

## だいち 2 号 SAR 干渉解析による御嶽山噴火に伴う地表変位の検出 Detection of Deformation Triggered by Eruption of Mt. Ontake Volcano with InSAR Using ALOS-2 data

測地部 山田晋也・森下 遊・和田弘人・吉川忠男・山中雅之・藤原 智  
Geodetic Department Shinya YAMADA, Yu MORISHITA, Kozin WADA,  
Tadao KIKKAWA, Masayuki YAMANAKA and Satoshi FUJIWARA

地理地殻活動研究センター 飛田幹男・矢来博司・小林知勝  
Geography and Crustal Dynamics Research Center Mikio TOBITA, Hiroshi YARAI  
and Tomokazu KOBAYASHI

### 要 旨

国土地理院は、2006 年から 2011 年まで運用されていた陸域観測技術衛星「だいち」に搭載されている L バンド合成開口レーダーの観測データを用いて、全国の地盤沈下、地すべり及び火山地域を対象に定期的に SAR 干渉解析を実施してきた。また、災害発生時には災害状況の把握等を目的として、緊急観測を実施してきた。

2014 年 5 月に後継機である陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」が打ち上げられた。2014 年 9 月 27 日に発生した御嶽山の噴火に対して、定常運用前ではあったがだいち 2 号による緊急観測が実施され、この観測データを用いて地表変位を求める緊急解析を行った。解析結果は直ちに国土地理院の Web ページに掲載するとともに、地理院地図上に SAR 干渉画像を重ね合わせることができるデータを公開した。

### 1. はじめに

干渉 SAR とは、人工衛星などに搭載した合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) を用いて、ある地域を 2 回以上観測し、反射波の位相差を計算することによって地表面の変動を求める宇宙測地技術である。一般には数 m から数十 m の空間分解能で数十 km から数百 km の範囲の地殻変動を数 mm から数 cm の精度で面的に捉えることができる特徴がある。

国土地理院では、2006 年から 2011 年までだいちによる SAR 観測データを用いて定期的に SAR 干渉解析を実施し、地盤沈下、地すべり、火山活動による地殻変動の監視に寄与してきた。また、地震の発生や火山の噴火といった緊急時には、緊急解析を実施した。例えば、地震では平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震 (雨貝ほか, 2008 年) や平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (山中ほか, 2011)、火山では平成 23 年 (2011 年) 霧島山 (新燃岳) の噴火 (小林ほか, 2011) において、緊急解析により広範囲の変動を面的に検出することに成功した。

2014 年 5 月 24 日にだいち 2 号が打ち上げられた。だいち 2 号は約半年の初期機能確認運用及び初期校正検証運用の期間を経て、11 月 25 日からデータの定常配布を開始している。だいち 2 号は、だいちに比べ同じ軌道に戻ってくる回帰日数が短くなり観測頻度も向上するとともに、衛星進行方向の左右両方向の観測ができるようになっている。また、2 回の干渉ペア観測の軌道位置のずれ量である基線長が常に短くなるように軌道制御が実施されているので、垂直基線長によって干渉ペアが制限されることが極めて少ない。観測モードは分解能と観測範囲に応じて 6 種類あり、必要に応じた観測ができる。

9 月 27 日に岐阜・長野県境の御嶽山の噴火が発生した。だいち 2 号は定常運用の状態ではなかったものの、緊急観測を実施し、国土地理院でもデータを入力・解析を行い、解析結果を公表した。SAR はマイクロ波を用いるので、雲や噴煙に遮られることなく観測できることも大きな特徴であり、火山噴火時の観測にも有用であることが改めて示された。

本稿では、御嶽山の噴火に際して国土地理院が行った、「だいち 2 号」の緊急観測要求の過程、データの緊急解析、得られた成果の公開及び変位源モデルの考察について報告する。

### 2. 観測要求

国土地理院は宇宙航空研究開発機構 (以下「JAXA」という。) が地球観測衛星を用いた防災利用実験の一環として実施している火山噴火予知連絡会衛星解析グループ (以下「火山 WG」という。) に PI (Principal Investigator, 研究責任者) 及び CI (Co-Investigator, 共同研究者) として参加している。火山 WG は 2006 年 11 月に JAXA の協力のもと気象庁を事務局として発足し、衛星観測データを用いた日本付近の主要火山の活動監視と、噴火時の状況把握を目的としている。PI は必要なデータの提供を受けることができる他、災害発生時には緊急観測を提案することができる。提供されたデータを用いた解析の成果は火山

噴火予知連絡会に報告し、火山活動の評価に利用されている。

9月27日11時52分頃の噴火発生当時、だいち2号は初期校正検証運用期間中であり、観測データの定常配布はされていなかったが、国土地理院では火山WGを通じて緊急観測要求を行い、9月27日23時17分頃に噴火後初の観測が行われた。この観測に対しては、噴火前に同条件で観測されたデータはなく、干渉解析には至らなかったが、9月29日23時58分頃に始めて噴火前の観測と併せて干渉解析を実施できるデータが観測された。10月3日23時44分頃には新たに干渉解析可能な観測が行われた。データ提供はオンラインを経由してどれも観測後24時間以内に行われた。

### 3. 緊急解析

#### 3.1 噴火前後の解析の概要

御嶽山噴火に際して表-1の通り2つの干渉ペアにおいて緊急解析を行った。干渉解析には国土地理院で開発したソフトウェア「新GSISAR」を用いた。地形縞を除去するのに必要なDEMとしてGSI10mDEHMJapan(飛田, 2009)を用いた。また、2回の衛星軌道の差である基線値の再推定を行って画像中の軌道による残存縞模様を除去し、標高の一次関数近似により大気による誤差の低減処理を行った。2つめの干渉解析ペアである(2)については気象モデルを用いた対流圏誤差低減処理(小林ほか, 2014)も併せて行った。初めにJAXAより配布された8月18日観測のデータには、強度画像に電波照射方向に平行な縞模様が地上電波源由来と考えられるノイズとして現れていたが、だいち2号のデータに適合したノイズ低減フィルタを開発し(飛田, 2015)、これを用いて強度画像中の縞模様を除去し、干渉性を改善させた。

表-1 御嶽山噴火における緊急解析ペア

	(1)	(2)
観測日(マスター)	2014年8月18日	2014年8月22日
観測日(スレーブ)	2014年9月29日	2014年10月3日
モード	高分解能(3m)	高分解能(3m)
衛星進行方向	北行	北行
電波照射方向	右	右
オフナディア角	46.8°	32.4°
垂直基線長	+97m	-6m

### 3.2 得られた成果

#### 3.2.1 干渉画像と成果公開

表-1の(1)の解析で得られたSAR干渉画像を図-1に、(2)の解析で得られたSAR干渉画像を図-2に示す。それぞれに国土地理院の航空機SARの観測から推定された火口の位置を付け加えている。ペア

(1)の画像では、噴火口南西側の1km四方のごく狭い領域において位相変化が検出された。この位相変化の原因として、地表変位または堆積した火山灰の影響が考えられる。干渉解析において、干渉が得られるためには地形の起伏が保存される必要があり、火山灰が地形の起伏を保持したまま堆積する状況が考えられる。しかし、今回捉えられた位相変化の領域は噴火口に近く、噴火口近傍では火砕流による横方向からの堆積が想定されることから、地形の状態が保持されず、干渉性が失われる可能性が高い。したがって、この噴火口周辺の位相変化が火山灰の堆積による可能性は低いと考えられる。位相変化がすべて地表の変位によるものとする、衛星(観測地域の西南西上空から観測)に近づく方向に約10cmの地表変位となる。ペア(1)、(2)の画像ともに、山頂である剣ヶ峰とその周囲に非干渉の領域がみられた。非干渉とは、2回の観測間で地表面の状態が変わってしまったときによく観測されるもので、火山灰や噴石などの噴出物が堆積し、地表面の状態が大きく変わったためだと考えられる。また、空白域はオフナディア角(鉛直下方からの観測角度)が小さいために、レイオーバー(観測角度と地形の組み合わせによってデータが重なり合っただけで干渉画像ができなくなる現象)となってしまうと考えられる。

これら2つの干渉解析ペアについて、ペア(1)は10月3日に、ペア(2)は10月6日に国土地理院のWebページ(<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h26-ontake-index.html>)に掲載した。また、国土地理院が運用しているWeb地図である地理院地図(<http://maps.gsi.go.jp/>)を用い、地図上で干渉画像を重ね合わせることでデータを作成した。作成したデータは、電子基準点の配置や空中写真など、様々な地理空間情報とともに前述のWebページから地理院地図のページへリンクし、付したコメントを参照したり、干渉画像の透過率を変えて地形と比べたりしながら、誰でも自由に閲覧できるようにした。

#### 3.2.2 モデルの考察

ペア(1)の解析により検出された噴火口南西側の位相変化について、原因を考察し、地下の変位源による地表変位を推定してモデルを検証した。噴火口近傍で検出された位相変化は、1km程度のごく狭い領域に限られることから、原因が地下の変位源の場合、その変位源の深さは浅いと推定される。言い換えると、噴火前の約1か月間に地下深くのマグマの膨張を示すような顕著な地殻変動は見られない。

火山噴火に関する何らかの物質が地下から地上の火口に向かう際に、板状に周囲の岩石を押し開きながら上昇するものとして、半無限弾性体中に変位源

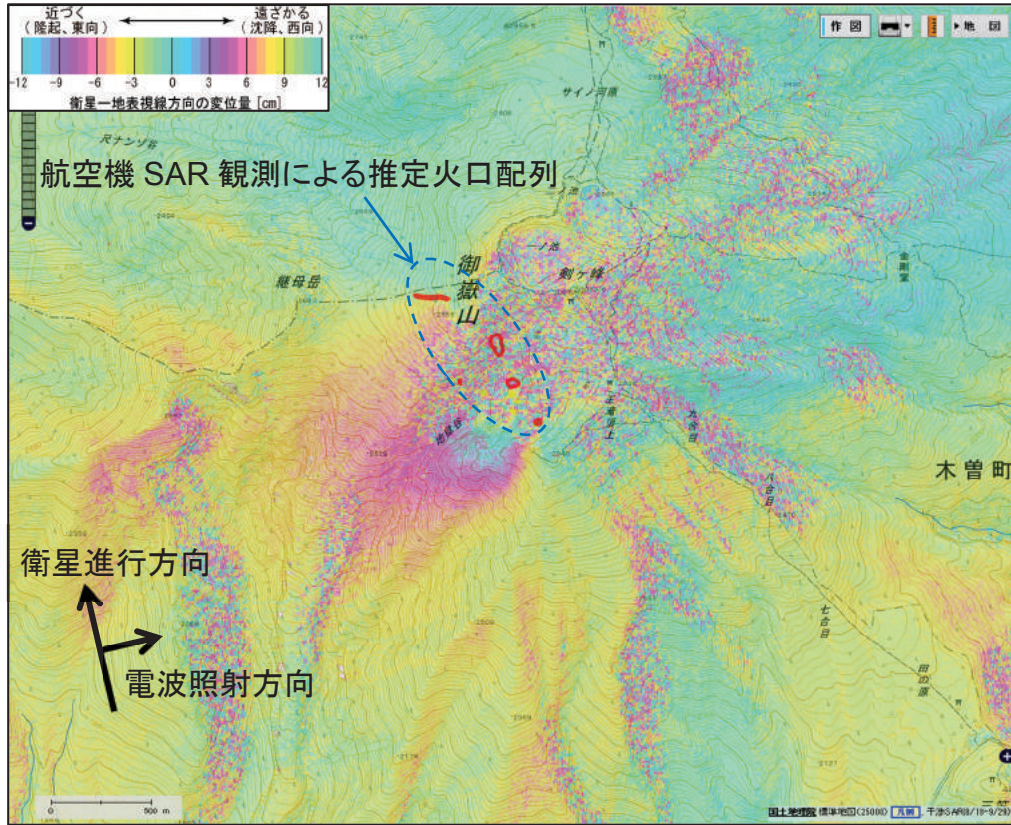


図-1 2014年8月18日-2014年9月29日の干渉画像(地理院地図使用)

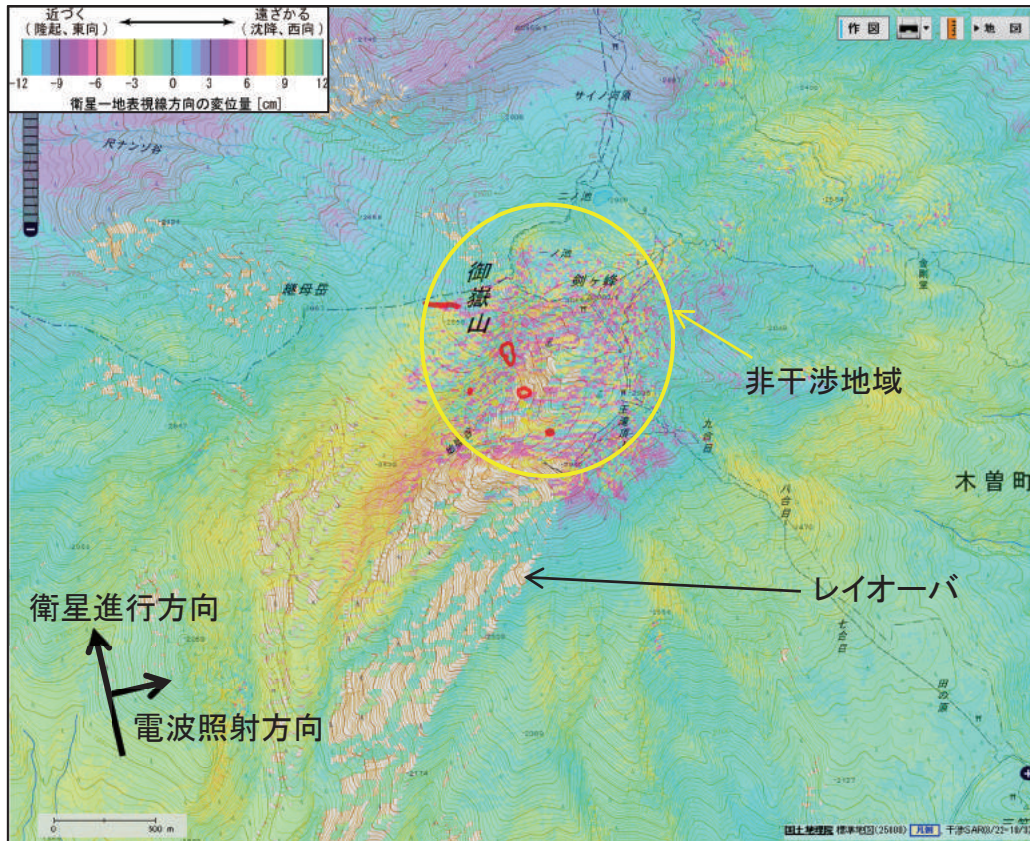


図-2 2014年8月22日-2014年10月3日の干渉画像(地理院地図使用)

として矩形の開口クラック 1 枚を仮定し、Simulated Annealing 法 (Kirkpatrick et al., 1983) により開口クラックモデルの大きさ等のパラメータを推定した。最適解は観測変位量と計算変化量の残差の二乗和が最小となる解とした。残差の二乗和の計算においては、変動域の変位の重みを大きくし、大気の影響や地形の影響を抑えることを目的に、山頂域から各計算点の距離の二乗の逆数を重みとした。開口クラックの位置は国土地理院の航空機 SAR 観測による火口配置から得られたものに強く拘束し、走向角  $140\text{--}150^\circ$ 、断層長  $0.3\text{--}0.5\text{km}$ 、傾斜角  $0\text{--}90^\circ$  (南東傾斜)、開口量  $0\text{--}2\text{m}$  の範囲で探索を行った。また、気象庁の傾斜計 (田の原) で観測された噴火前後の傾斜量を図から読み取り、推定に用いている。

表-2 のとおり、火口直下に北西-南東方向を走向とする開口クラックのパラメータが推定された。図-3 に開口クラックモデルによる変位から求めた計算位相 (左) 及び観測位相 (図-1) との残差 (右) を示す。噴火口南西側で位相変化が検出された領域について、残差の図ではほぼ全体で位相値が 0 付近 (緑

～黄緑) となっており、仮定したクラックモデルは噴火口南西側の位相変化をほぼ説明できていることが分かる。

このことから、SAR 干渉解析で検出された位相変化は、地下の非常に浅い位置の変位源による地殻変動である可能性が高いと考えられる。また、位相変化が確認された領域では、観測位相との残差がほとんど見られないことから、今回考察した領域以外で変動がなかったと考えられる。

以上については、第 130 回火山噴火予知連絡会に報告した。

表-2 推定された開口クラックのパラメータ

経度	$137.477^\circ$	幅	1.3km
緯度	$35.888^\circ$	走向	$150^\circ$
深さ	0.76km	傾斜	$84.6^\circ$
長さ	0.5km	開口量	0.45m

(開口クラックの中央位置で定義、開口クラック上端の深さは 0.1km)

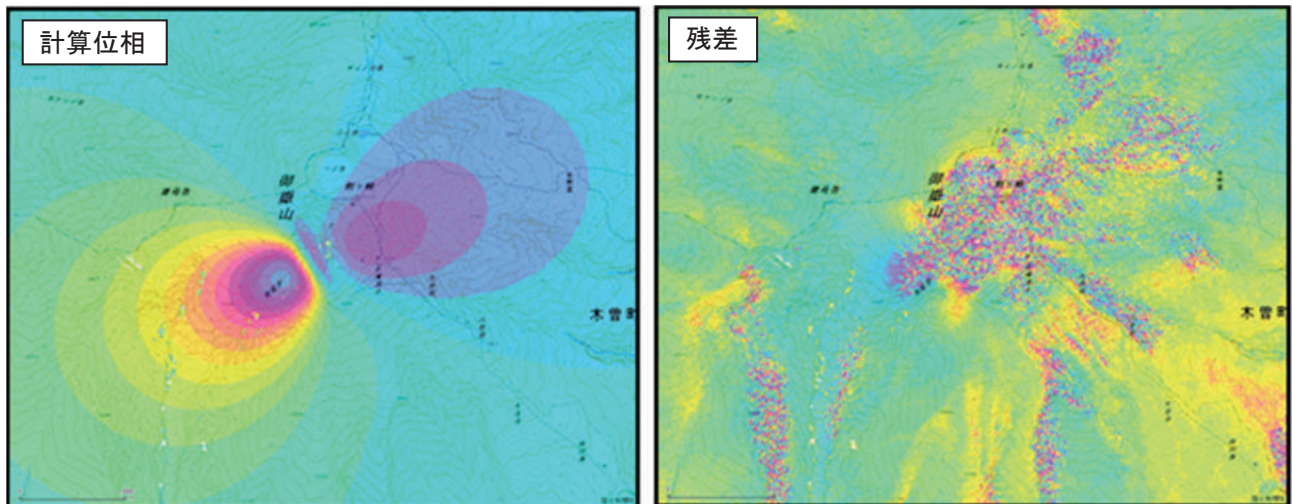


図-3 開口クラックモデルによる変位の計算位相と残差 (観測値-計算値)

#### 4. まとめと今後の課題

国土地理院では御嶽山噴火に際し、火山 WG を通じて JAXA に緊急観測要求を行い、提供された観測データを用いて緊急解析を行った。その結果、噴火口南西部で衛星方向に近づく位相変化が検出された。この位相変化の原因は地下の浅い位置の変位源による地殻変動である可能性が高いことが分かった。御嶽山の活動には依然として警戒が必要である。

だいち 2 号の定常運用が始まり、国土地理院では日本全国を対象にした定常解析を行う予定である。地域によっては最短で 1.5 か月に 1 度、最新の観測データを用いて解析を行う。また、緊急時にはだいち運用時より迅速な緊急観測及びデータ提供が可能

となる。今後も速やかな成果の公表ができるよう、効率的な対応を検討していく。

#### 謝 辞

ここで使用しただいち 2 号の原初データの所有権は、宇宙航空研究開発機構にあります。これらのデータは、火山噴火予知連絡会衛星解析グループを通じて提供されました。数値気象モデルは、「電子基準点等観測データ及び数値予報格子点データの交換に関する細部取り決め協議書」に基づき、気象庁から提供されました。この場を借りて、御礼申し上げます。

(公開日：平成 27 年 3 月 12 日)

## 参 考 文 献

- 雨貝知美, 鈴木啓, 和田弘人, 藤原みどり, 飛田幹男, 矢来博司 (2008) : 衛星合成開口レーダーを用いた平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 117, 15-20.
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi (1983) : Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220, 671-680.
- 小林知勝, 石本正芳, 飛田幹男, 矢来博司 (2014) : SAR 干渉解析のための数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理ツールの開発, 国土地理院時報, 125, 31-38.
- 小林知勝, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 鈴木啓, 野口優子, 石原操 (2011) : 「だいち」 SAR 干渉解析により捉えられた霧島山 (新燃岳) の火山活動に伴う地殻変動とその圧力変動源の推定, 国土地理院時報, 121, 195-201.
- 飛田幹男 (2009) : 地殻変動計測のための SAR 画像分析の高度化に関する研究 (第 3 年次), 平成 21 年度国土地理院調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000057644.pdf> (accessed 22 Jan 2015)
- 飛田幹男 (2015) : 地殻変動計測のための SAR 画像分析の高度化に関する研究 (第 7 年次), 平成 26 年度国土地理院調査研究年報 (準備中)
- 山中雅之, 野口優子, 鈴木啓, 宮原伐折羅, 石原操, 小林知勝, 飛田幹男 (2011) : 衛星合成開口レーダーを用いた平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 117, 15-20.