

干渉 SAR による 2015 年箱根火山の活動に伴う大涌谷の地表面変位

道家涼介*・原田昌武*・竹中 潤*

InSAR analysis of surface displacements in Owakudani associated with the 2015 Hakone Volcanic Activity

by

Ryosuke DOKE*, Masatake HARADA* and Jun TAKENAKA*

1. はじめに

箱根山では、2015 年 4 月下旬より地震活動が活発化し、それにともない傾斜計や GNSS により山体の膨張を示す地殻変動が観測された（板寺ほか、2015；原田ほか、2015）。5 月 3 日には、大涌谷の温泉供給施設（蒸気井）において噴気異常（暴噴）が認められ、5 月 6 日には噴火警戒レベルが 2 に引き上げられた。それ以後、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の地球観測衛星だいち 2 号（ALOS-2）搭載の合成開口レーダー（PALSAR-2）による緊急観測が 5 月 7 日以降、複数回実施された。その結果、大涌谷において、暴噴した蒸気井を含む領域が局所的に隆起していることが明らかとなった（例えば、小林ほか、2015）。6 月 29 日～7 月 1 日にかけては、この局所的な隆起域の極近傍で小規模な水蒸気噴火が発生し、新たに 4 つの火口が形成されたことが確認された（万年ほか、2015）。

箱根山では、過去に繰り返し群発地震活動が発生しているが、衛星搭載の合成開口レーダーによってその際の有意な地表面変位が確認されたことはない。今回と同様に蒸気井の暴噴現象が認められた 2001 年の活動や、それに次ぐ規模の活動であった 2013 年の活動時は、国産の衛星が切り替わる際の過渡期に当たり、観測自体が行われていなかった。また、2008～2009 年にかけて発生した群発地震活動は先代の衛星『だいち（ALOS）』の運用期間中であったが、同活動を挟む干渉ペアにおいては、これまでのところ有意な火山性の地殻変動は報告されておらず、また活動中の時間変化を追えるほどの高頻度の観測は行われていない。

ALOS-2/PALSAR-2 では、2015 年の活動の間、同一観測条件においては、最短 2 週間という頻度で緊急観測が実施されており、水蒸気噴火を含む期間中の地表面の変位について、時間を追って捉えることができた。これは、

箱根の火山活動のみならず、国内外の他の活火山を含め、極めて貴重な観測例と言える。本報告では、ALOS-2/PALSAR-2 データを使って、筆者らが独自に解析した結果から明らかとなった大涌谷の地表面変位の時空間変化を紹介する。

2. 使用データと解析方法

ALOS-2 による緊急観測は、噴火警戒レベルが 2 に引き上げられたことを受け、2015 年 5 月 7 日に最初に実施され、南行軌道・右観測のデータ（Path 18）が取得された。その後、北行軌道・右観測により異なる 2 つ観測条件のデータ（Path 125、126）が 5 月 10 日、5 月 15 日に取得されている。以降、これら 3 つの観測条件で、繰り返しデータの取得が行われた。Path 18 では、5 月 7 日以降、5 月 21 日、6 月 4 日、6 月 18 日、7 月 2 日、7 月 16 日、8 月 27 日に観測が行われ、また、Path 125 では、5 月 10 日以降、5 月 24 日、6 月 7 日、7 月 5 日に観測が行われた。Path 126 では、5 月 15 日以降、7 月 10 日、7 月 24 日に観測が行われた。さらに、群発地震発生以前に取得された、以上の 3 つと同じ観測条件のデータも存在する。また、群発地震発生中の 2015 年 5 月 28 日には、南行軌道・左観測（Path 25）によるデータが基本観測シナリオとして取得され、以降、8 月 6 日、8 月 20 日に同一条件のデータが緊急観測により取得されている。本報告では、以上の観測データを使用し、大涌谷における地表面変位を抽出した結果について紹介する。本研究で使用したデータについては、図 1 および表 1 に整理し、まとめてある。

なお、2015 年 9 月 1 日には、基本観測シナリオにより南行軌道・右観測（Path 19）のデータが取得されているが、本稿執筆時において干渉ペアとなる候補は 2014 年 12 月 23 日の 1 つのみである。したがって、大涌谷に

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 47 巻, 23-29, 2015

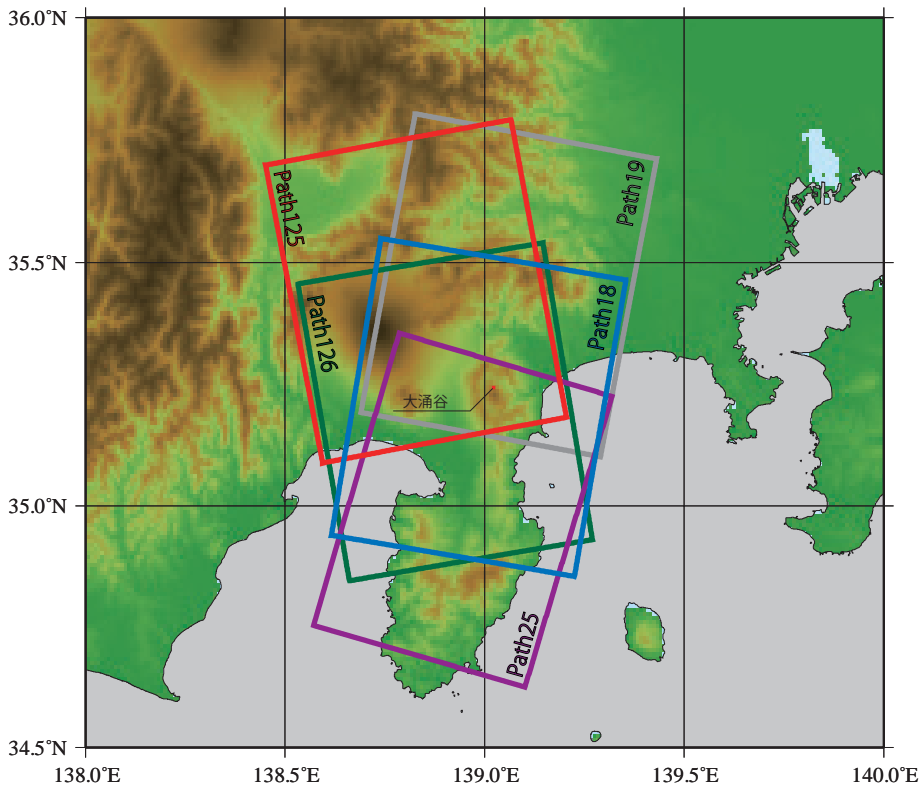


図1 本研究で使用した ALOS-2/PALSAR-2 データ。図示したフレームの範囲に対し、箱根火山が中心にくるよう衛星進行方向の前後にシーンシフトしたデータについても一部の Path で使用している。Path 19 (灰色) の解析結果については、本稿では言及しない。

表1 各 Path の概要および観測日。

観測Path	Path 18	Path 125	Path 126	Path 25
軌道・観測方向	南行軌道・右観測	北行軌道・右観測	北行軌道・右観測	南行軌道・左観測
オフナディア角	38.2°	29.1°	38.2°	40.6°
入射角(大涌谷付近)	42.8°	33.4°	43.6°	45.6°
観測日	2014/10/9	2014/12/21	2014/12/12	
		2015/3/1	2015/4/17	
	群発地震活動(2015/4/26~)の開始 大涌谷における蒸気井の暴噴(2015/5/3~)			
	2015/5/7	2015/5/10	2015/5/15	
	2015/5/21	2015/5/24		2015/5/28
	2015/6/4	2015/6/7		
	2015/6/18			
	水蒸気噴火の発生(2015/6/29~7/1)			
	2015/7/2	2015/7/5	2015/7/10	
	2015/7/16		2015/7/24	2015/8/6
	2015/8/27			2015/8/20

における地表面変位の時間変化を追うという本稿の論旨にそぐわないため、その解析結果について、ここでは言及しない。

データの解析には、防災科学技術研究所が開発した SAR 干渉解析ツール (RINC ver. 0.31) を使用し、4×4 ルックで解析を行った。解析の際、10m メッシュの楕円体高データを使用し、地形および衛星軌道による干渉縞をシミュレートし、その結果を初期干渉画像から差

し引き、差分 SAR 干渉画像を取得した。さらに、Baran et al. (2003) によるフィルタリング処理及び軌道間距離補正を行ったものを解析結果とした。地理座標への変換の際、楕円体高データの間隔に基づき、解析結果を 0.4×0.4 秒メッシュのデータへ変換した。なお、大涌谷における局所的な地表面変動の時間変化を比較するため、変位域の近傍で、変動の影響を受けていない地点として、暴噴した第 39 号蒸気井付近から N60E 方向に

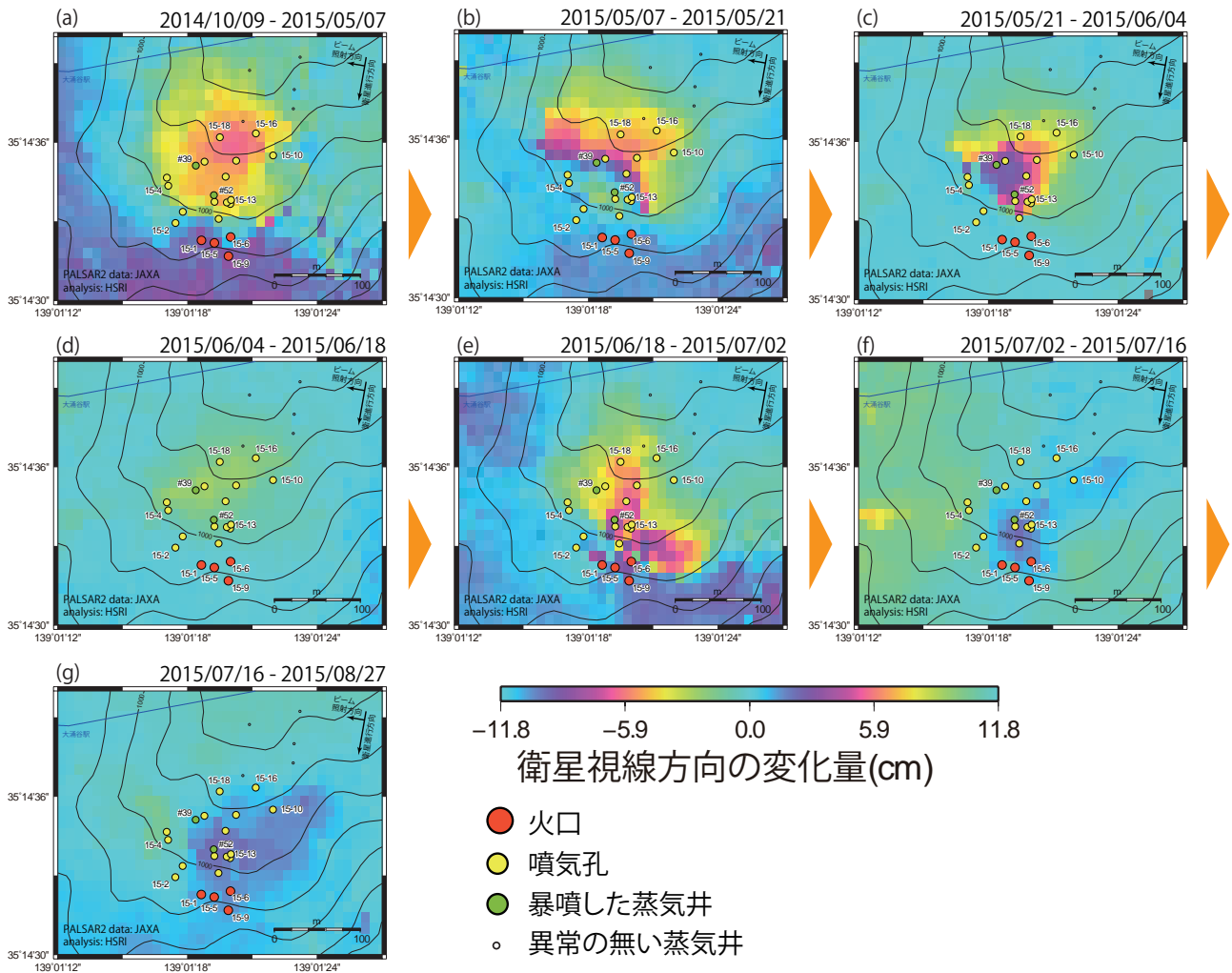


図2 Path 18 (南行軌道・右観測)における干渉 SAR 解析結果。オフナディア角は 38.2° 、大涌谷付近における入射角は 42.8° である。図中の等高線の間隔は 25m。青線は箱根ロープウェイの索道を示す。火口および噴気孔の位置は、神奈川県温泉地学研究所・伊豆ジオパーク推進協議会 (2015) による。凡例の正が衛星から遠ざかる変位 (水色→紫色→黄色の順に変化)、負が衛星に近づく変位 (水色→黄色→紫色の順に変化) を示す。カラースケールは位相を変位に直したものであるため、 $\pm 2\pi$ (±約 11.8cm) を超える変位が生じた場合は、同一のカラースケールを繰り返す。

200m の地点を不動とし、解析結果の描画および変位量の計測を行った。

3. 解析結果

3.1 Path 18 (南行軌道・右観測)

箱根火山における 2015 年の群発地震活動開始以降、最初に実施された緊急観測である 2015 年 5 月 7 日の観測では、2014 年 10 月 9 日に対し、大涌谷で直径約 200m、最大で衛星視線方向に約 6cm 近づく変位が観測された (図 2a)。この変位が生じた範囲には、5 月 3 日以降、暴噴が認められた第 39 号蒸気井も含まれる。その 2 週間後の 5 月 21 日、さらに 2 週間後の 6 月 4 日に実施さ

れた観測では、同範囲が継続して変位していることが確認され、その変位のピークは、変位域の南西部分に位置していることが認められた (図 2b, c)。このピーク付近においては、5 月 21 日の観測では、5 月 7 日に対し衛星視線方向に 13 ~ 14cm 近づく変位が観測された。さらに 6 月 4 日の観測では、5 月 21 日に対し衛星視線方向に 12 ~ 13cm 近づく変位が認められた。その後、6 月 18 日の観測では、6 月 4 日に対し衛星視線方向に近づく変位は 3 ~ 4cm 程度となり、変位に一時的な鈍化が認められた (図 2d)。

6 月 29 日に水蒸気噴火が発生し、7 月 2 日の観測では、再び衛星視線方向へ近づく変位が観測された (図 2e)。

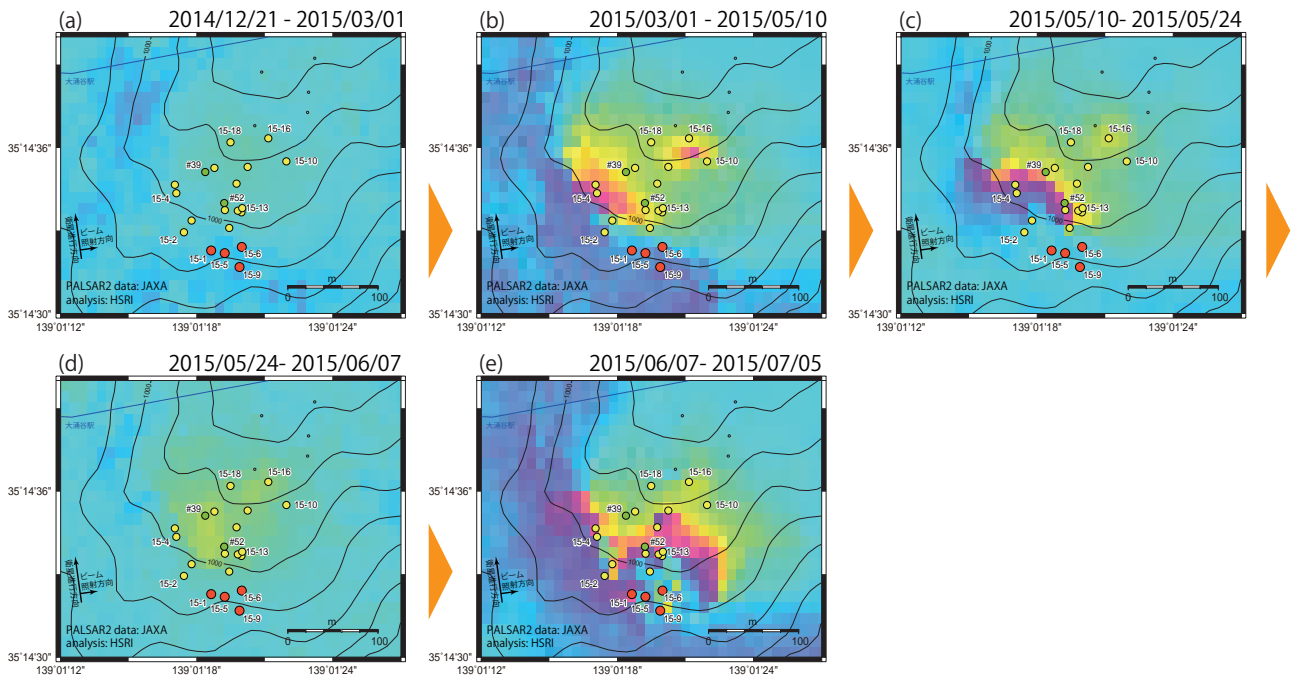


図3 Path 125 (北行軌道・右観測)における干渉 SAR 解析結果。オフナディア角は 29.1° 、大涌谷付近における入射角は 33.4° である。凡例については、図2および図4を参照。

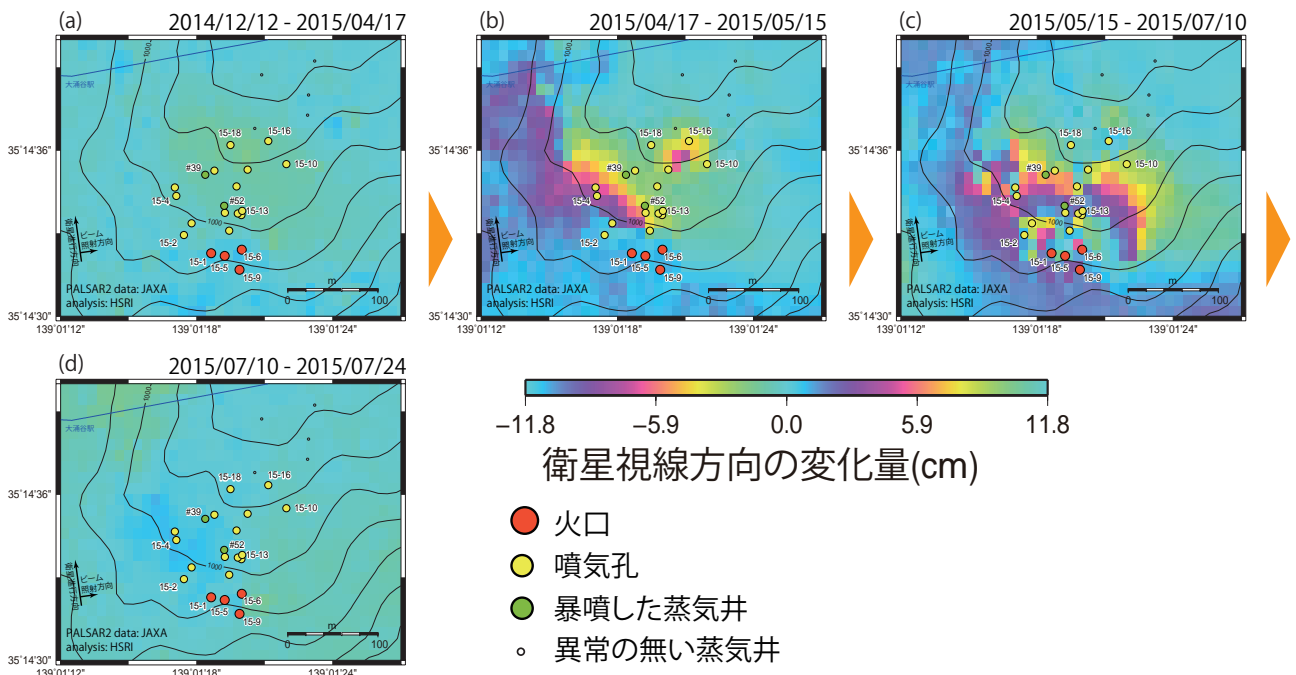


図4 Path 126 (北行軌道・右観測)における干渉 SAR 解析結果。オフナディア角は 38.2° 、大涌谷付近における入射角は 43.6° である。

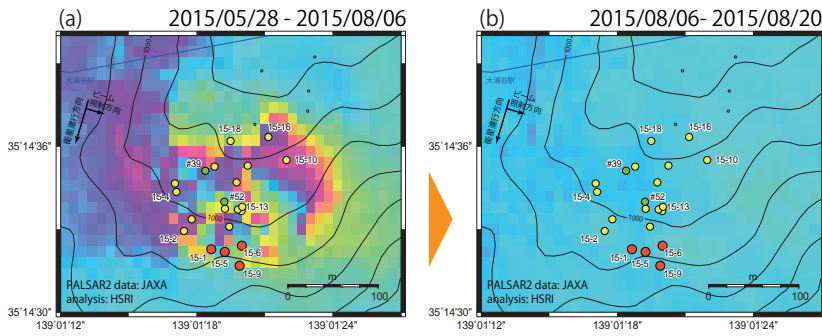


図5 Path 25 (南行軌道・左観測)における干渉 SAR 解析結果。オフナディア角は 40.6° 、大涌谷付近における入射角は 45.6° である。凡例については、図2および図4を参照。

その際の変位のピークは4つの火口が形成された箇所
の北側(第52号井付近)と東側(15-6火口の東)に
認められ、6月18日に対し最大で衛星視線方向に7~
8cm 近づく変位が観測された。なお、4つの火口が形成
された箇所では、干渉が悪くなっている様子も認められ
た。これは、噴出物の堆積などにより、地表面の様子が
大きく変化したことによると考えられる。

さらに2週間後の7月16日、その6週間後の8月27
日の観測では、火口周辺からやや北側にかけて、衛星か
ら遠ざかる方向の変位が観測された(図2f, g)。その
変位量は、7月16日の観測では7月2日に対し約2cm、
8月27日の観測では7月16日に対し2~3cm 程度であ
った。

3.2 Path 125 (北行軌道・右観測)

箱根火山における群発地震活動の開始以前の2015年
3月1日の観測では、2014年12月21日に対し有意な変
位は得られなかった(図3a)。

群発地震発生以後の5月10日、5月24日の観測では、
Path 18 同様、変位域の南西側に変位のピークを持つ衛
星視線方向へ近づく変位が確認された(図3b, c)。また、
北東側にも、直径40~60m 程のピークが認められた。
南西側のピークでは、5月10日の観測では3月1日に対
し7~8cm、5月24日の観測では5月10日に対し約
12cm の衛星視線方向へ近づく変位が認められた。また、
北東側のピークでは、5月10日の観測では3月1日に対
し約5cm、5月24日の観測では5月10日に対し3~
4cm の衛星視線方向へ近づく変位が認められた。その後、
6月7日の観測では、5月24日に対し衛星視線方向に近
づく変位は3~4cm 程度となり、変位に一時的な鈍化
が認められた(図3d)。

6月29日の水蒸気噴火後の7月5日の観測では、再
び衛星視線方向へ近づく変位が観測された(図3e)。そ
の際の変位のピークは火口の北~東側にかけての範囲で
あり、6月7日に対し最大で8~9cm の変位が認められ

た。また Path 18 同様、4つの火口が形成された箇所では、
干渉が悪くなっている様子も認められた。

3.3 Path 126 (北行軌道・右観測)

箱根火山における群発地震活動の開始以前の2015年
4月17日の観測では、2014年12月12日に対し有意な
変位は得られなかった(図4a)。

群発地震発生以後の5月15日の観測では、Path 125
同様、変位域の南西側に変位のピークを持つ衛星視線方
向への変位と、北東側に小さなピークが認められた(図
4b)。4月17日に対し南西側のピークで8~9cm、北東
側のピークでは約7cm の衛星視線方向へ近づく変位が
認められた。

6月29日の水蒸気噴火後の7月10日の観測では、前
回の観測からの間隔が8週間と比較的長期間であったた
め、南西側をピークとする衛星視線方向へ近づく変位の
継続と、火口の北~東側にかけての範囲における衛星視
線方向へ近づく変位の双方が認められた(図4c)。5月
15日に対し、南西側のピークでは9~10cm 程度の変位、
火口の北から東側の範囲にかけては最大で10~12cm
程度の変位が認められた。また Path 18、125 同様、4つ
の火口が形成された箇所では、干渉が悪くなっている様
子も認められた。

その2週間後の7月24日の観測では、7月10日に対
し有意な変位は認められなかった(図4d)。

3.4 Path 25 (南行軌道・左観測)

この Path では、群発地震発生中の2015年5月28日
に最初の観測が行われたため、活動開始以前の観測との
間で変位量を計測することはできなかった。

6月29日の水蒸気噴火後の8月6日の観測では、観
測間隔が10週間と長期間であったため、全体として衛
星視線方向へ近づく大きな変位が認められた(図5a)。
特に火口の近傍では、5月28日に対し最大で12cm を超
える変位が認められた。また他の Path 同様、4つの火口

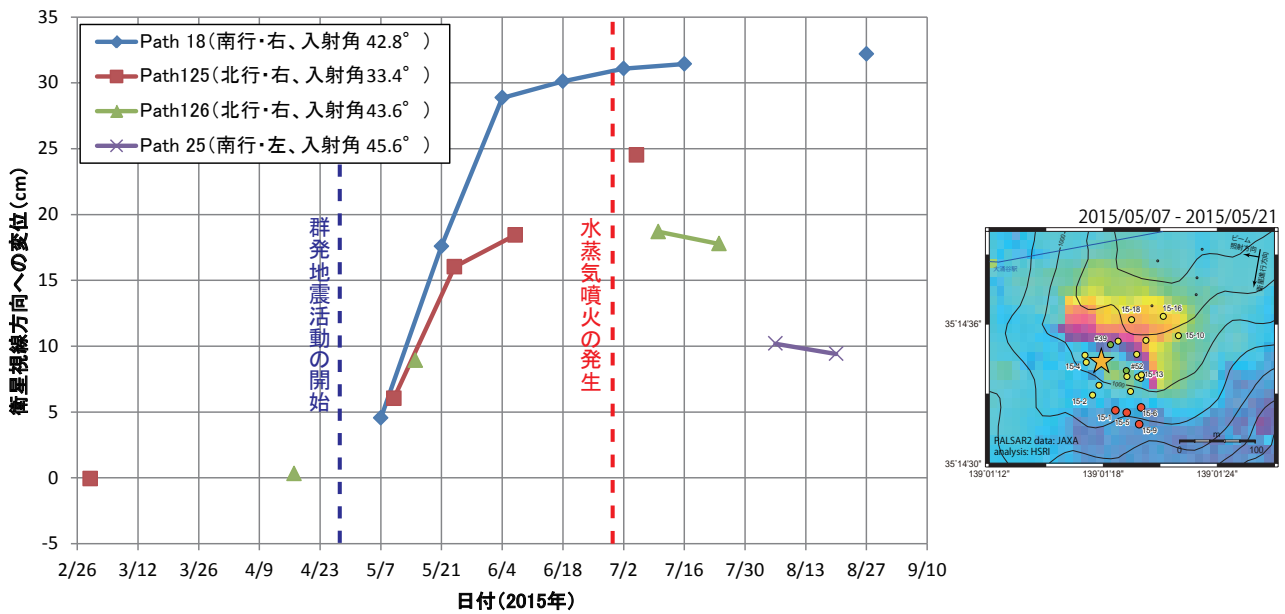


図6 大涌谷の地表面変位の時間変化。右図中の星印の地点における累積変位（衛星視線方向へ近づく変位を正としたその累積値）について、Path 毎にその時間変化を示した。観測間隔が最短（2週間）の場合のみを直線でつないだ。Path 25 については、累積変位量の基点が、群発地震発生以後の2015年5月28日であることに留意。

が形成された箇所では、干渉が悪くなっている様子も認められた。

その2週間後の8月20日の観測では、8月6日に対し有意な変位は認められなかった（図5b）。

4. 解析結果に基づく大涌谷の地表面変位の推移

ALOS-2/PALSAR-2の観測により、2015年の箱根火山の活動に伴って、5月上旬以降に大涌谷で検出された地表面変位は、異なる複数の観測条件において、衛星視線方向に近づく変位であったことから、水平変位よりも上下変位が卓越していたと言える。すなわち、大涌谷において局所的に地表面が隆起し、膨張している様子を捉えたものとみることができる。

解析結果を基に、この隆起現象の時間変化を整理すると、以下の通りとなる。

- i. 4月下旬の群発地震発生以前は、有意な変位は認められない（Path 125、126）。
- ii. 群発地震発生以降、5月中は急激な隆起が認められた（Path 18、125、126）。最初期（5月7日時点、Path 18）は、変位域の全体で隆起が認められたが、その後は、南西側にピークを持つような変位が観測され、北東側にも小規模なピークが認められた。
- iii. 6月に入り、変位にやや鈍化が認められた（Path 18、125）。

- iv. 6月29日～7月1日にかけて発生した水蒸気噴火の発生前後では、火口の北側から東側にかけて隆起した（全てのPath）。
- v. 噴火後は、明瞭な変位は認められない（Path 126、25）もしくはやや衛星から遠ざかる変位に転じた（Path 18）。

なお、図6は、5月中の観測で急激な変位が観測されたピーク付近の点（図6右図の星印の位置）において、衛星視線方向へ近づく変位の累積値の時間変化をグラフ化したものである。これによれば、5月中はPath 18で約0.9cm/day、Path 125で約0.7cm/dayという速度で衛星視線方向に近づく変位が継続していたことが分かる。

5. まとめ

2015年の箱根火山の活動に伴う大涌谷の地表面変位について、ALOS-2/PALSAR-2による緊急観測データの解析を行い、その時間変化を調べた。

大涌谷では、4月下旬の群発地震活動の開始以降、暴噴した蒸気井の周辺において局所的な隆起が観測された。5月中は急激に隆起が進展していたが、6月に入りやや鈍化が認められた。その後、6月29日の小規模な水蒸気噴火発生後には、再び隆起が観測されたが、以降は明瞭な変化は認められないか、もしくは衛星から遠ざかる変位に転じている様子が観測されている。ただし、

一部の Path において衛星から遠ざかる変位が認められることから、今後も地表における噴気状況の監視と合わせ、その推移を継続的に見ていく必要があると考える。

謝辞

ALOS-2/PALSAR-2 による観測データは火山噴火予知連絡会衛星解析グループを通して JAXA から提供されたものです。解析には、防災科学技術研究所の小澤拓氏が開発した SAR 干渉解析ツール (RINC) および同氏作成の楕円体高データを使用しました。気象研究所の安藤忍氏には、干渉 SAR の解析手法および手順についてご指導を頂きました。吉田明夫氏には、本稿をご一読頂き、原稿の改善に繋がる有益なコメントを頂きました。本稿で使用した図の多くは GMT (Wessel et al., 2013) を使用し作成しています。ここに記して感謝します。

参考文献

Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M., Perski Z. and Lilly P. (2003) A modification to the goldstein radar interferogram filter, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, 2114–2118.

原田昌武・板寺一洋・本多 亮・行竹洋平・道家涼介 (2015) 2015 年箱根火山活動に伴う地震活動と地殻変動の特徴 (速報), 神奈川県温泉地学研究所報告, **47**, 1-10.

板寺一洋・本多 亮・原田昌武・行竹洋平・道家涼介・竹中 潤 (2015) 神奈川県箱根火山における活発な群発地震活動 (2015), 日本水文科学会誌, **45**, 47–49.

神奈川県温泉地学研究所・伊豆ジオパーク推進協議会 (2015) 箱根山 2015 年噴火の火口・噴気孔群 (暫定版), 火山噴火予知連絡会提出資料 (平成 27 年 7 月 21 日), http://www.onken.odawara.kanagawa.jp/files/Hakone2015/20150721_onken.pdf.

小林知勝・飛田幹男・中島秀敏・矢来博司・森下 遊・和田弘人・仲井博之・三浦優司・山中雅之・山田晋也・攪上泰亮・上芝晴香 (2015) ALOS-2 干渉 SAR により捉えられた 2015 年箱根山・大涌谷火山活動に伴う地殻変動, 日本火山学会講演予稿集 2015 年秋季大会, P47.

萬年一剛・道家涼介・原田昌武・本多 亮・板寺一洋・菊川城司・行竹洋平・竹中 潤 (2015) 箱根火山 2015 年噴火の推移, 日本火山学会講演予稿集 2015 年秋季大会, A3-12.

Wessel P., Smith W. H. F., Scharroo R., Joaquim L. and Florian W. (2013) Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *Eos, Trans Am Geophys Union*, **94**, 409–410.