

干渉 SAR 時系列解析による神奈川県西部地域周辺の地殻変動

道家涼介*

InSAR time series analysis for detecting crustal deformation around western part of Kanagawa Prefecture

by

Ryosuke DOKE*

1. 研究背景および目的

人工衛星搭載の合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar : SAR) の観測データを用いた干渉解析 (SAR 干渉法) は、地震活動や火山活動などに伴う地殻変動を把握する有効な手法として、近年定着している。本手法は、衛星の回帰日数により同一観測条件での観測間隔が規制されるものの、地表面の変位を面的に把握することが可能である。これにより、地上の観測点 (GNSS、傾斜計など) の設置が困難な場所における変位や、これらの分布密度では捉えることのできない局所的な変位が抽出可能になるなど、地殻変動観測において大きな強みを発揮している。また、地表面における高密度の変位量のデータから、詳細かつ複雑な変動源モデルの推定も可能となった (例えば、Ozawa *et al.*, 2016)。

一方で、干渉 SAR 解析の結果には、大気遅延や電離層遅延などに起因する様々なノイズが含まれていることが知られており、これらのノイズを低減・除去する様々な方法が提案されている (藤原ほか、1999 ; 小林、2016 など)。また、同一の観測条件で取得された多数のデータを用いる干渉 SAR 時系列解析 (Berardino *et al.*, 2002 など) も行われている。干渉 SAR 時系列解析では、多数の干渉ペアをとり、同時に処理することによりノイズを除去し、変位量・変位速度を、数 mm (mm/yr) の精度で推定することが可能である。

本研究では、干渉 SAR 時系列解析を神奈川県西部地域に適用し、当該地域の地殻変動速度を面的に推定することを試みた。同地域は、フィリピン海プレートにのる伊豆半島が本州に衝突する地域に当たり、非常に複雑なテクトニクス場に位置している。活動度の高い活断層が多く分布するほか、2015 年に水蒸気噴火を起こした箱根火山も位置する。また、本地域は、国土地理院の

GNSS 観測網 (GEONET) の観測点が比較的密にある地域であるものの、その間隔は 10 ~ 15km 程度である。箱根火山周辺においては、温泉地学研究所の観測点を加えるとおよそ 5km 間隔で GNSS 観測点が分布することになるが、例えば、2015 年の水蒸気噴火に前駆した大涌谷の膨張 (道家ほか、2015) の様な局所的な変位を抽出するのは困難である。したがって、干渉 SAR 時系列解析により神奈川県西部地域における地殻変動速度を面的に把握することは、同地域の複雑なテクトニクスを評価する上で重要かつ基礎的なデータを提供するものといえる。また、神奈川県の平野部においては、生活および工業目的で地下水の利用がなされていることから、解析結果は、地盤沈下のモニタリングにも貢献が可能と考えられる。本稿では、2006 ~ 2011 年に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) により運用された陸域観測技術衛星『だいち』 (ALOS) に搭載された SAR センサー (PALSAR) による観測データを用いて実施した、神奈川県西部地域における干渉 SAR 時系列解析の予察的な解析結果について報告する。

2. 方法

ALOS/PALSAR が神奈川県西部地域の図 1 に示す範囲を撮像した観測データの内、表 1 に示したデータを使用した。使用したデータの内 407-690 は北行軌道で西側上空から観測されたもので、59-2910 は南行軌道で東側上空から観測されたものである。解析には、ENVI+SARscape ソフトウェアを用い、干渉 SAR 時系列解析の手法のうち Small Baseline Subset (SBAS) 法と呼ばれる手法を適用した。本手法は、同一の衛星軌道上から取得されたデータから、観測日の間隔および垂直軌道間距離 (2 回の観測における衛星位置の相対的距離の

* 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

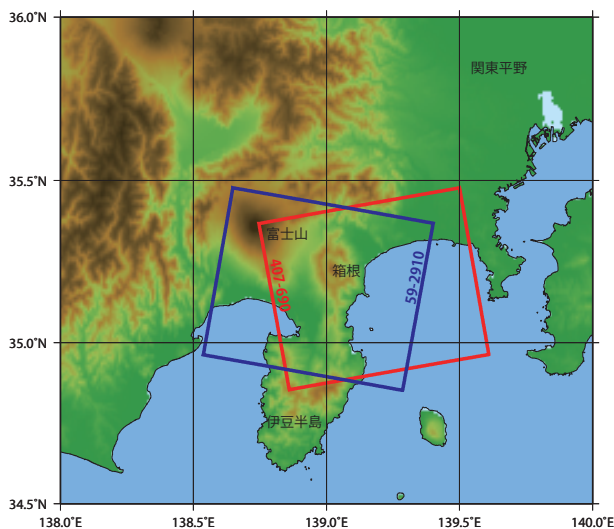


図1 本研究で使した ALOS/PALSAR データの範囲図。赤四角が北行軌道、青四角が南行軌道のデータを示す。

視線方向に垂直な成分)の短い干渉ペアを多数とり、各観測時における変位量、変位速度を推定する手法である (Berardino *et al.*, 2002)。本手法では、解析の際に、地表変動が滑らかに変化するという拘束条件のもと、高度の残差および変位速度をインバージョンにより同時推定し、大気による位相成分を除去した各観測時の変位量を推定する。本研究では、軌道毎に垂直軌道間距離が概ね 1,000m 程度以内となる干渉ペアを抽出し、干渉 SAR 解析を行った後、目視により干渉の悪いペアを取り除き、北行軌道では 21 シーン・64 ペア、南行軌道では 21 シーン・57 ペアを解析に用いた。なお、北行軌道では、他のデータ群との間で衛星の垂直軌道間距離が大きく離れている 3 シーンを除外した。また、南行軌道では、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の後に取得された 1 シーンを除外した。

解析の際、S/N 比を向上させるため、衛星進行方向およびレーダー照射方向の各ピクセルについて、それぞれ約 15m × 15m で平均化を行った。また、初期干渉画像における地形の影響を取り除くため、国土地理院による 10m メッシュの標高データと EGM2008 ジオイド高モデル (Pavlis *et al.*, 2012) を使用した。解析結果におけるノイズ低減のため、Goldstein and Werner (1998) によるフィルターを適用したのち、解析により得られる位相データ (2 π サイクル) を Minimum Cost Flow アプローチによりアンラッピングした。また、時系列解析の際、座標既知の点 (Ground Control Point : GCP) として、解析範囲内にある GEONET 観測点を使用し、各観測点における既知の座標変化との間で調和的な変位と

表1 使用したデータおよび観測日

北行軌道 407-690		南行軌道 59-2910	
※	2006/7/27	1	2006/9/29
1	2006/9/11	2	2006/11/14
2	2007/6/14	3	2006/12/30
3	2007/7/30	4	2007/8/17
4	2007/9/14	5	2007/10/2
5	2007/10/30	6	2007/11/17
6	2007/12/15	7	2008/1/2
7	2008/1/30	8	2008/4/3
8	2008/3/16	9	2008/5/19
9	2008/5/1	10	2008/8/19
※	2008/6/16	11	2008/10/4
※	2008/8/1	12	2008/11/19
10	2008/9/16	13	2009/5/22
11	2008/12/17	14	2009/8/22
12	2009/2/1	15	2009/10/7
13	2009/6/19	16	2009/11/22
14	2009/8/4	17	2010/5/25
15	2009/12/20	18	2010/7/10
16	2010/2/4	19	2010/8/25
17	2010/3/22	20	2010/10/10
18	2010/5/7	21	2010/11/25
19	2010/8/7	※	2011/4/12
20	2010/12/23		
21	2011/2/7		

※数字が振られていない観測日のデータは、解析から除外したデータを示す。

なるよう補正を行った。その際、国土地理院が公開している日々の座標値 (F3 解) を用いて、その座標値を 10 日間のタイムウィンドウでフィルタリング処理したものを使用した。以上の解析の結果から得られた変位速度分布 (レーダー座標系) を、およそ 25m × 25m メッシュの地理座標系に変換した。その際、高さの推定誤差が 5m 以下、変位速度の推定精度が 8mm/yr 以下となるピクセルのみを対象とし、最終的な地表面変位速度マップを得た。

なお、南行軌道については、データの取得範囲に富士山が含まれる。標高が周囲に対して極端に高い富士山周辺を含めた解析結果では、GNSS 観測点と同一地点のピクセルの変位と、GNSS の変位とを比較したところ、大

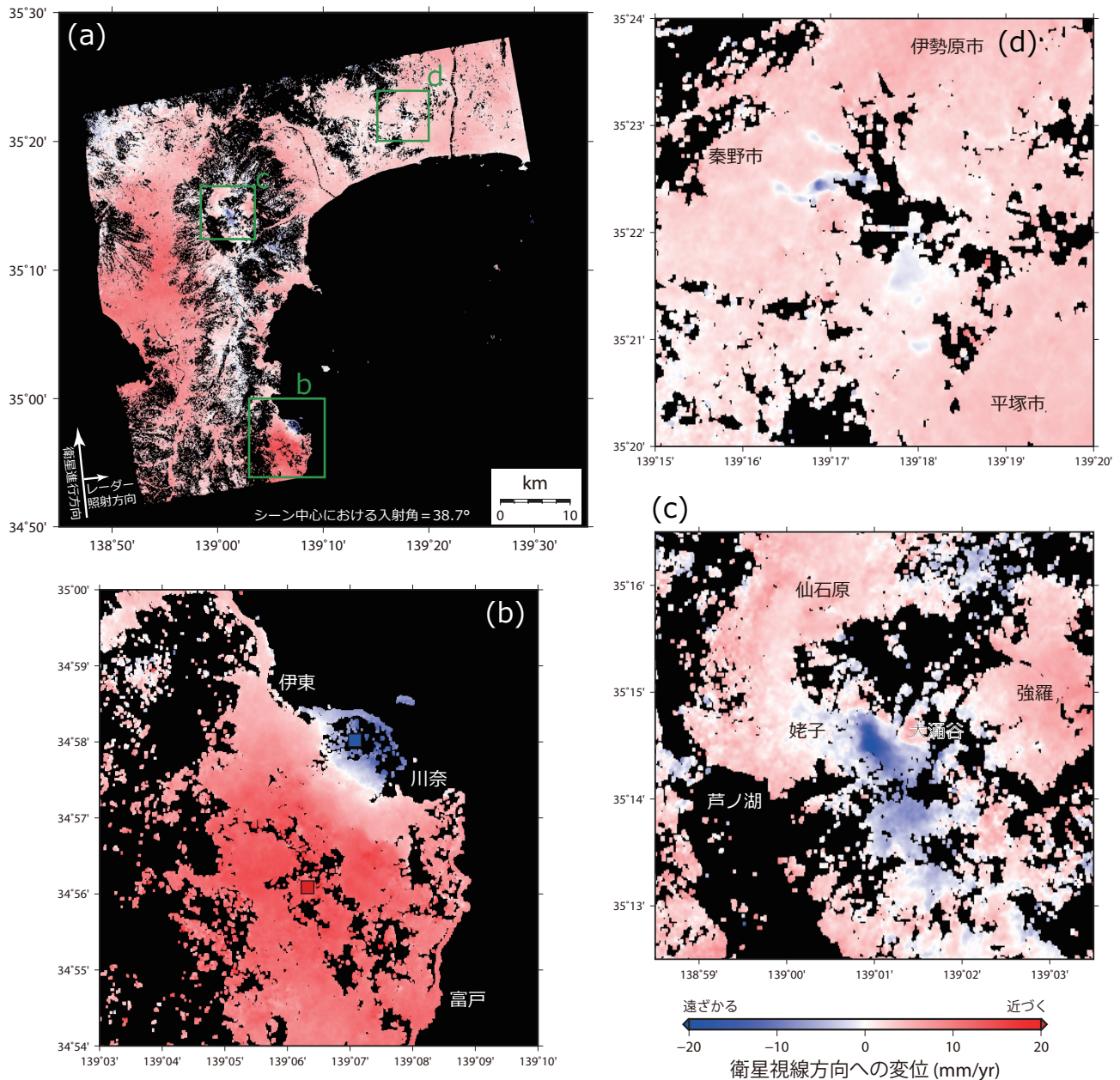


図2 北行軌道の解析結果。(a) 全体、(b) 静岡県伊東市周辺、(c) 箱根火山大涌谷周辺、(d) 神奈川県平塚市・秦野市周辺。

きな差異が生じてしまった。富士山周辺の観測データを除外して解析を行ったところ、概ね GNSS の変位と調和的な変位が得られたので、本稿では、こちらを報告する。

3. 解析結果

3.1. 北行軌道

北行軌道 (407-690) の解析結果を図2に示す。解析結果は、衛星視線方向 (西側上空からの視線) の変位速度を示したものであり、解析地域全体に約 4mm/yr で衛星に近づく変位が得られた (図2a)。平野から山地を含む解析対象地域が、一様に隆起したとは考えづらことから、この変位は解析地域全体が西方に変位していることを示しており、解析期間 (2006 ~ 2011 年) に

おける広域的な変位を示すものと解釈できる。

また、いくつかの地点において、全体の変位傾向に反して、衛星から遠ざかる変位も認められた。それらは、伊豆半島東部の伊東市周辺 (最大で約 -15mm/yr ; 図2b)、箱根火山の大涌谷西側 (最大で約 -23mm/yr ; 図2c)、平塚市～秦野市周辺 (約 $-1 \sim -11\text{mm/yr}$; 図2d) などである。

3.2. 南行軌道

南行軌道 (59-2910) の解析結果を図3に示す。解析結果は、衛星視線方向 (東側上空からの視線) の変位速度を示したものであり、解析地域全体に約 $-4.5 \sim -5.8\text{mm/yr}$ で衛星から遠ざかる変位が得られた (図

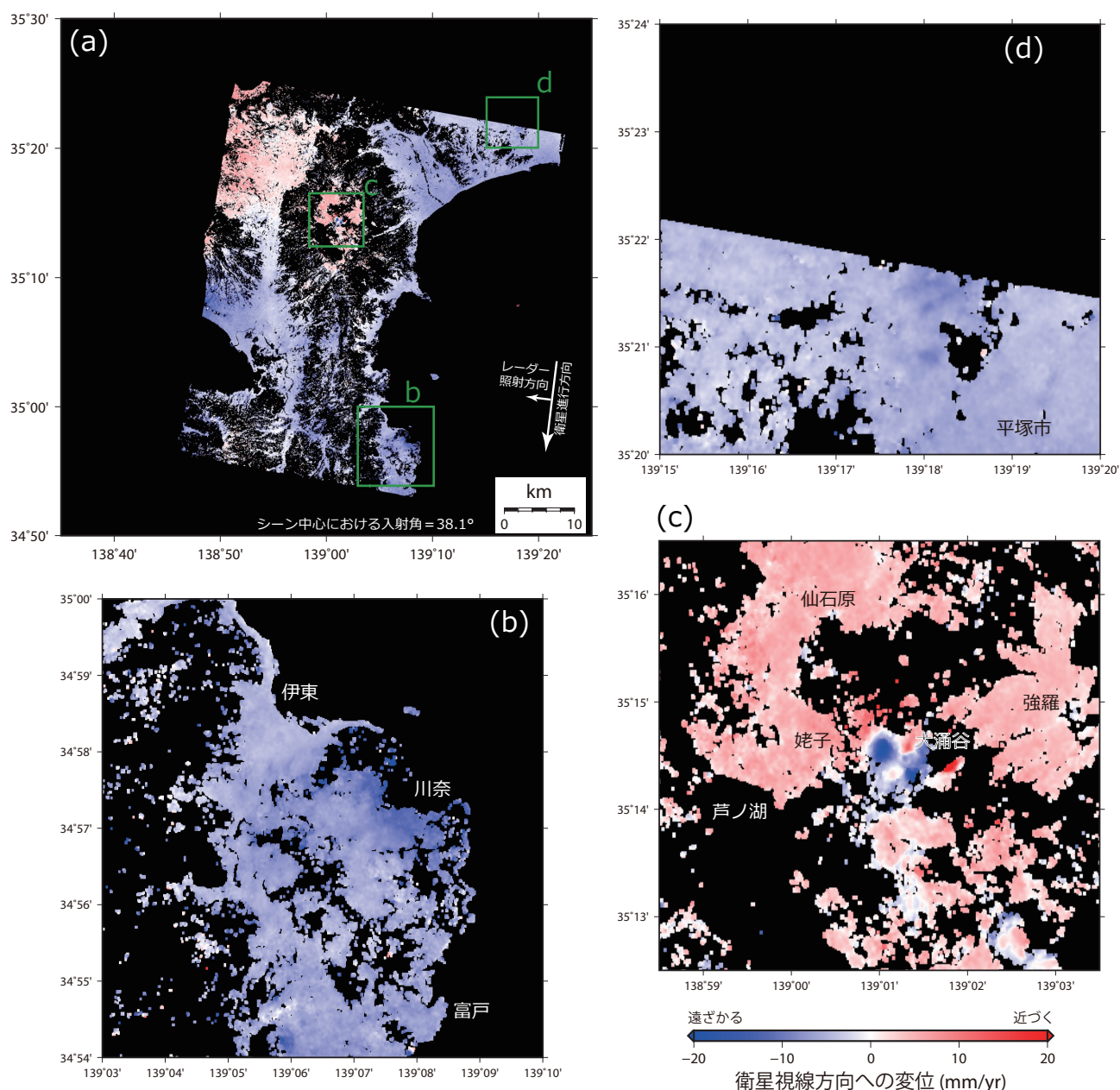


図3 南行軌道の解析結果。(a) 全体、(b) 静岡県伊東市周辺、(c) 箱根火山大涌谷周辺、(d) 神奈川県平塚市周辺。

3a)。これは、北行軌道の解析結果で、解析地域全体が西向きに変位していたとする結果を支持するもので、解析地域全体の大局的な変位を示すものである。なお、箱根火山～富士山周辺では、衛星に近づく変位（約0～7mm/yr）が認められた。

また、北行軌道で衛星から遠ざかる変位が認められた箇所では、周囲よりも大きな速度で衛星から遠ざかる変位が認められた（図3b～d）。その変位速度は、伊東市周辺で約－28mm/yr、大涌谷西側で約－20mm/yr、平塚市周辺で約－7～－10mm/yrである。異なる視線方向の観測結果に対して、周囲よりも相対的に衛星から遠ざかる変位を示していることから、これらの変位は沈降を示しているものである。

3.3. 2.5次元解析

2方向の衛星視線方向から取得された干渉SAR時系列解析の結果を用いて、より直感的に分かり易い方向の変位速度に変換を行った。変換方法は、Fujiwara *et al.* (2000) により紹介された2.5次元解析と呼ばれる手法で、異なる2つの衛星視線方向ベクトルがのる平面上の変位に変換するものである。本手法を適用することにより、準東西方向、準上下方向の変位を得ることが可能である。

本手法を北行軌道と南行軌道の解析結果に適用した結果を図4、5に示す。この解析は、両データにおけるピクセル毎の変位速度（図2、図3）に加え、解析時に得られる各ピクセルの視線方向ベクトルの値を用いて、

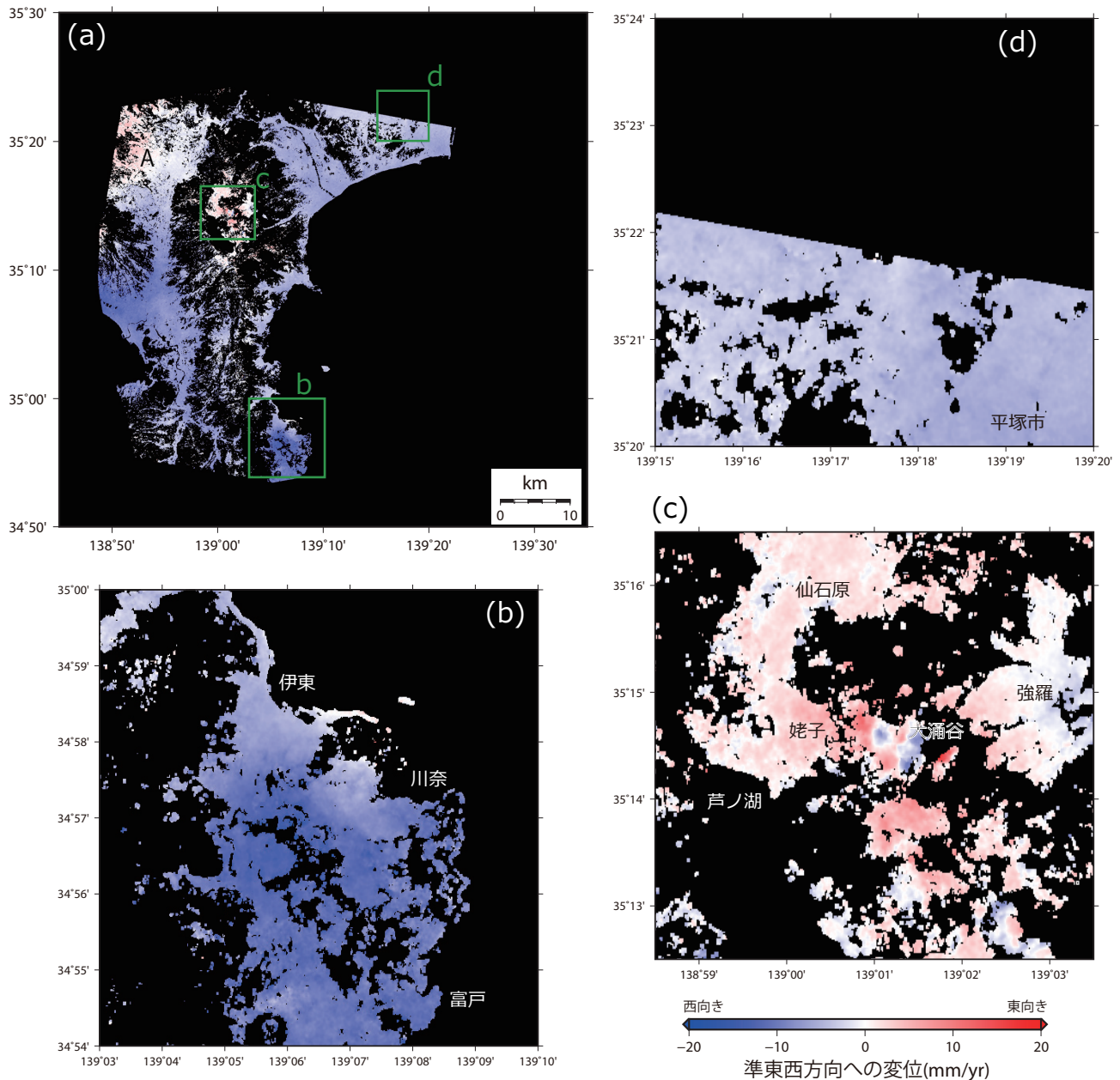


図4 準東西成分における変位速度。(a) 全体、(b) 静岡県伊東市周辺、(c) 箱根火山大涌谷周辺、(d) 神奈川県平塚市周辺。

GISソフトウェアの画像演算機能を用いて計算したものである。両データの衛星視線方向ベクトルが作る平面の走向・傾斜は、ピクセル毎に値に前後があるものの、概ね $N89^{\circ}W \cdot 85^{\circ}N$ である。

2.5次元解析の結果において、準東西成分の変位をみると、先に述べたとおり、解析地域全体が西方に変位していることが分かる(図4a)。一方、富士山のふもとにある御殿場市周辺(図4aのA地点周辺)と箱根火山の一部では、ほぼ変位無し、もしくは東向きの変位を示している。この期間、富士山周辺や箱根火山周辺では、山体の膨張が観測されていることから(原田ほか、2010)、これらの変位が、解析地域全体における西向きの変位を打ち消している可能性があるが、変位量・変位

方向の点から、それが正しいかどうかは検討が必要である。例えば、先述したように、富士山周辺のデータが解析結果に新たな誤差を生み出している可能性も否定できないため、この箇所の結果の妥当性については、今後十分に検討する必要がある。

また、準上下成分においては、富士山～箱根周辺や、伊豆半島でやや隆起する傾向が認められ、神奈川県平野部においては、変位無し、もしくはやや沈降の傾向が認められた(図5a)。先述した、顕著な沈降箇所である、伊東市周辺、大涌谷西側、平塚市周辺では、それぞれ、最大 -29mm/yr 、 -30mm/yr 、 -9mm/yr の沈降速度が得られた(図5b～d)。

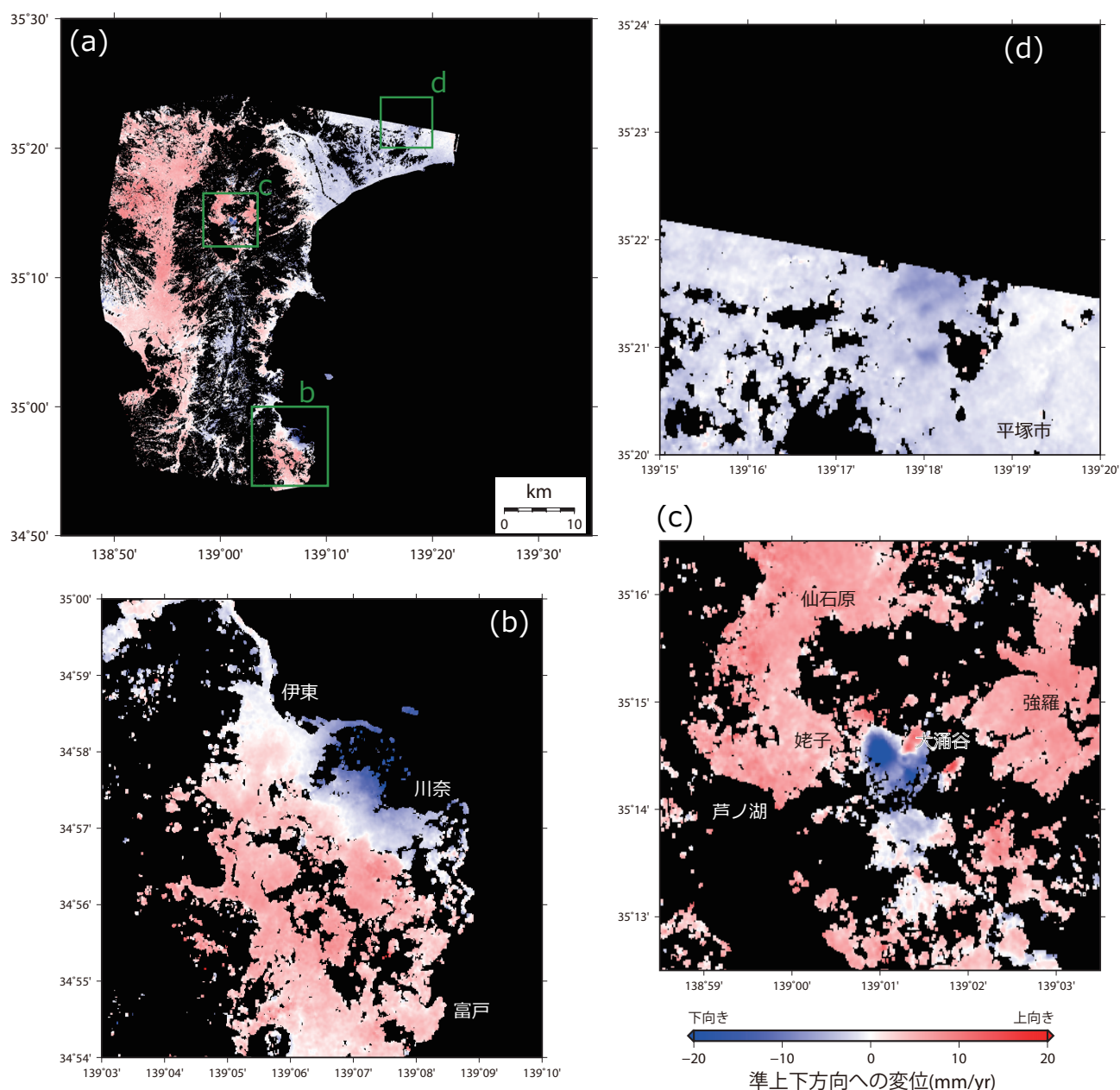


図5 準上下成分における変位速度。(a)全体、(b) 静岡県伊東市周辺、(c) 箱根火山大涌谷周辺、(d) 神奈川県平塚市周辺。

4. 考察

4.1. 伊豆半島東部の地殻変動

伊豆半島東部の伊東市付近においては、局所的な沈降が認められた。この付近において、沈降が見られた地点（図2bの青■）とそれ以外の地点（図2bの赤■）の2点を選択し、両地点の北行軌道の結果における時系列変化グラフを作成した（図6）。この結果、2009年8月4日の観測までは、両地点は同傾向の変位を示すのに対し、2009年12月20日の観測で、青■の地点が顕著に衛星から遠ざかる変位を示した。このことから、同地域において認められた沈降は、2009年8月4日～12月20日の間に発生もしくは開始したと考えられる。この

間、2009年12月17日から伊豆半島東方沖では、地震活動が発生しており、GNSS観測においてダイクの貫入を示唆する変位が観測されている（例えば、国土地理院、2010）。したがって、干渉SAR時系列解析において認められた局所的な沈降は、伊豆半島東方沖の地震活動に伴う地殻変動を見ていると考えられる。GNSSの解析結果から変動源のモデルが提案されているが（例えば、国土地理院、2010）、このモデルではSARで観測された地表面変位の一部しか説明できないので、今後、SARデータを説明する詳細な地殻変動モデルについて検討する必要があるだろう。

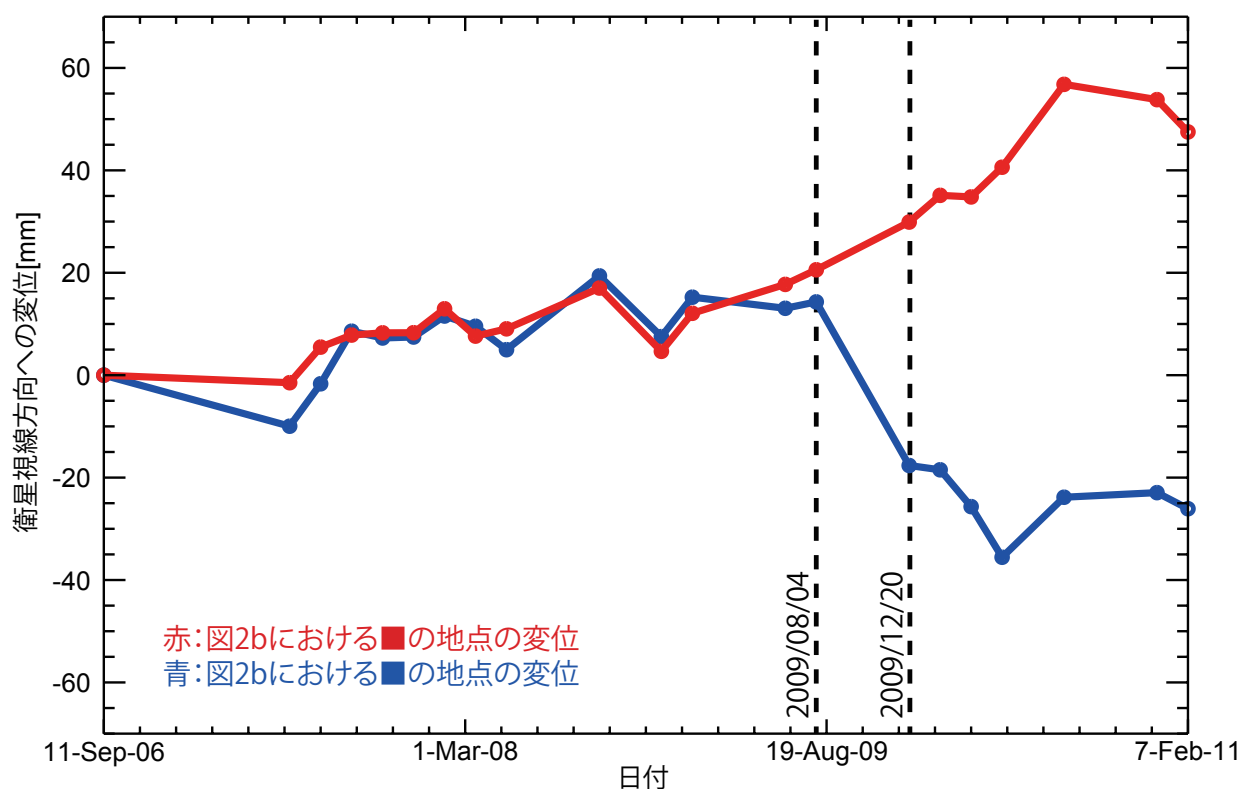


図6 静岡県伊東市における変位の時系列グラフ。各グラフは、それぞれ図2bにおいて示した各色の■の位置における各観測日の変位（2006年9月11日を基準）を示す。

4.2. 大涌谷西側における地表面変位

大涌谷の西側においては、準上下成分で最大約30mm/yrという大きな速度で沈降する箇所が認められた（図5c）。また準東西成分に着目すると、沈降域の西側で東向きの変位、東側で西向きの変位を示しており、沈降域の中心に向かい収縮するような変位を示している（図4c）。このことから、大涌谷西側の本地域においては、収縮が卓越しているものと考えられる。この地表面変位は、標高約702m（地表からの深さ約300m）付近に、年間 $1.04 \times 10^4 \text{m}^3$ の速度で収縮する球状圧力源（Mogi, 1958）の存在を仮定すると、説明することが可能である（図7）。この収縮源が、何を示しているかは不明であるが、この変位から約400～500m東に位置する活発な噴気域で、2015年の火山活動に伴い膨張が見られたことを考えると（道家ほか、2015）、収縮は過去に存在した噴気域が衰退している様子を見ている可能性も挙げられる。

4.3. 平野部における沈降

2.5次元解析の結果、神奈川県西部～中部の平野部において、周囲よりも沈降速度がやや大きい箇所がいくつか抽出された。特に顕著なものは平塚市付近で、その沈

降速度は約9mm/yrと見積もられた（図5d）。この沈降は、水平変位を伴わず（図4d）、純粋な沈降成分を示し、平野部における地盤沈下を見ているものと解釈される。

5. まとめ

ALOS/PALSAR データの干渉 SAR 時系列解析を実施し、神奈川県西部を中心とする地域の地表面変位速度のマッピングを行った結果について報告した。

対象地域全体においては、西向きの変位が卓越しており、これは、この地域の大局的な変位を示しているものと考えられる。また、局所的な変位として、2009年12月17日から伊豆半島東方沖で発生した地震に伴う変位、大涌谷西側における収縮源、平野部における地盤沈下を検出した。大涌谷西側における収縮源の存在は、これまで地上からの観測では抽出されておらず、箱根火山浅部における熱水の分布や移動を考える上で重要な結果と言える。

今後、隣接する地域についても同様の解析を実施し、今回解析した地域を含め、プレート収束帯における地殻変動速度を面的にマッピングすることを試みると共に、地殻変動を説明する変動源モデルについても解析を進めていく。

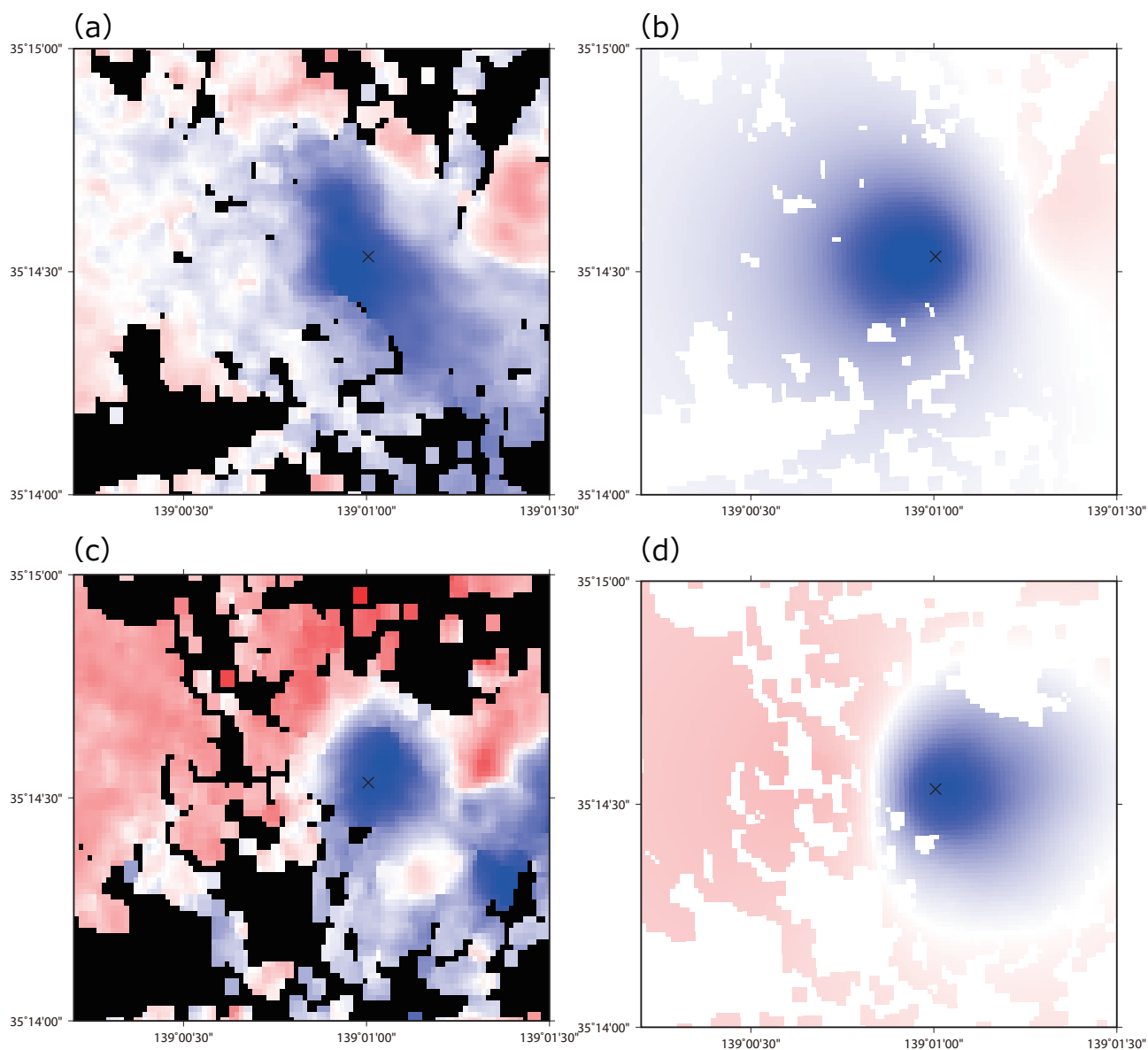


図7 大涌谷西側における地表面変位を説明する変動源モデル。(a) 北行軌道の観測値、(b) 北行軌道のモデル値、(c) 南行軌道の観測値、(d) 南行軌道のモデル値。モデルの推定は、変化が顕著な箇所を 20m 間隔、それ以外を 100 m 間隔で再サンプリングしたデータを対象に実施した。×の地点は、変動源モデルの水平位置を示す。モデルパラメータについては本文を参照。

謝辞

本研究で使用した ALOS/PALSAR 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 から提供頂きました。原初データの所有権は、JAXA および経済産業省にあります。2 名の査読者のコメントにより本稿は改善されました。ここに記して感謝します。

参考文献

- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 2375-2383.
- 道家涼介・原田昌武・竹中 潤 (2015) 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, *神奈川県温泉地学研究所報告*, 47, 1-10.
- 藤原 智・飛田幹男・村上 亮・中川弘之・Rosen P. A. (1999) 干渉 SAR における地表変動検出精度向上のための基線値推定法と大気 - 標高補正, *測地学会誌*, 45, 315-325.
- Fujiwara S., Nishimura T., Murakami M., Nakagawa H., Tobita M. (2000) 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophys Res Lett*, 27, 2049-2052.

Goldstein R. M., Werner C. L. (1998) Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophys Res Lett*, 25, 4035-4038.

原田昌武・細野耕司・小林昭夫・行竹洋平・吉田明夫 (2010) 富士山及び箱根火山の膨張歪と低周波地震活動, *火山*, 55, 193-199.

小林知勝 (2016) 数値気象モデルを用いた干渉 SAR の大気遅延誤差の低減効果について～ 2015 年桜島マグマ貫入イベントの解析を例に～, *測地学会誌*, 62, 79-88.

国土地理院 (2010) 伊豆地方の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, 84, 164-203.

Mogi K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, *Bull Earthq Res Inst*, 36, 99-134.

Ozawa T., Fujita E., Ueda H. (2016) Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano, *Earth, Planets Sp*, 68, 186.

Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. (2012) The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *J Geophys Res Solid Earth* 117:n/a-n/a. doi: 10.1029/2011JB008916

