

**PALSAR / InSAR により得られた
小笠原硫黄島の2006年火山活動活発化に伴う地殻変動（速報）**

小澤 拓*・上田英樹*・島田政信**・村上 亮***・飛田幹男***・矢来博司***
和田弘人***・雨貝知美***・藤原みどり***・藤田英輔*・鵜川元雄*

**Preliminary Results of Detecting Crustal Deformation
for 2006 Volcanic Activity of Iwo-jima Volcano by PALSAR/InSAR**

Taku OZAWA*, Hideki UEDA*, Masanobu SHIMADA**, Makoto MURAKAMI***,
Mikio TOBITA***, Hiroshi YARAI**, Kozin WADA***, Tomomi AMAGAI***,
Midori FUJIWARA***, Eisuke FUJITA*, and Motoo UKAWA*

**Volcano Research Department,*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
taku@bosai.go.jp, ueda@bosai.go.jp, ukawa@bosai.go.jp

***Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency, Japan*
shimada@eorc.jaxa.jp

****Geographical Survey Institute, Japan*

mccopy@gsi.go.jp, tobita@gsi.go.jp, yarai@gsi.go.jp, kwada@gsi.go.jp, amagai@gsi.go.jp, fmidori@gsi.go.jp

Abstract

Vertical movement at a GPS site located in the Motoyama district of Iwo-jima volcano changed from continuous subsidence since 2003 to uplift in mid-August of 2006. Increased seismicity was also observed. Observations by PALSAR (synthetic aperture radar sensor) aboard the ALOS satellite were conducted to investigate the volcanic activity. In this study, we are attempting to detect crustal deformation associated with the increase in volcanic activity by SAR interferometry using PALSAR data. We report the preliminary results in this paper.

Just before the increase of volcanic activity, a slant-range change representing a subsidence of several centimeters was detected throughout the Motoyama district, but it seemed to differ from the contraction pattern that had been dominant in the area. The contraction in Motoyama may have slowed down just before the increase in volcanic activity. Three months after the increase in volcanic activity, a slant-range change suggesting that the whole island had uplifted was detected. It suggests that crustal deformation induced by a relatively deep source was prominent in this period. When the volcanic activity was highest, the uplift accelerated and seismicity increased further. PALSAR observations were conducted from ascending and descending orbits in this period, and a two-dimensional displacement field could be obtained from these data.

The obtained result is characterized by an uplift pattern suggesting inclination of the whole island with uplifts in the south end of the island of 8 cm and uplifts in the north end of 40 cm. In the north-south fault zone in the west coast area, crustal deformation with an expansion and an east-up pattern was detected. Concentrated deformation was detected along the Asodai Fault located in the east end of the fault zone. Additionally, a steep gradient of vertical movement detected along the fault zone located in the south end of Motoyama district extended to the east and west. This crustal deformation pattern suggests a blockwise uplift of Motoyama district. In the interior of Motoyama district, a contraction

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 火山防災研究部

** 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター

*** 国土地理院

pattern in the center area and an uplift pattern in the north and the southwest area were superposed. Uplift patterns in the north area was accompanied by eastward motion and uplift in the southeast area was accompanied by westward motion. Since the wavelengths of these deformation patterns were relatively short, crustal deformation induced by a relatively shallow source must have dominated in this period.

The detailed crustal deformation detected in this analysis is expected to be important information for revealing mechanisms of the Iwo-jima volcano.

Key words : Iwo-jima Volcano, InSAR, Crustal deformation, PALSAR, ALOS

1. はじめに

小笠原硫黄島は伊豆・小笠原弧に属する火山のひとつであり、約 2,000 m の海底から隆起する直径約 40 km の火山体の山頂部にあたる (図 1)。山頂付近には直径約 10 km のカルデラを有し、その中央部から南西端付近までの領域が海上に現われている (例えば、貝塚ほか, 1985)。陸上には海成段丘が発達しており、その汀線高度やサンゴ等の堆積物の年代から、200 年間に 30~40 m の隆起が生じていたとする調査結果が報告されている (Kaizuka, 1992)。このように、小笠原硫黄島の特徴の 1 つは、極めて活発な隆起活動が見られることである。防災科学技術研究所 (旧防災科学技術センター) では、このような小笠原硫黄島の火山活動を調査することを目的として、1976 年から地殻変動観測を定期的に行っており、継続的に進行している元山の収縮変形、間欠的に生じる島全体にわたる隆起など、時空間的に複雑な地殻変動が生じていたことを明らかにしている (熊谷・高橋, 1985, Ukawa *et al.*, 2006)。また、2003 年には島内の 3 箇所に GPS 観測

点を設置し、連続的な地殻変動観測を開始している。さらに、国土地理院によって構築された日本全国 GPS 観測網 (Sagiya *et al.*, 2000) の電子基準点も島内に 2 箇所設置されており、あわせて 5 箇所での連続的な地殻変動観測が行われている。

元山に設置されている電子基準点「硫黄島 1」においては、2003 年以降、継続的な沈降が観測されていたが、2006 年 8 月頃から隆起に転じる変化が観測された (図 2)。また、これと同期するように、地震活動の活発化も観測されている。同様の火山活動活発化は 2001 年から 2002 年にかけても観測されており、隆起が継続していた 2001 年 9 月から 10 月にかけて、南東海岸沖と西海岸の井戸ヶ浜で水蒸気爆発が発生している (防災科学技術研究所・鹿児島大学理学部, 2002)。この火山活動活発化前後に行われた重力観測結果の比較から、隆起にマグマの移動が関与していた可能性を示唆する結果が示されている (鶴川ほか, 2006)。このような、火山活動活発時におけるマグマ移動を詳細に知ることができれば、小笠原硫黄島の

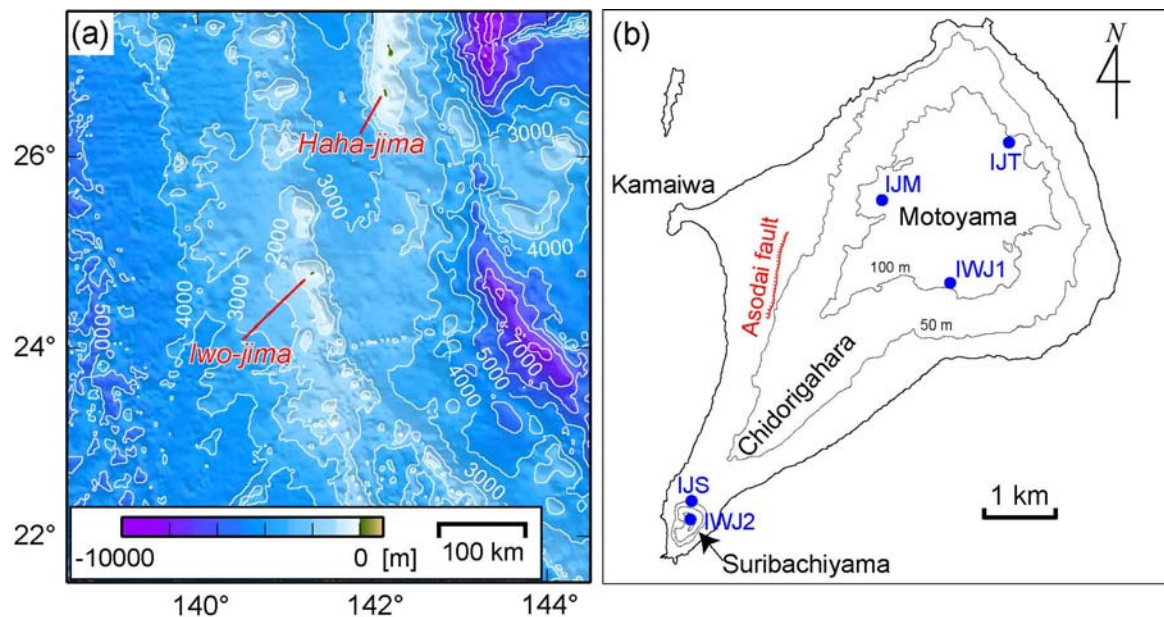


図 1 (a)小笠原硫黄島周辺の海底地形図 (ETOPO2 を用いて描画)。コンターは 1,000 m ごとの深度を示す。
(b)小笠原硫黄島の地図。青丸は GPS 観測点、赤線は阿蘇台断層を示す。

Fig. 1 (a) Bathymetric map around Iwo-jima described from ETOPO2. Contours indicate depth at 1,000 m intervals.
(b) Map of Iwo-jima. Blue circles show GPS sites. Red curve shows the Asodai Fault.

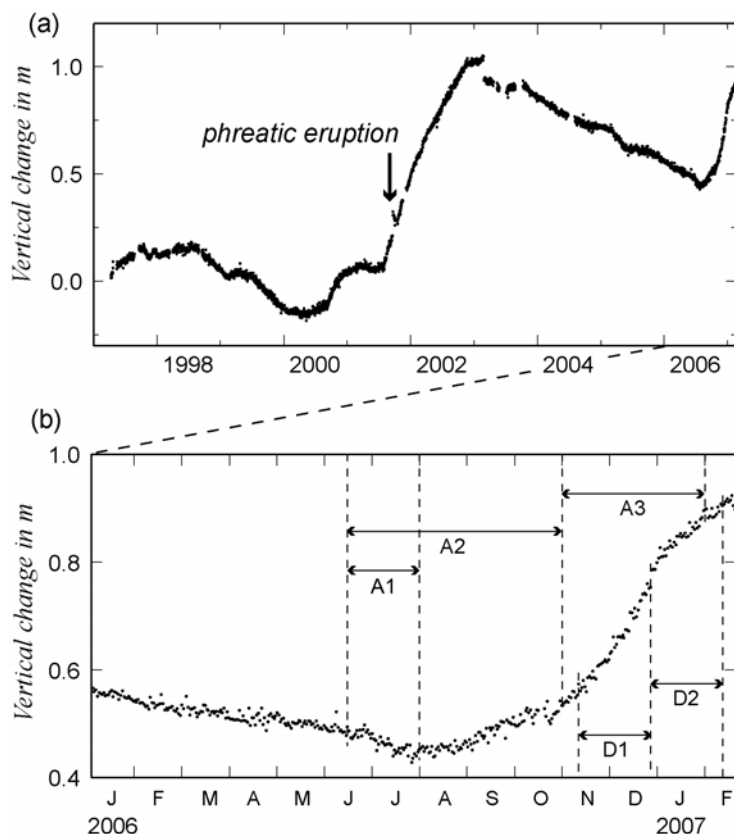


図 2 (a)電子基準点「硫黄島 1」の上下変位を示す時系列. 基準点は電子基準点「母島」である. (b)2006 年以降の拡大図. 矢印は, 本研究で解析した干渉ペアの期間を示す. 矢印と共に示す番号は, 表 1 に示す干渉ペア番号に対応する.

Fig. 2 (a) Time series depicting vertical movement of IWJ1 relative to Haha-jima. (b) Time series after 2006. Arrows show periods for interferometric pairs analyzed in this study. Numbers on the arrows corresponds to the numbers of the interferometric pair presented in Table 1.

表 1 JERS-1 の干渉解析で用いた干渉ペア

Table 1 Interferometric pairs used in JERS-1 SAR analysis.

Pair No.	Master	Slave	Recurrence time [day]	B_{PERP} [m]
A1	2006/6/16	2006/8/1	46	-1463
A2	2006/6/16	2006/11/1	138	-1554
A3	2006/11/1	2007/2/1	92	-608
D1	2006/11/11	2006/12/27	46	2167
D2	2006/12/27	2007/2/11	46	-720

火山活動メカニズムを理解する上で極めて重要な手がかりとなるはずである. その有効な手段の一つは, 詳細に地殻変動を観測することであるが, 小笠原硫黄島の地殻変動パターンは時空間的に複雑であり, 島内の 5 箇所における GPS 観測のみでは, 必ずしも十分な観測密度とはいえない. また, 観測点の増設や, キャンペーン観測の頻度を上げることは, メンテナンス, アクセスの困難さから現実的ではないという問題がある.

一方, 衛星搭載型合成開口レーダ (SAR) を利用した

干渉解析 (SAR 干渉法) は, 現地における観測点の設置を必要とせず, 地殻変動によって生じた衛星と地表面との辺長変化 (スラントレンジ変化) を面的に捉えられるという利点を有しており, 火山活動を捉える有効な手法として用いられている (例えば, Massonnet *et al.*, 1995, Amelung *et al.*, 2000, 小澤・谷口, 2007). 小笠原硫黄島においても, 日本の JERS-1 衛星の SAR を利用した SAR 干渉法の適用により, 元山における収縮変形を示す干渉縞パターンが報告されている (Ohkura, 1998). このような

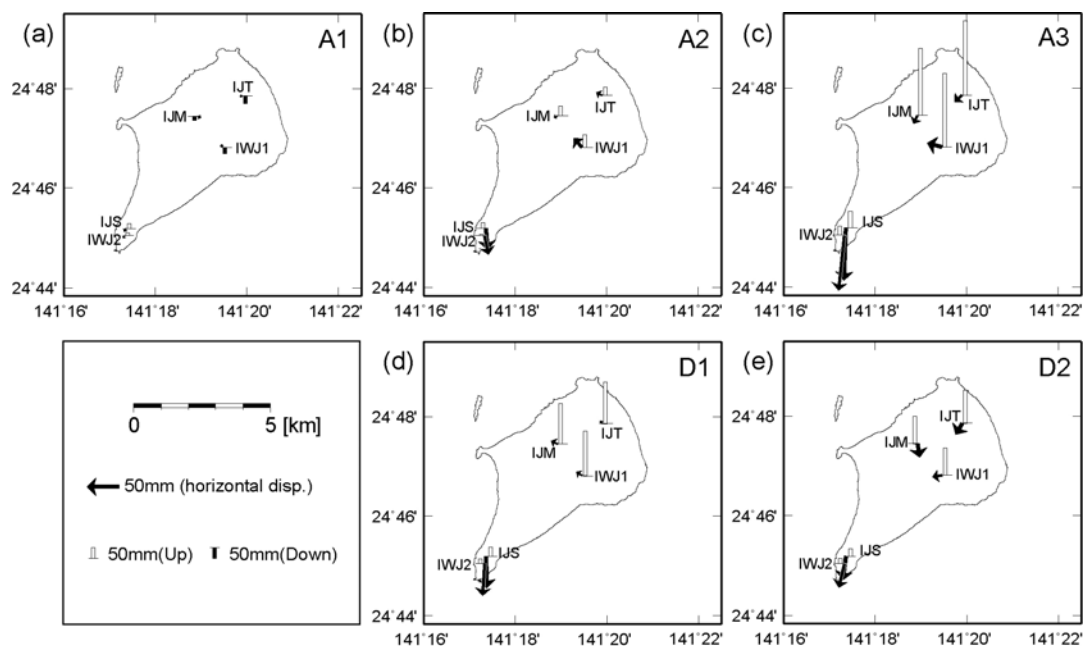


図 3 GPS によって観測された各干渉ペアのデータ取得間に生じた地殻変動。図の右上に示す番号は、表 1 に示す干渉ペア番号に対応する。

Fig. 3 Crustal deformation between data acquisitions of each interferometric pair observed from GPS measurements. Numbers at the upper right of the figure correspond to the numbers of the interferometric pair shown in Table 1.

SAR 干渉法を、火山活動が活発化している小笠原硫黄島に適用すれば、空間的に複雑な地殻変動パターンを明らかにできるはずである。そこで、本研究では、2006 年の火山活動活発化に関する地殻変動を検出するために、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) に搭載されている SAR を利用した SAR 干渉法の適用を試みている。本稿においては、その速報結果を報告する。

2. 解析データ

ALOS 衛星は日本の宇宙航空研究開発機構によって 2006 年 1 月 24 日に打ち上げられた陸域観測技術衛星であり、フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ (PALSAR) のほかに、地形標高観測のためのパンクロマチック立体視センサ (PRISM)、土地被覆観測などに用いられる高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2) を搭載している。現在、ALOS 衛星に関する防災利用実証実験の実施が計画されており、火山に関しては、火山噴火予知連絡会が中心となって、その準備が進められている。その枠組みの中で、火山活動の活発化が観測された小笠原硫黄島の地殻変動を観測することを目的として、PALSAR による緊急観測が行われた。観測は HH 偏波、オフナディア角 41.5° 、FBS (24MHz) のモードで行われた。このモードによるアセンディング軌道からの観測に関するレーダ波照射方向の単位ベクトルは (東西: 0.73, 北南: 0.13, 上下: -0.68) であり、ディセンディング軌道に関しては (東西: -0.71, 北南: 0.12, 上下: -0.69) である。SAR 干渉法によって得られる地殻変動成分は、

干渉ペアの観測間に生じた地殻変動によるスラントレンジ変化量であり、これは地殻変動ベクトルをレーダ波照射方向に投影した値に等しい。また、PALSAR は波長が 23.6 cm のマイクロ波を用いているので、これを解析して得られた干渉画像における 2π ラジアン の位相差は、半波長の 11.8 cm のスラントレンジ変化に相当する。

表 1 は解析を行った干渉ペアに関する諸元を示す。これらの干渉ペアの中で最長の観測間隔は、干渉ペア A2 に関する 138 日であるが、L-band の SAR は植生による干渉性劣化に対する耐性が高く (Rosen *et al.*, 1996)、小笠原硫黄島のように植生の成長が著しい地域においても、観測間隔が 1 年を超える干渉ペアを用いた SAR 干渉法の適用が可能である。よって、これは良好な適用条件と言える。一方、軌道間距離に関しては、干渉ペア A1 で B_{PERP} (レーダ波照射方向に対して直交する成分) が 2,000 m を超えており、良好な適用条件とは言い難いが、この観測モードに関するクリティカルベースラインである 22,000 m と比べて十分に短い。よって、地形が比較的平坦な小笠原硫黄島に対しては、十分に適用可能な条件といえる。

3. 干渉解析

本解析においては、ガンマリモートセンシング社の GAMMA SAR processor を用いて、差分干渉 SAR 法 (Massonnet *et al.*, 1993) による地殻変動検出を行った。差分干渉 SAR 法を適用するためには、地形に起因する位相差成分 (地形成分) をシミュレートするために、地形

表 2 干渉解析結果と GPS 観測結果の比較. NS, EW, UD は GPS 観測から得られた変位の南北, 東西, 上下成分. $\Delta\rho_{GPS}$ は, GPS による地殻変動から計算したスラントレンジ変化. $\Delta\rho_{SAR1}$ および Diff.₁ は, 干渉解析から得られたスラントレンジ変化および GPS 観測結果との差 (基準点は GPS 観測点 IWJ1). $\Delta\rho_{SAR2}$ および Diff.₂ は, GPS による地殻変動結果をもとに長波長誤差を補正した干渉画像に関するスラントレンジ変化および GPS 観測結果との差 (基準点は母島). 単位は mm.

Table 2 Comparison between InSAR and GPS results. The NS column indicates the north-south component; the EW column, the east-west component; and the UD column, the up-down component of GPS displacements. The $\Delta\rho_{GPS}$ column lists the slant-range change calculated from GPS displacement. The $\Delta\rho_{SAR1}$ column represent the slant-range change with respect to GPS site “IWJ1”, and the difference between that and the GPS result is shown in the column Diff.₁. The $\Delta\rho_{SAR2}$ column indicates the slant-range change corrected for the long-wavelength error component, and the difference between that and GPS result is listed in column Diff.₂ (Fixed point is Haha-jima). Unit is millimeters.

A1

Site	NS	EW	UD	$\Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_{SAR1}$	Diff. ₁	$\Delta\rho_{SAR2}$	Diff. ₂
IJT	-1	-4	-35	21	-6	-8	16	-5
IJM	-2	5	-20	17	0	1	16	-1
IJS	-5	-3	22	-17	-24	12	-18	-1
IWJ1	5	-1	-27	19	—	—	19	—
IWJ2	-4	-2	13	-11	-30	7	-16	-5

A2

Site	NS	EW	UD	$\Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_{SAR1}$	Diff. ₁	$\Delta\rho_{SAR2}$	Diff. ₂
IJT	5	-9	39	-32	26	10	-31	1
IJM	-3	-5	45	-35	35	21	-35	0
IJS	-34	3	26	-20	48	20	-18	2
IWJ1	14	-13	60	-48	—	—	-48	—
IWJ2	-31	7	4	-2	61	15	-3	-1

A3

Site	NS	EW	UD	$\Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_{SAR1}$	Diff. ₁	$\Delta\rho_{SAR2}$	Diff. ₂
IJT	-10	-12	352	-248	-12	-15	-250	-2
IJM	-13	-6	319	-222	24	-6	-222	0
IJS	-83	-3	79	-66	208	22	-68	-2
IWJ1	6	-23	349	-252	—	—	-252	—
IWJ2	-88	-9	41	-45	231	25	-46	-1

D1

Site	NS	EW	UD	$\Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_{SAR1}$	Diff. ₁	$\Delta\rho_{SAR2}$	Diff. ₂
IJT	4	-3	196	-132	5	-2	-139	-7
IJM	5	-10	192	-125	24	10	-124	1
IJS	-50	1	44	-38	90	-12	-51	-13
IWJ1	6	-9	212	-139	—	—	-139	—
IWJ2	-52	-3	21	-19	126	6	-14	5

D2

Site	NS	EW	UD	$\Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_{SAR1}$	Diff. ₁	$\Delta\rho_{SAR2}$	Diff. ₂
IJT	-18	-10	157	-103	-25	1	-99	4
IJM	-21	3	130	-95	-17	-1	-94	1
IJS	-38	-5	36	-26	52	4	-27	-1
IWJ1	-3	-15	128	-78	—	—	-78	—
IWJ2	-39	-9	22	-13	64	10	-8	5

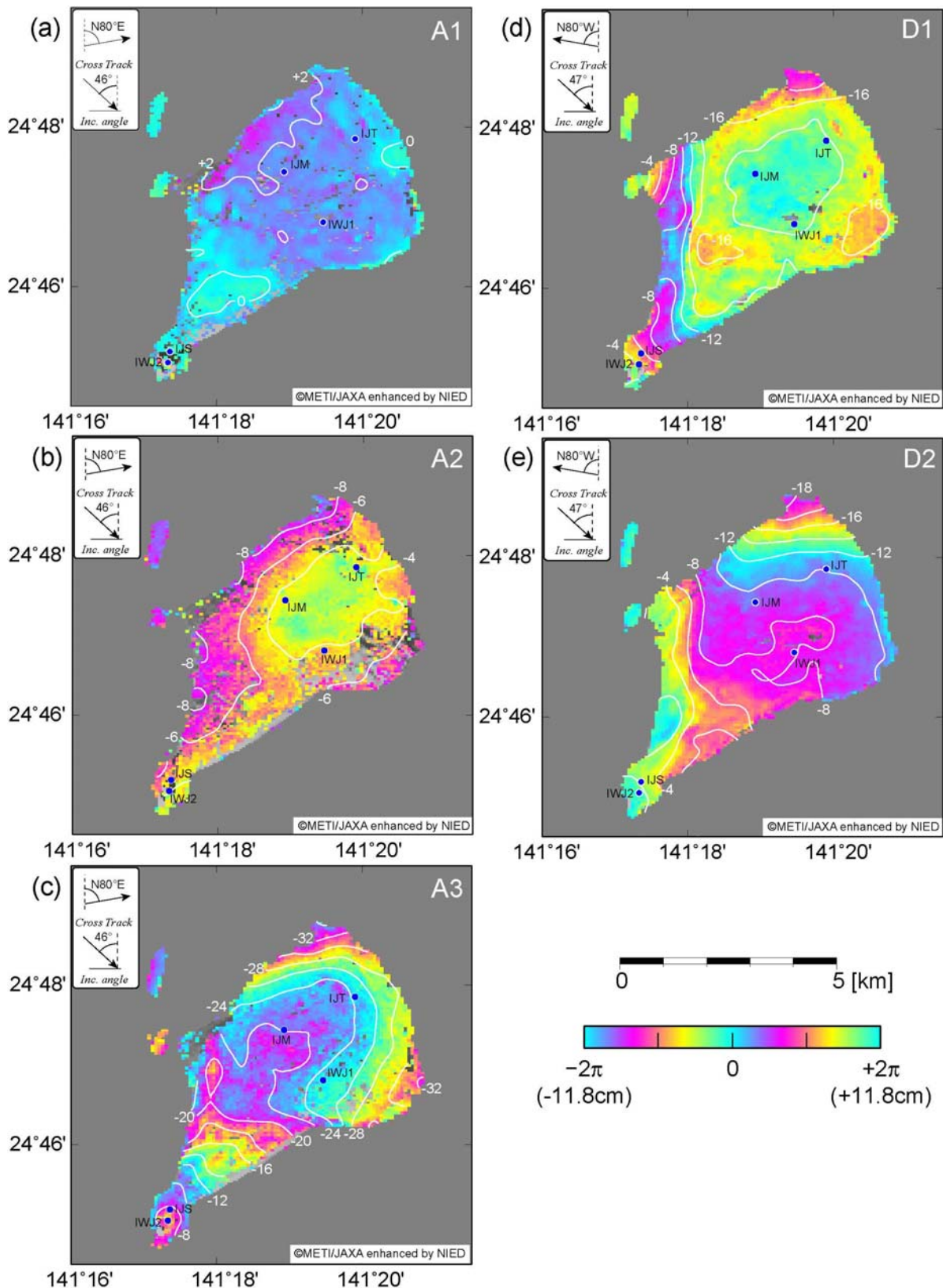


図 4 PALSAR データから作成した干渉解析。コンターは 2 cm 毎のスラントレンジ変化量を示す。青丸は GPS 観測点を示す。図の右上に示す記号は、表 1 に示す干渉ペアの番号に対応する。左上の挿入図はレーダ波照射方向を示す。

Fig. 4 Interferogram generated from PALSAR data. Contour lines represent slant-range change at 2 cm intervals. Blue circles indicate GPS sites. Numbers at the upper right of the figure corresponds to numbers of the interferometric pair shown in Table 1. Inset depicts the line-of-sight direction of radar.

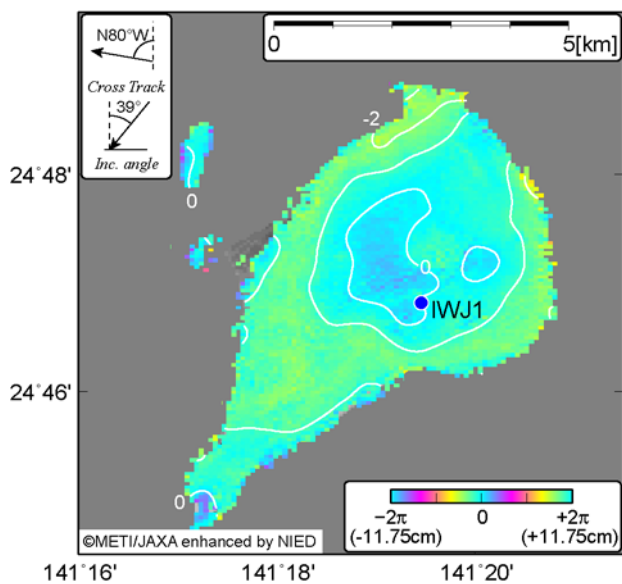


図5 1997年10月29日と1997年12月12日に観測された JERS-1 SAR データから作成した干渉画像。コンターは、2 cm 毎のスラントレンジ変化を示す。スラントレンジ変化は、GPS 観測点 IWJ1 を基準（青丸）とした。

Fig. 5 Interferogram generated from JERS-1 SAR data acquired on 29 Oct. 1997 and 12 Dec. 1997. Contour lines represent slant-range changes relative to GPS site “IWJ1” (Blue circle) at 2cm intervals.

標高モデル (DEM) を必要とするので、本解析では国土地理院から発行されている 50m メッシュの DEM を使用した。

本解析においては、まず、PALSAR の level 1.0 データに格納されている高精度軌道情報から計算したパラメータを用いて、軌道差による位相差成分（軌道成分）と地形成分をシミュレートし、初期干渉画像から除去した。地形起伏が比較的平坦な小笠原硫黄島においては、この解析により、ほぼ地形成分は除去されると考えられるが、軌道成分に関しては、軌道決定誤差に起因する長波長の位相差成分が残される可能性がある。ただし、島内の小領域に限定すると、その誤差は島内で一様な傾きを持つ位相差成分として近似できる。この傾動的な誤差成分を評価するために、干渉解析から得られたスラントレンジ変化と、GPS 観測から検出された地殻変動との比較を行った。GPS データは、マサチューセッツ工科大学とスクリップス海洋研究所が開発している GAMIT GPS analysis software を用いて解析を行った。各干渉ペアに関する期間に生じた地殻変動の導出においては、PALSAR データ観測日を中心とする 5 日間の座標の平均を求め、それらの比較から変位ベクトルを計算した（図 3 および表 2）。干渉解析と GPS 観測から得られたスラントレンジ変化を比較すると、その最大の残差は 21 mm、残差の root-mean-square (rms) は 9 mm と求まった。次に、干渉解析結果が GPS 観測結果と整合するように傾動的な誤差

成分を補正したところ、残差の最大は 13 mm、rms は 4 mm となり、有意に精度が改善されたといえる。この補正により得られた干渉画像を図 4 に示す。これらは GEONET 観測点「硫黄島 1」の変位量を考慮して、電子基準点「母島」に対するスラントレンジ変化量として表している。母島は小笠原硫黄島の北北東に位置しており、その間の距離は約 200 km である（図 1）。その間には、フィリピン海プレートの運動や太平洋プレートとのプレート間相互作用による相対変位があると推測されるが、その大きさは数 mm/yr と考えられ、ここでは無視できる。

4. 干渉解析

4.1 干渉ペア A1 から得られた干渉画像

干渉ペア A1 から得られる干渉画像（図 4(a)）は、元山における沈降が隆起に転じる直前までの地殻変動を示す。元山地区に設置されている GPS 観測点においては、同期間に 2~4 cm の沈降が観測されており（図 3(a) および表 2）、それと対応する 2cm 程度のスラントレンジ伸張が元山周辺で得られている。このスラントレンジ伸張パターンは元山一帯に一樣に広がっており、過去の観測から、継続的に進行していると考えられている収縮変形を示すパターンとは異なるように見える。例えば、火山活動が比較的静穏であった 1997 年後半における、JERS-1 の干渉解析結果（図 5）と比較しても、明らかにそのパターンは異なる。この結果は、隆起に転じる直前において、元山における収縮変形が鈍化もしくは停止していたことを示唆するものである。ただし、それ以降の火山活動活発化と関連する現象であるかについては不明である。

4.2 干渉ペア A2 から得られた干渉画像

干渉ペア A2 から得られる干渉画像（図 4(b)）は、元山が隆起に転じるより以前の 2006 年 6 月 16 日から、隆起に転じてから約 3 か月後までの地殻変動を示す。島全域において 3~8 cm のスラントレンジ短縮が見られ、北西-南東方向に 4cm 程度の幅でスラントレンジの変化が見られるのに対して、北東-南西方向には顕著なスラントレンジ変化は見られないことが特徴である。隆起に転じるより以前に生じたスラントレンジ変化は 2cm 程度であり、さらに比較的平坦なパターンなので（図 4(a)）、この干渉ペアから得られたスラントレンジ変化パターンのほとんどは、隆起に転じてからの地殻変動を表しているといえる。

同期間における GPS 観測によると、島の南端付近の隆起が 0~3 cm であるのに対して、元山の電子基準点「硫黄島 1」では 6 cm の隆起が生じている（図 3(b) および表 2）。一方、水平成分に関しては、元山付近で若干の西進が見られるのに対して、南端付近では 3 cm を越える南進が観測されている。このように、GPS から得られた地殻変動においては、島の北部と南部で地殻変動の傾向が異なることが特徴である。しかし、干渉解析結果においては、摺鉢山周辺に局所的な地殻変動パターンが見られることから、GPS 観測結果における南北の傾向の違いは、その影響によるものと考えられる。特に、摺鉢山周辺には、

活発に変形する断層や噴気を伴う火口があるため、局所的な地殻変動が生じていた可能性は十分に考えられる。また、元山においては、干渉ペア A1 では見られなかった収縮変形パターンが見られ、その中心におけるスラントレンジ伸張量は、北東海岸付近を基準として約 2 cm である。その他にも、東・西海岸に局所的なスラントレンジ短縮パターンが見られるが、それらを除去したとしても、島の全域に 5 cm 程度のスラントレンジ短縮が残るように見える。一方、GPS により観測されている元山の隆起は、これらの局所的な変形では説明することが出来ない。元山の隆起と島全域におけるスラントレンジ短縮は対応しているのかもしれない。つまり、島全域が一樣に隆起していた可能性を示しており、この期間においては、比較的深部に位置する膨張源に起因する地殻変動が卓越していたのかもしれない。

4.3 干渉ペア A3 から得られた干渉画像

干渉ペア A3 から得られる干渉画像 (図 4(c)) は、元山における隆起がもっとも活発であった期間を含む地殻変動を示す。同期間における GPS 観測からは、干渉ペア A2 の期間と同様に、元山が大きく隆起し、摺鉢山付近は南進する傾向の地殻変動が観測されている。ただし、変位量は大きく異なり、元山の隆起は 30 cm 以上、摺鉢山周辺における南進は約 9 cm と求まった (図 3(c) および表 2)。干渉解析結果においては南北に勾配を持つスラントレンジ変化パターンが得られ、摺鉢山周辺におけるスラントレンジ短縮量が 8 cm 程度であるのに対して、元山北端付近においては約 30 cm の変化が検出された。この結果は干渉ペア A2 に関する干渉解析結果とは異なる傾向を持つことから、この期間において、新たな力源が活動を開始したと考えられる。

西海岸付近に着目すると、約 500 m の幅で南北に伸びる特徴的なスラントレンジ伸張パターンが見られる。干渉画像と断層分布 (大八木・井口, 1985) を重ねてみると、この干渉縞パターンの東端は西落ちの阿蘇台断層、西端は東落ちの断層と一致し (図 6(a))、これらの断層に挟まれた領域がグラーベン状に沈降したとすれば、この干渉縞パターンを説明することが可能である。また、元山においては収縮変形パターンが見られ、南北に勾配を持つスラントレンジ変化を除去して考えると、その中心におけるスラントレンジ伸張量は約 2 cm である。島の南端に位置する摺鉢山付近においては、局所的な目玉状のスラントレンジ伸張パターンが見られる。気象条件によっては、このような地形に相関する干渉縞パターンが現れる場合もあるが (たとえば、藤原ほか, 1999, 島田, 1999)、GPS によって観測された山麓 (IJS) と山頂 (IWJ2) の間の相対変位と整合することから (表 2)、実際の地殻変動を示している可能性が高いと考えられる。つまり、摺鉢山周辺における断層やその火山活動に伴う局所的な地殻変動を示しているのかもしれない。

4.4 干渉ペア D1 および D2 から得られた干渉画像

干渉ペア D1 の期間は干渉ペア A3 の期間の前半とほぼ重なっており、元山における隆起がもっとも活発であっ

た時期に相当する。また、干渉ペア D2 の期間は、干渉ペア A3 の期間の後半とほぼ重なっている。しかし、干渉ペア D1 から得られた干渉画像 (図 4(d)) においては、干渉ペア A3 から得られた南北に勾配を持つ干渉縞パターンではなく、西海岸付近に南北に伸びる干渉縞パターンが得られた。この相違は、それぞれの観測に関するレーダ波照射方向の違いによるものであり、この期間に生じた地殻変動が単なる上下変位のみではなく、水平変位を伴っていることを示している。西海岸付近の干渉縞パターンは、島の西端に位置する釜岩付近を基準として、島の中央部が相対的に隆起もしくは東方へ変位したことを示す。そのスラントレンジ変化量は約 12 cm であり、西海岸付近の 1~2 km の幅でスラントレンジが急激に変化していることが特徴である。特に、その干渉縞パターンの東端に位置する阿蘇台断層において、ステップ状にスラントレンジが変化するパターンが得られ、その断層に変形が集中していることを示している (図 6(b))。同様の干渉縞パターンは干渉ペア D2 から得られた干渉画像 (図 4(e), 図 6(c)) にも見られるが、そのスラントレンジ変化量は約 6 cm であり、干渉ペア D1 で得られた変化量と比べて半分程度である。元山における隆起は、11 月から 12 月にかけてもっとも活発であったが、1 月以降においては比較的低下しており、干渉解析結果はそれと調和的といえる。

島の北端付近においてはスラントレンジ短縮パターンが見られ、北東海岸付近を基準としたスラントレンジ短縮量は干渉ペア D1 で約 4 cm、干渉ペア D2 では約 8 cm であった。このように、島の北端におけるスラントレンジ短縮パターンは、1 月以降に加速していることが特徴である。また、干渉ペア D1 においては、元山における収縮変形パターンが見られ、北東海岸付近を基準とした中心付近のスラントレンジ伸張量は約 2 cm である。一方、干渉ペア D2 に関しては、島北端におけるスラントレンジ短縮パターンの影響が大きいこと、明瞭に判読することは出来ないが、大きく見積もっても、1 cm を越えるスラントレンジ変化は生じていないように見える。つまり、元山における収縮変形は、1 月以降にも鈍化していたのかもしれない。

5. 2次元地殻変動の検出

干渉ペア D1 と D2 に関する期間を足すと、干渉ペア A3 に関する期間と 10 日のずれがあるのみで、ほぼ重なる。GPS によって観測された地殻変動においては、この 10 日のずれによる変位の差は 1 cm 以内であり (表 2)、この期間に生じた地殻変動と比べて十分に小さい。つまり、2006 年 11 月前半から 2007 年 2 月前半までに生じた地殻変動は、アセンディング軌道とディセンディング軌道の 2 方向から観測されているといえる。よって、これらの観測結果に Fujiwara *et al.* (2000) の方法を適用することにより、それぞれの観測におけるレーダ波照射方向を含む共通面内で、地殻変動を 2 成分に分解・合成することができる。本観測におけるその共通面は、ほぼ東西方

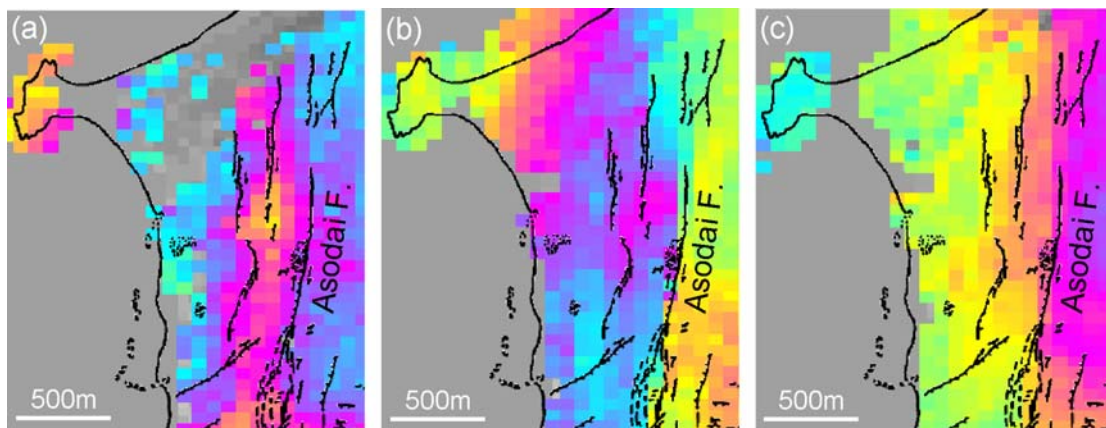


図 6 西海岸域における干渉画像の拡大図. 黒線は大八木・井口 (1985) による断層分布を示す. (a)干渉ペア A3 に関する拡大図. (b)干渉ペア D1 に関する拡大図. (c)干渉ペア D2 に関する拡大図

Fig. 6 Enlarged interferogram around the west coast area. Superposed fault map is from Oyagi and Inokuchi (1985).

(a) Enlarged interferogram for A3. (b) Enlarged interferogram for D1. (c) Enlarged interferogram for D2.

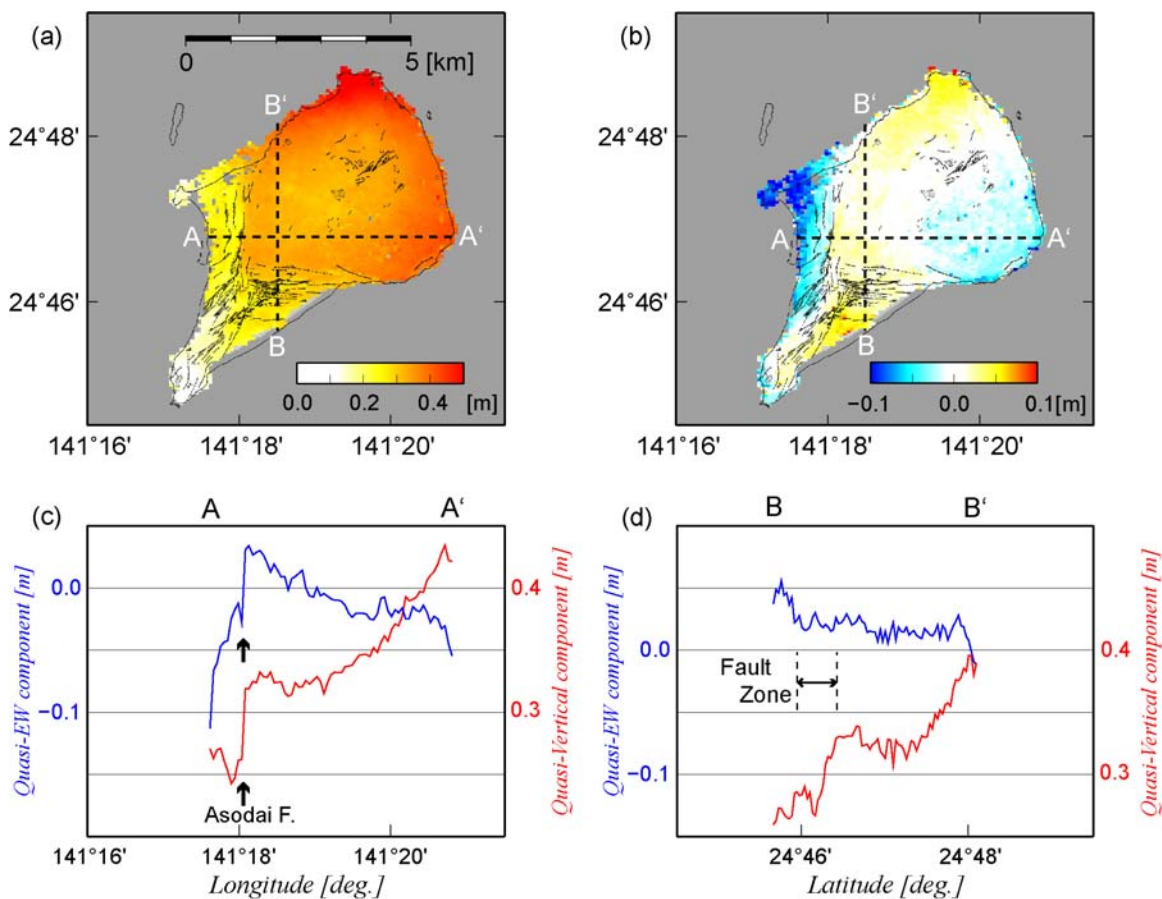


図 7 干渉ペア A3, D1, D2 から求めた 2 次元地殻変動. (a)大八木・井口(1985)による断層分布と重ねて示した準上下成分. (b)大八木・井口(1985)による断層分布と重ねて示した準東西成分. (c)図 7 (a) および (b) の A-A'における準上下成分 (赤線) と準東西成分 (青線) のプロファイル. (d)図 7 (a) および (b) の B-B'における準上下成分 (赤線) と準東西成分 (青線) のプロファイル

Fig. 7 Two-dimensional displacement calculated from interferograms of A3, D1, and D2. (a) Quasi-vertical component depicted with a fault map (Oyagi and Inokuchi, 1985). (b) Quasi-east-west component depicted with a fault map (Oyagi and Inokuchi, 1985). (c) Profiles of quasi-vertical (red line) and quasi-east-west (blue line) components along A-A' shown in Figs. 7 (a) and (b). (d) Profiles of quasi-vertical (red line) and quasi-east-west (blue line) components along B-B' shown in Figs. 7 (a) and (b).

向かつ垂直から南に 10 度傾いた面となり、準東西成分と準上下成分を計算することが可能である。図 7(a) および (b) は、電子基準点「硫黄島 1」における GPS 観測結果を考慮して電子基準点「母島」に対する変位に補正した、準上下成分と準東西成分を示す。

島の南端付近においては約 8 cm の隆起が得られたが、北に向かうにつれて次第に隆起量が増加し、島の北端付近では約 40 cm の隆起が検出された。このような傾動的なパターンが、この期間の地殻変動における特徴である。それぞれの干渉ペアにおいて、特徴的なスラントレンジ変化パターンが見られた西海岸付近の断層帯に着目すると、断層帯を軸として拡大し、東側が隆起するような地殻変動パターンが得られた。特に、断層帯の東端に位置する阿蘇台断層においては、準東西成分、準上下成分共にステップ状の変位パターンが見られ、その大きさは準東西成分で 5~10 cm、準上下成分で 10 cm を超えている (図 7(c))。阿蘇台断層は、明瞭な西落ちの断層崖を有しており、2006 年 12 月 12 日の現地調査においては、阿蘇台断層を横切る道路に亀裂が確認されていることから、現地調査と調和的な結果といえる。また、阿蘇台断層の西方 500 m に位置する断層帯においては東落ちの上下変位パターンが見られ、断層帯を軸とする拡大に伴うグラーベン状の沈降を示すものと考えられる。ただし、西端に位置する断層帯における変形は比較的緩やかであり、上下変化量も 5 cm 以下である。この拡大軸について北方への延長を見ると、走向を変化させずに海岸に達している。一方、南方への延長を見ると、元山と千鳥ヶ原の境界付近で南西方向に走向が変化し、摺鉢山の北山麓で海岸に達している。このパターンは断層分布 (図 7(a) および (b)) と類似しており、得られた地殻変動がそれぞれの断層の動きと関連しているのかもしれない。さらに、元山と千鳥ヶ原の境界付近に位置する東西に伸びる断層帯においても、元山側が隆起する方向の急激な変形が見られ (図 7(d))、西部と南部の断層帯に囲まれた元山がブロック的に隆起しているように見える。元山内部においては、中央部における収縮変形パターンや北端、南東海岸域における隆起が重畳している。特に、北端域においては東進、南東海岸域においては西進を伴っていることが特徴である。

6. まとめ

本研究においては、2006 年 8 月頃より火山活動が活発化した小笠原硫黄島の地殻変動を調査することを目的として、ALOS 衛星の PALSAR データを利用した干渉解析を行った。火山活動活発化直前においては、元山全域が沈降するような地殻変動パターンが見られたが、従来から継続的に進行していた収縮変形パターンは鈍化していたように見える。元山が隆起に転じてからしばらくは、従来と同様の収縮変形パターンが検出され、もっとも隆起が活発であった時期においては、若干それが大きくなり、その後、鈍化したように見える。ただし、他の地殻変動の影響による、見かけ上の変化である可能性も考え

られるので、これについては、より注意深い調査が必要である。また、隆起に転じてから 11 月までの期間においては、島全体が隆起するような地殻変動が生じていたことを示唆する結果が得られた。このことから、11 月までの隆起は、比較的深い領域にある力源の膨張によるものと推測される。それから 2006 年末にかけて、元山における隆起の加速や、地震活動の更なる活発化が観測されており、この期間においては、島内で複雑な変形パターンが検出された。本解析から得られた特徴的な地殻変動は次のとおりである。

- ・北に向かうにつれて次第に隆起量が増加する傾動的な地殻変動
- ・西海岸の南北に伸びる断層帯を軸に、拡大および西落ちの上下変位を伴う地殻変動
- ・阿蘇台断層とその 500 m 西に位置する断層に挟まれた領域におけるグラーベン状の沈降
- ・阿蘇台断層におけるステップ状の変形
- ・元山の南端付近の東西に伸びる断層帯における元山側が隆起するような急激な変形
- ・元山のブロック的な隆起
- ・元山中央部における収縮変形パターン
- ・元山の南東海岸域における隆起および西進
- ・元山の北端付近における隆起および東進

これらの地殻変動パターンに関する空間波長は比較的短いことから、比較的浅部に位置する力源に起因するものと推測される。

以上のように、PALSAR の干渉解析を小笠原硫黄島に適用することにより、2006 年の火山活動活発化直前から沈静化するまでの地殻変動の変化を詳細に捉えた。特に、火山活動がもっとも活発であった期間に関しては、2 方向からの観測によって、2 次元の地殻変動が求めることができた。これらは小笠原硫黄島の活動メカニズムを研究する上で重要な情報となることが期待される。今後は、他の観測データも併用した総合的な解釈により、小笠原硫黄島の火山活動メカニズムの解明を試みる予定である。

謝辞

本研究で用いた ALOS/PALSAR データの一部は、火山噴火予知連絡会が中心となって進めている防災利用実証実験に基づいて観測・提供されたものであり、原初データの所有権は、経済産業省 (METI) および宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が有している。また、一部は PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有しているデータを用いた。JERS-1 の SAR データに関する原初データの所有権は、METI および JAXA が有する。本研究では、日本全国 GPS 観測網 GEONET で観測されたデータ、および F2 解析値を使用した。本論文で示した図は、Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) を用いて作成した。本論文の改訂においては、吉田則夫総括主任研究員からの丁寧なコ

メントが有益であった。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Amelung, F., Jonsson, S., Zebker, H., and Segall, P. (2000) : Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry. *Nature*, **407**, 993-996.
- 2) 防災科学技術研究所・鹿児島大学理学部(2002):2001年9月・10月の小笠原硫黄島の噴火活動. 火山噴火予知連絡会会報, 80, 65-68.
- 3) 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一標高補正. 測地学会誌, 45-4, 315-325.
- 4) Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., and 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.
- 5) 貝塚爽平・加藤茂・長岡信治・宮内崇裕(1985) : 硫黄島と周辺海底の地形. 地学雑誌, 94-6, 22-34.
- 6) Kaizuka, S. (1992) : Coastal evolution at a rapidly uplifting volcanic island: Iwo-jima, western pacific ocean. *Quaternary International*, 15/16, 7-16.
- 7) 熊谷貞治・高橋博(1985) : 硫黄島の地殻変動 (II). 地学雑誌, 94-6, 479-487.
- 8) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaute, T. (1993) : The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**, 138-142.
- 9) Massonnet, D., Briole, P., and Arnaud, A. (1995) : Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, **375**, 567-570.
- 10) Ohkura, H. (1998) : Applications of SAR data to monitoring earth surface changes and displacements. *Advances Space Res.*, 21, 485-492.
- 11) 大八木規夫・井口隆(1985) : 硫黄島の地質. 地学雑誌, 94-6, 436-445.
- 12) 小澤拓, 谷口宏充(2007) : 合成開口レーダ干渉法による白頭山の火山活動に伴う地殻変動の検出. 防災科学技術研究所研究報告, No.71, 1-10.
- 13) Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., and Webb, F. H. (1996) : Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, 101, 23109-23125.
- 14) Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T. (2000) : Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *PAGEOPH*, 157, 2303-2322.
- 15) 島田政信 (1999) : SAR干渉処理における軌道誤差と大気位相遅延の補正方法. 測地学会誌, 45-4, 327-346.
- 16) Ukawa, M., Fujita, E., Ueda, H., Kumagai, T., Nakajima, H., and Morita, H. (2006) : Long-term geodetic measurements of large scale deformation at Iwo-jima caldera, Japan. *J. Volcanology Geothermal Res.*, 150, 98-118.
- 17) 鶴川元雄・藤田英輔・上田英樹・野崎京三・岩本鋼司(2006) : Scintrex CG-3M型重力計で測定された小笠原硫黄島の重力変化. 測地学会誌, 52-1, 37-50.
- 18) Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) : New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, 79, 579.

(原稿受理 : 2007年4月13日)

要 旨

2006 年 8 月頃から火山活動の活発化が観測された小笠原硫黄島を調査するため、陸域観測技術衛星「だいち」の PALSAR データを用いた SAR 干渉法の適用を行った。元山が隆起を開始する直前においては、従来から継続的に進行していた収縮変形パターンは鈍化していたように見える。また、隆起に転じてから 11 月までの期間においては、島全体が隆起するような地殻変動が生じていたことを示唆する結果が得られた。このことは、11 月までの期間に比較的深部に位置する力源の膨張に起因する地殻変動が卓越していたと考えられる。もっとも火山活動が活発であった 11 月以降においては、ディセンディング軌道とアセンディング軌道からの 2 方向からの観測が行われ、これらのデータから地殻変動の準上下成分と準東西成分の 2 成分を求めた。島の南端付近における隆起量は 8 cm 程度であるが、元山に近づくにつれて隆起量は大きくなり、島の北端付近では約 40 cm の隆起が検出された。西海岸付近における南北に伸びる断層帯においては、拡大かつ西落ちの上下変位を伴う地殻変動が検出された。特に、断層帯の東端に位置する阿蘇台断層において、変形が集中していることが特徴である。また、元山と千鳥ヶ原の境界付近に位置する東西に伸びる断層帯においても、元山側が隆起する方向の急激な変形が見られ、元山がブロック状に隆起しているように見える。元山内部においては、中央部における収縮変形パターンや北端、南東海岸域における隆起が重畳している。特に、北端域においては東進、南東岸域においては西進を伴っていることが特徴である。これらの地殻変動パターンの空間波長は比較的短いことから、比較的浅部に位置する力源に起因するものと推測される。

キーワード：小笠原硫黄島, SAR 干渉法, 地殻変動, PALSAR, ALOS