

「だいち2号」を利用した 宇宙からの火山活動の監視

山田 晋也¹・三浦 優司¹・山中 雅之¹・仲井 博之¹・和田 弘人¹

¹国土地理院 測地部 宇宙測地課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

国土地理院は、(国研)宇宙航空研究開発機構(JAXA)が2014年5月に打ち上げた「だいち2号」のレーダーのデータを解析し、火山活動に伴う地殻変動に関する情報を随時提供している。「だいち2号」は、地上観測施設のない場所においても高い空間分解能で面的に地表の変化を捉えられるという強みがあり、解析で得られた変動量とその範囲の情報は防災上の判断に役立てられている。

キーワード だいち2号, 干渉SAR, 地殻変動, 火山

1. はじめに

SAR (Synthetic Aperture Radar) は「合成開口レーダー」と呼ばれるレーダーであり、航空機や人工衛星などに搭載されたアンテナから電波を斜め下方に向けて照射し、地表からの反射波を受信する。干渉SARは、同じ地域を同じ条件で観測した複数回のデータを用い、反射波に含まれる衛星－地表間の距離に関する情報を用いることによって地表面の変動を計測するという技術である。1回の観測で地表の南北を縦断する数十kmから数百kmの幅を観測することができ、解析によって得られた画像の1つのピクセルの辺の長さは数mから数十mとなる。複数回のデータを用いて解析すると、各ピクセルごとに変動を計算することができ、その精度は数cmである。この「SAR干渉解析」を行うことによって、その期間に起きた変動を面的に捉えることができる(図-1)。SARによる観測は空中写真の撮影や光学衛星による観測とは異なり、電波を照射することから、天気や昼夜を問わず観測することができる。

2014年9月に発生した御嶽山の噴火、2015年5月以降の箱根山の火山活動の活発化、同じく5月の口永良部島の噴火、8月の桜島の活発化などに際して、陸域観測技術衛星「だいち2号」による緊急観測が実施された。国土地理院では、災害前の基準となるデータと災害発生時の緊急観測データを用いてSAR干渉解析を行い、解析結果に解説文を付けて関係機関へ提供するとともに、ホームページによる公表と地理院地図への掲載を行った。

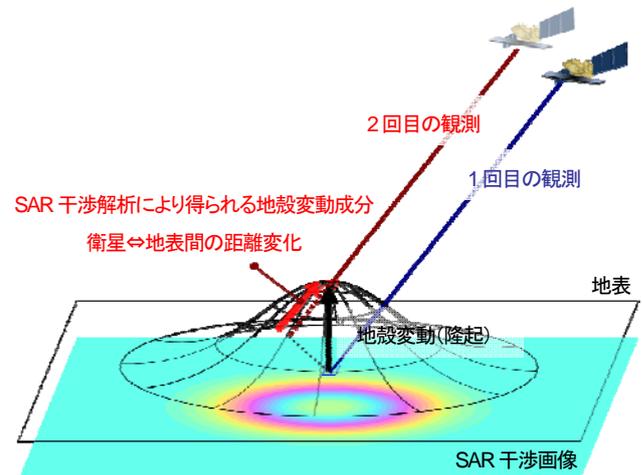


図-1 干渉SARの原理の概略図

干渉SARには、GNSS連続観測や傾斜計など他の地上観測の空白域での地表の変化を面的に捉えられるという強みがあり、干渉SARは噴火警戒レベルの上げ下げの判断材料の一つとして利用されつつある。本稿では、「だいち2号」を利用した干渉SARによる活火山での地殻変動の検出結果について報告する。

2. 「だいち2号」を利用した干渉SAR

国土地理院では、研究・開発を目的に1994年から「ふよう1号」のデータを用い、SAR干渉解析を行ってきた。また、2006年から2011年に運用された「だいち」の時代から干渉SARによる地殻変動の監視を行い、その結果を火山噴火予知連絡会等に提出してきた。しかし、「だいち

ち」は回帰日数（衛星が地球上の同じ場所に再び戻ってくるまでの日数、2回の観測の間隔に影響する）が46日と長く、得られる情報は即時性に欠けており、噴火発生直後の変動を迅速に提供することは困難であった。

「だいち2号」は、「だいち」の後継機として2014年5月24日にJAXAより打ち上げられた。「だいち2号」は「だいち」に比べ、次の点において性能が向上した（表-1）。

- ① 回帰日数が大幅に短くなり観測頻度が増加
- ② 空間分解能が向上
- ③ 電波を照射する方向を衛星の進行方向に対して左右両方に切り替え可能
- ④ 2回の観測の軌道の位置のずれを表す垂直基線長が短くなることで衛星の軌道が安定し、干渉解析が可能なデータの組み合わせが増加

表-1 だいち2号とだいちの主な性能

		だいち2号	だいち
回帰日数		14日	46日
高分解能観測モード	分解能 観測幅	3m 50km, 70km	10m 70km
広域観測モード	分解能 観測幅	100m 350km, 490km	100m 250km~300km
電波照射方向		左右可能	右のみ
垂直基線長		1km以内	最長10km超

これらの性能の向上により、災害対応の迅速性が大きく向上し、最長でも発災後74時間以内にSAR干渉解析可能な観測が実施できる。

3. 干渉SARによる火山活動の監視

(1) 2014年9月に発生した御嶽山の噴火

岐阜・長野県境の御嶽山で2014年9月27日に発生した噴火を受けて、国土地理院はデータの入手・解析を行い、10月3日に解析結果を公表した（図-2）。解析結果からは、噴火に伴う噴火口南西側の1km四方のごく狭い領域において10cm程度の膨張性の地殻変動が観測された。また、山頂である剣ヶ峰とその周囲には、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ことによるものと考えられる非干渉の領域が見られた。これらの情報は、山頂付近の現象であるため干渉SARでしか得られない貴重な情報であった。なお、干渉SARによる御嶽山噴火に伴う地殻変動の検出については山田ほか（2015）²⁾により詳細に報告している。

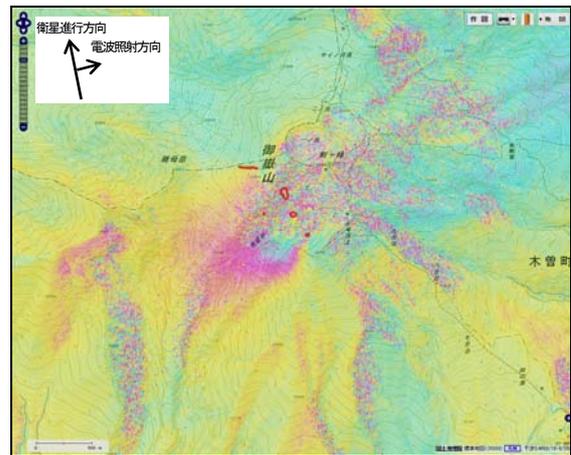


図-2 2014年9月27日の噴火を挟む期間（2014年8月18日～2014年9月29日）の解析結果

(2) 2015年5月以降の箱根山・大涌谷における火山活動

箱根山・大涌谷では、火山活動の活発化に伴い2015年5月6日に噴火警戒レベルが1から2に、6月30日にレベル2から3に引き上げられ、活動の低下により、9月11日にレベル3から2に引き下げられた。

箱根山・大涌谷では、4つの異なる観測条件（（1）南行軌道/入射角43度、（2）北行軌道/入射角33度、（3）北行軌道/入射角43度、（4）南行軌道/入射角46度）で、干渉解析が可能なデータが緊急観測によって取得された。国土地理院は、火山活動が活発化する前の観測データを含めてこれらすべての条件における観測データを用いて解析処理を行った。

火山活動が活発化する前の最後のデータとなる4月17日の観測データを解析したところ、大涌谷においてノイズレベルを超える有意な変動は見られないことから、大涌谷の地殻変動が開始した時期は早くても4月17日以降と考えられる。

火山活動が活発化した以降では、SAR干渉画像において、大涌谷で膨張性の変動が捉えられた（図-3）。活動活発化直後の5月7日の干渉画像（図-3 ①）では、大涌谷内の直径200m程度の狭い範囲で、最大6cm程度の変動が見られた。（2）の条件で観測した5月10日の干渉画像では、変動の広がりには大きな変化はないものの、その分布に変化が見られ、前回の変動の中心より南西側に約8cm程度の大きな変動のピークが現れた。その後は変動の範囲や分布に大きな変化は見られず、変動量が小さくなりつつも膨張性の地殻変動は継続した。ごく小規模な噴火発生前最後の6月18日の観測データによる干渉画像（図-3 ①～④）では、活動活発化前からの累積の変動量は最大33cm程度に達した。

6月末に発生したごく小規模な噴火の時期を挟む干渉画像（図-3 ⑤）では、変動の範囲に大きな変化は見られないものの、噴気孔周辺で直径100m程度の非干渉の領域が見られた。非干渉の領域では火山灰や噴石などの

噴出物が堆積し、1回目と2回目の観測の間に地表面の状態が大きく変化しと考えられ、気象庁による調査結果と整合している。なお、ごく小規模な噴火後には、収縮性の変動が捉えられている（図-3 ⑥）。

以上の結果を箱根山火山防災協議会に提出した。これ

らの情報は、火山の局所的な地殻変動を時間の経過の中で面的に捉えられた唯一の情報であり、火山防災協議会において、火山防災対策の判断材料として活用された。

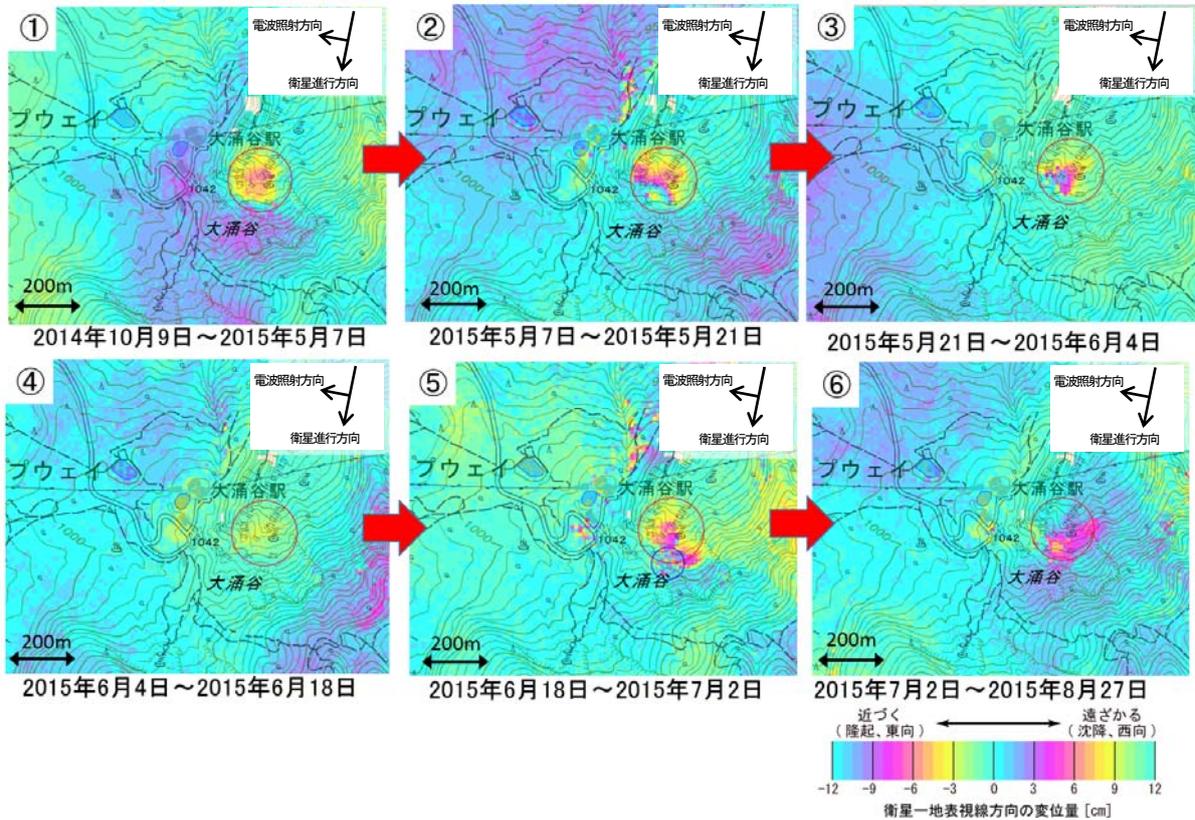


図-3 観測条件1の観測データにより検出された箱根山・大涌谷における地殻変動。
赤丸は変動が見られる範囲を、青丸は非干渉の領域を示す。

(3) 2015年5月に発生した口永良部島の噴火

口永良部島では2015年5月29日09時59分に爆発的噴火が発生した。この噴火に伴い火砕流が発生し、新岳の北西側（向江浜地区）では海岸にまで達し、噴火警戒レベルが3から5に上げられた。

噴火が発生した3時間後の13時頃には、「だいち2号」による緊急観測が実施され、翌日にはSAR干渉解析結果を国土地理院ホームページから公開した。

解析結果からは、新岳火口を中心に向江浜まで、火砕流の発生や火山灰や噴石などの噴出物の堆積により、地表面の状態が大きく変化しと考えられる非干渉の領域を確認することができる。この領域は、遠方から撮影したやや精度の落ちる航空写真から判読した噴火による堆積物の領域とおおむね一致している（図-4）。

これは「だいち2号」が迅速に観測できるということ、そして航空機やヘリでは近づけない状況におい

ても観測出来るということが有効であった事例である。

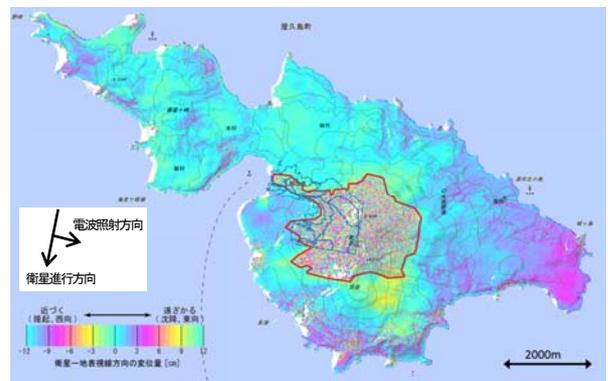


図-4 2015年5月29日の噴火を挟む期間（2014年11月14日～2015年5月29日）の解析結果。
赤線は非干渉の領域を、青破線は航空写真から判読した噴火による堆積物の領域を示す。

(4) 2015年桜島における火山活動

桜島では、2015年8月15日に南岳直下付近を震源とする火山性地震が多発し、また、桜島島内に設置している傾斜計などにより山体膨張を示す急激な地殻変動が観測され、同日噴火警戒レベルが3から4に引き上げられた。9月1日には活動の低下によりレベル4から3に引下げられた。

8月15日を挟む期間の解析結果には、桜島の火山活動の活発化に伴う明瞭な地殻変動が見られ(図-5)、得られた地殻変動をもとに推定される変動源を算出した。

一方、8月10日以前、及び8月17日以降はノイズレベルを超えるような変動は検出されなかった。この変動が8月15日前後の非常に短い時間の間に起き、それ以降は変動は起きていないと考えられる。

以上のような結果は、桜島火山防災連絡会や火山噴火予知連絡会において噴火活動の評価に活用され、噴火警戒レベルを変更する根拠の一つとして利用された。

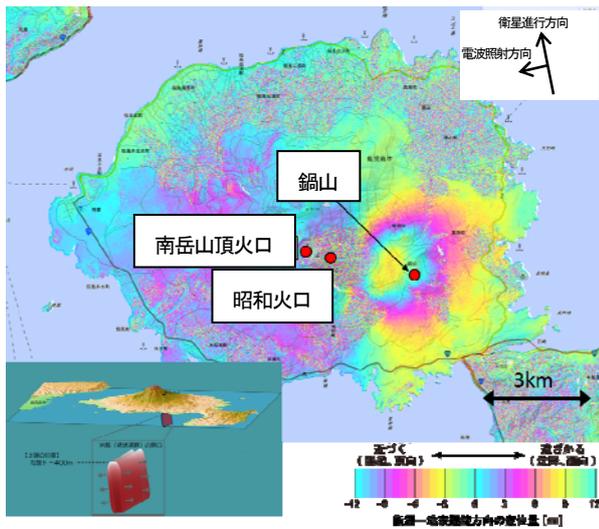


図-5 2015年1月4日～2015年8月16日の解析結果及び推定される変動源モデルの概念図

(5) その他の火山活動

国土地理院では、全ての活火山について、定期的にSAR干渉解析を実施し、火山活動による地殻変動を監視している。2回の観測の期間に起こった変動を検出するのみであることから、変動が起きた時間をピンポイントで特定することは難しいものの、他の地上の観測網では大きな変化が捉えられない場合でも、地下で進行している火山活動を見積もることが可能

である。

例えば、十勝岳においては、2014年8月30日と2015年8月15日(約1年間)の解析結果から62-II火口西側の直径1km程度の範囲で最大12cm程度膨張性の変動が検出された(図-6)。また、吾妻山では2014年9月9日と2015年6月2日(約9か月)の解析結果からは、吾妻山の深部での膨張を捉えていると考えられる、吾妻山山体の広い範囲での膨張性の地殻変動が見られ、大穴火口付近の狭い範囲においては、大穴火口周辺の浅部での膨張を捉えていると考えられる膨張性の変動が捉えられた(図-7)。

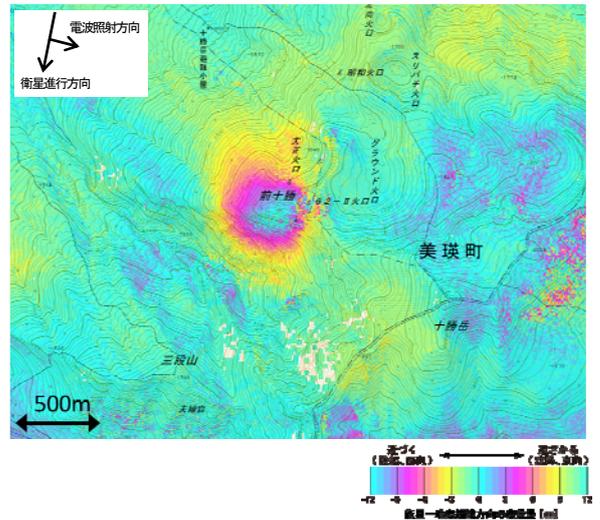


図-6 2014年8月30日～2015年8月15日の解析結果

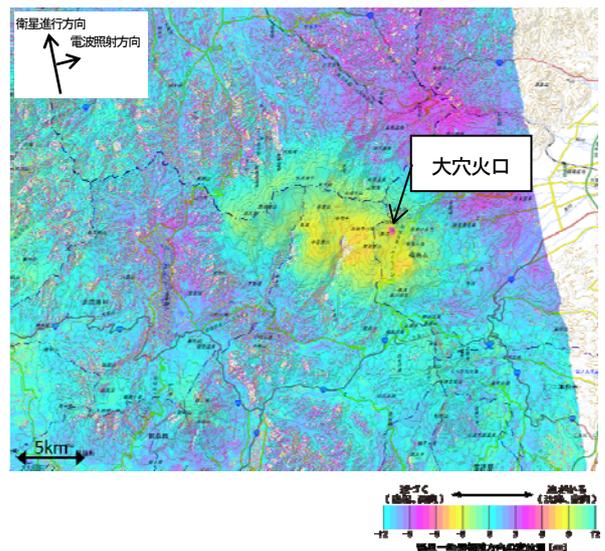


図-7 2014年9月9日～2015年6月2日の解析結果

4. 干渉SARによる火山監視の利点と課題

従来の火山活動の監視手法に対し「だいち2号」の観測データを用いた干渉SARによる火山活動の監視の利点は、次の3つがあげられる。

- ①地上観測施設が不要で、地上観測の空白域であっても、山体全域の地殻変動や地表面の状態変化を面的に観測できる。
- ②規制によって人や航空機等が近づくことが困難な状況においても、天候や昼夜に関係なく観測データを取得できる。
- ③空間分解能の向上によって、局所的な変動の大きさと分布を把握することができる。

国土地理院はJAXAによる基本観測シナリオにおいて日本で定常的に行われている観測についてSAR干渉解析を実施している。解析結果から活火山の中で変動が見られる火山を見つけ出し、変動量とその範囲について判読を行っている。また、火山の活動度に応じてJAXAに対して更なる観測を要望することも可能であり、これにより重点的に観測が必要な火山に対しては頻度を高くするといった、効率的な火山の監視ができる。

なお、SAR干渉画像は、地図や空中写真、他の地理空間情報と重ね合わせることができるよう、国土地理院が運用しているweb地図「地理院地図」(<http://maps.gsi.go.jp>)で公表している。これにより、防災機関だけでなく地方自治体や一般国民が、干渉SARの画像を利用する機会が増大していくと考えられる。

一方、SAR干渉画像の表現は慣れないと理解が難しく、大気中に含まれる水蒸気の影響などによる誤差も含まれるため、地方自治体や一般国民がSAR干渉画像を目にした場合には、誤解を生じる可能性がある。また、噴火の危険度を評価するには、地殻変動の情報だけではなく、変動から推定される地下のマグマ等の状態についての情報も併せて提供する必要があり、SAR干渉画像だけでは評価するのは難しい場合がある。SAR干渉画像の効果的な利用を促進するために、これらのことを踏まえて情報を提供していくこ

とが今後の課題である。

5. おわりに

干渉SARは、噴火による立ち入り禁止や火口付近がガスで覆われた場合など、人が近寄れずに地上での観測が困難な状況でも、火山活動に伴う地殻変動を捉えることができる。また「だいち2号」は「だいち」よりも回帰日数が短くなり、左右両方の電波を照射できるようになるなど、性能が向上したことで観測頻度が増加し、火山活動が急激に高まった時に非常に迅速に対応することができる。

また、高い空間分解能で変動を捉えられることから、GNSS等、地上の地殻変動観測網だけでは捉えることが困難な局所的な変動現象の範囲も明らかにすることが可能となる。

このような局所的な変動の範囲の特定は、立入り規制等に直接的に関係する情報となり得ることから、これらの変動情報をわかりやすく関係機関に提供し、防災・減災に役立てる方法を検討していきたい。

謝辞：本研究で使用した「だいち2号」データの所有権は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）にあります。これらのデータは、「陸域観測技術衛星2号に関する国土地理院と宇宙航空研究開発機構の間の協定」に基づいて提供されたものです。

参考文献

- 1) JAXA/ALOS-2プロジェクト (2015) : ALOS-2基本観測シナリオ (第1版) -B改訂-, http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/obs/scenario/ALOS-2_Basic_Observation_Scenario_First-Ed_J_v00_B.pdf (accessed 28 Sep. 2015)
- 2) 山田晋也・森下 遊・和田弘人・吉川忠男・山中雅之・藤原 智・飛田幹男・矢来博司・小林知勝 (2015) : 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, 国土地理院時報, 127, <http://www.gsi.go.jp/common/00010168>