

リモートセンシングによる伊豆鳥島の2002年噴火後の
地殻変動と温度分布の観測

和田 裕*・實渕哲也*・大倉 博*・鶴川元雄*

(2005年11月24日受付, 2006年11月9日受理)

Crustal Deformation and Surface Temperature Distribution Observed by
Remote-Sensing Techniques after the 2002 Izu-Torishima Eruption

Yutaka WADA*, Tetsuya JITSUFUCHI*, Hiroshi OHKURA* and Motoo UKAWA*

The volcanic island, Izu-Torishima, erupted in August, 2002. The National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention observed the crustal deformation and surface temperature distribution of the island after the eruption by using remote-sensing techniques of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and airborne Multi-Spectral Scanner (MSS). The InSAR image from RADARSAT-1 data acquired about 15 and 40 days after the eruption exhibits no large deformation exceeding several centimeters for the entire island, showing the limit of the analysis without any ground control points (GCPs). However, a small local movement (less than 2.8 cm) is observable at the center of the island. The airborne MSS, VAM-90A, obtained the surface temperature distribution from infrared bands and pseudo-color images from visible and near-infrared bands almost one year after the eruption. The high-temperature area (over 70°C) is limited around the central crater, where the ground surface is covered by sublimed sulfur. The highest temperature of 80°C is detected in this area.

Key words: Izu-Torishima 2002 eruption, remote sensing, InSAR, multi spectral scanner

1. はじめに

2002年8月に伊豆鳥島の硫黄山が63年ぶりに噴火した(伊藤・他, 2003; 海上保安庁海洋情報部・東京大学大学院総合文化研究科, 2002)。同島は東京の南方約580 kmに位置し, Fig. 1に示されるように子持山・硫黄山の二つの中央火口丘を有する直径約2.7 kmの火山島である(気象庁, 2005)。

2002年の噴火時には連続的な火山活動観測が行なわれていなかったため, 我々は衛星搭載 SAR (Synthetic Aperture Radar, 合成開口レーダ) および航空機搭載 MSS (Multi-Spectral Scanner, 多波長走査計) という2種類のリモートセンシング手法により噴火活動の把握を試みた。特に干渉 SAR 手法については, 国内外の火山島に適用された実績はあるが(例えば Ohkura (1998)), これらの多くは軌道誤差補正のための参照点(GCP)を島内に設定することが可能な比較的大きな火山島を対象とし

ており, 今回のように小規模な火山島でかつ島内の地上観測データのない条件での適用例の報告はなかった。我々は, このような環境下での干渉 SAR 解析の有用性の検証も今回の目的とした。なお, DEMとして国土地理院発行「数値地図50m(標高)」を, また図中の等高線には国土地理院発行「1:25000地形図」を使用した。

2. RADARSAT-1衛星観測データより検出された地殻変動

我々は, 2002年8月27日(噴火のおよそ半月後)とその24日(1回帰)後の9月20日にRADARSAT-1衛星によって取得されたデータを用いて位相干渉処理を行ない, 地殻変動の検出を試みた。同衛星に搭載された SAR センサはCバンド(周波数5.3 GHz, 波長5.6 cm)のマイクロ波を用いており, 位相干渉処理によりセンチメートルのオーダーでの地表の相対的な変動を検出すること

* 〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1
防災科学技術研究所
National Research Institute for Earth Science and
Disaster Prevention, 3-1, Tennodai, Tsukuba City,

Ibaraki Pref. 305-0006, Japan.

Corresponding author: Yutaka Wada
e-mail: y-wada@bosai.go.jp

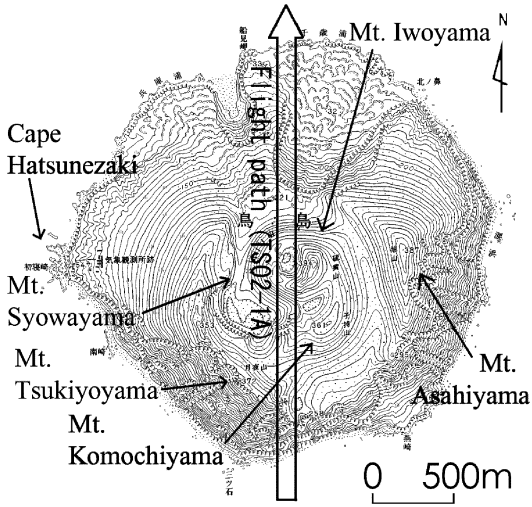


Fig. 1. Topographic map of Izu Torishima. We used a map extracted from “1 : 25,000 Scale Topographic Map”, issued by the Geographical Survey Institute. English texts, arrows, north arrow, and scale are edited by the authors.

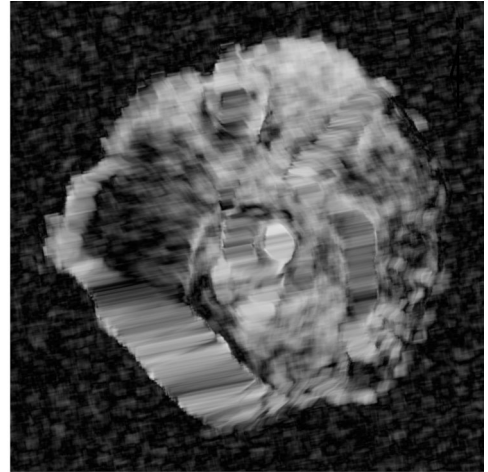


Fig. 3. Coherence map with 12×12 window size. The average coherence is 0.43.

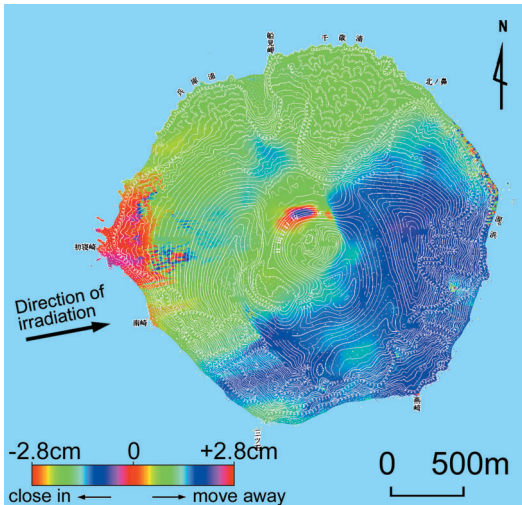


Fig. 2. Interferogram of Izu Torishima, generated from RADARSAT-1 data pair (acquired on 2002/08/27 and 2002/09/20).

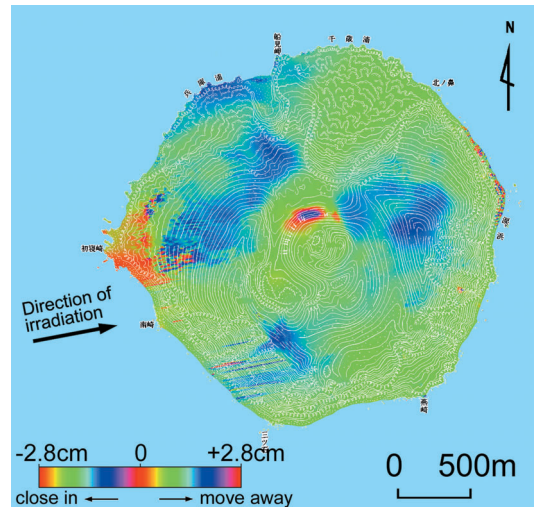


Fig. 4. Corrected interferogram of Izu Torishima (generated from the same pair as Fig. 2). We adjusted the orbital parameters to make the phase around the entire island flatten.

ができる。また同センサは約 10 m の高い空間分解能を有している。

解析処理には、リモートセンシング解析用ソフトウェア EarthView™ を用いた。解析に用いたデータ等の諸元を Table 1 に示す。位相干渉処理により得られた干渉画

像を Fig. 2 に、干渉性の空間分布を示すコヒーレンスマップを Fig. 3 にそれぞれ示す。なお、Fig. 3 の計算に用いたウィンドウの大きさは 12×12 ピクセルで、陸域におけるコヒーレンスの平均値は 0.43 であり、概ね十分な干渉が得られている。島の中西部には暗色の領域が

Table 1. Description of DInSAR source.

	Data1(Master)	:	Data2(Slave)
Satellite	RADARSAT-1		
Date	Aug.27, 2002	:	Sep.20, 2002
Orbit	35555 Ascending	:	35898 Ascending
Baseline*	B _{perp} = 8.52 (m) B _{para} = 20.40 (m)		
Beam mode	SAR FINE 1 FAR BEAM (Incidence Angle: 37.2–40.3 deg) 5.3GHz C-Band		
DEM	GSI Digital Map 50m Grid (Elevation)		
Processor	Earthview™ (Atlantis Scientific/Vexcel)		

* The baseline is the cross-track orbit separation. B_{perp} is the component of the baseline which is perpendicular to the slant-range direction, and B_{para} is the component which is parallel to the slant-range direction. The value of B_{perp} influences the sensitivity of the orbital fringe and the topographic fringe.

あるが、これは第4節で後述する我々のMSSによる観測結果 (Fig. 5) から得られた植生に覆われた領域に重畳することから、低干渉性の要因は植生の影響であると考えられる。

Fig. 2には全体として北西側が青色、南東部が青色という傾向が見られる。このような変位傾向が生じる要因としては、島全体が一様に変形した可能性、あるいは軌道縞 (衛星の軌道誤差に起因する縞状成分) である可能性が考えられる。まず我々は、この変位傾向は軌道縞であると仮定し、対応する軌道誤差成分の除去を試みた。

Fig. 2の解析結果に対し島の海岸線付近の相対変位量を全体に小さくする軌道補正として、9月20日の衛星軌道に垂直方向−2.0m、偏揺角−0.000283°の補正を施したものがFig. 4である。RADARSAT-1衛星の公称軌道精度は鉛直方向成分で±26m、偏揺角成分で±0.1°であり (Table 2, Table 3)、我々の補正量はこれらよりも十分に小さく、Fig. 2の島全体の相対変位傾向を軌道縞とする仮定と矛盾しない。

この変位傾向が軌道誤差成分によるものでなく実際の変動の影響であると仮定すると、1) 島全体が傾動的に変動した可能性 (島の北西部が隆起、南東部が沈降)、2) 北西部はほぼ西方に、南東部はほぼ東方に変位した可能性のいずれか (または両方) が考えられる。しかし、その変位量は上述のように軌道縞として充分説明可能であり、真の地殻変動に起因していることを確認するためには地上でのGCPデータが必要である。

北西-南東方向の変位傾向以外に硫黄山北側斜面に東西およそ250m、南北およそ100mの大きさの明瞭な楕円状の干渉縞 (内側から青→赤→緑) が確認できる。この干渉縞は硫黄山北側斜面の一部での局所的な隆起もし

Table 2. Position and velocity errors of RADARSAT-1.

	Position Errors	Velocity Errors
Along-Track	±1430m	±0.75m/s
Cross-Track	±36m	±1.5m/s
Radial	±26m	±1.5m/s

Table 3. Rotation measurement and drift errors of RADARSAT-1.

	Rotation Measurement Errors	Drift Rates
Roll	±0.1°	±0.001°/s
Pitch	±0.1°	±0.001°/s
Yaw	±0.1°	±0.001°/s

くは西方への変動で説明できる。このとき、楕円状の縞の外側の緑色域と縞の中央部との相対変動量はおよそ1.9cm (2/3 サイクルに相当)、位相差の最も大きい旭山山頂付近からの相対変動量はおよそ2.8cm (1 サイクル) である。

このような干渉縞は、DEMと実際の標高との間の誤差や、水蒸気分布の差による大気遅延誤差によって現れることがある。しかし、今回の解析で用いたデータのペアは観測軌道間の距離 (baseline) が垂直方向8.5mと短く、2/3 サイクルに対応する標高の誤差はおよそ200–300mに及ぶことから標高の誤差により生じたものとは考え難い。また、大気遅延誤差が原因と仮定した場合、局所的に水蒸気圧が周囲と著しく異なる (8月観測時に著しく高かった、または9月観測時に著しく低かった) 領域の存在が必要であるため、その水蒸気圧を気象庁全球客観解析データを用い、島田 (1999) に従って計算した。干渉縞の規模を考慮し、標高400m付近に周囲との温度差のない120mの厚さの水蒸気圧が異常な気塊の存在を仮定した。この場合、2/3 サイクルの位相差が生じるためには気塊と周囲との間におよそ10hPaの水蒸気圧の差が必要であることがわかった。8月観測時の標高400m付近の温度は297.7K (飽和水蒸気圧は31.1hPa)、水蒸気圧は26.1hPa (湿度は84%) であるため、仮に水蒸気に飽和した (湿度100%) 気塊が存在したとしても周囲との水蒸気圧の差は約5hPaに過ぎない。9月の観測時の温度は297.2K (飽和水蒸気圧は30.1hPa)、水蒸気圧は24.8hPa (湿度82%) であった。局所的に周囲より水蒸気圧が10hPa低い領域が存在したと仮定すると、水蒸気圧が14.8hPa (湿度49%) の気塊が存在したことになる。一般的な気象現象でこのような狭い範囲に極端な水蒸気異常が起こることは考え難い。また、噴煙の影響で電波の伝達に遅延が生じる例 (Houlié N. et al., 2005)

も報告されているが、海上保安庁海洋情報部(2003)によると伊豆鳥島の噴煙活動は8月21日以前で終息しており、また8月12, 13, 14日に水蒸気と見られる白煙や噴煙が確認された火口(1998年火口および2002年火口)は硫黄山の火口南西側壁に位置し、干渉縞の範囲とは符合しないため、噴煙の影響による干渉縞とも考え難い。以上の検討から、硫黄山北側斜面の干渉縞は誤差によって生じたものではなく、真の地殻変動に起因すると考えられる。

このほかに、Fig. 2とFig. 4のいずれからも島の西端の初寝崎付近に赤色域が確認でき、初寝崎付近にも局所的な変動(旭山山頂付近から相対的に2/3サイクル \approx 1.9cm程度)が生じている可能性が考えられる。ただし初寝崎のすぐ東は急峻な海食崖となっているため、正射影画像作成時の幾何的補正の際に、崖下や崖壁の限られた範囲の変動により生じた赤色域が見かけ上大きく広がられている。また、初寝崎東の崖上の領域は比較的高いコヒーレンスが低い範囲である(Fig. 3)ことから信頼性はあまり高くない。

以上の解析結果をまとめると、この期間の島内の相対地殻変動は最大でも2.8cm程度であり、それほど大きな地殻変動は発生していなかった可能性が高い。

伊豆鳥島の地殻変動に関しては、九州大学による2003年5月から2004年5月にかけてのGPS観測の結果が報告されている(松島・杉本, 2004)。この報告でも変動量は1点を除き2cm以内と小さく、全体として大きな変動はないという我々の解析結果に矛盾しない。

3. 島嶼部における干渉 SAR

干渉 SAR による火山島の地殻変動解析は、国内では小笠原硫黄島(Ohkura, 1998)や三宅島(大倉・島田, 2001)などで、国外ではカーボヴェルデ(Amelung and Day, 2002)、カナリア諸島(Fernández *et al.*, 2003)、アリューシャン列島(Bridges and Gao, 2006)、ガラパゴス諸島(Amelung *et al.*, 2000)などで実施されている。これらの火山島では、噴火の前後にかけて行われた水準測量やGPS測量により変動量が判明している点をGCPとして軌道誤差の補正を行なうことが可能であった。また、いくつかの火山島は島内または近傍に火山活動の影響を受けていないと推定できる陸域(火山体から数十キロ程度離れた陸地)が存在しており、その範囲を変動量のGCPとすることで高精度に補正することが可能であったと考えられる。伊豆鳥島のような直径3km程度の孤島の場合、現地測量によるGCPを用いず島全体の一様な傾動や伸張といった変動成分と軌道誤差成分とを分離することは困難である。しかし、島内の局所

的な変動を検出することは可能である。日本には利島、青ヶ島、硫黄島島といった直径2-4km程度の比較的小さな火山島が存在する(気象庁, 2005)ことから、本解析はこのような島々に対する干渉 SAR 技術適用のテストケースとなりうると考えられる。

今回の解析結果を過去の変動と比較するために、我々は衛星搭載 SAR によって観測された伊豆鳥島の他のデータの解析を試みた。しかし、Cバンド SAR センサを有する ERS-1/2、RADARSAT-1 の各衛星によって観測されたデータは全く存在せず、Envisat 衛星は噴火時まだ正規運用を開始していなかった。Lバンド SAR センサを有する JERS-1 衛星によって観測されたデータ(PATH=61; ROW=249)が存在したため、1992年から1998年までの多数の観測データから、軌道間距離56-220m程度と比較的好条件の複数のペアについて解析を試みた。しかし、得られた干渉画像は全般に干渉性が低く、満足な干渉が得られるのは島内でも北部の溶岩地帯など一部の範囲に限られ、島全体の変動について議論できるような干渉縞は得られなかった。また硫黄山北斜面付近にも明瞭な干渉縞は見られなかった。JERS-1衛星は1998年に運用が終了していることから、2002年噴火後の画像を取得することも不可能であった。

2006年1月に打ち上げられた陸域観測衛星ALOS(だいち)にはフェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ(PALSAR)センサが搭載されている。同センサは10mの比較的高い空間分解能を有しており、また確定軌道精度は1mと極めて高精度である。高度約700km、入射角34.3°のモードで視線方向に3km程度の径の島を観測した場合、軌道誤差で生じ得る位相差は最大1/5サイクル程度であるため、直径数キロ程度の孤島を観測する場合GCPがなくても軌道縞を十分に除去することができると期待される。

4. 航空機搭載 MSS により観測された地表面状況

伊豆鳥島の噴火後の状況を把握するため、我々は航空機搭載型のMSSであるVAM-90Aを用いて地表面温度および地表面状況の観測を計画した。VAM-90Aは可視近赤外5バンドと赤外4バンドの波長域を同時に観測するセンサを有する。その瞬時視野角は3.0mrad(可視近赤外バンド)と1.5mrad(赤外バンド)で、対地高度3,000mで観測した場合の空間分解能は、それぞれ9mと4.5mである(實測・他, 2002)。VAM-90Aは一般的な航空写真や赤外カメラと異なり、各バンドにより地上の分光画像が計測できるため、対象物を形状とスペクトル情報(温度情報も含む)の両面から同時に評価できる。

当初は噴火直後の2002年8月に観測を予定していたが、

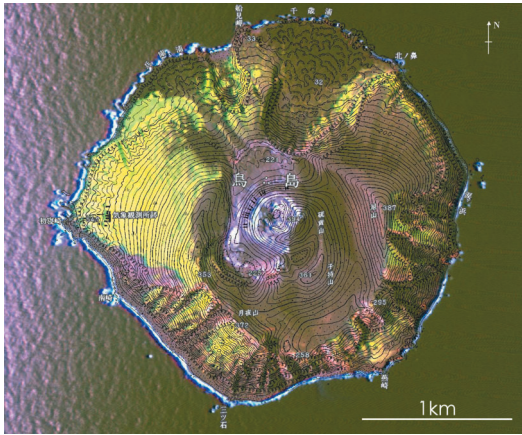


Fig. 5. Pseudo color image of Izu Torishima, observed on Aug.10, 2003 (15:05-15:15 JST).

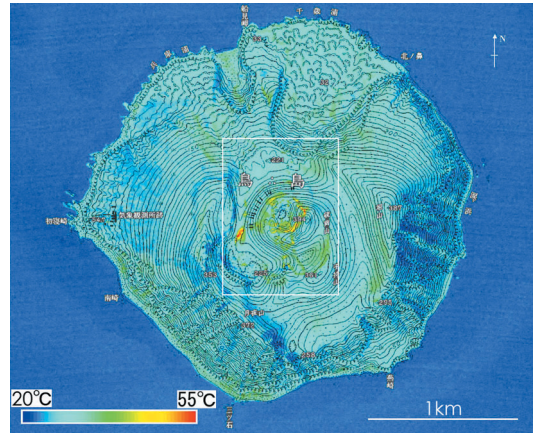


Fig. 6. Brightness temperature image of Izu Torishima, observed with band 8 (8.00-11.00 μm). A white rectangle indicates the area shown in Fig. 7.

計画期間中天候条件に恵まれなかったため観測は2003年8月10日(15:05-15:15 JST)に行なわれた。観測高度は海拔3,000m、測線はFig. 1中に示したTS02-1Aである。観測によって得られたデータに国土地理院発行の「数値地図50m(標高)」および「1:25000地形図」を用いて幾何補正を施したものをFig. 5およびFig. 6に示す。

Fig. 5は、可視近赤外のバンド2, 3, 4(観測波長はそれぞれ0.61-0.69 μm , 0.80-1.10 μm , 1.55-1.75 μm)のデータを青, 緑, 赤に割当てた全島の擬似カラー画像であり、植生は緑色に、裸地は茶褐色に発色している。同図より、島の西側に植生域が広がることと島の中央部は植生に覆われていないことがわかる。また、山頂付近に明色の物質の分布が認められる。杉本・松島(2005)は、この明色部と重畳する複数地点において硫黄昇華物の付着を現地を確認している。硫黄は可視近赤外バンドにおいて平坦で高い反射特性を有することから、山頂付近の明色域は火山活動に関連する硫黄昇華物の分布を捉えたものと考えられる。

Fig. 6は熱赤外のバンド8(観測波長8.00-11.00 μm)で測定した分光放射輝度値から、瞬時視野内が放射率1.0で温度分布が一様であると仮定して作成した全島の輝度温度分布画像である。同図からは、相対的に高温の領域は島の中央部付近に集中していることがわかる。みかけの最高輝度温度は56°Cであった。

この島の中央部の地表面温度分布を評価するために、バンド8で観測した分光放射輝度値に放射伝搬解析コードMODTRAN4.0(Berk *et al.*, 1989)による放射伝搬解析を施し、観測値から地表の分光放射輝度値のみを抽出した(モデル大気はMODTRANのTropicalを採用)。

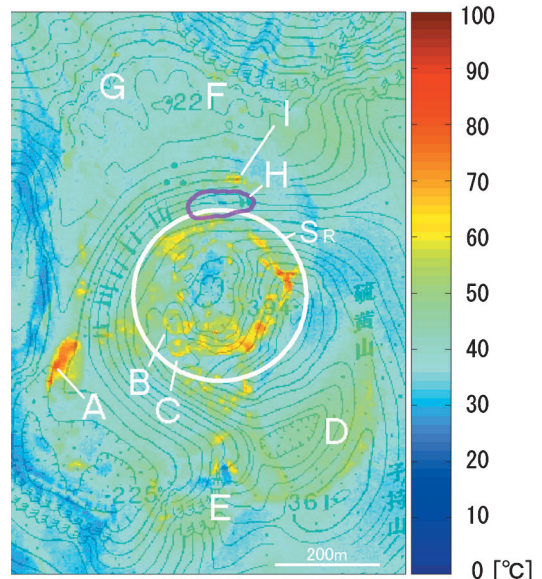


Fig. 7. Surface temperature from calibrated image by atmospheric and topographic correction (assumed emissivity=0.98), in the central part of Fig. 6.

この島の中央部の地表面は、Fig. 5の可視近赤外画像から、植生には覆われておらず地表が露出した状態であると推察されるため、この地表面を火成岩と仮定した。最小と最大の温度推定値を見積もるために、火成岩の放射率を0.85-0.98の範囲とする文献値(Salisbury and D'Aria, 1992)に基づき放射率0.98および0.85について計算した。

以上の解析から、放射率を0.98とした場合の島の中央部の地表面温度分布をFig. 7に示す。同図より、Fig. 5における明色部に重畳する山頂火口縁部付近（図中の S_R ）およびその南西部（図中のA付近）に70°C（80°C）以上の温度分布が確認できる（括弧内の温度は放射率0.85を仮定した場合の推定値、以下同様）。A点ではみかけの最高温度である56°Cが観測されたが、放射伝搬解析による同地点の地表面温度の推定値は80°C（91°C）であった。その他に45°C（50°C）程度の比較的温度的の高い領域が見られるが、これは観測時刻や地形を考慮すると日射の影響のみでも到達し得る程度の温度であるため、領域内に火山性の熱源が存在するとは断定できない。

更に細かく見ると、同図のBおよびCに60°C（70°C）以上の長径30-40m程度の円形の温度分布パターンが見られる。図中D付近にも45-60°C（50-70°C）程度の相対的にやや高温の部位が見られる。E付近には最高63°C（75°C）程度の地点がある。また、F、G付近には60°C（70°C）程度の地点が散在している。

可視近赤外画像および地形図から、最高温度が観測されたA点は1956-57年にかけて火口南西部に形成された「昭和山」と呼ばれる隆起部（田中、1958）、Bは2002年に形成された火孔（pit crater）、Cは1998年に形成された火孔の熱源をそれぞれ捉えたものと考えられる。

紫色の線で囲まれたHの領域は、Fig. 4における中央付近の楕円状の干渉縞のうち硫黄山北斜面の青色の範囲を示したものである。観測時期が異なるが、第2節で検出された局所的変動の中央部分の地表面温度はほぼ30°C程度であり、異常を示していない。同領域は可視近赤外画像（Fig. 5）においても暗色で、硫黄昇華物の付着も見られない。Fig. 3においても同領域内は周辺部と比較してコヒーレンスが高いこともあり、この付近の変位は地表面上の噴出物の付着等ではなく、地中の何らかの力源による変動の可能性がある。その場合、変動範囲が狭いことから、想定される力源は極めて浅い位置に存在すると考えられる。また、 S_R の北辺の高温域とI点付近の高温部はFig. 4の赤色域に含まれることから、地殻変動とこれらの熱源との間に関連がある可能性もある。

九州大学の現地調査によると、硫黄山北部の火口原や月夜山山頂北部のカルデラ縁等に地中温度90-100°Cの点（地下10-50cm深）が多数存在することが報告されている（杉本・松島、2004；杉本・松島、2005）。硫黄山北部の火口原の調査結果はFig. 7のF・G付近に散在する60°C（70°C）程度の温度分布と対応が付き、月夜山山頂北部のカルデラ縁の温度分布は同図Eの63°C（75°C）の温度分布と対応が付き、また、同調査では子持山の山頂部に火山性の噴出物と見られる明色物の付着が報告され

ている。これは我々の観測において45-60°C（50-70°C）程度の温度分布が推定された図中D付近の高温域の一部である。我々の観測では日照の影響とみられる45°C（50°C）程度の高温部が他に数箇所検出されており、D付近の温度はこれらの高温部と同程度であるため厳密な判別は困難であるが、同調査報告の結果を踏まえれば、D付近では火山性の熱源の一部も捉えていた可能性がある。

温度分布については、海上保安庁が2001年10月および2002年9月に観測した火口付近の温度画像を発表している（海上保安庁海洋情報部、2003）。今回の我々の観測と比較すると、噴火直後の画像である2002年9月と噴火1年後の2003年8月の観測との間に温度分布の大きな変化は見られず、この期間に伊豆鳥島の火口付近は顕著な熱的変動がなかったと言える。

5. まとめ

伊豆鳥島の2002年噴火以後の火山活動の把握のため、防災科学技術研究所では衛星搭載SARセンサおよび航空機搭載MSS（VAM-90A）を利用したリモートセンシングによる観測を行なった。

RADARSAT-1衛星により観測されたデータの解析により、伊豆鳥島の噴火の半月後から約一ヶ月の間に生じた硫黄山北斜面の局所的な地殻変動が検出された。島内における相対変動量は最大2.8cm程度であり、この時期には火山活動は活発ではなかったと言える。ただし、本解析では軌道誤差補正にGCPを用いない手法を適用しており、島全体に及ぶような変動は正確に把握することができない。干渉SARによる解析の離島への適用は有効であるが、より効果を高めるためにはGCPとなるGPS連続観測網の整備と噴火以前からの定常的な画像取得が必要である。

噴火の約1年後に実施したVAM-90Aによる観測により、可視近赤外画像からは硫黄昇華物と考えられる領域を検出し、また温度画像からは山頂周辺部に高温域を検出した。放射伝搬解析の結果、地表面の最高温度は地表面の放射率を0.98と仮定すると80°C、放射率を0.85と仮定すると91°C程度であると推定された。

RADARSAT-1観測データから検出された硫黄山北斜面の局所的変動の中心部は比較的高いコヒーレンスが強く周辺部はやや低くなっている。また、観測時期が異なるがVAM-90Aによる可視近赤外画像でも変動範囲の中心部は暗色であり、熱赤外画像でも比較的低温を示している。変動範囲が狭いことから、この変位の力源は極めて浅い位置に存在すると考えられる。

謝 辞

各観測結果の解釈にあたり大変貴重なご意見を頂きました元東京大学の島治氏、本稿の推敲にあたり貴重かつ有益な御意見を賜りました査読者の松島健氏および匿名査読者、ならびに編集委員の後藤章夫氏に深く感謝申し上げます。

引用文献

- Amelung, F. and Day, S. (2002) InSAR observations of the 1995 Fogo, Cape Verde, eruption: Implications for the effects of collapse events upon island volcanoes. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi: 10.1029/2001GL013760.
- Amelung, F., Jónsson, S., Zebker, H. and Segall, P. (2000) Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galápagos volcanoes observed with radar interferometry. *Nature*, **407**, 993–996.
- Berk, A., Bernstein, L. S. and Robertson, D. C. (1989) MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, Air Force Geophysics Laboratory Technical Report, GL-TR-89-0122, Hanscom AFB, MA.
- Bridges, D. L. and Gao, S. (2006) Spatial variation of seismic b-values beneath Makushin Volcano, Unalaska Island, Alaska. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **245**, 408–415.
- Fernández, J., Yu, T.-T., Rodríguez-Velasco, G., González-Matesanz, J., Romero, R., Rodríguez, G., Quirós, R., Dalda, A., Aparicio, A. and Blanco, M. J. (2003) New geodetic monitoring system in volcanic island of Tenerife, Canarias, Spain. Combination of InSAR and GPS techniques. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **124**, 241–253.
- Houlié, N., Briole, P., Necessian, A. and Murakami, M. (2005) Sounding the plume of the 18 August 2000 eruption of Miyakejima volcano (Japan) using GPS. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi: 10.1029/2004GL021728.
- 伊藤弘志・大谷康夫・小野智三・大島 治・成田 学・山野寛之・佐藤勝彦・渡邊健志・小河原秀水 (2003) 鳥島火山2002年噴火の経緯. *火山*, **48**, 235–239.
- 實測哲也・鶴川元雄・藤田英輔・岡田義光・宮坂 聡・赤池勝明・松岡滋治 (2002) 航空機搭載型多波長走査計による有珠山2000年噴火の多時期観測. *火山*, **47**, 297–323.
- 海上保安庁海洋情報部 (2003) 海底火山の最近の活動について. 火山噴火予知連絡会会報, 第83号, 103–109.
- 海上保安庁海洋情報部・東京大学大学院総合文化研究科 (2002) 鳥島2002年8月噴火の経緯. 第93回火山噴火予知連絡会資料
- 気象庁 (2005) 日本活火山総覧 (第3版). 気象庁, 437–440.
- 松島 健・杉本 健 (2004) 伊豆鳥島火山の地震活動及び地殻変動. 日本火山学会2004年度秋季大会講演予稿集, 86.
- Ohkura, H. (1998) Applications of SAR data to monitoring Earth surface changes and displacements. *Advances in Space Research*, **21**, 485–492.
- 大倉 博・島田政信 (2001), RADARSAT DInSARによる三宅島の地殻変動のモニタリング. *自然災害科学* **20**, No. 2, 136–137.
- Salisbury, J. W. and D'Aria, D. M. (1992) Emissivity of Terrestrial Materials in the 8–14 μm Atmospheric Window. *Remote Sens. Environ.*, **42**, 83–106.
- 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—地殻変動検出への応用—. *測地学会誌*, **45**, 327–346.
- 杉本 健・松島 健 (2004) 伊豆鳥島火山の噴気活動. 日本火山学会2004年度秋季大会講演予稿集, 154.
- 杉本 健・松島 健 (2005) 伊豆鳥島火山の噴気活動. 九州大学大学院理学研究院研究報告 地球惑星科学, **22**, 23–27.
- 田中康弘 (1958) 鳥島火山の活動性 (I). *験震時報*, **23**, 21–36.

(編集担当 後藤章夫)