

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

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」
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

(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 研究コミュニティー（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た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にする。

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、データベース化した。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の構築を行った。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開発における課題の一つは、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った。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、そのノイズを劇的に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、手動方式に関する計測実験を浅間山で実施し、手動方式用の 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。

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、令和元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、衛星 SAR を用いた事例研究として、草津白根山、蔵王山、吾妻山、有珠山のほか、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。

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 3 年度における成果の目標及び業務の方法

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、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。さらに、SAR 画像に重畳するノイズの低減を目的として、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た。令和 3 年度においては、その有用性を再度確認した後に本体に組み込み、可搬型レーダー干渉計の運用機を

完成させる。手動方式の開発においては、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。令和 3 年度においては、その解決法の一つとして、SAR 処理ソフトウェアに、GNSS/INS から得られるアンテナの位置・姿勢情報を用いて、アンテナの動揺を補正する機能を組み込む。

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、これまでの観測データとのペアに SAR 干渉法の適用を試みる。

これまでの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、観測可能場所や許可申請先の調査に時間を要するため、火山活動活発化時等の緊急性の高い場合においても、迅速な観測の実施が困難となる可能性が懸念される。その対策として、可搬型レーダー干渉計の観測可能火山について、あらかじめ観測可能場所の調査を進める予定である。令和 3 年度においては、十勝岳の 62-II 火口の観測に関する調査を行う。

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 3 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、十勝岳、蔵王山、吾妻山、雲仙岳、口永良部島の 5 火山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。令和 3 年度においては、以前の解析において明瞭な地殻変動が検出された三宅島と吾妻山について、地殻変動発生メカニズムの研究や可搬型レーダー干渉計による計測に役立つ利用方法についての検討を行う。また、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を継続して運用する。

国際測地学協会（International Association of Geodesy）の国際会議に参加し、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 3 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、可搬型レーダー干渉計実験機の改良と、性能評価や問題点の洗い出し等を目的とした計測実験を重ねてきた。令和 2 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 DDS 方式の信号発生器を作製し、その有効性を確認した。令和 3 年度においては、コーナーリフレクター計測実験や、吾妻山における車載型による計測実験からその有効性をさらに確認した後、送受信部本体に DDS 方式の信号発生器を組み込んだ。これにより、可搬型レーダー干渉計運用機の完成とし、本センサー名称を SCOPE (SAR for Crustal defOrmation with

Portable Equipment)とした。また、計画当初においては、レーダーセンサーの運搬には車両を利用することを想定していたが、さらに軽量化することにより、人力でも運搬可能な方式でも観測可能とする手動方式の開発にも着手している。手動方式から得られる画像精度は、地上設置方式や車載方式と比べて劣るが、例えば登山を要する場所からの観測も可能になり、観測可能範囲を格段に広げることが可能である。これまでに、手動方式のプロトタイプによる計測実験を行い、画像を得ることに成功しているが、SAR処理精度が十分ではなく、その改良が課題であった。令和3年度においては、その解決方法の一つとして、SAR処理ソフトウェアに、アンテナの動揺を補正する機能を追加した。また、令和元年度、令和2年度に計測を行った霧島山の新燃岳と硫黄山について、令和3年度においても計測を行い、SAR干渉法の適用に成功した。ただし、2年間の干渉ペアの解析結果においては、干渉性の劣化が顕著であった。これまでの実際の火山における計測実験において明らかとなった問題の一つとして、緊急的に観測を実施することになった場合に、可搬型レーダー干渉計による観測可能場所を探すために時間を要するという問題が懸念される。この解決のため、可搬型レーダー干渉計による観測可能火山について、あらかじめ観測場所を調査する。令和3年度においては、十勝岳の62-II火口の観測を対象とした調査を行った。

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3年度においては、令和元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、5火山（十勝岳、蔵王山、吾妻山、雲仙岳、口永良部島）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三宅島と吾妻山で得られた地殻変動について、その発生メカニズムの推定を行った。また、日本の SAR 研究グループ PIXEL で共有している PALSAR、PALSAR-2 データを、衛星 SAR 自動解析システムで利用するためのサーバを継続して運用した。さらに、国際測地学協会（International Association of Geodesy）の国際会議に参加し、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った。

(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運用機の作製

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手動方式（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、ノイズ低減が課題となっており、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。また、令和 2 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、その有効性を確認した。これらの改良により、劇的にノイズを低減することに成功した。

ii) DDS 方式の信号発生器に関する有用性の確認

令和 2 年度においては、精度の高い波形を出力することが可能な DDS 方式の信号発生器を作製し、浅間山における計測実験から、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ることを確認した。令和 3 年度においては、その有効性を再度確認するため、①コーナーリフレクター計測実験、②吾妻山における車載方式による計測実験を行った。

コーナーリフレクター計測実験は、10 月 7 日に筑波山西麓の桜川河畔の広場で行った。計測は 10m のレールを用いた地上設置方式を用いた。計測場所は横幅が数 10m

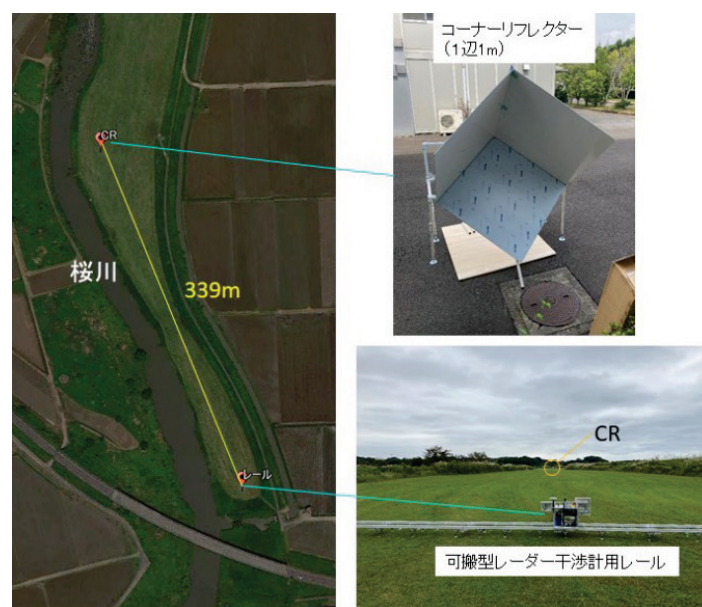


図 1-1 コーナーリフレクター計測実験の観測場所と計測機器設置位置

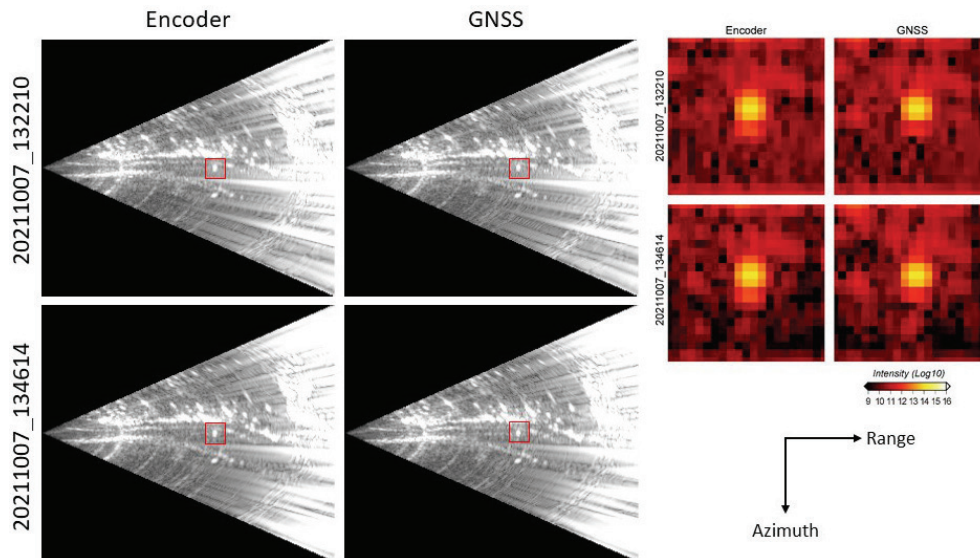


図 1-2 コーナーリフレクター計測実験で得られた散乱強度画像

の細長い平坦地であり、その東側は堤防があり、西側には桜川が流れている。また、両側には背の高い草が密集している。その南端に地上設置方式のレール、その 339m 前方に 1 辺 1m の立方体のコーナーリフレクターを設置し、計測を行った(図 1-1)。本計測実験においては、設置したコーナーリフレクターからの反射波を、明確な点像として捉えられることを確認する。

図 1-2 は、計測された 2 回の画像について、ヘッド部を移動させるモーターのエンコーダーから計算されるアンテナ位置を用いて SAR 処理を行った画像と、GNSS から得られるアンテナ位置を用いて SAR 処理を行った画像を示す。両画像ともに、コーナーリフレクターからの反射波を明瞭な点像として得られることを確認した。他にも画像を取得したが、どの画像についても同様の結果が得られている。

車載方式による観測、および、DDS 方式による観測データへの SAR 干渉法適用に関して、適切な結果が得られるかを確認するため、2021 年 10 月 28 日と 29 日に、吾妻山の大穴火口を対象として、計測実験を行った。吾妻山は東北地方の福島県北部に位置する火山群である。大穴火口はその火山群に含まれる一切経山(1949m)の南山腹の約 1700m に位置しており、現在も噴気活動が見られる活動的な火口である。

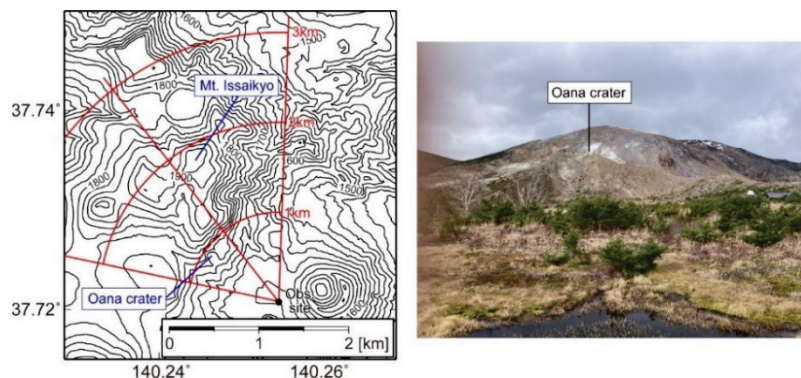


図 1-3 車載方式の計測実験を行った吾妻山の観測場所および観測場所からの風景

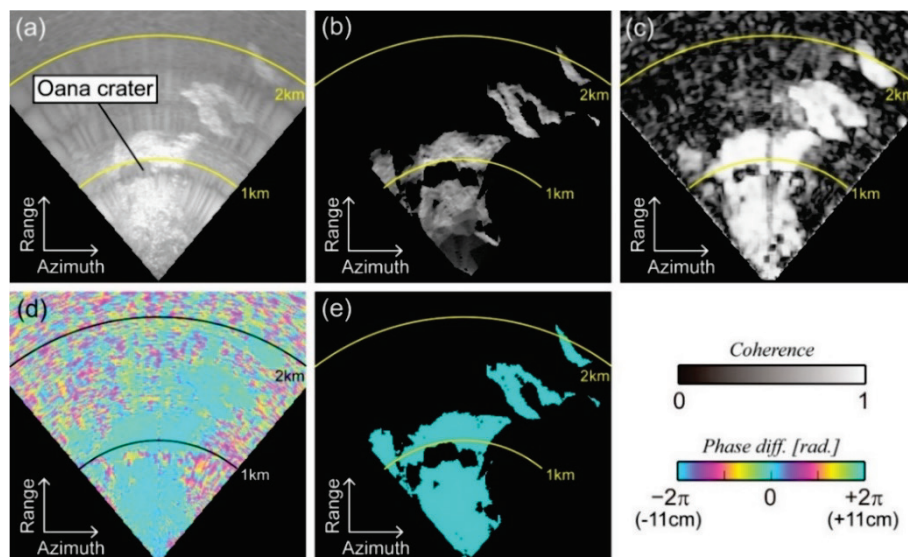


図 1-4 吾妻山観測データの解析結果．黄色線と黒線はレーダー設置位置からのレンジ距離を示す。(a) 観測された散乱強度画像。(b) 地形データからシミュレートされた散乱強度画像。(c) コヒーレンス画像。(d) 初期干渉画像。(e) 数値気象モデル解析値から計算した大気遅延量。

大穴火口周辺の植生は薄く、植生による干渉性劣化は顕著ではないと考えられる。最近では、衛星 SAR の解析から、膨張変形が繰り返して発生していることが明らかになっており（姫松・小澤，2021¹⁾）、次に膨張が発生した時に、その地殻変動を捉えるためのベースデータとすることも、本計測の目的の一つである。大穴火口の南方の標高 1600m には、大穴火口を含む一切経山の南山麓を一望できる道路が設置されており、本実験においては、その道路を利用して、車載方式による計測を行った（図 1-3）。観測地点から大穴火口までの距離は約 1km である。観測においては、SUV 車の屋根に車載方式用のアンテナマウントフレームを吸盤で固定し、道路を低速で走行しながら、レーダー波の送受信を行った。本実験においては、迅速に計測を行うことを目的とした実験として、別の車を観測地点から約 300m 離れた場所に停車し、その屋根に GNSS アンテナを固定して、レーダーアンテナの位置決めのための基準点とした。

本観測で得られた散乱強度画像を図 1-4(a) に示す。これは国土地理院の 10m DEM からシミュレートした散乱強度画像（図 1-4(b)）と整合的であり、ノイズも小さいように見える。さらに、10 月 28 日と 29 日に得られた SAR データペアに SAR 干渉法を適用したところ、有意な後方散乱が得られた領域ではクリアな干渉縞が得られ（図 1-4(c)）、その領域のコヒーレンスはほぼ 0.8 以上であった（図 1-4(d)）。これは、車載方式でも地殻変動を検出するうえで十分なコヒーレンスが得られることを示している。干渉画像については、おおよそ平坦な位相分布が得られた。この 1 日に特別に大きな火山活動の活発化は観測されておらず、それと整合する結果である。つまり、得られる位相分布についても、特に、空間的な歪みはなく観測できていると考えられる。以上のように、車載方式の繰り返し観測により得られた SAR デ

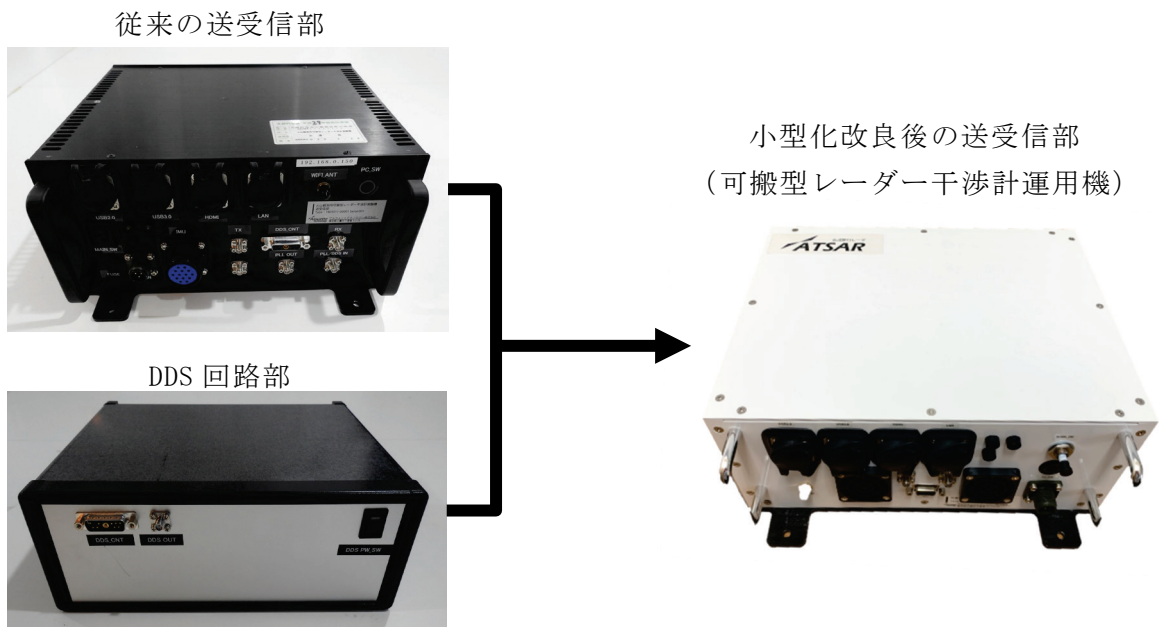


図 1-5 従来の送受信部と DDS 信号発生器、および、一体化後の送受信部

一タにも、適切に SAR 干渉法の適用が可能であることが確認された。また、吾妻山については、今後も定期的に観測を行い、地殻変動検出を試みる予定である。

iii) DDS 方式の送受信部への組み込み（運用機の完成）

令和 2 年度と前述した計測実験から、DDS 方式の信号発生器の有効性を確認した。そこで、可搬型レーダー干渉計実験機送受信部に DDS 方式の信号発生器を組み込む

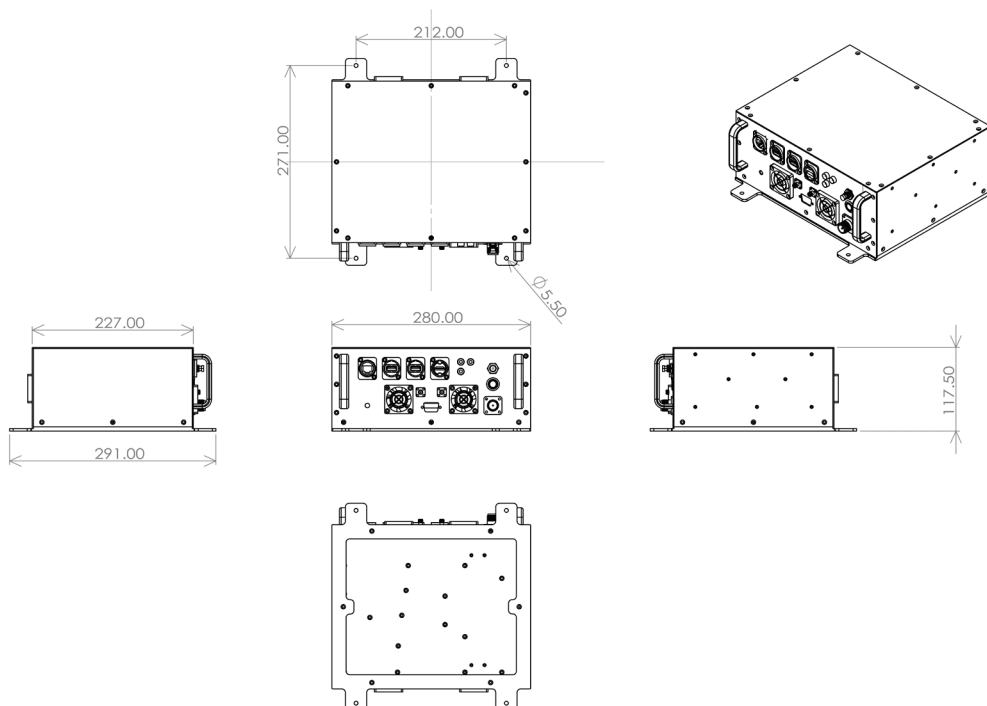


図 1-6 可搬型レーダー干渉計送受信部の小型改良後の外観構造図

(図 1-5)。また、本改修においては、内部基板等を小型化することにより、従来の送受信部とサイズを大きく変えないようにするとともに、軽量化を行う。

図 1-6 は、DDS 方式の信号発生器を組み込んだ可搬型レーダー干渉計の運用機の外観構造図である。これまでに開発した可搬型レーダー干渉計の地上設置方式用のヘッド部や手動方式用のケースを改修せずに使用できるように、それらに固定する治具（ベースプレート）は流用した。筐体のサイズは、従来の筐体とくらべて、高さが若干低くなったほかは、ほぼ同じである。重量については、従来の送受信部が約 7kg であったのに対して、軽量の筐体を用いることによって、約 4kg にまで軽量化することができた。改修後の送受信部について送信波形の計測を行い、設定どおりの波形が生成されることを確認した（図 1-7）。また、オフセット周波数 1MHz における位相雑音を計測したところ -137dBc と求まり、改修前と同程度であることが確認された（図 1-8）。

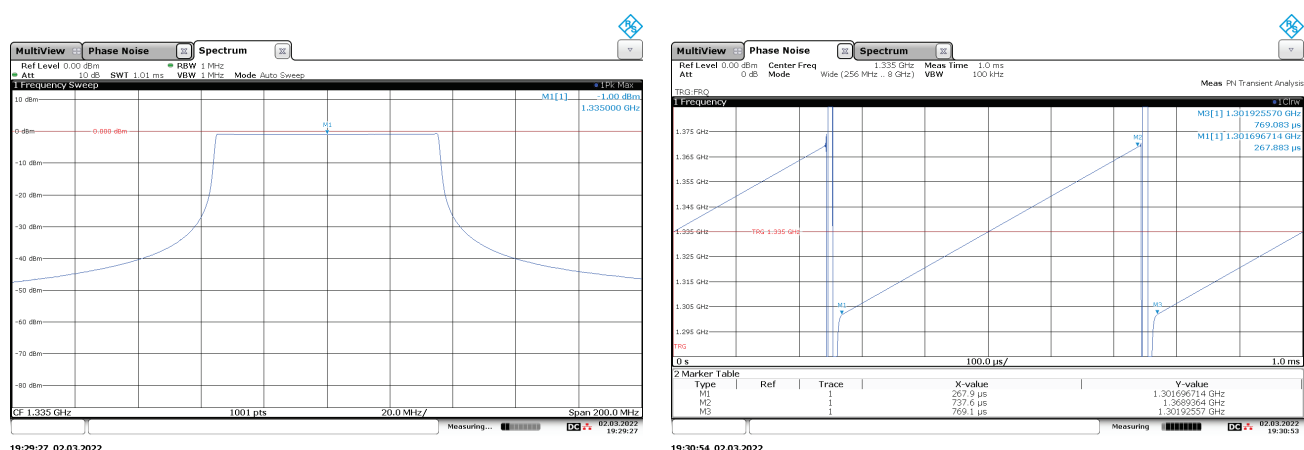


図 1-7 送信帯域幅 70MHz 、パルス繰返し周期 500 μ sec を設定した場合のチャープ信号

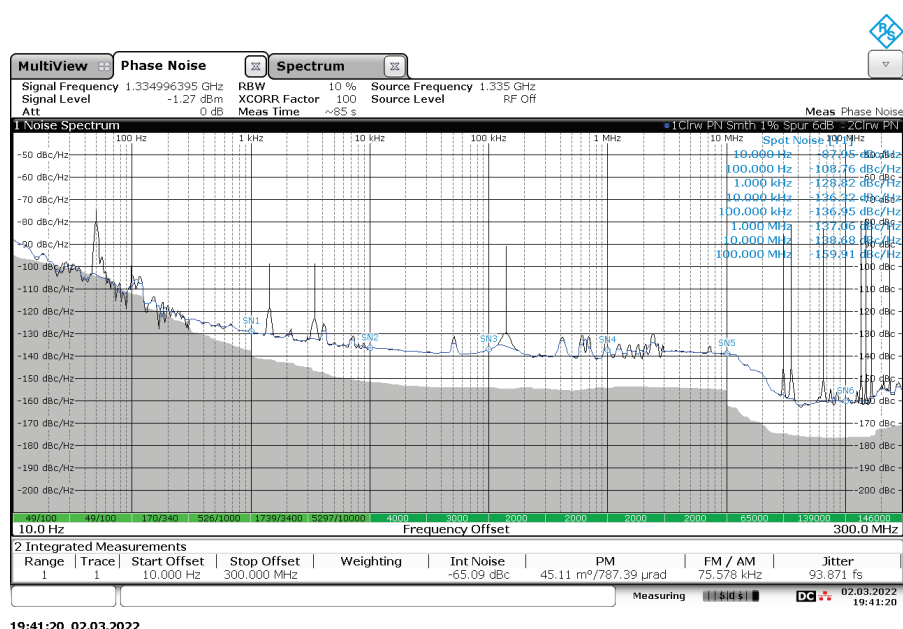


図 1-8 送信する周波数変調連続波の位相雑音

以上の改修により、可搬型レーダー干渉計の運用機の完成とし、本センサーの名称を SCOPE (SAR for Crustal def0rmation with Portable Equipment)とした。

b) 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、2019年から可搬型レーダー干渉計実験機による観測を実施している。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）、地上設置方式で実施した。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は比較的高い。令和元年度の観測は、11月19日と20日、令和2年度の観測は11月17日と11月18日に実施した。

新燃岳の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。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

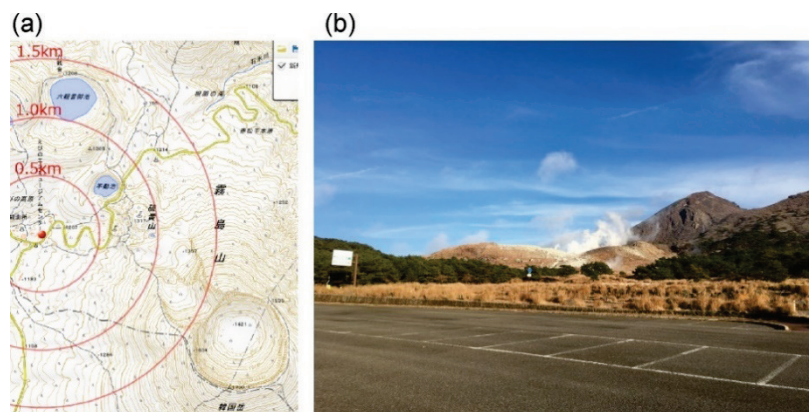


図 1-9 (a)硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）。赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。(b)レーダー設置場所から見た硫黄山。

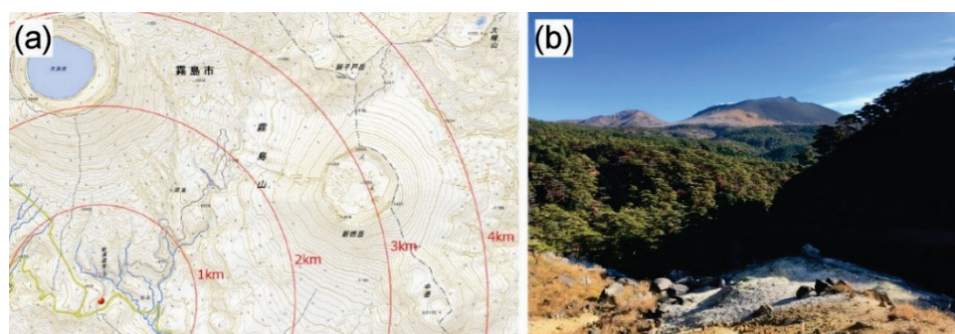


図 1-10 (a)新燃岳観測場所周辺の地図（地理院地図）。赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。(b)レーダー設置場所から見た新燃岳。

渉ペアでは植生による干渉性劣化が顕著に現れる。令和元年度の観測は 11 月 20 日と 21 日、令和 2 年度の観測は 11 月 17 日と 11 月 18 日に実施した。

令和 3 年度の計測は、硫黄山、新燃岳ともに 11 月 9 日に実施した。硫黄山におけるレーン設置位置、新燃岳における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。今年度の観測においては、令和 2 年度に開発した DDS 方式の信号発生器を用いており、これまでの観測とは異なる。

硫黄山における観測時間は約 1 時間であり、約 7 分間隔で繰り返しスキャンを行った。その最初の観測を基準として、11 月 9 日内のデータペアを解析して得られた干渉画像を図 1-11 に示す。同日内の干渉ペアの解析結果においては、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。この期間に特段の変化は見られない。これは、特に大きなノイズに影響されることなく、観測ができたことを示している。図 1-12 は、令和元年度、令和 2 年度、令和 3 年度に取得されたデータのペアを解析して得られた干渉画像を示す。これらの解析においては、気象庁の数値気象モデル（メソスケール）の解析値を用いて、大気電波伝搬遅延量を推定し、除去している。令和元年度と令和 2 年度のペアを解析して得られた初期干渉画像には、レンジ距離に相関するような明瞭な位相変化が求めたが、大気電波伝搬遅延成分を除去することにより、ほぼ平坦な位相変化分布を得ることができた。一方、令和 3 年度を含むデータペアの解析においては、大気電波伝搬遅延成分を除去した後も、レンジ距離に依存するような位相変化が残った。令和 3 年度には、それ以前の観測とは異なり、DDS 方式の信号発生器を使用しており、送信信号の波形が若干異なっている。このため、周波数帯域を合わせこむ処理が必要であり、残存

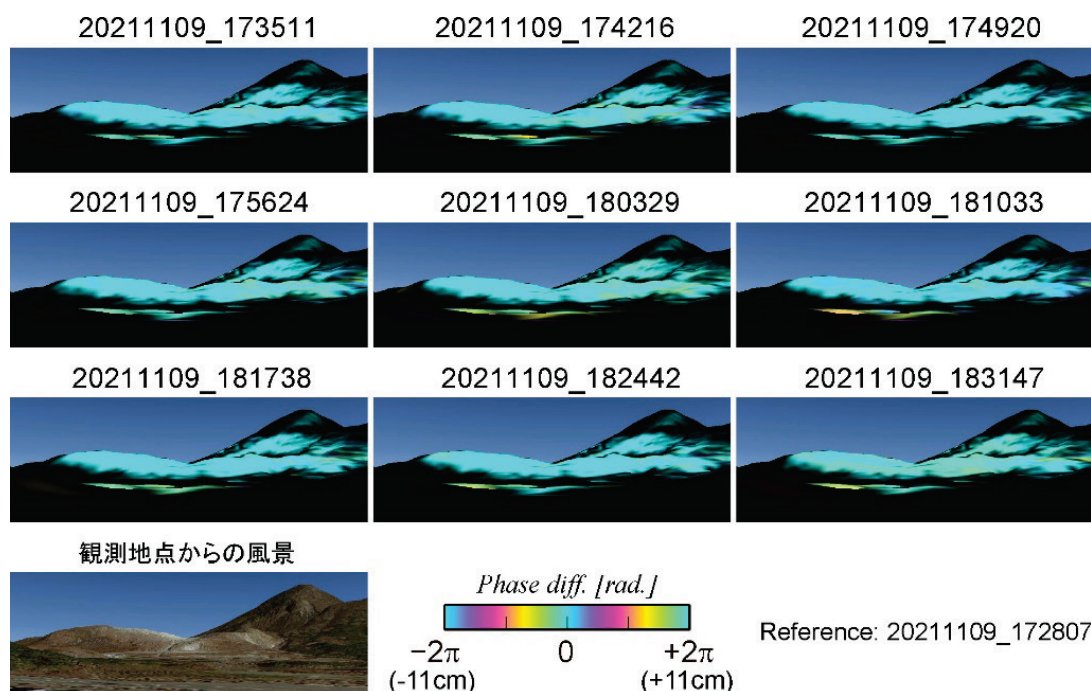


図 1-11 硫黄山における令和 3 年度の可搬型レーダー干渉計計測により得られた 2021 年 11 月 9 日の 17 時 28 分観測データを基準として得られた干渉画像。

した位相変化は、それに伴う成分と推測する。本解析においては、その長波長成分を距離に対する一次式で近似し、除去した。その結果、令和2年度と令和3年度の期間にも、有意な地殻変動は検出されなかった。干渉性に着目すると、令和2年度と令和3年度のデータペアについては、令和元年度と令和2年度と同程度に滑らかな干渉縞が得られており、地殻変動検出に適した干渉性が得られたと考えられる。令和元年度と令和3年度のデータペアについては、干渉は得られたが、干渉性の劣

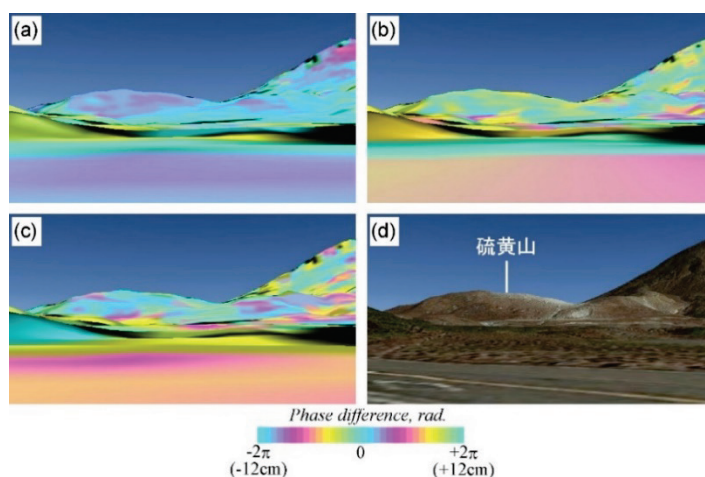


図 1-12 硫黄山において①2019年11月20日、②2020年11月17日、③2021年11月9日に観測したデータに関する SAR 干渉解析結果。Google Earth を用いて、おおよそ観測地点からの視点で描画した。(a) ①と②のデータペアの解析結果。(b) ②と③のデータペアの解析結果。(c) ①と③のデータペアの解析結果。(d) Google Earth で計算される同地点からの風景。

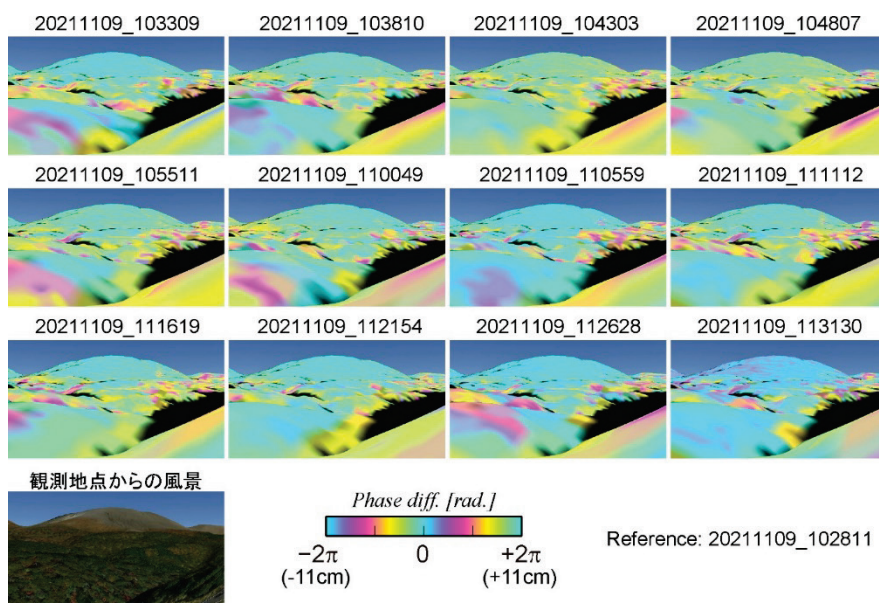


図 1-13 新燃岳における令和2年度の可搬型レーダー干渉計計測により得られた2021年11月9日の10時28分観測データを基準として得られた干渉画像。

化が顕著であった。硫黄山は比較的植生が少ない観測対象であるが、2 年間の干渉ペアでは、細かな地殻変動を検出することは難しいかもしれない。

新燃岳における観測時間は約 1 時間であり、約 10 分間隔で繰り返しスキャンを行った。その最初の観測を基準として、11 月 9 日内のデータペアを解析して得られた干渉画像を図 1-13 に示す。同日内の干渉ペアの解析結果においては、高い干渉性が得られ、また、この時間内に特段の変化は見られない。この結果は、硫黄山の解析と同様に、大きなノイズに影響されることなく、観測ができたことを示している。図 1-14 は、令和元年度、令和 2 年度、令和 3 年度に取得されたデータのペアを解析して得られた干渉画像を示す。これらの解析においては、硫黄山の解析と同様に、数値気象モデルの解析値を用いた大気電波伝搬遅延誤差の低減処理を適用している。令和元年度と令和 2 年度のペアを解析して得られた初期干渉画像には、レンジ距離に相関するような明瞭な位相変化が求まったが、大気電波伝搬遅延成分を除去することにより、ほぼ平坦な位相変化分布を得ることができた。令和 3 年度を含むデータペアの解析については、硫黄山の解析と同様に、大気電波伝搬遅延誤差低減処理後に、レンジ距離に依存するような位相変化が残ったため、その成分を距離に対する一次式で近似し、除去した。その結果、令和 2 年度と令和 3 年度の期間にも、有意な地殻変動は検出されなかった。干渉性については、1 年のデータペアでは地殻変動検出が可能な程度の干渉が得られたが、2 年のデータペアでは、干渉性の劣化が顕著であった。

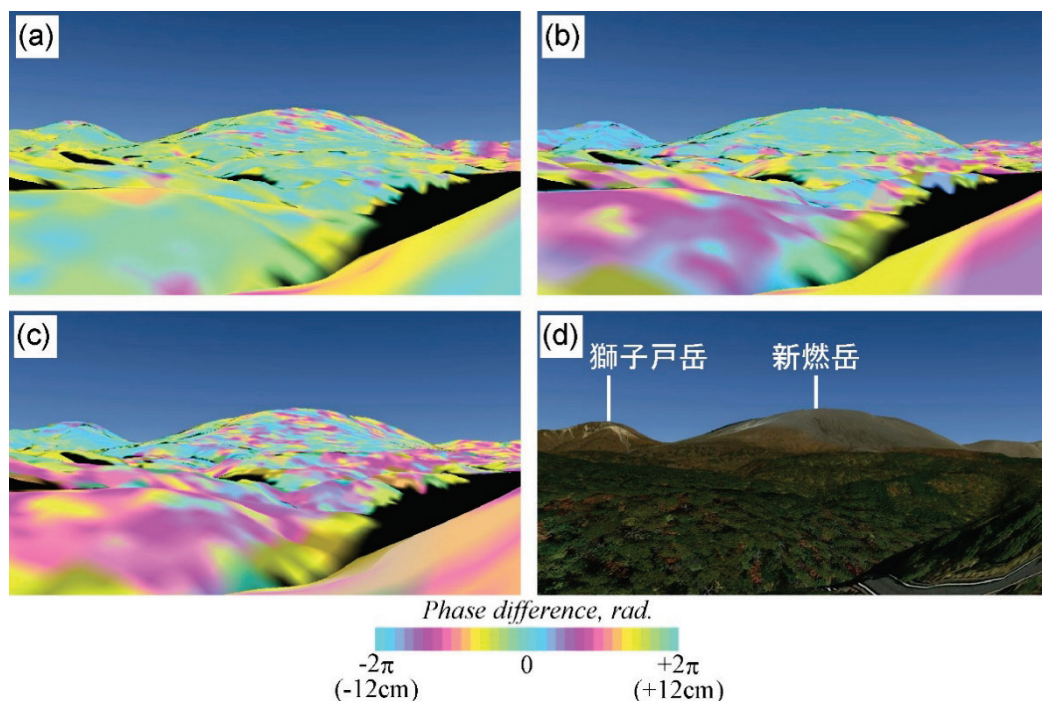


図 1-14 新燃岳において①2019 年 11 月 21 日、②2020 年 11 月 18 日、③2021 年 11 月 9 日に観測したデータに関する SAR 干渉解析結果。Google Earth を用いて、おおよそ観測地点からの視点で描画した。(a)①と②のデータペアの解析結果。(b)②と③のデータペアの解析結果。(c)①と③のデータペアの解析結果。(d)Google Earth で計算される同地点からの風景。

c) 手動方式の開発

i) 背景

令和元年度に人力での運搬が可能な手動方式の開発に着手した。手動方式では、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、ある程度、アンテナを直線的に動かす必要があるので、簡易的なガイドに沿ってアンテナを移動させる（図 1-15）。令和 2 年度においては、浅間山において、プロトタイプによる計測実験を行い、繰り返し観測によって干渉が得られることを確

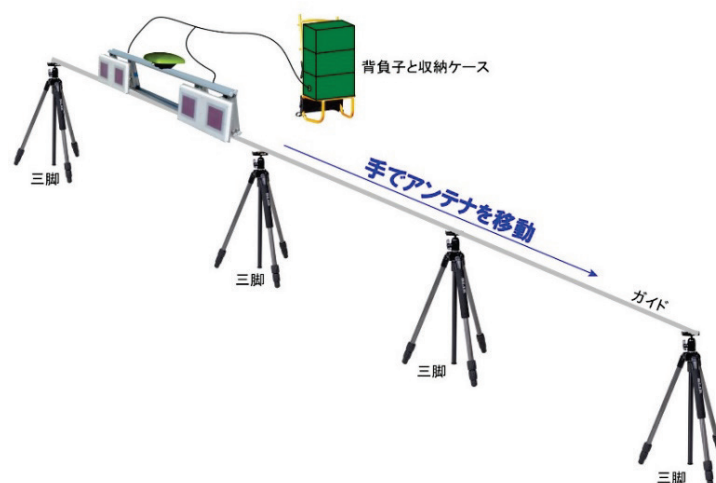


図 1-15 手動方式観測システムの概要図

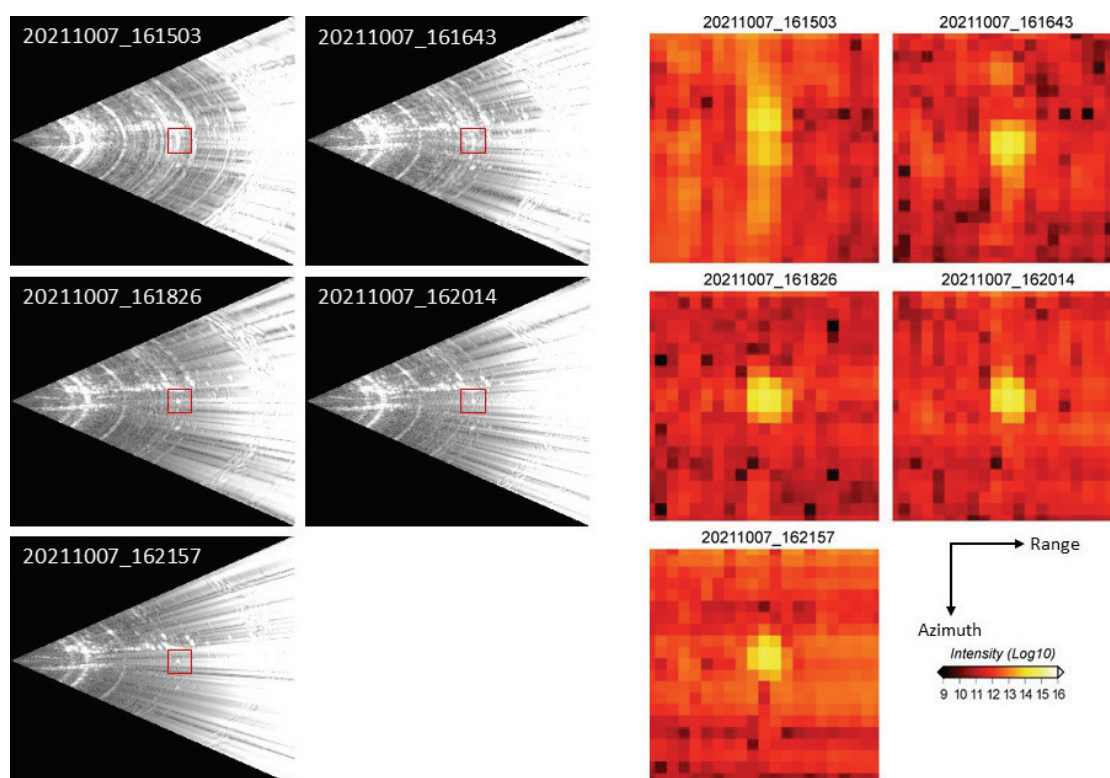


図 1-16 手動方式によるコーナーリフレクター計測実験結果

認したが、全体的にフォーカスが十分ではなく、その改良が課題となっている。この精度不十分は、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原因の一つと考えられる。この解決には、その動揺を抑える方法と、その動揺を正しく計測し、SAR 処理において補正する方法が考えられる。

ii) 手動方式によるコーナーリフレクター計測実験

手動方式における精度劣化は、アンテナ移動時における動揺が大きいことにより、十分な精度で SAR 処理が適用できていないことによると考えられる。これが正しければ、手動方式を用いても、アンテナの動揺が少なければ、精度良く圧縮処理を適用できると考えられる。そこで、前述した DDS 方式の信号発生器に関する有用性の確認のためのコーナーリフレクター計測実験において、手動方式による計測も行った。この計測における手動方式用のレールは、注意深く動揺が少なくなるように設置した。その計測データを解析して得られた散乱強度画像を図 1-16 に示す。5 回の計測のうち、最初の計測については、コーナーリフレクターからの反射波の点像が、アジマス方向（アンテナ移動方向）に伸びるような散乱強度分布がみられたが、それ以外では、地上設置方式とそれほど変わらない点像を得ることができた。このことは、アンテナの動揺を抑えることができれば、精度良く圧縮処理を適用できることを示唆する。

iii) 手動方式による硫黄山・霧島山計測実験

手動方式は、観測機器一式を人力で運搬して計測を行う。その計測に関する問題点・改良点を、実計測を通じて明らかにしたい。そこで、2021 年 11 月 10 日と 11 日に、霧島山の硫黄山（1317m）を対象とした計測実験をおこなった。観測場所周辺の地図と写真を図 1-17 に示す。硫黄山は新燃岳と同じく霧島火山群に含まれる火山の一つであり、韓国岳の北山麓に位置する溶岩ドームである。2018 年には小規模な水蒸気噴火が発生している。特に、噴火発生前には、前駆的な膨張が観測されている（Narita *et al.*, 2020²⁾）。そのような活動に伴う変動が発生した時に、その地殻変動を捉えるためのベースデータとすることも目的の一つである。観測場所は、

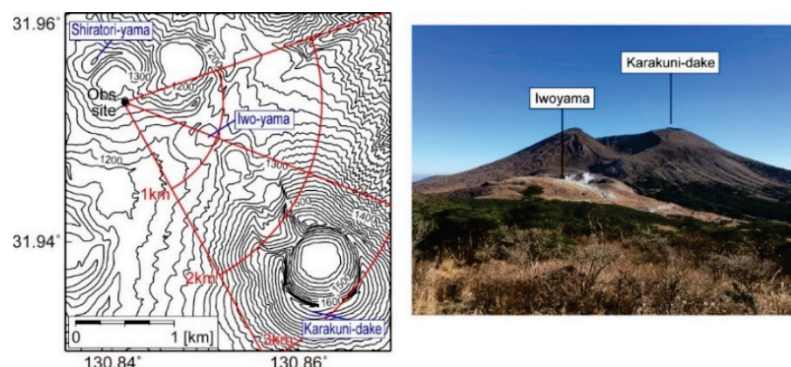


図 1-17 (a)手動方式による硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）。黒丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。(b)レーダー設置場所から見た硫黄山。

観測対象の山頂とほぼ同じ高さに位置する、硫黄山西方に位置する白鳥山の火口縁である。観測場所へのアクセスには、20 分ほどの登山を要するので、地上設置方式や台車方式の機材の運搬は困難である。観測場所から硫黄山までの距離は約 1.3km であり、標高は約 1310m である。観測場所では 10m のレールを設置するスペースがなかったため、レールの長さは 6.5m とした。

硫黄山において、手動方式で計測して得られた散乱強度画像と国土地理院の 10m DEM からシミュレートした散乱強度画像を図 1-18(a), (b) に示す。散乱強度画像には、硫黄山や韓国岳火口縁からの後方散乱が判読できる。SAR 干渉法を適用した結果、硫黄山周辺ではおおよそ 0.6 以上のコヒーレンスが求まった。しかし、SAR 画像は全体的にぼやけており、精度よくフォーカシングができていないと考えられる。本計測を実施した両日とも降雨によって地面がぬかるんでいる状態であり、三脚を十分に固定できていなかった。また、時折強い風が吹く場合があり、アンテナ軌道がかなり不安定であった。そのため、アンテナの動揺が大きく、その動揺を精度よく補正出来ていない可能性が考えられる。また、干渉画像においては、アジマス方向に対して 3.7 サイクル/ラジアン程度の位相変化が見られた。この観測期間においては、火山活動は静穏であり、またその分布から見ても、明らかに地殻変動を示すシグナルではない。その原因については、今後のさらなる解析、調査から明らかにしていく予定である。以上のように、干渉は得られたが、その利用にはより安定した軌道で計測を行う方法、軌道のふらつきをより高精度に補正する方法についての改良が必要である。アンテナ軌道のふらつきを低減させる方法の一つとして、三脚をより堅固に固定するための三脚用石突を作製した。この有効性については、今後の計測実験により、明らかにする予定である。

iv) SAR 処理ソフトウェアへのアンテナ動揺補正機能追加

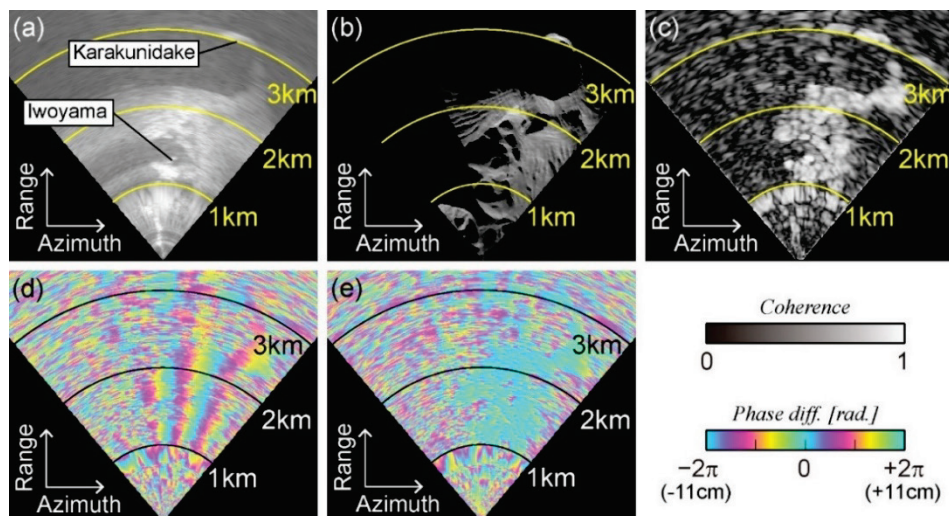


図 1-18 手動方式による硫黄山観測データ解析結果．黄色線と黒線はレーダー設置位置からのレンジ距離を示す。(a)観測された散乱強度画像．(b)地形データからシミュレートされた散乱強度画像．(c)コヒーレンス画像．(d)初期干渉画像．(e)平坦化された干渉画像。

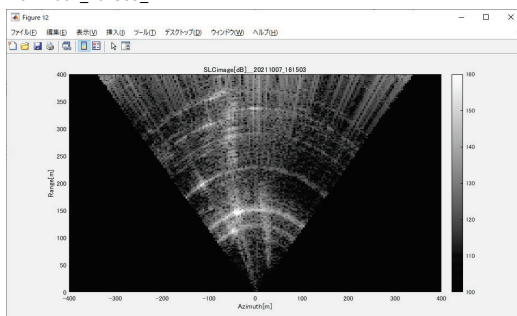
前述した通り、手動方式の観測においては、アンテナ移動時における動揺が、SAR 処理精度の劣化の原因と考えられる。その解決の一つとして、SAR 処理においてアンテナの動揺を補正する試みを行った。本試みにおいては、観測場所近傍に設置する GNSS 基準点との相対キネマティック測位、および、IMU との統合解析から求まる送・受信アンテナそれぞれの位置を用いる。アジマス圧縮処理時に、レーダー計測の各アジマス位置の計測データについて、計測した送・受信アンテナの位置と設定するアンテナ軌道においてアンテナが軌道に対して平行であった場合の送・受信アンテナの位置とずれに対応する位相差を補正する。

この補正機能の有効性を確認するために、手動方式によるコーナーリフレクター計測実験のデータについて解析を行った。再生処理画像は大きな違いは見られなかったが、コーナーリフレクターの圧縮結果（拡大図の赤丸部分）を比較すると、機能追加後のソフトウェアによる画像のレンジ方向の広がりにより小さくなっていることが確認できる（図 1-19）。これは、送信アンテナ、受信アンテナそれぞれの位置情報を用いて動揺補正を行った結果、より正確なレンジマイグレーション補正が行えていることを示すものであり、今回の機能追加の効果と考えられる。この機能については、今後、さらに計測実験を重ね、改良を進めていく予定である。

v) 今後の課題

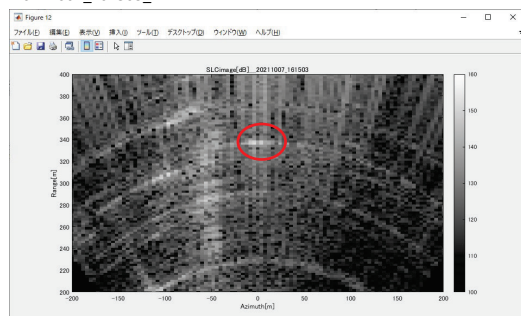
火山観測用可搬型レーダー干渉計の地上設置方式、車載方式については、本年度の開発より開発フェーズを終了し、今後は運用的に観測を進めていく予定である。

20211007_161503_RT

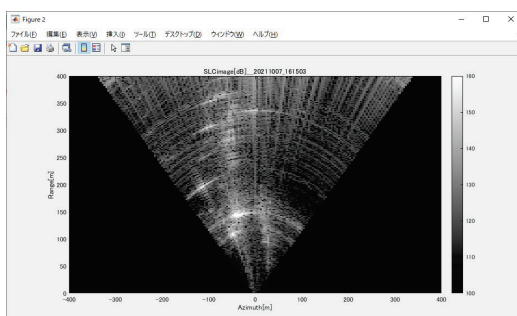


従来の画像再生ソフトウェア(fmcwsar299MAT_2019fy_f2)による再生画像

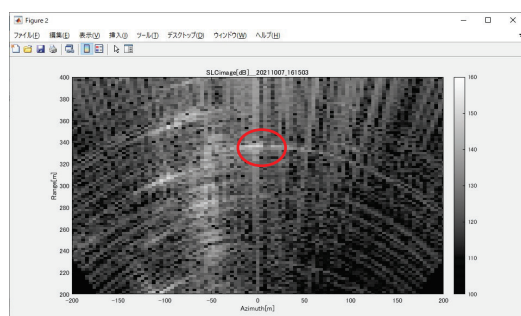
20211007_161503_RT



従来の画像再生ソフトウェア(fmcwsar299MAT_2019fy_f2)による再生画像(拡大)



機能追加版解析ソフトウェア(fmcwsar299MAT_2021fy_f2)による再生画像



機能追加版解析ソフトウェア(fmcwsar299MAT_2021fy_f2)による再生画像(拡大)

図 1-19 手動方式によるコーナーリフレクター計測実験の計測データに関して、従来の SAR 処理ソフトウェアとアンテナ動揺補正を組み見込んだ SAR 処理ソフトウェアで解析して得られた画像の比較。

る。手動方式については、実際に画像が得られるようになり、1日の繰り返し観測においても干渉を得ることに成功した。しかし、まだ実利用に向けては、精度が不十分であり、今後も改良を継続する予定である。

d) 十勝岳に関する観測場所の調査

i) 背景

火山観測用可搬型レーダー干渉計による観測を実施するためには、観測対象に対する見通しが効く場所において、アンテナを10m程度移動させる必要があり、緊急的な観測を実施する場合において、そのような観測に適した場所を探すために時間を要し、観測開始までにかかなりの時間を要してしまう可能性が懸念される。この問題を回避するためには、観測を実施する可能性のある火山において、観測に適した地点をあらかじめ調査しておく必要がある。今後、このような調査を順次進めていく予定である。

ii) 十勝岳の観測場所調査

令和3年度においては、十勝岳の62-II火口の観測地点に関する調査を実施した。十勝岳は、北海道の中央部に位置する活火山であり、山頂の標高は2077mである。その北東には美瑛岳、南西には上富良野岳、富良野岳、西方には前十勝岳、三段山が位置している。最近の火山活動は中央火口丘が中心となっており、20世紀には3回のマグマ噴火が発生している。特に、62-II火口周辺では、地震や熱活動の活発化や山体浅部に力源を持つような膨張が観測されている。本調査においては、62-II火口周辺に対して見通しが取れることと、アンテナを10m程度移動させるスペースを確保できることを条件とし、図1-20に示す3地点（望岳台、吹上温泉、三段山）を選定した。

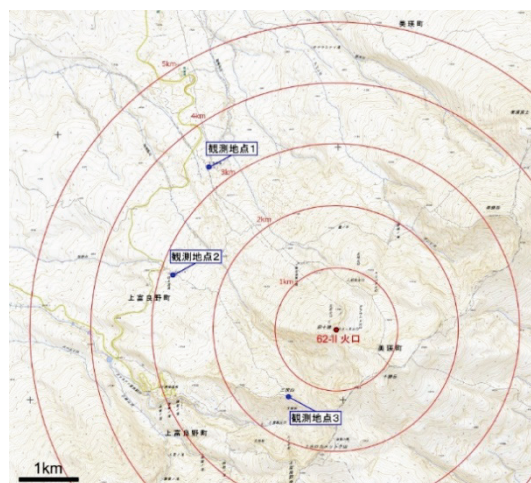


図 1-20 観測候補地点の位置と 62-II 火口からの距離



図 1-21 望岳台における観測地点候補地と観測地点候補地から見た十勝岳の風景。

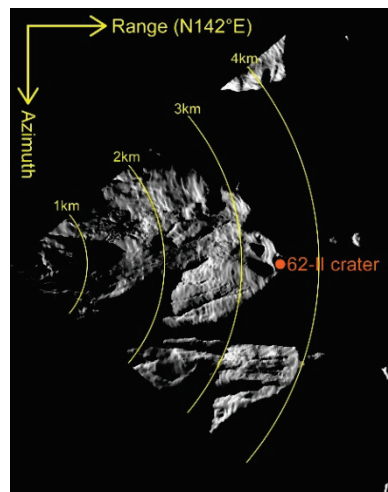


図 1-22 地形データからシミュレートした、望岳台から観測した場合の散乱強度画像。

望岳台の観測場所の風景を図 1-21、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図 1-22 に示す。望岳台からは、62-II 火口の西を広く観測することが可能である。また、近傍まで車両で機材を運搬できることや、62-II 火口周辺への見通しが良いことから、もっとも観測条件が良い地点と言える。

座標：北緯 43 度 26 分 49.39 秒、東経 142 度 38 分 57.75 秒、標高 932.1m

観測方向と距離（62-II 火口）：N142° E、3.4km

見通し：良好

地面：未舗装（アウトリガーの高さ調整の板を用意する必要あり）

観測方式：地上設置方式

機材運搬：近傍まで車両で運搬可能

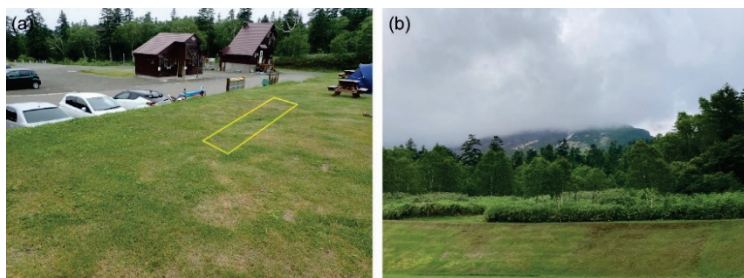


図 1-23 吹上温泉における観測地点候補地と観測地点候補地から見た十勝岳の風景。

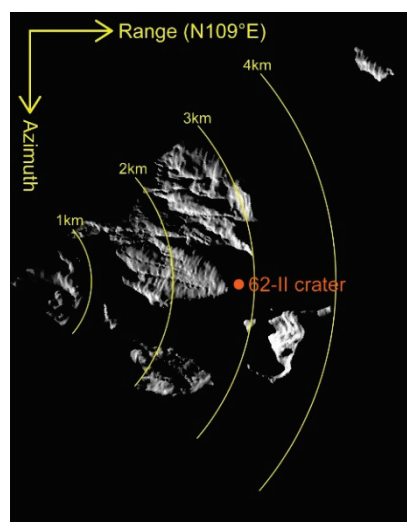


図 1-24 地形データからシミュレートした、吹上温泉から観測した場合の散乱強度画像。

吹上温泉の観測場所の風景を図 1-23、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図 1-24 に示す。吹上温泉は、近傍まで車両で機材を運搬できることや、望岳台とは若干異なる方向からの観測になるため、望岳台と合わせて観測することにより、地殻変動の 2 成分を推定できると期待される。ただし、樹木により、標高の低い領域は観測できないという不利な点がある。

座標：北緯 43 度 25 分 52.25 秒、東経 142 度 38 分 32.41 秒、標高 955.8m

観測方向と距離（62-II 火口）：N109° E、2.8km

見通し：樹木により、火口周辺しか見えない。

地面：芝生

観測方式：地上設置方式

機材運搬：近傍まで車両で運搬可能

三段山の観測場所の風景を図 1-25、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図 1-26 に示す。三段山は、62-II 火口から 1.4km の距離にあり、火山活動が活発化した場合には、立ち入りが規制されることが考えられる。また、本観測地点候補地にアクセスするためには、2 時間程度の登山を要するという、不利な点がある。しかし、62-II 火口の南側の急斜面を観測できると期待され、衛星 SAR でも観測が困難な領域の地殻変動が観測できる可能性がある。

座標：北緯 43 度 24 分 47.63 秒、東経 142 度 39 分 56.14 秒、標高 1742.2m

観測方向と距離（62-II 火口）：N36° E、1.4km

見通し：良好

地面：未舗装



図 1-25 三段山における観測地点候補地と観測地点候補地から見た 62-II 火口の風景。

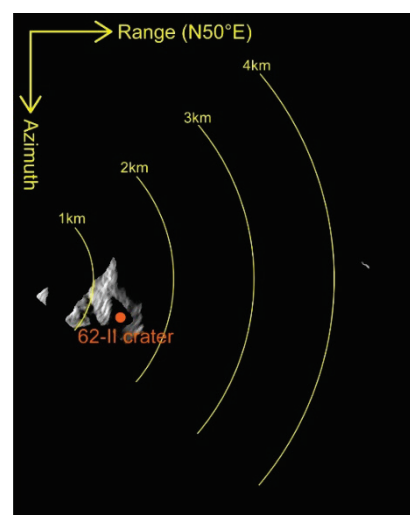


図 1-26 地形データからシミュレートした、三段山から観測した場合の散乱強度画像。

観測方式：手動方式

機材運搬：要登山（空荷で約 2 時間）

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) 背景

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 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 1-27 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、各火山の解析システムを構築する。令和 3 年度においては、十勝岳、蔵王山、吾妻山、雲仙岳、口永良部島に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。本システムは、日本の SAR 研究グループ PIXEL との連携により、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と PIXEL との共同研究協定に基づいて提供される PALSAR-2、PALSAR データを用いる。この共有データを衛星 SAR 自動解析システムで利用するためのデータサーバは、本課題において運用している。

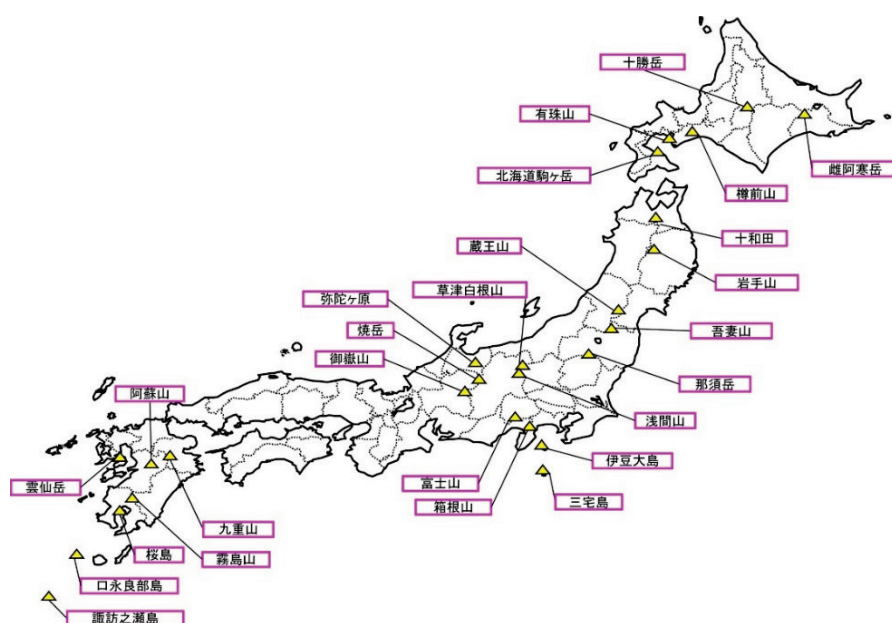


図 1-27 衛星 SAR 自動解析システム構築予定の火山

表 1-1 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
十勝岳	18	南行軌道	右	10	14
十勝岳	123	北行軌道	右	12	13

蔵王山	18	南行軌道	右	12	12
蔵王山	124	北行軌道	右	11	12
吾妻山	18	南行軌道	右	12	12
吾妻山	124	北行軌道	右	10	14
雲仙岳	23	南行軌道	右	12	12
雲仙岳	131	北行軌道	右	12	12
口永良部島	23	南行軌道	右	11	12
口永良部島	131	北行軌道	右	11	12

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

Target	Path	Orbit	Rang looks	Azimuth looks
十勝岳	56	南行軌道	6	14
十勝岳	397	北行軌道	6	14
蔵王山	58	南行軌道	6	14
蔵王山	404	北行軌道	6	14
吾妻山	58	南行軌道	6	14
吾妻山	404	北行軌道	6	14
雲仙岳	74	南行軌道	6	14
雲仙岳	425	北行軌道	6	14
口永良部島	73	南行軌道	6	14
口永良部島	74	南行軌道	6	14
口永良部島	425	北行軌道	6	14
口永良部島	426	北行軌道	6	14

表 1-3 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	Lat.1	Lat.2	Lon.1	Lon2	Spacing
十勝岳	43°21'36"	43°28'12"	142°37'12"	142°44'24"	1 sec.
蔵王山	38°4'48"	38°10'48"	140°24'0"	140°30'0"	1 sec.
吾妻山	37°39'0"	37°48'0"	140°9'0"	140°19'12"	1 sec.
雲仙岳	32°34'48"	32°54'0"	130°6'0"	130°24'0"	1 sec.
口永良部島	32°34'48"	32°54'0"	130°6'0"	130°24'0"	1 sec.

令和 3 年度においては、十勝岳（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：2 軌道）、蔵王山（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：2 軌道）、吾妻山（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：2 軌道）、雲仙岳（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：2 軌道）、口永良部島（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：4 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 1-1 および表 1-2

に示す。また、これらの解析結果は、表 1-3 に示す範囲、ピクセルスペーシングで出力する。

ii) 十勝岳

十勝岳の PALSAR-2 データ（2015～2021）の解析結果を図 1-28、図 1-29 に示す。十勝岳における冬季のデータを用いた解析においては積雪による干渉性の劣化が著しく、地殻変動検出に十分な精度が得られなかった。そのような積雪の影響が大きいデータは解析には用いなかったため、得られた地殻変動時系列のエポック数は観測データ数と比べて大幅に減少している。広域的には数 cm 程度の変化が見られるが、その空間分布や入力した SAR 干渉解析結果から見ると、それらは解析に起因するノイズ成分と考えられ、空間波長が 1km を超えるような、火山活動に伴う地殻変動は検出されなかった。しかし、現在でも噴気活動等が活発な 62-II 火口周辺に注目すると、空間波長が数 100m の衛星 - 地表間距離短縮変化が見られた。その大きさは、6 年間で 10cm を超えている。その時間変化は、観測開始から 2017 年ころまで変化量が大きく、それから 2019 年ころまでは変化は減速し、それ以降に再度加速しているように見えることが時間的な変化の特徴である。このような変化は特に東方向視（図 1-28、パス 18）に顕著にみられるが、西方向視（図 1-29、パス 123）にもわずかな変化が見られている。これについては、SAR 干渉解析の途中結果を確認したところ、実際には東方向視と同程度の大きさの変化が求まっているが、レーダー波の入射方向と地殻変動方向との関係によって、西方向視の SAR 干渉解析結果に表れる変化は、極めて局所に現れるため、ノイズ低減フィルターの適用により、値が小さくなっていることが分かった。この対策については、今後の改良に向けた課題として検討したい。

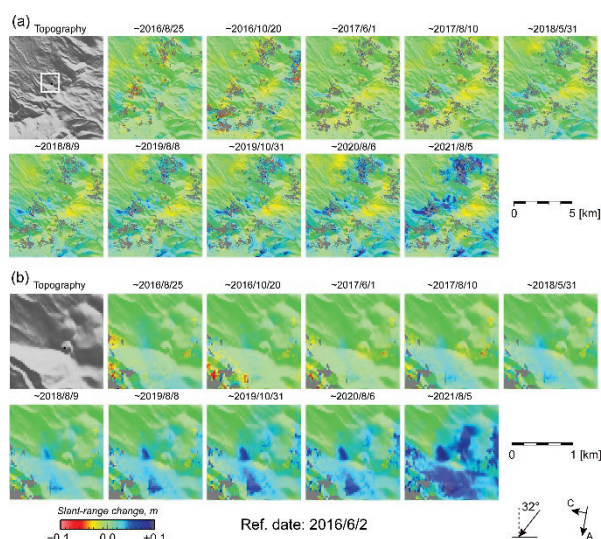


図 1-28 十勝岳における PALSAR-2 のパス 18 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

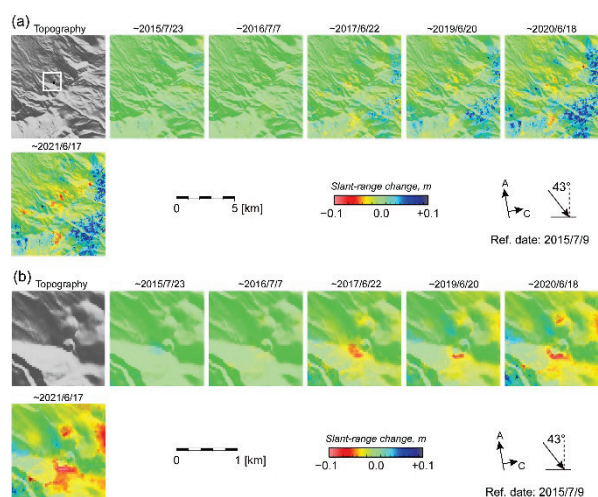


図 1-29 十勝岳における PALSAR-2 のパス 123 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

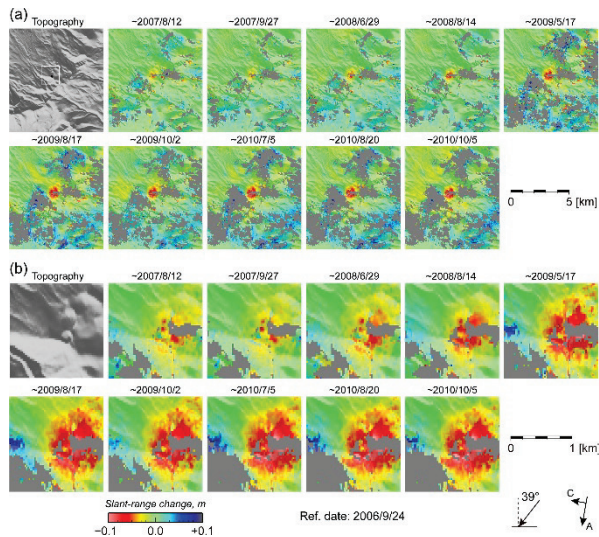


図 1-30 十勝岳における PALSAR のパス 56 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

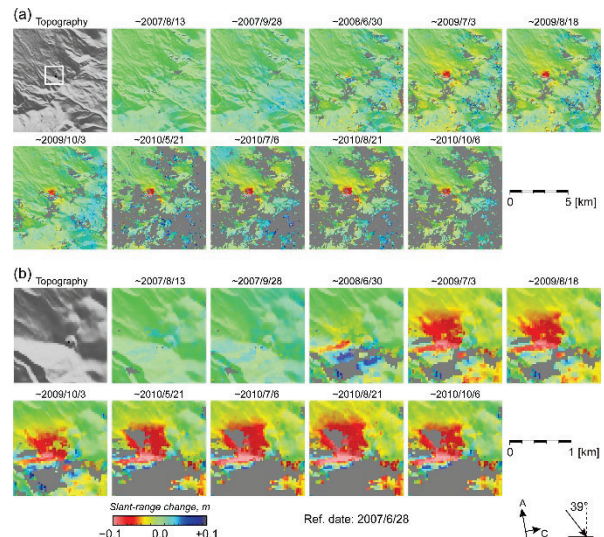


図 1-31 十勝岳における PALSAR のパス 397 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

一方、PALSAR データ（2006～2010）の解析結果によっては、西向視（図 1-30、パス 56）、東方向視（図 1-31、パス 397）ともに、顕著なスラントレンジ短縮変化が求まり、その変化量は 3 年間で 5cm を超えている。空間波長は明らかに PALSAR-2 で得られたスラントレンジ短縮変化よりも長く、地殻変動力源が PALSAR-2 の観測時期と比べて深い位置にあった可能性を示唆している。

iii) 蔵王山

蔵王山の PALSAR-2 データの解析結果を図 1-32、図 1-33 に示す。蔵王山においても十勝岳と同様に、冬季のデータを用いた解析においては積雪による著しい干渉性の劣化が見られた。そのような積雪の影響が大きいデータは解析には用いなかった。特に、火山活動に伴うと考えられるような有意な地殻変動は検出されなかったが、周辺の多くの場所で、地すべりと考えられる変化が見られた。特に、蔵王山の御釜の北西においては、西方向視に関する解析結果では衛星 - 地表間距離短縮変化、東方向視に関する解析では伸長変化が検出された。東方向視に関する伸長変化は、5 年間で 5cm を超えている。同様の变化は PALSAR データ（2006～2010）の解析にも見られ（図 1-34、図 1-35）、この変化は少なくとも 2000 年代から継続的に進行していると考えられる。また、西方向視の解析結果には、火口の西から南西にかけて、ほぼ同じ標高におけるバンド状の衛星 - 地表間距離伸長変化が求まった。これは、PALSAR-2 の解析結果にも PALSAR の解析結果にも見られることから、ノイズではなく、実際の地表変形を捉えている可能性が考えられる。この変動を生じさせるメカニズムについては、現時点では不明である。

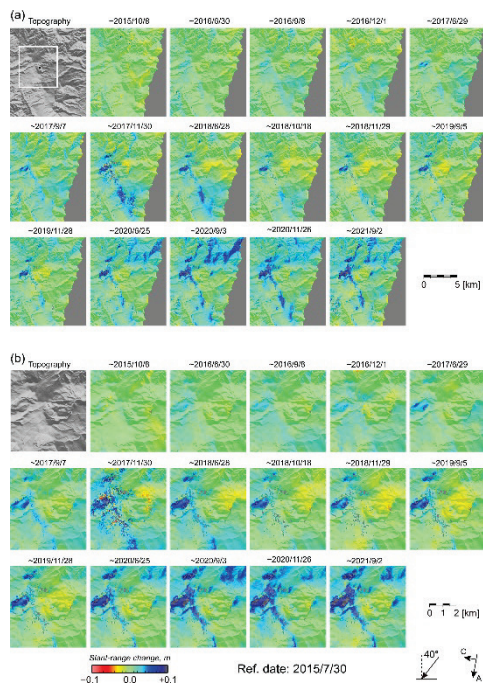


図 1-32 蔵王山における PALSAR-2 のパス 18 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

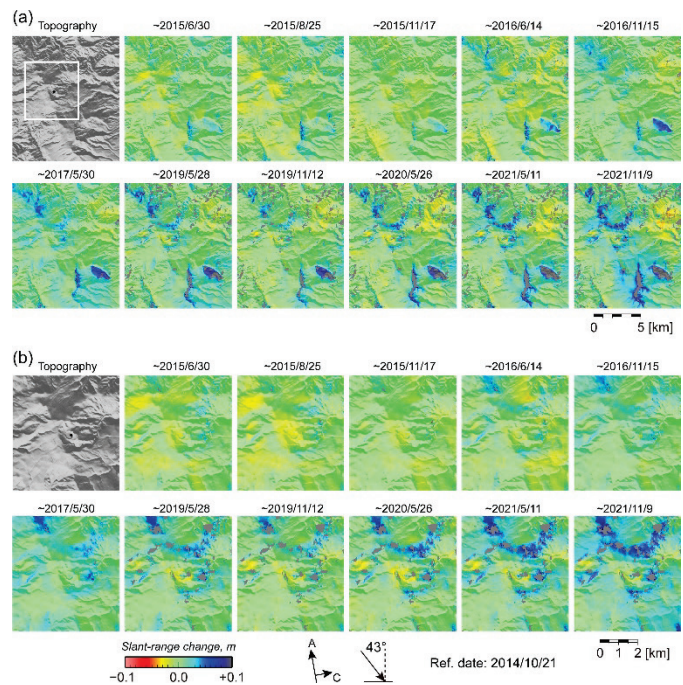


図 1-33 蔵王山における PALSAR-2 のパス 124 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

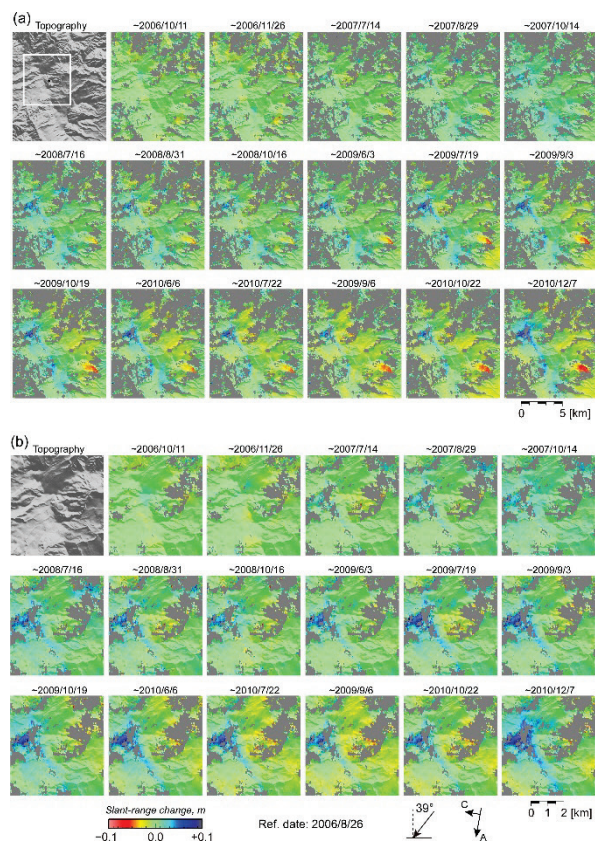


図 1-34 蔵王山における PALSAR のパス 58 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

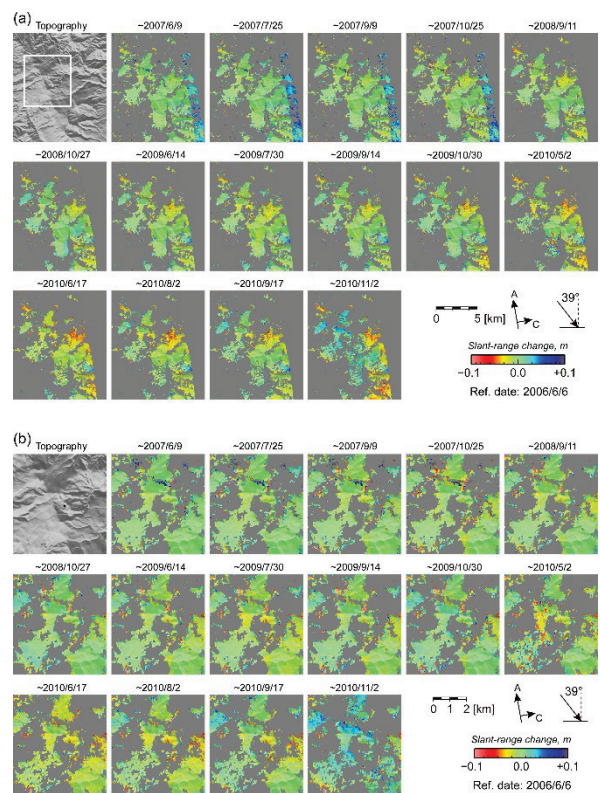


図 1-35 蔵王山における PALSAR のパス 404 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

iv) 吾妻山

吾妻山の PALSAR-2 データの解析結果を図 1-36、図 1-37 に示す。吾妻山においても十勝岳や蔵王山と同様に、冬季のデータを用いた解析においては積雪による著しい干渉性の劣化が見られた。そのような積雪の影響が大きいデータは解析には用いなかった。広域的には数 cm 程度の変化が見られるが、その空間分布や入力した SAR 干渉解析結果から見ると、それらは解析に起因するノイズ成分と考えられ、空間波長が 1km を超えるような、火山活動に伴う地殻変動は検出されなかった。しかし、現在でも噴気活動等が活発な大穴火口周辺に注目すると、1km より小さな空間波長を持つ衛星 - 地表間距離短縮変化が見られた。この短縮変化は、東方向視、西方向視の両方の解析結果に見られることから、主に膨張変形が卓越していると考えられる。東方向視（パス 124、図 1-37）の衛星-地表間距離変化の時系列は、2014-2015 年と 2018-2019 年に火山活動の活発化に伴う山体の膨張を示唆する衛星視線距離の短縮を示した。吾妻山では、2014-2015 年と 2018-2019 年に火山性地震の増加や圧力源の増圧に伴う膨張といった短期的な火山活動の高まりが繰り返していることが報告されており、衛星 SAR から得られた衛星-地表間距離短縮変化が顕著に見られた時期と一致している。西方向視（パス 18）においては、衛星-地表間距離変化の空間分布の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 1-36）。PALSAR の解析結果からも同様の膨張変形が大穴火口周辺で見られた（図 1-38、図 1-39）。その時間変化は、2009 年頃に停滞していたよ

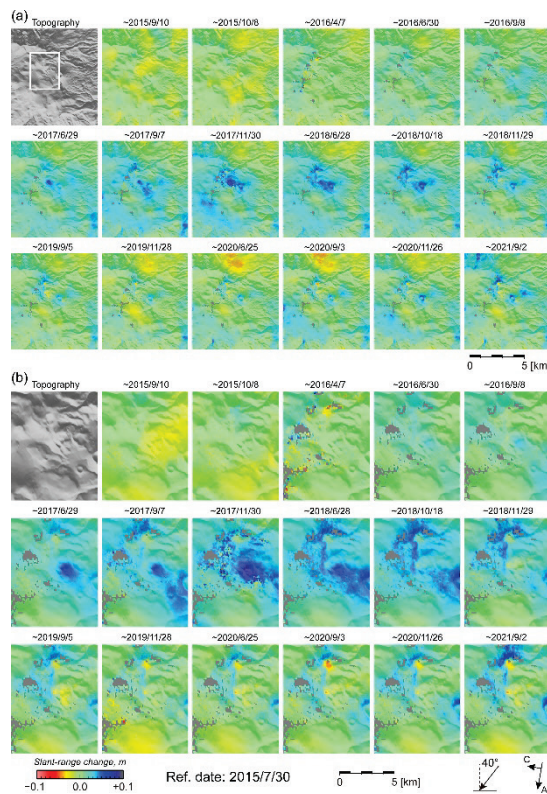


図 1-36 吾妻山における PALSAR-2 のパス 18 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

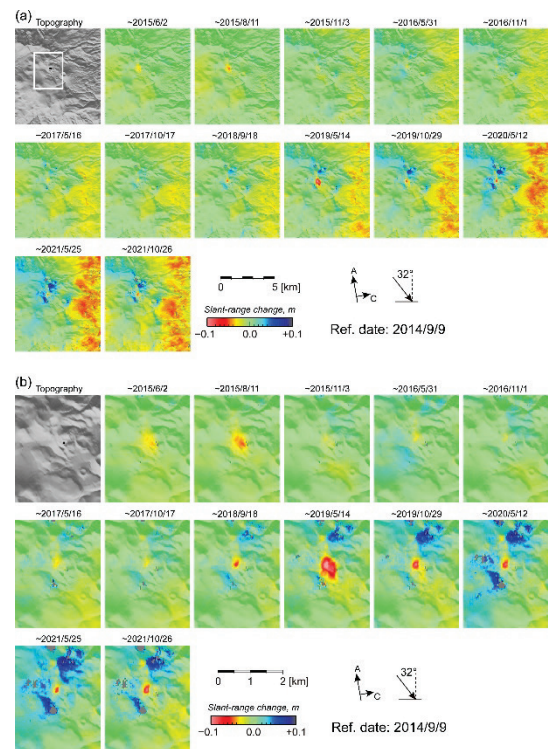


図 1-37 吾妻山における PALSAR-2 のパス 124 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

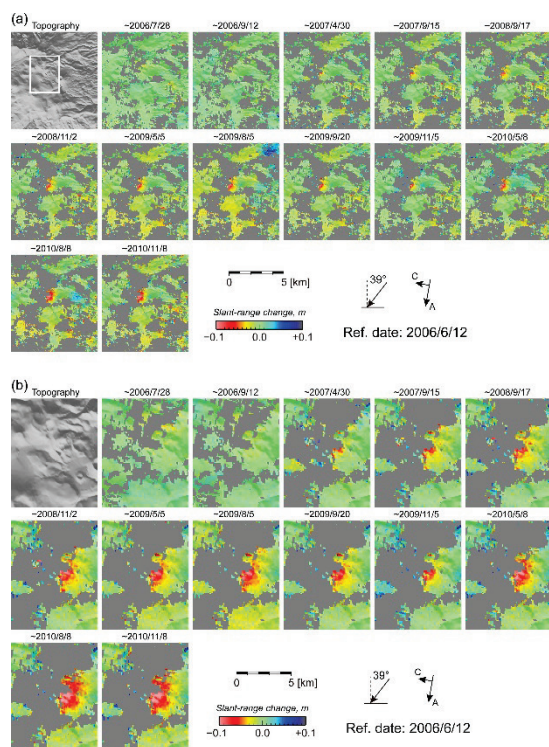


図 1-38 吾妻山における PALSAR のパス 58 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

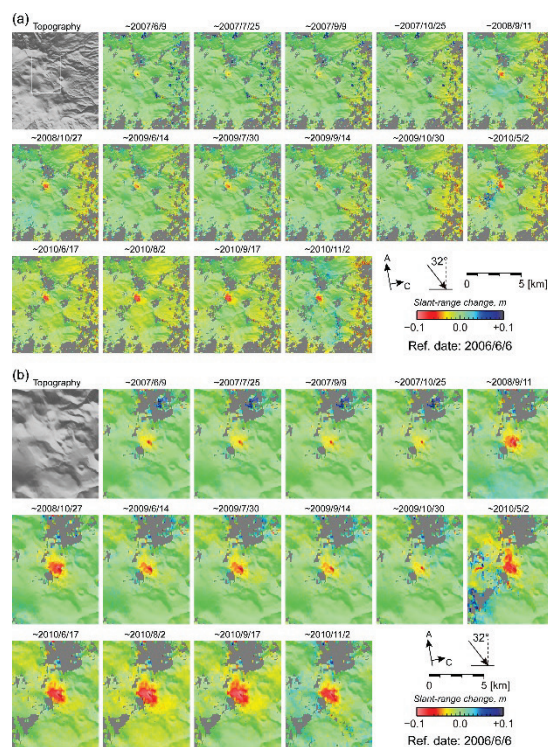


図 1-39 吾妻山における PALSAR のパス 404 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

うに見えるが、それ以外の期間においては、継続的に変動が継続していたように見える。また、その空間分布は、PALSAR-2 から得られた結果とおおよそ同じに見えることから、その地殻変動力源は大きく変化していない可能性が示唆される。

冬季に積雪がある領域では、散乱特性の変化に伴う干渉性劣化が顕著にみられ、衛星 SAR による地殻変動の抽出を困難にさせる。十勝岳、蔵王山、吾妻山はその領域に含まれる。十勝岳、蔵王山、吾妻山を撮像範囲に含む PALSAR-2 データは年間数シーンと撮像頻度が低く、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。令和 4 年度に打上げが計画されている ALOS-4/PALSAR-3 による高頻度観測が実現すると、L-band SAR による積雪に伴う干渉性劣化を回避した時系列化が可能になり、より詳細な地殻変動検出が可能になると期待される。ALOS-4/PALSAR-3 の運用が開始され次第、衛星 SAR 自動解析システムへの組み込みに向けた検討を進めたい。

v) 雲仙岳

雲仙岳の PALSAR-2 データ（2014～2021）の解析結果を図 1-40、図 1-41 に示す。広域的には数 cm 程度の変化が見られるが、その空間分布や入力した SAR 干渉解析結果から見ると、それらは解析に起因するノイズ成分と考えられ、空間波長が 1km を超えるような、火山活動に伴う地殻変動は検出されなかった。しかし、普賢岳山頂や山頂から東側に伸びる溶岩ドーム付近においては、東方向視、西方向視の両方

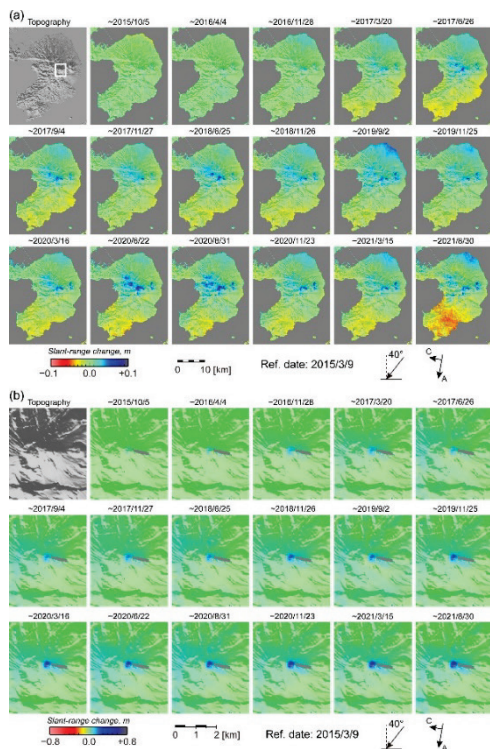


図 1-40 雲仙岳における PALSAR-2 のパス 23 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

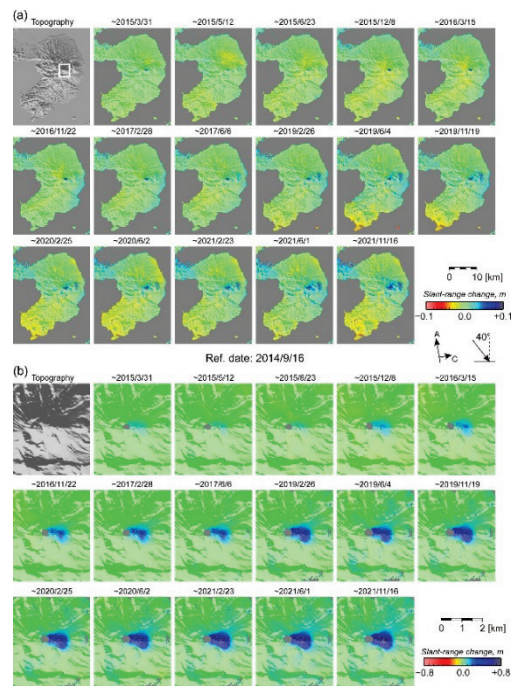


図 1-41 雲仙岳における PALSAR-2 のパス 131 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

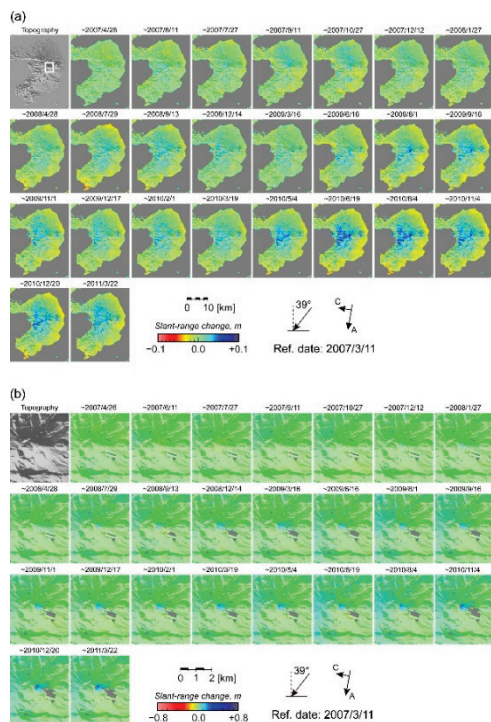


図 1-42 雲仙岳における PALSAR のパス 74 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

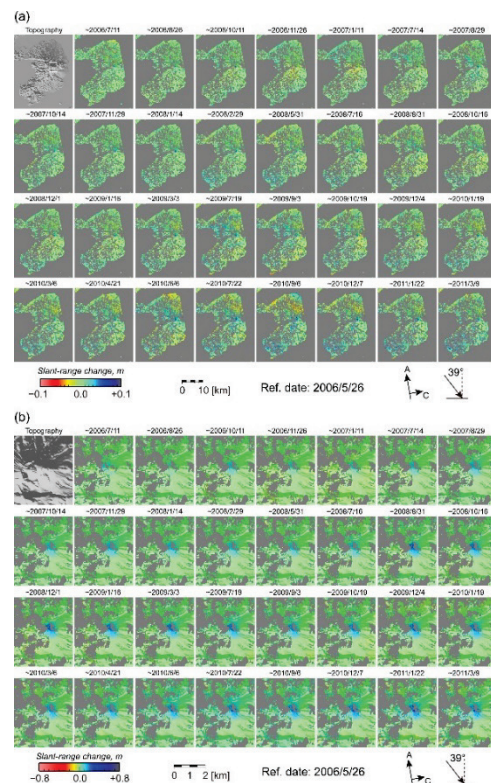


図 1-43 雲仙岳における PALSAR のパス 425 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

の解析結果に、衛星 - 地表間距離が伸長する変化が検出された。ただし、東方向視

の解析結果に見られる変化のほうが、伸長変化が大きい。

これは、この地表変形は沈降を伴うが、東向きの変化がより卓越していることを示す。その時間変化は時間的におよそ一定であり、東方向視の解析結果における2015年から2021年までの変化量は80cmを超えている。その変化域に注目すると、普賢岳の東方に延びる溶岩ドームの領域において、特に変化量が大きい。その縁辺は溶岩ドームよりも広い領域に位置する。また、その縁辺部での変化量は外側に向けて滑らかに減衰しており、溶岩ドームそのものの変形ではなく、地下に位置する収縮源が、この地殻変動を生じさせているように見える。また、この地殻変動はPALSARの解析結果にも見られ、その空間分布については、干渉性劣化域によりマスクされている領域があるため、より詳しい調査が必要であるが、およそ同じように見える（図1-42、図1-43）。時間変化は、PALSARデータ（2006～2010）の解析結果もPALSAR-2と同様に、一定の速度で変化しているように見えるが、その速度は明らかにPALSAR-2の解析結果のほうが速い。これは、PALSAR-2の運用期間における変動量は、PALSARの運用期間と比べて加速していることを示す。

vi) 口永良部島

口永良部島の解析においては、海域を含むことによるSAR干渉処理の困難を避けるため、口永良部島周辺の領域を切り出したSAR画像を用いた。また、SAR干渉処理においては、島内の位相分布を平坦化する処理を適用している。口永良部島のPALSAR-2データ（2015～2021）の解析結果を図1-44、図1-45に示す。新岳付近に注目すると、明瞭な衛星-地表間距離伸長変化が見られる。この伸長変化は、東方向視、西方向視に関する両方の解析結果にも見られ、その空間波長はおよそ1km程度である。ただし、東方向視の結果においては、その中心は新岳火口よりも西側に位置し、西方向視の結果は逆に東寄りに位置している。これは、収縮変動によって説明可能である。その収縮変動はPALSAR-2の観測開始から継続して生じているように見えるが、その変化量は時間の経過とともに減衰しているように見える。一方、PALSARデータ（2006～2021）の解析結果においては、その空間分布はまったく異な

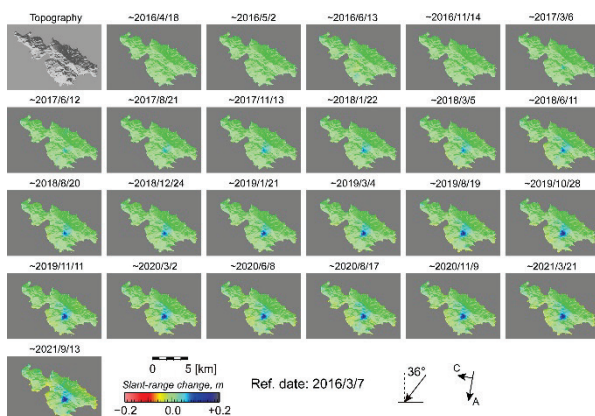


図1-44 口永良部島 PALSAR-2 のパス 23 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

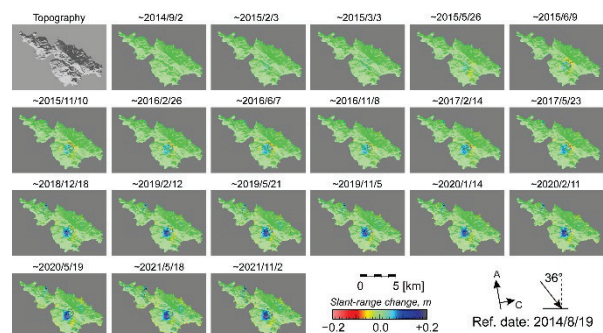


図1-45 口永良部島 PALSAR-2 のパス 131 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

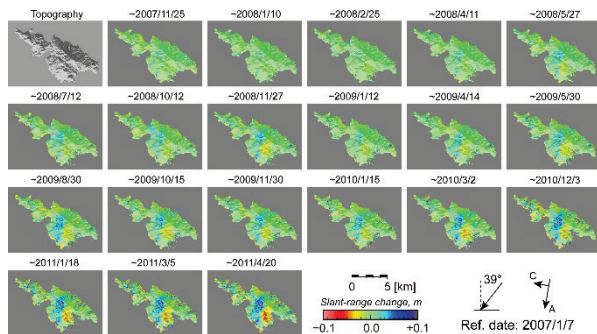


図 1-46 ロ永良部島 PALSAR のパス 73 のデータを解析して得られた地殻変動時系

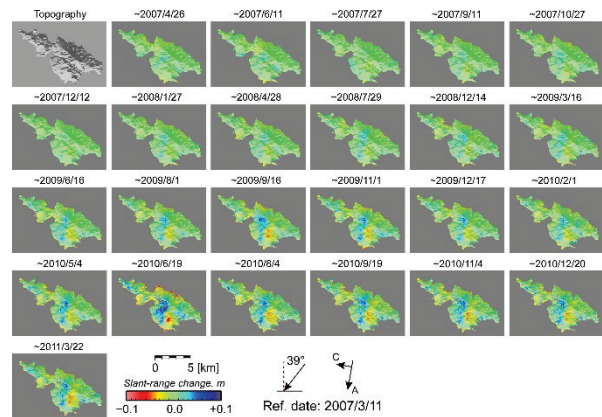


図 1-47 ロ永良部島 PALSAR のパス 74 のデータを解析して得られた地殻変動時系

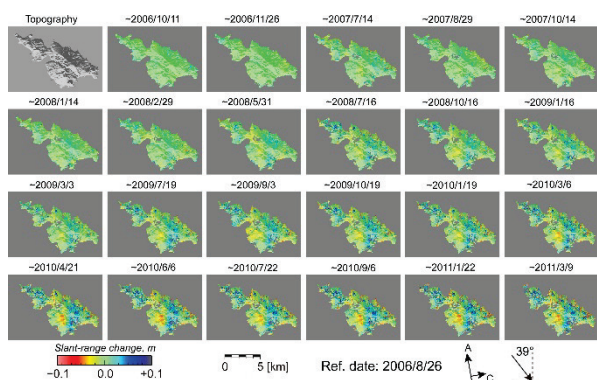


図 1-48 ロ永良部島 PALSAR のパス 425 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

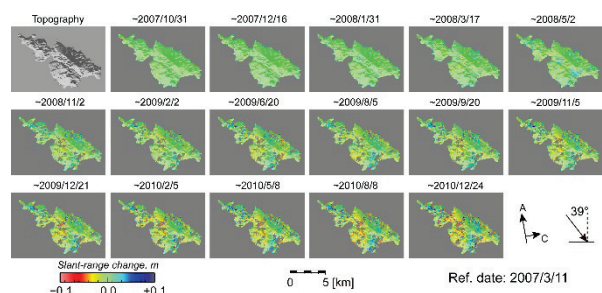


図 1-49 ロ永良部島 PALSAR のパス 426 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

る（図 1-46、図 1-47、図 1-48、図 1-49）。東方向視の解析結果においては、新岳、古岳の西山腹で短縮、東山腹で伸長変化が得られた。一方、西方向視ではその逆の変化が求まった。この地殻変動は東山腹で東進、西山腹で西進の変動が生じていたことを示しており、この地殻変動はごく浅部に位置するおおよそ南北に走向を持つダイク状の地殻変動力源によって説明できる。その時間変化には若干のゆらぎが見られるものの、PALSAR の運用期間においては、継続的に生じていたように見える。ただし、その結論には、より詳細な調査が必要である。

b) 衛星 SAR を用いた事例研究

i) 吾妻山

吾妻山に関する事例研究については令和 2 年度の成果として報告したが、令和 3 年度においては、得られた地殻変動を説明するモデルを構築し、そのモデルから火山観測用可搬型レーダー干渉計 (SCOPE) により得られる地殻変動分布を推定した。その結果について報告する。

本解析では Multi-temporal InSAR (MTI) 法を用いて地殻変動を検出した。MTI 法は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

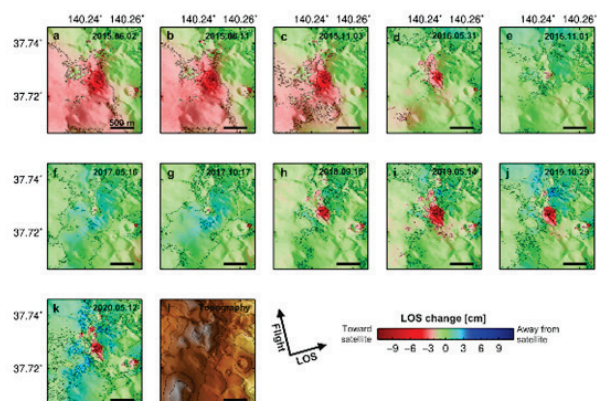


図 1-50 PALSAR-2 のパス 124 データから得られた、大穴火口周辺の衛星視線距離変化の時系列(基準日: 2014 年 9 月 9 日)。

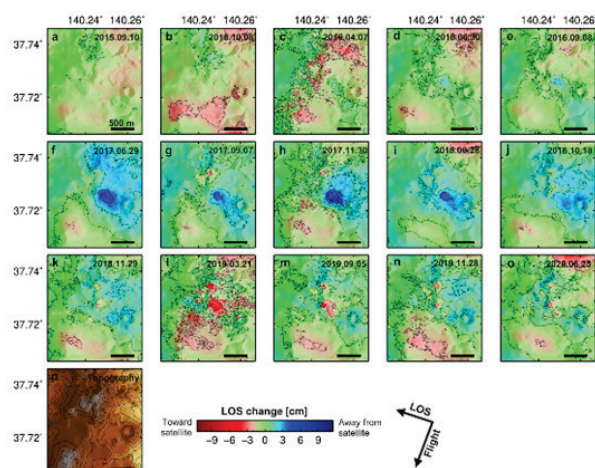


図 1-51 PALSAR-2 のパス 18 データから得られた、大穴火口周辺の衛星視線距離変化の時系列(基準日: 2015 年 7 月 30 日)。

ける平均変位速度を推定する手法である。2014 年から 2020 年に撮像された 28 枚の PALSAR-2 データから 167 ペアに SAR 干渉法を適用し、得られた衛星視線距離変化の時系列を推定した (図 1-50、図 1-51)。パス 124 (北行軌道・右向き観測) の衛星

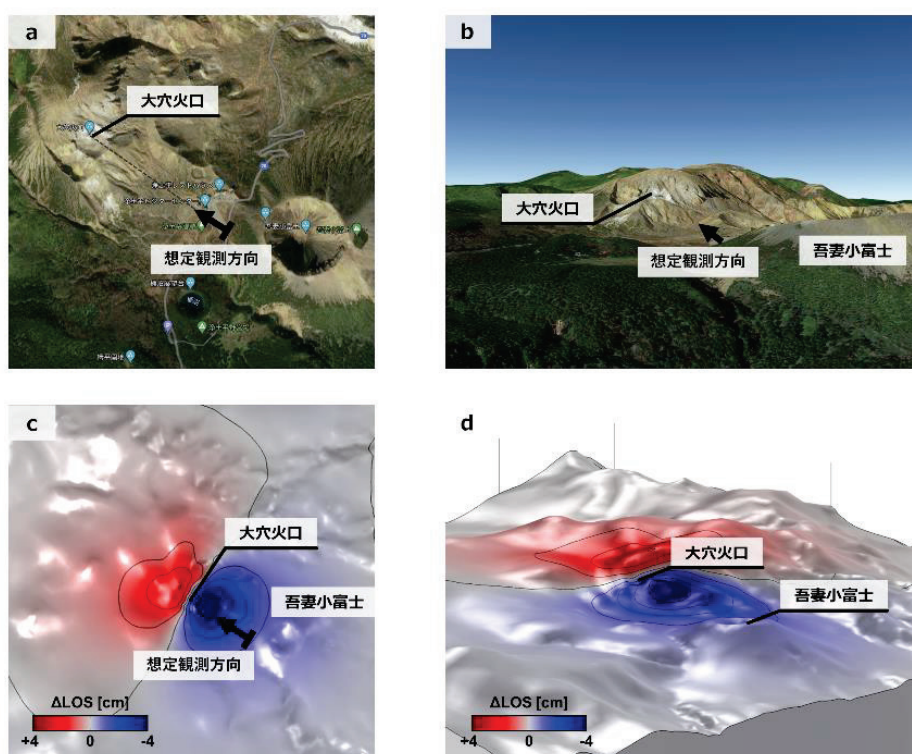


図 1-52 可搬型レーダ干渉計の観測幾何における衛星視線距離変化のシミュレーション。(a) 大穴火口周辺図 (Google Earth より)。(b) 南東方向から大穴火口を望む鳥観図 (Google Earth より)。(c) 想定観測方向に対する視線距離変化の計算結果と (d) 南東方向からの鳥観図。コンターは 1cm 間隔で示した。

視線距離変化の時系列は、2014-2015 年と 2018-2019 年に火山活動の活発化に伴う山体の膨張を示唆する衛星視線距離の短縮を示した。2014 年 9 月から 2015 年 8 月にかけて衛星視線距離の短縮が認められ、最大変化量は 8cm である。その後 2016 年 11 月にかけて視線距離の短縮量は減少し、おおむね観測期間当初の 2014 年 9 月の水準にまで戻った。2017 年にかけて明瞭な視線距離変化は認められない。2018 年に衛星視線距離が短縮し始め、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 であった。2020 年にかけて衛星視線距離の短縮量は減少し、2020 年末の段階においても同様の傾向が続いている。この傾向は、衛星 SAR 自動解析システムから得られた結果と整合的である。

本サブテーマにおいては、大穴火口周辺で検出された地殻変動をより詳細に調査するため、同サブテーマで開発した火山可搬型レーダー干渉計 (SCOPE) による観測を実施する予定である。その予備調査として、衛星 SAR から得られた地殻変動情報から、SCOPE により得られると期待される地殻変動分布の推定を行った。大穴火口における局所的な地殻変動は水平に横たわる長球の回転楕円体構造の増圧によってよく説明できた。そこで、推定した地殻変動モデルから有限要素法を用いて地殻変動分布を推定し、その地殻変動分布から 2021 年 10 月 28 日と 29 日に吾妻山で実施した計測実験と同じ観測によって得られる地殻変動分布を推定した(図 1-52)。その結果、大穴火口を中心に南東側で視線距離の短縮 (最大 4cm)、北西側で視線距離の伸長 (最大 3cm) が求まった。これまでの計測事例から推測される検出精度から考えれば、比較的容易に検出できると期待される。このような計算は、SCOPE による計測を行う場合に、効率的な地殻変動検出が可能な場所や方向を事前に調査できる有効な方法といえる。

ii) 三宅島

三宅島に関する事例研究については、令和元年度の成果として報告したが、令和 3 年度においては、地殻変動メカニズムの解釈をさらに進めた。この結果について述べる。

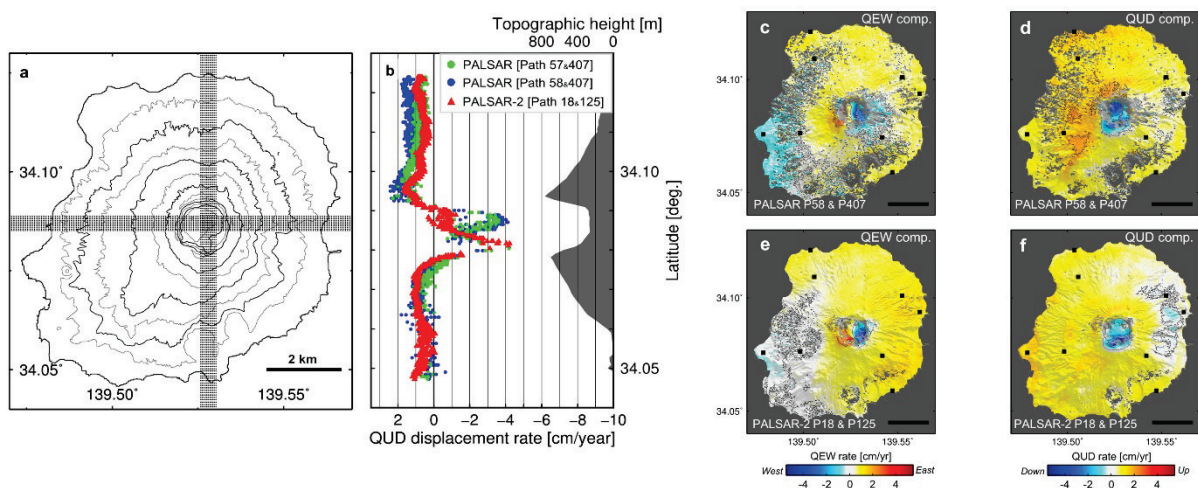


図 1-53 PALSAR (2006-2011 年) と PALSAR-2 (2014-2019 年) データから求めた各観測期間における準上下変位と準東西変位の平均変位速度および準上下変位平均速度の南北断面。

本解析では ALOS/PALSAR（2006～2011）と ALOS-2/PALSAR-2（2014～2019）から得られた SAR 干渉解析結果に MTI 法を適用し、地殻変動の時空間変化を求めた。特に、MTI 法の解析においては数値標高モデル（DEM）の誤差の影響を考慮した補正も導入した。PALSAR と PALSAR-2 データを解析した結果は GNSS データが示す島全体の膨張と火口底における収縮が認められた（図 1-53）。三宅島における地殻変動を駆動する圧力源が少なくとも 2 つ存在することを示す。東向き観測と西向き観測の衛星視線距離変化の平均変位速度に対して準東西変位と準上下変位に分離すると、2009 年中頃に火口底の変形様式が同心円の収縮から南北非対称の変形様式に変わり、最近まで継続していることを明らかとなった（図 1-54）。

初めに島全体の膨張を駆動する深部圧力源の幾何推定を試みた。深部圧力源の幾何推定には火口底における変動の影響を排除するために御蔵島を基準とする 2014 年から 2019 年における平均変位速度を示す GNSS データを使用した。深部圧力源の幾何は長球の回転楕円体を仮定し、回転楕円体の圧力変化に伴う地表変化の解析解（Yang model）を用いて地殻変動の再現を試みた（Yang *et al.* 1988³⁾）。パラメー

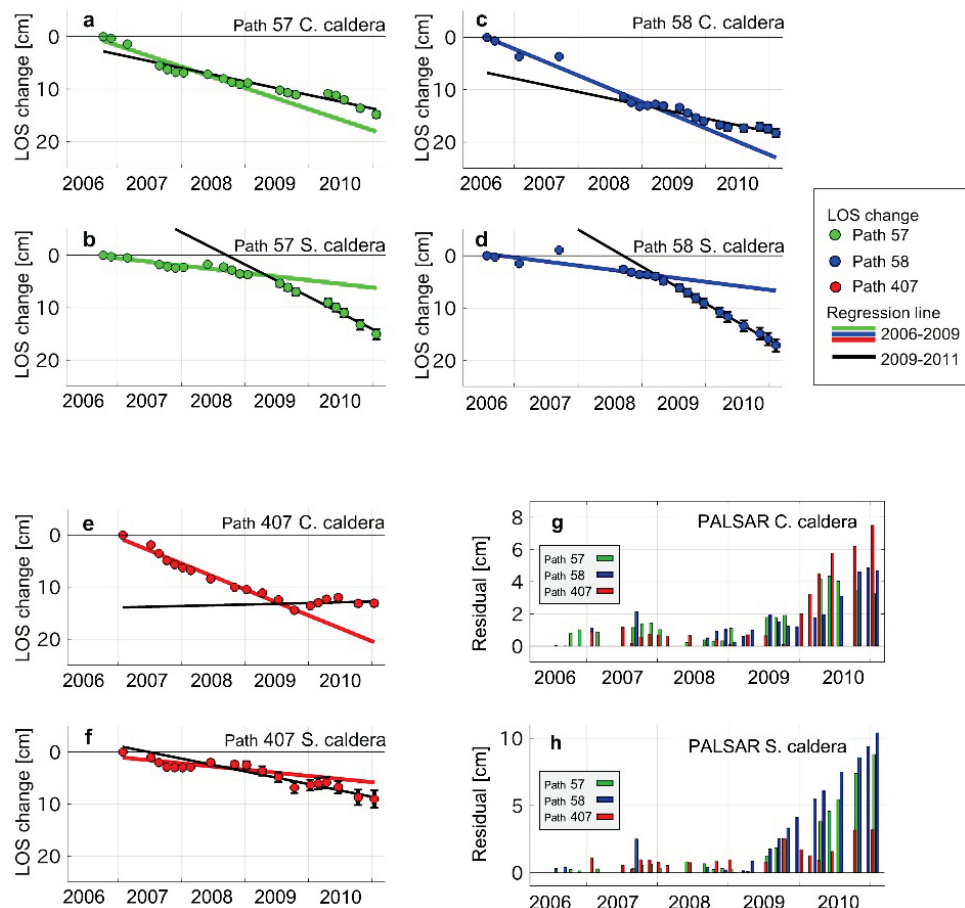


図 1-54 火口底における PALSAR（2006-2011 年）の衛星視線距離変化の時系列。パス 57 (a, b)、パス 58 (c, d)、パス 407 (e, f) の衛星視線距離変化。上段が火口底中央、下段が火口底南端における衛星視線距離変化の時系列を示す。色付き線は 2009 年中頃までの衛星視線距離変化に対する回帰直線。(g, h) 2009 年までの線形回帰直線と視線距離変化の残差の時系列。

タの探索には Particle swarm optimization (PSO) アルゴリズムを採用した (Kennedy and Eberhart 1995⁴⁾)。PSO による深部圧力源幾何を推定した結果はカルデラからおおよそ南西に 1 km、深さ 4 km に中心をもち、深さ方向に長軸を持つ回転楕円体の構造が求まった (図 1-55)。剛性率を 15 GPa と仮定すると、圧力変化量は 17.6 MPa であった。深部圧力源の位置は既往研究で推定されている位置と類似しており、最近の電磁気探査の結果とも矛盾しない (Nishimura *et al.* 2001⁵⁾; Gresse *et al.* 2021⁶⁾)。

次に、解析解を用いて火口底における収縮を再現する圧力源 (以下、浅部圧力源) 幾何を推定する。ここでは南北非対称の収縮の描像に注目するため、PALSAR-2 データの衛星視線距離変化の平均速度に対して圧力源幾何を推定した。SAR データに含まれる島全体の膨張を再現するために、深部圧力源の幾何は前項で推定したパラメータを採用した。浅部圧力源の幾何推定には前項と同様に PSO を用いて最適なパラメータを探索した。浅部圧力源の幾何も長球の回転楕円体を仮定した。SAR データは計算の効率化とデータの重みづけのために四分木法により、データをダウンサンプリングした。PSO によって推定された最適パラメータは、長軸がほぼ南北に向き、北側に傾斜する長球の回転楕円体の構造が求まった。回転楕円体の南端は火口底南端に位置する火孔の位置におおむね一致していた。剛性率 2 GPa を仮定すると、圧力変化量は 1.5 MPa と求まった。火口底直下では 60-75° 程度の傾斜をもって分布しているが、それよりも回転楕円体の傾斜角は低角 (およそ 34°) に求まった (図 1-55)。最適パラメータを用いた計算値と観測値を比較すると、計算値の火口底の収

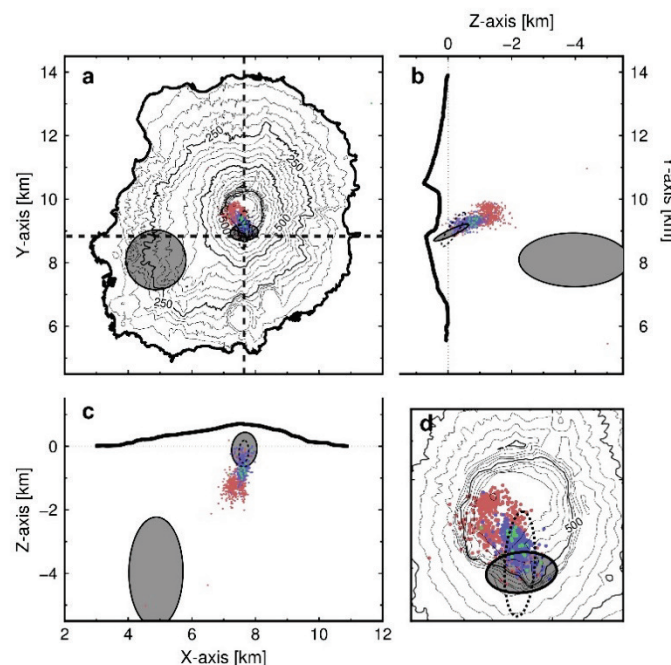


図 1-55 圧力源幾何推定の結果と震源分布。(a) 平面図。点線は南北・東西断面位置を示す。(b) 南北断面。(c) 東西断面。(d) カルデラ周辺拡大図。灰色楕円は有限要素法で計算した圧力源構造の外枠、点線楕円は解析解を用いて推定した最適モデルの外枠を示す。震源分布はそれぞれ高周波地震を赤点、やや低周波地震を緑点、低周波地震を青点で示す。

縮を示唆する衛星視線距離の伸長の最大値はおおむね一致しているものの、伸長領域は火口縁にも分布していることが見てとれる（図 1-56）。より現実環境に近い計算媒質を考慮し、震源分布と圧力源構造の関係を調査するために有限要素法による数値計算を用いて地殻変動を再現する最適な圧力変化量を推定した。ここでは計算媒質の剛性率が深さ方向に増加し、浅部圧力源が震源分布と一致する構造を仮定し、最適な圧力変化量を推定する。3 次元の計算領域を考慮し、計算領域上端は国土地理院提供の 10 m DEM で地形を形成し、側面にはローラー（法線方向変位ゼロ）、底面には変位ゼロの境界条件を与えた。側面には計算領域境界の影響を軽減するために無限反射面を設定した。剛性率は火山における地震波速度構造から推定し、深さ方向に対数関数的に変化させた（Lesage *et al.* 2018⁷⁾）。代表的な値として海拔ゼロで 8.7 GPa、海拔下 4.0 km で 14.3 GPa の剛性率をとる。圧力変化量は浅部圧力源に対しては -6 MPa から 0 MPa を 0.25 MPa 間隔で、深部圧力源に対しては 0 MPa から 10 MPa を 0.5 MPa 間隔で地表変位を計算し、観測値と計算値の最小二乗誤差が最も小さくなる圧力変化量を推定した。

最適な圧力変化量を推定した結果は、浅部圧力源では -1.5 MPa（収縮）、深部圧力源については 5.0 MPa（膨張）を与えた場合に観測値との最小二乗誤差を最小に

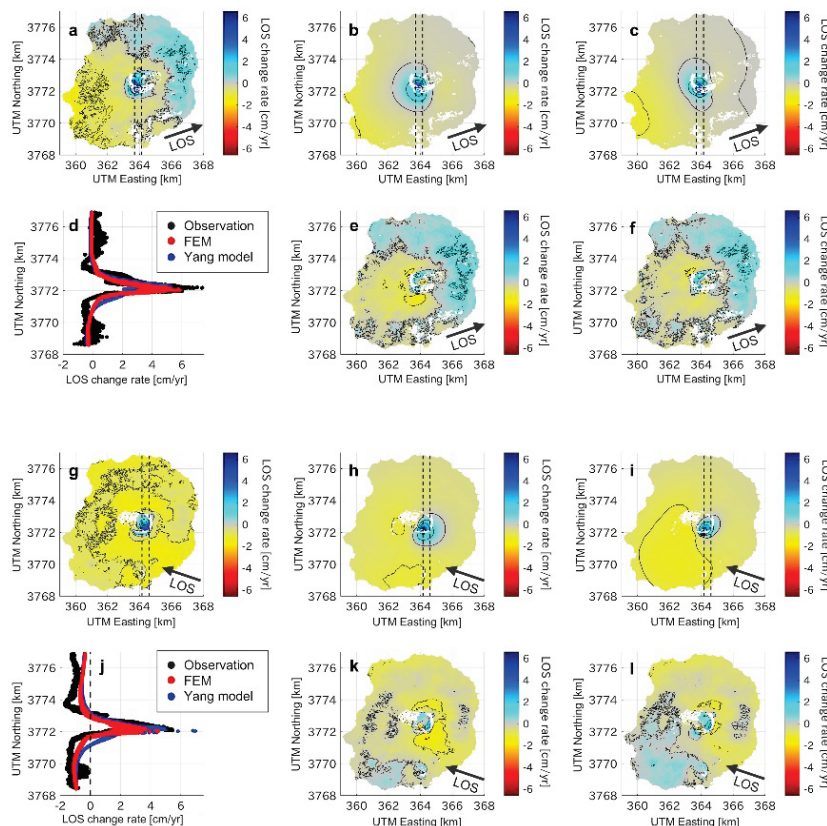


図 1-56 観測値と最適モデルに基づく計算値との比較。それぞれパス 124 (a-f) とパス 18 (g-l) の結果。(a, g) 観測値、(b, h) 解析解による計算値、(c, i) 有限要素法による計算値、(d, j) 観測値と計算値の南北断面、(e, k) 解析解による計算値との残差、(f, l) 有限要素法による計算値との残差。衛星視線距離変化の伸長を正の値（青）とした。黒矢印は視線方向を、黒点線は南北断面位置を示す。

した。解析解を用いて推定した圧力変化量と比較して、浅部圧力源に関してはおおむね一致していた。一方、深部圧力源の圧力変化量は解析解で推定された圧力変化量（剛性率 14.3 GPa を仮定した場合に 16.8 MPa）と比較して小さく求まった。これは解析解で仮定した均質媒質とは異なり、剛性率が深さ方向に変化している影響が要因と考えられる。また解析解から求めた計算値と比較して、火口底における衛星視線距離の伸長領域の火口縁に広がる範囲が小さくなっており、観測値に対する再現性が向上した（図 1-56）。有限要素法から求めた計算値と観測値との最小二乗残差の値も、解析解から求めた場合と比較して改善した。したがって、本解析では有限要素法による解析結果をもとに、火口底における収縮を駆動する力源は震源分布が示唆するような北向き傾斜の構造を有しており、火口底直下で観測される火山性地震と強く関連していることを示唆した。

衛星 SAR による解析結果は 2009 年ごろに三宅島の火口底における収縮の最大位置が火口底中央部から南端に移り、その前後では変位速度がおおむね一定であることを明らかにした。火口底における変形の駆動メカニズムは多くの既往研究で議論されており、火口底における変形は圧力源、もしくは火道内の圧力環境変化を強く反映すると考えられている。特に非対称の変形様式については数値シミュレーションや室内実験の結果をもとに、Trapdoor faulting, 環状断層の食い違い、非対称構造の圧力減少が駆動メカニズムとして提案されている（Lipman 1997⁸⁾; Amelung *et al.* 2000⁹⁾; Gudmundsson *et al.* 2016¹⁰⁾）。また力源の上端深さが火口の径に対して浅い位置にあることも提案されている。Trapdoor faulting は地殻変動の描像のみならず、震源分布などから駆動メカニズムが同定される事例が多いが、三宅島の例でこれらに該当しない。地質学的調査では三宅島の火口直下にはカルデラ形成に伴って内向きと外向き環状断層が共存していると考えられている（Geshi 2009¹¹⁾）。震源分布は明瞭な環状を示していないものの、火口底直下の内向き断層が深部から供給される火山性流体の経路となり、周辺の岩盤が熱水変質し、重力に駆動されて継続的かつ微小な脆性破壊が進行していると仮定すると、地殻変動の描像と火口直下の震源分布を説明する上で矛盾が生じない。火口底南端の火孔から放出される火山性流体の放出量は 2000 年の活動以降指数関数的に減少しているため、放出量と火口底の変形が直接対応しているとは考えにくい。したがって上述のメカニズムによって三宅島の火口底における地表変化を駆動していると提案できる。

c) 国際会議参加報告（IAG: International Association of Geodesy 2021）

本課題で得られた解析結果についての報告を行うとともに、海外における最新の SAR 解析技術を調査することを目的として、2021 年 6 月 28 日から 7 月 2 日までの日程で中国の北京、および、オンラインで開催された IAG 2021（Scientific Assembly of the International Association of Geodesy）に参加した。今回の IAG 大会における講演の全体的な傾向としては、1990 年頃から実用化された宇宙測地技術によるおよそ 30 年にわたる長期的な観測を通して明らかになった見地に関する講演が中心であった。

本課題に関しては、“3.3 Geodetic observations in volcanic and tectonically active area”のセッションにおいて、草津白根山 2018 年噴火に関する SAR 解析結果についての発表を行った。本セッションは、地震に伴う諸現象の観測成果が主であり、火山を対象とした講演はわずかであった。このセッションでは衛星 SAR のデータを用いた地殻変動観測の成果報告も散見された。特に 2014 年以降に打ち上げられた SAR 衛星が高頻度で長期にわたって撮像したデータが蓄積したことにより、SAR 時系列解析による地殻変動観測の測定精度が向上したことに加えて、より詳細な時間変化の様子を捉えられるようになった。今後は小型 SAR 衛星によるコンステレーションの構築がすすむにつれて、衛星 SAR による地殻変動観測の高精度化につながることを期待される。

(c) 結論

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、令和 2 年度に作製した DDS 方式の信号発生器の有効性を確認した後、送受信機本体に組み込んだ。これにより、当初計画どおりに運用機の開発を完了した。また、手動方式の開発については、SAR 処理ソフトウェアにアンテナの動揺を補正する機能を追加した。その効果については、より詳細な計測実験を通じて確認していく必要がある。霧島山における計測実験においては、前年度の観測データとのペアについて干渉を得ることに成功したが、火山活動に伴うと考えられる有意な地殻変動は検出されなかった。また、硫黄山について、手動方式に関する計測実験を実施し、レールの不安定の改善が必要であることを明らかにした。これについては、三脚の石突を改良することにより、安定性の向上を試みた。

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

令和 3 年度においては、十勝岳、蔵王山、吾妻山、雲仙岳、口永良部島に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。各火山において、火口周辺に有意な地表変動が見られ、今後の火山研究に有用な情報が得られたと考えられる。これらの地殻変動情報は、JVDN において公開している。得られた結果においては、ノイズ低減が不十分な場合があった他、干渉性劣化が顕著な領域においては、対象とする火山周辺の多くの領域がマスクされるという問題が見られた。これらは、地殻変動情報の利用の妨げになる可能性があり、その改善については今後の重要な課題と考えられる。

(d) 引用文献

- 1) 姫松裕志、小澤拓、 PALSAR-2 と Sentinel-1 による吾妻山における間欠的隆起の検出、日本火山学会 2021 年秋季大会、pp.11, 2021.
- 2) Narita, S., T. Ozawa, Y. Aoki, M. Shimada, M. Furuya, Y. Takada, and M. Murakami, 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, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01280-5>, 2020.

- 3) Yang, X.M., P.M. Davis, J.H. Dieterich, Deformation from inflation of a dipping finite prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing, *J. Geophys. Res.*, 93:4249-4257, 1988.
- 4) Kennedy J., R. Eberhart, Particle swarm optimization, In: *Proceedings of ICNN' 95 - International Conference on Neural Networks*. IEEE, pp 1942-1948, 1995.
- 5) Nishimura, T., S. Ozawa, M. Murakami, T. Sagiya, T. Tada, M. Kaidzu, M. Ukawa, Crustal deformation caused by magma migration in the northern Izu Islands, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 28:3745-3748, 2001.
- 6) Gresse, M., M. Uyeshima, T. Koyama, H. Hase, K. Aizawa, Y. Yamaya, Y. Morita, D. Weller, T. Rung-Arunwan, T. Kaneko, Y. Sasai, J. Zlotnicki, T. Ishido, H. Ueda, M. Hata, Hydrothermal and magmatic system of a volcanic island inferred from magnetotellurics, seismicity, self-potential, and thermal image: an example of Miyakejima (Japan), *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 1-24, 2021.
- 7) Lesage, P., M.J. Heap, A. Kushnir, A generic model for the shallow velocity structure of volcanoes, *J. Volcanol Geotherm Res.*, 356:114-126, 2018.
- 8) Lipman, P.W., Subsidence of ash-flow calderas: Relation to caldera size and magma-chamber geometry, *Bull. Volcanol.*, 59:198-218, 1997.
- 9) Amelung, F., S. Jonsson S, H. Zebker, P. Segall, Widespread uplift and “trapdoor” faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry, *Nature*, 407:993-996, 2000.
- 10) Gudmundsson, M.T., K. Jónsdóttir, A. Hooper, et al (2016) Gradual caldera collapse at Bárðarbunga volcano, Iceland, regulated by lateral magma outflow, *Science*, (80-) 353:aaf8988, 2016.
- 11) Geshi, N., Asymmetric growth of collapsed caldera by oblique subsidence during the 2000 eruption of Miyakejima, Japan. *Earth Planet Sci Lett* 280:149-158, 2009.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和 4 年度の業務計画案

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、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。令和 3 年度においては、本体のサイズを大きく変更せずに、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組み込み、運用機を完成させた。令和 4 年度においては、コーナーリフレクターを用いた計測実験や実際の火山等を対象とした計測実験を実施し、運用機の性能評価を行う。また、可搬型レーダー干渉計に関する無線局免許の更新に向け、関係各所との調整を進める。

手動方式について、令和 3 年度に計測実験を行い、繰り返し観測により干渉が得られることを確認した。しかし、SAR 処理の精度が十分でなく、観測もしくは解析方法の改良が必要である。令和 4 年度においては、これまでの計測実験において明らかになったルールやアンテナのふらつきに起因する精度劣化を改善するため、アンテナフレームやレールの安定化、解析方法についての検討を進める。

令和 3 年度に計測実験を実施した霧島山、吾妻山において、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る。また、十勝岳などの可搬型レーダー干渉計による観測可能火山において、地殻変動検出のための計測を開始する。さらに、可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、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 4 年度においては、雲仙岳など、可搬型レーダー干渉計による観測可能火山のうち、未調査の火山を対象とする。

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

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、その解析結果を火山観測データ一元化共有システム(JVDN システム)に提供する。令和 3 年度においては、5 火山（岩手山、箱根山、阿蘇山、焼岳、雌阿寒岳を予定）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を継続して運用するとともに、データバックアップシステムを導入する。

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

(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（8-14 μm ）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、攪拌播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（8-14 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッド、冷却型 MWIR（3-5 μm ）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（8-14 μm ）領域の XGA カメラセンサーヘッド、冷却型 LWIR（7.5-9.5 μm ）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) 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 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) 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 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 μ m) 領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッド、SPIC-C の 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、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：

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した。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した。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し小型化した。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。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。

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 μ m）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（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。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築：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。
- ・ 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 μ m）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（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車載型とする。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築：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3年度における成果の目標及び業務の方法

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 プロトタイプの実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 プロトタイプの実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 プロトタイプの実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。

(2) 令和 3 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 の各プロトタイプをベースとしたフィールドタイプの開発として、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させた。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させた。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させた。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させた。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築した。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、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した。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した。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した。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 を製作した。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った。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、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った

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 3 年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプをベースとしたフィールドタイプの開発として、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-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の開発、d) SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の開発、e) SPIC プロトタイプによる火山試験観測、f) 画像分光装置のプロトタイプ(ISH)の改造を実施した。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、g) 斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する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 2-1～2-11 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-12285-1000 (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)	

表 2-3 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプの主な諸元 (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 NETD (@25℃)	FOV 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV 0.348mrad 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 NETD (@25℃)	FOV 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV 0.348mrad 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-12285-1000 (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 プロトタイプの主な諸元 (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	263×276×308mm、13kgf	
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)	

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	30μs~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)

表 2-10 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	・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)

表 2-11 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)

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、昨年度にハード部分の開発を実施¹⁾した屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) のソフト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 (本年度はソフト部分の製作)。

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。また格納された各カメラの仕様を表 2-12、2-13 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である。カメラ本体と制御 PC (Window10) 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。完成した装置の写真と、開発したソフトにより試験計測を実施した際の写真を図 2-4 に示す。

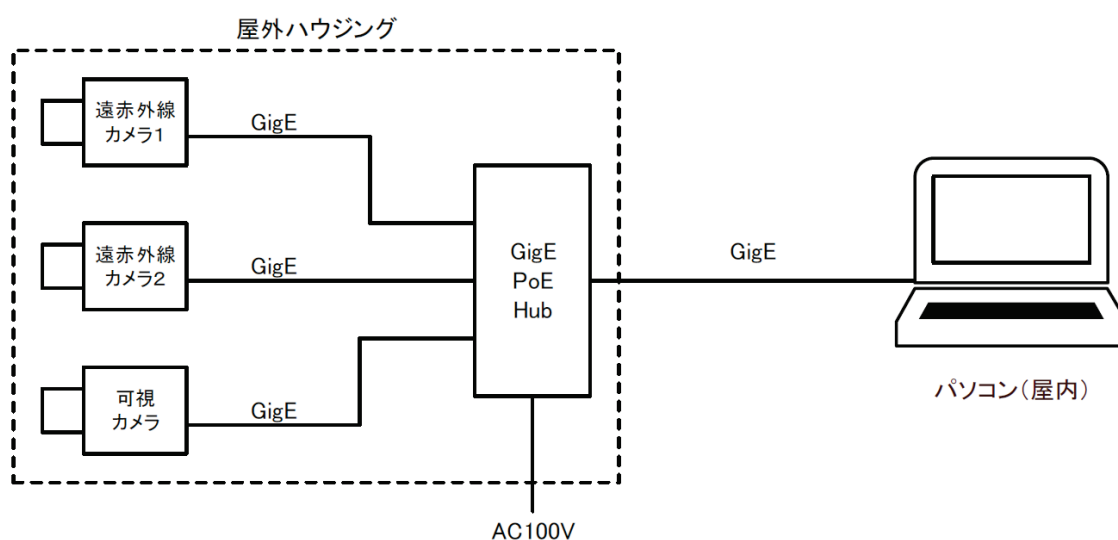


図 2-3 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) の構成模式図

表 2-12 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）	8000～14000nm （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 2-13 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

開発したソフトは、各カメラの同期計測と保存（動画 30fps または静止画）を実現する制御記録 Viewer ソフトと保存した画像を再生する DumpViewer ソフトである。Viewer ソフトのスクリーンショットを図 2-5 に、DumpViewer ソフトのスクリーンショットを図 2-6 に示す。

昨年度のハード製作及び本年度のソフト制作の完了により、非冷却型赤外定点観測カメラ（定点観測タイプ（温度・ガス計測））を観測に供する準備が整った。

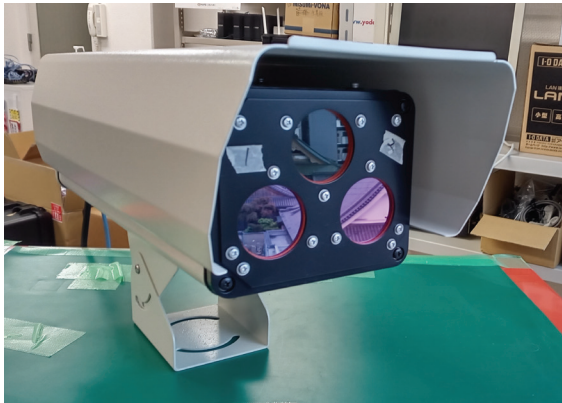


図 2-4 完成した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) の写真と、開発したソフトにより試験計測を実施した際の写真



図 2-5 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) の制御記録 Viewer ソフトのスクリーンショット

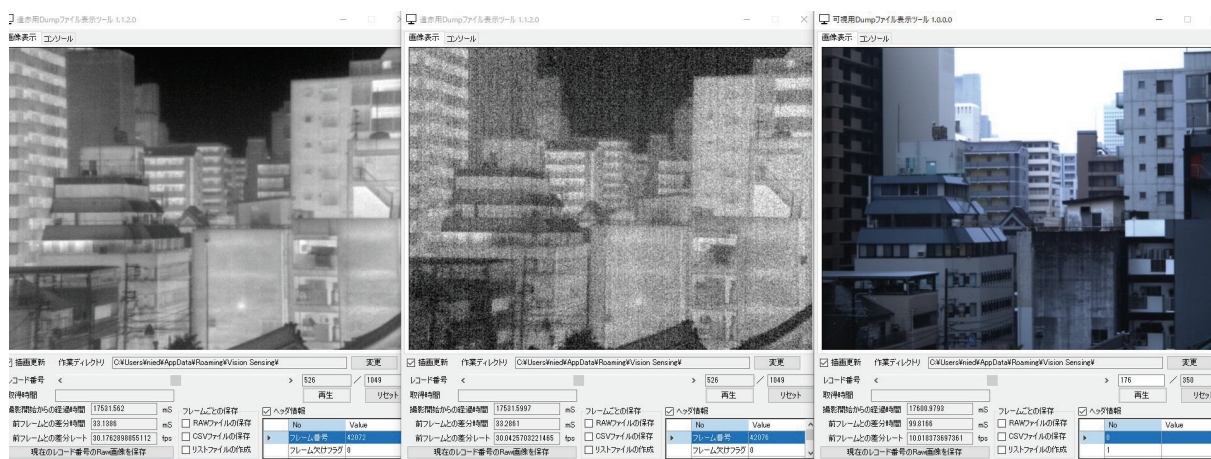


図 2-6 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) の DumpViewer ソフトのスクリーンショット

b) 冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプの開発

令和 2 年度に、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。また本装置は 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ている。

令和 3 年度は、小型冷却型赤外カメラ（MWIR 領域）と SPIC-C(LWIR)プロトタイプのカメラ 3 及び、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 SPIC-UC(4VGA)の各カメラを 3 台まで同時搭載可能な、冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプ（MWIR/LWIR）を実現するシステムの製作を実施した。この装置の図面を図 2-7 に、完成写真、試験観測作業の写真を図 2-8 に示す。

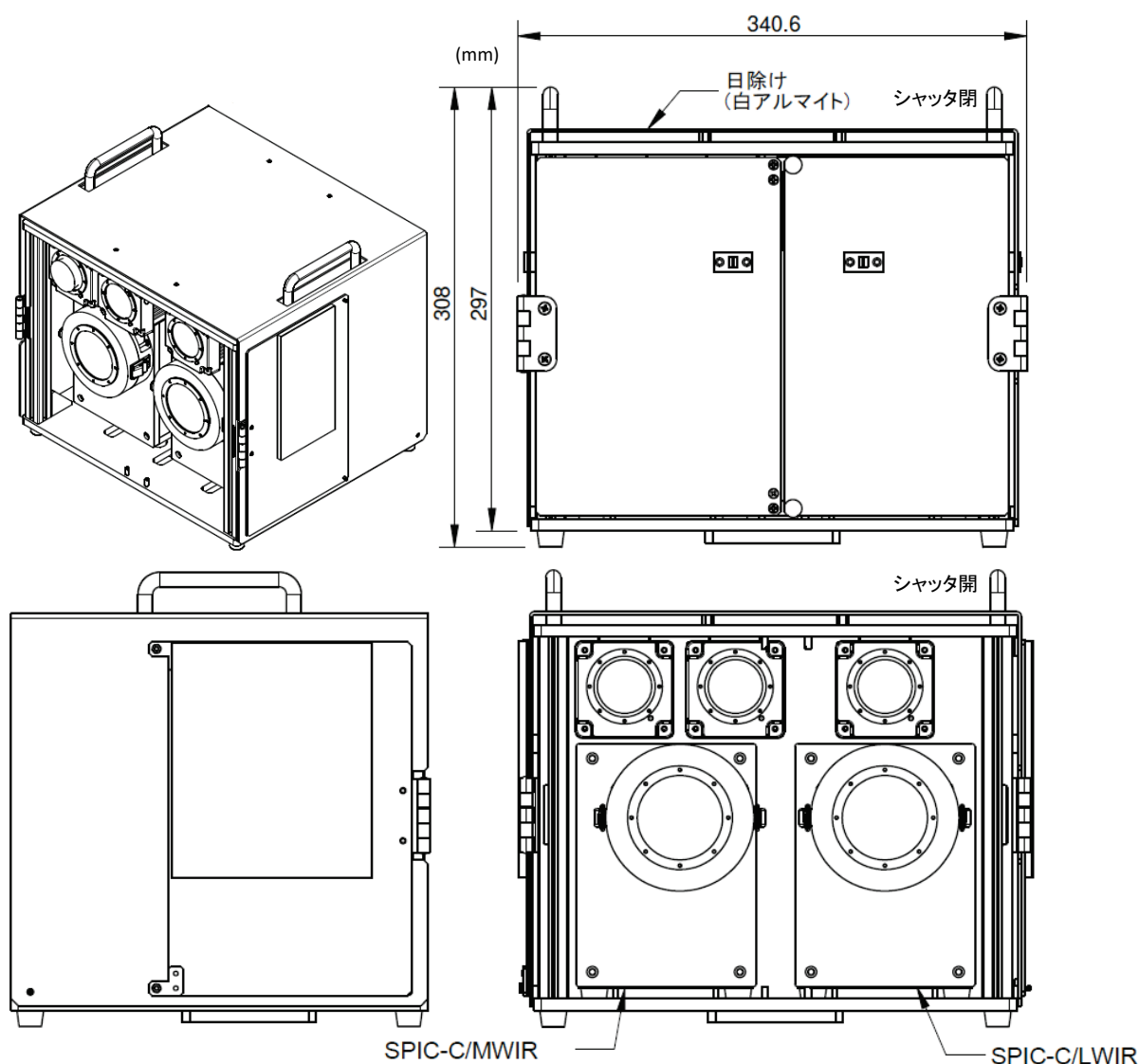


図 2-7 冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプ（MWIR/LWIR）の図面

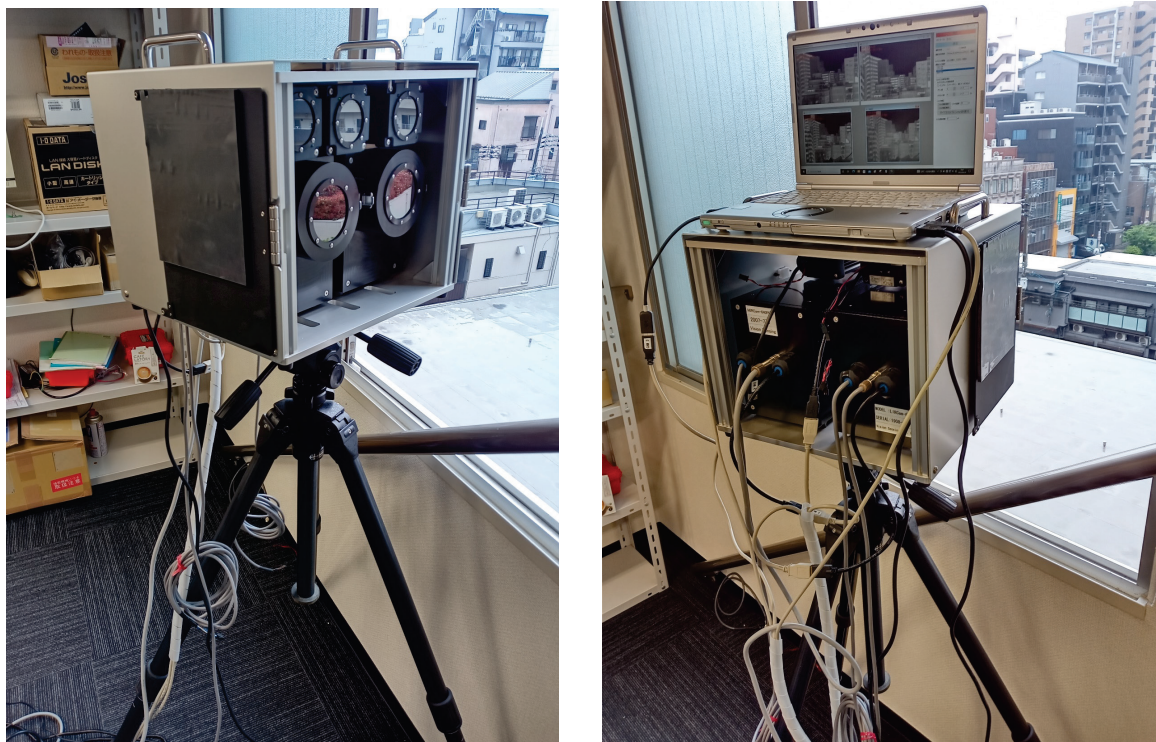


図 2-8 冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプ（MWIR/LWIR）の完成写真と試験計測の様子

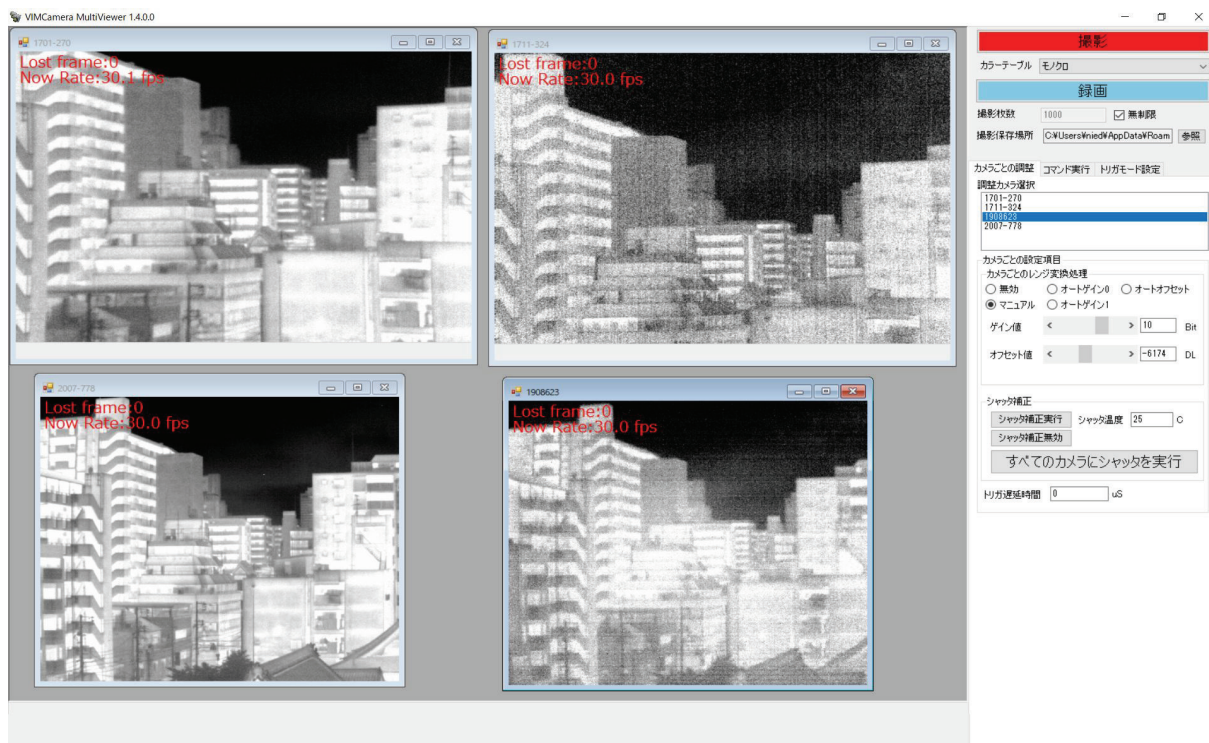


図 2-9 冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプ（MWIR/LWIR）の制御記録 Viewer ソフトのスクリーンショット

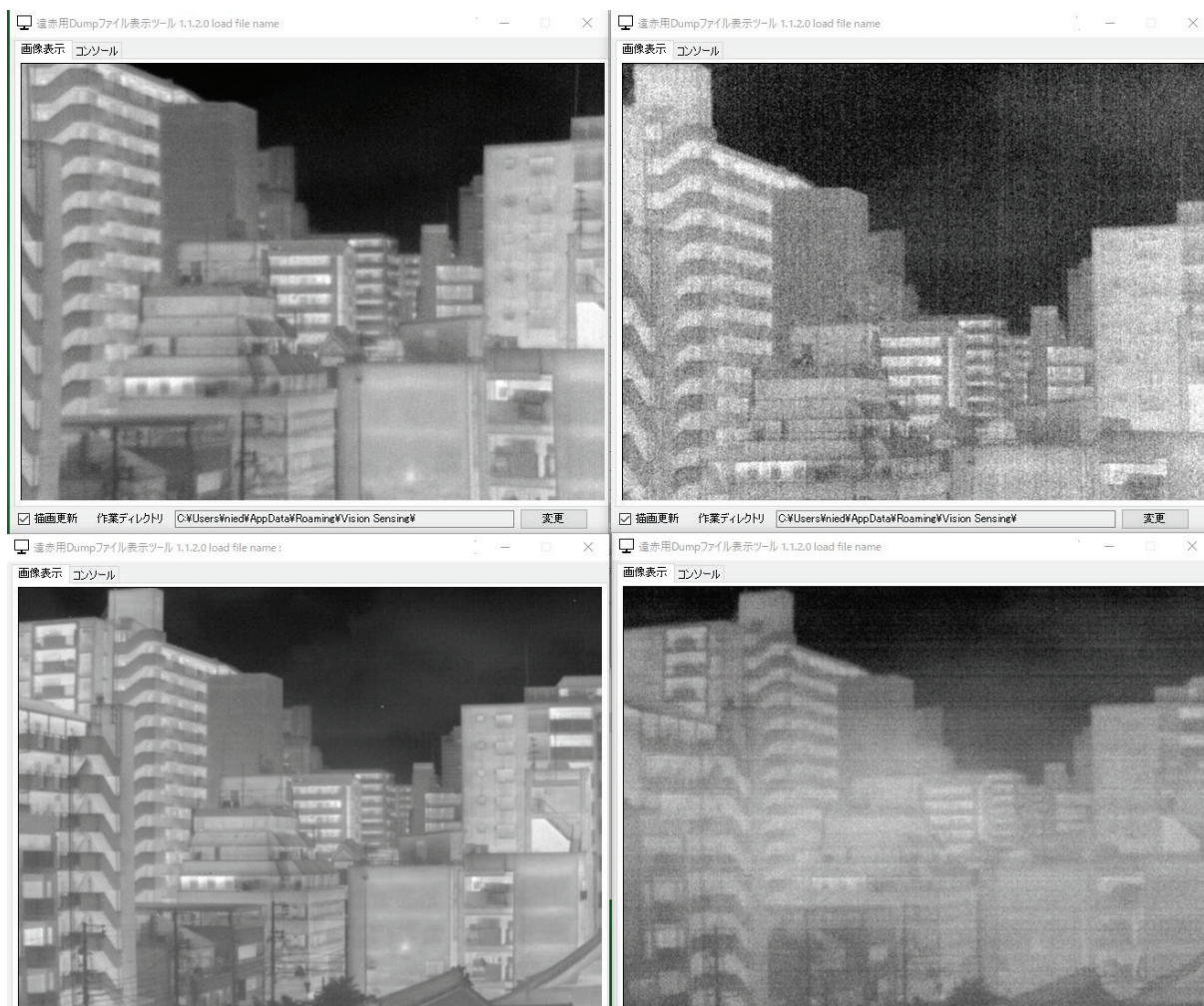


図 2-10 冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプ（MWIR/LWIR）の DumpViewer ソフトのスクリーンショット

本装置は、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（令和元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。

各カメラの同期計測と保存（動画 30fps または静止画）は制御記録 Viewer ソフトで実現し、保存した画像の再生は DumpViewer ソフトで実現する。制御記録 Viewer ソフトのスクリーンショットと図 2-9 に、DumpViewer ソフトのスクリーンショットを図 2-10 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。



図 2-11 SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の完成写真

c) SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の開発

令和 2 年度に引き続き、装置の小型化の検討を行い、フィールド仕様の可搬性を重視した 2 バンド型の 2 台の赤外カメラとして、FLIR 社製 GF77LR、GF77HR をカメラ 1、2 に採用した 2 眼カメラシステムとして機能する SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）を構築した。本装置のカメラ 1 の観測域は、7.5 μ m 付近の SO₂ ガスの吸収波長域（図 2-1 参照）に感度を有するが、水蒸気の影響も受けるため、主に、数 m～数 100m の近接域からのガス観測を実現するシステムとして構想している。本装置の主な諸元を表 2-14 に、装置の外観を図 2-11 に示す。以上により、今後の試験計測の準備が整った。

表 2-14 SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の赤外カメラ 1、2 の主な諸元

	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、320×240 素子	
フィルター（感度波長域）	7000～8500nm (SO ₂ 吸収)	9500～12000nm (リファレンス)
フレームレート	30fps	
カメラインターフェース	USB2.0	
レンズ	f=18mm/F1.04	
NETD (@30℃)	0.025K	0.025K
本体サイズ、重量	150×201×84mm、1540gf	
電源	バッテリー/AC アダプタ	

d) SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の開発

SPIC-SS のフィールドタイプの開発では、昨年度までの装置の小型化の検討を反映し、可視カメラ（2 台のカラーカメラ）と非冷却型赤外カメラからなる装置を考案し、設計、製作を実施した。本装置の主な諸元を表 2-15、表 2-16 に示す。

表 2-15 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の赤外カメラの主な諸元

センサーヘッド	カメラ 1
センサータイプ	FLIR 社 A700 非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子
感度波長域	7500～14000nm
フレームレート	30fps（同期可能）
A/D	16bit
レンズ	18 mm 24° f/1.0
NETD（@30℃）	0.03K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	123×77×77 mm
保護ハウジング	IP4 対応（Ge 窓付き）
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af

表 2-16 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の可視カメラ諸元

センサーヘッド	The Imaging Source 社製 DFK 39GX265-Z20 筐体サイズ：71×71×147mm（2 台）
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	20 μ s～30s
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	6.8 mm F1.5(wide) to 136 mm F3.4(tele)
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af

本装置は、バッテリー駆動であり、手持ち、首掛け、三脚設置での使用ができる。3 台のカメラは計測制御ソフト LabView で記述されたソフト（（株）イー・アイ・ソル社製作）により制御され、データ取得、保存等を実現する。3 台のカメラはフレーム同期可能で、それぞれオートフォーカス機能を有する。また可視カメラはズーム機能を搭載し、2 台の画角（視野）を wide、tele 等の異なる値に設定し使用できる。

この装置の図面を図 2-12 に、完成した装置の写真と、開発したソフトにより試験計測を実施した際の写真を図 2-13 に示す。また、計測制御ソフトのスクリーンショ

ットを図 2-14 に示す。試験計測の結果、装置の正常稼働を確認できた。本装置は SfM/MVS 等にご利用可能なデータの取得も視野に入れており、今後、その取得を試みる。

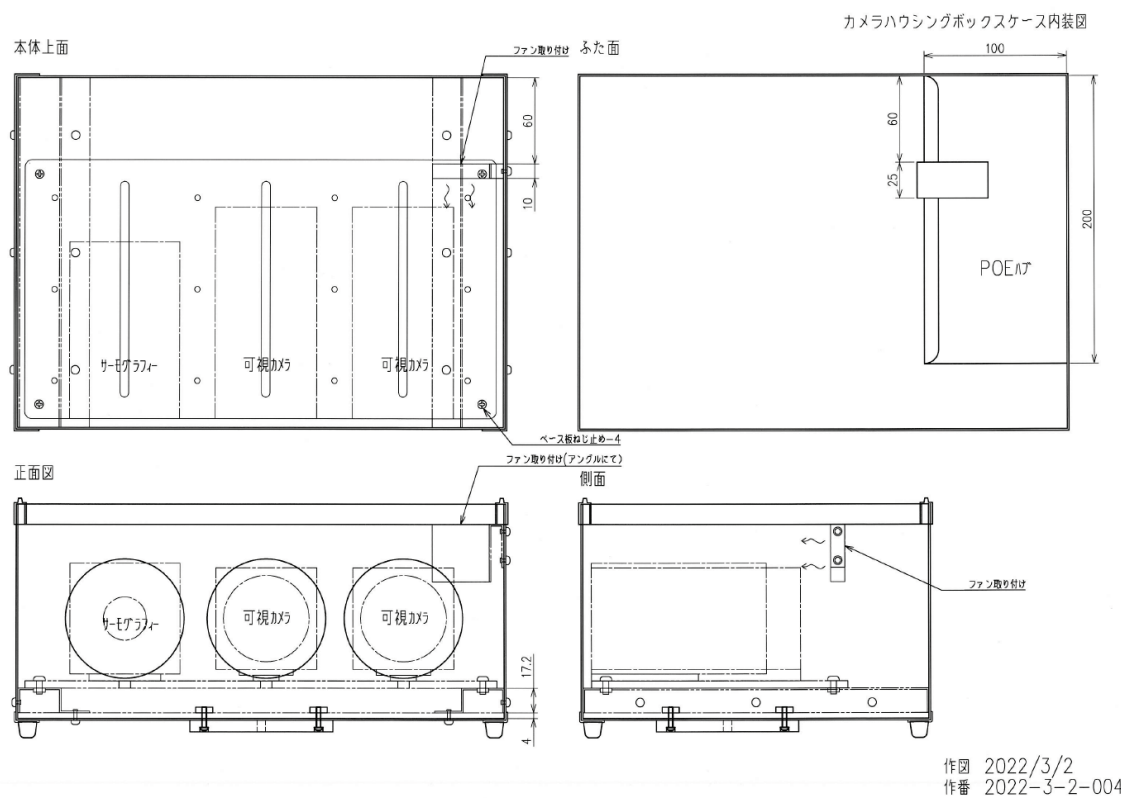


図 2-12 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の図面

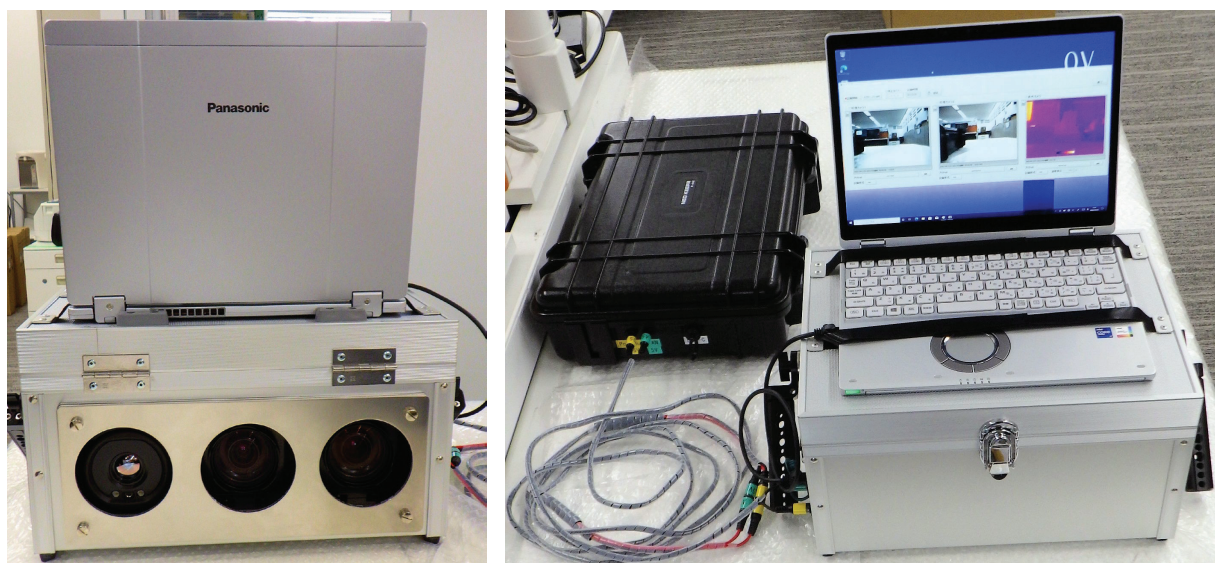


図 2-13 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の完成写真と試験計測の様子



図 2-14 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の試験計測画像（3 秒間隔の 3 台のカメラ同期画像の例）

e) 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、令和 2 年度までに試作した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) プロトタイプによる火山試験観測を、阿蘇山で令和 3 年 7 月、11 月に、立山で 9 月に実施した。

i) SPIC-UC (4QVGA) による火山試験観測（阿蘇中岳、立山）

令和 2 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、阿蘇山で年度当初から計画した。しかし、令和 3 年 4～9 月は、新型コロナウイルス感染症の状況の顕著な改善がなかったため、当初計画の観測を実施できなかった。このため、この期間中は、当初の計画より観測機材を少なくし、かつ観測期間を短くした火山試験観測を実施することとし、SPIC-UC (VGA) プロトタイプと画素数のみが異なる小型の SPIC-UC (4QVGA)（防災科研で別途開発中の機材：画素数 384x288）による試験観測を立案し、令和 3 年 7 月 27 日に阿蘇山中岳の噴煙

観測を、令和3年9月25日に立山（地獄谷）の観測を行った。SPIC-UC(4QVGA)の機材特性は、SPIC-UC(VGA)プロトタイプのそれと近いため、その試験観測データは今後のSPIC-UCのフィールドタイプの開発に活用できる。

SPIC-UC(4QVGA)のフィールドでの観測の様子を図2-15に、装置運用試験データとして取得した阿蘇山中岳の噴煙観測を図2-16に、立山（地獄谷）の観測結果を図2-17に示す。



図2-15 SPIC-UC(4QVGA)のフィールドでの観測の様子（阿蘇山中岳の噴煙観測、2021年7月27日）。阿蘇山中岳の西方3.15kmの草千里展望所より観測



図2-16 SPIC-UC(4QVGA)の阿蘇山中岳の観測結果（異なる赤外バンドで計測したデータの輝度コントラスト補正画像。大気補正は未補正。2021年7月27日12時54分。）阿蘇山中岳の西方3.15kmの草千里展望所より観測。明確なSO₂検出データの取得は未達

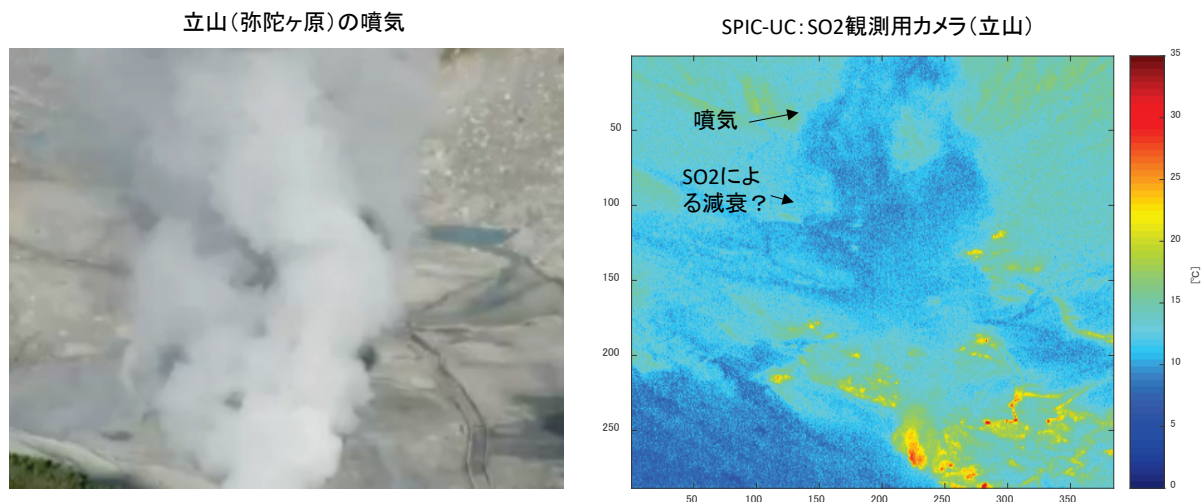


図 2-17 SPIC-UC (4QVGA) の観測結果（可視画像と SO_2 計測用の赤外バンドで計測したデータの輝度温度画像。大気補正は未補正。2021 年 9 月 25 日。）明確な SO_2 検出データの取得は未達。立山（弥陀ヶ原）

令和 3 年 7 月 27 日の阿蘇山中岳の噴煙観測は、観測距離約 3 km からの観測を実施し、噴煙中の SO_2 ガスの可視化を試みたが、画像による明確な検出はできなかった。この時期の噴煙に含まれる SO_2 ガスは日量 300～400t（気象庁調べ）であり、装置の検出限界以下の量の可能性もある。令和 3 年 9 月 25 日に立山（地獄谷）観測は近接（約 100m）観測を実施し、噴煙中の SO_2 ガスの可視化を試みたところ地熱域の SO_2 ガスによる減衰と考えられるデータが得られたが、 SO_2 ガス濃度の比較データがないため、定性的な解釈までとなっている。

これらの観測では、令和 2 年度の検討¹⁾でも指摘した、環境温度の影響と推察される装置バイアスの低減が、観測精度向上には重要であると考察できる基礎的な装置運用試験データが取得できた。一例として、観測時の機材への温度擾乱（日射等の影響）による機器温度バイアスデータの解析結果を図 2-18 に示す。装置は装置校正データを内蔵しているが、その装置校正データの範囲外の擾乱（バイアス成分）

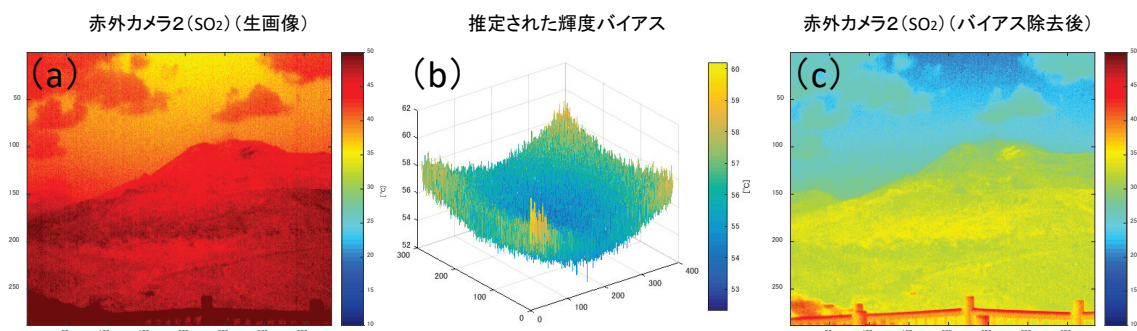


図 2-18 装置開発に役立つ装置データの取得。日射等の影響等による温度擾乱の影響で SO_2 観測用の内蔵型干渉フィルターによる温度バイアス（a）が発生することを試験観測で確認。装置バイアスを推定し真の輝度値を推定する手法を開発中

を十分に補正できないことが分った（図 2-18(a)）。しかし、計測時に黒体（（図 2-15(d)）によるオンサイト補正を行うことで、ある程度その擾乱を推定出来（図 2-18(b)）、観測結果を補正できることが分った（図 2-18(c)）。

ii) 環境温度の影響と推察される装置バイアスの低減

阿蘇山中岳の令和 3 年 7 月の観測では、環境温度の影響と推察される装置バイアスの低減が、観測精度向上には重要であると考察できる基礎的な装置運用試験データが取得できた。この結果を受け、以降の観測の前にその改善策を検討し実施した。

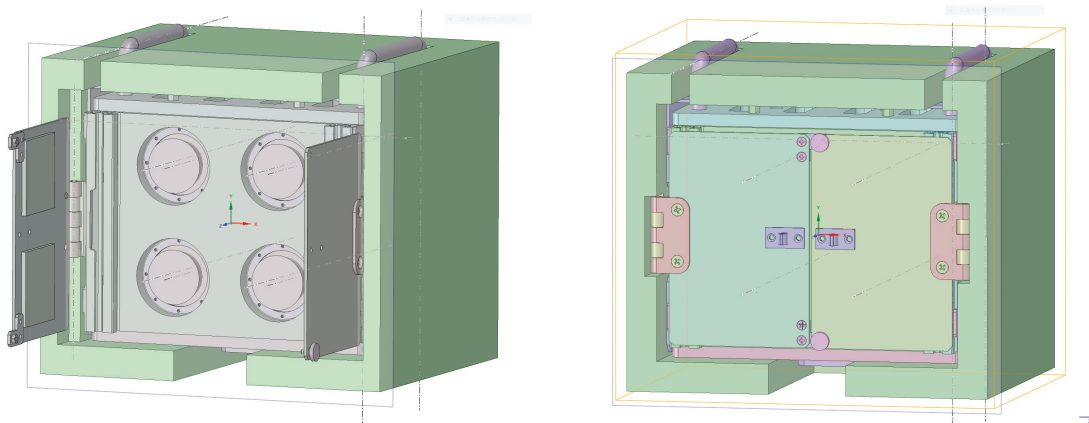


図 2-19 日射等の影響等による温度擾乱の影響を低減するためのカメラ格納ケース用の断熱カバー

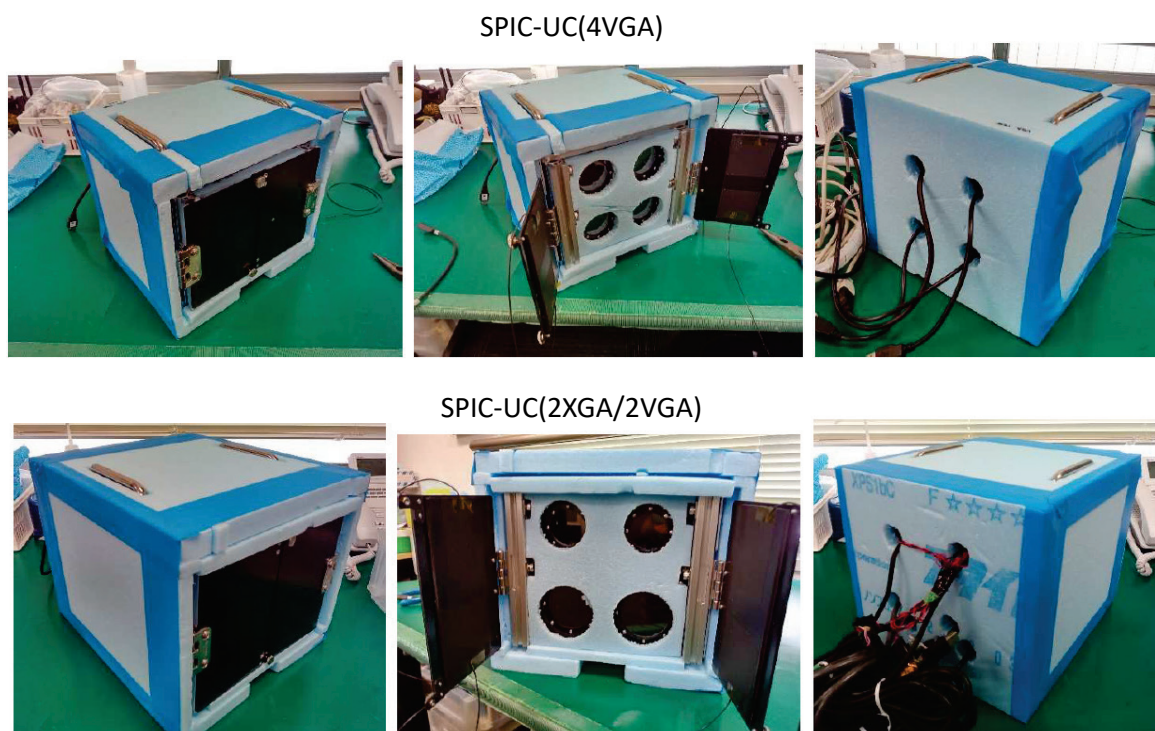


図 2-20 日射等の影響等による温度擾乱の影響を低減するためのカメラ格納ケース用の断熱カバーを SPIC-UC(4VGA)および SPIC-UC(2XGA/2VGA)に付加した様子

その結果、装置の温度擾乱を少なくするために、SPIC-UC 各プロトタイプのアルミ製のカメラ格納ケースにスタイロフォーム製の断熱カバーを付加した。また、各カメラ格納ケースの補正用疑似黒体の特性を改善（Acktar 光吸収ホイル Metal Velvet™（Edmund 社）採用）した。この断熱カバーの 3D 図を図 2-19 に、SPIC-UC 各プロトタイプへの付加の様子の写真を、図 2-20 に示す。以降の観測では、この断熱カバーを装着した観測を実施することとした。

iii) SPIC-UC/4VGA プロトタイプによる火山試験観測（阿蘇山中岳）

令和 3 年 10 月～12 月は、新型コロナウイルス感染症の状況の改善が認められたため、各 SPIC プロトタイプ（SPIC-UC/4VGA）による火山試験観測（阿蘇山中岳噴煙観測）を令和 3 年 11 月 24 日から 11 月 27 日に実施できた。その結果、観測条件が、晴天を背景とした噴煙であった 11 月 27 日に、阿蘇山中岳噴煙中の SO_2 を SO_2 検出用カメラの明確な発光画像として検出できた。これは先行研究⁷⁾と調和的結果である。SPIC-UC/4VGA プロトタイプの阿蘇山中岳噴煙観測の 11 月 27 日の観測の様子を図 2-21 に、取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像を図 2-22 に示す。この観測は温度擾乱を低減する断熱カバーを装着した状態で実施し、観測時にオンサイトで黒体補正データを取得し機器のバイアス推定、補正を実施した。

阿蘇中岳は、令和 3 年 10 月 20 日の噴火以降、気象庁の観測（紫外線による噴煙断面観測である DOAS 観測）によれば、 SO_2 ガスの発生量が同年 7 月の 10 倍程度になっており、我々が観測した（可視化出来た）噴煙の SO_2 も同程度（2000～3000t/day、気象庁調べ）であったと推定される。



図 2-21 SPIC-UC/4VGA プロトタイプの阿蘇山中岳噴煙観測の 11 月 27 日の観測の様子（阿蘇山中岳の噴煙観測、2021 年 11 月 27 日）。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測

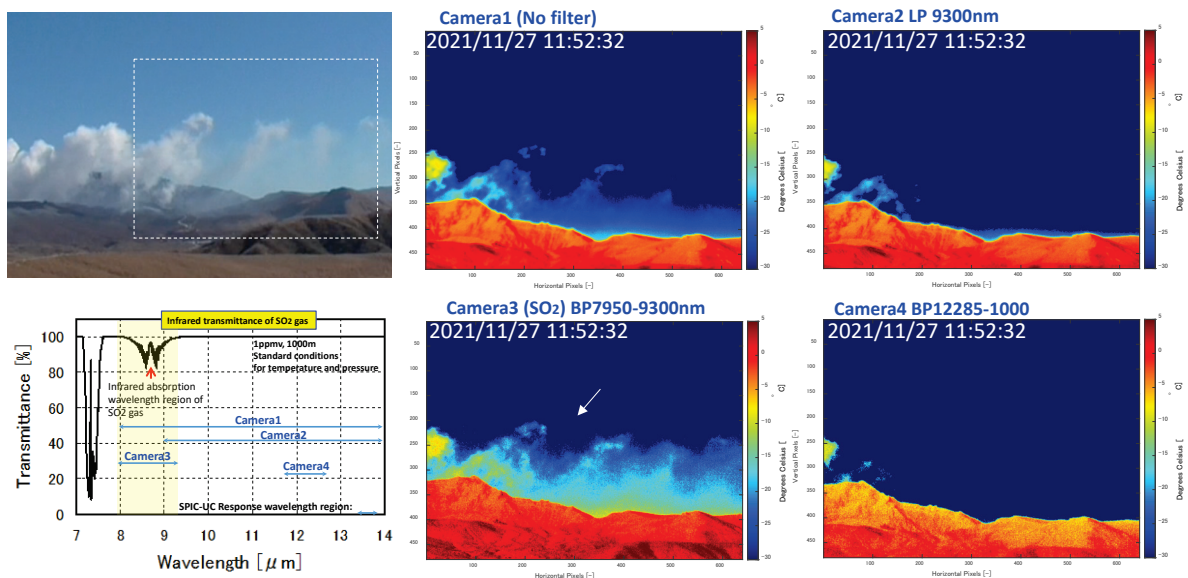


図 2-22 SPIC-UC/4VGA プロトタイプで取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像（黒体補正済み、2021 年 11 月 27 日）。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測。阿蘇：2021/7/27、立山：2021/9/25 の 2 回の観測では、明確な SO_2 検出データの取得は未達であったが、2021/11/27 の阿蘇観測で SO_2 の可視化を実証できた。参考： SO_2 放出量～2021/7/27:約 300～400t/day、2021/11/27:約 2000～3000t/day（JMA 観測）

以上により、本試験観測で、開発中の SPIC プロトタイプの SO_2 可視化機能を火山試験観測により、初めて実証できたと考えられ、本開発の重要な装置運用試験データが取得できた。

iv) 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ（定点観測タイプ（温度・ガス計測））による火山試験観測（阿蘇山中岳）

開発中の屋外定点観測用の非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ（定点観測タイプ（温度・ガス計測））による火山試験観測（阿蘇山中岳噴煙観測）も令和 3 年 11 月 27 日に実施できた。その結果、阿蘇山中岳噴煙中の SO_2 を SO_2 検出用カメラによる明確な発光画像として検出できた。

非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの阿蘇山中岳噴煙観測の 11 月 27 日の観測の様子を図 2-21 に、取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像を図 2-23 に示す。なお、11 月 27 日時点では今年度開発中の非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの同期計測用の Viewer ソフトが未完であったため、個別ソフトにて計測を実施後、同期画像を抽出した。

以上の結果で得られたデータは、今後の非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの運用での SO_2 可視化機能を実証したデータと考えられる。

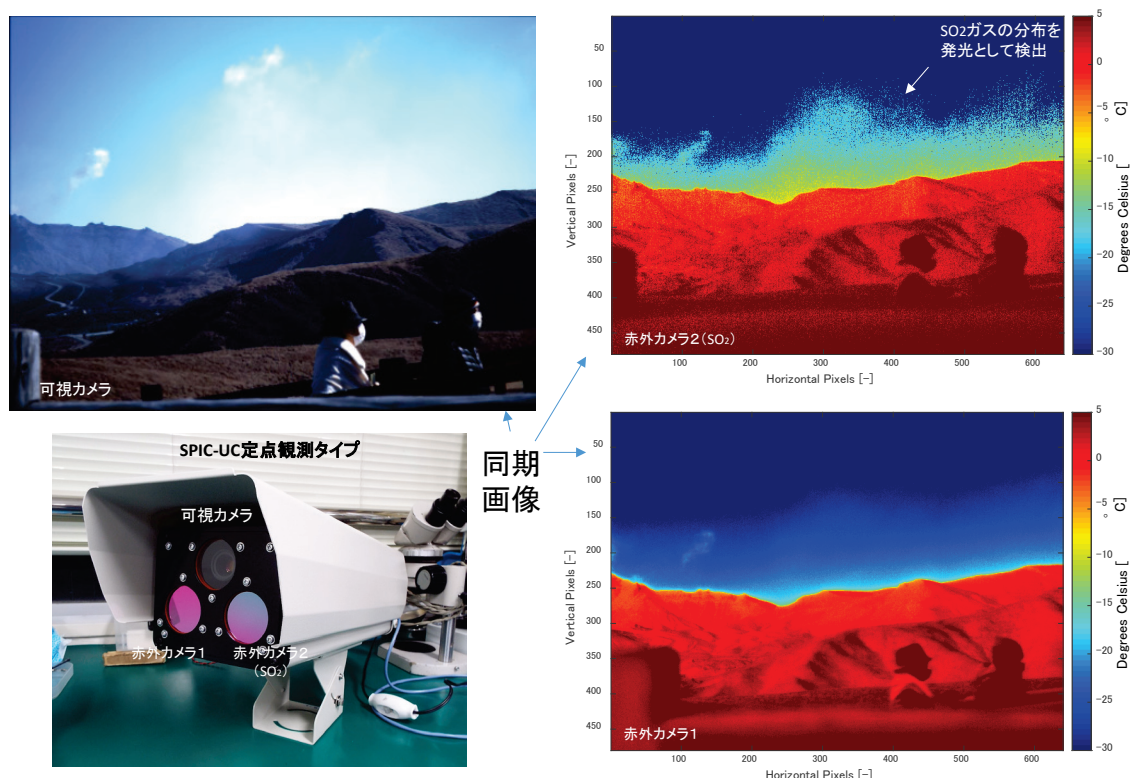


図 2-23 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプで取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像 (黒体補正済み、2021 年 11 月 27 日)。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測。2021/11/27 の阿蘇観測で SO_2 の可視化を実証できた。参考： SO_2 放出量～2021/7/27: 約 300～400t/day、2021/11/27: 約 2000～3000t/day (JMA 観測)

f) 画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造

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⁾ (対象の分光放射率等) を得ることができる。しかし既製の装置はなく、先行する幾つかの研究事例^{9), 10)}での独自開発が行われている状況である。より多くの多波長の分光画像からは、詳細な対象の反射、放射特性 (分光放射率、分光スペクトル)⁸⁾ が導かれることから、本課題では、SPIC の ISH として干渉分光方式の ISH の導入を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 のプロトタイプの製作、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渉計の製作、およびその外部入力光学系として機能する小型干渉計用発光入力光学系を製作した¹⁾。令和 3 年度は、令和 2 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渉計の外部入力光学系を用いた対象の分光放射率の試験計測と外部入力光学系の機能追加を行った。

i) 分光放射率の試験計測

令和2年度に開発したステップスキャン型赤外域の小型干渉計の外部入力光学系を用い、対象の分光放射率を計測するための、計測手法の検討を実施した。

開発中の小型干渉計はマイケルソン型である。同型の干渉計を用い、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）を得るための計測値のモデルとして、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 $V_{means}(\lambda, T)$ は計測される干渉計の電圧出力、 $\varepsilon_{smp}(\lambda)$ 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、 $\varepsilon_{inst}(\lambda)$ は干渉計（装置）の放射率、 $B_{inst}(\lambda, T)$ は干渉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、昨年度までに、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渉計の外部入力光学系として小型干渉計用発光入力光学系を製作した¹⁾。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。また干渉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、干渉計のスキャン動作（スローおよびステップ）による計測機能を開発し、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なっている。

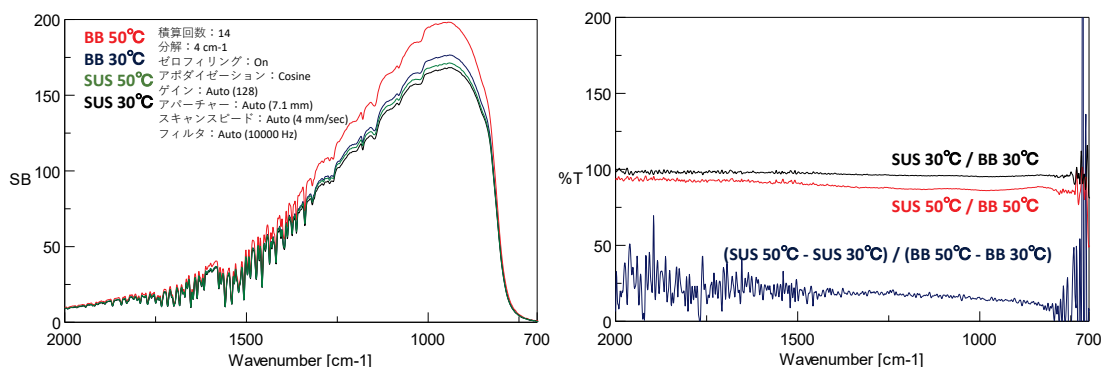


図 2-24 サンプル（SUS）および黒体（BB）の2温度（30℃、50℃）の状態から放射率を計測する2温度法の試験計測結果。左図はシングルビーム、右図はそれらの演算結果

令和3年度は、まず、昨年度までに開発した装置による対象の分光放射率の試験計測として、サンプルおよび黒体の2温度の状態から放射率を計測する2温度法とチョッパとスキャン動作を組み合わせ放射率を計測する変調法を検証した。

2温度法の検証結果を図2-24に示す。図2-24左図より、低放射率のSUSのシングルビーム計測値には、環境放射の影響が重畳していることがわかる。そのため、SUSの放射率は、同温の単一のSUSとBBのから演算しても求まらないが、2温度の複数のSUSとBBを用いる2温度法（ $(\text{SUS } 50^{\circ}\text{C} - \text{SUS } 30^{\circ}\text{C}) / (\text{BB } 50^{\circ}\text{C} - \text{BB } 30^{\circ}\text{C})$ ）により求まる従来知見を検証できた（図2-24右図）。

次に、変調法の検証結果を図2-25に示す。この手法ではサンプルと黒体の温度設定は1温度で済み、(1)式において計測時に混入するサンプル以外からのエネルギーをチョッパにより低減するものである。図2-24左図と図2-25左図の比較より、低放射率のSUSのシングルビーム計測値の環境放射の影響が減少している

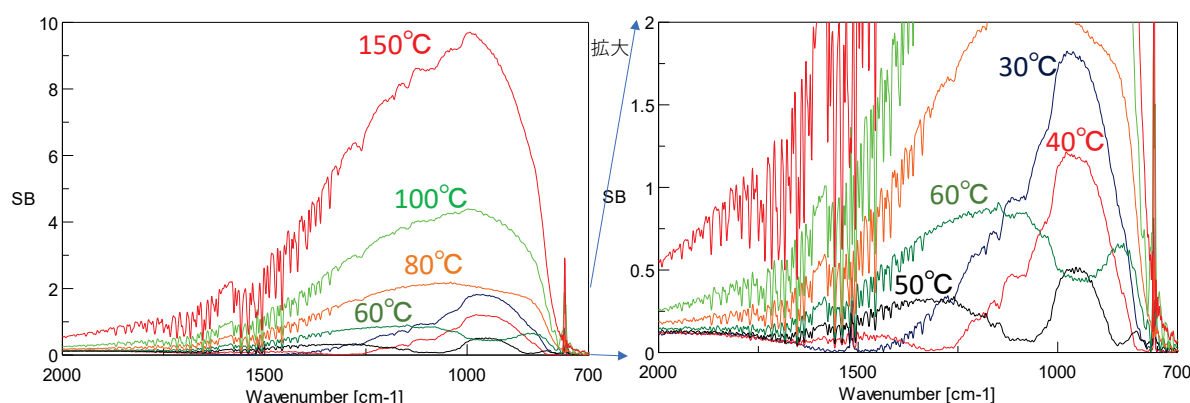


図2-25 チョッパとスキャン動作を組み合わせ放射率を計測する変調法の試験計測結果。左図はシングルビーム（縦軸スケール10）、右図はシングルビーム（縦軸スケール2）

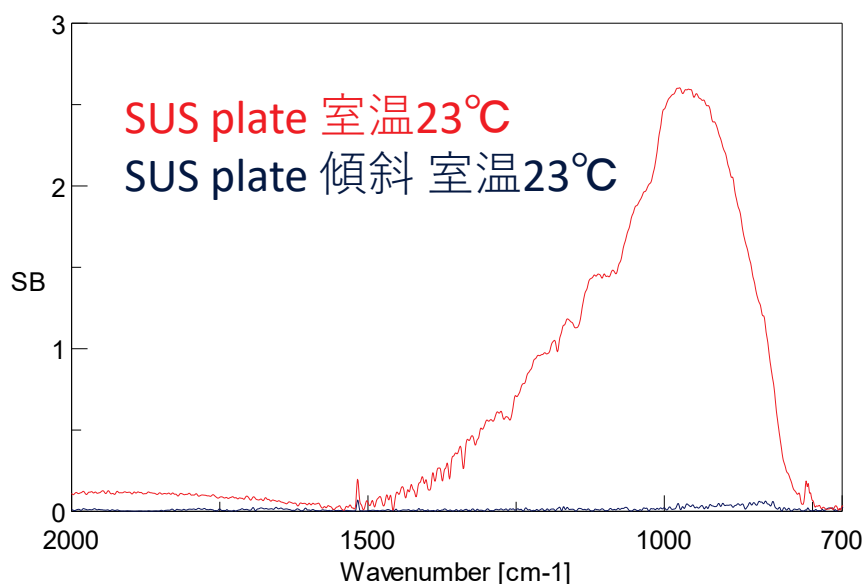


図2-26 光軸に面が正対したサンプル（SUS plate）と光軸に対し約5度傾斜させたサンプル（SUS plate）のシングルビーム

ことがわかる。しかし、図 2-25 右図より、60℃以下の計測値は、通常のプランク関数の温度依存性と異なる値となっている。検討の結果、この原因は、高反射率のサンプルの SUS の表面が計測系の光軸に正対している影響と考えられた。この判断を検証した結果を図 2-26 に示す。

図 2-26 より、高反射率のサンプルの SUS の表面が計測系の光軸に正対しているときに計測された値は、SUS の表面を計測系の光軸に対し約 5 度傾斜させることで、低減できていることがわかる。

ii) 外部入力光学系の機能追加

以上の検証結果を受け、本年度は、外部入力光学系の改修として、計測時の光軸をサンプル面に対し 8 度傾ける光軸傾斜機能、縦置き型サンプル計測機能、積分球インターフェース機能の追加ための開発・製作を実施した。機能追加を行った本装置の 3D 図面を図 2-27 に、装置の写真を図 2-28 に示す。

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。

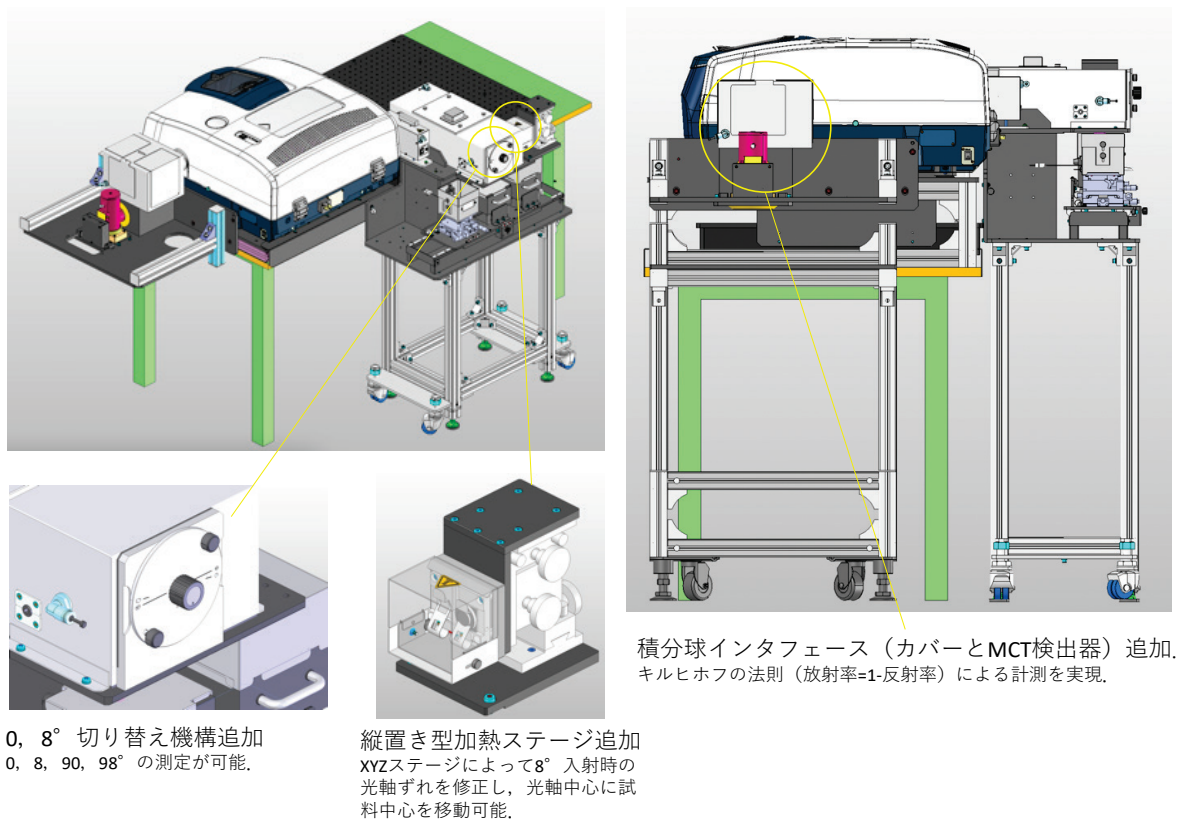


図 2-27 機能追加を行った小型干渉計用発光入力光学系 3D 図

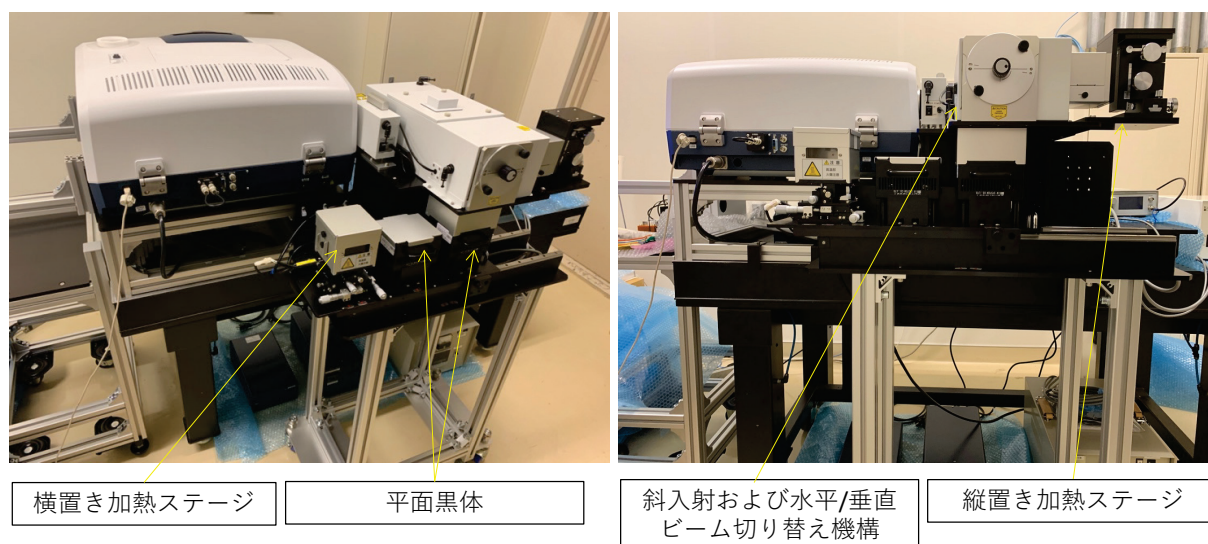


図 2-28 機能追加を行った小型干渉計用発光入力光学系の装置外観写真

g) 斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法の開発

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、防災科研の空撮用可搬型赤外カメラシステム (STIC-P)^{17), 18)}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、ヘリコプターからの赤外カメラの斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法を開発した。

防災科研では、火山観測用途の航空機搭載型リモートセンシング装置の開発研究と活用を 1988 年より実施している。現在までに、1990 年に火山専用空中赤外映像装置：VAM-90A、2006 年に航空機搭載型ハイパースペクトルセンサ：ARTS、2015 年に ARTS-SE を開発した。ARTS-SE の開発では、航空機搭載型のカメラ型センサ：Structure and Thermal Information Capture (STIC) を開発した。以上のセンサはすべて固定翼機に搭載され、観測方向は観測機の直下視方向である。

令和 2 年度までの開発では、各 SPIC プロトタイプデータをエミュレートしたカメラ型センサのデータとして、直下視観測データである ARTS-SE の STIC を用い、STIC で取得した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い、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), 14), 15), 16)}。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。

令和 3 年度は、従来の直下視観測画像とことなる、斜め観測画像データに関する検討を行った^{17)、18)}。この検討では、防災科研が、2020 年 3 月に開発した、空撮で使用可能な手持ち型赤外カメラシステム：STIC-Portable (STIC-P) のデータを活用した。STIC-P は 3 つのカメラで構成される。その 1 つは赤外カメラ、他の 2 つは可視カメラである。すべてのカメラは、静止画像またはビデオ (30Hz) 画像を測定できる。STIC-P は手持ち可能な可搬型で、地上およびヘリコプター等による上空からの斜め観測での使用を考慮し構成した。STIC-P の観測ジオメトリの概念図を図 2-29 に主な諸元を表 2-17 に示す。

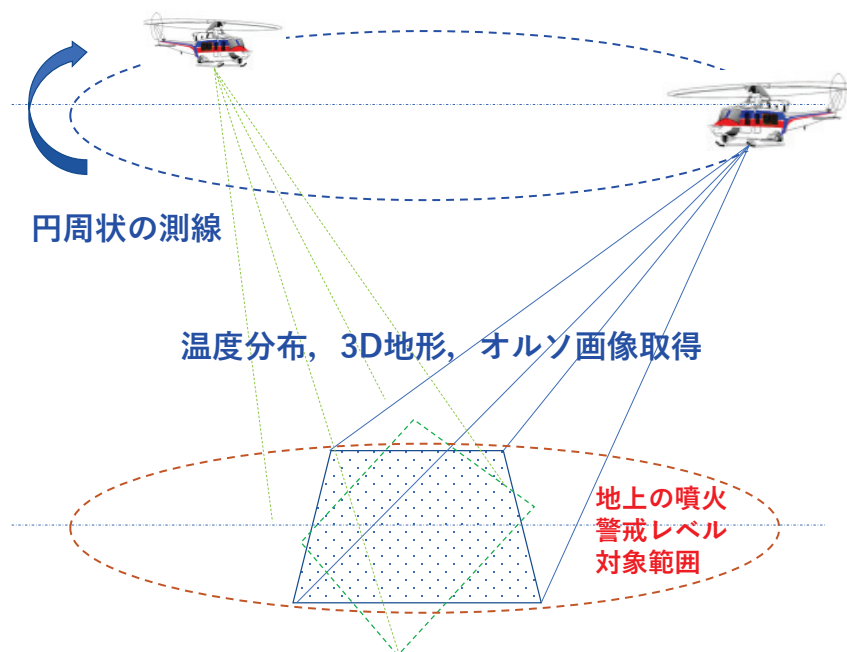


図 2-29 ヘリコプターからの STIC-P による火山観測のジオメトリ概念図

表 2-17 STIC-P の主な諸元

STIC-P Sensor Head Unit		STIC-P system	
Sensor Type	IR camera	VIS camera1	VIS camera2
Wavelength coverage	7.5-14 μ m	0.4-0.8 μ m	0.4-0.8 μ m
Spectral Channels #	1	RGB	RGB
Spacial Pixels #	640×480	6000×4000	3840×2160
Measurment Temperature Range	-40 - 2000 °C	-	-
Instantaneous Field of View (IFOV)	0.69 mrad	0.11 mrad	0.43 mrad
Total Field of View (FOV)	25°×19°	37°×25°	80°×58°
f	24.6mm	35mm	7.9mm
f/#	f/1.0	f/8	f/4.0
Frame Rate	30Hz	0.5Hz or 30Hz	30Hz
Quantization	14bit	14bit	14bit
Data Stragege	32GB SDHC	512GB SDXC	256GB SDXC
Geocoding		SfM/MVS	
Platform		Portable	

本年度は、この STIC-P のデータを各 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利用し、SPIC の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行った。利用したデータは、STIC-P による火山の試験観測（箱根山（大涌谷）：2021 年 4 月 26 日）にて、各種観測条件（飛行経路、高度、撮影角度等）を検討し、山岳地形、地熱地帯の互いにオーバーラップする複数の上空からの斜め観測画像データである。観測画像データに SfM/MVS 処理を適用した結果、山岳地形、地熱地帯の DSM の推定が可能であることが確認できた^{17)、18)}。結果の一例として、SfM/MVS 処理で作成した、可視および赤外の 3 次元画像 (DSM) を図 2-30、図 2-31 に示す。また推定された DSM に GCP を付与することで、DSM からの等高線図やオルソ補正画像（オルソモザイク画像）の作成を、位置誤差約 10m 以内で行えた。結果の一例として、試験観測で得た、箱根山（大涌谷）の輝度温度分布のオルソ補正画像を図 2-32(a)に示す。また、比較のため 2015 年の ARTS-SE の STIC の観測結果（直下視観測）を図 2-32(b)に示す。

図 2-32(a)、図 2-32(b)より、STIC-P の斜め観測情報と ARTS-SE の直下視観測情報とは、面的に詳細比較が可能であることが分る。以上より、STIC-P は噴火警戒レベルの対象範囲の斜め上空の空域から、従来の航空機による火山直下視観測と同様の、高空間分解能の面的情報を取得する観測手法となる可能性があることが分り、同様の画像データ取得が予測される SPIC でも、この様なデータ活用が可能なが示唆された。

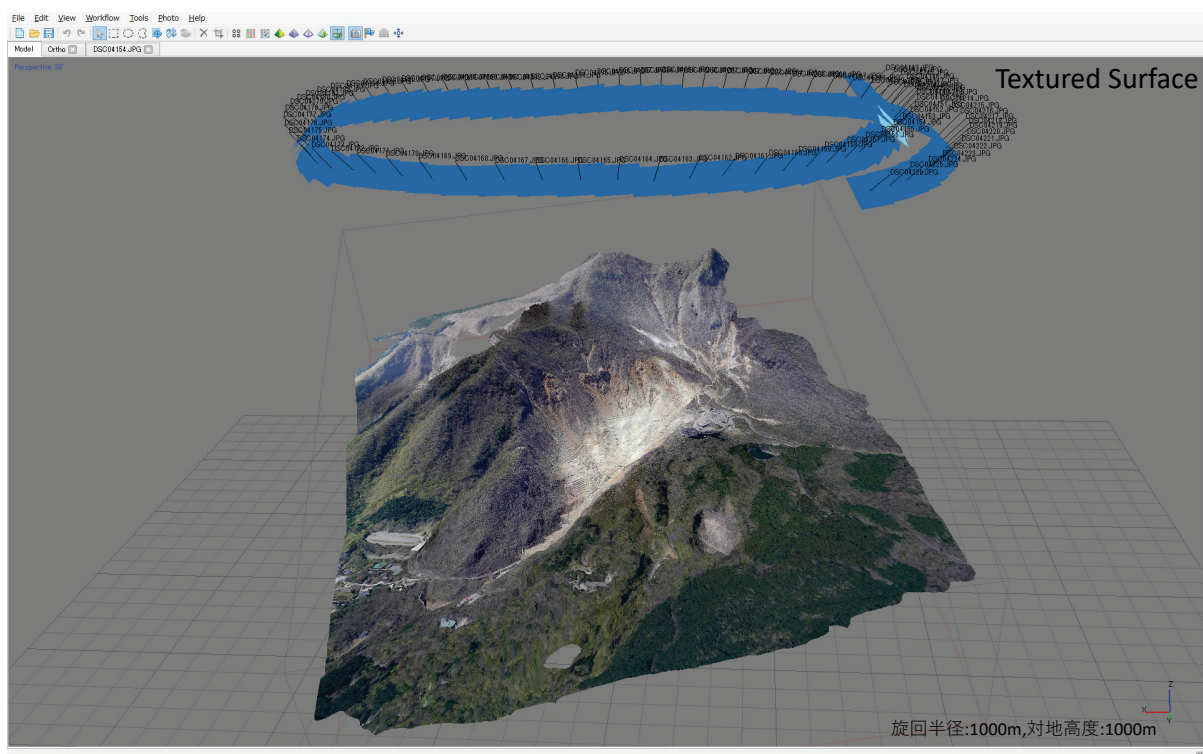


図 2-30 STIC-P による箱根大涌谷試験観測結果：可視画像（VIS Camera1 の 0.5Hz 計測画像の MVS 処理結果への可視 Textured Surface 作成）

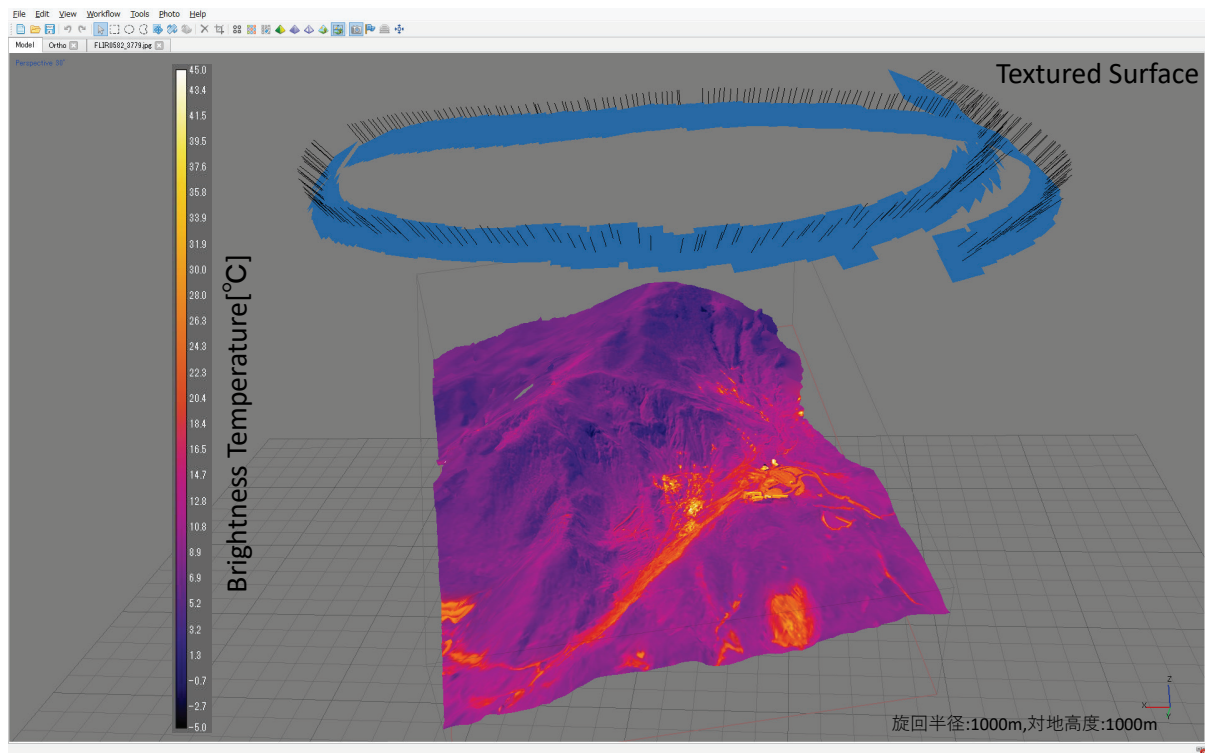


図 2-31 STIC-P による箱根大涌谷試験観測：赤外画像（IR Camera の 2Hz 計測画像の MVS 処理結果への輝度温度 Textured Surface 作成）

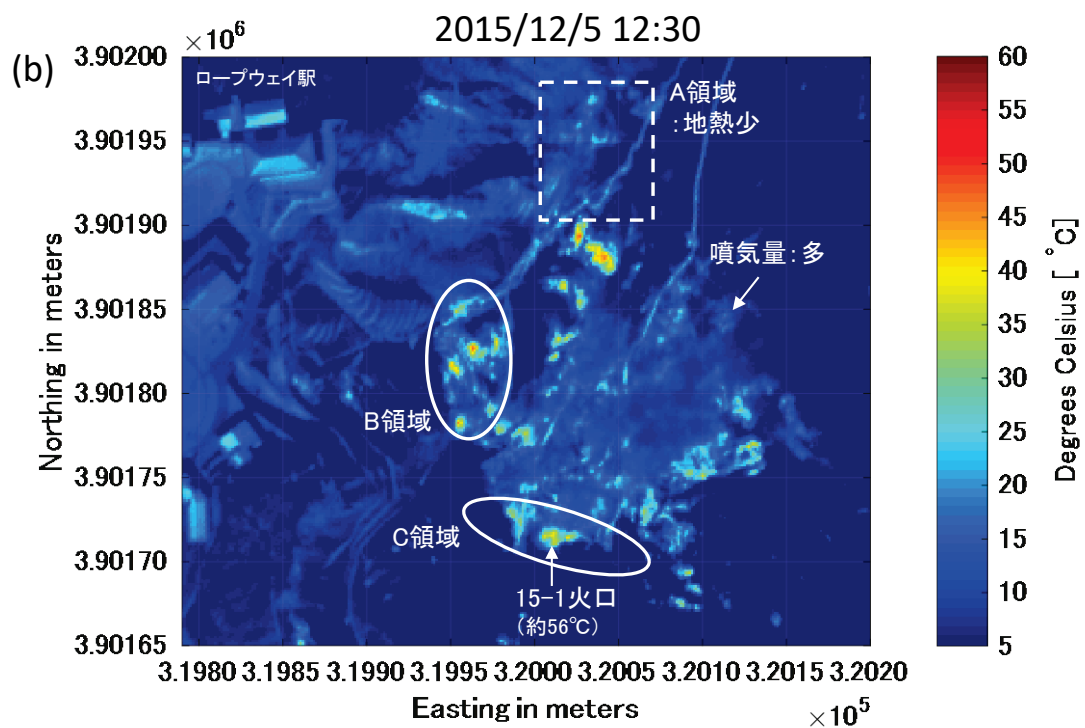
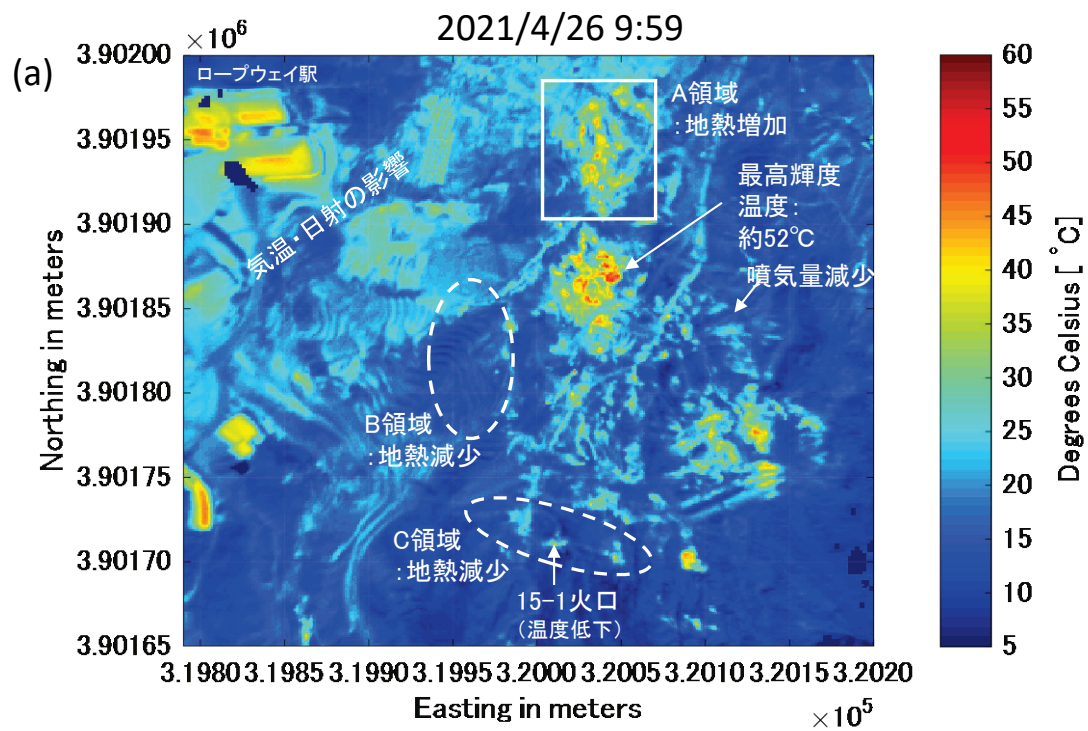


図 2-32 (a)STIC-P (斜め観測) で得た箱根山 (大涌谷) の輝度温度分布のオルソ補正画像、(b) 2015 年の ARTS-SE の STIC (直下視観測) の観測結果で得た同一範囲のオルソ補正画像。(a)、(b) は詳細な比較が可能である

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

令和 2 年度までの技術開発^{2), 19)}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²⁰⁾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の構築のために、多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトルを取得する手段として、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、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) 全体をスキャンできる装置開発として、大型試料スキャンステージの開発 (設計、製作) を実施した¹⁾。参考として令和元年度までに確立した、可視画像分光装置によるコア試料の計測の様子を図 2-33 に示す。

令和 3 年度は、昨年度開発した岩石コアスキャン装置 (大型試料スキャンステージ) に大型スキャンニングステージ用の光源装置の開発・製作・追加を行い、同装置を用いたスペクトルの計測手法の検討と計測を行った。

a) 大型試料スキャンステージ用光源装置の開発

令和 2 年度に開発した本装置の搭載可能最大サンプルサイズは $L \times W = 760 \times 500 \text{ mm}$ 、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。令和 2 年度は、可視画像分光装置の光源を利用し、大型スキャンステージの視野の特性試験を行った。その結果、観測視野の幅は約 200 mm、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、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、直径 63 mm コアが 1 列) の画像スキャンが可能であることを確認した。一方、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 1030 mm、直径 63 mm のコアが 5 列で保管された形態、5 列全体の幅は 380 mm) を箱のままステージに搭載しスキャンできる機能を有

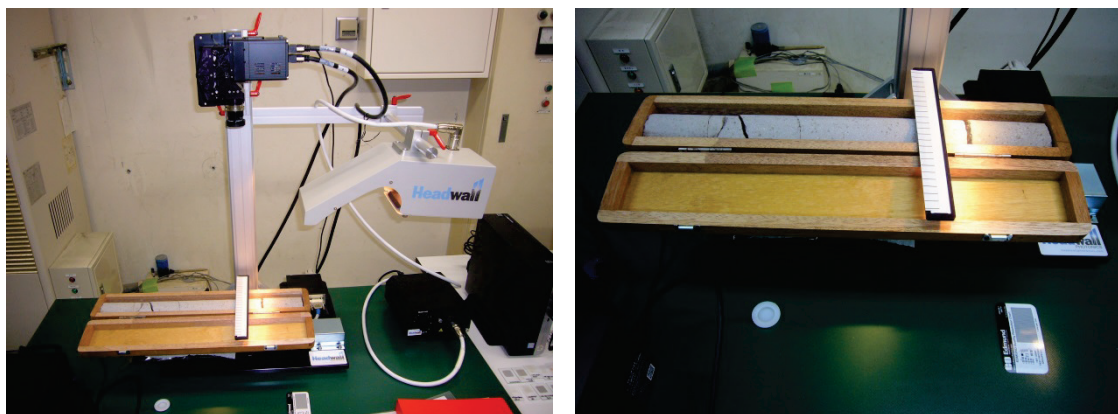


図 2-33 可視画像分光装置によるコア試料の計測。計測全景 (左)、スキャンステージに搭載した計測中のコア試料 (右) (スキャン範囲は約 20 cm でコアの一部のみ)

するように開発したが、令和 2 年度までの可視画像分光装置による観測幅 200mm では国土交通省仕様のコア箱の全幅 380mm 全体を一度にカバーできない。

令和 3 年度は、令和 2 年度開発の大型スキャンニングステージの横方向の観測幅を国土交通省仕様のコア箱の全幅 380mm 全体を一度にカバーできる 420mm に拡張（昨年度までは 200mm）するため、大型スキャンニングステージ用の光源装置の開発・製作・導入を完了した。開発した大型スキャンニングステージ用の光源装置とこれまでの光源等の比較、および同光源を搭載した岩石コアスキャン装置（大型試料スキャンステージ）の外観の写真を図 2-34 に示す。また、今後、複数回、多地点の国土交通省仕様のコア箱を装置に搭載し計測することを想定し、国土交通省仕様のコア箱をそのまま格納し、大型スキャンニングステージに搭載するコア箱用外箱（内寸：420×1100×90mm）を製作した。このコア箱用外箱に国土交通省仕様のコア箱を搭載し大型スキャンニングステージに搭載した外観の写真を、図 2-35 に示す。

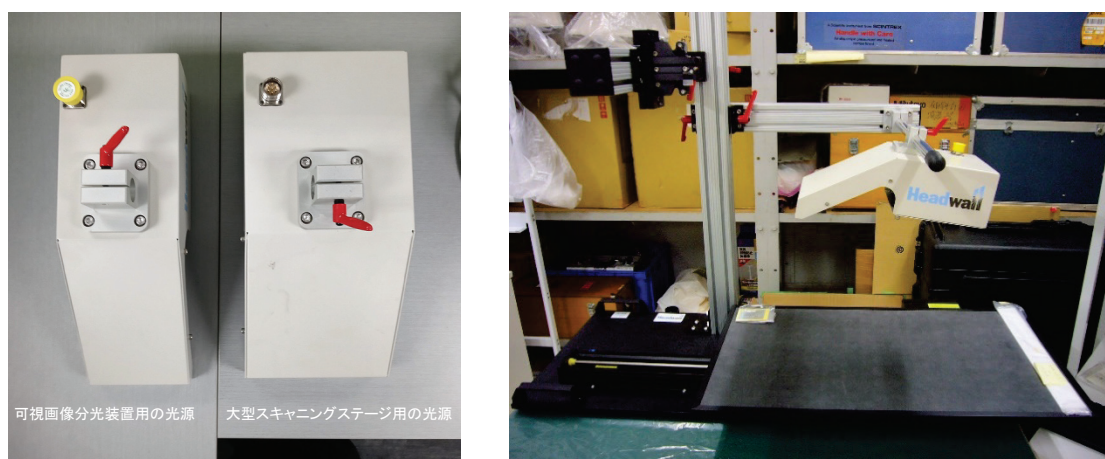


図 2-34 開発した大型スキャンニングステージ用の光源装置とこれまでの光源等の比較、および同光源を搭載した岩石コアスキャン装置（大型試料スキャンステージ）の外観

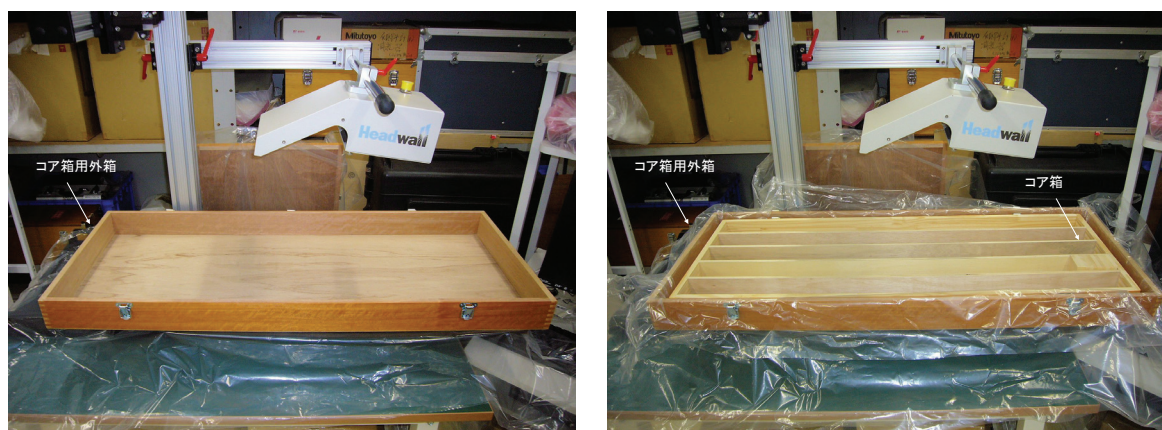


図 2-35 コア箱用外箱（内寸：420×1100×90mm）およびコア箱用外箱に国土交通省仕様のコア箱を搭載し大型スキャンニングステージに搭載した外観写真

本装置の全視野の特性を検証として、これまでの可視画像分光装置光源と大型スキャニングステージ用光源装置を同時搭載した場合の試験計測を行った。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 2-36、図 2-37 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、可視画像分光装置光源と大型スキャニングステージ用光源装置を同時搭した場合の方が輝度増していること、両者とも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、これまでの可視画像分光装置光源と大型スキャニングステージ用光源装置を同時搭載した方が、ノイズが少ないことが分る。

以上の結果より、今後、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、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。今後、スペクトルデータベースの計測を順次実施する予定である。

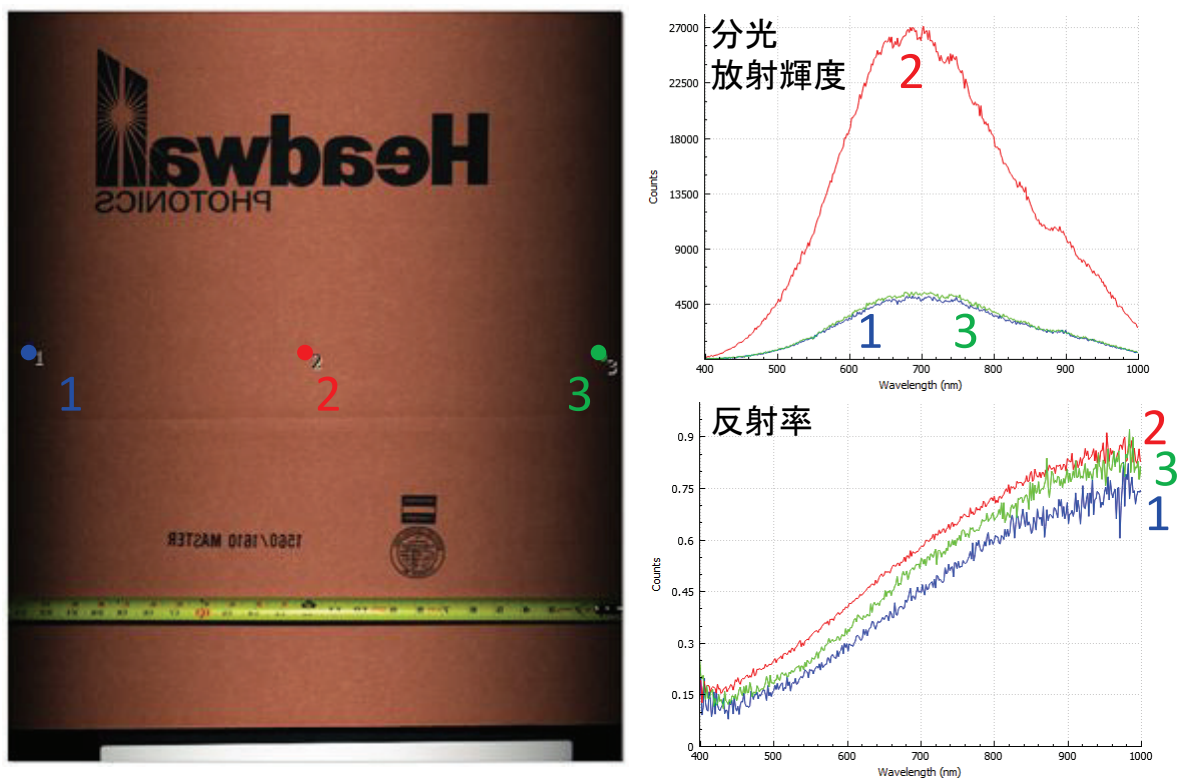


図 2-36 照明光の直下および両サイドの点の分光放射輝度と、反射標準（白）との比較で得られた分光反射率の試験計測結果（可視画像分光装置光源のみ）

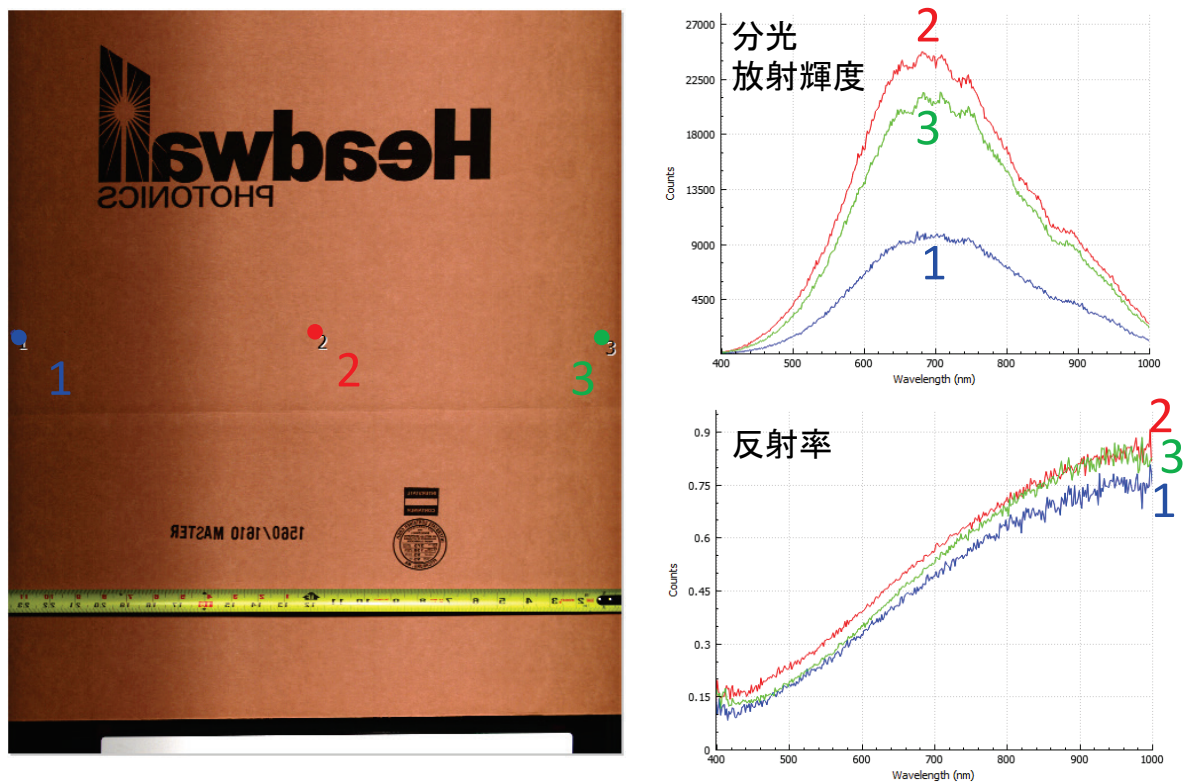


図 2-37 照明光の直下および両サイドの点の分光放射輝度と、反射標準（白）との比較で得られた分光反射率の試験計測結果（可視画像分光装置光源と大型スキャニングステージ用光源装置を同時搭載）

(c) 結論

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

a) SPIC 各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ソフトウェアの設計、製作仕様検討、ソフトウェアの製作を行った。本装置は、これまでのプロトタイプの開発結果を反映した、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) から構成され、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昨年度、ハードウェアを完成させており、本年度はそのソフトウェアの製作し、装置を完成できた。並行して、屋外仕様での各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、断熱処理を各プロトタイプの筐体に施し、火山試験観測 (令和 3 年 11 月 24~27 日実施) でその効果を検証した。また、昨年度に引き続き、装置の小型化の検討を行い、フィールド仕様の可搬性を重視した 2 バンド型の赤外カメラを製作し、装置を完成できた。冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発では、昨年度に完成した小型冷却型赤外カメラ (MWIR 領域) と令和元年度に開発した冷却型赤外カメラ (LWIR 領域) の同時搭載型仕様の装置の開発を実施し、設計、製作仕様検討、製作を実施し、装置を完成できた。これらの 2 台小型冷却型赤外カメラは、各カメラの製作時より、将来的に 2 台の冷却カメラを同時に運用する仕様で製作を進めた。SPIC-SS のフィールドタイプの開発では、昨年度までの装置の小型化の検討を反映し、可視カメラ (波長域の異なる 2 台のカラーカメラ) と非冷却型赤外カメラからなる装置を考案し、設計、製作仕様検討、製作を実施し、装置を完成できた。画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造では、画像分光用前置光学系ブレ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設計、製作仕様検討、装置製作を実施した。同装置により赤外領域 ($3\sim 14\mu\text{m}$) の分光放射率、分光放射輝度値の計測 (反射および放射) が実現される予定で SPIC の分光性能の向上に寄与することが期待される。今後は、以上の開発した装置による試験観測の実施とデータ解析が課題である。

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として、ヘリコプターからの可搬型赤外線カメラ (防災科研が令和 2 年度に開発した STIC-P) により、令和 3 年 4 月 26 日 (箱根大涌谷) で実施した観測データを活用し、同装置のデータの SfM/MVS 解析手法を開発し、SPIC のデータの活用目標のひとつである、ヘリコプターからの赤外カメラの斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法を実現でき、SPIC の開発コンセプトの実データからの検証が行えた。今後は、解析手法の改善、解析事例の蓄積等が課題である。

(b) SPIC プロトタイプによる火山試験観測 (令和 3 年度)

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ために、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、阿蘇山で年度当初から計画した。令和 3 年 4~9 月は、

新型コロナウイルス感染症の状況が顕著な改善がなかったため、当初計画の観測を実施できなかった。このため、この期間中は、当初の計画より観測機材を少なくし、かつ観測期間を短くした火山試験観測を実施することとし、SPIC-UC プロトタイプのみによる観測として、令和3年7月27日に阿蘇山中岳の噴煙観測と令和3年9月25日に立山（地獄谷）の観測を行った。令和3年7月27日に阿蘇山中岳の噴煙観測は、観測距離約3kmからの観測を実施し、噴煙中のSO₂ガスの可視化を試みたが、画像による明確な検出はできなかった。この時期の噴煙に含まれるSO₂ガスは日量300～400t（気象庁調べ）であり、装置の検出限界の可能性も考えられる。令和3年9月25日に立山（地獄谷）観測は近接（約100m）観測を実施し、噴煙中のSO₂ガスの可視化を試みたところ地熱域のSO₂ガスによる減衰と考えられるデータが得られたが、SO₂ガス濃度の比較データがないため、定性的な解釈までとなっている。これらの観測では、環境温度の影響と推察される装置バイアスの低減が、観測精度向上には重要であると考察できる基礎的な装置運用試験データが取得でき、以降の観測でその改善策を検討し実施した。令和3年10月～12月は、新型コロナウイルス感染症の状況の改善が認められたため、各SPICプロトタイプ（SPIC-UC/4VGA および開発中の屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラ）による火山試験観測（阿蘇山中岳噴煙観測）を令和3年11月24日から11月27日に実施できた。その結果、観測条件が、晴天を背景とした噴煙であった11月27日に、阿蘇山中岳噴煙中のSO₂をSO₂検出用カメラによる明確な発光画像として検出できた。阿蘇中岳は、令和3年10月20日の噴火以降、気象庁の観測（紫外線による噴煙断面観測であるDOAS観測）によれば、SO₂ガスの発生量が同年7月の10倍程度になっており、我々が観測した噴煙のSO₂も同程度（2000～3000t/day、気象庁調べ）であったと推定される。

以上により、本試験観測で、開発中のSPICプロトタイプのSO₂可視化機能を火山試験観測により、初めて実証できたと考えられ、本開発の重要な装置運用試験データが取得できたと結論できる。今後は、解析事例の蓄積、ガス濃度分布の定量化手法の開発等が課題である。

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

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）品をそのままスキャンできる大型試料ステージを開発した。同装置の大型スキャンングステージ部分は令和2年度に開発した。令和3年度は、令和2年度開発の大型スキャンングステージの横方向の観測幅を420mmに拡張（昨年度までは200mm）した。本装置構成により、長さ方向のスキャンのみで、上述の国土交通省仕様のコア箱内のコア試料の画像分光データを取得できる装置を完成できた。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、データベースのデータ仕様の試作が今後の課題である。

(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令和 2 年度成果報告書，pp. 90 - 132, 2021.
- 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 μ m): 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) 實渕哲也, 空撮用手持ち型赤外カメラシステム (STIC-P) の開発と火山試験観測, 日本火山学会講演予稿集 2021 年度 秋季大会, pp.129, 2021
- 18) 實渕哲也, 空撮用手持ち型赤外カメラシステム (STIC-P) の開発, 日本リモートセンシング学会 第 71 回 (令和 3 年度秋季) 学術講演会論文集, pp.153-154, 2021
- 19) 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.
- 20) 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) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

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 4 年度の業務計画案

令和 4 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 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (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車載型とする。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車載型とする。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車載型とする。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。

具体的には、SPIC-UC の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-UC プロトタイプの要素技術および SPIC-UC フィールドタイプをベースとした開発を行い、SPIC-UC の車載型（常温域、低温域型）、定点型）を製作する。SPIC-C の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-C プロトタイプ、フィールドタイプの試験観測結果を踏まえ、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、非冷却型 LWIR (8-14 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる SPIC-C 車載型を開発する。SPIC-SS の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-SS プロトタイプ、SPIC-SS フィールドタイプの試験観測結果等を参考とし、SPIC-SS の車載型を開発する。また SPIC に共通で使用する、車載型の黒体を開発する。ISH の開発では、これまでに開発した画像分光装置の試験計測結果を踏まえ、フィルター方式のカメラと一体式の ISH を車載型とする。また、小型干渉計用の黒体接続機構を開発する。また、各 SPIC のフィールドタイプの車載での試験運用による火山試験観測を実施する。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継続的に開発する。

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

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。

具体的には、平成 28、29、令和 2 年度、令和 3 年度に導入、開発した分光装置（大型試料ステージ+専用光源）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、スペクトルデータベースの試作を行う。