

(1) 実施機関名：

(独) 防災科学技術研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

SAR 干渉解析による地殻変動把握技術の高度化およびその活用に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 新たな観測技術の開発

(2) 宇宙技術等の利用の高度化

ア. 宇宙測地技術

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

ア. 日本列島域

イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

陸域観測技術衛星「だいち」の活躍による火山・地震に関する地殻変動検出例が次々と報告されており、SAR 干渉法は火山・地震研究において欠かすことの出来ないツールになりつつある。しかし、未だ大気等によるノイズの補正方法は十分に確立されておらず、現時点においても地殻変動モデルの推定に大きな影響を及ぼすほどのノイズが重畳する場合があるという問題が残されている。そこで、これまでの誤差軽減手法を効率よく併用した SAR 干渉解析手法を確立させ、地殻変動検出精度を向上させることが本課題の目標である。また、長期的な地殻変動をより精度良く検出する高精度 SAR 干渉解析手法（PS-InSAR 法や SBAS 法など）の活用について着手する。さらに、火山活動の活発化や地震が発生した場合には、SAR 干渉解析を実施し、マグマの動きや断層モデルの推定を行う。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 及び 22 年度においては、これまでに開発した誤差軽減手法を併用した SAR 干渉解析手法を実施し、検出された地殻変動の精度評価を行う。平成 23 から 25 年度においては、長期的地殻変動の検出のための高精度 SAR 干渉解析手法（PS-InSAR 法や SBAS 法など）について着手する。また、火山活動の活発化や地震が発生した場合には、適宜 SAR 干渉解析を実施し、マグマの動きや断層モデルの推定を行う。

(7) 計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

本課題においては、SAR 干渉解析の高度化に関する研究および火山・地震に関する SAR 解析研究に関して成果が得られた。それぞれの成果についての概要を、以下に述べる。

SAR 干渉解析の高度化に関する研究においては、複数軌道（衛星）から得られる SAR 干渉画像を用いた時系列解析手法を開発した（Ozawa and Ueda, 2010）。陸域観測技術衛星「だいち」の PALSAR によるシーン範囲は、隣の軌道に関するシーン範囲と重なっており、さらに、標準オフナディア角（34.3

度)だけでなく、オフナディア角 41.5 度による観測も年に 1 回程度の頻度で実施されているため、10km 程度の領域は、複数の軌道・オフナディア角で観測された SAR 画像に含まれる。ただし、各軌道に関するレーダー波の入射方向 (LOS: Line-of-sight) ベクトルはそれぞれ異なるので、それぞれの軌道の SAR 干渉画像が示す地殻変動成分は異なる。しかし、これらのベクトルにもっとも適合する面を最小二乗法で求めると、LOS ベクトルの共通面からのずれは 1 度以下である。つまり、すべての LOS ベクトルは、一つの面に含まれると仮定することができる。よって、各 SAR 干渉画像で得られるスラントレンジ変化は、共通面における水平成分 (東西成分) およびそれに直交する成分 (準上下成分: 垂直から南に約 10 度傾く) の合成によって記述することができる。逆に、それらの成分を複数の SAR 干渉画像から逆解析によって求めることが可能である。この逆解析においては、各観測日のずれを考慮した観測方程式を用いることにより、より正確に全期間の地殻変動を同時に推定することが可能である。また、細かな地殻変動を推定する場合には、数値地形モデル (DTM) の誤差も有意に影響を受ける場合があるので、その誤差成分も同時に推定する。さらに、地殻変動の時間変化は滑らかであると仮定し、地殻変動の加速度を抑制する拘束条件を付与することにより、より高精度に地殻変動時系列を推定する。

開発した手法を三宅島に適用し、2006 年から 2010 年までの地殻変動時系列を求めた。この解析においては、気象庁メソスケールモデルを用いた大気遅延誤差軽減手法や GNSS による地殻変動を用いた長波長誤差軽減手法を適用し、高精度化を試みた。三宅島については 6 つの軌道から観測された SAR 画像を解析した。推定された地殻変動と GNSS 観測による地殻変動を比較したところ、ほぼ 1cm 以内で一致した。推定された地殻変動において火口付近に注目すると、火口底が継続的に沈降する変化が求まった。この沈降は、2008 年まで 14cm/yr の速度で進行していたが、2010 年においては、3cm/yr にまで減速したことが明らかになった。火口の外側においては、東部で西進、西部では東進が求まった。これは収縮する地殻変動と考えられる。

ScanSAR データを用いた SAR 干渉解析手法に関する研究も行った。PALSAR のストリップマップモードの観測幅はおおよそ 70km であり、SAR 干渉解析によっては、そのシーン範囲内の相対的な地殻変動しか得られない。M8 クラスの地震に伴う地殻変動は、そのシーン範囲を超えるので、複数の軌道から観測された画像を用いる必要があるが、この場合、観測時間が異なるため、詳細な議論が困難になるという問題がある。ScanSAR は、オフナディア角を変化させながら観測するモードであり、空間分解能を低下させるかわりに、数 100km の観測幅を実現する。本課題では、PALSAR の ScanSAR の level1.0 データから Single Look Complex 画像を作成する Full-Aperture 法を適用するためのプリプロセッサを開発した。開発したプロセッサを用いて、チリ地震、バハ・メキシコ地震、ニュージーランド地震等に関する SAR 干渉解析を実施し、地殻変動を検出した。

火山に関する SAR 解析研究においては、国内外の火山に関する地殻変動調査を行った。特に、2011 年新燃岳 (霧島山) 噴火においては、噴火前後の地殻変動だけでなく、火口内に出現した溶岩の変遷を定量的に捉えることに成功した。地殻変動調査においては、PALSAR データを用いた SAR 干渉解析を実施し、噴火前の膨張、噴火に伴った収縮、そして噴火後の再膨張が求まった (宮城ほか, 2013)。それらの地殻変動は、おおよそ Mogi (1958) による球状圧力源モデルで説明することができ、噴火前の膨張、噴火時の収縮、噴火後の再膨張に関する地殻変動力源の位置は変化していないことが示唆された。また、地殻変動源における体積変化量を見積もったところ、噴火前は $+1.7 \times 10^7 \text{m}^3$ 、噴火時には $-1.5 \times 10^7 \text{m}^3$ と推定された。

次に、SAR 画像から求めた、火口内に出現した溶岩の変遷 (Ozawa and Kozono, 2013) について述べる。新燃岳において 1 月 19 日に小噴火が発生したことに伴い、火山活動把握を目的とした ALOS による緊急観測が実施された。ALOS の回帰周期は 46 日であるが、通常観測では使用されないオフナディア角を用いることにより、異なる軌道からも観測が行われ、高頻度に火口の画像が取得された。さらに、ドイツの TerraSAR-X、カナダの RADARSAT-2 による観測も要求し、数日毎に火口内の SAR 画像が得られた。噴火前の 1 月 18 日に観測された画像においては、火口底に散乱強度が弱い領域が見られ、それは火口湖を示すものである。その火口湖を示す低散乱強度域が、1 月 27 日に取得された画像にお

いては明らかに消失している。そのかわりに、火口中央部に凸形状を持つような強度分布が見られる。そのアジマス方向の幅は大まかに 100m 程度である。翌日の午前中に実施されたヘリコプターによる目視観測によれば、ほぼ同じ場所に溶岩ドームの出現が確認されており、この結果は、溶岩ドームはその半日前には、すでに出現していた可能性を示すものである。ただし、SAR 画像から判読される構造は、空間分解能と比べて十分に高くないことから、鮮明とは言い難い。爆発によって形成された別の構造を示す可能性も否定できないので、1 月 27 日の夜に、すでに溶岩ドームが出現していたかどうかについては、議論の余地が残るところである。1 月 29 日に観測された画像からは、明らかに、凸形状の構造が成長していることがわかる。さらに、1 月 29 日に観測された ALOS 画像、1 月 31 日、2 月 1 日に観測された TerraSAR-X 画像にも凸形状の構造が見られ、それは時間とともに成長しているように見える。2 月 3 日と 2 月 4 日に取得された PALSAR 画像には、2 月 1 日の画像と同様の凸形状の構造が見られるが、それ以降に取得された画像では、その形状は徐々に平坦化しているように見える。それは、溶岩の自重による変形を示すものかもしれない。また、2 月 1 日以降、繰り返しブルカノ式噴火が発生し、その噴出物が堆積し、火口内表面の形状が平坦になる効果も大きいと考えられる。そして、2 月 4 日以降に観測された PALSAR 画像からは、その形状をはっきりと認識できなくなった。より高分解能の TerraSAR-X、RADARSAT-2 の画像においては、その表面の微細な表面形状を判読可能であり、ブルカノ式噴火によって生じた穴などを識別することが可能であった。より定量的に溶岩の体積を調べるために、SAR 画像からおおまかな地形を推定する手法を開発した。この手法は、DTM からシミュレートされる散乱強度画像が、観測された画像と整合するように DTM を修正するものである。この解析においては、溶岩の表面形状を回転楕円体の一部で近似し、その楕円体の中心の座標（緯度、経度、高さ）と楕円体のパラメータ（水平方向の長径、短径、上下の系、水平方向の回転角）を試行錯誤により決定する。推定された結果によれば、溶岩は火口湖の南西岸付近に出現し、そこを中心に広がっていくという結果が求まった。溶岩出現前の地形との比較から火口内の溶岩の体積を求めたところ、火口内の溶岩は 1 月 29 日頃から急激に増加し、1 月 31 日の体積は約 15 万立米に達した。それ以降に、体積は大きく変化していないように見える。1 月 29 日、30 日、31 日の体積は一定の速度で増加しているように見えることから、それらに直線を当てはめると、 $88.7\text{m}^3/\text{sec}$ の噴出率が求まった。さらに、その x 切片は 29 日 7 時 33 分 (JST) に求まり、これは溶岩噴出期に見られた継続的な傾斜変化が開始した時間と良く一致する。さらに、1 月 31 日の TerraSAR-X の観測時間は継続的な傾斜変動が停止する直前であるが、それ以降の観測画像から推定される体積は 1 月 31 日の画像から推定される体積と大きく変わらない。この結果は、推定された溶岩体積の信憑性を示すとともに、この時期の傾斜変動と溶岩噴出のレートが深く関係していることを示唆している。また、溶岩が覆った領域も求めることができた。これを Huppert *et al.* (1982) による理論式（平坦な場所に一定の噴出率で溶岩が噴出した場合の面積の時間変化）に当てはめ、溶岩の粘性を推定したところ、 $2.1\text{GPa} \cdot \text{s}$ の粘性率が求まった。 $88.7\text{m}^3/\text{sec}$ の噴出率と $2.1\text{GPa} \cdot \text{s}$ の粘性率を考慮すれば、溶岩の噴出地点が火口の外側であれば、溶岩流として流下した可能性が考えられる。

地震に関する SAR 解析においては、国内外で発生した地震に関する地殻変動を調査した。特に、2011 年東北地方太平洋沖地震に関する地殻変動調査においては、地震に伴う局所的な沈降が、火山周辺において検出された (Ozawa and Fujita, 2013)。以下に、その結果について述べる。本地震の発生に関して実施された 7 つの北行軌道および 2 つの南行軌道から観測された PALSAR データを解析し、地震に伴う地殻変動を捉えた。この結果と、GEONET による地殻変動に整合する断層モデルを推定し、その残差に着目したところ、秋田駒ヶ岳、栗駒山、蔵王山、吾妻山、那須岳周辺に 5-12cm 程度のスラントレンジ伸長を示す残差が見られた。その幅はおおよそ 10-30km である。このようなスラントレンジ変化は大気電波伝搬遅延による擾乱に起因するケースが多いが、異なる観測日のデータに同様の変化がみられることや、GEONET による地殻変動にも整合的な変化がみられることから、これは実際の地殻変動シグナルであると考えられる。局所地殻変動は地震に関連して生じたと考えられることから、この地殻変動は地震に伴う伸長変動に係ると推測される。一般に、火山下にはマグマに関連した高温の媒質が存在すると考えられ、そのような媒質は、周辺の媒質よりも変形しやすく、より大きく伸長

すると考えられる。その伸長変動に伴って、その直上付近に局所的な地殻変動が生じたという可能性が考えられる。この仮説の検証のため、有限要素法を用いた数値実験を試みた。計算領域は $100\text{km} \times 100\text{km} \times 30\text{km}$ とし、 1km 間隔の格子を設定し、各側面と下面の境界の要素に、推定した断層モデルから Okada (1992) によって計算される変位を与えた。その媒質のポアソン比は 0.25、ヤング率は 72GPa とした。さらに、その中心の直下 10km に半径 5km 、ヤング率 1GPa の媒質が含まれる場合についても計算し、一様媒質で計算した場合との差から、局所的な地殻変動を計算した。その結果、低ヤング率を設定した媒質の直上に、局所的な沈降が生じることが確かめられた。また、その沈降域は、主ひずみの短縮軸方向に延びるような分布をしており、これは SAR 干渉解析から得られた地殻変動分布と調和的である。一方、数値実験から求めた沈降量が数 cm であるのに対して、観測されたスラントレンジ変化量は $5\text{--}12\text{cm}$ 程度である。数値実験によって、観測された地殻変動を再現するためには、巨大なやわらかい媒質を、極めて浅い領域に設定する必要がある、現実的ではないように思われる。この地殻変動を説明するためには、複数のマグマだまりの存在や、減圧に伴うマグマの流下による収縮変動の可能性も考えられる。このような成分は、力源の収縮によって説明することができるので、数値実験により求めた断層走向方向には収縮、直交方向には膨張の成分を持つという特徴と異なる。よって、より密な 3 次元地殻変動情報があれば、これらを分離することができるかもしれない。

以上のように、本課題においては、SAR 干渉解析の高度化に関する研究および火山・地震に関する SAR 解析研究に関して成果が得られ、当初の目的はほぼ達成されたと考えられる。ただし、SAR 干渉解析の高度化については、いまだ多くの課題が残されており、今後も継続して解析手法の高度化を進める必要がある。また、間もなく、ALOS-2 などの新たな SAR ミッションが開始される予定であり、これらの SAR データを用いることにより、より詳細な地殻変動が得られるようになることが期待される。

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

宮城洋介, 小澤拓, 河野裕希, 2013, DInSAR 及び GPS によって検出された、霧島山・新燃岳 2011 年噴火に伴う地殻変動, 火山, 58, 341-351.

Ozawa, T. and T. Kozono, 2013, Temporal variation of the Shinmoe-dake crater in the 2011 eruption revealed by spaceborne SAR observations, Earth Planets Space, 65, 527-537.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

独立行政法人防災科学技術研究所 観測・予測研究領域地震・火山防災研究ユニット
他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：防災科学技術研究所 アウトリーチ・国際研究推進センター
電話：029-851-1611
e-mail：toiawase@bosai.go.jp
URL：http://www.bosai.go.jp/index.html

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：小澤拓
所属：観測・予測研究領域地震・火山防災研究ユニット