

MODIS 夜間赤外画像による浅間山 2004-2005 年活動の熱観測

金子隆之*・高崎健二*・安田 敦*・青木陽介*

(2006年1月16日受付, 2006年5月19日受理)

Thermal Surveillance of the Asama 2004-2005 Activity Using MODIS
Nighttime Infrared Images

Takayuki KANEKO*, Kenji TAKASAKI*, Atsushi YASUDA* and Yosuke AOKI*

Asama volcano, located in the central part of Japan, repeated medium to small scale Vulcanian eruptions, from September through December 2004. We analysed the activity between January 2004 and April 2005 using nighttime infrared data from MODIS -Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer -onboard Terra and Aqua satellites, in conjunction with the data from ground-based instruments obtained simultaneously and chemical composition of the ejecta. The observed period is divided into four stages, S-I, S-II, S-III and S-IV, based on the relationship between thermal anomalies observed by MODIS and eruptive activity. S-I (second half of August) is the thermally active period preceding to the series of eruptions. This may have been caused by a magmatic supply to the shallow level of the conduit, resulted from dyke intrusion at a deep level (1 km below sea level) in July, as suggested by the ground deformation monitoring. This magmatic supply probably resulted in initiating the eruptive activity of S-II. S-II (1 September -mid-December) is the thermally active period during the series of eruptions, which is sub-divided into two stages, S-IIa (1 September -10 October) and S-IIb (10 October -mid-December), by the two thermally active pulses in this period. Similar pulses are also recognized in the time-series variation of eruptive amount of S-II, as well as seismicity and SO₂ discharge rate. A deep dyke intrusion observed in the late S-IIa may have resulted in a new supply of magma to the shallow level, which caused the IIb activity. After two months of inactive period of S-III (late December 2004 - February 2005), S-IV (March-at least April 2005), the post eruptive thermally active period, started. Although this stage did not involve eruptive activities, SO₂ discharge rate, level of volcanic glow and height of plume raised. This may have been caused by the third magmatic supply to the shallow level in late January. At the volcanoes possessing open to semi-open passages between the summit crater and shallow level of the conduit like Asama, MODIS may detect pre-eruptive thermal anomaly, which can be utilized for monitoring those distributing in remote areas, such as east Asia.

Key words: MODIS, Asama volcano, thermal analysis, infrared, remote sensing

1. はじめに

火山は地球内部からもたらされる高温物質-マグマ、ガスなどが地表へ噴出する場所であり、火山表面の熱的狀態は、その活動状況を知る上で重要な情報源となる。噴火の際マグマが地表に噴出することによって大きな熱異常が生ずる。一方、マグマが直接噴出しない場合でも、

噴火に繋がる地下のマグマの動きや火口・火道域の構造変化に関してガス放出に変化が起き、火口周辺の熱的狀態が変化することもある。例えば、熱異常が噴火に先行して拡大(鍵山・辻, 1987; Dehn *et al.*, 2002)あるいは縮小する場合(Wooster and Rothery, 1997; Wooster, 2001), 噴火後に発生する場合(金子・ウスター, 2003)など、様々なパターンが報告されている。このような熱変化から、逆に地下のマグマの動きや火道域の状態を知ることができれば、噴火の発生や活動推移を予測する上で重要な手がかりとなる。しかしながら、まだ観測例が少なく、系統的な研究はなされていない。熱異常の情報を噴火予知に活用するためには、まず観測データを蓄積

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

東京大学地震研究所

Earthquake Research Institute, University of Tokyo,
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.

Corresponding author: Takayuki Kaneko
e-mail: kaneko@eri.u-tokyo.ac.jp

し、それぞれの例で、特徴的パターンを見出し、それらが地下のどのような現象に対応しているかを多角的に検討する必要がある(金子, 2005)。

こうした火山熱異常の観測には、火口を含む広い領域を定常的に観測する必要がある。定常的熱観測には、地上に設置した赤外線映像装置を使うことが多いが、山頂火口を下方から望むことになるため火口内を面的に見渡すことは通常不可能に近い。航空機を利用すれば上空からの周期的観測が可能となる(實測・他, 2002)が、多大な経費がかかること、太陽光の影響を受けない夜間観測が難しいなどの問題がある。一方、このような要件を満たすものとして、衛星赤外線画像がある。とくに、ノアなどの気象衛星タイプはコストも低く、昼夜によらず、長期的に高頻度観測ができるため、短いタイムスケールで変動する火山の熱観測には好適である(Harris *et al.*, 1997)。また、衛星は地球を周回する軌道にあるため、遠隔地の火山の監視・観測に容易に適用できるメリットがある(浦井・他, 1999; Kaneko *et al.*, 2002)。

本研究は、浅間火山の2004年9月1日に始まった一連の噴火活動を Terra 及び Aqua MODIS の夜間赤外線画像データを使って解析した。約3ヶ月間に及んだ今回の噴火活動では、散発的にブルカノ式が繰り返された(中田・他, 2005; 吉本・他, 2005)。この間、マグマの動きを示す地殻変動や地震活動のデータ、噴出物の物質科学的データが多数得られており、これらと MODIS 赤外線画像によって検出した熱異常-主に火口からの噴気ガスの放出状況を反映-の変動を関連づけて検討できる絶好の機会となっている。これにより、浅間火山の噴火解析を行うと共に、衛星リモートセンシングを用いて地上観測が難しい地域に分布する同タイプの火山の監視・観測を行うための基礎データ・手掛り等も得られることが期待される。

2. 浅間火山 2004-2005 年の活動の概要

浅間火山は我が国の代表的活火山であり、大きな被害をもたらした天明3年の大噴火等に加え、数多くの中〜小規模の噴火を行ってきた(Aramaki, 1963)。同火山は安山岩質の粘性の高いマグマを産することから、爆発的噴火により溶岩片を周囲に放出するブルカノ式噴火を特徴とする。2004年の噴火も、最近の1973, 1982, 1983年噴火同様、このようなブルカノ式噴火が繰り返された(宮崎, 2003; 中田・他, 2005; 吉本・他, 2005)。

2004年の噴火活動は9月1日に始まった。この噴火に先行して、地震活動が2000年頃から徐々に増加傾向を示すこと(中田・他, 2005)、地殻変動が2004年4月頃から膨張傾向を示すこと(村上, 2005)などが観測され

たが、直前の明瞭な前兆現象を伴わず、噴火が発生した。1日の噴火は中規模のブルカノ式噴火で、火道域を塞いでいたと思われる岩片が多く放出された(吉本・他, 2005)。14日~18日の噴火は、初め小噴火を繰り返していたが、15日昼から噴火が多くなり、16日夕方から17日未明にかけて赤熱した溶岩のしぶきを周囲に飛ばすストロンボリ式噴火が観察された(吉本・他, 2005, 気象庁, 2004)。この間の16日午前、航空機 SAR により、火口内にパンケーキ型に溶岩が噴出しているのが確認された(大木・他, 2005)。続いて23日, 29日, 10月10日と規模の小さいブルカノ式噴火が起き、主に火口内のパンケーキ型溶岩の一部と思われる岩片が放出された(吉本・他, 2005)。この後1ヶ月以上静穏な期間が続いたが、11月14日に中規模のブルカノ式噴火が発生した(吉本・他, 2005)。12月9日にも極小規模の噴火が起きたが、それ以降噴火活動は発生していない(2005年末現在)。SO₂の放出率は噴火前の2004年5月には500 t/day程度であったが、噴火直後の9月3日には1,500 t/dayとなり、その後も徐々にレベルが上がり、12月末には5,000 t/dayに達した(気象庁, 2004, 2005)。この後、放出率は変動しながらも高い状態が続いたが、2005年4月以降徐々に低下し、同年5月末には1,000 t/dayを下回るレベルとなった。

上記期間の地下のマグマの動きに関連する変動が、浅間山周辺に設置された各種観測機器により捉えられている。GPSによる地殻変動の観測によって、2004年9月の噴火に先行して、浅間山頂の西6kmの地点下に、上端の深さが海拔下約1km、走向が東西もしくは西北西-東南東、体積が650万m³のダイクが貫入したことが推定されている(青木・他, 2005)。これが、今回の噴火に関係して供給されたマグマと考えられる。Takeo *et al.* (2005)は、山頂部の広帯域地震計を含む地震データの再検討を行い、震源の分布が、このダイク上端にあたる標高下1km付近から山頂方向へ水平に延び、火口直下から上方へ向かうことを明らかにし、これをマグマの供給路と考えた。ただし、今回及び過去の噴火に関する地震の発生から、山頂のやや東側直下にも別のマグマ供給路が存在する可能性があることが指摘されている(高木・他, 2005)。一方、絶対重力の連続観測から、各噴火に先行して山頂直下の火道内でマグマ頭位が上昇(数100m程度)していたことが推定されている(Okubo *et al.*, 2005)。また、村上(2005)により、浅間山では2004-2005年活動も含め山体が膨張傾向にあるとき(少なくともここ10年で、2年に1回程度の頻度で起きている)、噴煙高度やSO₂放出率が高いことが指摘されている。

3. 使用したデータと解析方法

3-1 使用データ

本研究で使用した MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) は米国の地球観測衛星 Terra 及び Aqua に搭載されている光学センサーで、可視から熱赤外域 ($0.4\sim 14\mu\text{m}$) を 36 バンドで観測する。走査幅は $2,330\text{ km}$ 、実効的な回帰日数は 2 日で、2 機体制で運用されているため、1 日 1 回程度の割合で夜間データが利用できる。ただし、天候の影響で実際に利用できるのは、週に数シーン程度に留まる。分解能は熱観測に利用する短波長～熱赤外バンドでは 1 km で、ノア AVHRR とほぼ同等となっている。データの量子化レベルは 12 bit、計測精度は輝度温度で、バンド 20: 0.05 K , 21: 2.00 K , 22: 0.07 K , 23: 0.07 K , 29: 0.05 K , 30: 0.25 K , 31: 0.05 K , 32: 0.05 K (Noise-equivalent temperature difference) となっている。

解析に利用した MODIS データは、NASA の GES Distributed Active Archive Center から提供を受けたものである。2004 年 1 月 1 日から 2005 年 4 月 30 日に撮影された画像データの内、プレビュー画像で浅間山付近に雲がない夜間画像 295 シーン (Terra: 161, Aqua: 134) を選択し、その Level 1B フォーマットの画像データ (Terra: MOD021KM/Aqua: MYD021KM) を用いた。

3-2 解析方法

MODIS 画像の前処理については、フランス Lille 大学の Msphinx を基に NASA・Maryland 大学が共同で MODIS 画像処理用に開発した HDFLOOK を用いて、輝度補正 (デジタル値から輝度値への変換) および幾何補正を行った。幾何補正は、衛星観測データに記録された位置情報を用いて行った。幾何補正後の出力画像座標は、緯経度座標であり、画素サイズは緯度および経度方向共に 32.37 秒 (約 1 km) となっている。この後、プランクの式を用いて輝度値から輝度温度に変換した後、浅間山を中心とする東西 100 画素 (ピクセル方向) × 東西 100 画素 (ライン方向) の領域について切出しを行った。

解析には、MODIS の赤外バンドの内、バンド 20 ($3.7\mu\text{m}$) と 31 ($11\mu\text{m}$) を用いた。これらのバンドは、大気透過率の高い波長領域に位置するため大気の影響が少なく、従来から火山の解析に用いられるノア AVHRR のチャンネル 3, 4 とほぼ同じ波長域にあり、類似の解析手法が利用できる利点がある。切出しを行った MODIS バンド 20 画像、バンド 31 画像で、浅間山山頂火口を中心とする 6 画素 × 6 画素の領域を精査し、その中で最も輝度温度の高い画素の値を熱異常を示す指標として取り出した。

MODIS のバンド 20 ($3.7\mu\text{m}$)、バンド 31 ($11\mu\text{m}$) は、主観測ターゲットが雲および地表の温度とされ (NASA, <http://modis.gsfc.nasa.gov/>)、それらに対応してセンサーの調整がなされているため、季節変化や日変化の影響を受けやすく、輝度温度の変化を単純に火山活動による熱異常の変化とすることはできない。そこで、何らかの方法で、このようなバックグラウンドの変動の影響を取り除く必要がある。ここでは、両バンドの輝度温度を同時にプロットし、グラフィカルに判読する方法を用いた。

プランクの式による温度と分光放射輝度の関係 (Fig. 1) から、両バンドとも温度が高くなるにつれて、輝度値も高くなる。しかし、詳しくみると、バンド 20 ($3.7\mu\text{m}$) は数 100°C を越える付近から、温度に対して輝度値が急激に増加するのに対し、バンド 31 ($11\mu\text{m}$) では、輝度値の増加は、直線に近く緩い。従って、バンド 20 ($3.7\mu\text{m}$) では、数 100°C を越えるような高温域が画素内にあると、サイズが小さくとも、それに強く影響され高い輝度値を示す (Wooster and Kaneko, 1998)。それに対し、バンド 31 ($11\mu\text{m}$) では、小さな高温域が画素内にあっても、その影響は小さく、基本的に広い領域-バックグラウンド-の温度を強く反映する。例えば、低温部 0°C が 90% と高温部 500°C が 10% からなる画素を想定すると、バンド 20 ($3.7\mu\text{m}$) では、高温部からの分光放射輝度は面積に比例して 10 分の 1 となり、低温部は 0 に近いため、

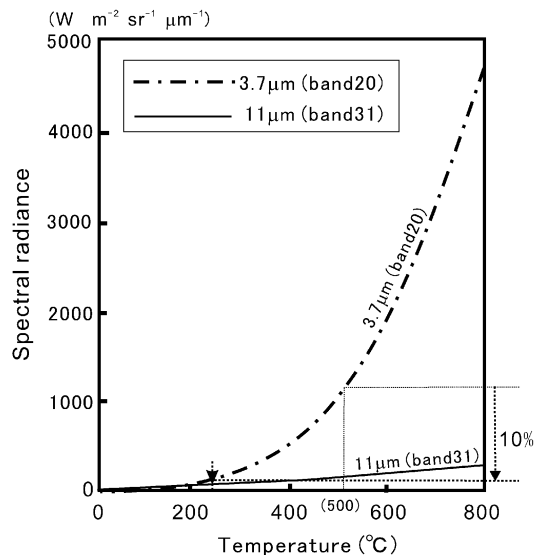


Fig. 1. The relationship between emitted radiance and brightness temperature for the $3.7\mu\text{m}$ and $11\mu\text{m}$ channels, calculated using the Planck function. (Wooster and Kaneko, 1998)

両者合わせた分光放射輝度に対応する見かけの温度は250°C程度となる (Fig. 1). これに対し、バンド31 (11 μm) では、関係が直線に近くなるため、より低温部に近い50°C程度の温度となる。

MODISの画素サイズ1km \times 1kmに対して、浅間山山頂部の熱源は十分小さく (4-1節参照)、上記の性質から、バンド31はバックグラウンドに近い温度を示すと考えられる。従って、時間に対して、両バンドの輝度温度をプロットすると、バンド31はバックグラウンドの変動を示し、バンド20は、火山の熱異常が低いときはバックグラウンドの温度を、高いときはバックグラウンドを超える見かけ温度-熱異常-を示すと考えられる。一方、画素内に雲を含むデータがプロットされた場合、バックグラウンドより低い温度となることが予想され、そのようなデータは解析から除外する必要がある。また、解析に利用したのはすべて夜間データであるため、バンド20 (3.7 μm) の波長域で問題となる太陽光の反射光の影響は無視できる。なお、大気透過率、放射等の変動の影響も見込まれるが、このような影響は、概ねバックグラウンドのばらつきが示す小幅で短い時間スケールの変動や季節変化といった長期変動に含まれていると考えられる (高温域ではバックグラウンドより変動幅が数度程度大きくなることもある)。

4. 結果と考察

4-1 MODISによる熱異常の時系列変化パターン

MODISによる熱異常の時系列変化を Fig. 2a に、解析に使用した MODIS 画像の例を Fig. 3a (中心に位置する浅間火山山頂部に熱異常を示す画素が認められる) に示す。Fig. 2a では、精査領域内での各バンドの輝度温度の最高値を用いているが、バンド31をバンド20の最高値と同一画素の値としても結果は変わらない。

バンド31は緩やかな変動を示し、熱異常を示唆するスパイク等は一切は見られない。この変化は、1年を周期とし夏に高く冬に低いことからバックグラウンドの季節変動を示すと考えられる。この変動を上回るような熱異常が見られないことは、浅間山の熱源は画素サイズより小さく、火口内に限定されていることと調和的である (Fig. 3c に浅間火山主要部の画像を示すが、中央付近に直径約400mの火口が見える)。なお、この季節変動曲線より輝度温度が低い点が数点みられるが、これらは目視で判別できなかった雲の影響と考えられ、考察の対象からは除く。一方、バンド20は、基本的にはバンド31と重なるトレンドを示すが、これより高温側にプロットされる点も認められる。これらの点はバックグラウンドのばらつきより大きく、高温側にプロットされることか

ら、火山性の熱源に由来する熱異常を示すと考えられる。

熱異常と噴火推移との関係から観測期間は以下の4期に区分される。

I期 (2004年8月後半): 噴火に先行して、弱い熱異常が認められる期間。

II期 (2004年9月から12月中旬): 一連の噴火活動に対応して熱異常が見られる期間。

III期 (2004年12月下旬~2005年2月): 噴火後の静穏期。

IV期 (2005年3月~少なくとも4月): 噴火は起きていないものの大きな熱異常が見られる期間。

4-2 熱異常の発生要因

MODISで観測された熱異常 (Fig. 2a) は、基本的には火口底の噴気孔から放出される水蒸気を主体とする高温噴気 (噴煙となる) の放出率を反映していると考えられる。Fig. 4b に示すように、観測期間を通じて山頂火口から白色の噴煙が立ち上っている (9月3日撮影)。このような噴煙による準定常的遮蔽のため、火口底にある噴気孔周辺部を、直接上空から直接見ることはほとんどできない。Fig. 4b と同フライトで撮影された赤外画像 (Fig. 4a) を示すが、火口内に滞留する噴煙全体が30~50°Cとやや温度が高く、さらにその中心付近がより高い温度 (>128°C) を示しており、このような噴煙の高温部が熱異常の主原因と考えられる。一方、今回の活動に伴い、火映現象がしばしば観察された (Fig. 4d)。これは、噴気孔の奥にある赤熱した高温物体からの放射によって、噴煙が照らされたものと考えられ、バンド20の波長域ではこのような火映が熱異常となって観測されている可能性もある。観測期間、火口内の最高温度は500°C (\pm 200°C程度) とほぼ一定であったことが報告されている (Fig. 2d) (気象庁, 2005)。従って、噴気孔からの高温噴気の放出率増加に伴って、周囲の大気との混合比が高くなり噴煙上部の高温域の温度やその面積が増加したり、同時に火口底噴気孔内の赤熱部 (Fig. 4c, 矢印。噴煙による遮蔽が一時的に除かれた瞬間に、このような赤熱部を観察することができる) が拡大しその外に向いた領域が増加し火映強度が増し、MODISで観測される熱異常が高くなったと推定される。両者の寄与の度合いやその変化等の詳細に関して現有データで推定することは困難であり、今後検討を重ねる必要がある。一方、Fig. 2a で熱異常を示す点は、同じ時期でも一様なレベルを示すのではなく、ばらつきが大きい (本論では最高値に着目して全体的な変化トレンドをみる)。これは、噴煙の変動や火口周辺の局地的な気象条件の変化によると考えられる。また、熱源が複数の画素の境界に位置するため、1画素

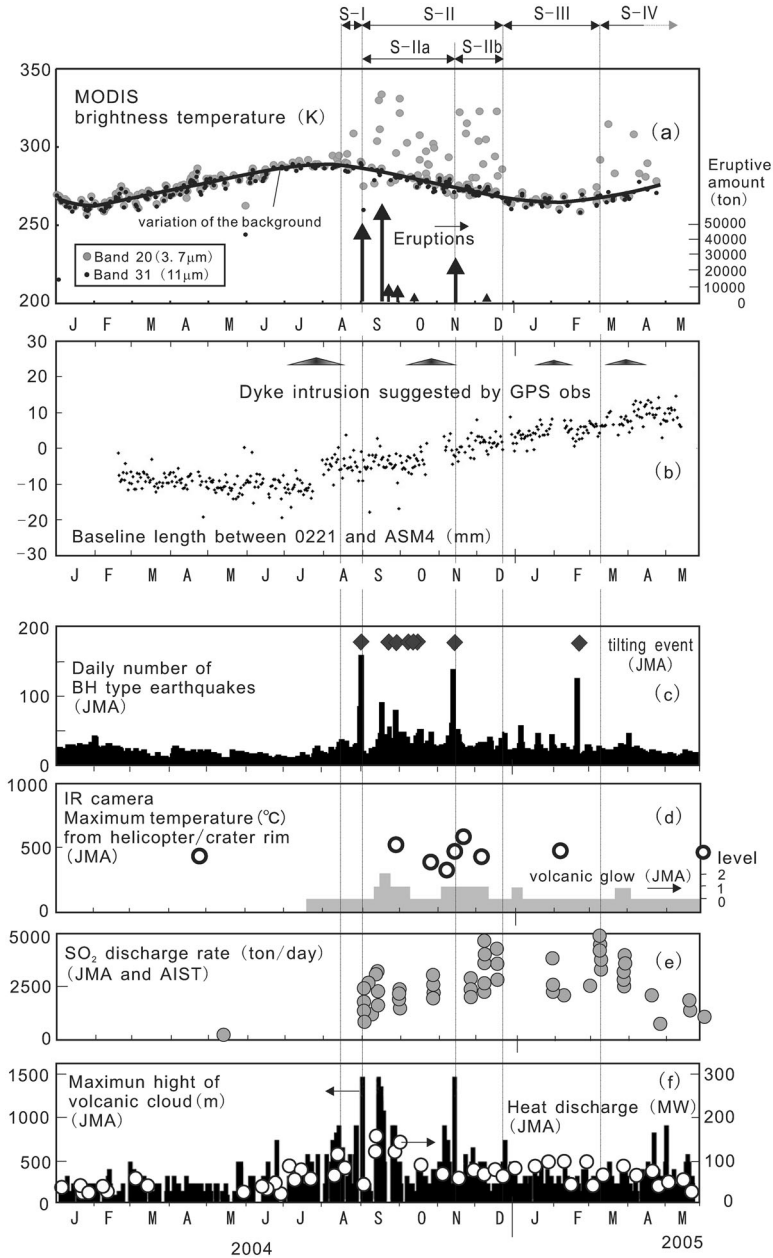


Fig. 2. (a) Temporal variations of the MODIS band 20 and 31 brightness temperature between January 2004 and May 2005 and amount of each eruptive event (arrows, Yoshimoto *et al.*, 2005). (b) Dyke intrusion events suggested by ground deformation (upper triangles) and Baseline length between 0221 (GSI Tsumagoi) and ASM4 (ERI South). (c) Daily number of BH (high frequency) type earthquakes (bar chart) and tilting events (diamonds) (after JMA, 2005). (d) Maximum temperature at the summit crater determined with thermal infrared camera from helicopter or the crater rim (open circles) and level of volcanic glow observed from Karuizawa (bar chart) (after JMA, 2005). (e) SO₂ discharge rate measured by COSPEC (JMA and National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) (after JMA, 2005). (f) Maximum height of volcanic cloud (bar chart) and estimated heat discharge (open circles) (after JMA, 2005).

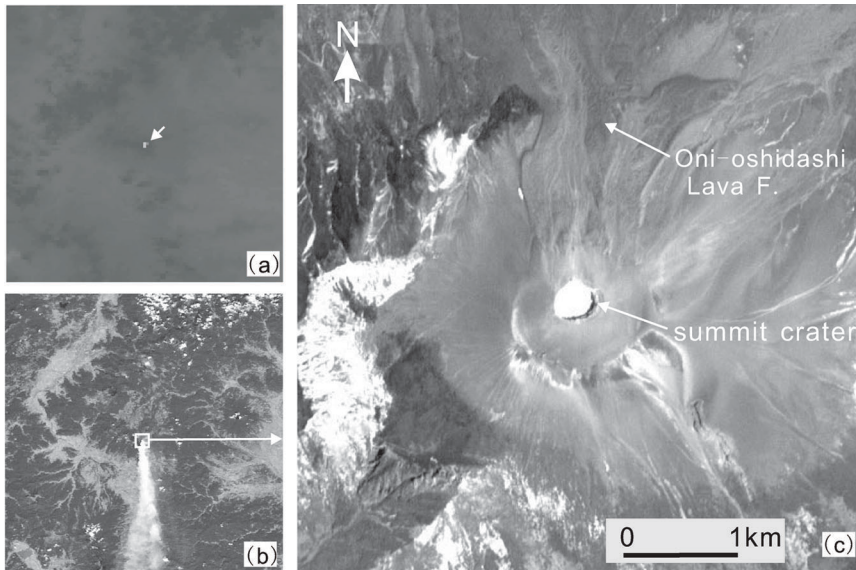


Fig. 3. (a) Nighttime Terra MODIS band 20 image (30 September 2004, 12h 45m GMT, ID=MOD021SS.A 2004274.1245.001.2005127093932_16144). The bright point in the centre shows thermal anomaly from the summit of Asama. The image is 100 km \times 100 km area. (b) Daytime image of MODIS imagery (visible and near infrared bands) (24 September 2004, 1h 30m GMT) of the same area as (a). (c) The summit area of Asama (SPOT-2 HP, 22 May 1998), boxed in (b).

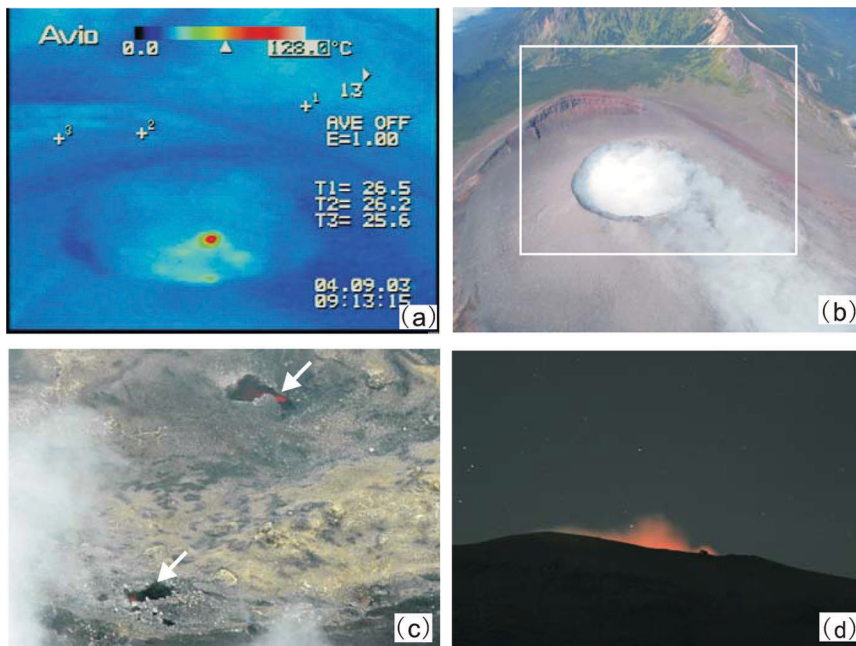


Fig. 4. (a) Thermal infrared image (AVIO TVS-100) of Asama taken from helicopter on 3 September 2004, viewed from the eastern side (taken by T. Kaneko), boxed in (b). The diameter of the crater rim is about 400 m. (b) A photograph from the same direction as (a) (taken by T. Kaneko). (c) Incandescent fumarolic vents in the summit crater (taken by T. Fujii on 9 August 2005). (d) Volcanic glow observed on 30 September 2004 (taken by M. Yoshimoto).

の輝度温度が低減している場合もあり得る（プロットには最も高い輝度温度を示す画素の値を使用）。Fig. 4a で、9月1日の噴火で放出された岩塊が火口の周囲に分布しているが、熱異常は示さない。これは、噴出量が少なく、火口縁でも今回の火山灰は5 cm 程度の厚さ（吉本・他、2005）であり、散在する噴出岩塊表面も噴出後しばらくして周囲とほぼ同じ温度になってしまったためと推定される。他の空中から撮影された赤外画像でも火口縁の堆積物からの熱異常は認められないため、ここでは噴出物の温度に及ぼす影響は軽微と見なし考慮しない。

4-3 噴火の前兆としての熱異常（I期）

Fig. 2a のプロットでは、噴火に先行する約半月前の8月16日の画像から熱異常 (>300K) が現れている。肉眼で観察される噴煙はこれにやや先行して、7月下旬から徐々に高くなっている（気象庁、2004、2005；鍵山・小山、2006）。浅間山では、非噴火時でも準定常的に噴煙が上がっていることから、火口と火道域内をつなぐ通路が完全には閉じていないことが推定される。青木・他（2005）は、2004年9月の噴火に先行して7月下旬頃、山体西下標高-1 km 付近でダイク貫入イベントがあったことを報告している（Fig. 2b）。これに関連してマグマが浅部へ供給され、脱ガスにより生成した高温ガスの一部が火道域を通過して火口に達し、高温噴気放出率を増加させ、熱異常が生じた可能性が考えられる。

このような推定が正しいとすると、火道域の状況に変化がなく、山体下でマグマから分離したガスが火口底まで到達する通路が通じていれば、今後も似たようなブルカノ式噴火に先行してこのような熱異常が現れる可能性が高い（II期の間、連続的に熱異常が続くため、2回目以降の噴火においても噴火前は熱異常が見られる状態となっている）。地殻変動等のデータと併せて利用すれば、噴火の発生を知る手立てとして有効であろう（4-4節、4-6節の深部でのダイク貫入イベントに関する記述参照）。ただし、IV期やNOAA AVHRRによる過去の観測（金子・安田、2003）では、浅間火山では噴火を伴わない熱異常が見られることがしばしばあり、熱異常のレベルや貫入量などの関係の検討が必要である。このI期で見られる関係は、ブルカノ式噴火と熱異常発生パターンの一例として重要であるが、全てのブルカノ式噴火で先行する熱異常が発生するパターンをとるとは限らない。今後他の火山を含めたデータを収集し、熱異常の発生パターンと噴火の規模や性質との関係をさらに詳しく検討する必要がある。

4-4 噴火期における2つのパルス（II期）

浅間火山の噴火活動期間は、MODISによる熱異常も高いレベルを示す。この期間のMODISの熱異常の時間

変化を詳しくみると、9月中旬をピークとするパルス（I期～IIa期）と11月下旬をピークとするパルス（IIb期）の2つが識別される（Fig. 2）。

これらの熱異常のパルスは、基本的に噴火活動のパルスに対応していると思われる（Fig. 2）。すなわちIIa期では、最初の9月1日と14–18日の噴火は5万トンレベルの噴出量であったが、23日、29日、10月10日と小噴火（この3回の噴出量を合わせても、IIa期の全体の20%以下）が繰り返され、やがて噴火のない期間が1ヶ月以上に続いた（吉本・他、2005）。しかし、この休止期後11月14日に、9月1日に次ぐ規模（2.5万トン）の大きな噴火が発生した（IIb期の開始）。12月9日にも極小規模な噴火が起き、これが一連の活動の最後の噴火となった。一方、この9月～12月の噴火期間、SO₂放出率、火映強度や地震活動（Fig. 2c-e）、噴煙の最高高度等にも、同様に9月と11月中旬～12月中旬付近をピークとする2つの活発期が認められる（気象庁、2004、2005）。

このIIb期のパルスは、新たにマグマが火道域浅部へ上昇（貫入）したことを示すのかもしれない。嶋野・他（2005）は、本質物質と思われる岩片の石基結晶度と先行する噴火休止期間の間に正の相関関係を見出した（Fig. 5）。これを、噴火に先行して上昇したマグマが火道域浅部（<1 km）で滞留、結晶化し、ブルカノ式噴火を起こし放出されるというモデルで説明した。しかしながら、このような関係はIIa期に相当する期間では上手くあてはまるものの、IIb期の11月14日の噴出物は、先行する休止期間に比べ結晶度が低く（低SiO₂量、低K₂O量）、この関係からは外れる。このことは、休止期間がIIa期内の噴火と比べ長いことと併せると、9月1日から始まったIIa期の活動は10月10日を最後に終わり、その後、新たなマグマ（全岩化学組成は同じであることから、一連のマグマのより深部に留まっていた部分と思われる）が深部から供給され、11月14日から始まるIIb期の活動に繋がったことを示すのかもしれない。

このような新たなマグマの供給イベントは、地殻変動の観測からも捉えられている。青木・他（2005）は、7月下旬と同様のダイク貫入イベントが10月下旬にも起きており、これが何らかの形で11月14日の噴火を誘発したことを指摘している（Fig. 2b）。この貫入によるマグマが11月14日の噴出マグマではないにしても、これより浅部にあるマグマを火道域浅部までもたらす間接的原因となった可能性がある（Fig. 5のIIa期の関係が後も当てはまると仮定すると、11月14日噴火に対応するマグマの火道域浅部への上昇は11月上旬と推定される）。

4-5 噴火後の静穏期（III期）

III期とした2004年12月下旬から2005年2月は、SO₂

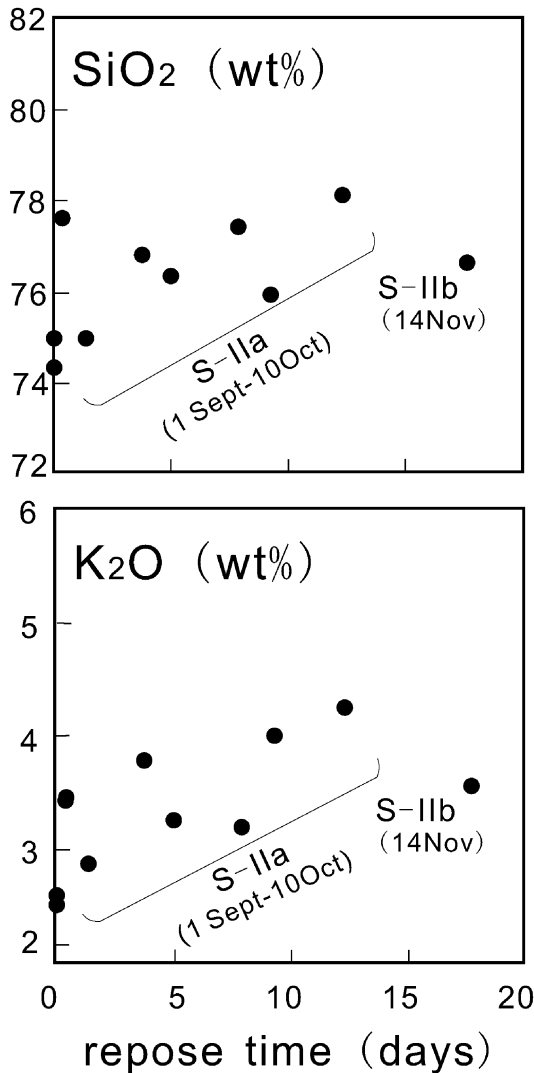


Fig. 5. Relationship between eruptive interval and SiO₂ (upper) and K₂O (lower) content of matrix glass of brown ash particles (adopted from Shimano *et al.*, 2005).

放出率は、噴火期であるIIa期と比べても高いレベルにあるが、Fig. 2aのMODISデータでは熱異常は認められない(火口内の最高温度は噴火以前から500°C程度とほぼ一定である。Fig. 2d)。三宅島2000年活動でも見られたように(気象庁, 2006)、噴煙高度が最高となるのは噴火期間とほぼ同じ(2004年7月~12月)である一方、SO₂放出率が最高となるのはそれよりやや遅れている(2004年12月~2005年4月)(Fig. 2d, f, 気象庁, 2005)。このことから、放出される高温噴気中の水蒸気とSO₂の割合は活動期間を通して必ずしも一定でなかった可能性

もある。III期は高いSO₂放出率にかかわらず、噴気すなわちその主体である水蒸気の放出率が相対的に低いため、熱異常はバックグラウンドと重なるレベルまで低下したとの解釈もできる。しかしながら、放熱率のデータは減少していない(Fig. 2f, 気象庁, 2005)などの矛盾する点もあり、この解釈については各データの誤差評価を含め今後のさらなる検討を要する。

4-6 噴火後の熱異常(IV期)

2005年3月~4月の熱異常の発生時期は、噴火は起きていないものの、表面現象は活発化し、SO₂放出率や火映強度が高いレベルを示すようになっている(気象庁, 2005)(Fig. 2)。この間パルス的に噴気放出率が増加し、熱異常が再び観測されるようになったと考えられる。地上赤外線映像装置を使った連続観測(浅間火山の北西7.5 km地点に2004年12月8日~2005年4月26日の間設置。金子・安田, 2005)では、IIb期内にあたる2004年12月8日~18日には熱異常が認められるものの、IV期にあたる2005年3月には認められないことから、IV期の熱異常のレベルは相対的に噴火活動期であるII期より低いことが推定される。一方、GPSによる地殻変動は、噴火活動期から引き続いて山体は膨張した状態にあり(気象庁, 2005)、地震活動は噴火活動期に比べやや低下しているものの、2月下旬に、単発的に噴火に先行してみられたBH型地震の多発を伴う傾斜変動が発生している(Fig. 2c)。これらのことは、この時期、火道域の比較的浅い場所までマグマが上昇していたことを示唆する。

噴火および熱異常の発生に数週間先行して発生したダイク貫入イベント(2004年7月と10月)が、2005年1月末(規模は小さい)および3月末にも観測されている(Fig. 2b)。傾斜変動、BH型地震の発生タイミング等(Fig. 2c)との関係を考慮すると、1月末の小規模な貫入イベントが、3月の表面現象活発化をもたらしたマグマの火道域浅部への上昇を誘発した可能性が考えられる。

5. まとめ

本研究の内容は以下のようにまとめられる。

- MODISの赤外画像によって、浅間火山2004-2005年の熱的状态の観測を行った。この結果、2004年8月~12月、2005年3月~4月に熱異常の発生が認められた。
- これらの熱異常は、噴火の発生との関係から、I期: 噴火前の熱異常発生期(2004年8月中~下旬)、II期: 噴火活動期の異常発生期(2004年9月~12月中旬)、III期: 静穏期(2004年12月下旬~翌年2月)、IV期: 噴火を伴わない熱異常発生期(2005年3月~少なくとも

も 4 月末), に分けられる. この区分に対応して, 地震活動, SO₂ 放出率, 傾斜変動の発生状況なども変化している.

- MODIS で観察される熱異常は, 山頂火口底の噴気孔から放出される高温噴気の放出率の増大 (同時に, 噴気孔奥の赤熱部の温度上昇や面積拡大による放射光も増加) を反映して, 拡大すると考えられる.
- 9 月 1 日の噴火に先行して, その約半月前から熱異常の増加が認められる (I 期). この原因として, 7 月下旬に地殻変動で観測された深部のダイク貫入に伴って, この時期直前に火道域浅部にマグマが供給された可能性がある.
- II 期の噴火活動期は, 熱異常から 2 つのパルス (II a 期と II b 期) に分けられる. これらのパルスに対応して, 地震活動や SO₂ 放出率も活発になっている. また, 噴出物についてみると, 先行する休止期の長さに対し II b 期の最初の噴火である 11 月 14 日の噴出物は結晶度が低いことから, II a 期のマグマの活動が一旦終了した後, 新たにマグマの供給があった可能性が示唆される (10 月下旬に深部でのダイク貫入が推定されており, これに誘発されたことが考えられる).
- IV 期の熱異常は, 2004 年 12 月 9 日噴火以降, 約 3 ヶ月間の休止期に続いて起きている. この熱異常の発生と同期あるいは先行して, 地震活動や傾斜変動の単発的な活発化, ダイクの貫入イベント (2005 年 1 月下旬) が見られることから, 噴火には至らないものの, マグマの火道域浅部への供給イベントがあった可能性が推定される. 従って, 今回の活動では, 少なくとも火道域浅部へのマグマの供給イベントが 3 回あった可能性が高く, 初めの 2 回は噴火を伴ったが, 3 回目は噴火には至らなかった.

今回の浅間火山 (I 期) のように, 火口と火道域内が何らかの形で通じている火山では, 似た様なブルカノ式噴火前に熱異常が現れることが期待される. このようなタイプの火山では, 衛星赤外画像により熱異常の高頻度観測を行うことにより, 噴火の予兆を捉えることができる可能性があり, 観測機器の設置が困難な遠隔地や噴火で危険な状況にある火山の活動監視に有効と思われる. 一方, 熱異常の出現とそれに先行して起きる深部ダイク貫入イベントを結ぶプロセス, および熱異常の発生パターンとブルカノ式噴火の規模や性質との関係については, 今後多数例のデータを収集し, さらに詳しい検討を行う必要がある.

謝 辞

本論をまとめるにあたって, 東京大学地震研究所の中

田節也教授, 藤井敏嗣教授, 吉本充宏博士, 東北大学東北アジア研究センターの嶋野岳人博士から貴重なご意見, ご協力を頂いた. 京都大学理学部火山研究センターの鍵山恒臣教授には赤外線映像装置 (TVS-100) の使用を許可して頂いた. また, 朝日新聞黒沢大陸氏には噴火間もない時期に上空からの火口観察の機会を与えて頂いた. MODIS データは NASA GES Distributed Active Archive Center からの提供を受けた. 本研究の一部に, 文部科学省科学研究費補助金・特別研究促進費「2004 年浅間火山の噴火に関する総合的調査」(代表: 中田節也 No. 1680002, 平成 16 年度), 同基盤研究 B「宇宙からのリアルタイム火山観測: 東アジアへの適用とその高度化」(代表: 金子隆之 No. 15310125, 平成 15–17 年度), 地震研究所所長裁量経費 (代表: 金子隆之「衛星データによる火山観測システムの開発」, 平成 17 年度) を使用した. 本稿を改善するにあたって, 査読を担当された鍵山恒臣教授および匿名査読者の方からのコメントはきわめて有益であった. 記して感謝致します.

引用文献

- 青木陽介・渡辺秀文・小山悦郎・及川 純・森田裕一 (2005) 2004–2005 年浅間山火山活動に伴う地殻変動. 火山, **50**, 575–584.
- Aramaki, S. (1963) Geology of Asama Volcano. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo, sec. 2*, **14**, 229–443.
- Dehn, J., Dean, K., Engle, K. and Izbekov, P. (2002) Thermal precursors in satellite images of the 1999 eruption of Shishaldin volcano. *Bull. Volcanol.*, **64**, 525–534.
- Harris, A.J.L., Butterworth, A.L., Carlton, R.W., Downey, L., Miller, P., Navarro, P. and Rothery, D.A. (1997) Low-cost volcano surveillance from space: case studies from Etna, Krafla, Cerro Negro, Fogo, Lascar and Erebus. *Bull. Volcanol.*, **59**, 49–64.
- 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.
- 鍵山恒臣・小山悦郎 (2006) 浅間火山 2004 年噴火に関連した噴煙の時間変動. 火山, **51**, 75–89.
- 鍵山恒臣・辻 浩 (1987) 1986 年伊豆大島噴火の熱的前兆と現況. 月刊地球, **9**, 435–440.
- 金子隆之 (2005) 衛星リモートセンシングによる火山の赤外観測. 火山, **50**, 50 周年記念特集号, S223–S251.
- 金子隆之・M. ウスター (2003) ノア AVHRR 画像による伊豆大島 1986–1987 年の噴火活動. 平成 13–14 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2)「衛星データによる準リアルタイム活火山熱観測システムの開発」代表: 金子隆之) 研究成果報告書, 28–31.
- 金子隆之・安田 敦 (2003) 2002–2003 年に REAL-VOLC によって観測された国内 10 火山の熱異常. 平成 13–14 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2)「衛星データによる準リアルタイム活火山熱観測シス

- テムの開発」代表: 金子隆之) 研究成果報告書, 16-27.
- 金子隆之・安田 敦 (2005) 2004 年浅間火山噴火に関する赤外画像観測. 平成 16 年度科学研究費補助金 (特別研究促進費「2004 年浅間火山の噴火に関する総合的調査」代表: 中田節也) 研究成果報告書, 65-69.
- Kaneko, T., Yasuda, A., Ishimaru, T., Takagi, M., Wooster, M.J. and Kagiya, T. (2002) Satellite hot spot monitoring for Japanese volcanoes: a prototype AVHRR based system. *Advances Enviro. Monitor. Model.*, **1**, no. 3, 153-166.
- 気象庁 (2004) 浅間山. 火山活動解説資料, 平成 16 年 (2004 年) 年報, http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-ac_t_doc/monthly_vact_2004.htm.
- 気象庁 (2005) 浅間山. 火山活動解説資料, 平成 17 年 (2005 年) 11 月号, 12 月号, http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-ac_t_doc/monthly_vact.htm.
- 気象庁 (2006) 三宅島. 火山活動解説資料, 平成 18 年 (2006 年) 4 月号, http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-ac_t_doc/tokyo/06m04/320_06m04.pdf.
- 宮崎 努 (2003) 浅間山火山活動記録の再調査. 震研彙報, **78**, 283-463.
- 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.
- 中田節也・吉本充宏・小山悦郎・辻 浩・ト部 卓 (2005) 浅間山 2004 年噴火と過去の噴火との比較による活動評価. 火山, **50**, 303-313.
- Okubo, S., Ohminato, T., Hirabayashi, J., Kazahaya, K., Mori, T., Matsumoto, S., Koyama, E. and Sun, W. (2005) Gravity change as a predictor of volcanic eruption. *Report of Research Project, Grant-in-Aid for Scientific Research (Special Purposes, No. 1680002) in FY 2004*, 49-53.
- 大木章一・村上 亮・渡辺信之・浦部ぼくろう・宮脇正典 (2005) 航空機搭載型合成開ロレーダー (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. 火山, **50**, 401-410.
- 嶋野岳人・飯田晃子・吉本充宏・安田 敦・中田節也 (2005) 浅間火山 2004 年噴火噴出物の岩石学的検討. 火山, **50**, 315-332.
- 高木朗充・福井敬一・藤原健治・上田義浩・飯島 聖・山本哲也・坂井孝行・菅野智之・湯山弘明 (2005) 地殻変動から推定される 2004 年浅間山噴火前後の浅部マグマ供給系. 火山, **50**, 363-375.
- Takeo, M., Aoki, Y., Ohminato, T. and Yamamoto, M. (2006) Magma supply path beneath Mt. Asama volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.* (in press)
- 浦井 稔・福井敬一・山口 靖・David C. Pieri (1999) ASTER による火山観測の可能性とグローバル火山観測計画. 火山, **44**, 131-141.
- Wooster, M.J. (2001) Long-term infrared surveillance of Lascar volcano: contrasting activity cycles and cooling pyroclastics. *Geophys Res. Lett.*, **28**, 5, 847-850.
- Wooster, M.J. and Kaneko, T. (1998) Satellite thermal analysis of lava dome effusion rate at Unzen volcano, Japan. *J. Geophys. Res.*, **103**, 20935-20947.
- Wooster, M.J. and Rothery, D.A. (1997) Thermal monitoring of Lascar Volcano, Chile using infrared data from the Along Track Scanning Radiometer: a 1992-1995 time-series. *Bull. Volcanol.*, **58**, 566-579.
- 吉本充宏・他 17 名 (2005) 浅間山 2004 年噴火の噴出物の特徴と降灰量の見積もり. 火山, **50**, 519-533.

(編集担当 小川康雄)