱つた正確な土工量を求めることができ、設計業務が大きく変わることも考えられる。一般道ではそのための検討も始まつたところであり（重高ら、2012）、路線設計分野での航空レーザ計測データの有効性は今後ますます大きくなつていくものと思われる。

## 引用文献

- 斎藤仁志（2012）LiDARデータを用いた林道設計手法と作業道配置手法の開発. 宇都宮大学農学部演習林報告別刷、48、71-110.
- 重高浩一・青山憲明・井星雄貴（2012）道路設計のための3次元地形データの作成仕様に関する研究. 983pp、国土交通省国技政策総合研究所、オンライン、(<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0664pdf/ks0664.pdf>)、2012年9月3日参照。

## 第5節 補完的手法

### 第1項 手持ちカメラを用いた森林資源解析

#### 1. SfM 解析について

Structure from Motion (SfM) は複数の画像から撮影位置と姿勢の解析を行い、画像上のある一点が他の画像ではどこに位置するか（または、写っているか）といった対応関係を解析し三次元空間を推定する技術である。森林計測においては SfM 技術を用いることで樹冠を対象として UAV から撮影した画像から樹冠の 3D モデルを作成し森林資源情報を取得する方法や、樹幹を対象として手持ちカメラから撮影した画像をから樹幹の 3D モデルを作成する方法が考えられる。本検討では前年に地上レーザ計測を行っているため、類似するデータを取得するために樹幹を対象として撮影を行った。複数画像を SfM 解析することで 3D モデルが作成できるため、計測機器が高価な地上レーザ計測の代替計測手法となると考えられる。ただし、SfM の場合には 3D モデルの空間座標は推定であり、地上レーザ計測のように実空間を計測していないため精度、正確さで劣ると考えられる。

本検討では SfM 解析のソフトウェアとして Agisoft の PhotoScan を使用した。SfM 解析のソフトは様々な種類があり、acute3D の ContextCapture（旧 Smart3DCaptuer）や Pix4D の Pix4Dmaper、オープンソースとしては Snavely の Bundle がある。有償のソフトウェアの価格はおよそ 50 万から 100 万程である。なお、PhotoScan の場合には画像をマッチングさせるためには各画像間で 60% 以上のオーバーラップが必要となる。

#### 2. SfM 解析による 3D モデル化と立木本数

現地調査において円形プロット内の樹木が写るように撮影を行った。既存の研究より円形プロットの外側より撮影を行う場合には円形プロット境界付近の樹幹が写り込んだ画像が少なくなるため生成される点群が少なくなることがわかっている。そのため、本検討ではプロットの外側から中心への撮影に加えて、中心から外側への写真を撮影することとした。また、空間座標を補完するために Grand Control Point (GCP) を設置した。円形プロットの中心に据えたポールを基準とし他のポールとの相対位置をバーテックスとトランスポンダーにより計測し、座標を決定した。撮影した写真の一部を以下に示す。





図 2-63 視差のある撮影画像

PhotoScanにより撮影位置、姿勢を解析した結果を以下に示す。青い長方形がカメラの位置を示しており、  
フラッグのアイコンは GCP を示す。

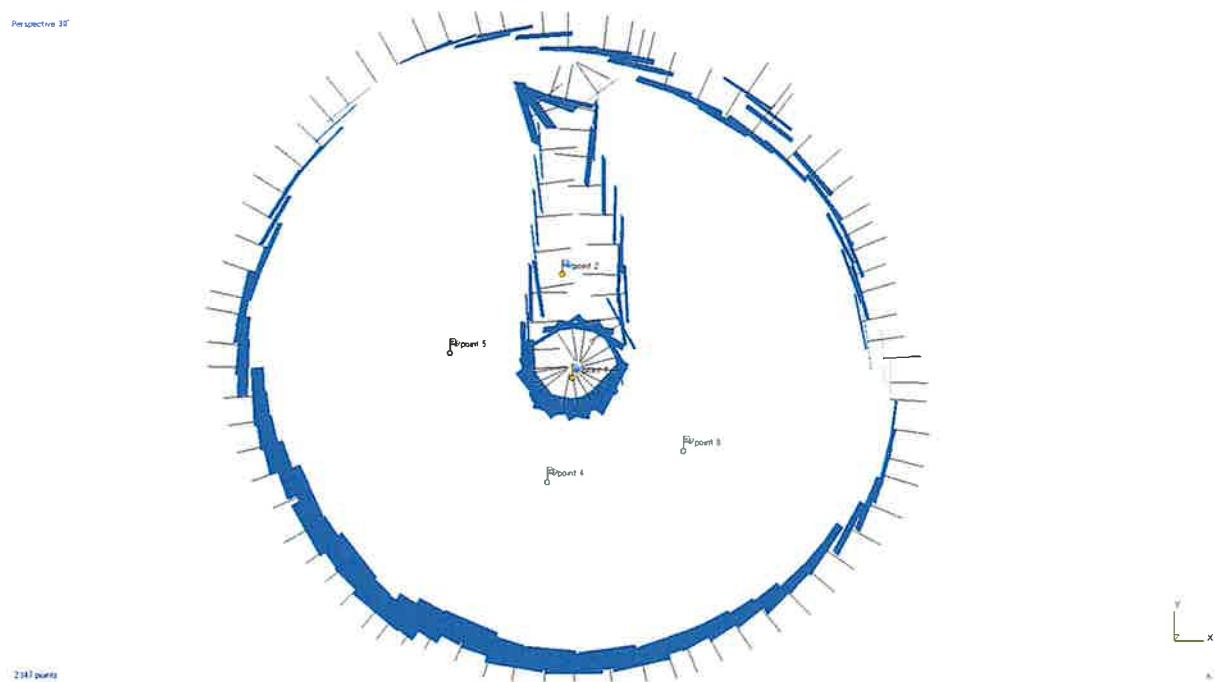


図 2-64 撮影位置図

次に PhotoScan により生成された画像間で対応する点（タイポイント）を示す。また、タイポイントの数を表 2-70 に示す。Plot3 ではタイポイントの数が他のプロットと比較し少ないが、これは Plot3 では樹木が込み合っており他のプロットより遠くまで見通せなかつたためであると考える。

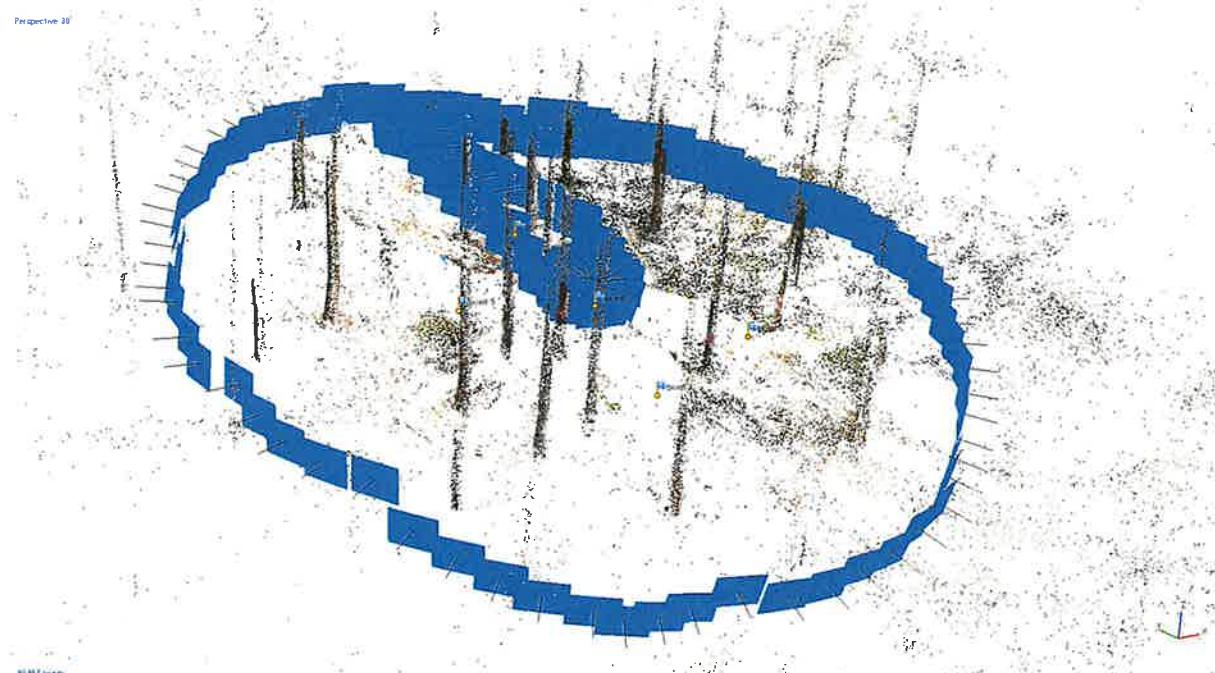


図 2-65 タイポイント

次に三次元空間を推定しポイントクラウドを生成した結果を示す。このポイントクラウドデータより樹幹と認識できるポイントクラウドを抽出し、立木本数をカウントした。また、胸高直径の推定にもポイントクラウドを使用した。

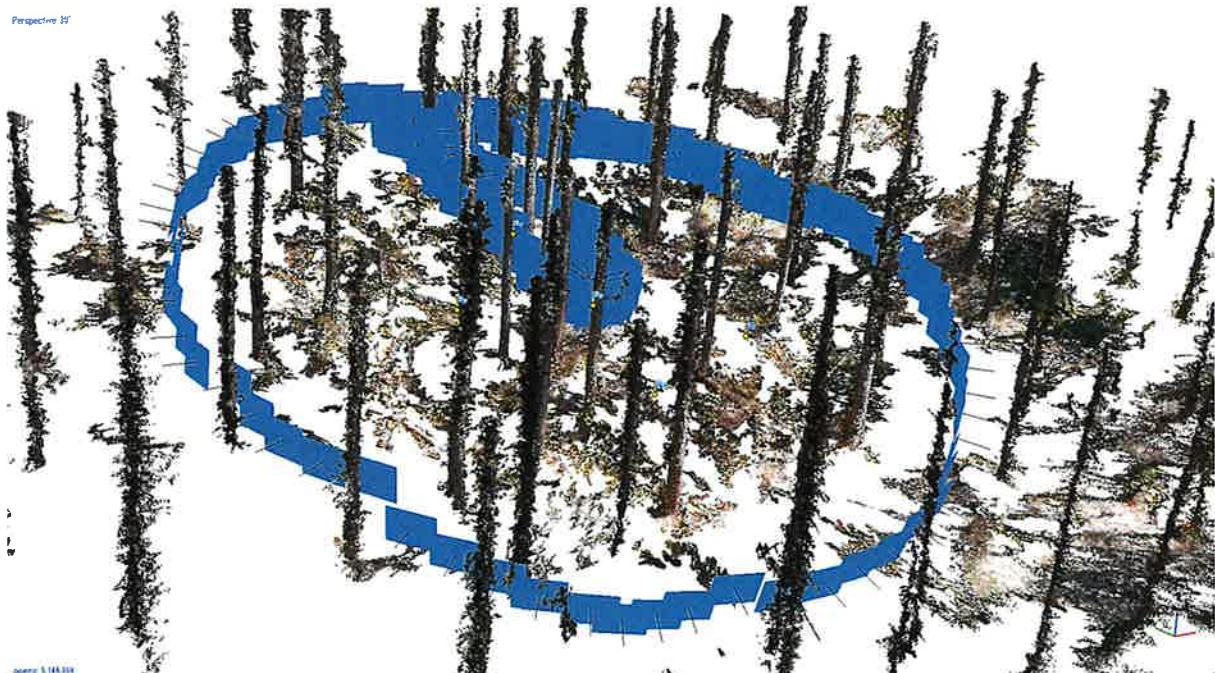


図 2-66 ポイントクラウド生成結果

表 2-70 Phoscan 解析結果

調査プロット No.	写真枚数 (枚)	タイポイント (点)	ポイントクラウド (点)
Plot1	119	80,857	5,146,384
Plot2	111	77,065	5,525,077
Plot3	114	46,834	5,108,807
Plot4	119	75,998	5,826,450
平均	116	70,189	5,401,680

各現地調査プロットにおける現地調査結果の立木本数と SfM 解析による立木本数また使用した画像枚数を以下に示す。Plot3において立木本数が 2 本少なくなった。現地調査での胸高直径との対応をとるとポイントクラウドが樹幹として認識できなかった樹木の胸高直径は 8cm と 3cm であった。樹幹が細い場合には 3D モデルによる計測が困難であり、Plot3 のように樹幹が細い場合には円形プロットの半径を狭めることで確実な計測を行えると考える。

表 2-71 現地調査と 3D モデルの立木本数比較

調査Plot No.	現地調査		3Dモデル	写真枚数 (枚)
	DBH (cm)	立木本数(本)		
Plot1	27.2	25	25	119
Plot2	28.0	20	20	111
Plot3	15.6	40	38	114
Plot4	27.4	19	19	119
平均	24.6	26.0	25.5	116
合計	-	104	102	-

### 3. 胸高直径の推定

プロット全体の 3D モデルより単木ごとデータを分割した後、地盤面とノイズを手動フィルタリングにより除去し樹幹を表すポイントクラウドデータのみにした。胸高断面（樹幹の最低点から 1.1~1.3m の範囲）のポイントクラウドの集合を最小二乗法により真円にフィッティングし、胸高直径の中心位置と直径を推定する方法をとった。円推定を行う高さを変更することで胸高直径以外の樹幹直径を推定することができる。

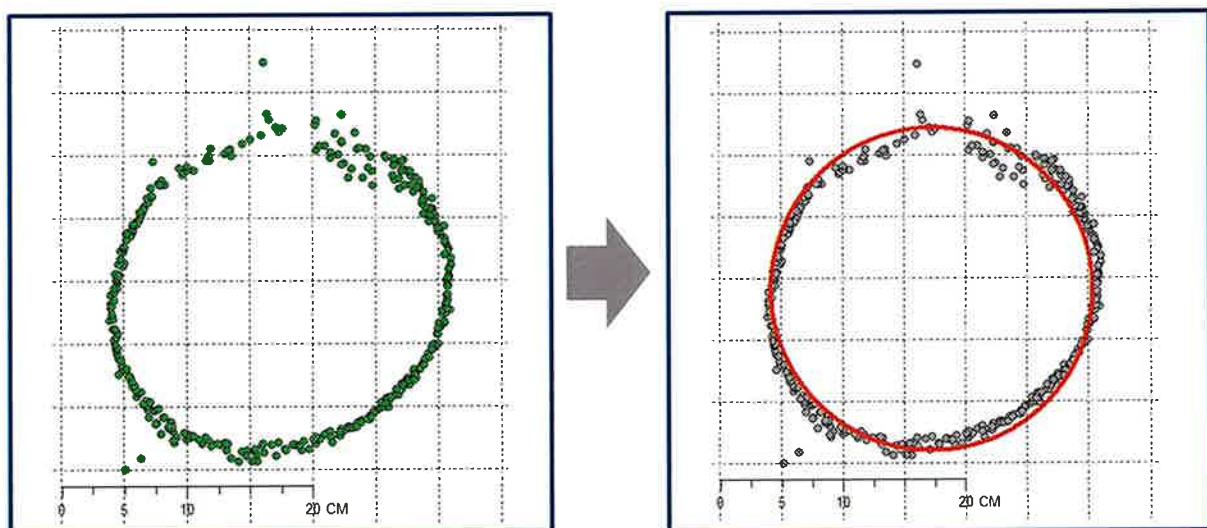


図 2-67 円推定例

真円に近似するためには 3 点以上のポイントがあれば推定できるため、樹幹の円周に満遍なくポイントクラウドがある必要はなく、一部からでも胸高直径の推定を行うことができる。

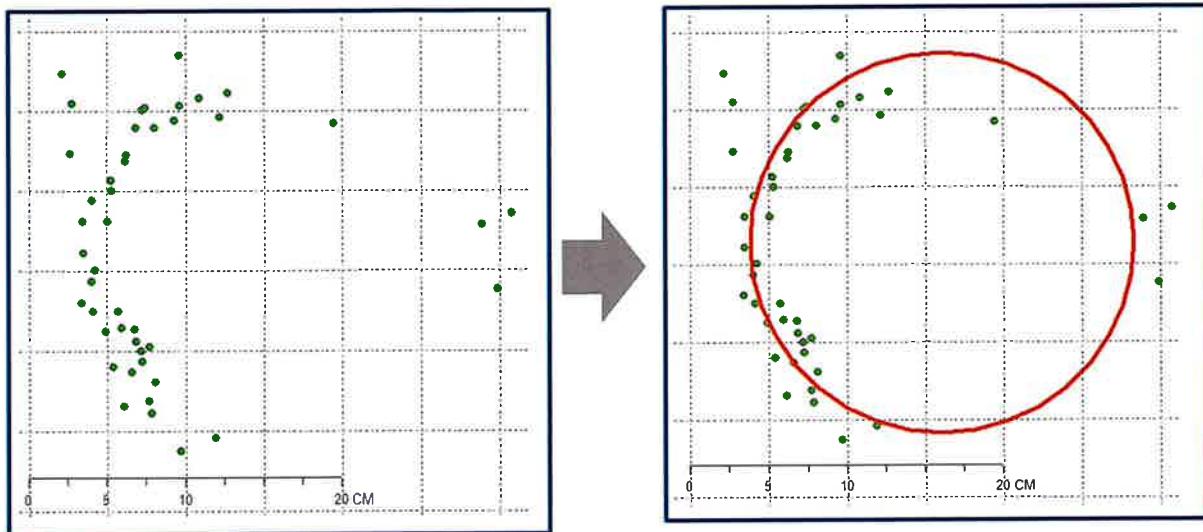


図 2-68 樹幹が一部である場合の円推定例

SfM により 3D モデル化した樹木の胸高直径の結果を表 2-72 に示す。現地調査の平均胸高直径が 22.9cm に対して 3D モデルの平均胸高直径は 25.2cm となり、平均二乗誤差 (RMSE) は 3.0cm となった。ただし、現地調査は山側一本ざしであるため現地調査の結果が真値ではない。Plot1 と Plot3 では誤差が Plot2、Plot4 より小さいがこれは精度の向上を図るために SfM 解析に使用する画像を増やし樹幹のポイントクラウドを正確にすることを試みた結果である。なお、画像を増やす前の 4 プロットの RMSE は 3.5cm であった。Plot2 と Plot4 でも画像を増やすことを試みたがマッチングする画像が増えなかったため胸高直径の精度は改善しなかった。また、胸高直径の推定は過大になっていることが全木の比較から示された（図 2-69）。

表 2-72 現地調査と 3D モデルの胸高直径比較表

調査Plot No.	現地調査結果 (cm)	3Dモデル (cm)	RMSE (cm)	写真枚数 (枚)
Plot1	27.2	28.8	2.1	119(194)
Plot2	28.0	32.7	4.9	111
Plot3	15.6	16.8	1.9	114(554)
Plot4	27.4	30.4	3.3	119
平均	22.9	25.2	3.0	116

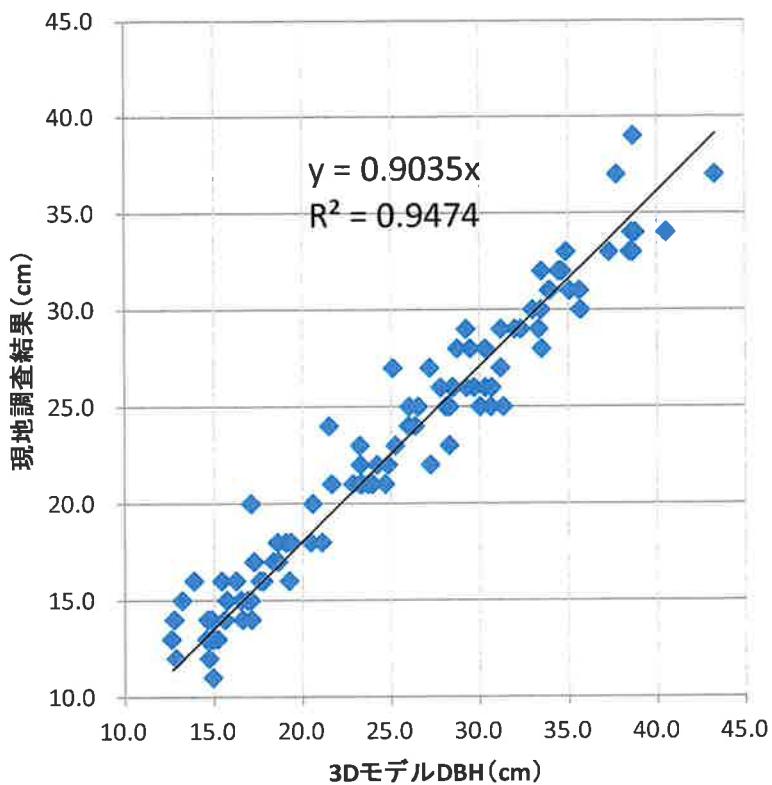


図 2-69 現地調査と 3D モデルの胸高直径比較結果

毎木調査等では 2cm 括約で調査されているため、胸高直径の推定精度が 1cm 未満であれば輪尺を使用した森林調査と同じ精度となると考える。本検討より胸高直径推定誤差を小さくするためには 3 つのことが考えられる。画像の撮影方法と GCP の座標の計測方法、円推定方法である。画像の撮影方法は外側と内側から行つたが、3D モデルを作成すると外側の画像から生成したポイントクラウドと内側の画像から生成したポイントクラウドが整合しないことがあった（図 2-70）。

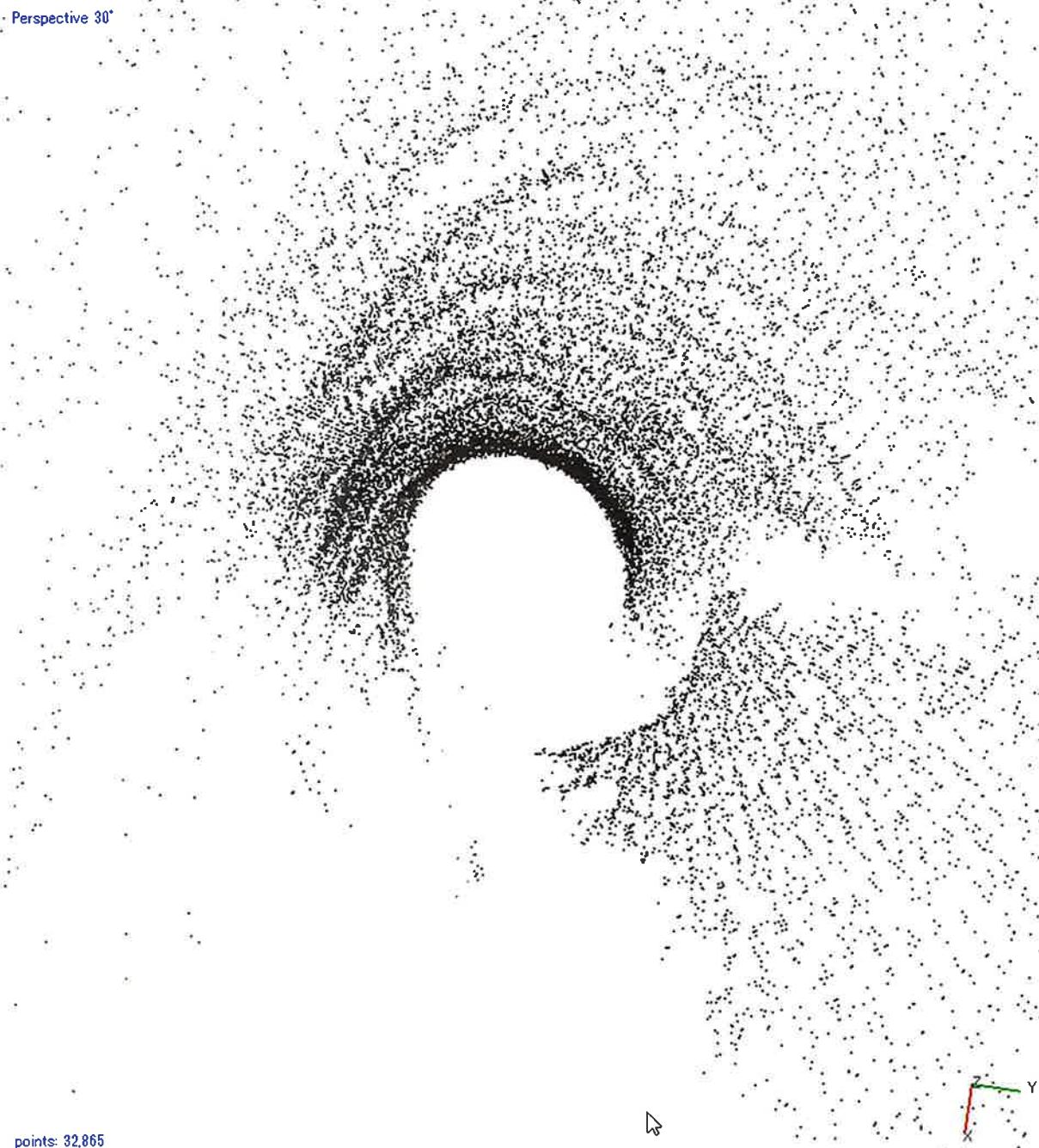


図 2-70 樹幹ポイントクラウド不整合例

これは外側からの撮影した画像と内側から撮影した画像にオーバーラップがないため空間座標の整合が取れなかつたためであると考えられる。樹幹を全方位から撮影することで解消できると考えるが、撮影の手間が増える。内側からのポイントクラウドを削除し、胸高直径を推定すると精度がよく推定できるため撮影は外側からのみとし、円形プロット境界付近の樹幹が写り込んだ画像が少なくなるため生成される点群が少なくなることについては別の方針を今後検討する。

GCPについては現地調査において簡易に計測を行うため、樹高を計測する調査道具であるバーテックスとトランスポンダーにより座標を計測したが距離表示が 0.1m 単位であるため、10cm 程度の誤差がある。レーザ距離計等を使用し GCP の座標精度を向上させる必要がある。

胸高直径の円推定には樹幹表面のポイントクラウドを使用しているが、カメラで撮影した画像では剥離した樹皮も樹幹としてポイントクラウドとなるために樹幹直径が大きく算出される可能性がある。円推定により

樹幹断面の中心を求めた後、短径をもとに胸高直径を算出することや樹皮の影響を考慮し推定結果に補正をかけることにより精度の向上が見込まれる。

円推定を行う高さを変更することで胸高直径以外の樹幹直径、樹幹断面の中心を推定することができる。0.5m 毎に計測した結果が図 2-71 である。樹幹を表すポイントクラウドはおよそ 7~8m 地点まで生成されているものの、枝条のポイントクラウドも混在しており正しい推定を行うことができないため、5.7m までの胸高断面の直径と中心を推定した。

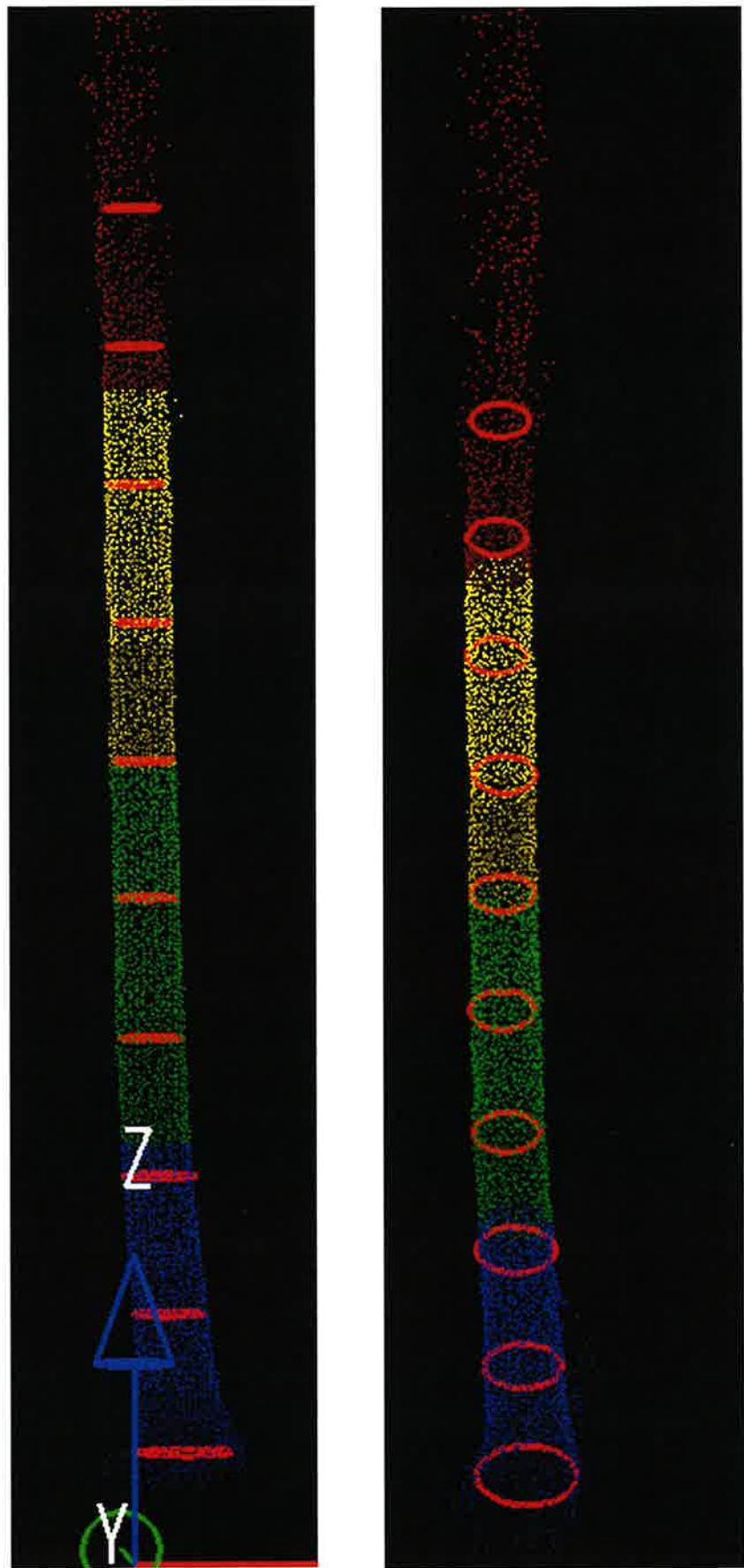


図 2-71 円推定結果

また、円推定の結果を真上から確認した結果（図 2-72）偏心していることが分かる。今後は各樹幹断面の中心位置と直径より矢高を算出することができると言える。

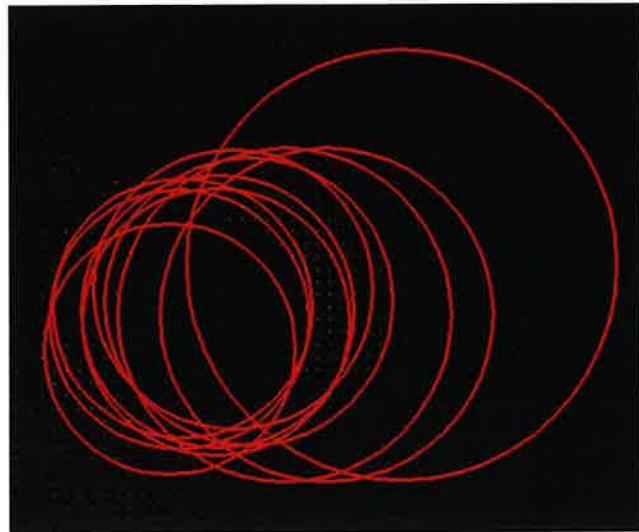


図 2-72 円推定結果（上部より）

#### 4. 3D モデルと航空レーザ計測の立木本数比較

森林資源情報は樹木の成長や間伐、皆伐、植栽といった施業により情報の更新が必要となる。しかし、航空レーザ計測を毎年行うにはコストがかかりすぎる。そこで次の航空レーザ計測までに森林資源情報を更新する手段が必要である。本検討では平成 26 年に航空レーザ計測を行った範囲において平成 27 年に間伐が実施され、平成 28 年の現地調査において SfM による林内の 3D モデルを作成した。航空レーザ計測より樹頂点抽出した結果と SfM 解析より円推定した結果を比較することで間伐前後の森林資源情報の相違を求めた。

間伐前の平成 26 年の航空レーザ計測結果からは樹冠高データ（DCHM）を作成し樹頂点抽出を行った。さらに領域分割の手法の一つである Watershed 法により樹冠と樹冠の分岐点を探索し単木ごとの樹冠に分割した。樹頂点ではなく樹冠面積と 3D モデルについては胸高直径の円推定を行ったさいに算出した胸高断面中心を比較することで 2 時期のデータに若干の樹木位置の誤差がある場合にも整合が取れる。

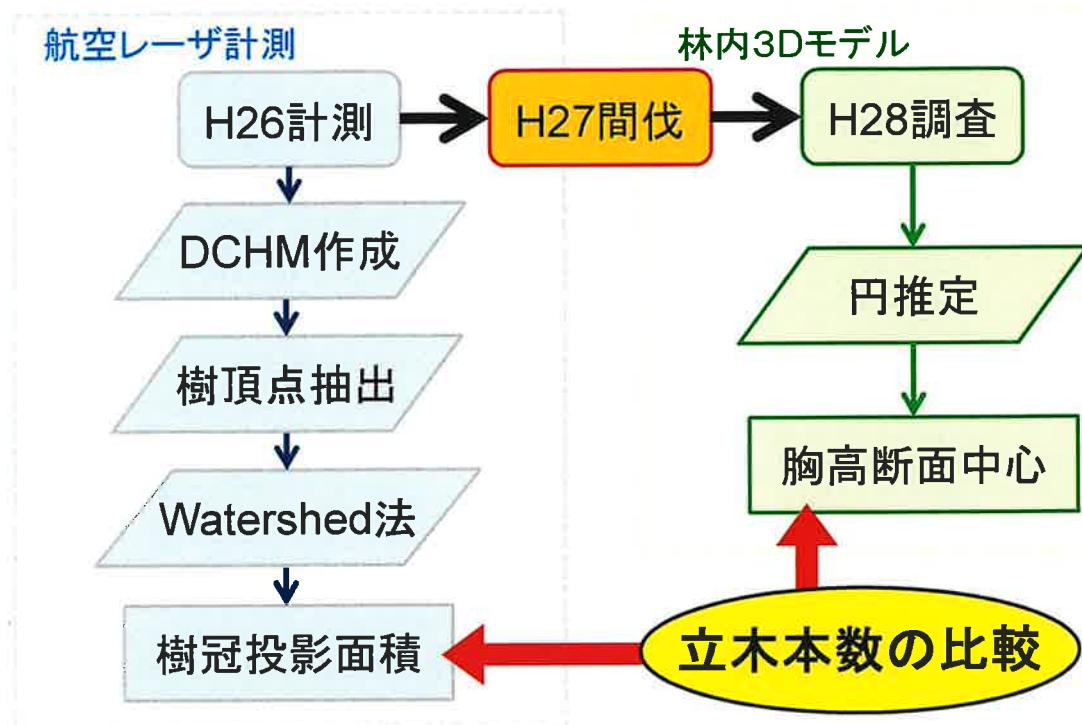


図 2-73 航空レーザと 3D モデルの比較フロー

航空レーザ計測によって取得した樹冠投影面積を図 2-74 に示す。

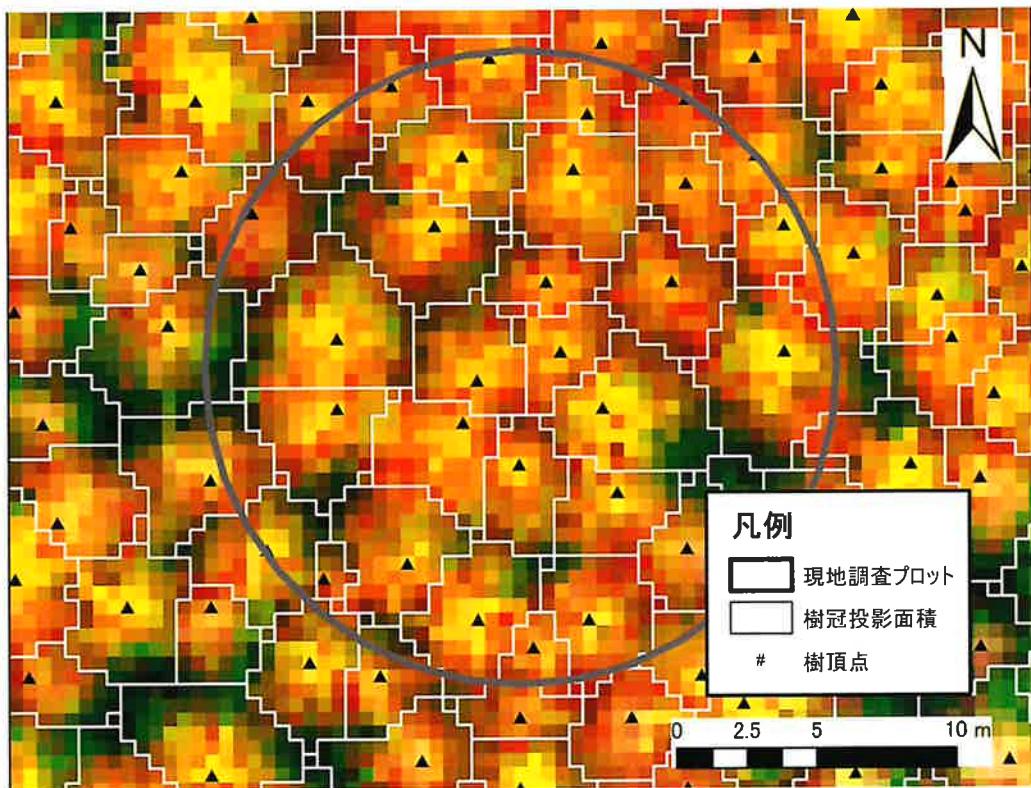


図 2-74 樹冠投影面積

3D モデルより取得した胸高断面の中心を図 2-75 に示す。なお、3D モデルの位置精度は低いため樹木位置とトッラクログをもとに手動での位置の補正を行った。

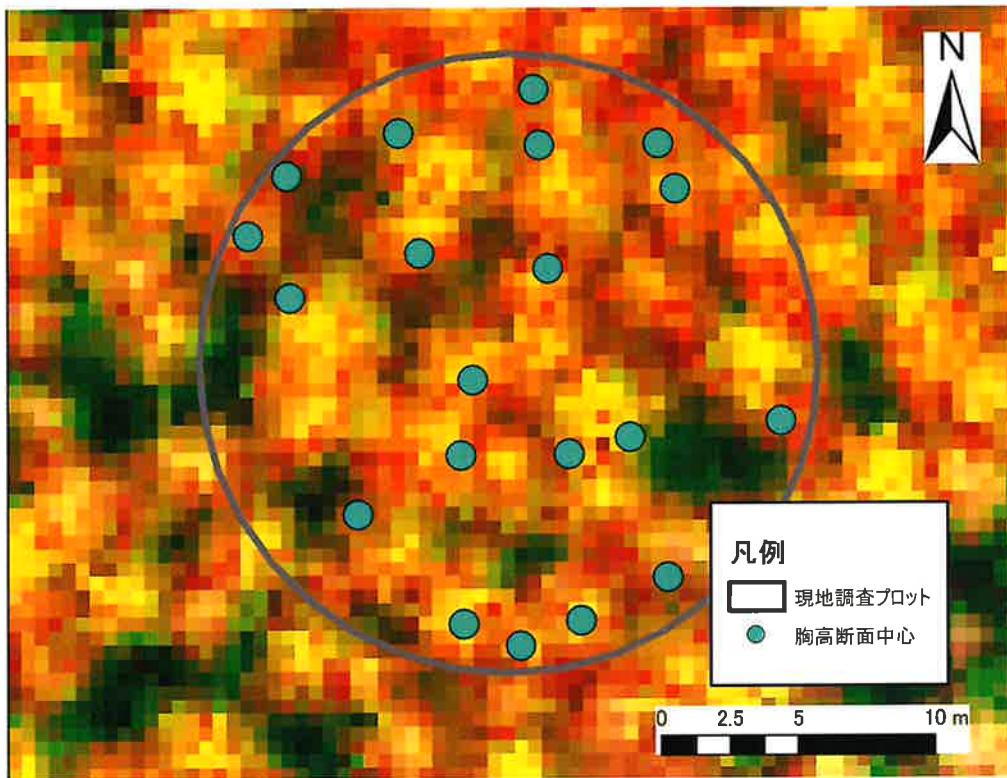


図 2-75 樹幹断面中心

樹冠投影面積の内側に胸高断面の中心が入っている場合には、間伐後も立木としても残っている樹木であるとし、樹冠投影面積の内側に胸高断面の中心が入っていない場合には伐採された樹木であるとした(図 2-76)。

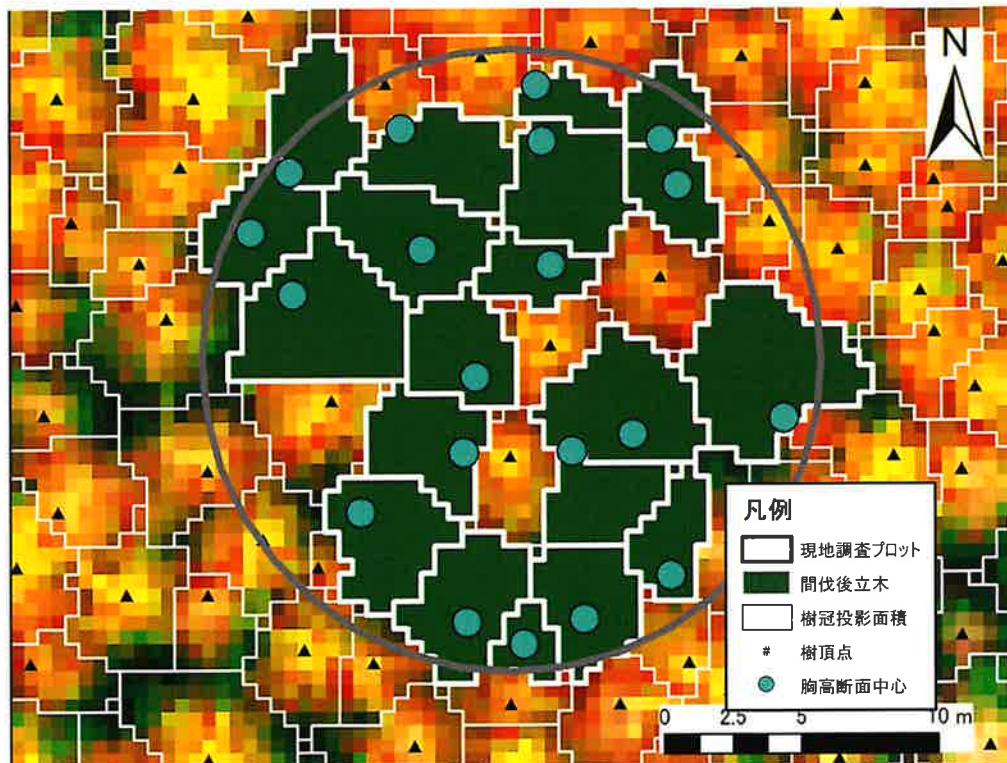


図 2-76 樹冠投影面積と樹冠断面中心比較結果

航空レーザ計測と3Dモデルの比較結果を表2-73に示す。航空レーザ計測と3Dモデルの比較により立木本数は間伐前には139本であったが間伐後には102本となり、伐採本数は37本、伐採率は26.6%となった。伐採率を比較すると現地調査結果31.1%に対し26.6%となった。航空レーザ計測は上層木をカウントするが3Dモデルは被圧木も計測するため、伐採率は実際より過小になる。また、材積間伐率を算出するために航空レーザ計測と3Dモデルの樹木位置を比較した。間伐前の材積は47.26m<sup>3</sup>、間伐後には36.80m<sup>3</sup>となった。伐採材積は10.46m<sup>3</sup>、材積伐採率は22.1%となり、伐採されたと考えられる樹木の単木材積を合計することで間伐材積を算出できた。また、伐採木の位置を視覚的に表現できた。

表2-73 3Dモデルと航空レーザの比較と現地調査との比較

調査Plot No.	現地調査			航空レーザ計測と3Dモデル比較					
	立木本数			立木本数			合計材積		
	間伐前	間伐後	伐採率	レーザ	モデル	伐採率	レーザ	モデル	伐採率
Plot1	35	25	28.6%	27	25	7.4%	13.01	11.74	9.7%
Plot2	28	20	28.6%	29	20	31.0%	12.10	9.09	24.9%
Plot3	62	40	35.5%	61	38	37.7%	11.40	6.83	40.1%
Plot4	26	19	26.9%	22	19	13.6%	10.75	9.14	15.0%
合計	151	104	31.1%	139	102	26.6%	47.26	36.80	22.1%
差分				47			37		10.46

本章の検討を通して航空レーザ計測と3Dモデルの比較には以下の課題があることが分かった。

- 3Dモデルの位置精度が航空レーザ計測程正確でないこと
- 樹頂点と胸高断面の位置が異なること
- 航空レーザ計測では上空から上層木を対象に計測しているのに対して3Dモデルでは現地調査と同じように被圧木まで計測する違いがあること

今後、航空レーザ計測とUAV計測（レーザ、写真）や地上レーザ計測と組合せ、森林資源情報の更新に効率的かつ経済的な計測手法について検討していく。

## 第2項 UAV写真計測を用いた森林資源解析

航空レーザ計測による森林資源解析の事例が増えているなかで、森林資源情報の更新について検討する必要がある。毎年小面積で実施される間伐等の森林施業の実施状況の把握が必要である。しかし、航空レーザ計測は大面積で実施する場合、面積当たりの経費は現地調査よりもコストは小さいと言われているが、イニシャルコストが高額であるため毎年の更新は困難である。施業を行った箇所について局所的に低成本で計測を行う必要がある。そこでUAV写真計測により森林資源情報を更新する検討を行った。UAV写真計測は間伐前後で2回行い、それぞれの計測で飛行高度を50mと100mの2回計測を行った。

UAV写真計測による森林資源解析の検討項目は以下の通りである。

- ① 位置情報付与方法の検討
- ② 対地高度の違いによる森林資源解析結果の比較検討
- ③ 間伐前後での森林資源解析結果の比較検討

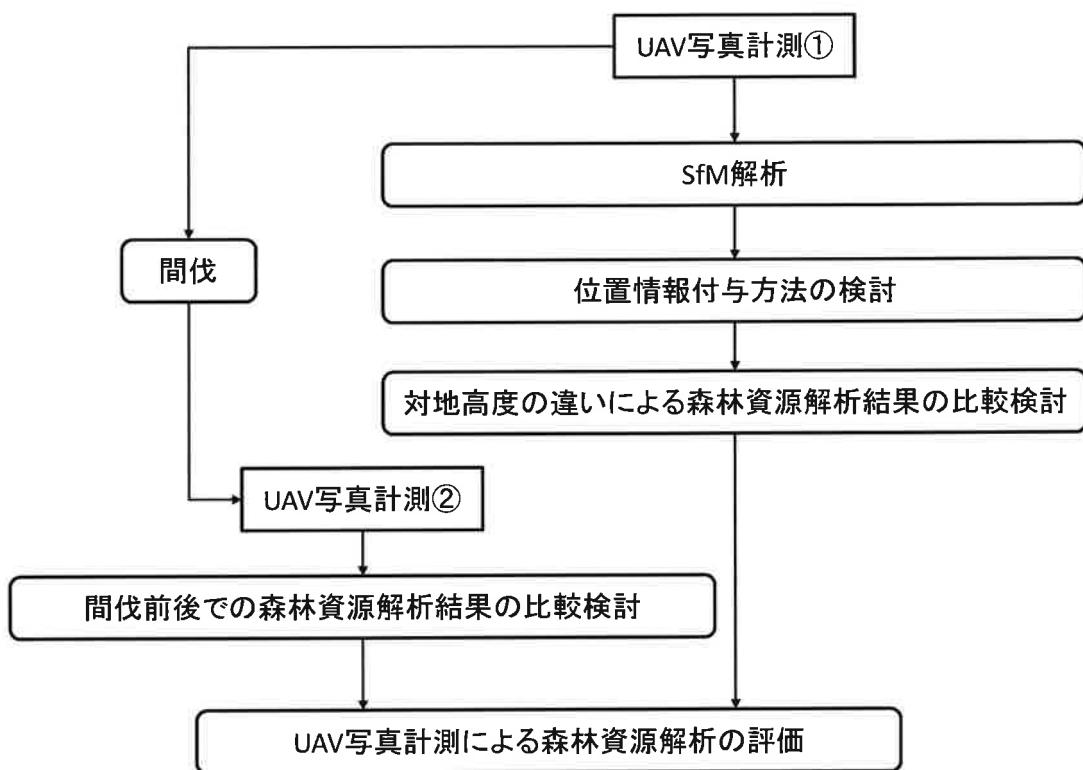


図 2-77 検討フロー

## 1. UAV 写真計測方法について

UAV 写真計測は間伐前後の 2 回行い、1 回目は 2016 年 11 月 28 日、2 回目は 2017 年 4 月 28 日に行った。それぞれの計測では高度を対地高度 50m、100m と変え同じ範囲の計測を行った。なお、計画上の対地高度は目安であり実際の計測時には安全管理のため計画よりも高く飛んだ範囲もある。これは今回の計測対象範囲が南北に伸びており南北での高低差が 100~150m ほどあり、北側から飛ばした UAV の高度を徐々に低くしながら飛ばすことが困難であったためである。

表 2-74 UAV 計測諸元

UAV機体	Phantom4		
カメラモデル	FC330		
搭載センサー	1/2.3"CMOS		
有効画素数	12.4M		
焦点距離	20mm		
基準対地高度	50m	100m	
地上分解能	20.7cm	4.14cm	
計測日時	2016年11月28日 13時17分		2016年11月28日 14時19分
	2017年4月28日 12時43分		2017年4月28日 12時06分
計測時間	2016年11月28日	39分	22分
	2017年4月28日	30分	22分
写真枚数	2016年11月28日	412枚	279枚
	2017年4月28日	520枚	295枚
オルソ解像度	2016年11月28日	3.4cm	5.1cm
	2017年4月28日	3.6cm	5.0cm



図 2-78 計画経路（左：高度 50m、右：高度 100m）

## 2. SfM 解析について

UAV 写真計測により取得した画像データより点群を生成するために Structure from Motion (SfM) を行い、レーザで取得する点群データと類似する点群データとオルソ画像を生成した。

SfM は複数の画像から撮影位置と姿勢の解析を行い、画像上のある一点が他の画像上で位置する箇所の対応関係を解析し三次元空間を推定する技術である。森林計測においては SfM 技術を用いることで UAV から撮影した画像から樹冠の 3D モデルを作成し森林資源情報を取得する方法や、手持ちカメラを用いて撮影した画像をから樹幹の 3D モデルを作成する方法が考えられる。

本検討では SfM 解析のソフトウェアとして Agisoft の PhotoScan を使用した。SfM 解析のソフトは様々な種類があり、acute3D の ContextCapture (旧 Smart3DCapture) や Pix4D の Pix4Dmapper、オープンソースとしては Snavely の Bundle がある。有償のソフトウェアの価格はおよそ 50 万円から 100 万円程である。なお、PhotoScan の場合には画像をマッチングさせるためには各画像間で 60%以上のオーバーラップが必要となる。PhotoScan での処理過程を図 2-79 に示す。また、タイピントの生成時と点群の生成時のパラメータを表 2-75 に示す。

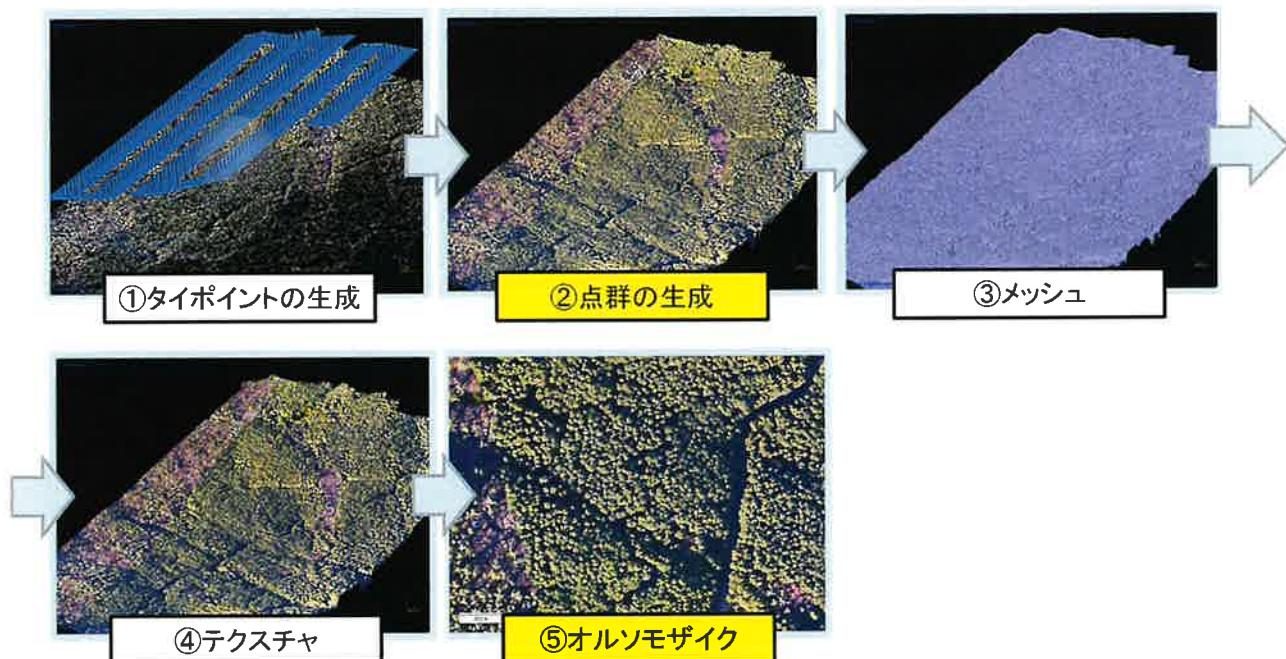


図 2-79 PhotoScan による点群作成・オルソモザイク作成過程

表 2-75 PhotoScan 処理パラメータ

Align Photos	Build Dense Cloud		
Accuracy	Medium	Quality	Medium
Pair preselection	Disabled	Depth filtering	Aggressive
Key point limit	600,000		
Tiepoint limit	40,000		

### 3. 位置情報付与方法の検討

本検討では森林資源情報の更新作業のため、計測を行う対象者が容易に実施できるように簡易かつコストが安価な手法を用いた。そのため、対空標識や調整用基準点を用いていない。しかし、その場合には位置座標の付与方法について検討する必要がある。位置情報については UAV に搭載されている GPS の位置情報をもとに座標を与える方法と SfM 解析後の 3D モデルに座標を与える方法がある。

#### (1) EXIF と GCP による位置情報付与

点群とオルソモザイクに位置座標を付与するためには写真の属性である Exchandeable Image File Format (EXIF) を用いる方法と Ground Control Point (GCP) を用いる方法がある。EXIF は写真の画像ファイルフォーマットの一つであり、撮影機材や撮影条件とともに GPS により写真を撮影した場所の三次元情報を属性情報として記録している。PhotoScan では EXIF をもとに 3D モデルに位置情報を付与することができる。しかし、位置精度は GPS の精度に影響され、さらに画像から三次元位置を推定する際にも誤差が生じると考えられる。そのため、作成した 3D モデルに対して GCP により実際の位置情報を付与する方法についても検討する。本検討では対空標識や調整用基準点を設置していないため、GCP は航空レーザ計測により取得した DEM、DSM を用いて三次元座標を取得した。

間伐前に行った計測の 3D モデルについては EXIF と GCP の両手法により位置座標を付与し、航空レーザ計測の DSM、DEM と EXIF の点群、GCP の点群を比較した。航空レーザ計測のデータについては測量精度を確認しているため、これを真値とした。当初 GCP は 6 点とし、すべて林道のような DEM から標高値を取得できる箇所である（図 2-80）。なお、6 点では不十分であることが検討により判明したため、最大 12 点の GCP を設置することとした。

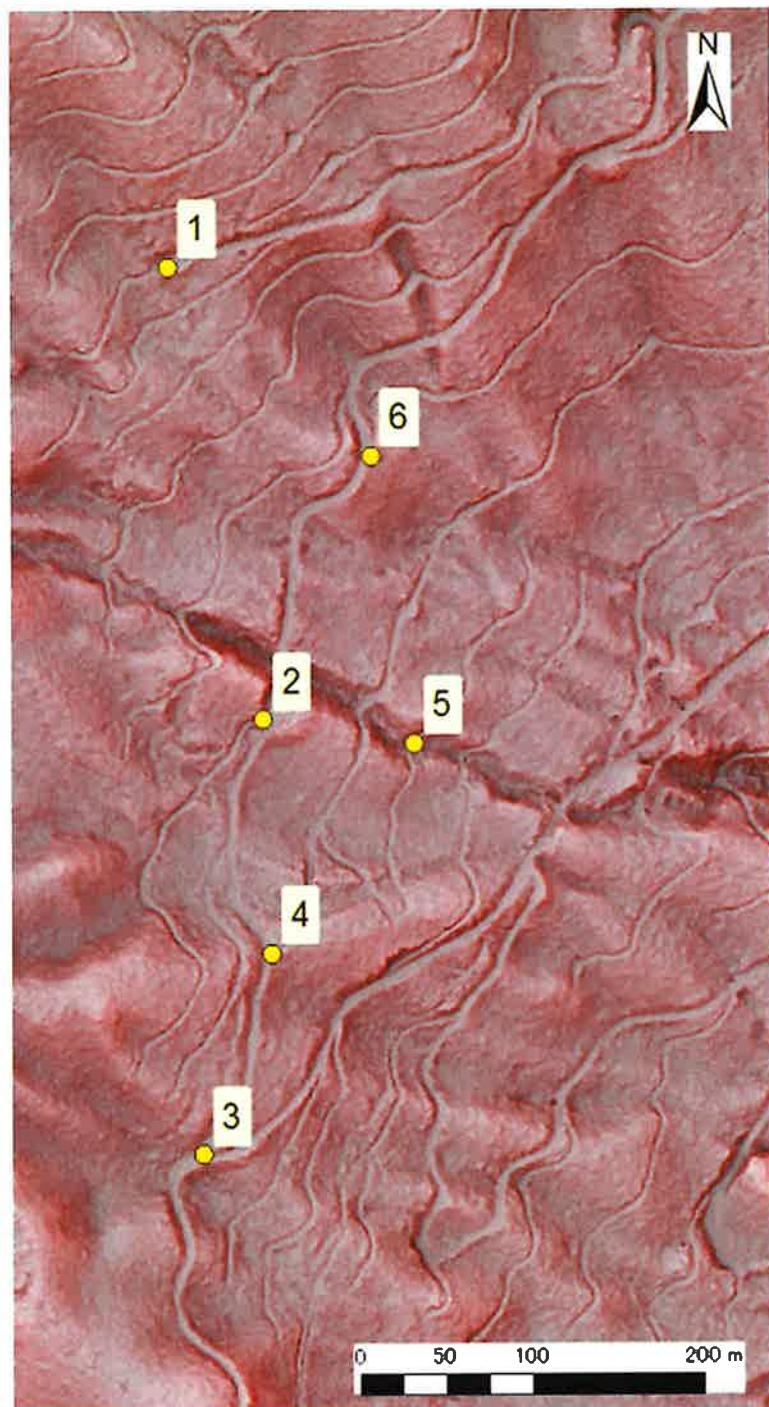


図 2-80 GCP 設置箇所 (6 点)

特徴的な樹木の頂点などの 3 地点について縦横断面をとり、航空レーザ計測データと GCP を用いた 3D モデルと EXIF を用いた 3D モデルの誤差を計測した。3 地点の縦横断面図を図 2-81～図 2-83 に示す。なお、図中の丸は誤差を求めるために座標の比較を行った箇所である。

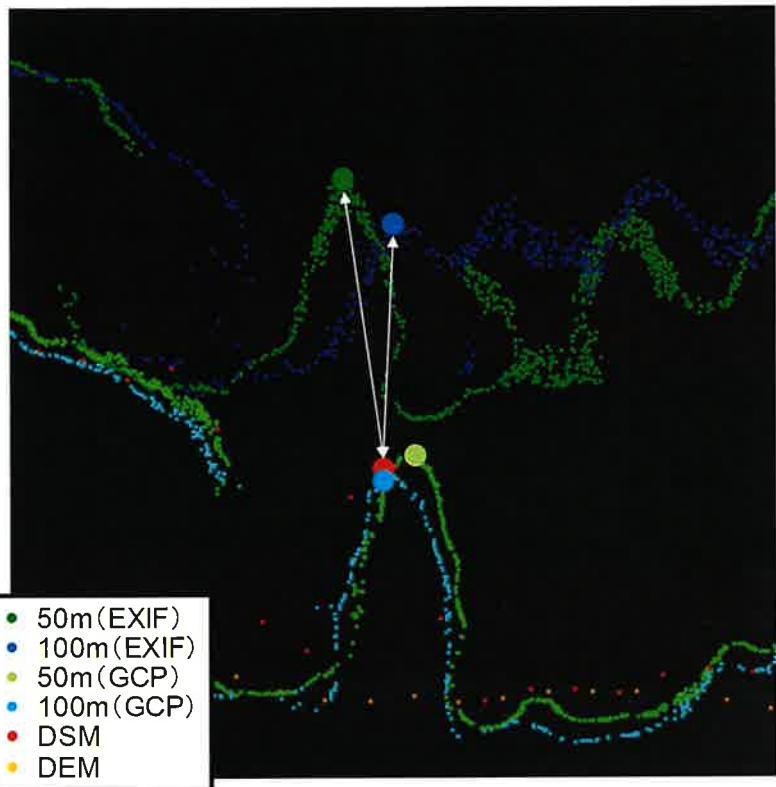


図 2-81 位置精度検証箇所①

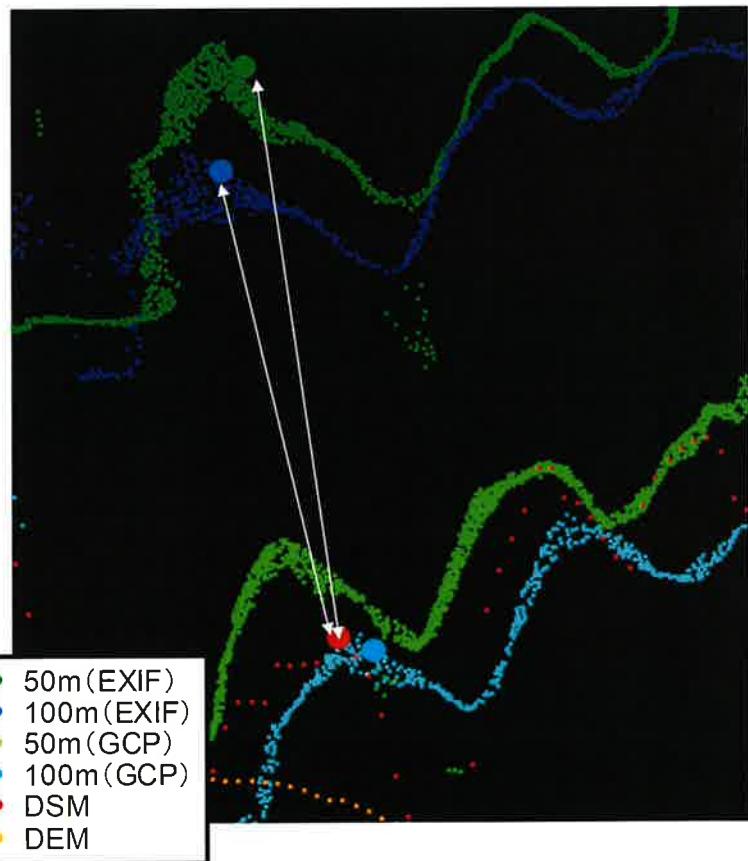
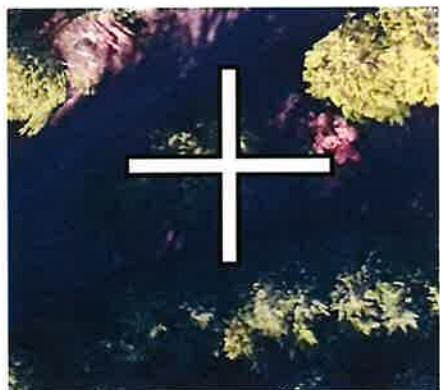
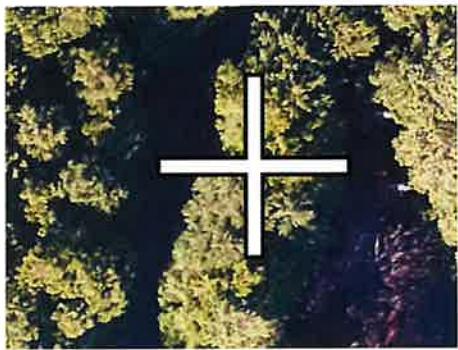


図 2-82 位置精度検証箇所②



	高度	誤差X (m)	誤差Y (m)	誤差Z (m)
GCP	50m	0.86	0.20	2.03
	100m	0.50	0.11	3.32
EXIF	50m	0.65	0.67	16.21
	100m	1.24	0.64	16.96

- 50m(EXIF)
- 100m(EXIF)
- 50m(GCP)
- 100m(GCP)
- DSM
- DEM

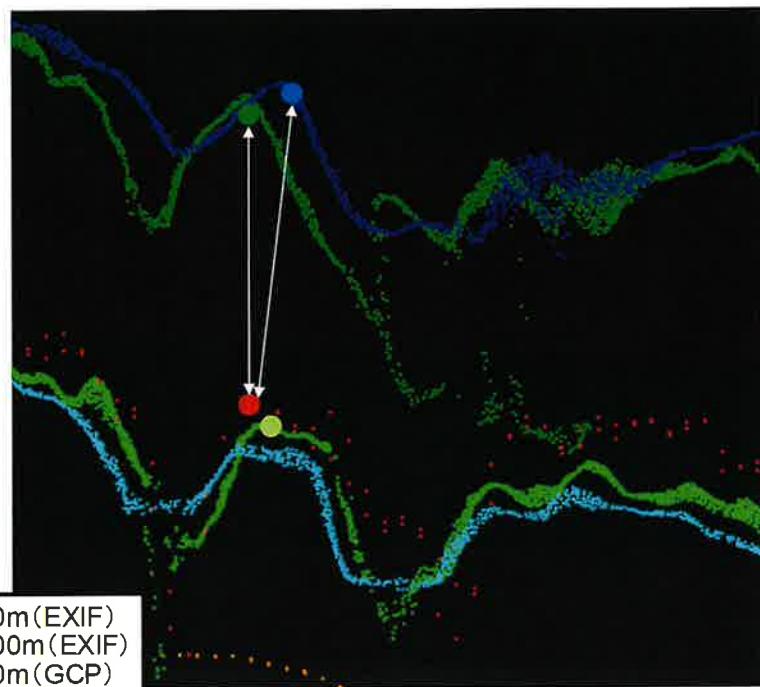


図 2-83 位置精度検証箇所③

表 2-76 には 3 地点での EXIF と GCP の 3D モデルの平均誤差を示した。EXIF を用いた 3D モデルでは Z 軸方向に 10m~20m 高い箇所に点群が存在していた。これは UAV に搭載されている GPS の誤差と、SfM 時に三次元空間を推定した誤差の両方が影響していると考える。そのため、GCP による位置補正是必須であることが分かった。

表 2-76 位置精度評価

	高度	平均誤差X (m)	平均誤差Y (m)	平均誤差Z (m)
GCP	50m	1.11	0.82	1.87
	100m	0.42	0.29	1.69
EXIF	50m	0.50	1.46	16.84
	100m	0.91	1.04	15.36

## (2) GCPによる位置合わせの検討

位置情報付与に EXIF を用いた 3D モデルよりも、GCP を用いた 3D モデルのほうが高さ方向の精度が正確になることが分かった。しかし、GCP を対空標識なしで 3D モデルに与えることにも問題があった。

一般的な航空レーザ計測の成果品である数値地形図データには、DEM データが必ず含まれているが、DSM データは含まれていない。そのため、DEM のみから GCP をとり、高い精度の 3D モデルを作成することができれば、今後他地域での UAV 写真計測及び 3D モデル作成に役立つと考えた。しかし、写真の倒れこみや影の影響によりギャップを取得することが難しく、退避場があるような大きなギャップでなければ地盤面の 3 次元点群が作成されにくく、森林域において UAV 写真計測から作成した 3D モデルでは DEM と同じ高さを取得している箇所は少ない。傾きやゆがみのない 3D モデルの作成には 3D モデル内にまんべんなく GCP を設置することが重要であるが、森林域の UAV 写真計測から作成した 3D モデルでは地盤面に GCP を設置できる箇所が限られた。

本検討では当初 GCP は DEM のみから設定できるように 6 点設置したが、DCHM を作成したところ、作成した全域の 3D モデルに傾きが生じ、計測範囲の東部では実際よりも低く、西部では実際よりも高いモデルとなってしまった（図 2-84）。UAV 写真計測範囲は中心付近で南北に比較的幅の広い林道が通っており退避場も数ヶ所見られたものの、西側、東側には幅の広い林道はなかった。そのため、GCP が必然的に中心付近に集中した結果、高さ補正を行った 3D モデルが東西に傾いた。

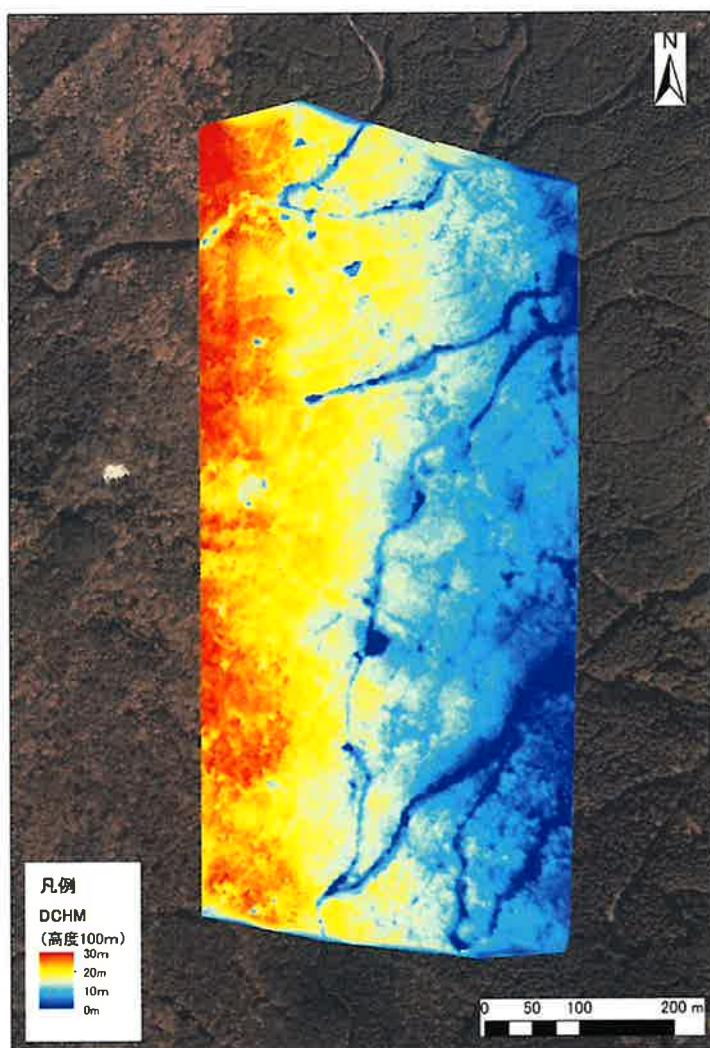


図 2-84 GCP6 点時の DCHM（間伐前/100m）

DCHM の傾きを解消し、樹高を正確に求めるために、航空レーザ計測データから作成した DSM を用いて GCP を 6 点追加し、合計 12 点に増やした（図 2-85）。DSM より標高値を取得した GCP は樹高の高い樹木や針葉樹に囲まれた広葉樹など、特徴的な箇所とした。GCP を 12 点にした場合の DCHM は 6 点の場合（図 2-84）と比較すると東西の傾きが少なくなった。GCP を 12 点にした DCHM の作成結果を図 2-86 に示す。『4 (2) 樹冠データについて』において差分解析を行い、航空レーザ計測により作成した DCHM に対する UAV 写真計測の DCHM の誤差が一方向に偏在していないことを確認した。

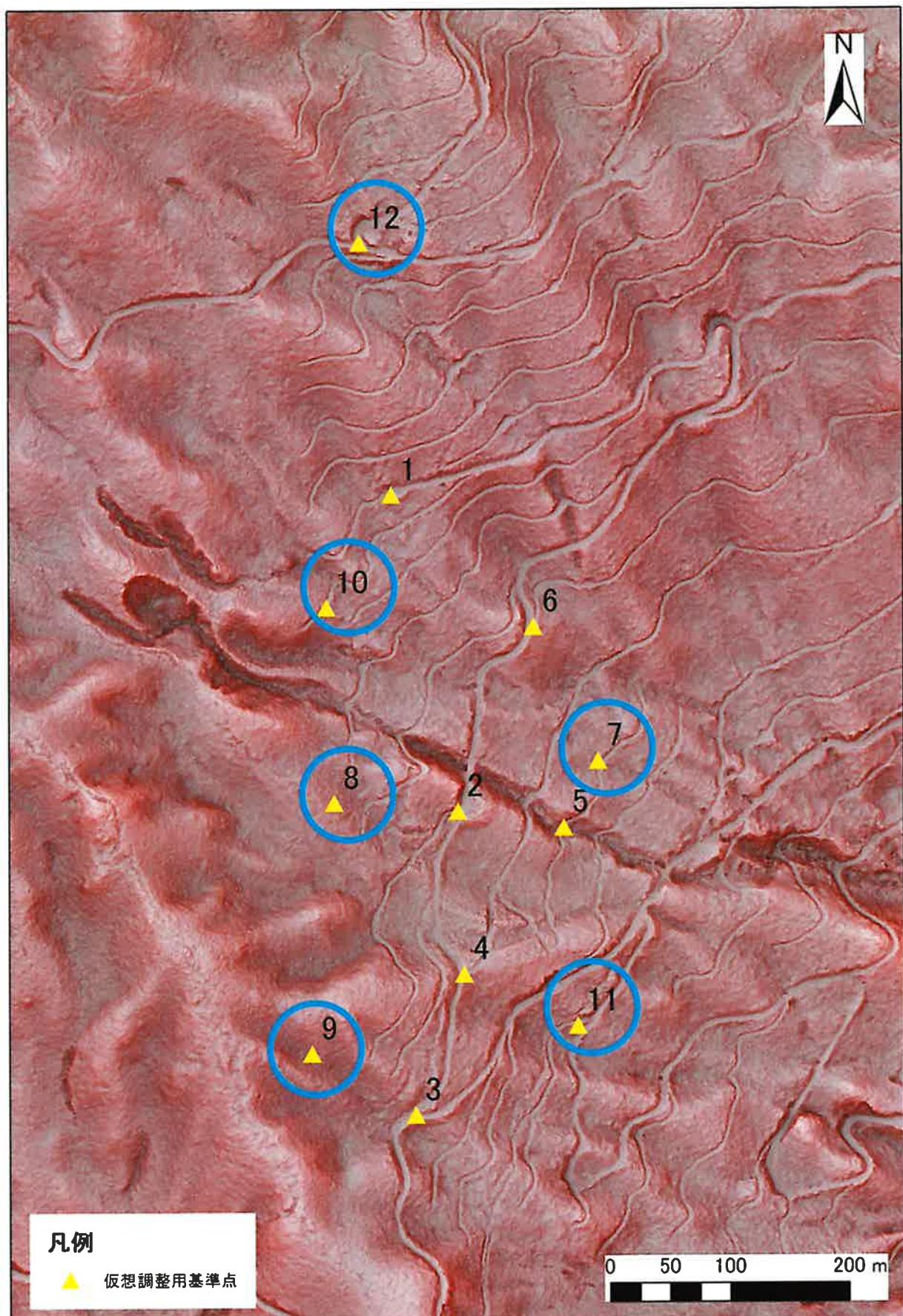


図 2-85 GCP 設置箇所（12 点）

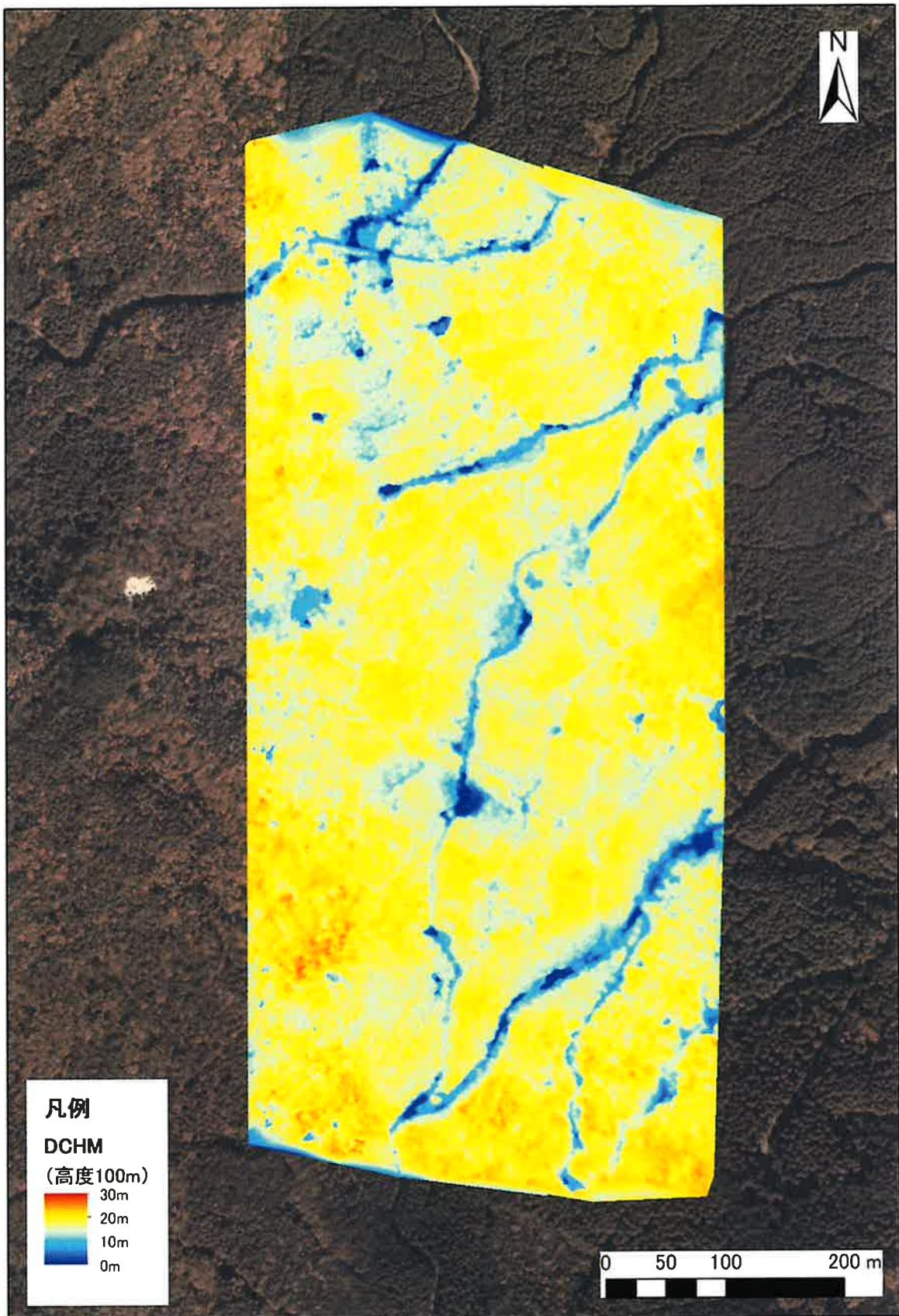


図 2-86 GCP12 点時の DCHM (間伐前/100m)

#### 4. 高度の違いによる森林資源解析結果の比較検討

UAV 写真計測では対地高度を 50m と 100m の 2 パターンに分けて計測を行った。対地高度が高いほど面積当たりの撮影の効率と SfM 解析の効率がよくなり撮影コストが低くなるが、地上解像度が低くなっていくため正確な樹冠の高さデータを計測できない可能性が考えられた。そのため、高度 50m と高度 100m のデータを比較することで UAV 写真計測による森林資源解析に最適な高度の検討を行った。

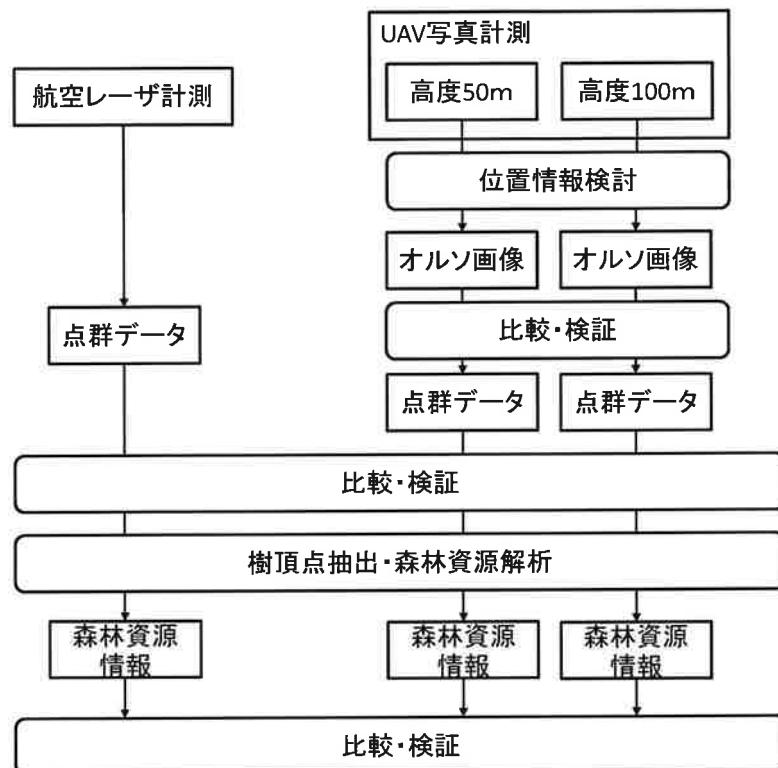


図 2-87 比較検討フロー

### (1) オルソ画像について

間伐前の高度 50m と高度 100m のオルソ画像について比較をした。高度 50m で計測を行った場合には写真枚数は 412 枚となり、地上解像度は 1.84cm であった。また、計測を行った 2016 年 11 月 28 日 13 時 15 分頃の太陽高度は 28.67 度、太陽方位は 205.84 度であった。UAV により計測した写真の一例を図 2-88 に示す。高度 100m で計測を行った際には写真枚数 279 枚となり、地上解像度はおよそ 3.69cm であった。また、計測を行った 2016 年 11 月 28 日 14 時 15 分頃の太陽高度は 22.07 度、太陽方位は 219.46 度であった。計測した写真の一例を図 2-89 に示す。



図 2-88 計測した写真（高度 50m）

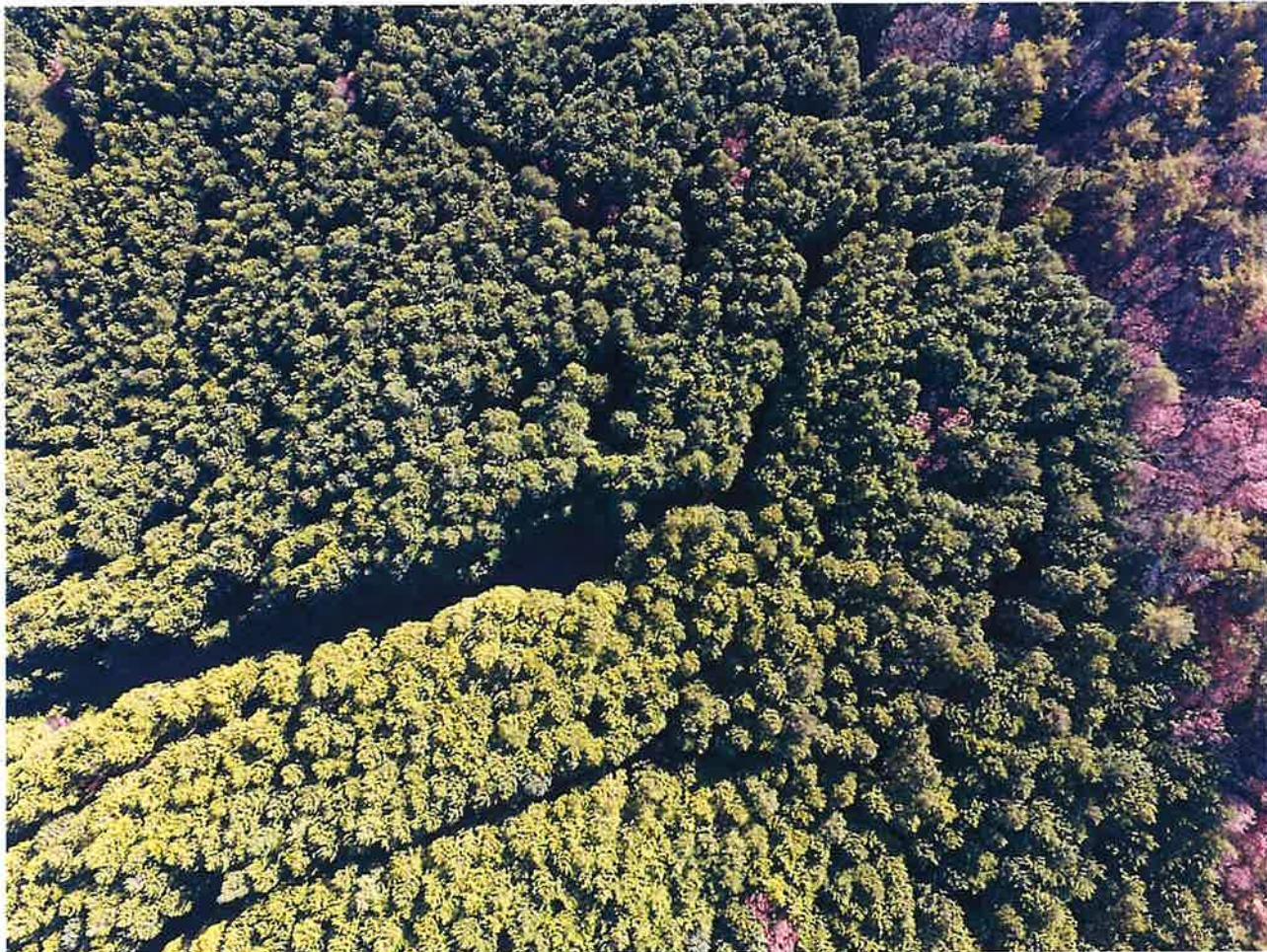


図 2-89 計測した写真（高度 100m）



図 2-90 拡大図 (左図：高度 50m、右図：高度 100m)

高度 50m では地上解像度 1.8cm で計測を行い、オルソ画像の解像度は 3.4cm となった。高度 100m では地上解像度 3.7cm で計測を行い、オルソ画像の解像度は 5.1cm となった。高度が低く、地上解像度がより高いほうが高解像度のオルソ画像を作成できることを確認した。



図 2-91 オルソ画像（間伐前/50m）

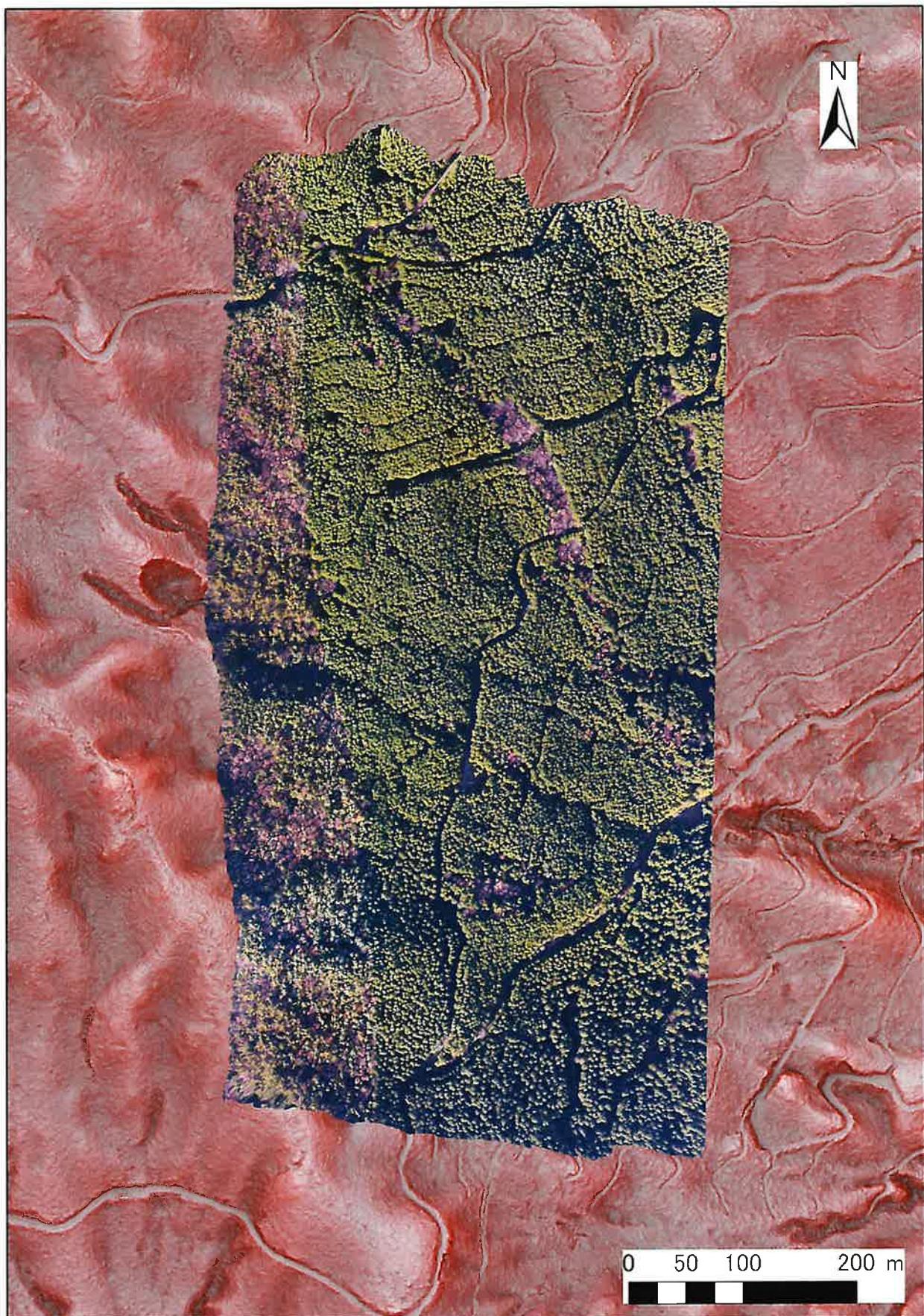


図 2-92 オルソ画像（間伐前/100m）

高度 50m では解像度 3.4cm であり、落葉した広葉樹の枝が明瞭であったが、高度 100m では解像度は 5.1cm となり不明瞭であった（図 2-93 - 1）。また、オルソ画像は影部が少なく、色調が一様な画像が求められる。13 時 15 分頃に計測した場合（図 2-93 - 2 左図）には林道に日光がさしている箇所があり、色調が一様ではなかった。14 時 15 分頃に計測した場合（図 2-93 - 2 右図）には林道が一様になっていた。

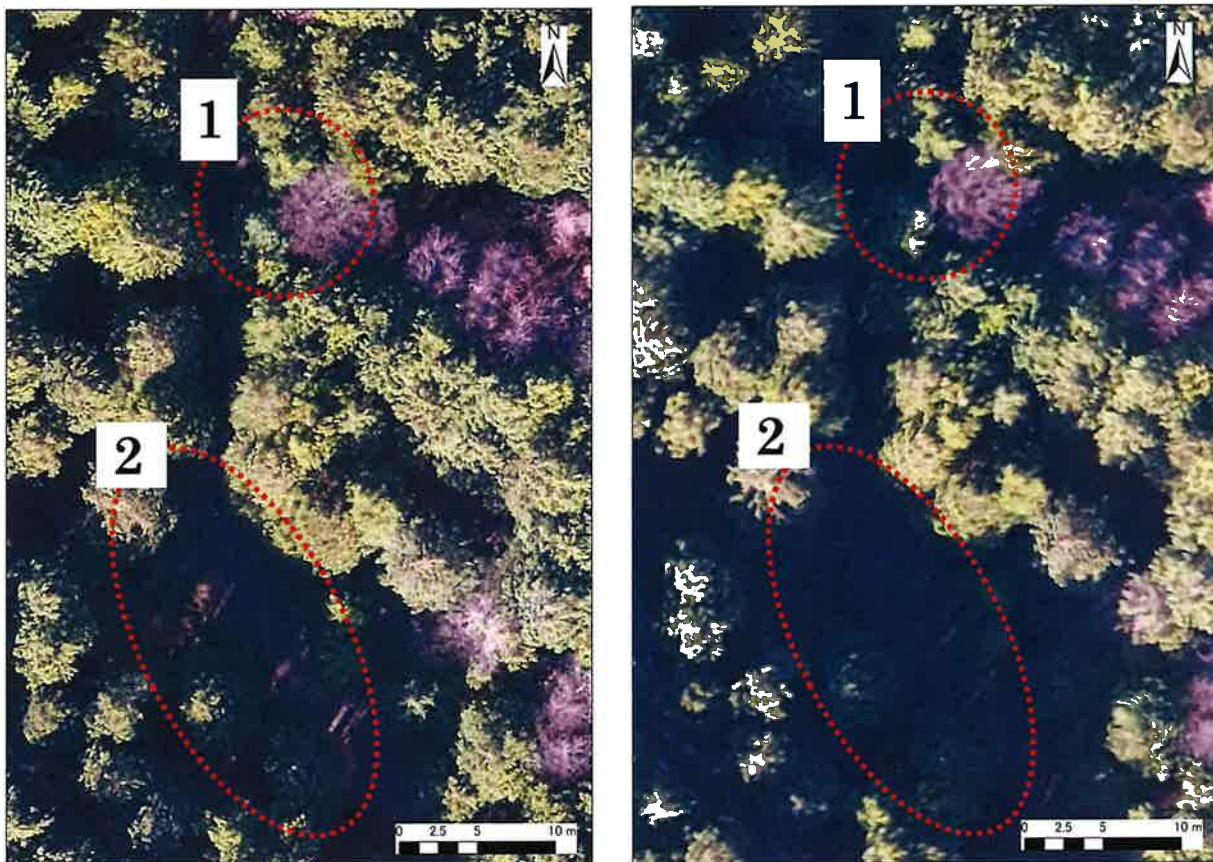


図 2-93 オルソ画像①（左図：高度 50m、右図：高度 100m）



図 2-94 オルソ画像② (左図：高度 50m、右図：高度 100m)

## (2) 樹冠データについて

UAV 写真計測での点群密度は高度 50m で平均 120 点/ $m^2$ 、最大は 1,089 点/ $m^2$ 、高度 100m で平均 47 点/ $m^2$ 、最大は 439 点/ $m^2$ となつた。また、高度 50m、100m どちらにも 0 点/ $m^2$ の箇所がみられる。点群密度の分布を図 2-95 に示す。

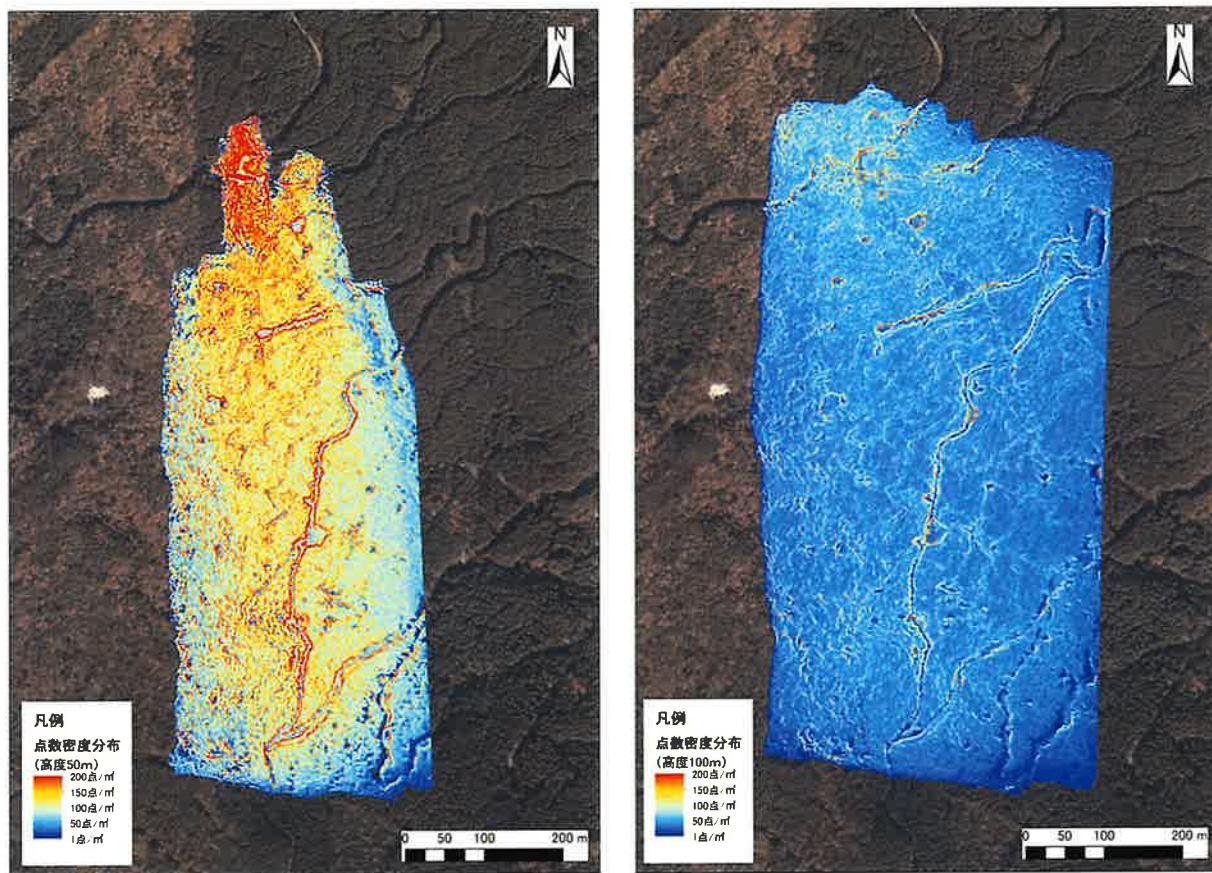


図 2-95 点数密度分布（左図：高度 50m、右図：高度 100m）

高度 50m では高度 100m よりも作成された点群の密度が 2 倍から 3 倍高くなつてゐた。また、高度 50m、100m ともに林道付近で極端に点群密度が高くなつてゐた。これは三次元的にサーフェスが作成され、林縁では樹冠に沿つて Z 軸方向にサーフェスが作成されるためであり、その結果点群密度が高くなつた。点群密度は航空レーザ計測よりも高く取得できたが、航空レーザ計測の照射密度に合わせ、DSM、DCHM、樹冠形状指数のデータは解像度 0.5m で作成した。

航空レーザ計測により作成した DCHM を図 2-96 に示し、UAV 写真計測により作成した DCHM を図 2-97、図 2-98 に示した。

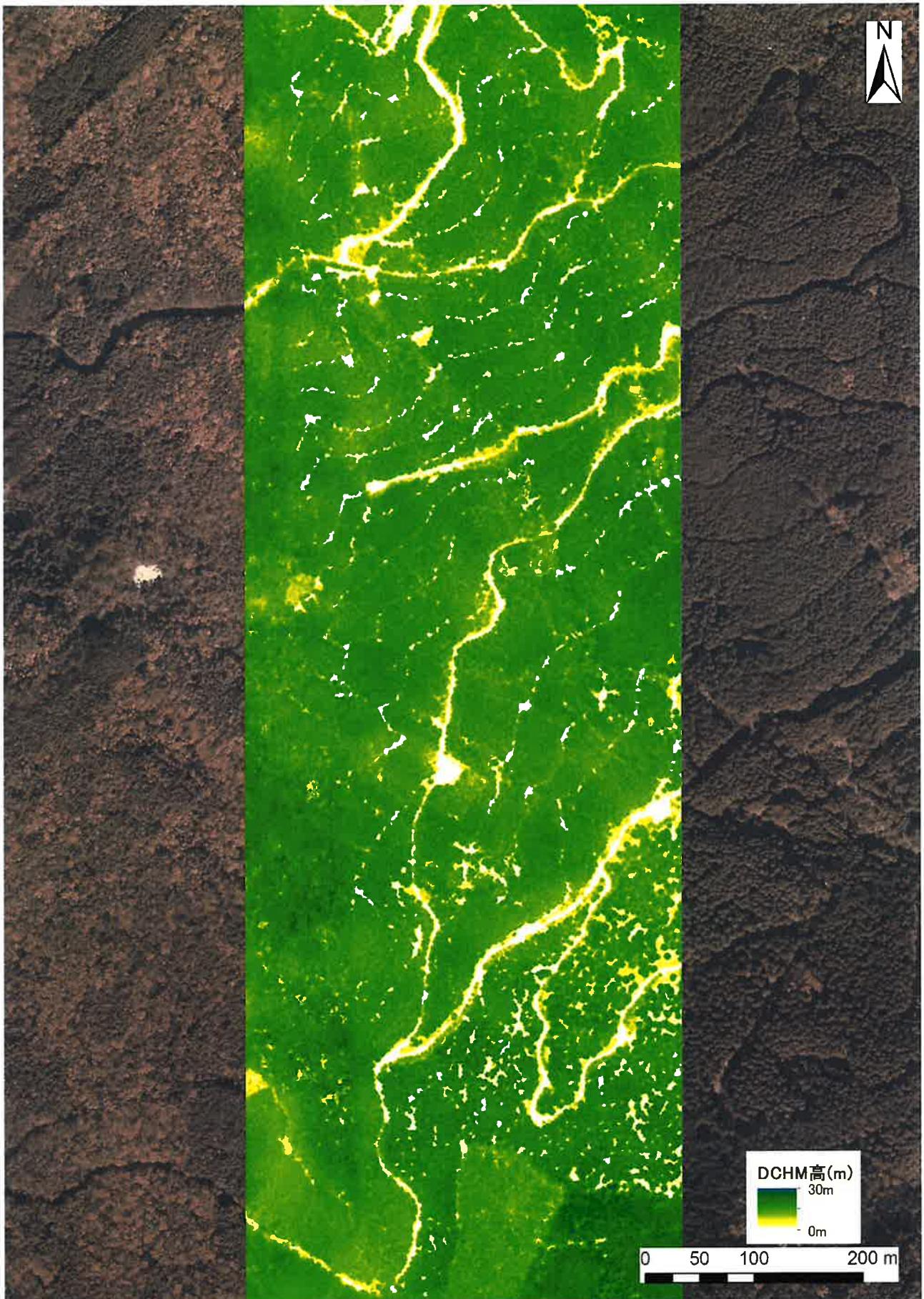


図 2-96 DCHM (レーザ)

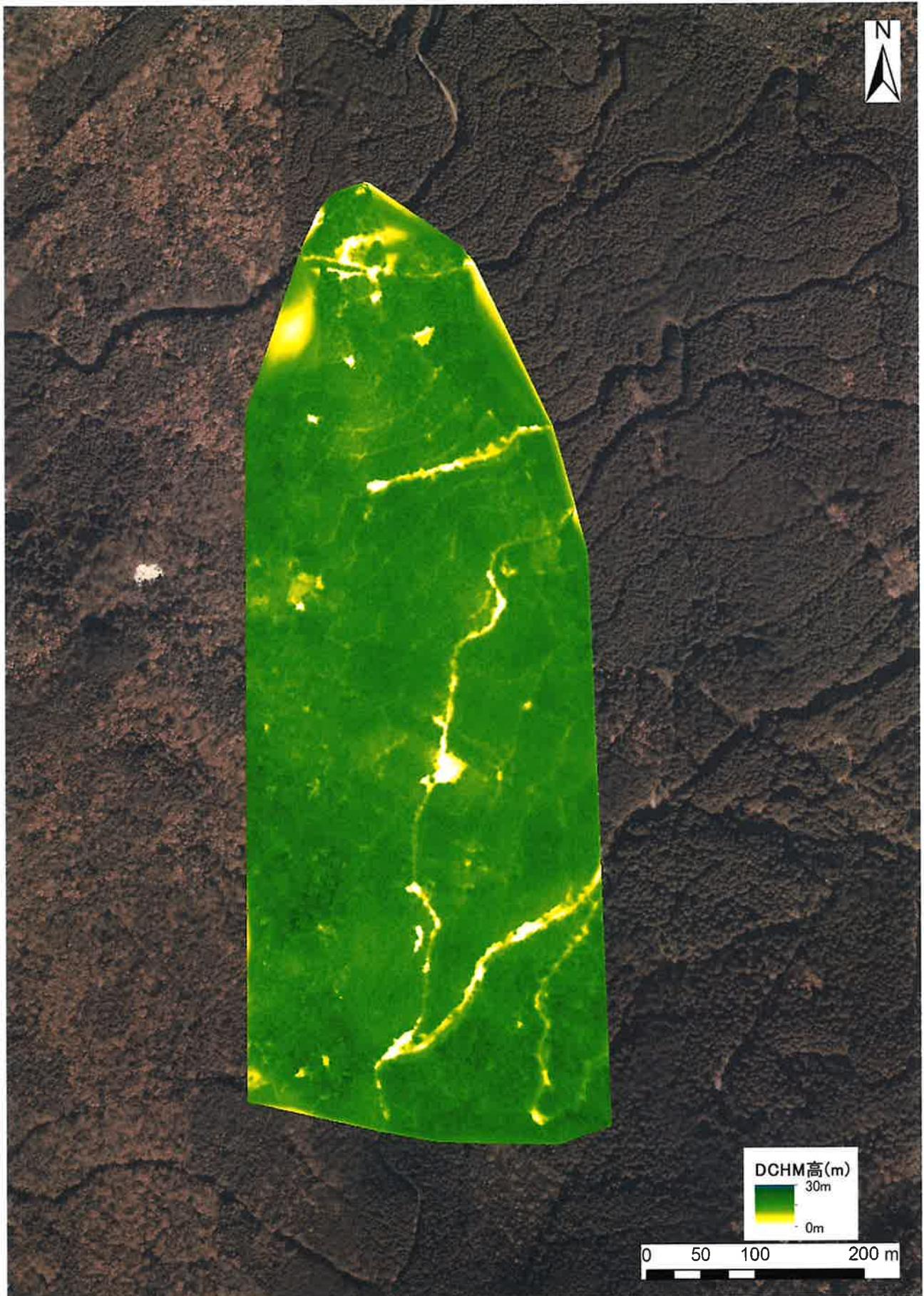


図 2-97 DCHM (間伐前/50m)

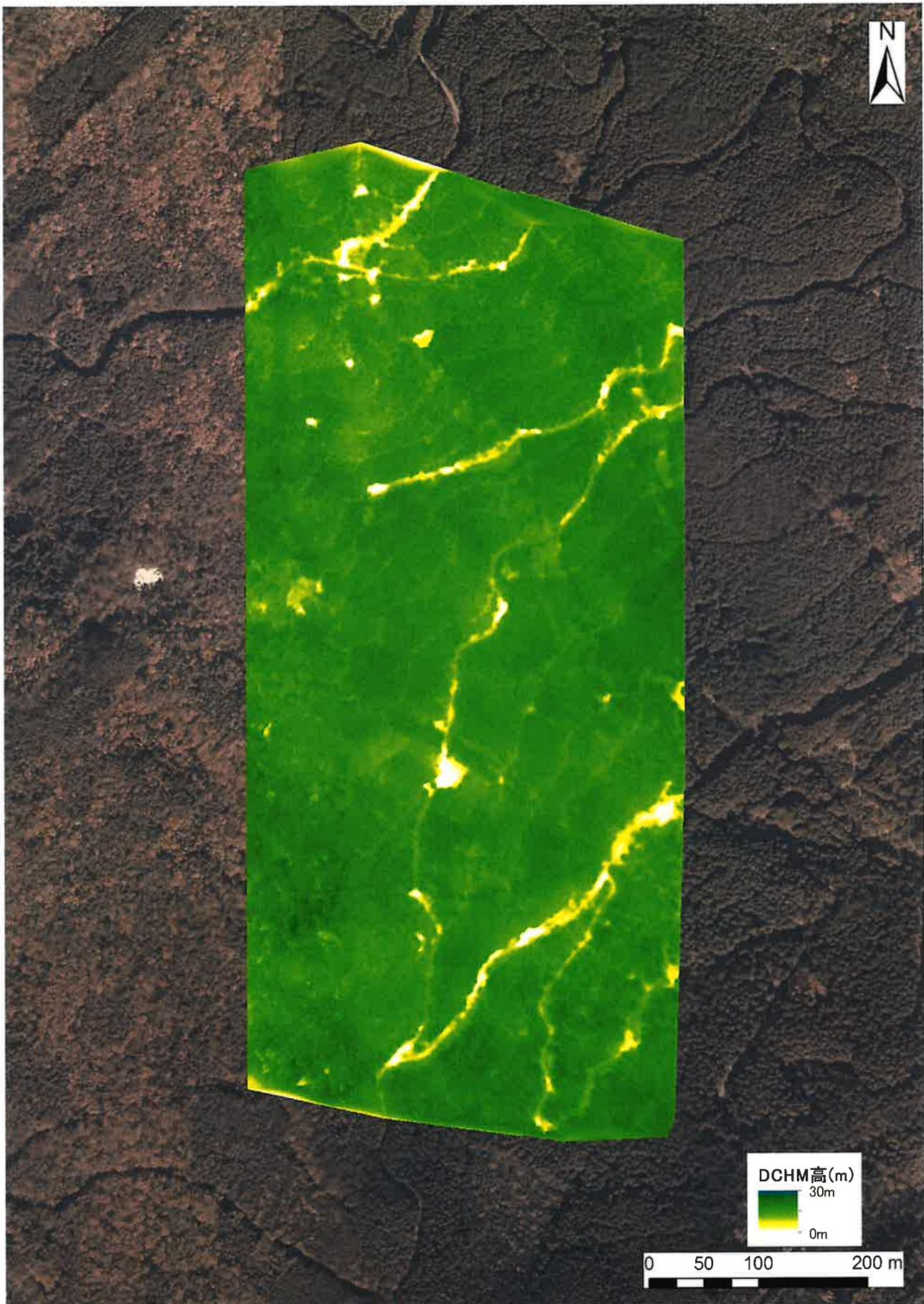


図 2-98 DCHM (間伐前/100m)

航空レーザ計測の DCHM と UAV 写真計測の DCHM を比較する。1 本の樹木における樹頂点の高さと樹冠縁の高さの高低差を比較したところ、航空レーザ計測の DCHM よりも UAV 写真計測の DCHM のほうが差は小さくなつた。航空レーザ計測の DCHM よりも樹冠のうち樹頂点と樹冠縁の高低差が小さくなつた。レーザでは地盤面となっているギャップでも UAV 写真計測については写真の倒れこみや、影部でのマッチングの影響により地盤面が計測できず、樹冠部と同じ高さとなつてゐた。高度 50m の DCHM と高度 100m の DCHM を比較すると、高度 50m の DCHM の方が樹冠のうち樹頂点と樹冠縁の高低差がより表現できており、高度 100m よりも航空レーザ計測に近いデータを得ることができたと考える。

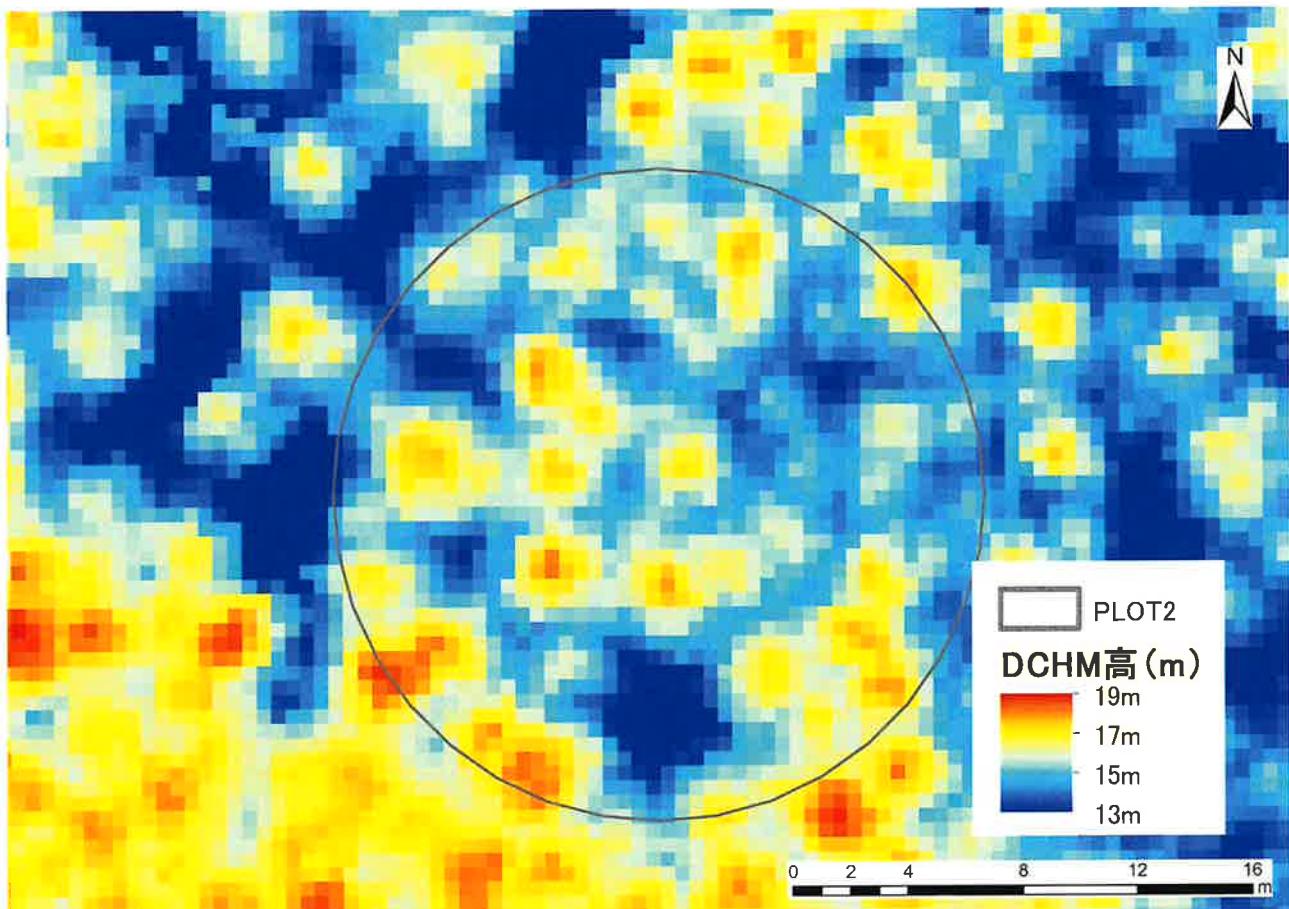


図 2-99 DCHM PLOT2 付近（レーザ）

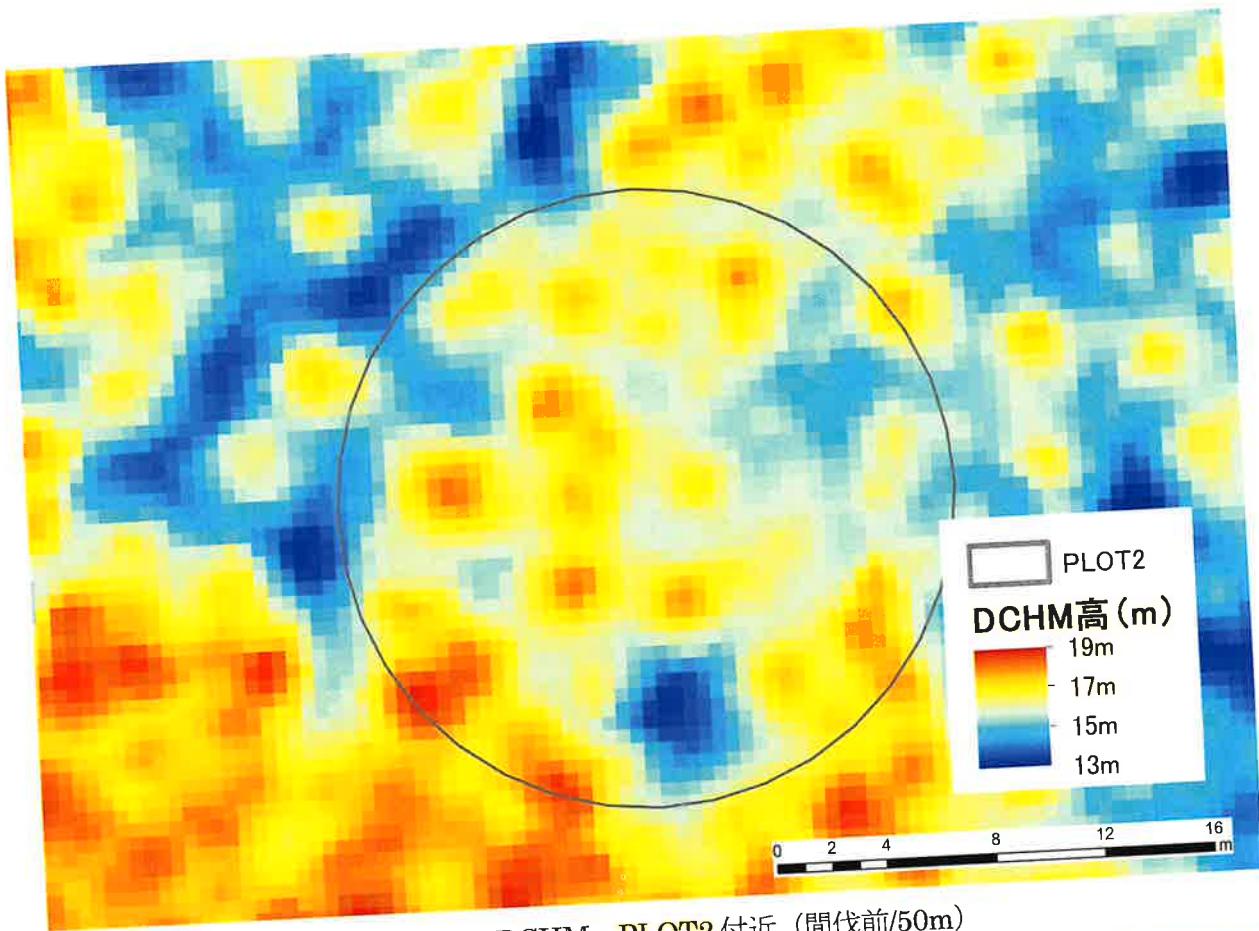


図 2-100 DCHM PLOT2 付近 (間伐前/50m)

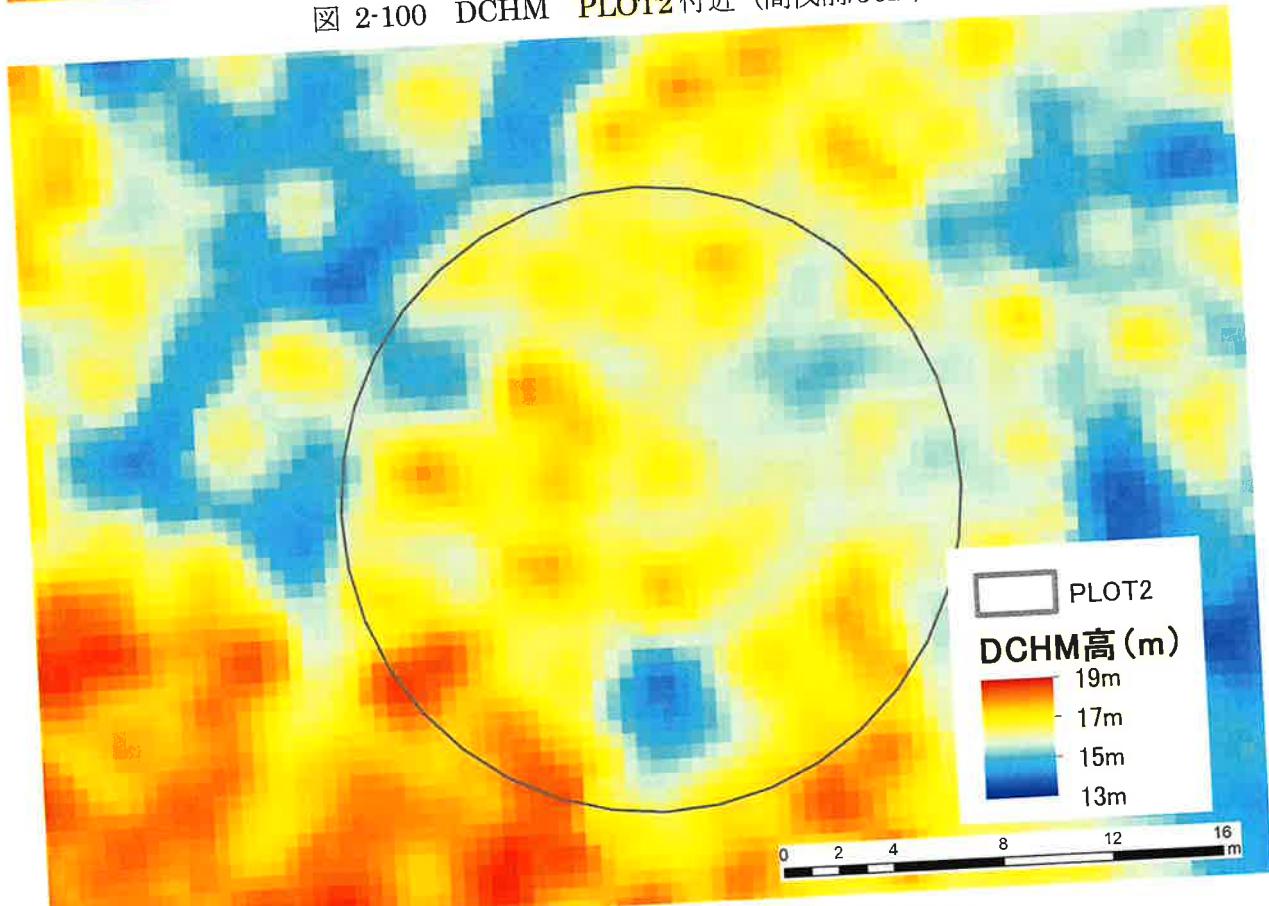


図 2-101 DCHM PLOT2 付近 (間伐前/100m)

航空レーザ計測の DCHM と UAV 写真計測の DCHM の差分解析を行い、航空レーザ計測の DCHM と比較し、高い箇所、低くなる箇所、また水平の位置ずれがないかを確認することができる。基準とする DCHM と比較する DCHM が同じ高さであれば差分は 0 となり、基準 DCHM が比較 DCHM より高い場合にはプラスの値をとり、低い場合にはマイナスの値となる。位置ずれがある場合にはプラスとマイナスの差分が交互になる。

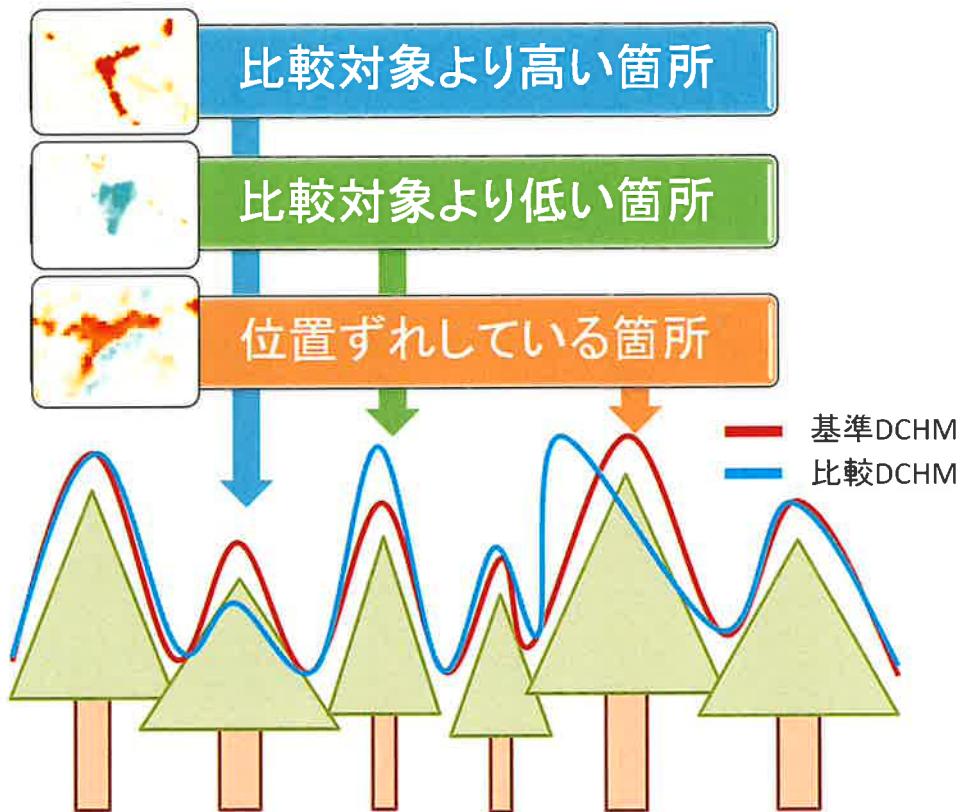


図 2-102 差分解析イメージ図

航空レーザ計測のデータより作成した DCHM を基準とした場合の UAV 写真計測の DCHM の誤差を図示した。高度 50m の UAV 写真計測と航空レーザ計測を比較した結果を図 2-103 に示し、高度 100m の UAV 写真計測と航空レーザ計測を比較した結果を図 2-104 を示す。また、高度 50m を基準とし高度 100m と比較した結果を図 2-105 に示す。

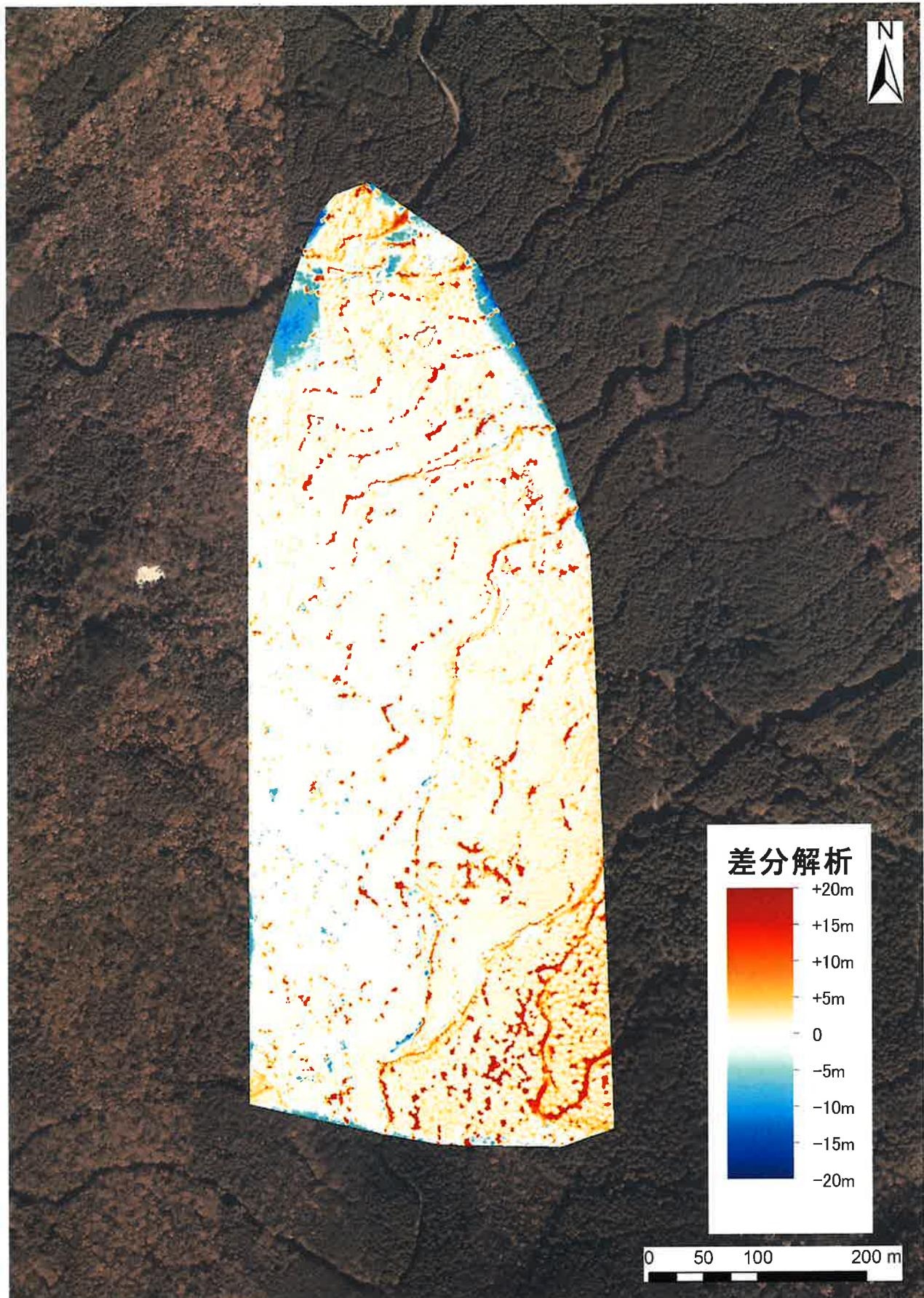


図 2-103 差分解析結果（間伐前/50m—レーザ）

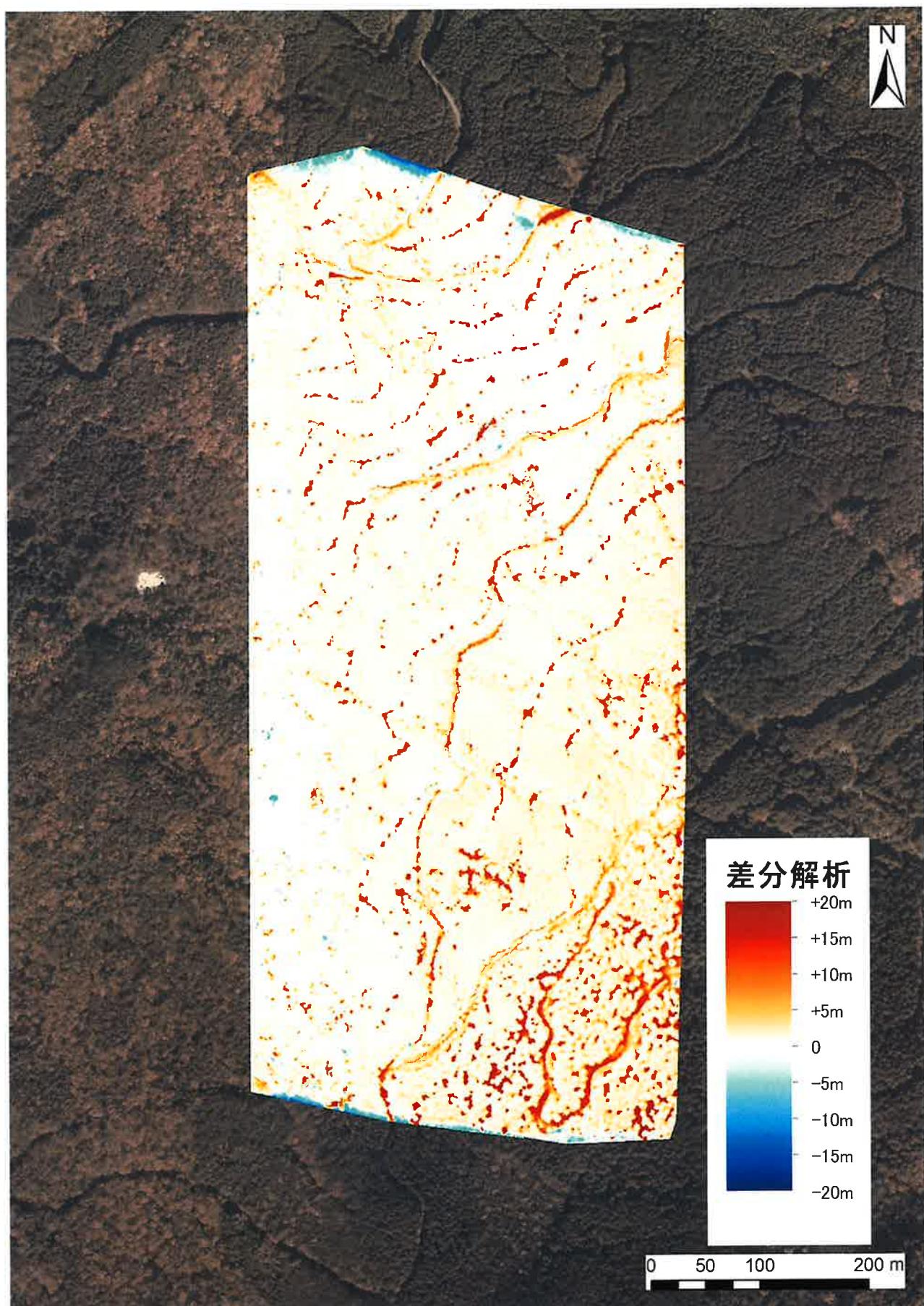


図 2-104 差分解析結果（間伐前/100m レーザ）

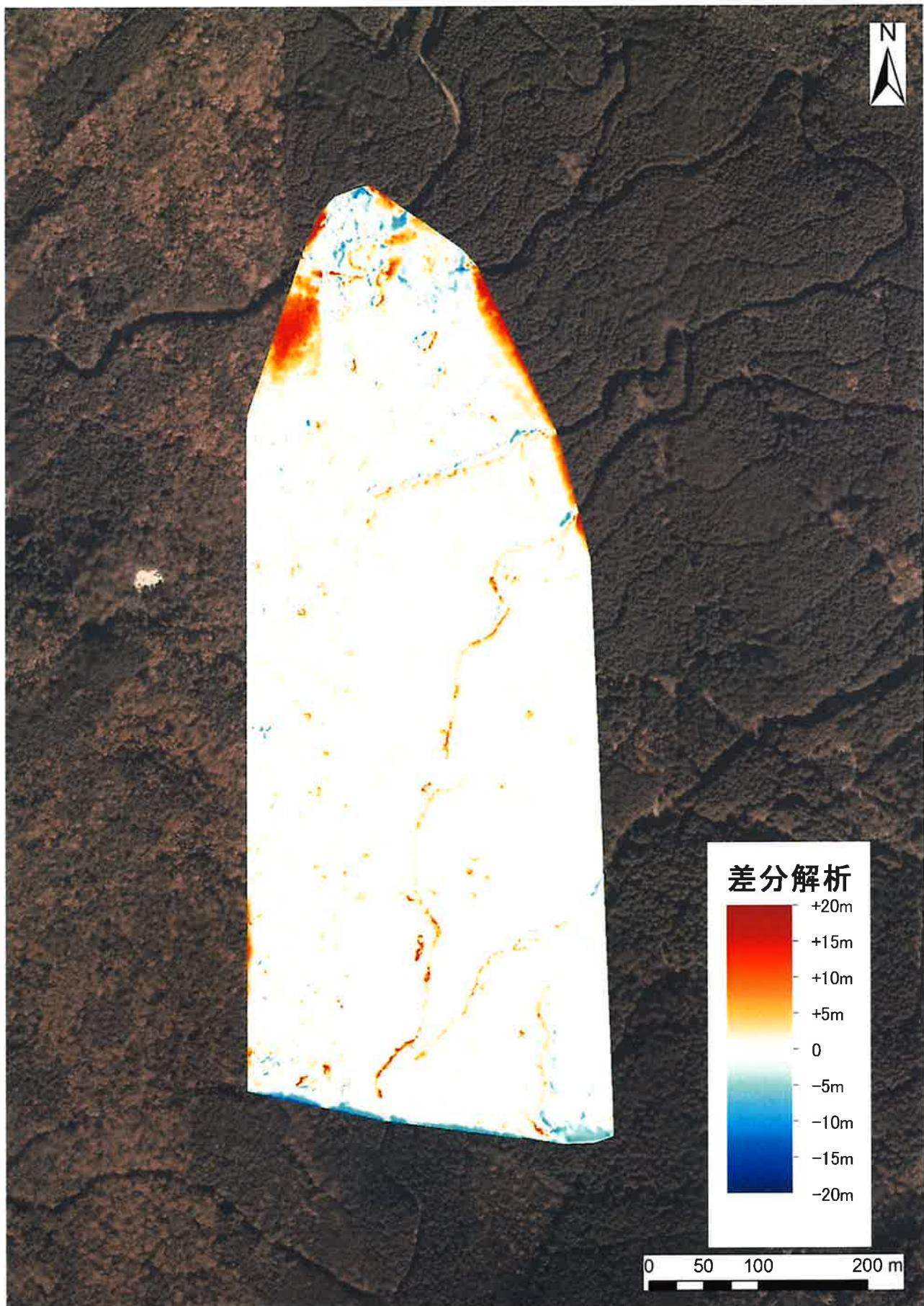


図 2-105 差分解析結果（間伐前/100m－間伐前/50m）

レーザと間伐前・高度 50m の差分解析により、樹冠部のうち樹頂点付近ではマイナスの値となり、樹冠縁付近ではプラスの値をとった。レーザと間伐前・高度 100m の差分解析でも同じ傾向がみられた。そのため、レーザの DCHM と比較すると UAV 写真計測の DCHM では凹凸の情報が少なくなっている可能性がある。高度 50m と 100m の DCHM の差分解析の結果ではレーザと比較したときよりも差が少ないものの、林道付近では高度 50m のほうがより地盤近くまで DSM を作成できていた。

プロット 2 の南側の差分がプラスに大きい箇所は航空レーザ計測ではギャップの地盤高を計測できているが UAV 写真計測では地盤まで取れなかったと考えられる箇所である。

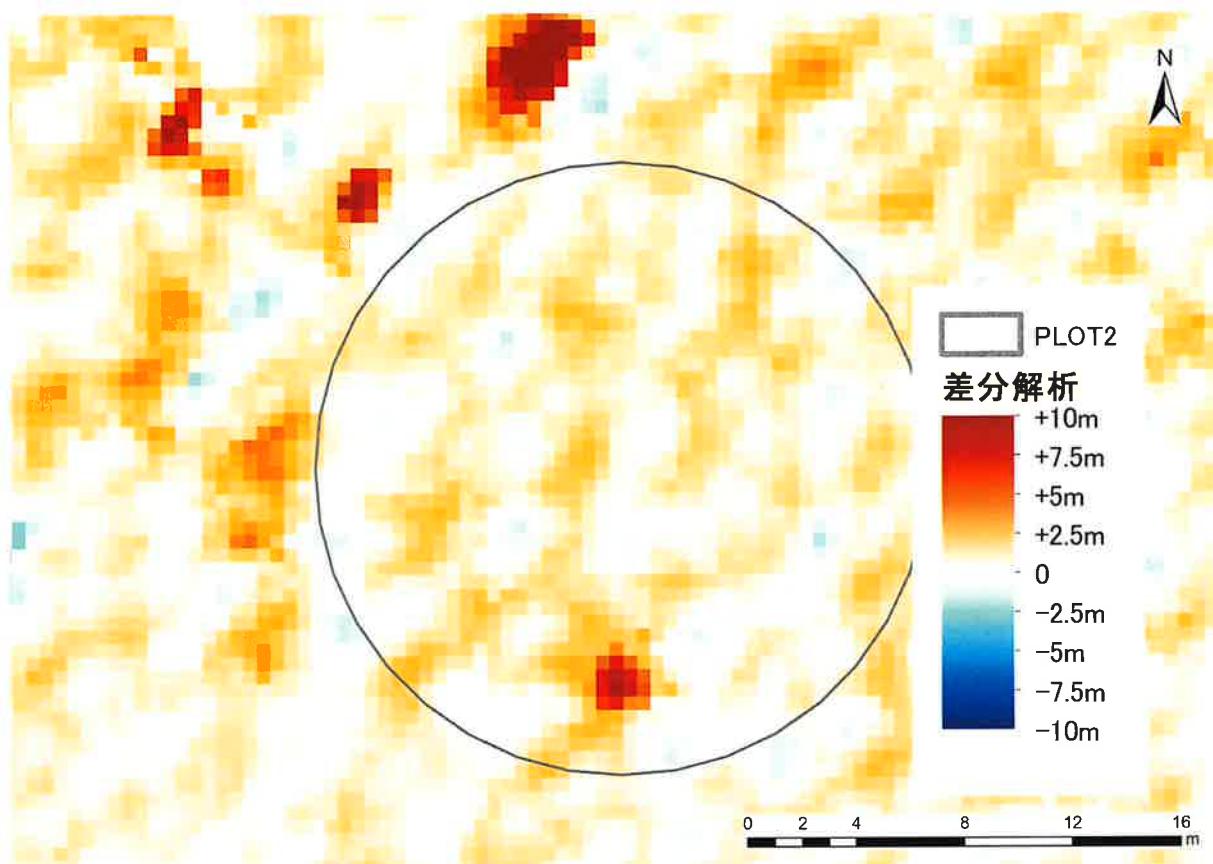


図 2-106 差分解析結果 PLOT2 付近 (間伐前/50m-レーザ)

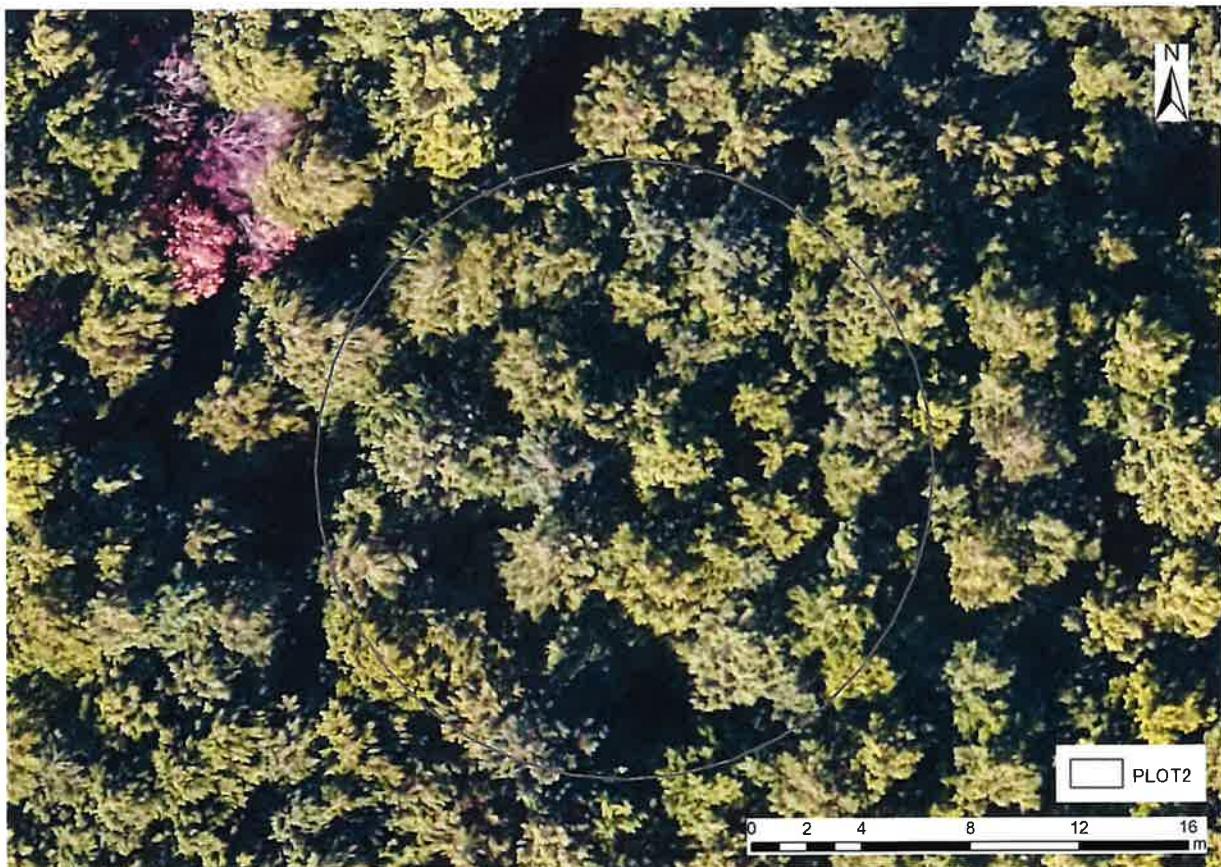


図 2-107 オルソ画像 PLOT2 付近 (間伐前/50m)

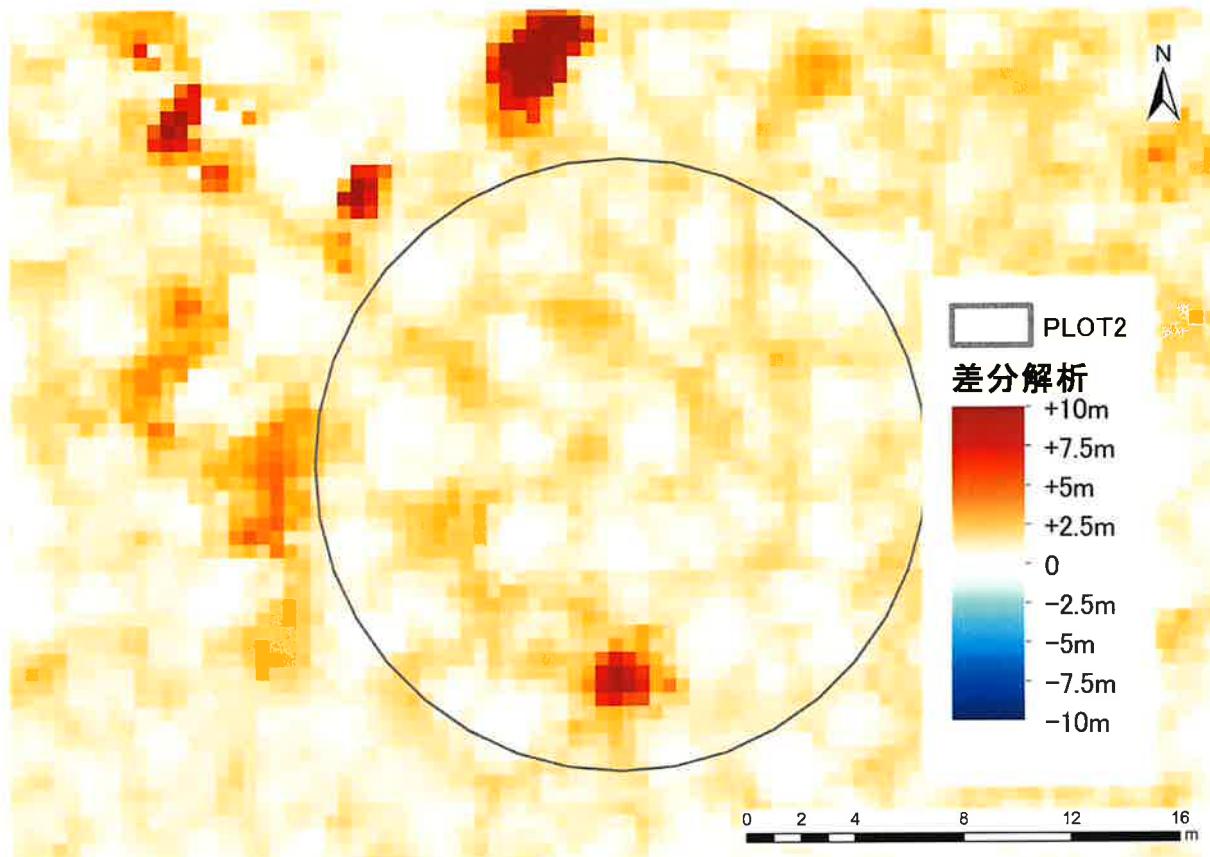


図 2-108 差分解析結果 PLOT2 付近（間伐前/100m－レーザ）

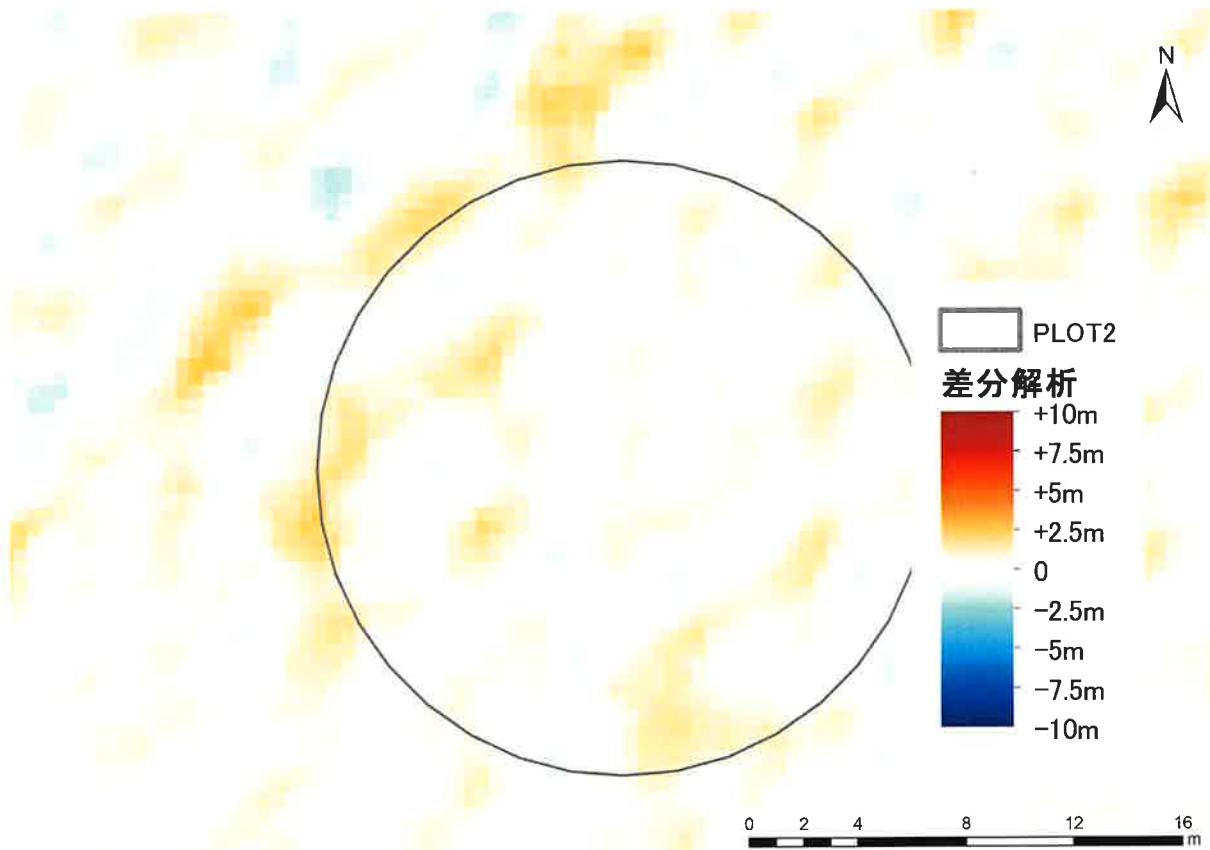


図 2-109 差分解析結果 PLOT2 付近（間伐前/100m－間伐前/50m）

差分解析により UAV 写真計測の DCHM では凹凸の情報が失われている可能性が示唆された。森林資源解析のうち樹頂点抽出、樹頂点抽出は凹凸の情報を用いている。樹頂点抽出に用いる凹凸の情報は樹冠形状指数と呼称し、DCHM の各ピクセルが周囲のピクセルの位置関係より凸形状であれば +70 の数値に近くなり、凹形状であれば -70 の数値に近くなる指標値とした。樹冠形状指数画像を図 2-110、図 2-111 に示す。

図 2-110、図 2-111 より凸部と凹部が明確に分かれることができ確認でき、+70 が樹頂点、-70 が樹冠縁を示す、樹冠形状指数画像を作成できた。しかし、図 2-110、図 2-111 の赤丸で示したような箇所では高度 50m の場合には高度 100m よりも明瞭に単木の樹冠を示している。高度が高くなるに従い、凸部と凹部が不明瞭になり複数の樹冠が一つの樹冠のようになるため、樹頂点抽出が過小な結果になる可能性があった。

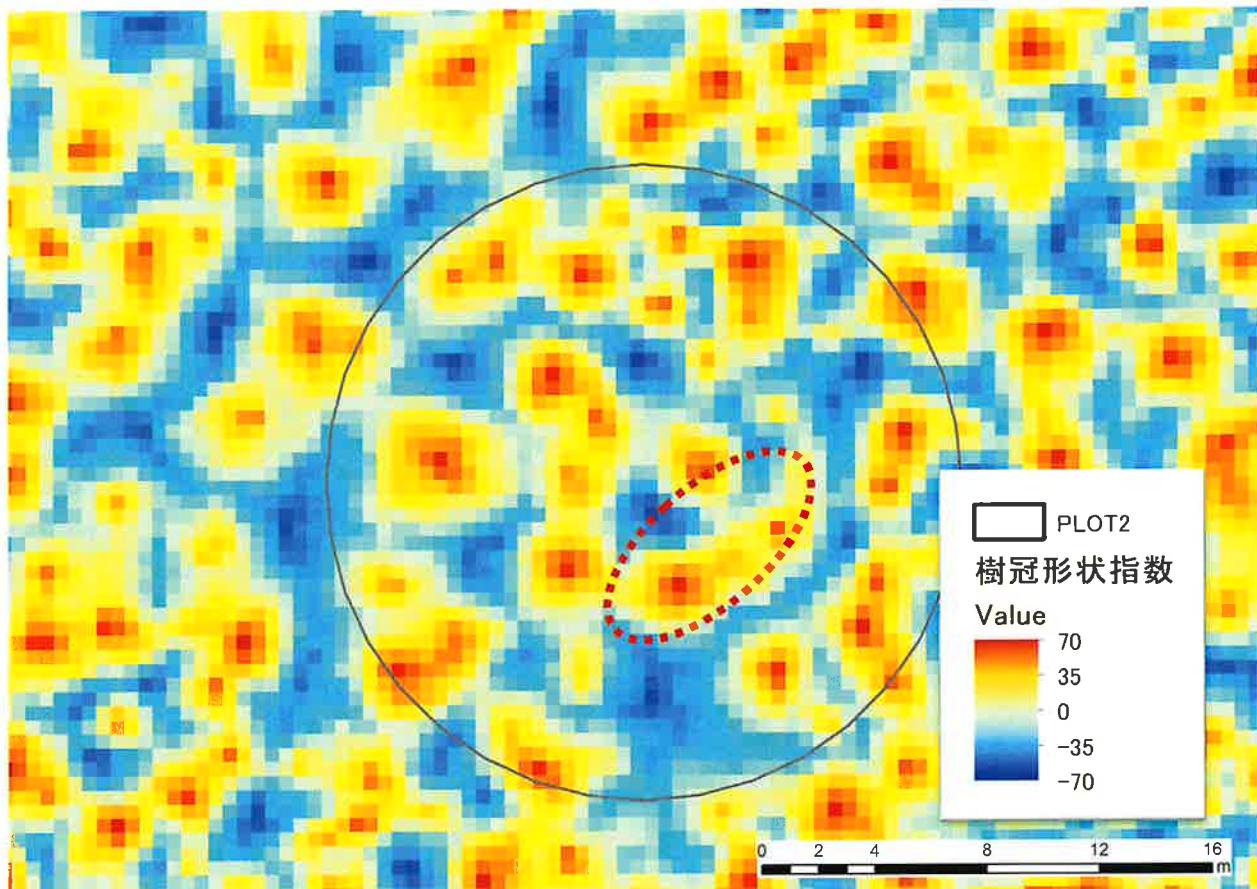


図 2-110 地上開度（高度 50m）

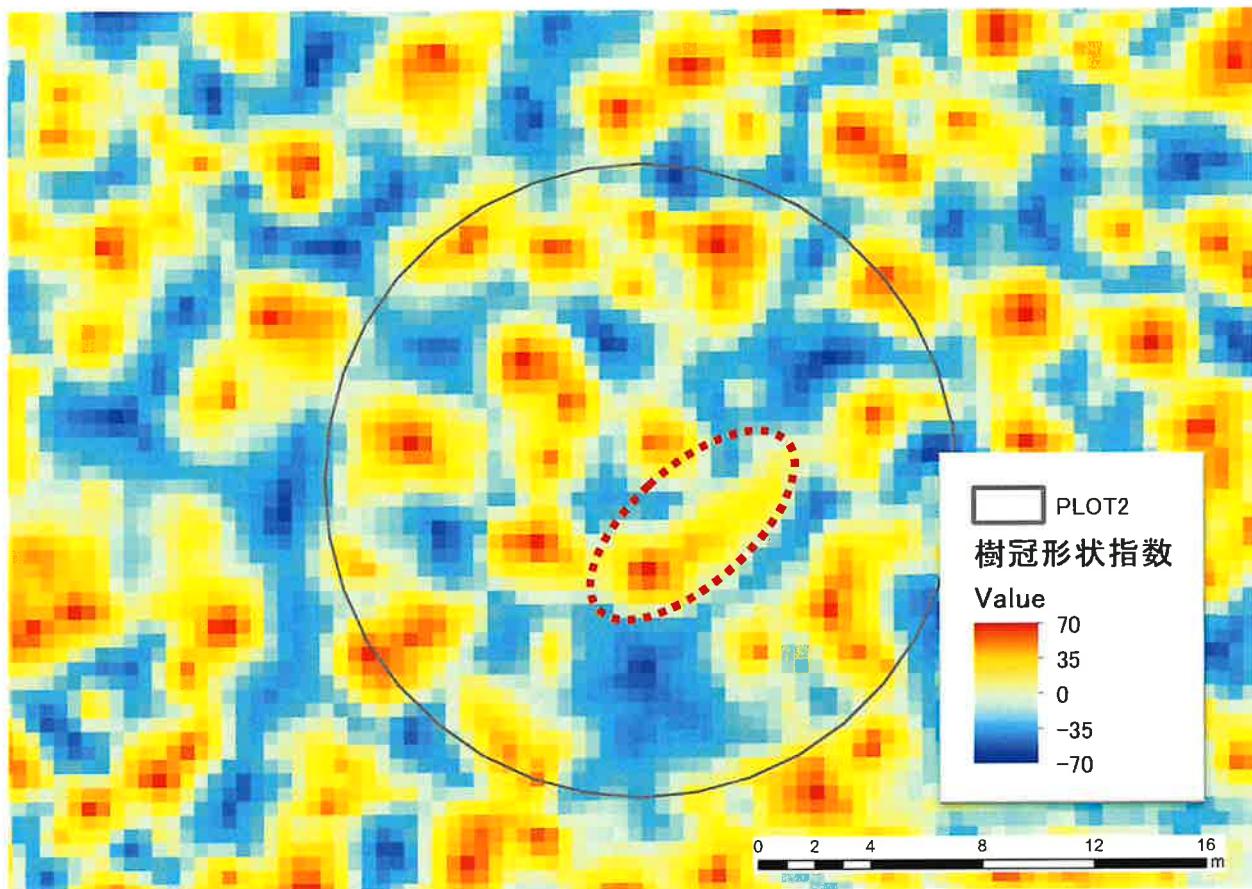


図 2-111 地上開度 (高度 100m)

### (3) 樹頂点データについて

DCHM を用いて樹頂点抽出により樹木の凹凸の情報から樹頂点位置を抽出した。樹頂点抽出はアジア航測株式会社と東京電力株式会社が共同で開発した特許技術（特許第 4279894 号）である。DCHM より樹冠の凹凸を表す樹冠形状指数を算出し、樹冠部抽出する。樹冠部の中で最も DCHM の値が高い箇所を樹頂点として抽出する。樹頂点抽出を行うことで樹木位置とその単木の樹高を求めることができる。

現地調査を行ったプロット 2 付近での樹頂点抽出結果を図 2-112～図 2-114 に示す。樹頂点抽出により算出したプロット 2 内の立木本数は現地調査の立木本数 43 本に対して、航空レーザ計測では 43 本、UAV 写真計測の高度 50m では 34 本、高度 100m では 24 本となった。

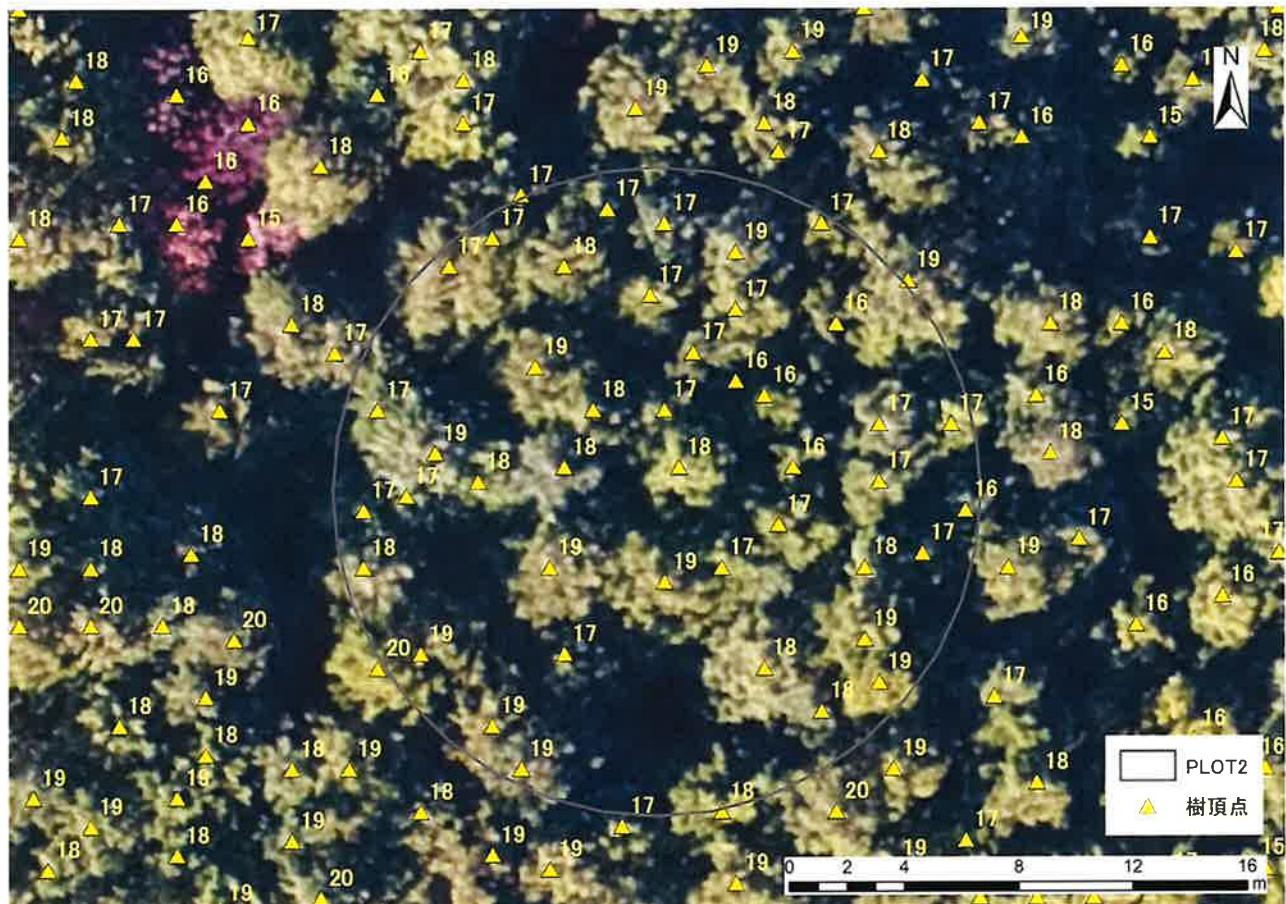


図 2-112 樹頂点抽出結果（レーザ）

※図中の数字は樹高を表す

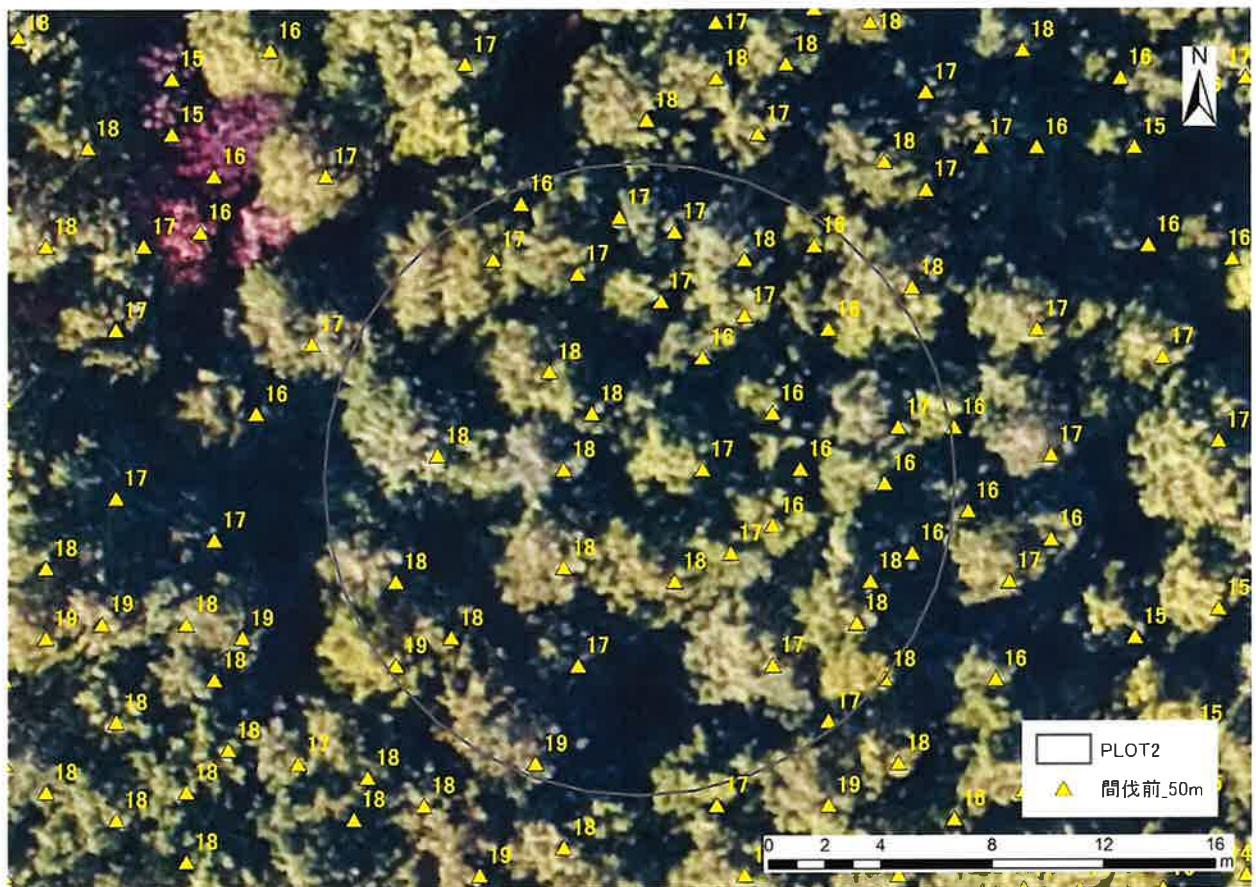


図 2-113 樹頂点抽出結果（間伐前/50m）

※樹高を表示

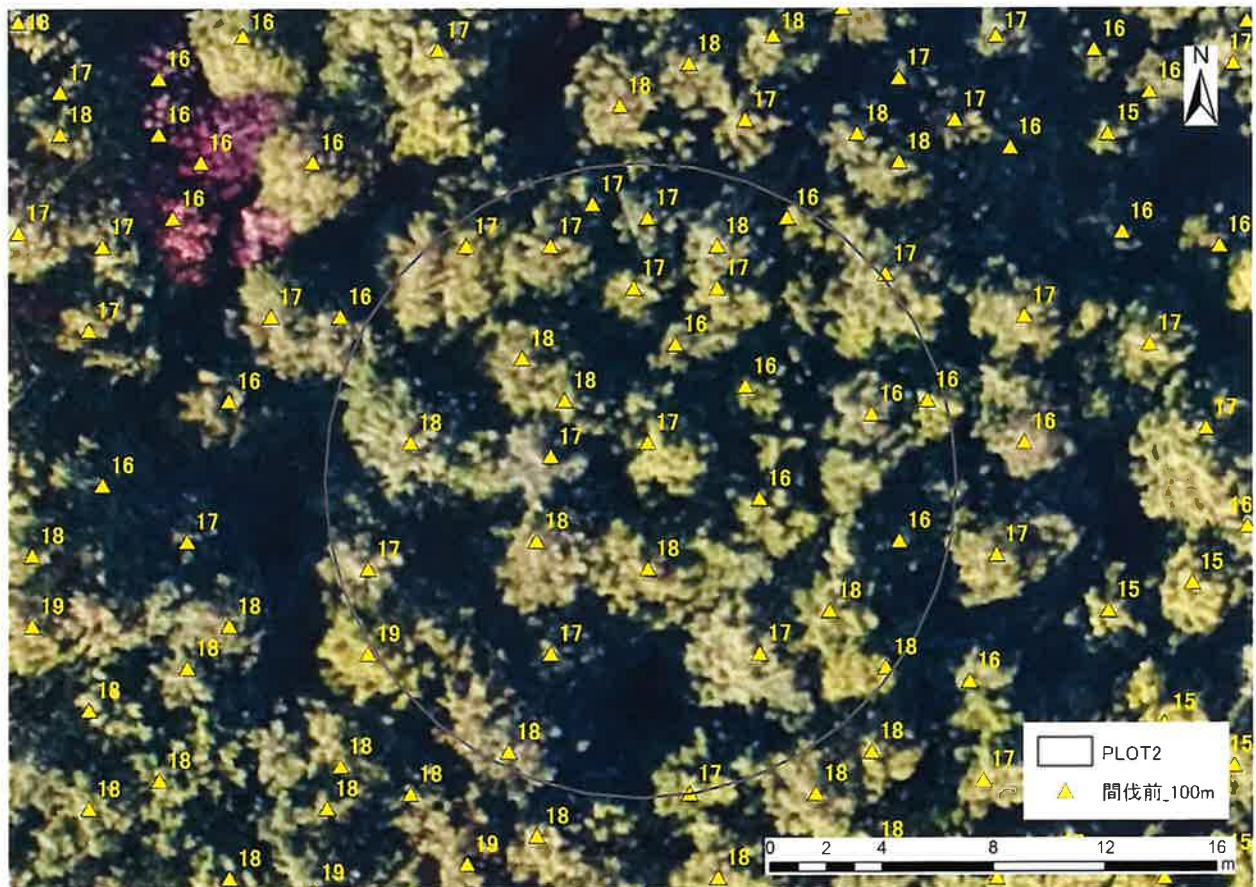


図 2-114 樹頂点抽出結果（間伐前/100m）

※樹高を表示

航空レーザ計測より取得した樹頂点と UAV 写真計測より取得した樹頂点を比較した。樹冠の小さな樹木（図 2-115-1）や樹冠と樹冠が密接しているところ（図 2-115-2）では、UAV 写真計測では樹頂点が抽出できていない箇所がみられた。単木ごとの樹高については航空レーザ計測により算出した値と UAV 写真計測の値に大きな違いはないと考える。

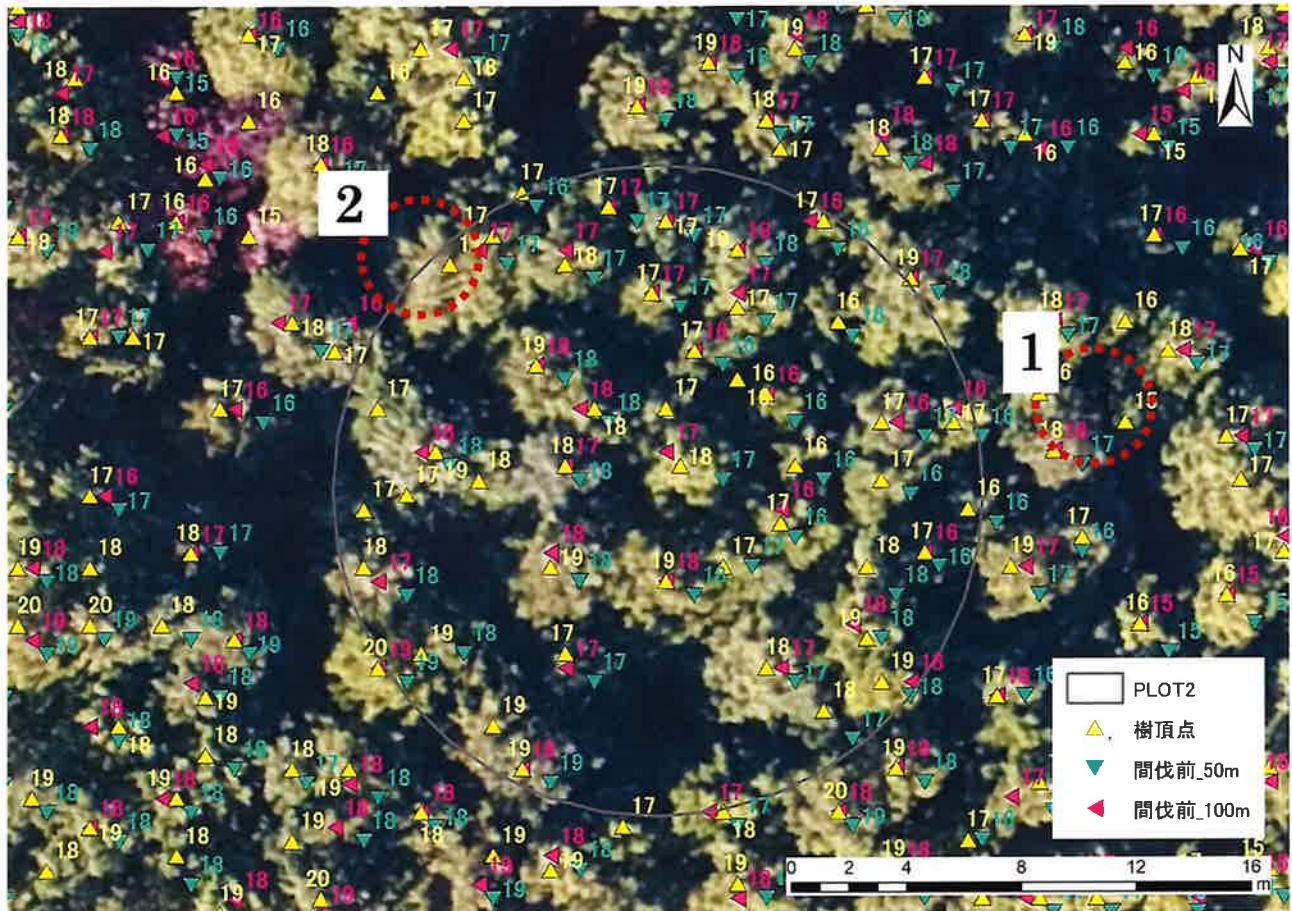


図 2-115 樹頂点抽出結果比較

※樹高を表示

#### (4) 森林資源情報集計結果について

##### 1) 立木本数

航空レーザ計測と UAV 写真計測による立木本数はレーザで 12,615 本、間伐前の UAV 写真計測の高度 50m は 10,147 本、高度 100m は 8,377 本であった（表 2-77）。航空レーザ計測と UAV 計測樹頂点抽出結果を 20m メッシュ（20m×20m の正方形の範囲）で立木本数を集計した結果を図 2-116、図 2-117 より比較したところ、全体の傾向として UAV 写真計測は航空レーザ計測より立木を過少に計測する傾向がみられた。相関係数は 1 に近ければ相関が高く、0 に近ければ相関がないと判断できる。航空レーザ計測の立木本数に対しての相関係数は間伐前の UAV 写真計測では高度 50m が 0.78、高度 100m では 0.75 となった。航空レーザ計測と UAV 写真計測はともにやや強い正の相関関係があった。計測された立木本数が高度 50m では立木密度 3,000 本/ha が算出され、一方高度 100m では立木密度 2,000 本/ha しか算出されなかったことと、加えて相関係数と決定係数から、航空レーザ計測に対する UAV 写真計測の立木本数の抽出精度は高度 50m の方が良いと考えられる。

表 2-77 立木本数の算出結果

		立木本数(本)	割合(%)
航空レーザ計測		12,615	
UAV写真計測	間伐前/高度50m	10,147	80
	間伐前/高度100m	8,377	66

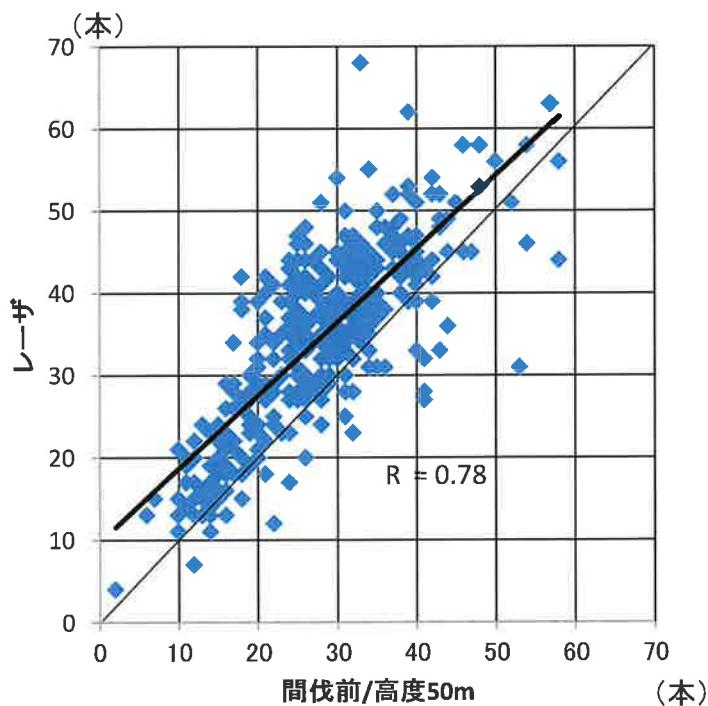


図 2-116 航空レーザ計測と UAV 写真計測（高度 50m）の立木本数の比較

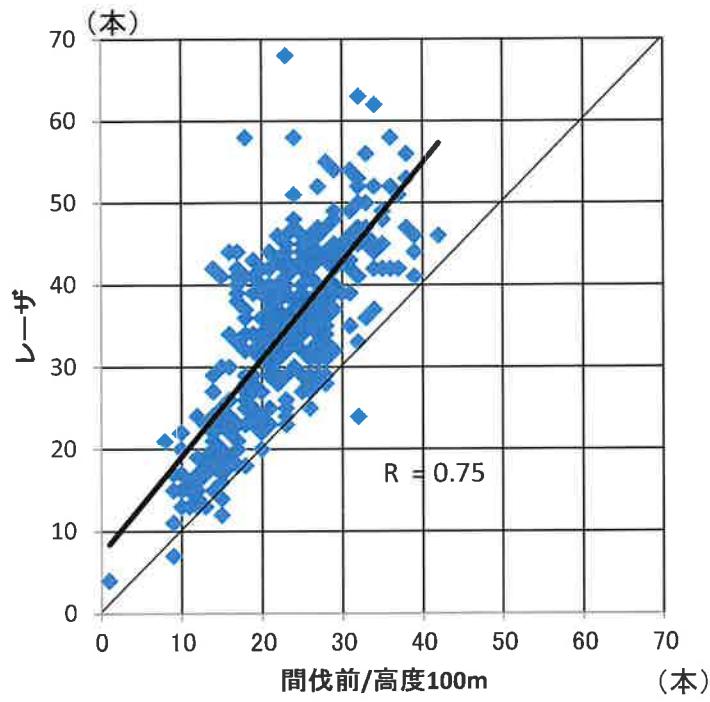


図 2-117 航空レーザ計測と UAV 写真計測（高度 100m）の立木本数の比較

航空レーザ計測と UAV 写真計測を 20m メッシュで集計した結果を図 2-118、図 2-119、図 2-120 に示す。航空レーザ計測と UAV 写真計測の結果を比較すると、北側では立木密度が高い箇所についても UAV 写真計測の高度 50m では抽出できていた。一方、中央付近から南側にかけては、UAV 写真計測の立木本数は航空レーザ計測よりも少なく抽出されていた。南側に行くほど UAV の高度が高くなっていたことにより地上解像度が粗くなり、樹頂点抽出の誤差が大きくなしていく傾向があると考える。また、最南部の立木密度が低い箇所については航空レーザ計測と同じ結果を得ることができたため、立木密度と地上解像度が樹頂点抽出の精度に影響していると考えられる。20m メッシュで集計した結果から UAV 写真計測で高度 50m の方が高度 100m よりも航空レーザ計測に近い計測が可能であった。

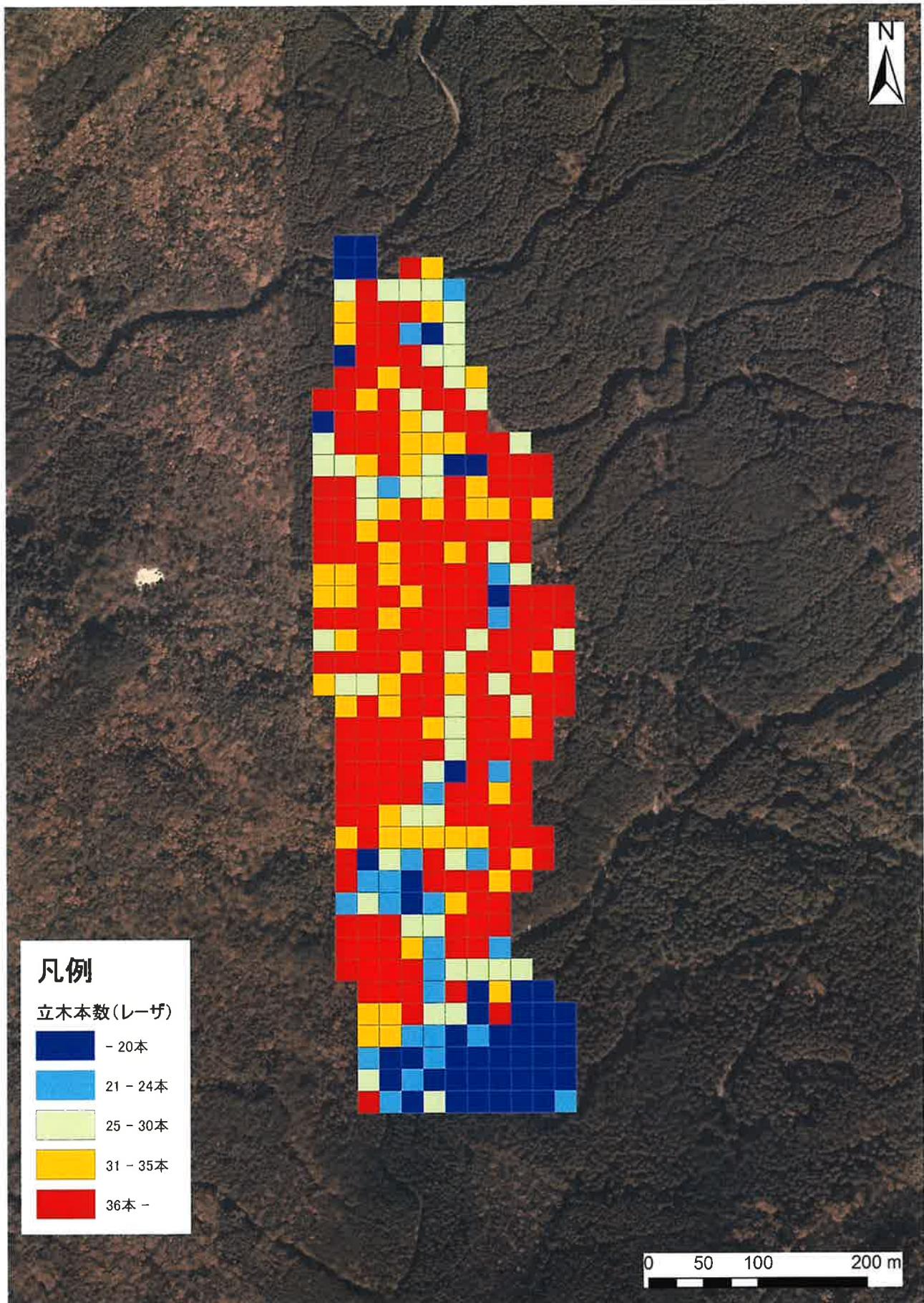


図 2-118 20m メッシュによる立木本数集計結果（航空レーザ計測）

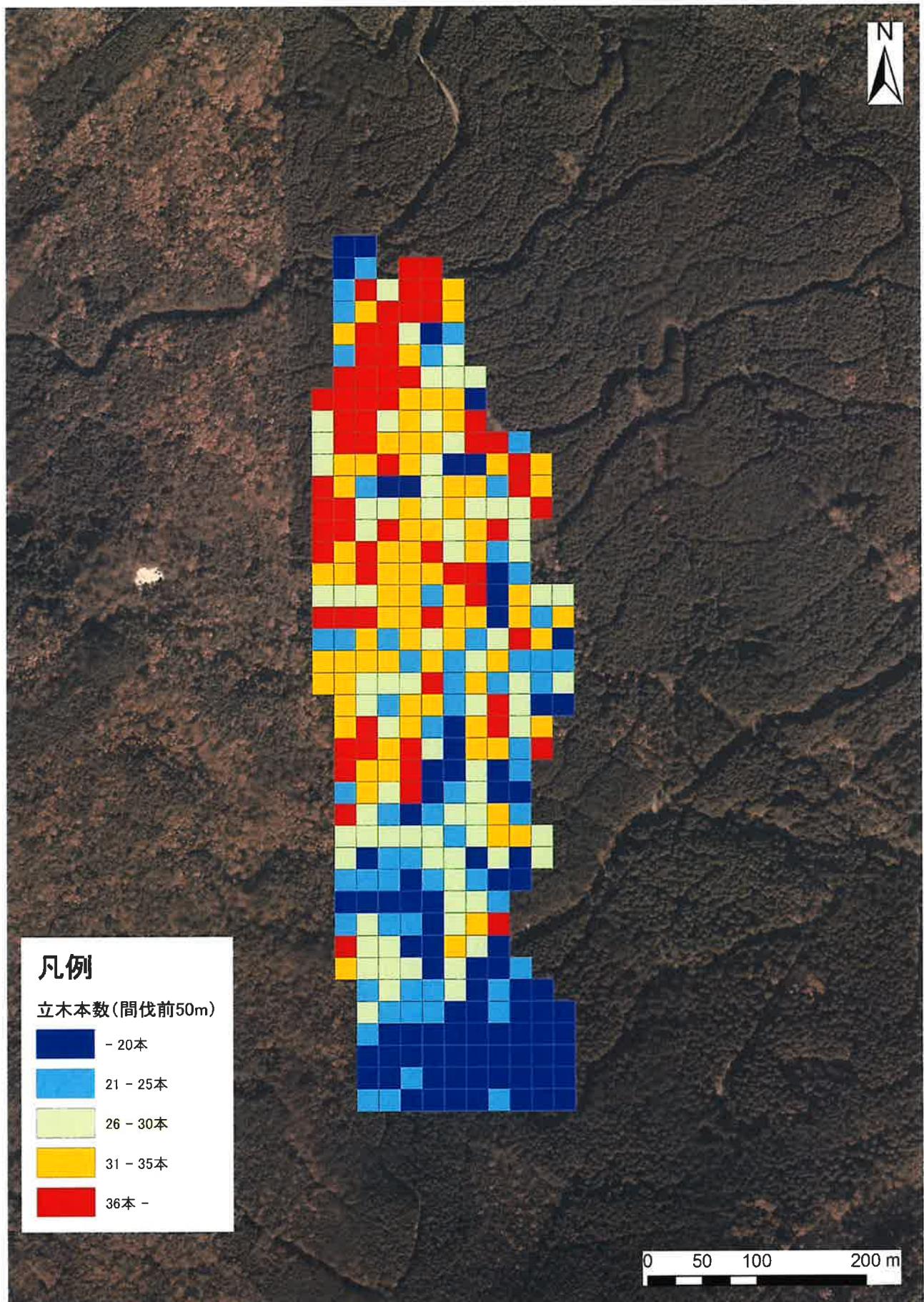


図 2-119 20m メッシュによる立木本数集計結果 (UAV 写真計測 高度 50m)

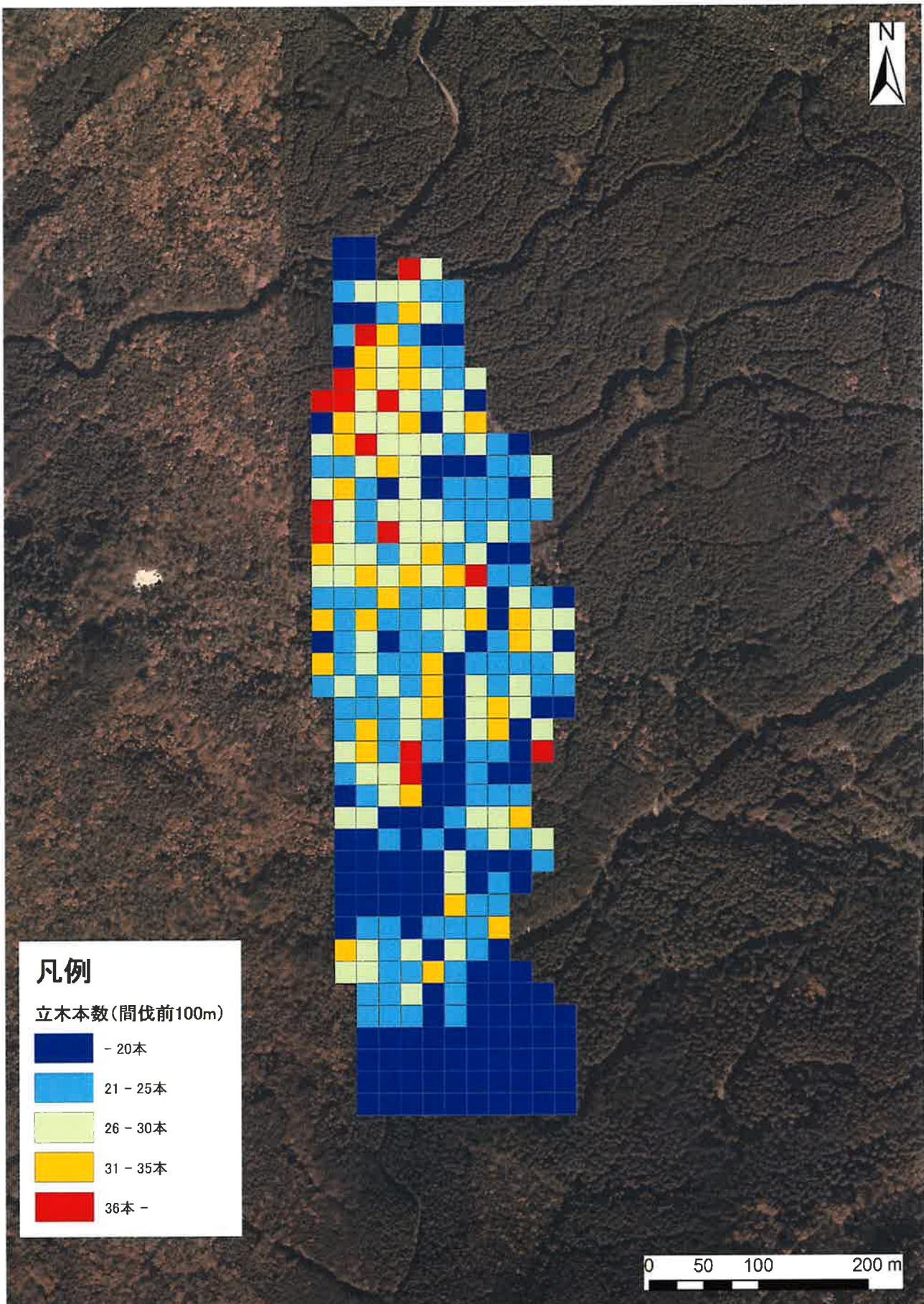


図 2-120 20m メッシュによる立木本数集計結果 (UAV 写真計測 高度 100m)

## 2) 樹高

DCHM と樹頂点の位置より単木の樹高を算出した。その結果、樹高は航空レーザ計測で 13.1~24.1m、間伐前の UAV 写真計測の高度 50m で 12.5~23.4m、高度 100m の UAV 写真計測で 12.0~23.4m の範囲であった。図 2-121、図 2-122 より UAV 写真計測の相関係数の値は間伐前の UAV 写真計測の高度 50m で 0.96、高度 100m で 0.97 と、ともに相関係数が 1 に近く、航空レーザ計測から算出した樹高との相関が非常に強いことがわかった。このことから航空レーザ計測に対する UAV 写真計測は高度に依らず精度が高く、UAV 写真計測は航空レーザ計測結果に近い値が得られると考えられる。

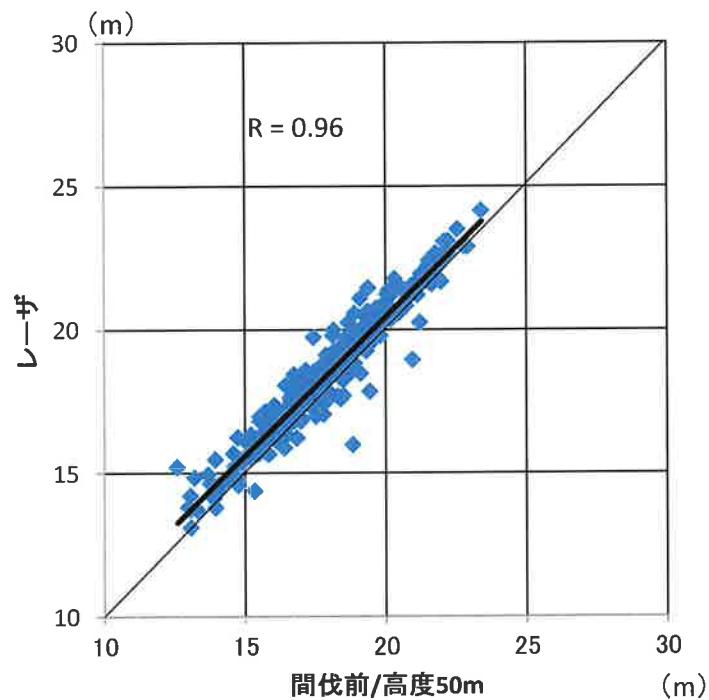


図 2-121 航空レーザ計測と UAV 写真計測（高度 50m）の樹高の比較

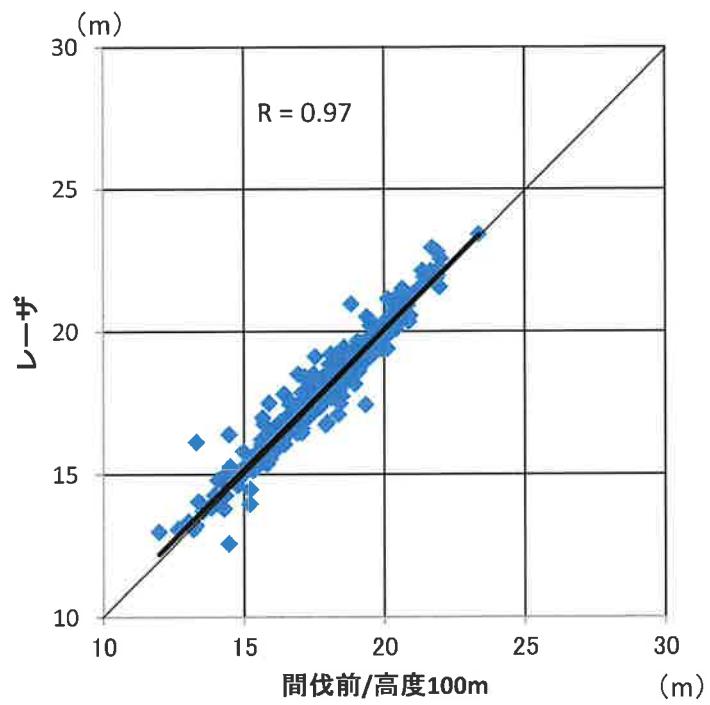


図 2-122 航空レーザ計測と UAV 計測（高度 100m）の樹高の比較

航空レーザ計測と UAV 写真計測の樹高計測結果を 20m メッシュで集計した結果を図 2-123、図 2-124、図 2-125 に示す。図 2-123、図 2-124、図 2-125 より計測対象地の南側に樹高が高い箇所があり、樹高の低い箇所は北側から中央部にかけて点在していた。この傾向は航空レーザ計測と間伐前の UAV 写真計測の高度 50m、100m の樹高計測結果から確認できた。そのため、UAV 写真計測による樹高計測は飛行高度にかかわらず高い精度であることが分かった。

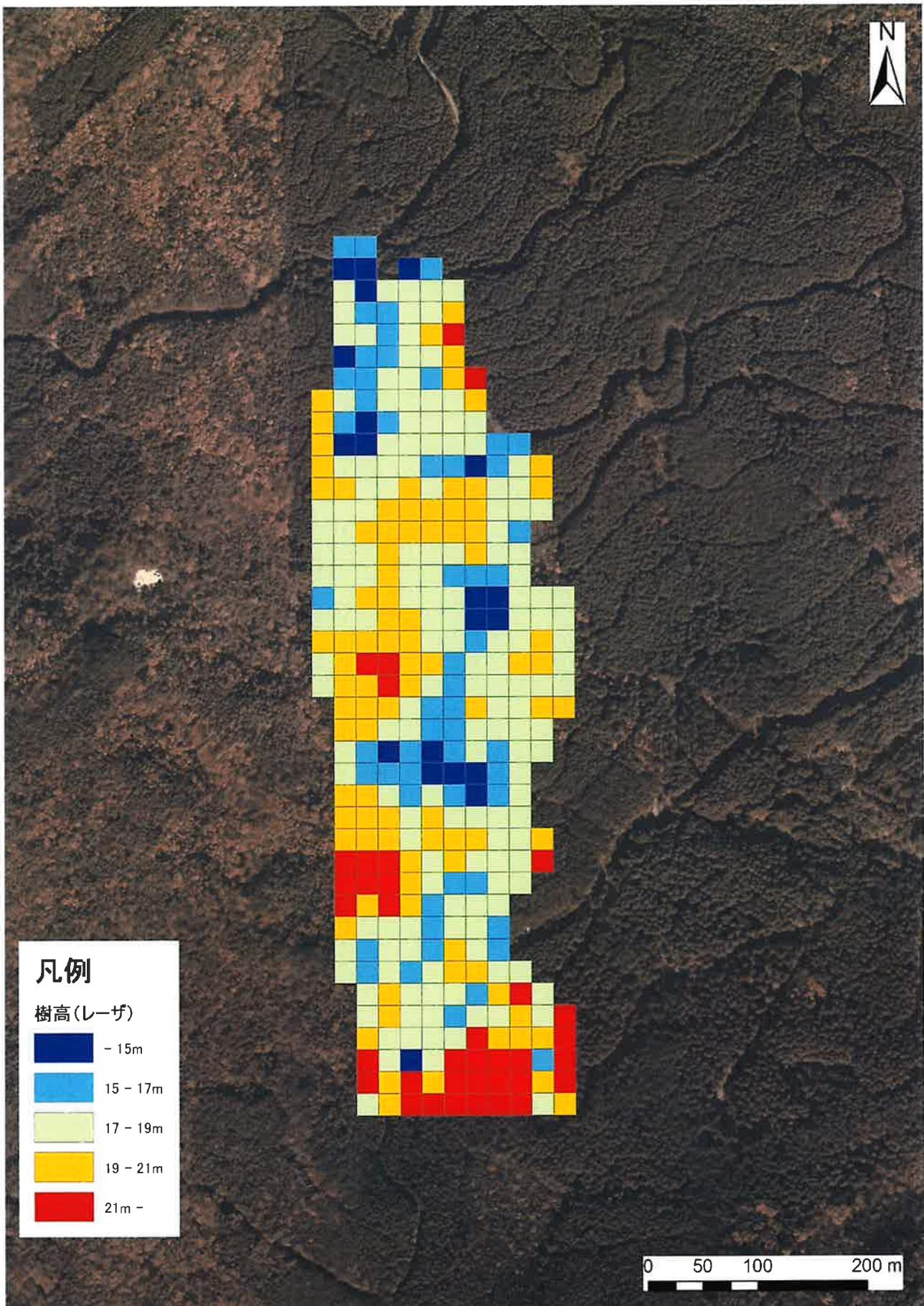


図 2-123 20m メッシュによる樹高集計結果（航空レーザ計測）

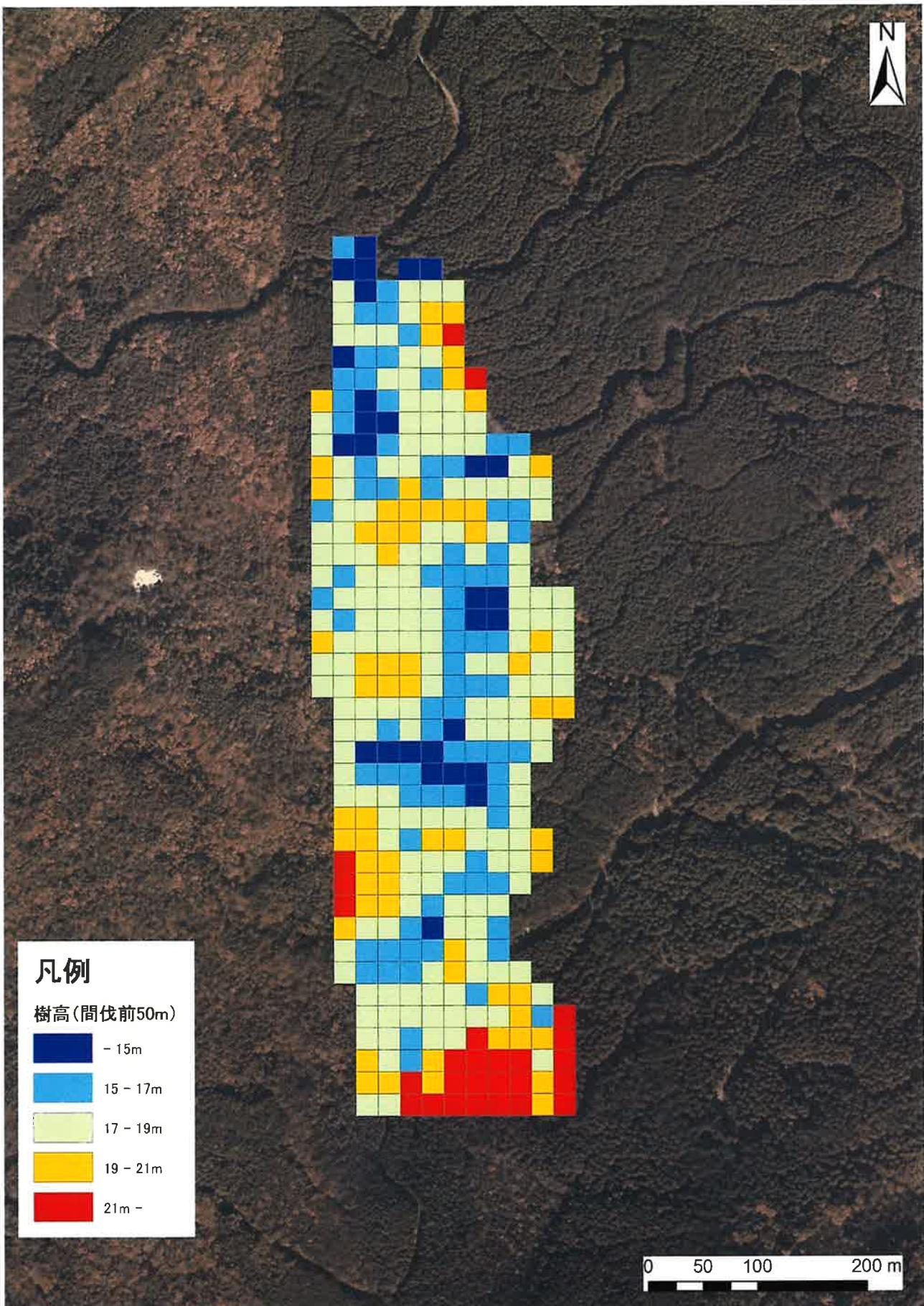


図 2-124 20m メッシュによる樹高集結果 (UAV 写真計測 高度 50m)

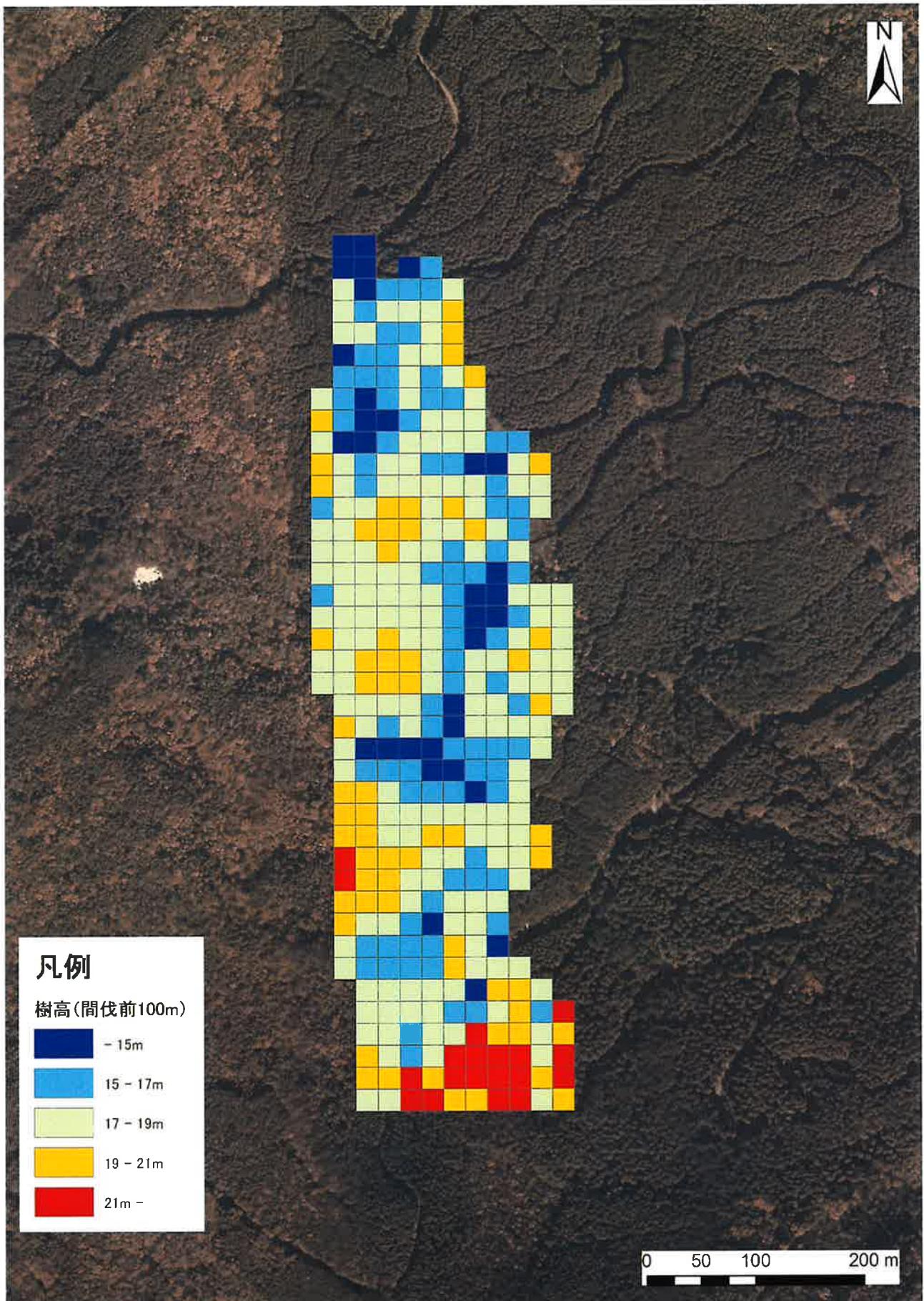


図 2-125 20m メッシュによる樹高集計結果 (UAV 写真計測 高度 100m)

### 3) 胸高直径

単木の胸高直径は樹頂点抽出過程で取得することができる樹冠の大きさとの回帰式より算出した。会式を以下に示す。

$$DBH = 13.723 \times Sarea^{0.1645}$$

ここで、DBH は胸高直径、Sarea は樹冠表面積である。

航空レーザ計測と UAV 写真計測による胸高直径は、ともに 20~30cm の範囲で計測された。航空レーザ計測と UAV 写真計測の結果を図 2-126、図 2-127 に示す。航空レーザ計測と間伐前の UAV 写真計測の相関係数は高度 50m で 0.81、高度 100m は 0.87 とともに 1 に近く、強い相関関係であった。このことから航空レーザ計測に対する UAV 写真計測の精度は高度 50m、100m とともにやや高く、また高度に依る差はみられなかった。

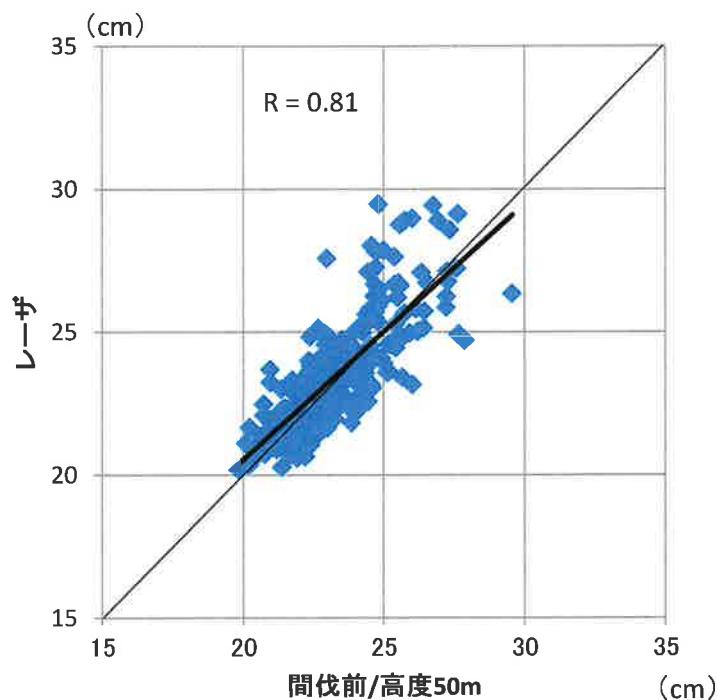


図 2-126 航空レーザ計測と UAV 写真計測（高度 50m）の胸高直径の比較

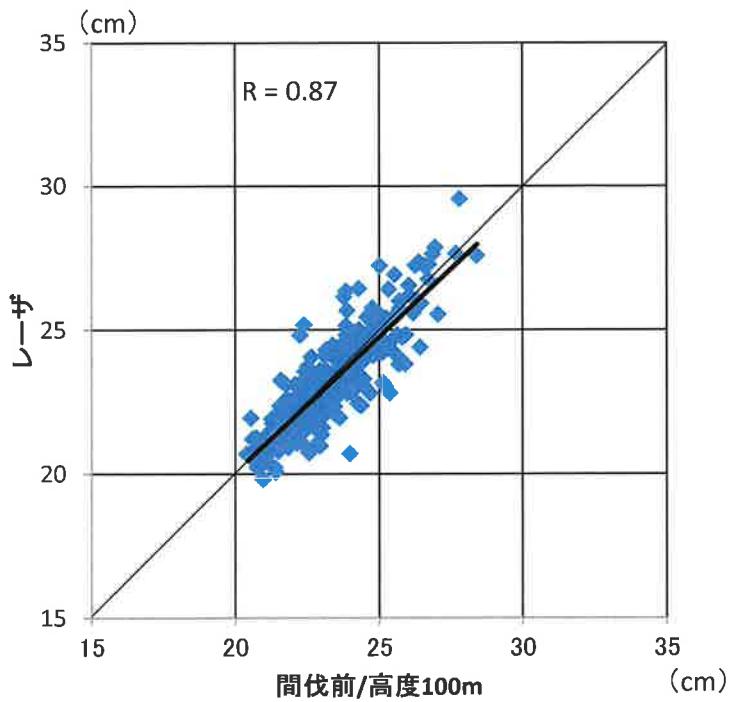


図 2-127 航空レーザ計測と UAV 写真計測（高度 100m）の胸高直径の比較

航空レーザ計測と UAV 写真計測の 20m メッシュに抽出した結果を図 2-128、図 2-129、図 2-130 に示す。航空レーザ計測では胸高直径が大きい箇所が南側もみられたが、UAV 写真計測では胸高直径がやや小さくなつた。間伐前の UAV 写真計測の高度 50m、高度 100m は航空レーザ計測結果に近い結果となつたことが確認できた。

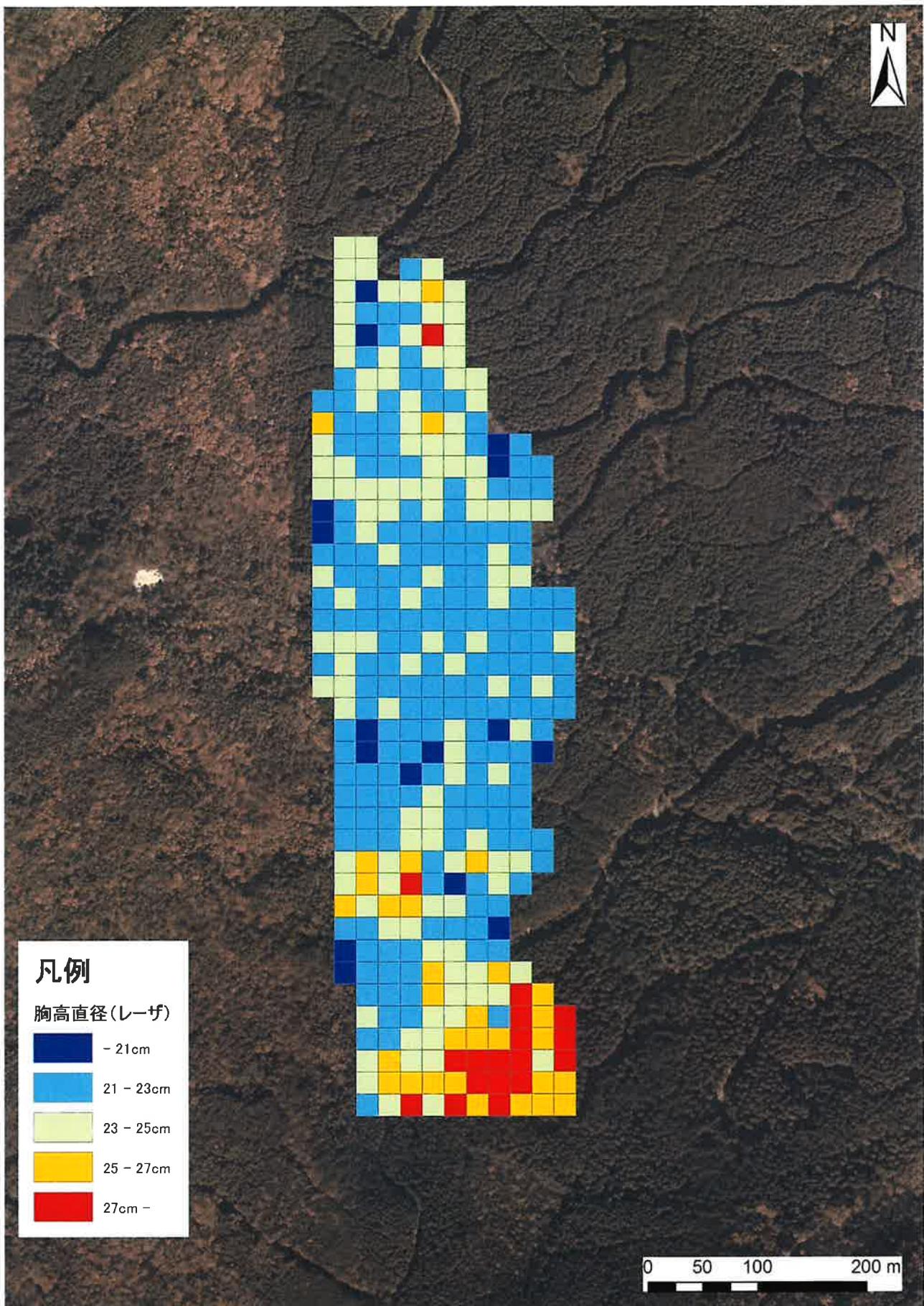


図 2-128 20m メッシュによる胸高直径集計結果 (航空レーザ計測)

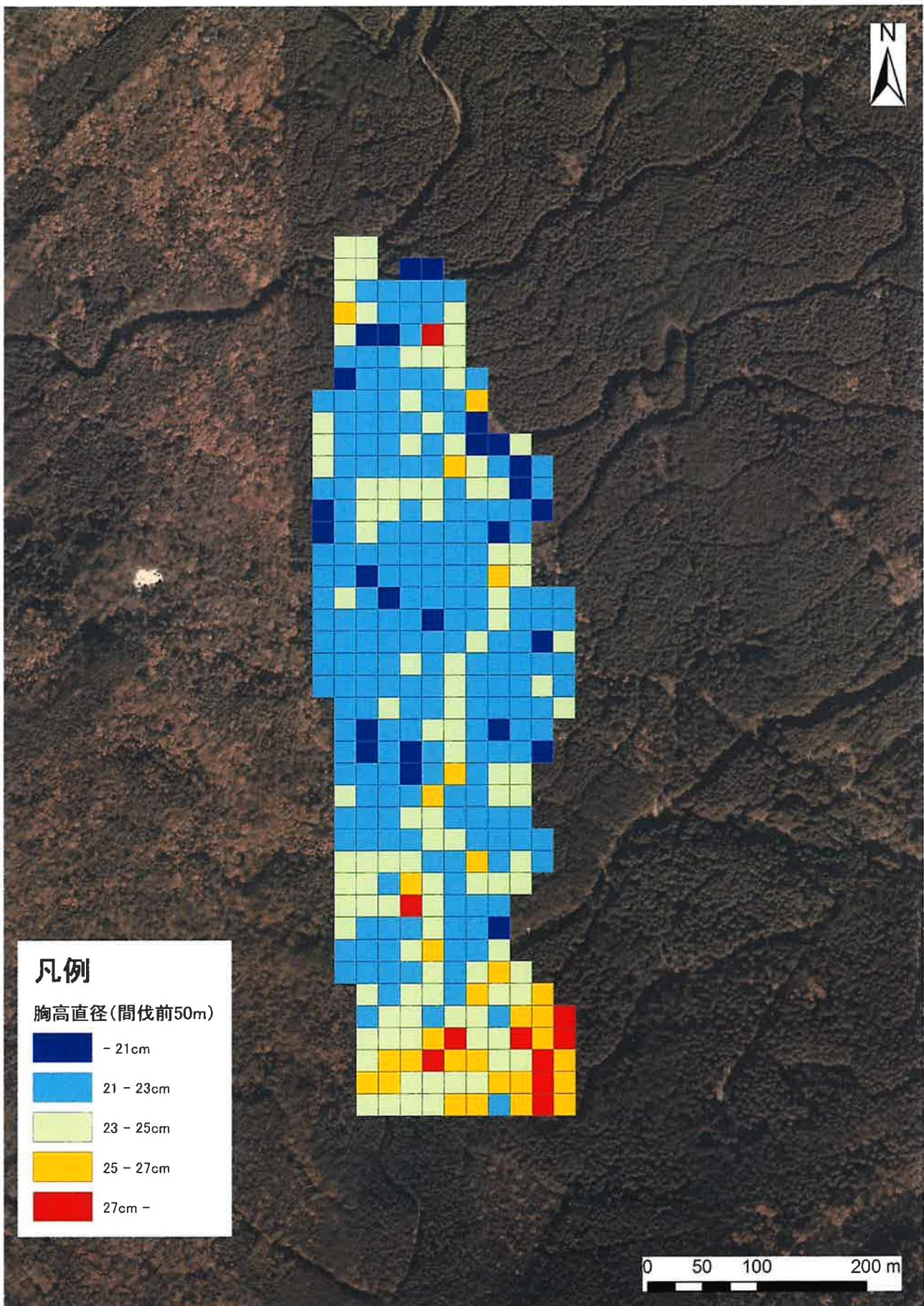


図 2-129 20m メッシュによる胸高直径集計結果 (UAV 写真計測 高度 50m)

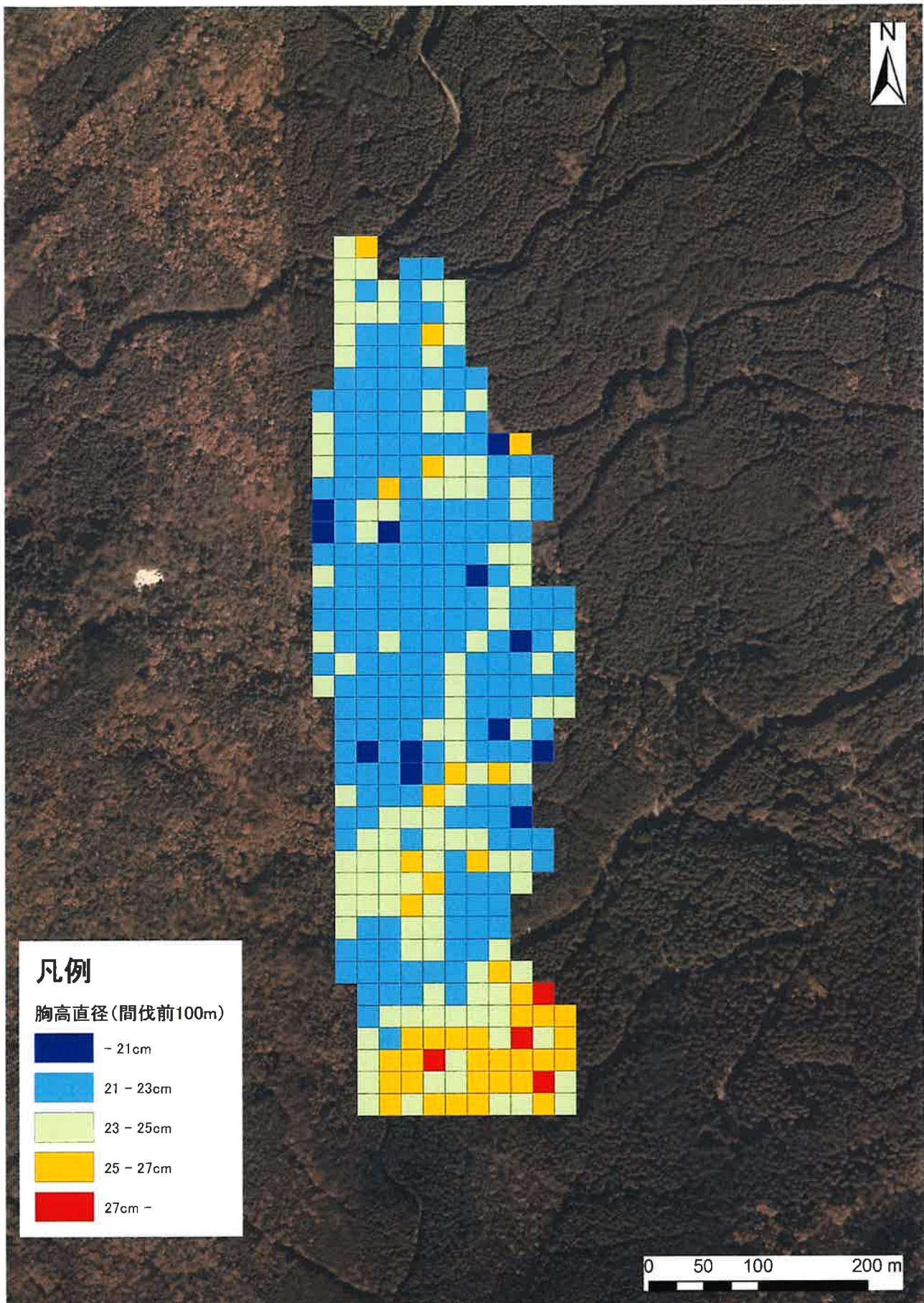


図 2-130 20m メッシュによる胸高直径集計結果 (UAV 写真計測 高度 100m)

#### 4) 材積

単木の材積は樹高と胸高直径より二変数材積式（林野庁計画課編、立木幹材積表－西日本編－）を用いて算出した。使用したヒノキの材積式を以下に示す。

富山、岐阜、愛知地方 ヒノキ（人工林）（昭和 34 年調整）

$$\log V = -5 + 0.658496 + 2.009104 \log d + 0.929831 \log h \quad (d : 6 \sim 10\text{cm})$$

$$\log V = -5 + 0.583947 + 1.909076 \log d + 1.097628 \log h \quad (d : 12 \sim 20\text{cm})$$

$$\log V = -5 + 0.729152 + 1.756400 \log d + 1.166107 \log h \quad (d : 22 \sim 40\text{cm})$$

$$\log V = -4 + 0.243210 + 1.370193 \log d + 1.239011 \log h \quad (d : 42\text{cm 以上})$$

ここで  $V$  は単木材積、 $d$  は胸高直径、 $h$  は樹高である。

航空レーザ計測と UAV 写真計測での合計材積は、航空レーザ計測で  $4,846 \text{ m}^3$ 、間伐前の UAV 写真計測の高度 50m で  $3,543 \text{ m}^3$ 、高度 100m で  $2,953 \text{ m}^3$  であった（表 2-78）。航空レーザ計測と UAV 写真計測の材積の集計結果を比較した（図 2-131、図 2-132）。航空レーザ計測と間伐前の UAV 写真計測は、ともに相関係数が 0.73 と正の高い相関関係があった。航空レーザ計測に対する UAV 写真計測の精度が高度に依らず低かった。また、UAV 写真計測は航空レーザ計測より過少に計測される傾向がみられた。これは UAV 写真計測の立木本数が航空レーザ計測の立木本数より過小に計測された結果が合計材積に影響を与えたと考えられる。

表 2-78 合計材積の算出結果

		総材積( $\text{m}^3$ )	割合(%)
航空レーザ計測		4,845.6	
UAV写真計測	間伐前/高度50m	3,542.6	73
	間伐前/高度100m	2,952.8	61

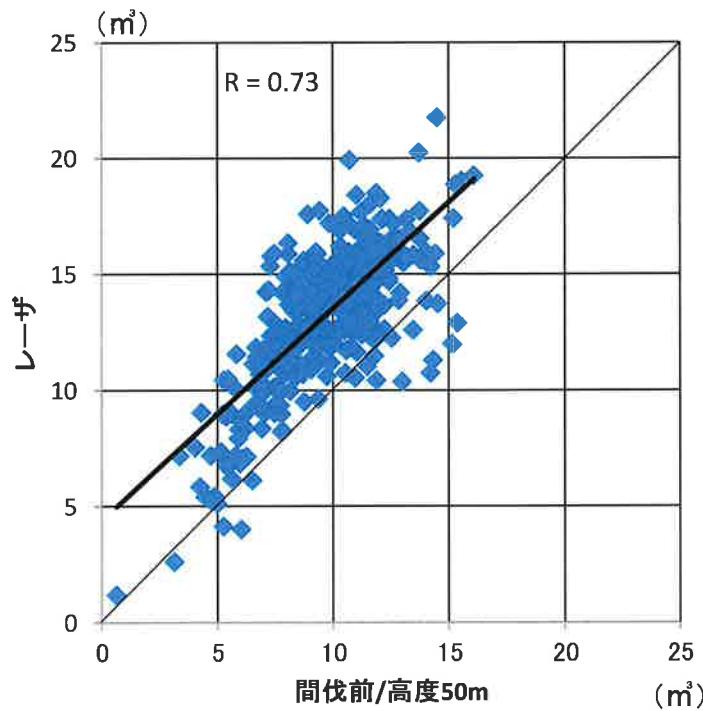


図 2-131 航空レーザ計測と UAV 写真計測（高度 50m）の材積の比較

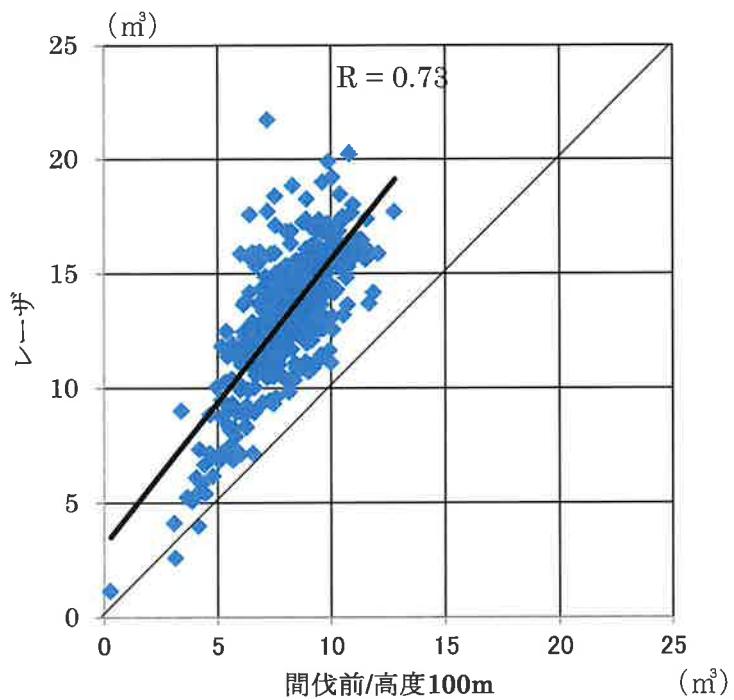


図 2-132 航空レーザ計測と UAV 写真計測（高度 100m）の材積の比較

航空レーザ計測と UAV 写真計測の 20m メッシュに集計した結果を図 2-133～図 2-135 に示す。立木本数の計測結果の図 2-116～図 2-118 と、材積の計測結果の図 2-133～図 2-135 より、立木本数と材積の計測結果が近い傾向を示していることが確認できる。

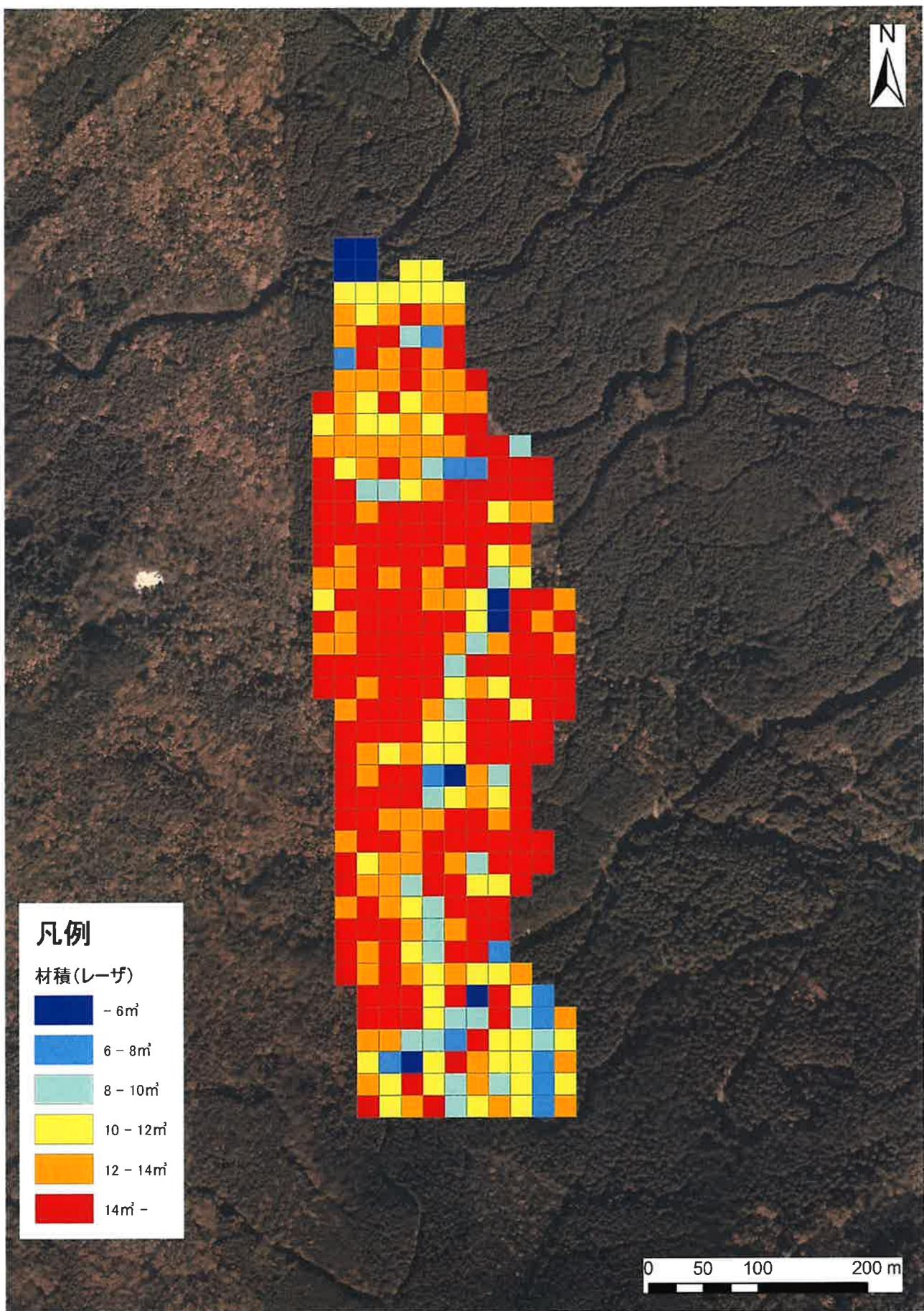


図 2-133 20m メッシュによる材積集計結果（航空レーザ計測）

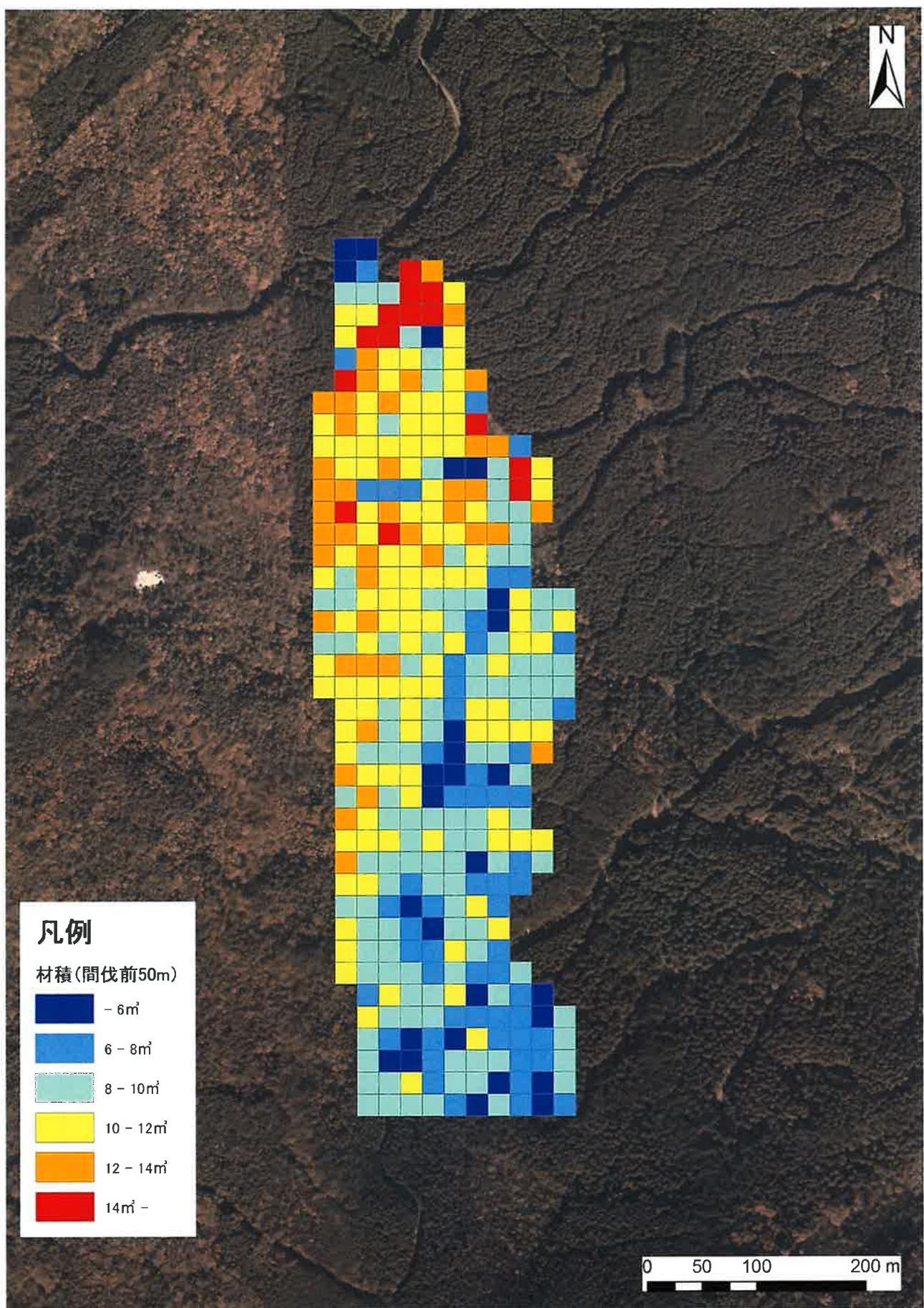


図 2-134 20m メッシュによる材積集計結果 (UAV 写真計測 高度 50m)

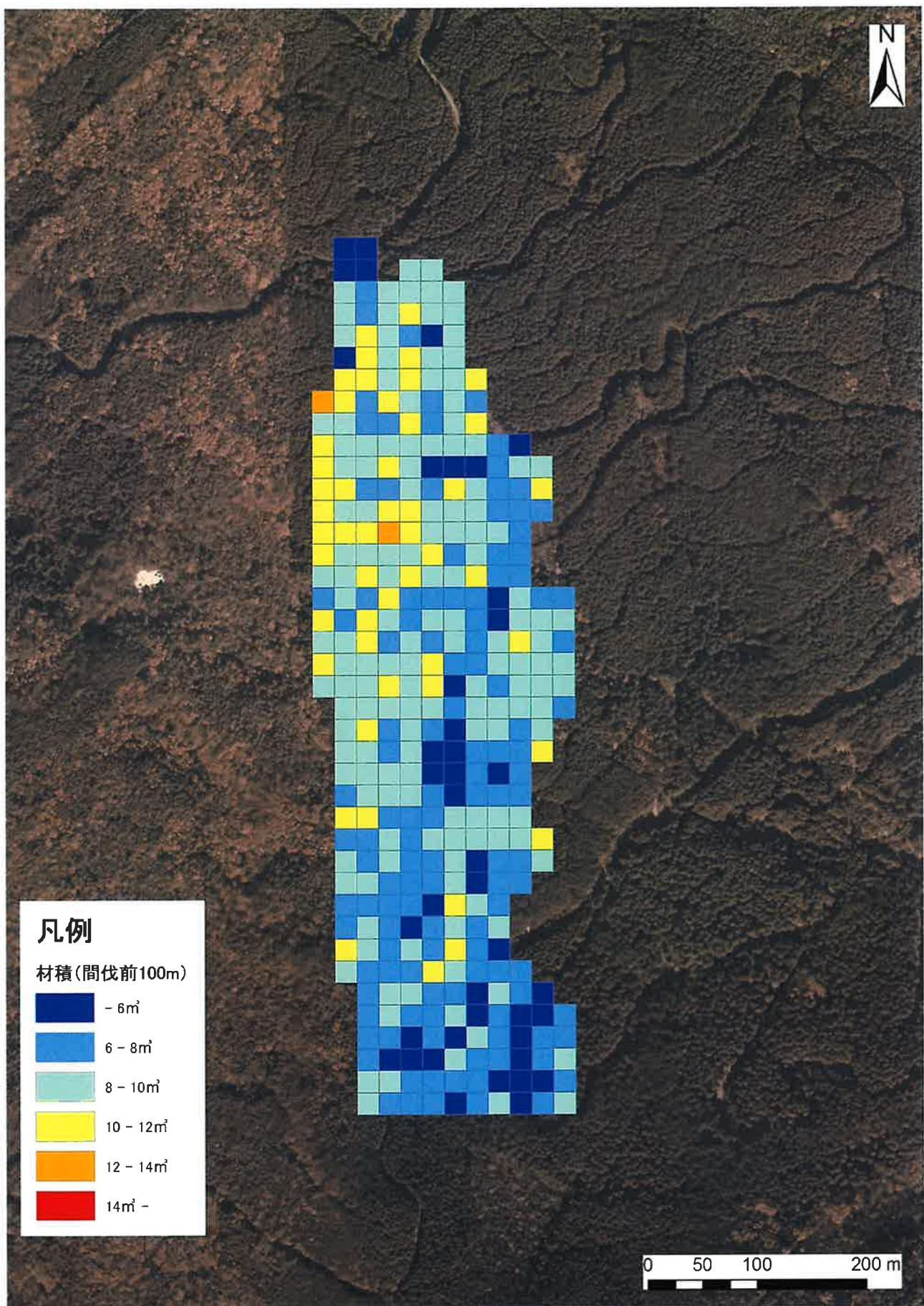


図 2-135 20m メッシュによる材積集計結果 (UAV 写真計測 高度 100m)

## 5. 間伐前後の UAV 写真計測による森林資源解析

間伐前後の計測データを用いて森林資源解析を行い、結果を比較することで伐採した樹木の位置や、伐採された樹木の情報（樹高、胸高直径、材積等）を取得することができる。間伐前後の森林資源解析により以下のような検討を行なうことができると思われる。

- ① 間伐実績の評価
- ② 間伐作業効率の評価
- ③ 森林資源情報の更新

密度管理・木材生産目標より間伐率や選木方法が決まるが、実際に間伐後にその計画の達成率度を知るために毎木調査を間伐の前後に行なう必要があった。間伐前後に計測を行うことで現地調査のコスト削減につながる。

間伐作業効率の評価は伐採された樹木の位置と航空レーザ計測によって取得した地形解析結果（DEM、微地形表現図、等高線）より間伐した樹木の集材の効率について評価することができる。検討した結果を作業員にフィードバックしていくことで選木方法や作業システムの検討を行うことができ、間伐施業の効率化、低コスト化を図る。

航空レーザ計測により森林資源情報を取得したのちに施業を実施した場合に森林資源情報の更新が必要である。現地調査でも情報の更新は可能であるが、オルソ画像や樹頂点データの更新ができないため、実状と森林資源情報のかい離や森林資源情報間（例えば森林簿とオルソ画像）の齟齬が発生し、取扱いの困難なデータとなってしまう。

間伐前後のデータを取得する利点はあるものの航空レーザ計測を短期間に複数回行なうことは費用の面で適さない。そのため、小面積を安価に計測することのできる UAV 写真計測を用いて森林資源解析を行い、実用性の検討を行なった。検討フローを図 2-136 に示す。

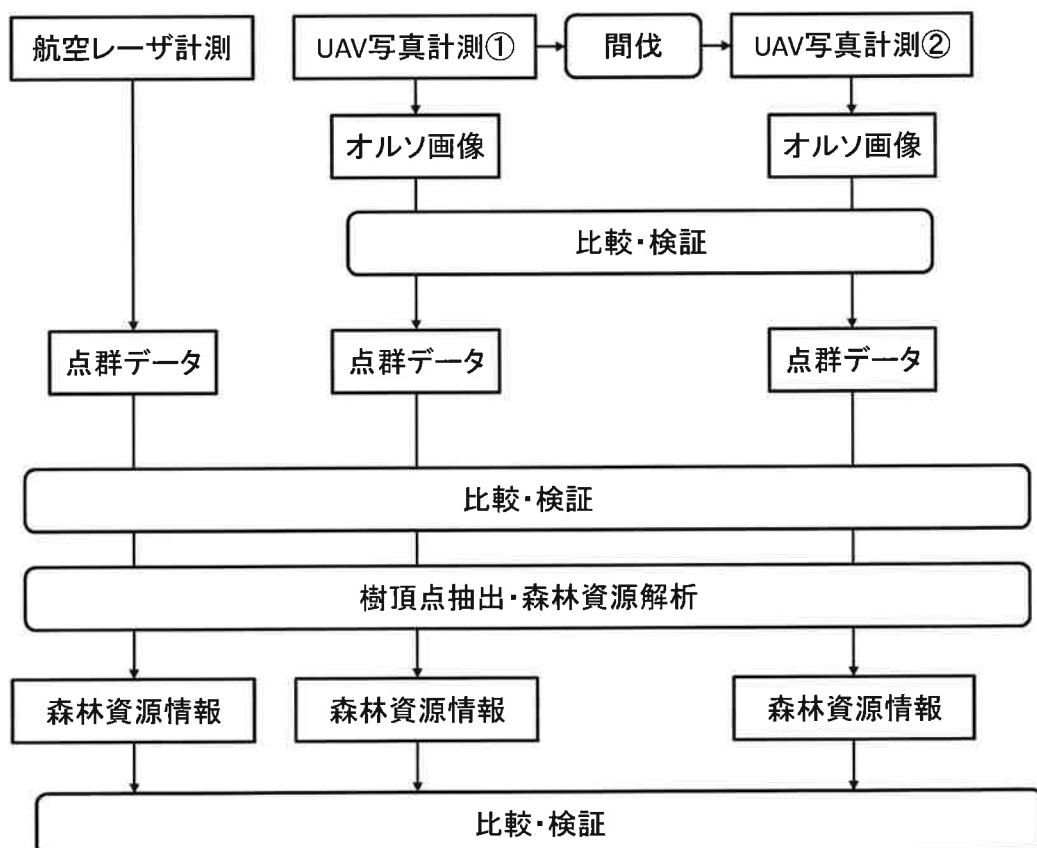


図 2-136 検討フロー（間伐前後）

### (1) オルソ画像について

間伐前後におけるオルソ画像の違いを比較するために間伐後に計測を行った。高度 50m で計測を行った場合には 写真枚数は 520 枚となり、地上解像度は 1.84cm であった。また、計測を行った 2017 年 4 月 28 日 12 時 45 分頃の太陽高度が 65.07 度、太陽方位は 214.80 度であった。計測した写真の一例を図 2-137 に示す。高度 100m で計測を行った際には写真枚数 295 枚となり、地上解像度はおよそ 3.69cm であった。また、2017 年 4 月 28 日 12 時 00 分頃の太陽高度が 68.48 度、太陽方位は 188.27 度であった。写真の一例を図 2-138 に示す。



図 2-137 計測した写真（間伐後/高度 50m）

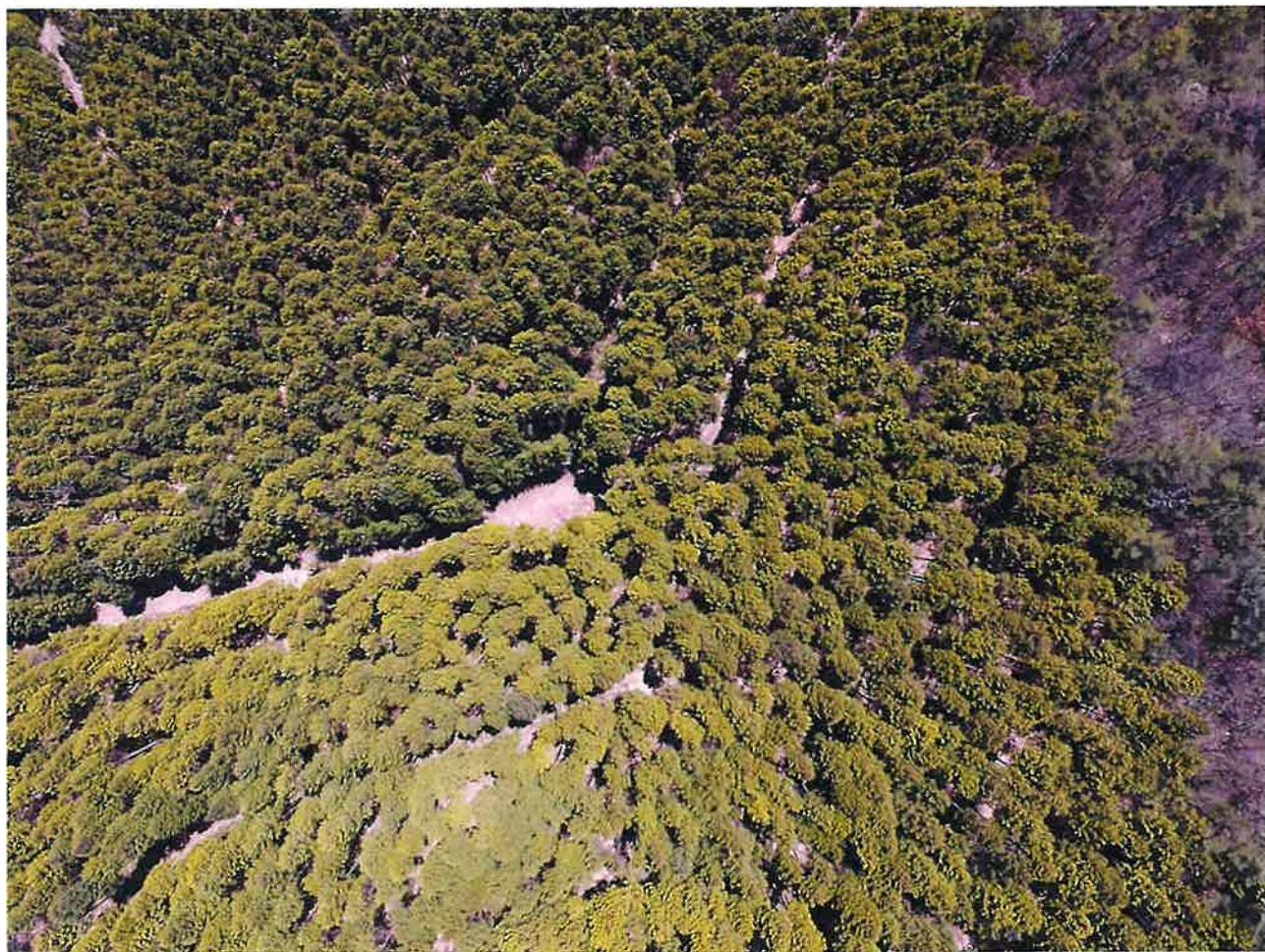


図 2-138 計測した写真（間伐後/高度 100m）

また、計測した写真より作成したオルソを図 2-139、図 2-140 に示す。



図 2-139 オルソ画像（間伐後/50m）



図 2-140 オルソ画像（間伐後/100m）

プロット調査から間伐本数が 13 本と確定している PLOT2 付近でのオルソ画像を比較した。図 2-141、図 2-142 ではオルソ画像から 13 本の間伐木を特定することはできなかった。間伐前後の違いよりも太陽高度もしくは気象条件の違いの影響が大きくオルソ画像に出ている。間伐後に計測した場合には太陽高度が 65~68 度あり、間伐前の太陽高度 22~25 度と比較し高いため、ギャップや林道の影が少なくなった。

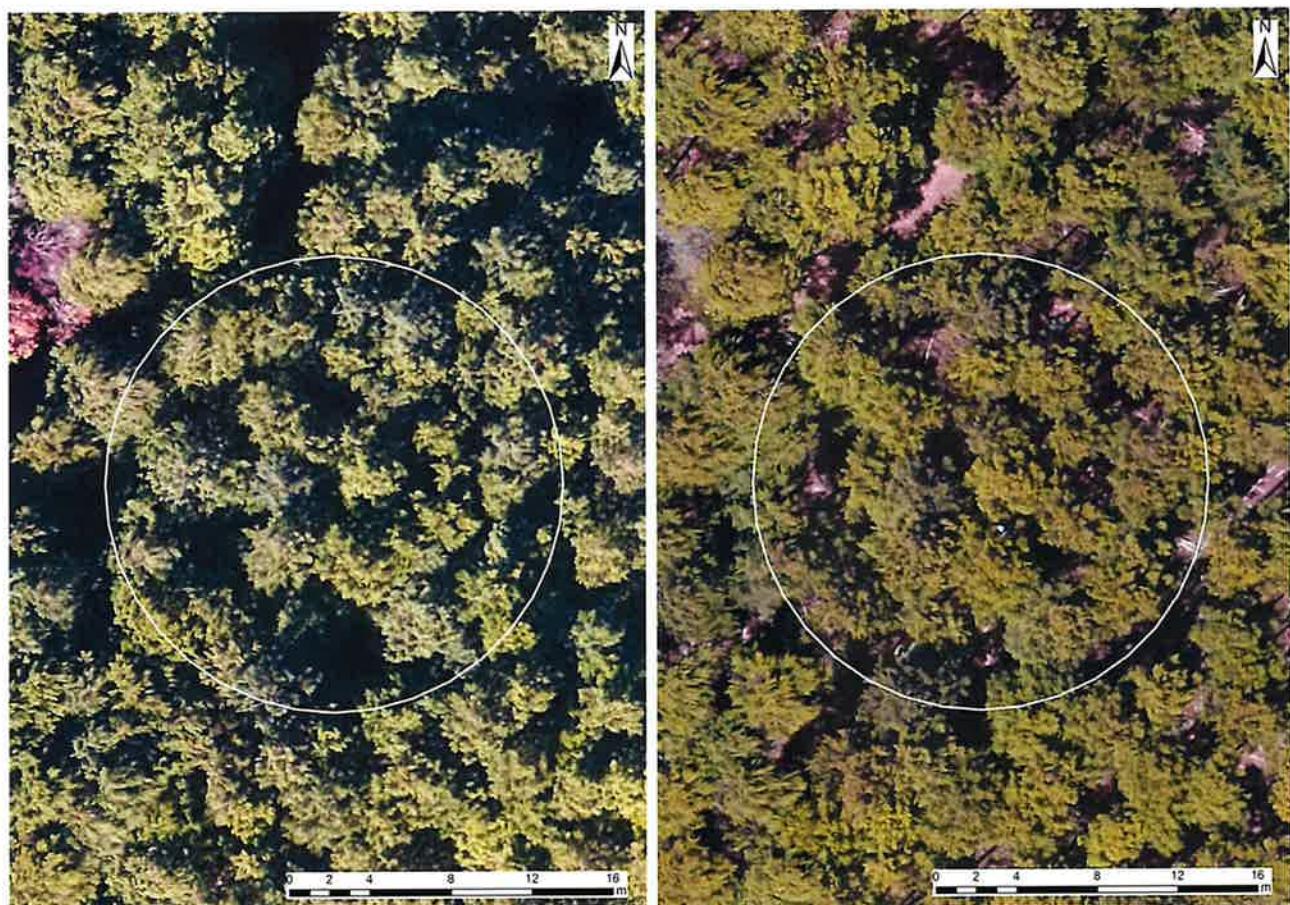


図 2-141 間伐前後のオルソ画像比較（高度 50m）

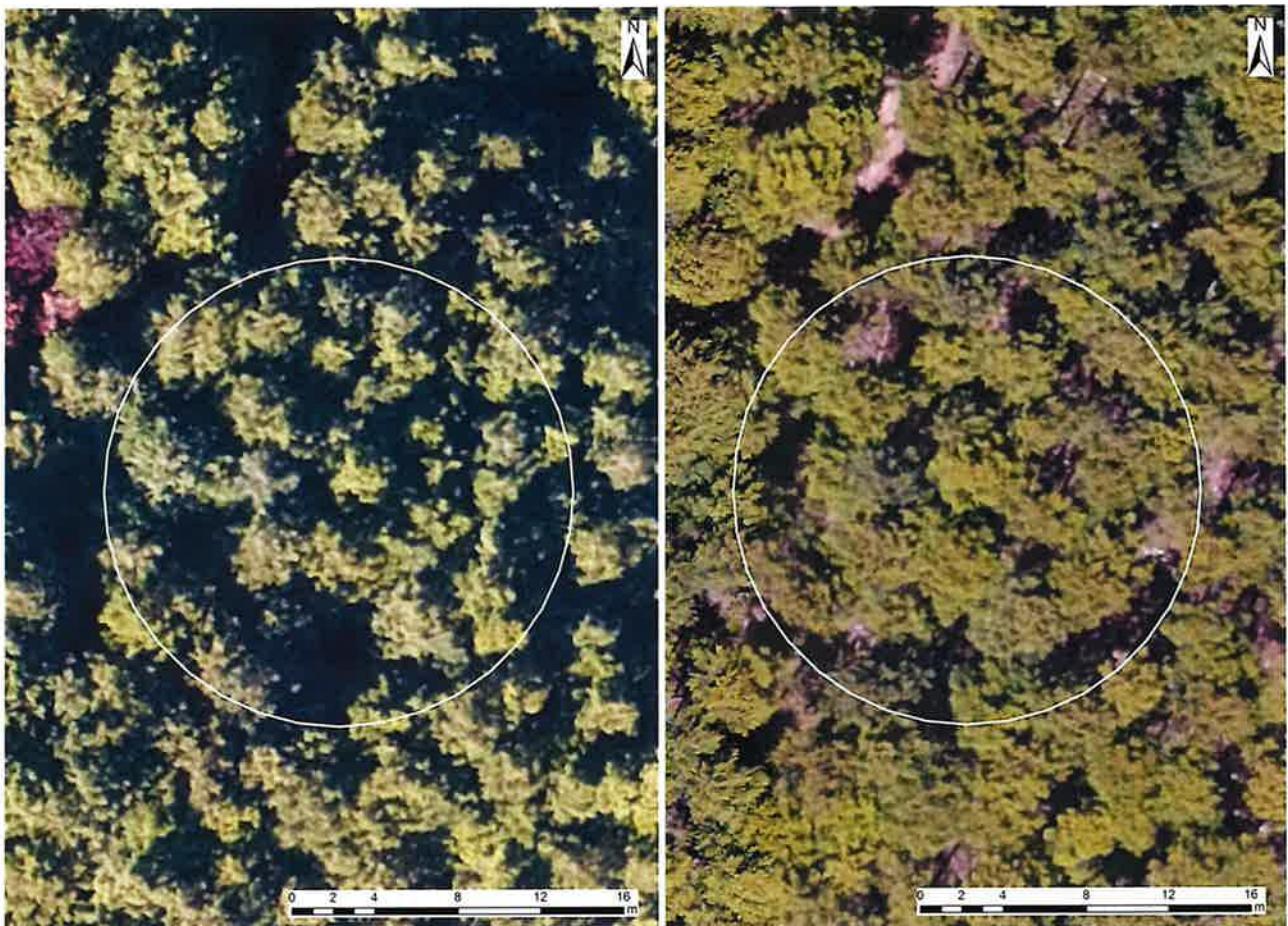


図 2-142 間伐前後のオルソ画像比較（高度 100m）

## (2) 樹冠データについて

間伐後に行った UAV 写真計測により作成した DCHM を図 2-143、図 2-144 に示す。間伐前の DCHM と同様に解像度は 0.5m である。

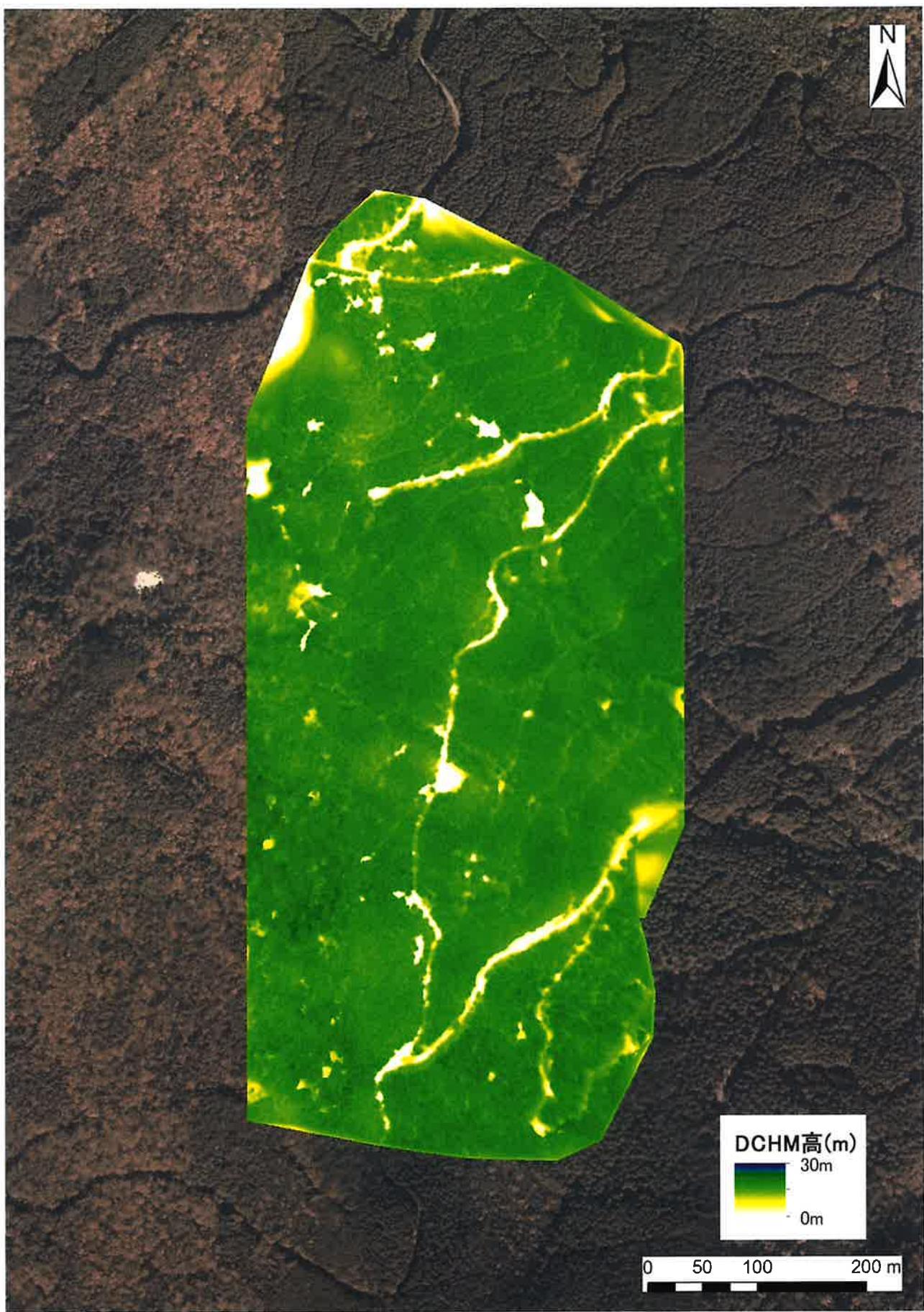


図 2-143 DCHM (間伐後/50m)

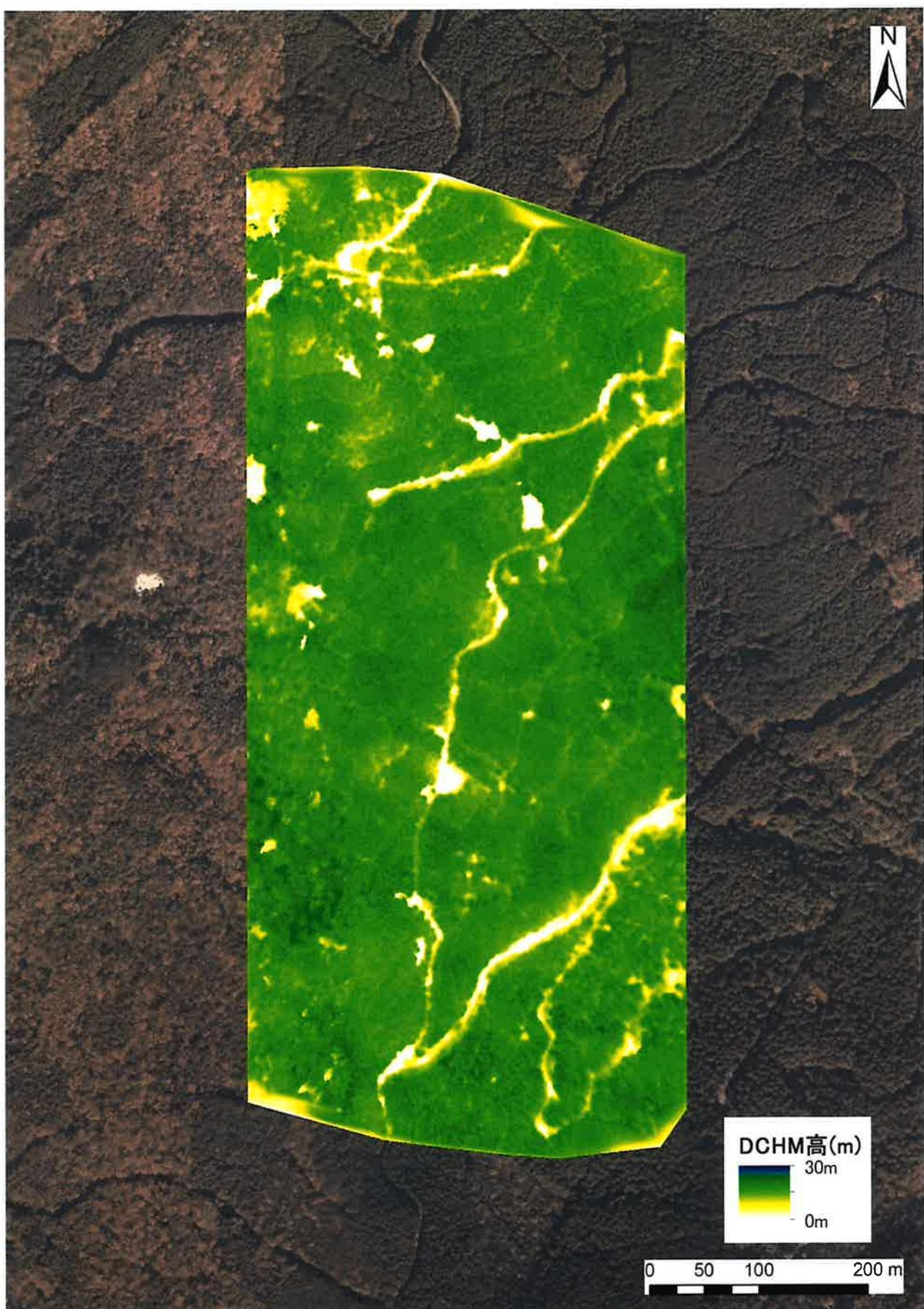


図 2-144 DCHM (間伐後/100m)

現地調査を行ったプロット 2 では間伐前後で 13 本伐採された。しかし、プロット 2 付近の間伐前後の DCHM を比較しても 13 本の伐採箇所は特定できなかった。

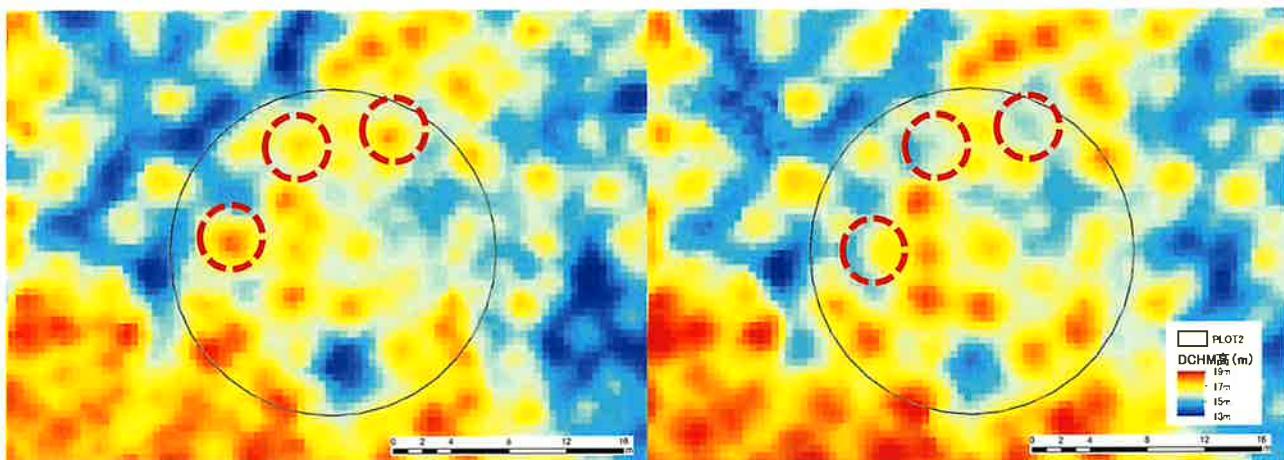


図 2-145 間伐前後の DCHM 比較（高度 50m）

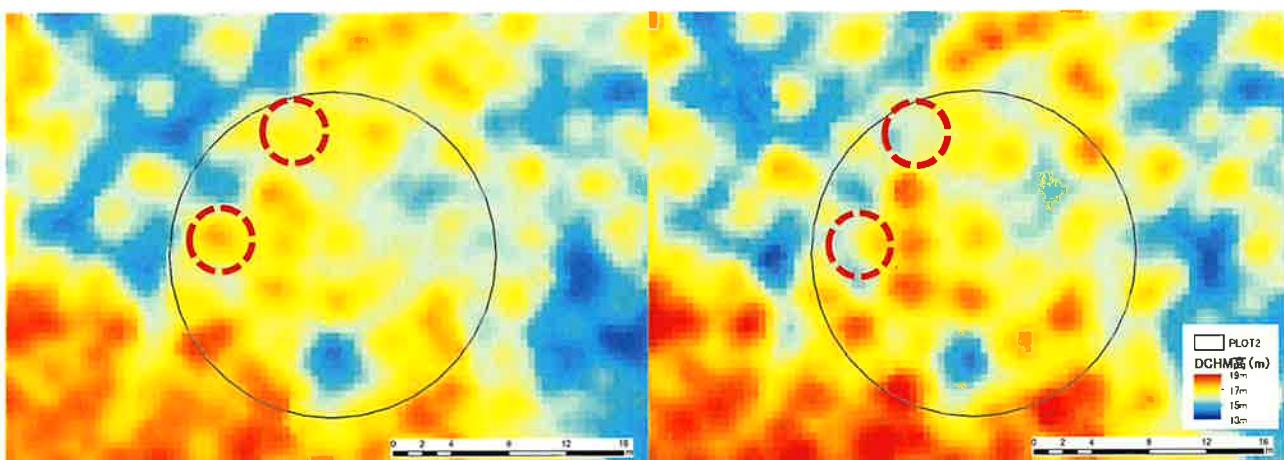


図 2-146 間伐前後の DCHM 比較（高度 100m）

(3) 樹頂点データについて

間伐後の DCHM より樹頂点抽出を行った。現地調査を行ったプロット 2 での樹頂点抽出結果を図 2-147、図 2-148 に示す。

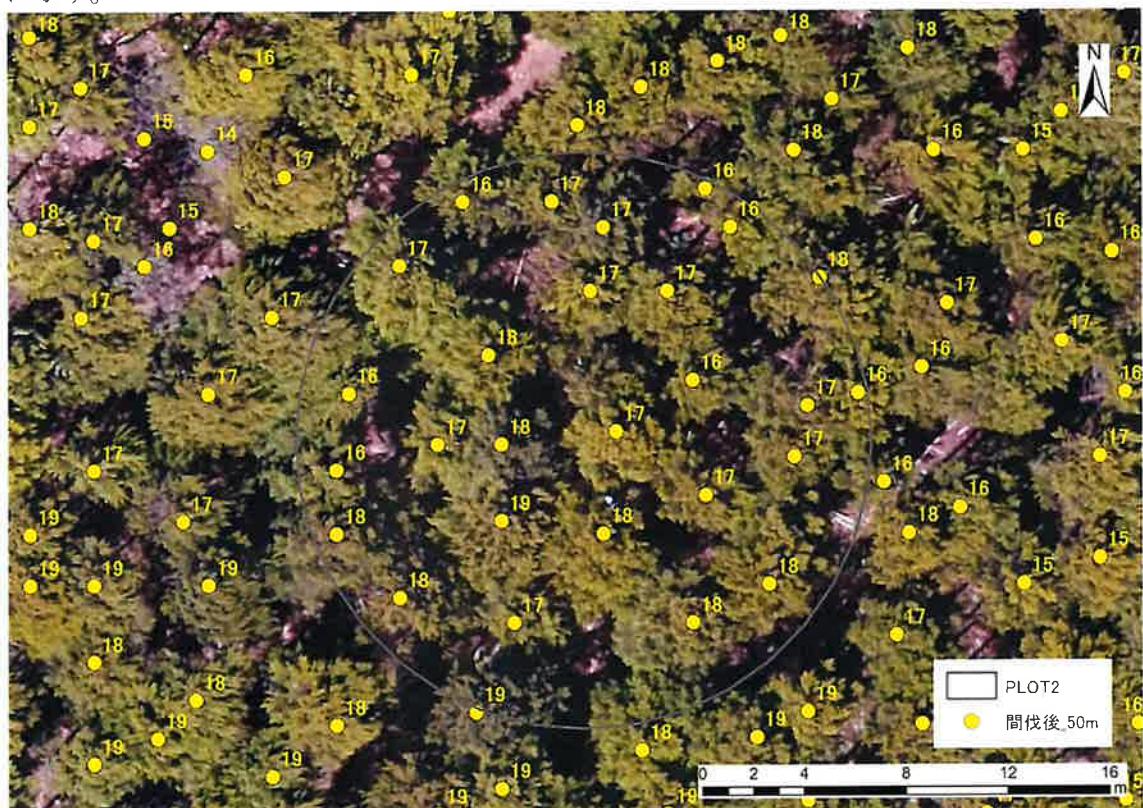


図 2-147 樹頂点抽出結果（間伐後/高度 50m）



図 2-148 樹頂点抽出結果（間伐後/高度 100m）

間伐前と間伐後の樹頂点抽出結果を比較した（図 2-149、図 2-150）。

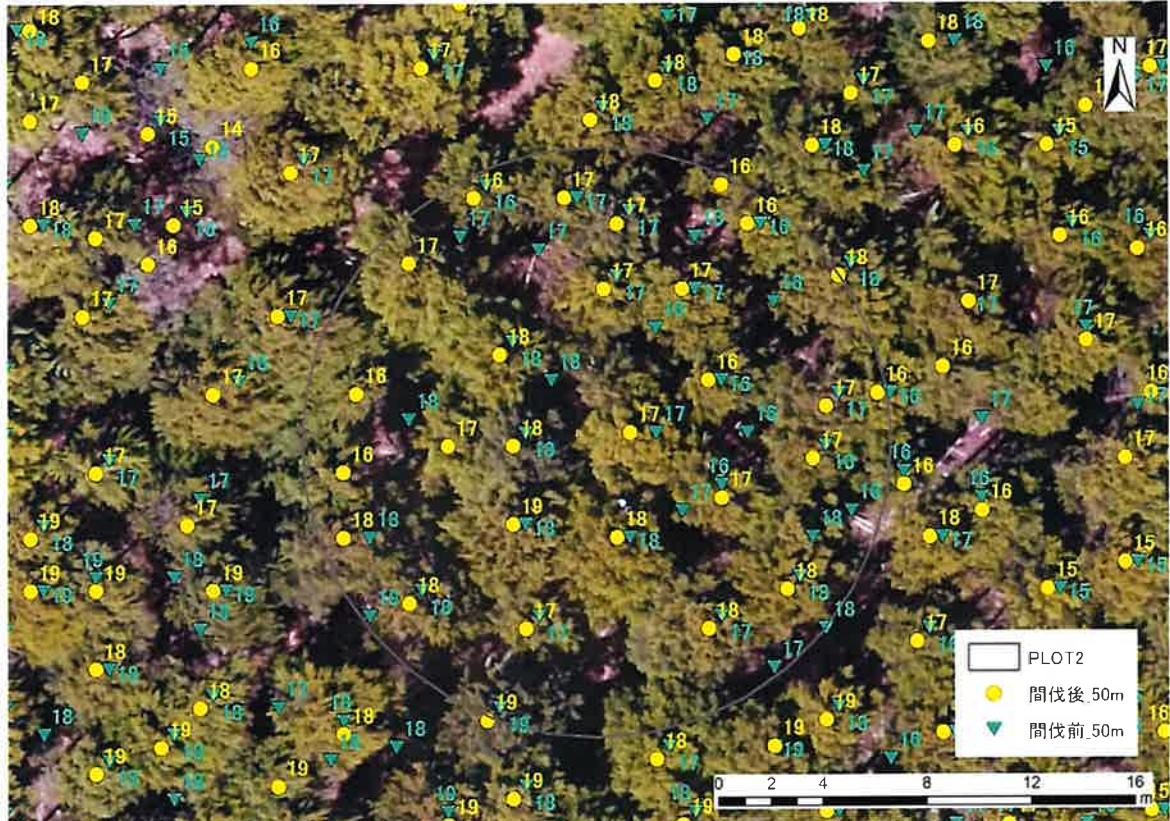


図 2-149 間伐前後の樹頂点抽出結果（高度 50m）

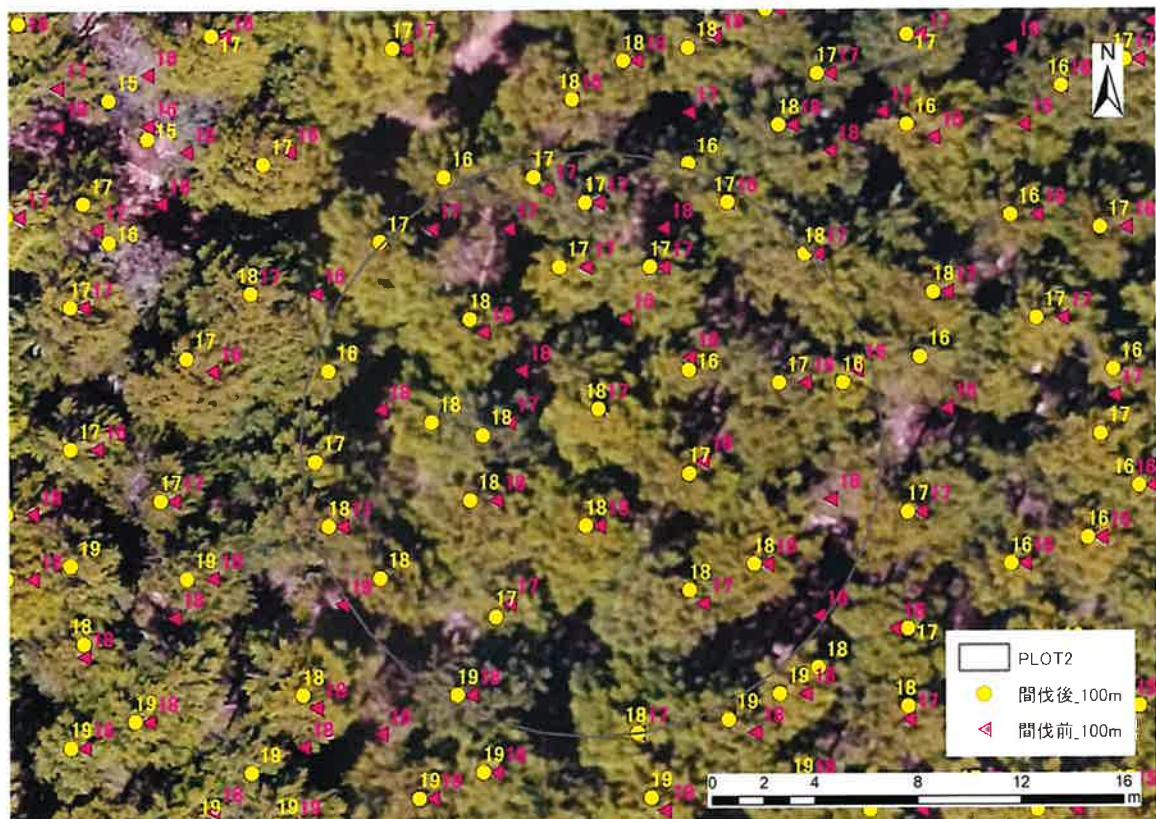


図 2-150 間伐前後の樹頂点抽出結果（高度 100m）

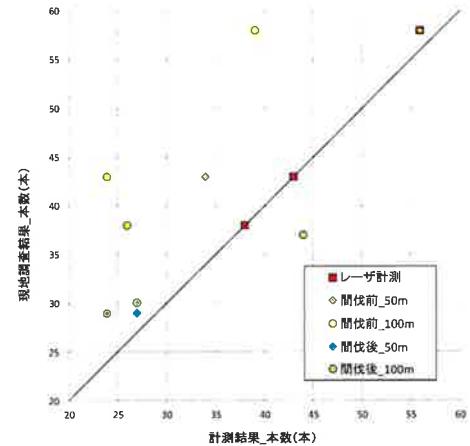
現地調査を行った 3 地点での樹頂点の抽出結果を表 2-79 に示す。間伐前の現地調査の立木本数と航空レーザ

計測の立木本数、高度 50m での間伐前の UAV 写真計測の立木本数、100m の立木本数の比較と、間伐後の現地調査の立木本数と高度 50m での間伐後の UAV 写真計測の立木本数、100m の立木本数の比較を行った。なお、現地調査地点 P1 では高度 50m での間伐後の UAV 写真計測で計測範囲から外れていたため、『( )』とし参考値を記載した。

表 2-79 間伐前後での現地調査との比較（立木本数）

Plot_ID	立木本数									
	間伐前									
	現地調査	レーザ計測	現地比	誤差率	UAV_50m	現地比	誤差率	UAV_100m	現地比	誤差率
P1	58	56	97%	3%	56	97%	3%	39	67%	33%
P2	43	43	100%	0%	34	79%	21%	24	56%	44%
P3	38	38	100%	0%	26	68%	32%	26	68%	32%
平均	46.3	45.7		1.1%	38.7		18.7%	29.7		36.2%
	R	1.00			R	1.00		R	0.93	
	RMSE	1.15			RMSE	8.74		RMSE	16.99	

Plot_ID	立木本数							
	間伐後							
	現地調査	UAV_50m	現地比	誤差率	UAV_100m	現地比	誤差率	
P1	37	(30)	-	-	44	119%	19%	
P2	30	27	90%	10%	27	90%	10%	
P3	29	27	93%	7%	24	83%	17%	
平均	32	27.0		8.4%	31.7		15.4%	
	R	-			R	1.00		
	RMSE	2.55			RMSE	5.26		



間伐前の UAV 写真計測では高度 50m では 18.7%、高度 100m は 36.2% と精度が航空レーザ計測に比べ著しく劣っていた。しかし、間伐後の現地調査と間伐後の高度 50m の平均誤差率はでは 8.4%、高度 100m では 15.4% であり、間伐後の樹頂点抽出では通常航空レーザ計測での精度と同程度の精度であった。間伐後であれば、樹冠がひらけるため、単木の樹冠が明確になり、単木ごとの樹冠の凹凸が取得できた可能性がある。

#### (4) 森林資源情報集計結果について

森林資源情報の推定結果について局所的な比較検討を行うために、20m メッシュごとの立木本数、平均樹高、平均胸高直径、合計材積の集計を行った。本項においては間伐前の航空レーザ計測の森林資源情報と間伐後の森林資源情報の立木本数と材積の比較を行った。

##### 1) 立木本数

森林資源情報を集計した範囲での航空レーザ計測の立木本数の合計は 12,615 本、間伐後・高度 50m の UAV 写真計測の立木本数の合計は 8,727 本、間伐後・100m での立木本数の合計は 7,844 であった（表 2-80）。そこから算出した本数間伐率は高度 50m との比較では 30.8%、高度 100m では 37.8% となった。現地調査では本数間伐率は 31.9% であり、高度 50m と非常に近い値となった。

表 2-80 立木本数の集計結果

測定方法	間伐前		間伐後	
	立木本数	UAV写真計測		本数間伐率
		高度50m	高度100m	
航空レーザ 計測	12,615	8,727	7,844	30.8%
				37.8%

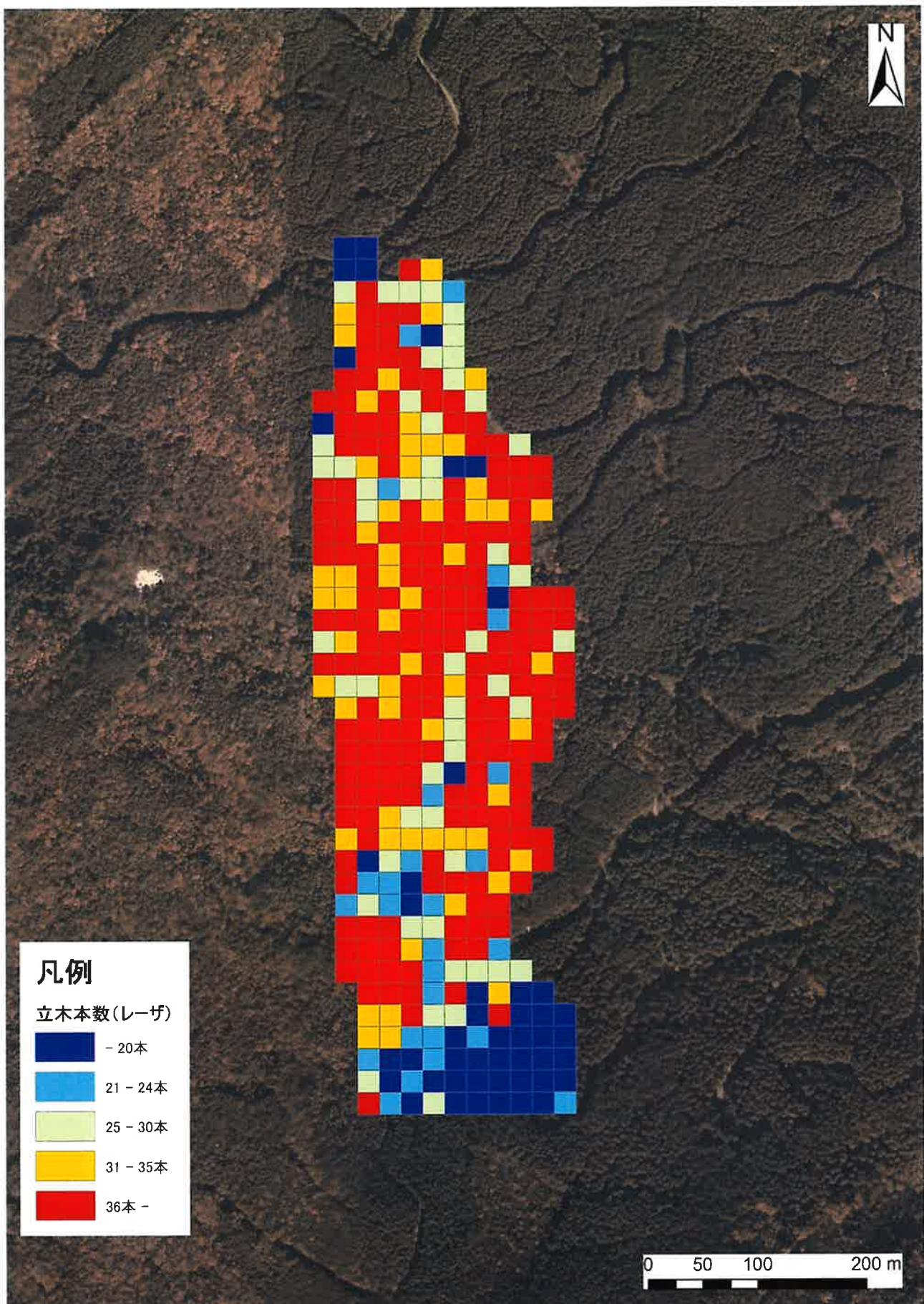


図 2-151 立木本数集計結果（レーザ）

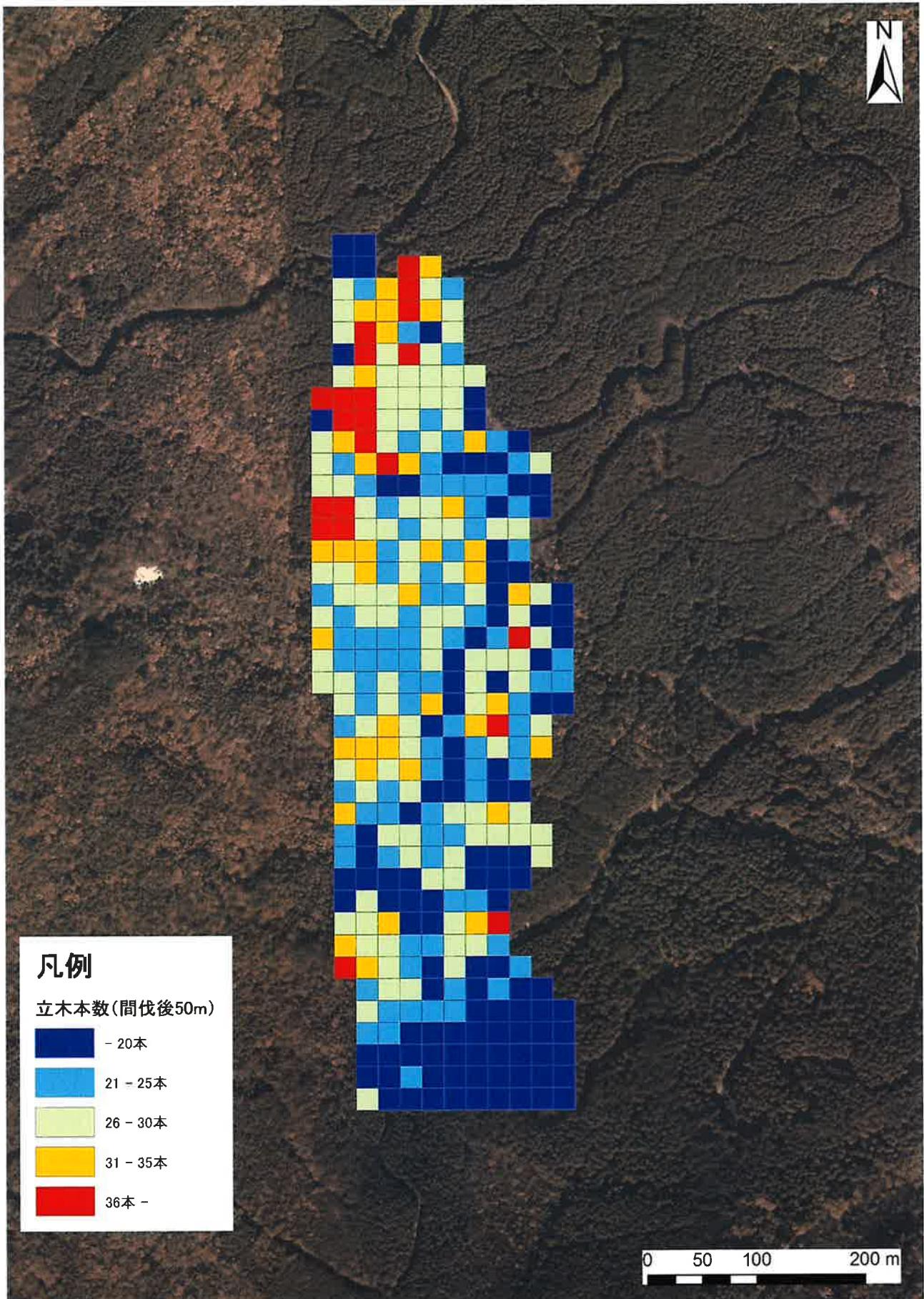


図 2-152 立木本数集計結果（間伐後/高度 50m）

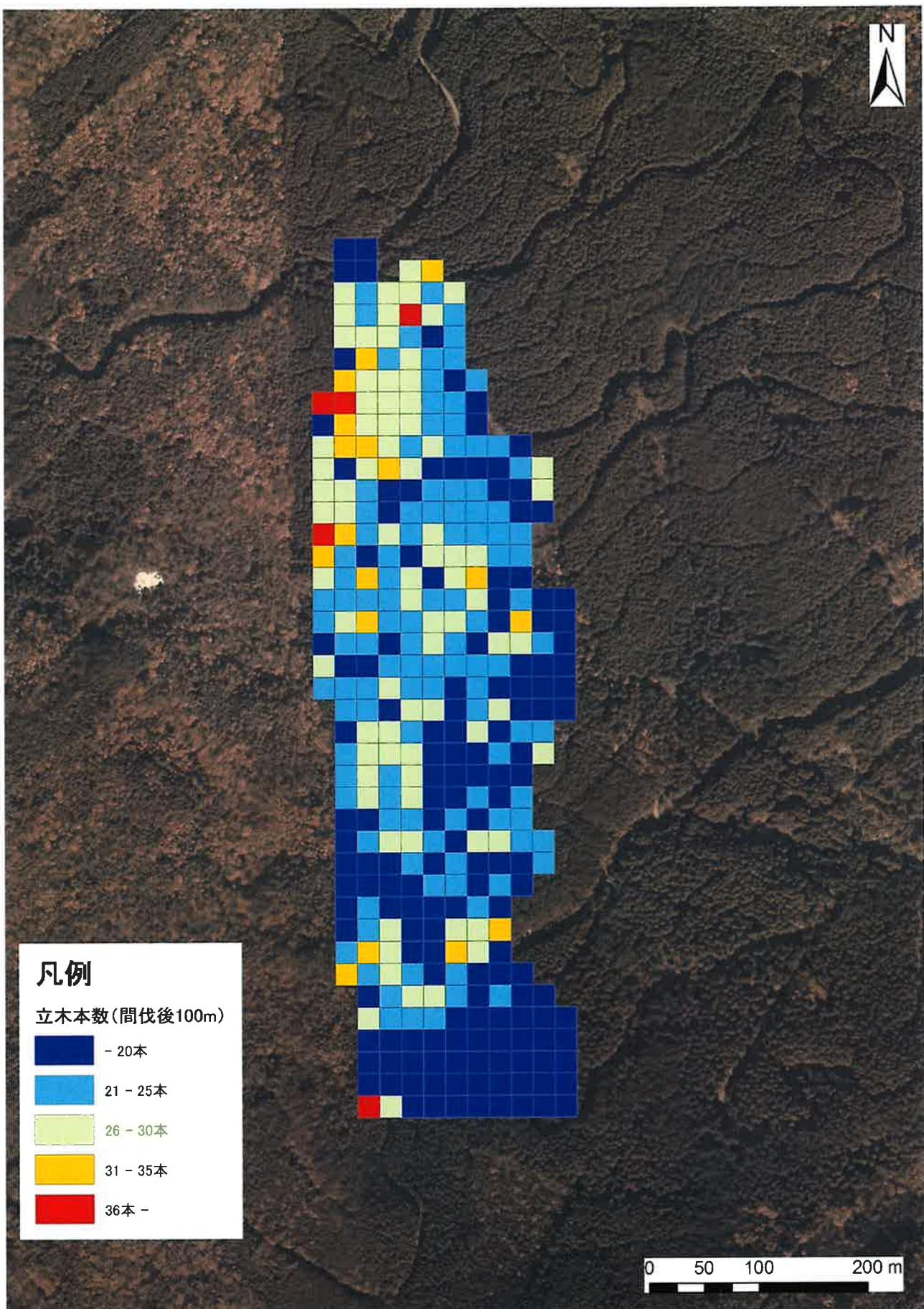


図 2-153 立木本数集計結果（間伐後/高度 100m）

## 2) 材積

合計材積については航空レーザ計測では  $4,845.59\text{ m}^3$ 、間伐後・高度 50m の UAV 写真計測は  $3,226.48\text{ m}^3$ 、間伐後・100m では  $2,886.46\text{ m}^3$  (表 2-81)。そこから算出した材積間伐率は高度 50m との比較では 33.4%、高度 100m では 40.4% となった。現地調査より材積間伐率は 22.6% であるため、合計材積はやや少なかった。

表 2-81 合計材積の集計結果

航空レーザ 計測	間伐前	間伐後	
	高度50m	UAV写真計測	
		高度100m	
合計材積	4,845.59	3,226.48	2,886.46
材積間伐率	33.4%		40.4%

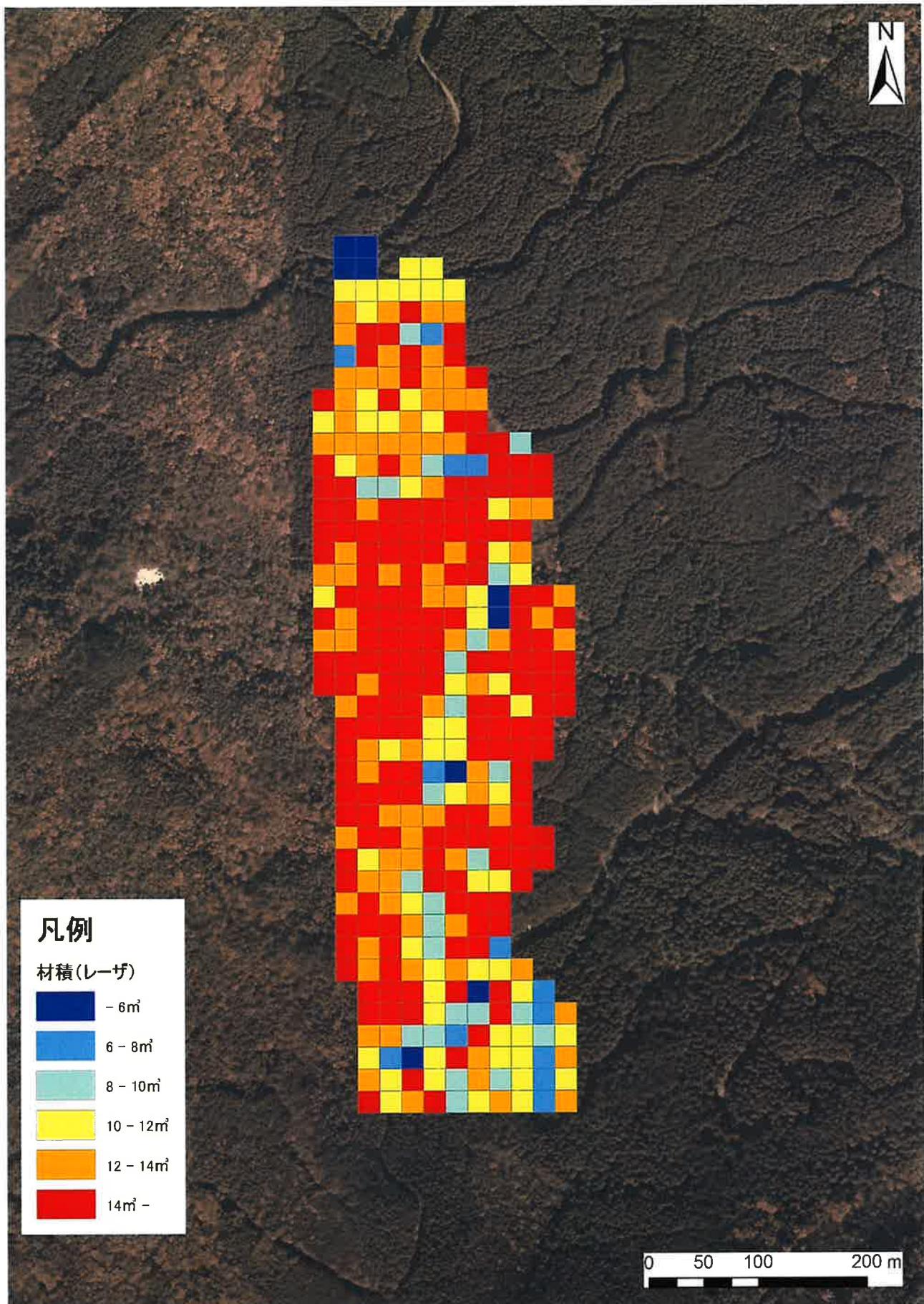


図 2-154 材積集計結果（レーザ）

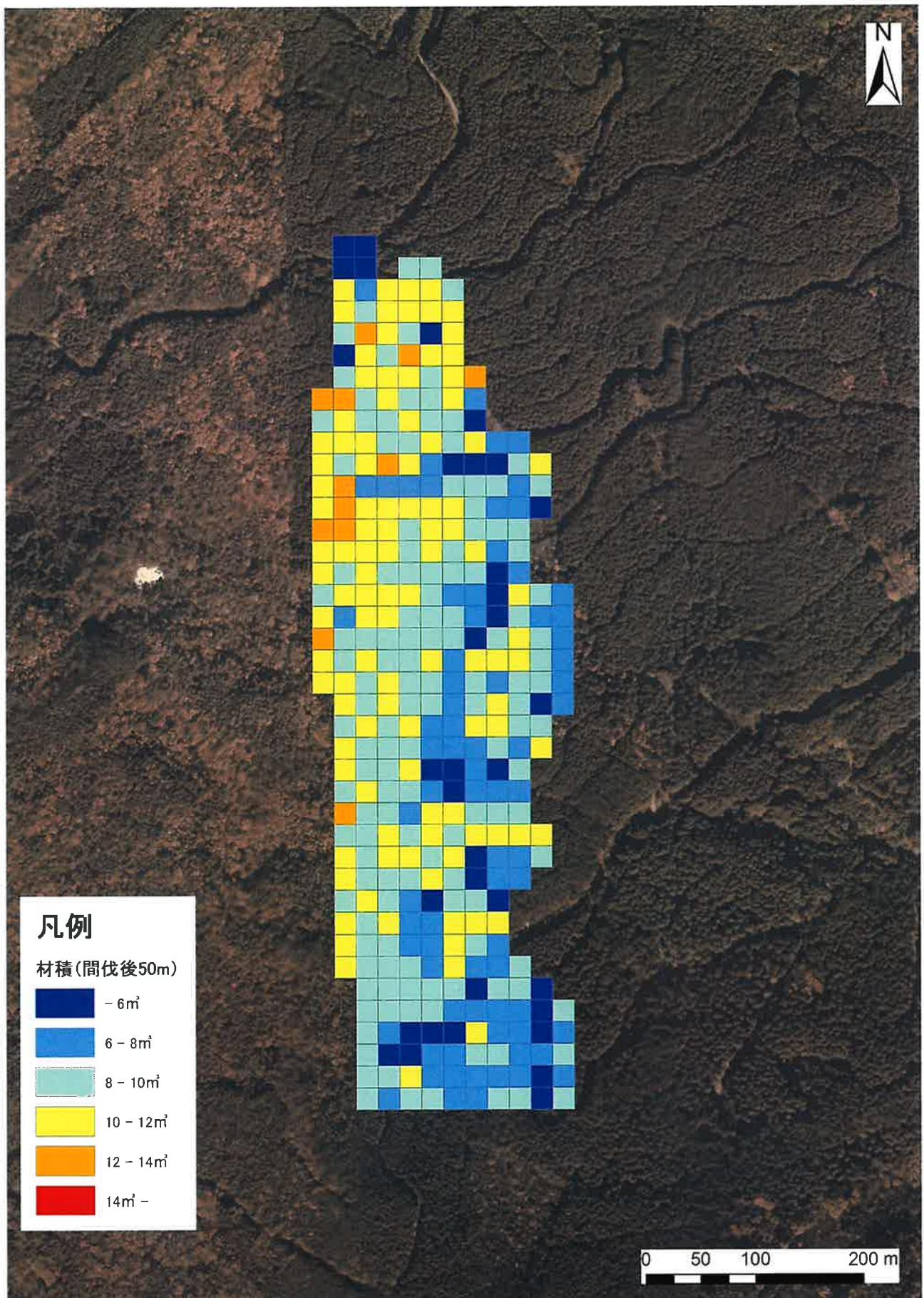


図 2-155 材積集計結果（間伐後/高度 50m）

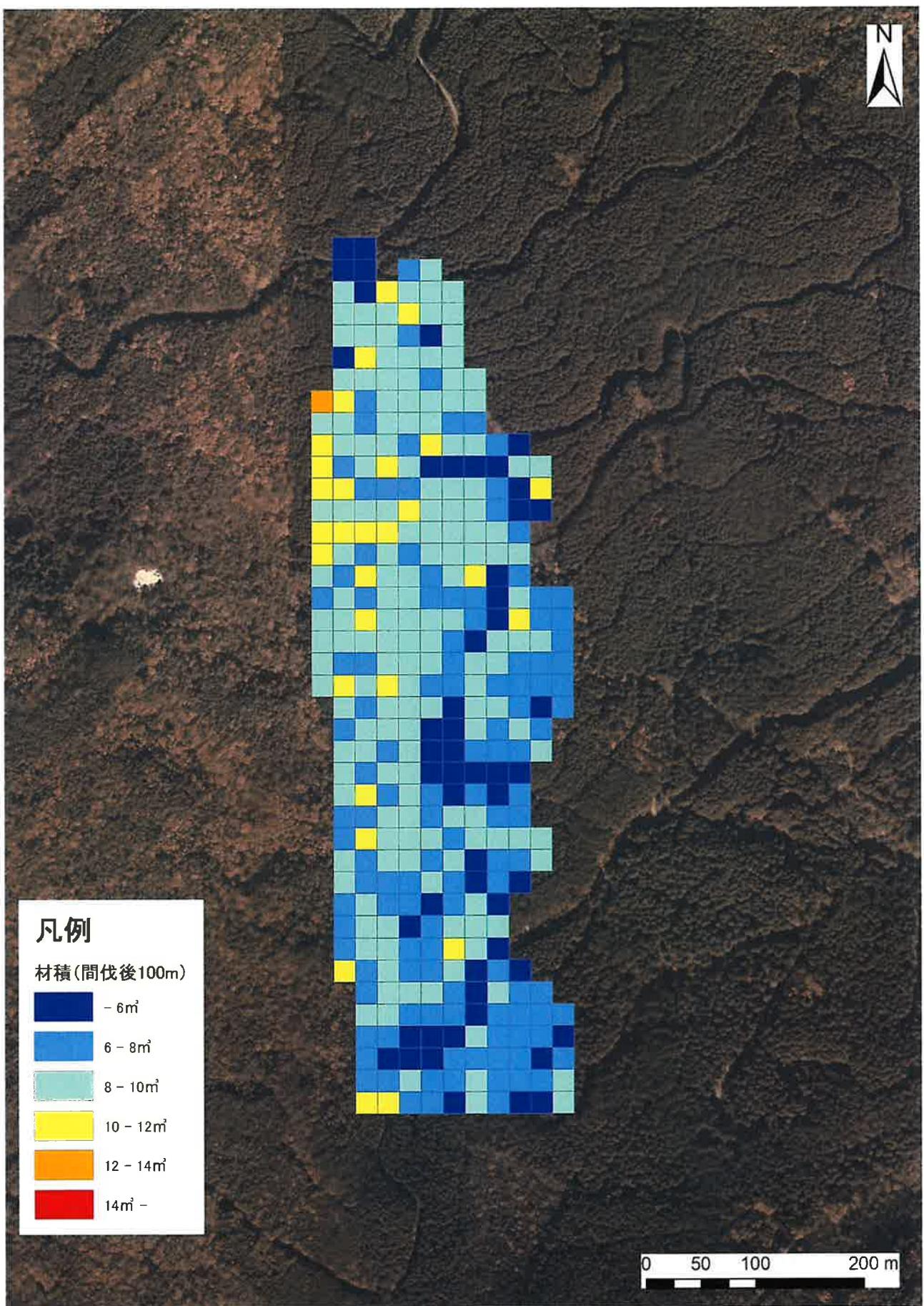


図 2-156 材積集計結果（間伐後/高度 100m）

## 6. UAV 写真計測による森林資源解析のまとめ

本検討では UAV 写真計測による森林資源解析の検討を行った。位置情報については GIS 上で GCP を設置し PhotoScan 上の 3D モデルで同じ箇所に座標を与えることで樹高計測には問題ない精度の DCHM を作成することができた。

UAV 写真計測による森林資源情報解析と航空レーザ計測による森林資源解析を比較した。オルソ画像は航空レーザ計測で作成する簡易オルソよりも解像度の高い画像を得ることができた。しかし、森林資源情報のうち立木密度については高度が高くなるほど樹頂点抽出数が過小になる傾向があった。材積は UAV 写真計測では立木本数が少なくなるため、材積も同じように少なくなる傾向がみられた。

表 2-82 UAV 写真計測による森林資源解析結果

オルソ画像		森林資源情報			
		立木本数	樹高	胸高直径	材積
航空レーザ計測	○	○	○	○	○
UAV 写真計測	高度50m	◎	△	○	△
	高度100m	◎	×	○	△

間伐後に立木本数の抽出精度が向上したこと、高度が 50m と 100m では 50m でより精度が高くなることから、UAV 写真計測を行った際の地上解像度と抽出可能な立木密度に関係があることが考えられる。今後の課題として高度と抽出可能な立木密度の関係を明らかにする必要がある。

## 第1節 はじめに

森林資源量の正確な把握は、国内外で注目を集めている。国内では、森林簿更新のために正確性の高い計測技術が必要とされている。国際的には REDD++という環境政策があり、熱帯途上国で簡易的で、そして正確に樹木を計測する技術が必要とされている。これまでの資源量把握には、人が計測した胸高直径と樹高から材積式によって材積を算出してきた。材積式は、樹種や地域によって異なる式が用いられてきているため、同一樹種でも異なる地域では、別の式を作成しなければならなかった。そのためには、多数の樹木を伐倒しなければならない。しかし、現在使用されている材積式は 1960 年代に作成された物をそのまま使用しており、長伐期化している現状に見合う正確性の高い式とは言い難い。材積式を更新する必要があると考えられる。

材積式を更新するために、新たに伐採するのは多大な労力を必要とするため、3 次元データが取得できるレーザー技術が注目されるようになった。特に、航空機レーザーが全国でデータ取得されるようになってきたため、航空機レーザーによるデータを用いて材積を推定する手法が検討されている。しかし、航空機レーザーは上空からレーザーを照射するために、これまでの材積式で必要とされている胸高直径の幹形状情報を得ることが難しい。その点を改善するために、上空からのレーザー照射でも計測できる樹冠形状を胸高直径に置き換えた式を作成し、材積を推定する手法が検討してきた。最近のレーザーの研究事例では、細かなレーザーによる点データをそのまま扱うのではなく、ラッピング法 (Kato et al., 2009) を用いて樹木構造を正確に把握した研究などが行われている（図 3-1）。



図 3-1 ラッピング法によってレーザーの点群から樹木形状を再現した例。

コンピュータグラフィック技術を用いて、レーザー点群から各樹木の樹冠部を認識し、点をラッピングし、形状を明らかにした。

現在使用されているレーザーによるデータ取得方法は 3 種類あり、航空機に搭載する「航空機レーザー」、車などの地上移動体に搭載する「車載レーザー」、そしてセンサーを林内に持ち運んで計測できる「地上レーザー」がある。航空機や車載からのレーザーデータは広域を効率良くデータ取得できるが、樹木の上部または側部のデータしか取得できないため、森林内の幹形状を取得できる地上レーザーが森林を計測するには最適と考えられる。地上レーザーは、照射する位置を自由に設定できるため、様々な方角から対象木の 3 次元データを収集できる。本章では特に地上レーザーに特化して、データ取得から解析結果を紹介したい。

地上レーザーセンサーと言っても様々な精度のセンサーが市販されており、設置したセンサーから半径 500m ~4,000m の長距離データを取得するタイプから、半径 100m~300m の中距離タイプ、半径 30m~120m の小型の短距離タイプがある。長距離レーザーの購入には 1,000 万円以上の費用が必要であるため、広範囲を効率良くデータ取得できる一方で、森林現場での保有はデータを整備するだけにそこまでの初期費用を捻出することは難しい。そのため長距離センサーを使用する際は、センサーを保有する測量会社などにデータの取得や解析を依頼する方が望ましい。その一方で、小型センサーは可搬性に優れ、100 万円~200 万円で購入できる。

よって、センサーの保有には小型センサーを購入するのが現実的である。センサーを保有できれば、外注する場合と異なり、対象とする林地を頻繁に、そして継続的に調査できるようになる。

地上レーザーはこれまでの航空機レーザーを用いた森林構造解析よりも細かい幹構造を計測できる。センサーを林内に設置してデータを取得するため、取得される3次元データは樹冠下部からのレーザー反射が多い。航空機レーザーでは正確に把握できない森林内部の詳細な状況が地上レーザーでは計測できるため、幹部を容易に計測できる。さらに、非破壊で森林の3次元構造を計測できるため、毎木調査等で行われている現地調査を飛躍的に効率化できると期待されている。これまでも毎木調査の調査項目を地上レーザーによって計測されてきた。樹高、胸高直径、毎木位置図を地上レーザーから正確に計測できる。

国内で使用されている地上レーザーセンサーには様々な種類があり、価格順にセンサーの名前を記載してある（表3-1）。上方に記載してあるセンサーが低価格で、下方にいくほどセンサー価格が高額になる。表1から値段に応じてレーザーの到達する距離が長くなることがわかる。レーザーのビーム幅（mrad）は距離に応じて広がるが、値段の高いセンサーはビーム幅があまり広がらない特性がある。

本研究では、様々なセンサーの中で、特に可搬性に優れた簡易型地上レーザーであるSICK LMS511を用い、森林現場でのデータ取得方法や計測精度も明らかにした。安価な簡易型地上レーザーセンサーはこれまでの研究でも普及が期待されている。

地上レーザーセンサーも航空機レーザーと同様に反射強度情報も記録できている。レーザーセンサーによつて使用する波長が異なる。主に、緑域から近赤外域の波長帯を用いている。本研究で用いるSICK LMS511は近赤外の波長を用いたレーザーである。レーザーの反射強度値を用いて樹種判別が行われた研究事例はあるが、地上レーザーの場合は照射距離が一様ではないため、キャリブレーションせずに反射強度をそのまま用いて樹種判別に用いることは難しい。また、照射対象物の固さによっても反射強度は変化するため、将来的に樹種判別できる可能性はあるが、現在の解析手法ではまだ可能とは言えない。

表3-1 市販されている代表的なレーザーセンサー一覧

メーカー	型番	最長距離 (m)	レーザー波長 (nm)	ビーム幅 (mrad)	重さ (kg)
Hokuyo	UTM_30LX-EW	30	905	3.0	0.21
SICK	LMS511	50	905	4.7	3.7
SICK	LD-LRS	120	905	4.7	4.1
FARO	Focus 3D S	153	905	0.19	5
Leica	Scan Station C5	300	532	0.2	14
Leica	Scan Station C10	300	532	0.2	13
Leica	Scan Station P20	120	808 / 658	0.2	14
TOPCON	GLS-1500	550	1535	0.16	16
RIEGL	VZ-400	600	1550	0.35	9.6
RIEGL	VZ-1000	1400	1550	0.3	9.8
RIEGL	VZ-4000	4000	1550	0.14	14.5

注) メーカーホームページに掲載してあるカタログから作成

## 第2節 解析方法

### 第1項 地上レーザー

本研究では、国内で最も安いレーザースキャナーの一つであるLMS511（SICK社製）を使用した。計測可能距離は50mである。本研究で使用した地上レーザーシステムは、千葉大学 環境リモートセンシングセンター 本多嘉明准教授、梶原康司講師によって開発されたものであり、本研究のためにご協力いただいた。SICK LMS511センサー自体にはスキャナー機能がなく、センサーは水平方向にレーザーを照射するラインセンサーである。そのため、そのラインセンサーを縦置きにし、回転台（いづみ製作所製）を取り付けることで3次元レーザースキャナーとした（図3-2）。また、計測時の水平・垂直角度分解能は0.1667度に設定してデ

ータ取得を行った。計測時間は360度1回転を3分程度で計測できる。

## 第2項 研究対象地

それぞれのレーザーセンサーの性能を現地で検証するため、本研究では岐阜県中津川市苗木財産区有林11林班を対象地とした。樹種はヒノキ48年生であり、平均傾斜は20%程度の緩傾斜である。対象地にプロットを3箇所選定し、2015年12月にデータを取得した（図3-3、表3-2）。調査プロット1は、下層植生があり、さらに緩傾斜がある場所であり、プロット2は、下層植生が少なく、ほぼ平坦な場所であり、プロット3は、広葉樹等が林内にあり、プロット1よりも傾斜がある場所を選んだ。



図3-2 本研究に用いた地上レーザー

（SICK LMS51、レーザーセンサ下に回転台を取り付け、スキャナーシステムとした）

表3-2 計測プロット一覧

No	主要樹種	傾斜
1	ヒノキ林	緩斜面
2	ヒノキ林	ほぼ平坦
3	ヒノキ林	緩斜面

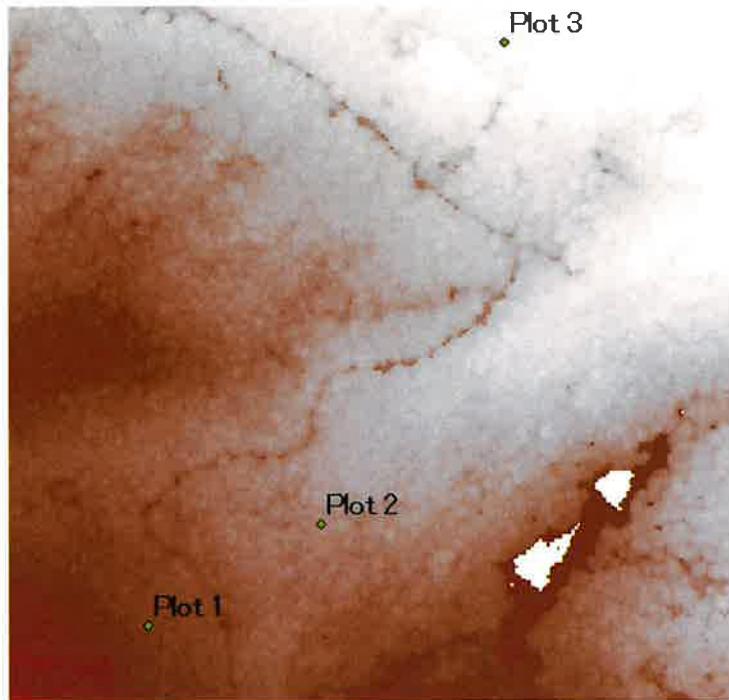


図 3-3 各調査区の場所

(Plot 1 は緩傾斜で下層植生があるヒノキ林。Plot 2 は下層植生がない平坦なヒノキ林。Plot3 は Plot1 よりも傾斜がある広葉樹林のあるヒノキ林。)

### 第3項 現地計測

地上レーザーを計測する手順として、地上レーザーを設置する最適な場所を決めなければならない。地上レーザーによるデータ取得には、対象とする森林の 1) 立木本数、2) 下草の状況、3) 傾斜 が影響を及ぼす。これらの条件を考慮した上で、現地踏査での状況を踏まえて最適なセンサー設置箇所を決める。地上レーザーを林内で設置してデータを収集する際、1 箇所のみでは樹木の一側面しかデータ取得ができないが、タイポイントという基点を現場で設置することで、タイポイントを基準に様々な場所から取得したデータをデータ合成できる。その結果、樹木のすべての面のデータ補完ができ、データを収集することができる。

地上レーザーセンサーの設置方法は、調査プロットの中心に 1 箇所まず設置し、水平方向で全方位 (360 度) のデータを取得し、さらに、調査区画のコーナーに 4 箇所設置し、プロット全体のデータを取得した。本研究で使用したレーザーセンサーの性能である最大照射距離を考慮し、それ以上の大きさのプロットにならないよう気をつけなければならない。最大照射距離よりも大きなプロットを対象とする場合は、新たなセンサー設置点を設け、データを合成する必要がある。本研究対象地では地上レーザーからパノラマ図を作成し、森林内の状況を示した (図 3-4)。

#### 2.4 レーザーの解析方法

レーザーによって 3 次元データを収集した後、地形図である Digital Terrain Model (DTM) と地表面図である Digital Surface Model (DSM) を作成する。DSM と DTM の差分から Digital Canopy Model (DCM) や Digital Canopy Height Model (DCHM) と呼ばれる樹冠高デジタルデータを作成できる (本章では DCM と記載する)。DCM から樹高計測することになるため、DTM の精度は重要である。これまでの航空機レーザーでは、ラストリターンから DTM に使用するデータを分類することができるが、地上レーザーは、最後に反射してくるラストリターンが必ずしも地形からの反射ではないため、ラストリターンを使用することはできない。そのため、本研究では地上レーザーで取得された 3 次元データの標高値の最低点だけを集め、初期の DTM を作成した。さらに、その中で幹の一部から反射されてきている場所 (他の場所よりも高い位置になっている場所) を自動で特定し、ノイズとして除き、地面を自動判別した。ノイズとして除いた場所が空いてしまうため、内挿法を

用いて穴を補完した連続データを作成した。地上レーザーから作成した地形図を図 3-5 に示す。

樹高計測に一番簡易な手法として DCM のピークを自動で判別し、そのピークを梢端と定義し、樹高計測を行う（図 3-6）。航空機レーザーデータの解析でも用いられる一般的な手法である。しかし、梢端の位置が幹元の位置と一致する訳ではないため、正確な樹木位置図を作成するには地上レーザーによる地上計測が優れてい る。さらに、正確な毎木位置図が作成できれば、地上レーザーによって取得された幹部データを自動で切り出し、様々な高さでの幹直径を 3 次元データから計測できる。地上レーザーから幹部の樹木位置図を作成した例を図 3-7 に示す。作成した樹木位置（幹部）の場所を基準に、地上レーザーを胸高直径の高さで切り出し、その幹直径を自動計測した。樹高は、切り出した単木単位のレーザー点群の最大の高さとした。

レーザーによる 3 次元データから幹を計測する解析手法として、円を当てはめて幹直径を推定する方法が主流であるが、ニューラルネットワークの手法を応用し、複雑な幹形状をそのまま正確に計測できるアルゴリズムを開発した（図 3-8）。その結果、人が現場で計測するのと同じ精度で計測ができるようになった。

さらに、本研究では、樹木の曲がりを評価するために、幹部の中心位置を高さ 1m 間隔でレーザーデータを抜き出し、中心位置を自動で把握した。

Plot1



Plot2



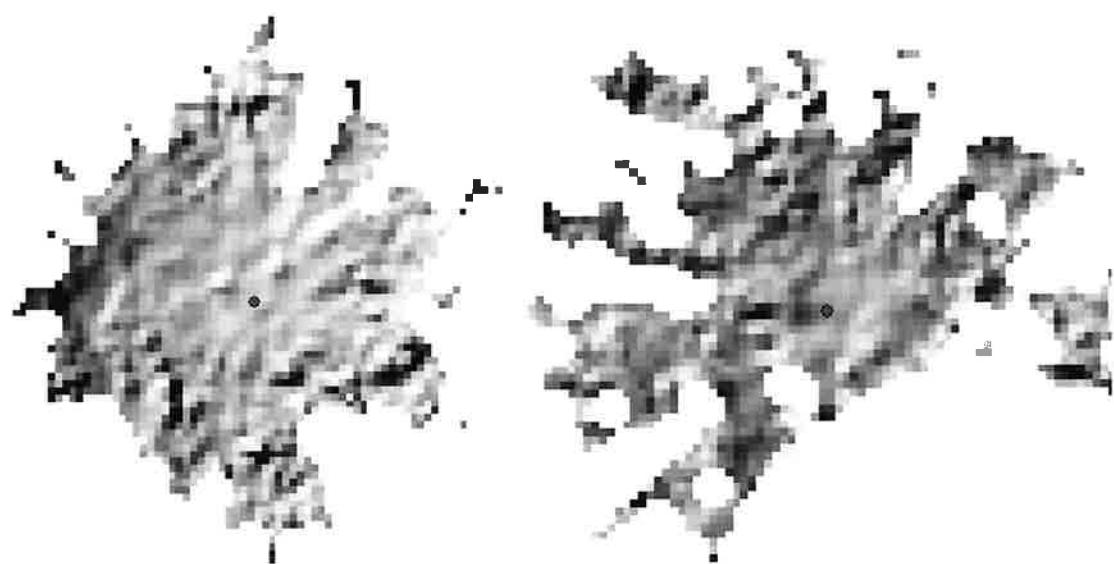
Plot3



図 3-4 各調査区の様子

（Plot 1 は緩傾斜で下層植生があるヒノキ林。Plot 2 は下層植生がない平坦なヒノキ林。Plot3 は Plot1 よりも傾斜がある広葉樹林のあるヒノキ林。地面データは除いて表示している。）

Plot 1



Plot 2



Plot 3



図 3-5 地上レーザーから作成した地形図  
図中の赤色点はセンサーを設置した場所

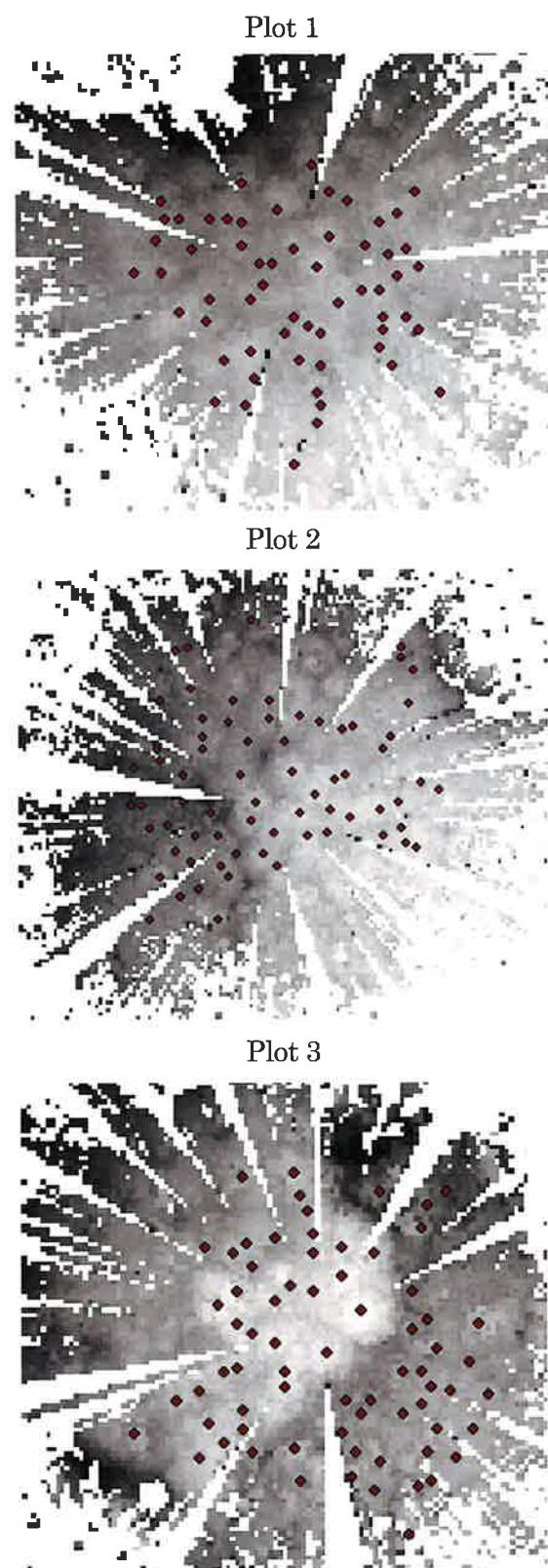
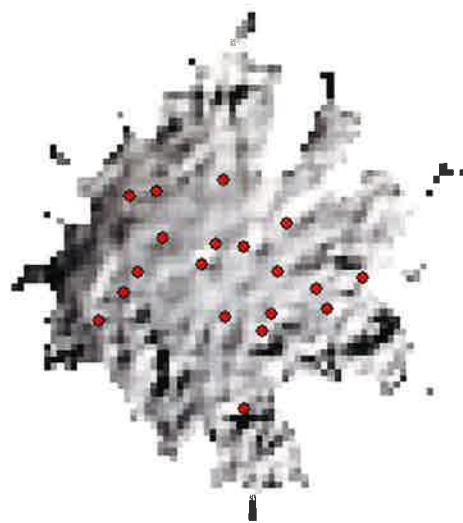
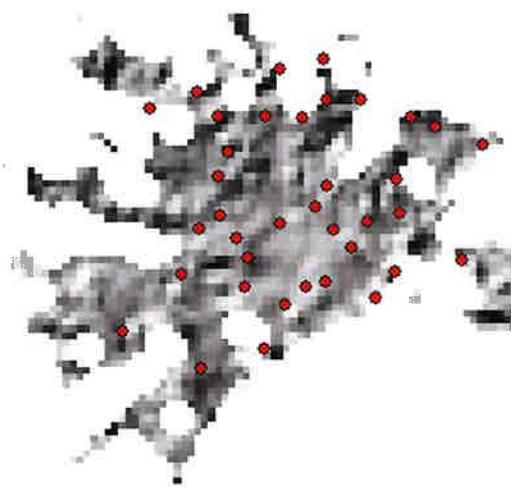


図 3-6 DSM から樹頂点を自動で把握した結果

Plot 1



Plot 2



Plot 3

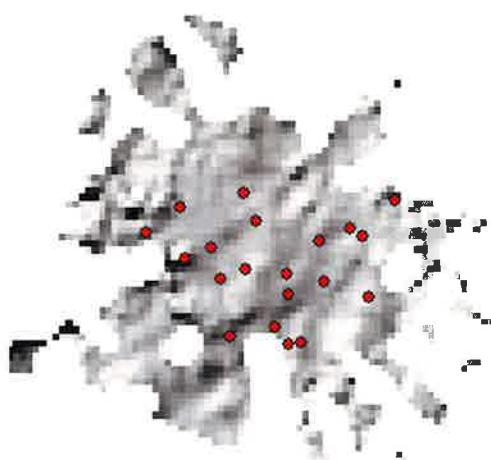


図 3-7 地上レーザーによって把握できた樹木位置図

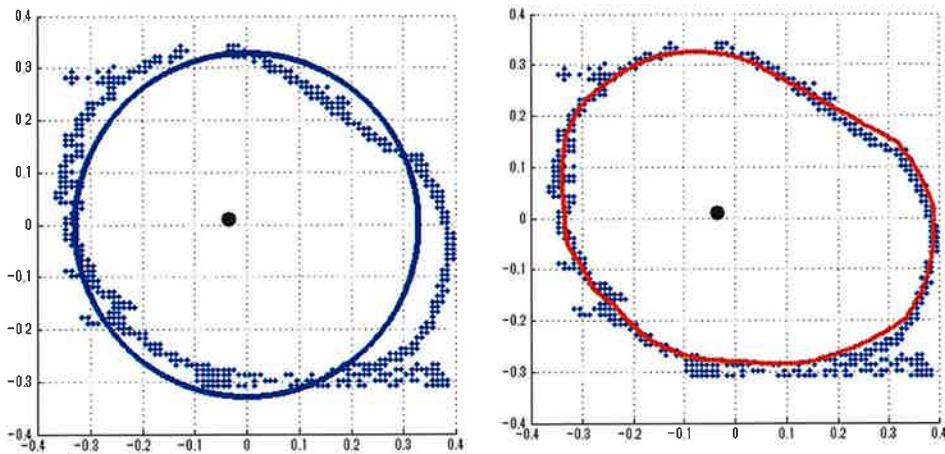


図 3-8 地上レーザーで取得した 3 次元データから胸高直径の位置でデータを切り出し、その幹形状を円推定ではなく、より形状に沿って計測した解析結果

(背景の青色点：地上レーザーデータから胸高直径の位置でデータを切り出した点群、左図：青線が円による推定、右図：赤線が本研究に用いた手法による結果。赤線が不定形の幹形状を正確に当てはまることがわかる。)

### 第3節 結果と考察

地上レーザーにより計測した結果の精度を検証するために、樹高、胸高直径を現地で実測したデータと比較し、正確性を検証した（図 3-9、図 3-10）。これらの結果から、レーザーによって取得された 3 次元データから計測した結果でも十分に正確性の高い樹木データが取得できることがわかった。よって、樹木をマニュアルで計測した不正確なデータ収集を行わなくとも、レーザーによって解析する結果だけで十分に質の高いデータが提供できることがわかった。マニュアル計測のように測定者の技量に関係なく、誰でも同じように樹木計測ができることが本研究によって実証できた。

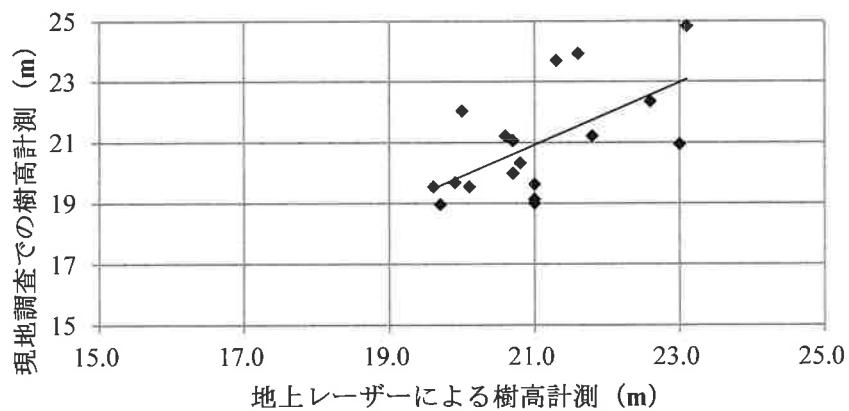


図 3-9 地上レーザーから計測した樹高を現地で計測した値と比較した結果

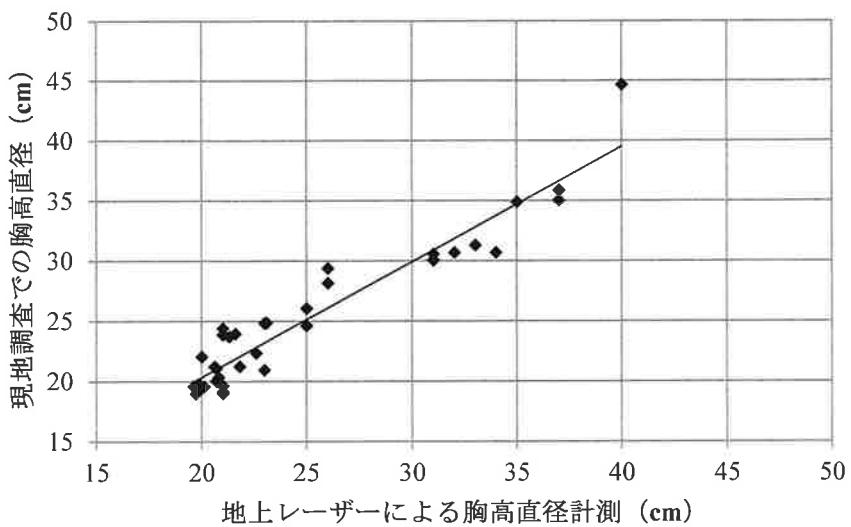


図 3-10 地上レーザーから計測した胸高直径を現地で計測した値と比較した結果

図 3-9、図 3-10 より相関直線が 1 対 1 の対応を表していることがわかる。精度を評価するために各結果から平均二乗誤差を樹高と胸高直径で計算したところ、樹高では 1.38m で、胸高直径では 2.13cm の誤差で計測できていることがわかった。これらの結果より人が計測するのと同等の正確性で材積を評価するために必要な樹高と胸高直径が計測できた。

各プロットの曲がりを評価するために、幹の中心点を自動で抜き出した結果を図 3-11、図 3-12、図 3-13 に示す。

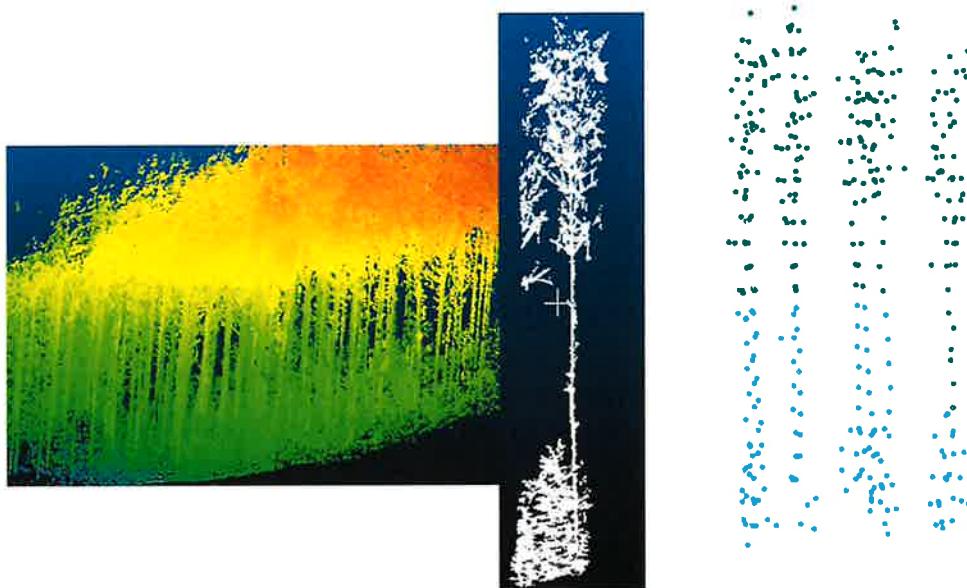


図 3-11 Plot 1 での対象木の曲がり評価

(左図 : Plot 1 全体の 3 次元データ、中図 : 単木で抜き出したデータ、右図 : 複数の樹木を対象に、曲がりを評価するために幹中心位置を自動判別した結果)

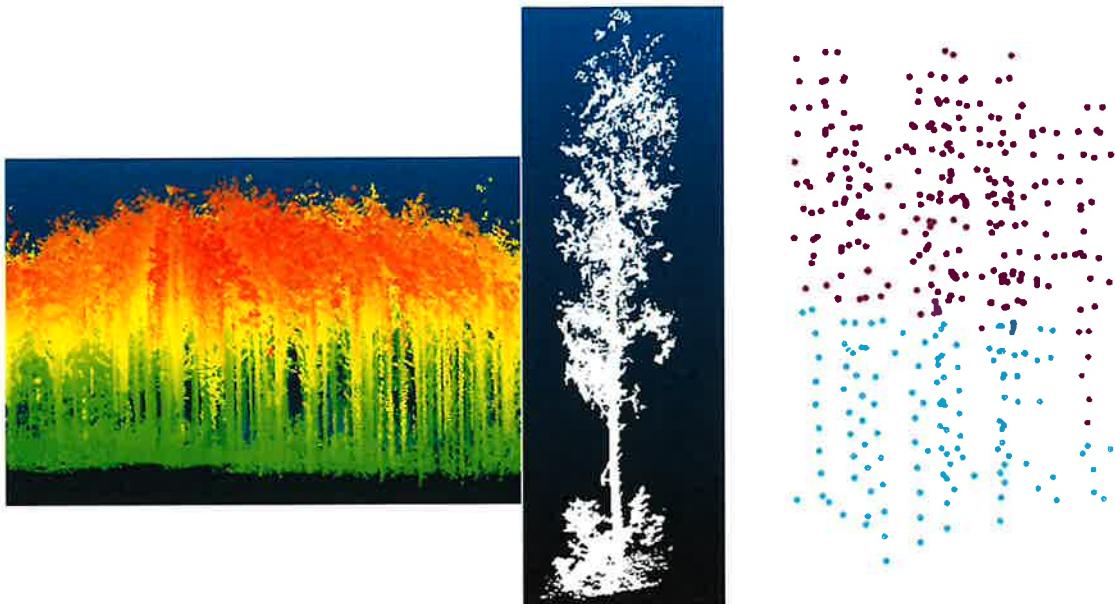


図 3-12 Plot 2 での対象木の曲がり評価

(左図 : Plot 1 全体の 3 次元データ、中図 : 単木で抜き出したデータ、右図 : 複数の樹木を対象に、曲がりを評価するために幹中心位置を自動判別した結果)

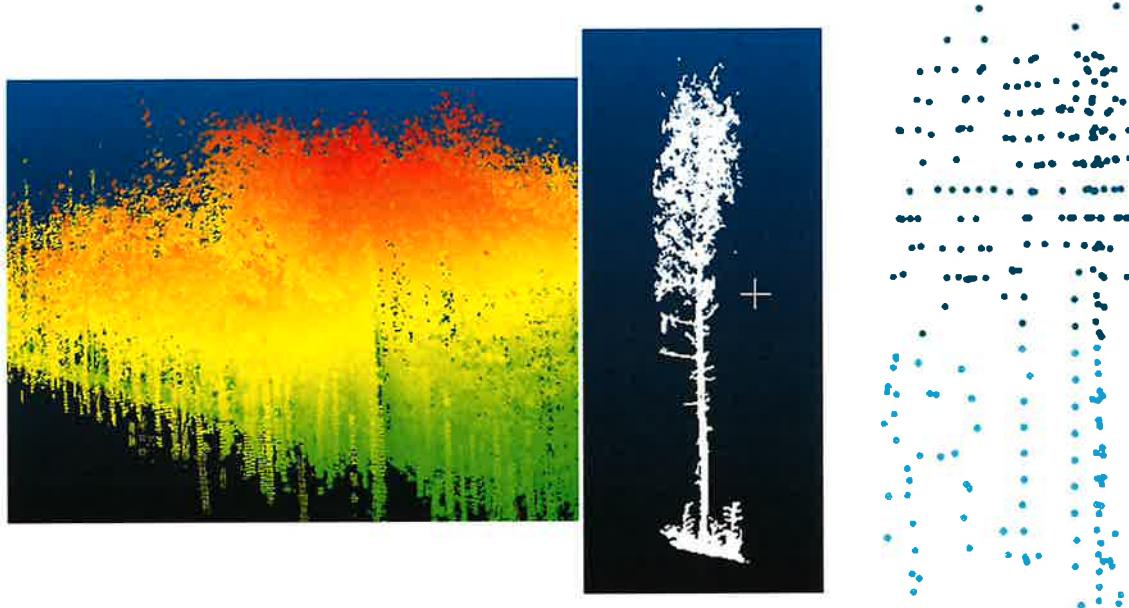


図 3-13 Plot 3 での対象木の曲がり評価

(左図 : Plot 1 全体の 3 次元データ、中図 : 単木で抜き出したデータ、右図 : 複数の樹木を対象に、曲がりを評価するために幹中心位置を自動判別した結果)

図 3-11、図 3-12、図 3-13 より幹中心位置が樹冠下部までは一列に並んでいることがわかる。樹冠内部になると、点が散らばるようになる。その原因として、地上レーザーによる高密度データを使用したとしても、樹冠内部の幹部と葉部を自動判別できない。その結果、幹部だけを特定し、中心位置を計算することが難しい。と図 3-12 の単木単位でのレーザーデータを比較すると、図 3-12 は図 3-11 より樹冠下に枝が残っているが、幹中心を自動判別した結果では、幹部のみを抽出できていることがわかる。本研究では、曲がりの評価ができる幹部中心位置を樹冠下までは自動で抽出することができた。今後、樹冠内部でより高密度のデータが取得できれば、樹頂点までの様々な高さで、幹の曲がりを測定できると考えられる。今回は地上レーザーの 3 次元デ

ータを約 20m 四方のプロットを対象としてデータを取得したが、単木単位でもデータを取得できる。センサーの設置箇所をより対象木に近づけ、より詳細な樹冠内部の 3 次元データを得ることができれば、樹冠内の幹情報も取得できる。その結果、樹冠内の幹の曲がりも伐倒せずに測定できると考えられる。データ取得範囲と計測にかける時間を考慮する必要がある。

#### 第4節 まとめ

地上レーザーは、人による従来の森林計測よりもデータ取得効率や計測精度が飛躍的に向上し、マニュアルによる計測誤差を最小限に抑えてデータ取得ができるため、森林調査分野で大変有効な測定技術である。センサーは安いものから高額なものまで様々な種類が利用可能である。本研究では、安価なセンサーを用いたが、樹高計測で 1m ほどの誤差、胸高直径計測で 2cm の誤差であった。従来の人による計測と比較しても同等の精度で計測ができることがわかった。また、曲がりに関しても樹冠下までは幹の曲がりを自動で計測することができるすることがわかった。これらの情報をもとに、材質を評価する ABC 材等の評価に結果を反映したい。

平成 29 年 6 月 30 日 発行

編集・発行 公益社団法人 森林保全・管理技術研究所

郵便番号 102-0085

住 所 東京都千代田区六番町 7 番地 日林協会館

T E L 03-5212-8148

F A X 03-6737-1237

E-mail office@hozen-ken.jp

U R L <http://www.hozen-ken.jp/>