

令和 2 ～ 4 年度
UAV による森林調査等実証実験業務委託

ドローンで撮影した写真による 森林資源量調査マニュアル

令和 5 年 3 月
秋田県 農林水産部 森林整備課

*** 目 次 ***

1. はじめに.....	1
1. 1. 本マニュアルの趣旨	1
1. 2. UAV を活用したさまざまな森林資源量調査の手法	1
1. 3. 本マニュアル使用にあたっての留意点.....	4
2. ドローン写真による森林調査を実施するにあたって	5
2. 1. 調査の流れ.....	5
2. 2. 調査に適したドローンおよび SfM ソフトウェアについて	8
2. 3. 解析に使用する無償ソフトウェアのダウンロード・インストール方法.....	10
2. 3. 1. ExifTool のダウンロード.....	10
2. 3. 2. 3DF Zephyr Free のダウンロード・インストール.....	12
2. 3. 3. QGIS のダウンロード・インストール	13
2. 3. 4. CloudCompare のダウンロード・インストール	18
2. 4. 汎用的な胸高直径推定式（暫定版）について	20
3. 点群データの作成	30
3. 1. ドローンによる写真撮影の実施.....	30
3. 1. 1. 事前調査の実施	30
3. 1. 2. 自動飛行用コースの作成.....	31
3. 1. 3. 撮影の実施.....	35
3. 2. SfM ソフトウェアを用いた解析の実施	37
3. 2. 1. SfM ソフトウェアを使用する前に：ExifTool による写真の高度補正.....	38
3. 2. 2. 3DF Zephyr Free を使用する方法 ※非商用利用に限る	44
3. 2. 3. Metashape Professional を使用する方法	53
4. 樹高・樹冠投影面積の算出	61
4. 1. 使用するデータの準備	61
4. 1. 1. DSM の準備	61
4. 1. 2. DEM の準備	65
4. 1. 3. DSM の水平位置補正.....	66
4. 2. QGIS を用いた算出の実施.....	70
4. 2. 1. 算出方法の概要	70
4. 2. 2. 算出の実施.....	73
5. 胸高直径の推定および材積の算出	95

5. 1.	使用するデータ等の準備	95
5. 1. 1.	材積算出式の準備	95
5. 1. 2.	材積算出式に入力するデータの準備	95
5. 2.	材積算出の実施	96
6.	【参考】より高度な解析手法	98
6. 1.	点群データの作成～樹高・樹冠投影面積の算出	98
6. 1. 1.	ドローン写真に記録された高度の補正	98
6. 1. 2.	QGIS のグラフィカルモデラーの活用	102
6. 2.	胸高直径の推定：調査地のスギ特性を反映した推定式の作成	107
6. 2. 1.	R のダウンロード・インストール	107
6. 2. 2.	プロット調査の実施	113
6. 2. 3.	立木位置の突合作業の実施	120
6. 2. 4.	R を用いた推定式作成	123
7.	【参考】UAV による森林調査等実証実験業務の成果（抜粋）	131
7. 1.	実施内容	131
7. 2.	実施結果	133
7. 2. 1.	立木本数	133
7. 2. 2.	樹高	136
7. 2. 3.	樹冠投影面積	141
7. 2. 4.	胸高直径	141
7. 2. 5.	材積	147

1. はじめに

1.1. 本マニュアルの趣旨

近年、林業労働者の不足を補うとともに、過重な労働環境を改善し、安全かつ効率的に森林資源量（樹高や胸高直径、材積など）を把握できるよう、ドローンやレーザ測量機器といった ICT 技術を活用した調査が推進されています。秋田県農林水産部森林整備課においても、令和 2 年度から「UAV による森林調査等実証実験業務委託」を実施し、本県スギ人工林を対象として UAV（Unmanned Aerial Vehicle／無人航空機）を用いたより簡便な森林資源量調査手法の構築を目指してきました。

本マニュアルは、上記業務の成果をふまえ、UAV を用いた森林資源量調査のなかでも比較的手軽なドローンで撮影した空中写真を用いた調査の手法について、現場での人手を抑え、多くの工程を無償ソフトウェアで実施できるよう取りまとめたものです。人手をかけ、高価なソフトウェアを多用する方法と比較すると、精度的には劣っていると考えられます。しかしながら、ICT 技術を活用した森林調査について、皆様の学習や導入のきっかけとなればと思い、提供するものです。

なお、今後ドローンで撮影した空中写真による森林調査の実施を強制するものではありません。前述のとおり精度的に劣る面があるため、主に以下に記す場面において、調査方法の選択肢の 1 つと考えていただければ幸いです。

- ◎ 一山にどの程度の材積があるか見込みを立てたい場合
- ◎ 航空レーザや無人ヘリレーザでは対象とならないような小面積の調査を実施する場合
- ◎ 航空レーザ等で大規模に調査を実施してから年数が経ち、最新の状況を調査したい場合

1.2. UAV を活用したさまざまな森林資源量調査の手法

近年、ドローンやレーザ測量機器といった技術を活用し、森林資源量調査の省力化・高度化が図られています。なかでも、UAV による森林資源量調査は、林内に長時間立ち入ることなく空中から取得したデータを解析することで、立木位置の抽出から材積の算出まで実施できることから、近年導入が進んでいます。

UAV を用いた森林資源量調査の主な手法は、以下のとおりです。なお、ドローン・無人ヘリともに UAV の一種です。

- ・ドローンによる空中写真から作成した点群データ※を用いる調査（ドローン写真）
- ・ドローンに搭載したレーザ計測機器で計測した点群データを用いる調査（ドローンレーザ）

- ・無人ヘリに搭載したレーザ計測機器で計測した点群データを用いる調査（無人ヘリレーザ）

※ 点群データ…3次元にある物体や地形などを、座標値（水平位置および高度 [XYZ]）や色情報（R・G・B）を持った点の集合体で表現したデータ

いずれの手法も、作業の流れはおおむね共通しており、そのイメージは図 1. 2.1 のとおりです。始めに、UAV で撮影した写真やレーザ計測したデータを処理することで、樹木表層（や幹）を含むデータを用意します。さらに地盤を示すデータも用意します。この二つのデータを組み合わせることで立木位置を抽出し、単木毎に樹高・樹冠投影面積の算出を実施します（①）。材積を算出するには胸高直径も必要です。これについては、現地調査を実施して樹高や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推定するか、レーザ計測による超高密度の点群データから幹が判別できる場合は、このデータを使って直接計測します（②）。以上により、単木毎に樹高と胸高直径が得られたので、林野庁の立木幹材積表などを用いて材積を算出します（③）。

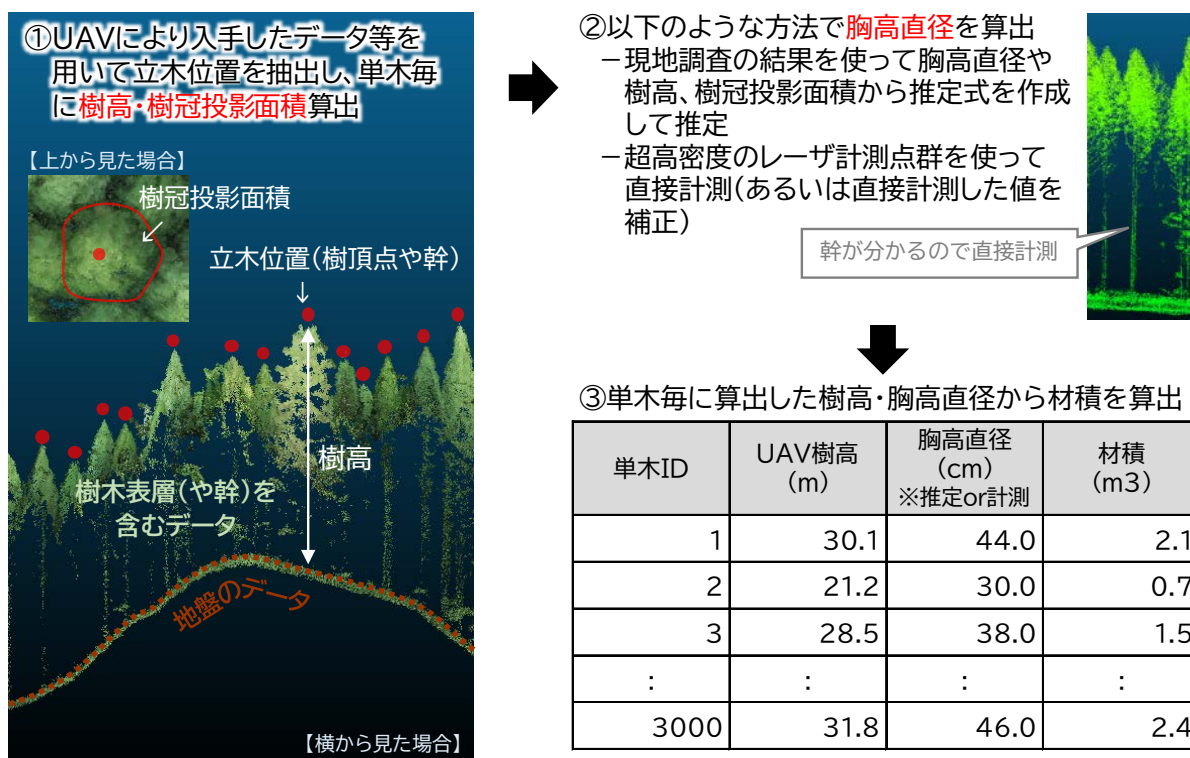


図 1. 2.1 UAV を活用した森林資源量調査の作業イメージ

さらに具体的に、ドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザそれぞれで取得可能なデータを表 1.2.1 に示します。

ドローン写真では、写真に写ったものしか点群データにできないため、地盤の点群データを入手することができないほか、被圧木など他の立木に隠れているような木も抽出することができません。

ドローンレーザでは、レーザが枝葉の隙間をすり抜けるか貫通するかして地面まで届くため、樹冠表層のデータと同時に、地盤のデータも取得できます。ただし、無人ヘリレーザに比べると一般的にレーザ機器の性能が劣っており点群データの密度が低いため、被圧木等の抽出も難しいほか、胸高直径を直接計測するようなこともできません。無人ヘリは、より重量が大きい機材を搭載して長時間飛行できるため、性能の優れたレーザ機器を搭載し、超高密度の点群データを得ることができます。そのため、幹の判別が可能であり、胸高直径を直接計測するか、あるいは高い位置で計測した幹の直径を胸高での値に補正することで、実測に準じたかたちで胸高直径を算出することができます。

表 1.2.1 UAV を用いた森林資源量調査で取得可能なデータ

調査項目	ドローン 写真	ドローン レーザ	無人ヘリ レーザ	(参考) 毎木調査
樹木表層（や幹）の高さを 含む点群データ	○	○	○	—
地盤の点群データ	×	○	○	—
立木本数	○ 被圧木等は×	○ 被圧木等は×	○	○
立木位置の座標データ	○	○	○	—
樹高	○	○	○	○ (基本的に)推定
樹冠投影面積	○	○	○	—
胸高直径	○ 推定	○ 推定	○ 実測に準じる	○ 実測
材積	○	○	○	○

○…調査可能 ×…調査不可 —…調査対象外

1.3. 本マニュアル使用にあたっての留意点

本マニュアルの手法は、秋田県のスギ人工林の調査向けに構築したものです。さらに、秋田県農林水産部森林整備課が実施している「森林情報デジタル化推進業務委託」により、航空レーザ測量による高精度の地盤データが入手できることを前提としています。完了していない地域で本マニュアルの手法を実践する場合は、既存のレーザ測量データの入手または別途ドローンレーザ測量等が必要となる点に留意してください。

また、本マニュアルの調査手法は、以下のバージョンのソフトウェア、プログラミング言語で動作を確認しています。

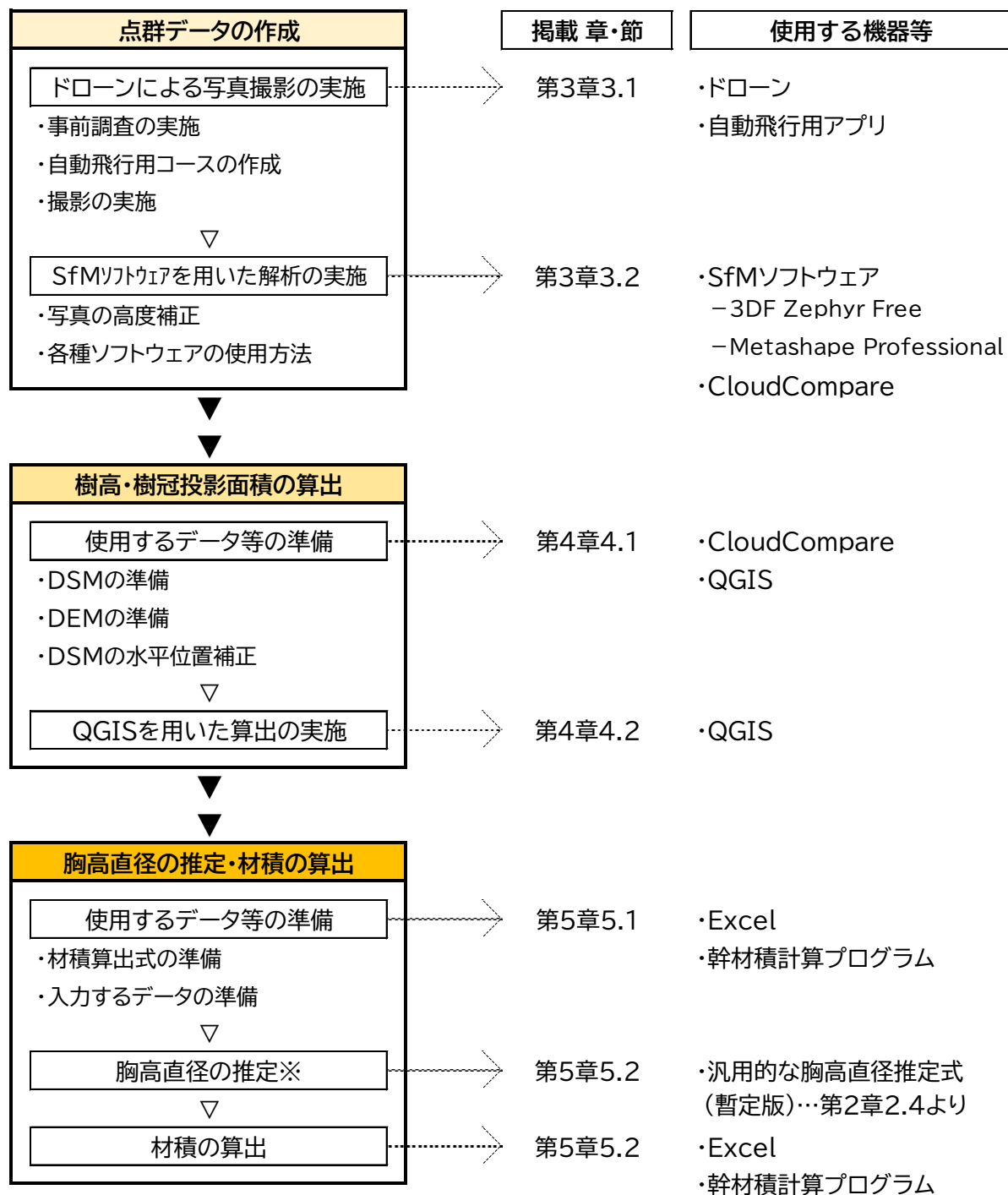
- ExifTool 12.5.2
- 3DF Zephyr Free 6.513
- Metashape Professional 1.8.3
- QGIS 3.18.3
- CloudCompare 2.12.4
- R 4.2.2 + Rstudio Desktop 2022.07.2+576

上記以外のバージョンを使用する場合、機能やツールの名称・内容等に変更が生じている可能性があります。さらに、本マニュアルの解析手法、特に QGIS を用いた解析については、あくまで無償のソフトウェアでできる範囲の解析手法の一例として示しています。今後皆様が活用されていくなかで、必要に応じて改良していただければ幸いです。

2. ドローン写真による森林調査を実施するにあたって

2.1. 調査の流れ

本マニュアルにおける森林資源量調査の作業フローは、図 2.1.1 のとおりです。



※本マニュアルで提示した汎用的な胸高直径推定式(暫定版)を使わず、調査地独自の胸高直径推定式を作成する場合は、第6章をご参照ください

図 2.1.1 ドローン写真による森林資源量調査の作業フロー

始めに、ドローンで撮影した写真から点群データを作成します。ドローンでの撮影は、カメラを真下に向け、同一コース間・隣接コース間の写真が一定の割合で重複するように設定し、基本的に自動飛行で実施します。

撮影した写真から点群データを作成するには、SfM ソフトウェアを使用します。SfM とは、Structure From Motion の略で、一定の重複度で撮影された複数の写真から抽出した多数の特徴点の三次元情報を一度に求める処理を指します。この処理をふまえて写真同士のマッチングを行ない、高密度の点群データやメッシュモデルを作成することを MVS (Multi View Stereo) といいます。多くの SfM ソフトウェアでは、SfM に加えてこの MVS やオルソ画像の作成も実行できます。

SfM ソフトウェアで作成した点群データが、前章で示した樹木表層（や幹）の高さを含むデータに該当します。これと別途用意した地盤の高さを示すデータを組み合わせて QGIS で処理することで、スギ立木の樹頂点を抽出し、樹頂点が抽出できた立木について単木毎に樹高や樹冠投影面積を算出します。この処理をする際は、SfM ソフトウェアで作成した点群データから DSM を作成する必要があり、地盤のデータとして点群データを用意した場合は DEM を作成する必要があります。

DSM は Digital Surface Model の略で、「数値表層モデル」と訳されます。一方、DEM は Digital Elevation Model の略で、「数値標高モデル」と訳されます。DSM・DEM とともに点群データをグリッドデータに加工したものです。加工方法はさまざまありますが、イメージとしては図 2.1.2 のとおりで、不均一に存在する点群データにグリッド（＝格子）をかぶせ、そのグリッドに対して点（＝標高値）が一つになるように加工します。

（例）グリッド内にある点の最大値を使ってDSMに変換する場合

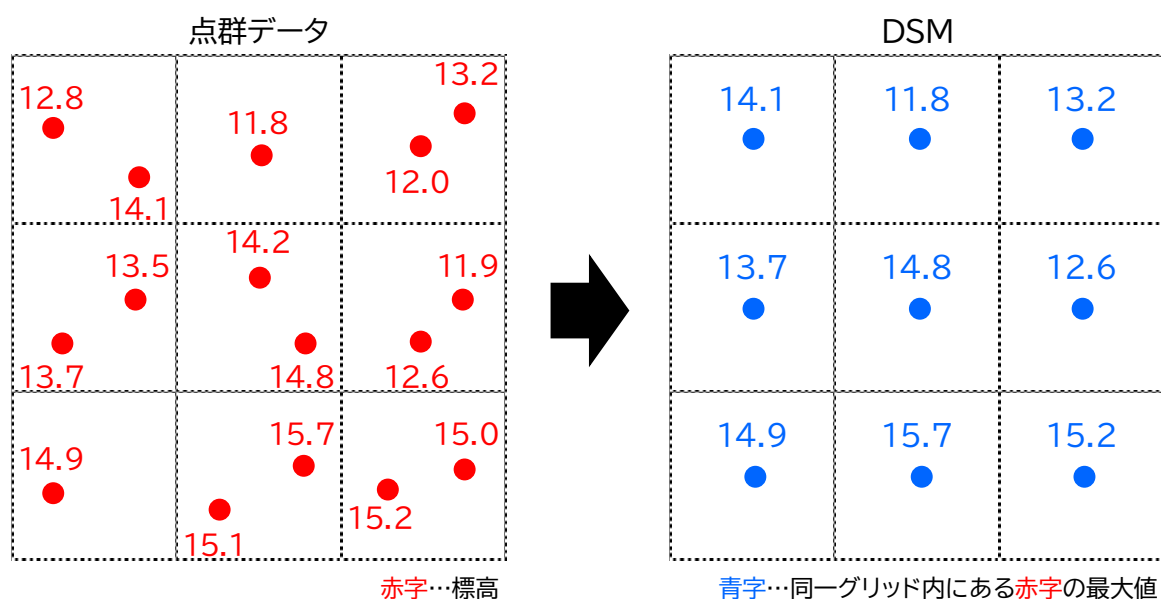


図 2.1.2 点群データを DSM に変換する過程のイメージ (DEM も同様)

このように作成した DSM・DEM を GIS ソフトウェアで利用する場合の形式の一つがラスタデータです。ラスタデータは、格子状に並んだセル（ピクセル）で構成されており、このセルの一つひとつに何らかの数値情報が格納されています。この形式で表現される代表的なものは、写真やスキャンした地図などの画像データ、標高や降水量などの連続値を表現したデータです。例えば標高のラスタデータは、一見すると標高の低い方から高い方に向かって滑らかに値（色）が変化していますが、一部を大きく拡大すると、格子状のセルが並んだ構造になっています（図 2. 1.3）。この格子状のセルの一つひとつに、標高値が格納されています。

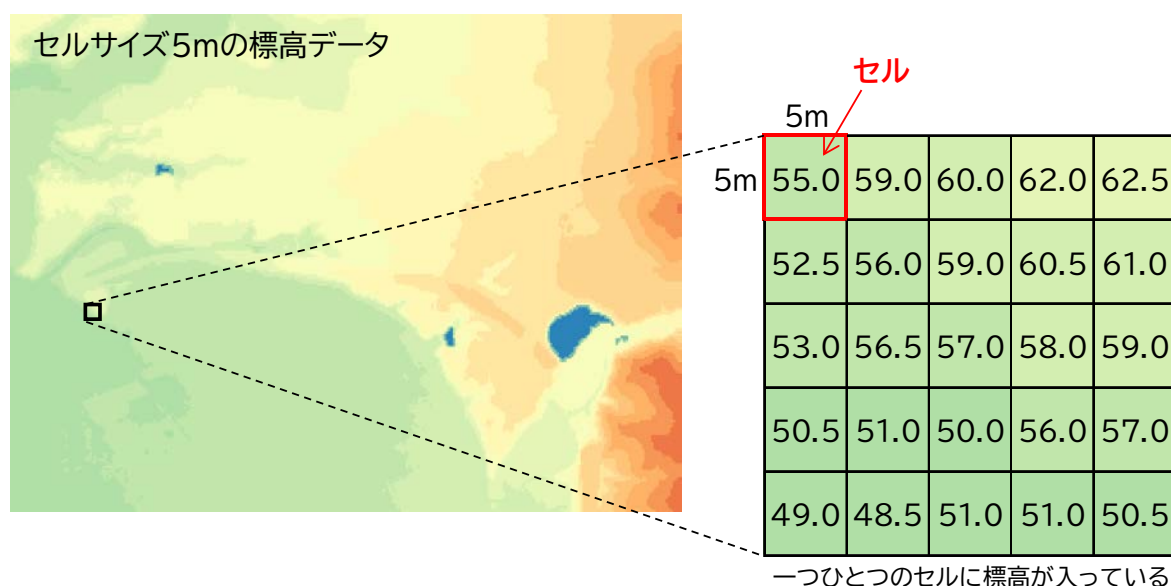


図 2. 1.3 ラスタデータのイメージ

DSM・DEM を使用して樹高・樹冠投影面積を算出したのちに材積を算出するには、単木毎に胸高直径が必要です。しかし、ドローンで撮影した写真からでは分からないため、推定しなければなりません。そこで、本マニュアルには「UAV による森林調査等実証実験業務」で調査したプロット調査やドローンによる解析結果を活用して作成した、本県スギ人工林に対する汎用的な胸高直径推定式（暫定版）を掲載したので、これを使用して胸高直径を推定します。

最後に、単木毎に推定した胸高直径と QGIS を使って算出した樹高を林野庁計画課監修「立木幹材積表（東日本編・西日本編）」（1970 年）に対応した森林総合研究所作成の Excel 用関数（幹材積計算プログラム）に入力することで、材積を算出します。

2. 2. 調査に適したドローンおよび SfM ソフトウェアについて

前述の説明にあるとおり、ドローン写真を使用した森林資源量調査を実施するには、以下の機器・ソフトウェアが必須です。

- ・ドローン（カメラが別売りの場合はカメラも）
- ・SfM ソフトウェア

ドローンでの写真撮影では、カメラが真下に向くこと、自動飛行が実施できることが必要です。そこで、カメラの向きを変えられることができ、かつ自動飛行用の無料純正アプリが使用できることを基準とし、表 2. 2.1 に調査に適したドローンの例を挙げました。表に挙げたドローン以外でも、このカメラの向きを変えられることができ、自動飛行が可能であれば調査に使用できます。ただし、カメラの静止画サイズ（＝画質）が作成する点群データの質に影響するため、表にあるドローンより大きく劣っている場合は、点群データを使った解析が困難になる可能性がある点に注意してください。

表に記載している Phantom 4 RTK、Matrice 300 RTK は、ほかの機体と異なり RTK（リアルタイムキネマティック）測位※を利用することができます。RTK 測位を利用できる機体はより正確な位置情報を取得できるため、一般的な機体よりも高価にはなりますが、第 3 章 3. 2. 1 や第 4 章 4. 1. 3 に示した位置情報の補正作業は基本的に不要となるため、調査がさらに効率的になるというメリットがあります。

調査に適した SfM ソフトウェアの例は、表 2. 2.2 のとおりです。Metashape Professional と Pix4DMapper の二つは価格が高いですが、現在 SfM ソフトウェアとして広く普及しており、ユーザーも多く、インターネット上でも使用方法に関する情報が入手しやすいです。

※ RTK 測位…複数の受信機で同時に GNSS（GPS や GLONASS などの測位衛星システム）の信号を受信し、相対的な位置関係を求める「相対測位方法」の一種で、1 台の受信機により位置を求める単独測位と比べるとより正確な位置情報が得られます

表 2.2.1 調査に適したドローンの例(純正の自動飛行アプリが使用可能なドローン)

機体(+別売カメラ)の 名称	メーカー	導入費用 目安※1	静止画サイズ (最大)	使用できる純正 自動飛行アプリ
Mavic 2 Pro	DJI	A	5472 × 3648	DJI GS Pro
Mavic 2 Zoom	DJI	A	4000 × 3000	DJI GS Pro
Mavic 3 Enterprise	DJI	C	5280 × 3956	DJI Pilot 2
Phantom 4 Pro V2	DJI	B	4096 × 2160	DJI GS Pro
Phantom 4 RTK	DJI	C	5472 × 3648	DJI Pilot
Inspire 2 +Zenmuse X5S または X7	DJI	C	5280 × 3956 (X5S) 6016 × 4008 (X7)	DJI GS Pro
Matrice 300 RTK+Zenmuse P1	DJI	D	8192 × 5460	DJI Pilot 2

※1 A=30 万円以下 B=50 万円以下 C=100 万円以下 D=100 万円以上 (バッテリー・送機・カメラ等を含む基本的なセットの価格(2022 年 12 月時点) / 購入先によって変動あり)

表 2.2.2 調査に適した SfM ソフトウェアの例

名称	メーカー	価格の目安	備考
Metashape Professional	〃	60 万円程度※1	<u>Windows・MacOS 対応</u> 点群データ・オルソ画像作成可
Pix4Dmapper (買取ライセンス)	Pix4D	60 万円程度※1	<u>Windows のみ対応</u> 点群データ・オルソ画像作成可
KUMIKI (くみき)	スカイマティクス	要問い合わせ※2	クラウド型のため、PC の OS は不問 点群データ・オルソ画像作成可
3DF Zephyr	3Dflow	3,900 ユーロ (約 55 万円)+税※1	<u>Windows のみ対応</u> 点群データ・オルソ画像作成可
3DF Zephyr Lite	3Dflow	11 万円※1	<u>Windows のみ対応</u> 一度に処理できる写真は 500 枚まで オルソ画像作成不可・メッシュのみ出力可
3DF Zephyr Free	3Dflow	無償 (非商用利用のみ可)	<u>Windows のみ対応</u> オルソ画像作成不可・メッシュのみ出力可

※1 2022 年 12 月時点の価格 (購入先によって変動の可能性あり)

※2 2023 年 2 月時点

2. 3. 解析に使用する無償ソフトウェアのダウンロード・インストール方法

本マニュアルで紹介する調査手法では、前節に示したような SfM ソフトウェアを含め、以下の無償ソフトウェアを使用します。本マニュアル内で一部使用方法を説明している有償のソフトウェアについては、購入先のサポートがあるかと思しますので、ダウンロード・インストール方法は割愛します。

- ・ ExifTool
- ・ 3DF Zephyr Free
- ・ QGIS
- ・ CloudCompare

本節では、上記四つのダウンロード・インストール方法を、64bit 版の Windows10 が搭載された PC を例として説明します。

2. 3. 1. ExifTool のダウンロード

ExifTool は無償で Exif 情報（写真の撮影日時や位置情報、機種名などのデータ）を編集できるツールです。本マニュアルではドローンで撮影した写真の位置情報の補正に使用します。

（1）ダウンロード

はじめに、ExifTool の Web サイト (<https://exiftool.org>) にアクセスします（図 2. 3.1）。ページ上部にある「Windows Executable:」の右にある「exiftool-●.●.zip」（●.●はソフトウェアのバージョンを示す数字）をクリックすると、ダウンロードが始まります。

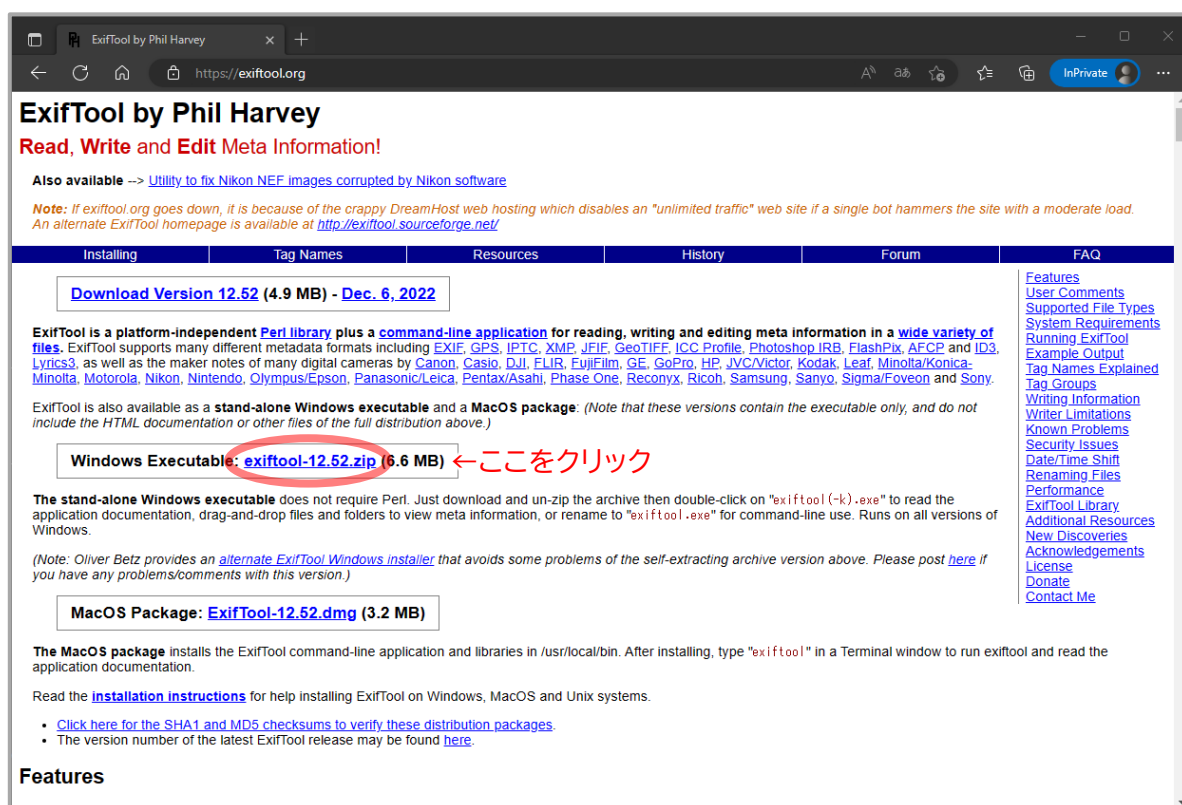


図 2. 3.1 ExifTool のダウンロード(2022 年 12 月時点)

(2) ダウンロードしたファイルの展開・修正

続いてダウンロードしたファイルを解凍すると、フォルダの中に「exiftool(-k).exe」というファイルが確認できます。これが処理を実施するための実行ファイルです。この exe ファイルの名前を「exiftool.exe」に修正し、デスクトップに移動させてください (図 2. 3.2)。これにより、本マニュアルに記載した写真の位置情報の補正 (第 3 章 3. 2. 1 参照) が実行できるようになります。

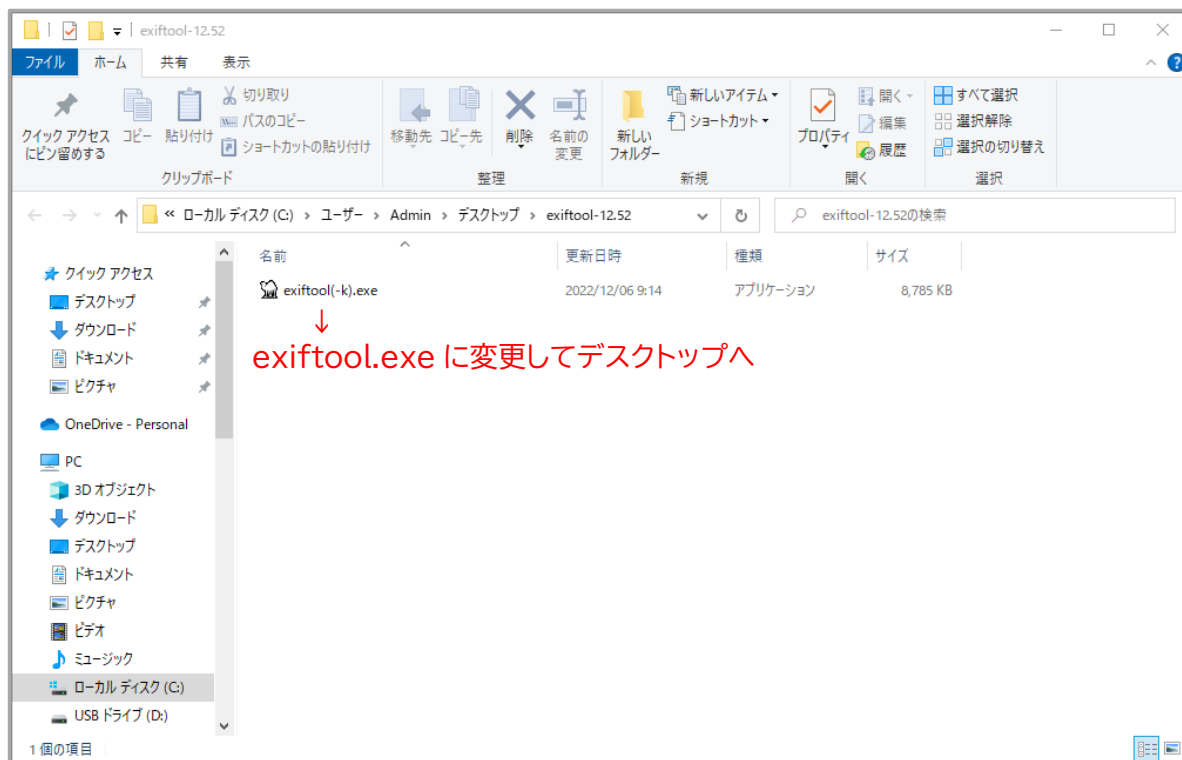


図 2.3.2 ダウンロードしたファイルを解凍してできたフォルダ

2.3.2. 3DF Zephyr Free のダウンロード・インストール

3DF Zephyr Free は、非商用利用に限って使用できる無償の SfM ソフトウェアです。GUI ベースで使いやすいのですが、非商用利用に限られるため営利目的の業務あるいはその業務に関連する作業で使用することはできません。さらに、処理できる写真の枚数も 50 枚に制限されています。しかしながら、実行にあたって高性能の GPU※が必須ではなく、ドローンで撮影した写真を使った SfM 処理の工程を学習するには最適と考えられます。

3DF Zephyr Free をインストールするには、はじめにダウンロードページ (<https://www.3dflow.net/3df-zephyr-free/>) にアクセスします (図 2.3.3)。ページ下部にある「Download 3DF Zephyr Free (Asia mirror) - Version ●.●」(●.●はソフトウェアのバージョンを示す数字) をクリックすると、インストーラー (拡張子: exe) のダウンロードが始まります。

ダウンロードしたインストーラーをダブルクリックすると、インストールが始まります。インストールに関する設定について尋ねる画面がいくつか現れますが、基本的には既定値のまま進んでかまいません。

※ GPU…Graphics Processing Unit の略で、グラフィックボードに搭載されている画像処理に特化した演算処理装置のことです。グラフィックボードはコンピューターにおいて画面の描画を行なうための装置で、高画質の画像や 3D データを表示するには高性能なものが必要です。高

性能 GPU としては、NVIDIA 製や AMD 製のものが代表的です。

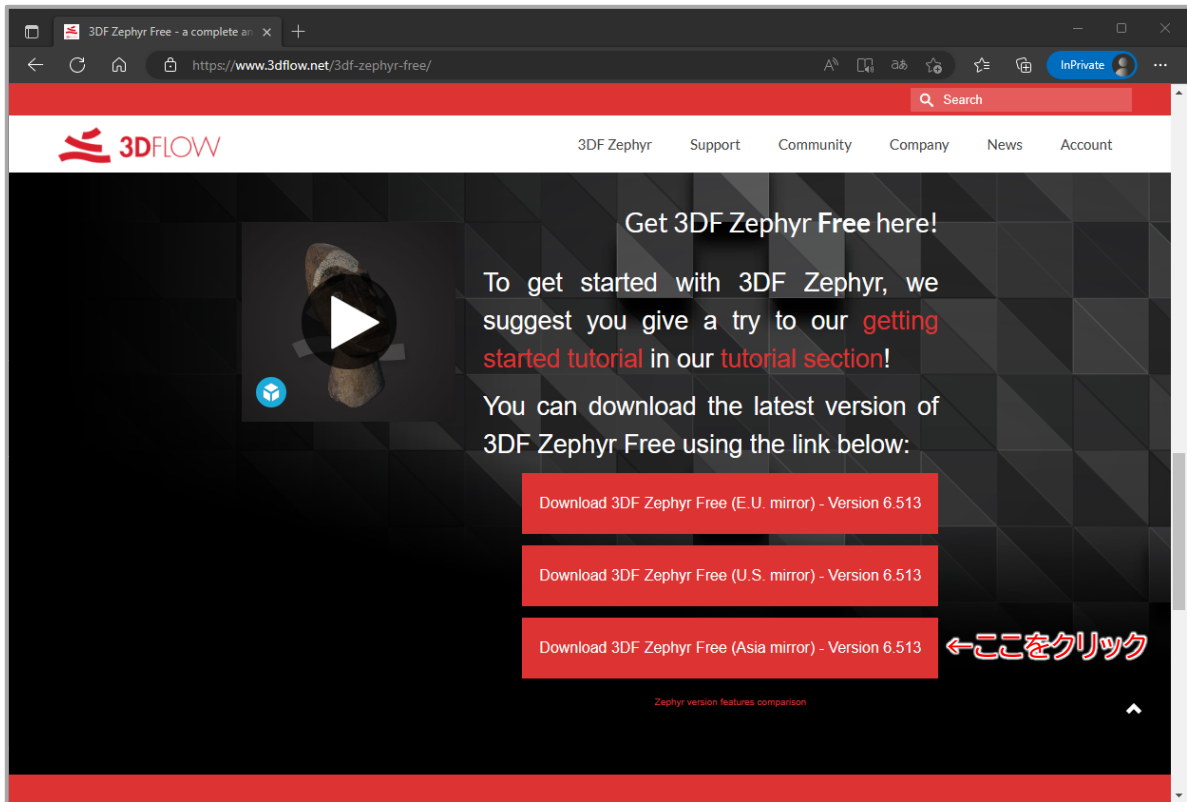


図 2.3.3 3DF Zephyr Free のダウンロード(2022 年 12 月時点)

2.3.3. QGIS のダウンロード・インストール

QGIS は無償の GIS ソフトウェアで、本マニュアルでは主に樹高や樹冠投影面積の算出に使用します。

(1) ダウンロード・インストール

QGIS の最新版あるいは安定版をダウンロードしたい場合は、ダウンロードページ (<https://qgis.org/ja/site/forusers/download.html>) にアクセスします。(図 2.3.4)。一般的に、ソフトウェアのリリースから長期が経過しており、より操作が安定しているのは安定版です。より前のバージョンの QGIS を使用したい場合は、全てのバージョンがダウンロードできるページ (<https://download.qgis.org/downloads/>) にアクセスします(図 2.3.5)。なお、本マニュアルの手法はバージョン 3.18.3 に基づいているため、こちらのページにアクセスします。

全てのバージョンがダウンロードできるページから目的の QGIS を見つけたら、クリックしてインストーラー(拡張子: exe)をダウンロードします。

続いて、ダウンロードしたインストーラーをダブルクリックすると、インストールが始まります。

インストールに関する設定等についていくつか選択する画面が現れますが、基本的に規定値のまま次に進んでかまいません。

インストールが完了すると、**Window** のアプリ一覧に「**QGIS 3.18**」というフォルダが作成され、その中にインストールしたソフトウェアが並んでいます（図 2.3.6）。本マニュアルでは、**QGIS** の「**プロセッシングツールボックス**」からさまざまな機能を使用するので、**QGIS** 起動時に画面上部のツールメニュー「**ビュー**」にある「**パネル**」にてチェックを入れ、表示するようにしてください（図 2.3.7）。



図 2.3.4 QGIS の最新版および安定版のダウンロードページ(2022 年 11 月時点)

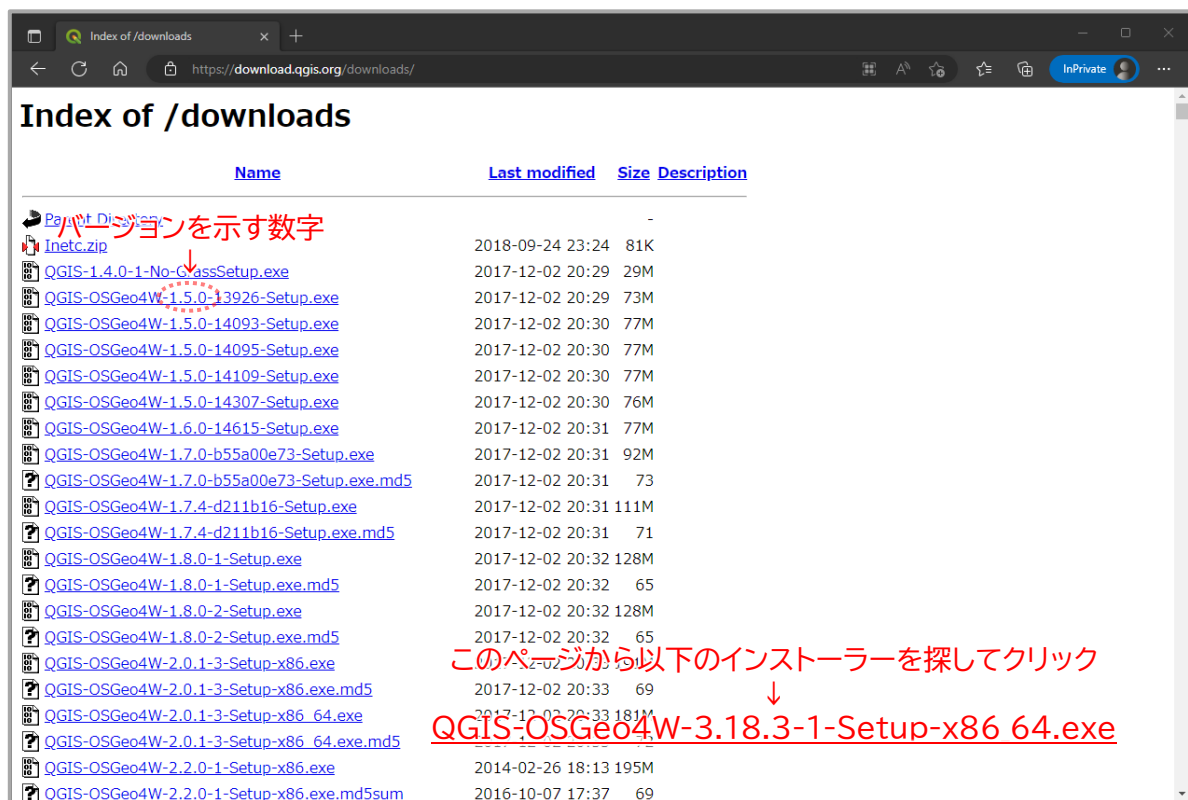


図 2. 3.5 全てのバージョンの QGIS がダウンロードできるページ

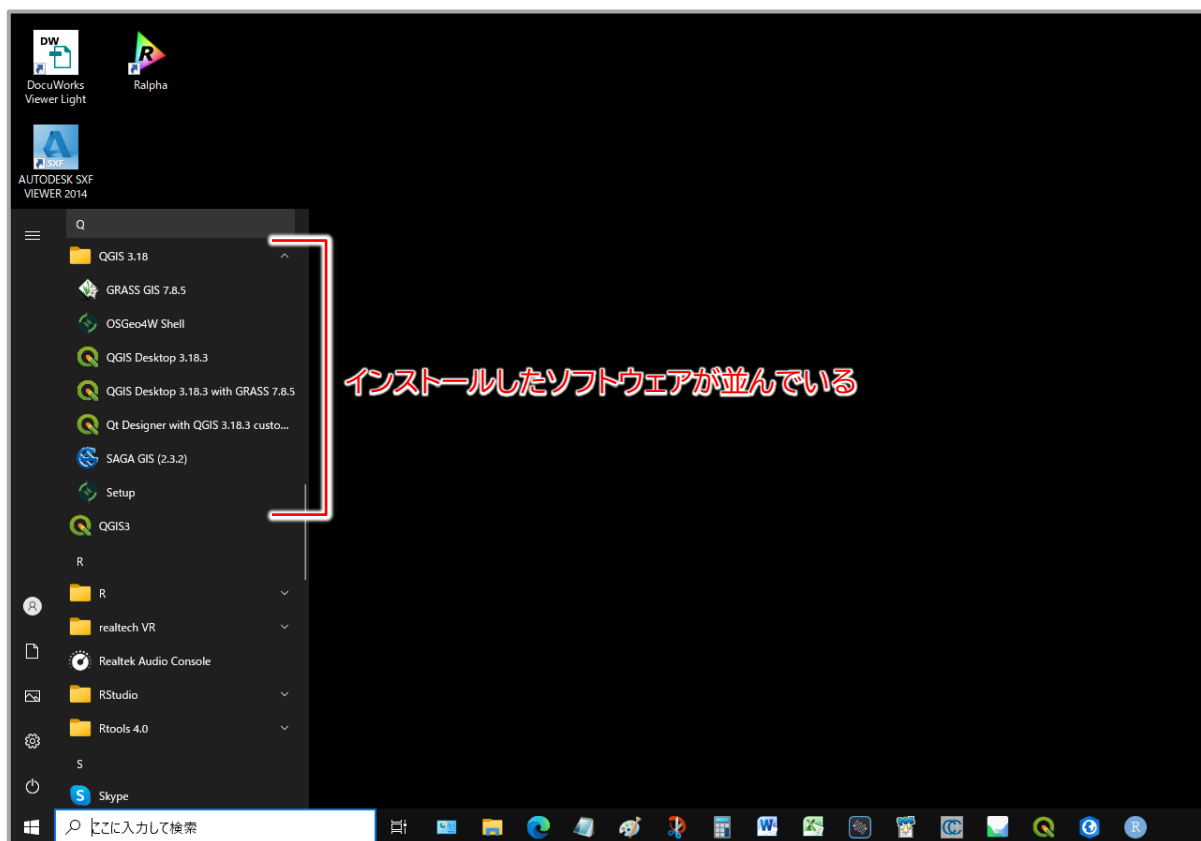


図 2. 3.6 QGIS のインストール後

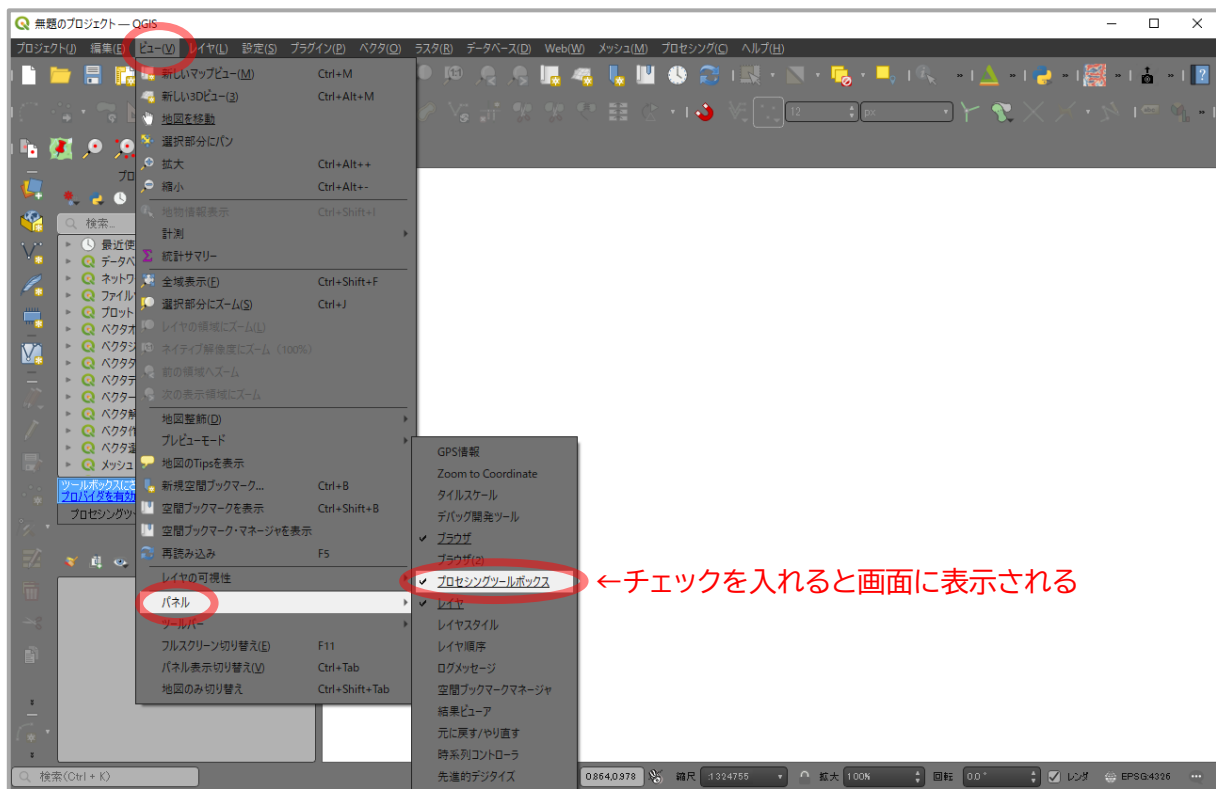


図 2.3.7 プロセッシングツールボックスの表示

(2) プラグインのインストール

QGIS は、企業や個人が作成したさまざまなプラグイン（拡張機能）をインストールすることで、QGIS 本体には無い機能を使用することができます。本マニュアルでも、第 3 章・第 6 章の一部に、プラグインを使用した手法を紹介しているため、ここで使用するプラグインを例として、インストール方法を説明します。

- ① QGIS を起動し、画面上部の「プラグイン」タブをクリックして「プラグインの管理とインストール」を選択します（図 2.3.8）
- ② 現れた画面の左側で「すべて」をクリックし、上部にある検索ボックスに「Lat Lon Tools」と入力すると、当該プラグインの説明とともにインストールボタンが現れるので、このボタンをクリックします（図 2.3.9）
- ③ 元の QGIS の画面にこのプラグインに含まれる機能を示すアイコンが現れれば、インストールは成功です（図 2.3.10）

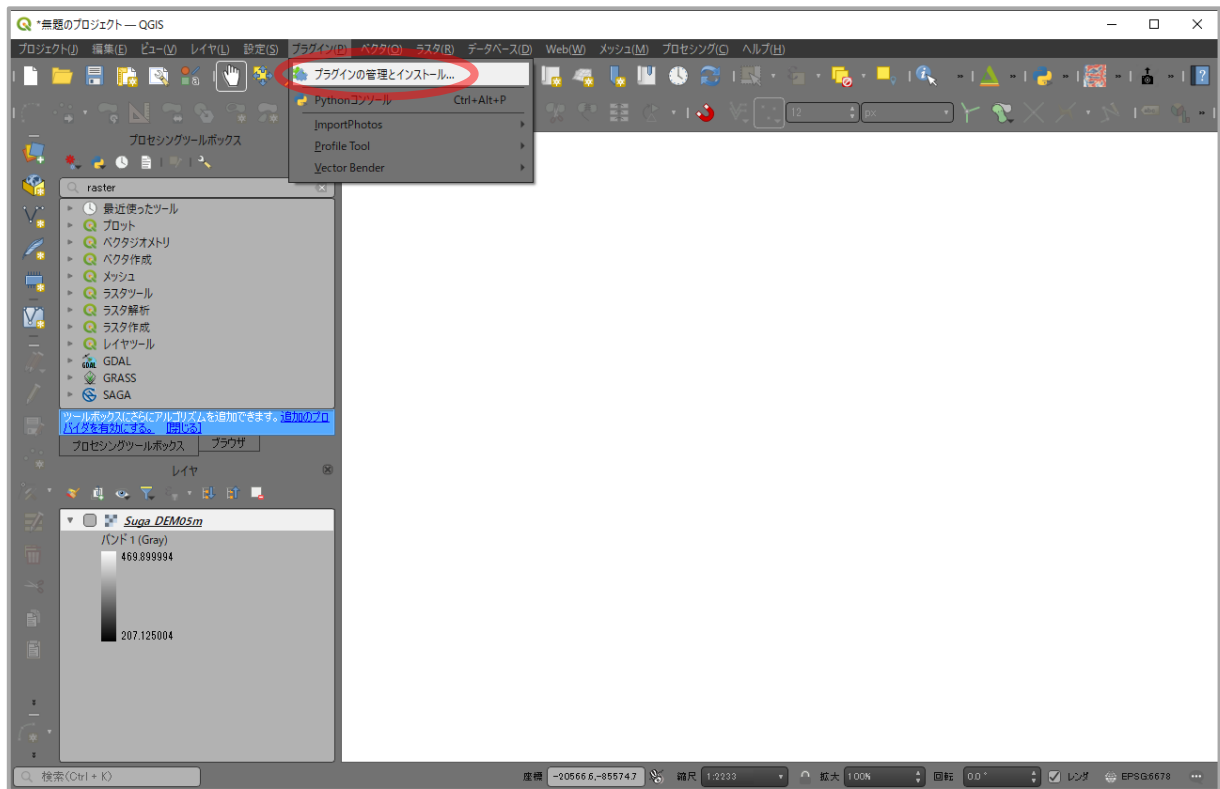


図 2.3.8 プラグインのインストール その 1

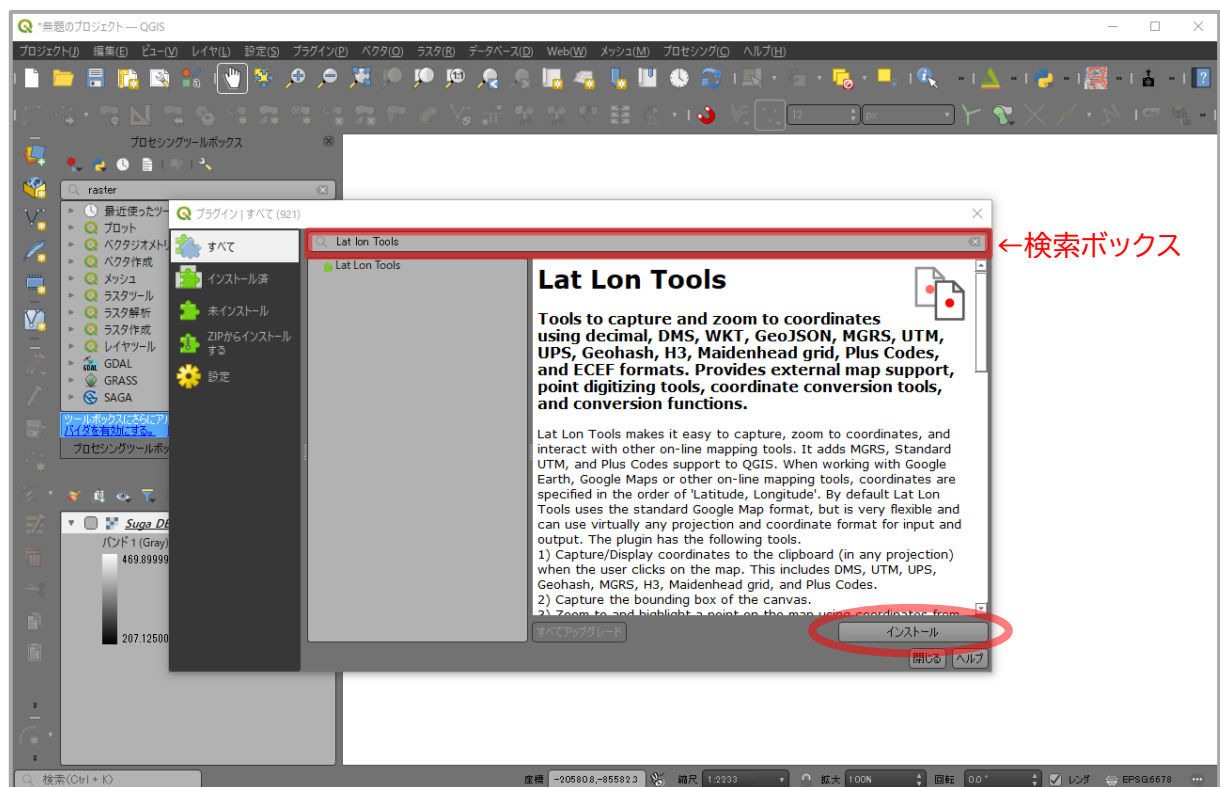


図 2.3.9 プラグインのインストール その 2

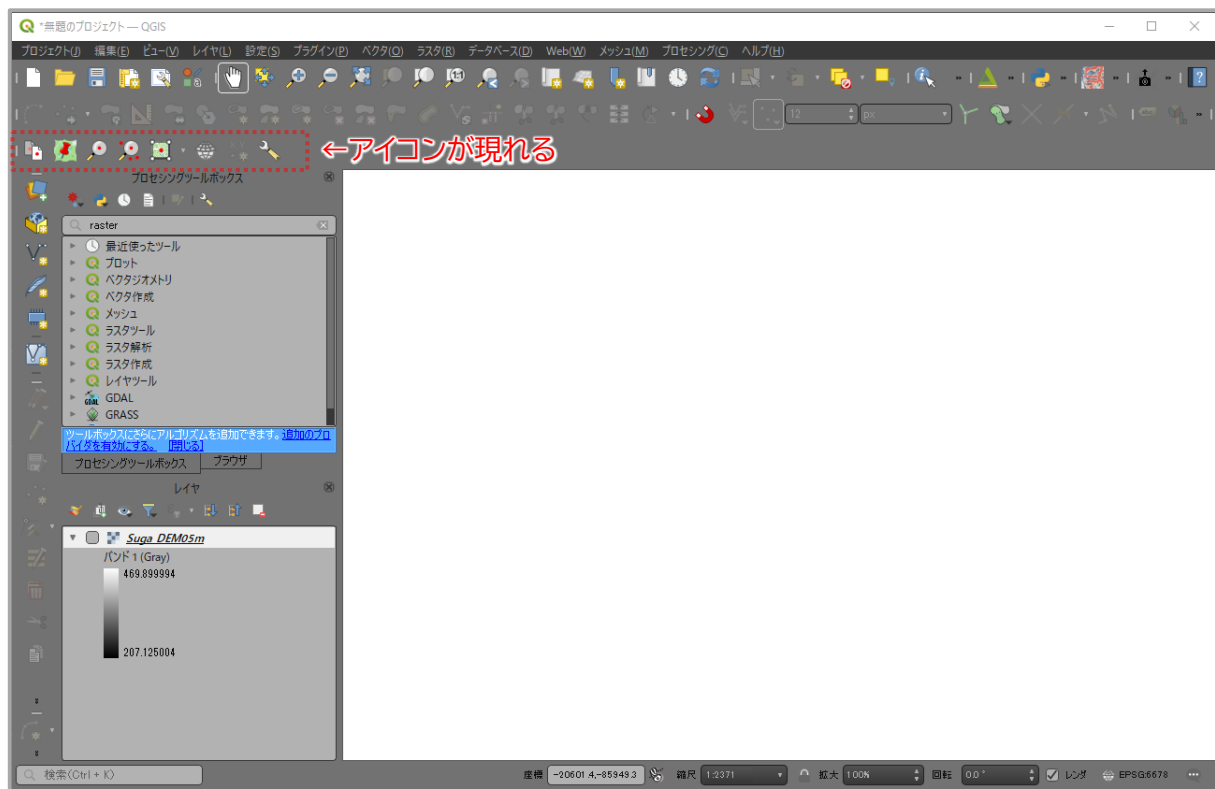


図 2. 3.10 プラグインのインストール成功後

2. 3. 4. CloudCompere のダウンロード・インストール

CloudCompere は無償の点群閲覧・編集ソフトで、本マニュアルでは主にドローンで撮影した写真から作成した点群データや地盤データとして用意した点群データの処理に使用します。

(1) ダウンロード・インストール

始めに、CloudCompare の Web サイト (<https://www.danielgm.net/cc/>) にあるダウンロードページにアクセスします。Beta リリース (最新版) と Stable リリース (安定版) があるため、どちらかを選択する必要があります。一般的に、ソフトウェアのリリースから長期が経過しており、より操作が安定しているのは安定版です。本マニュアルの手法は安定版 (バージョン 2.12.4) に基づいているため、安定版が掲載されているページの中ほどまで進みます。

安定版の掲載箇所を見つけたら、図 2. 3.11 に示す赤丸部分をクリックしたのち、図 2. 3.12 に示す赤丸部分をクリックし、Windows 64bit 版のインストーラー (拡張子: exe) をダウンロードします。

続いて、ダウンロードしたインストーラーをダブルクリックすると、インストールが開始されます。インストール時に画面に現れる言語は、すべて英語です。インストールに関する設定等についていくつか選択する画面が現れますが、規定値のまま次に進んでかまいません。

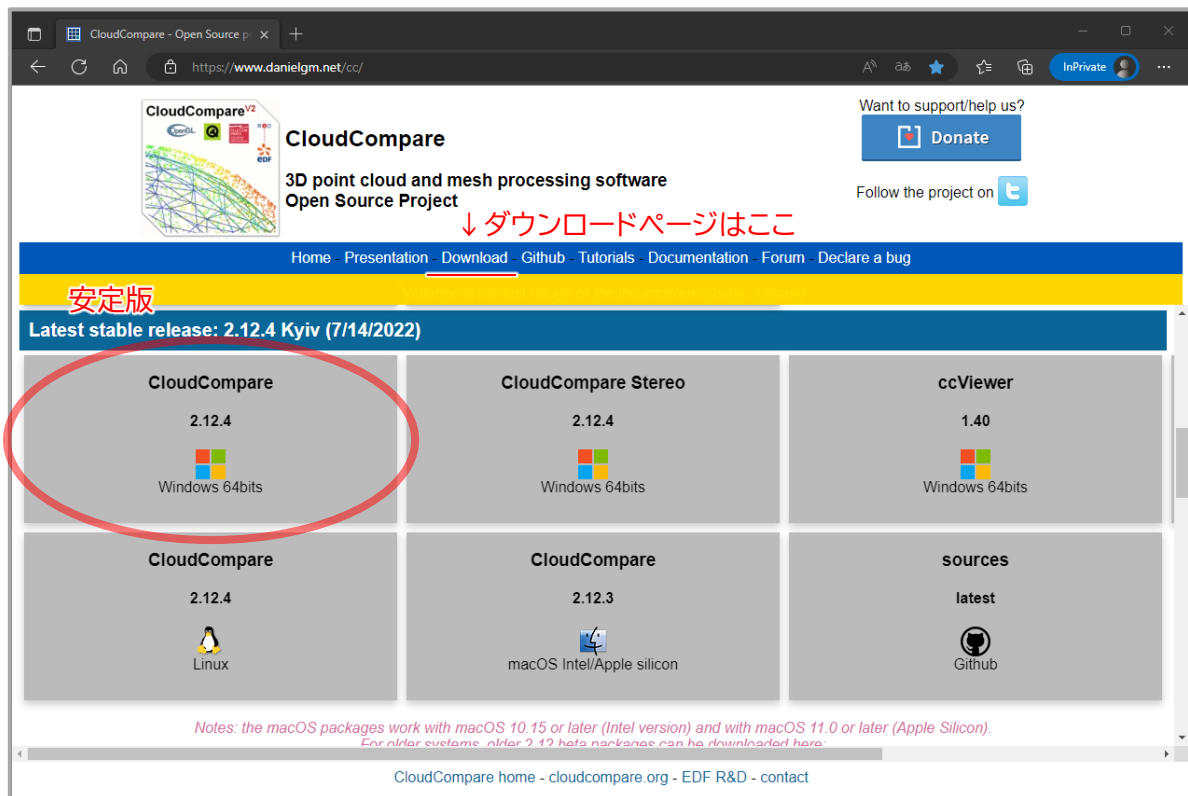


図 2. 3.11 CloudCompare のダウンロード その 1(2022 年 11 月時点)

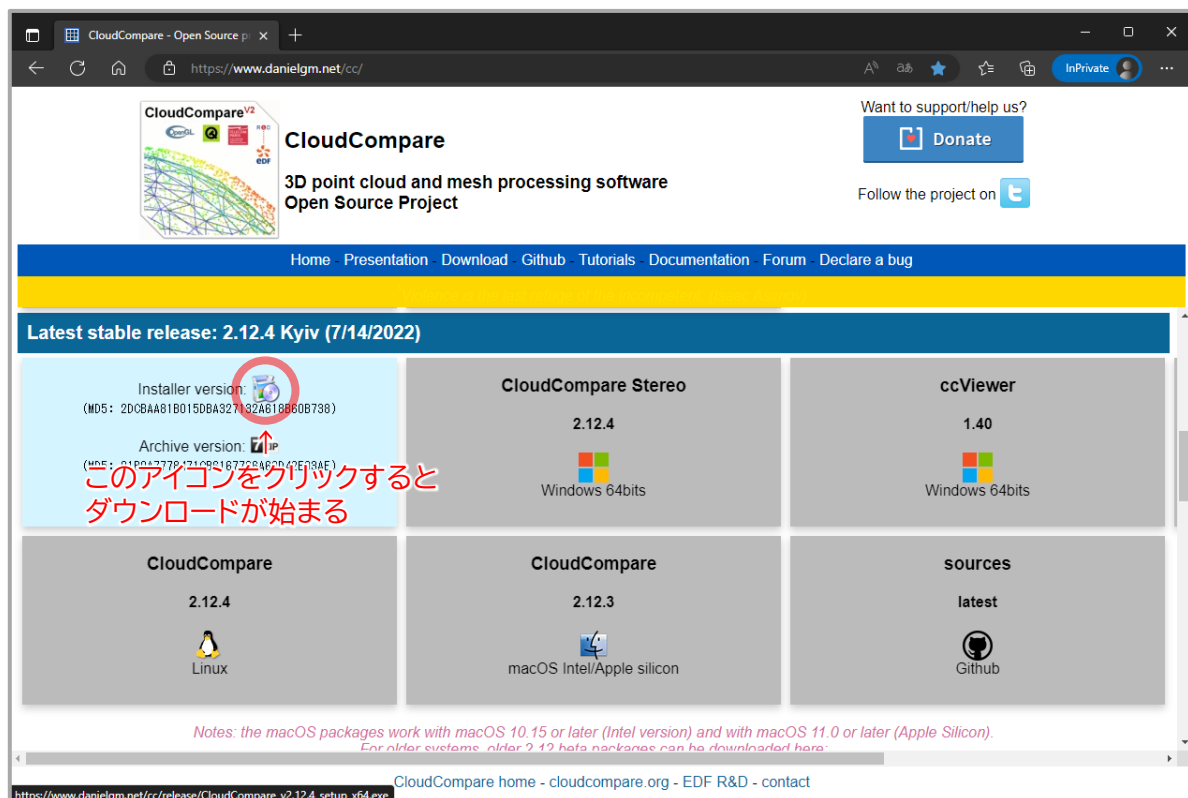


図 2. 3.12 CloudCompare のダウンロード その 2(2022 年 11 月時点)

(2) 日本語化

画面の表示を日本語化したい場合は、CloudCompare を起動し、図 2. 3.13 のとおりにしてください（ただし、すべての機能を日本語化することはできません）。

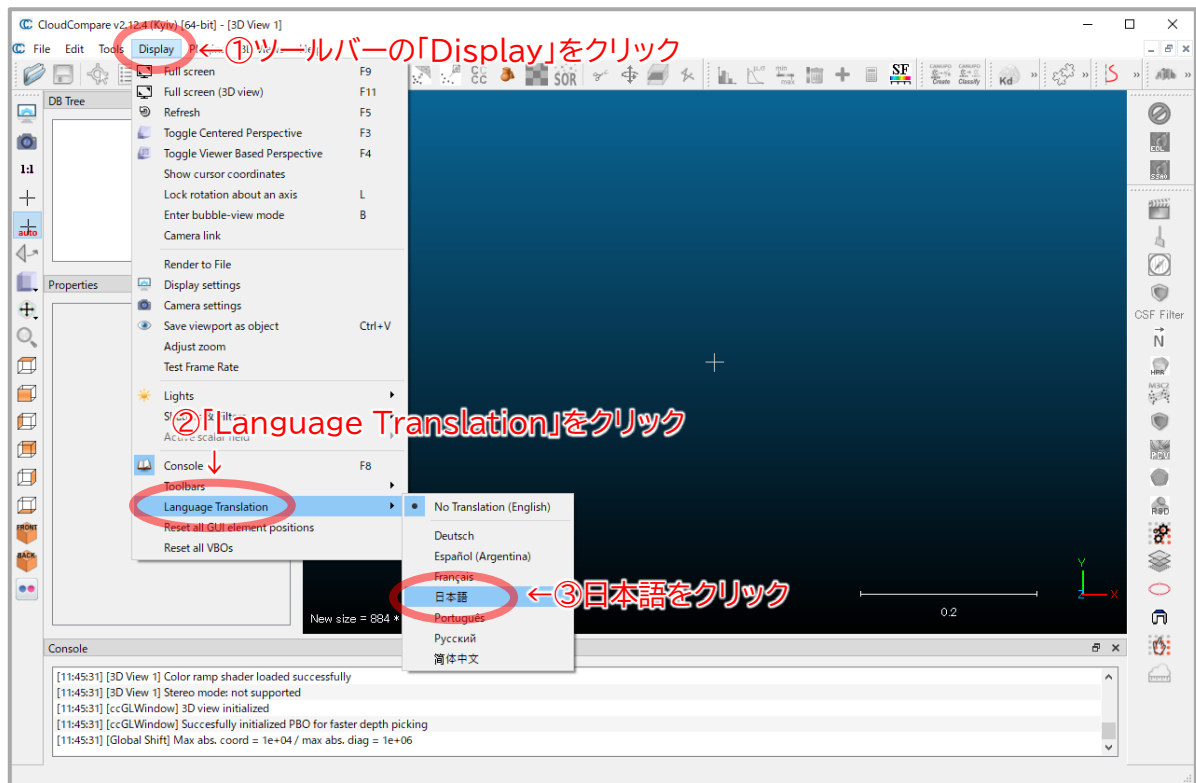


図 2. 3.13 CloudCompare の日本語化方法

2. 4. 汎用的な胸高直径推定式(暫定版)について

第 1 章で述べたように、UAV を活用した森林調査では超高密度の点群データが無ければ胸高直径推定式を作成する必要があります。

胸高直径推定式を作成する手法としては、本マニュアルの第 6 章 6. 2 に【参考】として掲載した手法が代表的であり、現地でのプロット調査が必須となります。そのため、ドローン写真による森林資源量調査が手軽とはいっても、ある程度林内に滞在しての調査が必要となってしまいます。

そこで、令和 2～4 年度に実施した「UAV による森林調査等実証実験業務」で実施したプロット調査の結果から、県内のスギ人工林で利用できる汎用的な胸高直径推定式を暫定的に作成しました。推定式は、プロット調査箇所毎の実測胸高直径平均値を目的変数とし、ドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザのいずれかの調査により算出した樹高・樹冠投影面積の平均値を説明変数とした次頁の式による非線形回帰分析を実施して作成しました。

$$\text{胸高直径} = a \times \text{樹高}^b \times \text{樹冠投影面積}^c$$

a・b・c…非線形回帰分析で導かれる係数

非線形回帰分析とは、予測したい変数（目的変数）とその予測したい変数を説明する変数（説明変数）とのあいだにある、非線形な関係を示す方程式（回帰式）を作成する統計解析処理です。ここでいう「関係」とは、胸高直径を推定する場合は基本的に「胸高直径が大きいほど樹高が大きい」「胸高直径が大きいほど樹冠投影面積が大きい」という傾向があることを指します。

作成に使用したプロット調査箇所的位置図を図 2. 4.1 に、調査結果として立木本数および胸高直径・樹高・樹冠投影面積の平均値を表 2. 4.1 に示します。プロット 1 箇所の面積は、200m²（＝半径約 8m の円）としました。この表のデータが、汎用的な胸高直径推定式（暫定版）の作成に使用したデータです。

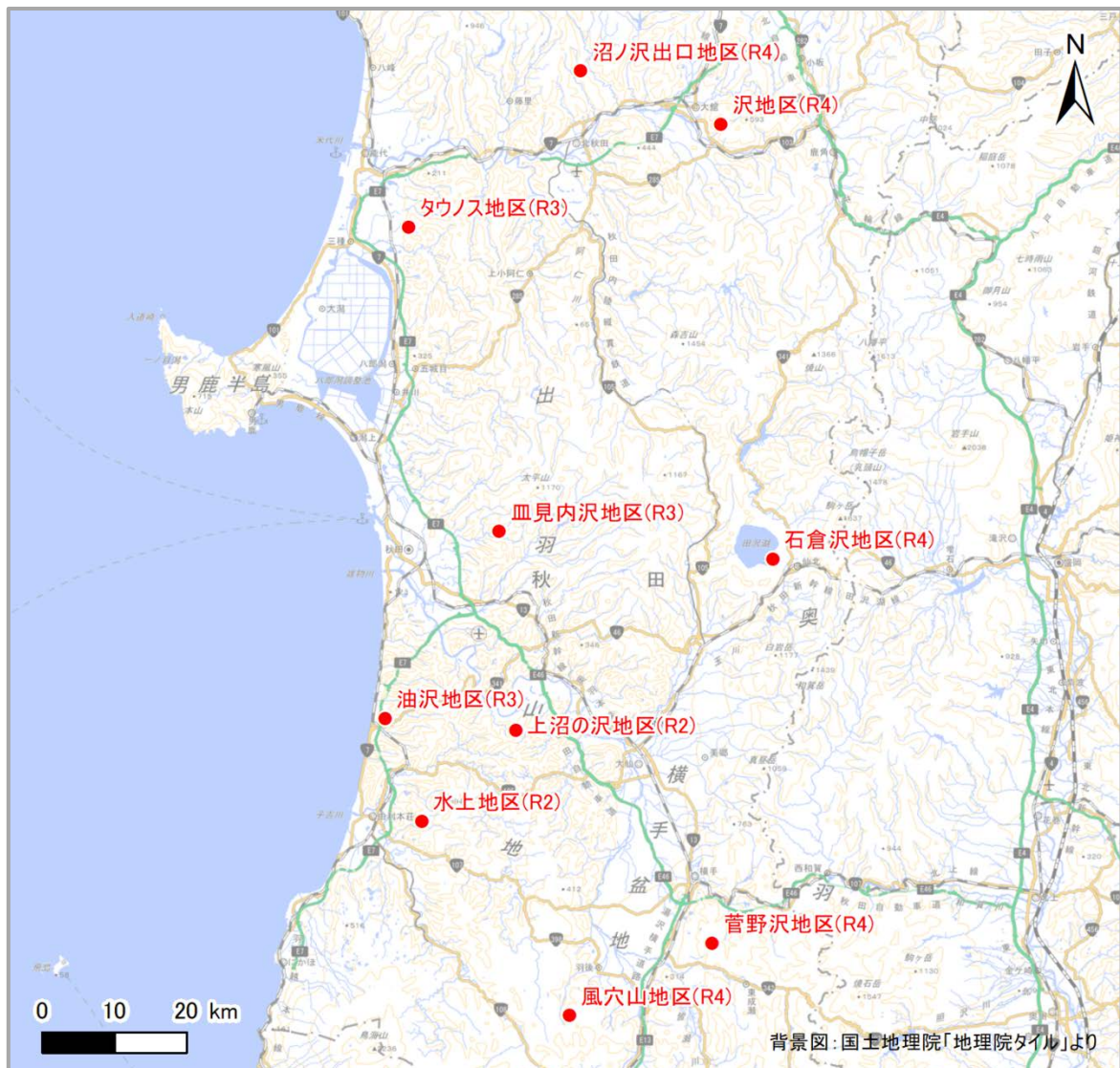


図 2. 4.1 令和 2～4 年度に実施したプロット調査箇所位置

表 2.4.1 令和2～4年度に実施したプロット調査の結果一覧

振興局名	地区名 ※0は実施年度	プロット No	林齢	スギ 本数	胸高直径(cm) ※実測	樹高(m) ※解析	樹冠投影面積 ※解析	解析種別
05 由利	水 上 (R 2)	P1	57	21	32.19	21.94	11.70	ドローンサ
05 由利	水 上 (R 2)	P2	58	24	29.38	21.58	9.56	ドローンサ
05 由利	水 上 (R 2)	P3	58	18	32.78	23.49	12.79	ドローンサ
05 由利	水 上 (R 2)	P4	58	23	26.87	17.72	10.70	ドローンサ
05 由利	水 上 (R 2)	P5	57	16	33.62	25.27	13.67	ドローンサ
05 由利	水 上 (R 2)	P6	57	10	41.10	27.85	18.68	ドローンサ
05 由利	水 上 (R 2)	P7	57	15	32.07	26.57	14.00	ドローンサ
06 仙北	上沼の沢(R2)	P1	66	20	33.65	29.80	10.48	ドローンサ
06 仙北	上沼の沢(R2)	P2	66	24	29.92	25.09	10.28	ドローンサ
06 仙北	上沼の沢(R2)	P3	65	21	32.05	25.93	13.29	ドローンサ
06 仙北	上沼の沢(R2)	P4	65	21	37.43	28.79	12.33	ドローンサ
03 山本	タウノス(R3)	P1	72	22	31.32	23.84	12.91	ドローンサ
03 山本	タウノス(R3)	P2	72	18	40.00	32.63	17.51	ドローンサ
03 山本	タウノス(R3)	P3	72	23	33.65	28.14	13.05	ドローンサ
03 山本	タウノス(R3)	P4	72	17	32.29	26.36	15.18	ドローンサ
04 秋田	皿見内沢(R3)	P1	80	15	40.93	29.46	20.82	無人ヘリサ
04 秋田	皿見内沢(R3)	P2	80	18	31.06	26.29	10.87	無人ヘリサ
04 秋田	皿見内沢(R3)	P3	63	20	33.80	27.81	18.23	無人ヘリサ
05 由利	油 沢 (R 3)	P1	70	13	44.77	26.95	19.29	ドローンサ
05 由利	油 沢 (R 3)	P2	70	16	37.31	27.14	17.67	ドローンサ
05 由利	油 沢 (R 3)	P3	70	15	35.27	25.46	12.53	ドローンサ
02 北秋田	沢 (R 4)	P1	73	13	28.00	23.91	12.41	ドローン写真
02 北秋田	沢 (R 4)	P2	74	11	31.27	30.35	10.98	ドローン写真
02 北秋田	沢 (R 4)	P3	74	13	35.55	31.07	11.79	ドローン写真
02 北秋田	沢 (R 4)	P4	74	16	32.38	32.23	19.18	ドローン写真
02 北秋田	沼ノ沢出口(R4)	P1	59	35	29.31	28.24	9.61	ドローンサ
02 北秋田	沼ノ沢出口(R4)	P2	59	16	31.10	26.53	11.99	ドローンサ
02 北秋田	沼ノ沢出口(R4)	P3	59	25	27.78	23.07	9.07	ドローンサ
06 仙北	石倉沢 (R4)	P1	60	27	29.17	27.92	7.15	無人ヘリサ
06 仙北	石倉沢 (R4)	P2	60	36	28.03	27.60	7.70	無人ヘリサ
06 仙北	石倉沢 (R4)	P3	60	35	21.70	19.59	5.54	無人ヘリサ
07 平鹿	菅野沢 (R4)	P1	59	7	26.51	18.26	12.62	ドローン写真
07 平鹿	菅野沢 (R4)	P2	59	15	28.19	19.93	11.53	ドローン写真
07 平鹿	菅野沢 (R4)	P3	59	12	37.59	22.08	15.86	ドローン写真
07 平鹿	菅野沢 (R4)	P4	59	13	31.56	20.47	12.60	ドローン写真
08 雄勝	風穴山 (R4)	P1	68	21	29.81	26.59	11.91	ドローン写真
08 雄勝	風穴山 (R4)	P2	68	16	37.22	31.11	12.81	ドローン写真
08 雄勝	風穴山 (R4)	P3	68	19	38.55	29.78	13.40	ドローン写真

※胸高直径・樹高・樹冠投影面積の値はすべてプロット調査箇所毎の平均値

汎用的な推定式を作成するにあたり、地域によってスギの成長に差があると考えられることから、鹿角を除く県内 7 地域振興局管内の 38 箇所で調査を実施しました。そのうえで、県内においてスギ人工林の特性の違いによって推定式を分けて作成する必要があるのか検討するため、胸高直径・樹高・樹冠投影面積に地域差があるのか検証しました。

検証の結果が、図 2.4.2・図 2.4.3 です。図には全プロットにおける胸高直径平均値・樹高平均値・樹冠投影面積平均値および林齢・立木本数の関係を示しました。胸高直径－樹高の関係をみると、北秋田・山本・雄勝で他振興局より樹高が大きい傾向がみられました（図 2.4.2 左）。これは主にこの 3 地区で林齢が高いからという一般的な傾向を反映したものであり（図 2.4.2 右）、地域差とはいえませんでした。さらに、胸高直径－樹冠投影面積については、全体として胸高直径が大きいほど樹冠投影面積も大きいという一般的な傾向を示していますが、同じ振興局管内でもばらつきが大きいという結果でした（図 2.4.3 左）。樹冠投影面積－立木本数の関係については、プロット調査箇所の大きさが同一なため、立木本数が多い＝立木密度が大きいと考えると、立木密度が大きいほど樹冠投影面積が小さいという一般的な傾向を示しており、こちらも同じ振興局管内であってもばらつきが大きいという結果でした（図 2.4.3 右）。

以上をまとめると、プロット調査の結果からは地域差を見いだすことは困難という結論に至りました。このような結論となった要因としては、38 箇所という調査量では地域差を見いだすには少ないこと、地域的な生育環境の差（気温や積雪）だけでなくスギの成長には個々の森林の管理状態も大きく影響していることが考えられます。よって、現時点では地域によって推定式を分けて作成することは適当でないと判断しました。

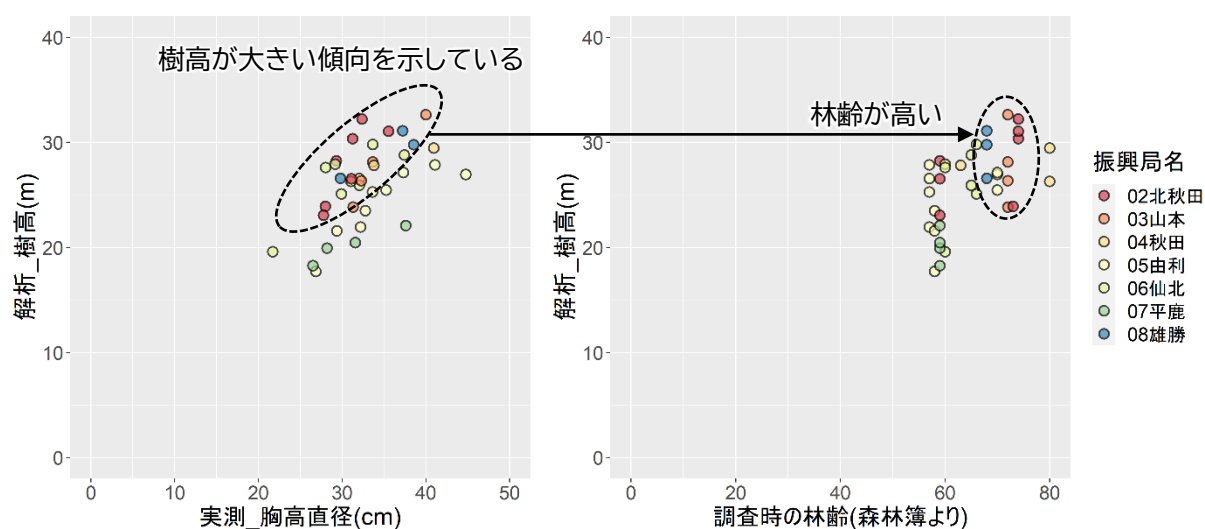


図 2.4.2 プロット調査箇所における胸高直径と樹高および林齢と樹高の関係

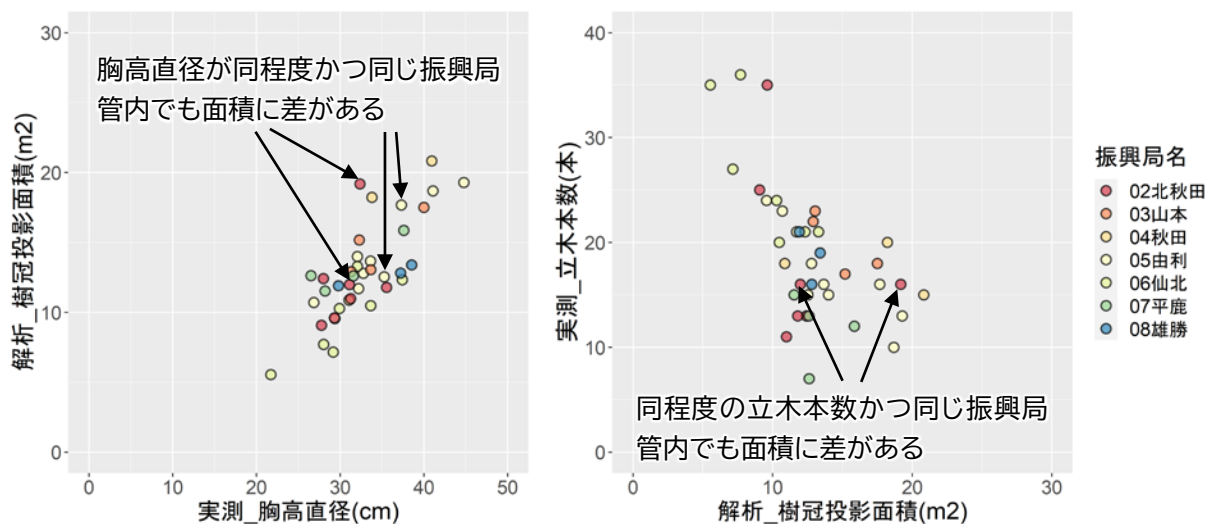


図 2.4.3 プロット調査箇所における胸高直径と樹冠投影面積および樹冠投影面積と立木本数の関係

そこで、38 箇所のデータから前述の非線形回帰分析によって式を 1 つ作成し、これを秋田県のスギ人工林における汎用的な胸高直径推定式（暫定版）としました。その式は、以下のとおりです。

<秋田県における汎用的な胸高直径推定式（暫定版）>

$$\text{胸高直径} = 4.920 \times \text{樹高}^{0.322} \times \text{樹冠投影面積}^{0.335} \dots (1)$$

式（1）の精度を検証するため、図 2.4.4～図 2.4.11 に以下の内容を示しました。このマニュアルがドローン写真を対象としているため、比較対象である式（2）および式（1）・式（2）で胸高直径の推定に使う樹高・樹冠投影面積はドローン写真による調査の成果を使用しました。

令和 3・4 年度に実施したプロット調査箇所の単木毎に、

- ・式（1）によって推定した胸高直径と実測胸高直径を比較
- ・プロット調査を実施して調査地独自に作成した推定式（作成方法は第 6 章に従う）…（2）による推定胸高直径と実測胸高直径を比較

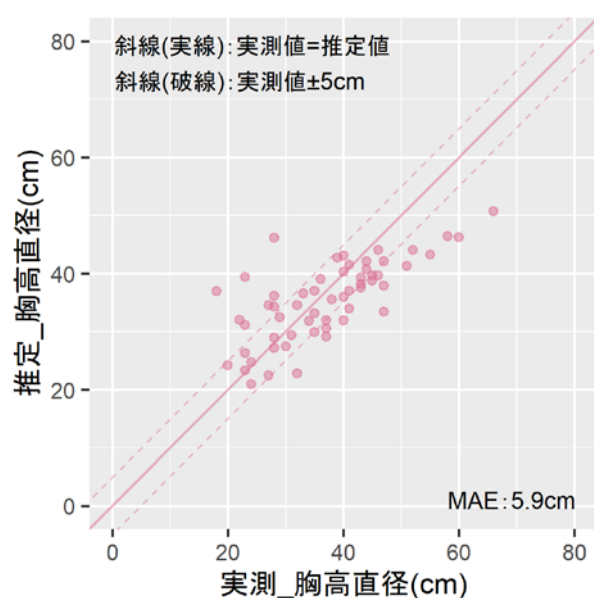
図中に引いた実線に近いほど、実測値と推定値が近いことを示します。また上記のどちらにも、MAE（平均絶対誤差：真値と予測値の誤差の絶対値を平均した値／ここでの真値＝プロット調査による実測値、予測値＝推定式による値）を示しました。式（1）の MAE が式（2）の MAE より大きければ、汎用的な推定式は調査地独自に作成した推定式の精度に劣っていることを示します。

結果として、風穴山地区を除く 7 地区では式（1）と式（2）の MAE の差は 1cm 程度に収まっていた。すなわち、多くの地域において、汎用的な胸高直径推定式の精度は調査地独自に作成

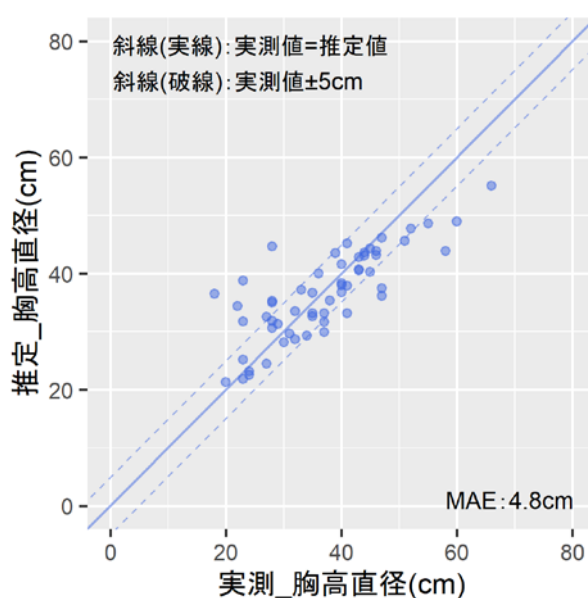
した推定式に大きく劣ってはいないといえます。一方で、風穴山地区で式(1)のMAEが式(2)のMAEより2cm以上大きくなったのは、少なくとも今回38箇所の調査結果から作成した式(1)では当該地区のスギ立木特性を捉えられていないためと考えられ、調査地独自の推定式作成が必要な地域が出てくることを示唆しているといえます。

ここで注意が必要な点が、式(1)と式(2)のどちらであっても実測値と推定値の乖離が10cmを超えるような立木や、MAEが5~7cm程度と大きい地区がみられることです。前述のとおり、非線形回帰分析による推定式は、あくまでも調査地で「胸高直径が大きいほど樹高が大きい」「胸高直径が大きいほど樹冠投影面積が大きい」といった一定の傾向があること前提としています。例えば本業務で対象とした菅野沢地区は、積雪の影響で先折れしているスギが多くみられました。このような立木は、胸高直径が大きかったとしても樹高が小さくなり、「胸高直径が大きいほど樹高が大きい」という全体的な傾向から外れます。さらに、このような立木が多くなれば、推定式作成に使用する立木全体において「胸高直径が大きいほど樹高が大きい」という傾向が不明瞭になります。

すなわち、全体的な傾向から外れる立木がある場合、あるいは調査した立木の胸高直径・樹高・樹冠投影面積をみても傾向が不明瞭な場合(一定の傾向がみられない場合)は、汎用的な式であれ、調査地でプロット調査をして独自に作成した式であれ、胸高直径の推定精度が低くなってしまいます。この点をふまえたうえで、汎用的な推定式を使用してもよいか、さらにはドローンによる森林資源量調査に適した地域なのか判断してください。

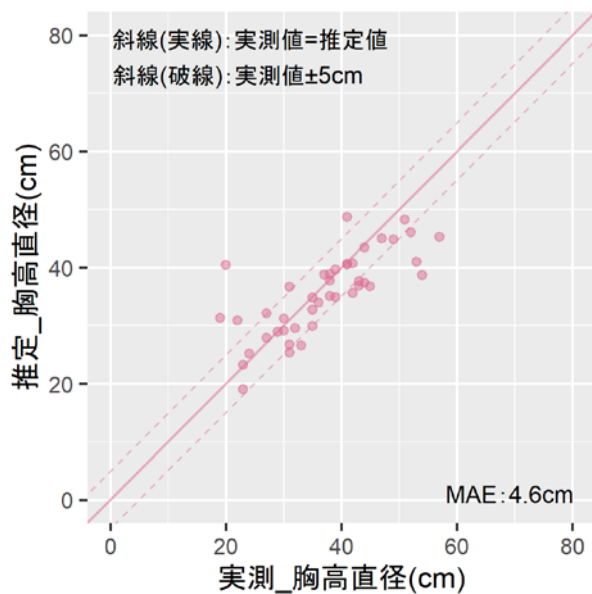


式(1)[汎用]

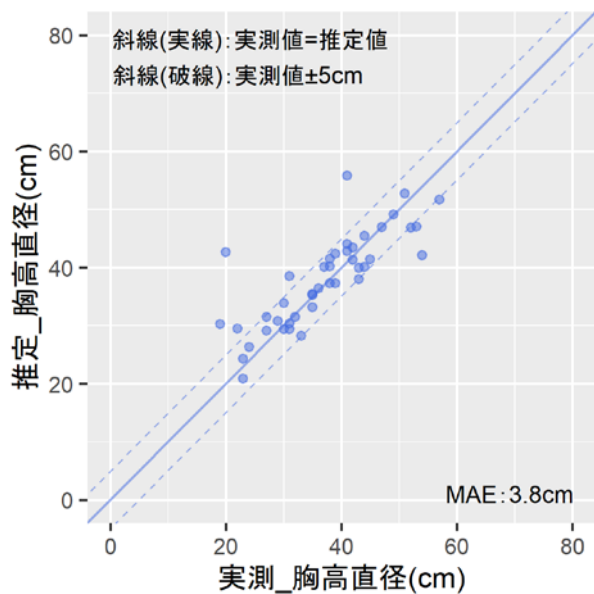


式(2)[調査地独自]

図 2.4.4 胸高直径の推定結果(R3 タウノス)

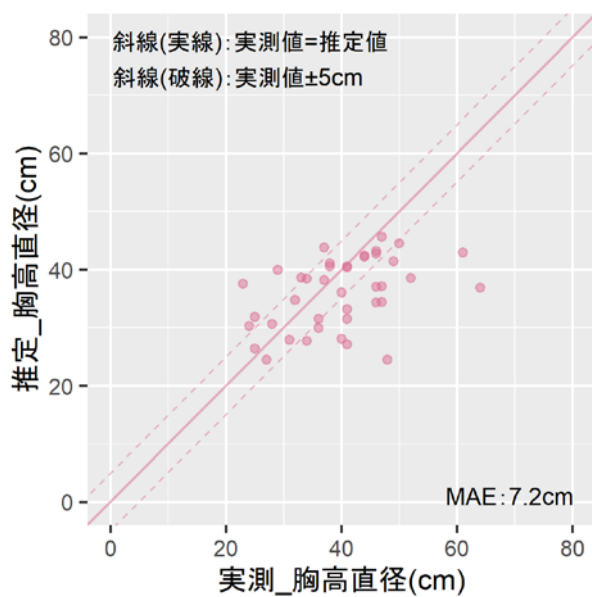


式(1)[汎用]

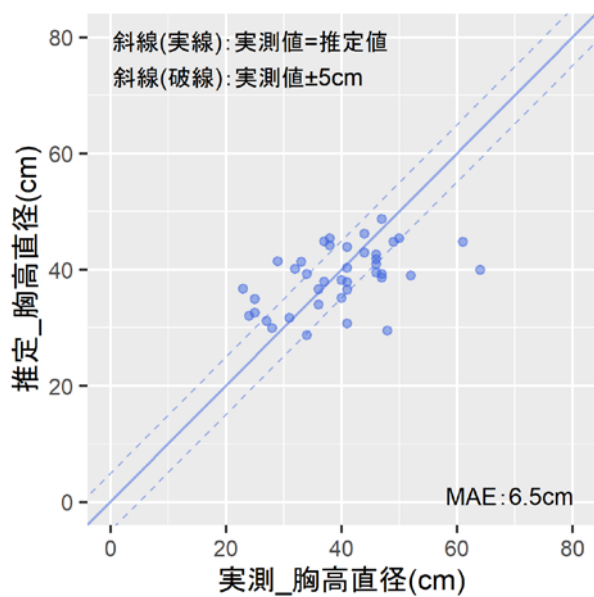


式(2)[調査地独自]

図 2.4.5 胸高直径の推定結果(R3 皿見内沢)

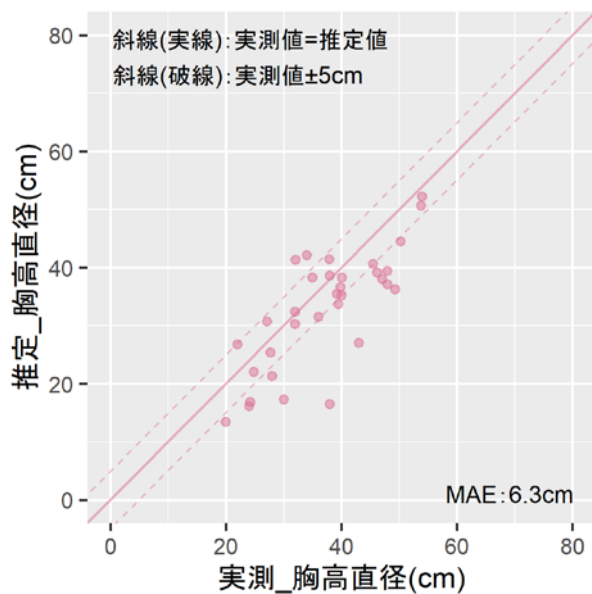


式(1)[汎用]

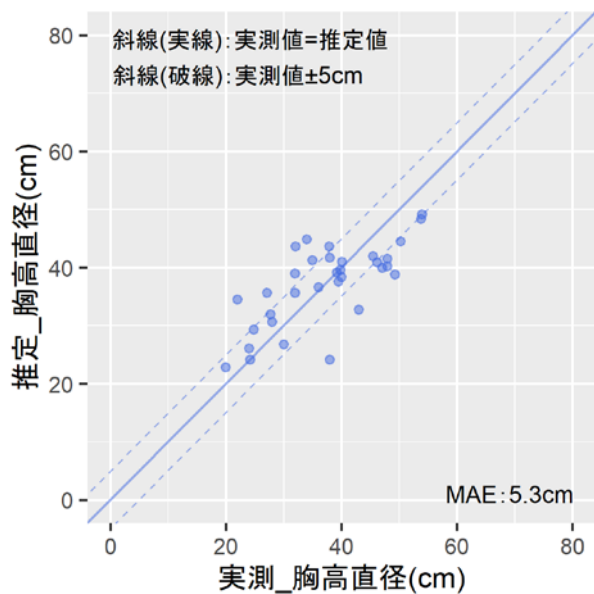


式(2)[調査地独自]

図 2.4.6 胸高直径の推定結果(R3 油沢)

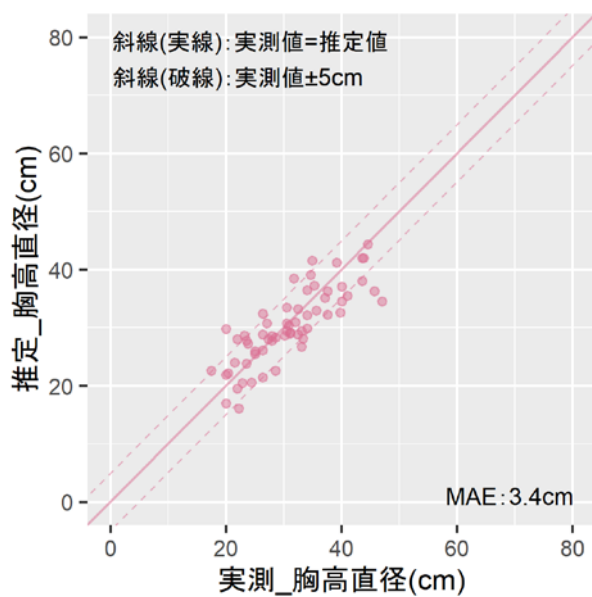


式(1)[汎用]

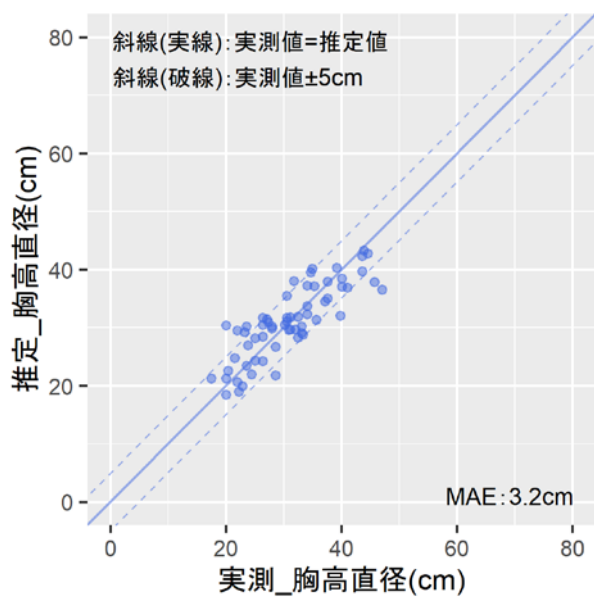


式(2)[調査地独自]

図 2.4.7 胸高直径の推定結果(R4 沢)

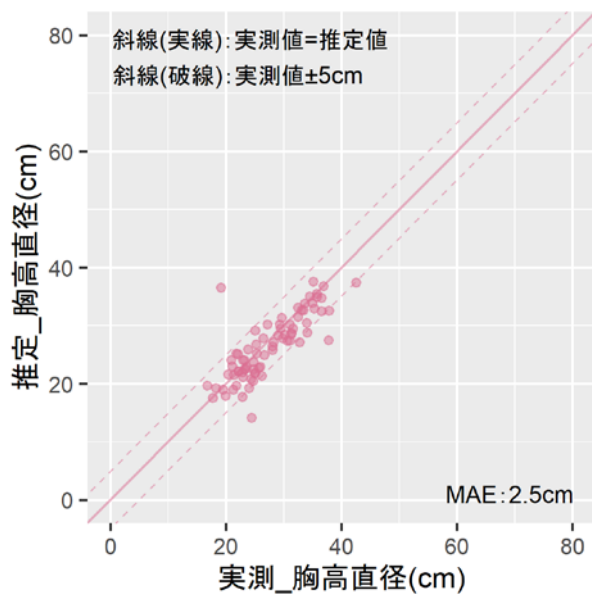


式(1)[汎用]

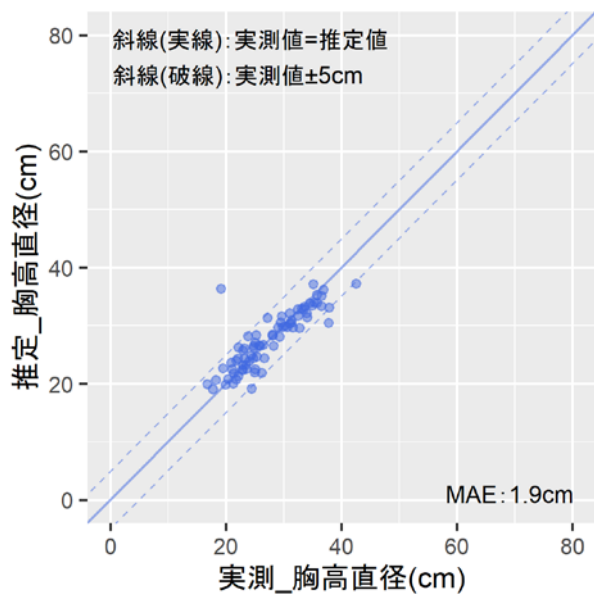


式(2)[調査地独自]

図 2.4.8 胸高直径の推定結果(R4 沼ノ沢出口)

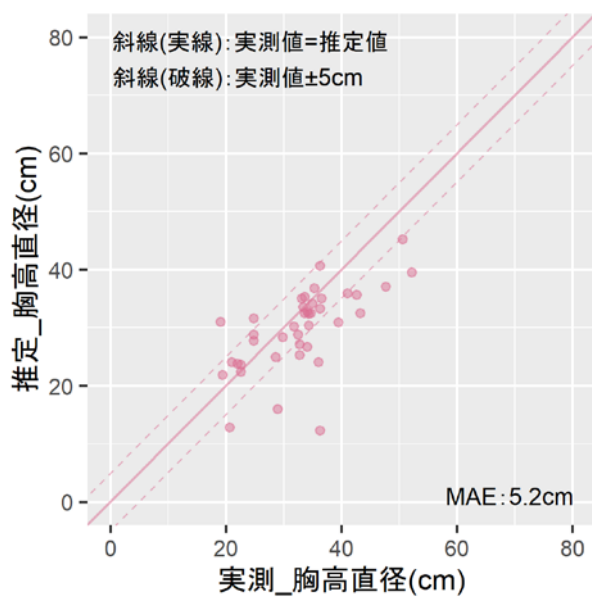


式(1)[汎用]

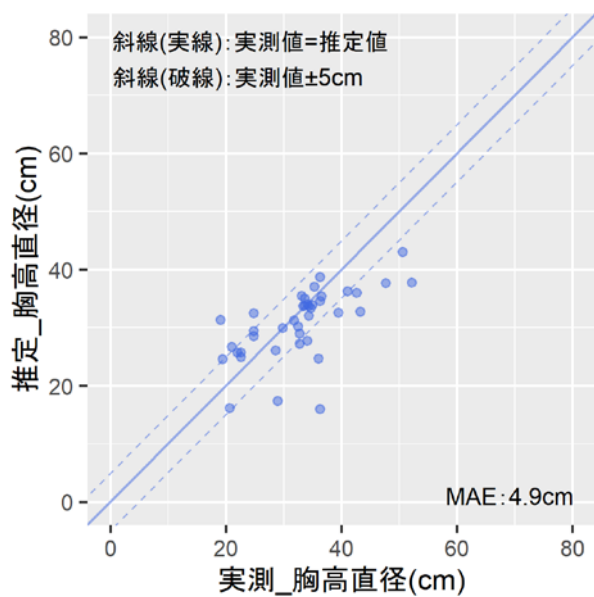


式(2)[調査地独自]

図 2.4.9 胸高直径の推定結果(R4 石倉沢)

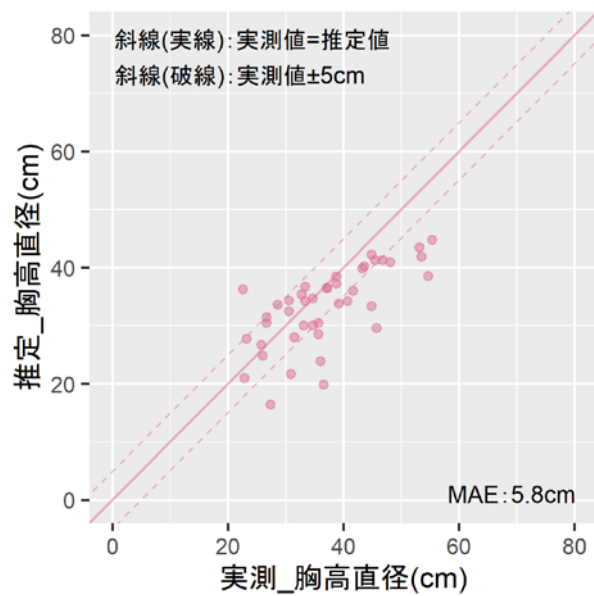


式(1)[汎用]

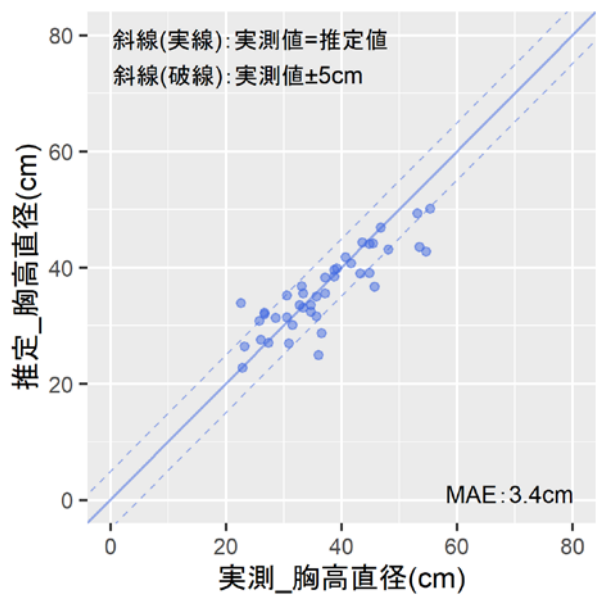


式(2)[調査地独自]

図 2.4.10 胸高直径の推定結果(R4 菅野沢)



式(1)[汎用]



式(2)[調査地独自]

図 2. 4.11 胸高直径の推定結果(R4 風穴山)

3. 点群データの作成

3.1. ドローンによる写真撮影の実施

樹高・樹冠投影面積の算出に必要な点群データを作成するためには、ドローンで飛行経路上および隣接コース間で一定の割合で重複させた写真を撮影することが必要です。この章では、その撮影に必要な作業について説明します。

なお、機体やカメラ、操縦に使用するアプリそのものの取り扱い（プロペラやカメラの等の取り付け方、操縦・操作方法など）については、林野庁の『UAV 立木調査マニュアル』を始めとするマニュアル類や、インターネット上でも情報が充実しているため、ここでは割愛します。また、国土交通省等で定めているドローンの飛行に関する規制は、基本的に理解しているものとして説明します。

3.1.1. 事前調査の実施

写真撮影を実施するために、あらかじめ調査地の情報を収集します。収集すべき情報とその入手先は、主に表 3.1.1 のとおりです。

表 3.1.1 事前調査で収集すべき情報

項目	収集の理由	入手先の例
飛行禁止区域の位置	撮影範囲および離着陸予定地点が飛行禁止区域に該当していないか調査するため	<ブラウザ> ・DJI「GEO 区域マップ」 ・SORAPASS（要ログイン） ・国土理地理院「地理院地図」 <アプリ> ・ドローンフライトナビ
撮影範囲および離着陸予定地点の地形や標高	離着陸場所や飛行高度を検討するため	国土地理院「地理院地図」 Google Earth その他既存の地形図
送電線や風力発電といった構造物の位置	飛行時に障害となるものがないか検討するため	国土地理院「地理院地図」 Google Map（写真） その他既存の地形図

いずれの情報も重要ですが、撮影範囲および離着陸予定地点の地形や標高の情報は、次項 3.1.2 で自動飛行用コースを作成する際に特に重要です。例えば、国土地理院が公開している「地理院地図」(<https://maps.gsi.go.jp/>) では、簡単に作図をしたり、断面図を描いたりすることができます(図 3.1.1)。離陸予定地点(操縦者のいる場所)から調査範囲の奥の方まで見通せるか、見通すためには飛行高度を何 m にすればよいかといったことを検討する場合に役立つと考えられます。

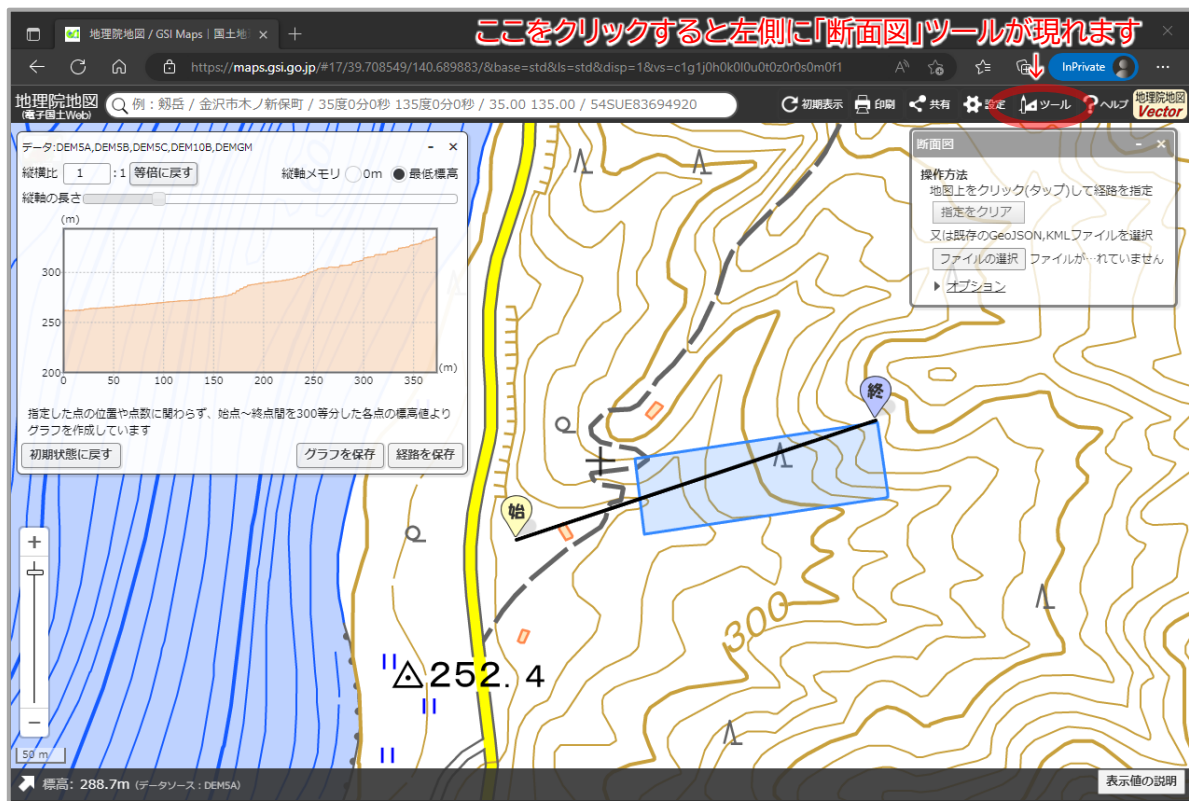


図 3.1.1 地理院地図での断面図作成例

3.1.2. 自動飛行用コースの作成

自動飛行用コースの作成および作成したコースに従った自動飛行は、基本的にアプリによって実施します。代表的なアプリは、表 3.1.2 のとおりです。

表 3.1.2 代表的な自動飛行アプリ

アプリ名	提供元	導入費用	備考
DJI GS Pro	DJI	無料	<u>iOS のみ対応</u> Mavic 2 シリーズ、Mavic 2 Enterprise シリーズ、Mavic Pro、Phantom 3 シリーズ、Phantom 4 シリーズ、Inspire 1・2、Matrice 100、Matrice 200 シリーズ、Matrice 600 シリーズに対応
DJI Pilot	DJI	無料	<u>iOS・Android に対応</u> Mavic 2 Enterprise シリーズ、Phantom 4 RTK、Matrice 200 シリーズ、Matrice 600 Pro に対応
DJI Pilot 2	DJI	無料	Mavic 3 Enterprise や Matrice 300 RTK、Matrice 30 のスマート送信機専用
Litchi for DJI Drones ^{※1}	VC Technology	4,000 円 ^{※2} 3,500 円 ^{※3}	<u>iOS・Android に対応</u> Mavic 3 には非対応 ^{※4}
Pix4Dcapture ^{※1}	Pix4D	無料	<u>iOS・Android に対応</u> DJI・Parrot・Yuneec のドローンに対応（ただし、DJI Mavic Air 2・Mavic 2 Zoom・Mavic 3 シリーズ、Phantom 4 RTK、Matrice 300 RTK には非対応 ^{※4} ）

※1 ドローンメーカー純正のアプリではない

※2 2023 年 1 月時点の価格（iOS 版）

※3 2023 年 1 月時点の価格（Android 版）

※4 2023 年 1 月時点

使用するアプリによって、見た目や操作方法が異なりますが、設定すべき項目はおおむね共通しています。そこで、ここでは点群データ作成のための写真撮影を自動飛行で実施するにあたって、設定すべき項目と推奨される設定値を表 3.1.3 にまとめました。表には、設定の違いによる撮影枚数の目安も併せて記載しました。さらに、例として DJI GS Pro の設定画面を図 3.1.2 に示します。

なお、使用するアプリによっては表にある項目の一部について設定の必要がない場合や設定内容の一部が選択できない場合もありますが、ご了承ください。

表 3.1.3 自動飛行にあたって設定すべき主な項目

設定項目	選択可能な設定	推奨される設定
カメラ方向	コースと並行 コースと垂直 進行方向に沿う	コースと並行
撮影モード	ホバリング撮影 等時間間隔で撮影 等距離間隔で撮影	等時間間隔で撮影
撮影間隔（撮影モード）	「等時間間隔で撮影」を選択した場合に手動で設定する／オーバーラップ率等に合わせて自動で設定される	4.0 秒程度（手動で設定する場合）
飛行速度	「等時間間隔で撮影」を指定した場合は自動で計算される／手動で設定する	3.0～8.0m/s 程度（手動で設定する場合）
飛行高度（高度）	地面・水面から 150m 未満という規制を超えないよう適宜設定	左同
飛行経路上のオーバーラップ率（オーバーラップ率 [OL 率]）	10～99%	90%
飛行経路間のオーバーラップ率（サイドラップ率 [SL 率]）	10～99%	80%
ジンバルピッチ	-90° ～0° （真下=-90° ）	-90°
ミッション完了時動作	自動帰還（Return to Home） ホバリング（タスクを終了） 自動着陸（着地） はじめの位置に戻り、ホバリング	ホバリング（タスクを終了）
【参考】OL 率・SL 率・飛行高度（離陸地点から一定の場合）による撮影枚数目安		
OL 率 90%・SL 率 <u>75%</u> ・高度 <u>120m</u> 場合		約 50 枚／2.0ha
OL 率 90%・SL 率 <u>80%</u> ・高度 <u>120m</u> 場合		約 80 枚／2.0ha
OL 率 90%・SL 率 <u>80%</u> ・高度 <u>145m</u> 場合		約 60 枚／2.0ha

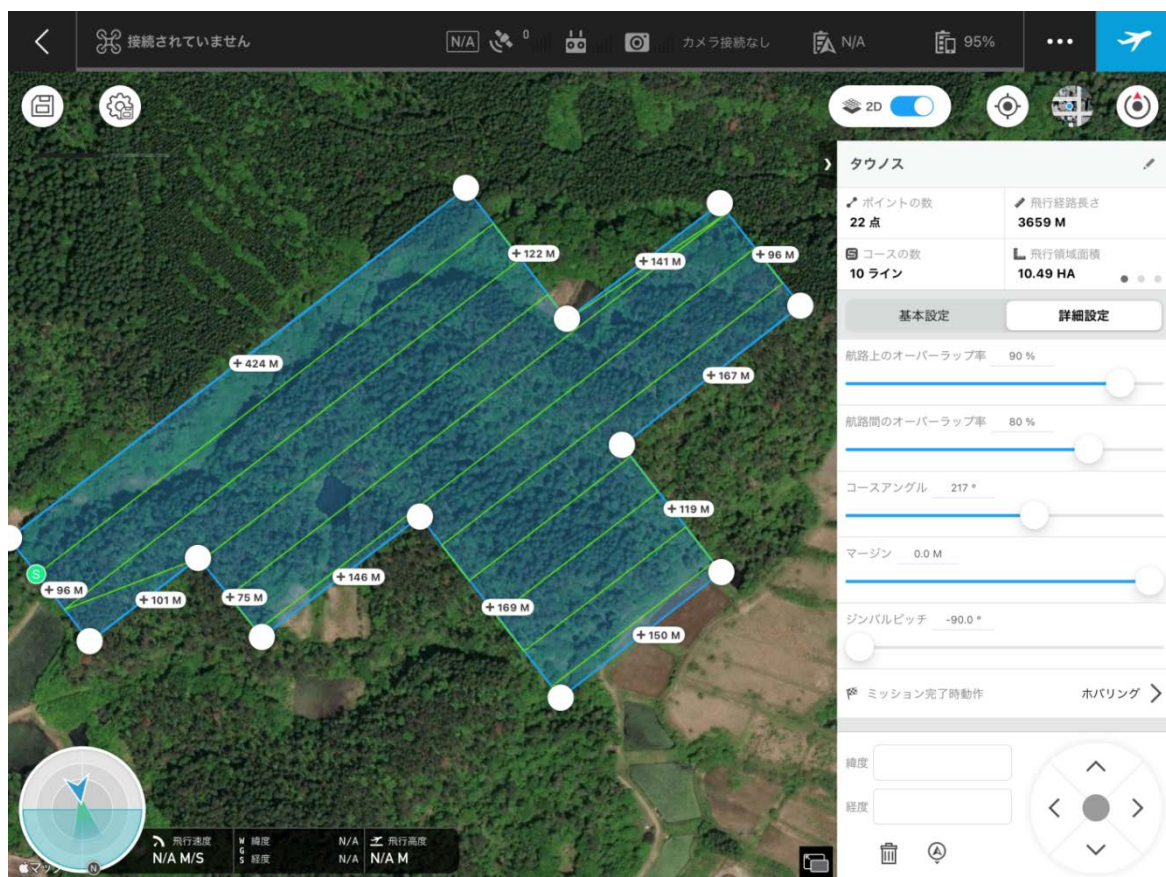
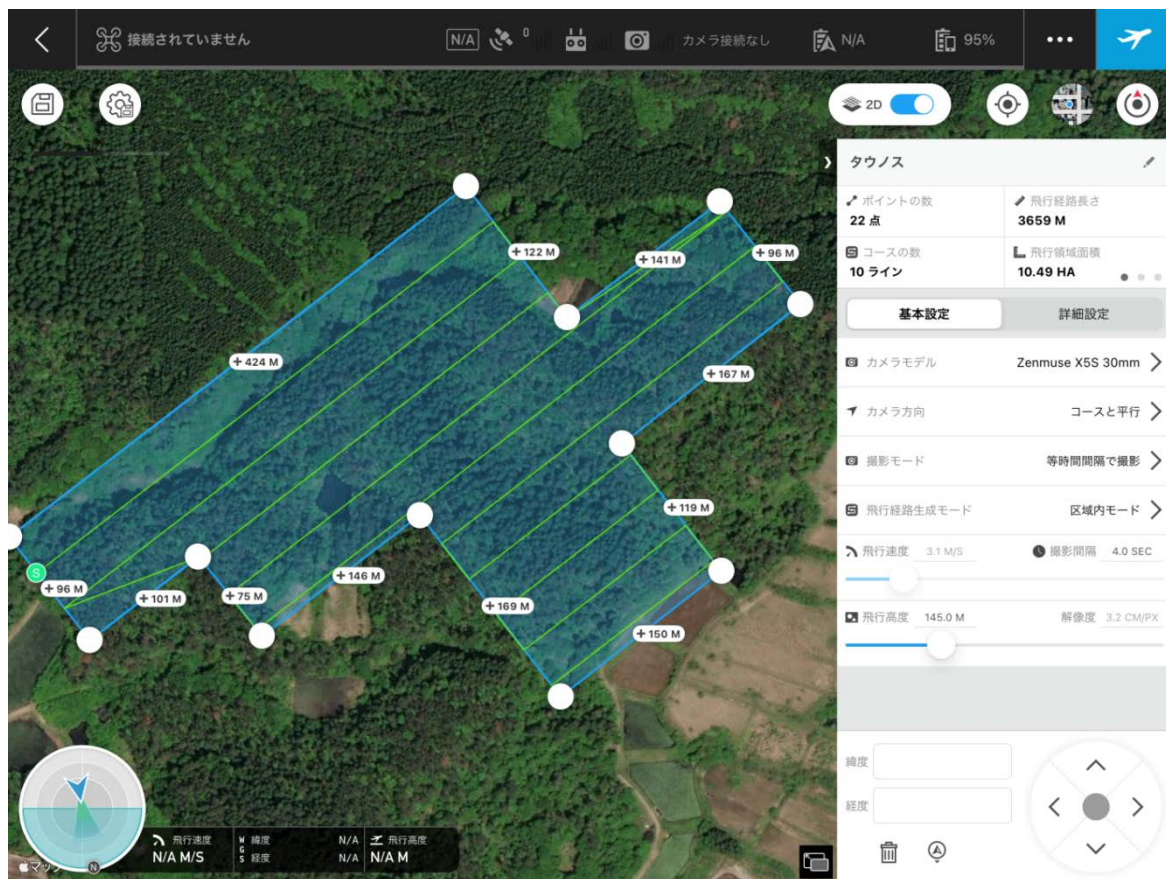


図 3.1.2 自動飛行アプリの画面例(DJI GS Pro)

3.1.3. 撮影の実施

前項 3.1.2 で作成した自動飛行用コースに従い、写真撮影を実施します。ドローンは GNSS から位置情報を取得し、機体自身の位置を把握した安定的な飛行や撮影した写真への位置座標（水平位置・高度）の付与を実現しています。そのため、作成した点群データやオルソ画像も位置座標を持っており、既存の航空レーザ測量などによる地盤データと合わせて解析をすることが可能になります。

しかしながら、第 2 章 2.2 で述べた RTK 測位に対応していないドローンは GNSS 受信機の精度が十分でなく、特に高度の精度が悪いとされています。すなわち、ドローンで撮影した写真から作成される点群データやオルソ画像も、実際の位置からずれてしまうことになります（図 3.1.3）。

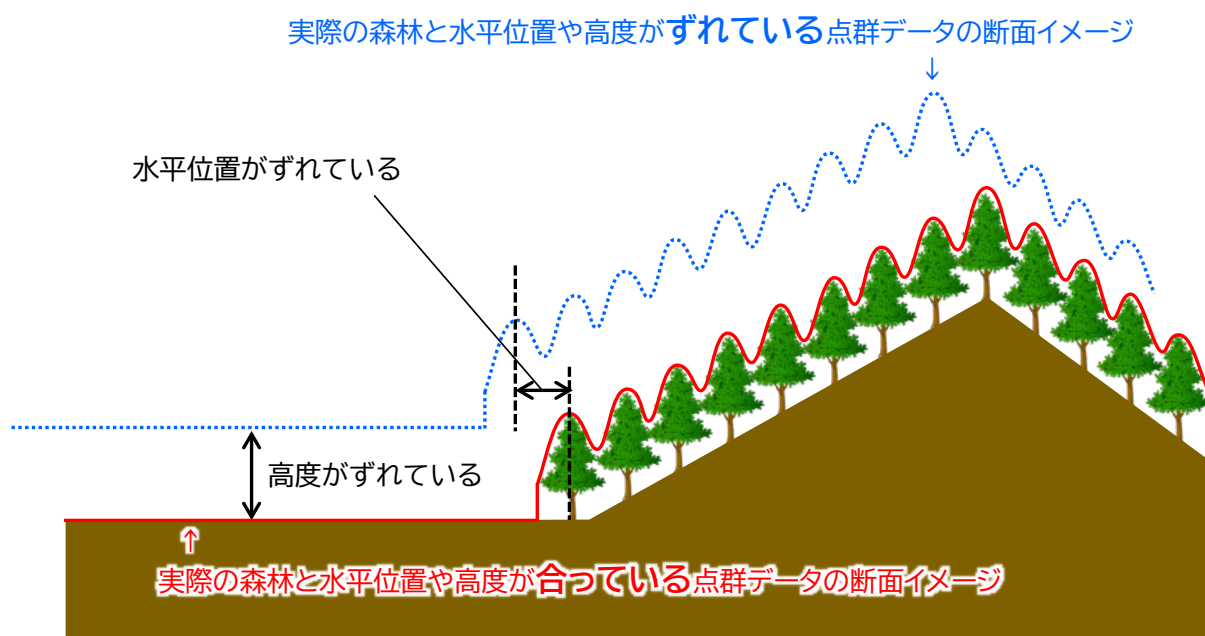


図 3.1.3 位置座標の精度が十分でない写真から作成したデータに生じるズレのイメージ

既存の地盤データ（＝位置が正確）と合わせて解析をするには、この点を補正する必要があります。そのため撮影時には、あらかじめ水平位置や標高を正確に測量した点＝GCP（Ground Control Point）数点に対空標識を置き（図 3.1.4）、SfM ソフトウェアを用いた処理のなかで、この既知の座標を使って補正することが一般的です。ただし森林では、地形条件等により GCP となる点をあらかじめ測量することが困難な場合が多いと考えられます。さらに、開けた場所も限られ、上空から対空標識が見える場所を複数探すことが困難な場合も少なくありません。そこで、本マニュアルでは GCP を置かずに撮影を実施し、そのために生じた位置のズレを補正する手法を次節 3.2 で紹介します。



図 3. 1.4 対空標識を設置した撮影の例

撮影した写真によっては、SfM ソフトウェアで処理する際に写真のマッチングができない、作成された点群データが現実とは異なる形状に歪む・傾くといった結果が得られることがあります (SfM ソフトウェアでの処理の詳細は次節 3. 2 参照)。このような結果になると、これ以降に記載している解析が上手くできません。精度のよい結果を得るためには、以下のような条件で撮影できることが望ましいです。

- ・曇天
- ・太陽が真上にある（午前 11 時頃）
- ・無風（あるいは限りなく無風に近い）

また事前に設定したコースに沿ってテスト飛行を実施することを推奨します。テスト飛行では、主に以下のことを確認します。

- ・事前に設定した飛行高度が適切か（木に衝突しないか等）
- ・操縦者がいる場所からドローンが目視できるか
- ・送信機と機体の通信が切れる場所がないか

テスト飛行で前述の事項を確認した際、飛行高度が適切でなければ、その場でコースを調整する必要があります。また、操縦者がいる場所は、おおよそその場合ドローンの離着陸地点になるでしょう。その場所からドローンが目視できない場合は、操縦者が多少移動するか飛行高度を変えれば対応できる場合もありますし、大きく離れた場所に移動しなければならない可能性もあることに留意してください。

テスト飛行による確認・調整が終わったら、自動飛行による撮影を実施します。自動飛行中も、ドローンから目を離さないようにしてください。

3. 2. SfM ソフトウェアを用いた解析の実施

撮影が問題なく終了したら、得られた写真を使用して樹冠表層の点群データを作成します。第 2 章 2. 2 で紹介したように、点群データを作成するための SfM ソフトウェアはさまざまなものがあります。本マニュアルでは、以下の 2 つのソフトウェアを用いた手法を紹介します。

- ・ 3DF Zephyr Free ※無償・非商用利用に限る
- ・ Metashape Professional ※有償

SfM ソフトウェアで点群データを作成する処理を実施する手順は、基本的に図 3. 2.1 のとおりです。始めに、一定のラップ率で撮影した複数の写真から特徴となる点を見出し、写真のマッチングを実施します。そのマッチング結果を利用し、高密度の点群データを作成します。Metashape Professional であれば、点群そのものの作成はこれで終了です。3DF Zephyr Free はメッシュモデルしかデータとして出力・保存できないという制限があります。そのため、点群データのポイント同士を三角形のポリゴンでつないでメッシュモデルを作成し、このメッシュモデルを出力して再度別のソフトウェアで点群データを作成するという手順を踏む必要があります。

なお、3DF Zephyr ですが、有償・廉価版の 3DF Zephyr Lite（写真枚数 500 枚まで・メッシュのみ出力可／価格 11 万円）でも、ここで紹介する Free 版と同様の手順で点群データの作成が可能であることは、14 日間の体験版 (<https://www.3dflow.net/3df-zephyr-evaluation-download-page/>) で確認できました。

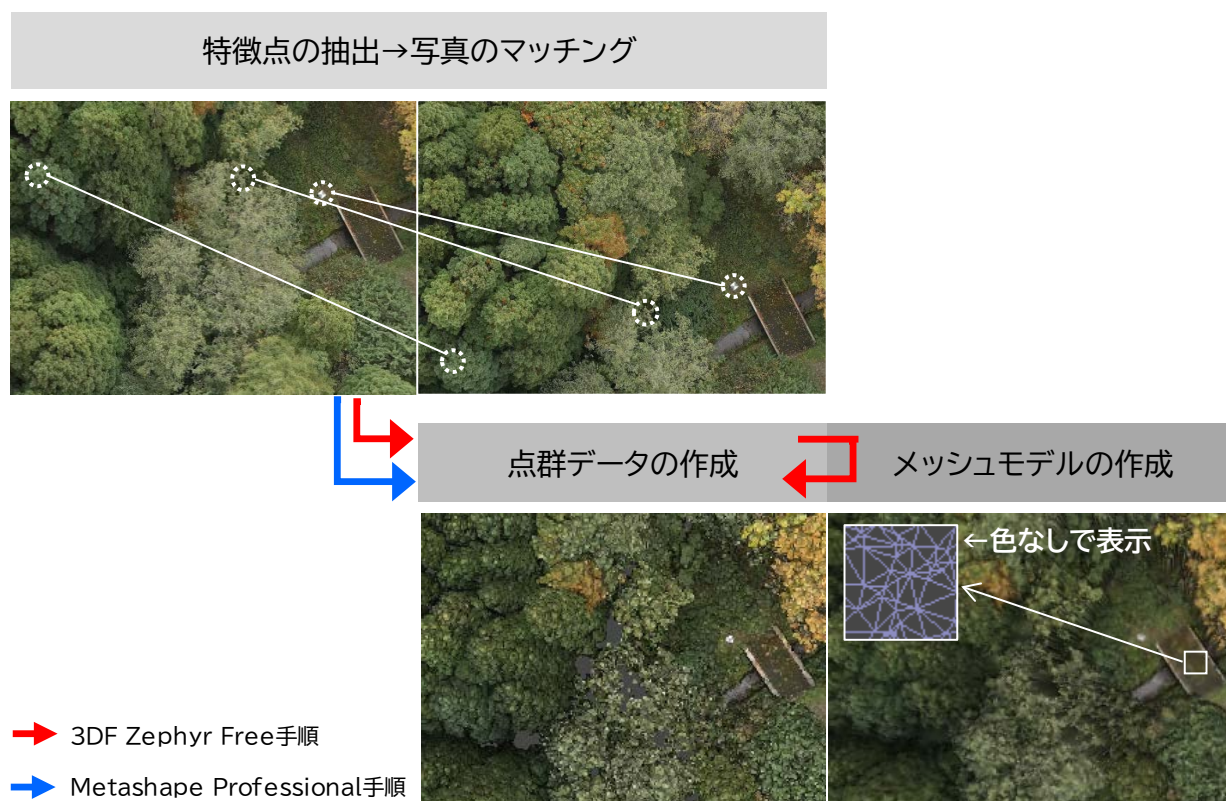


図 3. 2.1 SfM ソフトウェアを用いた点群データ作成手順の概要

(Metashape Professional の場合は、点群データ作成に続いて DSM 作成・オルソ画像作成も実施)

3. 2. 1. SfM ソフトウェアを使用する前に:ExifTool による写真の高度補正

ドローンで撮影した写真を SfM ソフトウェアで処理する際、一般的に写真に記録された GNSS により取得した位置情報（水平位置、高度）を使用します。しかし、現在普及しているドローンは GNSS 受信機の精度が十分ではないものが多く、SfM ソフトウェアで作成した点群データの位置情報にもズレが生じてしまいます(前掲図 3. 1.3)。特に、GNSS で取得した絶対高度(=GPS Altitude)は精度が低く、数 m 超の誤差が生じることもあります。さらに、DJI 製ドローンの一部では、写真に記録されている GPS Altitude は純粋に GNSS で取得した絶対高度ではなく、より大きな差が生じているという指摘もあり、現実的な標高値を持った点群データを作成することが困難な状況です(参考：<https://qiita.com/t-noguchi/items/62420a40dd92f354533b>)。

このような誤差に対しては、水平位置や標高を正確に測量した点(=GCP)に対空標識を置いた状態で撮影を実施し、SfM ソフトウェアで処理を実施する過程でこの GCP の座標を入力して補正する方法が一般的であること、しかしながら GCP を設置するための測量に非常に労力がかかることはすでに述べたとおりです(本章 3. 1. 3 参照)。

そこで、本マニュアルでは GCP を置かずに写真を撮影し、そのあとで水平位置や高度を補正することとしました。そのため、ここでは前述の二つの SfM ソフトウェアを使用する前に、まず写真

に記録された高度情報を「ExifTool」を用いて現実的な標高値に補正する方法を説明します。

この補正方法の概念は図 3. 2.2 のとおりで、GPS Altitude ではなく、ドローンに内蔵されている気圧センサーで計測した「離陸地点からの相対高度」(Relative Altitude) と離陸地点の標高を足し合わせた値をドローンで撮影した写真の高度 (= 標高) として使用するというものです。Relative Altitude も風や気圧の急激な変化などにより大きな誤差が生じる可能性はあるものの、前述の DJI 製ドローンで確認された GPS Altitude の問題を鑑みれば、より現実に近いと考えられます。すなわち、この補正を実施した写真を使用して作成した点群の高さ情報も現実的な標高値をもつことになります。

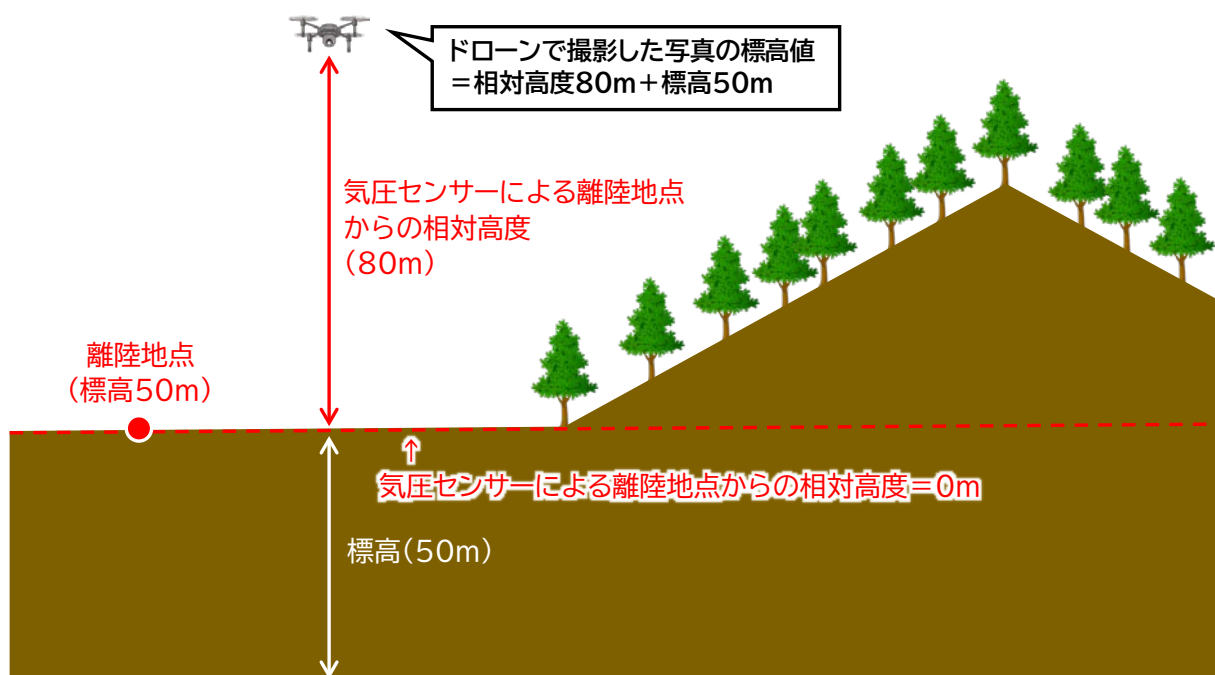


図 3. 2.2 気圧センサーによる相対高度を用いた高度補正方法のイメージ

この処理を実施する具体的な手順は、以下のとおりです。なお、RTK 測位に対応しているドローンを使用している場合は、以下の処理は基本的に不要です。

- ① ドローンを飛行させる前に離陸地点上で写真を撮る、あるいはハンディ GNSS 受信機で計測するといった手法により、離陸地点の緯度経度情報を入手します。この緯度経度に該当する場所が地盤データとして用意する DEM 上（作成方法は第 4 章 4. 1. 2 参照）にある場合は、QGIS 上でプラグイン「Lat Lon Tools」を使ってこの DEM から標高値を取得します（図 3. 2.3・図 3. 2.4）。DEM がない場合は、国土地理院「地理院地図」(<https://maps.gsi.go.jp/>) にこの緯度経度を入力し、離陸地点の標高値を入手します（図 3. 2.5）

- ② デスクトップに「Edit」というフォルダを作成し、撮影してきた写真をこの中にコピーしてください。これ以降の処理では元の写真の情報を上書き修正するので、必ずコピー・貼り付けした写真に対して処理を実行してください。フォルダの場所やフォルダ名は任意で変更可能ですが、⑤⑥で入力するコマンドをそれに合わせて変更しなければならない点に注意してください
- ③ コマンドプロンプトを起動します
- ④ はじめに ExifTool がある場所を指定する以下のコマンドを入力し、Enter キーを押します (図 3.2.6)。ここでは、デスクトップにあるものとしています

```
cd C:\Users\●●●●●\Desktop ※●●●●はユーザー名
```

- ⑤ 続いて、以下のコマンドを入力してください (前掲図 3.2.6 参照)。GPS Altitude を Relative Altitude に置き換えるためのコマンドです。画面上に 1 枚ずつ処理を実施していること示す表示が次々を現れます。表示が止まったら、処理は完了です

```
for %i in (Edit\*.JPG) do exiftool %i -s-s-RelativeAltitude | exiftool -overwrite_original %i "GPSAltitude<=" -gpsaltituderef#0
```

- ⑥ 最後に、以下のコマンドを入力して Enter キーを押してください (図 3.2.7)。Relative Altitude に置き換えた GPS Altitude に離陸地点の標高を加えるためのコマンドです。画面上に 1 枚ずつ処理を実施していること示す表示が次々を現れます。表示が止まったら、処理は完了です

```
for %i in (Edit\*.JPG) do exiftool %i -overwrite_original -GPSAltitude+=● ※●は離陸地点の標高
```

この方法は GCP の設置が困難な場合の代替手法であり、天候により気圧センサーによる相対高度に誤差が生じる点や、航空レーザ測量データや地理院地図から抽出した離陸地点の標高にも誤差があり、特に地理院地図では標高のソースが 10mDEM の場合数 m 程度の誤差が含まれる可能性がある点に留意してください。

また、ドローンによっては GPS Altitude に楕円体高 (標高+ジオイド高※) が記録される場合があります。この場合、SfM ソフトウェアで作成する点群の高度情報=標高にするためには、ソフトで処理する過程でジオイド高を考慮しなければなりません。これが困難な場合も、ここで説明した補正方法を使用して標高にすることは可能ですが、もともと記録されている楕円体高の精度が高い場合、その精度より劣ってしまう可能性がある点に注意してください。

※ ジオイド高…日本では東京湾平均海面を基準として標高を決定しており、その東京湾平均海面を陸地まで延長した面をジオイド面と呼んでいます。ジオイド高とは、準拠楕円体（測量の基準として採用する地球楕円体）からこのジオイド面までの高さのことを指します

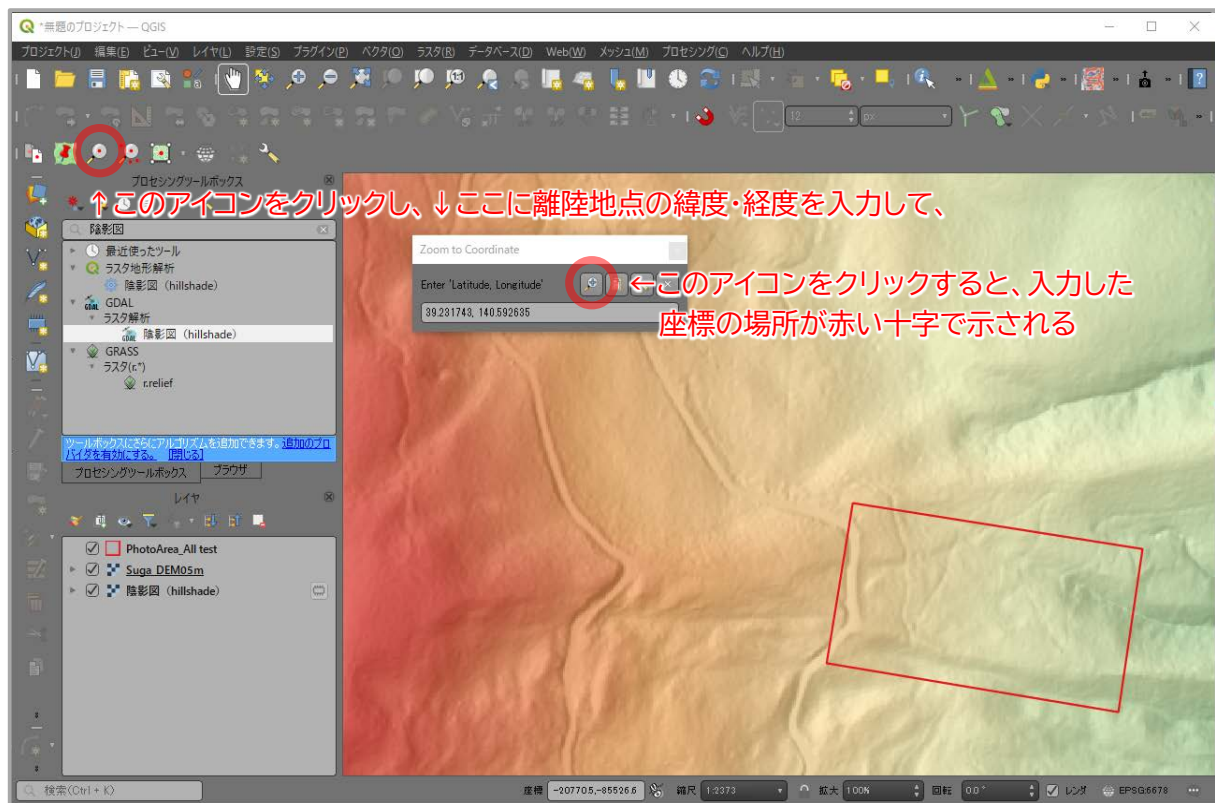


図 3.2.3 離陸地点の標高値入手例:DEM の場合 その1

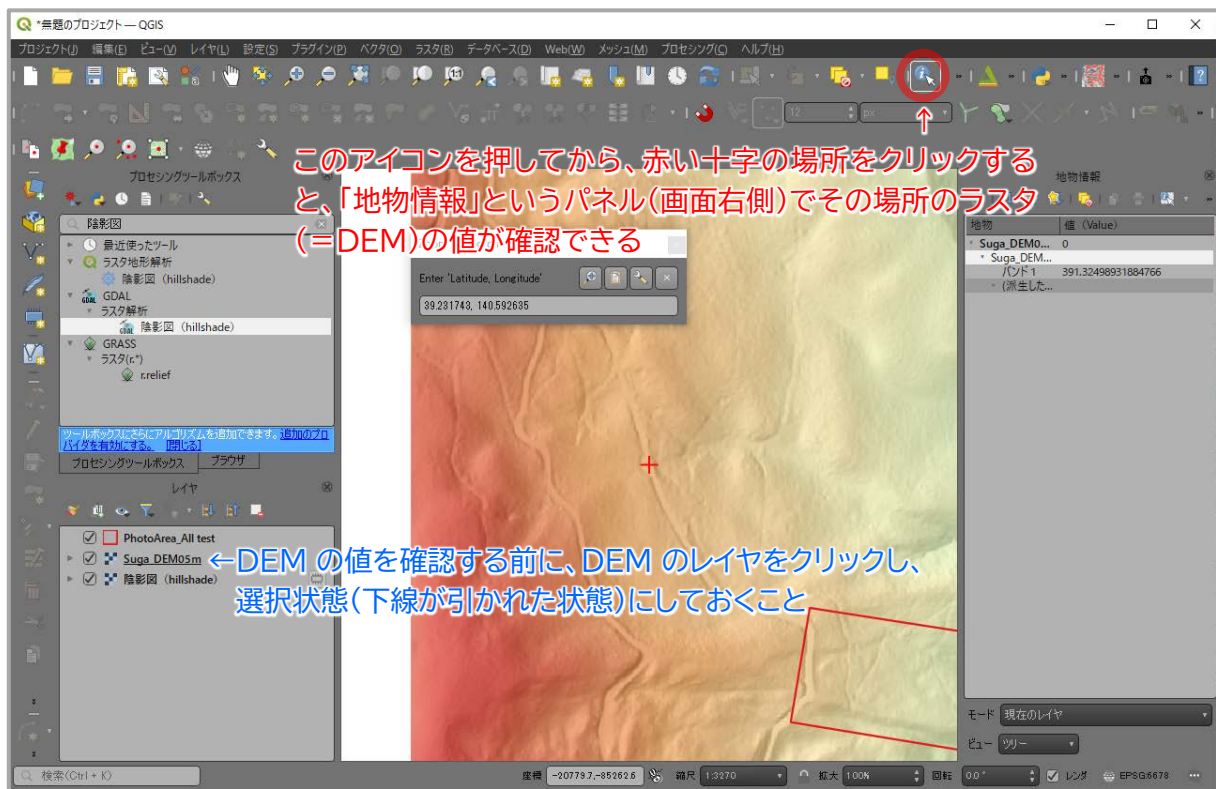


図 3. 24 離陸地点の標高値入手例:DEM の場合 その 2

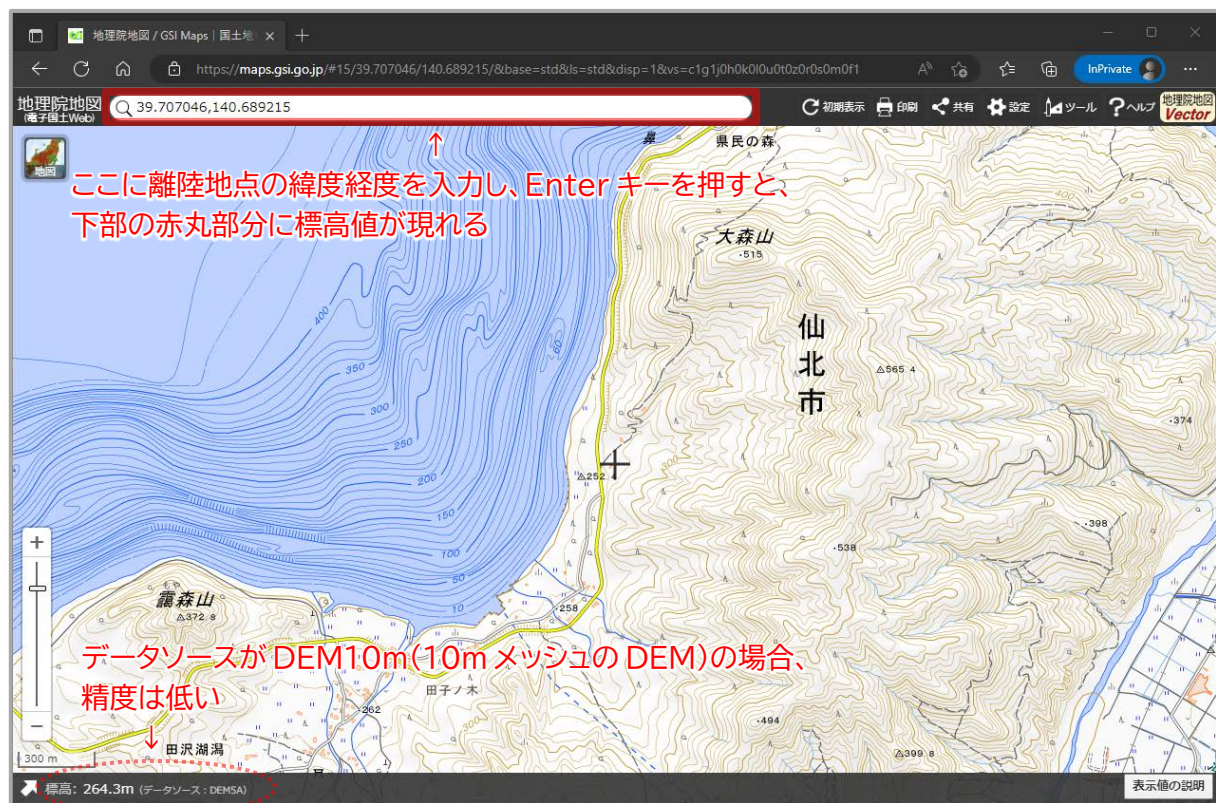


図 3. 25 離陸地点の標高値入手例:地理院地図の場合

```
Microsoft Windows [Version 10.0.19044.2251]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\Admin>cd C:\Users\Admin\Desktop ←ExifToolがある場所を指定

C:\Users\Admin\Desktop>for %i in (Edit\*.JPG) do exiftool %i -s -s -s -RelativeAltitude | exiftool
-overwrite_original %i "-GPSAltitude<=-" -gpsaltituderef#=0

↑GPS Altitude を Relative Altitude に置き換える
(写真1枚1枚に対して実行される)
```

図 3.2.6 コマンドプロンプトおよび ExifTool を用いた処理の入力 その 1

```
C:\Users\Admin\Desktop>for %i in (Edit\*.JPG) do exiftool %i -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
038 ↑Relative Altitude に置き換えた GPS Altitude に離陸地点の標高を加える

C:\Users\Admin\Desktop>exiftool Edit\DJI_0027.JPG -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
1 image files updated

C:\Users\Admin\Desktop>exiftool Edit\DJI_0028.JPG -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
1 image files updated

C:\Users\Admin\Desktop>exiftool Edit\DJI_0029.JPG -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
1 image files updated

C:\Users\Admin\Desktop>exiftool Edit\DJI_0030.JPG -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
1 image files updated

C:\Users\Admin\Desktop>exiftool Edit\DJI_0031.JPG -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
1 image files updated

C:\Users\Admin\Desktop>exiftool Edit\DJI_0032.JPG -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
1 image files updated

C:\Users\Admin\Desktop>exiftool Edit\DJI_0033.JPG -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
1 image files updated

C:\Users\Admin\Desktop>exiftool Edit\DJI_0034.JPG -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
1 image files updated

C:\Users\Admin\Desktop>exiftool Edit\DJI_0035.JPG -overwrite_original -GPSAltitude+=41.038
1 image files updated
```

図 3.2.7 コマンドプロンプトおよび ExifTool を用いた処理の入力 その 2

3. 2. 2. 3DF Zephyr Free を使用方法 ※非商用利用に限る

(1) 起動・新規プロジェクトの設定

3DF Zephyr Free を起動し、画面上部のルーツメニュー「ワークフロー」から「新規プロジェクト...」をクリックしてください。

現れた画面で、「プロジェクト作成後 3D モデルを計算」「サーフェス抽出後にテクスチャを計算」にチェックを入れてください。これ以外は規定値のままとし、「次へ」をクリックしてください (図 3. 2.8)。

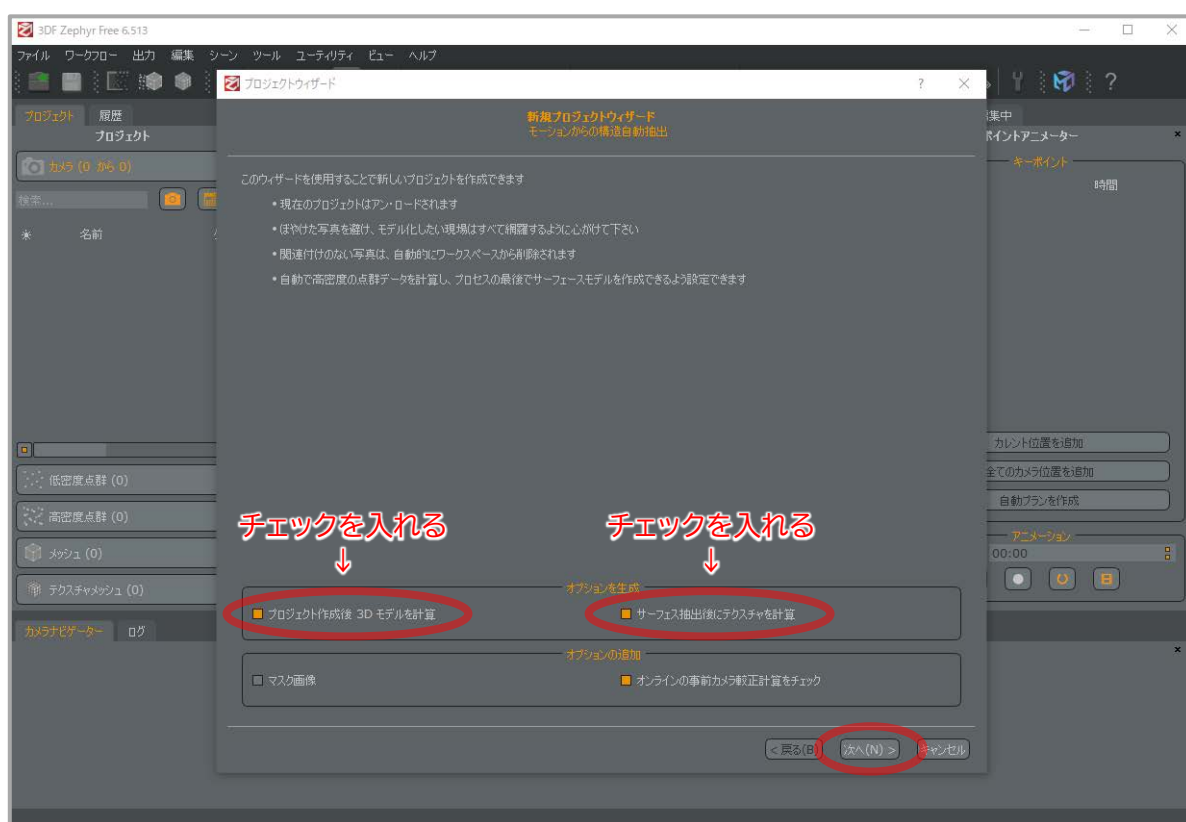


図 3. 2. 8 新規プロジェクトの設定

(2) 写真の読み込み

(1)で「次へ」を押して現れた画面で、前項 3. 2. 1 で高度を補正した写真をすべて読み込みます (図 3. 2.9)。読み込みは画面下部の「+」のマークが付いたアイコンをクリックしてもよいですし、写真のファイルをすべて選んでドラッグ&ドロップしてもよいです。

写真の読み込みが終わって「次へ」をクリックすると、「カメラ校正」の画面が現れますが、何もせず「次へ」をクリックしてかまいません (図 3. 2.10)。

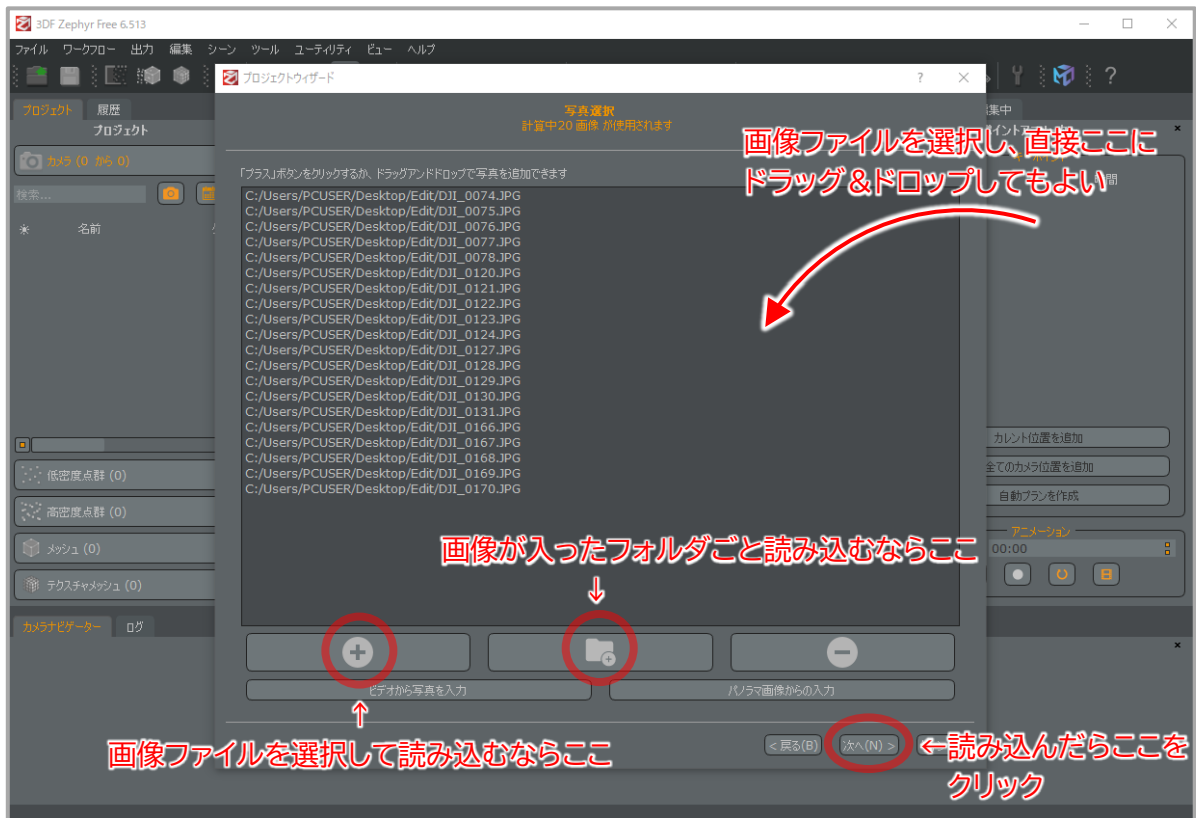


図 3.2.9 写真の読み込み

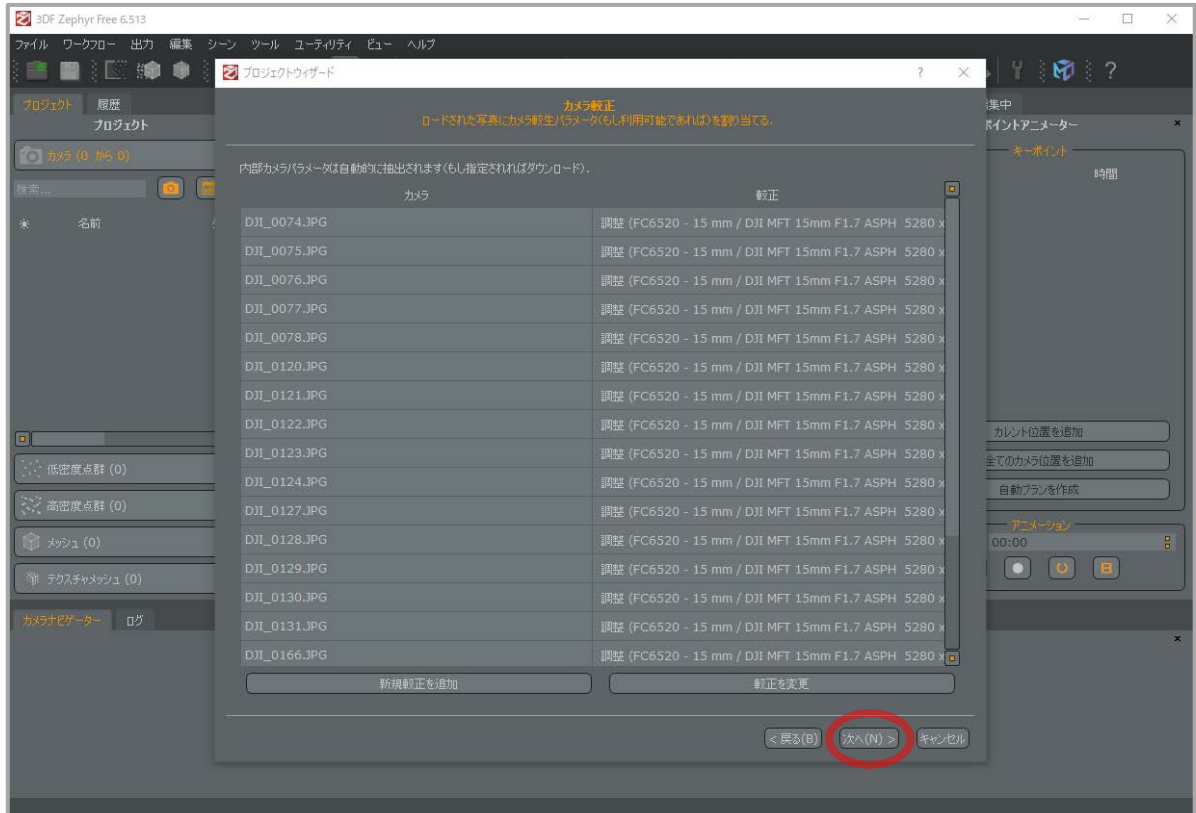


図 3.2.10 カメラ校正の設定

(3) 処理内容の設定・実行

「カメラ方向」という画面が現れたら、点群データおよびメッシュデータ作成に関する処理の設定をしていきます。「カメラ方向」に続いて、「高密度点群作成」「サーフェスモデル化」「テクスチャリング」についても設定が必要です。

設定内容の選択肢は、画面右上の設定から「プリセット」「アドバンスド」「カスタム」のどれを選択するかで変わってきますが、本マニュアルでは四つともすべて「プリセット」を選択してください（図 3. 2.11）。そのうえで、表 3. 2.1 に挙げた選択肢から「カテゴリー」「プリセット」について適宜選んでください。表には推奨値も記載してあるので、参考にしてください。

「テクスチャリング」の設定終了後「次へ」をクリックすると、「モデル化開始」という画面が現れるので、「実行」をクリックして処理を実施してください。

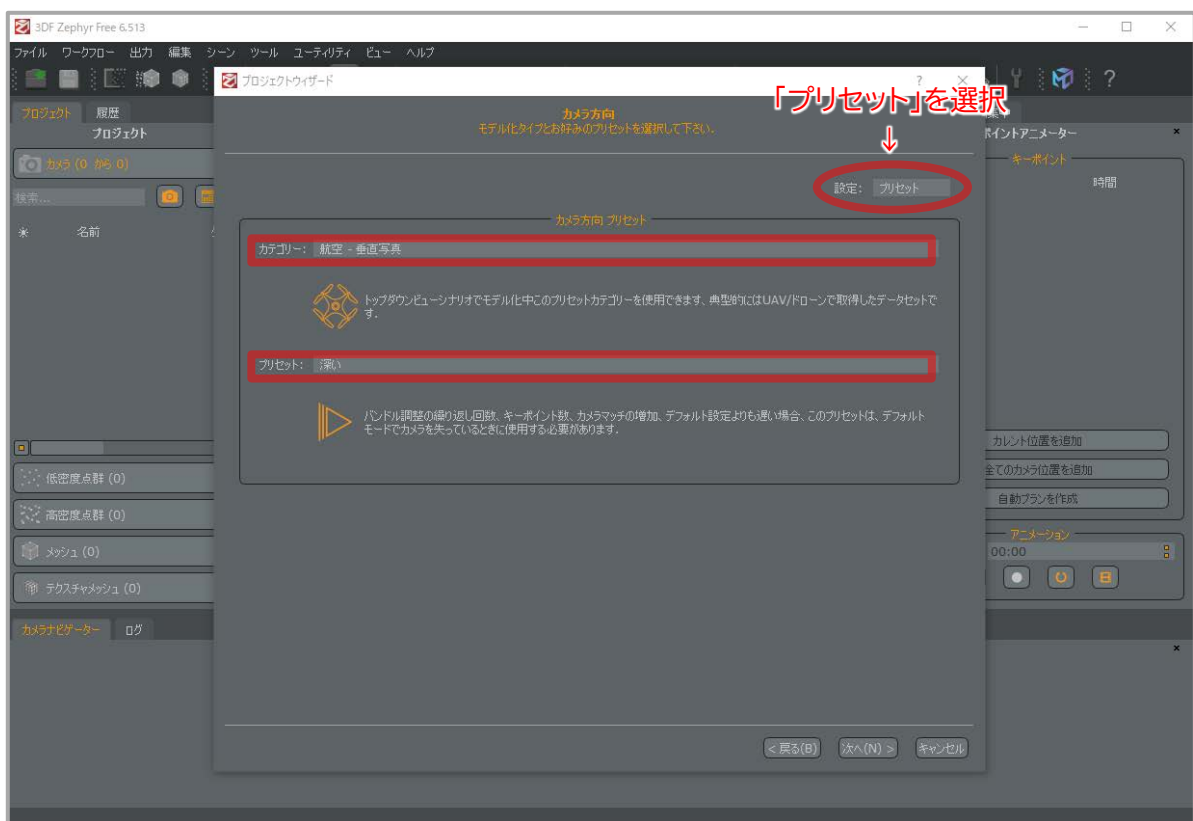


図 3. 2.11 点群データおよびメッシュデータ作成に関する処理の設定（「カメラ方向」の例）

表 3.2.1 3DF Zephyr Free での処理に関する設定

順	項目	選択可能な設定内容	推奨される設定内容
①	カメラ方向	カテゴリー) 一般 航空－垂直写真 市街地 人体 サーフェスをスキャン 垂直構造	カテゴリー) 航空－垂直写真
		プリセット) 早い デフォルト 深い	プリセット) 深い
②	高密度点群作成	カテゴリー) カメラ方向に同じ	カテゴリー) 航空－垂直写真
		プリセット) プレビュー デフォルト 高精細	プリセット) 高精細
③	サーフェスモデル化	カテゴリー) 一般 航空－垂直写真 市街地 人体 サーフェスをスキャン 垂直構造 レーザースキャン	カテゴリー) 航空－垂直写真
		プリセット) 高密度点群に同じ	プリセット) 高精細
④	テクスチャリング	カテゴリー) 一般 垂直構造	カテゴリー) 一般
		プリセット) 低ポリ デフォルトシングルテクスチャ デフォルトマルチテクスチャ 高精細	プリセット) 高精細

(4) メッシュの出力

処理が完了した旨を示す画面が現れたら、画面に作成されたテクスチャ付きメッシュが現れます(図 3.2.12)。

本節の始めでも述べましたが、3DF Zephyr Free ではテクスチャ付きメッシュしか出力できないため、このメッシュから点群データを作成する必要があります。そこで、画面上部のツールメニュー「出力」から「テクスチャ付きメッシュを出力」をクリックします。現れた画面で以下のように設定し、適当な名前を付けてメッシュを出力してください。これ以外の設定は、既定値のままでよいです(図 3.2.13)。

- ・フォーマットを出力：Ply
- ・テクスチャをリスケール：最も近い2のべき乗数 ※これに設定して出力し CloudCompare に読み込んだ際、メッシュの表面が撮影した写真で着色されていなかった場合(=図 3.2.12 に表示されているような見た目でない場合)は、1042~16384 のあいだで適宜設定
- ・フェースプロパティとしてテクスチャ座標を出力：チェックを入れる

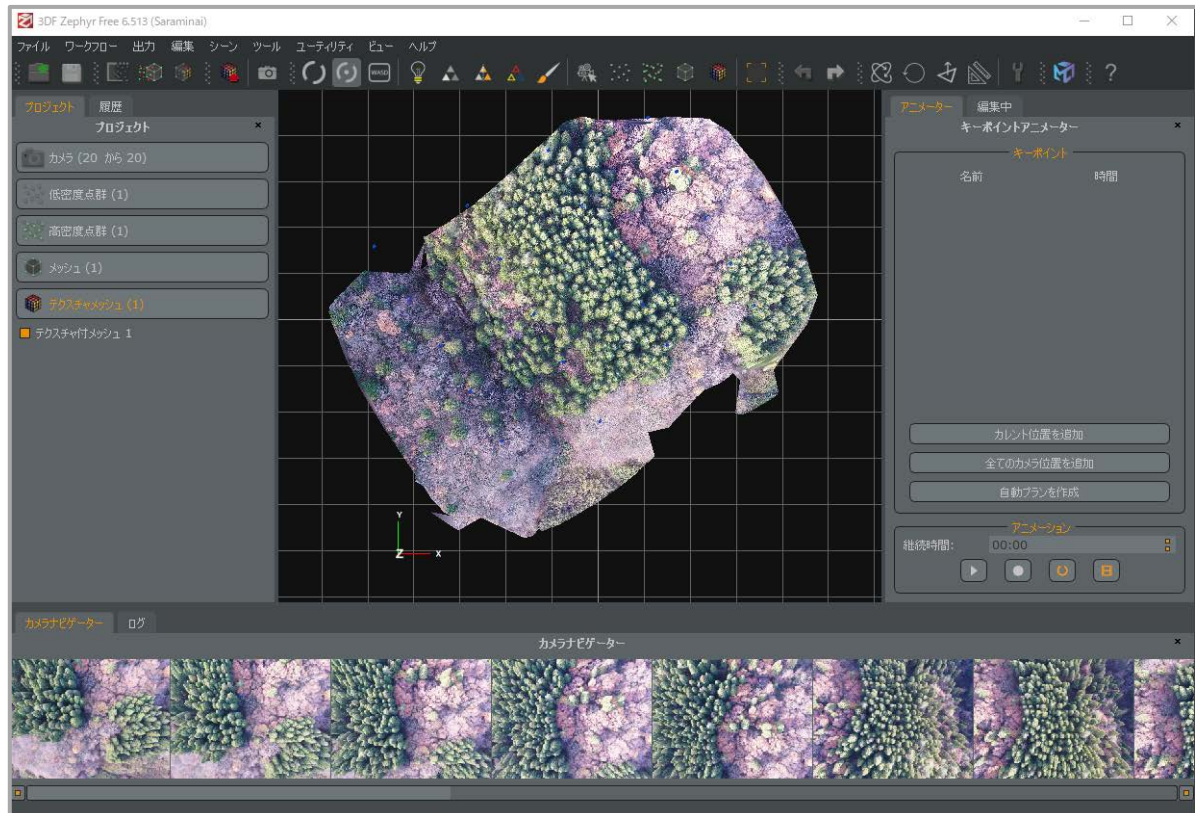


図 3.2.12 作成されたテクスチャ付きメッシュの例

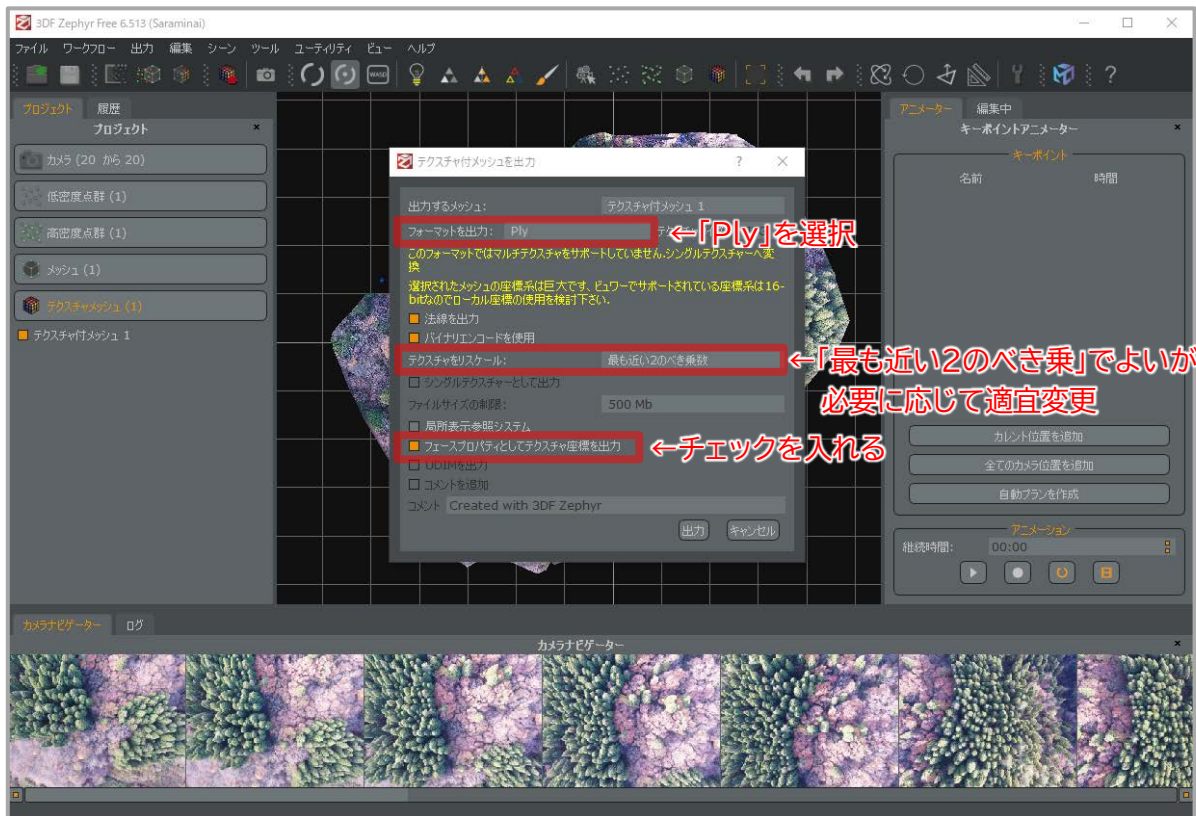


図 3. 2.13 テクスチャ付きメッシュの出力

(5) 点群データの作成・出力

CloudCompare を起動し、(4) で出力したメッシュを画面上にドラッグ&ドロップします(図 3. 2.14)。その際、ドラッグ&ドロップしたのち、データの内容や座標体系に関するダイアログ(図 3. 2.15・図 3. 2.16) が現れた場合は、基本的に「Apply」や「はい (Y)」を選択してかまいません。

読み込んだメッシュが表示されたら、そのメッシュを選択した状態で画面上部にある「メッシュ上の点のサンプル」アイコンをクリックします(図 3. 2.17)。現れた画面で「密度」にチェックを入れてから、その下の欄に 1m^2 当たり何点の点を作成するか入力してください(図 3. 2.18)。200 点程度あれば元のメッシュの形状を十分再現できると考えられますが、メッシュの面積によってはデータの容量が大きくなり PC に負荷がかかることが考えられますので、適宜変更してかまいません。数値を入力したら、他の項目は規定値のままとし、「OK」をクリックしてください。やや時間を置いて点群データが作成されます(図 3. 2.19)。

点群データが作成されたら、そのデータ名をクリックした状態で画面上部のツールメニュー「ファイル」から「保存」をクリックし、ファイル形式を「las」として適当な名前を付けて保存してください。las 形式とは、レーザ等による点群データを格納するための標準的な規格で、バイナリ形式でデータを保持します。

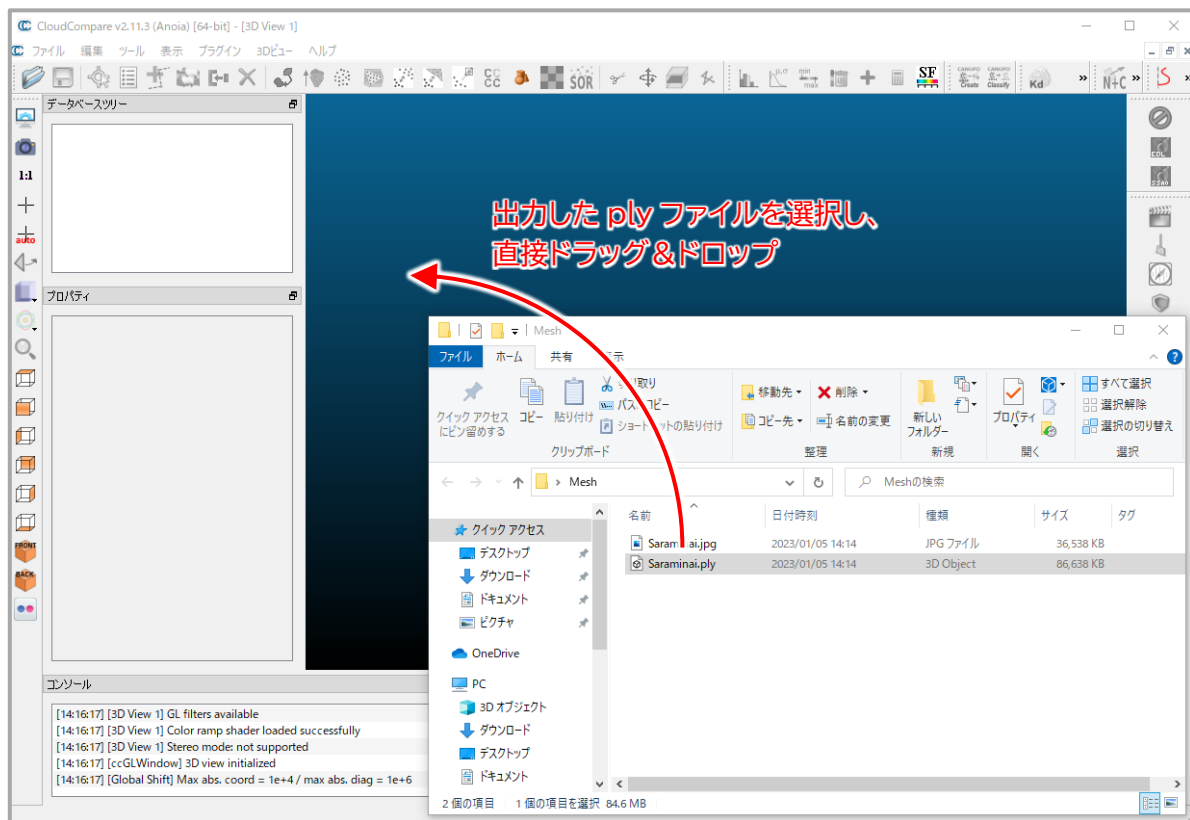


図 3.2.14 テクスチャ付きメッシュの読み込み

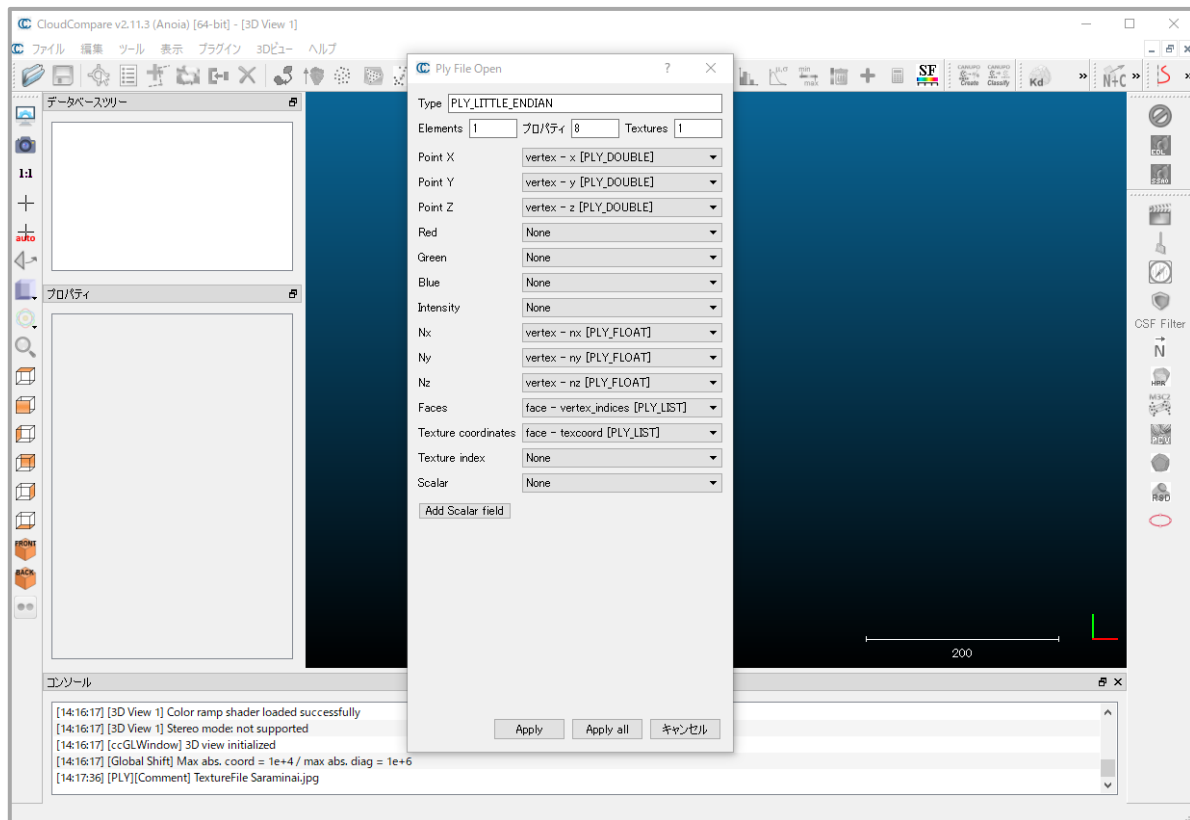


図 3.2.15 ファイル読み込み時に現れるダイアログの例 その 1

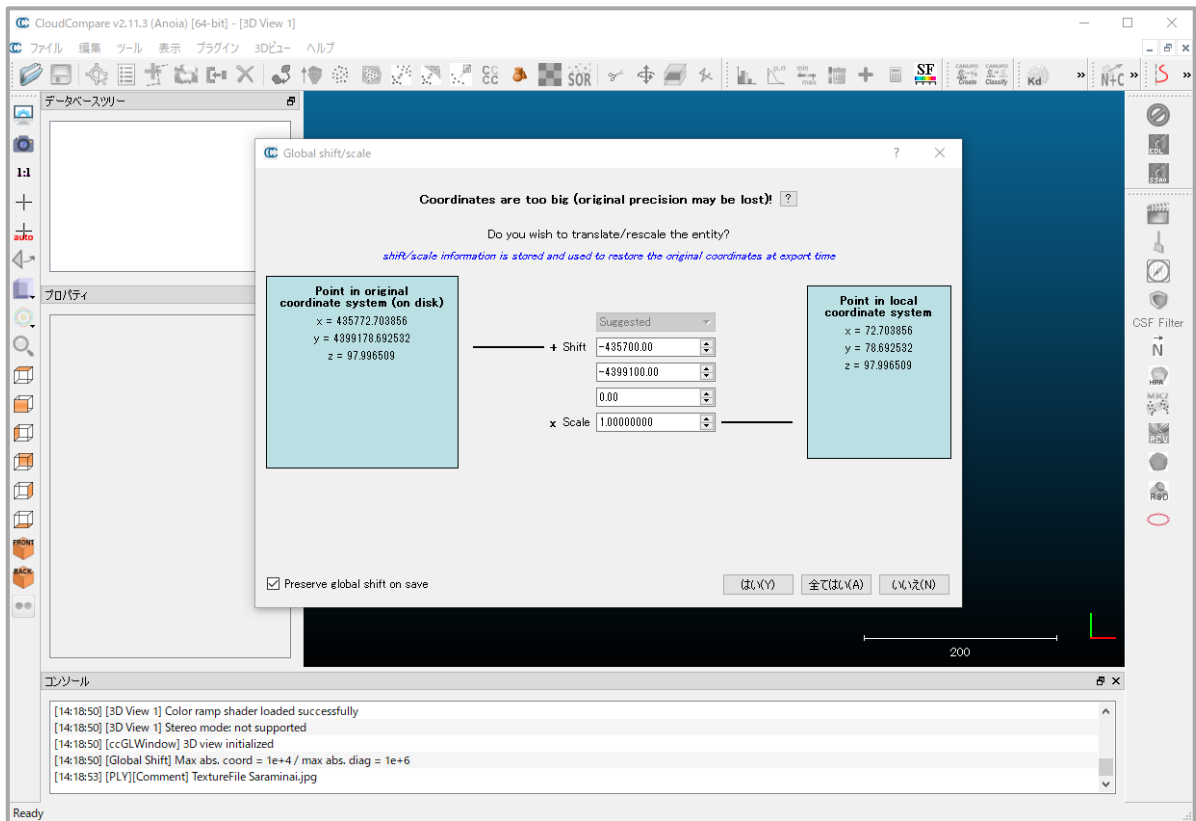


図 3.2.16 ファイル読み込み時に現れるダイアログの例 その2

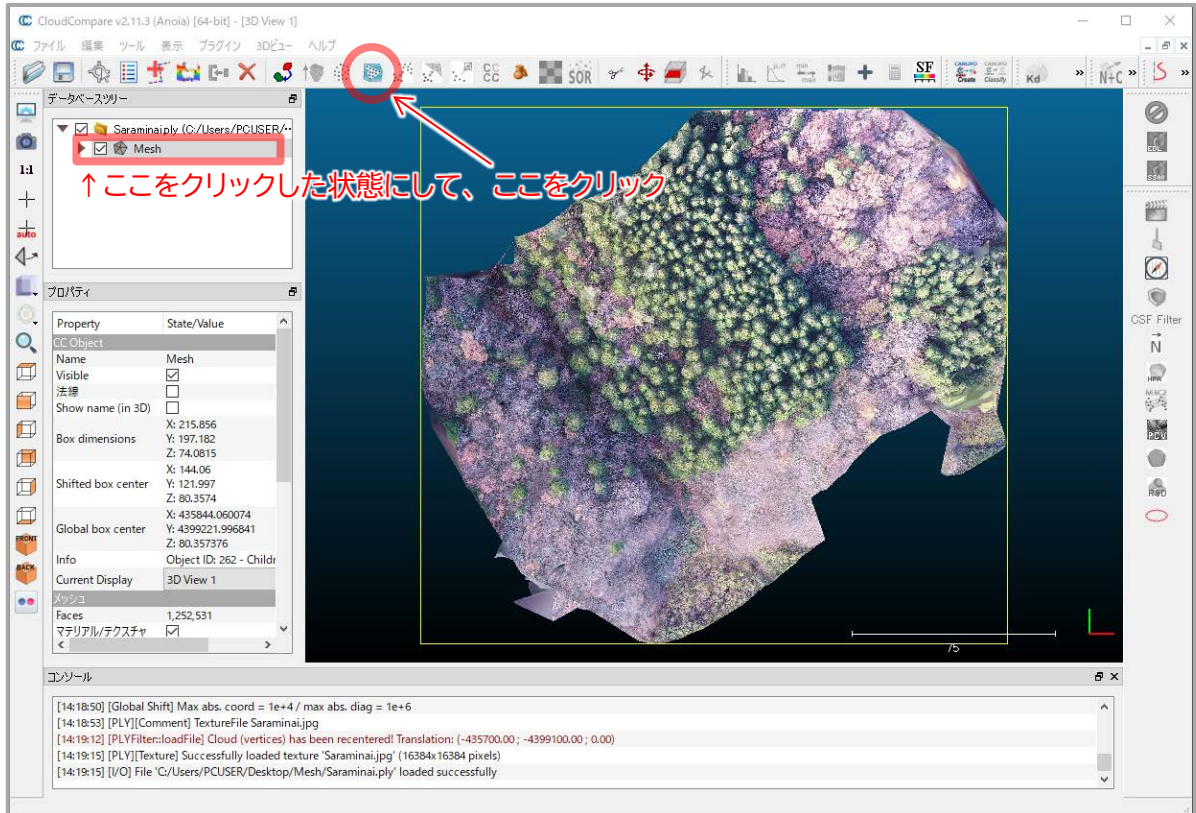


図 3.2.17 メッシュを点群データに変換 その1

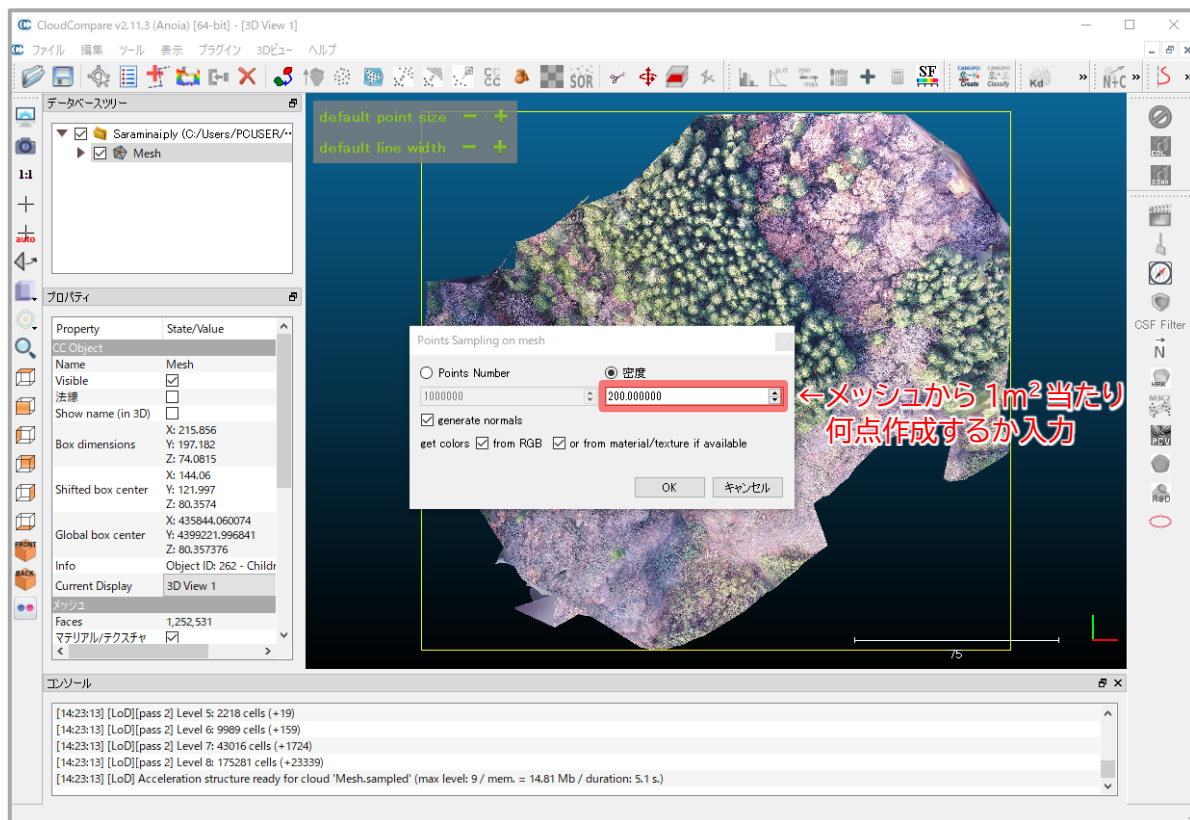


図 3.2.18 メッシュを点群データに変換 その2

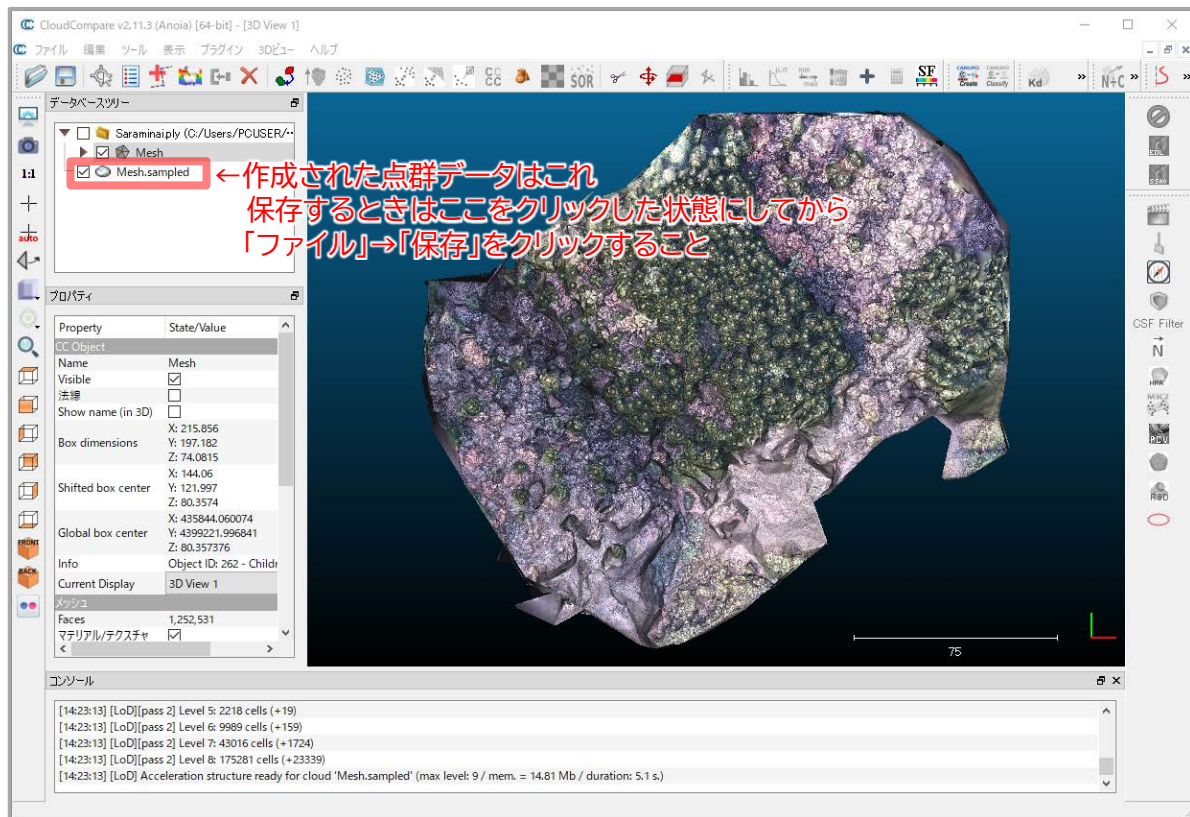


図 3.2.19 作成された点群データの例

3. 2. 3. Metashape Professional を使用する方法

高価な SfM ソフトウェアは、無償版や廉価版と比較してより高機能であり、以下のようなメリットがあります。

- ・処理できる写真の枚数に制限がない
- ・オルソ画像まで取得できる
- ・アップデートによる不具合の修正や機能追加がより高い頻度で行なわれる
- ・サポートが充実している

そこで、皆様が今後ドローンによる森林調査に取り組まれる際の参考として、Metashape Professional を用いた基本的な点群データの作成方法も説明します。

Metashape Professional は、ドローンなどによって撮影された写真から高密度点群データやオルソ画像などを作成する処理が簡単な操作で実行でき、数千枚の画像の一括処理が可能です。SfM ソフトウェアのなかでもドローンユーザーの認知度が高く、利用者も多いです。

(1) 写真のアライメント

Metashape Professional を起動したら、画面上部のツールメニュー「ワークフロー」から、「写真の追加」または「フォルダの追加」をクリックし、前項 3. 2. 1 で高度を補正した写真を読み込みます (図 3. 2.20)。画面のほぼ上半分を占める「モデル」ペイン上に写真ファイルを直接ドラッグ & ドロップしてもよいです。

読み込みが終了したら、画面上部のツールメニュー「ワークフロー」から「写真のアライメント」をクリックします。続いて現れた設定画面の「一般」タブで、「精度」を「最低・低・中・高・最高」から選択します (図 3. 2.21)。「最高」に近いほど精度はよいですが、その分コンピューターにかかる負荷が大きくなります。「中」または「高」にすることを推奨します。「汎用事前選択」はチェックを外します。これ以外の設定は規定値のままでよいです。

以上の設定が済んだのち、画面下部の「OK」をクリックすると処理が開始されます。終了すると、タイポイント (粗な点群: 写真をマッチングさせるための特徴点) が生成されます。GCP に対空標識を設置して撮影した場合は、この後にその座標を反映させる処理を実施しますが、本マニュアルでは GCP の設置を前提としていないため、説明は割愛します。

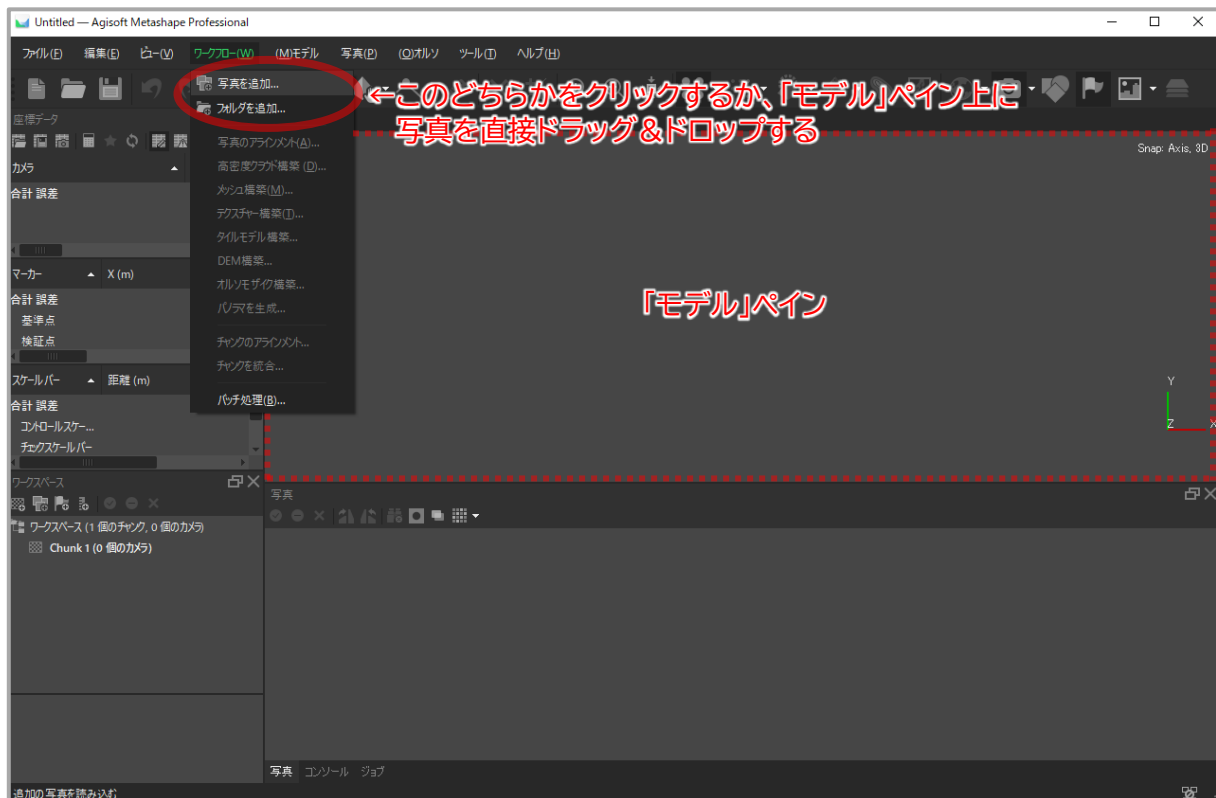


図 3.2.20 Metashape への写真の読み込み

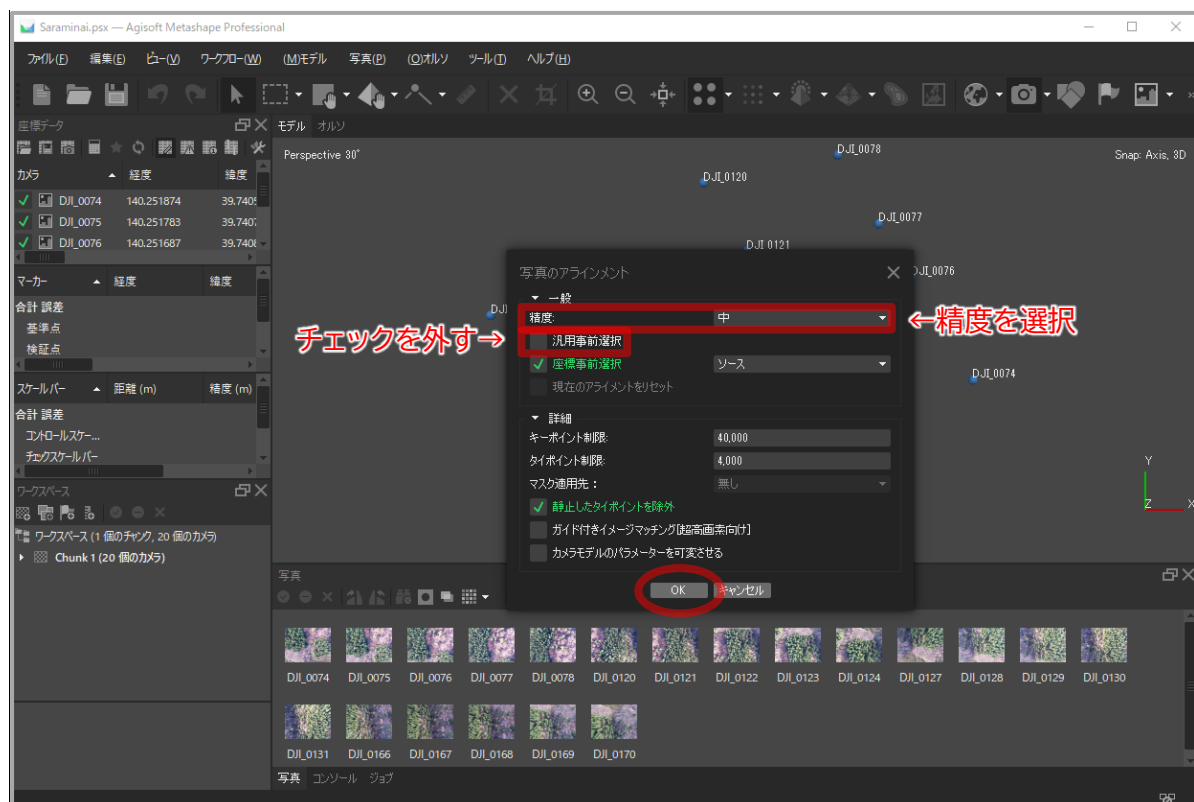


図 3.2.21 「写真のアライメント」の実施

（２）高密度クラウド構築

「写真のアラインメント」が終了したら、画面上部のツールメニュー「ワークフロー」から「高密度クラウド構築」をクリックします。続いて現れた設定画面の「一般」タブで、「品質」を「最低・低・中・高・最高」から選択します（図 3. 2.22）。「最高」に近いほど精度はよいですが、その分コンピューターにかかる負荷が大きくなります。「中」か「高」にすることを推奨します。さらに、「詳細」タブを開き、「深度フィルタ」を「無効・低・中・高」から選択します。「高」に近いほどノイズを除去できますが、小さな形状は失われるため、「中」を推奨します。写真の枚数や設定にもよりますが、すべての工程の中でも「高密度クラウド構築」は特に処理に長時間を要するので注意してください。

以上の設定が済んだのち、画面下部の「OK」をクリックすると処理が開始されます。終了すると、タイポイントよりも非常に密度が高い点群が生成されます。

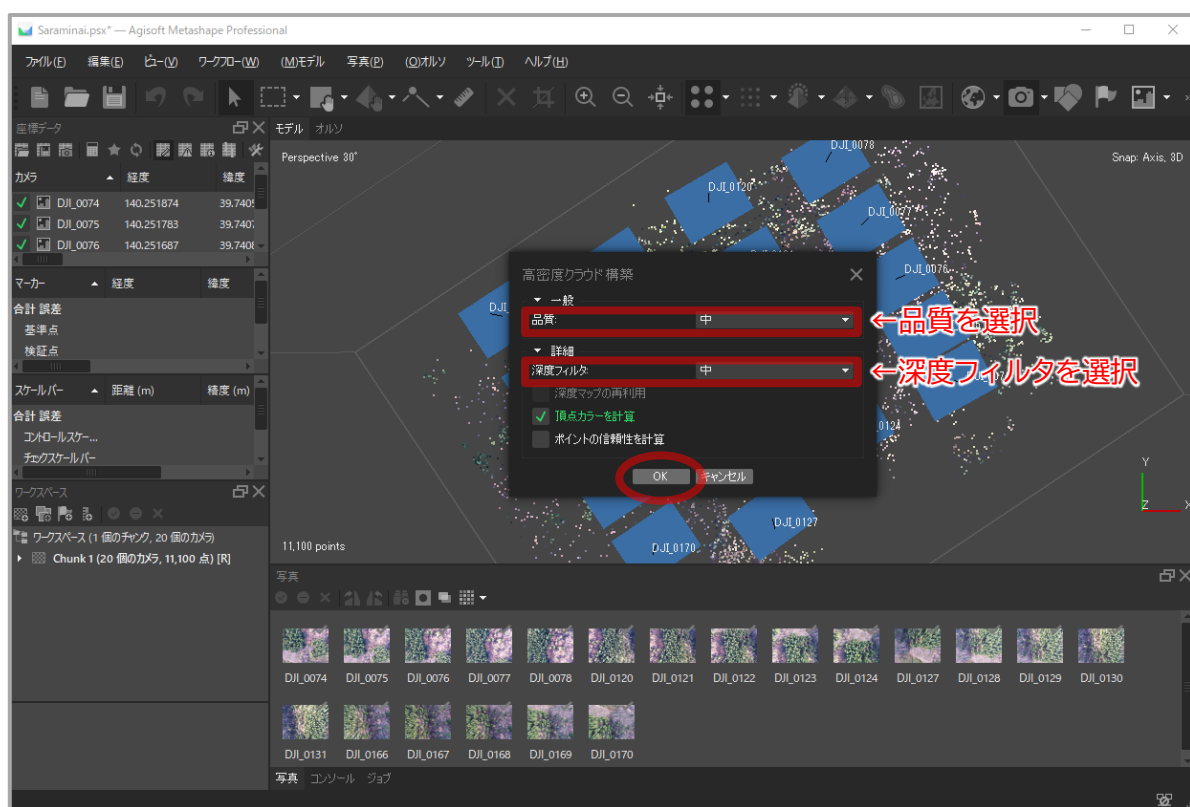


図 3. 2.22 「高密度ポイントクラウド構築」の実施

(3) メッシュ構築

GCP を設置して撮影をしない場合、DSM の位置補正が必要となることはすでに述べたとおりですが、その補正作業にオルソ画像が必要となるため、その作成に必要なメッシュデータの構築作業を実施します。

「高密度クラウド構築」が終了したら、画面上部のツールメニュー「ワークフロー」から「メッシュ構築」をクリックします。続いて現れた設定画面の「一般」タブで、「サーフェスタ입」を「ハイトフィールド (2.5D)」とします (図 3. 2.23)。「ポリゴン数」は「カスタム・低・中・高」から選択できます。「高」に近いほどポリゴンの数が多く細部まで表現できますが、その分コンピューターにかかる負荷が大きくなります。「中」または「高」にすることを推奨します。これ以外の設定は規定値のままでよいです。なお、設定画面が現れる前に、「高密度クラウドを分析中」という画面が現れることがあります。何もせず分析が終わるのを待っていれば図 3. 2.23 に示す設定画面が現れます。

以上の設定が済んだのち、画面下部の「OK」をクリックすると処理が開始されます。終了すると、点群データのポイント同士が三角形でつながれてポリゴン (=面) になった 3D メッシュモデルが生成されます。

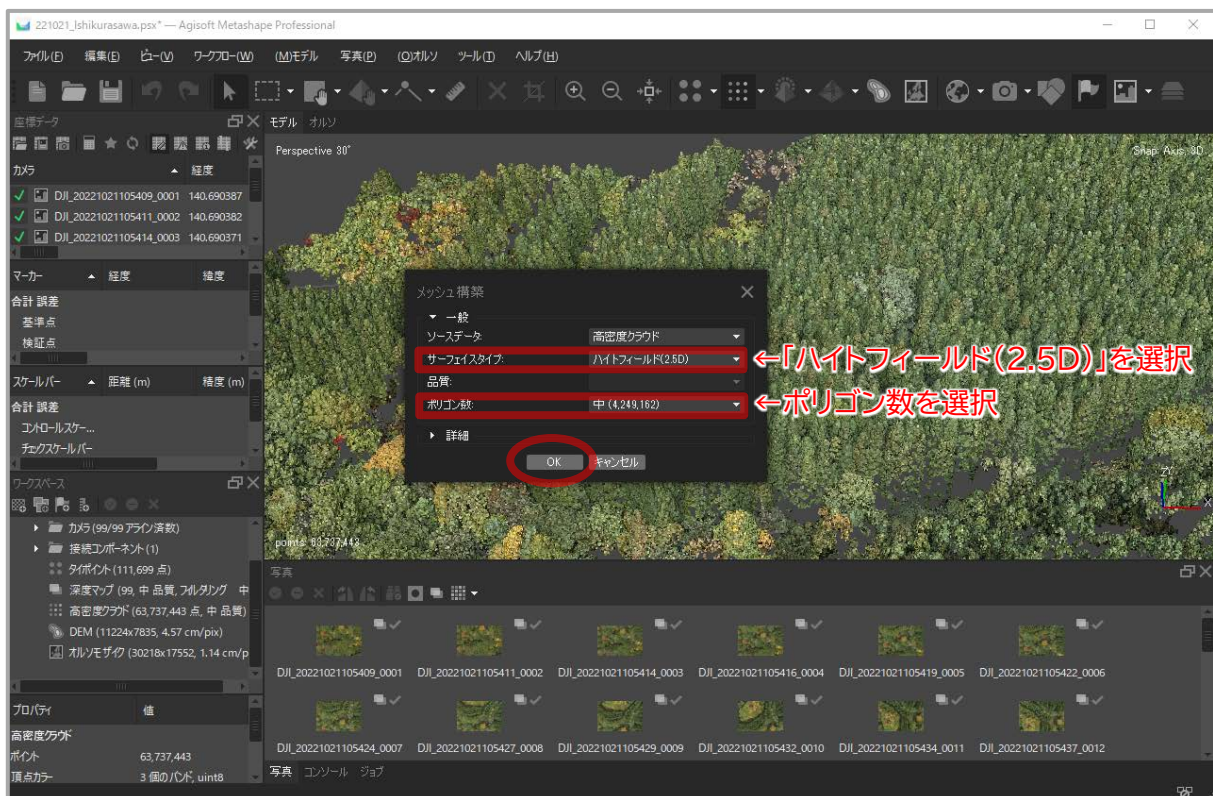


図 3. 2.23 「メッシュ構築」の実施

(4) DEM 構築

樹冠表層の点群データを使用して樹高・樹冠投影面積の算出を実施するには、点群データを DSM に変換し、ラスタデータ化する必要があります (第 2 章 2. 1 参照)。Metashape Professional を使用している場合は、このソフトウェア上で併せて実施します。

「メッシュ構築」が終了した時点で一度もプロジェクト (= 実施した処理と作成されたデータ) の保存を実施していない場合は、「DEM 構築」実施時に保存するよう求められますので、ツールメニューの「ファイル」等から保存を実施してください。

「DEM 構築」を実施するには、画面上部のツールメニュー「ワークフロー」から「DEM 構築」をクリックします。現れた設定画面で「ジオグラフィック」にチェックを入れ、チェックを入れた場所のすぐ右下にある▼を押して現れるドロップダウンリストから、「もっと…」を選択します (図 3. 2.24)。「座標系の選択」という画面が現れるので、秋田県で撮影した写真の場合は基本的に「フィルター」に「6678」と入力し、「JGD2011 / Japan Plane Rectangular CS X」(平面直角座標系*第 10 系)を選択して「OK」をクリックします。一度使用した座標系は、次回から▼を押して現れるリストに表示されます。元の設定画面に戻ったら、「ソースデータ」が「高密度クラウド」、「内挿補間」が「有効 (標準)」となっているか確認してください。

以上の設定が済んだのち、画面下部の「OK」をクリックすると処理が開始されます。終了すると、これまで点群やメッシュモデルを表示していた「モデル」ペインではなく、「オルソ」ペインに作成した DSM が表示されます。Metashape Professional 上は「DEM」と表示されていますが、本マニュアルで生成するデータは樹冠表層の高さなども含んでいるため、正しくは「DSM」です。

作成できた DSM は、以下の①～③の手順によりラスタデータとして出力します。

- ① 画面上部の「ファイル」タブをクリックし、「エクスポート」から「DEM をエクスポート」を選択します (図 3. 2.25)
- ② 保存するファイル名を入力する画面が現れるので、ファイルの種類は「TIFF / GeoTIFF (*.tif)」とし、ファイル名を適宜入力します
- ③ 続いて出力するラスタデータの座標系やピクセルサイズ (= セルサイズ) 等を尋ねる画面が現れるので、「0.1」(=10cm) と入力します。ピクセルサイズは、XY で同じ値としてください。これ以外については、基本的に規定値のままでよいです

10cm というピクセルサイズは、林野庁『UAV による立木調査マニュアル』を参考に決定しました。本マニュアルの基礎となった「UAV による森林調査等実証実験業務」でも、DEM および DSM はセルサイズ 10cm のラスタデータとしており、十分樹冠や樹頂点の形状を捉えることができている

ました。

※ 平面直角座標系…日本の公共測量で採用されている座標系（地球上での位置を表す場合に必要
な、どこを原点とするのか、座標の単位はどうするのかといった決まりごと）。座標値の単位は
m（メートル）で、「ガウス・クリューゲル図法」により楕円体である地球を平面に投影してい
ます。楕円体面を平面に投影することによる歪みを小さくするために、日本全国を第1系～第
19系の19地域に分割してそれぞれに原点を設置しており、秋田県は第10系に該当します

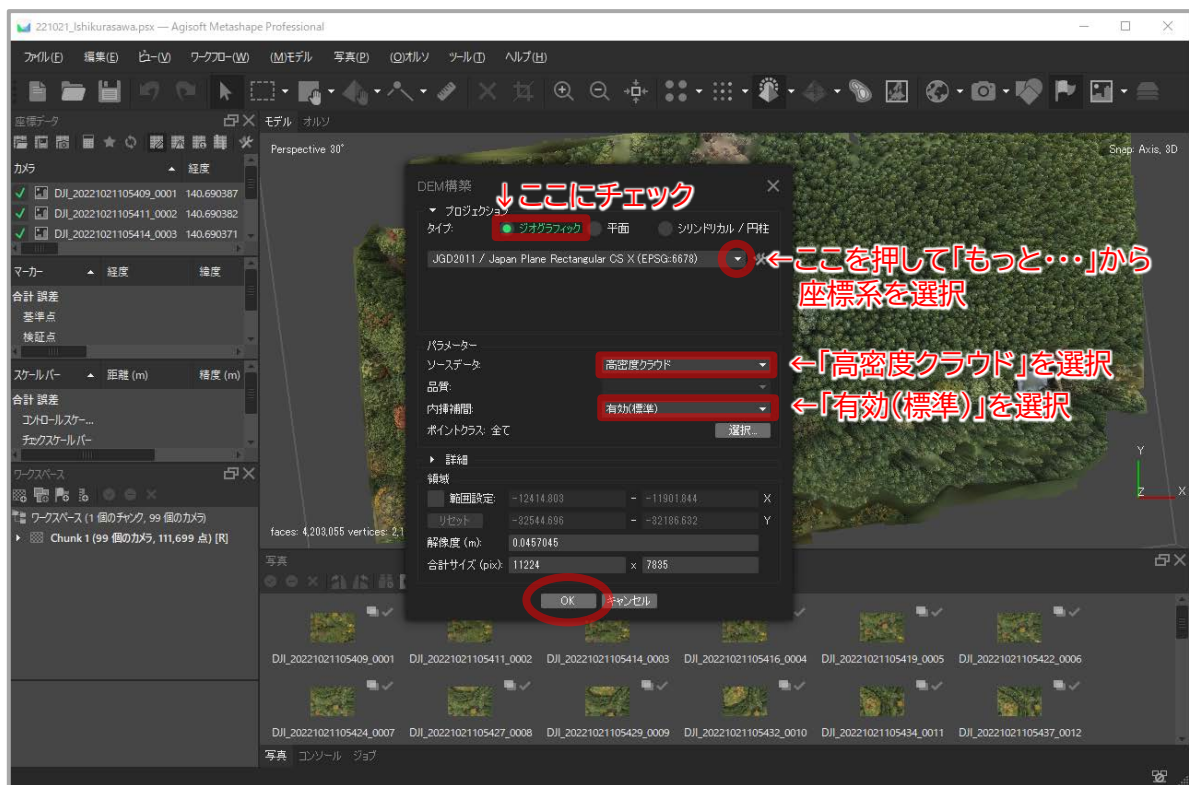


図 3.24 「DEM 構築」の実施

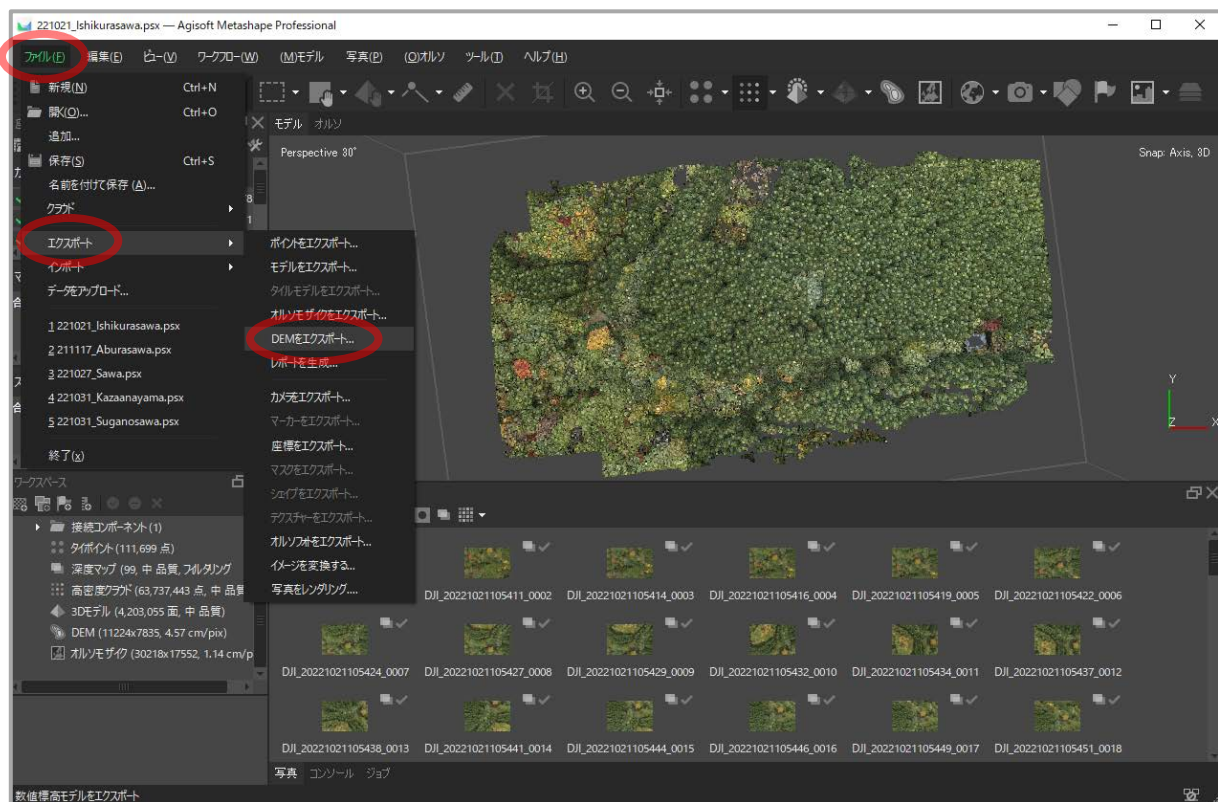


図 3.2.25 DSM(ラスタデータ)を出力する画面

(5) オルソモザイク構築

GCP を設置して撮影をしない場合、DSM の位置補正が必要となることはすでに述べたとおりですが（本章 3.2.1 参照）、その補正作業にオルソ画像が必要となるため、作成を実施します。

「DEM 構築」が終了したら、画面上部のツールメニュー「ワークフロー」から「オルソモザイク構築」をクリックします。現れた設定画面で、中ほどにある「サーフェイス」で「メッシュ」を選択します（図 3.2.26）。そののちに、画面上部の「ジオグラフィック」にチェックを入れ、チェックを入れた場所のすぐ右下にある▼を押して現れるドロップダウンリストから、「JGD2011 / Japan Plame Recutangular CS X」（平面直角座標系第 10 系）を選択します。さらに、「穴埋めを有効にする」にチェックが入っているか確認してください。ピクセルサイズは自動で計算された値が入っているので、そのままでもよいです。

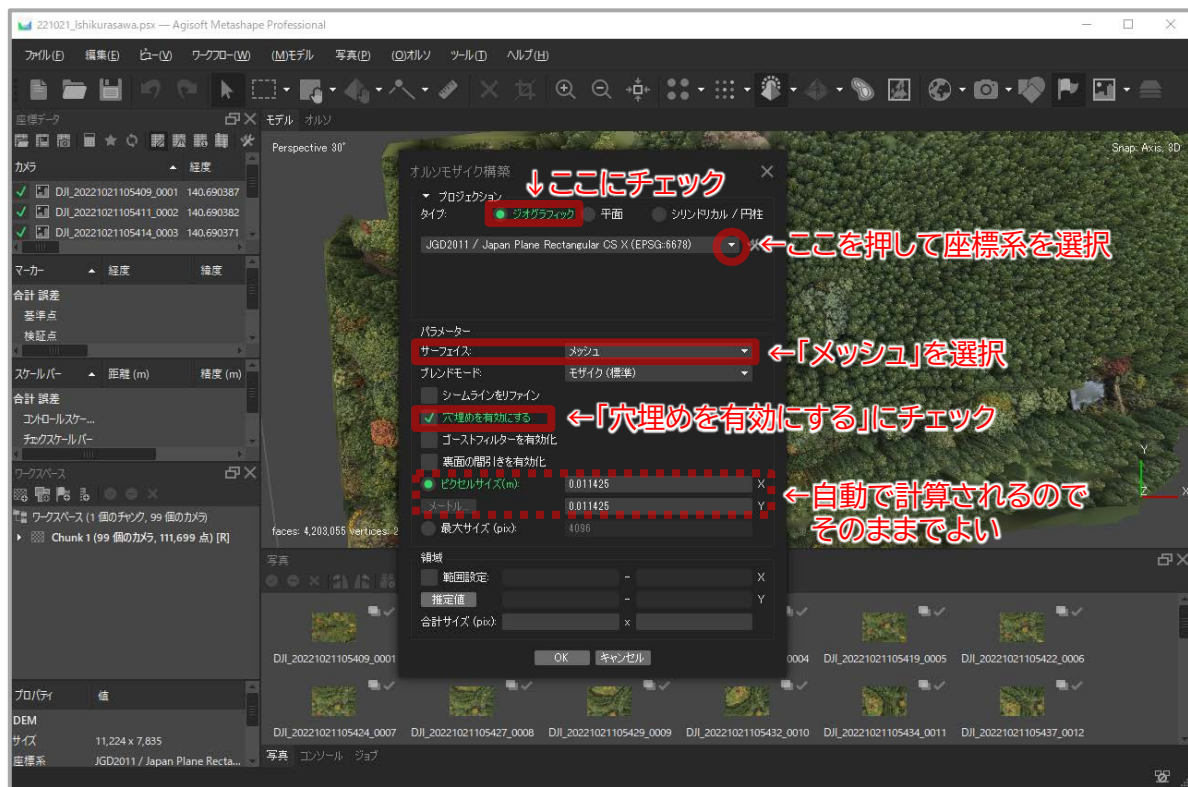


図 3.2.26 「オルソモザイク構築」の実施

「オルソモザイク構築」が終了したら、作成したオルソ画像を出力します。ツールメニューの「ファイル」から「エクスポート」を選択し、「オルソモザイクのエクスポート」を選択します。始めに保存するファイル名を入力する画面が現れるので、ファイルの種類は「TIFF / GeoTIFF (*.tif)」とし、適宜ファイル名を付けてください。続いて、エクスポートに関する設定を入力する画面が現れるので、座標系が「JGD2011 / Japan Plane Rectangular CS X」になっているか確認します。ピクセルサイズは自動で入力されている値のままでよいですし、ファイルサイズが大きくなりすぎて保存等に時間がかかる場合は、適宜大きなサイズに変更してください。これ以外の設定は規定値のままでよいです。設定内容に問題ないか確認して「OK」をクリックすると、オルソ画像が出力されます。

4. 樹高・樹冠投影面積の算出

4.1. 使用するデータの準備

樹高・樹冠投影面積の算出にあたって、あらかじめ樹冠表層の高さを含む点群データから DSM を、地盤の点群データから DEM を作成し、ラスタデータとして出力する必要があります。さらに、RTK 測位が利用できず、かつ GCP を設置せず撮影している場合は、DSM の水平位置を補正する必要もあります。ここでは、これらの作業について説明します。

4.1.1. DSM の準備

DSM については、第 3 章で紹介した 3DF Zephyr Free で作成した点群データ (las 形式) を CloudCompare によってグリッドデータ化し、ラスタデータとして用意します。Metashape Professional を使用している場合、ここでの作業はすでに実施しているため不要です (第 3 章 3.2.3(4)参照)。

グリッドデータ化する際のグリッドサイズ (=ラスタデータとして出力する際のセルサイズ) については、10cm としてください。第 3 章 3.2.3 でも延べましたが、10cm という値は、林野庁『UAV による立木調査マニュアル』を参考に決定しました。本マニュアルの基礎となった「UAV による森林調査等実証実験業務」でも、DEM および DSM はセルサイズ 10cm のラスタデータとしており、十分樹冠や樹頂点の形状を捉えることができていました。

(1) CloudCompare の起動・点群データの読み込み

CloudCompare を起動したら、画面の青い部分に点群データのファイルをドラッグ&ドロップします。点群データの形式は、txt 形式や las 形式が一般的です。

ドラッグ&ドロップしたのち、データの内容や座標体系に関するダイアログが現れた場合は、基本的に「Apply」や「はい (Y)」を選択してかまいません。

画面の青い部分に点群データが現れたら、読み込みは完了です。

(2) DSM 作成・ラスタデータとして出力

画面右側の「データベースツリー」でデータ名をクリックした状態で、「点を 2D ラスターに変換」をクリックします (図 4.1.1)。現れた画面で以下のように設定し、「Update grid」をクリックすると、DSM が作成されます (図 4.1.2)。

- step (セルサイズ) : 10cm (0.1m)
- active layer : Height grid values
- direction : Z
- cell height : maximum
- Fill with : interpolate または leave empty

作成が終わったら、画面左下の「Export」タブにある「Raster」ボタンをクリックすると（図 4.1.3）、出力内容について尋ねる画面が現れるので、「Export Heights」にチェックが入っているか確認してください（図 4.1.4）。確認後に「OK」をクリックするとファイル名と保存先を聞かれるので、適宜入力してください。以上で、点群データをグリッドデータに変換し、ラスターデータとして出力する作業は終了です。

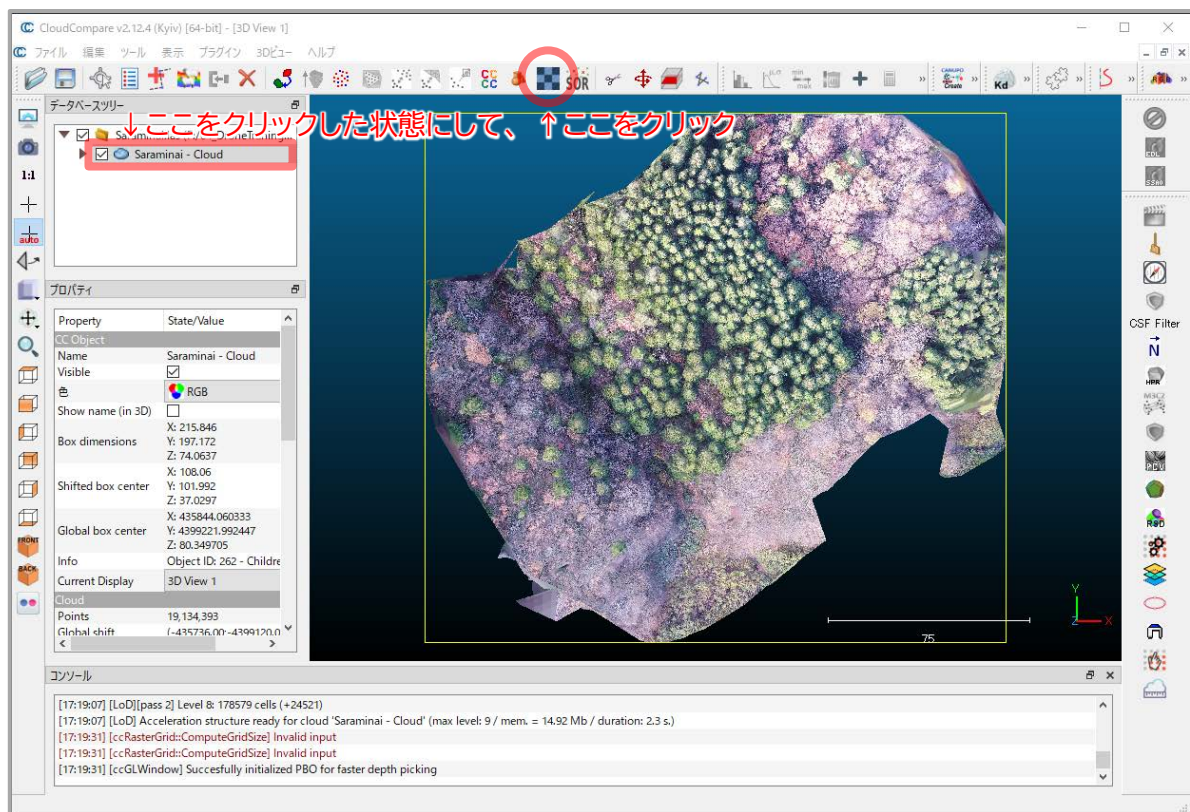


図 4.1.1 グリッドデータへの変換 その1

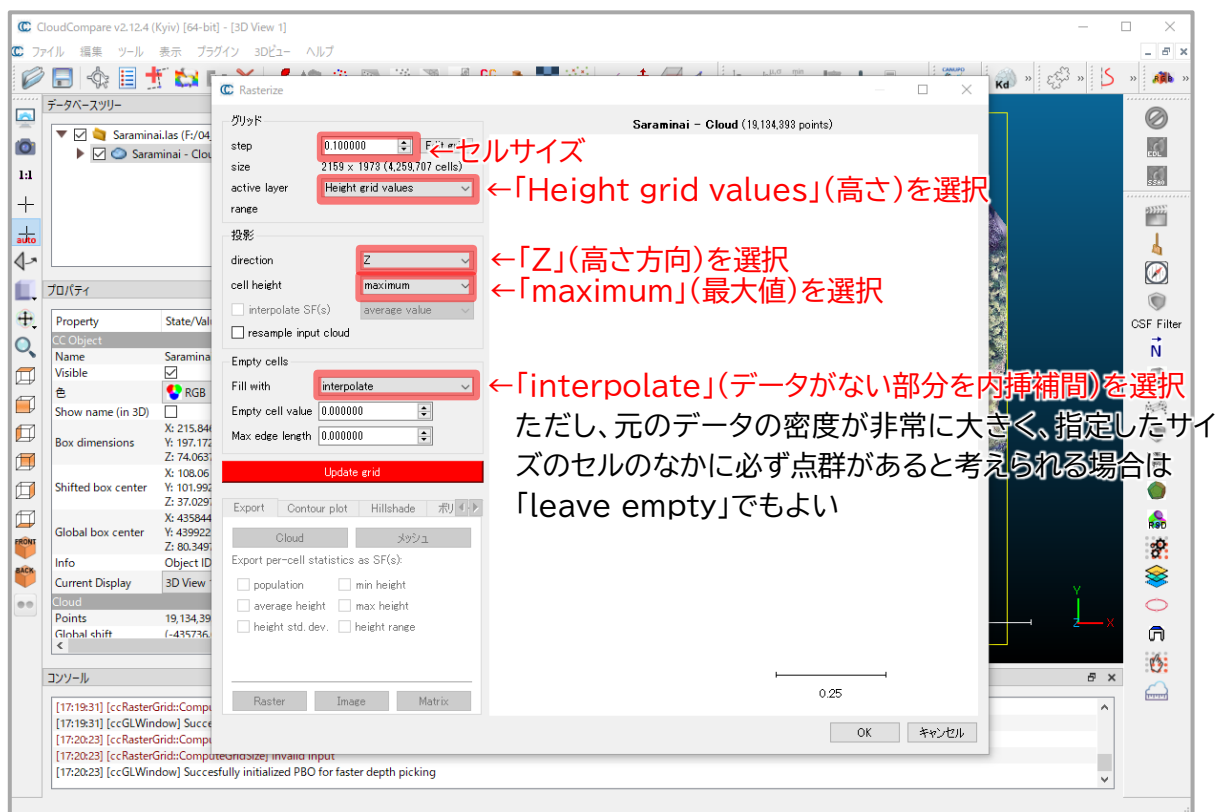


図 4.1.2 グリッドデータへの変換 その2

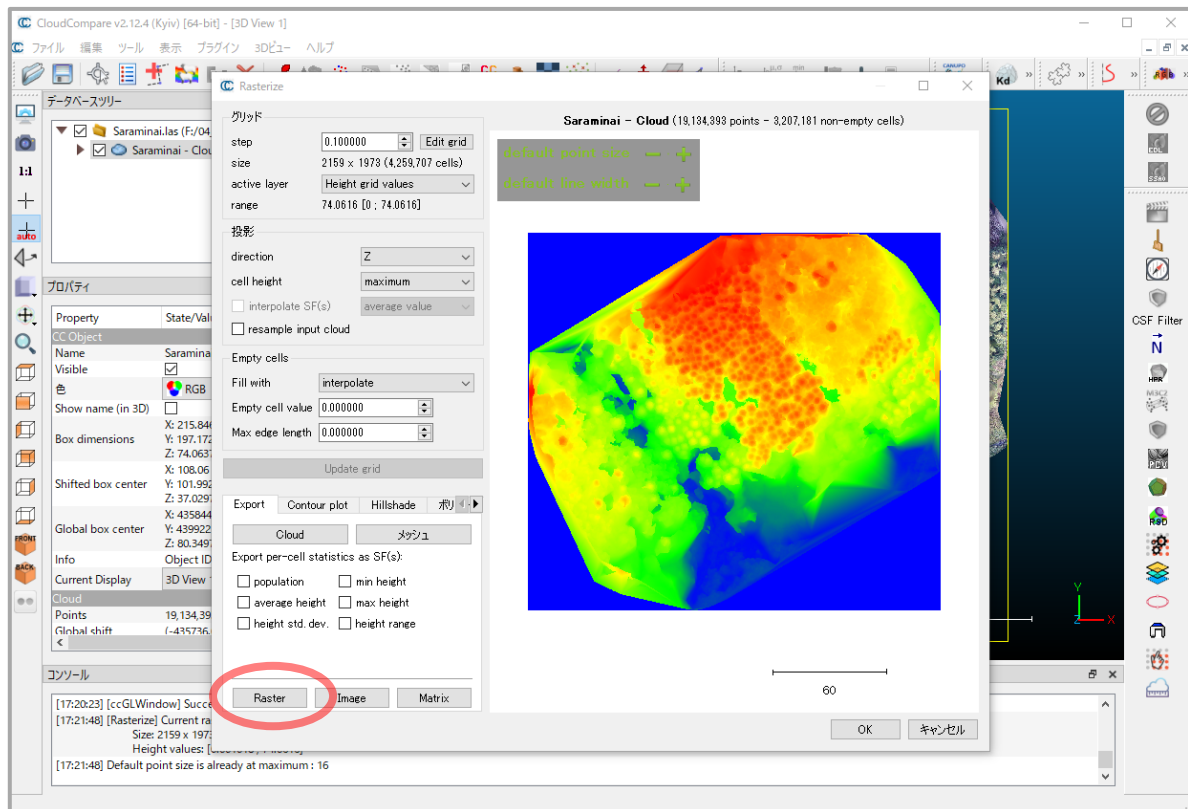


図 4.1.3 グリッドデータをラスターデータとして出力 その1

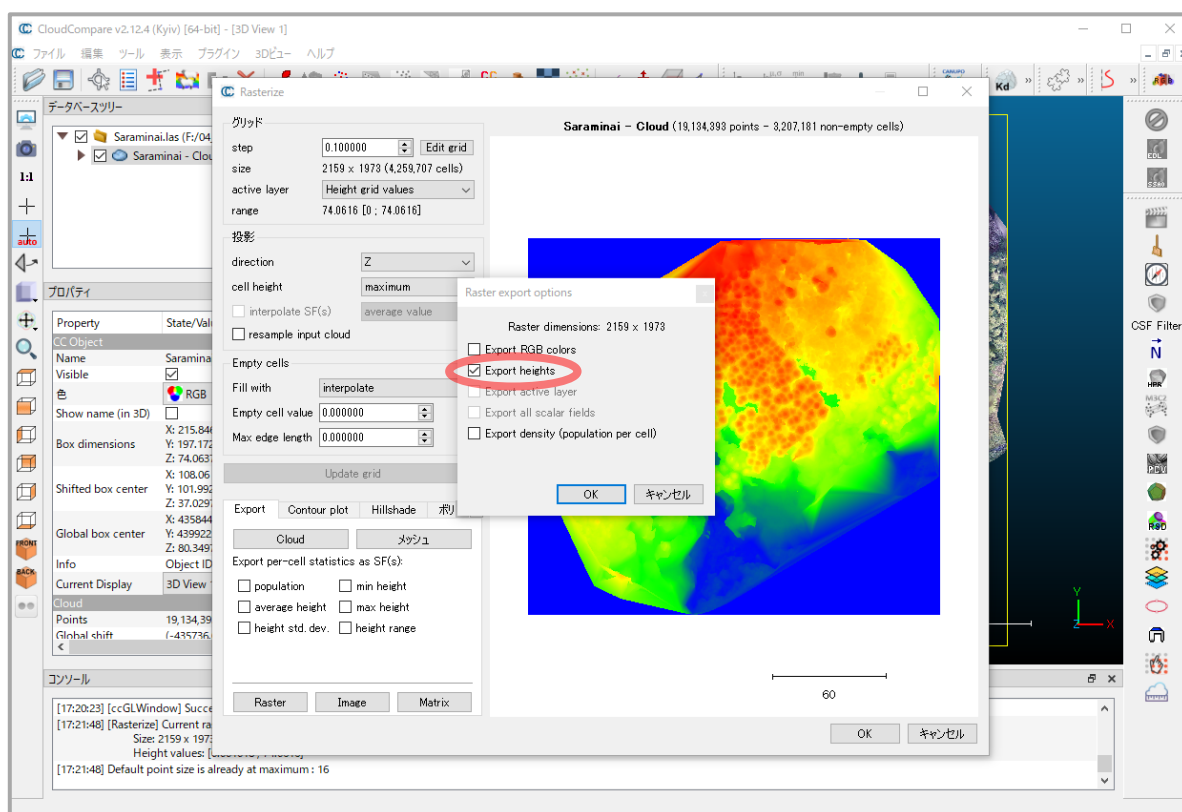


図 4.1.4 グリッドデータをラスターデータとして出力 その 2

(3) RGB 画像の作成・出力

本マニュアルでは GCP の設置を前提としないため、水平位置や高度の精度が十分でないことはすでに述べたとおりであり、高度については第 3 章 3. 2. 1 で SfM ソフトウェアを使用する前に補正する方法を紹介しました。水平位置については、このあと第 4 章 4. 1. 3 で補正方法を説明します。その際、3DF Zephyr Free を使用している場合はカラー表示された点群データを真上からみた画像（以降、RGB 画像）が必要であるため、ここで出力します。

画面右側の「データベースツリー」でデータ名をクリックした状態で、「点を 2D ラスターに変換」をクリックします。現れた画面で以下のように設定し、「Update grid」をクリックすると、RGB 画像が作成されます（図 4.1.5）。

- step（セルサイズ）：適宜（3～10cm [0.03～0.10m] 程度）
- active layer：RGB
- direction：Z
- cell height：average
- Fill with：interpolate または leave empty

作成した画像を出力する際は、画面左下の「Export」タブにある「Raster」ボタンをクリックすると、出力内容について尋ねる画面が現れるので、「Export RGB colors」のみにチェックを入れてください（前掲図 4.1.4 参照）。確認後に「OK」をクリックするとファイル名と保存先を聞かれるので、適宜入力してください。

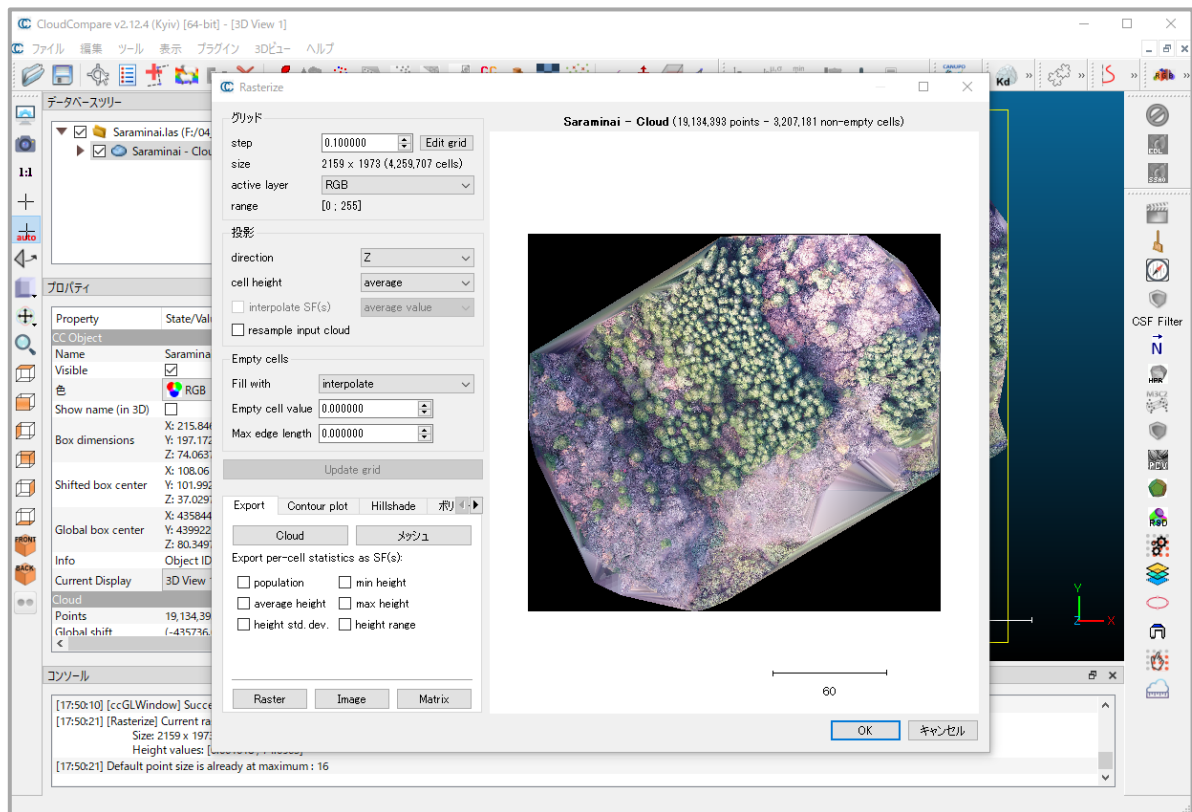


図 4.1.5 RGB 画像の作成

4.1.2. DEM の準備

DEM については、ドローン写真による調査では別途用意する必要があります。航空レーザ測量等による点群データ（グラウンドデータという：ファイル形式は las や txt など）を用意した場合は、前項 4.1.1 で紹介した CloudCompare を用いた変換方法を使用してラスタデータにしてください。その際、「cell height」は「average」としてください。セルサイズについては、DSM と同様に 10cm としてください。

すでに DEM（グリッドデータ）になっているデータ（ファイル形式は txt や csv など）を用意した場合も、ラスタデータとして出力する必要があるので、同様に CloudCompare で変換してください。

4. 1. 3. DSM の水平位置補正

DSM の水平位置のズレについては、点群データを作成後、ラスタデータとして出力した状態（本章 4. 1. 1 参照）から、**QGIS** および基準となる（＝位置が正しい）航空写真画像や地形図などを使用して、以下の手順で補正します。

なお、**DSM** の水平位置が基準となる画像や地形図とほとんどズレがない場合は、ここで説明する作業は実施不要です。例えば **RTK** 測位に対応しているドローンを使用した場合が該当します。

- ① 基準となる画像や地形図などを **QGIS** に読み込みます（図 4. 1.6）。基準となる画像や地形図などの座標系は基本的に次の②で設定する「変換先 CRS」と揃えてください。
- ② ツールバーにある「ラスタ」から「ジオリファレンサ」を起動し、前項 4. 1. 1(3)で出力した RGB 画像または第 3 章 3. 2. 3(5)で出力したオルソ画像を画面上に読み込みます。続いて、画面上部にある「変換の設定」をクリックし、以下のように設定します。以下にない項目は、規定値のままでよいです（図 4. 1.7）

- ・変換タイプ：ヘルマート
- ・変換先 CRS：適宜 ※秋田県なら基本的に JGD2011 / Japan Plane Rectangular CS X
- ・出力ラスタ：ファイル名は適宜（形式：tif）

- ③ 基準となる画像や図面と RGB 画像またはオルソ画像で共通する場所について、はじめに「ジオリファレンサ」画面のオルソ画像上でクリックすると、「地図座標の入力」という画面が現れるので、下部の「地図キャンバスから」をクリックします（図 4. 1.8）
- ④ ①の画面に戻るので、基準となる写真や図面上でクリックします。「地図座標の入力」画面に座標値が入力されるので、「OK」を押します（図 4. 1.9）。③④の作業を最低 3 点分実施してください
- ⑤ ③④の作業が終了したら、画面上部にある「ジオリファレンスの開始」をクリックし、変換を実行します（図 4. 1.10）。画面に成功した旨のメッセージが表示されたら、RGB 画像またはオルソ画像の位置調整は終了です。同じく画面上部にある「名前を付けて保存」をクリックし、③④の作業で作成された点（＝GCP）を適当な名前で保存してください
- ⑥ 続いて「ジオリファレンサ」画面に **DSM** を読み込みます。②と同様に変換の設定をしたら、画面上部にある「GCP を読み込み」をクリックして④で保存した GCP を読み込みます（図 4. 1.11）。そのうえで「ジオリファレンスの開始」をクリックすると、**DSM** が補正された RGB 画像またはオルソ画像と同じ位置に移動します。これで、**DSM** の位置補正は終了です

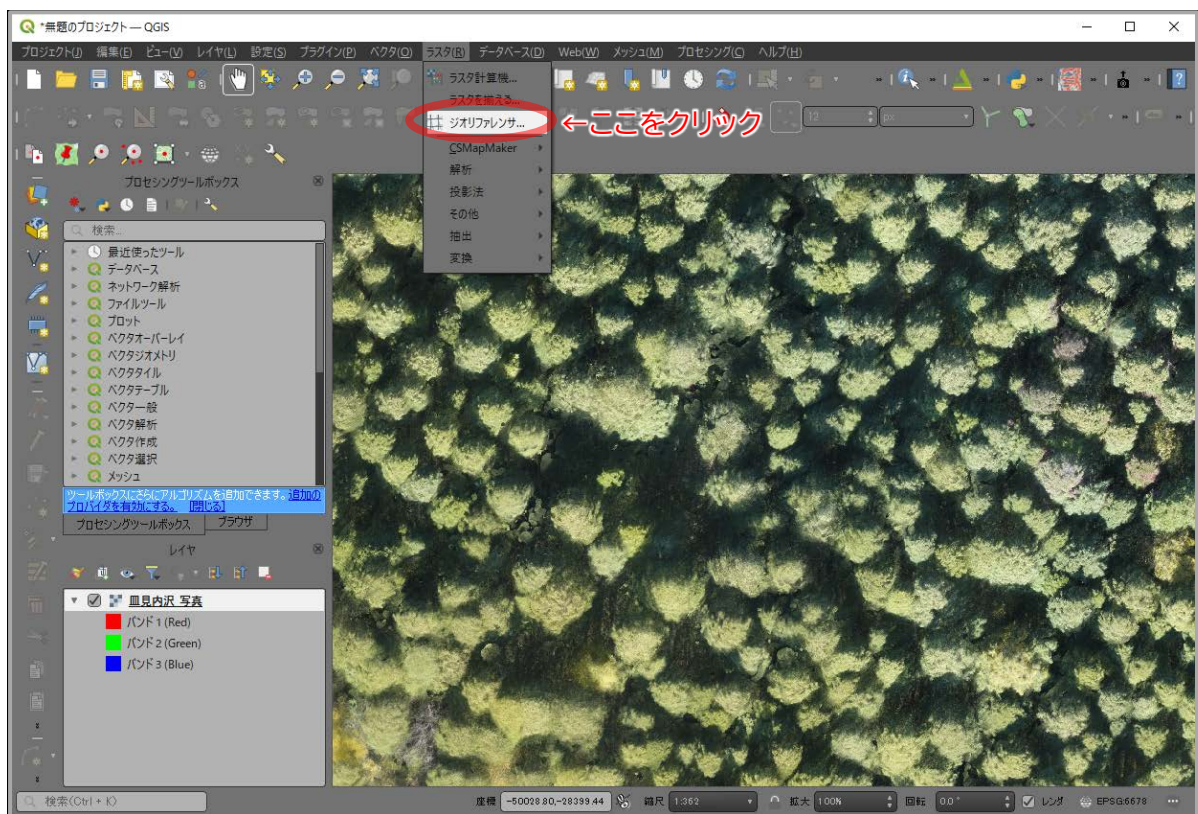


図 4.1.6 RGB 画像に対するジオリファレンサの実行 その 1

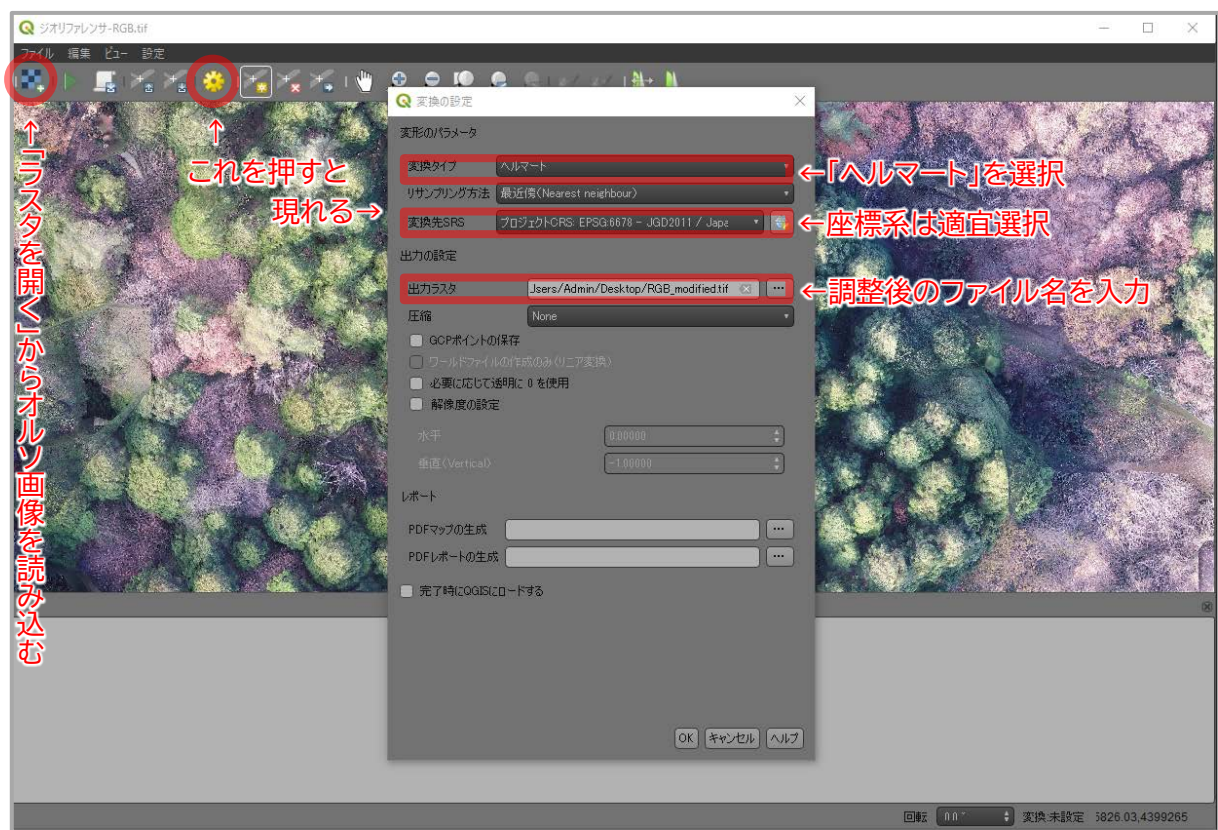


図 4.1.7 RGB 画像に対するジオリファレンサの実行 その 2

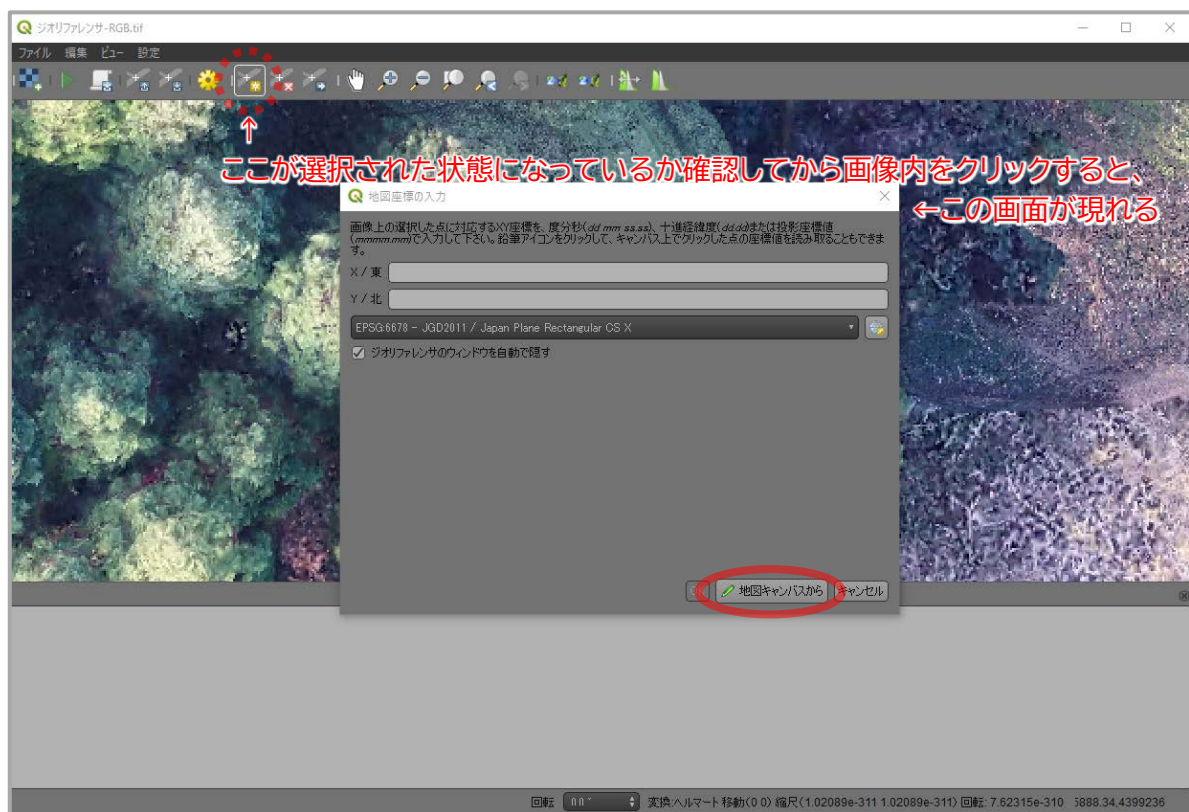


図 4.1.8 RGB 画像に対するジオリファレンサの実行 その 3

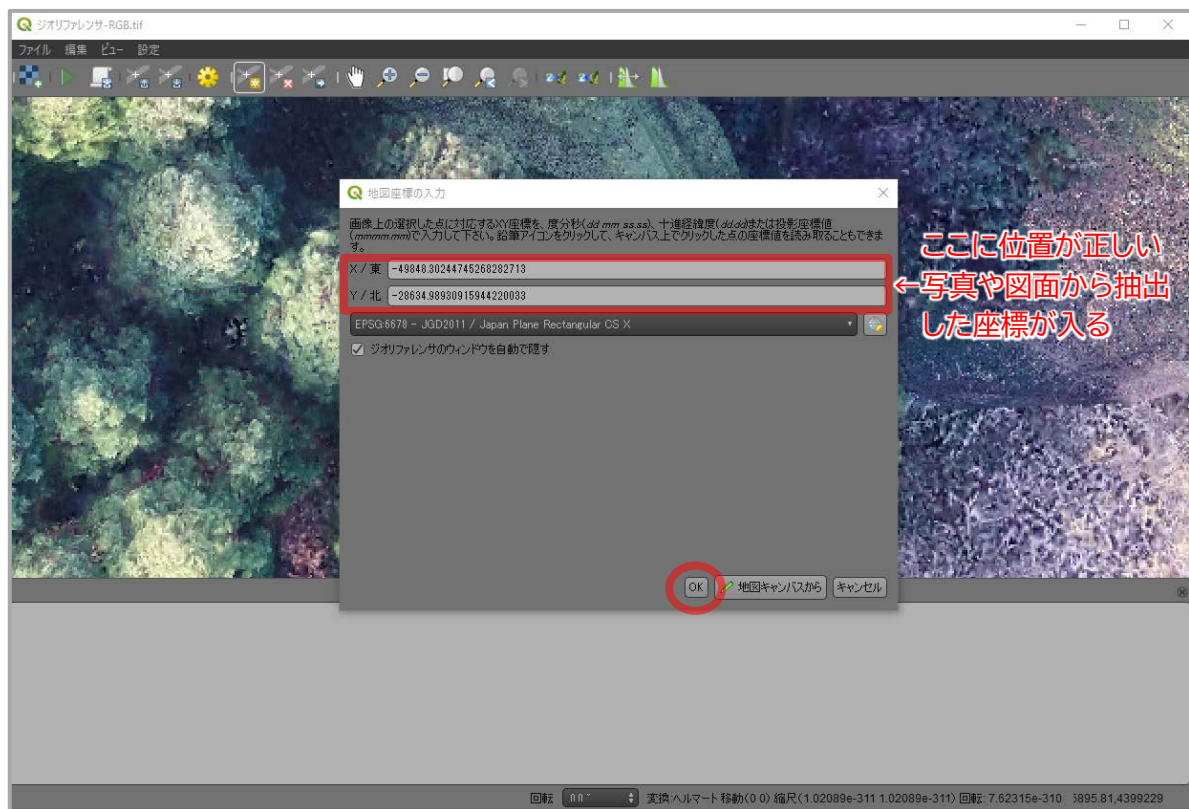


図 4.1.9 RGB 画像に対するジオリファレンサの実行 その 4

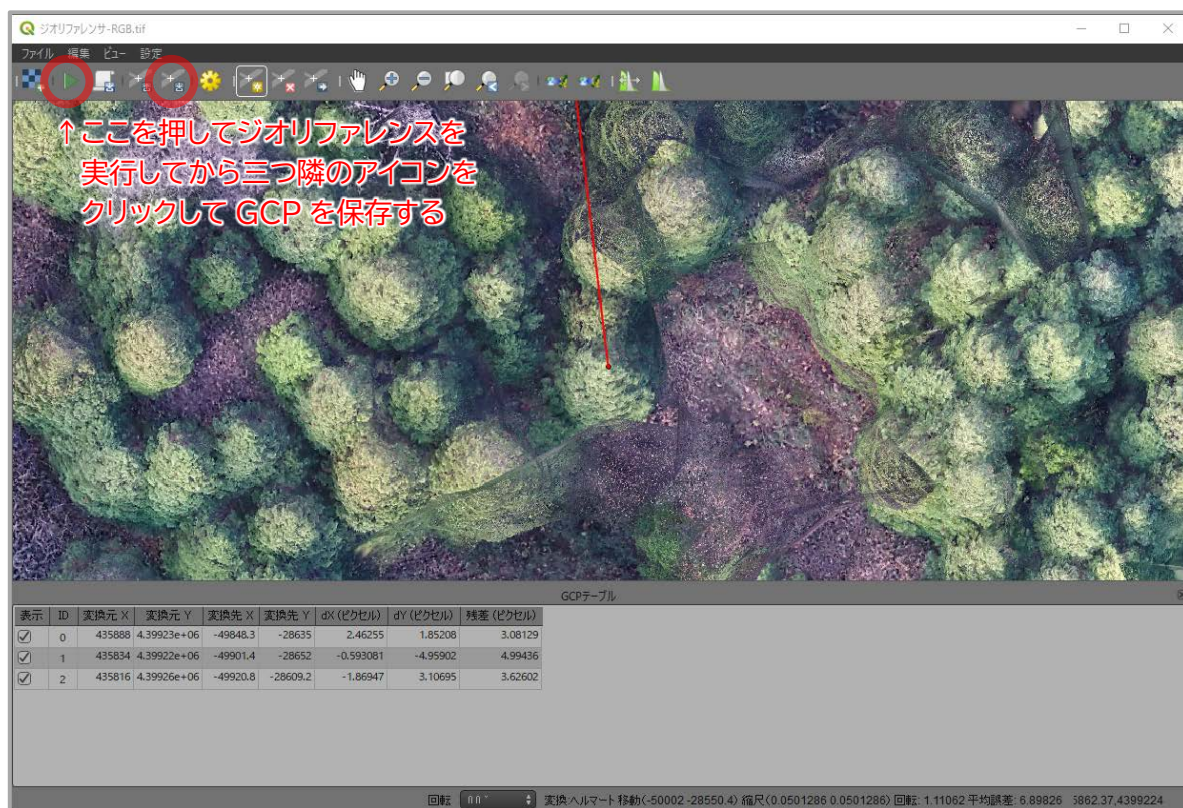


図 4.1.10 RGB 画像に対するジオリファレンスの実行 その 5

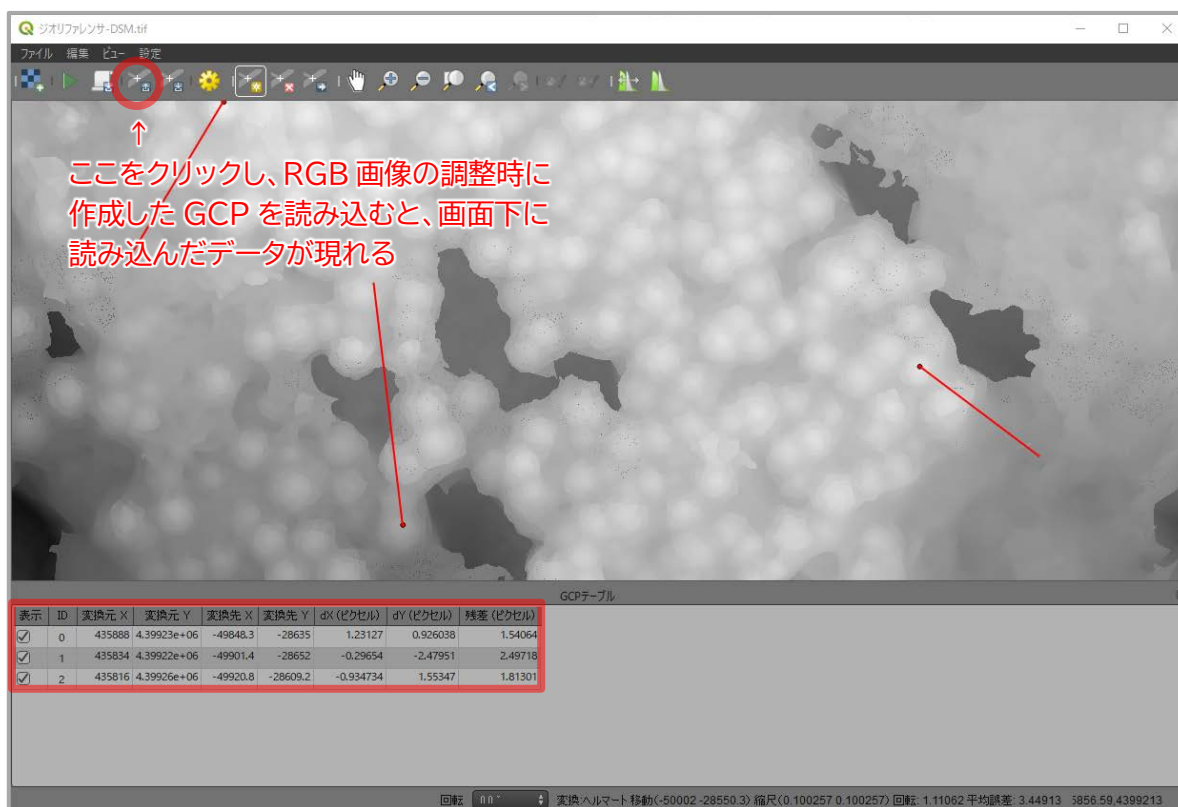


図 4.1.11 DSM に対するジオリファレンスの実行

4. 2. QGIS を用いた算出の実施

4. 2. 1. 算出方法の概要

前節で準備した DSM・DEM を基に、無料の GIS ソフトウェアである QGIS を使用して樹高・樹冠投影面積を算出する手順は、大きくまとめると図 4. 2.1 のとおりです。この手法では、樹高を算出するために樹頂点を抽出しますが、本来樹頂点でない点（＝ノイズ）も抽出される場合があるため、樹冠表面の形状を滑らかにしたり、1 本のスギに対して複数抽出されている樹頂点をひとまとめにする処理を実施したりして、なるべく除去します。ノイズのイメージは、図 4. 2.2 のとおりです。

ただし、このような処理を行なったとしても、誤抽出木や未抽出木を 0 とすることは困難です。その一例は、図 4. 2.3 に示すとおりです。この例のほかにも、スギとマツが著しく混在し、マツの枝葉がスギに被さっているような状態の場合も、誤抽出・未抽出が生じやすいです。

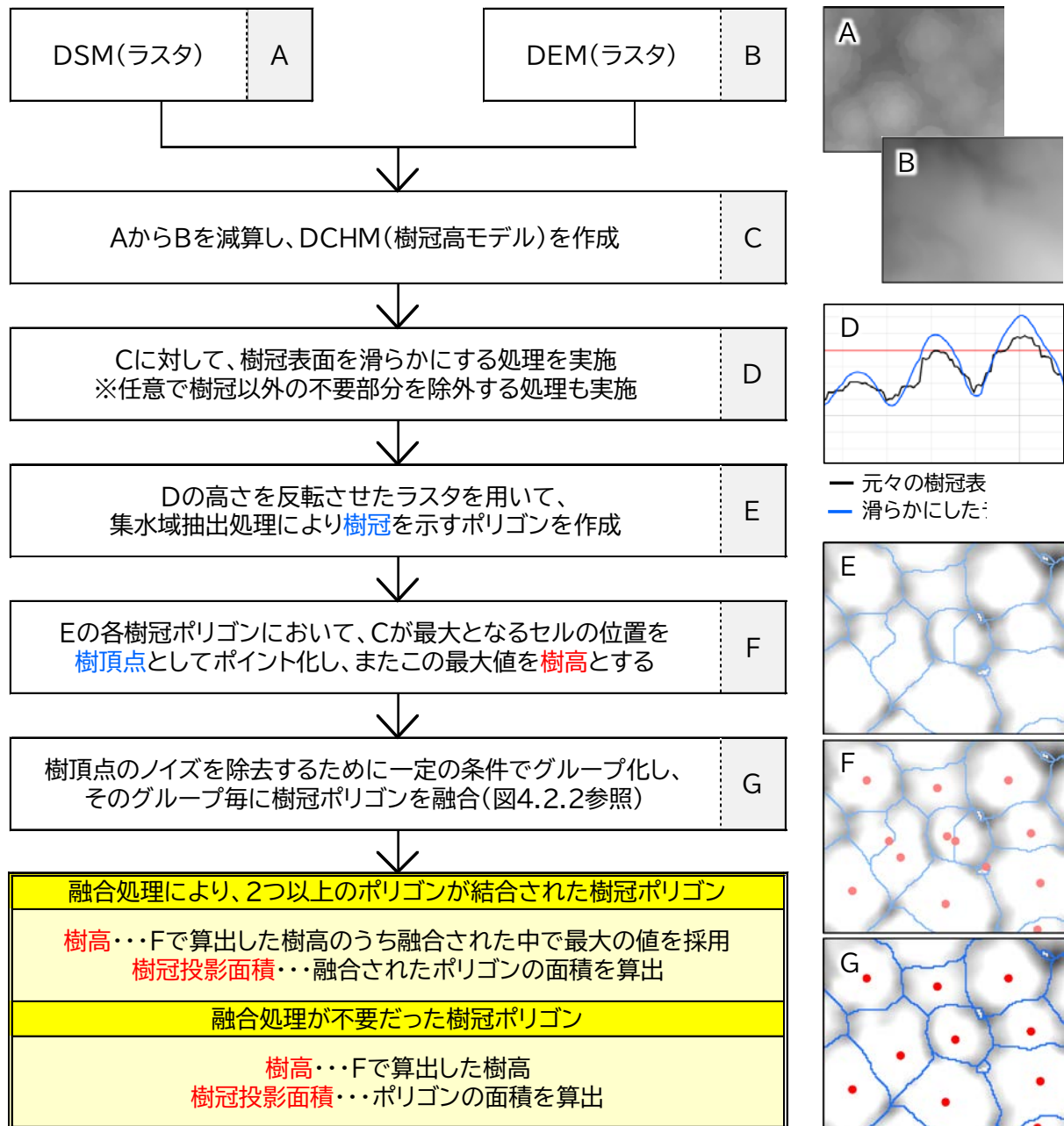


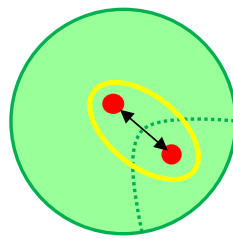
図 4.2.1 樹高・樹冠投影面積の算出フロー

スギの単木に対して、2つ以上の樹頂点が抽出される場合がある



スギ(単木)

各樹頂点同士の距離が一定の値より短い場合、1つのグループにまとめる



上から見た場合

..... 樹冠境界

まとめた樹頂点のグループに合わせて樹冠を融合し、樹高が最大となる点を樹頂点として採用

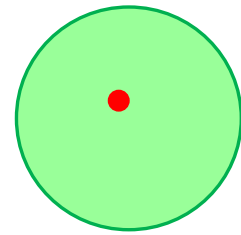
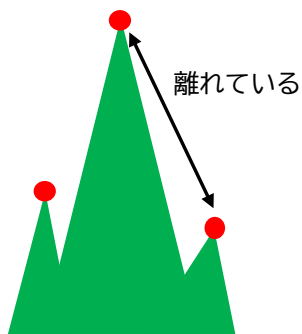


図 4.2.2 ノイズ除去のイメージ

【誤抽出木の例】



スギ(単木)

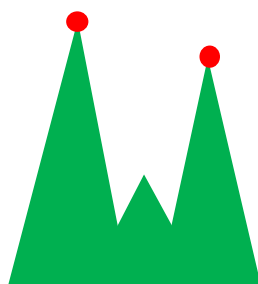


オルソ画像上でみた場合

本来は単木のスギだが、樹冠が分岐した状態になっており、ノイズ除去処理で設定した円のサイズでは対応しきれない
→実際より本数が多くなってしまう

しかし、ノイズ除去に使用する距離を大きくしすぎると、本来2本であるスギまでひとまとめにしてしまう恐れがある

【未抽出木の例】



周辺より低いスギ



オルソ画像上でみた場合

周辺のスギに密接していて、かつ樹高が低いため、点群データで形状を十分捉え切れず、樹頂点の抽出ができない
→実際より本数が少なくなってしまう

オルソ画像で判別できる単木が、点群データによる解析ですべて抽出できる訳ではない

図 4.2.3 誤抽出木・未抽出木の例

4. 2. 2. 算出の実施

(1) QGIS の起動

本マニュアルでの樹高・樹冠投影面積算出には、QGIS 上から QGIS と同時にインストールされた GRASSGIS・SAGAGIS の機能を使用します。そのため、インストールしたソフトウェア一覧から「QGIS Desktop 3.18.3 with GRASS 7.8.5」を起動します。解析で使用する機能は、QGIS の画面に表示されているプロセッシングツールボックスの上部に検索ボックスがあるので、そこに使用したツール名を入れて検索し、呼び出すことができます（図 4. 2.4）

なお、QGIS は日本語対応が進んでいますが、いまだに入出力データのパス（ファイルの場所・ファイルの名前）に日本語が含まれていると、エラーが生じることが度々あります。これ以降に説明する処理では、入出力データのパスに日本語が含まれないよう、ご注意ください。また QGIS では、処理の結果を毎回ファイルとして保存する必要はなく、一時レイヤ（一時ファイル）として画面上に出力することができます。そのため、本マニュアルの一部の処理でも、出力ファイルの保存を実施しないような記載としています。ただ、QGIS が予期せずフリーズすることなども考えられるので、適宜保存してかまいません。また、手順が進むにつれて不要になったレイヤは削除してかまいません。

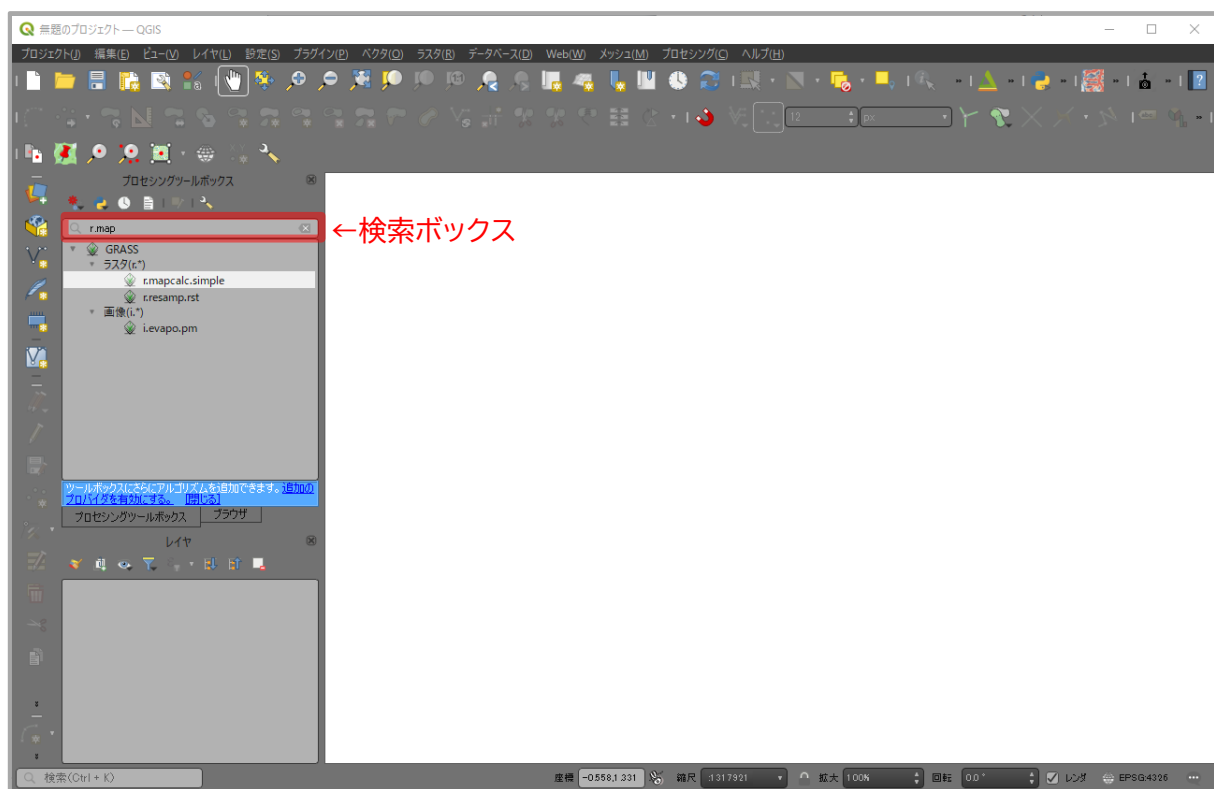


図 4. 2.4 QGIS でのツール検索方法

(2) DSM・DEM の座標系定義

QGIS を起動したら、作成した DSM・DEM のラスタデータを読み込みます。その際、CloudCompare から出力した DEM および本章 4.1.3 の作業を実施しなかった DSM の場合、QGIS 上に読み込むと、実際は位置情報を持っているにもかかわらず「不正な投影法」という扱いになります (図 4.2.5)。

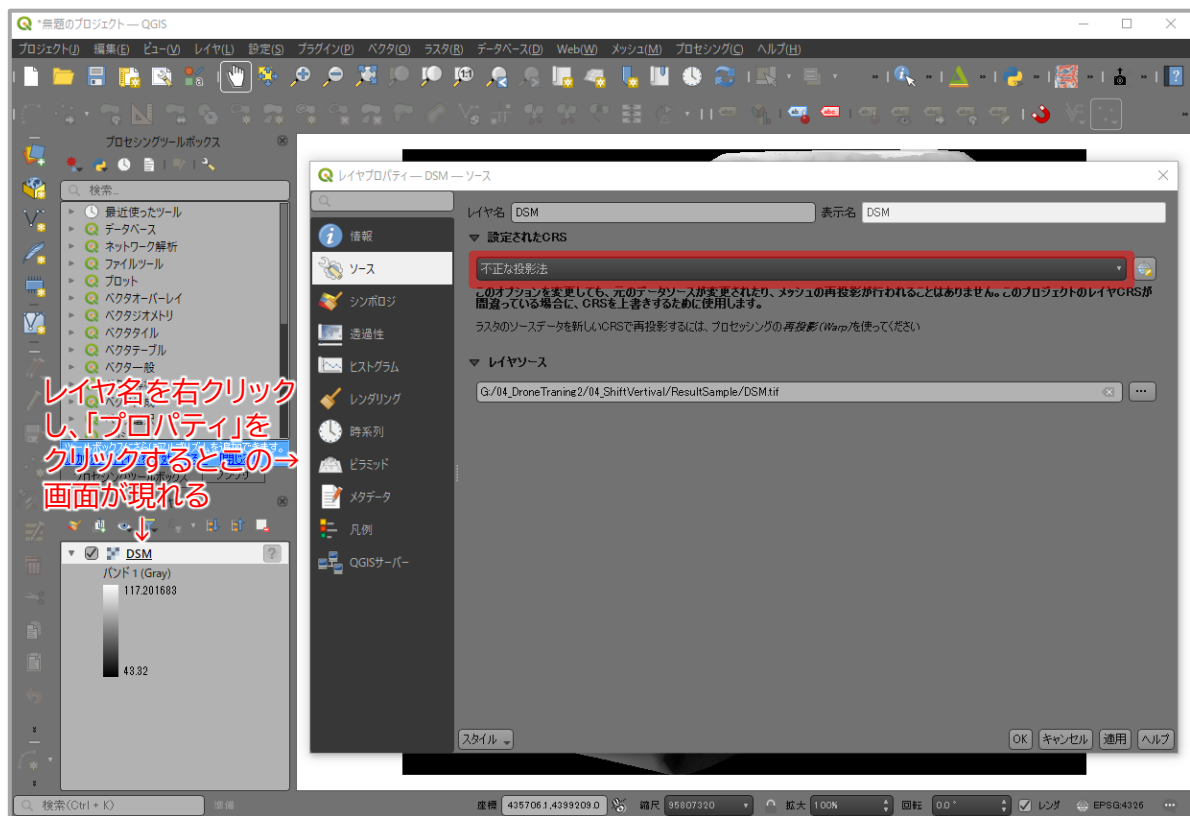


図 4.2.5 読み込んだラスタデータのプロパティ

そこで、座標系を定義する必要があります。DSM の場合は、使用した SfM ソフトウェアによって手順が異なりますので、注意してください。

<3DF Zephyr Free を使用した DSM の場合>

プロセッシングツールボックスから「投影法の割り当て」を起動してください (図 4.2.6)。「設定する座標参照系 (CRS)」は、秋田県のデータの場合は基本的に UTM 座標系*である「WGS 84 / UTM Zone 54N」とし、画面下の「実行」をクリックしてください。処理が終了したら、「再投影 (Warp)」を起動してください。「設定する座標参照系 (CRS)」を「JGD2011 / Japan Plane Rectangular CS X」とし、これ以外の項目は規定値のままとしたうえで、出力するフォルダ名・ファイル名を適宜入力して実行してください (図 4.2.7)。

<Metashape Professional を使用した DSM の場合>

プロセッシングツールボックスから「投影法の割り当て」を起動してください。「設定する座標参照系 (CRS)」は、Metashape Professional から DSM を出力するときに設定した座標系と同じものを選択してください。

<DEM の場合>

地盤データとして使用するデータ（航空レーザ測量、ドローンレーザ測量などの成果品）について、座標系の定義を成果品等から確認してください。不明であれば計測業者に尋ねてください。近年の成果品であれば、基本的に「JGD2011 / Japan Plane Rectangular CS X」のはずです。

プロセッシングツールボックスから「投影法の割り当て」を起動してください。「設定する座標参照系 (CRS)」は、成果品で定義されている座標系としてください。この座標系が DSM と一致しない場合は、「再投影 (Warp)」を起動し、「ラスタの CRS」で DSM と同じ座標系を選択して変換してください。

※ UTM 座標系…日本では国土地理院の地形図や地勢図で採用されている座標系です。UTM とは Universal Transverse Mercator（ユニバーサル横メルカトル）の略で、地球上を経度 6 度ごとのゾーンに分けて東回りに番号を振り、地球を平面に投影しています（秋田は 54 番のゾーンに該当）

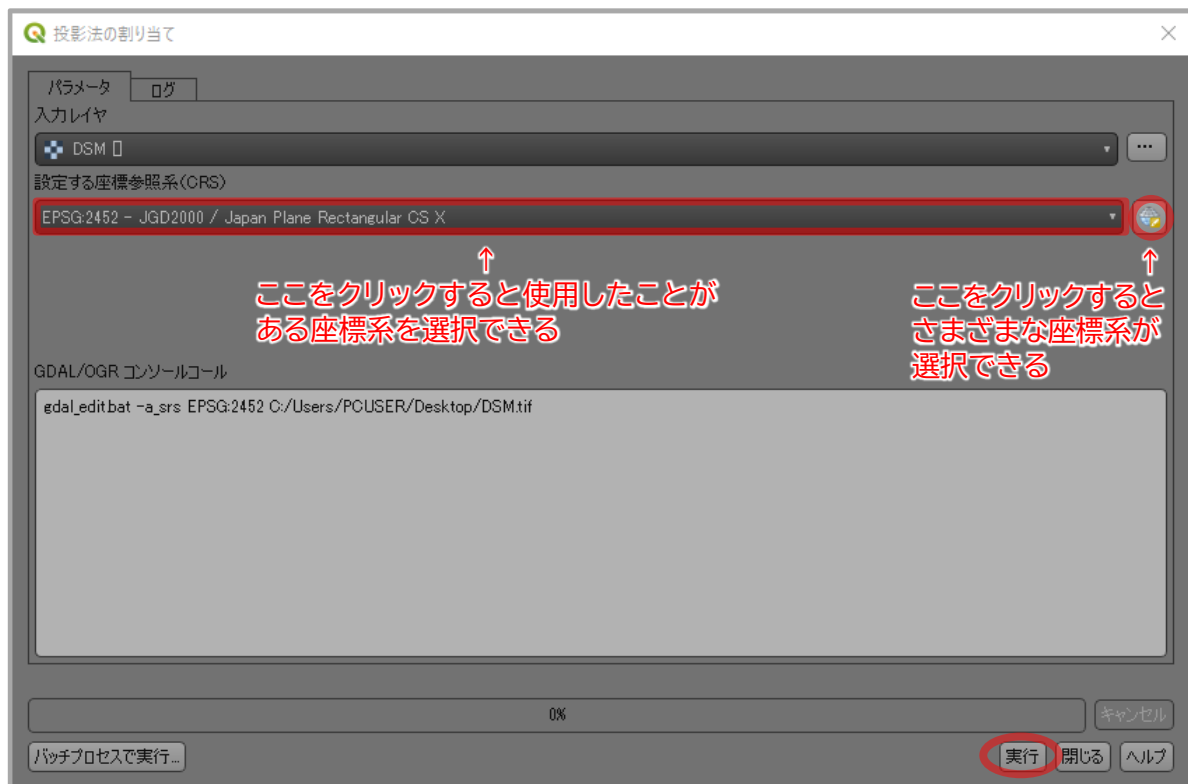


図 4. 2.6 投影法の割り当て

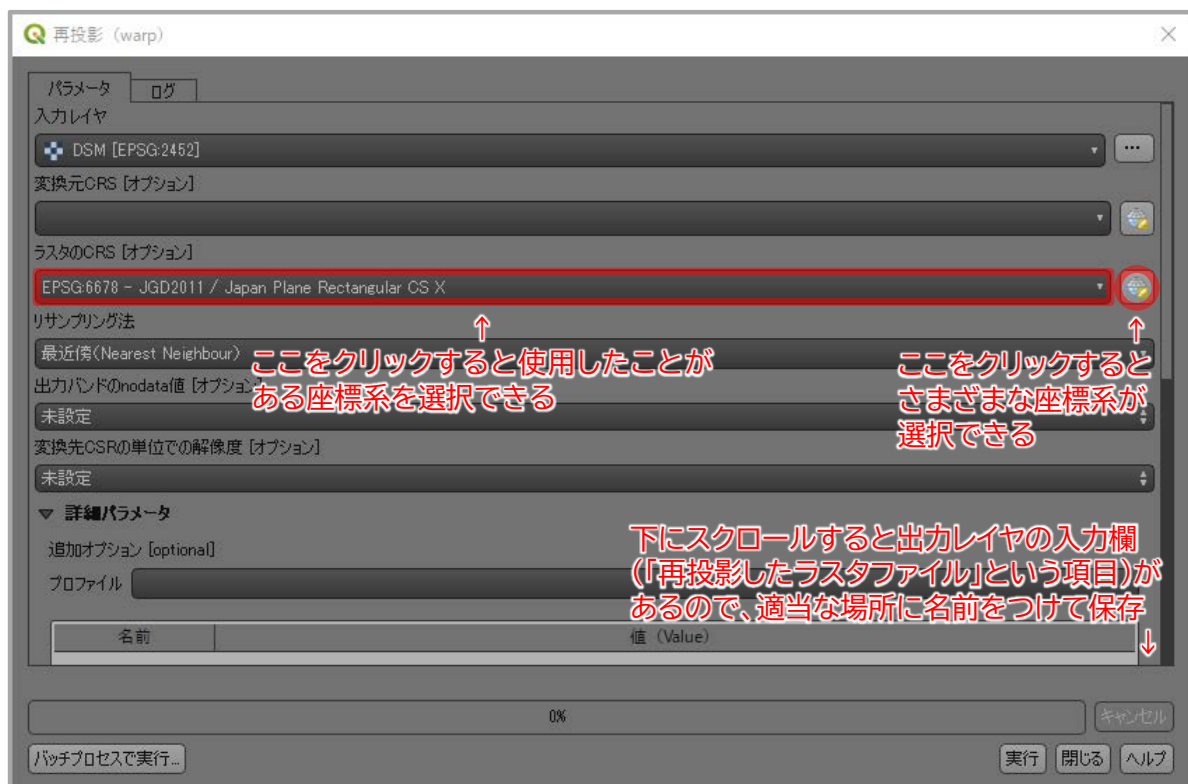


図 4. 2.7 再投影(warp)

(3) DSM・DEMの事前処理

樹高・樹冠投影面積を算出する前に、DSM および DEM に対して事前処理を実施します。その手順と内容は、表 4.2.1 のとおりです。表には使用するツールの画面を示した図の番号も記載しているので、併せて参照してください。

始めに、DSM (=表層) から DEM (=地盤) の高さを除外して DCHM (Digital Canopy Height Model : 樹冠高モデル) を作成します (①)。そのうえで、この DCHM の凹凸を強調しつつ表面を滑らかにしつつ処理を実行します (②・③)。この処理は、樹冠の形状 (スギ特有の凸形状) を維持しつつも、のちに実施する集水域抽出機能による樹冠抽出の際に、ノイズ (前掲図 4.2.2 参照) が発生することを少しでも抑えるために実行します。さらに、スギの樹冠に相当する部分以外は樹冠投影面積の算出には必要ないため、任意でこのような余分な部分をできるだけ取り除く処理を実行します (④・⑤)。調査地において余分な部分がほぼ無いようであれば、実行は不要です。

表 4.2.1 DSM・DEMの事前処理手順

順	QGIS ツール名	設定項目：設定値または入力データ
①	r.mapcalc.simple …図 4.2.8	ラスタ A : 本章 4.1.1 で準備した DSM ラスタ B : 本章 4.1.2 で準備した DEM 計算式 : A-B 出力レイヤ : DCHM.tif (必ずこのファイル名で)
②	Simple Filter …図 4.2.9	グリッド (=入力レイヤ) : ①で出力した DCHM.tif 検索モード : Circle フィルタ : Sharpen 半径 : 16~24 程度 ※出力結果をみて適宜決定してください フィルタ済みグリッド (=出力レイヤ) : 一時ファイルに保存
③	Simple Filter …図 4.2.10	グリッド (=入力レイヤ) : ②の出力レイヤ 検索モード : Circle フィルタ : Smooth 半径 : 4~6 程度 ※出力結果をみて適宜決定してください フィルタ済みグリッド (出力レイヤ) : 一時ファイルに保存 ※④⑤を実施しない場合は、DCHMf.tif ※必ずこの名前にしてください
④ ※ 任意	Valley Depth …図 4.2.11	高さ : ③の出力レイヤ テンション閾値 : 1 サーフェイスの稜線を維持する : チェックを入れる 稜部検出閾値 : 4 渓谷の深さ (=出力レイヤ) : 一時ファイルに保存 ※このレイヤ以外は出力不要
⑤ ※ 任意	r.mapcalc.simple …図 4.2.12	ラスタ A : ④の出力レイヤ ラスタ B : ③の出力レイヤ 計算式 : $((A < \bullet) / (A < \bullet)) * B$ ※ \bullet は数値 : 出力結果をみて適宜決定してください (16~20 程度) 出力レイヤ : DCHMf.tif ※必ずこの名前にしてください

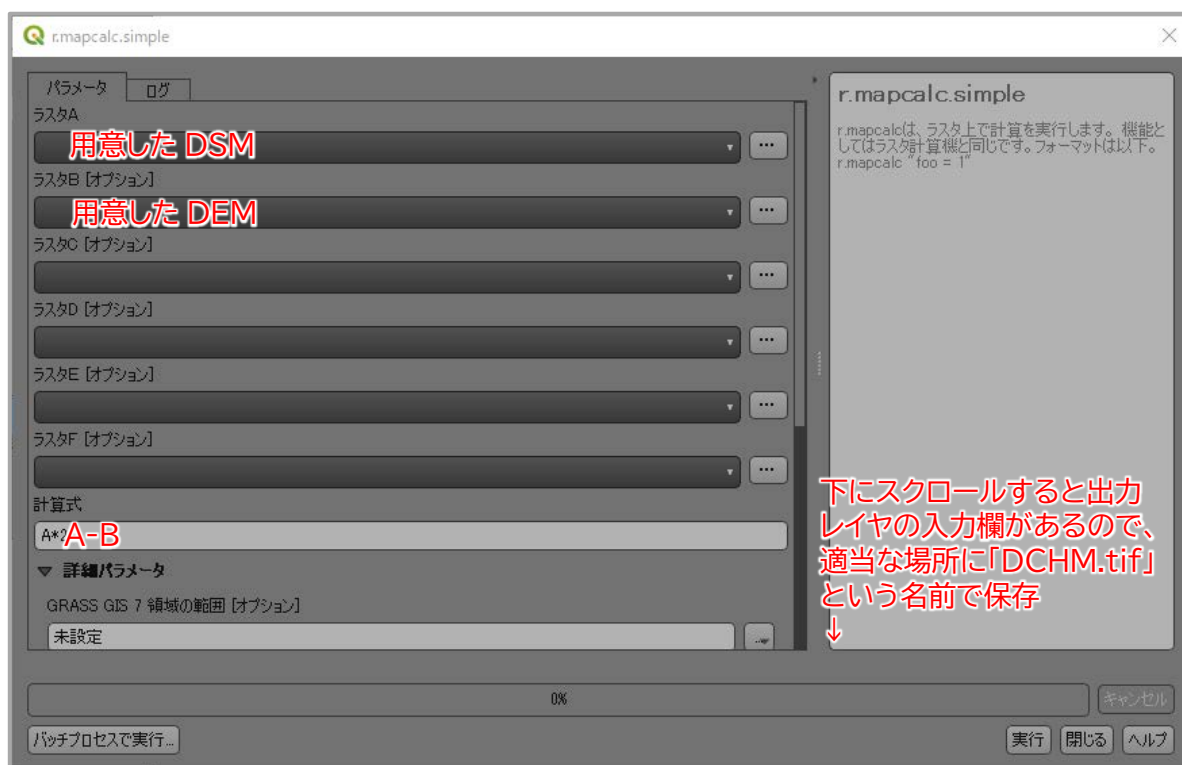


図 4.2.8 DSM・DEM の事前処理手順①

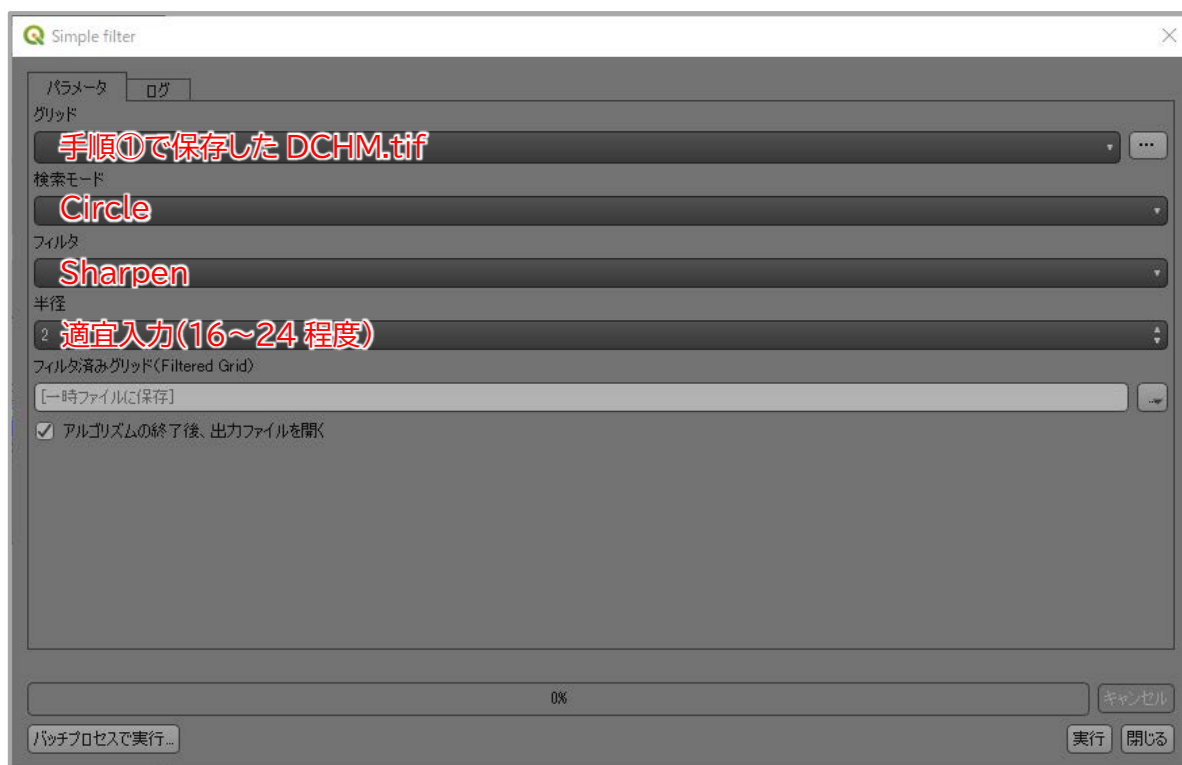


図 4.2.9 DSM・DEM の事前処理手順②

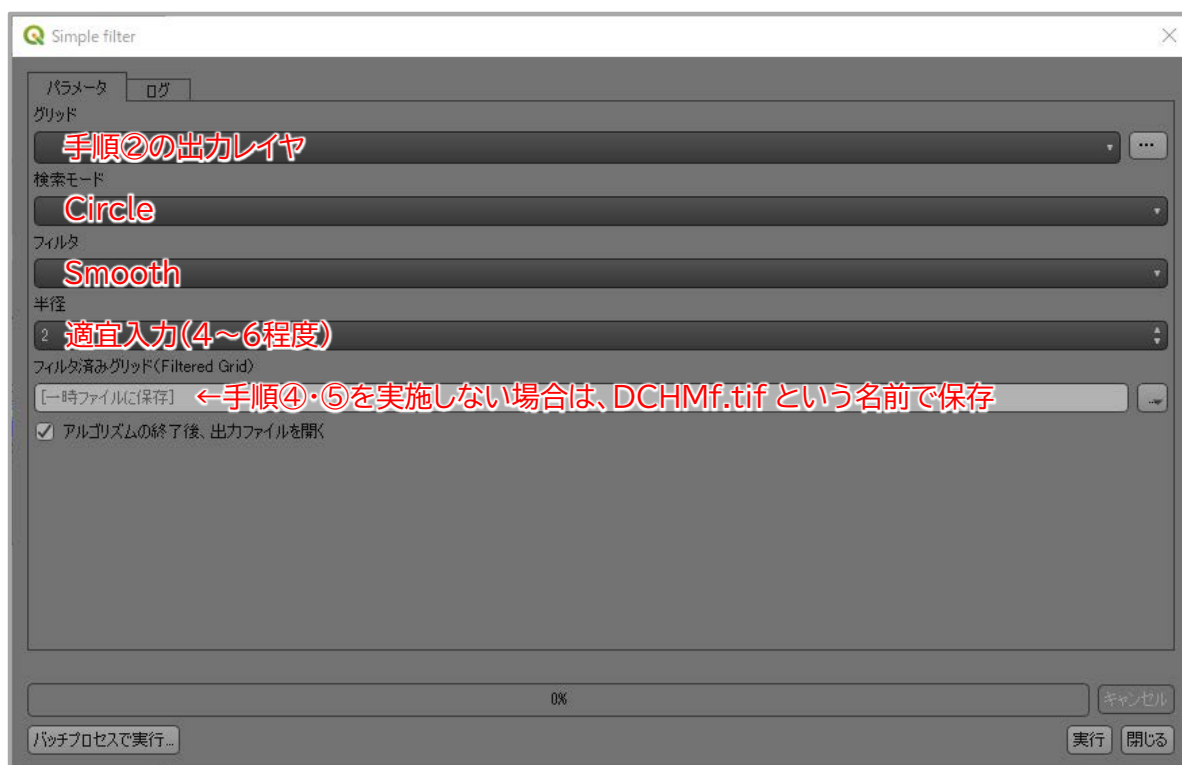


図 4. 2.10 DSM・DEM の事前処理手順③

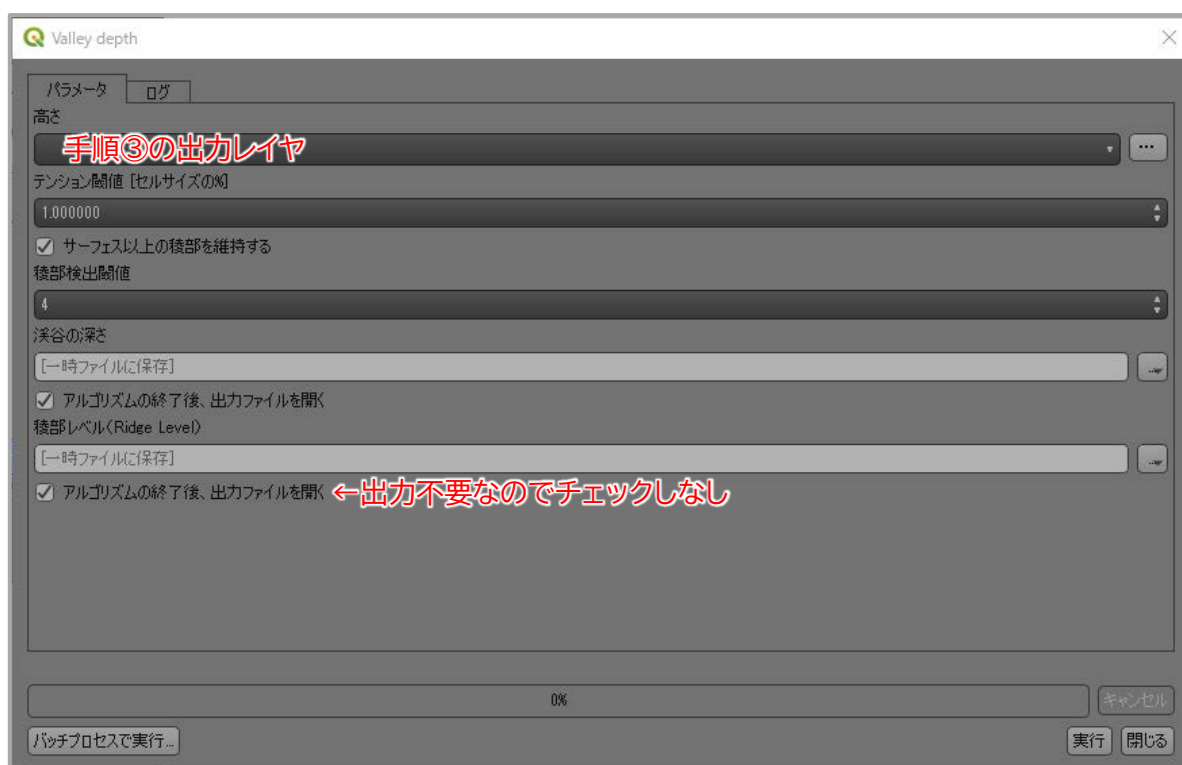


図 4. 2.11 DSM・DEM の事前処理手順④ ※実施は任意

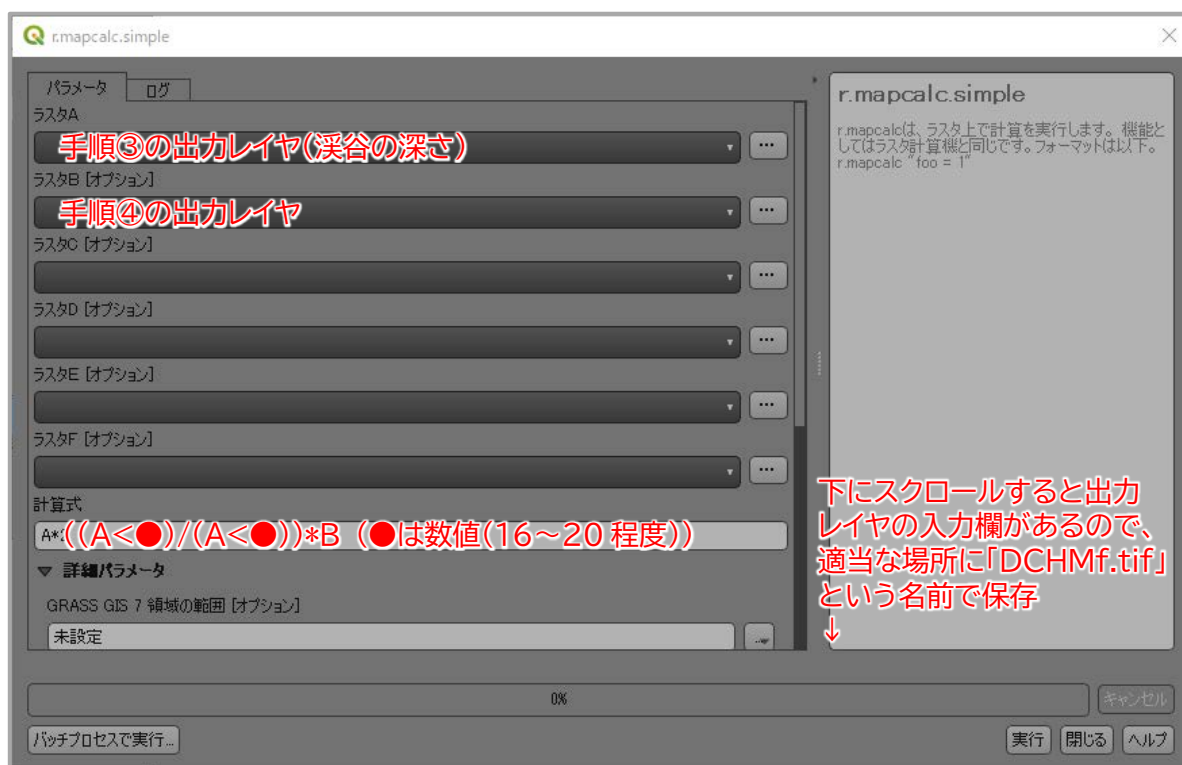


図 4. 2.12 DSM・DEM の事前処理手順⑤ ※実施は任意

(4) 樹高・樹冠投影面積の算出

(3)で作成した「DCHM.tif」「DCHMf.tif」を使い、樹高・樹冠投影面積を算出します。その手順と内容は、表 4. 2.2～表 4. 2.4 のとおりです。表には使用するツールの画面を示した図の番号も記載しているので、併せて参照してください。

始めに、(3)で出力した DCHMf.tif を反転させたラスタを作成します (①)。このラスタの集水域を出力し、この集水域毎に(3)で出力した DCHM.tif の最大値を算出します (②・③)。各集水域においてこの最大値をとる位置を抽出し、ポイントデータ化します (④～⑩)。これがノイズを除去する前の樹頂点です。このポイントに DCHM.tif の値 (= 樹高) を与えてから (⑪)、距離が近い樹頂点をグループ化して番号を振り、同じ番号のうち樹高が最も高いポイントだけを残し、それ以外をノイズとして除去します (⑫～⑭)。そのうえで、先に算出してあった集水域をポリゴンに変換します。これが樹冠に該当します。樹頂点のグループ番号をこの樹冠にも与え、そのグループごとにポリゴンを融合することで、一つの樹頂点に対して一つのポリゴンができるようにします (⑮～⑰)。最後に、このポリゴンの面積を算出し (= 樹冠投影面積)、著しく面積が大きい場合ものは樹木の樹冠ではないと考えて除去します (⑱・⑳)。除去した樹冠に対応する樹頂点は不要なので、残った樹冠に対応する樹頂点のみを抽出したら (㉑)、作業は終了です。作業後は、図 4. 2.34 にあるようなデータができているはずです。

表 4.2.2 樹高・樹冠投影面積の算出手順 その1

順	QGIS ツール名	設定項目：設定値または入力データ
①	r.mapcalc.simple …図 4.2.13	ラスタ A : DCHMf.tif 計算式 : $A*-1$ 出力レイヤ : 一時ファイルに保存
②	r.terrafrow …図 4.2.14	標高ラスタ (=入力レイヤ) : ①の出力レイヤ SFD(D8)を使う : チェックを入れる SFD(D8)方向を使う : 1 使用メモリの上限 : 300 集水域の出力 (=出力レイヤ) : 一時ファイルに保存 ※集水域以外は出力不要/このレイヤは⑤でも使用するので注意
③	r.stats.zonal …図 4.2.15	ベースラスタ (=入力レイヤ) : ②の出力レイヤ カバーラスタ : DCHM.tif 統計量の種類 : max 出力ファイル : 一時ファイルに保存
④	r.mapcalc.simple …図 4.2.16	ラスタ A : ③の出力レイヤ ラスタ B : DCHM.tif 計算式 : $A-B$ 出力レイヤ : 一時ファイルに保存
⑤	ラスタを丸める …図 4.2.17	Input raster : ④の出力レイヤ バンド番号 : 1 丸める方向 : 四捨五入 小数点以下の桁数 : 5 基数 : 10 出力ラスタ : 一時ファイルに保存
⑥	r.mapcalc.simple …図 4.2.18	ラスタ A : ⑤の出力レイヤ 計算式 : $(A==0)/(A==0)$ 出力レイヤ : 一時ファイルに保存
⑦	ラスタのベクタ化 (polygonize) …図 4.2.19	入力レイヤ : ⑥の出力レイヤ バンド番号 : 1 作成するフィールドの名前 : DN ※規定値・任意の英字に変更可 上下左右の 4 方向ではなく、8 方向の連結関係をチェックする : チェックしない ベクタ化 (=出力レイヤ) : 一時ファイルに保存
⑧	フィールド計算機 …図 4.2.20	入力レイヤ : ⑦の出力レイヤ 属性名 : Area ※必ずこの名前にしてください フィールド型 : 浮動小数点数 (Float) フィールド長 : 10 精度 : 6 計算式 : <code>area(\$geometry)</code> 出力レイヤ : 一時レイヤを作成
⑨	QGIS 式による抽出 …図 4.2.21	入力レイヤ : ⑧の出力レイヤ 式 : <code>"Area" <= 0.02</code> 出力レイヤ (マッチした地物) : 一時レイヤを作成

表 4.2.3 樹高・樹冠投影面積の算出手順 その2

順	QGIS ツール名	設定項目：設定値または入力データ
⑩	重心 …図 4.2.22	入力レイヤ：⑨の出力レイヤ 各パートに重心を作成：チェックしない 重心（出力レイヤ）：一時レイヤを作成
⑪	Add raster values to points …図 4.2.23	ポイント（＝入力レイヤ）：⑩の出力レイヤ グリッド：DCHM.tif 内挿：Bilinear Interpolation 出力：一時ファイルに保存
⑫	DBSCAN クラスタ リング …図 4.2.24	入力レイヤ：⑪の出力レイヤ 最小クラスタサイズ：1 クラスタ化された点の最大距離：1.2～1.5 程度 ※適宜決定 クラスタを示す属性名：cID ※必ずこの名前にしてください クラスタサイズを示す属性名：cSIZE ※必ずこの名前にしてください クラスタ（＝出力レイヤ）：一時レイヤを作成 ※このレイヤは⑬でも使用する ので注意
⑬	自動インクリメント 属性を追加 …図 4.2.25	入力レイヤ：⑫の出力レイヤ 属性名：RANK ※必ずこの名前にしてください 開始値：1 グループ化のための属性：cID ソート式：DCHM 昇順：チェックしない NULL は最初にソートされる：チェックしない 出力レイヤ：一時レイヤを作成
⑭	属性による抽出 …図 4.2.26	入力レイヤ：⑬の出力レイヤ 選択基準になる属性：RANK 演算子：＝ 値：1 抽出された属性（＝出力レイヤ）：一時レイヤを作成 ※このレイヤは⑮ でも使用する ので注意
⑮	ラスタのベクタ化 (polygonize) …図 4.2.27	入力レイヤ：⑭の出力レイヤ バンド番号：1 作成するフィールドの名前：DN ※規定値・任意の英字に変更可 上下左右の4方向ではなく、8方向の連結関係をチェックする： チェックしない ベクタ化（出力レイヤ）：一時ファイルに保存
⑯	ジオメトリの修復 …図 4.2.28	入力レイヤ：⑮の出力レイヤ 出力レイヤ：一時レイヤを作成
⑰	属性の空間結合 …図 4.2.29	ベースレイヤ（＝入力レイヤ）：⑯の出力レイヤ 結合レイヤ（＝入力レイヤ）：⑫の出力レイヤ ジオメトリの空間関係：交差する 結合するフィールド：空欄（＝すべて結合する） 結合のタイプ：マッチした地物ごとに地物を作成（1対多結合） 結合対象がなかった地物を破棄：チェックなし 出力レイヤ：一時レイヤを作成

表 4.2.4 樹高・樹冠投影面積の算出手順 その3

順	QGIS ツール名	設定項目：設定値または入力データ
⑮	融合(dissolve) ※GDALではない方 …図 4.2.30	入力レイヤ：⑮の出力レイヤ 基準となる属性：cID 融合ポリゴンの出力：一時レイヤを作成
⑯	フィールド計算機 …図 4.2.31	入力レイヤ：⑮の出力レイヤ 属性名：Area フィールド型：浮動小数点数 (Float) フィールド長：10 精度：6 計算式：area(\$geometry) 出力レイヤ：一時レイヤを作成
⑰	QGIS式による抽出 …図 4.2.32	入力レイヤ：⑯の出力レイヤ 式："Area" < 100 ※数値は適宜変更可 出力レイヤ (マッチした地物)：ファイル名は任意・形式は shp →樹冠
⑱	場所による抽出 …図 4.2.33	抽出する地物のレイヤ：⑰の出力レイヤ 空間的關係：交差する 比較対象の地物のあるレイヤ：⑰の出力レイヤ 出力レイヤ (マッチした地物)：ファイル名は任意・形式は shp →樹頂点

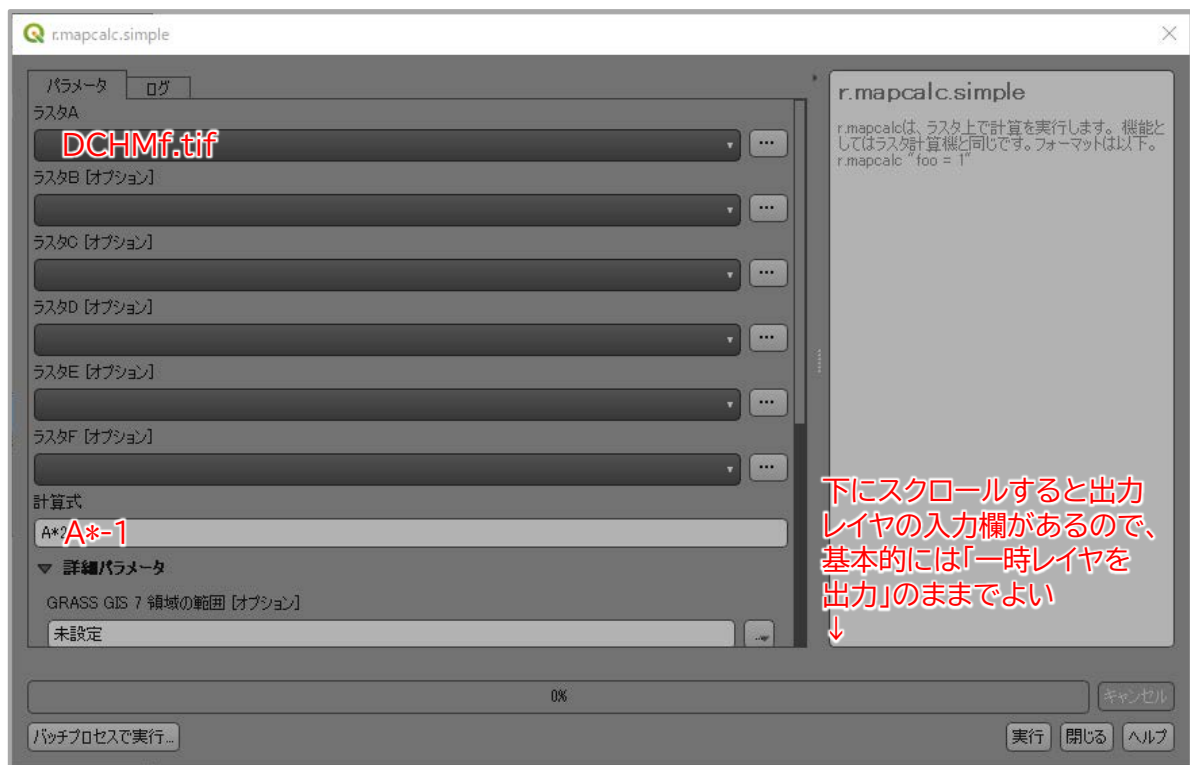


図 4.2.13 樹高・樹冠投影面積の算出手順①

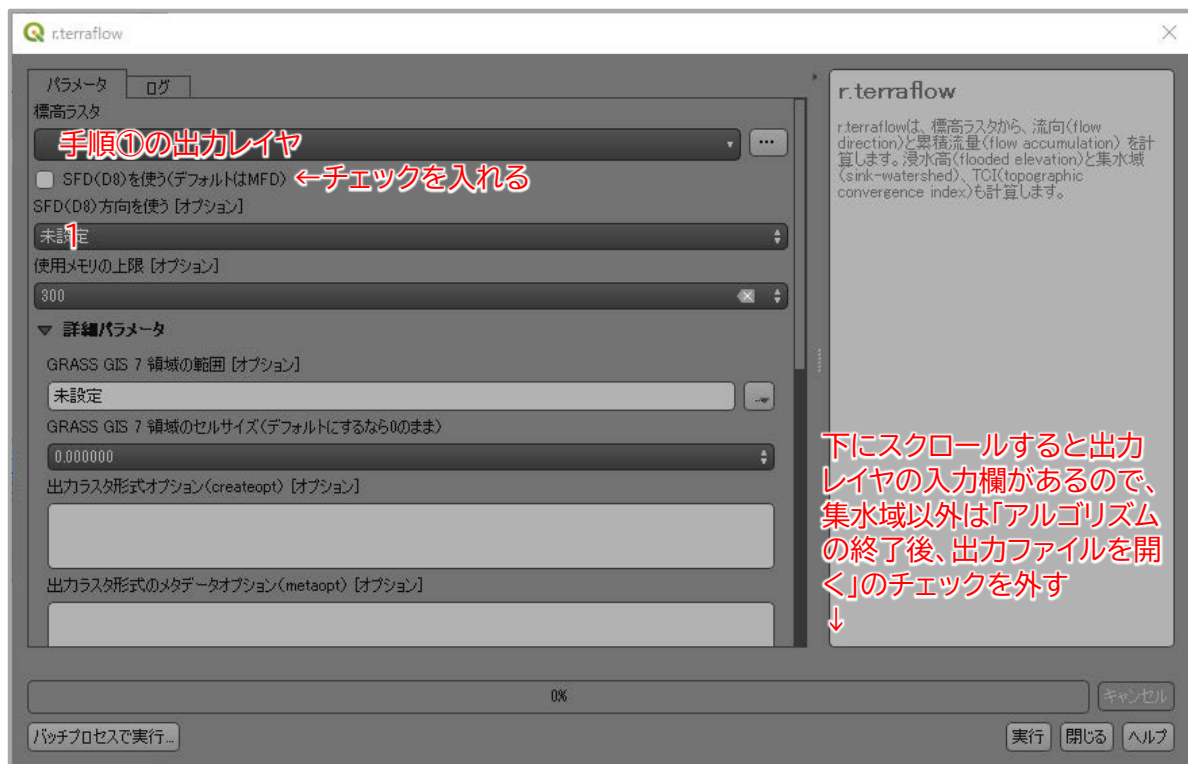


図 4.2.14 樹高・樹冠投影面積の算出手順②

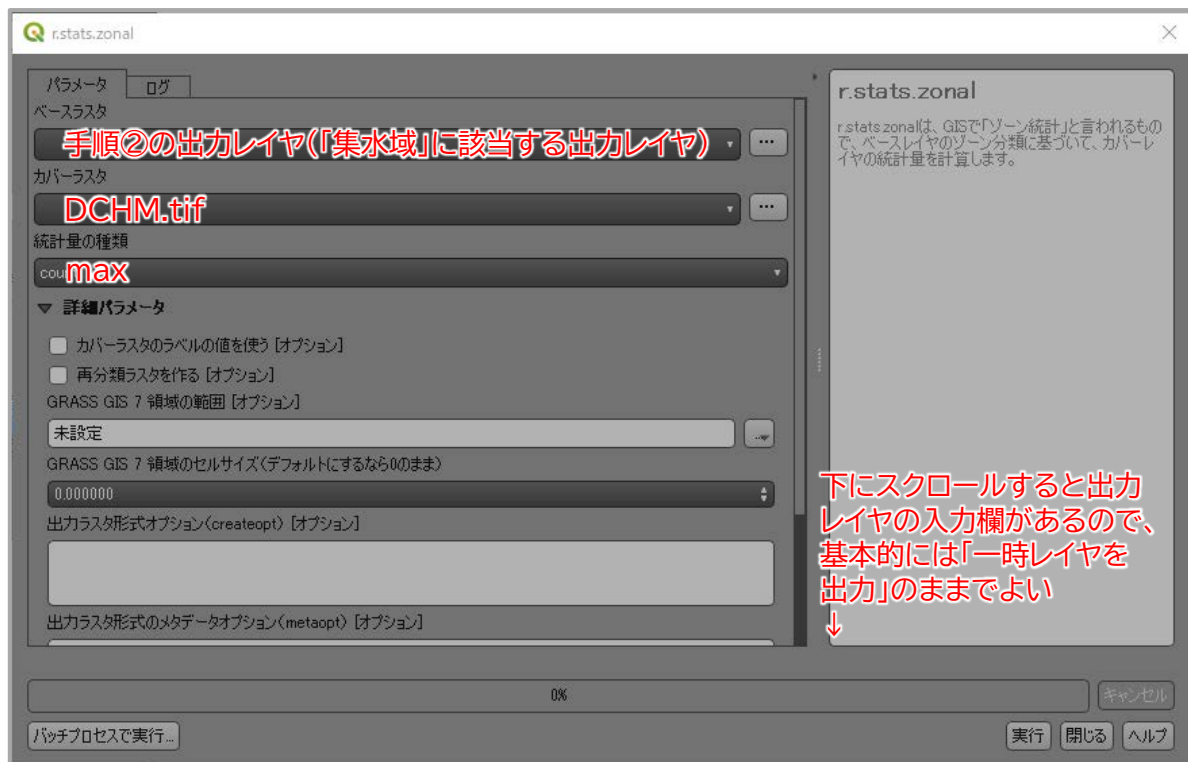


図 4.2.15 樹高・樹冠投影面積の算出手順③

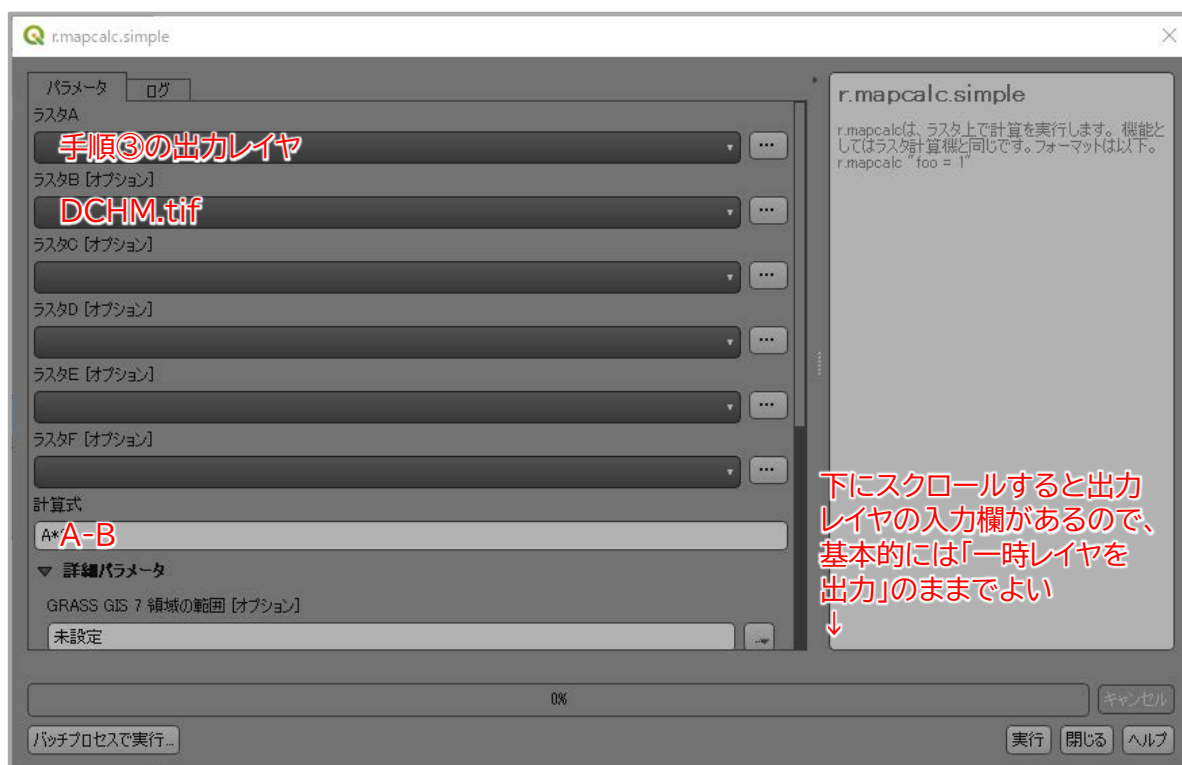


図 4.2.16 樹高・樹冠投影面積の算出手順④

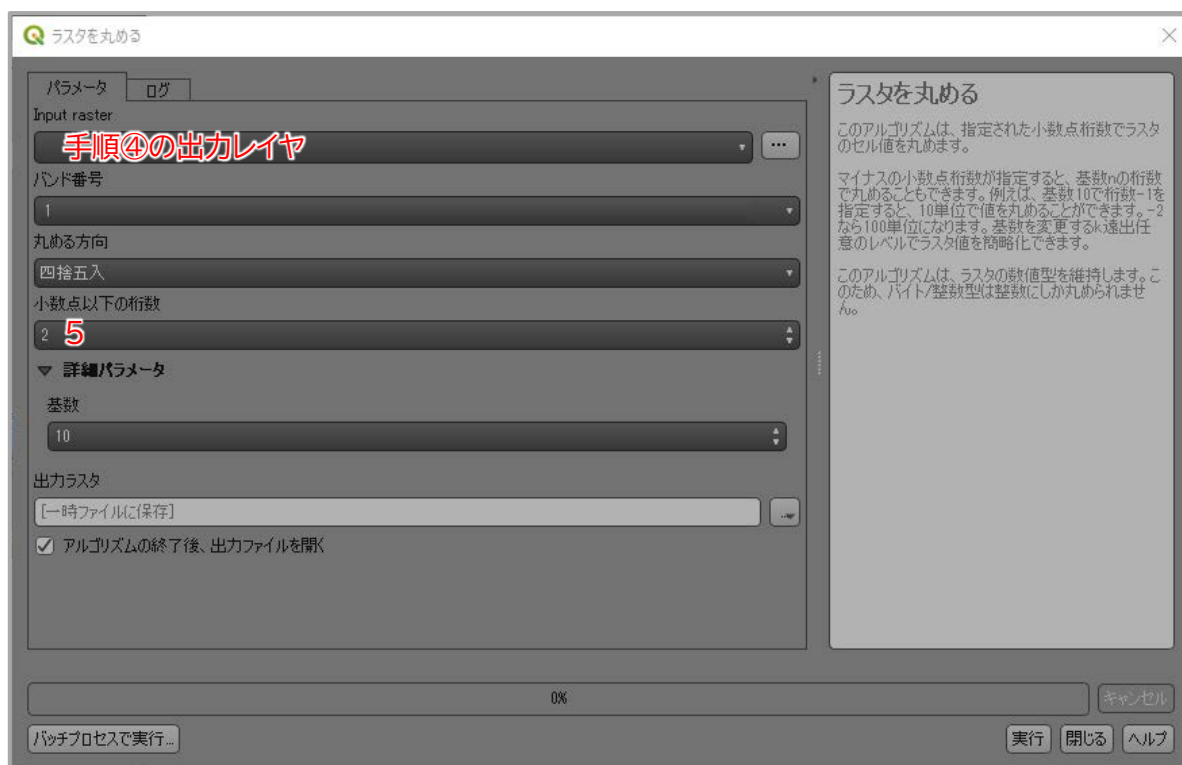


図 4.2.17 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑤

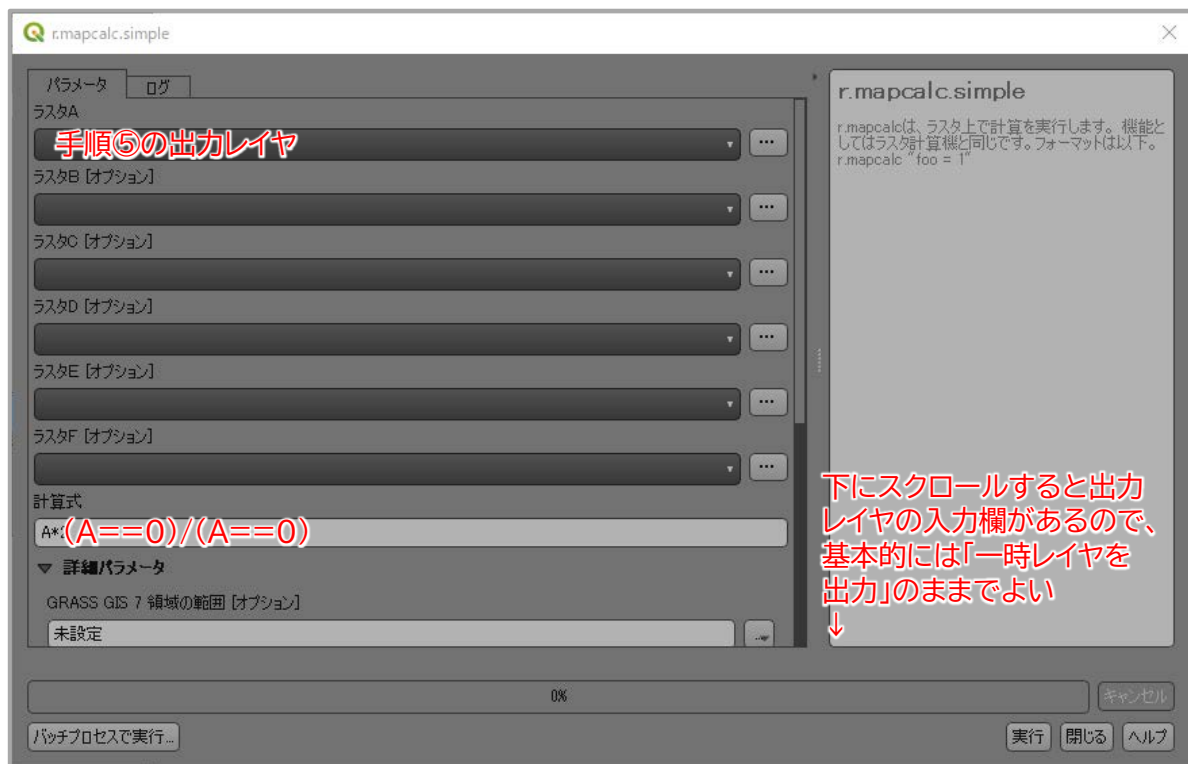


図 4.2.18 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑥



図 4.2.19 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑦

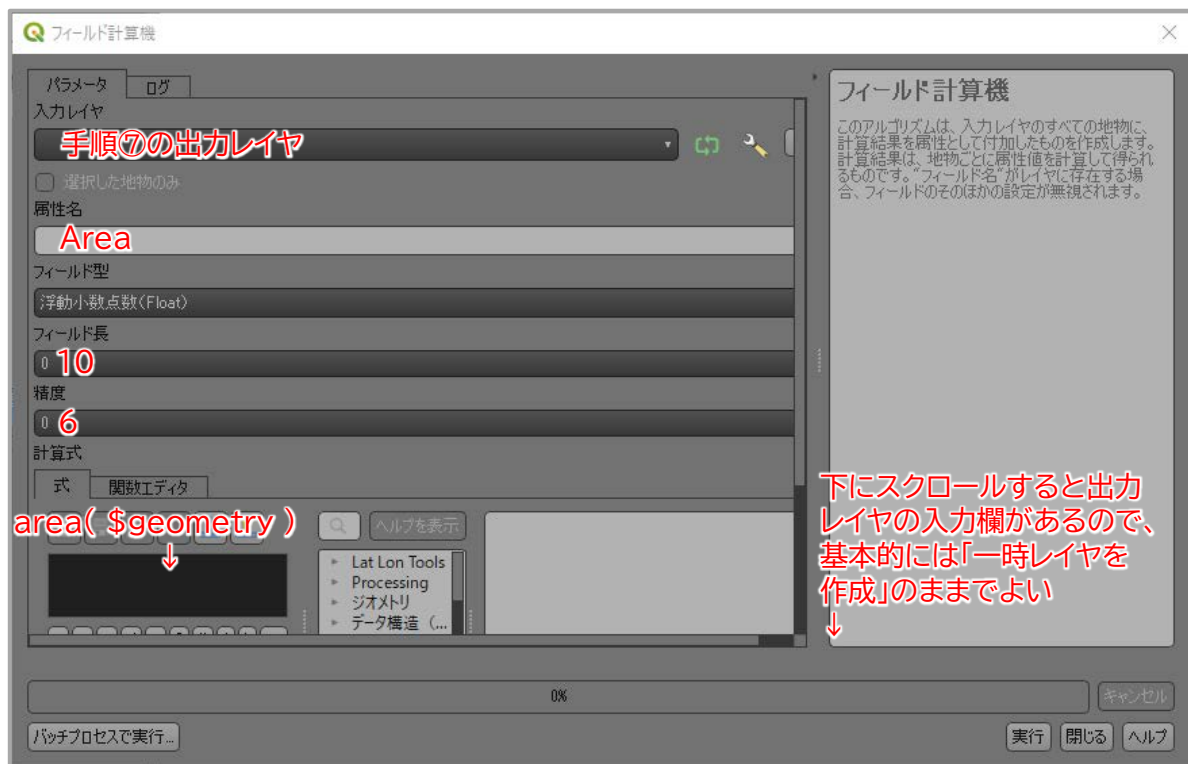


図 4.2.20 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑧

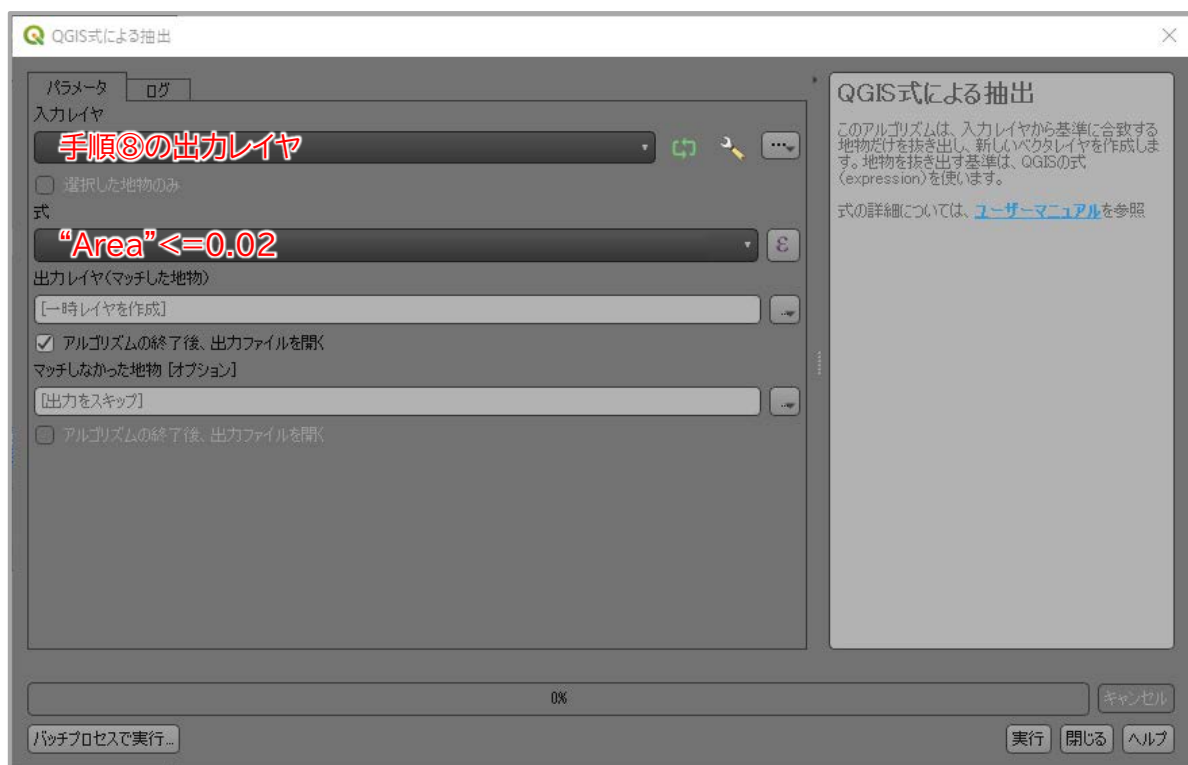


図 4.2.21 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑨

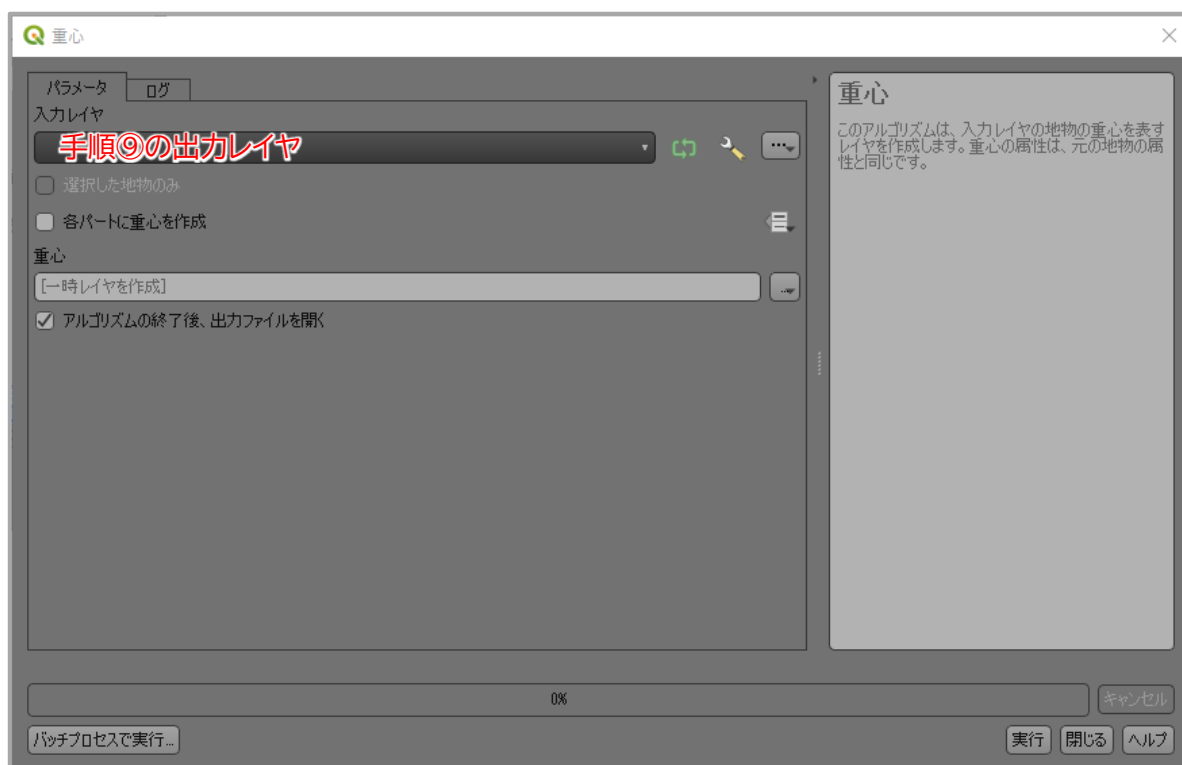


図 4.2.22 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑩



図 4.2.23 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑪

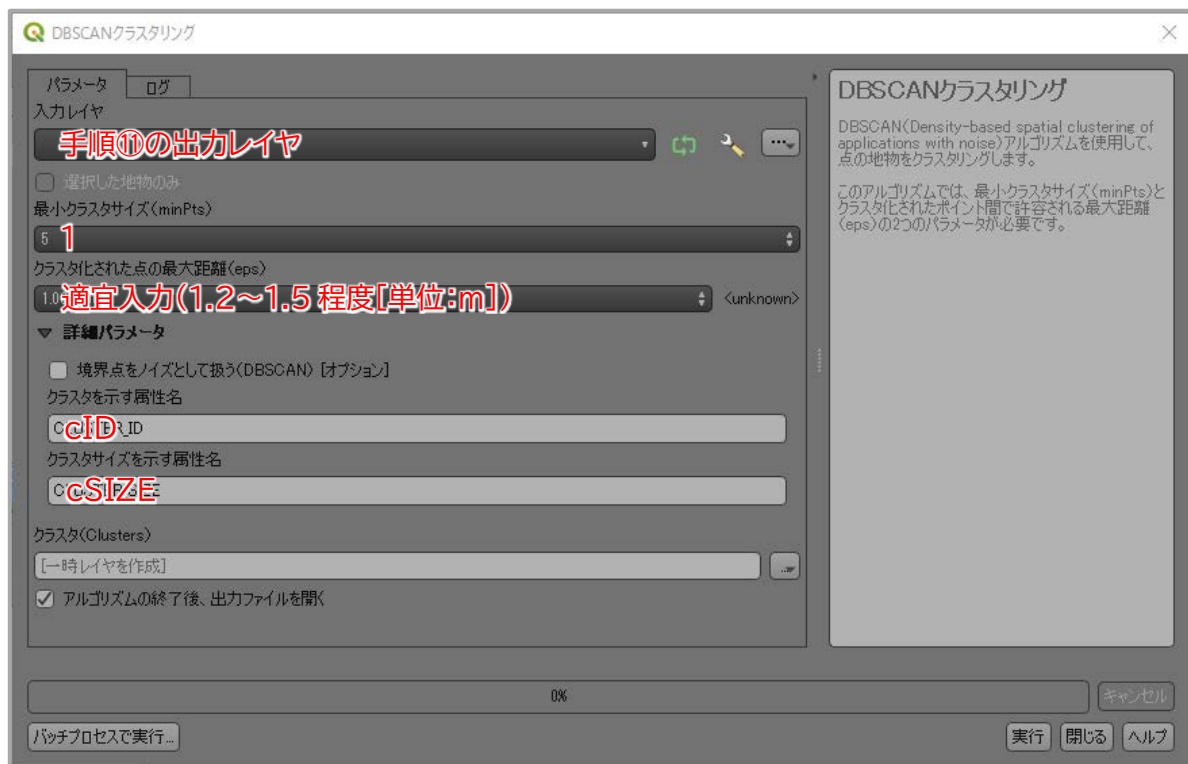


図 4.2.24 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑫

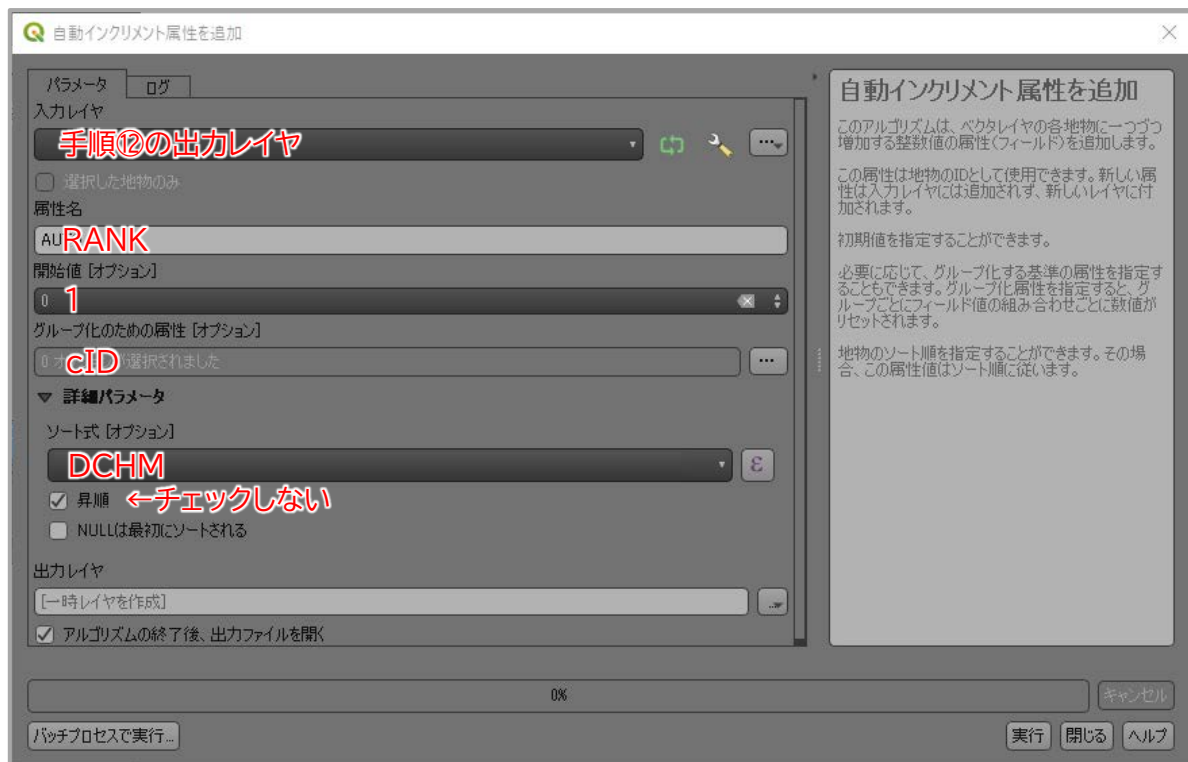


図 4.2.25 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑬



図 4.2.26 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑭



図 4.2.27 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑮

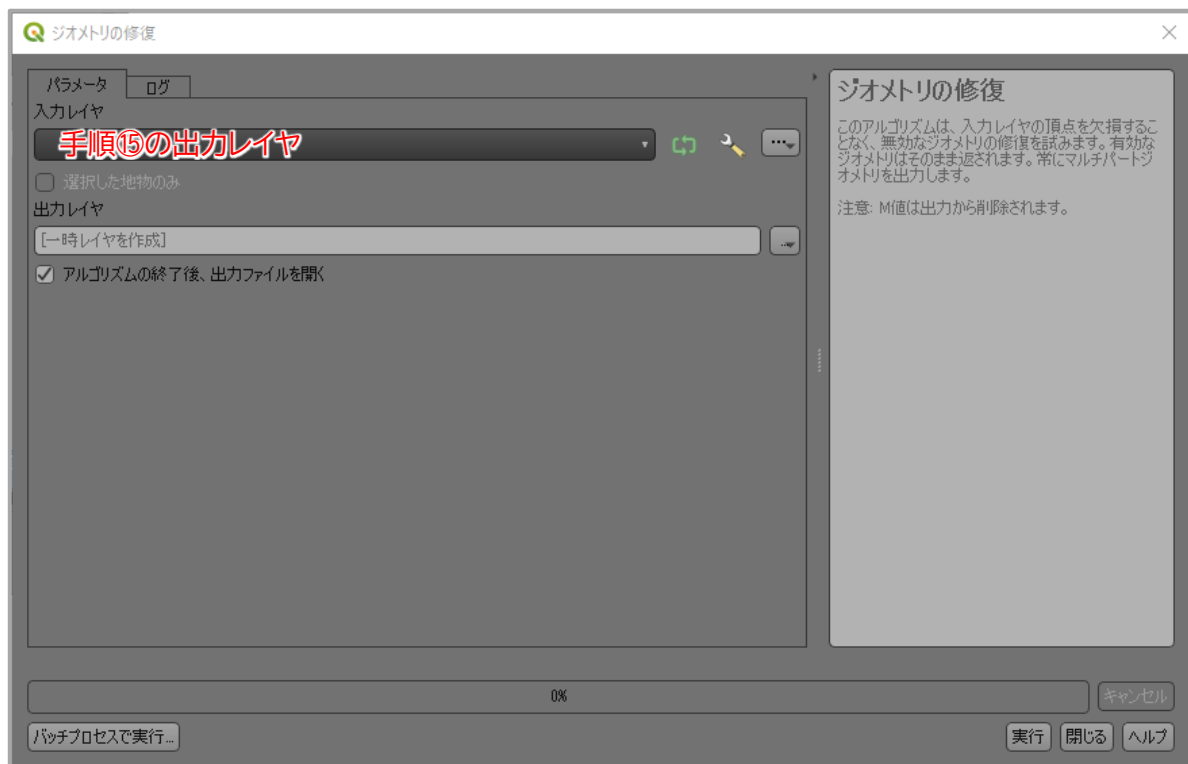


図 4.2.28 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑬

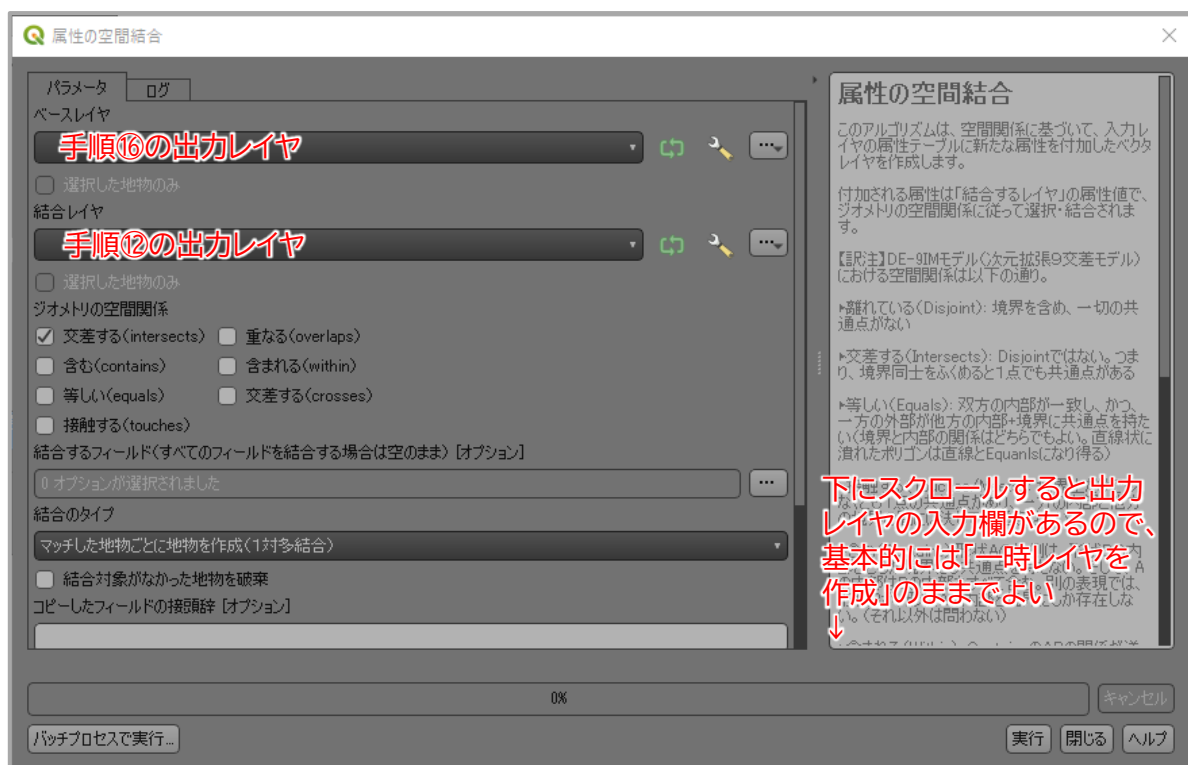


図 4.2.29 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑭

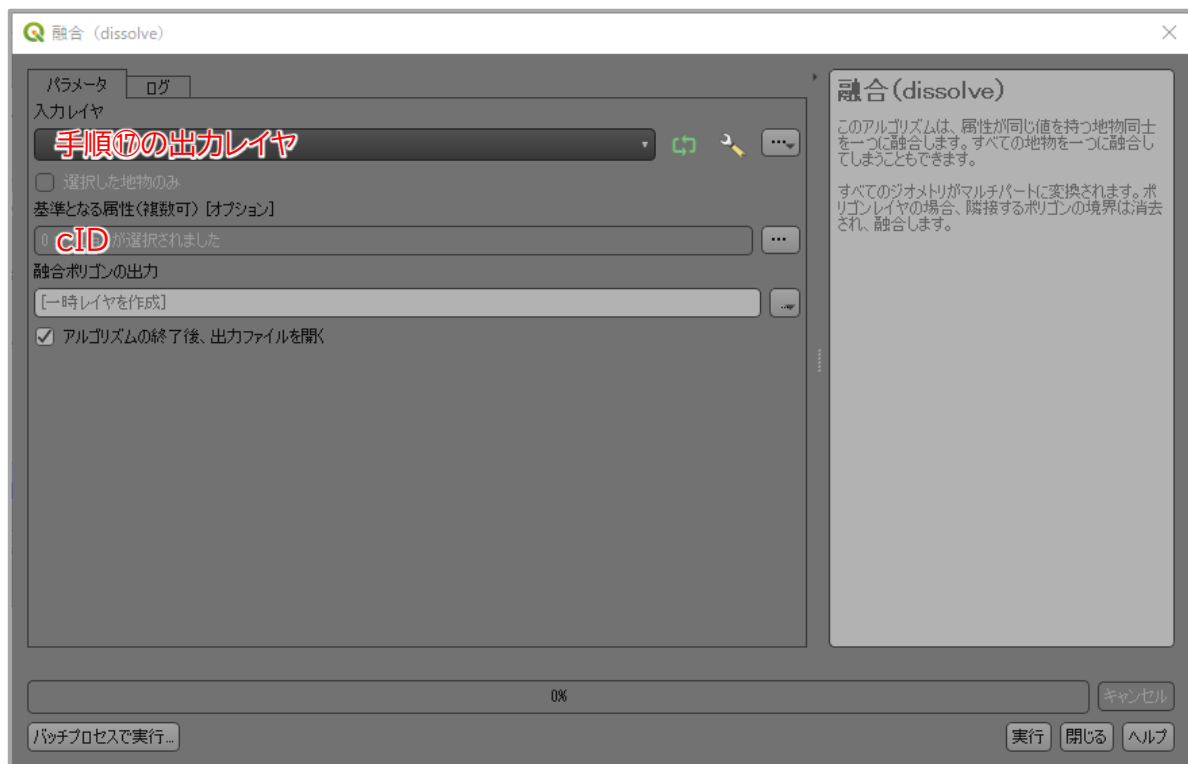


図 4.2.30 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑩



図 4.2.31 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑪

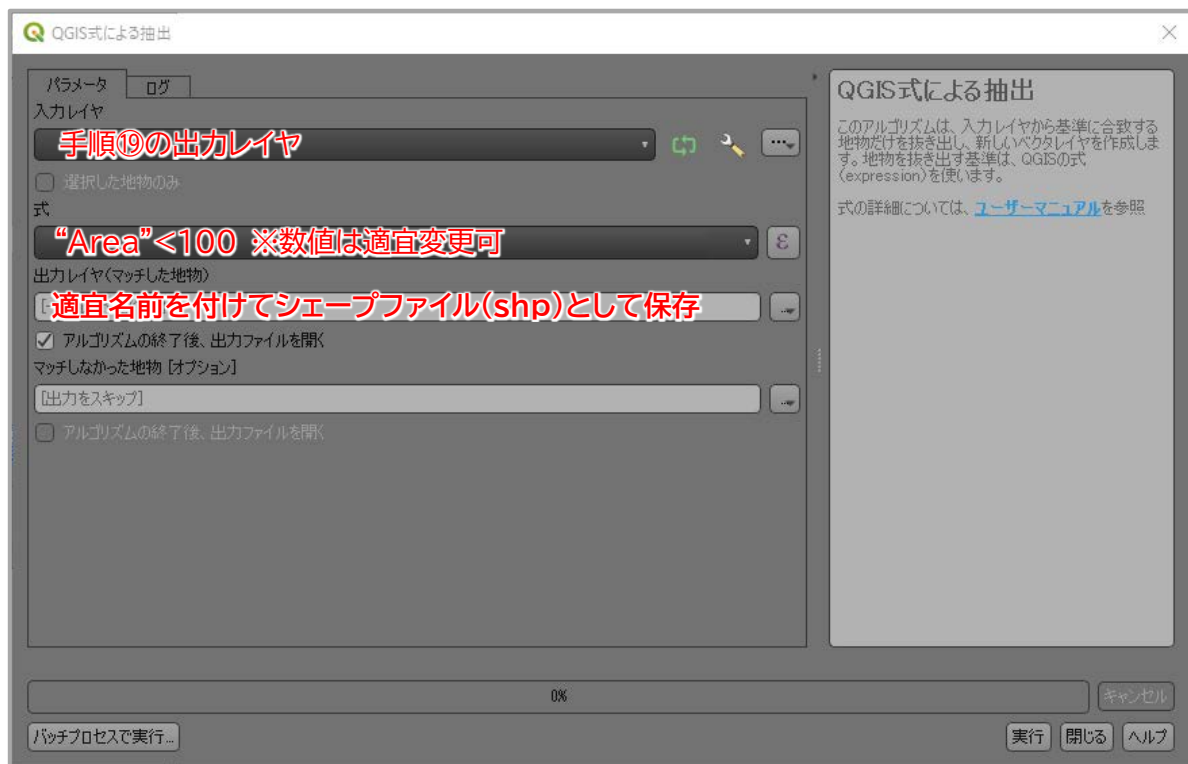


図 4.2.32 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑩

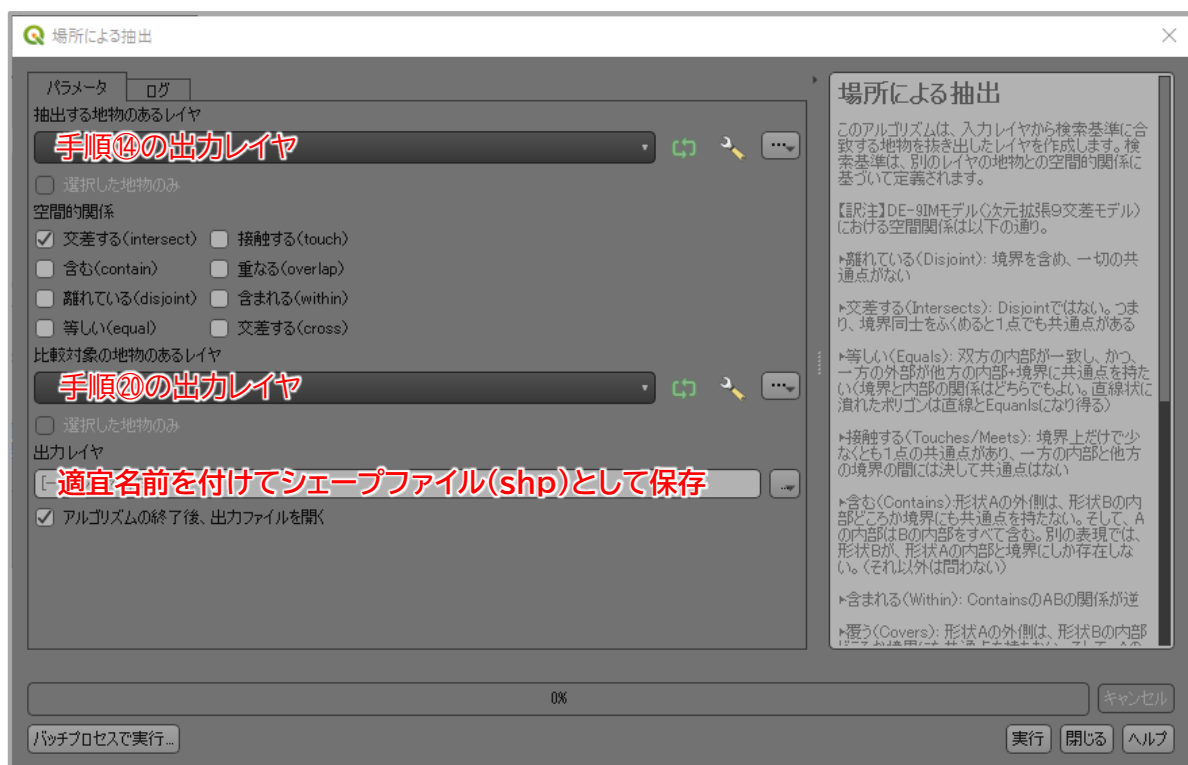
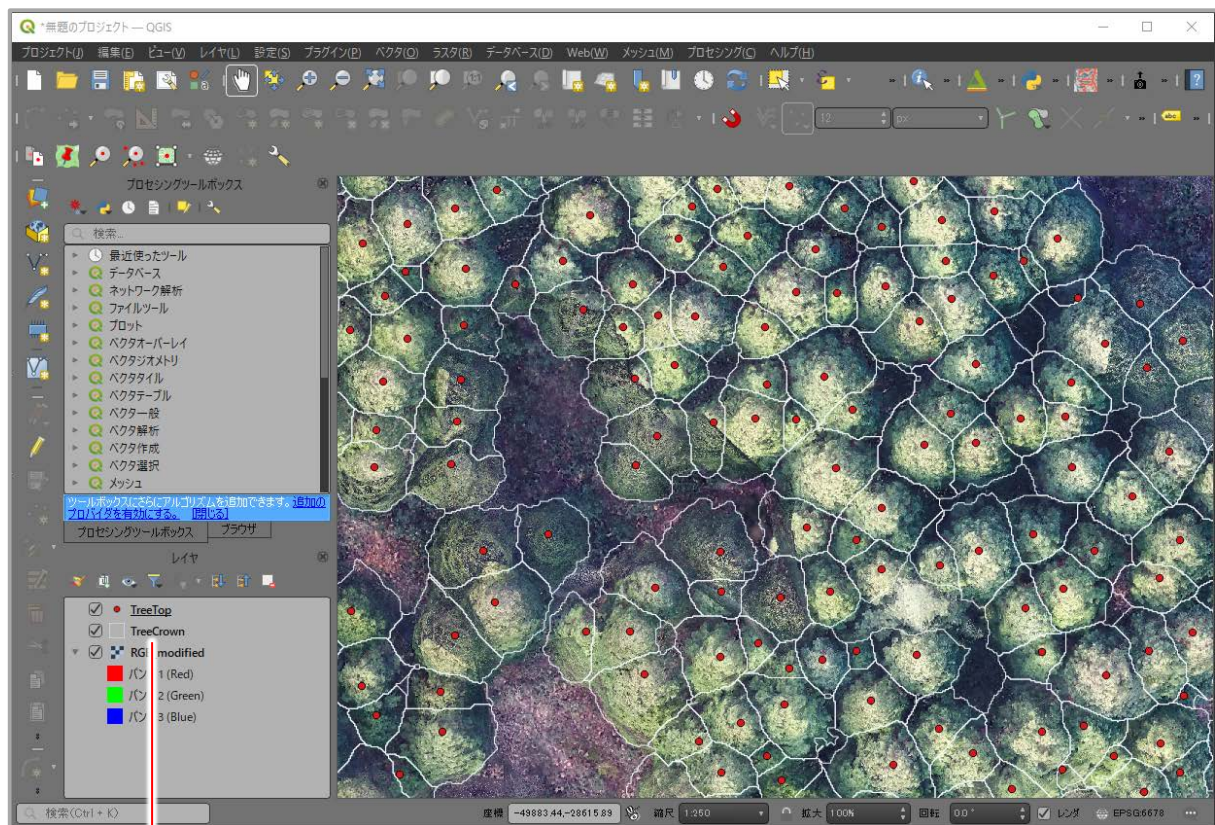


図 4.2.33 樹高・樹冠投影面積の算出手順⑪



樹冠ポリゴンの属性データ

TreeCrown :: 地物数 合計: 851, フィルタ: 851, 選択: 0

樹冠投影面積 樹高

	fid	DN	fid_2	DN_2	Area	DCHM	cID	cSIZE
1	690	209	212	1	13.8077326018	23.9675028580	184	1
2	688	211	211	1	3.3694466957	20.3527444150	183	1
3	687	212	214	1	5.1691511623	18.8403822740	186	1
4	691	210	213	1	9.3184697935	23.2436782600	185	1
5	662	207	216	1	3.6394023657	21.0638594170	188	1
6	655	206	215	1	1.8496962573	16.7347385540	187	1
7	692	214	218	1	8.3686257695	24.7031781270	190	1
8	695	213	217	1	3.0095058024	22.2466332340	189	1
9	446	167	169	1	9.5484320309	20.1079658170	144	1
10	512	166	168	1	15.4474633380	25.9336445200	143	1
11	480	170	171	1	6.0989984700	22.9559801800	146	1
12	463	168	170	1	6.7488917496	22.2465365680	145	1
13	400	169	173	1	4.3792808686	18.5501121910	148	1
14	452	172	172	1	6.0190116048	20.6066074770	147	1
15	569	173	175	1	14.6275979699	22.4386757400	150	1
16	451	171	174	1	4.2992940035	18.2467441580	149	1
17	449	158	161	1	8.7985551699	22.3760102680	136	1
18	445	157	160	1	14.8275651329	30.0382297760	135	1
19	447	163	163	1	9.0685108399	20.7230917250	138	1
20	369	159	162	1	3.2594647561	21.1618182460	137	1
21	448	161	165	1	11.1981611253	23.2155380590	140	1
22	513	162	164	1	24.0060579124	31.3605503210	139	1
23	394	165	167	1	1.8097028247	18.0013582800	142	1
24	453	164	166	1	3.3194549050	19.6070144500	141	1

全地物を表示。

図 4. 2.34 樹高・樹冠投影面積の算出作業により作成されるデータ

5. 胸高直径の推定および材積の算出

5.1. 使用するデータ等の準備

5.1.1. 材積算出式の準備

材積の算出は、森林総合研究所作成の Excel 用ユーザー定義関数「StemVolume 関数」を使用します。この StemVolume 関数は、林野庁計画課監修「立木幹材積表（東日本編・西日本編）」（1970 年）に収録されている 83 樹種の材積表に対応しており、樹種・胸高直径（cm）・樹高（m）を入力すると、材積が計算できるようになっています。

すなわち、材積の算出は Excel で実施することになるので、始めに以下の手順により算出に必要な Excel ファイルを準備します。

- ① 森林総合研究所の Web サイト内にある「幹材積計算プログラム」のダウンロードページ（<https://www.ffpri.affrc.go.jp/database/stemvolume/index.html>）にアクセスします。ページの下部にある「stemvolume.zip」をダウンロードし、適当なところに解凍してください
- ② 解凍してできたフォルダの中にある「幹材積計算プログラム.xlsm」というファイルを開きます。その際、「マクロが無効にされました」という警告が出たら、この文言の右に出ている「コンテンツの有効化」をクリックしてください
- ③ 「幹材積計算プログラム.xlsm」には、すでに「使用例 1」「使用例 2」というシートがあるので、新たに材積を算出するために、シートを追加してください。ファイルは必要に応じて別名で保存してもかまいません

5.1.2. 材積算出式に入力するデータの準備

材積算出に使用する StemVolume 関数に入力するのは、樹種・胸高直径・樹高です。樹高は、第 4 章の解析で単木毎に算出済みです。胸高直径については、第 4 章で算出した単木毎の樹高・樹冠投影面積を第 2 章 2.4 で説明した汎用的な胸高直径推定式に入力することで推定できます。

そこで、前項 5.1.1 で作成した新しいシートに、これらのデータを貼り付けます。貼り付けた例を、図 5.1.1 に示します。第 4 章で作成したシェープファイルの属性ファイル（.dbf）は Excel で開くことが可能なので、Excel でファイルを開き、樹高に該当する「DCHM」、樹冠投影面積に該当する「Area」を追加した新しいシートに貼り付けてください。胸高直径推定式の係数については、第 2 章 2.4 に掲載されている汎用的な推定式（暫定版）または調査地毎に作成した推定式（第 6 章 6.2 参照）の係数 $a \cdot b \cdot c$ をシートに入力します。

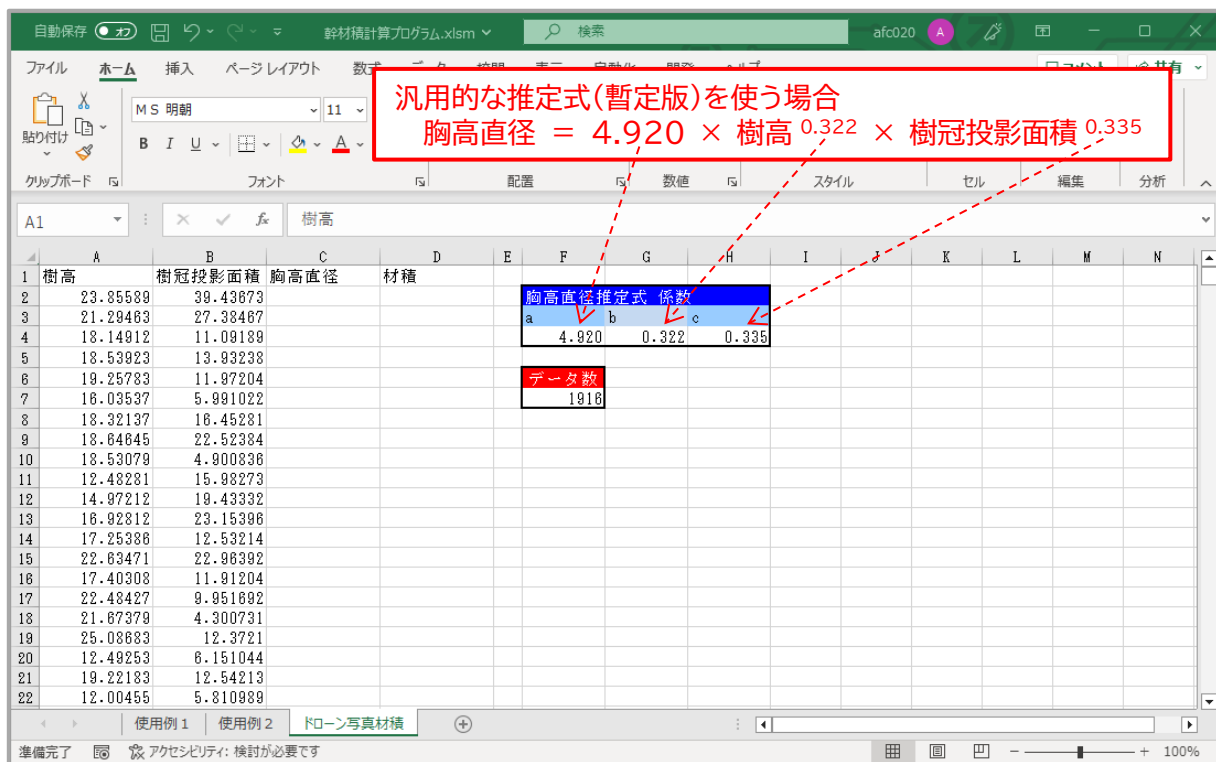


図 5.1.1 樹高・樹冠投影面積・胸高直径推定式の係数を貼り付けた例

5.2. 材積算出の実施

前節にて用意したファイル上で、始めに胸高直径を算出します。図 5.1.1 にあるように、樹高・樹冠投影面積・胸高直径・材積がそれぞれ A 列・B 列・C 列・D 列、推定式の係数 a・b・c がそれぞれ F4 セル・G4 セル・H4 セルにある場合、C2 セルに入力するのは以下の式になります。

$$=F\$4*(A2^{\wedge}G\$4)*(B2^{\wedge}H\$4)$$

入力が終わったら、オートフィルにより残りのすべての行にこの式を入力してください（図 5.2.1）。これで単木毎に胸高直径が推定できたので、材積を算出します。D2 セルに以下の数式を入力してください。

$$=StemVolume("秋田スギ",C2,A2)$$

入力が終わったら、胸高直径の算出時と同様にオートフィルにより残りのすべての行にこの式を入力してください（図 5.2.1）。

以上で、ドローン写真による森林資源量調査の工程は終了です。

自動保存 幹材積計算プログラム.xlsm • 保存しました

ファイル ホーム 挿入 ページレイアウト 数式 データ 校閲 表示 自動化 開発 ヘルプ

MS 明朝 11 A' A'

B I U 背景色 文字色 下線 上付き 下付き

グループボックス フォント 配置 数値 スタイル セル 編集 分析

コメント 共有

貼り付け クリップボード

条件付き書式 テーブルとして書式設定 セルのスタイル

挿入 削除 書式

Σ 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22

データ分析

樹高

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	樹高	樹冠投影面積	胸高直径	材積										
2	23.85589	39.43873	46.7928557	1.73881829		胸高直径推定式 係数								
3	21.29463	27.38467	39.92391212	1.168267897		a	b	c						
4	18.14912	11.09189	28.01518261	0.520934458		4.920	0.322	0.335						
5	18.53923	13.93238	30.44662141	0.617328078										
6	19.25783	11.97204	29.29510118	0.60517181		データ数								
7	16.03537	5.991022	21.9009886	0.292546348		1918								
8	18.32137	16.45281	32.06845145	0.665464513										
9	18.64645	22.52384	35.82880158	0.823431517										
10	18.53079	4.900836	21.45198361	0.337094209										
11	12.48281	15.98273	28.08730767	0.330144714										
12	14.97212	19.43332	31.77383024	0.51122393										
13	16.92812	23.15396	35.05311211	0.704191761										
14	17.25386	12.53214	28.71315639	0.510825176										
15	22.63471	22.96392	38.3842492	1.176477733										
16	17.40308	11.91204	28.30753613	0.503726978										
17	22.48427	9.951692	28.94446616	0.716813461										
18	21.67379	4.300731	21.59597379	0.413300889										
19	25.08683	12.3721	32.25189167	0.98832241										
20	12.49253	6.151044	20.38845848	0.196918399										
21	19.22183	12.54213	29.73729022	0.619602724										
22	12.00455	5.810989	19.74868788	0.178298763										

使用例 1 使用例 2 ドローン写真材積

準備完了 アクセシビリティ: 検討が必要です

100%

図 5.2.1 材積算出まで終了したファイルの例

6. 【参考】より高度な解析手法

6. 1. 点群データの作成～樹高・樹冠投影面積の算出

6. 1. 1. ドローン写真に記録された高度の補正

一般的にドローンの GNSS 受信機の精度は十分でないため、撮影した写真の位置座標（水平位置・高度）について、実際の値と大きくズレが生じる場合があることは、すでに述べたとおりです。

そこで、第3章3.2.1では3DF Zephyr Free・Metashape Professionalのどちらでも高度を修正できる方法として、ExifToolを用いた手法を紹介しました。一方で、Metashape Professionalを使用している場合は、このソフトウェア内で高度のズレを修正する方法として、開発元であるAgisoft社が公開しているHelpdeskページに掲載されている手法（<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000152491-working-with-dji-photo-s-altitude-problem>）もあるので、ここで紹介します。

この手法は、第3章3.2.1と同様に、ドローンの離陸地点について信頼できる標高値が入手できれば、ドローンに内蔵されている気圧センサーにより計測された離陸地点からの相対高度にこの標高値を加えることで、各写真についてGNSSによる絶対高度より正確な標高値が得られるという考えに基づいたものです（図6.1.1）。

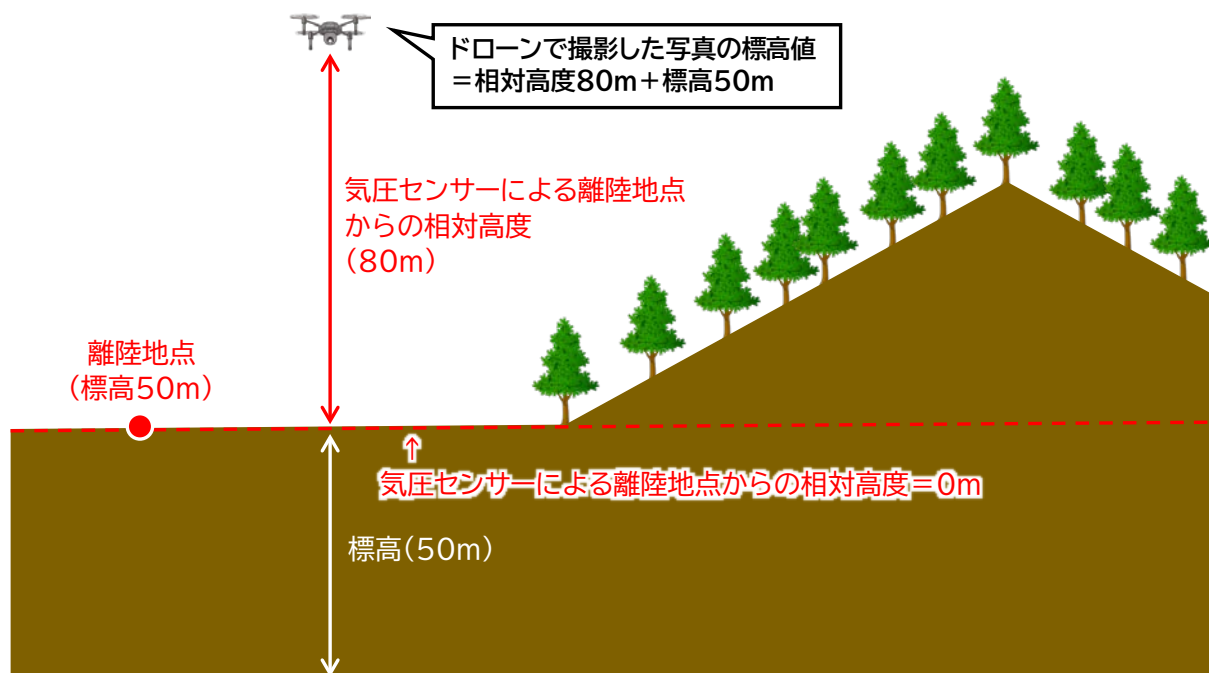


図 6. 1. 1 気圧センサーによる相対高度を用いた高度補正方法のイメージ(再掲)

具体的な手順は、以下の①～⑤のとおりです。

- ① 第3章 3.2.1 で説明した方法により、離陸地点の標高を入手します。
- ② Agisoft 社の GitHub (プログラムコード等の保存・公開用ウェブサービス) にある Metashape 用 Python[※]スクリプトのページ (<https://github.com/agisoft-llc/metashape-scripts>) から、スクリプトをダウンロードします (図 6.1.2)
- ③ Metashape Professional を立ち上げ、使用する写真を読み込みます
- ④ ダウンロードしたフォルダを解凍し、「src」フォルダにある「read_altitude_from_DJI_meta.py」「add_altitude_to_reference.py」を、画面上部のツールメニュー「ツール」にある「スクリプトの実行」を使って読み込みます (図 6.1.3・図 6.1.4)
- ⑤ ④の実行により、ツールメニューに「Script」というメニューができるので、これをクリックし、始めに「Read RelativeAltitude DJI Metadata」を実行します (図 6.1.5)
- ⑥ 続いて、「Add Reference Altitude」を実行します。その際、①で入手した標高値を「Please specify the height to be added:」以下に入力します (図 6.1.6)

以上の処理を実行したあとは、第3章 3.2.3 に示した方法で解析を実施し、点群データを作成すればよいです。

なお、第3章 3.2.1 でも述べましたが、この方法は GCP の設置が困難な場合の代替手法であり、天候により気圧センサーによる相対高度に誤差が生じる点や、航空レーザ測量データや地理院地図から抽出した離陸地点の標高にも誤差があり、特に地理院地図では標高のソースが 10mDEM の場合数 m 程度の誤差が含まれる可能性がある点に留意してください。

※ Python…プログラミング言語の一つ。アプリケーションや Web システムの開発、機械学習・深層学習など幅広く利用されており、コードが平易で読みやすい点が特徴です

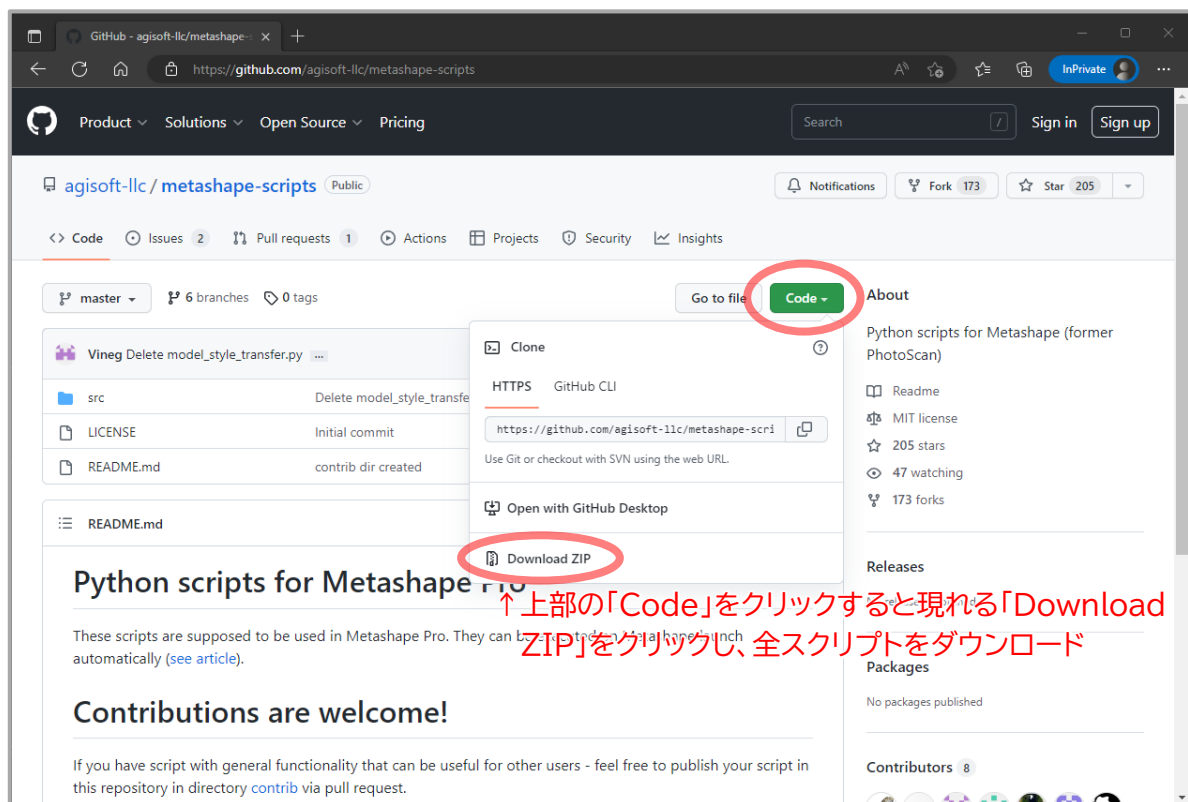


図 6.1.2 Metashape Professional 用 Python スクリプトのダウンロード画面

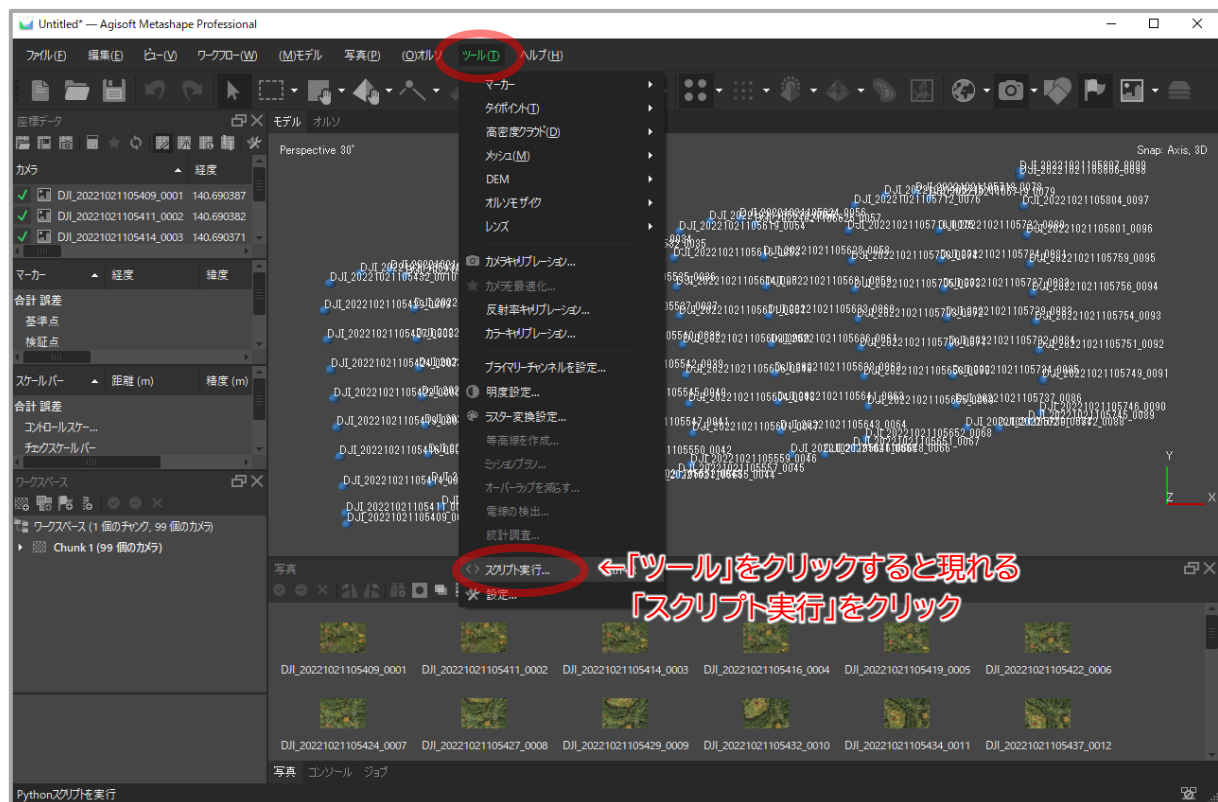


図 6.1.3 Metashape Professional への Python スクリプト読み込み画面 その 1

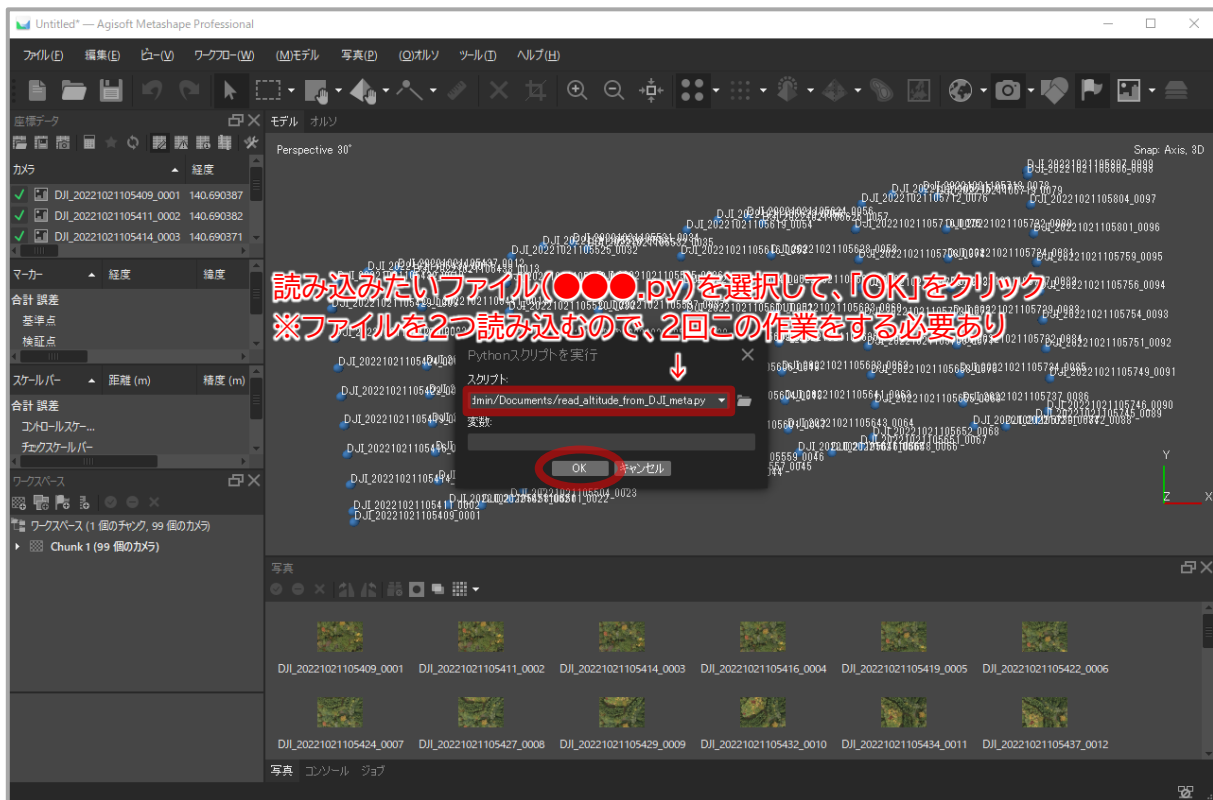


図 6.1.4 Metashape Professional への Python スクリプト読み込み画面 その2

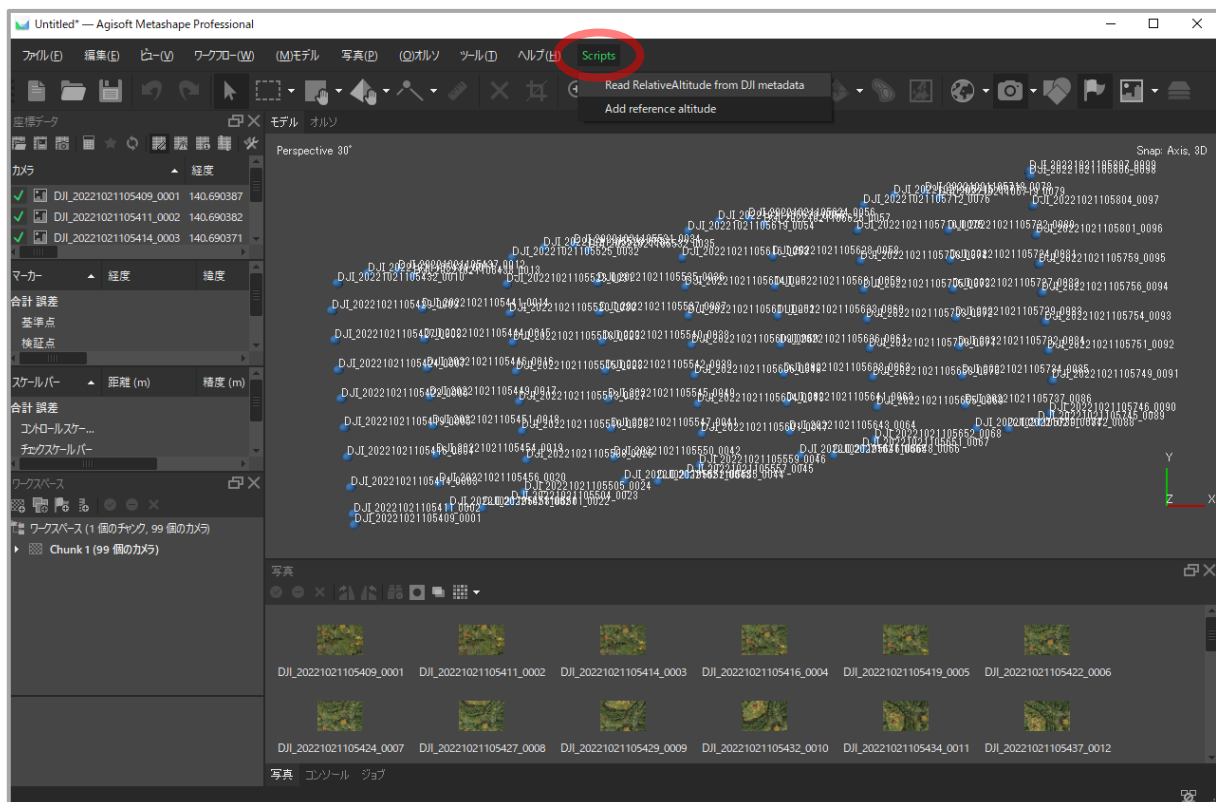


図 6.1.5 読み込んだスクリプトの実行画面 その1

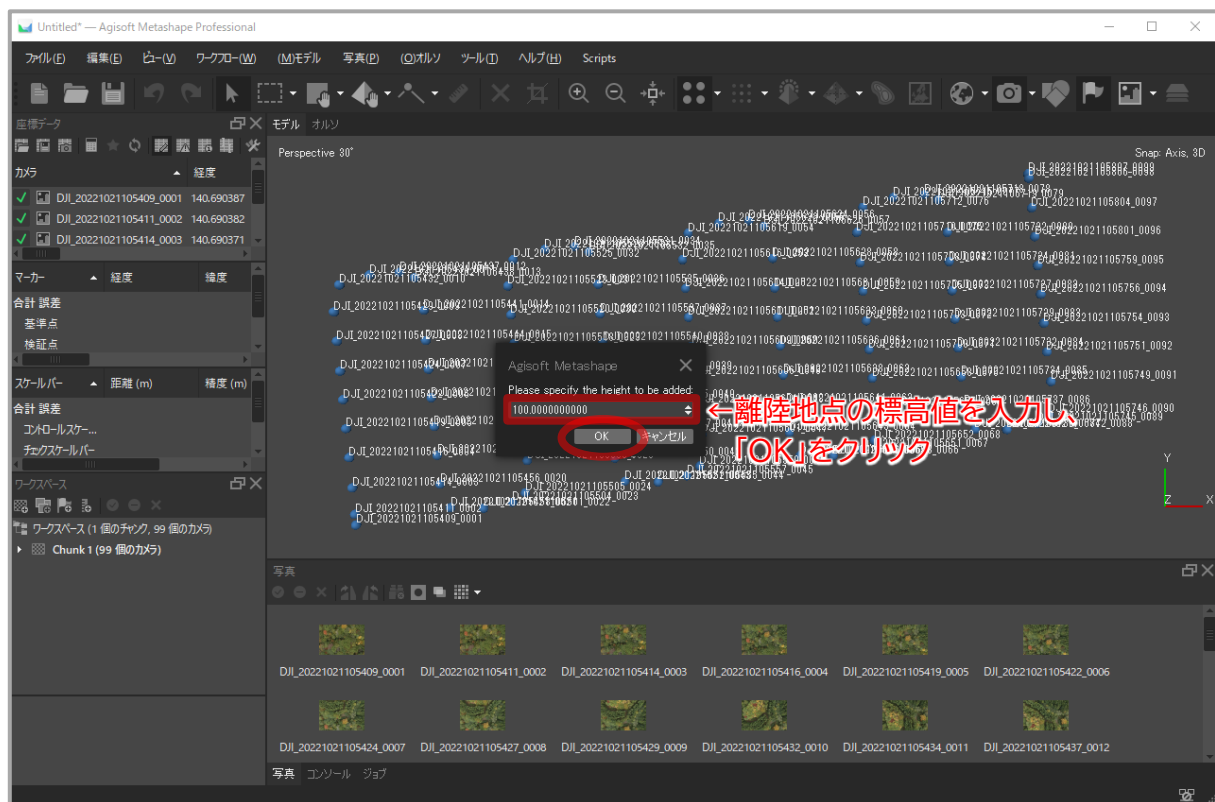


図 6.1.6 読み込んだスクリプトの実行画面 その2

6.1.2. QGIS のグラフィカルモデラーの活用

第4章4.2でQGISを用いた解析手法を説明しましたが、DSM・DEMの処理で5工程、樹高・樹冠投影面積の算出で21工程あり、さまざまな場所でドローン写真による森林資源量調査を試してみようとする際に、何度もこの工程を繰り返すのはやや手間がかかるといえるでしょう。

そこで、QGISの機能である「グラフィカルモデラー」の使用方法を紹介します。グラフィカルモデラーは、さまざまなツールを使った一連の処理を一つのモデルとしてまとめることができ、複雑な処理を何度も実行する場合におすすめの機能です。

ここでは例として樹高・樹冠投影面積の算出にかかる21工程をとりあげ、モデルの作成方法を説明します。手順は以下のとおりです。

- ① QGISのプロセッシングツールボックス左上にある「モデル」のアイコンをクリックし、「新規モデルを作成する」をクリックします(図6.1.7)
- ② 現れた画面の右側に「名前」「グループ名」という欄があるので適宜入力し、モデルを保存します(図6.1.8)。保存先を尋ねる画面が現れますが、その画面に表示されている保存先から変えずに、ファイル名を入力してください
- ③ 画面右側の「入力」パネルで以下の項目をダブルクリックして[]の内容を入力し、モデルに

変数として追加します（図 6.1.9）。以下に指定がない項目は規定値のままでかまいません。

- ・ラスタレイヤ [説明：DCHM]
- ・ラスタレイヤ [説明：DCHMf]
- ・数値 [説明：Distance (Cluster) 数値型：浮動小数点(float) 最小値・最大値：適宜
デフォルト値：1.4] ※手順⑫の「クラスタ化された点の最大距離」で使用

- ④ 画面右側を「アルゴリズム」パネルに切り替え、第4章4.2の表4.2.2～表4.2.4にあるツールを順にモデルに追加していきます。パネル内でツール名をダブルクリックすると、第4章4.2の図4.2.13～図4.2.33に示したようにツールの画面が現れるので、表にあるとおり入力レイヤや数値などを指定してください（図6.1.10）。入力レイヤとして③で作成した変数を選択する場合は「モデル入力」を、モデルに追加したツールで出力されたレイヤを参照する場合は「アルゴリズム出力」を選択し、適宜設定してください。属性名や数式を入力する場合は、基本的に「値」を選択して、適宜入力してください。最終的な樹冠・樹頂点として出力するレイヤのみ、ツールの「出力レイヤ（出力ファイル）」欄にレイヤ名を入力してください。すべてのツールを追加し終わったら、作成は終了です（完成したモデルは図6.1.11のとおり）

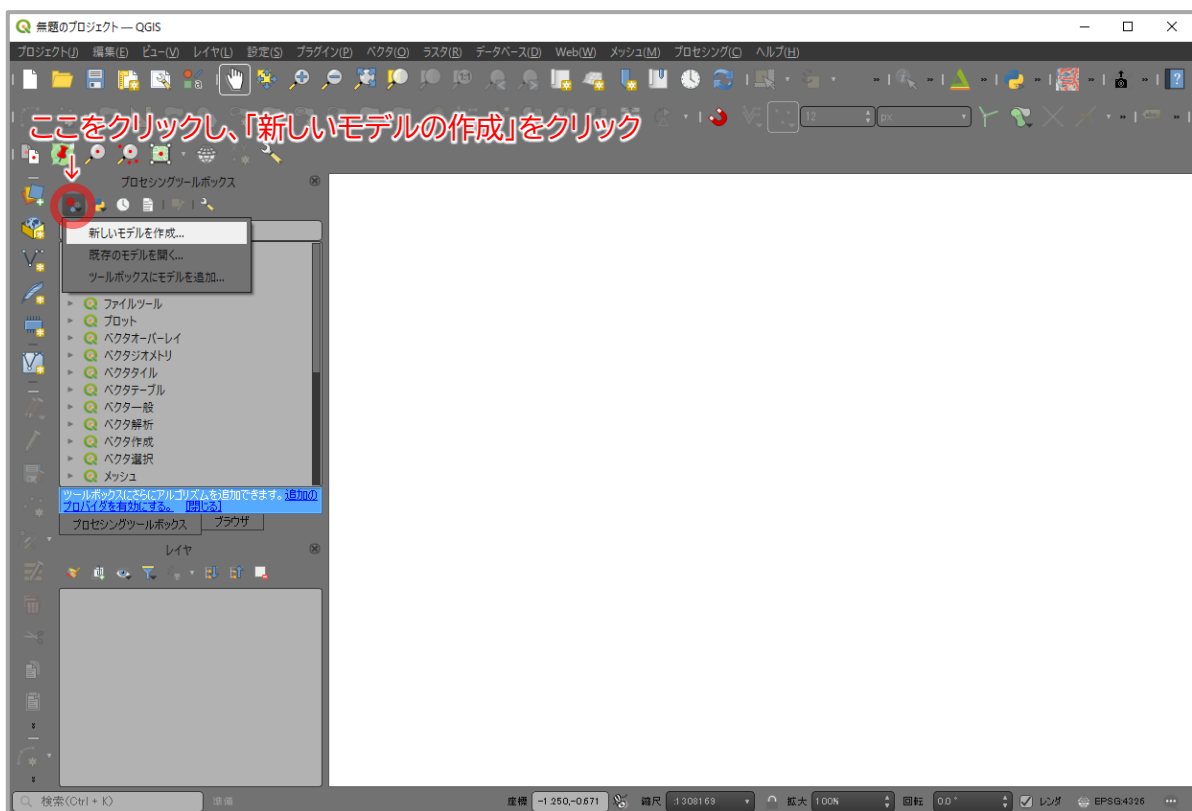


図 6.1.7 モデルの作成開始

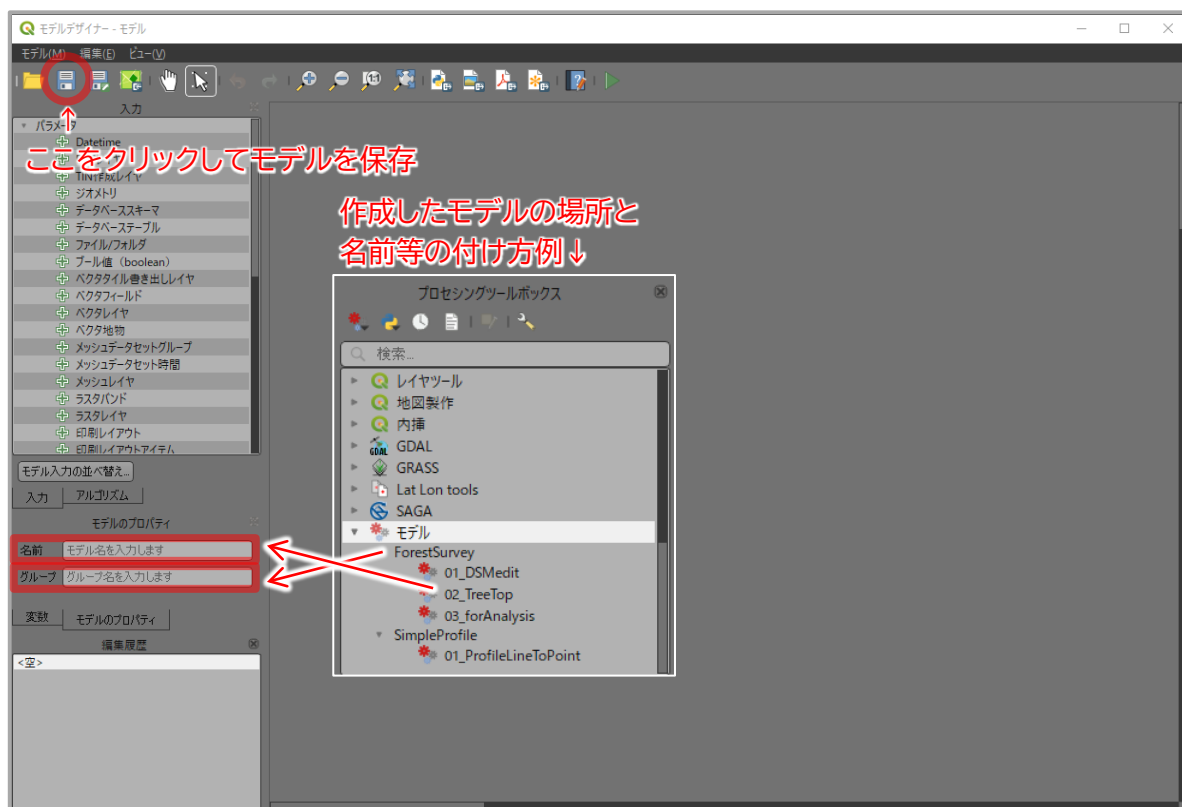


図 6.1.8 名前・グループの入力とモデルの保存

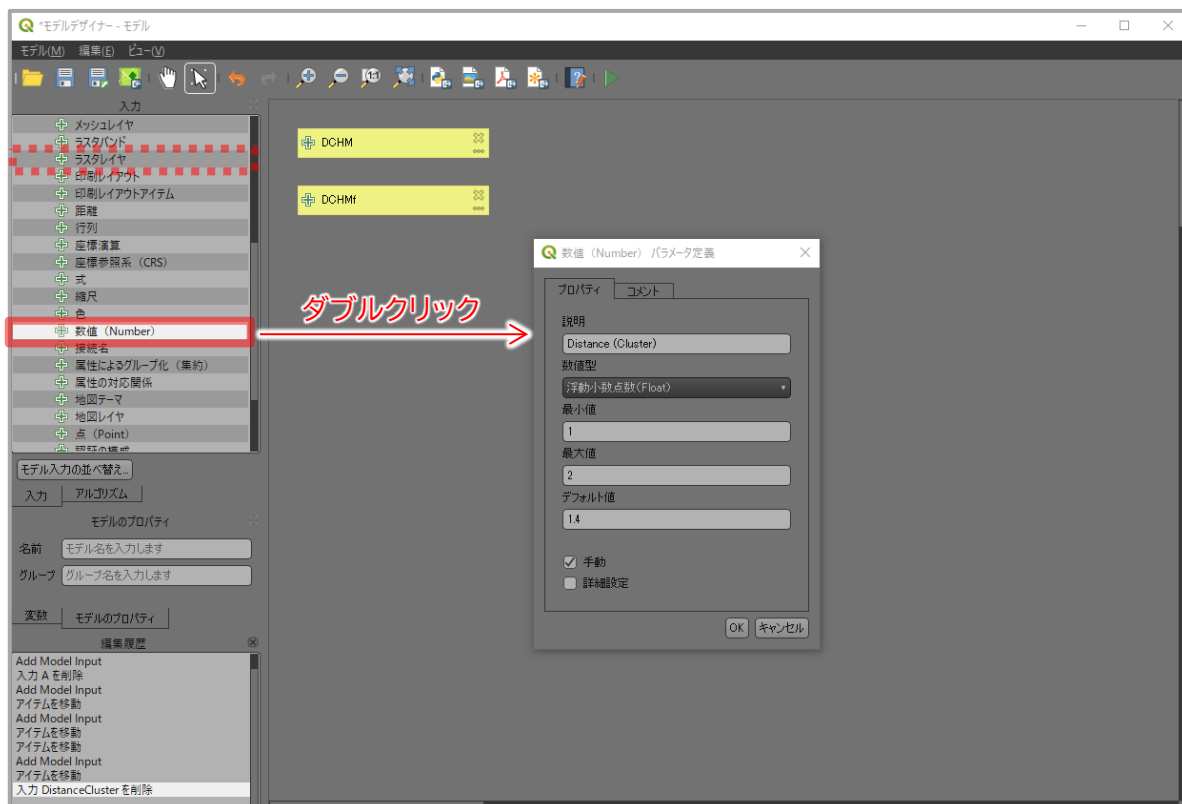


図 6.1.9 モデル内のへ変数の配置

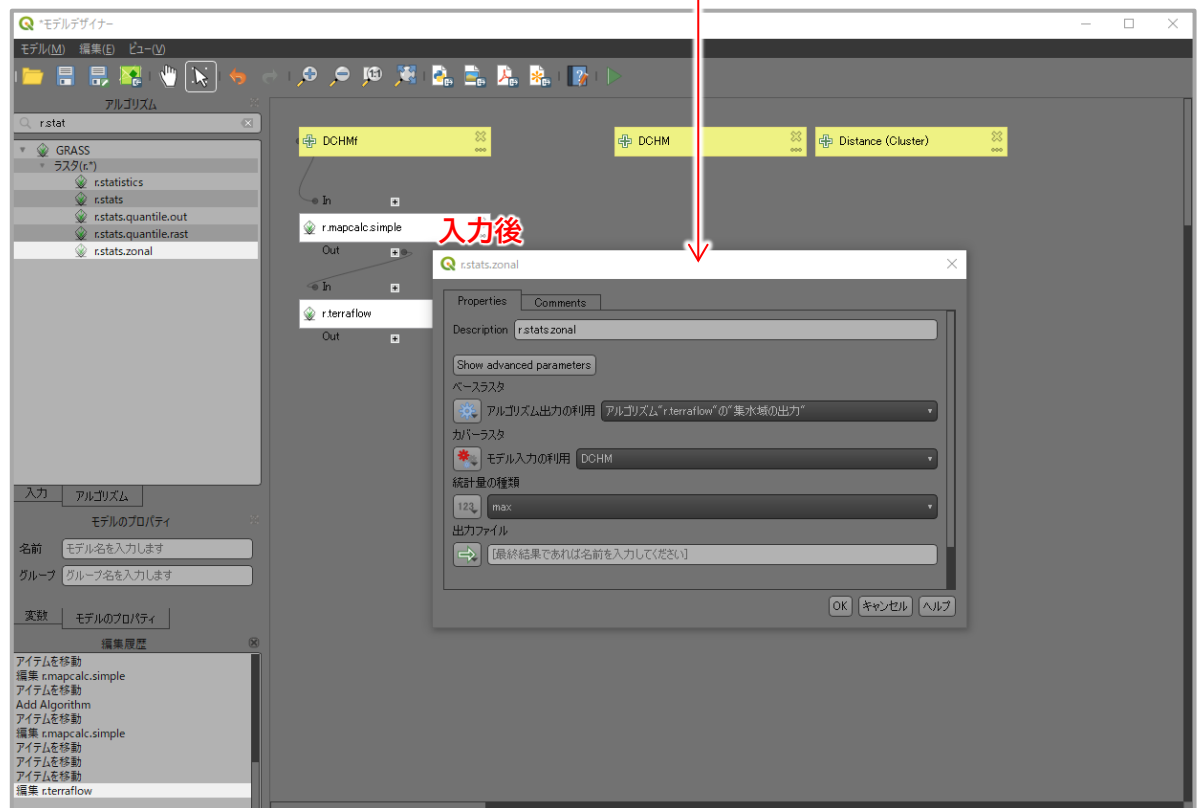
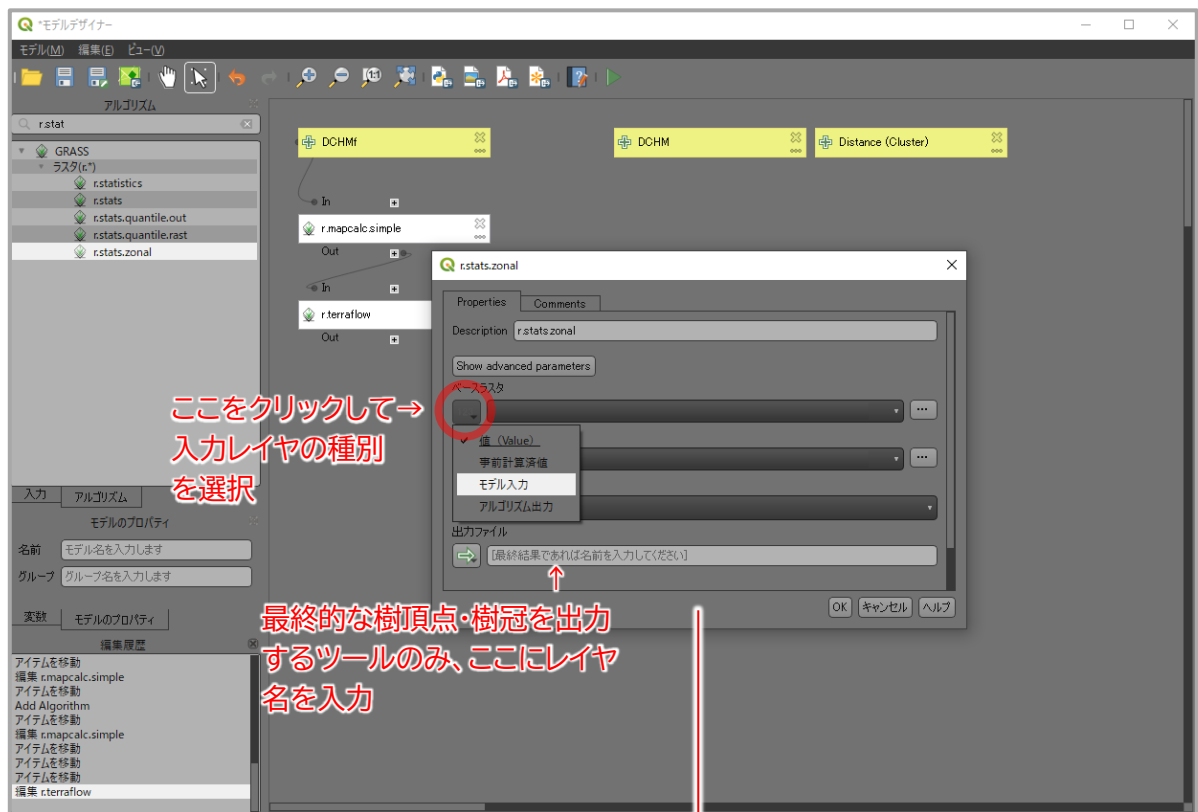


図 6.1.10 モデル内へのツール配置

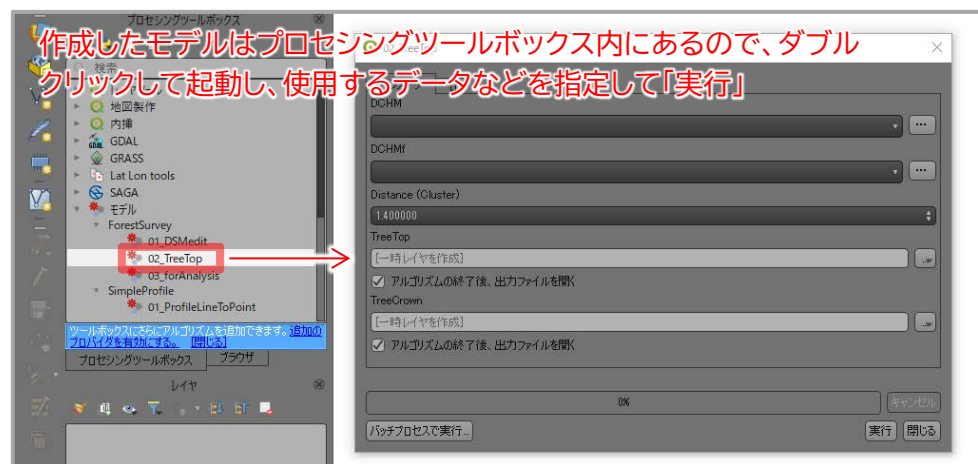
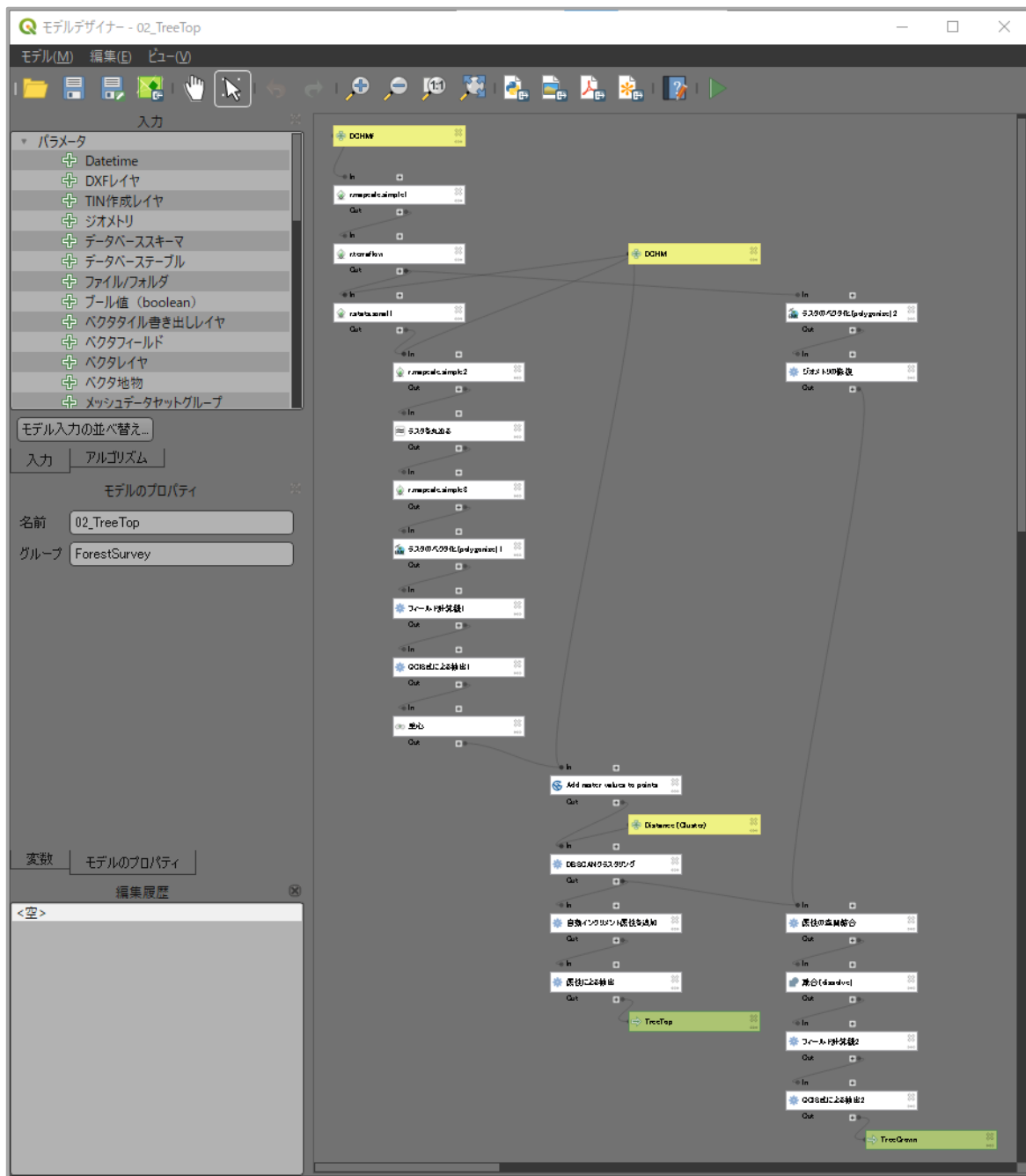


図 6. 1.11 作成したモデル

6. 2. 胸高直径の推定:調査地のスギ特性を反映した推定式の作成

第 5 章では、「UAV による森林調査等実証実験業務」で作成した汎用的な胸高直径推定式（暫定版）を使用し、材積算出に必要な胸高直径を取得する方法を紹介しました。

しかしながら、調査地によってはこの汎用的な胸高直径推定式では推定精度が不十分な場合（＝誤差が大きい場合）が出てくると考えられます。

そこで、本節ではプロット調査を実施して得た単木毎の実測胸高直径を目的変数とし、点群データの解析によって算出した樹高・樹冠投影面積を説明変数として非線形回帰分析を行ない、調査地独自に以下の推定式を作成する方法を紹介します。

＜本マニュアルでの胸高直径推定式＞

$$\text{胸高直径} = a \times \text{樹高}^b \times \text{樹冠投影面積}^c$$

$a \cdot b \cdot c$ …非線形回帰分析で導かれる係数

なお、ここで紹介する手法では、基本的に調査地のオルソ画像が作成済みであることが前提となります。第 3 章 3. 2. 3 にも記載しましたが、本マニュアルで使用方法を紹介した SfM ソフトウェアのうち、Metashape Professional であれば作成が可能です。

6. 2. 1. R のダウンロード・インストール

第 2 章 2. 4 にて紹介した汎用的な胸高直径推定式（暫定版）は、オープンソースかつ無償の統計解析向けプログラミング言語である R を使用して作成しました。R は「パッケージ」と呼ばれる関数やデータのセットが多数開発されており、現在では統計学以外の分野でも幅広く使用されています。

調査地独自の胸高直径推定式を作成する場合もこの R を使用するため、以下にダウンロード・インストール方法を説明します。

なお、本項以降で説明する手法は Windows 版の R 4.2.2 および Rstudio Desktop 2022.07.2+576 を使用しています。

（１）R 本体のダウンロード・インストール

始めに、以下のいずれかの国内ミラーサイトにアクセスします。

- ・ 数理統計研究所ミラーサイト (<https://cran.ism.ac.jp/>)
- ・ 山形大学ミラーサイト (<https://ftp.yz.yamagata-u.ac.jp/pub/cran/>)

サイトにアクセスすると、図 6.2.1 の画面が現れるので、赤丸部分をクリックします。続いて図 6.2.2 の赤丸部分をクリックし、さらに図 6.2.3 の赤丸部分をクリックすると、インストーラーのダウンロードが開始されます。

ダウンロードしたインストーラーをダブルクリックすると、インストールが開始されます。開始直後にインストールに使用する言語を尋ねられるので、「日本語」を選択した状態で「OK」をクリックしてください。以降、インストールに関する設定等についていくつか選択する画面が現れますが、基本的に規定値のまま「次へ」をクリックしてかまいません。

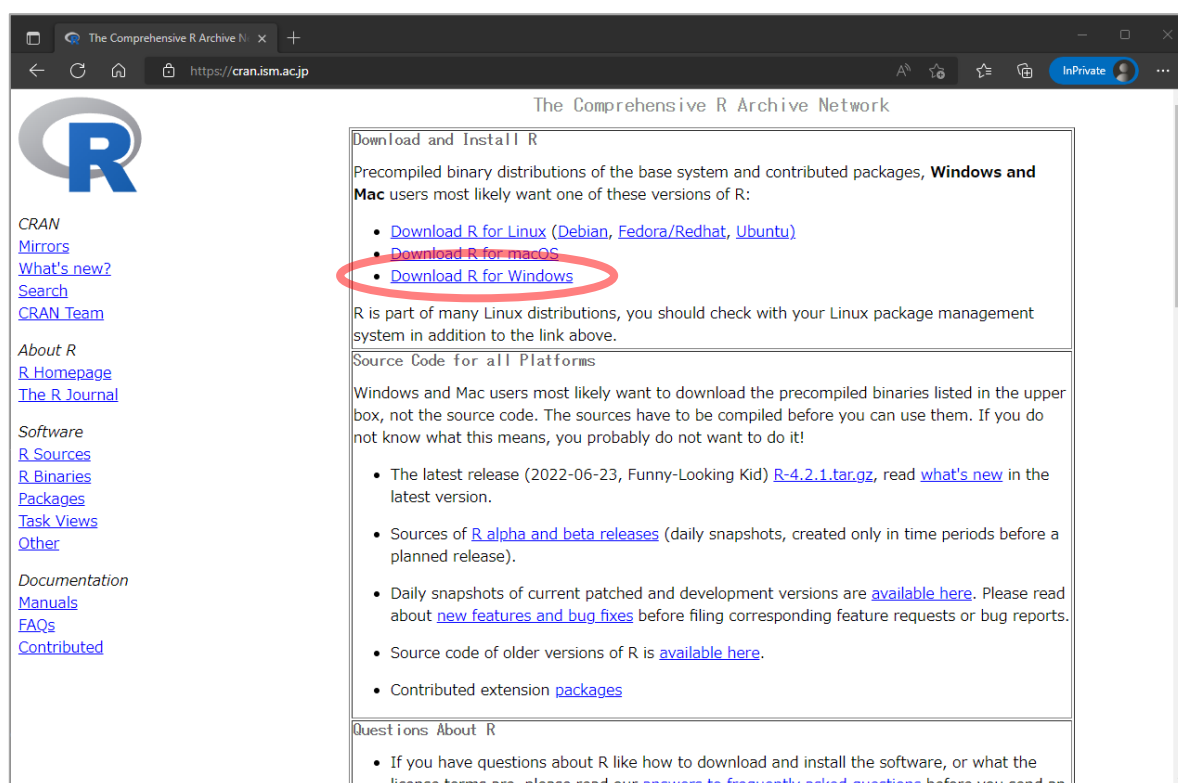


図 6.2.1 R のダウンロード その 1(2022 年 11 月時点)

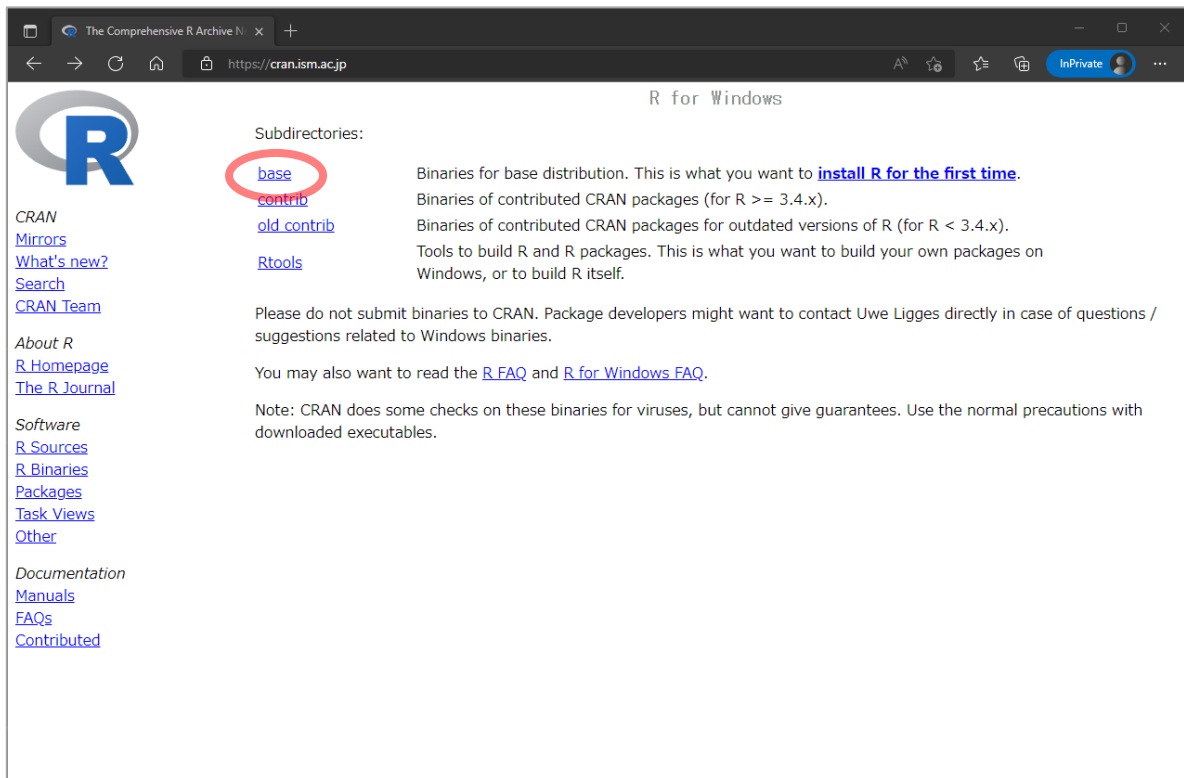


図 6.2.2 R のダウンロード その 2(2022 年 11 月時点)

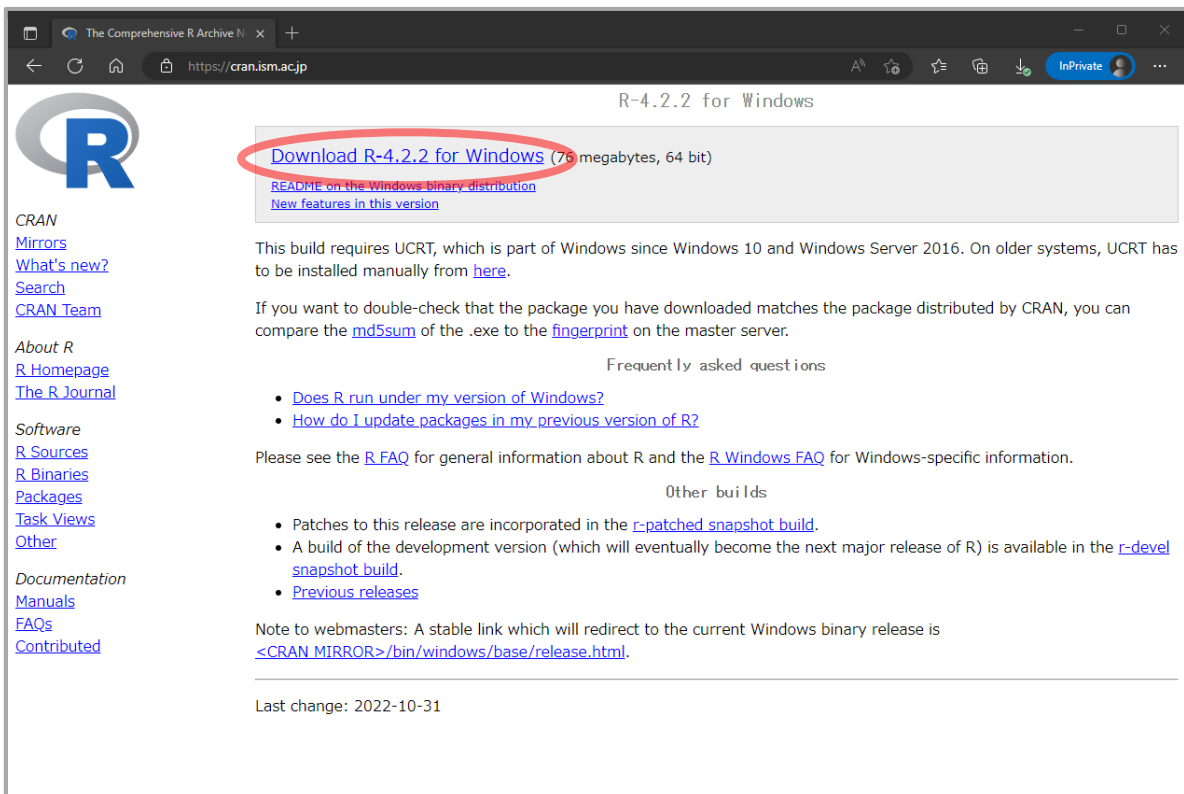


図 6.2.3 R のダウンロード その 3(2022 年 11 月時点)

(2) Rstudio のダウンロード・インストール

Rstudio とは、R 用の統合開発環境です。統合開発環境とは、プログラミングをする際に必要な複数のツールを 1 つのグラフィカル・ユーザー・インタフェース (GUI) で使えるようにしたもので、これを導入することでプログラミングがより容易になります。

Rstudio をダウンロード・インストールするには、始めに Rstudio のダウンロードページにアクセスします (<https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/>)。無料バージョンを使用するので、図 6. 2.4 の赤丸の部分をクリックし、続いて図 6. 2.5 の赤丸の部分をクリックすると、インストーラーのダウンロードが始まります。

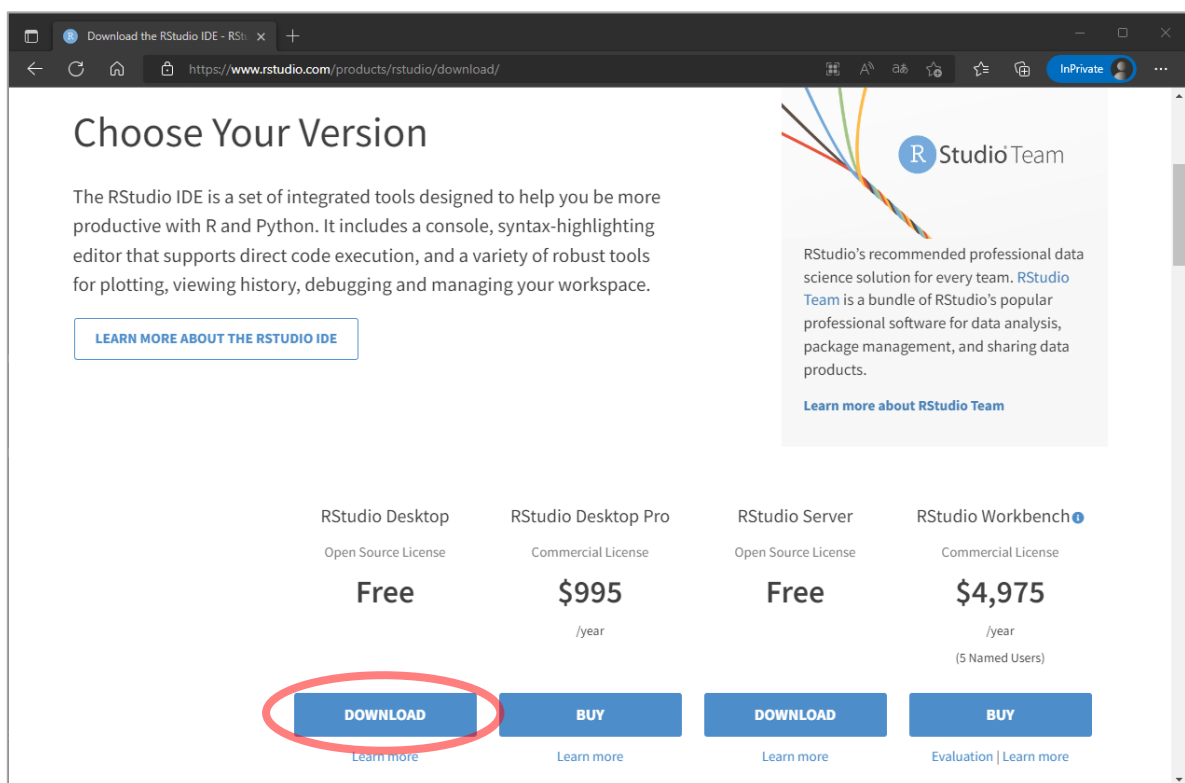


図 6. 2.4 Rstudio のダウンロード その 1(2022 年 11 月時点)

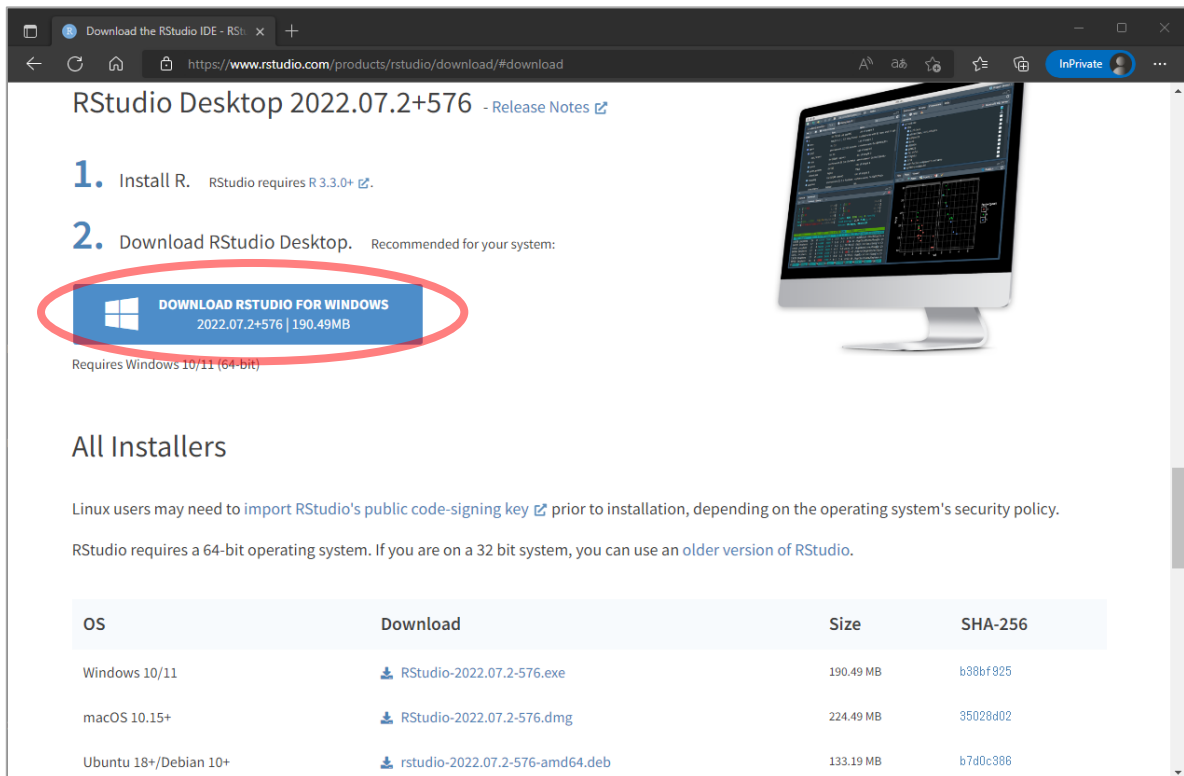


図 6.25 Rstudio のダウンロード その2(2022 年 11 月時点)

(3) パッケージのインストール

R 言語は、さまざまな企業や個人が作成した「パッケージ」をインストールすることで、多様なデータ処理・解析を実施することができます。本マニュアルに示す手法では、R のインストール時に同時にインストールされない以下の二つのパッケージが必要です。

- DMwR2
- soilphysics

パッケージのインストールは、Rstudio の画面右下にある「Package」タブにある「install」ボタンから実施できます (図 6.2.6 参照)。

「Install」ボタンをクリックし、現れた画面の空欄にインストールしたいパッケージ名を打ち込み、「Install」をクリックしてください (図 6.2.7 参照)。画面左の「Console」ペインに次々とメッセージが表示され、最終的にインストールが成功すると「package ●●● (パッケージ名) successfully unpacked～」というメッセージが表示されます。

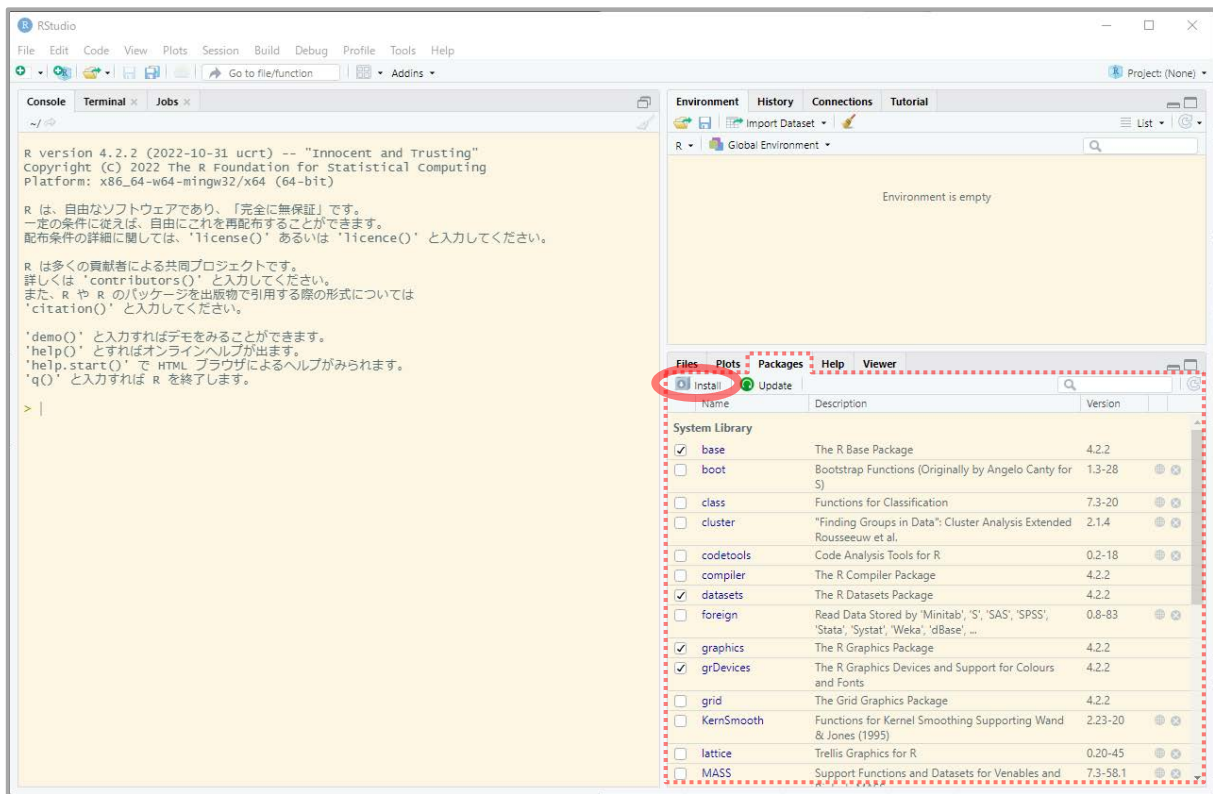


図 6.2.6 パッケージのインストール その 1

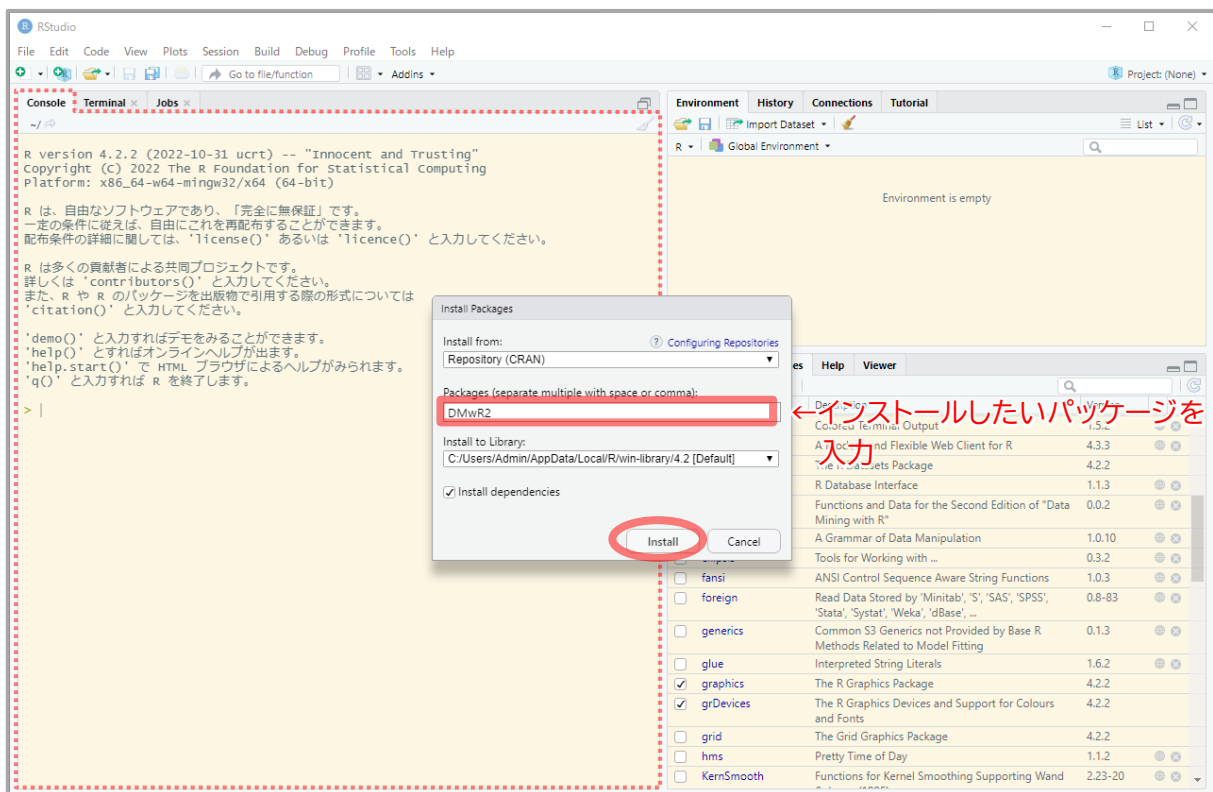


図 6.2.7 パッケージのインストール その 2

6.2.2. プロット調査の実施

非線形回帰分析の説明変数となる実測胸高直径を得るために、ドローンで撮影した範囲においてプロット調査を実施します。その方法と調査のイメージは、表 6.2.1・図 6.2.8 のとおりです。プロットのサイズは半径 8m の円（＝面積 200m²）とし、調査必須項目は立木の配置・プロットを中心座標・胸高直径です。

プロット数の目安ですが、1ha 当たり 1 箇所としています。ただし、以下のような場合において、1ha 当たり 1 箇所では調査量として不十分な可能性が出てくると考えられます。

- ・調査範囲が狭い場合、1ha 当たり 1 箇所ではプロット数が 2～3 箇所になってしまう
- ・枯損木で樹冠が無い、あるいは無いに等しいスギについては点群データを用いた解析による樹冠抽出が困難で推定式作成に使用できない
- ・点群データの解析ではどうしても未抽出木が出てしまう（第 4 章 4.2.1 参照）

このような場合、本マニュアルの基礎となっている「UAV による森林調査等実証実験業務」の成果をふまえると、少なくとも枯損木を除いて 50 本程度確保できるようにプロット数を設定するか、1 プロットの面積を変更することを推奨します。ただし、そもそも樹頂点を抽出できた立木が少なければ、後述の立木位置の突合を実施できる立木が少なくなるため、より現地で調査本数を確保しないと推定式が作成できない可能性がある点に注意してください。

表 6.2.1 プロット調査の方法

項目	内容
プロットの形状	円形 ※状況に応じて変更可
1 プロットの面積	0.02ha (200m ²) [半径約 8m の円] ※状況に応じて変更可
現地でのプロット 設定方法	プロットの中心に杭を設け、そこから周囲 8 方向程度に向かって水平距離を測定し、8m となる地点に杭を打って設定
調査プロット数	1ha に 1 箇所程度 ※調査範囲が小さい場合、スギ（枯損木除く）の総数が少なくとも 50 本程度になるように設けることを推奨
調査樹木	プロット内にあるすべてのスギ ※枯損木の調査は任意
調査項目	プロット内にある立木の配置、プロットの center 座標、胸高直径（+ 樹高） ナンバーテープ付与が必須
使用機器	プロット設定時の水平距離：トータルステーション等 立木の配置：手描きで記録またはトータルステーション等で測量 プロットの center 位置座標：ハンディ GNSS 受信機（Garmin 社製など） 胸高直径：輪尺や巻尺など 樹高：レーザ距離計 ※参考情報として

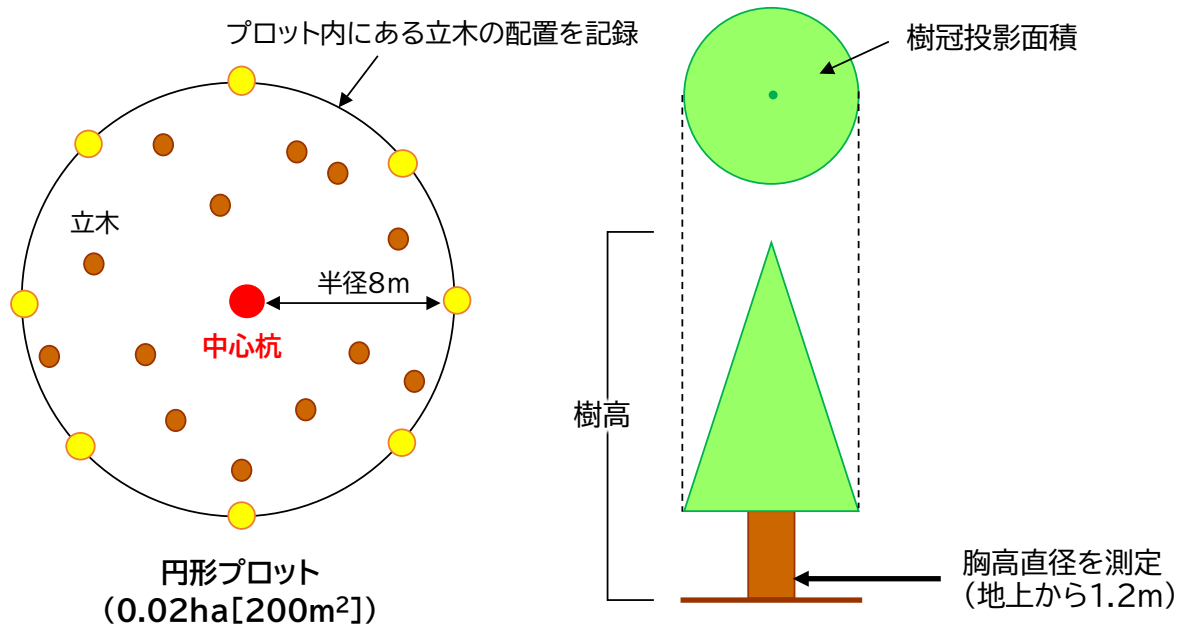


図 6.2.8 プロット調査内容のイメージ

後述する R による胸高直径推定式作成時には、プロット調査の結果を含め以下のようにデータを整理する必要があります。

プロット番号	立木番号	実測胸高直径	点群データ解析樹高	点群データ解析樹冠投影面積
P1	100	30.0	23.4	14.7
P1	101	25.0	22.1	11.9
:	:	:	:	:
P4	424	31.0	27.8	18.0
P4	454	22.0	26.5	12.3

すなわち、プロット調査をした立木について点群データの解析で取得した樹高および樹冠投影面積が必要となることから、現地での立木位置と点群データ上の立木位置を突合しなければなりません。そのため、プロットの中心座標および立木配置の記録が特に重要です。プロット調査箇所を中心位置座標については、中心に打った杭のそばにハンディ GNSS 受信機を置いておいてログ（軌跡）を取りつつ、調査中に衛星の受信状態が安定したら記録するよいでしょう（図 6. 2.9）。プロットからプロットへの移動時もログを取っていれば、位置の突合に役立つ可能性があります。



図 6. 2.9 プロットの中心杭とハンディ GNSS 受信機

立木配置の記録方法は任意ですが、参考として「UAV による森林調査等実証実験業務委託」でのプロット調査時に記録した配置図を図 6. 2.10 に示します。他樹種（マツ等）や特別樹冠が大きな立木、上空からでも見えるような枯損木などが含まれていると、位置の突合がしやすいと考えられます。

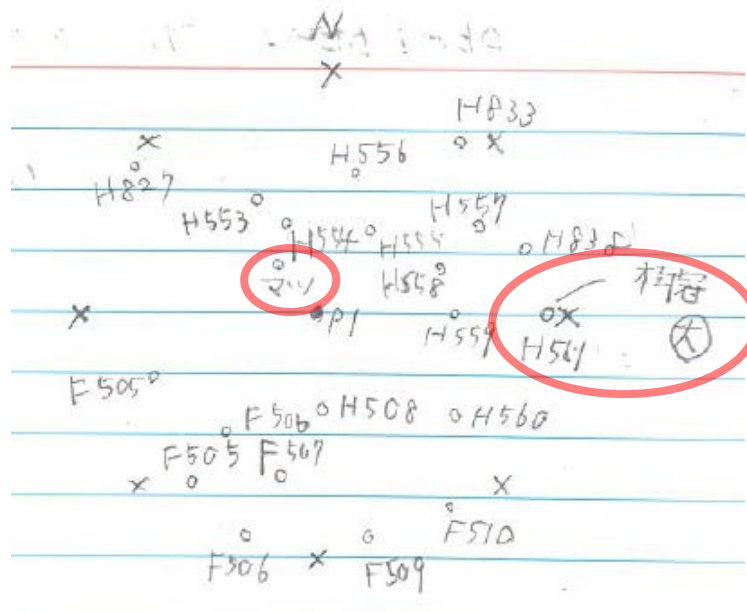


図 6. 2.10 実際の調査で作成した立木配置図

作成済みのオルソ画像をみて目印となる木があれば、その木を含むようなかたちでプロット調査を実施するとよいでしょう。現地での調査時、目印とした木まで向かっていくための手段として、オフライン環境でも自作の地図上を用いて、スマートフォンやタブレットの位置情報から自分が今いる場所を表示できるアプリを利用する方法を紹介します。

使用するアプリは「Avenza Maps」という無料アプリで、iOS・Android に対応しています（ダウンロードページ：https://avenzamaps.jp/?page_id=7）。このアプリには、QGIS で作成した GeoPDF（位置情報付きの PDF）を取り込むことができるため、この機能を利用します。

- ① QGIS 上に作成したオルソ画像を読み込みます（図 6. 2.11）。②以降の作業に入る前に、座標参照系（CRS）が正しく定義されているか確認してください
- ② 調査範囲全体が画面上に入るようにし、画面上部の「プロジェクト」にある「インポートとエクスポート」から「地図を PDF にエクスポート」をクリックします（図 6. 2.12）

- ③ エクスポートの内容を設定する画面が現れるので、解像度を 200～300dpi 程度にし、「ジオ PDF (GeoPDF) を作成」にチェックを入れます (図 6.2.13)。この状態で「OK」をクリックし、適切なファイル名を付けて PDF を作成します
- ④ microSD カード等を利用してタブレットやスマートフォンに③で作成した PDF をインポートしておきます。そのうえで Avenza Maps を起動し、作成した GeoPDF を選択してインポートしてください (図 6.2.14・図 6.2.15)

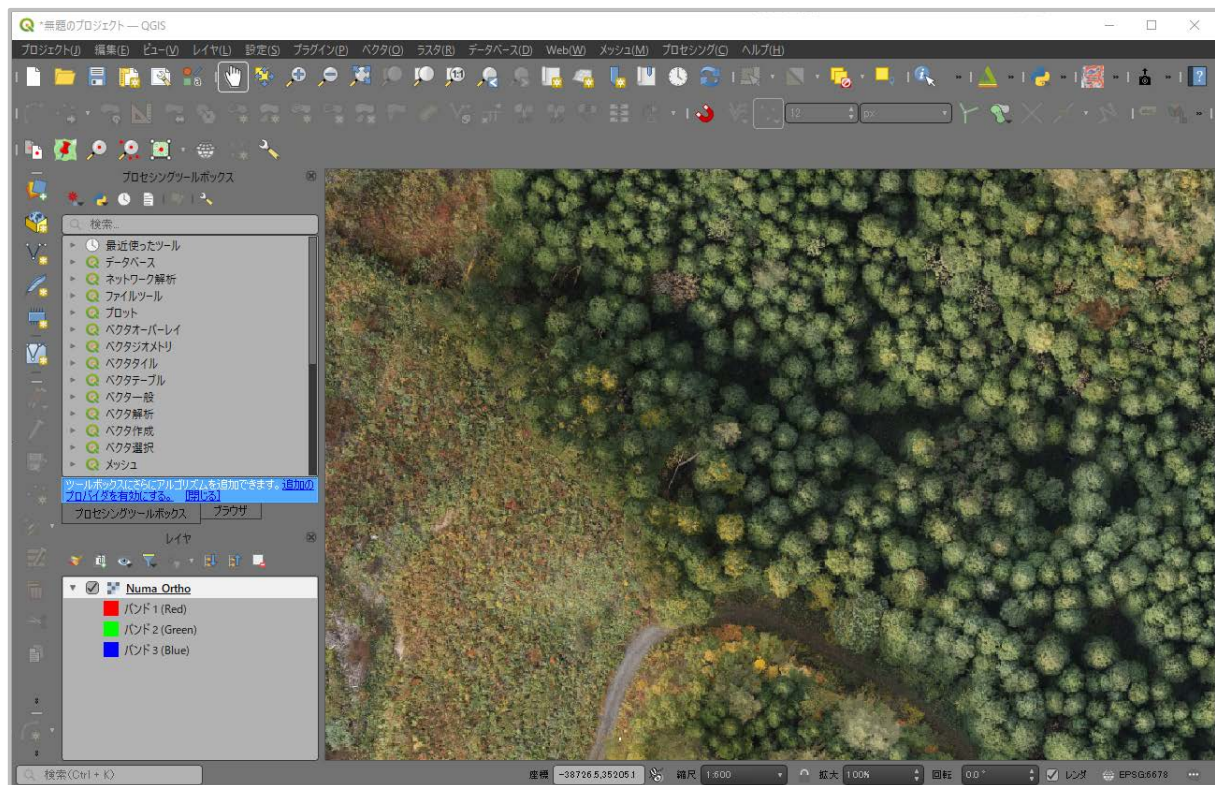


図 6.2.11 QGIS に読み込んだオルソ画像

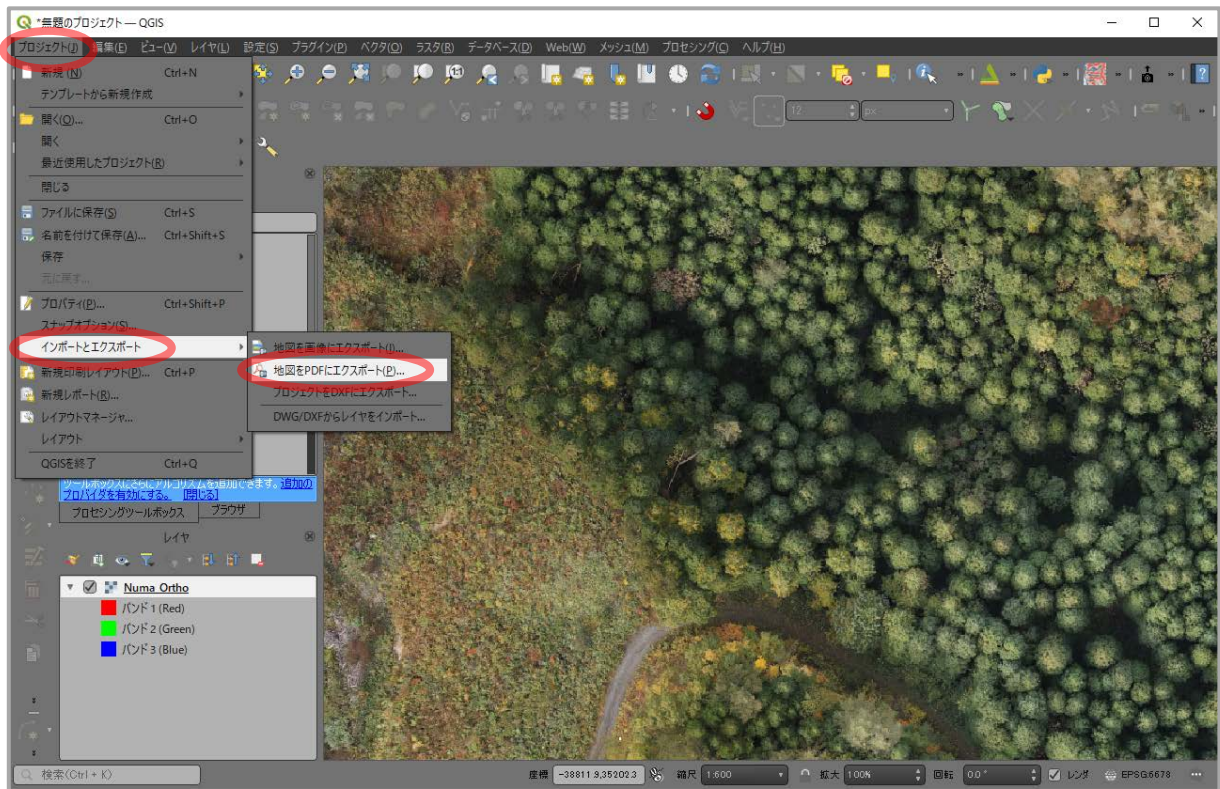


図 6.2.12 表示画面のエクスポート その 1

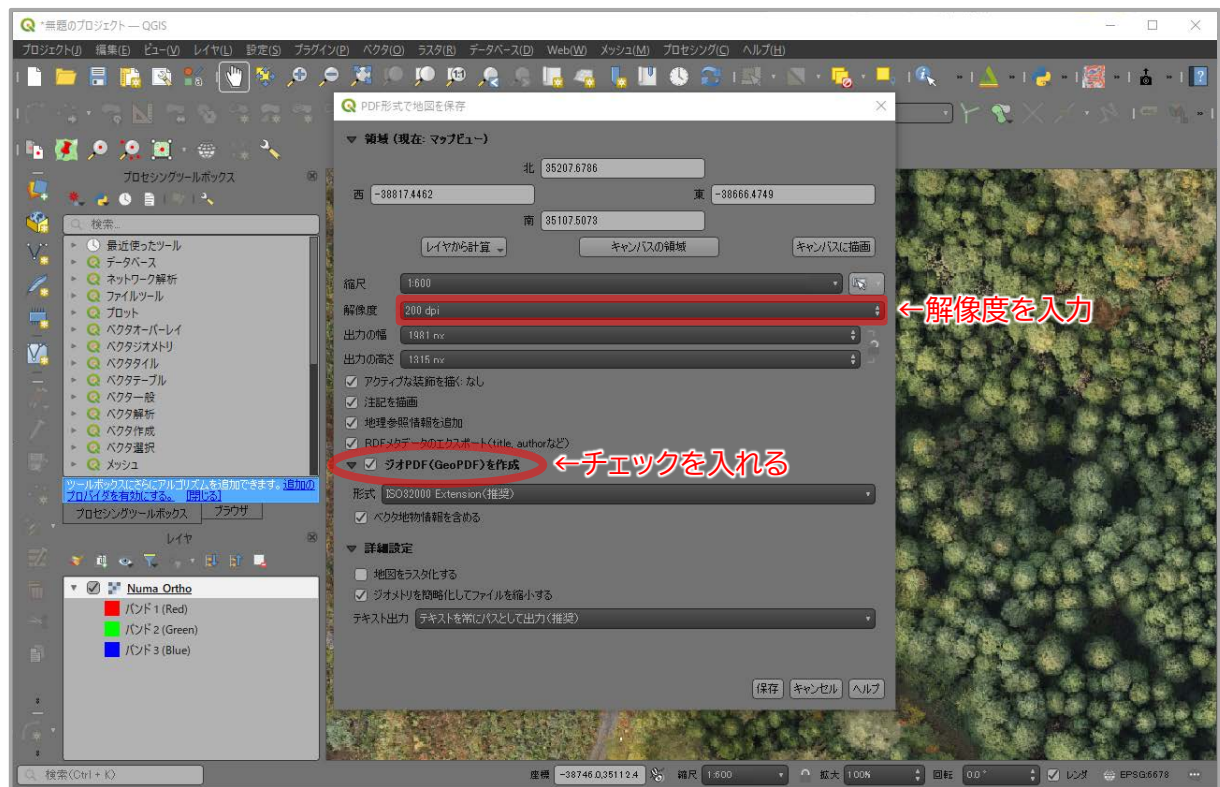


図 6.2.13 表示画面のエクスポート その 2

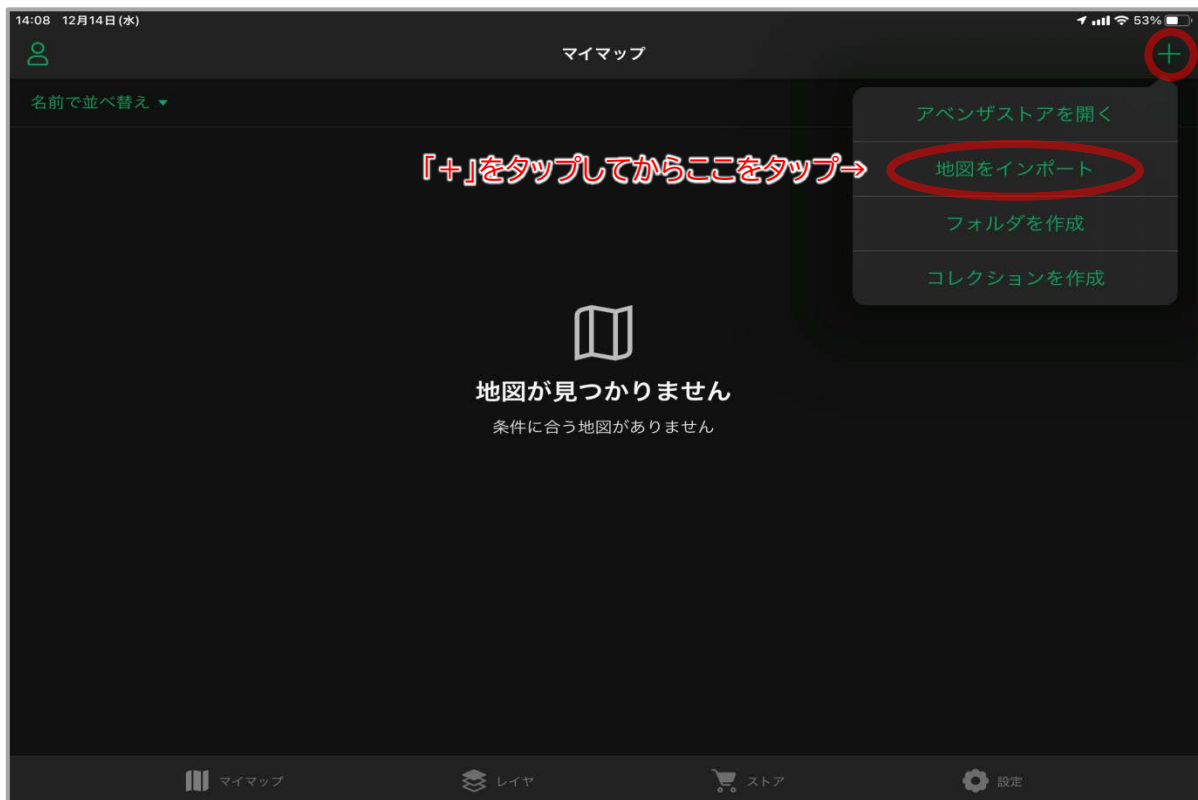


図 6.2.14 Aneza Maps への GeoPDF 取り込み その 1



図 6.2.15 Aneza Maps への GeoPDF 取り込み その 2

6.2.3. 立木位置の突合作業の実施

プロット調査時に記録したプロットの中心座標やログ、立木の配置から、プロット調査した立木と点群データ上の立木位置の突合作業を実施します。

方法はさまざま考えられると思いますが、ここでは第4章4.2で作成した樹頂点、ハンディGNSS受信機で取得したプロットの中心位置、ログ（軌跡）、オルソ画像などをQGIS上に読み込み、現地で記録してきた立木の配置と突合してシェープファイルとしてまとめる方法を紹介します。

なお、点群データの解析で樹頂点が抽出できなかった立木は位置の突合ができませんので、注意してください。

- ① QGISを起動し、新規シェープファイルを用意します（ファイル名は任意）。このシェープファイルの属性として「PlotName」「NO」「DBH」の三つを用意します。型は「PlotName」「NO」がテキスト、「DBH」が小数点付き数値としてください（図 6.2.16）。この三つ以外は、クリックして選択状態にしてから画面右下の「フィールド削除」で削除してください
- ② QGIS上にオルソ画像・樹頂点・ハンディGNSS受信機等で記録した中心座標・ログのデータ（拡張子：gpx）をQGIS上にドラッグ&ドロップします。読み込むデータを選択する画面が現れます（図 6.2.17）。すべてのデータが選択された状態になっていますので、そのまま「OK」を押してもかまいませんが、プロットの中心位置であれば「waypoints」のみを、ログであれば「tracks」のみを選択すると余計なデータが読み込まれなくて済みます
- ③ ①のシェープファイルを編集状態にします。そのうえで、QGIS上に読み込んだ各種データと、現地で記録してきた立木の配置を比較し、プロット調査した立木に該当する樹頂点を突き止めます。突き止めたら、①のファイルでその樹頂点の位置にポイントを追加してください。その際、スナップを有効にし、樹頂点と完全に一致するようにポイントを作成してください。
「PlotName」にプロット調査箇所の番号（例：P1）を、「NO」にはナンバーテープの番号（例：A100）、「DBH」には計測してきた胸高直径を入力します（図 6.2.18）。この作業をプロット調査したすべての立木について実施してください。作業中はポイントを追加した①のファイルを適宜上書き保存するようにしてください
- ④ シェープファイルが完成したら、「プロセッシングツールボックス」から「属性の空間結合」ツールを起動します（図 6.2.19）。ベースレイヤは作成したシェープファイル、結合レイヤは第4章で作成した樹冠のシェープファイルとしてください。ジオメトリの空間関係は「交差する」とし、結合するフィールドは「Area」（＝樹冠投影面積）、「DCHM」（＝樹高）にチェックを入れてください。結合のタイプは「最初に合致した地物の属性のみを取得（1対1結合）」としてください。出力レイヤは任意の名前でかまいません

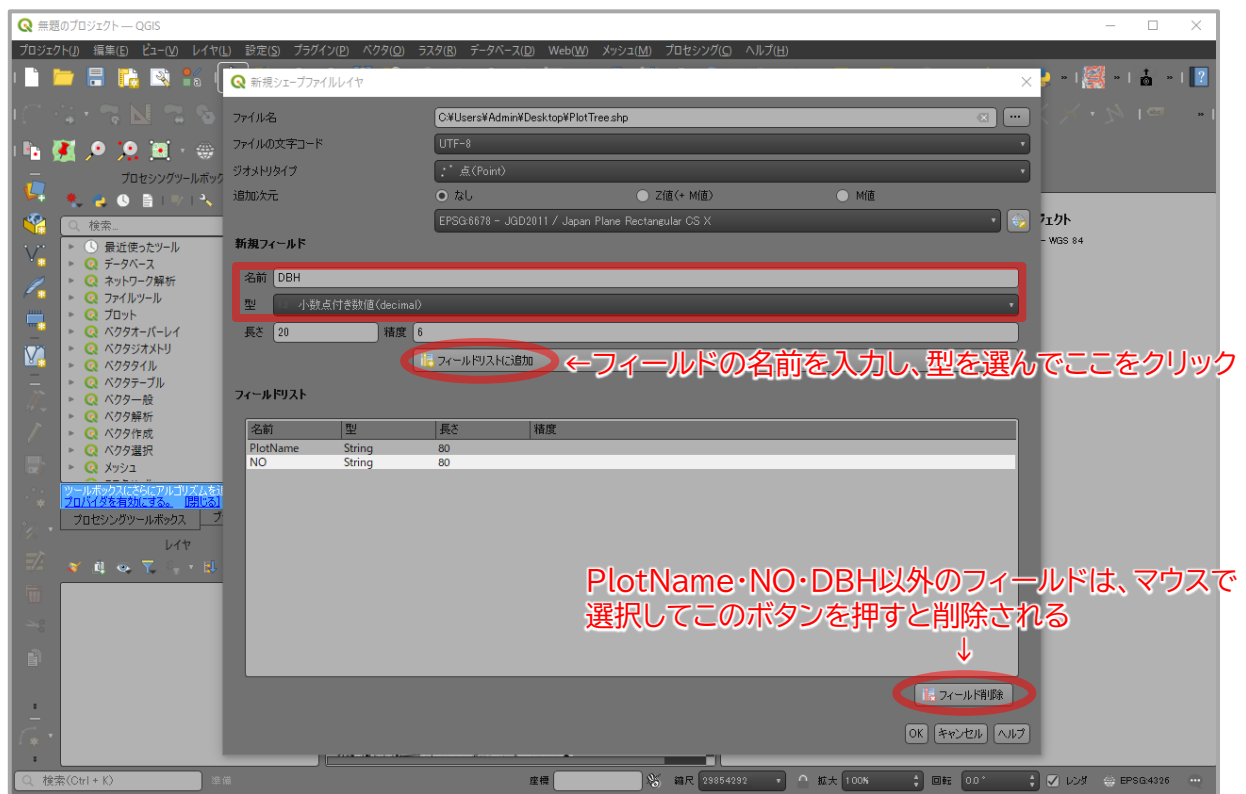


図 6.2.16 新規シェープファイルの作成と属性追加

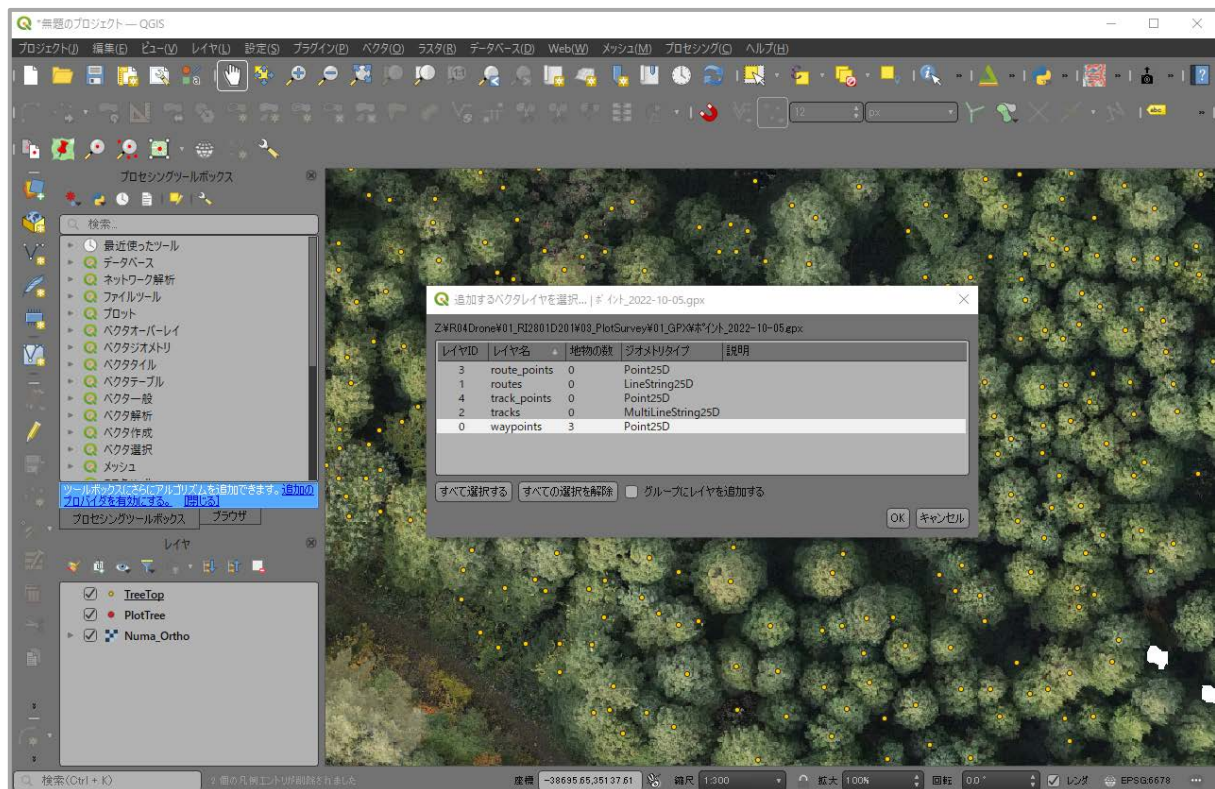


図 6.2.17 QGIS への GPX ファイル読み込み

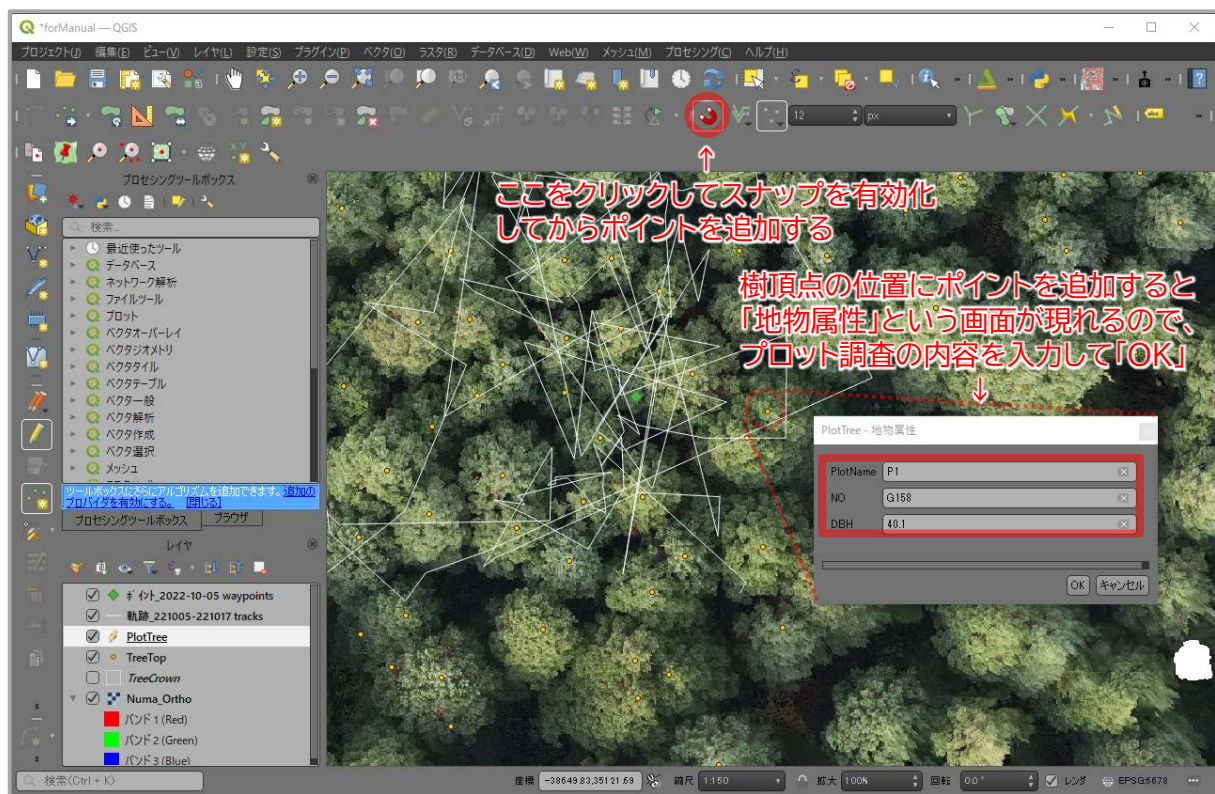


図 6. 2.18 樹頂点の位置へのポイント追加

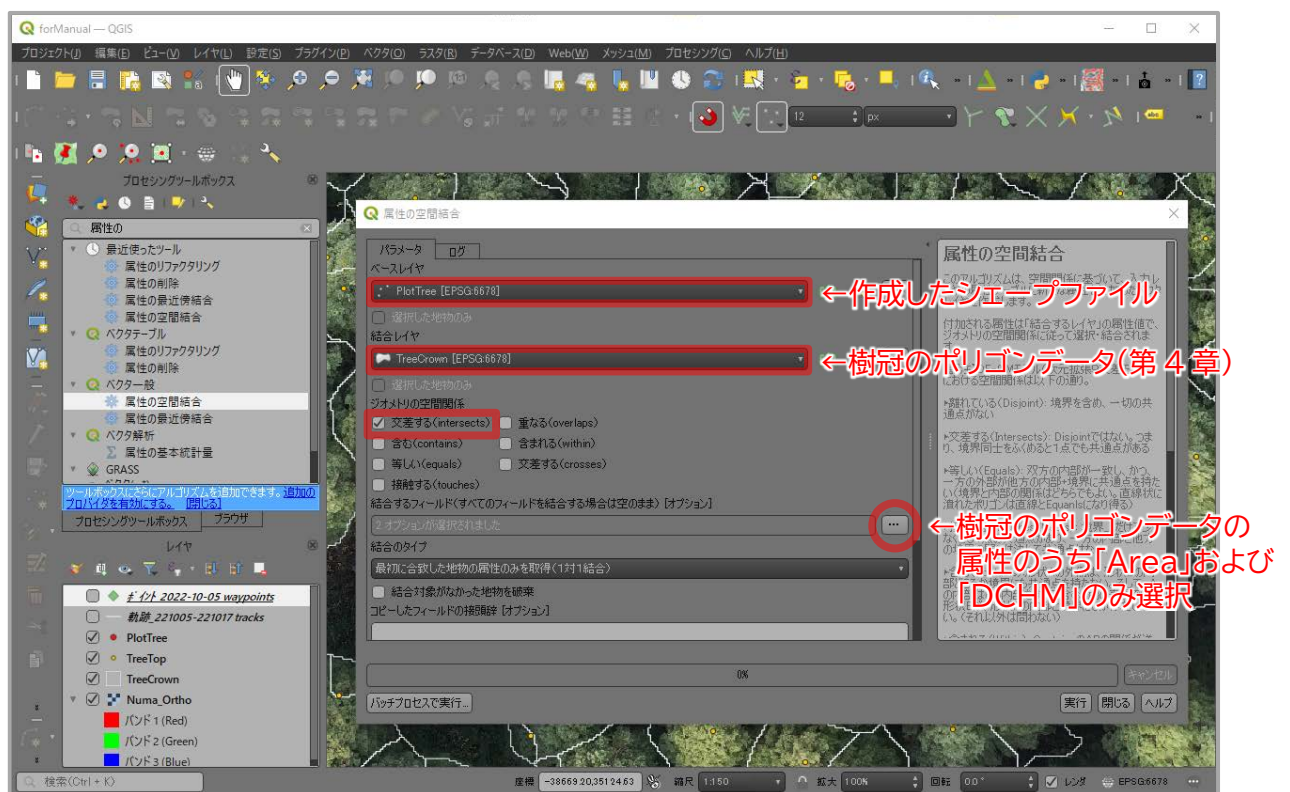


図 6. 2.19 「属性の空間結合」の実施

6.2.4. Rを用いた推定式作成

推定式作成のための非線形回帰分析は、R上で、以下の処理を順に実施するスクリプトを作成して実施します。作業のイメージは、図 6.2.20 のとおりです。

- ① Rに前項 6.2.3 で作成した実測胸高直径・点群データの解析で算出した樹高および樹冠投影面積をまとめた DBF ファイルを読み込みます（このファイルでは、胸高直径 [DBH] が 3 列目、樹冠投影面積 [Area] が 4 列目、樹高 [DCHM] が 5 列目に並んでいるはずです）
- ② 読み込んだファイルにある胸高直径を目的変数に、樹高・樹冠投影面積を説明変数に指定し、非線形回帰分析を実施し、結果（係数 $a \cdot b \cdot c$ や p 値など）を出力します
- ③ 非線形回帰分析の結果から補正 R^2 値（自由度調整済み決定係数）・RMSE（二乗平均平方根誤差）を計算し、出力します

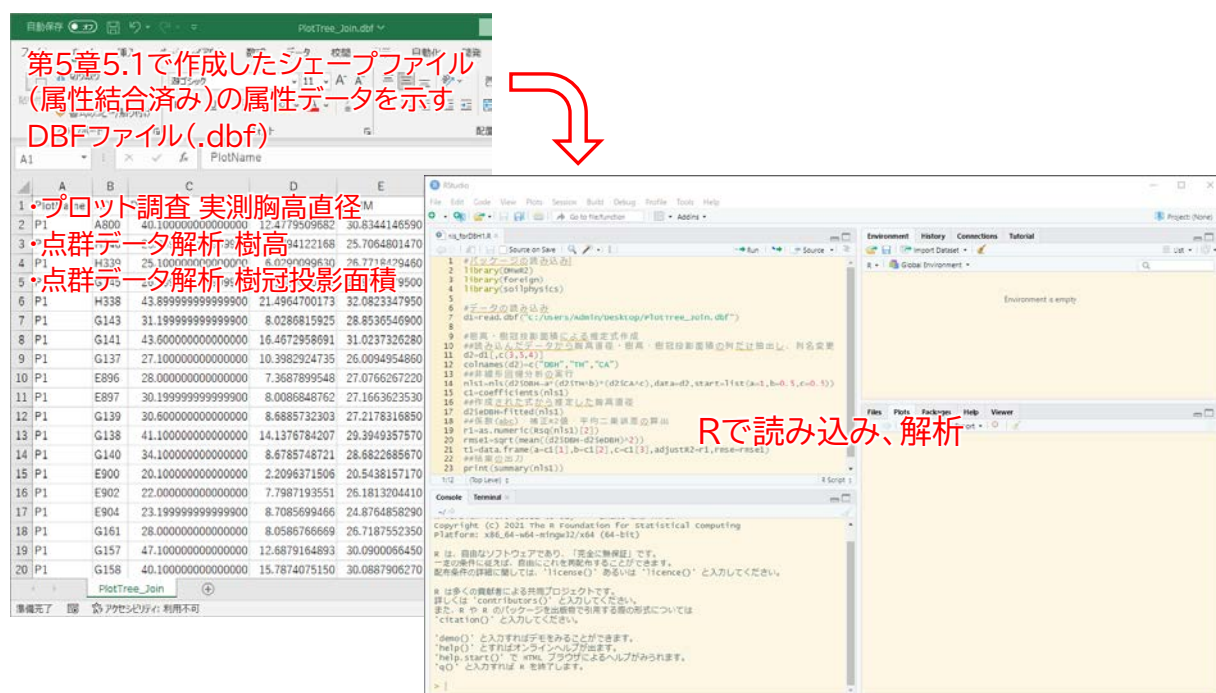


図 6.2.20 Rによる推定式作成のイメージ

②については、基本的に準備した全立木のデータを用います。ただし、なかには胸高直径が大きいほど樹高や樹冠が大きいといった一般的な傾向から大きく逸脱した値をもつ立木が含まれる可能性があります。このような「外れ値」がデータに含まれる場合、回帰式の精度が低下することが知られているため、参考として Local Outlier Factor 法によって外れ値とみなせる計測値をもつ単木を除外する手法を紹介します。

Local Outlier Factor 法とは、ある点の局所密度（周りにある点との密度）をその周辺にある他

の点の局所密度と比較し、有意に密度が低ければ外れ値とみなす手法です（図 6.2.21）。全立木のデータを使用して解析を実施した際、非線形回帰分析の結果を評価する指標である p 値・補正 R^2 値・RMSE が妥当な値にならなかった場合は、外れ値を除外して式を作成することも検討してみてください。

なお、外れ値として除外するデータの数が多すぎても、非線形回帰分析に使用できるデータの数が増え、 p 値・補正 R^2 値・RMSE が望ましい値にならない可能性や、ごく限られたデータから生成された汎用性が不十分な推定式になってしまう可能性がありますので、注意してください。

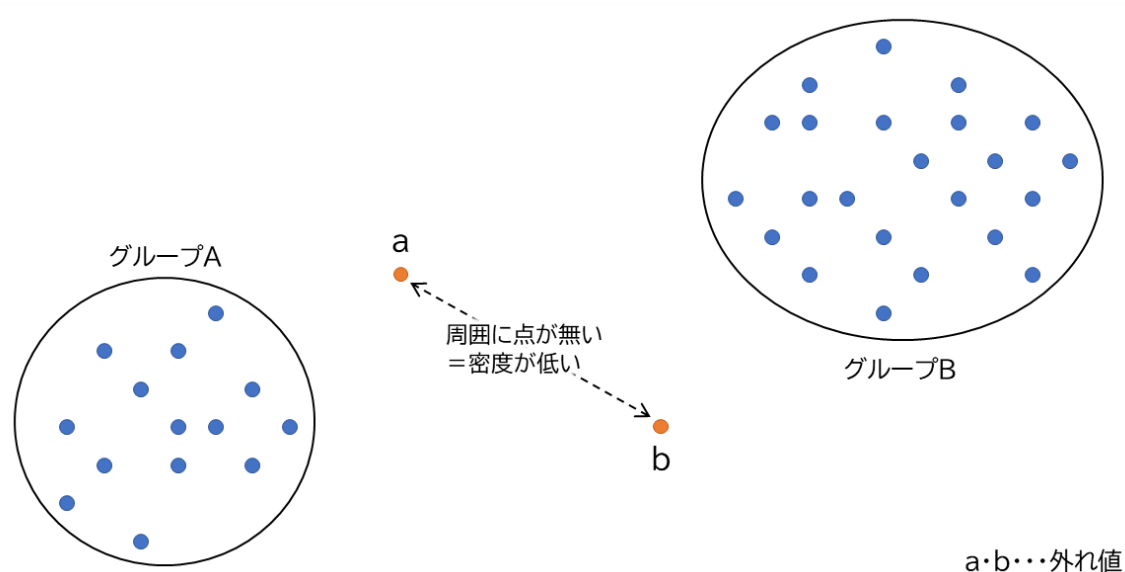


図 6.2.21 Local Outlier Factor 法のイメージ

②で出力される p 値、③で出力される補正 R^2 値（自由度調整済み決定係数）・RMSE（二乗平均平方根誤差）は、作成した推定式の精度を評価する指標となります。具体的には、以下のように評価します。

< p 値>

回帰分析において、目的変数と説明変数に関係性があるかを示す値です。この値が小さいほど、目的変数と説明変数はより関係していることを指しています。一般的には 0.1 未満であれば、目的変数と説明変数に関係があると判断されます。回帰分析では、目的変数と無関係な説明変数を用いても、式を作成することは可能です。そのため、 p 値によって、目的変数を予測するために使った説明変数が適切かどうか判断することが必要となります。

<補正 R^2 値（自由度調整済み決定係数）>

導かれた回帰式の当てはまりの良し悪しを示す値で、0～1 までの値を取ります。この値が高いほど、回帰式が実際のデータに当てはまっていることを表しており、説明変数が目的変数をよく説明しているといえます。反対に値が著しく低ければ、式の作成に使用した説明変数では目的変数を十分に説明していないといえます。0.5 以上あれば望ましいです。

<RMSE（二乗平均平方根誤差）>

回帰式によって求められた予測値と実際の値（＝目的変数）の誤差を二乗し、その平均値の平方根をとった値です。これも回帰式の当てはまりの良し悪しを示しており、値が小さいほど回帰式によって求められた予測値がより実際の値（＝目的変数）に近いといえます。

具体的なスクリプトの作成方法は、以下のとおりです。

（１）Rstudio の起動・新規スクリプト作成

Rstudio を起動し、左上の「+」のマークをクリックして「R Script」を選択するか、キーボードの「Ctrl」「Shift」「N」を同時に押して、新規 R スクリプト※（何も書かれていないスクリプト）を開きます（図 6. 2.22）。

開いた新規 R スクリプトは、画面の左上に新しく現れる「Source」ペインに表示されます（図 6. 2.23）。スクリプトに入力を行なう前に、適当な名前を付けて保存してください。

※ スクリプト…コンピューターが理解できる言語（＝機械語）への変換作業を省略して、簡単に解釈実行できるようにした簡易プログラムのこと

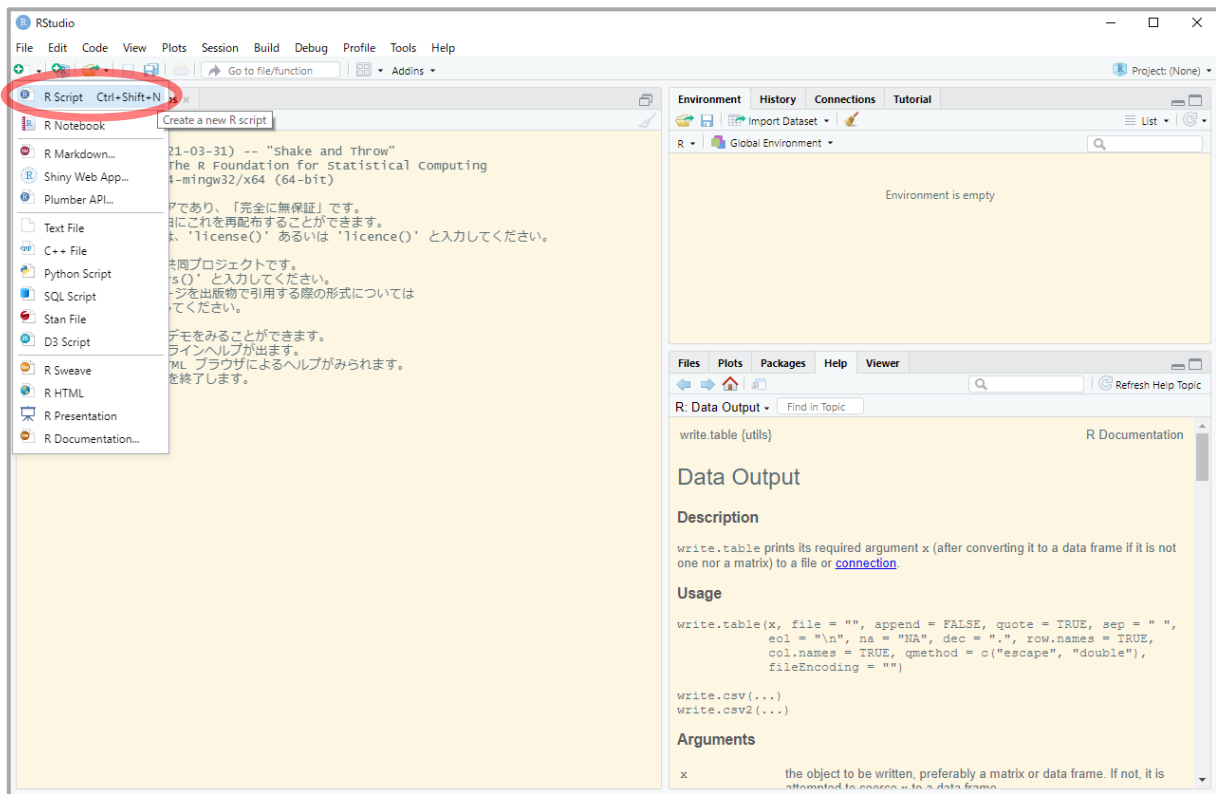


図 6.222 新規 R スクリプトの作成

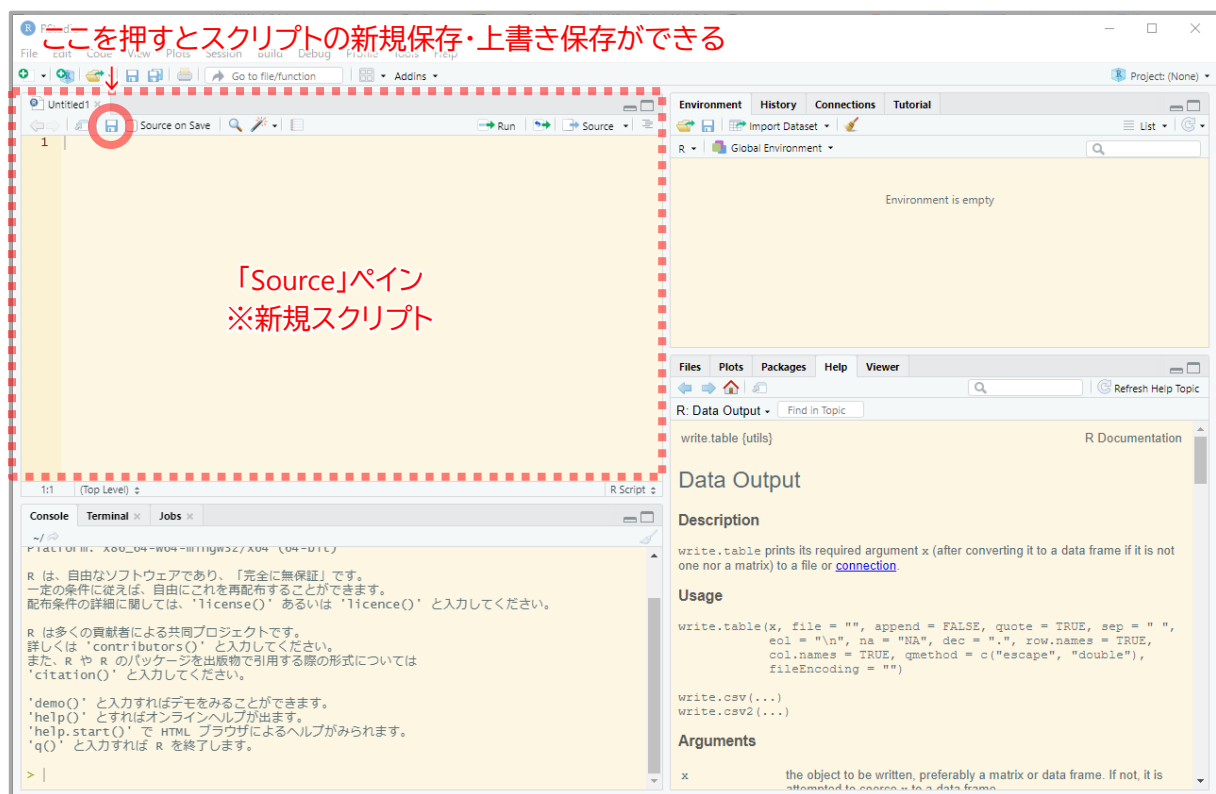


図 6.223 作成された新規 R スクリプト

(2) スクリプトに処理内容を記載

(1)で作成した新規 R スクリプトに、次頁の内容を記述して下さい。ただし、赤字は作業にあたっての注意点なので記述不要です。外れ値を除外しない場合と、除外する場合の二通りありますが、1 つのスクリプトファイルに両方記述して別々に実行してもよいですし、ファイル自体を分けてもかまいません。

前述のとおり、外れ値は除外することで非線形回帰分析の精度低下を防ぐ一方で、除外しすぎても影響があります。外れ値を除外する場合のスクリプトに記述した「**##LOF** 法による外れ値の除外」にある処理において、値を適宜変更し、除外されるデータの数や作成される推定式の **p 値・補正 R² 値・RMSE** をみてよく検討してください。

なお、R スクリプトにおいて先頭に「**##**」と付いている行はコメント行といいます。のちほどスクリプトを見返したときや作成者以外の方がみたときに分かりやすいように、主に処理の内容に関する説明等を記述します。

外れ値を除外しない場合

```
#パッケージの読み込み
library(DMwR2)
library(foreign)
library(soilphysics)

#データの読み込み
d1=read.dbf("〇〇〇.dbf") 前項 6.2.3 で作成したシェープファイルの DBF のパスを記述

#樹高・樹冠投影面積による推定式作成
##読み込んだデータから胸高直径・樹高・樹冠投影面積の列だけ抽出し、列名変更
d2=d1[,c(3,5,4)] 胸高直径(3列目)・樹高(5列目)・樹冠投影面積(4列目)の順になるように抽出
colnames(d2)=c("DBH","TH","CA")
##非線形回帰分析の実行
nls1=nls(d2$DBH~a*(d2$TH^b)*(d2$CA^c),data=d2,start=list(a=1,b=0.5,c=0.5))
c1=coefficients(nls1)
##作成された式から推定した胸高直径
d2$eDBH=fitted(nls1)
##係数(abc)・補正 R2 値・平均二乗誤差の算出
r1=as.numeric(Rsq(nls1)[2])
rmse1=sqrt(mean((d2$DBH-d2$eDBH)^2))
t1=data.frame(a=c1[1],b=c1[2],c=c1[3],adjustR2=r1,rmse=rmse1)
##結果の出力
print(summary(nls1))
print(t1)
```

(参考例)外れ値を除外する場合

```
#パッケージの読み込み
library(DMwR2)
library(foreign)
library(soilphysics)

#データの読み込み
d1= read.dbf("〇〇〇.dbf") 前項 6.2.3 で作成したシェープファイルの DBF のパスを記述

#樹高・樹冠投影面積による推定式作成
##読み込んだデータから胸高直径・樹高・樹冠投影面積の列だけ抽出し、列名変更
d2=d1[,c(3,5,4)] 胸高直径(3列目)・樹高(5列目)・樹冠投影面積(4列目)の順になるように抽出
colnames(d2)=c("DBH","TH","CA")
##LOF 法による外れ値の除外
sc1=lofactor(d2,k=5) kの値は、外れ値として除外されるデータの数等をみて適宜変更可
d2$LOF=sc1
d3=d2[d2$LOF<1.1,1:3] 除外するLOFの値(<1.1)は k と同様に適宜変更可
##非線形回帰分析の実行
nls1=nls(d3$DBH~a*(d3$TH^b)*(d3$CA^c),data=d3,start=list(a=1,b=0.5,c=0.5))
c1=coefficients(nls1)
##作成された式から推定した胸高直径
d3$eDBH= fitted(nls1)
##係数(abc)・補正 R2 値・平均二乗誤差の算出
r1=as.numeric(Rsq(nls1)[2])
rmse1=sqrt(mean((d3$DBH-d3$eDBH)^2))
t1=data.frame(a=c1[1],b=c1[2],c=c1[3],adjustR2=r1,rmse=rmse1)
##結果の出力
print(summary(nls1))
print(t1)
```

(3) スクリプトを実行

作成したスクリプトのうち、実行したい部分を選択状態にし、スクリプト画面の右上にある「Run」をクリックすると、処理が実行されます（図 6. 2.24）。

実行された処理やその処理の結果は、Rstudio の画面左下にある「Console」ペインに表示されます。

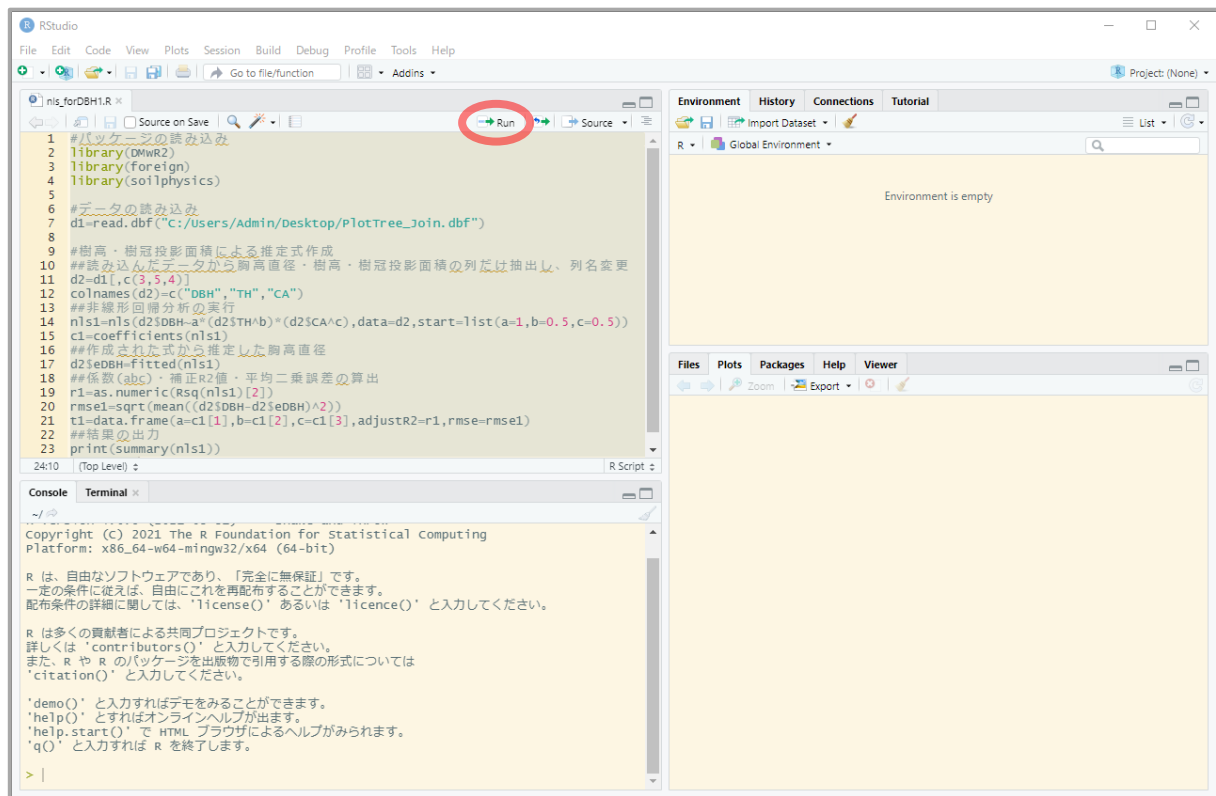


図 6. 2.24 処理の実行

(4) 結果を検証

本マニュアルのスクリプトを実行すると、「Console」ペインに図 6. 2.25 のような内容が表示されているはずです。

p 値については、「*」または「.」で精度が示されており、例えば「***」の場合は p 値が 0.001 未満であることを示しています。また「adjustR2」が補正 R^2 値、「rmse」が RMSE（二乗平均平方根誤差）に該当します。各指標の値が前項 6. 2. 4 に記載した望ましい値になっているか確認してください。

```

Console Terminal R Markdown
Z:/R04Drone/01_RI2801D201/06_DBHformula/
> print(summary(nls1))

Formula: d2$DBH ~ a * (d2$TH^b) * (d2$CA^c)

Parameters:
  Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
a  1.83615    0.88796   2.068   0.043 *
b  0.70045    0.16230   4.316 6.16e-05 ***
c  0.23837    0.04001   5.958 1.52e-07 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 4.097 on 59 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 5
Achieved convergence tolerance: 2.626e-06

> print(t1)
      a      b      c adjustR2  rmse
a 1.836154 0.7004501 0.2383655 0.691891 3.997013
>

```

← 係数 a・b・c のp値とその精度を示す記号

← 「*」や「.」の意味

↑ 非線形回帰分析の係数 ↑ 補正 R² 値・RMSE

図 6.225 非線形回帰分析の結果

7. 【参考】UAVによる森林調査等実証実験業務の成果(抜粋)

ここでは、本マニュアルの基礎となった「UAVによる森林調査等実証実験業務委託」（令和2～4年度実施）の成果について、当該業務の報告書の内容を抜粋して記載します。本マニュアルで手法を解説しているドローン写真だけでなく、ドローンレーザや無人ヘリレーザによる森林資源量調査の結果も記載しています。今後皆様がICT技術を活用した森林調査に取り組んでいく際に、調査手法を選択する参考となれば幸いです。

7.1. 実施内容

「UAVによる森林調査等実証実験業務委託」の実施内容について、年度毎に表7.1.1にまとめました。

令和3年度以降に無人ヘリレーザによる調査が加わっていますが、基本的にはドローン写真による調査の精度と、ドローン等のレーザ計測による調査の精度の違いについて、実測値等と比較しながら検討を実施することを目的としていました。ドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザによる調査方法は、本マニュアルの第1章1.2に記載したとおりです。

調査を実施した箇所は、汎用的な胸高直径推定式（暫定版）について述べた第2章2.4に示したとおり、鹿角を除く7地域振興局管内の10箇所です。令和2・3年度は当該年度に毎木調査を実施した範囲と同じ範囲で調査を実施し、結果を比較検討しました。一方、令和4年度はそれまで実施していなかった振興局管内で調査を実施することを優先し、大面積になってしまう毎木調査範囲での調査は実施しませんでした。

樹高や樹冠投影面積の算出方法は、年度を追うごとに若干の改良を加えていますが、おおむね本マニュアルの第4章4.2.2に示したとおりです。ドローン写真やドローンレーザによる調査では胸高直径を推定する必要があることはすでに述べたとおりですが（第1章1.2参照）、その推定式の作成方法は第6章6.2と同様の手法を使用しており、調査地毎に式を作成しました。材積の算出方法も、第5章5.2のとおりです。

表 7.1.1 「UAVによる森林調査等実証実験業務委託」の実施内容

項目	令和2年度	令和3年度	令和4年度
調査箇所	<ul style="list-style-type: none"> ・水上地区(由利本荘市): 6.45ha ・上沼の沢地区(大仙市): 3.48ha 	<ul style="list-style-type: none"> ・タウノス地区(三種町): 4.38ha ・皿見内沢地区(秋田市): 3.14ha ※無人ヘリレーザは17ha程度 ・油沢地区(由利本荘市): 2.58ha 	<ul style="list-style-type: none"> ・沢地区(大館市): 1ha程度 ・沼ノ沢出口地区(北秋田市): // ・石倉沢地区(仙北市): // ※無人ヘリレーザは30ha程度 ・菅野沢地区(横手市): 1ha程度 ・風穴山地区(羽後町): //
調査手法	<ul style="list-style-type: none"> ・ドローン写真(全地区) ・ドローンレーザ(全地区) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ドローン写真(全地区) ・ドローンレーザ(油沢・タウノス) ・無人ヘリレーザ(皿見内沢) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ドローン写真(全地区) ・ドローンレーザ(沼ノ沢出口) ・無人ヘリレーザ(石倉沢)
プロット調査	調査地区内に200m ² の円形プロットを複数設置し、胸高直径・樹高等を調査	調査地区内に200m ² の円形プロットを複数設置し、胸高直径・樹高等を調査	調査地区内に200m ² の円形プロットを複数設置し、胸高直径・樹高等を調査
胸高直径推定式の作成方法	プロット調査による <u>実測胸高直径・実測樹高・樹冠投影面積</u> を使用した非線形回帰分析により作成	プロット調査による <u>実測胸高直径およびドローンレーザまたはドローン写真による樹高・樹冠投影面積</u> 、あるいは <u>無人ヘリレーザによる胸高直径・樹高・樹冠投影面積</u> を使用した非線形回帰分析により作成	プロット調査による <u>実測胸高直径およびドローンレーザまたはドローン写真による樹高・樹冠投影面積</u> を使用した非線形回帰分析により作成
毎木調査との比較	実施 ただし、ドローン写真およびドローンレーザによる調査範囲と毎木調査実施範囲の境界を合わせる作業は未実施	実施 ドローン写真およびドローンレーザによる調査範囲と毎木調査実施範囲の境界を合わせる作業を実施	未実施
検討会	未実施	実施	未実施
使用ソフト等	<ul style="list-style-type: none"> ・Metashape Professional ・QGIS ・幹材積計算プログラム 	<ul style="list-style-type: none"> ・Metashape Professional ・QGIS ・幹材積計算プログラム 	<ul style="list-style-type: none"> ・Metashape Professional ・QGIS ・幹材積計算プログラム

7.2. 実施結果

7.2.1. 立木本数

立木本数は、毎木調査およびプロット調査で得られた実測本数を真値とし、ドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザによる調査で抽出できた本数と比較した結果を示します。なお、毎木調査範囲での比較結果は令和 2・3 年度実施分を示します。プロット調査箇所での比較結果は、令和 2～4 年度実施分を示します。

(1) 毎木調査

毎木調査範囲において、立木本数を比較した結果を表 7.2.1 に示します。

上沼の沢地区以外はドローン等による調査で抽出できた立木本数が 80%以上でした(表 7.2.1)。令和 3 年度に実施された検討会で有識者から出た「ドローン写真による調査では 2 割ほど本数が欠ける」というコメントや、林野庁報告書(2020)にてドローンレーザによる調査での抽出本数の誤差率が最大約 14%であったことをふまえると、おおむね妥当な結果と考えられました。上沼の沢地区で毎木調査に対する抽出本数が著しく低かったのは、令和 2 年度業務では毎木調査範囲とドローンによる調査範囲の整合を図っておらず、実際は両者のズレが大きかったためと考えられました。

また、ドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザの値を比較すると、無人ヘリレーザによる調査が最も抽出精度が高いという結果でした。一方で、ドローン写真とドローンレーザには大きな差はありませんでした。すなわち、ドローン写真による調査の精度は高精度な計測データのみを使用したドローンレーザによる調査に大きく劣っていないことが確認されました。

表 7.2.1 立木本数の比較(毎木調査範囲)

年度	地区名	立木本数 合計(本)			備考
		毎木調査	ドローン写真	ドローンレーザ 無人ヘリレーザ	
R2	水 上	5,004	4,444(89%)	4,062(81%)	
	上沼の沢	3,333	1,875(56%)	1,770(53%)	調査範囲の不整合が大きかった?
R3	タウノス	2,403	1,916(80%)	1,918(80%)	
	皿見内沢	1,856	1,586(86%)	1,907(103%)	
	油 沢	1,813	1,660(92%)	1,658(92%)	

※無人ヘリレーザによる調査は R3 皿見内沢のみであり、他 4 地区はすべてドローンレーザ

※0内は毎木調査の立木本数に対する抽出率

(2) プロット調査

プロット調査箇所において、立木本数を比較した結果を表 7.2.2 に示します。

タウノス地区・沢地区以外はドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザによる調査の平均誤差率が 0~20%程度という結果でした。この結果も、前述の有識者のコメントや林野庁報告書(2020)の結果を鑑みれば、おおむね妥当と考えられました。タウノス地区では、毎木調査により採材対象外木・不良木が全体の約 33%確認されており、被圧木を始めとした劣勢木が多く存在していると考えられました。劣勢木は DSM・DEM を使った解析で樹頂点(=立木)を抽出することが難しいため、プロット調査箇所として選定した箇所が特にそういった状況を反映していたとすると、平均誤差率が 30%程度であることは妥当と考えられました。沢地区では、スギとマツが著しく混在しており、スギの樹冠にマツが覆いかぶさっている状態が散見されました。この影響により樹頂点の抽出が困難となり、平均誤差率が大きくなったと考えられました。

また、ドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザの値を比較すると、無人ヘリレーザによる調査が最も平均誤差率が低く、抽出精度が高いという結果でした。一方で、ドローン写真とドローンレーザには大きな差はなく、毎木調査範囲での比較結果と同様に、ドローン写真による調査の精度はドローンレーザに大きく劣っていないことが確認されました。

表 7.2.2 立木本数の比較(プロット調査箇所)

年度	地区名 プロット No		立木本数 合計(本)			備考
			プロット調査	ドローン写真	ドローンレーザ 無人ヘリレーザ	
R2	水上	P1	21	19	18	平均誤差率 ドローン写真：12.7% ドローンレーザ：16.5%
		P2	24	21	20	
		P3	18	14	13	
		P4	23	21	19	
		P5	16	15	17	
		P6	10	13	12	
		P7	15	15	17	
	上沼の沢	P1	20	18	20	平均誤差率 ドローン写真：18.3% ドローンレーザ：17.4%
		P2	24	18	21	
		P3	21	17	15	
		P4	21	17	15	
R3	タウノス	P1	22	15	15	平均誤差率 ドローン写真：29.9% ドローンレーザ：28.8% 採材対象外木・不良木の影響？
		P2	18	14	13	
		P3	23	16	17	
		P4	17	11	12	
	皿見内沢	P1	15	13	15	平均誤差率 ドローン写真：15.0% 無人ヘリレーザ：0.0%
		P2	18	15	18	
		P3	20	17	20	
	油沢	P1	13	12	12	平均誤差率 ドローン写真：8.8% ドローンレーザ：8.8%
		P2	16	13	13	
		P3	15	15	15	
R4	沢	P1	13	9	—	平均誤差率 ドローン写真：37.0%
		P2	11	6	—	
		P3	13	11	—	
		P4	16	7	—	
	沼ノ沢出口	P1	35	27	27	平均誤差率 ドローン写真：18.6% ドローンレーザ：14.5%
		P2	16	12	14	
		P3	25	23	23	
	石倉沢	P1	27	23	26	平均誤差率 ドローン写真：20.9% 無人ヘリレーザ：5.9%
		P2	36	27	32	
		P3	35	27	34	
	菅野沢	P1	7	6	—	平均誤差率 ドローン写真：13.8%
		P2	15	10	—	
		P3	12	12	—	
		P4	13	12	—	
	風穴山	P1	21	14	—	平均誤差率 ドローン写真：24.7%
		P2	16	12	—	
		P3	19	16	—	

※無人ヘリレーザによる調査は R3 皿見内沢・R4 石倉沢のみであり、残りはすべてドローンレーザ

7.2.2. 樹高

樹高は、毎木調査およびプロット調査で得られた樹高とドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザによる調査で算出した樹高を比較した結果を示します。なお、毎木調査範囲での比較結果は、調査範囲の整合を図った令和3年度実施分を示します。プロット調査箇所での比較結果は、令和4年度実施分を示します。

(1) 毎木調査

毎木調査範囲において、樹高1m毎の本数を比較した結果を図7.2.1～図7.2.3に示します。

毎木調査とドローン等の解析による樹高は、全体として分布の差が大きいという結果でした。ドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザによる調査では、抽出できた全立木について樹木表層や地盤の点群データを解析して単木毎に樹高を算出することができます。一方、毎木調査は一部の立木で計測した樹高と胸高直径から樹高曲線を作成し、単木毎の樹高を推定しています。有識者による検討会でも、「樹高はUAVを使って算出した方が正確」とのコメントがあったことから、樹高の分布はドローン等の解析によるものがより現実的と考えられます。すなわち、一部の立木の値をもって全立木の樹高を推定している毎木調査は、現実的な樹高の分布を捉えることが難しく、ドローン等の解析による分布との差が生じたと考えられました。

また、タウノス地区、油沢地区におけるドローン写真とドローンレーザの分布、皿見内沢地区におけるドローン写真と無人ヘリレーザの分布を比較すると、両者に大きな差はありませんでした。令和3年度に実施したドローン写真による調査では、本マニュアルと同様に別途航空レーザ測量やドローンレーザ測量による地盤データを使用して解析を実施しています。すなわち、レーザ測量による精度が高い地盤データを使用できれば、より手軽な手法であるドローン写真による調査であっても、十分な精度で樹高が算出できることが確認できました。

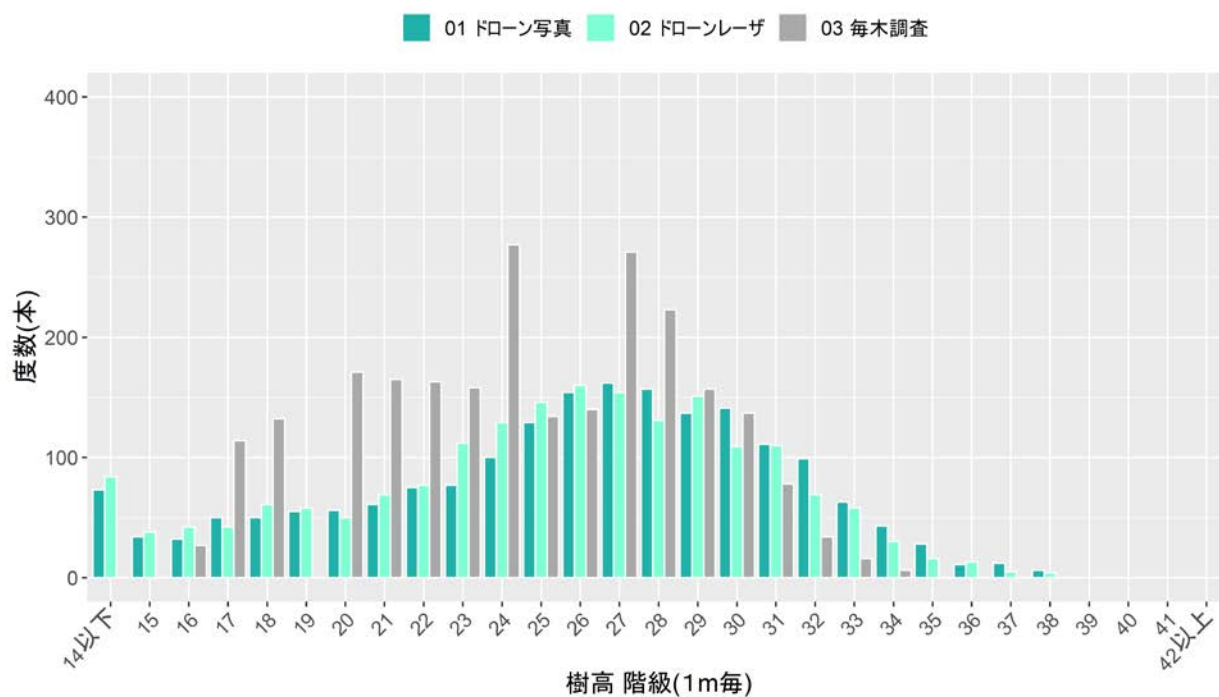


図 7.2.1 単木毎樹高の分布比較(毎木調査範囲／R3 タウノス)

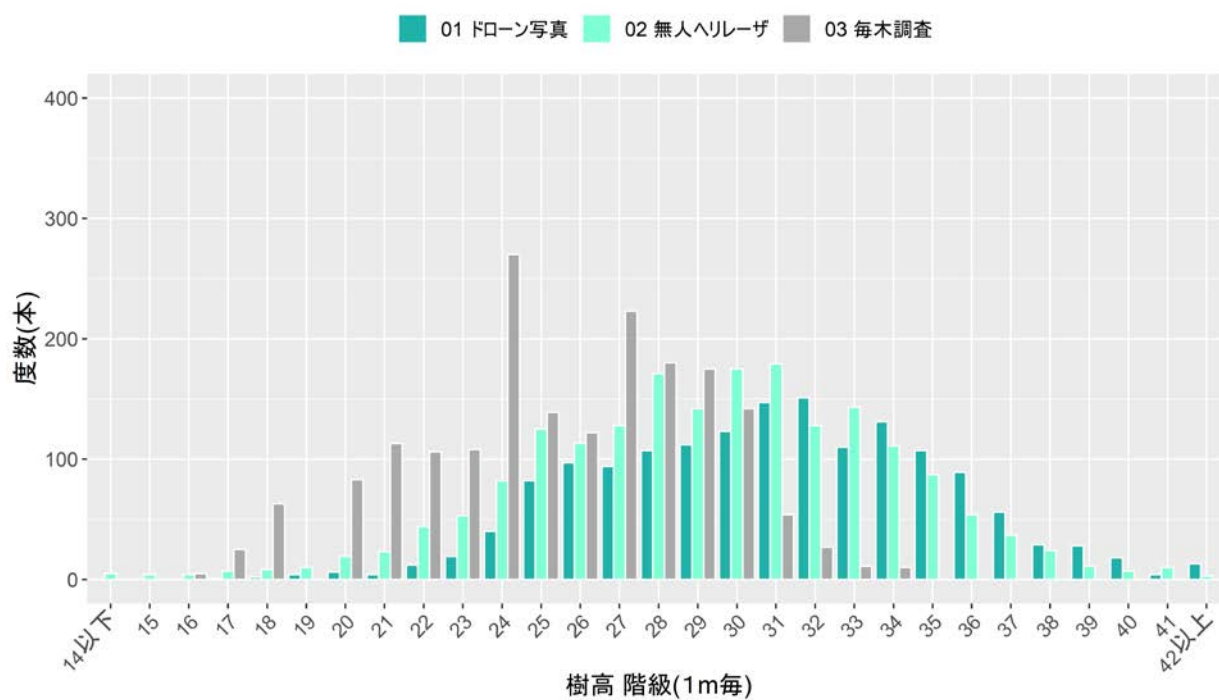


図 7.2.2 単木毎樹高の分布比較(毎木調査範囲／R3 皿見内沢)

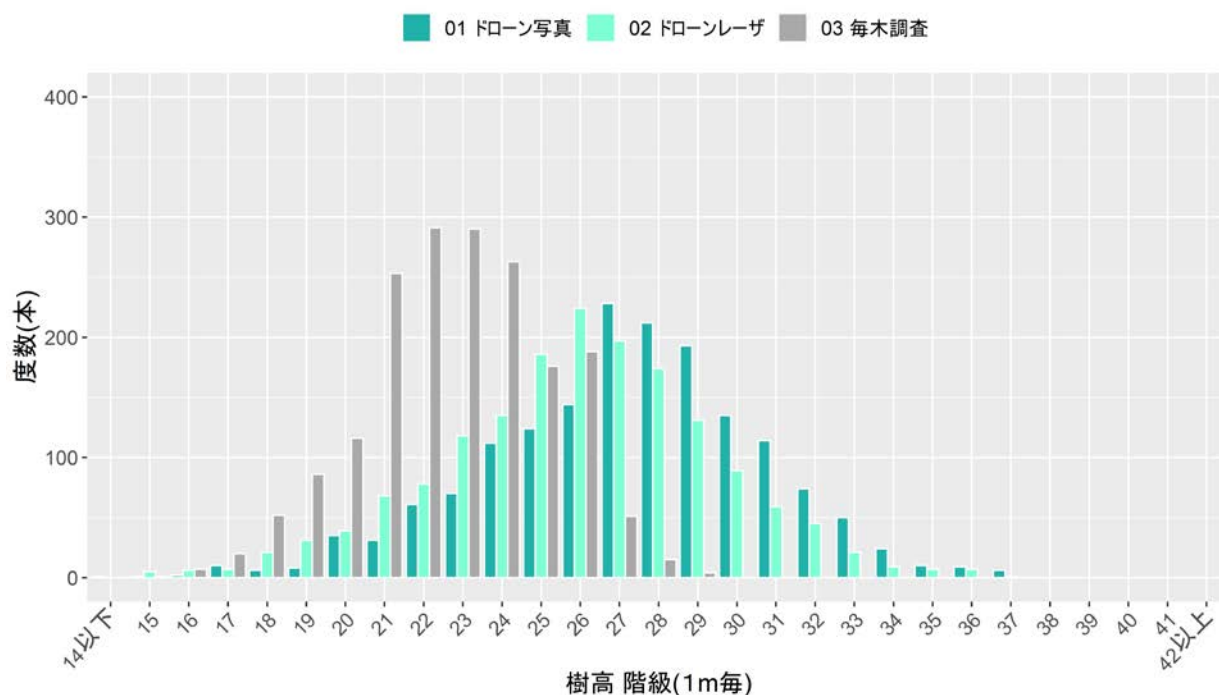


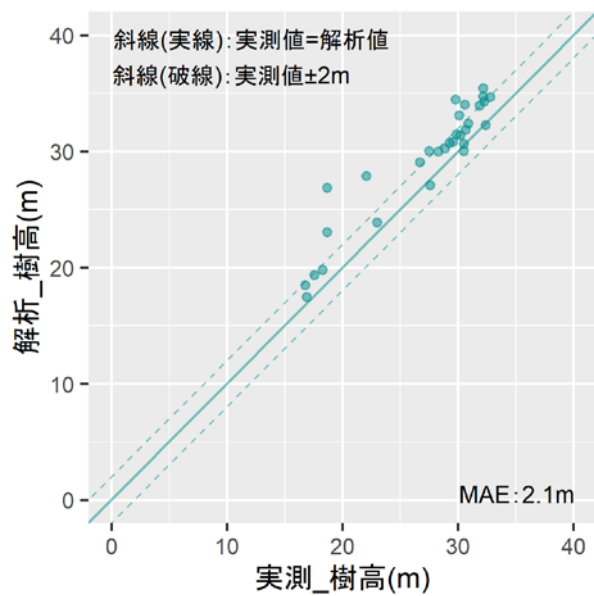
図 7.2.3 単木毎樹高の分布比較(毎木調査範囲／R3 油沢)

(2) プロット調査

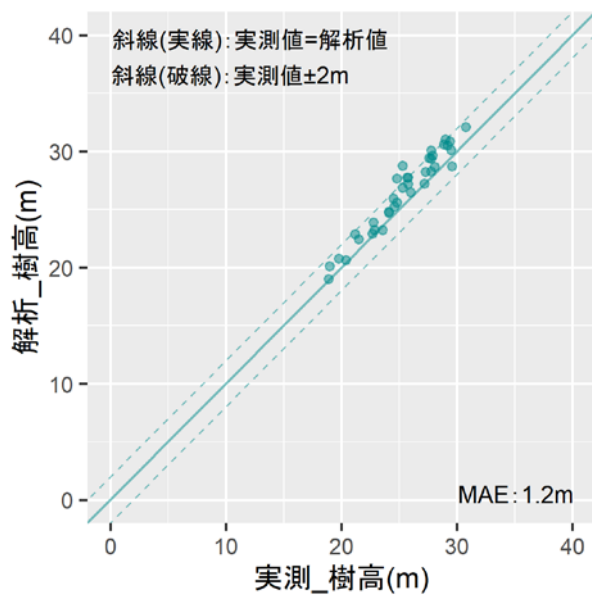
プロット調査箇所において、単木毎の樹高を比較した結果を、図 7.2.4・図 7.2.5 に示します。図には、MAE（平均絶対誤差：真値と予測値の誤差の絶対値を平均した値／ここでの真値＝プロット調査による実測値、予測値＝ドローン等による解析結果）も示しました。

いずれの地区・いずれの調査手法においても、実測樹高との MAE は 1～2m 程度に収まっています。さらに、いずれの調査手法でも図中の実線の上側に位置しているポイントが多いため、全体として実測樹高より解析による樹高がやや大きくなっていました。このような結果は、現地での計測は見通しが十分でなく、梢端を捉えることが難しい場合が多いと考えられることや、樹高に関する前述の有識者のコメントを鑑みれば、妥当であると考えられました。

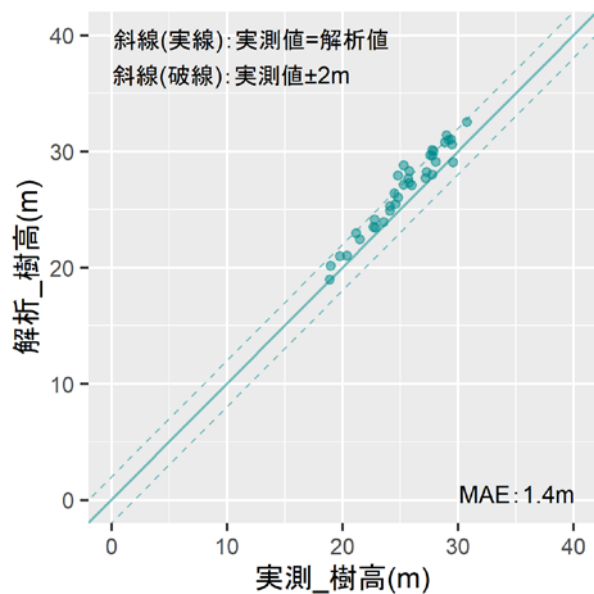
沼ノ沢出口地区におけるドローン写真とドローンレーザ、石倉沢地区におけるドローン写真と無人ヘリレーザを比較すると、MAE やポイントの分布に大きな差はありませんでした。そのため、毎木調査範囲での比較結果と同様に、レーザ測量による精度が高い地盤データを使用できれば、より手軽なドローン写真による調査であっても十分な精度で樹高が算出できることが確認できました。



沢地区(ドローン写真)

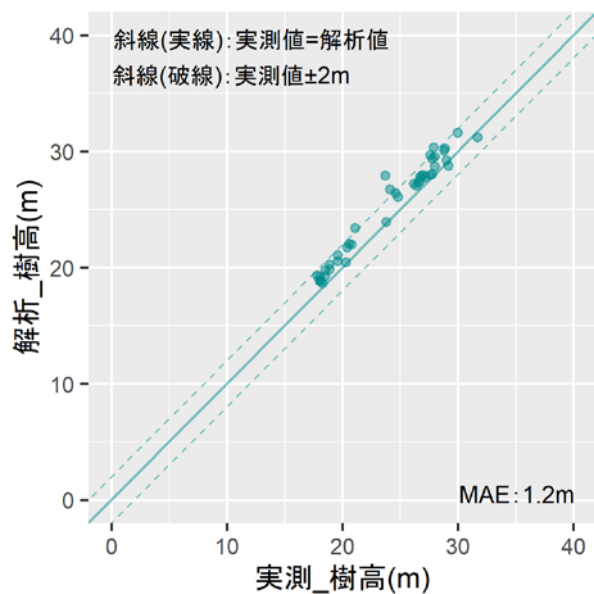


沼ノ沢出口地区(ドローン写真)

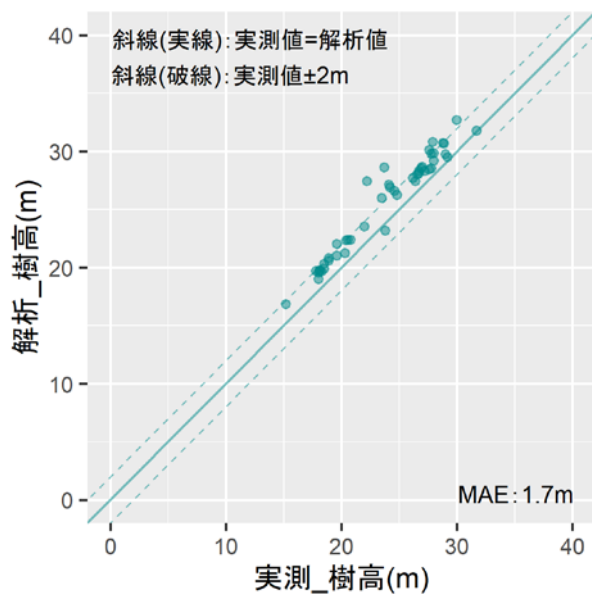


沼ノ沢出口地区(ドローンレーザ)

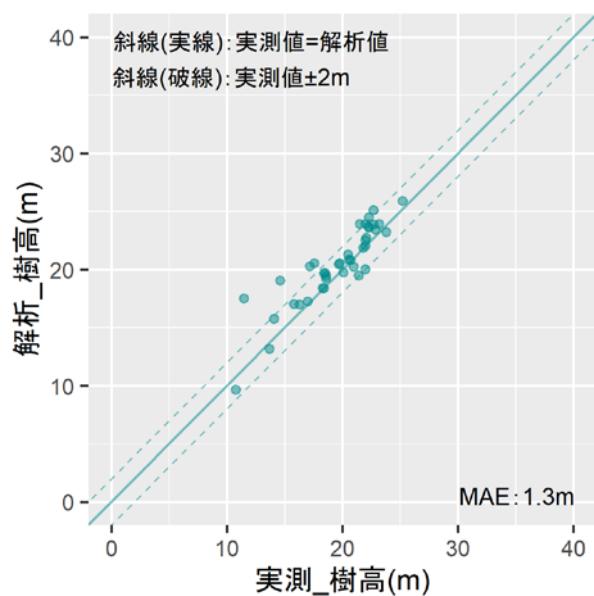
図 7.2.4 単木毎樹高の比較(プロット調査箇所／R4 沢・R4 沼ノ沢出口)



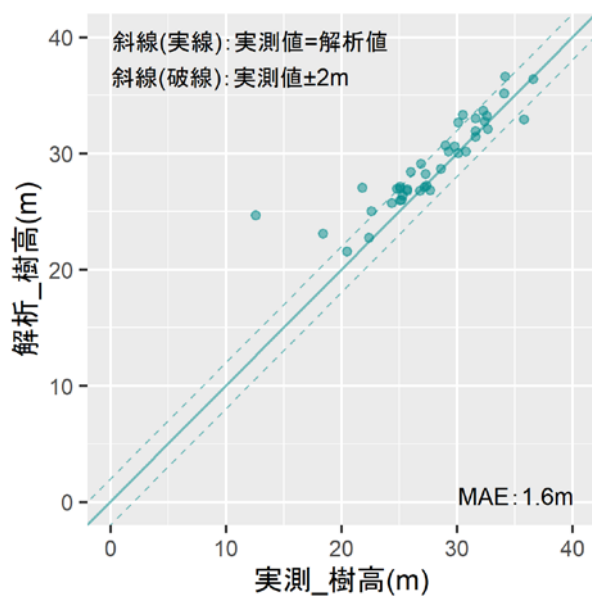
石倉沢地区(ドローン写真)



石倉沢地区(無人ヘリレーザ)



菅野沢地区(ドローン写真)



風穴山地区(ドローン写真)

図 7.25 単木毎樹高の比較(プロット調査箇所／R4 石倉沢・R4 菅野沢・R4 風穴山)

7.2.3. 樹冠投影面積

樹冠投影面積は、毎木調査では調査項目となっていないため、プロット調査で計測した実測値とのドローンで算出した値の比較結果を図 7.2.6 に示します。図には MAE も示しました。なお、令和 3 年度に実施した一部地区におけるドローン写真による調査の結果を示します。

タウンス地区、皿見内沢地区ともに図中に示した実線（＝実測と解析による値が一致する線）よりも下側に位置しているポイントが大半を占めていることから、樹冠投影面積はプロット調査で得た実測値に比べてドローン写真による調査では小さく算出されるという結果が得られました。このような結果となった要因は、現地での計測と異なり、ドローンでの解析では枝葉の重なりを考慮できない点にあると考えられました。ここでは図は示しませんが、ドローンレーザによる調査でもおおむね同様の結果が得られました。

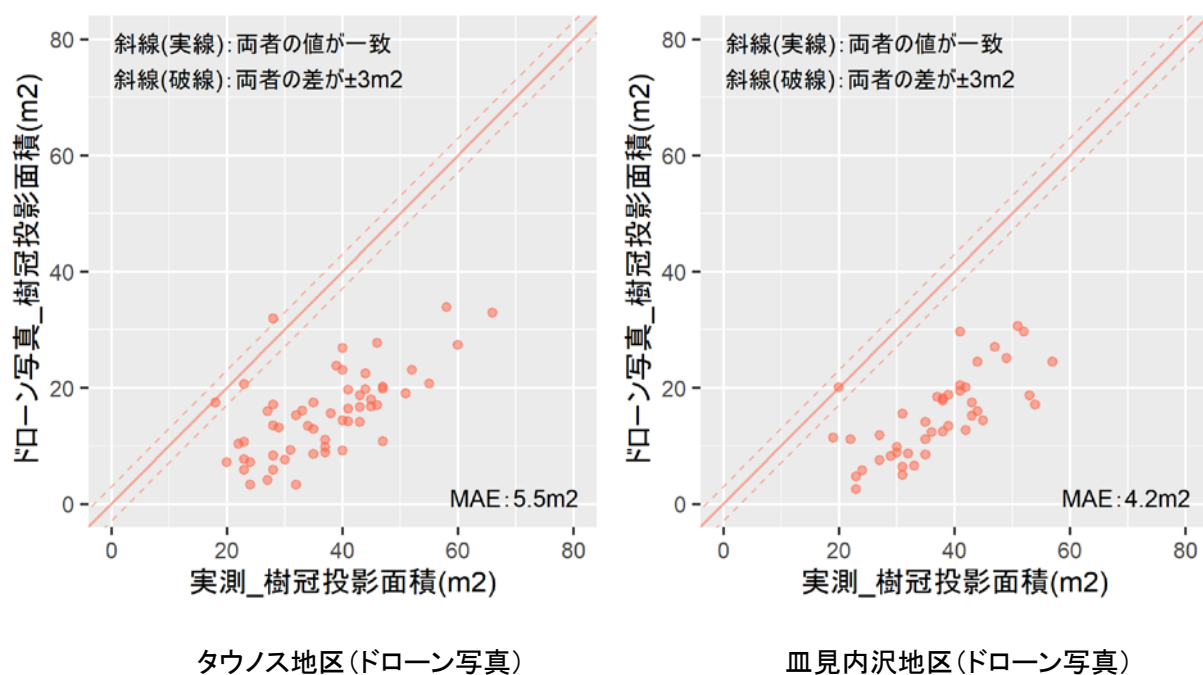


図 7.2.6 単木毎樹冠投影面積の比較(プロット調査箇所／R3 タウノス・R3 皿見内沢)

7.2.4. 胸高直径

胸高直径は、毎木調査およびプロット調査で得られた実測胸高直径とドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザによる調査で算出（推定）した胸高直径を比較した結果を示します。なお、毎木調査範囲での比較結果は、調査範囲の整合を図った令和 3 年度実施分を示します。プロット調査箇所での比較結果は、令和 4 年度実施分を示します。

(1) 毎木調査

毎木調査範囲において、2cm 括約毎の本数を比較した結果を図 7.2.7～図 7.2.9 に示します。毎木調査と比べると、ドローン等による調査ではおおむね胸高直径 30cm 以下の立木の本数が少ないという結果でした。胸高直径が細い立木は被圧木等の劣勢木である場合が多いと考えられるため、ドローン写真およびドローンレーザによる調査では樹頂点の抽出が難しいことが推察されます。無人ヘリレーザによる調査では、レーザが幹に十分当たらなければ推定に誤差が生じることもあるとのことだったため、直径が細い立木（＝レーザが当たる範囲に限られる立木）でそういった状況が生じやすいことが推察されます。以上のような要因により、毎木調査とドローン等の解析に分布の差が生じたと考えられました。このほか油沢地区については、胸高直径推定式の精度が十分でなかったため、毎木調査に比べると胸高直径 36～44cm の立木が多い結果となりました。

タウノス地区、油沢地区においてドローン写真とドローンレーザの分布を比較すると、両者に大きな差はありませんでした。すなわち、より手軽な手法であるドローン写真による調査であっても、ドローンレーザによる調査に劣らないことが確認されました。皿見内沢地区では、ドローン写真は無人ヘリレーザよりも顕著に胸高直径 34cm 以下の立木が少なく、48cm 以上の立木が多いという結果でした。ドローン写真では限られた立木の実測値を使用した推定式により胸高直径を推定している一方、無人ヘリでは超高密度の点群データを用いて実測に準じるような手法で胸高直径を計測しています。この解析手法の差が、分布の差につながったと考えられました。

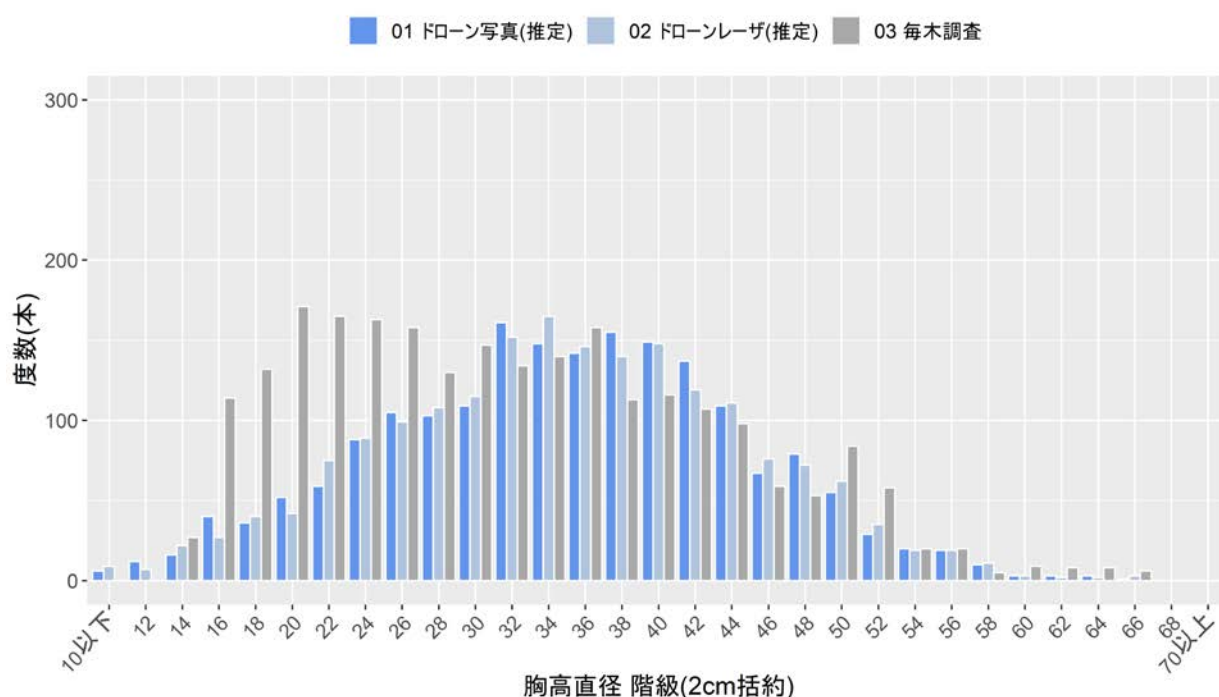


図 7.2.7 単木毎胸高直径の分布比較(毎木調査範囲／R3 タウノス)

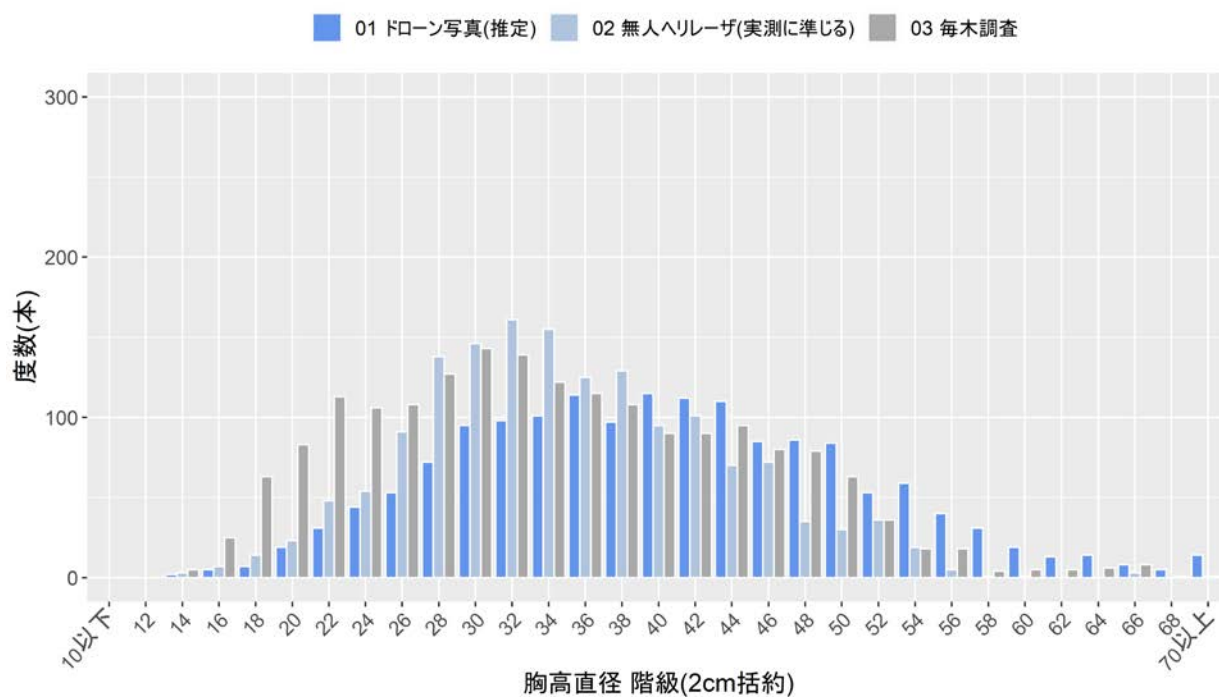


図 7.2.8 単木毎胸高直径の分布比較(毎木調査範囲／R3 皿見内沢)

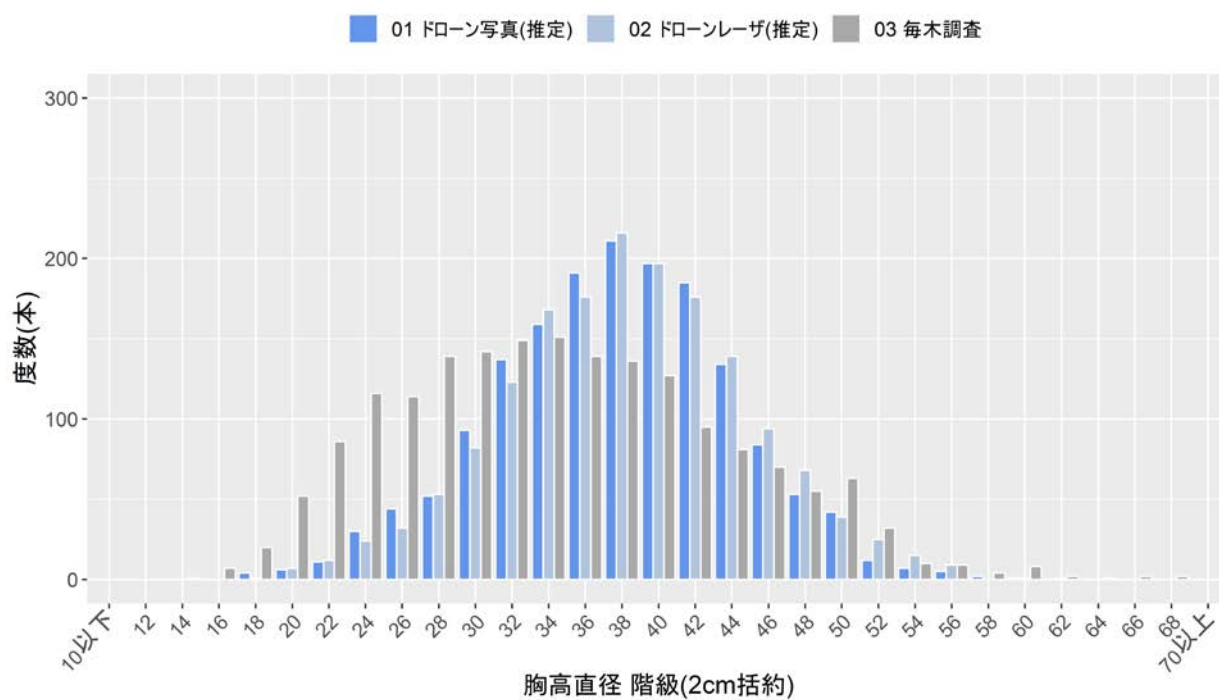


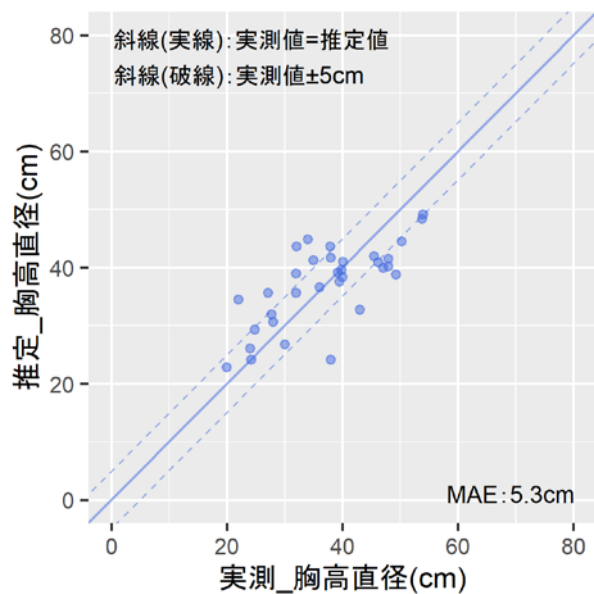
図 7.2.9 単木毎胸高直径の分布比較(毎木調査範囲／R3 油沢)

(2) プロット調査

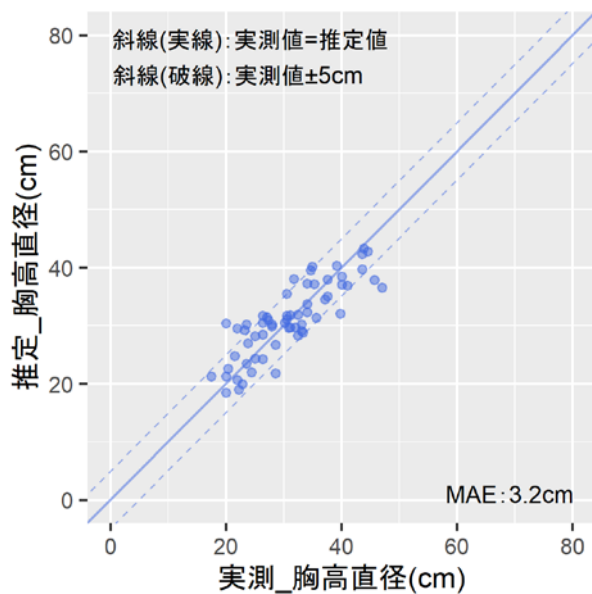
プロット調査箇所において、単木毎の胸高直径を比較した結果を、図 7.2.10・図 7.2.11 に示します。図には MAE も示しました。

沢地区（ドローン写真）、石倉沢地区（無人ヘリレーザ）、菅野沢地区（ドローン写真）を除いて、MAE は 3.5cm 未満に収まっていました。沢地区で差が大きかったのは、マツとの混在により推定式作成に必要なスギを十分得られず、精度の低い推定式になったためと考えられました。菅野沢地区では積雪による先折れ木が多く、「胸高直径が大きいほど樹高が大きい」という傾向が十分みられなかったため、推定式の精度が低下した影響と考えられました。石倉沢地区の無人ヘリレーザで差が大きかったのは、立木密度が高いことによりレーザ計測で幹の形状を十分取得できなかったためと考えられました。

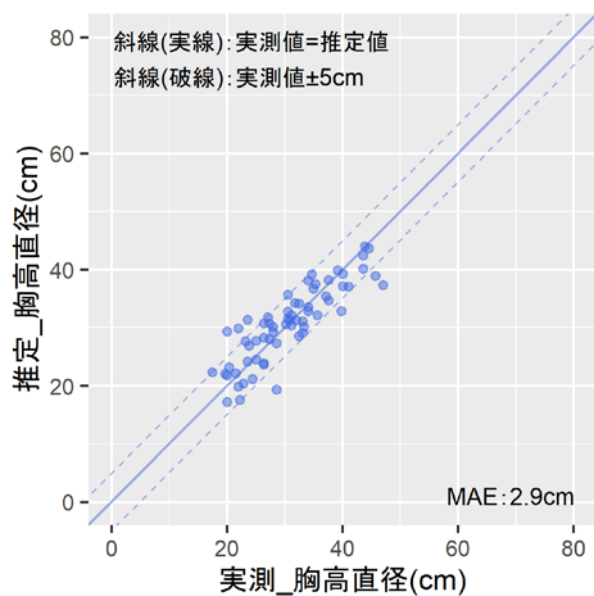
沼ノ沢出口地区においてドローン写真とドローンレーザのポイントの分布や MAE を比較すると、両者に大きな差はありませんでした。すなわち、より手軽な手法であるドローン写真による調査であっても、高精度なレーザ計測データを用いた調査に劣らないことが確認されました。石倉沢地区では、ドローン写真より無人ヘリレーザの方で MAE が大きい、すなわち実測値との誤差が大きいという結果でした。これは、前述のとおり無人ヘリによるレーザ計測で幹の形状が十分取得できなかったためと考えられました。



沢地区 (ドローン写真)

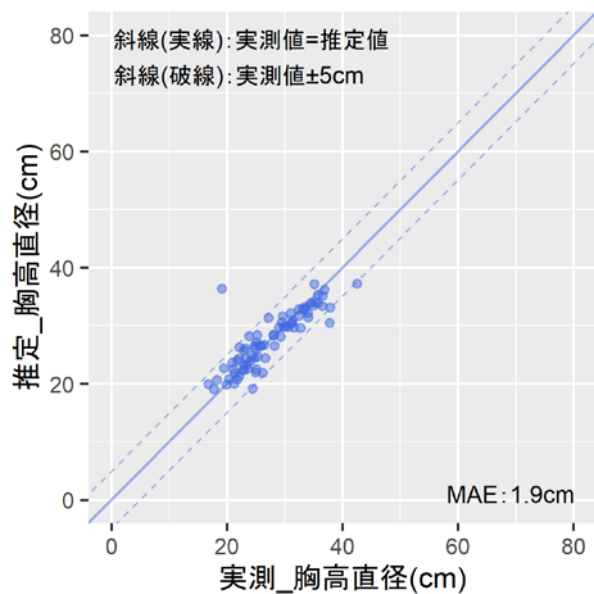


沼ノ沢出口地区 (ドローン写真)

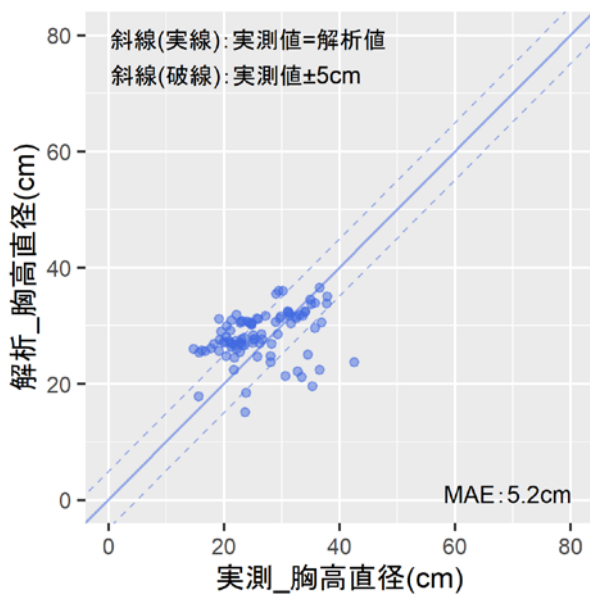


沼ノ沢出口地区 (ドローンレーザ)

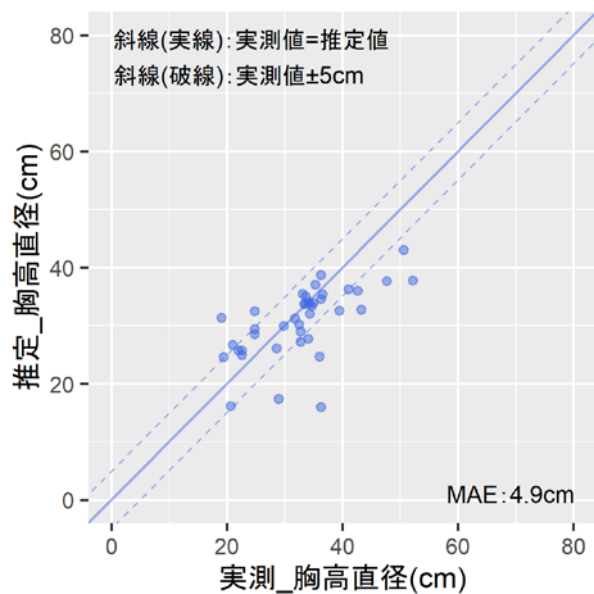
図 7.2.10 単木毎胸高直径の比較(プロット調査箇所／R4 沢・R4 沼ノ沢出口)



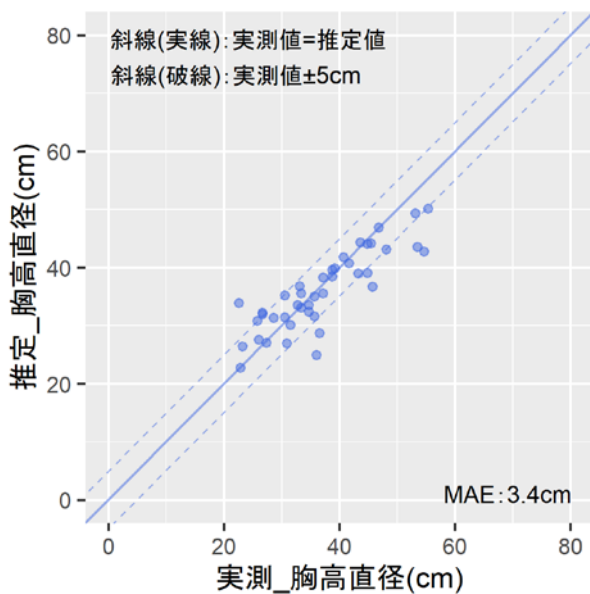
石倉沢地区(ドローン写真)



石倉沢地区(無人ヘリレーザ)



菅野沢地区(ドローン写真)



風穴山地区(ドローン写真)

図 7. 2.11 単木毎胸高直径の比較(プロット調査箇所／R4 石倉沢・R4 菅野沢・R4 風穴山)

7.2.5. 材積

材積は、毎木調査およびプロット調査で得られた材積とドローン写真、ドローンレーザ、無人ヘリレーザによる調査で算出した材積を比較した結果を示します。なお、毎木調査範囲での比較結果は、調査範囲の整合を図った令和3年度実施分を示します。プロット調査箇所での比較結果は、令和4年度実施分を示します。

(1) 毎木調査

毎木調査範囲において、材積の合計値を比較した結果を表 7.2.3 に示します。タウノス地区・皿見内沢地区では、いずれの調査手法でも毎木調査と同程度の値でした。油沢地区では、ドローン写真による調査、ドローンレーザによる調査ともに胸高直径の推定誤差が大きかったこと（前掲図 7.2.9 参照）と、毎木調査で樹高が低く推定されていること（前掲図 7.2.3 参照）が影響し、材積の合計値に差が生じる結果となりました。

またいずれの地区でも、ドローン写真とドローンレーザ、ドローン写真と無人ヘリレーザは同様の値となっていました。そのため材積についても、ドローン写真による調査の値は高精度なレーザ測量データのみを使用した調査に大きく見劣りしないことが改めて確認できました。

表 7.2.3 合計材積の比較(毎木調査範囲)

年度	地区名	材積 合計(m ³)			備考
		毎木調査	ドローン写真	ドローンレーザ 無人ヘリレーザ	
R3	タウノス	2697.11	2638.58	2575.12	
	皿見内沢	2350.69	2504.96	2364.84	
	油 沢	1962.42	2565.69	2485.67	樹高および胸高直径の差が影響?

※無人ヘリレーザによる調査は R3 皿見内沢のみであり、他 2 地区はすべてドローンレーザ

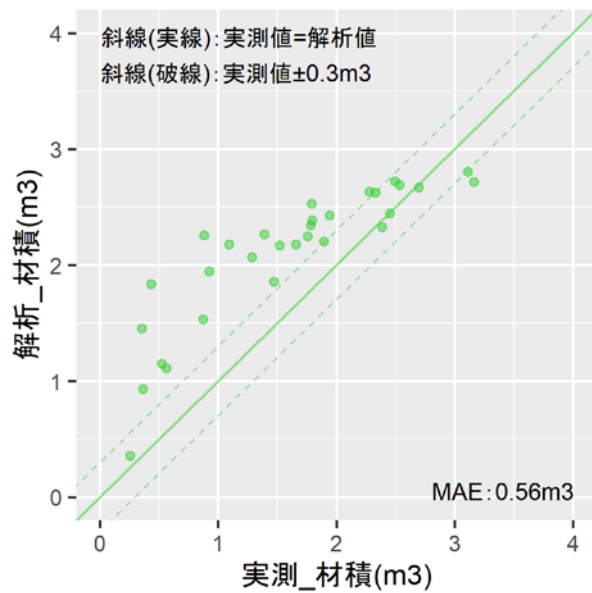
(2) プロット調査

プロット調査箇所について、単木毎の材積を比較した結果を、図 7.2.12・図 7.2.13 に示します。図には MAE も示しました。

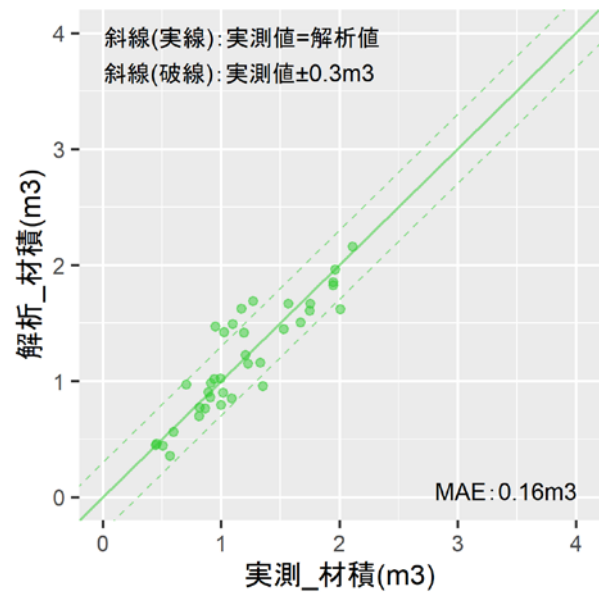
沢地区（ドローン写真）、石倉沢地区（無人ヘリレーザ）、菅野沢地区（ドローン写真）を除いて、MAE は 2m³未満に収まっていました。MAE が大きかった 3 地区は、前項 7.2.4 で述べたとおり、解析による胸高直径の誤差が大きかった影響と考えられました。

沼ノ沢出口地区においてドローン写真とドローンレーザの値を比較すると、両者に大きな差はあ

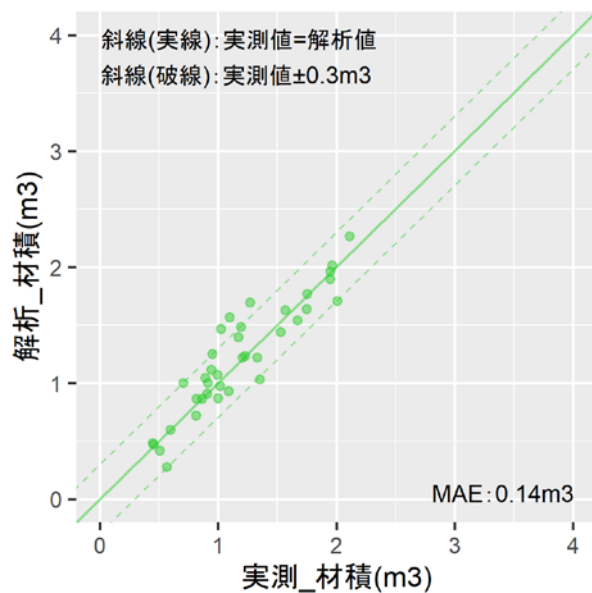
りませんでした。すなわち、毎木調査範囲の結果と同様に、より手軽な手法であるドローン写真による調査であっても、ドローンレーザによる調査に劣らないことが確認されました。



澤地区(ドローン写真)

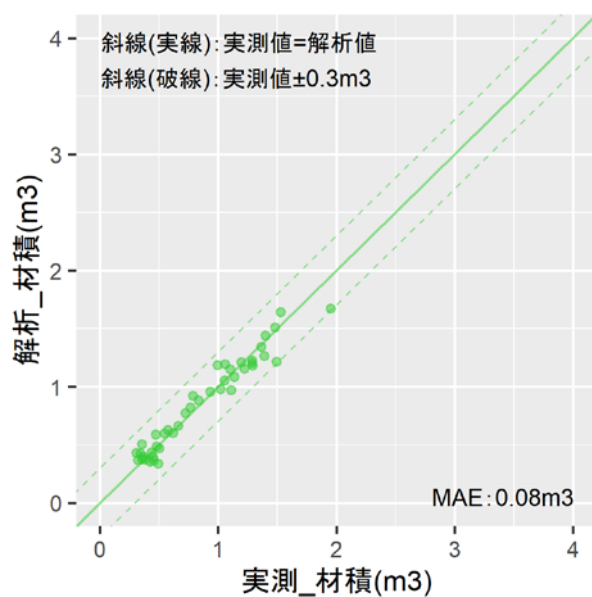


沼ノ沢出口地区(ドローン写真)

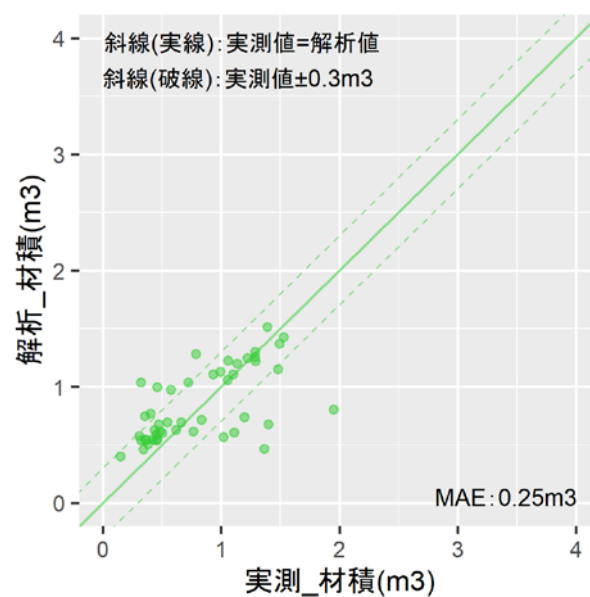


沼ノ沢出口地区(ドローンレーザ)

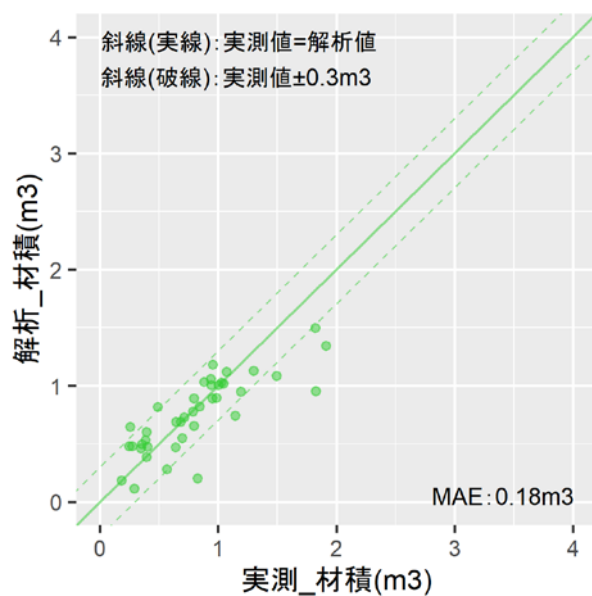
図 7.2.12 単木毎材積の比較(プロット調査箇所／R4 沢・R4 沼ノ沢出口)



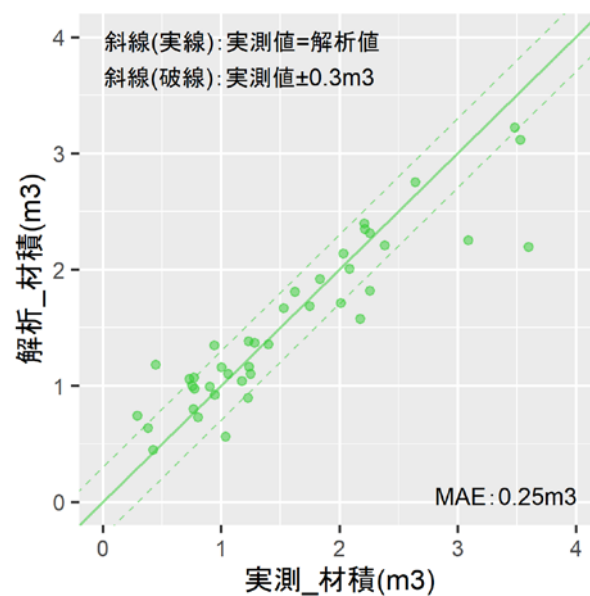
石倉沢地区(ドローン写真)



石倉沢地区(無人ヘリレーザ)



菅野沢地区(ドローン写真)



風穴山地区(ドローン写真)

図 7. 2.13 単木毎材積の比較(プロット調査箇所/R4 石倉沢・R4 菅野沢・R4 風穴山)

<参考文献>

林野庁(2020): 令和元年度 リモートセンシング技術を活用した収穫調査の効率化手法検討委託事業 報告書, 84p.

UAV による森林調査等実証実験業務委託 成果
ドローンで撮影した写真による森林資源量調査マニュアル

令和 5 年 3 月

＜業務受注者＞一般社団法人 秋田県林業コンサルタント

〒010-0941 秋田県秋田市川尻町字大川反 170-169

TEL:018-865-1133

担当:佐藤 李菜