２．研究成果の説明

２．１　無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
アジア航測株式会社	共同実施機関	先端技術研究所　室長	千葉達朗
		国土保全技術部　課長	佐々木寿
		システム開発部　課長	野中秀樹
		国土保全技術部	成毛志乃
		国土保全技術部	三浦俊介
		国土保全技術部	江川　香
		システム開発部	森　貴章
		システム開発部	望月拓実
		システム開発部	泉田温人
		システム開発部	浦山利博

(c) 業務の目的

本業務では、噴火時における無人機（ドローン等）及び航空機による火口周辺や火口周辺から離れた空域から撮影した可視画像・赤外画像等を用いて、噴石の飛散状況、溶岩流や火砕流の発生状況やその到達範囲等の火山噴火の状況を迅速に把握するためのシステムを開発することを目的とする。

写真測量解析においては、解析処理に時間を要していた課題を解決するために、低解像度の解析をリアルタイムで出力し、時間と共に解像度を上げていく一連の写真測量処理システムを構築する。また、夜間や噴煙等により視界不良の場合でも、取得した画像から定点を自動的に抽出して、写真測量処理を自動的に行うシステムを開発する。処理された可視画像や赤外画像から、噴石の飛散状況、溶岩流や火砕流の到達範囲をマッピングして位置情報を自動的に取得し、直面する火山災害への対応への支援を念頭に、噴火の推移と災害の発生状況をリアルタイムで把握するシステムを開発する。

なお、実施期間中に噴火が起きた場合には、検討中の内容を反映する等して無人機（ドローン等）を運航して撮影した空域からの可視画像をもとに、３Ｄモデルを作成するなどして、ホームページで公開できるよう資料を作成することとする。作成した資料のうち、地形データを取得した場合には、本委託業務が他のサブテーマと一体となって展開する次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトにおける次世代火山研究推進事業の課題Ｄサブ

テーマ２（リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発)、課題Ｃサブテーマ３（シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発）へデータ提供した上で、課題Ｄサブテーマ３（火山災害対策のための情報ツールの開発）で情報共有される計画とする。また、最新の現地概略情報を取得できた場合には、被災自治体等へ画像等を提供するとともに、要望をふまえて改めて現地情報を取得、提供することを想定する。

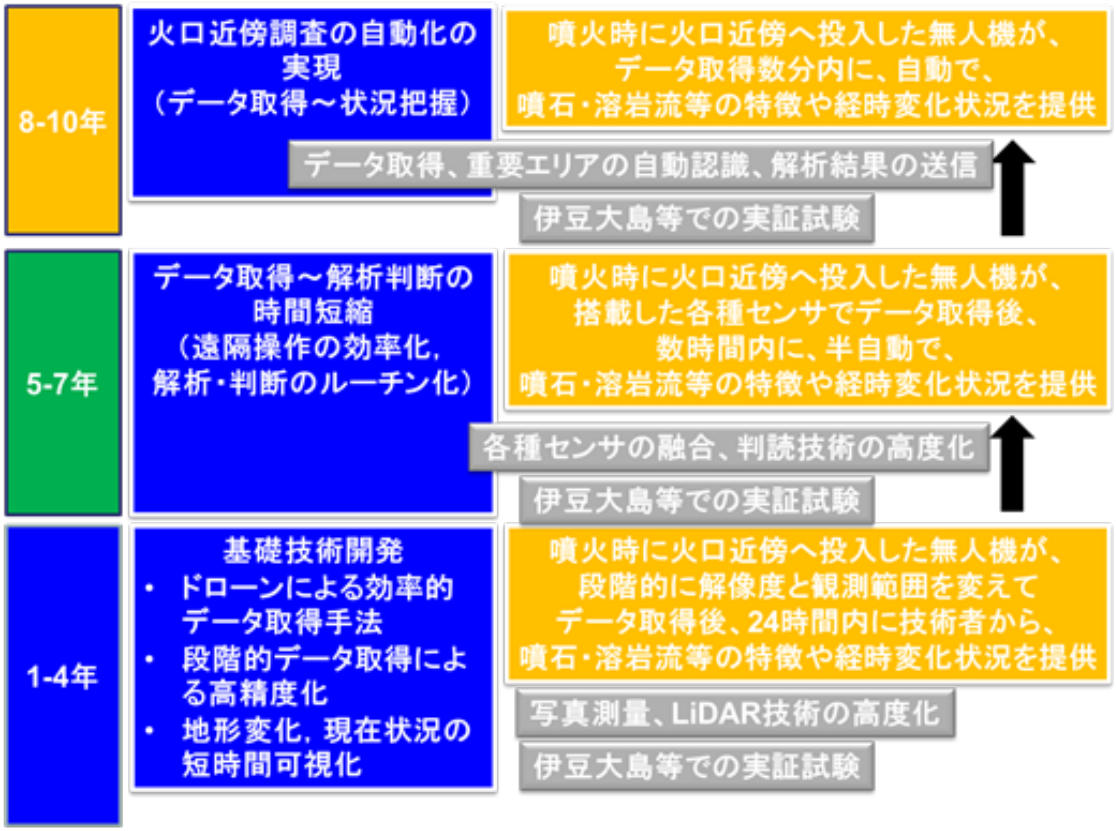


図 1 本業務の全体計画

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

「無人機を使った火山災害把握手法」の現状把握と、状況把握のために必要な無人機等の機能・仕様等を明らかにした。また、火山噴火時に想定される各種制約条件をふまえて、実証実験計画を立案した。

2) 平成 29 年度：

無人機（ドローン等）を用いて、写真測量技術、SfM 技術、UAV 搭載 LiDAR の活用等による火山災害状況把握に掛る時間と抽出変化の内容・解像度の違いについて、実証試験を通じてとりまとめた（表 1)。

表 1　火山災害状況把握のために活用可能な技術と特徴の優劣

	画像解析		地形計測
	ＵＡＶ＋Photogrammetry	ＵＡＶ＋Structure-from-Motion	ＵＡＶ＋Laser Imaging Detection and Ranging
変化の詳細把握	△	○	◎
処理時間	◎	△	○
操作性	◎	◎	△
コスト	○	◎	△

3）平成 30 年度：

災害誘因現象の発生から初期状況把握までの総時間短縮のための、無人機（ドローン等）観測からデータ解析、結果提供までの課題を抽出し、災害シナリオやタイムラインにそった、時点最適なルーチンを開発した。

4）令和元年（平成 31 年）度：

前年度までに開発したルーチンをモデル火山において実証試験し、中間成果をとりまとめるとともに、次段階の課題を設定する。

5）令和 2 年度：

前年度までに開発したルーチンで取得したデータをもとに、変化を抽出・判断するための課題と事例を収集整理する。自動標定技術や夜間や天候不順時の代替手段等について技術開発の方向性を設定する。

6）令和 3 年度：

無人機（ドローン等）に搭載する機器（GNSS 受信機、赤外カメラ、火山ガス計測装置、噴出物採取装置、レーザ計測装置等）を利用したモデル火山における実証試験と、画像解析・データ処理技術により、経時変化抽出のための課題と解決策をとりまとめる。

7）令和 4 年度：

無人機（ドローン等）に搭載する機器の改良案の提示と、火山防災・対策に資する画像解析・データ処理技術の高度化により、噴火前データが存在しない場所での変化抽出方法を開発する。

8）令和 5 年度：

前年度までに開発したルーチン、搭載機器仕様をもとに、災害状況把握技術を遠隔自動化および時短化するための課題を整理し、必要機能・改良点等をとりまとめる。

9）令和 6 年度：

トレーサを用いた変化把握や噴出物の自動追尾計測・解析処理機能を開発して、実証試験を行う。

10）令和 7 年度：

高度化した無人機（ドローン等）と必要機能を組み込み改良した各種センサを利用して、噴出物（噴石・溶岩流・火砕流など）の発生状況や到達範囲の経時変化などをリアルタイムで取得し、火山防災・対策情報に資するデータを提供する。

(e) 令和２年度業務目的

本サブテーマでは、噴火時における無人機（ドローン等）及び航空機による火口周辺や火口周辺から離れた空域から撮影した可視画像・赤外画像等を用いて、噴石の飛散状況、溶岩流や火砕流の発生状況やその到達範囲等の火山噴火の状況を迅速に把握するためのシステムを開発することを目的とする。令和２年度は、無人機（ドローン等）の観測から火山災害状況把握の基礎となる地形データの取得のため、RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化による 3D モデルの精度向上に関して実証試験を通じてとりまとめる。また、高精度の 3D モデルを短時間で作成するために、計算に特化した専用の機器を用いた SfM/MVS 計算時間の短縮について研究を行う。

(2) 令和２年度の成果

(a) 業務の要約

- 伊豆大島で実証実験を実施し、新たに購入した RTK-GNSS 搭載 UAV を用いた計測を行う。また、比較検証として、昨年度まで使用した UAV による計測も行う。
- RTK-GNSS 搭載 UAV で取得したデータを用いた計測精度向上と高速化について研究する。昨年度まで使用した UAV の取得データとの比較も行う。
- SfM/MVS 計算時間の短縮を図るため、汎用のノートパソコンではなく、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器を用いた研究を実施する。

(b) 業務の実施方法

1) プロジェクトの総合推進

- 現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進する。
- サブテーマ 2 との連携：大量降灰時にドローンを活用した地形変化抽出を行い予測降灰量と照合することを目的として、地形データ精度向上の検討を実施する。
- サブテーマ 3 との連携: 各種コンテンツのインプットデータとして利用するため、ドローンで取得した画像から地図と重ねられる「オルソ画像」を迅速に作成する手法に関する実証実験を計画して実施する。オルソ画像の必要分解能、体裁等について連携して進める。
- テーマ A、C との連携: 災害状況把握のためにドローン等による空域からの画像、画像から作成されるオルソ画像および数値標高モデルのフォーマットや分解能、受け渡し方法について連携して研究する。また、数値シミュレーション用データとして使用される数値標高モデルの分解能、品質、受け渡しのフォーマットにつ

いて連携して研究する。

- 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携・融合の一環として、現地で取得した画像から３Ｄ地形モデルを作成する技術の体験、民間企業における火山調査関連技術や火山防災業務の紹介等のプログラムを計画・準備した上で、開催案内と参加者募集を行う。

2) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化

- 2019 年度は、UAV の撮影のタイミングに合わせて、撮影範囲内に GCP を設置し、その地点を撮影と同時に RTK-GNSS 計測を実施した。その結果、従来よりも大幅な精度向上が実現でき、差分等の計算を直ちに行えることが確認できた。しかしながら、実際の噴火中には、火口周辺は危険で立ち入りが難しく、このような RTK-GNSS を使用した GCP 標識の設置や同時計測を行うことは困難であると考えられる。
- そこで今年度は、最新の RTK-GNSS 搭載型の UAV を導入し、現地での GCP の設置と同時計測を省いた、高精度現状把握手法の開発を計画する。導入予定の機種では、工事現場等で、地上での同時計測なしで、センチオーダーの高精度のモデルが迅速に作成できるとされている。
- 噴火によって、火口付近の立ち入りが不可能な場合はもちろん、火口周辺の地形が大きく変化し、既往の GCP が失われたようなケースでも、位置やゆがみの補正をすることなく、迅速に差分計算し、噴出量などを求めることも想定して研究を進める。

3) SfM/MVS 計算時間の短縮

- 撮影後に作成する３D 地形モデルは精度を向上させることで、迅速な現況把握が可能となる。1m メッシュ程度の地形モデルでは、最も多い 20 ㎝程度の火山弾のサイズやクレーターの深さを計測することは難しい。特に堆積した火山灰の層厚を計測するには、さらに精密なモデルが必要となるが、これまではデータ処理に数日を要していた。計算時間とモデルの精度は、相反する問題で、計算時間を優先させれば、精密なモデルが作成できない。
- そこで、高精度の３D 地形モデルを短時間で作成するために、汎用のノートパソコンではなく、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器（アジア航測で開発中）を使用した研究を行う。この機器の使用により高速で高精度の３D 地形モデルを作成し、現在より短時間での状況把握に資するデータの作成について研究する。

(c) 業務の成果

1) プロジェクトの総合推進

現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進した。

a) サブテーマ 2 との連携

大量降灰時にドローンを活用した地形変化抽出を行い予測降灰量と照合することが考えられる。今回、伊豆大島において RTK-GNSS 搭載 UAV（図 2）を用いた実証実験を行い、計測測精度向上について検証した（詳細は(2)(c)2)を参照)。

従来の UAV(Matrice210)と RTK-GNSS 搭載 UAV (Phantom4-RTK)の取得画像から作成した DSM を用いた断面図を比較すると、図 3 に示すように、高さ方向に多少のずれが確認できた。差分の RMS(二乗平均平方根)を求めると 0.423m となり、40~50cm 近くのずれが発生することとなる。

今回 RTK-GNSS 搭載 UAV を使用して計測を行ったが高精度な測量結果を得ることが出来なかった。計測時の衛星や基地局との接続状況にもよるが、計測方法については引き続き検証が必要であると考えられる。



図 2　使用したRTK-GNSS搭載UAV(左)と撮影状況(右)

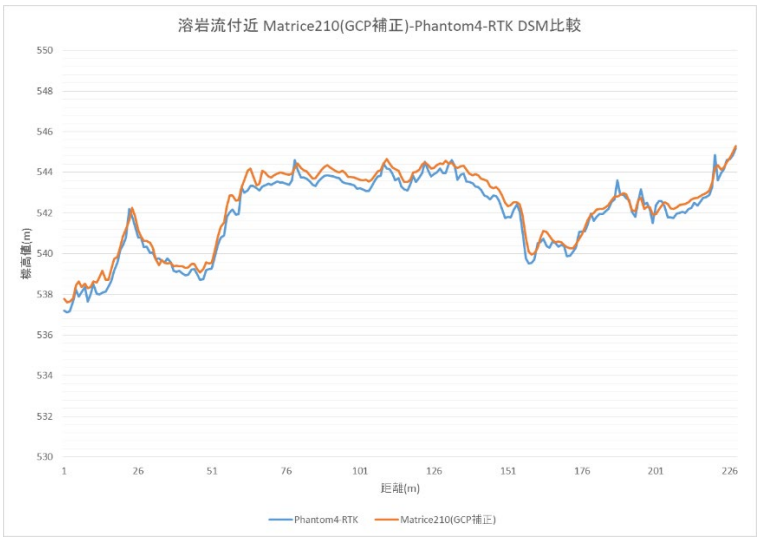


図 3　従来のUAV(Matrice210)とRTK-GNSS搭載UAV (Phantom4-RTK)の断面比較

b) サブテーマ 3 との連携の検討

火山噴火時に迅速な対応を行う際、既存の大縮尺地図との比較がなされることが予想される。伊豆大島で作成されている大縮尺な地図は、東京都が整備している国土基本図（縮尺 2500 分の 1）である（図 4）。国土基本図は東西方向 2km、南北方向 1.5km の範囲を示す地図であり、図郭番号が定められている。

公共測量における標準的な作業方法等を定められている作業規定の準則（令和 2 年 3 月 31 日 国土交通省告示 第 461 号）では、縮尺 2500 分の 1（地図情報レベル 2500）の写真地図を作成する場合の分解能（地上画素寸法）は 0.4m 以内とされている。

そのため、オルソ画像の体裁は国土基本図と同様のメッシュで分割した画像とする。また、オルソ画像の分解能は 0.4m とし、画像ファイルは TIFF 形式、位置情報ファイルは TFW として作成する方針とする。

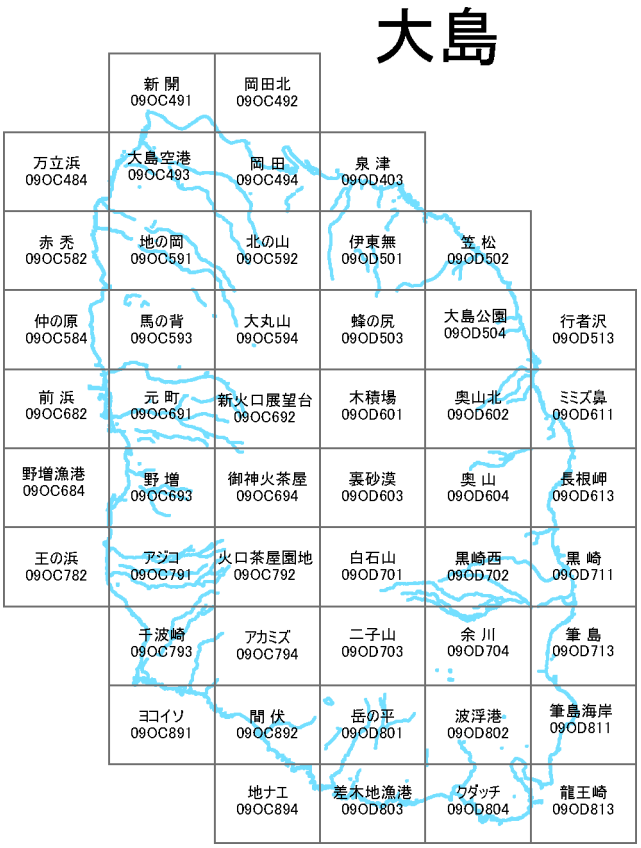


図 4　東京都縮尺1/2500地形図（平成23年度版）索引図の伊豆大島の例

出典：東京都 HP（https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/kiban/map_user/index.html）

ドローンで取得した画像から迅速にオルソ画像を作成するためには、SfM/MVS 計算時間の短縮が必要となる。今年度は、高精度な三次元モデルを短時間で作成するために、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器（アジア航測で開発中）を使用し、三次元モデルの作成を行った。三次元モデルの精度及び処理時間を汎用 PC 及び市販ソフトウェアと比較した。汎用 PC 及び市販ソフトウェアは、専用機器に比べ約 3 時間処理に時間がかかることがわかった（詳細は(2)(c)3)を参照）。

令和 2 年度の撮影した画像から作成したオルソ画像（分解能 0.4m）を図 5、図 6 に示す。撮影範囲が限定的なため、空白部が多くなってしまう。作成したオルソ画像には等高線、道路、建物などの地物がないため(図 6 左)、オルソ画像単独では位置を特定する情報が不足するという課題がある。図 6 右は地理院地図との重ね合わせた画像であり、道路等との関係が把握できる。

SfM/MVS 計算には時間がかかるものの、作成された三次元モデルからオルソ画像を作成する時間は、面積にもよるが数分～１時間程度である。一方、オルソ画像と既存地図を重ね合わせた画像の作成には、調整等に時間を要するため、今後、自治体等のニーズを把握し、表示内容の検討を進める必要がある。

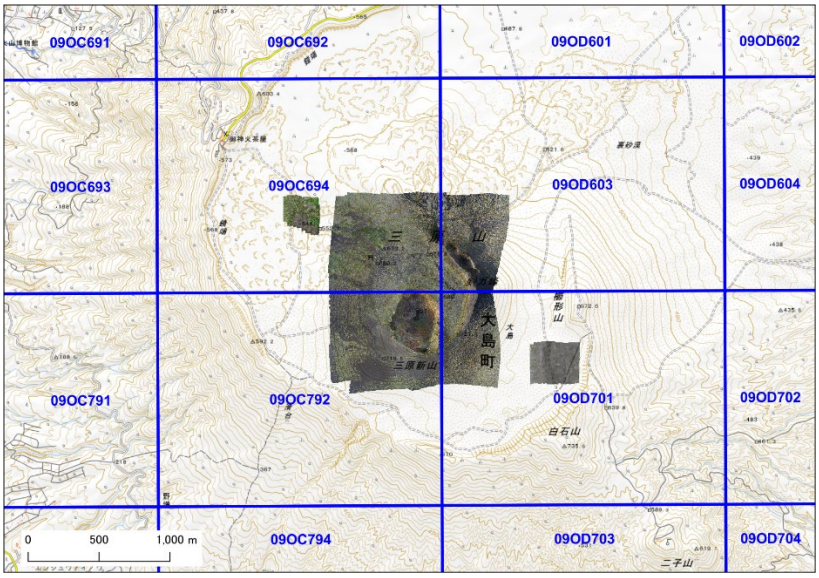


図 5　作成したオルソ画像の例（地理院地図と重ね合わせ）

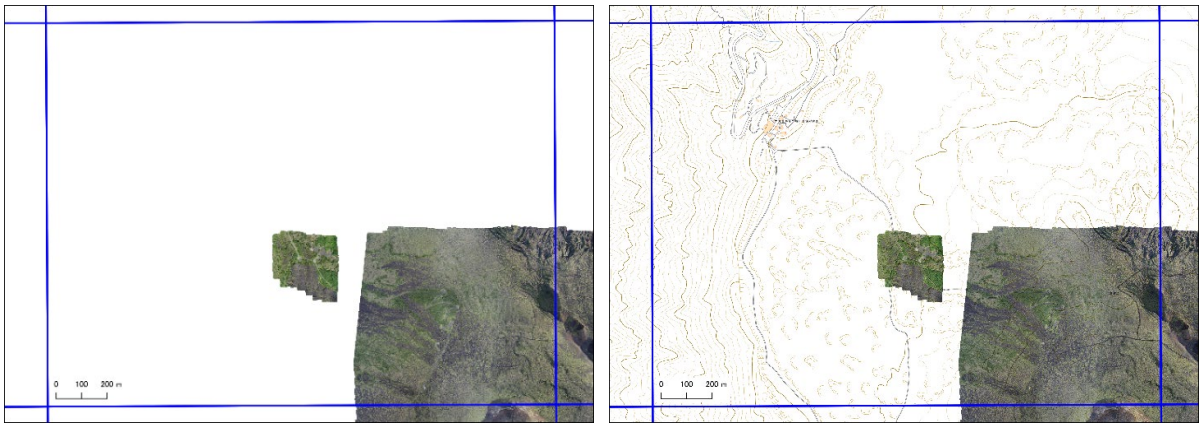


図 6　作成したオルソ画像の例（図郭09OC694）左：オルソ画像のみ　右：地理院地図

c) テーマ A、C とのデータ連携の検討

サブテーマ D1 で取得したデータについての連携方法について検討した。桜島火山 60 周年記念研究集会（11 月 10 日・11 日）終了後に行った課題 D の打合せ、および 2021 年 1 月 28 日のサブテーマ C3 との Web 打合せなどの結果を踏まえ、データ連携方法を整理した（図 7）。

- サブテーマ D1 が作成したデータは、基本的にサブテーマ A に格納され、必要に応じて各サブテーマが参照する形式とする。ファイル形式等は表 2 を想定する。
- サブテーマ D1 からサブテーマ D2 および D3 へは、直接データを提供せず、サブテーマ A 経由で必要なデータを入手する。
- サブテーマ C3 に、サブテーマ D1 が作成した数値標高モデル（DEM）を提供することで、噴火後の地形を反映した溶岩流の数値シミュレーションなどを実施することが可能となる。やり取りが頻繁になる場合も想定し、直接受け渡しする方法も検討した方が良い
- サブテーマ C3 に、サブテーマ D1 が提供する数値シミュレーション用データのファイル形式等を表 3 に示す。溶岩流のシミュレーションは 1 ～ 2 日かかるので、頻繁に DEM をもらっても計算できない。分布等は把握したいため、頻繁な計測は継続した方が良い。
- 噴火前の地形データを収集して整備しておくことも重要である。

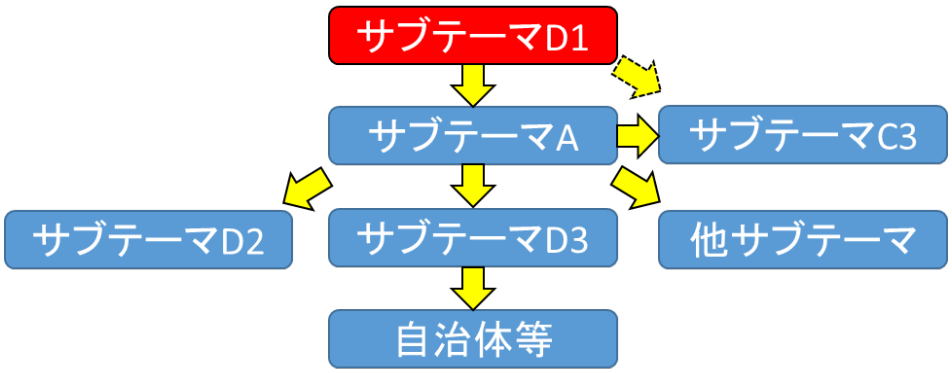


図 7　他サブテーマとのデータ連携イメージ

表 2　サブテーマAに格納するデータ例

データ種別	フォーマット	備考
UAV で取得した画像	Jpg 形式	撮影後の生データ
UAV で取得した動画	MP4 形式	撮影後の生データ
オルソ画像	Geotiff 形式	
3D モデル	Obj 形式	
数値標高モデル	Esri ASCII ラスター形式	UTM 座標
判読結果等	KML 形式	

表 3　サブテーマC3に提供するデータの一覧

データ種別	フォーマット	備考
オルソ画像	Geotiff 形式	
数値標高モデル	Esri ASCII ラスター形式	10m メッシュ

ファイル形式については整理できたが、分解能、品質、受け渡し方法については今後の課題である。数値シミュレーションに使用する数値標高モデルは 10m メッシュで良いが、詳細な差分解析から噴出量を算出するための分解能や品質については処理時間も含めた検討が必要となる。また、データの受け渡し方法については、迅速な対応をするために共同実施機関内に専用サーバーを構築するなどの検討が必要である。

d) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携

火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携として現地実証実験への参加者募集を行い、３名が参加した。内訳は九州大学２名、東京工業大学１名であった。

現地での UAV に関する研修および宿舎でのデータ処理に関する研修を実施した(図 8)。



UAV の飛行実習



GCP 設置の説明



SfM/MVS 計算に特化した専用機器の説明



三原山火口の地形の講義

図 8　研修写真

2) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化

a)実証実験の概要

2019 年度は、UAV の撮影範囲内に GCP（Ground Control Point）を設置し、その地点の座標を RTK-GNSS 計測した上で、三次元モデルの作成を行った。その結果、従来よりも大幅な精度向上が実現でき、二時期差分等の計算が行える精度の三次元モデルが作成できることを確認した。しかし、実際の噴火中には、火口周辺は危険で立ち入りが難しく、RTK-GNSS を使用した GCP の設置を行うことは困難であると考えられる。

今年度は、RTK-GNSS 搭載 UAV を導入し、GCP を設置しない三次元モデルの作成として、高精度な現状把握手法の開発を計画した。導入した UAV は、工事現場等において地上計測なしで、センチメートルオーダーの高精度の三次元モデルが迅速に作成できるとされている。RTK-GNSS 搭載 UAV は、DJI 社の Phantom4-RTK(図 9、表 4)を用いた。

噴火によって、火口付近の立ち入りが不可能な場合はもちろん、火口周辺の地形が大きく変化し、既往の GCP が失われたようなケースでも、位置やゆがみの補正をすることなく、迅速に差分計算し、噴出量などを求めることも想定した三次元モデル作成のための計測方法を検討した。

2020 年 9 月 30 日～10 月 1 日に伊豆大島の三原山山頂火口と山麓を対象に実証実験を実施した。



図 9　Phantom4-RTK

表 4　Phantom4-RTK　機体スペック

機体情報	詳細内容
機体重量	1391g
対角寸法	350mm
最大飛行速度	50～58km/h
最大飛行時間	約 30 分



図 10　Phantom4-RTK　飛行風景



図 11　高精度GNSS レシーバー　D-RTK 2 モバイルステーション

Phantom4-RTK は、高精度 GNSS レシーバーの D-RTK 2 モバイルステーションと併せて使用することで、RTK-GNSS 測位を行うことができる。「RTK」とは「Real Time Kinematic（リアルタイムキネマティック）」の略で、地上に設置した「基準局」からの位置情報データによって、高い精度の測位を実現する。これに、GPS・GLONASS・Galileo といった衛星を用いた測位『GNSS 測位システム』を組み合わせることで、センチメートルレベルの高い精度で測量データを取得することが可能となり、GCP を使用することなく高精度なモデルデータを作成することができる。

b)三原山火口付近でのモデル・DSM 比較

三原山山頂の火口付近において、2019 年度と同様に GCP を火口周辺に設置し「RTK-GNSS 搭載 UAV」の Phantom4-RTK と「未搭載 UAV」の Matrice210 で同一エリアの撮影を行った。Matrice210 で撮影した画像から作成したモデルは GCP により補正を行い、Phatom4-RTK で撮影した画像から作成したモデルと DSM の比較を行った。

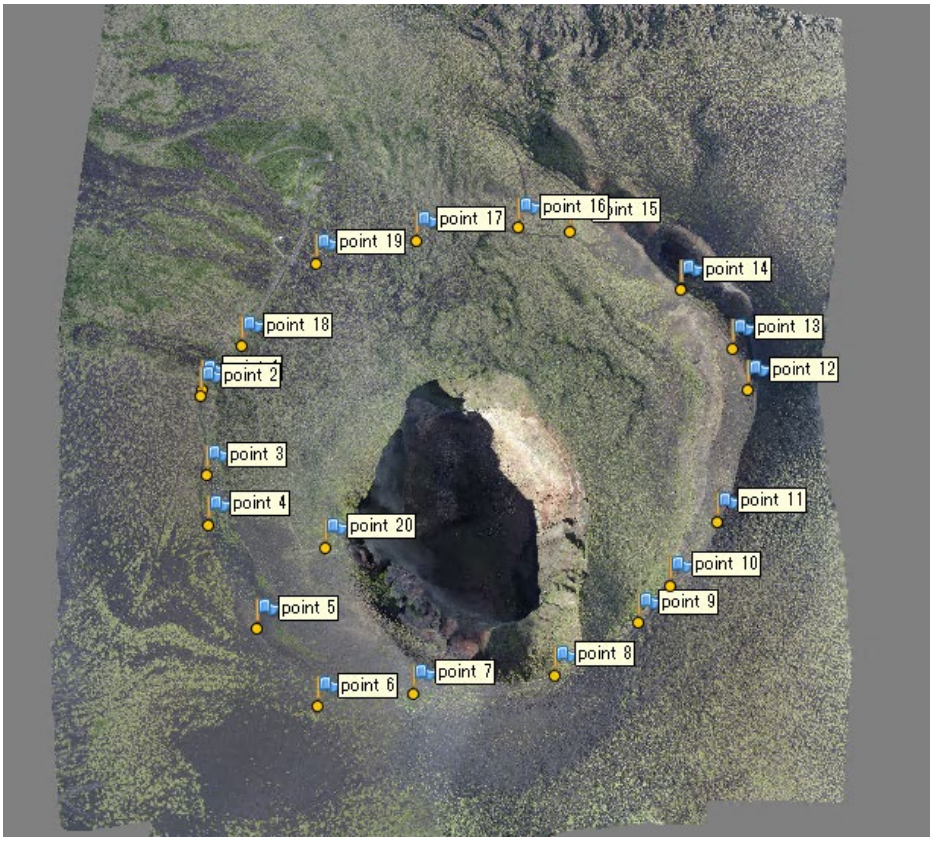


図 12　三原山山頂火口付近　GCP設置地点

Matrice210 で取得した画像から作成した火口の三次元モデルを図 13 と図 14 に示す。

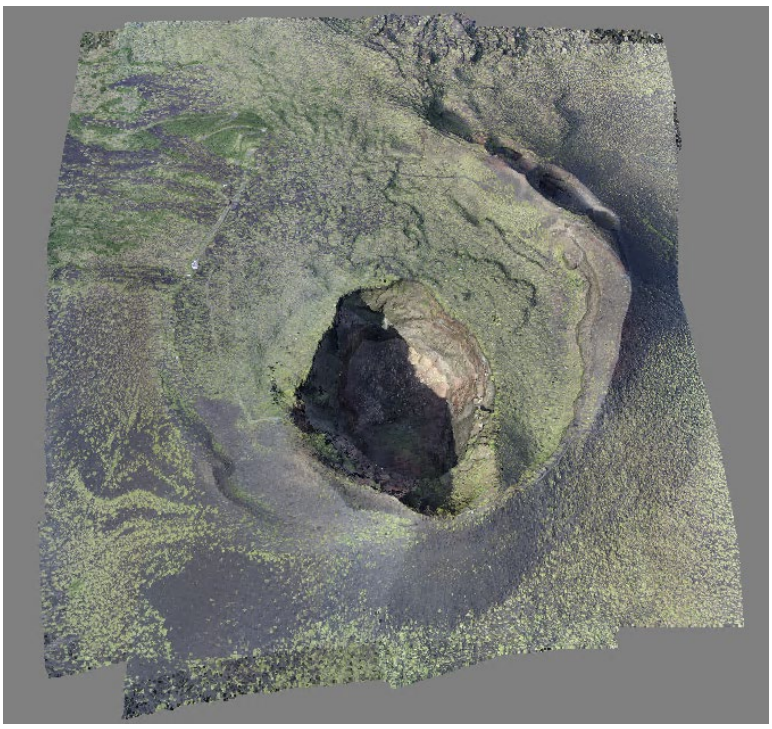


図 13　Matrice210撮影データ作成モデル(GCP補正済)

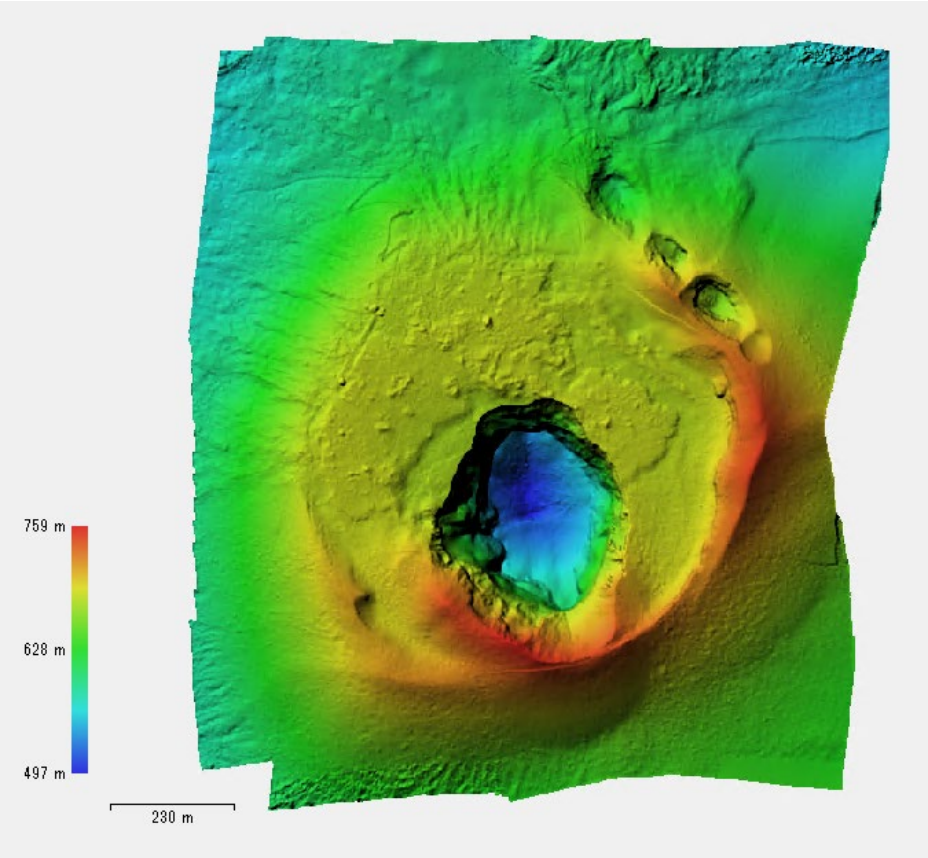


図 14　　Matrice210撮影データ作成DSM

Phantom4-RTK で取得した画像から作成した火口の三次元モデルを図 15 と図 16 に示す。

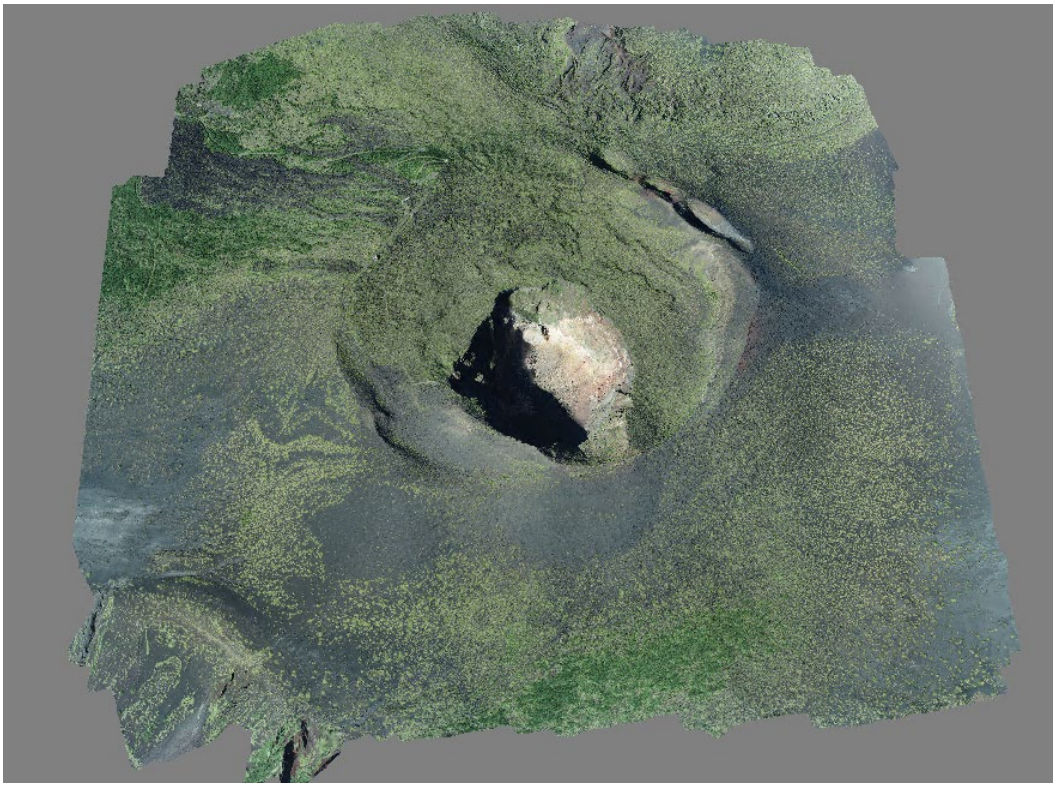


図 15　Phantom4-RTK撮影データ作成モデル

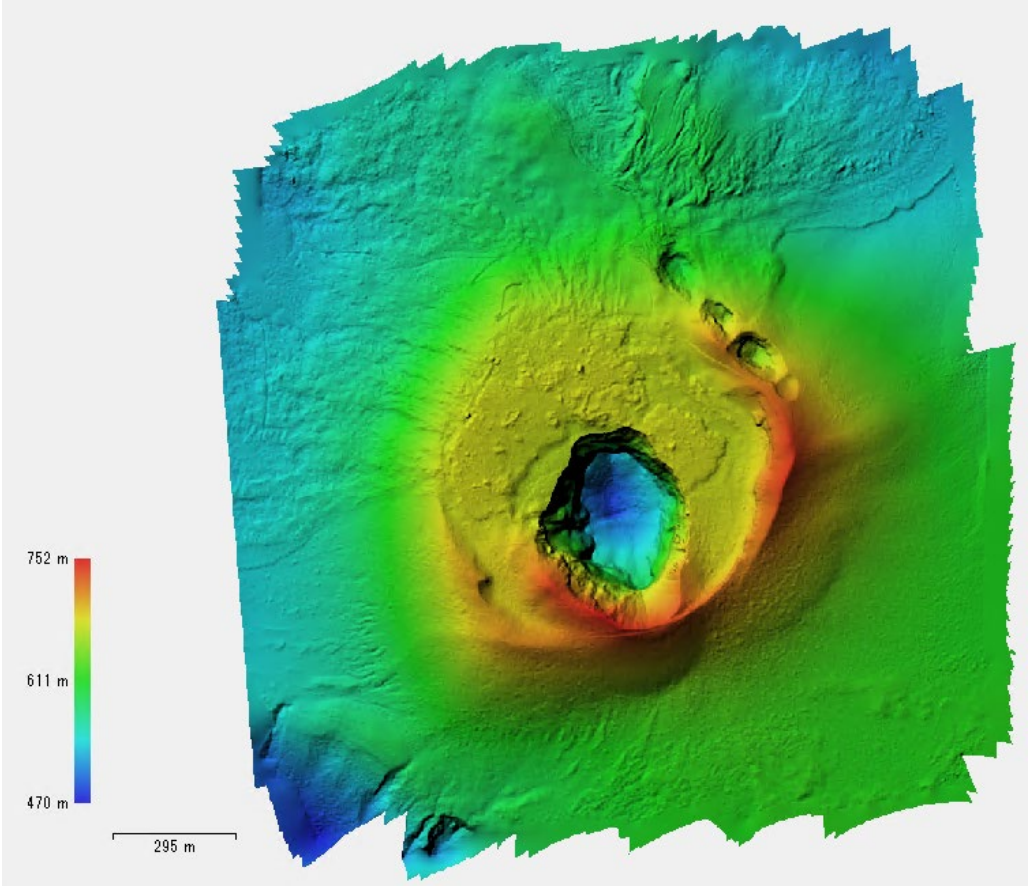


図 16　Phantom4-RTK撮影データ作成DSM

Matrice210 撮影データ（GCP 補正）と Phantom4RTK 撮影データから作成した DSM は図 17 の位置で断面図の比較を行った。GCP 補正した Matrice210 と Phantom4-RTK の DSM を比較すると、図 18、図 19 に示すように、高さ方向に大きなずれが確認できた。DSM の高さ差分の RMS(二乗平均平方根)を求めると断面位置①で 8.5409m、断面位置②で 12.154m となり 10m 近くのずれが発生していることが確認できた。

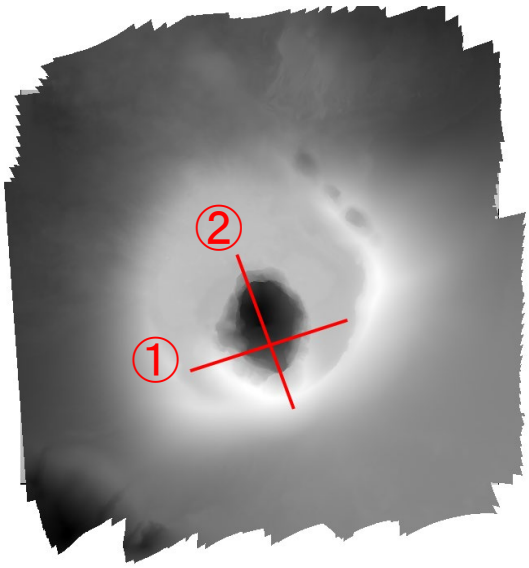


図 17　三原山火口Matrice210(GCP補正)モデル-Phantom4-RTKモデル　DSM比較断面位置

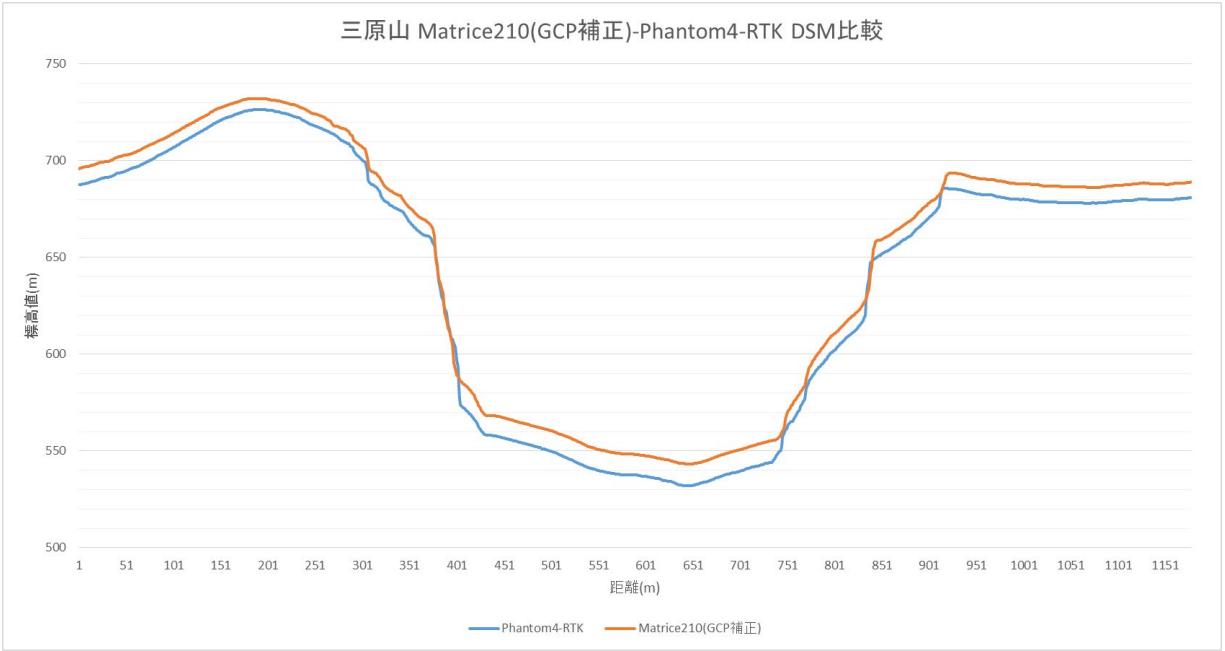


図 18　Matrice210(GCP補正)-Phantom4-RTK DSM比較　断面図①

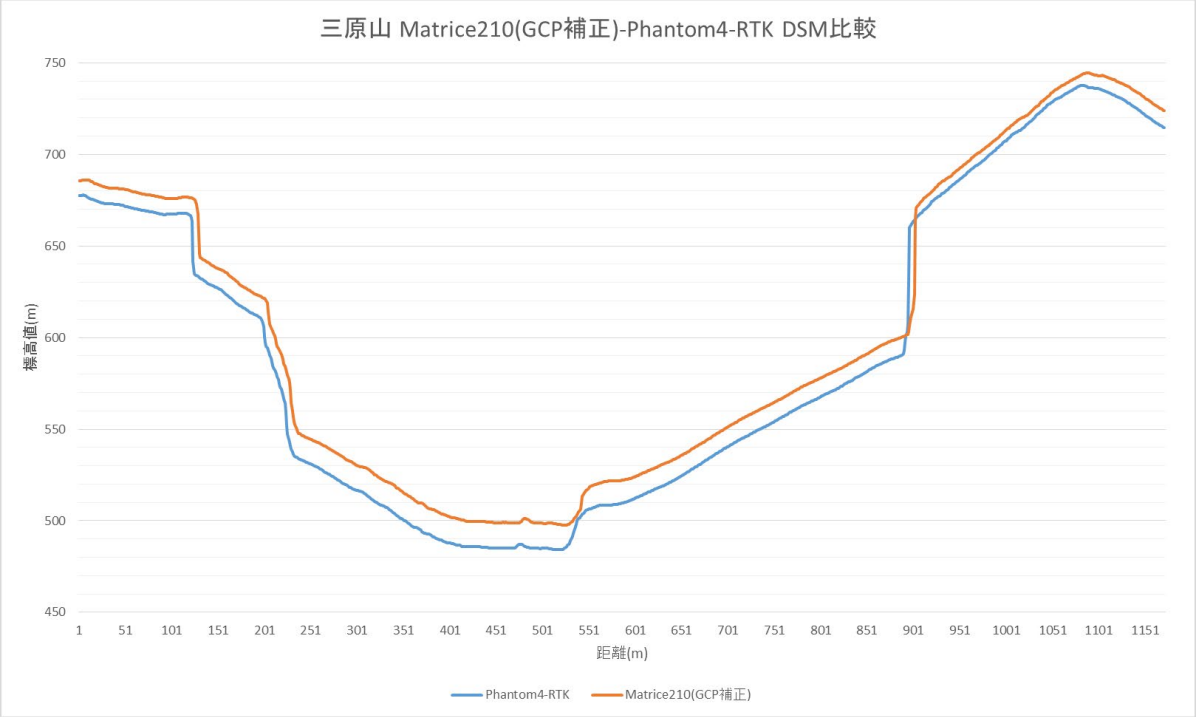


図 19　Matrice210(GCP補正)-Phantom4-RTK DSM比較　断面図②

c)溶岩流付近(三原山)でのモデル・DSM 比較

1986 年噴火時の溶岩流付近においても GCP を設置し「RTK-GNSS 搭載 UAV」の Phantom4-RTK と「未搭載 UAV」の Matrice210 で同一エリアの撮影を行った。三原山火口付近での撮影と同様に、Matrice210 で撮影した画像から作成したモデルは GCP により補正を行い、Phatom4-RTK で撮影した画像から作成したモデルと DSM の比較を行った。

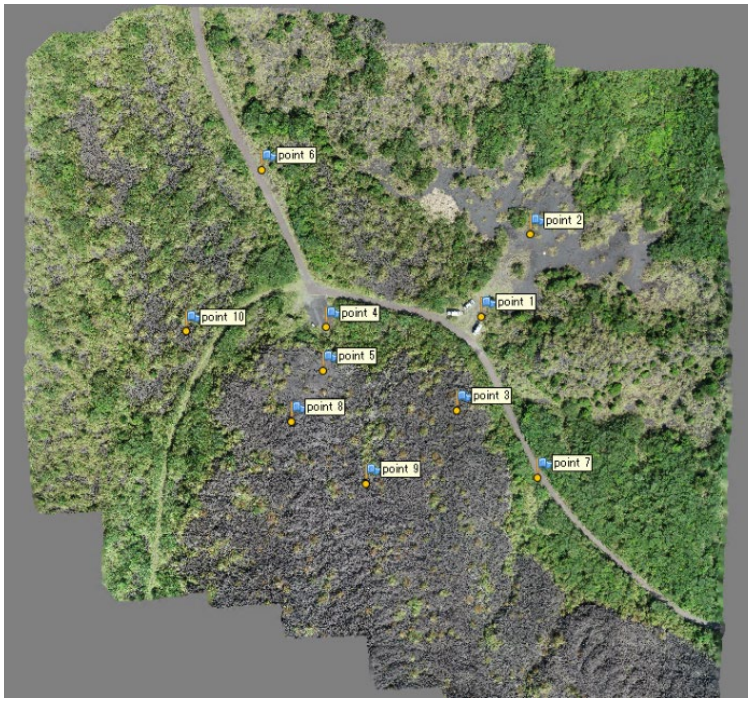


図 20　溶岩流付近(三原山)　GCP設置地点

Matrice210 で取得した画像から作成した溶岩流の三次元モデルを図 21 と図 22 に示す。

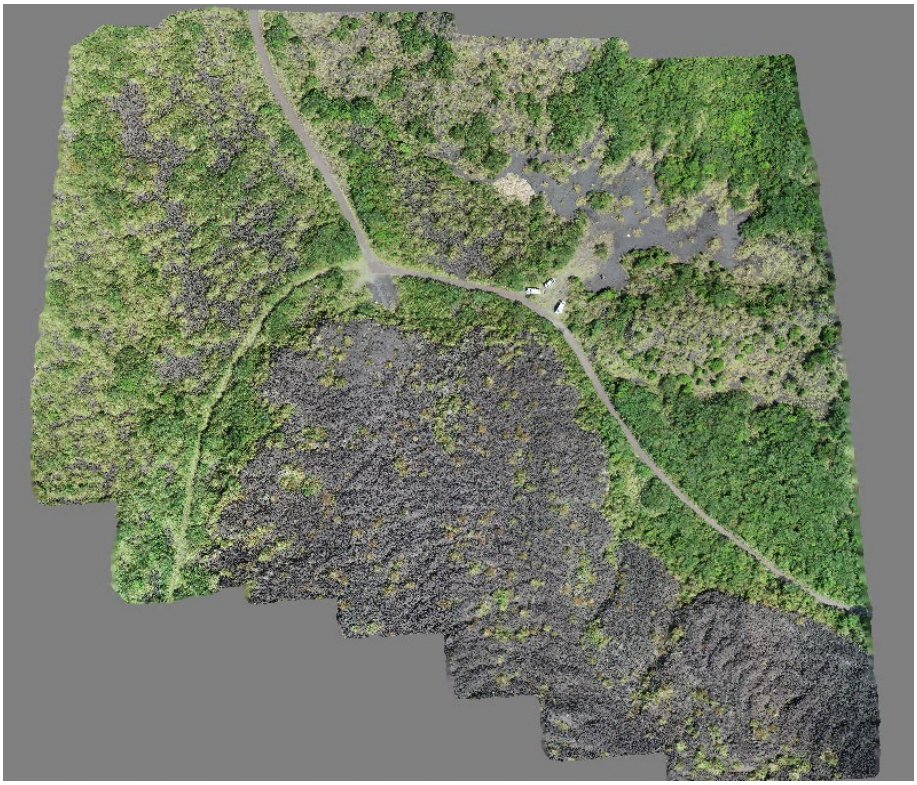


図 21　Matrice210撮影データ作成モデル(GCP補正済)

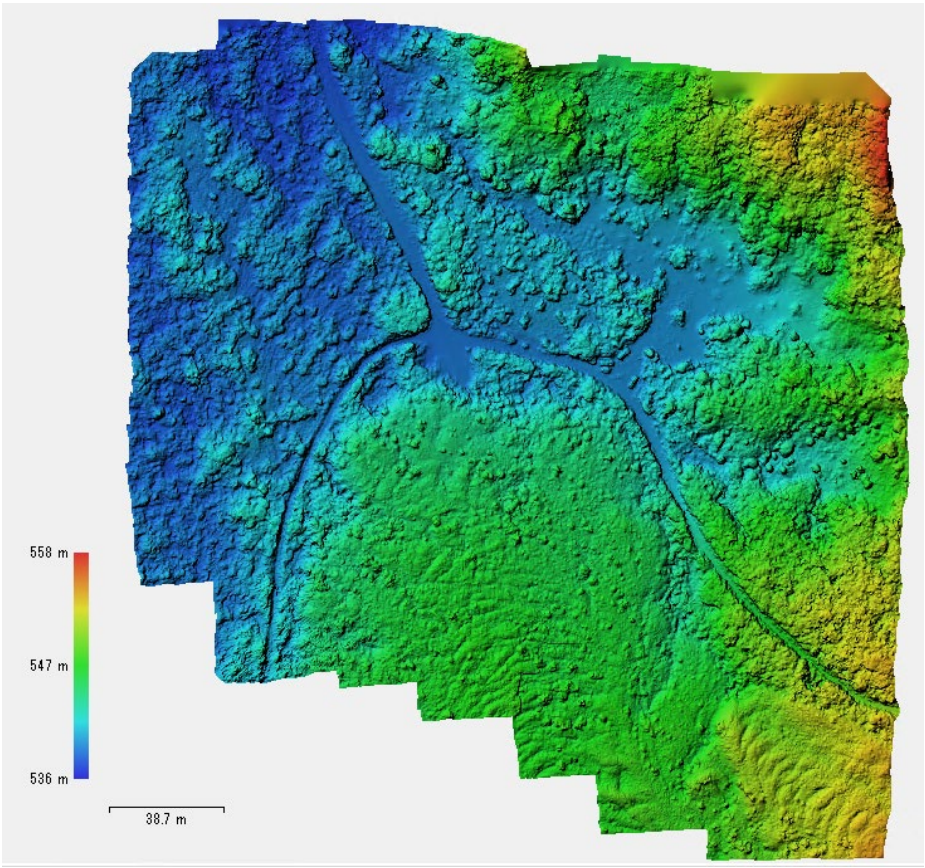


図 22　Matrice210撮影データ作成DSM

Phantom4-RTK で取得した画像から作成した溶岩流の三次元モデルを図 23 と図 24 に示す。

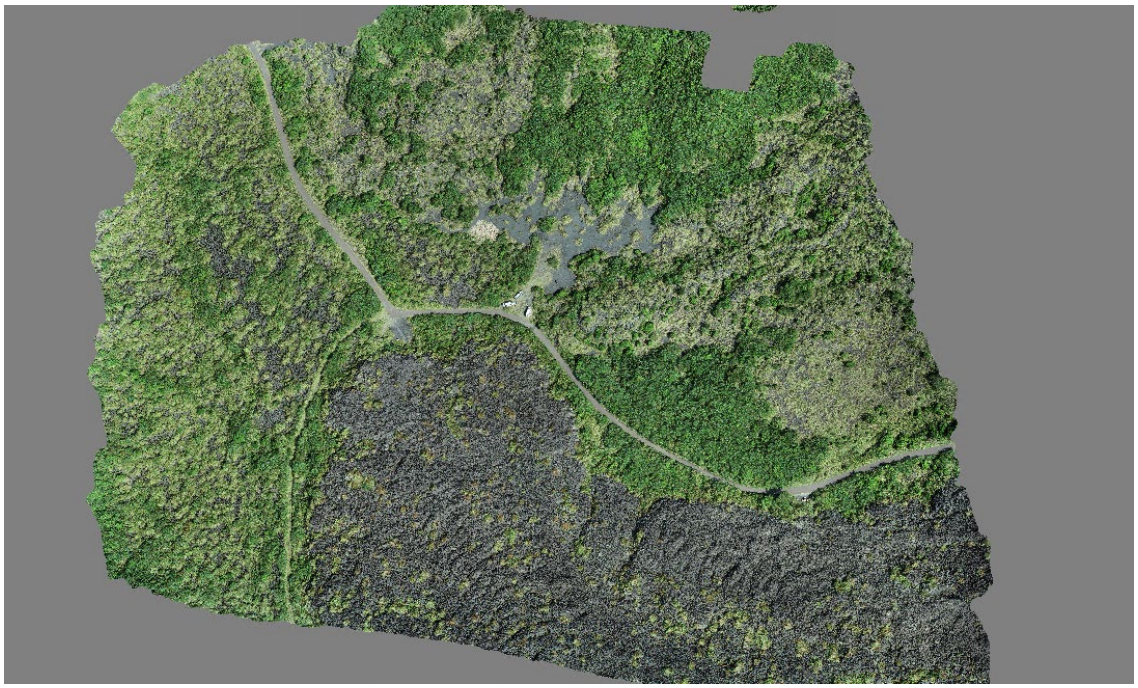


図 23　Phantom4-RTK撮影データ作成モデル

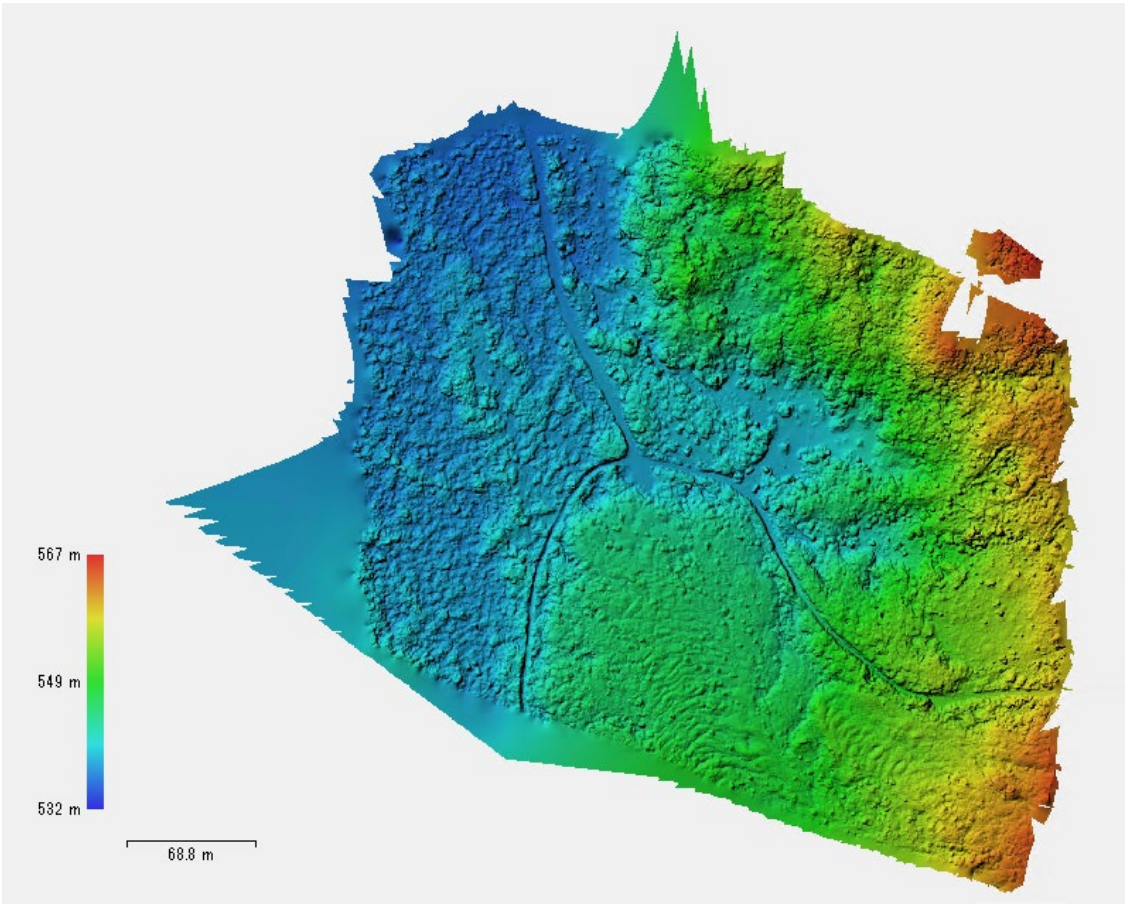


図 24　Phantom4-RTK撮影データ作成DSM

Matrice210 撮影データ（GCP 補正）と Phantom4-RTK 撮影データから作成した DSM は図 25 の位置で断面図の比較を行った。

GCP 補正した Matrice210 と Phantom4-RTK の DSM を比較すると、図 26、図 27 に示すように、高さ方向に多少のずれが確認できたが、三原山火口付近のモデル程のずれは発生していなかった。DSM の高さ差分の RMS(二乗平均平方根)を求めると断面位置①で 0.423m、断面位置②で 0.527m となり 40~50cm 近くのずれが発生していた。

今回 Phantom4-RTK を使用して計測を行ったが高精度な測量結果を得ることが出来なかった。特に高低差のある三原山火口付近では 10m 程度のずれが発生し、計測時の衛星や基地局との接続状況にもよるが、計測方法については引き続き検証が必要であると考えられる。また、Phantom4-RTK の測位方法は表 5 に記載しているその他の方法も存在するため、別の測位方法での検証も必要と考えられる。

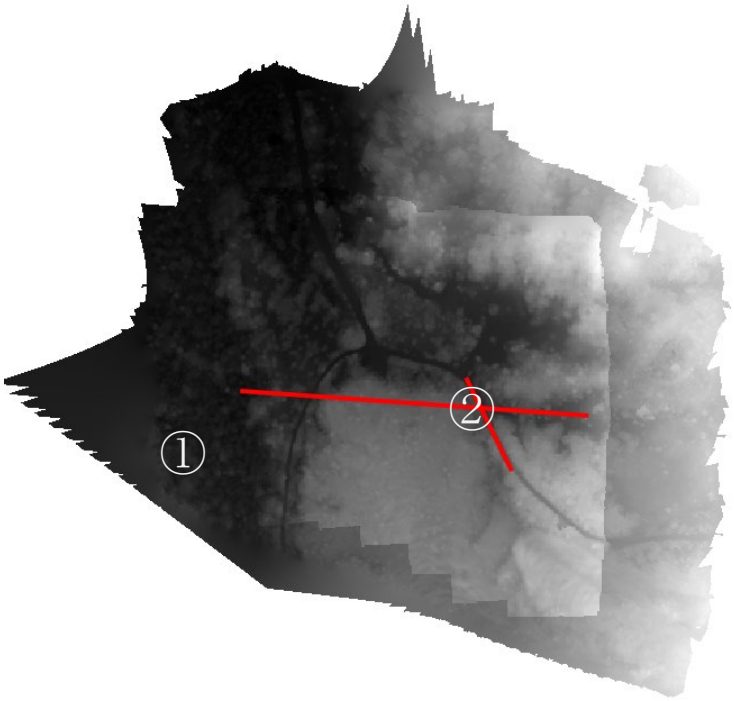


図 25　溶岩流付近(三原山)Matrice210(GCP補正)モデル-Phantom4-RTKモデル　DSM比較断面位置

表 5　Phantom4-RTK　その他の測位方法

種類	測位方法	備考
ネットワーク型 RTK	位置情報データ配信サービスを使用した測位	基地局が不要であるが、通信契約が必要
PPK 方式	ネットワーク RTL 方式と同様の技術を後処理として行い補正する	ネットワーク通信を必要としないが、後処理が発生

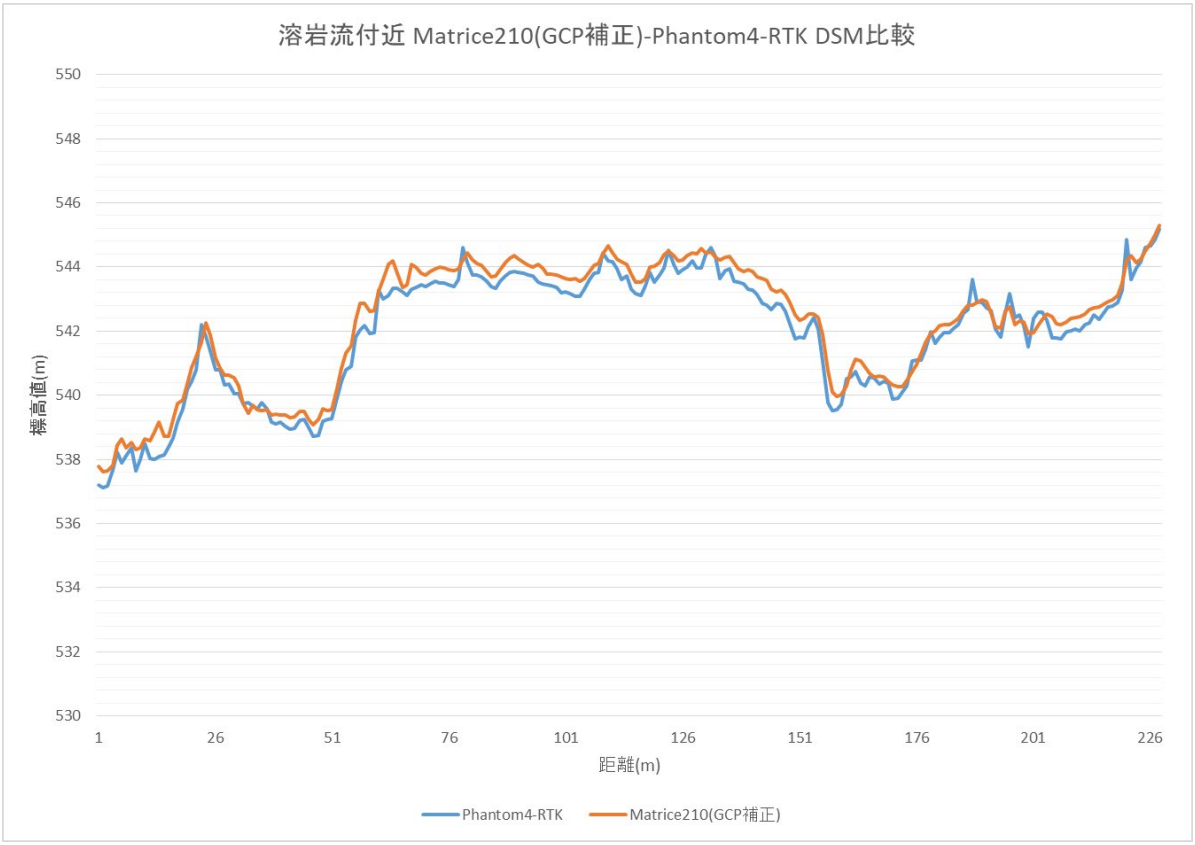


図 26　Matrice210(GCP補正)-Phantom4-RTK DSM比較　断面図①

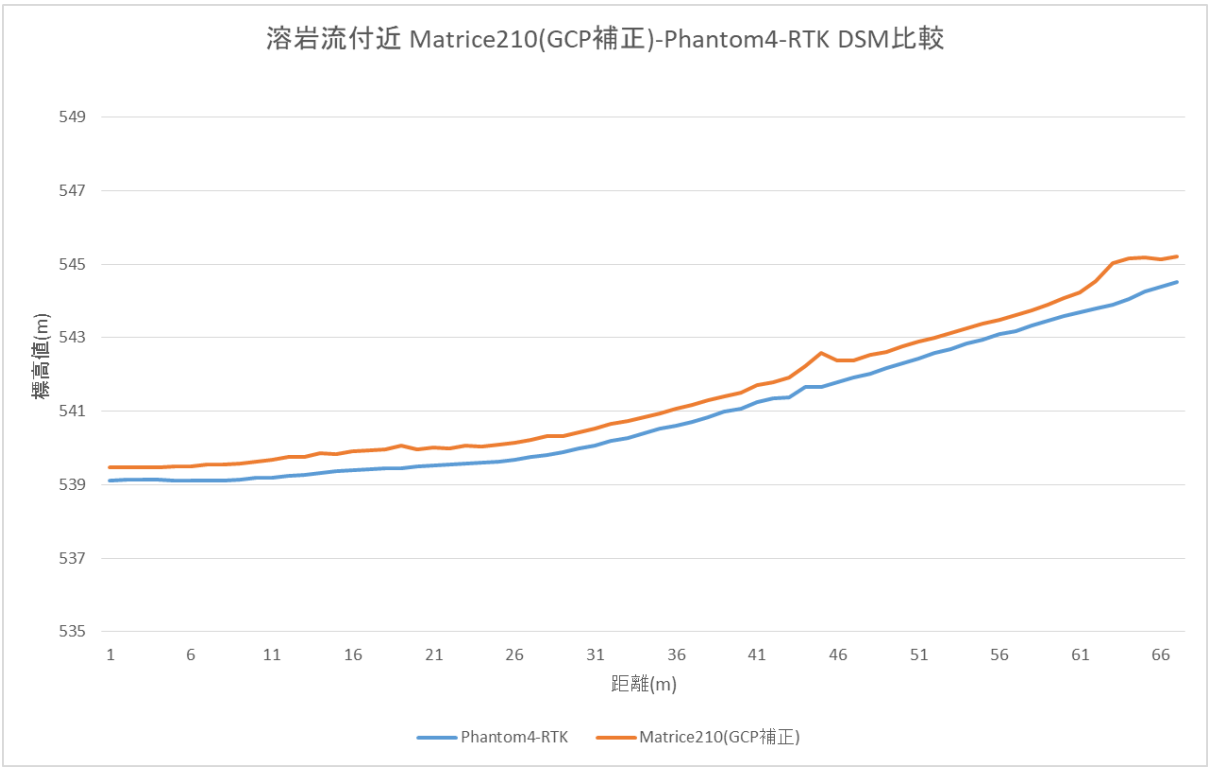


図 27　Matrice210(GCP補正)-Phantom4-RTK DSM比較　断面図①

d)最低限の GCP 付与による Phantom4-RTK 撮影データの位置精度・歪み補正

今回の検証では Phantom4-RTK での高精度な計測結果を得られなかったが、最低限の GCP を付与することで、複数の GCP で補正を行った Matrice210 撮影データから作成したモデルと同等の精度を得ることができないか検証を実施した。

検証対象は Phantom4-RTK で撮影を行った三原山火口付近と溶岩流付近のデータで作成したモデルとし、GCP を 3 点・4 点・5 点で均等に付与し、モデルの補正状況を Matrice210 撮影データから作成した DSM と比較を行い、評価を行った。

i)三原山火口付近

以下に GCP3～5 点の付与した箇所と、補正したデータと Matrice210 撮影データから作成したモデルとの DSM を比較した結果として、図 17 で示す位置の断面図を示す。

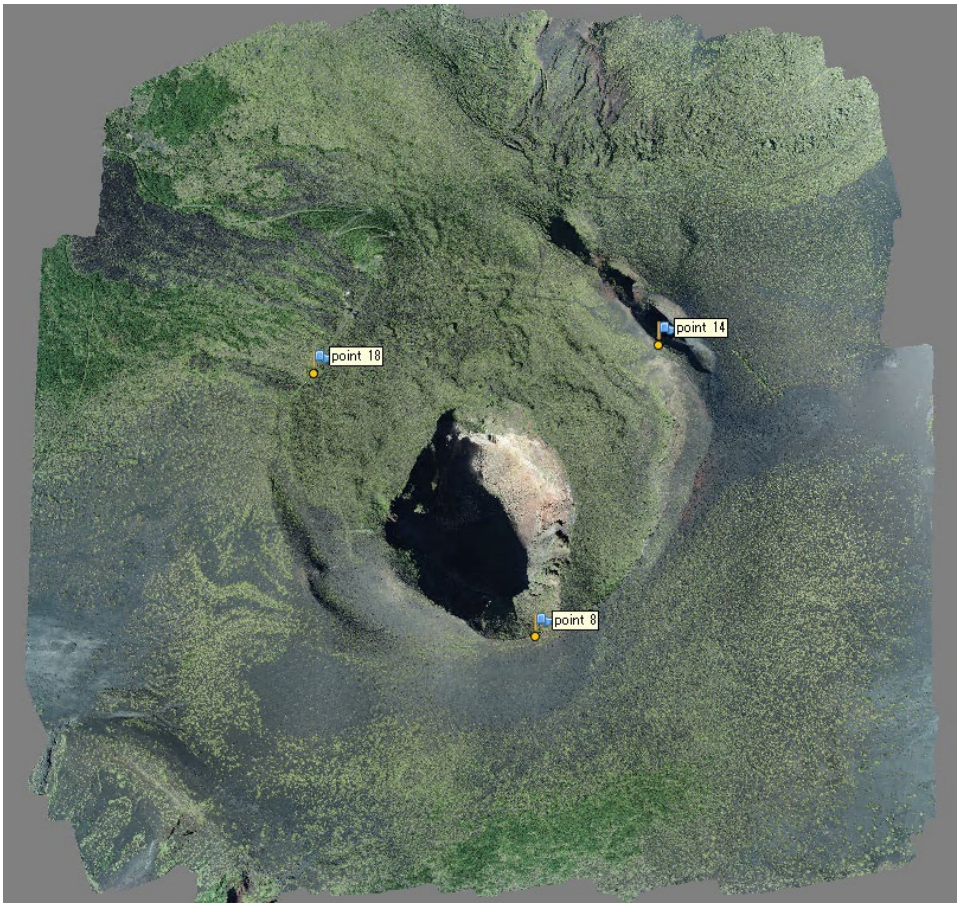


図 28　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル GCP3点での補正

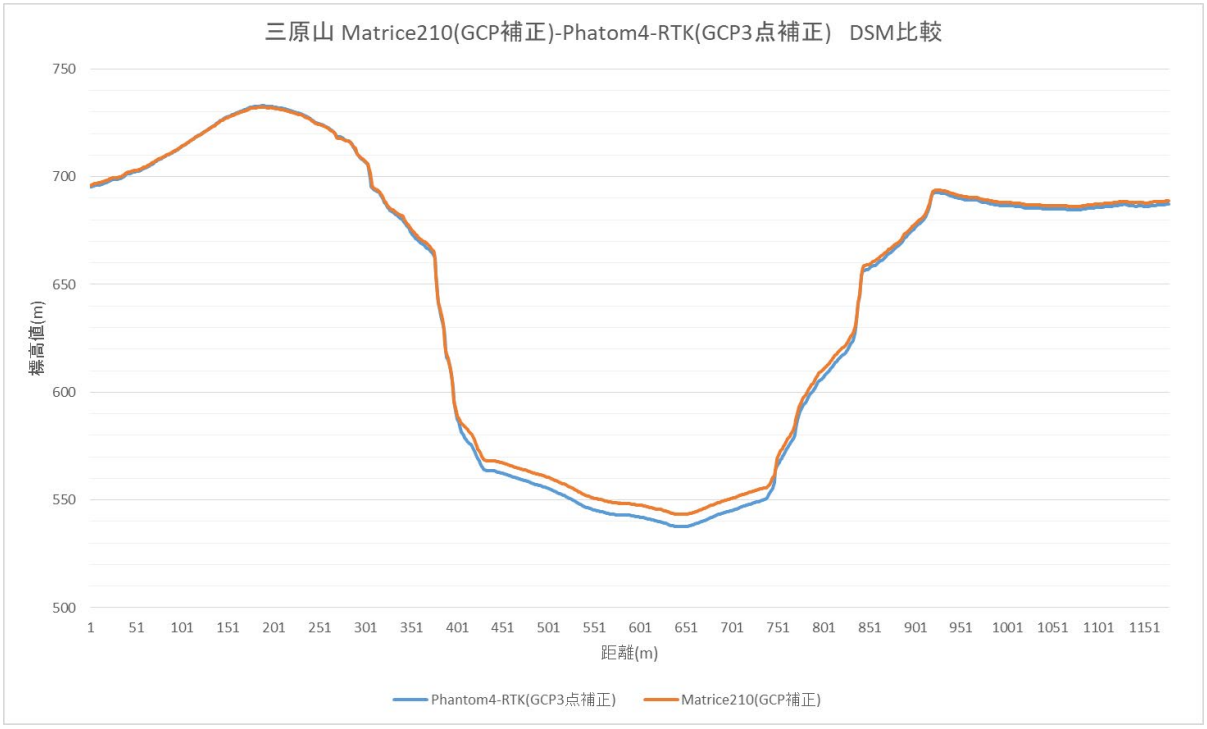


図 29　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP3点補正) DSM比較 断面図①

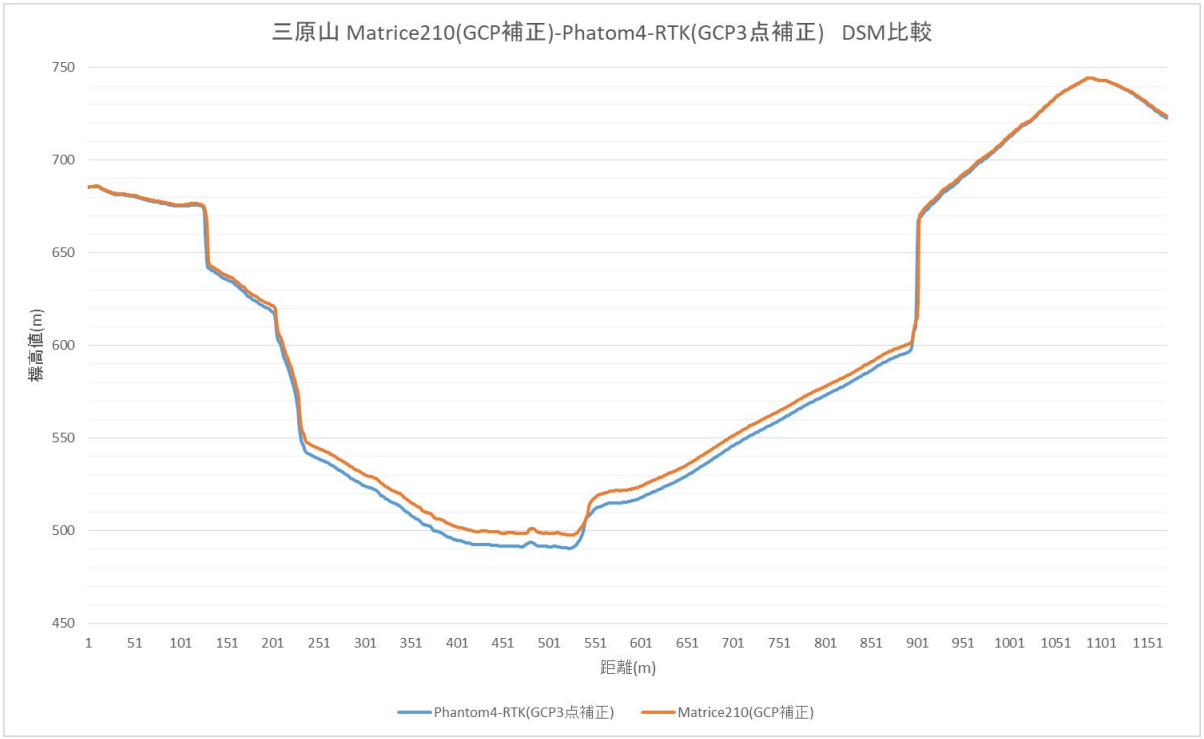


図 30　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP3点補正) DSM比較 断面図②

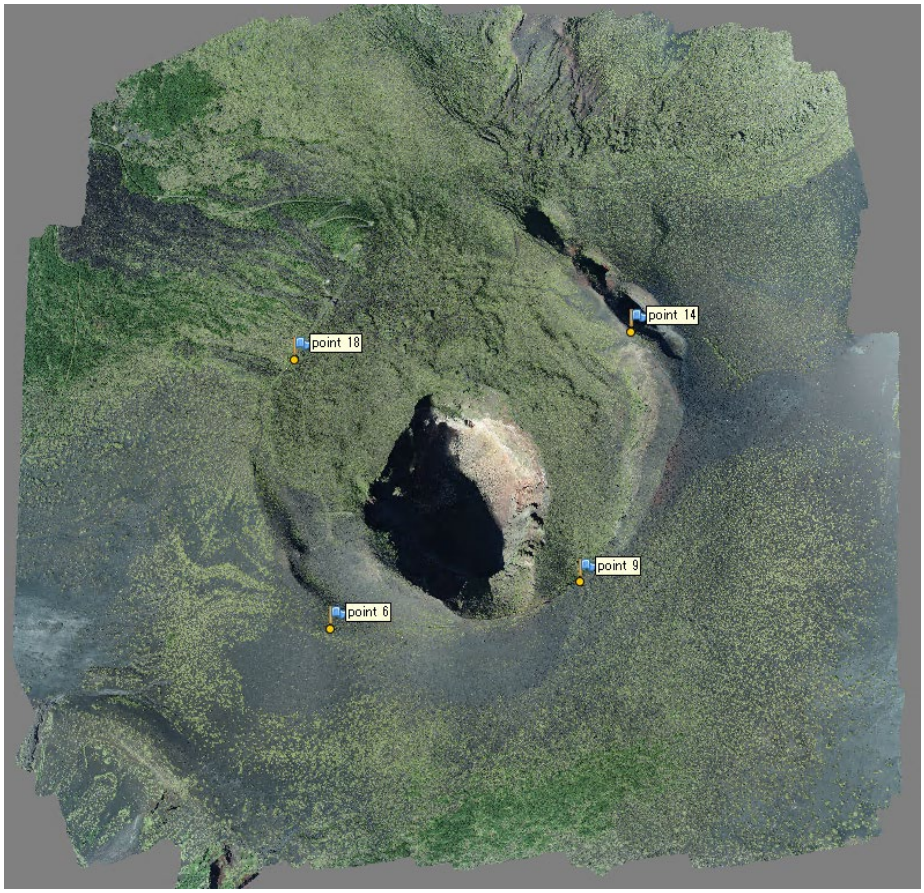


図 31　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル GCP4点での補正

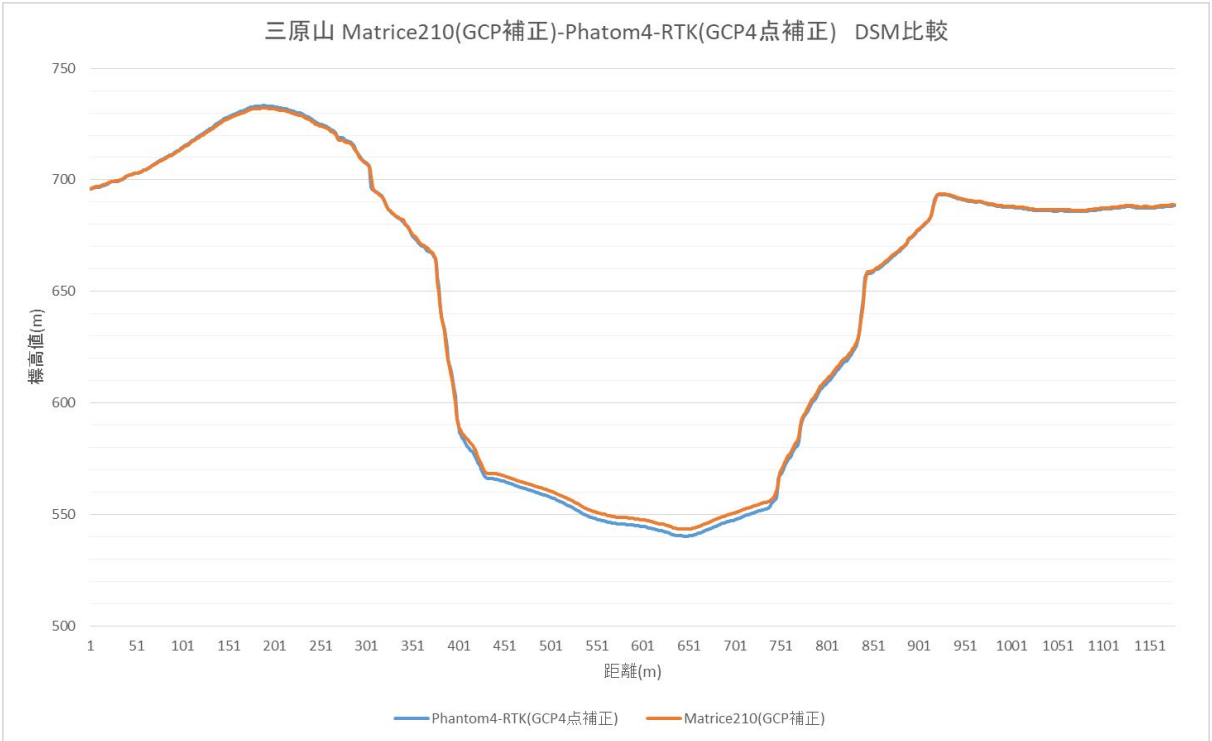


図 32　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP4点補正) DSM比較 断面図①

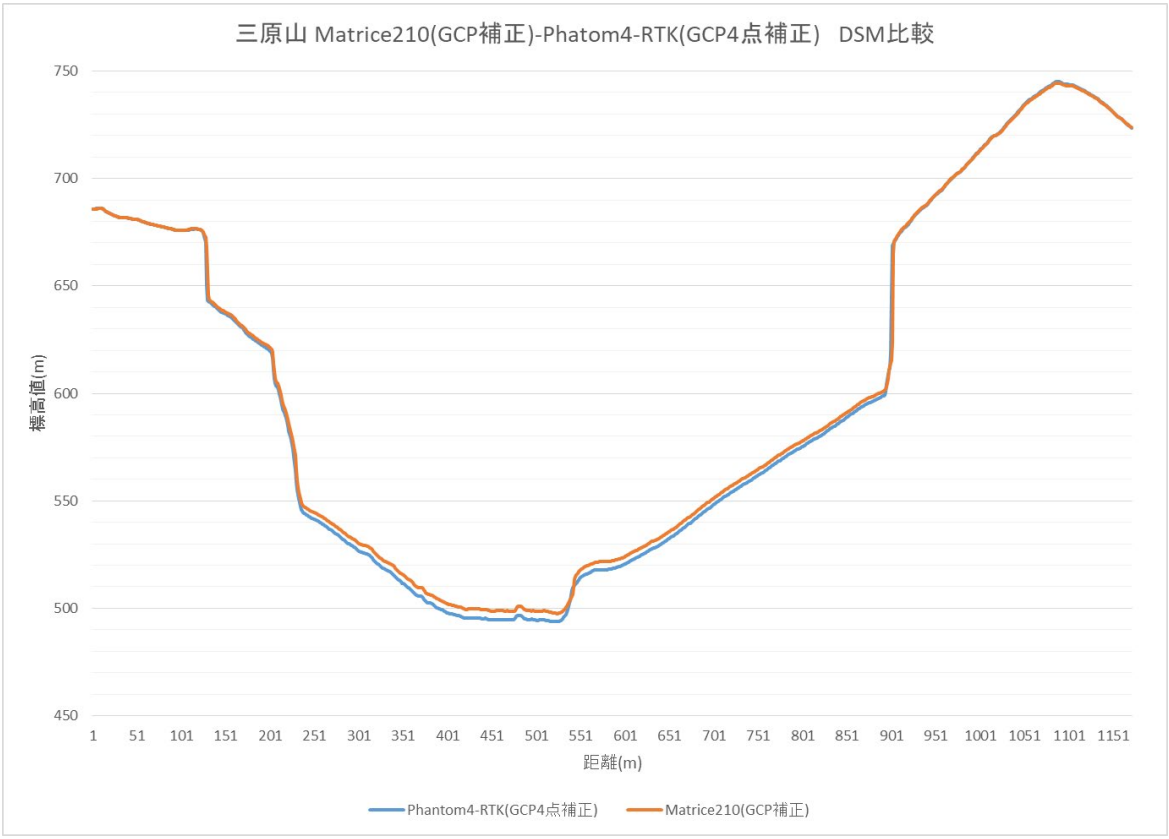


図 33　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP4点補正) DSM比較 断面図②

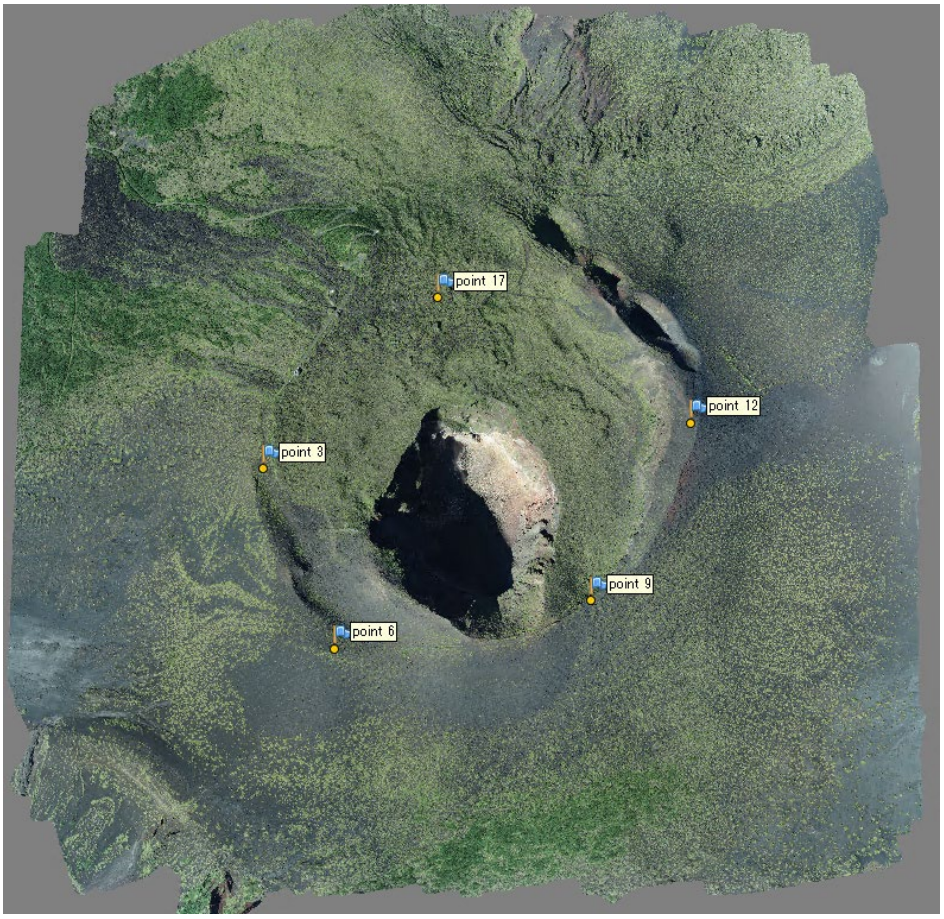


図 34　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル GCP5点での補正

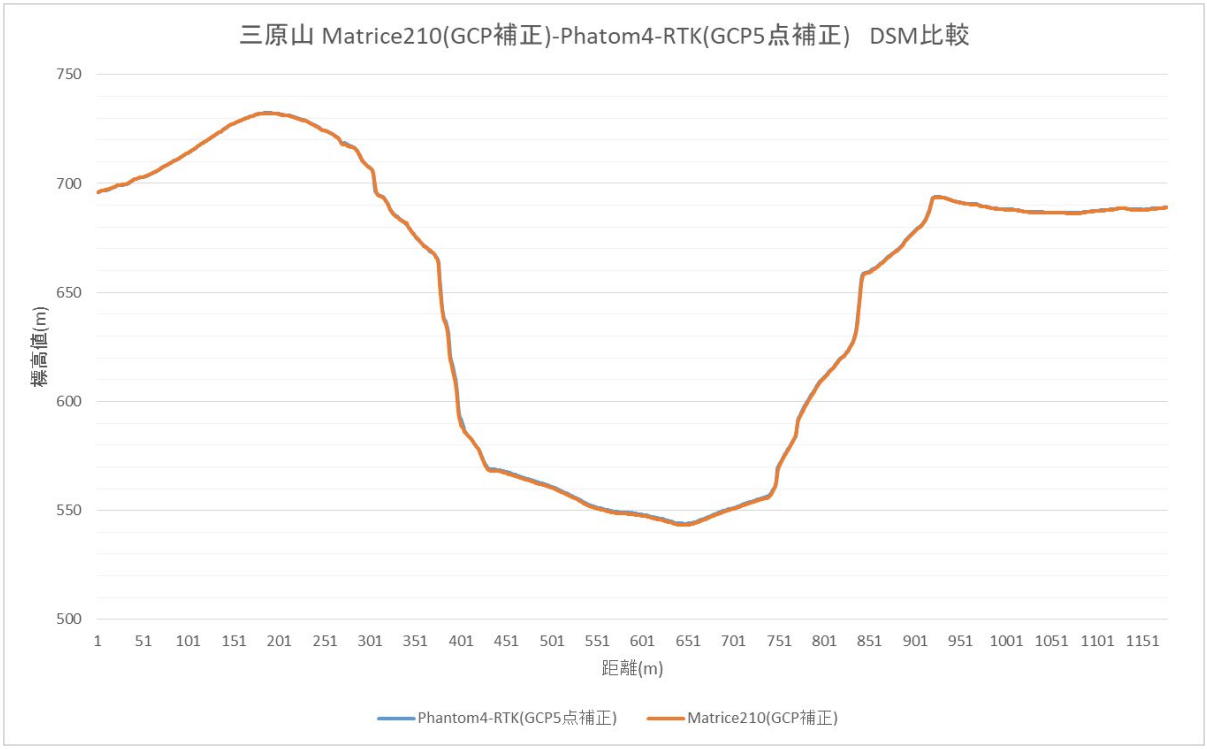


図 35　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP5点補正) DSM比較 断面図①

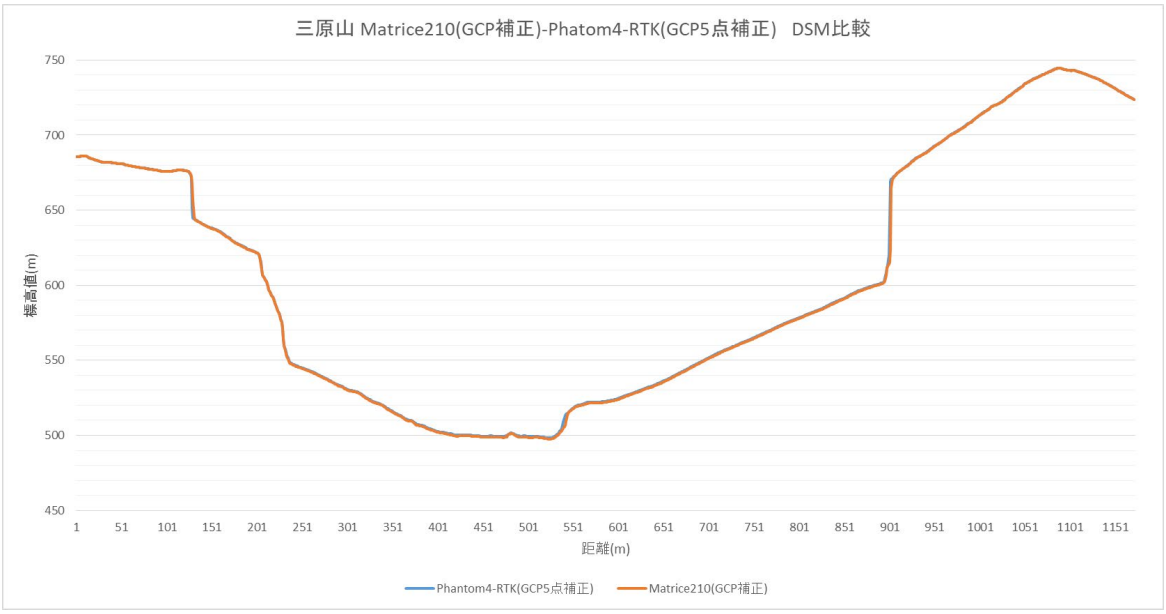


図 36　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP5点補正) DSM比較 断面図②

各データの DSM の比較結果において、断面位置での高さ方向の差分を RMS(二乗平均平方根)でまとめた。GCP3 点補正の場合は、断面位置①で 3.181m、断面位置②で 5.098m、GCP4 点補正の場合は、断面位置①で 1.719m、断面位置②で 3.152m、GCP5 点補正の場合は断面位置①で 0.542m、断面位置②で 1.777m であった。

三原山火口付近のように高低差が大きく発生している箇所では、GCP5 点補正でも 1m 程度のずれが発生するケースも確認できたため、高さ方向のずれを補正するために最低限 5 点以上の GCP を使用する必要があると考えられる。

ii)溶岩流付近(三原山)

以下に GCP3～5 点の付与した箇所と、補正したデータと Matrice210 撮影データから作成したモデルとの DSM を比較した結果として、図 25 で示す位置の断面図を示す。

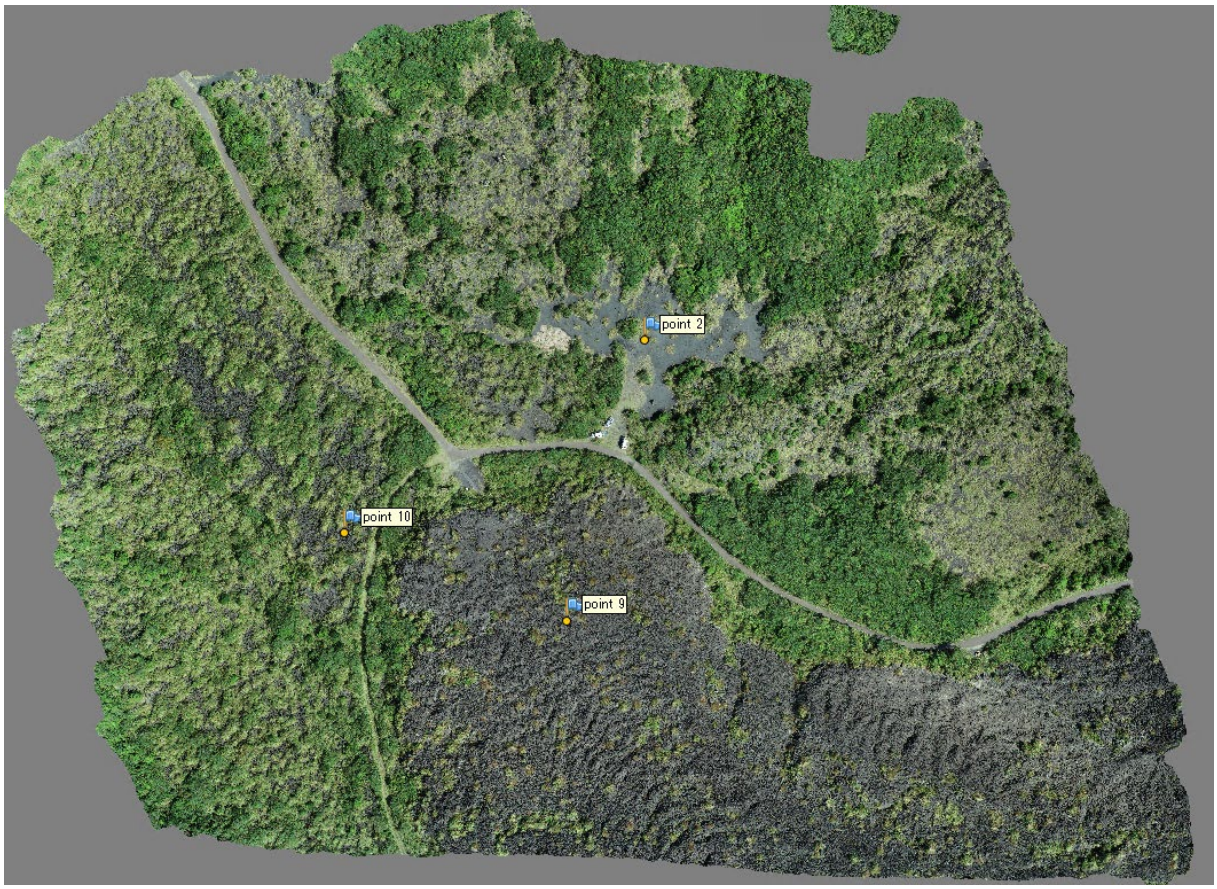


図 37　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル GCP3点での補正

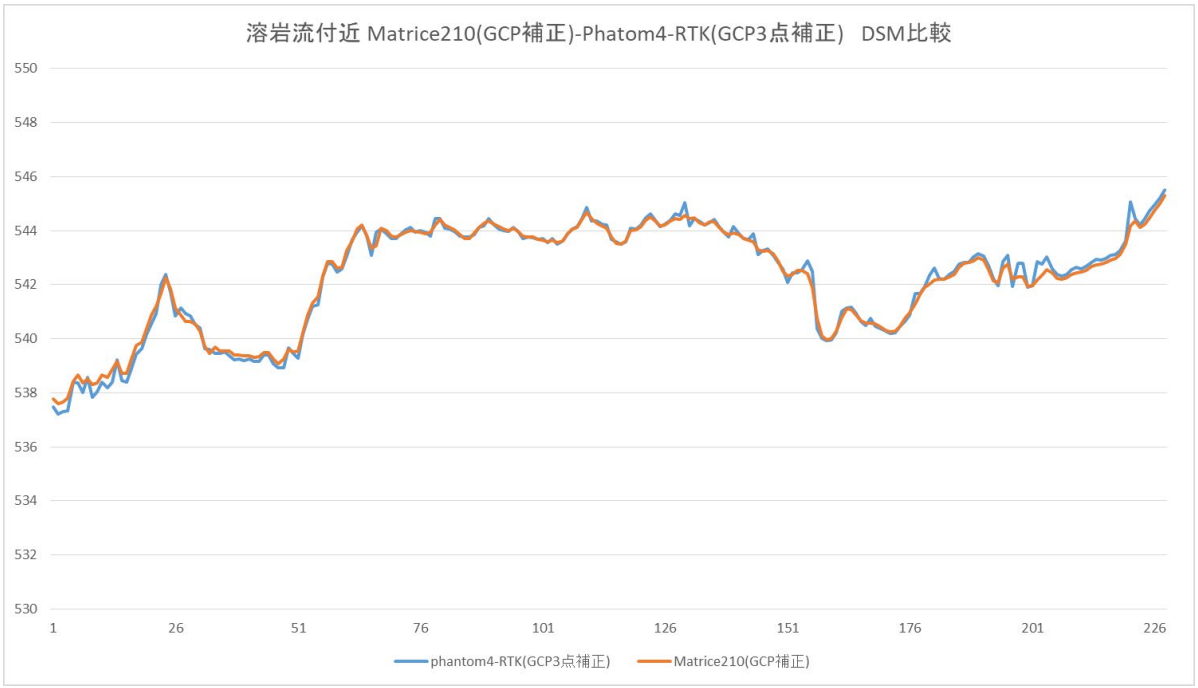


図 38　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP3点補正) DSM比較 断面図①

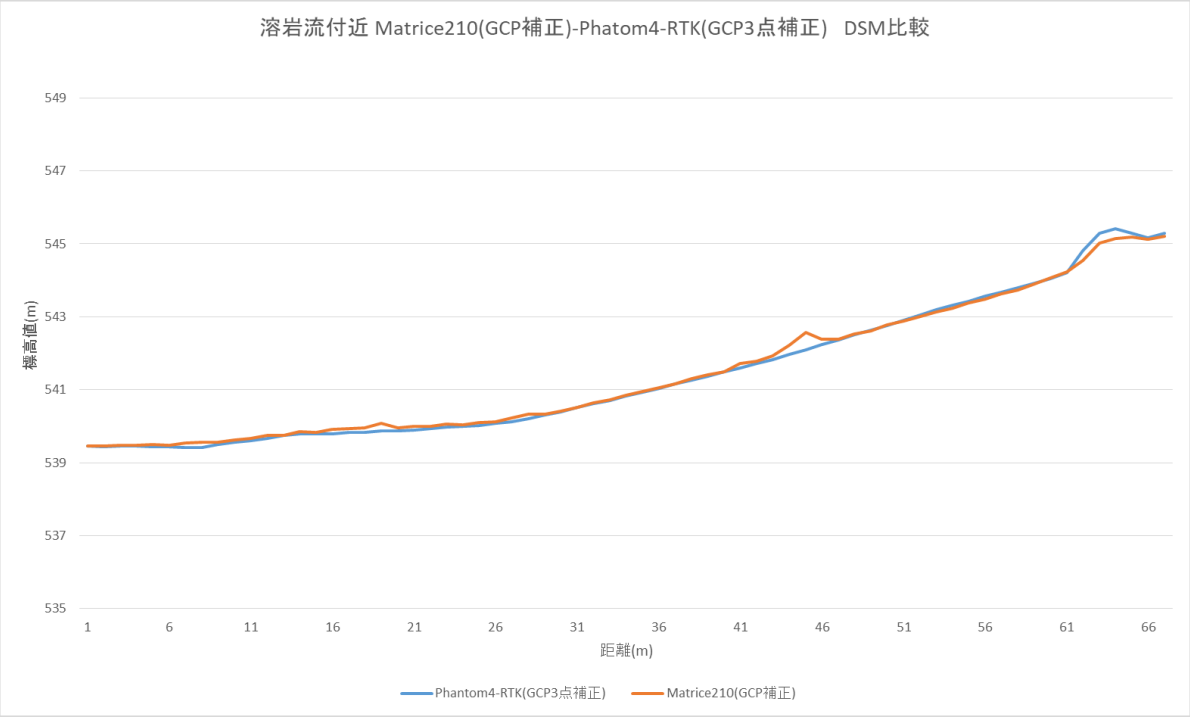


図 39　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP3点補正) DSM比較 断面図②

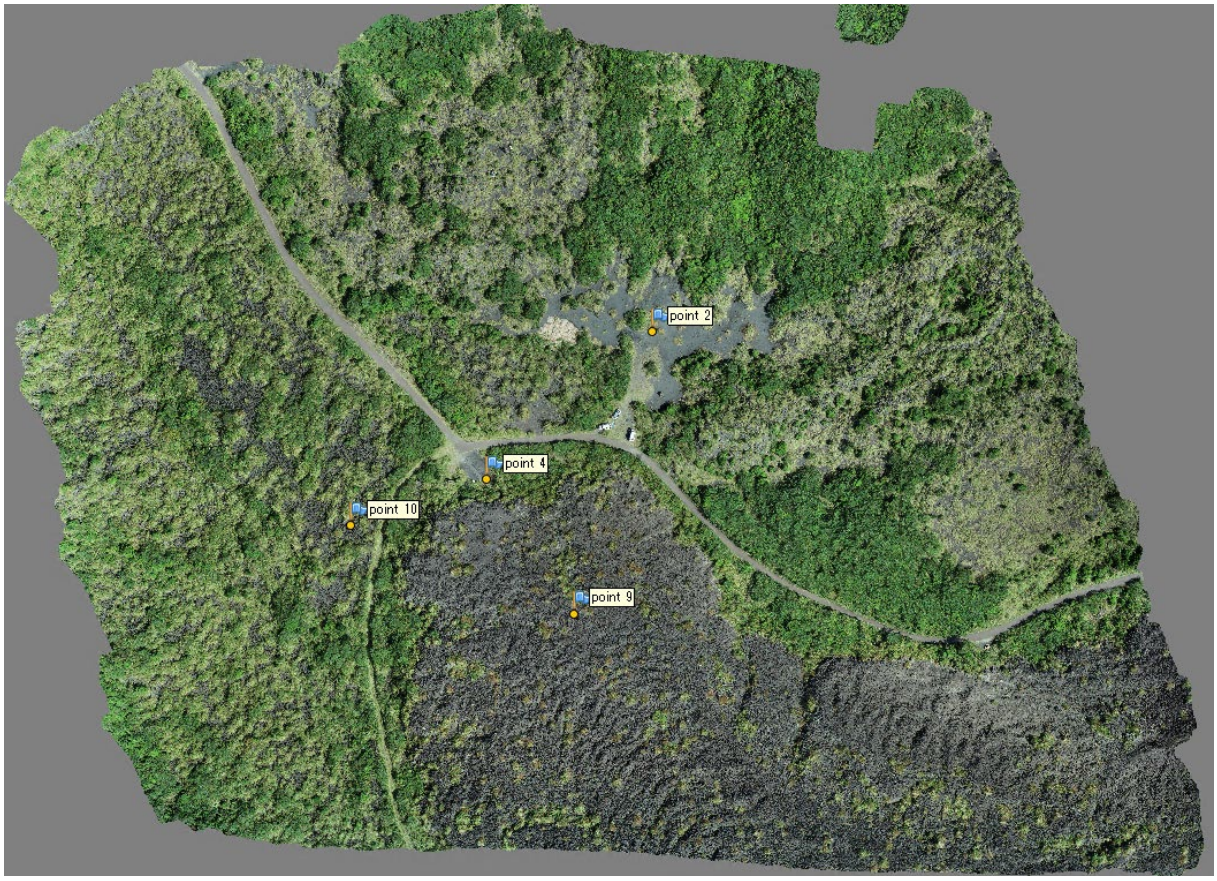


図 40　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル GCP4点での補正

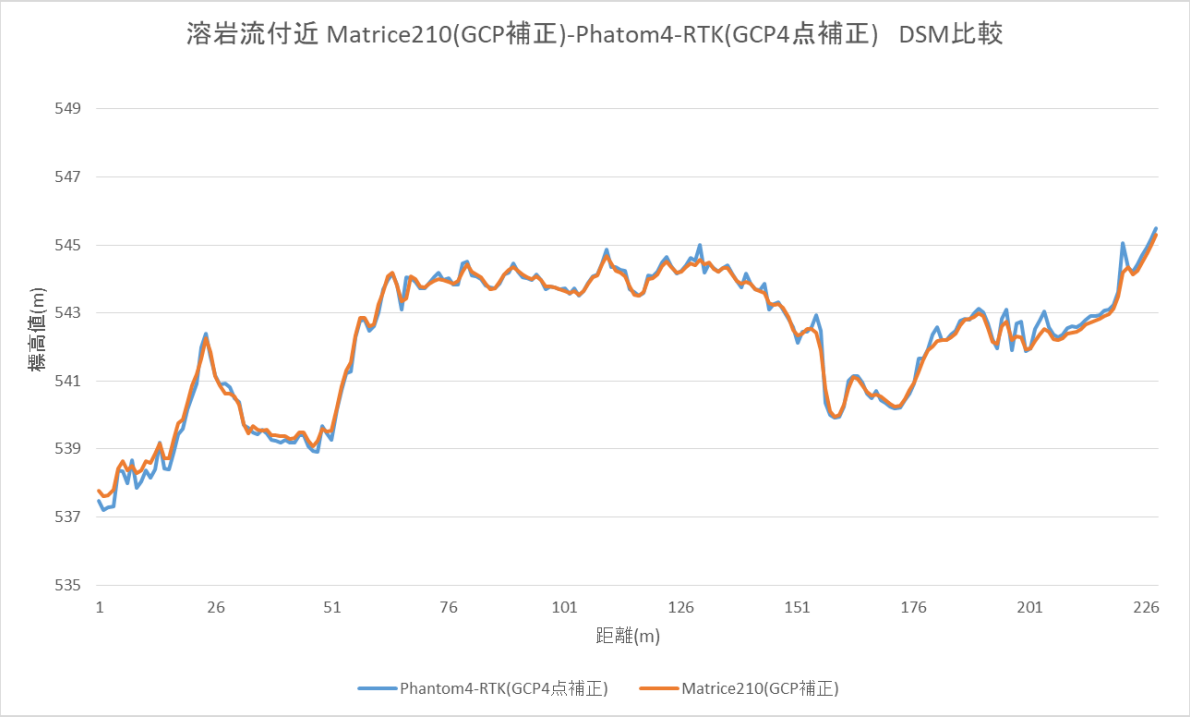


図 41 溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP4点補正) DSM比較 断面図①

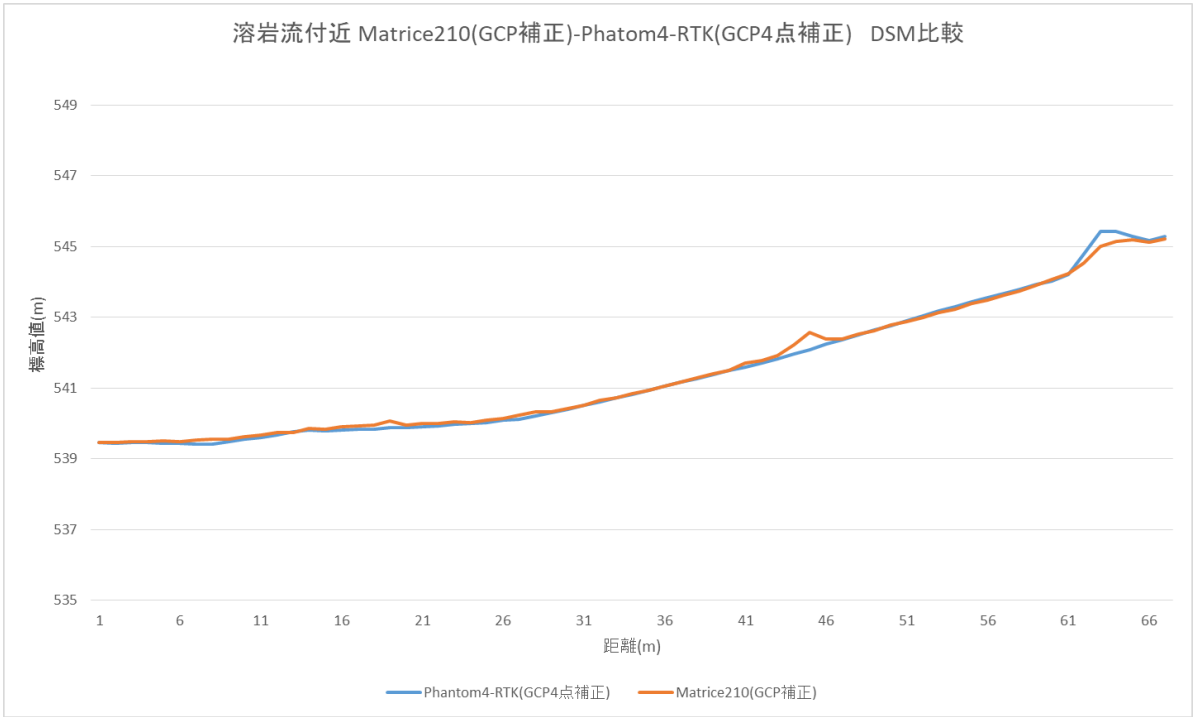


図 42 溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP4点補正) DSM比較 断面図②

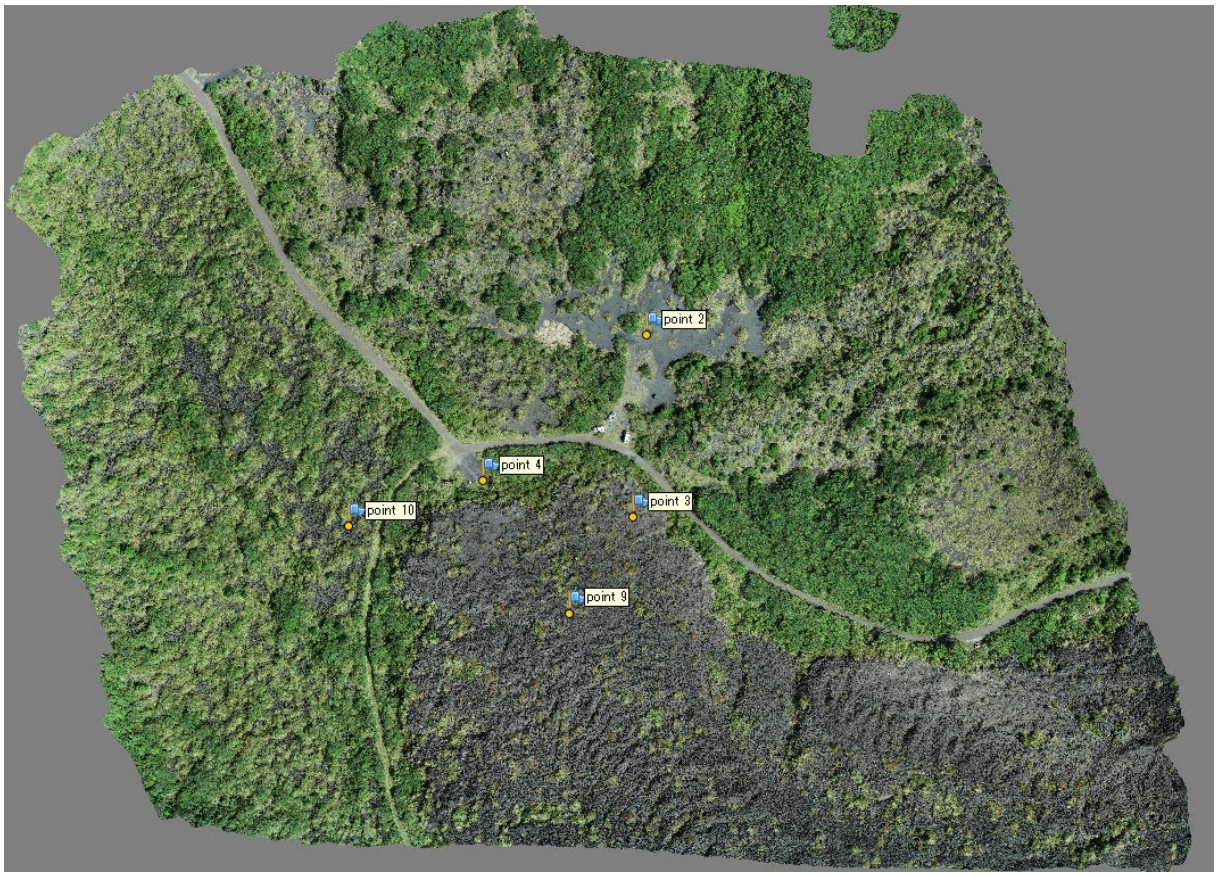


図 43　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル GCP5点での補正

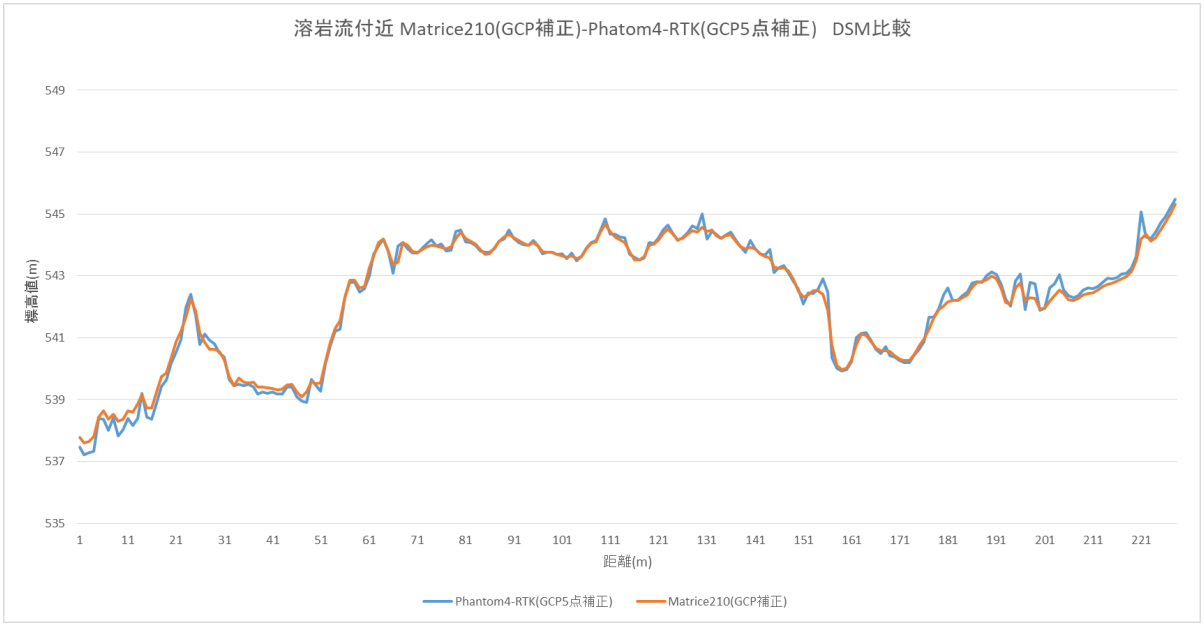


図 44　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP5点補正) DSM比較 断面図①

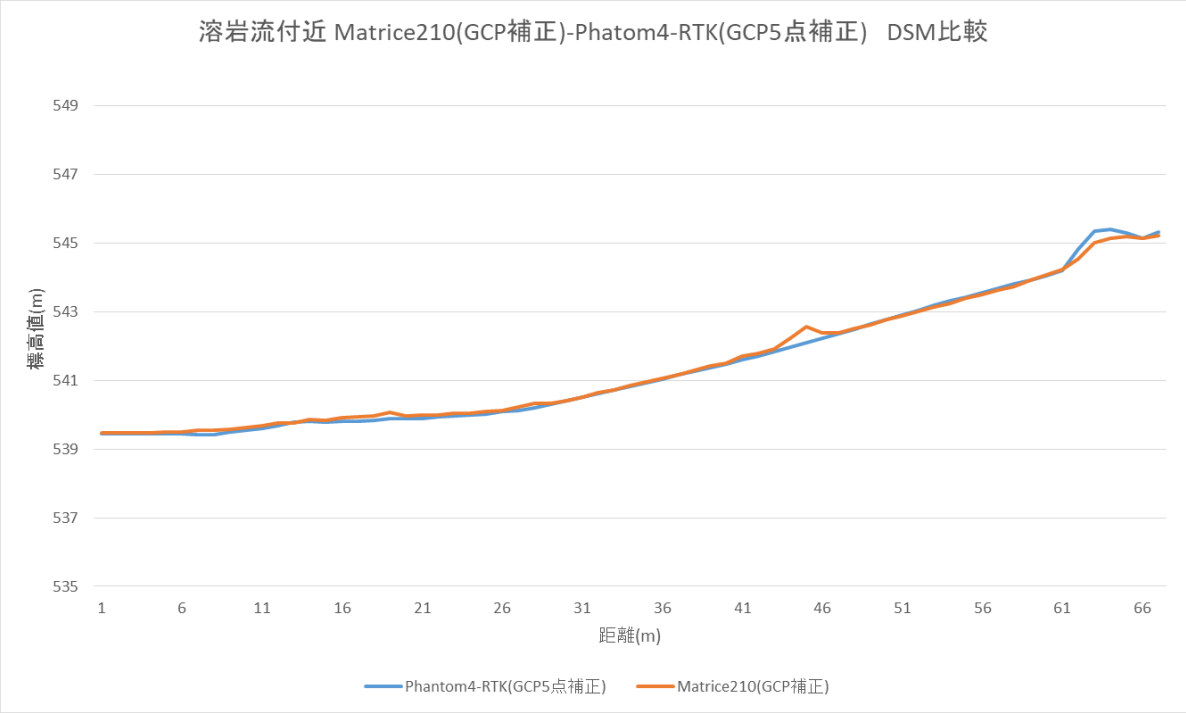


図 45　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP5点補正) DSM比較 断面図②

各データの DSM の比較結果において、断面位置での高さ方向の差分を RMS(二乗平均平方根)でまとめた。GCP3 点補正の場合は、断面位置①で 0.202m、断面位置②で 0.112m、GCP4 点補正の場合は、断面位置①で 0.194m、断面位置②で 0.117m、GCP5 点補正の場合は断面位置①で 0.197m、断面位置②で 0.114m であった。

溶岩流付近は三原山火口付近のように高低差が大きく発生している箇所ではないため、GCP3 点補正でも 20cm 程度の高さ方向の補正を行うことができた。速報データとしては、GCP3 点補正の結果でも十分に使用できると考えられる。

e)裏砂漠(三原山)　Matrice210 での撮影

三原山の裏砂漠を対象に、Matrice210 で撮影を行い、設置した GCP によりモデルの補正を行った。その結果をもとに、2019 年に被害をもたらした台風 15 号により裏砂漠の地形がどのように変化したのか、台風 15 号以前の DEM と比較を行い、結果の解析を行った。

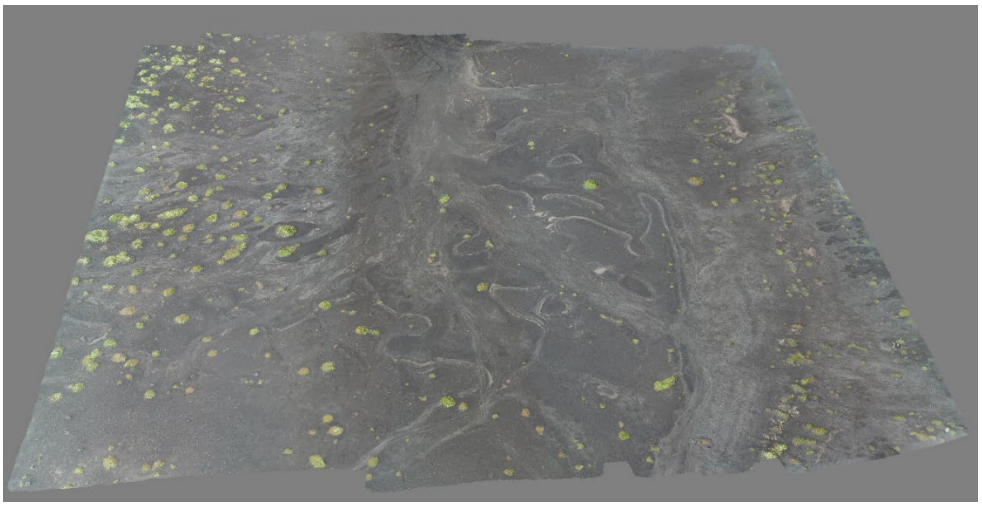


図　46　裏砂漠Matrice210撮影データ作成モデル(GCP補正)

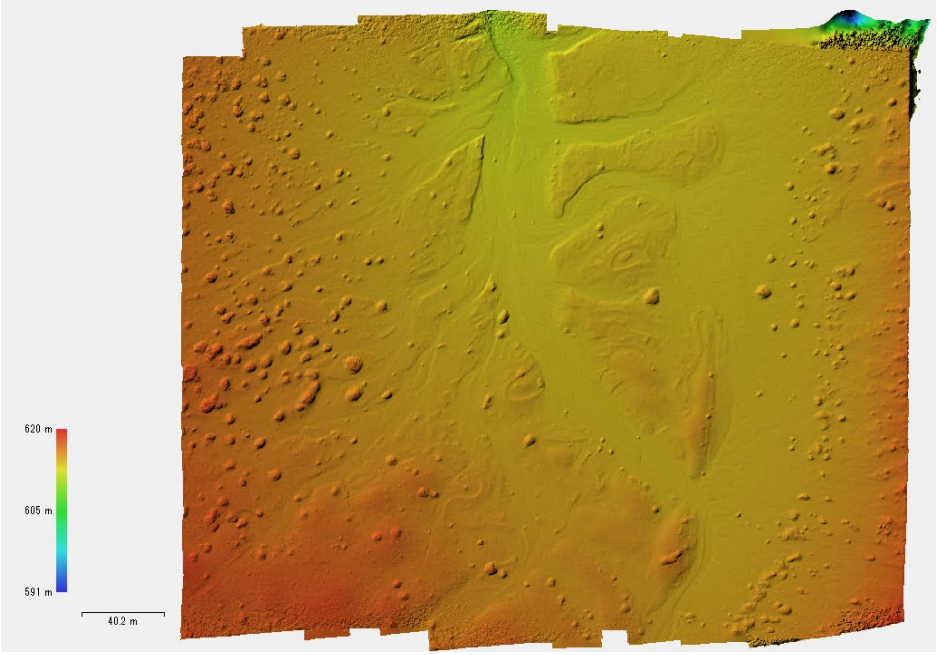


図　47　裏砂漠Matrice210撮影データ作成DSM

図 48 の解析結果から、2019 年台風襲来時の水流による側岸侵食で高さが 1m程度低くなっていることが確認できた。

また、2019 年台風襲来時の風食による高さがに 10~20cm 程度低くなっている箇所も確認できた。

今回の検証結果より、風食による小さな変化についても確認することができたことから、噴火した際の火山灰等の堆積変化についても、UAV で撮影した結果から解析できると考えられる。

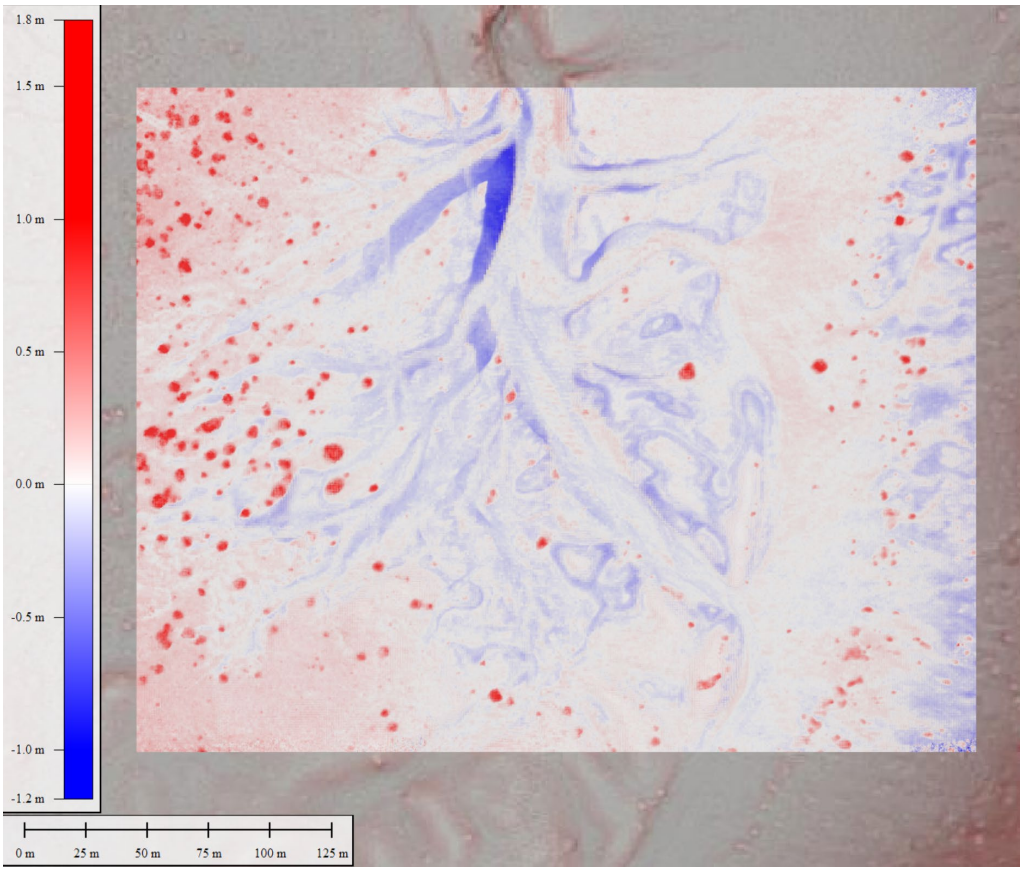


図 48　裏砂漠　台風15号前後のDEMとDSMの差分結果

f)御神火茶屋付近から三原山火口への長距離飛行での撮影

御神火茶屋付近から Matrice210 を使用して、三原山火口付近までの長距離での飛行と撮影を行った。この撮影は、噴火時に離れた地点からの飛行・撮影が可能であるかの検証として実施した。

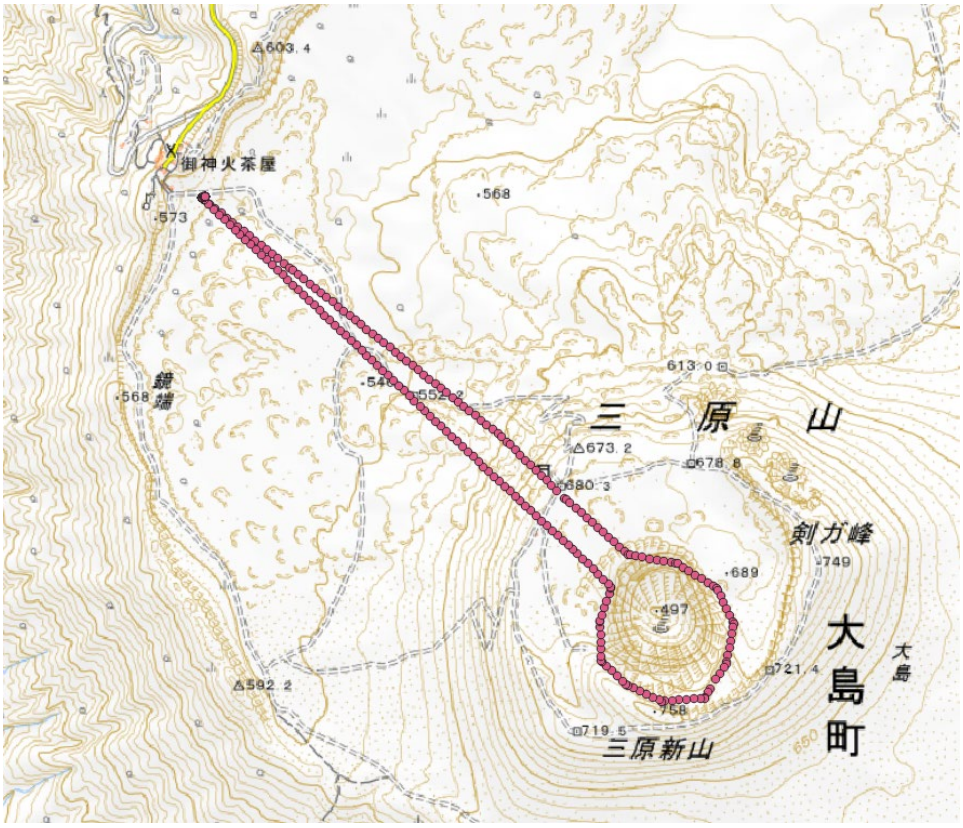


図 49　御神火茶屋付近からの撮影ルート(出典：地理院地図)



図 50　御神火茶屋から約1.5km地点の三原山山頂付近での撮影画像

御神火茶屋付近から三原山火口付近までの距離はおおよそ 2km である。今回の飛行では、飛行中に UAV 本体との接続が切れることなく、問題なく撮影を行うことができた。

これは噴火警戒レベル３－①「カルデラ内および山頂火口から約 2km までの範囲への立入規制」が発表された場合にも、立ち入り禁止範囲外から撮影できることが想定され、噴火時にも離れた位置からの撮影で可能であることが確認できた。

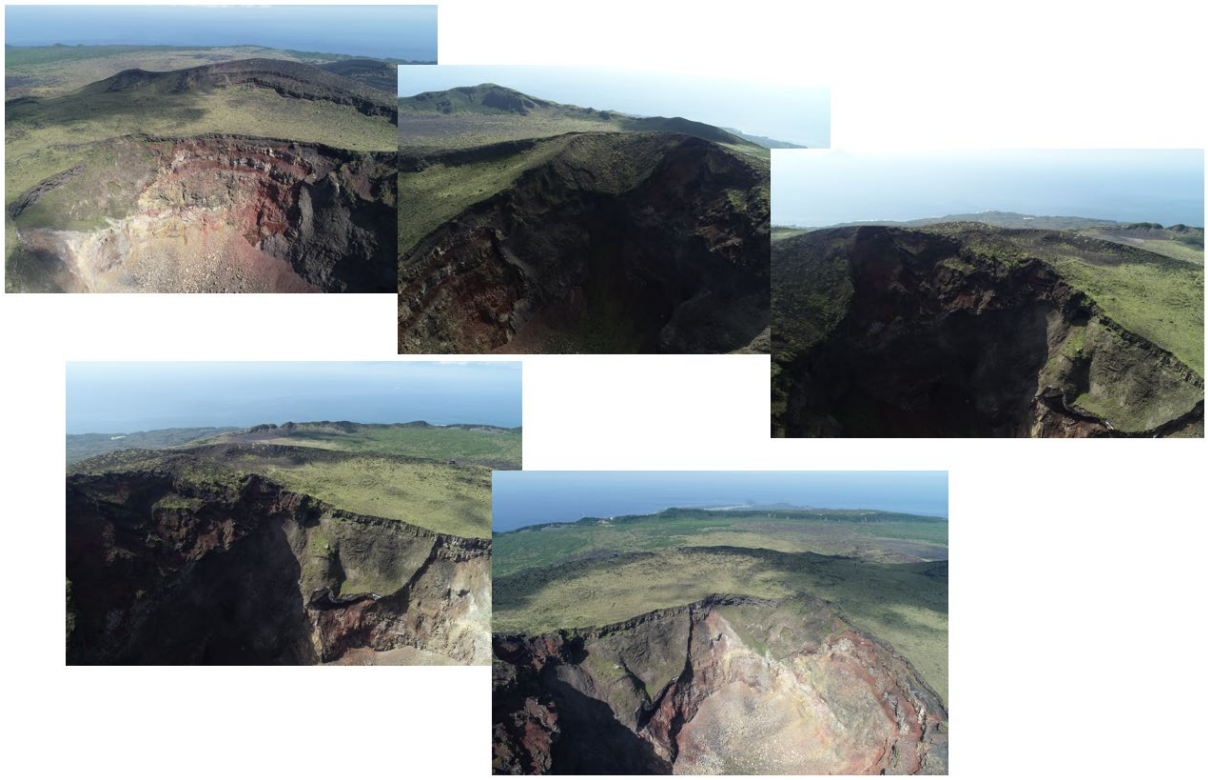


図 51　御神火茶屋から約2km地点の火口内部の撮影画像

3)　SfM/MVS計算時間の短縮

データ取得後に作成する三次元モデルの精度を向上させることで、迅速な状況把握が可能となるが、高精度の三次元モデルの作成には、時間を要する。高速化と高精度化は、相反する関係であるため、処理時間を優先すると、精密な三次元モデルを作成することが難しくなる。

今年度は、高精度な三次元モデルを短時間で作成するために、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器（アジア航測で開発中）を使用し、三次元モデルの作成を行った。三次元モデルの精度及び処理時間を汎用 PC 及び市販ソフトウェアと比較した。



図 52　SfM/MVS計算に特化した専用機器

専用機器と汎用 PC 及び市販ソフトウェア（Metashape）において、三次元モデル作成の処理時間を比較した。処理データは、Matrice210 で撮影した 429 枚の 4K 画像を用いた。

表 6　処理時間の比較

機器	三次元モデルの精度	モデルのメッシュ数	処理時間
専用機器	高精度 (オリジナル画像の解像度で作成)	16,157,863	4 時間 52 分 11 秒
汎用 PC 及び市販ソフトウェア	高精度 (オリジナル画像の解像度で作成)	23,933,307	7 時間 54 分 10 秒

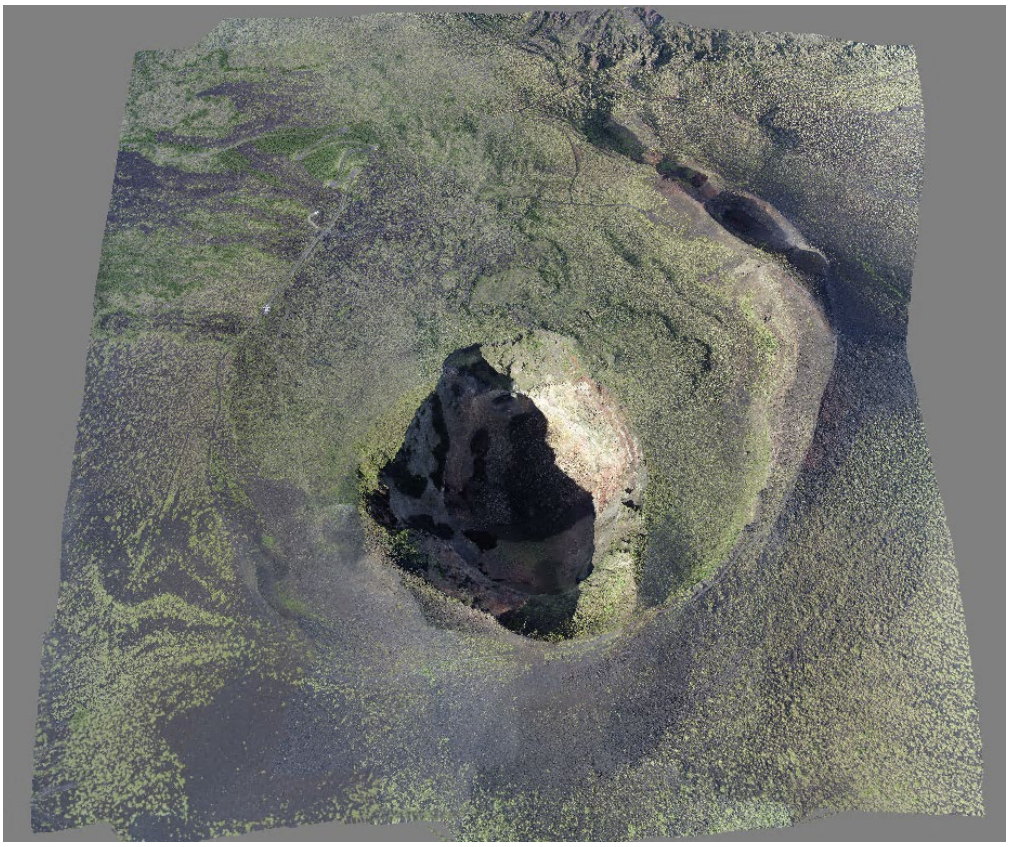


図 53　専用機器で作成した三次元モデル

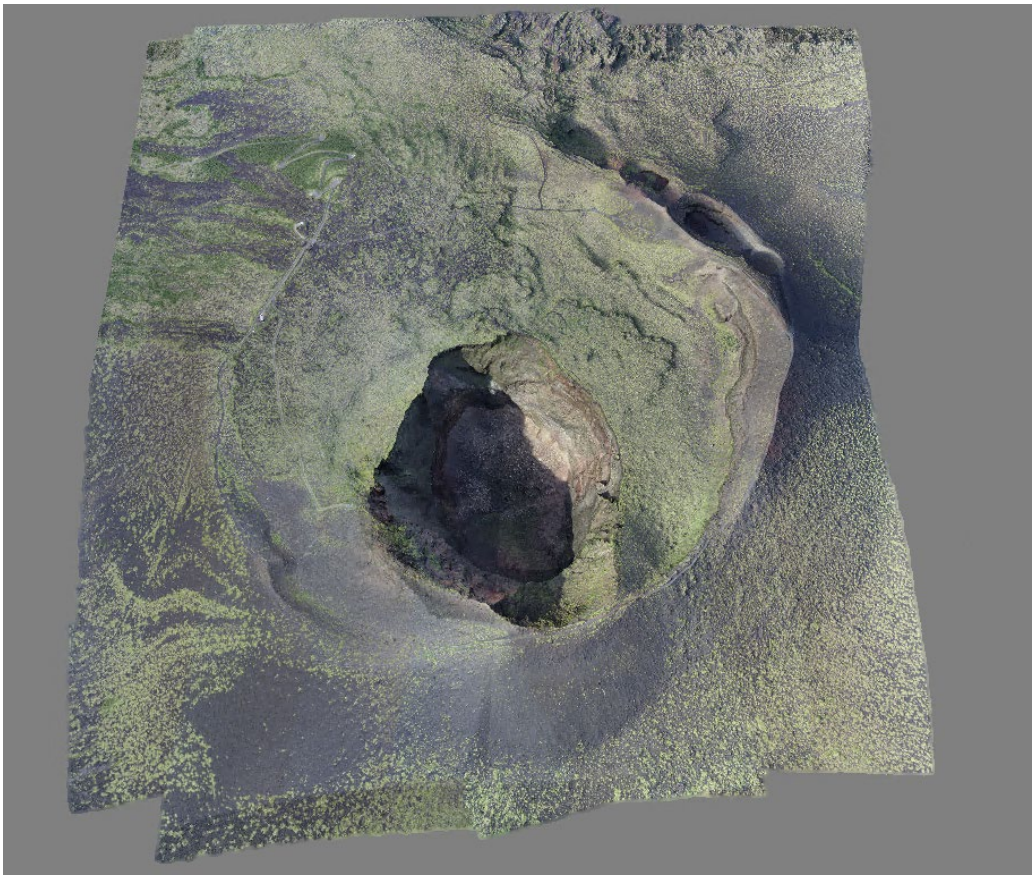


図 54　汎用PC及び市販ソフトウェアで作成した三次元モデル

汎用 PC 及び市販ソフトウェアは、専用機器に比べ約 3 時間処理に時間がかかる。ただし、モデルのメッシュ数は、汎用 PC 及び市販ソフトウェアの方が多い結果となり、より詳細なモデルを作成することができている。

汎用 PC の場合、スペックに依存し処理時間も変わることが想定される。特に、処理に時間がかかっているメッシュを発生させる処理についてはメモリ数に大きく依存するため、PC スペックを上げることで、処理時間は短縮することができると考えられる。

専用機器の場合、処理前の事前準備の工程が少ないため、データ取得から処理完了までの全体的な時間では、より短時間で処理を完了させることができる。

専用機器には、モードとして高精度の「BEST」と低精度の「FAST」が存在する。「FAST」とすると精度は低くなるが処理時間は短くなる。「FAST」で処理した場合の時間は、画像枚数・画質にも影響するが 4K 画像を 500 枚程度処理する場合で約 30 分程度の処理時間でモデルが作成できる。

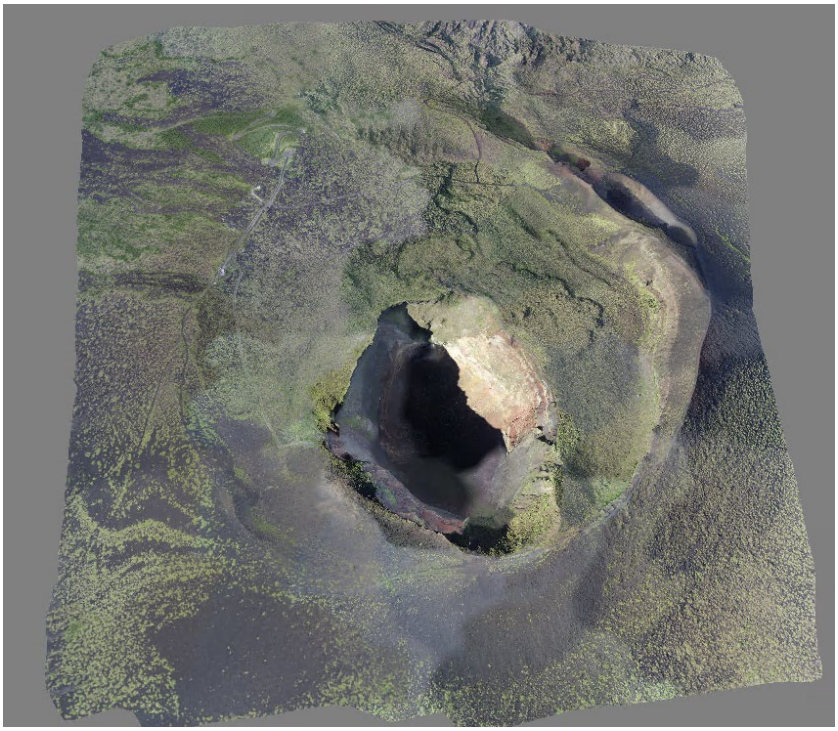


図 55　専用機器「FAST」モードで作成したモデル

「FAST」モードで作成したモデルのメッシュ数は 30,000～50,000 程度となるが、噴火時の速報としては利用できるデータではないかと考えられる。

噴火時は、低精度だが迅速に三次元モデルを提供するには専用機器を用いて、平行して汎用 PC 及び市販ソフトウェアを用いて高精度の三次元モデルを作成することが良いのではないかと考えられる。

データ処理の高速化を目的とし、UAV の飛行と同時に三次元処理する市販ソフトウェアも開発されているため、このような最新技術を活用することも検討する必要がある。

(d) 結論ならびに今後の課題

伊豆大島において、RTK-GNSS 搭載 UAV を用いた撮影を行い、基準点（GCP）を設置せずに３D モデルを作成する方法を研究した。2019 年度と同様に GCP を火口周辺に設置し「RTK-GNSS 搭載 UAV」の Phantom4-RTK と「未搭載 UAV」の Matrice210 で同一エリアの撮影を行い、比較検証を行った。GCP 補正した Matrice210 と Phantom4-RTK の DSM を比較すると、火口周辺では 10m 程度、溶岩流では 40～50 ㎝程度のずれが生じたが、GCP を 3～5 点用いて解析すると誤差が減少する。計測時の衛星や基地局との接続状況にもよるが、計測方法については引き続き検証が必要であると考えられる。

伊豆大島の噴火時には立入規制となるため、噴火時に離れた地点からの飛行・撮影が可能であるかの検証を行った。御神火茶屋付近から三原山火口付近までの約 2km の長距離飛行を行ったところ、飛行中に UAV 本体との接続が切れることなく、問題なく撮影を行うことができた。これは伊豆大島の噴火警戒レベル３－①「カルデラ内および山頂火口から約 2km までの範囲への立入規制」が発表された場合にも、立ち入り禁止範囲外から撮影できることを確認した。

高精度な三次元モデルを短時間で作成するために、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器を使用し、三次元モデルの精度及び処理時間を汎用 PC 及び市販ソフトウェアと比較した。汎用 PC 及び市販ソフトウェアは、専用機器に比べ約 3 時間処理に時間がかかる。ただし、モデルのメッシュ数は、汎用 PC 及び市販ソフトウェアの方が多い結果となり、より詳細なモデルを作成することができている。噴火時は、専用機器を用いて低精度だが迅速に三次元モデルを作成し、平行して汎用 PC 及び市販ソフトウェアを用いて高精度の三次元モデルを作成することが望ましいと考えられる。データ処理の高速化を目的とし、UAV の飛行と同時に三次元処理する市販ソフトウェアも開発されているため、このような最新技術を活用することも検討する必要がある。

今後の課題として、RTK-GNSS 搭載 UAV を用いて、安全を確保しつつ、３Dモデルの精度を向上させる技術開発が必要である。また、5～7 年目の目標である数時間以内のデータ処理完了のためには、SfM/MVS 計算時間をさらに短縮させる手法検討が必要である。取得したデータの共有について、伊豆大島のデータを用いた具体的な連携方法の検討を進める必要がある。

(e) 引用文献

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和３年度の業務計画案

(a) プロジェクトの総合推進

- 現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進する。
- サブテーマ 2 との連携：ドローンを活用した地形変化抽出を行い、予測降灰量と照合することを目的として、数値地形モデルの迅速な作成についての実証実験を計画して実施する。
- サブテーマ3との連携: 各種コンテンツのインプットデータとして利用するため、ドローンで取得した画像から地図と重ねられる「オルソ画像」を迅速に作成する手法に関する実証実験を計画して実施する。オルソ画像の必要分解能、体裁等について連携して進める。
- テーマ A、C との連携:災害状況把握のためにドローン等による空域からの画像、画像から作成されるオルソ画像および数値標高モデルのフォーマットや分解能、受け渡し方法について連携して研究する。また、数値シミュレーション用データとして使用される数値標高モデルの分解能、品質、受け渡しのフォーマットについて連携して研究する。
- 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携・融合の一環として、現地で取得した画像から３Ｄ地形モデルを作成する技術の体験、民間企業における火山調査関連技術や火山防災業務の紹介等のプログラムを計画・準備した上で、開催案内と参加者募集を行う。
- 東京都大島町において説明会を開催し、取得データに関する自治体等からのニーズを把握する。

(b) RTK-GNSS搭載UAVの導入による計測精度向上と高速

- 2021 年度は、実際の噴火を想定して、立入規制区域外からの飛行による高精度現状把握手法の開発を計画する。
- 噴火によって、火口付近の立ち入りが不可能な場合はもちろん、火口周辺の地形が大きく変化し、既往の GCP が失われたようなケースでも、位置やゆがみの補正をすることなく、迅速に差分計算し、噴出量などを求めることも想定して研究を進める。

(c) 夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発

- これまで火口などの地形を高精度に把握する手法を検討するため、計測対象エリア近傍から計測を行い精度向上の検討を行ってきた。しかし、実際の噴火では計測は立入規制区域外からの撮影となり、火口上空を飛行することができないことも想定される。また、日中だけではなく夜間のデータ取得などが求められる可能性がある。
- 2021 年度は、実際の噴火を想定して、立入規制区域外からの夜間飛行による撮影を実施し、夜間における高精度現状把握手法の開発を計画する。
- また、火口上空を飛行できないことも考え、日中に火口内を斜め撮影し、取得画像から写真測量技術を用いて解析する手法を開発する。

(d) SfM/MVS計算時間の短縮

- 2021 年度は RTK-GNSS 搭載 UAV を用いてリアルタイムにデータ処理を行うソフトウェアを購入し、高精度の３D 地形モデルをさらに短時間で作成する手法について研究する。