

## ．研究成果の概要

### 1．総括

本共同研究は、平成 19 年度以降、火山観測や火山学研究などにおける衛星データの利用方法を調査研究するために実施されているものである。共同研究は参加機関毎に課題を設定して行われ、実施された研究は平成 23 年度が 21 研究課題（気象庁協定外の研究を含む）、平成 24 年度及び平成 25 年度がいずれも 13 研究課題であった。

本共同研究の目的は、日本列島・領海内の主要活火山等を対象に、ALOS データによる火山活動の監視及び地殻変動等の検出手法及びこれらによる解析結果の火山活動評価への利用方法についての調査・検討、噴火活動開始等の異常が確認された場合における噴火の規模や影響の範囲の把握等についての ALOS データの有効性の調査・検討、としている。

これまでの成果から、火山の監視・観測や調査研究などにおける衛星データ利用の長所と短所には、以下の点を挙げることができる。

#### <長所>

- ・観測場所を選ばないため、アクセスが困難な火山や観測設備の設置が困難な火山の観測ができる。
- ・火山活動が活発な火山でも危険を冒さずに観測ができる。
- ・広範囲の均一な観測データが取得できる。
- ・周期的に観測ができる。

#### <短所>

- ・観測対象によっては、解像度が十分でない。
- ・軌道により、観測時期と観測場所が制限される。
- ・光学センサーは雲や太陽の影響を受ける。また、レーダーセンサーにおいても、電離層や対流圏で影響を受ける。

これらの長所を生かしつつ、短所を補いながら、上記の目的を達成するため、各研究課題に取り組んだ。本研究期間中の成果としては、まず、国内の主な活火山を中心に、SAR 干渉法による地殻変動解析等が上げられる。特に、平成 23 年 1 月に始まった霧島山（新燃岳）の火山活動の活発化については、噴火前から噴火後にかけての面的な地殻変動の検出がされたほか、複数の SAR 強度画像解析から、火口内の溶岩の蓄積状況等が詳細に捉えられ、前回の報告書に引き続き、火山活動を監視する上での衛星データの活用の有用性が強く示された。また、十勝岳、有珠山、吾妻山、伊豆大島、三宅島、雲仙岳、九重山、パプアニューギニアのラバウル火山等においても、火山活動に起因したと考えられる地殻変動を検出した。さらに、地殻変動以外にも、火山山体の形状変化、噴気活動や変色海域の解

析等による火山活動評価への活用が検討された。

以上のように、各参加機関において積極的に課題に取り組み、着実に成果を挙げつつあったが、平成 23 年 5 月に機器障害のため ALOS の運用が停止となった。このため、その後の研究では、これまでに蓄積された ALOS アーカイブデータの活用及び現在運用中の他衛星等のデータを利用した火山活動評価等を主目的として取組を継続した。例えば、ALOS アーカイブデータを用いた取組として、複数の活火山において干渉 SAR 時系列解析及び気象モデルを用いた対流圏遅延補正を適用し、解析手法の高度化を図った。また、他衛星等のデータを利用した火山活動評価では、航空機 SAR の Pi-SAR-L2、海外衛星の TerraSAR-X・Cosmo-Skymed・RADARSAT-2・MODIS・FORMOSAT-2・Landsat-8 等の画像を用いて、地殻変動、地形・地質、火山噴出物等を把握する取組を行った。

以上、本実証実験において、衛星データによる火山活動評価への利用及び噴火の規模や影響の範囲の把握について有効であることが示された。今後の ALOS-2 (だいち 2 号) の運用開始により、合成開口レーダーの火山活動評価への更なる活用が期待されるところである。また、ALOS-2 には搭載されない光学センサについても有効性が示され、今後の運用再開を期待する。

本研究の成果について、次項で観測項目別に概要を述べる。

## 2. 研究成果の概要

本共同研究の課題は、表1-1に示したとおりである。各研究課題の成果を分類すると、「地殻変動」、「地形・地質」、「火山噴出物」、「噴煙（噴気）」、「変色海域」に衛星が利用できることが報告されている。以下、表2に各研究成果の概要を整理し、項目別に共同研究成果の概要を述べる。

表2 共同研究成果の概要

項目	共同研究成果の概要（）内は活用センサー名、[]内は研究課題番号
地殻変動	干渉 SAR による地殻変動の検出（PALSAR 等） [火山-2501, 2503, 2505, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2513, 2307] ・隆起や沈降の面的な地殻変動の把握 ・アクセスが困難な場所の地殻変動の把握 ・GNSS 観測による地殻変動との比較 ・干渉 SAR 時系列解析の実施と検証 ・気象モデルを用いた対流圏遅延補正の適用
地形・地質	溶岩の噴出状況の把握（PRISM, AVNIR-2, PALSAR 等） [火山-2502, 2505, 2512] 火山山体及び噴火のモニタリング（MODIS, MTSAT）[火山-2504] 火山山体の変化状況、地滑り状況、火口内変化状況の抽出（Pi-SAR-L2） [火山-2513]
火山噴出物	火砕流堆積物及び火山灰の範囲と層厚の把握（PALSAR）[火山-2506] 火砕流堆積物及び火山灰の範囲の把握（Pi-SAR-L2）[火山-2513]
噴煙（噴気）	噴煙、噴気地帯、熱活動域の把握（PRISM, AVNIR-2） [火山-2512, 火山-2513]
変色海域	海底火山等の変色海域の把握（AVNIR-2, MODIS）[火山-2502, 2309]

## (1) 地殻変動

火山活動を評価する上で地殻変動の推移を把握することは重要である。本共同研究において、干渉 SAR 解析を実施し、得られた地殻変動の情報から圧力源を推定する取組が多数報告された。特に、観測設備が整っている火山では、干渉 SAR 解析による地殻変動の結果と GNSS 等の観測機器による結果を比較し、調和的であることを確認した。解析手法に関する取組として、複数の機関において干渉 SAR 時系列解析及び気象モデルを用いた対流圏遅延補正の適用が試みられ、従来の 2 ペアの干渉 SAR 解析と比較して、高精度に地殻変動を検出した事例が報告された。ALOS 運用停止後には、RADARSAT-2 を用いた干渉 SAR 解析による地殻変動の抽出や航空機搭載 L バンド合成開口レーダー 2 (Pi-SAR-L2) から干渉 SAR 画像を作成する試みなど、海外衛星や航空機搭載型 SAR を用いた解析を行った。

国土地理院(火山-2501)は、ALOS 運用停止まで全国 46 の活火山について地殻変動の定常的な解析を実施し、解析結果をホームページで公表した。霧島山新燃岳の 2011 年 1 月からの噴火活動については、干渉 SAR 解析によって噴火前の膨張と噴火後の収縮を捉え、その変動源を推定した。解析にあたっては、数値気象モデルを使用して対流圏遅延誤差を低減する処理を適用した。ALOS の運用停止後は、解析手法に関する研究として干渉 SAR 時系列解析の取組を実施した。伊豆大島では、非定常的な変動を把握するとともに、GNSS 観測との比較を行い解析結果の精度を検証した。九重山では、GNSS では検出困難であるスケールでの火山性の地殻変動を検出した。雲仙岳では、干渉 SAR 時系列解析を導入することにより、従来の 2 ペアの干渉 SAR 解析結果よりも高精度で地殻変動を検出することを確認した。桜島では、当該地域で推定されている茂木ソースと調和的な膨張性の地殻変動を検出した。

北海道大学(火山-2503)は、有珠山、十勝岳、択捉島における火山活動評価のため、干渉 SAR 解析を実施し、地殻変動の把握に取り組んだ。有珠山では、2000 年噴火口域、山頂外輪内、及び昭和火山において明瞭な収縮性地殻変動を検出し、地下の収縮量を推定した。十勝岳では、62- 火口周辺の局所的な膨張性地殻変動を検出し、圧力源を推定した。

防災科学技術研究所(火山-2505)は、霧島新燃岳の 2011 年 1 月からの噴火活動について、干渉 SAR 解析によって噴火前の膨張と噴火後の収縮を捉え、その変動源を推定した。噴火時には収縮、噴火後には再膨張が観測されたが、それらの変動源は同じ位置であることが示唆された。

気象庁(火山-2507, 2508, 2509, 2510, 2511)は、霧島新燃岳の 2011 年 1 月からの噴火活動について、干渉 SAR 解析によって噴火前の膨張と噴火後の収縮を捉え、その変動源を推定した。阿蘇山周辺の SAR 干渉解析を実施し、高岳山頂付近を中心とした局所的な衛星視線方向の変化を観測し、その変動源の推定を実施した。変動源の推定にあたっては、いずれも気象研究所が開発した火山用地殻活動解析支援ソフトウェア (MaGCAP-V) を使用した。ALOS の運用停止後は解析手法に関する研究として、干渉 SAR 時系列解析及び気象庁非静力学モデルを用いた対流圏遅延補正の取組を実施した。干渉 SAR 時系列解析では、十勝岳・吾妻山・伊豆大島・三宅島・薩摩硫黄島において地殻変動の動きを時空間的に捉え、

GNSS の観測結果とも調和的であることを確認した。また、気象庁非静力学モデルを用いた対流圏遅延補正手法を開発し、霧島山新燃岳・十勝岳で検証を実施した結果、いくつかの課題はあるものの干渉 SAR でのボトルネックである大気中の水蒸気による位相遅延を補正し、干渉 SAR 解析をより高精度に実施できることを確認した。ALOS が運用されていない期間中の火山活動を把握するため RADARSAT-2 の画像を取得し、霧島山新燃岳と八甲田山の解析を実施した。霧島山新燃岳については、山頂周辺での局所的な地殻変動と思われる衛星視線方向の変化を観測した。八甲田山周辺においては干渉性のある解析結果は得られず、Lバンド SAR である PALSAR と比較して、Cバンド SAR である RADARSAT-2 が短波長であるため、木の生い茂っている植生の多い場所等では干渉が得にくいことを確認した。

宇宙航空研究開発機構(火山-2513)は、霧島山新燃岳の 2011 年 1 月からの噴火活動について、干渉 SAR 解析によって噴火前の膨張と噴火後の収縮を捉え、その変動源を推定した。推定した結果、噴火にともなって地下のマグマ溜りでは  $10^7$  m<sup>3</sup> 規模の体積変化が起こったことが示された。また、Pi-SAR-L2 から干渉 SAR 画像を作成し、地殻変動を抽出する技術開発・テスト飛行を実施し、いくつかの技術的な課題を把握した。

名古屋大学(火山-2307)は、2007 年以降の PALSAR データを用いて、パプアニューギニアのラバウル火山の干渉 SAR 解析を実施し、地殻変動を検出した。また、得られた干渉 SAR 結果と GNSS 解析結果から圧力源を推定し、マグマ供給過程を考察した。

## (2) 地形・地質

火山の地形や地質の調査は、現地調査に頼ることが多いが、衛星画像は広範囲でアクセス困難な場所のデータも入手できるため、地形や地質の調査に有用である。本共同研究では、霧島山新燃岳や西之島をはじめ、光学画像及び SAR 強度画像から地形・地質の変遷を詳細に捉えた事例が多数報告された。地形・地質の変遷を把握するにあたっては、ALOS に搭載された PRISM・AVNIR-2・PALSAR の他に、航空機 SAR である Pi-SAR-L2 や海外衛星である TerraSAR-X・Cosmo-Skymed・RADARSAT-2・FORMOSAT-2・Landsat-8 等のデータも用いられた。

海上保安庁(火山-2502)は、2013 年 11 月に活発化した西之島の噴火活動について、FORMOSAT-2 による光学画像等を用いて継続的な監視を行った。

東京大学(火山-2504)は、東京大学地震研究所で運用している MODIS と MTSAT に基づく東アジアの活火山観測システムを高度化する取組を実施した。現行のシステムでは、各インデックスを独立に閲覧する仕組みになっているため、各インデックス相互の関係をパラレルタイムラインチャートとして生成する検討を行った。また、各インデックスと噴火プロセスに関するデータベースを構築するため、サリチェフ 2008 年噴火、霧島山新燃岳 2011 年噴火等をモデルケースとして検討した。

防災科学技術研究所(火山-2505)は、霧島山新燃岳の 2011 年 1 月からの噴火活動について、PALSAR、TerraSAR-X、RADARSAT-2 の強度画像から火口内溶岩の変遷を詳細に捉えた。

得られた SAR 強度画像と数値地形モデルからシミュレートした画像を整合させることによって、溶岩の噴出量及び噴出率を推定し、溶岩の噴出率が傾斜計によって捉えられた変動と深く関係しているとの知見を得た。また、溶岩の粘性率を計算し、2011 年 1 月からの噴火活動で現れた溶岩が火口の外側に出現していたならば、溶岩流として流下した可能性が高かったことを示した。

気象庁(火山-2512)は、霧島山新燃岳の 2011 年 1 月からの噴火活動について、光学画像 (PRISM、AVNIR-2) 及び SAR 強度画像 (PALSAR) による判読を実施した。PRISM・AVNIR-2 を用いた解析では、得られたデータを合成表示することで、高解像度のカラー画像で山頂火口周辺の詳細な状況を把握することができた。また、PALSAR から得られた SAR 強度画像を使った解析では、光学センサでは観測のできない悪天候や夜間時間帯、更には噴煙活動の活発化した時期にも、刻々と変化する山頂火口内の状態を把握することが可能であった。これらの得られたデータを活用し、噴火警報の発表に資する情報として有効利用できることが分かった。ALOS 運用終了後の 2013 年 11 月に活発化した西之島の噴火活動については、Landsat-8 の光学画像を取得し判読したところ、新たな陸地の形成及び拡大を空間的に把握し、評価する上で有用な情報が得られることが分かった。

宇宙航空研究開発機構(火山-2513)は、霧島山新燃岳の 2011 年 1 月からの噴火活動について、AVNIR-2 と PRISM のデータからパンシャープン画像を作成し、火口内に蓄積された溶岩を確認した。また、PRISM データを用いて、噴火前と噴火後の二時期の数値標高モデルを作成し、火口内溶岩による火口底隆起量と溶岩の体積を推定した。ALOS の運用停止後は、TerraSAR-X によるモニタリング及び Pi-SAR-L2 による航空機観測を実施した。TerraSAR-X による火口内の干渉 SAR 解析では、2011 年 11 月以降継続して起こる新燃岳火口内溶岩表面の地殻変動を検出した。Pi-SAR-L2 から得られた SAR 強度画像では、新燃岳火口内溶岩の表面全体にわたって小さな火孔 (もしくは噴気孔) が多数生じていることを確認した。2013 年 11 月に活性化した西之島の噴火活動について、Cosmo-Skymed による観測を実施し、SAR 強度画像で新島の形成過程をモニタリングした。また、Pi-SAR-L2 による観測を実施し、SAR の多偏波データ (ポラリメトリ) を用いて、新たな陸地の表面形状を把握した。活発な活動が続く桜島の噴火活動については、Cosmo-Skymed による観測を実施し、SAR 強度画像から火口の形状等を把握した。

### (3) 火山噴出物

衛星では噴火に伴う広範囲の火砕流や降灰の範囲を把握することができる。火山噴火前後の SAR の相関 (コヒーレンス) 画像・強度画像・干渉画像を使用することで火砕流堆積物や噴火時の降灰域をおおよそ把握することができた。

土木研究所(火山-2506)は、霧島山新燃岳の 2011 年 1 月からの噴火活動について、SAR を用いたコヒーレンス解析を実施し、堆積深の薄い降下火砕物堆積範囲の抽出に取り組んだ。また、干渉 SAR 解析を用いた火山灰堆積深計測の可能性を検討し、現地での計測と良い整

合を示すことが確認された。インドネシアのムラピ火山 2010 年噴火については、SAR 強度画像を使用して、火砕流堆積物及び降下火砕堆積物の分布を調べ、現地調査等とも整合した結果を得た。

宇宙航空研究開発機構(火山-2513)は、インドネシアのガマラマ火山において、Pi-SAR-L2 による観測を実施し、山頂付近において植生の無い領域を検出し、Lバンド SAR の有効性を確認した。また、フィリピンのマヨン火山においても、PI-SAR-L2 による観測を実施し、SAR 強度画像及び干渉 SAR 画像から火山灰の堆積や溶岩流出と想定される領域を検出した。

#### (4) 噴煙(噴気)

噴煙(噴気)の観測は火山の放出エネルギー等の評価にとって重要であるが、衛星の光学画像により、ある程度の規模以上の噴煙が判読できることが確認できた。

気象庁(火山-2512)は、2011 年霧島山新燃岳噴火前後の山頂火口周辺における噴煙の噴出状況を、PRISM・AVNIR-2 を用いた解析で把握した。また、国内の主な活火山について、噴気等の現地調査結果と PRISM の画像を比較し、噴火には至っていない状態でも、気象等の条件のよい場合には、熱活動や噴気活動の把握が可能であることを確認した。

宇宙航空研究開発機構(火山-2513)は、2011 年霧島山新燃岳の噴火活動について、AVNIR-2 と PRISM を用いて霧島山新燃岳から流れる噴煙の状況を確認した。

#### (5) 変色海域

海底火山の活動に伴って海水が変色することがあり、変色海域の把握は海底火山の監視にとって重要であるが、衛星画像では周期的に広範囲の画像を得ることができるため、変色域の定常的な監視に利用できる可能性がある。

海上保安庁(火山-2502)は、南方諸島海域の火山において火山活動が認められる場合、MODIS 等の光学センサにより火山活動の推移を監視・解析した。硫黄島については、MODIS による衛星画像から北東海岸から東方へ変色水が流出していることを確認し、航空機による画像においても同様の傾向を確認した。青ヶ島周辺海域については、航空機で観測された変色水の規模が小さく色も薄く、MODIS 画像の分解能では検出できなかった。2013 年 11 月に活発化した西之島の噴火活動については、溶岩流や規模の大きな変色水を伴う火山活動であるため、MODIS 画像の分解能でも周辺との物理量の差が非常に大きく、海面水温画像や海面放射輝度画像から火山活動を検知することができた。

産業技術総合研究所(火山-2309)は、福徳岡ノ場について、海底火山の火山活動と変色海水の関係について調査した。AVNIR-2 で観測された変色海水の反射率は、2007 年は高く 2008 年は低かったことが分かり、航空機観測によって変色海水が確認された回数の割合と対応していることを確認した。

### 3 . 衛星データと成果について

本共同研究で利用した ALOS の原初データは、(独)宇宙航空研究開発機構が所有するものである。

PALSAR 及び SAR データの原初データは、経済産業省及び(独)宇宙航空研究開発機構が所有するものである。また、一部の ALOS データは、PIXEL で共有しているものであり、(独)宇宙航空研究開発機構と東京大学地震研究所との共同研究契約により(独)宇宙航空研究開発機構から提供されたものである。

本共同研究の成果は、火山噴火予知連絡会・衛星解析グループの活動によるものである。