

### 3. 2 リモートセンシング技術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

サブテーマ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	
	研究統括	宮城 洋介	
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	

##### (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たい。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、火口周辺の観測には困難がという問題がある。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（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成28年度：

樹林帯、草地、裸地を対象として、L-band 放射計を用いた実験観測を実施し、散乱強度、位相の時間的安定性から、開発する可搬型レーダー干渉計用で使用する予定のレーダー波の有効性を確認する。

PIXEL において、SAR データを共有するデータサーバーを導入する。

2) 平成29年度：

可搬型レーダー干渉計試験機を製作する。

PIXEL において、共有する SAR データの検索・ダウンロードシステムを作成する。また、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。さらに、2 火山について、だいち1号、2号、Sentinel-1 等の SAR データを用いた地殻変動検出を行う。

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。また、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。

PIXEL において、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。また、2 火山について、だいち1号、2号、Sentinel-1 等の SAR データを用いた地殻変動検出を行う。

4) 平成31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。さらに、車載型方式での観測に向けた、ハードウェアを改良する。

PIXELにおいて、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。さらに、2火山について、だいち1号、2号、Sentinel-1等のSARデータを用いた地殻変動検出を行う。

5) 平成32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。また、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。さらに、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。

PIXELにおいて、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) 平成33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。

PIXELにおいて、4火山について、だいち1号、2号、Sentinel-1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) 平成34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。

PIXELにおいて、4火山について、だいち1号、2号、Sentinel-1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) 平成35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。

PIXELにおいて、4火山について、だいち1号、2号、Sentinel-1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) 平成36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。

PIXELにおいて、4火山について、だいち1号、2号、Sentinel-1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) 平成37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。

PIXELにおいて、4火山について、だいち1号、2号、Sentinel-1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28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

従来の地上設置型レーダー干渉計はKu-bandのレーダー波を用いているが、Ku-bandのレーダー波は植生の影響を受けやすいため、植生域の地表変動の検出は困難である。一般に、より波長が長いL-bandのレーダー波は植生に対する透過性が高く、影響が少ないと考えられている。そこで、本サブテーマでは、L-bandのレーダー波を用いたレーダー干渉計を開発する予定であるが、実際にL-bandのレーダー波が、植生域における地表変動検出に適しているかどうかを調査するため、マイクロ波放射計を用いた実験観測を行う。

裸地、樹林域を模した環境を構築し、そこにリフレクターを設置してL-bandのマイクロ波放射計による観測を実施する。その観測から得られるリフレクターからの反射波の位相および強度の時間安定性と理論的に得られる空間分解能を考慮して、植生域の地殻変動観測にも適したマイクロ波を決定する。

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

東京大学地震研究所と宇宙航空研究開発機構との研究協定に基づいて、PIXELの活動のために提供されるだいち1号、2号のデータ、および、欧州宇宙機関から提供されるSentinel-1等のデータ（欧州宇宙機関に依頼中）を用いた解析を実施する予定である。これらのデータは年間100TB（6年で600TB）以上の増加が考えられ、それらを共有するための環境を構築する。

だいち1号、2号、Sentinel-1等のSARデータをPIXELにおいて共有するためのデータサーバーを導入する。

## (2) 平成28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

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

#### 2) 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 による火山性地殻変動データベースの作成においては、本事業と連携して進める SAR 研究グループ (PIXEL) において、だいち 1 号、2 号等の SAR データを共有するためのデータサーバーを導入した。

### (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

本業務では、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。その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ので、本業務で開発するレーダー干渉計が用いるレーダー波の周波数域を決定することを目的として、レーダー波の帯域と植生に対する透過・反射特性の関係を調査する計測実験を実施した。この計測実験においては、計測にかかわる対象物以外からの反射波が極力少ない環境が必要なため、国立研究開発法人電子航法研究所の電波無響室において実施した。

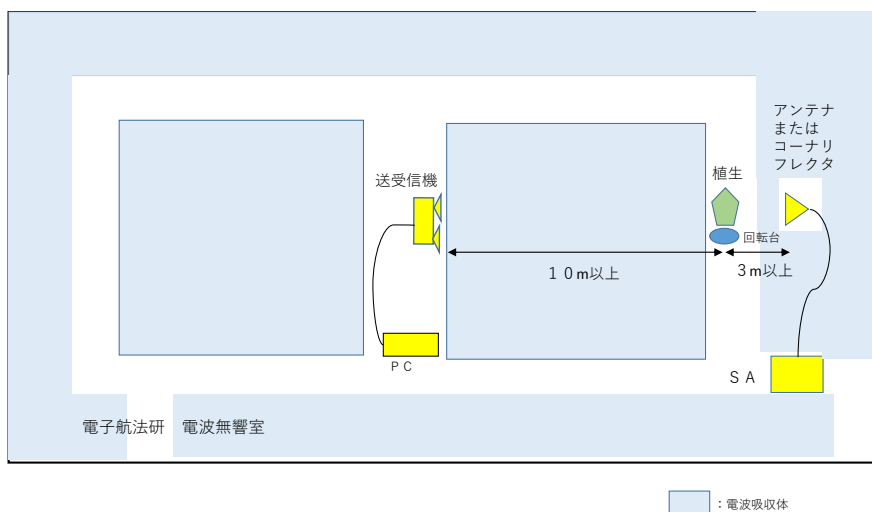


図 1. 植生透過性実験に関する計測コンフィグレーション

表 1. 計測実験に用いた機器の諸元

L-band 送受信機	製品名：ATSAR-GBL-002 ・中心周波数：1.2575GHz ・帯域幅：85MHz ・空中線電力：100mW ・送信繰り返し周波数：1000Hz
X-band 送受信機	製品名：ATSAR-GBX-002 ・中心周波数：9.6GHz ・帯域幅：300MHz ・空中線電力：160mW ・送信繰り返し周波数：1000Hz
Ku-band 送受信機	製品名：ATSAR-GBK-002 ・中心周波数：16.7GHz ・帯域幅：300MHz ・空中線電力：300mW ・送信繰り返し周波数：1000Hz
X-, Ku-band 用コーナーリフレクタ	三角三面型コーナーリフレクタ ・1辺長：220mm
L-band 用コーナーリフレクタ	三角三面型コーナーリフレクタ ・1辺長：500mm
受信アンテナ	型式名：ETS-LINDGREN Model13115 ・周波数レンジ：750MHz~18GHz
スペクトルアナライザ	型式名：Rohde&Schwarz Signal analyzer FSQ26 ・周波数レンジ：20Hz~26.5GHz



写真1. 計測実験で使用した植生。左から葉の多い樹木、葉の少ない樹木、草。

本計測実験における、機器等の配置を図1に示す。電波無響室の中央部にL-bandとX-band、Ku-bandのマイクロ波送受信機を並べて設置し、レーダー波照射方向の約13m先にコーナーリフレクタを設置した（これらの諸元を表1に示す）。植生は、コーナーリフレクタの3m手前に設置した。つまり、計測するコーナーリフレクタからの反射波は、植生を2回透過したものである。使用する植生は草、葉の少ない樹木、葉の多い樹木を用い（写真1）、異なる性質の植生についての計測を行った。また、植生は、風や成長などによる植生の形状の変化を考慮して、回転台に乗せて計測した。さらに、降雨により植生が濡れた場合を考慮して、植生には水滴を付けた。各計測値を正確に比較するため、これらの計測を実施する前に、計測機器、コーナーリフレクタの校正計測を実施した。

## 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

SAR 研究グループ (PIXEL) において、だいち 1 号、2 号等の SAR データを共有するためのデータサーバーの仕様を検討し、導入した。

### (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

反射波の受信データを処理して得られた受信強度の一例として、X-band のレーダー波で、葉の多い樹木に関して計測した結果を図2に示す。2~6 ピクセルの受信信号の高まりは、送信アンテナと受信アンテナのカップリングによるものであり、31~35 ピクセルの受信信号の高まりがコーナーリフレクタからの反射を示す。22~24 ピクセルが植生の設置位置に相当し、受信信号強度が大きく変化している。これは、植生の回転に伴って透過性が変化しているためであり、植生の影響を大きく受けていることを意味する。その他にも受信信号の高まりがみられるが、これらは部屋の床等からの反射と推測される。

植生による減衰 ( $P_{att}$ ) は、植生を設置しない場合に計測されるコーナーリフレクタからの反射受信電力 ( $P_{rc}$ ) と植生を置いた場合に計測されるコーナーリフレクタからの受信電力 ( $P_{rs}$ ) を用いて、次式から求めた。

$$P_{att} = 10 \text{ Log } (P_{rs} / P_{rc}) \quad (1)$$

この計算から得られた各種レーダー波および植生の種別に対する減衰を表2に示す。L-bandのレーダー波の減衰はほぼ0dBであったのに対して、X-band、Ku-bandのレーダー波は葉の多い植生の減衰が大きく求まった。このことから、L-bandのレーダー波は、植生の影響が極めて小さく、X-band、Ku-bandのレーダー波は、植生に置いて散乱が大きいことが確かめられた。

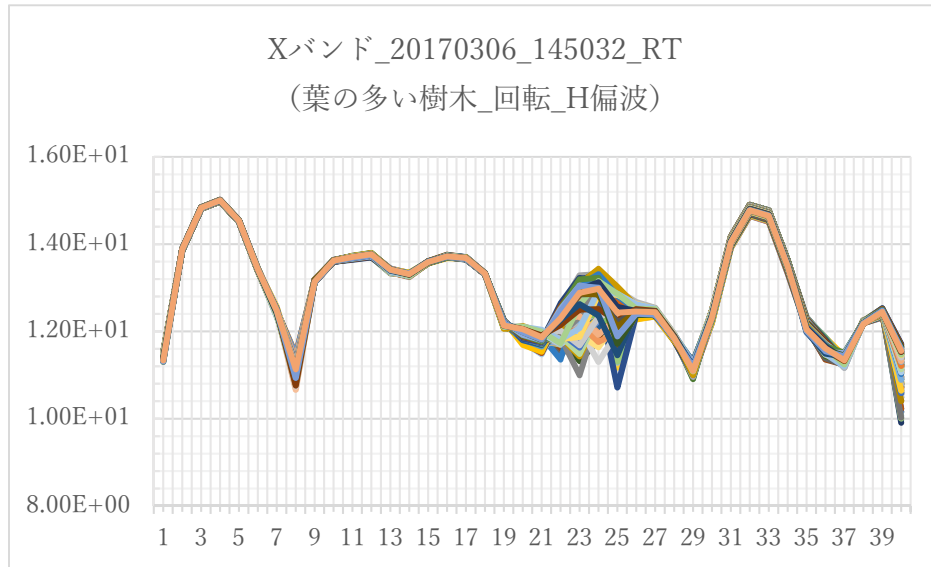


図2. X-bandのレーダー波で、葉の多い樹木に関して計測した受信強度。縦軸は受信信号強度(dB)、横軸は処理ピクセル数を示し、1ピクセルは0.5mに相当する。

表2. 植生によるレーダー波の減衰 (dB)

	葉の多い植生	葉の少ない植生	草
L-band	0.52	-0.21	0.03
X-band	-6.22	-1.89	-0.67
Ku-band	-10.56	-3.37	-3.54

次に、位相の変化に注目する。最初の計測を基準として、各ピクセルにおいて、位相の時間変化を求めた。その例として、葉の多い樹木について計測した結果を図3に示す。X-bandとKu-bandのレーダー波を用いた計測においては、植生による位相変化が明確に見られるのに対して、L-bandのレーダー波を用いた計測においては、顕著な位相変化は見られなかった。この傾向は、葉の多い樹木について計測において、もっとも顕著に見られたが、他の葉の少ない樹木、草についても同様の傾向が見られた。このことは、X-bandとKu-bandのレーダー波において、受信



信号に植生からの散乱波が卓越する場合には、地殻変動計測においても大きな干渉性劣化の原因となることを示している。一方、L-band のレーダー波については、その影響が小さいことが確かめられた。

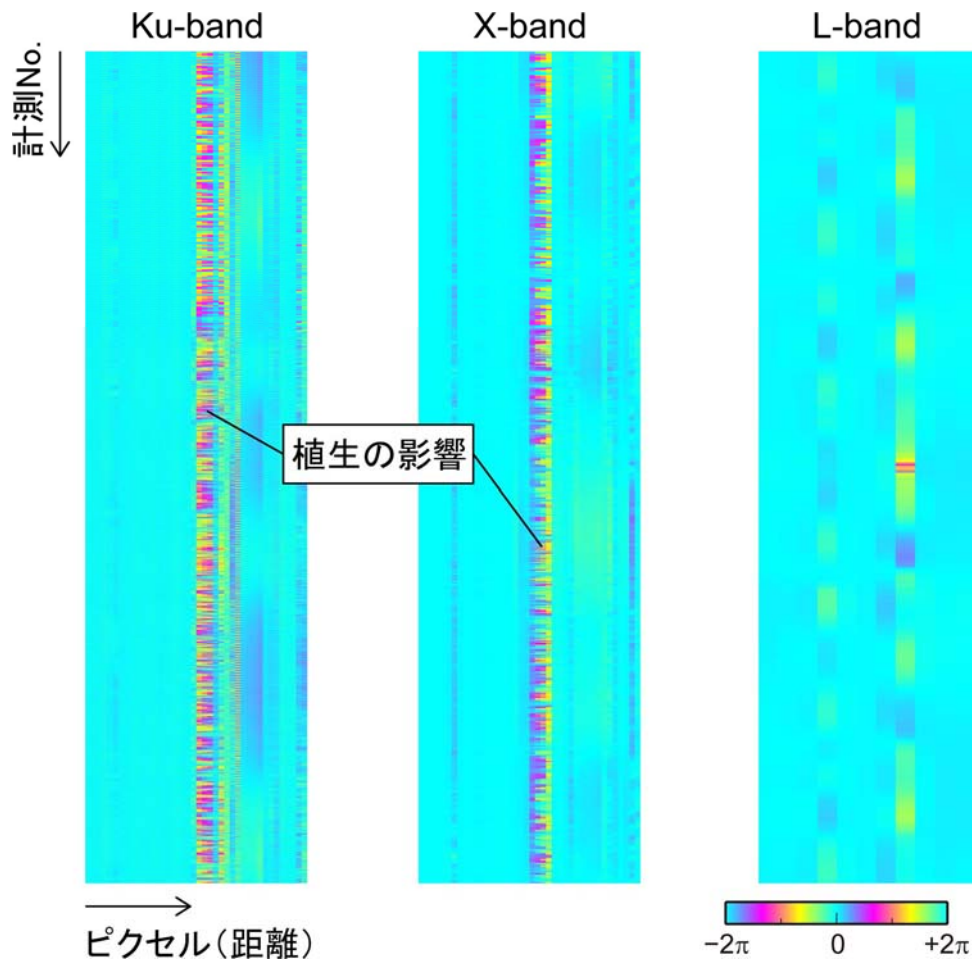


図3. 葉の多い樹木に関して計測した位相変化。

## 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 による火山性地殻変動データベースの作成においては、東京大学地震研究所を中心として活動している地表変動研究のための SAR 研究コミュニティー (PIXEL) と連携して、標準的解析手法に関する検討やだいち 1 号、2 号 (PALSAR、PALSAR-2) や Sentinel-1 等の衛星 SAR データの解析を進める。これらの SAR データは年間 100TB 以上の増加が考えられ、それらを共有するための環境を構築する必要がある。このため、実行容量で 850TByte のデータサーバーを東京大学地震研究所のサーバー室に設置した。導入したサーバーの写真写真 2 に示す。



写真2. 東京大学地震研究所サーバー室に設置した、SAR データ共有サーバー。

(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

本計測実験から、X-band、Ku-band のレーダー波は植生の影響を大きく受けるのに対して、L-band のレーダー波は植生による影響は小さいことが確かめられた。植生域の地表変動も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という目的を達成するためには、L-band のレーダー波を用いることが必須と考えられる。ただし、L-band のレーダー波を採用した場合、原理的に大きなアンテナや合成開口長が必要となり、可搬性の点において不利になる。また、L-band のレーダー波は、X-band や Ku-band と比べて、利用可能な帯域幅が狭いこと等から、空間分解能が劣るという不利な点もある。それらの不利を考慮したとしても、X-band、Ku-band のレーダー波では、植生域の地殻変動を安定的に計測することは困難な場合があると考えられることから、本事業では L-band のレーダー波を用いた可搬型レーダー干渉計を開発することに決定する。

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 による火山性地殻変動データベースの作成においては、SAR データを共有するデータサーバーを導入した。これらに格納されるデータを用いて、標準的解析手法に関する検討やだいち1号、2号 (PALSAR、PALSAR-2) や Sentinel-1 等の衛星 SAR データの解析を進める。

(e) 引用文献

なし

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

### (3) 平成29年度業務計画案

平成28年度においては、開発する可搬型レーダー干渉計が用いるマイクロ波の周波数帯域を決定するため、Ku-band、X-band、L-bandのマイクロ波について、植生に対する透過性の計測実験を行った。平成29年度においては、この実験の結果に基づいて決定された周波数帯域のマイクロ波を用いる可搬型レーダー干渉計実験機を作成する。これにより、平成30年度から開始する地上設置方式に関する実験の整備を完了する。

衛星 SAR による地殻変動データベース作成においては、データベース作成のための標準的な解析手法についての検討を進める。平成29年度においては、数値気象モデルの解析値に基づいて、大気によるレーダー波の伝搬遅延誤差を軽減する手法に注目し、衛星 SAR による地殻変動データベース作成において、ルーチン的にその手法を適用できるようにするための解析補助データの作成方法を決定する。また、標準的解析手法の検討、および、将来にデータベース化することを目的として、SAR シーン内に陸地が多い2火山について、だいち1号の PALSAR およびだいち2号の PALSAR-2 データを用いた解析を実施し、地殻変動データを作成する。