

ドローンを用いた ほ場計測マニュアル (不陸(凹凸)編改訂版)+(応用事例編)



ドローンを用いた ほ場計測マニュアル (不陸(凹凸)編改訂版)+(応用事例編)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
農業環境変動研究センター

令和3年3月

目次

1	不陸計測の作業手順概要	4
2	ドローンによる撮影	8
2.1	飛行計画の策定	8
①	規制の確認	8
②	飛行ルートの設定	9
③	撮影高度の計算	10
④	撮影間隔の設定	10
⑤	飛行時間の計算	10
2.2	DJI GS Pro の設定	11
①	ミッションの新規作成	11
②	飛行範囲の設定	12
③	飛行高度（撮影高度）の設定	13
④	ラップ率（重なり具合）の設定	13
⑤	飛行ルートの設定	14
⑥	撮影モードの設定	15
⑦	ミッション完了時動作の設定	16
⑧	その他の設定	17
⑨	飛行時間の確認	17
2.3	飛行・撮影の実施	18
①	天候の確認	18
②	撮影場所の確認	18
③	対空標識の設置	18
④	飛行・撮影	18
2.4	ドローンを安全に運用するための注意事項	21
①	飛行時の注意点	21
②	飛行訓練	21
③	ドローンのメンテナンス	22
④	法規制	22
⑤	許可承認申請	22
⑥	墜落時の対応	23
3	地上基準点（GCP）の測量	24
3.1	地上基準点のレベル測量	24
①	地上基準点の選定	24
②	対空標識の設置	25
③	レベル測量	25
3.2	地理院地図より座標と標高値を取得	26
4	Agisoft MetaShape Professional による地表高データの作成	27
4.1	Agisoft MetaShape の概要	27
4.2	データ処理の手順	27
①	写真の読み込み	27

②	写真のアライメント	29
③	マーカーの配置	31
④	マーカーの座標を入力	32
⑤	カメラを最適化	33
⑥	精度の低いタイポイントの削除	36
⑦	高密度な点群の構築	36
⑧	ポリゴンメッシュの構築 (オプション)	37
⑨	デジタルエレベーションモデル (DEM) 構築	38
⑩	オルソモザイク構築	40
⑪	オルソモザイクの出力	40
⑫	デジタルエレベーションモデルの出力	41
⑬	レポートの出力	41

5 QGIS による不陸量の算出 42

5.1 QGIS について 42

5.2 不陸量の算出とレイアウト図の作成手順 42

①	DSM データとオルソモザイク画像の読み込み	42
②	不陸量算出範囲のポリゴン作成	43
③	平均標高の算出	44
④	平均標高ポリゴンからラスターデータを作成	45
⑤	不陸量の算出	45
⑥	不陸量ラスターのスタイル設定	46
⑦	レイアウト図の作成	47

6 フリーソフトによる地表高データの作成 49

6.1 フリーソフト FieldReconst について 49

6.2 FieldReconst の利用手順 49

①	ダウンロードとインストール	49
②	準備	51
③	実行方法	51
④	出力	52

6.3 出力結果の確認方法 52

①	CloudCompare による LAS ファイルの確認	52
②	CloudCompare 画像の出力	55
③	オルソ画像の確認	57
④	DSM データの確認	59

6.4 GCP の利用 (オプション) 64

①	GCP 用対空標識の設置	64
②	GCP 用設定ファイルの準備	65
③	処理方法	66

事例集 67

1	ドローンと RTK-GNSS 受信器利用による位置精度の向上	68
2	ドローン空撮画像による水稻生育観測事例	72
3	衛星画像とドローンを組み合わせた事例	76
4	D-RTK2 を用いた非通信環境下における RTK 空撮	86
5	ドローン画像と AI 技術を組み合わせた事例	91

1

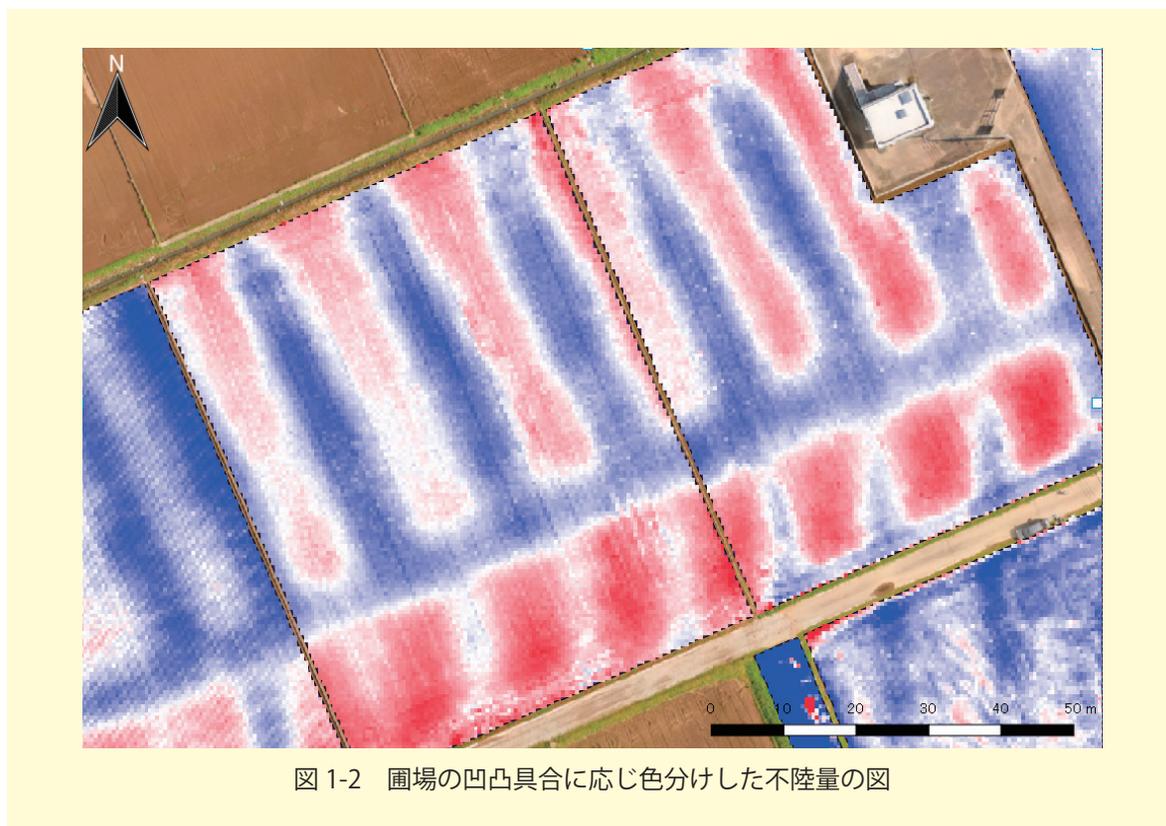
不陸計測の作業手順概要

このマニュアルは、圃場を対象として、ドローンで撮影した画像から不陸計測をおこなう方法について説明します。

作業手順は、以下の通りです。まず、対象とする圃場をドローンで撮影します。次に、地上基準点（GCP）の測量を行います。そして、撮影した画像と地上基準点から、SfMソフトを利用し地表高データ（DSM）を作成します。最後に、GISでDSMデータを解析し不陸量を算出します（図1-1）。最終成果としては、図1-2に示したような不陸量に応じ色分けした図を作成します。



図 1-1 ドローンを利用した不陸計測の作業手順



このマニュアルで使用するドローンおよびソフトは以下の通りです。

- | | |
|-----------|---|
| ● ドローン | DJI Phantom 3 Professional |
| ● 自動操縦ソフト | DJI GS PRO Ver. 1.2.1（現時点では ipad 版のみリリース） |
| ● SfM ソフト | Agisoft MetaShape Professional Ver. 1.6.1 |
| ● GIS ソフト | QGIS Ver. 3.4 もしくは 3.16 |

ドローンは、今回使用する機体の他にも、DJI Phantom 4 Professional, Mavic など同等の画像を撮影できる機体であれば利用できます。また、QGIS については、異なるバージョンでも手順は大きく異なるないので、適宜、読み替えてください。

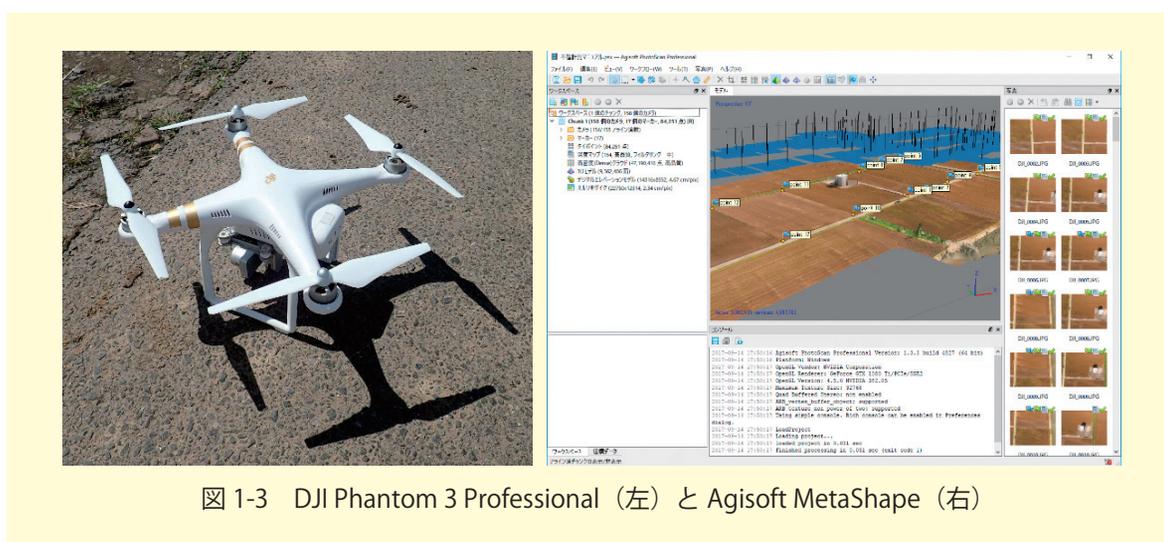


図 1-3 DJI Phantom 3 Professional（左）と Agisoft MetaShape（右）

次章から詳細な手順について説明します。

用語説明：

- ※ **GCP (Ground Control Points)**：画像データの幾何補正をおこなうために使用する座標と高さが既知の基準点のこと。
- ※ **DSM (Digital Surface Model)**：数値表層モデルと呼ばれ、地盤の高さだけでなく、建物や樹木の高さの情報も含まれている高さのモデル。またそのデータのこと。
- ※ **SfM (Structure from Motion)**：カメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、カメラの位置と 3 次元形状を復元する手法。
- ※ **GIS (Geographic Information System)**：位置情報を総合的に管理・加工・視覚的に表示し、高度な分析や迅速な判断を可能にする技術。またそのソフトのこと。

圃場の不陸を計測する方法としては、このマニュアルで扱うドローン空撮画像を用いる方法以外にも、レーザーを用いたものがあります。

地上レーザーによる計測については、国土地理院が「地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」を作成し、平成 29 年（2017 年）3 月 31 日に公表、平成 30 年 3 月 15 日に改訂されています。

<https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/tls/index.html>

また、ドローンにレーザスキャナを搭載して計測を行う方法についても、「UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」を平成 30 年 3 月 30 日に公表し、令和 2 年 3 月 31 日に改正しています。

<https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uavls/index.html>

国土地理院のマニュアルで扱っているのは、測量士の資格を有する者が、公共測量として計測する際の作業規定になります。ドローン空撮画像を用いて測量を行う場合におけるマニュアルとしても「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」が平成 28 年 3 月 30 日に公表され、平成 29 年 3 月 31 日に改訂されています。一方、このマニュアルで扱う不陸計測は、土木工事などのもととなる公共測量に準じた計測を目的としたものではなく、事前に簡易的に計測を行う、または普段の営農活動に利用するための不陸計測であるため、公共測量規定に則る必要は必ずしもありません。しかしながら、公共測量の方法を知ることには大変参考になるものですので、国土地理院のマニュアルにも目を通すことをお勧めします。

<https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/>

このマニュアルで扱っている回転翼型のドローンによる計測は、機動的に容易に行うことができる一方、数十 ha～数百 ha といった広域を計測しようとする、効率が悪くなります。そのような場合には、有人航空機測量や人工衛星を用いた計測を検討することとなります。しかしながら、航空機や人工衛星の画像を用いる場合、広域を計測することができる一方、ドローンのような高い解像度の画像を得ることが困難となり、計測される不陸の空間分解能や高さ方向の精度は低下することになります。また、航空機のチャーター代、人工衛星画像代などの費用も発生します。自分で解析をしない場合、つまり成果物として納品をしてもらう場合、処理費用も発生します。したがって、求める精度、観測範囲、予算に応じて選択をしていくこととなります。

航空機からレーザーを用いて計測するものを航空機 LiDAR (Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging) といいます。航空機 LiDAR の仕組みについては、国土地理院 HP の「航空機レーザー測量について」

http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_senmon.html

を参考にしてください。航空機 LiDAR で圃場の不陸を計測しようとした場合、民間の航測会社に依頼をすることになります。費用は 1 回の計測で最低でも数百万円かかります。

航空機 LiDAR のデータは、LAS データまたは LAZ データという業界標準の形式で提供されます。LAS がアスキー形式で LAZ がバイナリ形式のデータです。PointCloud データ (点群データ) の各点はそれぞれの座標値のほかに LiDAR データ特有の属性 (反射強度, リターン値, スキャン角度, 他) を持ちます。PointCloud データ (点群データ) を編集可能なフリーのソフトウェアとしては、「MeshLab」や「CloudCompare」が有名です。「CloudCompare」については、今回のマニュアルで追加した 6.3 ① CloudCompare による LAS ファイルの確認フリーソフトの結果を表示する方法で触れています。

衛星画像から得られる高さ方向の精度は、高くても 1m 程度となるため、今回対象としている圃場内の不陸を計測することは、非常に困難です。一方、斜面にある圃場など広域全体の地形などを把握するためには有効です。

2

ドローンによる撮影

不陸計測では、まず対象となる圃場をドローンで撮影するところから始まります。この章では、ドローンによる飛行計画の策定方法、自動操縦アプリの設定方法、飛行・撮影の実施について説明します。また、ドローンを安全に運用するための注意事項についても説明します。

2.1 飛行計画の策定

まずは、撮影のための飛行計画を立てます。飛行計画では、①撮影場所の規制の確認、②飛行ルートの設定、③撮影高度の計算、④撮影間隔の設定、⑤飛行時間の計算、を行います。また、飛行計画を立てる際に、自動操縦ソフトを使用するかどうかも決定しておきます。

① 規制の確認

撮影範囲や飛行方法が航空法の規制の対象になっていないかを確認します。

航空法では、(1)飛行させる空域、(2)飛行させる方法について規制が設けられています。

(1) 飛行させる空域について

空港等の周辺（進入表面等）の上空の空域や総務省が設定した人口集中地区（DID）に該当していないかを確認します。また、地表および水面から150m以上の高さの空域も規制の対象となっています。

(ア) ブラウザで地理院地図^{※1}にアクセスします。

(イ) 撮影範囲に移動し、画面左にある情報パネルの地図の種類から「その他」→「他機関の情報」を選びます。

(ウ) 表示された一覧の中から「人口集中地区 平成27年（総務省統計局）」および「空港等の周辺空域（航空局）」を選択します。人口集中地区が赤色、空港等の周辺が緑色で表示されます。

(エ) 撮影範囲が規制の対象空域になっていないか確認します。対象空域になっている場合、地方航空局長や空港事務所長への許可申請が必要となります（詳細は2.4で説明します）。空港等の周辺の上空の空域に対する規制の場合は、空港との位置関係や飛行高度によっては許可申請が必要ない場合もありますので、各空港事務所へ確認します。

(2) 飛行させる方法について

航空法では飛行させる場所に関わらず、飛行させる方法についての守るべきルールがあ

^{※1} <https://maps.gsi.go.jp/>

ります。ここでは不陸測量での飛行に関わる箇所のみ説明します（その他のルールは 2.4 で説明します）。

(ア) 日中（日出から日没まで）に飛行させること

撮影範囲のある地域の日の出の時刻から日の入りの時刻の間のみ飛行させることができます。

(イ) 目視（直接肉眼による）範囲内で無人航空機とその周囲を常時監視して飛行させること

飛行させる者が自分の目で見える範囲内でのみ飛行させることができます。双眼鏡による監視や補助者による監視は上記の条件には含まれません。

(ウ) 人（第三者）又は物件（第三者の建物，自動車など）との間に 30m 以上の距離を保って飛行させること

無人航空機を飛行させる者の関係者以外の者および関係者以外の者が管理する物件から 30m 以上離れていれば飛行させることができます。なお，土地や堤防，自然物は保護すべき物件には該当しません。国土交通省 HP の Q&A^{※2} の Q12-1,12-2 に具体例が記載してありますので参考にしてください。

以上のルールに則らない方法で飛行させる場合には地方航空局長への承認申請が必要となります。その他，詳細は国土交通省の無人航空機の飛行ルールのページ^{※3}の「2. 無人航空機に係る航空法改正について」を確認してください。

また，撮影範囲および撮影方法が上記規制の対象になっていないかを確認するために，事前に現地の下見を行い，第三者物件（電柱や電線，鉄塔や送電線も第三者物件にあたります）の有無，離発着場所周辺の状況等を調べておきましょう。

② 飛行ルートの設定

圃場を効率的に撮影できる飛行ルートを設定します。また飛行ルートを設定する際には，法規制や安全面，電波の送受信に悪影響を及ぼすもの（強力な電磁波を発生している施設）等について注意する必要があります。具体的には，ドローンを目視できる範囲内での飛行であるか（法規制），第三者物件から 30m 以上離れて飛行できるか（法規制），他者の私有地の上空を飛行しないようにルート設定できているか（法規制・安全面），主要道路をまたがないようにルート設定できているか（安全面），高さのある人工物や樹木にぶつからないようにルート設定できているか（安全面），高圧線・変電所・電波塔および無線施設等の施設などが近くにないか（電波への悪影響）などの点に注意します。

自動操縦アプリ DJI GS Pro を使用すれば，単純な飛行ルートは自動で設定できるので，規制や障害物がない場所では利用すると良いでしょう。

^{※2} <https://www.mlit.go.jp/common/001303819.pdf>

^{※3} http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html

③ 撮影高度の計算

取得したい画像の解像度から撮影高度を計算します。撮影高度を計算するためには、必要とする地上画素寸法、使用するカメラのセンサーサイズ、画像サイズ、焦点距離（35mm換算ではない）の4つのデータが必要になります。計算式は以下の通りです。

計算式

$$\text{撮影高度} = \frac{\text{画像サイズ (pixel)} \times \text{焦点距離 (mm)} \times \text{地上画素寸法 (m/pixel)}}{\text{センサーサイズ (mm)}}$$

Phantom 3 pro の場合だと、横幅の画像サイズ 4000pixel、焦点距離 3.6mm、横幅のセンサーサイズ 6.3mm で、地上画素寸法 0.01m/pixel の画像を撮影するためには、撮影高度は 22.85m となります。同様に Phantom 4 pro では、横幅の画像サイズ 5472pixel、焦点距離 8.8mm、横幅のセンサーサイズ 13.2mm なので、撮影高度は 36.48m となります。なお、DJI GS Pro を使用すれば、自動で撮影高度を計算することができます。

④ 撮影間隔の設定

撮影高度が決まったら、次に撮影間隔を決定します。撮影間隔は、飛行経路上（進行方向上）の画像間のラップ率（重複度、重なり具合、オーバーラップ率）が 60～90%、飛行経路間（隣接コース間）のラップ率が 30～60% になるように設定する必要があります。ラップ率が低いと SfM で適切に処理できなくなります。ちなみに、国土地理院の UAV を用いた公共測量マニュアルでは、飛行経路上が 80% 以上、隣接コース間は 60% 以上とされています。

ラップ率を考慮しながら撮影する方法として、地上の目標物を目印として撮影する方法があります。映像に写っている地上の目標物が、カメラが映し出している映像全体の 1/3 進んだところで撮影するという作業を繰り返していくとラップ率 66% 程度、1/5 進んだところで撮影するという作業を繰り返していくとラップ率 80% 程度になります。その際は、カメラが映し出している映像に補助線（グリッド線）をいれると作業が容易になります。なお、DJI GS Pro を使用する場合は、撮影する際のラップ率を設定することができます。

⑤ 飛行時間の計算

撮影間隔が決まったら、そこから撮影に掛かる飛行時間を概算します。手動の場合は、飛行スピードや技術によって撮影時間が変わるので、これまでの経験から自分で計算しておきます。また、飛行時間が長くなる場合は、必要なバッテリーの本数も計算しておきます。これも DJI GS Pro を使用する場合は、自動で計算されます。

2.2 DJI GS Pro の設定

自動操縦アプリの DJI GS Pro を使用すると、前項で説明した飛行計画の設定を簡単に行うことができます。ここでは DJI GS Pro の設定方法について説明します。

事前に「DJI GS Pro」アプリはインストールしておきます。なお、現時点では、DJI GS Pro は iPad 版 (iOS 9.2 以降) のみとなっています。

① ミッションの新規作成

アプリを立ち上げると下のような画面になります。撮影範囲までマップを移動させ、左下にある「新規」を選択します。

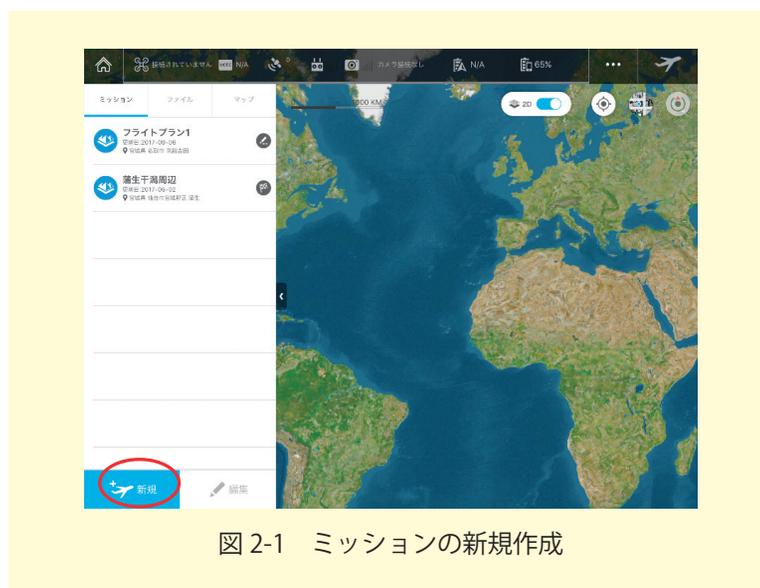


図 2-1 ミッションの新規作成

続いて、新規ミッションのモード選択画面では「計測撮影領域モード」を選択します。



図 2-2 計測撮影領域モードの選択

次の画面では「地図上指定」を選択します。



図 2-3 地図上指定の選択

② 飛行範囲の設定

地図上の任意の場所をタップすると下のような画面になります。

青い枠内が撮影範囲になるので、撮影予定の形に変えていきます。角を移動させるには○をドラッグします。角を増やすには+マークをドラッグします。角を選択し、下の図の赤枠で囲った箇所の矢印ボタンをタップすることで位置の微調整ができます。また直接緯度経度を入力することもできます。角を選択した状態で、赤枠左下のごみ箱アイコンをタップすることで選択した角を削除することができます。



図 2-4 飛行範囲の設定

③ 飛行高度（撮影高度）の設定

飛行高度を設定する前にカメラモデルの設定を行います。使用する機種によってカメラの性能が異なるため事前に設定しておく必要があります。下の図の赤枠で囲まれた箇所をタップし、使用するカメラモデルを選択します。

撮影するための飛行高度を設定するには、青枠で囲った箇所のスライダーを使用します。スライダーを動かして飛行高度を増減させると青枠上部右にある解像度の値が変化するので、必要とする解像度になるように飛行高度を設定します。飛行高度の数字部分を長押しすると「+」が表示されるので、数値を細かく増減させることもできます。



図 2-5 飛行高度の設定

④ ラップ率（重なり具合）の設定

ラップ率の設定は、詳細設定のページで行います。下の図の赤枠で囲まれた箇所の「詳細設定」タブをタップします。次に、青枠で囲まれた箇所でスライダーを動かして「飛行経路上（進行方向上）のオーバーラップ率」「飛行経路間（隣接コース間）のオーバーラップ率」を設定します。オーバーラップ率の数字部分を長押しすると「+」が表示されるので、数値を細かく増減させることもできます。

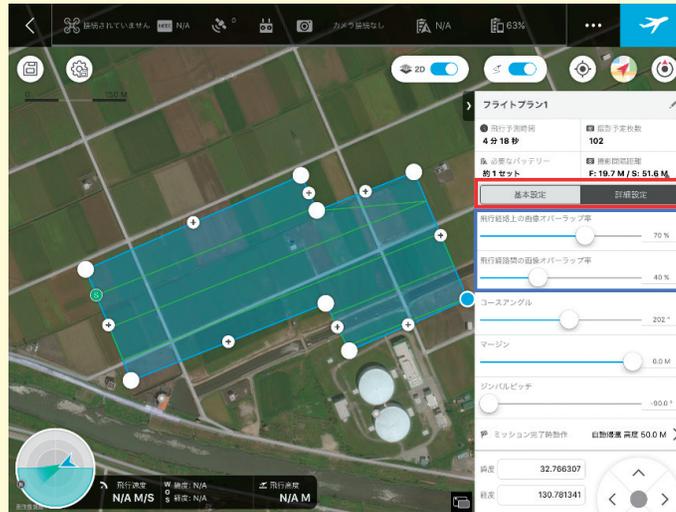


図 2-6 ラップ率の設定

⑤ 飛行ルートの設定

飛行ルートの設定には2つの項目が関わってきます。

一つ目が基本設定ページにある赤枠で示した飛行経路生成モードです。「区域内モード」では、設定した範囲内だけで飛行経路を生成します。「スキャンモード」では設定した範囲を最短でカバーするように飛行経路を生成します。スキャンモードの方が効率よく飛行できますが、安全面等を考慮し、設定した範囲外を飛ばさないように「区域モード」に設定します。

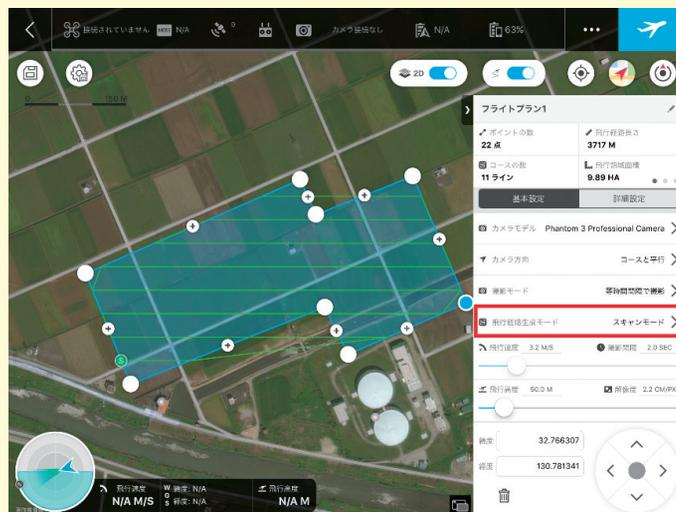


図 2-7 飛行ルートの設定

二つ目が詳細設定ページにある青枠で示したコースアングルです。コースアングルを変えることで飛行するルートが角度が変わり、飛行予定時間が増減します。飛行時間が短くなるようにコースアングルを設定することで、効率よく撮影できます。なお、各ポイント間の距離は1～2000mの範囲に収まるように設定します。左の値の範囲外の距離で設定することはできませんが、飛行時にエラーが出るため飛行開始できません。



⑥ 撮影モードの設定

撮影モードの設定は下の図の赤枠で囲った箇所で行います。「ホバリング撮影」では、機体が一旦停止し、ホバリングを行って撮影します。ローリングシャッター現象が起これにくく精度が高くなります。一方、風がある状況だと一旦停止するために機体が風に煽られます。「等時間間隔で撮影」では、機体は停止せずに一定の時間ごとに撮影を行います。「等距離間隔で撮影」では、機体は停止せずに一定の距離ごとに撮影を行います。等時間・等距離間隔ではスピーディーに撮影できます。

画像の精度や撮影にかけられる時間を考慮して、適当なモードを選択します。

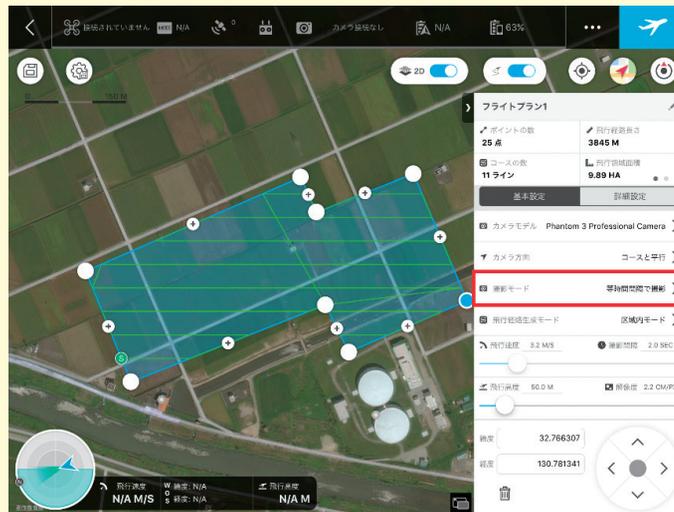


図 2-9 撮影モードの設定

⑦ ミッション完了時動作の設定

ミッション完了時に行う動作の設定は下の図の赤枠で囲った箇所で行います。「自動帰還」ではあらかじめ設定した高度を保ったまま離陸地点に戻ってきます。「ホバリング」では最後の撮影地点でホバリングを行います。「自動着陸」では最後の撮影地点で着陸します。安全面を考慮して「自動帰還」もしくは「ホバリング」を設定します。「自動帰還」を設定する場合には周辺の建物や樹木等より高くなるような高度に設定します。

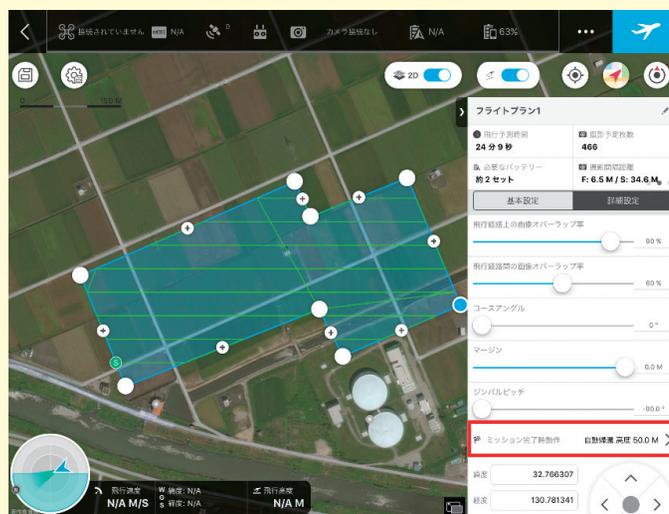


図 2-10 ミッション完了時動作の設定

⑧ その他の設定

「カメラ方向」は飛行コースに対して機体・カメラの角度を設定する項目ですが、特別な理由がない限りは「コースと平行」を選択します。「飛行速度」は⑥でホバリング撮影を選んだ場合のみ任意の速度に変更できます。それ以外では自動的に設定され変更することはできません。「マージン」は指定した撮影範囲に対してマージン（余白）を設定します。特別な理由がない限りは0mで問題ありません。「ジンバルピッチ」はカメラの角度です。 -90° （鉛直方向） $\sim 0^{\circ}$ （水平方向）の範囲で設定できますが、通常は -90° で問題ありません。一方、 -90° のみの画像だとドーム効果^{※4}が出てしまいます。ここでは、次章で説明するGCPを適切に設置する方法で回避していますが、斜め撮影画像を混ぜるという方法や、 -80° など、少し鉛直方向でない角度で撮影する方法もあります。ただし、その場合はカメラが傾いている方向以外の精度が落ちるため、1方向のみの撮影でなく、直行2方向（つまり経路がクロスする状態）で撮影を行うなど、対象の形状とコース方向との関係を考慮する必要があります。

⑨ 飛行時間の確認

全てを設定すると「飛行予想時間」「必要なバッテリー本数」が下の図の赤枠で示した個所に自動で算出されます。

最後に、青枠で示した個所をタップしてミッションを保存します。ミッション名を変更するには緑枠の鉛筆マークをタップして編集します。また、ミッション一覧画面でミッションを左にスワイプすることで保存したミッションのコピーや削除を行うことができます。



図 2-11 飛行時間の確認とミッションの保存

※4 ドーム効果（実際には平坦であるにもかかわらず、DSMの中央付近が盛り上がってしまう現象）

2.3 飛行・撮影の実施

飛行計画が策定できたら、実際に撮影を行います。撮影の手順は、①天候の確認、②撮影場所の確認、③対空標識の設置、④飛行・撮影、となります。

① 天候の確認

安全に撮影できる天候かどうか確認します。雨や雪が降っていないか、霧が出ていないか、風速は5 m/sを越えていないか、落雷の予報は出ていないか等の気象状況を確認します。少しでも危険を感じたら飛行させることは控えましょう。「飛ばさない勇氣」を持つことが大事です。また、画像の質に関わる明るさや水面反射についても気をつける必要があります。

② 撮影場所の確認

実際の撮影場所が、飛行計画と相違ないかを確認します。撮影範囲内に第三者がいないか、飛行させるルート上に障害物がないかなどを確認します。

③ 対空標識の設置

地上基準点に対空標識を設置します。対空標識の設置方法については、次章で説明します。

④ 飛行・撮影

手動で操縦する場合は、飛行計画に基づき、安全に注意して飛行・撮影を実施します。以下ではDJI GS Proを使用する場合について、手順を説明します。

以下の図の右上のある赤枠で囲った「飛行機アイコン」をタップすると飛行開始となります。ドローンが地上で静止している状態でも、空中でホバリングしている状態でも飛行開始できます。なお、ドローンの飛行モードをFモード（Phantom 3 Proの場合）またはPモード（Phantom 4 Proの場合）にしておきます。

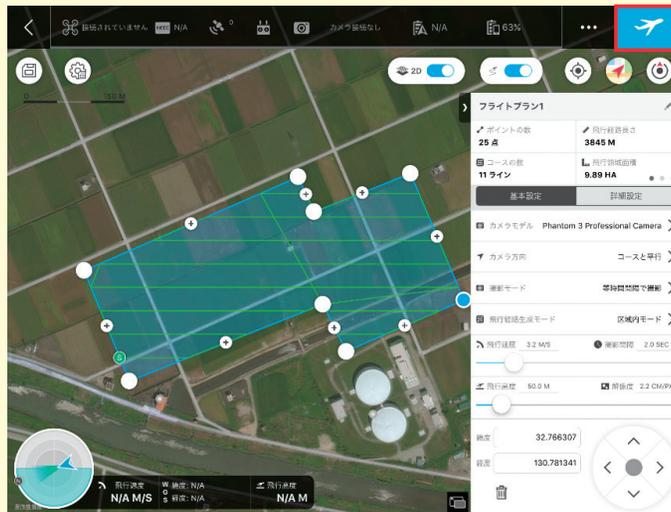


図 2-12 飛行の開始

飛行機アイコンをタップすると以下のようなチェック画面になります。機体の状態や衛星の補足数などが表示されます。各項目に問題がなければ緑字になり、赤枠で囲んだ飛行開始が選択できます。飛行に問題があると赤字になり飛行開始が選択できません。その場合は赤字になった項目を確認してください。飛行開始をタップするとモーターが回転して離陸します。

撮影が終了すると 2.2 の⑦で設定した動作に移行します。周囲の安全を確認してドローンを着陸させます。



図 2-13 チェック画面

飛行を中断させるには以下の図の右上にある青枠で囲んだ「一時停止アイコン」をタップしてください。ただちに機体はホバリングし、ミッションは中断され、機体の操縦は自由に送信機から行えるようになります。



図 2-14 飛行の中断

飛行を再開させるには以下の図の右上にある赤枠で囲んだ「再生アイコン」の下にある再開の一覧から選択してください。

(1) 前回中断した場所から再開

機体は中断した場所に戻りミッションを再開します。飛行時間が長くバッテリーの交換が必要な時は、ミッション中断後に手動で機体に戻し、バッテリーを交換したのち、このモードで飛行を再開してください。また、再開は中断直後でなくとも再開できます。中断中のミッションがある場合は、ミッション一覧の該当ミッションの脇に一時停止アイコンが表示された状態になっていますので、該当ミッションをタップし飛行を再開してください。

(2) 最初の地点から再開

機体はスタート位置に戻りミッションを最初からやり直します。

(3) 現在のミッションを取り消す

中断したミッションを再開することなくキャンセルします。

(4) ミッション一覧へ戻る

ミッションの一覧表示画面に戻ります。



図 2-15 飛行の再開

2.4 ドローンを安全に運用するための注意事項

ドローンを安全に運用するための注意事項を以下に示します。

① 飛行時の注意点

- (1) ドローンが予期しない動きをした際に、プロペラが人体にぶつくと重大な怪我をする恐れがあります。怪我を防止するために、飛行の際には長袖・長ズボン・保護メガメ・ヘルメット・手袋等を着用しましょう。
- (2) 操縦者は、操縦に集中しているため周辺の安全確認や第三者への対応が難しくなります。それらを補助するため、少なくとも2名1組で飛行を行う必要があります。
- (3) 飛行を行った際には、「飛行日」「飛行・着陸時間」「飛行・着陸場所」「飛行時間」等を記録しておきます。⑤で説明する許可承認申請の際に必要になります。
- (4) 第三者の土地の上空を飛行させる場合、所有権の侵害とされる可能性があります。どうしても飛行させる必要があるときは、土地の所有者の承諾を得る必要があります。
- (5) ドローンは離陸時および着陸時に姿勢が不安定になりやすい傾向があります。離着陸は広いところで行いましょう。

② 飛行訓練

飛行技能の維持・向上のために定期的に飛行訓練を行う必要があります。DJI GS Pro アプリを使用すると、ほとんどが自動操縦で行われる設定となりますが、飛行中にGPSの補足数が足りなくなると手動に切り替わります。このような事態に備え、手動で操作する技術を維持・向上させる必要があります。

③ ドローンのメンテナンス

日常的に機体のメンテナンスを行うことで、飛行時のトラブルを少なくすることができます。メンテナンスは、「日常的に行うもの」「飛行直前に行うもの」「飛行開始時に行うもの」「飛行後に行うもの」等があります。詳細なメンテナンス内容については DJI 社の安全飛行 / 点検項目のページ^{*5} を参考にしてください。

④ 法規制

2.1 の①で示した規制以外にも以下の 7 つの規制があります。令和元年 9 月 18 日付けで追加された (1)～(4) のルールは常時順守してください。(5) から (10) の規制にかかる飛行を行う場合には、あらかじめ地方航空局長への承認申請が必要となります。

- (1) アルコール又は薬物等の影響下で飛行させないこと
- (2) 飛行前確認を行うこと
- (3) 航空機又は他の無人航空機との衝突を予防するよう飛行させること
- (4) 他人に迷惑を及ぼすような方法で飛行させないこと
- (5) 日中（日出から日没まで）に飛行させること
- (6) 目視（直接肉眼による）範囲内で無人航空機とその周囲を常時監視して飛行させること
- (7) 人（第三者）又は物件（第三者の建物、自動車など）との間に 30m 以上の距離を保って飛行させること
- (8) 祭礼、縁日など多数の人が集まる催しの上空で飛行させないこと
- (9) 爆発物など危険物を輸送しないこと
- (10) 無人航空機から物を投下しないこと

⑤ 許可承認申請

2.1 ①および 2.4 の④で説明した航空法の規制の対象となる場合には、地方航空局長や空港事務所長への許可承認申請が必要となります。現在はオンラインサービス「ドローン情報基盤システム（DIPS）」^{*6} で飛行申請手続きができるようになっていきますので、詳細は国土交通省の HP^{*7} の「3. 許可・承認の申請手続きについて」を参考にしてください。さらに、令和元年 7 月 26 日付で、許可・承認を受けて飛行を行う場合には、飛行前に飛行経路に係る他の無人航空機の飛行予定の情報等を「ドローン情報基盤システム（飛行情報共有機能）（FISS）」^{*8} で確認するとともに、本システムに飛行予定の情報を入力することが必要です。

^{*5} <http://www.dji.com/jp/flysafe/check>

^{*6} <https://www.dips.mlit.go.jp/portal/>

^{*7} http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html

^{*8} <https://www.fiss.mlit.go.jp/top>

⑥ 墜落時の対応

飛行時に墜落や機体の紛失などの事故が起きた際には、関係各所に連絡する必要があります。具体的には、人の死傷、第三者物件の損傷、飛行時における機体の紛失、航空機との衝突や接近といった事案が発生した場合には、状況に応じて警察や消防に連絡をします。また許可承認申請の有無に関わらず国土交通省への情報提供を行います。情報提供については国土交通省のHP^{*9}の「5. 無人航空機による事故等の情報提供」を参考にしてください。

^{*9} http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html

3

地上基準点（GCP）の測量

ドローンでの撮影と同時に地上基準点の測量も実施します。地上基準点とは、撮影範囲内に設置する位置と高さの基準点で、次章で説明する SfM ソフトの解析に使用します。

ここでは、地上基準点のレベル測量の方法と、地理院地図を利用した座標と標高値の取得方法について説明します。なお、これらの方法以外に、GNSS（衛星測位システム。アメリカの GPS が有名）受信機を用いて位置を測位する方法があります。こちらの方法については、農研機構において「小型 GNSS 受信機を用いた高精度測位マニュアル（ドローン用対空標識編）」^{※10} を公開しましたので、参照ください。

3.1 地上基準点のレベル測量

地上基準点の高さを計測するためにレベル測量をおこないます。レベル測量は、①地上基準点の選定、②対空標識の設置、③レベル測量の実施、の手順でおこないます。

① 地上基準点の選定

地上基準点は、以下の条件を満たす場所を選定して、撮影範囲内に複数設置します。

- (1) 撮影範囲を囲むように配置し、その内部にも複数点配置する。
- (2) 標高が高い部分と低い部分になるべく 1 点は含まれるように配置する。
- (3) レベル測量が実施できる平らな場所に配置する。
- (4) 地理院地図から座標が取得しやすい圃場の交差点などの特徴のある場所に配置する。



図 3-1 地上基準点の設定イメージ

※10 https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/130441.html

地上基準点は、最低3点以上あれば解析可能ですが、精度を確保するためには、少なくとも10～15地点は設置します。配置の間隔は、レベル測量の最大視準距離を超えない範囲（30～80m程度）で設置できると効率的です（図3-1）。また、地上参照点の他に、検証点として2～3点を別に設置できると、後から精度の検証もおこなえます。

② 対空標識の設置

対空標識は、地上基準点に設置する一時的な標識で、ドローンで撮影した画像における地上基準点の目印となります。図3-2のように、撮影した画像から中心位置が判別しやすい模様になっています。なお、対空標識を設置しない場合は、ドローンで撮影した画像から測量場所が分かるように、地上基準点の場所を別途記録しておきます。



図 3-2 対空標識の例

③ レベル測量

地上基準点でレベル測量を実施します。レベル測量では、地上基準点の相対的な高さを計測します。地上基準点の中間に機器を設置し、前視と後視のスケールの値から、高低差を計算します。ベンチマークとなる地上基準点の高さを0として、すべての地上基準点の相対高度を計測し記録しておきます。



図 3-3 レベル測量の様子

3-2 地理院地図より座標と標高値を取得

地理院地図を利用して、地上基準点の座標を取得します。また、ベンチマークとなる地上基準点の標高値を取得します。値の取得は以下の手順でおこないます。

- (1) ブラウザで地理院地図^{*11}にアクセスします。
- (2) 撮影範囲に移動して、画面左上にある「情報」ボタンの「ベースマップ」タブから「写真」を選択します。
- (3) 中心に表示されている十字マークを地上基準点に合わせます。
- (4) 画面下の座標パネルを表示させ、緯度、経度、標高値を記録します。緯度、経度は、十進数の値を記録します。標高値は、レベル測量のベンチマークとなる地点のみ記録しておきます。地理院地図から取得した標高値は、レベル測量で計測した高さを標高値に変換するために使用します。

場所によっては、ベースマップの「写真」以外にも、より詳細な地図や写真が公開されている場合があるので、それらを利用しても良いでしょう。



図 3-4 地理院地図から座標値と標高値を取得

*11 <https://maps.gsi.go.jp>

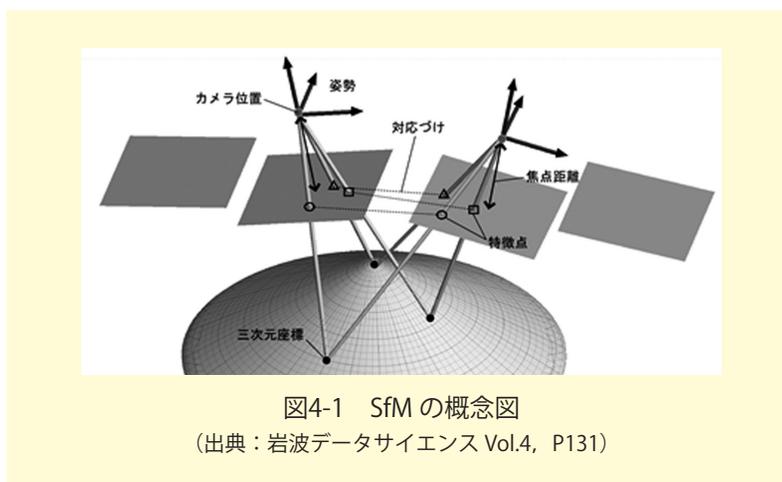
4

Agisoft MetaShape Professional による
地表高データの作成

ドローンで撮影した画像と地上基準点から Agisoft MetaShape Professional を利用し、地表高データ (DSM) を作成します。この部分をフリーソフトで行う方法は 6 を参照して下さい。

4.1 Agisoft MetaShape の概要

Agisoft MetaShape は、SfM・MVS と呼ばれる手法で、3次元の物体を複数の観測点から撮影した画像から復元できるソフトです。主な処理内容は、(1)画像の特徴点の抽出、(2)画像間の特徴点の対応づけ、(3)カメラ位置とカメラパラメータの推定、(4)疎な点群の構築、(4)高密度な点群の構築、(5)ポリゴンメッシュの構築、(6)テクチャーの構築、(7)オルソモザイクの構築、(8)デジタルエレベーションモデルの構築 (DSM も含む) などです。Agisoft MetaShape を利用すると、これらの処理を簡単に実行することができます。

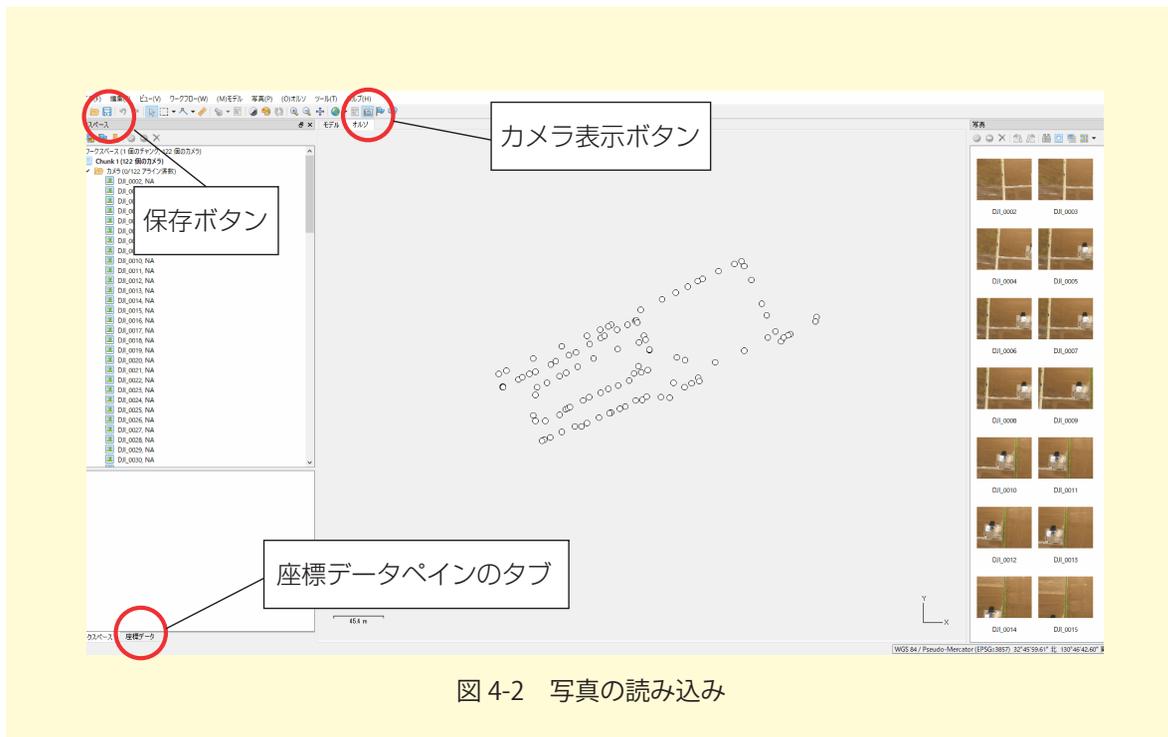


4.2 データ処理の手順

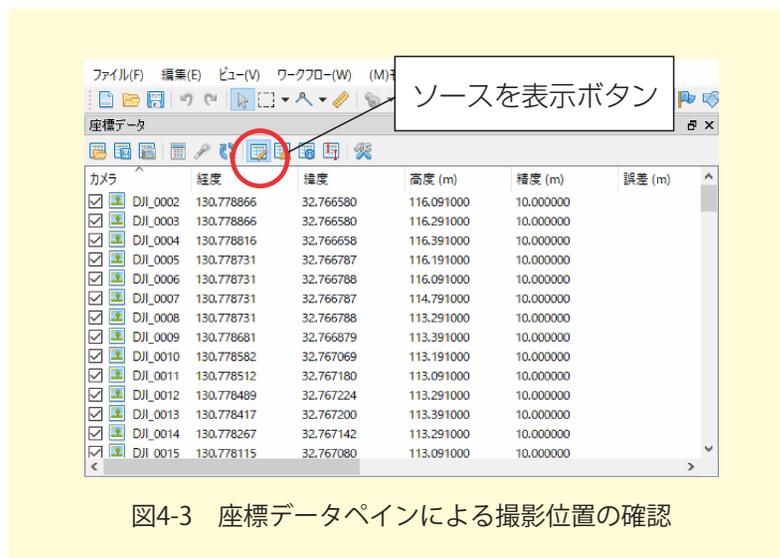
Agisoft MetaShape Professional を利用したデータ処理の方法を順に説明します。事前に、ドローンで撮影した画像、地上基準点の計測値、地理院地図で取得した地上基準点の座標およびベンチマークの標高値を用意しておきます。

① 写真の読み込み

メニューの「ワークフロー」から「写真を追加...」を選択して、ドローンで撮影した写真を読み込みます。ツールバーの「カメラ表示ボタン」が選択されていれば、写真のEXIF情報に記録されている緯度、経度、高度から、おおよその撮影位置が白丸で表示されます(図4-2)。



「座標データペイン」を開き、「ソースを表示」ボタンを押すと、撮影位置の緯度、経度、高度を確認できます。なお、現時点（2017年9月）において、Phantom 3 ProfessionalのEXIFに記録される高度は、GPSで計測した楕円体高になっています。また、GPSで計測した高度は、誤差も大きいので、撮影高度とはズレた値となっているので注意してください。



メニューの「ツール」から「カメラキャリブレーション...」を選択すると、カメラの情報を確認できます。図4-4の例だと Phantom 3 Pro のカメラは、FC300X というフレームカメラで、焦点距離が 3.61mm、画像サイズが 4000 × 3000pix (pixel の略)、画像センサーのピクセルサイズ (1 ピクセルの大きさ) が 0.00156192 × 0.00156192mm ということが分かります。また、カメラパラメータの基準値では、焦点距離 f (ピクセル単位) に 2311.25 ($=3.61/0.00156192$) がセットされています。また、主点のずれ c_x, c_y 、半径方向の歪み k_1, k_2, k_3, k_4 、円周方向の歪み p_1, p_2, p_3, p_4 、せん断歪み b_1, b_2 には 0 がセットされています。なお、カメラキャリブレーションを別途実行している場合は、その値をパラメータにセットしておくこともできますが、ここでは行いません。

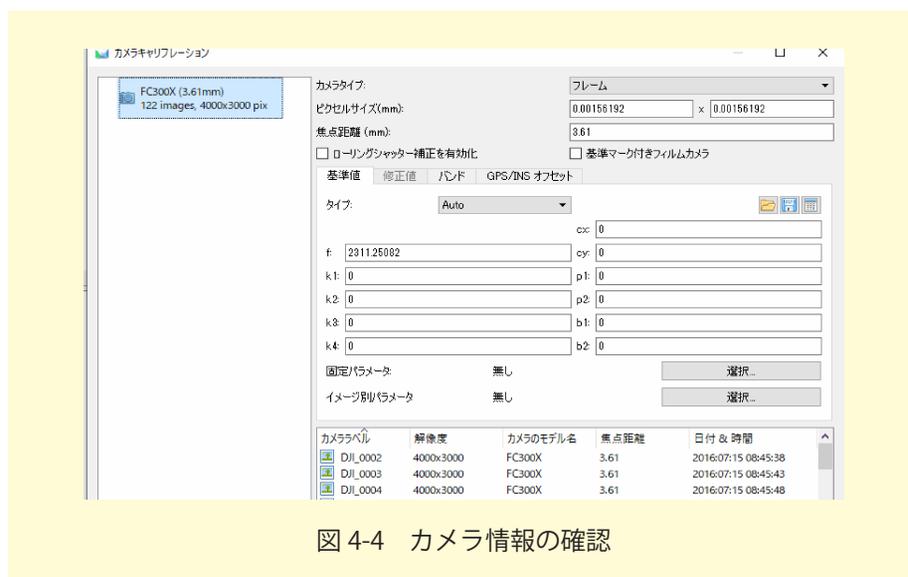


図 4-4 カメラ情報の確認

ツールバーの「保存」ボタンを押し、MetaShape のプロジェクトファイルを保存しておきます。以後、作業ごとにプロジェクトファイルを保存しておいてください。

② 写真のアライメント

写真から特徴点 (キーポイント) を抽出し、そこから画像間で対応づけ可能な特徴点 (タイポイント) の選択を行います。また、タイポイントから撮影位置を推測し、タイポイントの三次元座標 (疎な点群) を構築します。

メニューの「ワークフロー」から「写真のアライメント...」を選択し、設定画面を開きます (図4-5)。

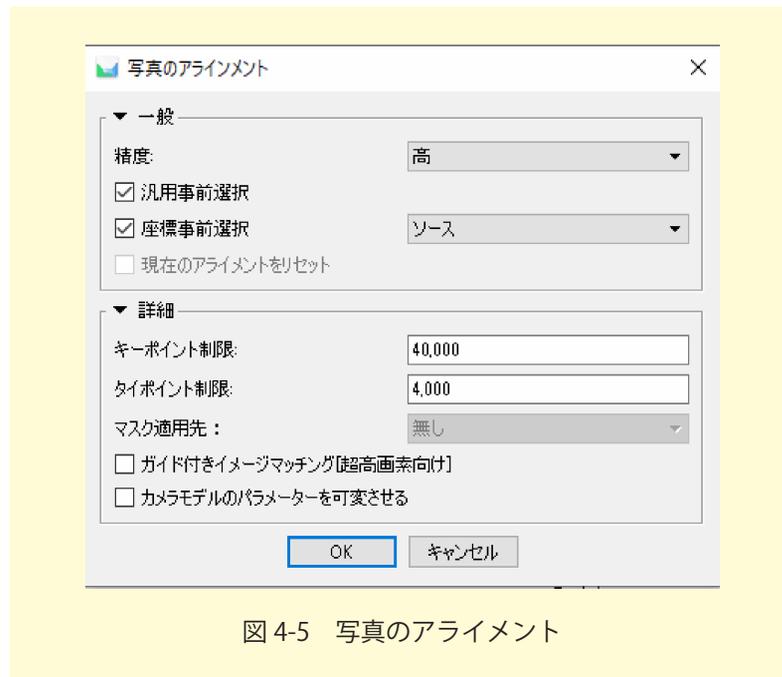


図 4-5 写真のアライメント

- (1) 「精度」は、特徴点を抽出する際の画像サイズで、「最高」はオリジナル画像を縦横 2 倍に拡大したもの、「高」はそのまま、「中」は縦横 1/2 倍、同様に「低」は 1/4 倍、「最低」は 1/8 倍となります。ここでは「高」を選択しておきます。
- (2) 「汎用事前選択」は、タイポイントの抽出を高速化するために、最初に低精度の設定で処理を実行しておき、オーバーラップしている画像を選択する設定です。「座標事前選択」は、同じく画像の位置情報でオーバーラップしている画像を選択します。ここでは、どちらもチェックを入れておきます。
- (3) 「キーポイント制限」は、画像 1 枚あたりの特徴点の上限数で、「タイポイント制限」は、画像 1 枚あたりの画像間で対応づけする特徴点の上限数です。値を 0 に設定すると無制限になりますが、信頼度の低いポイントが多く抽出される可能性があります。ここでは、「キーポイント制限」を 40,000、「タイポイント制限」を 4,000 としておきます。
- (4) 「カメラモデルのパラメーターを可変させる」は、推測可能なカメラパラメータを自動で選択、修正するかどうかの設定です。推測可能なカメラパラメータは、画像を撮影した際のカメラの配置で決定されます。ここでは、チェックを入れておきます。チェックしない場合は、焦点距離 f 、主点のずれ c_x, c_y 、半径方向の歪み k_1, k_2, k_3 、円周方向の歪み p_1, p_2 のみが選択、修正されます。

「OK」ボタンを押すと、処理が実行され、推定されたカメラ位置とタイポイントの三次元座標（疎な点群）が表示されます（図4-6）。

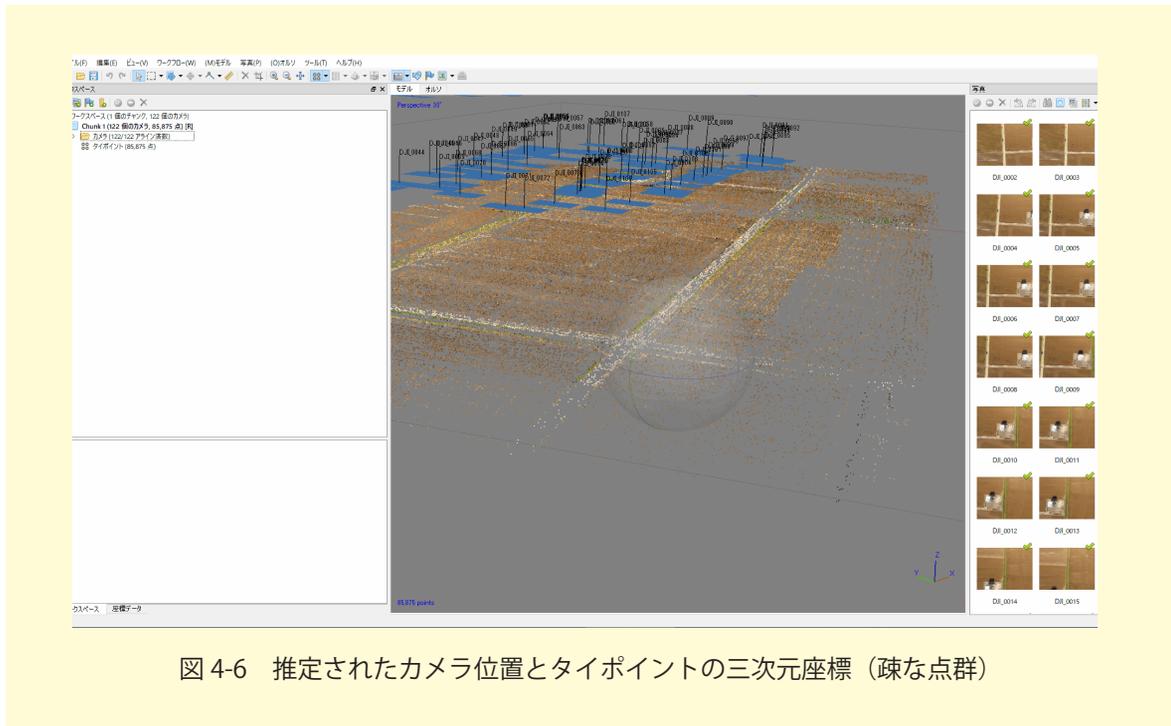


図 4-6 推定されたカメラ位置とタイポイントの三次元座標（疎な点群）

③ マーカーの配置

ドローンで撮影した画像から地上基準点（GCP）を探し、すべての画像にマーカーを配置します。マーカーの配置は、以下の手順でおこないます。

- (1) 写真ペインから地上基準点が写っている画像をダブルクリックして、画像を表示します。同じ基準点が写っている画像は複数あるので、良く写っているものを選びます（図4-7）。
- (2) 拡大ボタンかマウスホイールで画像を拡大し、地上基準点の中心で右クリックし、「マーカー作成」を選択します。対空標識を設置した場合は、標識の中心で、設置していない場合は、基準点を設置した際の目印（道路の交差部など）を参考にします（図4-7）。
- (3) ワークスペースペインから作成したマーカーを選択し、右クリックで「マーカーでフィルタリング」を選択すると、写真ペインにマーカーが写っている画像のみが抽出されます（図4-8）。
- (4) 抽出された写真を表示して、マーカーがずれている場合は、マーカーをドラッグして微調整をします。微調整が済んだ画像は青いフラグが緑色に変わります。
- (5) すべての地上基準点に対し（1）～（4）を繰り返して、マーカーを配置します。



図 4-7 マーカーの作成

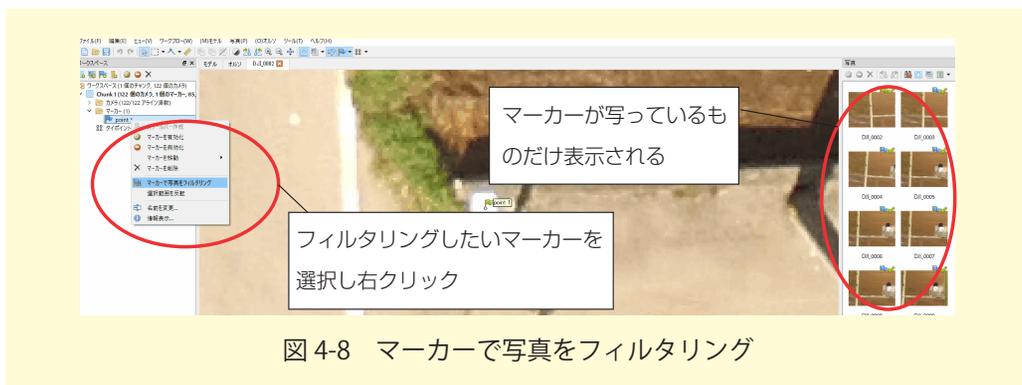


図 4-8 マーカーで写真をフィルタリング

④ マーカーの座標を入力

配置したマーカーに地上基準点の座標を入力します。座標は MetaShape で直接入力することも可能ですが、ここでは別途 CSV ファイルに入力して、それを読み込みます。メモ帳などのテキストエディタで以下のように入力し CSV 形式で保存します。EXCEL に入力して、CSV 形式で保存する方法でも構いません。

```

LABEL,X,Y,H
point 1,130.778937,32.766627,4.100
point 2,130.779112,32.766634,3.935
point 3,130.779387,32.766087,3.860
以下、ポイントの数だけ入力

```

LABEL の列は、配置したマーカーの名前と同じになるように入力します（マーカー名を変更していなければ、point と数字の間にスペースが入っているので注意してください）。X 列に経度、Y 列に緯度を入力します。H 列は、地理院地図で取得したベンチマークとする地上基準点の標高値にレベル測量で計測した相対高度を足し合わせた値を入力します。

座標データペインの「インポート」ボタンを押して、計測値を入力した csv ファイルを選択します。ウィンドウが開くので、「座標系」が WGS84 (EPSG:4326) になっているのを確認し、「デリミター」でコンマを選択、「列」で対応する列番号を入力します。「列のインポートを開始（行の間違い）」は、一行目には列名が入っているため、2 を入力します。

「OK」ボタンを押すと座標データペインのマーカ一覧に座標がインポートされます。

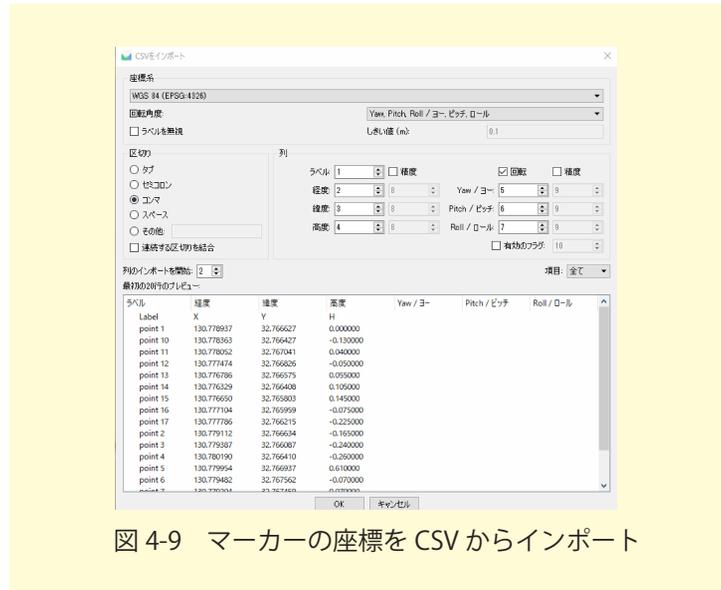


図 4-9 マーカーの座標を CSV からインポート

⑤ カメラを最適化

地上基準点となるマーカーを配置したので、これをもとにカメラ位置、カメラパラメータ、タイポイントの三次元座標を再度計算（カメラを最適化）します。

まず、精度の設定を確認しておきます。座標データペインの「設定」ボタンを押すとウィンドウが開くので、「計測精度」と「画像の座標精度」を確認します。「計測精度」における、「カメラ精度」はドローンに搭載されている GPS の座標精度で約 10m、マーカー精度は地上基準点の座標精度なので理想的な値として約 0.005m となっています。「画像の座標精度」における「マーカー精度」は、画像にマーカーを配置した際のピクセル精度で 0.1pix、「タイポイント精度」は画像間のマーカーのずれで 1pix としておきます。

※計測精度の「マーカー精度」を大きな値に変更すると、上手くカメラを最適化することができないので注意してください。



図4-10 精度の設定

次に「カメラを最適化」に使用する座標を選択します。精度の低いカメラの座標は使用せず、マーカの座標を使用します。また、検証点を設置する場合は、検証点となるマーカも使用しません。

座標データペインの画像をすべて選択した状態で、右クリックし「チェックを外す」を選択します。また、検証点として使用するマーカを残し、それ以外のマーカをチェックします。

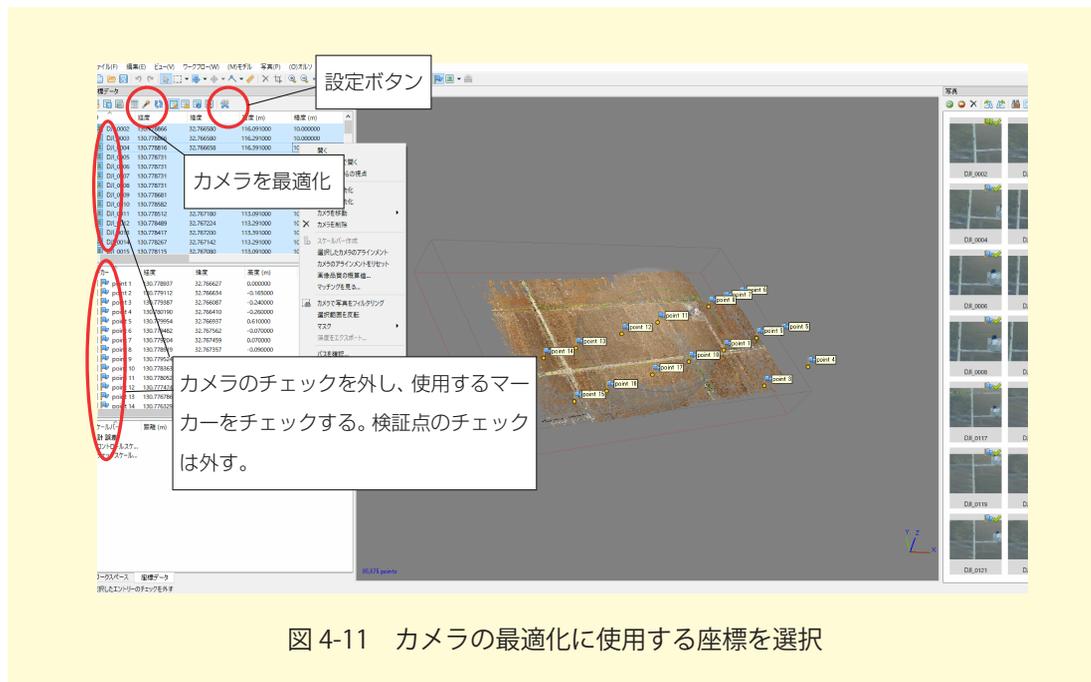


図 4-11 カメラの最適化に使用する座標を選択

最後に、座標ペインの「カメラを最適化」ボタンを押すと、最適化するカメラのパラメータを選択するウィンドウが表示されますが、パラメータは、そのままにしておき、「OK」ボタンを押して実行します。

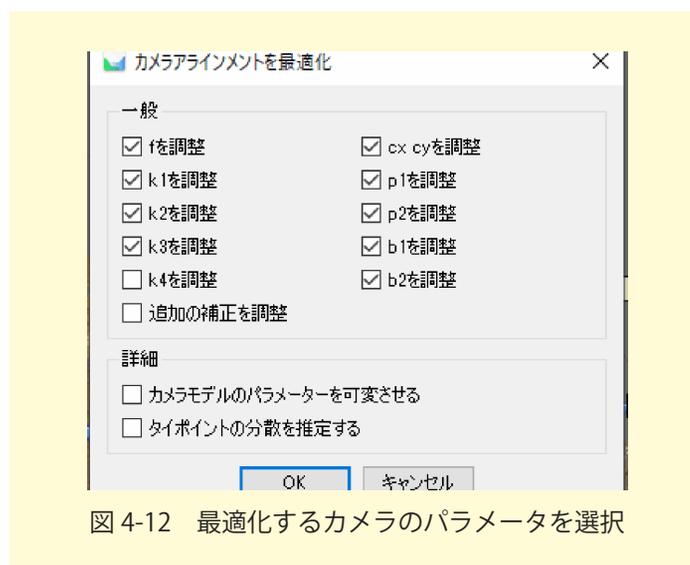
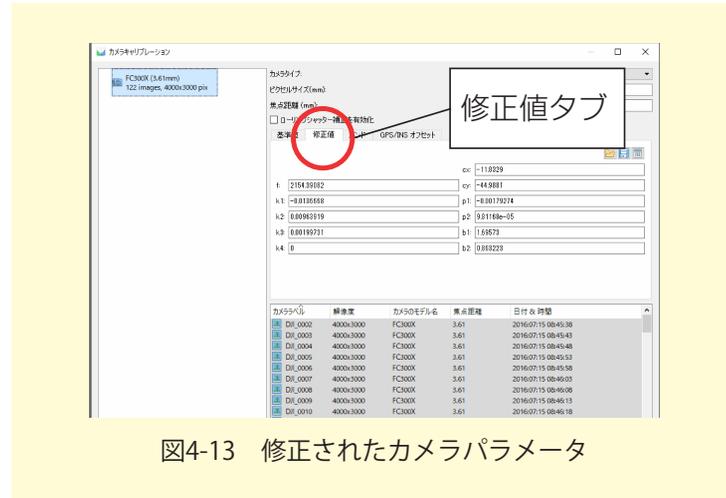
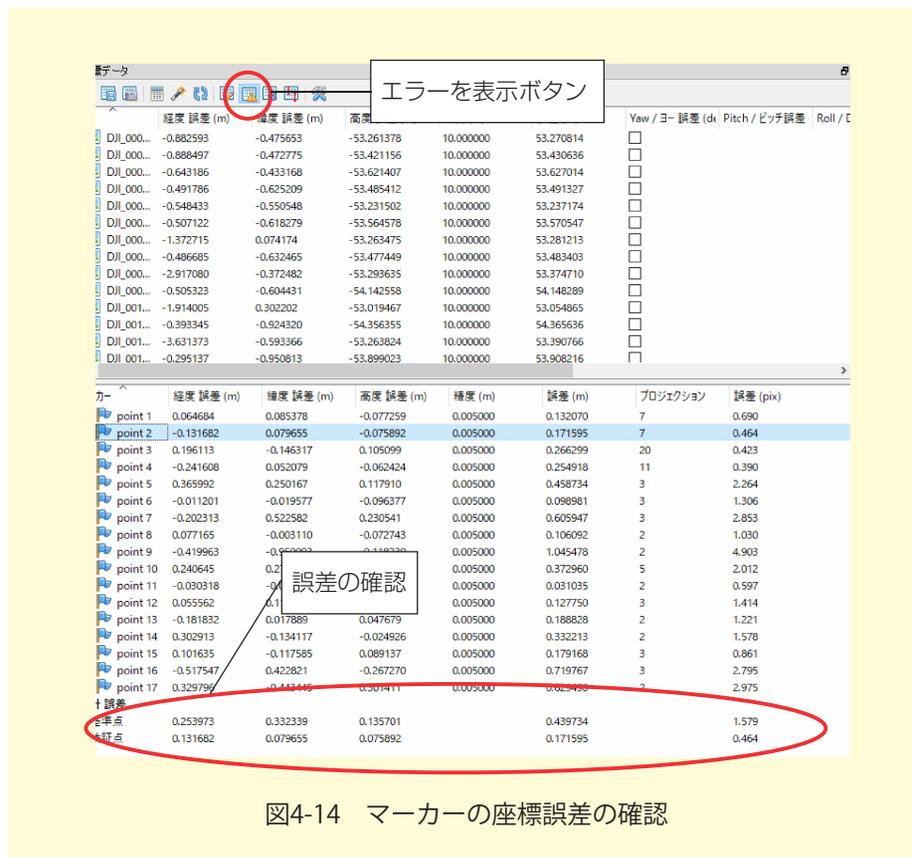


図 4-12 最適化するカメラのパラメータを選択

カメラを最適化すると、カメラパラメータが修正されます。メニューのツールから「カメラキャリブレーション...」を選択し、「修正値」タブを開くと修正されたカメラパラメータを確認できます。



カメラパラメータが修正されたので、再計算されたマーカの座標値と、もとの座標値との誤差も確認しておきます。座標データペインで「エラーを表示」ボタンを押すとマーカの一覧表の下に、コントロールポイントとチェックポイントの誤差が表示されているので、許容できる範囲かどうかを確認します。



⑥ 精度の低いタイポイントの削除

「カメラの最適化」をしても誤差が許容範囲とならない場合や、もっと精度を上げたい場合は、精度の低いタイポイントを削除し、再度「カメラの最適化」をします。

明らかに精度の悪いタイポイント（空中に浮いているなど）は、ツールバーから「長方形選択」ボタンなどを使ってタイポイントを選択し、メニューの編集から「選択範囲を削除」を選び削除します。また、メニューの「モデル」から「段階的選択」を選ぶとウインドウが開くので、「基準」から適切なものを選び、「レベル」を指定します。レベルに応じて、タイポイントが選択されるので、同様に精度の低いタイポイントを削除します。選択されているポイント数は、画面の左下に表示されます。

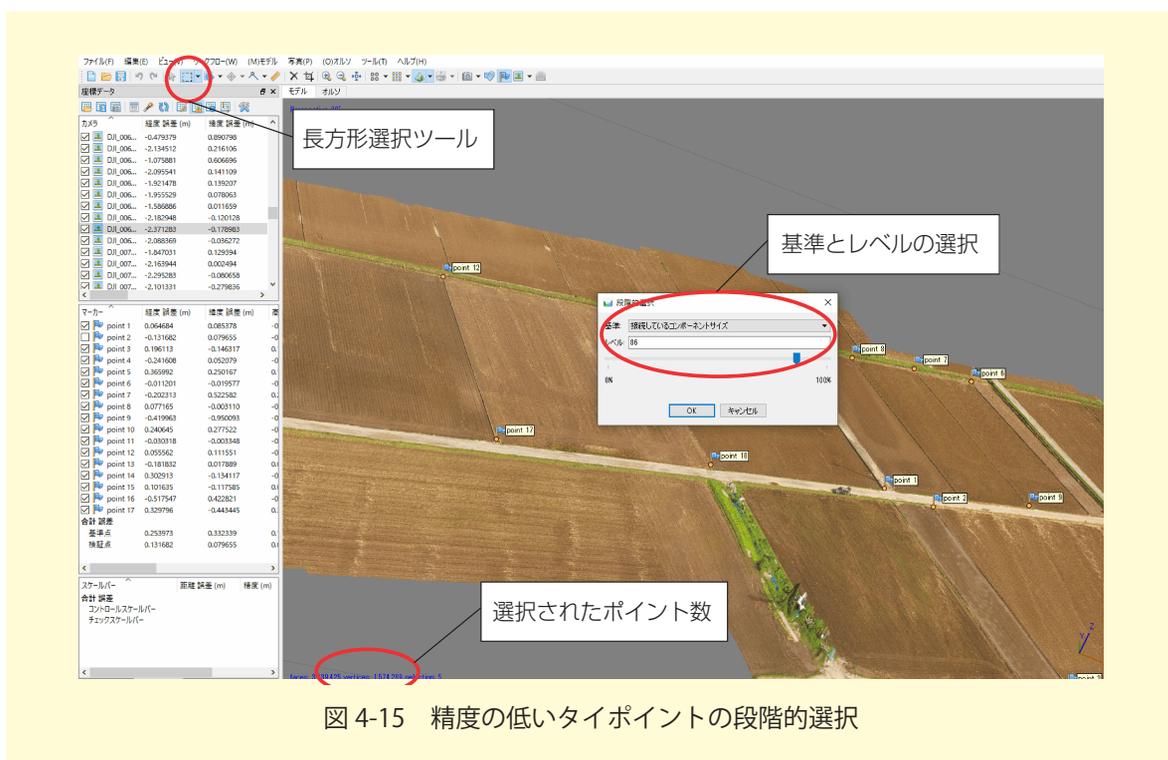


図 4-15 精度の低いタイポイントの段階的選択

精度の低いタイポイントを削除したら、「カメラを最適化」して、誤差を確認します。

⑦ 高密度な点群の構築

カメラを最適化できたら、それをもとに高密度な点群を構築します。メニューの「ワークフロー」から「高密度クラウド構築...」を選択します。「品質」は、写真のアライメントの時と同じく、点群を作成する際に使用する写真のサイズが異なります。高品質ほど、詳細で地形の再現性が良いものが作成されますが、その分時間がかかります。ここでは「高」を選択しておきます。「深度フィルタ」は、構築する点群の外れ値を削除するための設定です。深度フィルタを「強」にする程、外れ値が除外されますが、小さな形状が失われる可能性があります。ここでは「中」を選択しておきます。「OK」ボタンを押すと高密度な点群が作成されます。

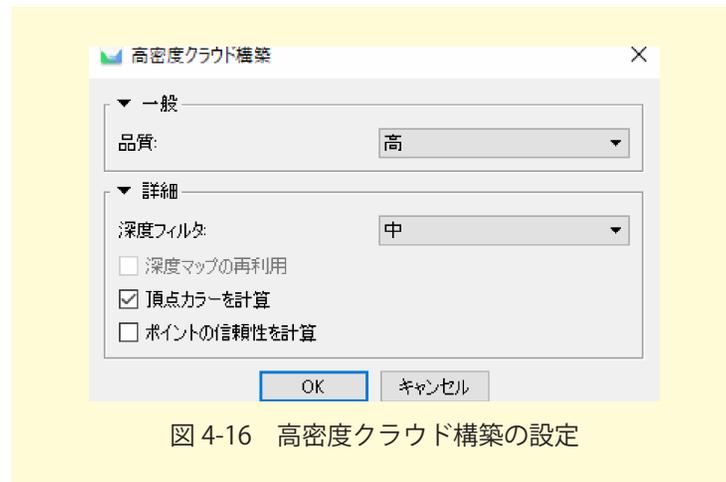


図 4-16 高密度クラウド構築の設定

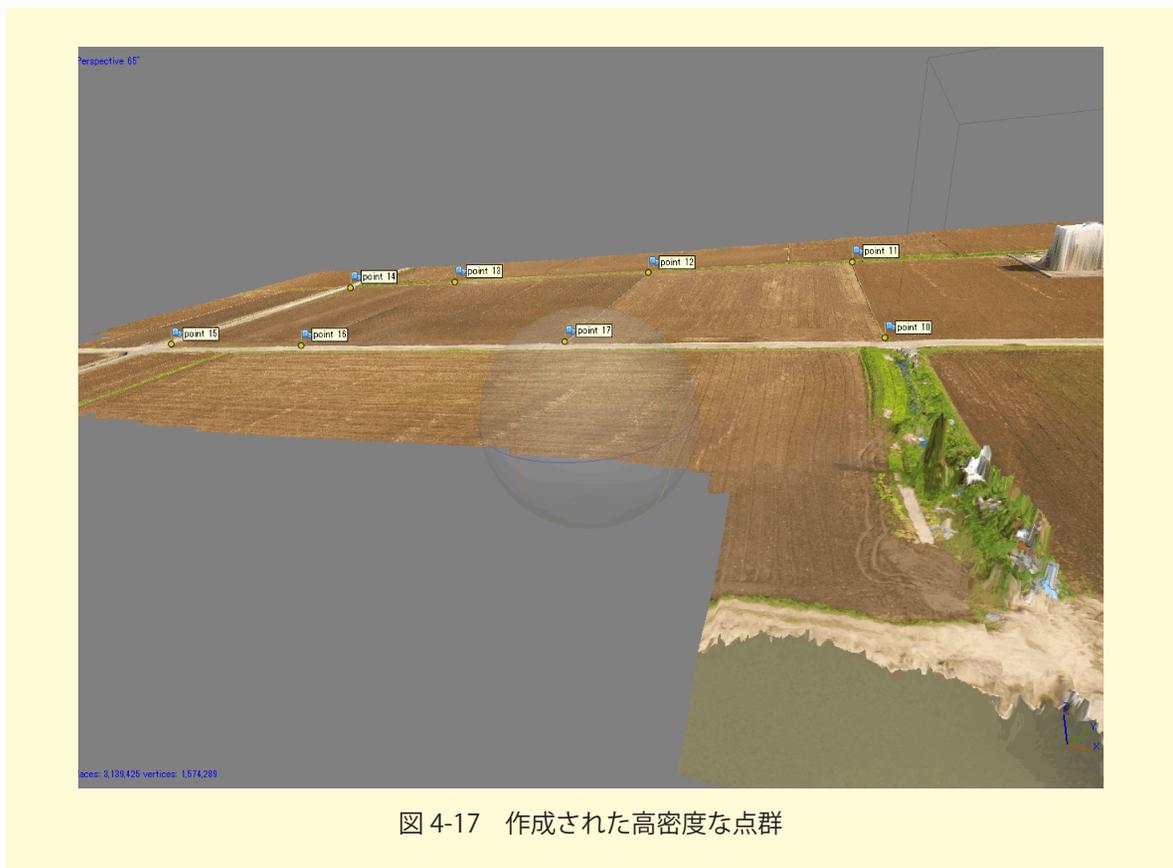


図 4-17 作成された高密度な点群

高密度な点群に不要なポイント（水面の波立ちや電線など）がある場合は、「長方形選択」ツールなどで選択し、削除しておきます。

⑧ ポリゴンメッシュの構築（オプション）

高密度な点群を利用して、地表面をポリゴンの集合で表すメッシュモデルを構築します。メニューの「ワークフロー」から「メッシュ構築...」を選択し、「サーフェスタ입」を「ハイトフィールド (2.5D)」、 「ソースデータ」を「高密度 (Dense) クラウド」に設定します。

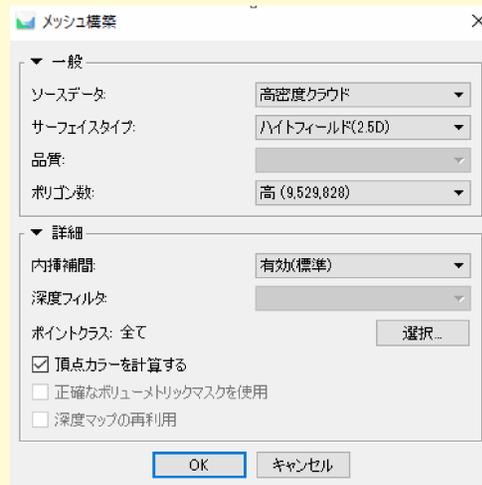


図4-18 メッシュ構築の設定

「OK」ボタンを押すとポリゴンメッシュが作成されるので、ツールバーの「シェード」「ソリッド」「ワイヤーフレーム」ボタンで表示を切り替え確認します。不要な箇所が残っている場合は、ツールバーの「高密度クラウド」ボタンで表示を切り替え、不要なポイントを削除しておきます。なお、⑦の時点で不要なポイントを削除できている場合は、ポリゴンメッシュを構築する必要はありません。

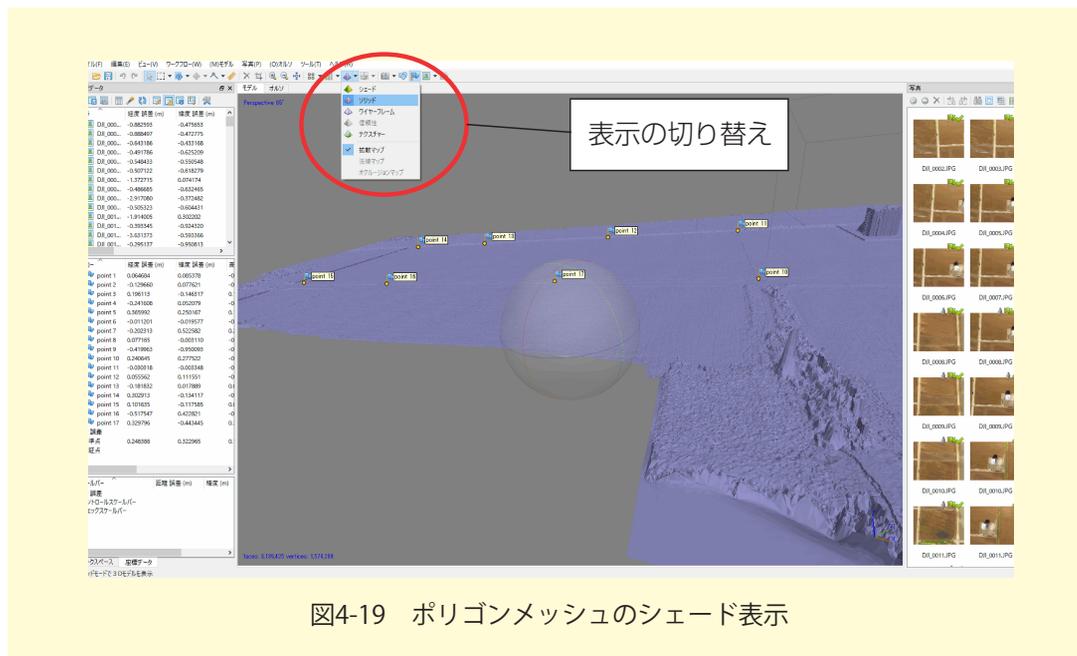


図4-19 ポリゴンメッシュのシェード表示

⑨ デジタルエレベーションモデル (DEM) 構築

高密度な点群を利用して、デジタルエレベーションモデル（厳密には DSM）を構築します。メニューの「ワークフロー」から「DEM 構築...」を選択すると設定ウィンドウが開く

ので (図4-20), 「プロジェクションタイプ」で「ジオグラフィック」を選択し, 座標系をリストダウンから「もっと ...」を押し, 平面直角座標系 (対象地域の系番号 (ここでは対象地の熊本の座標系番号を示しています))^{※12} を選択します。「ソースデータ」は「高密度クラウド」を選択します。「OK」ボタンを押すとデジタルエレベーションモデルが作成されます。

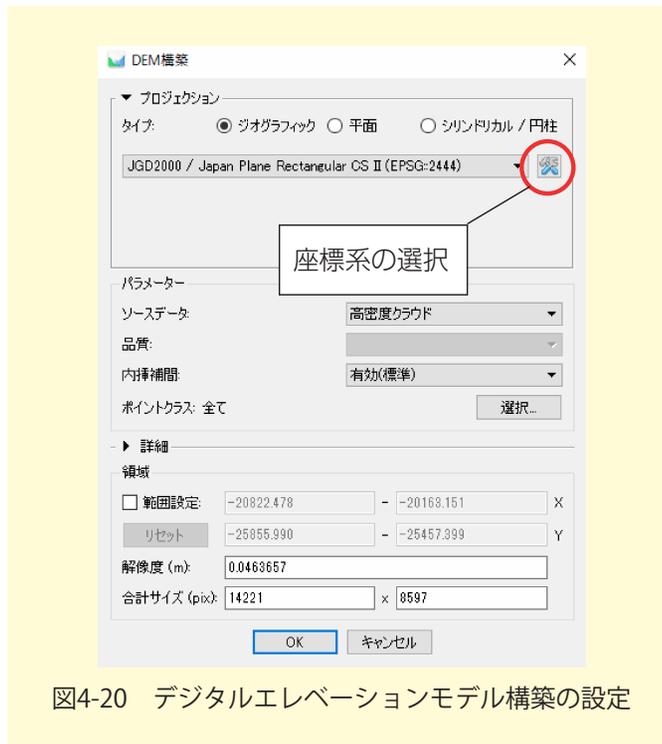


図4-20 デジタルエレベーションモデル構築の設定

「ワークスペース」ペインのDEMをダブルクリックすると作成されたモデルを確認できます。

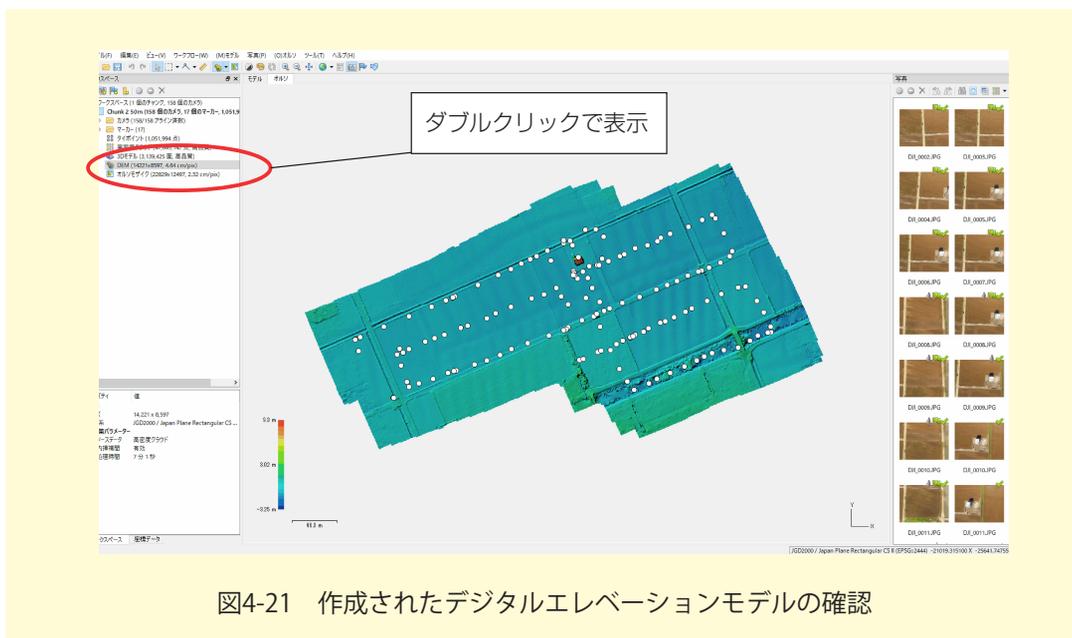


図4-21 作成されたデジタルエレベーションモデルの確認

※12 わかりやすい平面直角座標系 (国土地理院) <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/jpc.html>

⑩ オルソモザイク構築

デジタルエレベーションモデルを利用して、オルソモザイクを構築します。メニューの「ワークフロー」から「オルソモザイク構築...」を選択すると設定ウインドウが開くので(図4-22左)、「プロジェクションタイプ」で「ジオグラフィック」を選択し、座標系はデジタルエレベーションモデルで選択したものと同じものになっているかを確認します。「サーフェイス」は「DEM」を選択します。「OK」ボタンを押すと、オルソモザイク画像が作成されます。

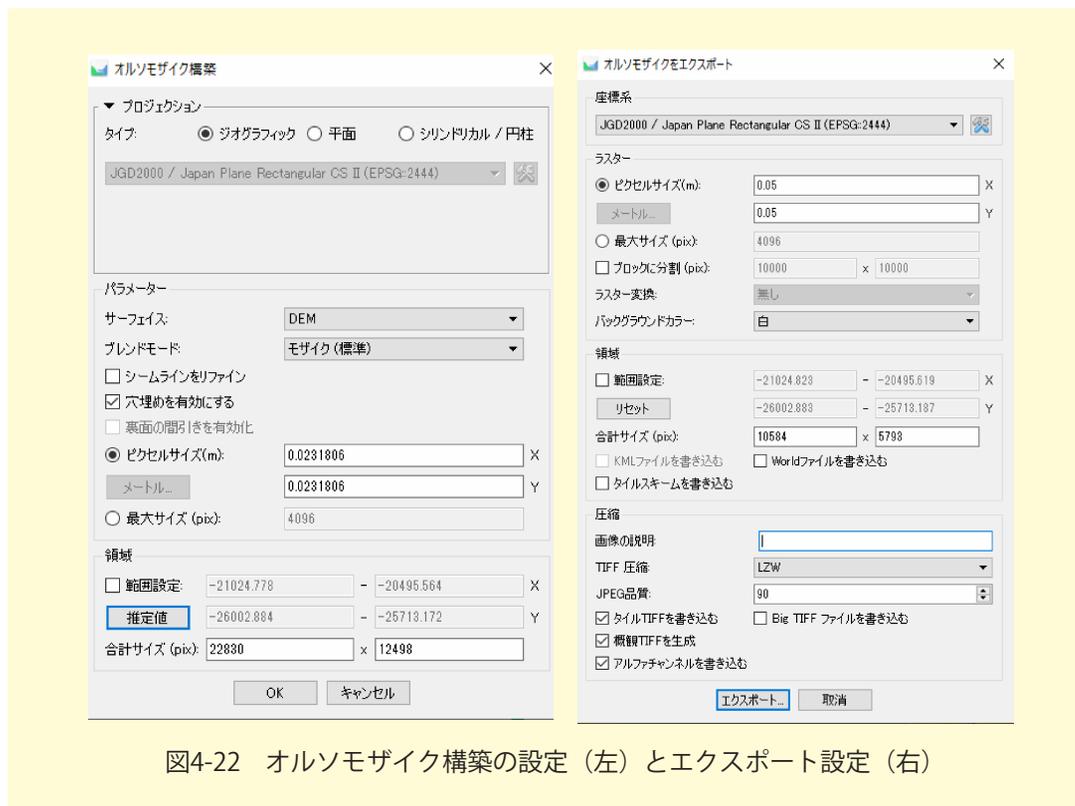


図4-22 オルソモザイク構築の設定（左）とエクスポート設定（右）

⑪ オルソモザイクの出力

作成したオルソモザイクをファイルに書き出します。オルソモザイクの出力は、メニューの「ファイル」から「オルソモザイクをエクスポート」を開き、「JPEG/TIFF/PNGをエクスポート...」を選択します。設定ウインドウが開くので(図4-22右)、「座標系」がオルソモザイクの構築で選択したものと同じになっているのを確認し、ピクセルサイズは0.05にしておきます。値を小さくすれば詳細な画像を出力できますが、その分ファイルサイズが大きくなります。「エクスポート」ボタンを押すと、ウインドウが開くので、ファイルの種類を「TIFF/GeoTIFF」にし、ファイル名を指定して保存します。ここでは「ortho.tif」としておきます。

⑫ デジタルエレベーションモデルの出力

作成したデジタルエレベーションモデルをファイルに書き出します。デジタルエレベーションモデルの出力は、メニューの「ファイル」から「DEMをエクスポート」を開き、「TIFF/BIL/XYZをエクスポート...」を選択します。設定ウインドウが開くので（図4-23）、「座標系」がデジタルエレベーションモデルの構築で選択したものと同じになっているのを確認し、ピクセルサイズは変更せずデフォルトのままにしておきます。「エクスポート」ボタンを押すとウインドウが開くので、ファイルの種類を「TIFF/GeoTIFF」にし、ファイル名を指定して保存します。ここでは「dsm.tif」としておきます。

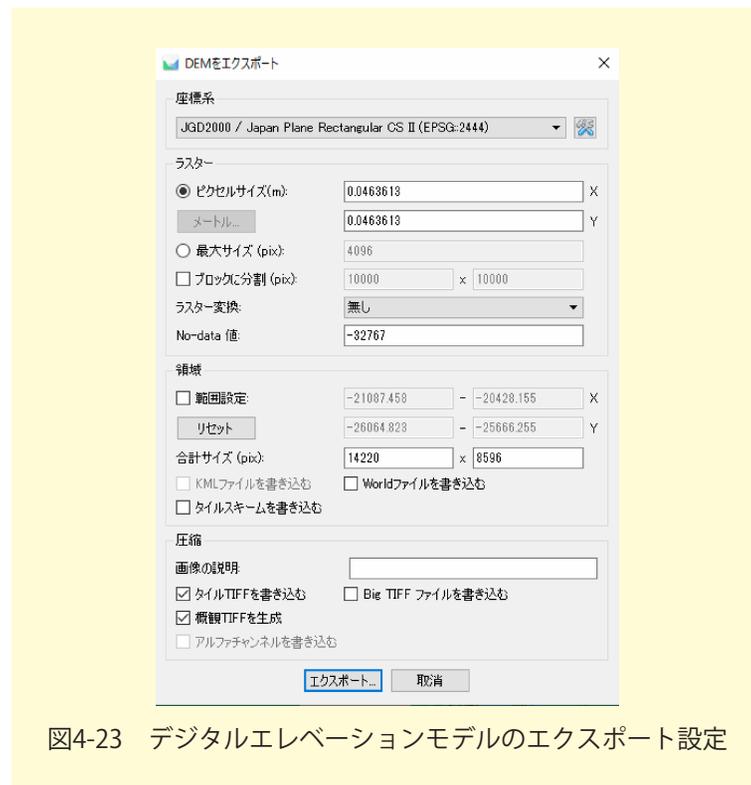


図4-23 デジタルエレベーションモデルのエクスポート設定

⑬ レポートの出力

これまでの処理の設定や、作成したオルソモザイクやデジタルエレベーションモデルの精度をレポートとして出力します。メニューの「ファイル」から「レポートを作成...」を選択し、タイトルを入力したら「OK」ボタンを押して、ファイル名を指定します。PDF形式のレポートが出力されるので、内容を確認しておきます。

5

QGIS による不陸量の算出

Agisoft MetaShape から出力した DSM データを利用し、QGIS で不陸量の算出とレイアウト図の作成をおこないます。

5.1 QGIS について

QGIS は、位置情報の表示、作成、解析、印刷などができるオープンソースの GIS ソフトです。ソフトの機能は大変多く、操作の詳細をすべては説明できませんので、詳しく知りたい場合は、WEB の情報や書籍を参考にしてください。なお、本マニュアルでは、QGIS の Ver3.4 を使って操作の説明をします。

5.2 不陸量の算出とレイアウト図の作成手順

QGIS を使用した不陸量の算出方法と、レイアウト図の作成方法を説明します。事前に Agisoft MetaShape から出力した DSM データとオルソモザイク画像を用意しておきます。

① DSM データとオルソモザイク画像の読み込み

QGIS を起動して、メニューの「レイヤ」→「レイヤの追加」→「ラスタレイヤの追加 ...」から、作成した DSM データを選択し読み込みます。同様に、作成したオルソモザイク画像も読み込みます。



図 5-1 DSM データとオルソモザイク画像の読み込み

② 不陸量算出範囲のポリゴン作成

不陸量を算出する範囲のポリゴンデータを作成します。まず、新規のシェープファイルを作成します。メニューの「レイヤ」→「レイヤの作成」→「新規シェープレイヤ...」を選択します。ウィンドウが開くので、ファイル名の「...」ボタンを押し、任意の保存先を指定してファイル名を「area.shp」とします。タイプを「ポリゴン」、ファイルエンコーディングを「System」、座標系を Metashape での「DEM 構築」で設定したものと同一ものを選択します。「OK」ボタンを押すと、空のシェープファイルが QGIS に追加されます。

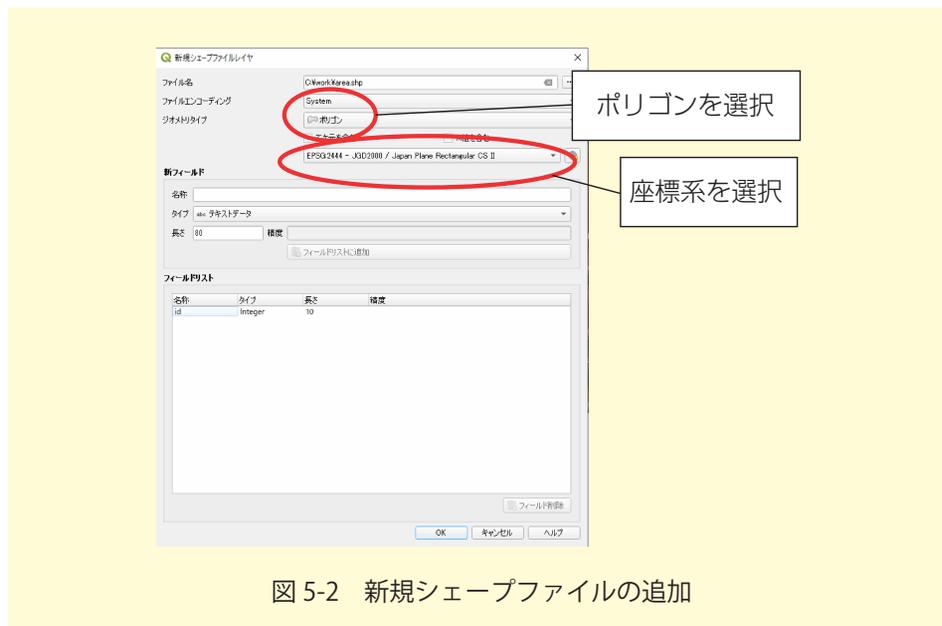


図 5-2 新規シェープファイルの追加

レイヤパネルで、追加したシェープファイルを選択し、ツールバーの「編集モード切り替え」ボタンを押して編集モードにします。ツールバーの「地物の追加」ボタンを選択し、読み込んだオルソ画像を見ながら、対象範囲を囲うようにクリックしていきます。最後の地点を追加した後、右クリックすると、ポリゴンが閉じられ、属性入力ウィンドウが表示されるので ID 番号を入力します。同様にして、対象範囲の数だけポリゴンを作成し、編集が終わったら「編集モード切り替え」ボタンを押して編集内容を保存します。対象範囲の広さや形状によっては、先に大きな範囲を囲ってから、ポリゴンを分割して作成する方法もあるので、状況によって使い分けると良いでしょう。



図 5-3 不陸量算出範囲のポリゴンの作成

③ 平均標高の算出

DSM データの平均標高をポリゴンの範囲ごとに算出し、属性テーブルに算出結果を追加します。メニューから「プロセッシング」→「ツールボックス」を選択すると、プロセッシングツールボックスが開きます。「ラスタ分析」→「ゾーン統計量統計」をダブルクリックし、開いたウィンドウで「ラスタレイヤ」は DSM データを選択し、「地域ベクタレイヤ」は、作成したポリゴンデータを選択します。「実行」ボタンを押すと、作成したポリゴンデータ属性の「_mean」に平均標高が追加されます。

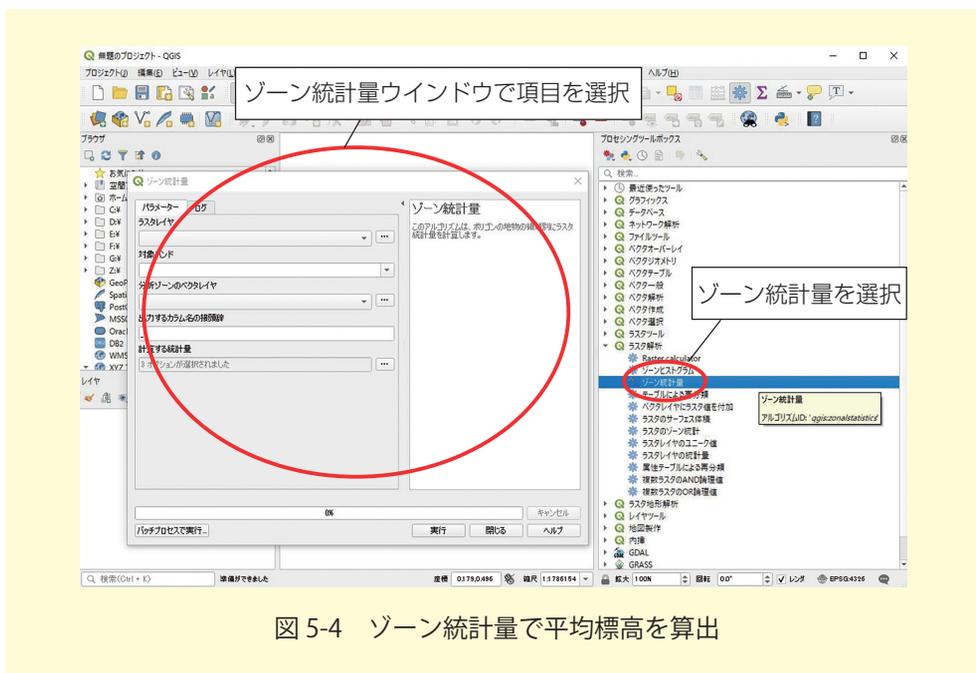


図 5-4 ゾーン統計量で平均標高を算出

④ 平均標高ポリゴンからラスターデータを作成

ポリゴンデータの平均標高の値を使用し、ラスターデータを作成します。メニューから「ラスター」→「変換」→「ラスター化 (ベクタのラスター化) ...」を選択します。「入力レイヤ」に「area」を指定し、「バーンイン値に使用するフィールド」は「_mean」を選択します。出力ラスターサイズの単位には「地理参照された単位」を選択し、「幅 / 水平方向の解像度」「高さ / 垂直方向の解像度」に「0.5」と入力します。「出力範囲」は右の「...」を押し、「レイヤの領域を使う」を選択します。「出力バンドに指定された no data 値を割り当てる」に「9999」と入力します。「出力ファイル」は「選択」ボタンを押してファイル名を指定します。ここでは、「mean_elev.tif」とします。「実行」ボタンを押すと、平均標高値のラスターファイルが作成され、レイヤが追加されます。

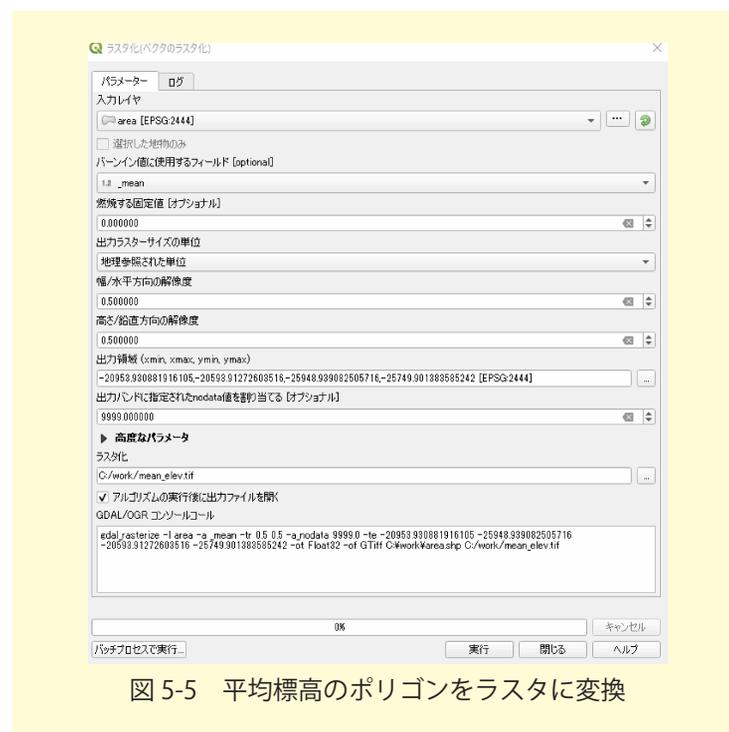


図 5-5 平均標高のポリゴンをラスターに変換

⑤ 不陸量の算出

平均標高のラスターデータと DSM のラスターデータとの差分から不陸量を算出します。メニューから「ラスター」→「ラスター計算機」を選択します。ラスター計算機の「ラスター演算式」に以下の式を入力します。ラスターバンドをダブルクリックするとバンド名が入力されます。

```
"dsm@1" - "ラスター化 @1"
```

「出力レイヤ」でファイル名を指定します。ここでは、「furiku.tif」とします。出力範囲を設定するために「ラスターバンド」の「ラスター化 @1」を選択し、「選択レイヤの領域」ボタンを押します。「OK」ボタンを押すと、不陸量の値が入ったラスターレイヤが追加されます。

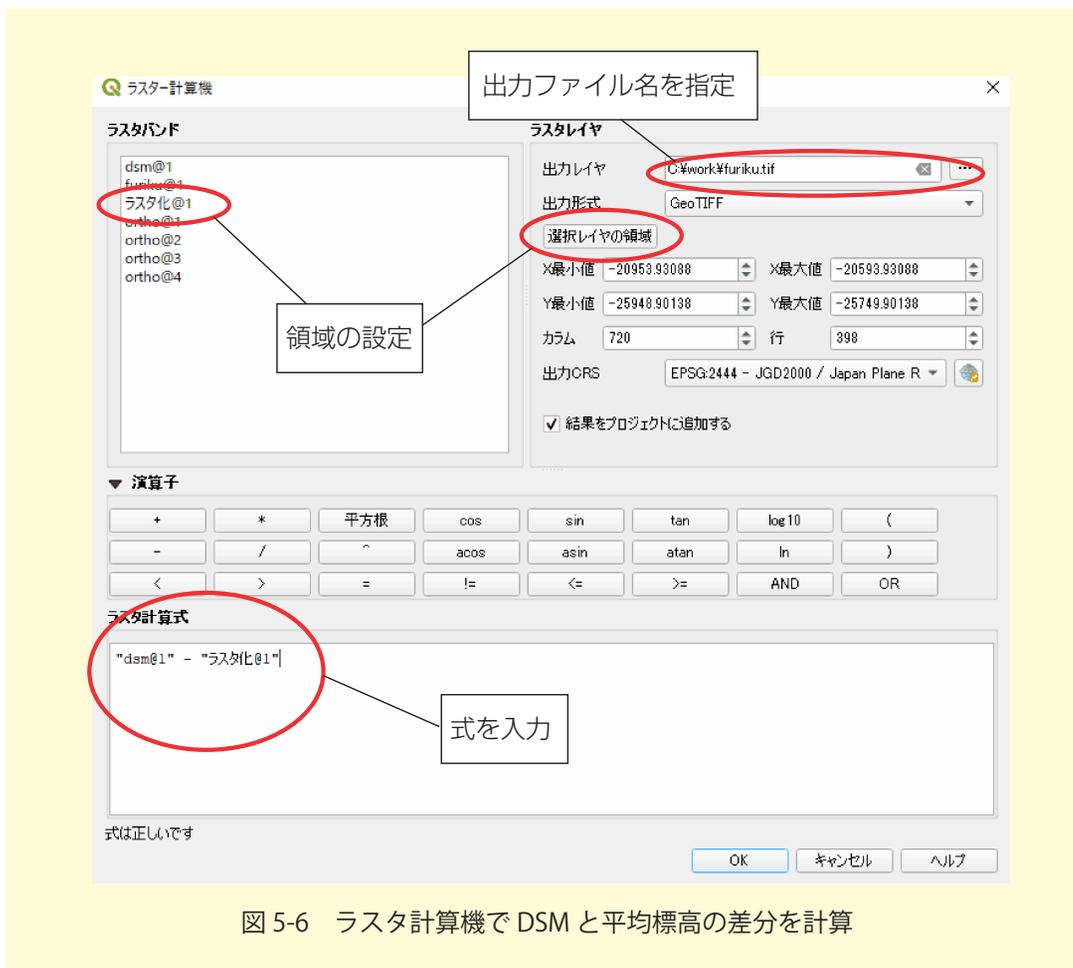
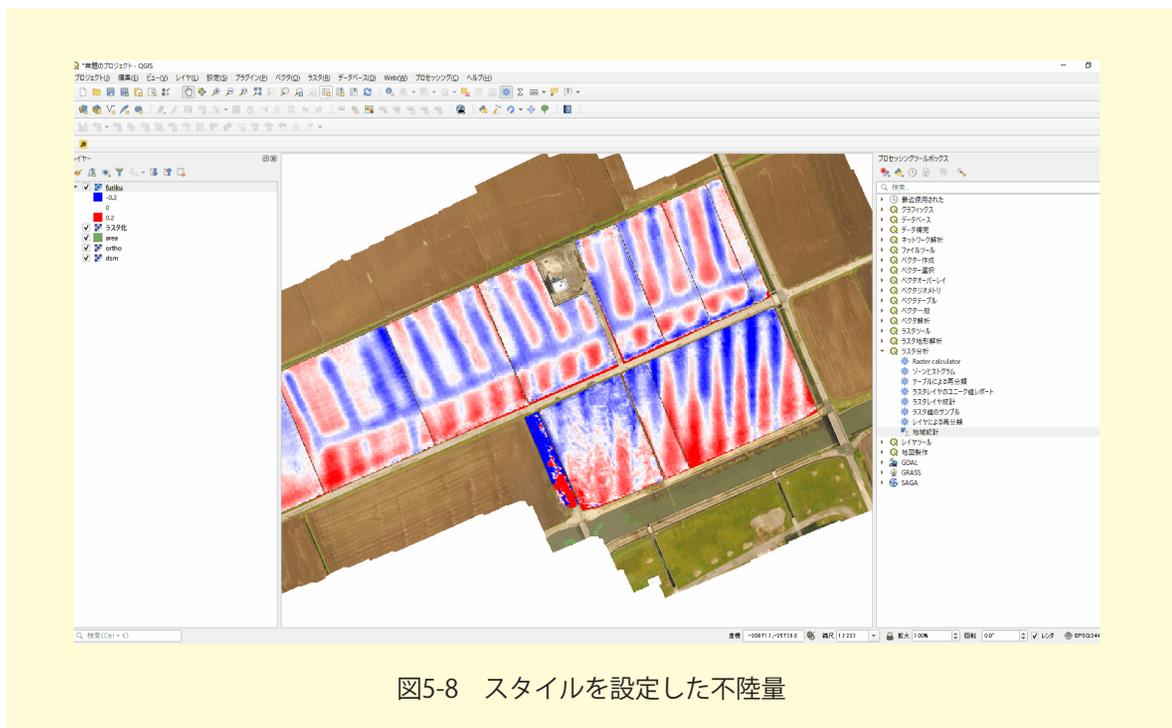
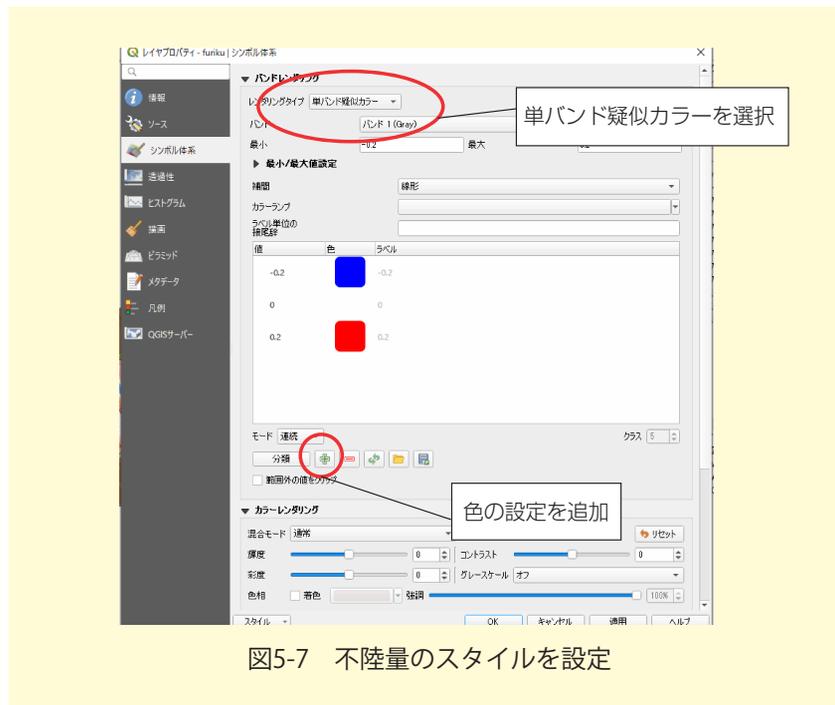


図 5-6 ラスタ計算機で DSM と平均標高の差分を計算

⑥ 不陸量ラスタのスタイル設定

不陸量が見やすくなるようにスタイルを設定します。レイヤパネルの「furiku.tif」を右クリックし「プロパティ」を選択します。「シンボル体系」タブを開き、「レンダータイプ」を「単バンド疑似カラー」に変更します（図 5-7）。画面下の「+」ボタンを押して値と色を追加します。不陸量の最小値と最大値をカバーするように値を設定し、最小値（平均標高より低い場所）に青色、平均標高を白色、最大値（平均標高より高い場所）を赤色に割り当てます。図 5-7 の例では最小値が -0.17、最大値が 0.16 であることから、-0.2 に青色、0 に白色、0.2 に赤色を割り当てています。「OK」ボタンを押すと、スタイルが適用されます（図 5-8）。



⑦ レイアウト図の作成

不陸量の図を印刷できるように地図のレイアウトをします。メニューから「プロジェクト」→「新規プリントレイアウト」を選択し、タイトルを入力すると、プリントレイアウトが開きます。プリントレイアウトでは、まず、画面を右クリックをして「ページのプロパティ」を選択し、用紙サイズと方向を指定しておきます。次にツールバーから「新規地図を追加」

ボタンを選択し、編集画面で地図を表示させたい範囲にドラッグします。地図のスケールを変更したい場合は「アイテムプロパティ」タブの縮尺に値を入力します。また、地図を移動したい場合は、ツールバーの「アイテムのコンテンツを移動」ボタンを選択し、地図をドラッグします。方位記号を追加したい場合は、ツールバーの「イメージ追加」ボタンを選択し、編集画面でドラッグします。「アイテムプロパティ」タブの「検索ディレクトリ」から方位記号の画像を選択すると、ドラッグした範囲に表示されます。縮尺を追加したい場合は、ツールバーの「新規スケールバーを追加」ボタンを選択し編集画面でクリックします。「アイテムプロパティ」タブの線分列の項目を変更するとスケールバーの長さを変更できます。

レイアウトが整ったら、ツールバーの「PDFとしてエクスポート」ボタンを押し、PDFとして図を書き出します。

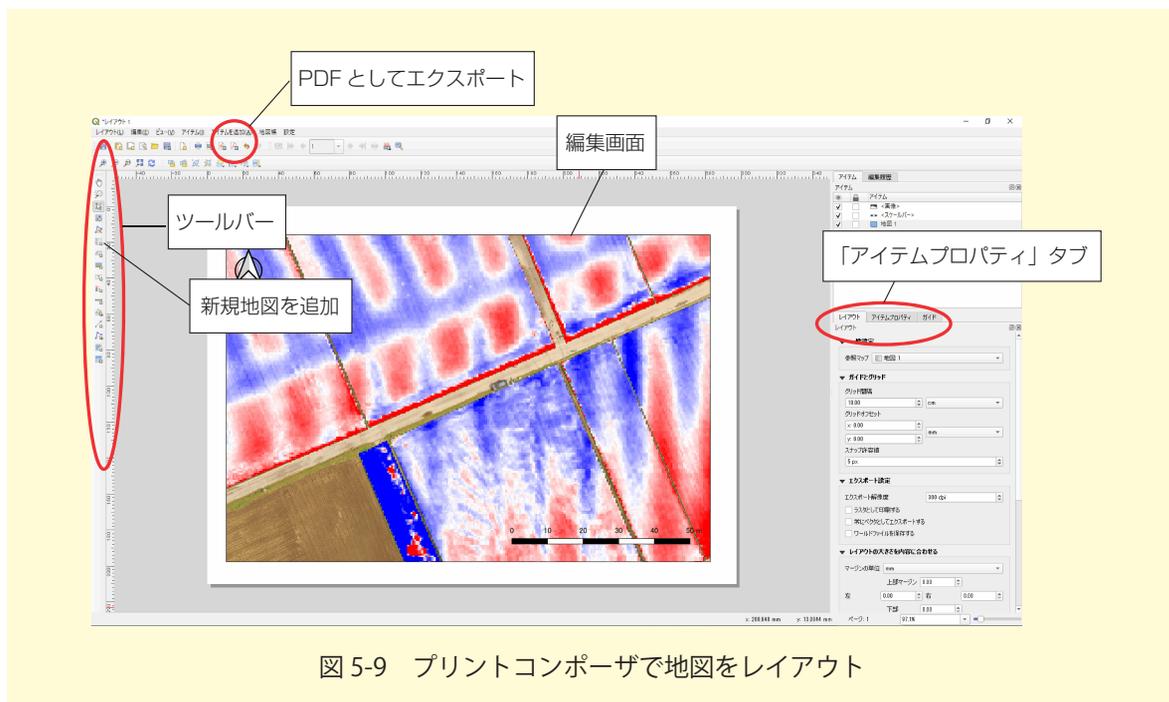


図 5-9 プリントコンポーザで地図をレイアウト

6

フリーソフトによる地表高データの作成

このマニュアルの「4. Agisoft MetaShape Professional による地表高データの作成」では、市販ソフトである Metashape Professional を利用して、地表高データを算出する方法について説明しました。ここでは、フリーソフトを用いることで、同様に地表高データを算出する方法について説明します。

6.1 フリーソフト FieldReconst について

農研機構では、複数の画像から SfM (Structure from Motion) により被写体の 3 次元形状を復元するフリーソフトウェア、FieldReconst を公開しています。FieldReconst は、農研機構の職員である杉浦綾氏が作成したもので、個人使用、業務使用に関わらず、自由に使うことができます。

動作環境

- Windows 7/8/10 64bit のパソコン
- 8GB 以上のメインメモリ
- NVIDIA 製 GPU (2GB 以上) を搭載したグラフィックボード
※NVIDIA 製 GPU のみ対応しています。また、搭載されているが上手く動かない時はドライバを最新のものにしてみてください。
- Visual Studio 2015 の Visual C++ 再頒布可能パッケージがインストール済

6.2 FieldReconst の利用手順

① ダウンロードとインストール

農研機構の HP の下記の場所から

<http://cse.naro.affrc.go.jp/rsugiura/FieldReconst/>

FieldReconst.zip をダウンロードし、任意の場所に展開してください。インストールは不要です。ただし、日本語を含むディレクトリは避けてください。



図 6-1 ダウンロードサイト

Visual Studio 2015 の Visual C++ 再頒布可能パッケージがインストールされていない場合、

<https://www.microsoft.com/ja-jp/download/details.aspx?id=48145>

から「vc_redist.x64.exe」「vc_redist.x86.exe」など自分の環境にあったプログラムをダウンロードし Visual Studio 2015 Visual C++ をインストールしてください。



図 6-2 ダウンロードサイト

② 準備

空撮したドローン画像（jpeg 画像）を一つのフォルダに格納します。この際、フォルダ名やパスに日本語やスペースなどが含まれないようにしてください。今回の事例では、「Flight1」というフォルダに、211 枚のドローン空撮画像を用意しました。

③ 実行方法

「FieldReconst.zip」を展開したフォルダの中に、「FieldReconst.exe」という実行ファイルがあります。ドローン空撮画像を格納したフォルダ「Flight1」を「FieldReconst.exe」の上にドラッグアンドドロップするとプログラムが実行されます。

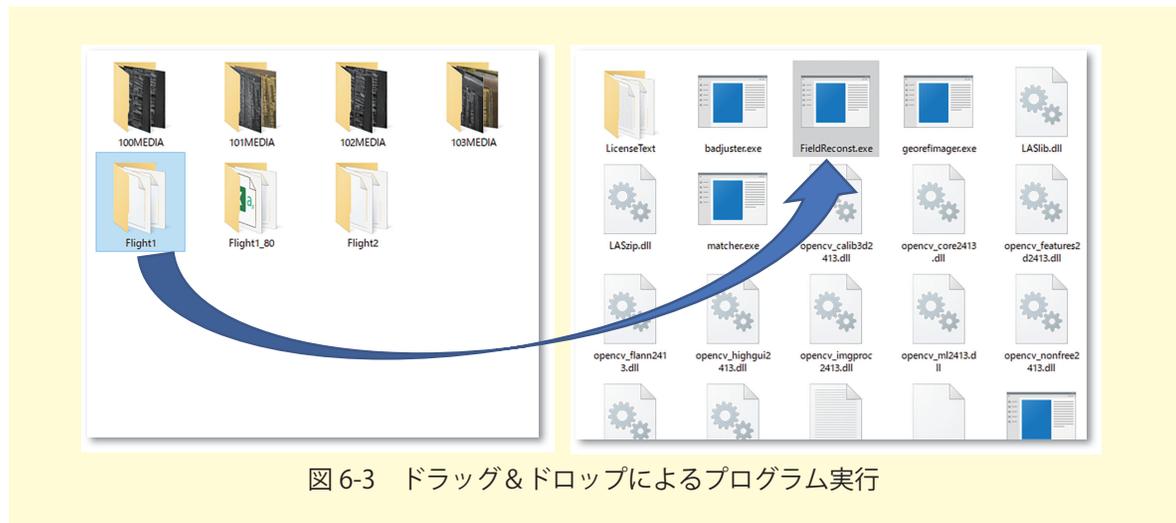


図 6-3 ドラッグ&ドロップによるプログラム実行

プログラムが正常に実行されると、自動的にコマンド画面と読み込んだドローン空撮画像が表示され、現在のプロセスが表示されます。画像の画面は読み込みが終わると消えますが、コマンド画面のみが残り計算プロセスが続いていきます。計算はパソコン、GPU の性能や画像数・質、事前準備ファイル（後述）などの条件により変化しますが、かなりの時間（数時間）を要します。

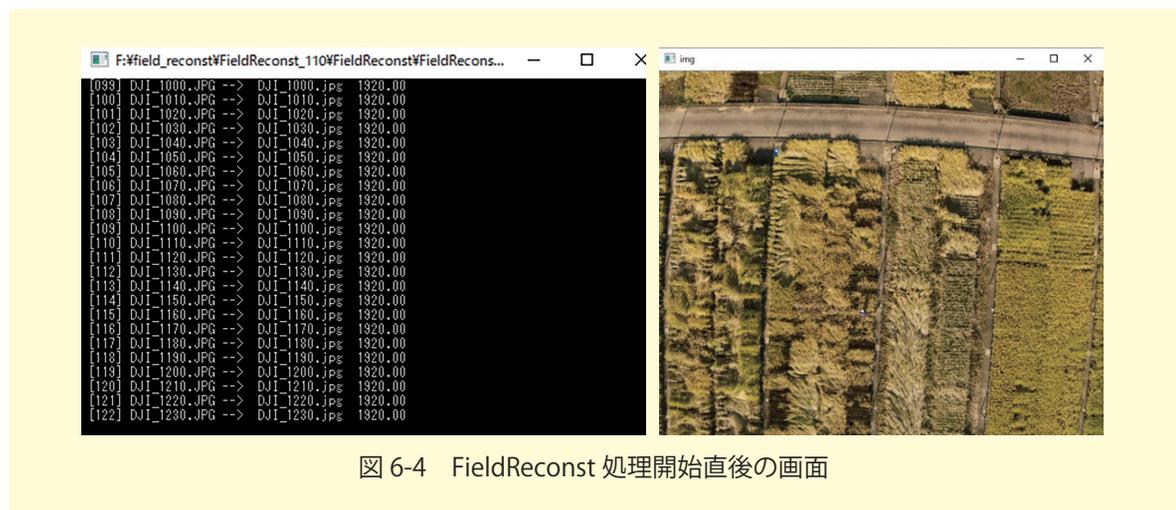


図 6-4 FieldReconst 処理開始直後の画面

④ 出力

計算が終了すると、ドローン空撮画像を入れておいたフォルダ「Flight1」に、「各画像のファイルネーム.key.bin」というファイルと、「timestamp.txt」「Pair_list.csv」「cam_info.yaml」「options.txt」「matches.init.txt」というファイルおよび「Tag_Georef」「PointCloud」「bundle」というフォルダができます。「Tag_Georef」のフォルダを開けると、生成されたDEM やオルソ画像、LAS データ関係のファイルがあります。

6.3 出力結果の確認方法

① CloudCompare による LAS ファイルの確認

「1 不陸計測の作業手順概要」の航空機 LiDAR データの説明で触れたように、点群データ (PointCloud データ) の業界標準データ形式として LAS データがあります。「Tag_Georef」フォルダ内にある、拡張子が「.las」となったデータが全体の点群データです。「PointCloud」フォルダには、各画像ペアの PointCloud データが入っています。

LAS ファイルの確認には、不陸編でも挙げた CloudCompare を利用します。

<http://cloudcompare.org/>

から、Download を選択し、Latest stable release (2.11.3 Anoaia) を環境に合わせてダウンロードし、インストールしてください。

The screenshot shows the CloudCompare website's download page. The 'Download' link in the navigation bar is circled in red. Below the navigation bar, the text 'Latest stable release (2.11.3 Anoaia)' is displayed. A table provides download links for different platforms:

	CloudCompare 2.11.3 installer version	CloudCompare 2.11.3 7z archive version	ccViewer 1.39 7z archive version
Windows 64 bits	(MD5: c43dbac7e2768c7d50b5dd47575a0787)	(MD5: 700f38cff87b81f868db8d55e04b446e)	(MD5: b435f71433a06b11b9540c43da912fdb)
Windows 64 bits Stereo (support for NVIDIA 3D Vision and Oculus Rift)	(MD5: 53b385a757468e6cd9db1177a1e0d6a2)	(MD5: 724ff39a2c8cb44cad5f53fd508de41d)	(MD5: 0188dd248093c853da01a0b6cf5269fd)
Mac OS 64 bits	Thanks to Andy Maloney, MacOS apps are available here		
Linux 64 bits	<p>Now thanks to Alberto Mardegan (and Romain Janvier), there is a "universal" snap package for Linux. On Ubuntu, starting from version 16.04 it's as simple as typing "snap install cloudcompare". On other distributions, you may need to install snap first (please refer to the corresponding documentation if necessary). Snaps are published in 3 channels: "stable", "beta", and "edge". The "stable" and the "beta" channel deliver the latest stable and beta versions of CloudCompare while "edge" delivers nightly builds and may eat your laundry. You can switch at any time between these three channels by launching "sudo snap refresh --channel name" in your terminal.</p>		

CloudCompare home - cloudcompare.org - EDF R&D - contact

図 6-5 ダウンロードサイト

読み込みのオプションが表示されますが、そのまま「Apply」を押します。

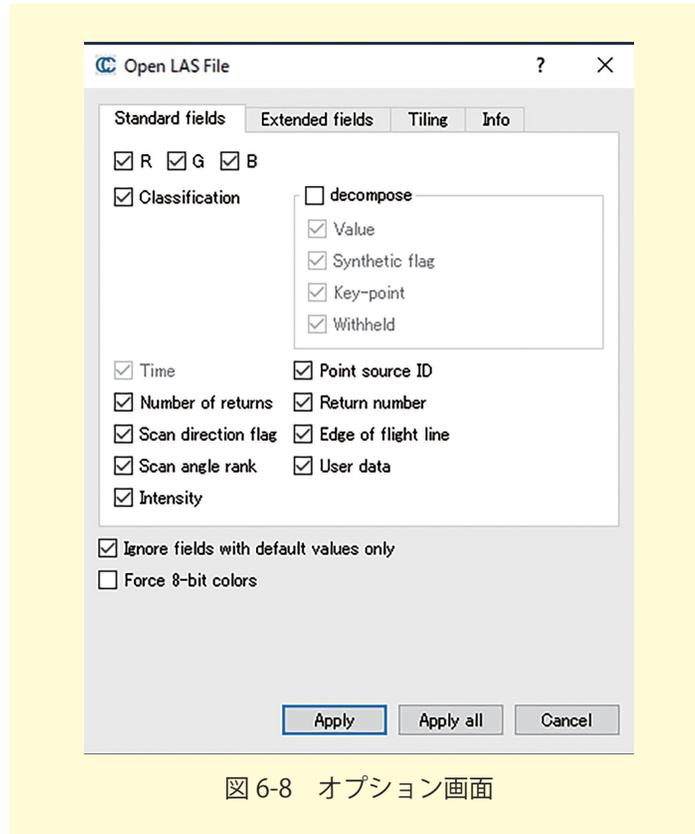


図 6-8 オプション画面

すると、Coordinates が大きすぎると表示されます。これは、CloudCompare が数mの小さなオブジェクトを表示することを念頭に作られているからです。ここでは、そのまま「Yes」を選択して座標変換を適用します。

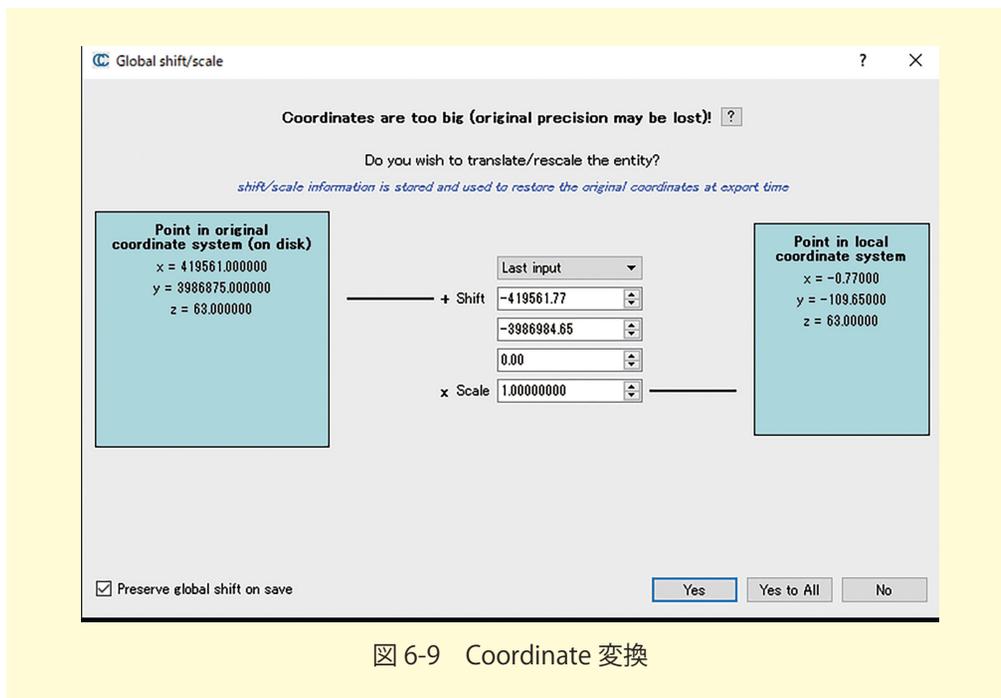


図 6-9 Coordinate 変換

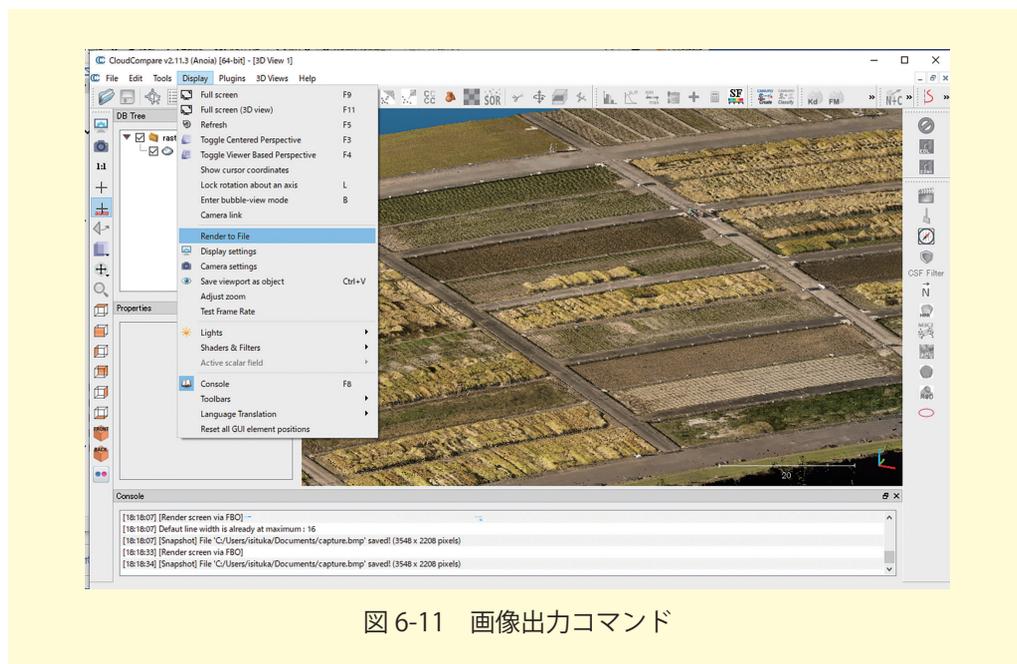
LAS データが読み込まれますので、任意の角度から 3 次元モデルを確認することができます。



左マウスドラッグでモデルの回転、右マウスドラッグで平面移動、マウスホイール（Shift + マウスドラッグ）でズームができます。

② CloudCompare 画像の出力

任意の角度を表示した状態で、「Display」→「Render to file」を選択します。



任意のファイル名、ディレクトリ、ファイルフォーマットを決定してください。
Zoom の値を大きくすると、出力サイズが大きくなります。「OK」を押下すると画面表示されている PointCloud データが画像として出力されます。

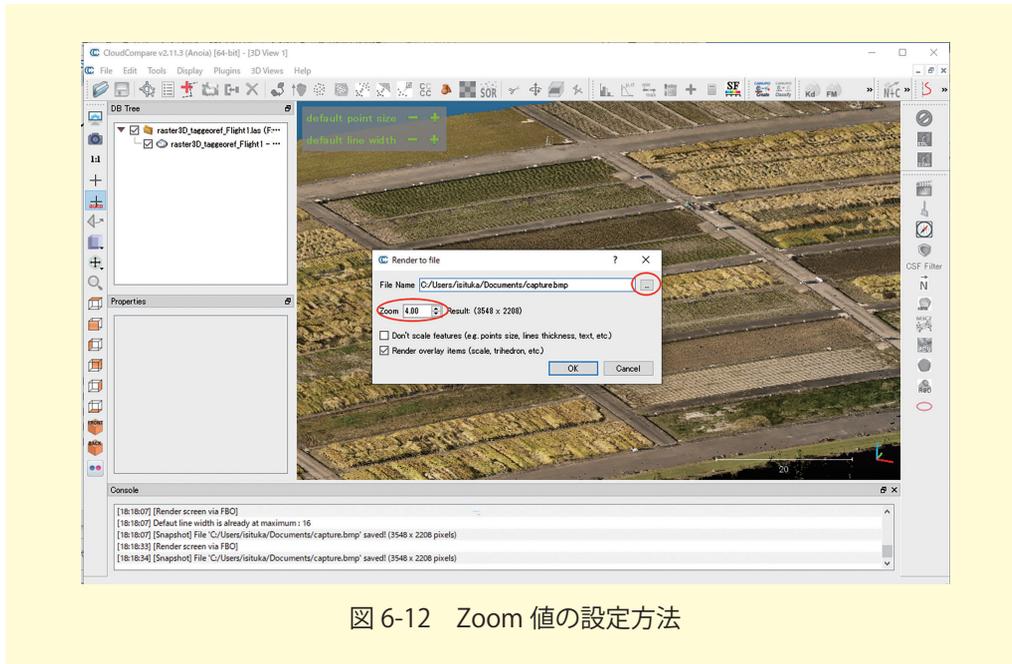


図 6-12 Zoom 値の設定方法

ただし、Zoom の値を大きくしても点群の各点のサイズはそのままであるので、Zoom の値のみ大きくすると点と点が離れたスカスカの画像が出力されます。これは画像を拡大した際も同様です。その場合、Zoom に合わせて、画面左上の「default point size」の「+」をクリックして点群の点を大きく表示することで隙間を擬似的に埋めることができます。

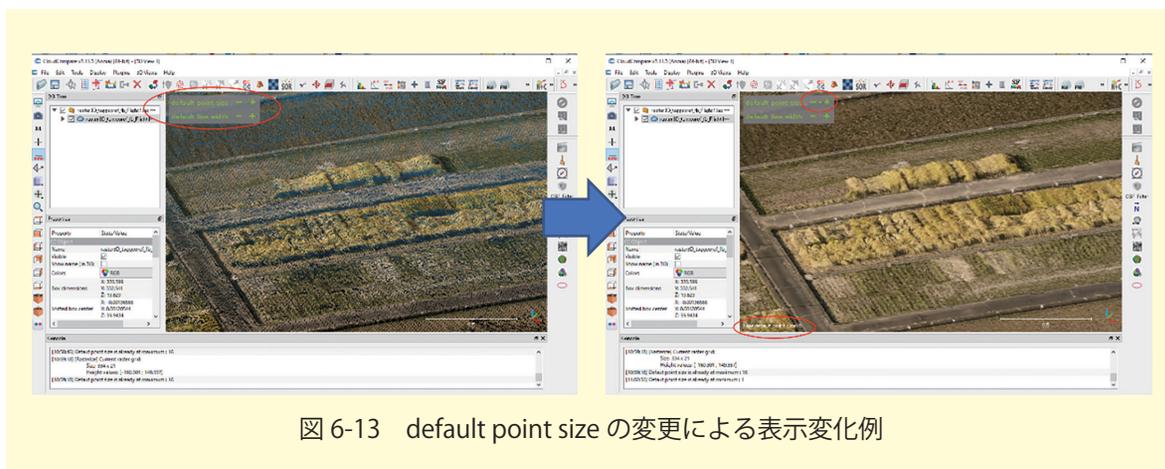


図 6-13 default point size の変更による表示変化例

③ オルソ画像の確認

オルソ画像としては、「orthoimage_taggeoref_fb_フォルダ名」「orthoimage_taggeoref_フォルダ名」という2つのファイル名のjpg画像とTiff画像があります。計算の結果、画像間の対応点が見つけれず、3次元再構成がうまくいかない部分が発生することがあります。そのような部分は生成されるオルソ画像の中で空白のピクセル（データが無いピクセル）となってしまう、黒くなっています。「fb」がついたファイルは「fill blank」という処理を行い、空白ピクセルを周辺のピクセルで空間補間しているため、少しだけ見た目が良くなっています。ただし、欠損を補間した箇所についてはデータが無いというのが正しいため、「fb」は解析には用いないようにしてください。

ここでは、QGIS Ver3.16を用いた説明を行います。QGISを起動し、新規プロジェクトをクリックして開いてください。

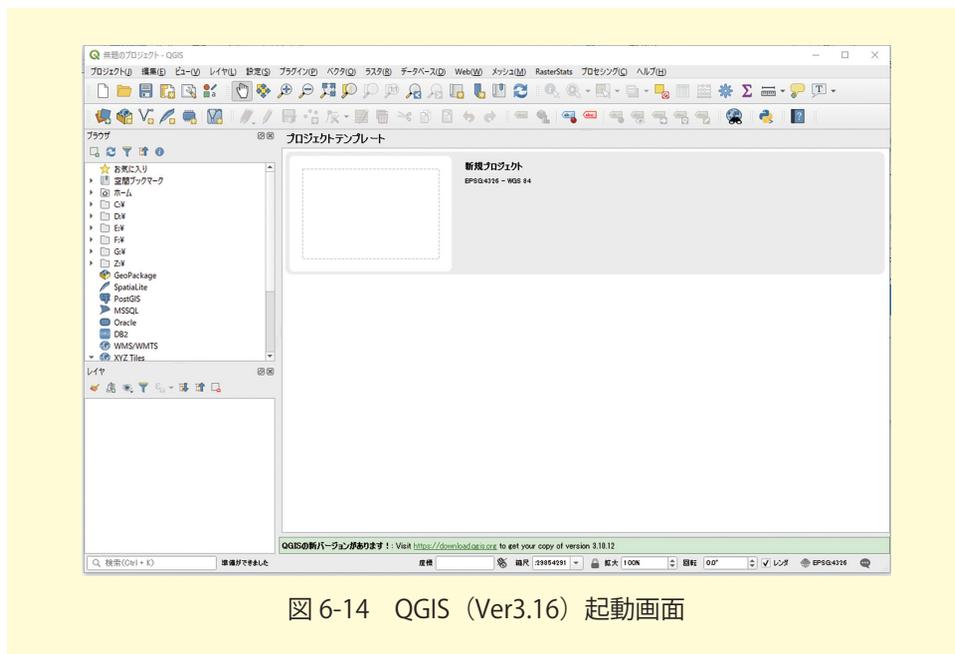


図 6-14 QGIS (Ver3.16) 起動画面

ブラウザから「XYZ Tiles」→「OpenStreetMap」をダブルクリックし、画面に地図を表示してください。最初は世界地図になります。

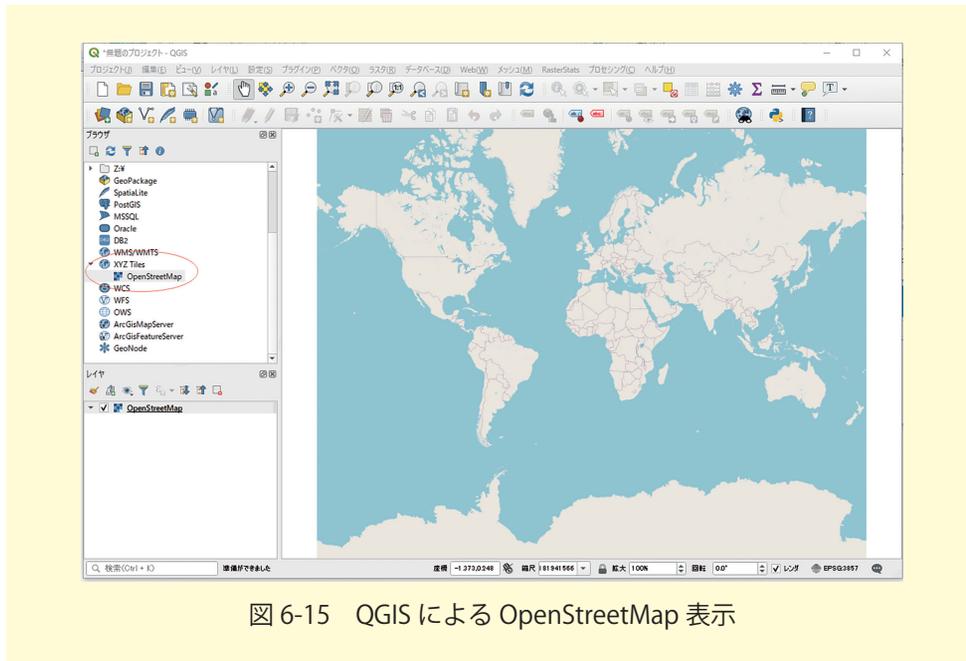


図 6-15 QGIS による OpenStreetMap 表示

※ 「XYZ Tiles」 のところで右クリックし、「新しい接続」を選択し、URL に <https://cyberjapandata.gsi.go.jp/xyz/std/{z}/{x}/{y}.png> を入力すると、地理院地図を利用することも可能となります。

撮影した付近に地図をズームアップします。生成された GeoTiff 画像「orthoimage_taggeoref_fb_flight1.tif」をレイヤに追加（ドラッグ&ドロップ）します。

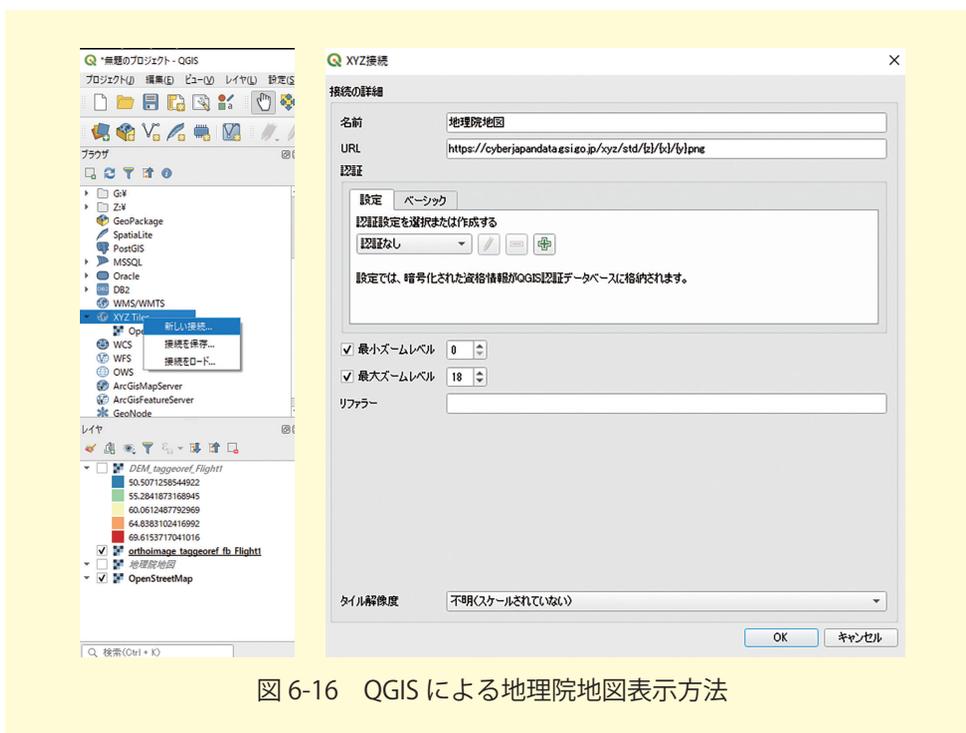


図 6-16 QGIS による地理院地図表示方法



図 6-17 ドラッグ&ドロップによるオルソ画像の表示

④ DSM データの確認

次に、DSM データを確認してみます。FieldReconst 内では DSM データは DEM と呼ばれています。「DEM_taggeoref_Flight1.tif」を同じくレイヤにドラッグ&ドロップして追加してください。

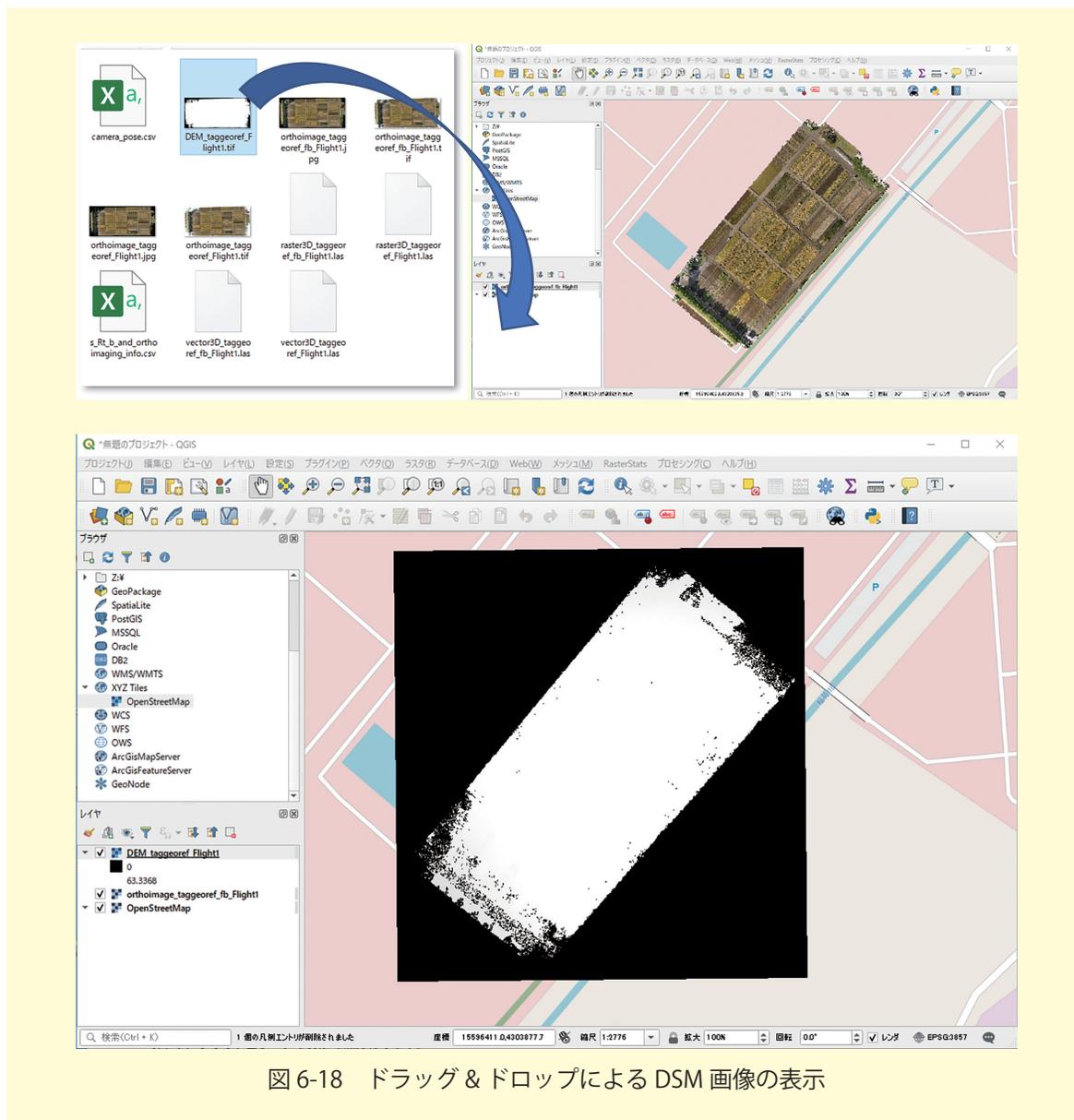


図 6-18 ドラッグ & ドロップによる DSM 画像の表示

背景として0が入っていますので、背景を消します。レイヤのDEM画像を右クリックし、「プロパティ」を選択します。

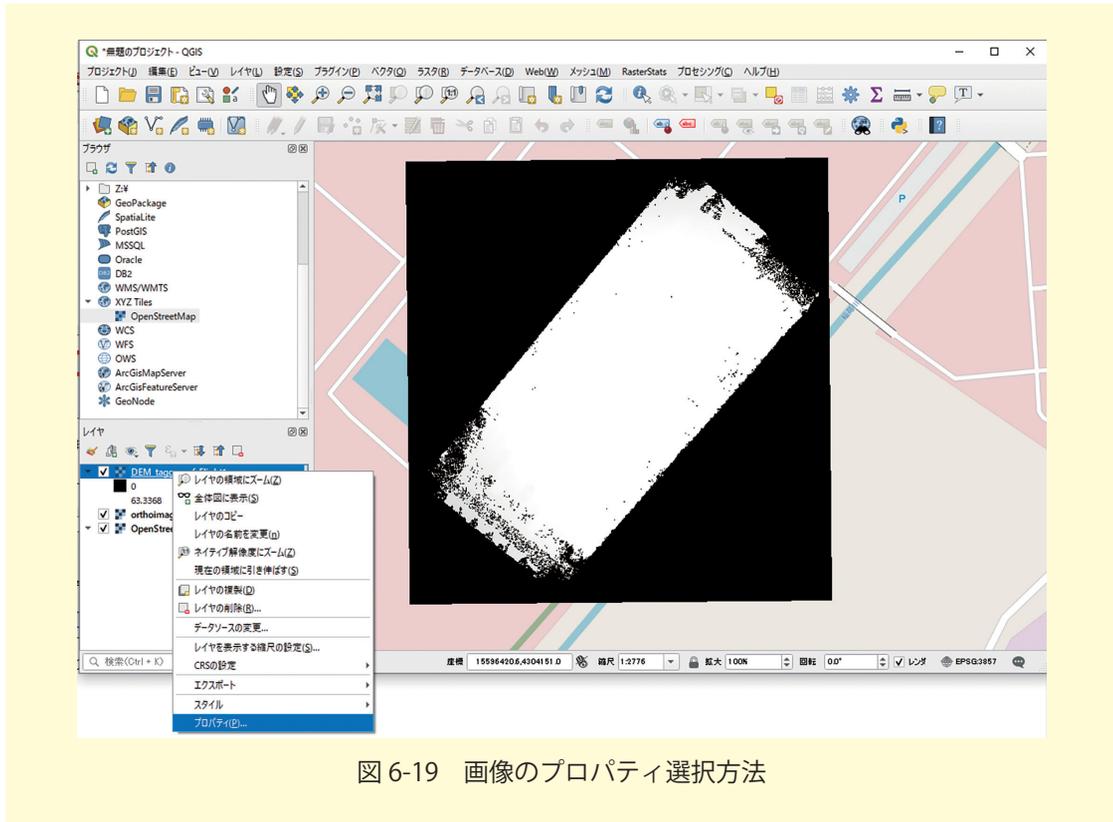


図 6-19 画像のプロパティ選択方法

透過性のタブを選択し、「nodata 値」に背景となっている「0」を入れてください。

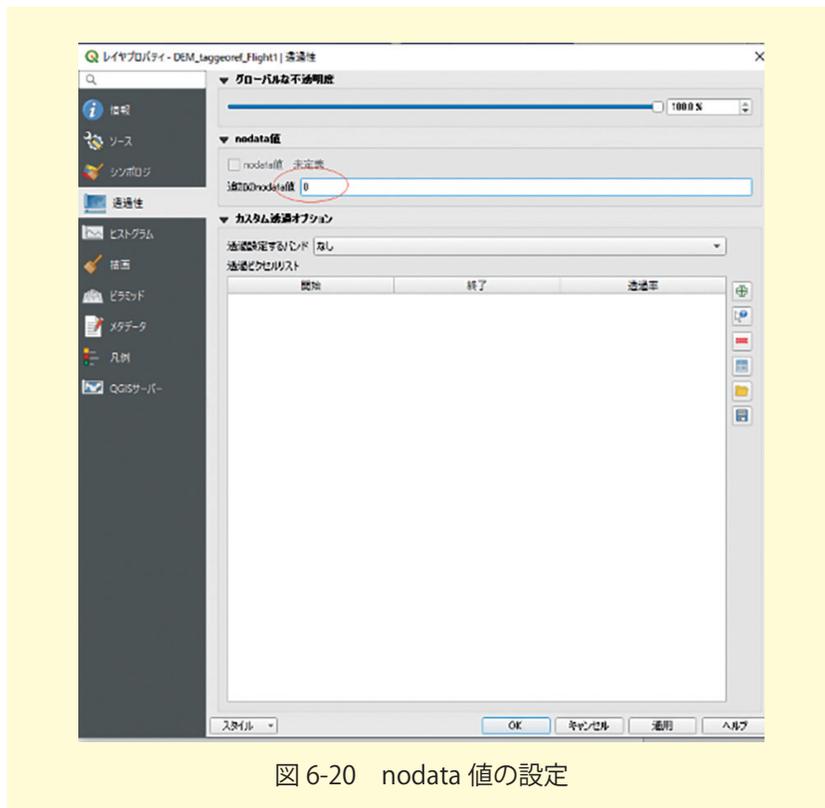


図 6-20 nodata 値の設定

背景として入っていた 0 が取り除かれます。

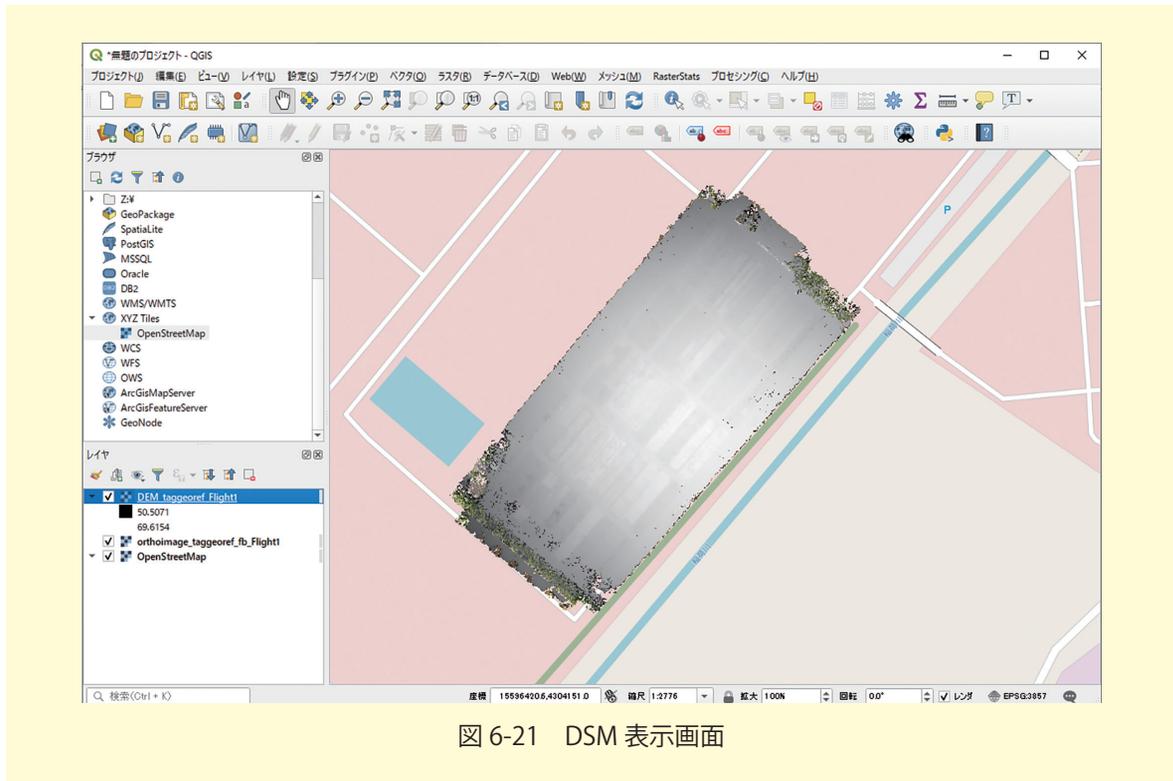


図 6-21 DSM 表示画面

この時点では、DSM がグレースケールで表示されています。場合によっては、擬似的にカラーにしてみてください。先ほどと同様に、レイヤの DSM 画像を右クリックし、「プロパティ」を選択します。今度は、「シンボロジ」のタブを選択して、レンダリングタイプを「単バンド疑似カラー」にします。カラーランプに「Spectral」を選択しますが、このままだと低い値の方が暖色系になってしまいますので、右端の下向三角形を選択して「カラーランプを反転」を適用してください。

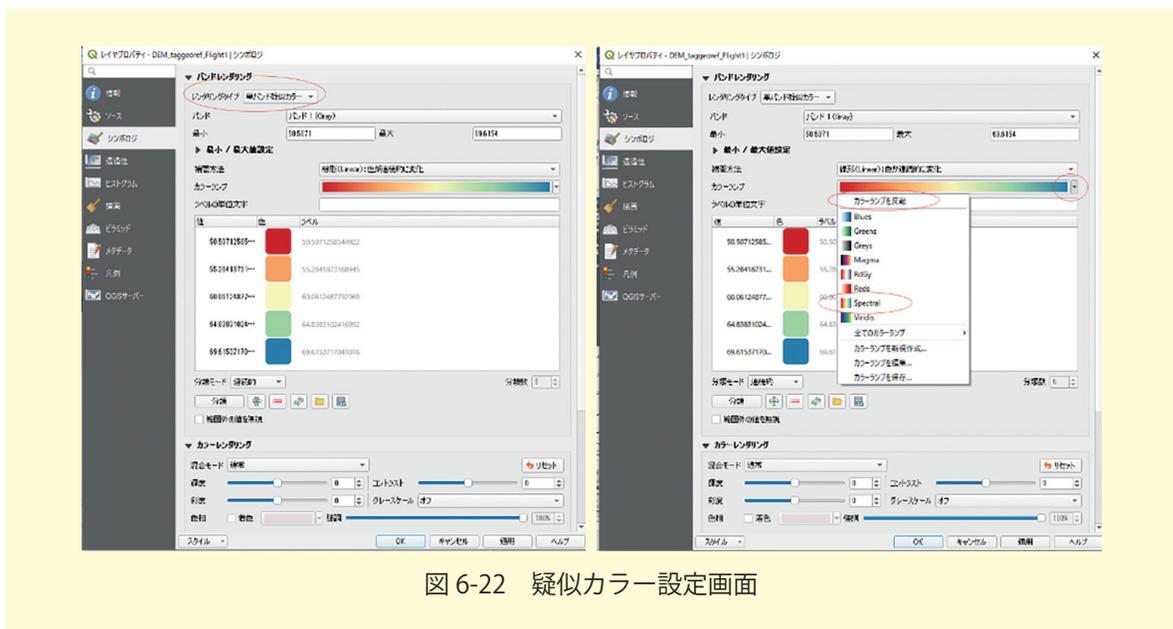


図 6-22 疑似カラー設定画面

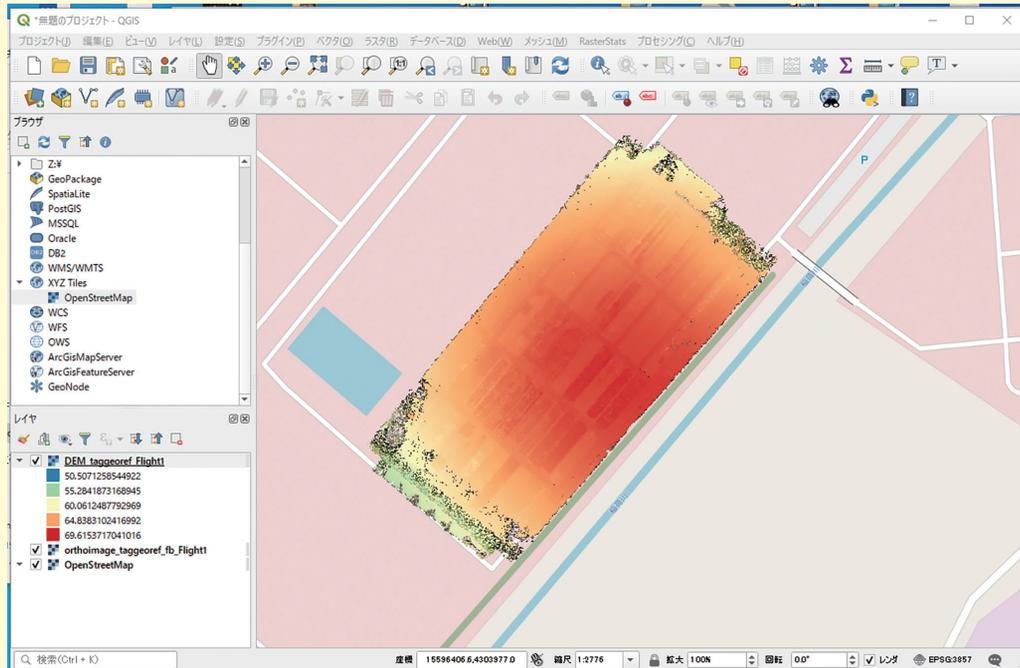


図 6-23 DSM の疑似カラー表示

DSM レイアの マークを on/off することで表示 / 非表示を切り替えることができます。拡大してみると、水稲の残っている部分と残っていない部分で DSM の高さが違うことがわかります。このように、地表高以外の高さの違いについても知ることができます。

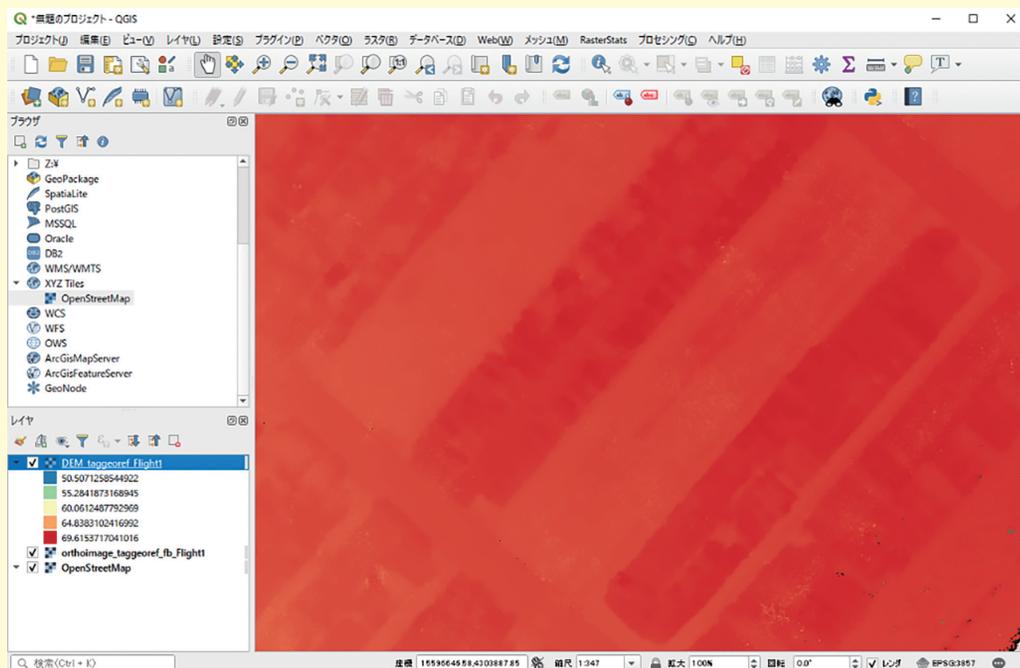


図 6-24 DSM 表示

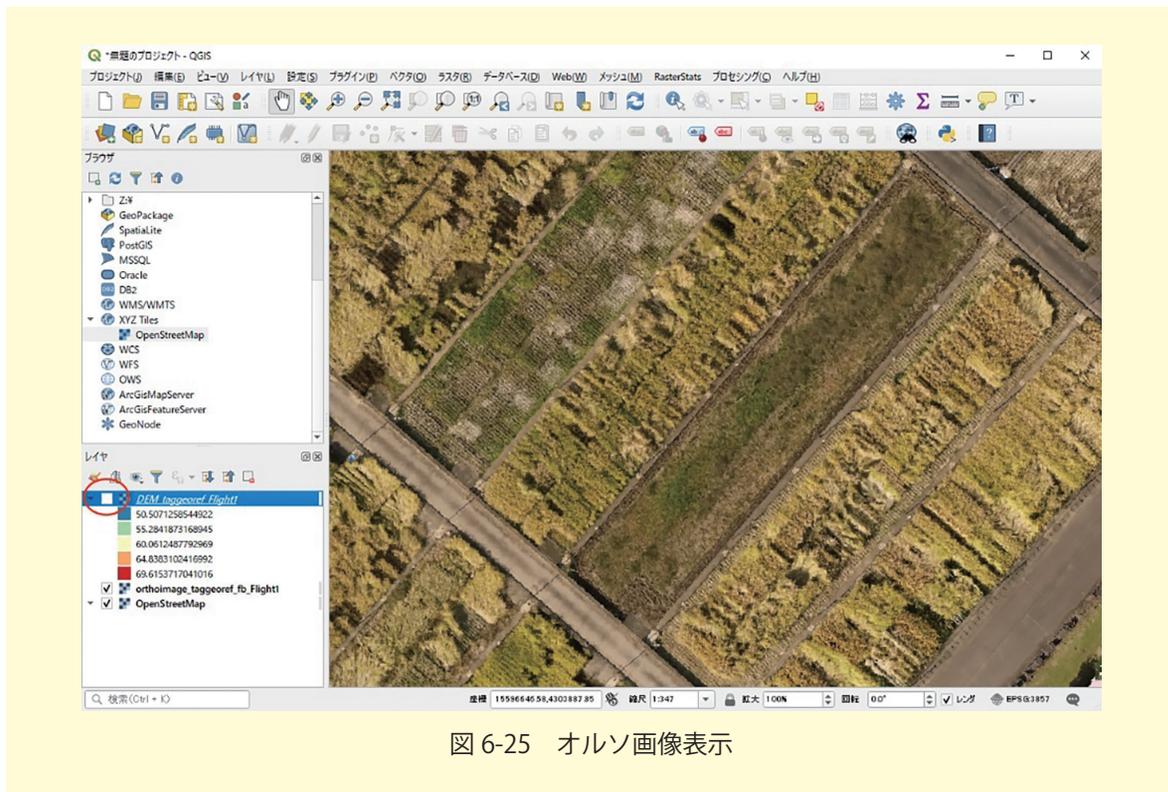


図 6-25 オルソ画像表示

これで、「4. Agisoft MetaShape Professional による地表高データの作成」で説明した DSM データが作成された状態になります。このデータを用いてこのマニュアルの「5.QGIS による不陸量の算」に進めば、不陸量の算出や地表面と水稻が残っている部分の差から植生の高さなどを算出することができます。

6.4 GCP の利用（オプション）

DSM データの全体図を見ると、ドーム効果（実際には平坦であるにもかかわらず、DSM データの中央付近が盛り上がってしまう現象）が出てしまっていることが分かります。回避する方法は斜め撮影画像を混ぜる等いくつかありますが、その一つは、地上基準点（Ground Control Point, GCP）を利用することです。つまり、既知の座標値を教えてあげることで位置のズレを小さくしていく方法です。

このマニュアルの「3. 地上基準点（GCP）の測量」では、レベル測量を行って高さ方向の補正を行う方法と、地理院地図を利用して座標と標高値を取得する方法を示しています。また、「小型 GNSS 受信機を用いた高精度測位マニュアル（ドローン用対空標識編）」では、高精度 GNSS を用いて地上基準点の測位値を取得する方法について説明しています。

① GCP 用対空標識の設置

今回のようなドーム効果を小さくするためには、「3. 地上基準点（GCP）の測量」の地上基準点の選定の部分で述べたように、周辺を囲むように配置するだけでなく、盛り上がり易い内

部、盛り下がり易い外側、高低差の大きい部分、などに設置する必要があります。

FieldReconst では、事前に既知の GCP をファイルとして用意することで、処理時に自動的に読み込み、処理をすることができます。ドローン空撮時の GCP は対空標識と呼ばれます。詳しくは「小型 GNSS 受信機を用いた高精度測位マニュアル（ドローン用対空標識編）」を参照してください。FieldReconst では、白黒の四角の対空標識のみに対応しています。



図 6-26 FieldReconst に対応する対空標識の例

② GCP 用設定ファイルの準備

FieldReconst における GCP 設定ファイルは、FieldReconst の HP のテスト用画像、画像データ 2 の中に「2018_B2_01_UTM_3cm.gcp」という名前が入っています。これをベースに自分の画像用に修正します。

```
#2018_B2_01 圃場マーカー座標 (2018 年 6 月 25 日測量) ,,,
#NumOfGCP,Coordinate system,Zone if UTM,North of South
8,UTM,54,North                                     ←緯度経度の場合 WGS84
    UTM-Easting [m], UTM-Northing[m], Altitude[m], ←緯度経度の場合 degree
669335.7774,4750348.939,96.01913008,
669336.8934,4750352.53,95.91680412,
669339.5627,4750357.723,95.85154286,
669342.279,4750363.235,95.77198592,
669291.7484,4750383.662,96.18410526,
669289.3743,4750379.075,96.31205,
669288.2718,4750376.769,96.36876344,
669285.5024,4750369.976,96.51365891,
#LocalOrigin X[m] Y[m] Z[m],,,Remove '#' from lines-14,16 and 18 if you want specify the
range for orthoimage.
#669270.65,4750364.75,85,
#Rotation angle of Local Coordinate system [deg],,,
#-22,,,
```

```
#LocalWidth[m],#LocalHeight[m],#LocalDepth[m],
#78.3,35,20,
#Resolution [m/pixel],,, ←ここで設定する解像度は出力画像の解像度
0.03,,,
```

③ 処理方法

「.gcp」ファイルは撮影画像と同じフォルダに格納しておく、プログラム開始時に、gcp ファイルを使うかどうか聞かれますので、「y」を入力してエンターキーを押してください。FieldReconst では白黒の四角の対空標識のみに対応しており、画像中から自動的に検出を行い gcp ファイルの値を適用します。



図 6-27 GCP ファイルの利用有無の選択

ただし、対空標識と似たパターンが画像中にある場合、間違えて抽出することがあります。

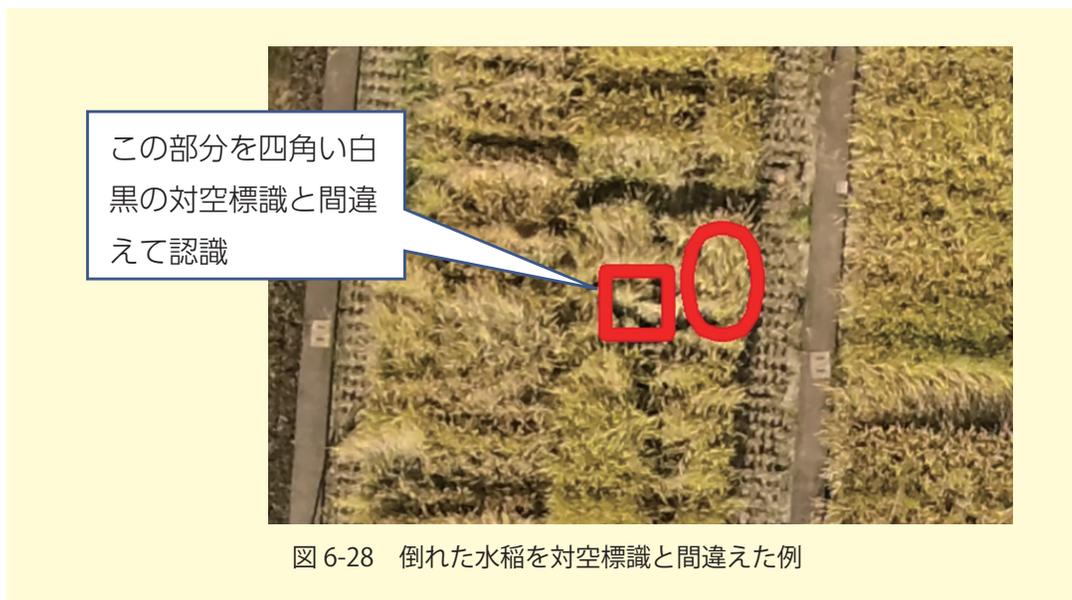


図 6-28 倒れた水稻を対空標識と間違えた例

事 例 集

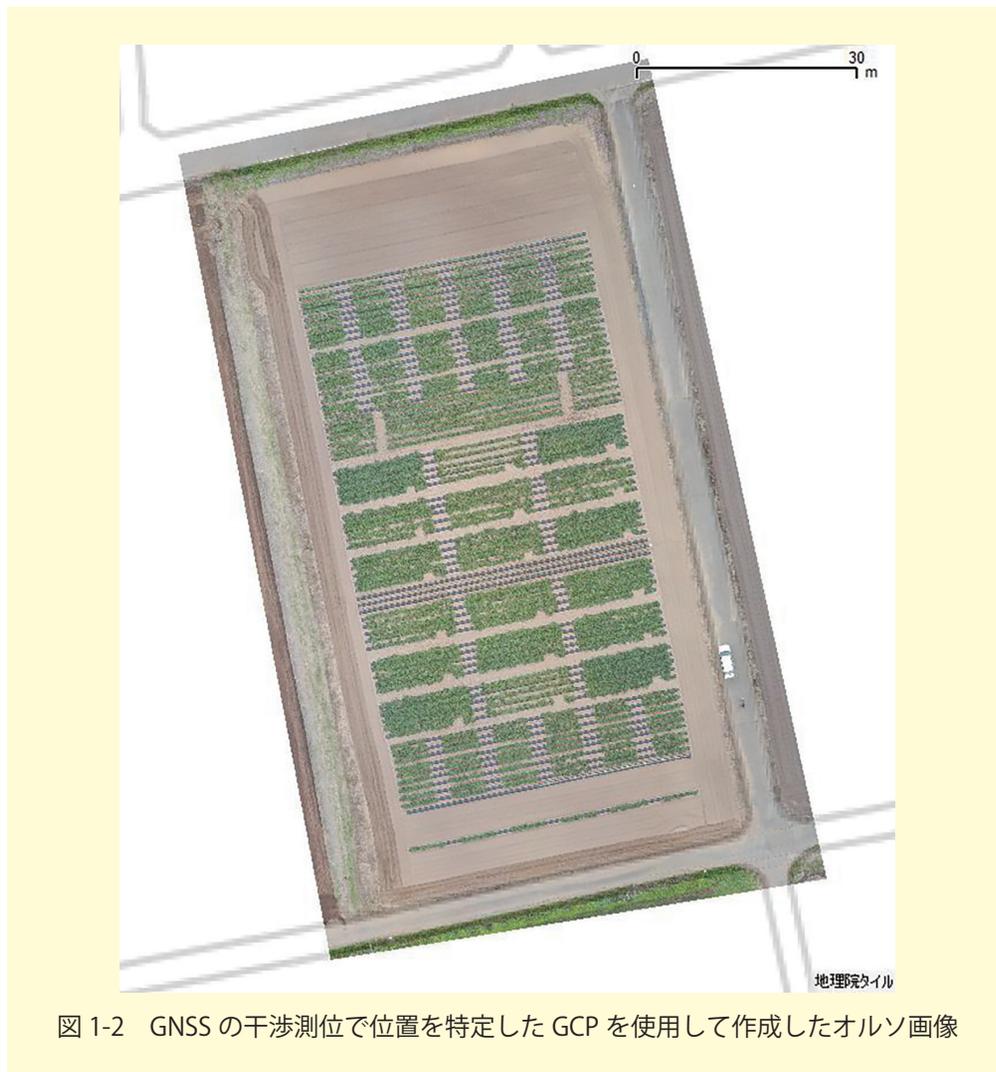
1 ドローンと RTK-GNSS 受信器利用による位置精度の向上

ドローンを用いて計測を行う際に高い位置精度が必要なケースとしては、時系列で同じ場所を計測してその変化を観測する場合や、GISなどで他のデータと重ねる場合が挙げられます。ドローン画像は空間解像度が高いため、本体に搭載されたGNSS受信機の単独測位精度では前述の解析を行うには不十分となります。

図1-1はドローンに搭載されたGNSS受信機の単独測位精度でSfM,MVS処理を行いオルソ画像を作成し、公表されているGISデータと重ねたものです。GISデータにおける道路とドローン画像の道路にズレが生じているのがわかります。一方、図1-2は、RTK-GNSS測位による位置情報をGCPとして用いて作成したオルソ画像をGISデータと重ねたものです。こちらの画像では、ドローン画像の道路と、GISデータの道路が重なっていることがわかります。この事例では道路に注目していますが、圃場のポリゴンデータなどと重ねる場合に位置精度は重要となります。



図 1-1 ドローン搭載の GNSS 測位データのみで作成したオルソ画像



次の事例はドローンに RedEdge-M というマルチスペクトルカメラをドローンに取り付け、2019年7月8日に撮影したデータから NDVI (Normalized Difference Vegetation Index ; 正規化植生指数)^{*13} を算出したものです。GCP を使ったものが図 1-3 使わない場合が図 1-4 となります。こちらの事例ですと、GCP を使わずにドローンの単独測位データのみで位置を求めると、約 3.3m の位置にズレが生じていました。

^{*13} $(NIR-R)/(NIR+R)$ で計算され (NIR は近赤外域の反射率, R は赤の反射率), 理論的には -1 から 1 の間の値をとる。値が大きいほど 植生の量が多いまたは生育が良いと判断されます。



図 1-3 小型 GNSS 受信機を用いて干渉測位した位置情報を使用して作成したオルソ画像

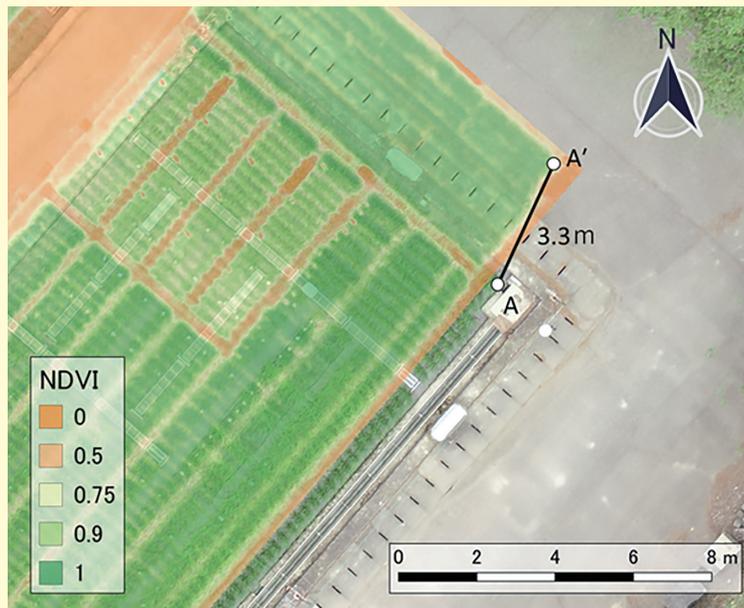
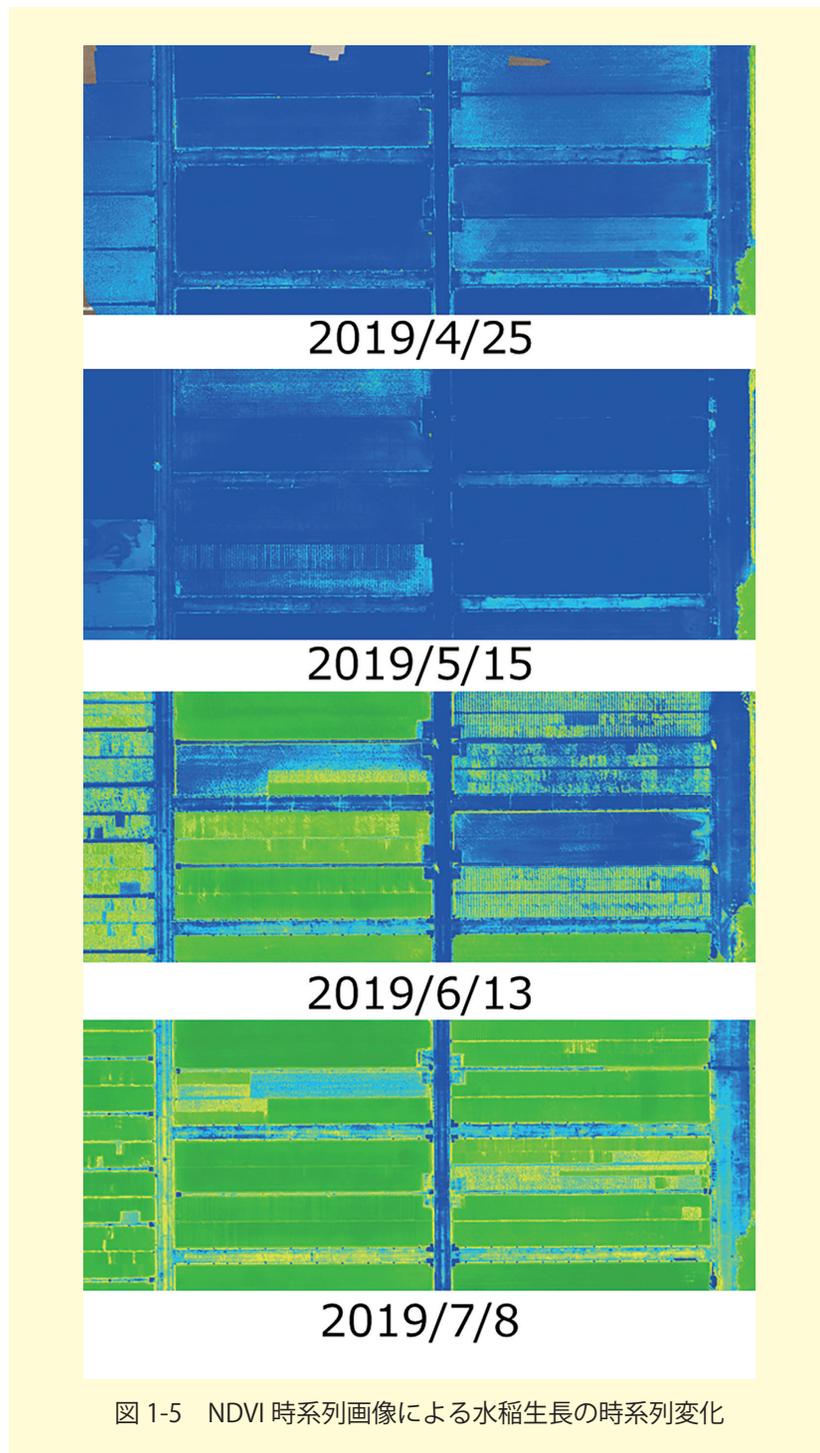


図 1-4 ドローン搭載の GNSS 測位データのみで作成したオルソ画像

時系列データの比較や、変化抽出を行う際にも、位置精度は重要となります。ドローン空撮画像は高空間解像度を有しているため、少しの位置誤差が大きな差となってしまいます。仮に空間解像度が 10cm の画像だとすれば、位置ずれが 5cm でも半ピクセルずれることになり、10cm あると違うピクセルを参照することになってしまいます。上記の事例のように、3m もズレがあると、時系列で同じ位置の作物を比較することができないことになります。

図 1-5 は RTK-GNSS を搭載した DJI 社の Phantom4RTK を用い、さらに GNSS 受信機内蔵型対空標識（詳しくは「小型 GNSS 受信機を用いた高精度測位マニュアル（ドローン用対空標識編）」^{※14} を参照してください）を組み合わせ、試験圃場で水稻を時系列で計測し NDVI 画像に変換したものです。各画像が高い位置精度を有しているからこそ、このような時系列解析ができ、水稻の生長をモニタリングすることができます。



※14 https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/130441.html

2 ドローン空撮画像による水稲生育観測事例

農研機構の実験圃場で栽培している水稲の草高と、ドローン空撮画像を比較した事例を紹介します。

実験圃場は水稲が作付けしてあり、施肥（元肥）を窒素換算で0kg から1kg, 2kg, 4kg, 6kg, 8kg と変化をつけて6区画に分かれています。使用したドローンはDJI社のPhantom 3 Standardです。ドローンのスキット部分にPanasonic製のウェアラブルカメラHX-A1Hに近赤外線フィルタを取り付けたものを結束バンドで取り付け、近赤外動画を撮影できるようにしています。撮影は2018年の8月30日にマニュアルで行っています。同日の撮影直後に、各区画毎の水稲の草高をメジャーで5回計測し、平均値を算出しました。

取得されたドローン本体のカメラの画像をMetashapeで処理し、オルソ画像にしたものは図2-1です。一方、ウェアラブルカメラで撮影した近赤外動画から、実験圃場付近を切り出したものが図2-2です。

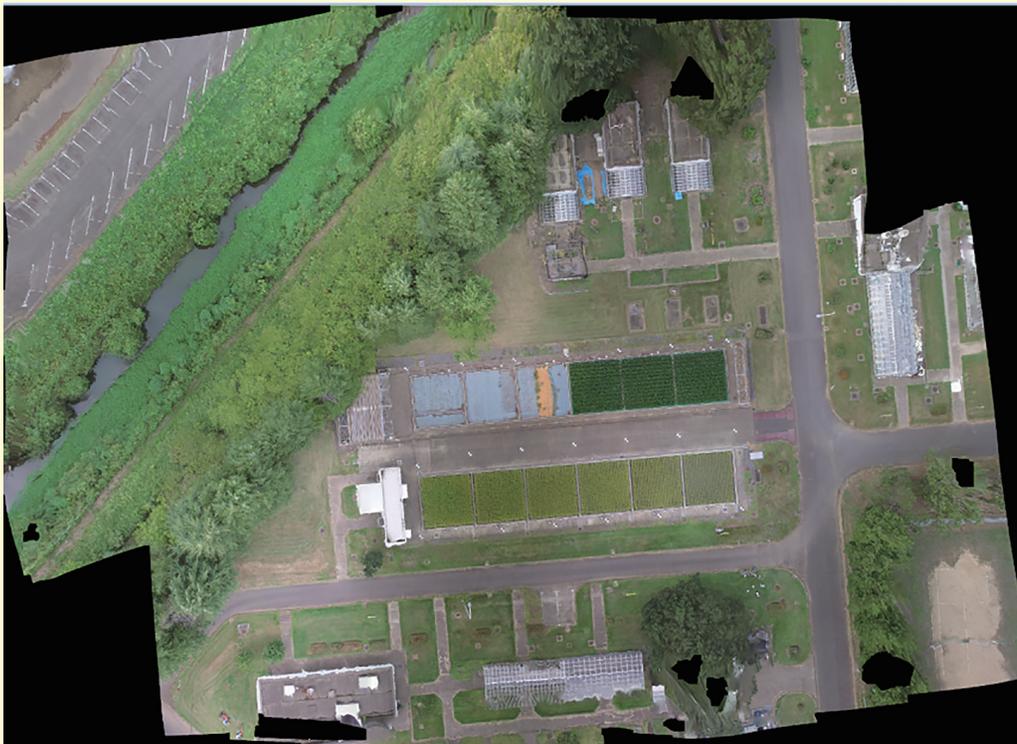


図 2-1 ドローン搭載カメラ画像で作成したオルソ画像

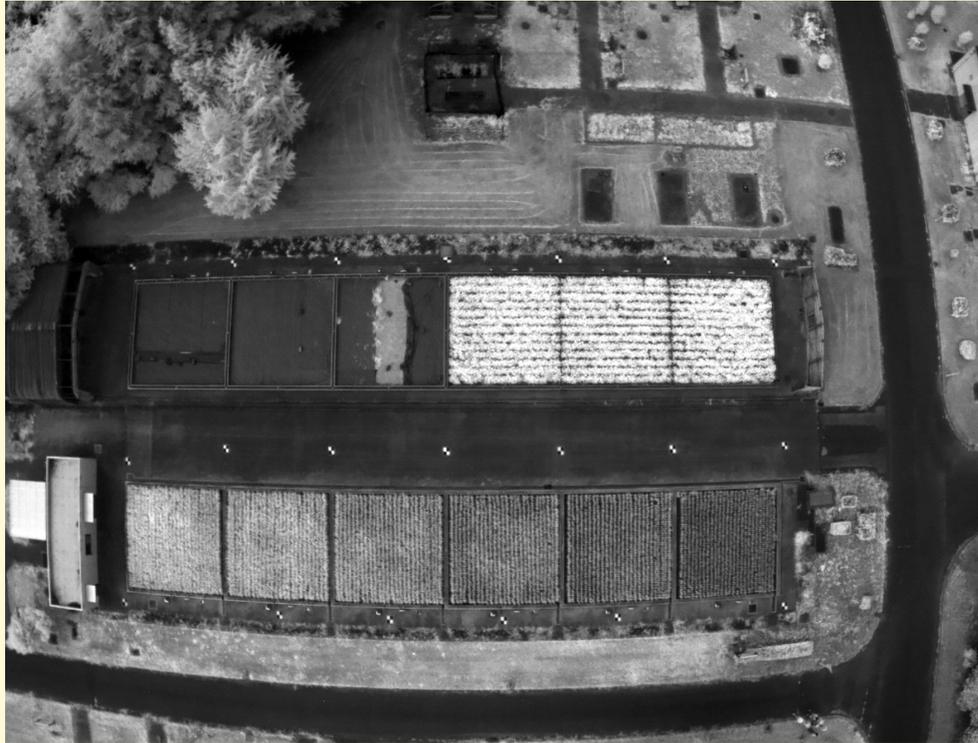


図 2-2 ウェアラブルカメラの近赤外動画から対象圃場付近を切り出した図

図 2-1 のオルソ画像から対象となる水田部分を切り出したものが、図 2-3 です。



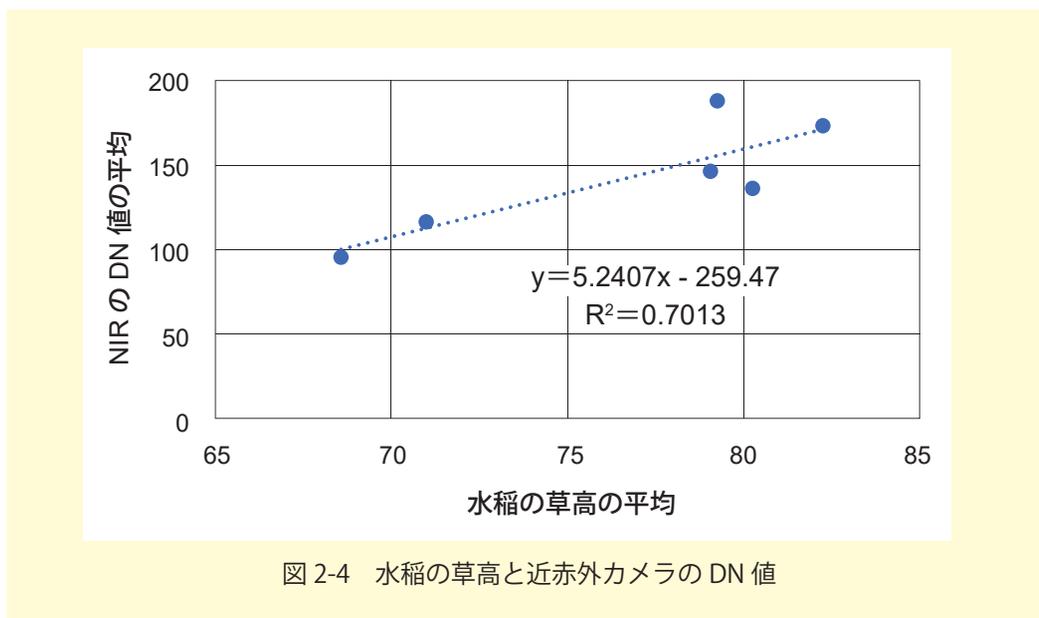
図 2-3 可視光画像

図 2-3 でも施肥量に応じて右から左に生育が良くなっていることがわかります。しかし、先に挙げた図 2-2 の近赤外画像の方が、より明確に差が出ていることがわかると思います。そこで、近赤外画像から画像の DN 値を読み取り平均値を求めました。その DN 値と草高の平均値を圃場毎にまとめたものが次の表です。

表 1-1 計測値

圃場	水稻の高さの平均 (cm)	NIR の DN 値の平均
1	68.6	95.4
2	71	116.4
3	80.3	136.2
4	79.1	146.6
5	82.3	173.6
6	79.3	188.8

この結果をグラフにし、直線回帰してみると次のようになります。



簡易的な近赤外カメラですが、 $R^2 = 0.7$ という数字が得られました。反射板などを利用して反射率に変換する、背景の水面の影響を除くなどすれば、より高い精度を得ることができると思われます。

ドローンによる空撮画像は、飛行高度によりますが、一度にある程度の範囲を一度に取得することができます。これは、言い換えると、1枚の画像の範囲は時間差の無い観測を行っているということになります。例えば、圃場の中を数点地上計測するなら、

$$1 \text{ 点あたりの計測時間} \times \text{計測数} + \text{移動時間}$$

が必要となります。1点あたりの計測時間が長かったり、点数が増える、圃場が大きになると、最初の計測地点と最後の計測地点では、計測時刻が変化するということになります。その間に対象が変化しない事象であればよいですが、通常は何らかの時間変化が発生してしまいま

す。空撮をはじめとしたリモートセンシングの利点の一つが、この「同時性」になります。今回計測した水稻の草高は時間で変化しない事象ですが、近赤外線画像との関係を見ようとした場合、地上で計測していれば、時刻により光環境は変化してしまいます。それに対し、ドローン空撮画像であれば、同時性があるため、同一画像内は同じ光環境であったと考えることができます。

3 衛星画像とドローンを組み合わせた事例

ここでは、衛星観測とドローン観測を組み合わせた事例を紹介します。何をターゲットにするかにより組み合わせ方は変わりますが、ここでは仮に圃場内のムラの大きい圃場を探し出し、圃場内のムラに合わせた可変施肥を行うための情報を得ることをタスクとして考えてみましょう。

図 3-1 は、とある地域で 2018 年 7 月 14 日に撮影された Planet 衛星画像^{*15} に、農林水産省において公開している圃場の筆ポリゴンデータを重ね合わせたものです。



図 3-1 衛星画像による広域多数の圃場を概観

Planet 衛星画像は空間解像度が直下視で約 3.7m となっており、ドローンよりは劣っています。しかし、図 3-1 に示した範囲だけでも約 1.2km × 2 km あり、回転翼ドローンで全ての圃場を撮影するにはかなりの労力と時間、つまりコストを必要とします。さらに、ドローンでこの範囲を観測することは不可能ではないものの、同時に観測することは不可能であり、観測する間に太陽高度・角度、雲および雲影、等が変化したデータが異なるデータが混在することとなります。ですので、この範囲の多数の圃場をドローンで同じ条件で計測し、比較することは出来ないということになります。

一方、後で示しますが、衛星画像から圃場内のムラをはっきりと知るためには、もう少し高

^{*15} Planet 社が提供している衛星画像。Dove と呼ばれる重量 5kg 程度の超小型衛星を 100 機以上軌道に投入することにより、ほぼ毎日撮影を可能としている。

い解像度が必要となります。そこで、衛星画像から圃場内のムラの大きな圃場を探し出し、そのような圃場のみドローンで詳細観測をして可変施肥の設計図にするというシナリオが考えられます（ムラが小さい圃場は可変施肥は必要ないという判断にもなります）。

3.1 筆ポリゴンデータ

筆ポリゴンデータは平成31年7月から農林水産省統計部においてオープンデータとして公表・配布されている、衛星画像等をもとに筆ごとの形状に沿って作成したほぼ全国の圃場ポリゴンデータです。フォーマットはシェープファイルとなります。属性としては地目としての田と畑が入っており、現在は、全圃場にユニークIDが付与されています。

<https://www.maff.go.jp/j/tokei/porigon/index.html>

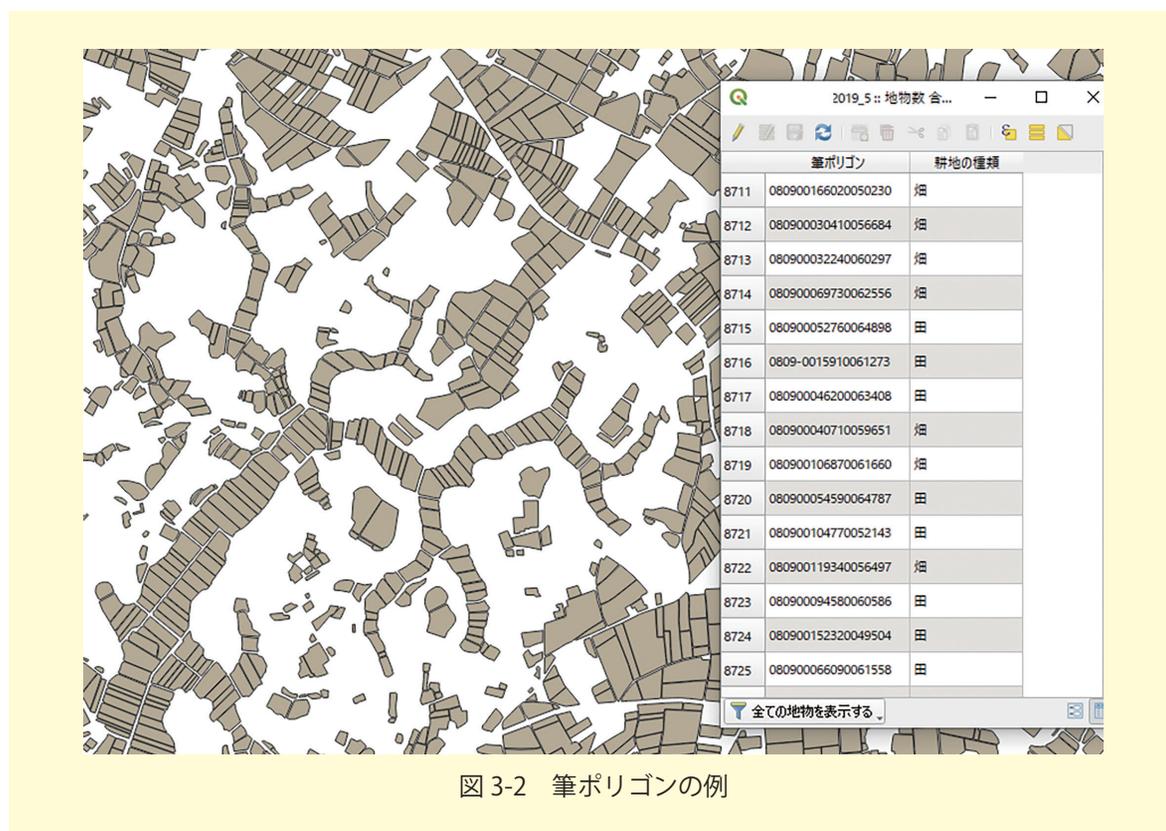


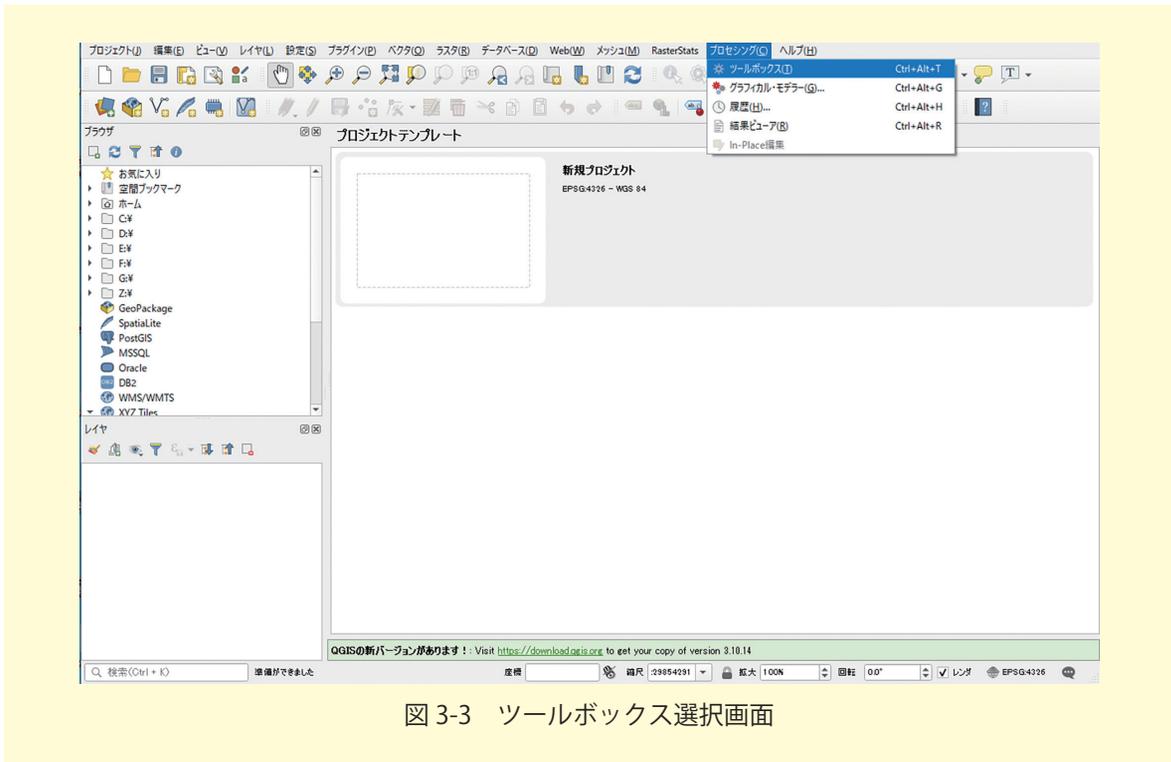
図 3-2 筆ポリゴンの例

3.2 スクリーニング手順

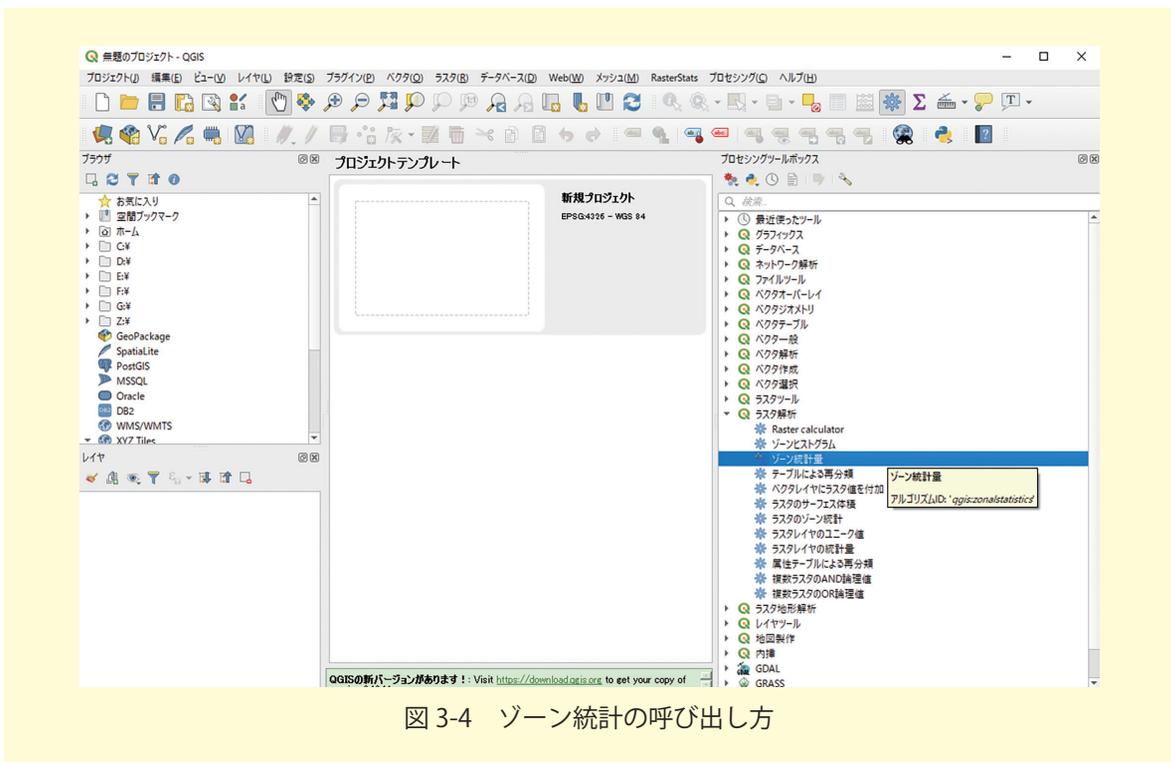
① ツールの立ち上げ

この衛星画像の近赤外線バンドの値を、筆ポリゴンデータを用い、圃場毎に標準偏差、最小値、最大値、分散を集計します。ここでは QGIS のゾーン統計量ツールを利用します。

「プロセッシング」→「ツールボックス」を選択します。



「ラスタ解析」→「ゾーン統計量」を選択するか、検索ボックスに「ゾーン統計量」と入力してください。



② 解析データの設定

表示されたウインドウで、「ラスタレイヤ」には利用する衛星画像を設定します。「対象バンド」は、今回は植生に大きな反応を示す近赤外線バンド、この Planet 衛星では「バンド 4」を選択します。「分析ゾーンのベクタレイヤ」には、対象地の圃場ポリゴンを設定します。「出力するカラムの接頭辞」には、初期設定で「_」が設定されています。このままでも構いませんが、後で何のデータであったかわからなくなりますので、今回は衛星の観測日「714」とバンド 4 を集計したことがわかるように「b4」を組み合わせ「714b4_」としました。接頭辞は長すぎると、後に続く項目の字数が減ってしまい、今度は項目がわからなくなってしまうため、5文字程度に抑えてください。

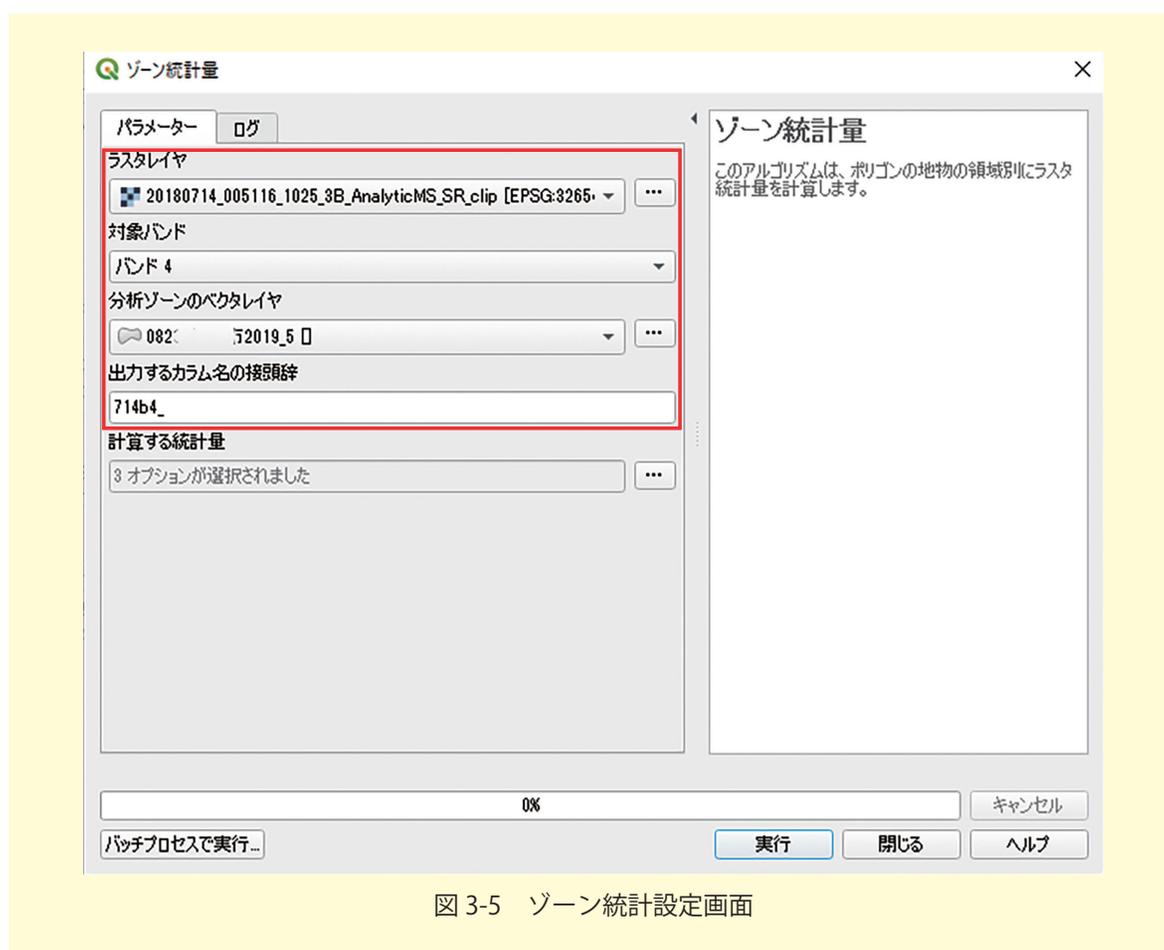
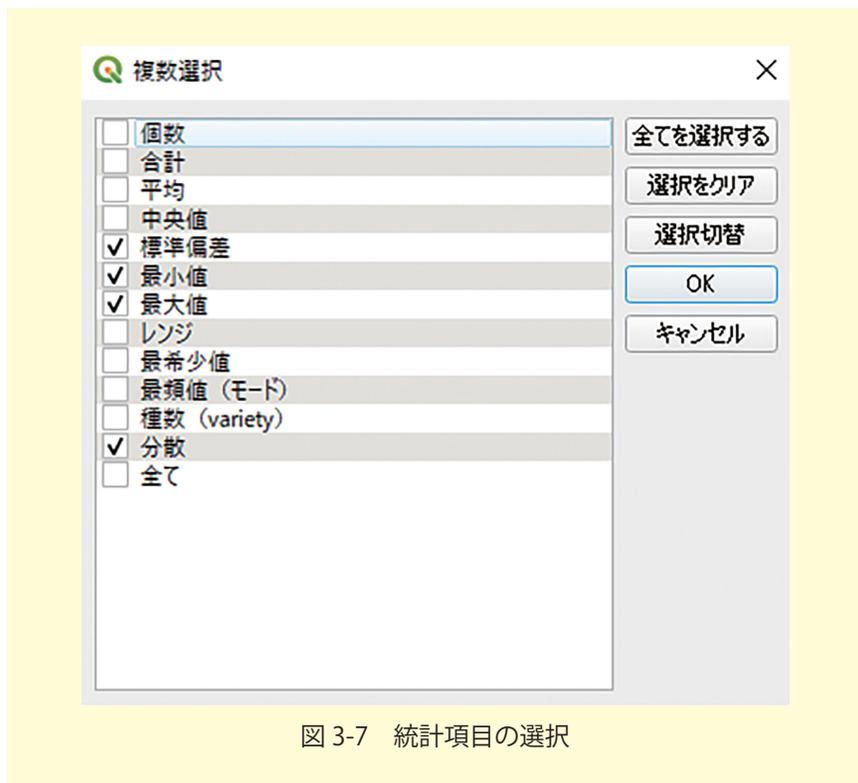
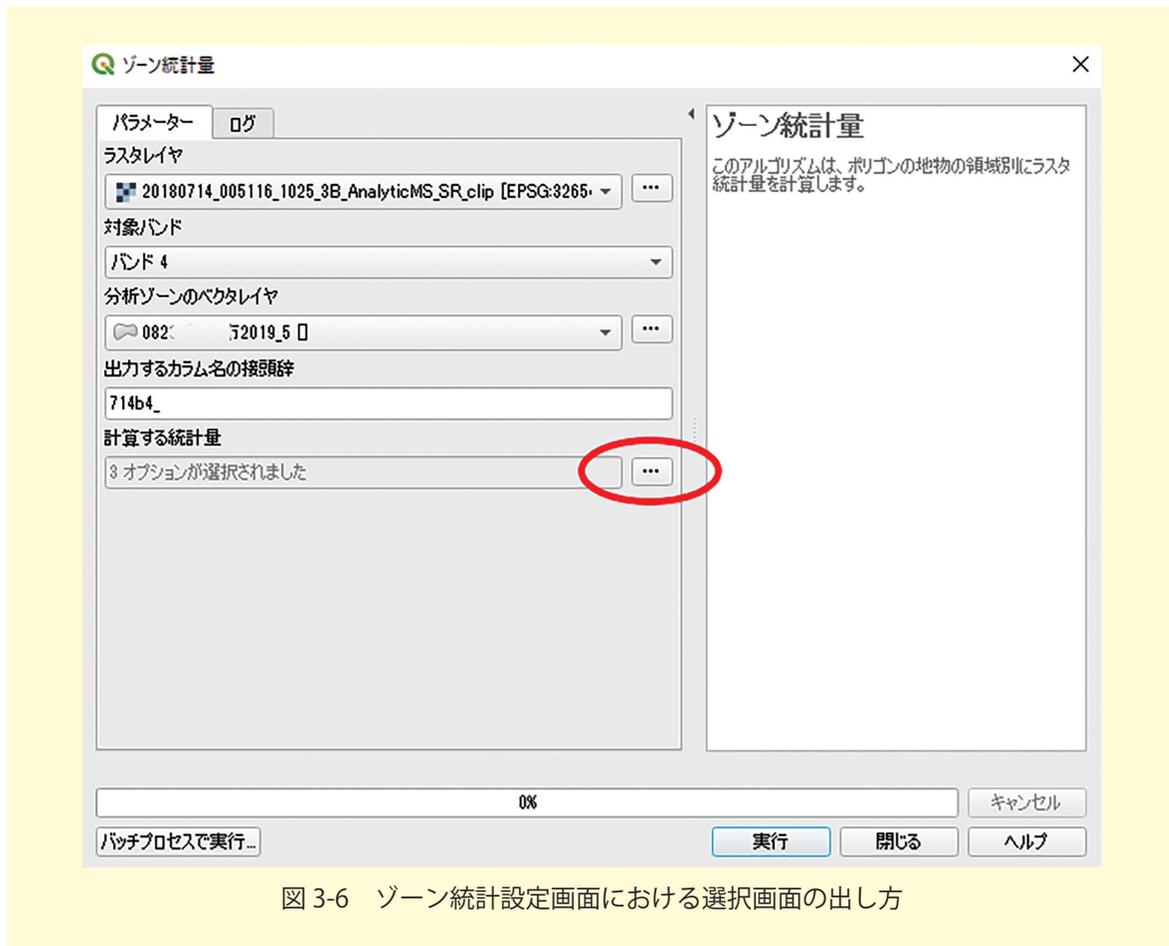


図 3-5 ゾーン統計設定画面

今回は圃場毎の標準偏差，最小値，最大値，分散を集計するので，項目を設定します。「計算する統計量」の横にある「…」を選択します。「複数選択」というウインドウが開きますので，今回は，標準偏差，最小値，最大値，分散に☑を入れ，それ以外を外した後「OK」を押下します。



③ 分析と結果確認

「計算する統計量」の設定後、「実行」を押下すると計算が始まります。計算が終わったら「閉じる」でウィンドウを閉じます。

画面左のレイヤから統計に利用したポリゴンデータの上で右クリックし、「属性テーブルを開く」を選択してください。

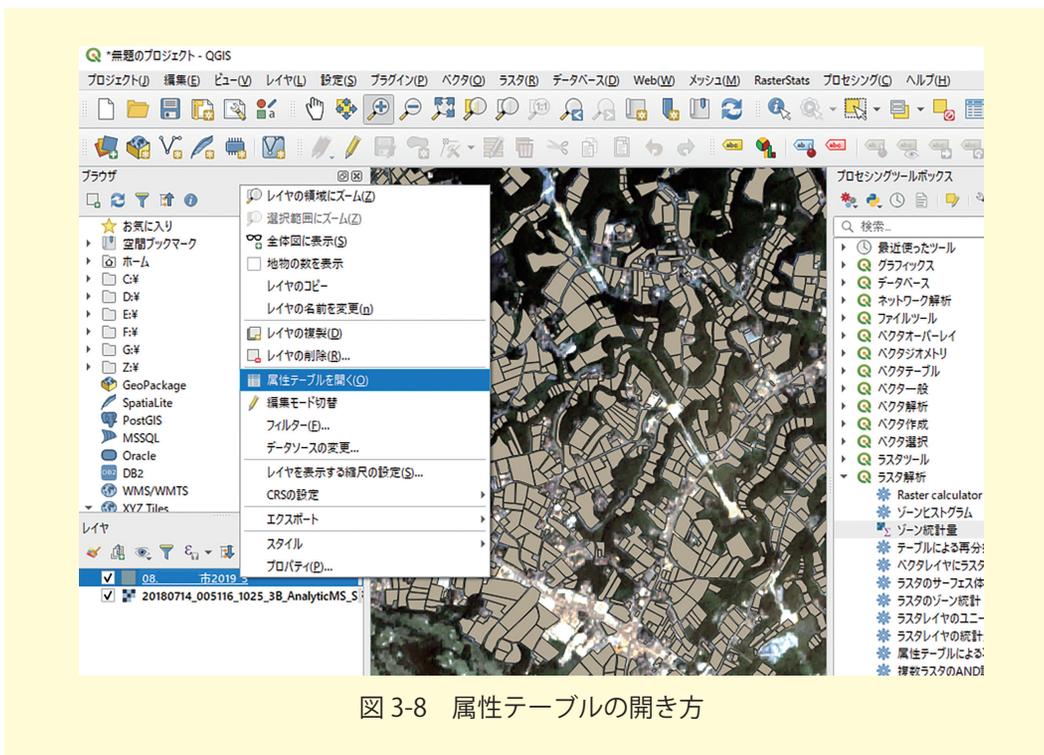


図 3-8 属性テーブルの開き方

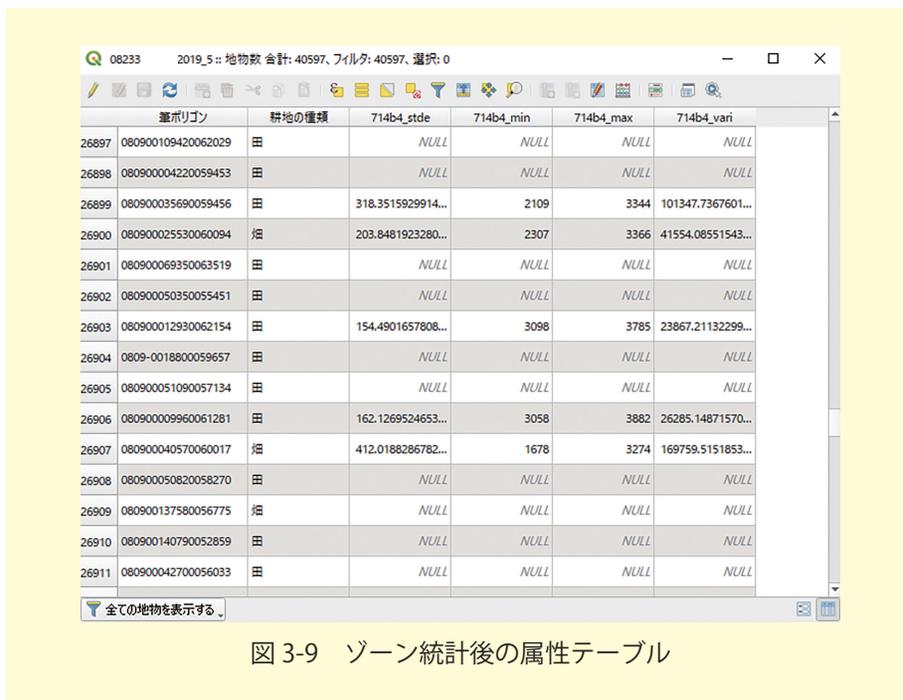


図 3-9 ゾーン統計後の属性テーブル

設定した接頭辞「714b4_」に続いて、stde, min, max, vari がついた列が追加されていることがわかります。これらがそれぞれ、その圃場ポリゴンにおける衛星画像の band4 の地表面反射率の標準偏差, 最小値, 最大値, 分散ということになります。「null」はそのポリゴンは、衛星画像に重なっていなかった（統計量がなかった）という意味です。衛星画像が設定したポリゴンの範囲より大きければこのようなものは発生しません。

ここからは、エクセルで作業を行います。エクスプローラーで元のシェープファイルの構成ファイルのうち、「〇〇〇〇.dbf」ファイルを、加工用に別の場所にコピーします。

※ここで、そのまま加工してしまうとシェープファイルが破損してしまいます。必ず別の場所へコピーしたファイルを利用してください。



図 3-10 シェープファイル群

エクセルを立ち上げ、空白のブックを開きます。その後、別の場所にコピーした .dbf ファイルをエクセルのワークシート上にドラッグ&ドロップしてください。列の幅を適当に見やすいように調整してください。

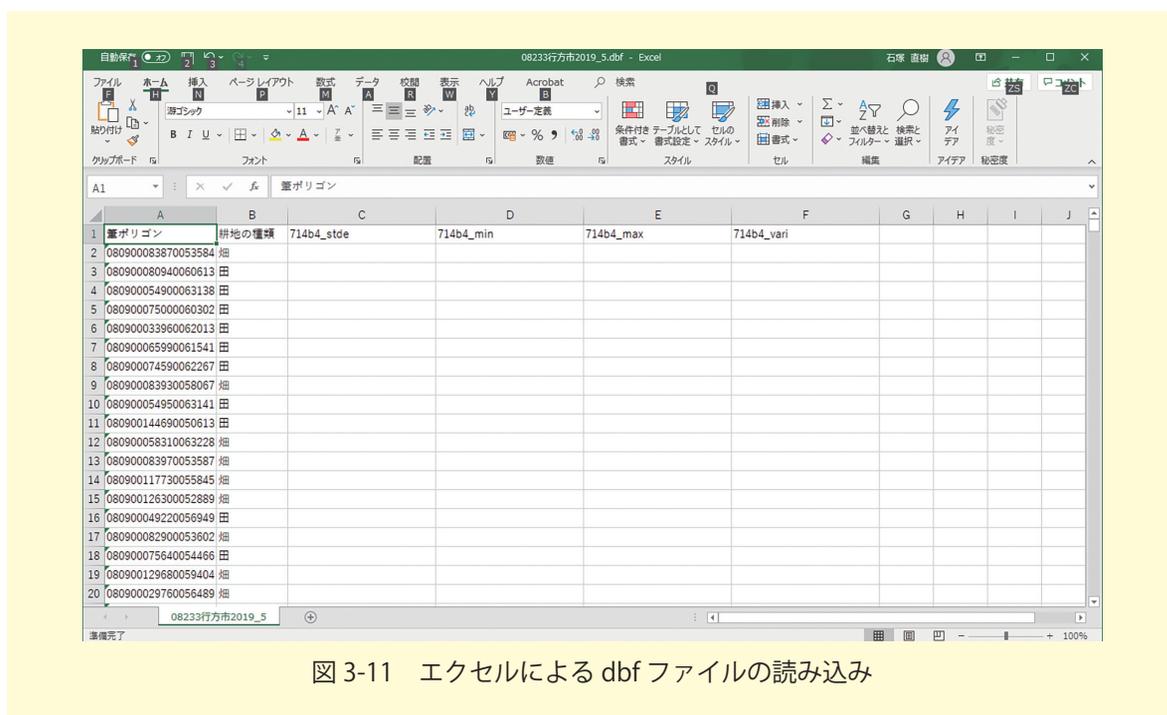


図 3-11 エクセルによる dbf ファイルの読み込み

ここでは、分散の値をもとにソートします。「分散」のF列の部分で「714b4_stde」を選択した状態で、「並べ替えとフィルター」→「降順」を選択します。

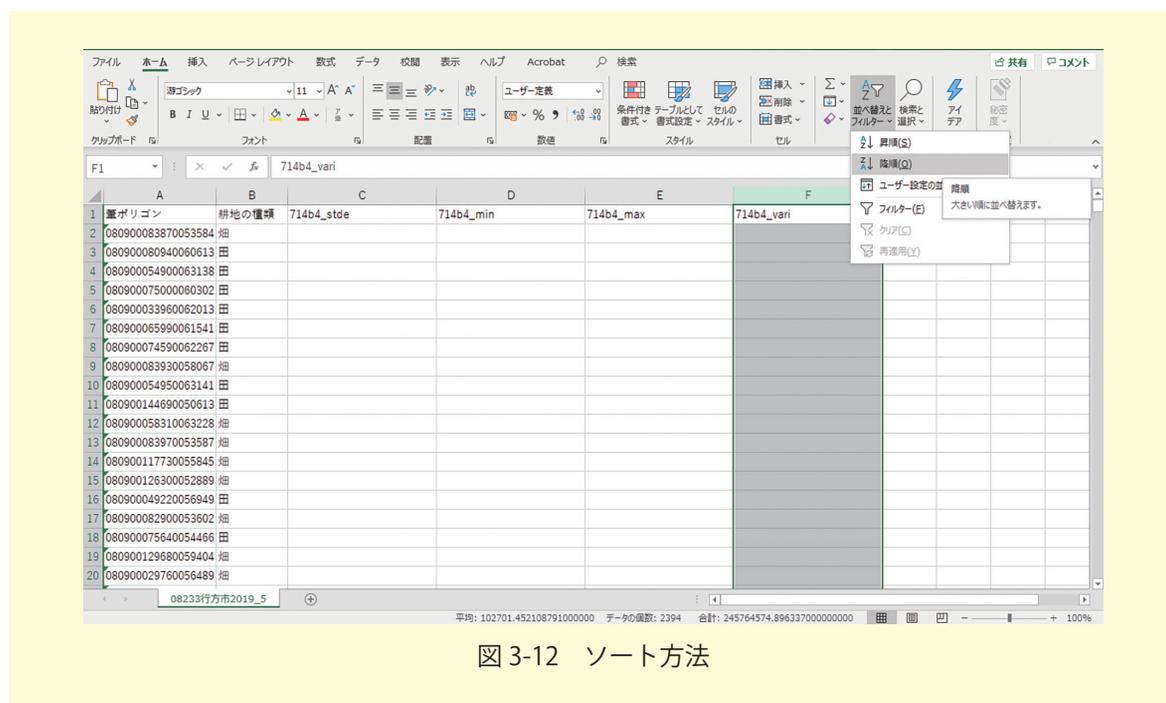


図 3-12 ソート方法

「並べ替えの前に」というポップアップがありますが、「選択範囲を拡張する」を選択したまま「並べ替え」を選択します。

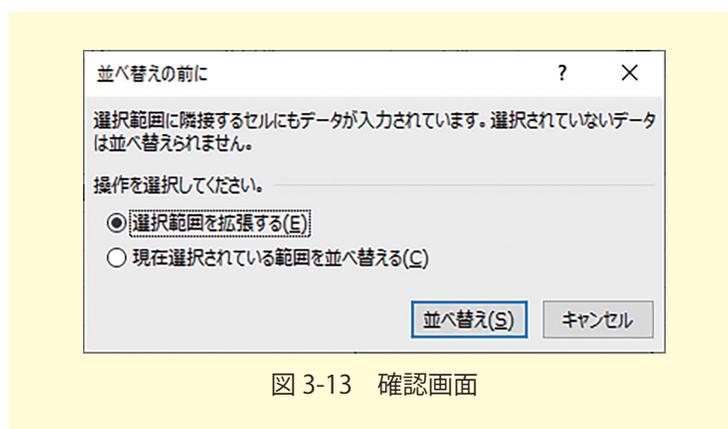


図 3-13 確認画面

これでスプレッドシートが分散の大きい順に並びました。あとは「714b4_stde」などを「標準偏差」など分かりやすいものに変更します。その結果が、表 3-1 となります。

表 3-1 衛星画像から求めた圃場毎の近赤外バンドの統計値

筆ポリゴン ID	耕地の種類	標準偏差	最小値	最大値	分散
080900022150059799	畑	990.08	2393	5190	980264.82
080900039070058888	畑	964.61	2239	5194	930477.36
080900012610060566	畑	915.30	2588	5557	837772.70
080900022930059789	畑	911.27	2044	5296	830417.71
080900033850060105	畑	869.00	2142	5266	755168.59
080900035020061246	畑	862.02	2412	5249	743086.93
080900033460060531	畑	854.46	2492	5197	730099.82
080900034870058375	畑	847.27	2719	5551	717860.13
080900028280059519	畑	841.27	2291	5302	707729.94
080900034370060448	畑	836.66	2256	5380	699993.75
080900031660059551	畑	827.70	2067	4636	685094.37
080900028670060152	畑	819.57	2316	5097	671698.42
080900031260059590	畑	814.27	2371	5002	663030.10
080900022020059621	畑	800.94	2262	4880	641505.04
080900010560060764	畑	791.61	2848	5242	626654.19
080900039270058480	畑	791.38	2273	5196	626274.94
080900014510060850	畑	787.37	2772	5433	619950.91
080900030590059857	畑	783.29	2376	4886	613549.72
080900029680059395	畑	782.38	2583	5274	612112.33

⑤ 衛星画像分析結果の利用

この集計値において、標準偏差や分散の値が高い圃場は、圃場内の近赤外線バンドの値のバラツキが大きいということであり、圃場内の生育ムラが大きい可能性が高い圃場ということになります。ただし、畑作地においては出荷時期をずらす等のため圃場内の生育ステージが異なる場合もあり、そのような場合も値が大きくなります。このあたりは、対象作物にもよると思います。これで確認すべき圃場の優先順位はつきましたので、上位から調査をしていくことで効率的に調査を行っていくことができますし、可変施肥の必要な圃場のスクリーニングに必要な閾値の目安もおのずと分かることになります。

⑥ 確認

図 3-14 は表 3-1 の上位にある圃場の一つであり、衛星画像においても不明瞭ながらも圃場内が一様でないことが確認できます。この圃場について、2018 年 7 月 20 日にドローンで空撮を行ったものが図 3-15 です。DJI 社の Phantom4Pro に Parrot 社の sequoia を搭載して撮影したものであり、同じく近赤外線バンドの画像を示しています。ドローンの空間解像度は数 cm であるため圃場内の生育ムラが明瞭に確認することができます。また、図 3-14 および図 3-15 のパターンは概ね一致していることも確認できます。

この事例では、空間解像度は低いものの、観測幅は広いという特徴を有する衛星観測を用いることで、多数の対象から特定の条件の対象をスクリーニングしています。そして、広域の同

時観測できないものの、高い空間解像度で観測可能という特徴を有するドローンで詳細な計測を行う，という形で，お互いの長所・短所を組み合わせましたものです。

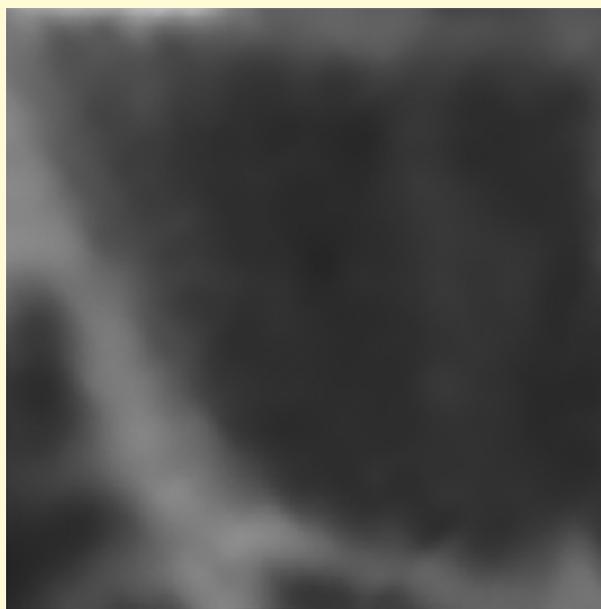


図 3-14 衛星画像の集計値からスクリーニングされた生育ムラの大きい圃場

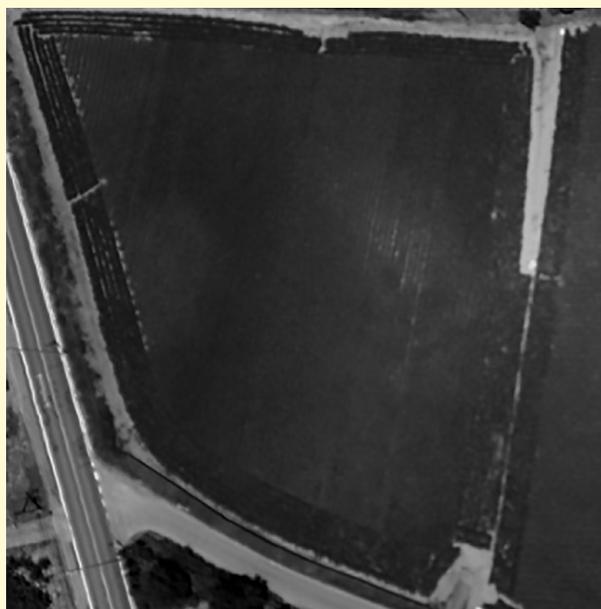


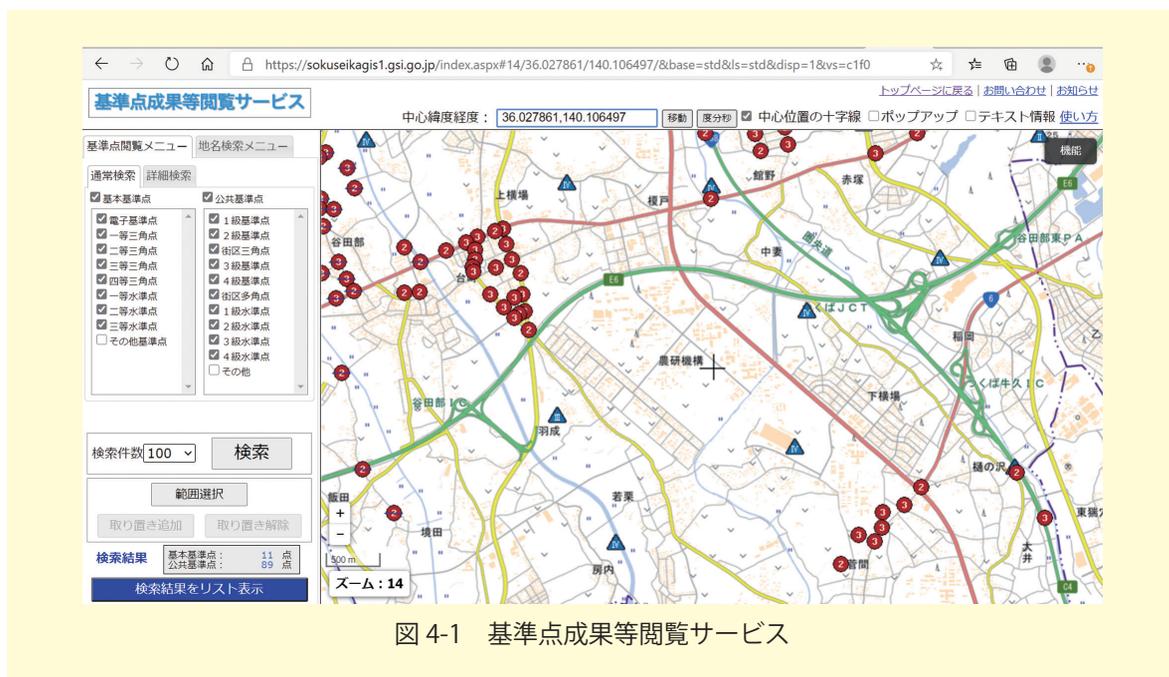
図 3-15 ドローンによる詳細計測

4 D-RTK2 を用いた非通信環境下における RTK 空撮

RTK を利用した空撮は、ドローンの撮影した画像に付与される位置精度が高いため、オルソ合成画像等の位置精度が高くなります。一方、RTK を利用するには、VRS-RTK (VRS:Virtual Reference Station) などの位置情報サービスとの契約および通信が必要となります。RTK は位置が正確にわかっている基準局との差を干渉処理により精度良く求めることで、測位精度を向上させる仕組みです。ですので、正確な位置がわかっている基準局との通信状態があれば RTK を利用することができます。

DJI では D-RTK2 という基準局を販売しています。この D-RTK2 を位置が正確にわかっている位置に設置すれば、D-RTK2 とドローン間で通信を行うことで、RTK 機能を有するドローンは RTK 精度で位置情報を記録することができます。つまり、VR-RTK のようなインターネット接続環境を必要とせず RTK 運用をすることが可能となります。

ここで課題となるのは、D-RTK2 の設置位置です。D-RTK2 は、高い精度で位置がわかるところに設置する必要があります。通常、このような RTK の基準局は、正確な位置がわかっている点の上、例えば、水準点や三角点といった基本基準点および公共基準点の上に設置する、もしくは公共基準点から任意の設置地点まで測量してゆき設置地点の位置を算出する必要があります。基本基準点および公共基準点は、「基準点成果等閲覧サービス」で確認することができます。これ以外にも、この基準点をもとに、市などで設置している基準点もあります。



運良く計測したい場所の近くに基準点があったとしても、使いやすい場所に基準点があるとは限りません。道路や橋にあることもあれば、私有地や学校などの施設の屋上に設置されている場合もあります。そのような場所に三脚を立てて一定時間動かさないようにするのは困難です。その場合、基準点から測量をしてゆくことで新たな基準点（新点）を設置する必要があります。これらの作業は公共測量として行う場合、国土交通大臣の定める「作業規程の準則」に則って行う必要があります。今回はドローンを飛ばす基準点として一時的に使うことが目的の基準点ですので、公共測量と同じ手順・精度を必要とはしませんが、公的な基準点から任意の位置を測量して求めるのは非常に煩雑な作業や、高価な測量機器が必要となります。



図 4-2 公共基準点の例と新点設置の様子

先に述べたように、今回はドローンのための基準点ですので、それほど高い精度は必要としません。そこで、GNSSを使った測位により基準点の位置を計測することとします。測位方法については、「小型 GNSS 受信機を用いた高精度測位マニュアル（ドローン用対空標識編）」^{※16}を参照してください。測位方法にはいくつかの方法がありますが、電子基準点データを用いたポストプロセッシングで行えば、設置しようとする地点におけるネットワーク環境は必要としません。したがって、携帯電話の電波が届かない山間地域の圃場であっても基準局となる D-RTK2 を簡単に設置することが可能となり、D-RTK2 との交信により RTK ドローンの運用が可能と

※16 https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/130441.html

なります。

今回は、P4 Multispectral と D-RTK2、GNSS 受信機を用いた例を紹介します。

① D-RTK2 設置位置の測位

まず、D-RTK2 を設置する場所の位置を正確に測位することが必要となります。今回は「小型 GNSS 受信機を用いた高精度測位マニュアル（ドローン用対空標識編）」で扱っている小型 GNSS 受信機を用いて行いました。具体的な手順については、マニュアルを参照してください。

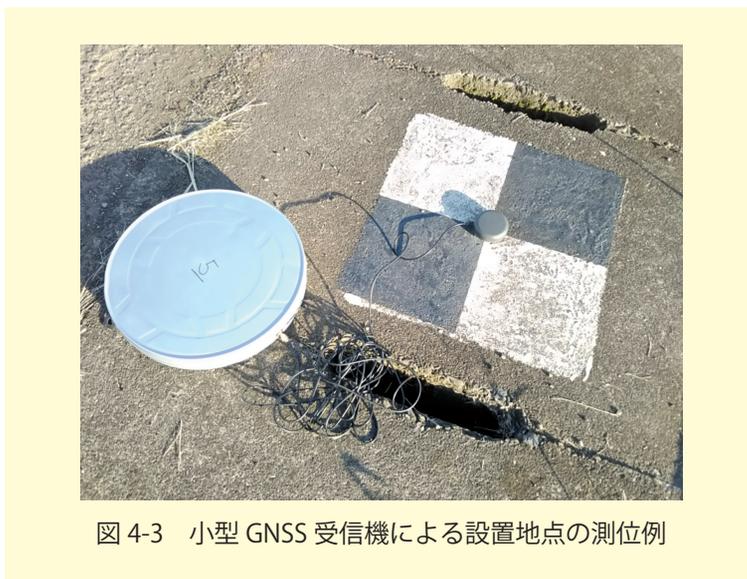


図 4-3 小型 GNSS 受信機による設置地点の測位例

② D-RTK2 の設定

DJI のマニュアルにあるように D-RTK2 を測位した基準点の上に設置します。ポールの先端の石突が基準点の上になるように、且つ、三脚にある水泡を見ながら水平になるように設置をします。

充電したバッテリーを取り付けます。

D-RTK2 は対で使用する機体により運用モードが異なります。今回は P4 Multispectral で使用しますので、操作モード 1 で運用します。電源ボタンを長押しして電源を入れたのち、操作モードボタンを約 2 秒間長押ししインジケータが緑から黄色に変わりモード切替ステータスになったことを確認します。モード 1 は点滅パターンが 1 回ですので、1 回点滅になった状態で 2 秒以上待ち、インジケータが黄色から緑になるのを確認します。



図 4-4 D-RTK2 設置例

③ P4 Multispectral の設定

プロポの電源を入れ、DJI GS pro を立ち上げます。

GS pro のミッションページから、RTK 設定メニューに移動し RTK 信号送信元として「D-RTK2」を選択します。メニューの下部で機体の RTK を有効にし、機体が RTK データにアクセスできるようにします。

「リンク」をタップすると、プロポからビープ音が鳴り始めます。その状態で、D-RTK2 のリンクボタンを押します。

プロポのライトが緑色に点灯すればリンクが成功です。



図 4-5 リンク成功時のプロポ

RTK 設定の下部にある「詳細設定」をタップし、1 で測位した位置を入力します。この時、高さは測位した楕円体高と三脚で設置した D-RTK2 のアンテナの高さは違うことに注意してください。DJI の純正のポールを使用している場合、ポールの高さ（石突きからアンテナの底面まで）「1.655m」+ アンテナの底面から受信部までの高さ「148.1mm (0.148m)」を加えた値「合計 1.803m」を測位値に足してください。1 で測位した高さが何であるがにも注意をし

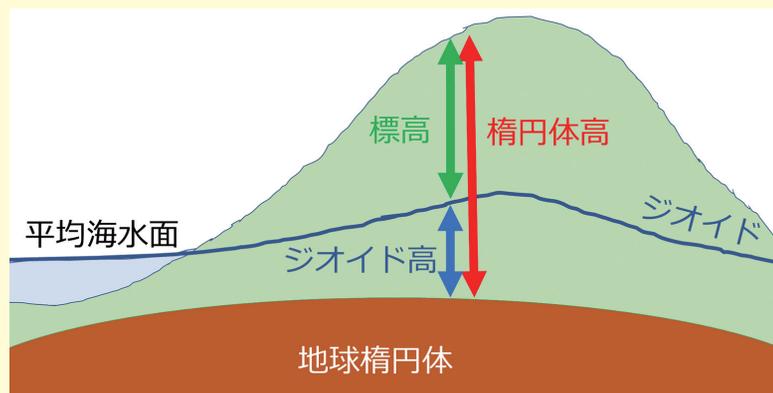


図 4-6 標高、ジオイド高、楕円体高の違い

て入力してください。GNSS で測位する高さは楕円体高になります。標高を求めるためには、ジオイド高を差し引く必要があります。1 で標高を求めている場合、ジオイド高を足して楕円体高に戻してください。元々 GNSS 受信機で測位している値は楕円体高になりますので、標高への換算をしていない場合、その値を利用できます。

④ 結果

P4 Multispectral を D-RTK2 を用いて非ネット通信環境下で撮影した結果と、ジェノバの VR-RTK 環境下で撮影した結果を比較しました。4 点の GCP を設置し、それぞれの位置を小型 GNSS 受信機で測位し、その値とドローン空撮画像から作成したオルソ合成画像において見える GCP の座標との差、さらに相対的な位置誤差を見るために 2 点間の距離の差を計測しました。差は RMSE で評価を行いました。その結果を表 4-1 に示します。なお、比較のために CGP の位置座標を用いてオルソ画像を作成した場合についても、別の日に計測した例であるが同表に示しました。

表 4-1 方法の違いによる精度の違い

計測日	組み合わせ	GCP との位置 RMSE (m)	2 点間の距離 RMSE (m)
2020/10/21	P4M+D-RTK2	2.88	0.684
2020/10/21	P4M+VRS	2.29	0.482
2019/11/ 7	P4RTK+VRS+GCP	0.02	0.002

D-RTK2 を用いた方が、VRS を用いた場合より、若干精度が低い結果となりました。計測時 D-RTK2 の方が衛星の補足数は VRS よりも多い状態であったことから、おそらくロシアか中国の衛星の分多く補足していたと思われます。本来なら補足衛星数が多い方が精度が高いと考えられますが、時刻が違うことによる DOP 値の違い等が影響している可能性もあります。

しかし、GCP を用いた処理との差をみれば、両者の精度はオーダーレベルで同じ程度と考えられることから、非通信環境下で RTK を用いたドローン計測を行う方法としては有効といえます。

5 ドローン画像とAI技術を組み合わせた事例

圃場内の土壌物理性や水分状況を空間的にとらえることは、作物の生育ムラや湿害予測等において有用です。そこで、土壌特性の分布を評価するツールの一つとして、ドローンによる空撮画像の利用が注目されています。

また、近年のAI技術の発達により、農業分野においても様々な活用が試みられています。

特に、高解像度のドローン画像は、人工知能の構築に必要なビッグデータとしての活用も期待されています。一方で、地上調査から取得できる土壌データ数は、通常、多くても数十点程度と限られており、理想的には数千～数万点といわれる機械学習の実装に十分なデータ量が入力できません。そのため、ドローン画像による土壌水分の推定精度は高くないのが現状です。

そこで農研機構では、AIの一種である機械学習に十分なビッグデータを構築するための地上調査データ拡張方法を検討し、圃場内の土壌含水率の空間分布をUAV空撮画像を活用することで高精度に推定できる手法を開発しましたので、紹介します。なお、この内容について詳細を知りたい方は、論文^{*17}を参照なさってください。

① 計測

約100m四方のほぼ1haの圃場において、土壌突き刺し型センサを用いて圃場内64地点の含水率を測定しました。また、P4 MultispectralとMavic 2 Enterprise Dualにより飛行高度100mから撮影を行い、対象圃場のマルチスペクトル画像、熱赤外画像を取得しました。

② データ処理

Mavic 2 Enterprise Dualの可視光画像にSfM・MVS処理を行い、DSM画像を算出しました。P4 Multispectralの5バンド（青、赤、緑、Rededge、近赤外）、算出したDSM、Mavic 2 Enterprise Dualの熱赤外画像の7画像がデータセットになります。

③ 機械学習用データセットの作成

圃場で計測した64点の含水率データを位置情報をもとにQGISで読み込み、観測地点を中心とした1.5mの円バッファを作成しました（図5-1）。ここで生成した円バッファ内の含水率が均一と仮定して、上記の7画像のピクセル値のデータ拡張を行いました。これにより64点から2251点までデータを増やすこととなり、土壌含水率とドローン空撮画像の関係についての機械学習が可能になりました。

*17 森下・石塚（2020）UAV観測によるダイズ圃場の土壌含水率分布推定—グラウンドトゥールースデータの拡張による機械学習の適用—，システム農学，36(4), pp.55-61.

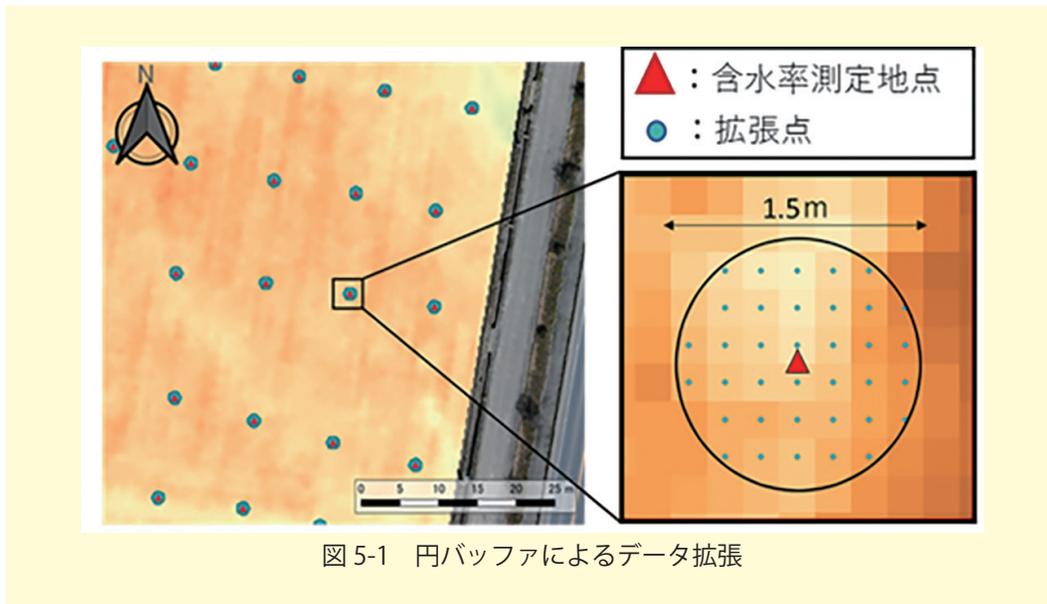


図 5-1 円バッファによるデータ拡張

④ 機械学習によるモデル作成

ランダムフォレストは機械学習アルゴリズムの一種で、弱識別器として決定木を複数作成し、それぞれの識別結果を統合して1つの解を決定するアンサンブル学習です。③で作成したデータセットに対してランダムフォレスト回帰を適用し、圃場内の含水率分布を、②の画像のピクセル値から推定するモデルを構築しました。また、機械学習アルゴリズムの適用がモデル精度に与えた効果を検証するため、同じデータセット用いて重回帰分析を行い、比較しました。

⑤ 圃場含水率マッピング

機械学習（ランダムフォレスト回帰）により算出されたモデルを空撮画像に適用することで、圃場内の含水率をマッピングすることができます（図 5-2）。含水率の実測値とマッピングされた推定値の関係（図 5-3：左）は、圃場内の含水率を精度高く推定可能であることを示しています。一方で、データ拡張処理を行わない場合はデータが不足するため機械学習を適用できず、重回帰分析では高い精度は得られません（図 5-3：右）。

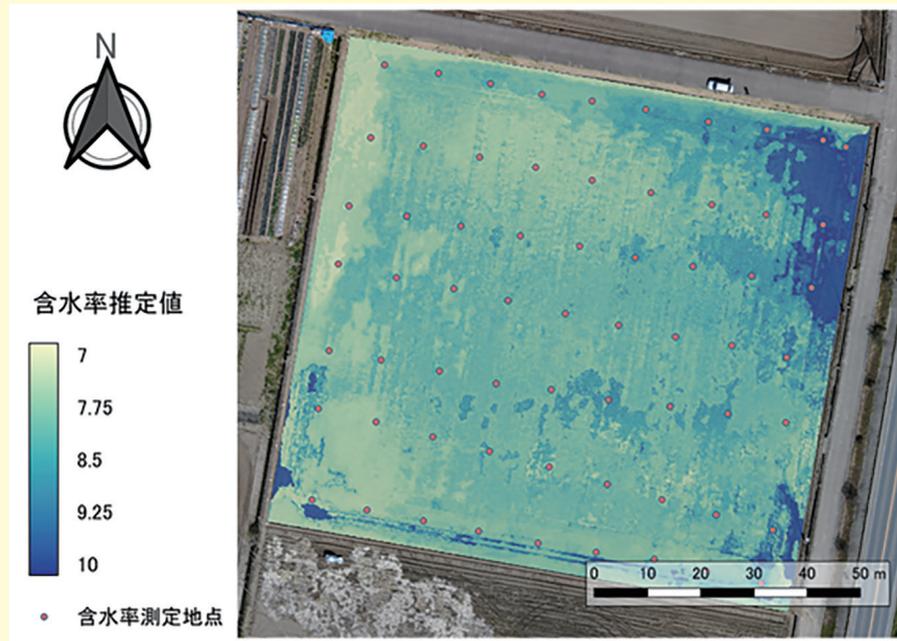


図 5-2 圃場内の含水率分布推定図

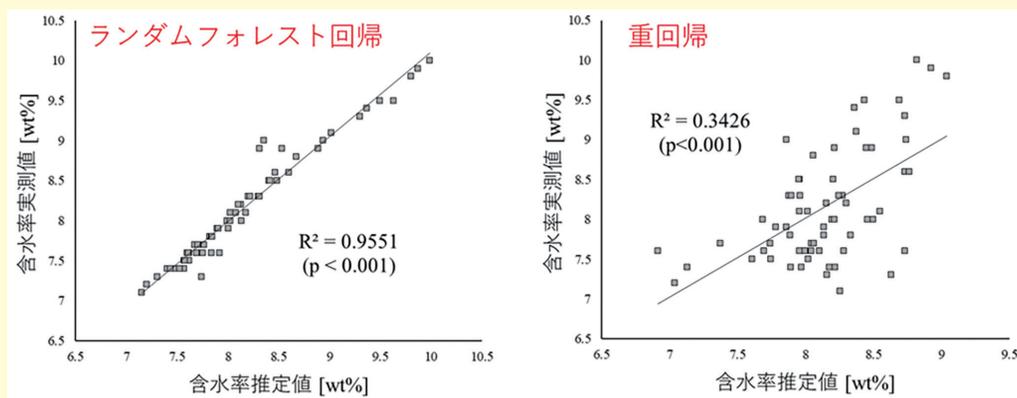


図 5-3 実測値（圃場内 64 点）と推定値の関係
 （左：機械学習を適用した場合の結果，右：従来の重回帰による結果）

ただし、今回の機械学習モデルは今回のデータに対してのみ高い精度が得られるものであることに注意が必要です。つまり、十分な推定精度を得られるのは実際にドローンで観測した時刻および場所での含水率を学習させた場合のみであるということです。他の場所や異なる時間帯で同様の空間推定を行いたい場合は、その都度、地上での含水率測定とドローン観測が必要になります。さらに、ドローンの飛行高度やセンサの解像度によってバッファに含まれるピクセル数は変化するため、今回はバッファサイズ 1.5m が適していましたが、観測条件および機材によっては適切なバッファサイズが変化する可能性があります。

あとがき

前回の「ドローンを用いたほ場計測マニュアル（不陸（凹凸）編）」を平成30年（2018年）3月に出してから約3年が経過しました。この3年の間に、おかげ様で本マニュアルは約3万件のダウンロードがあり、それなりに大きなインパクトを残すことができたと考えています。2016年の熊本地震にドローンを用いた調査を行ってから5年近くが経ち、その間にドローンを取り巻く環境は大きく変化しました。また、2019年に公開した「小型GNSS受信機を用いた高精度測位マニュアル（ドローン用対空標識編）」で紹介したGNSS周辺の技術についても、近年、大きく変化しています。

今回、ソフトウェアまわりのバージョンアップに対応を行うとともに、問い合わせの多い部分の細かな修正を行いました。また、新たに、農研機構のフリーソフトを用いたDSM作成方法の説明と、ドローンとGNSSを組み合わせて利用する事例紹介を加えました。今回のフリーソフトの利用により、このマニュアル活用のハードルが大きく下がり、誰もが利用できる技術になったと思っております。このマニュアルを手にとりて頂いた方々の、何等かのお役に立てれば幸いです。

最後に、こちらのマニュアルを利用・参考にして頂いた場合、末筆で結構ですので、その旨を記載頂ければ幸いです。

本研究は平成28年度農林水産省委託プロジェクト緊急対応研究
「被災地域の営農再開にむけた熊本地震による農地・作物生育への影響に関する調査研究」の
成果によるものです。

農研機構は、本マニュアルに掲載された情報を圃場計測以外に使用すること、および、ご利用になったことにより損害が生じても一切の責任を負いません。

令和3年3月

技術マニュアル

「ドローンを用いたほ場計測マニュアル（不陸（凹凸）編改訂版）+
（応用事例編）」

著者 石塚直樹，岩崎亘典，坂本利弘，森下瑞貴

発行者 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター

〒305-8604 茨城県つくば市観音台3-1-3

問い合わせ先 農研機構 農業環境変動研究センター 石塚直樹

Tel：029-838-8191 E-mail：isituka(at)affrc.go.jp