

### 3. 2 リモートセンシングを利用した火山観測技術の開発

#### 3. 2. 1 可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による精密地殻変動観測技術の開発

##### (1) 業務の内容

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

##### (b) 担当者

| 所属機関                         | 役職    | 氏名   | メールアドレス                 |
|------------------------------|-------|------|-------------------------|
| 国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター | 研究統括  | 小澤 拓 | taku@bosai.go.jp        |
| 国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター | 契約研究員 | 姫松裕志 | himematsu@bosai.go.jp   |
| 国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山防災研究部門   | 契約研究員 | 河野裕希 | yuhki-k@bosai.go.jp     |
| 国立大学法人東京大学地震研究所 地球計測系研究部門    | 准教授   | 青木陽介 | yaoki@eri.u-tokyo.ac.jp |

##### (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り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、衛星 SAR と併用して効率的に地殻変動を計測するための研究開発を実施する。具体的な実施内容は、①可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発、②衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発である。

実施内容①の可搬型レーダー干渉計は、移動体に搭載したアンテナからレーダー波を送受信して SAR 画像を取得し、各画素における位相の時間変化から地表変動を面的に検出す

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

実施内容②においては、だいち 1 号、2 号 (PALSAR、PALSAR-2) や Sentinel-1 等の衛星 SAR データを解析して地殻変動履歴を調査する。衛星 SAR を用いた地殻変動計測は、1990 年代より活発に研究開発が行われ、現在では火山調査・研究における重要な観測ツールの 1 つとなっている。しかし、その解析には多くの時間を要するという問題や、その解析には専門的な知識が必要であり、誰もが簡単にその有用な地殻変動情報を用いることができないという問題がある。そこで、東京大学地震研究所を中心として活動している地表変動研究のための SAR 研究コミュニティ (PIXEL) と連携して、重点観測火山に指定されている 25 火山と箱根山について SAR 解析を実施し、その解析結果として得られる地殻変動情報を、本事業 (次世代火山研究推進事業) の課題 A (各種観測データの一元化) で構築する一元化共有システム (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

##### 1) 平成 28 年度：

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

##### 2) 平成 29 年度：

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。その開発には繰り返し実験観測を

実施する必要がある、そのための可搬型レーダー干渉計実験機を作製した。

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

### 3) 平成 30 年度：

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

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

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(令和元)年度：

- ・ 前年度の検討に基づき、地上設置型方式での利用に関するソフトウェア・ハードウェアを改良して実験観測を行い、地上設置型方式に関する設計仕様を決定する。

- ・ 車載型方式での観測に向けた、ハードウェアを改良する。
- ・ SAR 解析による地殻変動データベースのためのフォーマット、解析手法を決定する。
- ・ 2 火山についてだいち 1 号、2 号等の SAR データを用いた地殻変動検出を行う。

5) 令和 2 年度：

- ・ 車載型方式で観測したデータを解析するソフトウェアを開発する。
- ・ 車載型方式での実験観測を行い、ハードウェアの改良を進める。
- ・ 車載型方式に関する可搬型レーダー干渉計の設計仕様を決定する。
- ・ 解析結果転送システムを開発する。
- ・ 2-4 年次に解析した 6 火山の解析結果を再検討し、一元化データ共有システムに提供する。

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成する。
- ・ 4 火山についてだいち 1 号、2 号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

7) 令和 4 年度：

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

8) 令和 5 年度：

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

9) 令和 6 年度：

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

10) 令和 7 年度：



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

(e) 平成 31（令和元）年度業務目的

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

本業務においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式と車載方式）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を開発する。令和元年度においては、観測における信号対雑音比を向上させる検討として、受信アンテナの改良を試みる。そして、地上設置方式による観測のためのハードウェアの仕様を決定する。また、車載方式による観測についての検討を進める。特に、直線でない軌道での観測・解析方法に注目する。さらに、長期間の繰り返し間隔で得られたデータペアに関する干渉性や位相の安定性を調査するため、数か月以上の間隔をおいた繰り返し観測の実験を行う。

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 SAR データの解析を行う。本年度においては、その標準的解析手法における時系列化手法を決定し、自動解析システムのプロトタイプを構築する。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、2 火山（草津白根山と三宅島）について、だいち 1 号の PALSAR およびだいち 2 号の PALSAR-2 データの解析を実施し、地殻変動データを作成する。

## (2) 平成 31（令和元）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、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比較的容易に再設置が可能であること、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 のレーダー波を採用することによって解決することとした。②の再設置の簡便性については、レーダーセンサーを車両や台車に搭載して計測を行う機能（車載型）に加え、車両でアクセスできない場所での観測も可能とするため、手動でレーダーアンテナを移動させて合成開口レーダー観測を実施する Manborne SAR 方式についても開発項目に追加した。③の設置位置のずれ補正の機能については、GNSS から得られる位置情報を用いて位置ずれを補正する SAR 解析手法の開発を進めている。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。平成 30 年度においては、浅間山における野外計測実験を実施し、当初の目標である 4km 遠方の観測に成功している。

現時点における検討課題の一つは、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り、その改善を試みることである。令和元年度においては、その解決方法の一つとして、SAR 処理ソフトウェアの改良を試みた。具体的には、位相誤差が大きいピクセルのマスキング、FFT 処理における Blackman 窓の適用、レンジ方向の圧縮処理におけるオーバーサンプリング法の適用、反射波の到来方向ごとに位相補正量を考慮したアジマス圧縮処理の適用についてである。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。また、1 スキャンのデータの処理に 1 時間程度を要するという問題があったが、解析アルゴリズムの改良により、従来のソフトウェアと比べて 10 分の 1 以下の処理時間を実現した。これにより、緊急観測時の迅速性も向上したと考えられる。また、ノイズ軽減の方法の一つとして、信号対雑音比を向上させる受信アンテナの高感度化を試み、約 3dBi のアンテナ利得の向上が確認された。

次に、可搬型レーダー干渉計の再設置による観測データへの SAR 干渉法の適用性能や干渉性の持続性等について調査するため、防災科研の近傍である筑波山をテストサイトとして設定した。ただし、筑波山テストサイトは外来波の影響が大きいことが判明し、性能評価のためのテストサイトとしては条件が良くないことが分かった。そのような条件ではあったが、可搬型レーダー干渉計の開発における重要な課題である、再設置による観測データへの SAR 干渉法の適用性能について確認することができた。また、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。このように成功裏に結果が得られたことから、地上設置方式については、現時点のハードウェア仕様を基本とする。さらに、比較的火山活動が活発な火山において地表変動検出を試みるため、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した。令和 2 年度において再観測を実施し、その期間の地殻変動の検出を試みる予定である。

## 2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

本課題では、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。現時点で、SAR 干渉法の解析手法はおおよそ確立されているが、その中のいくつかの処理については、解析者が有する経験やノウハウに基づいて、個々のデータに適する処理方法やパラメータを選択して解析を行っている。そのため、解析者によって解析精度が異なる場合があり、そのような精度の異なる解析結果はデータベース化には不向きである。そのため、データベース化のための処理方法として、標準的に用いられている解析手法を検討する。さらに、その手法に基づく自動解析システムを構築し、解析結果をデータベース化する。平成 29 年度と平成 30 年度には、大気遅延誤差、電離圏遅延誤差の軽減手法について検討した。令和元年度においては、それらの検討結果を取り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。

また、標準的解析手法の検討、将来のデータベース化、および、それを利用した火山研究事例として、草津白根山、三宅島、浅間山、2019 年に大規模な噴火が発生したフィリピンのタール火山についての解析を行った。

## (b) 業務の実施方法

### 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

これまでに火山観測用可搬型レーダー干渉計実験機とその解析ソフトウェアを開発した。浅間山においてその実験機を用いた野外計測実験を実施し、10m のレールを用いた地上設置方式による観測については、成功裏に高い干渉性を持つ干渉画像を得ることができた。これにより、一般的な地上設置型合成開口レーダーと同様に、レールを一点に固定して観測する手法については、ほぼ実用的に利用可能なレベルにまで、開発が進んでいると考えられる。ただし、観測・解析に起因すると考えられるノイズが干渉性を劣化させている場合が見られ、その改善が検討すべき課題の一つであった。また、車にレーダーアンテナを搭載して観測を行う車載方式についての実験も行い、アンテナの軌道が異なる場合においても、GNSS による位置情報を考慮した SAR 処理を適用することにより、干渉を得ることができた。ただし、地上設置方式と比べて、明らかに干渉性が低く、さらには、観測位置のずれに起因すると考えられるような位相変化が見られ、それらの改善も課題の 1 つであった。さらに、前年度までに開発した SAR 処理ソフトウェアは、1 スキャンの観測データに関して、約 1 時間の処理時間を要するという問題があり、緊急時に迅速に処理を行うためには、その解析時間の短縮が課題となっている。これらの課題に加え、観測可能な範囲を拡大させるため、軽量かつ小型の機器で観測することが可能な Manborne SAR 方式を開発項目の一つに加えた。その他、今後、この火山観測用可搬型レーダー干渉計を実用的に活用するため、干渉性の時間的持続性についての把握、浅間山以外での状況での事例研究の蓄積を進める

必要がある。

以上で述べた課題の解決に向け、令和元年度においては、a) SAR 処理解析ソフトウェアの改良、b) 筑波山テストサイトの設定、c) 繰り返し観測および干渉性の時間的持続性の調査、d) 受信アンテナの高感度化に関する検討、e) Manborne SAR の開発、f) 霧島山における実験観測を実施した。

#### a) SAR 処理ソフトウェアの改良

火山観測用可搬型レーダー干渉計実験機で観測されたデータは、SAR 処理ソフトウェアを用いて圧縮処理を適用し、高空間分解能の Single Look Complex (SLC) 画像に変換される。平成 29 年度にベースとなる基本的な SAR 処理ソフトウェアを開発し、平成 30 年度に高精度化の改良を行ったが、さらなる改良の余地が残されていた。令和元年度においてはそれらの改良点のうち、処理時間短縮とノイズ低減について注目した。処理時間に関する問題は、前年度に開発した SAR 処理ソフトウェアでは、1 スキャンのデータの処理に 1 時間以上の時間を要することであり、緊急時に迅速に速報結果を公表するという目的には不適であった。1 時間以上の処理時間を要している要因は、圧縮処理において、計算コストが大きい二次元の時間領域処理を採用していることが原因と考えられる。ノイズに関する問題は、後方散乱強度が弱いピクセルにおいて、解析方法に起因すると考えられるノイズが顕著にみられることや、車載方式による非直線の軌道で観測されたデータの解析において干渉性が低いことである。これらの問題の解決には、解析ソフトウェアとハードウェアの両方の改良が必要と考えられるが、本章では解析ソフトウェアについての改良について述べる。ハードウェアの改良についても、一部、今年度を実施しており、それについては後に述べる。

本年度における SAR 処理ソフトウェアの改良は、以下の項目についてである。

- ① 位相誤差が大きいピクセルのマスク
- ② FFT 処理における Blackman 窓の適用
- ③ レンジ方向、アジマス方向の独立圧縮処理
- ④ レンジ方向の圧縮処理におけるオーバーサンプリング法の適用
- ⑤ 反射波の到来方向ごとに位相補正量を考慮したアジマス圧縮処理の適用

①に関する検討は、チャープの最初と最後に対応するレンジ位置において、システムの特性に起因する大きな位相誤差が見られたことから、その領域のマスク処理を適用する。②については、レンジ圧縮、アジマス圧縮における FFT 処理において、Blackman 窓を採用する。③については、従来のソフトウェアが二次元の時間領域処理を用いていることが、大きな処理時間を要する要因であったことから、レンジ方向、アジマス方向の圧縮処理を独立に行う、一般的なアルゴリズムを採用する。④については、レンジマイグレーション処理における位相情報をより正確に処理することを目的として、レンジ圧縮処理時にオーバーサンプリング法を用いる。⑤については、幾何学的な処理の厳密化による精度向上のために組み込む。

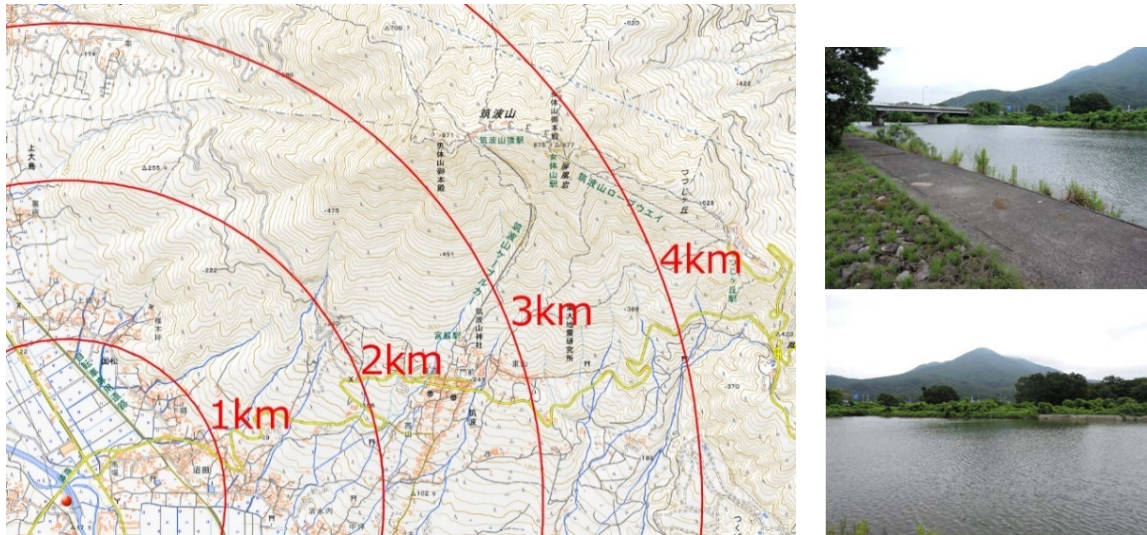


図 1. 筑波山テストサイトの地図（地理院地図）、および、レーダー設置場所とそこから見た筑波山の風景．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。

#### b) 筑波山テストサイトの設定

令和元年度においては、再設置による繰り返し観測、干渉性の時間的持続性の調査、高感度アンテナの性能評価、Manborne SAR 観測に関する計測実験を行う。これらの計測実験には、観測方法に関する試行錯誤などのため、頻繁に計測実験を行う必要があり、平成 30 年度に実施した浅間山の観測場所では実施するのは効率的ではない。そこで、防災科研から距離が近い筑波山をターゲットしたテストサイトを設定する。観測場所を図 1 に示す。センサー設置場所は桜川のコンクリートで固められている川辺である。そこから北西方向にレーダー波を照射すると筑波山の男体山と女体山の山頂を観測することが可能である。男体山までの距離は 3.3km で、女体山までの距離は 3.8km である。筑波山の山腹は濃い植生に覆われており、その影響による干渉性劣化が顕著に表れることが予測される。本テストサイトにおける計測実験を実施し、その観測環境等について調査する。

#### c) 繰り返し観測および干渉性の時間的持続性の調査

本課題で開発する火山観測用可搬型レーダー干渉計の重要な特徴の一つは、1 点に常時設置するのではなく、設置を繰り返して、観測間に生じた地殻変動を検出する手法を用いることである。このような観測を簡便に行うため、本課題で開発している SAR 処理ソフトウェアは、ヘッド部に搭載する GNSS 観測から得られる位置情報に基づいて補正を行い、任意の位置で観測した場合に得られる SAR 画像を作成する機能を有している。これにより、繰り返し観測時の設置位置を厳密に合わせこむ必要はなく、効率的に観測を実施できるはずである。また、繰り返し観測により、どの程度の時間間隔で、地殻変動計測に利用可能なほどの干渉性が得られるかを調査する必要がある。そこで、筑波山テストサイトにおいて、繰り返し計測実験を実施する。

d) 受信アンテナの高感度化に関する検討

これまでの可搬型レーダー干渉計による計測実験において、観測・解析に起因するノイズが干渉性を劣化させる場合があり、その低減のため、信号雑音比を向上させたい。信号雑音比を向上させる方法は、受信感度を向上させるか、雑音を低減させる必要がある。解析ソフトウェアの改良による雑音の低減については、前述したとおりである。ハードウェアの改良による雑音の低減については後年度の課題とし、今年度は受信信号強度の向上を目的とした、受信アンテナの高感度化を試みた。送信アンテナの変更には実験試験局免許の変更が必要なため、本課題では受信アンテナのみの高感度化を試みることにした。

従来のアンテナはアンテナ素子を水平方向に2つ並べた2パッチアンテナであり、今回作製した高感度アンテナはアンテナ素子を水平・上下に2×2の配列で素子を並べた4パッチアンテナとした。これにより、エレベーション方向のビーム幅が半分になると考えられるが、2パッチアンテナのエレベーション方向のビーム幅(3dBi ダウン幅)は62度であり、火山観測においてはその半分でも十分と考えられる。

作製した4パッチアンテナの性能を評価するため、室内および筑波山テストサイトにおいて計測実験を実施し、性能を評価する。

e) Manborne SAR の開発

後述するように、地上設置方式については再設置による繰り返し観測データの解析に成功し、現段階でほぼ完成と言えるレベルになった。車載方式についても、若干の改善の余地は残されているものの、現時点でも実利用可能なレベルにまで開発が進んでいる。当初の計画においては、火山観測用可搬型レーダー干渉計の観測は車両でのアクセス可能な場所に限定するという仕様を考えており、ワンボックスカー1台で運べる程度のサイズ、重量とするセンサーの開発を進めてきた。しかし、人力で運搬することができれば、例えば、山頂からの観測など、観測可能場所が格段に広がり、その有用性が格段に向上すると期待される。地上設置方式では、10mのレールを設置する必要があり、その大きさと重量を考慮すると、これを人力で運ぶのはかなり困難

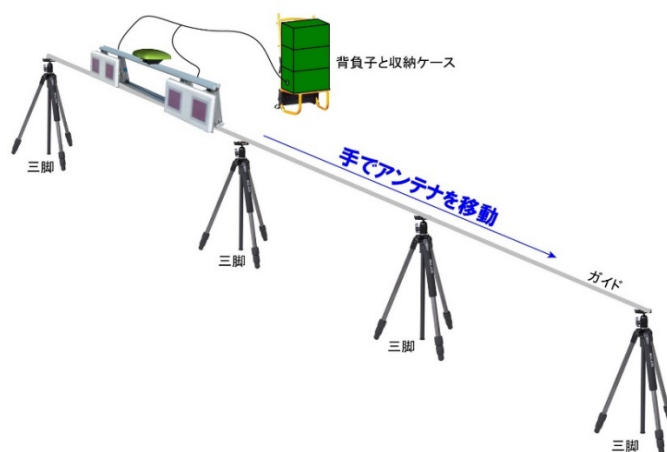


図 2. Manborne SAR 方式観測システムの概要図

である。また、車載方式については、車両を用いることができないことは当然のこと、台車を用いた車載方式を用いるとしても、整地されていない場所で台車による観測は困難である。そこで、手動でアンテナを動かして合成開口レーダー観測を行う Manborne SAR 方式の開発を試みることにした（概要図を図 2 に示す）。Manborne SAR 方式では、車載方式と同様に、アンテナの位置を GNSS で観測し、その情報を考慮して直線上で観測した場合の SAR 画像を作成する。しかし、精度の良い SAR 画像を得るためには、アンテナをある程度直線的に動かす必要があるため、アンテナは簡易的なガイドに沿って移動させる。送受信部やバッテリーはプラスチック製の箱に収納し、背負子で運べるようにする。軽量化・小サイズ化のため、送受信アンテナは 2 パッチアンテナを用いることとする。このように、アンテナを手動で動かす Manborne 方式では、ヘッド部を移動させるモーターを搭載する必要はなく、また、使用電力も大幅に削減できるのでバッテリーを小型化できるので、軽量化・小型化が可能になる。令和元年度においては、その実験的なシステムを開発する。

f) 霧島山における実験観測

地上設置方式、車載方式による観測は、実用的に利用可能なレベルにまで開発が進んでいる。これまで、浅間山における計測実験を行ったが、現時点における浅間山の火山活動は比較的静穏であり、可搬型レーダー干渉計で検出可能なほどの地殻変動は観測されていない。そこで、より火山活動が活発な火山において実験観測を行い、地殻変動の検出を試みたい。そこで、2018 年に噴火が発生し、顕著な地殻変動が観測された霧島山の新燃岳と硫黄山を対象として観測を実施する。さらに、後年度に再観測を行い、地殻変動の検出を試みる。

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

a) 自動解析システムプロトタイプの構築

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 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、自動的に解析するシステムを構築する。この自動解析システムにおいては、標準的に用いられている解析手法を用いることとし、本課題において、その手法の検討を進めてきた。これまでは、レーダー波の大気遅延および電離圏遅延に起因する誤差成分を軽減する手法について検討した。令和元年度においては、その検討結果を組み込んだ自動解析システムのプロトタイプを構築する。後年度には、このプロトタイプをベースとして、火山ごとに解析システムを構築する。

b) データベース公開方法に関する検討

本課題で解析するデータは、地殻変動研究グループの PIXEL で共有しているだいちの PALSAR データとだいち 2 号の PALSAR-2 データを基本とし、それ以外にも、火山活動が活発化した場合には、Sentinel-1 等の他のデータについても解析する。こ



これらの解析結果は、課題 A で構築している一元化共有システム JVDN でデータベース化し、公開する。その公開方法について検討し、テスト公開を開始する。

### c) SAR を用いた事例研究

解析手法や衛星 SAR による地殻変動のデータベースの活用方法等の検討のため、衛星 SAR を用いた火山活動に関する事例研究を進めている。令和元年度においては、草津白根山、三宅島、浅間山、および、2019 年に大規模な噴火が発生したフィリピンのタール火山に解析を行った。

### (c) 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) SAR 処理ソフトウェアの改良

SAR 処理の精度を向上させるため、SAR 処理ソフトウェアに位相誤差が大きいピクセルのマスク、FFT 処理における Blackman 窓の適用、レンジ方向の圧縮処理におけるオーバーサンプリング法の適用、反射波の到来方向ごとに位相補正量を考慮したアジマス圧縮処理の適用に関する改良を行った。また、処理時間短縮のため、レンジ方向、アジマス方向の圧縮処理を独立に行うアルゴリズムを採用した。まず、機能追加したオーバーサンプリング処理については、適切な倍率を決定する必要がある。そ

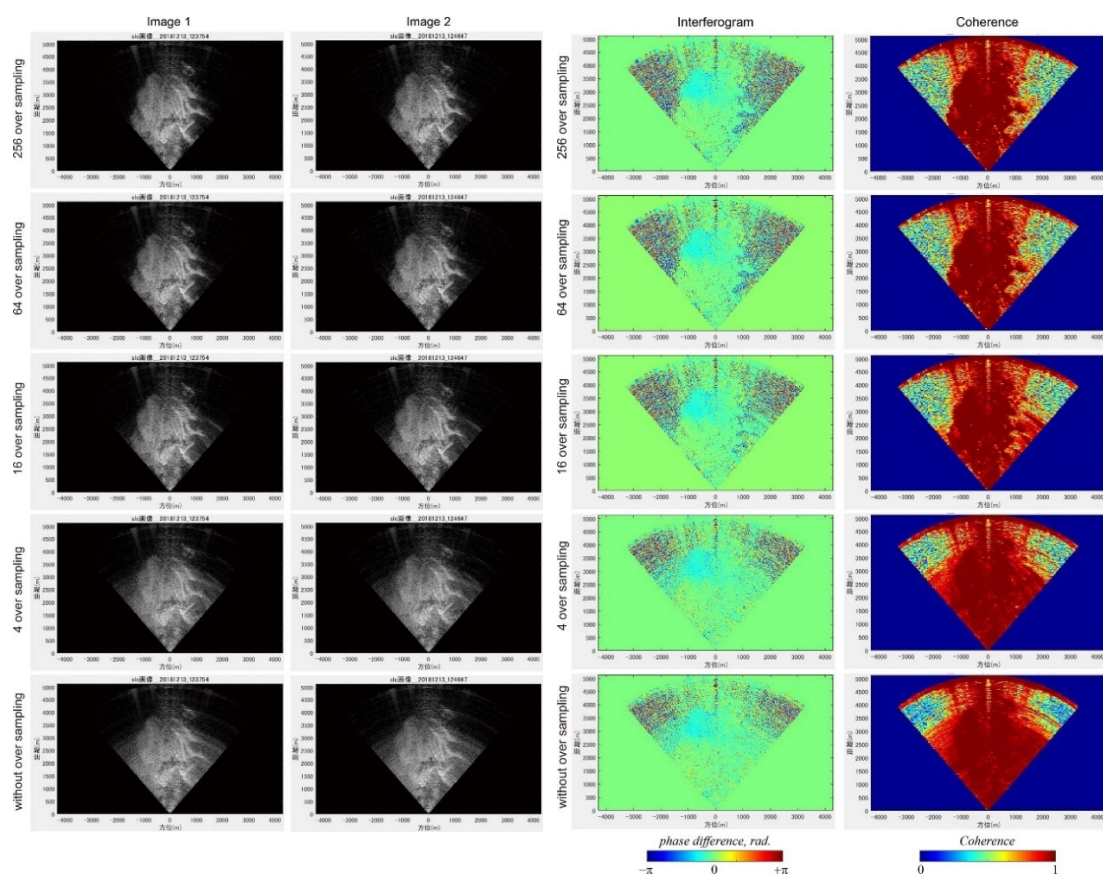


図 3. SAR 処理におけるオーバーサンプリングを変えて処理した結果の比較。



こで、平成 30 年 12 月 13 日に浅間山において地上設置方式で計測したデータについて、オーバーサンプリングなし、倍率 4、16、64、256 で処理して得られた散乱強度画像と干渉画像、コヒーレンス画像を比較した（図 3）。オーバーサンプリングなしで処理した結果においては、後方散乱強度が強いターゲットが存在するレンジ距離に円弧状に拡散するノイズが顕著にみられ、さらに、それが干渉するという問題が見られる。それがオーバーサンプリング倍率を大きくするにつれて改善が見られた。オーバーサンプリング倍率 64 までは明らかにそのノイズの改善が見られるが、64 と 256 ではあまり改善効果に差は見られなかった。以上のことから、オーバーサンプリング倍率は 64 が最適と考えられる。

次に、今年度に改良した SAR 処理ソフトウェアと従来の SAR 処理ソフトウェアで処理した結果を比較する。解析データは、平成 30 年 12 月 13 日に浅間山で実施した計測実験における、地上設置方式と車載方式による観測データである。その解析結果の例を図 4 に示す。従来の SAR 処理ソフトウェアの解析結果には、後方散乱強度が強いターゲットの存在するレンジ距離に円弧状に拡散するノイズが顕著にみられるが、改良した SAR 処理ソフトウェアにおいては、それが大幅に低減されている。特に、車載方式で観測したデータを解析した結果については、干渉性も格段に改善された。この傾向は、図 4 に示すペアのみではなく、解析したほとんどのデータペアにおいて見られ、この改良により精度が改善されたといえる。

次に、処理時間について、従来のソフトウェアと改良したソフトウェアを比較する。本比較においては、平成 30 年度 12 月 13 日に浅間山で計測した 9 つのデータを解析した。解析には Intel Xeon E5-2670 v2 (2.50GHz) の CPU と 64Gbyte のメモリを搭載

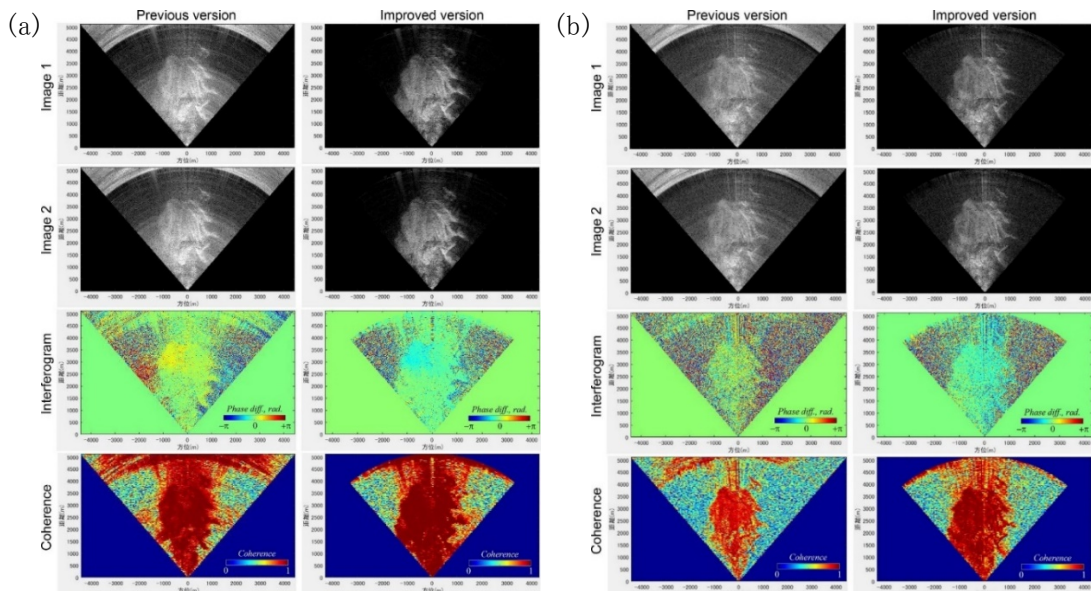


図 4. 今年度に改良した SAR 処理ソフトウェアと従来の SAR 処理ソフトウェアで処理した結果の比較. (a) 地上設置方式による観測データの解析結果. (b) 車載方式による観測データの解析結果. 上段から Master image と Slave image の散乱強度画像、干渉画像、コヒーレンス画像.

表 1. 改良した SAR 処理ソフトウェアと従来の SAR 処理ソフトウェアによる処理時間

| 解析データの観測時間<br>(yyyymmdd_hhmmss) | 従来ソフトウェア<br>処理時間[秒] | 本改良ソフトウェア<br>処理時間[秒] | 処理時間改善度<br>(今回/従来) |
|---------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 20181213_112516                 | 4651                | 190                  | 1/24.5             |
| 20181213_113109                 | 4686                | 182                  | 1/25.7             |
| 20181213_113235                 | 4636                | 183                  | 1/25.3             |
| 20181213_123754                 | 3071                | 186                  | 1/16.5             |
| 20181213_124647                 | 3089                | 183                  | 1/16.9             |
| 20181213_130631                 | 3085                | 185                  | 1/16.7             |
| 20181213_135105                 | 4079                | 282                  | 1/14.5             |
| 20181213_135600                 | 4120                | 375                  | 1/11.0             |
| 20181213_140149                 | 4088                | 317                  | 1/12.9             |

する計算機を使用した。従来のソフトウェアと改良したソフトウェアの処理時間を表 1 に示す。改良したソフトウェアによる処理時間は従来ソフトウェアと比べて 10 分の 1 よりも短く、格段に高速化されたといえる。

今年度を実施した SAR 処理ソフトウェアの改良により、強度画像、干渉画像、コヒーレンスの質に大きな改善が見られた。これにより、地上設置方式、車載方式については、ほぼ、実用的に利用できるほどのレベルにまで、開発が進んだと考えられる。

さらなる精度の向上のために検討すべき課題を以下に述べる。検討すべき課題の一つは、後方散乱強度が強いターゲットのアジマス方向の近傍に見られるノイズに関するものである。観測データの中に、飽和（サチレーション）している値が含まれる場合、レンジ圧縮処理において、その影響がその近傍に拡散するため、後方散乱強度が強いターゲットの近傍のピクセルに位相誤差の影響が及ぶことが考えられる。これについては、観測時にはできるだけ観測データが飽和しないように注意する必要がある。その回避方法については、今後の検討課題の一つである。

二つ目の検討課題は、観測時のアンテナの動揺に関するものである。台車に搭載して観測する方法（車載方式）で観測したデータには、後方散乱強度が強いターゲットの含まれるレンジにおいて、アジマス全体にノイズが拡散している場合がある。台車方式の観測時は、路面の状況等により細かい振動や、直線コースからのずれがほかの観測方式より大きく、その影響が補正しきれていないことが考えられる。今後は、アンテナ位置決定手法の高度化や姿勢の影響についての補正方法について検討する必要がある。

三つ目の検討課題は、FMCW の位相誤差に関するものである。散乱強度画像、干渉画像において、アジマス 0（アンテナ正面方向）付近において大きなノイズが残っている。これは、観測機器の発生する FMCW の位相誤差が影響していると考えられる。この解決においては、システム内で生成するチャープ信号の精度を改善する方法が考えられ、そのハードウェア改良に向けた検討を令和 2 年度に実施する予定である。

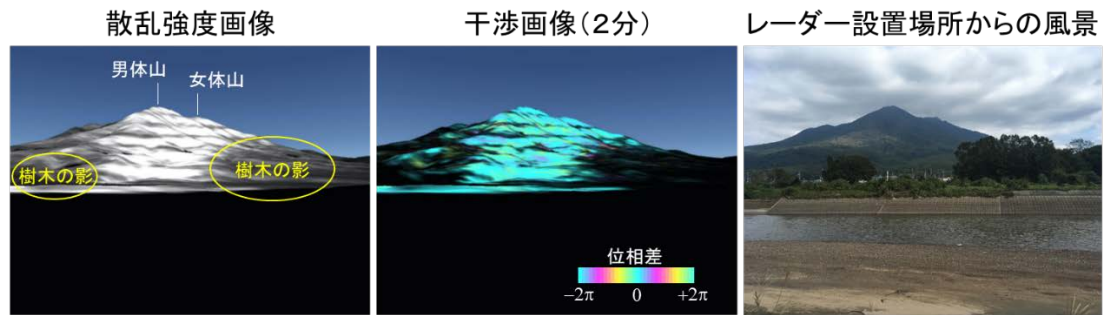


図 5. 筑波山テストサイトにおける令和元年 10 月 16 日の計測実験の結果. レーダー設置位置からの視点で描画した散乱強度画像と干渉画像、および、レーダー設置位置から撮影した写真.

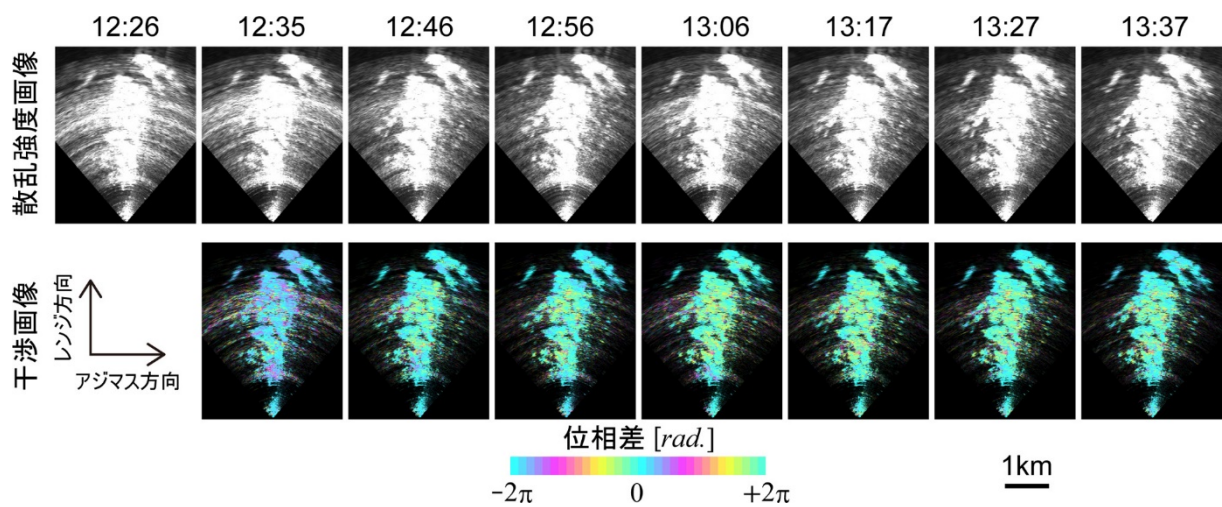


図 6. 筑波山テストサイトにおける令和元年 10 月 16 日の計測実験の結果. 約 10 分毎の散乱強度画像と干渉画像. 画像上の数字は取得時刻を示す. 干渉画像は 12:26 に計測した画像との干渉ペアの解析結果.

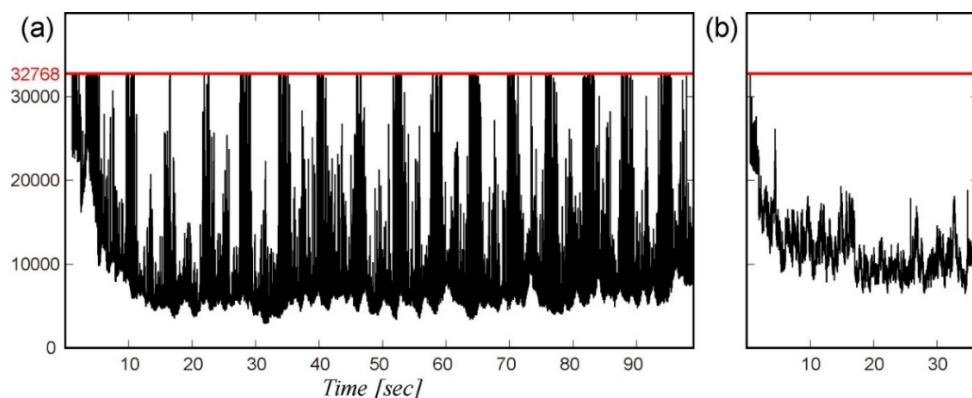


図 7. 計測生データの観測ラインごとの最大強度の比較. (a)筑波山テストサイトにおける令和元年 10 月 16 日の観測データ. (b) 浅間山における平成 30 年度 12 月 13 日の観測データ.

b) 筑波山テストサイト

筑波山テストサイトにおける計測実験を令和元年 10 月 16 日に行った。本計測実験は、10m のレールを用いた地上設置方式で行った。計測したデータの解析結果を図 5 に示す。レーダー波を照射した正面方向については、筑波山の麓から山頂にかけて強い後方散乱が得られ、干渉性も高い。しかし、その左右に干渉が得られない領域が見られた。これをレーダー設置場所から撮影した写真と比べてみると、その範囲は川の対岸に生えている樹木と一致する。つまり、照射したレーダー波が、これらの樹木によって大きく減衰したことによると考えられ、それについての改善については検討しない。また、筑波山山腹には、角度依存性を持つような散乱強度が弱い領域が見られる。この原因については究明に至っていないが、照射したレーダー波のマルチパスによる影響が疑われる。図 6 は約 10 分ごとに取得した画像の散乱強度画像と干渉画像を示し、レンジ距離依存性の円弧状のノイズが見られる。また、強い後方散乱が得られている領域においては、干渉が得られているが、短周期のノイズが重畳していることがわかる。これらのノイズについて調査するため、観測生データについて、観測ラインごとの最大強度を求めた（図 7）。強度は実部と虚部の二乗和から求めており、実部と虚部はそれぞれが 1 バイトで格納されているので、32768 の値は完全に飽和していることを示す。明らかに周期的な観測値の飽和が見られる。このような現象は、平成 30 年度に行った浅間山での計測においては見られない。これらのことから、何らかの外来波が影響していると考えられる。以上のことから、筑波山テストサイトは、性能評価の場所としてはかなり条件が良くないことが分かった。このような条件においても、ある程度の干渉が得られたことは、今後の観測の実施における有用な知見だが、性能評価のためには、別のテストサイトを設定することが望ましい。

c) 繰り返し観測および干渉性の時間的持続性の調査

再設置による繰り返し観測の性能、および、干渉性の時間的持続性の調査ため、筑波山テストサイトにおいて繰り返し観測の計測実験を行った。観測は 2019 年 10 月 16 日、10 月 17 日、11 月 13 日、12 月 18 日、2020 年 1 月 14 日、3 月 17 日に行った。観測には 10m のレールを用いた地上設置方式で行い、レールの再設置時には、厳密な設置位置の調整は行っておらず、おおよそ最初の観測位置と一緒にするように目視で調整した。SAR 処理時に、ヘッド部に搭載した GNSS から得られる位置情報に基づいて、毎回同じ軌道で観測したように観測データを補正する。その GNSS によるアンテナ位置は、レールから数 10m 離れた位置に設置した GNSS を基準点として、キネマティック解析により求めた。前述したように、筑波山テストサイトにおいては、外来波の影響が大きいと、解析して得られた散乱強度画像を目視で確認し、もっともノイズが少ないと思われる画像を選択し、2019 年 10 月 16 日-2019 年 10 月 17 日（1 日）、2019 年 10 月 17 日-2019 年 11 月 13 日（1 ヶ月）、2019 年 10 月 17 日-2019 年 12 月 18 日（2 ヶ月）、2019 年 10 月 17 日-2020 年 1 月 14 日（3 ヶ月）、2019 年 10 月 17 日-2020 年 3 月 17 日（5 ヶ月）のデータペアについて解析した。

解析結果を図 8 に示す。すべての干渉ペアにおいて干渉が得られていることがわ

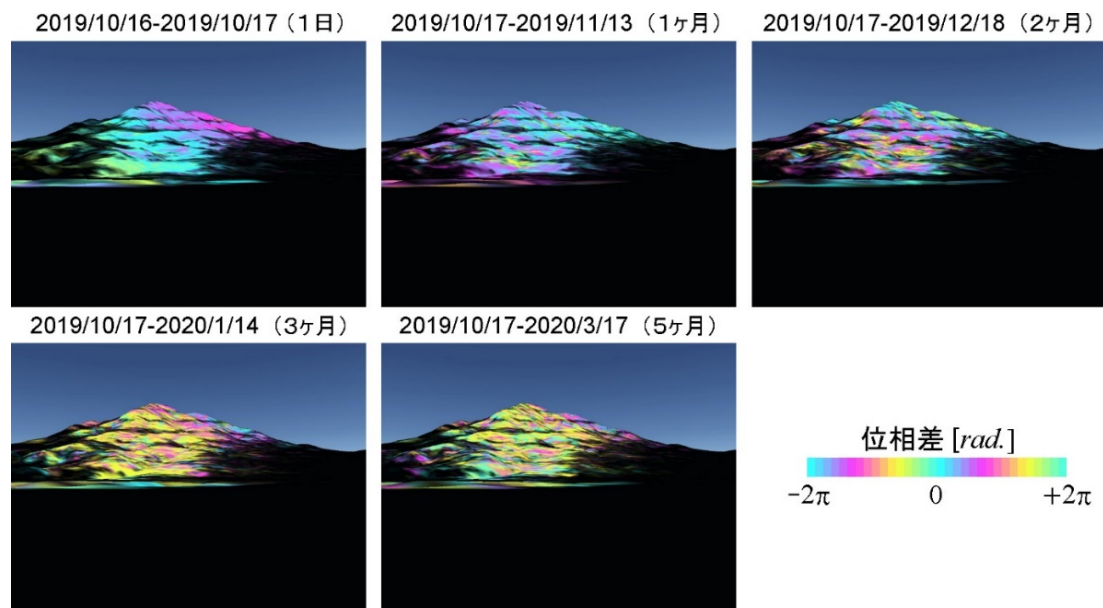


図 8. 筑波山テストサイトにおける繰り返し計測実験の結果. 可搬型レーダー干渉計設置位置からの視点で描画.

かる。特に、1 日間の干渉ペアにおいてはノイズの少ない明瞭な干渉縞が見られ、高い干渉度が得られていることがわかる。これらの結果から、レールの再設置による繰り返し観測により、安定的に干渉が得られることを確認した。また、観測間隔が離れるとともに、干渉性劣化による考えられるノイズが大きくなる傾向が見られたが、5 カ月の期間でも十分に地殻変動検出が可能なレベルの干渉度が得られた。これは、植生に対する透過性が高い L-band のレーダー波を用いたことによる効果が得られたと推測される。5 カ月間の干渉ペアについては、干渉性劣化が顕著であったが、筑波山テストサイトは外来波による影響もあるので、干渉性の時間的持続性についての正確な把握はこの結果からは困難である。これについては、今後、異なるテストサイトで計測実験を実施し、調査していく予定である。

#### d) 受信アンテナの高感度化に関する検討

信号雑音比の向上を目的として、高感度受信アンテナ（4 パッチアンテナ）を作製した。作製した高感度アンテナの図面を図 9 に示す。中心周波数（1.335GHz）におけるビーム幅（3dBi ダウン幅）は、アジマス方向に 34 度、エレベーション方向に 29 度と求まった（アンテナパターンを図 10 に示す）。従来の 2 パッチアンテナと比べて、アジマス方向についてはほぼ同じであり、エレベーション方向については約半分である。アンテナ利得は約 13.4dBi と求まり、従来のアンテナより約 3dBi 高いことが確認できた（図 11）。さらに、耐環境性能の向上のため、アンテナを発泡スチロールで覆い、エフレタン塗装を行った。レドームの減衰を計測したところ、その減衰量は 0.5dB 以下と求まった。

次に、作製した高感度アンテナの性能を確認することを目的として、筑波山テストサイトにおける計測実験を令和 2 年 3 月 17 日に行った。本計測実験においては、10m



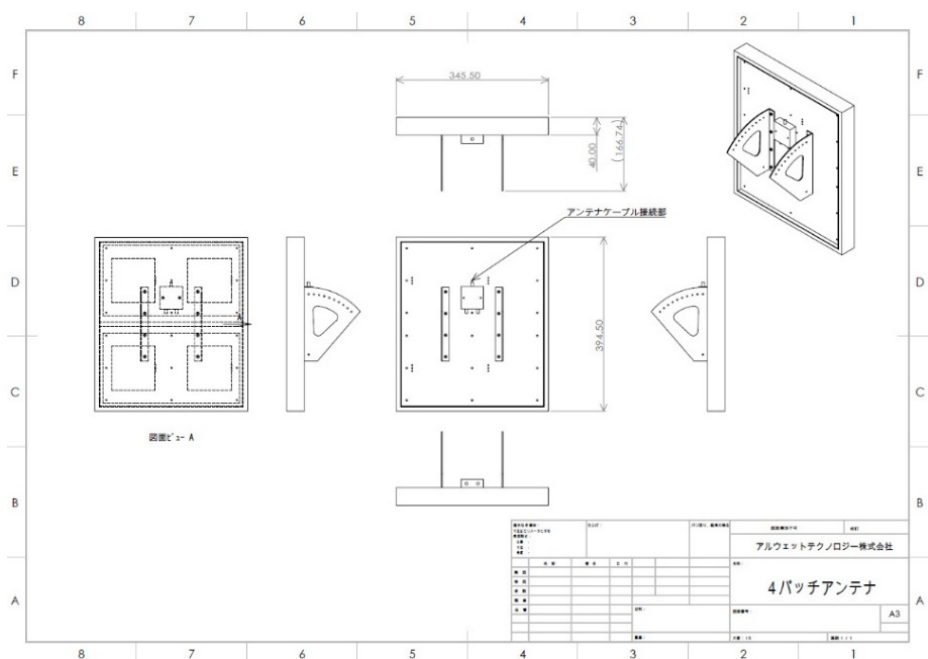


図 9. 高感度アンテナ（4パッチアンテナ）の図面

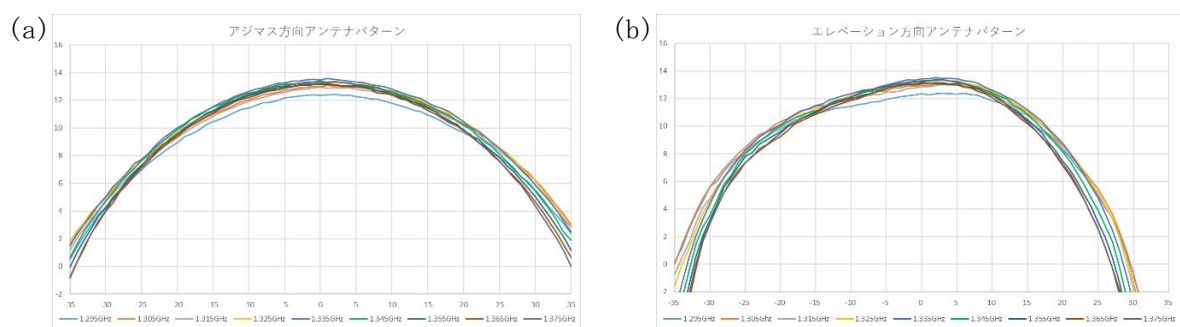


図 10. 計測した高感度（4パッチ）アンテナのアンテナパターン. (a)アジマス方向. (b)エレベーション方向

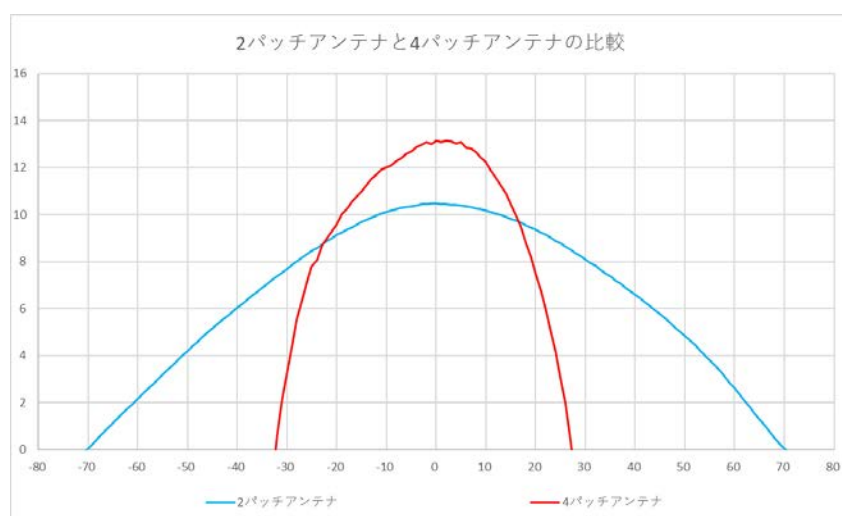


図 11. 2パッチアンテナと4パッチアンテナに関するエレベーション方向のアンテナパターンの比較

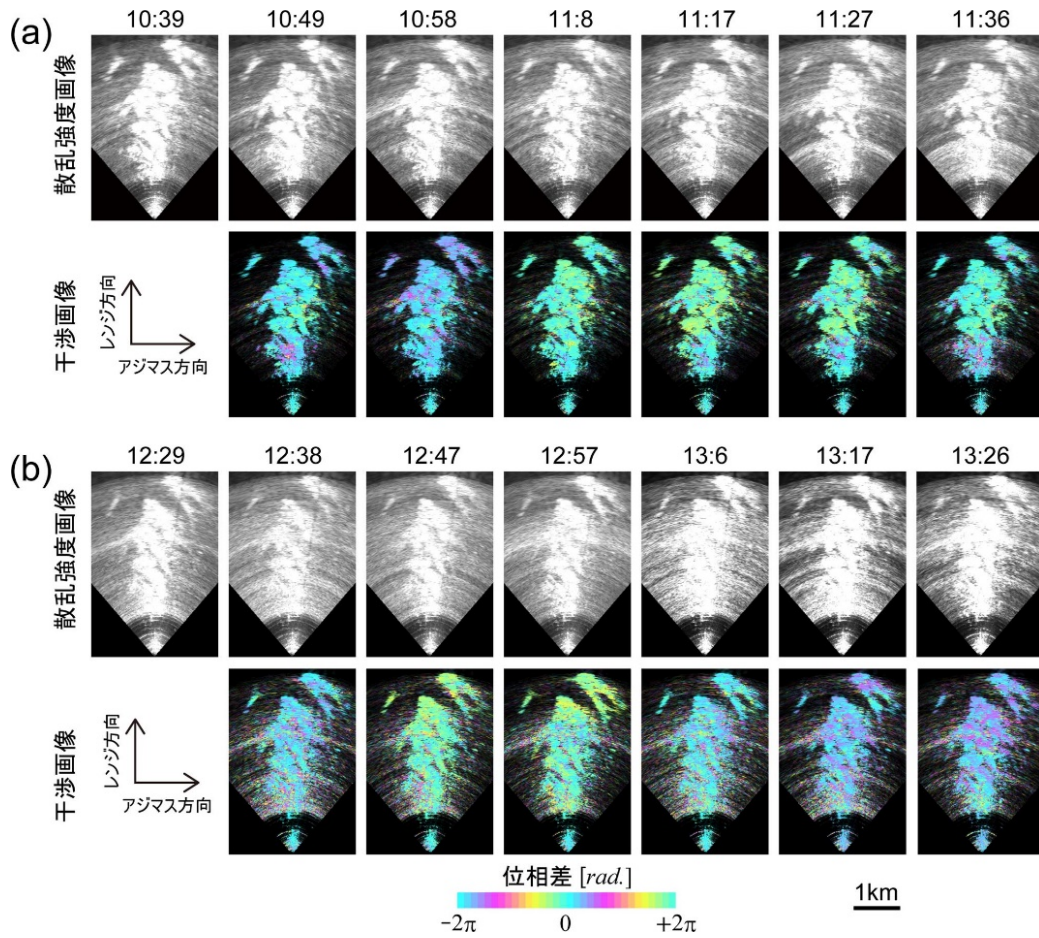


図 12. 筑波山テストサイトにおける 2 パッチアンテナと 4 パッチアンテナによる観測から得られた散乱強度画像と干渉画像の比較．画像上に示す数字はデータ取得時刻を示す．(a) 2 パッチアンテナに関する結果．(b) 4 パッチアンテナに関する結果．

のレールを用いた地上設置方式で行い、2 パッチアンテナと 4 パッチアンテナに関して、それぞれ 1 時間行った。その計測により得られた強度画像と干渉画像を図 12 に示す。前述したように、筑波山テストサイトでは、外来波によると考えられるノイズが顕著に表れる。散乱強度画像を見ると、顕著なノイズはどちらのアンテナを用いた結果にも見られる。ただし、2 パッチアンテナの観測結果に見られた角度依存の散乱強度画像の明暗は、4 パッチアンテナの観測結果には見られない。しかし、これはアンテナの性能というよりも、エレベーション方向のビーム幅が狭まったことにより、マルチパスによる干渉が無くなったためかもしれない。干渉画像を見ると、どちらのアンテナに関する結果にも外来波によると考えられるノイズが重畳しているが、明らかに 4 パッチのよる解析結果のほうが、そのノイズは顕著である。これは外来波による影響が、より顕著に表れたことによる可能性が考えられる。

アンテナ利得の向上から、より高感度の計測が可能になったと考えられるが、筑波山テストサイトにおける観測結果の比較だけでは、作製した高感度アンテナの性能を確認することは困難である。今後、異なる場所での計測実験を行い、その性能を確認したい。



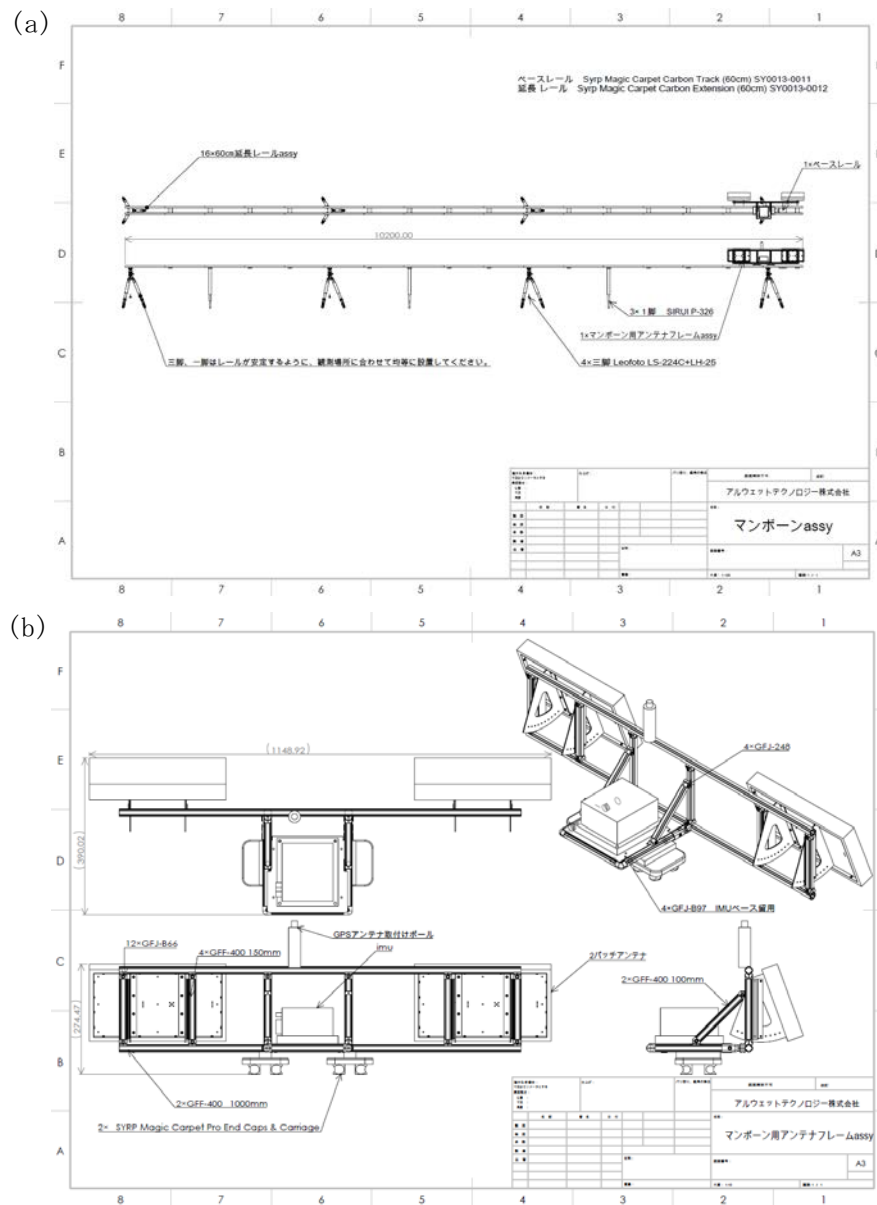


図 13. (a)Manborne SAR 用ガイドレールの図面. (b)Manborne SAR 用アンテナフレームの図面

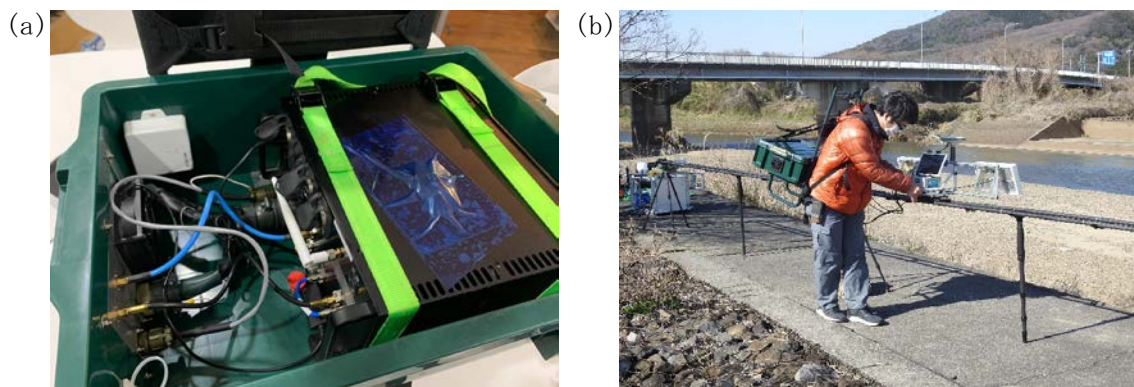


図 14. Manborne SAR 方式に関する (a)送受信部の収納状況、および、(b)観測風景。

e) Manborne SAR の開発

人力で運搬することが可能な Manborne SAR の開発に着手した。Manborne SAR 方式に関するガイドレールおよびアンテナフレームの図面を図 13 に示し、送受信部の収納状況や観測風景を図 14 に示す。Man-borne SAR のガイドレール、アンテナ、送受信部等の総重量は 40kg であり、近距離ならば、人力での運搬は困難ではない。ただし、1 時間を超えるような登山を要する場合には、さらなる軽量化が望ましい。観測時には、送受信部とバッテリーを背負子に搭載して、アンテナはガイドレール上を滑らせるだけなので、観測時に観測者が持つ重量は 11kg 程度である。レーダー波の送受信部はアンテナ部に装着する Windows タブレット PC で操作するので、観測時には 1 名でのオペレーションも可能である。

Manborne SAR 方式に関する開発の課題を調査するため、筑波山テストサイトにおける計測実験を令和 2 年 3 月 17 日に実施した。計測は、10m のガイドレールを用いて、約 1 時間で 24 回のスキャンを行った。これらの解析を試みたところ、9 データについては正常に SAR 処理が終了したが、他のデータについては、処理が途中で異常終了する、もしくは、適切な SAR 画像が得られなかった。正常に SAR 処理が終了したデータについても、全体的に画像がぼやけており、明らかに SAR 処理の精度が十分でない（図 15）。SAR 処理ができた 9 データについて干渉解析を試みたところ、干渉は得られたが、顕著なノイズが重畳している。これは、前章で述べた外来波の影響も考えられるが、主には、SAR 処理の精度が十分でないことによると考えられる。Manborne SAR 方式による観測は、地上設置方式や車載方式と比べて、アンテナの姿勢の動揺が大きいと考えられるのに対して、現在の SAR 処理ソフトウェアには、そのような動揺

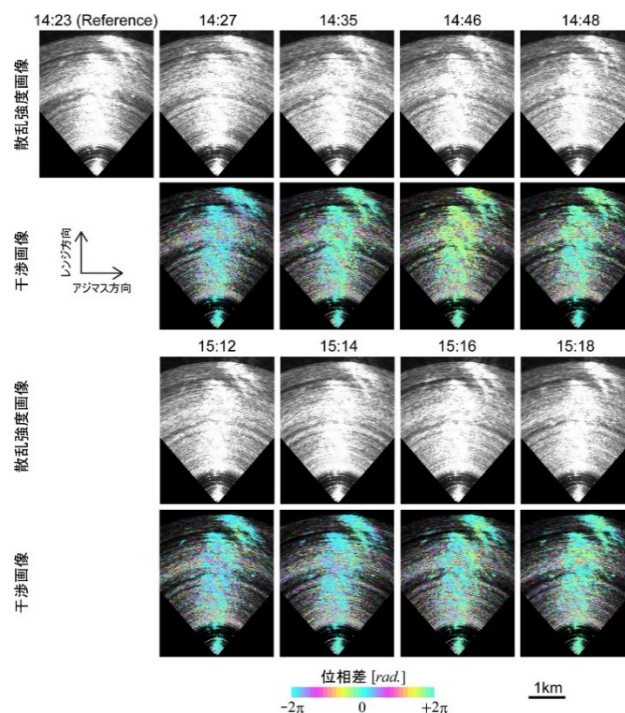


図 15. Manborne SAR 方式で観測したデータを解析して得られた散乱強度画像と干渉画像。画像上の数字はデータ取得時刻を示す。

を補正する機能を組み込んでおらず、それが SAR 処理の精度不十分の原因であるかもしれない。この改善については、Manborne SAR 方式の開発における大きな課題の一つである。

e) 霧島山における実験観測

火山活動が比較的活発な火山において、火山観測用可搬型レーダー干渉計による計測実験を行い、地殻変動の検出を試みたい。そこで、2018 年に噴火が発生し、顕著な地殻変動が観測された霧島山の新燃岳と硫黄山を対象として観測を実施した。

硫黄山の観測場所の地図、および、レーダー設置位置から見た硫黄山の写真を図 16 に示す。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、令和元年 11 月 19 日と 20 日に実施した。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性は比較的高いと予測される。

令和元年 11 月 19 日の観測データを解析し、レーダー設置位置からの視点で描画した散乱強度画像と干渉画像を図 17 に示す。センサー設置場所から見える硫黄山西

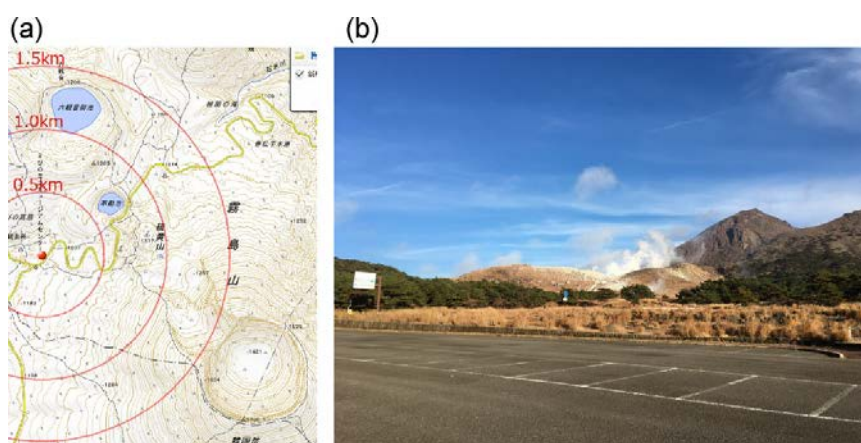


図 16. (a)硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）. 赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す. (b)レーダー設置場所から見た硫黄山.

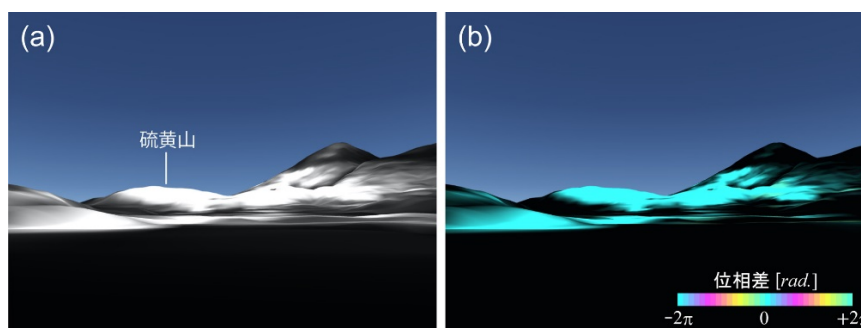


図 17. 硫黄山における令和元年 11 月 19 日の観測結果. レーダー設置位置からの視点で、図 16(b)におおよそ一致するように描画. (a)散乱強度画像. (b)干渉画像 (14:38-14:44)



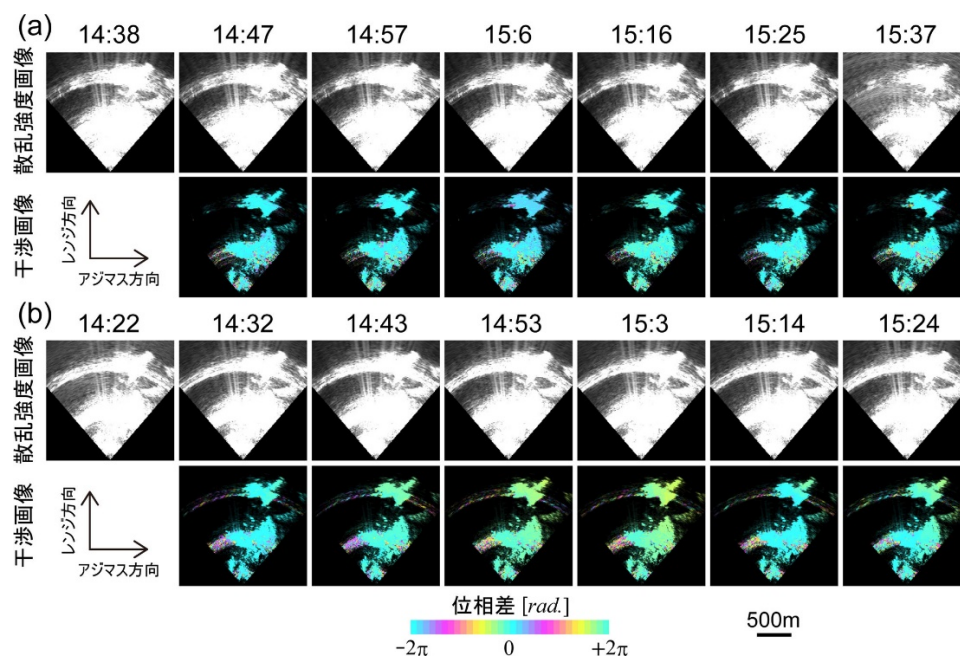


図 18. 硫黄山で観測したデータを解析して得られた散乱強度画像と干渉画像の時系列. 画像上の数字はデータ取得時刻を示す. (a) 令和元年 11 月 19 日の観測結果. 干渉画像は 14:38 観測とのペアの解析結果. (b) 令和元年 11 月 20 日の観測結果. 干渉画像は 14:22 観測とのペアの解析結果.

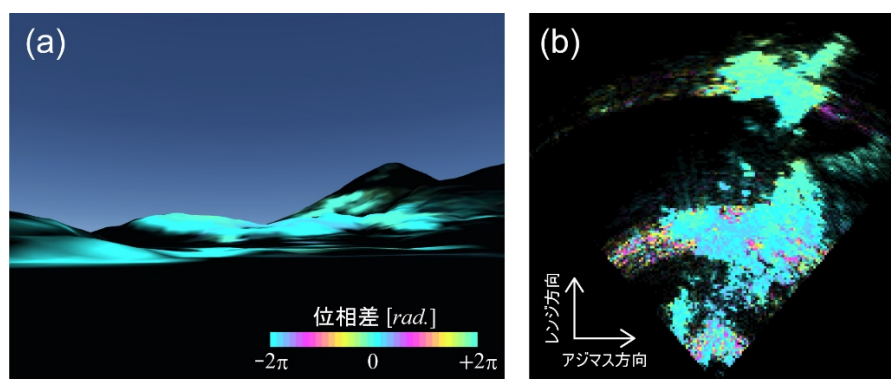


図 19. 硫黄山における令和元年 11 月 19 日と令和元年 11 月 20 日の観測データを解析して得られた干渉画像. (a) レーダー設置位置からの視点で描画. (b) レーダー座標系で描画.

山腹については、散乱・干渉が得られている。ただし、樹木や地形によって見えない領域も多い。より広い領域を観測するために、より標高から見下ろすことが可能な場所から観測することが望ましいが、そのような場所は車両によるアクセスはできなかった。図 18 は、レーダー座標系で示した散乱強度画像と干渉画像の時系列を示し、短期間では高い干渉性が得られていることがわかる。さらに、11 月 19 日と 11 月 20 日に観測したデータペアを解析しても、高い干渉性が得られ（図 19）、再設置による繰り返し観測でも適切に干渉が得られることを確認した。

新燃岳の観測場所の地図、および、レーダー設置位置から見た硫黄山の写真を図 20

に示す。観測は新湯温泉近くの県道であり、台車にヘッド部を搭載する車載方式で行った。観測日は令和元年 11 月 20 日と 21 日である。新燃岳は観測場所東方に位置し、新燃岳火口西縁までの距離は約 2.5km である。新燃岳の山頂付近の植生は薄い、山麓では濃い植生に覆われており、長期間の干渉ペアでは植生による干渉性劣化が顕著に現れる可能性がある。

令和元年 11 月 20 日の観測データを解析し、レーダー設置位置からの視点で描画した散乱強度画像と干渉画像を図 21 (a), (b) に示す。センサー設置場所から見えるレーダー設置位置から正面については、散乱・干渉が得られているが、その左右の画像は得られなかった。これは観測場所近傍に位置する尾根や樹木の影響によるものと考えられる。より視通の良い場所での観測が望ましいが、そのような場所は車両によるアクセスはできなかった。また、レーダー設置位置から直線状に干渉性のノイズが

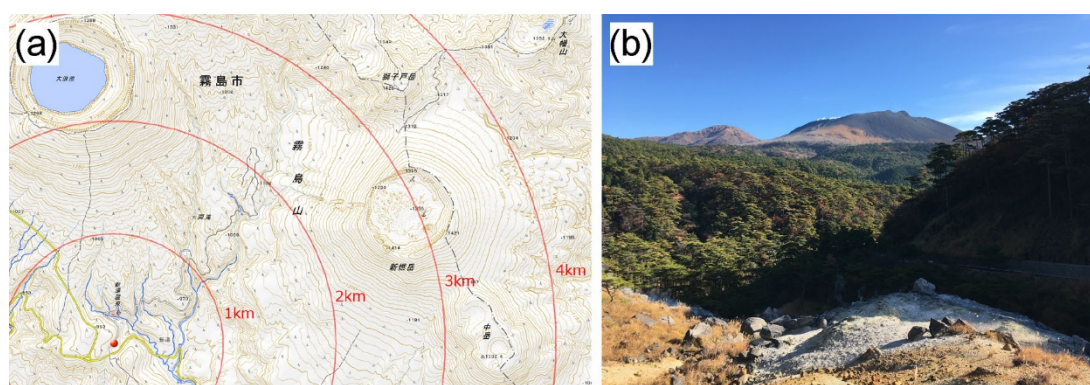


図 20. (a) 新燃岳観測場所周辺の地図（地理院地図）。赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。(b) レーダー設置場所から見た新燃岳。

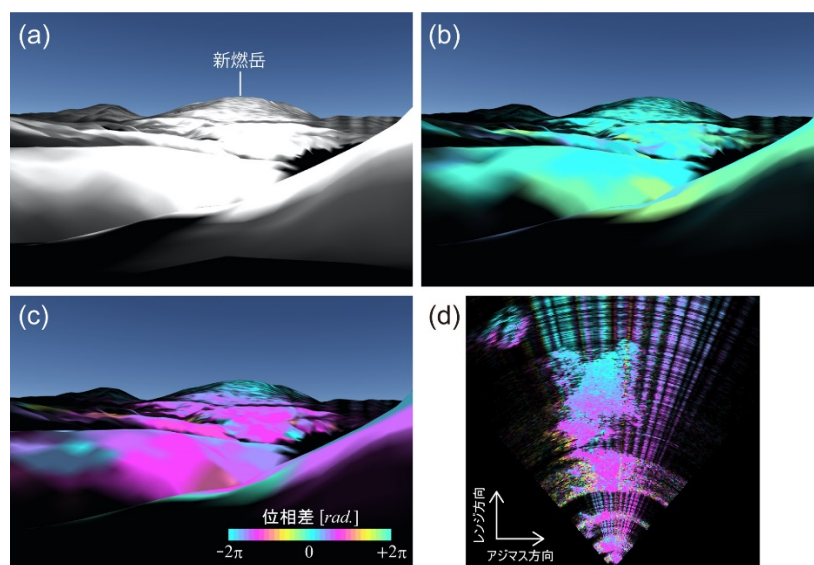


図 21. 新燃岳における観測結果。(a)–(c)はレーダー設置位置からの視点で、図 20 (b) におおよそ一致するように描画。(a) 散乱強度画像。(b) 干渉画像（2019/11/20 10:48–10:53）。(c) 干渉画像（2019/11/20 10:22–2019/11/21 9:48）。(d) レーダー座標系で描画した干渉画像（2019/11/20 10:22–2019/11/21 9:48）。

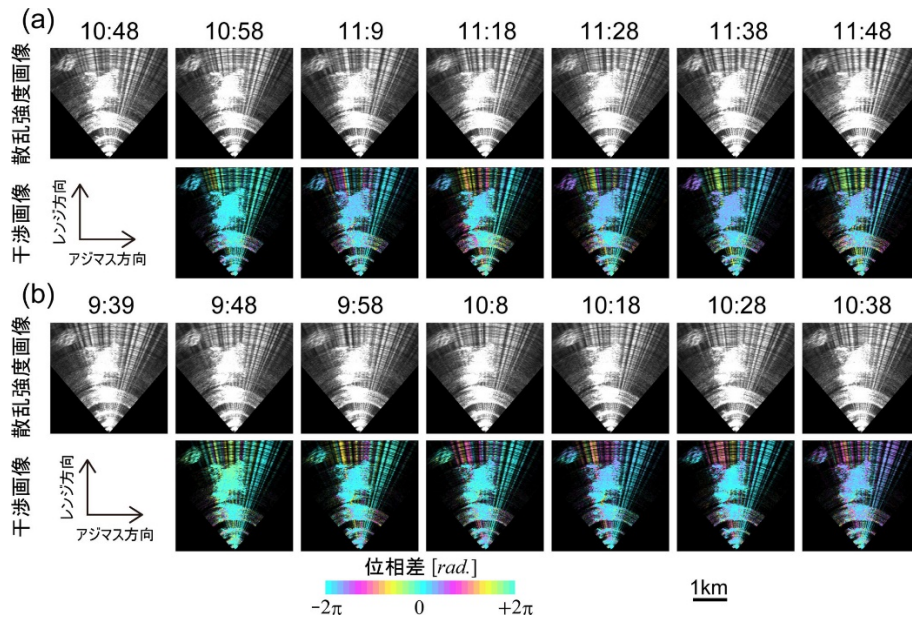


図 22. 新燃岳で観測したデータを解析して得られた散乱強度画像と干渉画像の時系列. 画像上の数字はデータ取得時刻を示す。(a)令和元年 11 月 20 日の観測結果. 干渉画像は 10:48 観測とのペアの解析結果. (b)令和元年 11 月 21 日の観測結果. 干渉画像は 9:39 観測とのペアの解析結果.

見られた。この原因究明については、今後の課題とする。図 22 は、レーダー座標系で示した散乱強度画像と干渉画像の時系列を示し、短期間では高い干渉性が得られていることがわかる。さらに、11 月 20 日と 11 月 21 日に観測したデータペアを解析しても、高い干渉性が得られ（図 21(c), (d)）、再設置による繰り返し観測でも適切に干渉が得られることを確認した。

以上のように、硫黄山、新燃岳においての観測では、繰り返し観測によるデータの解析から干渉を得ることに成功した。同様の観測を後年度に実施し、その間に生じた地殻変動の検出を試みる予定である。

## 2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

### a) 自動解析システムプロトタイプの構築

これまでに検討した誤差軽減手法を組み込み、自動解析システムのプロトタイプを構築する。自動解析システムの基本的な解析フローを図 23 に示す。この解析フローに沿って、防災科研が開発した SAR 干渉解析ツール（RINC）を用いた自動解析システムを構築する。以下では、各処理に関する詳細を述べる。

(Master image と Slave image)

本解析で使用する解析データは、だいち（ALOS）とだいち 2 号（ALOS-2）に搭載された PALSAR および PALSAR-2 で取得された SAR データである。火山活動の活発化が観測された場合等には、臨時的に Sentinel-1 等の解析も試み、有用な結果が得られた場合には、JVDN で解析結果を公開する。このような臨時的な解析においては、使



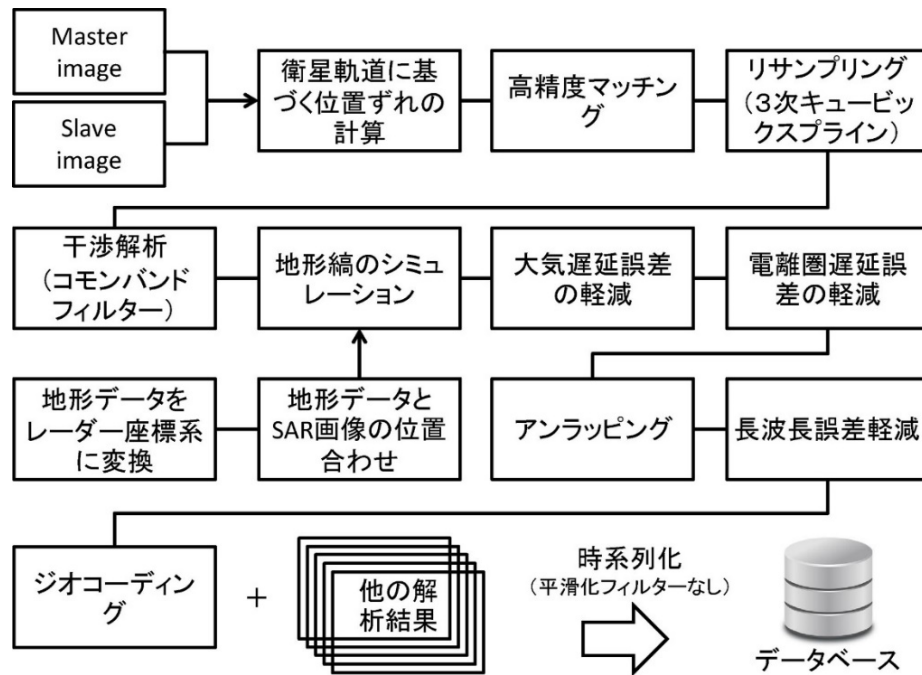


図 23. 自動解析システムの基本的な解析フロー

用するデータの解析に最適な解析手法を用いることとし、必ずしもこの解析手法に基づかないこととする。PALSAR データは、東京電機大学の島田政信教授が作成された SIGMA-SAR を用いて、level1.0 データから Single Look Complex (SLC) 画像に変換し、解析を行う。PALSAR-2 データは、level1.1 データを入手し、解析を行う。

#### (衛星軌道に基づく位置ずれの計算)

Master image と Slave image を取得したレーダー波照射方向のスキャン角を同じと仮定し、Master image のシーンセンターのピクセルを同じスキャン角で見られる衛星位置をサーチする。また、その位置からシーンセンターまでのスラントレンジ距離を比較することにより、Master image と Slave image の位置ずれを大まかに推定する。

#### (高精度マッチング)

飛田ほか (1999) の高精度マッチング法により、Slave image をサブピクセルの精度で Master image の位置に合わせこむためのアフィン変換係数を推定する。ここでのアフィン変換式は

$$x' = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy$$

$$y' = a_5 + a_6 x + a_7 y + a_8 xy$$

を用いる。ここで、 $x, y$  は slave image のピクセル位置、 $x', y'$  は Master image のピクセル位置、 $a_1 \sim a_8$  はアフィン変換係数である。

(リサンプリング)

推定したアフィン変換係数を用いて、slave image をリサンプリングする。リサンプリングにおいては、双三次スプライン補間を用いる。

(干渉解析)

干渉処理においては、

$$\begin{aligned}\phi_M &= a_M + ib_M, \phi_S = a_S + ib_S \\ \phi_{interf} &= \phi_M \phi_S^* = \Sigma(a_M a_S + b_M b_S)/n + i \Sigma(a_S b_M - a_M b_S)/n\end{aligned}$$

から各ピクセルの値を計算する。ここで、 $a$ ,  $b$ ,  $\phi$ は SLC 画像に格納される実部と虚部の値、および複素数であり、上付きの\*は複素共役を示す。また、それらの下付きの  $M$ ,  $S$  はそれぞれ master image と slave image の値であることを示す。 $n$  はルック処理の総ピクセル数である。また、この干渉処理を実行する前に、わずかな入射角の違いによるスペクトルシフトを補正するフィルター (Gatelli *et al.*, 1994) を適用する。

(地形データをレーダー座標系に変換)

本システムにおいては、干渉画像に現れる地形成分の除去等のために、国土地理院が公表している 10m メッシュ標高と EGM96 ジオイドモデルから計算されるジオイド高を足し合わせて求めた楕円体高データを用いる。これらは等緯度経度のグリッドで格納されているため、それをレーダー座標系に変換する必要がある。この計算においては、ピクセルのアジマス位置に対応する衛星位置とスラントレンジ長を固定し、グリッドサーチによって地表面と観測位置が一致するオフナディア角を推定する。一致するオフナディア角が求まった後、推定した位置がレーダー影でないかをチェックする。レーダー影でなければ、入射方向と地表面の法線方向の関係から、疑似的な後方散乱強度を計算する。この推定処理を、後の処理のため、レンジ、アジマス方向に±100 ピクセル延長した範囲について計算する。

(地形データと SAR 画像の位置合わせ)

レーダー座標系に変換した地形データは、軌道誤差や大気遅延等により、観測画像とは若干のずれがある。そこで、シミュレートした散乱強度画像が観測画像と一致するように位置合わせを行う。この位置合わせにおいては、SAR 画像の位置合わせと同じアフィン変換式を用いる。アフィン変換係数の推定においては、画像全体におおよそ 100 ピクセル間隔で 32×32 ピクセルの小領域を設定し、その平行移動量を推定する。それらの平行移動量をよく説明するアフィン変換を最小二乗法によって推定する。

(地形縞のシミュレーション)

干渉画像には、master image と slave image を取得した軌道の差に起因する位相差成分が生じる。地殻変動成分を抽出するため、その成分はシミュレートして干渉画像から除去する。そのスラントレンジ変化成分 $\delta\rho$ は

$$\delta\rho = \rho_s - \rho_M = \{\rho_M^2 + B^2 - 2\rho_M B \cos\varphi\}^{1/2} - \rho_M$$

から計算する。ここで、 $\rho_M$ 、 $\rho_s$ は master image と slave image のスラントレンジ、 $B$ は master image と slave image の軌道間距離、 $\varphi$ はレーダー照射方向と軌道間ベクトル方向がなす角である。

(大気遅延誤差の軽減)

大気遅延誤差については、平成 29 年度に検討した方法を用いる。詳細は平成 29 年度の次世代火山研究推進事業課題 B サブテーマ 2 の報告書および Ozawa *et al.* (2019)に述べているので、ここでは簡単に述べるのみとする。

大気遅延量は、数値気象モデルの解析値に基づいて、レーダー波の伝搬経路上の伝搬遅延量を積算することによって推定する。その際、電波の屈折は考慮しない。気象データは、気象庁が公表しているメソスケールモデルを境界値とした WRF (Skamarock *et al.*, 2008)による解析により、1 時間値にダウンサンプリングした値を用いる。WRF による解析は、ALOS の運用が開始された 2006 年から現在まで終了しており、PIXEL とデータを共有するためのシステムにアーカイブしている。また、最新のデータについては、自動的に解析を実行するシステムを構築しており、その結果も随時アーカイブする。

(電離圏遅延誤差の軽減)

電離圏遅延誤差については、平成 30 年度に検討した方法を用いる。詳細は平成 30 年度の次世代火山研究推進事業課題 B サブテーマ 2 の報告書に述べているので、ここでは簡単に述べるのみとする。

電離圏遅延の推定方法は、レーダー波のチャープ帯域を分割して、異なる周波数の SAR 画像を作成し (Split-spectrum 法)、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方法を用いる (Brcic *et al.*, 2010; Rosen *et al.*, 2010)。その基本的な解析手順は、Gomba *et al.* (2016)が示した方法を用いることとする。ただし、帯域幅が狭い ALOS の解析、陸域面積 (干渉が得られる面積) が狭い火山島などの解析においては、自動解析では安定して精度が得られない場合が多く見られたため、Split-spectrum 法による電離圏遅延推定は行わない。これについては、自動解析システムの構築時に、火山周辺の特性に合わせて決定することとする。

(アンラッピング)

位相アンラッピングを精度よく行うため、処理前に Goldstein and Werner (1998)

によるスペクトル強調フィルターを適用する。位相アンラッピングは、スタンフォード大学が開発したアンラッピングソフトウェア SNAPHU (Chen and Zebker, 2000; Chen and Zebker, 2001; Chen and Zebker, 2002)を用いる。アンラッピングは干渉解析から得られる位相差が持つ  $2\pi$  の整数倍の不確定性を解決する処理であるが、その推定を間違えると L-band SAR の場合には 10cm を超える誤差が生じる (アンラッピングエラー)。これは大きな誤差要因であり、完全になくすことは困難であることから、目視で確認することとする。アンラッピングエラーが見られる場合には、必要に応じて、奥山 (2010) による `mod_unw` を用いて修正を試みる。修正が困難な場合は、そのペアは後の解析には用いないこととする。

#### (長波長誤差軽減)

軌道情報には若干の誤差を持つので、その軌道誤差に起因する成分が残存する。これを除去するため、長波長成分を多項式で近似し、シーン内に設置されている GNSS 観測による地殻変動情報と整合するように、その多項式の係数を決定する。迅速な解析を必要としない平時のデータの解析においては、IGS 最終暦を用いた GNSS 解析から得られる地殻変動情報を用いることとする。

#### (ジオコーディング)

SAR 干渉解析はレーダー座標系において行うが、その解析結果を容易に解釈するためには、地理座標系のデータに変換する必要がある。そこで、地形データをレーダー座標系に変換したパラメータを用いて、逆に、最終結果を地理座標系に変換する。

#### (時系列化)

SAR 干渉解析においては、異なる時間に取得された 2 つの画像を解析して、それらのデータを取得時間の間に生じた地殻変動によるスラントレンジ変化を求める。よって、SAR データ数を  $L$  とした場合、解析可能なペア数は  $L C_2$  である。これらすべてをデータベース化するのは効率的ではないので、 $k$  番目と  $k+1$  番目の SAR データの観測時間の間に生じた地殻変動成分を求めてデータベース化する。これにより、データベース化するデータ数は  $L-1$  となる。その後使用する地殻変動は、必要となる期間の地殻変動解析結果を足し合わせて求める。 $k$  番目と  $k+1$  番目の期間の地殻変動は、 $k$  番目と  $k+1$  番目の SAR データを解析から得られるが、その期間だけの解析結果だけで時系列化したデータは、長期間の地殻変動を求める場合に解析誤差が積算され、大きな誤差が生じる場合がある。そこで、より多くのデータペアの解析結果から時系列データを推定する。各解析から得られるスラントレンジ変化量  $\delta p_{i,j}$  は、

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

と表される。ここで、 $\delta p$  はスラントレンジ変化量で、下付き添え字は、その期間を示す。SAR 干渉解析結果を合わせて、最小二乗法によって、短期間のスラントレンジ変

化量 $\delta p_{k,k+1}$ を求める。この手法は Small Baseline Subset (SBAS)法 (Berardino *et al.*, 2002) と同様だが、一般的によく用いられる時間方向のスムージングや地形誤差の推定は、その拘束条件や推定パラメータの設定の仕方によって、解が大きく変わる可能性があるので、ここでは単純な時系列化のみを行うこととする。

図 23 に示す解析フローは、自動解析システムのベースとなるものであり、実際のシステム構築時には、解析地域や用いるデータの特性に合わせて、処理やパラメータを変更する必要がある。その一つは干渉画像を作成する場合のルック数である。本解析では、最終結果の分解能を 1 秒 (約 30m) とすることを基本としており、そのため、レーダー座標系での解析では、グラントレンジでおおよそ 25m になるようにルック数を決める。しかし、濃い植生でおおわれている領域など、干渉性が悪い地域においては、より多くのルック数を設定して、ノイズを軽減する必要がある。その場合には、データベース化する結果もそれに応じて、最終結果のメッシュサイズも変更する予定である。また、アンラッピングを行う前には、アンラッピングエラーを減らすために、Goldstein and Werner (1998) のフィルターを適用する。そのフィルターの窓サイズは  $32 \times 32$  ピクセル、フィルター強度は 0.8 を基本とするが、これについてもその地域の特性に合わせて、適切なパラメータを用いることにする。電離圏遅延誤差軽減については、前述したように、データや地域の特性から、安定的に精度よく適用可能な場合にのみ、この処理を用いる。長波長誤差軽減においては、その成分を多項式に近似して、解析結果が GNSS による地殻変動と整合するように、その多項式の係数を推定する。その多項式は二次曲面を基本とするが、電離圏遅延を推定しない場合にはより高い次数の設定が適切な場合が考えられる。一方、GNSS 観測点が少ない地域や、火山島などの陸域が狭い場合には、低い次数のほうが適切と考えられる。時系列化においては、どの程度の期間の干渉解析結果を用いるかを検討する必要がある。すべての組み合わせについて解析を行い、そのすべてを用いて時系列データを推定する方法も考えられるが、干渉ペアの取得期間が長くなると、干渉性劣化が顕著となり、その誤差が時系列データ推定の精度を劣化させる可能性が考えられる。よって、安定的にある程度の干渉性が得られる期間を、その地域の特性に合わせて設定する必要がある。

自動解析システムは、火山ごとに、以上のような事項について検討して構築する。そのプロトタイプとして、霧島山における PALSAR-2 のパス 23 (南行軌道、右方向視) を例として、システムの構築を試みた。テスト解析に用いるデータは、2015 年 2 月 9 日から 2017 年 9 月 18 日までに SM1 (帯域幅 80MHz) の観測モードで取得された 28 データである。ルック数はグラントレンジでおおよそ 25m になるようにレンジ方向に 10 ルック、アジマス方向に 11 ルックを設定した。その他についても、すべて上述した基本的なパラメータ・処理を設定した。解析した干渉画像の一部 (2015 年 2 月 9 日に取得した画像を master image とした解析結果) を図 24 に示す。データ取得間隔が 1 年のデータペアにおいては、画像全体で地殻変動検出が可能な程度の干渉性が得られているが、それが約 1 年半を超えると、干渉性が低いためにマスクされた領域が顕著に見られるようになる。これは植生による時間的な干渉性劣化が顕著に見



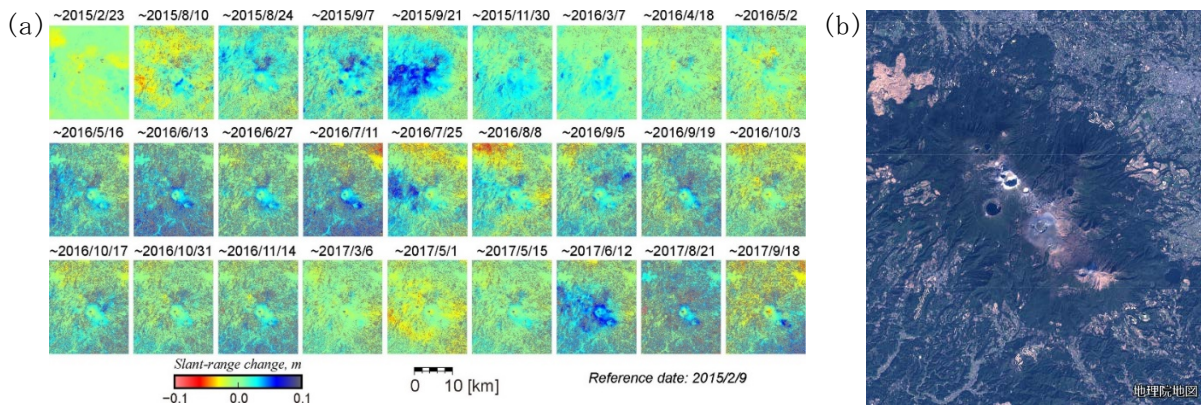


図 24. (a)霧島山に関する PALSAR-2 のパス 23（南行軌道、右方向視）に関して構築した、自動解析システムのプロトタイプから得られた SAR 干渉解析結果。ここで示す結果は、2015 年 2 月 9 日を Master image として得られたスラントレンジ変化を示す。Slave image の取得日は各画像の上に示す。干渉度が低いのはマスクした（灰色で示す領域）。(b) 画像範囲の航空写真（地理院地図）。

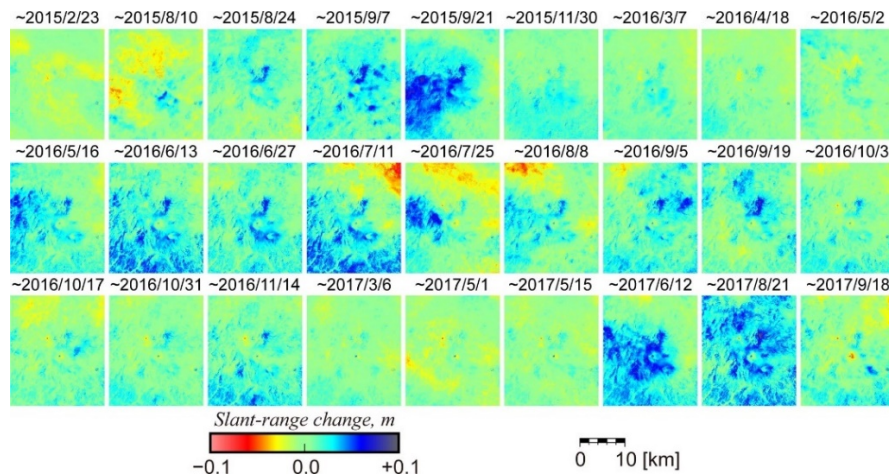


図 25. 霧島山に関する PALSAR-2 のパス 23（南行軌道、右方向視）に関して構築した、自動解析システムのプロトタイプで得られたスラントレンジ変化時系列。画像範囲は図 24(b)に示す。

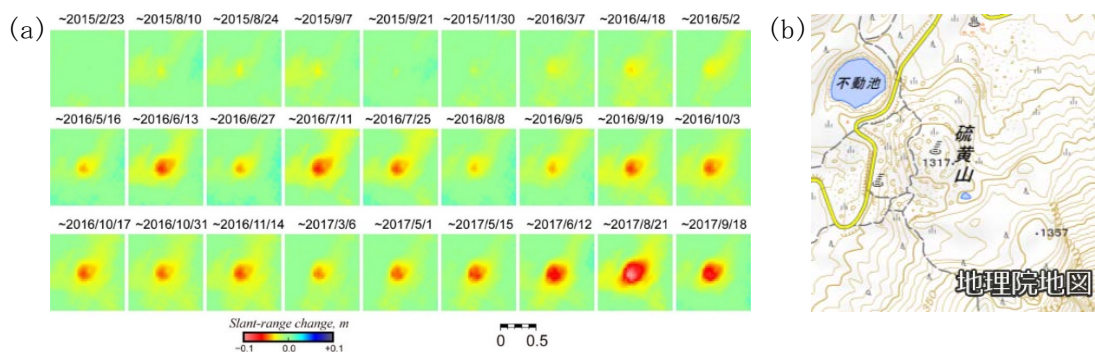


図 26. (a)スラントレンジ変化時系列（図 25）の硫黄山周辺の拡大図。(b) 画像範囲の地図（地理院地図）。

られるためと考えられ、よりデータ取得間隔がさらに長くなると、マスクされる領域がさらに増えると考えられる。そこで、前述したように、他の組み合わせのデータペア得られた結果も併せて、時系列解析を行う。すべてのデータペアの組み合わせについて得られた結果を用いて推定したスラントレンジ変化時系列を図 25 に示す。ほとんどのピクセルでスラントレンジ変化が得られていることがわかる。また、干渉性劣化に伴うような短周期のノイズは顕著には見られない。ただし、本解析では時間方向のスミージングを適用していないので、取り切れていない大気遅延や電離圏遅延等によるノイズはそのまま残っている。その大きさは場合によっては 5cm を超えている。それでも、見る領域を限定し、スラントレンジ変化の基準点を適切に設定することによって、地表変動の情報を正しく見ることが可能である。図 26 は、硫黄山周辺について拡大し、基準点をその近傍に設定して得られたスラントレンジ変化である。硫黄山は 2018 年に噴火が発生したが、その前兆的な膨張の時間的変化を詳細に見ることができた。より広い範囲の地殻変動を見るためには、残存するノイズの軽減が必要である。そのため、今後、得られたスラントレンジ変化時系列に適用するフィルターを開発する予定である。

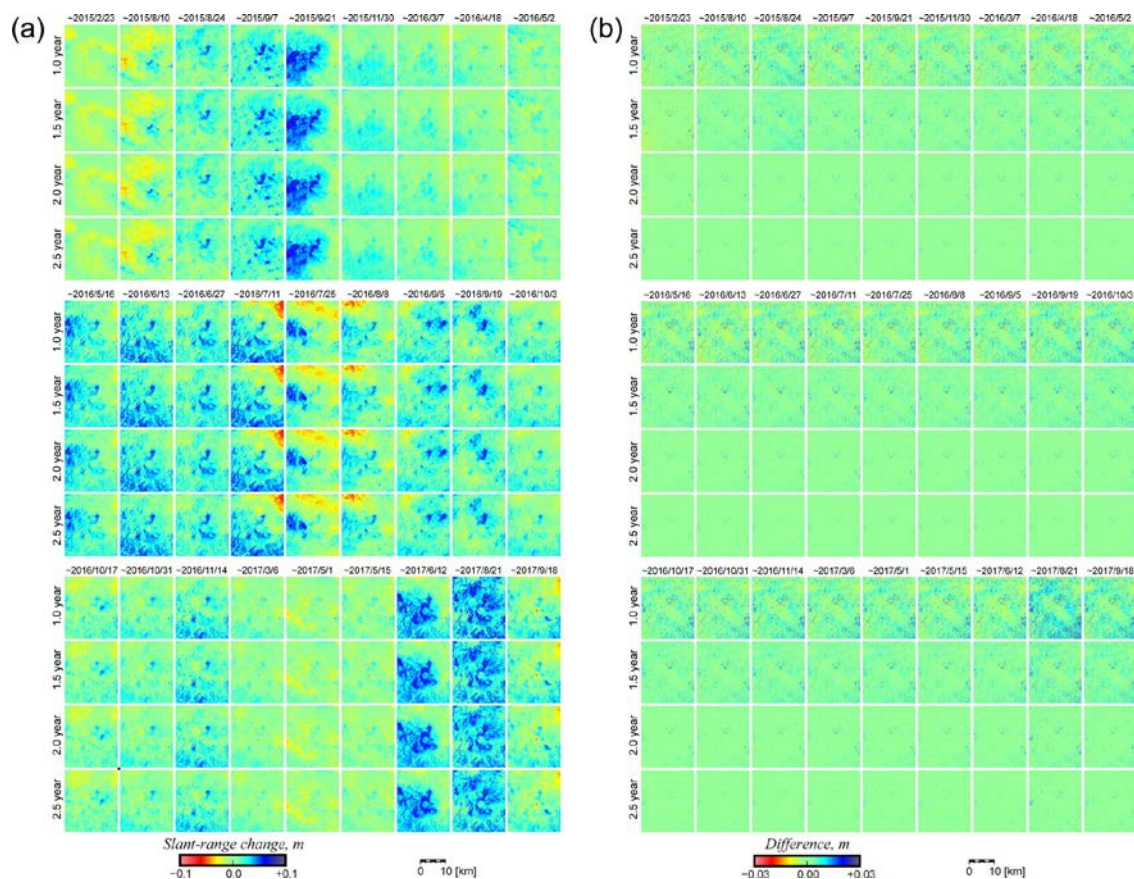


図 27. (a) データ取得間隔が 1.0 年、1.5 年、2.0 年、2.5 年以下のデータペアの SAR 干渉解析結果を用いて推定したスラントレンジ変化時系列。画像範囲は図 24(b) に示す。(b) SAR 画像のすべての組み合わせから推定したスラントレンジ変化時系列 (図 25) との差。



図 25 はすべての SAR 画像の組み合わせで SAR 干渉解析結果を用いて推定したスラントレンジ変化時系列であるが、今後、さらにデータが増えるので、それらすべての SAR データの組み合わせについて SAR 干渉解析を行うのは効率的でない。また、データ取得間隔が長くなると干渉性の劣化が顕著となり、アンラッピングエラーが生じやすくなることが予測される。よって、SAR 干渉解析を行うデータペアをデータ取得間隔で制限して、それらの結果からスラントレンジ変化時系列を推定するようにしたい。その適当なデータ取得間隔を調査するため、データ取得間隔が 1.0 年、1.5 年、2.0 年、2.5 年以下のデータペアの SAR 干渉解析結果を用いて推定したスラントレンジ変化時系列を、すべての組み合わせで得られた SAR 干渉解析結果から求めたスラントレンジ変化時系列と比較する（図 27）。その結果、1.5 年より短い場合には、若干の差が見られたが、2 年以上では顕著な変化が見られなかった。この結果から、霧島山に関する PALSAR-2 のパス 23 に関する自動解析システムにおいては、解析するデータペアのデータ取得期間は 2 年以下と設定することとした。

同様の検討を、伊豆大島に関する PALSAR-2 のパス 18（南行軌道、右方向視）に関しても行った。テスト解析に用いるデータは、2014 年 12 月 4 日から 2019 年 11 月 28 日までに SM1（帯域幅 80MHz）の観測モードで取得された 28 データである。伊豆大島の山腹は極めて濃い植生に覆われているため、その影響による干渉性劣化が著しい。そこで、SAR 干渉解析におけるルック数をグランドレンジでおおよそ 45m になるように設定し、解析結果の出力メッシュを 2 秒（約 60m）とした。SAR 画像のほとんどは海域であり、経験的に、そのような海域が多いデータの解析においては解析誤差が出やすいことが知られているため、伊豆大島付近を切り出して解析を行うように設定した。また、陸域が狭い画像の解析においては、電離圏遅延の推定を精度よく行えない場合があり、また、小領域での電離圏遅延は、ほとんどの場合に一様に傾く成分と

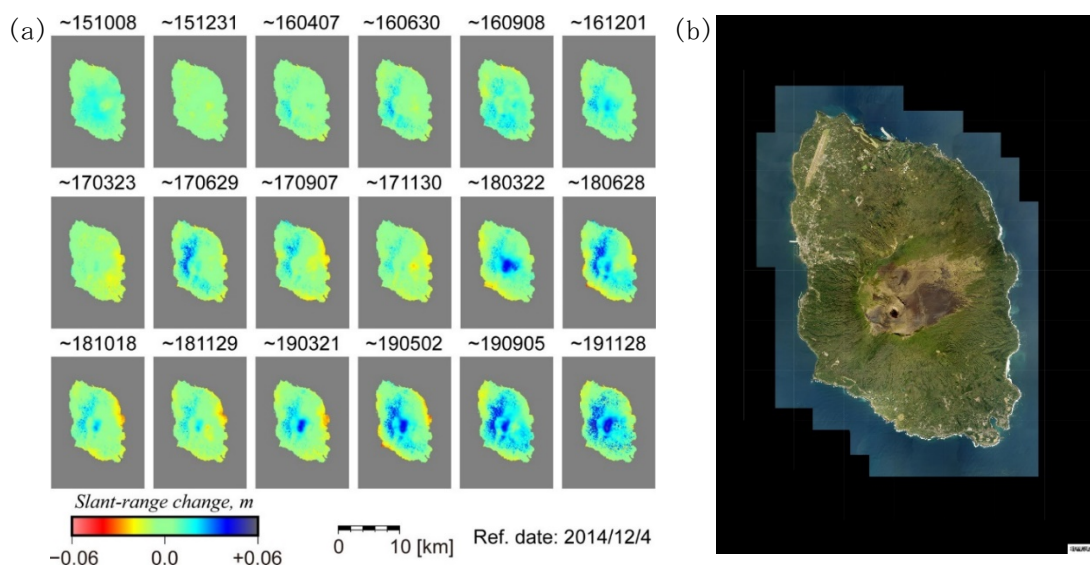


図 28. (a)伊豆大島に関する PALSAR-2 のパス 13（南行軌道、右方向視）に関して構築した、自動解析システムのプロトタイプで得られたスラントレンジ変化時系列。(b)画像範囲の航空写真（地理院地図）。

して近似できることから、ここでは電離圏遅延成分の推定処理を行わないこととした。以上の解析から、図 28 に示す結果が得られている。伊豆大島については、この結果を示すのみとする。

#### b) データベース公開方法に関する検討

前述したように、衛星 SAR による観測毎の地殻変動を格納し、長期間の地殻変動を得るためには、その期間の地殻変動情報を積算して求める。その公開方法については、課題 A と連携して検討した。

JVDN において火山名と期間を入力（図 29 の①、②）して検索すると、その期間において利用可能な SAR データが表示される（図 29 の③）。それらの中から、必要とする期間のデータの横に表示されているボックスにチェックすると（図 29 の④）、それらを積算した結果が表示される。さらに、”ダウンロード”を選択すると、その積算した結果を取得することができる。データのフォーマットは Generic Mapping Tools (GMT) ver. 4 (Wessel and Smith, 1998) で作成したグリッドファイル (netcdf) であり、そのまま GMT の `grdimage` で描画することが可能である。また、GMT のコマンド `grd2xyz` で緯度、経度、スラントレンジ変化量のアスキーデータ、および、ヘッダーなしのバイナリーデータに変換することも可能である。さらに、これらのデータを解釈するためには、レーダーの入射方向ベクトルが必要であり、そのデータも同フォーマットでダウンロードデータに含まれる。

時系列データ以外に、火山活動の活発化が観測された場合などには、自動解析とは別に、解析を行う場合がある。そのような場合は、イベントデータとして検索される。これは自動解析システムから得られる時系列データと異なり、地殻変動量の積算は行わない。

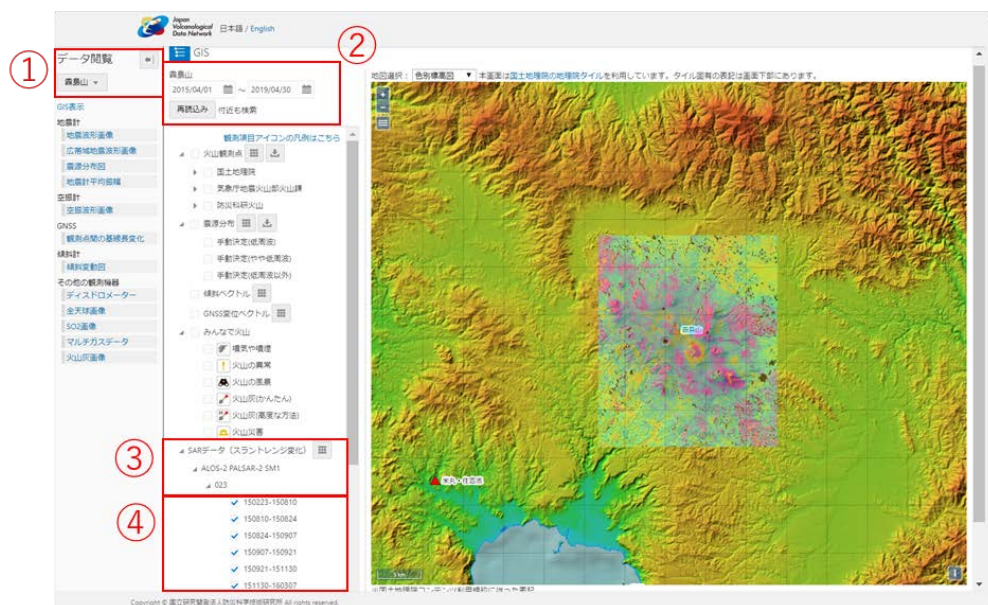


図 29. JVDN 検索画面

c) SAR を用いた事例研究

標準的解析手法の検討、将来のデータベース化、および、その利用方法に関する検討に向けた火山研究事例として、草津白根山、三宅島、浅間山、および、2019 年に大規模な噴火が発生したフィリピンのタール火山に解析を行った。それらの事例研究についての報告を以下に述べる。

i) 草津白根山に関する事例研究

地殻変動研究事例として、草津白根山に関する衛星 SAR の解析を行った。草津白根山における主な活動としては、主に湯釜付近における断続的な地震活動の高まりと、本白根山における 2018 年水蒸気噴火が挙げられる。本解析においては、ALOS/PALSAR (L-band、2006-2011 年)、ALOS-2/PALSAR-2 (L-band、2014-2019 年)、Sentinel-1 (C-band、2014-2019 年) のデータから地殻変動時系列を求めたい。衛星 SAR データを用いた地殻変動の時系列変化を推定する手法として Stacking 法や PS-InSAR 法などの SAR 時系列解析の手法が知られているが、本解析では Multi-temporal InSAR (MTI) 法を適用した。MTI 法は SAR 時系列解析の中でも解析者のバイアスが生じにくく、微小変動と誤差の分離に有効であることが知られている。MTI 法は複数の異なる撮像間隔の干渉画像を作成し、最小二乗法によって各画像撮像間隔における平均変位速度を推定する。単一の干渉画像を足し合わせる Stacking 法と比較して、対流圏伝搬遅延といった規則性なく現れる誤差を有効的に低減させることが期待される。本解析では時系列解析に適用したすべての干渉画像において干渉性を示す coherence が 0.1 を上回った点のみを信頼性の高い地点における地殻変動データとして保持し、coherence は 0.1 を下回った点においては信頼性の低い点として mask した。

衛星 SAR データを用いて草津白根山における地殻変動の時系列変化を推定する際に、夏季の植生の隆盛（主に本白根山周辺）と冬季の積雪が干渉性の低下を誘因すると予想される。一方、比較的波長が長いレーダー波を用いて SAR データを撮像する L-band SAR は時間基線長が大きくとも干渉性を維持することが期待される。これは L-band マイクロ波は葉や枝を透過しやすいために植生の盛衰に伴う散乱特性の変化に鈍感で、かつ冬季の積雪のより深い領域まで透過するため表面融解などに伴う散乱特性の変化に鈍感な特徴を持つためである。したがって衛星 SAR による草津白根山の地殻変動の時系列変化を推定するうえで、L-band マイクロ波を使用してデータを撮像する ALOS/PALSAR, ALOS-2/PALSAR-2 データが有効であると期待される。またマイクロ波周波数による干渉性低下の程度を比較するために C-band マイクロ波を採用する Sentinel データを用いた解析も行った。3 つの SAR センサーが撮像したデータに SAR 時系列解析を適用したところ、PALSAR と Sentinel データに関しては有意な地殻変動の時系列変化を推定することができなかった。詳細は後述する。明瞭な地殻変動の時系列変化を明らかにした PALSAR-2 データ（2014-2019 年）の解析結果を湯釜周辺と本白根山に区別して詳細を以下に述べる。

PALSAR-2 時系列解析の結果を図 30 に示す。湯釜周辺では 2014-2015 年において



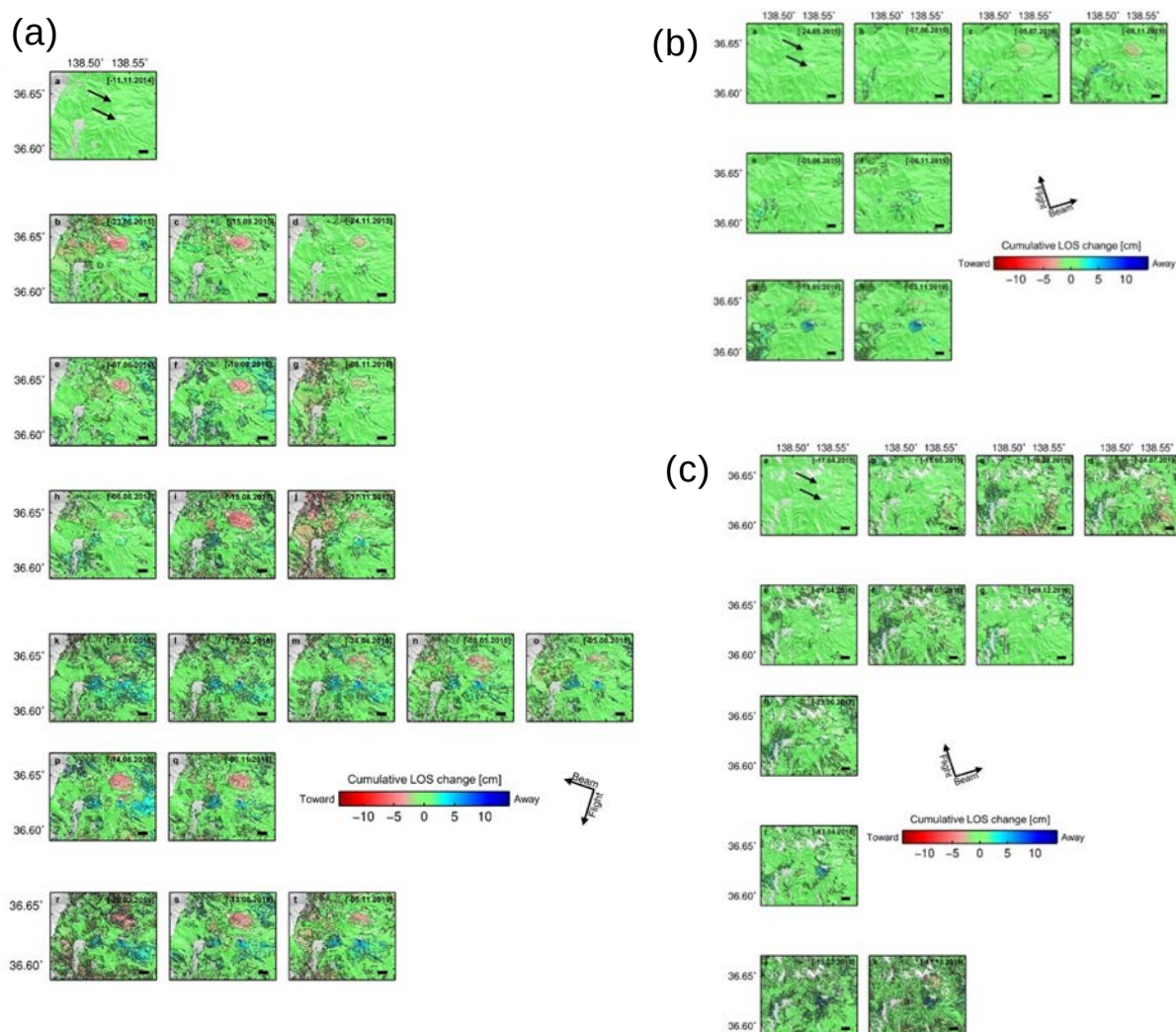


図 30. 草津白根山に関する PALSAR-2 の解析結果. 右下黒線は 1km のスケール。(a)パス 19 の時系列解析の結果. 結果内の黒矢印で湯釜 (黒矢印上) と本白根山 (黒矢印下) の位置を示した。(b)パス 125 の時系列解析の結果。(c)パス 126 の時系列解析の結果。

2cm 程度の衛星地表距離の短縮が観測され、その後 2016 年にかけて減衰しているように見える。観測された地殻変動のうち上下成分が優位と考えると、衛星地表距離の短縮は隆起と解釈できる。2014-2015 年における隆起は傾斜計による観測も指摘していることから、観測された衛星地表距離の短縮は信頼性の高い結果といえる。2016 年以降も湯釜周辺における衛星視線距離の短縮が断続的に観測された。一方、傾斜計の結果は有意に地殻変動が生じていたことを示していなかった。したがって、2016 年以降に湯釜周辺で観測された変位は SAR による観測特有の信号である可能性がある。湯釜周辺では植生が乏しく、浅部熱水系が発達しており、L-band SAR を使用していることから土壌水分量の変化を反映している可能性も排除できない。一方、湯釜周辺で観測された衛星地表距離短縮の信号が現れた範囲は観測期間を通しておおむね一致している。したがって、更なる結果の精査とその他の観測結果との比較を通して、検出された地表変位の信頼性と結果の解釈をする必要がある。本白

根山では主に 2018 年に水蒸気噴火に伴う明瞭な地殻変動が観測された。これは衛星地表距離が最大 8cm 程度の伸長が、西北西-東南東方向に分布する火口列の南東側に分布していることを示した。噴火後から 2019 年末にかけて噴火時の地殻変動の傾向が 2-3 cm 程度進行していたことを明らかにした。2018 年噴火以前では顕著な地殻変動は検出されなかった。

PALSAR データを用いた草津白根山における地殻変動の時系列変化は、草津白根山周辺で干渉性が保たれていた画像ペアのみを選択することによって推定した（図 31）。PALSAR データについて L-band SAR の長所を生かせることが期待されたものの、ALOS 衛星の空間基線長の大きさが干渉性の低下をもたらした。その結果、MTI

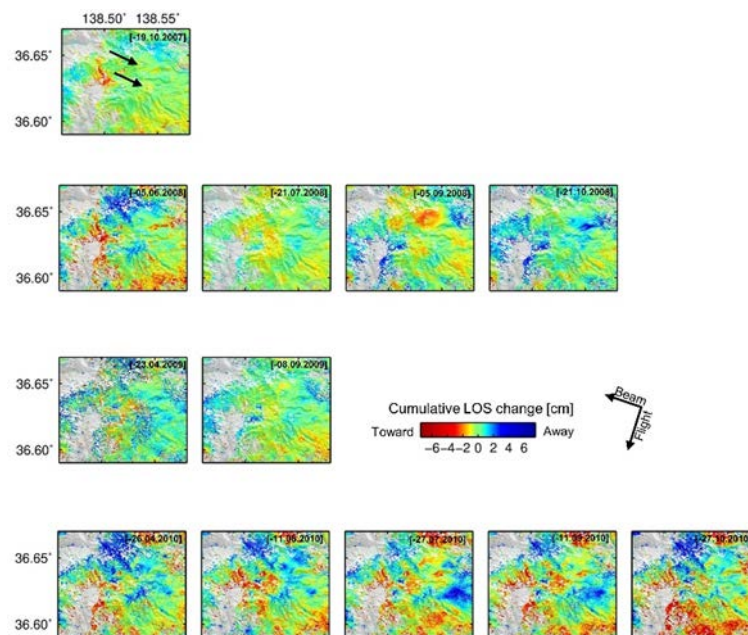


図 31. PALSAR のパス 60 に関する時系列解析結果。

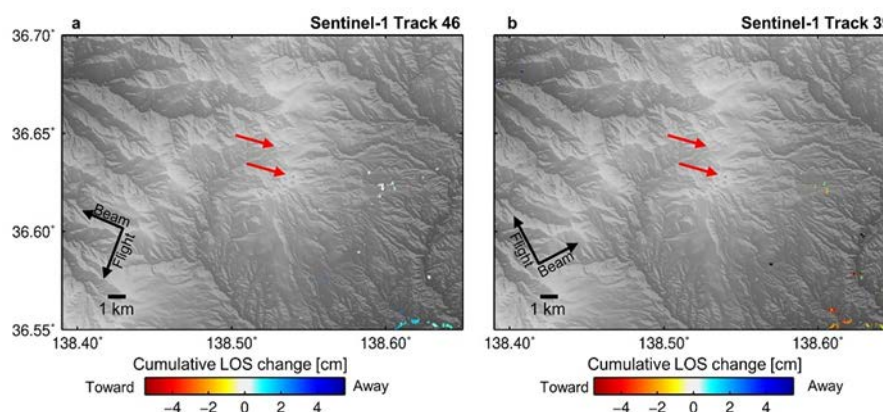


図 32. Sentinel-1 のトラック 46（2014 年 11 月 30 日-2019 年 12 月 22 日）とトラック 39（2015 年 4 月 30 日 - 2019 年 12 月 11 日）の時系列解析より求めた累積衛星地表編距離変化量。赤矢印は湯釜と本白根山の位置を示す。

法を適用して平均変位速度を推定するために用いるデータの数に限られてしまった。また coherence は 0.1 を上回ったものの、干渉性が低い領域における誤差が大きく、火山活動に起因しない信号が現れてしまっていた。これらの結果からは草津白根山における顕著な地殻変動を検出することはできなかった。

Sentinel-1 データを用いた時系列解析の結果は冒頭で述べた植生と積雪の影響による干渉性の低下が顕著であったため、観測期間を通して連続した地殻変動の時系列変化を推定することができなかった（図 32）。植生が乏しい湯釜周辺においても冬季の積雪の影響で散乱特性の変化による干渉性の低下が顕著であった。本白根山周辺においては冬季の積雪の影響に加えて夏季の植生の隆盛が散乱特性の変化をもたらし、多くの干渉画像で本白根山周辺は非干渉領域となった。時間基線長が 12-48 日の画像ペアを用いて生成した複数撮像間隔の干渉画像 458 枚のうち、本白根山周辺で coherence が 0.1 となった干渉画像は 23 枚であった。主に植生が比較的乏しく積雪量が少ない 4 月と 11 月に観測されたデータに限定されていた。PALSAR と PALSAR-2 データと比較して短い時間基線長のデータを用いて解析を行ったものの、L-band SAR による解析結果と比較して顕著な干渉性の低下によるデータの欠損領域がみられる。この結果からもデータの欠損は時間基線長が短い Sentinel データを用いたとしても、マイクロ波周波数の散乱特性の相違に起因すると推測される。以上の結果の比較からも衛星 SAR データを用いた草津白根山を対象とした地殻変動を検出するためには L-band SAR が有用であることが示された。

## ii) 三宅島に関する事例研究

地殻変動研究事例として、三宅島に関する衛星 SAR の解析を行った。その解析方法は、前述した草津白根山と同様である。ALOS/PALSAR（L-band、2006-2011 年）、ALOS-2/PALSAR-2（L-band、2014-2019 年）、Sentinel-1（C-band、2014-2019 年）に MTI 法を適用し、三宅島における地殻変動の時系列変化を推定した。三宅島では GNSS 連続観測による地殻変動の描像や地震波解析の結果より、カルデラから南東 2km、深さ 5km 付近に変動源マグマ供給源が存在していることが推定されており、マグマ供給源からカルデラに向かう火道は北向きに傾斜した柱状構造であることが報告されている。ALOS/PALSAR と ALOS-2/PALSAR-2 データに MTI 法を適用した結果は、多少の相違はあるものの似た観測幾何であれば、2006-2011 年と 2014-2019 年にかけて空間的特徴と変位速度に顕著な変化はないように見える（図 33）。

三宅島全体は GNSS 観測により三宅島東部で水平西向き変位、三宅島西部で隆起が卓越していることが明らかにされている（図 34）。ここでは PALSAR-2 データを用いた三宅島における衛星地表距離の平均変位速度について、南行軌道の Path18 では三宅島の広い範囲で衛星地表距離の短縮領域が卓越しており水平東向き変位と隆起に起因すると考えられるが両者を分離することが困難である。一方、北行軌道の Path125 では三宅島東部で衛星地表距離の伸長領域が、三宅島西部で衛星地表距離の短縮領域が観測された。これはそれぞれ水平東向き変位と隆起の比の違いを反映しているものと考えられる。両者の観測時期はほぼ同一期間であるため、2 方向

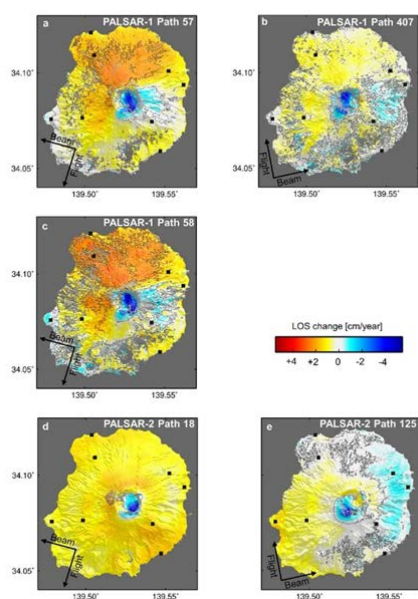


図 33. PALSAR のパス 57、58、407  
と PALSAR-2 のパス 18、125  
に関する時系列解析結果。

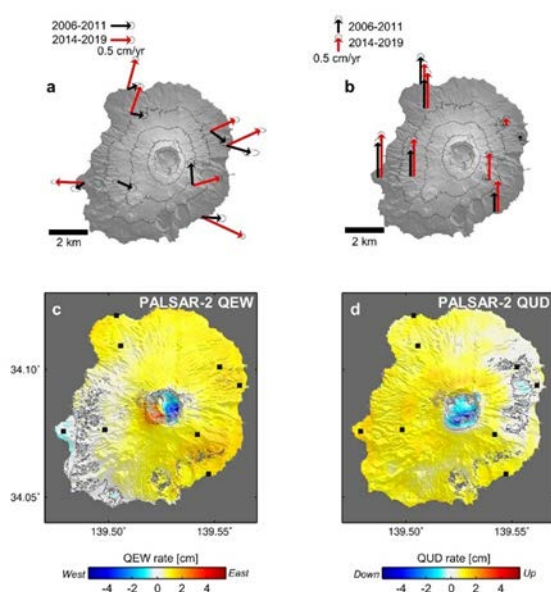


図 34. 観測期間における GNSS から求めた  
平均変位速度 (a: 水平変位, b: 上下  
変位) と PALSAR-2 時系列解析により  
推定した東西変位 (c) 上下変位 (d)  
の平均変位速度。

から観測された平均変位速度に対して、2 方向の衛星視線単位ベクトルがなす（およそ 8 度南に傾斜した）平面上におけるほぼ東西成分とほぼ上下成分に分離することができる。GNSS 連続観測による結果と比較すると、水平成分と上下成分のいずれの空間的特徴ともおおむね整合している。

山頂カルデラにおいては ALOS/PALSAR データが撮像されたいずれの期間、いずれのパスにおいても衛星-地表間距離が伸長する変位が明らかになった。これはカルデラが継続して沈降していることを示唆している。カルデラにおける沈降量の最大の位置に注目すると ALOS/PALSAR が撮像した 2006-2011 年ではカルデラ中央に位置しているのに対して、ALOS-2/PALSAR-2 ではカルデラ南端に沈降の最大が位置しているように見える。カルデラ中央部は 2000 年噴火に伴ってカルデラ形成の開始地点、カルデラ南端は噴気を伴う火孔が位置している。カルデラ南縁においても衛星地表距離の伸長がみられ、沈降が継続していると考えられる。

Sentinel-1 データに MTI 法を適用した結果は L-band SAR を用いた場合と比較して、多くの領域でデータの欠損がみられた（図 35）。一方、カルデラ底では衛星地表間距離の伸長量がカルデラ中央からカルデラ南端にかけて大きくなる描像を見ることができる。カルデラ底における変動の空間的特徴は L-band SAR に MTI 法を適用した結果と整合しているように見える。本解析では Sentinel データは最短 12



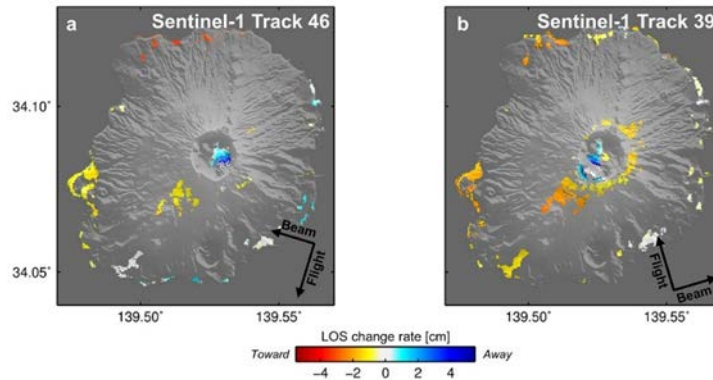


図 35. Sentinel-1 のトラック 46 とトラック 39 に関する時系列解析結果。

日間隔、最長 48 日間隔で撮像されたデータを使用しており、散乱特性の時間変化による干渉性劣化は比較的小さいことが予想された。しかし、C-band のような短波長のマイクロ波は葉や枝で散乱しやすい特性を有するので、三宅島の大部分を覆っている植生が C-band SAR データによる観測結果における干渉性の維持を妨げると考えられる。三宅島の山頂付近と海岸部の集落を除いて濃い植生に覆われているため、C-band のような短波長マイクロ波では干渉性が保たれないことが示された。

以上より、三宅島を観測対象とした衛星 SAR による地殻変動の時系列変化は主にカルデラにおける沈降様式の空間的变化を捉えることができ、何らかの浅部火道内の圧力環境が変化したことを示唆している。一方、沈降が継続していることから直ちに噴火の切迫性を示す傾向ではないと言える。この沈降量の最大の位置が移動した決定的なメカニズムの提案には至っておらず、今後、衛星 SAR の結果の解釈を補助するために他項目の観測結果との照らし合わせによる追跡調査が必要である。

### iii) 浅間山に関する事例研究

衛星 SAR を用いた火山研究事例として、浅間山に関する解析を行った。浅間山においてはこれまでの地震・地殻変動・電磁気観測などにより、活動期には山頂西側でダイク貫入が発生し、マグマは水平移動と鉛直移動を経て山頂に至り、噴火が発生するという描像があきらかになってきた。しかし、山頂付近に GNSS 観測点が 2 点しかないために、山頂付近の地殻変動場は明らかになっていなかった。そこで我々は SAR 時系列解析により 2014 年から 2018 年にかけての浅間山頂付近の地殻変動場を明らかにした。我々は Sentinel-1 および ALOS-2 を用いて persistent scatterer および distributed scatterer の位相変化を追っていくことにより変動場の抽出を試みた。浅間山の山腹は濃い植生に覆われており、Sentinel-1 では山頂付近でしか変動場を求めることができなかった（図 36(a) の点線で囲った範囲内）。しかし、Sentinel-1 は観測頻度が高いという利点がある。2014 年から 2018 年にかけては顕著な変動場の変化は観測されなかったため、4 年の平均的な変動場を求めることに集中した。

得られた変動場を図 36 に示す。山頂北東部と山頂南東部で最大 7 mm/yr 程度の



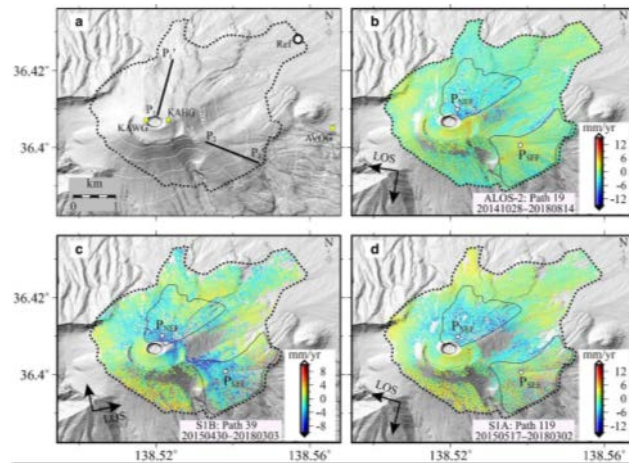


図 36. 浅間山周辺において InSAR 時系列解析により求められた変位速度。  
 (a) 地形の陰影図。(b) ALOS-2 下降軌道からの画像から求めた変位速度。  
 (c) Sentinel-1 上昇軌道からの画像から求めた変位速度。(d) Sentinel-1 下降軌道からの画像から求めた変位速度。

変位速度が見られた。北行軌道からの結果と南行軌道からの結果を組み合わせた結果、山頂北東部は東西方向の変位速度が無視できるほど小さく、観測された視線距離変化は主に沈降によるものであることがわかった。ただし、InSAR 観測からは南北変位への感度はほとんどない。沈降が観測された地域は 1783 年噴火にともなう溶岩流が流出したところであるが、観測された沈降速度は溶岩流の熱収縮と考えるにはあまりにも大きい。そのため、観測された視線距離変化は山頂北東部における局所的な熱水活動によるものか、山体が斜面にそってすべり落ちる山体不安定によるものであると考えられる。北行軌道からの結果と南行軌道からの結果によると、山体南東部の変位は東西への変位と鉛直変位に組み合わせであり、斜面に沿って変位していると考えられる。そのため、観測された山体南東部の変位は山体不安定によるものであると考えられる。しかし、変位速度は最大 7 mm/yr 程度であり、山体崩壊の前兆と考えるにはあまりにも小さい。

本研究は Earth Planets and Space 誌に掲載された (Wang *et al.*, 2019)。

#### iv) タール火山に関する事例研究

タール火山は 2020 年 1 月 12 日に 1977 年以来の噴火が発生した。我々は噴火を挟む時期および噴火直後の ALOS-2 画像を解析した。噴火を挟むペアについては最大 1 メートル以上の明瞭な変動が観測された (図 37)。観測された変動場は北東—南西走向のダイク貫入によって大まかに説明することができるが、詳細な変動場は複雑である。噴火直後の地殻変動は噴火にともなうそれよりも小さいが、最大 200 mm ほどの明瞭な変動が観測された。観測された変動は噴火を挟むペアと同様に北東—南西方向のダイク貫入によって説明できるが、ダイク貫入はより浅部で発生したと思われる。

以上のように、衛星 SAR の解析からタール火山の噴火に伴う地殻変動の概要を知

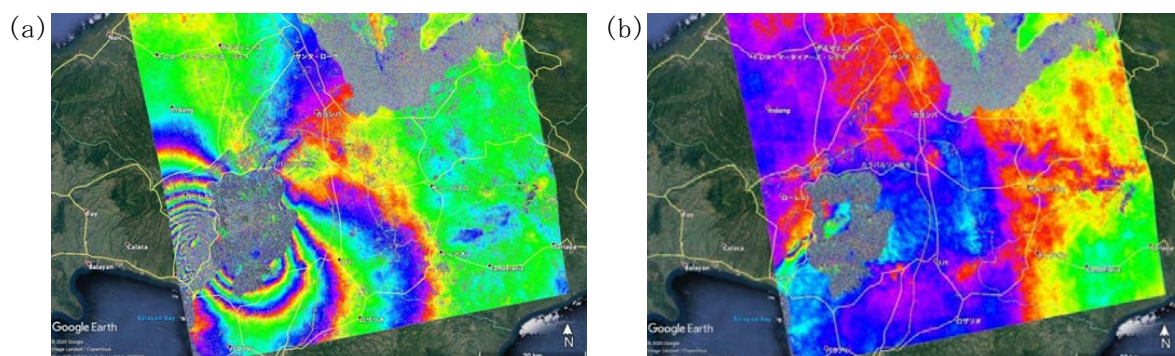


図 37. (a)2019 年 11 月 12 日から 2020 年 1 月 21 日にかけての視線距離変化。視線方向は西南西から東北東である。(b)2020 年 1 月 21 日から 2020 年 2 月 4 日にかけての視線距離変化。視線方向は、(a)と同じ西南西から東北東である。1 フリンジは 11.8 cm に相当する。

ることができた。このような大規模な火山活動は、将来、日本でも発生する可能性があり、そのような場合において迅速な火山活動把握につなげるため、タール火山で発生したような海外における事例についても良く理解しておく必要がある。今後は、SAR 干渉法だけでなく、ピクセルオフセット法なども利用し、大変形が発生した部分の変動場を明らかにすると同時に、三次元地殻変動の検出を試み、他のデータ等も考慮しながら、得られた変動場を説明できるような火山活動モデルの構築を試みる予定である。さらに、2020 年 2 月以降の解析から、噴火後の地殻変動の時間変化を求め、噴火後のマグマ輸送についての知見を得たい。

#### (d) 結論ならびに今後の課題

##### 1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

令和元年度においては、可搬型レーダー干渉計に関する SAR 処理ソフトウェアの改良を行った。この改良により、従来のソフトウェアの解析結果には表れていたノイズが劇的に低減され、さらに解析時間も短縮できた。また、可搬型レーダー干渉計による再設置による繰り返し観測についての計測実験を行い、成功裏に干渉を得ることができた。また、干渉性の時間的持続性についての調査を行い、データ取得期間が約 5 カ月離れているデータペアについても、干渉が得られることが確認された。以上のことから、地上設置方式、車載方式による観測については、ほぼ実用的に利用可能なレベルにまで開発が進んだと言える。特に、地上設置方式に関しては、現在のハードウェア仕様を基本として、実利用化フェーズに移行する。さらなる精度向上を目的とした受信感度の向上のため、アンテナ素子を 4 つ並べた高感度アンテナを作製し、3dBi のアンテナ利得の向上が確認された。野外観測での性能を評価するため、筑波山を対象にして計測実験を行ったが、外来波の影響が大きく、その性能の確認には至らなかった。その確認については、今後の課題とする。これに加え、チャープ波を生成するシステムのノイズの低減も含めて、ハードウェアの改良を進めていく予定である。これらの改良は、実利用化のための観測と並行して進める予定である。また、新たな観測方式として、人力で運搬すること

が可能な Manborne SAR 方式の開発にも着手し、その実験的なシステムを作製した。作製した観測システムを用いた計測実験を行ったが、精度の良い SAR 画像は得られなかった。これはアンテナの動揺の補正が十分でないことによると推測されるが、その調査については今後の課題とする。これらの課題の解決は、Manborne SAR 方式だけでなく、地上設置方式や車載方式による観測についての精度向上も期待される。

火山観測用可搬型レーダー干渉計の実用に向けた地殻変動検出の試みとして、火山活動が比較的活発な霧島山の新燃岳と硫黄山において、計測実験を試みた。その結果、1 日間の短期間においては、高い干渉性が得られることを確認した。令和 2 年度に再観測を行い、地殻変動検出を試みる予定である。

## 2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

令和元年度においては、これまでに検討した大気遅延、電離圏遅延誤差の軽減手法等を組み込んだ自動解析システムのプロトタイプを、霧島山と伊豆大島に関する PALSAR-2 データの解析を例として構築した。干渉画像作成時のルック数や最終結果のメッシュサイズ、干渉画像フィルターの強度、解析するデータペアのデータ取得期間の上限などを、解析地域やデータの特性に合わせて設定することにより、自動的にスラントレンジ変化時系列を求めることができた。今回構築した自動解析システムをベースとして、他の火山、データについて構築し、来年度以降に課題 A で進めている一元化共有システム JVDN において、データベース化を進める予定である。公開方法については課題 A と連携して検討し、現時点で、テスト解析した霧島山と伊豆大島の結果を公開している。一方、現在の自動解析システムで得られるスラントレンジ変化時系列には、補正しきれなかった大気遅延や電離圏遅延成分が 5cm 程度にまで達する場合があります、その軽減方法については今後も継続して検討を続け、安定的に適用可能になれば、自動解析システムへの組み込み、もしくは、ソフトウェアの公開によって、対応する予定である。

標準的解析手法の検討、将来のデータベース化、および、その利用方法に関する検討に向けた火山研究事例として、草津白根山、三宅島、浅間山、および、2019 年に大規模な噴火が発生したフィリピンのタール火山に解析を行った。草津白根山の解析においては、湯釜と本白根山周辺において有意な地殻変動が検出された。特に本白根山周辺で見られた地殻変動は 2018 年の水蒸気噴火以降に見られ、噴火発生メカニズムの理解に役立つ情報が得られた。また、Sentinel-1 データを用いた解析も試みたが、植生による影響と考えられる干渉性劣化が顕著であった。この結果に基づき、データベース作成においては、Sentinel-1 のデータは、火山活動の活発化時等に臨時的な解析に限定し、有意な地殻変動が検出された場合には、イベントデータとして JVDN で公開する。

三宅島の解析においては、2006 年から 2011 年まで運用された ALOS の PALSAR データと 2014 年から運用が開始された ALOS-2 の PALSAR-2 データを解析し、地殻変動の時間変化を調査した。特に、山頂カルデラ内に見られた沈降に注目すると、ALOS の解析結果ではその中心がカルデラ底の中央付近であったのに対して、ALOS-2 の解析結果ではカルデラ底の南端付近であった。以上の結果から、ALOS、ALOS-2 のデータから長期的な地殻変動の変遷を見ることができることを示した。

浅間山の解析においては、persistent scatterer および distributed scatterer を用いた高度解析手法を適用し、山頂北東部と南東部に最大 7mm/yr 程度の変化が検出された。山頂北東部の変位については、局所的な熱水活動によるものか、山体が斜面にそってすべり落ちる山体不安定によるものであると考えられ、山体南東部の変位については山体不安定によるものであると推測される。データベース化においては、一般的な SAR 干渉法を用いた解析だが、このような高度解析手法を用いることによって、mm/yr レベルの小さな変動も捉えられる可能性がある。次世代のデータベースに向け、このような解析手法についての検討も進めていきたい。

タール火山は 2020 年 1 月 12 日に大規模な噴火が発生し、その噴火活動に伴う地殻変動を調査したところ、最大で 1 メートルを超える明瞭な地殻変動が検出された。しかし、その地殻変動の空間分布は複雑であり、詳細なモデルの構築が必要である。このような事例解析を通じて、将来の迅速な火山活動把握につなげたい。

#### (e) 引用文献

- 1) 飛田幹男, 藤原智, 村上亮, 中川弘之, Paul A. Rosen, 干渉 SAR のための高精度画像マッチング, 測地学会誌, 45, 315-326, 1999.
- 2) Gatelli, F., A. M. Guamieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati, and F. Rocca, The wavenumber shift in SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 32, 4, 855-865, doi: 10.1109/36.298013, 1994.
- 3) Ozawa, T., Y. Aoki, S. Okuyama, X. Wang, Y. Miyagi, and A. Nohmi, Database of Crustal Deformation Observed by SAR: Improving Atmospheric Delay Mitigation for Satellite SAR Interferometry and Developing L-Band Multi-Type Portable SAR, J. Disast. Res., 14, 713-727, doi: 10.20965/jdr.2019.p0713, 2019.
- 4) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113pp., doi: 10.5065/D68S4MVH, 2008.
- 5) Brcic, R., A. Parizzi, M. Eineder, R. Bamler, and F. Meyer, Estimation and compensation of ionospheric delay for SAR interferometry, in Proc. IEEE IGARSS, 2908-2911, 2010.
- 6) Rosen, P., S. Hensley, and C. Chen, Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band interferometric SAR data, in Proc. IEEE Radar Conf., 1459-1463, 2010.
- 7) Gomba, G., A. Parizzi, F. De Zan, and M. Eineder, Toward operational compensation of Ionospheric effects in SAR Interferograms: The split-spectrum method, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 54, 1446-1461, 10.1109/TGRS.2015.2481079, 2016.
- 8) Goldstein, R. M. and C. Werner, Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophys. Res. Lett., 25, 4035-4038, 1998.
- 9) 奥山哲 (2010) ブランチカット法で生じた SAR 干渉画像中のアンラップエラーの修

正、測地学会誌, 56, 149-153, 2010.

- 10) Chen, C. W. and H. A. Zebker, Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, J. Opt. Soc. Am. A, 17, 401-414, 2000.
- 11) Chen, C. W. and H. A. Zebker, Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization, J. Opt. Soc. Am. A, 18, 338-351, 2001.
- 12) Chen, C. W. and H. A. Zebker, Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 40, 1709-1719, 2002.
- 13) Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens., 40:2375-2383, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>, 2002.
- 14) Wang, X., Y. Aoki, and J. Chen, Surface deformation of Asama volcano, Japan, detected by time series InSAR combining persistent and distributed scatterers, 2014-2018, Earth Planets Space, 71:121, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1104-9>, 2019.
- 15) Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998), New, improved version of generic mapping tools released, EOS Trans. AGU 79(47), 579.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

| 著者                                                                              | 題名                                                                                                                                                                                       | 発表先                        | 発表年月<br>日         |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Ozawa, T., Y.<br>Aoki, S.<br>Okuyama, X.<br>Wang, Y.<br>Miyagi, and<br>A. Nohmi | Database of Crustal<br>Deformation Observed by SAR:<br>Improving Atmospheric Delay<br>Mitigation for Satellite SAR<br>Interferometry and Developing<br>L-Band Multi-Type Portable<br>SAR | J. Disast. Res.            | 令和元年 8<br>月 1 日   |
| Xiaowen Wang,<br>青木陽介, Jie<br>Chen                                              | Surface deformation of Asama<br>Volcano, Japan, detected by<br>time series InSAR combining<br>persistent and distributed<br>scatters, 2014-2018                                          | Earth Planets and<br>Space | 令和元年<br>11 月 14 日 |
| 小澤拓                                                                             | SAR 干渉法における電離圏遅延<br>推定：分割スペクトル二重差分<br>干渉画像を用いた手法の有用性                                                                                                                                     | JpGU2019                   | 令和元年 5<br>月 27 日  |



|                               |                                                                                                                                                                     |                               |                    |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 青木陽介,<br>Xiawen Wang          | 合成開口レーダーにより観測された有珠山溶岩ドームの収縮:<br>1992-2017 年                                                                                                                         | JpGU2019                      | 令和元年 5<br>月 28 日   |
| 姫松裕志, 小<br>澤拓, 青木陽<br>介       | PALSAR-1/2 による草津白根山に<br>おける地殻変動の時系列変化:<br>2018 年白根山噴火に伴う地殻変<br>動と力源推定                                                                                               | 日本火山学会 2019<br>年度秋季大会         | 令和元年 9<br>月 25 日   |
| 小澤拓, 姫松<br>裕志                 | 火山観測用可搬型レーダー干渉<br>計の開発                                                                                                                                              | 日本火山学会 2019<br>年度秋季大会         | 令和元年 9<br>月 26 日   |
| 姫松裕志, 小澤<br>拓                 | PALSAR-1/2 SBAS 法による三宅<br>島のカルデラ沈降様式の時系列<br>変化                                                                                                                      | 日本測地学会 132 回<br>講演会           | 令和元年<br>10 月 31 日  |
| 小澤拓, 姫松<br>裕志                 | 火山観測用可搬型レーダー干渉<br>計の開発                                                                                                                                              | 日本測地学会 132 回<br>講演会           | 令和元年<br>10 月 29 日  |
| Himematsu, Y.<br>and T. Ozawa | Post-seismic crustal<br>deformation of Aso volcano<br>associated with the 2016<br>Kumamoto earthquake sequence<br>based on ALOS-2/PALSAR-2<br>time-series analysis. | AGU Fall Meeting<br>2019      | 令和元年<br>12 月 9 日   |
| 小澤拓, 實渕<br>哲也                 | リモートセンシングを活用した<br>火山観測技術の開発                                                                                                                                         | 次世代火山研究推<br>進事業 令和元年度<br>研究集会 | 令和 2 年 2<br>月 15 日 |

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

可搬型レーダー干渉計の観測データを解析するソフトウェアを改良した。

### (3) 令和 2 年度業務計画案

#### 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（地上設置方式と車載（台車）方式、手動方式）を選択して観測を実施し、火山周辺の地表変動を効率的に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より、現時点で、車載（台車）方式やレールの再設置によって得られた観測データへの SAR 干渉法の適用に成功している。しかし、現時点では、SAR 画像に重畳するノイズが顕著に表れる場合があり、その低減が課題の一つとなっている。そこで、令和 2 年度においては、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採用することによる信号対雑音比の改善についての実験を行う。また、繰り返し観測による干渉性の持続性や位相の安定性を調査することを目的とした計測実験を前年度から実施しており、その繰り返し観測実験を継続して実施する。特に、前年度に霧島山においても観測を実施したので、その再観測を行い、SAR 干渉法による地表変動検出を試みる。この霧島山における観測においては、観測後 24 時間以内に解析結果を共有システム等に転送することを目的としたテストを実施する。さらに、2019 年度に開発した手動方式による観測機能を用いた計測実験を行い、その有用性を確認する。改良すべき点が明らかになった場合には、今後の改良方法について検討する。

#### 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）に基づいて衛星 SAR データの解析を行う。令和 2 年度においては、前年度に構築した標準解析手法を用いた自動解析システムのプロトタイプをベースとして、2-4 年次に解析した 6 火山（霧島、桜島、伊豆大島、有珠山、草津白根、三宅島）に関する解析システムを構築するとともに、過去の観測データについても再解析を実施し、その解析結果を一元化共有システムに提供する。また、だいち 1 号の PALSAR およびだいち 2 号の PALSAR-2 データを用いた蔵王の解析を実施する。さらに、PIXEL で共有している衛星 SAR データを、本業務で利用するためのサーバーを継続して運用する。

### 3. 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      課題 B   先端的な火山観測技術の開発  
                         サブテーマ 2   リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発  
                         2-2   火山表面現象遠隔観測技術の開発

#### (b) 担当者

| 所属機関                            | 役職    | 氏名     | メールアドレス            |
|---------------------------------|-------|--------|--------------------|
| 国立研究開発法人防災科学技術研究所<br>火山研究推進センター | 主任研究員 | 實 渕 哲也 | jitu@bosai.go.jp   |
|                                 | 主任研究員 | 三 輪 学央 | miwao@bosai.go.jp  |
|                                 | 契約研究員 | 長 井 雅史 | mnagai@bosai.go.jp |

#### (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 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：

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

2) 平成 29 年度：

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

3) 平成 30 年度：

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

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

4) 平成 31 (令和元) 年度 :

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築 : スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS)、VGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14  $\mu$  m) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14  $\mu$  m) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) を構築し、それらを一体化したプロトタイプ・構造 (SPIC-UC/SS) を完成させる。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築 : スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS)、MWIR (3~5  $\mu$  m) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5  $\mu$  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) を構築し、それらを一体化したプロトタイプ (SPIC-C/SS) を完成させる。
- ・ 画像分光用前置光学系 : プロトタイプの構築を行う。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) を完成する。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ (アルゴリズム開発) : 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。

5) 令和 2 年度 :

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



6) 令和 3 年度 :

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築 : VGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14  $\mu\text{m}$ ) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{m}$ ) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{m}$ ) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5  $\mu\text{m}$ ) 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 ( $8\text{--}14\mu\text{m}$ ) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 ( $8\text{--}14\mu\text{m}$ ) 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 ( $3\sim 5\mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR ( $7.5\sim 9.5\mu\text{m}$ ) 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 ( $8\text{--}14\mu\text{m}$ ) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 ( $8\text{--}14\mu\text{m}$ ) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC)、MWIR ( $3\sim 5\mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR ( $7.5\sim 9.5\mu\text{m}$ ) 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)、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) 令和元年度業務目的

令和元年度は、当初計画通り、昨年度までに開発した SPIC の各要素技術を一体化した、SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS のプロトタイプの実現のための開発を実施する。また、スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測とスペクトルデータ

ベースフォーマットの検討を行う。これらを遂行する為に、以下を実施する。

#### 1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

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  $\mu\text{m}$ ) 型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14  $\mu\text{m}$ ) 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) を完成させる。スペクトル推定カメラ (SPIC-SS) 及び MWIR (3~5  $\mu\text{m}$ ) 領域と LWIR (7.5~9.5  $\mu\text{m}$ ) 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) を完成させる。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) を完成する。

具体的には、H30 年度までに試作した SPIC-UC の非冷却型 LWIR (8-14  $\mu\text{m}$ ) 領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッド、SPIC-C の MWIR (3~5  $\mu\text{m}$ ) 領域と LWIR (7.5~9.5  $\mu\text{m}$ ) 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する。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する。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する。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フォーマットの検討を行う。

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う。

## (2) 平成 31（令和元）年度の成果

### (a) 業務の要約

昨年度までに開発した SPIC の各要素技術を一体化した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS のプロトタイプの実現として、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  $\mu\text{m}$ ）型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14  $\mu\text{m}$ ）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。また、スペクトル推定カメラ（SPIC-SS）及び MWIR（3～5  $\mu\text{m}$ ）領域と LWIR（7.5～9.5  $\mu\text{m}$ ）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。また、各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）を完成させた。

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  $\mu\text{m}$ ）領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッド、SPIC-C の MWIR（3～5  $\mu\text{m}$ ）領域と LWIR（7.5～9.5  $\mu\text{m}$ ）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。

また、スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測として、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。

### (b) 業務の成果

#### 1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和元年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各要素技術（カメラセンサーヘッド、分光装置）を一体化した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS のプロトタイプの実現として、a) SPIC-UC、SPIC-C のカメラセンサーヘッド（要素技術）による  $\text{SO}_2$  計測精度のシミュレーションによる評価、b) 開発した各カメラのセンサーヘッドによる画像取得試験、c) 各装置の要素技術を統合した各装置のプロトタイプの概念設計、d) 各装置のプロトタイプ製作、e) 各装置のプロトタイプの試験画像取得、f) 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の開発を実施した。

以下の表 1～6 に、上述の a)、b) の評価に用いた、昨年度までに開発した各要素技術（カメラセンサーヘッド、分光装置）の主な諸元を示す。

表 1 SPIC-UC カメラセンサーヘッドの主な諸元 (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) | 9000～<br>14000nm         | 8370～8920nm |
| 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                     | 0.6K        |
| 本体サイズ、重量      | 33×33×27.5mm、 175gf      |             |

表 2 SPIC-UC カメラセンサーヘッドの主な諸元 (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) | ～10500nm                 | Filter less、8000～<br>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℃)   | 0.12K                    | 0.06K                        |
| 本体サイズ、重量      | 33×33×27.5mm、 175gf      |                              |

表 3 SPIC-UC (XGA 型) カメラセンサーヘッドの主な諸元

| センサーヘッド     | SPIC-UC (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           |
| 感度波長域       | 8000～14000nm<br>(フィルター1枚搭載可)        |
| 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      | F0V 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV 0.348mrad |
| NETD (@25℃) | 0.1K (@60fps)                       |
| 本体サイズ/重量    | 86×86×212mm、 1.5kgf                 |
| 保護ハウジング     | IP67 対応                             |



表 4 SPIC-C (MWIR) カメラセンサーヘッドの主な諸元

|             |                                                                                                             |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| センサーヘッド     | FAST M350 (Telops 社製)                                                                                       |
| センサータイプ     | 冷却型 InSb、640×512 素子                                                                                         |
| 冷却          | スターリングクーラー (センサー動作温度 77K)                                                                                   |
| 感度波長域       | 3000～5000nm                                                                                                 |
| フィルター       | 内蔵型電動フィルターホイール (4 枚搭載可)<br>フィルターF1 :BBP-3040-4500nm<br>フィルターF2 :BBP-3440-4075nm<br>フィルターF3 :BBP-4000-5000nm |
| フレームレート     | フルフレーム最大 357fps (同期可能)                                                                                      |
| A/D         | 14bit                                                                                                       |
| レンズ         | f=25mm/F3.0                                                                                                 |
| NETD (@25℃) | 16mK                                                                                                        |
| 重量          | 6kg (レンズ無)                                                                                                  |
| 本体保護ハウジング   | IP54 (レンズ部を除く)                                                                                              |

表 5 SPIC-C (LWIR) カメラセンサーヘッドの主な諸元

|             |                                                                                                  |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| センサーヘッド     | FAST-L200 (Telops 社製)                                                                            |
| センサータイプ     | 冷却型 MCT、640×512 素子                                                                               |
| 冷却          | スターリングクーラー (センサー動作温度 77K)                                                                        |
| 感度波長域       | 7700～9300nm                                                                                      |
| フィルター       | 内蔵型電動フィルターホイール (4 枚搭載可)<br>フィルターF1 :LPF-8110nm<br>フィルターF2 :LPF-8650nm<br>フィルターF3 :BPF-8645-550nm |
| フレームレート     | フルフレーム最大 200fps (同期可能)                                                                           |
| A/D         | 14bit                                                                                            |
| レンズ         | f=25mm/F1.4                                                                                      |
| NETD (@25℃) | 19mK                                                                                             |
| 重量          | 6kg (レンズ無)                                                                                       |
| 本体保護ハウジング   | IP54 (レンズ部を除く)                                                                                   |

表 6 SPIC-SS 試作機の主な諸元

|            |                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------|
| センサーヘッド    | CMOS 型カメラ BU302MG ((株) 東芝テリー社製) ×<br>6<br>筐体サイズ : 29×29×16mm、33g |
| センサータイプ    | 1/1.8 CMOS、IMX252 搭載 (2064×1536 素子)                              |
| A/D        | 12bit                                                            |
| 露光時間       | 30 $\mu$ s ~ 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)<br>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        | $\phi$ 29mm、SV-1614V、f=16mm/F1.4<br>((株) ヴイ・エス・テクノロジー社製)         |
| 制御 PC、記録装置 | Windows 10 Pro、2TB SSD×3                                         |

a) SPIC-UC、SPIC-C のカメラセンサーヘッド (要素技術) による SO<sub>2</sub> 計測精度のシミュレーションによる評価<sup>1)</sup>

SPIC-UC、SPIC-C は SO<sub>2</sub> ガスの可視化を実現することを目指し、昨年度まで各要素技術 (カメラセンサーヘッド) を開発した。令和元年度の開発では、開発した各要素技術を用いた各プロトタイプを構築するために、昨年度までに開発したカメラセンサーヘッドの SO<sub>2</sub> ガス計測性能の定量的な評価を行い、それらの結果を反映し、各カメラセンサーヘッドを一体化した各プロトタイプの構築を行う手順とした。

i) SPIC-UC のカメラセンサーヘッドの評価

昨年度までに開発した、SPIC-UC のカメラセンサーヘッド (要素技術) のうちの 1 台 (カメラ 2) の感度波長域は、SO<sub>2</sub> ガスの吸収スペクトル帯に一致させている。我々は、当所の従来の航空機搭載型画像分光装置 (ARTS) で得られた実際の SO<sub>2</sub> 濃度分布<sup>2),3)</sup>が、試作した SPIC-UC のカメラ 2 でどの程度の精度で観測できるかを検討するために、放射伝達解析コード MODTRAN4.0<sup>4)</sup>による放射伝達シミュレーションを式 (1) に従って行った<sup>1)</sup>。

$$L_s(\lambda, T_s) = \{\varepsilon(\lambda)B(\lambda, T_s) + [1 - \varepsilon(\lambda)]L_d(\lambda)\}\tau(\lambda) + L_u(\lambda) \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 $L_s$  : 観測する分光放射輝度、 $\lambda$  : 波長、 $T_s$  : 地表面温度、 $\varepsilon$  : 地表の放射率、 $B$  : 黒体輻射、 $L_d$  : 大気の下向き分光放射輝度、 $\tau$  : 大気、噴気の透過率、 $L_u(\lambda)$  :

大気、噴気からの上向き分光放射輝度である。この放射伝達シミュレーションの条件は、これまでに ARTS で観測した桜島南岳 A 火口の  $\text{SO}_2$  の濃度分布の観測条件と同一とした。すなわち、この観測の観測方向は、センサーはセンサー高度 4000m より直下方向からの  $L_s$  を観測する。観測パスに存在する大気は、中緯度夏季のモデル大気および桜島の南岳 A 火口内の標高 700~1200m の領域（厚さ 500m）に  $30^\circ\text{C}$  の  $\text{SO}_2$  ガスが存在すると仮定する。また、これらが火口内の地表面温度（ $T_s$ ） $50^\circ\text{C}$  の放射率 0.85（火成岩を想定<sup>5)</sup>）を背景として存在すると仮定する<sup>1), 2), 3)</sup>。この観測条件で、 $\text{SO}_2$  の濃度を 0、5、25ppmv とした場合に観測されるエネルギーの波長分布（ $L_s(\lambda, T_s)$ ）を図 1 に示す。

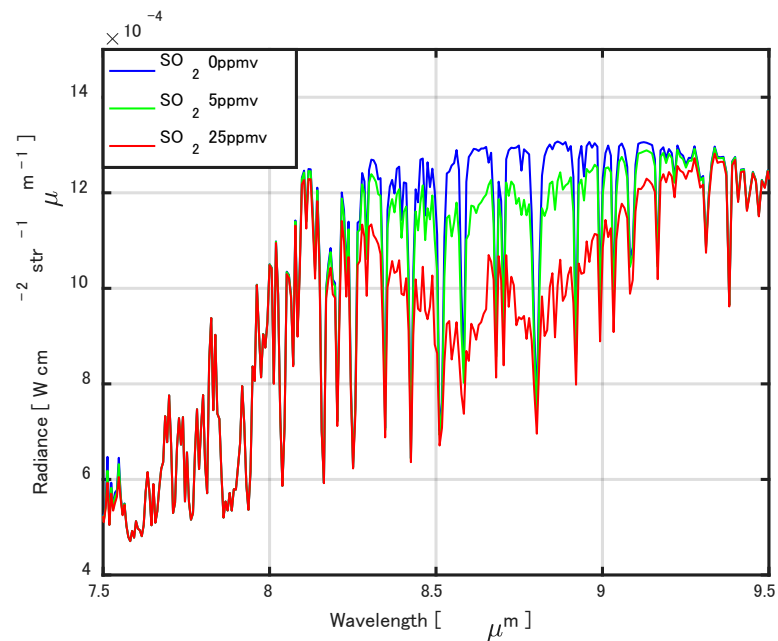


図1.  $\text{SO}_2$  ガス濃度と観測される分光放射輝度（ $L_s$ ）のシミュレーション結果（ $L_s$  は ARTS で桜島南岳 A 火口内の  $\text{SO}_2$  ガス濃度分布を  $50^\circ\text{C}$  の地表を背景として上空 4km から観測した場合の値）。

一般に赤外吸収特性を有するガスは、背景放射に対し、発光または吸収（減衰）のいずれかで観測されるが、ここでの観測条件では、 $\text{SO}_2$  濃度が増すと  $\text{SO}_2$  ガスの吸収波長域のエネルギーが減衰するように観測されることが分かる。すなわちこれは、感度波長域を  $\text{SO}_2$  ガスの吸収スペクトル帯に一致させているカメラ 2 で観測すると、背景温度の見かけの輝度温度値が  $\text{SO}_2$  濃度の増加にともない低下することを意味する。図 2 に SPIC-UC のカメラ 2 で観測した場合の、観測される見かけの輝度温度と  $\text{SO}_2$  濃度の関係を示す<sup>1)</sup>。

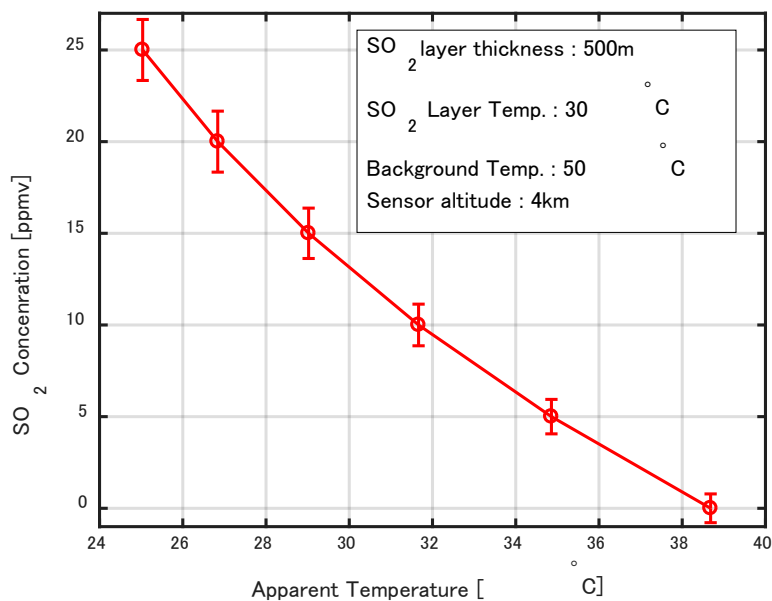


図2. SPIC-UCのカメラ2で観測した場合の、観測される見かけの輝度温度とSO<sub>2</sub>濃度の関係（エラーバー：カメラ2のNETDより計算）

図2のエラーバーは、ある見かけの輝度温度を観測した場合に、カメラ2のNETDを観測装置のノイズと考え、その値が、SO<sub>2</sub>濃度の変動としてどのように現れるかを示したものである。図2より、輝度温度変化から推定されるSO<sub>2</sub>ガスの濃度の推定値は、約1~2ppmvのSO<sub>2</sub>ガス濃度以上から、NETDに起因するSO<sub>2</sub>濃度の変動分よりも卓越し、SO<sub>2</sub>ガス濃度の推定が可能であることが分かる。これより、背景温度をSO<sub>2</sub>ガスの吸収波長域を観測しないSPIC-UCのカメラ1で観測すると同時に、SO<sub>2</sub>ガスの吸収波長域のエネルギーをSPIC-UCのカメラ2で観測することで、地表の温度が50℃以上ある領域上の常温（周辺大気と平衡な温度）付近で存在するSO<sub>2</sub>ガス濃度の計測が可能であることが推測される。

この予想される性能の実用性を評価するために、これまでにARTSで推定（ARTSは背景とSO<sub>2</sub>ガスの温度コントラストが5℃以上でSO<sub>2</sub>ガスを観測可能）された桜島観測結果<sup>3)</sup>を図3に示す。図3の背景画像（白黒画像）は、地表のLWIR領域の分光放射輝度を反映した画像である。この観測では、火口内には50℃以上の領域が存在しSPIC-UCでも十分観測可能な3ppmv以上の濃度の領域が広く認められた。すなわち、このような観測対象では、SPIC-UCでもSO<sub>2</sub>ガス濃度分布の情報が十分取得できると期待される。また、現行システムのNETD値を改善すれば、SO<sub>2</sub>濃度の検出限界も改善でき、同条件の観測で、1ppmv以下のSO<sub>2</sub>濃度の推定も可能になると予想されることから、NETDの改善を今後の装置開発で達成することが重要と思われる<sup>1)</sup>。

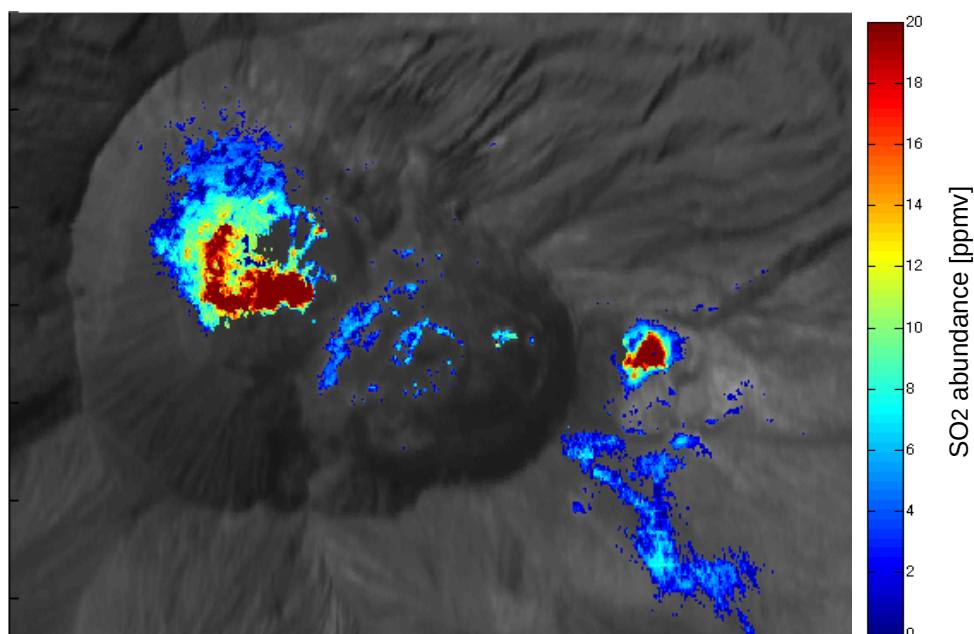


図3. ARTSで推定した桜島南岳A火口内のSO<sub>2</sub>ガス濃度分布（1049(UTC+9) Apr. 8, 2008）<sup>3)</sup>

## ii) SPIC-C のカメラセンサーヘッドの評価

常温を背景とする場合の SO<sub>2</sub> ガスの濃度分布の計測を実現することを主目的とした、SPIC-C(LWIR)（フィルター無し）がどの程度の精度で観測できるかの検討を、同様の放射伝達シミュレーションにより行った。結果を図4に示す。これより SPIC-C(LWIR)の NETD が 19mK であることを反映し、SO<sub>2</sub> ガスの濃度推定誤差は±0.054ppmv (27ppmm) であることがわかり、SPIC-UC のカメラ 2 よりも高い推定精度が実現できることが分かった。

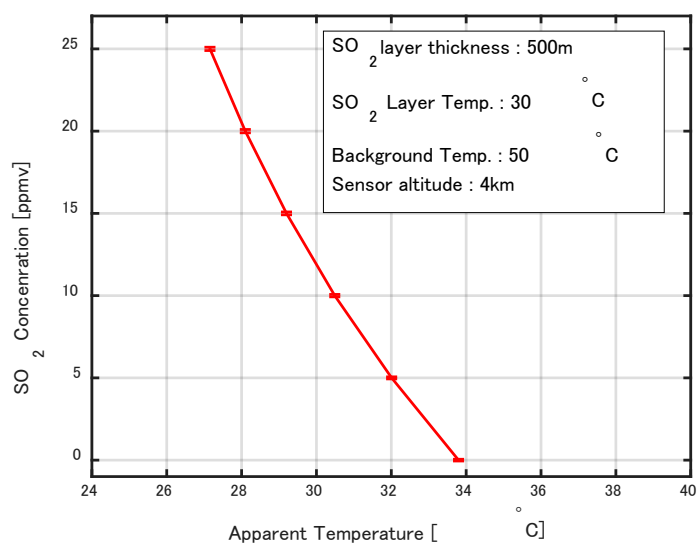


図4. SPIC-C(LWIR)で観測した場合の、観測される見かけの輝度温度とSO<sub>2</sub>濃度の関係（エラーバー：SPIC-C(LWIR)のNETDより計算）



b) 開発した各カメラのセンサーヘッドによる試験画像取得

昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、SPIC-SS の各カメラセンサーヘッドは、同期計測機能を有するマルチカメラシステムとして実現した。各カメラセンサーヘッドには、画像分光を可能にするフィルター型の ISH が搭載されており、これにより各装置は、マルチバンドカメラシステムとして機能する。

以下では、これらのマルチバンドカメラシステムの試験画像取得結果を示す。

i) SPIC-UC (VGA) 4 台構成による試験画像取得（風景の計測と同期計測機能の確認）

SPIC-UC のプロトタイプ構築に先立ち、そのセンサーヘッド部分として採用予定の、開発した 4 台の SPIC-UC (VGA) のカメラ 1 (LP9000)、カメラ 2 (BPF86450-550)、カメラ 3 (SPF10500)、カメラ 4 (Filter less) の性能を画像により確認するため、4 台のセンサーヘッドを写真 1 の様に近接させ並列に設置し、室内で試験画像 (30Hz の動画) を取得した<sup>6)</sup>。試験画像の取得には、これまでに開発した赤外カメラ用同期制御・記録ソフトを用いた。

図 5 に室内からみた外の風景の 1 フレームの同期計測画像を示す。また、図 6 に手の形状を動的に変化（グー、チョキ、パー）させた状況を 30Hz で計測した際の 1 フレームの同期計測画像を示す。各カメラは観測するエネルギー量が異なるが、図 5 では、各カメラの画像を比較するために、各カメラの白黒表示上の濃淡を規格化し（すなわち観測するエネルギーの少ないカメラほど観測物理量を拡大して）表示している。この結果、各カメラはフレームレート 30Hz で 4 台で同期して計測できることを確認できた。なお、カメラ 2 が観測する最も観測するエネルギーの少ない画像では、風景画像に重畳する映像（左隅の白いもや状のパターン）が確認できる。このパターンは図 6 の温度 30 度以上の手を観測したシーンでは目立たなくなっている。これより、このパターンは規格化表示の結果現れた輝度的に拡大されたパターンであることが確認できた。また、これは、静的なパターン（迷光等によるバイアス成分）であることも確認している。よって、実際の計測では、カメラのレンズ前面に温度がほぼ均一な板状の物体（たとえば黒体塗料を塗ったアルミの板等）を置き、その計測画像を均一面の基準とする赤外カメラのバイアス成分を取り除く一般的な手法等を用いることで、静的なバイアス成分を除去し、表示画質を改善する方針とした。以上より、これらの 4 台のカメラセンサーヘッドを組み込んだ SPIC-UC (VGA) 4 台からなる、SPIC-UC (4VGA) プロトタイプを構築する開発に着手した。



写真 1. 4 台の SPIC-UC (VGA) カメラ

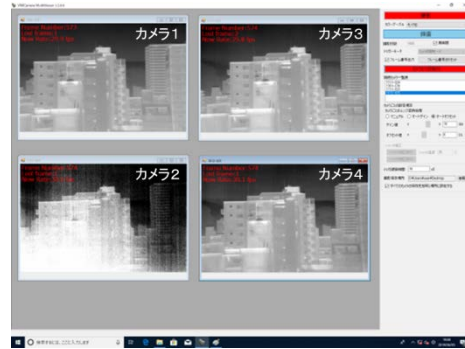


図 5. 風景の 1 フレームの同期計測画像

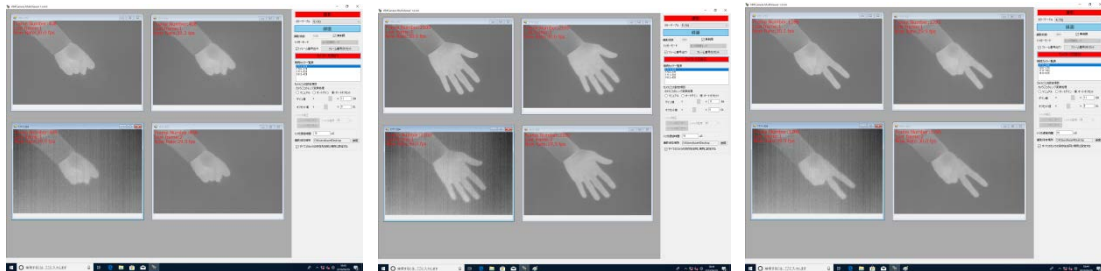


図 6. 手の形状を動的に変化させた様子を 30Hz で計測した 1 フレームの同期計測画像  
(左上カメラ 1, 左下カメラ 2, 右上カメラ 3, 右下カメラ 4)

ii) SPIC-UC (VGA) 4 台構成による試験画像取得 (ガスの濃度分布の計測と同期計測機能の確認)

先述した a) SPIC-UC、SPIC-C のカメラセンサーヘッド (要素技術) による  $\text{SO}_2$  計測精度のシミュレーションによる評価、i) SPIC-UC のカメラセンサーヘッドの評価にて、カメラセンサーヘッドの  $\text{SO}_2$  ガス観測に関する性能評価と  $\text{SO}_2$  ガス観測機能のシミュレーションを実施し良好な結果を得た<sup>1)</sup>。この結果を実測により確認する為、 $\text{SO}_2$  ガスの赤外吸収特性に類似した特性をもつ HFC152a ガス (フルオロカーボン 152a、可視では無色透明のガス) を用いたガスの可視化実験を行った<sup>6), 7)</sup>。 $\text{SO}_2$  ガスおよび HFC152a ガスの赤外吸収特性を図 7 に示す。カメラ 1 ~ 3 が観測する領域を両端矢印で示した。特にカメラ 2 の観測域は矢印に加え黄色でも表示している。図 7 よりカメラ 2 が捉える  $\text{SO}_2$  ガスの吸収特性に近い波長域に HFC152a も吸収特性があることがわかる。なお HFC152a ガスの場合、その赤外吸収特性はカメラ 2、カメラ 3、カメラ 1 の順に強く計測される。この試験では HFC152a 100% からなる市販のエアダスターを用い、エアダスターから噴射される HFC152a ガスを計測した。

図 8 に青空を背景として HFC152a ガスを、カメラ 1、2、3 で観測した結果を示す。青空は  $-15^\circ\text{C}$  以下の放射として観測されるため、エアダスターから噴射した HFC152a ガスは背景よりも高い温度 (常温程度) であるため、発光として観測される。この場合、理論的に吸収特性が大きい波長域ほど強い発光となるが、図 8 では、カメラ 2、3、1 の順に、噴射されている HFC152a ガスの部分が明るく観測されている。この結果は、HFC152a の吸収特性 (図 7) を反映した結果となっている<sup>6), 7)</sup>。

次に約 60℃の平面黒体を背景とした計測結果を図 9 に示す。今度は HFC152a ガスの温度（常温）よりも背景温度が高いため、背景温度が HFC152a ガスの赤外吸収特性によりエネルギーの減衰として低温（暗くなる）に観測される。図 9 では、カメラ 2、3、1 の順に、噴射されている HFC152a ガスの部分が暗く観測されている。この結果も、HFC152a の吸収特性（図 7）を反映した結果となっている<sup>6), 7)</sup>。

以上の試験計測結果より、これらの 4 台のカメラセンサーヘッドを組み込んだ SPIC-UC (VGA) 4 台からなる SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの構築を決定し、その開発に着手した。

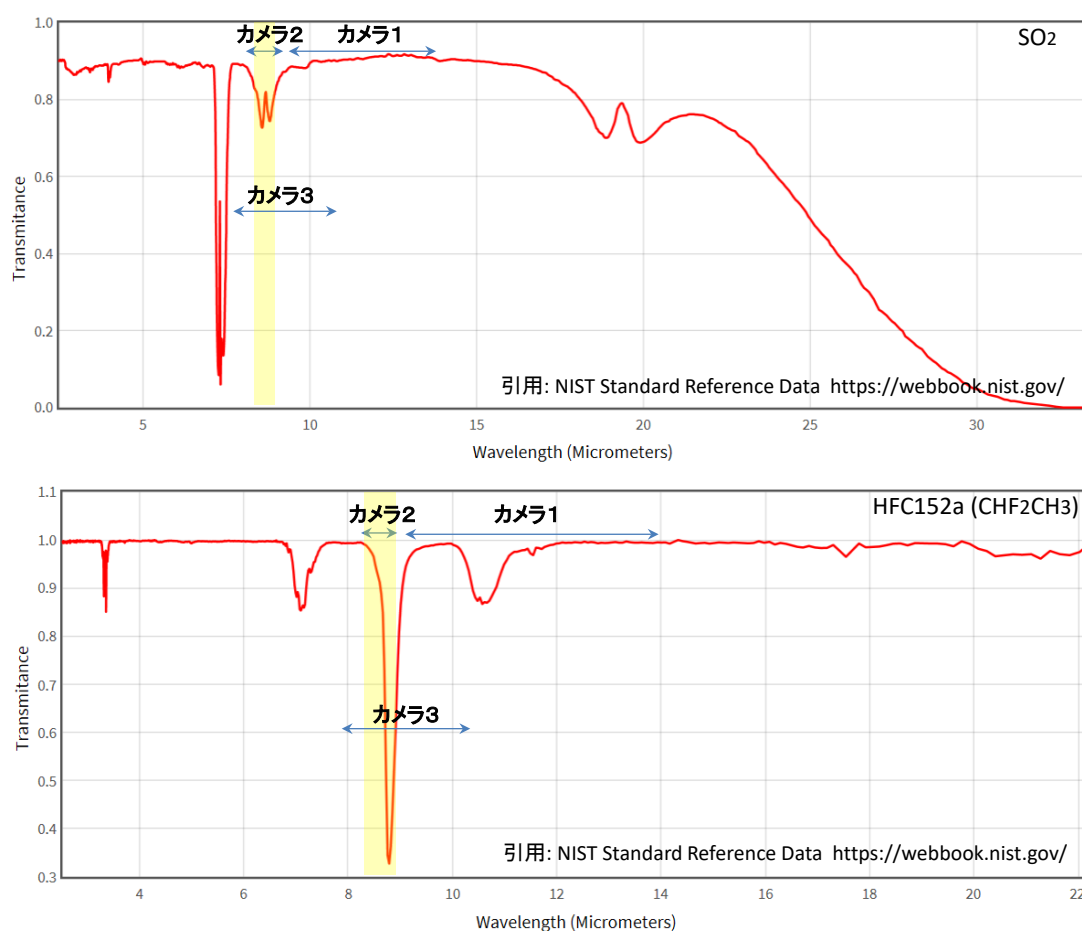


図 7. SO<sub>2</sub> ガス(上)と HFC152a ガス (下) の赤外吸収特性および SPIC-UC (カメラ 1、2、3) の観測波長域 (⇔)

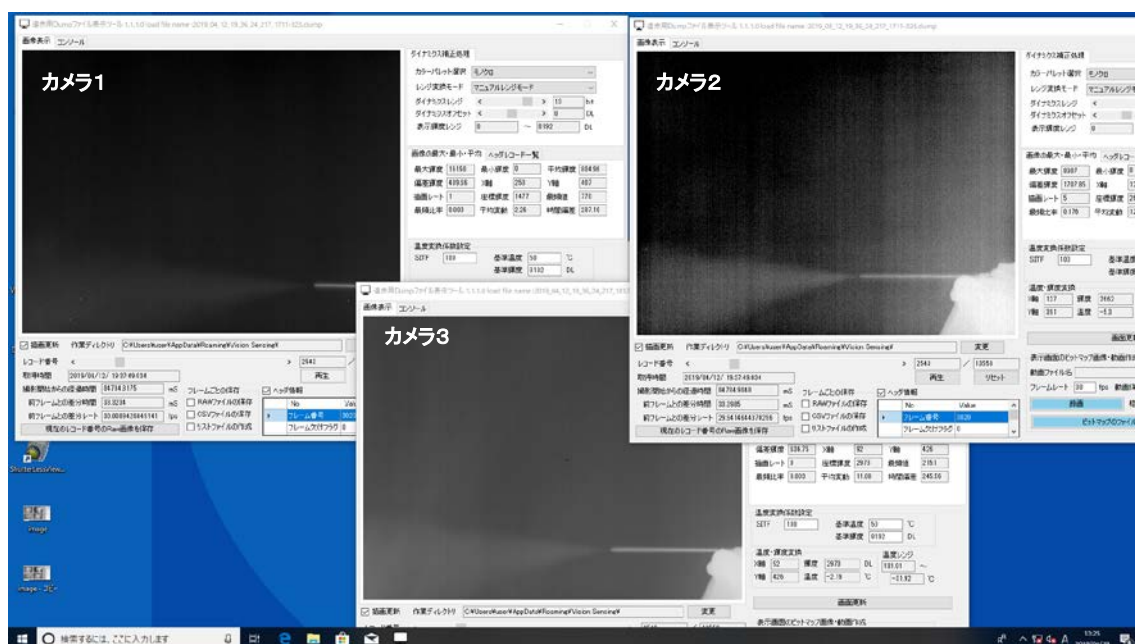


図 8. 青空を背景として HFC152a ガスをカメラ 1、2、3 で観測した結果



図 9. 60℃の平面黒体を背景として HFC152a ガスをカメラ 1、2、3 で観測した結果

iii) SPIC-UC XGA1 台、VGA3 台構成による試験画像取得（風景の計測と同期計測機能の確認）

SPIC-UC(4VGA)の1台のカメラ4（Filter less）をXGAカメラに変更すると、赤外カメラでより高い空間分解能有するプロトタイプである SPIC-UC(XGA/3VGA)を構築できると考え、その構築に先立ち、センサーヘッドとして採用する候補の SPIC-UC(XGA)および3台の SPIC-UC (VGA) のカメラ1（LP9000）、カメラ2（BPF86450-550）、カメラ3（SPF10500）の性能を画像により確認する試験を実施した。試験では4台のセンサーヘッドを写真2の様に近接させ並列に設置し、室内で試験画像（30Hzの動画）を取得した。

図10に室内からみた外の風景の1フレームの同期計測画像を示す。また、図11に手の形状を動的に変化（グー、チョキ、パー）させた状況を計測した際の1フレームの同期計測画像を示す。なお、先の SPIC-UC(4VGA)の場合と同様に、各カメラの白黒表示上の濃淡を規格化し表示している。試験計測の結果、1台がXGAカメラ

となり取得するデータ量が増加（VGA の 2.56 倍）となっても、各カメラはフレームレート 30Hz で 4 台で同期して計測できることを確認できた。3 台の VGA カメラの結果は先の SPIC-UC(4VGA)の結果と同様の結果を得た。

以上の試験計測結果より、これらのカメラセンサーヘッドを組み込んだ SPIC-UC(XGA)1 台 SPIC-UC(VGA)3 台からなる SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプの構築を決定し、その開発に着手した。



写真 2. SPIC-UC(XGA)と 3 台の SPIC-UC(VGA) 図 10. 風景の 1 フレームの同期計測画像

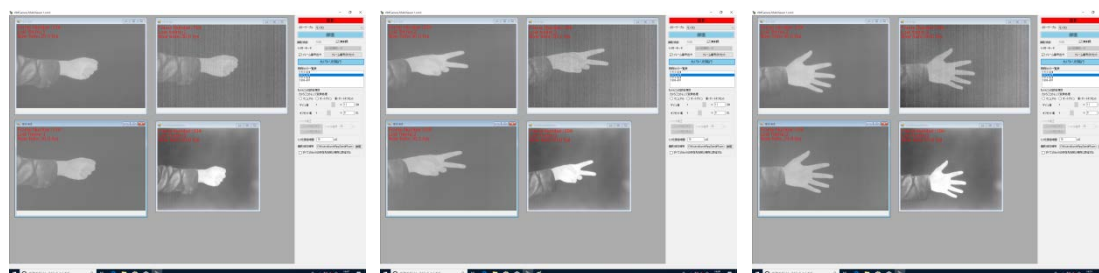


図 11. 手の形状を動的に変化させた様子を 30Hz で計測した 1 フレームの同期計測画像  
(左上 VGA カメラ 1、左下 VGA カメラ 3、右上 VGA カメラ 2、右下 XGA カメラ)

#### iv) SPIC-C(MWIR)による温度画像の確認

SPIC-C(MWIR)のプロトタイプの構築に先立ち、冷却型 MWIR 領域赤外カメラとして採用した FAST M350 の性能を画像により確認するための試験画像を取得した。図 12 に人物の計測画像を示す。この結果、開発した赤外カメラの中で最も性能の高い 16mK を反映した高い画質の輝度温度画像が取得できることが確認できた。また先の性能評価ではフィルター越しの性能評価も良好であった<sup>1)</sup>。以上より、MWIR 領域の冷却型赤外センサーの有用性が実証できたことを受け、SPIC-C(MWIR)のプロトタイプの開発に着手した。



図 12. SPIC-C (MWIR) で計測した人物の画像

v) SPIC-C (LWIR) による温度画像の確認

SPIC-C (LWIR) のプロトタイプ構築に先立ち、冷却型 LWIR 領域赤外カメラとして採用した FAST-L200 のガス濃度分布の可視化に関する性能を画像により確認するため、試験画像を取得した。SPIC-C (LWIR) は、常温を背景とする場合の  $\text{SO}_2$  ガスの濃度分布の計測を実現することを主目的とし試作し、さきに述べたように、構築した FAST-L200 は、その感度波長領域と NETD から、SPIC-UC よりも精度の高い  $\text{SO}_2$  ガスの可視化機能が期待できる（感度は、SPIC-C で 0.054ppmv、SPIC-UC で 0.5ppmv）。SPIC-UC の試験同様に、HFC152a ガス（フルオロカーボン 152a）の可視化を試みた。図 13 に SPIC-C が観測する波長域と  $\text{SO}_2$  および HFC152a の赤外吸収特性の関係を示す。試験では HFC152a 100% からなる市販のエアダスターを用い、エアダスターから噴射される HFC152a をフィルターなしで計測した。その結果を図 14 に示す。図 14（噴射後）よりノズルから噴射された HFC152a が、常温付近の背景温度を減衰させる（背景の赤外エネルギーを吸収）ことから、その濃度分布が視認できる。

以上より、SPIC-C (LWIR) のガス濃度分布可視化機能の確認および先述の a) ii) の性能検証結果から LWIR 領域の冷却型赤外センサーの有用性が実証できたことを受け、これらをカメラセンサーヘッドに採用した SPIC-C (LWIR) のプロトタイプの開発に着手した。



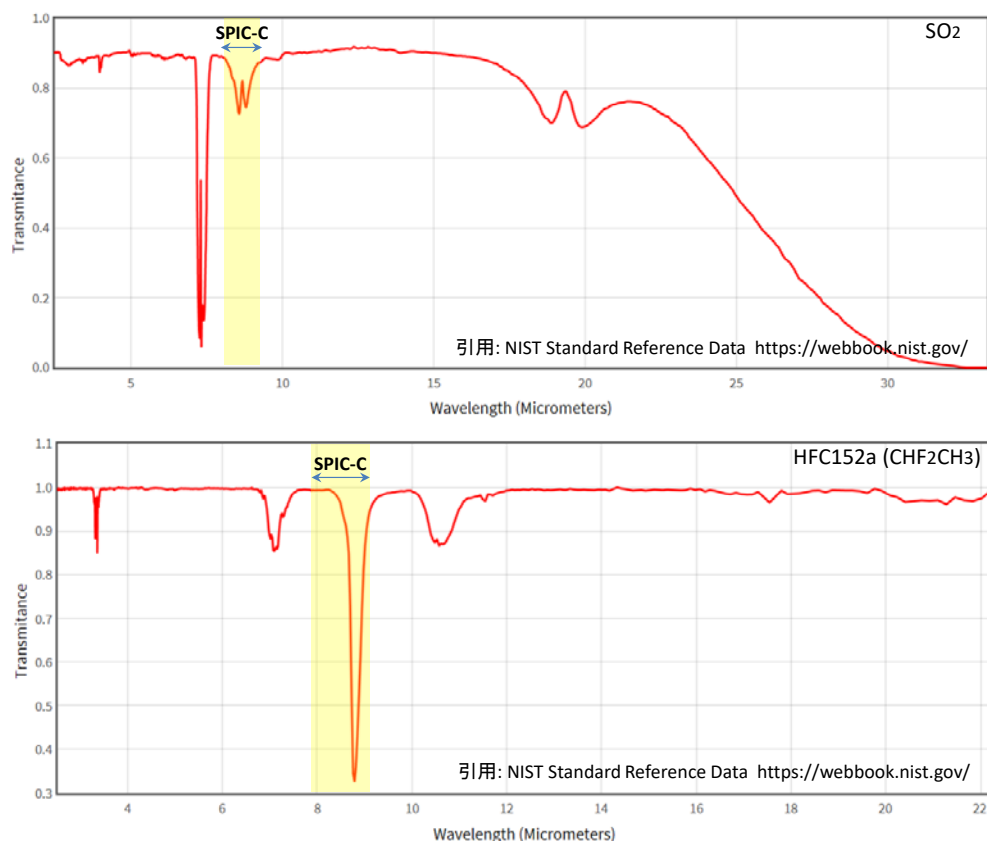


図 13. SO<sub>2</sub> ガス(上)と HFC152a ガス (下) の赤外吸収特性および SPIC-C (LWIR) 観測波長域 (⇔)

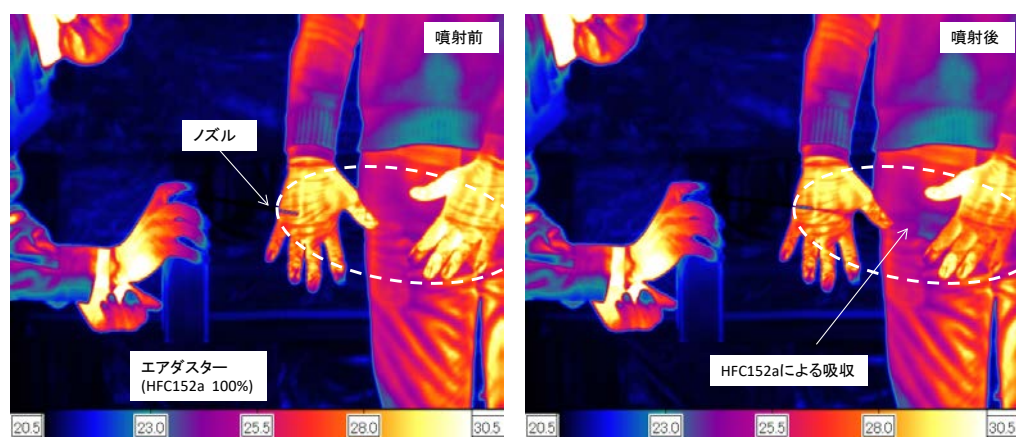


図 14. エアダスターから噴射される HFC152a を SPIC-C (フィルター無) で計測した結果

#### vi) SPIC-C(MWIR/LWIR)の同期機構の構築

昨年度までに製作した SPIC-C(MWIR)カメラセンサーヘッドと SPIC-C(LWIR)カメラセンサーヘッドのトリガー機能を利用し、図 15 に示す、同期計測機構を実現した。

以上より、SPIC-C(MWIR)カメラセンサーヘッドと SPIC-C(LWIR)カメラセンサーへ

ッドの同期計測機構が実現できたことを受け、他のプロトタイプとの同期計測の実現が可能となった。



図 15. 同期信号 (TTL) による SPIC-C(MWIR)カメラセンサーヘッドと SPIC-C(LWIR)カメラセンサーヘッドの同期計測機構の実現

vii) SPIC-SS (FullHD 6 台) の試験画像取得 (同期計測画像の確認)

SPIC-SS のプロトタイプの構築に先立ち、開発した 6 台で同期する 1920×1080 (FullHD) のカメラからなる SPIC-SS の試作機を写真 3 の様に近接させ並列に設置し、昨年度までに開発したモバイル型制御装置により、室内で試験画像 (3.75Hz の動画) を取得した<sup>1)</sup>。

図 16 に手の形状を動的に変化させた状況を計測した際の 1 フレームの同期計測画像を示す。この結果、各カメラはフレームレート 3.75Hz にて 6 台で同期して計測できることを確認できた。このフレームレートは当所の ARTS-SE のカメラ型センサー (STIC) が 3.75Hz よりも遅い連続計測画像 (STIC の可視カメラが 0.5Hz、赤外カメラが 2Hz) を使用して SfM を実現できた<sup>1)</sup>ことを踏まえると、6 台のカメラは同様の観測条件で SfM 処理が実現できると予想される。

以上の試験計測結果より、これらの SPIC-SS 試作機を組み込んだ SPIC-SS プロトタイプの構築を決定し、その開発に着手した。



写真 3. SPIC-SS のカメラ（6 台の Full HDD）を近接させ並列に設置した様子

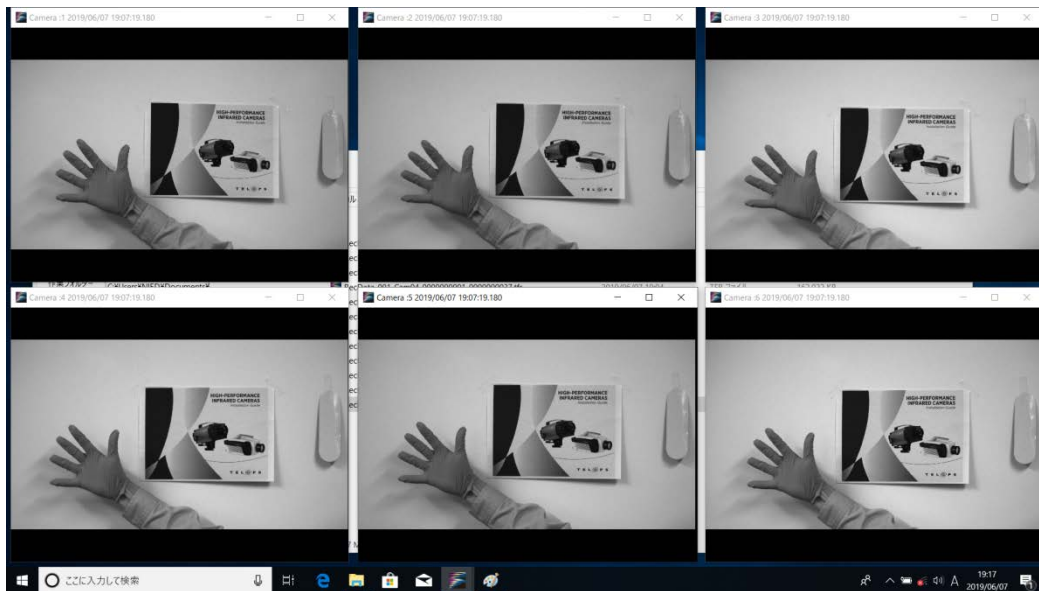


図 16. 手の形状を動的に変化させた状況を SPIC-SS で 3.75Hz で計測した際の 1 フレームの同期計測画像

c) 各装置の要素技術を統合した各装置のプロトタイプの概念設計

i) 各装置のプロトタイプの概念設計

本課題の計画当初の開発する各装置の概念モデルと開発年次計画を図 17 に示す。事業開始後、2020 年まで（本年度、令和元年度）に SPIC の要素技術・構成装置である、SPIC-UC、SPIC-C、SPIC-SS、ISH のプロトタイプを完成させる。引き続き 2023 年までに各プロトタイプを一体化した地上設置型・車載型装置を完成させる。さらに、2025 年までに航空機搭載型装置を完成させ、火山観測への試験提供を開始する計画である<sup>1)</sup>。

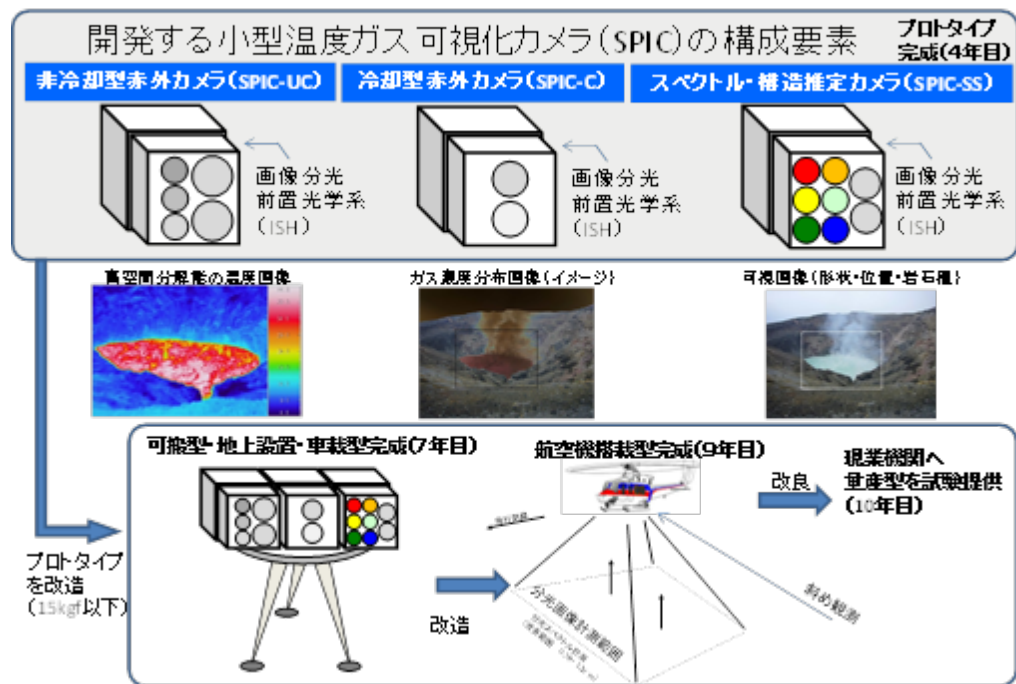


図 17. 開発する小型温度ガス可視化カメラ (SPIC) の概念モデルと開発計画

本年度は、上述した H30 年度までに開発した SPIC の各カメラの要素技術（カメラセンサーヘッド b）の記述）による試験画像取得の成功を受け、実験室内での使用を前提としていたこれらの要素技術（カメラセンサーヘッド）を、実験室外で利用できる仕様とした SPIC の各プロトタイプの前製作業を開始した。まず、これらのプロトタイプの前製作業では、H30 年度 SPIC-UC(XGA)の試作機で開発したカメラセンサーヘッド用の耐環境型カメラハウジングの技術を各プロトタイプの実現に応用し SPIC の各プロトタイプの概念設計を行った。

概念設計に元づく、各プロトタイプの完成予想外観の 3DCAD イラストを図 18～図 21 に示す。各プロトタイプは、複数台のカメラからなるマルチバンド（多バンド）カメラシステムで、可搬型（三脚搭載可能）、耐環境仕様とした。各プロトタイプのセンサーヘッドは耐環境型カメラハウジングに格納され、それらは搭載フレームに格納、設置される。また、搭載フレームを拡張することで、カメラの組み合わせ、台数を変更可能な仕様とした。また SPIC-SS を SPIC-UC、SPIC-C と一体的化する SPIC-UC/SS および SPIC-C/SS は、個別の三脚に搭載された SPIC-SS、SPIC-UC、SPIC-C の各カメラセンサーが取得する画像データを同期取得することでその機能を実現する方針とした（ハードの構成としては、物理的に SPIC-SS を SPIC-UC、SPIC-C の上部に搭載することも可能である）。

SPIC-UC(4VGA)プロトタイプは異なる波長を計測する合計 4 台の VGA 型非冷却カメラから構成される。SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプは異なる波長を計測する 1 台（または 2 台）の XGA 型非冷却カメラ、3 台（または 2 台）の VGA 型非冷却カメラから構成される合計 4 台のカメラで構成される（図 18、図 19）。SPIC-C プロトタイプは異なる波長を計測する 1 台の VGA 型冷却カメラ、3 台の VGA 型非冷却カメラか



ら構成される合計4台のカメラで構成される(図20)。SPIC-SSプロトタイプは異なる波長を計測する合計6台のFullHD可視カメラから構成される(図21)。なお、SPIC-Cプロトタイプの冷却カメラは、今後のSPIC-Cフィールドタイプで装置を小型化することを見据え、これまでの開発の知見を活かし、本年度に新たにLWIR領域のSPIC-Cの冷却型カメラセンサーヘッドを開発し、耐環境型カメラハウジングに搭載する方針とした。さらに、本年度開発したLWIR領域のSPIC-Cの冷却型カメラセンサーヘッドの大きさ、電気的特性等の仕様で、MWIR領域のSPIC-Cの冷却型カメラセンサーヘッドも製作できる設計を行った。これらより、来年度以降のSPIC-Cフィールドタイプの開発につながる技術開発を実現できた。

なお、当初計画では、耐環境仕様ではない室内仕様の各SPICプロトタイプを2019年度に完成させ、引き続き2021年度に耐環境仕様のSPICフィールドタイプを完成させた後に、火山での野外試験観測を実施する予定であった。本年度の開発で、各SPICプロトタイプにも、耐環境仕様を付加できたことで、先行して、SPICプロトタイプによる火山試験観測を実施できるようになり、当初計画を上回る進捗となった。

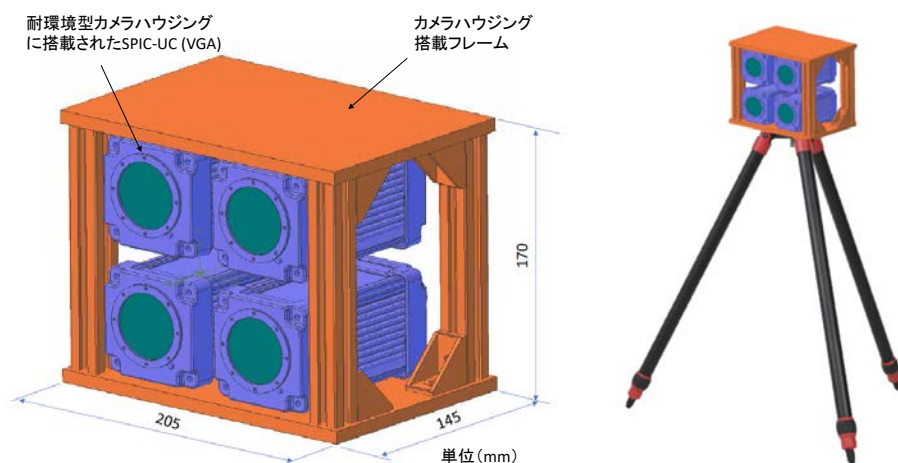


図 18. SPIC-UC (4VGA) プロトタイプ (左) とその可搬型三脚搭載仕様 (5kg) (右)

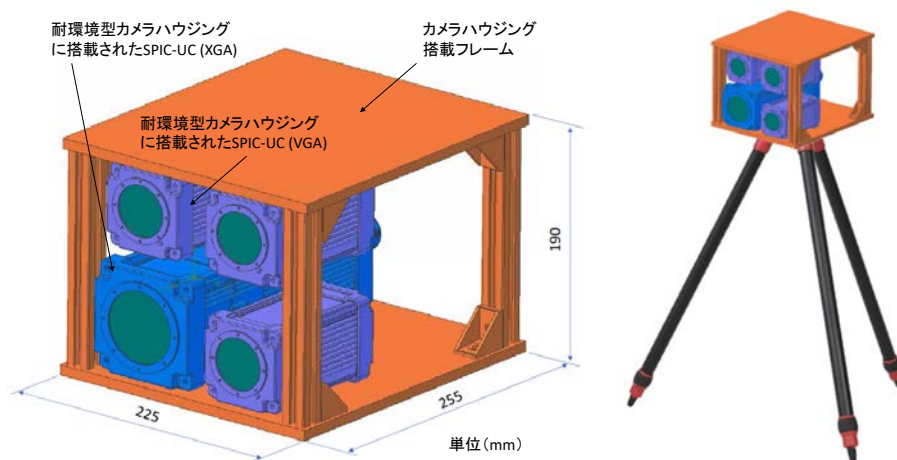


図 19. SPIC-UC (XGA/3VGA) プロトタイプ (左) とその可搬型三脚搭載仕様 (6kg) (右)

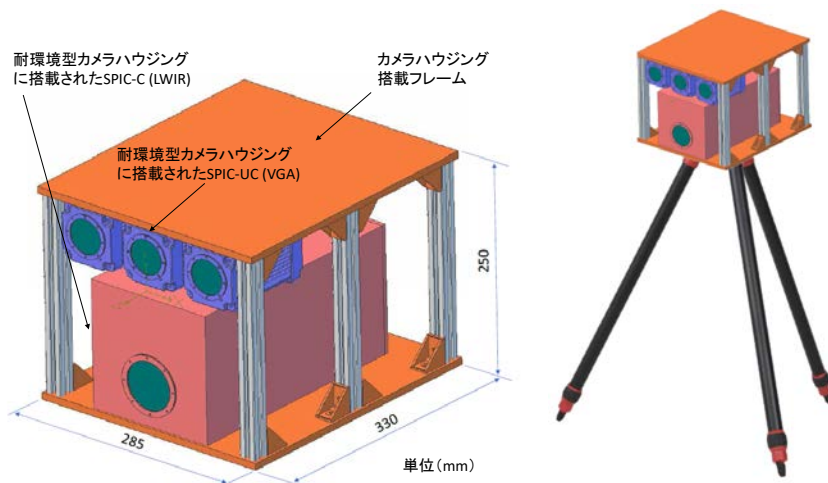


図 20. SPIC-C プロトタイプ（左）とその可搬型三脚搭載仕様(12kg)（右）

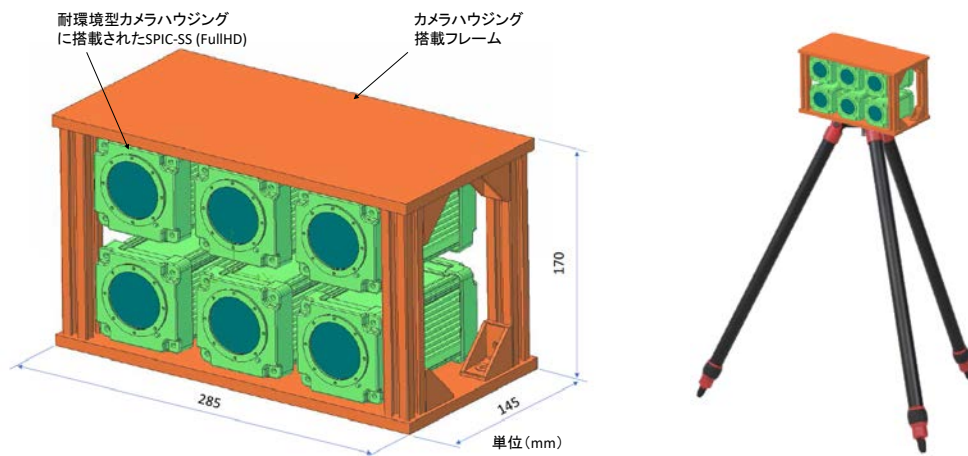


図 21. SPIC-SS プロトタイプ（左）とその可搬型三脚搭載仕様(5kg)（右）

#### d) 各装置のプロトタイプの製作

##### i) SPIC-UC(4VGA)プロトタイプ

概念設計に従い、SPIC-UC(4VGA)プロトタイプは異なる波長を計測する合計 4 台の VGA 型非冷却カメラから構成し製作した。製作した装置の主な諸元を表 7、8、図 22 に示す。なお、 $\text{SO}_2$  ガスの赤外吸収帯域に合わせたカメラ（カメラ 3）の感度波長域は昨年度までは 8650nm を中心にしたバンド幅 500nm (NETD:0.6K) としていたが、NETD を向上させるために、7950～9300nm とした。この結果 NETD は 0.32K に改善できた。また、リファレンスバンドとして、11785～12785nm の感度域を持つカメラ（カメラ 4）を構成した。このバンドは、 $\text{SO}_2$  の赤外吸収帯域ではなくかつ 7950～9300nm と水蒸気の吸収特性に近い特徴を有する。また、カメラハウジング搭載フレームには、日除け用のアルミカバー、輝度補正用疑似黒体扉、持ち運び用の持ち手、三脚台座を付加した。装置の図面を図 23 に、写真を、写真 4 に示す。

本プロトタイプは、小型赤外カメラ制御・記録用 PC：ノート PC (Windows 10 Pro 64bit、Core™ i7-8665UvPro™, 16GBRAM, Panasonic SV8) より USB 接続にて各カ



メラセンサーヘッドに接続し、専用ソフト（昨年度までに開発した赤外カメラ用同期制御・記録ソフト）により制御、データ取得（ノート PC の M.2 SSD 1TB SSD に記録）を行う。現行の本制御記録システムは、4 台のカメラの 30fps のフレーム同期計測を実現できる。

表 7 SPIC-UC (4VGA) プロトタイプ of 主な諸元 (カメラ 1、2)

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

表 8 SPIC-UC (4VGA) プロトタイプ of 主な諸元 (カメラ 3、4)

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

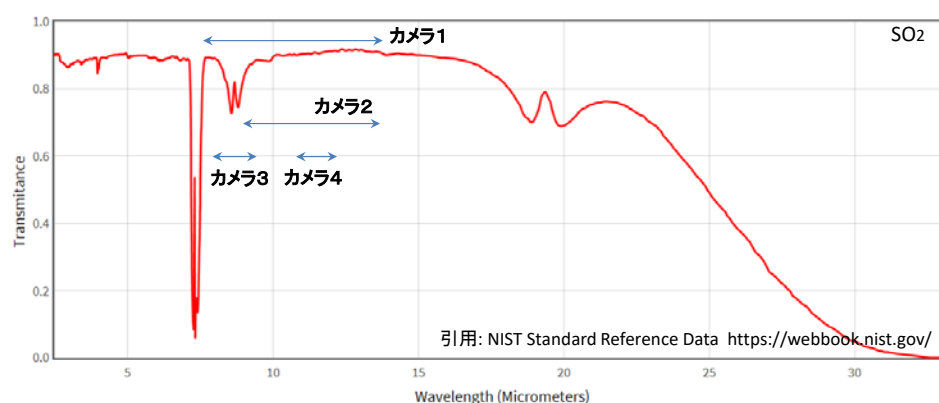


図 22. SO<sub>2</sub> ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC (4VGA) の各カメラの波長感度特性(⇔)との関係

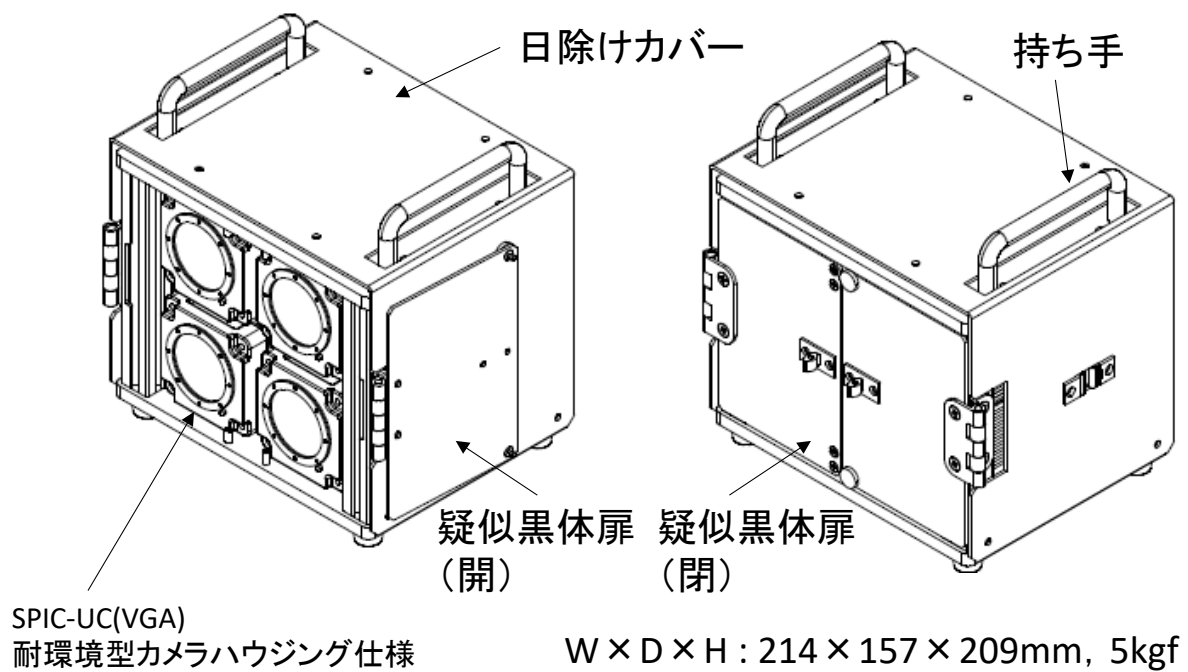
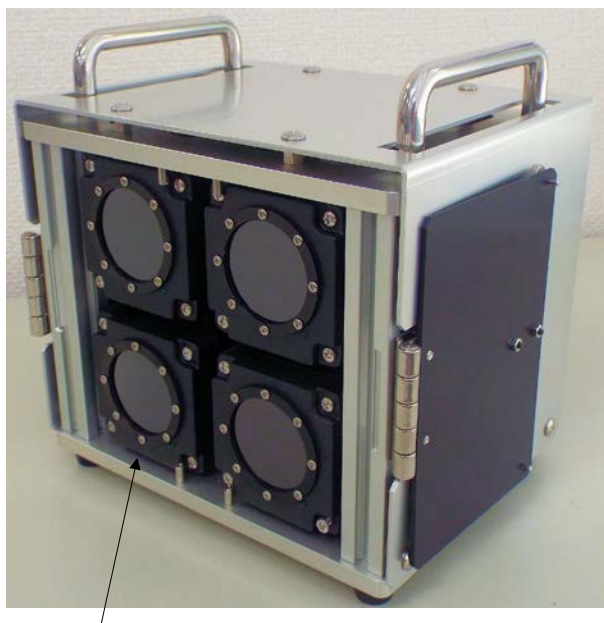


図 23. SPIC-UC (4VGA) プロトタイプ の 3D 図面。



SPIC-UC(VGA)耐環境型カメラハウジング仕様



写真 4. 製作した SPIC-UC (4VGA) プロトタイプ (左)、同装置の三脚搭載状態。  
(右)

ii) SPIC-UC(XGA/3VGA) プロトタイプ

概念設計に従い、SPIC-UC (XGA/3VGA) プロトタイプは異なる波長を計測する 1 台（または 2 台）の XGA 型非冷却カメラ、3 台（または 2 台）の VGA 型非冷却カメラから構成される合計 4 台のカメラで構成可能な装置を製作した。なお、今年度のこの開発では、SO<sub>2</sub> ガスの赤外吸収帯域に合わせた XGA カメラ（XGA カメラ 3）として感度波長域が、7950～9300nm のカメラを、新規に製作し、昨年度に製作した XGA カメラ（フィルター無し、感度波長域 8000～14000nm）と同時搭載し、2 眼の XGA カメラ、2 眼の VGA カメラ、合計 4 台のカメラとして機能する SPIC-UC (2XGA/2VGA) を構成した。これにより、2 台の XGA 型カメラを用いた、VGA 型よりもより空間分解能の高い SO<sub>2</sub> ガス濃度分布の取得が可能な仕様となった。新規に製作した 1 台の XGA カメラの主な諸元を表 9 に示す。もう一台の XGA カメラは、表 3 のカメラを搭載する表 10 の仕様とした。他の 2 台の VGA カメラは、先述の SPIC-UC (4VGA) プロトタイプのカメラ 2、4 を搭載する表 11 に示す仕様とした。また、カメラハウジング搭載フレームには、日除け用のアルミカバー、輝度補正用疑似黒体扉、持ち運び用の持ち手、三脚台座を付加した。装置の図面を図 24 に、写真を写真 5 に示す。

本プロトタイプは、小型赤外カメラ制御・記録用 PC：ノート PC（Windows 10 Pro 64bit、Core™ i7-8665UvPro™, 16GBRAM, Panasonic SV8）より USB 接続にて各カメラセンサーヘッドに接続し、専用ソフト（昨年度までに開発した赤外カメラ用同期制御・記録ソフト）により制御、データ取得（ノート PC の M.2 SSD 1TB SSD に記録）を行う。現行の本制御記録システムは、4 台のカメラの 30、60fps のフレーム同期計測を実現できる。

表 9 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             | FOV 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV 0.348mrad |
| NETD（@25℃）         | 0.3K（@60fps）                        |
| 搭載フレームサイズ(WDH)、総重量 | 243×256×238mm、8kgf                  |
| 保護ハウジング            | IP67 対応（Ge 窓付き）                     |

表 10 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプの主な諸元（カメラ 1（XGA 型））

| センサーヘッド      | カメラ 1（XGA 型）              |
|--------------|---------------------------|
| センサータイプ      | 非冷却型マイクロボロメータ、1024×768 素子 |
| フィルター（感度波長域） | フィルター無し (8000～14000nm)    |
| フレームレート      | 5～60fps（同期可能）             |
| A/D          | 14bit                     |

|                    |                                     |
|--------------------|-------------------------------------|
| レンズ                | f=50mm/F1.2                         |
| 画角、分解能             | FOV 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV 0.348mrad |
| NETD (@25℃)        | 0.3K (@60fps)                       |
| 搭載フレームサイズ(WDH)、総重量 | 243×256×238mm、8kgf                  |
| 保護ハウジング            | IP67 対応 (Ge 窓付き)                    |

表 11 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプの主な諸元 (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<br>(9000～14000nm) | BP-12285-10000<br>(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)          |                                   |

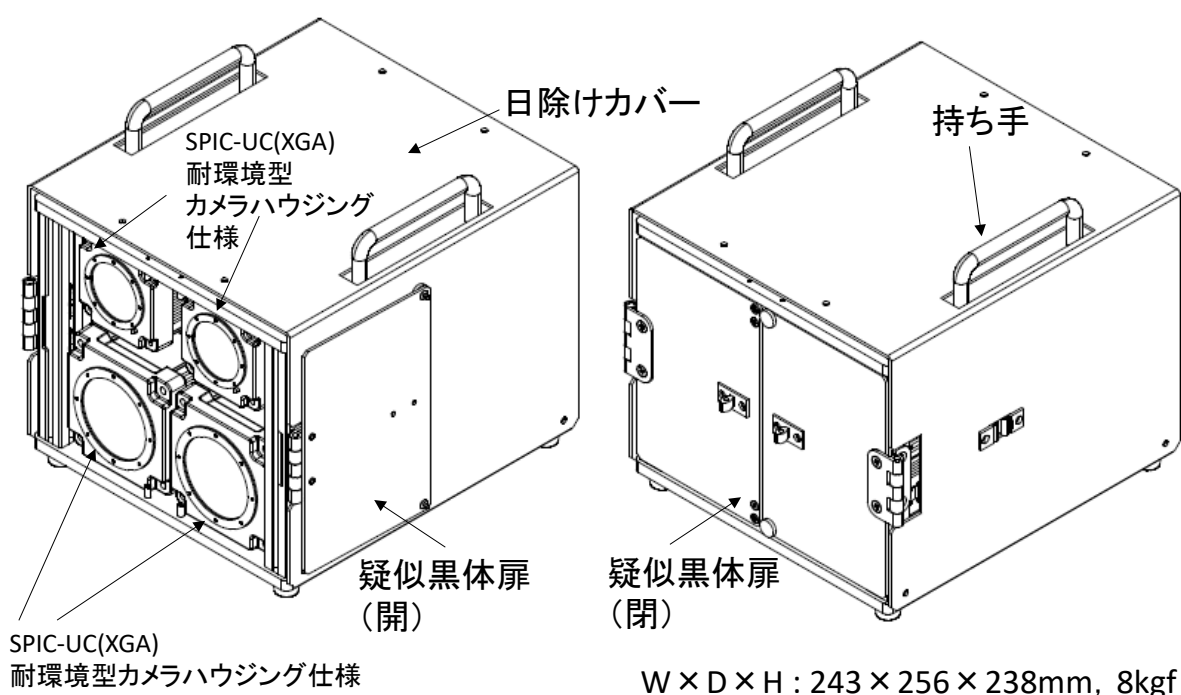
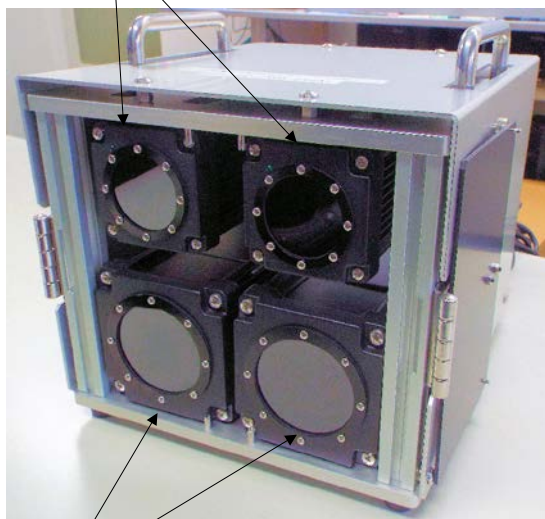


図 24 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプの 3D 図面。

SPIC-UC(VGA)耐環境型カメラハウジング仕様



SPIC-UC(XGA)耐環境型カメラハウジング仕様



写真 5. 製作した SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプ (左)、同装置の三脚搭載状態 (右)。

### iii) SPIC-C プロトタイプ

概念設計に従い、SPIC-C プロトタイプは異なる波長を計測する 1 台の VGA 型冷却カメラ、3 台の VGA 型非冷却カメラから構成される合計 4 台のカメラからなる仕様で製作した。また、概念設計で先述したように、今年度は、将来の SPIC-C フィールドタイプを見据えた、SO<sub>2</sub> ガス観測用の LWIR 領域の SPIC-C のカメラセンサーヘッドを新規に開発し、耐環境型カメラハウジング仕様で製作した (カメラ 3)。新規に開発、製作した SPIC-C プロトタイプの LWIR 領域の冷却型カメラセンサーヘッドの主な諸元を表 12 に示す。また、この装置の図面を図 25 に示す。

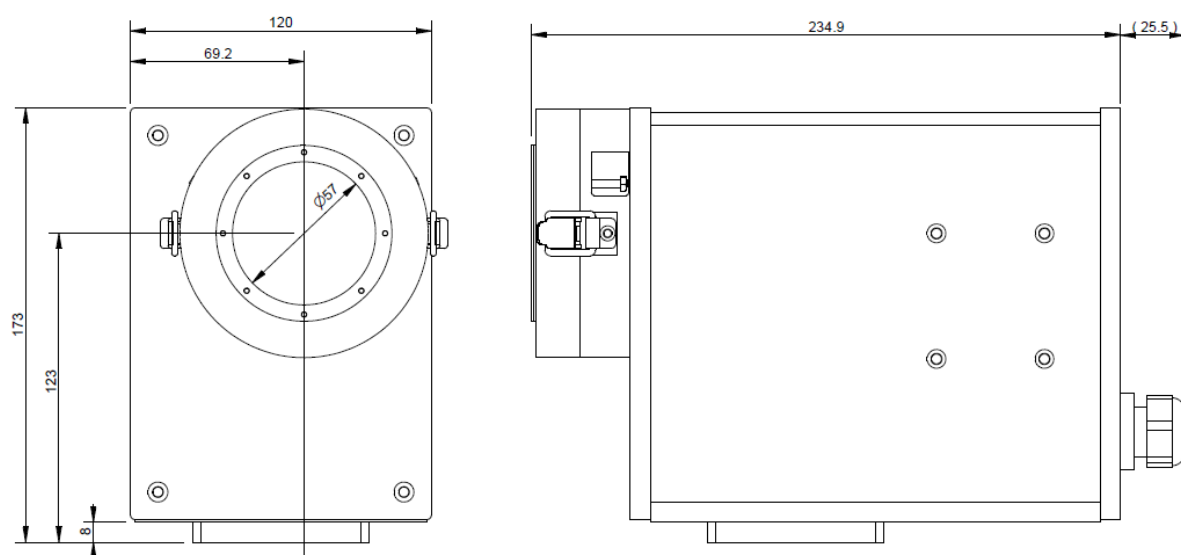
本プロトタイプは、小型赤外カメラ制御・記録用 PC：ノート PC (Windows 10 Pro 64bit、Core™ i7-8665UvPro™, 16GBRAM, Panasonic SV8) より USB 接続にて各カメラセンサーヘッドに接続し、専用ソフト (昨年度までに開発した赤外カメラ用同期制御・記録ソフト) により制御、データ取得 (ノート PC の M.2 SSD 1TB SSD に記録) を行う。現行の本制御記録システムは、4 台のカメラの 30fps のフレーム同期計測を実現できる。



表 12 SPIC-C プロトタイプ の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        |

SPIC-C(LWIR)耐環境型カメラハウジング仕様



単位 mm, 重さ 5kgf

図 25. SPIC-C プロトタイプ の冷却型 LWIR カメラセンサーヘッド（カメラ 3）の図面

さらに、SPIC-C プロトタイプ の  $\text{SO}_2$  ガス濃度分布観測用のリファレンスバンドとして、10300～12500nm の感度域を持つ非冷却型 VGA 型赤外カメラ（カメラ 4（SPIC-C））を新規に製作した。このバンドは、 $\text{SO}_2$  の赤外吸収帯域ではなくかつ SPIC-C の冷却型カメラセンサーヘッドが観測する 8100～9300nm と水蒸気の吸収特性に近い特徴を有する。新規に製作した SPIC-C プロトタイプ の  $\text{SO}_2$  ガス濃度分布観測用のリファレンスバンドとなる非冷却型 VGA 型赤外カメラの主な諸元を表 13 に示す。他のカメラは、表 14 に示す SPIC-UC (4VGA) プロトタイプ のカメラ 1、2 を搭載した。

図 26 に SO<sub>2</sub> ガス吸収特性と SPIC-C 各カメラの観測域を示す。また、SPIC-C のカメラハウジング搭載フレームには、日除け用のアルミカバー、輝度補正用疑似黒体扉、持ち運び用の持ち手、三脚台座を付加した。装置の図面を図 27 に、写真を写真 6 に示す。

表 13. SPIC-C プロトタイプ of 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 14. SPIC-C プロトタイプ of 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)         |                        |

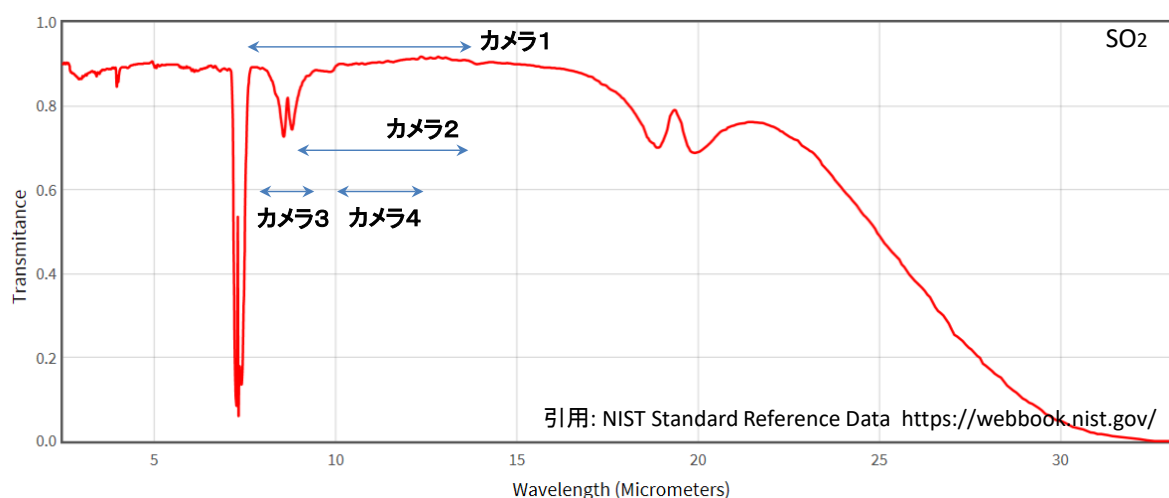


図 26. SO<sub>2</sub> ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの波長感度特性 (↔) との関係

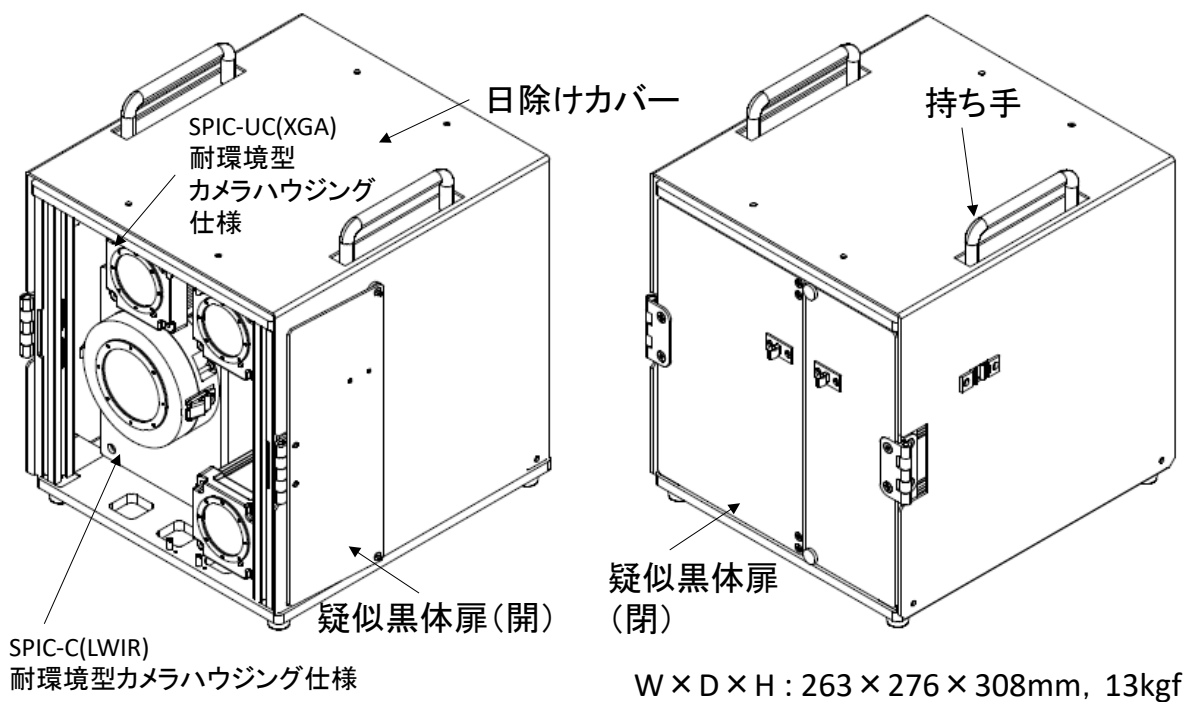


図 27. SPIC-C プロトタイプの 3D 図面

SPIC-UC(VGA)耐環境型カメラハウジング仕様



SPIC-C(LWIR)耐環境型カメラハウジング仕様



写真 6. 製作した SPIC-C プロトタイプ (左)、同装置の三脚搭載状態 (右)

#### iv) SPIC-SS プロトタイプ

概念設計に従い、SPIC-SS プロトタイプは異なる波長を計測する合計6台のFullHD可視カメラから構成される仕様として製作した。概念設計では6台の可視カメラセンサーヘッドを個別の耐環境型カメラハウジングしハウジング搭載フレームに搭載する計画であったが、装置の軽量化を実現するため、6台を1つの耐環境型カメラハウジングに搭載する仕様とした(ハウジング搭載フレーム無し)。軽量化のために、ハウジングはポリカーボネート製を採用し、装置サイズは250×209×183mm(WHD)装置総重量は3.5kgf以下を実現した。開発したSPIC-SSプロトタイプの主な諸元を表15に示す。また、SPIC-SSのカメラハウジングには、輝度補正用レンズカバー、三脚台座を付加した。耐環境型ハウジング内部の6台のカメラの搭載状態を図28に、外観の3D図面を図29に示す。

本マルチカメラセンサーヘッドは、昨年度に開発した制御用ノートPC(Windows 10 Pro 64bit、Core i7-7700, 32GBRAM, Epson Endeavor NJ6100E)よりUSB接続にて2台のUSB HUBに3台ずつ接続し、専用ソフト(Fire Recorder)により制御、データ取得(ノートPCのM.2 SSD 512GB, M.2 SSD 1TB SSDに記録)を行う。システムは最速3.75fpsのフレーム同期計測を実現できる。

表 15 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)<br>×6、各カメラサイズ: 29×29×16mm、33g |
| センサータイプ                 | 1/1.8 CMOS、IMX252 搭載 (2064×1536 素子)                           |
| A/D                     | 12bit                                                         |
| 露光時間                    | 30 $\mu$ s～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)<br>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                     | $\phi$ 29mm、SV-1614V、f=16mm/F1.4<br>((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)                            |

SPIC-SS(FullHD)カメラセンサーヘッド

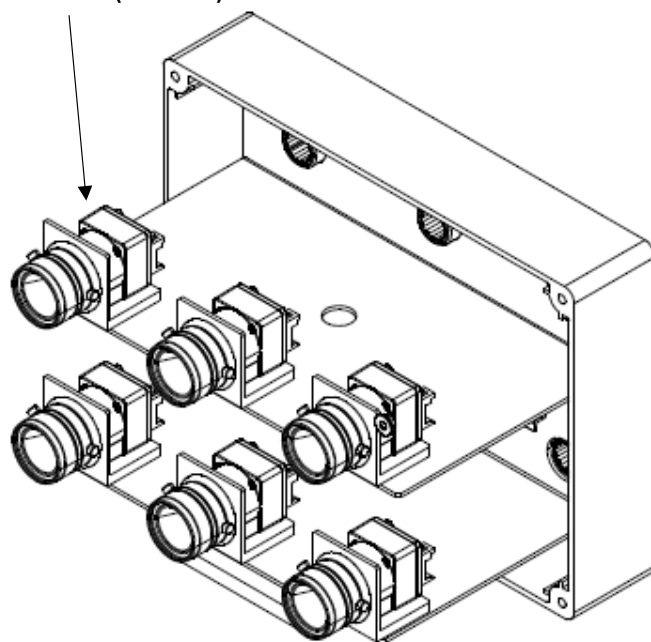
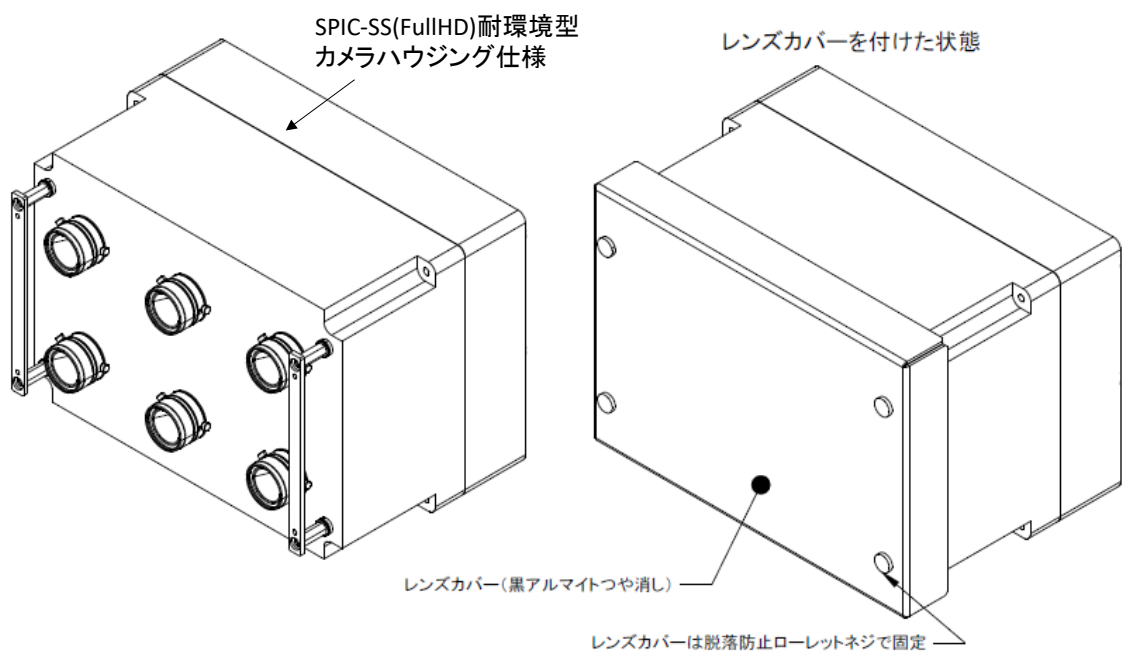


図 28. SPIC-SS プロトタイプの耐環境カメラハウジング内部の 6 台のカメラセンサーヘッド搭載状況



W × D × H : 250 × 209 × 183mm, 3.5kgf

図 29. SPIC-SS プロトタイプの 3D 図面

v) 干渉分光方式の ISH プロトタイプ

本年度の 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た（先述の SPIC 各センサーヘッド参照）。これに加え、今後の新規の画



像分光装置開発のために、赤外カメラと一体として機能する干渉分光方式の ISH のプロトタイプ製作を行った<sup>8)</sup>。

本年度は、昨年度開発した、横ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外域干渉計 BBM (CCM) と一体として機能する小型赤外カメラを開発するとともに、同装置の CCM の 3 軸微動調整機能の付加、可視光の干渉機能実現のための、Quartz ビームスプリッタの製作を行った (BBM: ブレッドボードモデル、CCM: コーナーキューブミラー)。開発した小型赤外カメラの主な諸元を表 16 に示す。また装置の概略図を図 30 に示す。

表 16 干渉分光方式の ISH のプロトタイプ小型赤外カメラの主な諸元

| ISH プロトタイプ用   | 小型赤外カメラ                  |
|---------------|--------------------------|
| 赤外画像センサー      | (VIM-640 ビジョンセンシング社製)    |
| 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) | Filter less、8000～14000nm |
| フレームレート       | 30fps (同期可能)             |
| A/D           | 14bit                    |
| レンズ           | f=17mm/F1.2              |
| NETD (@25℃)   | 0.06K                    |
| 本体サイズ、重量      | 33×33×27.5mm、175gf       |

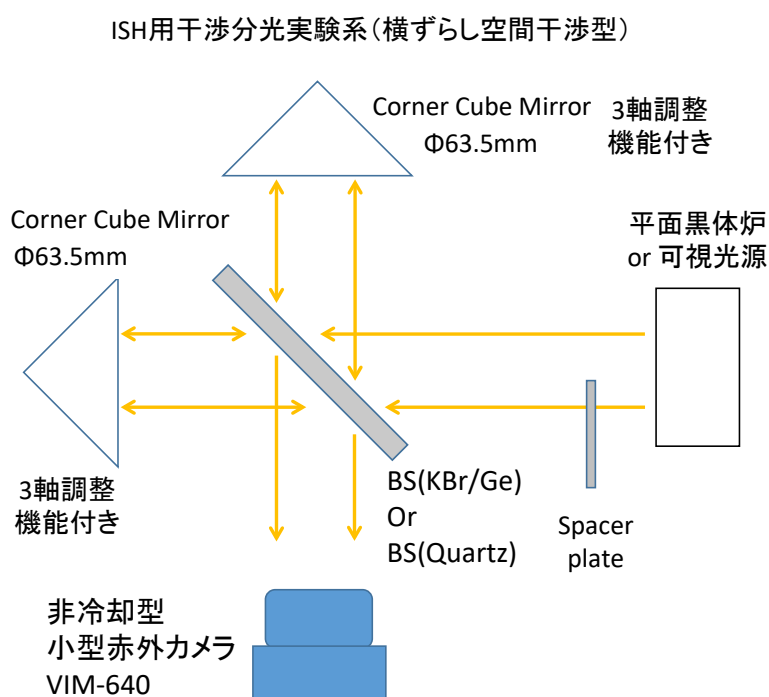


図 30. 横ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外域干渉計 BBM (CCM) 概略図

さらに、本年度は、新たに、縦ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外カメラと一体として機能する、ステップスキャン型赤外域干渉計 (日本分光株式会社製) を

製作した。本装置は、主に外部光入出力光学系と、Step Scan 干渉計で構成される。  
装置の概略図を図 31 に、装置の写真を写真 7 に示す。

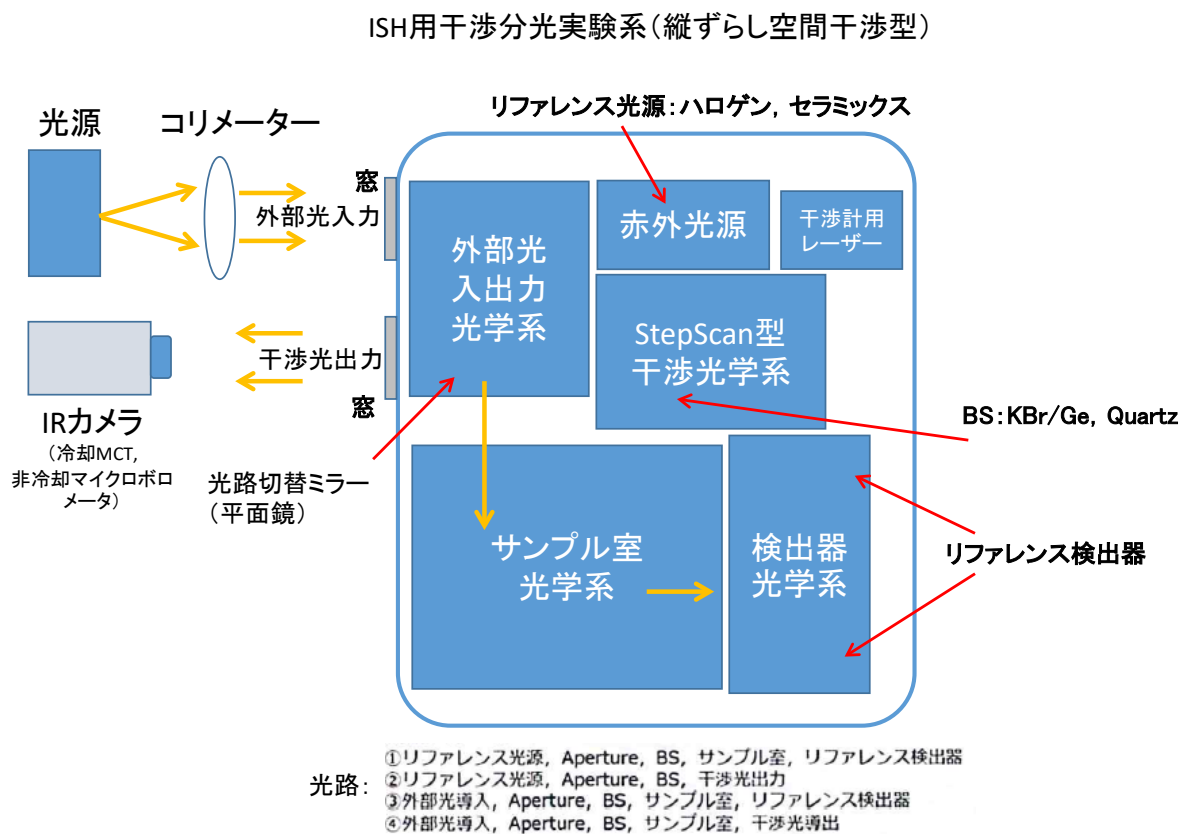


図 31. 縦ずらし型の空間干渉縞を取得する、ステップスキャン型赤外域干渉計概略図

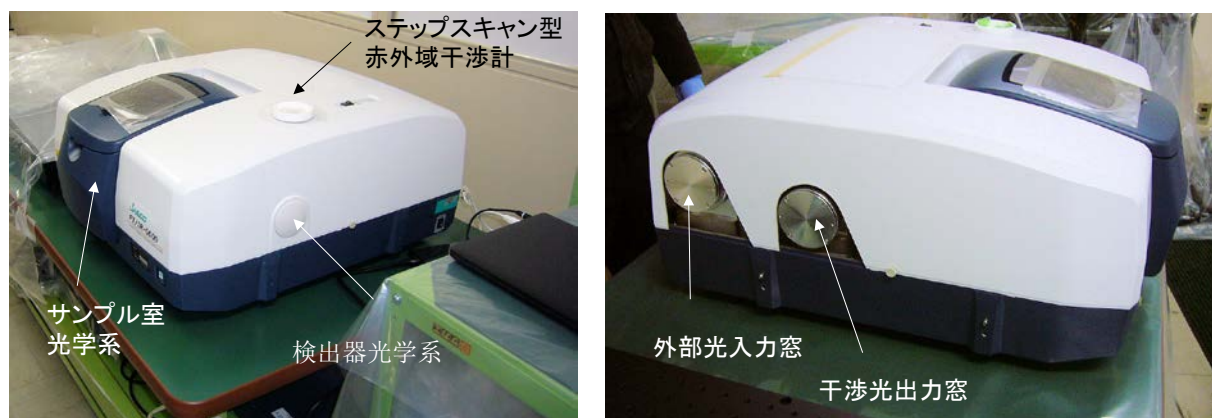


写真 7. ステップスキャン型赤外域干渉計。本体（左）、外部光入出力窓（右）

e) 各装置のプロトタイプの試験画像取得

今年度製作した、SPIC-UC(4VGA)プロトタイプ、SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプ、SPIC-Cプロトタイプに関し、動作確認を兼ねた試験画像取得を行った。以下に結果を示す。

i) SPIC-UC(4VGA)プロトタイプ

(機器構成)

SPIC-UC(4VGA)プロトタイプには、異なる分光フィルターを装着した4台の非冷却型VGA型赤外カメラを実装し、それらを専用の計測ソフト(赤外カメラ用同期制御・記録ソフト)を搭載した小型赤外線カメラ制御用ノートPCにて制御、表示、記録した。電源は屋外での使用を想定したリチウムイオン電池型のポータブル電源を使用した。4台のカメラは、1台のカメラをマスターとして、他の3台にフレーム同期信号を供給するように構成し、4台のカメラのフレーム同期した画像を計測し記録する。図32に制御用ノートPCとの接続と機材の写真を示す。



図 32. SPIC-UC(4VGA)の試験画像取得時の機器構成。接続概略(左)、制御用PCとポータブル電源(右)

(試験画像取得結果:簡易平面黒体)

簡易平面黒体(黒体温度  $40^{\circ}\text{C}$ ・ $60^{\circ}\text{C}$ )と簡易平面黒体(黒体温度  $40^{\circ}\text{C}$ )を背景としたHFC152aガスの計測( $\text{SO}_2$ ガスの濃度分布可視化機能の確認)を行った。計測時の様子を示す写真を写真8に、簡易平面黒体の $40^{\circ}\text{C}$ と $60^{\circ}\text{C}$ の輝度温度画像の計測結果を図33に示す。

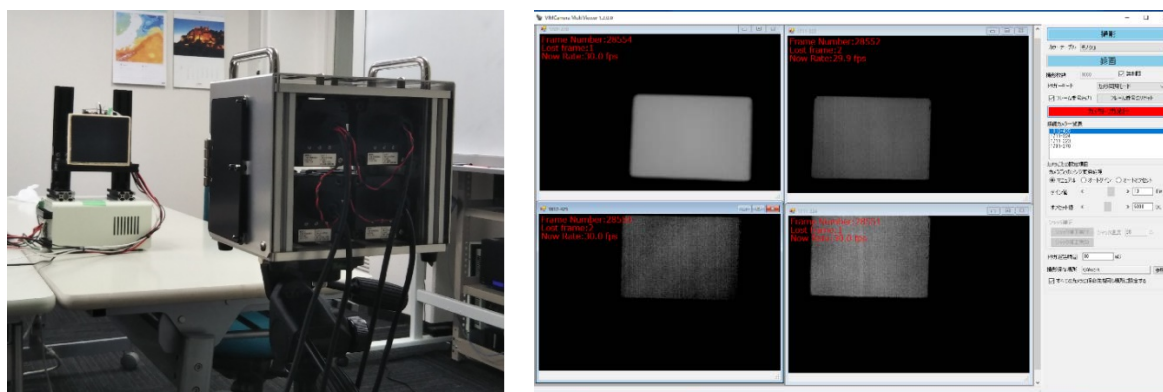


写真 8. SPIC-UC(4VGA)簡易平面黒体試験画像取得。機器配置(左)、制御用PCの画面(右)

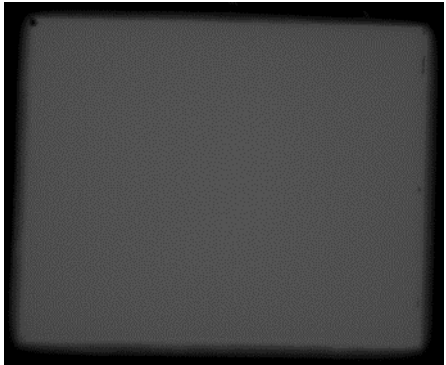
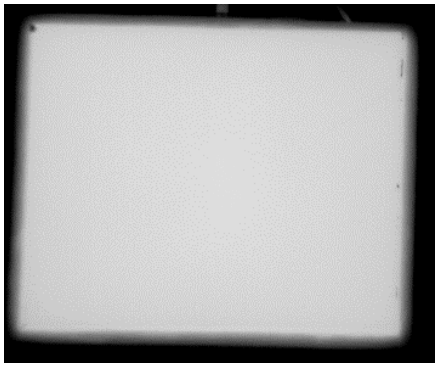
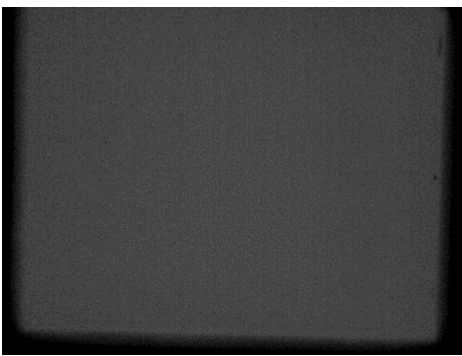
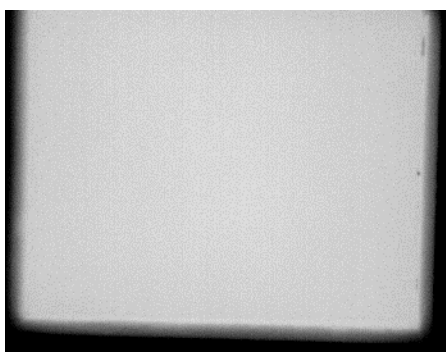
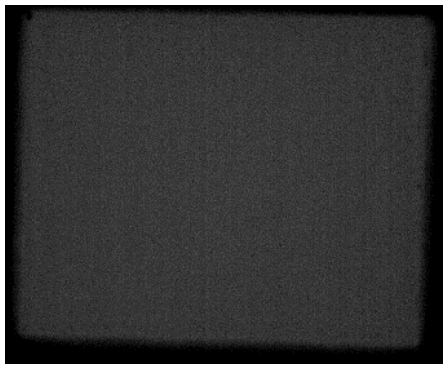
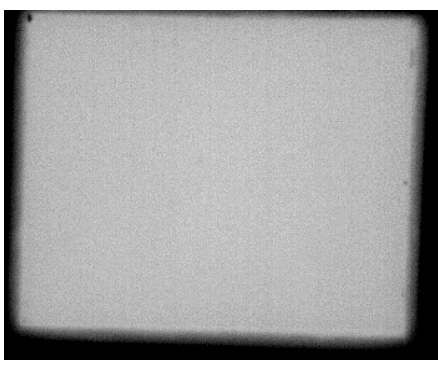
| カメラ<br>番号                         | 40℃                                                                                 | 60℃                                                                                  |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| カメラ<br>1<br>フィル<br>タなし            |    |    |
| カメラ<br>2<br>LP-<br>9000           |   |   |
| カメラ<br>3<br>BBP-<br>7950-<br>9300 |  |  |
| カメラ<br>4<br>BP-<br>12285-<br>1000 |  |  |

図 33. SPIC-UC(4VGA)による簡易黒体（40℃、60℃）試験計測画像（表示レンジ：35～65℃）

次に、簡易平面黒体（黒体温度 40℃）を背景とした HFC152a ガスの計測（SO<sub>2</sub> ガスの濃度分布可視化機能の確認）結果を図 34 に示す。HFC152a ガスは背景の黒体よ

り温度が低いため、吸収特性として計測されており、その濃淡は、HFC152a ガスの赤外域吸収特性と、SPIC-UC(4VGA)の各カメラ（バンド）の特性の関係（図 35）と整合していることが確認できた。

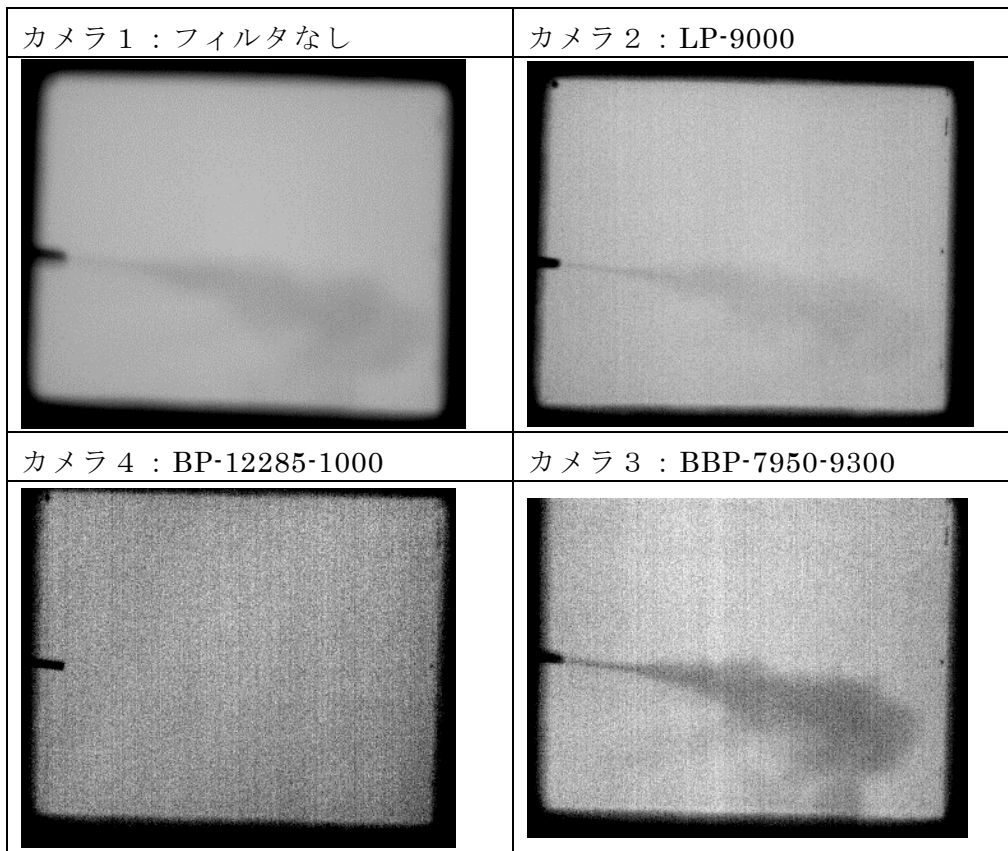


図 34 SPIC-UC(4VGA)による簡易黒体（40℃）を背景とした HFC152a ガスの試験計測画像（表示レンジ：35～45℃）

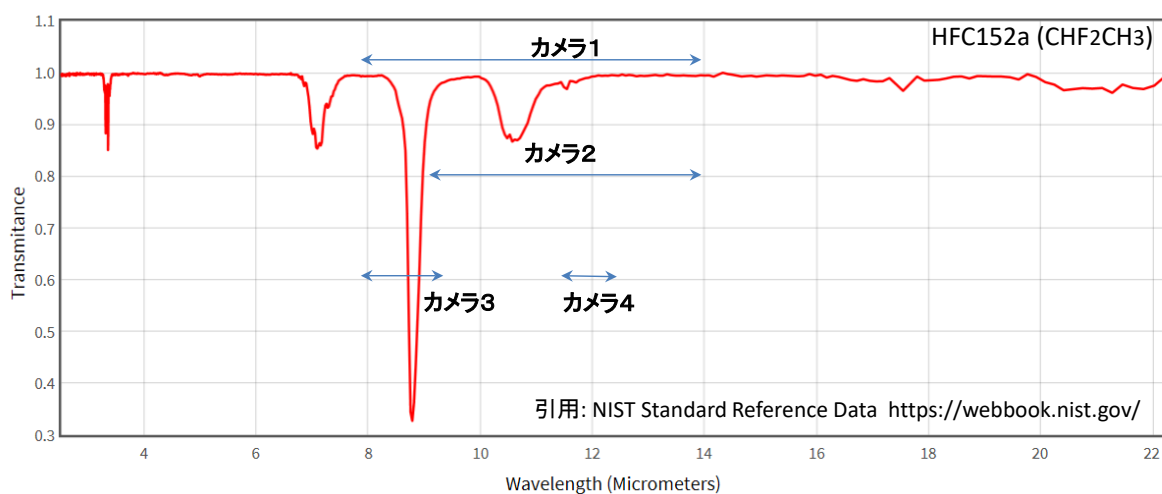


図 35. HFC152a ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC(4VGA)の各カメラの波長感度特性（↔）との関係



(試験画像取得結果:屋外の風景)

屋外の風景計測とそれら（ビル群）を背景とした HFC152a ガスの計測（SO<sub>2</sub> ガスの濃度分布可視化機能の確認）を行った。計測計測時の様子を写真 9 に、屋外の風景計測とそれらを背景とした HFC152a ガスの計測の計測結果を図 36 に示す。ガスは背景のビル群より温度が低いため、吸収特性として計測されており（カメラ 3）、その濃淡は、HFC152a の赤外域吸収特性と、SPIC-UC(4VGA)の各カメラ（バンド）の特性の関係（図 35）と整合していることが確認できた。



写真 9. SPIC-UC(4VGA)屋外風景試験画像取得。機器配置と HFC152a ガス噴射の様子



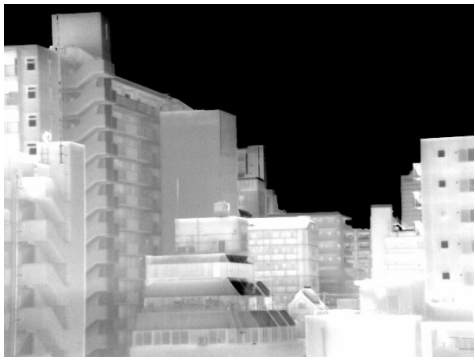
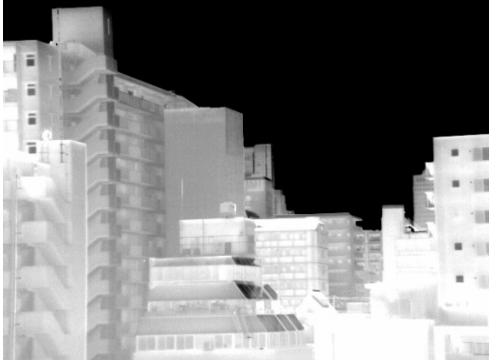
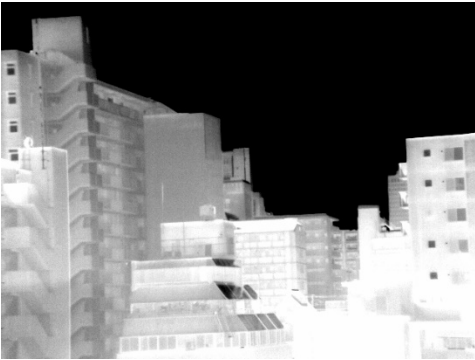
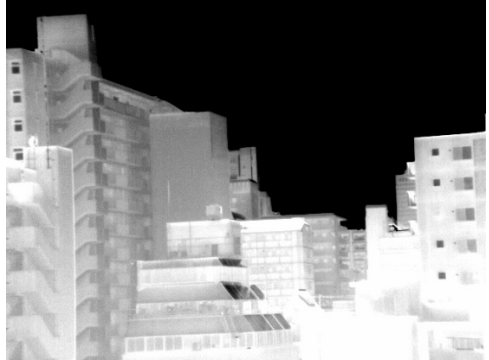
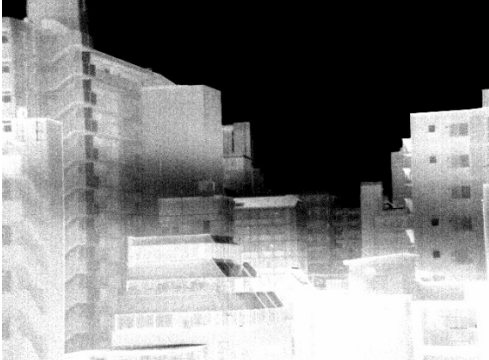
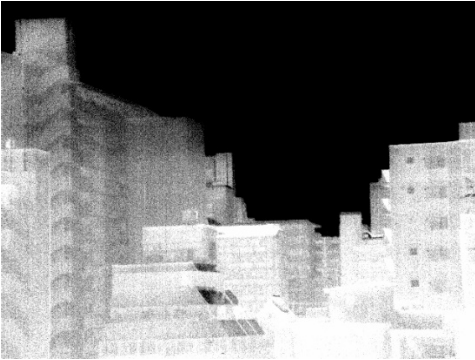
| カメラ番号                 | ガスなし                                                                                | ガスあり                                                                                 |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| カメラ1<br>フィルタなし        |    |    |
| カメラ2<br>LP-9000       |   |   |
| カメラ3<br>BBP-7950-9300 |  |  |
| カメラ4<br>BP-12285-1000 |  |  |

図 36. SPIC-UC(4VGA)による屋外風景（ビル群）とそれらを背景とした HFC152a ガスの試験計測画像（表示レンジ：10～20℃）

## ii) SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプ

本年度に新規に製作した  $\text{SO}_2$  ガスの赤外吸収域に計測波長感度特性を合わせた SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプを構成するカメラ 3 (SPIC-UC(XGA)カメラ) による風景の計測を実施した。機器の制御、画像計測は SPIC-UC(4VGA)に使用した小型赤外カメラ制御ノート PC を用いた。結果を図 37 に示す。同様の波長感度特性を有する SPIC-UC プロトタイプのカメラ 3 の画像と比較し、画質の劣化が少なく空間分解能が向上していることが確認できた。

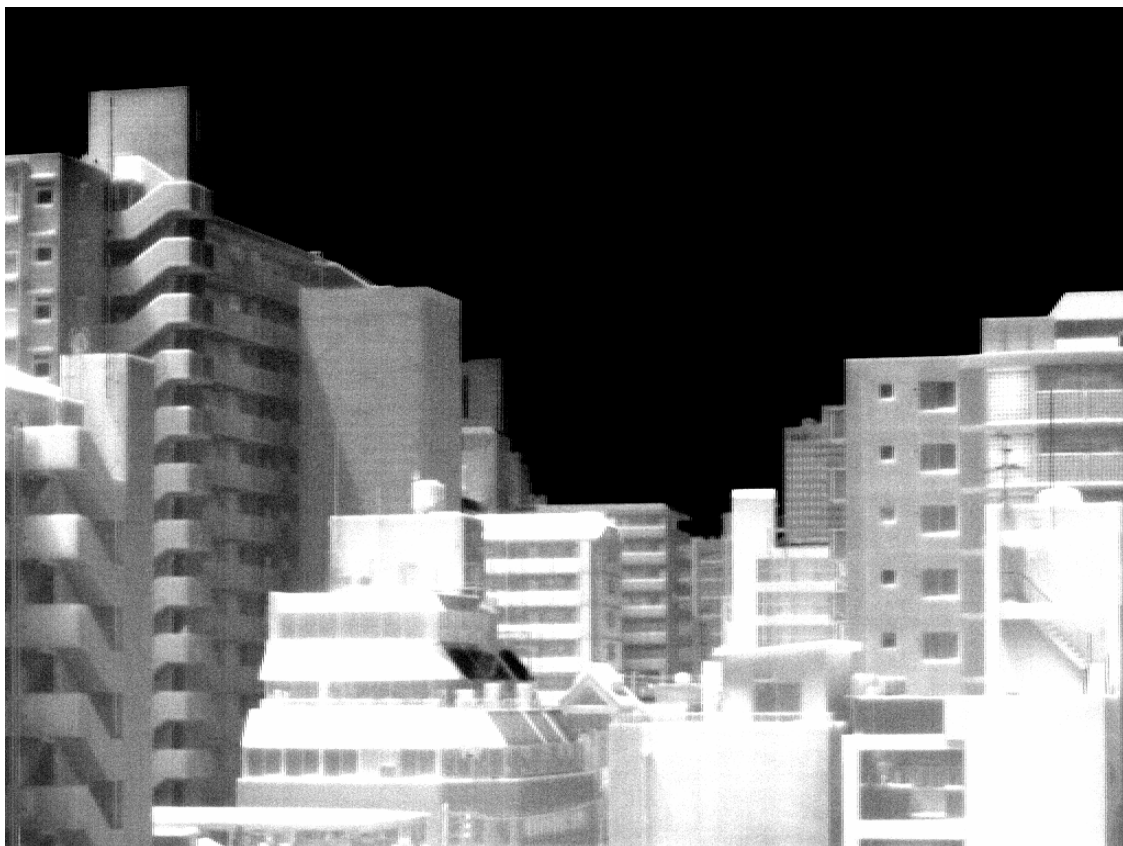


図 37. SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプを構成するカメラ 3(SPIC-UC(XGA)カメラ)による屋外風景（ビル群）試験計測画像（表示レンジ：10～20℃）

## iii) SPIC-C プロトタイプ

本年度に新規に製作した  $\text{SO}_2$  ガスの赤外吸収域に計測波長感度特性を合わせた SPIC-C プロトタイプを構成するカメラ 3 (SPIC-C(LWIR)カメラ) による風景の計測およびそれらを背景として赤外透明のポリエチレン袋に封入した空気と HFC152a ガスの計測を実施した。機器の制御、画像計測は SPIC-UC(4VGA)同様、これまでに開発した小型赤外カメラ制御ノート PC を用いた。結果を図 38、39 に示す。同様の波長感度特性を有する SPIC-UC プロトタイプのカメラ 3 の画像と比較し、画質が向上していることが確認できた。図 39 より、ポリエチレン袋に封入された室温の空気は透明に計測されることがわかるとともに、ポリエチレン袋に封入された室温の

HF152a ガスは、背景より温度が高いところ（ほとんどのビルの壁面）では発光特性として、背景の温度より温度が低いところ（風景手前の屋根）では吸収特性として計測されていることがわかる。これらの濃淡は、HFC152a ガスの赤外域吸収特性と、SPIC-C プロトタイプを構成するカメラ 3（SPIC-C(LWIR)カメラ）の特性の関係（図 40）と整合していることが確認できた。



図 38. SPIC-C プロトタイプのカメラ 3（SPIC-C(LWIR)カメラ）による屋外風景（ビル群）（表示レンジ：オート）



図 39. SPIC-C プロトタイプのカメラ 3（SPIC-C(LWIR)カメラ）による屋外風景（ビル群）を背景とした赤外透明のポリエチレン袋に封入した空気（左）と HFC152a ガス（右）の試験計測画像（表示レンジ：オート）

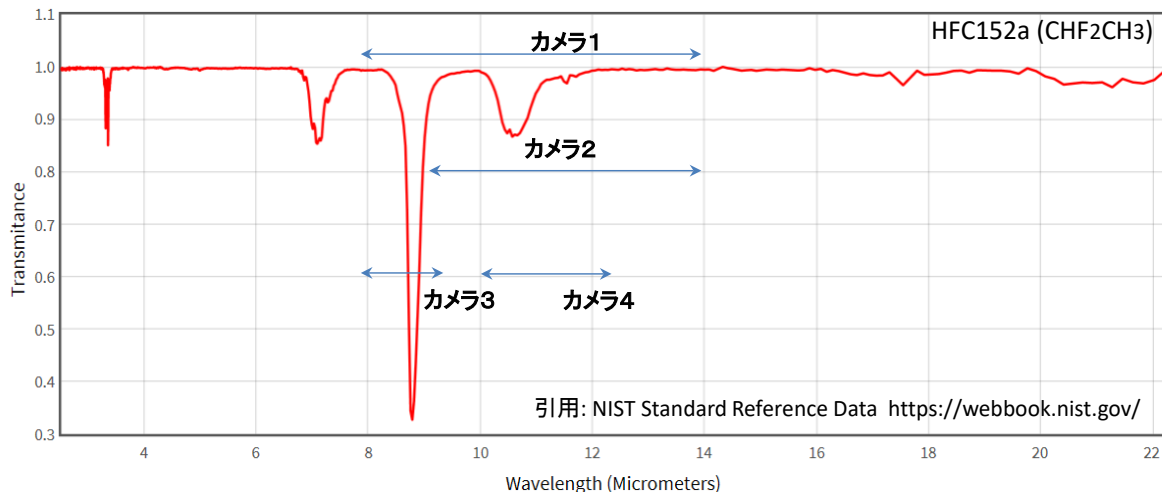


図 40. HFC152a ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの波長感度特性 (↔) との関係

f) 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の開発

スペクトル推定手法のアルゴリズム開発では、昨年度までの開発で、スペクトル推定のデータベースとして多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトル取得が有効と結論したことを受け、本年度は、計測対象の火成岩として、防災科研が有する火山観測井工事で取得したコア試料の画像分光計測手法を検討し、基本的な計測手法を開発し（後述の 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参照）、それらの計測結果に昨年度までのアルゴリズム<sup>1), 9)</sup>が適用できることを確認した。

また、ストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発では、昨年度に開発した、2015 年 12 月 5 日に ARTS-SE のカメラ型センサ：STIC の試験観測で取得した箱根山大涌谷の地熱地帯の可視、赤外画像を用い SfM 処理で求めた地熱地帯の DSM から等高線図を求めるプログラムで局所的な精度評価を実施した<sup>1)</sup>。昨年度までの開発では、DEM と SfM で求めた DSM を Profile line 上で比較すると、オルモザイク画像の端（10～15%程度の周縁領域）以外は、両標高値は、約 20m 以内の差（大涌谷部分を除くと 10m 以内）であった。しかし、可視、熱赤外画像とも画像の端での標高値の差が大きく（約 20～50m）、DSM を求める処理には画像端での歪が生じることが確認された<sup>10), 11)</sup>。本年度の開発では、局所的な地形依存の誤差について解析を行った<sup>1)</sup>。この局所的な評価のため、図 41 に赤枠で示した平坦な地形（大涌谷駐車場付近：parking）と急峻な地形（大涌谷の斜面：slope）に着目し、SfM 処理で推定した DSM と DEM の差を比較した。可視画像の SfM 処理で推定した DSM（可視 DSM）と DEM の差の比較結果を図 42(a)、(b)に、熱赤外画像の SfM 処理で推定した DSM（赤外 DSM）と DEM の差の比較結果を図 43(a)、(b)に示す。どちらの結果も、平坦な地形領域の方が急峻な地形領域よりも DSM と DEM との差の分布の地形への依存性が小さいことがわかる。この原因として、水平位置の推定誤差や、用いた DEM の解像度と SfM 処理で推定した DSM の空間解像度の差の影響等が考えられる。また両図を比較すると、

地形によらず、可視 DSM と DEM の差のほうが赤外 DSM と DEM の差よりも大きい。また昨年度までの Profile line 上での比較を見ると、可視のみ大涌谷付近で DSM と DEM の差（バイアス）が局所的に生じている。この局所的な誤差の原因の解明は今後の課題である。

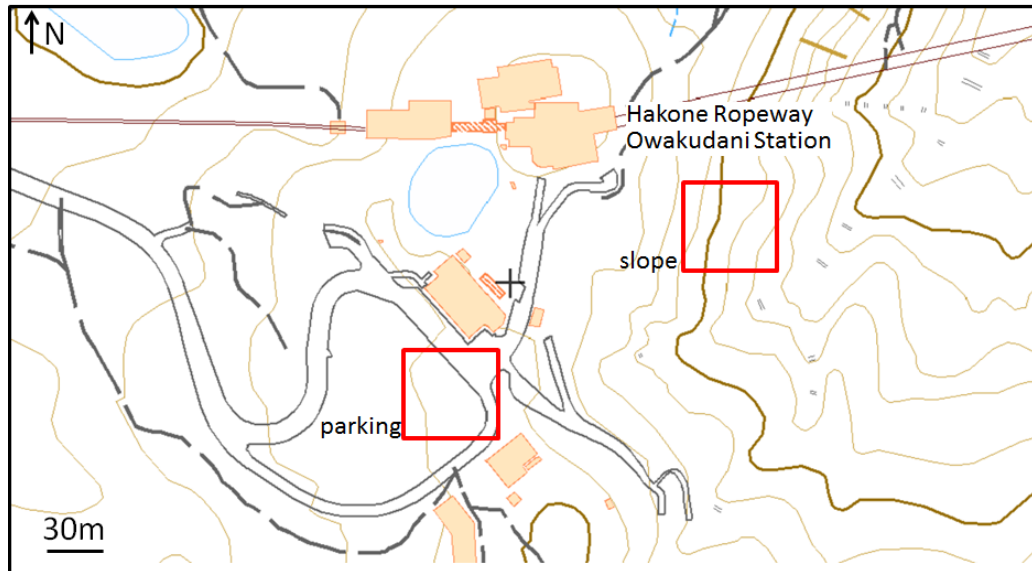


図 41. SfM 処理で推定した DSM と DEM の差の局所的な評価のために選定した、平坦な地形（大涌谷駐車場付近：parking）と急峻な地形（大涌谷の斜面：slope）（赤枠で表示）。国土地理院 GSI Maps を使用。

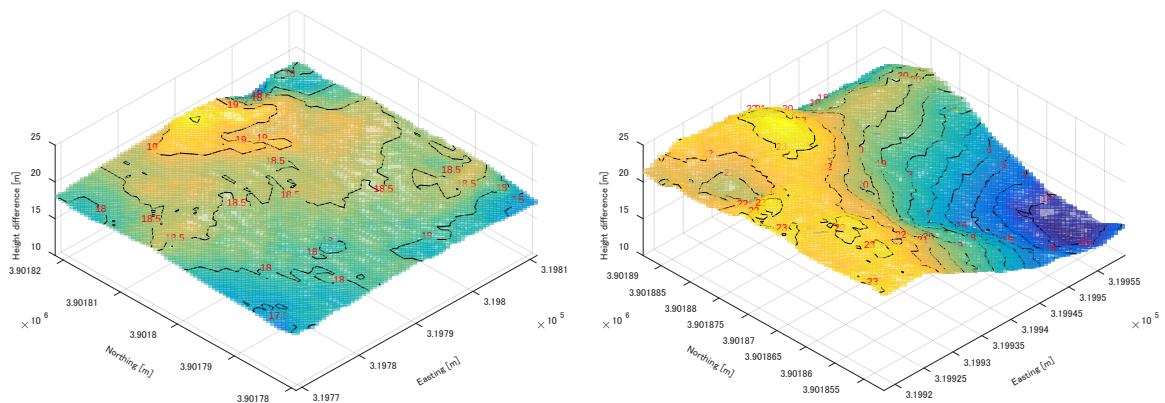


図 42. 可視画像の SfM 処理で推定した DSM（可視 DSM）と DEM の差。(a) 平坦な地形（大涌谷駐車場付近：parking）（図 41 の赤枠）、(b) 急峻な地形（大涌谷の斜面：slope）（図 41 の赤枠）。



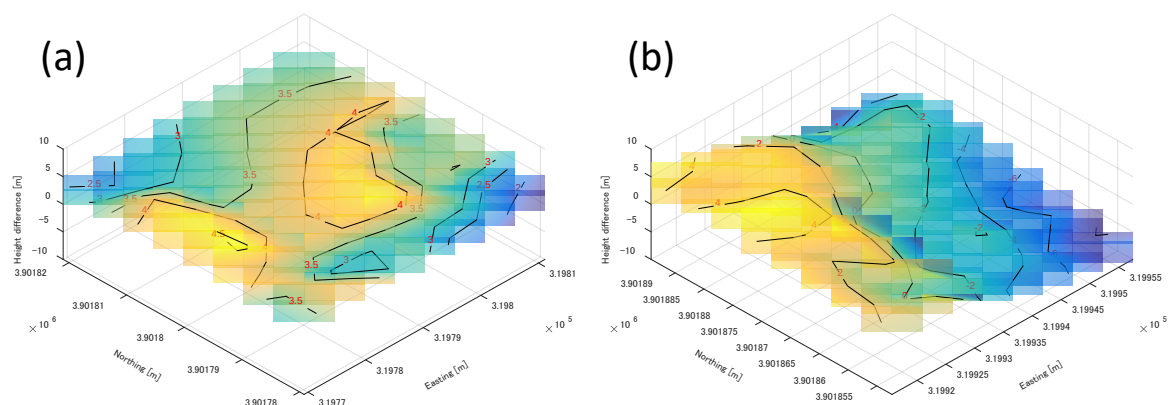


図 43. 赤外（輝度温度）画像の SfM 処理で推定した DSM（赤外 DSM）と DEM の差。  
 (a) 平坦な地形（大涌谷駐車場付近：parking）（図 41 の赤枠）、(b) 急峻な地形（大涌谷の斜面：slope）（図 41 の赤枠）。

これまでの結果より、STIC の画像の端面での処理や局所的な誤差に課題は残るが、可視カメラ、熱赤外カメラを用いたストラクチャ（DSM）の定量的推定は水平方向で  $\pm 4 \sim 12\text{m}$  程度（RMS 誤差：東西方向で  $3.788\text{m}$ 、南北方向で  $5.622\text{m}$ ）、高さ方向で約  $30\text{m}$  程度（局所的な部分を除くと  $10\text{m}$  以内）の誤差で可能であることが分かった。これらの結果より、SPIC の各カメラの計測データのストラクチャ推定手法として SfM が活用できることが示唆される<sup>1), 11)</sup>。

## 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

平成 30 年度は、平成 29 年度に導入した室内用可視画像分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置 (Jasco 製:MSV-5200) を用い、火成岩のスペクトル計測を実施した。

昨年度までの技術開発で、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として活用できることと、および、スペクトル推定のデータベースとして多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトル取得が有効と結論したこと<sup>1)</sup>を受け、本年度は、計測対象の火成岩として、防災科研が有する火山観測井工事で取得した、コア試料の画像分光計測手法を検討し、基本的な計測手法を構築した。

### a) ボーリングコア試料の画像分光計測手法の開発と岩石のスペクトルデータベースのフォーマット検討

i) 構築した計測手法は、コア試料の形状は直径 63mm 長さ約 50cm で、保管の為のコア保管箱 (50cm コア箱) に格納したまま、画像分光装置で約 20cm の長さを計測する手法である。計測の状況を写真 10 に、計測画像を図 44 に示す。計測されたコア試料の長さ方向円筒側面中心部の幅 20mm ほどの領域は十分ピントが良好であり、この領域の画像分光データが取得できること、これまでのスペクトル推定アルゴリズム<sup>1),9)</sup>が適用できることを確認した。

以上の結果より、今後、構築した計測手法を岩石のスペクトルデータベースのフォーマットとし、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画像分光データを順次計測し、スペクトルデータベースの構築を実施する目途が立った。

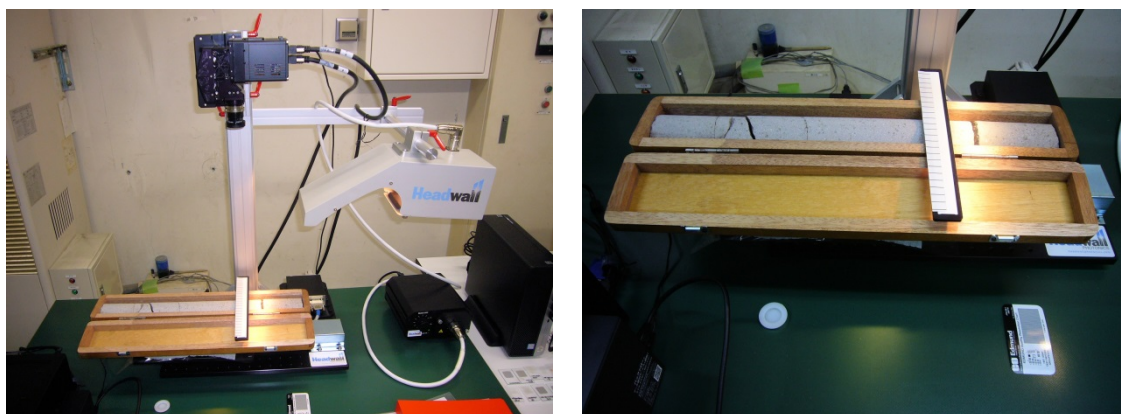


写真 10. 可視画像分光装置によるコア試料の計測。計測全景 (左)、スキャンステージに搭載した計測中のコア試料 (右)。

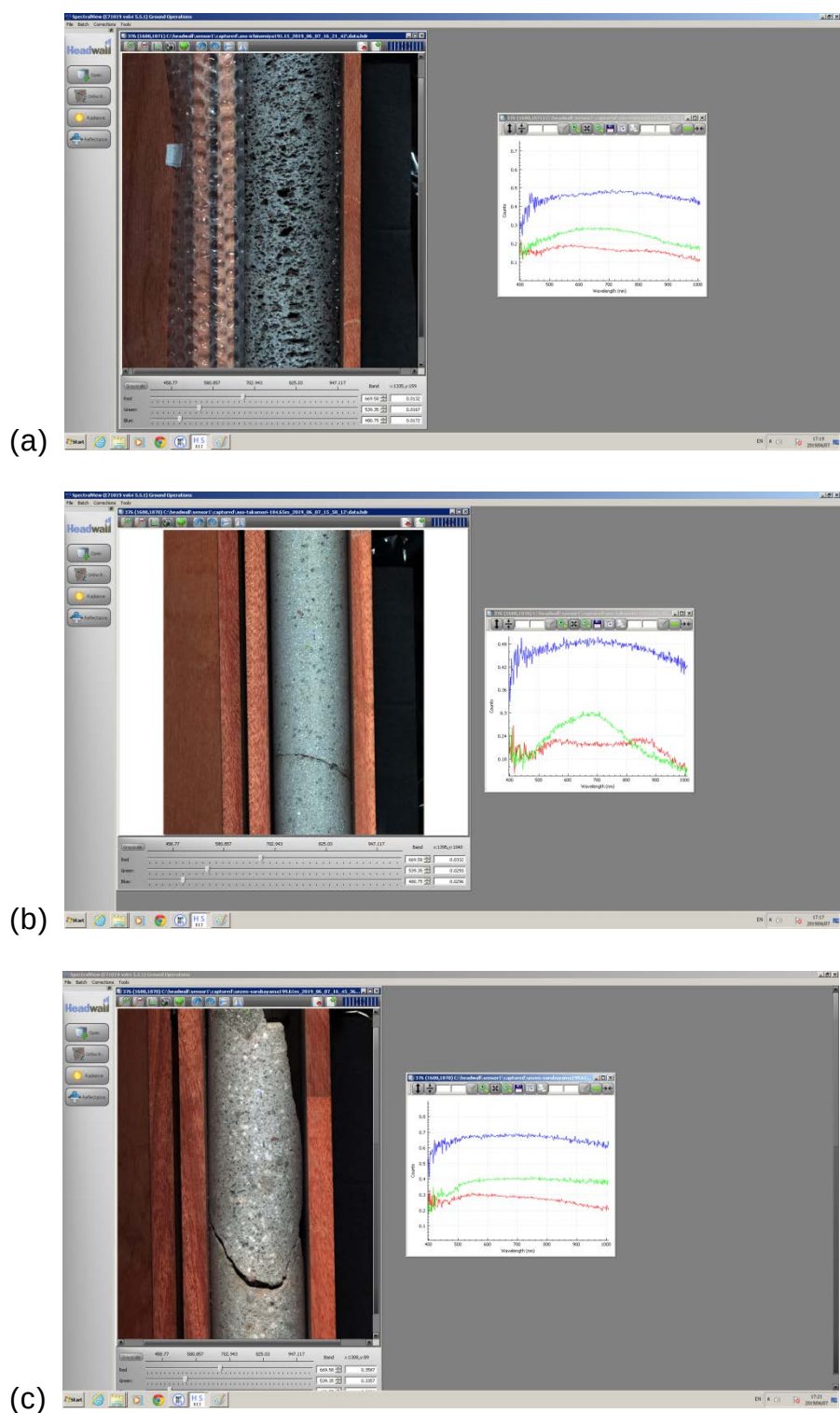


図 44. コア試料の画像分光計測結果。(a)阿蘇山一の宮火山観測施設(ASIV)観測井コア 深度 191.15m~191.38m、(b) 阿蘇山高森火山観測施設(ASTV)観測井コア 深度 184.65m~184.88m、(c) 雲仙岳猿葉山火山観測施設(UNSV)観測井コア 深度 199.65m~199.88m。各コアの画像は 376 バンドから 3 バンド選び、R:669nm/G:539nm/B:480nm で表示した疑似カラー画像。

### (c) 結論ならびに今後の課題

#### 1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

本年度は、SPIC の各プロトタイプとして、多眼のマルチバンドカメラからなる可搬型の非冷却型赤外カメラ（4 眼の SPIC-UC(4VGA)、4 眼の SPIC-UC(2XGA/2VGA)）、冷却型赤外カメラ（4 眼の SPIC-C）、可視カメラ（6 眼の SPIC-SS）の各プロトタイプを実現できた<sup>1)</sup>。SPIC-UC と SPIC-C では温度とガス濃度分布を同時に可視化できる。SPIC-SS では観測対象の形状と可視スペクトルを推定できる。また各プロトタイプは同期観測が可能であり、SPIC-SS と他のプロトタイプを同期させることで、SPIC-UC/SS、SPIC-C/SS を機能的に構成・実現できる。

これらの開発では、フィルター分光方式の画像分光装置（ISH）を有する非冷却型および冷却型の VGA（640×480 画素）型の赤外カメラセンサーヘッドの、温度および SO<sub>2</sub> ガス濃度分布の可視化機能を、シミュレーションとガス可視化試験観測により検証し、その機能の実現を確認できた<sup>1), 6), 7)</sup>。また、より高精細な、温度および SO<sub>2</sub> ガス濃度分布の可視化機能を有する XGA サイズ（1024×768 画素）型の画像センサーを有する赤外カメラセンサーヘッドを開発した。またカメラ型センサデータの SfM 処理手法の精度検証を行った<sup>1), 11)</sup>。また、これらの機器 4 台をフレーム同期（30Hz）させる同期計測機構を開発し動的な対象の観測が可能になった。さらに、これまでの開発を通じ、各装置は日本国内での開発・保守・較正を行う協働体制が構築できた。構成部品は海外製を含むが、それらを含む各装置はすべて日本国内での開発、改良、保守ができる体制を構築でき、今後、装置を普及する際の関係者の体制を整えることができた。

各プロトタイプの開発では各カメラセンサーヘッドを格納する保護ハウジング機能を開発でき、開発する SPIC の各プロトタイプを屋外仕様とすることが可能になった。当初計画では各プロトタイプは室内仕様を想定していたが、本年度の開発により、各プロトタイプに屋外観測機能を付加することができたのは、予定を上回る進捗である。これにより、2021 年度までに実現予定である小型の屋外仕様（SPIC フィールドタイプ）の開発の検討に、本年度開発した SPIC プロトタイプの屋外での使用結果をフィードバックした開発が実現できる。今後、これらの SPIC プロトタイプによる阿蘇山の噴煙観測（火山ガス観測）を阿蘇火山博物館の協力のもと実施する予定である。これらを通じ、各プロトタイプの小型化手法を具現化することおよび各プロトタイプの計測画像による SfM 処理の実現が今後の課題である。

さらに、新規な ISH の開発として、干渉画像分光方式の試験装置を構築できた。今後は、これらの装置を用いた実験により、新規な画像分光装置の製作のための開発を実施することが課題である。

#### 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

本年度の開発では、SPIC-SS のスペクトル推定手法の開発時に取得した画像分光データの取得方法の検討結果を活用し、岩石のスペクトルデータベースのフォーマットの提供として、防災科研の火山観測点で取得されたボーリングコア試料の画像分光データの取得手順を試験的に開発でき、これまでのスペクトル推定アルゴリズム<sup>1)</sup>が適用できる

ことを確認した。

以上のこれまでの検討結果を受け、今後、本年度構築した計測手法を岩石のスペクトルデータベースのフォーマットの候補とし、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画像分光データを順次計測し、スペクトルデータベースの構築を実現することが今後の課題である。

#### (d) 引用文献

- 1) 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.
- 2) T. Jitsufuchi, “Development of a new airborne hyperspectral imager for volcano observations,” Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, pp. 657-660, 2010.
- 3) T. Jitsufuchi, “Thermal infrared surveys for mapping surface temperature and sulfur dioxide plumes at SAKURAJIMA VOLCANO (MINAMIDAKE A-CRATER, SHOWA CRATER) using the airborne hyperspectral scanner,” Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International, pp. 715-718, 2013.
- 4) A. Berk, L. Bernstein and D.C. Robertson: MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, Air Force Geophysics Laboratory Technical Report, GL-TR-89-0122 (1989).
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 實渕哲也, 2018, 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.
- 11) 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.



## (e) 成果の論文発表・口頭発表等

| 著者                 | 題名                                                                                                                                                                                                                      | 発表先                                                                  | 発表年月日            |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------|
| Tetsuya Jitsufuchi | Development of an optical remote sensing technique for volcanic surface phenomena observation to estimate hyperspectral data from multispectral data                                                                    | JpGU Meeting 2019                                                    | 2019 年 5 月 26 日  |
| 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, p198                                                                                                                                                                       | 日本火山学会 2019 年度秋季大会                                                   | 2019 年 9 月 26 日  |
| 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                                             | 2019 年 11 月 29 日 |
| Tetsuya Jitsufuchi | REPEATED OBSERVATIONS WITH SHORT TIME INTERVALS FOR MEASURING TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A VOLCANIC CRATER USING AN AIRBORNE MULTISPECTRAL SCANNER, pp. 1809-1812, 2019.                                               | Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), IEEE International Symposium | 2019 年 7 月       |
| Tetsuya Jitsufuchi | DEVELOPMENT OF AN AIRBORNE RADIATIVE TRANSFER SPECTRAL SCANNER FOR A SINGLE-ENGINE AIRCRAFT, pp. 9141-9144, 2019.                                                                                                       | Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), IEEE International Symposium | 2019 年 8 月       |
| Tetsuya Jitsufuchi | Development of an optical multispectral remote sensing system for measuring volcanic surface phenomena<br>-Promotion Project for Next Generation Volcano Research B2(subtopic2-2), Vol. 14, No. 5, pp. 728 - 743, 2019. | J. Disaster Res.                                                     | 2019 年 8 月       |
| Takahiro Miwa      | Measurement of H <sub>2</sub> O molecule and hydroxyl concentrations in hydrous rhyolitic glass by UV-Vis-NIR dispersive micro-spectroscopy, Vol. 14, No. 5,                                                            | J. Disaster Res.                                                     | 2019 年 8 月       |

|  |                      |  |  |
|--|----------------------|--|--|
|  | pp. 780 - 785, 2019. |  |  |
|--|----------------------|--|--|

- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定  
赤外カメラ用同期制御・記録ソフトを改良した。

### (3) 令和 2 年度業務計画案

令和 2 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  $\mu\text{m}$ ) 型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14  $\mu\text{m}$ ) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化する。MWIR (3~5  $\mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5  $\mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のプロトタイプを改造し小型化する。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ (ISH) を改造し小型化する。スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のプロトタイプを改造し小型化する。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。

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

#### 2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

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

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