

平成 30 年度

「国有林における収穫調査等の効率化  
手法実践体制構築委託事業」

報 告 書

平成 31 年 3 月

林 野 庁

# 目 次

1	事業の概要	1
1.1	背景及び目的	1
1.1.1	事業の背景	1
1.1.2	事業の目的	1
1.2	実施体制	2
1.2.1	事業の構成	2
1.2.2	実施者	2
1.2.3	委員会の構成	3
1.3	事業の実施方針	4
1.3.1	調査対象地域	4
1.3.2	推定式作成手法の検討	4
1.3.3	既存の推定式等の活用の検討	4
1.3.4	推定精度向上の取組方策の検討	4
1.3.5	汎用ソフトを用いた UAV による立木調査方法の手順の整理	5
1.3.6	被圧木等の推定	5
1.3.7	過去の収穫調査データを活用した材種・品質区分の推定	5
1.3.8	UAV を使用した収穫調査の工程の整理及び人工数の把握	5
1.3.9	各種 GNSS 受信機における特徴の把握	5
2	調査地と調査方法	6
2.1	調査対象区域	6
2.2	調査プロットの設定	7
2.3	プロット調査	8
2.3.1	従来型毎木調査	8
2.3.2	地上レーザ計測	9
2.4	UAV による空撮	11
2.4.1	準備作業	12
2.4.2	UAV 画像の撮影	12
2.4.3	UAV による上空からの撮影	13
2.4.4	プロット区画の位置情報の取得	14
2.4.5	UAV による樹高の測定方法	15
3	プロット調査の結果	17
3.1	毎木調査の結果（従来型）	17
3.2	毎木調査の結果（地上レーザ計測）	19
4	UAV による撮影画像の解析	22
4.1	解析手法・手順の概要	22
4.1.1	UAV 撮影画像の SfM 解析	23
4.1.2	DCSM データ及び DEM データの作成	23
4.1.3	樹頂点の抽出と樹冠ポリゴンデータの作成	24

4.2	汎用ソフトによる SfM 解析の結果	25
4.3	汎用ソフトによる SfM 解析の課題	28
4.3.1	解析パラメータの設定	28
4.3.2	DEM データの整備	29
5	UAV 収穫調査のための胸高直径推定式作成手法の検討	30
5.1	胸高直径推定式の現状と課題	30
5.2	既存の推定式	30
5.3	胸高直径推定式の検討	31
5.3.1	胸高直径推定式の試案	32
5.3.2	推定式作成の前提条件	35
5.4	樹形モデルによる胸高直径推定式	36
6	被圧木等の推定	40
6.1	径級別本数割合からみた被圧木の状況	40
6.2	収穫調査における被圧木補正の考え方	41
7	過去の収穫調査データを活用した材種・品質区分の推定	44
8	UAV を活用した収穫調査の工程及び人工数	46
9	UAV による立木調査方法のまとめ	47
9.1	UAV 撮影画像の品質向上に向けた留意点	47
9.1.1	撮影時の気象条件	47
9.1.2	飛行計画	47
9.1.3	UAV 搭載カメラの設定	48
9.2	汎用ソフトを用いた SfM 解析の留意点	48
9.3	SfM 解析に必要な位置情報の精度と取得方法	49
9.4	樹高の求め方	51
9.5	胸高直径推定式の特徴と精度確保	52
9.6	径級別本数及び材積の補正方法の検討	53
10	各種 GNSS 受信機における特徴の把握	54
10.1	調査機種 (GNSS 受信機)	54
10.2	精度検証地	55
10.3	精度検証方法	58
10.4	精度検証結果	58
10.4.1	座標値の誤差	58
10.4.2	SBAS と座標誤差	58
10.4.3	地形等と座標誤差	60
10.4.4	面積の誤差	62
10.4.5	面積誤差の範囲推定	63
10.4.6	精度検証のまとめ	70

# 1 事業の概要

## 1.1 背景及び目的

### 1.1.1 事業の背景

#### (1) 国有林材の販売に係る情勢

国有林野事業においては、利用期に達した人工林を伐採し、将来的に均衡のとれた齢級構成に誘導するとともに、国産材の安定的・効率的な供給体制の構築に貢献するため、立木販売を中心に収穫量を増加させることとしている。このような中、立木価格の低迷や限られたマンパワーに対応しつつ、収穫調査を効率的かつ適切に実施していくことが重要な課題となっている。

#### (2) デジタル技術を活用した効率的で実用可能な収穫調査方法等の進展

国有林における収穫量が増大していく中で、収穫調査等国有林材の販売関連業務分野において ICT 技術を積極的に活用し、業務の効率化を推進することが求められている。また、国有林における ICT 技術の開発・利用推進は、広く民有林も含め、スマート林業の構築にも大きく貢献できるものと考えられ、国有林において、これら技術を開発し、汎用化させることが、今後のわが国の林業成長産業化においても極めて重要な先導的役割を果たすこととなる。

### 1.1.2 事業の目的

昨年度実施された「国有林材の販売に係る収穫調査等の効率化手法検討委託事業(以下、「平成29年度事業」という)において、UAV(巻末 用語説明参照)によるオルソ画像を使用した立木調査(以下、「UAV立木調査法」という。)の手法について現地実証を行ったところ、標準地調査と同程度の材積推定精度及び工期が見込まれるという結果が得られた。

本事業は、UAV立木調査法等について、具体の工程の整理を行うとともに、追加の検証等を行い、国有林野事業に導入するために必要な調査手順等の考え方、精度向上に向けた取組方針等を検討するとともに、職員等向けマニュアル案の整理等を行うものである。

## 1.2 実施体制

### 1.2.1 事業の構成

#### (1) 推定式作成手法等の整理

UAV 立木調査法を国有林野事業に本格的に導入するためには、上空の空撮画像から立木情報を推定する手法を整備することが不可欠である。平成 29 年度事業においては、調査対象地及びその近辺の類似林分におけるプロット調査により樹冠面積及び樹高から胸高直径を求める推定式を作成し、従来型の標準地調査法と同程度の精度が得られた。本事業では、現地調査によって取得した胸高直径データと UAV によるオルソ画像から把握した樹冠面積等の関係から作成する推定式の効率的な作成方法及びその適用範囲を明らかにする。

#### (2) 汎用性のある解析手法に係る精度検証、解析手順等の整理

森林管理局署で運用していくことを前提とした UAV 立木調査法について、汎用性のある手法による場合の解析手順、解析の際の留意点等を整理するとともに、その精度検証を行う。また、外部委託などで想定される独自手法による立木調査法に係る精度の考え方について検討する。

#### (3) UAV 立木調査法における課題の克服

UAV 立木調査法においては、被圧木等が認識されにくく、材種・品質区分が困難である等の課題があり、これを克服するための手法について検討する。

#### (4) UAV を使用した収穫調査等に係る工期等の把握

UAV を使用した収穫調査に係る計画から調査、復命書作成に至る各工程、推定式作成に係る計画からプロット調査、推定式決定に至る各工程について整理するとともにその作業に要する人工数を把握する。

#### (5) 各種 GNSS 受信機における特徴の把握

国有林野事業において使用されている GNSS 受信機（巻末 用語説明参照）を中心に、測定条件の違いによる精度特性等を把握するとともに、実測による誤差の確認を行う。

### 1.2.2 実施者

一般財団法人日本森林林業振興会に委託し、一部業務はアジア航測株式会社に再委託された。

事業実施体制は表 1.2.1 のとおりである。

**表 1.2.1 事業実施体制**

<b>【技術担当】</b>											
管理技術者 石田祐二(常務理事)	<table border="1"> <tr> <td>UAV撮影担当</td> <td>川瀬政輝(本部)</td> </tr> <tr> <td>技術収集分析担当</td> <td>千葉幸弘(本部)</td> </tr> </table>	UAV撮影担当	川瀬政輝(本部)	技術収集分析担当	千葉幸弘(本部)						
UAV撮影担当	川瀬政輝(本部)										
技術収集分析担当	千葉幸弘(本部)										
	<table border="1"> <tr> <td>収穫調査担当</td> <td>山本富夫(東京支部)</td> </tr> <tr> <td>プロット調査担当</td> <td>北岡 哲(本部)</td> </tr> <tr> <td>UAV画像解析担当</td> <td>高野一隆(高知支部)</td> </tr> </table>	収穫調査担当	山本富夫(東京支部)	プロット調査担当	北岡 哲(本部)	UAV画像解析担当	高野一隆(高知支部)				
収穫調査担当	山本富夫(東京支部)										
プロット調査担当	北岡 哲(本部)										
UAV画像解析担当	高野一隆(高知支部)										
	<table border="1"> <tr> <td>GNSS担当</td> <td>浪岡保男(本部)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>坂井敏純(本部)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>竹谷幸久(青森支部)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>後藤良寛(秋田支部)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>能登忠博( " )</td> </tr> </table>	GNSS担当	浪岡保男(本部)		坂井敏純(本部)		竹谷幸久(青森支部)		後藤良寛(秋田支部)		能登忠博( " )
GNSS担当	浪岡保男(本部)										
	坂井敏純(本部)										
	竹谷幸久(青森支部)										
	後藤良寛(秋田支部)										
	能登忠博( " )										
	<table border="1"> <tr> <td>照査技術者</td> <td>山口正三(理事)</td> </tr> </table>	照査技術者	山口正三(理事)								
照査技術者	山口正三(理事)										
<b>【契約担当】</b> 浪崎 晃(本部)											
<b>【再委託】</b> 画像処理、SfM(巻末 用語説明参照)解析による立木調査は、専門の画像解析技術及び施設を有し、実績が豊富な「アジア航測株式会社」を協力機関として、一部業務を再委託により実施。											

### 1.2.3 委員会の構成

本事業の実施に当たっては「国有林における収穫調査等の効率化手法実践体制構築検討委員会」(以下「検討委員会」と言う。)を設置し、技術的指導及び助言を受け、検証方法、検証結果の分析評価を行った。委員は、収穫調査、素材生産、ICT 技術等に関する学識経験者等が含まれるよう、林野庁担当職員と調整の上構成した。検討委員会は平成 30 年 10 月 18 日、平成 31 年 2 月 4 日の 2 回開催した。検討委員会構成員及び検討委員会での検討事項は、それぞれ表 1.2.2、表 1.2.3 のとおりである。

**表 1.2.2 検討委員会名簿**

氏名	所 属
加藤 正人	信州大学 先鋭領域融合研究群 山岳科学研究所 教授
細田 和男	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 資源解析研究室長
鹿又 秀聡	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 林業システム研究室
松岡 真如	高知大学 教育研究部 自然科学系農学部門 准教授
平川 素行	一般財団法人経済調査会 監事

**表 1.2.3 検討委員会検討事項**

第1回検討委員会	調査対象技術の選定 調査実施計画の検討	平成30年10月18日
第2回検討委員会	調査結果の分析と評価 報告書のとりまとめ方針の検討	平成31年 2月 4日

### 1.3 事業の実施方針

事業の実施方針については、事業の目的並びに効率的で実用可能な収穫調査方法検証の有効性を確保することを基本に、林野庁担当官と調整の上、第1回検討委員会での検討委員の意見を踏まえて以下のとおり、取り組むこととした。

#### 1.3.1 調査対象地域

関東森林管理局管内の主伐対象スギ人工林が多く存在する流域であって、本事業における調査時期が冬季になり得ることを考慮して、茨城森林管理署管内、八溝・多賀流域の国有林を調査対象地域として選定した。

#### 1.3.2 推定式作成手法の検討

UAVによる空撮画像の解析によって収穫調査を行うためには、当該林分の画像解析から林木の樹高や樹冠面積等をデータ化して、そのデータをもとに胸高直径を推定する必要がある。平成29年度事業でも指摘されているように、樹冠面積等から胸高直径を求める「推定式」については、対象林分の林齢、林分密度、斜面傾斜、その他の立地条件等の影響を考慮する必要があると考えられる。そのため、本事業では、胸高直径「推定式」を作成する手法の確立に向けて、調査区域を設定して、UAVによる空撮画像を取得して、当該林地に適用可能な推定式を作成するとともに、胸高直径推定値の妥当性・再現性を検証することなどを含めた一連の作業について、以下の手順で整理する。

##### ① 合計40箇所程度の調査プロットの設定

- ・ 流域内の多様な立地条件（地位級等）をバランス良くカバーするよう選定
- ・ 6地域×6～7箇所程度のプロット（1プロットの面積0.04ha程度）
- ・ スギVI～XⅡ齢級（主伐対象林分～間伐対象林分）

##### ② プロット調査の実施

- ・ プロットの位置情報の取得
- ・ UAVによるステレオ写真取得
- ・ SfM解析（汎用ソフト）による樹冠面積、樹高、本数、立木配置の取得
- ・ 地上におけるプロット調査（人力及び地上レーザスキャナ）
- ・ 胸高直径、本数、立木配置の突合

##### ③ 樹冠面積等の説明変数から胸高直径推定式の検討

- ・ プロット箇所数（最大40箇所程度）、プロットの面積（0.01～0.04ha）を変化させることを想定して、次の2つのケースで推定式を検討する
  - ケース 1 : 流域全体に一律に適用する推定式
  - ケース 2 : 流域内の地位級等に区分して適用する推定式

##### ④ 胸高直径推定式の照査

- ・ 推定式照査のための対照区を設定し、候補となった推定式の適合度を検証。対照区の規模は1～2ha
- ・ 対照区の調査は毎木調査、標準地調査、UAVによる調査

#### 1.3.3 既存の推定式等の活用の検討

地方公共団体等が作成した推定式を収集し、既存推定式の活用を検討する。

#### 1.3.4 推定精度向上の取組方策の検討

精度向上のための取組み方策を検討する。

### 1.3.5 汎用ソフトを用いた UAV による立木調査方法の手順の整理

「汎用ソフトを用いた UAV によるオルソ画像を使用した立木調査マニュアル」（以下、「UAV立木調査マニュアル」という。）を作成する。

- ① 汎用ソフトを利用し SfM 解析により本数、樹冠面積等を把握する。
- ② 上記により得られたデータを推定式に当てはめ、胸高直径、単木材積を求める。

### 1.3.6 被圧木等の推定

画像解析で認識できない被圧木等の推定方法について検討する。

- ① プロット調査結果をもとに、画像解析で適切に認識できない被圧木等の出現理由及び出現率、本数及び径級を把握する（UAVからの樹冠確認が困難な被圧木、樹頂点の確認が困難な近接木、二叉木等）
- ② 被圧木等の推定方法と復命書等における整理方法を検討する。

### 1.3.7 過去の収穫調査データを活用した材種・品質区分の推定

UAVによる立木調査においては、材種・品質区分が困難であるという課題に対応して、国有林が保有する過去の収穫調査データを分析し、材種・品質区分を推定する手法を検討する。

### 1.3.8 UAV を使用した収穫調査の工程の整理及び人工数の把握

UAVを使用した収穫調査に係る各作業について、実際に要した工程の整理、人工数を把握し、実査命令後の森林官の行う外業、内業を業務の流れに即して整理する。

### 1.3.9 各種 GNSS 受信機における特徴の把握

- ① 国有林野事業で使用されている GNSS 受信機（5～10機種、国有林から貸与）について精度に関する特徴を把握する。
- ② 比較的精度が高いと思われる5機種程度を抽出し面積実測し、公共測量水準による実測面積と比較する。
- ③ GNSS受信機による面積実測における留意点及び面積誤差の確認方法について整理する。

## 2 調査地と調査方法

### 2.1 調査対象区域

UAVによる収穫調査方法を検討するための調査プロットの設定にあたっては、調査作業の効率性・利便性等を考慮するとともに、本事業の調査時期が冬季にも及ぶ可能性があることにも配慮して、関東森林管理局管内で主伐対象のスギ・杉林が多く存在する茨城森林管理署管内の八溝・多賀流域内の国有林を調査対象とした。

さらに、当該流域の立地環境の違いを念頭に、沿岸部、内陸部、奥地に分けて、図2.1.1及び表2.1.1に示すようにA～Fの6つの地区に区分し、これら区域の国有林から、①林齢、②地位級、③樹冠疎密度を考慮して、各区域に6～9林分を抽出して、合計44調査プロットを設定した。

これら調査プロットとは別に、UAVによる空撮画像の解析データをもとに作成される胸高直径推定式を検証するための「照査区」、ならびにGNSS受信機の計測性能評価を行うための「GNSS試験地」については、C地区内に設定した。

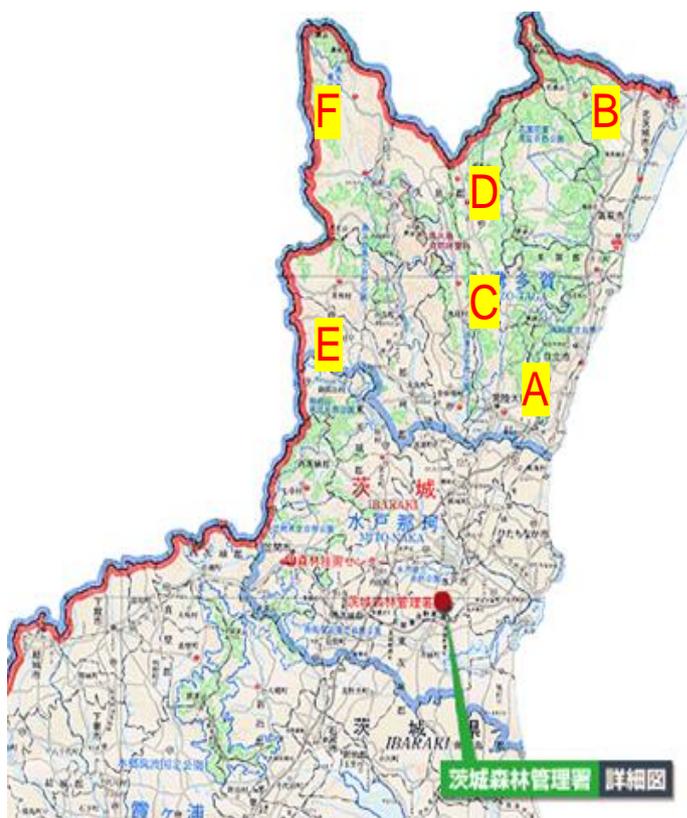


表 2.1.1 調査区域の調査プロット

区域	プロット数	所在地
A	9	茨城県日立市
B	7	茨城県北茨城市
C	7	茨城県常陸太田市
D	7	茨城県常陸太田市
E	6	茨城県常陸大宮市
F	8	茨城県大子町
計	44	

図 2.1.1 茨城森林管理署管内の八溝・多賀流域に設定した6調査区域  
(A、B、C、D、E、F)

## 2.2 調査プロットの設定

6つの調査区域に設定した調査プロットは、胸高直径推定式を作成するための基礎データとして、胸高直径や樹高等の計測が目的である。さらに調査データを元に作成される胸高直径推定式について統計的な妥当性を検討する必要もある。そのため、調査プロットの大きさを10m×40m (0.04ha) とし、それを4つの10m×10m (0.01ha) サブプロットに細分し (図2.2.1、図2.2.2、図2.2.3)、統計解析を想定して同一プロット内での「反復区」とした。

今回設定した調査プロット数44箇所、細分化したサブプロット数は176 (=44×4) である。

対象区域の国有林では列状間伐も実施されており、調査プロット44箇所のうち20箇所が列状間伐林分であった。列状間伐林分の場合、伐開幅にもよるが、伐採列に対してプロットを平行あるいは直交させて配置すると、枠内の立木本数が極端に異なる可能性があるため、可能な限り伐採列に対して斜めになるように配慮して調査プロットを配置した。

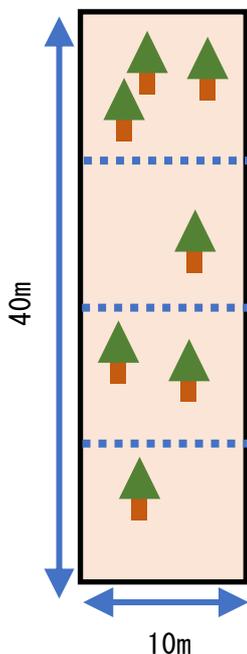


図 2.2.1 プロットの形状



図 2.2.2 定性間伐箇所に設定したプロット



図 2.2.3 列状間伐箇所に設定したプロット

## 2.3 プロット調査

対象流域に設置した44箇所の調査プロットにおいて、すべての立木の胸高直径、樹高、枝下高、立木位置を計測し、材種区分等を行った。調査の主目的は、樹冠面積から胸高直径推定式の作成及びその検証のためであるが、同時に、森林調査業務の効率化・低コスト化の可能性を分析することでもあり、従来型の毎木調査に加えて、簡易携行タイプの地上レーザ計測による調査も並行して実施した。

### 2.3.1 従来型毎木調査

各プロットの現地調査を次の手順により実施した。

#### (1) プロット設定(10m×10m×4)

周囲測量では、ポケットコンパスと巻尺によりプロット杭の位置を確定し、周囲標示(テープ)を行った(図2.3.1)。また、UAVの空撮画像及び地上レーザ計測において、下層の雑草木類の影響による計測効率が妨げられないよう、事前に刈払いを実施した。

#### (2) プロット内の毎木調査

毎木調査については、輪尺による胸高直径の測定、バーテックスによる樹高及び枝下高の測定を行い、同時に材種区分(一般材または低質材)を行った(図2.3.2)。また空撮画像による個体識別結果の照合を行うため、サブプロット(10m×10m)ごとに立木位置の簡易測量を行った。使用機材は、サブプロットの周囲杭の位置からの方位計測のためのコンパスグラス及び水平距離計測のためのトゥルーパルスである(図2.3.3)。



図 2.3.1 プロット設定



図 2.3.2 毎木調査(従来型)



図 2.3.3 立木位置の計測

方位計測のためのコンパスグラスと距離計測のためのトゥルーパルスを使用。

### 2.3.2 地上レーザ計測

従来型の毎木調査に代わる調査機材として、また、簡易なレーザ計測で立木位置を直ちに計測できることから、可搬型で、計測操作の簡便な地上レーザ計測装置である「森林3次元計測装置“OWL”」(株式会社アドイン研究所製、**図 2.3.4**)を用いて、調査プロットの計測を行った(**図 2.3.5**)。

OWL は、“一脚式”であり、三脚式のように現地で装置を設置する際の手間が不要で、傾斜地での使用が容易である。レーザ計測はボタン操作のみで、データ処理でも専門知識はほぼ不要であり、現地での毎木調査が大幅に効率化される可能性がある。本事業では、後述するように、UAV による空撮画像の解析で得られる立木の照合作業が必要であり、OWL の計測データをその検証に利用することとした。



**図 2.3.4 地上レーザースキャナ  
森林3次元計測装置 OWL**



**図 2.3.5 地上レーザースキャナ計測  
装置 OWL による森林調査の様子**

#### (1) 計測手順

調査プロットの周囲を囲む杭のほぼ真上でレーザ計測を行う。1地点の計測所要時間は45秒である。スキャンした計測データはUSBメモリに自動的に記録される。調査プロットの周囲杭は10箇所であるので、現地の状況次第(傾斜等)ではあるが、区域外表示・計測地点間の移動時間も含めた計測所要時間はおよそ30~45分である。

#### (2) データ解析と立木データの出力

計測終了後、USBメモリに記録されたデータを、専用解析ソフトがインストールされているノートPCに読み込ませ、簡単な解析処理計を行えば、数分程度で、すべての計測地点のデータセットが自動的に編集されて、立木の胸高直径、幹曲り(矢高)、立木の3次元位置座標、枝下高、樹高、材積などが一覧表として出力される(**図 2.3.6**)。なお、材積計算は「立木幹材積表」(林野庁監修)によっている。

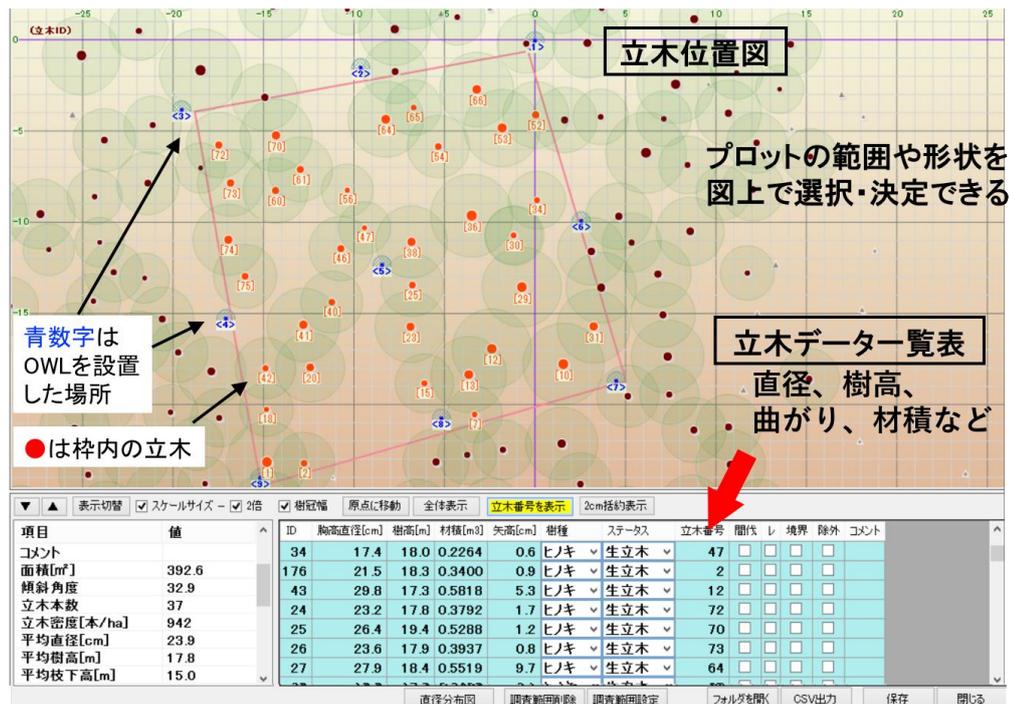


図 2.3.6 OWL の出力データ例  
(上段：立木位置図、下段：立木データ一覧)

OWL の計測精度については、平均的な誤差として、立木位置で $\pm 4$  cm、胸高直径で $\pm 2$  cm、平均樹高で $-1 \sim -2$  m、平均枝下高で $\pm 1$  m、平均斜面傾斜で $\pm 3^\circ$ である。しかし、レーザ計測の特質として、林冠の混み具合や着葉時期など林況によって樹高が低く計測される傾向はあるが、樹形モデル（第5章コラム）による計算方法により、樹高計測値が補正される見通しである。

### (3) 3次元点群データの出力

上記(2)で出力される立木情報の元となるのは、レーザ計測の3次元点群データである。レーザ光線の反射データひとつひとつが3次元の座標を持ち、それらすべてが森林の構造や樹木の形状を構成する点群データである。OWL 付属ソフトウェアの「ウォークスルー」機能（図 2.3.7）を使うことで、測定地点の間を移動しながら、林内を巡回するように動画で確認できる。この画像には、個体識別されたすべての林木に、通し番号、胸高直径、樹高が表示されるので、現地でパソコンの動画を見ながら、林木の確認作業が可能である。

本事業では、UAV による空撮画像で得られる立木情報の妥当性を調査プロットごとに確認する必要があり、OWL の立木データをその検証作業に利用することとしている。ウォークスルーを活用することで、立木の正確な位置（図 2.3.6）、樹冠の形状、おおまかな樹種や枯損状況の識別など（図 2.3.7）が可能であり、立木単位の照合作業がスムーズに進むと期待される。

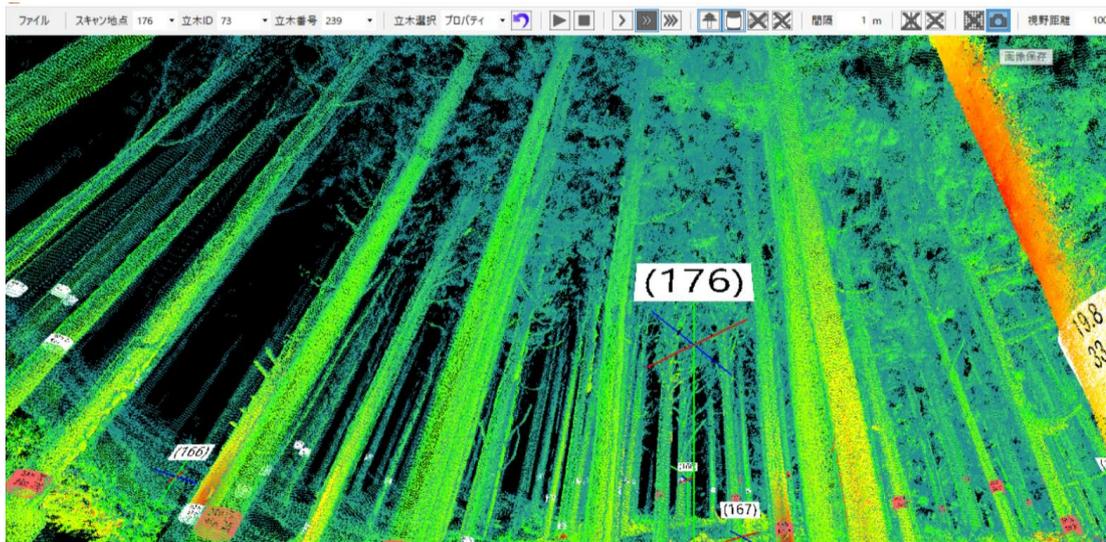


図 2.3.7 OWL のウォークスルー機能による 3 次元点群データの可視化  
林内の状況が可視化され、PC 内で林内を自由に巡回・確認できる。

## 2.4 UAV による空撮

従来の収穫調査を UAV で空撮した画像解析によって効率化するためには、調査対象地の解析に必要十分な空撮画像を取得する必要がある。UAV の飛行技術と併せて空中写真撮影のための技術ならびに手順等について検討し整理した。

詳細は別冊「UAV 立木調査マニュアル」を参照。

### 【用語解説】

オルソ化: 日本語では「正射変換」。写真上の像の位置ズレをなくし、空中写真を地図と同様に真上から見たような傾きのない正しい大きさと位置に表示される画像に変換すること。

ラップ率: ある対象物を複数の画像で撮影するときの、どれだけ重複させて撮影させるかという相互の重複率のこと。撮影していく経路に対して、進行方向の重なり具合をオーバーラップ率、進行方向と平行する経路との重なり具合をサイドラップ率という。ラップ率が高いほど、オルソ化ならびにその後の SfM 解析での高い解析精度につながるが、データ処理に要する時間も増える。「UAVを用いた公共測量マニュアル」では、オーバーラップ率 60%、サイドラップ率 30% が標準とされるが、森林では地形及び林冠の凹凸が大きく、対地高度も変化することなどから、経験的にはオーバーラップ率 80%、サイドラップ率 60% 以上が推奨される。

対空標識: 上空にある UAV から明瞭に撮影できるように当該地点に設置するマークであり、通常は四角または丸い形状で、色は白黒または黄や黒を標準とし、判別しやすいパターンを使用する。対空標識は、UAV からの撮影で明瞭に識別できるように、その設置地点の上空が十分に開けている必要があるが、森林の場合、対空標識を設置できる場所は限定的である。

基準点: 「対空標識」に公共測量による高精度な位置情報(緯度、経度、標高)が付与されたものが基準点あるいはグランドコントロールポイント(GCP)である。森林ではほとんどの場合、GCP の設置は望めない。

## 2.4.1 準備作業

- (1) 使用機材：ドローン本体（Phantom 4 Pro）
- (2) 飛行準備：機体の準備・点検作業、関連機器及びソフトウェア
- (3) 区域設定：飛行ルート、ラップ率、マージンの設定等
- (4) 対空標識：使用する対空標識のタイプ（通常タイプ、光源タイプ）、設置場所と設置数



**図 2.4.1 対空標識の設置**  
(左：通常の対空標識 右：LED 光源の対空標識)

## 2.4.2 UAV 画像の撮影

- (1) 作業計画の策定
- (2) 飛行許認可の取得
- (3) 飛行計画
- (4) 撮影スケジュール
- (5) 飛行テスト
- (6) 飛行計画の実行



機体名： Phantom4Pro  
製造会社： DJI  
重量： 1380g  
最大フライト時間： 28分

**図 2.4.2 UAV による撮影の様子(左)と撮影に用いた機体の写真(右)**

### 2.4.3 UAVによる上空からの撮影

撮影不良（立木の揺れ、UAVの飛行姿勢に起因する画像の乱れ等）を考慮して、オーバーラップ率、サイドラップ率とも80%を確保し、画像の欠落が生じた場合でも画像解析に堪えられるよう留意した。

#### (1) 飛行プログラムの作成

- ・自動飛行制御アプリ（DJI GS Pro）に撮影区域を入力
- ・地形情報から離着陸地点を選定
- ・オーバーラップ率、サイドラップ率、飛行高度を設定

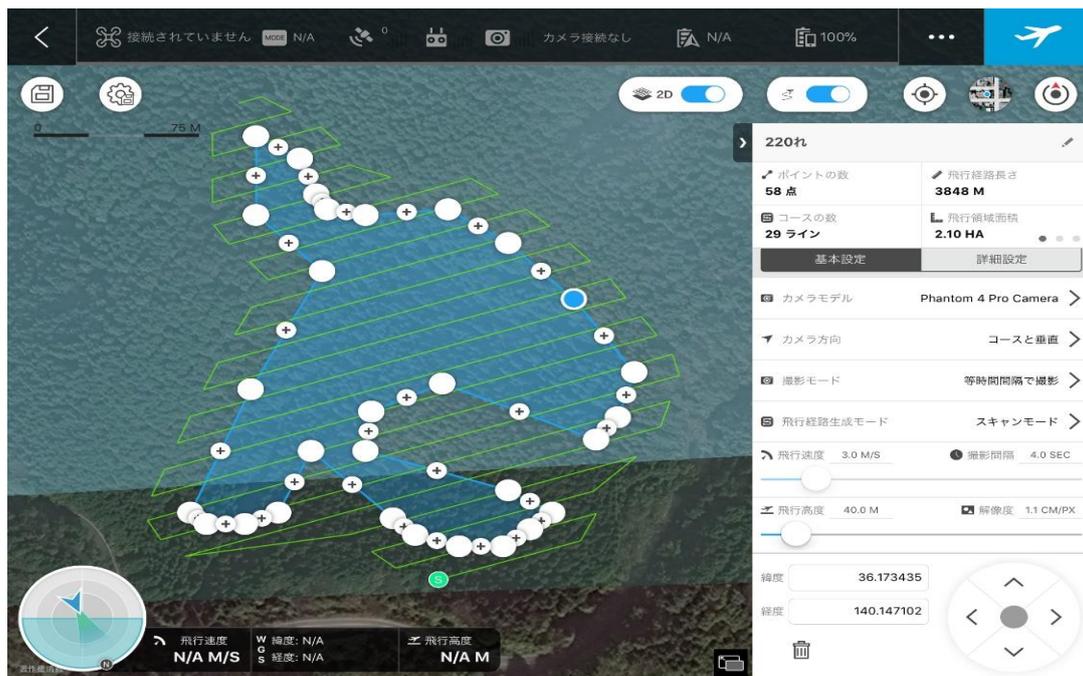


図 2.4.3 自動飛行制御アプリ「DJI GS Pro」

#### (2) 撮影飛行準備

- ・現地実態に合わせた離着陸地点の確定
- ・風速計測・支障物の有無の確認
- ・飛行プログラムの再確認と微調整
- ・その他安全確認等

#### (3) 撮影飛行

- ・離着陸は手動で実行
- ・電波状況・アプリ動作を常時監視

#### (4) 撮影データの確認

- ・撮影した連番画像を確認し、追加飛行の必要性の有無を判断

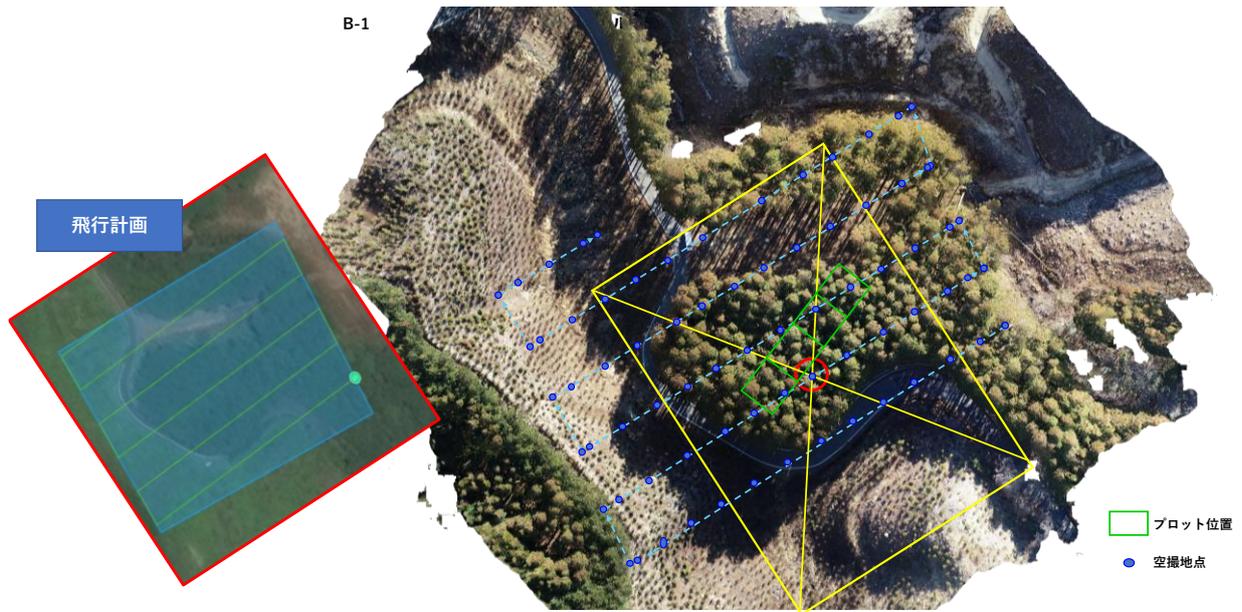


図 2.4.4 UAV による空撮の実施

#### 2.4.4 プロット区画の位置情報の取得

UAV で撮影した画像を解析するためには、調査プロットの位置情報を撮影画像に取り込んで、画像の中にプロット区画を挿入する必要がある。その方法論としては、表 2.4.1 に示すように、①対空標識による方法、②基準点からのプロット位置測量等、③位置情報が付与された既存の衛星写真等の地物情報の活用が考えられる。

表 2.4.1 プロット位置情報の取得方法

方法	地上作業	画像上の作業
① 対空標識による方法	対空標識を設置しプロット位置及び対空標識をコンパス測量	UAV により取得した画像上の対空標識及びコンパス測量成果をもとにプロットを刺針して復元
② 基準点からのプロット位置測量等	プロットの位置情報を取得（ネットワーク型 RTK 測量、基準点からの測量等）	UAV 搭載の GNSS 測位データによるプロットの復元
③ 衛星写真等の地物情報の活用	プロットの位置情報を取得（地物等）	国土地理院電子国土 Web、Google Earth 等の信頼できる位置情報を有する画像上の地物の位置情報を使用してプロットを復元

②の方法は、既に位置情報が明確な基準点から対象林地までを測量するものであり、精度は高いが林地を対象とする場合は現実的ではない。③の方法は、プロット周辺に明確な地物が無

ければ使えないなど林地での採用はむずかしい。現実的な方法としては①対空標識による方法であり、今回はこの方法によった。

なお、この方法による場合でも、地形等によっては、樹頂点付近でオルソ(正射)画像が形成されても地表面では位置ずれが生じるケースもあり、標識が本来の直線上に並ばないケースもあった。このような場合は、当該プロットの立木位置情報等も参照しながらプロット区画を画像に挿入することとした。

## 2.4.5 UAVによる樹高の測定方法

調査区域内の立木の樹高測定は、測高器（バーテックス、トゥルーパルス等）によるのが基本であるが、航空機 LiDAR や UAV による樹高計測の方法としては、一般には、林冠表面の高さ（DCSM: Digital Canopy Surface Model (巻末 用語説明参照)）と地盤高（DEM: Digital Elevation Model (巻末 用語説明参照)）の差を樹高とする方法が用いられる（表 2.4.2、図 2.4.5）。ただし、この手法で樹高計測する要件として、対象林分で確実に DCSM が得られることと、地盤データである DEM を入手できることが前提である。

表 2.4.2 樹高の測定方法

方 法	内 容	備 考
① 測高機（バーテックス等）による計測	現地において地上から測高	プロット調査において実施可能
② DCSM-DEM による測高	SfM 解析より得られた樹冠表層高(DCSM)と地盤高(DEM)の差分から測高	DEM データの質（メッシュの大きさ、取得方法等）によって十分な精度が得られない場合があるため、DCSM に正しい位置情報の付与が必要

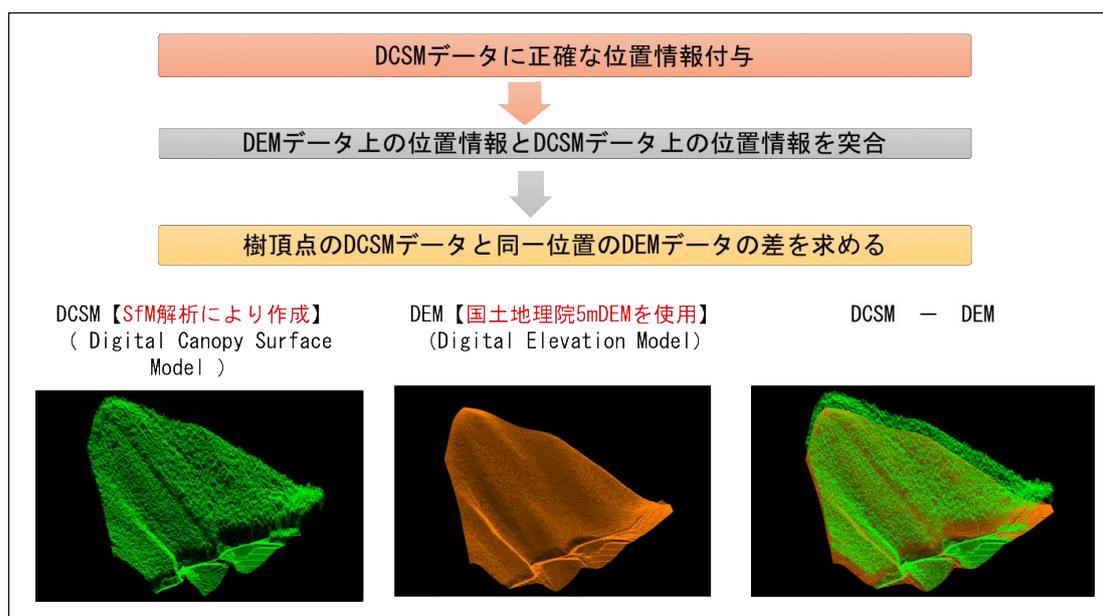
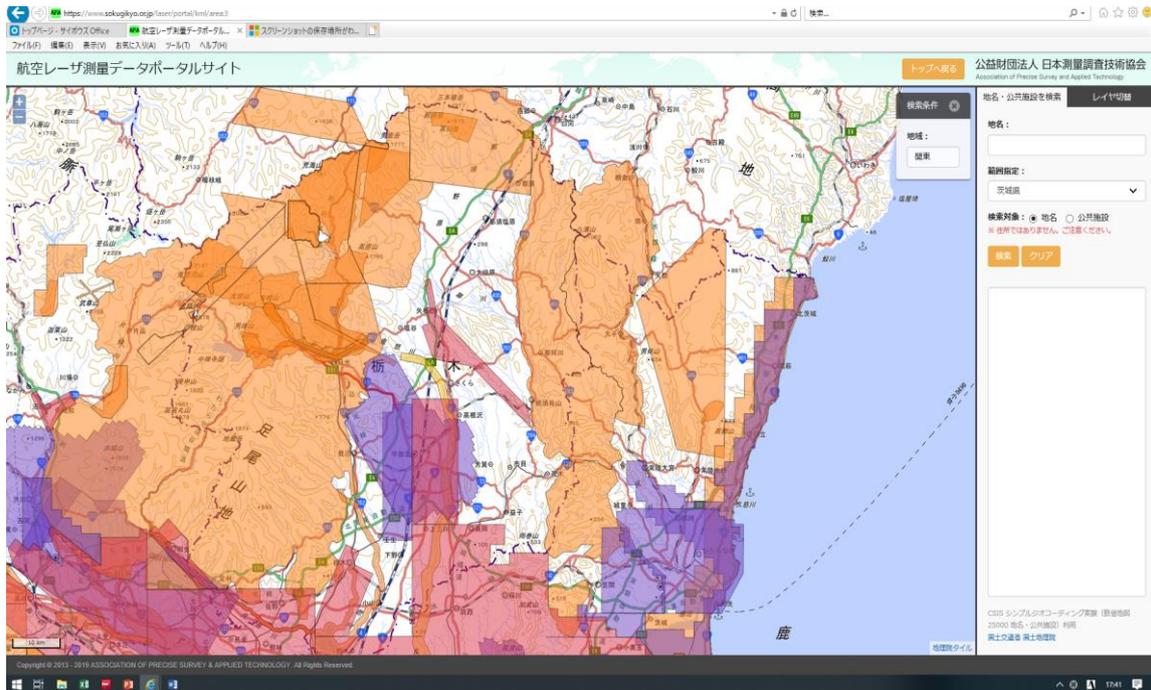


図 2.4.5 林冠表層高 DCSM と地盤高 DEM との差で推定する樹高

UAVによる空撮画像から SfM 解析によって、調査プロットの DCSM が得られる可能性はあるが、一方で、八溝・多賀流域では 5m メッシュの DEM は得られないことが判明した(図 2.4.6)。精度の粗い 10m メッシュ DEM では樹高計測は困難である。また DCSM と DEM の位置情報を正しく照合する必要もある。このため、44 調査プロットの樹高の把握、並びに、樹冠投影面積から胸高直径を推定する推定式の作成においては、毎木調査の樹高測定値を利用することとした。

他方、胸高直径推定式の精度を検証する照査区の SfM 解析においては、(国研) 産業技術総合研究所の協力を得て 1m メッシュ DEM データ(吉見 2014)を使用することができたことから、SfM 解析より得られた樹冠表層高(DCSM)と地盤高(DEM)の差から樹高を算出して材積計算に用いることとした。



公益財団法人日本測量調査技術協会航空レーザ測量ポータルサイトより

図 2.4.6 八溝多賀流域とその周辺でのレーザ計測データのあるエリア

### 3 プロット調査の結果

#### 3.1 毎木調査の結果（従来型）

本事業では、関東森林管理局管内八溝・多賀流域のスギ人工林を対象に、UAVによるオルソ画像から流域スケールで適用可能な胸高直径推定式を作成することが目的であり、そのためには、当該流域のスギ人工林の中から可能な限り多様な林分を抽出し、ある程度の汎用性が確保されるよう配慮する必要がある。

そこで、当該流域におけるスギ人工林から森林簿の情報等を参考に、調査プロット 44 箇所を選定し、従来型の毎木調査を行った。結果の概要を表 3.1.1 に示す。林齢は 27 年生から 58 年生、定性間伐を行った箇所が 24 箇所、列状間伐を行った箇所が 20 箇所である。各プロットについて、ha 当たり立木本数密度は 400～2,100 本/ha、平均胸高直径(DBH)は 18.7～40.3cm、平均樹高は 16.7～28.3m、1 本当たりの平均材積は 0.213～1.354m<sup>3</sup>、ha 当たり材積は 258～916m<sup>3</sup>であった。このように、今回選定した 44 箇所の調査プロットは、林分密度、個体サイズともに幅広く抽出されており、胸高直径推定式を作成する上で十分な範囲をカバーしていると判断される。なお、各プロットの毎木調査の結果は表 3.1.2 のとおりである。

表 3.1.1 毎木調査の結果の概要（従来型）

林 齢	27～58 年生 (VI～VII9 箇所、VIII～IX12 箇所、X～XI17 箇所、XII～XIII6 箇所)
施業履歴	定性間伐実施 24 箇所、 列状間伐実施箇所 20 箇所
立木密度	400 ～ 2100 本/ha
平均 DBH	18.7 ～ 40.3 cm
平均樹高	16.7 ～ 28.3 m
平均個体材積	0.213 ～ 1.354 m <sup>3</sup>
ha 当たり材積	258 ～ 916 m <sup>3</sup> /ha

表 3.1.2 各プロットの毎木調査の結果（従来型）

地区	PLOT	林齢	間伐種類	立木本数 本/plot	立木密度 本/ha	DBH 平均	樹高 平均	枝下高 平均	樹冠長 平均	材積 m3/plot	材積 haあたり	材積 個体平均
A	1	49	列状	41	1025	22.3	16.7	10.5	6.2	13.85	346.3	0.338
A	2	49	列状	20	500	28.0	18.6	10.1	8.5	12.44	311.1	0.622
A	3	49	列状	38	950	26.2	23.8	15.5	8.3	19.13	478.4	0.504
A	4	49	列状	40	1000	19.7	19.6	13.5	6.1	10.35	258.7	0.259
A	5	27		69	1725	19.6	18.4	10.3	8.2	15.56	389.0	0.226
A	6	27		50	1250	25.7	23.4	16.4	7.0	24.46	611.6	0.489
A	7	49		27	675	33.2	23.0	13.0	10.0	26.20	654.9	0.970
A	8	44		40	1000	28.0	22.5	13.9	8.6	22.37	559.2	0.559
A	9	58		26	650	35.3	24.2	14.7	9.4	26.43	660.6	1.016
B	1	59		39	975	34.2	28.3	20.7	7.6	35.95	898.9	0.922
B	2	33		63	1575	23.2	18.2	10.5	7.7	22.10	552.4	0.351
B	3	46		78	1950	25.0	25.3	19.6	5.7	33.58	839.5	0.430
B	4	31		52	1300	26.9	21.5	13.0	8.5	25.87	646.6	0.497
B	5	56		42	1050	28.8	23.9	15.2	8.7	25.16	629.1	0.599
B	6	47		37	925	31.7	25.0	17.0	8.0	28.89	722.3	0.781
B	7	33	列状	84	2100	20.0	17.3	9.6	7.6	20.40	509.9	0.243
C	1	54	列状	63	1575	19.6	17.3	NA		16.70	417.6	0.265
C	2	53		65	1625	27.8	19.5	11.0	8.5	36.65	916.4	0.564
C	3	45		48	1200	24.0	20.3	12.9	7.5	18.24	456.0	0.380
C	4	45		30	750	30.5	23.0	13.0	10.0	21.96	549.0	0.732
C	5	51	列状	40	1000	28.1	20.5	12.6	7.9	26.08	652.1	0.652
C	6	51	列状	38	950	25.5	18.0	10.0	8.0	17.93	448.2	0.472
C	7	27	列状	38	950	28.2	21.6	14.3	7.2	21.73	543.2	0.572
D	1	40	列状	27	675	28.5	22.8	14.5	8.3	15.78	394.5	0.584
D	2	56	列状	31	775	32.5	25.9	17.8	8.0	25.49	637.3	0.822
D	3	51	列状	35	875	26.8	24.9	18.2	6.7	18.63	465.8	0.532
D	4	36		38	950	27.6	24.1	15.3	8.8	20.41	510.3	0.537
D	5	32		63	1575	19.5	19.3	12.7	6.5	17.14	428.5	0.272
D	6	47	列状	41	1025	26.8	22.7	15.1	7.6	20.33	508.1	0.496
D	7	44		55	1375	24.6	19.5	12.6	6.9	23.24	581.0	0.423
E	1	56		16	400	40.3	27.7	17.1	10.6	21.66	541.4	1.354
E	2	44	列状	39	975	24.5	20.5	13.1	7.4	17.53	438.2	0.449
E	3	51	列状	54	1350	22.7	21.5	15.0	6.6	19.90	497.5	0.368
E	4	49		17	425	36.7	24.0	14.2	9.8	19.25	481.4	1.133
E	5	37		26	650	29.6	23.5	14.1	9.4	22.69	567.3	0.873
E	6	33		31	775	33.2	25.5	15.6	9.9	27.38	684.4	0.883
F	1	51	列状	79	1975	19.2	20.7	15.6	5.1	19.30	482.6	0.244
F	2	51	列状	75	1875	18.7	17.8	11.8	6.0	16.00	400.0	0.213
F	3	47	列状	42	1050	27.3	23.9	15.2	8.7	22.18	554.6	0.528
F	4	37		48	1200	27.3	23.2	14.5	8.7	24.70	617.6	0.515
F	5	36		39	975	29.6	25.1	16.2	8.9	24.57	614.1	0.630
F	6	45	列状	39	975	26.1	21.1	12.9	8.1	17.50	437.4	0.449
F	7	32		45	1125	26.0	20.8	12.6	8.1	22.40	559.9	0.498
F	8	43	列状	28	700	30.3	24.0	15.4	8.6	19.22	480.5	0.686

### 3.2 毎木調査の結果（地上レーザ計測）

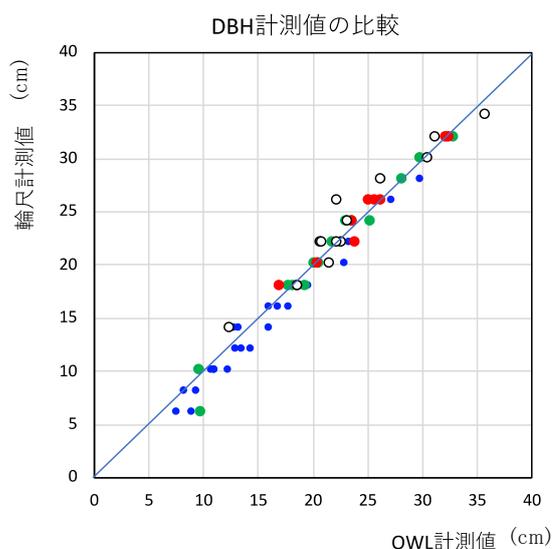
従来型の毎木調査方法の代替として効率的にプロット調査を行うとともに、立木位置情報を確実に取得するため、地上レーザ計測装置 OWL（株式会社アドイン研究所製）により、調査区域 A から F に設置したプロット 44 箇所のうち 38 箇所を計測した。A 地区の A1 から A6 の調査プロット 6 箇所については、再委託先である株式会社アジア航測が調査担当となっており、地上レーザ計測は実施していない。

「2.3.2 地上レーザ計測」で述べたように、調査プロット（サブプロット 10m×10m が 4 つ連続した区画 10m×40m）の杭 10 箇所の直上でレーザ計測を行った。計測者は 1 名、補助者 1 名で、1 プロットあたりの計測とデータ処理をあわせて約 45～60 分で調査が終了できた。並行して実施した従来型毎木調査に比してかなり効率的に行えることが確かめられた。調査プロットを囲む 10 箇所での計測が終了したら、その場でノート PC にデータを読み込んで専用ソフトで解析を行うが、10 箇所の計測データであれば、数分で計測結果が出力される（表 3.2.1）。

**表 3.2.1 地上レーザ計測による調査項目と測定精度の概要**

立木本数	従来型調査とほぼ一致
立木位置	従来型計測（ポケットコンパスと巻尺による）とほぼ一致
胸高直径	輪尺による従来型計測の±2cm程度
樹高	計測値は低め。特に樹冠が密な場合は数 m 低くなる。
枝下高	おおむね正確
材積	立木幹材積表(林野庁監修)に基づいた自動計算
その他	地上高 10cm ごとの幹径、幹曲がり・矢高、ヘクター換算データ、3次元点群データ（地形、等高線）など

図 3.2.1 は、レーザ計測と輪尺による胸高直径の計測値の比較の一例である。OWL の計測値は、小径木でやや小さめだったが、誤差範囲 2～3cm で両者はおおむね一致していた。



**図 3.2.1 輪尺と OWL による DBH 計測値の比較**  
色の違いはサブプロットの違いである。

OWLによるレーザ計測結果の一例を図3.2.2に示す。立木位置図(図3.2.2上段)では、調査プロットの範囲(この例ではピンク色の長方形の枠で表示)とその内部の立木が●で表示され、調査プロット外の立木は●で表示されている。調査プロットの枠線に沿った青色の数字は、OWLの計測場所である。この例ではプロット枠内にもOWL計測した箇所が3箇所ある。通常であれば枠線上の10箇所の計測のみで十分であるが、立木配置や地形の凹凸等の状況を判断して、念のためにOWL計測箇所を追加したものである。図3.2.2下段は、林内の点群データをウォークスルー機能で表示したものである。各立木の胸高位置に赤色で表示された部分に、立木番号、胸高直径、樹高が自動的に表示される。白枠の数字パネルは、OWLの計測場所である。このウォークスルー画像をマウスで任意の方向に転回することができ、またズームイン・ズームアウトしながら、林内あるいは立木の状況を確認することができる。

図3.2.2上段で示される立木位置の計測精度について、従来手法であるポケットコンパスと巻尺で計測した立木位置と比較したところ、レーザ測量の位置誤差は数cm以内であり、ポケットコンパスよりも、精度的にも計測時間についても大幅に改善されており、地上レーザ計測によって確実かつ容易に立木位置を把握できることが確認された。

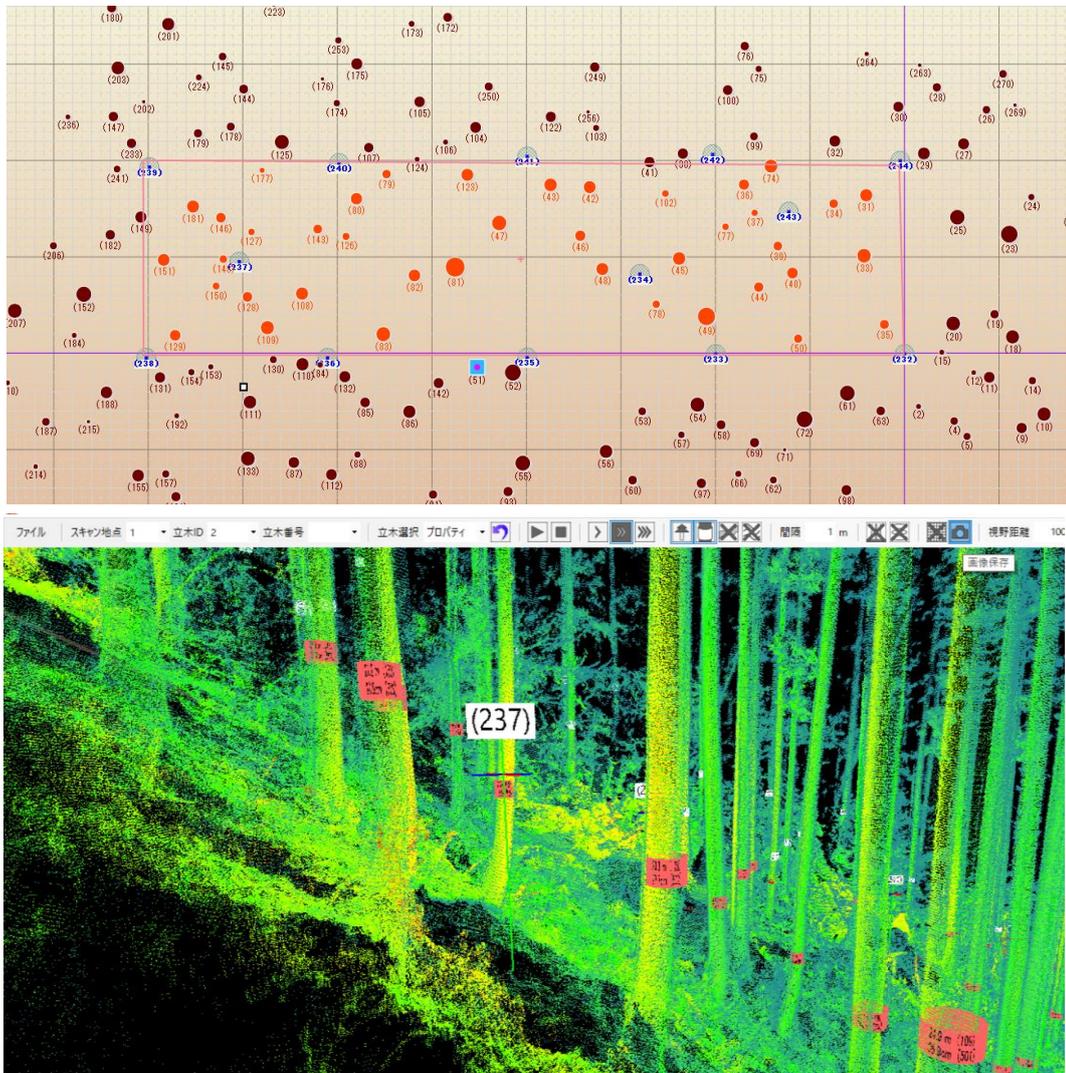
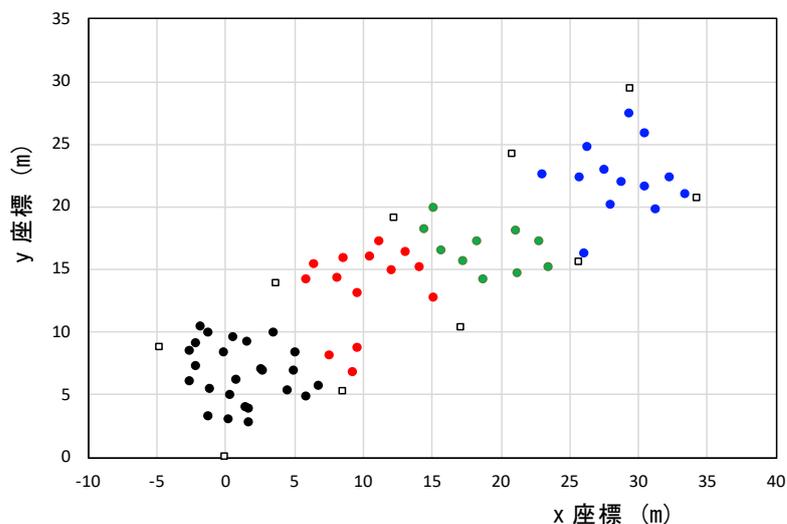


図3.2.2 地上レーザ計測装置OWLによるプロット調査例  
ウォークスルー画像(上)と立木位置図(下)

OWLによる計測結果はすべて csv データで出力される。図 3.2.3 は計測結果をもとにプロット内の立木位置を改めて図化したものである。プロットの枠杭の位置が□で表示され、すべての立木位置を●で表示している。色の違いは4つのサブプロットの違いである。



**図 3.2.3 地上レーザ計測によるプロット調査結果（例）**  
色の違いはサブプロットの違い、□はプロット枠の杭位置であるである。

今回設定した調査プロット(10m×40m)を OWL で計測するのであれば、現地での計測と解析の時間を併せて 45～60 分程度で作業が終了し、従来法では必要だった内業の集計作業も一切不要である。胸高直径と立木位置の計測であれば、上述したように非常に簡便に、しかも必要とされる計測精度で結果が得られることが確認された。

## 4 UAVによる撮影画像の解析

### 4.1 解析手法・手順の概要

UAVによる撮影画像の解析手法の検討にあたって、本事業の林野庁担当官との打ち合わせ並びに第1回検討委員会での検討結果を踏まえて、森林管理局署の担当者が画像解析を行うことを前提として、一連の解析手法の一般化を目指すこととした。そこで、解析ソフトに関しても市販の汎用ソフトによることとして、①Photo Scan (Agisoft社)、②Globalmapper (Blue Marble Geographics社)、③ArcGIS+ Spatial Analyst エクステンション (ESRI社)を選定した。汎用ソフトによる空撮画像解析の作業手順イメージを図4.1.1に示す。以下、解析手法と手順の概要を述べる。

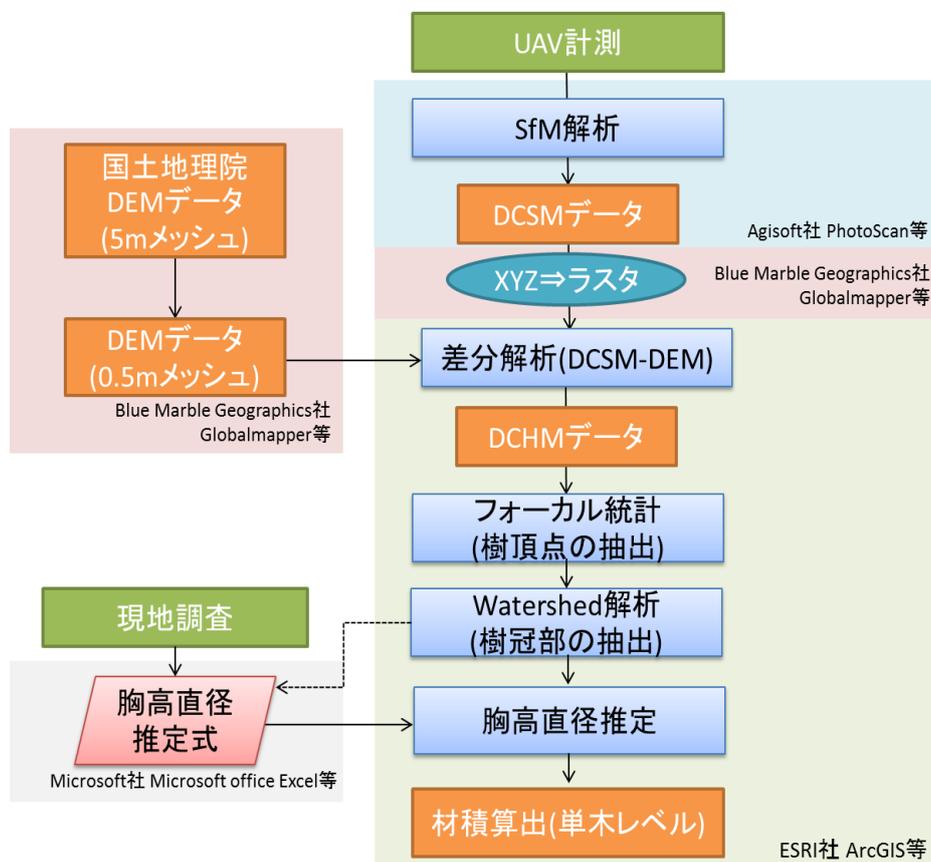


図 4.1.1 汎用ソフトによる UAV 画像解析の流れ

#### 4.1.1 UAV 撮影画像の SfM 解析

UAV で撮影した画像を Photo Scan に取り込んで、オルソ画像を作成するとともに、3次元点群データに変換する（図 4.1.2）（詳細は「UAV 立木調査マニュアル」を参照）。

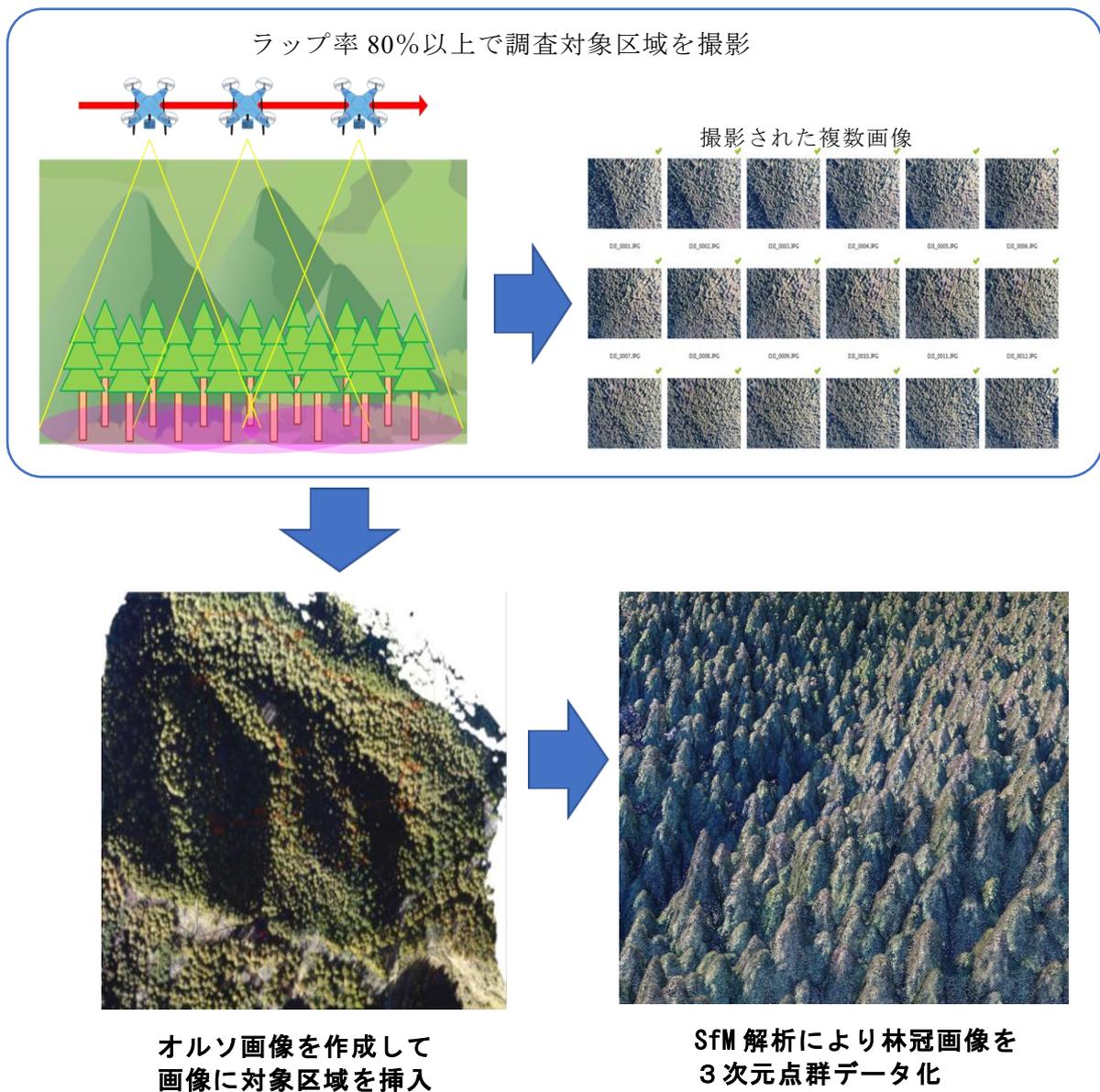


図 4.1.2 汎用ソフトによる SfM 解析の概念図

#### 4.1.2 DCSM データ及び DEM データの作成

Photo Scan で作成した点群データ（テキストファイル）を Globalmapper(Blue MarblGeographics 社)に読み込んで、調査対象区域の DCSM（数値樹冠表層モデル）データを作成する（図 4.1.3）。さらに、精細な DEM（数値標高モデル）データ及び基準点（GCP）の位置情報が得られている場合は、調査対象区域の DEM データを作成する。この作業段階で 0.1mDCSM、0.5mDCSM、0.1mDEM、0.5mDEM が作成される。

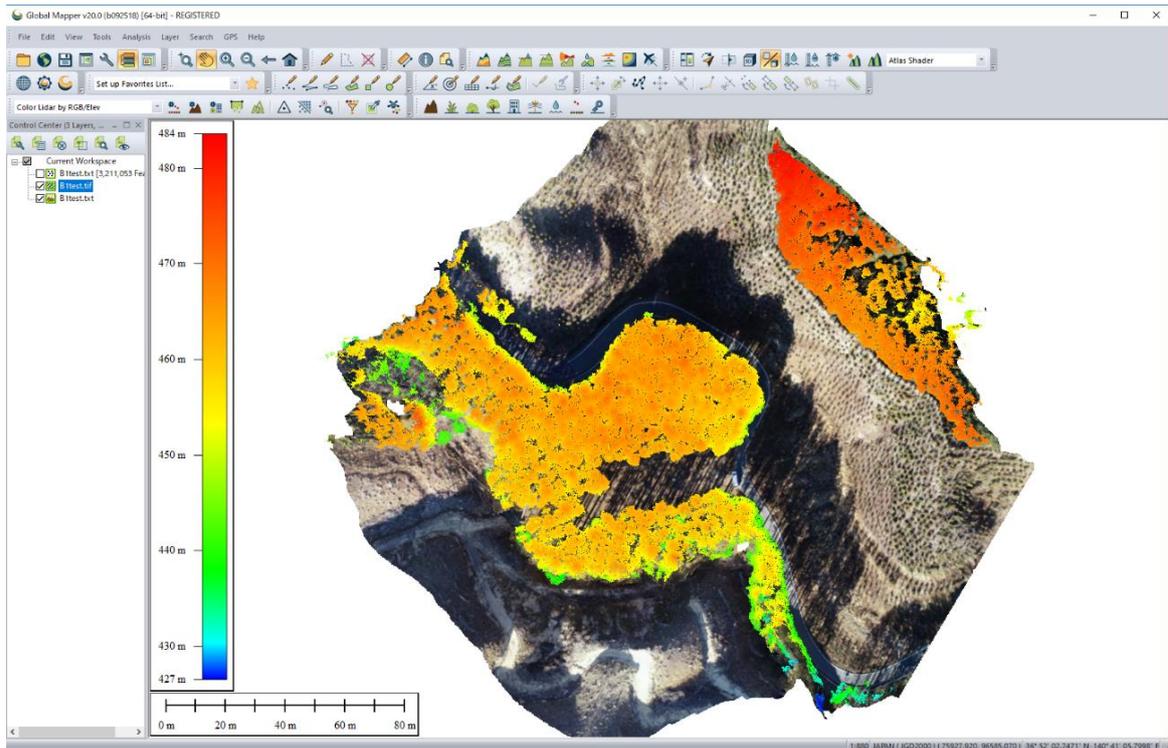


図 4.1.3 オルソ画像上の DCSM (数値樹冠表層モデル)  
林冠部分の色の違いは、標高の違い

#### 4.1.3 樹頂点の抽出と樹冠ポリゴンデータの作成

上記 4.1.2 で作成された 4 つのファイル (0.1mDCSM、0.5mDCSM、0.1mDEM、0.5mDEM) を ArcGIS に読み込んで、ラスタ演算によって DCHM(数値樹冠高モデル)データを作成する。この後、図 4.1.4 に示す手順で、樹頂点を抽出する作業になる。ただし無処理のままのラスタデータでは凹凸が細か過ぎるなど、樹冠の形状を把握しにくいいため、ArcGIS の機能「フォーカル統計」によって、データを平滑化してノイズを除去する必要がある。その際に設定するのが「平滑化の値」と「フォーカル統計の値」であり、適切な樹頂点の抽出ができるように、これらの数値を調整する。この調整次第で、樹冠形及び樹頂点ポイントデータが適切に作成できるかどうか決まるので、この調整は SfM 解析でもっとも重要である。

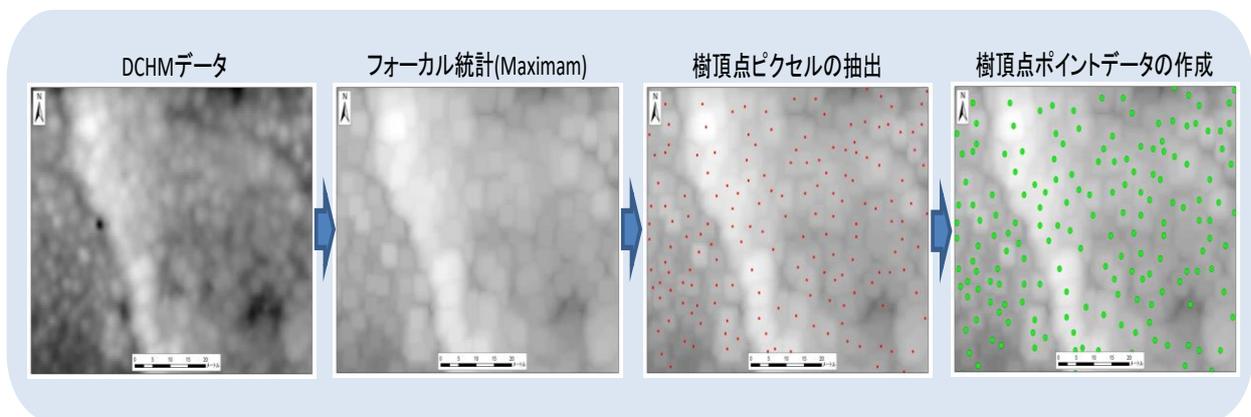


図 4.1.4 樹頂点ポイントデータの作成手順

樹頂点抽出の後、図 4.1.5 の手順で個々の樹冠形状を復元した樹冠ポリゴンデータが作成される。これら一連の解析作業における留意事項等については、4.3 で述べる。

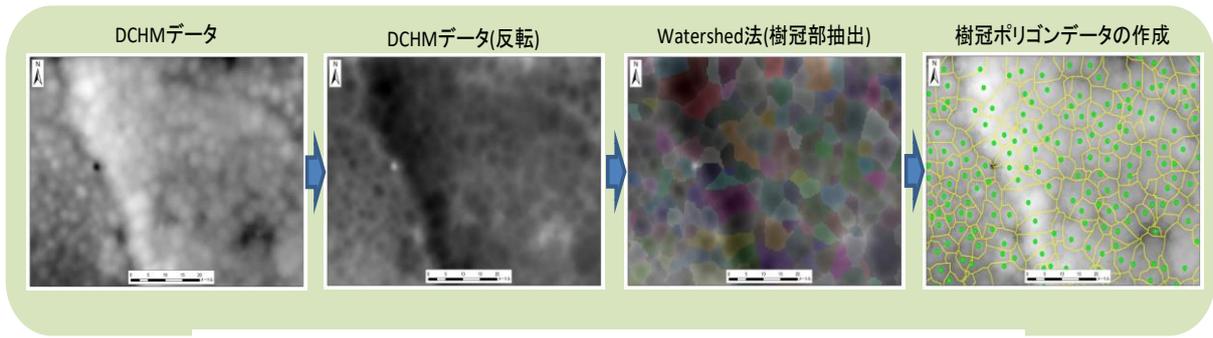


図 4.1.5 樹冠ポリゴンデータの作成手順

## 4.2 汎用ソフトによる SfM 解析の結果

汎用ソフトを用いた SfM 解析結果について、その例を図 4.2.1 に、解析結果を表 4.2.1 に示す。解析に供した調査地の中には、樹頂点や樹冠長が判別できない調査地もあった。SfM 解析により得られた樹頂点と毎木調査により得た本数の比率は 52.17～286.54%であった。列状間伐を行った調査地で、樹頂点が判別できた 17 箇所中 15 箇所毎木調査結果との本数比±20%を超えた。

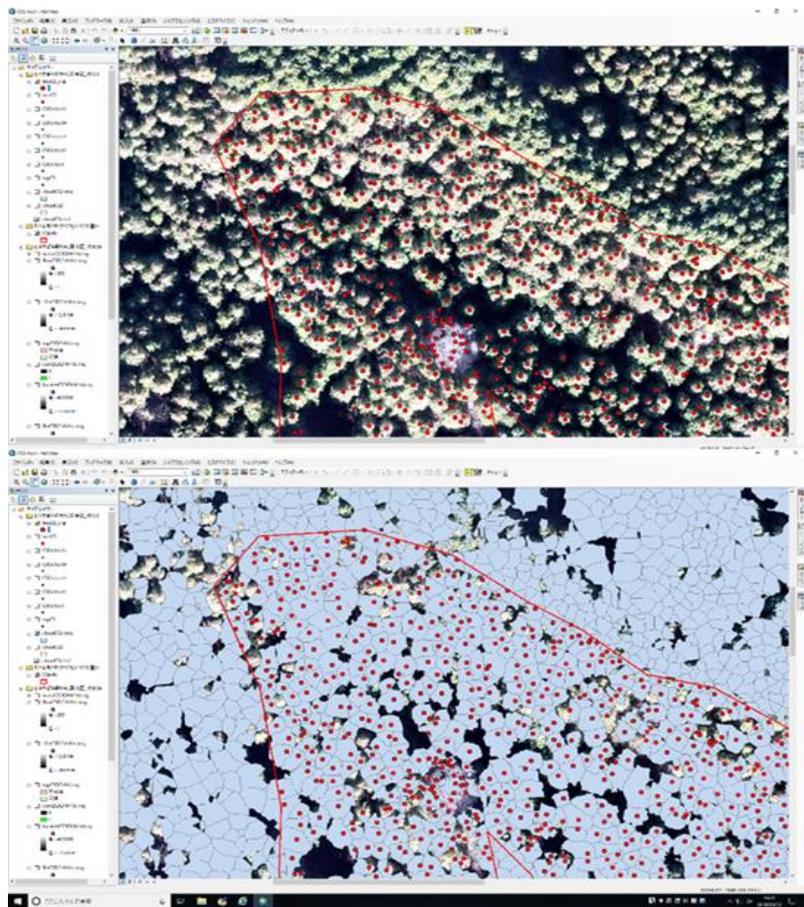


図 4.2.1 汎用ソフトによる樹頂点解析結果の例

赤丸印が樹頂点と判別された点である。下図の写真灰色で分画され部分は樹冠と判別された部分を示す。

定性間伐の調査地については、本数比±20%を超えた調査地が 24 箇所中 7 箇所あった。樹頂点や樹冠長の判別できない調査地は列状間伐、定性間伐それぞれ 2 箇所ずつあった(表 4. 2. 1)。

表 4. 2. 1 各調査地の SfM 解析結果

地区	プロット No	林齢	列状間伐 0:なし, 1: あり	本数/plot	sfm幹本数 /plot	SfM本数/ 每木本数 (%)	毎木樹冠長 (m)	SfM樹冠長 (m)	SfM樹冠長/ 毎木樹冠長 (%)	備考
A	1	49	1	40	28	70.00	6.200003	6.469491	104.346579	
A	2	49	1	20	32	160.00	8.526318	5.666386	66.4575964	
A	3	49	1	38	33	86.84	8.28125	8.311527	100.365609	
A	4	49	1	38	30	78.95	6.137931	6.545002	106.632056	
A	5	27	0	69	36	52.17	8.161764	7.385416	90.4879876	
A	6	27	0	50	55	110.00	7.021275	4.360707	62.1070532	
A	7	49	0	30	27	90.00	9.96667	10.882	109.18391	
A	8	44	0	40	44	110.00	8.575	6.243505	72.8105539	
A	9	58	0	26	36	138.46	9.423081	5.255169	55.7691163	
B	1	59	0	39	44	112.82	7.5641	8.525771	112.713621	
B	2	33	0	63	56	88.89	7.682537	7.470014	97.2336873	
B	3	46	0	78	51	65.38	5.743586	4.132406	71.9481871	
B	4	31	0	52	53	101.92	8.46154	6.396199	75.591429	
B	5	56	0	40	44	110.00	8.65	6.229495	72.0172832	
B	6	47	0	36	34	94.44	8.000002	9.285882	116.073496	
B	7	33	1	82	67	81.71	7.621954	5.973847	78.376844	
C	2	53	0	65	47	72.31	8.53846	8.439348	98.8392286	
C	3	45	0	48	41	85.42	7.458333	5.244554	70.3180456	
C	4	45	0	30	28	93.33	9.999997	8.24312	82.4312247	
C	5	51	1	44	69	156.82	7.918605	12.457261	157.316358	
C	6	51	1	38	54	142.11	8.000004	7.151685	89.3960178	
C	7	27	1	38	37	97.37	7.210525	9.874382	136.944009	
D	1	40	1	26	39	150.00	8.349357	7.510052	89.947669	
D	2	56	1	31	50	161.29	8.03226	14.696642	182.970198	
D	3	51	1	35	39	111.43	6.68571	12.414744	185.690734	
D	4	36	0	38	40	105.26	8.789472	7.580873	86.2494698	
D	5	32	0	75	81	108.00	6.53333	0	NA	樹頂点抽出されず
D	6	47	1	40	54	135.00	7.55	8.687361	115.064384	
D	7	44	0	55	55	100.00	6.945454	6.95804	100.181212	
E	1	56	0	16	36	225.00	10.5625	8.871003	83.9858272	
E	2	44	1	39	68	174.36	7.384615	7.188393	97.3428269	
E	3	51	1	52	149	286.54	6.576922	20.296767	308.605865	
E	4	49	0	17	46	270.59	9.823529	8.792346	89.5029271	
E	5	37	0	31	25	80.65	9.419358	0	NA	
E	6	33	0	31	29	93.55	9.850537	7.105175	72.129824	
F	1	51	1	79	98	124.05	5.092422	0	NA	樹頂点抽出されず
F	2	51	1	75	NA	NA	6.043243	NA	NA	樹頂点抽出されず
F	3	47	1	41	103	251.22	8.707318	21.870924	251.178652	
F	4	37	0	48	52	108.33	8.687503	6.809493	78.3826262	
F	5	36	0	39	87	223.08	8.871792	10.194546	114.90966	
F	6	45	1	35	45	128.57	8.142854	8.844996	108.6228	
F	7	32	0	47	45	95.74	8.127662	7.082312	87.1383677	
F	8	43	1	28	44	157.14	8.642853	8.992254	104.042658	

注) SfM 解析で立木がカウントされていたとしても、樹頂点が検出されない場合や樹冠長がゼロとなる場合がある。

以下、樹頂点数と立木本数の整合性について検討する。画像解析では、市販の汎用ソフト（Photo Scan、GlobalMapper、ArcGIS+Spatial Analyst エクステンション）を使用した。樹頂点の抽出作業は難航した。上述したように、閉鎖林、疎林、列状間伐林など、林内での樹冠配置や樹冠サイズのバラツキなどの状況によって、解析パラメータの統一的な調整が困難であり、解析結果としての樹頂点数と実際の立木本数との乖離が避けられなかった。

SfM 解析による樹頂点の数と、毎木調査による立木本数とを比較すると（図 4.2.2）、サブプロット数 88 のうち、過小判定は 47、一致したのが 7、過大判定が 34 であった。判定の誤差率が±20 を越えたのは 50 プロットで、解析したプロットの 57% に相当する。図でも明らかなように、SfM 解析で立木本数をカウントするのは現時点では困難である。なお、今回比較した全プロットを合計すると、樹頂点数は実際の立木本数の 85% ということになるが、個々のプロットでの過大評価や過小評価があまりに多い実態を考慮すると、「SfM 解析では、実際の立木本数の 85% 程度に見積もる傾向がある」という評価は適当ではないようである。

SfM 解析で判定された樹頂点数が実際の立木本数と異なる理由や傾向については、これまで十分に検討されてきたわけではない。林地の状況（林冠高、林冠の凹凸、傾斜、列状間伐林かどうかなど）と何らかの関係がある可能性もある。図 4.2.3 は、各プロットにおける樹頂点の立木本数との誤差率を求め、プロットごとの立木本数と比較したものである。一見して、誤差率が立木本数と明確な関係性があり、立木本数が少なければプラス側（過大評価）に誤差率が大きくなり、立木本数が多くなるとマイナス側（過小評価）に誤差率が大きくなるのがわかる。さらに言えば、立木本数がより多くなるほど、本数を過小評価する傾向はあるが、誤差率そのものは極端に大きくはならないように見える。プロット面積は 10m×10m なので、プロットあたりの立木本数 20 本は ha 換算で 2000 本/ha となるが、この程度の林分密度であれば、樹頂点数は立木本数の 70～80% 程度になる可能性はある。つまり、間伐前の込んだ人工林（立木本数 2000 本/ha 前後）であれば、実際立木本数の 70～80% 程度で樹頂点が判定される、という評価はあり得る。一方、それよりも林分密度が少ない、手入れされた人工林について見ると、図 4.2.3 から類推できるように、今回の SfM 解析では誤差率が大きくなるので、実際に立木本数が判定できているのかどうか確証が持てない。今回示したデータを見る限り、列状間伐林と誤差率との因果関係等については判然としない。

被圧木の誤認識の可能性に関しては、現在の SfM 解析精度では、樹頂点数がすべてのプロットで誤差率が大きく、プロットの林況との関連性についても今のところ特段の傾向は見いだせなかった。立木本数を過小に評価しているだけでなく、過大評価している事例も相当の割合で発生しているため、単純に「被圧木だから識別できない」とは言い切れないようである。オルソ画像で確認される樹冠の状態と、SfM 解析による樹頂点をプロットごとに照合して、個々の樹冠の大きさ等を確認しながら、誤認識の要因を分析して、解析パラメータの調整だけでなく解析手法の改善を含めて検討する必要があると考えられる。

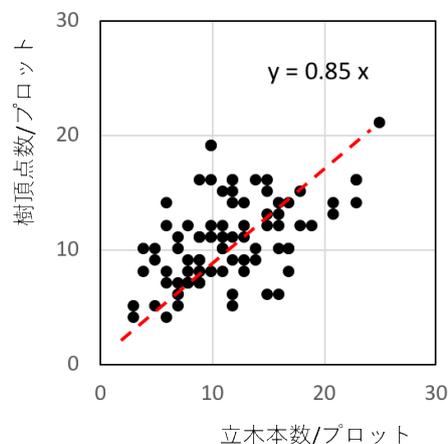


図 4.2.2 樹頂点数と毎木調査による立木本数の比較（プロット A～C）

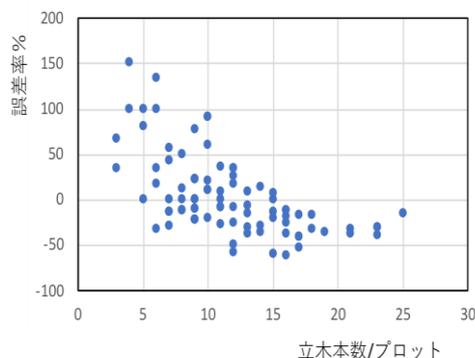


図 4.2.3 樹頂点数の誤差率と立木本数の関係

## 4.3 汎用ソフトによる SfM 解析の課題

### 4.3.1 解析パラメータの設定

本事業では、収穫調査業務における調査結果の客観性確保と調査工程の効率化を図ることを念頭に、UAV による調査手法を流域スケールなどの広い範囲で統一的に活用できることが望ましいとの判断がなされた。そのため ArcGIS の「フォーカル統計」機能を使用する際に設定するふたつのパラメータ(「平滑化の値」と「フォーカル統計の値」)については、全調査プロットに共通に使える統一的なパラメータ設定を前提として検討を行った。このパラメータ設定は、4.1.3 で述べたように、空撮画像の解析過程で最も重要であり、このパラメータの調整次第で解析結果が大きく影響されるというジレンマがある。

調査プロット 44 箇所のオルソ画像や地上レーザースキャナ OWL による立木配置図、毎木調査の結果等を参照しながら、代表的な調査プロットについてパラメータを調整して得られる樹頂点抽出の結果を比較しながら、パラメータの値の調整を繰り返した。すべての調査プロットに統一的に適用するパラメータとして、最終的に「平滑化の値」=5、「フォーカル統計の値」=6 を決定し、各調査プロットの画像解析から樹頂点を抽出した。

しかしながら実態としては、列状間伐箇所のように本数密度が低く、ギャップの多い場所ではノイズが発生しやすい傾向があり、樹頂点の誤認識が多く発生した。こうしたプロットでは検出された樹頂点が毎木調査による立木本数の 2 倍になるケースも見られた。また、調査プロットの中には、オルソ画像上でははっきりと認識できる樹冠があるにもかかわらず、樹頂点が検出されない例も見られた。照査区についても、上述した統一的なパラメータを適用すると、樹頂点(立木本数)検出率が 180% を超える結果となった。照査区で、実測した立木本数に近い樹頂点数とするには、ふたつのパラメータを「平滑化の値」=8、「フォーカル統計の値」=9 に変更する必要があった。

汎用ソフトを用いた SfM 解析では、実態として、調査プロットごとに最適な「平滑化の値」と「フォーカル統計の値」を変えざるを得ないようである。また、照査区のようにある程度広い面積を対象とする場合には、その範囲内に含まれる環境(林況)が多様であるため、同一林内であってもパラメータ調整がかなり難しいという課題が明らかになった。

現時点での現実的な対応としては、解析担当者が、現地調査で得られた対象林分の実際の本数密度や空撮画像で得られるオルソ画像等を参考にしながら、パラメータの適合度を対象林分ごとに判断せざるを得ない。本事業では、茨城県八溝・多賀流域の調査結果だけであったが、今後は、他地域を含め、よりバラエティのある森林流域を対象に、立木密度等の要因を考慮しながら解析パラメータを判断し、それらの解析事例を蓄積しながら、最適なパラメータを探索する手法について統一的な方法論を見いだして、胸高直径推定式作成等の効率化を図っていく必要がある。

表 4.3.1 パラメータ設定による本数認識率の違いの例

地区	プロット番号	サブプロット番号	フィルタ設定値	フォーカル統計設定値	樹頂点検出本数	毎木調査本数	認識率	
B	1	1	2	3	9	8	112.50%	102.78%
		2			8	8	100.00%	
		3			8	9	88.89%	
		4			12	11	109.09%	
	3	1			14	15	93.33%	78.18%
		2			9	11	81.82%	
		3			12	15	80.00%	
		4			8	14	57.14%	



注: B3プロットの本数認識率を向上させようとする、B1プロットの誤差が大きくなる。

### 4.3.2 DEM データの整備

本報告書の「2.3.4 樹高の測定方法」で述べたように、精細な DEM（数値標高モデル）データが得られる地域では、基準点（GCP）の正確な位置情報が得られることを前提として、調査対象区域の DCSM（数値樹冠表層モデル）データと DEM（数値標高モデル）データとの差分から樹高の推定が可能であり、サンプリング調査での樹高曲線の作成を省略することができる。

しかしながら、森林に関しては航空レーザ計測等による精度の高い DEM データが利用可能な地域は都市部に比べて少なく、また、等高線読み取りによる 10m メッシュ数値標高モデルは 5m 程度あるいはそれ以上の誤差が想定されるのが現状である。

今回の調査では、照査区の SfM 解析においては（国研）産業技術総合研究所の協力を得て 1m メッシュ DEM データ（吉見 2014）を用いることができたが、そのデータ量は膨大で、通常 PC ではデータ処理が困難であった。そのため、44 箇所の調査プロットのデータ解析では 1m メッシュ DEM データは使用せず、毎木調査での実測樹高を用いざるを得なかったのが実態である。

今後、森林・林業分野における ICT 活用を進めていくための基盤情報として、航空レーザ計測等による精細な DEM データを整備していくこととともに、画像処理や精細データ処理に支障のないハイスペック PC 等の整備が不可欠である。PC の処理能力は、PC そのもののスペックだけでなく、使用するソフトウェアにも依存するが、本事業における画像データ処理等で使用した PC のスペック等を参考までに表 4.3.3 に示す。

表 4.3.2 DEM（数値標高モデル）データの種類と精度の目安

保有機関	メッシュの大きさ	取得方法	対象地域	精度
国土地理院 （数値標高モデル）	5mメッシュ	レーザ	主に都市部	0.3m
	5mメッシュ	写真	主に都市域周辺	0.7~1.4m
	10mメッシュ	等高線読取り	全国26火山	2.5m
	10mメッシュ	等高線読取り	全国	5m
林野庁	各種	レーザ	森林	各種
国土交通省河川・砂防等	各種	レーザ	1級河川等	各種
産総研	各種	レーザ	断層等	各種
その他民間等	各種	レーザ	各種	各種

表 4.3.3 本事業の画像解析処理等で使用した PC のスペック

項目	条件
オペレーティングシステム	Windows10
プロセッサ（CPU）	Intel Core i9
システムの種類	64bit
メモリ（RAM）	64GB
外部記憶装置	SSD または HDD 3TB HDD (7200rp/6Gbps 対応)
グラフィックボード	NDVIA GeForce GTX1080Ti/11GB
ディスプレイ	24.1 型 IPS 液晶

## 5 UAV 収穫調査のための胸高直径推定式作成手法の検討

### 5.1 胸高直径推定式の現状と課題

リモートセンシングによる森林資源量把握に関する調査研究では、森林バイオマスの推定のほか、伐採収穫量の推定を含め多くの報告があるが、収穫調査での径級別資源量の推定を目的とした報告では、航空機 LiDAR 及び UAV によって樹冠形状や樹高を計測して、胸高直径を推定する手法が開発されている。

UAV 立木調査法では、空撮画像から林木の樹高や樹冠サイズを判読して、そのデータから胸高直径を推定するという手順が必要である。胸高直径推定式を作成するためには、UAV による空中写真から把握した樹冠面積等と現地調査で得られる胸高直径の実測値から、何らかの回帰式を作成することになる。

UAV による 3 次元空間座標の推定誤差について、水平方向の誤差は 1m 前後と比較的良好であるのに対して、高さ方向の誤差は 10~20m に及ぶことがあり、この原因として考えられるのは、UAV 搭載の GPS（巻末 用語説明参照）の誤差と、SfM 解析時の 3 次元空間推定誤差の両方が影響して、10~20m の誤差が生じることが報告されている（引用文献 Mohan et al. 2017）。高さ方向の誤差は樹高推定精度を左右するものであり、その解決策として GCP（基準点、Ground Control Point）による位置補正が必須とされる。

### 5.2 既存の推定式

地方公共団体等でこれまでに検討または採用されている無人航空機（UAV）による森林資源把握等に関して、立木の樹冠面積等を用いた胸高直径推定式の有無についてメールによる聞き取り調査を行った。その結果、具体的な推定式が得られているとの回答は 4 件である（青森県、石川県、和歌山県、佐賀県）。そのうち UAV による事例は石川県のみであるが、その内容は、林分密度管理図を介して林分材積を推定するものであり、樹冠面積等を用いた胸高直径推定式とは異なる内容であった。一方、石川県以外の 3 県は、UAV ではなく航空機 LiDAR による計測ではあったが、樹高及び樹冠投影面積から胸高直径を推定する回帰式を作成しているとの回答であった。ただし、回帰式の提案そのものは航空機 LiDAR 計測を実施したアジア航測株式会社によるものである。それぞれの回答内容は以下のとおりであった。

#### (1) 青森県産業技術センター

航空機 LiDAR による計測と胸高直径推定式の作成を実施（計測日は 2015 年 5 月）。計測対象区域は、青森県東津軽郡平内町山館実験林 77ha、実施主体はアジア航測株式会社である。スギ人工林 11 箇所、400m<sup>2</sup> の円形プロットを設定し、毎木調査データと LiDAR データから回帰分析を行い、以下の胸高直径推定式を作成した。

$$DBH = 2.482 \times Ac^{0.350} \times H^{0.532}$$

ここで、DBH: 胸高直径 (cm)、Ac: 樹冠投影面積 (m<sup>2</sup>)、H: 樹高 (m) である。

この回帰式の決定係数  $r^2 = 0.8841$ 、推定 DBH の RMSE = 1.64 である。

---

注)  $r^2$  は、回帰式の適合度合いの指標で、 $r^2=1$  に近いほど適合性が高い。

RMSE (Root Mean Square Error)は、真値と観測値との誤差の指標で、RMSE 値が小さいほど誤差が少ない。

(2) 石川県農林総合研究センター

UAV による空撮画像から SfM 解析で生成した樹冠投影面積から立木密度を算定し、林分密度管理図から材積を推定する方法を提案した(中部森林学会にて発表)。本事業での胸高直径推定とは異なる手順で材積推定を行ったものである。

(3) 和歌山県

航空機 LiDAR による計測と胸高直径推定式の作成を実施 (2015 年 5 月計測)、計測対象区域は、和歌山県 (有田地区、龍神地区、桧葉地区)、実施主体はアジア航測株式会社である。スギ人工林 40 箇所、毎木調査データと LiDAR データから、6 つの変数 (樹高、樹冠投影面積、樹冠長、樹冠長率、樹冠表面積、樹冠堆積) について回帰分析を行い、以下の胸高直径推定式を作成した：

$$DBH = 2.801 \times Ac^{0.226} \times H^{0.559}$$

DBH: 胸高直径 (cm)、Ac: 樹冠投影面積 (m<sup>2</sup>)、H: 樹高 (m) である。この回帰式の決定係数 r<sup>2</sup> = 0.811、推定 DBH の RMSE = 3.07 であった。

(4) 佐賀県

航空機 LiDAR による計測と胸高直径推定式の作成を実施。計測対象区域は、佐賀県全域で、実施主体はアジア航測株式会社。スギ、ヒノキを対象に、樹冠投影面積から胸高直径の推定式を作成した。林分疎密度 (相対幹距比) によって回帰式が影響されることを考慮して、林分疎密度を 3 区分して、以下の推定式を調整・作成した。

$$DBHs1 = 8.0113 Ac^{0.5742}$$

$$DBHs2 = 7.8273 Ac^{0.5444}$$

$$DBHs3 = 7.6567 Ac^{0.529}$$

ただし、DBHs1: 密区分の胸高直径(cm)、DBHs2: 中区分の胸高直径(cm)、DBHs3: 疎区分の胸高直径(cm)、Ac: 樹冠投影面積 (m<sup>2</sup>) である。

### 5.3 胸高直径推定式の検討

5.2 に述べたように、UAV による立木調査で採用されている胸高直径推定式は、樹冠投影面積と樹高を独立変数とした“べき乗式”で近似されることが多く、以下で表される：

$$DBH = a SC^b H^c \tag{5-1}$$

SC は樹冠投影面積、H は樹高、a、b、c は定数である。胸高直径の推定式としてはさまざまな形式があり得ると考えられるが、どのような形式の推定式であったとしても、樹冠形状 (樹冠投影面積や樹冠長) と樹高が、UAV によってある程度の精度で計測されていることが前提である。

本事業で実施した UAV 空撮画像による樹頂点の抽出に際しては、毎木調査結果と比較しながら、最適な立木本数が判別できるように、SfM 解析でのパラメータ調整を進めた。理想的には、調査対象区域のすべての人工林に適用できる解析パラメータが決定されることを期待したが、林冠の状況、地形、立木密度のほか、撮影画像の品質の問題等もあり、全プロットに適用可能なパラメータを見いだすのは困難で、実際の立木本数と樹頂点数が乖離する結果となった (表 4.2.1)。

また樹高については、対象地域で利用可能な精度の高い DEM を参照することができなかつたため、トータルステーションで測量を実施した照査区を除いて、樹高の計測精度を確保することができず、多くの調査プロットで樹高の推定値が使えない状態であった。ただ、SfM 解析

の計算過程で得られる樹冠投影面積と樹冠長については、それらしい計測値が得られた。そのため、樹高に関しては、検証用データとして取得していた毎木調査結果を利用することとした。また本来であれば、立木一本一本のデータを使って回帰分析を行うべきと考えられるが、樹頂点抽出による立木本数が必ずしも適切な推定となっていないことを考慮して、今回はプロットごとの平均値を用いて回帰分析を行った。

### 5.3.1 胸高直径推定式の試案

べき乗式を用いた胸高直径推定式の作成にあたっては、以下の要領で解析データを調整した。

- UAVによる樹高に代えて、各プロットで実施した毎木調査の平均樹高を用いる。
- 樹冠投影面積と樹冠長は、UAVの計測値から得られるプロットごとの平均値を用いる。
- UAVが判定した樹頂点の数は実測本数と異なるが、立木本数については解析に用いない。
- UAVによる樹冠投影面積あるいは樹冠長がすべてゼロとなるプロットを対象から除外する。

前述した「べき関数」による推定式を基本として以下のように回帰分析を行った。

SfM解析による樹頂点の数が、定性間伐林や列状間伐林などによって安定しなかったことはすでに述べたとおりだが、データ解析においてこうした林分状況の違いを考慮する必要がある。実際、列状間伐林分は林冠構造が不均一であるため、樹頂点の抽出数が過大になるなど、解析パラメータの調整等で今後検討すべき課題がある。今回解析に供したプロット数は39箇所だが、そのうち列状間伐林は17プロットである。また定性間伐林分であっても、立木本数と比べて樹頂点数が20%以上過大あるいは過小なプロット（以下、「不適合林分」と呼ぶ）もあったため、これらを解析対象に含めるか否かによる推定式への影響についても検討することとした。

以上を踏まえて、樹冠投影面積と樹高の二つを独立変数とした2変数の推定式、さらに樹冠長も加えた3変数による胸高直径推定式を作成した。

$$2 \text{ 変数推定式 } \quad DBH = a SC^b H^c \quad (5-2)$$

$$3 \text{ 変数推定式 } \quad DBH = a SC^b H^c CL^d \quad (5-3)$$

ここで、a、b、c、dは定数、SCは樹冠投影面積、Hは樹高、CLは樹冠長である。

回帰分析にあたっては、上述したように、列状間伐林分あるいは不適合林分を除外することで得られる推定式の妥当性についても検討した。回帰分析に用いたデータ数とそれに応じて決定されたそれぞれの推定式の係数a、b、c、d及び決定係数を表5.3.1に示す。SfM解析で得られた樹頂点の誤差は、樹冠投影面積や樹冠長のデータに影響すると考えられるが、そうした不安定なデータをすべて回帰分析に供した場合は、表5.3.1から明らかなように、推定式への適合度 $r^2$ が低くなる。それに対して、樹頂点数が特に不安定だった列状間伐林や外れ値となるデータを回帰分析から除外することで、推定式の適合性は当然ながら改善された。今回の推定式でもっと良好だったのは、3変数推定式で、列状間伐と外れ値を除いた推定式( $r^2=0.92$ )であった。

今回検討した全ての推定式を照査区（スギ46年生人工林、1.73ha）に適用してその妥当性を検討した。照査区については、(国研)産業技術総合研究所提供の1mメッシュDEMデータ(吉見2014)が得られているので、SfM解析による樹高、樹冠投影面積、樹冠長のすべての計測値が得られた。ただし、SfM解析におけるパラメータ調整で判読される樹頂点数が必ずしも安定せず、調査プロットで調整したパラメータをそのまま照査区に適用すると樹頂点数が実際の立木本数の80%程度多かった。そこで、推定式の検証に際しては、照査区内の樹頂点の数が実測した立

木本数とほぼ一致するようにパラメータ調整した上で、胸高直径推定式をすべての立木に適用することとした。

図 5.3.2 は、2 変数及び 3 変数の胸高直径推定式を適用して、調査区内の全個体の DBH を算出し、径級ごとの立木本数を集計した結果である。右下の赤いヒストグラムは、調査区の毎木調査による実際の径級別立木本数である。解析本数密度と実数の差が 2 割以内の 15 プロット（列状間伐箇所を除く）から作成した 3 変数推定式の適合度が最も高く、毎木調査結果と比較して本数で 90%、材積で 91%であった（表 5.3.2）。

表 5.3.1 2 変数及び 3 変数の胸高直径推定式のパラメータ

2 変数推定式 $DBH = a \times \text{樹冠投影面積}^b \times \text{樹高}^c$ のパラメータの比較						
使用データ	プロット数	a	b	c	$r^2$	
全データ	39	1.1406*	0.079	0.9778**	0.57	
列状間伐を除く	22	0.8655 <sup>ns</sup>	0.0486 <sup>ns</sup>	1.0876**	0.55	
列状間伐と外れ値を除く	15	1.4456*	0.2194**	0.7994**	0.87	

3 変数推定式 $DBH = a \times \text{樹冠投影面積}^b \times \text{樹高}^c \times \text{樹冠長}^d$ のパラメータの比較						
使用データ	プロット数	a	b	c	d	$r^2$
全データ	39	1.0358*	0.1071*	0.9468**	0.0655 <sup>ns</sup>	0.59
列状間伐を除く	22	0.739 <sup>ns</sup>	0.0411 <sup>ns</sup>	1.0067**	0.2168*	0.66
列状間伐と外れ値を除く	15	1.4781**	0.1300*	0.7569**	0.1552*	0.92

注) 記号は有意水準を示す： \* p<0.05、\*\* p<0.01、. p<0.1、ns p > 0.1

「全データ」：調査プロット39箇所のすべてのデータで回帰分析

「列状間伐を除く」：調査プロットのうち列状間伐を除く22プロットで回帰分析

「列状間伐と外れ値を除く」：樹頂点数が実際よりも20%過大あるいは過小なプロットも除いた15プロットで回帰分析

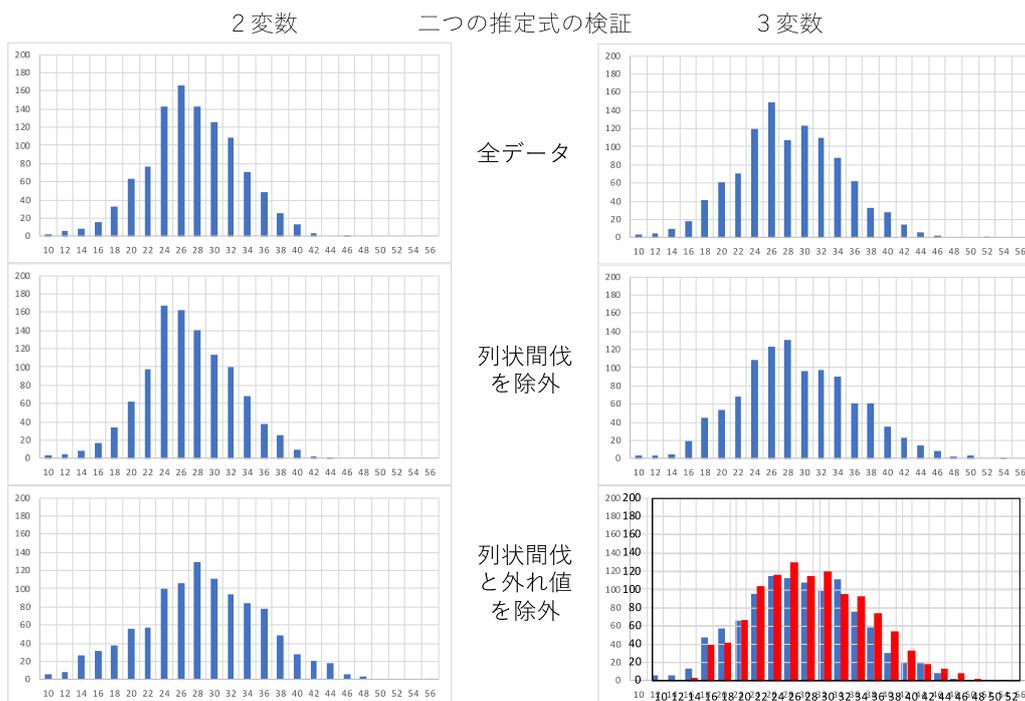


図 5.3.2 胸高直径推定式の調査区での検証結果

右下の赤いヒストグラムは、毎木調査で得られた実際の径級別立木本数である。

表 5.3.2 照査区における毎木調査と UAV 調査(3 変数推定式)の対比

胸高直径	毎木調査結果		UAVを使用した立木調査			
	本数	材積	本数	(比率)	材積	(比率)
スギ cm	本	m3	本	%	m3	%
10	9	0.37	1		0.03	
12	2	0.13	7		0.49	
14	7	0.73	13		1.35	
16	40	6.40	15		2.35	
18	43	9.03	62		12.63	
20	67	18.09	52		13.78	
22	105	37.80	87		29.73	
24	117	49.14	106		44.30	
26	130	66.30	112		55.50	
28	115	71.30	113		66.28	
30	120	87.60	100		69.65	
32	96	78.72	111		90.64	
34	93	89.28	87		82.88	
36	74	79.92	74		82.56	
38	55	68.20	44		55.90	
40	34	45.90	24		34.29	
42	18	27.54	23		36.98	
44	14	22.82	12		20.94	
46	9	15.75	5		9.95	
48	2	4.06	2		4.39	
50	1	2.17				
52	1	2.50				
54			1		2.75	
小計	1152	783.75				
広葉樹	10	2.97				
合計	1162	786.72	1051	90.45	717.37	91.18

※ 照査区は茨城森林管理署 2065 林班ほ小班内のスギ 46 年生人工林 1.73ha に設定した。

樹高は 1m メッシュ DEM データ(吉見 2014)を用いて解析した。

### 5.3.2 推定式作成の前提条件

胸高直径推定式の作成にあたって、UAV の空撮画像の SfM 解析で出力される変数として、前節で述べたように、樹高、樹冠投影面積、樹冠長の 3 変数を採用して、全立木の胸高直径の推定を試みた。ただ、ここで用いた 3 変数が実際に利用できるかどうかは、調査対象区域で高精度な DEM データが利用できることと、SfM 解析による画像解析が支障なく処理されることが前提である。それがクリアされていれば、上述した 2 変数または 3 変数の推定式の作成が可能である。以下、個々の変数について整理する。

#### (1) 樹高推定の条件

すでに述べたように、SfM 解析で樹高を自動的に推定するためには、調査対象区域で高精度な DEM データが利用できるというのが前提である。今回の照査区の解析では、(国研)産業技術総合研究所提供の 1m メッシュ DEM データ(吉見 2014)が利用できたが、これが利用できなければ、国土地理院の数値地形データ(10m メッシュ)が唯一の DEM データとなる。しかしこの DEM データは旧来の地形図から標高等を数値化したものであって、現地の微地形を再現するには精度が粗く、参考データと言ってよい。区域によっては 5m メッシュの DEM もあるが、樹高を推定するためには、何らかの手法で補完・調整する必要がある。国有林においては、高精細な DEM データが利用な区域はきわめて限定的であり、UAV の活用にあたってはそれら基盤データを整備する必要がある。

#### (2) 樹冠投影面積と樹冠長

すでに 4.2 及び 4.3 で述べたように、SfM 解析による樹頂点がある程度精確に判定されることが前提であるが、樹頂点が確定して初めて個々の樹冠サイズが決まるはずである。SfM 解析の要点である ArcGIS の「フォーカル統計」機能の 2 つのパラメータ「平滑化の値」及び「フォーカル統計の値」を調整することで、森林表面の凹凸データである DCHM データが変化する。つまり林冠の凹凸状態が微妙に変化することによって、樹頂点が現れたり曖昧になったりするが、実際のオルソ画像と見比べながら、適切と思われるパラメータを指定すれば、そのパラメータに応じて林冠の凹凸が決まり、それに従って樹頂点や個々の樹冠サイズが計算されることになる。個々の樹冠サイズがオルソ画像に合致するように自動計算されるわけではないので、全体的な林冠の凹凸の状態から、オルソ画像と似たような樹冠配置が得られるものと考えられる。

そうしたことを踏まえると、SfM 解析で得られる樹冠投影面積や樹冠長のデータは、画像から樹冠サイズを直接計測するものではないので、解析結果の善し悪しは、第一義的には、樹頂点を正しく判別できるかどうかにかかっている。今回の調査では林分状況等によって樹頂点の判別が不安定であったことを考慮すると、推定式の変数として用いる樹冠投影面積と樹冠長について、個々の林木レベルで高い推定精度を求めるには無理がある。林分単位での平均値レベルでその妥当性を判断するのが現実的と考えられる。

## 5.4 樹形モデルによる胸高直径推定式

前節 5.3 で得た推定式(5-2)式と(5-3)式は、両辺を対数変換すればわかるように重回帰式の形式であり、この推定式は複数の変数で DBH を推定するための経験的な回帰式である。そのため、推定される DBH は、推定式作成でも用いた調査データに依存する。言い換えれば、ある地域で得られた回帰式を他地域にそのまま援用することはできない。推定式の係数を一般化しようとしても、経験式であるため一般化する根拠が得られない。そのため、地域の違いや林況の違いなどの条件が異なる場合に推定式を作成するためには、その都度、今回と同様のプロット調査を行って、回帰式を改めて作成する必要がある。

上空からの空撮画像やレーザ計測によって得られるデータとしては、樹冠投影面積、樹冠幅、樹冠長、そして樹高である。こうした樹冠情報から胸高直径を推定するためには、樹形の成り立ちをベースとした理論式を応用することによって、より汎用性の高い推定方法を見いだせる可能性があり、他地域や他樹種等に適用させる場合にも有効と考えられる。そこで本節では、樹形モデル（コラム参照）をベースとした胸高直径推定式の誘導とその妥当性を検討した。

### (1) 胸高直径推定式の誘導

枝の合流によって形成される樹幹形については、樹形形成の理論式（BOX 参照）があり、針葉樹や広葉樹を問わず分枝構造を表し、葉、枝、幹の相互関係は、BOX(1)式及び(2)式で表される。林木の成長とともに樹冠量（枝葉）は枯れ上がるが、人工林では林木の占有面積が成長とともに大きく変化することはないので、過去に存在していた樹冠量を大雑把に一定と見なせる。枝下高よりも下では枝葉は枯れ上がっているので現在枝葉はないように見えるが、過去に存在していたはずの枝葉の痕跡は樹幹内に「節」となって封入されている。つまり、過去の枝葉が枯れ上がらずに残っていたとすれば、枝下高以下には枝葉がほぼ均等に一定量だけ分布しているはずである。そこで、枝下高以下の枝葉量（L+B）を一定とすると（L+B = C<sub>0</sub> 一定）、幹 S(z)を次式で表すことができる。

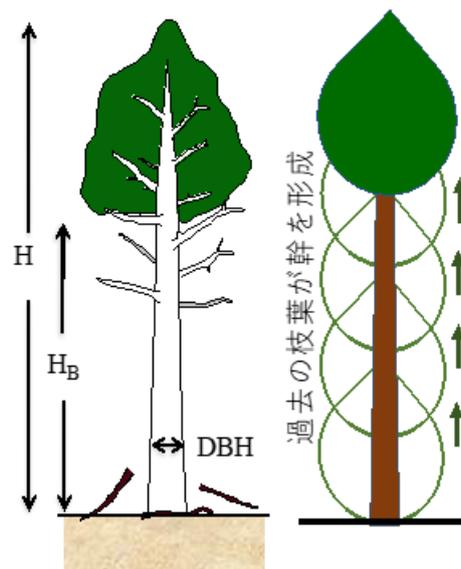


図 5.4.1 単木 DBH の推定根拠

$$S(z) = C_0 e^{z/b} (e^{-CL/b} - e^{-(H-1.3)/b}) \quad (5-4)$$

ただし、z は樹頂からの深さ、小端 CL は樹冠長、H は樹高、C<sub>0</sub> 及び b は定数である。

厳密には(5-4)式の S(z)は単位長さあたりの樹幹重量であるが、幹の比重を一定とすれば S(z)を幹の断面積あるいは直径と読み替えることができる。そこで(5-4)式の z を胸高位置とすれば、S(z)は胸高直径に換算することができる。つまり、計測対象木の樹高 H 及び樹冠長 CL が既知であれば、(5-4)式に z = H - 1.2 を代入すれば、胸高直径を計算できる。なお、C<sub>0</sub> を枝下高以下における枝葉量としていたが、上述のように幹の比重やその他の換算係数を包含させた値で置き換えることとする。

### (2) 胸高直径推定式の妥当性の確認

UAV によって各林木の樹高 H 及び樹冠長 CL が計測できれば、上記(5-4)式により、林木ごとに胸高直径を推定できることになる。そこで、本事業において実施したプロット調査で

得られた樹高と樹冠長の実測データを用いて、この推定式の妥当性を検討した。図 5.4.2 は、プロット A 及び B で実測した樹高と枝下高から樹冠長を計算して(5-4)式から立木の胸高直径（縦軸）と実測の胸高直径（横軸）を対比した。林木ごとであるためバラツキはあるが、各プロットでの胸高直径の推定値は概ね良好と言える。なお(5-4)式の係数  $C_0$  については樹冠長だけでなく樹冠幅あるいは樹冠体積の個体差を反映させるため、樹高そのものを加味し、次式の形式とした： $C_0 = \alpha \times H \times CL$ （係数  $\alpha$  はプロットごとに調整して決定したが、各林分の平均樹高と相関がある）。

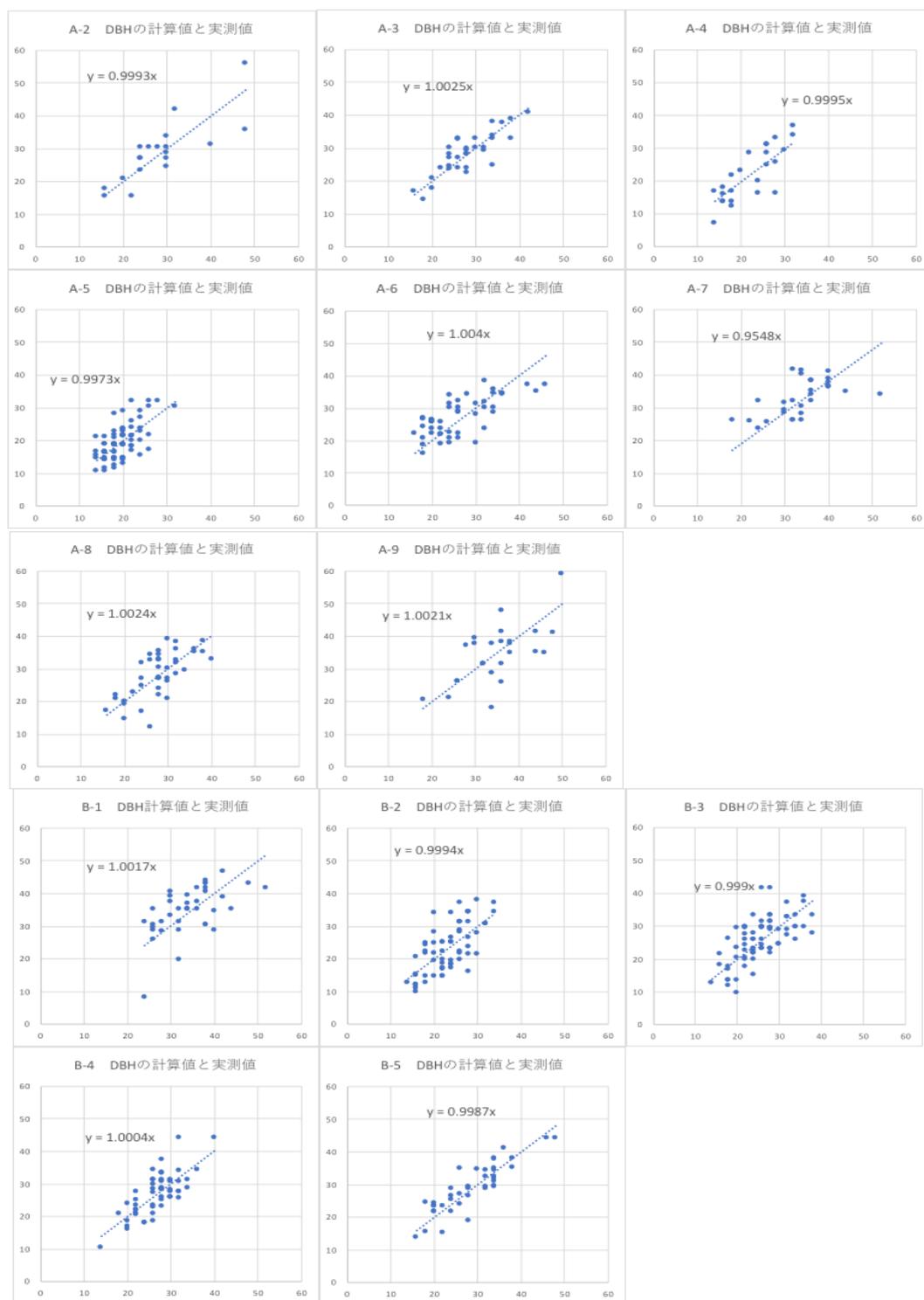


図 5.4.2 立木単位の胸高直径の推定値と実測値の比較（プロット A 及び B の一部）

樹形モデルによる胸高直径推定式を各プロットの林木に適用して、プロットごとの実測値の平均と推定値の平均を比較したところ（図 5.4.3）、プロット平均値レベルでは十分に実測値を再現できることが確認できた。今回は集計作業を割愛したが、平均値レベルで胸高直径を推定できることが確認できたので、前節 5.3 で試みた胸高直径推定式による林分集計と同様の計算を行えば、図 5.3.2 と同様の集計結果が得られるであろう。

今回提案した推定式(5-4)式は、樹形の成り立ちをベースにした推定方法であり、経験的な近似式である(5-2)式または(5-3)式とは異なり、理論的根拠に基づいているという点で、普遍性を求めることは可能であり、他地域あるいは異なる林分に適用させる「一般化」を図る上で効果的な推定方法と考えられる。単木レベルで胸高直径の推定精度を向上の可能性は、この推定式で用いている独立変数（樹高、樹冠長及び樹冠投影面積）の値が、UAV で精度良く計測できるかどうかにかかっている。なお、この推定法は樹幹形状をベースとしているので、単なる胸高直径の推定のほか、幹細りを考慮した採材効率の評価等での活用の可能性もあり得る。

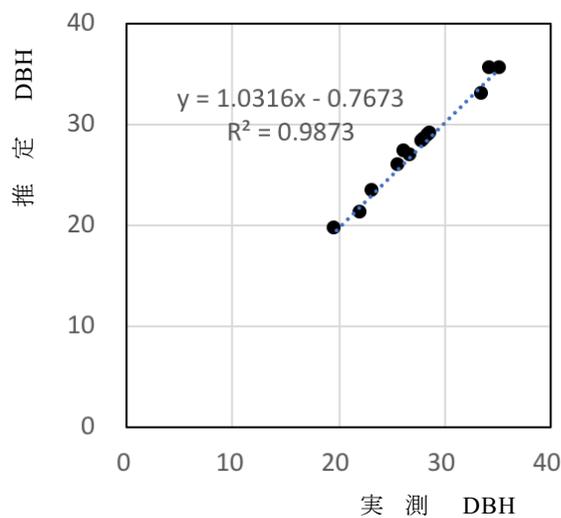


図 5.4.3 樹形モデルによるプロットごとの平均胸高直径の推定値と実測値の比較

樹木の幹は枝が合流して形成される（図1：パイプモデル）。樹木は長年月にわたってその重量を物理的に支えるため、特定の部位に負荷がかからない構造になっている。つまり、木部（枝や幹）の任意断面に加わる荷重（単位断面積あたりの荷重）がどこでもほぼ均等になっており、これが樹体を安定的に維持する基本構造である。枝下高より下の幹形は、下向きの距離に対して直径が指数関数的に増加しており、この形状こそが樹体を安定的に支える構造である。

樹幹先端から樹体を厚さ 1m で切断したとき、梢端からの深さ  $z$  における単位長さあたりの葉、枝、幹の重量密度(kg/m)をそれぞれ  $\Gamma(z)$ 、 $B(z)$ 、 $S(z)$  とすると、梢端から  $z$  までの全重量  $T(z)$  は、

$$T(z) \equiv \int_0^z (\Gamma(z) + B(z) + S(z)) dz \quad (1)$$

で定義される。針葉樹や広葉樹を含め、幹重量  $S(z)$  と  $T(z)$  は比例する：

$$T(z) = b S(z) \quad (2)$$

ただし、 $b$  は比例定数である。この関係は、樹体重量  $T(z)$  を物理的に支えている幹  $S(z)$  に加わる荷重が、幹の部位に無関係に一定であることを示している。(1)式と(2)式から葉、枝、幹の相互関係は、次式で表される：

$$\frac{dS(z)}{dz} = \frac{1}{b} (\Gamma(z) + B(z) + S(z)) \quad (3)$$

(3)式は、針葉樹のように幹がまっすぐに伸びるような樹形だけでなく、幹が斜立していたり、横向きの枝のような場合にも成り立つことがわかっている。

(3)式から明らかのように、枝葉の分布関数 ( $\Gamma(z) + B(z)$ ) を代入すると幹の分布関数  $S(z)$  が計算できる。針葉樹のように比較的単純な樹冠形を仮定すると、幹の形状は、梢端付近では幹が下向きに指数関数的に太くなること、さらに枝が枯れ上がった枝下高以下の部分でも指数関数的に太くなる（下図右）。つまり幹の形状は、2つの指数関数の合成関数として近似的に表すことができる。枝葉が合流して形成される幹の分布関数(3)式は、間伐による幹の成長制御をモデル化するための根拠ともなる。

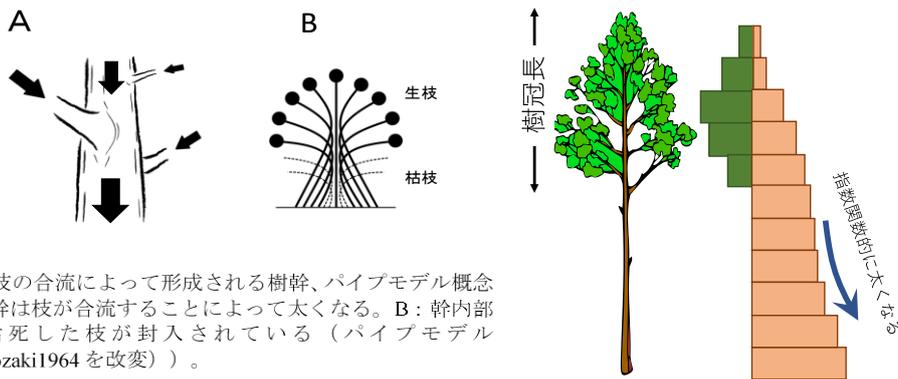


図-1 枝の合流によって形成される樹幹、パイプモデル概念  
A：樹幹は枝が合流することによって太くなる。B：幹内部には枯死した枝が封入されている（パイプモデル（Shinozaki1964を改変））。

図 枝の合流で形成される樹幹とパイプモデルの概念  
A：樹幹は枝が合流することで太くなる。  
B：幹内部には枯死枝が封入されている  
（Shinozaki ら(1964)を改変）

## 6 被圧木等の推定

航空機 LiDAR による場合でも、UAV の画像解析による場合でも、個々の林木を正しく認識できないケースは避けられない。誤認識としては、存在するのに識別できないこと (omission)、存在しないのに存在すると判断してしまうこと (commission) がある。一般にそうした誤認識の割合は8割ほどという報告が多い。誤認識の発生原因としては、劣勢木が優勢木と重なって識別できないこと、近接する個体を一体化してしまうこと、ギャップ下で暗い環境で画像が判読できないこと、ひとつの樹冠内での凹凸を別個体と判別することなどが考えられる。

こうした UAV を利用した立木の誤認識は多くは劣勢木などで生じると考えられ、林分材積としての評価では大きく影響しないだろうと考えられている。しかし、毎木調査の代替として UAV を用いた手法を採用するのであれば、誤認識の実態と収穫調査における材積等の数量評価への影響を分析した上で、可能であれば、被圧木の補正方法等について検討しておく必要がある。



図 6.0.1 オルソ画像及び SfM 解析で判定された樹頂点 (照査区の一例)

図中の●は SfM 解析で判定された樹頂点で、部分的にオルソ画像の樹冠と一致していないように見える。

### 6.1 径級別本数割合からみた被圧木の状況

SfM 解析で判定された樹頂点数が実際の立木本数と異なる結果になったことについては、4.2 すでに述べたが、誤判定が主として被圧木だけに限って発生しているわけではないようである。本事業では、解析手段として Photo Scan や ArcGIS などの汎用ソフトの活用を前提とした。こうした汎用ソフトであったために、誤判定が多く発生したのかどうかは不明であるが、今後は SfM 解析関連の手法やソフトウェアが改良されていくことが考えられ、いずれは主林木については確実な判別が行われるであろう。立木として誤判定される可能性が高いのは、林冠木に

被陰されたり、優勢木と一体化して見えてしまう被圧木であろう。そこで、今後の SfM 解析技術の向上を見越して、人工林における被圧木の実態ならびに林分材積に占める被圧木の割合等について、検討しておく。

一般的に人工林における径級別の立木本数や材積は、多少の違いはあるが、正規分布に近いヒストグラムになる(図 6.1.1)。照査区の毎木調査から集計したものだが、照査区のスギ立木本数のうち、一般材が 1136 本、低質材は 16 本と判定され、低質材の本数割合は 1.4% だった。材積では一般材 782.38m<sup>3</sup> に対して低質材は 1.37m<sup>3</sup>、低質材の材積割合はわずか 0.2% であった。

低質材が直ちに被圧木と見なせるわけではないが、照査区における低質材の径級は 10cm 台前半がほとんどで、樹高も 10m 台前半がほとんどであり、照査区における低質材は相対的には劣勢木と言ってよいようである(図 6.1.2)。また樹高について見てみると、低質材で 1 個体だけ樹高 22m を越えるものがあったが、それ以外はすべて 10m 台、ほとんどは 10m 台前半であり、林冠層での相対的な位置関係から判断すると、低質材は被圧木と言ってよい。

他の事例として過去行われた収穫調査結果については 7 章で述べるが、低質材とされるほとんどの立木は、径級、樹高ともに当該林分の中で相対的にかなり小さい場合がほとんどであり、被圧木と言って差し支えない。

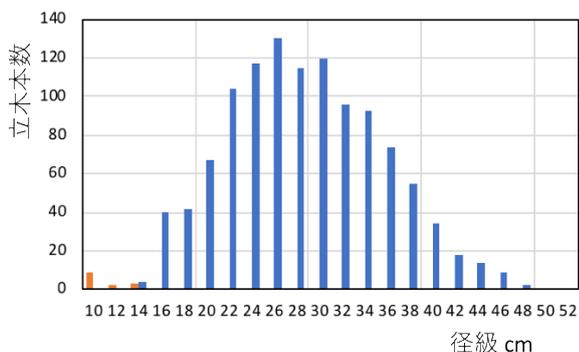


図 6.1.1 径級別の立木本数 (照査区 1.73ha)

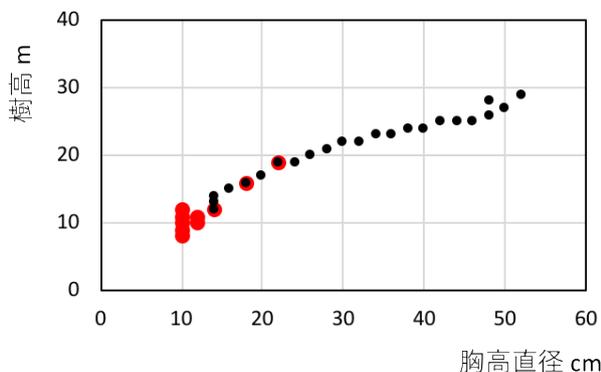


図 6.1.2 照査区における低質材の樹高と胸高直径  
図中の●は低質材である。

## 6.2 収穫調査における被圧木補正の考え方

収穫調査の材積算定等において UAV でカウントされない被圧木があった場合に、どのようにして被圧木を収穫量として見積もるか(あるいは補正するか)というのは、厄介な問題である。人工林内における被圧木を定量的に評価した事例はほとんどなく、間伐施業での被圧木の整理の仕方によって、主伐時の被圧木の量が違ってくるはずである。施業履歴だけでなく、林分密度や成長の善し悪しなどの要因も加味して林分を分類しておいて、その分類ごとに被圧木の想定の割合を一定と見なして算定するのが最も単純な補正の考え方であるが、次章 7 で述べるように、現時点では人工林を分類するだけの必要な情報やデータが揃っていない。

ただ、同一林分の中での被圧木は言うまでもなく劣勢木なので、林木の相対的な大きさに着目することで、被圧木を定量的に評価できる可能性がないわけではない。そこで、ひとつの方法として Hozumi ら(1968)が提案した MNY 法という解析法を紹介する(図 6.2.1)。MNY 法の要点は、材積などの立木サイズに着目して大きい順に林木を並べ替え、順に 1,2,3・・・と番号(N)を付した上で、大きい順に立木サイズの積算値 Y(N)を計算して、Y や N などの関係を解析する

方法である。以前は、データを大きい順に並べ替える作業は相当厄介であったが、現在は Excel などデータ並べ替えは容易である。

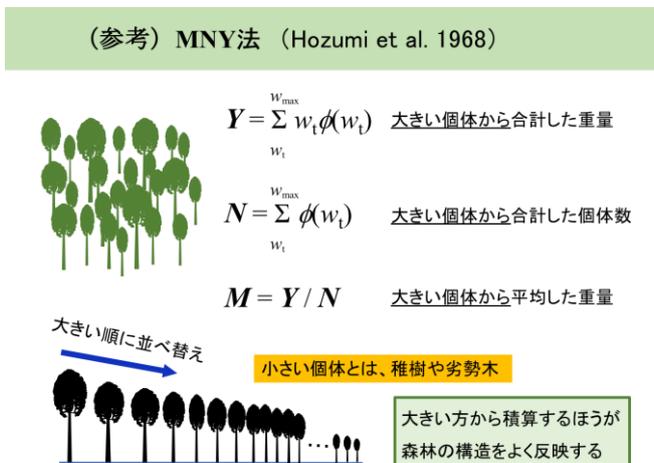


図 6.2.1 個体サイズの序列による解析方法 MNY 法の概要

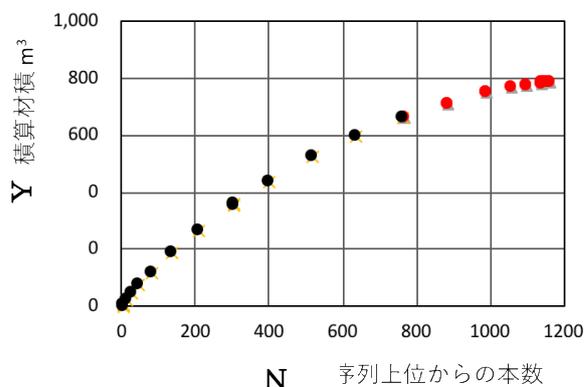


図 6.2.2 照査区のデータで得られる Y-N 曲線 ● は被圧木 (低質材)

照査区の毎木調査を例に、具体的な解析方法を説明する。立木本数 1162 本すべてについて、立木材積を計算しておいて、材積が大きい順に並べ替えて、上位から順に番号(N)を付して、大きい材積から順に合計した積算材積を Y として、Y と N の関係を図化したのが図 6.2.2 である。この関係を Y-N 曲線と呼ぶ。材積の大きい優勢木が原点付近にあるので、原点付近ほど Y の増加量が多い (曲線の傾きが大きい)。N が増えていくと積算されるのは劣勢木になってくるので、Y の増加率が小さくなり (曲線の勾配が小さくなり)、Y と N の曲線関係は徐々に緩やかになっていく。図中の●は低質材と判定された被圧木である。グラフ右上の最終点が、この照査区の総本数と総材積になる。

この Y-N 曲線は、人工林だけでなく、天然林などのように個体サイズが不均質な森林であっても、図 6.2.2 と同様に滑らかな曲線になることがわかっており、Y(N) と N の関係は、以下のようなミッチャーリッヒ式で近似できる：

$$Y(N) = Y_{max} ( 1 - \exp( -a / Y_{max} N ) ) \tag{6-1}$$

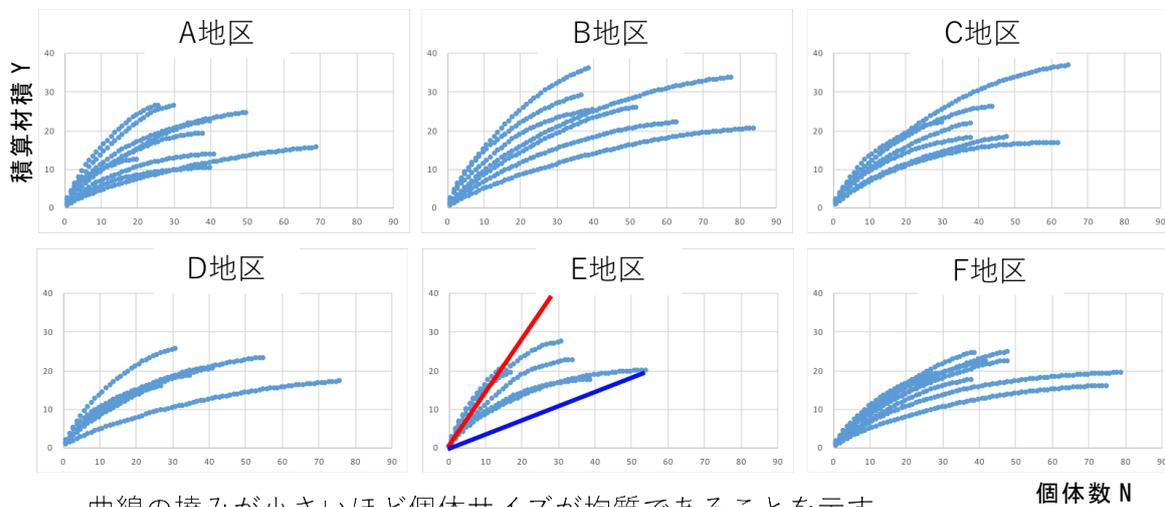
ここで、Y<sub>max</sub> は Y(N) の最大値、a は Y-N 関係の初期勾配である。この初期勾配は最大立木材積 (つまり最大個体の材積) に近い値になる。

この図からもわかるが、被圧木は多少本数が多くなったとしても、総材積に占める割合が小さいが、この関係式を使うことによって、林分材積に占める被圧木の材積割合を定量的に評価できる可能性がある。つまり、UAV によって林冠を構成する優勢木の樹冠サイズが確実に把握できるのであれば、その陰に隠れて検出できない被圧木があったとしても、被圧木の材積割合などをこの関係式を用いることで補正する方法が導き出せる可能性がある。今後、さらに適用事例を増やして、被圧木の補正方法を検討しておく必要がある。

参考までに、本事業で調査した A~F 地区における各プロットの Y-N 関係を図 6.2.3 に列挙する。調査対象地区ごとに設定した 6~9 箇所の調査プロットの毎木調査データから、単木材積の大きい順に林木を並べ換えて Y-N 曲線を作成した。個体数は多いにもかかわらず材積が少ないプロットがあったり、逆に、個体数が少ない割に林分材積の大きいプロットなどが一見して

理解できる。各林分の被圧木は相対的に小さい個体であるから、Y-N 曲線の右上部分が被圧木に相当し、劣勢木がカウントされなかったとしても総材積への影響は数%程度とみられる。

10m×40mプロットの毎木調査データから作図



曲線の撓みが小さいほど個体サイズが均質であることを示す。  
 (凡例:E 地区)  
 初期勾配 = 最大個体材積、最終点の勾配 = 平均単木材積

図 6. 2. 3 調査プロット A~F の Y-N 関係

## 7 過去の収穫調査データを活用した材種・品質区分の推定

従来の収穫調査では、対象区域の立木を直接計測しながら、材種及び品質を判定してきたが、UAV 立木調査法では、立木の材種・品質を直接判定することができない。UAV による収穫調査を前提とするためには、材種・品質については収穫調査とは別の段階で評価しておく必要がある。

立木の材種・品質は、前章 6 で述べた被圧木とも関連するが、林地における地位、林分密度、施業履歴のほか、立地環境や地形、競合植物等との相互作用が影響する。特に、生育初期段階での競合植物や生育不良木の除伐、間伐時における立木配置等への配慮など、施業履歴の影響が大きいと考えられる。一方で、適切な間伐が実施されていない林分であっても形質良好な立木が得られる場合もあり、材種・品質に影響する要因とその実態については十分に解明されているわけではない。

UAV 立木調査法においては材種・品質区分が困難であるという課題に対応して、国有林が保有する過去の収穫調査データをもとに検討した。具体的には八溝・多賀流域の過去 5 カ年分の収穫調査データ（主伐・間伐）から、地区、地位等の立地環境、その他の材種・品質に影響を及ぼすと考えられる因子に対応した材種・品質区分の出現状況を分析した（図 7.1.1）。

材種・品質区分については、森林管理局ごとに「収穫調査規程」で定められており、関東森林管理局の場合、一般用材が採れるものを一般材、小径あるいは一定以上の曲がり、さらに腐れのあるもの等を低質材（パルプ材）に区分している。すでに述べたように材種の出現比率は成長経過や施業履歴によって異なると考えられるが、今回解析に供した収穫調査データ及び当該林分の森林簿では、施業履歴や林分密度などの必要な林況情報が得られなかったため、低質材の出現に影響する要因を分析するには至らなかった。ただ、図 7.1.2 に例示したように、今回の収穫調査データを分析する限り、胸高直径及び単木材積が大きい林分ほど、低質材の割合が低い傾向があるなど、ある程度の傾向を見いだすことはできた。

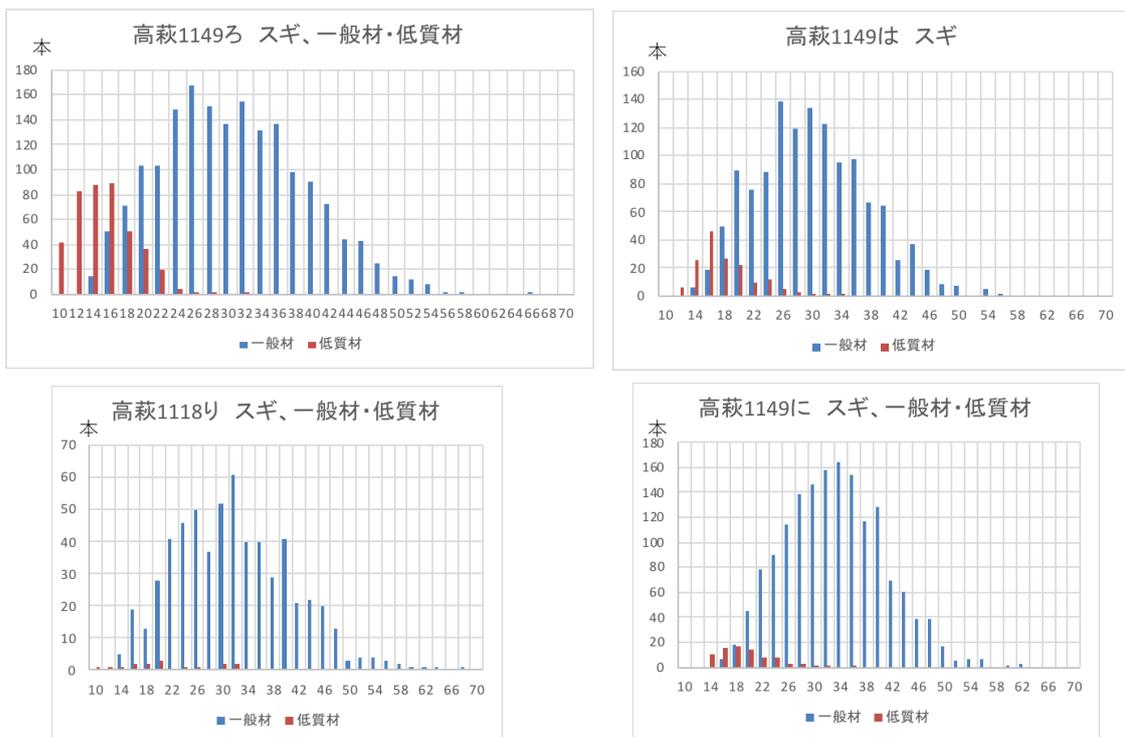


図 7.1.1 収穫調査データにみる一般材と低質材の出現状況

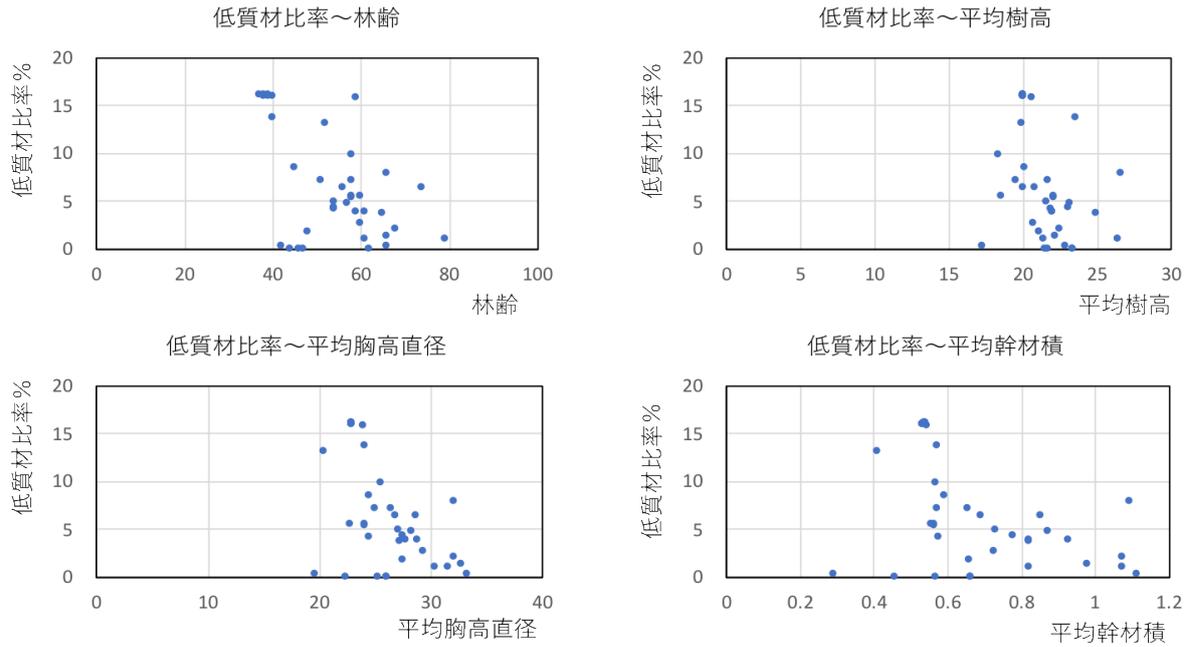


図 7.1.2 低質材の出現比率と林況データとの関係

なお、UAV 使用を想定した収穫調査において、材種・品質区分をどのように反映させるか、という課題については、材種・品質区分推定式の検討が求められているが、既存の収穫調査データ及び森林簿では、材種品質区分の定量的な分析に必要な森林情報(施業履歴や林分密度等の基本データ)が得られなかったため、今後、これら必要な情報を収集整理して、材種品質区分の定量評価に向けてさらに検討する必要がある。

## 8 UAV を活用した収穫調査の工程及び人工数

UAV を使用した収穫調査において、計画から調査、復命書の提出までの一連の工程を、従来収穫調査（毎木調査法、標準地調査法）の工程と対応させる形で整理し、それぞれに要した人工数と併せて表 8.1.1 に示した。

事前調査及び区域測量（区域標示を含む）は共通しているが、UAV を使用した収穫調査では、従来型の調査とは異なる次の工程が必要になる。

「UAV 空撮」…………… 飛行計画の設定、対空標識の設置、撮影飛行等。

「サンプリング調査」…………… 径級・樹高（精細な DEM データが得られていない地域では必須）、1ha 当たり本数（SfM 解析においてパラメータ設定が適切か否かを効率的に確認するために必要）。

「画像解析」…………… オルソ画像の作成、SfM 解析（点群データ作成、樹頂点抽出、樹冠解析等）。

「推定式での材積計算」…………… 画像解析から得られた①樹冠投影面積、②樹冠長、③樹高（精細な DEM データが利用できない場合はサンプリング調査で得られた樹高曲線）を胸高直径推定式に適用し、胸高直径階別の本数・材積を計算。

また、1ha 当たりの就労人工数を比較すると、従来型の毎木調査法が 6.5 人日、標準地調査法が 5.3 人日であったのに対して UAV を使用した収穫調査が 5.9 人日であった。ただし、今後、精細な DEM データの整備、解析ソフトの改良等の進展に応じて効率化できる余地がある。

表 8.1.1 収穫調査の工程と就労人工数

現地調査 (H30年 11・12月)		従来型収穫調査 (工程と人工数)		UAV を使用した収穫調査 (工程と人工数)	
事項	就労数	2065ほ林小班 区域面積 : 1.73 ha 標準地面積 : 0.18 ha		2065ほ林小班 区域面積 : 1.73 ha	留意点
		毎木調査法	標準地調査法	毎木調査法	
事前調査		※ 0.500	※ 0.500	事前調査	※ 0.500 0.125
区域測量	3.222	(留) 3.882	(留) 3.882	区域測量	(留) 3.882
標準地測量	1.563		1.563		• UAV飛行に係る事前確認(安全等) • 区域表示等(※0.660)を含む
毎木調査 (標準地を除く)	3.583	3.583		UAV空撮	1.000
標準地調査 (径級・樹高)	1.667	1.667	1.667	サンプリング調査	2.000
復命書 作成	面積計算	※ 0.250	※ 0.250	面積計算	※ 0.250
	材積計算	※ 0.750	※ 0.750	オルソ画作成・解析	1.500
	搬出計画	※ 0.250	※ 0.250	推定式での材積計算	0.250
	更新計画	※ 0.130	※ 0.120	材積データの入力等	0.125
	総括表	※ 0.250	※ 0.250	搬出計画	※ 0.250
計		※ 1.630	※ 1.620	更新計画	※ 0.130
合計		11.262	9.232	総括表	※ 0.250
				計	2.755
				合計	10.262

人工/ha 6.5 5.3 人工/ha 5.9

注. 表中の※印箇所は平成29年度「国有林材の販売に係る収穫調査等の効率化手法検討委託事業」を参考。

## 9 UAVによる立木調査方法のまとめ

### 9.1 UAV撮影画像の品質向上に向けた留意点

本事業において実施した UAV 立木調査法は、

- ① UAVにより上空から写真撮影
- ② 得られた写真からオルソ画像を作成
- ③ オルソ画像から樹頂点を抽出し立木本数を推定
- ④ オルソ画像から樹冠面積及び樹冠長を計算
- ⑤ オルソ画像の樹冠高から地盤高を差し引いて樹高を推定
- ⑥ 樹冠面積等と樹高をあらかじめ作成しておいた胸高直径推定式に当てはめて胸高直径を推定
- ⑦ 胸高直径（推定値）と樹高（推定値）から立木材積を推定

することにより、当該林分の立木調査を行おうとするものである。

樹頂点抽出時において、

- ・ 林分ごとに解析パラメータ数値（平滑化の値、フォーカル統計の値）の調整
- ・ 解析パラメータ数値を設定するためのサンプリング調査
- ・ 精確に樹高を推定するためのレーザー航測の地面データ等精細な DEM データの取得が必要であることなど、克服すべき課題は多いものの、これらの課題がクリアできる場合、毎木調査法による材積と比較して 10%程度の誤差範囲に収まることが示唆された。

以下に各工程における留意点を示す。

#### 9.1.1 撮影時の気象条件

UAVで森林を上空から撮影する際には、先ず、気象条件に留意する必要がある。国土交通省「無人航空機飛行マニュアル」では、風速 5 m/s 以上の状態では飛行させない、雨の場合や雨になりそうな場合や雲や霧の中では飛行させないこととしており、例えば、地上で 1 ~ 2 m/s の風のときでも上空はそれ以上の風が吹いている場合があることに注意する必要がある。

また、森林の撮影に特有の留意点として、例えば、風速 3 m/s でも立木の樹頂が風で揺れている場合は、画像がぶれてしまうことがあるため、UAV 搭載カメラのシャッター速度等の設定を工夫する必要があることが挙げられる。

晴天で無風または微風の日には UAV の飛行には適している。ただし、画像の明暗コントラストが強くなり、立木等の影に入った部分の判読が難しくなるという傾向がある。このため、航空機による空中写真撮影ではできるだけ影の面積が小さくなる太陽高度が高い時間帯に撮影することが推奨されており、UAV においても参考にすべきと考えられる。

うす曇りで無風または微風の日には、明暗のコントラスト差が小さくなることで、森林の樹頂から地表までを明瞭に撮影することが可能となる。このため、撮影画像の品質向上に向けては最適な気象条件とすることができる。

#### 9.1.2 飛行計画

調査区域及び対空標識を含む空中写真を連続的に撮影できる範囲で飛行コースを設定する。また、調査区域の外側については、少なくとも 1 枚以上の空中写真が多く撮影されるようにコース設定を行うことに留意する。

<オーバーラップ率、サイドラップ率>

国土交通省国土地理院「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」ではオーバーラップ率（同一コース内の隣接空中写真との重複度）80%以上、サイドラップ率（隣接コースの空中写真との重複度）60%以上を推奨している。

山地では撮影コースを斜面に沿って設定することが多く、コースの高低差も考慮して余裕を持った設定をすることが望ましい。このため、実際の照査区の撮影ではオーバーラップ率 90%、サイドラップ率 70%を採用した。

<飛行高度>

飛行高度は、計画区域の高低差を考慮しながら対地高度が 150m を超えることのないように余裕をもって設定する必要があることから、100メートル程度で設定することが望ましい。

<コースアングル>

飛行コースが、調査区域をオルソ画像に挿入する際の起点となる対空標識の真上を通過するように設定する。

### 9.1.3 UAV 搭載カメラの設定

<撮影間隔>

撮影した画像の SD カードへの保存に要する時間を考慮する必要がある。撮影間隔が短かすぎると撮影された画像が保存されないケースがあるため、4 秒間以上の撮影間隔で設定する。

<カメラの基本設定>

シャッター速度を 1/640 秒以上に設定することで、風による影響を軽減することができる。この場合、ISO は基本的には「AUTO」で撮影する。天候などで、全体的に暗い場合は露出(EV)を調整し、明るめの画像を撮影する。

無風で明るい条件下の撮影では ISO を 200 程度で設定することにより画質を向上させることができるが、暗い日はシャッター速度が遅くなる。撮影条件が変化していく中で画像のぶれを防ぐ基本設定としては、シャッター速度を優先し、ISO は「AUTO」とすることが望ましい。

## 9.2 汎用ソフトを用いた SfM 解析の留意点

樹頂点の検出は、ArcGIS の「フォーカル統計」機能によって検出されたものから、およそノイズにより誤って検出されたと見なされるものを除外し行う。従って、「フォーカル統計」機能による検出時点での精度が高ければ、当然、結果も良いものとなる。UAV による精度の高い撮影飛行が必要であると共に、最も重要であるのが、「フォーカル統計」機能を使用する際に設定する「平滑化の値」と「フォーカル統計の値」である。

解析の客観性、及び工程の簡略化という観点からこれらの数値は、何らかの基準等をもって選択されるのが望ましいと考えられる。今回の検証においては、全て「同一地域内」と見なし、オルソ画像や 3D レーザースキャナによる立木配置図、毎木調査の結果等を参考に、いくつかの代表的なプロットに関して比較を行った。それによって導き出されたのが、「UAV 立木調査マニュアル」に記載している「平滑化の値：5」「フォーカル統計の値：6」である。

しかし、これらの値では、いくつかのプロットではノイズが大量に発生した。照査区でも、本数検出率が 180% を超える結果となった。最終的に、照査区に関しては上記の検討を別途行い、「平滑化の値：8」「フォーカル統計の値：9」として解析したものが本報告書の成果である。

ノイズは、本数密度が低く、ギャップの多い場所に発生しやすい傾向が見られる。また、オ

ルソ画像上でははっきりと認識できる樹頂点が検出されない、といった例もあった。本手法における樹頂点の検出は、あくまで Photo Scan による SfM 解析によって得られた 3D データ（点群データ）を元に行われている。オルソ画像では一見正常に見えている地表面や樹冠であっても、3D データでは不十分なものとなっている可能性があり、こうした問題が生じると考えられる。例えば、樹冠の間から見える地表面の一部は、見える角度が限定されることで十分に解析されず、実際より高い場所と見なされる場合がある。オーバーラップ率を通常より高める等、より精度の高い撮影飛行をする必要があるだろう。また、これは森林内における GCP 設置の困難さでもある。森林において GCP を SfM 解析にもちいる際は、十分に上空が開け、地上を正確に 3D データ化できている場所であることを、確認する必要がある。

精度の高い撮影飛行を前提として、「平滑化の値」と「フォーカル統計の値」をプロット毎に最適な値を導き出すことは可能かもしれない。しかしながら、今回設定した「10m×40m」プロット内でさえ、最適だろうと言える値は変化する。調査区のように、一定の面積があるものを対象とする場合は、含まれる環境が多く判断が難しい。

これらの課題に対しては、現時点では、解析担当者が、サンプリング調査等から得られた調査対象林分の本数密度を参考にしながら、設定したパラメータの適合度を判断して進めていくしかないものと考えられる。このため、今後、本数密度等の条件要素と最終的に確定させた各数値の組合せ情報をさらに蓄積し、これを共有していくことによって作業効率の向上を図っていく必要がある。また、林分状態に応じて最適な数値設定が行えるようなソフトの開発等も将来に向けた課題であると考えられる。

### 9.3 SfM 解析に必要な位置情報の精度と取得方法

UAVによる空撮画像からSfM解析を行う際は、2.4.4で述べたように、撮影画像からオルソ化した画像に、調査対象区域の位置を正しく挿入しておく必要がある。この挿入位置のズレは、その後の画像解析に影響するため、挿入される調査対象区域の位置情報の精確さが解析結果の精度を左右することになる。

このため、調査対象区域の位置情報をどのような方法で、より精確に取得するかが重要な課題である。例えば、高精度な測量成果が求められる公共測量に関する「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」(国土交通省国土地理院)では、3次元点群作成を目的とする場合に設置すべき標定点(対空標識)の目安が規定されており、対象区域の外側及び内側に、地形変化にも配慮して、多数配置する必要がある。さらに設置する標定点の総数の半数以上の検証点の設置が必要とされる。標定点及び検証点の位置及び高さの観測にあたっては、要求される位置精度に応じて、トータルステーション(TS)、TSによる放射法、GNSSによるキネマティック法、RTK法、ネットワーク型RTK法により行うことができるとしている。

しかしながら、森林においては、対空標識が見通せる場所が林道上等に限定されること、山地及び林内は基地局との通信が難しいこと等により、公共測量の計測環境との違いが著しい。また、労力及びコストの面からも、より簡易な方法によって一定程度の精度を得ていくことが求められている。森林調査におけるそうした状況を考慮して、今回のプロット調査及び照査区調査における位置情報の取得に関しては、以下の方法及び手順により行った。

#### <プロット調査>

- ① 林道上等の上空の開けた場所に対空標識を設置するとともに、10m×40mの方形プロットの長辺に10m間隔で5箇所の光源標識を設置する。
- ② プロット区域をコンパス測量した後、対空標識位置に接続する。

- ③ UAV空撮画像から作成したオルソ画像上の対空標識の位置、光源標識の位置、コンパス測量の成果を用いて調査対象区域を挿入する。

<照査区調査>

- ① 林道上等の上空の開けた場所に基準点(GCP)となる対空標識を3箇所設置する。
- ② 各基準点(GCP)及び調査区域をトータルステーションで測量する。
- ③ UAV空撮画像から作成したオルソ画像上の3箇所の基準点(GCP)の位置及び測量成果を用いて調査対象区域を挿入する。

照査区の測量をトータルステーションで実施した理由は、GNSS受信機の精度試験を実施する必要があったほか、胸高直径推定式の精度検証も必要であり、その検証用データとして照査区では高精度の位置情報が不可欠であったためである。その結果、基準点(GCP)の正確な位置情報を得ることができたわけであるが、国有林の現場でこうした高精度な位置情報を得るのは現実的には困難である。正確な位置情報を得るための次善の策としては、UAV撮影画像から作成されるオルソ画像に付与されるUAV搭載GNSS受信機の位置情報を利用することが考えられる。森林上空を飛行するUAVのGNSS受信機であればその測位精度は高いはずである。そこで、今回実施した照査区上空を飛行するUAVのGNSS受信機で得られる位置情報とトータルステーションによるGCPの測位精度を比較検証した。

その結果、XY方向の測位誤差は平均1.6m(誤差範囲1.1m~2.4m)であり(表9.3.1)、林内でGNSS受信機を用いて計測する場合と比べて、衛星との間の遮蔽物が少ない上空からの測位精度が高いことが確認された。このレベルの位置誤差であれば、UAV画像が有する位置情報として十分に現地調査で活用可能であることが、本事業の検討委員会でも示唆されたところである。

表 9.3.1 UAV 搭載 GNSS の測位精度

観測地点 K 1	十進法度単位		度 分 秒		偏差(XY)
	X	Y	X	Y	
GCP (TS測位)	36.6795910278	140.4977902500	36度40分46.5277秒	140度29分52.0449秒	
CS-1 (照査区)	36.6795948241	140.4977744590	36度40分46.54137秒	140度29分51.98805秒	1.5 m
CS-2 (照査区)	36.6795932548	140.4977735645	36度40分46.53572秒	140度29分51.98483秒	1.5 m
CS-3 (照査区)	36.6795814292	140.4977855443	36度40分46.49315秒	140度29分52.02796秒	1.1 m
観測地点 K 2	X	Y	X	Y	偏差(XY)
GCP (TS測位)	36.6794505833	140.4977948056	36度40分46.0221秒	140度29分52.0613秒	
CS-1 (照査区)	36.6794521866	140.4977753175	36度40分46.02787秒	140度29分51.99114秒	1.8 m
CS-2 (照査区)	36.6794509955	140.4977786341	36度40分46.02358秒	140度29分52.00308秒	1.4 m
CS-3 (照査区)	36.6794394665	140.4977905043	36度40分45.98208秒	140度29分52.04582秒	1.3 m
観測地点 K 3	X	Y	X	Y	偏差(XY)
GCP (TS測位)	36.6800051667	140.4966431944	36度40分48.0186秒	140度29分47.9155秒	
CS-1 (照査区)	36.6800091103	140.4966316944	36度40分48.03280秒	140度29分47.87410秒	1.1 m
CS-2 (照査区)	36.6799966737	140.4966179742	36度40分47.98803秒	140度29分47.82471秒	2.4 m
CS-3 (照査区)	36.6799854606	140.4966369829	36度40分47.94766秒	140度29分47.89314秒	2.3 m

X,Yは緯度経度。偏差(XY)はGCP(TS測位)との位置誤差。CS-1,2,3はUAVによる測位の繰り返し。

- UAV搭載のGNSS測位精度を確認するため、上空から視認できる基準点（GCP）3箇所を設定してトータルステーションで精密な位置座標を測量
- 基準点（GCP）に対空標識を設置しUAV撮影（3回）
- 作成したオルソ画像の対空標識の位置座標を比較

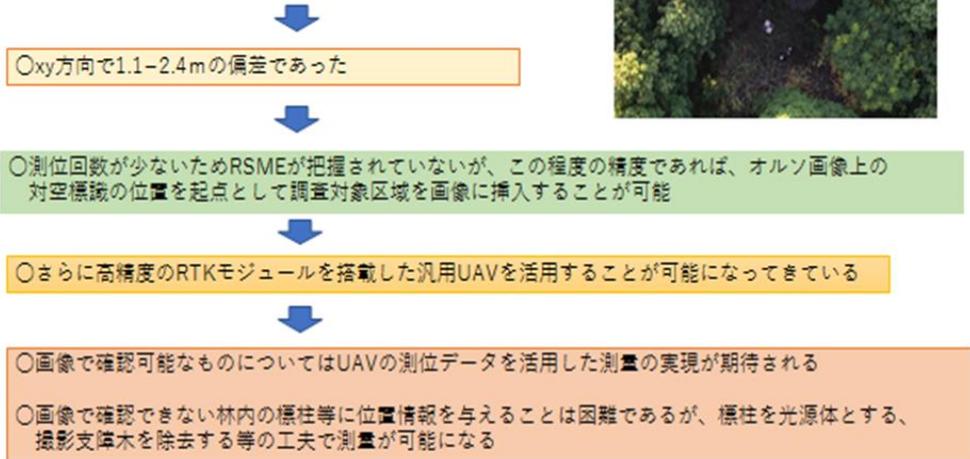


図 9.3.1 UAV 搭載 GNSS の測位精度

## 9.4 樹高の求め方

### (1) 精細な DEM（地盤高）データのある地域

UAV 立木調査法における樹高の求め方については、航空レーザ計測等による 5mメッシュ DEM データやさらに精細な DEM データが整備されている地域においては、調査対象区域の UAV 空撮画像を解析して取得した DCSM（樹冠表層高）データと DEM データとの差分から樹頂点ごとの樹高を推定することが可能であり、サンプリング調査における樹高曲線の作成作業も省略することができる。

この場合、基準点（GCP）の正確な位置情報が得られることが前提であり、基本的には公共測量水準で測量した基準点を用いる必要があるが、立木調査の箇所ごとに公共測量水準の測量を行うことは労力及びコストの面から現実には取り難いのが実情である。このため、複数の対空標識を設置して上空から UAV で撮影した画像上の対空標識の位置情報を基準点（GCP）の代替として用いる簡便法が考えられるところであり、今後、その精度について検証しつつ手法の改良を図っていくことが望ましい。

### (2) 精細な DEM データのない地域

森林に関しては航空レーザ計測等による精度の高い DEM データが利用可能な地域が都市部に比べて少なく、また、等高線読み取りによる 10mメッシュ数値標高モデルは Z 方向に 5m 程度の誤差が想定されるのが現状である。

こうした地域において UAV 空撮画像を解析して取得した DCSM データと DEM データとの差分から樹頂点ごとの樹高を推定しようとすると、実際の樹高とは大きな差が生じ、材積の推定精度にも大きく影響しかねないのが現状である。

このため、こうした地域においては、当面の対応として、調査対象区域を現地で設定した際に簡易なサンプリング調査によって径級毎の樹高曲線を作成し、その数値を樹高とみなして材積計算を行う必要がある。

将来的には、森林・林業分野における ICT 活用を進めていくための基盤情報として、航空レーザ計測等による精細な DEM データを整備していくことが望まれる。

## 9.5 胸高直径推定式の特徴と精度確保

UAVによる空撮画像をもとに林木の胸高直径を推定することが目的であるので、推定式作成の元になるデータは自ずと限られ、上空からの樹冠形状（樹高、樹冠投影面積、樹冠長等）が基本である。したがって、胸高直径の推定精度を向上させる上で重要な要因としては、樹冠形状がどれだけ精確に計測・推定できるかということと、胸高直径を推定するための推定式そのものの妥当性ということになる。さらに言えば、推定の対象となるのが森林であり、構造的にもサイズの的にも、直接計測するのが困難であるため、推定式作成のための必要十分なデータを如何に確保できるかが問題である。

### (1) 空撮画像による樹冠形状の把握

本章ですでに指摘されている内容と重複するが、オルソ化させる前の空撮画像の質的向上がいかに図られるかがカギである。撮影時の UAV の姿勢や気象条件等によって、画像のぶれ、立木の倒れ込み、画像の陰影などに影響するため、SfM 解析に堪え得る画質を確保する。さらに、対象区域における撮影画像のオーバーラップ率は、SfM 解析によるデータの精細さに影響するので、飛行計画時点で留意すべきことである。

解析に必要な画質が確保された上で、SfM 解析を行って林内の樹冠形状を復元することになるが、解析ソフトでのパラメータ調整がその結果を大きく左右する。対象林分が比較的均質であれば、ある程度広い面積を対象に一気に解析することも可能だが、個体サイズや林分密度等が不均質な林分では、一律のパラメータ設定では適切な樹冠形の復元が困難になる。そのため、同一林分であっても、林況に応じて複数区域に分割してパラメータを設定するなどの配慮も必要である。

### (2) 推定式の特徴と妥当性

5章では胸高直径推定式として大きく2種類を提案した。2変数または3変数による「べき乗関数」の推定式は、あくまでも多変量解析のひとつの経験式である。解析に供したデータの暫定的な近似式であり、そこで得られた式を他の林分や地域に適用するのは適当ではない。この近似式を他地域に適用する場合は、改めて、当該地域で標準地調査を行い、その地域での推定式を新たに作成しなければならない。「べき乗関数」の推定式は、近似式としては単純で理解しやすく、また変数を増すほど近似性能がよくなることは間違いない。SfM 解析で得られるデータの質にもよるが、可能な限り3変数の推定式とするのが望ましいであろう。

もう一つの樹形モデルによる推定式は、生物学的理論に基づいて導かれる推定方法であり、他地域あるいは不均質な林分等に適用する場合は、ある程度の普遍性をもって係数のチューニングを行うことが可能と考えられる。SfM 解析性能との兼ね合いもあるが、SfM 解析で得られるデータ（樹高、樹冠投影面積、樹冠長）がある程度信頼できるようになれば、樹形モデルによる推定式の方が他地域での使用に耐えられるなど汎用性が期待できるが、現時点では SfM 解析が不安定でもあり、現実的な対応としては「べき乗関数」による推定式とすればよいであろう。

### (3) 実務上堪え得るデータの確保

いずれの推定式を作成する場合でも実測データが多いほど回帰分析の信頼性が増すことに

なる。しかし、調査プロットや照査区の設置・調査・解析など、推定式作成に係る作業効率とコスト面を考えれば調査面積とプロット数は極力減らしたいところである。本事業では、標準地として44プロットを設定したが、実際に回帰分析に供したのは39プロットであり、そのうち、列状間伐林分などで SfM 解析データが必ずしも良好でなかったプロットを除かざるを得なかった。回帰分析に供したプロット数は最終的に15プロットであった。

いずれも統計的には有意な推定式が得られ、照査区で検証した結果、実測値をよく再現していた(5章参照)。しかしここで留意すべきは、SfM 解析による樹冠形データのうち良好でないプロットを除外していることであり、今回だけでなく、他地域で同様の推定式作成作業を行う場合にも、回帰分析に適しない「外れ値」となるプロットが生じる可能性は否定できない。特に、対象とする林分が構造的に不均一であるほど、SfM 解析でのパラメータ調整が困難になるであろう。したがって、推定式を作成しようとする地域における林分の多様さにも配慮したプロット設定が必要である。

## 9.6 径級別本数及び材積の補正方法の検討

UAV 等による上空からの立木調査では、優勢木から劣勢木まですべての林木の本数を正確に把握できるわけではなく、材種品質の評価について対応を考える必要がある。このため、6章及び7章で検討したように、被圧木や材種を把握する定量的な解析手法の可能性は残されている。

しかしながら、当面の現実的な対応としては、樹高曲線(樹高と胸高直径との関係)や SfM 解析の際に参考とする ha 当たり本数を把握するためのサンプリング調査のデータを活用することが適当と考えられる。

ここで言うサンプリング調査とは、胸高直径階をカバーするように標本木を抽出して、その胸高直径と樹高を計測して記録する。その際、従来調査と同様に材種品質を判定・記録しておくことで、曲がり等による低質材の判断や枯損状況等の出現率を把握するものである。

また ha 当たり本数に換算することを想定して、例えば半径 4m 円内(約 50m<sup>2</sup>)に入る立木を、上述したサンプリング調査の対象とすることで、その本数をカウントして、10 箇所程度で同様の調査を行い、その平均本数を 200 倍すれば当該林分の ha 当たり本数を簡易に推計することができる。その際、低質材(特に胸高直径の細い被圧木等)の本数についても同様に記録しておくことによって、その出現率を簡易に把握することも可能である。

このように、サンプリング調査で得られた低質材の径級と出現率を調査区全体に乗じて、収穫調査結果として補正することが現実的であり、また効率的でもあると考えられる。

## 10 各種 GNSS 受信機における特徴の把握

近年、GNSS 受信機の精度向上を背景に、GNSS 受信機を使用した面積実績が可能となっているが、森林内は、尾根や谷などの地形的条件、粗密度などの立木状況等により、捕捉衛星数、電波強度、マルチパス(多重伝播)等が影響を受け、測位精度が低下すると言われている。

一方、国有林の収穫調査規程において、収穫面積の計測は GNSS(Global Navigation Satellite System の略)受信機の使用を許容しているが、精度の考え方については触れていない。このため、収穫面積の計測は、GNSS 受信機による計測はほとんど行われず、コンパス測量が用いられているのが現状である。

このため、国有林で現在使用している GNSS 受信機 7 機種と日本森林林業振興会で所有する 1 機種(表 10.1.1、図 10.1.1)を対象に、尾根、斜面、谷等での計測精度を、トータルステーションを用いた公共測量水準の実測値との比較から検証した。

### 10.1 調査機種(GNSS 受信機)

精度検証は、次の 8 機種で実施した。捕捉可能な衛星の種類、測位方法を表 10.1.1 に示す。Mobile Mapper 20 や Mobile Mapper 50 などの機種によっては、後処理で測位精度を高める機能や位置座標と共に位置誤差が出力される機能を有する。これらの機能を用いて、受信機の位置誤差と面積誤差を評価できる新しい評価手法(松岡ほか 2018)が提唱されている。しかし、今回は、国有林の現地において利用している状況を前提とした誤差の評価を行うことが目的であるため、現地における受信による単独測位及び SBAS による補強という条件で比較を行った。

表 10.1.1 精度検証に用いた GNSS 受信機の特性一覧

機 種	捕捉可能衛星			測位方法		備 考
	GPS	GLONASS	みちびき	単 独	SBAS	
Garmin GPS MAP 64SCJ	○	○	○	○	○	
Garmin GPS MAP 64SJ	○	○	○	○	○	
Garmin GPS MAP 62SJ	○		○	○	○	
Garmin eTrex Touch 35J	○	○	○	○	○	
Mobile Mapper 50	○	○	○	○	○	
Mobile Mapper 20	○		○	○	○	
Zenfone 2	○	○	○	○	○	スマートフォン
GNS2000plus	○	○	○	○	○	

\*注 GNS2000plus のみ日本森林林業振興会のものである。



図 10.1.1 精度検証に用いた GNSS 受信機

(上段左より、Mobile Mapper50、Mobile Mapper20、Garmin eTrex Touch 35J、同 GPS MAP62SJ、同 GPS MAP64SCJ、同 GPS MAP64SJ、下段左より、Zenfone2、GNS2000Plus(通常のスマートフォンに観測数値を表示、本体は最上段中央)

## 10.2 精度検証地

精度検証地は、次のとおり茨城森林管理署管内の 2065 林班ち小班等のスギ人工林等に設定した。測点は、尾根等の平坦地、北向き斜面、南向き斜面、谷等の 16 点に設置した。その後、トータルステーションを用いて公共測量水準で測量し、位置情報(座標値)等を整理した。面積は 1.39ha で、現地の地形図と UAV で撮影したオルソ画像を図 10.2.1 に示す。また、測点での全天空写真と地形の断面図での位置関係の模式図は図 10.2.2 に示す。更に、各測点の全天空写真は図 10.2.3 に示す。開空率は林冠の閉鎖していない尾根において大きく、逆に林冠が閉鎖した谷では小さくなった。また、各測点の地形と斜面の向き、森林の状態、開空率は表 10.2.1 のとおりであった。

- ① 位置 : 茨城森林管理署 2065 林班ち小班外(茨城県常陸大宮市天下野)
- ② 面積 : 1.39ha
- ③ 標高 : 380m~460m(測点)
- ④ 測点 : 平坦地、斜面(北向き、南向き)、谷等の 16 カ所に測点を設置。  
各測点を、TS(トータルステーション)により、公共測量水準で測量。

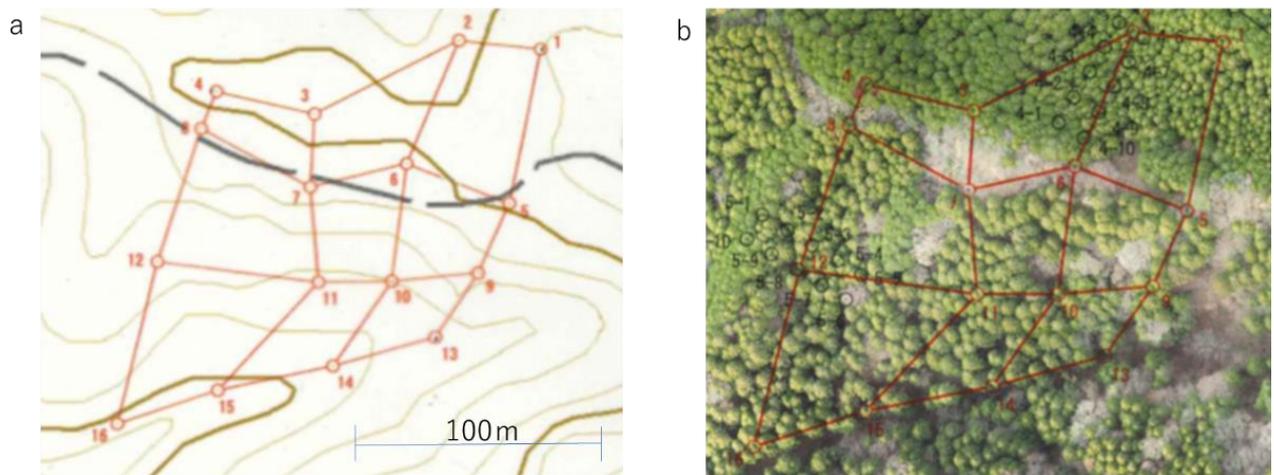


図 10.2.1 精度検証地  
a)地形図、b)オルソ画像

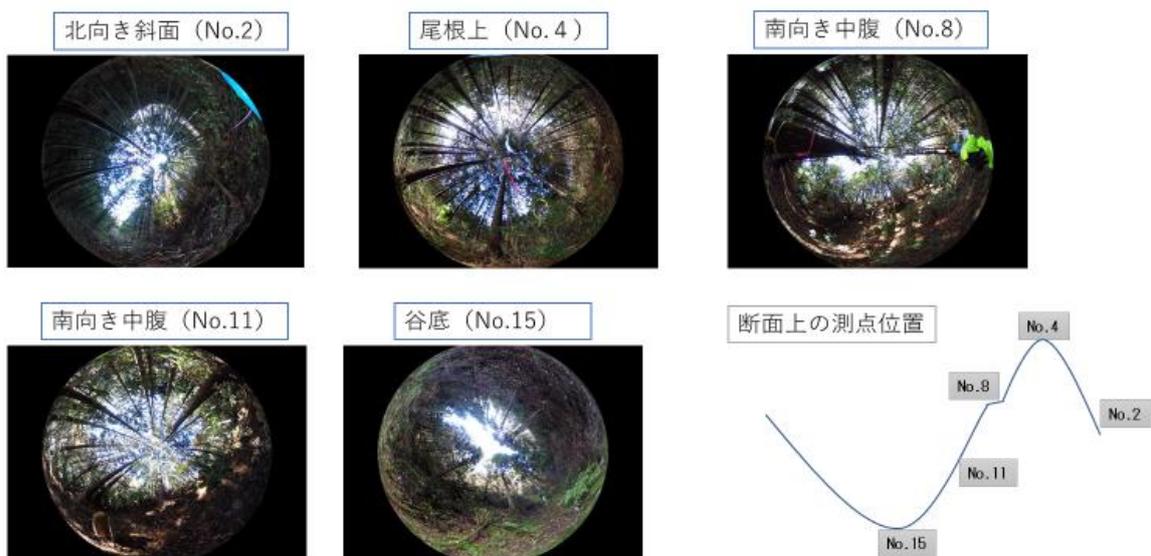


図 10.2.2 各測点の開空状況と位置関係

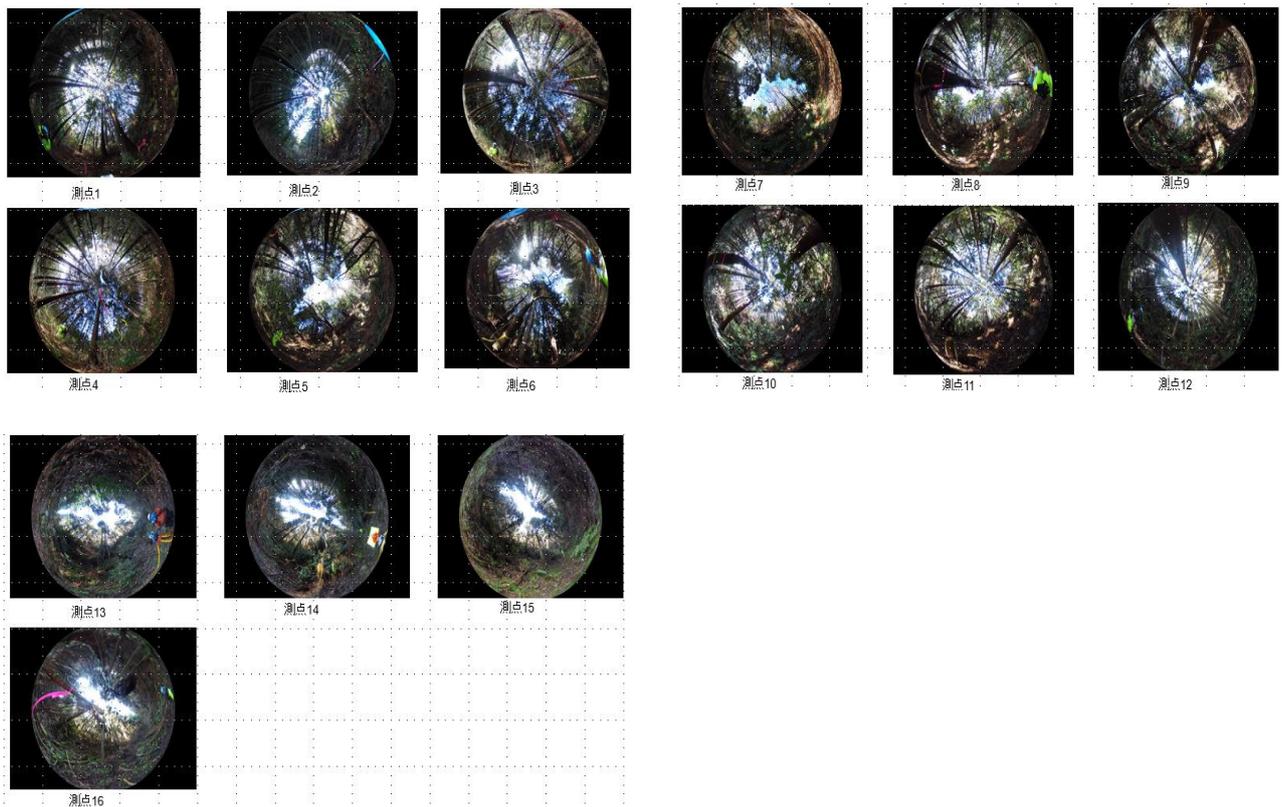


図 10.2.3 各測点の全天空写真

表 10.2.1 設置した各測点の地形情報、森林の状態及び開空率

測点No.	N方向仰角	S方向仰角	標高 (m)	地形	森林の状態	開空率 (%)
1	0	1	447	北向き斜面	スギ林内	20.8
2	0	2	426	北向き斜面	スギ林内	12.4
3	0	0	460	山頂	ヒノキ林内	15.9
4	0	0	450	尾根上	ヒノキ林内	14.4
5	23	5	450	南向き斜面	作業道上 (広葉樹上木あり)	19.9
6	0	17	446	尾根上鞍部	作業道上 (ヒノキ上木あり)	15.5
7	30	0	443	南向き斜面	作業道上 (スギ上木あり)	16.5
8	31	9	437	南向き斜面	作業道上 (スギ上木あり)	13.3
9	34	22	430	南向き斜面	作業道上 (スギ上木あり)	12.3
10	31	18	422	南向き斜面	スギ林内	18.0
11	33	11	420	南向き斜面	スギ林内	15.3
12	31	9	405	南向き斜面	スギ林内	15.6
13	40	33	404	谷底	スギ林内	15.3
14	43	32	394	谷底	スギ林内	12.0
15	37	20	384	谷底	スギ林内	11.3
16	39	26	380	谷底	スギ林内	11.6

### 10.3 精度検証方法

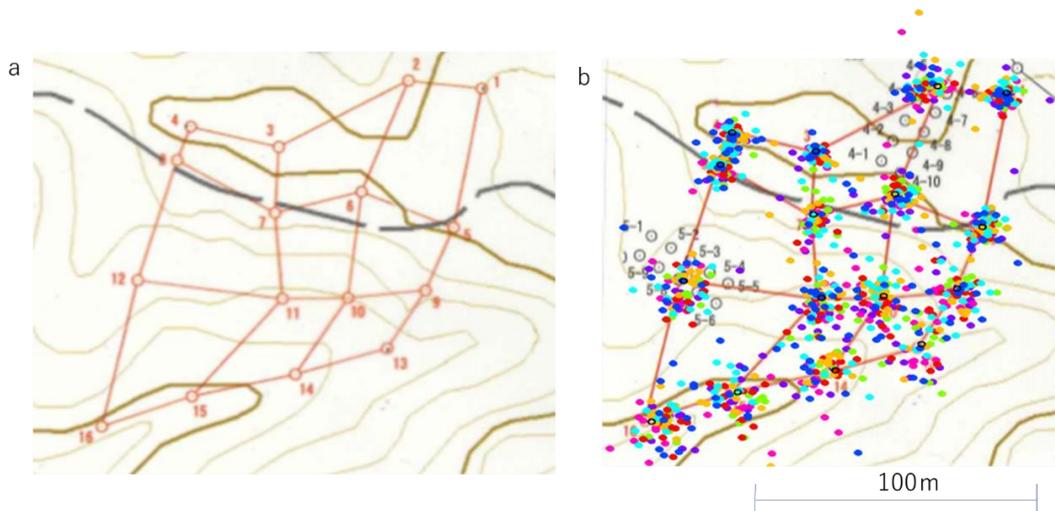
精度検証は、各測点において GNSS 受信機を静置し 1 分間計測後、得られた位置座標を記録した。1 周 16 測点の測定を 1 計測とし、平成 30 年 12 月 13 日から 15 日の 3 日間で計 10 回の計測を行った。

- ① 調査期間 : 平成 30 年 12 月 13 日~15 日
- ② 天 候 : 晴 (3 日間とも)
- ③ 測定方法 : 各測点で 1 分程度待機した後、取得した位置座標等を記録。合計 16 測点を巡回して計測。計測は 3 日間で計 10 回繰り返した。また後処理は行わない。

### 10.4 精度検証結果

#### 10.4.1 座標値の誤差

得られた位置情報は、国土地理院の国土地理院平面直角座標への変換( <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2xyf.html> )サービスを利用して、座標値に変換してから、測量区域面積の確定等の計算を行った。測定結果を概観するために、各測点において得られた座標値をプロットしたものが、**図 10.4.1** である。機種による違いは明確には見られないが、概して受信環境が悪いと考えられる谷底などにおいて点のばらつきが大きくなっていることがみてとれる。



**図 10.4.1 調査地地形図 (a) と各測位点における測位結果 (b)**

色の違いは機種の違いを示している。

赤: Garmin eTrex Touch 35J、黄: 同 GPS MAP 62SJ、黄緑: 同 GPS MAP 64SJ、  
緑: 同 GPS MAP 64SCJ、水色: GNS 2000 plus、青: Mobile Mapper 20、  
紫: Mobile Mapper 50、桃: Zenfone 2 である。

#### 10.4.2 SBAS と座標誤差

GNSS 受信機の受信性能に影響を及ぼす要因と受信性能の指標について **図 10.4.2** にまとめた。受信性能に影響を及ぼす要因として、マルチパス(多重伝播)による通信障害が挙げられ、受信性能の指標としては PDOP(位置精度低下率: **P**osition **D**ilution **O**f **P**recision の略)値や、SBAS(衛星航法補強システム: **S**atellite-**B**ased **A**ugmentation **S**ystem の略)受信の有無などが挙げられる。

マルチパスとは衛星からの電波が山、立木、人等に反射して攪乱されることで発生し、電波が互い干渉することで GNSS 受信機の測位性能が著しく低下する現象である。森林内のように立木の密度が高いとマルチパスが生じやすくその影響が大きくなると考えられる。PDOP 値とは解析に使用する衛星の配置によって決定される精度低下率の指標である。一般に、捕捉衛星数が多くなるほど PDOP 値は小さくなり、一定の精度を維持できると考えられる。SBAS は静止衛星から発信される補強信号のことであり、測位衛星からの誤差補正情報(電波が電離層をとおるときの時差などを補正する情報)を提供しており、この受信によって測位精度は高まっていると考えられる。

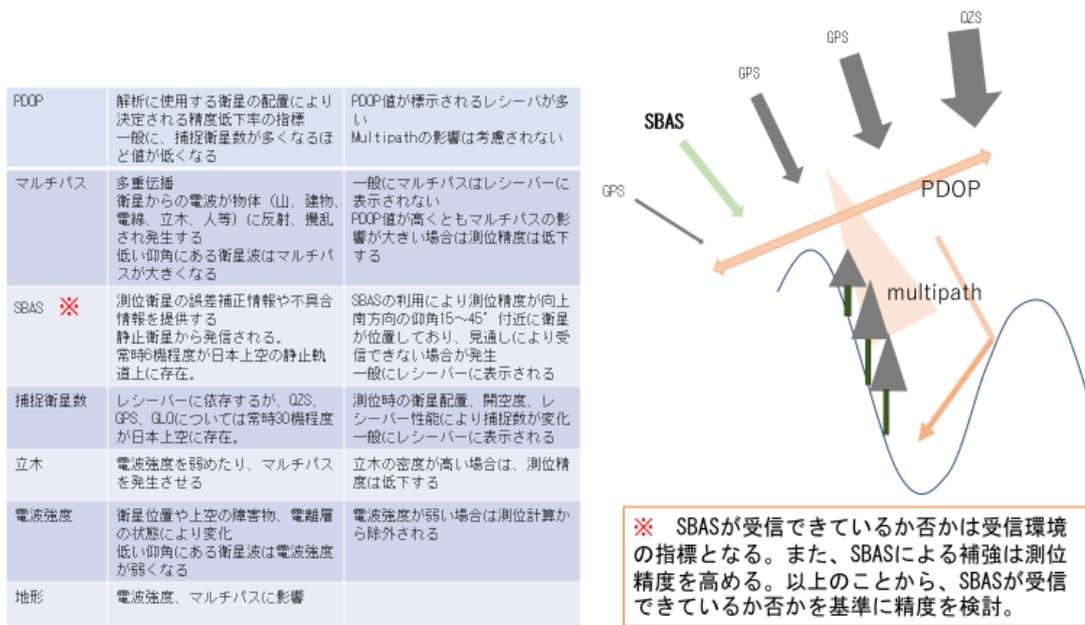


図 10. 4. 2 GNSS 受信環境等と測位精度

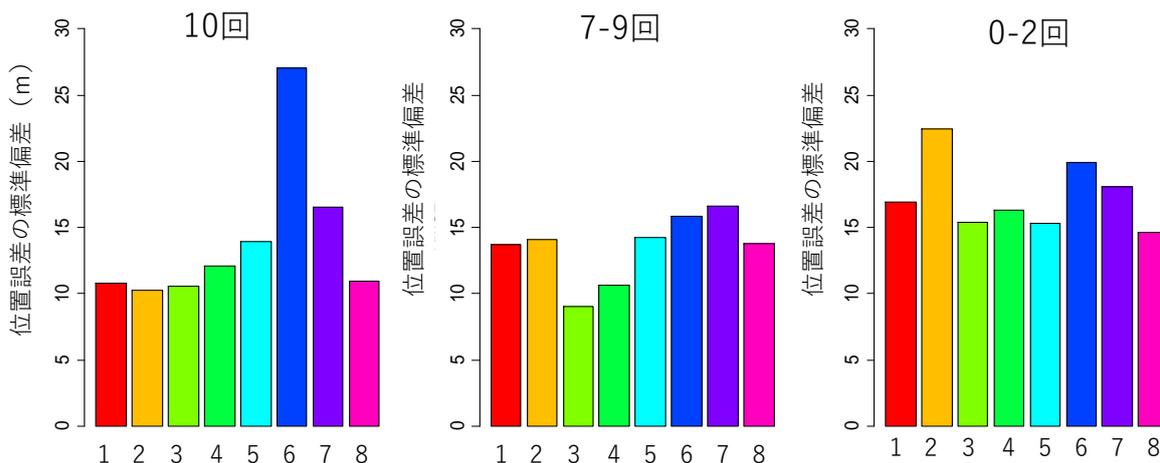


図 10. 4. 3 SBAS 受信の回数により整理した各機種的位置誤差の標準偏差の最大値  
(左より SBS 受信回数が 10/10 回、9-7/10 回、2-0/10 回である。色の違いは機種の違いを示す。左から 1(赤): Garmin eTrex Touch 35J、2(黄): 同 GPS MAP 62SJ、3(黄緑): 同 GPS MAP 64SJ、4(緑):同 GPS MAP 64SCJ、5(水色): GNS 2000 plus、6(青):Mobile Mapper 20、7(紫): Mobile Mapper 50、8(桃): Zenfone 2 である。)

本調査においては、以下の2つの理由により、SBAS 受信の有無を基準にして8機種種の精度を検討した。

① PDOP 値はマルチパスの影響を考慮していないため、例えば、PDOP 値は低いが、マルチパスの影響が大きく測位精度が低下する事例が想定されること。

② 機種によるが SBAS は受信の有無を GNSS 受信機の画面上で容易に確認可能である。という理由である。8機種種の位置誤差の標準偏差( $\sigma$ )の最大値を SBAS 受信回数により、10 回中 10 回受信、9-7 回受信、2-0 回受信の3区分にわけたのが図 10.4.3 である。例外もみられるが、総体的に SBAS の受信回数が増えるほど、位置誤差の標準偏差の最大値が小さくなる傾向がみられた。

### 10.4.3 地形等と座標誤差

各 GNSS 受信機について、16 測定毎の 10 回観測から、平均の座標値誤差を求めたものが表 10.4.1 である。誤差は、全ては 5m 以内であるが、機種毎にみると、10 回観測の平均値でも 10m 以上の誤差が発生しているもの(Garmin GPS MAP62SJ、Mobile Mapper50、Mobile Mapper20)があった。測点毎にみると、測点 13 から 16 の谷底では誤差 5 m 以上が多く、誤差 10m 以上もあり、精度が悪かった。また、北向き斜面の測点 1 及び 2、南向き斜面の測点 10 から 12 までも、誤差 5 m 以上が多く、精度が劣った。その一方で、南向き斜面の測点 5、8、9 では、全て誤差が 5 m 以内であった。測点 10 から 12 までにスギ林内に対して、測点 5、8、9 は作業道上であったことが影響したと考えられた。また、南向き斜面で作業道上であった測定 7 が誤差 5 m 以上もあったが、岩が多い作業道法面が後方にあったことが影響した可能性があった。山頂の測点 3 や尾根の測点 4 については、一部機種においては誤差 5 m 以上のものがあったが、スギ林内が影響したとも考えられるが、原因は不明である。

また、各測点において、各 GNSS 受信機が観測した数値のうち、最小誤差を求めたものが、

表 10.4.1 各種 GNSS による調査結果(座標値の誤差) <10 回観測の平均値>

単位：m

測点	X 座標の差								Y 座標の差							
	Garmin				Mobile Mapper	Zenfone 2	GNSS 2000 plus	Garmin				Mobile Mapper	Zenfone 2	GNSS 2000 plus		
	GPS MAP			eTrex Touch 35 j				GPS MAP			eTrex Touch 35 j					
	64scj	64sj	62sj		64scj	64sj	62sj									
1	-2.22	-1.13	-0.99	-0.40	-3.89	-2.19	-2.87	1.05	-1.11	0.25	-6.36	-0.25	-1.40	-1.44	-0.34	-0.51
2	-1.50	-1.32	2.16	3.55	-4.27	0.62	0.31	2.07	-5.18	-5.92	-3.77	-5.61	-8.51	-9.34	-1.00	-1.70
3	-1.14	-4.01	-2.32	-0.10	-6.97	0.38	-1.71	0.08	1.24	0.74	4.65	0.24	0.91	-0.56	-0.43	-0.04
4	-0.67	-0.97	-2.59	-1.48	-4.71	-1.90	-0.79	-1.22	0.47	0.99	8.38	-0.72	4.82	1.22	0.16	0.75
5	-0.23	-0.10	0.58	-2.48	-3.59	-1.66	0.39	0.72	0.97	1.32	2.01	1.06	0.10	-0.65	-2.18	0.47
6	0.70	2.25	-3.47	0.55	-4.01	-0.65	-0.53	-3.63	0.36	1.82	3.64	1.16	-6.90	-3.20	1.20	2.43
7	-2.86	-0.76	-0.11	-2.86	-6.52	-4.12	-0.53	2.58	2.19	3.04	-1.33	2.51	-0.77	2.00	1.83	4.93
8	-1.16	0.72	3.22	-2.24	-2.77	-0.38	-0.64	0.16	1.20	1.59	1.64	1.34	0.02	-0.86	0.36	0.50
9	-2.61	1.39	-0.94	0.32	-3.23	-3.64	-4.08	2.41	-0.39	4.15	0.39	-0.10	0.06	-2.32	-2.63	4.14
10	-1.06	0.76	1.19	1.30	-4.56	-2.52	0.12	4.32	-3.73	-3.42	-3.50	-6.36	-5.89	-6.04	0.22	-1.07
11	-4.21	-5.28	4.24	-4.12	-5.63	-2.57	-0.46	1.88	-0.36	0.81	-0.20	-0.46	-5.82	-3.45	3.54	1.08
12	-7.69	-4.33	0.42	-5.51	-0.59	0.27	-3.05	-5.55	1.74	1.92	1.56	-4.48	-0.47	-5.49	-2.03	-0.41
13	5.56	0.56	0.84	7.46	-2.76	1.74	-2.32	5.38	-4.67	-1.33	-14.29	-2.79	-6.42	-2.34	-2.02	0.25
14	2.34	3.95	-0.68	1.59	-3.04	-3.65	-6.04	-3.07	-2.23	-1.99	-12.16	0.01	-10.23	-12.71	-6.40	-5.39
15	-4.51	-5.90	-8.10	-7.99	-1.42	1.99	-7.57	2.91	0.56	4.59	-4.90	-2.82	-1.87	-8.49	1.88	-4.13
16	-2.75	-1.96	3.76	-2.99	-5.57	-8.64	-3.99	7.05	7.54	5.28	3.65	1.19	7.58	10.93	-2.60	2.09
平均	-1.50	-1.01	-0.17	-0.96	-3.97	-1.68	-2.11	1.07	-0.09	0.86	-1.29	-1.01	-2.17	-2.67	-0.65	0.21

注 青色枠は座標値の誤差が5m以内、黄色は10m以上のものである。なお誤差50m以上は、異常値として削除した。

表 10.4.2 である。各機種とも、条件が整えば、誤差 1 m 以内となることが分かった。更に、各測点において、各 GNSS 受信機が観測した数値のうち、最大誤差を求めたものが、表 10.4.3 である。各機種とも、誤差が 5 m 以内となることは少なく、誤差 10m 以上がほとんどであった。とりわけ谷底は極めて誤差が大きくなっていた。なお、座標誤差 50m 以上は異常値として除外したが、Mobile Mapper20 で 4 回、Zenfone2 で 3 回、Mobile Mapper50 で 2 回、Garmin GPS MAP62SJ で 1 回観測されている。

今回の精度検証地は、「開空率が 11.3% から 20.8% であり上空が余り開けていなかったこと」、「谷底の測点が 1 / 4 (16 測点のうち 4 測点) を占めること」、「スギ人工林内であることや斜面对面に尾根や斜面があったこと」、「作業道上の測点の後方に岩等の法面があったこと」などから GNSS 受信機にとって受信環境が厳しい現場であり、その影響があったものと考えられる。

表 10.4.2 各種 GNSS による調査結果(座標値の誤差) <10 回観測の最小誤差>

単位：m

測 点	X座標の差								Y座標の差							
	Garmin				Mobile Mapper	Zenfo ne 2	G N S 2000 plus	Garmin				Mobile Mapper	Zenfo ne 2	G N S 2000 plus		
	GPS MAP			eTrex Touch 35 j				GPS MAP			eTrex Touch 35 j					
	64scj	64sj	62sj		50	20	64scj	64sj	62sj							
1	0.23	-0.03	1.19	-0.02	0.28	-0.63	-0.47	1.21	-0.23	-0.28	-0.05	-0.01	-0.33	-0.22	-0.30	-0.02
2	-0.20	-0.47	0.15	0.80	-2.07	-0.85	-1.02	-0.23	-1.42	-1.17	-0.89	3.30	0.27	-2.17	-1.28	1.34
3	0.08	-0.87	0.04	0.06	-0.64	0.06	0.03	-0.56	0.36	-0.13	0.08	0.10	-0.13	0.09	-0.08	0.08
4	0.49	-0.73	0.21	-0.38	2.04	0.13	0.60	-0.10	-0.46	0.03	2.50	-0.28	0.25	-0.22	0.23	-0.20
5	0.14	-0.72	-0.17	0.40	-0.15	-1.29	0.32	1.35	0.94	-0.07	-0.05	-0.10	-0.04	-0.06	-0.73	0.67
6	0.01	0.06	0.33	0.31	-0.42	-0.55	-1.96	0.70	-0.47	1.23	0.76	0.54	-1.44	1.27	-1.11	-1.17
7	-0.32	0.33	-0.01	-1.25	0.29	0.01	0.96	0.30	-0.07	0.74	0.70	0.25	0.20	0.33	-0.48	0.20
8	-0.17	0.18	-1.11	0.18	0.49	0.15	0.03	0.44	-0.26	-0.01	-0.28	-1.48	1.02	0.23	-0.02	-1.27
9	-1.94	0.22	-0.10	-0.99	-0.17	-0.41	0.14	-0.09	0.14	1.36	0.84	-0.44	0.60	0.38	1.41	-1.43
10	-0.61	-0.59	0.19	1.27	-3.67	-0.14	1.53	-0.32	-0.57	-0.25	0.56	0.11	-0.20	0.55	1.20	0.53
11	-0.15	-0.46	0.44	-0.20	0.42	1.02	-3.20	0.71	-0.47	-1.03	0.01	0.52	0.04	-0.15	0.15	0.64
12	-0.92	0.30	-0.35	-1.62	3.03	-0.06	0.17	-2.60	1.80	0.54	0.23	0.04	0.47	-0.50	0.62	-1.03
13	0.95	-0.02	-0.96	-1.00	0.19	-1.90	-2.59	-1.34	2.26	-0.82	0.20	-0.94	-1.77	-0.47	1.59	-1.95
14	-0.10	-0.75	-1.96	0.15	0.50	-0.80	1.61	-0.69	0.69	-1.06	-0.29	-2.03	-1.05	4.74	0.18	-4.47
15	0.03	-1.26	1.47	0.89	0.30	-1.28	-0.53	-0.09	2.15	1.17	0.14	-2.65	1.00	3.49	-0.85	-0.47
16	-0.07	-0.77	-0.13	-0.91	-1.70	0.78	0.41	1.38	2.66	-1.27	-0.10	0.20	-0.26	3.24	-1.37	2.40

注 青色枠は座標値の誤差が5m以内のものである。

表 10.4.3 各種 GNSS による調査結果 (座標値の誤差)<10 回観測の最大誤差>

単位：m

測 点	X座標の差								Y座標の差							
	Garmin				Mobile Mapper	Zenfo ne 2	G N S 2000 plus	Garmin				Mobile Mapper	Zenfo ne 2	G N S 2000 plus		
	GPS MAP			eTrex Touch 35 j				GPS MAP			eTrex Touch 35 j					
	64scj	64sj	62sj		50	20	64scj	64sj	62sj							
1	-10.52	-7.12	-15.84	-7.40	-34.21	-6.52	-9.23	6.16	-7.71	7.43	-14.18	-6.21	19.38	-4.72	5.46	-8.18
2	-6.34	-5.77	31.86	21.40	-37.24	9.05	23.48	13.38	-14.06	-11.56	-11.57	-17.04	-15.80	-19.02	23.62	-13.33
3	-4.87	-16.32	-12.14	6.81	-37.03	8.36	-32.85	-4.58	4.31	6.33	19.79	-4.62	31.13	3.32	5.15	-4.37
4	-3.20	-9.91	-11.24	-20.14	-18.92	-6.88	-3.45	-9.98	4.26	9.77	18.92	-5.49	44.34	13.44	-5.96	10.69
5	-5.45	-6.64	8.48	-15.56	-9.76	-15.78	-6.14	8.16	-5.22	-12.72	11.38	17.90	8.68	-27.10	7.78	-11.17
6	-7.41	5.59	-10.19	14.47	-8.59	8.39	21.23	-28.42	-6.01	10.18	13.25	6.76	-36.42	-21.86	9.72	-11.20
7	-12.39	10.17	4.93	-19.41	-16.06	13.88	-12.96	21.61	10.69	10.94	-19.41	6.97	-14.74	11.61	15.73	23.04
8	-6.59	-8.78	10.99	-7.81	8.51	-10.01	-11.64	12.82	5.92	3.95	10.83	6.98	-5.93	-10.76	-12.11	9.94
9	-18.98	4.86	17.97	15.88	-16.41	-21.72	-10.10	20.90	-9.65	18.25	-15.16	7.07	-9.37	-20.01	-12.75	15.02
10	-13.24	12.65	-5.83	20.23	-13.69	-17.87	12.32	10.84	-9.61	-11.35	-19.78	-18.08	-21.42	-22.76	24.01	-6.66
11	-17.47	-17.50	16.04	-20.79	-15.00	-17.77	-10.05	22.65	7.71	10.68	-13.79	-6.70	-36.35	-13.15	17.37	5.90
12	-19.14	-15.82	-12.12	-15.51	44.14	23.18	-13.30	-14.27	9.69	12.40	6.92	-13.40	17.07	-26.73	-14.06	-22.82
13	19.89	-21.56	27.63	29.85	-16.66	-16.07	-9.50	15.74	-16.73	-17.55	-39.18	-17.40	-18.44	20.11	-16.19	-22.88
14	16.70	14.34	5.77	15.82	13.18	-36.10	-27.35	-43.60	-21.27	-19.76	-36.03	14.68	35.99	42.29	-14.91	-23.96
15	-20.04	-20.03	-32.59	-19.78	-25.42	22.43	-27.03	12.87	12.47	12.78	-32.83	-15.77	-18.86	-28.80	15.66	-10.34
16	-15.22	-9.04	15.57	-17.97	-25.65	-36.68	-17.94	45.64	15.57	10.91	10.90	-17.20	15.74	-20.11	-18.74	-15.29

注 青色枠は座標値の誤差が5m以内、黄色は10m以上のものである。なお誤差50m以上は異常値として削除した。

#### 10.4.4 面積の誤差

精度検証地を図 10.4.4 のとおり、9つの区域に分けて、トータルステーションによる公共測量水準での調査結果と各 GNSS 受信機による調査結果(10 回測定の実測値)とによる面積比較を行ったのが表 10.4.4 である。1 から 9 の 1 区域では、ほとんど面積比が 95% から 105% の範囲から外れており、とりわけ谷底を含んだ区域での外れる範囲が多かった。また、面積誤差が 95% から 105% の範囲内に入る割合は、1 区画(0.08~0.24ha)では 22%(16/72)、3 区画(0.43~0.49ha)では 45%(11/24)、6 区画(0.93~0.95ha)では 75%(12/16) と高くなり、9 区画(1.39ha)では 100%(8/8)であった。1 回毎の座標値測定に誤差があっても、数多く(本調査では 10 回観測)測定し、その平均値を用いて面積計算するとともに、本調査(1.39ha)のように測定面積を広くすれば、面積誤差は 95% から 105% の範囲内に入ることがわかった(表 10.4.4)。

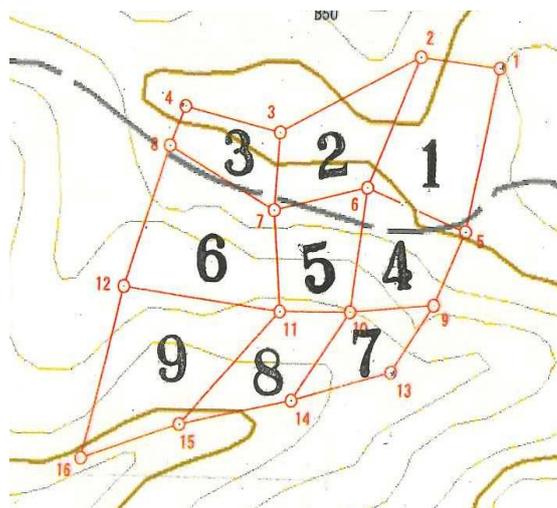


図 10.4.4 面積精度検証地

表 10.4.4 各種 GNSS による調査結果(面積比) <各機種 10 回観測の平均値を用いて面積算出>

区分	区域	Garmin				Mobile		Zenfone 2	G N S 2000 plus	面積 m <sup>2</sup> (TSによる 測量)
		GPS MAP			eTrex Touch 35 j	Mapper				
		64scj	64sj	62sj		50	20			
1区画	1	101.0%	101.8%	94.1%	111.9%	117.2%	114.2%	95.1%	102.1%	1,994
	2	92.5%	86.2%	101.2%	103.4%	78.1%	94.8%	106.9%	105.9%	1,513
	3	106.1%	88.1%	88.0%	106.9%	97.1%	108.0%	109.0%	91.0%	881
	4	113.4%	110.6%	99.6%	106.7%	117.0%	115.9%	97.8%	89.9%	1,328
	5	93.2%	95.4%	90.9%	85.4%	88.9%	86.1%	86.8%	83.7%	1,303
	6	107.9%	111.9%	93.6%	112.6%	94.5%	106.7%	103.5%	112.7%	2,339
	7	74.5%	109.6%	94.3%	86.5%	104.5%	104.2%	109.7%	115.9%	879
	8	74.2%	62.2%	92.2%	83.4%	79.6%	90.5%	93.9%	107.1%	1,171
	9	86.0%	99.1%	101.7%	103.2%	86.5%	83.1%	119.7%	80.2%	2,496
3区画	1. 2. 3	99.1%	93.7%	95.3%	108.0%	99.7%	106.3%	101.9%	101.2%	4,388
	4. 5. 6	105.5%	107.2%	94.5%	103.9%	99.0%	103.7%	97.6%	99.0%	4,970
	7. 8. 9	80.8%	91.6%	97.8%	94.9%	88.2%	89.1%	111.1%	94.0%	4,546
6区画	1. 2. 3	102.5%	100.9%	94.9%	105.8%	99.3%	104.9%	99.6%	100.0%	9,358
	4. 5. 6									
	7. 8. 9	93.7%	99.8%	96.1%	99.6%	93.8%	96.7%	104.0%	96.6%	9,515
9区画 (全域)	1~9	95.4%	97.8%	95.8%	102.2%	95.7%	99.8%	103.4%	98.0%	13,903

注1 10回観測の平均値から求めた面積である。なお、誤差50m以上は異常値として削除した。

2 青色枠は、TS(トータルステーション)により公共水準で測量した面積と比べて、95%から105%の範囲内のものである。

#### 10.4.5 面積誤差の範囲推定

測位誤差によって、面積も過大また過小に評価されるが、測位誤差と面積誤差については、**図 10.4.5** のとおり各測点の観測値を無作為復元抽出し、そこから面積誤差の範囲を推定することができる。このため、本調査では、各測点の観測値を 10,000 回復元抽出し、面積誤差の範囲を推定することとし、上記の結果から「面積誤差 95%から 105%の範囲内」に収まる可能性が高い、6 区画の「尾根・中腹(1~6 区域)」、「中腹・谷(4~9 区域)」及び 9 区画の「全体(1~9 区域)」について試算した。得られた面積を TS 観測の座標値より得た面積で除して面積比を求めた。無作為抽出の計算は奥村(2019)を参考に、Microsoft Excel を用いて計算した。

GNSS 受信機毎に面積試算した頻度分布図が**図 10.4.6** から 13 である。点線は「面積誤差 95%から 105%の範囲」を、赤色点線は標本の 95%分布範囲、すなわち 10,000 回の計算結果のうち上位と下位の両側 2.5%に該当する部分を除いた 9,500 回の計算結果の分布範囲を示している。仮に赤点線で示された範囲が、点線で示された範囲の内側に収まれば、その GNSS 受信機を用いた測位による測量は、同様な条件以上であれば、95%の確率(20 回の観測中 19 回と同義)で、面積比 95%から 105%の範囲内に収まると考えられる。しかしながら、すべての機種で面積誤差 95%から 105%の範囲内に推定結果の 95%がおさまる結果は得られなかった。機種毎に見ると、全域における面積誤差±5%以内の割合は、Garmin GPS MAP 64SCJ が 51.64%、Garmin GPS

MAP 64SJ が 60.93%、Garmin GPS MAP 62SJ が 47.03%、Garmin eTrex Touch 35J が 52.62%、Mobile Mapper50 が 46.43%、Mobile Mapper20 が 20.95%、Zenfone2 が 45.82%、GNS2000plus が 48.55%であった。

測位誤差によって、面積も過大・過小評価される。各測位点の位置情報を無作為抽出法により、複数回抽出して、真の測定点からの誤差範囲を推定し、面積誤差の範囲も推定する。

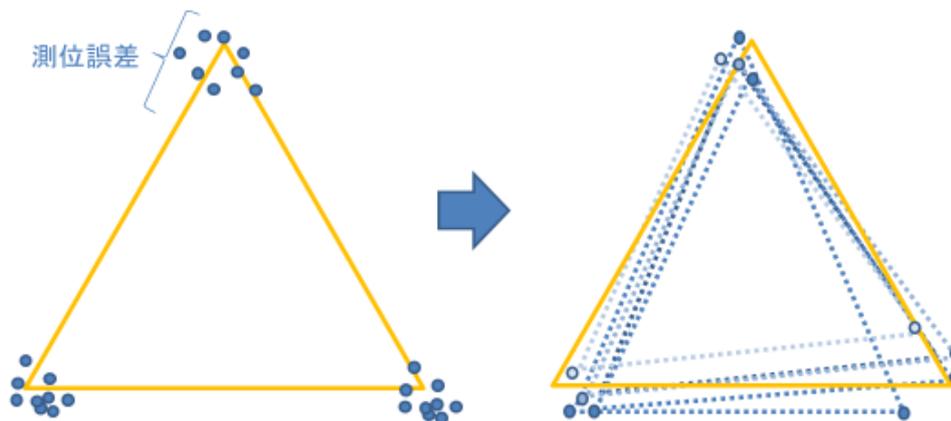


図 10.4.5 測位誤差と面積誤差の関係について

次に、表 10.4.4 の結果より、調査面積の増大によって面積誤差が減少する可能性について、精度検証地の面積を相似形で 3 倍（1.39ha から 4.17ha に）した場合の面積誤差試算から検討した。試算には、Garmin GPS MAP 64SCJ と Garmin GPS MAP 64SJ を用いた。その結果、面積拡大により面積比 95%から 105%内の割合は、Garmin 64SCJ において 51.04%から 77.82%に増加し、Garmin GPS MAP 64SJ は 60.93%から 87.64%に増加した(図 10.4.14)。いずれも推定結果の 95%が面積比の誤差±5%に収まる結果は得られなかった。しかし 95%データ分布範囲は、Garmin GPS MAP 64SCJ において、面積比 90.94%から 103.50%の間に、Garmin GPS MAP 64SJ において、面積比 93.50%から 107.77%にあった (P69 図 10.4.14)。

GNSS 受信機の測点における位置誤差は、GNSS 受信機の機種、地形、斜面の向き、森林の状況、開空率、衛星情報、マルチパスの状況等により異なると考えられるが、測量面積の大小では変わることがないので、面積増加により面積誤差が減少したと考えられる。このことから谷底の測点を含む場合でも、尾根筋や作業道の測点を含めて、大面積で測量すれば面積誤差が少なくなると考えられるが、あくまで GNSS 受信機種や測量地の地形、斜面、開空率等の条件により面積誤差は異なることに留意する必要がある。

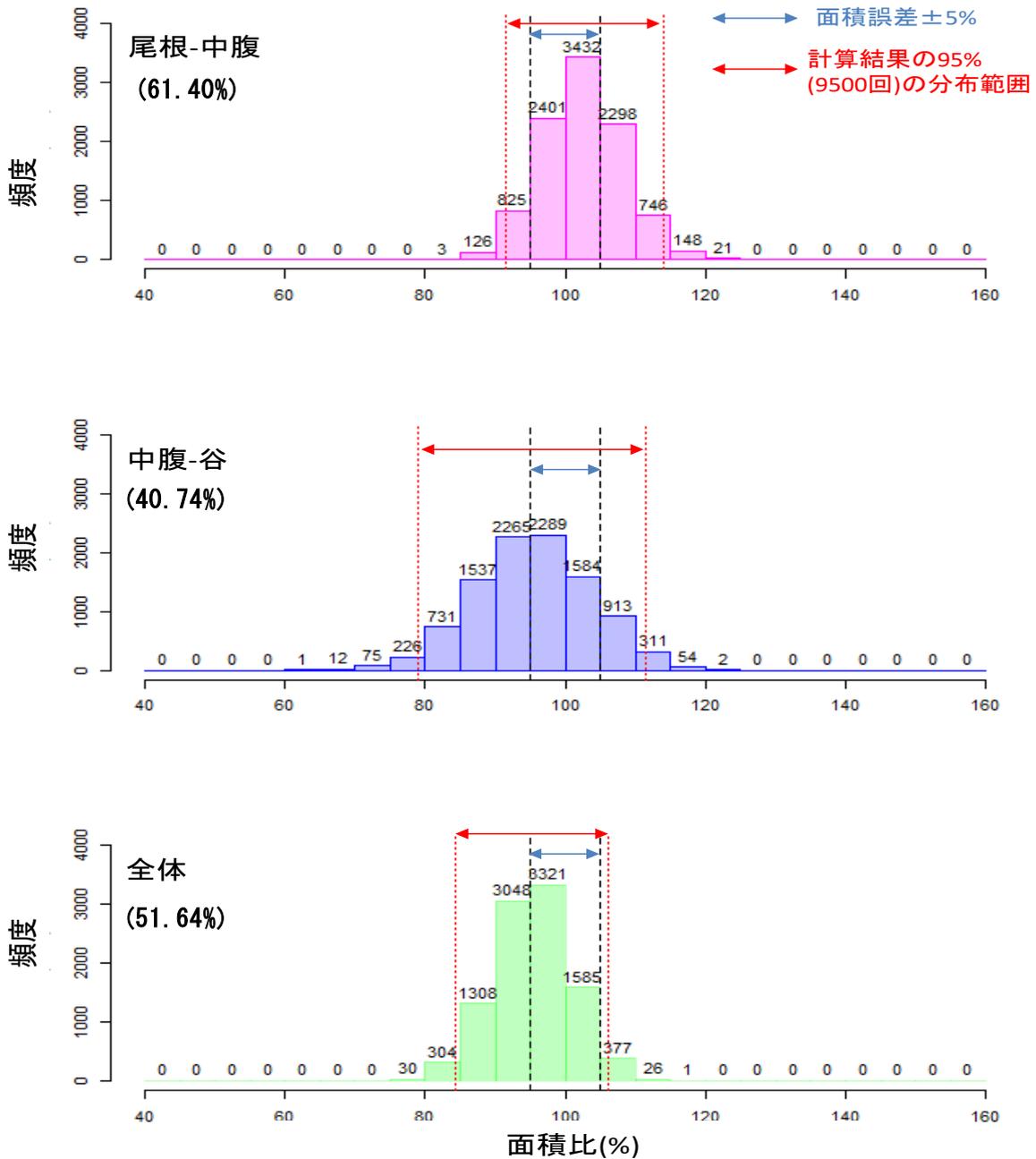


図 10.4.6 面積試算した頻度分布図 (Garmin 64SCJ)

上から順に、尾根-中腹(図 10.4.4 の区域 1-6 の部分)、中腹-谷(図 10.4.4 の区域 4-9 の部分)、全体(図 10.4.4 の 1-9)である。黒点線は面積比 95%-105%の区間を示し、試算結果より得た頻度分布の 2.5%と 97.5%に赤点線を付した。()内は 10000 回の試算から、両端 2.5%を除いた 9500 回の試算のうち、面積誤差±5%以内に入った割合である。

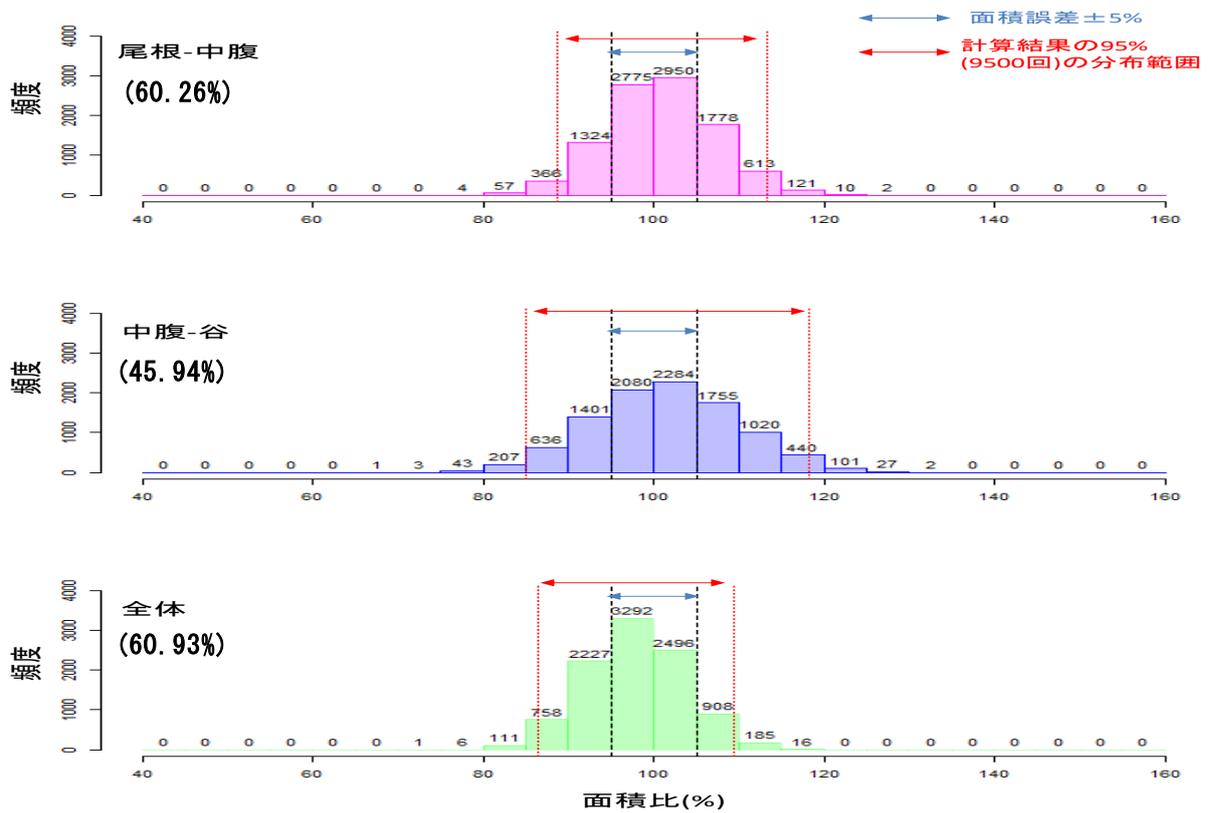


図 10.4.7 面積試算した頻度分布図 (Garmin 64SJ)

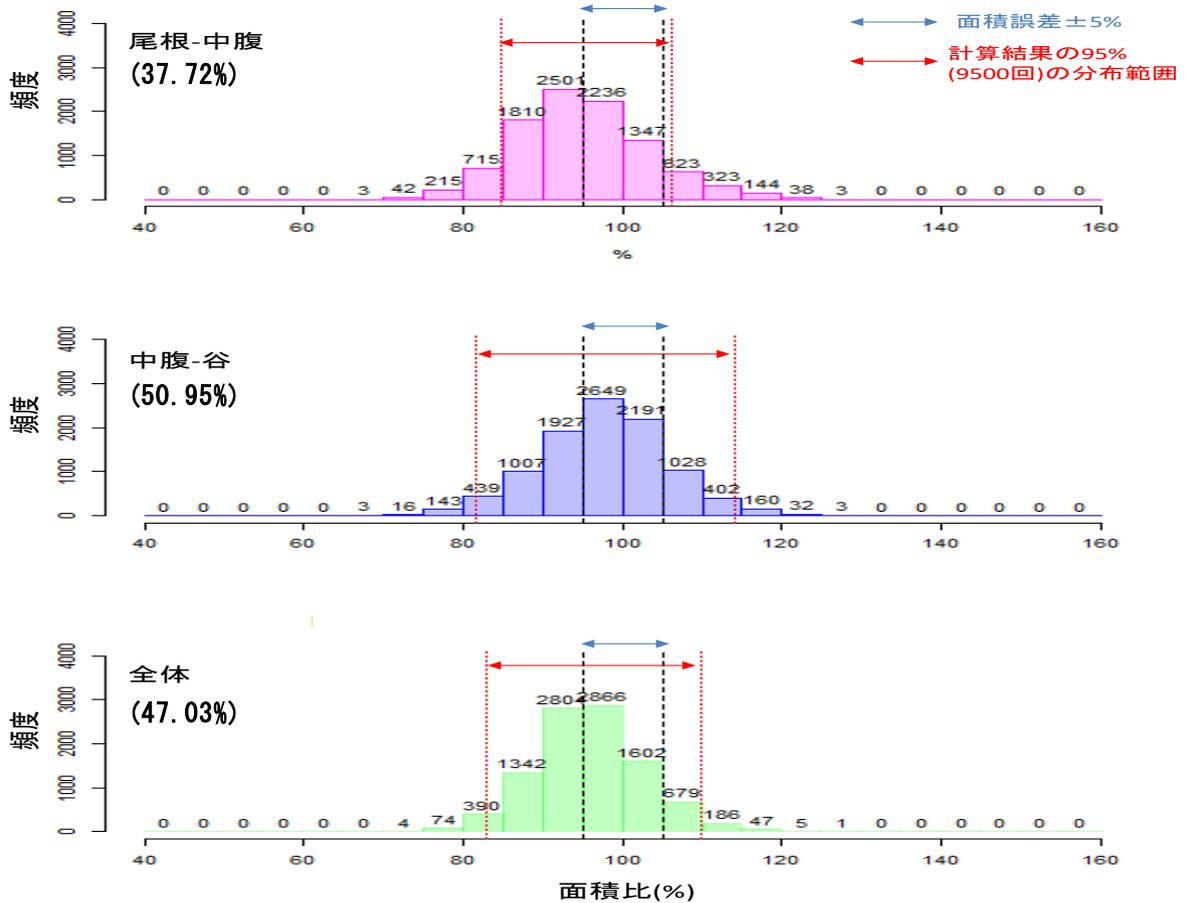


図 10.4.8 面積試算した頻度分布図 (Germin 62SJ)

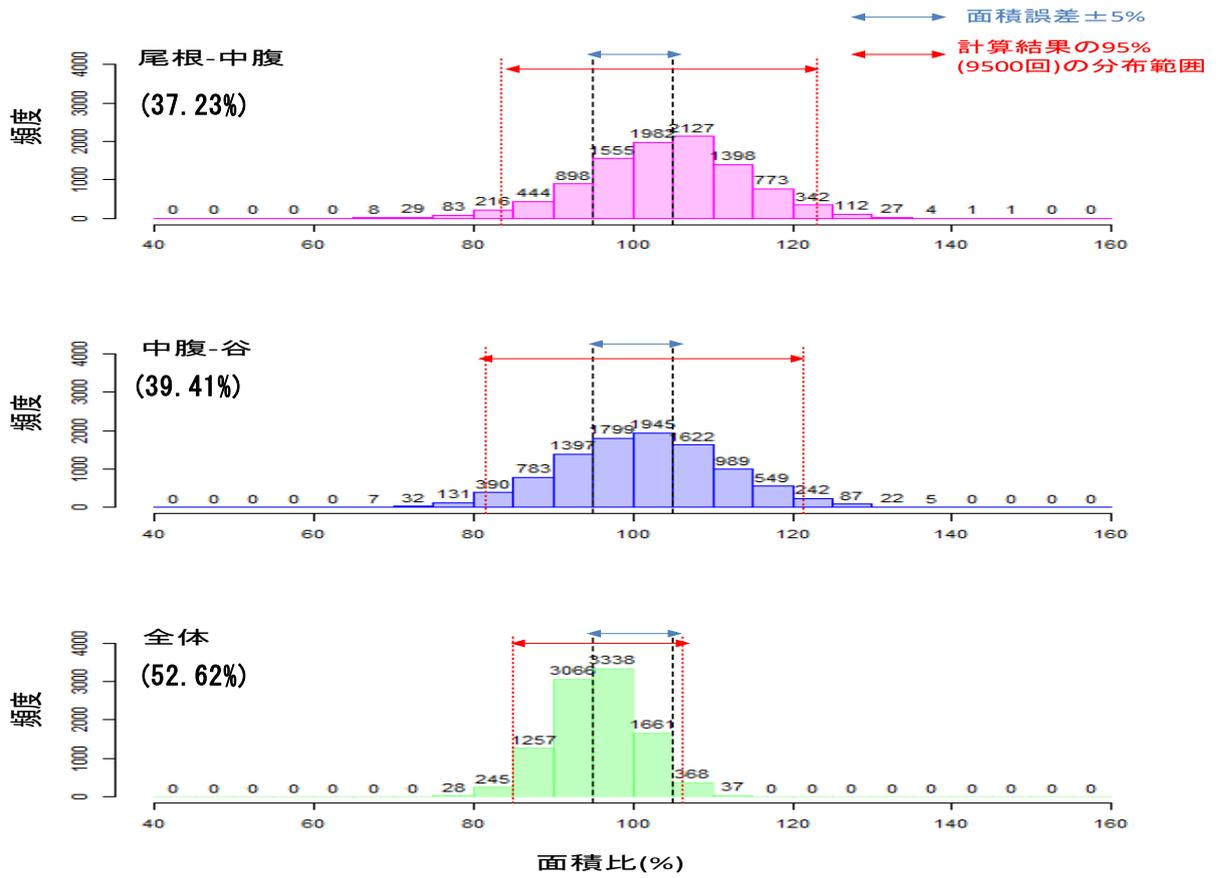


図 10.4.9 面積試算した頻度分布図 (Germin etrex Touch 35J)

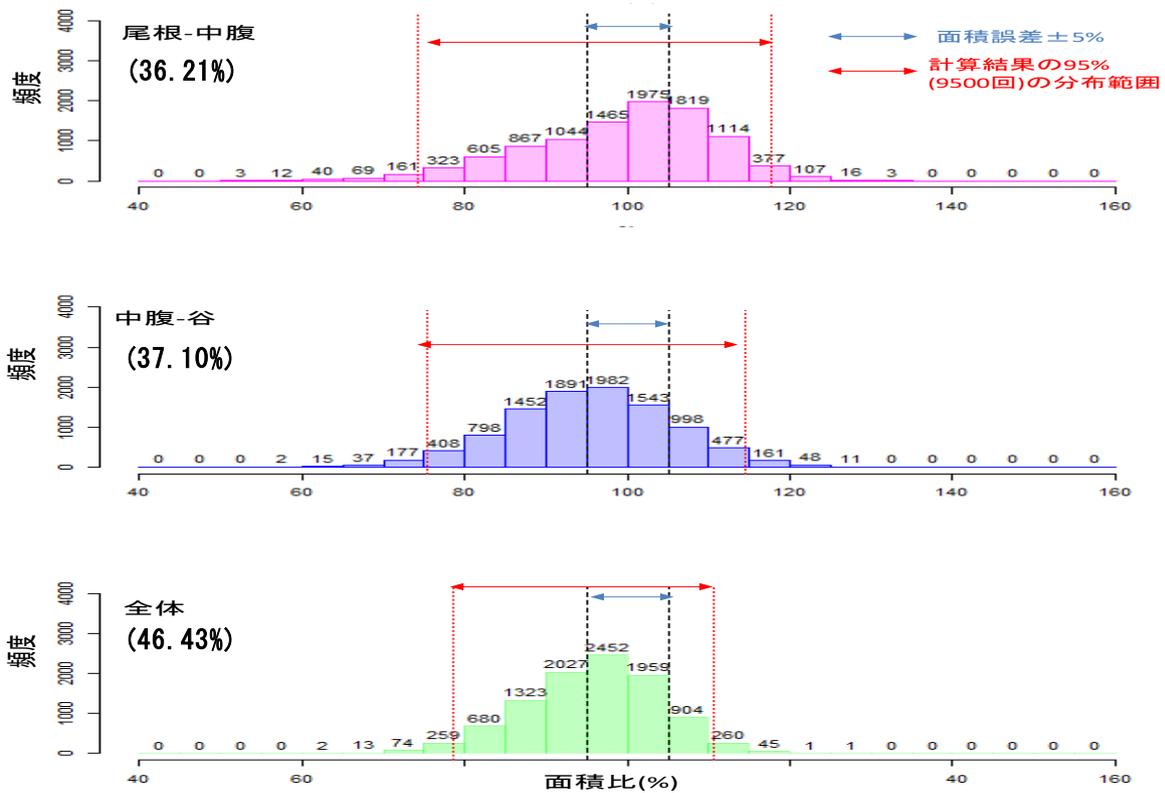


図 10.4.10 面積試算した頻度分布図 (Mobile Mapper 50)

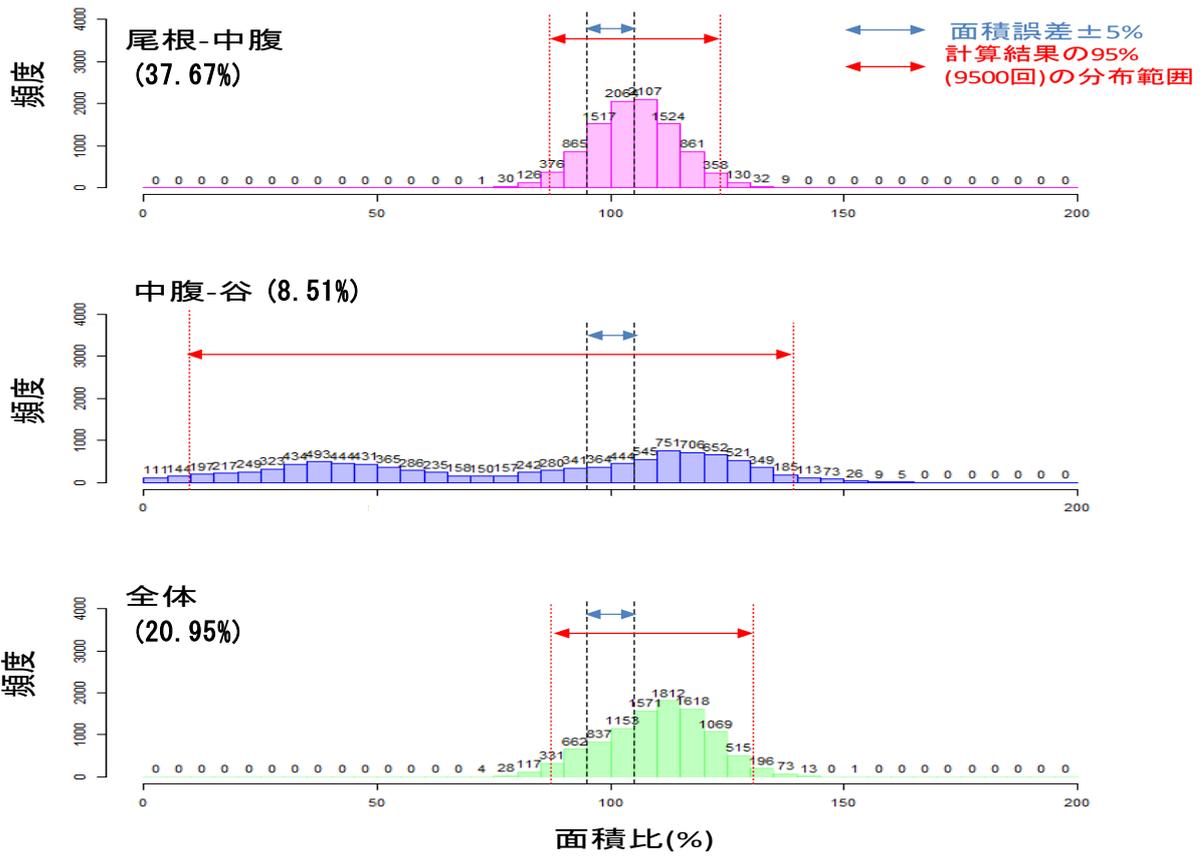


図 10.4.11 面積試算した頻度分布図 (Mobile Mapper 20)

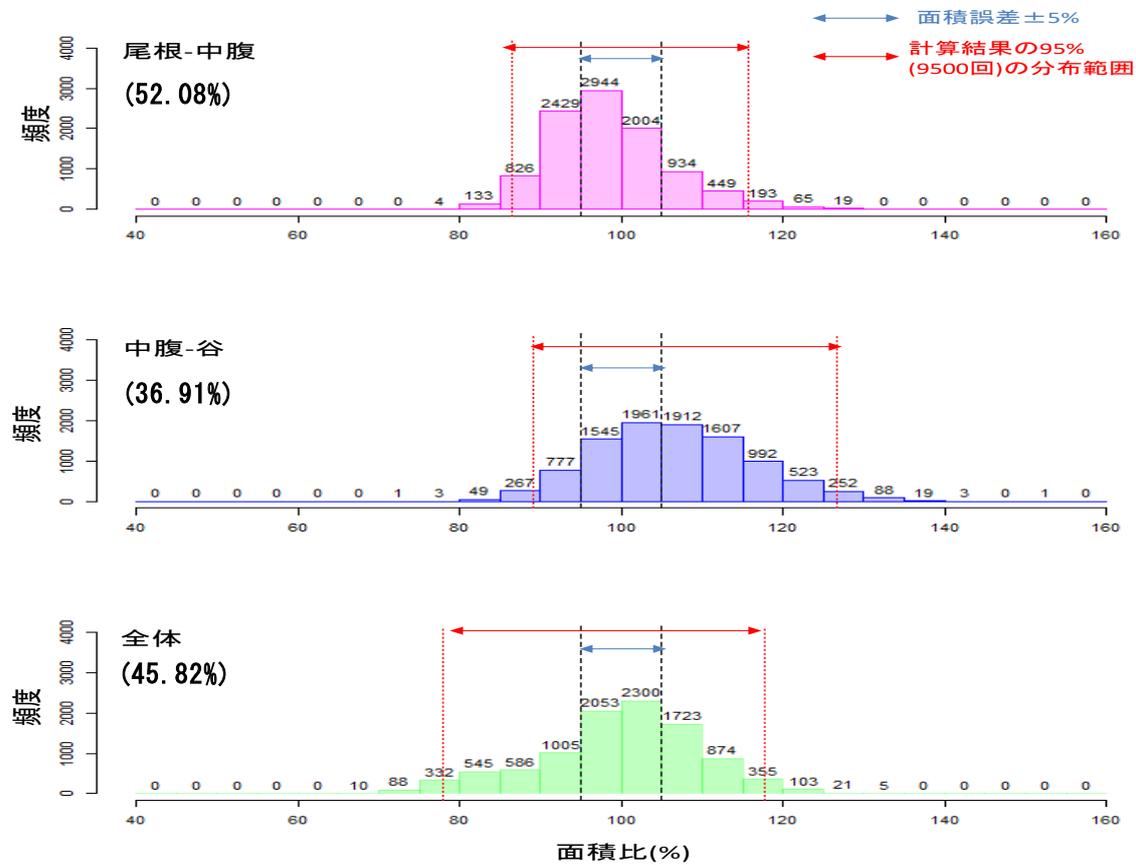


図 10.4.12 面積試算した頻度分布図 (zenfone2)

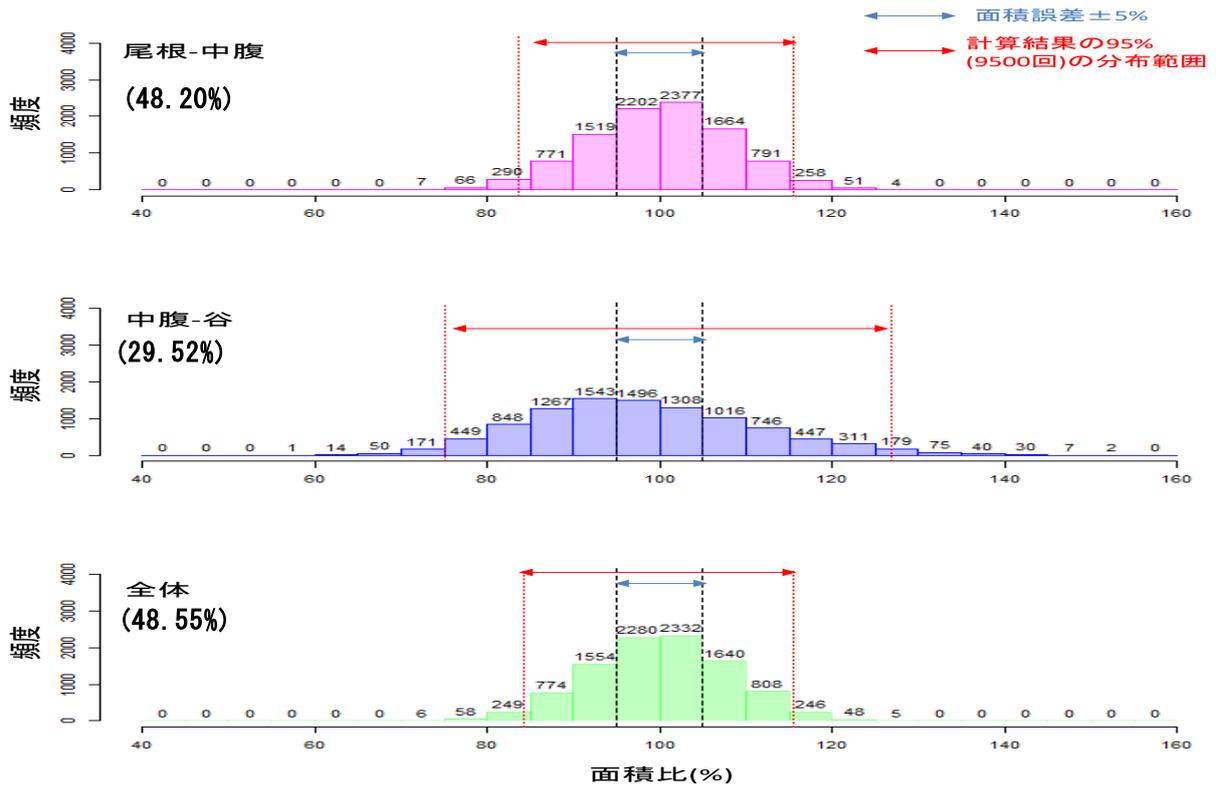


図 10. 4. 13 面積試算した頻度分布図 (gns2000 plus)

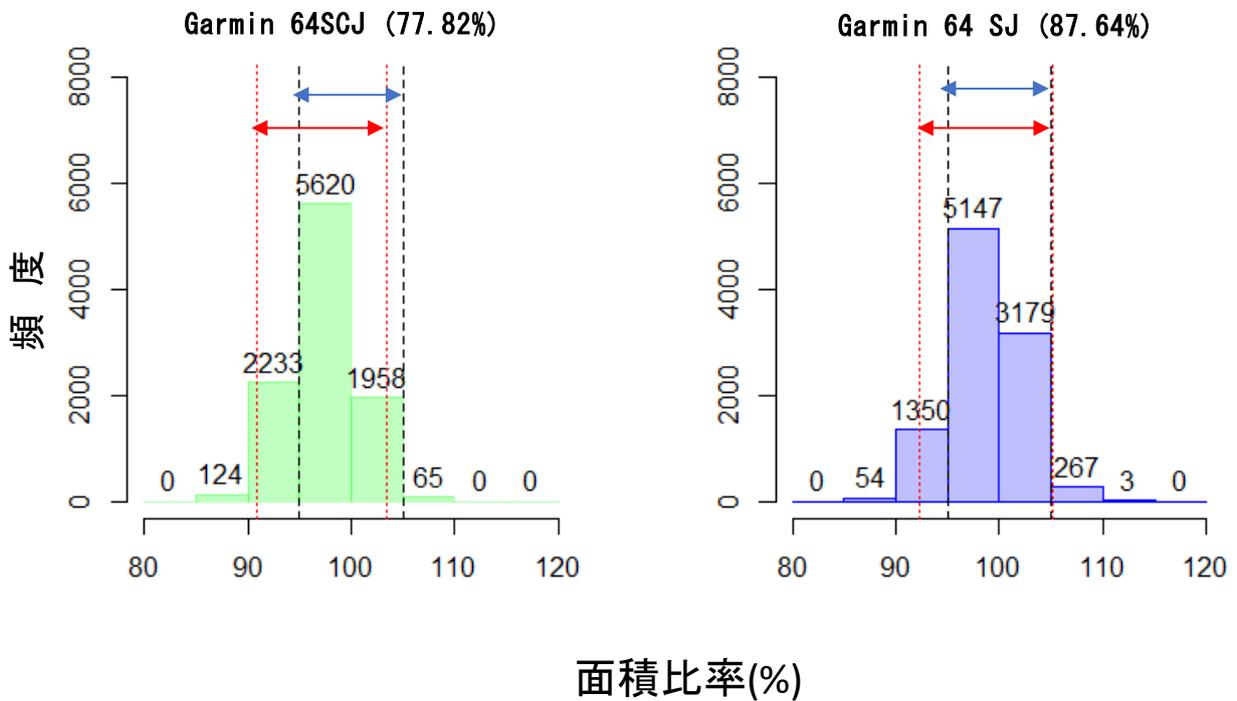


図 10. 4. 14 検証地 (1.39ha) の面積 3 倍 (4.17ha) と仮定試算した頻度分布図 (左:Garmin 64SCJ,右:Garmin 64 SJ) 矢印で示した範囲は青: 面積誤差±5%の範囲、赤: 計算結果の 95%分布範囲である。

#### 10.4.6 精度検証のまとめ

以上の検証結果から、森林内では、谷などの地形条件から捕捉衛星が平地と比べて少なくなることやマルチパスが多いことなどから、平地での測位精度と比べ著しく劣っており、場合によっては10m以上も誤差が生じることがあることがわかった。

また1回毎の座標値測定に誤差があっても、数多く（本調査では10回観測）測定し、その平均値を用いて面積計算するとともに、本調査（1.39ha）のように測定面積を広くすれば、全ての機種での面積誤差は95%から105%の範囲内に入ることがわかった。

機種毎に見ると、Garmin GPS MAP 64SJ、Garmin eTrex Touch 35J、Garmin GPS MAP 64SCJなどが異常値もなく比較的精度が良かった。また、Zenfone2、Garmin GPS MAP 62SJ、Mobile Mapper 50、GNS 2000 plus、Mobile Mapper 20がそれに続いたが、観測時には、観測までの時間が1分間であったこと、内蔵されている図面での現地確認を行わなかったこと、他機種の観測測定値との比較を行わなかったこと、さらには後処理で補正できる機種もあったがそれを行わなかったことが影響したとも考えられる。

このためGNSS受信機を収穫調査等の現場で活用する場合の留意点を整理すると、GNSS受信機の測位特性として、1) SBAS受信が受信性能の指標になるが、機種や受信環境によって精度が異なること、2)使用中の誤作動に留意する必要がある、などが挙げられる。例えばGarmin 62SJではSBAS受信が10回では、最も位置誤差の最大値が小さかったが、同機種のSBAS受信0~2回の計測結果は、位置誤差の最大値が他機種よりも大きくなった(図10.4.3)。これは測量の実施にあたって事前に把握しておくべき機種の特性であろう。また、まれに、機種によっては、誤作動としか思えない位置を標示することも、今回の検証ではみられた。使用前の設定のチェック、使用中の誤作動の有無についての確認作業も留意すべき重要な点といえるだろう。例えば、「使用するGNSS受信機の正しい操作方法の習得」、「測地系、使用衛星の種類選択」、「SBAS機能のONなどの設定確認」、「誤作動の有無の事前チェック(あらかじめ基準点等で複数回確認または複数GNSS受信機で相違ないか確認)」、「複数回の測位」、「内蔵衛星画像データによる確認」等である。

GNSS受信機による測位は、上述のような留意点に注意して運用すれば、GNSS受信機がコンパス測量の機器に比べて小型軽量であること、据え付けや前後の見通し確保のための時間も要しないことから、コンパス測量の未熟者でも計測が容易と考えられる。面積誤差の問題については、例えば周囲測量の測点を増やす、複数機種で運用するなどにより、面積誤差を低減させることは可能と考える。さらに平成30年11月1日より、みちびき(準天頂衛星システム)から、センチメートル級測位補強サービス(CLAS)が提供され始めており、数年以内には、センチメートル級測位補強信号(L6)を利用できる比較的安価なGNSS受信機の登場により、さらなる測位精度の向上が期待されている。

なお、今回の調査を通じてUAVに搭載されているGNSS受信機で取得した位置情報(XY方向)が比較的精度が高いことが示唆された。このため、現地表示とどのように組み合わせしていくかを検討していく必要はあるが、UAV撮影画像を活用した調査区域の位置情報の取得や区域面積の計測方法について、今後、さらに検討していくことが望ましい。

## 謝 辞

本調査業務の実施において、国立研究開発法人産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 吉見雅行氏には、調査対象区周辺における 1km メッシュ DEM データをご提供頂くとともに本事業での利用をご快諾頂いた。既存推定式の情報収集に際しては、各都道府県担当者の皆様のご協力を頂いたほか、青森県産業技術センター林業研究所 土屋慧氏、石川県農林総合研究センター 矢田豊氏、佐賀県農林水産部森林整備課 満行貢樹氏、和歌山県林業振興課 大澤篤弘氏には、推定式に関する貴重な情報をご提供頂いた。また現地調査に際しては、茨城森林管理署本署並びに管内各森林事務所の皆様をはじめ多くの方々にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

## 引用文献

- 千葉幸弘 (2016) 木材生産のための造林技術、造林学第四版、朝倉書店
- Hozumi, K ら (1968) Studies on the frequency distribution of the weight of individual trees in a forest stand. Jap.J.Ecol 18: 10-20.
- 国土交通省国土地理院 (2017) UAV を用いた公共測量マニュアル(案)、平成 29 年 3 月改正
- 松岡真如・小野寺栄治・川上利次・高野一隆・木村 穰 (2018) GNSS 測量で得られた面積の精度評価指標 日本森林学会誌 100:193-200.
- 奥村晴彦 (2019) ホームページ “Excel によるリサンプリング”  
<https://oku.edu.mie-u.ac.jp/~okumura/stat/excel-resample.html> (参照 2019-3-8)
- Shinozaki, K ら (1964) A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. I. Basic analyses. Japanese Journal of Ecology 14: 97-105.
- 吉見雅行 (2014) 東日本地域の変形構造評価のための基礎データ整備ー首都圏周辺域の詳細地形データ整備と東北地方の地層走向・傾斜データのデジタイズー、巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書、産業技術総合研究所地質調査総合センター、229-238. <https://www.gsj.jp/researches/project/multiple-geohazards/index.html>

### (参考) 用語説明

用 語	補 足 説 明
UAV (無人航空機)	英語：Unmanned Air Vehicle ※人が乗らず、コンピュータによる自動操縦、または、遠隔操作により飛行する航空機。ドローンとも呼ばれる。H7.12.10 改正の改正航空法で「無人航空機」を定義している。 (注：①ドローンは、drone(雄蜂、蜂の羽音)から由来。プロペラのある無人航空機に対して使用されることが多く、プロペラのない航空機を UAV と区分して使用することもある。②航空法では、無人航空機は、飛行機、回転翼航空機、滑空機、飛行船としている。)

SfM ※連続写真立体化 (仮訳)	英語：Structure (Shape) from Motion ※移動するカメラから撮影した画像により、3次元形状を自動的に復元する手法
DSM (数値表層モデル)	英語：Digital Surface Model ※航空レーザで <u>地表データ</u> を計測する手法。地盤の高さに建物や樹木の高さを加えた地表の情報(オリジナルデータ)を得る。
DEM (数値標高モデル)	英語：Digital Elevation Model ※航空レーザにより <u>地形データ(グラウンドデータ)</u> を得る手法。地表データから建物等の高さを取り除いて地面の高さ(標高)を示す。(注：DEMは本来、高さデータのセット(標高以外のデータを含む)であり広義だが、数値地形モデルDTM(Digital Terrain Model)と同義で使用されることが多い。)
DCHM (樹冠高)	英語：Digital Crown(Canopy) Height Model ※表層データ(表層高)から地形データ(標高)を差し引くことで、表層物の高さを計測する手法。以下の関係式で樹高を得ることができる。 $\text{樹冠高 (DCHM)} = \text{樹冠表層高(DCSM)} - \text{地盤高(DEM)}$

(GNSS 関係)

GNSS (全球測位衛星システム、 衛星測位システム)	英語：Global Navigation Satellite System ※元々は航空機・船舶等の航法支援用に開発されたシステムでGPS衛星、地上管制局、利用者の受信機で構成される。利用者は4機以上のGPS衛星からの距離を同時に知ることにより位置等を得ることができる(注：6軌道面に衛星を30個配置すると地球の全域をカバー可)。
GPS (全地球測位システム、 衛星測位システム)	英語：Global Positioning System ※米国国防総省が開発した人工衛星を利用した位置測定システム。GNSSの一つ。航空機・船舶、地上の車両等の受信者に三次元位置を与えるために使用される。 (注：日本では初期からGPSを利用していただけ、衛星測位システム全般を指してよぶことが多い。)
QZS (準天頂衛星)	英語：Quasi-zenith Satellite ※地域航法衛星システムであり、地上から高仰角で観測できる準天頂衛星を常に1機は見通せることができるようにするもの。日本は、H22年に実証のための初号機みちびき(QZS-1)を打ち上げ、H29年に3機を追加し、H30年から4機体制でシステム運用を開始する(注：2023年は7機体制となる予定)。 QZSはGNSSと併用して用いられる。
GIS (地理情報システム)	英語：Geographic Information System ※地理空間情報(地点や区域の位置情報等)を管理・利用するシステム

注：林野庁業務資料による(国土地理院等の公表資料をもとに作成)。

国有林における収獲調査等の効率化手法実践体制構築委託事業報告書

平成 31 年 3 月

業務受託：一般財団法人日本森林林業振興会  
〒112-0004 東京都文京区後楽一丁目7番12号  
TEL：03-3816-2471  
担当：石田祐二