

だいち 2号 SAR 干渉解析によって検出された箱根山・大涌谷内の地表変動 Ground surface deformation at Owakudani on Hakone Volcano detected with InSAR using ALOS-2 data

測地部 山田晋也・三浦優司・山中雅之・仲井博之・和田弘人・攪上泰亮・上芝晴香
Geodetic Department Shinya YAMADA, Yuji MIURA, Masayuki YAMANAKA,
Hiroyuki NAKAI, Kozin WADA, Yasuaki KAKIAGE and Haruka UESHIBA
地理地殻活動研究センター 矢来博司・小林知勝・森下遊
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Hiroshi YARAI, Tomokazu KOBAYASHI and Yu MORISHITA

要旨

国土地理院は、宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」という。）が運用する陸域観測技術衛星「だいち 2号」のデータを用いて、地表面の変動を干渉 SAR により検出する取組を実施している。だいち 2号は、高分解能モードで全国を網羅する定常的な観測を実施しているほか、火山活動の活発化などの緊急時には災害状況把握のための緊急観測を行う。

2015年4月下旬から箱根山の火山活動が活発化したことに伴い、5月7日にだいち 2号による緊急観測が行われた。国土地理院が解析した結果、大涌谷内のごく狭い範囲内で地面の変動が検出された。その後も変動の推移を把握するため、8月下旬頃まで平均週 1 回ペースでの高頻度な観測が実施された。国土地理院では、観測後速やかに SAR 干渉解析を実施し、長期間にわたり直径 200m 程度の範囲内における変動を高頻度に検出した。火山活動の活発化からごく小規模な噴火を経て停滞するまでの一連の変動とその速度の変化を高頻度に捉えたことは、これまでにない画期的な事例であった。

解析結果は、火山噴火予知連絡会や箱根火山防災協議会などに情報提供を行い、立ち入り規制等の判断材料として活用された。また、地理院地図を通して画像を閲覧できる形式でウェブサイトにて解析結果を掲載した。

1. はじめに

「SAR」とは、合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar) の略で、合成開口と呼ばれる技術により空間分解能を高めたマイクロ波レーダーである。SAR は、人工衛星や航空機などに搭載されたセンサから地上に向かってマイクロ波を斜め下に照射し、地表からの反射波を受信する。SAR によりある地域を複数回観測し、反射波の位相差を計算することによって衛星-地表間の距離の変化を求める手法を「干渉 SAR」という（なお、本稿では、干渉 SAR の結果を得るための解析のことを「SAR 干渉解析」という。）

(図-1)。SAR 干渉解析によって、観測期間中に生

じた地表面の変動を面的に計測し、火山活動、地震、地盤沈下、地すべりといった現象によって生じた地表面の変動の検出に活用することができる。

国土地理院では、これまでに SAR を搭載した人工衛星である「ふよう 1号 (運用期間：1992年～1998年)」や「だいち (運用期間：2006年～2011年)」のデータを用いて、地表面の変動を捉えてきた。現在は、2014年5月に打ち上げられただいち 2号のデータを用いて、全国を対象とした SAR 干渉解析を行っている。

2015年4月下旬から箱根山で火山性地震が増加する等の火山活動の活発化が見られ、5月6日には噴火警戒レベルが1から2に引き上げられた。(気象庁, 2015)。火山活動が活発化したことを受けて、だいち 2号による緊急観測が5月7日から繰り返し行われた。国土地理院では、観測されたデータを用いて SAR 干渉解析を行い、その結果を関係機関に提供すると共に、ウェブサイト (国土地理院, 2015a) で公表した。

本稿では、だいち 2号のデータを用いた SAR 干渉解析によって明らかになった箱根山・大涌谷内の地表面の変動とその時間推移について報告する。

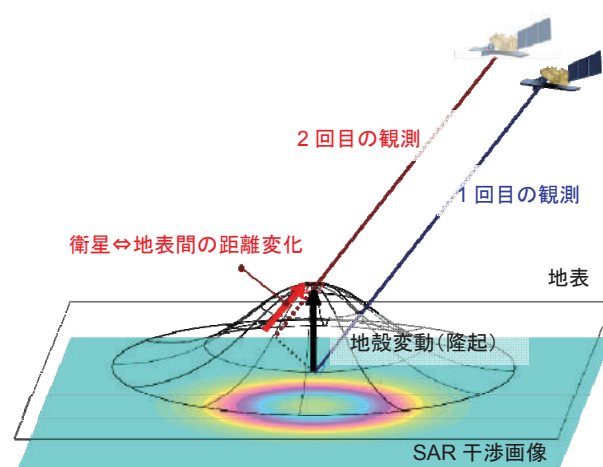


図-1 干渉 SAR の原理

2. だいち 2 号による緊急観測

だいち 2 号は、だいちの後継機として 2014 年 8 月から定常的な観測を開始し、2014 年 11 月からデータの定常配布が始まった。だいち 2 号の主な性能は表-1 のとおりである。

表-1 だいち 2 号とだいちの主な性能

	だいち2号	だいち
1) 回帰日数	14日	46日
2) 空間分解能	3m	10m
3) 観測方向	左右可能	右のみ
4) 垂直基線長	1km以内	最長10km超

だいち 2 号はだいちに比べ、

- 1) 回帰日数が短くなり、観測頻度が増加
- 2) 空間分解能が向上
- 3) 観測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) 衛星の軌道が安定したことで垂直基線長 (2 回の観測間の衛星の位置のずれのことで、短いほど SAR 干渉解析には好条件) が短くなり、SAR 干渉解析が可能なデータの組み合わせが増加といった点で性能が向上し、災害発生時の初動対応としての緊急観測がより迅速に行えるようになった。また、必要に応じて同じ場所をより短期間で高頻度に観測を行うことができるようになった。

火山活動が活発化した場合には、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。) からだいち 2 号を運用する JAXA に対して緊急観測を要望することができる。JAXA は観測の可能性を検討し、可能であると判断した場合は緊急観測を実施し、データを火山 WG に参加する機関に提供する。火山 WG には国土地理院も参加しており、必要なデータの提供を受けることと災害発生時の緊急観測を提案することができる。

今回の箱根山の火山活動の活発化に際して、国土地理院からの提案に基づき、火山 WG から JAXA に観測要求を提出し、だいち 2 号による緊急観測が繰り返し行われた。

3. 箱根山の SAR 干渉解析

箱根山の火山活動の活発化に際し、衛星進行方向、観測方向、入射角の異なる 5 つの観測条件 (表-2) を組み合わせることにより、これまではない高頻度な観測が行われた (表-3)。1 つの観測条件のみしか用いない場合、回帰日数である 14 日に 1 回の観測しかできないが、5 つの観測条件を組み合わせることによって、5 月から 8 月にかけて、平均で 1 週間に 1 回の頻度で観測が実施され、特に 5 月は、3~6

日に 1 回という高い頻度で観測が実施された。国土地理院では、観測の実施後、速やかに SAR 干渉解析を実施し、その結果を防災関係機関と提供するとともにウェブサイト公表した。SAR 干渉解析を行った結果は、観測条件毎に図-2 から図-6 に示す。SAR 干渉解析で計算される変動量は、衛星と地表を結ぶ衛星視線方向の変動を表し、観測条件が異なると衛星視線方向も異なることから、観測条件毎に結果の画像を示している。

表-2 観測条件

観測条件	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
衛星進行方向	南行	北行	北行	南行	南行
観測方向	右	右	右	左	右
入射角※	43°	33°	43°	46°	33°

※入射角は解析画像の中心位置での値を示している。

なお、SAR 干渉解析においては、国土地理院で開発したソフトウェア「新 GSISAR」を用いた。地形による干渉縞を除去するための標高データ (DEM) は「GSI10mDEHMJapan」(飛田, 2009) を用いた。また、大気中の水蒸気遅延による誤差を低減するため、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) を適用し、衛星の軌道誤差等に起因する長波長の誤差を低減するため、GNSS 観測のデータを使用した補正を適用した (飛田ほか, 2005)。

3.1 箱根山・大涌谷での変動の検出

箱根山では、2015 年 4 月 26 日以降に火山性地震が増加し、傾斜計や体積ひずみ計で火山活動に伴う変動が観測された。また、5 月 3 日から大涌谷の温泉供給施設で蒸気が勢いよく噴出していることが確認され、5 月 6 日には箱根山の噴火警戒レベルが 1 から 2 に引き上げられた (気象庁, 2015)。上記の火山活動の活発化に伴い、火山 WG から観測要求を JAXA に提出し、2015 年 5 月 7 日にだいち 2 号による緊急観測が実施された。

観測された 2015 年 5 月 7 日のデータを用いて SAR 干渉解析を実施したところ、大涌谷の直径 200m 程度の非常に狭い範囲で衛星に近づく変動が検出された (図-2 (B))。一方、2015 年 4 月 17 日までの SAR 干渉解析結果である図-4 (A) では、大涌谷周辺においてノイズレベルを超える変動は見られていない。したがって、大涌谷内の直径 200m 程度の範囲において変動が現れたのは、2015 年 4 月 17 日から 2015 年 5 月 7 日までの間であり、SAR 干渉解析によって 2015 年 5 月 7 日に検出された大涌谷内の変動は、4 月 26 日以降に始まった箱根山の火山活動の活発化

表-3 箱根山の解析ペア一覧

解析ペアの番号 (A~U) は、2 回目観測日の日付順

(変動量は衛星に近づく変動がプラス、衛星から遠ざかる変動がマイナス)

解析ペア	1 回目観測日	2 回目観測日	間隔	観測条件	最大変動量
A	2014/12/12	2015/4/17	126 日	(3)	ノイズレベル
B	2014/10/9	2015/5/7	210 日	(1)	+6cm
C	2015/3/1	2015/5/10	70 日	(2)	+8cm
D	2015/4/17	2015/5/15	28 日	(3)	+12cm
E	2015/5/7	2015/5/21	14 日	(1)	+15cm
F	2015/5/10	2015/5/24	14 日	(2)	+12cm
G	2015/5/21	2015/6/4	14 日	(1)	+10cm
H	2015/5/24	2015/6/7	14 日	(2)	+7cm
I	2015/6/4	2015/6/18	14 日	(1)	+3cm
J	2015/6/18	2015/7/2	14 日	(1)	+7cm
K	2015/6/7	2015/7/5	28 日	(2)	+8cm
L	2015/5/15	2015/7/10	56 日	(3)	+12cm
M	2015/7/2	2015/7/16	14 日	(1)	-3cm
N	2015/7/10	2015/7/24	14 日	(3)	ノイズレベル
O	2015/5/28	2015/8/6	70 日	(4)	+12cm
P	2015/8/6	2015/8/20	14 日	(4)	ノイズレベル
Q	2015/7/16	2015/8/27	42 日	(1)	-3cm
R	2015/8/27	2015/10/22	56 日	(1)	-4cm
S	2015/7/5	2015/11/8	126 日	(2)	-11cm
T	2015/9/1	2015/11/10	70 日	(5)	-4cm
U	2015/10/22	2016/1/14	84 日	(1)	-4cm

に伴う変動であると考えられる。

大涌谷周辺への立入規制が 5 月 6 日から行われたことから、ごく狭い範囲の変動を監視するための近傍での地上観測が困難であった。それに対して、人工衛星を利用した干渉 SAR は、局所的な変動の検出に優れており (たとえば、藤原ほか, 2005), 上空から定期的に観測することができる。上記の理由から、だいち 2 号による観測はこれまでになく高頻度を実施され、赤丸で囲まれている大涌谷内の直径 200m 程度の非常に狭い範囲で、地表面の変動を継続的に検出した (図-2 (B) (E) (G), 図-3 (C) (F) (H), 図-4 (D))。

2015 年 5 月 7 日までの解析結果 (図-2 (B)) では、赤丸内の中心付近に変動量の最大の位置があったが、2015 年 5 月 15 日までの解析結果である図-3 (C), 図-4 (D) には、赤丸内の中心付近と南西付近の 2 ヶ所に変動のピークが現れた。その後、変動の最大の位置は赤丸内の南西付近のみとなり (図-2 (E) (G), 図-3 (F) (H)), 変動の最大の場所が火山活動の変化とともに赤丸内の南西側に移り、その付近で衛星に近づく変動が継続した。また、6 月末の噴火前の解析結果 (図-2 (I)) では、一時的に赤丸の範囲での変動がおさまる傾向がみられた。

6 月 30 日に大涌谷で新たな火口 (15-1 火口) が現地調査により確認され、火山灰の堆積による噴気孔の盛り上がりが見られたことなどから、6 月 29 日夜から 6 月 30 日にかけてごく小規模な噴火が発生したと判断された (気象庁, 2015)。ごく小規模な噴火が発生した 6 月末を挟んだデータを用いた SAR 干渉解析では、継続的に変動が見られた赤丸の南側に非干渉の範囲が見られた (図-2 (J), 図-3 (K), 図-4 (L), 図-5 (O) の青丸, 青丸の直径は 100m 程度)。青丸の範囲は何らかの原因で地表の状態が変化したと考えられ、噴気孔の形成や噴出物の堆積を示唆している。図-7 は、新たに確認された 15-1 火口の位置と変動の見られた大涌谷内の直径 200m 程度の範囲との関係を示したものである。15-1 火口は、SAR 干渉解析での変動量が最も大きい領域と、変動が見られない領域の境界である赤丸の線上に位置している。これは大涌谷周辺の地下の圧力増加に伴う地表の変動が赤丸の領域内で累積したことによって、赤丸の境界付近の地表でひずみが生じ、脆弱な場所で火口が形成された可能性を示唆している。

6 月末の噴火後の解析結果では、衛星から遠ざかる収縮性の変動が継続して観測された (図-2 (M) (Q) (R) (U), 図-3 (S), 図-6 (T))。これは、噴火に

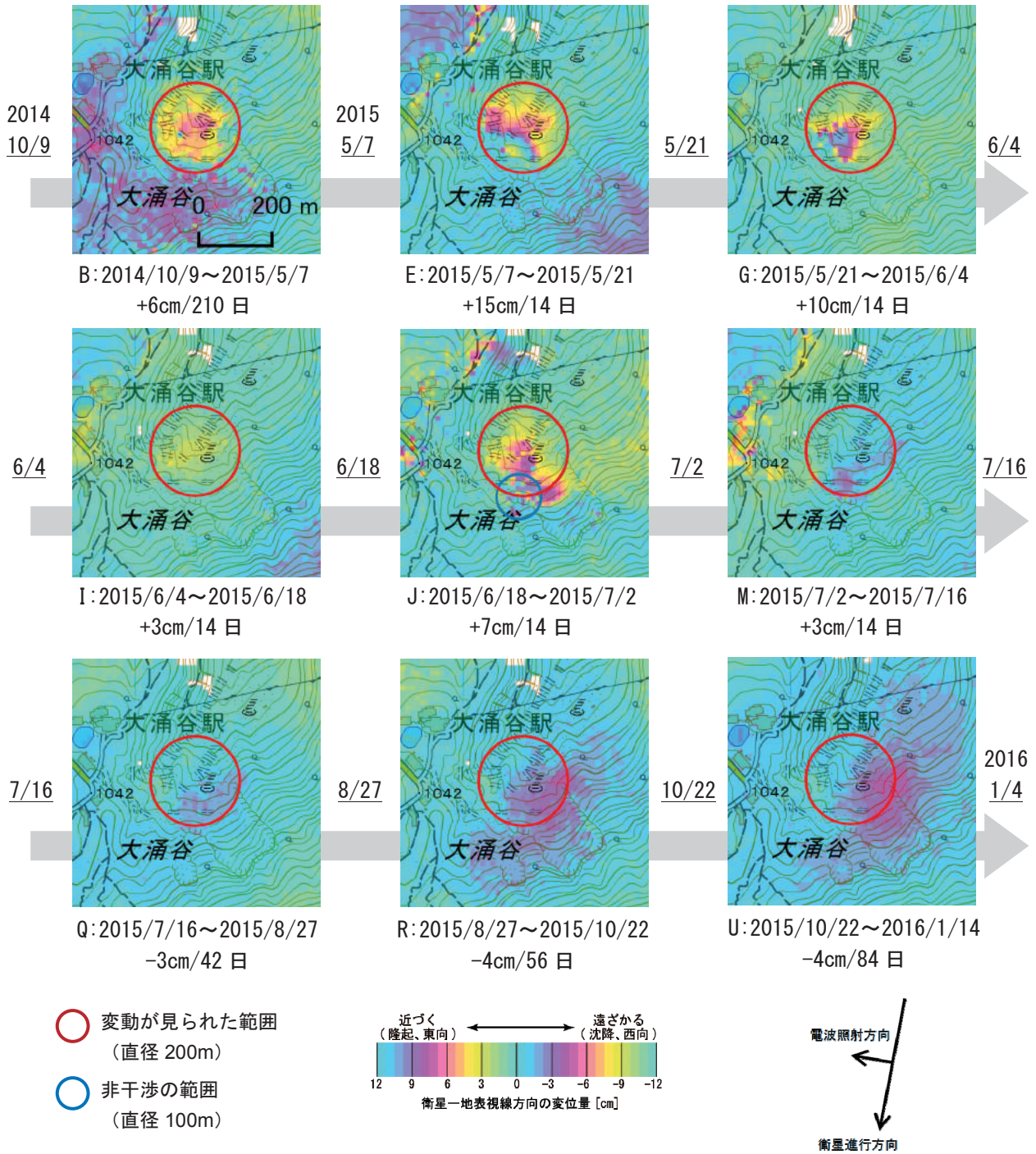


図-2 箱根山の SAR 干渉解析 観測条件 (1)

各図において、距離は図の中の最大変動量を、日数は 2 回の観測の間隔を表す
(変動量は衛星に近づく変動がプラス、衛星から遠ざかる変動がマイナス)

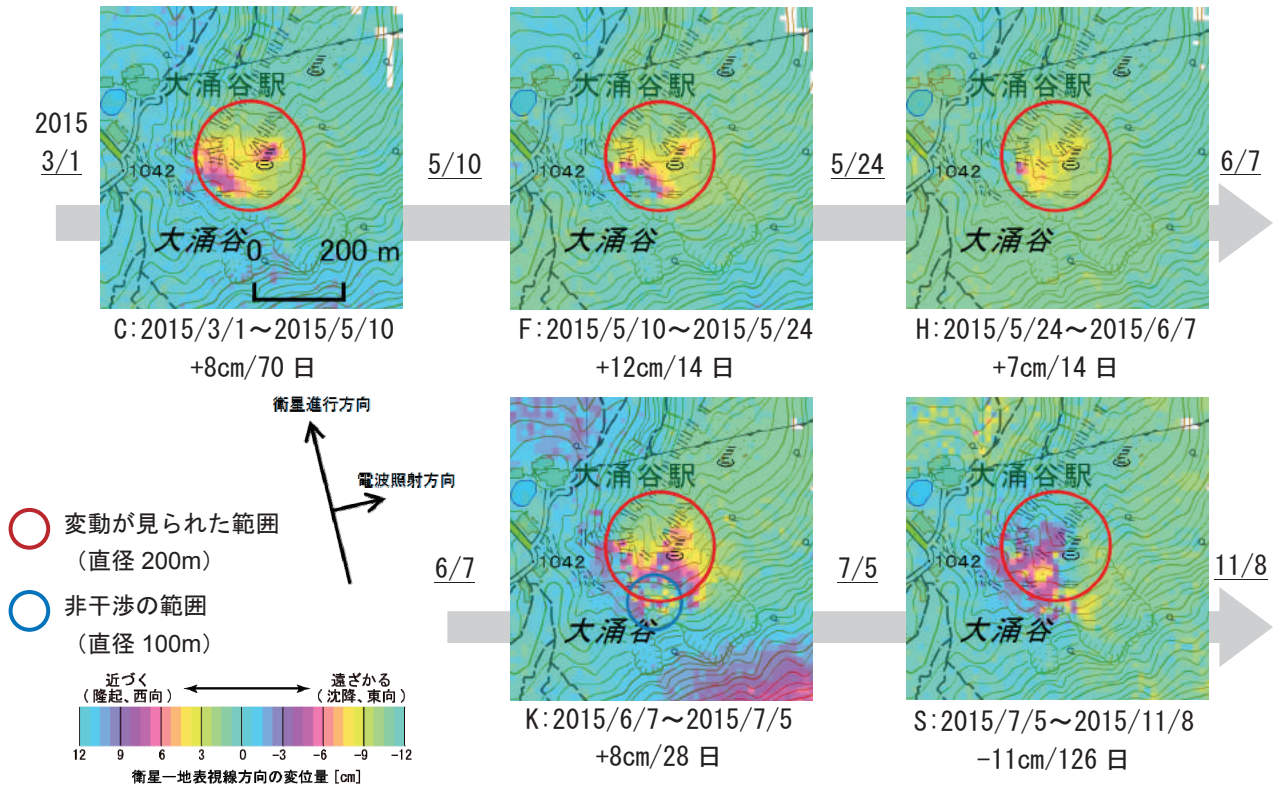


図-3 箱根山の SAR 干渉解析 観測条件 (2)

各図において、距離は図の中の最大変動量を、日数は 2 回の観測の間隔を表す
(変動量は衛星に近づく変動がプラス、衛星から遠ざかる変動がマイナス)

に伴い水蒸気やガスの通り道ができ、地中内部にたまった圧力が解放されたことによると考えられる。実際、ごく小規模な噴火後、火山性地震は少ない状態で経過し、GNSS 連続観測でみられていた山体膨張は停滞している (気象庁, 2015)。2015 年 9 月 11 日に箱根山の噴火警戒レベルが 3 から 2 に、2015 年 11 月 20 日に 2 から 1 に引き下げが行われ、2015 年 5 月 6 日以来、約 7 か月ぶりに平常レベルに戻った。

3.2 累積変動量の推定

3 回以上観測が行われた表-2 の観測条件 (1), (2), (3) について、累積変動量の推定を行い、一連の火山活動の推移に伴う変動の定量的な評価を試みた。これまでの解析画像から最大変動量を読み取り、時系列ごとに累積する計算を行った。ただし、読み取った最大変動量の値は衛星視線方向の変動の値であり、方向はそれぞれの観測条件で異なることから、大涌谷内においては水平方向の変位が十分小さいと仮定し、鉛直方向に変換して累積させた。なお、観測条件 (4), (5) については、噴火前後 1 か月に観測がないことから評価の対象から除外した。

図-8 にそれぞれの観測条件についての累積計算の結果を示す。各画像において最大の変動が生じた場所はそれぞれ異なるので、図-8 の累積変動量は赤丸

内の特定の場所における累積の変動量ではなく、各解析において赤丸内での最大変動量を累積させた値であり、赤丸内全体で現れうる最大の変動量を表している。観測条件 (1) については最初の観測が行われた 2014 年 10 月 9 日を基準として鉛直方向の累積変動量を示している。また、観測条件 (2), (3) については、変動の傾向の比較のため、ごく小規模な噴火後の最初の観測で、累積変動量が同じ値になるように調整している。

まず、最も多く観測が行われた観測条件 (1) について見ると、火山活動が活発化した 5 月以降、衛星に近づく膨張性の変動が加速していることが分かる。その後ごく小規模な噴火が発生し、衛星に近づく膨張性の変動は頭打ちとなった。なお、赤丸内の鉛直方向の累積変動量は、最大約 56cm である。また、噴火後は、衛星から遠ざかる収縮性の変動が見られ、変動のトレンドが噴火前後で変わったことを示している。変動の速度は噴火前の膨張性の変動と比較すると小さい。また、この収縮傾向について最新の観測結果である 2016 年 1 月 14 日まで変化は見られない。観測回数が条件 (1) よりも少ない条件 (2), (3) においても、変動の時間変化は、条件 (1) に概ね調和的であるといえる。

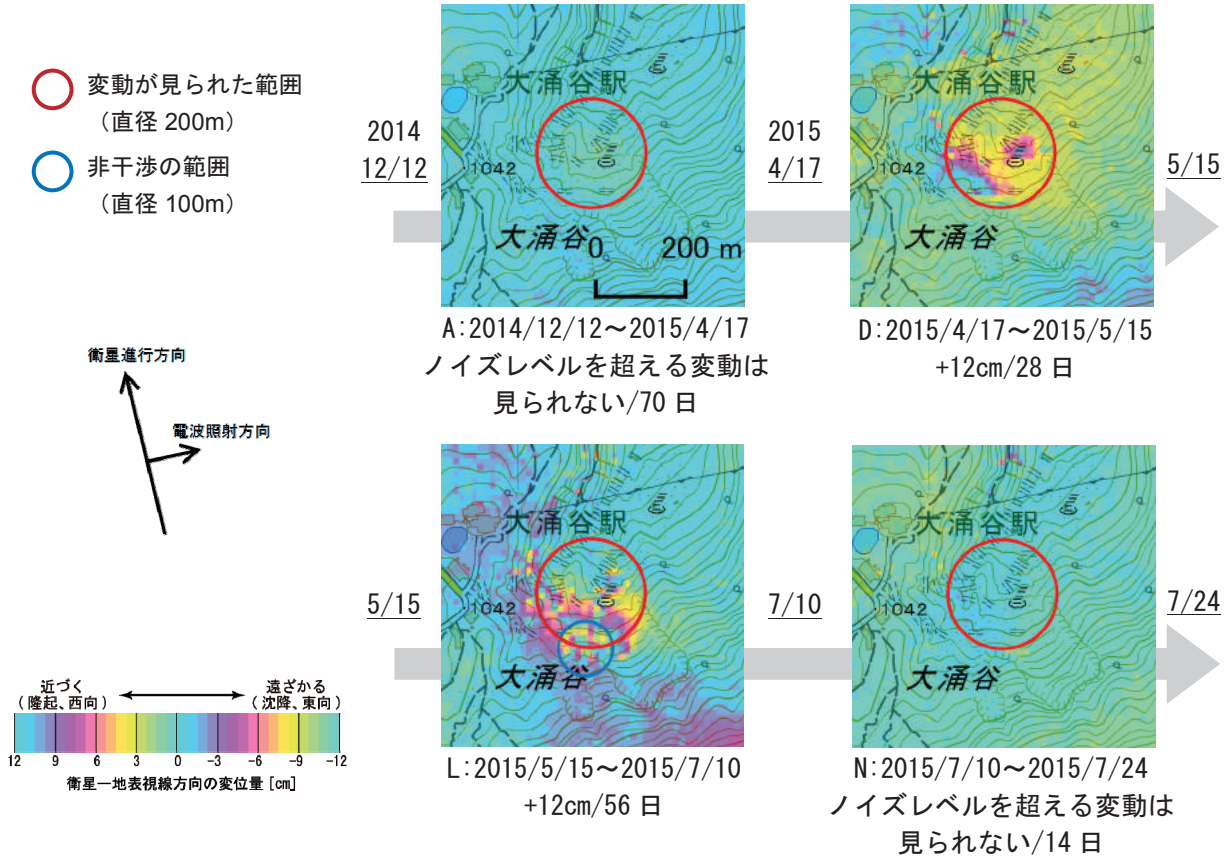


図-4 箱根山の SAR 干渉解析 観測条件 (3)

各図において、距離は図の中の最大変動量を、日数は 2 回の観測の間隔を表す (変動量は衛星に近づく変動がプラス、衛星から遠ざかる変動がマイナス)

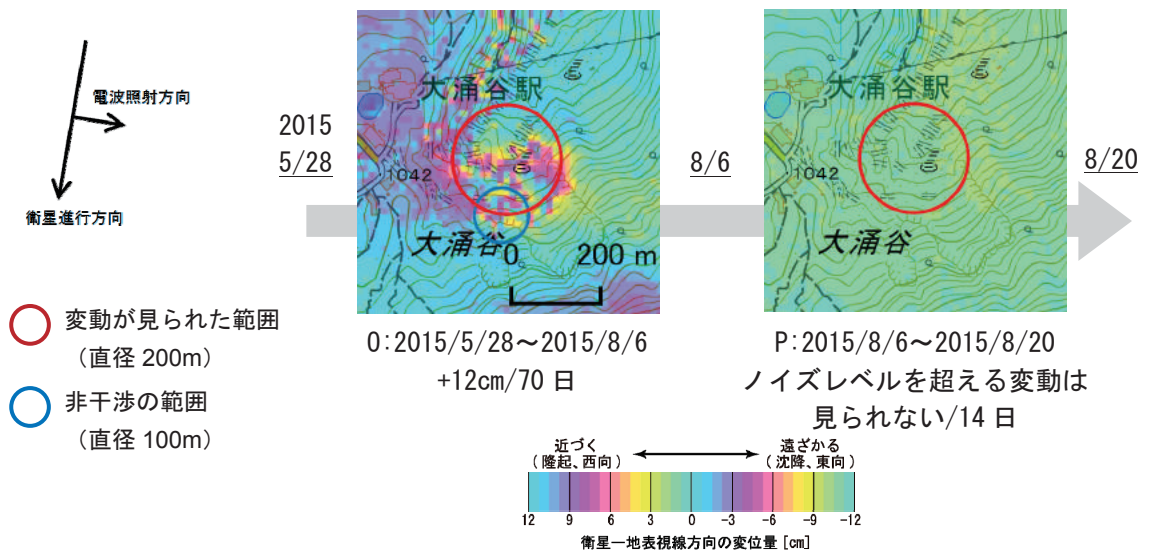


図-5 箱根山の SAR 干渉解析 観測条件 (4)

各図において、距離は図の中の最大変動量を、日数は 2 回の観測の間隔を表す (変動量は衛星に近づく変動がプラス、衛星から遠ざかる変動がマイナス)

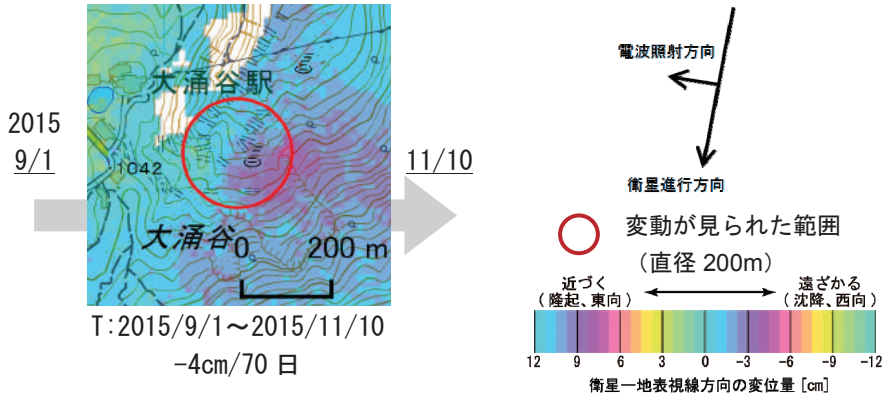


図-6 箱根山の SAR 干渉解析 観測条件 (5)

各図において、距離は図の中の最大変動量を、日数は 2 回の観測の間隔を表す (変動量は衛星に近づく変動がプラス、衛星から遠ざかる変動がマイナス)

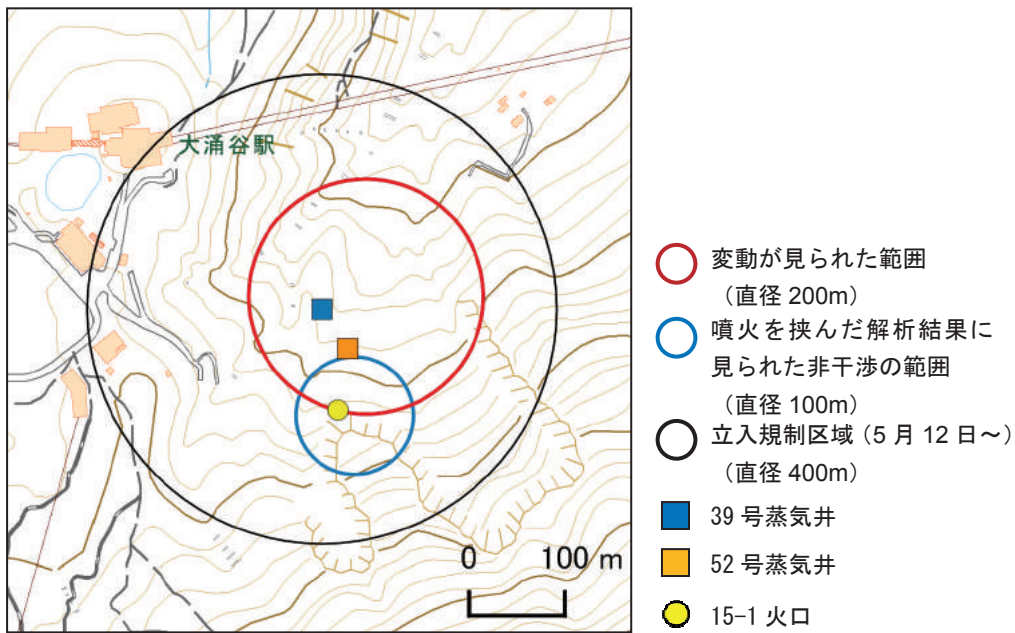


図-7 立入規制区域と蒸気井、火口の位置

(39号蒸気井、52号蒸気井、15-1火口の位置は、神奈川県温泉地学研究所(2015)を基に地図上に表示)

4. 情報の提供と防災への活用

2015年の箱根山の火山活動においては、箱根山周辺で地震活動が活発化し、国土地理院が連続的なGNSS測量を行っている電子基準点網(GEONET)の結果では、山体全体が膨張を示す地殻変動が検出されたが(国土地理院, 2015b)、実際に噴火が発生した大涌谷の数百mの範囲で変動の場所を特定できたのは、面的に監視をすることができる干渉SARのみであった。また、だいち2号の高頻度な観測により大涌谷周辺の局所的な変動とその時間的な推移を明瞭に捉えることができた。これまで、2011年の新燃岳の噴火(小林ほか, 2011)や、2014年御嶽山の噴火(山田ほか, 2015)など、噴火に伴う変動を捉えた例はあるものの、火山活動の活発化から噴

火を経て、活動が沈静化するという局所的な地表変動の時間推移を明らかにした例はこれまでになかった。このような成果が得られたのは、先代のだいちと比べて、回帰日数の短縮、分解能の向上、多彩な観測モードによる緊急観測といった、だいち2号の性能と運用能力が向上したことによるものである。

干渉SARにより得られた解析結果は、箱根火山防災協議会や火山噴火予知連絡会に提出し、立入規制や防災対策等の判断材料として活用された。箱根町は5月12日以降、温泉供給施設などの保守点検のための立入許可の条件として、39号蒸気井を中心とした直径400m以内には立ち入らないこととしており(箱根町, 2015)、これは変動が見られた赤丸の範囲も考慮されている(図-7)。また、国土地理院で提供

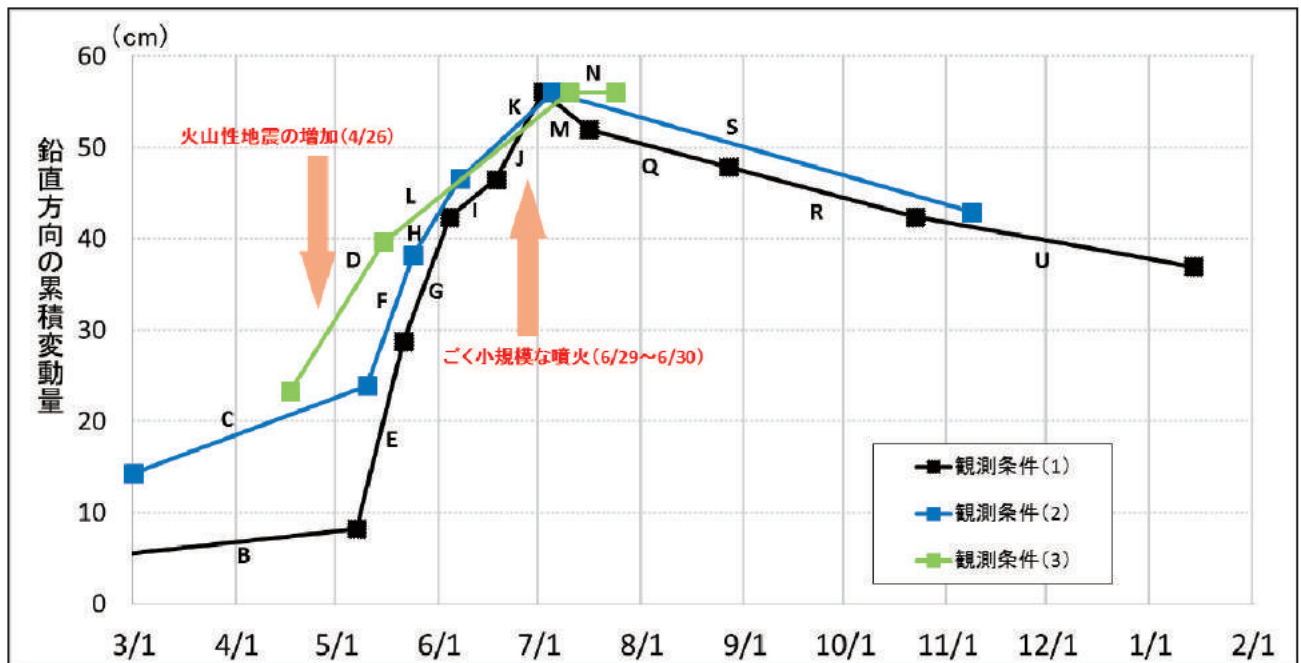


図-8 3つの観測条件における推定累積変動量

しているウェブ地図である「地理院地図 (<http://maps.gsi.go.jp/>)」を活用し、地形図と解析画像を重ね合わせて閲覧できる形式でウェブサイトに公表した。

5. まとめ

2015年における箱根山の活動活発化に対し、国土地理院でだいち2号によって観測されたデータを用いてSAR干渉解析を行った。大涌谷内のごく狭い範囲での地殻変動とその時間変化を噴火前から面的かつ高頻度に捉えられたことは、傾斜計やGNSS等の地上観測機器では捉えきれない局所的な変動を検出した貴重な事例となった。これは、だいち2号の高い性能と運用能力によって実現したことである。得られた解析結果は、箱根火山防災協議会や火山噴火予知連絡会に提供し、立ち入り規制区域を設定するなど、防災対策に役立てられた。

国土地理院は、だいち2号の定常観測のデータを使って全国を対象にしたSAR干渉解析を行ってお

り、災害発生時には緊急観測のデータを使って解析を行い、結果を公表している。今後も干渉SARで得られた地表面の変動情報を関係機関や住民に速やかに分かりやすく提供できるよう、検討を進めていきたい。

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。数値気象モデル及び気象庁GNSS観測点のデータは、「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ました。この場を借りて、御礼申し上げます。

(公開日：平成28年3月15日)

参考文献

- 藤原智, 仲井博之, 板橋昭房, 飛田幹男, 矢来博司 (2005): JERS-1 干渉 SAR による小空間スケール地表変位の検出, 測地学会誌, 51, No.4, 199-213.
- 箱根町 (2015): 規制区域への立入りの再開について, http://www.town.hakone.kanagawa.jp/hakone_j/content/000031108.pdf (accessed 29 Jan. 2016).
- 神奈川県温泉地学研究所 (2015): 2015年箱根山噴火の推移について, <http://www.onken.odawara.kanagawa.jp/files/Hakone2015/Hakone20151214.pdf> (accessed 29 Jan. 2016).
- 気象庁 (2015): 平成27年(2015年)の箱根山の火山活動, <http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/>

STOCK/monthly_v-act_doc/tokyo/2015y/315_15y.pdf (accessed 29 Jan. 2016).

国土地理院 (2015a) : 箱根山の火山活動に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/kikakuchousei/bousaichousei/h27-hakoneyama-index.html> (accessed 29 Jan. 2016).

国土地理院 (2015b) : 箱根山周辺の地殻変動, <http://www.gsi.go.jp/common/000110223.pdf> (accessed 29 Jan. 2016).

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.

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, <http://www.gsi.go.jp/common/000057644.pdf> (accessed 29 Jan. 2016).

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.

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.

