



ドローンを活用した 農地基盤モニタリング

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
農村工学研究部門

目次

はじめに	3
1章：農地基盤モニタリングの必要性と考え方	4
2章：ドローン等を用いた農地基盤データの取得	9
3章：圃場整備前後におけるモニタリング	28
4章：圃場周辺の農地基盤の障害物・危険箇所の把握	34
5章：2時期データの解析にもとづく変状箇所の把握	43
用語解説	49
参考文献	50

はじめに

本書の対象と目的

本書では、農地基盤の維持管理・整備に携わる土地改良区職員（農業者も含む）・行政職員（農業土木技術者）を対象に、省力的かつ効果的な農地基盤モニタリングの実現を目的に、ドローン（小型 UAV : Unmanned Aerial Vehicle, 無人航空機）空撮技術及び3次元化技術（SfM : Structure from Motion）等を用いた農地基盤モニタリングの流れについて紹介します。本書では、長期間にわたる農地基盤のモニタリングを実施していく上での様々なシチュエーションを想定し、全体の流れを示しつつ、部分ごとでも参照できるように構成しております。

関連ガイドライン・マニュアル

本書に関連する以下の内容については、各ガイドライン・マニュアルを参照されることをお勧め致します。重要な項目については、本文内でも参照先を記します。

ドローンを飛行させる際に必要となる手順（点検・整備、遵守事項など）

無人航空機飛行マニュアル（国土交通省航空局標準マニュアル）

<https://www.mlit.go.jp/common/001521378.pdf>

農地を対象としたドローンによる撮影の方法・注意事項・地上基準点などの測量方法

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）（農研機構 農業環境変動センター）

https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/drone_unevenness_2021.pdf

ドローン導入の検討と飛行準備および農業水利施設管理への活用方法

ドローンを活用した農業水利施設管理の手引き（全国土地改良事業団体連合会）

https://www.inakajin.or.jp/websys/wp-content/uploads/2023/03/20230317_drone_tebiki.pdf

農業農村整備でのドローンの活用（必要事項・活用事例・用語など）

農業農村整備における UAV 活用の手引き（関東農政局 利根川水系土地改良調査管理事務所）

https://www.maff.go.jp/kanto/nouson/sekkei/kokuei/tonecho/challenge/R5uavtebiki_R06.5.pdf

1章：農地基盤モニタリングの必要性と考え方

農地基盤モニタリングの必要性

耕作道や圃場への進入路、障害物などを含めた圃場周辺の農地基盤の危険箇所や変状箇所等の状態把握は、これまで個々の農業者や土地改良区職員などの日常的な作業・見回りの中で都度対応が行われてきました。

今後、農地集積と規模拡大が更に進むことによって、耕作者が圃場ごとの農地基盤の状態を正確に把握して作業に臨むことは、より困難になってくることが予想されます。こうした状況の下で、農作業の安全の確保や各種スマート農機の円滑な走行等を実現していくためには、網羅的（全域的）かつ定期的な農地基盤の状態把握（点検）が必要となってきます（図 I - 1）。

しかしながら、網羅的かつ定期的な点検は、農業者や土地改良区等職員にとっても負担が大きく、省力的な方法で農地基盤モニタリングを実現していく必要があります。

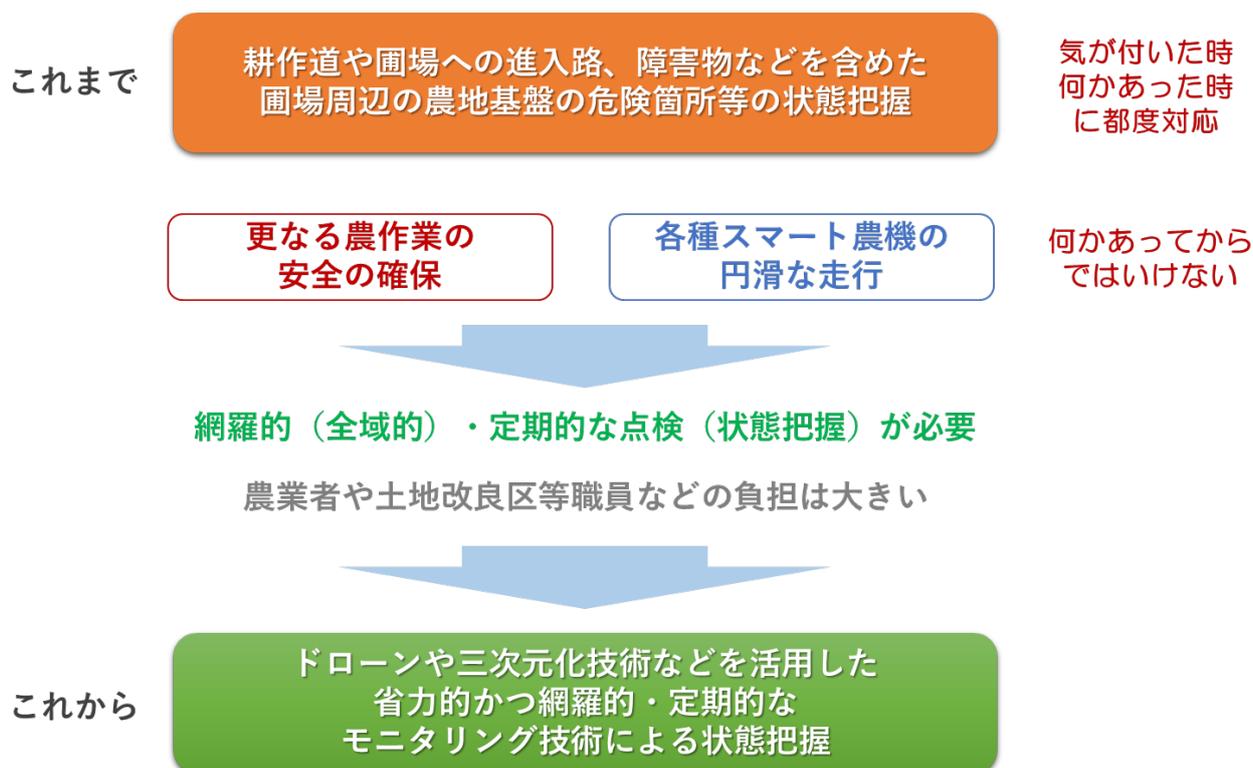


図 I - 1 農地基盤モニタリングの必要性

農地基盤モニタリングの対象

図 I - 2 は、本書で対象とする農地基盤を模式図（断面図・平面図）で示しています。均平な圃場面（田面）の周囲に、畦畔・法面、用水路・排水路、圃場進入路、農道（耕作道）などが存在しており、平地部に立地する圃場であっても、圃場周辺には農作業上の危険箇所となりうる傾斜や凹凸を有する対象が多く存在します。山間部では、圃場面間の高低差が大きくなり、法面の面積や圃場進入路の勾配なども拡大することになります。加えて、電柱や給水栓などの農作業上は障害物になりうる対象も存在します。

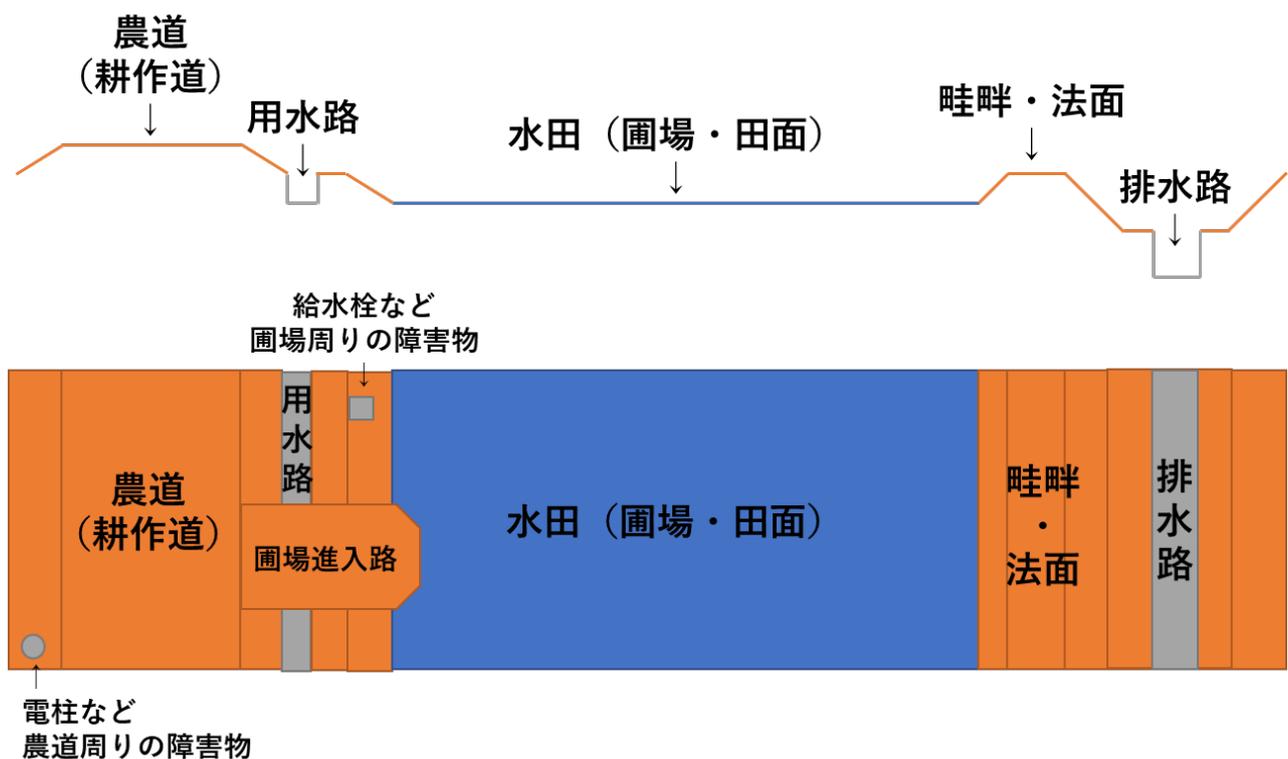


図 I - 2 農地基盤モニタリングの対象

農地基盤モニタリングの考え方

図 I - 3 に本書における農地基盤モニタリングの考え方を示します。横軸は時間（経年）を表しており、維持管理、圃場整備や災害などの事象に対するモニタリングや現地調査のタイミングを整理しています。圃場周辺の農地基盤は、水路や一部の農作業道を除けば、概ね土構造物であり、時間の経過とともに変化（劣化）していくものです。コンクリート構造物についても、経年的には沈下やひび割れなどの変化は生じます。農地基盤モニタリングは、ある一時点の現状を把握・評価する一方で、経年的な変化をモニタリングしていくことを目的としています。あわせて、圃場周辺の農地基盤が大きく変化するタイミングとして、1) 圃場整備と2) 災害及びその後の災害復旧の2つを想定しており、圃場整備については、情報化施工などを通じて、圃場周辺の3次元データが取得されることも想定しています。こうした農地基盤データを蓄積していくことにより、農地基盤のモニタリングが実現できます。

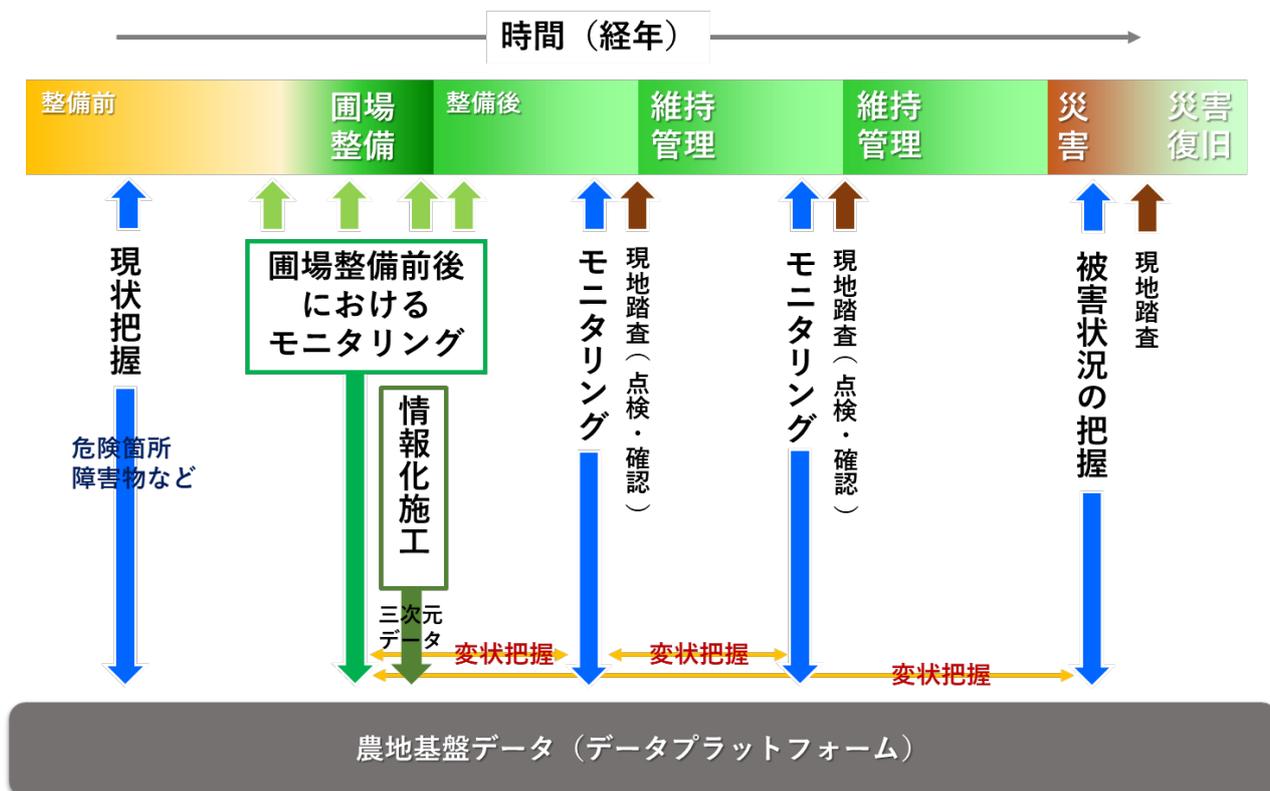


図 I - 3 農地基盤モニタリングの考え方

ドローンを用いた撮影・モニタリングの特長と有効性

ドローンを用いた撮影・モニタリングの特長は以下の3点に整理できます。

- **適時性**：必要な時期に必要な場所の撮影が可能
- **高解像度**：従来の航空写真などと比較して、より詳細な情報の把握が可能
- **3次元**：高低差や形状などの3次元の情報の把握が可能

こうした特長は、土構造物が多く、日常の耕作・維持管理、雨風などの気象条件、ならびに植生の成長などの影響を受けやすい圃場周辺のモニタリングをおこなっていく上で有効です。特に、必要な時期に必要な場所で撮影が可能であるという「適時性」は、図 I - 4 に示すように、高頻度で撮影を行ったり、最適な撮影時期を選択したり、季節変化や経年変化を捉えたりする上で大変有効です。



図 I - 4 農地基盤モニタリングにおける適時性の有効性

ドローンを用いて農地基盤の状態を把握する2つのアプローチ

ドローンを用いたモニタリングにより、農地基盤の状態を把握する方法には、大きく分けて2つのアプローチが存在します（図I-5）。一つは、ドローンを用いた撮影により得られた写真画像を3次元化にすることによって、圃場内の凹凸や法面の勾配などを把握（可視化）する方法、もう一つは、ドローンを用いた撮影により得られた写真画像の解析によって、作物の生育ムラを通して農地基盤条件の違いを把握（可視化）する方法です。



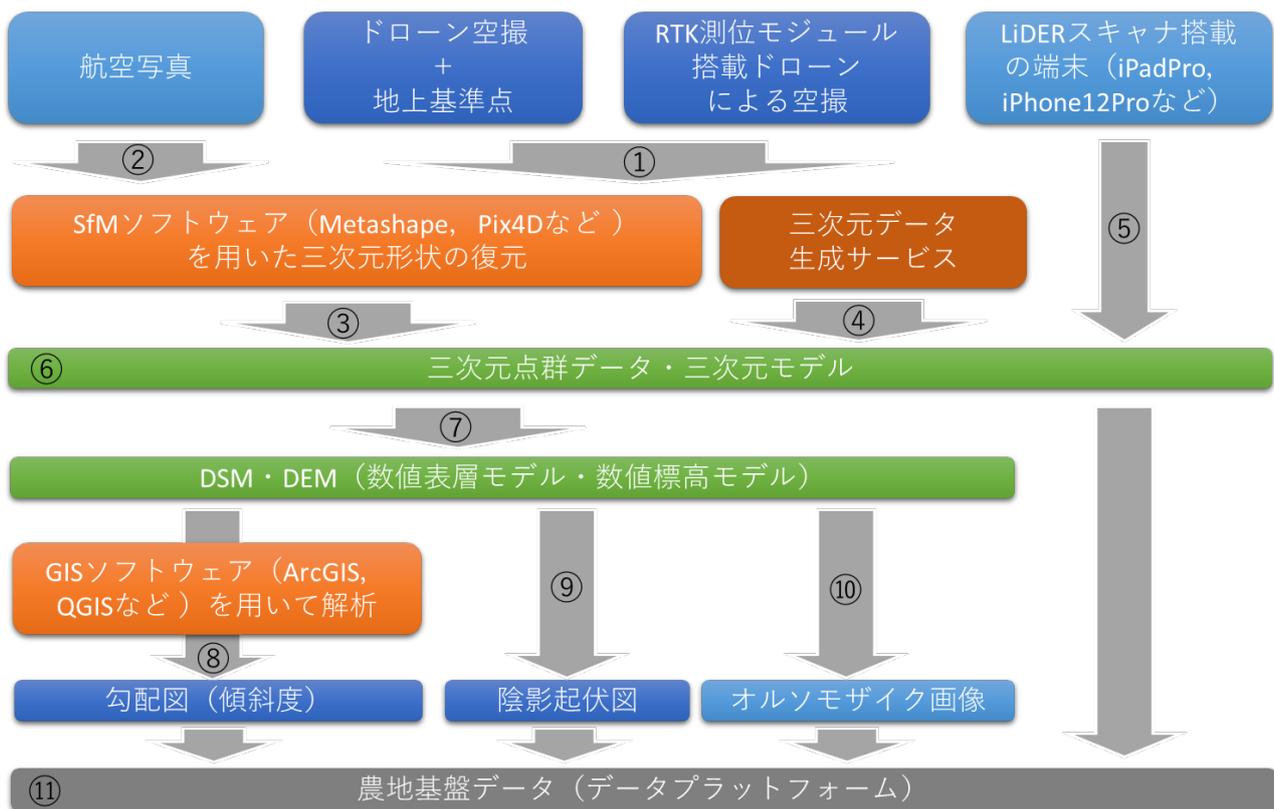
図I-5 農地基盤モニタリングの2つのアプローチ

※農研機構技報5号 P18 図1から引用

2章：ドローン等を用いた農地基盤データの取得

ドローン等を用いた農地基盤データの取得の流れ

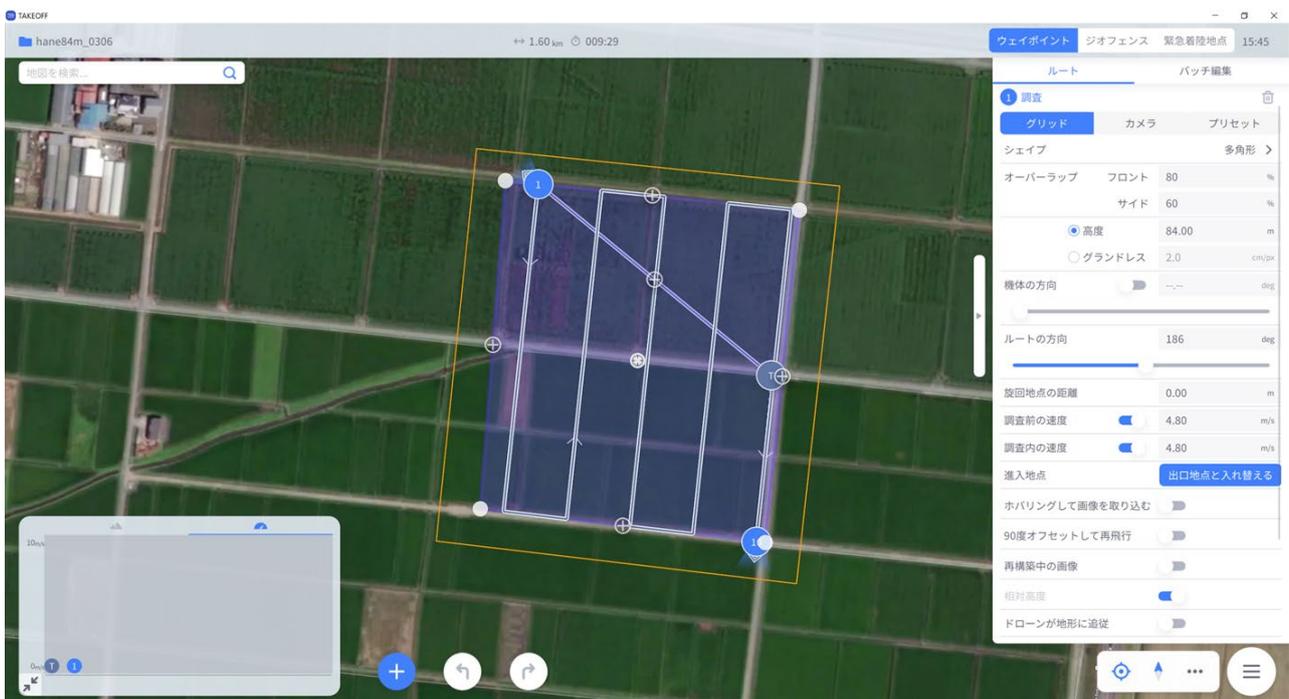
図Ⅱ-1は、本書で紹介するドローン等を用いた農地基盤データの取得の流れを示したものです。ドローンを用いて撮影した空中写真等を用いて、3次元点群データなどの3次元データの生成をおこない、3次元データからGIS（Geographic Information System：地理情報システム）などを用いた解析により、勾配図や陰影起伏図、オルソモザイク画像などの農地基盤データを出力し、データプラットフォームに格納するなどの方法で、データを蓄積します。



図Ⅱ-1 ドローン等を用いた農地基盤データの取得の流れ

① ドローンを用いた撮影による空中写真データの取得

ドローンを用いて撮影した空中写真から3次元形状の復元（3次元点群データ、3次元モデルの生成）を行うためには、一定のオーバーラップ（撮影範囲の重複）を有する異なる視点から撮影された写真画像群が必要となります。ドローンに装着（付属）したカメラのインターバル撮影（一定間隔での連続撮影）を実施しながら手動での操縦をおこなう方法もありますが、ドローン操作用のアプリケーションの自律航行（オートパイロット）システムを用いて、プログラム飛行をおこなうことにより、必要な写真画像群を取得することが可能です（図Ⅱ-2）。



図Ⅱ-2 アプリケーションを用いたプログラム飛行の設定例

ACSL 社 TAKEOFF での設定例：青紫色のハッチのエリアを撮影高度：84m、フロントラップ 80%、サイドラップ 60%で撮影をおこなうプログラム飛行の飛行ルート

ACSL 社の国産小型空撮ドローン SOTEN（蒼天）（図 II -3）を用いたプログラム飛行のための飛行計画作成の流れは、①専用のアプリケーション TAKEOFF を起動、②画面右下のメニューマークをクリックし、「プラン」を選択、③左上の「新規プラン」→「新規」→「Survey テンプレート」を選択、④表示された飛行範囲（飛行ルート）の四隅のポイントを移動させて、飛行範囲を撮影したい範囲に変更、⑤左側のタブの「調査」部分を「カメラ」、「グリッド」の順に設定、⑥「カメラ」は SOTEN の標準カメラ「Xacti CX-GB100」（標準カメラ使用の場合）を選択、⑦「グリッド」では「オーバーラップ」をフロント「80%」、サイド「60%」と入力、高度に撮影したい高度を入力、⑧「ルート方向」などを調整することで飛行ルートを決めます（図 II -2）。ちなみに、SOTEN 標準カメラの撮影高度と撮影で得られる画像の地上分解能との関係は、高度 42m で地上解像度 1cm、高度 84m で地上解像度 2cm、高度 126m で地上解像度 3cm です。



図 II -3 ACSL 社国産小型空撮ドローン SOTEN

図 II -4 は、図 II -2 で設定されたプログラム飛行により撮影された一定のオーバーラップを有する写真画像群を示しています。

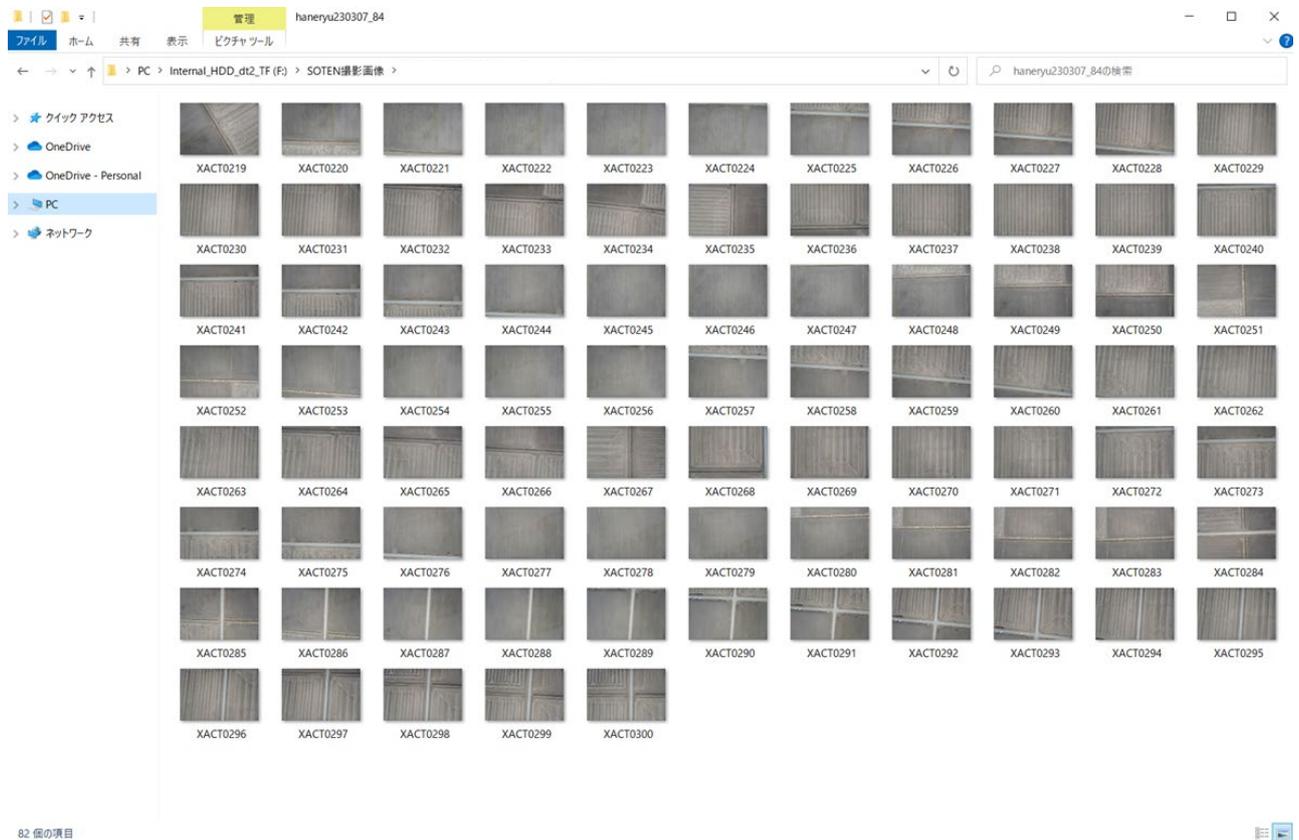
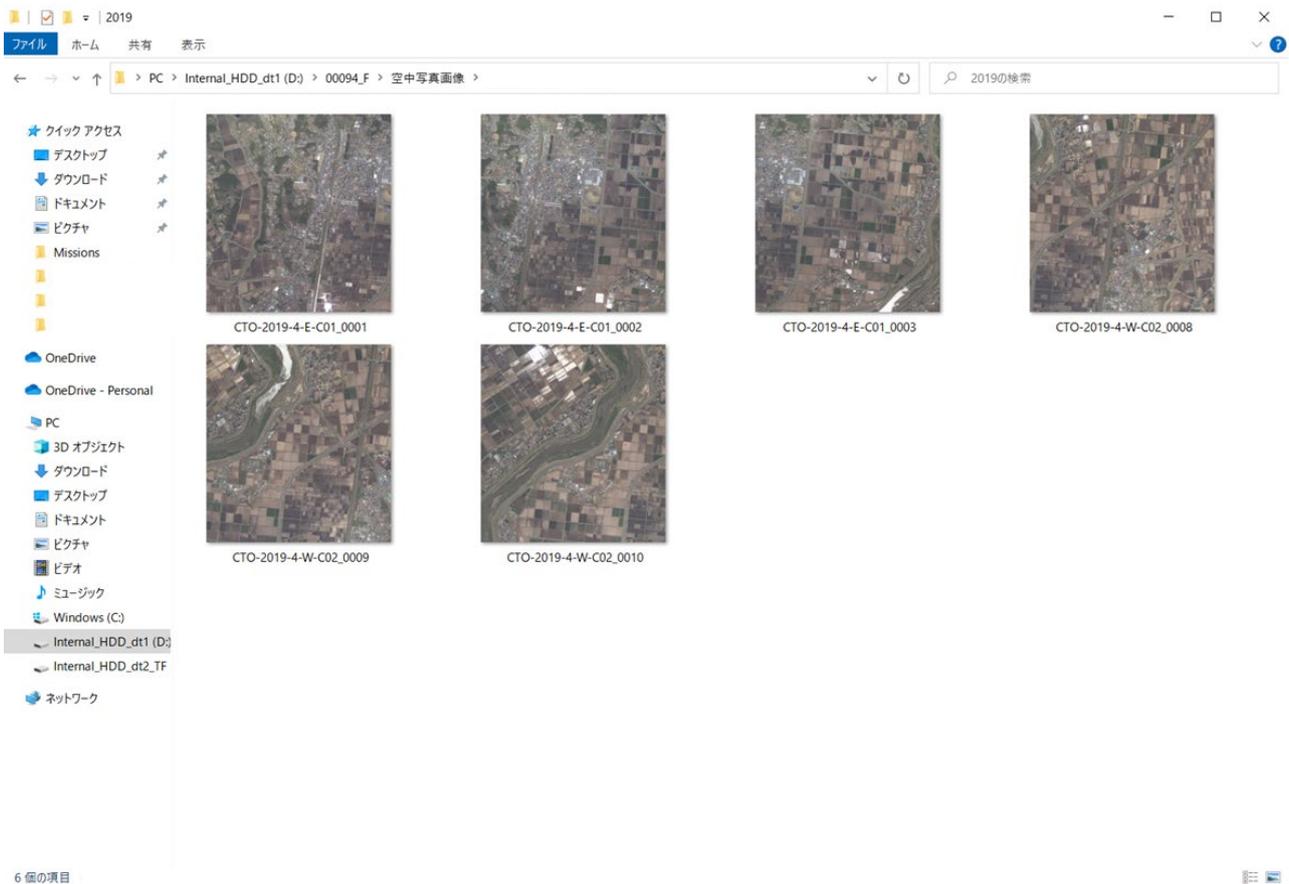


図 II -4 プログラム飛行により撮影された写真画像群

なお、ドローンによる撮影の方法の詳細（飛行・撮影の実施、安全な運用のための注意事項など）および地上基準点の設置方法については、農研機構農業環境変動研究センターが令和3年3月に発行した技術マニュアル「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）」の2章「ドローンによる撮影」、3章「地上基準点の測量」を参照されることをお勧めします。

② 航空機を用いた撮影による空中写真データの活用

3次元形状の復元（3次元点群データ、3次元モデルの生成）は、写真測量や地形図の作成などを目的に撮影された従来までの航空写真を用いても実施することが可能です。航空写真の閲覧・購入は、国土地理院の地図・航空写真閲覧サービス（<https://mapps.gsi.go.jp/>）からおこなうことができます。ドローンによる撮影したものに比べて、地上解像度は劣りますが、広範な範囲をカバーすることが可能であり、用途によっては十分活用が可能です。図Ⅱ-5は、航空機によって撮影された写真画像群の例です。



図Ⅱ-5 航空機により撮影された写真画像群

③ SfM ソフトウェアを用いた 3 次元形状の復元

一定のオーバーラップを有する写真画像群から SfM ソフトウェアを用いることにより対象物の 3 次元形状を復元することができます。

SfM (Structure from motion) : 複数の画像からカメラの撮影位置を推定し, 撮影画像中の特徴点 (被写体) の 3 次元分布を推定する技術。バーチャルリアリティやロボットの自律制御や自動車の衝突防止などの分野で活用。

MVS (Multi-view Stereo) : SfM で推定したモデルから高密度な 3 次元点群を構築する技術。写真測量の技術がベース (伝統的な写真測量に比べて簡易)。従来の航空写真などと比較して, より詳細な情報の把握が可能。

SfM-MVS は, 異なる視点から撮影した複数の写真から被写体の 3 次元モデルを生成する技術のことになります。

SfM ソフトウェアは, 複数のソフトウェアメーカーから市販されています (Agisoft 社 Metashape Professional, Pix4D 社 Pix4Dmapper など)。ドローンにより撮影された一定のオーバーラップを有する写真画像群を読み込み, 各写真画像の撮影位置を推定し, 推定された撮影位置にもとづき撮影画像中の特徴点の 3 次元分布を解析することによって, 対象地域 (農地) の 3 次元形状を復元する (3 次元点群データの出力) ことができます。

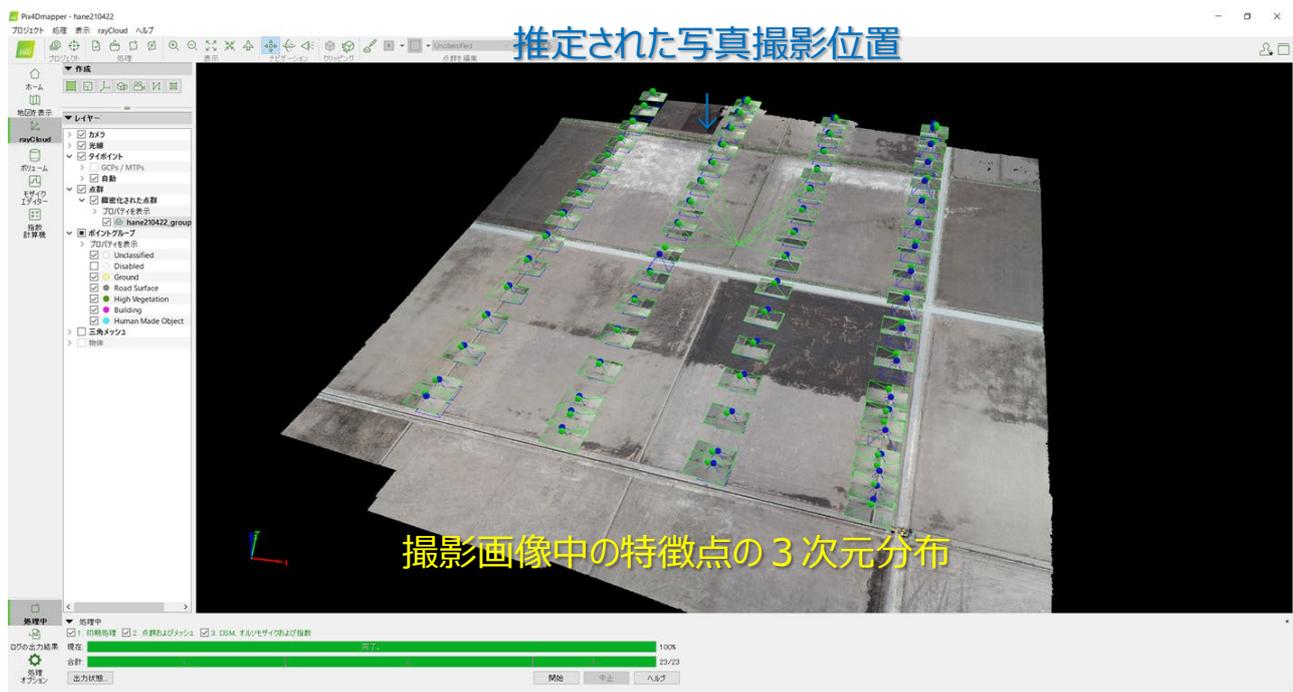
図Ⅱ-6は、Agisoft社のMetashape Professionalによる3次元点群データの生成時のキャプチャー画像を示しています。



図Ⅱ-6 3次元点群データの生成時のキャプチャー画像 (Agisoft社 Metashape Professional)

Agisoft社のMetashapeの概要および3次元点群データの生成の詳しい流れについては、先に紹介した技術マニュアル「ドローンを用いたほ場計測マニュアル」の4章「Agisoft Metashape Professionalによる地表高データの生成」(P.27~36)等に、詳細な手順が紹介されています。

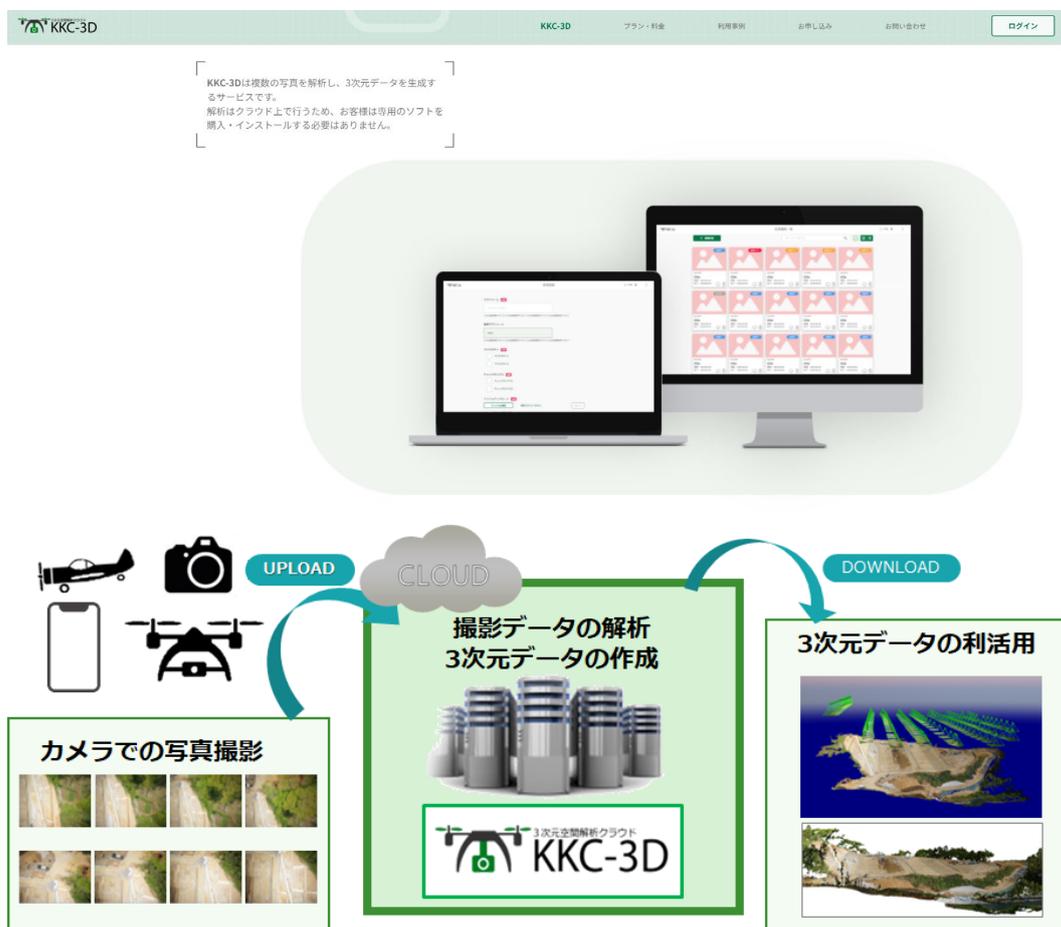
図Ⅱ-7は、Pix4D社のPix4Dmapperによる3次元点群データの生成時のキャプチャー画像を示しています。Pix4Dmapperを用いた3次元点群データの生成は、「新規プロジェクト」を選び、「画像の選択」のウィンドウで「画像を追加」を選択し、撮影した画像群を読み込み、画像プロパティ、出力座標系を確認の後、処理オプションで「3D Maps」を選び、処理を開始することで生成が可能です。



図Ⅱ-7 3次元点群データの生成時のキャプチャー画像
(Pix4D社 Pix4D Mapper)

④ 3次元データ生成サービスを用いた3次元形状の復元

3次元形状の復元（3次元点群データの出力）は、SfMソフトウェアを所有していない場合は、web上の3次元データ生成サービスを用いる（ドローン等により撮影された一定のオーバーラップを有する写真画像群などをwebサービスに解析データとしてアップロード）ことで、3次元形状の復元が可能です。図II-8は、3次元データ生成サービスの一例を示しています。



図II-8 3次元データ生成サービスの例
(国際航業(株)社 3次元空間解析 KKC-3D)

※ 3次元空間解析 KKC-3D (<https://www.3dcloud.kkc.jp/>)

⑤ LiDAR 搭載端末を用いた 3 次元形状の復元

近年, Apple 社の iPhone の上位機種 (iPhone 15 Pro など) や iPad Pro などの高性能な携帯端末では, レーザー光の反射を利用して対象物までの距離や対象物の形などを計測することができる LiDAR (Light Detection And Ranging) スキャナを搭載したものが増えてきています。LiDAR 搭載端末において, 3D スキャンアプリケーションを用いることにより, 地物の 3 次元形状の復元が可能です (図 II - 9)。3 次元形状の復元が可能な範囲は限られますが, 局所的な変化などを詳細に押さえておきたい時などには有効です。

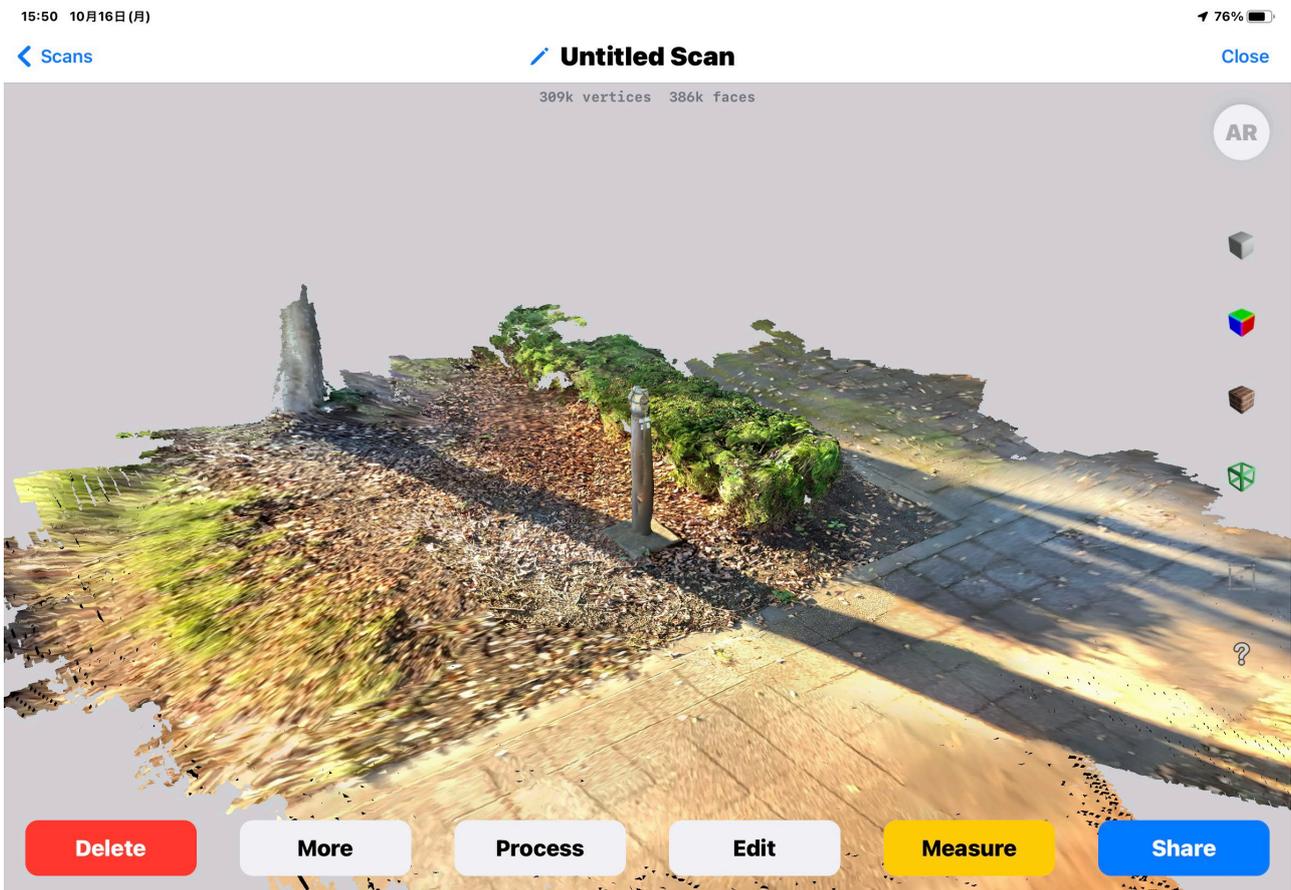


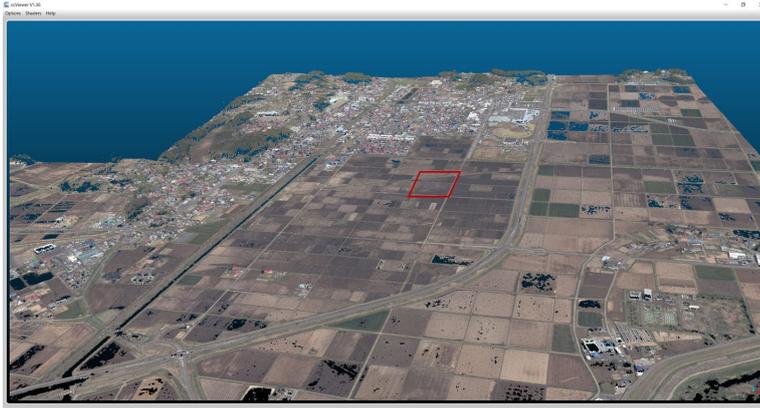
図 II - 9 3D スキャンアプリケーションの例
(Laan Labs 社 : 3D Scanner App)

⑥ 3次元点群データ・3次元モデル

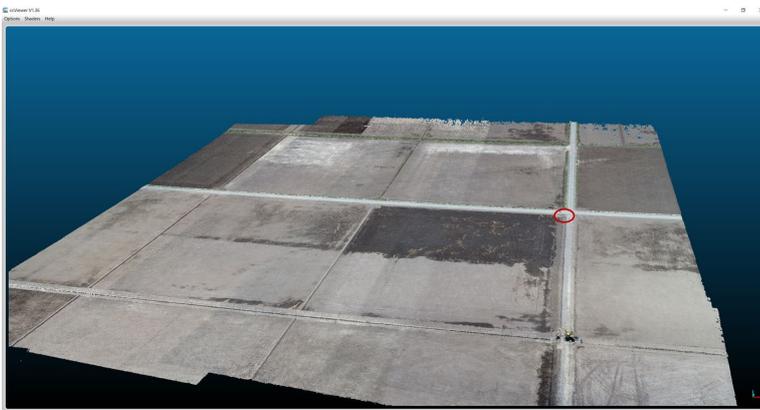
3次元点群データは、3次元形状復元技術（SfM-MVS）や3次元レーザースキャナーなどを使用して取得することができる3次元空間における物体や環境（地表面）の3次元形状を表現した無数の点の集合体です。1つ1つの点が3次元空間の位置（座標値）や色などの情報を持っており、3次元モデルや数値表層モデル（DSM）、オルソモザイク画像などの農地基盤データの元データにもなります。LAS形式、txt形式などの複数のデータ形式が存在します。

3次元モデルは、コンピューター上で表現された3次元の座標を持つ立体的なモデルデータです。点の集合体である3次元点群データの点と点を結び面データに変換（3次元モデル化）することで3次元モデルが得られます。

図Ⅱ-10～12は、航空機による空中写真データ（図Ⅱ-10）、ドローンによる空中写真データ（図Ⅱ-11）、LiDAR搭載端末（図Ⅱ-12）を用いて3次元形状の復元をおこなった3次元点群データを示しています（表示にはオープンソースの点群処理・表示ソフト CloudCompare viewer 使用）。図Ⅱ-10内の赤い四角が図Ⅱ-11の範囲、図Ⅱ-11内の赤い丸の範囲が図Ⅱ-12の範囲を示しており、各手法で3次元形状の復元できる範囲が大きく異なることが分かります。



図Ⅱ-10 3次元点群データ（航空写真データを用いて3次元化）
（CloudCompare viewer）



図Ⅱ-11 3次元点群データ（ドローン写真データを用いて3次元化）
（CloudCompare viewer）



図Ⅱ-12 3次元点群データ（LiDAR 搭載端末を用いて3次元化）
（CloudCompare viewer）

⑦ 数値表層モデル (DSM) ・数値標高モデル (DEM) の構築

SfM ソフトウェア等を用いて復元した 3 次元モデル (3 次元点群データ) から、GIS 等で高さ (標高) や傾斜などの表示・解析に用いる数値表層モデル (DSM) や数値標高モデル (DEM) が出力できます (図 II -13)。一般的な SfM ソフトウェアでは、処理・解析のワークフローのなかで DSM・DEM の構築が可能です。構築・出力された DSM, DEM は、GIS 上で表示できます。図 II -14 は、平地地域の水田において、構築・出力した DSM の例、図 II -15 は、山間地域の水田において、構築・出力した DSM の例を示しています。

DSM (Digital Surface Model) : 植生や建物の高さも含む地表面のモデル

DEM (Digital Elevation Model) : 植生や建物を除いた地表面だけのモデル

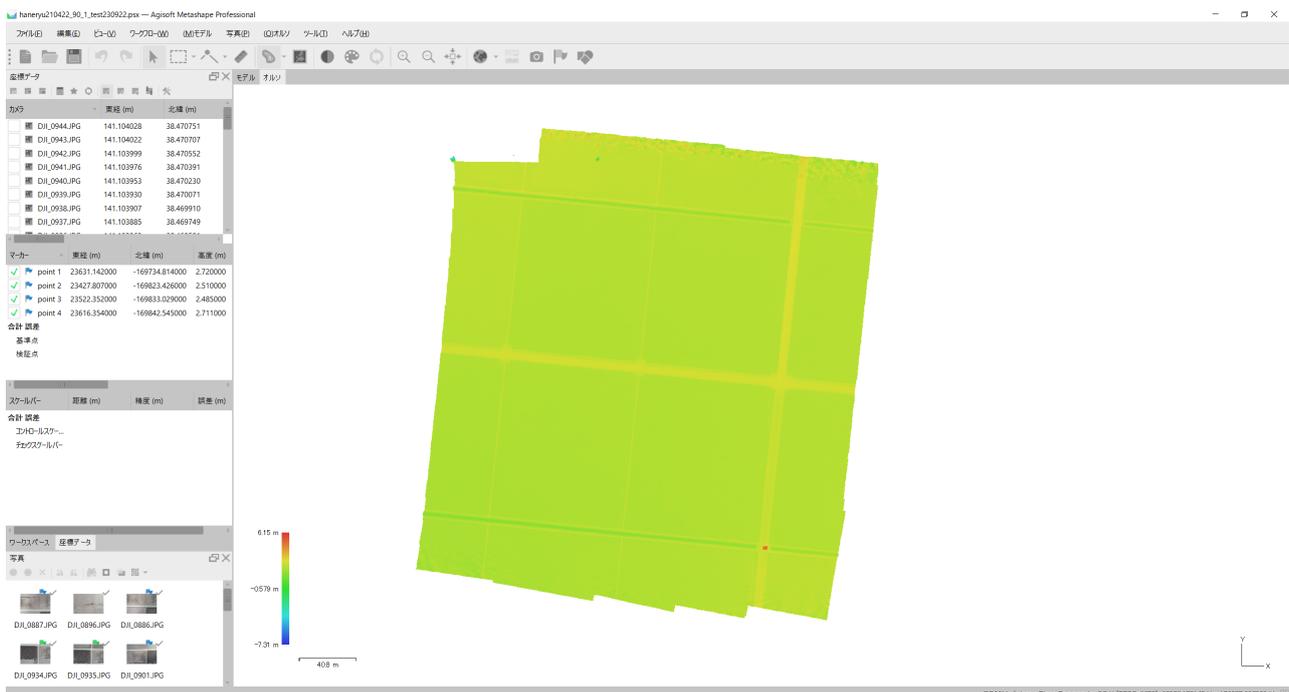


図 II -13 構築された数値表層モデル (DSM)
(Agisoft 社 Metashape Professional)

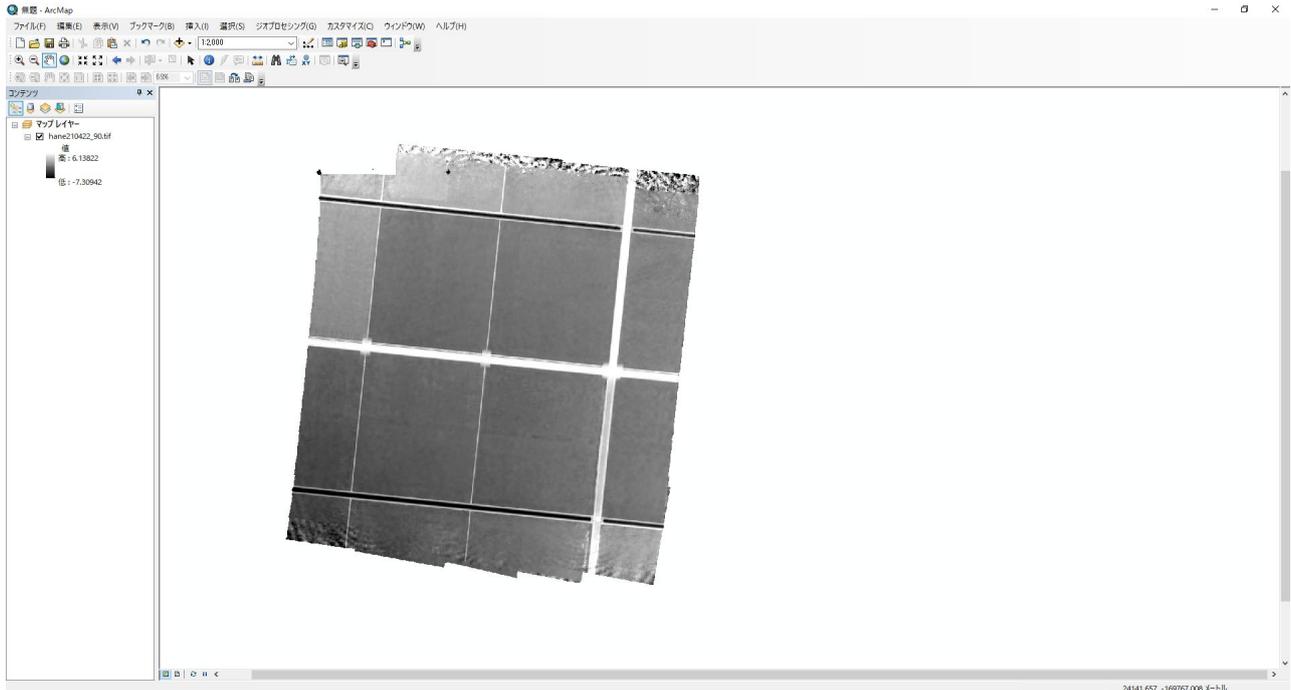


図 II-14 地理情報システムで表示した数値表層モデル (DSM) 例 :
平地地域 (ESRI 社 ArcGIS)

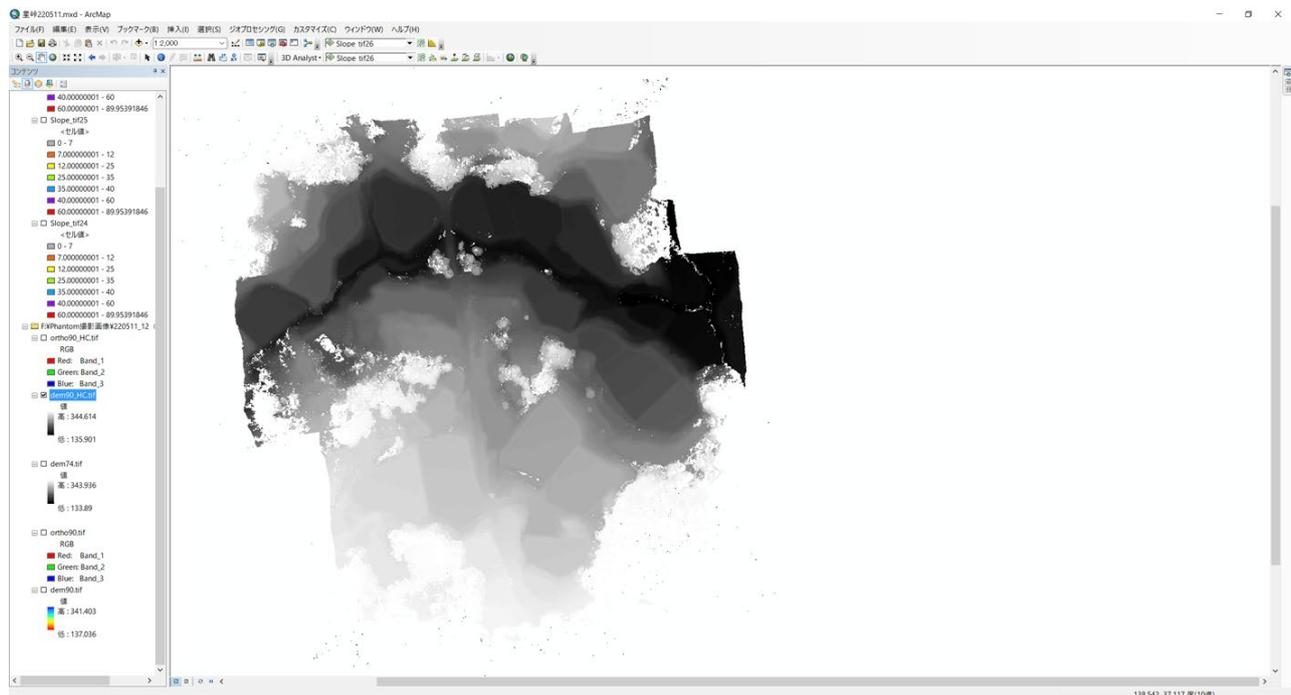


図 II-15 地理情報システムで表示した数値表層モデル (DSM) 例 :
山地地域 (ESRI 社 ArcGIS)

⑧ GIS ソフトウェアなどを用いた勾配図の作成・出力

構築・出力された DSM を用いることによって、法面や畦畔などの斜面の勾配（傾斜度）が分かる勾配図を作成・出力することが可能です。代表的な GIS ソフトウェア、ESRI 社 ArcGIS（ArcMap および 3D Analyst）を用いた勾配図作成・出力の流れは、TIFF 形式などで出力した DSM のファイルを ArcMap 上で「ファイル」→「データ追加」で読み込み、読み込んだ DSM ファイルを選択し、「ジオプロセッシング」→「ArcToolbox」→「3D Analyst ツール」→「ラスターサーフィス」→「傾斜角（Slope）」を選択し、入力ラスターで読み込んだ DSM ファイルを選び、実行することで畦畔・法面や圃場進入路などを含む圃場周辺の農地基盤の勾配図の作成・出力が可能です（図 II - 16）。

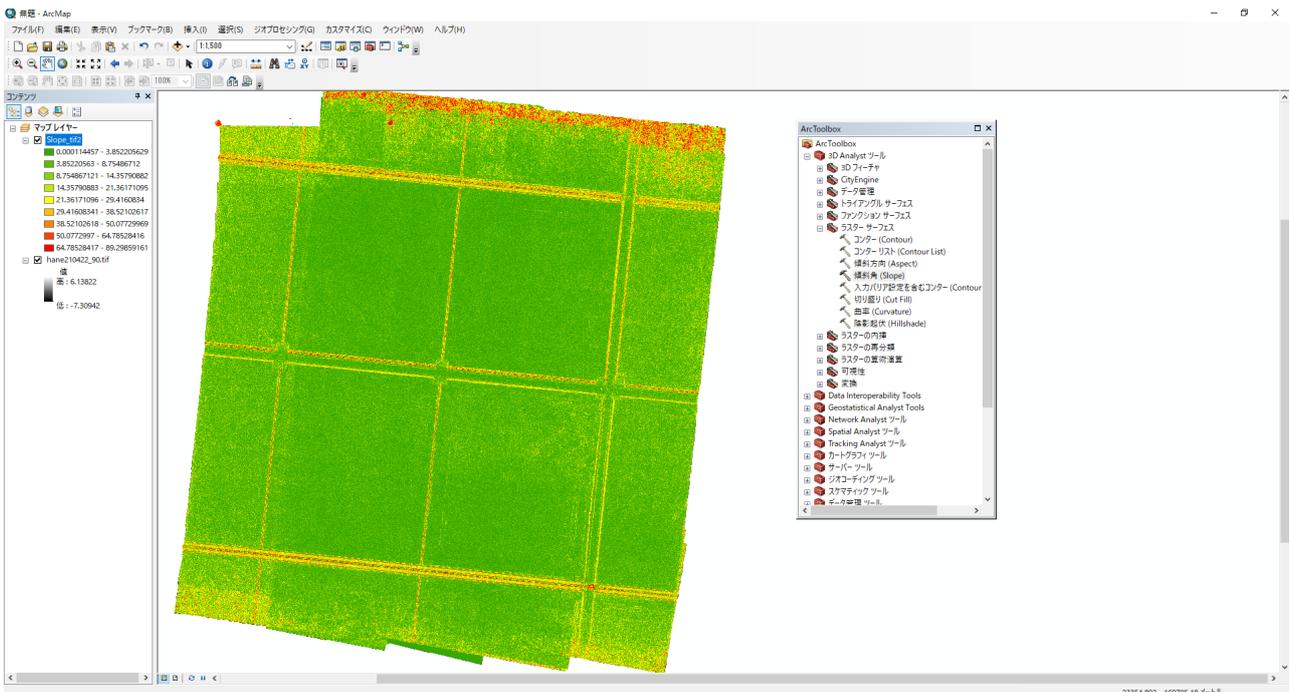
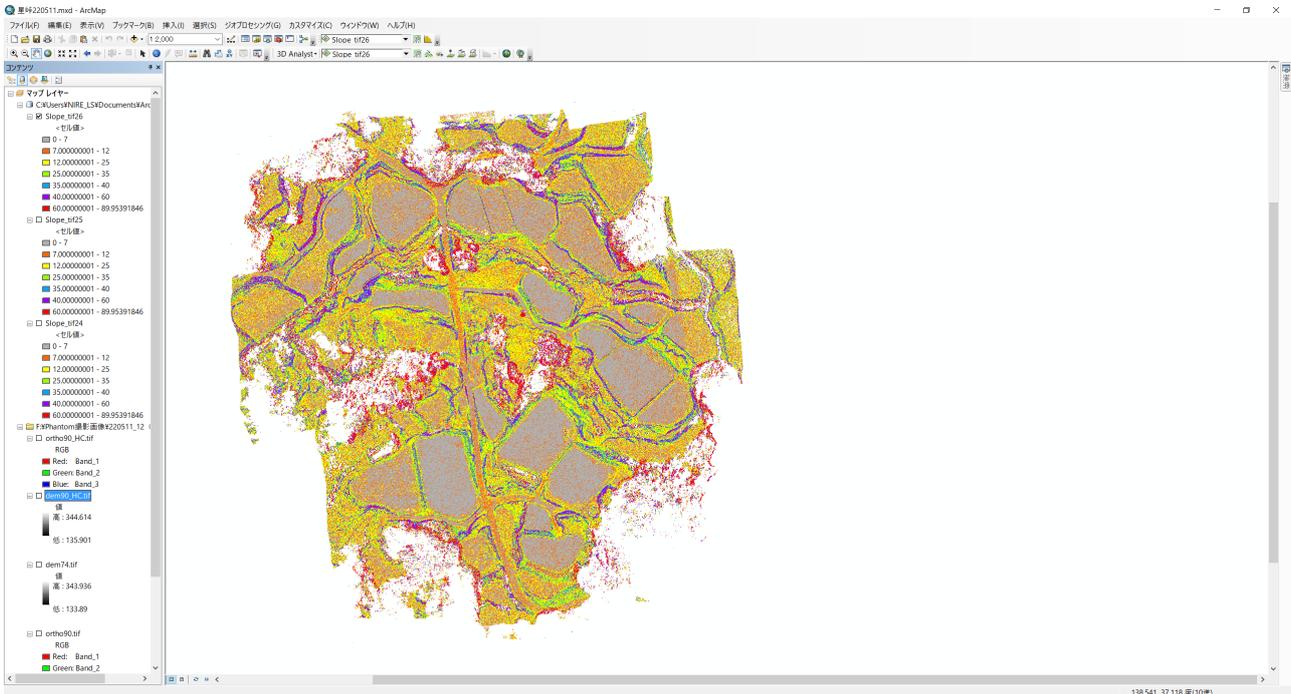


図 II - 16 GIS ソフトウェアを用いて作成した勾配図
(ESRI 社 ArcGIS)

対象地域内の勾配（傾斜度）を区分し、区分ごとに表示の設定をすることによって、急勾配箇所などを可視化することができます（図Ⅱ-17）。



図Ⅱ-17 GISソフトウェアを用いて作成した勾配区分図
※赤や紫の表示は40°以上の急勾配箇所
(ESRI社 ArcGIS)

⑨ 陰影起伏図の表示・出力

DSM や DEM の表示において、陰影や起伏を強調した表示（陰影起伏表示：ヒルシェーディング）をおこなうことにより、農地基盤の起伏（高低差や傾斜）を見える化することができます。陰影起伏表示は、SfM ソフトウェアや GIS ソフトウェアの表示機能として実装されており、図 II -18 のような表示が可能です。

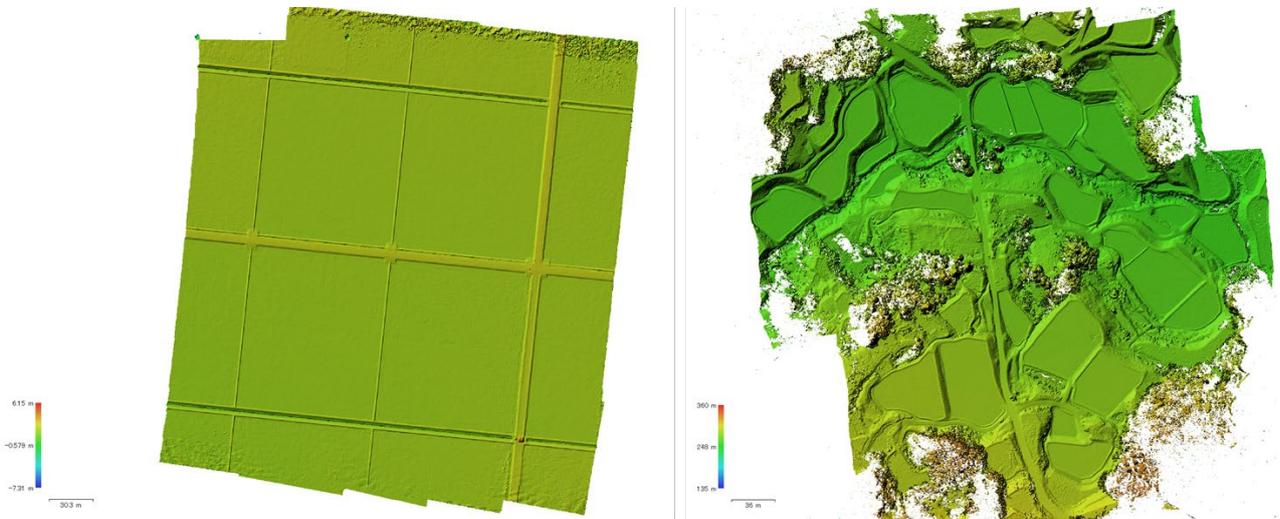


図 II -18 農地基盤の陰影起伏表示の例
※左：平地地域，右：山間地域
(Agisoft 社 Metashape Professional)

⑩ オルソモザイク画像の表示・出力

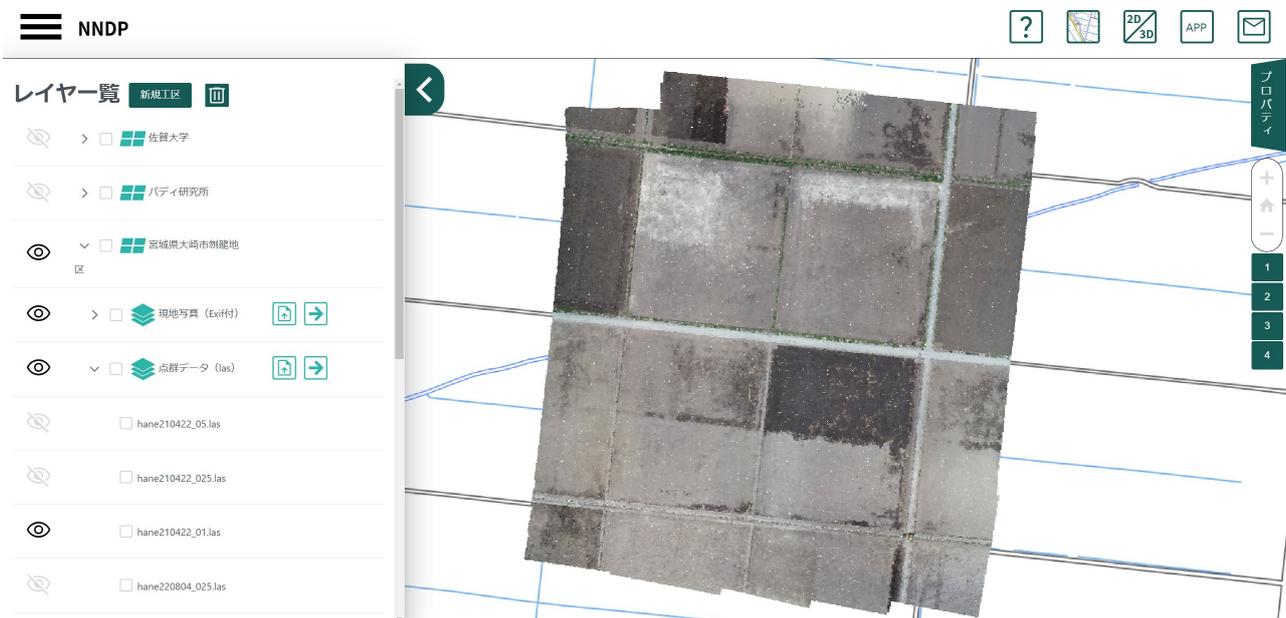
ドローンなどで撮影をした写真画像群から SfM ソフトウェアを用いて 3 次元形状の復元をおこなうことにより、オルソモザイク画像の出力が可能です（図 II - 19）。ドローンなどで撮影した元の空中写真画像は、中心投影の画像であり、歪みを有しています。そのため、既存の地図などとは重ね合わせるできません。オルソモザイク画像は正射変換したものであり、写真内の対象物が正しい位置に表示され、GIS などを用いて重ね合わせることも可能です。



図 II -19 出力されたオルソモザイク画像の例
※左：平地地域，右：山間地域
(Agisoft 社 Metashape Professional)

⑪ データプラットフォームへの格納

出力された3次元点群データ・3次元モデル、勾配図、陰影起伏図、オルソモザイク画像などの農地基盤に関わるデータは、場所（対象地区・対象圃場など）や時期ごとに整理して蓄積しておくことにより、以後の変状把握などに活用することができます。加えて、サーバーやクラウド上などに構築されたデータプラットフォームに格納することにより、他のユーザーとの共有、データプラットフォーム上のアプリケーションなどを用いた解析などが可能となります（図Ⅱ-20）。



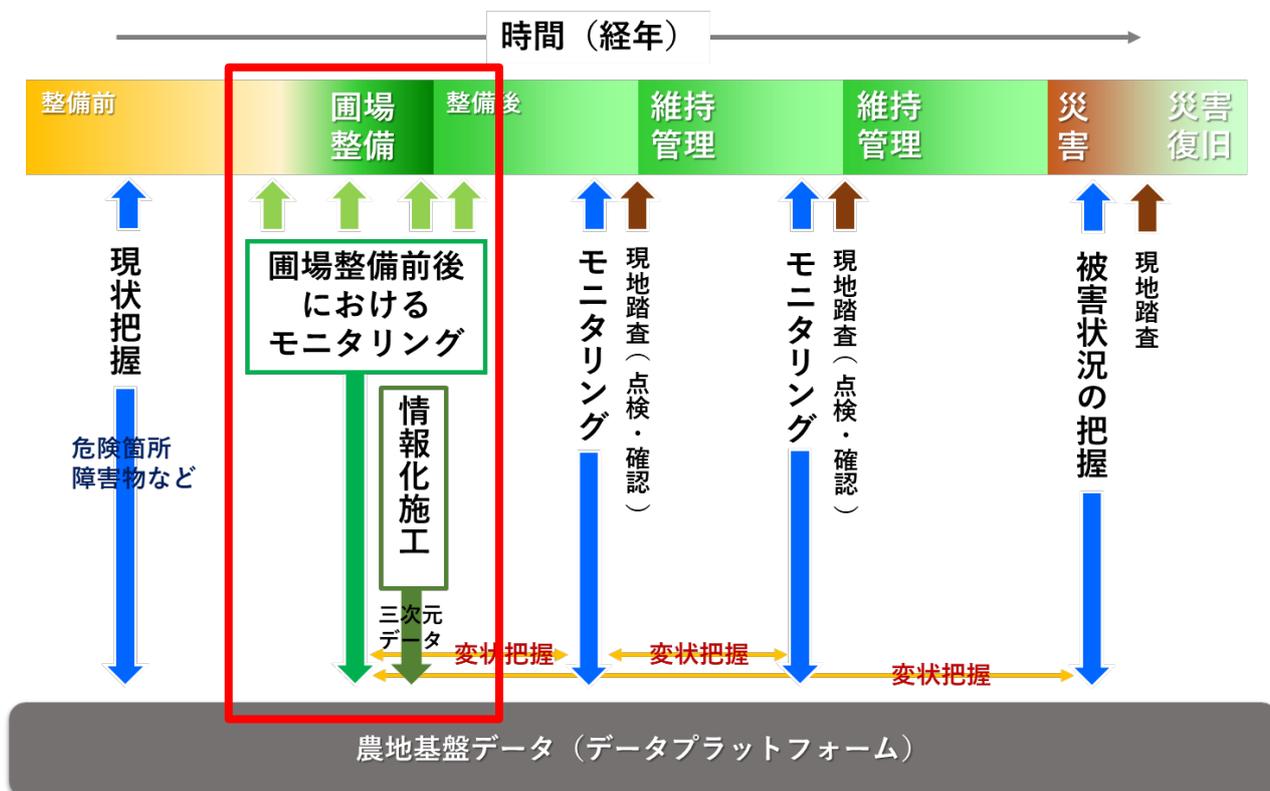
図Ⅱ-20 データプラットフォームへのデータ搭載例
（農研機構 農地基盤デジタルプラットフォームのプロトタイプ）

3章：圃場整備前後におけるモニタリング

圃場整備前後における農地基盤のモニタリング

圃場整備の前後（図Ⅲ-1）は、農地の基盤条件が大きく変化します。整備前の農地の条件（土壌条件や透排水性など）の違いや、整備期間中の施工履歴、3次元データなどを、以後の営農や維持管理に引き継ぐことが出来れば、整備の効果はより高まります。一方で、整備前や整備期間中の事象は、機会を逃すと取得が困難なデータでもあり、適切なタイミングで取得する必要があります。

近年では、情報化施工などを通して、農地基盤の3次元データが整備され始めており、あわせて実施することにより、より効率的で効果的なデータの取得が可能です。他方、事業の実施期間内は、事業の実施主体によるモニタリングが可能だが、期間外（整備前後）は、営農や維持管理の主体によるモニタリングが必要となることもあり、主体間が連携し、相互にデータ共有をおこなうことも重要です。

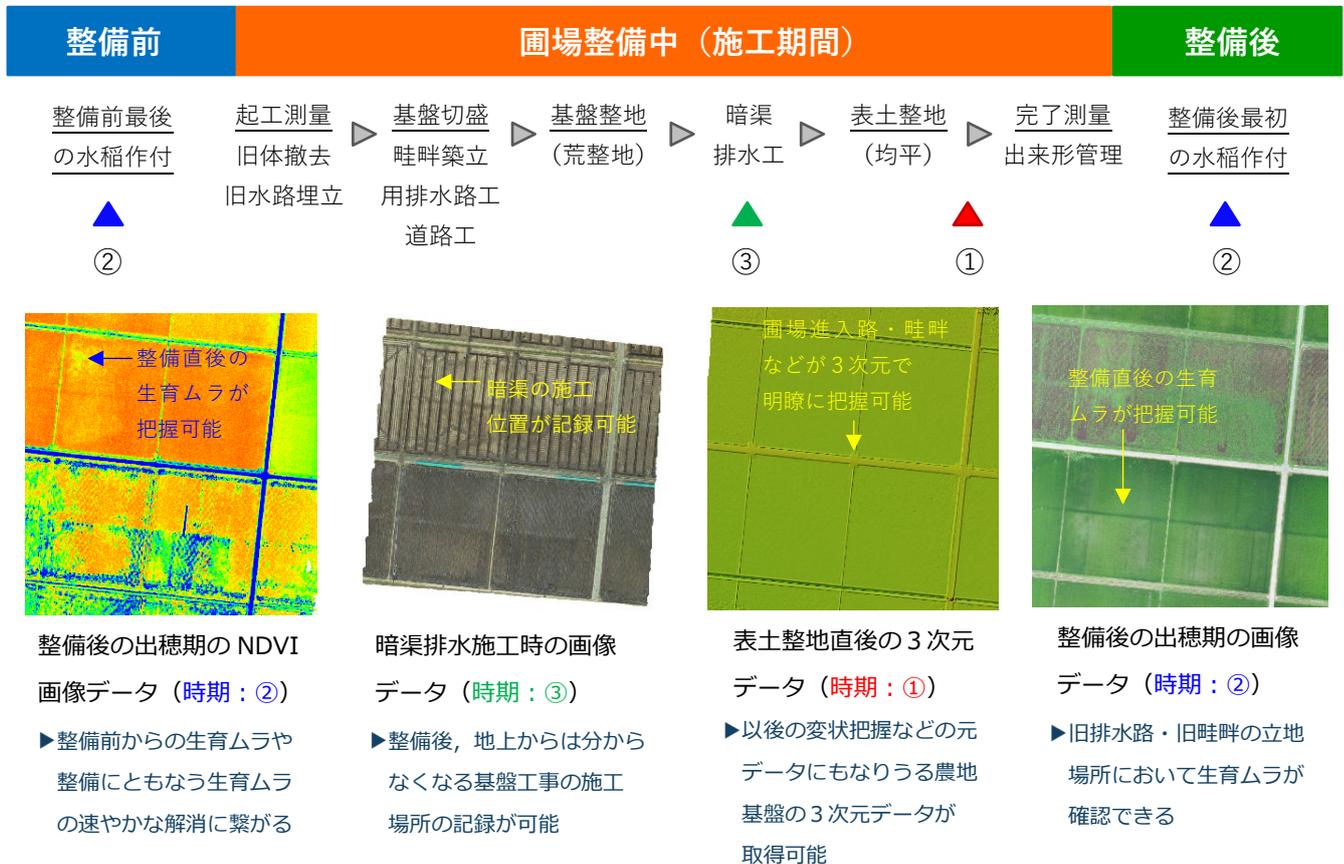


図Ⅲ-1 圃場整備前後におけるモニタリング

圃場整備前後のドローンセンシングを実施する有効なタイミング

営農や維持管理に活用可能なデータを取得できる圃場整備前後のドローンセンシングを実施する有効なタイミングは、以下の3つです（図Ⅲ-2）。

- ① 表土整地の直後： 以後の変状把握（維持管理、災害発生時の復旧）などの元データにもなりうる農地基盤の3次元データを取得することができます。
- ② 整備直前・直後に作付けした水稻の出穂期： 整備前からの生育ムラや整備にともなう生育ムラを把握することができます。マルチスペクトルカメラを用いれば、正規化植生指数（NDVI: Normalized Difference Vegetation Index）で生育ムラを把握することも可能です。
- ③ 客土や暗渠施工など基盤条件を大きく変化させる工事のタイミング： 整備後、地上からの把握は困難となる客土の実施場所や暗渠の施工位置などを記録することができます。



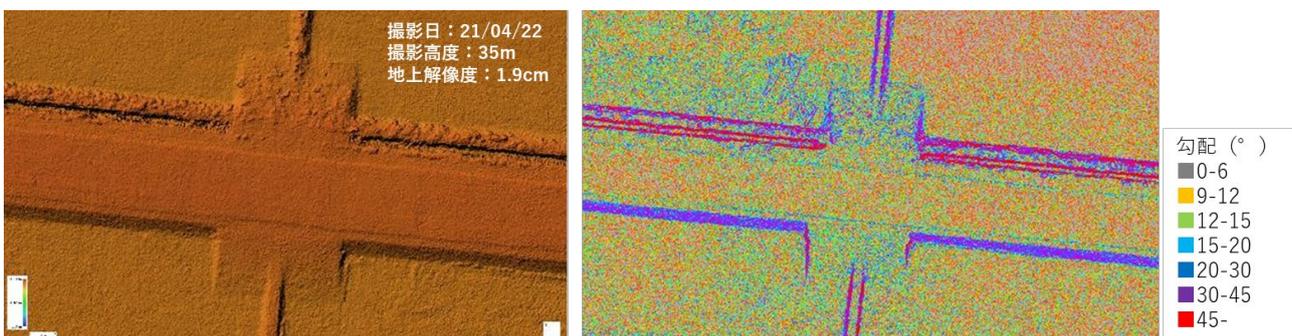
図Ⅲ-2 圃場整備の流れとドローンセンシングのタイミング

① 表土整地の直後

圃場整備期間中の表土整地（均平）の直後のタイミングでドローンによるセンシングを実施し、3次元化を試みることで、植生や耕作管理、経年変化の影響を受けていない農地基盤の3次元データを取得することができます。

図Ⅲ-3（左）は圃場整備地区において、表土整地直後におこなったドローンセンシングによって得られた3次元データについて、圃場進入路付近を拡大表示したものです。田面、畦畔・法面、耕作道、圃場進入路が植生などの影響を受けず、記録できていることが見て取れます。図Ⅲ-3（右）は、3次元モデル（数値表層モデル）からGISソフト（ESRI社 ArcGIS Spatial Analyst）の傾斜角算出ツールを用いて、同範囲の勾配を算出したものです（本書、P.22 参照）。図中の法面の勾配は最大45°で設計されていますが、作業道の南側の法面は紫色（30～45°）の表示で設計通りとなっていることが見て取れます。

同タイミングで取得された3次元データは、整備後の何らかの要因にとまらぬ、農地基盤に変化が生じた際に、その変状を把握する際の元データとなります。例えば、耕作道や圃場進入路などの経年的な劣化状況の把握や、地震や豪雨などの災害により農地基盤が被害を受けた際の被害（変状）の把握、災害復旧にあたっての基礎データとしても活用が可能です。



3次元モデル（陰影起伏表示）

勾配図（3次元モデルから解析）

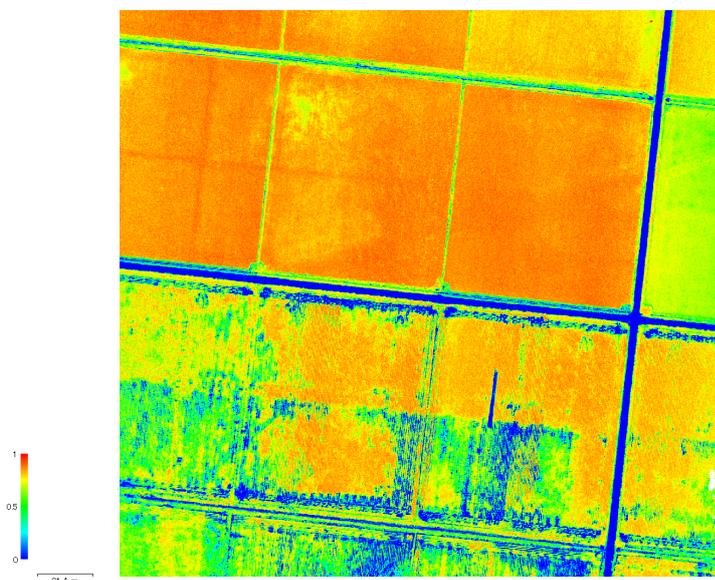
図Ⅲ-3 表土整地直後のドローンセンシングにより得られた3次元データ（※圃場進入路付近を拡大）

② 整備直前・直後に作付けした水稻の出穂期

営農・栽培などの分野においては、ドローンによるセンシングは水稻の生育状況やその差（生育ムラ）を把握することに用いられます。特に生育ムラを把握する上では、イネの出穂期のセンシングが有効です。生育のムラは、地力や保水・排水性などの条件の違いに起因していることが多く、生育ムラを通して農地基盤の条件の違いを可視化することが可能です。

圃場整備前後においては、整備直前（整備前最後の水稻作付け時）、整備直後（整備後最初の水稻作付け時）のタイミングは、基盤条件が大きく変化する前後の生育ムラを記録できる機会であり、圃場内で生育ムラを生じさせる整備前の基盤条件の違いの解消と、整備にともない工事直後に生じてしまう圃場内の地力差などの影響の早期解消の両面から有効です。

生育ムラは、可視画像（RGB 画像）からも植被の差や葉色の差（緑の濃さ）などから把握することが可能（図Ⅲ-2：右から1番目の画像）ですが、近赤外域を含むマルチスペクトル画像から算出することができる植生の活性度を表す NDVI（ $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ ）、NIR は近赤外域の反射率、RED は赤色光の反射率）を用いると、より精緻に生育差（橙色の部分が NDVI の値が大きく、植生の活性度は高く、緑色や青色の部分は NDVI の値が小さく、植生の活性度は低い）を把握することができます（図Ⅲ-4）。

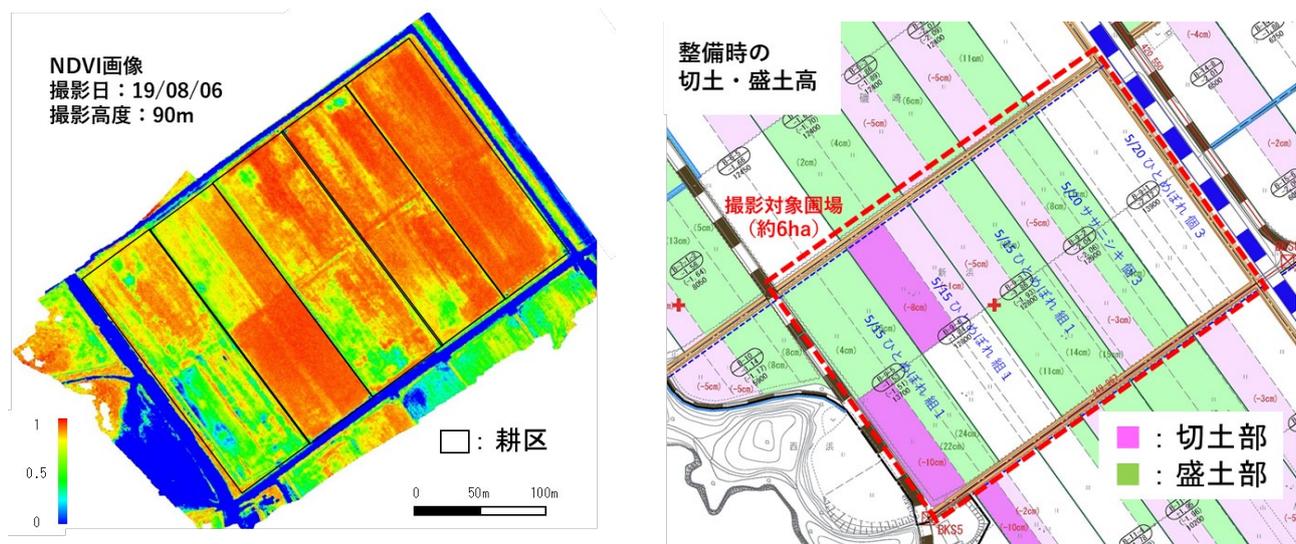


図Ⅲ-4 整備直後の水稻出穂期の NDVI 画像データ

図Ⅲ-5は、圃場整備地区において、圃場整備後に最初に作付けした水稻の出穂期に、ドローンセンシングを実施し、得られたマルチスペクトル画像から算出したNDVI画像（左）と撮影対象圃場の整備時の切土・盛土高（右）を示したものです。NDVI画像からは植生指数の差として圃場内の水稻の生育ムラが把握できます（赤色の部分は生育が良好な部分，橙色や黄色は生育に影響が出ている部分，緑色や青色の部分は欠株が生じるなど生育が不良な部分を示しています）。現在の5枚の耕区単位での差に加えて、圃場整備以前の耕区単位と思われる生育差も確認することができます。

当該地区の生育ムラについては、整備時の切土盛土との関係が確認されています（図Ⅲ-5（右））。地区は、海拔0m以下の干拓地に立地しており、整備時において、耕土層下に酸性硫酸塩土壌が確認されていたことなどから、基盤整地にあたっては、基盤をなるべく動かさない整備方法が取られました。そのため、整備後も肥料を含む耕土を確保する表土扱いを実施することができなかったことも要因の1つと考えられます。

把握された生育ムラのデータをもとに、次年度の施肥量を圃場内で細かく調整する（生育が不良な部分だけ施肥量を増やす）などの対策を実施することにより、速やかに整備にともなう影響を解消することが可能となります。



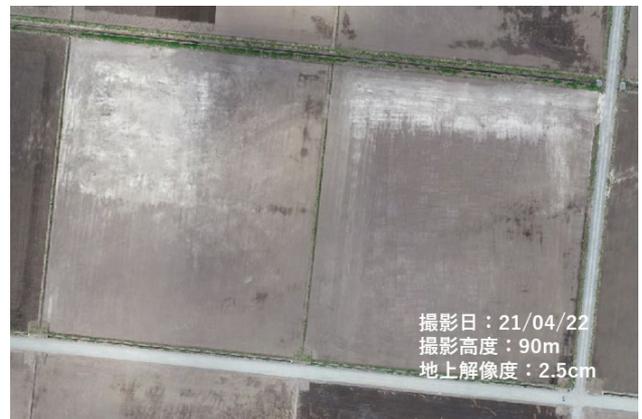
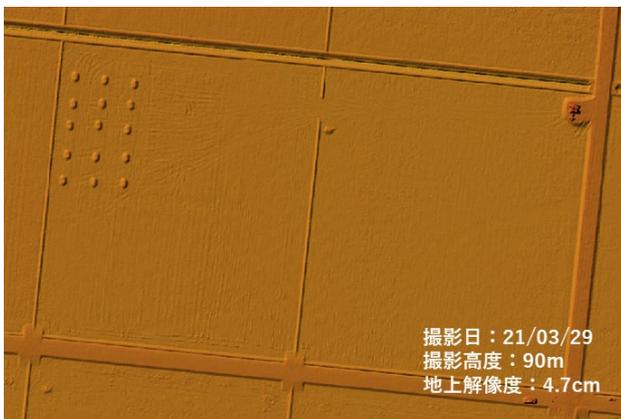
図Ⅲ-5 圃場整備後に最初に作付けした水稻の出穂期におけるドローンセンシング画像（NDVI画像）（左）と撮影対象圃場の整備時の切土・盛土高（右）

③ 客土・暗渠施工など基盤条件を大きく変化させる工事のタイミング

圃場整備時に実施される工事には整備後の基盤条件を変化させる工事が多く存在します。一方で、整備後には、実施場所や施工位置の地上からの把握が困難となるものも少なくありません。

図Ⅲ-6は、圃場整備地区において、客土工実施中とその1ヵ月後の客土工終了直後におこなったドローンセンシングによって得られた3次元データと可視画像です。図Ⅲ-6（左）では、圃場内にならす前の土盛り（左側の圃場の左上の複数の点）が陰影起伏図の凹凸で確認でき、図Ⅲ-6（右）では、ならされた後の客土の範囲が周辺より白っぽい土色の違いで確認できます。また、図Ⅲ-2（右から2番目の画像）は、暗渠施工中のドローンセンシング画像で、暗渠の施工位置（溝）が確認できます。

適時的なドローンセンシングによって記録された客土や暗渠などの施工の範囲や位置の情報は、以後の営農・維持管理において（例えば、客土後の的確な施肥管理、暗渠の維持管理や再整備など）において活用が可能です。

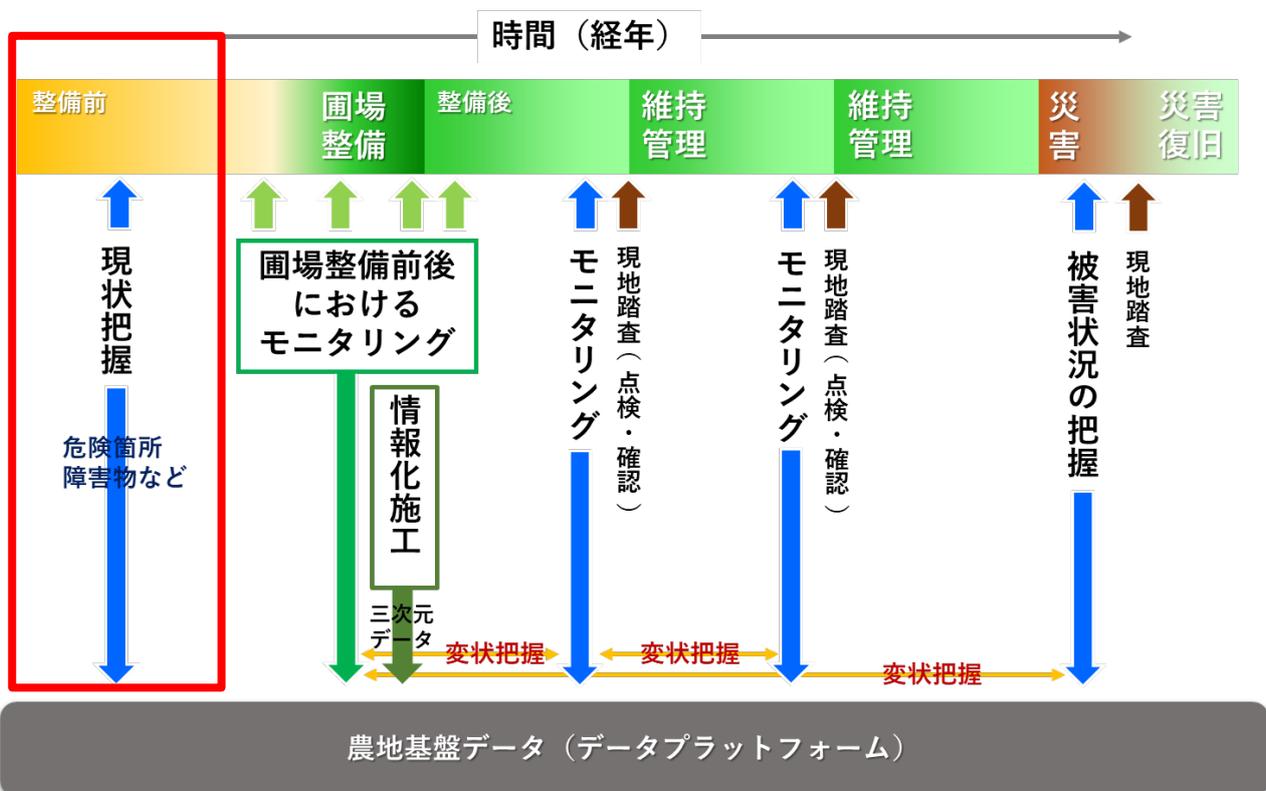


図Ⅲ-6 客土工直後のドローンセンシングにより得られた3次元データ（左）と可視画像（右）

4章：圃場周辺の農地基盤の障害物・危険箇所の把握

圃場周辺の農地基盤の障害物・危険箇所の把握

ドローン等を用いて取得した農地基盤データを用いることにより、圃場周辺の農地基盤の障害物や危険箇所等を把握することができます。圃場周辺の農地基盤の障害物や危険箇所の把握は、今後、普及が進んでいく自動走行などを実施するスマート農機等の円滑な走行において重要です。同時に、死亡事故などを含めて社会問題となっている農作業事故の防止、農作業時の安全確保の観点からも、障害物の有無や危険箇所の把握などの圃場周辺の作業環境の把握は不可欠です。特に、地形などの耕作条件の厳しい中山間地域や、大規模な圃場整備などが実施されていない整備前の地区では、農地基盤の条件が複雑かつ一様でないため、危険箇所等が存在する可能性が高く、重要です（図IV-1）。



図IV-1 圃場周辺の農地基盤の障害物・危険箇所の把握

農作業安全に関わる農地基盤の環境的要素

表Ⅳ-1は、木村（2017）の区画および道路周辺の危険箇所・作業困難の状況のまとめなどの既往研究や農作業安全に関わる指針などをもとに、農作業安全に関わる農地基盤の環境的要素を整理したものです。圃場周辺の箇所ごと、大きさや勾配などの特徴ごとに整理したもので、ドローンセンシング及び3次元技術を用いて把握が不可能ないし困難と思われる環境的要素を整理しています。土質や地盤などに関わる要素は、可視画像だけでは把握が困難な部分が多い一方で、それ以外の要素については、概ね把握が可能です。

表Ⅳ-1 農作業安全に関わる農地基盤の環境的要素

	形状・大きさ	高低・落差	勾配	土質・地盤	安全施設・障害物	管理状態
農地区画 (田面)	○形状の不整形 ○規模の狭小			×小さい地耐力	▲障害物の存在	
畦畔	○幅の不足	●高さの不足				▲雑草等の繁茂
法面	●大きい法面	●高い法面	●急な勾配	×土質の悪さ △石礫の多さ	▲小段の欠如 ▲障害物（樹木・石ほか）の存在	▲雑草等の繁茂
進入路	○配置の悪さ ○幅員の不足	●道路と田面の大きな段差	●急な勾配	×舗装の悪さ（滑りやすさ）	△安全施設の欠如	
水路	○幅のある水路	●農道や田面との大きな落差			△渡し板や蓋等の欠如	
農道 (耕作道)	○形状の悪さ ○狭い幅員	●路面の陥没（凹凸） ・沈下等	●急な勾配	×舗装の悪さ	△安全施設の欠如 ▲障害物の存在	▲雑草等の繁茂

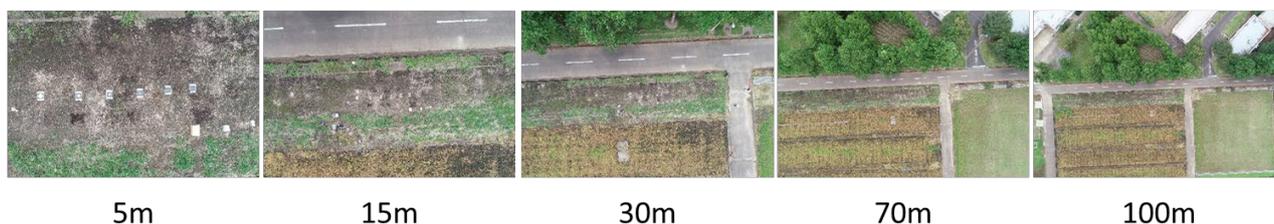
○：2次元情報から把握可能 ●：3次元情報から把握可能 ▲△：条件次第で把握可能 ×：把握困難

※木村和弘（2017）：「棚田における農作業事故と動力刈払い機安全対策」：『棚田の保全と整備』，農林統計出版，pp.153-168

圃場周辺の農地基盤の障害物の把握

圃場周辺の農地基盤の障害物を把握する方法には、ドローン等を用いて取得した農地基盤データのうち、オルソモザイク画像を用いて目視で確認する方法と、DSM（数値表層モデル）を陰影起伏（ヒルシェイド：Hill shade）表示した陰影起伏図を用いる方法があります。図IV-2は、異なるドローンの機種を用いて、複数段階の高度からマーカーを撮影した例です。ドローンによる地物の把握（分解能）は、ドローンに搭載されたカメラの性能と撮影高度に影響を受けます。

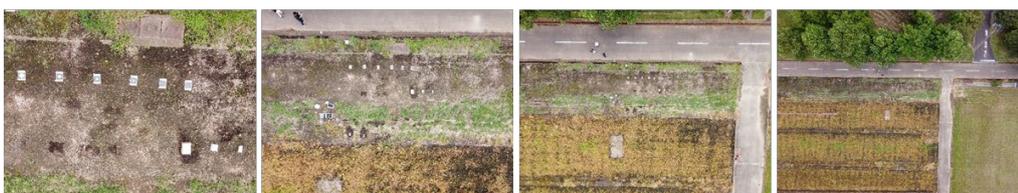
DJI Phantom4 Pro



Parrot ANAFI THERMAL



DJI Mavic Mini



DJI Phantom4 Pro：センサー：1型（13.2mm×8.8mm），
2000万画素（5472×3648），焦点距離：8.8mm，撮影高度60mでの分解能1.64cm

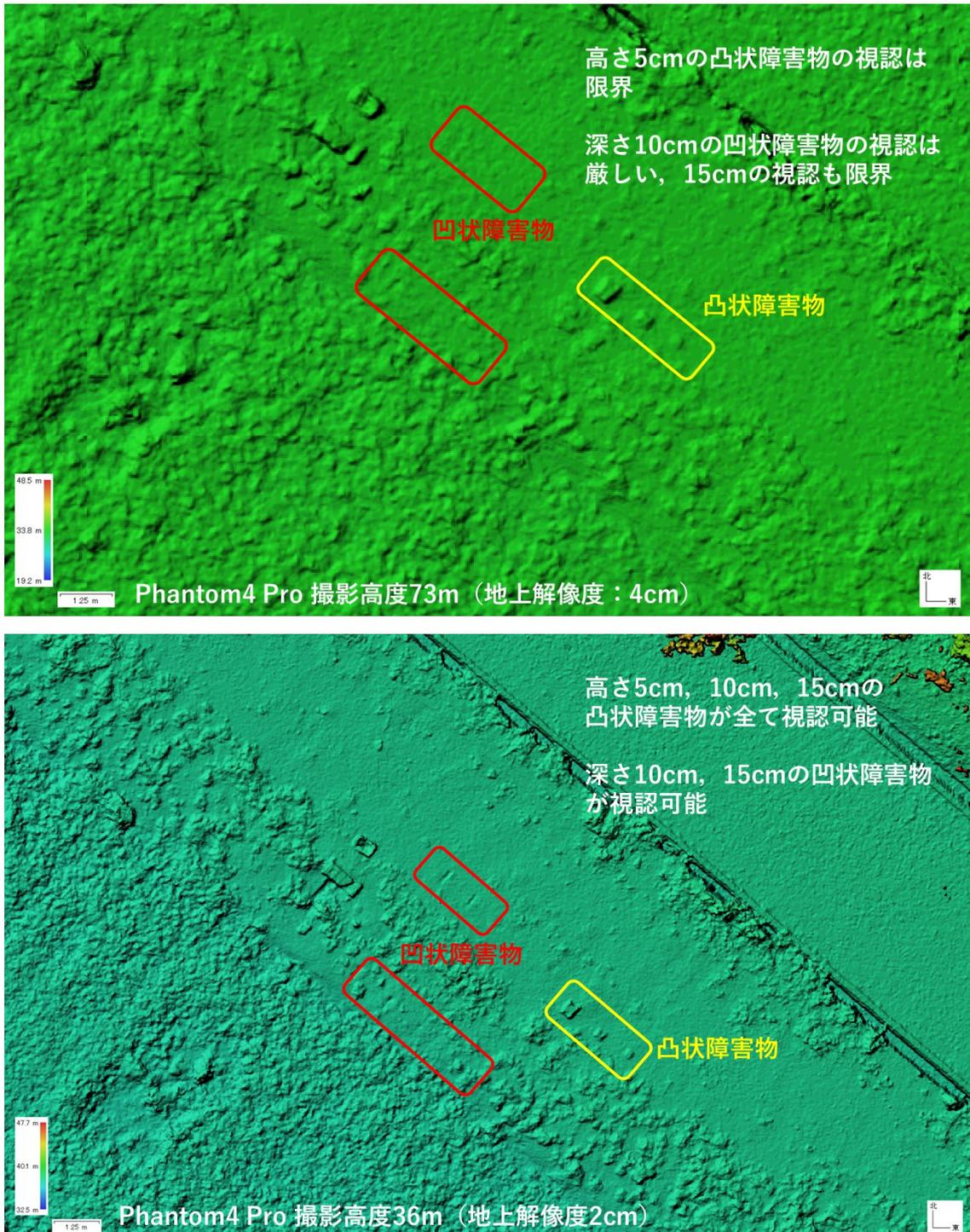
Parrot ANAFI THERMAL：センサー：1/2.4型（対角7.487mm），
2100万画素（5344×4016）焦点距離：4.1mm，撮影高度60mでの分解能2.05cm

DJI Mavic Mini：センサー：1/2.3型（6.2mm×4.6mm），
1200万画素（4000×3000），焦点距離：4.25mm，撮影高度60mでの分解能2.19cm

図IV-2 機種（カメラ）・撮影高度による地物の見え方の違い

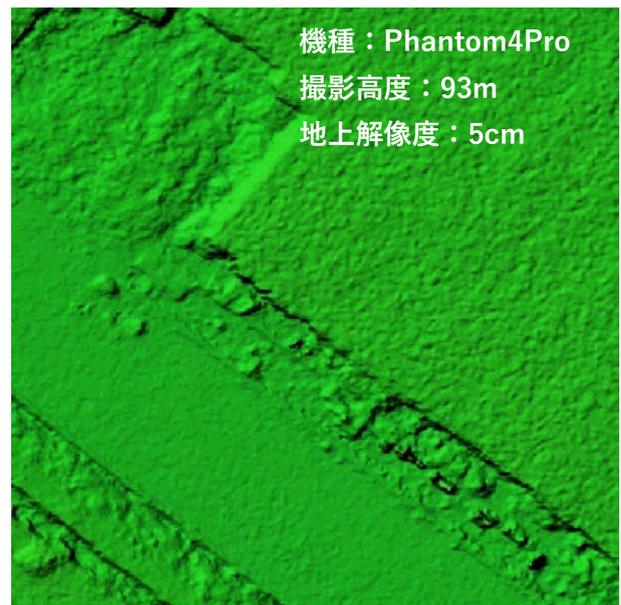
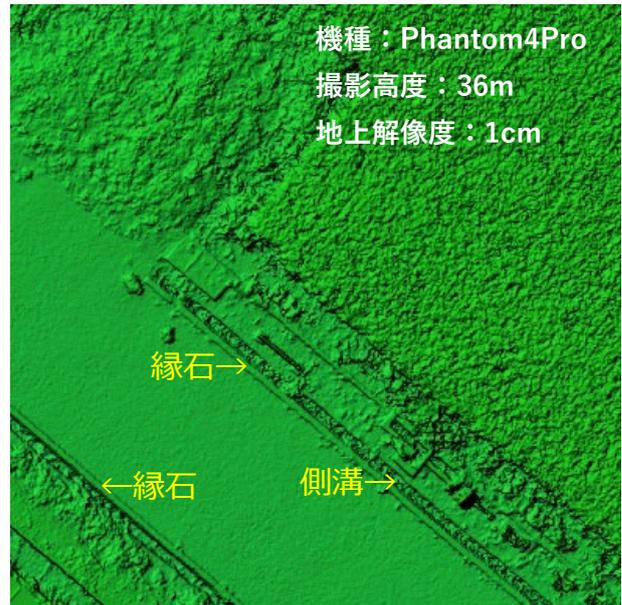
陰影起伏図を用いた障害物の把握

図IV-3は、地表面に凹状や凸状の障害物を設置し、同一機種のドローンで異なる高度から撮影することにより、地上解像度の異なるDSM（数値表層モデル）を生成し、陰影起伏図を出力したものです。



図IV-3 陰影起伏図による凹凸状障害物の視認

図IV-4は、同一機種のドローンで異なる高度から撮影することにより、地上解像度の異なるDSM（数値表層モデル）を生成し、圃場周辺の付帯施設（縁石・側溝・自動給水栓など）の陰影起伏図を出力したものです。縁石（高さ：10cm，幅：18cm）や側溝（幅：30cm）などの地物は、地上解像度1cmの陰影起伏図ではエッジも含めて視認可能ですが、地上解像度5cmのものでは視認は困難です。これらの地物の視認をおこなう際には、地上解像度2cm以上のDSMデータがあることが望ましいです。



図IV-4 陰影起伏図による付帯施設の視認

勾配からみた圃場周辺の危険箇所

表Ⅳ-2は、表Ⅳ-1で整理した環境的要素の一つである勾配を対象に、設計基準、機械諸元、事故事例等の分析などから危険・作業困難箇所に関連すると思われる閾値を抽出・整理したものです。圃場周辺の要素ごとに閾値は異なりますが、段階的な閾値の設定等により、圃場周辺全体の危険箇所を示すことも可能です。

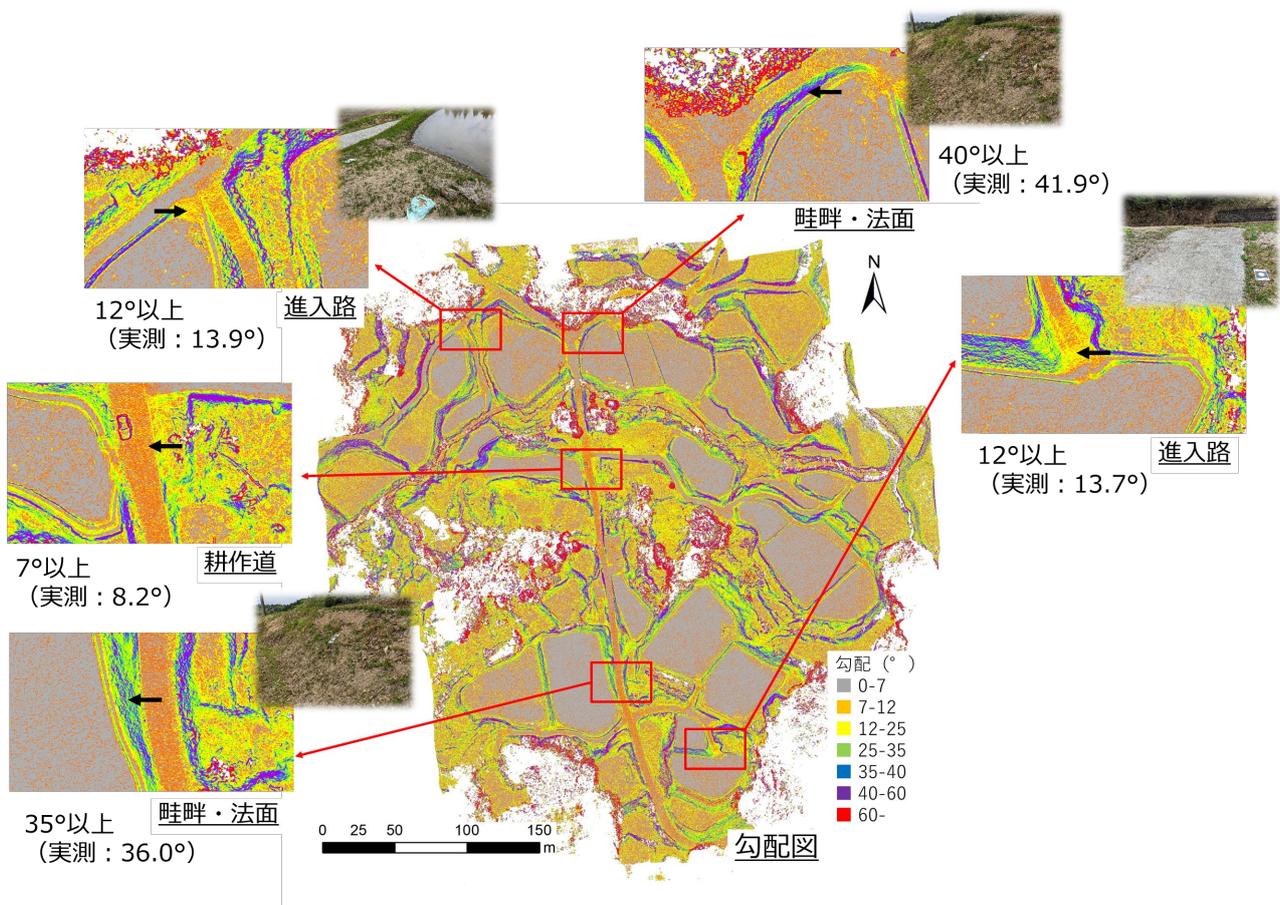
表Ⅳ-2 勾配からみた圃場周辺の危険箇所

	設計基準	機械諸元・基準	事故事例等分析
畦畔 ・ 法面	土畦畔の場合 45°（段差0.5m未満） 40～45°（段差0.5～1.5m） 35～40°（段差1.5～4.0m） ※切土・盛土、土質及び地質で 標準勾配は変化	使用最大傾斜角 乗用草刈機：15～25° ラジコン草刈機：25～40°	刈払い作業： 傾斜度40°を越える 不安定姿勢で事故
進入路	12°以下 ※傾斜地では実状に合わせて	安全鑑定基準（乗用型機械の 左右の安定度）：30° トラクター・田植機・コンバイン： 登坂角度：15°，転倒角：10°以下 ※安全面・運転者の恐怖心を 考慮した限界	事故発生地点の勾配： 縦断勾配：登坂中17～19° 降坂中10～14° 横断勾配：13～20° ※（田村ら，2016）
農道 （耕作道）	幹線農道：5°以下（一般） 7°を限度		

※田村孝浩，内川義行，松井正実，守山拓弥（2016）：基盤構造に着目した農作業事故の発生要因に関する考察，水土の知 84（8），669-672.

勾配にもとづく圃場周辺の農地基盤の危険箇所の可視化

図IV-5は、ドローン等を使用して取得したDSMを用いて、中山間地域の未整備水田を対象に、圃場周辺の畦畔・法面・進入路等の勾配を解析（ESRI社ArcGIS 3DAnalyst使用）、表IV-2で整理した各要素の危険ないし作業困難と考えられる閾値（畦畔・法面（40°以上）、進入路（12°以上）など）を用いて、可視化したものです。



図IV-5 勾配図による圃場周辺の危険箇所の可視化

ラジコン式草刈り機（除草ロボット）の運用可否判断への適用例

勾配にもとづく圃場周辺の農地基盤の危険箇所の可視化を、畦畔除草の軽労化を図るために開発されたラジコン式草刈り機（小型除草ロボット：中山間地域の急傾斜法面にも対応）の運用に適した法面（勾配・障害物の有無等）の把握に適用した事例を紹介します（図IV-6）。



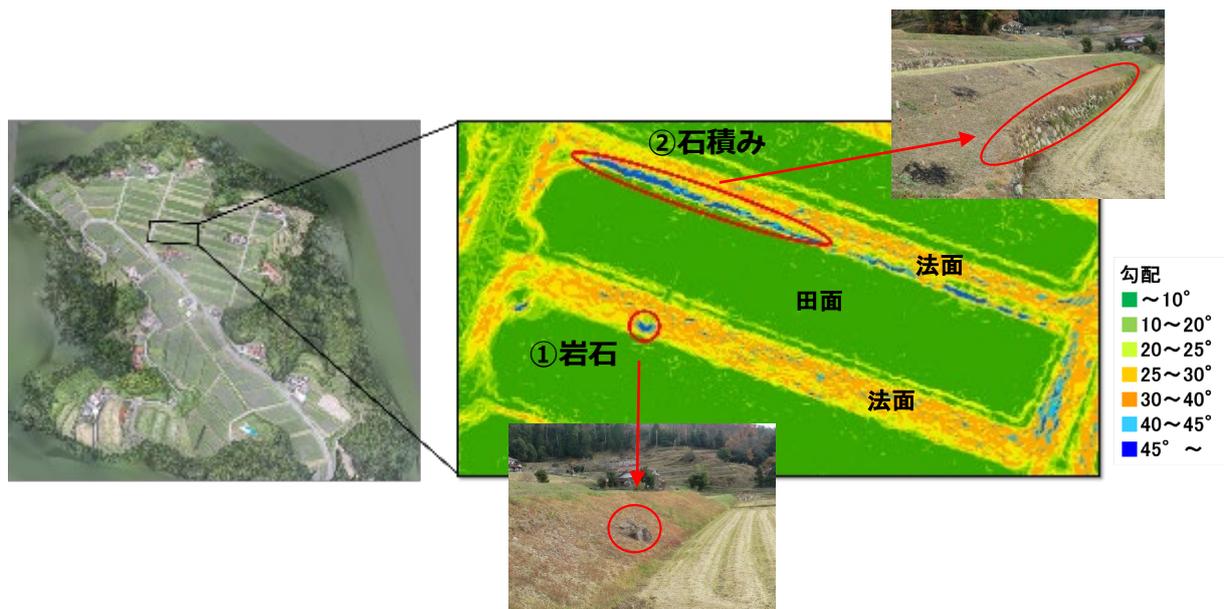
除草ロボットの運用からみた法面の傾斜度

20°以下	: 既存の乗用型草刈機でも走行可能
25～30°（緩斜面）	: 旋回も含めて除草ロボットの運用が可能
40～45°（急斜面）	: 旋回以外の除草ロボットの運用は可能
45°以上	: 除草ロボットの走行は困難

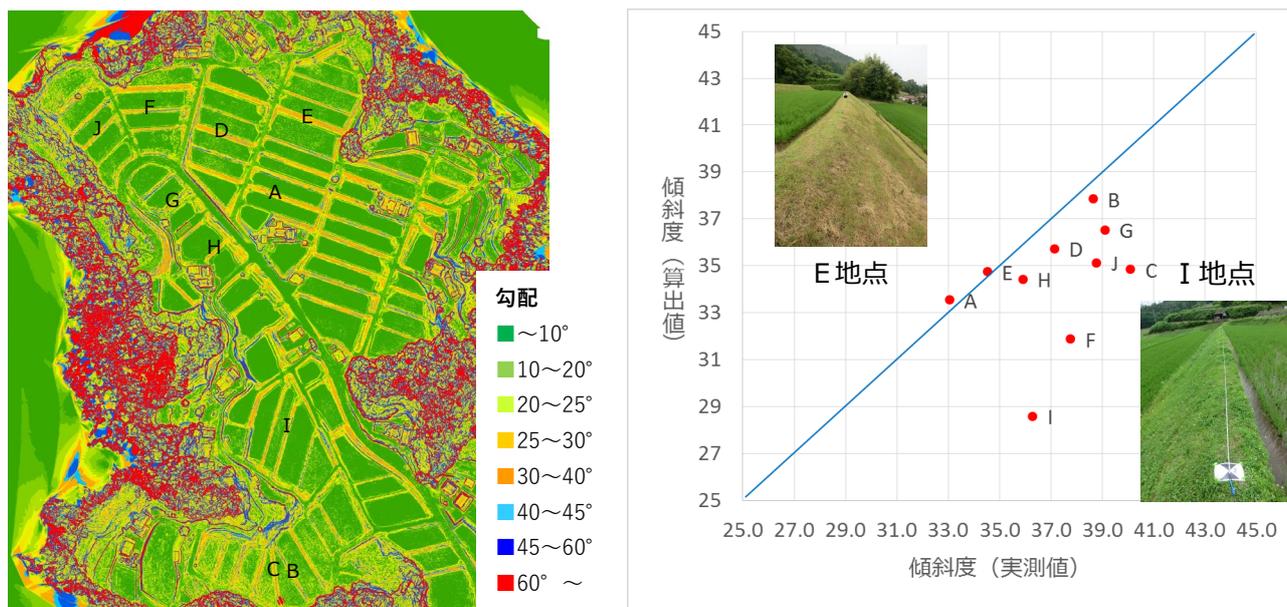
図IV-6 除草ロボットの運用からみた法面の勾配

図IV-7は、ドローンを使用して取得したDSMを用いて、除草ロボットの運用を予定している傾斜地水田の3次元モデルとGISを用いた解析による勾配図（一部を拡大）を示しています。法面の勾配は概ね30°前後ですが、除草ロボットの走行が困難となる45°を超える場所が部分的に存在していることが分かります。該当箇所を現地を確認すると、それぞれ①土坡で造られた法面内に残された大きな岩石、②土坡の法面の裾部に残された石垣の法面であることが分かりました。いずれも該当箇所に気付かず、草が繁茂した状態で除草ロボットを運用していたら、転倒などの事故が生じていた可能性のある危険箇所でした。国土地理院等で公開されている既存の数値標高モデル（5mメッシュ単位）や航空写真等から判別が困難な箇所であり、高解像度で農地基盤の3次元情報を取得することが出来るドローンセンシングの有効性が確認できました。

図IV-8は、ドローンを用いて取得したDSMから算出した法面勾配の値と現地での実測の値を比較したものです。差は概ね6°未満に収まりますが、I地点のように草刈りが未実施の場所では、実際より勾配を緩く算出してしまっていることが分かりました。これはドローンセンシングにおいては植生も含めた地表の情報が把握されるためです。



図IV-7 運用予定地区の3次元モデルと勾配図

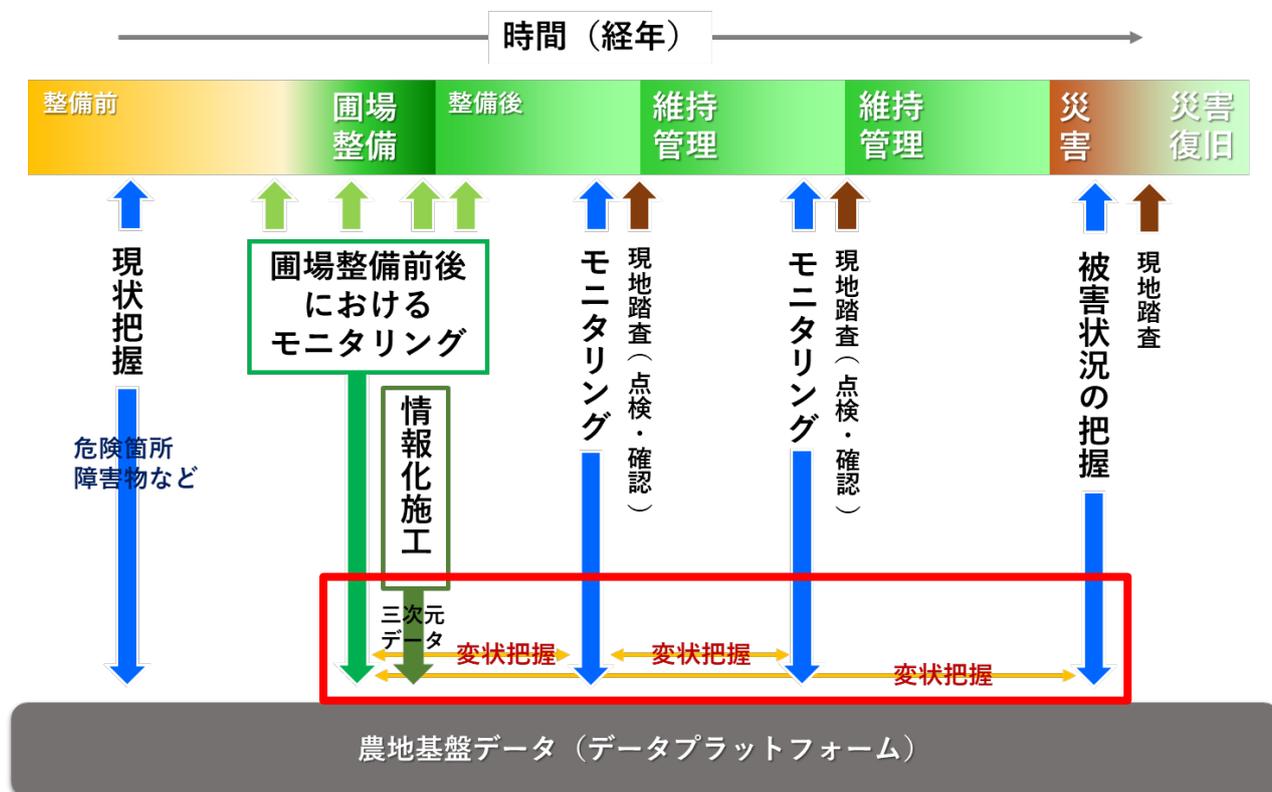


図IV-8 3次元モデルからの算出値と実測値の比較

5 章：2 時期データの解析にもとづく変状箇所の把握

2 時期データの解析にもとづく変状箇所の把握

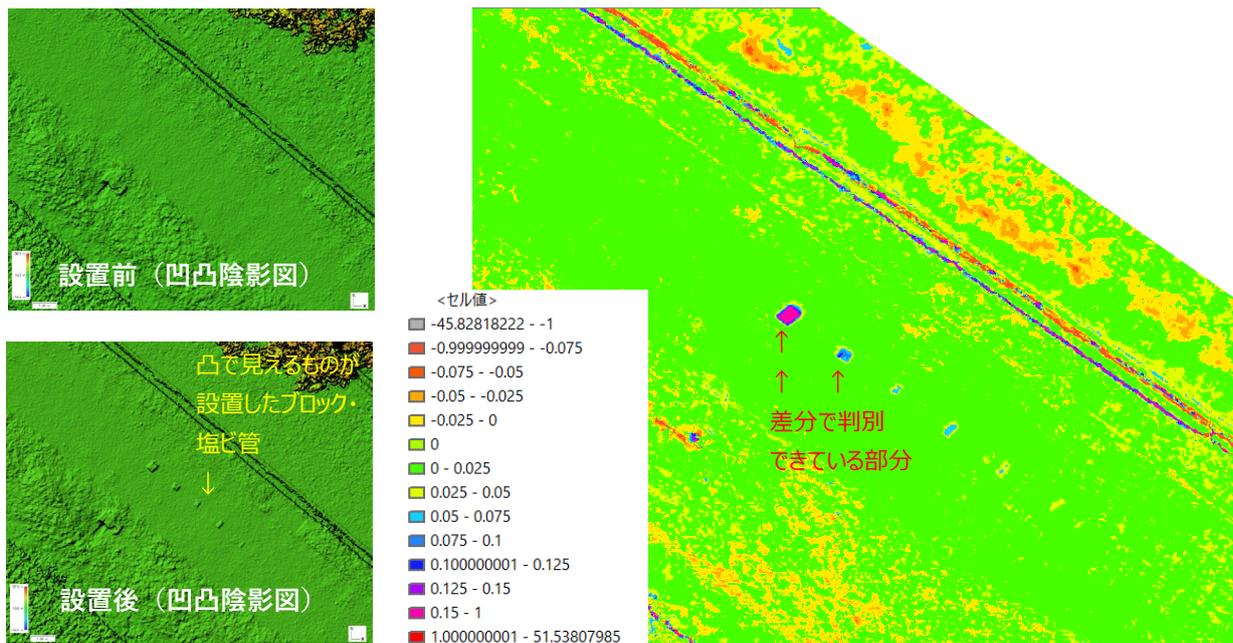
ドローン等を用いて取得された2 時期の農地基盤データ（3次元データ）を使用して、その差分を算出することにより、農地基盤の変状箇所（変化のあった場所）を把握することができます。図V-1のように、圃場整備時（表土整地直後など）に取得された農地基盤データを経年変化が生じる前の元データとして活用して、定期的な維持管理の前などに、ドローンを用いたモニタリングを実施し、得られた農地基盤データとの差分を調べることにより、整備時からの経年変化（変状）を把握することができ、詳細な現地踏査（点検・確認）、維持管理に繋がっていくことができます。元データには、情報化施工時に取得された出来形計測データ（3次元データ）を用いることも可能です。加えて、地震や水害などの災害により、農地基盤に被害が生じた場合においても、災害発生前（整備時など）の元データと災害発生後に取得したデータを比較することにより、詳細な被害状況を把握することが可能です。



図V-1 2 時期データの解析にもとづく変状箇所の把握

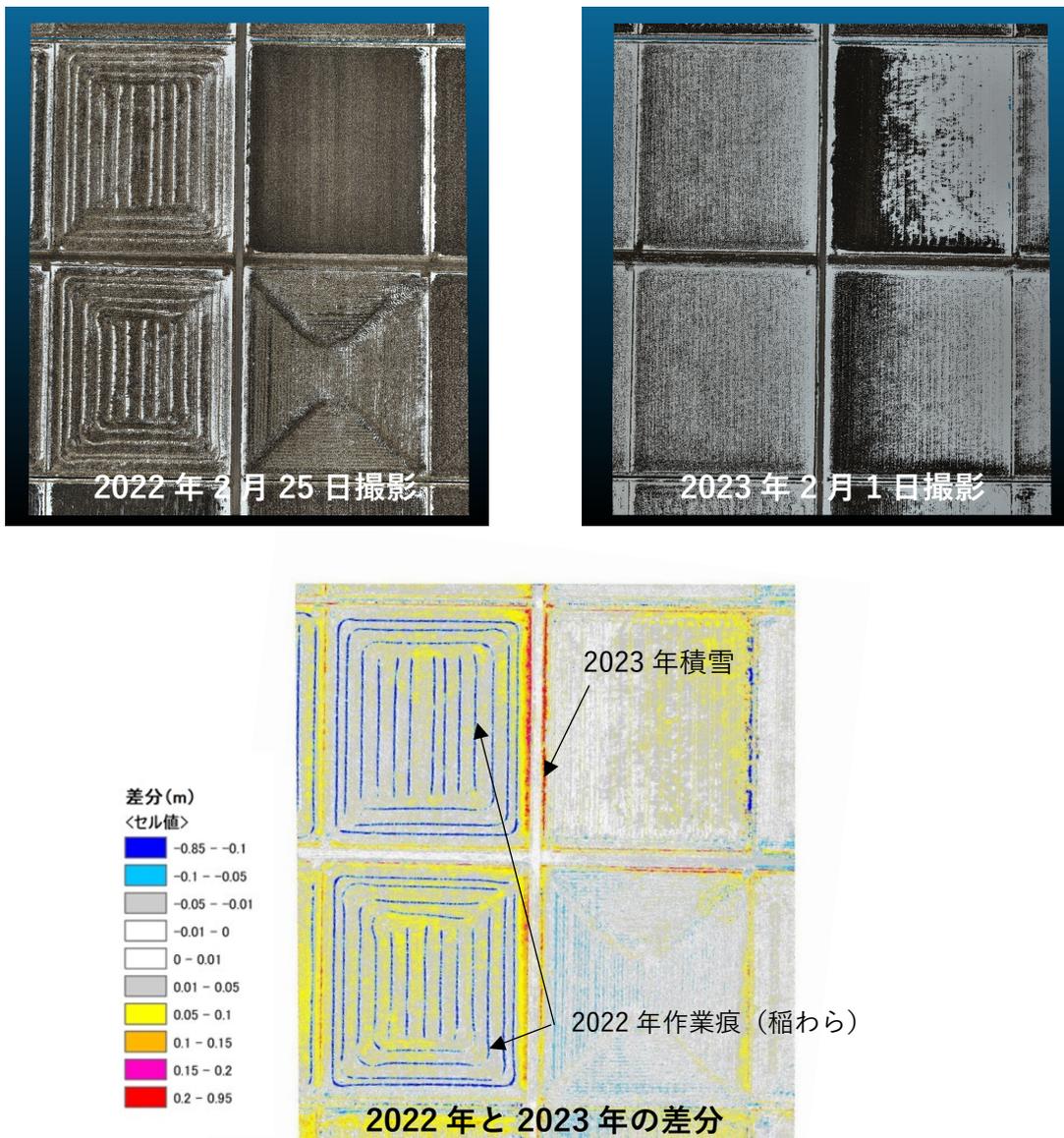
RTK測位モジュール搭載ドローンの活用

差分や変状把握などの2時期のデータの比較は、地上基準点（GCP：Grand Control Point）の設置などによって、撮影等によって取得された2時期の3次元データの精度（絶対的な測位精度）が担保されていることが必要となります。一般的なGNSS（GPSなど）測位モジュールのみを搭載したドローンの撮影画像に記録される位置情報はm単位の誤差を有しており、そのままでは2時期データの比較は困難です。一方で、地上測量（地上基準点の設定）には、時間と労力を要するため、定期的なモニタリングの際に毎回実施していくことが難しい場合や、災害時などに現場での作業者の安全が確保できない場合においては、実施が困難な場合もあります。その際に、活用ができるのがRTK測位モジュール搭載のドローンです。図V-2は、大きさの異なる障害物（ブロックや塩ビ管）を設置することによって、疑似的な変状を作り出し、RTK測位モジュール搭載のドローンを用いた変状把握を試みたものです。高さ15cmのブロック（境界も明瞭）、高さ10cm、5cmのブロック、高さ8cm、5.6cmの塩ビ管まで判別が可能であり、地上基準点を設置しなくても一定の変状把握が可能なが分かります。



図V-2 RTK搭載ドローンを用いた変状箇所の把握

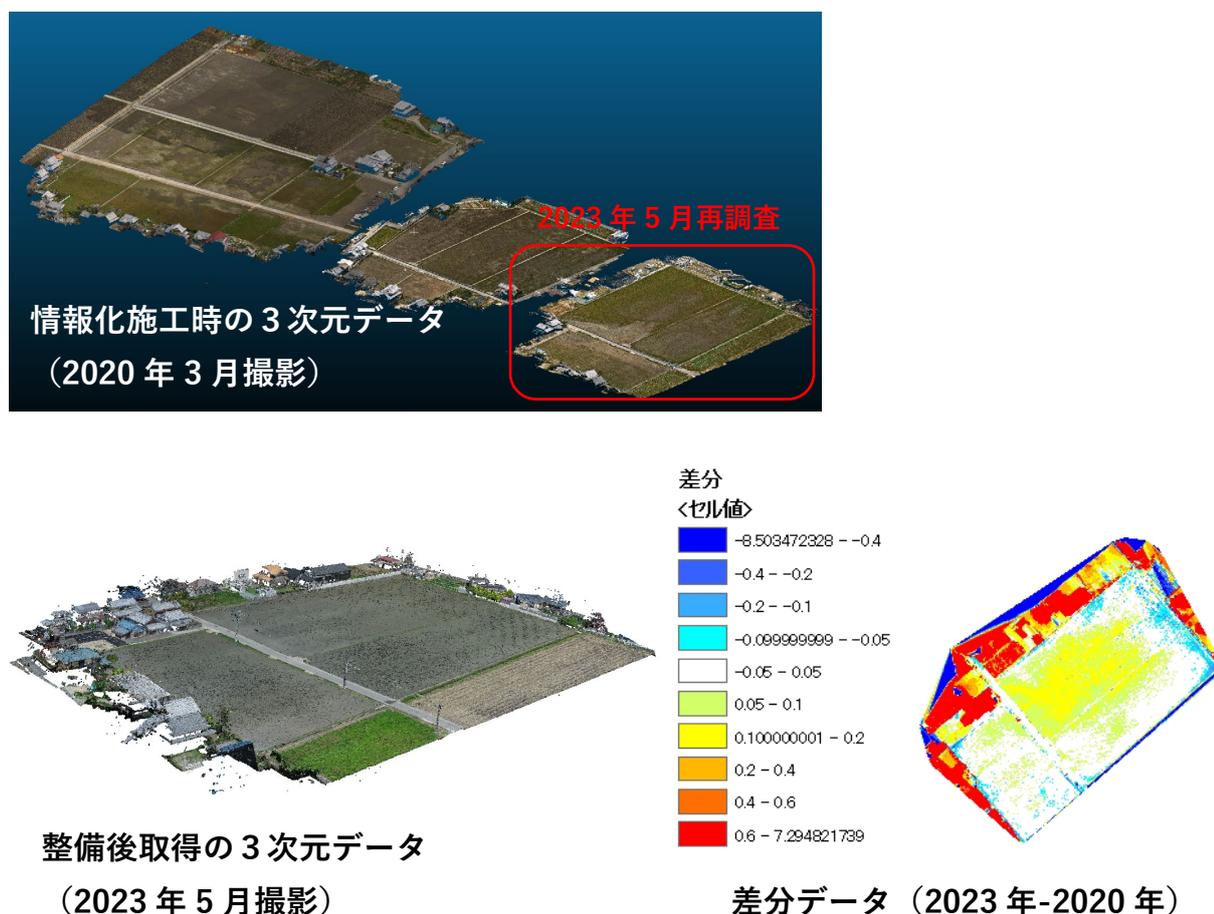
図V-3は、RTKモジュール搭載ドローンを用いて、4枚の大区画圃場を含む範囲を、冬期間、2年時（2022年、2023年）の高解像度（地上解像度1cm）撮影を実施し、取得した農地基盤データ（3次元データ）の経年変化（2時期の差分を算出）把握したものです。2023年の積雪や2022年の作業痕（稲わら）など $\pm 5\sim 10\text{cm}$ 程度の差分を抽出できていることが分かります。RTKの測位精度は $1\sim 5\text{cm}$ （水平 $2\sim 3\text{cm}$ 、鉛直 $3\sim 4\text{cm}$ 程度）で、農地基盤の大部分が土の構造物であることを加味すると、RTK測位モジュール搭載ドローンを用いて把握できる変状は、 $\pm 5\sim 10\text{cm}$ 以上と整理できます。



図V-3 RTK搭載ドローンを用いた経年変化の把握

情報化施工時の3次元データの活用

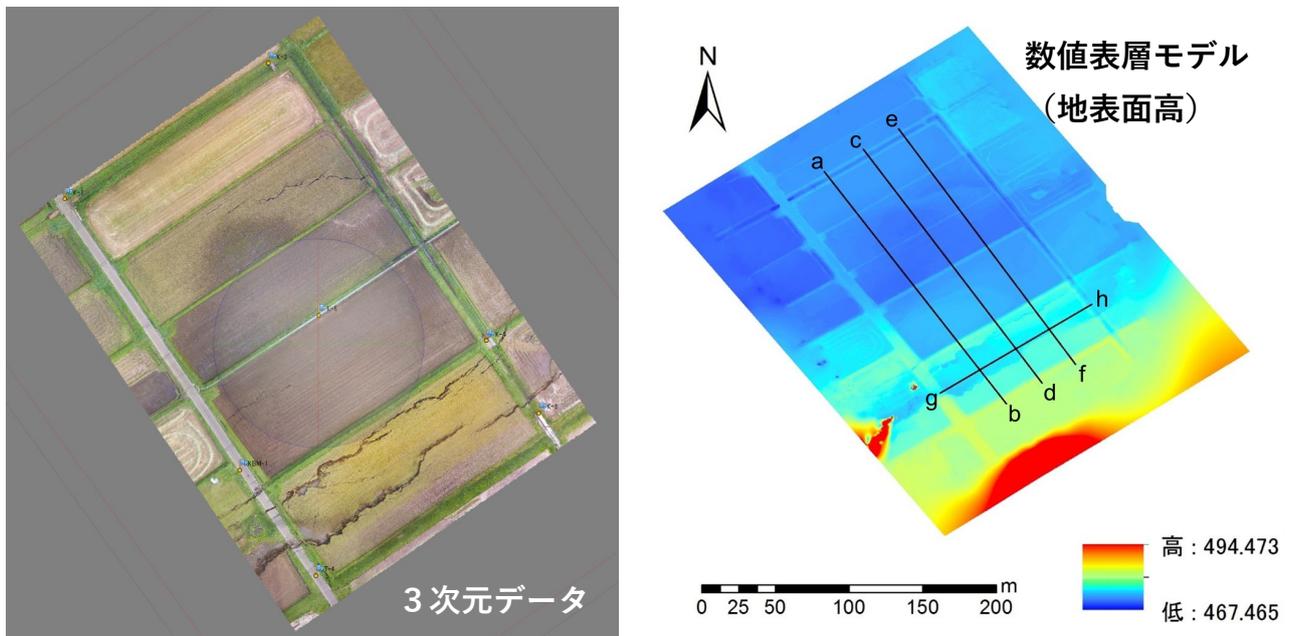
農地基盤の経年的な変化（地盤沈下や田面区画内の均平度の低下など）を把握する2時期のデータの比較には、比較元のデータとして、圃場整備事業などにおいて実施された情報化施工の3次元データ（出来形計測データ）を活用することもできます。図V-4は、圃場整備事業地区において、2020年3月に情報化施工によって取得された農地基盤の3次元データ（出来形計測データ）（図V-4：上）、整備後3年経過した2023年5月にRTK搭載ドローンを用いて取得した3次元データ（図V-4：左下）、2つのデータの差分（図V-4：右下）を示したものです。



図V-4 情報化施工時の3次元データとの比較

災害発生時の被害状況の把握への活用

2 時期データの解析にもとづく変状の把握が最も必要とされる場面の一つに、地震や水害などの災害発生時があります。迅速に被害状況を把握し、復旧・復興に繋げていく上でドローンによって取得される農地基盤データ（3次元データ）が役に立ちます。図V-5は、2016年4月に発生した熊本地震において被災した農地について、ドローンを用いて農地基盤データを取得した例（熊本大学山下裕作教授が取得した農地基盤の3次元データを解析）です。3次元モデル（3次元点群データ）から得た数値表層モデルから断面図などを出力することができ、不陸などの被害状況を詳細に把握することができます。



撮影・モデル作成：(株)文化財保存活用研究所

計測断面図（左：g-h，右：a-b）

図V-5 3次元データを用いた災害発生時の被害状況の把握

また、図V-6は、2024年1月に発生した能登半島地震において被災した農地について、2024年8月にドローンを用いて農地基盤データ（オルソモザイク画像）を取得した例です。地震発生から7ヶ月経過して、耕作されなかった農地では草本等が繁茂していますが、地震によって生じた亀裂群を確認することができます。



図V-6 ドローン空撮画像による災害発生時の被害状況の把握

用語解説

オルソモザイク画像：空中写真の歪みを正射投影により補正し、つなぎ目が目立たないように接合処理をした画像

3次元点群データ：コンピューター上で扱う点の集合のデータ，直交座標 (x,y,z) で表現される。レーザーを用いた3次元スキャナや SfM ソフトウェアを用いた多視点画像計測により，点群データを生成することができる

マルチスペクトルカメラ：光学センサの一種，一般に紫外線や赤外線などの人には見えない可視光線 (RGB) 以外も含めた複数の異なる波長帯を観測できるカメラ

陰影起伏図：

DEM (Digital Elevation Model)：数値標高モデル，植生や建物を除いた地表面だけのモデル

DSM (Digital Surface Model)：数値表層モデル，植生や建物の高さも含む地表面のモデル

GNSS (Global Navigation Satellite System)：全球測位衛星システム，人工衛星を利用して地上の位置を計測する衛星測位システムの総称，GPS はアメリカが運営している衛星測位システムで GNSS の一つ

LiDAR (Light Detection and Ranging)：光による検知と測距，レーザー光を照射してその反射光を測定することで，対象物までの距離や形状，動きを検出する技術

MVS (Multi-view Stereo)：SfM で推定したモデルから高密度な3次元点群を構築する技術，写真測量の技術がベース（伝統的な写真測量に比べて簡易），従来の航空写真などと比較して，より詳細な情報の把握が可能

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)：正規化植生指数，植生の分布状況（植物の量）や活性度を示す指標， $(NIR-R) / (NIR+R)$ で計算される（NIR は近赤外域の反射率，R は可視赤色域の反射率）

RTK (Real Time Kinematic)：相対測位方式，基準局と移動局の2つの受信機で衛星から電波を受信し，受信機間の位置情報のズレを補正することで，高精度な位置情報を得る

SfM (Structure from motion)：複数の画像からカメラの撮影位置を推定し，撮影画像中の特徴点（被写体）の3次元分布を推定する技術，バーチャルリアリティやロボットの自律制御や自動車の衝突防止などの分野で活用

参考文献

- ・栗田英治・加藤修一（2021）：営農と圃場整備をつなぐドローン圃場センシングの可能性：農業農村工学会誌, 89(1), 7-10
- ・栗田英治（2019）：世界農業遺産「大崎耕土」における居久根景観保全に向けた取り組み：農業農村工学会誌, 87(10), 825-828.
- ・栗田英治（2018）：多様な主体の参画に向けた傾斜地水田管理に関わる知の共有：農業農村工学会誌, 86(12), 1117-1120.
- ・栗田英治・福本巨人（2016）：小型 UAV 空撮・三次元化形状復元技術による傾斜地農地環境の把握：農業農村工学会誌, 84(9), 753-756
- ・山下裕作・池田朋生・栗田英治・伊藤広宣・友松貴志（2018）：MMG システムによる農業・農村伝承文化の資源化と活用：農業農村工学会誌, 86(3), 195-198
- ・井上公・内山庄一郎・鈴木比奈子（2014）：自然災害調査のためのマルチコプター空撮技術：防災科学技術研究所 研究報告, 81, 61-98.
- ・内山庄一郎・井上公・鈴木比奈子（2014）：SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究：防災科学技術研究所 研究報告, 81, 37-60.
- ・栗田英治（2020）：ドローン空撮・3次元化技術を活用した農地基盤情報の可視化：農研機構技報, (5), 18-21.
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/laboratory/naro/naro_technical_report/135031.html
- ・栗田英治（2020）：農業農村整備事業の景観配慮対策に関わる調査における小型 UAV 活用ガイド
https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/keikan_uav.pdf

本書は農林水産省スマート農業技術の開発・実証プロジェクト（うち国際競争力強化技術開発プロジェクト）「農地基盤のデジタル化によるスマート農業の機能強化技術の開発」の成果によるものです。

令和6年2月（評価版）

令和7年3月（最終版）

ドローンを活用した農地基盤モニタリング

著者 栗田英治・篠原健吾

発行者 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門

〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

問い合わせ先 農研機構 農村工学研究部門

農地基盤情報研究領域 空間情報グループ 栗田英治

Tel : 029-838-7558（空間情報グループ）

E-mail : hkurita(at)naro.go.jp

※本書からの転載・複製をおこなう場合は、当部門の許可を得て下さい。