

3. 2 リモートセンシングを活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 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」
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
	研究統括	宮城 洋介	m_yosuke@bosai. go. jp
国立大学法人東京大学地震研究所 地震火山噴火予知研究推進センター	助教	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リモートセンシング技術の活用が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り、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：

- ・ 可搬型レーダー干渉計による観測データの解析ソフトウェアを開発する。
- ・ 地上設置型方式での実験観測を実施し、その改良点について検討する。
- ・ 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、解析手法に関する検討を行う。
- ・ 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。

4) 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 30 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

平成 29 年度においては、可搬型レーダー干渉計の開発研究に用いるための実験機を作製した。平成 30 年度においては、可搬型レーダー干渉計の観測データから地殻変動情報を求めるソフトウェアを開発する。また、野外における実験観測を行い、初期性能評価、繰り返し観測手法検討のためのデータ取得、降雨等に対する耐環境性能に関する改良に向けた基礎的な実験観測、車載方式による観測手法の検討に向けた基礎的な実験観測を実施する。

2) 衛星 SAR による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR から得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順（標準的解析手法）に基づいて SAR データの解析を行う。平成 30 年度においては、その標準的解析手法における電離圏遅延誤差を軽減する手法を決定する。また、SAR 解析により得られる地殻変動を時系列化する手法についての基礎的な検討も行う。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 データの解析を実施し、地殻変動データを作成する。他の観測データとの比較についても検討を行う。

フランスで開催される Wegener Conference、および、アメリカで開催される AGU Fall Meeting に参加し、海外における最新の SAR 解析技術を調査するとともに、本課題で得られた解析結果についての報告を行う。

(2) 平成 30 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設置位置の誤差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、L-band のレーダー波を採用することによって解決する。②の再設置の簡便性、および、③の設置誤差補正の機能については、実験観測を繰り返して、開発を進めていく必要がある。さらに、本課題においては、レーダーセンサーを車両に搭載したままで、計測を可能とする機能（車載型）の開発も試みる。この機能の開発においても、実験観測を繰り返す必要がある。そこで、それらの実験観測に用い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 年度に作製した。平成 30 年度においては、可搬型レーダー干渉計による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、可搬型レーダー干渉計実験機による野外初観測を浅間山において実施し、目標とする 4km 先の観測を実施するためには、SN を向上させる必要があることがわかった。そこで、システムノイズを低減させる改良を適用し、再観測を実施した結果、4km 先の観測も可能となった。また、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。

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、自動解析システムを構築し、その解析結果をデータベース化する。そこで、データベース化のための処理方法（標準的解析手法）についての検討を進める。

図 1 に、想定している標準的解析手法の解析手順を示す。平成 30 年度においては、Split-spectrum 法による電離圏遅延誤差の軽減処理を標準的解析手法に組み込むことについての検討を行った。Split-Spectrum 法による電離圏遅延成分の抽出手法は、Brcic *et al.* (2010)、Rosen *et al.* (2010)、Gomba *et al.* (2016)によって述べられているが、それとは異なる計算式に基づく 2 つの手法を Wegmüller *et al.* (2018)が提案している。これらの研究で提案されている 3 つの手法を、比較的大きな電離圏誤差が含まれる PALSAR-2 の SM1 モード（帯域幅 80MHz）の吾妻山周辺の干渉ペアに適用したところ、電

離圏遅延成分を有効に低減することができた。また、この事例解析においては、どの手法を適用しても、ほぼ同じ結果が得られた。より一般的な適用性能を調査するため、PALSAR-2 の SM1 モード（帯域幅 80MHz）の霧島山を含む約 4.3 年間に取得された 21 シーンのデータを解析したところ、観測間隔が長く、干渉性が低い干渉ペアについては、Brcic *et al.* (2010)、Rosen *et al.* (2010)、Gomba *et al.* (2016)によって述べられている手法が、欠損領域なく電離遅延成分を推定できた。一方、PALSAR の FBS(帯域幅 28MHz)、FBD(帯域幅 14MHz)については、観測間隔が短く、干渉性が高い干渉ペアについては、電離遅延成分を効果的に推定することができたが、干渉性が低い干渉ペアについては、推定誤差成分が大きく、地殻変動検出精度を大きく劣化させる場合が多かった。

以上の結果から、PALSAR-2 データに関するデータベース化のためのルーチン解析においては、その地域の特性或対象の大きさ等を考慮して、電離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、Brcic *et al.* (2010)、Rosen *et al.* (2010)、Gomba *et al.* (2016)による手法を用いることとする。電離遅延誤差軽減手法を組み込まない場合には、解析結果をチェックして、電離遅延擾乱が大きい場合に、手動解析によって、電離遅延誤差軽減手法を適用することとする。PALSAR データの解析においては、電離遅延誤差軽減手法を組み込まない場合と同様とする。

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 のデータを用いた干渉解析を行った。有珠山の解析においては、過去の火山活動にともない貫入した溶岩ドーム周辺において、長期的に継続する収縮変動が見られ、過去の水準測量や EDM の結果と比較・解釈することにより、この収縮変動は地下のマグマだまりの熱収縮によると推

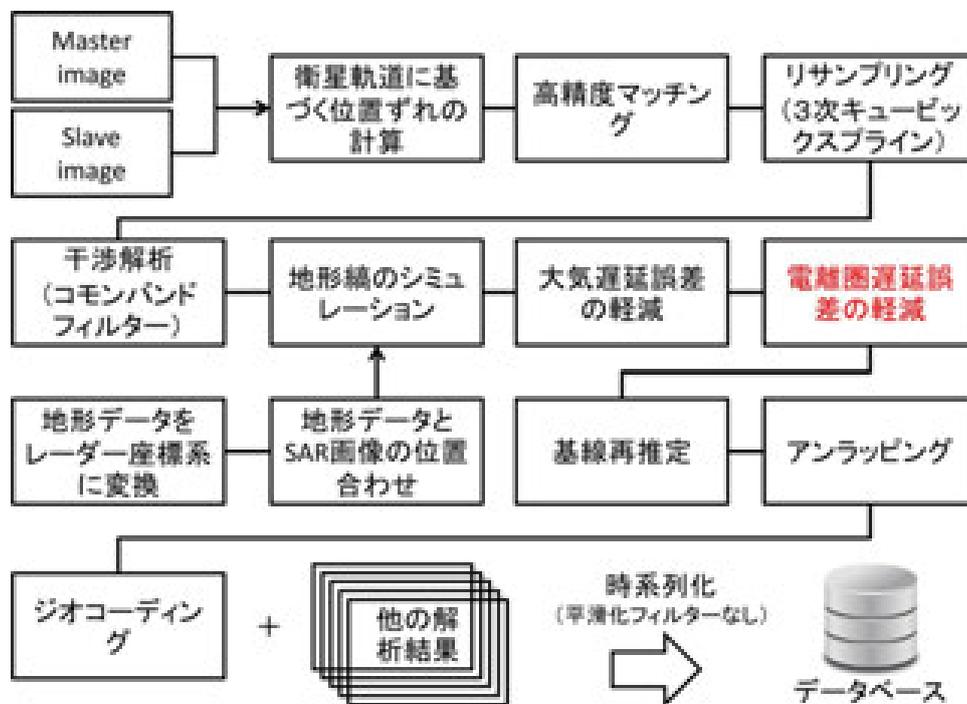


図 1. データベース作成のための SAR 干渉解析手順

測される。伊豆大島の解析においては、画像全体が陸地のデータを解析する場合の解析手順をそのまま使用すると、大きな解析誤差を生じる場合があり、島嶼の解析においては、その大きさ等を考慮して、適切な解析手順を模索し、解析システムを構築する必要性が示された。

有珠山の解析結果については、ウェゲナー、AGU において発表するとともに、世界における SAR 解析に関する動向についての情報収集を行った。

(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

a) ソフトウェアの開発

平成 29 年度における可搬型レーダー干渉計実験機の作製において、観測データに圧縮処理を適用して、SAR 画像 (Single Look Complex (SLC) 画像) を作成するソフトウェア、位相差を計算して干渉画像を作成するソフトウェアも作成した。その結果を地殻変動の解釈に用いることが可能な地殻変動情報に変換するためには、位相アンラッピング処理 (干渉画像の各ピクセルに格納される位相が持つ 2π ラジアン の整数倍の不確定性の解決)、位相差から距離変化量への変換、レーダー座標系から地図座標系への変換が必要である。これらの処理を精度よく処理するためには、マルチルック処理、フィルタリング処理、干渉性 (コヒーレンス) の計算等の処理が必要である。また、得られた地殻変動情報の解釈においては、ピクセル毎のレーダー波入射方向ベクトルも得る必要がある。さらに、将来のリピートパスの観測、車載方式による観測データを解析するためには、直線でない軌道で観測されたデータに圧縮処理を適用して、SAR 画像を得る解析ソフトウェアの開発も必要である。そこで、平成 30 年度においては、以下に示す機能に関するソフトウェアを開発した。

- ① マルチルック干渉画像作成機能
- ② コヒーレンス画像作成機能
- ③ ノイズ低減フィルター機能
- ④ シミュレート画像差分機能
- ⑤ アンラッピング処理機能
- ⑥ 位相差・スラントレンジ変化量変換機能
- ⑦ ジオコーディング機能 (レーダー座標系から測地座標系への変換)
- ⑧ 観測位置・軌道を補正した合成開口処理機能

b) 可搬型レーダー干渉計実験機による野外観測実験

平成 29 年度に作成した可搬型レーダー干渉計実験機の初期性能評価を目的とした野外における初観測を浅間山において実施した。この観測における目的は、本開発が目標とする 4km 先の画像が得られるかどうかの確認、約 1 時間の観測における時間的な位相変化および干渉性の劣化状況を調査することである。本観測において、改良すべきところが見つかった場合には、年度内で可能な範囲で改良を行い、再観測により

確認を行う。

また、可搬型レーダー干渉計によるリピート観測をより簡便に実施するための開発を進めるための基礎的な計測実験も行った。具体的には、台車および車の屋根にアンテナを搭載して観測を行う。レールを用いた地上設置方式による観測においては、アンテナの軌道は直線とみなすことができ、そのレール上の位置はアンテナを移動させるギアの回転数から精密に計算することが可能であるのに対して、台車や車載方式による観測においては、軌道は直線でなく、さらに、その位置を GPS/IMU で求める必要がある。その開発のための基礎的な実験として、現在の装備でどの程度の解析が可能かを確認し、今後の改良点を明らかにする。

c) 可搬型レーダー干渉計実験機の耐環境性能に関する改良

降雨や降灰等の可搬型レーダー干渉計への影響を低減するため、ヘッド部に装着する外装を作製するとともに、アンテナにレドームを装着する。

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

a) 可搬型レーダー干渉計実験機の耐環境性能に関する改良

電離圏におけるレーダー波の伝搬遅延は、SAR 干渉法の適用における大きな誤差要因の一つである。電離圏は高度約 60~1000km の間に位置し、主に太陽紫外線による中性粒子の電離により、電子密度が高くなっている領域である。電子密度が高い領域をレーダー波が伝搬すると、伝搬速度の変化や屈折が生じるため、遅延が生じる。この遅延量の観測毎の変化が、SAR 干渉法による地殻変動検出における誤差となる。電離圏遅延成分は画像サイズと比べて比較的波長が長い場合が多く、干渉画像の位相分布に双二次曲面等の関数を当てはめて、その成分を除去する方法が一般的に用いられている。しかし、電離圏擾乱が大きい場合には、そのような関数のあてはめでは十分に電離圏遅延成分を除去できない場合がある。そのような大きな電離圏擾乱が生じる頻度は高くないが、大きな誤差を生じる場合があるので、有効に適用可能な電離圏遅延誤差の軽減手法があれば、それを標準的解析手法に組み込みたい。最近では、Split-spectrum 法 (e.g., Brcic *et al.*, 2010; Rosen *et al.*, 2010; Gomba *et al.*, 2016) が、電離圏遅延誤差を軽減させる有用な方法として用いられるようになりつつある。ただし、この手法はまだ新しく、十分に成熟された解析手法となっているとはいえない。そこで、本課題において、データベース化のための自動解析に組み込むことが妥当かどうかについて検討する。

Split-spectrum 法は、SAR 観測に用いるチャープ信号の帯域を高周波側と低周波側に分割した SAR 画像を作成し、高周波側の干渉ペアと低周波側の干渉ペアから得られる干渉画像において、電離圏遅延成分と地殻変動等の成分の周波数に対する応答の違いを利用して、電離圏遅延成分を推定する。フルバンド SAR 画像、低周波側 SAR 画像、高周波側 SAR 画像の中心周波数を f_0 , f_l , f_h 、低周波側の干渉ペアと高周波側の干渉ペアから得られる干渉画像の位相差を ϕ_l , ϕ_h とすると、電離圏遅延成分 ϕ_{iono} は、

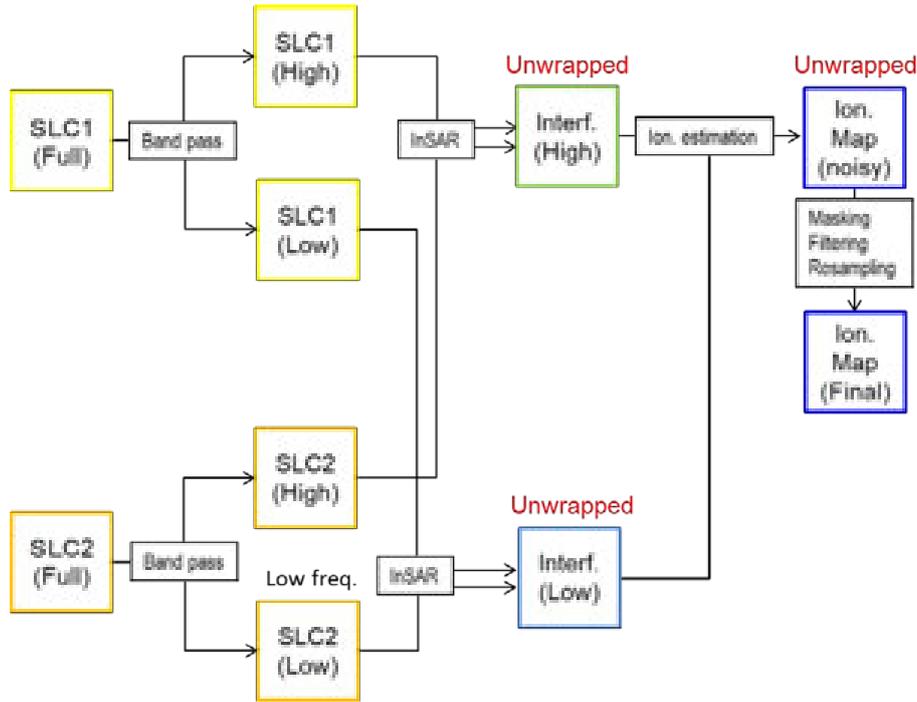


図 2. 手法 1 による電離圏遅延成分推定の解析手順

$$\phi_{iono} = \frac{f_h f_l (\phi_{ifh} - \phi_{ifl})}{f_0 (f_h^2 - f_l^2)} \quad (1)$$

で記述される (*e.g.*, Brcic *et al.*, 2010; Rosen *et al.*, 2010; Gomba *et al.*, 2016)。この手法による解析手順を図 2 に示す。最初に、Single Look Complex (SLC) 画像にチャープ信号の帯域をバンドパスフィルターにより半分に分割し、高周波側の SLC 画像と低周波側の SLC 画像を作成する。そして、高周波側と低周波側のそれぞれのペアで干渉解析を行う。干渉度の低い領域では短周期ノイズが大きくなるため、干渉画像について指定する窓サイズでアンサンブル平均を求める (以下、2nd ルックと呼ぶ)。これにアンラッピング処理を適用することにより式(1)の ϕ_l , ϕ_h を求め、式(1)から電離圏遅延成分 ϕ_{iono} を求める。さらに、異常値のマスク処理、フィルターを適用し、補間により 2nd ルックをとる前の画像サイズの電離圏遅延画像を作成する。以下では、この手法による電離圏遅延成分推定法を手法 1 とする。

経験的に、干渉性が高い干渉ペアにおいては、この式から精度よく電離圏遅延成分を推定できるが、干渉性が低い干渉ペアにおいては、主にアンラッピングの困難により、精度が劣化する場合が多い。また、 f_l と f_h の幅が狭い場合には電離圏遅延に対する感度が低いため、処理上のノイズが大きく増幅されるという問題がある。そこで、Wegmüller *et al.* (2018) は、電離圏遅延成分の導出方法を見直し、

$$\phi_{iono} = A\phi_0 + B(\phi_h - \phi_l) \quad (2)$$

から電離圏遅延成分を推定する方法を提案した。ここで、 ϕ_0 はフルバンド SAR 画像の

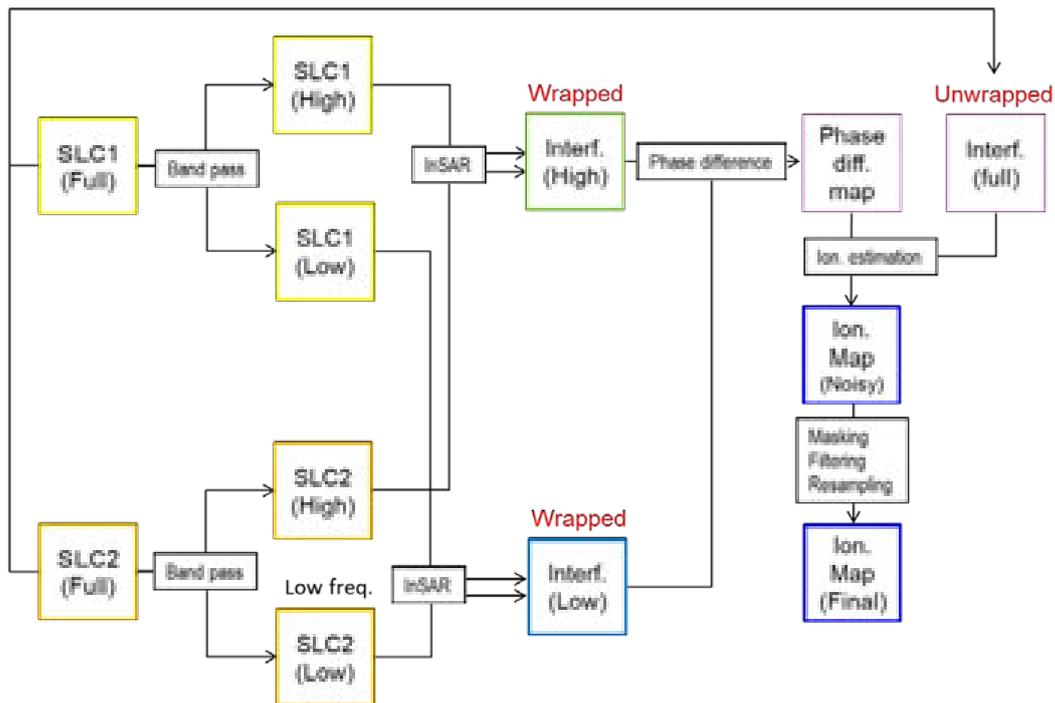


図 3. 手法 2 による電離圏遅延成分推定の解析手順

干渉ペアから得られる位相差であり、A および B は中心周波数から求められる係数である。帯域幅が広いほど干渉性が良い場合があり、第 1 項は周波数を分割した干渉ペアよりもアンラッピングは比較的容易になる可能性がある。第 2 項は、ほとんどの場合で $-\pi$ から $+\pi$ の値に入るため、複雑なアンラッピング処理を必要とせず、容易に位相差を求めることが可能である。この手法による解析手順を図 3 に示す。干渉画像を作成するところまでは、手法 1 と同じだが、それ以降は、アンラッピングしていない干渉画像から高周波側と低周波側の位相差 ($\phi_h - \phi_l$) を求め、さらにフルバンドの干渉画像のアンラッピング画像から求まる ϕ_0 も用いて、式 (2) から電離圏遅延成分を推定する。つまり、この手法においては、大きな誤差が生じる可能性が大きいアンラッピング処理を 1 回ですむという利点がある。また、この解析においても、2nd ルックをとった画像を用いることとする。以下では、この手法による電離圏遅延成分推定法を手法 2 とする。

手法 2 を用いても、フルバンドの干渉画像のアンラッピングが必要である。しかし、A がほぼ 0.5 であることに着目すると、

$$2\phi_{iono} = \phi_0 + 2B(\phi_h - \phi_l) \quad -(3)$$

と近似することが可能である。前述したように、第 2 項は容易に位相差を推定することが可能なので、アンラッピングすることなしに、電離圏遅延成分のみを示す干渉画像を得ることが可能である。推定される電離圏遅延成分は、 $-\pi$ から $+\pi$ ラジアンにラップされた画像であるため、最終的にアンラッピング処理が必要なるが、大きな地殻変動によりアンラッピングが困難な場合には、この手法によって電離圏遅延成分のみ

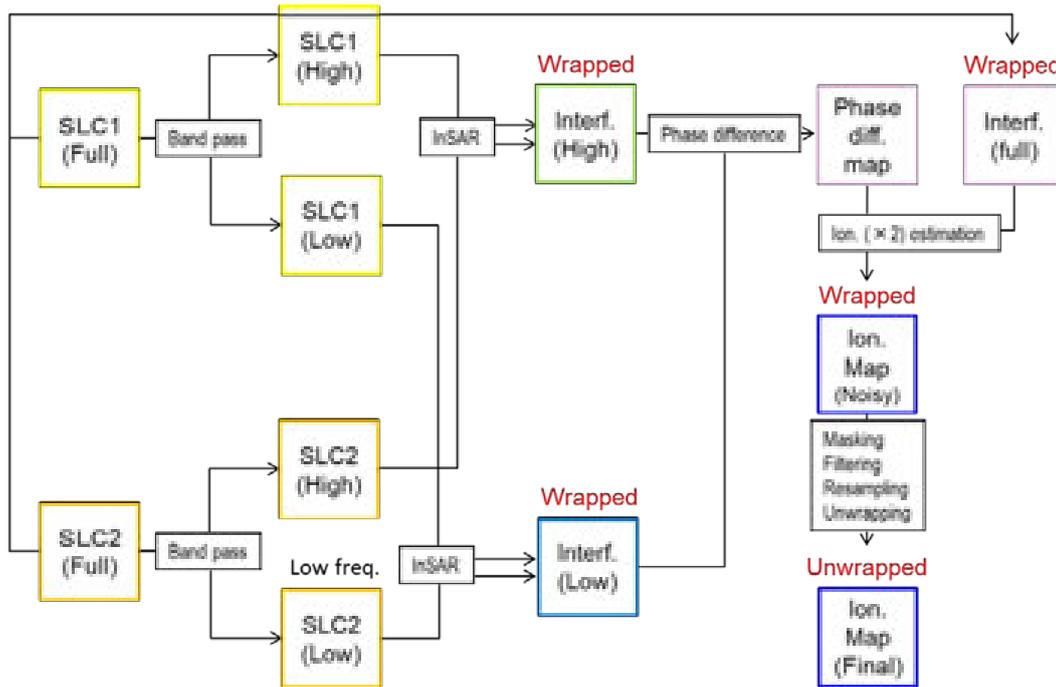


図 4. 手法 3 による電離圏遅延成分推定の解析手順

を抽出できるので、アンラッピングが容易になる場合がある。以下では、この手法による電離圏遅延成分推定手法を手法 3 とし、その手順を図 4 に示す。電離圏遅延推定手法に関する検討においては、以上で述べた手法 1~3 についての事例解析を行い、標準的解析手法への組み込みの妥当性について調査した。

b) 有珠山および伊豆大島に関する SAR 干渉解析

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、①有珠山と②伊豆大島に関する PALSAR および PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析を実施した。有珠山については、JERS-1 のデータも解析したほか、過去の水準測量や EDM による地殻変動情報と比較・検討した。

c) 成果発表および海外における SAR 解析研究の動向についての調査

2018 年 9 月 10 日から 13 日までグルノーブル（フランス）で開催された Wegener Conference および 12 月 10 日から 14 日までワシントン DC（アメリカ合衆国）で開催された米国地球物理学会秋季大会に参加し、有珠山の解析において得られた結果の成果発表および海外における SAR 解析研究の動向についての調査を行った。

(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) ソフトウェアの開発

平成 30 年度に開発したソフトウェアの各機能の説明を以下に述べる。

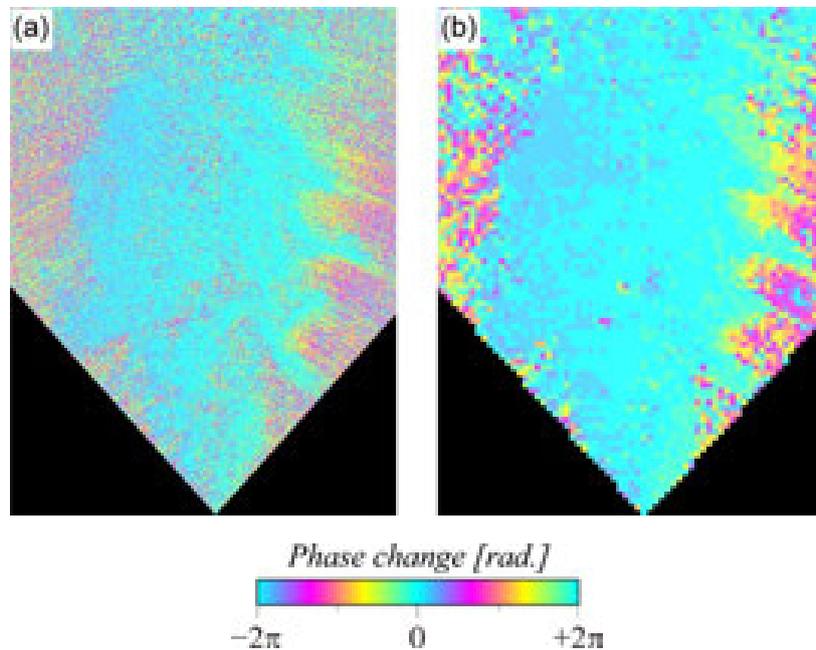


図 5. (a)シングルルックの干渉画像 (b)5×5 ルックで作成した干渉画像

① マルチルック干渉画像作成機能

一般に、干渉性が低い干渉画像では、短波長のノイズ成分が卓越するため、地殻変動検出精度が劣化するほか、後に適用するアンラッピング処理が困難になる。そこで、マルチルック処理や干渉画像フィルター等を適用して、干渉縞の連続性を高める必要がある。本機能は、そのマルチルック処理に関するものである。この処理においては、設定する窓サイズ (nx、ny) における位相差 ϕ を

$$\phi = \sum a/n + i \sum b/n \quad -(4)$$

から求める。ここで、a と b は干渉画像の各ピクセルに格納される複素数の実部と虚部であり、n は窓の中のピクセル数である。本機能においては、干渉ペアの 2 枚の SLC からマルチルック干渉画像を作成する。図 5 に、シングルルック、5×5 ルックで作成した干渉画像の比較を示す。5×5 ルックで作成した干渉画像では分解能は低下しているが、細かなノイズが平均化され、滑らかな位相分布となっていることがわかる。

② コヒーレンス画像作成機能

コヒーレンス γ (干渉性) は

$$\gamma = |\Sigma y_m y_s^*| / (\Sigma y_m^2 \Sigma y_s^{*2})^{1/2} \quad (5)$$

から求められる干渉度を示す指標の一つであり、0 から 1 の間の値で示される。ここで、 y_m と y_s はマスターSLC 画像およびスレーブ SLC 画像の各ピクセルに格納される複素数で

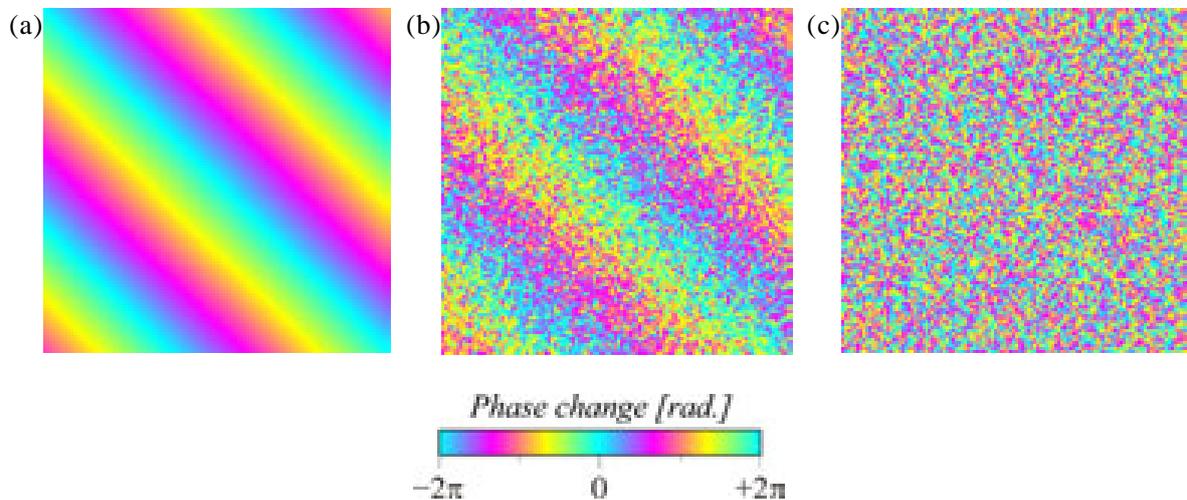


図 6. (a) コヒーレンス 1.0 の干渉画像。(b) コヒーレンス 0.5 の干渉画像。(c) コヒーレンス 0.0 の干渉画像。

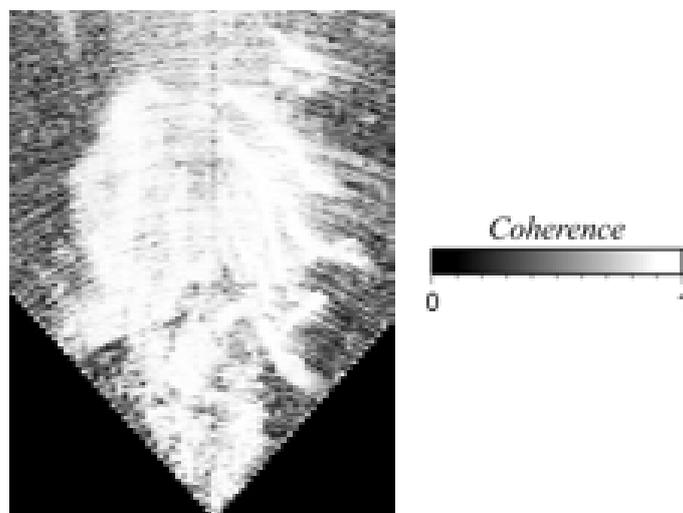


図 7. 図 5 に示す干渉画像に関するコヒーレンス画像

あり、*は複素共役を意味する。コヒーレンスが 1 に近いほどノイズが少なく、0 では干渉縞の連続性がまったく見られない (図 6)。本機能で作成した、図 5 に示す干渉画像に関するコヒーレンス画像を図 7 に示す。

③ 低減フィルター機能

一般に、干渉性が低い干渉画像では短波長のノイズ成分が卓越し、地殻変動検出精度が劣化するほか、後述するアンラッピング処理が困難になる。そこで、マルチルック処理や干渉画像フィルター等を適用して、干渉縞の連続性を高める必要がある。本機能は、

干渉画像に適用するノイズ低減フィルターに関するものである。これまで、干渉画像に適用する数多くのフィルターが提案されているが、もっともよく用いられるフィルターは、Goldstein and Werner (1998)によるスペクトル強調フィルター、もしくは、それを応用したフィルターである。このフィルターは、干渉画像に高速フーリエ変換を適用

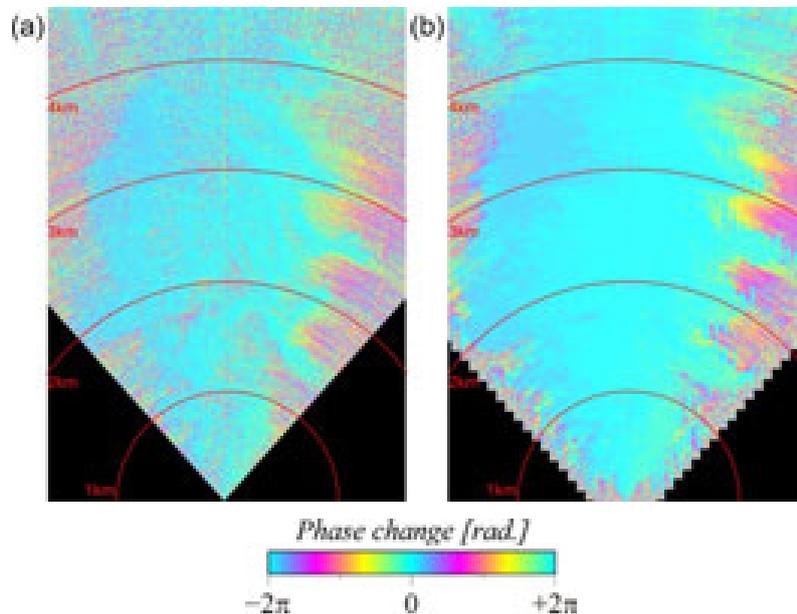


図 8. (a)干渉画像フィルター適用前 (b)干渉画像フィルター適用後 ($\alpha=0.5$)

してスペクトル $Z(u, v)$ を求め、 $0 \sim 1$ のフィルター係数 α を用いて、出力する干渉画像のスペクトル $H(u, v)$ を次式から求める。

$$H(u, v) = |Z(u, v)|^\alpha Z(u, v) \quad -(6)$$

この計算結果に逆フーリエ変換することによって、フィルター窓の範囲で卓越する位相差分布を強調させる。さらに、計算するフィルター窓を $3/4$ ずつオーバーラップさせて計算し平均する。本フィルター適用前の干渉画像と $\alpha=0.5$ でフィルターを適用した干渉画像を図 8 に示す。

④ シミュレート画像差分機能

地殻変動を精度よく検出するため、干渉画像から外部プログラム等から求めたモデル位相画像を差し引く処理が必要になる場合がある。本機能は、その差分処理に関するものである。

⑤ アンラッピング処理機能

干渉処理によって得られる画像には $-\pi \sim +\pi$ ラジアン位の位相差が格納され、各ピクセルの位相差情報には 2π ラジアン位の整数倍の不確実性を持つ。得られた位相差情報を地殻変動解析に用いるためには、その不確実性を解決する必要がある。この処理はアンラッピング処理と呼ばれる。本ソフトウェアにおいては、InSAR 処理において良く用いられる

アンラッピングアルゴリズムの一つであるブランチカット法 (Goldstein *et al.*, 1988) を採用した。本ソフトウェアのアンラッピング機能を用いた処理例を図 9 に示す。

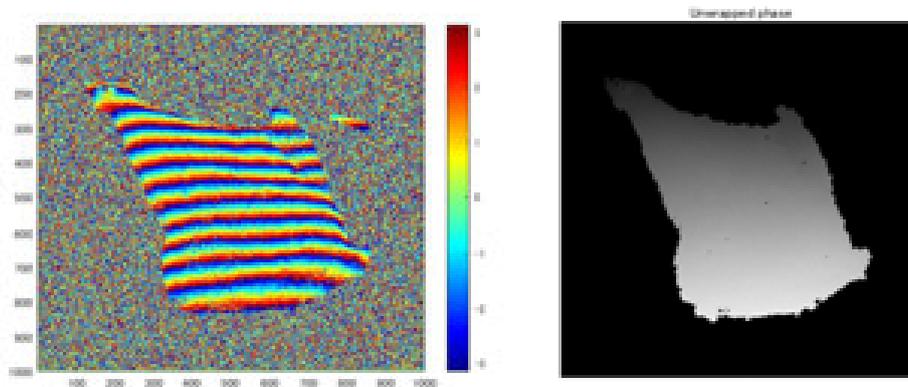


図 9. アンラッピング機能の解析例 (PALSAR-2 による小笠原硫黄島の干渉画像)

⑥ 位相差・スラントレンジ変化量変換機能

SAR 干渉法により得られる変化情報は、位相変化 (radian) なので、距離変化 (m) に変換する必要がある。本機能においては、アンラッピング処理された位相変化 ϕ を距離変化 ρ に、次式に従って変換する。

$$\rho = \lambda \phi / 4\pi \quad (7)$$

ここで、 λ はレーダー波の波長である。

⑦ ジオコーディング機能 (レーダー座標系から測地座標系への変換)

可搬型レーダー干渉計の観測データに圧縮処理を適用して得られる SAR 画像の画素は、レーダー座標系 (横方向: スラントレンジ、縦方向: アンテナ移動方向) で格納されており、地殻変動の精密な解釈に用いるためには、画像を測地座標系に変換する必要がある。レーダー観測からは各ピクセルのセンサーからの距離と方位は求まるが、測地座標系における座標は一意には決まらない。ただし、可搬型レーダー干渉計から得られる画像のピクセルは地表に位置すると考えられるので、地形情報があれば、図 10 に示すように、ピクセルの 3 次元的位置を求めることができる。それが求まれば、レーダー座標系の画像を測地座標系の画像に変換 (ジオコーディング) することができる。

また、可搬型レーダー干渉計から得られるスラントレンジ変化量から地殻変動の解釈を行う場合には、各ピクセルにおけるレーダー波入射方向の情報も重要である。あるピクセルの変位ベクトルを $(d_x \ d_y \ d_z)$ 、そのピクセルにおけるレーダー波の入射方向の単位ベクトルを $(u_{losx} \ u_{losy} \ u_{losz})$ とすると、SAR 干渉法により得られる距離変化成分 ρ は、それらの内積

$$\rho = d_x u_{losx} + d_y u_{losy} + d_z u_{losz} \quad -(8)$$

から求められる。この関係を用いることによって、SAR 干渉法による解析結果を球状圧力源 (Mogi, 1958) や半無限弾性体ディスロケーションモデル (Okada, 1985) 等の地

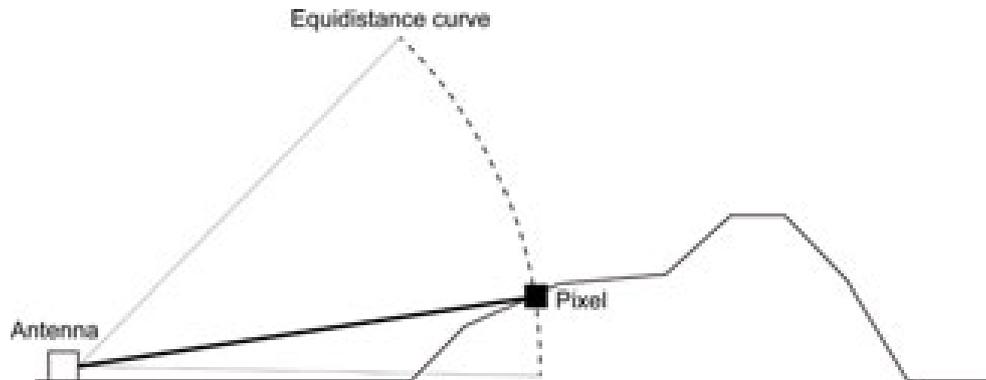


図 10. レーダー観測幾何に関する概要図

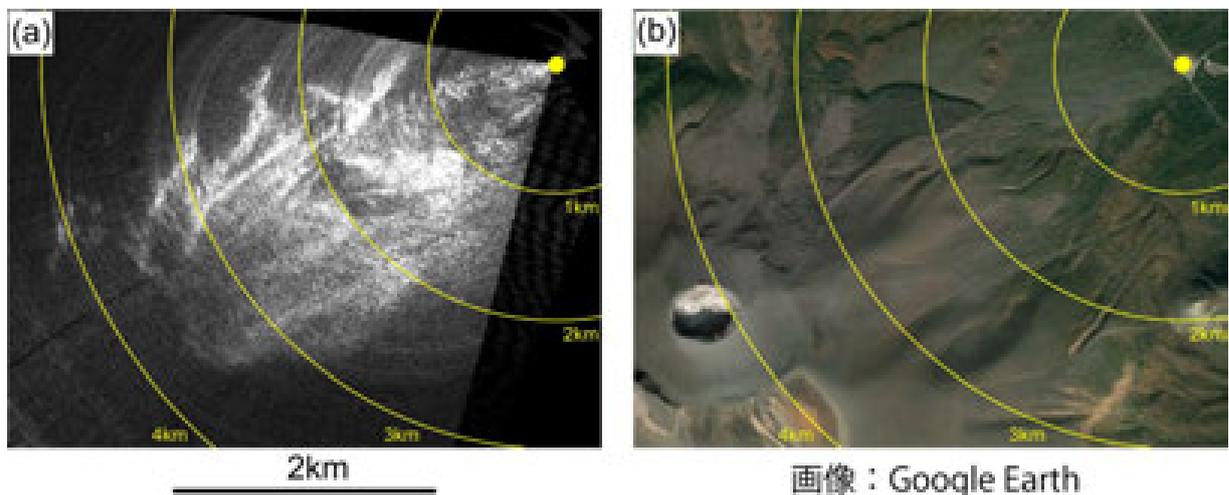


図 11. (a)測地座標系の画像に変換した散乱強度画像と(b)同領域の Google Earth 画像

殻変動計算に用いることができる。よって、可搬型レーダー干渉計による変化量から地殻変動の解釈をする場合には、レーダー波の入射方向ベクトルを正確に求める必要がある。前述した処理から、各ピクセルの測地座標がわかるので、アンテナ位置と各ピクセル位置を直線で結ぶ方向から、レーダー波の入射方向ベクトルを求めることができる。

本機能は、地形情報と観測位置の情報から、各ピクセルの測地座標を計算して求め、その情報から、レーダー座標系の画像を測地座標系の画像に変換する。また、同時に、各ピクセルのレーダー波入射方向の単位ベクトルを求める。本機能により、測地座標系に変換したアンラップ画像の例を図 11 に示す。

⑧ 観測位置・軌道を補正した合成開口処理機能

レールを用いた地上設置方式による観測においては、アンテナの軌道は直線とみなすことができ、その位置はヘッド部を動かすギアの回転数から精密に求めることができる。

その情報を用いて、精密に圧縮処理を適用することが可能である。一方、車載方式等のレーンを用いない観測においては、ヘッド部に搭載している GPS/IMU の観測データを解析して得られる位置情報のみを用いて軌道の揺らぎを補正し、圧縮処理を適用する必要がある。アンテナの軌道が、正確にわかれば、図 12 に示すように、アンテナが直線上

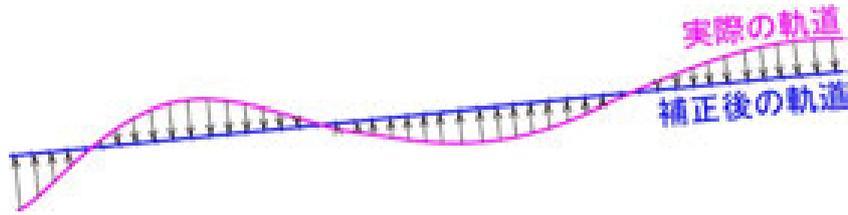


図 12. 軌道の揺らぎの補正に関する概略図

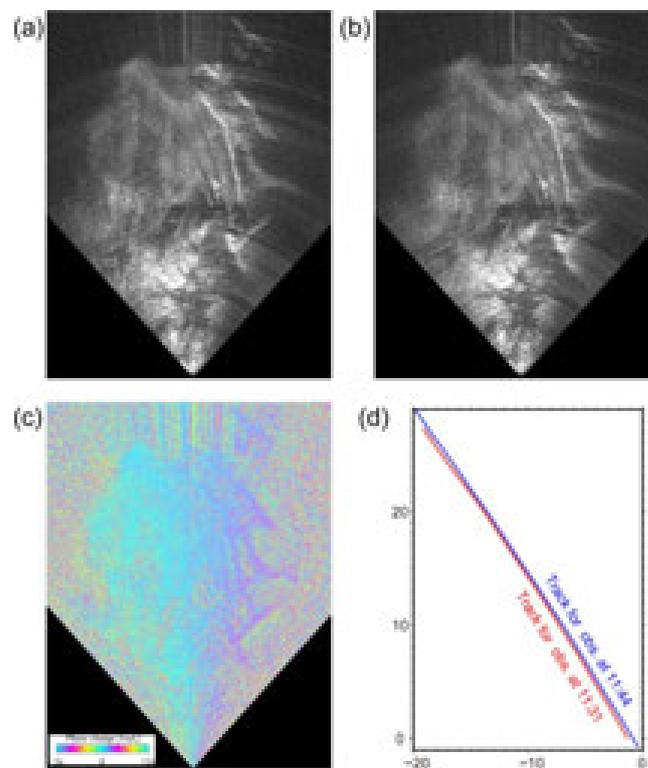


図 13. (a)車載方式による SAR 画像 1 (11 時 31 分) (b)車載方式による SAR 画像 2 (11 時 44 分) (c)干渉画像(d)SAR 画像 1 (赤) および SAR 画像 2 (青) に関する観測時のアンテナの軌道

を移動して観測したように補正することが可能である。本機能は、GPS/IMU の出力結果を用いて、設定した直線上で観測したように補正して圧縮処理を適用し、SAR 画像を作成する。車載方式による 2 回の観測における軌道と、その観測データを同じ直線上で観測したように補正して得られた SAR 画像、および、干渉画像を図 13 に示す。干渉が得られていることから、ある程度の精度で、画像間の位置あわせはできていると考えられる。

b) 可搬型レーダー干渉計実験機による野外観測

平成 29 年度に作成した可搬型レーダー干渉計実験機による野外での初観測を、平成 30 年 7 月 18 日に浅間山において実施した。本観測の主な目的は、レールを用いた地上設置方式による観測を実施し、本開発が目標とする 4km 先の画像が得られるかどうかの確認、約 1 時間の観測における時間的な位相変化および干渉性の劣化状況を調査することである。本観測では、株式会社プリンスホテルの協力により、浅間山の山頂火口の北東約 4km に位置する浅間山六里ヶ原休憩所の駐車場に可搬型レーダー干渉計実験機を設置し、浅間山の山頂方向にレーダー波を照射した（地図と設置状況を図 14 に示す）。山頂までの距離は 4km 強である。観測におけるレーダー波のパラメータは、中心周波数 1.335GHz、帯域幅 70MHz であり、その後方散乱波を 500 μ S の繰返し周期で受信した。アンテナの移動速度は 30 cm/s で、約 6 分間隔で 1 時間の観測を行った。本計測で得られた散乱強度画像を図 15(a) に示す。

アンテナから 3km 付近までは、明瞭な後方散乱を判読することができ、鬼押し溶岩の一部も判読できる（裏側はレーダー影の領域）。また、最初の観測を基準として、干渉画像を作成したところ、植生が多い領域においても、顕著な干渉性の劣化は見られなかった（図 16）。位相変化に注目すると、1.5 ラジアン（約 3cm の距離変化に相当）程度の位相変化が見られたが、これは大気遅延によるものと推測される。自明のことであるが、Ku-band のレーダー波を用いた場合には、この程度の位相変化により、干渉性が

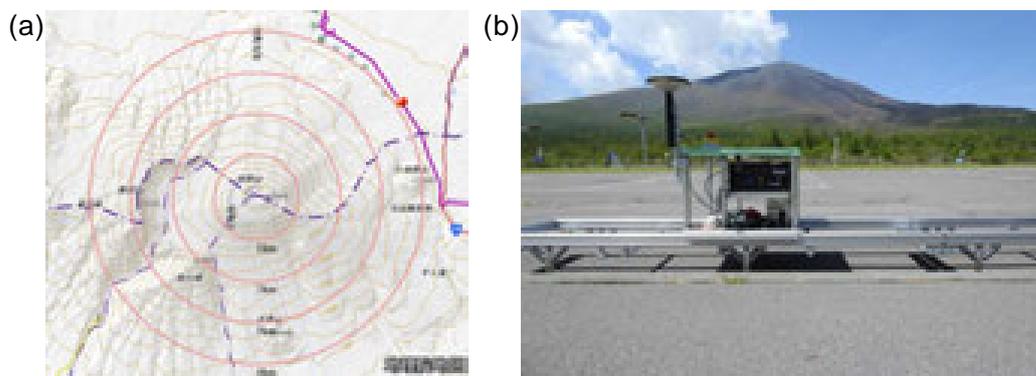


図 14. (a) 観測実施場所周辺の地図。赤丸は可搬型レーダー干渉計実験機設置場所を示す。(b) 可搬型レーダー干渉計の設置風景。

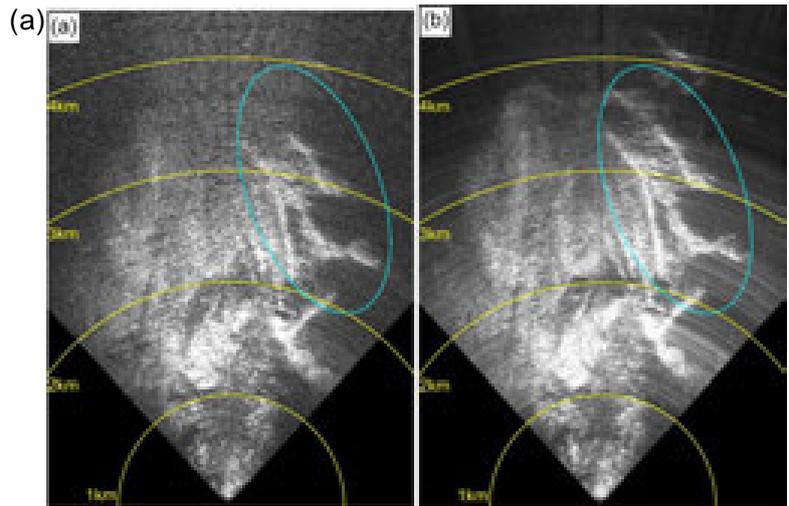


図 15. (a)平成 30 年 7 月 13 日観測の散乱強度画像。(b)平成 30 年 12 月 17 日観測の散乱強度画像。水色の線は鬼押し出し溶岩の位置を示す。

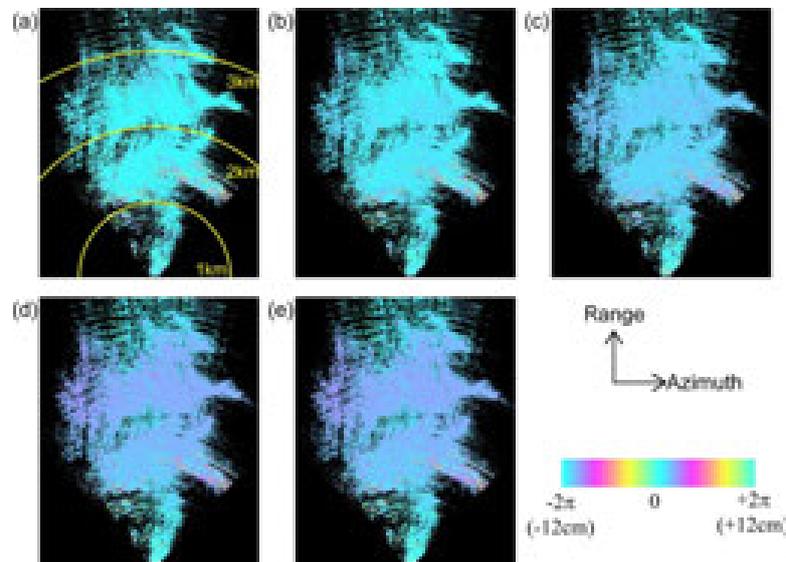


図 16. 平成 30 年 7 月 13 日観測の干渉解析結果。(a)-(e) 10 分間、20 分間、30 分間、40 分間、50 分間の干渉ペアの干渉画像。

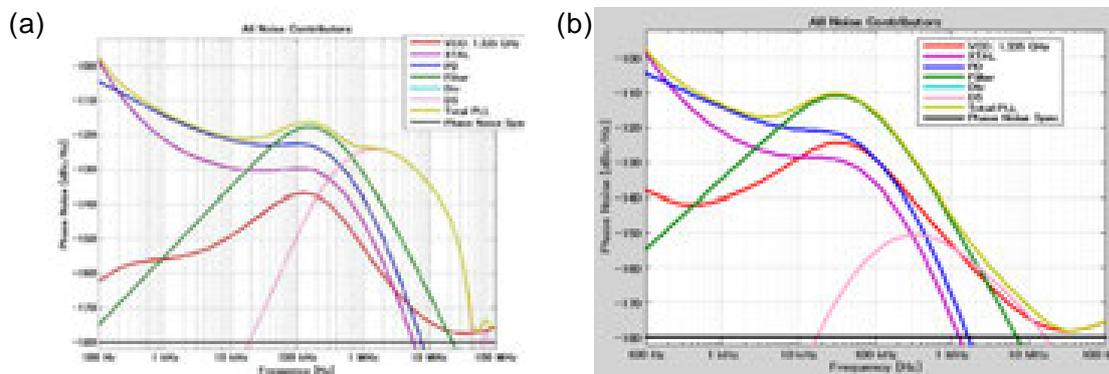


図 17. (a)調整前と(b)調整後に関する位相ノイズのシミュレーション結果

失われる場合や、アンラッピングの困難が生じる場合がある。そのような変化に影響を

受けにくいことは、L-band のレーダー波を用いることの有用性の一つと考えられる。一方、本課題で開発する可搬型レーダー干渉計は、火山活動の活発化時に、火口から 4km 圏内の立ち入りが規制された場合でも観測可能とするため、4km 先の観測を可能にすることを目指す。しかし、7月13日観測結果によれば、その目標は達成できていない。そこで、送信信号の位相雑音成分を低減させる方法について検討した。レーダー干渉計実験機で使用する中間周波数は 100kHz から 5MHz 以下であるが、シミュレーションにより位相ノイズを推定したところ、信号源 PLL（位相ロック発信器）のデルタシグマ (DS) 雑音成分が 2MHz でピークとなっており（図 17(a)）、これを調整することにより、位相雑音を低下できる可能性があることがわかった。そこで、調整を試みたところ、位相雑音のオフセット周波数 約 5MHz 以下の位相雑音を約 15dBc (@1MHz) 改善することができるという計算結果が得られた（図 17(b)）。この調整により、3km よりも遠方の領域でも雑音に埋もれることなく画像化が可能となるはずである。

以上で述べた調整を適用した結果を調査するため、平成 30 年 12 月 13 日に 7 月 18 日

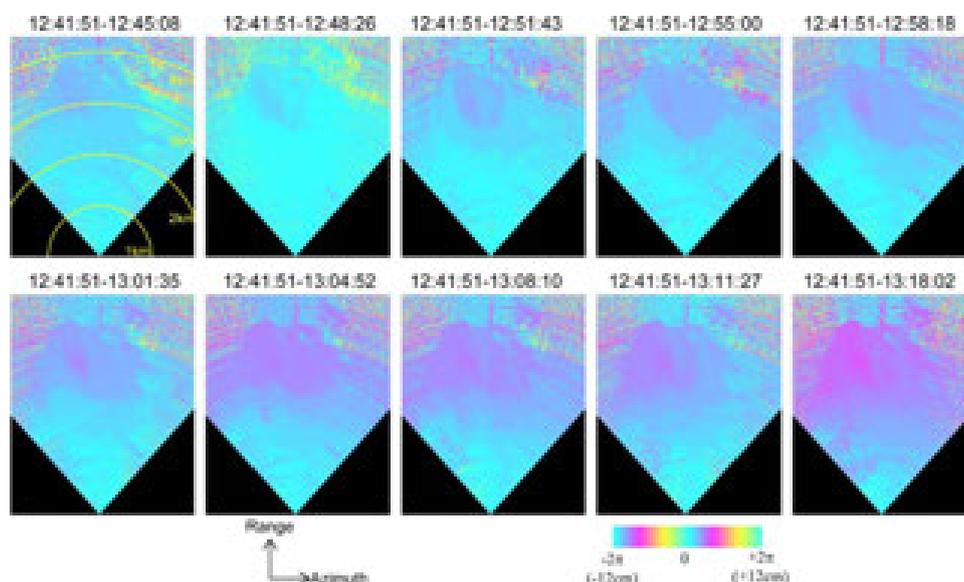


図 18. 平成 30 年 12 月 13 日観測の干渉解析結果。解析した干渉ペアの観測時間を各図の上を示す。

に実施した観測実験と場所で同様の観測を行った。観測パラメータも同様に設定した。本観測で得られた散乱強度画像を図 15(b)に示す。アンテナから 4km 付近においても、明瞭な後方散乱を判読することができた。また、干渉画像を作成したところ、1 時間程度においては、ほとんど干渉性劣化が見られなかった（図 18）。

以上の実験により、調整の結果、当初の目標であった 4km 先の観測が可能になったことを確認した。しかし、降雨や降灰によるレーダー波の減衰を想定する場合には、必ずしもこれで十分な感度を有しているとは言えない。そこで、受信感度を向上させる改良についても検討した。本検討においては、現行の可搬型レーダー干渉計実験機の受信用 2 パッチアンテナを 4 パッチアンテナに変更した場合のアンテナ利得をシミュレートした。シミュレーションにおいて設定したアンテナのパッチサイズと層構成を図 19 に示

す。4パッチアンテナのシミュレーションはこれらの素子を横方向に並べてビームを鋭くし、高利得化を行った。アンテナ利得は2パッチから4パッチに変更した場合、アンテナ利得が3dB程度向上することが分かった(図20、図21)。火山等の遠方を観測する場合、利得が向上しデータのSNが改善する利点はある。ただし、アンテナサイズが大きくなるため、風の影響を受けやすくなる欠点がある。その利点、欠点については、実際の観測実験に基づいて調査する必要があり、今後の検討課題の一つである。

平成30年12月13日に浅間山で実施した観測においては、車載方式による観測を含む、簡便にリピート観測を実施するための開発を進めるための基礎的な実験も行った。基本的に、地上設置方式による観測においてはアンテナの軌道を直線とみなすことができ、レール上の位置は、ヘッド部を動かすための歯車の回転数から精密に計測することができるので、精度良く圧縮処理を適用することができる。しかし、その観測においては、10mのレールを設置する場所を確保する必要があり、どこでも観測可能とは言い難い。その困難を解決する方法として、①台車、②車に搭載して観測する方式について開

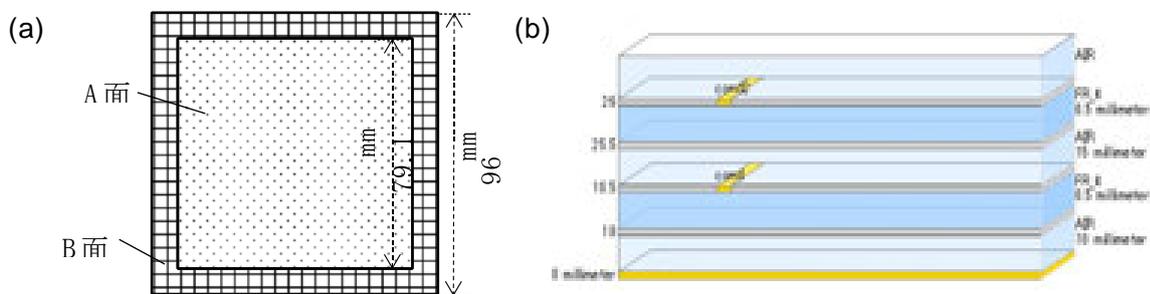


図19. ダブルレイヤーパッチアンテナの平面図 (b) ダブルレイヤーパッチアンテナの層構成

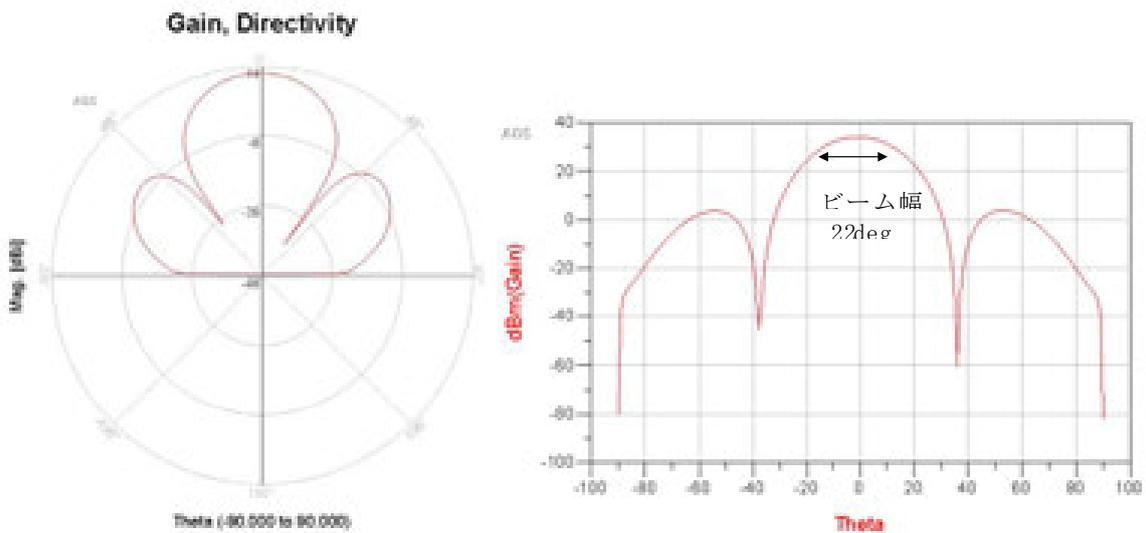


図20. 2パッチアンテナの(a)アンテナ利得と(b)アンテナパターン

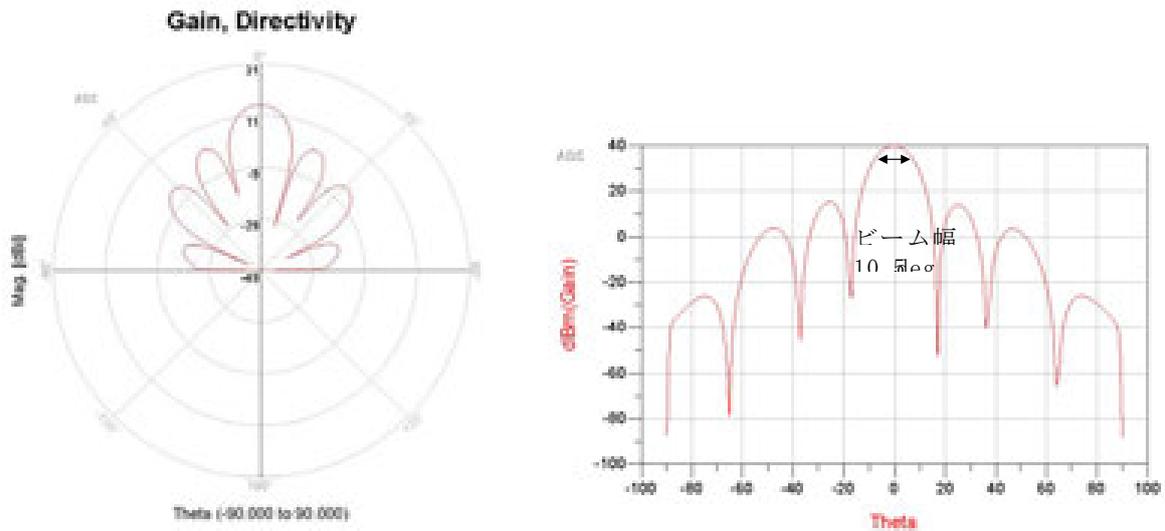


図 21. 4パッチアンテナの(a)アンテナ利得と(b)アンテナパターン

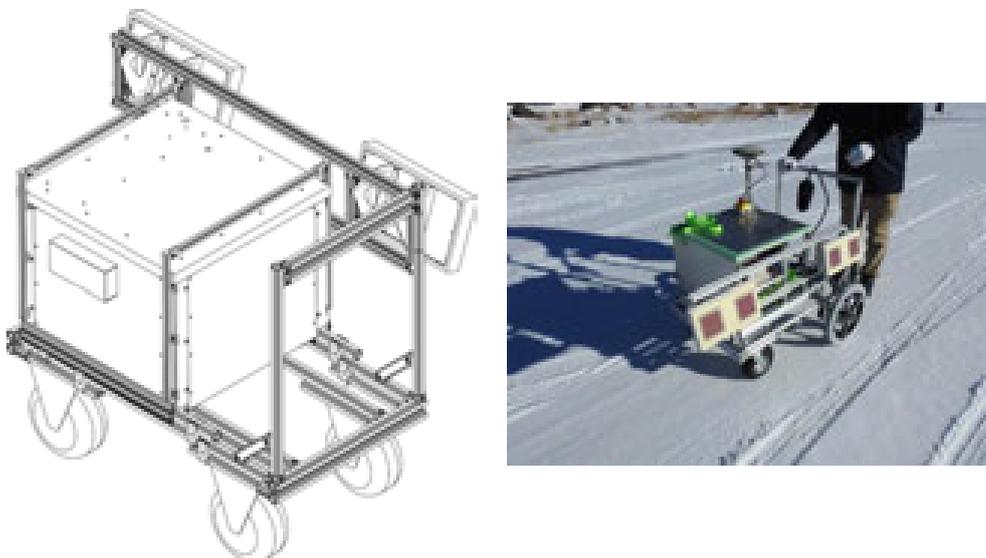


図 22. 可搬型レーダー干渉計を搭載する台車の外観図と観測風景

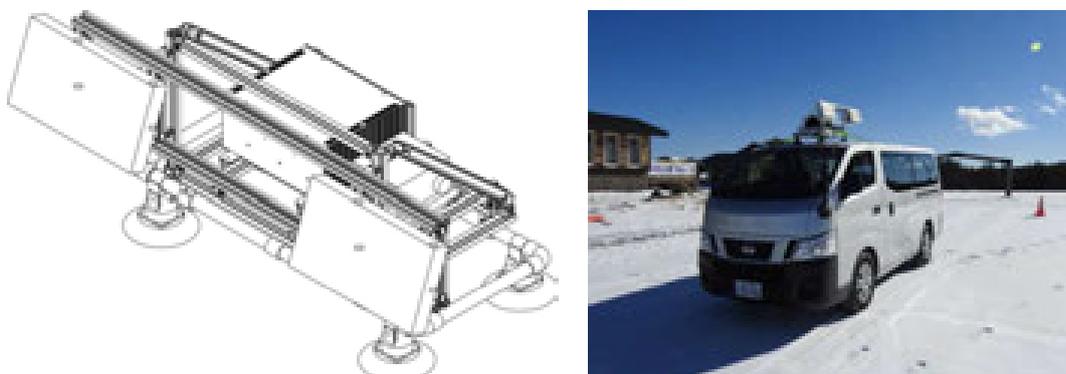


図 23. 可搬型レーダー干渉計を車の屋根に装着するための治具の外観図と観測風景

発を進める。①の実験のためには、可搬型レーダー干渉計実験機のヘッド部を搭載する台車を作製し(図 22)、②の実験のためには、車の屋根にアンテナを搭載するための

治具を作製した（図 23）。

アンテナを台車および車の屋根に搭載して観測を行う実験においては、移動距離を 20m 以上とした。台車を用いた観測においては、手押しでおおよそ人が歩く速度で測定した。車載方式による観測においては、低速（約 5km/h）、中速（10km/h）、高速（20 km/h）の 3 種類の速度について、10 回以上の測定を行った。観測におけるレーダー波のパラメータは、中心周波数 1.335GHz、帯域幅 70MHz であり、その後方散乱波を $500\mu\text{S}$ の繰返し周期で受信した。SAR 画像の作成においては、本年度に開発した、GNSS によるアンテナの軌道情報から軌道の揺らぎを補正して、圧縮処理を行うソフトウェアを用いた。本観測における GNSS のサンプリングレートは 1 秒とした。本計測で得られた散乱強度画像を図 13 に示す。アンテナからの距離が 4km を超えている領域でも、散乱強度が得られており、地上設置方式による散乱強度画像（図 15(b)）との明瞭な差は見られなかった。一方、SAR 干渉法を適用したところ、ほぼすべての画像について干渉が得られ、アンテナの移動速度による影響は顕著には見られなかった。しかし、地上設置方式による干渉画像と比べると、全体的に干渉

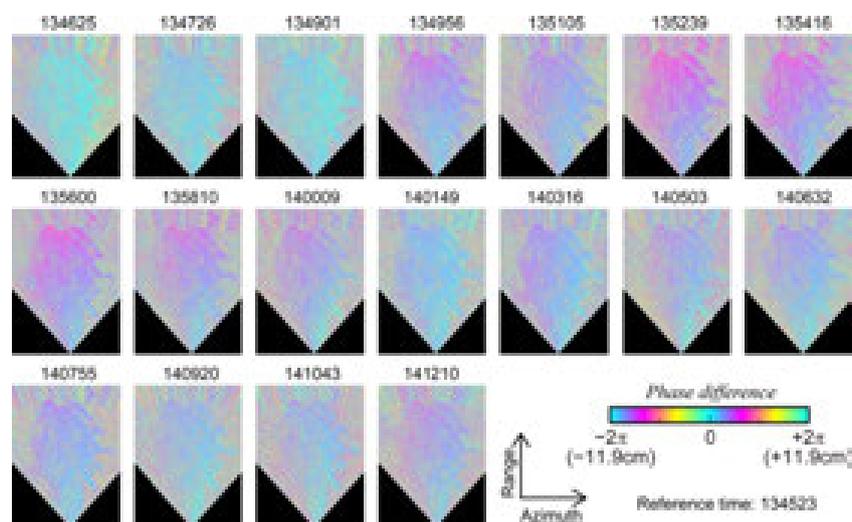


図 24. 台車に搭載して観測したデータに関する干渉画像。マスター画像の観測開始時刻は 13:45:23 であり、スレーブ画像の観測開始時刻は各画像の上に示す。

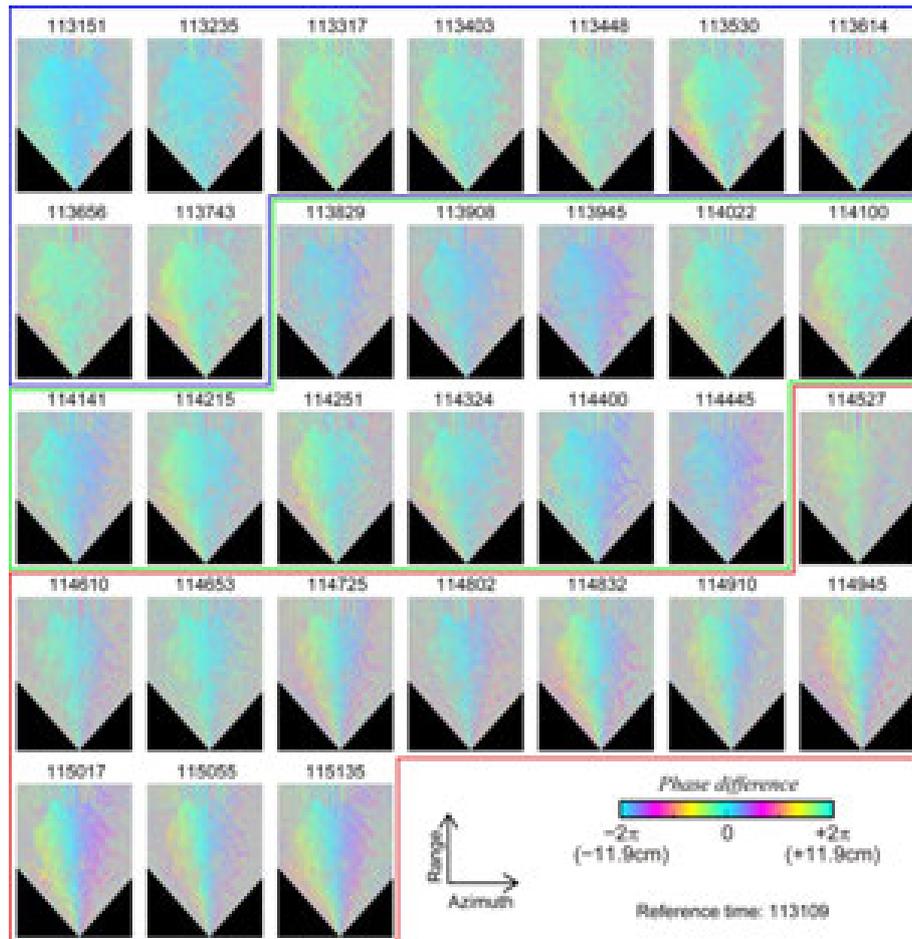


図 25. 車載方式による観測データの干渉画像。すべての干渉画像のマスター画像は低速で 11:31:9 に観測された画像である。スレーブ画像の観測開始時刻は各画像の上に表示。青、緑、赤枠は、それぞれ、低速(5km/h)、中速(10km/h)、高速(20km/h)で観測された画像をスレーブ画像とした干渉ペアから得られた結果である。

性は低い(図 24、図 25)。特に、台車に搭載して観測した画像については、車載方式よりも干渉性が低かった。観測時の地面は観測前日の積雪が凍り付いており、時折、台車が横滑りするような状況であったため、1秒サンプリングのGNSS観測では追従できないような急激な軌道のずれが生じていたのかもしれない。そのような急激な動きに対する補正方法については、今後の課題の一つである。また、干渉画像の位相差分布を見ると、そのアジマス方向に位相が変化するようなパターンが見られる。その分布から推測すると、気象ノイズではなく、解析上問題(例えば、観測幾何による)であるのかもしれない。これについてのより詳しい調査も今後の課題の一つである。

台車、車載方式ともに干渉が得られ、位相の傾きが見られるような問題は見つかったが、画像範囲よりも小さな波長の変化であれば、現状でも十分に地殻変動観測に用いることができるはずである。さらに、今後の観測方法やソフトウェア等の改良により、全体の位相差の傾き成分の補正ができるようになれば、さらに波長の長い地殻変動も検出できると期待される。車載方式や台車に搭載した観測により、地上設置方式では観測困

難な場所でも、より簡便にリピート観測が可能になると考えられる。ただし、現状では、観測場所へのアクセスが山道であるようなところでは、運搬の困難が考えられる。さらに観測可能範囲を広げるため、今後、さらに軽量の観測システムの開発も試みたい。

c) 可搬型レーダー干渉計実験機の耐環境性能に関する改良

降雨等のシステムへの影響を低減するため、可搬型レーダー干渉計実験時のヘッド部に装着する外装を作製した。外装は破損防止のため、ポリカーボネート樹脂を使用した。また、外装を装着することによる重量増加を抑えるため、ヘッド部のフレームは新規設計を行った。また、アンテナには降雨等の影響を低減するため、レドームを作製しアンテナを覆った。レドームの材質は 6 mm の高発泡発泡スチロールを使用した。レドーム表面硬化の為に電波に影響の少ないエフレタン塗装を施した。作製したレドームの装着前と装着後で、減衰量の差を図 26 に示す。測定した計測器の誤差の ± 0.6 dB を考慮して

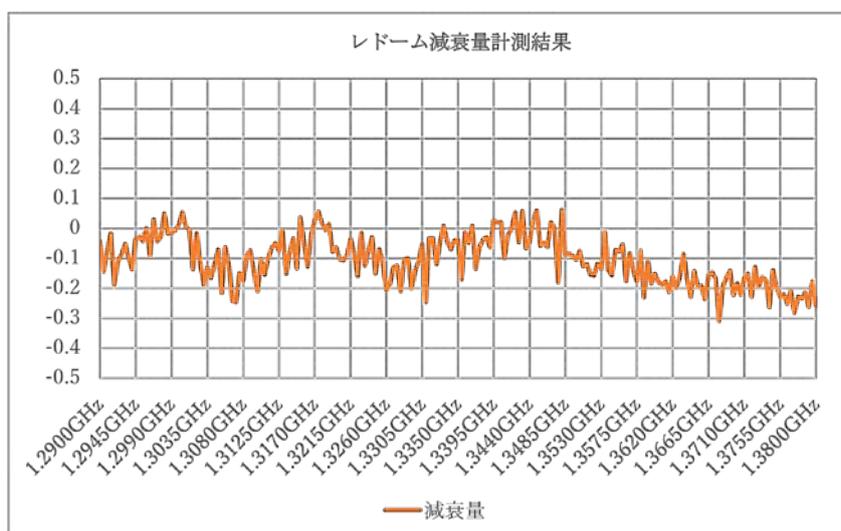


図 26. レドームの装着前と装着後の減衰量の差

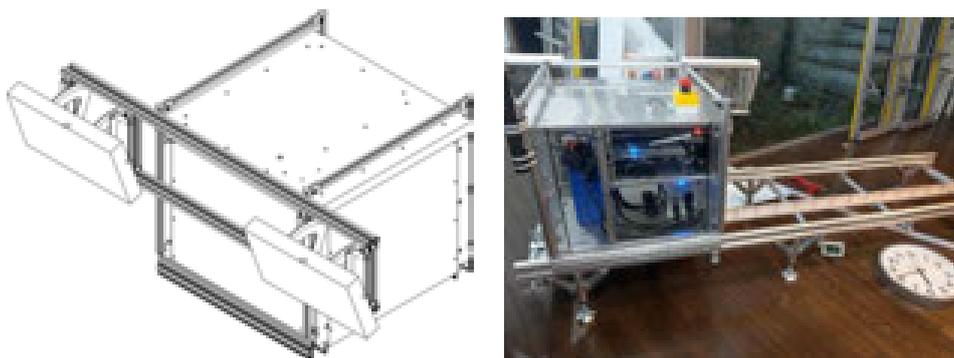


図 27. 外装およびアンテナを装着したヘッド部の外観図およびその写真

も、その差は 1dB 以内である。外装およびアンテナを装着したヘッド部の外観図およびその写真を図 27 に示す。

外装を装着した場合、システムから発生する熱により不具合が生じる可能性が考えら

れる。そこで、30度以上の気温の室内で1時間27分間、2mのレール上を1分毎に往復運転を行い、正常に稼動するかを調査したところ、特に異常は見られなかった。また、外装を装着することにより、降雨によってヘッド部内部が濡れることがないかと確かめるため、約20分の間、水道水を実験機に向けて散水しながら可搬型レーダー干渉計を2mのレール上を1分毎に往復運転させた。その結果、ヘッド部内部への水の侵入は見られなかった。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

a) 標準的解析手法における電離圏遅延誤差軽減手法の検討

前述した電離圏遅延成分を推定する3つの手法を比較するため、PALSAR-2のパス124(南行軌道)の右方向視で、2014年9月9日と2015年8月11日に吾妻山周辺を観測したSM1(帯域幅80MHz)の干渉ペアを解析した。このシーンの散乱強度画像を図28(a)、地形縞、軌道縞を除去し、大気遅延誤差軽減手法を適用した干渉画像を図28(b)に示す。このペアの干渉画像においては、画像全体で1サイクル程度(約12cmのスラントレンジ変化)の位相変化が見られる。この時期にそれほど大きな地殻変動は観測されておらず、また、大気遅延誤差の軽減手法の精度と比べて十分に大きな位相変化である。手法1~3を用いて、電離圏遅延成分を推定したところ、1サイクル程度の位相変化が求まった(図28(c)-(e))。その成分を除去したところ、比較的平坦な位相分布が得られた(図28(f)-(h))。吾妻山周辺に注目すると、0.5サイクル程度の位相変化(約6cmのスラントレンジ短縮変化に相当する)が見られる。吾妻山周辺におけるGNSS観測によれば、この時期に山体が膨張するような地殻変動が観測されており、電離圏遅延成分と地殻変動成分を適切に分離できたと考えられる。手法の違いに注目すると、フィルター等の影響による少々の違いが見られたのみで、おおむね同じ結果と言える。

吾妻山の解析事例は、比較的干渉性が良い干渉ペアであったが、データベース化のための自動解析においては、より干渉性が悪いペアも解析する可能性がある。そこで、より一般的な適用性能を調査するため、平成29年度に解析を行った、霧島山を含む

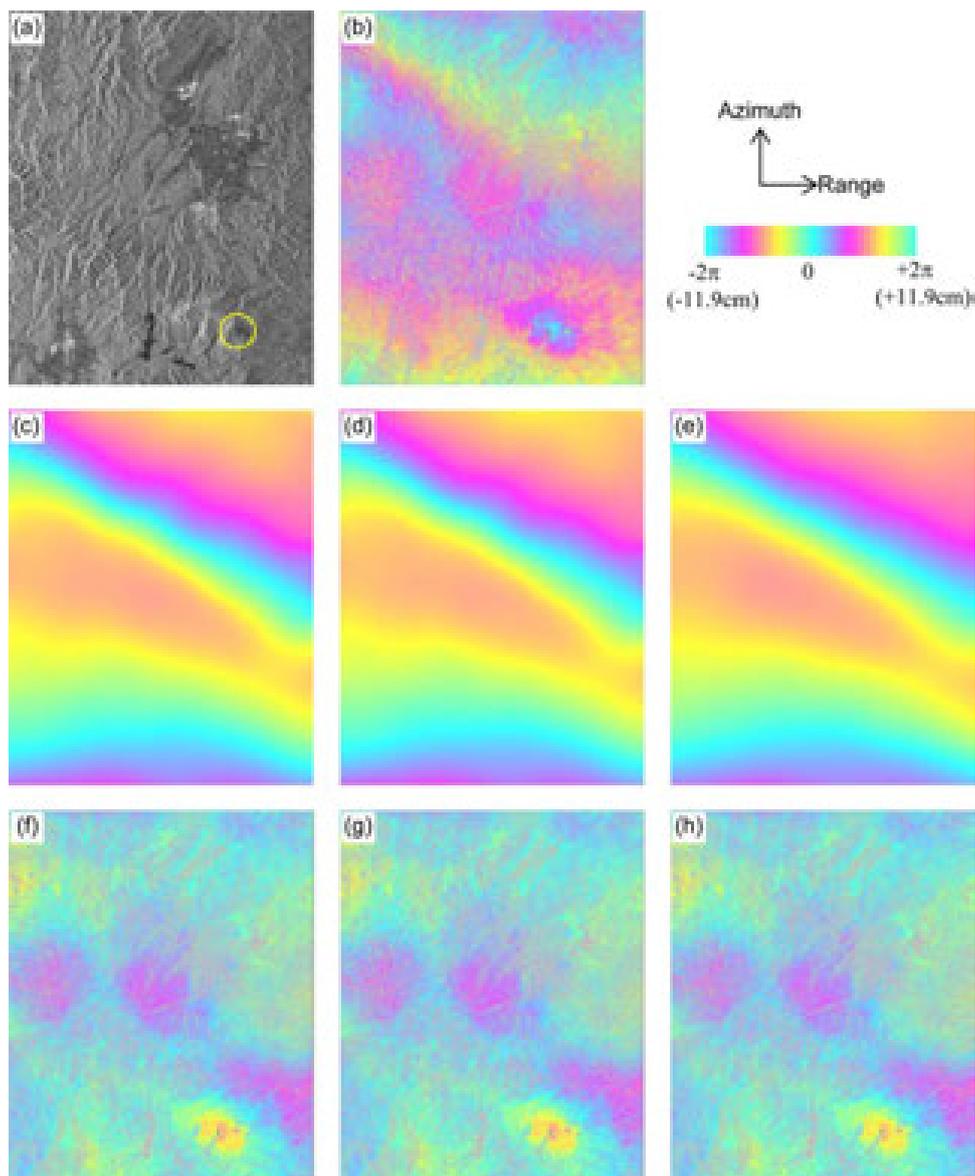


図 28. 3 種類の電離圏遅延推定手法による解析結果の比較。本解析では、PALSAR-2 によるパス 124、Frame750 において、2014 年 9 月 9 日と 2015 年 8 月 11 日に観測されたデータペアを用いた。(a) 散乱強度画像。黄線は吾妻山の位置を示す。(b) 補正前の干渉画像（大気遅延補正適用）。(c) 手法 1 により求めた電離圏遅延成分。(d) 手法 2 により求めた電離圏遅延成分。(e) 手法 3 により求めた電離圏遅延成分。(f) 手法 1 により電離圏遅延を補正した結果。(g) 手法 2 により電離圏遅延を補正した結果。(h) 手法 3 により電離圏遅延を補正した結果。

PALSAR-2 のパス 130（北行軌道、右方向視）の解析結果に手法 1～3 の適用を試みた。この解析においては、ルーチン解析についての調査のため、手動的なチューニングは行っていない。図 29 に電離圏遅延軽減手法を適用しない結果、手法 1 を適用した結果、手法 2 を適用した結果、手法 3 を適用した結果の比較を示す。すべての解析結果は、画像全体で位相分布に傾きがなくなるように、軌道補正量を推定している（フラ

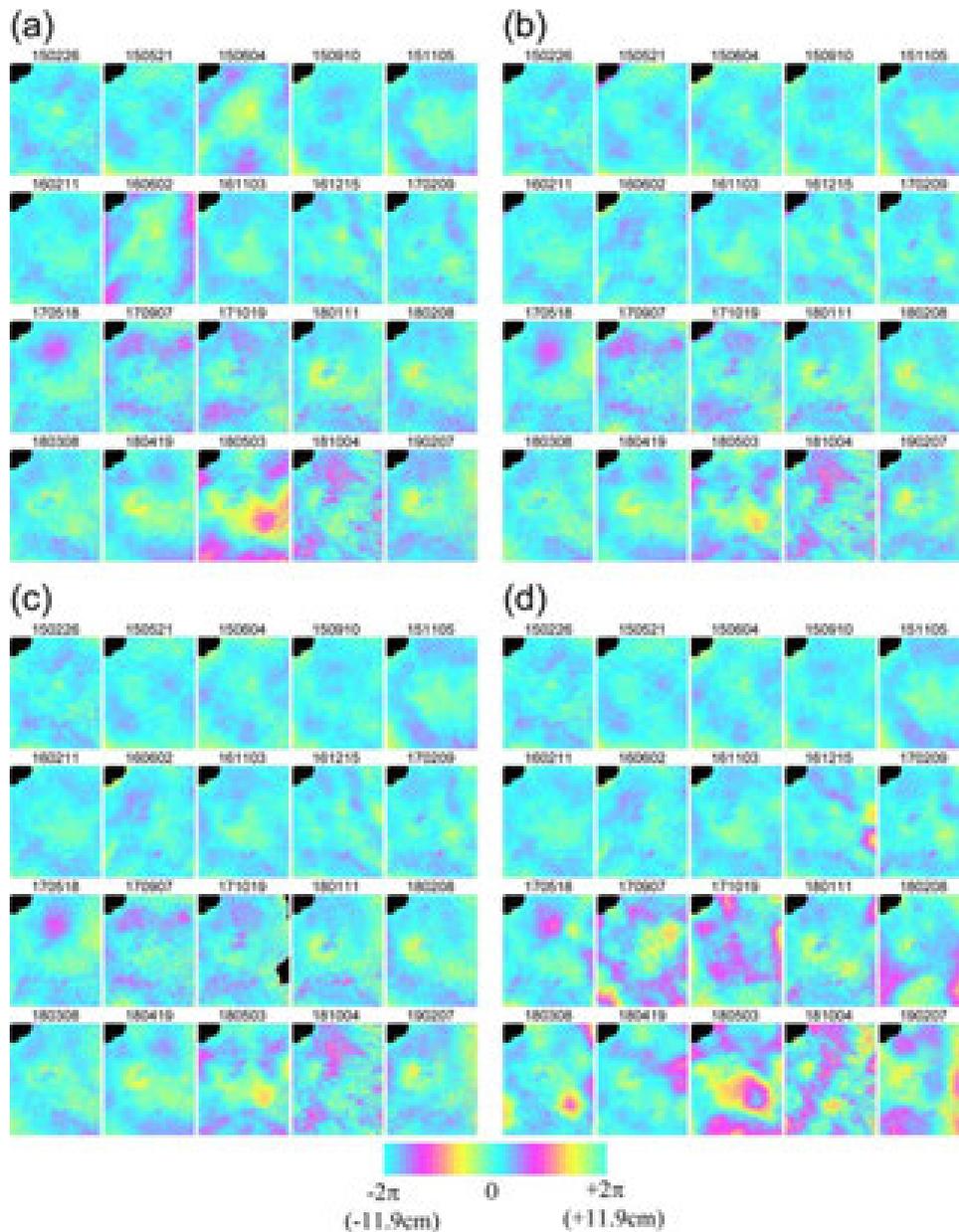


図 29. (a)電離圏遅延軽減手法を適用しない結果、(b)手法 1 を適用した結果、(c)手法 2 を適用した結果、(d)手法 3 を適用した結果の比較。すべての画像のマスター画像は 2014 年 10 月 23 日観測画像であり、スレーブ画像の観測日は各画像の上に示す。

ットニング処理)。電離圏遅延擾乱が大きいと考えられる 2015 年 6 月 4 日、2016 年 6 月 2 日、2018 年 5 月 3 日の解析結果については、手法 1 および 2 を適用した結果、位相差が小さくなっていることがわかる。そのほかについても、わずかに位相差が小さくなっているものもあり、もともと電離圏遅延擾乱が小さいペアについては、ほとんど変わらない。これは電離圏遅延誤差の分離がうまくできていることを示している。2017 年 10 月 19 日の画像では、手法 2 で推定した電離圏遅延成分の一部に欠損があった。この領域の干渉度は低く、手法 2 の解析においてはこの領域のピクセルは、異常

値と判別され、マスクされてしまったためである。この差がどのような要因によるものかは、現時点では不明だが、手法 1の方が安定して電離圏遅延成分を推定できるのかもしれない。手法 3 に関しては、観測間隔が短く、干渉性が高いペアについては手法 1、2の結果とほぼ同じ結果が得られたが、観測間隔が長く、干渉性が低いペアでは大きな位相変化が求めた。手法 3は、解析の途中で電離圏遅延成分の 2 倍を処理するため、干渉性が低いペアにおいてはノイズが増幅される。その結果、多くのピクセルが異常値としてマスクされ、その後の補間処理において、適切に遅延量を求められなかったと考えられる。この結果から考えると、手法 3は干渉性が低いペアには適していないと考えられ、データベース化のためのルーチン解析には不向きと考えられる。

次に、積雪の多い領域として、有珠山周辺を含む PALSAR-2 の干渉ペアに手法 1 の適

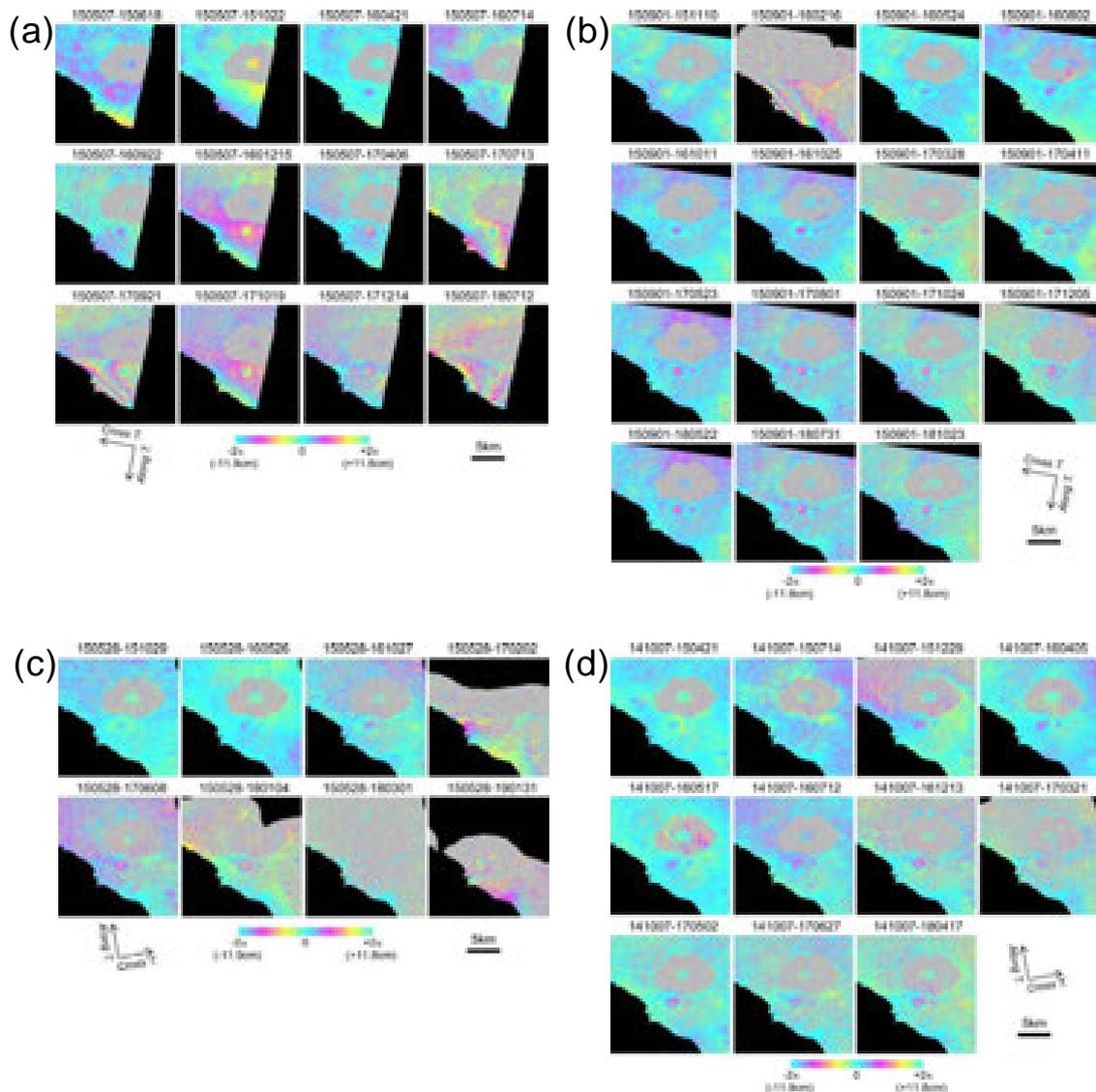


図 30. 有珠山周辺を含む PALSAR-2 の干渉ペアに手法 1 の適用を試みた結果。(a)パス 18 (南行軌道、右方向視)。(b)パス 19 (南行軌道、右方向視)。(c)パス 123 (北行軌道、右方向視)。(d)パス 124 (北行軌道、右方向視)。用を試みた。解析したデータは南行軌道のパス 18、パス 19 と北行軌道のパス 123 と

パス 124 である。解析結果を図 30 に示す。有珠山周辺においては、明瞭な衛星-地表間距離の伸長変化が見られる。この解釈については後に述べる。気象庁の観測によると、この領域に近い大岸では、おおよそ 11 月から 3 月の期間に積雪が観測されている。この期間に観測されたデータを含む干渉ペアでは、大きな位相差が求めた。これらは、積雪による非干渉のために、適切に電離圏遅延成分が推定されなかったためである。特に、有珠山周辺において干渉が得られているペアにおいても、その周辺の非干渉領域における電離圏遅延成分の誤推定が影響し、有珠山周辺でも、明らかな日地殻変動成分が見られた。このような干渉ペアに対しては、電離圏遅延軽減手法を適用しないほうが良いと考えられる。

次に、手法 1 と手法 2 について、PALSAR データに適用を試みた。解析したデータは、平成 29 年度に解析した、霧島山、桜島を含むパス 73 の FBS モード（帯域幅 28MHz）のデータの解析結果で、軌道間距離の視線方向に対する垂直成分 (B_{PERP}) が 1000m 以下の干渉ペアである。電離圏遅延軽減手法を適用しない結果、手法 1 を適用した結果、手法 2 を適用した結果の比較を図 31 に示す。これらの解析において、画像サイズを超えるような大きな波長の電離圏遅延成分は推定されたが、そのような成分は、電離圏遅延誤差軽減手法を適用しない場合でもフラットニング処理において除去されるので、結果には顕著な差として見られない。より短波長の成分に注目すると、電離圏遅延誤差軽減手法を適用した結果において、適用前よりも位相差が大きくなっているように見える。特に、その傾向は、観測間隔が約 2 年以上の干渉ペアにおいて明らかである。これは、帯域幅が狭い PALSAR データにおいては、電離圏遅延成分の推定精度が十分に

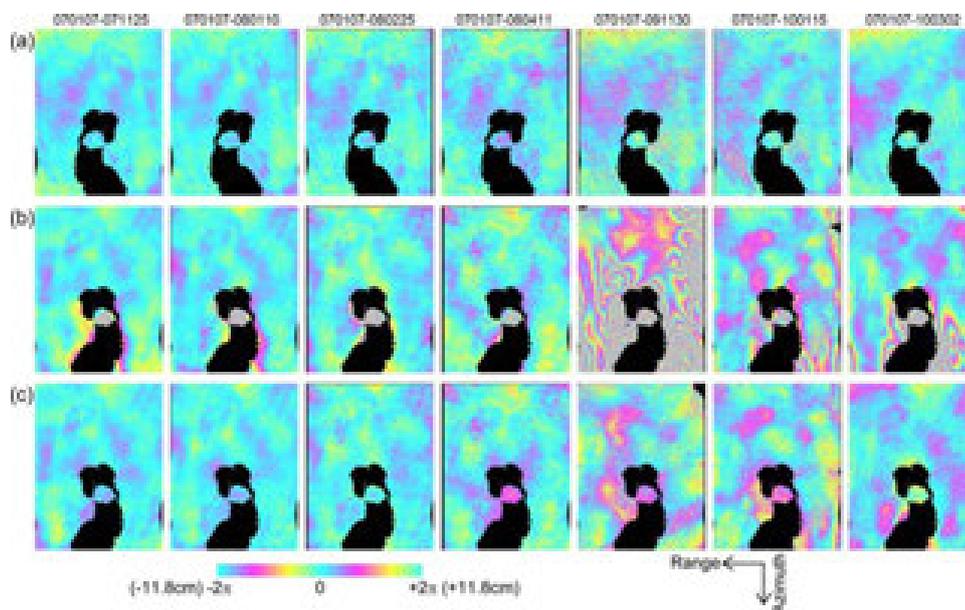


図 31. 霧島山、桜島を含むパス 73 の FBS モード（帯域幅 28MHz）で取得された PALSAR データの解析事例。(a) 電離圏遅延軽減手法を適用しない結果、(b) 手法 1 を適用した結果、(c) 手法 2 を適用した結果の比較。すべての画像のマスター画像は 2007 年 1 月 7 日観測画像であり、スレーブ画像の観測日は各列の上を示す。

はなく、その推定誤差が顕著に結果にあらわれてしまうことが要因の一つと考えられる。ただし、干渉性が十分によければ、その誤差も小さくなると考えられ、Gomba *et al.* (2016)や Wegmüller *et al.* (2018)は、PALSAR データの干渉ペアにおいても、成功裏に電離圏遅延成分を推定した結果を紹介している。よって、Split-spectrum 法が電離圏遅延誤差軽減手法に有効であることは間違いない。しかし、干渉性が低いペアにおいては、その誤差成分が大きくなり、特に干渉性が低い場合には、多くのピクセルが異常値としてマスクされてしまうため、その後の補間処理において、大きな推定誤差が生じると考えられる。別のいくつかのデータについても同様な解析を試みた結果、PALSAR データについては、特に電離圏遅延が大きい場合を除き、電離圏誤差軽減手法を適用すると、地殻変動検出精度が劣化するが多かった。このことから、PALSAR データについてのルーチン的な解析には、この処理を組み込むのは適切ではないと考える。

b) 有珠山および伊豆大島に関する SAR 干渉解析

① 有珠山に関する SAR 干渉解析

前述した通り、有珠山周辺では顕著な衛星-地表間距離伸長変化が求められた。これらは過去の火山活動にともない貫入した溶岩ドーム（潜在溶岩丘）の位置と一致しており、その変形をもたらすメカニズムについての考察を行った。本結果は Wang and Aoki (2018)において発表したものであり、その要約を以下に述べる。

有珠山は北海道南部に位置する活動的火山であり、1663 年に大規模な噴火が発生した。最近でも、1910 年、1943-1945 年、1982-1987 年、2000 年に噴火が発生した。有珠山で噴出するマグマは粘性が高く、噴火の際には溶岩ドームが生成される。1982-1987 年噴火の際には山頂付近に溶岩ドームが生成されたが、最近のその他の噴火の際には山腹で溶岩ドームが生成された。本研究では 1992-1998 年に観測された JERS1、2006 年から 2011 年までに観測された ALOS、2014 年から観測されている ALOS-2 の 3 つの L バンド SAR 衛星のデータを干渉解析し時系列解析することにより、1992 年から 2017 年にかけての有珠山の地殻変動を明らかにした。SAR データからは、有珠山における地殻変動は 1943-1945 年、1982-1987 年、2000 年噴火の際に生成した溶岩ドーム付近に局在化していることが明らかになった（図 32）。なお、1910 年噴火にともない生成された溶岩ドーム付近では地殻変動は観測されなかった。上昇および下降軌道のデータを用いて鉛直成分と水平成分の変位を分離することにより、溶岩ドームにて観測された地殻変動は鉛直成分の方が水平成分よりもはるかに大きく、溶岩ドームが沈降しつつ収縮していることが明らかになった。観測された溶岩ドーム付近での沈降の様相は、場所によって異なることが明らかになった。2000 年噴火によって生成された溶岩ドームでは 2006 年から 2011 年にかけては約 4 cm/yr の速度で沈降していたが、2014 年以降はほとんど沈降していない。1982-1987 年噴火で生成された溶岩ドームにおいては、1992-1998 年に約 6.5 cm/yr、2006-2011 年に約 4.5 cm/yr、2014-2017 年に約 4 cm/yr と、沈降速度が減衰している。それに対して、1943-1945 年噴火で生成された溶岩ドームでは 1992 年から 2017 年までの 25 年間、沈降速度は約 2 cm/yr で安

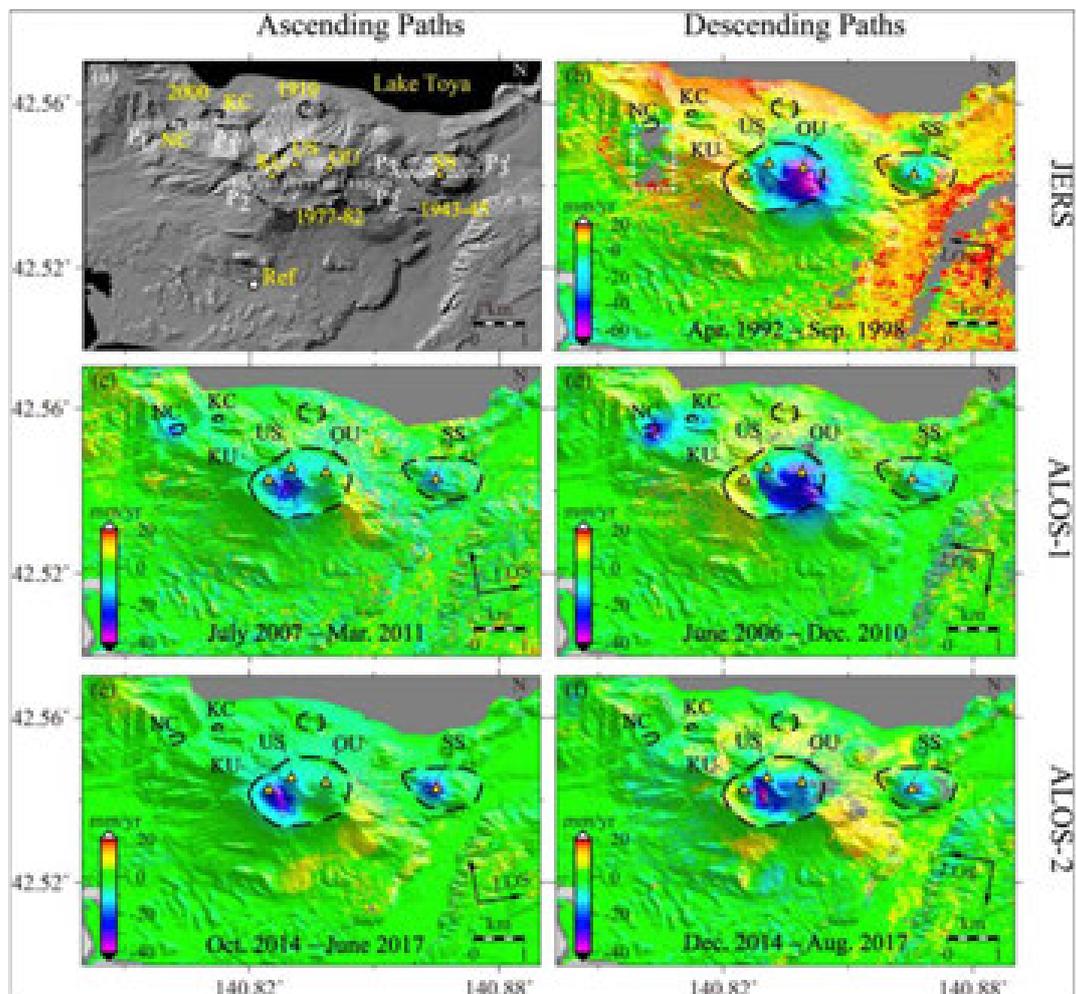


図 32. 観測された地殻変動。左列が北行軌道、右列が南行軌道から観測されたものを示す。上段が 1992-1998 年の平均的な地殻変動、中段が 2006-2010 年の平均的な地殻変動、下段が 2014-2017 年の平均的な地殻変動を示す。1943-1945 年および 1977-1982 年噴火で貫入した溶岩ドームにともなう変動域は図中それぞれ東側および中央部の点線で示す。2000 年噴火にともない貫入した溶岩ドームにともなう変動域は西側 NC および KC で示す。

定している。また、この溶岩ドーム付近では 1960 年代から水準測量が行われており、1964-1976 年に約 5 cm/yr、1976-1992 年に約 3 cm/yr の沈降速度が得られている。

静穏期の火山の沈降を解釈するモデルとして、地下の物質の粘弾性緩和によるものとする研究が過去にあるが、本研究の場合は観測された地殻変動が局所的であるために、他のメカニズムを考える必要がある。我々は、観測された変動場が貫入した球状のマグマの熱収縮によるものと仮定した。定性的には、それぞれの変動域における変動様式の違いは、それぞれの噴火にともなう溶岩の貫入体積の違いにあると考えられる。すなわち、2000 年噴火においては溶岩の貫入体積が他の 2 つと比べて小さく、貫入マグマが熱拡散により周囲の岩石と熱的平衡状態になるまでの時間が短いのに対し

て、1943-1945 年噴火においては溶岩の貫入体積が大きく、貫入マグマが熱的平衡状態になるまでの時間が長いと考えられる。観測を統一的に説明できるパラメータを推定したところ、1943-45 年噴火にともなうマグマ貫入地域の見かけ熱拡散係数は実験室で求められる岩石の熱拡散係数とほぼ等しいことがわかった。それに対して、1977 年-1982 年および 2000 年噴火にともなうマグマ貫入地域のそれは、実験室で求められる岩石の熱拡散係数の約 10 倍であった。有珠山は洞爺湖が隣接しており、また、過去の噴火でマグマ水蒸気爆発が頻発していることを考えると有珠山には豊富な地下水が存在すると考えられ、マグマ貫入直後は熱水循環によってマグマの熱を効率的に周囲に逃がしているのではないかと考えられる。今後は、数値計算などを通してマグマ貫入にともなう熱輸送についてより定量的に理解していく必要がある。

② 伊豆大島に関する SAR 干渉解析

標準的解析手法の検討において、周辺を海域で囲まれた火山島の解析について検討するため、伊豆大島に関する PALSAR-2 および PALSAR データを用いた SAR 干渉解析を実施した。伊豆大島は、北北西-南南東 15 km、東北東-西南西 9 km の火山島であり、PALSAR-2、PALSAR の画像サイズと比べて小さい。このような画像を解析する場合には、マスター SLC 画像とスレーブ SLC 画像のマッチングがうまくできない場合があり、島の領域周辺を切り出して処理を行う方法が一般的である。本解析においても、伊豆大島周辺を切り出して処理を進めたが、これまで解析を行った霧島山や桜島のような、大部分が陸地の画像を解析する場合の解析フローをそのまま使用すると、マスター SLC 画像とスレーブ SLC 画像のマッチングや地形データと SAR 画像との位置あわせ、PALSAR-2 の電離圏遅延の推定において、適切な解が得られない場合があった。マッ

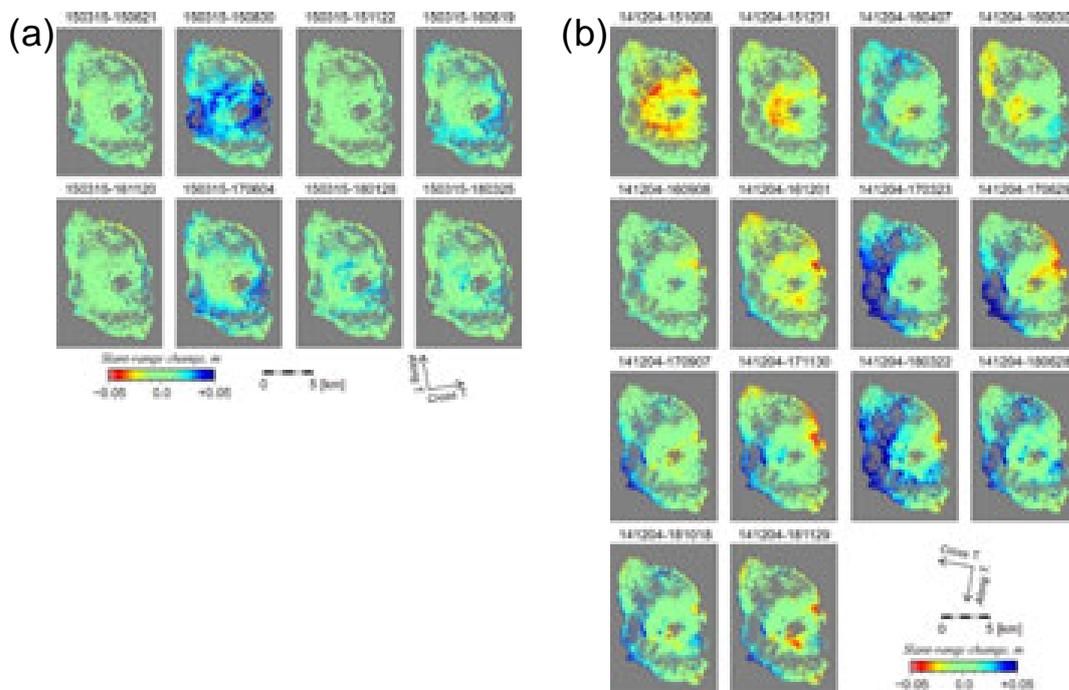


図 33. PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析から求めた、伊豆大島の地殻変動時系列。(a)パス 125 (北行軌道、右方向視)。(b)パス 18 (南行軌道、右方向視)

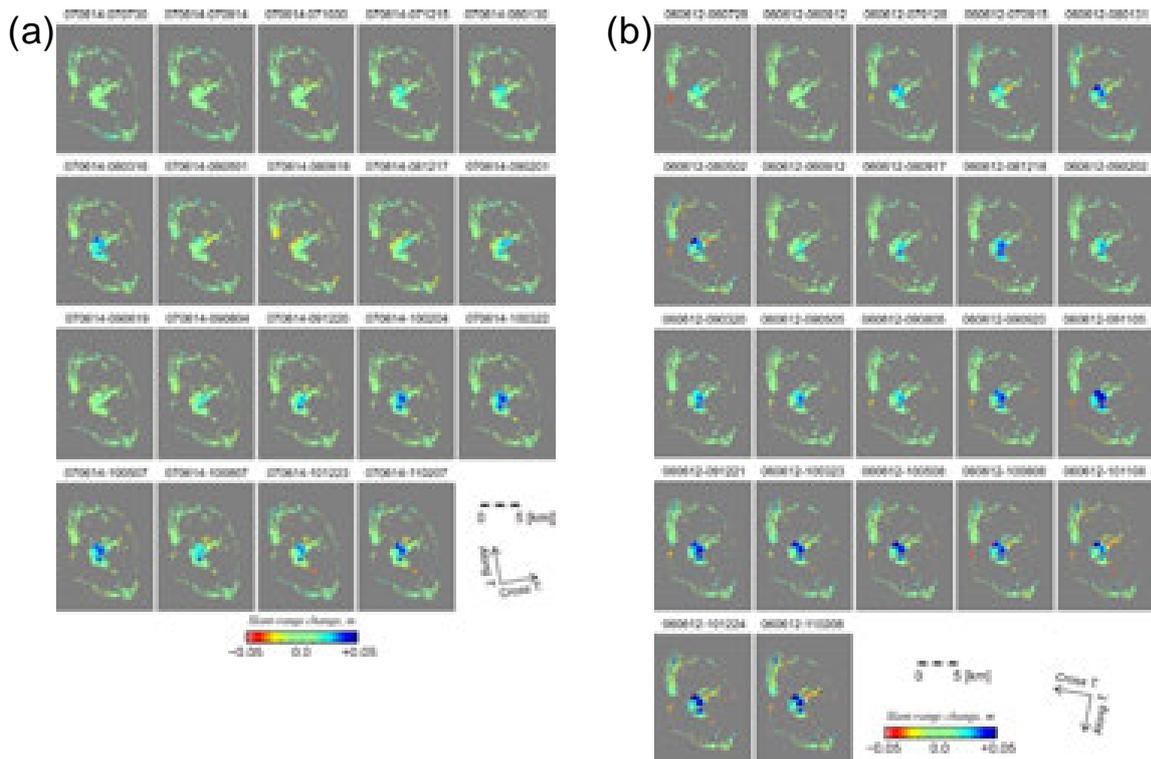


図 34. PALSAR データを用いた SAR 干渉解析から求めた、伊豆大島の地殻変動時系列。
 (a)パス 125 (北行軌道、右方向視)。 (b)パス 18 (南行軌道、右方向視)

ングについては、ずれ量推定時の窓サイズを、この領域に適切な大きさに設定することにより改善した。また、島内では濃い植生により干渉性の時間的劣化が早いという特徴がある。そのため、PALSAR-2 の電離圏遅延成分の推定において、低干渉のために、多くのピクセル領域が異常値としてマスクされてしまうことが原因であった。有珠山における積雪時の解析事例と同様に、このような領域では、必ずしも電離圏遅延成分をルーチン解析に組み込む必要はないのかもしれない。また、低干渉のため、多くのペアにおいて、自動解析においてはアンラッピングエラーが多く発生した。これらについては、目視でチェックした後、アンラッピングエラーを確認した場合には、奥山 (2010) によるアンラップエラーの修正法を適用して補正した。

以上の解析結果から求めた PALSAR-2 の地殻変動時系列を図 33、PALSAR の地殻変動時系列を図 34 に示す。PALSAR-2 の解析結果においては、大気遅延誤差と考えられる大きな位相差が見られた。ただし、このような変化は、時間的に相関がないため、SAR 時系列解析で用いられる時間方向のフィルターを用いることによって、ある程度は軽減できると考えられる。一方、PALSAR の解析結果については、山腹のほとんどで低干渉によって、解が得られなかった。これは、時系列解析において用いるすべての画像において、位相差が求まっているピクセルのみについてのみ計算する方法を用いたことによると考えられる。この問題の軽減のため、より適切な時系列解析手法の検討が必要である。なお、山頂付近においては、顕著なスラントレンジ伸張変化が求まっており、PALSAR データからは 5 年間でおよそ 5cm、PALSAR-2 データからは 3 年間で

およそ 3cm 程度の伸張である。この変化が上下変位のみによると仮定すると、およそ 1.3cm/yr の沈降に相当する。同様の変化は、Furuya (2005) が 1993 年から 1999 年に取得された ERS/SAR データの解析から 2-3cm/yr の速度で沈降していたことを示しており、それよりも減速していることを示している。Furuya (2005) は、この地殻変動は、過去に貫入したマグマの熱収縮によるものと推定しており、その継続によるものと推測される。

(c) 成果発表および海外における SAR 解析研究の動向についての調査

2018 年 9 月 10 日から 13 日までグルノーブル (フランス) で開催された Wegener Conference および 12 月 10 日から 14 日までワシントン DC (アメリカ合衆国) で開催された米国地球物理学会秋季大会に参加し、研究発表および情報収集を行った。両会議とも火山測地学に特化したセッションが開催されており、有珠山溶岩ドームの過去 25 年の地殻変動についての発表を行った。セッション内の多くの発表は 2014 年に打ち上げられた Sentinel-1 衛星が短い再帰周期を持ちデータ量が多いことを背景に、過去数年間の地殻変動について議論したものであるのに対し、我々の発表はより長い時間スケールの地殻変動を議論したものであり、その点で他の発表との違いを見せることができたと思われる。

先述したように、Sentinel-1 衛星により火山地域での地殻変動が SAR 衛星により高い時間・空間分解能で明らかにされるようになったことから、海外における SAR 研究人口はここ数年で飛躍的に増加しており、向こう数年の ALOS-4 および NISAR の打ち上げを考えると、この傾向はさらに加速するものと考えられる。また、現在の研究のトレンドは、豊富なデータ量を背景として火山における地殻変動の時間変化をデータから抽出する研究であるが、観測された地殻変動データとマグマ輸送の物理過程についての知見を組み合わせ、観測データからマグマや熱水の物性やマグマだまりの性質を明らかにしようとする研究も出てきている。データ量の増加と計算機性能の向上を考えると、観測されたデータから火山体地下におけるマグマ輸送のメカニズムを明らかにしようとする研究は今後増加するものと思われる。また、SAR 干渉画像は様々なノイズを含み、経験を積んだ解析者でなければノイズと信号を見分けることが困難なことが多いが、この困難を機械学習的なアプローチにより解決しようという研究も近年見るようになってきている。従来熟練した解析者によって行われてきた作業が機械学習的アプローチにより計算機に置き換わる現象は、今後 SAR 干渉解析の分野にも見られるであろう。

(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

平成 30 年度においては、可搬型レーダー干渉計の観測データを解析して、地殻変動情報を求めるためのソフトウェアを作成した。また、可搬型レーダー干渉計実験機による野外初観測を浅間山で行い、目標とする 4km 先の観測を実現するための問題点を明らか

にした。さらに、その解決法の一つとして、システムノイズを低減させる改良を適用し、再観測を行った結果、4km 先についても、地表からの後方散乱を得ることができ、さらに、干渉も得られた。降雨や降灰によっては、レーダー波の空中の伝搬中にも減衰が大きくなる可能性があることから、アンテナの高感度化についても検討し、現行の 2 パッチアンテナから 4 パッチアンテナに変更することにより、3dB の向上が見込まれる。これについての実観測によるテストは、平成 31 年度に実施する予定である。また、降雨等の状況でも観測できるようにするため、ヘッド部の外装、アンテナのレドームを作製した。以上のことから、地上設置方式については、検討すべき事項は若干残っているものの、現状でも実観測に用いることが可能になった。また、地上設置型ではレールの設置場所が限られるという問題やリピート観測に時間がかかるという問題の解決のため、より簡便にリピート観測を行うための観測方式に関する開発を進める。そのための基礎的なデータを得るため、台車および車の屋根にアンテナを搭載して観測を行った。その観測データを用いても、ある程度の干渉が得られることが分かった。ただし、地上設置型により得られる干渉画像よりも干渉性が低いことや、観測・解析によるものと推測される位相変化が求まるなどの問題が明らかとなり、今後の課題とすることにした。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

平成 30 年度においては、SAR 干渉解析における電離圏遅延誤差を軽減する Split-spectrum 法を標準的解析手法に組み込むことについて検討した。帯域幅の広い PALSAR-2 データの干渉性が高いペアについては、精度良く電離圏遅延誤差を軽減することができることを確認した。特に、PALSAR-2 については、軌道再現性が高くなるように軌道制御されているので、積雪の少ない領域においては、3 年程度の干渉ペアにおいても干渉性が良く、有効に適用可能な精度で電離圏遅延成分を推定できることがわかった。しかし、積雪のある領域においては、非干渉による電離圏遅延成分の推定誤差が大きく、それをデータベース化のためのルーチン解析に組み込むのは適切でない可能性が示された。また、帯域幅が狭い PALSAR データについては、電離圏遅延成分の推定誤差が地殻変動検出精度を劣化させる場合が多いという結果が得られた。

以上の結果から、PALSAR-2 のデータに関するデータベース化のためのルーチン解析には、その地域の特性や対象の大きさ等を考慮して、電離圏遅延誤差軽減手法が有効であると判断される場合には、Brcic *et al.* (2010)、Rosen *et al.* (2010)、Gomba *et al.* (2016) による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、解析結果をチェックして、電離圏擾乱が大きい場合に、手動解析によって、電離圏遅延誤差軽減を試みる。PALSAR データの解析においては、電離圏遅延誤差軽減手法を組み込まない場合と同様の解析とする。

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 のデータを用いた干渉解析を行った。有珠山の解析においては、過去の火山活動にともない貫入した溶岩ドーム周辺において、長期的に継続する収縮変動が見られ、過去の水準測量や EDM の結果と比較・解釈することにより、この収縮変動は地下のマグマだまりの熱収縮によると推

測された。伊豆大島の解析においては、画像全体が陸地のデータを解析する場合の解析フローをそのまま使用すると、大きな解析誤差を生じる場合があり、島嶼の解析においては、その大きさ等を考慮して、適切な解析フローを模索し、解析システムを構築する必要性が示された。

有珠山の解析結果については、ウェゲナー、AGU において発表するとともに、世界における SAR 解析に関する動向についての情報収集を行った。

(e) 引用文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Wegmüller, U., C. Werner, O. Frey, C. Magnard, and T. Strozzi, Estimation and compensation of the ionospheric phase in SAR interferograms, Procedia Computer Sci., 138, 318-325, 2018.
- 5) Goldstein, R. M. and C. Werner, Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophys. Res. Lett., 25, 4035-4038, 1998.
- 6) Goldstein, R. M., H. A. Zebker, and C. Werner, Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, Radio Sci, 23, 713-720, 1988.
- 7) Mogi, K., Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, Bull. Earthquake Res. Inst., 36, 99-134, 1958.
- 8) Okada, Y., Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 1135-1154, 1985.
- 9) Wang, X., and Y. Aoki, Y., Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017, J. Geophys. Res. Solid Earth, doi:10.1029/2018JB016729, 2019.
- 10) 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.
- 11) Wang, X. and Y. Aoki (2019) Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017, J. Geophys. Res, 124, 335-357, <https://doi.org/10.1029/2018JB016729>.
- 12) Furuya, M. (2005) Quasi-static thermoelastic deformation in an elastic half-space: theory and application to InSAR observations at Izu-Oshima volcano, Japan, Geophys. J. Inter., 161, 230-242.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Wang, X. and Y. Aoki	Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017	J. Geophys. Res.	平成 31 年 1 月 5 日
小澤拓, 能美 仁	室内計測実験から見た InSAR を用いた地表変動計測における植生の影響	測地学会誌	印刷中
Ozawa, T., Y. Aoki, S. Okuyama, X. Wang, Y. Miyagi, and A. Nohmi	Next generation volcano research B subtheme 2-1: Development for creating a database of volcano deformation detected from radar interferometry	J. Disast. Res.	改訂中
小澤拓, 宮城 洋介	SAR 干渉解析による新燃岳火口周辺の地表変動: 2011 年噴火後の隆起の終息と 2017 年噴火前の沈降の加速	JpGU2018	平成 30 年 5 月 23 日
阿部華菜, 小 川佳子, 久田 泰広, 出村裕 英, 三浦哲, 小澤拓	InSAR 解析を用いた吾妻山周辺の地殻変動量推定: 大気遅延補正の試み	JpGU2018	平成 30 年 5 月 23 日
Wang, X. and Y. Aoki	Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017	JpGU2018	平成 30 年 5 月 22 日
小澤拓, 宮城 洋介, 青木陽 介, Xiaowen Wang, 奥山哲	次世代火山研究推進事業 B2-1: 可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダーによる精密地殻変動観測技術の開発	日本火山学会 2018 年度秋季大会	平成 30 年 9 月 28 日
奥山哲, 小澤 拓, 青木陽介	Sentinel-1 データ収集・配布システムの構築	日本火山学会 2018 年度秋季大会	平成 30 年 9 月 26 日
小澤拓, 宮城 洋介	新燃岳における 2011 年噴火から 2018 年噴火までの火口周辺の地表変動	日本測地学会第 130 回講演会	平成 30 年 10 月 17 日

小澤拓, 宮城洋介, 青木陽介, Xiaowen Wang, 奥山哲	次世代火山研究推進事業 B2-1 : 可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダーによる精密地殻変動観測技術の開発	日本測地学会第 130 回講演会	平成 30 年 10 月 16 日
阿部華菜, 小川佳子, 久田泰広, 出村裕英, 小澤拓, 三浦哲	大気遅延補正を適用した InSAR 解析と GNSS データの解析結果の比較	日本測地学会第 130 回講演会	平成 30 年 10 月 16 日
Wang, X. and Y. Aoki	Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017	19th General Assembly of Wegener	平成 30 年 9 月 12 日
Wang, X. and Y. Aoki	Surface Deformation of Asama Volcano, Japan, Detected by Sentinel-1 and ALOS-2 InSAR Observations Between 2014 and 2018	AGU fall meeting 2018	平成 30 年 12 月 10 日
Aoki, Y., and X. Wang	Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017	AGU fall meeting 2018	平成 30 年 12 月 10 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開発した。

(3) 令和元年度業務計画案

a) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式と車載方式等）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。平成 31 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、簡便なりピートパス観測を実施するための観測方法についての検討を進める。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。

b) 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。平成 31 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作成する。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を予定）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。

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 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. 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 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が期待が寄せられている。そこで、本業務では、分光技術を用いて熱・ガス等の分布を計測する技術の開発を実施する。

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

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

(d) 10 年間の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

今後の開発での改善項目の基礎データ取得の為、非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ 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、攪拌播潰機の整備を行い以降の開発環境を整えた。

2) 平成 29 年度：

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。SPIC-C の開発として冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。ISH の開発として、主にフィルター分光方式の試験を行った。SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーヘッドの導入、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR（8-14 μ m）領域の VGA カメラセンサーヘッド、冷却型 MWIR（3~5 μ 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：

- ・ 非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部構築：XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ m）型を導入する。同期計測機構を構築する。
- ・ 冷却型赤外カメラセンサーヘッド部構築：LWIR（7.5~9.5 μ m）領域の VGA カメラセンサーヘッドを構築する。
- ・ 画像分光用前置光学系：ブレッドボードモデルの構築を行う。非冷却型赤外 FPA と干渉分光方式の試験を行う。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ（カメラセンサーヘッド整備）：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する。スペクトル推定手法、ストラクチャ

ャ推定手法の検討を行う。

- ・ スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行う。

4) 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 μ m）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ m）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）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 μ m)領域のVGAカメラセンサーヘッドとLWIR(7.5~9.5 μ m)領域のVGAカメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）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 μ m）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ m）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）の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 μ m)領域のVGAカメラセンサーヘッドとLWIR(7.5~9.5 μ m)領域のVGAカメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のプロトタイプを改造し小型化する。
- ・ 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 μ m）型、XGA 非冷却型カ

メラ広帯域 (8-14 μ m) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを完成する。

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

7) 令和 4 年度：

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

8) 令和 5 年度：

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) の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 μ m) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5~9.5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- ・ 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH) の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。

- ・ スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発）：スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- ・ スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行う。

9) 令和 6 年度：

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

10) 令和 7 年度：

- ・ 試験観測：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ m）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ m）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）、MWIR（3~5 μ m）領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR（7.5~9.5 μ m）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）、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) 平成 30 年度業務目的

平成 30 年度は、当初計画通り、SPIC の各要素技術の実現のために、SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS 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

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する。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う。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する。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR (8~14 μ m) 領域の XGA カメラセンサーヘッド、冷却型 LWIR(7.5~9.5 μ m)領域の VGA カメラセンサーヘッドを導入する。また、これらに他装置との同期計測機構を構築する。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う。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する。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成する。

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う。

(2) 平成 30 年度の成果

(a) 業務の要約

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築すると共に、SPIC-C の開発として、冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。また ISH の開発として、画像分光用前置光学系のブレッドボードモデルの構築を行った。さらに SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーヘッドを整備した。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR (8~14 μ m) 領域の XGA カメラセンサーヘッド、冷却型 LWIR (7.5~9.5 μ 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。

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

a) SPIC-UC の開発 (非冷却型 LWIR (8~14 μ m) 領域の XGA カメラセンサーヘッドの開発)

i) 開発した試作機の概要

SPIC-UC の開発では、LWIR (8~14 μ m) 領域に感度を有する非冷却型マイクロボロメータの XGA サイズ (1024×768 画素) の FPA を有するカメラセンサーヘッドの試作を実施した (以下、SPIC-UC(XGA 型)ともいう)。SPIC-UC(XGA 型)は、昨年度までに試作した VGA サイズ (640×480 画素) の FPA を有するカメラ (以下、SPIC-UC(VGA 型)ともいう) よりも、縦横 1.6 倍の画素数があるため、同じ画角で計測した場合、より高い空間分解能で画像を計測できる。このため、SPIC-UC(XGA 型)は SPIC-UC(VGA 型)に比較し、SfM 処理や瞬時視野 (IFOV) 程度の大きさの熱源の温度推定において、その精度向上が原理的に実現できる。

試作したカメラの非冷却型マイクロボロメータセンサーには、XGA の FPA センサー (仏 ULIS 社 PIC01024Gen2) を採用し、これを組み込んだ XGA カメラセンサーヘッドを構築した ((株) ビジョンセンシング社製)。本装置は、将来的に実験室外でも使用することを想定し、この XGA カメラセンサーヘッドと赤外カメラレンズを組み合わせた構成を、保護ハウジング (IP67 対応) に格納した装置形態の試作機を実現した。本装置は PC (Windows) より USB 接続にて制御、データ取得を行う。また、5~60fps でのフレーム同期計測を実現する機能、フィルターをレンズと FPA の間に 1 枚搭載する機能を実現した。試作機の構成の概念図を図 1 に、外観を写真 1 に、

保護ハウジングの形態と機能を図 2 に、主な諸元を表 1 にそれぞれ示す。

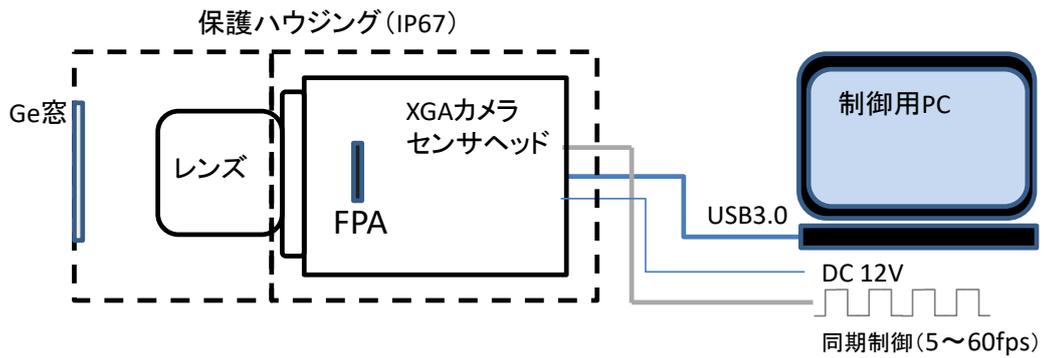


図 1 SPIC-UC (XGA 型) 試作機装置構成概念図

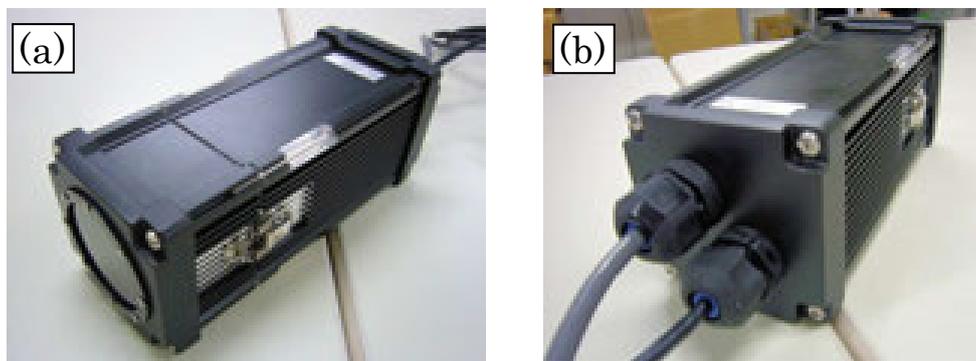


写真 1. SPIC-UC (XGA 型) 試作機外観 ((a)前方、(b)後方)

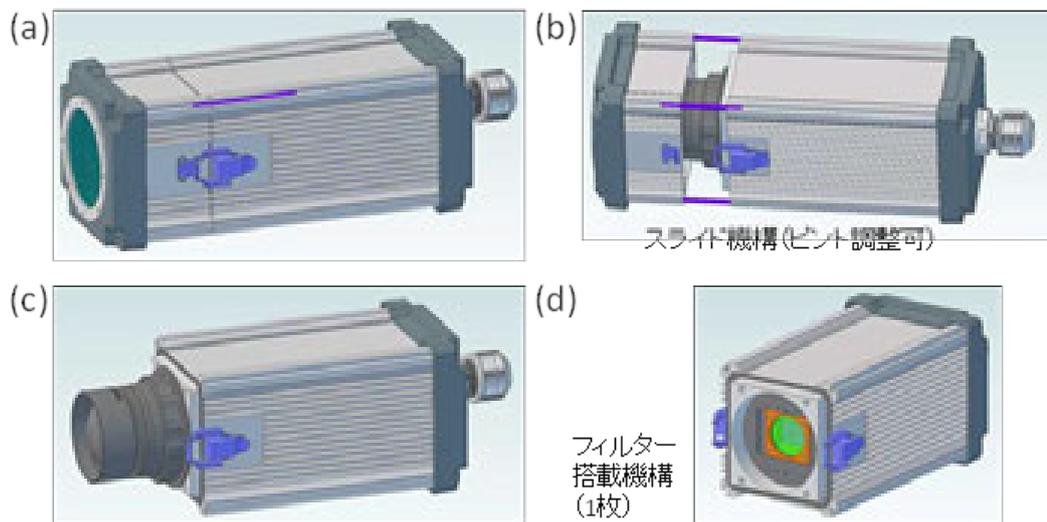


図 2. SPIC-UC (XGA 型) 試作機の保護ハウジングの形態と機能。モールド状態 (a)、ピント調整機構 (b)、保護窓なしの形態 (c)、フィルター交換機能 (d)。

表 1 SPIC-UC (XGA 型) 試作機的主要諸元

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 (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	FOV 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

ii) 開発した装置の基本性能評価

開発した試作機: SPIC-UC (XGA 型) は環境温度-10~50℃において、ターゲット温度 0、27、54、81℃に対し輝度較正を行った。その直線性試験および NETD 評価試験の結果を図 3、4 に示す。これらの評価の結果、SPIC-UC (XGA 型) の直線性は環境温度、-10、0、10、20、30、40、50 においてターゲット温度 0、27、54、81℃に対し、温度 1K 以内の計測再現性が得られた (図 3)。また、ターゲット温度 0、27、54、81℃での NETD も環境温度 0、10、20、30、40 において 0.1K 以内を達成できることが分る (図 4)。

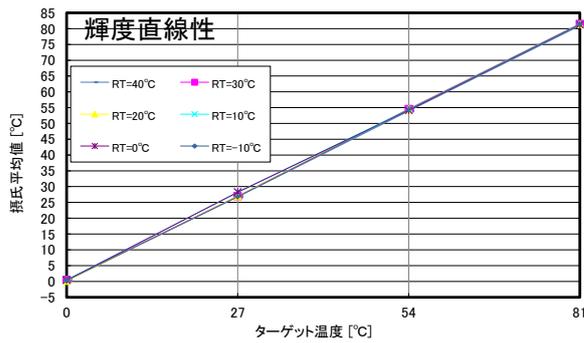


図 3. SPIC-UC (XGA 型) の輝度直線性

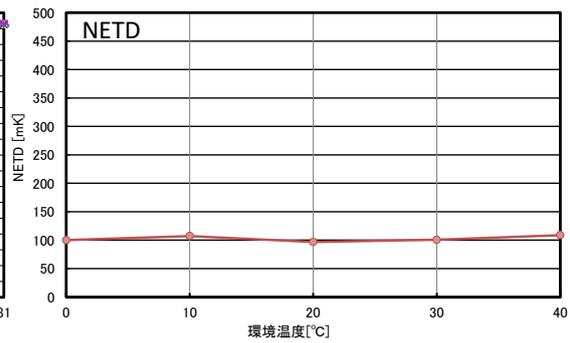


図 4. SPIC-UC (XGA 型) の NETD

iii) 開発した装置での画像の試験計測

開発した試作機：SPIC-UC (XGA 型) の空間分解能を確認する為、SPIC-UC (XGA 型)、SPIC-UC (VGA 型) による風景の比較撮影を行った。図 5 に、SPIC-UC (XGA 型) と SPIC-UC (VGA 型) で計測した風景の全景を示す。SPIC-UC (XGA 型) の瞬時視野 (IFOV) は 0.348mrad (FOV は水平×垂直： $19.7\times 14.9^\circ$)、昨年度に試作した SPIC-UC (VGA 型) のそれは 0.486mrad (FOV は水平×垂直： $17.7\times 13.3^\circ$) であることから、SPIC-UC (XGA 型) の全景である図 5(a) の計測範囲は、SPIC-UC (VGA 型) の全景である図 5(b) の計測範囲よりやや広い。瞬時視野の違いの確認ため、図 6 に図 5 の部分拡大画像 (図 6(a)、(b)) と目視確認のための可視画像 (図 6(c)) を示す。ビルの屋上部分の構造物に着目した比較により、SPIC-UC (XGA 型) の計測画像である図 6 の (a) の方が、SPIC-UC (VGA 型) の計測画像である図 6 の (b) よりも詳細な構造が視認できことが分かる。以上より、両カメラの瞬時視野の違いによる計測画像の空間解像度の差が確認できる。

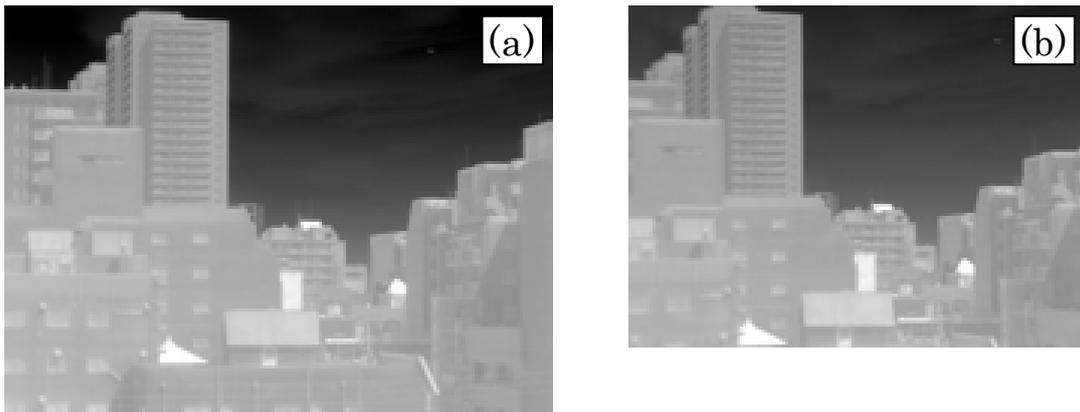


図 5. 風景の試験観測全景画像。SPIC-UC (XGA 型) (a)、SPIC-UC (VGA 型) (b)

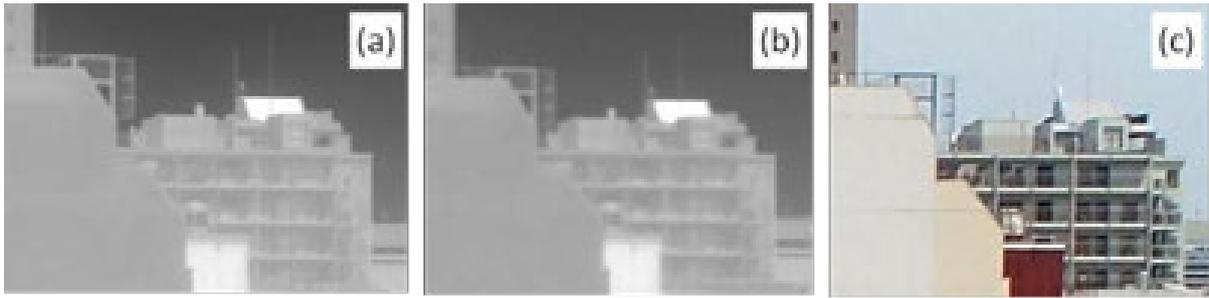


図 6. 風景の試験観測全景画像（図 5）の部分拡大画像による解像度比較。SPIC-UC（XGA 型）(a)、SPIC-UC（VGA 型）(b)、対象の目視確認のための可視画像(c)。

iv) 開発した装置の同期機能（SPIC-UC(VGA 型)との同期計測）

本年度に開発した試作機：SPIC-UC（XGA 型）の同期機能と昨年度に試作した SPIC-UC（VGA 型）の同期機能を活用し、両装置での同期計測を実現するソフトウェアの試作を行った。この試作したソフトウェアは、現時点で 1 台の SPIC-UC (XGA 型) と 3 台の SPIC-UC (VGA 型) の、合計 4 台のカメラの 30fps での同期計測が実現できる。装置構成の概要を図 7 に示す。4 台のうちのいずれか 1 台のカメラからマスタ同期信号を発生させ、この信号を同期信号分配機によりスレーブ同期信号として分配することで、他の 3 台との同期計測を実現する。また画像を保存する制御 PC のストレージは SSD を想定している。

写真 2 に、試験的に実施した 4 台の同期計測の装置構成写真を示す。また図 8 に同期計測ソフトの計測画面を示す。

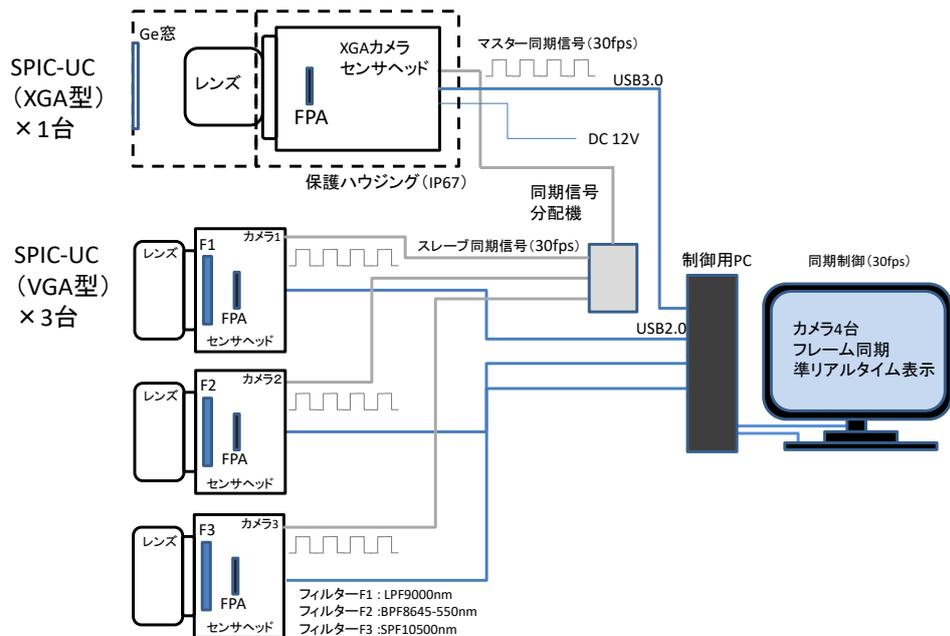


図 7. SPIC-UC（XGA 型）1 台と SPIC-UC（VGA 型）3 台での同期計測装置の構成概要



写真 2. SPIC-UC (XGA 型) 1 台と SPIC-UC (VGA 型) 3 台の同期計測装置



図 8. SPIC-UC (XGA 型) 1 台と SPIC-UC (VGA 型) 3 台での同期計測ソフトの計測画面

b) SPIC-C の開発(内蔵型分光フィルターを有する冷却型 LWIR(7.5~9.5 μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドの開発)

i) 開発した装置の概要

SPIC-C の開発では、内蔵型分光フィルターを有する LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の冷却型 VGA カメラセンサー (冷却型 MCT) を採用したセンサーヘッドの試作機を製作した (以下、SPIC-C(LWIR)とも呼ぶ)。SPIC-C(LWIR)は、常温を背景とする場合の SO₂ ガスの濃度分布の計測を実現することを主目的とした装置である。試作機に組み込む分光フィルターは、大気の透過率¹⁾、SO₂ガスの放射率²⁾、火成岩の放射率³⁾を考慮し選定した。すなわち、水蒸気の影響をカットする為に、領域 8110nm 以上の波長を透過するロングパスフィルター (LP-8110nm)、火成岩の放射率に差異がある領域 8650nm 以上の波長を透過するロングパスフィルター、SO₂ガスの吸収特性²⁾に合わせた 8370~8920nm を透過するバンドパスフィルター (BPF8645-550nm) を選定した。試作機は、1 眼のカメラシステムとし、フィルターホイールを切り換え、各フィルターを透過したエネルギーを非同時に計測する方式を採用した。この仕様を満たすカメラとしてレンズ後段に内蔵型のフィルターホイール(4 枚搭載可)を有する既製の LWIR 領域 (7.7~9.3 μm) に感度を有するの冷却型 MCT カメラ (Telops 社製:FAST-L200) を採用した。このカメラに、上述の分光フィルターを組み込み SPIC-C(LWIR)を構築し、メーカーでの較正試験を実施し、各分光フィルターで実現できる諸性能の試験データを取得した。SPIC-C(LWIR)は PC (Windows) より GigE 接続にて制御、データ取得を行う。またフレーム同期計測を実現する機能を有する。試作機の構成の概要を図 9 に、外観を写真 3 に、主な諸元を表 2 に示す。なお、フィルターがない場合の L200 の感度波長域は 7.7~9.3 μm である。これは当初計画した SPIC-C (LWIR) の LWIR 領域の感度波長域 7.5~9.5 μm よりもやや狭いが、当初計画では、一般的な LWIR 領域の IR カメラが観測する波長域である 8~14 μm の範囲よりも狭く、8.65 μm 付近の SO₂吸収特性 (8~9 μm にわたる) によるエネルギーの変化を、選択的に捉えられる計測を想定しており、L200 の感度波長域は 7.7~9.3 μm はこの要求に合致している。

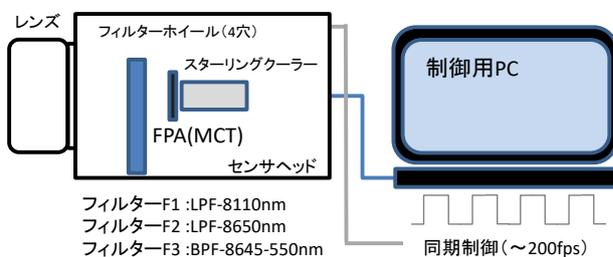


写真 3. SPIC-C(LWIR)試作機外観

表 2 SPIC-C(LWIR) 試作機の主な諸元

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) フィルターF1 : LPF-8110nm フィルターF2 : LPF-8650nm 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°C)	19mK
重量	6kg (レンズ無)

ii) 開発した装置の基本性能評価

試作機の冷却型 LWIR 領域赤外カメラとして採用した L200 は、露光時間を最適に制御するダイナミックエクスポージャータイムコントロール (AEC) を有している。これにより、固定された感度波長域において、センサーが飽和しない最適な動作範囲を維持しながら、観測対象の輝度温度を計測できる。メーカーでの較正試験では AEC を機能させた較正を実施し、異なる感度波長域での装置性能 (分光放射輝度画像取得性能) を検証するために、フィルターなしおよび F1～F3 の各分光フィルターで実現できる諸性能の試験データを取得した。結果を以下の表 3 に示す。これらの評価結果より、システムは 19mk の NETD を達成できること、フィルター1, 2 を用いた温度計測は零度以下 (-33°C、-2°C)、フィルター3 を用いた温度計測は常温付近 (18°C) から可能であることが分かった。また、フィルター2 では-2～1152°Cわたる計測が実現できることが分かった (これは常温から溶融した溶岩の温度レンジをカバーできる)。

表 3 SPIC-C(LWIR) 試作機の分光輝度画像取得性能の検証結果

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)			
レンズ	f=25mm/F1.4			
NETD (@25°C)	19mK			
感度波長域	7700～ 9300nm	8110nm～ 9300nm	8650nm～ 9300nm	8370～ 8920nm
フィルター	なし	F1 :LPF- 8110nm	F2 :LPF- 8650nm	F3 :BPF- 8645-550nm
輝度温度計測範囲 (精度±1°C/±1%)	-40～657°C	-33～709°C	-2～1152°C	18～1078°C

iii) 開発した装置での試験画像計測

常温を背景とする場合の SO₂ ガスの濃度分布の計測を実現することを主目的とし、試作した SPIC-C(LWIR) のガス濃度分布可視化機能の確認の為、SPIC-C(LWIR) の観測波長域に、図 10 に示す、約 300nm 幅の赤外線吸収特性をもつ、HFC152a (フルオロカーボン 152a) の可視化を試みた。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結果を図 11 に示す。図 11(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ができた。

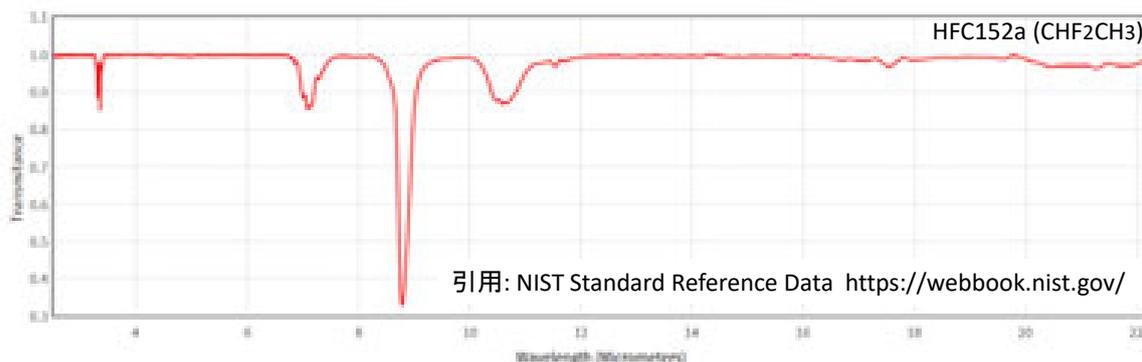


図 10. HFC152a の赤外吸収スペクトル

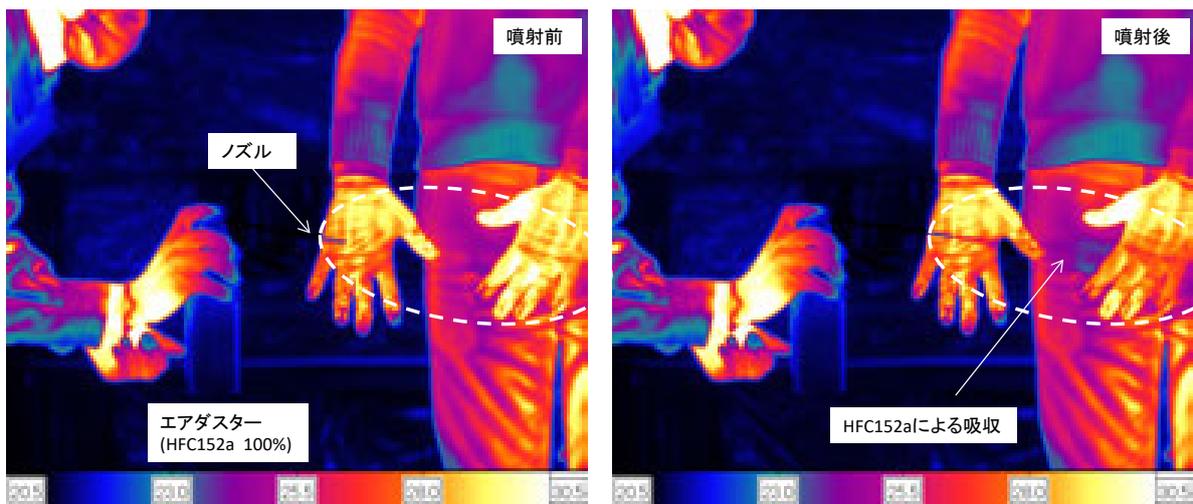


図 11. SPIC-C(LWIR)のガス濃度分布可視化機能確認のためのHFC152a可視化試験

c) ISHの開発

i) 非冷却型赤外FPAと干渉分光方式の組み合わせの性能検証

ISH(画像分光用前置光学系)のブレードボードモデル(以下BBMという)の構築として、平成30年度は、検出器に非冷却型赤外FPAを用いた干渉分光方式のISHの試験を実施した。画像分光の為に、等傾干渉縞を最終的に得ることを踏まえ、本年度はマイケルソン型干渉計の分光方式を検討した。

まず、可視域でBBMによる干渉計の作製を試み、 $\phi 25.4\text{mm}$ 平面鏡(固定鏡)、 $\phi 25.4\text{mm}$ 平面鏡(微動ステージ付)、 $\phi 25.4\text{mm } 90^\circ$ 軸外放物鏡とクォーツのビームスプリッターで構成した干渉計を構築、調整し、干渉縞を得ることができた。図12に装置の概要を、写真4に実験装置の外観を、写真5に得られた干渉縞を示す。

次に赤外域への拡張の為に、KBr/Geからなるビームスプリッターを専用ホルダーに搭載した機構(以下BSと称す)を製作した((株)日本分光製、図13)。画像分光計を製作するために、本年度は、まず、このBSを介した赤外域での結像を確認した。はじめに、図12の装置にBSを組み込み、 $\phi 25.4\text{mm } 90^\circ$ 軸外放物鏡でコリメートした、平面黒体(60°C)の像を、非冷却型赤外FPAを有す赤外カメラ(T650sc:FLIR社製)で確認した。図14に装置の概要を、写真6に実験装置の外観を示す。確認できた像を、図15に示す。これより、BSを介し、平面黒体表面の結像が非冷却型赤外FPAを有す赤外カメラによりできることが確認できる。次に、上記の平面鏡より大口径($\Phi 63.5\text{mm}$)の2つのコーナーキューブミラー(以下CCMともいう)からなるマイケルソン干渉計を可視域で調整(干渉を確認)、構築し、上記の赤外用のBSを組み込み、BSを通して見た、平面黒体を背景とした幾何学形状(光学部品のステンレス製スペーサー)の結像の確認を行った。図16に装置の概要を、写真7に実験装置の外観を示す。また、確認できた像を、図17に示す。これより、CCM、BSを介し、物体の結像が非冷却型赤外FPAを有す赤外カメラによりできることが確認できる。以上より、BSを介した赤外域での結像が可能であることが確認できた。

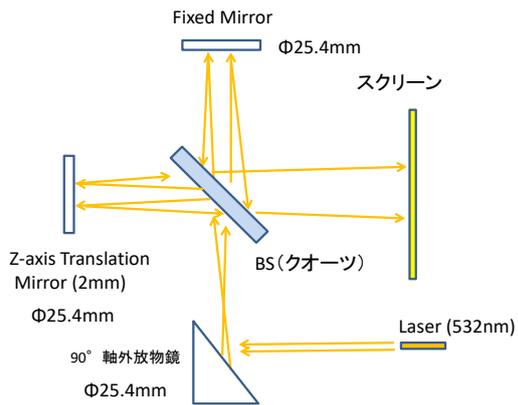


図 12. 可視域干渉計 BBM 構成概要

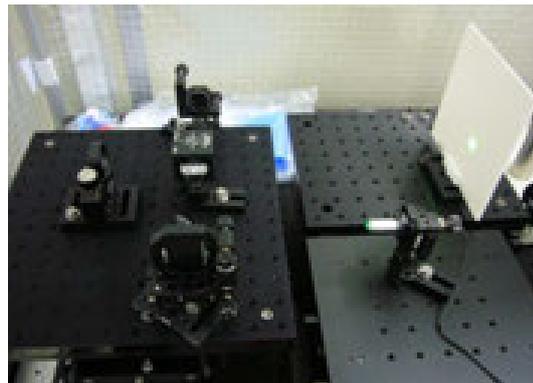


写真 4. 可視域干渉計 BBM 外観



写真 5. 可視域干渉計 BBM で形成した干渉縞

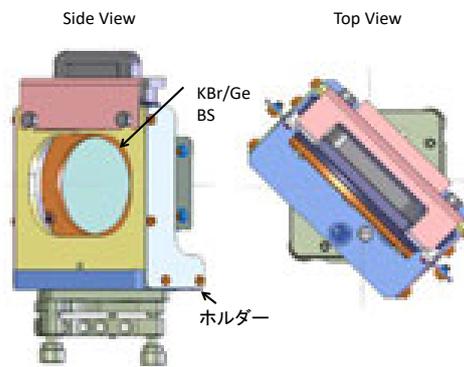


図 13. ホルダー搭載赤外域用 KBr/Ge BS

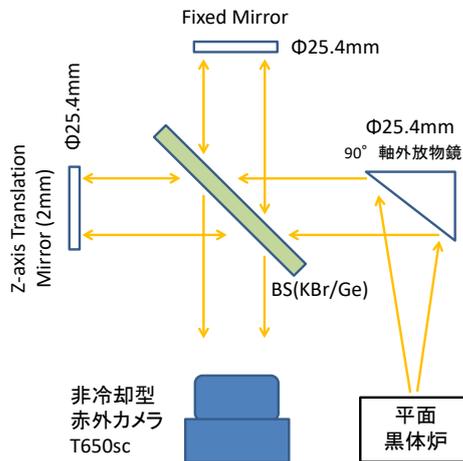


図 14. 赤外域干渉計 BBM (平面鏡) 構成概要

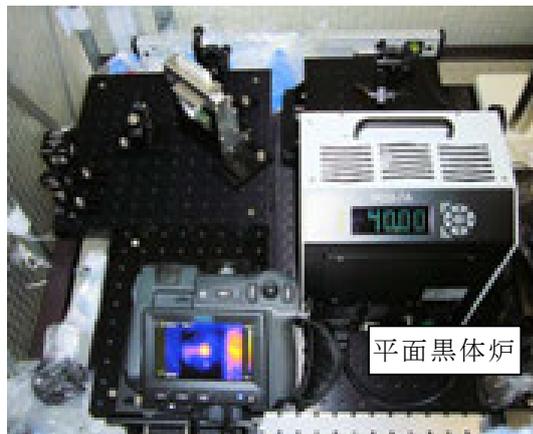


写真 6. 赤外域干渉計 BBM (平面鏡) 外観

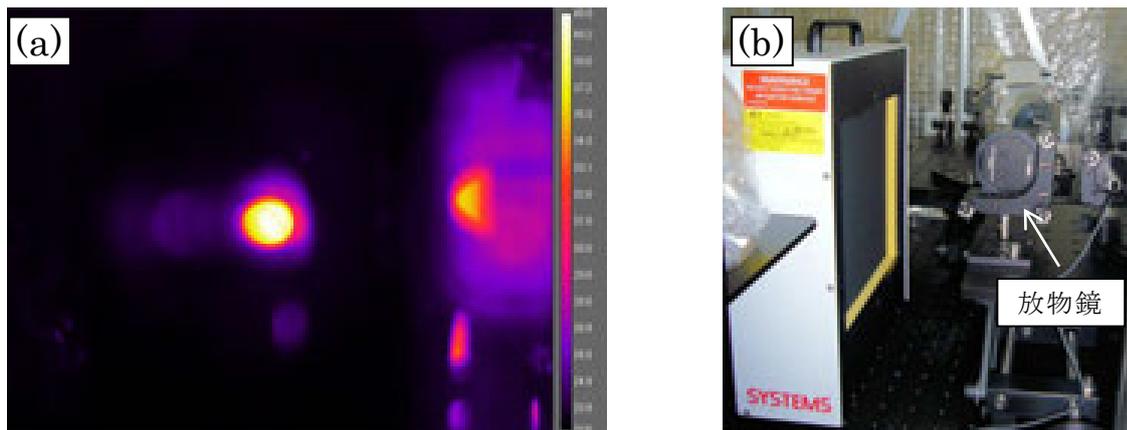


図 15. 赤外線干渉計 BBM（平面鏡）を介し、非冷却型赤外線カメラで観測した平面黒体炉表面（放物鏡焦点面）(a)、観測した放物鏡焦点面の平面黒体炉の写真(b)

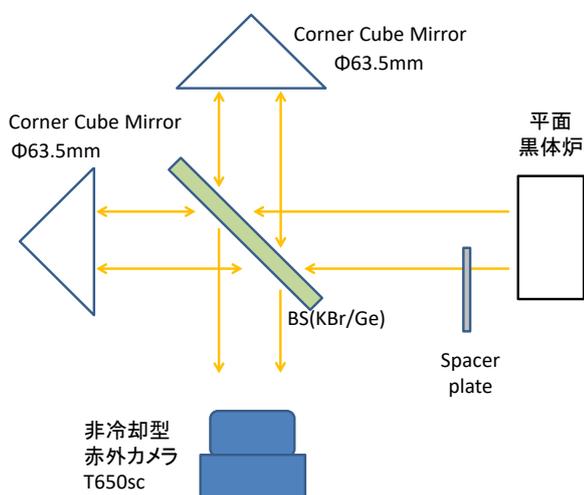


図 16. 赤外線干渉計 BBM（CCM）構成概要 写真 7. 赤外線干渉計 BBM（CCM）外観

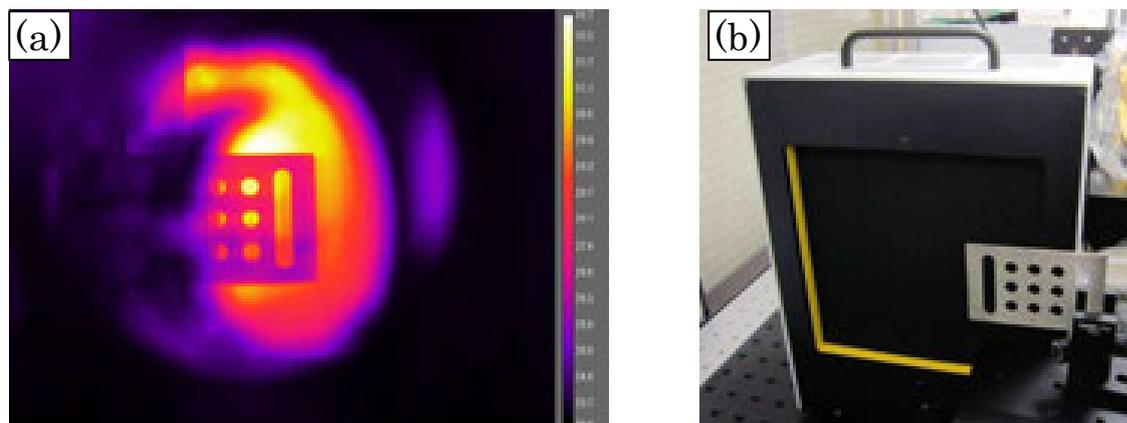


図 17. 赤外線干渉計 BBM（CCM）を介し、非冷却型赤外線カメラで観測した平面黒体炉を背景としたスペーサー（CCM で像は反転）(a)、観測したスペーサーの写真(b)

d) SPIC-SS の開発

本年度の SPIC-SS の開発では、昨年度とは異なる計測波長域を有する FPA センサーとして、紫外域に感度がある紫外可視カメラセンサーヘッドおよび紫外域分光フィルターからなるシステム（以下、SPIC-SS (DUV) という）を構築した。また昨年度に開発した、6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドシステムの制御系をモバイル型のノート PC とする機能追加を実施した。また、昨年度に引き続き、SPIC-SS で活用するスペクトル推定手法とストラクチャ推定手法の検討、プログラム開発を実施した。

i) SPIC-SS (DUV) の概要

紫外域の SPIC-SS を実現するための試験装置として、紫外可視カメラセンサーヘッド、電動フィルターホイール、紫外用レンズから構成されるシステム：SPIC-SS (DUV) を構築した。紫外可視カメラは CMOS カメラよりもノイズの少ない冷却 CCD カメラ（1600×1200 画素）（ビットラン（株）製：BU-54DUV）を採用した。電動フィルターホイールは、ビットラン（株）製：CST-FW43-36N/50N を採用した。この電動フィルターホイールは、内蔵のフィルターターレットを交換することで、搭載するフィルター径、枚数を変更できる。現仕様では、φ50mm のフィルターを 5 枚、または、φ36mm のフィルターを 7 枚同時に搭載できる。搭載するフィルターは、SO₂ ガスの計測を考慮して φ50mm のフィルターを 2 枚選定した⁴⁾。それらは、SO₂ ガスの吸収がある中心波長 310nm、半値幅 10nm のバンドパスフィルター、および SO₂ ガスの吸収が少ない中心波長 330nm、半値幅 10nm のバンドパスフィルター（Edmund Optics 社製）である。紫外可視域に対応するレンズは（株）栃木ニコン製：紫外線撮影用レンズ UV-105mm F4.5 とした。電動フィルターホイールは PC（Windows）より USB 接続にて制御、冷却型 CCD カメラは PC（Windows）より USB 接続にて制御、データ取得を行う。試験装置の構成の概要を図 18 に、外観を写真 8 に、主な諸元を表 4 に示す。以上により、紫外域が計測できる SPIC-SS の試験装置を開発できた。

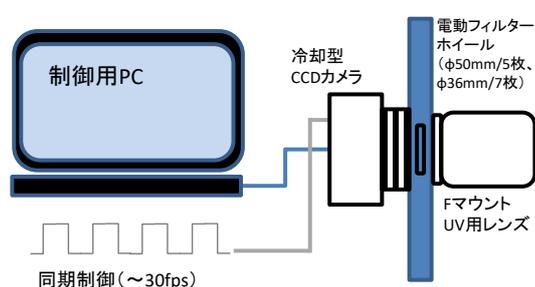


図 18. SPIC-SS (DUV) の構成の概要

写真 8. SPIC-SS (DUV) の外観

表 4 SPIC-SS (DUV) の主な諸元

センサーヘッド	冷却型紫外可視カメラ
センサータイプ	CCD, 1600×1200 素子
A/D	16bit
露光時間	10ms～18hr
フィルターホイール	電動フィルターホイール (PC、手動制御)
フィルターターレット	搭載フィルター：φ 50mm/5 枚 or φ 36mm/7 枚
フィルター	Φ 50mm, CWL310nm(FWHM10nm), CWL330nm(FWHM10nm)
フレームレート	4.2fps (同期可能)
レンズ	f=105mm/F4.5、F マウント

ii) マルチカメラセンサーヘッドシステムのモバイル型制御装置の開発

昨年度に開発した、6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドシステムの制御系をモバイル型のノート PC とする機能追加を実施した。6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドは昨年同様である。本年度は制御系をモバイル型とするために制御系をノート PC としたシステムを構築した ((株) テクノスコープ製)。本マルチカメラセンサーヘッドは、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。試作機の構成の概要を図 19 に、外観を写真 9 に示す。以上により、6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドシステムのモバイル型制御系を構築できた。

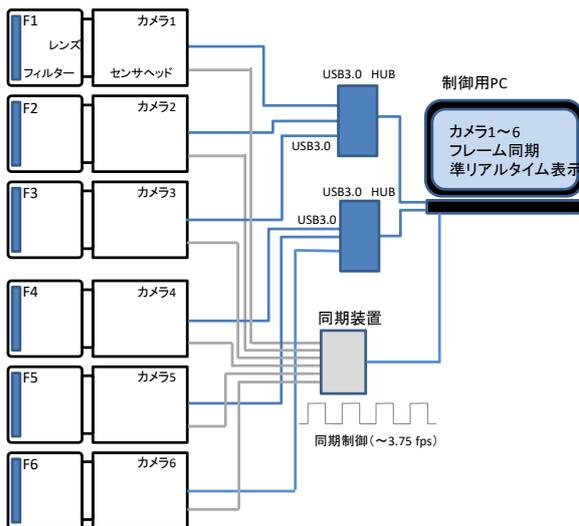


図 19. SPIC-SS モバイル型制御装置の構成

写真 9 SPIC-SS モバイル型制御装置外観

iii) スペクトル推定手法の検討とプログラム開発⁶⁾

平成 29 年度に導入した室内用可視画像分光装置(Headwall Photonics 社製: Micro Hyperspectral E)により試験データを取得し、これらを用い、スペクトル推定手法のアルゴリズムとして多変量解析処理手法の重回帰分析手法⁵⁾を検証するプログラムを作成した⁶⁾。このプログラムは平成 28 年度に赤外反射スペクトルについて開発したプログラムを基本にし、平成 29 年度に、可視域のスペクトルデータにも対応できるよう改造し作成したものを改良(異なる変換行列 G の計算手段を追加)したものである。

検証データは、室内用可視画像分光装置により計測した(写真 10)、整形試料(円筒形 ϕ 16mm、 h =7mm に整形、平坦面をダイヤモンドペースト C#150 (約 70 μ m) で研磨、(株)ニチカ)の流紋岩(石英粗面岩: 裾花凝灰岩部層の溶岩)、安山岩(桜島火山大正 II 溶岩)、玄武岩(玄武洞溶岩)(写真 11)、およびバルク試料(火山岩標本、(株)ニチカ)の黒雲母流紋岩(和田峠流紋岩)、輝石安山岩(霧ガ峰火山)、玄武岩(玄武洞溶岩)(写真 12)の、相対反射率データ(376 波長、リファレンススペクトル: r)を使用した。この手法は、測定対象のマルチバンドスペクトル(SPIC で取得する予定のデータ) V (n 個のマルチバンドスペクトル: v が張る 1 次元ベクトル空間 [$1 \times n$]、今回 v は r からバンド間の積分で計算) から、その高次の純スペクトル(リファレンススペクトル) R (n 個のリファレンススペクトル r が張る r 次元ベクトル空間 [$r \times n$]) を、重回帰分析により求めた線形写像 G ($[r \times 1]$) により、 $R=GV$ とし求める(ただし、 $r \gg 1, n > r$)。ここで $G=RV^T(VV^T)^{-1}$ で特異値分解(SVD)を援用し求めた。推定される \hat{r}_k は $\hat{r}_k=Gv_k$ となる。今回 v は試作中のマルチバンドカメラを 6 バンドとした為、6 バンドマルチスペクトルデータ (v) から 376 波長のリファレンスデータ (r) を推定することを検証した。

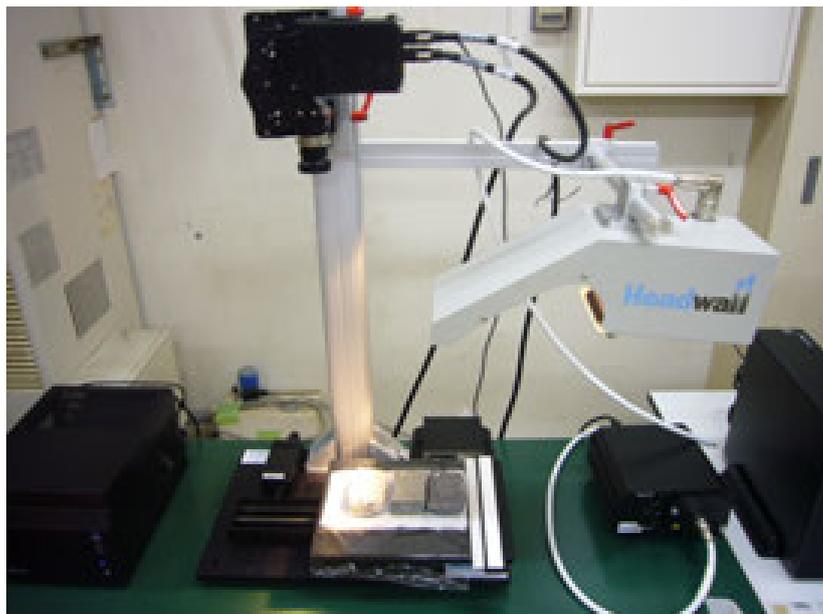


写真 10. 室内用可視画像分光装置による火成岩の可視相対反射率分布の画像計測

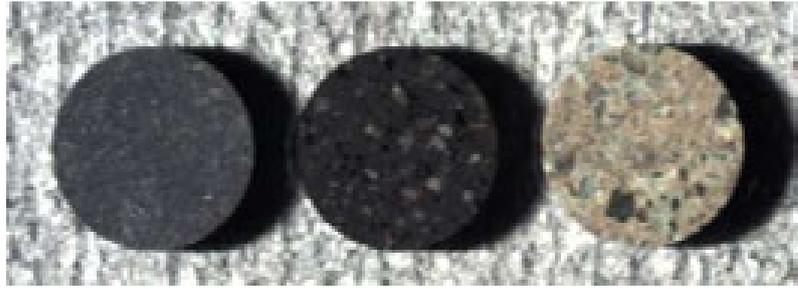


写真 11. 整形試料 (ϕ 16mm, h=7mm)。左から、玄武岩、安山岩、流紋岩 (R/G/B=635/551/471nm)。



写真 12. バルク試料 (約 90×60mm)。左から、玄武岩、輝石安山岩、黒雲母流紋岩 (R/G/B=635/551/471nm)。

図 20 に整形試料の流紋岩、安山岩、玄武岩の結果を示す。図 21 にバルク試料の黒雲母流紋岩、輝石安山岩、玄武岩の結果を示す。図 22 にすべての整形試料から求めた線形写像 G を用いて、バルク試料の黒雲母流紋岩、輝石安山岩、玄武岩の各 376 波長のリファレンスデータ (r) を求めた結果を示す。いずれの結果も、 r の推定値 \hat{r} は、 r が比較的なめらかでない領域を除き、 r の値にして数%以内の一致を示している。以上より、整形試料のリファレンスデータからバルク試料のスペクトルが推定可であること、開発したアルゴリズムは、試作中の SPIC-SS (6 眼マルチバンドカメラ) に活用できることが示唆される。

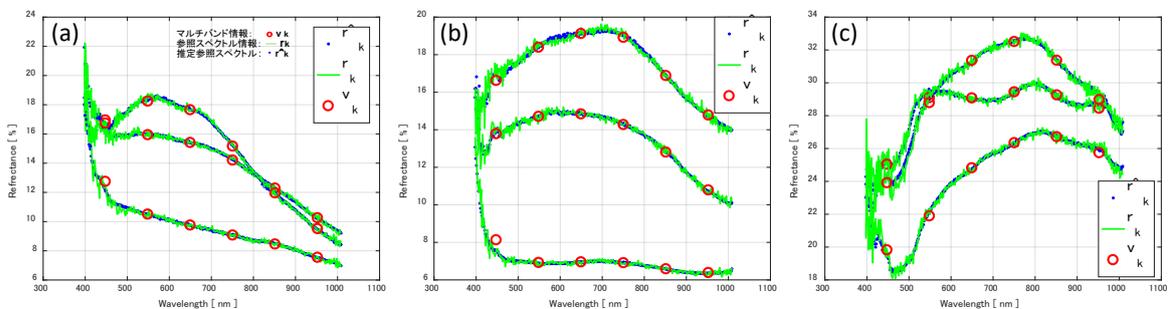


図 20. スペクトル推定手法の整形試料可視相対反射率実測データによる検証。(a) 玄武岩 (G の推定に 5703 スペクトル使用)、(b) 安山岩 (G の推定に 5263 スペクトル使用)、(c) 流紋岩 (G の推定に 5279 スペクトル使用)。推定した r_k は、G の推定には用いない。スペクトルの空間サンプリング領域は、約 $300 \times 300 \mu\text{m}$ 。

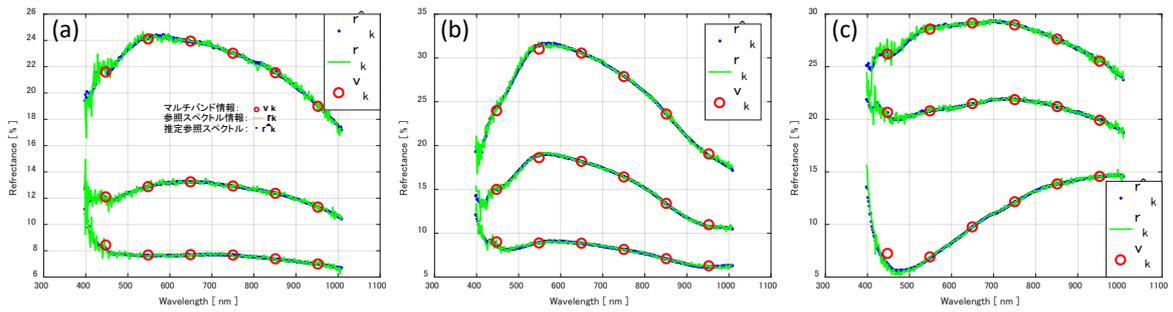


図 21. スペクトル推定手法のバルク試料可視相対反射率実測データによる検証。(a)玄武岩 (Gの推定に 5933 スペクトル使用)、(b)輝石安山岩 (Gの推定に 5545 スペクトル使用)、(c)黒雲母流紋岩 (Gの推定に 5466 スペクトル使用)。推定した r_k は G の推定には用いない。スペクトルの空間サンプリング領域は、約 $300 \times 300 \mu\text{m}$ 。

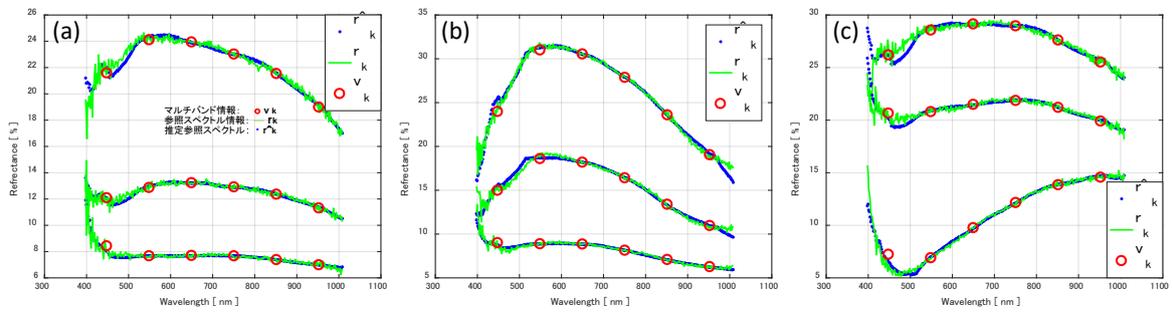


図 22. 全整形試料スペクトルから求めた G を用いた、バルク試料可視相対反射率実測データのスペクトル推定の検証。(a)玄武岩、(b)輝石安山岩、(c)黒雲母流紋岩。使用した全整形試料スペクトル数は 16248。スペクトルの空間サンプリング領域は、約 $300 \times 300 \mu\text{m}$ 。

iv) ストラクチャ推定手法の検討とプログラム開発⁷⁾

昨年度に引き続き、ストラクチャ推定手法として、オーバーラップ領域を有する複数の画像データから、計測対象の形状（ストラクチャ）とカメラの位置、姿勢を同時に推定する技術である SfM に着目し検討を実施した⁷⁾。検討では、当所の航空機搭載型センサーである、単発エンジン航空機搭載型放射伝達スペクトルスキャナ (ARTS-SE)⁸⁾ の試験観測データを使用した。ARTS-SE は我々の以前の装置である ARTS の push-broom 方式の画像分光装置と新規に開発したカメラシステムである Structure and Thermal Information Capture (STIC) から構成される。STIC は、Structure from Motion (SfM) 処理等に活用できる可視画像と熱赤外画像を連続的に計測する。本年度は、2015 年 12 月 5 日に 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、赤外画像を用い地熱地帯の DSM から等高線図を求めるプログラムを作成した。

ARTS-SE による箱根 (大涌谷) の火山観測は、2015 年 12 月 5 日 12:30 に実施した。観測高度は海拔 3000m、対地速度は 75m/s である。STIC の可視カメラで 2s 間

隔で計測した連続する 51 枚の画像および、STIC の熱赤外カメラの、 $-40\sim 150^{\circ}\text{C}$ レンジの 0.5s 間隔の連続した 93 枚の画像を市販の写真測量画像処理ソフト (Agisoft PhotoScan) で SfM 処理した。GCP は地理院地図 (国土地理院、電子国土 Web) を利用し求め、オルソ処理を WGS84/UTM 座標系で行った。

SfM 処理より求めた大涌谷付近の可視画像と熱赤外画像のオルソ画像を図 23、24 に、オルソ処理にあたり推定した地形情報 (DSM) から計算した大涌谷近傍の等高線図を図 25、26 に示す。これらより地熱地帯の噴気の影響は、熱赤外画像の方が小さいことが分かる。これらの結果より、光学的に多波長にわたる SPIC の各カメラの計測データに対し SfM を活用した場合、各カメラの光学的データの特性を反映した、形状推定が可能であることが示唆される。

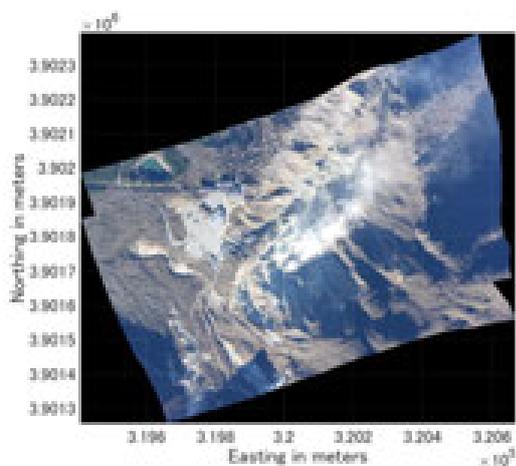


図 23. STIC の可視オルソ画像

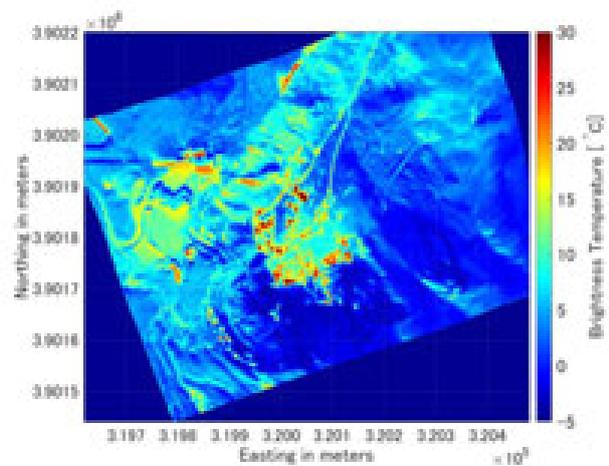


図 24. STIC の熱赤外オルソ画像

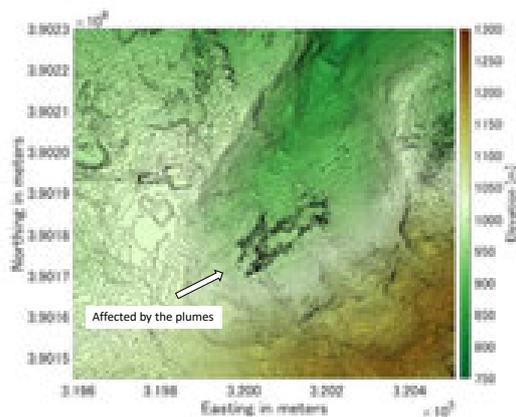


図 25. 可視画像から求めた等高線図

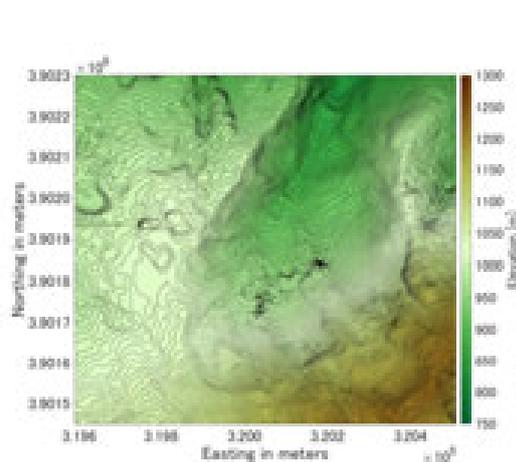


図 26. 熱赤外画像から求めた等高線図

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。

a) 火成岩のスペクトルの計測手法の検討と計測

i) 室内用可視画像分光装置での検討とデータ取得

スペクトル推定手法のアルゴリズムとして多変量解析処理手法の重回帰分析手法を検証するプログラムを作成するために、平成 29 年度に導入した室内用可視画像分光装置により試験データを取得した。取得したデータは、火成岩整形試料(円筒形 ϕ 16mm、 $h=7$ mm に整形、平坦面をダイヤモンドペースト C#150 (約 70 μ m) で研磨、(株)ニチカ)の流紋岩(石英粗面岩:裾花凝灰岩部層の溶岩)、安山岩(桜島火山大正 II 溶岩)、玄武岩(玄武洞溶岩)、およびバルク試料(火山岩標本、(株)ニチカ)の黒雲母流紋岩(和田峠流紋岩)、輝石安山岩(霧ガ峰火山)、玄武岩(玄武洞溶岩)の、相対反射率データ(376 波長)である(前節 1) iii) 参照。)

以上により計測したデータは、スペクトル推定アルゴリズムの検証に活用できた。特に、整形試料のリファレンスデータからバルク試料のスペクトルが推定可能である結果を得たことから、実際の地表のスペクトル推定でも、対象そのもののリファレンススペクトルではなく、整形試料等のリファレンススペクトルが利用できる可能性が期待できる。この特性は、今後のリファレンススペクトルデータの取得方法に関する 1 つの指針になる可能性がある。

ii) 顕微紫外可視近赤外分光装置での検討とデータ取得

顕微紫外可視近赤外分光の測定手法の検討では、室内用可視画像分光装置よりもさらに微小な領域のスペクトル測定手法の開発を実施しており、岩石中の 100 μ m より小さい空間構造を示す、斑晶や石基等の計測手法の開発を目指している。平成 29 年度までに、アパーチャーを使用した 100 μ m 以下の空間領域の拡散反射スペクトル計測に関する試験測定を実施し、研磨した平面形状の火山岩試料の 100 μ m 程度の領域のスペクトルが、精度よく行えることが確認できた。平成 30 年度は、顕微紫外可視近赤外分光による、火山ガラス中の 50 μ m 以下の微小領域における水分種の定量的評価を検討した。

火山ガラス中の H_2O 分子と OH^- 基の濃度比やこれらを足し合わせた全岩水量は、水和の有無やクエンチ圧力を評価するのに有用である。火山ガラスの水分種測定に関する初期の研究では、分散型の顕微紫外可視近赤外分光装置が利用されていたが、100 μ m を下回るような微小領域での測定はこれまで行われていない。そこで本課題では、分散型の顕微紫外可視近赤外分光装置を用いた 50 μ m 以下の微小領域におけるガラス中の H_2O 分子及び OH^- 基の濃度測定の妥当性を検討した。この検討では水熱合成減圧実験を用いて約 2~5wt.% の含水量を持つ流紋岩ガラスを合成し、両面研磨薄片を作成することで、顕微紫外可視近赤外分光装置による

透過測定に供した。近赤外領域に存在する H₂O 分子(1920 nm)と OH⁻基(2220 nm)由来の吸収ピークにおける吸光度を Lambert-Beer 則に適用することで、それらの濃度を定量化した(図 27)。また、測定領域サイズの変化に起因する測定濃度のばらつきを評価するため、アパーチャサイズを 30、50、100 μm に、累積測定回数を 1~2 回に設定して測定を行った。

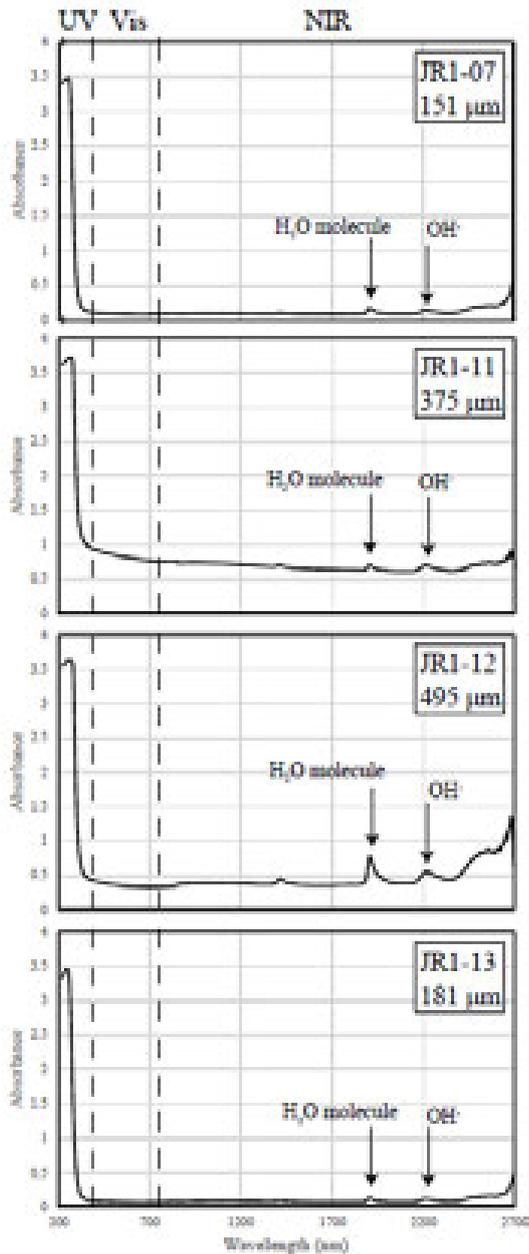


図 27. 合成流紋岩ガラスの吸収スペクトル (右上は試料厚さ)

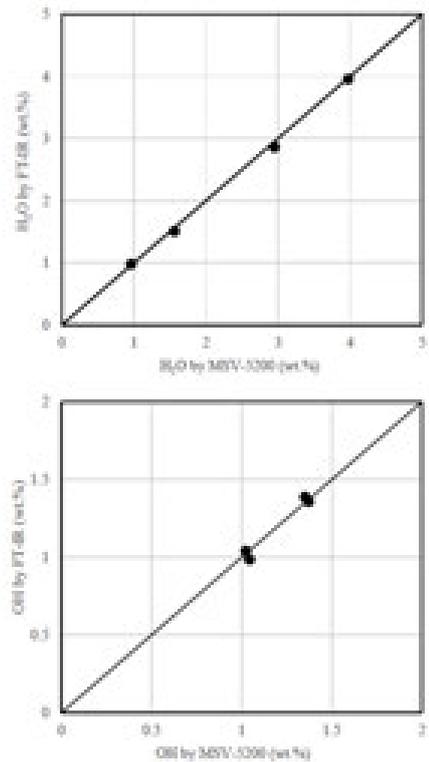


図 28. 顕微紫外可視近赤外分光装置と顕微 FT-IR の結果の比較

測定の結果、分散型の顕微紫外可視近赤外分光装置を用いることで、50 μm 以下の微小領域において、流紋岩ガラス中の H₂O 分子と OH⁻基の濃度を測定できることが分かった。本研究で得られた合成流紋岩ガラスの H₂O 分子と OH⁻基の濃度は顕微 FT-IR で別途測定された結果とほぼ一致する(図 28)。また、H₂O 分子と OH⁻基

の濃度を足し合わせることで得られる全含水量は、良く確立されている流紋岩マ
グマ中の水の溶解度の圧力変化を良く説明する(図 29)。さらに、アパーチャサイ
ズ $50\ \mu\text{m}$ で累積測定回数を 2 回にすることで、 H_2O 分子と OH^- 基の濃度に関する誤
差はそれぞれ 0.08 と 0.07 wt.% に抑えられることが分かった(図 30)。以上から、
分散型の顕微紫外可視近赤外分光装置を用いることで、火山ガラス中の $50\ \mu\text{m}$ 以
下の微小領域における水分種の定量的評価が可能であると結論付けられる。

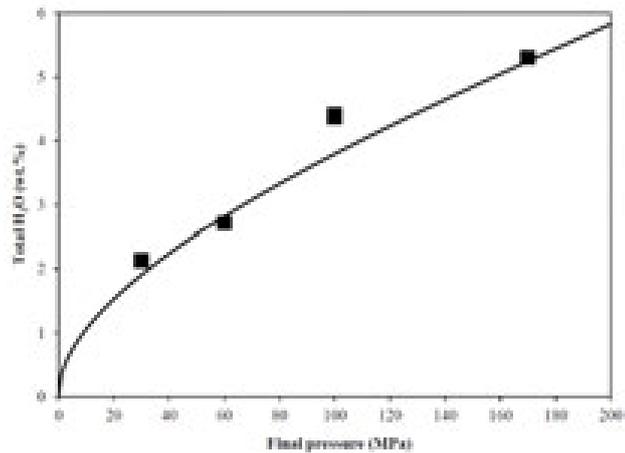


図 29. 全岩水量の圧力変化と溶解度計算(Newman and Lowenstern, 2002)⁹⁾の比較

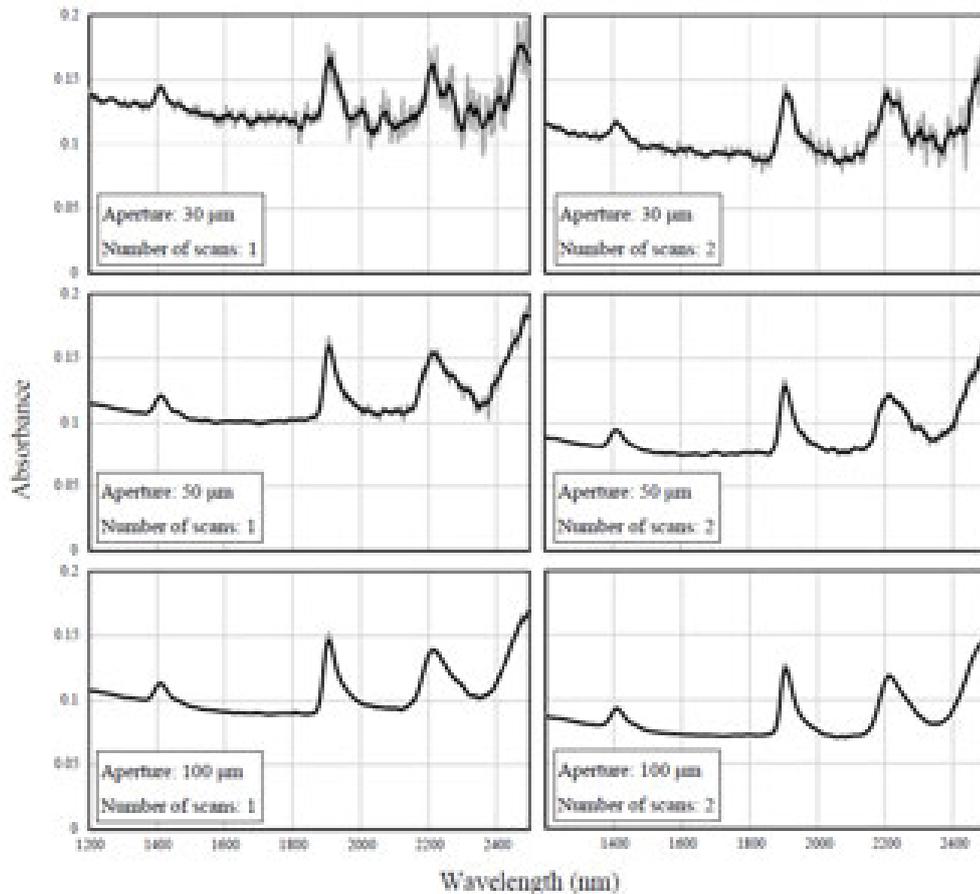


図 30. アパーチャサイズと累積測定回数の変化による近赤外吸収スペクトルの変化

(c) 結論ならびに今後の課題

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

SPIC-UC の開発では、保護ハウジングに格納した非冷却型 LWIR (8~14 μm) 領域の XGA カメラセンサーヘッドを開発し、その高空間分解機能を確認できた。また昨年度までに製作した非冷却型 LWIR (8~14 μm) 領域の VGA 型 3 台との同期計測機構 (ハード、ソフト) を構築できた。今後は、同期計測機構全体を保護ハウジングに格納し可搬性を高める予定である。一方、同期する 4 台のカメラの画像を有効活用するためには、4 台のカメラの視野を合致させる手法の開発が課題である。

SPIC-C の開発では、冷却型 LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドを開発し、そのガス可視化機能を HFC152a の可視化実験で確認できた。今後は昨年度に開発した冷却型 MWIR (3.0~5.0 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドとの同期計測機構の構築と 2 台のカメラの視野を合致させる手法の開発が課題である。

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い、BS を介した赤外画像の結像を確認できた。今後は、反射鏡の精密な位置調整機構を開発し、視野の結像に干渉縞を重畳させることが課題である。

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紫外域に感度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。今後は、本装置の可搬性を向上させるとともに、昨年度までの他の SPIC-SS との同期制御機構の開発が課題となる。また、航空機搭載型カメラセンサのデータを試験的に用いることで、SPIC-SS に適用するスペクトル推定手法、等高線図を推定するストラクチャ推定手法のプログラムを開発できた。今後、SPIC-SS で計測したデータに対しこれらを適応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

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、前年度まで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。その結果、室内型画像分光器で測定した火成岩の整形試料のスペクトルが、バルク試料のスペクトル推定に利用できる可能性が示唆された。これらは、今後のスペクトル推定用データベース構築においてのリファレンスデータの取得手法の検討の指針となる結果となった。また、顕微紫外可視近赤外分光装置を用いることで、火山ガラス中の 50 μm 以下の微小領域における水分種の定量的評価が可能と結論できた。これらの計測を多様な試料に適応することが今後の課題である。

(d) 引用文献

- 1) 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).
- 2) 實渕哲也 : 航空機搭載 MSS (VAM-90A) で計測した三宅島の SO₂ ガス濃度分布, 日本赤外線学会誌, Vol. 13, pp. 12-13, 2003.
- 3) A.M. Baldridge, S.J. Hook, C.I. Grove, G. Rivera : The ASTER spectral library version 2.0, Rem. Sens. Environ., 113, pp. 711-715, 2009.
- 4) T. Mori and M. Burton : The SO₂ camera: A simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO₂ in volcanic plumes, Geophys. Res. Lett., 33, L24804, doi:10.1029/2006GL027916, 2006.
- 5) 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.
- 6) 實渕哲也・三輪学央・長井雅史, 2018, 火山表面現象遠隔観測技術 (SPIC-SS) の開発, 日本火山学会講演予稿集 (2018 年度秋季大会), p. 183.
- 7) 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.
- 8) 實渕哲也 : 単発エンジン航空機搭載型放射伝達スペクトルスキャナ (ARTS-SE) の開発, 日本リモートセンシング学会第 59 回学術講演会論文集, pp. 219-220, Nov. 2015.
- 9) S. Newman and J.B. Lowenstern : VOLATILECALC: a silicate melt-H₂-CO₂ solution model written in Visual Basic for excel, Computers & Geosciences, 28, pp. 597-604, 2002.

(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	The validation results of the DSM of the geothermal area from the multiple-view images of an airborne sensor (ARTS-SE' s camera systems)	JpGU Meeting 2018	2018年5月 21日
實渕哲也・三輪 学央・長井雅史	火山表面現象遠隔観測技術 (SPIC-SS) の開発	日本火山学会 2018年度秋季大会	2018年9月 26日
實渕哲也	航空機搭載型センサ (ARTS-SE) のカメラシステム (STIC) による箱根山 (大涌谷) の地熱地帯の観測	日本リモートセンシング学会第65回学術講演会	2018年11月 27日
Tetsuya Jitsufuchi	REPEATED OBSERVATIONS WITH SHORT TIME INTERVALS FOR MEASURING TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A VOLCANIC CRATER USING AN AIRBORNE MULTISPECTRAL SCANNER	Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), IEEE International Symposium	Accepted
Tetsuya Jitsufuchi	DEVELOPMENT OF AN AIRBORNE RADIATIVE TRANSFER SPECTRAL SCANNER FOR A SINGLE-ENGINE AIRCRAFT	Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), IEEE International Symposium	Accepted
Takahiro Miwa	Measurement of H ₂ O molecule and hydroxyl concentrations in hydrous rhyolitic glass by UV-Vis-NIR dispersive micro-spectroscopy	J. Disaster Res.	改訂中
Tetsuya 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.	改訂中

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定
なし

(3) 令和元年度業務計画案

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 μ m) 型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) を一体化したプロトタイプ (SPIC-UC/SS) を完成させる。スペクトル推定カメラ (SPIC-SS) 及び MWIR (3~5 μ m) 領域と LWIR (7.5~9.5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) を一体化したプロトタイプ (SPIC-C/SS) を完成させる。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 μ m) 領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッド、SPIC-C の MWIR (3~5 μ m) 領域と LWIR (7.5~9.5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーヘッド、SPIC-SS の可視カメラセンサーヘッドに、それぞれ専用の耐環境ハウジングを製作し、各カメラのプロトタイプを構築する。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。

