

航空機搭載型合成開口レーダー (SAR) 観測による
浅間火山 2004 年噴火に伴う火口内の地形変化

大木章一*・村上 亮**・渡辺信之***・浦部ぼくろう***・宮脇正典****

(2005年4月18日受付, 2005年8月30日受理)

Topographic Change of the Summit Crater of the Asama Volcano during 2004 Eruption
Derived from Repeated Airborne Synthetic Aperture Radar (SAR) MeasurementsShoichi OKI*, Makoto MURAKAMI**, Nobuyuki WATANABE***,
Bokuro URABE*** and Masanori MIYAWAKI****

The Asama volcano (elevation 2568 m), central Japan, erupted on September 1, 2004. Since then thick volcanic fumes prevented monitoring of the topography on the summit crater floor by standard optical methods. To detect geomorphic changes of the volcano, Airborne Synthetic Aperture Radar (AirSAR) measurements including interferometry were repeatedly carried out on September 16, October 22, December 15, 2004 and March 10, 2005. The comparison of AirSAR result in September with a digital elevation model (DEM) by laser profiling measurements in October 2003 revealed that a pancake shape lava mound (volume = $0.9 \times 10^6 \text{ m}^3$) was formed on the floor. The subsequent AirSAR measurement on October 22 indicated that the pancake shape mound had disappeared and a small pit hole was formed. The volume of ejecta amounted to $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$. The AirSAR results in December 2004 and March 2005 suggested that the shape of the crater floor stayed generally unchanged during that time window. From these, we infer that lava extrusion during the 2004 Asama eruption occurred within a short period around September and October.

Key words: Asama volcano, SAR, DEM, topography, volume of lava

1. はじめに

浅間山 (2,568 m) は、東北日本弧と伊豆マリアナ弧に伴う両火山フロントの会合点付近に立地する極めて活動的な火山で、有史以来多くの噴火が記録されている (宮崎, 2003)。2004年9月から始まった噴火は、2005年7月現在も継続中であり、活発な火山活動が続いている (加藤・菅野, 2005; 気象庁, 2005a, 2005b, 2005c)。この火山の山頂は、直径約 400 m・深さ約 200 m のすり鉢状

のクレーター地形となっている。少なくとも 20 世紀以降の噴火様式は、全てクレーター床に形成される火口から溶岩や各種の噴出物を放出するものであり、今回の噴火も今までのところ、同様の経過で推移している。(宮崎, 2003)。

火山学上および防災上の観点から、山頂周辺の火山活動状況を把握することが重要である。しかし、2004年9月に噴火開始以降、クレーター内部は、常時噴煙に覆わ

* 〒100-8918 東京都千代田区霞が関 2-1-3
国土交通省大臣官房技術調査課
Engineering Affairs Division, Minister's Secretariat,
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2-1-3 Kasumigaseki, Chiyoda, Tokyo 100-8918, Japan.

** 〒305-0811 茨城県つくば市北郷 1 番
国土地理院地理地殻活動研究センター
Geography and Geodynamics Research Center, The
Geographical Survey Institute, 1-Kitasato, Tsukuba,
Ibaraki 305-0811, Japan.

*** 〒305-0811 茨城県つくば市北郷 1 番
国土地理院測図部

Topographic Department, The Geographical Survey
Institute, 1-Kitasato, Tsukuba, Ibaraki 305-0811,
Japan.

**** 〒183-8501 東京都府中市日新町 1-10
日本電気航空宇宙システム(株) 防衛航空システム
事業部
NEC Aerospace Systems, Ltd., Defense and Aero-
nautic Systems Division, 1st Engineering Department,
1-10 Nisshin-cho, Fuchu, Tokyo 183-8501, Japan.

Corresponding author: Makoto Murakami
e-mail: mcopy@gsi.go.jp

れ、目視や通常の光学的手段によってその様子を観測することが困難な状況であった。このような場合には、雲や噴煙などの透過性に優れた電波を用いる合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) による観測の有効性が期待される。

SAR を航空機に搭載して火山観測を行うための技術開発は、従来から進められてきた (例えば, Mougini-Mark and Garbeil, 1993; Rowland *et al.*, 1999; Kobayashi *et al.*, 2000). わが国でも、最近噴火した有珠山 (浦塚・他, 2001) や三宅島を対象として、航空機 SAR の実験的観測が行われた。なかでも、2000 年噴火後の三宅島では、観測が繰り返し行われ、この噴火で形成された陥没カルデラの成長過程を明らかにするなどの成果が上がっている (長谷川・他, 2000; 長谷川・他, 2001; 佐藤・他, 2002; 宮脇・他, 2002; Hasegawa *et al.*, 2005)。

現在では、レーザープロファイラや写真測量技術も開発が進み、火山地形の変化を精密に測定する手法として利用されている。しかし、2004 年噴火時の浅間山のように火口が常時噴煙や雲に覆われて光学観測が困難な場合には、電波を利用する航空機 SAR 観測の長所が最大限に発揮される。本稿では、浅間山火口内の状況を把握するために、繰り返し実施された航空機 SAR 観測から明らかにした、火口内部の地形変化について報告する。

2. 航空機 SAR による地形観測

SAR は、口径の小さいアンテナを利用しながら、空間

的に高分解能の計測を達成するために開発された、電波を利用するリモートセンシング技術である。その観測では、ほぼ直線的に移動する飛行体上のアンテナから、地表に対してマイクロ波パルスを繰り返し発射し、ターゲットからの反射波を受信する (Curlander and McDonough, 1991)。一連の観測はデジタル記録され、合成処理と呼ばれる事後の計算処理によって、地上の空間単位 (航空機搭載型の場合、1 m~数 m 程度) 毎に反射強度と位相の 2 種類の情報が取得される。反射強度を可視化すると、航空写真のように地上の起伏や地物の分布などを描写した画像となる。他方、位相は、そのまま可視化しても意味のある画像とはならない。しかし、飛行体とターゲットとの間の距離についての正確な情報を含んでおり、観測時間またはアンテナ位置を変えて実施した観測間の比較をすることによって、地殻変動や地形の精密計測が可能である。このような手法は、干渉 SAR (SAR Interferometry または InSAR) と呼ばれている。干渉手法を応用した地殻変動の検出技術は、最初に衛星搭載 SAR データで実用化され、断層変動のみならず、火山活動による地殻変動も多く検出されている (例えば Massonnet *et al.*, 1995; Pritchard and Simons, 2002; Fujiwara *et al.*, 2000)。

国土地理院も、航空機による InSAR 手法の実用化を目的として、Fig. 1 に示すような装置を用いた実験観測を従来から行っている。前節で述べた三宅島の観測も、この装置を用いて実施されたものである。SAR では、飛

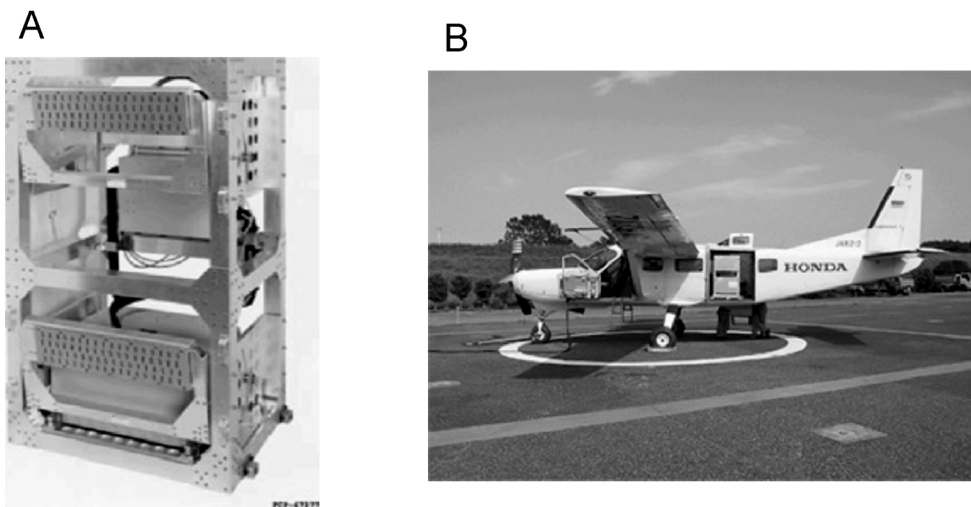


Fig. 1. A: Assembled airborne SAR equipments used for the repeated observation over the Asama volcano on September 16, October 22 and December 15, 2004. This radar is capable of interferometric measurements to produce a precise Digital Elevation Model (DEM). B: The aircraft (Cessna 208) with onboard SAR instruments mounted.

行方向の横方向斜め下に向かって、マイクロ波パルスを送受信するため、この場合は、胴体の側面に開口部のあるスカイダイビング用の機体を使用している。この送受信装置には、2つの受信アンテナが間隔を置いて装着されており、同一のターゲットから反射されたマイクロ波を2つのアンテナで並行して受信する。反射体からのパルスの伝播経路は、微小ではあるがアンテナ間で異なっており、反射波の位相差が生じる。この位相差はターゲットの標高と比例関係があり、それに注目した位相干渉処理を行うことによって、地表起伏を定量的に計測し、数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) を作成することができる。

航空機 SAR による地表観測の特徴を Fig. 2 に示す。すでに述べたように、SAR 技術は、噴煙による遮蔽や夜間の暗黒等、光学カメラでは撮影が不可能な状況下でも地表の情報を取得できることが最大の利点である。とりわけ、噴火中の火山における火口内部の観測などにおいて、その有効性が発揮される。しかし、その一方で、後述するように「シャドウ」や「倒れこみ」と呼ばれる現象によって、観測不能地域が生じる。さらに、観測コストが高い、電波に関する法的規制が厳しいなどの短所もあり、観測手段として普及させるための課題となっている。これらのなかでも、特に、大きな障害である経済的側面については、解析ソフトを自動化して人件費を縮小し、観測コストを低減させるなど、改善に向けての努力が続けられている。

SAR では、斜め下方に照射した電波による距離計測を原理としているため、標高の高い地点が、実際の位置

よりもレーダー側に近い位置にずれて画像化される「倒れこみ」と呼ばれる現象が生じる。「倒れこみ」は画像を歪ませるだけでなく、画像の部分的な重畳が生じて地上情報取得の障害となる。また、山地など地形の起伏が大きい地域においては、斜めに発射されるマイクロ波が届かない「シャドウ」と呼ばれる領域が発生する。観測では、これらの影響を極小化することが望ましい。撮影条件を比較的自由に設定できる航空機 SAR の場合は、電波の照射角を最適化するほか、多方向から取得したデータを統合することによって、観測不能領域を最小にする対策がとられる。これにより、火口内部のような不利な条件下でも、かなりの範囲で地形計測が可能である。

一方、衛星搭載型の SAR には、打ち上げ費用を除けば、定期的に安価なデータが提供されるという大きな長所がある。しかし、パラメータをそれほど自由に設定できないため、「シャドウ」や「倒れこみ」の影響を大きく受ける。特に、浅間山のように、狭い火口底を観測する場合は、観測方向が固定された衛星 SAR では、これらの占める面積が相対的に大きくなり取得できる情報が限られる。

SAR では、目的や機器構成上の制約によって、異った周波数電波が用いられる。航空機には、比較的高周波 (短波長) の機器が搭載される場合が多く、高空間分解能の観測が可能であるが、一回の撮像面積が限られるなどの欠点もある。本稿で報告する観測は、Xバンド (9.6 GHz、波長約 3.1 cm) および Ku バンド (16.7 GHz、波長約 1.8 cm) で実施されたものである。

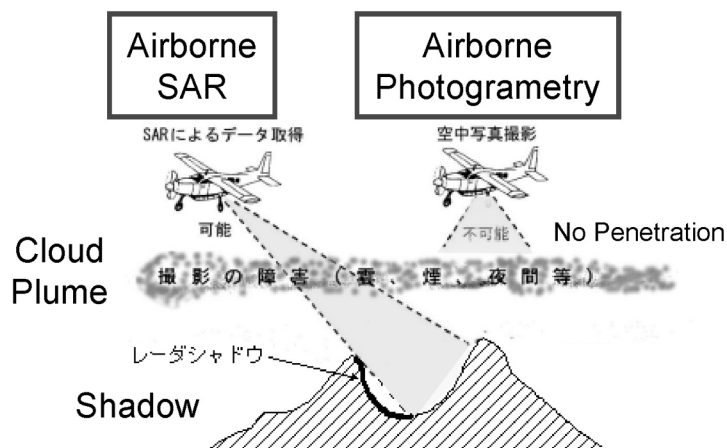


Fig. 2. Schematic illustration of airborne SAR measurements over a volcano. SAR is advantageous in measurements during night or through cloud, mist and volcanic plume. In addition, airborne SAR is more flexible about the observing conditions, such as flight direction, off-nadir angle and time of measurements comparing with satellites.

3. 浅間火山 2004 年噴火

浅間山の 2004 年噴火は、9 月 1 日の爆発的噴火によって始まった。以下では、加藤・菅野 (2005), 気象庁 (2005a, 2005b, 2005c) に基づき、この噴火を簡単に振り返る。大きな爆発音と空振を伴った 9 月 1 日の爆発は、火口周辺に噴石を飛散させ、山頂の北東 6 km の地点でも最大 3 cm の火山礫が降下した。また、9 月 14-18 日に噴火がしばしば発生し、特に、16 日未明から 17 日夕方には、噴火が連続的に発生して広範囲に火山灰を降らせた。さらに、9 月 23 日、9 月 29 日および 11 月 14 日にもやや大きめの爆発が発生したが、12 月 9 日以降は、火山灰や噴出物を放出する噴火は生じていない。また、SO₂ ガスは、9 月の噴火時には、最大 1 日 3,000 トン以上が放出された。その後は、緩やかに減少しているものの、放出が継続している。噴煙高度も高い状態が続いている。

星住・他 (2004) は一連の 9 月噴火の噴出物の岩石学的解析を行い、9 月 14 日から 16 日にかけて続いた断続的な噴火の途中から、噴出物の構成が、新鮮な本質物質由来の構成に移行したと指摘している。また、村上 (2005) は、浅間山周辺の GPS 連続観測点における地殻変動データを解析し、9 月噴火の数ヶ月前から始まった山体の膨張が、9 月から 10 月にかけて一時的に停止し、その後再開して 2005 年 6 月現在も継続中であると報告

している。

4. 国土地理院による浅間山火口付近の航空機 SAR 観測

4-1 2004 年 9 月 16 日の観測

国土地理院は、干渉機能を備えた X バンドの SAR 装置を航空機に搭載し (Fig. 1 参照)、浅間山火口付近の最初の撮影を 9 月 16 日に実施した。観測当日は、前述のように、一連の 2004 年噴火の中でも比較的規模の大きな噴火の進行中であり、火口周辺は濃い噴煙に覆われ、火山灰の降下が広範囲で観測されていた。電波は噴煙を透過して火口内からの良好な反射波が観測され、噴火中の火山上空での航空機の運航面を含めて、問題なく撮影が終了した。火口内部の可視領域を最大にするため、オフナディア角 (航空機の直下方向と電波の照射方向がなす角度) を Table 1 のように設定し、山頂を取り巻く東西南北の 4 方向から観測を行った。火口のような凹地を撮影する場合には、レーダー側の火口縁付近では「シャドウ」が生じ、一方、遠方側の火口縁は手前に倒れこんで、火口底を掩蔽する。この 2 つの現象は、同時に発生し、双方がトレードオフの関係にあるため、対象物の地形を詳細に検討しながら、最適の入射角を設定する必要がある。Table 1 の撮影条件は、浅間山の火口地形を考慮に入

Table 1. Specifications of repeated airborne SAR measurements over the Asama volcano during 2004 eruption.

Date	Direction	Distance Between Scene Center and flight Path	Off-Nadir Angle at Scene Center	Altitude Of Aircraft	Freq. band (frequency)	Across Track Spatial Resolution At Scene Center	Along Track Resolution
Sept. 16	NESW	2 km	49 deg	4,250 m	X (9.6GHz)	2.0 m	1.5 m
	NESW	3 km	60 deg			1.7 m	1.5 m
Oct. 22	NESW	2 km	49 deg	4,250 m	X (9.6GHz)	2.0 m	1.5 m
Dec. 15	SWN	2 km	49 deg	4,250 m	X (9.6GHz)	2.0 m	1.5 m
March 10	NESW	2 km	49 deg	4,250 m	Ku (16.7GHz)	0.4 m	0.3 m

れた綿密な検討の結果、選定されたものである。

9月16日に実施した各方向からの観測のうち、飛行経路と山頂の水平距離を2kmに設定して撮影した反射強度画像と干渉画像をFig. 3に示す。

まず、反射強度画像を見てみよう。いずれの画像でも、中央部に火口が位置するようにトリミングされている。「倒れこみ」や「シャドウ」の出現状況は観測方向によって異なるため、地形の見え方は画像ごとに異なっている。しかし、どの画像でも、火口内に、一部が欠けた直径約150m程度の丸い円盤状地形が写っている。この地形の火口内の位置は、いずれの画像でもセンサーの反対方向にあるが、これは「倒れこみ」によって火口縁が本来の位置からシフトして写ったためである。この影響を補正した円盤状地形の位置は、火口底の中央部からやや北東よりの場所である。

噴火前の火口内の地形は、国土交通省関東地方整備局利根川水系砂防事務所が2003年に実施したレーザープロファイラによる地形観測から作成された精度0.5m程度のDEMから知ることができる。このDEMによれば、円盤状地形が出現した場所は、噴火以前はすり鉢状の窪んだ地形であったことがわかる。したがって、航空機SARによって確認されたこの地形は、今回の噴火に伴って生成されたものである可能性が極めて高い。SAR画像に写った形状をさらに詳細に観察すると、この地形の同心円状の構造が認識できる。この特徴は、地形の形成メカニズムと何らかの関係があると推察する。

次に、干渉画像を見てみよう。干渉画像では、位相差に彩色しており、同色の場所をつなげた帯が、普通の地図における等高線の役割を果たしている。色彩変化の1サイクルに対応する標高差は、撮影高度や照射角度などの撮影時の幾何学的条件に左右される。この図の場合は、1サイクルはおよそ150mに相当する。このデータに基づいて火口底のDEMが作成された。

DEMの精度を見積もるため、地形変化のない山腹において、このDEMとレーザープロファイラによる噴火前のDEMとの比較を行った。10月以降の観測も併せた比較結果をTable 2に示す。2つのDEMの差の標準偏差は2-4mであり、2-4mを超える変動は、誤差でなく真の地形変化と考える。

2003年時点のDEMと9月16日のDEMから描いた北東-南東方向の地形断面をFig. 4に示す。強度画像から推定したように、噴火前は窪地であった所に、横に広がり上方に膨らんだ円盤状の地形が新たに形成されたことが読み取れる。このパンケーキに似た円盤状地形のピークの付近の標高は、噴火前に比べ約65m増加し、約2,380mとなっていた。

次に、強度画像をもう一度詳細に見直すことにしよう。この隆起地形の見え方の特徴は、①周辺に比べて反射強度がやや弱い(黒っぽくみえる)、②表面のテクスチャーが均一にみえる、③他とは独立した単一の構成体であり、表面には同心円状の構造が読み取れる、などである。表面テクスチャーの均一性から、構成する物質は溶岩であると推定され、9月の噴火で新たに溶岩が噴出して、薄い餅を重ねたようなドーム状の形状が形成されたと推測される。また、表面にみられる同心円状の構造の中心は火道位置を示している可能性が高い。以上のような推論に基づいて火口周辺の地形を判読した結果をFig. 5に示す。また、噴火前後のDEMを比較して計算した噴出物の体積は9月16日の時点で約 $0.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ であった。

4-2 2004年10月以降の観測

噴火活動による地形変化の推移を引き続き追跡するため、9月と同一の幾何学条件で、10月22日、12月15日、2005年3月10日にも撮影を行った(Table 1)。それぞれの観測から得られた強度画像とそれに対する判読結果をFig. 5に示す。

10月22日の撮影画像では、9月に出現していたパンケーキ状隆起地形が消滅している。干渉処理によれば、9月に観測された隆起地形は、直径50m、深さ20mの小さな窪地へ転じていた。噴火前との比較から、噴出物の最厚部の厚さは約75mに達し、火口カルデラ内の噴出物の総量は約 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ となっていたと推定される。9月以後新たに $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の噴出物がもたらされたことになる。10月の時点では、火口底内の最高点の標高は約2,430mであった。

3度目に行った12月15日観測の再生画像でも、10月の観測時と火口底の状況が大きく変わった様子はない。一方、干渉処理によるDEMは、火口底の高さが全体として、10月時点より10~15m程度低くなったことを示していた。底部の全体形状はほぼ中央部が落ち込んだ、傾斜の緩いすり鉢状である。北東部においては、局所的に10月に比べて20m程度盛り上がった部分があった。なお、この観測の実施中、全方向からの観測を終了する前に機材が故障し、DEMの作成領域が限られたため、噴出物の体積は計算できなかった。

次の2005年3月10日の観測時点においても、従来機の修理が未了であったため、波長の短い16.7GHz(Kuバンド)の機材を新たに準備し、観測に使用した(Table 1)。12月の画像と比べ大きな地形変化は見られなかったが、火口の外縁部が火口底に作る影の領域が僅かに広がっていた。このことから、火口底が相対的にやや低下していたと推定される。3月の画像では、すり鉢状の地

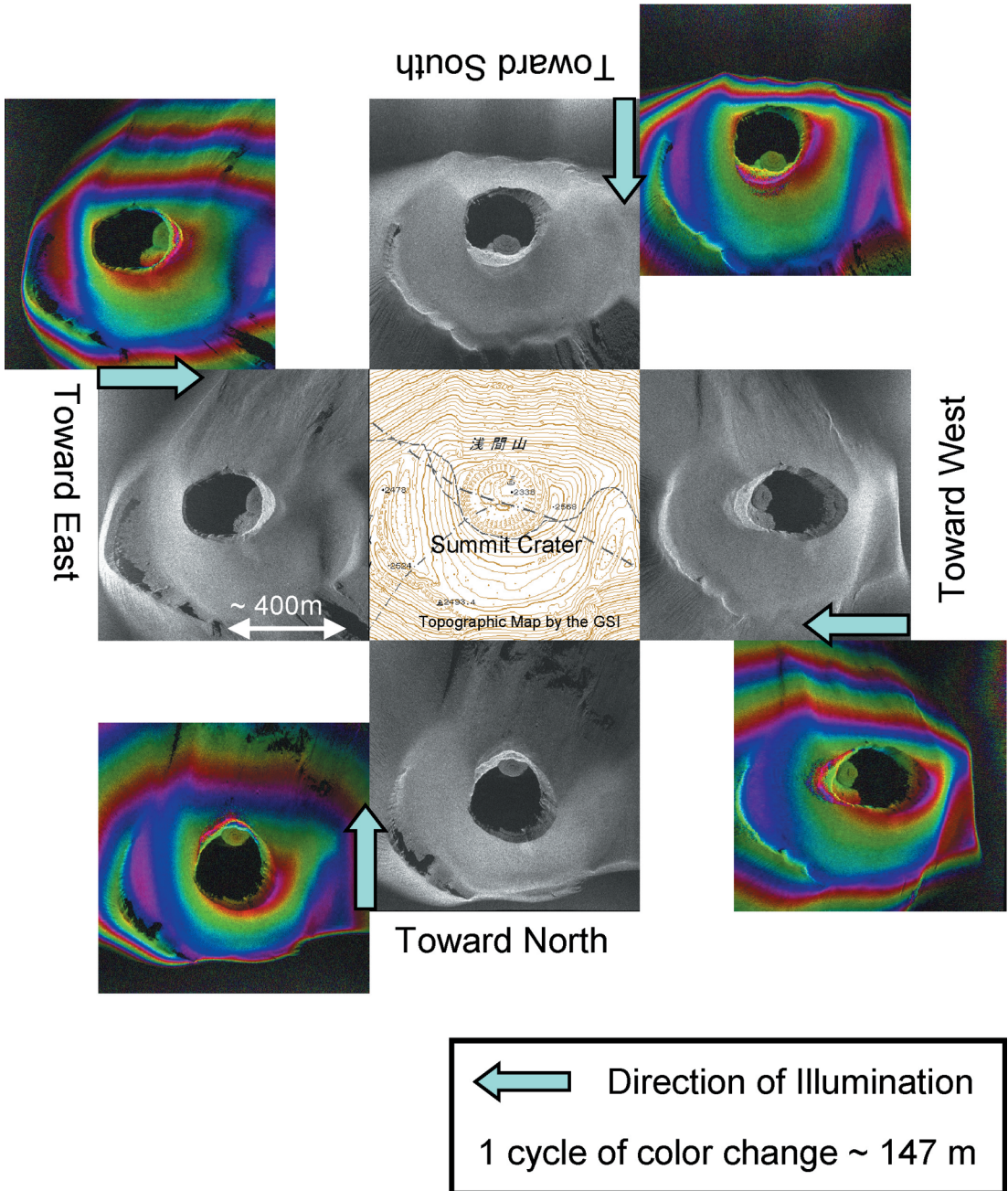


Fig. 3. Images around the summit of the Asama volcano derived from Airborne SAR measurements on September 16, 2005. Monochrome images are mapped backscatter amplitude, whereas colored ones are interferograms derived from single pass airborne SAR interferometry. The topographical map of the area is given in the center of the figure. Each image corresponds to data acquired from one of the flight paths from 4 directions. The distance between the flight path and summit is 2km. The other observation parameters are given in Table 1. One cycle of the color change in the interferogram corresponds to height difference of the topography by about 147m.

Table 2. Difference between DEMs by single path airborne SAR interferometry and laser profiler measurement.

Date	S.D. of difference (SAR v.s. Laser Profiler)
September 16	2.03m
October 22	4.16m
December 15	2.91m

形の表面に同心円状の筋が複数あることが識別できる。これについては、12 月以降に新たに形成されたのではなく、機材の変更からもたらされた画像の分解能の向上により、これまで識別できなかった微細構造が新たに認識されるようになったためと考える。しかし、波長の変更は、同時に撮影領域の減少というデメリットももたらし、干渉画像および DEM が取得された領域が、火口内およびその近傍に限られた。このため、地形変化のない地域における DEM の精度検証が不可能となった。したがって、この DEM は解析には使用しない。

5. 議 論

これまでみてきたように、航空機 SAR の繰り返し観測により、2004 年 9 月の噴火開始以降のクレーター底の地形変化と噴出物体積の推移を知ることができた。Fig. 4 に基づいて、2004 年 9 月 12 日、10 月 22 日、12 月 15 日の 3 回の観測から得られた北東-南東方向の地形断面の変遷を追うことにしよう。噴火前の火口の最深部であった窪地に、9 月 16 日の時点で溶岩がパンケーキ状に出現していた。次の 10 月 22 日には、火口底全体が上昇し、9 月に出現した隆起地形は、逆に浅い窪地となっていた。9 月に比べて、噴出物量が増加していたことから、この窪地の成因は、溶岩が地中に還流したためではなく、爆発的な噴火活動により、噴出物が吹き飛ばされたためであったと推定される。さらに 12 月では、その小さな窪地がより深くなっていた。その理由は、爆発的な噴火が続いていたからであろう。その後の 3 月の観測では信頼できる DEM は得られていないが、強度画像の傾向に大きな変化はないので (Fig. 5)、火口底の地形は 12 月とそれほど変化していなかった可能性が高い。

以上のことから、まず、溶岩の噴出は、9 月から 10 月にかけての噴火初期の短期間に集中していたと推測される。9 月 14 日から 16 日にかけて噴出物の組成が、新鮮な本質物質由来に移行したとする星住・他 (2004) の分析を考慮すると、溶岩の火口底への噴出は、この間に開始された可能性が高い。しかし 9 月 16 日から 10 月 22 日にかけても噴出物体積が増加しているため、本質物質

の噴出は、10 月頃まではしばらく続いたと推定される。

今回の活動では、火口底中央部やや北東よりの箇所、溶岩地形の形成や、その後の窪地地形の形成が継続して起こったことが大きな特徴である。噴火前の 2003 年には窪地であったこの場所に、9 月には溶岩が噴出した。その後、10 月には、火口底が全体に上昇したにもかかわらず、その場所は、逆に小さなすり鉢上の窪地になっていた。今回の噴火は、おそらく、火口底の中央やや北東部に開いた火口から始まり、最初は、比較的流動的な溶岩を噴出したものの、その後は爆発的な噴火に移行し、9 月に出現したパンケーキ状溶岩を吹き飛ばし、火口底全体にも噴出物を堆積させた結果、噴火口の周りに小さなすり鉢状の地形が生じたのであろう。

一方、10 月 22 日以降、火口底はむしろ下降傾向のようにみえる。10 月以降の強度画像には、9 月時点で認識されたパンケーキ状溶岩のような、一体の構造を持った地形は見当たらない。10 月以降の地形のテクスチャーから判断して、その時期の火口底には、破砕物が一面に堆積していた可能性が高い。破砕物の成因は、噴出した時点で既に破砕されていたか、溶岩として静かに噴出したものが後続の噴火によって粉砕されたかのいずれかであろう。SAR 観測から推測される 10 月以降の火口底の低下は、空隙率の高い破砕物の圧密によって生じる表層の沈降を見ている可能性がある。しかし、継続する噴火による物質のクレーター外への再移動や、流動性が保持された噴出溶岩が地下へ還流している可能性も除外できず、現時点では特定はできない。

さて、航空機 SAR 観測からは、溶岩の噴出が噴火の初期に集中して起きていたことが示唆されたが、その一方で、火山ガス放出、噴煙高度、火口温度などの表面活動、およびマグマの地下での移動を示す山体の膨張は、噴火開始以後も、高いレベルで継続しており (加藤・菅野, 2005; 気象庁, 2005a, 2005b, 2005c)、噴火の初期に集中した溶岩噴出の時間推移とは対照的である。村上 (2005) は、地殻変動の特徴として、長期的には噴火数ヶ月前から山体の膨張が続いている中で、9 月から 10 月にかけて中断期間が認められることに注目し、深部から上昇したマグマの大部分は、地表から約 2 km の深さに推定される浅部マグマ溜まりに定置し山体を膨張させたが、9 月頃に上昇した一部のマグマパッチの発泡度が特に高かったため、一気に上昇して地表まで達して溶岩として噴出し、その間は山体膨張が停止したと推定している。彼は、地殻変動の推移から関与マグマ量を計算し、溶岩噴出に係ったマグマ量を $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度と推定している。この量は、本稿の航空機 SAR による 10 月時点の噴出物体積の数値、 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ と、誤差の範囲で一致す

Change of Topography of Summit Crater of Asama Volcano

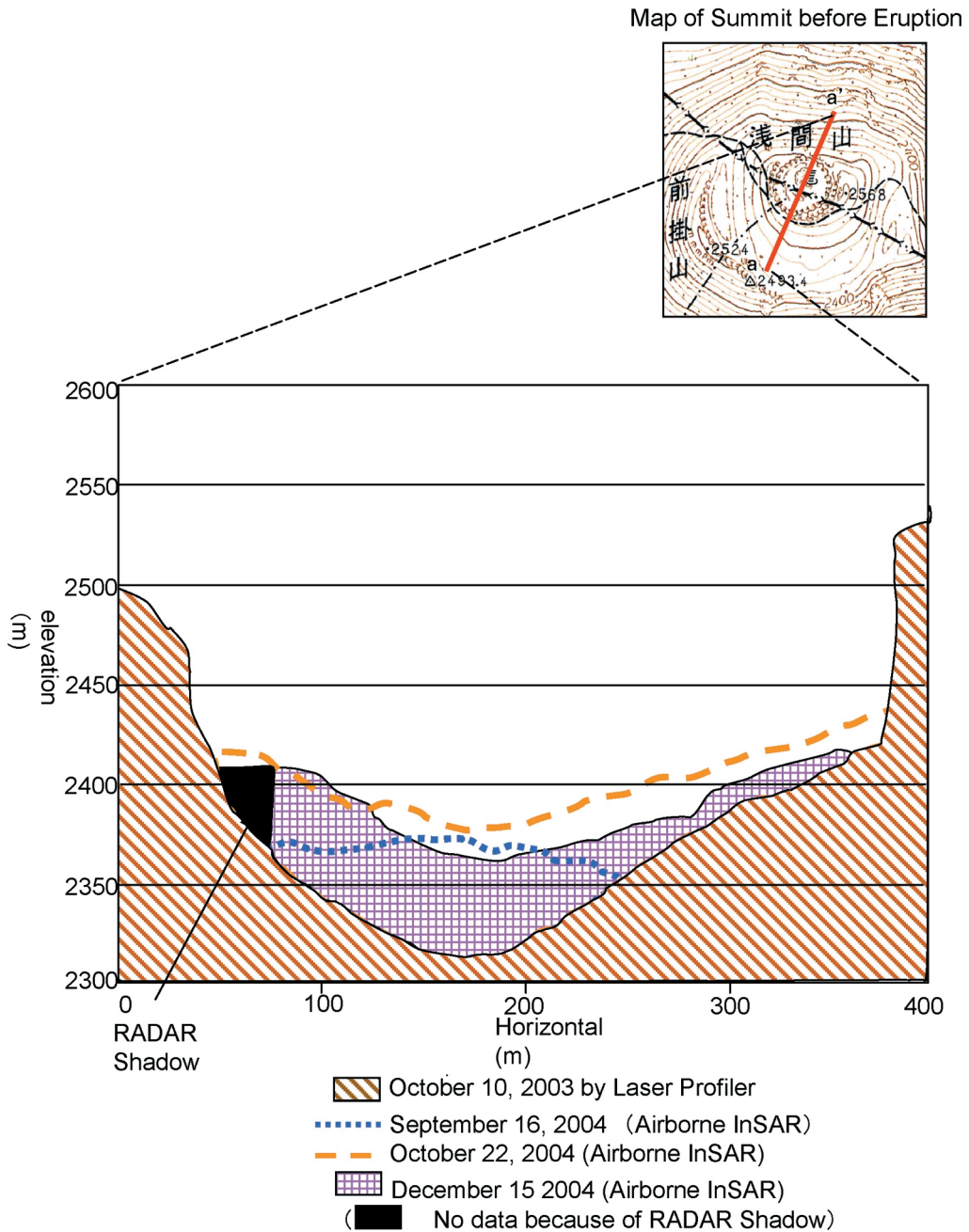


Fig. 4. Change of topography in the summit crater of the Asama volcano derived from DEMs obtained by the repeated airborne SAR Interferometry and laser profiler measurement of October 2003.

ると考える。このように、関与マグマ量についての量的な関係が次第に明らかになってきたものの、9月頃に上昇したマグマの発泡度だけが特別高かった理由について

は、村上(2005)も未解決の問題であるとしている。

浅間山では、20世紀初頭からの火口底の観察記録が残っており、これまでも火口の深さが大きく変化したこ

Airborne SAR Images Illuminated from the North

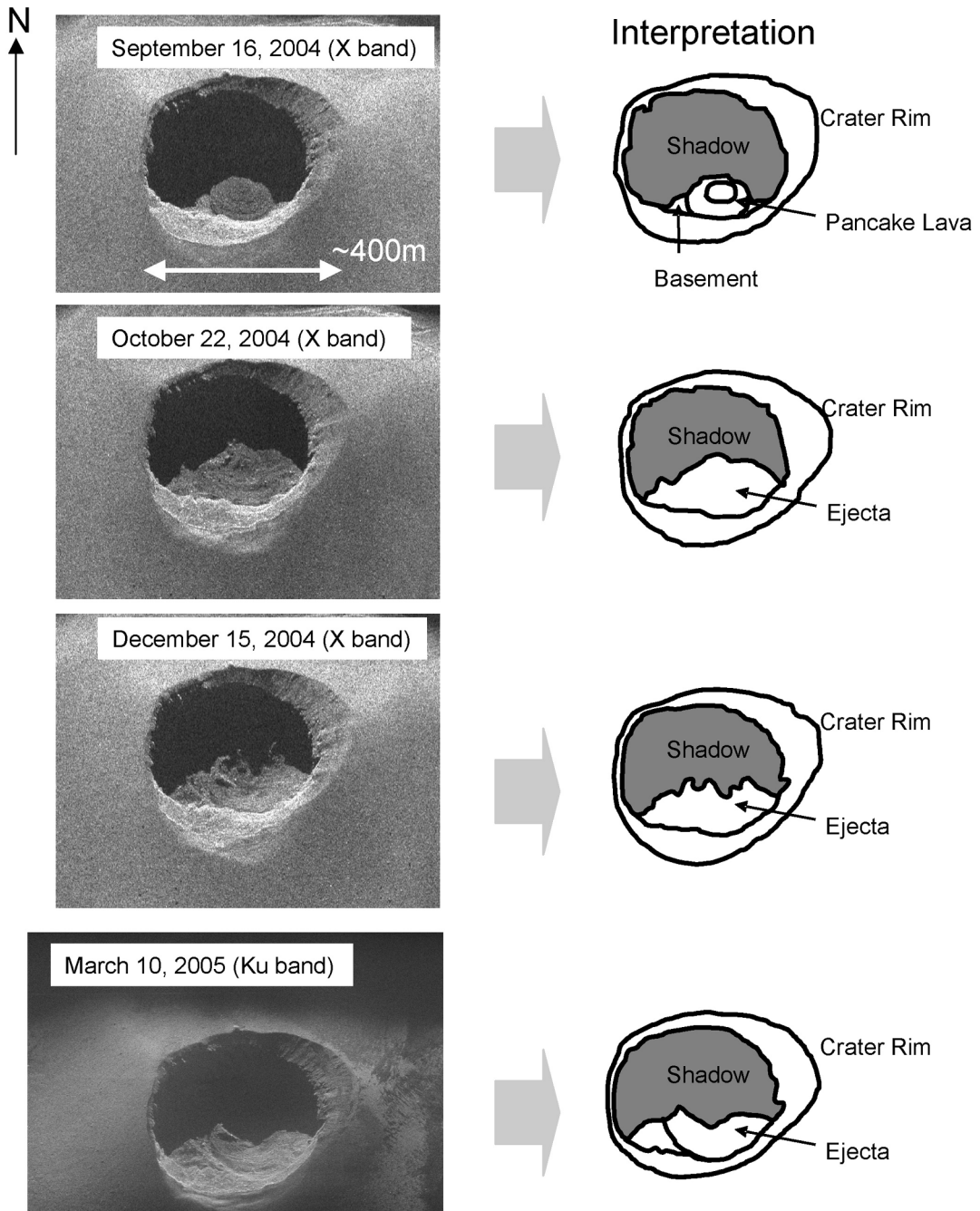


Fig. 5. Backscatter amplitude images in and around the summit of the Asama volcano obtained from Airborne SAR measurements on September 16, October 22, December 15, 2004 and March 10, 2005 (left) and schematic Interpretations (right).

とが知られている。記録に残る範囲では、20世紀初頭に最も火口底が高く、そのときは、火口縁近くまで達する

溶岩湖が形成されていた。その後は、徐々に火口底が下がってきたと推定されている。また、1973年の噴火直後

には今回の噴火と同様のパンケーキ状の溶岩が形成され、その様子が写真撮影されている(下鶴・他, 1975)。これらの過去の事例を参考にすると浅間火山の火口内では、今後も、溶岩量が大きく変化する可能性があり、火山学的観点からも、防災上の観点からも火口底の監視を継続することが重要である。

今回は、火口底が常時噴煙で覆われていたため航空機 SAR の特長が最大限に発揮された。現在では、各種の高精度地形測定技術が開発されており、今後も、噴気活動状況や天候などの観測条件にあわせて、最適の手法を選定しながら、継続的に火口内の地形観測を実施することが望まれる。

6. ま と め

航空機 SAR は、噴煙のため光学的観測が困難な火山でも地形観測に有効である。そこで、2004年噴火後の浅間山において、火口周辺を航空機 SAR で繰り返し観測した。その結果、9月16日に溶岩が噴出していたことを確認した。その後、2005年3月までに3回の観測を行い、噴出物量が10月にピークに達し、それ以後に大きな変化がなく、2004年浅間山年噴火おける溶岩の火口底への噴出は2004年9月から10月の短期間に集中していたと推定する。

謝 辞

この研究では、国土交通省関東地方整備局利根川水系砂防事務所が2003年に実施したレーザープロファイラによる浅間山火口周辺の観測結果を使用した。また、木股文昭博士と古屋正人博士による、注意深く詳細で建設的な査読によって、本稿は著しく改善された。ここに記して感謝する。

引用文献

- Curlander, J. C. and McDonough, R. N. (1991) *Synthetic Aperture Radar - systems and signal processing*. John Wiley & Sons, New York, 1-66.
- Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, N., Tobita, M. and Rosen, P. A. (2000) 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 14, 2049-2052.
- 長谷川裕之・村上 亮・松尾 馨・政春尋志 (2000) 写真測量による三宅島雄山火口の陥没量計測. 日本写真測量学会平成12年度秋季学術講演会発表論文集, 161-162.
- 長谷川裕之・村上 亮・政春尋志・松尾 馨・小荒井衛 (2001) 三宅島山頂の陥没地形の計測. 国土地理院時報, No. 95, 121-128.
- Hasegawa, H., Sato, P. H., Iwasaki, J. and Yoshida, S.

(2005) Continuous caldera changes in Miyakejima volcano after 2001. *Earth Planets Space* (submitted).

星住英夫・下司信夫・石塚吉浩・古川竜太・宇都浩三・中野 俊・宝田晋治・斎藤元治・東宮昭彦・宮城磯治・篠原宏志・伊藤順一・風早康平・大和田道子・森俊哉 (2004) 浅間火山2004年9月噴火の噴出物の特徴と噴出量の見積り. 日本火山学会2004年度秋季大会講演予稿集, 187.

加藤幸司・菅野智之 (2005) 2004年9月以降の浅間山の火山活動経過. 地球惑星科学関連学会2005年合同大会予稿集, V055p-001.

気象庁 (2005a) 日本活火山総覧 (第3版). 270-288.

気象庁 (2005b) 火山活動解説資料 (平成16年6月) 浅間山. p6.

気象庁 (2005c) 火山活動解説資料 (平成16年7月) 浅間山. p6.

Kobayashi, T., Umehara, T., Satake, M., Nadai, A., Uratsuka, U., Manabe, M., Masuko, H., Shimada, M., Shinohara, H., Tozuka, H. and Miyawaki, M. (2000) Airborne dual-frequency polarimetric and interferometric SAR. *IEICE Trans. Commun.*, **E83-B**, 9, 1945-1954.

Massonnet, M., Briole, P. and Arnaud, A. (1995) Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, **375**, 567-5705.

宮脇正典・村田 稔・佐藤 潤・小荒井衛・水野時夫・渡辺信之・飯田 洋・山田陽子・津田勇介 (2002) 航空機 SAR による三宅島火口の DEM 作成. SAR Workshop 2002 報告書, 32-35.

宮崎 務 (2003) 浅間火山活動記録の再調査. 東京大学地震研究所彙報, **78**, 4, 283-463.

Mouginis-Mark, P. J. and Garbeil, H. (1993) Digital topography of volcanoes from radar interferometry: an example from Mt. Vesuvius, Italy. *Bull. Volcanol.*, **55**, 566-570.

村上 亮 (2005) GPS 連続観測結果が示唆する浅間火山のマグマ供給系. 火山, **50**, 347-361.

Pritchard, M. E. and Simons, M. (2002) A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes. *Nature*, **418**, 167-171.

Rowland, S. K., MacKay, M. E., Garbeil, H. and Mouginis-Mark, P. J. (1999) Topographic analysis of Kilauea volcano, Hawaii, from interferometric airborne radar. *Bull. Volcanol.*, **61**, 1-14.

佐藤 潤・飯田 洋・宮脇正典 (2002) 地形計測における航空機搭載 SAR の活用—三宅島2000年噴火時の事例—. 写真測量とリモートセンシング, **41**, No. 4, 61-65.

下鶴大輔・内堀貞雄・行田紀也・小山悦郎・宮崎 務・松本時子・長田 昇・寺尾弘子 (1975) 1973年の浅間山噴火活動. 地震研究所彙報, **50**, 115-151.

浦塚清峰・梅原俊彦・灘井章嗣・佐竹 誠・前野英生・松岡建志・増子治信 (2001) 航空機搭載映像レーダによる有珠山の観測 (速報). 電子情報通信学会論文誌, **J84-B**, 134-136.

(編集担当 大倉敬宏)