2. だいち2号の干渉 SAR による火山活動モニタリング

Active volcano monitoring using ALOS-2 SAR interferometry

矢来 博司*・小林 知勝*・森下 遊*・山田 晋也*・三浦 優司*
和田 弘人*・仲井 博之*・山中 雅之*・攪上 泰亮*・上芝 晴香*

*Hiroshi YARAI, Tomokazu KOBAYASHI, Yu MORISHITA
Shinya YAMADA, Yuji MIURA, Kozin WADA, Hiroyuki NAKAI
Masayuki YAMANAKA, Yasuaki KAKIAGE and Haruka UESHIBA*

要旨：噴火に伴う被害の軽減のためには、火山活動のモニタリングが重要である。近年、地殻変動の空間分布を詳細に把握できる利点から、SAR を搭載する「だいち2号」の活用が期待されている。この「だいち2号」の干渉 SAR により、箱根山や桜島などで火山活動の活発化に伴う地殻変動が捉えられた。箱根山では大涌谷で地殻変動が検出され、継続的な観測により変動の推移が捉えられた。桜島では、捉えられた地殻変動から昭和火口の直下へのマグマ貫入が推定された。これらの情報は火山噴火予知連絡会などに報告され、評価に活用されている。

1. はじめに

近年、火山活動に関する社会的な関心が高まってきている。2014年9月27日の御嶽山噴火では大きな人的被害が生じ、社会に大きな衝撃を与えた。2015年には、4月下旬からの箱根山の火山活動の活発化とそれに続く6月30日の噴火、5月29日の口永良部島の爆発的噴火、8月15日の桜島の火山活動活発化など、全国の火山で活発な活動が見られた。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の後、東北地方を中心に全国で大きな地殻変動が生じており、その影響により火山活動が活発化する可能性も指摘されている。

ひとたび火山活動が活発化すると大きな人的・社会的被害が生じる可能性があることから、その被害の軽減のために火山活動のモニタリングが重要である。

火山活動のモニタリングとして、地震観測や地殻変動観測などが行われている。火山の地下でマグマなどの流体の体積増加や移動が起ると、それに伴う地震活動や地殻変動が現れる。火山の地殻変動観測では、GNSS (Global Navigation Satellite System : 衛星測位システム) がよく用いられているが、最近では衛星に搭載された SAR (Synthetic Aperture Radar : 合成

開口レーダー) データを用いて地表の動きを数 cm レベルで計測することができる SAR 干渉解析 (以下、干渉 SAR) の利用も増えてきている。

SAR の主な特徴として、①地上観測機器の設置が不要、②高い空間分解能による広域面的観測、③雲や噴煙に左右されない全天候型観測、④昼夜を問わない観測、が挙げられる。これらの特徴は、火山観測において、活動の活発化に伴いアクセスが困難となった危険地域の観測も可能 (①)、局所的な変動から広域の変動までを網羅した観測が可能 (②)、光学センサーとは異なり天候や時間帯を選ばない確実な観測が可能 (③④)、という点において、他の観測手段にない長所を有している。

2014年5月24日に打ち上げられた陸域観測技術衛星2号 (ALOS-2) 「だいち2号」は SAR センサーを搭載しており、火山活動モニタリングでの活用が期待されている。

2. だいち2号

SAR は、人工衛星や航空機から地上に向けてマイクロ波を照射し、その反射信号を処理することにより地表の情報を得る。欧州の SAR 衛星が X-band や C-band など短い波長のマイクロ波を用いているのに対し、だいち2号はそれらより波長の長い L-band を用いている。X-band や C-band のマイクロ波は樹木の

*国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 55, NO.1, 2016

葉の表面などで反射されるのに対し、これらより長い波長の L-band では、植生を透過して地面で反射される。そのため、植生が多い地域でも地表の情報を抽出することが可能となることから、日本の山岳部のように植生が多く分布する地域での干渉 SAR による地殻変動観測では、L-band の SAR が有利と考えられている。

この「だいち 2 号」は、先代の「だいち」に比べて空間解像度が高く(約 10m → 約 3m)、地表の変動を詳細に把握できるようになった。また、回帰周期が短く(46日 → 14日)、左右両方向の観測が可能となった(だいち は右観測のみ)ことから、観測機会が格段に増加し、事象が発生した際に迅速に対応できるようになった。

また、観測要求から実際の観測までの迅速性も向上している。2015年 5月29日に大規模な噴火を起こした口永良部島の事例では、9時54分の噴火の発生直後に緊急観測要求が行われ、噴火 3 時間後の 12時53分に観測が実施された(三浦ほか, 2016)。この観測データの解析結果は、噴火の翌日に開催された火山噴火予知連絡会に報告されており、現象発生から非常に短時間で情報が得られるようになってきている。このような特徴は、急激に進行することもある火山活動をモニターする上で非常に有用である。

3. 干渉 SAR による火山モニタリング

火山の地下でマグマの蓄積や移動が起これると、それに伴い地下に圧力変化が生じ地殻変動が発生する。我々は地下の様子を直接には知ることは出来ないが、地表に現れた変動の空間分布・規模を詳細に捉えることにより、地下でどのようなことが起きたのかを推定することができる。

火山周辺の地殻変動観測では、GNSS や傾斜計などの観測機器がこれまでよく用いられてきた。これらは、地殻変動を高い時間分解能で高精度に観測することができるが、現地に機器を設置する必要があること、機器を設置した地点の変動しか捉えられないことなどの弱点があった。

干渉 SAR は、時間分解能の点では GNSS 観測などに及ばないものの、観測範囲の地殻変動を高い空間分解能で面的に把握することができる。火口内など人が立ち入ることが危険な場所の地殻変動を把握することも可能なため、特に火山活動が活発化した場合などに

重要な観測手段である。2014年 9月27日の御嶽山の噴火の際には、「だいち 2 号」の干渉 SAR により噴火口付近の地殻変動が検出され(山田ほか, 2015)、火山噴火予知連絡会に報告された。

なお、干渉 SAR は様々な誤差要因の影響を受けるため、これらを低減するために様々な処理が必要となる。国土地理院での解析では、地形縞除去のための DEM として GSI10mDEHMJapan (飛田, 2009)、対流圏誤差の低減のために数値気象モデルを用いた対流圏誤差低減処理(小林ほか, 2014)、軌道誤差等に起因する長波長の誤差の低減のために GEONET データを使用した GNSS 補正(飛田ほか, 2005)を適用している。本稿の干渉画像は全てこれらを適用したものである。

4. だいち 2 号の干渉 SAR で見た火山の地殻変動

4.1. 箱根山

箱根山では、2015年 4月26日から大涌谷付近を震源とする火山性地震が増加するなど、火山活動が活発となった。傾斜計で変動が捉えられたことや蒸気の噴出の活発化、周辺の GNSS で変動が観測されるなど、様々な観測データが火山活動の活発化を示したことから、地殻変動の把握を目的として、箱根山を対象としてだいち 2 号による緊急観測が計画された。

だいち 2 号が 5月 7日に観測したデータを解析した結果、大涌谷内の直径 200m 程度の狭い範囲で地殻変動が検出された。衛星に近づく向きの変位で、変動域の中心では最大約 6 cm の変位量であった(図 1(a))。変動範囲が直径 200m 程度と狭いことから、大涌谷の地下数百 m 程度の浅い場所で膨張が生じたと推測される。これらの情報は火山噴火予知連絡会や箱根火山対策協議会に提供され、立ち入り規制や噴火警戒レベルの設定の判断材料として活用された。なお、活動が活発化する以前の 4月17日までのデータでは、ノイズレベルを超える変動は見られなかったことから、検出された変動は 4月17日以降に生じており、おそらく火山性地震の活発化に伴って生じたと考えられる。

その後もだいち 2 号による観測が継続的に行われ、地殻変動の時空間変化が捉えられた(図 1)。変動範囲には大きな変化はないものの、5月 7日以降は変動の中心がやや南西側に移動した。5月中は 1 回帰(14日)で 10cm を超える変動を示していたが、6月に入ってから 5 cm 程度と少し小さくなった(図 2)。地殻変

図1. だいち2号の干渉 SAR で捉えられた箱根山・大涌谷における地殻変動。

(a)~(d): 火山活動活性化後から噴火前までの期間, (e): 噴火を挟む期間, (f)~(g): 噴火後。(口絵カラー)

図2. 箱根山・大涌谷の変動域における累積変動量の推移

動が少し落ち着きを見せていた中、6月29日にごく小さな噴火が発生し、再び大きな変動が生じた(図1(e))。噴火地点は図1に示されている赤丸の最も南にあたる場所で、噴火前の変動量が最大となった地点の近傍であり、だいち2号の干渉 SAR が噴火地点の予測に役立ったといえる。

6月29日の噴火以降は、噴火口周辺で衛星から遠ざかる変位が継続して見られ、収縮が進んでいることが

わかる。大涌谷では噴火後も噴気活動が活発なため、現地への立ち入りが困難な状況であり、そのような中で得られた地殻変動は貴重な情報となっている。

4.2. 桜 島

桜島では、2015年8月15日に島内を震源とする地震が多発し、桜島島内に設置している傾斜計および伸縮計で山体膨張を示す急激な地殻変動が観測されたことから、規模の大きな噴火が発生する可能性が高くなっているとして、噴火警戒レベルが3（入山規制）から4（避難準備）に引き上げられた。

この火山活動について、だいち2号による観測が行われた。観測は南行軌道および北行軌道、また右側観測に加えて左側観測も実施され、4方向からの観測データが得られた。

これらの観測の結果、8月15日を挟む期間では顕著な変動が捉えられた。北行軌道の左方向観測（2015年1月4日～8月16日）および南行軌道の左方向観測（2015年7月6日～8月17日）の結果を図3(a), (b)に示す。なお、表紙の画像は南行軌道からの右側観測(2015

図3．だいち2号の干渉SARで捉えられた桜島の地殻変動。
(a)2015年1月4日～8月16日, (b)2015年7月6日～8月17日, (c)2015年8月17日～8月31日。(口絵カラー)

図4．桜島の地殻変動から推定された変動源モデル。
(a)だいち2号の干渉SARで捉えられた地殻変動, (b)モデルから計算される変動量, (c)モデルの模式図。

年8月10日～8月24日)の解析結果であり、こちらも地殻変動が明瞭に捉えられている。昭和火口の東側を中心として衛星に近づく変位が見られ、この付近の地下で体積増加が生じたことが推測される。

だいち2号の干渉SARおよびGNSS観測により得られた地殻変動に基づき、変動源のモデル推定を行った。その結果、昭和火口の直下約1kmを上端としてマグマが貫入し、約 $1.8 \times 10^6 \text{m}^3$ の体積増加があったと推定された(国土地理院地理地殻活動研究センター地殻変動研究室, 2015)(図4)。

なお、この地殻変動は8月17日以降では見られなかった(図3(c))ことから、その後は新たな貫入は生じなかったと考えられる。これらの結果は火山噴火予知連絡会における検討に活用され、特に後者の結果は9月1日に噴火警戒レベルを4から3へ引き下げの際の根拠の一つとなるなど、重要な役割を果たした。

4.3. 定常的なモニタリング

火山活動に伴う地殻変動は、箱根山や桜島の事例のように急激に進行するものばかりではなく、数か月から数年の時間スケールで緩やかに変化を示す事例もしばしばみられる。そのため、定常的な観測も重要である。

火山活動の顕著な活発化は見られないものの、2014年から2015年にかけて活動度がやや高い状態で推移した十勝岳では、GNSS観測により山体がわずかに膨張するような地殻変動が検出されていた(国土地理院, 2015など)。しかし、変動の空間分布などの詳細な情報は十分には得られていなかった。このような背景の下、だいち2号のSAR干渉解析を行った結果、十勝岳の62-II火口付近の直径1km程度の局所的な変動が捉えられた(図5)。地下の浅い場所で膨張が生じていたと考えられる。GNSS観測のみでは把握できなかった変動源についての情報が、干渉SARを加えることで得られたといえる。

5. まとめ

「だいち2号」に搭載されているSARは、初代の「だいち」と比較して、解像度や観測頻度、観測の迅速性が向上しており、干渉SARによる火山活動のモニタリングでの活用が期待されている。

この「だいち2号」は、2014年5月の打ち上げ以来、御嶽山の噴火に伴う地殻変動の検出をはじめとして、箱根山や桜島の火山活動活発化に伴う地殻変動を明らかにするなど、これまでに火山活動のモニタリングにおいて様々な成果を上げてきている。

図5. だいち2号の干渉SARで捉えられた十勝岳の62-II火口付近の地殻変動

このように火山活動モニタリングの上で重要な「だいち2号」であるが、設計寿命は5年（目標7年）となっている。平成27年1月に改定された宇宙基本計画には、「だいち2号」の後継機として先進レーダ衛星が記載されており、平成28年度（2016年度）をめどに開発に着手し、平成32年度（2020年度）をめどに運用を開始するとされている。

火山活動のモニタリングには継続的な観測が重要である。火山活動による被害軽減のために切れ目なく継続的に観測が行えるよう、「だいち2号」が設計寿命の目標の7年まで問題なく稼働し、後継の先進レーダ衛星が基本計画通りに打ち上げられることを期待したい。

謝 辞

本稿で使用した「だいち2号」データの所有権は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)にある。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の提供および「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ある。干渉SAR解析で用いられた数値気象モデルは、「国土地理院と気象庁とのオンラインによる防災情報の相互交換に関する協定」に基づき、気象庁から提供されたものである。

参考文献

- 国土地理院地理地殻活動研究センター地殻変動研究室, 2015. 桜島の火山活動に伴う地殻変動について. <http://www.gsi.go.jp/cais/topic150818-index.html> (accessed 15 Jan. 2016).
- 国土地理院, 2015. 平成27年8月の地殻変動について. <http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2015-goudou0908.html> (accessed 15 Jan. 2016).
- 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.
- 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, 109-110.
- 飛田幹男, 宗包浩志, 松坂 茂, 加藤 敏, 矢来博司, 村上 亮, 藤原 智, 中川弘之, 小澤 拓, 2005. 干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究. 国土地理院時報, 106, 37-49.
- 三浦優司, 和田弘人, 仲井博之, 山中雅之, 山田晋也, 攪上泰亮, 上芝晴香, 矢来博司, 小林知勝, 森下 遊, 2016. だいち2号を活用した口永良部島新岳噴火に伴う地表変位の検出. 国土地理院時報, 128, 印刷中.
- 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, 11-15.