

2. 2 リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

2. 2. 1 可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による精密地殻変動観測技術の開発

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目 課題 B 先端的な火山観測技術の開発
サブテーマ 2 リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発
2-1 可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による精密地殻変動観測技術の開発

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	研究統括	小澤 拓
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	契約研究員	姫松 裕志
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	契約研究員	河野 裕希
国立大学法人東京大学地震研究所	参加機関	准教授	青木 陽介
気象庁気象研究所	協力機関	主任研究官	奥山 哲
国立大学法人北海道大学	協力機関	准教授	高田 陽一郎

(c) 業務の目的

火山活動が活発化した場合には、確度の高い推移予測につなげるため、多項目の観測データに基づいて、その活動状況を的確に評価する必要がある。特に、火口周辺においては、顕著な表面現象が生じる場合があり、そのような情報を詳細に捉えることが重要である。しかしながら、活動が活発化した火山の火口周辺へのアクセスには危険が伴うため、火口周辺の観測は困難である。このような問題を解決するため、遠隔地から火口周辺を観測することが可能なリモートセンシング技術の活用に期待が寄せられている。

火山活動評価において、地殻変動は地下におけるマグマや地下水の挙動を推定できる重要な観測項目の一つである。いくつかの火山においては、GNSS 等の観測網による高精度な地殻変動観測が実施されているが、より詳細に火山活動を把握するためには、より稠密に地殻変動を観測する技術の開発が必要である。そこで、火山活動の活発化が観測された場合等に、その活動の推移予測に役立つ地殻変動情報を得ることを目的として、リモートセンシング技術を用いて効率的に地殻変動を計測するための技術開発を実施する。具体的な実施内容は、①可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発、②衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発である。

実施内容①の可搬型レーダー干渉計は、移動体に搭載したアンテナからレーダー波を送受信して SAR 画像を取得し、各画素における位相の時間変化から地表変動を面的に検出する。これまで、鉱山や地すべり地帯の斜面の安定性のモニタリングや山岳氷河の流動の計

測などを目的として、地上設置型レーダー干渉計の開発が行われてきた。これらの開発では、主に 17GHz 帯 (Ku-band) のレーダー波を用いた開発が進められてきたが、Ku-band のレーダー波は植生に対する透過性が低く、植生の影響により短期間で干渉性が著しく劣化するという性質があり、火山の山麓でよく見られる植生が濃い領域での地表変動の検出には適していないという問題があった。そこで、任意の場所で地殻変動観測を可能とするため、本テーマにおいては植生に対する透過性が高い波長帯のレーダー波を用いたレーダー干渉計を開発する。特に、任意の場所・時間での地殻変動計測を可能とするため、可搬性の高いシステムを開発する。

実施内容②においては、だいち 1 号、2 号 (PALSAR、PALSAR-2) や Sentinel-1 等の衛星 SAR データを解析して地殻変動履歴を調査する。衛星 SAR を用いた地殻変動計測は、1990 年代より活発に研究開発が行われ、現在では火山調査・研究における重要な観測ツールの 1 つとなっている。しかし、その解析には多くの時間を要するという問題や、その解析には専門的な知識が必要であり、誰もが簡単にその有用な地殻変動情報を用いることができないという問題がある。そこで、東京大学地震研究所を中心として活動している地表変動研究のための SAR 研究コミュニティ (PIXEL) と連携して、重点観測火山に指定されている 25 火山と箱根山について SAR 解析を実施し、その解析結果として得られる地殻変動情報を、本事業 (次世代火山研究推進事業) の課題 A (各種観測データの一元化) で構築する火山観測データ一元化共有システム (JVDN システム、JVDN: Japan Volcanological Data Network) においてデータベース化する。さらには、衛星 SAR と可搬型レーダー干渉計による解析結果を統合して、より詳細な地殻変動情報を得る技術を開発する。

(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 :

本業務においては、植生域においても地表変動を安定して計測することが可能な可搬型のレーダー干渉計を開発する。植生域の地表変動を計測するためには、植生に対する透過性が高い周波数帯のレーダー波を用いる必要がある。そこで、本課題の目的に適したレーダー波の周波数帯を選択することを目的として、L-band と X-band、Ku-band に関する植生に対する透過性を計測する実験を行った。本計測実験の結果、明らかに L-band のレーダー波は植生に対する透過性が高いのに対して、Ku-、X-band のレーダー波は植生での散乱が大きいことが確かめられた。L-band を用いる場合には、比較的大きなアンテナが必要という不利な点を考慮しても、植生域における地殻変動を安定して計測するためには、L-band のレーダー波を用いることは必須と考えられる。このことから、本業務において開発する可搬型レーダー干渉計は、L-band のレーダー波を用いることに決定した。

2) 平成 29 年度 :

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。その開発には繰り返し実験観測を実施する必要があり、その技術開発に用いる可搬型レーダー干渉計実験機を作製した。

また、衛星 SAR データを用いた干渉解析（SAR 干渉法）によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。そのデータベース化のための処理方法（標準的解析手法）における大気遅延誤差を軽減する手法を検討した。その結果、大気遅延誤差の軽減においては、レーダー波の伝搬経路を衛星－ピクセル間の直線と仮定し、その経路上の電氣的な遅延量を積分する手法を採用することとした。また、この解析においては、気象庁が公表している数値気象モデルの解析値を、気象モデルに基づいて補間したデータを用いることとした。さらに、標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、霧島山と桜島について、だいち 1 号の PALSAR、および、だいち 2 号の PALSAR-2 のデータを用いて干渉解析を行った。

3) 平成 30 年度：

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。その観測データを解析して、地殻変動情報を求めるソフトウェアを開発した。また、浅間山における野外観測を行うとともに、可搬型レーダー干渉計実験機の改良を進めた。その結果、目標とする 4km 先の観測に成功した。さらに、簡便にリピート観測を実施するための開発、車載型に関する開発をすすめるための基礎実験を実施し、今後の開発すべき点を明らかにした。さらに、雨天時や降灰のある場所でも観測を可能とするため、本体部の外装およびアンテナのレドームを作成した。

また、衛星 SAR データを用いた干渉解析（SAR 干渉法）によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。そのデータベース化のための処理方法（標準的解析手法）に関する電離圏遅延誤差を軽減する手法について検討した。電離圏遅延成分の推定においては、送信レーダー波の周波数帯域を分割して異なる周波数の SAR 画像を作成し、周波数に対する応答の違いから電離圏遅延成分を推定する split-spectrum 法を用いる。この手法は、SAR データや解析対象地域の特性、対象の大きさ等によって適用精度が異なるので、自動解析システム構築時に、電離圏遅延誤差軽減手法の組み込みが有効であると判断される場合には、この手法を組み込むこととした。電離圏遅延誤差軽減手法を組み込まない場合には、解析結果を目視でチェックし、電離圏擾乱が大きいと判断される場合に、手動解析によって、電離圏遅延誤差軽減手法の適用を試みることとする。

さらに、標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、有珠山と伊豆大島について、だいち 1 号の PALSAR、および、だいち 2 号の PALSAR-2 のデータを用いて干渉解析を行った。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。これまでの実験機を用いた計測実験から、後方散乱強度が弱い領域においてノイズが顕著に表れる場合があるという問題

が明らかとなっており、その改善が運用機開発に向けた大きな課題の一つであった。その解決を、ソフトウェアとハードウェアの両面から進める。令和元年度においては、SAR 処理ソフトウェアの改良と高感度受信アンテナの製作を行った。ソフトウェアの改良においては、劇的にノイズを低減することに成功するとともに、処理時間を 10 分の 1 以下にすることができ、緊急観測時の迅速性も向上させることに成功した。高感度受信アンテナの作製においては、約 3dBi のアンテナ利得の向上を確認した。また、可搬型レーダー干渉計の再設置繰り返し観測に関する適用性能や干渉性の持続性等について調査するため、筑波山をテストサイトとして計測実験を行い、レーダー再設置による繰り返し観測でも地殻変動計測に適切な干渉性が得られることを確認したとともに、観測期間が約 5 カ月のデータペアでも、ある程度の干渉が得られることも確認できた。さらに、長期間の観測についての性能を確認することを目的として、霧島山の新燃岳と硫黄山において計測実験を実施した。観測期間中のデータについては高い干渉性が得られることを確認できた。さらに、令和 2 年度に再観測を実施し、長期間の干渉ペアに関する干渉解析を試みる。

衛星 SAR データを用いた干渉解析（SAR 干渉法）によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。令和元年度においては、平成 29 年度と平成 30 年度に検討した大気遅延誤差と電離圏遅延誤差の軽減手法を組み込んだ自動解析システムのプロトタイプ構築を行った。さらに、衛星 SAR を用いた事例研究として、草津白根山、三宅島、浅間山、フィリピンのタール火山についての解析を行った。

5) 令和 2 年度：

- ・ 可搬型レーダー干渉計のノイズ低減を目的としたハードウェア改良に向けた実験を実施し、運用機に関する設計仕様を決定する。
- ・ 霧島山、筑波山テストサイトにおいて、可搬型レーダー干渉計による繰り返し観測を実施し、干渉性の時間的持続性について調査する。また、観測終了から 24 時間以内に速報結果を公開することについてのテストを実施する。
- ・ 可搬型レーダー干渉計の手動方式の改良点について検討する。
- ・ 6 火山の衛星 SAR 自動解析システムを構築し、解析結果の JVDN システムへの提供を開始する。
- ・ 蔵王山、吾妻山等について、衛星 SAR を用いた事例研究を行う。

6) 令和 3 年度：

- ・ 地上設置型、車載型方式に関して決定した設計仕様に基づき、可搬型レーダー干渉計運用機を作製する。
- ・ 4 火山についてだいち 1 号、2 号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

7) 令和 4 年度：

- ・ 開発した可搬型レーダー干渉計運用機について、性能評価を実施する。
- ・ 4 火山についてだいち 1 号、2 号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。
- ・ SAR データ共有サーバーを更新する。

8) 令和 5 年度：

- ・ 2 火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の 1 つは、桜島とする。また、他の火山については、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ 4 の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とする。
- ・ 4 火山についてだいち 1 号、2 号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

9) 令和 6 年度：

- ・ 2 火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の 1 つは、桜島とする。また、他の火山については、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ 4 の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とする。
- ・ 4 火山についてだいち 1 号、2 号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

10) 令和 7 年度：

- ・ 2 火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の 1 つは、桜島とする。また、他の火山については、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ 4 の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とする。
- ・ 4 火山についてだいち 1 号、2 号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

(e) 令和 2 年度の業務目的

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式と車載（台車）方式、手動方式）を選択して観測を実施し、火山周辺の地表変動を効率的に調査することが可能なレーダーセンサーの開発を進めている。これまでに実施した開発や計測実験を通じて明らかにした問題の改良により、車載（台車）方式やレールの再設置によって得られた観測データへの SAR 干渉法の適用に成功している。しかし、顕著なノイズが SAR 画像に重畳する場合があります、その低減が課題の一つとなっている。令和元年度に実施した SAR 処理ソフトウェアの改良、高感度アンテナの採用により、大幅にノイズは低減されたが、レーダーの正面方向に生じる干渉性のノイズの低減が残された課題の一つである。これは送信するレーダー波の位相精度が十分でないことによると考え、これまでに用いてきた Phase Locked Loop (PLL) 方式の信号発生器と比べて、位相雑音がより小さいダイレクトデジタルシンセサイザー (DDS) 方式

の信号発生器を採用することによって、ノイズを低減できるかどうかを調査する。また、繰り返し観測データへの干渉法の適用性能や干渉性の時間的持続性等を調査することを目的とした計測実験を令和元年度から実施しており、その繰り返し観測実験を継続して実施する。特に、令和元年度には霧島山においても観測を実施したので、その再観測を行い、約1年のデータペアについて SAR 干渉法の適用を試みる。霧島山における観測においては、観測終了後から24時間以内に速報解析結果を JVDN システムにアップロードすることについてテストを行う。さらに、令和元年度に開発した手動方式による観測機能を用いた計測実験を行い、その有用性を確認する。

2) 衛星 SAR による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR から得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順（標準的解析手法）に基づいて衛星 SAR データの解析を行う。令和2年度においては、令和元年度に構築した自動解析システムのプロトタイプをベースとし、2-4 年次に解析した6火山（霧島、桜島、伊豆大島、有珠山、草津白根、三宅島）に関する解析システムを構築する。また、過去の観測データについても再解析を実施し、その解析結果を課題 A で構築している JVDN システムに提供する。また、だいち1号の PALSAR およびだいち2号の PALSAR-2 データ等を用いた火山に関する事例研究を実施する。さらに、PIXEL で共有している衛星 SAR データを、本業務で利用するためのサーバーを継続して運用する。

国際会議に参加し、海外における最新の SAR 解析技術を調査するとともに、本課題で得られた解析結果についての報告を行う。

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、機動的に再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能な可搬型レーダー干渉計を開発する。これまで、火山観測に適した設計仕様を決めるため、作製した実験機をベースとして、計測実験と改良を重ねてきた。現時点におけるもっとも大きな課題は、可搬型レーダー干渉計から得られる干渉画像に重畳する干渉性のノイズを低減することである。令和 2 年度においては、従来の信号発生器と比べてより位相雑音が低い、ダイレクトデジタルシンセサイザー (DDS) 方式の信号発生器を作製し、それを用いることによって、劇的にノイズを低減させることに成功した。また、霧島山や筑波山テストサイトにおける計測実験を行い、観測条件が良ければ、観測間が 1 年のデータペアでも地殻変動検出に十分な干渉性が得られることを確認した。さらに、Manborne SAR に関する計測実験を浅間山で実施し、Manborne SAR 用の SAR 処理アルゴリズムの開発の必要について確認したとともに、アンテナ部の小型化・軽量化に向けた検討に着手した。また、可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動から、地殻変動源を精密に推定する手法についての検討にも着手した。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

本課題においては、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 2 年度においては、前年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、6 火山（霧島山、桜島、草津白根山、有珠山、伊豆大島、三宅島）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。また、前年度に解析を行った草津白根山に関する事例研究について、国際学術論文誌で発表したほか、だいち 1 号の PALSAR、だいち 2 号の PALSAR-2 等のデータを用いた蔵王、吾妻山、有珠山の地殻変動解析のほか、噴火に伴う地殻変動の事例研究として、バヌアツ共和国のアンブリム火山についての解析も実施した。

(b) 業務の成果

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

a) 可搬型レーダー干渉計のノイズ軽減に向けた検討

i) 背景

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、機動的に再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。そのような繰り返し観測から地表変動を精度良く得るためには、①観測時間が離れたデータペアの解析でも干渉性劣化が少ないこと、②比較的容易に繰り返し観測が可能であること、③設置位置のずれをデータ解析において補正する機能が必要である。①の干渉性劣化については、平成 28 年度に実施した計測実験の結果に基づき、L-band のレーダ

一波を採用することによって解決することとした。②の再設置の簡便性については、レーダーセンサーを車両や台車に搭載して計測を行う機能（車載型）に加え、車両でアクセスできない場所での観測も可能とするため、手動でレーダーアンテナを移動させて合成開口レーダー観測を実施する Manborne SAR 方式についても開発項目に追加した。③の設置位置のずれ補正の機能については、GNSS から得られる位置情報を用いて位置ずれを補正する SAR 解析手法を採用している。これらの開発のベースとすることを目的とした可搬型レーダー干渉計実験機を平成 29 年度に作製し、その基本的な解析ソフトウェアを平成 30 年度に開発した。この実験機を用いた計測実験を行い、当初の目標である 4km 遠方の観測に成功するとともに、繰り返し観測データに SAR 干渉法を適用し、地殻変動検出に必要な干渉性が得られることを確認した。一方、後方散乱強度が弱い領域において、干渉性のノイズが顕著に表れる場合があり、これが地殻変動検出における大きなノイズとなりえることから、その低減が課題となっていた。この改善のため、令和元年度においては、SAR 処理ソフトウェアの改良と高感度受信アンテナの製作を行った。ソフトウェアの改良においては、劇的にノイズを低減することに成功するとともに、処理時間を 10 分の 1 以下にすることができ、緊急観測実施時における迅速性も向上させることにも成功した。高感度受信アンテナの作製においては約 3dBi のアンテナ利得の向上を確認し、信号対雑音比を向上させることができた。本年度においては、レーダーの正面方向に生じる干渉性のノイズをさらに低減させることを目的として、精度の高い波形を出力することが可能な信号発生器の採用について検討する。また、令和元年度に、繰り返し観測データへの干渉法の適用性能や干渉性の時間的持続性等を調査することを目的とした計測実験を、霧島山や筑波山テストサイトにおいて実施しており、繰り返し観測データへの干渉法の実現性については確認している。干渉性の時間的持続性については、5 カ月までは確認できたので、令和 2 年度においては、計測実験を継続し、観測間が 1 年のデータペアへの干渉解析を試みる。さらに、観測条件が良い場所での Manborne SAR に関する計測実験を行うとともに、その改良に向けた検討を進める。また、可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動から、地殻変動源を精密に推定する手法についての検討にも着手する。

ii) ダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器の作製

現在の可搬型レーダー干渉計実験機では、Phase Locked Loop（PLL）方式の信号発生器を採用している。PLL 回路は、発振器から出力される信号の位相と閉回路からくる信号の位相を比較し、それらの位相が一致するように発振器を調整するものである。さらに、これを利用して、発振器が生成する基準信号に対して、倍数の周波数をもつ波形を生成することが可能である。これは比較的小型の回路を実現できるという利点がある。一方、ダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）は基準クロックから任意の周波数の波形をデジタル的に生成する回路であり、高精度の波形を生成することができるという特徴がある。現時点で課題となっている正面方向の干渉性のノイズは、PLL 回路が生成している波形の位相雑音に起因するという推測か



図 1-1 DDS 信号発生器の外観写真

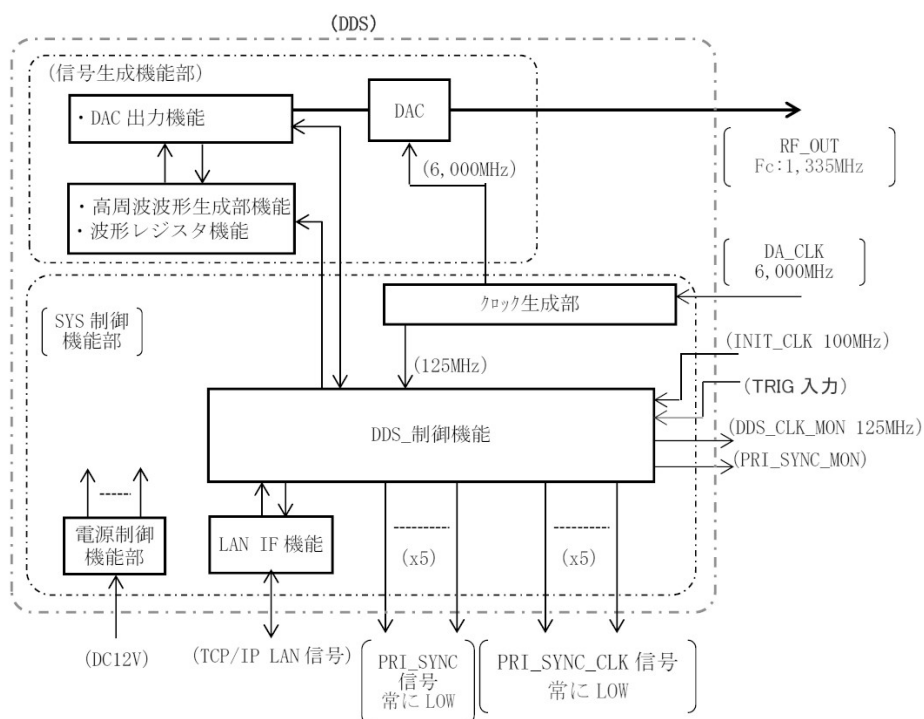


図 1-2 DDS 信号発生器のブロック図

ら、DDS 回路を用いた信号発生器により、そのノイズを低減できるかどうかを調査する。

作製した DDS 回路部の外観写真を図 1-1 に示す。DDS 回路部は大きく分けて①DDS 基板、②DDS クロック通倍部、③アンプ、フィルターの回路ブロックで構成され、DDS 基板のブロック図を図 1-2 に示す。DDS 基板では、高純度 100MHz 源振信号を DDS クロック通倍部で 60 通倍し 6GHz の DDS クロックを生成し、その DDS クロックを元に中心周波数 1.335GHz、帯域幅 70MHz の送信信号を生成する。DDS 基板で生成される送信信号は、制御パソコンから設定される情報に基づきリアルタイムに高周波信号波形データを生成し出力する。

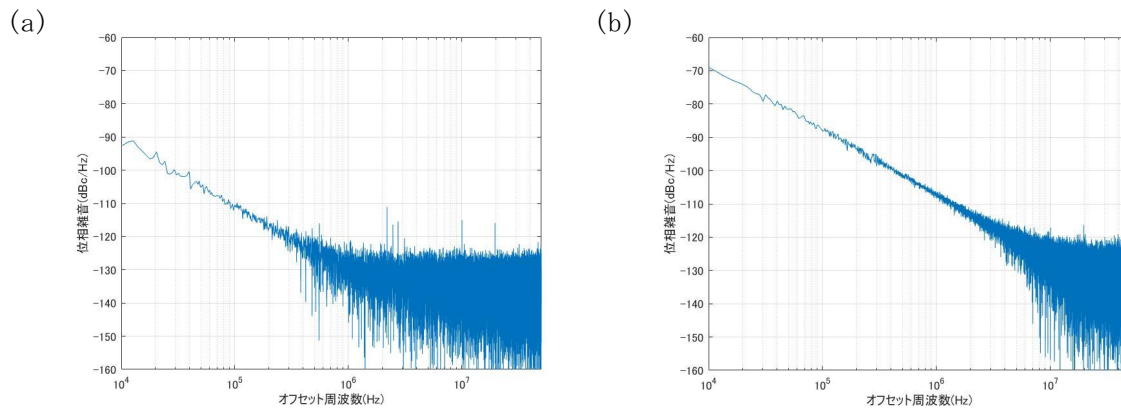


図 1-3 計測した信号発生器が出力するチャープ信号の位相雑音。(a)DDS 方式の信号発生器。(b)PLL 方式の信号発生器。

作製した DDS 方式の信号発生器の性能確認として、チャープ信号をデジタルオシロスコープで出力信号をデジタルデータとして取得し、オフラインで位相雑音を求めたところ、オフセット周波数 1MHz において -130dBc と求まった (図 1-3(a))。一方、従来の PLL 方式の信号発生器について、同様に計測を行ったところ、位相雑音は -130dBc と求まり (図 1-3(b))、位相雑音が劇的に低減されていることが確認された。

iii) 浅間山における計測実験

作製した DDS 方式の信号発生器に関する性能を、野外における実際の観測において確認するため、2021 年 3 月 16 日に浅間山の計測実験を実施した。計測実験実施場所およびセンサー設置場所からの風景を図 1-4 に示す。本計測実験は、もっとも精度よく計測が可能な地上設置方式で行った。レール長は 10m である。受信アンテナは、従来の 2 パッチアンテナと令和元年度に作製した 4 パッチを用い、それぞれのアンテナについて約 4 分間隔で 30 分の計測を行った。送信アンテナは 2 パッチアンテナである。本計測における送信中心周波数は 1.335GHz、送信帯域幅は 70MHz、繰返し周期は 500 μ sec である。

PLL 方式および DDS 方式の信号発生器を用いて観測された散乱強度画像の比較を図 1-5 に示す。4000m 付近まで散乱強度画像が大きい領域が見られるが、これは浅間山の山腹からの後方散乱波を示す。それ以遠には山体のレーダー影領域であるため、原理的には後方散乱強度は 0 になるはずだが、実際にはノイズに起因する若干の散乱強度が求まっており、これが干渉性のノイズの原因と考えられる。PLL 方式と DDS 方式の信号発生器を用いて得られた散乱強度を比較すると、明瞭とは言い難いが、若干のノイズの低減が見られる。一方、SAR 干渉画像およびコヒーレンス画像の比較においては、PLL 方式に関する干渉画像には影領域に明瞭な干渉が見られるが、DDS 方式に関する干渉画像には、レーダー影領域のコヒーレンスが劇的に低くなっている (図 1-6)。本結果は、DDS 方式の信号発生器を用いることによって、レーダー影領域に生じる干渉性のノイズを劇的に低減できたことを示している。

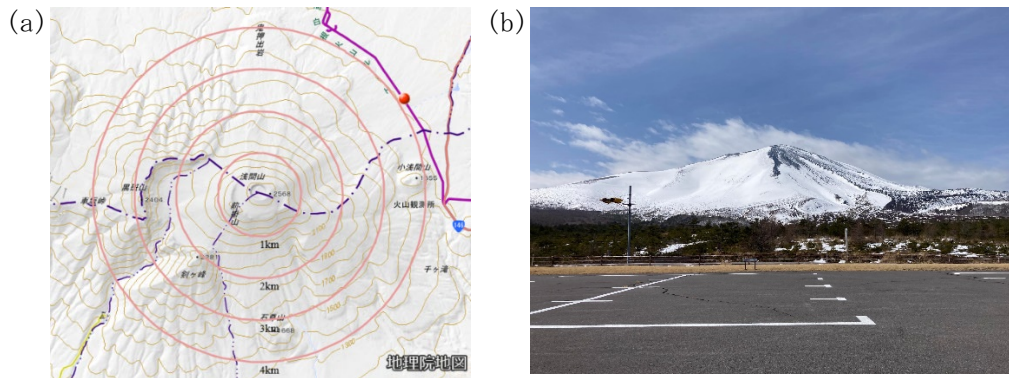


図 1-4 (a)観測実施場所周辺の地図。赤丸は可搬型レーダー干渉計実験機設置場所を示す。(b)センサー設置場所からレーダー波照射方向を見た風景。

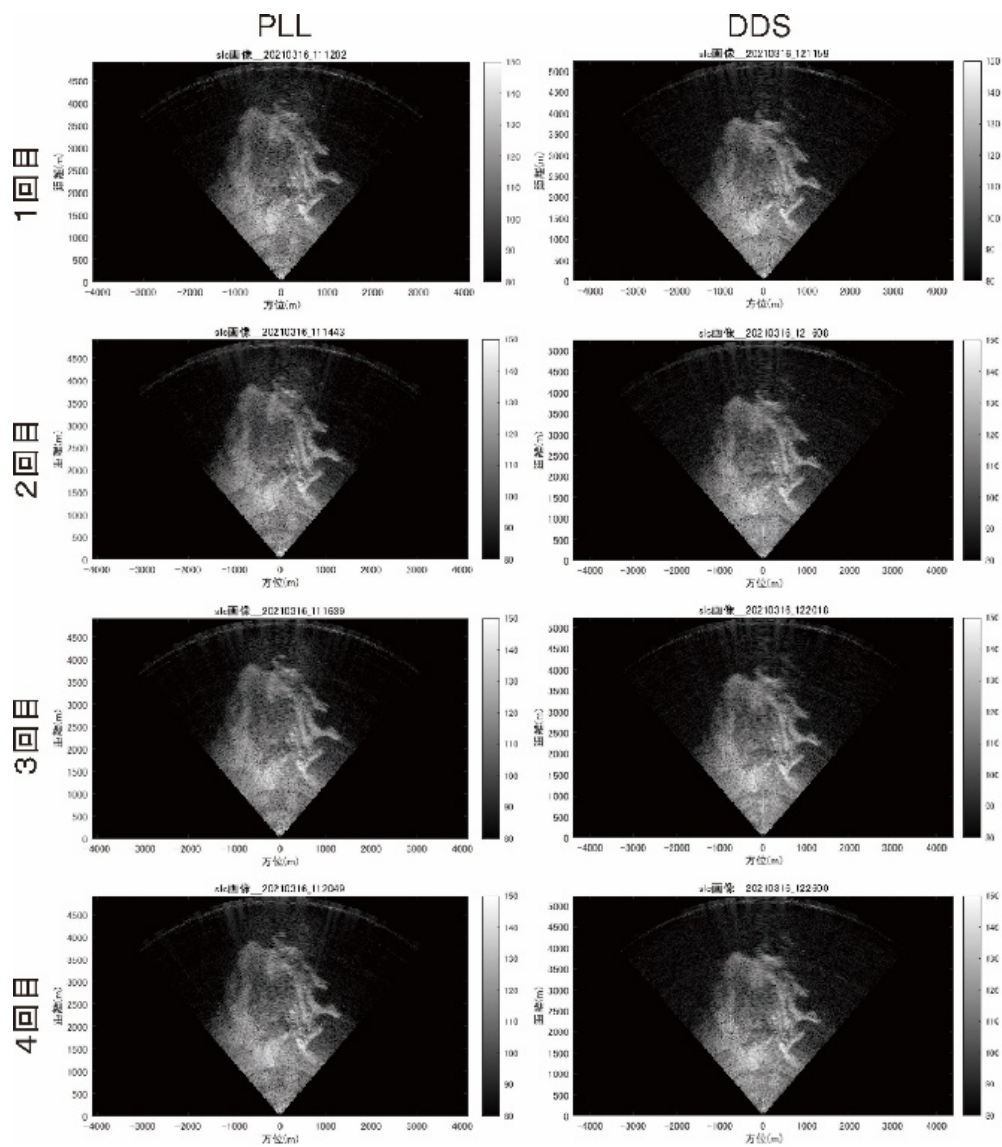


図 1-5 浅間山における可搬型レーダー干渉計の計測実験で得られた散乱強度画像。

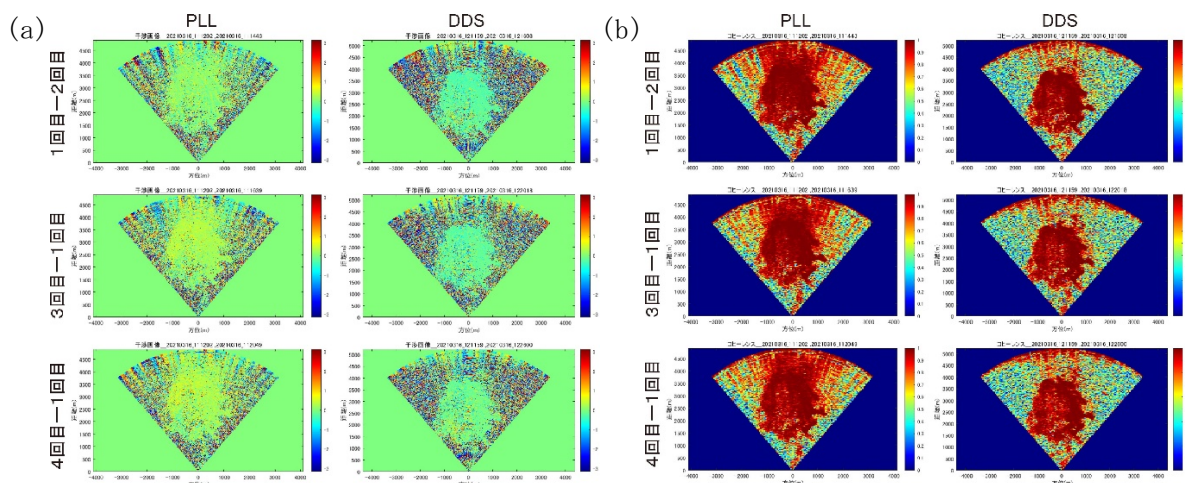


図 1-6 浅間山における可搬型レーダー干渉計の計測実験で得られた (a) 干渉画像。 (b) コヒーレンス画像。

iv) まとめ

これまでの可搬型レーダー干渉計実験機においては、干渉性のノイズが生じるという問題があり、その低減が大きな課題の一つであった。その解決のため、令和元年度に実施した SAR 処理ソフトウェアの改良、高感度受信アンテナの作製、令和 2 年度の DDS 方式の信号発生器の採用により、劇的にノイズを低減することができた。これを仕様として、令和 3 年度に運用機を完成させる予定である。

b) 筑波山テストサイト、霧島山における計測実験

i) 背景

可搬型レーダー干渉計の再設置による観測データへの SAR 干渉法の適用性能や干渉性の持続性等について調査するため、令和元年度に防災科研の近傍である筑波山をテストサイトに設定した。令和元年度には 6 回の計測実験を行い、再設置による繰り返し観測データへの SAR 干渉法の適用性能を確認するとともに、観測間が 5 カ月の干渉ペアでも、干渉が得られることを確認した。筑波山テストサイトは外来波の影響や、センサー設置場所の前の川面からのマルチパスの影響が大きいことが判明し、性能評価のためのテストサイトとしては条件が良くないことが分かったが、そのような悪条件での適用性能を確認するため、最初の計測から 1 年経過した時点での計測を行った。また、令和元年度に、実際の火山における計測実験を行うことを目的として、霧島山で計測を行った。令和 2 年度においては、同じ場所での再観測を実施した。

ii) 筑波山テストサイトでの計測実験

筑波山テストサイトのセンサー設置場所、および、センサー設置場所周辺の風景を図 1-7 に示す。以前に観測を実施した日は 2019 年 10 月 16 日、10 月 17 日、11 月 13 日、12 月 18 日、2020 年 1 月 14 日、3 月 17 日であり、さらに、最初の観測から

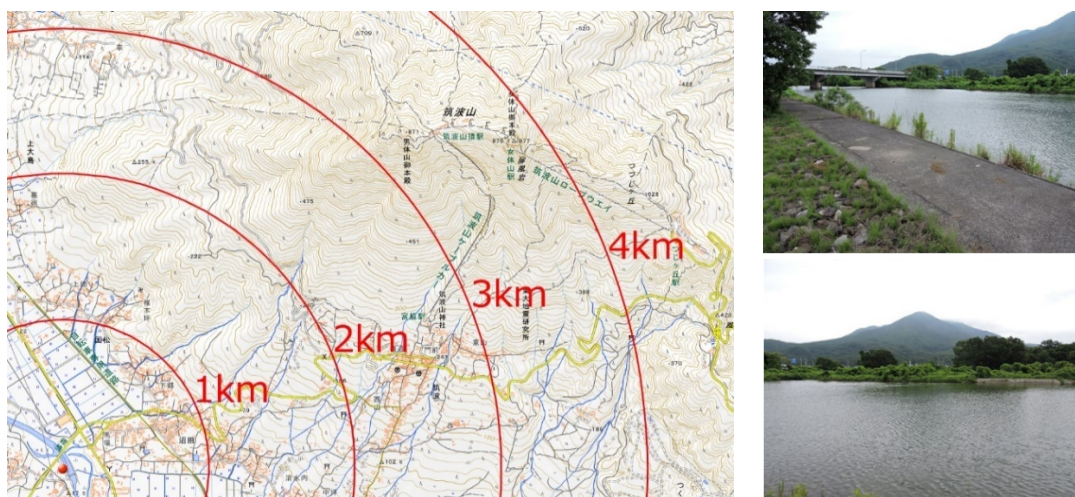


図 1-7 筑波山テストサイトの地図（地理院地図）、および、レーダー設置場所とそこから見た筑波山の風景．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。

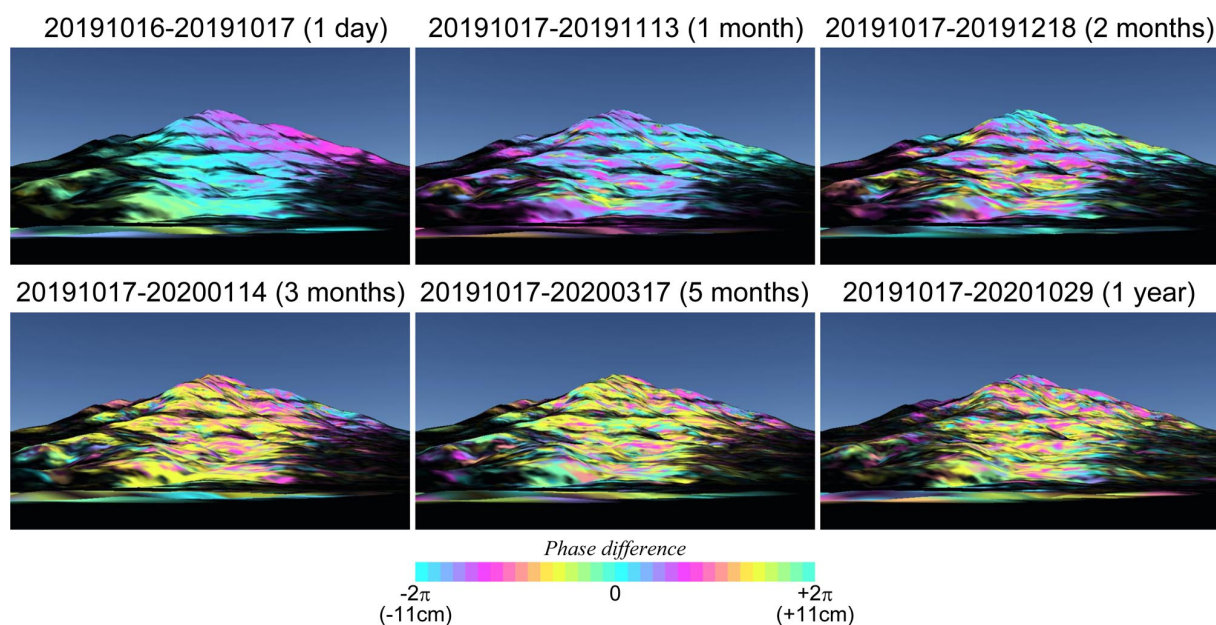


図 1-8 筑波山テストサイトにおける繰り返し計測によって得られた干渉画像

約 1 年経過した 2020 年 10 月 29 日に再計測を行った。観測には 10m のレールを用いた地上設置方式で行い、レールの再設置時には、厳密な設置位置の調整は行っておらず、おおよそ最初の観測位置と一緒にするように目視で調整した。SAR 処理時に、ヘッド部に搭載した GNSS から得られる位置情報に基づいて、毎回同じ軌道で観測したように観測データを補正する。その GNSS によるアンテナ位置は、レールから数 10m 離れた位置に設置した GNSS を基準点として、キネマティック解析により求めた。前述したように、筑波山テストサイトにおいては、外来波の影響が大きいため、解析して得られた散乱強度画像を目視で確認し、もっともノイズが少ないと思われる画像を選択し、2019 年 10 月 17 日-2020 年 10 月 29 日（1 年）のデータ

ペアについて解析した。解析結果を以前の計測結果とともに図 1-8 に示す。観測間隔が 1 年の干渉ペアにおいても干渉を得ることができたが、干渉性劣化が顕著に見られる。前述した通り、筑波山周辺では外来波が顕著に重畳するとともに、濃い植生によって覆われており、可搬型レーダー干渉計の観測条件としては極めて悪い。そのような悪条件においては、観測間隔が 1 年の繰り返し観測では、精度よく地殻変動を検出できない可能性が大きい。一方、そのような条件においても、1 カ月以内の繰り返し観測であれば、高い干渉性が得られている。このように、可搬型レーダー干渉計を用いて精度よく地殻変動を計測するためには、観測環境を的確に把握し、その場所に応じた観測間隔を選択する必要がある。

iii) 霧島山における計測実験

火山活動が比較的活発な火山において、火山観測用可搬型レーダー干渉計による計測実験を行い、地殻変動の検出を試みたい。そこで、2018 年に噴火が発生し、顕著な地殻変動が観測された霧島山の新燃岳と硫黄山を対象として観測を実施した。硫黄山の観測はえびのエコミュージアムセンターの駐車場に 10m のレールを設置し（観測場所とレーダー設置位置から見た硫黄山の風景を図 1-9 に示す）、新燃岳の

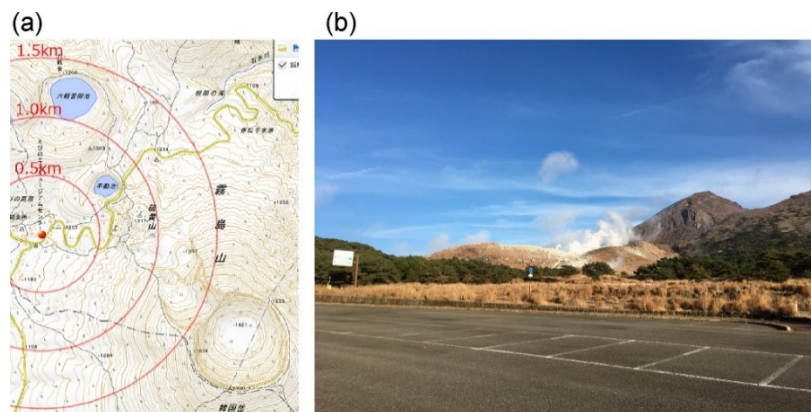


図 1-9 (a)硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す．(b)レーダー設置場所から見た硫黄山．

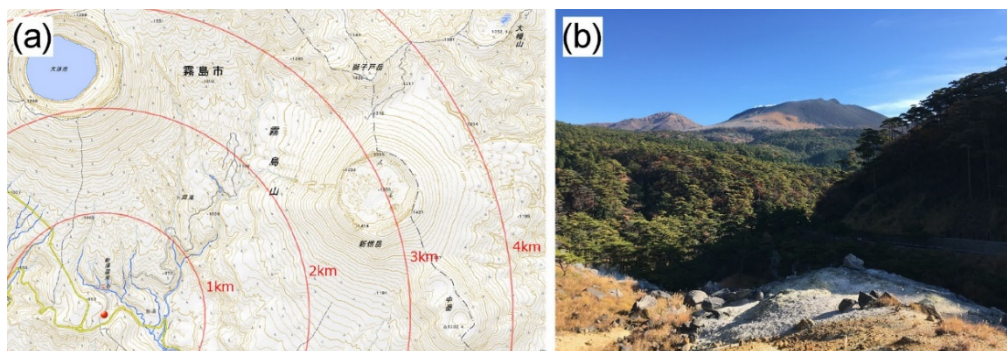


図 1-10 (a)新燃岳観測場所周辺の地図（地理院地図）．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す．(b)レーダー設置場所から見た新燃岳．

観測は新湯温泉近くの県道（観測場所とレーダー設置位置から見た新燃岳の風景を図 1-10 に示す）において台車にヘッド部を搭載する車載方式で実施した。令和元年度の観測日は、硫黄山については令和元年 11 月 19 日と 20 日、新燃岳については令和元年 11 月 20 日と 21 日である。硫黄山はレーダー設置位置の東方に位置し、山頂までの距離は約 1km である。硫黄山は植生が薄く、干渉性の時間的持続性は比較的高いと予測される。新燃岳は観測場所東方に位置し、新燃岳火口西縁までの距離は約 2.5km である。新燃岳の山頂付近の植生は薄い、山麓では濃い植生に覆われており、長期間の干渉ペアでは植生による干渉性劣化が顕著に現れる可能性がある。この観測結果は、令和元年度の報告書で述べた通り、1 日間の観測データのペアについては、高い干渉性が得られることを確認した。ただし、硫黄山や新燃岳以遠においては、干渉性のノイズが重畳するという問題があった。これについては、前述した送信信号の位相雑音に起因するものが考えられるが、新燃岳については、それだけでなく、道路沿いのガードレールからの反射がノイズ源になっている可能性がある。この対策については、今後の検討課題である。

令和 2 年度の観測は、11 月 17 日と 11 月 18 日に実施した。レーダー設置位置、台車の移動経路はおおよそ同じになるように設定した。若干の設置位置のずれは、GNSS 観測データから得られる位置情報を用いて補正する。11 月 17 日および 11 月 18 日における同日内のデータペアを解析して得られた硫黄山および新燃岳の干渉画像を図 1-11 と図 1-12 に示す。同日内においては、高い干渉性が得られており、問題なく計測できたことを示している。新燃岳においては、放射状の干渉領域が見られるが、これは前述したガードレールの影響による可能性が考えられる。この対策については今後の検討課題の一つだが、地面からの後方散乱が大きい領域においては、放射状の位相差パターンは見られないことや、散乱強度が大きく異なることから、その影響は大きくないと考えられる。

異なる観測日のデータペアを解析して得られた硫黄山と新燃岳の干渉画像を図 1-13 と図 1-14 に示す。観測間が 1 年のデータペアを解析して得られた結果においては、若干の干渉性劣化が見られるものの、地殻変動計測においては十分なほどの干渉性が得られている。筑波山テストサイトにおいては、観測間が 1 年のデータペアでは、著しい干渉性劣化が見られたが、霧島山においては外来波が顕著でなく、また、植生による干渉性劣化も小さかったことにより、干渉性の劣化は小さかったと考えられる。このような領域においては、より長い期間の干渉ペアでも干渉が得られる可能性がある。これについては、令和 3 年度においても再計測を行い、干渉性の時間的持続性に関する調査を実施する予定である。

観測間が 1 年のデータペアを解析して得られた硫黄山、新燃岳の干渉画像においては、顕著な位相変化が見られる。仮に、これが地殻変動によるものだとすると、硫黄山ではおおよそ 2cm、新燃岳ではおおよそ 5cm のスラントレンジ変化があったことを意味する。一方、後述するだいち 2 号のパス 23（南行軌道、右方向視）に関する衛星 SAR 自動解析システムから得られた 2019 年 11 月 11 日から 2020 年 11 月 9 日までの地殻変動を見ると、硫黄山、新燃岳周辺にそれほど大きな地殻変動は検

出されていない（図 1-15）。また、レンジ距離および地形に相関するような位相差パターンであることを考えると、この変化は大気遅延によるノイズ成分である可能性が高い。可搬型レーダー干渉計による観測においては大気の影響を特に受けやすいという特徴があり、その低減については、今後の改良すべき課題の一つである。

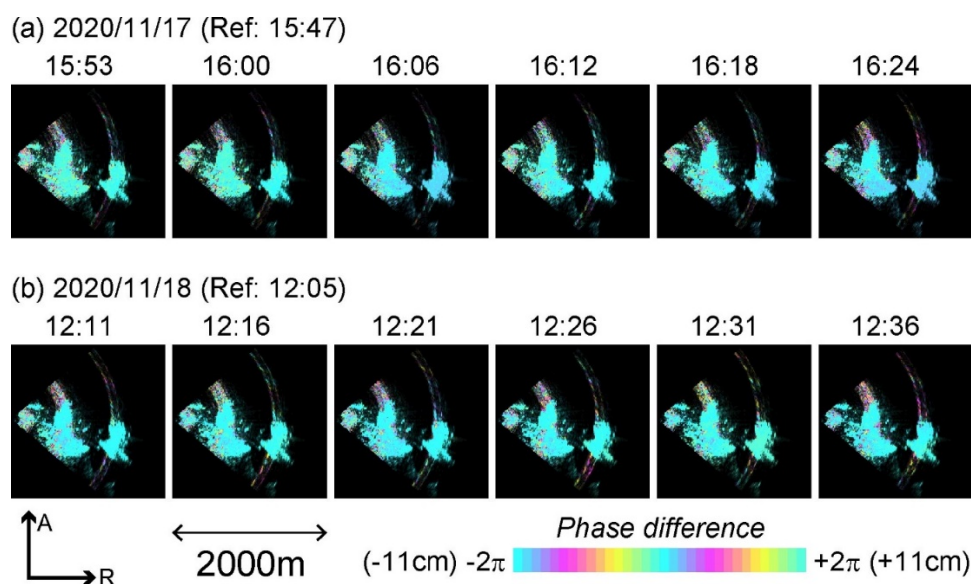


図 1-11 硫黄山における令和 2 年度の可搬型レーダー干渉計計測により得られた干渉画像。

(a) 2020 年 11 月 17 日の 15 時 47 分観測データを基準として得られた干渉画像。

(b) 2020 年 11 月 18 日の 12 時 5 分観測データを基準として得られた干渉画像。

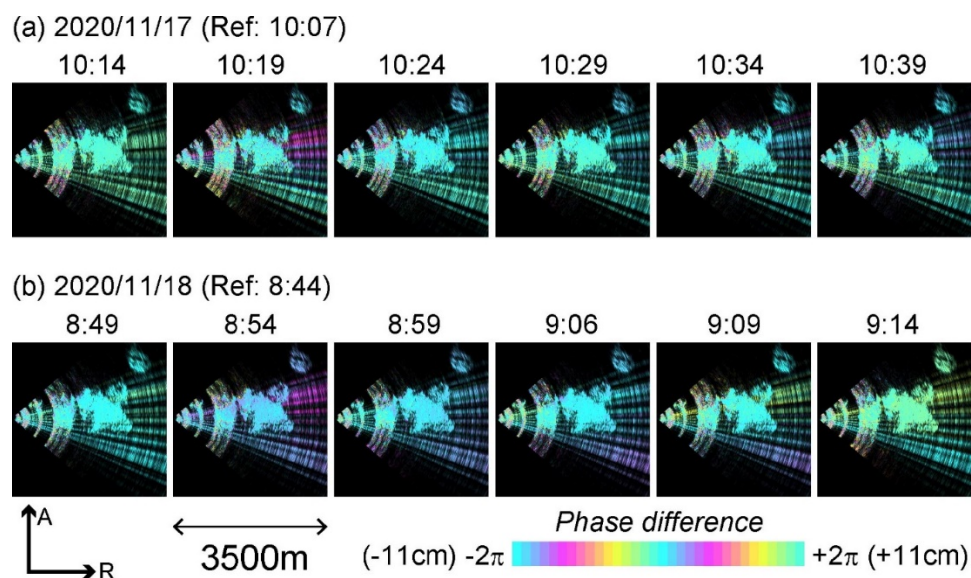


図 1-12 新燃岳における令和 2 年度の可搬型レーダー干渉計計測により得られた干渉画像。

(a) 2020 年 11 月 17 日の 10 時 7 分観測データを基準として得られた干渉画像。

(b) 2020 年 11 月 18 日の 8 時 44 分観測データを基準として得られた干渉画像。

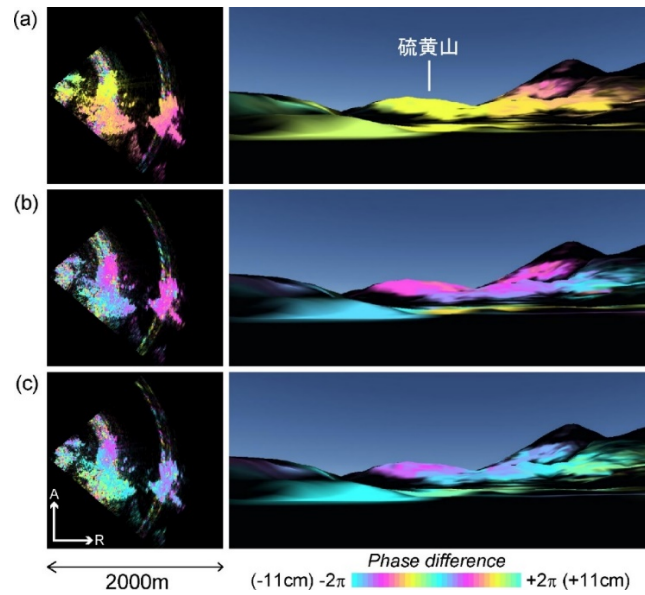


図 1-13 硫黄山に関する可搬型レーダー干渉計計測データを解析して得られた干渉画像。
 (a) 2019 年 11 月 19 日と 2019 年 11 月 20 日のデータペアから得られた干渉画像。
 (b) 2019 年 11 月 19 日と 2020 年 11 月 17 日のデータペアから得られた干渉画像。
 (b) 2019 年 11 月 19 日と 2020 年 11 月 18 日のデータペアから得られた干渉画像。

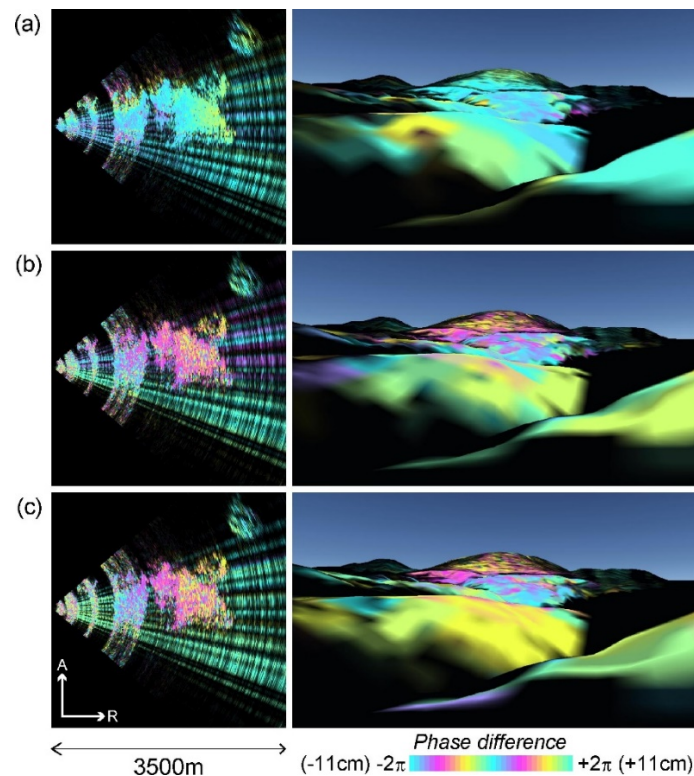


図 1-14 新燃岳に関する可搬型レーダー干渉計計測データを解析して得られた干渉画像。
 (a) 2019 年 11 月 20 日と 2019 年 11 月 21 日のデータペアから得られた干渉画像。
 (b) 2019 年 11 月 20 日と 2020 年 11 月 17 日のデータペアから得られた干渉画像。
 (b) 2019 年 11 月 20 日と 2020 年 11 月 18 日のデータペアから得られた干渉画像。

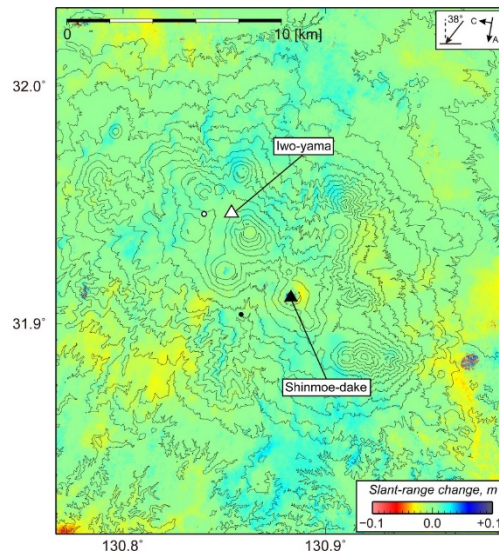


図 1-15 だいち 2 号のパス 23（南行軌道、右方向視）に関する衛星 SAR 自動解析システムから得られた、2019 年 11 月 11 日から 2020 年 11 月 9 日までのスラントレンジ変化分布。黒三角印と黒点是新燃岳の山頂とセンサー設置位置を示し、白三角印と白点は硫黄山の山頂とセンサー設置位置を示す。

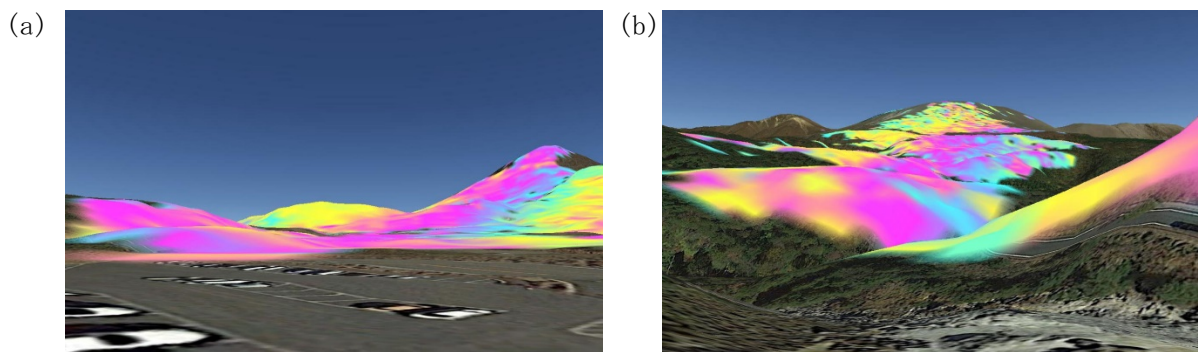


図 1-16 霧島山計測における即時解析のテストで得られた 2019 年 11 月と 2020 年 11 月のデータペアを解析して得られた干渉画像。(a) 硫黄山に関する結果。(b) 新燃岳に関する結果。

令和 2 年度の計測実験においては、計測結果を即時的に解析し、24 時間以内にデータを公開できるかを試みた。ヘッド部の位置を計測するための GNSS の基準点の座標は、放送暦を用いた精密単独測位で決定し、得られた座標を固定して、キネマティック解析によりヘッド部の位置を求めた。その結果に基づいて、SAR 処理を行い、過去の計測で得られた SAR 画像と干渉を試みた。明瞭な干渉縞が得られ、その結果を観測当日中に JVDN システムにアップすることができ、計画当初の目標の一つであった、即時公開が可能であることを確認した。しかし、解析結果には、長波長の位相変化成分の重畳が見られた（図 1-16）。これは後日、精密暦を用いて GNSS の基準点の座標を決定し、その座標に基づいて解析した結果には、そのような長波長成分は見られなかった。即時的な PPP 解析において求めた座標と、精密暦を用い

て周辺の電子基準点を基準とした解析から求めた座標には最大で 40cm ほどのずれがあった。基準点のずれは、センサー設置位置から画素の方位角によって、影響する量が異なることから、このような長波長の位相差成分が生じたと考えられる。ただし、このような基準点の座標のずれの影響は、長波長の成分として表れるので、衛星 SAR の解析におけるフラットニングと同様の処理である程度は補正できる可能性がある。その手法についての検討は、今後の課題の一つである。

iv) まとめ

筑波山テストサイト、および、霧島山における計測実験では、観測間が 1 年のデータペアについて、SAR 干渉法を適用し、干渉画像の作成を試みた。可搬型レーダー干渉計に関する観測条件が良くない筑波山テストサイトでは干渉性劣化が顕著であり、観測間が 1 年のデータペアにおいては、十分な干渉性は得られなかった。観測点選定や観測計画においては、外来波の状況などを適切に把握する必要があると言える。一方、霧島山においては、観測間が 1 年のデータペアでも良好な干渉性を得ることができた。条件の良い場所では、可搬型レーダー干渉計による長期的な地殻変動の計測にも利用可能であると言える。より長い期間のデータについても調査するため、霧島山では令和 3 年度にも計測実験を実施する予定である。また、緊急観測における速報結果を 24 時間以内に JVDN システムで公開することが可能なことを確かめることができた。ただし、GNSS の基準点の誤差を補正する手法の検討が必要である。

c) 可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動のシミュレーション手法の検討

火山活動に伴う地殻変動が検出された場合には、可搬型レーダー干渉計による観測場所の検討をして、効率的に地殻変動計測を実施したい。その検討においては、衛星 SAR による地殻変動情報を基に、可搬型レーダー干渉計によりどのような地殻情報が観測される可能性があるかを予測することが有効である。しかし、衛星 SAR のレーダー波の入射角は、おおよそ 30~40 度の入射角が主であるのに対して、可搬型レーダー干渉計のレーダー波入射方向はより水平に近く、それぞれの観測から得られる地殻変動成分は大きく異なる。そこで、地殻変動シミュレーションを用いて、衛星 SAR から得られる地殻変動情報に基づいて、可搬型レーダー干渉計から得られる地殻変動を推定したい。本検討においては、その検討の初期段階として、有限要素法による地形を考慮した地殻変動シミュレーションの事例解析を行った。

事例解析の対象は、可搬型レーダー干渉計の計測実験の対象としている霧島山の新燃岳と硫黄山を選択した（図 1-17）。新燃岳と硫黄山では、2017 年および 2018 年に発生した噴火に前駆する地殻変動が観測されている。これと同様の地殻変動が発生すると想定し、可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化の推定を試みた。はじめに衛星 SAR のデータを解析し、新燃岳と硫黄山における噴火に前駆する地殻変動を抽出した。衛星 SAR による地殻変動の抽出には、だいち 2 号のパス 23（南行軌道、右方向視）において、2016 年 3 月 7 日から 2017 年 9 月 18 日

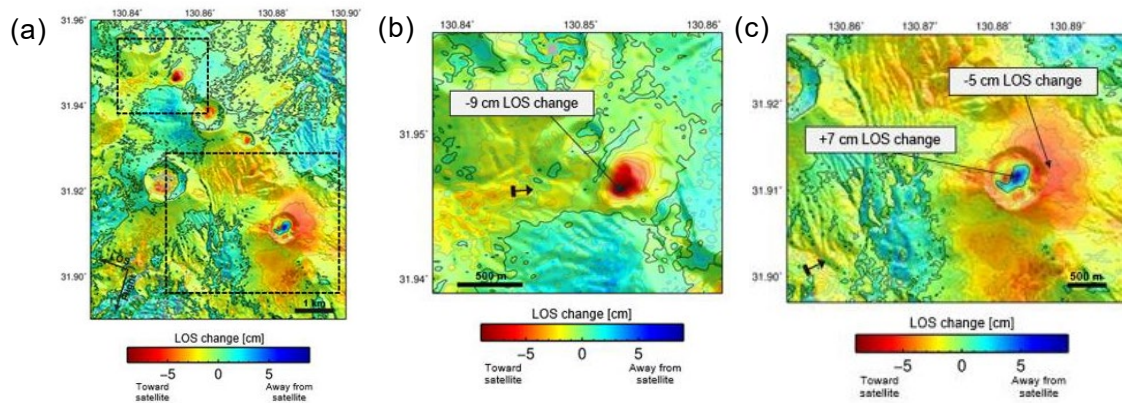


図 1-17 PALSAR-2 データを用いた 2016 年 3 月 7 日から 2017 年 9 月 18 日の期間における累積衛星視線距離変化の (a) 新燃岳全体図、(b) 硫黄山周辺拡大図、(c) 新燃岳周辺拡大図。正の視線距離変化は衛星から遠ざかる変位を示す。衛星進行方向と電波照射方向は左上図中の左下に示す。コンターは 1cm 間隔で示す。黒四角付き矢印は各火山における試験観測場所（新燃岳：新湯温泉入口、硫黄山：えびのエコミュージアム）と観測方位角を示す。

の期間に撮像された 21 枚の PALSAR-2 データに対して、SAR 時系列解析のひとつである Multi-temporal InSAR (MTI) 法¹⁾を適用した。観測終了日は 2017 年新燃岳噴火前に撮像された最後の観測日である。また、MTI 解析においては、時間方向の平滑化処理は適用していない。つぎに、有限要素法を用いて衛星 SAR データの解析により検出されたそれぞれの火山における地殻変動の再現を試みる。ここでは有限弾性体媒質中に変動源を模した空洞の境界面に荷重を与えた時の媒質変形を地殻変動として扱う。計算手法は Hickey et al. (2013)²⁾に倣う。観測された地殻変動を再現するために、圧力源の位置と形状、境界面に与える荷重をパラメータとして与える。有限要素法による弾性体媒質の変形の計算は COMSOL Multiphysics 5.6 (COMSOL 社製、以下 COMSOL) を用いた。硫黄山における地殻変動の変動源の幾何に関する情報は Narita et al. (2020)³⁾を参考にした。変動源の最適パラメータは試行錯誤的に探索し、観測値と計算値の残差の最小二乗和がもっとも小さくなる組み合わせを採用した。今回はシミュレーション手法の導入可能性の検討に主眼を置いているため、統計学的手法による最適パラメータの探索は適用していない。計算領域の側面にはローラー（境界面に対して垂直方向の変位成分ゼロ）の境界条件を、計算領域の底面は変位固定（境界面において変位ゼロ）の境界条件を与えた。計算領域の上面は国土地理院 10m メッシュ数値標高モデル (DEM) を基に要素配列を構築した。COMSOL には DEM ファイルを直接読み込み、計算領域を作成する機能は実装されていないため、数値解析ソフト MATLAB (MathWorks 社製) を用いて DEM の読込、データのリサンプリング、3 次元計算領域の作成を行い、Standard Triangulated Language (STL) 形式として出力したファイルを COMSOL に読み込ませた。今回の計算では重力の効果は導入していない。計算領域の側面と底面には無限境界要素を導

入し、計算領域の端に境界条件の影響を小さくした。空洞の任意の幾何とその境界面に与える荷重に対して媒質の変形を求め、もっとも衛星 SAR の結果を良く再現する最適なパラメータを探索した。最後に、前段で推定した空洞の境界面に与えた荷重による媒質の変形に対して、各火山における可搬型レーダー干渉計の観測幾何に対する視線方位に投影する。本解析において可搬型レーダー干渉計の想定観測位置は、新燃岳では新湯温泉入口、硫黄山ではえびのエコミュージアムとした。これらの位置は、令和元年度と令和 2 年度に、実際に可搬型レーダー干渉計を用いた計測実験を行った場所である。新燃岳の観測におけるレーダー波の照射方向を $N65^{\circ} E$ 、仰角を 20° （入射方向ベクトル：0.85 0.39 0.34）、硫黄山の観測におけるレーダー波の照射方向を $N85^{\circ} E$ 、仰角を 10° （入射方向ベクトル：0.98, 0.09, 0.17）とした。

図 1-17 に PALSAR-2 データを解析して得られた、2016 年から 2017 年の衛星視線距離の累積変化を示す。新燃岳、硫黄山いずれの火山においても火山活動に伴う地殻変動が検出された。新燃岳では東麓でおよそ 5 cm の衛星視線距離の短縮が、火口底ではおよそ 7cm の視線距離の短縮が検出された。検出された衛星視線距離変化は地殻変動源の圧力変化に伴う地殻変動であると解釈することができ、地下変動源の圧力増加とともに火口底周辺の構造が落ち込んでいることも再現している。このように、PALSAR-2 から得られた新燃岳周辺の地殻変動は、開放円柱構造（open

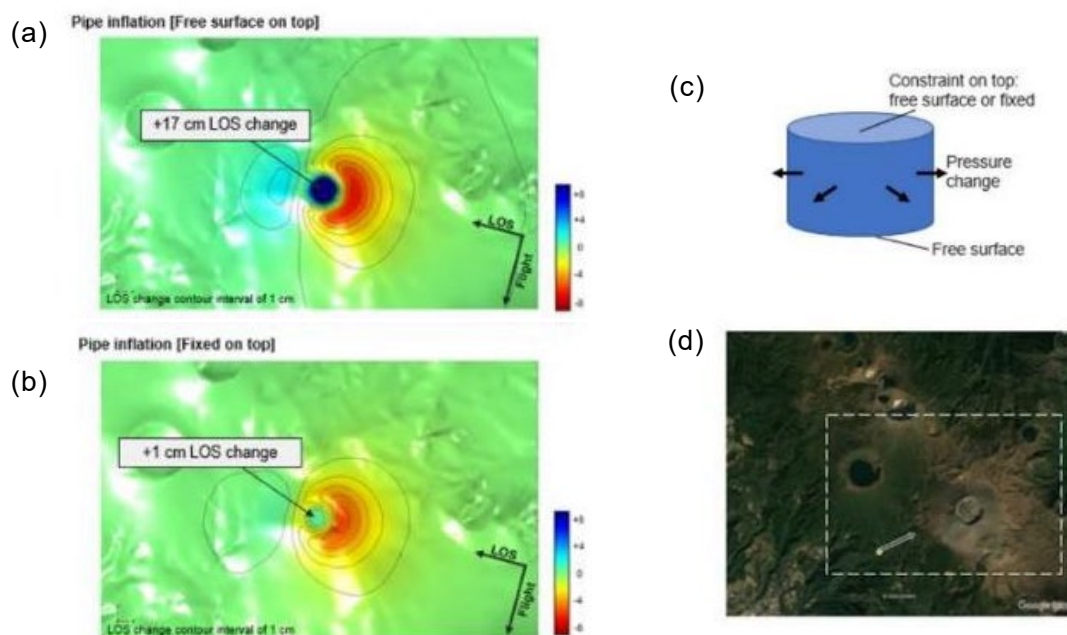


図 1-18 有限要素法による PALSAR-2 解析結果の再現の結果。(a)円柱構造の側面に境界荷重と上面を自由表面の境界条件を与えた場合の衛星視線距離変化。(b)円柱構造の側面に境界荷重と上面に固定境界の境界条件を与えた場合の衛星視線距離変化。(c)円柱構造に与えた境界条件の概要。(d)衛星光学画像と計算範囲。図中矢印で想定観測場所と観測方位角を示した。

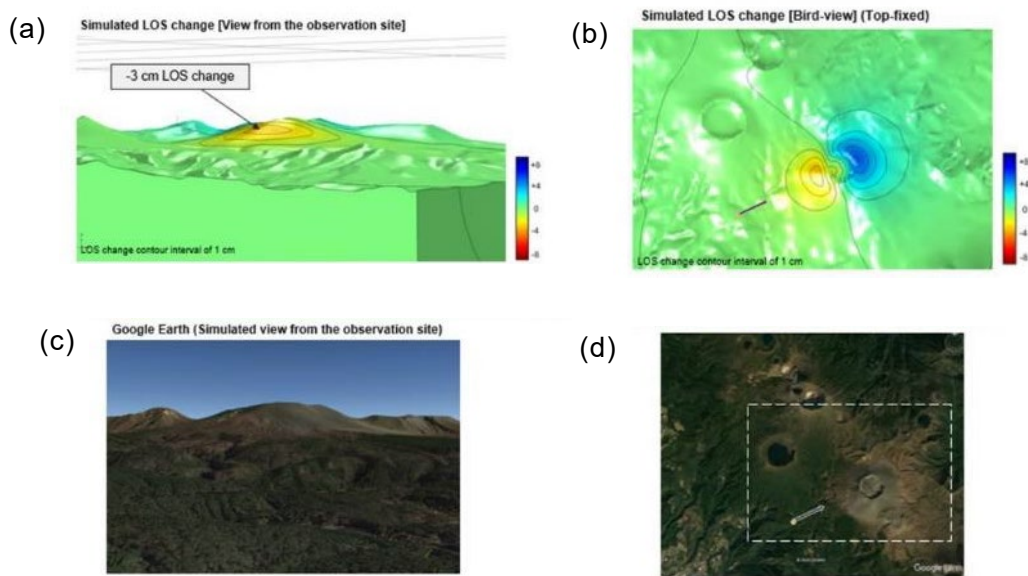


図 1-19 新燃岳における有限要素法による可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化の計算結果。(a)想定観測場所からの鳥観図。(b)直下視図。(c)衛星光学画像の鳥観図。(d)衛星光学画像と計算範囲。図中矢印で想定観測場所と観測方位角を示した。

pipe) の圧力増加によって衛星 SAR データの結果を再現できる。また、円柱構造の側面に荷重を与え、上面を自由境界面とした場合と固定変位の境界条件を与えた場合の媒質変形の結果を図 1-18 に示す。底面はいずれも自由境界面とした。いずれの計算設定においても、東麓における衛星視線距離の短縮は再現できる。しかし、火口底における変位は円柱構造の上面を自由表面とした場合には衛星視線距離の伸長量が約 17cm となり、過大である。一方、上面を変位固定の境界条件を与えた場合には計算される変化量が約 1 cm となり、過小となる。観測された火口底における視線距離変化と整合させるためには変動源とした円柱構造の上面の拘束条件を再考する必要があるが、今回は円柱構造の上面に変位固定の境界条件を与えた場合の計算設定を考える。図 1-19 に可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化の再現結果を示す。新燃岳の西南西方向から東北東向きに観測する幾何を考えて場合には、西麓では視線距離の短縮を示す。視線距離の伸長は中腹に最大を持つ描像を示し、視線距離の最大伸長量は 3cm 程度と求まった。

硫黄山では衛星 SAR のデータを解析することにより、およそ 9 cm の衛星視線距離の短縮が求まった (図 1-20)。観測された地殻変動は浅部熱水系の圧力増加に駆動されたことを示唆している³⁾。したがって、硫黄山では回転楕円体の圧力増加を想定した地殻変動の再現を試みる。図 1-21 に回転楕円体構造の空洞に荷重を与えた場合の媒質変形の結果を示す。今回は水平南北方向に長半径をもつ長球構造がやや北方向に傾く構造を与え、その境界面に荷重を与えた場合の媒質変形が衛星 SAR

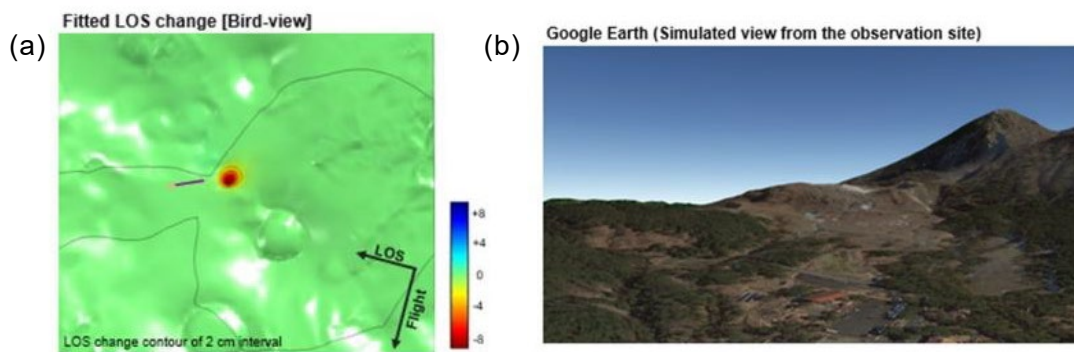


図 1-20 有限要素法による衛星 SAR の解析結果に対する再現の結果。(a) 図中矢印で想定観測場所と観測方位角を示した。図右下に衛星進行方向と電波照射方向を示す。(b) 衛星光学画像の想定観測場所から硫黄山を望む鳥観図。

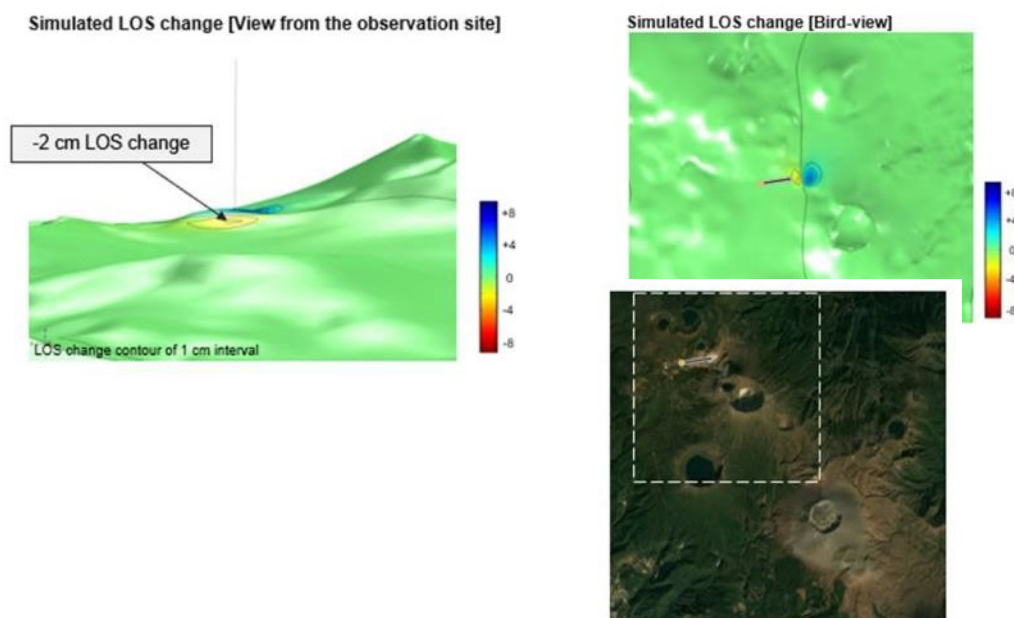


図 1-21 硫黄山における有限要素法による可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化の計算結果。(左上) 想定観測場所から視線距離変化の鳥観図と(右上) 直下視図。矢印は想定観測位置と方位角を示した。(左下) 霧島山周辺の衛星光学画像と計算範囲。

の解析結果と最も整合した。変形の範囲や振幅もおおむね一致した。図 1-21 に可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化を再現した結果を示す。硫黄山のほぼ西側からほぼ東向きの観測幾何に対して、西麓で視線距離の短縮が認められ、東麓で視線距離の伸長が認められる。衛星 SAR による衛星視線距離変化量は 9 cm の短縮であったのに対して、可搬型レーダー干渉計の観測幾何に対する視線距離変化量はおよそ最大 2 cm の短縮である。東麓はレーダーの視線に入らないため、西麓の視線距離変化のみを捉えている。硫黄山の中腹に視線距離変化の最大が位置

している。

以上のような計算により、可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動を予測することができた。火山性の地殻変動が観測された場合には、このような計算を即時的に行うことにより、効率的に地殻変動を計測するための観測計画に有効な情報となることが期待される。また、可搬型レーダー干渉計により地殻変動シグナルが得られた場合、それが衛星 SAR による地殻変動と整合するものかを判断するうえでも重要となるだろう。よって、将来的にはこのような計算を即時的に求めるシステムが必要になるが、最適な地殻変動源の形状や位置、境界面に与える荷重量を推定するためのパラメータの探索手法や媒質のパラメータの与え方等について、まだ検討すべき課題が多い。今後も検討を続ける予定である。

d) Manborne SAR 方式の改良に向けた検討

i) 背景

令和元年度から、人力で運搬することが可能な Manborne SAR 方式の開発に着手し、開発を進めている。Manborne SAR 方式では、車載方式と同様に、アンテナの位置を GNSS で観測し、その情報を考慮して直線上で観測した場合の SAR 画像を作成する。しかし、精度の良い SAR 画像を得るためには、アンテナをある程度直線的に動かす必要があるので、アンテナは簡易的なガイドに沿って移動させる(図 1-22)。令和元年度においては、プロトタイプを作製し、筑波山テストサイトにおいて計測実験を行い、繰り返し観測によって干渉が得られることを確認したが、外来波によるノイズが大きく、その適用性を十分に把握することは困難であった。そこで、今年度においては、外来波が少ない浅間山において計測実験を行った。また、プロトタイプにおいては、アンテナ部の重量によって、アンテナ部の動きが不安定となり、アンテナ移動時における動揺が大きかったことが、精度劣化の原因の一つと考えられる。そこで、今後はハードウェアとソフトウェアの両面から、その改良に取り組む予定である。今年度においては、小型化に向けた検討を行った。

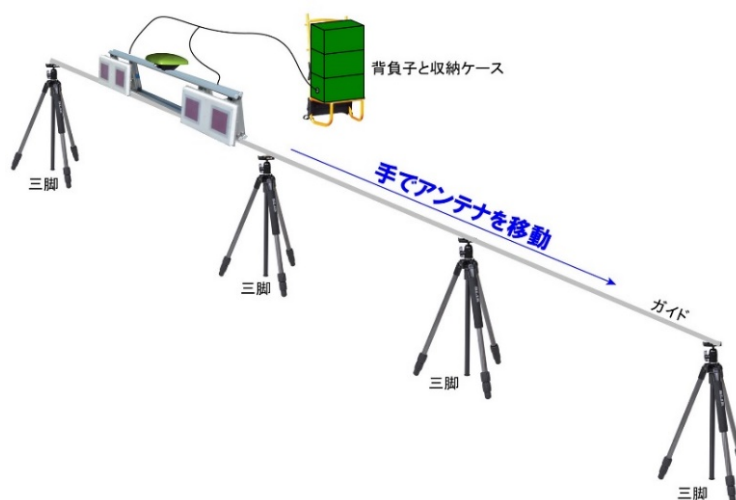


図 1-22 Manborne SAR 方式観測システムの概要図

ii) 浅間山における計測実験

現時点 Manborne SAR プロトタイプで、どの程度の干渉が得られるかを、外来波の少ない場所で確認するため、浅間山における計測実験を行った。計測は 10m のガイドレールを用いて、6 回のスキャンを行った。これらの解析を試みたところ、全体的にぼやけた SAR 画像が得られたが、昨年度に実施した筑波山テストサイトにおける計測結果と比べて、格段にノイズが小さい SAR 干渉画像が得られた（図 1-23）。SAR 画像が全体的にぼやけているのは、おそらく、アンテナの姿勢の動揺を考慮していないことによる、SAR 処理の不十分によるものと考えられる。ただし、地面からの後方散乱が得られていると考えられる領域においては、比較的高い干渉性が得られた。今後は、浅間山テストサイトとして、今後の改良を進めていく予定である。

iii) 検討

今年度においては、アンテナ部の軽量化・小型化に関する検討を進めた。プロトタイプにおいては、アンテナ部の位置・姿勢の計測に NovAtel 社製 Span-CPT を用いている。これは高精度に計測することが可能だが、そのサイズが $152 \times 168 \times 89 \text{mm}$ 、重量が 2.28kg であり、アンテナ部の重量を大きくしている要因の一つとなっている。一方、SBG 社製 Ellipse-D のサイズは $46 \times 45 \times 32 \text{ mm}$ であり、重量は 65g と小

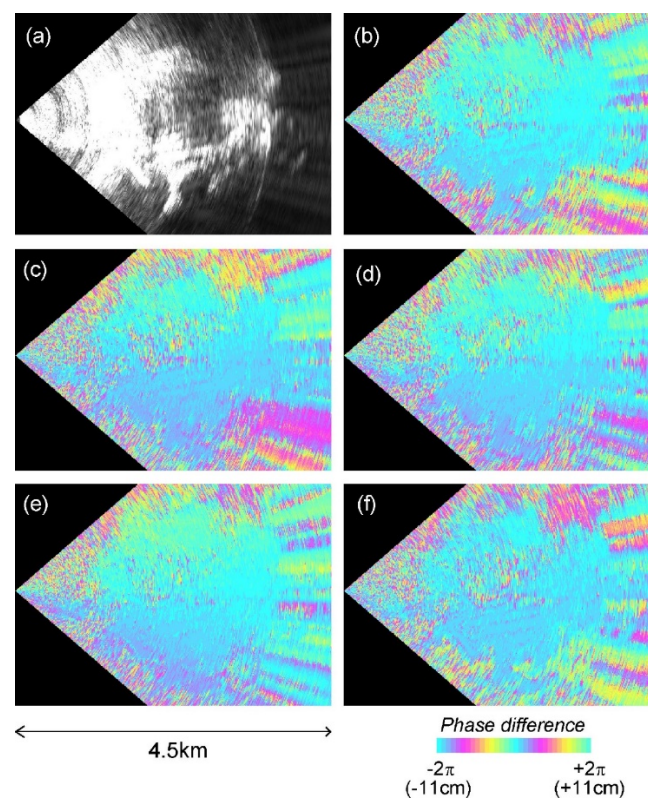


図 1-23 浅間山における Manborne SAR 方式による計測実験で得られた結果。(a)15:19 の計測で得られた散乱強度画像。(b)15:19 と 15:20 に計測したデータペアから求めた干渉画像。(c)15:19 と 15:22 に計測したデータペアから求めた干渉画像。(d)15:19 と 15:23 に計測したデータペアから求めた干渉画像。(e)15:19 と 15:24

に計測したデータペアから求めた干渉画像。(f)15:19 と 15:26 に計測したデータペアから求めた干渉画像。

型・軽量である。この Ellipse-D を代用できれば、大幅な軽量化・小型化が期待できる。そこで、Ellipse-D によって、可搬型レーダー干渉計用の SAR 処理において、アンテナ部の姿勢を考慮にいれた処理に適した精度が得られるかを確認することを目的として、Span-CPT と Ellipse-D による比較計測を行った。図 1-24 は NovAtel 社製 Span-CPT と SBG 社製 Ellipse-D で計測された相対的な角度の比較を示す。それぞれの時間的な変化の 1 次成分は、目視で除去している。Ellipse-D の計測結果は、Span-CPT と比べて、明らかに 2 次変化成分が重畳しており、また、短周期の変化もみられる。精度としては、Span-CPT ほどの精度は期待できないが、短期間の計測であれば、単純な時間変化モデルを適用することにより、0.1 度程度の精度は得られるかもしれない。ただし、より詳細な比較検討が必要である。今後、さらなる検討を進める予定である。

iii) まとめ

Manborne SAR の開発においては、浅間山における計測実験を行った。全体的にはばやけた SAR 画像が得られたが、ある程度の干渉性が得られることは確認できた。より精度の高い SAR 画像が得られるようになれば、有用なツールとして利用可能になると期待される。今後、そのためのソフトウェア、ハードウェアの改良を進める。ハードウェアの改良に関しては、小型化に向けた検討に着手した。

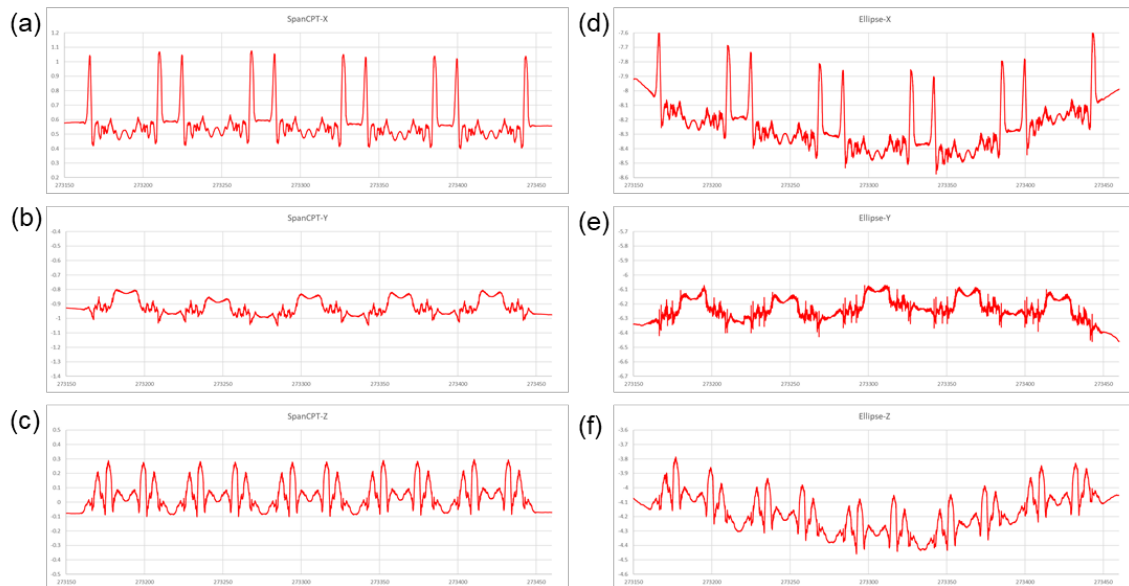


図 1-24 NovAtel 社製 Span-CPT と SBG 社製 Ellipse-D で計測された 24200 秒からの相対的な角度の比較。それぞれ、時間的な変化の 1 次成分は、目視で除去している。横軸は時間（秒）、縦軸は相対角度(deg)を示す。(a)-(c)SpanCPT が計測した X, Y, Z 成分。(d)-(f)Ellipse-D が計測した X, Y, Z 成分。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

a) 衛星 SAR 自動解析システムの構築

i) 概要

本課題においては、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。この解析では大量のデータを解析する必要があるため、衛星 SAR データを半自動的に解析するシステムを構築する。その衛星 SAR 自動解析システムの構築を予定している火山は、図 1-25 に示す 26 火山である。衛星 SAR 自動解析システムで用いる解析手法は、標準的に広く用いられている解析手法を採用することとし、これまで検討をおこない、令和元年度に衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプを構築した。このプロトタイプをベースとして、各火山の自動解析を構築していく。令和 2 年度においては、これまでに解析手法の検討等のために解析した、霧島山、桜島、草津白根山、有珠山、伊豆大島、三宅島に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築する。

ii) 解析手法

衛星 SAR 自動解析システムの解析手法の詳細は、令和元年度の次世代火山研究推進事業課題 B サブテーマ 2 の報告書において述べているので、ここでは簡単な記述にとどめる。

衛星 SAR 自動解析システムで解析するデータは、だいち 2 号 (ALOS-2) に搭載さ

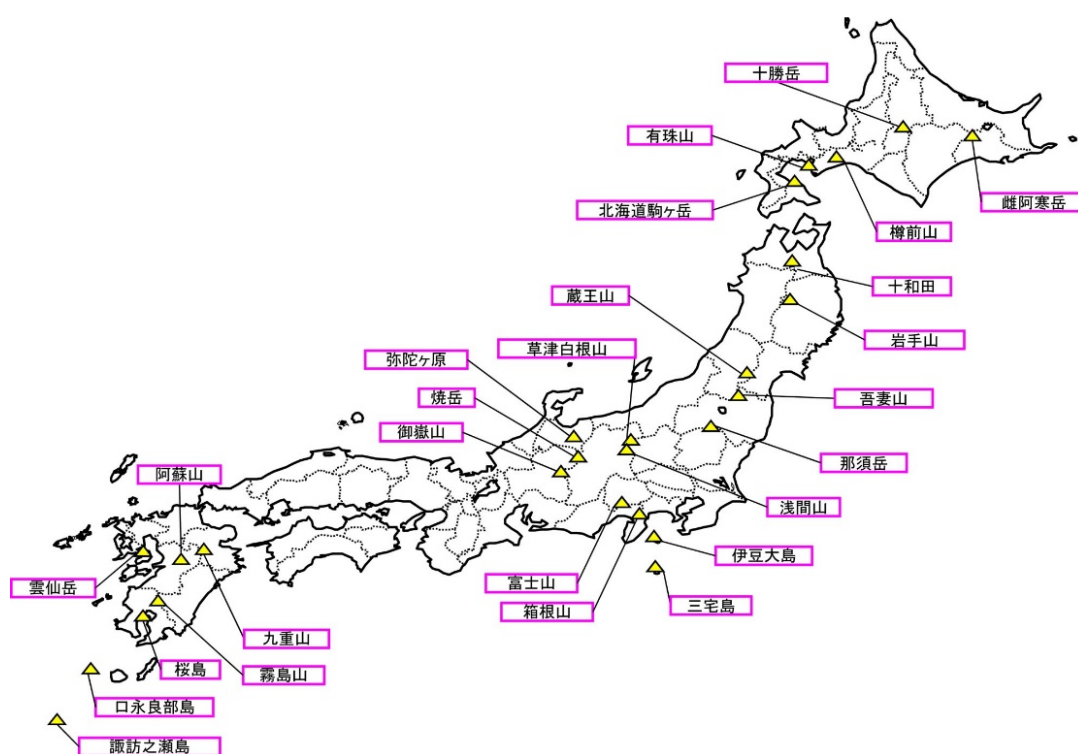
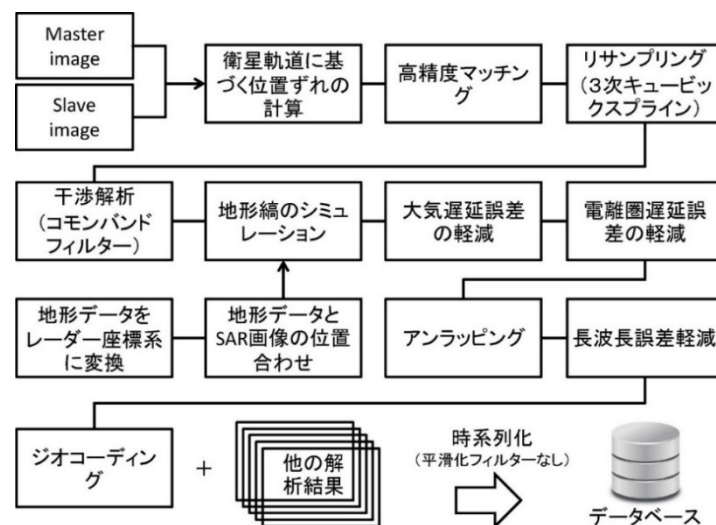


図 1-25 衛星 SAR 自動解析システム構築予定の火山

れた PALSAR-2 で取得される SAR データである。また、自動的ではないが、ほぼ同じアルゴリズムを用いて、運用が終了しているだいち (ALOS) の PALSAR で取得された SAR データについても解析し、得られた結果を JVDN システムで公開する。用いるデータは、SAR 研究グループ (PIXEL) が宇宙航空研究開発機構 (JAXA) との共同研究に基づいて提供され、グループ内で共有しているものを利用する。これらのデータを衛星 SAR 自動解析システムにおいて利用するためのストレージシステムの運用も継続して進めている。火山活動の活発化が観測された場合等には、臨時的に Sentinel-1 等の解析も試み、有用な結果が得られた場合には、JVDN システムで解析結果を公開する。その解析を迅速に行えるようにするため、ストレージシステムは平時の Sentinel-1 のデータを自動的に収集している。

本解析における解析フローを図 1-26 に示す。PALSAR データは、東京電機大学の島田政信教授が開発された SIGMA-SAR⁴⁾を用いて、level1.0 データから Single Look Complex (SLC) 画像に変換し、SAR 干渉解析を行う。PALSAR-2 データは、level1.1 データ (SLC) を入手し、SAR 干渉解析を行う。飛田ほか(1999)⁵⁾の高精度マッチング法を用いてデータペア間の位置を精密に合わせた後、初期 SAR 干渉画像を作成する。さらに、国土地理院が公表している 50m メッシュ標高データと EGM96 ジオイドモデルから作成した数値楕円体高モデルと軌道情報から軌道差に起因する位相差成分を計算し、除去する。大気遅延誤差は数値気象モデルの解析値から大気遅延量を求める方法^{6),7)}を用いて低減する。ここで使用する数値気象モデルの解析値は、気象庁が公表しているメソスケールモデルを境界値とした、WRF⁸⁾による解析から求めた 1 時間毎の値である。この WRF の解析は、PIXEL のデータを利用するストレージシステムの一部において自動的に処理され、アーカイブされる。電離圏遅延誤差は SAR 画像が持つ周波数帯域を、バンドパスフィルターを用いて分割し、それらの SAR 画像から作成した中心周波数が異なる 2 つの SAR 干渉画像から、地殻変動成分と電離圏遅延成分の周波数応答の違いを利用して、それらを分離するスプリットスペクトラム法^{9),10),11)}を用いて低減する。これらの非地殻変動成分を除去した後で



も、軌道情報の誤差等に起因する長波長の非地殻変動成分が残る場合があるので、画像全体に関数を当てはめ、その成分を除去する。用いる関数は、対象とする火山や想定される地殻変動の特徴に合わせて、試行錯誤によって決定する。位相アンラッピングを精度よく行うため、処理前に Goldstein and Werner (1998)¹²⁾によるスペクトル強調フィルターを適用する。フィルターの窓サイズは 32×32 ピクセル、フィルター強度は 0.8 を基本とする。位相アンラッピングは、スタンフォード大学が開発したアンラッピングソフトウェア SNAPHU^{13), 14), 15)}を用いる。

SAR 干渉解析においては、異なる時間に取得された 2 つの画像 (i 番目と j 番目に観測された SAR データとする) を解析して、それらのデータを取得時間の間に生じた地殻変動による衛星－地表間距離 (スラントレンジ) の変化 $\delta p_{i,j}$ を求める。そのスラントレンジ変化量は、その間の観測毎のスラントレンジ変化量の積算であることから、

$$\delta p_{i,j} = \sum \delta p_{k,k+1} \quad (k=i, \dots, j-1) \quad (1.1)$$

とかける。衛星 SAR 自動解析システムにおいては、令和元年度の検討結果から、観測間が 2 年以下のデータペアに限定して解析を行うが、それらの解析結果すべてをアーカイブするのは効率的でないので、得られた複数ペアのスラントレンジ変化から、 k 番目と $k+1$ 番目の SAR データの観測時間の間に生じたスラントレンジ変化成分 $\delta p_{k,k+1}$ を求めて、データベース化する。この観測間のスラントレンジ変化量を推定する手法は Small Baseline Subset (SBAS) 法¹⁶⁾と同様だが、一般的によく用いられる時間方向のスムージングの拘束条件の付加や地形誤差の推定は、その拘束条件の強さや推定パラメータの設定の仕方を試行錯誤して決定することが一般的であり、自動解析には向かないことから、ここでは単純な時系列化のみを行うこととする。令和元年度に構築したプロトタイプにおいては、以上の時系列化による結果を最終結果としていたが、非地殻変動成分が顕著に残存するケースが多いという問題があった。そこで、時間方向に短波長、空間方向に長波長の成分は非地殻変動成分であるとして、スペクトル解析によってその成分を分離するフィルター¹⁷⁾を適用することとした。図 1-27 は、霧島山のだいち 2 号のパス 23 (南行軌道、右方向視) の PALSAR-2 データを解析して得られたスラントレンジ変化時系列について、このフィルターを適用する前と後の比較を示す。明らかに時間的に連続しない空間的に長波長のスラントレンジ変化が除去されており、硫黄山や新燃岳付近の変化を明瞭に判読できるようになっている。ただし、実際に時間方向に短波長、空間方向に長波長の地殻変動が生じていた場合には、その成分はこのフィルターによって除去される可能性があるため、その解釈には注意が必要である。そのような地殻変動が想定される場合には、個別に解析を行い、イベントに関する解析結果として JVDN システムにおいてデータベースに加える予定である。

以上で述べた解析による衛星 SAR 自動解析システムを、防災科研が開発した SAR 干渉解析ツール (RINC) を用いて構築した。このシステムは、①所定の場所に PALSAR-

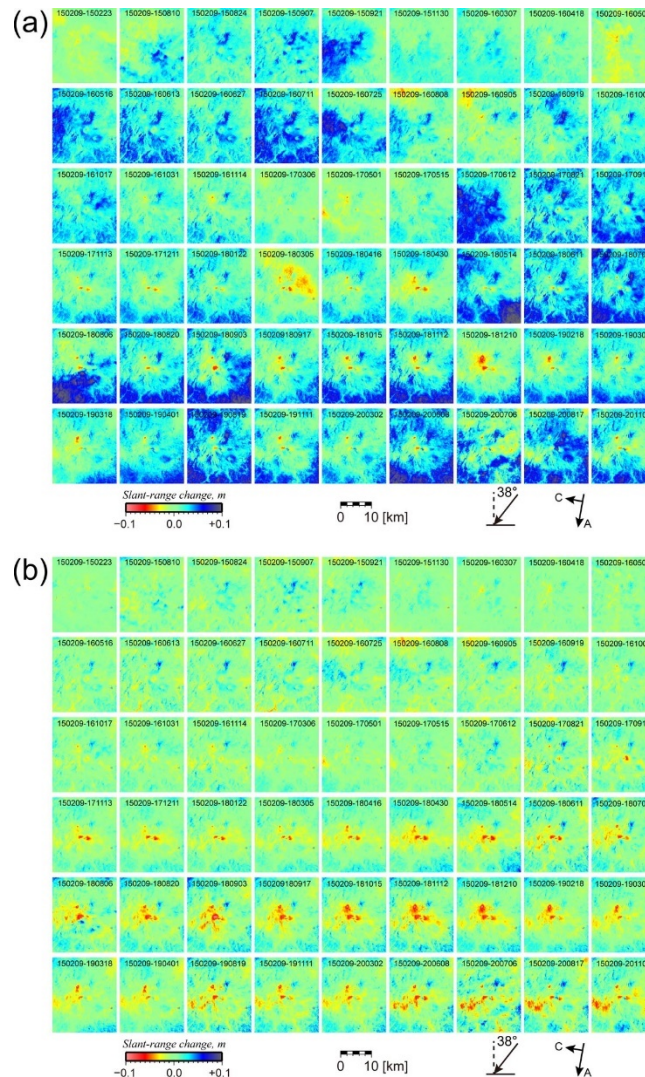


図 1-27 霧島山に関するだいち 2 号のパス 23（南行軌道、右方向視）で取得された SAR 画像を解析して得られたスラントレンジ変化時系列の比較。すべての画像は 2015 年 2 月 9 日からの変化量を示し、その期間は画像の上部に示す。(a)時系列フィルター適用前。(b)時系列フィルター適用後。

2 の Level1.1 データをアップロード、②解析コマンド実行、③解析結果のチェック、④JVDN システムにアップロードのように、4 つの手順のみで、簡単に解析結果を完了できるように構築している。JVDN システムにおいては、得られたスラントレンジ変化量を、The Generic Mapping Tools¹⁸⁾のグリッドファイル (NETCDF 形式) でダウンロードすることが可能である。また、スラントレンジ変化量の解釈に必要とされる、レーダー波の単位入射ベクトルも同時に取得できる。これらの軌道において、新たなデータが取得された場合には、衛星 SAR 自動解析システムで解析を行い、得られたスラントレンジ変化時系列を更新する予定である。

ii) PALSAR-2 に関する地殻変動検出結果

令和 2 年度においては、霧島山（2 軌道）、桜島（2 軌道）、有珠山（3 軌道）、草

津白根山（3 軌道）、伊豆大島（2 軌道）、三宅島（2 軌道）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。これらのデータに関する軌道、観測モード、SAR 干渉処理におけるルック数を表 1 に示す。また、これらの解析結果は、表 2 に示す範囲、ピクセルスペーシングで出力する。各火山、軌道について得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-27～図 1-33 に示す。以下では、各火山で得られた特徴的な地殻変動について述べる。

図 1-28(a)と(b)は、新燃岳の 2017 年噴火直前までのスラントレンジ変化時系列を示す。2017 年初頭までは、火口外において若干のスラントレンジ変化が見られるが、周辺のノイズと同レベルであり、地殻変動を示すものかは不明である。火口内において、Miyagi et al. (2014)¹⁹⁾が報告している、2011 年噴火以降に継続していた膨張が終息し、沈降に転じていることが分かる。また、2017 年夏頃から、パス 23（東上空からの観測）では東山腹において短縮変化、パス 131（西上空からの観測）

表 1 衛星 SAR 自動解析システムを構築した PALSAR-2 の軌道、観測モード、ルック数

Target	Path	Orbit	Look dir.	Rang looks	Azimuth looks
Kirishima	23	Descending	Right	11	13
Kirishima	131	Ascending	Right	13	14
Sakurajima	23	Descending	Right	11	13
Sakurajima	30	Descending	Left	14	10
Usu	19	Descending	Right	10	14
Usu	123	Ascending	Right	10	14
Usu	124	Ascending	Right	12	13
Kusatsu-Shirane	19	Descending	Right	11	12
Kusatsu-Shirane	125	Ascending	Right	10	14
Kusatsu-Shirane	126	Ascending	Right	12	13
Izu-Oshima	18	Descending	Right	20	19
Izu-Oshima	125	Ascending	Right	19	21
Miyakejima	18	Descending	Right	20	19
Miyakejima	125	Ascending	Right	19	21

表 2 PALSAR-2 の衛星 SAR 自動解析システムから出力されるデータ範囲・スペーシング

Target	Path	Lat.1	Lat.2	Lon.1	Lon2	Spacing
Kirishima	23, 131	31°48'40"	32°1'59"	130°46'1"	130°59'20"	1 sec.
Sakurajima	23, 30	31°27'40"	31°46'59"	130°30'1"	130°51'40"	1 sec.
Usu	19, 123, 124	42°29'31"	42°34'30"	140°46'0"	140°54'19"	1 sec.
Kusatsu-Shirane	19, 125, 126	36°29'41"	36°43'0"	138°25'0"	138°38'19"	1 sec.
Izu-Oshima	18, 125	34°38'22"	34°50'0"	139°19'0"	139°28'58"	2 sec.
Miyakejima	18, 125	34°0'42"	34°9'0"	139°27'0"	139°35'18"	2 sec.

では西山腹においてスラントレンジ短縮変化が明瞭に見られ、さらに時間とともに増大する傾向が見られた。これは 2017 年新燃岳噴火の前に、前駆的に山体膨張が生じていた可能性を示すものである。一方、火口内においては、沈降が大きくなっているように見える。図 1-28(c)と(d)は、だいち 2 号のパス 23 とパス 131 から取得された PALSAR-2 データを解析して得られた、2017 年新燃岳噴火以降のスラントレンジ変化時系列を示す。2017 年噴火と 2018 年噴火の間の期間においては、火口内においては 2017 年噴火直前から見られていた沈降の継続が見られるが、火口外においては顕著な地殻変動は見られない。2018 年噴火発生時にも、火口内を除いて、明瞭な変化は見られないが、それ以降においては、火口周辺で収縮変形が時間とともに増大する傾向が見られる。これは火口下のマグマだまりで減圧が生じていると推測される。さらに、硫黄山では局所的な膨張が見られる。

図 1-29 は、桜島において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。2015 年 8 月 15 日に桜島直下にダイクが貫入するイベントが発生しており、そのイベントに伴う地殻変動がみられる。それ以降には、昭和火口付近において収縮傾向の変化が見られる。また、錦江湾の東側において、パス 23（東上空からの観測）からはスラントレンジ短縮、パス 30（西上空からの観測）ではスラントレンジ伸長が見られ、さらに、パス 30（西上空からの観測）では、錦江湾の西側にスラントレンジ伸長が見られた。これは始良カルデラ下のマグマだまりの膨張に起因する地殻変動と推測される。

図 1-30 は、有珠山において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。どの軌道においても、有珠山山頂付近と昭和火山において、スラントレンジ伸長変化が見られた。この地殻変動については Wang and Aoki (2019)²⁰⁾において報告しており、過去の噴火において地下に貫入したマグマの冷却に伴う地殻変動と考えられる。有珠山山頂の地殻変動を詳細に見ると、沈降域の中心より西側において、より沈降が大きな領域が南北に延びている特徴が見られる。

図 1-31 は、草津白根山において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。本白根山においては、2018 年 1 月 23 日に噴火が発生しており、その噴火が発生した以降において、本白根山付近に特徴的な変化が見られる。この地殻変動についての詳細は、Himematsu et al. (2020)²¹⁾において報告しており、この噴火活動には、正断層のずれが関与していることを示した。

図 1-32 は、伊豆大島において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。伊豆大島の解析においては、解析領域が島内に限られるため、自動解析に含まれる画像内の位相変化を平坦にする処理によって、空間的に長波長の位相変化成分は除去される。そこで、伊豆大島の解析においては、スラントレンジ時系列に適用するスペクトルフィルターを適用した後、各期間のスラントレンジ変化が、GEONET F3 解の GEONET 大島 1(93051)観測点（緯度 34.784418907° N、経度 139.38139448° E）に対する地殻変動に整合するように、全体的な傾きを付加している。伊豆大島の山頂付近においては、ゆっくりとしたスラントレンジ伸長変化が見られる。これは、Furuya (2005)²²⁾が述べる、過去の噴火において地下に貫入したマグマの冷却に伴う

地殻変動と解釈することができる。また、山腹においては、継続的なスラントレンジ伸長、裏砂漠においては時折スラントレンジ短縮の変化が見られる。これが実際に地表の変位によるものかどうかは、現時点では不明だが、地表におけるレーダー波の体積散乱に起因する見かけ上の変化である可能性がある。今後の、より詳細な調査が必要である。

図 1-33 は、伊豆大島において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。三宅島の解析においては、伊豆大島と同様に解析領域が島内に限られるため、スラントレンジ時系列に適用するスペクトルフィルターを適用した後、各期間のスラントレンジ変化が、GEONET F3 解の GEONET 三宅 1(93059)観測点（緯度 34.121070294° N、経度 139.50384858° E）に対する地殻変動に整合するように、全体的な傾きを付加した。島全体に傾きをもつようなスラントレンジ変化分布が見られ、これは広域的な地殻変動と三宅島下のマグマだまりの膨張によるものと推測される。一方、山頂カルデラ付近においては、スラントレンジ伸長変化が見られる。特に、カルデラ底においては、南壁付近を中心としたスラントレンジ伸長変化が求まった。これについては、令和元年度の報告書で述べた通りである。

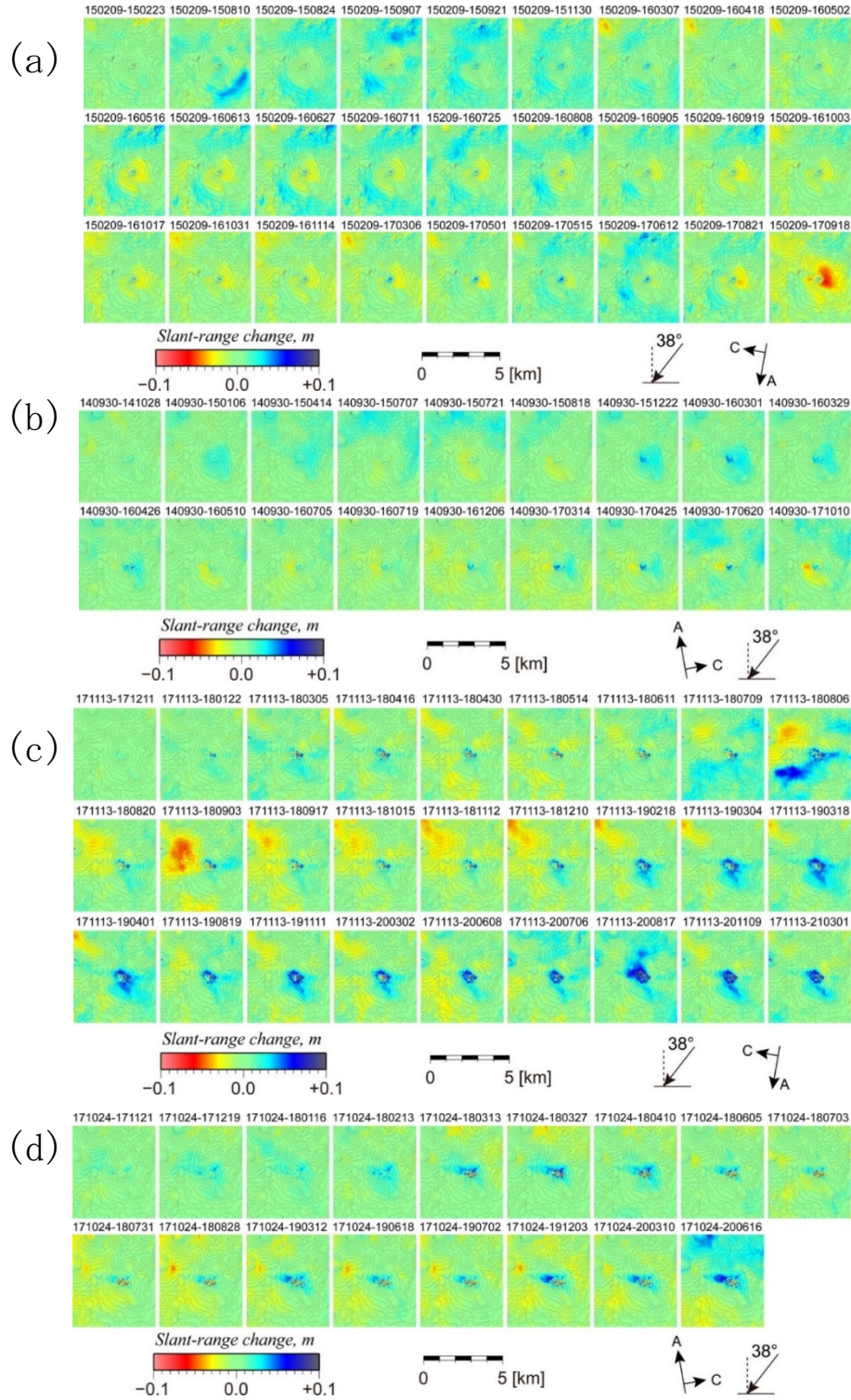


図 1-28 PALSAR-2 の衛星 SAR 自動解析システムで得られた新燃岳周辺の地殻変動。コンターは、50m 毎の標高を示す。(a)、(b)パス 23 (南行軌道、右方向視) とパス 131 (北行軌道、右方向視) の 2017 年新燃岳噴火直前までのスラントレンジ変化時系列。(c)、(d)パス 23 (南行軌道、右方向視) とパス 131 (北行軌道、右方向視) の 2017 年新燃岳噴火発生後からのスラントレンジ変化時系列。

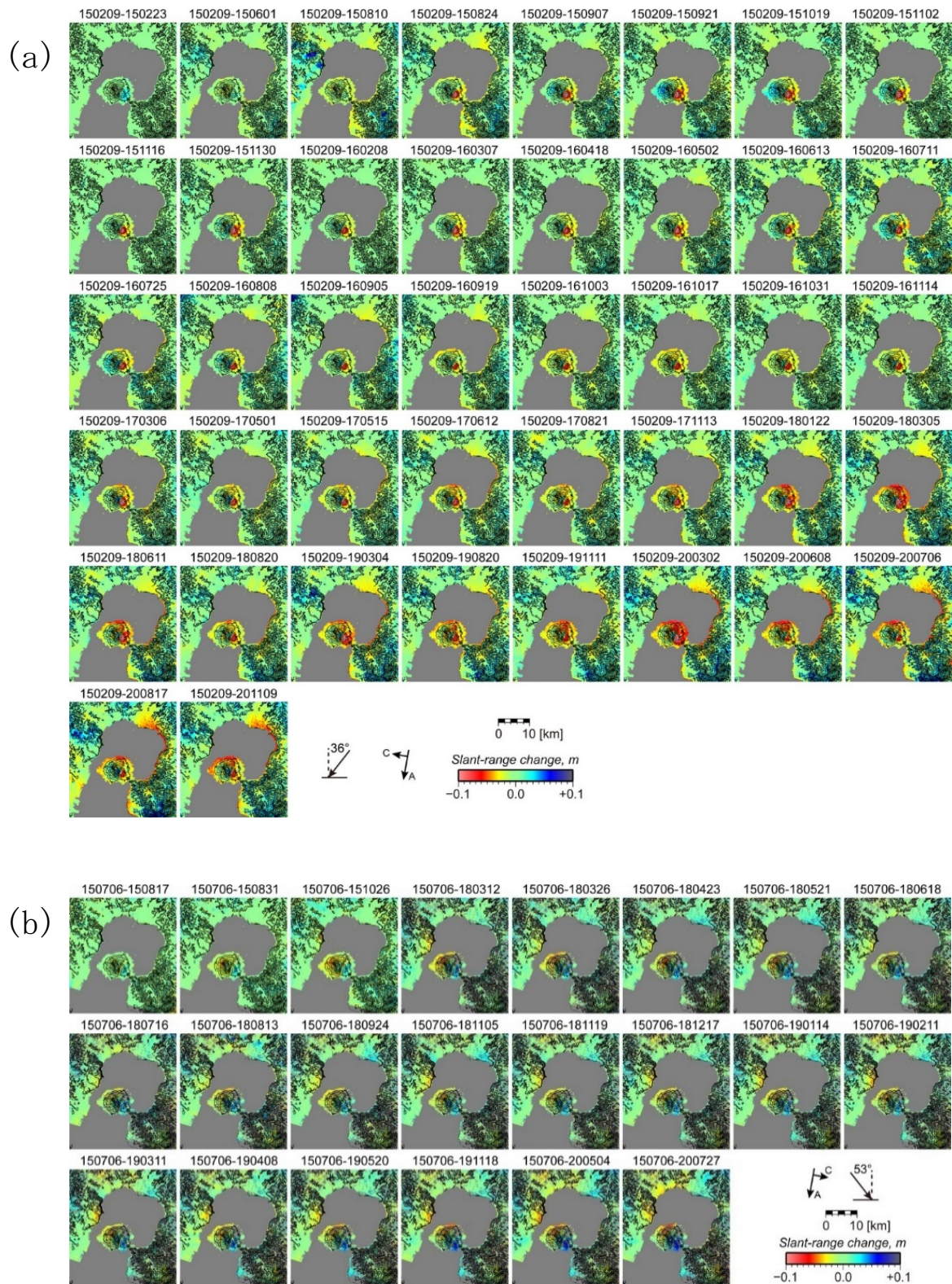


図 1-29 桜島に関するだいち 2 号の (a) パス 23 (南行軌道、右方向視) と (b) パス 30 (南行軌道、左方向視) で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

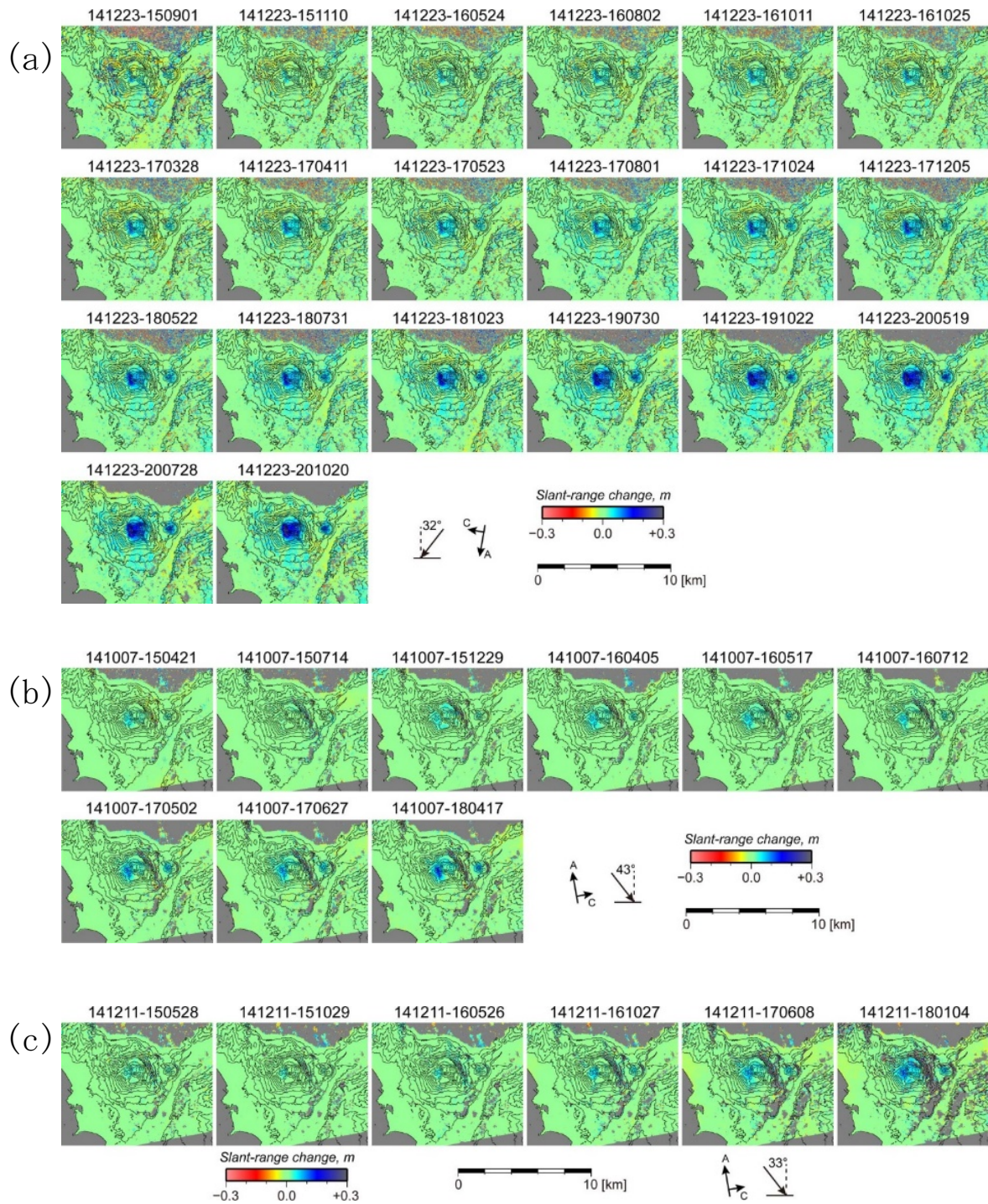


図 1-30 有珠山に関するだいち 2 号の(a)パス 19 (南行軌道、右方向視)、123 (北行軌道、右方向視)、124 (北行軌道、右方向視) で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

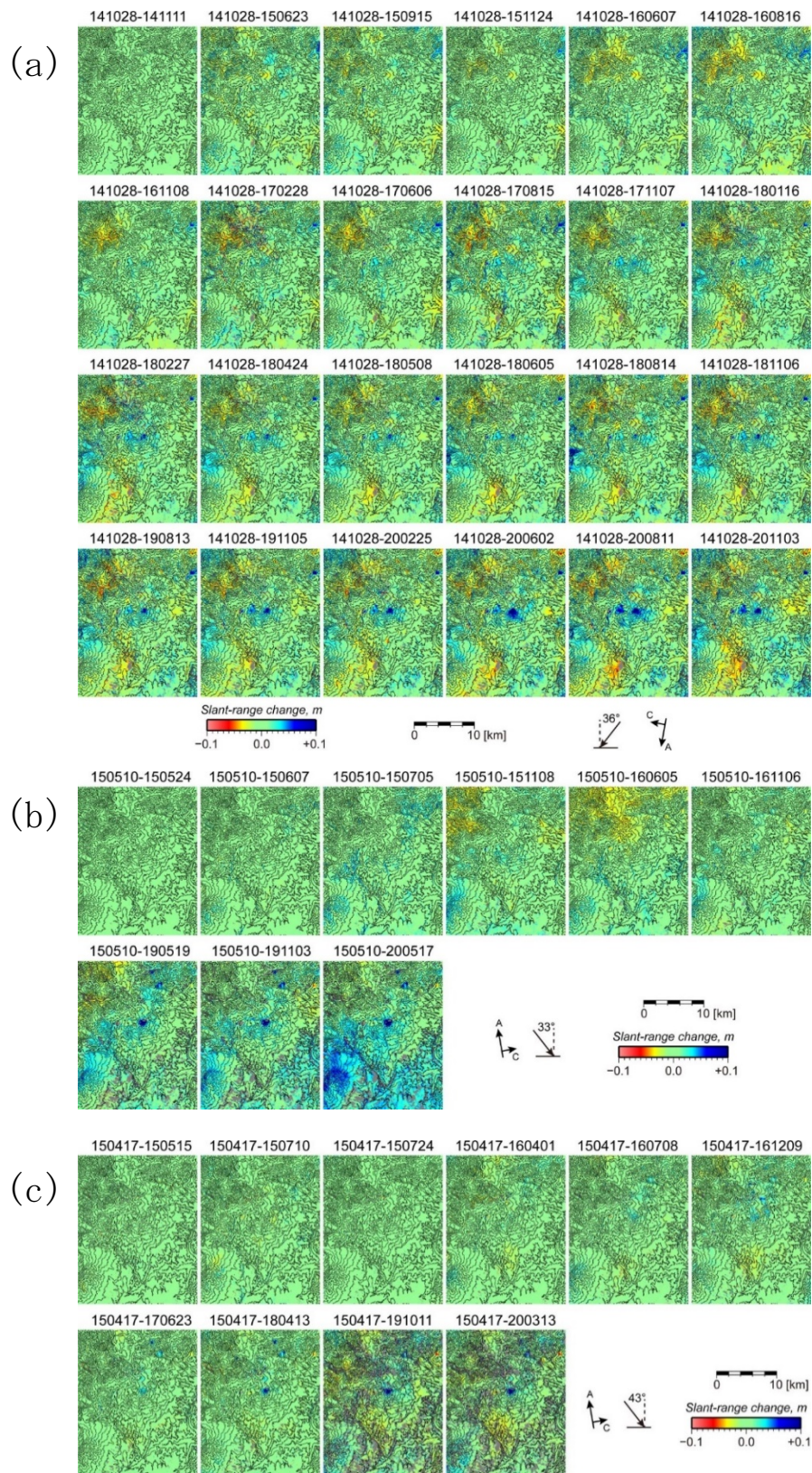


図 1-31 草津白根山に関するだいち 2 号のパス (a) 19 (南行軌道、右方向視)、(b) 125 (北行軌道、右方向視)、(c) 126 (北行軌道、右方向視) で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

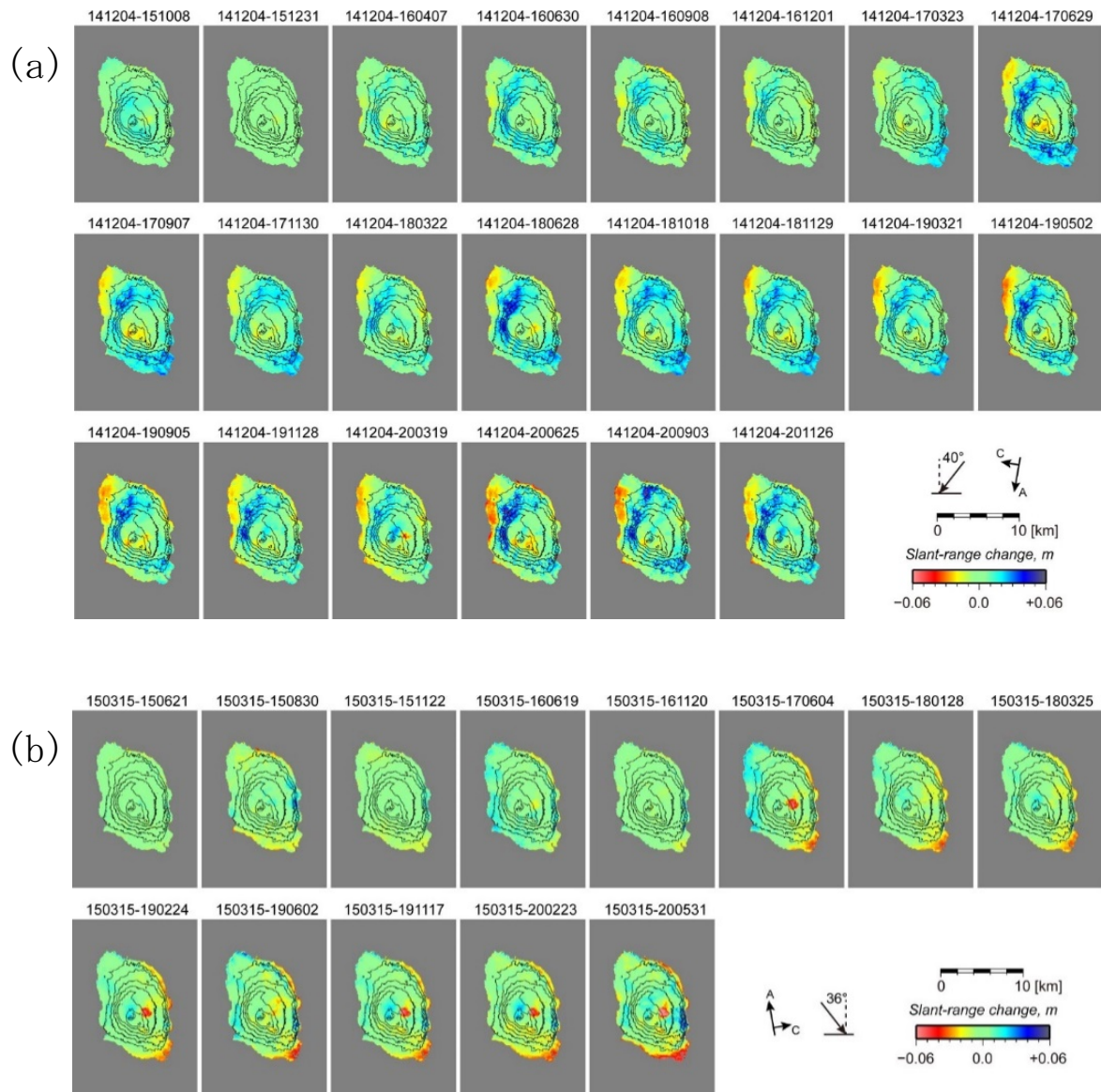


図 1-32 伊豆大島に関するだいち 2 号のパス(a)18（南行軌道、右方向視）、(b)125（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

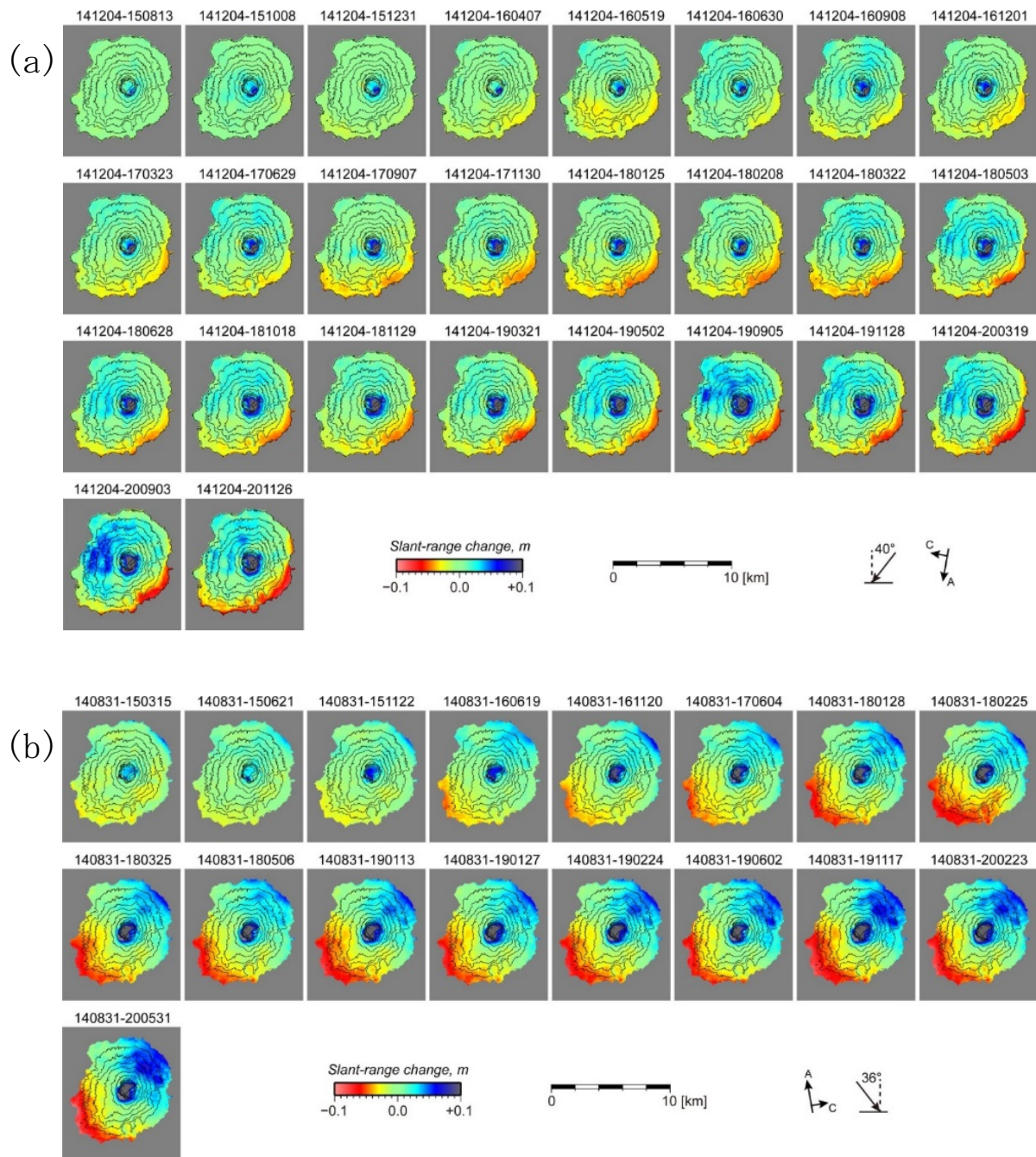


図 1-33 三宅島に関するだいち 2 号のパス(a)18 (南行軌道、右方向視)、(b)125 (北行軌道、右方向視) で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

iii) PALSAR に関する地殻変動検出結果

PALSAR データに関しては、令和 2 年度には、霧島山（2 軌道）、桜島（2 軌道）、有珠山（2 軌道）、草津白根山（3 軌道）、伊豆大島（2 軌道）、三宅島（2 軌道）についての解析を行った。これらのデータに関する軌道、出力範囲を表 3 に示す。基本的な解析方法は、衛星 SAR 自動解析システムとおおよそ同じだが、PALSAR の帯域（FBS:28MHz, FBD:14MHz）では、電離圏遅延誤差低減のためのスプリットスペクトラム法の適用を精度よくできない場合があるため、適用していない。この誤差成分は、関数をあてはめて、長波長成分を除去する処理において、おおよそは低減され则认为られる。SAR 干渉画像の作成においては、FBS モードのデータについては、レンジ方向に 6 ルック、アジマス方向に 14 ルックで処理を行った。FBD モードのデータについては、オーバーサンプリング法で 28MHz 相当のスペーシングにした後、同じルック数で処理を行った。各火山、軌道について得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-34～図 1-39 に示す。

以下では、各火山で得られた特徴的な地殻変動について述べる。霧島山においては、明瞭な地殻変動シグナルは見られなかった（図 1-34）。宮城ほか(2011)²³⁾では、2011 年新燃岳噴火の約 1 年前から新燃岳の北西域において、膨張変動がみられること述べているが、本解析においては、それは明瞭には見られない。解析におけるフィルター等によって除去された可能性がある。今後、詳細に調査を進める予定である。桜島においては、北海岸においてスラントレンジ短縮が見られた（図 1-35）。これは地下のマグマだまりの膨張に伴う地殻変動が生じていることを示唆する。有珠山においては干渉性劣化が顕著であったが、PALSAR-2 の解析結果と同様に、過去

表 3 JVDN システムで公開している PALSAR 解析結果に関する軌道と画像範囲

Target	Path	Orbit	Lat.1	Lat.2	Lon.1	Lon2
Kirishima	73	Descending	31°45'2"	32°5'0"	130°43'0"	131°2'58"
Kirishima	424	Ascending	31°45'2"	32°5'0"	130°43'0"	131°2'58"
Sakurajima	73	Descending	31°27'2"	31°47'0"	130°30'0"	130°51'58"
Sakurajima	424	Ascending	31°27'2"	31°47'0"	130°30'0"	130°51'58"
Usu	58	Descending	42°29'32"	42°34'30"	140°46'0"	140°54'18"
Usu	401	Ascending	42°29'32"	42°34'30"	140°46'0"	140°54'18"
Kusatsu-Shirane	60	Descending	36°29'42"	36°43'0"	138°25'0"	138°38'18"
Kusatsu-Shirane	407	Ascending	36°29'42"	36°43'0"	138°25'0"	138°38'18"
Kusatsu-Shirane	408	Ascending	36°29'42"	36°43'0"	138°25'0"	138°38'18"
Izu-Oshima	58	Descending	34°38'22"	34°50'0"	139°19'0"	139°28'58"
Izu-Oshima	407	Ascending	34°38'22"	34°50'0"	139°19'0"	139°28'58"
Miyakejima	57	Descending	34°0'42"	34°9'0"	139°27'0"	139°35'18"
Miyakejima	407	Ascending	34°0'42"	34°9'0"	139°27'0"	139°35'18"

に噴火が発生した領域におけるスラントレンジ伸長変化が見られた (図 1-36)。特に、PALSAR-2 の解析結果には顕著には見られなかった、2000 年噴火が発生した領域においても、スラントレンジ伸長が見られることが特徴である。この地殻変動についての詳細も、Wang and Aoki (2019)²⁰⁾で述べているように、2000 年の噴火活動において、地下に貫入したマグマの冷却に伴う収縮で説明される。草津白根山においては、干渉性劣化が著しく、多くの領域がマスクされる結果であった (図 1-37)。伊豆大島においても、Furuya (2005)で述べられているように、過去の噴火活動において、地下に貫入したマグマの冷却に伴う収縮と説明される変化が捉えられている (図 1-38)。三宅島においては、島中央部のスラントレンジ伸長が得られた。特に、カルデラ底においては、局所的により大きな沈降傾向の変化が見られる (図 1-39)。その詳細については、Ozawa and Ueda (2011)²⁴⁾で述べている。

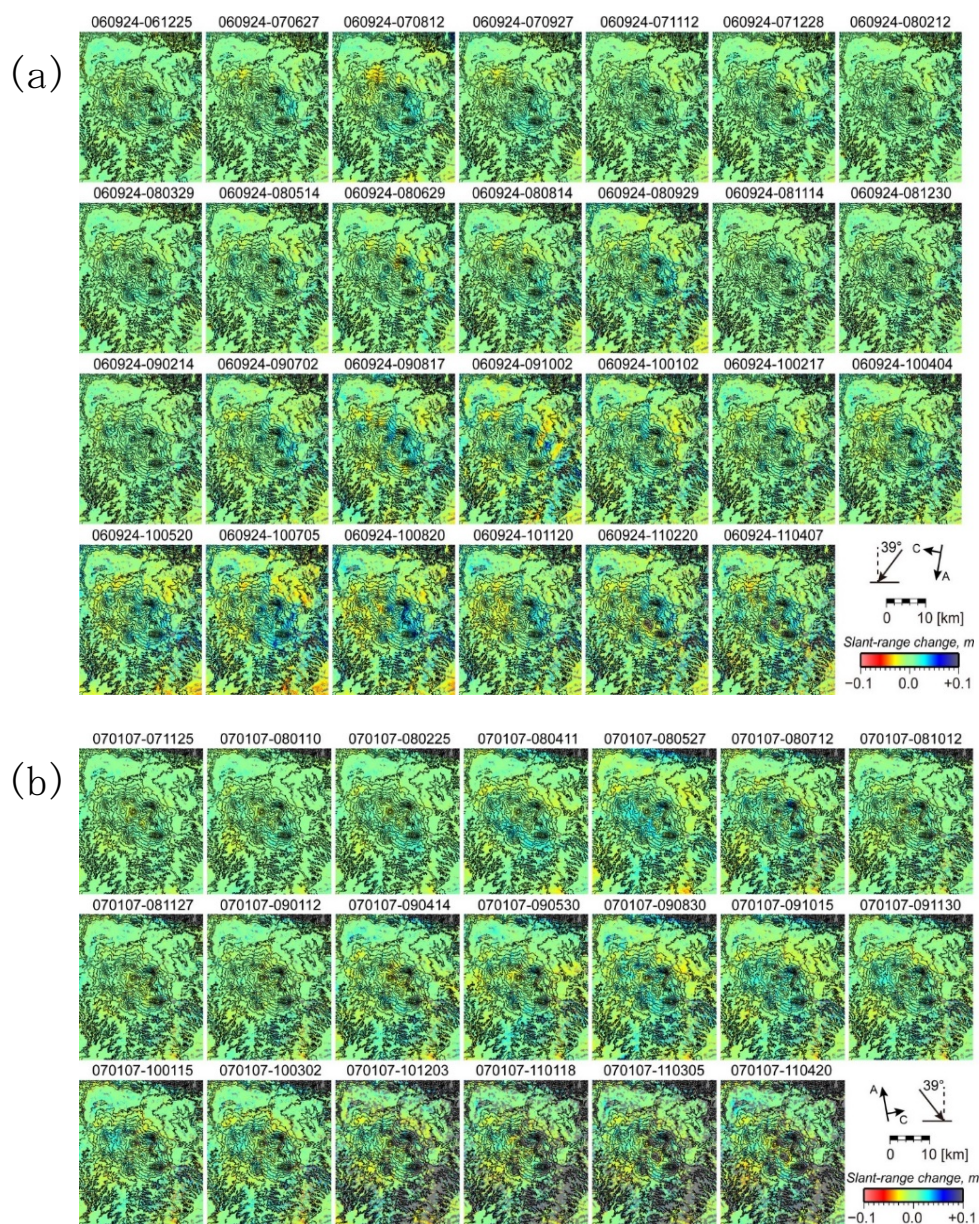


図 1-34 霧島山に関するだいちの (a) パス 73 (北行軌道、右方向視) と (b) で取得された

PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

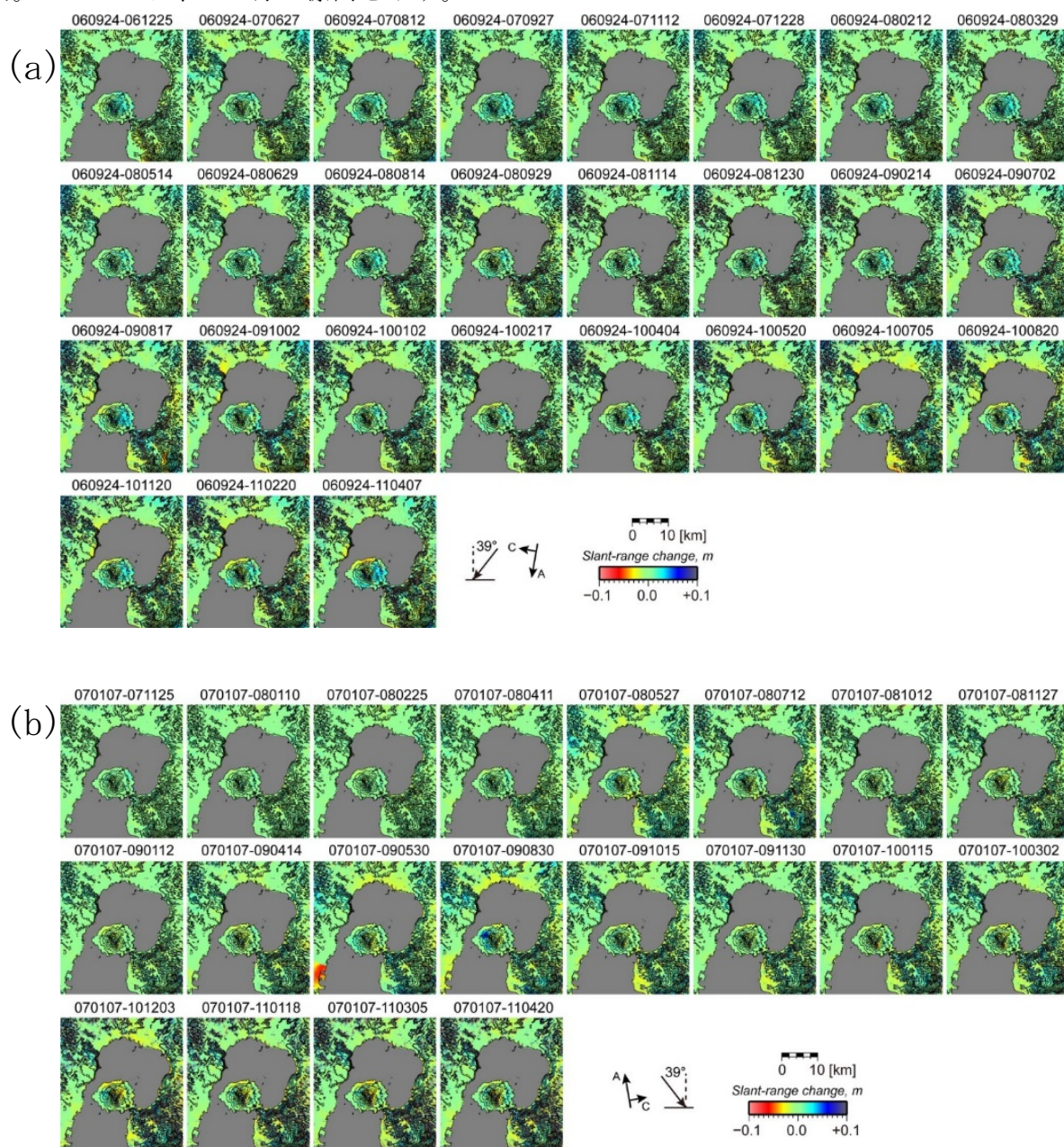


図 1-35 桜島に関するだいちの (a) パス 73 (北行軌道、右方向視) と (b) で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

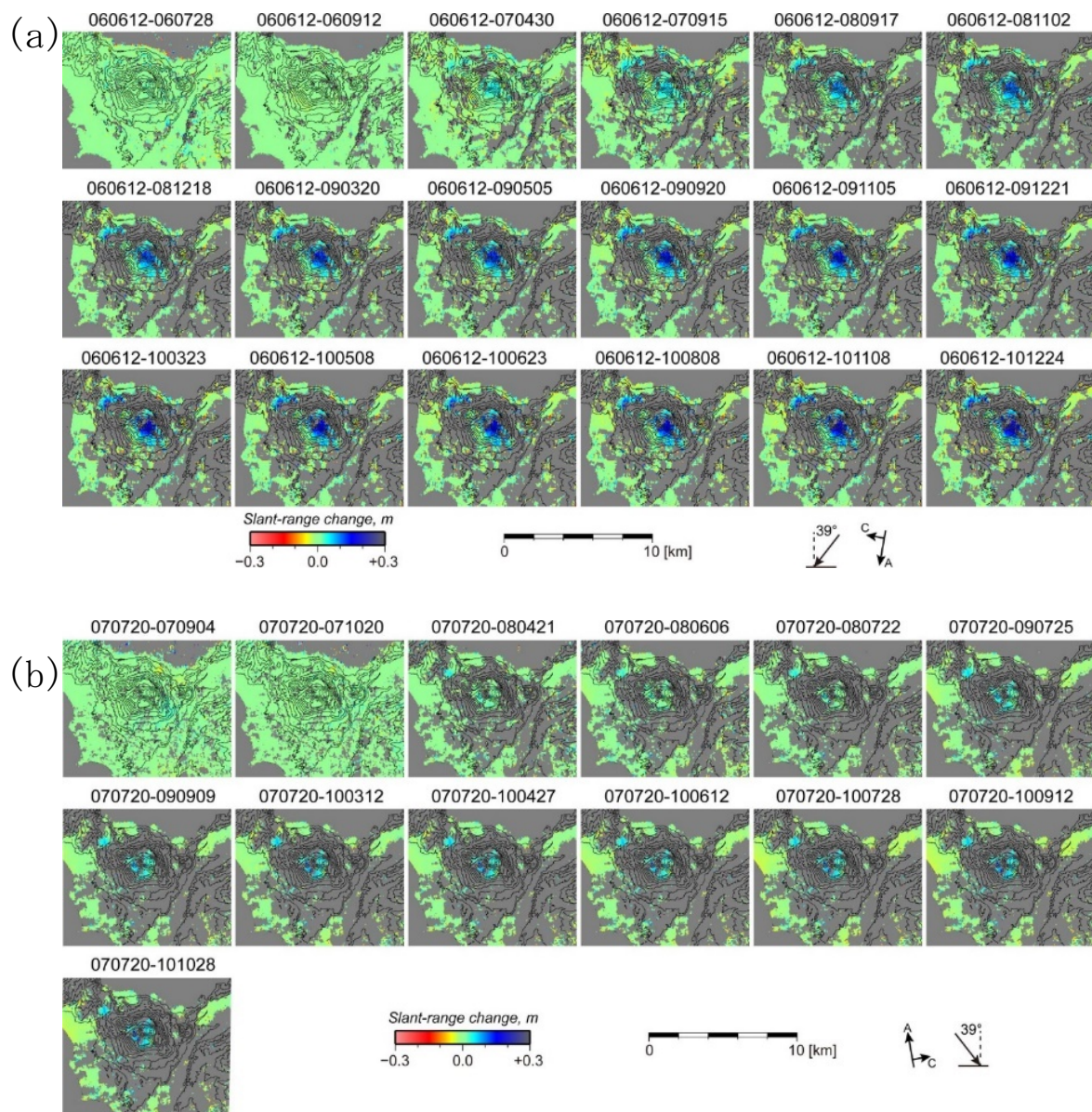


図 1-36 有珠山に関するだいちの (a) パス 58 (南行軌道、右方向視) と (b) パス 401 (北行軌道、右方向視) で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

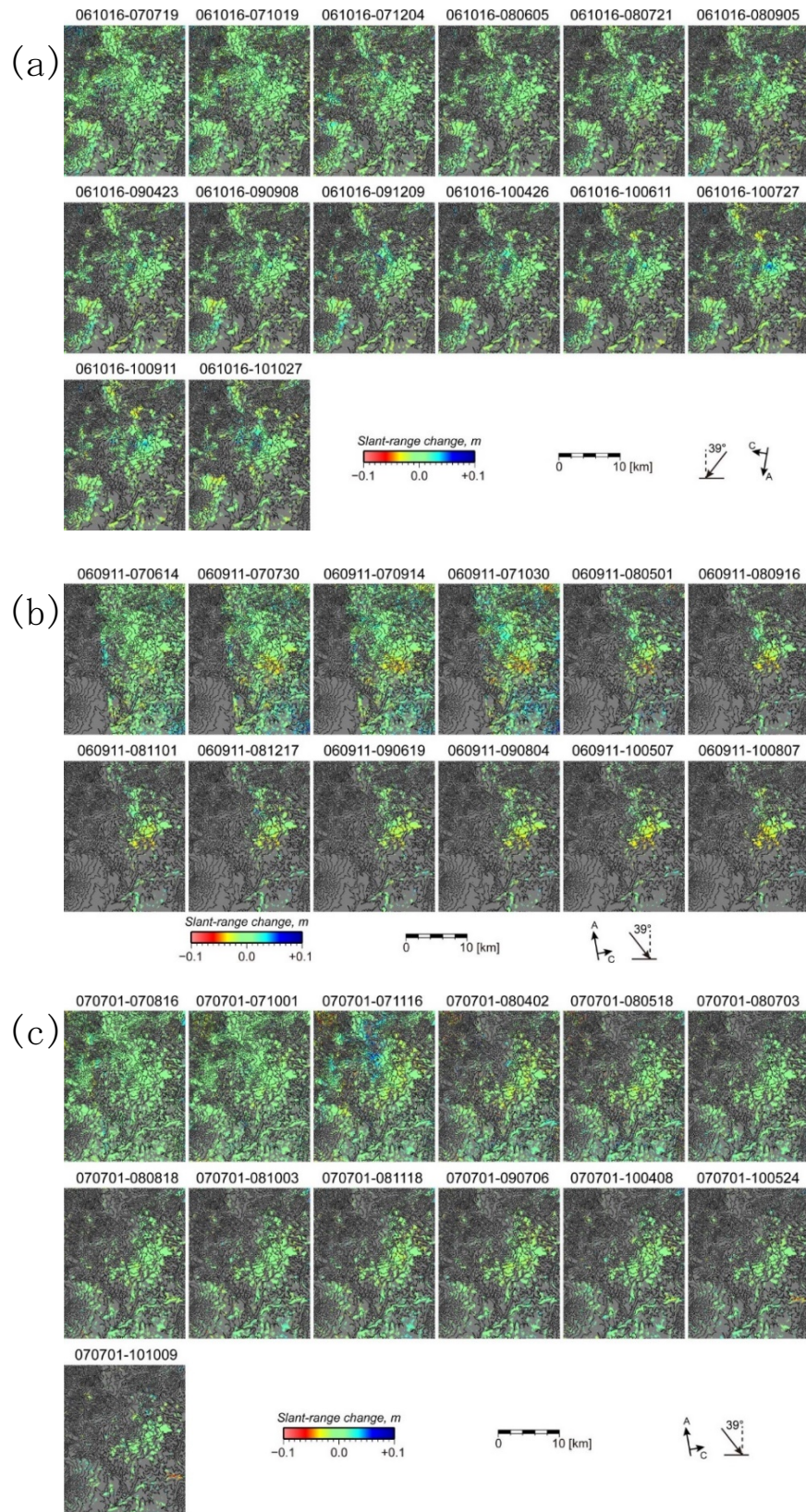


図 1-37 草津白根山に関するだいちの(a)パス 60 (南行軌道、右方向視)、(b)パス 407 (北行軌道、右方向視)、(c)パス 408 (北行軌道、右方向視)で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

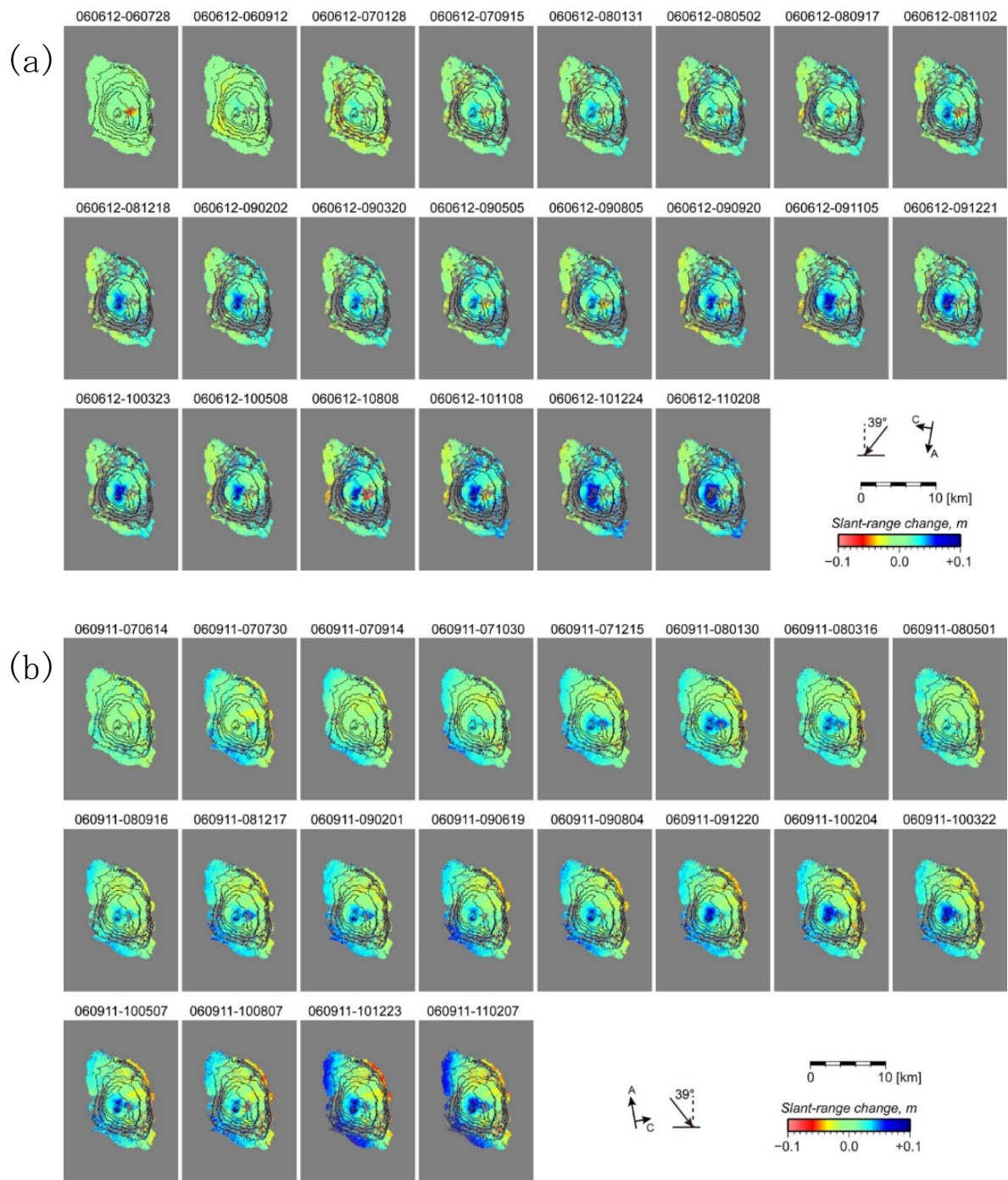


図 1-38 伊豆大島に関するだいちの(a)パス 58 (南行軌道、右方向視) と(b)パス 407 (北行軌道、右方向視) で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

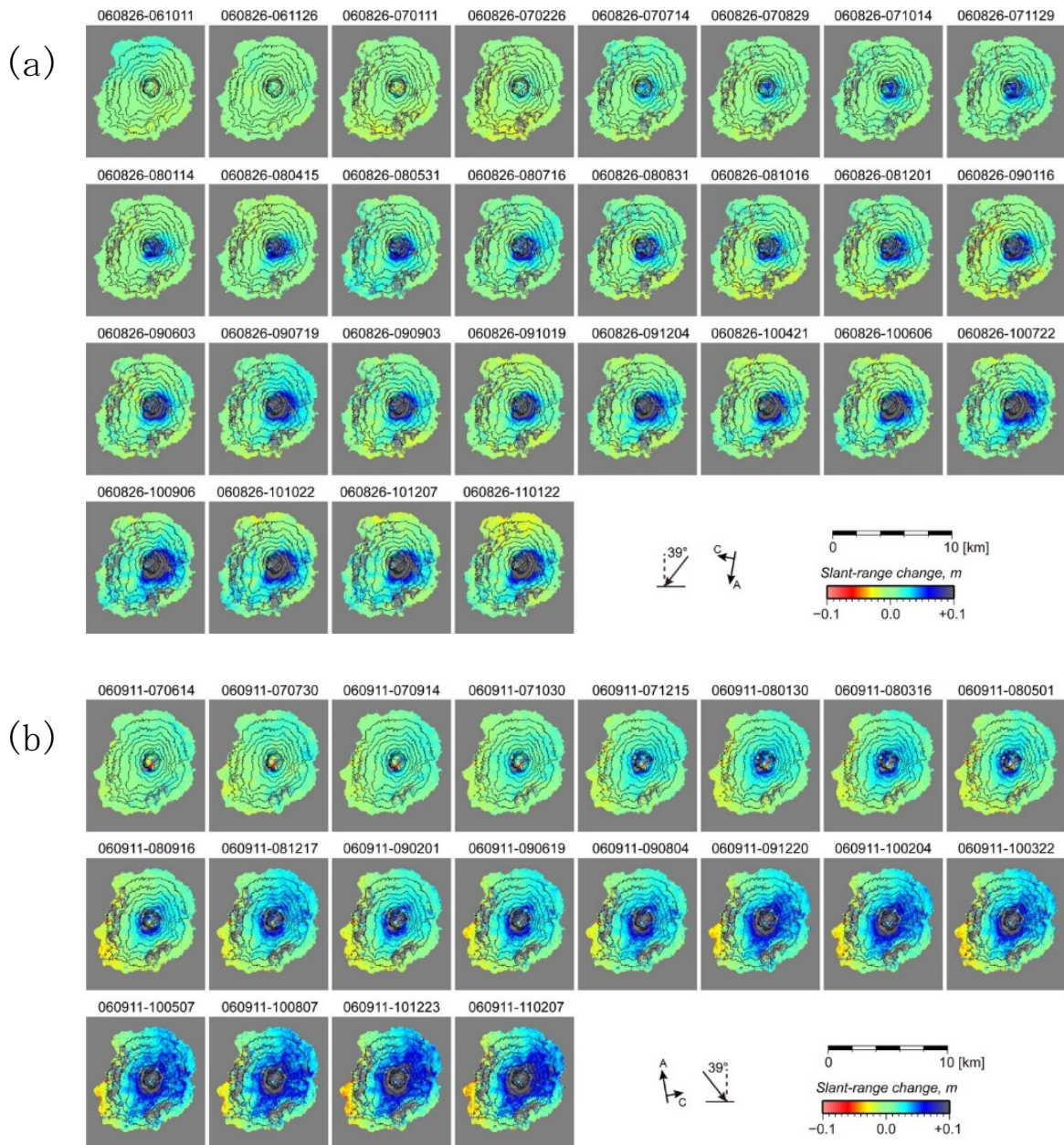


図 1-39 三宅島に関するだいちの(a)パス 57（南行軌道、右方向視）と(b)パス 407（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

iv) まとめ

PALSAR-2 および PALSAR を解析して得られた地殻変動情報の JVDN システムにおける公開を開始した。これらの解析は自動解析によるものであり、過去にマニュアルで精密に解析パラメータをチューニングして得られた結果とは異なる場合がある。特に、それは PALSAR の解析結果について顕著であった。これは、解析に改良の余地が残されていることを示す。今後も解析アルゴリズムの改良についての検討を進め、より精度の良い結果が得られた場合には再解析を行い、JVDN システムで公開している地殻変動情報を更新する予定である。

b) 衛星 SAR を用いた事例研究

標準的解析手法の検討、将来のデータベース化、および、その利用方法に関する検討に向けた事例研究として、国内の蔵王山、吾妻山、有珠山、および、バヌアツ共和国のアンブリム火山についての解析を行った。それらの事例研究についての報告を以下に述べる。

i) 蔵王山

蔵王山における地殻変動の時空間変化の抽出を目的として、衛星 SAR データに SAR 時系列解析を適用した結果について述べる。衛星 SAR データを用いた地殻変動の時系列変化を抽出する SAR 時系列解析手法として Stacking 法や PS-InSAR 法などが知られているが、本解析では MTI 法¹⁾を適用した。MTI 法は複数の異なる撮像間隔の干渉画像を作成し、最小二乗法によって各画像撮像間隔における平均変位速度を推定する。撮像日が連続する単一の干渉画像を足し合わせる Stacking 法と比較して、規則性なく現れる対流圏伝搬遅延由来のエラーを効率的に低減させ、火山活動に伴う微小なシグナルの抽出が期待される。本解析では干渉性を示すコヒーレンスが閾値（PALSAR-2: 0.1, Sentinel-1: 0.05）を下回った点は信頼性の低い点としてマスクした。注目した火山において顕著な干渉性劣化が認められたデータは時系列解析から除いた。今回の解析では時間領域における平滑化の処理を適用していない。

本解析では、2014 年から 2019 年に撮像された ALOS-2/PALSAR-2 (L-band) のデータに MTI 法を適用し、蔵王山における地殻変動の時系列変化の抽出を試みた。蔵王山における主な活動としては、2013 年から 2015 年にかけて散発的に火山性地震の回数の増加が報告されたが、以降は熱活動異常など顕著な火山活動は報告されていない。

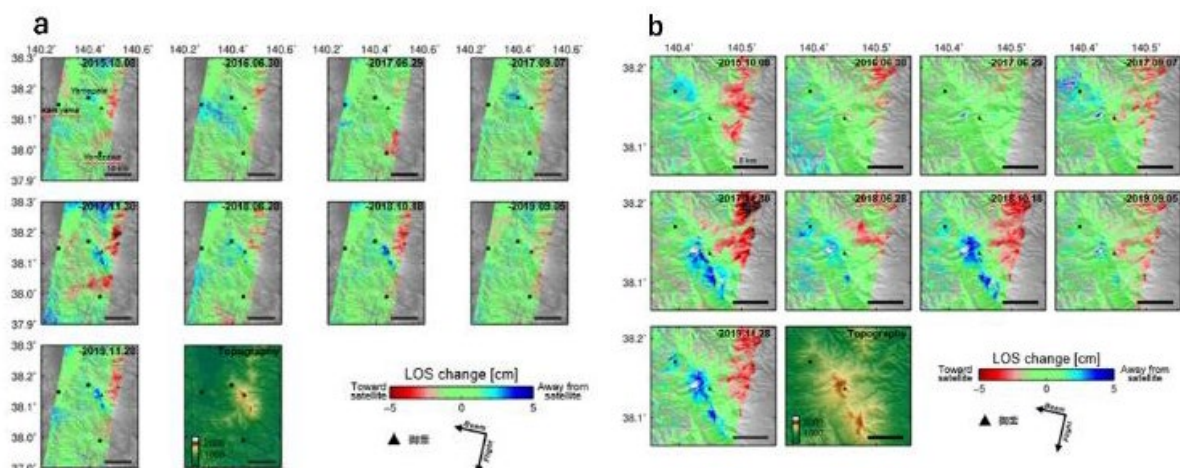


図 1-40 蔵王山周辺における PALSAR-2 データ（パス 18，下降軌道右向観測）による衛星視線距離変化の時系列。基準日は 2015 年 7 月 30 日。(a) 蔵王山全体。(b) 御釜周辺拡大図。正の値は衛星視線距離の伸長を示す。

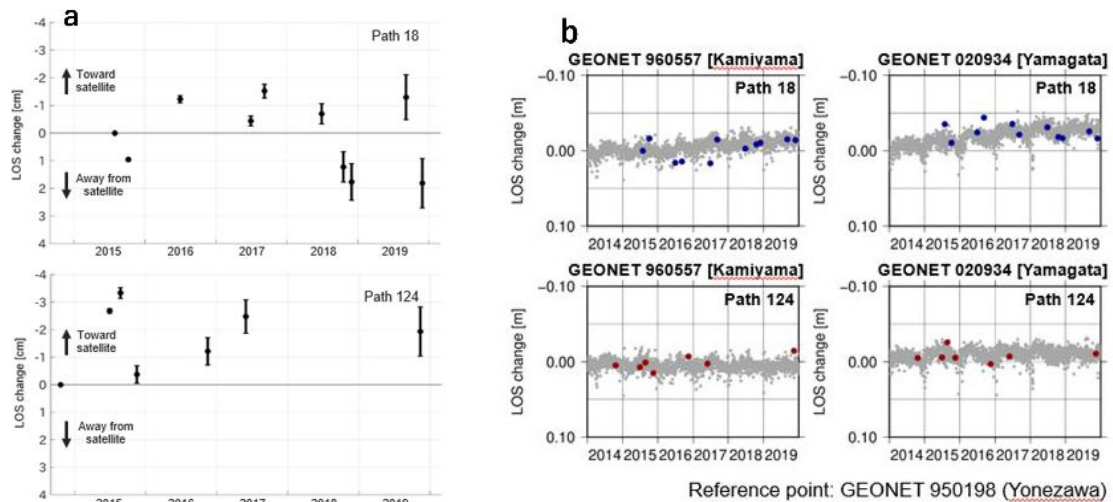


図 1-41 御釜における衛星視線距離変化の時系列と GNSS 観測との比較。(a) PALSAR-2 データのパス 18 (上段) とパス 124 (下段) による御釜における視線距離変化。縦軸上向きを視線距離変化の短縮とした。(b) GEONET 950198 (米沢) を基準とした GEONET 020934 (上山) と GEONET960557 (山形) における視線距離変化の時系列。灰色で GNSS の結果を、色付点で SAR による結果を示した。

PALSAR-2 データに MTI 法を適用した結果を図 1-40 に示す。蔵王山周辺に展開されている GEONET の F3 解と SAR 時系列解析の結果を比較すると、SAR 時系列解析の結果はおおむね GNSS による観測の傾向と整合しており、GNSS の測定精度の範囲に収まっているように見える (図 1-41)。しかし、時折大きなスラントレンジ変化が見られるが、これらは衛星 SAR による観測特有のノイズと推測される。そのノイズレベルを超えるような、明瞭な地殻変動シグナルは検出されなかった。

今回の解析で使用した PALSAR-2 データは非積雪期に撮像されたデータのみを使用し、MTI 法に適用したすべての画像ペアで干渉性が保たれていることを確認している。しかし、冬季の蔵王山は積雪に覆われ、散乱特性の変化に伴う干渉性の劣化が顕著となり、衛星 SAR による地殻変動の抽出を困難にさせる。また、蔵王山における PALSAR-2 の観測間隔は大きく、L-band SAR であっても非積雪期と積雪期に撮像された画像ペアで干渉性劣化を回避することは困難である。このため、MTI 法に用いることが可能なデータは限定され、MTI 法による大気遅延ノイズの低減効果が小さかったと考えられる。この問題に関する改善は、現時点では困難だが、2022 年度に打ち上げが計画されているだいち 4 号に搭載されている PALSAR-3 では、より高頻度な観測が可能となる設計となっており、短期間の干渉ペアであれば、積雪期においても SAR 干渉法による地殻変動検出が可能になるかもしれない。今後、本課題においては、PALSAR-3 データも利用する予定であり、その利用に向けて、積雪期における PALSAR-3 データを用いた SAR 干渉法の適用性能に関する検証を進める必要がある。

ii) 吾妻山

吾妻山の地殻変動を調査することを目的として、MTI 法によるだいち 2 号の PALSAR-2 (L-band) と Sentinel-1 (C-band) データの解析を行った。吾妻山においては、2014 年から 2015 年と 2018 年から 2019 年に火山性地震の増加や圧力源の増圧に伴う隆起といった短期的な火山活動の高まりが報告されている。

PALSAR-2 データの解析においては、2014 年から 2020 年に撮像された 28 枚の画像から 167 枚の SAR 干渉画像を作成し（画像範囲を図 1-42 に示す）、衛星視線距離変化の時系列を推定した。L-band SAR は植生の盛衰に伴う散乱特性の変化による干渉例劣化の影響を受けにくいことが知られているが、非積雪期に撮像されたデータと積雪期に撮像されたデータから得られた結果には、吾妻山周辺に顕著な干渉性劣化が生じる場合があり、そのような SAR 干渉画像は時系列解析から除外した。

図 1-43(a) および (b) は、パス 124（北行軌道、右方向視）の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を示す。吾妻山の大穴火口周辺に注目すると、2014 年 9 月から 2015 年 8 月にかけてスラントレンジの短縮が見られ、その最大変化量は 6cm であった。その後、2016 年 11 月にかけてスラントレンジ変化量は増加し、おおむね観測開始を始めた 2014 年 9 月の水準にまで戻った。2017 年にかけて明瞭なスラントレンジ変化は見られない。また、2018 年にスラントレンジ短縮変化が再度見られるようになり、2019 年 5 月に短縮量が最大となった。2017 年末からの累積変化量は 8cm と求まった。2020 年にかけてスラントレンジ伸長が進行し、2020 年末の段階においても同様の傾向が続いている。

一方、パス 18（南行軌道、右方向視）の観測開始日は 2015 年 7 月であり、パス 124 の時系列で認められた 2014 年から 2015 年における地殻変動が進行している期間にあたる。スラントレンジ変化の空間的特徴は異なって見えるものの、視線距離変化の時間変化の傾向はおおむね一致している（図 1-43(c)、(d)）。パス 18 の衛星視線距離変化の時間変化もパス 124 と同様の傾向を示しているが、2015 年と 2017 年の視線距離の変化量は 2cm 程度の差が認められる。これは大穴火口周辺が全体として東向き傾斜面に位置しているのに対して、東向き観測のパス 124 と西向き観測

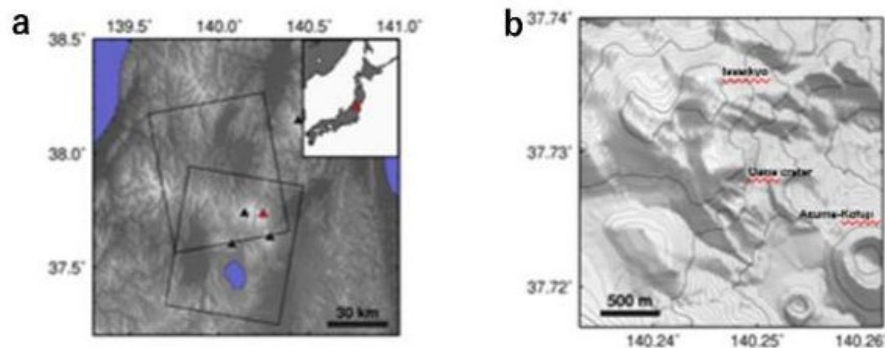


図 1-42 吾妻山を対象とした PALSAR-2 データと解析領域。(a) PALSAR-2 撮像領域。(b) 大穴火口周辺図。

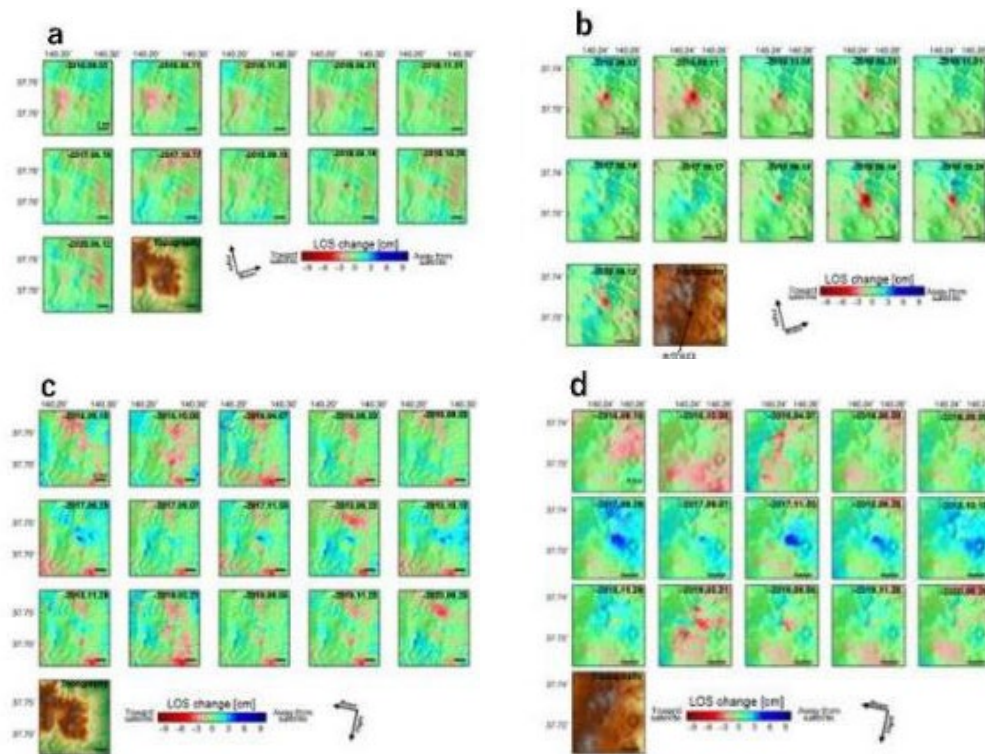


図 1-43 吾妻山周辺における PALSAR-2 データの衛星視線距離変化の時系列。(a) PALSAR-2 パス 124 (北行軌道、右方向視) 吾妻山全体図と (b) 大穴火口周辺拡大図。(c) PALSAR-2 パス 18 (南行軌道、右方向視) 吾妻山全体図と (d) 大穴火口周辺拡大図。衛星視線距離の短縮を負の値とした。

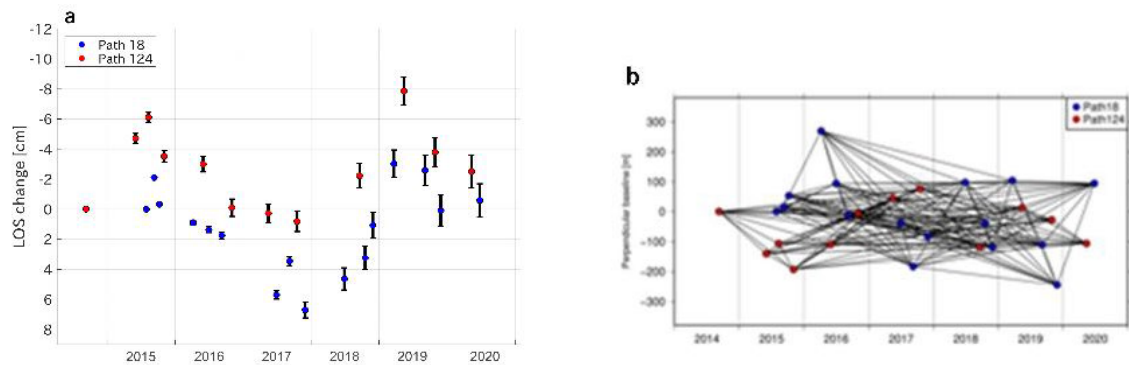


図 1-44 吾妻山周辺における PALSAR-2 データの衛星視線距離変化の時系列。(a) 大穴火口における衛星視線距離変化。衛星視線距離の短縮を負の値とした。縦軸上向きに衛星視線距離の短縮をとった。(b) 使用した PALSAR-2 データの垂直基線長分布。黒線は時系列解析で使用了画像ペアの組み合わせを示した。

のパス 18 で観測幾何が異なることが要因であると考えられる。いずれの観測パスにおいても視線距離変化の極性が一致しているため、検出された視線距離変化は上下変位成分が卓越した地殻変動と解釈することができる。

Sentinel-1 データの解析においては、2018 年から 2020 年に撮像された 106 枚の画像から 255 枚の干渉画像を作成し、スラントレンジ変化時系列を求めた。前述の解析で利用した吾妻山の PALSAR-2 データの観測は年に 1～3 回であり、7 年間(2014 年～2020 年)の観測期間における長期的な時間変化を捉えるためには有効であるが、時間的に詳細な変化を捉えるのは困難である。一方、Sentinel 衛星は日本域においては、おおむね 12 日～24 日周期で観測が行われており、PALSAR-2 と比較して時間的に詳細な変化が捉えられる可能性がある。ただし、Sentinel-1 衛星が採用している C-band のマイクロ波による観測は散乱特性の変化に敏感であり、特に冬の積雪においては、散乱特性の変化により干渉性が著しく低下するので、各年の非積雪期の 4 月から 11 月に限定して、各年のデータ群に SAR 時系列解析を適用した。その他にも、何らかの原因により干渉性が著しく低い SAR 干渉解析結果は、SAR 時系列解析には用いなかった。

大穴火口周辺において得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-45 に示す。北行軌道、および、南行軌道のデータから得られた結果は、おおむね整合したスラントレンジ変化を示している。2018 年 5 月から 11 月のおよそ 7 か月間で 3 cm のスラントレンジの短縮、2019 年 5 月から 11 月の 7 か月で 2-3cm のスラントレンジの伸長、2020 年 4 月から 11 月のおよそ 8 か月で 1 cm 程度のスラントレンジの伸長が見られ、これらは PALSAR-2 の解析結果とおおよそ同様の傾向である。2018 年におけるスラントレンジ変化の累積量の空間分布を図 1-46 に示す。PALSAR-2 の結果と同様に大穴火口を中心に東西・南北方向ともにおおむね 1km の範囲でスラントレンジ短縮領域が見られた。2019 年と 2020 年においても同様の領域でスラントレンジ変化が見られた。

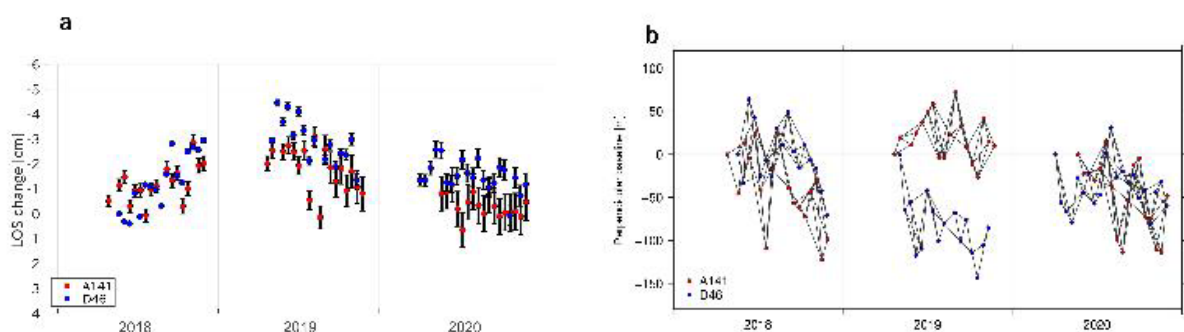


図 1-45 吾妻山周辺における Sentinel-1 データの衛星視線距離変化の時系列。(a) 大穴火口における衛星視線距離変化。衛星視線距離の短縮を正の値とした。(b) 使用した Sentinel-1 データの垂直基線長分布。詳細は図 1-44 と同様である。

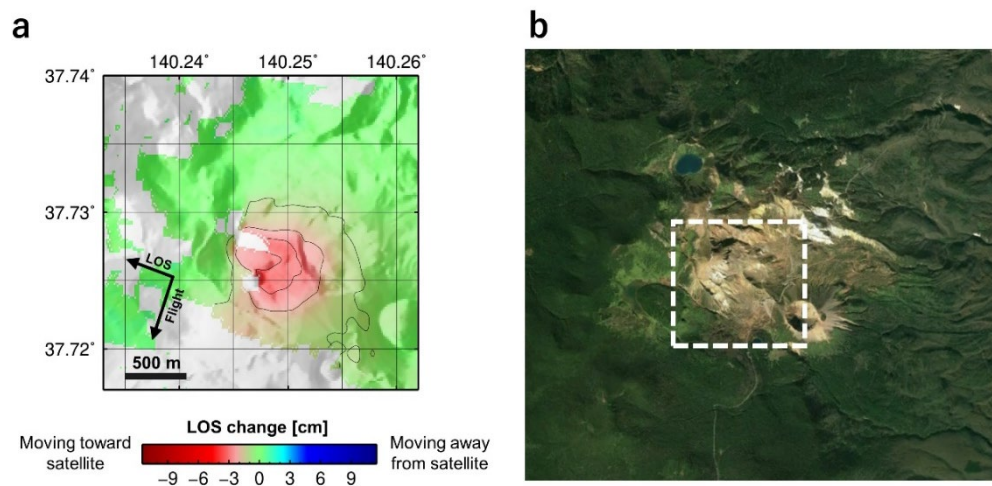


図 1-46 Sentinel-1 データによる衛星視線距離変化の 2018 年における累積変化。(a) 大穴火口における衛星視線距離の 2018 年における累積変化。衛星視線距離の短縮を負の値とした。コンターは 1cm 間隔で示した。(b) 吾妻山周辺の衛星光学画像。白点線枠で左図の表示範囲を示した。

得られたスラントレンジ変化分布と衛星光学画像と比較すると、植生が濃い領域では、干渉性劣化によりマスクされているのに対して、植生に乏しい領域ではスラントレンジ変化が得られている。これは、植生に乏しい領域では、一定の干渉性が保たれていたことを示している。しかし、実際には、時間基線長が 12 日の画像ペアを用いても火口付近で干渉性が低下した例が散見され、そのような画像ペアの解析結果は、SAR 時系列解析には用いていない。このことは、非積雪期における植生が乏しい領域に限定しても、撮像時における地表面の散乱特性の条件次第では干渉性が低下する場合があることを示している。このことは、今後の Sentinel-1 の解析において、考慮すべきことである。

L-band マイクロ波によって観測される PALSAR-2 データは長い時間基線長においても干渉性が持続するため、冬季の積雪期をまたぐデータペアに SAR 干渉法を適用することが可能であり、長期にわたる地殻変動時系列を求めることができる。しかし、PALSAR-2 の観測頻度は低いため、SAR 時系列解析におけるノイズ低減効果が小さいという問題がある。一方、C-band マイクロ波で観測される Sentinel-1 の観測機会が多い反面、植生や積雪による干渉性劣化が著しく、長期にわたる連続したデータの時系列化は難しい。両者のデータを用いることで、データの時系列化の測定精度の向上が期待できる。その解析手法については、今後の検討課題である。

iii) 2000 年有珠山噴火にともなう地形変化

有珠山は珪長質なマグマを噴出し、溶岩ドームを生成する火山である。有珠山の最も新しい噴火である 2000 年噴火の際には山頂西側に溶岩ドームを形成した。形成された溶岩ドームの形状を詳細に明らかにすることは、マグマの物性や溶岩ドー

ムの生成メカニズムを理解するのに重要である。本研究では、2000 年噴火後に作成された DEM を用いて 2000 年以前に JERS-1 衛星によって撮像された SAR 画像を干渉解析して、2000 年噴火にともなう地形変化を推定する試みを行った。

2000 年噴火に先立ち観測された SAR 画像を 2000 年噴火後の DEM を用いて干渉解析すると、2000 年噴火による地形変化に起因するみかけの位相変化が生じる。その位相変化は干渉解析に使った 2 枚の衛星を撮像した衛星の軌道間距離と DEM の誤差にそれぞれ比例する。本研究では JERS-1 衛星による SAR 画像から 19 ペアの干渉画像を作成したが、2000 年噴火により溶岩ドームが生成した地域は、各ペアの軌道間距離とみかけの位相変化に強い相関が見られる（図 1-47）。

図 1-48 に求めた地形変化の分布を示す。2000 年噴火の際に生成された溶岩ドーム周辺では最大 60 m ほどの地形変化が推定された。推定された地形変化は、実際に発生した地形変化と概ね調和的であるが、有珠山においては 2000 年噴火前および噴火後の DEM がそれぞれ存在するため、これらの DEM と本研究で求められた地形変化を比較して、本研究の有効性を評価することができる。このことは今後の課題である。また、本研究は、溶岩ドームを生成する噴火が発生した場合に、噴火後の SAR 画像を解析することによって噴火による地形変化を求めることができることを示している。今後の、噴火発生時における解析手法の一つとして用いることができるかもしれない。

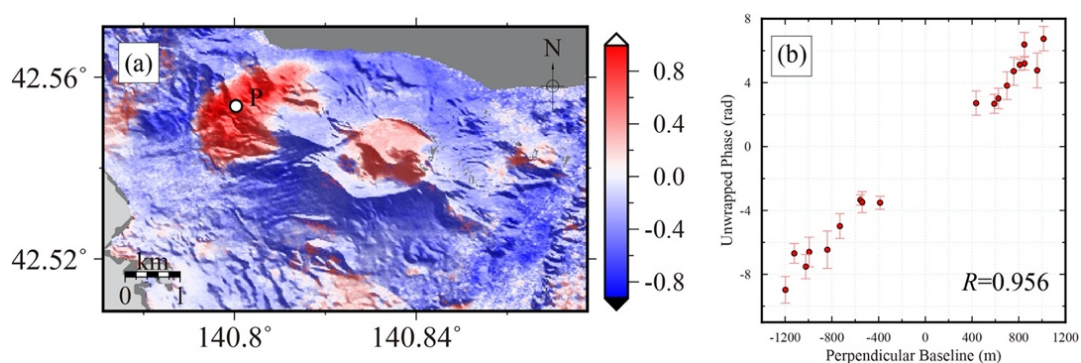


図 1-47 (a) 干渉画像に用いられた 2 画像の軌道間距離とみかけの位相差との相関係数。相関係数が高いほど、みかけの位相差が地形変化によって生じたことを示している。(b) 地点 P（図 1-47(a)）における軌道間距離とみかけの位相差の関係。

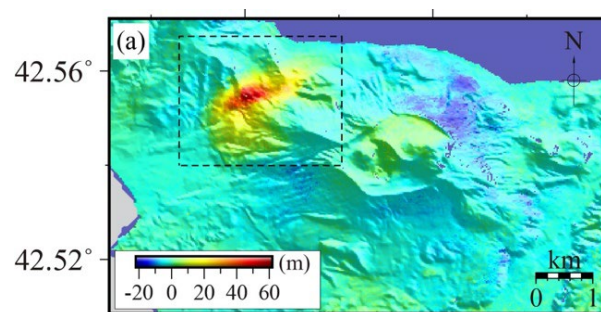


図 1-48 SAR 干渉画像より推定された 2000 年噴火にともなう地形変化。

iv) アンブリム火山 2018 年噴火に先立つ地殻変動

アンブリム火山はバヌアツ共和国に位置する火山である。本研究では 2018 年 12 月の割れ目噴火に先立つ地殻変動を、Sentinel-1 の SAR データを用いて解析した。アンブリム火山は植生が濃い火山であり、Sentinel-1 では山頂火口から 10 km 程度の地域で干渉が得られた (図 1-49(a))。干渉が得られなかった領域は、濃い植生に覆われている領域とほぼ一致する。また、SAR 時系列解析を適用し、山頂付近では 2016 年後半から数 cm/yr の速度で沈降し、周辺部では数 cm/yr の速度で隆起が求まった (図 1-49(b))。それが、噴火に数ヶ月先立ち変動が反転し、噴火直前には山頂火口ではゆっくりとした隆起が求まった (図 1-50)。観測された変動場およびその時間変化を説明するような物理モデルを構築するのが今後の課題である。

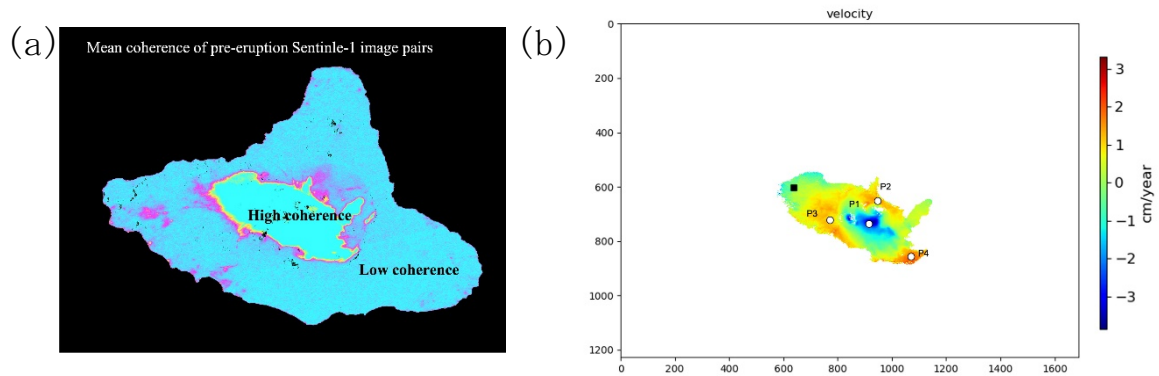


図 1-49 アンブリム火山に関する Sentinel-1 の解析結果。(a) コヒーレンスの平均。(b) 2016 年から 2018 年までの平均速度。

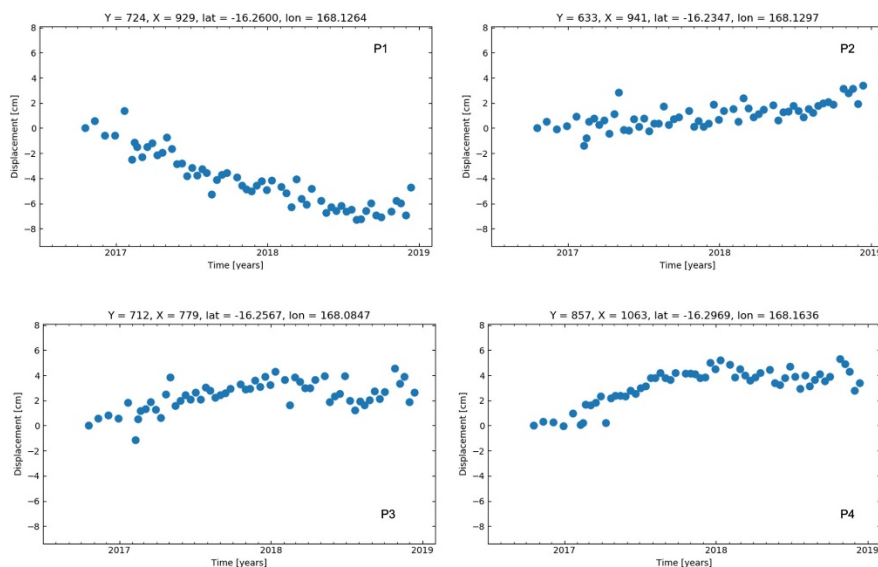


図 1-50 P1、P2、P3、P4(図 1-49) におけるスラントレンジ変化時系列。

c) 国際会議参加報告 (IGARSS2020)

2020 年 7 月に米国ハワイで開催予定だった IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2020 は、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の世界的拡大の影響により、2020 年 9 月下旬にオンラインで実施された。本課題に関しては、SAR 衛星によって観測された有珠山および浅間山の局所的な沈降についての成果に関して、WE1.R2: Monitoring and Damage Assessment of Natural Disasters III のセッションにおいて発表した。また、世界における衛星 SAR、SAR 干渉解析関連、火山観測のためのリモートセンシング技術に関する情報収集を行った。

1 日目と 2 日目に SAR Interferometry のセッションで SAR データ利用に関する講演が行われた。2020 年以降は SAR 衛星の打上げが相次いで予定されていることから、将来の衛星データのビックデータ時代を見据えた講演がされた。潮流は畳み込みニューラルネットワークを始めとする機械学習や深層学習による変化検出や地表面特徴の自動分類のための適用である。遠隔地における地表の特徴を自動で分類し、災害が発生した前後などで比較をすることにより、地表の特徴の変化の自動抽出に応用することを目指しているようである。これは衛星 SAR の画像データへの適用に限らず光学画像や近赤外画像にも適用された例が散見された。ALOS-4 衛星の開発状況に関する講演もあり、最新の情報では 2021 年度の打上げを予定しているようである。世界では ESA が打上、運用している C-band SAR 衛星のひとつである Sentinel-1 衛星のデータを用いた研究例が潮流であるが、2022 年打ち上げ予定の NISAR の利用・活用性を探るために ALOS-2 衛星の解析例が取り上げられる講演もあった。特に植生が豊富な領域や雪氷観測には L-band SAR データが有効であることが知られているので、その特徴を活かした研究テーマの模索をしているものと考えられる。

SAR 干渉法は地表変動を観測する成熟した手法として用いられるようになっており、大量の SAR データを用いた大規模解析と自動化に関する講演が目立った。注目すべきは COMET が開発している SAR 自動解析による地表変動データベースである²⁵⁾。SAR 干渉解析から時系列解析までを自動化し、プレート運動や地震・火山活動に伴う地殻変動をデータベース化するものである。このプロジェクトによりトルコのアナトリア断層全域における東西、上下方向における準リアルタイムの変位速度とひずみ速度の推定を実現している。プロジェクト遂行のために 46PB の記憶容量と 12000 コアのクラウドシステムによって解析が行われている。また SAR 干渉法による観測においても機械学習が適用されており、真の地表変動成分と対流圏遅延をはじめとするエラーの分離に用いられている。従来のエラーを分離するための外部データ (例えば対流圏遅延成分を分離するための気象モデル) を必要とせず、学習器さえ用意してしまえば新たなデータに対して適用できることから即時解析のためにも解析の迅速性が期待されている。機械学習・深層学習を用いた位相アンラッピングを行う試みに関する報告例もあった。干渉性が高い領域でも変位の勾配が大

きい領域では従来の手法ではエラーが現れる事例が多いが、機械学習によるパターン認識によって位相を連続的につないでいく手法も提案されていた。

3 日目の Monitoring and Damage Assessment of Natural Disasters III では火山観測のためのリモートセンシング技術に関する講演がテーマであったが、ほとんどが衛星 SAR データによる地殻変動観測に関する講演であった。主に 2015 年 Calbuco 火山、2018 年 Kilauea 火山、ガラパゴス火山を対象としたものであり、日本の火山を対象とした観測例も報告されていた。また、2018 年キラウエア火山噴火に関連して、光学画像と SAR 画像に機械学習を適用して、溶岩流流下に伴う住居の被害状況の自動検出にも用いられていた。これは火山噴火に伴う被害状況の即時把握への貢献が期待される。気象衛星データによる解析によって火山噴火に伴う火山灰の飛散を予測し、航空機の航行可否の予測、判断に用いるためのシステム開発も行われているようである。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計に関するこれまでの開発により、地上設置方式および車載方式による繰り返し観測で、安定的に干渉を得ることに成功しており、干渉画像に重畳する干渉性のノイズを低減することができれば、その手法を組み入れて、運用機的设计仕様とする。これまで、SAR 処理ソフトウェアの改良、高感度アンテナの作製により、ノイズを低減することに成功している。本年度には、さらに、DDS 方式の信号発生器を組み込むことによるノイズ低減を試み、その有効性を確認した。来年度には、DDS 方式の信号発生器を本体に組み込み、運用機を完成させる。一方、途中から開発項目に追加した Manborne SAR 方式については、アンテナ姿勢等のふらつきの影響と考えられる SAR 処理の精度不十分が課題となっており、今後、ソフトウェア、ハードウェアの両方についての改良を進める予定である。

霧島山における計測実験においては、観測間が 1 年のデータペアでも地殻変動検出に十分な干渉性が得られることを確認し、可搬型レーダー干渉計による長期的な地殻変動検出への利用に関する可能性を示すことができた。ただし、大きな外来波が重畳する筑波山テストサイトにおいては、観測間が 1 年のデータペアでは十分な干渉性を得ることができなかった。このことから、観測場所の選定においては、観測環境を適切に把握することが重要であることが分かった。

さらに、今後の実用フェーズへの移行に向け、効率的な観測計画や得られた結果の解釈に関する方法を検討する必要がある。特に、衛星 SAR による地殻変動情報との比較が有用と考えられるが、これらは直接的に比較できないので、今年度には地殻変動シミュレーションを用いた比較手法についての検討を進めた。その有用性は確認できたが、今後、さらなる改良を進める予定である。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

本課題においては、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、

それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 2 年度においては、前年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、6 火山（霧島山、桜島、草津白根山、有珠山、伊豆大島、三宅島）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。PALSAR-2 データについては、新たな観測データが取得された場合には、その都度解析を行い、解析結果を追加していく予定である。一方、解析手法については、まだ改良の余地は残されていると考えられ、今後もその改良についての検討を進め、有効な手法を開発された場合には、過去のデータも含めて再解析を行い、データベースを更新する予定である。また、衛星 SAR から得られる地殻変動情報を用いた事例研究も進めており、成果が得られている。今後も継続して進めていく予定である。

(d) 引用文献

- 1) Schmidt, D. A., R. Bürgmann, Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set, *J. Geophys. Res.*, 108, 1-13, <https://doi.org/10.1029/2002JB002267>, 2003.
- 2) Hickey, J., J. Gottsmann, and R. del Potro, The large-scale surface uplift in the Altiplano-Puna region of Bolivia: A parametric study of source characteristics and crustal rheology using finite element analysis, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 540-555, doi:10.1002/ggge.20057, 2013.
- 3) Narita, S., Ozawa, T., Aoki, Y. et al., Precursory ground deformation of the 2018 phreatic eruption on Iwo-Yama volcano, revealed by four-dimensional joint analysis of airborne and spaceborne InSAR. *Earth Planets Space* 72, 145, doi: 10.1186/s40623-020-01280-5, 2020.
- 4) Shimada, M., Verification processor for SAR calibration and interferometry, *Adv. Space Res.*, 23 (8), 1477-1486, 1999.
- 5) 飛田幹男, 藤原智, 村上亮, 中川弘之, Paul A. Rosen, 干渉 SAR のための高精度画像マッチング, *測地学会誌*, 45, 315-326, 1999.
- 6) 小澤拓・清水慎吾: 数値気象モデルを用いた SAR 干渉解析における大気遅延誤差の軽減, *測地学会誌*, 56, 137-147, 2010.
- 7) Ozawa, T., Y. Aoki, S. Okuyama, X. Wang, Y. Miyagi, and A. Nohmi, Database of Crustal Deformation Observed by SAR: Improving Atmospheric Delay Mitigation for Satellite SAR Interferometry and Developing L-Band Multi-Type Portable SAR, *J. Disast. Res.*, 14, 713-727, doi: 10.20965/jdr.2019.p0713, 2019.
- 8) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113pp., doi: 10.5065/D68S4MVH, 2008.
- 9) Brcic, R., A. Parizzi, M. Eineder, R. Bamler, and F. Meyer, Estimation and

- compensation of ionospheric delay for SAR interferometry, in Proc. IEEE IGARSS, 2908-2911, 2010.
- 10) Rosen, P., S. Hensley, and C. Chen, Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band interferometric SAR data, in Proc. IEEE Radar Conf., 1459-1463, 2010.
 - 11) Gomba, G., A. Parizzi, F. De Zan, and M. Eineder, Toward operational compensation of Ionospheric effects in SAR Interferograms: The split-spectrum method, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 54, 1446-1461, 10.1109/TGRS.2015.2481079, 2016.
 - 12) Goldstein, R. M. and C. Werner, Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophys. Res. Lett., 25, 4035-4038, 1998.
 - 13) Chen, C. W. and H. A. Zebker, Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, J. Opt. Soc. Am. A, 17, 401-414, 2000.
 - 14) Chen, C. W. and H. A. Zebker, Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization, J. Opt. Soc. Am. A, 18, 338-351, 2001.
 - 15) Chen, C. W. and H. A. Zebker, Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 40, 1709-1719, 2002.
 - 16) Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 40:2375-2383, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>, 2002.
 - 17) Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 38, 2202-2212, 2000.
 - 18) Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998), New, improved version of generic mapping tools released, EOS Trans. AGU 79(47), 579.
 - 19) Miyagi, Y., T. Ozawa, T. Kozono, and M. Shimada, Long-term lava extrusion after the 2011 Shinmoe-dake eruption detected by DInSAR observations, Geophys. Res. Lett., 41, 5855-5860, doi:10.1002/2014GL060829, 2014.
 - 20) Wang, X., Y. Aoki, and J. Chen, Surface deformation of Asama volcano, Japan, detected by time series InSAR combining persistent and distributed scatterers, 2014-2018, Earth Planets Space, 71:121, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1104-9>, 2019.
 - 21) Himematsu, Y., T. Ozawa, and Y. Aoki, Coeruptive and posteruptive crustal deformation associated with the 2018 Kusatsu-Shirane phreatic eruption based on PALSAR-2 time series analysis, Earth, Planets Space, 72:116,

<https://doi.org/10.1186/s40623-020-01247-6>, 2020.

- 22) Furuya, M., Quasi-static thermoelastic deformation in an elastic half-space: theory and application to InSAR observations at Izu-Oshima volcano, Japan, *Geophys. J. Int.*, 161, 230-242, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02610.2005>.
- 23) 宮城洋介, 小澤拓, 河野裕希, DInSAR 及び GPS によって検出された霧島山・新燃岳 2011 年噴火に伴う地殻変動, *火山*, 58, 341-351, 2013.
- 24) Ozawa, T. and H. Ueda, Advanced InSAR time-series analysis using interferograms of multiple-orbit tracks: A case study on Miyake-jima, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2011JB008489, 2011.
- 25) Hooper, A., T. Wright, J. Weiss, C. Rollins, M. Gaddes, M. Lazecky, Y. Morishita, R. Walters, H. Wang, E. Hussain, Exploiting InSAR on a large scale for tectonics and volcanic monitoring, *IGARSS 2020*, WE1.R2.11, 2020.

(e) 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) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式、車載（台車）方式、手動方式）を選択して観測を実施し、火山周辺の地表変動を効率的に検出することが可能なレーダーセンサーの開発を進めている。これまでに実施した開発や計測実験の繰り返しに基づく改良により、現時点で、車載（台車）方式やレールの再設置によって得られた観測データへの SAR 干渉法の適用に成功している。しかし、SAR 画像に重畳するノイズが顕著に表れる場合があり、その低減が課題の一つとなっている。そこで、令和 2 年度には、位相雑音が小さいダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器を作製し、その有用性を確認した。令和 3 年度においては、DDS 方式の信号発生器を本体に組み込み、可搬型レーダー干渉計の運用機を完成させる。

次に、手動方式の開発を進める。手動方式においては、そのプロトタイプを作製し、SAR 干渉法の適用に成功しているが、アンテナの姿勢のふらつきによると考えられる SAR 処理精度劣化の改善が大きな課題となっている。そこで、GNSS/INS から得られるアンテナの姿勢情報に基づいて、アンテナのふらつきによる送・受信アンテナのターゲットに対する距離変化を補正する機能を、SAR 処理ソフトウェアに組み込む。

霧島山において、令和元年度と令和 2 年度に可搬型レーダー干渉計による観測を実施し、それらの観測データへの SAR 干渉法の適用に成功している。令和 3 年度にも再観測を行い、干渉性の長期持続性を調査するとともに、SAR 干渉法による地表変動の検出を試みる。

これまでに実施した計測実験の経験から、可搬型レーダー干渉計による観測には、その観測可能場所の調査に時間を要するという問題が明らかとなっており、火山活動活発化時等における迅速な観測の実施の妨げになることが予想される。その解決のため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めていく予定である。令和 3 年度においては、十勝岳に関する調査を行う予定である。

(b) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR から得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順（標準的解析手法と呼ぶ）に基づいた自動解析システムを構築し、その解析結果を JVDN システムに提供する。令和 3 年度においては、5 火山（十勝岳、蔵王山、吾妻山、雲仙岳、口永良部島を予定）の自動解析システムを構築するとともに、過去の観測データについても解析を行う。また、明瞭な地殻変動が検出された火山に関して、衛星 SAR を用いた地殻変動メカニズム研究を行う。

PIXEL で共有している衛星 SAR データを、本業務で利用するためのサーバーを継続して運用する。さらに、オンラインで開催予定の IAG2021 に参加し、海外における最新の SAR 解析技術を調査する。

2. 2. 2 火山表面現象遠隔観測技術の開発

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目 先進的な火山観測技術の開発
「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」
火山表面現象遠隔観測技術の開発

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	主任研究員	實渕 哲也
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	主任研究員	三輪 学央
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	契約研究員	長井 雅史

(c) 業務の目的

火山活動が活発化した場合には、確度の高い噴火推移予測につなげるのに加え、火山災害への発展を推定するために、火口周辺における表面現象の観測は重要である。しかしながら、火山が噴火した場合や活動が活発化した場合には、火口周辺へ近づくのは大変危険であるため、火口周辺の観測は一般的に困難である。そのような問題を解決するため、遠隔地から火口周辺を観測し、噴火推移の予測に必要な情報を抽出することが可能なリモートセンシング技術の活用に期待が寄せられている。そこで、本業務では、分光技術を用いて熱・ガス等の分布を計測する技術の開発を実施する。

火山の地熱温度分布、噴煙、火山ガス、火山灰、溶岩流、火砕流等の表面現象の面的観測情報は、火山の活動度や火山災害の状況把握に資する重要な情報となる。これらの観測を実現するために、航空機や地表からの遠隔観測技術（リモートセンシング）による機動的な観測が活用されている。本事業では、これらの観測の現状の技術的課題を克服した遠隔観測技術を開発し、火山の表面現象の定量化・噴火ポテンシャル（切迫性）の判定の高精度化、噴火事象系統樹の分岐判断等に資する新たな観測装置を開発することを目的とする。

本委託業務では、現状の航空機搭載型画像分光装置と赤外カメラの技術的課題を改善した、より実用的な装置の実現を目的とし、両装置の利点を合わせ持つ、地上での観測とヘリコプター等搭載による上空からの斜め観測に両用できる小型温度ガス可視化カメラ（SPIC）を開発する。開発する小型温度ガス可視化カメラ（SPIC）は、非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）、冷却型赤外カメラ（SPIC-C）、画像分光前置光学系（ISH）、スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）の一群の装置から構成されるシステムである。各装置は最終的に可搬型の装置の実現を目指し、手持ち、フィールド設置、車載、航空機搭載等の多様な設置、運用形態の実現、および、直下、水平、斜め観測等の多様な観測方向の実現ができる装置とする。

(d) 10 年間の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

今後の開発での改善項目の基礎データ取得の為、非冷却型カメラ広帯域（ $8\sim 14\mu\text{m}$ ）型の狭帯域波長感度特性を検証した。また開発する画像分光用前置光学系（ISH）の候補となる画像分光方式の概念設計（フィルター分光方式）およびスペクトル推定手法の理論的検討（重回帰分析手法）を行った。また、以降の研究開発の基盤となる開発環境整備として、スペクトル・構造推定カメラでアルゴリズム開発に使用するソフト、カメラのコントロールソフトの整備、カメラ開発用較正装置（平面黒体炉、キャビティ黒体炉）の整備、スペクトルデータベースを取得するための分光装置（積分球付紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置）とそれらに供する試料調整用の精密切断装置、攪拌搗潰機の整備を行い以降の開発環境を整えた。

2) 平成 29 年度：

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。SPIC-C の開発として冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。ISH の開発として、主にフィルター分光方式の試験を行った。SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーヘッドの導入、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR（ $8\sim 14\mu\text{m}$ ）領域の VGA カメラセンサーヘッド、冷却型 MWIR（ $3\sim 5\mu\text{m}$ ）領域の VGA カメラセンサーヘッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を有する装置制御ユニット（ハードとソフト）を構築した。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA を検証し、フィルター分光方式のブレッドボードモデルを構築した。SPIC-SS の開発では、CMOS 型 FPA を有するカメラセンサーヘッドと分光フィルターを導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築の開発として、室内外用画像分光データ取得装置を整備した。また昨年度導入した分光装置による岩石スペクトル計測を開始した。具体的には、室内用可視画像分光装置、室外用可視画像分光装置を導入した。また、平成 28 年度に導入した紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置を用い、火成岩のスペクトル計測を開始しスペクトル計測手法の検討及びデータ取得を行った。

3) 平成 30 年度：

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築すると共に、SPIC-C の開発として、冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。また ISH の開発として、画像分光用前置光学系のブレッドボードモデルの構築を行った。さらに SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーヘッドを整備した。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR（ $8\sim 14\mu\text{m}$ ）領域の XGA カメラセンサーヘッド、冷却型 LWIR（ $7.5\sim 9.5\mu\text{m}$ ）領域の VGA カメラセンサーヘッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を構築した。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA と干渉分光方式の組み合わせの試験を行った。SPIC-SS の開発では、平成 29 年度とは異

なる帯域をカバーする FPA を有するカメラセンサーヘッドと分光フィルターを導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測として、スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行った。具体的には、平成 28、29 年度に導入した分光装置を用いて火成岩の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測を行った。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

非冷却型赤外カメラ構築として、スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）及び VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14 μm ）型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14 μm ）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）を一体化したプロトタイプ（SPIC-UC/SS）を完成させた。冷却型赤外カメラの構築として、スペクトル推定カメラ（SPIC-SS）及び MWIR（3～5 μm ）領域と LWIR（7.5～9.5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）を一体化したプロトタイプ（SPIC-C/SS）を完成させた。画像分光用前置光学系として、赤外カメラと一体化した画像分光装置のプロトタイプ（ISH）を完成した。具体的には、平成 30 年度までに試作した SPIC-UC の非冷却型 LWIR（8-14 μm ）領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッド、SPIC-C の MWIR（3～5 μm ）領域と LWIR（7.5～9.5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッド、SPIC-SS の可視カメラセンサーヘッドに、それぞれ専用の耐環境ハウジングを製作し、各カメラのプロトタイプを構築した。また、SPIC-UC と SPIC-SS の各プロトタイプを連動させた SPIC-UC/SS プロトタイプ、および、SPIC-C と SPIC-SS の各プロトタイプを連動させた SPIC-C/SS プロトタイプを製作した。ISH の開発では、各カメラと一体のフィルター分光方式のプロトタイプを完成させるとともに、赤外カメラと一体として機能する干渉分光方式の ISH のプロトタイプを製作した。また、各プロトタイプのデータを想定した、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築として、スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行った。具体的には、平成 28、29 年度に導入した分光装置を用い防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測を行った。

5) 令和 2 年度：

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μm ）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μm ）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化する。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築：MWIR（3～5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR（7.5～9.5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のプロトタイプを改造し小型化する。
- ・ 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ（ISH）を改造し小型化する。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発）：スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）のプロトタイプを改造し小型する。スペクトル推定手法、ストラクチャ

ャ推定手法の検討を行う。

- ・ スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

6) 令和 3 年度：

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μm ）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μm ）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）のフィールドタイプを完成する。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築：MWIR（3~5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR（7.5~9.5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のフィールドタイプを完成する。
- ・ 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置（ISH）のフィールドタイプを完成する。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発）：スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）のフィールドタイプを完成する。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- ・ スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

7) 令和 4 年度：

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μm ）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μm ）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）のフィールドタイプを車載型とする。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築：MWIR（3~5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR（7.5~9.5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のフィールドタイプを車載型とする。
- ・ 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置（ISH）のフィールドタイプを車載型とする。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発）：スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）のフィールドタイプを車載型とする。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- ・ 開発した装置を用いた試験観測を箱根山（大涌谷）等で実施する。
- ・ スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベース試作版の開発を行う。

8) 令和 5 年度：

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μm ）型、XGA 非冷却型カ

メラ広帯域 (8-14 μm) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。

- ・ 冷却型赤外カメラ構築：MWIR(3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- ・ 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH) の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ (ハード・アルゴリズム開発)：スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- ・ スペクトル推定用データベース構築 (スペクトル計測)：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行う。

9) 令和 6 年度：

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μm) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μm) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) の航空機搭載型を完成する。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築：MWIR(3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) の航空機搭載型を完成する。
- ・ 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH) の航空機搭載型を完成する。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ (ハード・アルゴリズム開発)：スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) の航空機搭載型を完成する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- ・ スペクトル推定用データベース構築 (スペクトル計測)：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行う。

10) 令和 7 年度：

- ・ 試験観測：VGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μm) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μm) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC)、MWIR(3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C)、非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH)、スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) の各装置のフィールド型、車載型、航空機搭載型を用いた観測を実施する。他の現業機関への装置の試験的提供 (量産型製作) の検討を行う。
- ・ スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。・ スペクトル推定用データベース構築 (スペクトル計測)：岩石スペクトル計測を行う。スペクトルデータベース完成版を構築する。

(e) 令和 2 年度の業務目的

令和 2 年度は、当初計画通り、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプの小型化のための開発を実施する。また、スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。これらを遂行する為に、以下を実施する。

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化する。MWIR (3~5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のプロトタイプを改造し小型化する。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ (ISH) を改造し小型化する。スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のプロトタイプを改造し小型する。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。

具体的には昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプをフィールドタイプとするために、非冷却型赤外カメラ小型化概念設計および屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラのハードの製作を行う。また冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のプロトタイプをフィールドタイプとするために、小型冷却型赤外カメラ (MWIR 領域) の製作を行う。また画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造として、小型前置光学系のブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の、設計、製作を行う。また、スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のプロトタイプを小型化するための可視カメラ小型化概念設計を行う。また、昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプによる火山試験観測を行い、SPIC-UC のフィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得する。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

具体的には、昨年度までに構築した画像分光装置による岩石コアサンプルの画像分光スペクトルデータの計測手法の開発として、岩石コアスキャン装置の試作を行うとともに試験データを取得する。

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

昨年度までに開発^{1),2)}した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプの小型化として、VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μm) 型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μm) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化した。MWIR (3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のプロトタイプを改造し小型化した。また、非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ (ISH) を改造し小型化した。スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のプロトタイプを改造による小型を検討した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。

具体的には昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプをフィールドタイプとするために、非冷却型赤外カメラ小型化概念設計および屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラのハードの製作を行った。また冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のプロトタイプをフィールドタイプとするために、小型冷却型赤外カメラ (MWIR 領域) の製作を行った。また画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造として、小型前置光学系のブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の、設計、製作を行った。また、スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のプロトタイプを小型化するための可視カメラ小型化概念設計を行った。また、昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプによる火山試験観測を行い、SPIC-UC のフィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得した。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行った。

具体的には、昨年度までに構築した画像分光装置による岩石コアサンプルの画像分光スペクトルデータの計測手法の開発として、岩石コアスキャン装置の試作を行うとともに試験データを取得した。

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 2 年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプの小型化のための開発として、a) 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発、b) 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発、c) SPIC プロトタイプによる火山試験観測、d) 可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業、e) 小型前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の設計製作を実施した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の

検討として、f) 多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法の開発を実施した。本年度の成果の記述の参考として、以下の表 2-1～2-9 及び図 2-1、2-2 に、昨年度までに開発した SPIC の各プロトタイプの主な諸元を示す。

表 2-1 SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの主な諸元 (カメラ 1、2)

センサーヘッド	カメラ 1	カメラ 2
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター (感度波長域)	無し (8000～14000nm)	LP-9000 (9000～14000nm)
フレームレート	30fps (同期可能)	
A/D	14bit	
レンズ	f=35mm/F1.1	
NETD (@25℃)	0.08K	0.1K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	214×157×209mm、 5kgf	
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)	

表 2-2 SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの主な諸元 (カメラ 3、4)

センサーヘッド	カメラ 3	カメラ 4
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター (感度波長域)	BBP-7950-9300 (7950～9300nm)	BP-12285010000 (11785～12785nm)
フレームレート	30fps (同期可能)	
A/D	14bit	
レンズ	f=35mm/F1.1	
NETD (@25℃)	0.32K	0.52K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	214×157×209mm、 5kgf	
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)	

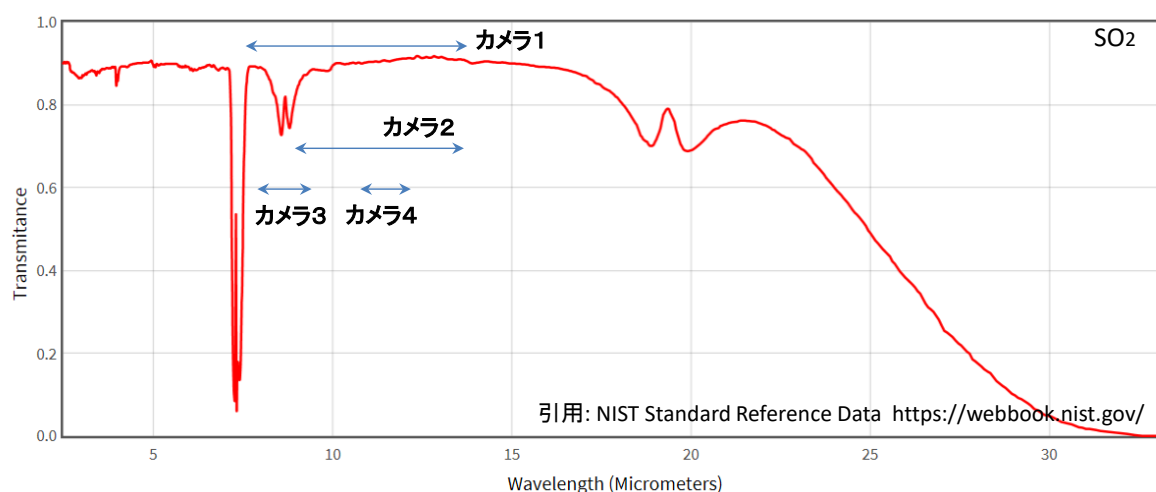


図 2-1 SO₂ ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC (4VGA) の各カメラの感度波長域との関係

表 2-3 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプ of 主な諸元 (カメラ 3 (XGA 型))

センサーヘッド	カメラ 3 (XGA 型)
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、1024×768 素子
フィルター (感度波長域)	BBP-7950-9300 (7950～9300nm)
フレームレート	5～60fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=50mm/F1.2
画角、分解能	FOV 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV 0.348mrad
NETD (@25℃)	0.3K (@60fps)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	243×256×238mm、8kgf
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)

表 2-4 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプ of 主な諸元 (カメラ 1 (XGA 型))

センサーヘッド	カメラ 1 (XGA 型)
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、1024×768 素子
フィルター (感度波長域)	フィルター無し (8000～14000nm)
フレームレート	5～60fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=50mm/F1.2
画角、分解能	FOV 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV 0.348mrad
NETD (@25℃)	0.3K (@60fps)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	243×256×238mm、8kgf
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)

表 2-5 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプ of 主な諸元 (カメラ 2、4 (VGA 型))

センサーヘッド	カメラ 2	カメラ 4
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター (感度波長域)	LP-9000 (9000～14000nm)	BP-12285-10000 (11785～12785nm)
フレームレート	30fps (同期可能)	
A/D	14bit	
レンズ	f=35mm/F1.1	
NETD (@25℃)	0.1K	0.52K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	243×256×238mm、8kgf	
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)	

表 2-6 SPIC-C プロトタイプ of 冷却型カメラセンサーヘッド (カメラ 3) の主な諸元

センサーヘッド	カメラ 3 (SPIC-C 冷却型 LWIR カメラ)
センサータイプ	冷却型 T2SL、640×512 素子
冷却型	スターリングクーラー (センサー動作温度 77K)
センサー感度波長域	7700～9300nm
フィルター (感度波長域)	LP-8110 (8110nm～)、1 枚搭載可
フレームレート	フルフレーム 30fps 以上 (同期可能)
A/D	13bit
レンズ	f=25mm/F1.4
NETD (@25℃)	33mK (フィルター : LP-8110) @30Hz
サイズ, 重量 (冷却カメラ単体)	120×234×173mm、5kg
保護ハウジング	IP54 対応 (Ge 窓付き)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、13kgf

表 2-7 SPIC-C プロトタイプ of 主な諸元 (カメラ 4)

センサーヘッド	カメラ 4 (SPIC-C)
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子
フィルター (感度波長域)	BBP-10300-12500 (10300～12500nm)
フレームレート	30fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=35mm/F1.1
NETD (@25℃)	0.3K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、13kgf
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)

表 2-8 SPIC-C プロトタイプ of 主な諸元 (カメラ 1、2)

センサーヘッド	カメラ 1	カメラ 2
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター (感度波長域)	無し (8000～14000nm)	LP-9000 (9000～14000nm)
フレームレート	30fps (同期可能)	
A/D	14bit	
レンズ	f=35mm/F1.1	
NETD (@25℃)	0.08K	0.1K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、13kgf	
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)	

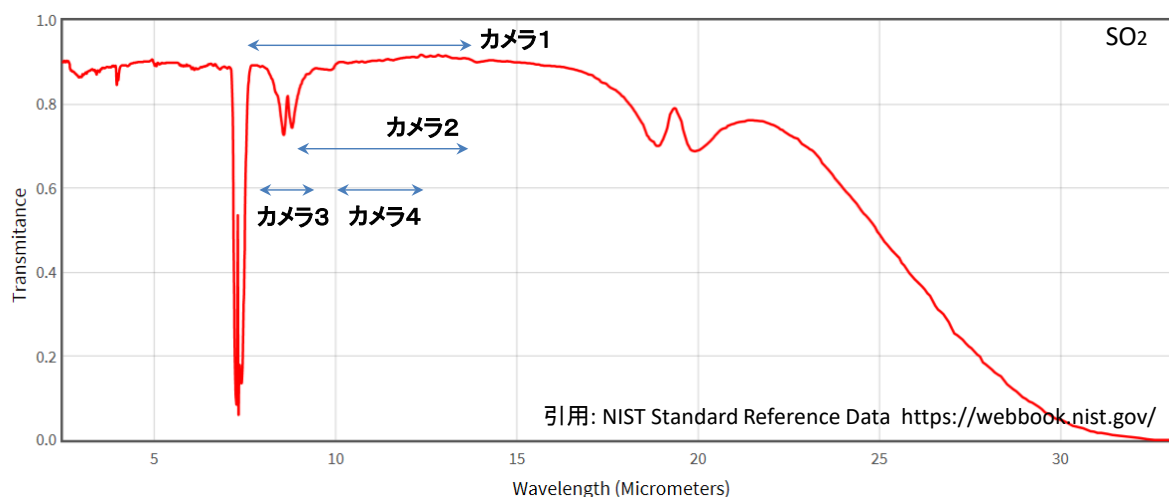


図 2-2 SO₂ ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの感度波長域との関係

表 2-9 SPIC-SS プロトタイプ の主な諸元 (カメラ 1 ～ 6)

センサーヘッド	CMOS 型カメラ BU302MG ((株) 東芝テリー社製) ×6、各カメラサイズ：29×29×16mm、33g
センサータイプ	1/1.8 CMOS、IMX252 搭載 (2064×1536 素子)
A/D	12bit
露光時間	30 μs～10s
感度波長域	400～1000nm
ダイナミックレンジ	70dB
接続	USB 3.0
フィルター	レンズ前段装着 (M27) フィルターF1～F6 (6 バンド同時取得)
フレームレート	6 バンド同期 (1920×1080) 最大 15fps
レンズ	φ 29mm、SV-1614V、f=16mm/F1.4 ((株) ヴイ・エス・テクノロジー社製)
カメラハウジング (WDH), 重量, 耐環境性	250×209×183mm、 3.5kgf、 IP54
制御ノート PC、記録装置	Windows 10 Pro、M.2 SSD(512MB, 1TB)

a) 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発

非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発では、屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラの設計、製作仕様検討及び同装置のハード部分の製作を実施した。本装置は、これまでのプロトタイプの開発結果^{3),4)}を反映するとともに装置全体の小型化を考慮し、温度とガスを観測する最小限必要な装置構成を検討した結果、装置は2眼の赤外カメラ（温度およびガス観測用）および可視カメラ（2K フォーマット）から構成し、それらを屋外使用可能なカメラハウジングに格納する仕様で製作した（本年度はハード部分の製作）。

非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの構成模式図を図 2-3 に示す。格納された各カメラの仕様を表 2-10、2-11 示す。なお赤外カメラは、インターフェースを除き昨年度に開発した SPIC-UC (4VGA) のカメラ 1, 3 と同様のハード仕様のカメラを製作した。カメラ本体と制御 PC との距離を取ることを考慮し、各カメラの信号インターフェースは GigE とし、PoE 給電仕様とした。製作図面、3D 図を図 2-4 に示す。また完成した装置の写真を図 2-5 に、試験的に計測した各カメラの画像を図 2-6 に示す。

製作した赤外カメラ 1、2 は環境温度 $-10\sim 50^{\circ}\text{C}$ において、ターゲット温度 $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$ に対し輝度較正を行い、雑音等価温度差 (NETD) 評価試験を行った。結果を図 2-7 に示す。これらの評価の結果、カメラ 1 の NETD は環境温度、 -10 、 0 、 10 、 20 、 30 、 40 、 50°C においてターゲット $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$ での NETD は、ほぼ 0.1K 以内を達成できることが分かった。またカメラ 2 の NETD は、約 $0.6\sim 0.8\text{K}$ 以内であることが分かった。

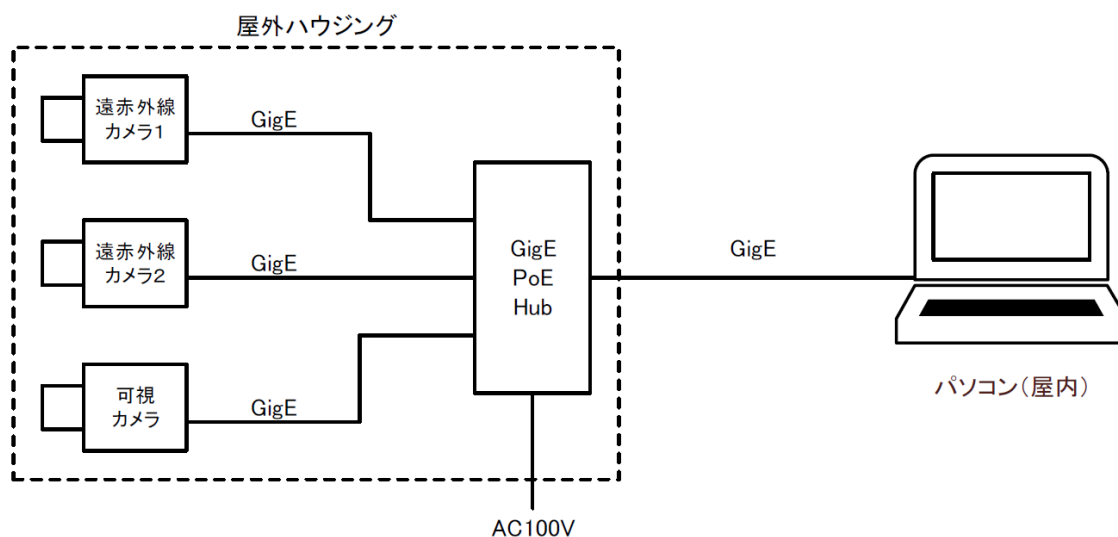


図 2-3 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの構成模式図

表 2-10 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの赤外カメラ 1、2 諸元

	カメラ 1	カメラ 2
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター (感度波長域)	9000～14000nm (フィルター無し)	BBP-7950-9300 (7950～9300nm)
フレームレート	30fps (同期可能)	
A/D	14bit	
カメラインターフェース	GigE Vision	
レンズ	f=35mm/F1.2	
NETD (@25℃)	0.1K	0.6K
本体サイズ、重量	33×33×27.5mm、175gf	
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af	

表 2-11 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの可視カメラ諸元

センサーヘッド	CMOS 型カメラ STC-MCS312P0E (オムロンセンテック製) 筐体サイズ : 29×29×53mm
センサータイプ	1/1.8 CMOS、IMX265 搭載 (2048×1536 素子)
A/D	12bit
露光時間	30 μ s～10s
感度波長域	400～1000nm
接続	Gig-E Vision
フィルター	RGB カラーセンサ
フレームレート	30fps (同期可能)
レンズ	TAMRON M118FM25 (f=25mm F/1.6)
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af

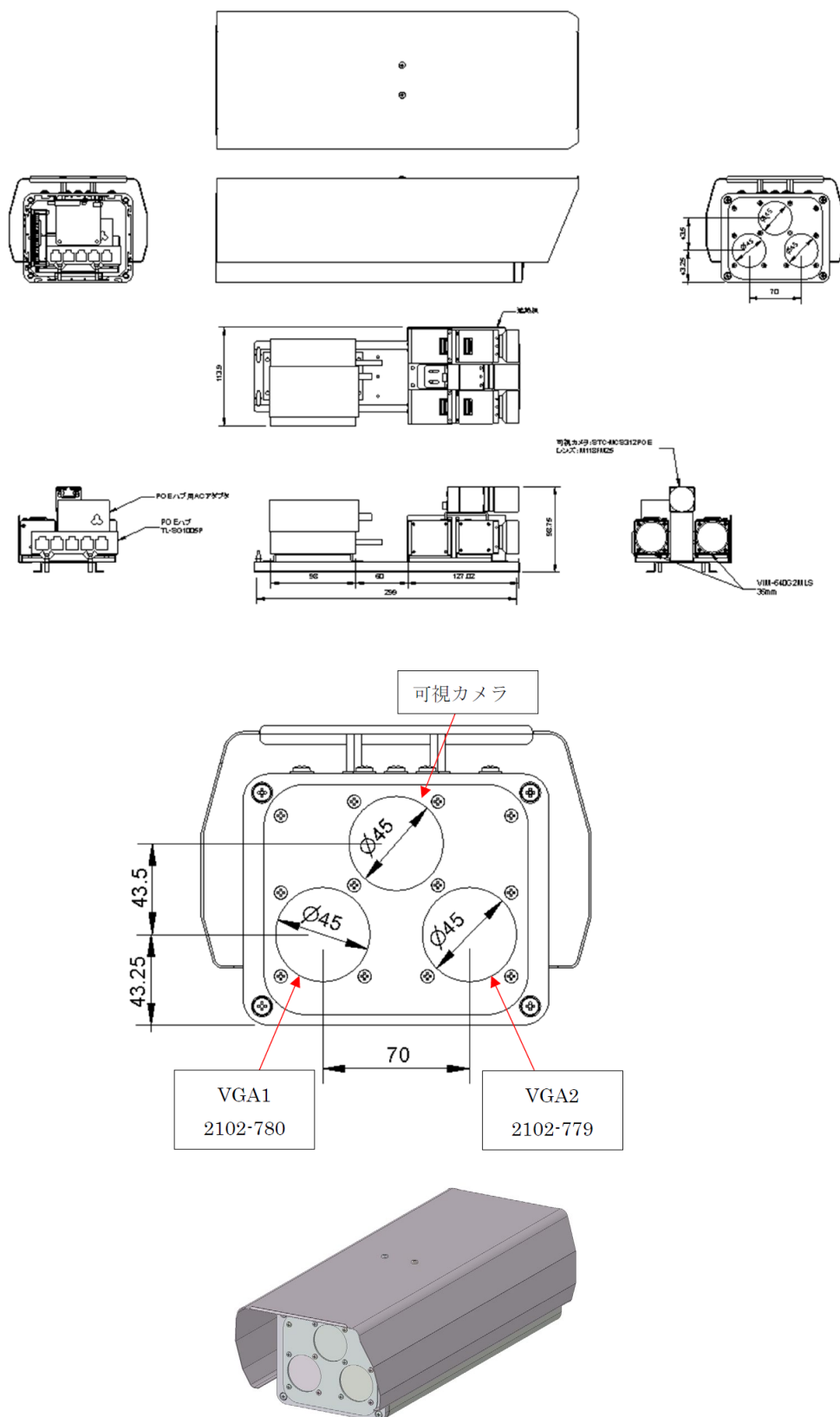


図 2-4 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの製作図面、3D 図



図 2-5 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの完成写真 (外観と格納されたカメラ)



図 2-6 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの試験計測画像 (赤外カメラ 1、2、可視カメラ)

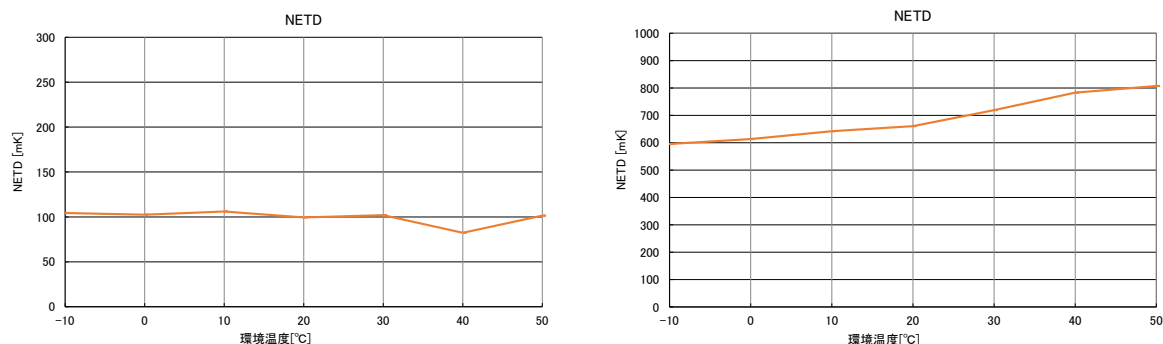


図 2-7 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの赤外カメラ 1, 2 の NETD

b) 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発

冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発として、小型冷却型赤外カメラ (MWIR 領域) の仕様検討、設計、製作を行った。本装置は、令和元年度に開発した冷却型赤外カメラ (LWIR 領域) の開発結果^{5), 6)}を反映した仕様とし、将来的にこれら 2 台の冷却カメラを同時にフィールドタイプで運用する小型の装置を構成することを考慮した仕様とした。新規に開発、製作した SPIC-C プロトタイプの MWIR 領域の冷却型カメラセンサーヘッドの主な諸元を表 2-12 に示す。また、この装置の図面を図 2-8 に、3D 図、完成写真を図 2-9 に、試験的に計測した画像を図 2-10 に示す。本装置は MWIR 領域の特性を生かし、LWIR 領域のカメラよりも高温域の輝度温度を計測する仕様としている。以上の試験観測画像、NETD の測定より、開発した装置の設計性能が概ね達成できていることが確認できた。

本プロトタイプは、小型赤外カメラ制御・記録用 PC：ノート PC (Windows 10 Pro 64bit、Core™ i7-8665UvPro™, 16GBRAM, Panasonic SV8) より USB 接続にて各カメラセンサーヘッドに接続し、専用ソフト (昨年度までに開発した赤外カメラ用同期制御・記録ソフト) により制御、データ取得 (ノート PC の M.2 SSD 1TB SSD に記録) を行う。現行の本制御記録システムは、4 台のカメラの 30fps のフレーム同期計測を実現できる。

さらに、SPIC-C (LWIR) プロトタイプ^{5), 6)}との同時運用を考慮し、SO₂ ガス濃度分布観測用時のリファレンスバンドとして機能する、9000~14000nm (LP9000) の感度を持つ非冷却型 VGA 型赤外カメラ (カメラ 2 (SPIC-C)) を新規に製作した。このカメラは昨年度までは SPIC-UC (4VGA) のカメラ 2 と共用であったが、本年度、SPIC-C 専用のカメラを製作した。新規に製作した SPIC-C プロトタイプの SO₂ ガス濃度分布観測用のリファレンスバンドとなる非冷却型 VGA 型赤外カメラの主な諸元を表 2-13 に示す。また、この装置の図面を図 2-11 に、3D 図、完成写真を図 2-12 に示す。以上の同装置の試験データ取得より、設計性能が概ね達成できていることが確認できた。

表 2-12 SPIC-C (MWIR) の冷却型カメラセンサーヘッドの主な諸元

センサーヘッド	SPIC-C (MWIR)冷却型カメラ
センサータイプ	冷却型 InSb、640×512 素子
冷却型	スターリングクーラー (センサー動作温度 77K)
センサー感度波長域	1500～5400nm
フィルター (感度波長域)	LP-3000-nm(3000nm～)、1 枚搭載可
フレームレート	フルフレーム 30fps 以上 (同期可能)
A/D	13bit
レンズ	f=25mm/F2.3
NETD (@25℃)	25mK (@30℃、フィルターなし、@30Hz)
計測輝度温度範囲	<ul style="list-style-type: none"> ・標準 (フィルタなし) : -20～+300℃ ・フィルタ付き (LP-3000-nm) : 100～1000℃
サイズ, 重量 (冷却カメラ単体)	120×234×176mm、5kg
保護ハウジング	IP54 対応 (Ge 窓付き)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、13kgf (SPIC-C(LWIR) 用)

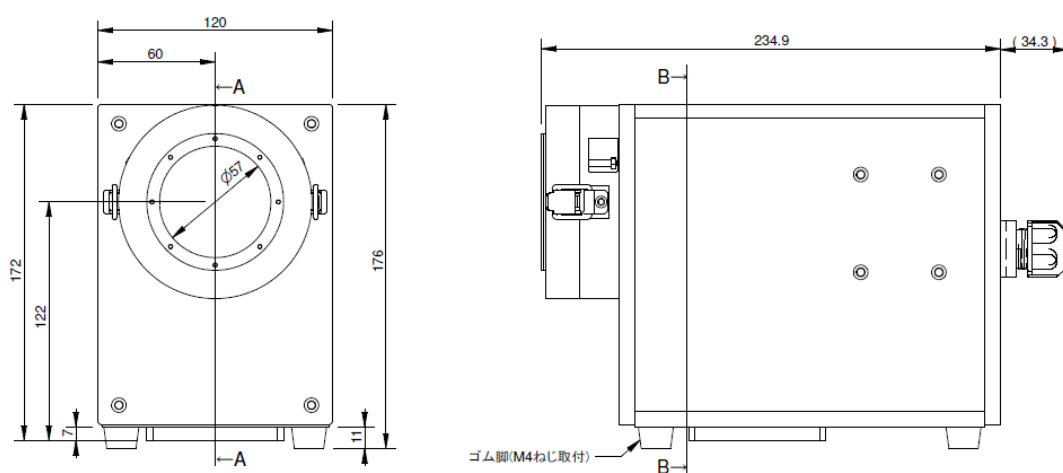


図 2-8 SPIC-C プロトタイプの冷却型 MWIR カメラセンサーヘッドの図面の主な諸元

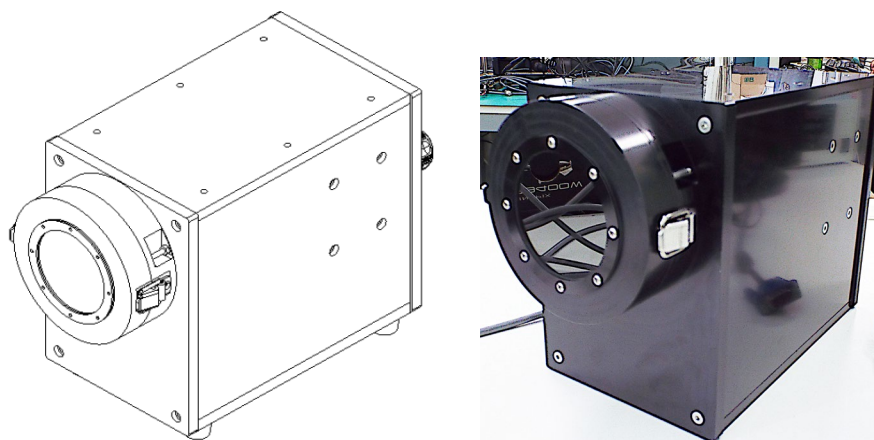


図 2-9 SPIC-C プロトタイプの冷却型 MWIR カメラセンサーヘッドの 3D 図、完成写真



図 2-10 SPIC-C プロトタイプの冷却型 MWIR カメラ試験観測画像（温度レンジ-20～300℃）

表 2-13 SPIC-C (MWIR) 用のリファレンスバンド赤外カメラの主な諸元

センサーヘッド	カメラ 2
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子
フィルター（感度波長域）	LP-9000 (9000～14000nm)
フレームレート	30fps（同期可能）
A/D	14bit
レンズ	f=35mm/F1.1
NETD（@25℃）	0.1K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	121×66×66mm
保護ハウジング	IP67 対応（Ge 窓付き）

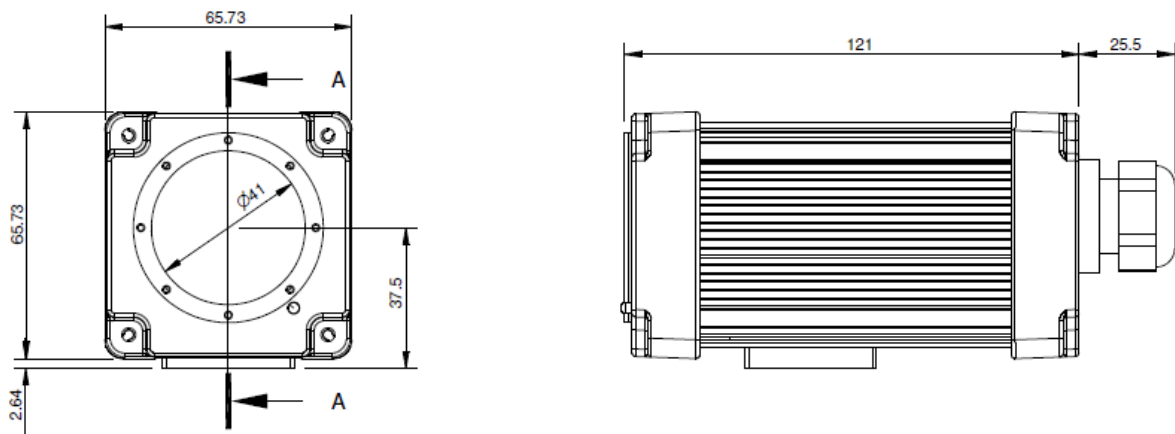


図 2-11 SPIC-C (MWIR) 用のリファレンスバンド赤外カメラの図面

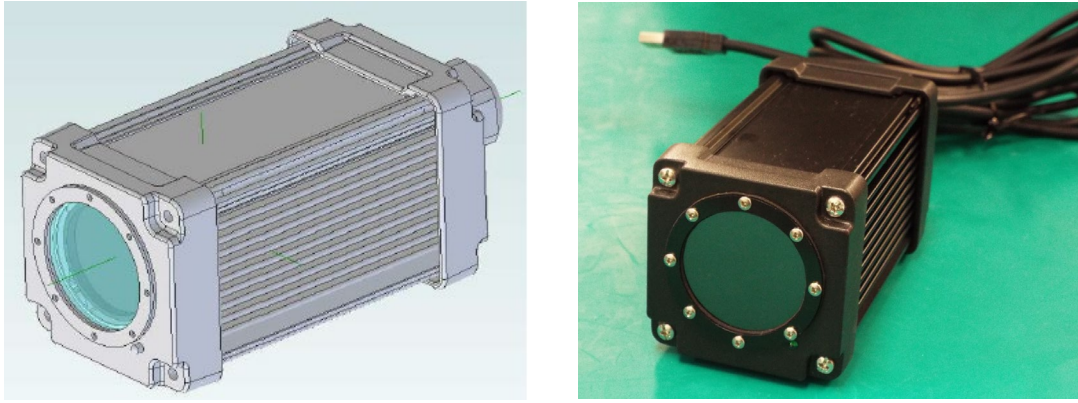


図 2-12 SPIC-C プロトタイプのリファレンスバンド用非冷却型カメラセンサーヘッドの 3D 図、完成写真

c) SPIC プロトタイプによる火山試験観測

SPIC-UC と SPIC-C のフィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得するために、昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) プロトタイプおよび SPIC-C (LWIR) 冷却型カメラによる火山試験観測を、阿蘇山で年度当初から 8 月まで計画した。しかし、新型コロナウイルス感染症の影響のため実施（移動）が困難であった為、試験観測を浅間山に変更し、観測を 10 月 20、21 日に実施した（浅間山は 2020 年 6 月 25 日より噴火警戒レベルがレベル 1 からレベル 2 となり、 SO_2 ガス放出の増加も認められたため試験観測地に選定した）。

i) SPIC-UC (4VGA)、SPIC-C (LWIR) のプロトタイプによる浅間山火山試験観測

浅間山での火山試験観測では SPIC-UC と SPIC-C (LWIR) の屋外での一連の動作確認が行えたとともに、浅間山の噴煙を観測できた。しかし、あいにく山頂部に雲がかかる気象条件であったため、 SO_2 ガス分布の推定に用いることができるデータは、取得できなかった（今後、再観測を実施する予定）。

観測は 2021 年 10 月 20 日（14～16 時）、21 日（13～16 時）に行った。各プロトタイプは浅間山北麓の浅間山火山博物館駐車場（36 度 26 分 21.77 秒 138 度 32 分 7.91 秒、標高 1374m）に設置し、浅間山山頂部付近を観測した。浅間山山頂までの直線距離は約 3.8km である。

図 2-13 に観測時の機材設置の様子を示す。また観測時（2020 年 10 月 20 日 15 時 38 分）の浅間山の可視画像を図 2-14 に示す。また図 2-15 に、2020 年 10 月 20 日 15 時 38 分に取得した SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの観測結果（カメラ 1～4 の異なる赤外バンドで計測したデータの輝度温度表示。大気補正は未補正。観測開始時に疑似黒体扉による補正を実施し、シーン以外からのエネルギー（装置バイアス）を補正。）を示す。図 2-14 より浅間山の山頂部には雲がかかっていたが、SPIC-UC (4VGA) の画像では浅間山山頂火口から放出される噴気（噴煙）は相対的に高い輝度温度として計測できている。また各バンドの画像を、本手法と類似した手法を用いる先行研究の事例⁷⁾と定性的に比較した結果、画像の SN は同程度であることを確認した。



図 2-13 浅間山火山試験観測での SPIC-UC (4VGA)、SPIC-C (LWIR) プロトタイプ設置の様子



図 2-14 浅間山火山試験観測時の可視画像

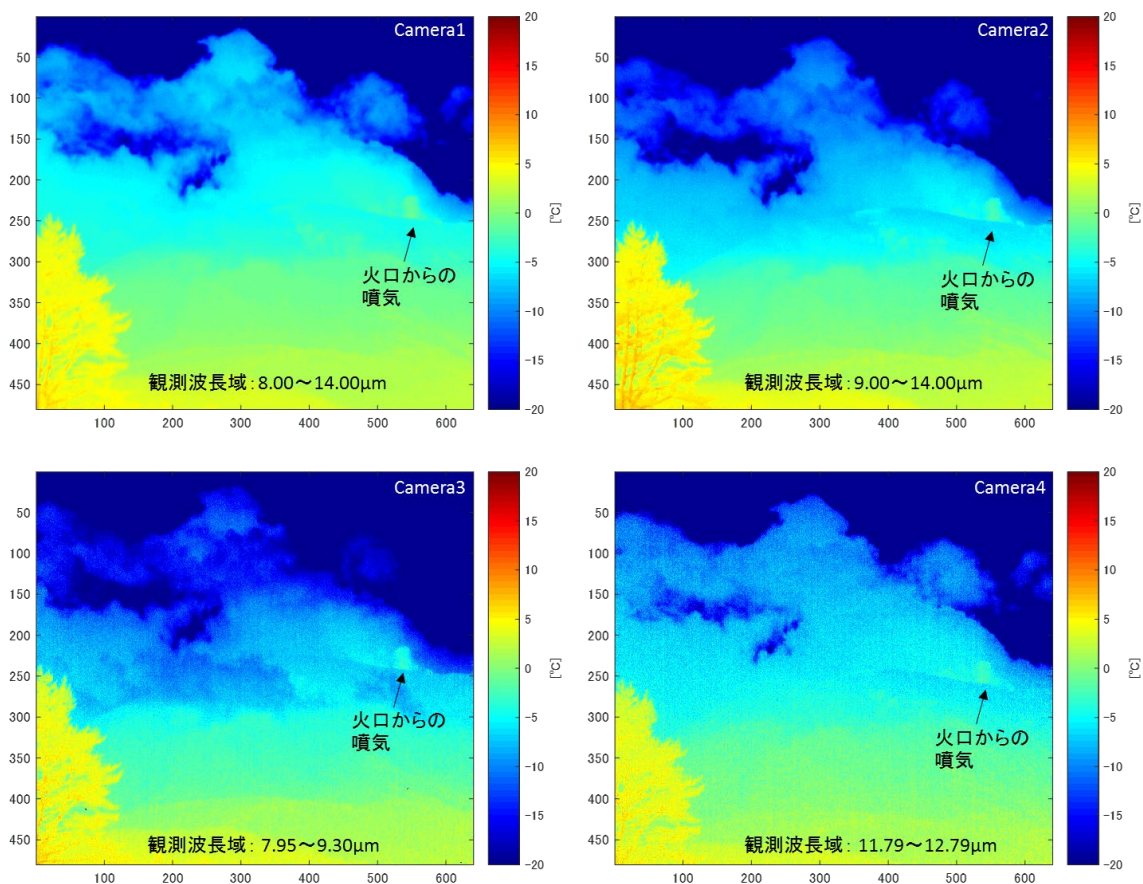


図 2-15 SPIC-UC (4VGA)プロトタイプの観測結果（カメラ 1～4 の異なる赤外バンドで計測したデータの輝度温度画像。大気補正は未補正。2020 年 10 月 20 日 15 時 38 分。）

図 2-16 に SO_2 ガスの吸収波長域を観測する SPIC-C (LWIR) 冷却カメラおよび SPIC-UC (4VGA) プロトタイプのカメラ 3 の観測結果を示す（輝度温度表示）。これより、両カメラのコントラストは概ね類似していることがわかる。これより開発した機器が概ね正常に機能していることが確認できる。

引き続き、両カメラの観測結果の詳細の比較のため、山頂上部の雲のない青空領域の輝度温度計測値を比較した。その結果、この領域の計測値は、SPIC-C (LWIR) 冷却カメラの約 -32°C の計測結果に対し、SPIC-UC (4VGA) プロトタイプのカメラ 3 は約 -24°C と高めの値が計測されていることが分った。この原因は現在究明中であるが、その可能性の一つとして、疑似黒体扉による SPIC-UC (4VGA) プロトタイプのカメラ 3 の装置バイアスの補正が十分な精度で機能していないことが考えられる。SPIC-C (LWIR) 冷却カメラは SPIC-UC (4VGA) プロトタイプのカメラ 3 と比較すると、構造上装置バイアスが少ないため、SPIC-C (LWIR) 冷却カメラの観測値がシーンの真値に近い値と考えられるからである。

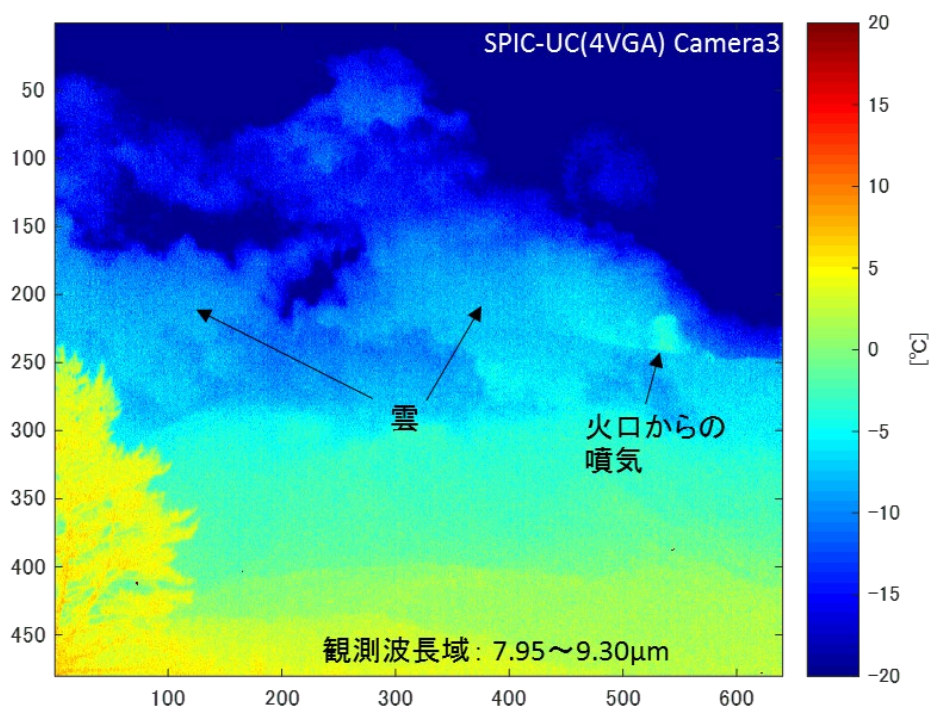
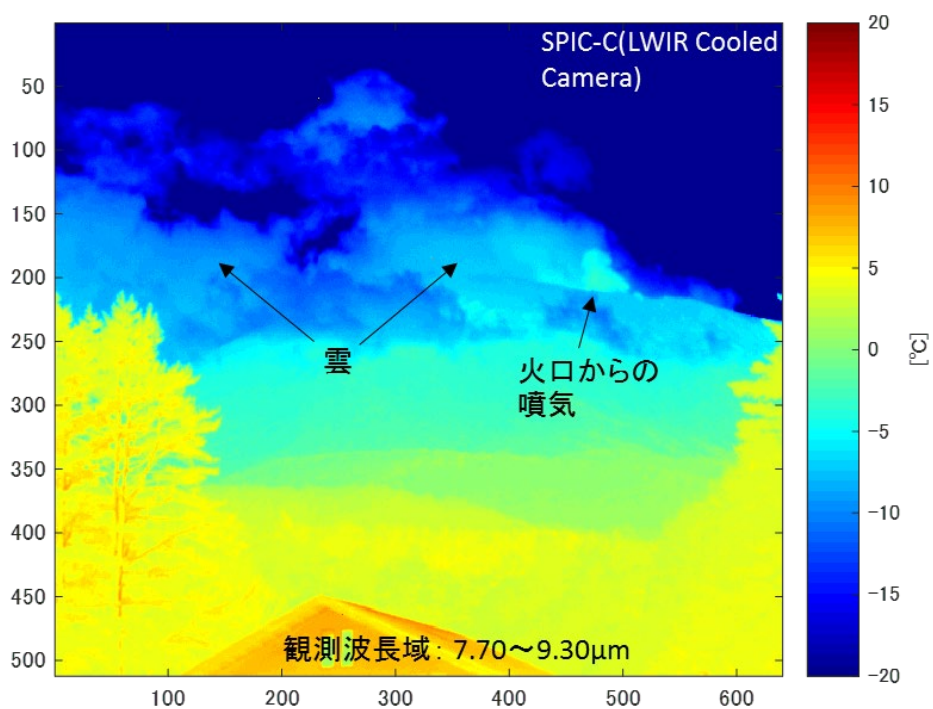


図 2-16 SO_2 ガスの吸収波長域を観測する SPIC-C(LWIR)冷却カメラおよび SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 の観測結果（輝度温度画像、大気補正は未補正。2020 年 10 月 20 日 15 時 38 分）

i i) 装置バイアスの補正精度の影響評価

上述の浅間山火山試験観測の結果から、装置バイアスの補正の精度が十分ではない可能性が考えられたため、この補正の精度がシーンの観測値（装置バイアスを補正した観測対象シーンからのエネルギー）の推定に与える影響をシミュレーションにより評価した。

SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 はセンサ前段の光路にバンドパスフィルターを有するため、フィルターからの放射、反射成分のエネルギーが、フィルターを通過する観測シーンからのエネルギーに重畳する。SPIC-UC(4VGA)は、このフィルターからの放射、反射成分のエネルギーをカメラの校正時に環境温度の関数として補正する仕様となっている。また、野外の観測時では、風、日射等様々な要因により校正時の環境温度のみでは補正できない外乱要因があると考え、観測時に疑似黒体扉によりシャッタ補正動作を実施している。このような、観測シーンとそれ以外からのエネルギーと輝度温度推定の関係をシミュレートした結果を図 2-17 に示す。青は校正時の校正曲線、赤は青の係数に補正しきれない装置バイアスが 1°C あった場合に生じるシーンとの関係である。これより、補正できない $+1^{\circ}\text{C}$ の装置バイアスあるとすると校正曲線は赤い線となるが、この現象を校正時の装置バイアス補正関数の青い線で温度変換した場合、シーンの温度を間違えて推定してしまうことが分る。その程度は、シーンが -10°C なら、 -4°C と推定、シーンが -30°C なら、 -21°C と推定する。これより、シーンが低温ほど温度推定に及ぼす影響が大きいことがわかる。この見積もりは、浅間山観測での青空の領域を観測した際の、SPIC-C(LWIR 冷却カメラ)の約 -32°C の計測結果に対し、SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 は約 -24°C と高めの値が計測された観測結果と整合的である。

これら結果より、今後の装置開発において、校正時の補正関数では補正しきれない装置バイアスを補正する場合、精度を 1°C よりも高い精度で補正を実現する必要があると考えられる。

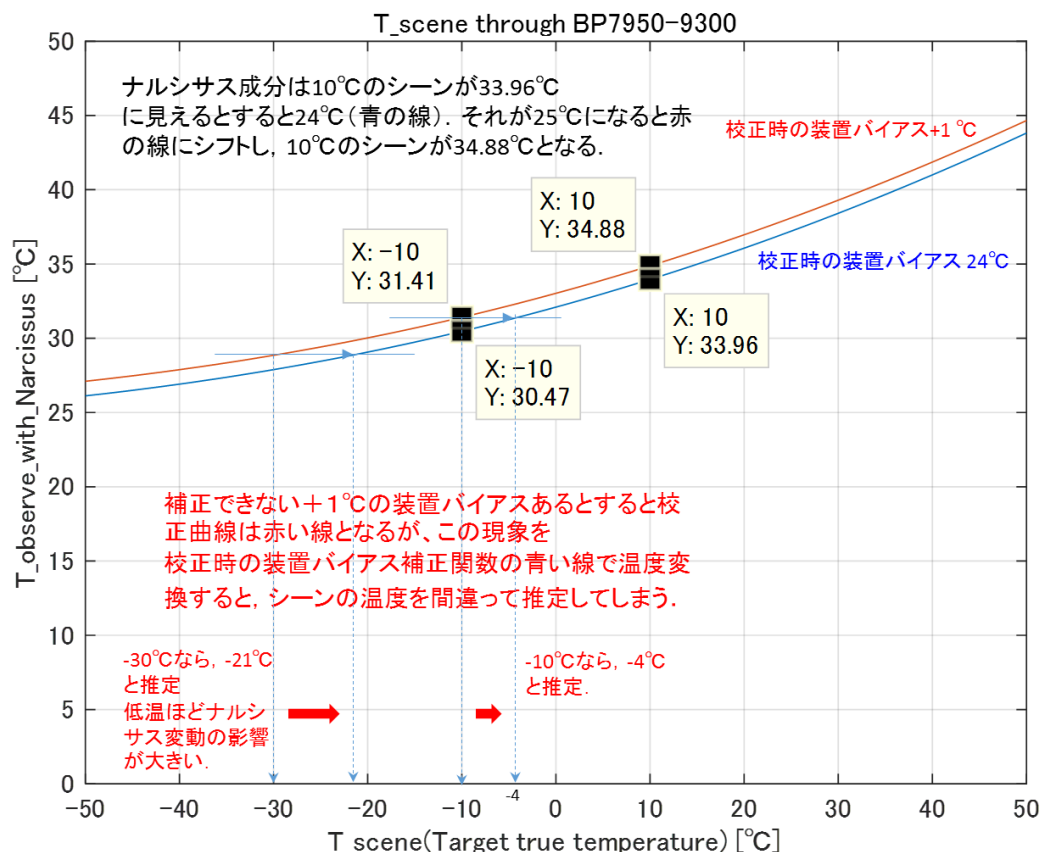


図 2-17 SPIC-UC (4VGA) プロトタイプのカメラ 3 の観測シーンとそれ以外からエネルギーのもとでのシーンの輝度温度推定。青は校正時の校正曲線。赤は青の関係に補正しきれない装置バイアスが 1 °C あった場合に生じるシーンとの関係

d) 可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業

本年度は、SPIC のフィールドタイプの開発のため、可視カメラおよび非冷却型赤外カメラを有する装置の小型化に関する概念設計作業を実施した。この作業では、先述した、浅間山での火山試験観測結果で今後の開発課題として上げた、装置バイアス補正の精度を 1°C よりも優れた補正手法の開発、実現が望まれることを踏まえた検討を実施した。主に、屋外仕様での装置の小型化、温度変動対策等の検討を行い、野外の環境中での安定動作の向上策を検討した。

i) SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの小型化に関する検討

現行の SPIC-UC (4VGA) プロトタイプは、1 台の赤外カメラセンサーヘッドが 1 つの耐環境カメラケースに格納された個別の耐環境カメラケースユニットを、耐環境カメラケース格納ユニットに 4 台束ね、マルチバンドカメラを構成している。本年度は、小型化のための方策として、4 台のカメラセンサーヘッドを 1 つの耐環境カメラケースに格納することで、全体の体積を縮小するための概念設計を実施した。この際、同時に装置の恒温化機能の実現も考慮した検討とした。

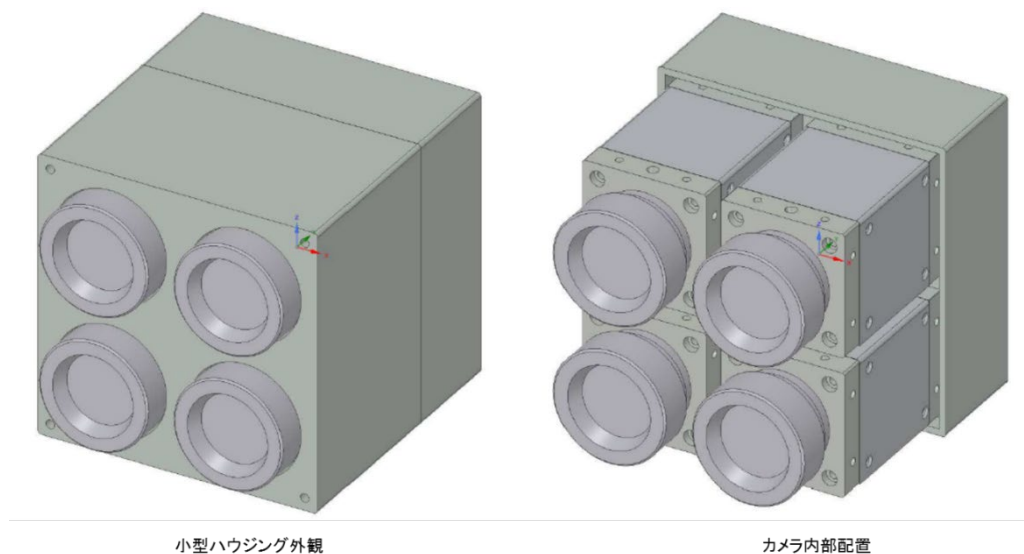


図 2-18 SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの実現する小型カメラハウジングの 3D 図

これまでに開発した非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを 4 台格納できる小型のカメラ格納ユニットとして機能する小型カメラハウジングを設計した。この小型カメラハウジングの概念設計検討結果を図 2-18 に示す。検討の結果、各センサヘッドユニットの間隔は 5mm、その後段に各カメラセンサーヘッドユニットの同期機能部を形成する構成とした。

ii) SPIC-SS プロトタイプの小型化に関する検討

現行の SPIC-SS プロトタイプは、6 台の可視カメラセンサーヘッドが 1 つの耐環境カメラケースに格納され、マルチバンドカメラを構成している。しかし、プロトタイプでは、この耐環境カメラケースは、各カメラユニット間の距離の最小化を図っていない。そこで本年度は、小型化のための方策として、4 台のカメラセンサーヘッドを 1 つの耐環境カメラケースに格納するとともに、全体の体積を縮小するための概念設計を実施した。

これまでに開発した可視カメラセンサーヘッドを 4 台格納できる小型のカメラ格納ケースとして機能する小型カメラハウジングの概念設計検討結果を図 2-19 に示す。検討の結果、各センサヘッドユニットの間隔は 10mm、その後段に各カメラセンサーヘッドユニットの同期機能部を形成する構成とした。なおこの構成は 6 台のカメラを格納する小型カメラハウジングの実現も可能である。

iii) SPIC-UC (4VGA) プロトタイプと SPIC-SS プロトタイプの融合・小型化の検討

非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発においても検討した、温度とガスを観測する最小限必要な 2 眼の赤外カメラ (温度およびガス観測用) および可視カメラ (2K フォーマット) からなる装置構成に 1 台の赤外カメラを追加した構成の小型化を検討した (この赤外カメラ追加により温度観測機能が向上する)。

概念設計した結果を図 2-20 に示す。検討の結果、SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの小形で検討した非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを 4 台格納できる小型のカメラ格納ユニットとして機能する小型カメラハウジングに、1 台の可視カメラセンサーヘッド、3 台の非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを格納できる構成を設計できた。また他と同様、後段に各カメラセンサーヘッドユニットの同期機能部を形成する構成とした。

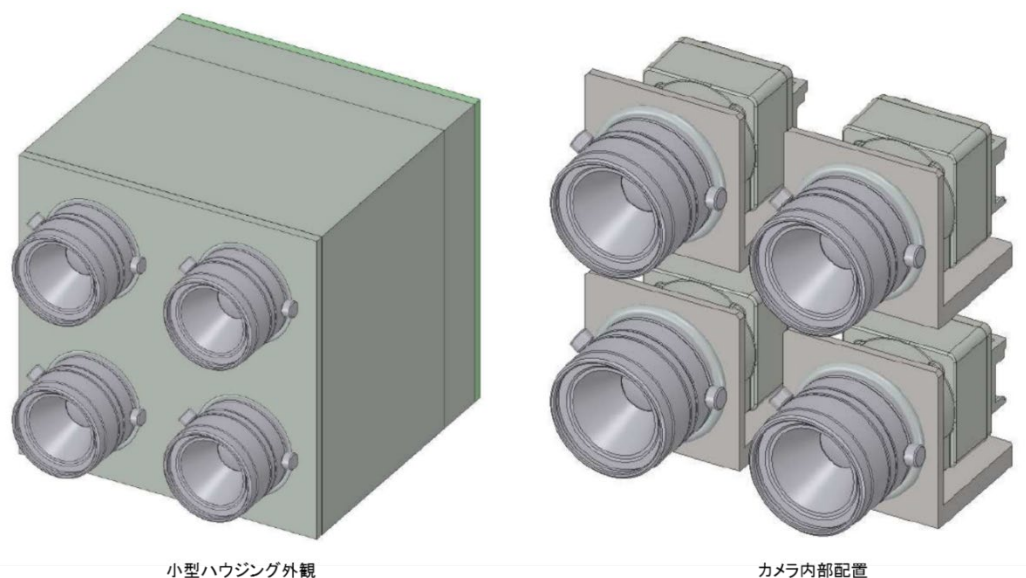


図 2-19 SPIC-SS プロトタイプ的小型化を実現する小型カメラハウジングの 3D 図

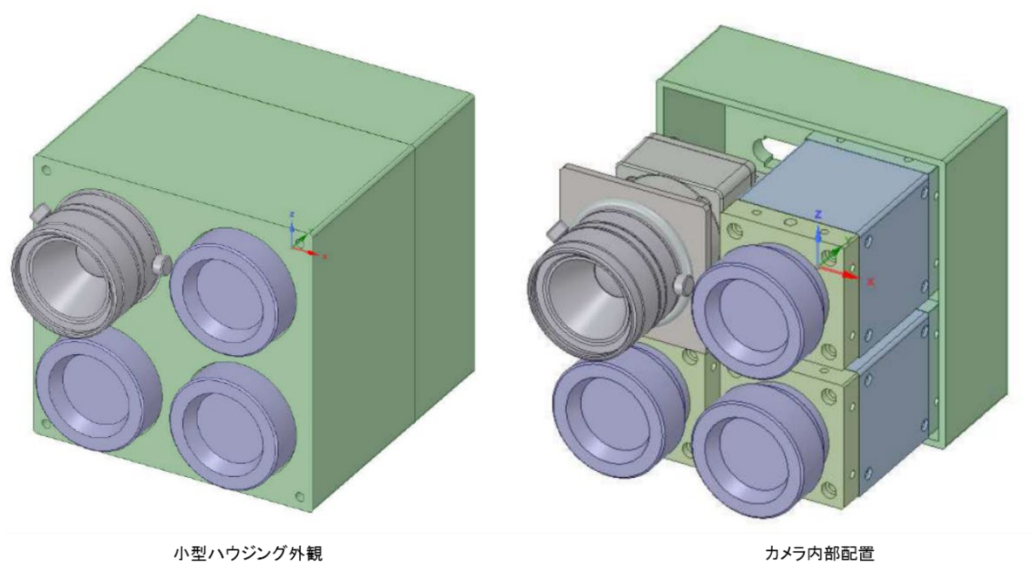


図 2-20 SPIC-UC (4VGA) プロトタイプと SPIC-SS プロトタイプの融合・小型化を実現する小型カメラハウジングの 3D 図

iv) SPIC-UC (4VGA) プロトタイプ小型化用の小型カメラハウジングの恒温化機能に関する検討

先述した、浅間山での火山試験観測結果で今後の開発課題として上げた、装置バイアス補正の精度が 1°C よりも優れた補正手法の開発、実現が望まれることを踏まえ、主に、屋外での装置の温度変動対策等の検討を行い、野外の環境中での安定動作の向上策を検討した。主として、装置の恒温化および装置バイアス補正用黒体の機能を実現するための概念設計を実施した。

現行の SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの小型方策として設計した、これまでに開発した非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを4台格納できる小型のカメラ格納ユニットへ恒温化機能および装置バイアス補正用黒体を追加する概念設計を行った。原理的に、装置の恒温化は温度擾乱の過渡的な変動を抑える効果がある。また装置バイアス補正用黒体は、校正時とことなる観測時の変動要因の補正を実現する。

恒温化機能および疑似黒体機能を追加した小型カメラハウジングの概念設計検討結果を図 2-21、2-22 に示す。恒温機能は、4 台のカメラのレンズマウント面に取り付けた熱伝導プレートを紹介し、熱交換を行うペルチェ素子を取り付けて、放熱面側に放熱フィンと冷却ファンを取り付け実現する（図 2-21）。ペルチェ素子は、熱伝導プレートに設置された温度センサの温度をモニタリングし、この温度が一定になるよう、温調コントローラにより制御される。疑似黒体機能は、恒温化機能を追加した小型カメラハウジングの前面に、可動型の黒体炉を設置し実現する（図 2-22）。黒体炉は観測前にカメラの前に現れて、各カメラがこれを撮影することで制御された温度分布面を基準として計測し装置バイアス補正を行う。観測中は黒体炉を格納ケースに収納する。

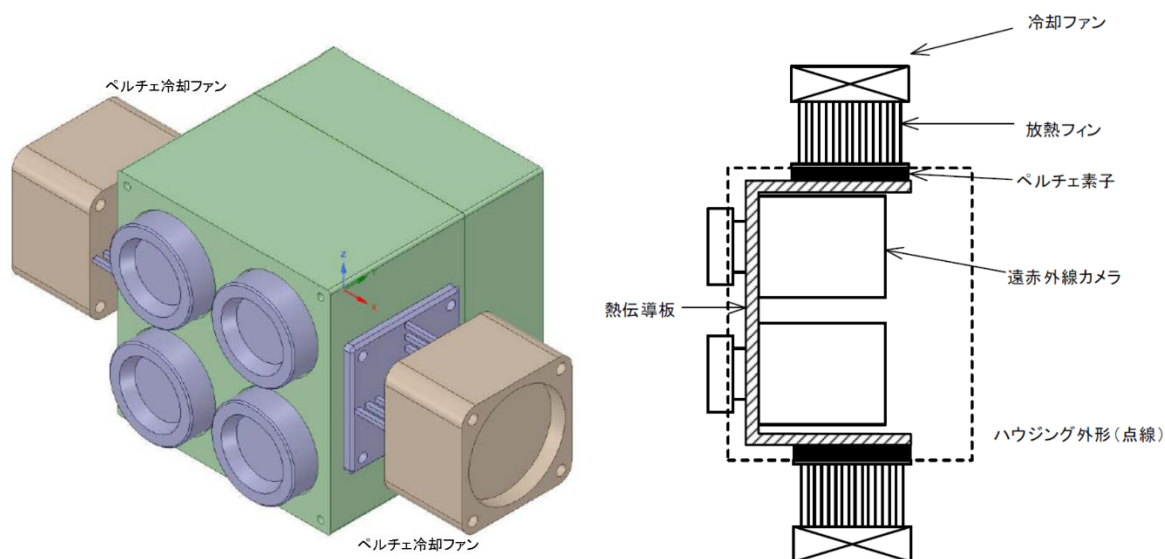


図 2-21 恒温化機能を追加した小型カメラハウジングの 3D 図

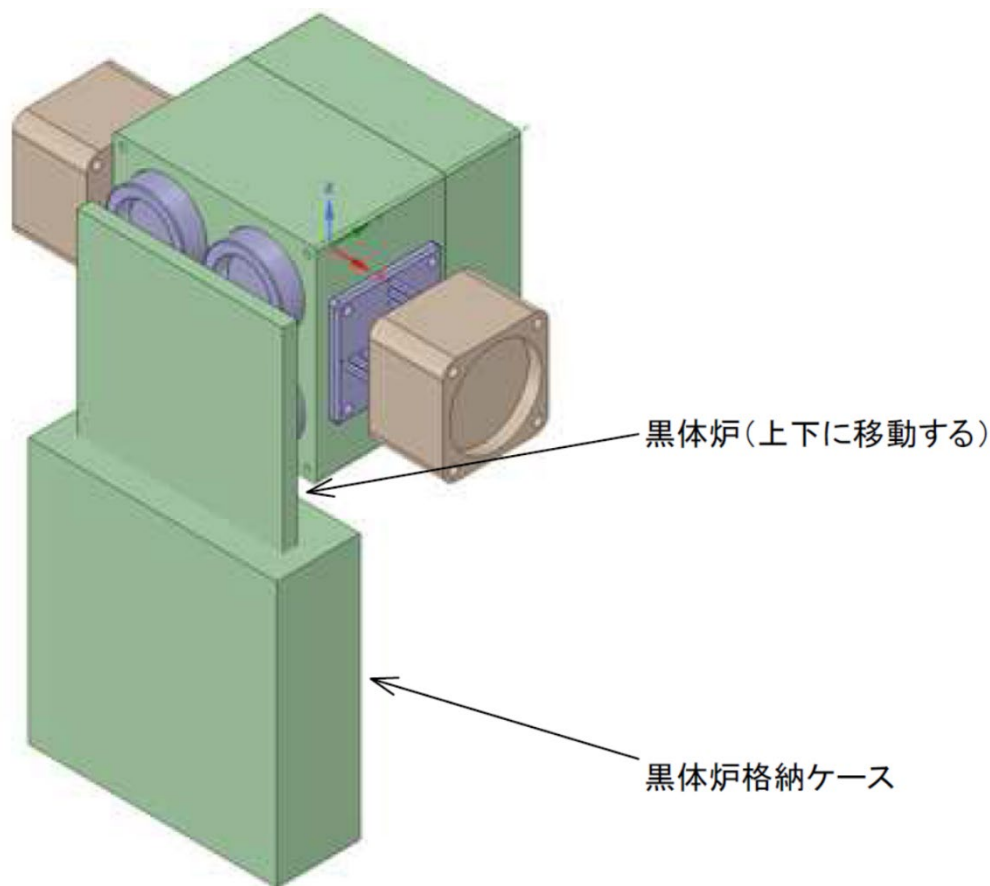


図 2-22 恒温化機能および疑似黒体機能を追加した小型カメラハウジングの 3D 図

e) 小型前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の設計、製作

画像分光用の干渉分光方式の ISH は原理的にフィルター分光方式の ISH よりも多波長の情報⁸⁾を得ることができるが、既存の装置はなく、先行する幾つかの研究事例^{9), 10)}がある状況である。多波長の分光画像からは、より詳細な対象の反射、放射特性（分光スペクトル）⁸⁾が導かれることから、SPIC の ISH としての導入を本課題で計画し開発を実施中である。昨年度までに、画像分光装置開発のために、赤外カメラと一体として機能する干渉分光方式の ISH のプロトタイプ製作を行った。

i) Quartz ビームスプリッタ用のホルダの開発

本年度は、これまでに開発した、横ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外域干渉計 BBM（CCM 型）の可視光・近赤外光域の干渉機能実現のための Quartz ビームスプリッタ (Quartz BS) の用のホルダの開発を行った（BBM：ブレッドボードモデル、CCM：コーナーキューブミラー、BS：ビームスプリッタ）。開発中の干渉分光方式の ISH のプロトタイプ概略図と製作した Quartz ビームスプリッタの用のホルダの写真を図 2-23 に示す。昨年度までは赤外域用の KBr/GeBS と供用のホルダを使用していたが、専用ホルダの導入により、BS 交換時の再アライメント等の利便性が向上した。

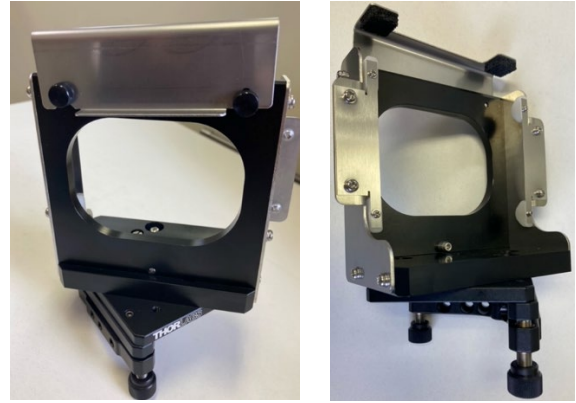
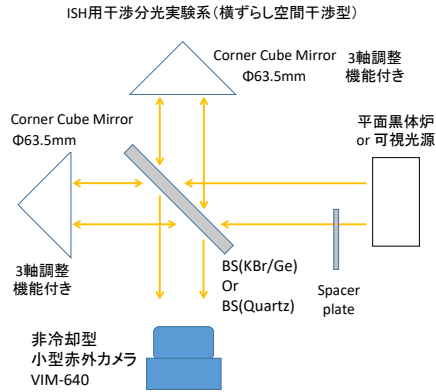


図 2-23 横ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外域干涉計 BBM (CCM) 概略図と Quartz ビームスプリッタの用のホルダ

ii) 小型干涉計用発光入力光学系の製作

開発中の小型干涉計はマイケルソン型である。この型の干涉計を用い、対象（サンプル）からの発光（エミッション）の分光スペクトル情報（分光放射率等）を得るための入力モデルとして、以下の式（1）の定式化がなされている¹¹⁾。

$$V_{means}(\lambda, T) = [\varepsilon_{smp}(\lambda)B_{smp}(\lambda, T) + R_{smp}(\lambda)\varepsilon_{env}(\lambda)B_{env}(\lambda, T) - \varepsilon_{inst}(\lambda) \cdot B_{inst}(\lambda, T)]F \quad \dots \dots (1)$$

ここで $V_{means}(\lambda, T)$ は計測される干涉計の電圧出力、 $\varepsilon_{smp}(\lambda)$ はサンプルの放射率、 $B_{smp}(\lambda, T)$ はサンプルと等温の黒体放射、 $R_{smp}(\lambda)$ はサンプルの反射率、 $\varepsilon_{env}(\lambda)$ は周囲環境の放射率、 $B_{env}(\lambda, T)$ は周囲環境と等温の黒体放射、 $\varepsilon_{inst}(\lambda)$ は干涉計（装置）の放射率、 $B_{inst}(\lambda, T)$ は干涉計と等温の黒体放射、 F は電圧と放射輝度の変換係数（装置関数）である。

この式（1）を用い、計測時に混入するサンプル以外からのエネルギー（変換係数： F 、装置バイアス： $\varepsilon_{inst}(\lambda)B_{inst}(\lambda, T)$ 、環境バイアス： $\varepsilon_{env}(\lambda)B_{env}(\lambda, T)$ 等）を実験操作を通じ補正、除去することで、対象の分光放射率： $\varepsilon_{smp}(\lambda)$ が求められる。ただし、本計測手法を利用した岩石等の分光放射率の計測装置として既成の装置はなく、先行する研究では、独自装置を製作し計測を行っている^{11), 12), 13)}。

本研究では、式（1）を用い、対象の分光放射率を求めることを方針とし、本年度は、昨年度に開発した、縦ずらし型の空間干渉縞を取得するステップスキャン型赤外域干涉計の外部入力光学系として小型干涉計用発光入力光学系を製作した。本装置の概略図を図 2-24 に、3D 図面、装置の写真を図 2-25 に示す。本装置は、異なる 2 温度に設定できる 2 つの黒体を有し、これより式（1）の F が求められる。また干涉計の連続スキャン動作による計測に加え、光路中にチョッパを設け、ロックインアンプと組み合わせた、干涉計のステップスキャン動作による計測機能も開発し、同機能による、式（1）の装置バイアス： $\varepsilon_{inst}(\lambda)B_{inst}$ の補正を実現できる構成とした。

本年度の本装置開発時の試験計測で取得した、異なる 2 温度の黒体の試験計測結果を図 2-26 に示す。これより開発した装置の正常動作を確認できた。今後、本装置の機

能と有効性を岩石の分光放射率計測を行いながら検証する予定である。

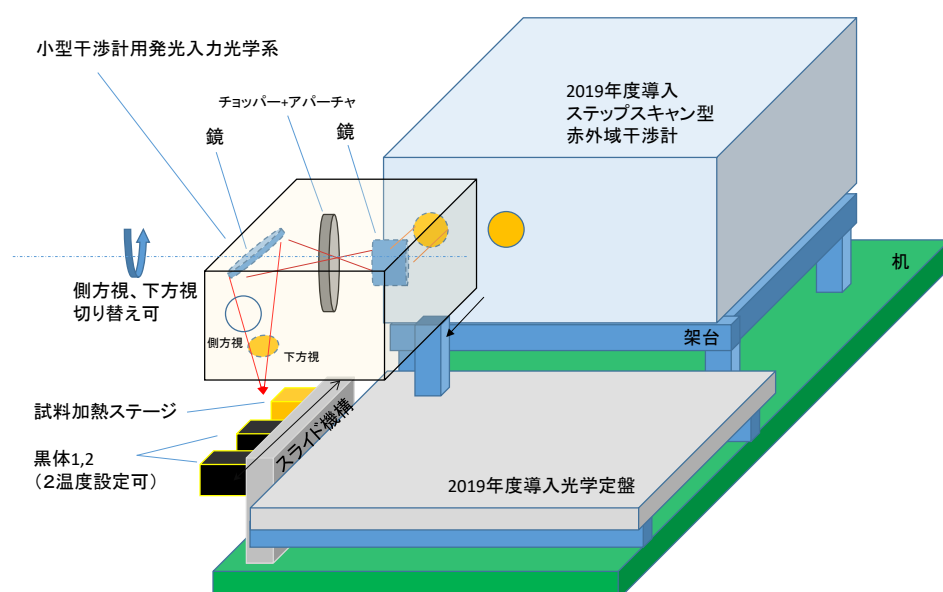


図 2-24 小型干渉計用発光入力光学系概略図

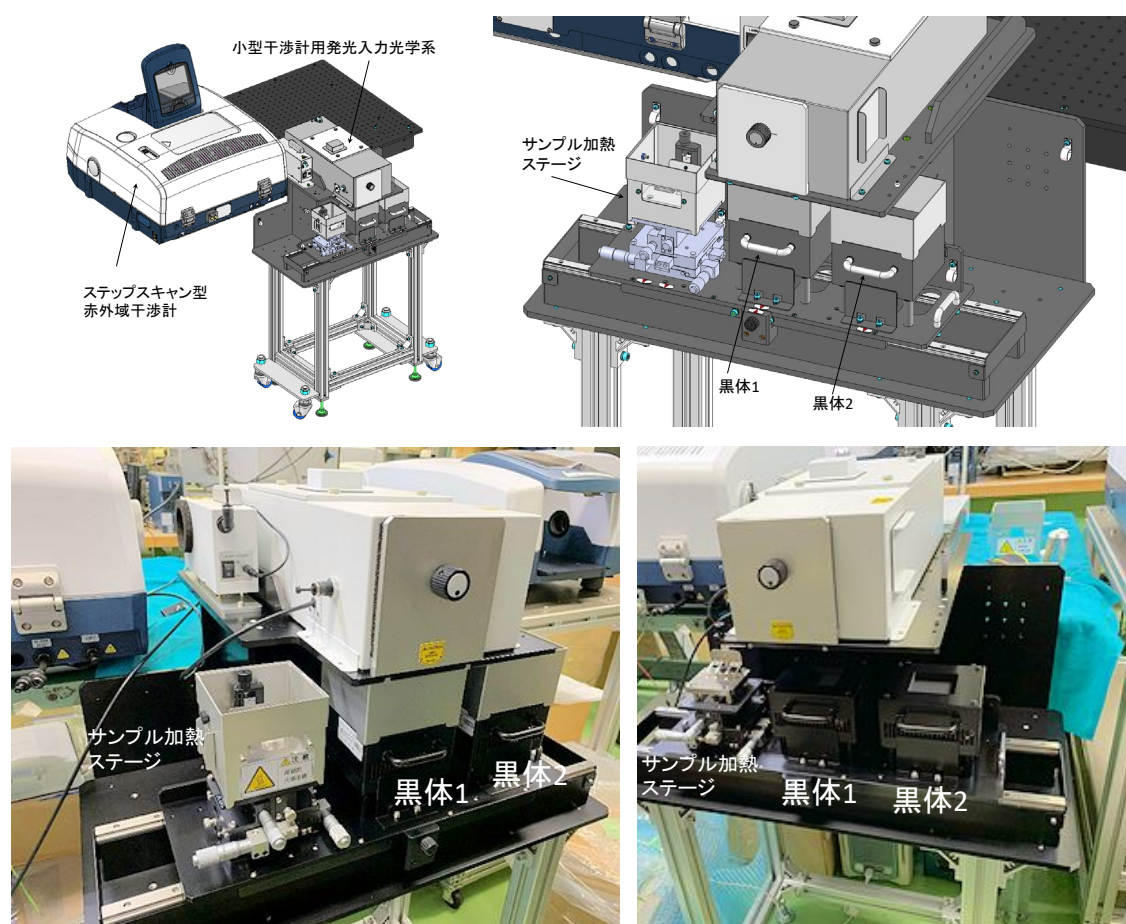


図 2-25 小型干渉計用発光入力光学系 3D 図、装置外観写真

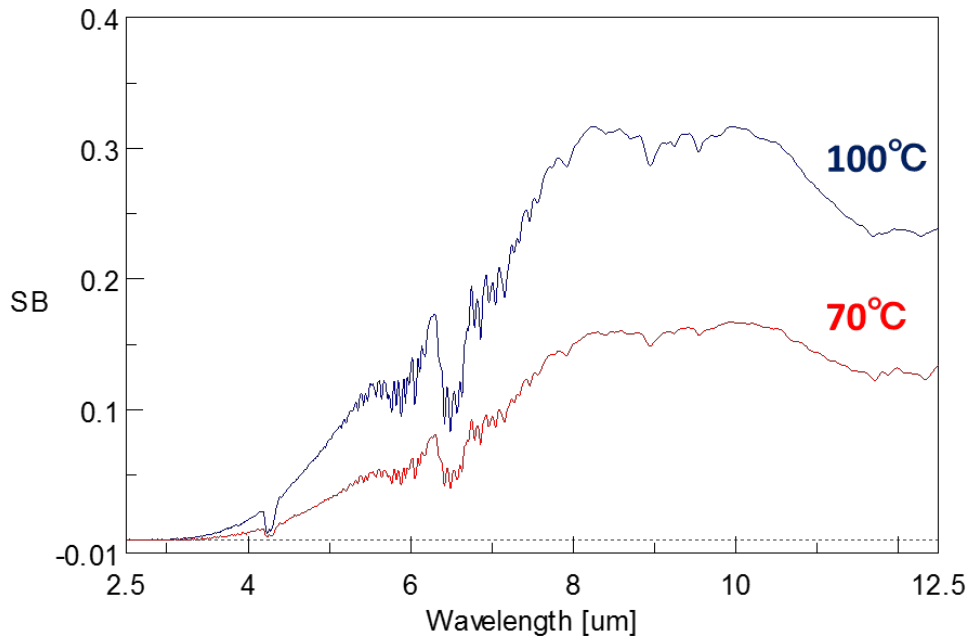


図 2-26 小型干渉計用発光入力光学系による異なる 2 温度の黒体の試験計測結果

f) 多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法の開発

各 SPIC プロトタイプデータをエミュレートしたデータとして、防災科研の ARTS-SE のカメラセンサ (STIC)¹⁴⁾ のデータを活用したスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発を実施し、多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法を開発した。

ARTS-SE¹⁴⁾ には、ARTS で開発した従来の push-broom 方式の可視近赤外センサ、赤外センサに加え、新規に小型のカメラ型センサ Structure and Thermal Information Capture (STIC) を開発し搭載した。STIC は、民生品のカメラ型センサの利用可能性を評価するために、市販の可視カメラおよび非冷却型赤外カメラを組み合わせで構築した航空機搭載仕様のカメラ型センサである。2015 年 11 月、12 月には、ARTS-SE による試験的な火山観測として箱根山、浅間山での性能評価観測を実施した。多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法を開発は、上述の試験的火山観測にて STIC の可視カメラおよび赤外カメラで取得した既存観測データ (箱根山大涌谷、対地高度約 2000m からの観測) を用い実施した。

昨年度までの開発で、オーバーラップ領域を有する連続する複数 (可視 2s 間隔の 51 画像、赤外 0.5s の間隔の 93 画像) の画像データから、計測対象の形状 (ストラクチャ) とカメラの位置、姿勢を同時に推定する技術である SfM/MVS のアルゴリズムに着目した検討を行った結果、可視画像で空間分解能約 16cm、赤外画像で空間分解能約 1.3m のオーバーラップ率 90% 程度の観測画像、および既知座標との対応がつく GCP を用いることで、SfM/MVS 処理により地形図 (UTM 座標) に重畳可能なオルソ補正画像の作成 (ストラクチャ情報の推定) が可能であることが分かった^{2), 15)}。これらの幾何補正の位置精度 (GCP での位置誤差) は、±4~12m 程度 (RMS 誤差: 東西方向で 3.79m、

南北方向で 5.62m) であった。SfM/MVS 処理で推定された地形情報 (DSM) を、画像の端面の領域 (全体の約 15% 程度の画像両端) を除いた領域で既存の DEM と比較したところ、推定精度は、約 30m 以内 (局所的な部分を除くと 10m 以内) を実現できることが分かった。また、これらより、1 枚の観測画像のオルソ画像や等高線図の作製も実現できた。特に地熱地帯では、SfM/MVS 処理より求めた可視画像と赤外画像のオルソ画像および等高線図の比較解析より、地熱地帯の噴気の影響は、赤外画像の方が小さいことが分かった。

令和 2 年度は、上述した連続する観測画像の位置合わせが可能なことを利用し、大涌谷の 2015 年の噴火で生じた 15-1 火口を観測した連続する 20 枚の赤外画像 (計測間隔 0.5s の 9.5s 間の観測画像、約 $0 \sim \pm 19^\circ$ の観測角で 15-1 火口を観測、図 2-27、2-28 参照) を用い、15-1 火口の最高輝度温度および放熱率の推定を行った¹⁶⁾。これらの結果より、9.5s 間の観測中に値は両者とも約 $\pm 50\%$ 程ゆらいていることがわかり、このような地熱域の表面現象を、STIC は従来のワンショットの観測よりも、より高い精度で計測できることが分かった (図 2-29)。これより、同様のカメラ型センサである、各 SPIC の連測する観測データを SfM/MVS 処理することでも、多入射角時系列データによる地熱地帯の熱源分布推定が可能であると考えられ、今回、開発した手法は、各 SPIC のデータ処理手法として活用できると予想される。

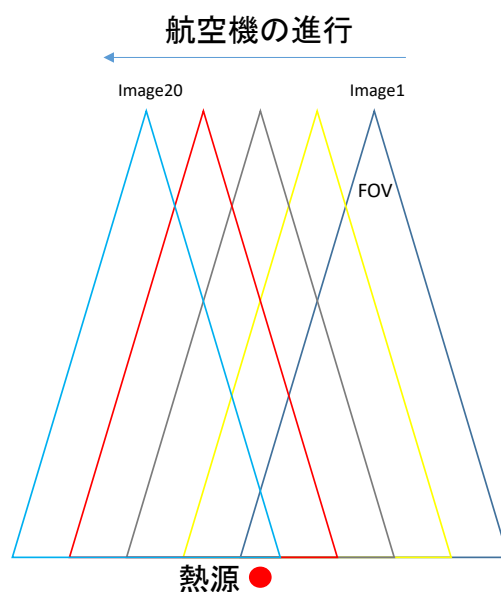


図2-27 STICの多入射角時系列データ (連続熱源観測データ) 取得模式図

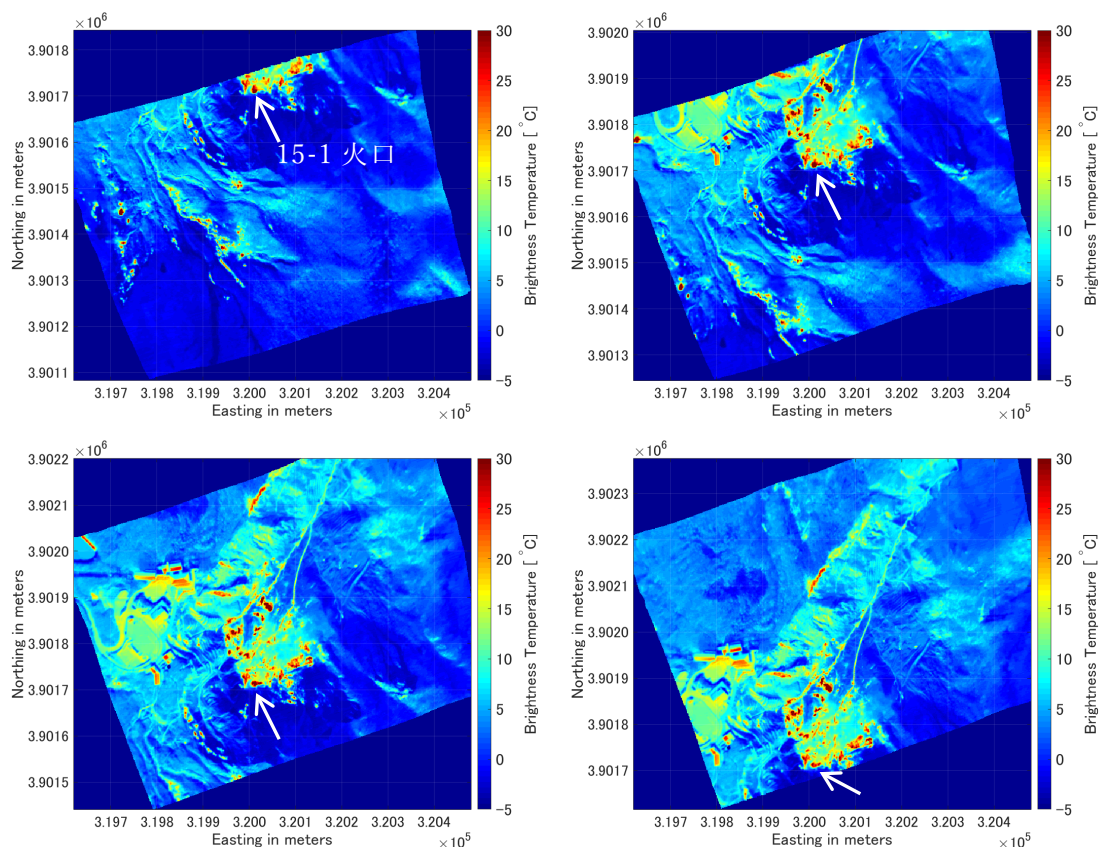


図2-28 STICの多入射角時系列データ（連続熱源観測データ例（2.5秒間隔））

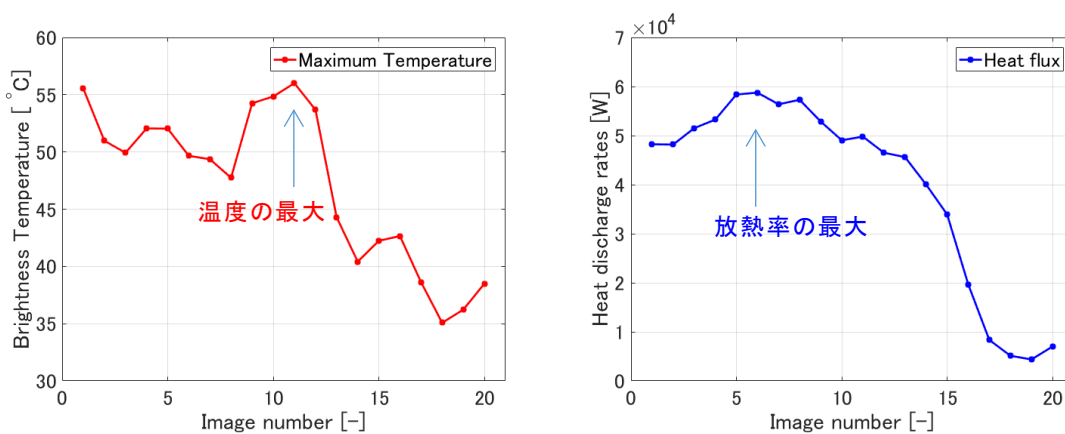


図2-29 STICで0.5秒間隔，9.5秒間（20枚の画像）観測した大涌谷15-1火口の最高温度と放熱率の変化。1回の観測よりも的確に熱源の情報を把握可能

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

昨年度までの技術開発^{2), 17)}で、可視画像分光装置 (Micro Hyperspectral E) の相対反射率データが岩石のスペクトル情報¹⁸⁾として活用できることと、および、スペクトル推定のデータベースとして多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトル取得として、火山観測井工事で取得したコア試料の画像分光計測が有効と結論した¹⁾。参考として昨年度までの確立した、可視画像分光装置によるコア試料の計測の様子を図 2-30 に示す。

令和 2 年度は、スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討として、昨年度までに開発した防災科研が有する火山観測井工事で取得した 50 cm コア箱 (孔底コア用の 50 cm コア箱) 中のコアをスキャン (最大 20cm) し画像分光計測する方法を発展させ、50 cm コア箱全体をスキャンできる装置開発として、a) 大型試料スキャンステージの開発 (設計、製作) を実施した。

a) 大型試料スキャンステージの開発

開発した大型試料スキャンステージの 3D 図を図 2-31 に、完成した装置の外観の写真を図 2-32 に示す。開発した本装置の搭載可能最大サンプルサイズは $L \times W = 760 \times 500$ mm、搭載可能最大重量は 136 kgf であり、50 cm コア箱 (孔底コア用の 50 cm コア箱) の全体を 1 回のスキャン動作でスキャン可能である。

本装置の全視野の特性を検証するため、試験計測を行った。最大サンプルサイズのスキャンの様子とスキャン画像を図 2-33 に示す (段ボールを計測)。また照明光の直下および両サイドの点の分光放射輝度と、反射標準 (白) との比較で得られた分光反射率の試験計測結果を図 2-34 に示す。視野が照明の直下から視野の両サイドに離れると、分光放射輝度は低下し照度の強度は低くなることが分るが、サンプルの分光反射率は視野の中心、両サイドで同様に計測できていることが分る。

以上の結果より、今後、防災科研が 2009 年度以降に北海道から九州で掘削した火山観測井 35 か所のボーリングコア試料の 50 cm コア箱 (孔底コア用の 50 cm コア箱) の画像分光データを順次計測し、スペクトルデータベースを構築する準備が整った。こ

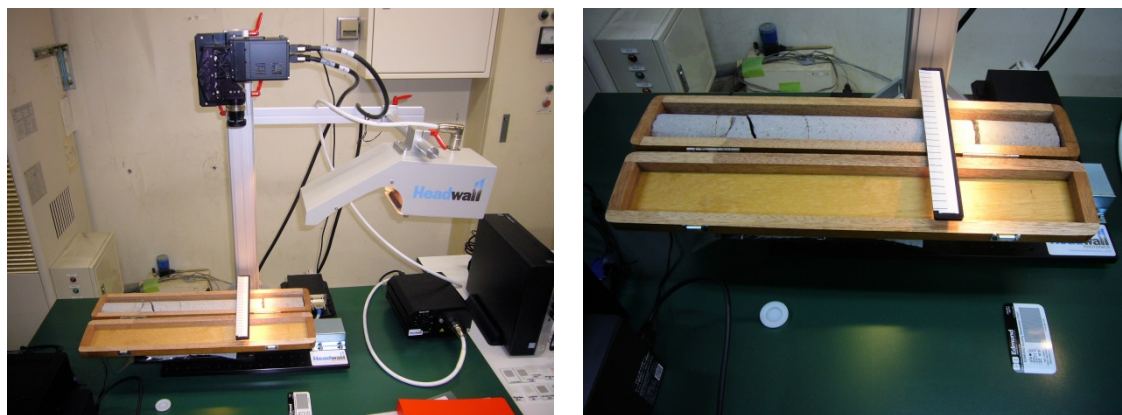


図 2-30 可視画像分光装置によるコア試料の計測。計測全景 (左)、スキャンステージに搭載した計測中のコア試料 (右) (スキャン範囲は約 20cm でコアの一部分のみ)

れに加え、本装置は、現有の防災科研の V-net の観測井掘削時に得られた大多数のコアが保管されている形態である、国土交通省仕様のコア箱（長さ 1030mm、直径 63mm のコアが 5 列で保管された形態）を箱のままステージに搭載しスキャン可能である。長さ方向は、コア箱の搭載位置を長さ方向にずらした 2 回（スキャン範囲は最大スキャン範囲の 1.35 回分）のスキャン動作でコア箱全体をスキャンできる。今後、この計測も検討する予定である。

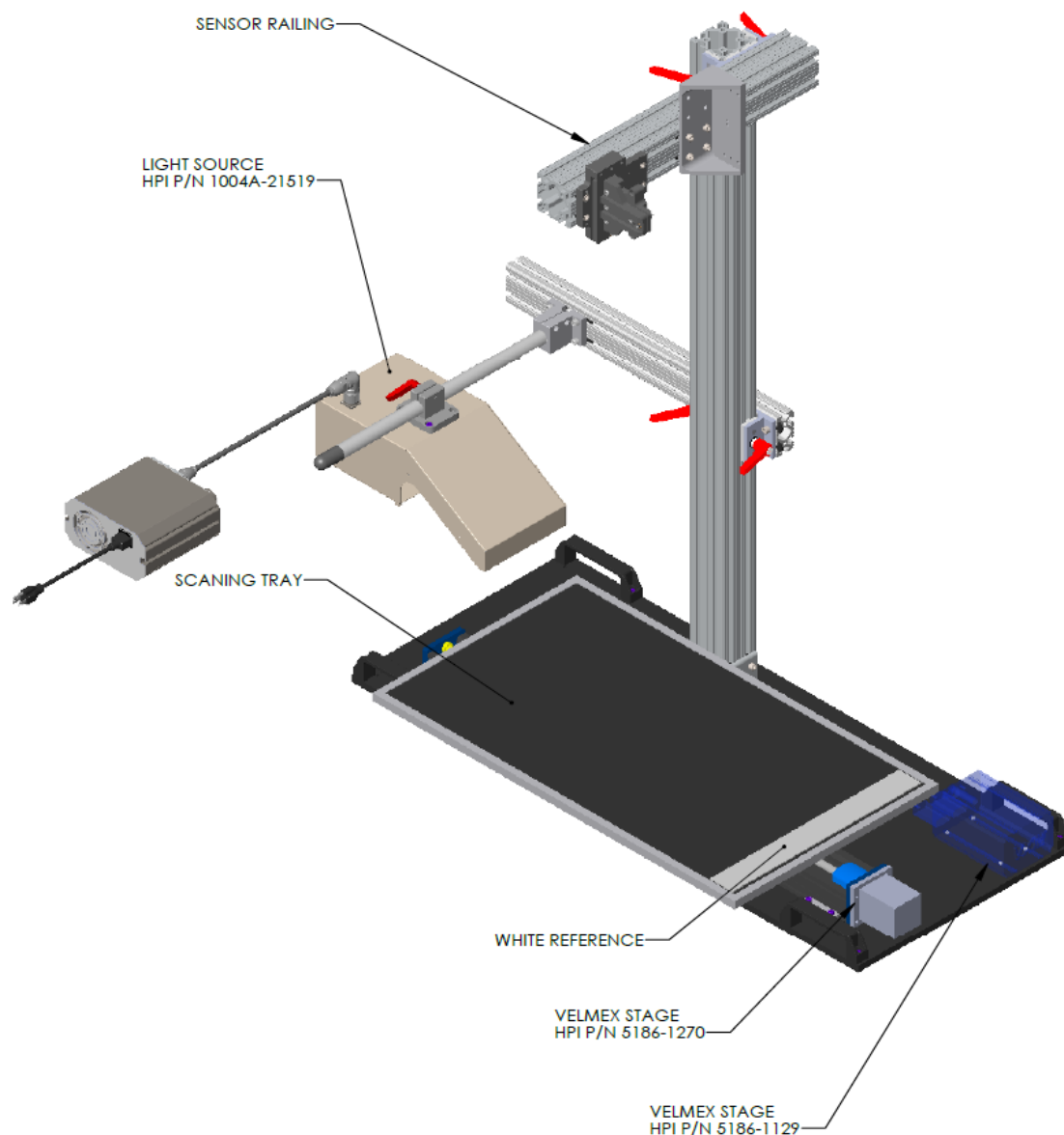


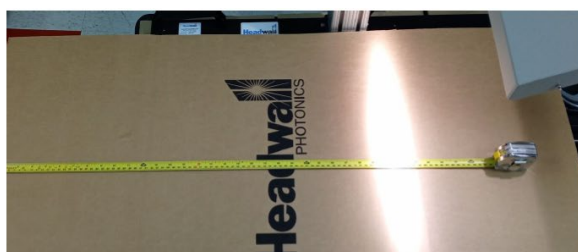
図 2-31 開発した大型試料スキャンステージの 3D 図面



図 2-32 完成した大型試料スキャンステージの外観写真



スキャン開始



スキャン終了



図 2-33 最大サンプルサイズのサンプルの試験計測の様子とスキャン画像

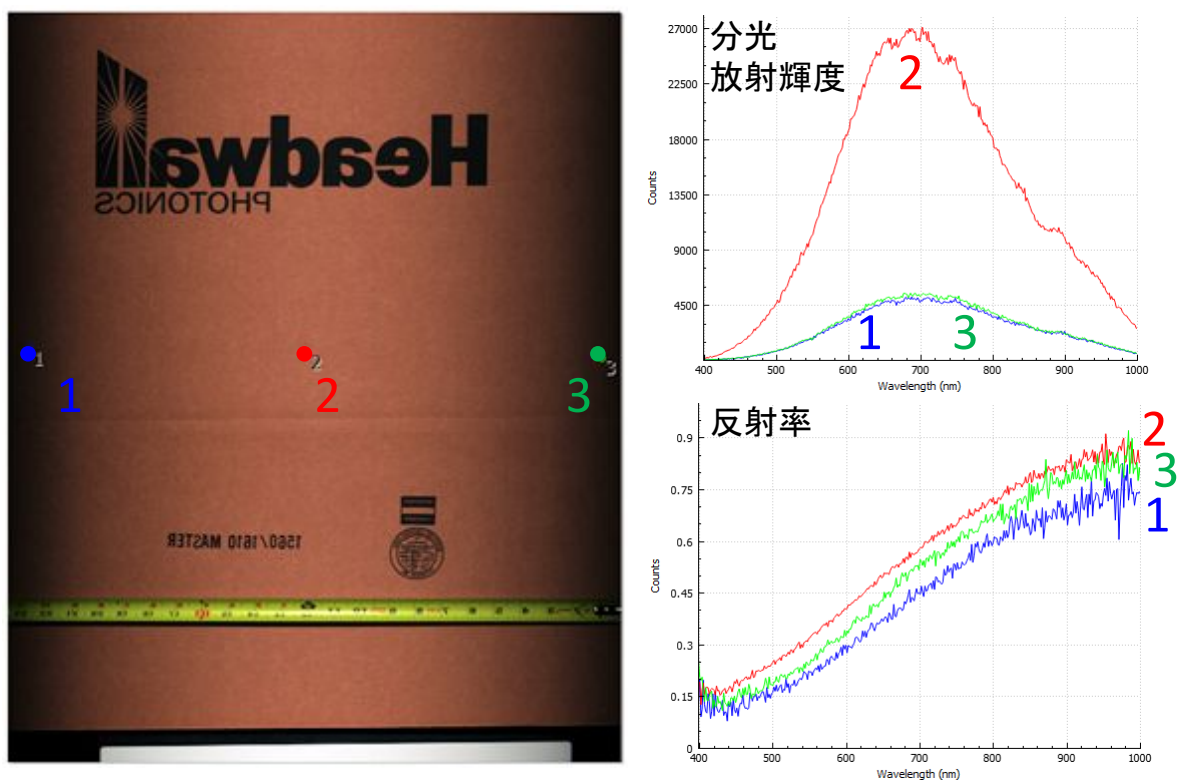


図 2-34 照明光の直下および両サイドの点の分光放射輝度と、反射標準（白）との比較で得られた分光反射率の試験計測結果

(c) 結論ならびに今後の課題

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 2 年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプの小型化のための開発として、a) 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発、b) 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発、c) SPIC プロトタイプによる火山試験観測、d) 可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業、e) 小型前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の設計製作を実施した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討として、f) 多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法の開発を実施した。

非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発では、屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラの設計、製作仕様検討及び同装置のハード部分の製作を実施した。小型化を考慮し、温度とガスを観測する最小限必要な装置構成を検討した結果、装置は 2 眼の赤外カメラ (温度およびガス観測用) および可視カメラ (2K フォーマット) から構成し、それらを屋外使用可能なカメラハウジングに格納する仕様のハード部分製作を実現できた。製作した装置の性能検証の結果、赤外カメラ 1、2 は環境温度-10～50℃において、カメラ 1 の NETD は環境温度、-10、0、10、20、30、40、50℃においてターゲット-40～120℃での NETD は、ほぼ 0.1K 以内を達成できること、カメラ 2 の NETD は、約 0.6～0.8K 以内であることが分かった。この結果より、ハード的な設計性能は、概ね達成でき、来年度、同装置のソフトウェアの製作実施を行えると結論できる。また、来年度の開発では、本年度実施した SPIC プロトタイプによる火山試験観測の結果、可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業の結果を考慮した開発を実施すること (例：装置の恒温化対策、オンサイト校正手法の開発) が課題である。

冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発では、小型冷却型赤外カメラ (MWIR 領域) の仕様検討、設計、製作を行った。本装置は MWIR 領域の特性を生かし、LWIR 領域のカメラよりも高温域の輝度温度を計測する仕様とした。開発した装置の試験データ取得より、設計性能が概ね達成できていることが確認できた。SPIC-C (LWIR) プロトタイプとの同時運用を考慮し、SO₂ ガス濃度分布観測用時のリファレンスバンドとして機能する、9000～14000nm (LP9000) の感度を持つ非冷却型 VGA 型赤外カメラ (カメラ 2 (SPIC-C)) を新規に製作し、同装置の試験データ取得より、設計性能が概ね達成できていることが確認できた。以上より、来年度は SPIC-C を MWIR 領域および LWIR 領域の冷却型カメラ、2 つの非冷却型赤外カメラ (リファレンスバンド) を有するシステムを開発することが可能と結論できる。開発の課題として、SPIC-UC 同様に装置の恒温化対策、オンサイト校正手法の開発が挙げられる。

SPIC プロトタイプによる火山試験観測として、浅間山での火山試験観測を 2021 年 10 月 20 日 (14～16 時)、21 日 (13～16 時) を実施できた。この浅間山での火山試験観測では SPIC-UC と SPIC-C (LWIR) の屋外での一連の動作確認が行えたとともに、浅間山の噴煙を観測でき機器が概ね正常に機能していることが確認できた。これにより、昨年度までに開発したプロトタイプの屋外での性能検証が行えたことが結論できる。しかし、

天候条件（曇天）ため SO_2 ガスの検出の確認までには至らなかったため、この検証作業は来年度以降の課題である。また、この試験観測では、低温（ -30°C 等）の天空を背景とした計測では、装置バイアスの補正の精度が十分ではない可能性が考えられ、校正時の補正関数では補正しきれない装置バイアスを補正する場合、精度を 1°C よりも高い精度で補正を実現する必要があると結論できる。これらは、今後の開発の課題である。

可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業では、浅間山での火山試験観測結果で今後の開発課題として上げた、装置バイアス補正の精度を 1°C よりも優れた補正手法の開発、実現が望まれることを踏まえた検討を実施し、主に、屋外仕様での装置の小型化、温度変動対策等の検討を行い、野外の環境中での安定動作の向上策を検討した。この結果、現行の SPIC-UC(4VGA)、SPIC-SS プロトタイプ of 小型方策として、これまでに開発した非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを 4 台格納できる小型のカメラ格納ユニットの概念設計および同小型装置へ恒温化機能および装置バイアス補正用黒体を追加する概念設計を完了した。来年度以降の装置開発に、この概念設計を反映させる必要があると結論できる。今後の開発においては、消費電力の低減、小型化と装置安定性のバランスの見極め等も課題である。

小型前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の設計製作では、ISH は原理的にフィルター分光方式の ISH よりも多波長の情報を得ることができる画像分光用の干渉分光方式の装置開発として、昨年度までに開発した横ずらし型の干渉計に用いるビームスプリッタの専用ホルダの製作を行った。この結果、装置のアライメント作業が容易になった結論できる。また昨年度までに開発した縦ずらし型の干渉計に用いる小型干渉計用発光入力光学系の製作を行い、画像分光（分光放射輝度計測）にマイケルソン方式の干渉計を利用する場合に補正すべき項目（装置バイアス、環境バイアス）を補正する機能を有する装置を設計、製作した。試験計測の結果、製作した装置は、正常に動作していると結論できる。今後、本装置の機能と有効性を、岩石の分光放射率計測を行いながら検証することが課題である。

多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法の開発では、各 SPIC プロトタイプのデータをエミュレートしたデータとして、防災科研の ARTS-SE のカメラセンサ（STIC）のデータを活用したスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発を実施し、多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法を開発した。その結果、大涌谷の 2015 年の噴火で生じた 15-1 火口を観測した連続する 20 枚の赤外画像（計測間隔 0.5s の 9.5s 間の観測画像、約 $0\sim\pm 19^\circ$ の観測角で 15-1 火口を観測）の SfM/MVS の結果を用い、15-1 火口の最高輝度温度および放熱率の推定を行った結果、 9.5s 間の観測中に値は両者とも約 $\pm 50\%$ 程ゆらいていることがわかり、多入射角時系列データは、このような地熱域の表面現象を、ワンショットの観測よりも、より高い精度で計測できると結論できる。これより、同様のカメラ型センサである、各 SPIC の連測する観測データを SfM/MVS 処理することでも、多入射角時系列データによる地熱地帯の熱源分布推定が可能であると考ええる。開発した手法を、各 SPIC の実際のデータ処理手法として活用することは、今後の課題である。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

本年度は、スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討として、昨年度までに開発した防災科研が有する火山観測井工事で取得した 50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱）中の 20cm のコアをスキャンし画像分光計測する方法を発展させ、50 cm コア箱全体をスキャンできる装置開発として、a) 大型試料スキャンステージの開発（設計、製作）を実施し、同装置の製作を完了した。また同装置の性能確認のための試験データを取得した。

性能確認の結果、本装置の搭載可能最大サンプルサイズは $L \times W = 760 \times 500 \text{ mm}$ 、搭載可能最大重量は 136kgf であり、50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱）の全体を 1 回のスキャン動作でスキャン可能であることが分かった。また、本装置の全視野の特性を検証するための試験計測を実施し、視野が照明の直下から視野の両サイドに離れると分光放射輝度は低下し照度の強度は低くなることものの、サンプルの分光反射率は視野の中心、両サイドで同様に計測できることを確認した。

以上の結果より、本年度製作した大型試料スキャンステージを用い、今後、防災科研が 2009 年度以降に北海道から九州で掘削した火山観測井 35 か所のボーリングコア試料の 50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱）の画像分光データを順次計測し、スペクトルデータベースを構築するための準備が整った。今後、50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱）の画像分光データを順次計測し、スペクトルデータベースを構築することが課題である。さらに、開発した大型試料スキャンステージは、現有の防災科研の V-net の観測井掘削時に得られた大多数のコアが保管されている形態である、国土交通省仕様のコア箱（長さ 1030mm、直径 63mm のコアが 5 列で保管された形態）を箱のままステージに搭載し、コア箱の搭載位置を長さ方向にずらす 2 回のスキャン動作で国土交通省仕様のコア箱全体をスキャンできることが予想されるため、この計測操作の有効性、データベース構築への活用の検証も今後の課題である。

(d) 引用文献

- 1) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」火山表面現象遠隔観測技術の開発，次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト平成 31（令和元）年度成果報告書，pp. 70 - 122，2019.
- 2) T. Jitsufuchi, Development of an optical multispectral remote sensing system for measuring volcanic surface phenomena-Promotion Project for Next Generation Volcano Research B2(subtopic2-2), J. Disaster Res., Vol.14, No.5, pp. 728 - 743, 2019.
- 3) 實渕哲也・三輪学央・長井雅史，次世代火山研究推進事業 課題 B サブテーマ 2-2：火山表面現象遠隔観測技術の開発（2019 年度秋季大会），p. 198.，2019.
- 4) 實渕哲也，火山表面現象計測用の非冷却マルチバンド赤外カメラの開発，日本リモートセンシング学会第 67 回学術講演会論文集，pp. 271-272.，2019.
- 5) 實渕哲也・三輪学央・長井雅史，火山表面現象遠隔観測技術（SPIC-C）の開発，日本火山学会講演予稿集 2020 年度 秋季大会，p. 122.，2020.

- 6) 實渕哲也, 火山表面現象計測用の冷却型赤外カメラの開発, 日本リモートセンシング学会第 69 回学術講演会論文集, pp.143-144., 2020
- 7) Prata, A.J.; Bernardo, C. Retrieval of sulfur dioxide from a ground-based thermal infrared imaging camera. *Atmos. Meas. Tech.* 2014, 7, 2807-2828.
- 8) A.M. Baldridge, S.J. Hook, C.I. Grove, G. Rivera, "The ASTER spectral library version 2.0," *Rem. Sens. Environ.*, Vol. 113, pp. 711-715, 2009.
- 9) Gabrieli, A.; Wright, R.; Porter, J.N.; Lucey, P.G.; Honnibal, C. Applications of quantitative thermal infrared hyperspectral imaging (8-14 μm): Measuring volcanic SO₂ mass flux and determining plume transport velocity using a single sensor. *Bull. Volcanol.* 2019, 81.
- 10) Nathalie, H.; Charlotte, S.; Sébastien, P.; Giuseppe, P.; Valéry, C.; Yan, F.; Tjarda, R.; Armande, P. F.; Delphy, R.; Laurence, C.; Stéphane, C.; Stéphane, L.; Alessandro, L. S.; Tommaso F. Infrared Hyperspectral and Ultraviolet Remote Measurements of Volcanic Gas Plume at MT Etna during IMAGETNA Campaign. *Remote Sens.* 2019, 11(10), 1175
- 11) Steven W. Ruff, Philip R. Christensen, Paul W. Barbera, 1 and Donald L. Anderson, Quantitative thermal emission spectroscopy of minerals: A laboratory technique for measurement and calibration, *J.G.R.*, 102, No. B7, pp14899-14913, 1997.
- 12) Andrew R. Korb, Peter Dybwad, Winthrop Wadsworth, and John W. Salisbury, Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity, *App. Opt.*, 35, No. 10, pp1679-1692, 1996.
- 13) George Mathew,, Archana Nair, T K Gundu Rao and Kanchan Pandel, Laboratory technique for quantitative thermal emissivity measurements of geological samples, *J. Earth Syst. Sci.*, 118, No. 4, pp391-404, 2009.
- 14) T. Jitsufuchi, DEVELOPMENT OF AN AIRBORNE RADIATIVE TRANSFER SPECTRAL SCANNER FOR A SINGLE-ENGINE AIRCRAFT, *Geoscience and Remote Sensing (IGARSS)*, 2019 IEEE International Symposium, pp. 9141 - 9144., 2019.
- 15) 實渕哲也, 航空機搭載型センサ (ARTS-SE) のカメラシステム (STIC) による箱根山 (大涌谷) の地熱地帯の観測, 日本リモートセンシング学会第 65 回学術講演会論文集, pp.217-220, 2018
- 16) T. Jitsufuchi, MULTI-ANGLE OBSERVATION OF THE GEOTHERMAL AREA IN THE HAKONE VOLCANO (OWAKUDANI) USING AN AIRBORNE SENSOR (STIC: ARTS-SE' S CAMERA SYSTEMS), *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 6842-6845, doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323995.
- 17) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」火山表面現象遠隔観測技術の開発, 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト平成 30 年度成果報告書, pp. 67 - 97, 2018.
- 18) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: 重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定, *光学*, Vol.27, No.7, pp.384-391, 1998.

(e)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

赤外カメラ用同期制御・記録ソフトを改良した。

3)仕様・標準等の策定

なし

(3)令和3年度の業務計画案

令和3年度は、当初計画どおり、以下の検討を実施する。

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域(8-14 μ m)型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域(8-14 μ m)型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプを完成する。MWIR(3~5 μ m)領域のVGAカメラセンサーヘッドとLWIR(7.5~9.5 μ m)領域のVGAカメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ(SPIC-C)のフィールドタイプを完成する。非冷却型赤外FPAと一体化した画像分光装置(ISH)のフィールドタイプを完成する。スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のフィールドタイプを完成する。SPIC-UC、SPIC-Cとの一体化手法を構築する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。

具体的には、非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプの開発では、これまでに試作したSPIC-UCの非冷却型LWIR(8-14 μ m)領域のVGA、XGAカメラセンサーヘッドからなるSPIC-UCプロトタイプの試験観測結果等の解析を参考とし、非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプを製作する。SPIC-Cのフィールドタイプの開発では、これまでに試作したSPIC-Cプロトタイプの試験観測結果等を参考とし、MWIR(3~5 μ m)領域とLWIR(7.5~9.5 μ m)領域のVGAカメラセンサーヘッド、非冷却型LWIR(8-14 μ m)領域のVGAカメラセンサーヘッドからなるSPIC-Cフィールドタイプを開発する。SPIC-SSのフィールドタイプの開発では、これまでに試作したSPIC-SSプロトタイプの試験観測結果等を参考とし、SPIC-SSフィールドタイプを開発する。ISHの開発では、各フィールドタイプにフィルター方式のISHを製作する。また画像分光装置のプロトタイプ(ISH)の改造として画像分光用前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計用積分球用検出器の製作を行う。また、SPICの各プロトタイプによる火山試験観測を行い、SPICの各フィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得する。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータ

ベースフォーマットの検討を行う。

具体的には、これまでに開発した岩石コアスキャン装置への光源追加と同装置を用いた防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの試作を行う。