

Windows PC を用いた自動撮影システムによる 三宅島火山噴煙の観測

寺田 暁彦^{*, **}・井田 喜明^{***}・大湊 隆雄^{*}

(2002年8月29日受付, 2003年9月22日受理)

Automatic Image Recording System Using the Windows PCs: Application to the Eruption Columns of Miyakejima Volcano, Japan

Akihiko TERADA^{*, **}, Yoshiaki IDA^{***} and Takao OHMINATO^{*}

Using commercial Windows PC and digital cameras, we have developed an automatic image recording system, which is inexpensive, small and lightweight. This system automatically records camera images in a digital form and transfers them to a remote server through telephone lines. This system can be flexibly applied to the observation and monitoring of eruption columns even under severe conditions. With this system we have recorded images of the eruption columns of Miyakejima Volcano, Japan, every 10 seconds from 12 August 2000 to 13 May 2002. These images revealed how the vents of volcanic gas ejection developed during August 2000. The images after September 2000 showed that the column was relatively high in summer, probably reflecting the amount of vapor in the ambient atmosphere.

Key words: image recording system, Miyakejima eruption, eruption columns, vents development, vapor in the ambient atmosphere

1. はじめに

火山噴火に伴う表面現象、特に噴煙の状態からは火山学的に興味あるさまざまな情報を得られるため、これを記録することは大変重要である。たとえば Wilson

et al. (1978) は、Morton *et al.* (1956) が導いた定常ブリュームの到達高度と初期エネルギー供給率との関係をプリニー式噴火の噴煙に適用して、噴煙として放出された熱エネルギーや火砕物の噴出量を見積もった。また、Woods and Kienle (1994) は、サーマルの上昇運動を定式化してこれを数値的に解き、Redoubt 火山 1990 年噴火の火砕流から生じた噴煙の運動を映像から解析して、火砕流の初期温度などを見積もった。一方、鍵山 (1978) は Briggs (1969) の考えを拡張して、風にたなびく噴煙の映像から熱放出率および H₂O 放出率を見積もる方法を考案し、有珠火山の噴煙の非噴火時に見られる変動を議論した。

以上のように記録された画像データを用いて各種の物理量を見積もるほかにも、噴火様式や火砕物の降下過程を調べること（たとえば、津久井・他, 1987）、噴火のメカニズムを考察すること（荒牧・早川, 1984）などの試みがある。また、画像をテレメータできれば、上記のような画像解析を迅速に行うことができるうえに、安全な場所から噴火の推移をリアルタイムで把握できるなど、防災上の観点からも有益である。

このような背景から、これまで、運用環境や目的によ

* 〒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.

** 現在: 〒060-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 8 丁目

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター

Current: Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, North 10 West 8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan.

Corresponding author: Akihiko Terada

e-mail: terada@eos.hokudai.ac.jp

*** 〒671-2201 兵庫県姫路市書写 2167

姫路工業大学大学院理学研究科

Graduate School of Science, Himeji Institute of Technology, 2167 Syosha, Himeji 671-2201, Japan.

りさまざまな画像取得・伝送システムが使用されてきた。たとえば、宝田・他(2001)は可視カメラ、熱赤外カメラおよびマイクロフォン等からなる観測システムを構築し、有珠火山2000年噴火の噴煙の観測を行った。このシステムは野外において安定に動作するほか、遠隔操作が可能であることなど高い実用性を有する。一方、木下・他(1999)は、画像を大容量記憶媒体MDに保存するデジタルカメラ(SHARP MD-PS1)等を使用して、薩摩硫黄島などの離島地域で噴煙観測を行った。MD-PS1は標準的な解像度において約2000回の自動インターバル撮影が可能であるほか、小型・低価格であるから、アクセスが困難な地域での噴煙観測装置として使用されている。このほか、報道機関や地元住民が撮影した画像を研究目的に使用できることがある。

しかし、これらのシステムには短所もある。高性能の画像取得・伝送システムは比較的高価で大きかりな設備を必要とするため、観測を長期間行うためには多くの費用と労力を要する場合が多い。火山活動の急な変化に応じてシステムを機動的に展開することが難しい。逆に、MD-PS1などの比較的低価格の撮影システムでは、記録可能容量が少ないことや、画像伝送、時刻校正などの機能がないなど観測に不都合な点が少ない。また、報道機関や地元住民から得られる映像や画像は、正確な撮影時刻や撮影場所が不明であったり、適当なスケールがないために物理量を測定できないなど、研究目的には十分に役立たないことも多い。

そこで我々は、噴煙を自動的に撮影して画像の一部を

任意の場所に自動的に伝送するシステムを構築した。本撮影システムは機動性に優れるため、火山活動の急激な変化にも対応できる。また、安価な汎用製品を使用しているから、状況に応じて撮影システムの補充を容易に行える。このような特徴から、三宅島火山において爆発的噴火活動が始まった直後の2000年8月12日という早い時期に噴煙観測を開始して、活動の推移を10秒間隔で安全に記録することができた。また、全島民の島外避難が行われる直前に三宅島から南南東に20 km離れた御蔵島に同様の撮影システムを設置して、2年間以上にわたり三宅島火山噴煙の連続画像を得ることができた。特に2000年8月から9月の時期には、三宅島火山で運用されていた監視・観測カメラは本撮影システムが唯一であった。

本論文では、自動撮影システムを構築・運営する方法と、得られた画像から噴煙の運動を定量化する方法について述べる。また、本撮影システムにより得られた画像を用いて、2000年8月における白色噴煙活動の変化と、9月以降の噴煙高度の変動について議論する。噴煙運動の定量的な解析手法や結果については別に発表する。なお、本論文ではWindows OSを搭載したパーソナルコンピュータをWindows PCあるいは単にPCと略記する。また、本論文で噴煙という呼称は火山灰の有無によらず用いる。

2. 自動撮影システムの構築方法

本撮影システムは、市販のデジタルスチルカメラやビ

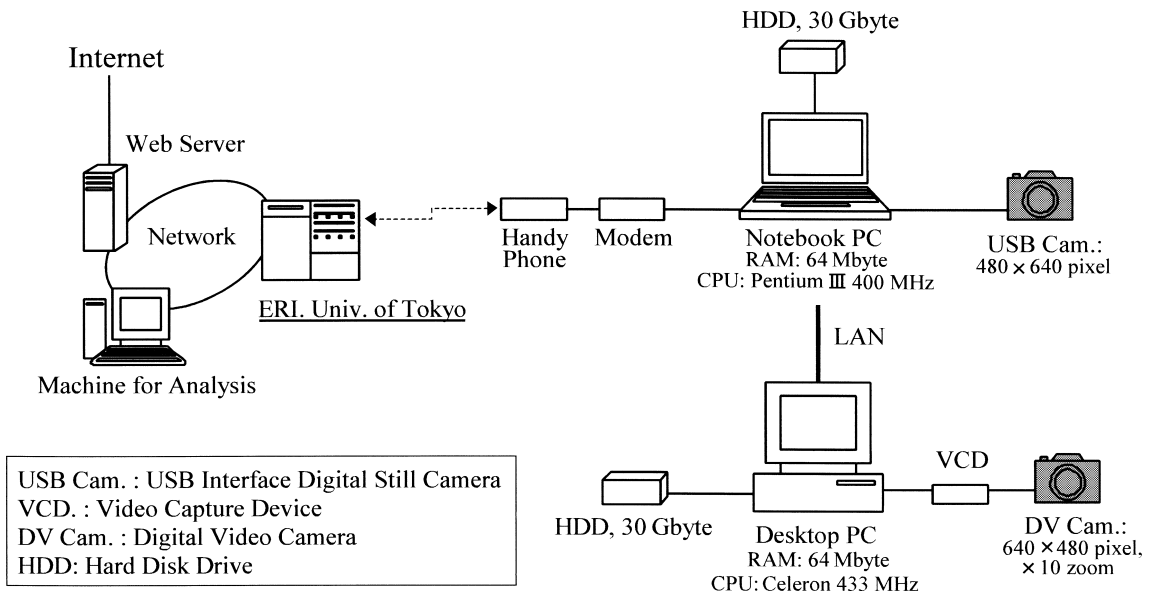


Fig. 1. The illustration of a typical configuration of the automatic image recording system.

デオカメラを Windows PC に接続し、画像取得ソフトウェアを用いてデジタル静止画像を任意の時間間隔で PC のハードディスクドライブに保存したうえで、画像の一部を一般電話回線を通じて自動伝送するものである。得られる画像の解像度は選択可能であり、本研究では最高の約 31 万画素で観測を行った。また、画像はフルカラー (RGB 24 bit) で、ファイルのサイズは 1 ファイルにつきおおむね 30~120 kbyte である。なお、本撮影システムは既存の建物内に設置することを前提としているため、電力供給や防水、温度管理等の対策を考える必要がない。

2-1 ハードウェア

Fig. 1 に撮影システム構成の例を示す。本撮影システムは、USB 接続型デジタルスチルカメラ (USB カメラ) をノート PC に、ビデオカメラをデスクトップ PC に接続した。本撮影システムでは 1 台の PC で複数のカメラを運用することも可能であるが、システムへの負荷を軽減させ、長期間の無人運用を安定に行うために、2 台の PC に処理を分散させた形でも運用できる。Fig. 1 は 2 台の PC に処理を分散させた場合の撮影システム構成の例である。

2 台のカメラを使用したのは、広角画像と望遠画像をそれぞれ同時に撮影するためである。画像から高さ等の物理量を計測するためには、噴煙規模に応じて画角や視線を動かすよりも、視野角の異なるカメラを複数設置する方が便利である。本撮影システムでは USB カメラを縦置き (横×縦=480×640 pixel) の広角カメラとして使用し、噴煙全体を撮影することで主に噴煙高度を測定した。一方、ビデオカメラを横置き (横×縦=640×480 pixel) の望遠カメラとして使用し、噴煙の根元付近を十分な解像度で撮影することで主に初期上昇速度を測定した。

次に、Fig. 1 に示した各器材の特性や選定上の諸問題を述べる。USB カメラは、USB 端子をもつほとんどの PC で安定に動作するが、性能は一般のデジタルスチルカメラより劣る場合が多い。本撮影システムで使用した SONY PCGA-VC1 は、本体の大きさが 36×67 mm、重量が 45 g と小型・軽量であるから、窓に張り付けるなどわずかなスペースに設置できる。

ビデオカメラは SONY DCR-TRV20 を使用した。一般に、ビデオカメラを PC に接続するにはビデオキャプチャデバイスが必要である。使用するカメラのビデオ出力の規格 (たとえば、NTSC コンポジット、S ビデオ、IEEE1394 など) とビデオキャプチャデバイスの入力規格が適合していれば、デジタルスチルカメラや高感度カメラ、熱赤外カメラなども使用できる。

Table 1. The daily schedules of operations with soft-wares used in this study.

Time	Task	Software
04:30	Revise the system clock	Sakura Watch network time client Ver0.2.1
05:00	Start the image capturing (10 seconds intervals)	ListCam Ver1.8
06:00	Start the file transferring (20 minutes intervals)	DT_FTP Ver1.05
18:00	Stop the file transferring	
19:00	Stop the image capturing	
19:30	Restart the system	Quick Reboot Ver1.0

必要な PC の性能は使用するデバイス等に依存する。

Fig. 1 の構成においては、図に付した PC の性能で十分に機能することを確認した。

撮影画像を保存するハードディスクドライブ (HDD) は、データ回収の便宜を考慮して外付型を用いた。本研究で使用した HDD の容量は 30 Gbyte であり、昼間 10 秒間隔で 1 枚 100 kbyte 前後の画像を撮影した場合には約 2 カ月程度記録できる。

画像のテレメータには携帯電話を使用できる。しかし、携帯電話の多くは、その機構から充電とデータ通信を同時に行うことができないため、携帯電話専用車載アダプタや、充電機能付携帯電話用接続ケーブルなどを利用する (平田・他, 1999)。

電源供給は商用 AC 100 V の使用を想定した。電圧の不安定や瞬間的な停電は撮影システムへ重大な影響を与える可能性があるため、無停電電源装置 (UPS) を使用した。

このほか、鮮明な画像を得るためにさまざまな製品や技術が存在する。たとえば、カメラレンズに偏向フィルター (PL フィルター) を装着すると、窓ガラスに映える室内の光や、大気の散乱光による画像コントラストの低下を軽減できる。また、光量を調整する ND フィルターは、太陽光によるカメラの CCD 素子の損傷を防ぐことにも使用できる。

2-2 ソフトウェア

一日の観測スケジュールの一例および観測に使用したソフトウェアの名称を Table 1 に示す。本撮影システムで撮影および画像の保存に使用したソフトウェアは ListCam Ver. 1.8 である。本ソフトウェアは、USB 端子やビデオキャプチャデバイスを介して PC に入力された映像から、任意の時間帯に任意の時間間隔で自動的に静止画像を取得して、JPEG や BMP などの形式で PC のドライブに保存する。最小撮影時間間隔は 1 秒である。このほか、本撮影システムでは DT-FTP Ver. 1.05 (画像伝送)、Quick Reboot Ver. 1.0 (システム自動再起動)、Sakura Watch network time client Ver. 0.2.1 (時刻校正)

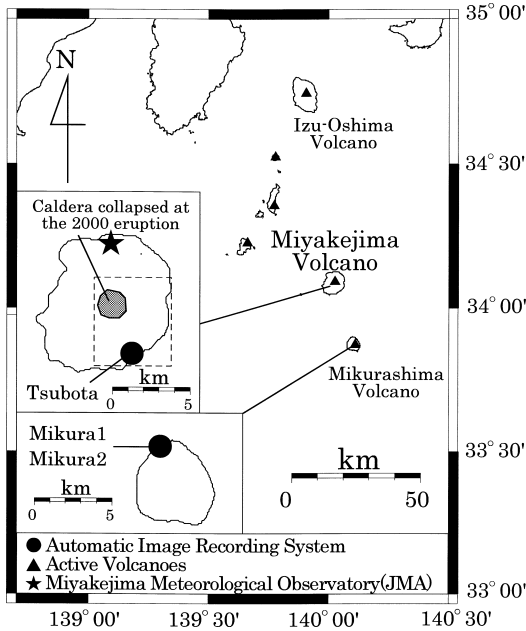


Fig. 2. Map of the area around the Miyakejima Volcano showing locations of the automatic image recording systems.

を使用した。これらのソフトウェアは、2003年9月現在インターネット上で無償配布されている。着信接続機能（電話回線による撮影システムへのアクセス）やWindows NetMeeting（撮影システムの遠隔操作）は、PCの基本ソフト（OS）であるMicrosoft Windows 98 SE/Me/2000/XPに標準添付されている。したがって、OS（Windows）を準備すれば、観測に必要なソフトウェアはすべて無償で入手できる。

2-3 本撮影システムの特徴

本撮影システムは、電話回線を通じた定期的な画像伝送のほかに、撮影システムの遠隔操作による各設定の変更や、画像の回収を任意に行うことができる。また、撮影システム安定性のため、数カ月以上にわたり現地でのメンテナンス作業なしに運用できる。さらに、目的や状況に応じて使用するカメラやパソコンの台数を変更し、高感度カメラや熱赤外カメラなどを組み合わせた多目的の観測点として運用することも可能である。撮影システムの設置や運用に特別な技術や知識を必要とせず、15～20万円程度で構築・運用でき、小型軽量のため一人で持ち運びができることなどの特徴は、火山活動の急激な変化に対応する上で大変有利である。

3. 自動撮影システムの運用方法

我々は、本撮影システムを三宅島坪田および御蔵島に

設置して、約2年間にわたり三宅島火山の噴煙連続撮影を行った（Fig. 2）。本節では観測点を選定するうえでの注意と、三宅島坪田および御蔵島観測点における運用経過について述べる。

3-1 観測点の選定方法

まず、観測点の位置について述べる。火口から見て最も望ましいカメラの設置方位は南である。この方角からは、太陽光による画像コントラストの低下やカメラCCD素子損傷のリスクを軽減できる。また、三宅島付近では西や北東風が卓越するため、風に流される噴煙を横方向から観測できることが多い。カメラから火口までの距離は観測目的に応じて決める。到達高度等の噴煙全容を観測する場合には、想定する噴煙高度と同程度以上離れることが望ましい。

次に見通しについて述べる。見通しは現地調査なしでは判断が難しい。建物や地形などの静的な障害物のほかにも、季節により木立の状況が変わることや、冬季に起きる結露等が見通しを妨げる原因になる。また、道路に面した窓には土埃が、海に面した窓には潮が付きやすい。海や湖、河を挟んで対岸にカメラを設置する場合には、霧を避けるためにできるだけ高所に設置するとよい。

3-2 三宅島坪田観測点での運用

本撮影システムを2000年8月12日に三宅島火山陥没火口から南南東に約2.6 km離れた三宅村坪田地区の民家に設置して、24時間10秒間隔で連続撮影を行った（Fig. 2）。噴火が頻発するなかで機動的に観測点を設置する必要があったため、坪田観測点ではノートパソコンとUSBカメラを1台ずつ使用する簡易型の撮影システムを構築した。電話回線の工事を行う時間的余裕がなかったため、画像の伝送には携帯電話を使用した。本観測点は、カメラから山頂部およびその上空まで障害物がないこと、携帯電話の通話状況がよいこと、交通の便がよいことなど優れた点が多かった。本観測点は、全島民の島外避難が実施された2000年9月4日まで運用した。観測開始から撤収までの24日間、画像の伝送に失敗することがあったものの撮影システムの停止は一度もなかった。本観測点で撮影された画像の例をFig. 3(a)に示す。画像の鉛直方向の視野角は46.2度、撮影可能高度は三宅島の火口上の海拔約3500 m、画像1枚の容量はおおむね30～80 kbyteである。携帯電話によるデータ伝送速度は遅く、すべての画像を送ることは困難であった。このため、本観測点では画像伝送を20分ごととし、伝送開始時刻直前の画像1枚を伝送した。伝送に要する時間は接続・認証にかかる時間も含めて3～5分であった。観測開始直後の2000年8月14日以降、携帯電話がつか

りにくい状況が頻繁に発生した。この際、FTP ソフト (DT-FTP) が停止して画像伝送ができない状態となる現象がほぼ毎日発生した。このため、FTP ソフトを定期的に強制終了、再起動させる仕様に変更した。

2000 年 8 月 14 日以降、噴煙の到達高度が増したために、噴煙頂部の見込み角が大きくなった。また、西から北西の風によって噴煙が観測点直上付近を流れることが多かった。さらに、弱風時には上空に滞留した噴煙のために噴煙頂部が見えないことなどから、噴煙高度の計測が困難な状況が多く発生した。その一方で、陥没火口壁付近における噴煙の様子を明瞭に撮影できた。これらの画像から得られた知見は 5 章で述べる。

3-3 御蔵島観測点での運用

噴煙の規模を考慮して、2000 年 8 月 31 日に三宅島から南南東へ約 20 km 離れた御蔵島の御蔵島小中学校に、坪田観測点と同一のノートパソコンと USB カメラを 1 台ずつ使用する簡易型撮影システムを設置して、昼間 10 秒間隔の撮影を行った (Fig. 2)。本観測点においては機器を逐次追加して、2001 年 1 月には Fig. 1 に示されるような 2 台の PC によって処理を分散する構成とした。本観測点では新規に一般電話回線を開設して、画像の伝送を 20~60 分ごとに (2001 年 10 月以降は一日 3 回) 行った。伝送する画像は、坪田観測点と同様に伝送時刻直前の御蔵 1、御蔵 2 の画像 1 枚ずつとした。本観測点は標高が海拔 150 m と高いために霧の影響が少なく、視野に障害物がなく、窓に結露が起きにくい理想的な場所であった。本観測点は 2001 年 3 月 11 日に同島内の通称西川住宅に移設した後、2002 年 5 月 13 日に撤収した。

撮影した画像の例を Fig. 3(b), (c) に示す。ここで、Fig. 3(b) は USB カメラによって得られた画像であり、御蔵 1 と呼ぶことにする。御蔵 1 の鉛直方向の視野角は約 46.2 度、撮影可能高度は三宅島上空の海拔 20 km 程度、画像 1 枚の容量は約 30 kbyte である。一方、Fig. 3(c) はズーム機能付のビデオカメラにより得られた画像であり、御蔵 2 と呼ぶことにする。御蔵 2 の鉛直方向の視野角は約 9.15 度、撮影可能最大高度は三宅島上空の海拔 3000 m 程度、画像 1 枚の容量は約 100 kbyte である。

4. 噴煙を定量化する方法

噴煙の到達高度や半径、上昇速度は浮力を反映した量であり、噴煙温度や火山ガス放出量等に関係する。本節では、これらの量を画像から計測する方法および計測誤差について述べる。

4-1 噴煙の到達高度と直径の計測

噴煙頂部の海拔高度 h は、水平面から測定したカメラの仰角 θ_0 、カメラの仰角から測定した噴煙頂部の見込み角 θ を用いて計算する (Fig. 4(a))。画像上で用いる座標は、画像左下端を原点とする直角座標 (X, Y)、単位は pixel とする (Fig. 4(b))。カメラの視野角を 2α 、画像鉛直方向の総 pixel 数を $2P_y$ としたとき、 α と θ には次の関係がある：

$$\tan \theta = \left(\frac{Y - P_y}{P_y} \right) \tan \alpha \quad (1)$$

Y は画像から pixel 単位で計測した噴煙頂部の座標である。 α と P_y が既知であれば、 θ は (1) 式から計算できる。

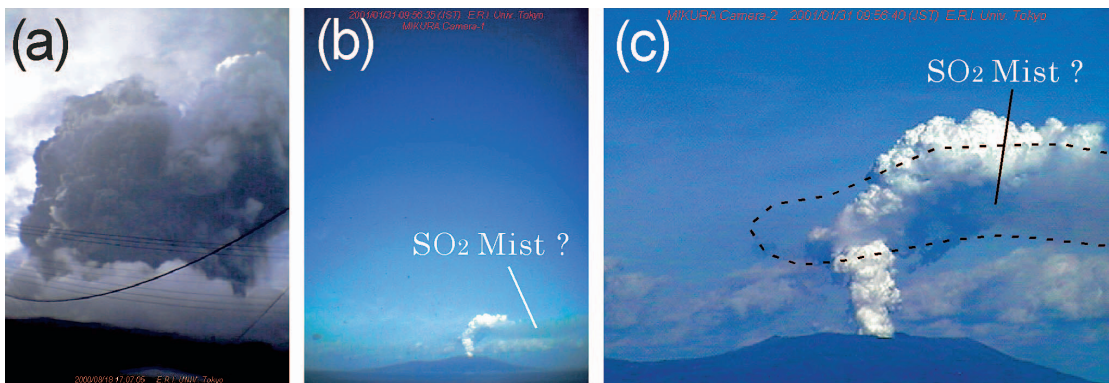


Fig. 3. Some examples of recorded images. Original images are colored with RGB 24bits. (a) An image for one of the most explosive eruptions at Miyakejima volcano in 2000. These images were automatically taken by the Tsubota Camera system at 17:07:05 (JST) on 18 August 2000. (b) A typical eruption column of Miyakejima volcano after September 2000. These images were taken by Mikura Camera 1 at 09:56:35 (JST) on 31 January, 2001. (c) The image taken by Mikura Camera 2 at 09:56:40 (JST) on 31 January, 2001.

別に測定したカメラの仰角 θ_0 を用いて、噴煙頂部の海拔高度は

$$h = d \tan(\theta + \theta_0) + h_0 \quad (2)$$

と表される。ここで、 h_0 は観測点を設置した海拔高度、 d は観測点から噴煙までの水平距離である。 d は1点の観測では独立に求めることができないため、本研究ではカメラから噴煙噴出口までの水平距離を d とした。坪田、御蔵島観測点における d は、それぞれ 2.6 km, 21 km である。

カメラの仰角 θ_0 は実測されていることが望ましい。しかし、カメラや雲台の仕様によっては測定が困難なことや、測定後に仰角が動いてしまうことがある。ここでは、(1) 式と同様な方法により、画像から θ_0 を推定する

方法を述べる。まず、画像上で特徴的に見え、実際の位置が既知の点を基準点 (X', Y') として選ぶ。本研究で基準点 (X', Y') は、三宅島の陥没火口壁西部上端の特徴的な部分に設定し、この位置を地形図から確定した。地形図を用いれば、観測点から見た基準点の水平面からの見込み角度 θ' を計測できる。このとき、 θ' 、 θ_0 および α は次の関係がある：

$$\tan(\theta' - \theta_0) = \left(\frac{Y' - P_y}{P_y} \right) \tan \alpha \quad (3)$$

ここで Y' は、画像から計測した基準点の鉛直座標である。(3) 式から、既知の θ' と P_y を用いてカメラの仰角 θ_0 を見積もることができる。本研究では、(3) 式を用いて θ_0 を見積もった。

噴煙半径についても、高さと同様な方法により計測した。

4-2 上昇速度の計測

後に述べるように、三宅島火山の噴煙は塊状である。したがって、これら噴煙塊の高さ方向の位置変化を追跡することで、噴煙の平均的上昇速度を測定できる。本研究では、Fig. 4(c) に示すように噴煙画像を等撮影時間間隔に並べて噴煙塊の中心付近を追跡し、時刻 t_i における上昇速度 w_i を以下の式を用いて求めた：

$$w_i = \frac{Y_{i+1} - Y_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (4)$$

4-3 計測誤差の検討

計測結果に含まれる誤差要因として、読取誤差 δ 、レンズの歪み Δ 、噴煙までの水平距離 d' が考えられる。以下では、各誤差要因について検討する。

4-3-1 読取誤差

坪田カメラ (USB カメラ) では、噴煙の位置を 1 pixel 単位で読み取ることができる。この値をカメラから見た角度に換算すると、横平均 7.6×10^{-2} 度、縦平均 7.2×10^{-2} 度に相当する。一方、御蔵 1 (USB カメラ) は焦点がやや甘いため、噴煙の位置の読取には 3 pixel 程度の不確定がある。この 3 pixel の不確定を考慮して角度に換算すると横平均 2.3×10^{-1} 度、縦平均 2.2×10^{-1} 度となる。さらに、御蔵 2 (ビデオカメラ) の読取誤差は 1 pixel であり、同様に角度に変換すると横平均 1.8×10^{-2} 度、縦平均 1.9×10^{-2} 度である。これらの値を鉛直方向の長さに変換すると、三宅島陥没火口上空の海拔 2000 m 付近における坪田、御蔵 1 および御蔵 2 の読取誤差 δ はそれぞれ 4.7×5.3 m, 69×78 m および 6.7×7.1 m となる (Table 2)。

4-3-2 レンズの歪み

本節では、(1) 式から計算されるある点 (X, Y) の仰角 θ と、実際の (X, Y) の仰角 θ の差 Δ を定義する：

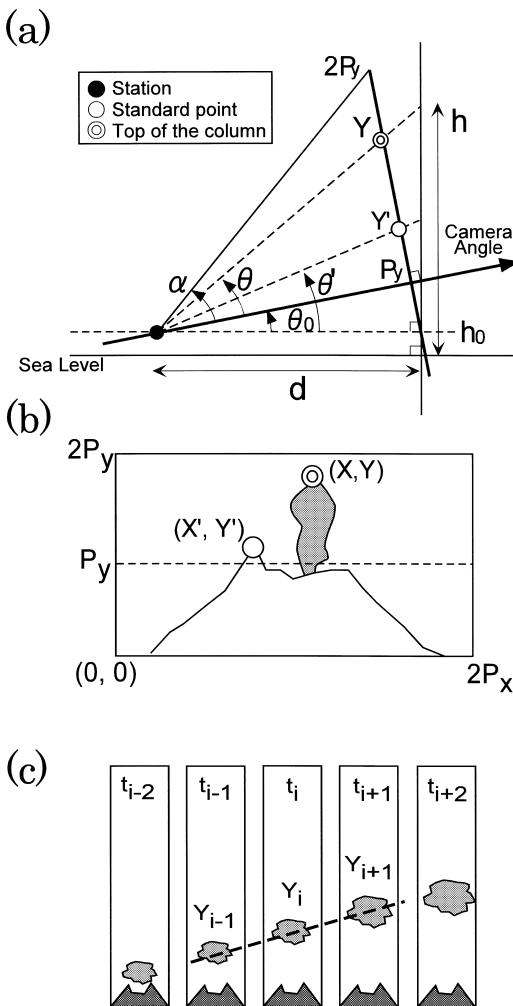


Fig. 4. Method to estimate the eruption column height and column ascent velocity from the images.

$$\Delta = \theta - \theta \quad (5)$$

本研究では Δ をレンズ歪みとみなして、その大きさを実験的に調べた。すなわち、観測に使用したカメラを用いて方眼用紙を撮影し、 θ の実測値と 4.1 節の方法で求めた θ とを比較した。この結果、USB カメラ（坪田および御蔵 1）の歪み Δ は横平均 8.1×10^{-2} 度、縦平均 9.1×10^{-2} 度で、画面の四隅で大きく最大で縦 6.7×10^{-1} 度であった。一方、ビデオカメラ（御蔵 2）の歪み Δ は横平均 2.0×10^{-2} 度、縦平均 1.9×10^{-2} 度、最大は縦 4.6×10^{-2} 度であった。先に述べた読取誤差と比較すると、平均値としてはほぼ同じ程度であった。

以上の歪みを陥没火口付近に換算した鉛直方向の長さで表すと、坪田カメラ、御蔵 1、御蔵 2 はそれぞれ約 4.9×5.6 m、 30×33 m および 7.3×7.0 m である (Table 2)。

4-3-3 噴煙までの水平距離の不確定

カメラから噴煙頂部までの水平距離 d の不確定が測定に及ぼす影響を考える。1 点のみの観測で d を独立に決めることができないため、ここでは d が風向 a のみに依存すると仮定して、 d の変動を見積もった。Fig. 5 のように a をカメラの方角から反時計まわりに測った角度で表現する。噴煙が風と同じ方向に流れるとき、噴煙からカメラまでの水平距離 d' と火口からカメラまでの水平距離 d との比は

$$\frac{d'}{d} = \left(1 - \frac{2r \cos \alpha}{d} + \frac{r^2}{d^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

と書ける。すなわち、 r/d が小さいほど、あるいは a が 90 度もしくは 270 度に近いほど、風向きによる d の不確定は小さい。

御蔵カメラによる d の不確定を考える。風に流されながら上昇する噴煙は、島上空内で上昇をやめることがほとんどであるから、最高到達高度の測定を画像上の三宅島上空で行えばよい。このとき、 r の最大値は三宅島の大きさから約 3 km、火口からカメラまでの水平距離 d は約 21 km である。したがって、噴煙高度の読み取りを風向が $45^\circ < a < 135^\circ$ および $225^\circ < a < 315^\circ$ のときに行えば、(6) 式から風向きによる噴煙高度の不確定は 1 割以下に抑えられることがわかる。三宅島周辺の卓越

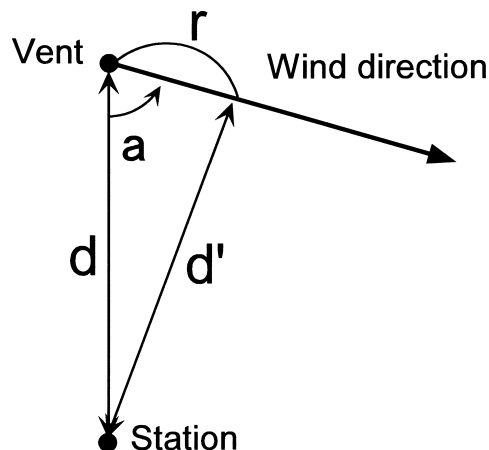


Fig. 5. The illustration to show the effect of wind direction on the estimated eruption column height.

風は西および北東、すなわち a が 250° および 75° であるから、多くの場合、風向きによる測定誤差は噴煙の高さの 1 割程度と考えられる。

一方、三宅島島内の坪田カメラでは、 r/d 比を抑えるために r を小さく取り過ぎると、特に風が強いときに噴煙が最高高度に達する前に高さが計測される恐れがある。また、噴煙は上昇するにつれて膨張するため、弱風であっても r は増加する。このために r/d を十分に小さく取ることができず、噴煙の到達高度を精度よく計測することは困難である。

4-3-4 計測誤差のまとめ

読み取り精度とレンズの歪みに関する検討結果を Table 2 にまとめた。画面の四隅以外であれば、読み取り精度やレンズの歪みに起因する計測誤差は、いずれのカメラを使用した場合でも三宅島火山の噴煙到達高度 1000~3000 m 前後と比較して十分に小さい。これに対して、風による噴煙到達高度の不確定さは 1 割にも及ぶ。したがって、噴煙到達高度を解析するには主として風に注意すればよい。

噴煙の直径は火口壁近傍で 100~500 m 程度で、

Table 2. Parameters of observation devices and accuracy of the captured images.

Station	Horizontal distance from Camera to the vent	Resolution	Azimuth of field	Length/Pixel at 2000 m a.s.l.	Accuracy of measurement	Lens Distortion at 2000 m a.s.l.
	[km]	Horizontal×Vertical [pixel]	Horizontal×Vertical [deg]	Horizontal×Vertical [m/pixel]	[pixel]	Horizontal×Vertical [m]
Tsubota	2.6	480×640	36.5×46.2	4.7×5.3	1	4.9×5.6
Mikura1	21	480×640	36.5×46.2	23×26	3	30×33
Mikura2	21	640×480	11.7×9.15	6.7×7.1	1	7.3×7.0

Table 3. Variation of the fumarolic activity from August to September, 2000. O, A, B and C indicate directions of active vents seen from Tsubota observation point. See text and Fig. 6 for detail.

Stage	Date*	Eruption Type	Vents Direction				Column Diameter (Around the top of caldera wall)	Column height
			O	A	B	C		
I	8/7		-----				50-100m	500m ⁻
	8		-----					
	9		-----					
	10▲	↑	-----					
	11		-----					
	12		-----					
	13▲	↑	-----				200-300m	1000-1500m
	14▲	↑↑	-----					
	15▲	↑↑↑	-----					
	16		-----					
II	17		-----					
	18▲	↑	-----					
	19		-----					
	20		-----					
	21		-----					
	22▲		-----					
	23		-----					
	24▲	↑	-----					
	25		-----					
	26■		-----				500-600m	2000-2500m
III	27■		-----					
	28▲		-----					
	29▲	↑	-----					
	30▲	↑	-----					
	31		-----					
	9/1		-----					
	2		-----					
	3▲	↑	-----					
	4▲	↑	-----					

Unification A with B

Remarkable eruption
 ↑ Mass of ejected ash is more than 10⁷⁻⁸ kg.
 Another eruption
 ↑ Small eruption : Ash ejection continues about a few - 10 minutes.
 ↑ Intermittent eruption: Small eruption occurs intermittently.
 † Continuous eruption : Ash ejection continues more than 10 minutes.
 ▲ Some eruptions reported by JMA.
 ■ Mud ejection from vents swarm reported by JMA.

*Lines with date indicate the no data because of clouds or strong wind.

御蔵 1 の読み取り精度と同じオーダーである。したがって、噴煙直径の計測には坪田および御蔵 2 を使用する。

噴煙の上昇速度は火口壁付近でおおむね 10 m/s 以下である。本研究で用いた撮影システムの画像取得時間間隔は 10 秒であり、読み取りやレンズの歪みに起因する測定誤差は坪田や御蔵 2 を用いたとき 0.5~0.7 m/s 程度見込まれる。御蔵 1 では、計測誤差が実際の速度のオーダーに等しいため、速度の計測は困難である。以上から、噴煙上昇速度の計測は坪田および御蔵 2 を使用する。

5. 噴煙活動の変化

三宅島火山では 2000 年 7 月 8 日に最初の山頂噴火が起こり、同時に山頂が陥没した(中田・他, 2001)。その後、8 月には白色の噴煙を連続的に噴出した他、10 日や

13 日、18 日、29 日には短時間に多量の火山灰を噴出する規模の大きな噴火が発生した(たとえば、宮城・東宮, 2002; 伊藤・他, 2002)。さらに 8 月中旬から 9 月上旬にかけて、二酸化硫黄放出量の著しい増加が観測された(たとえば、風早・他, 2001)。この時期にカメラによる噴煙の連続観測を行っていたのは本研究の自動撮影システムのみであり、得られた画像から噴煙活動の推移を定量的に記述することが可能である。本節では、主として本撮影システムにより得られた画像を用いて、これまで報告の少なかった白色噴煙の活動と比較的小規模な噴火の推移を中心に記述する。

5-1 2000 年 8 月の白色噴煙と小噴火

8 月に発生した規模の大きな噴火の前後も活発な白色噴煙の活動が続き、少量の火山灰を噴出する小噴火が

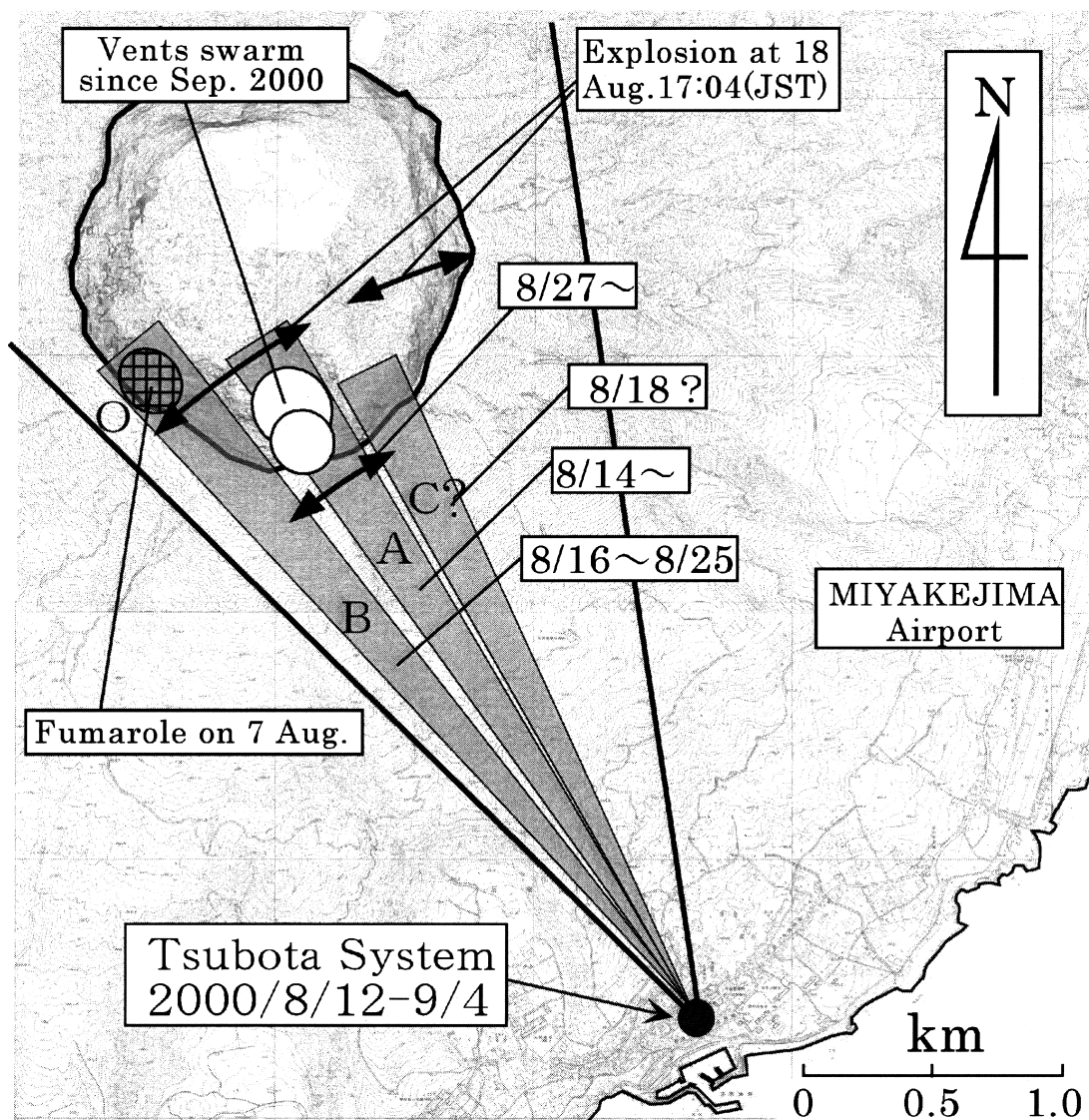
何度が発生した。以下で述べるように、白色噴煙の活動や小噴火は、規模の大きな噴火の背景を理解するうえでも重要と考えられる。

Table 3 に、坪田撮影システムおよび現地観察に基づいて、噴煙活動の特徴とその推移をまとめた。この表の噴火の型 (Eruption Type) で太矢印は 8 月 18 日や 29 日など規模の大きな噴火を、細矢印はそれ以外の小噴火を表す。小噴火は、火山灰の噴出する継続時間に基づいて 3 種類に分類した。日付に付した黒三角は、三宅島測候所が目視や現地調査により噴火や降灰を確認したことを、黒四角は、火口から小規模な土砂噴出が確認された

ことを示す。これらは、火山観測情報または臨時火山情報等として公表されている。観測手段や観測場所における局所的な天候の違いのため、本撮影システムで得られた結果と三宅島測候所の報告は必ずしも一致しない。

白色噴煙については、噴煙の上昇する位置と本数、直径、到達高度を示した。白色噴煙の特徴から、噴煙活動は I~III の 3 期間に分けられる。

第 I 期は 8 月 7 日から 13 日までで、比較的弱い連続的な噴煙活動が維持されていたと推定される。8 月 7 日早朝、陥没火口から白色噴煙が上昇していることが三宅島測候所 (Fig. 2 の星印) から確認された。その後、この



* After GSI 5000:1 eruption topographical map "MIYAKEJIMA IV" and "MIYAKEJIMA VI".

Fig. 6. Movement of vents in August 2000.

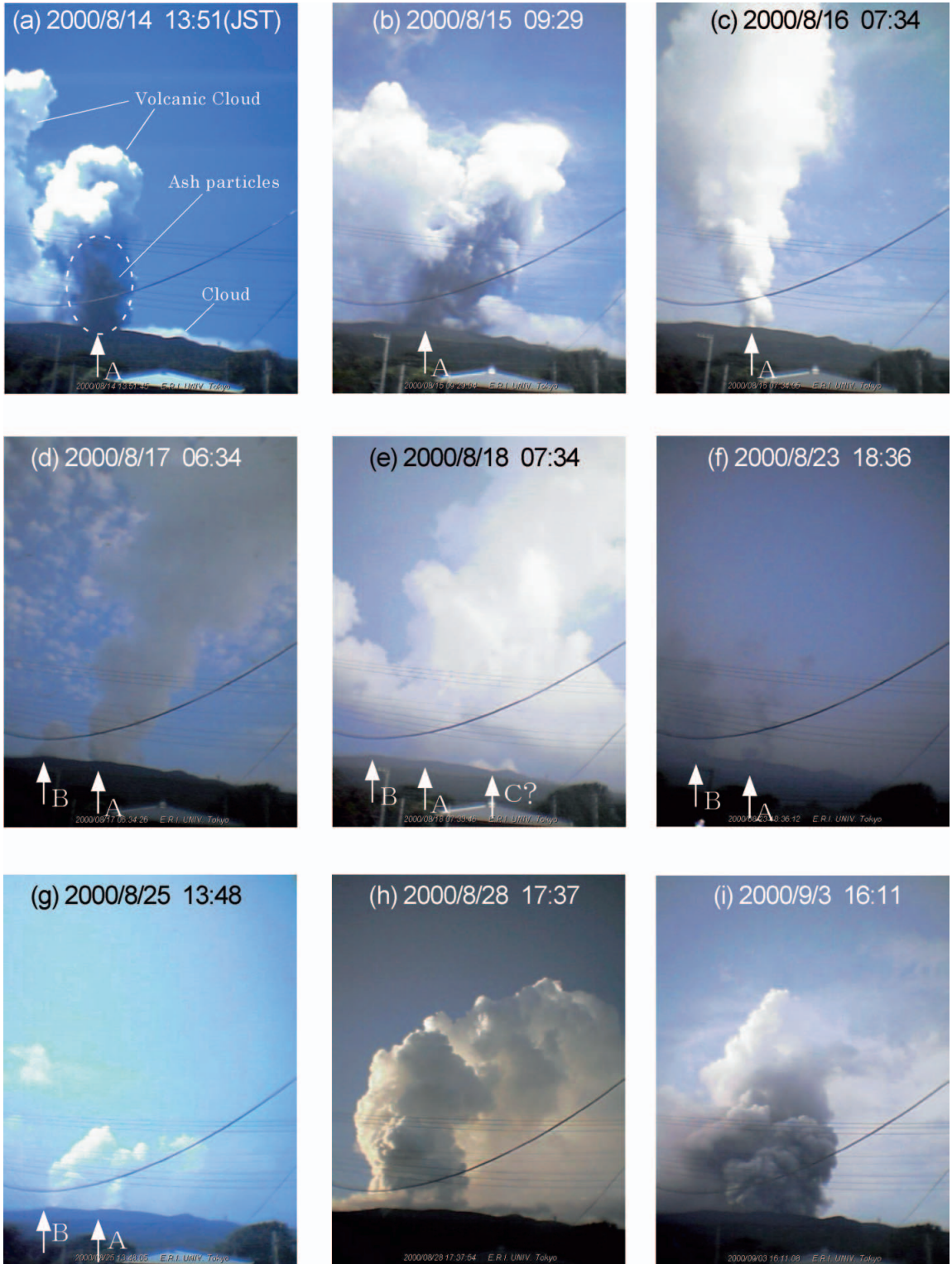


Fig. 7. A sequence of photographs showing the variation of the eruption column on 2000. Capturing times are represented at Japan Standard Time.

噴煙は山麓地域から視認できなくなったが、山頂駐車場跡付近（陥没火口壁南西部）から同日 12 時頃にビデオ撮影された（及川、私信）。Fig. 6 に、このビデオ映像から求めた噴煙の噴出孔の位置を示す。噴煙の噴出孔は陥没火口南西部の底付近にあった（Fig. 6(a) の網掛け O）。

この時期の噴煙は陥没火口壁頂部付近で消滅することが多く、噴煙の直径は消滅直前で 50~100 m であった。

第 II 期は 8 月 14 日から 25 日までで、断続的な小噴火の発生と白色噴煙の本数の増加で特徴づけられる。まず小噴火について述べる。8 月 14 日 10 時頃から日没後まで、火山灰の放出が 1~2 分程度継続する小噴火が繰り返し発生した（Fig. 7(a), Table 3 の ↑'）。小噴火の噴煙は、陥没火口壁よりも上空では外見上 1 本、もしくは 1 つの塊状に見えた。この噴煙の見える方角 (A) は、坪田観測点から見て第 I 期の噴煙 (O) と約 7 度異なる。この差を火口までの水平距離を用いて換算すると、A と O は少なくとも約 300 m 離れていたことがわかる（Fig. 6）。翌 15 日および 16 日には、火山灰の噴出が 10 分程度継続する単発的な小噴火が A と同じ方角で 1 回ずつ発生した（Fig. 7(b), Table 3 の ↑）。さらに 24 日には、火山灰の放出が数 10 分継続する小噴火（Table 3 の ↑）が発生した。24 日の小噴火は、14~16 日の小噴火と比較して噴火の開始と終了が明瞭でなかった。いずれの小噴火の噴煙も、比較的白く見える部分と黒く見える部分のまだらに見えた。このことは、噴煙中で水滴と火山灰の混合が不均質であったことを示す。噴煙の直径は、陥没火口頂部付近で 400 m 前後、最高到達高度は 2000 m 前後であった。

第 II 期の白色噴煙は、16 日までは A の方角から 1 本が連続的に上昇していた（Fig. 7(c)）。しかし 16 日 8 時 30 分頃から、さらに南の方角 (B) に 2 本目の白色噴煙が見え始めた。Fig. 7(d) に 17 日早朝の画像を示す。この方角は、最初の噴煙 (O) の方角と一致する。空中写真によれば、B に対応すると思われる噴煙噴出口は、O よりも観測点に近い位置にあったと推定される。B の方角から上昇した噴煙は A の方角の噴煙よりも弱く、画像からは明瞭に確認できないときもあり、その最高到達高度は海拔 1000 m 前後であった。なお、18 日 07 時 30 分から 08 時 40 分頃にかけて、A および B とは異なる方角 (C) に白煙が見られた（Fig. 7(e)）。この白煙の初期直径は 300 m 前後で、海拔 1000 m 前後に達すると蒸発して見えなくなった。ただし、この時期には噴煙とは無関係に積雲が発生しており、C の方角で発生した積雲を噴煙と見誤った可能性も否定できない。23 日から 25 日にかけて、A と B の方角から 2 本の白色噴煙が連続的に上昇している様子が見られたが、18 日以前とは異なり、これ

ら 2 本の白色噴煙の到達高度は同程度であった。

第 III 期は 8 月 26 日から 9 月上旬で、単一の大きな噴煙で特徴づけられる。26 日頃から、A, B の方角から上がっていた 2 本の白色噴煙は区別できなくなり、噴煙の陥没火口頂部における直径は 500~600 m 以上となって顕著に増大した（Fig. 7(h)）。8 月下旬に日野正幸氏が御蔵島から撮影した映像や 9 月以降の御蔵 1, 御蔵 2 によれば、噴煙到達高度は 3000 m を超えていた。この白色噴煙は、29 日早朝の規模の大きな噴火以降、少量の火山灰をほとんど常に含む状態になった。その間にも、火山灰量が著しく増加する時期があったが、このような小噴火の始まりと終了ははっきりしなかった（Table 3 の ↑, Fig. 7(i)）。この小噴火の噴煙は、海拔 1500 m 前後までは相対的に白い部分と黒い部分のまだらに見え、それより上では白色であった。なお、9 月 10 日頃以降は火山灰の量は減少した。

10 月以降は、白色噴煙のみが放出された。しかし、2001 年 1 月以降は再び小噴火が発生するようになり、2002 年 8 月までに合計 27 回が確認された（気象庁地震火山部・三宅島測候所、2002）。小噴火発生時を除く大部分の時間は白色噴煙のみが見られた。

5-2 2000 年 9 月以降の噴煙活動

本節では、御蔵島に設置した撮影システムを用いて、白色噴煙の活動の長期的な変化を記述する。

5-2-1 外見的特徴

噴煙は陥没火口内に形成された複数の孔から噴出しているが、それらは近接しているために火口壁の上では外見上つねに 1 本に見える（寺田・井田、2003）。風が弱いときには噴煙は鉛直方向に立ち昇り、上昇をやめた後水平方向に広がる。多くの場合、水滴は噴煙が上昇をやめても蒸発しきらずに残っている。上昇をやめてしばらくすると、白く見える水滴が消滅して、二酸化硫黄ガスまたはミスト状の硫酸と思われる半透明の霧が滞留する。このような霧は、偏光フィルターを装着していた御蔵 2 により明瞭に捉えられた（Fig. 3(c) の囲み）。一方、風が強いときの噴煙は上昇せず、風下方向に押し倒されて地表面に接しながら流れる。このような状況では、風下側の地上で二酸化硫黄や硫化水素等の火山ガスが観測される（小山田・他、2003）。押し倒された噴煙は、標高 200~300 m よりも下に達すると、白い水滴の大部分が蒸発して二酸化硫黄ガスもしくはミスト状の硫酸と思われる半透明の霧になる。

5-2-2 噴煙の長期的変化

Fig. 8 に、御蔵 1 および御蔵 2 の画像から計測した噴煙の到達高度を示す。Fig. 8(a) は日平均高度である。ここで、日平均高度とは全データから 10 分おきに抽出し

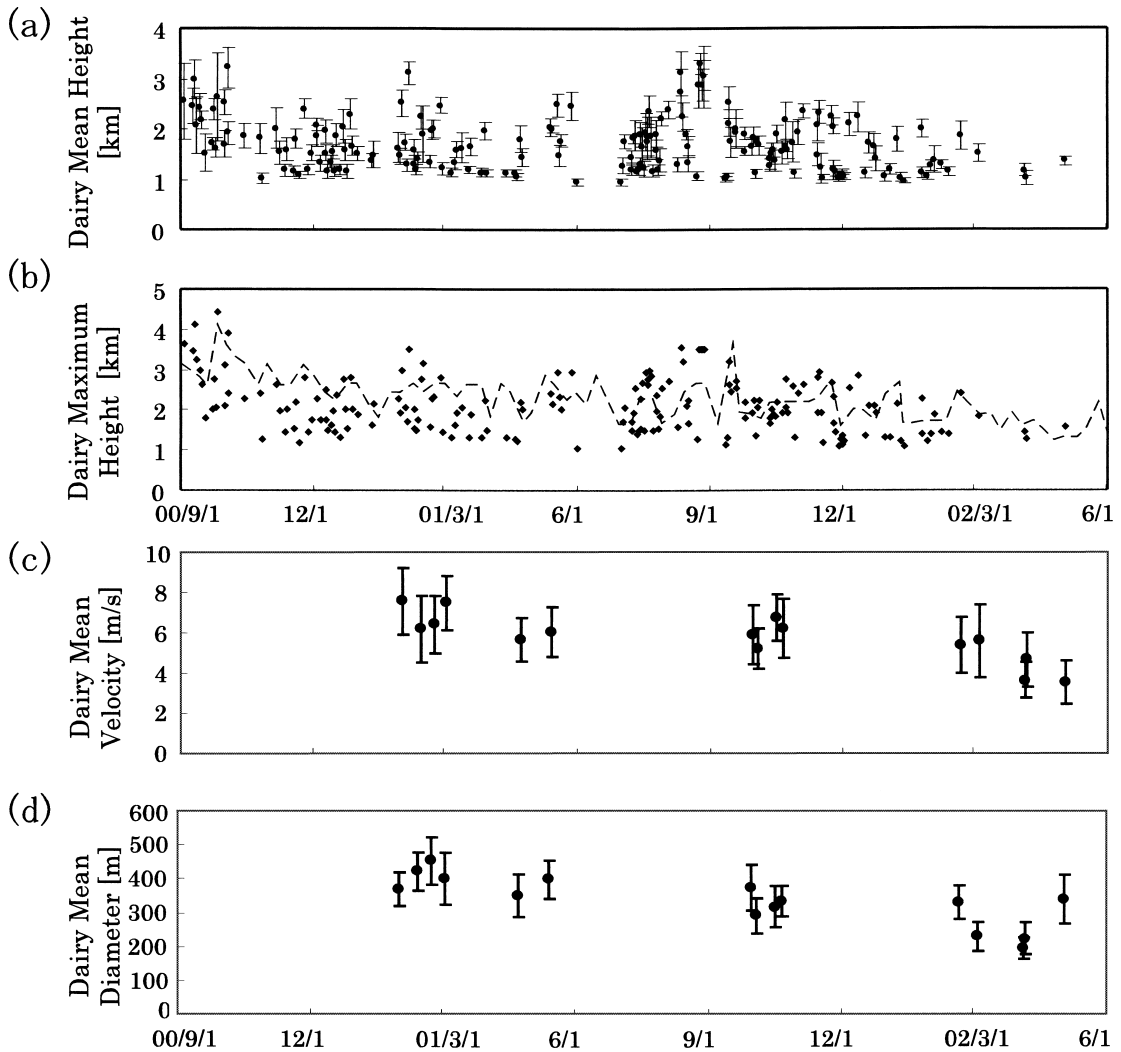


Fig. 8. Variation of the observed eruption column heights of Miyakejima volcano. Plotted column heights are daily average of the value acquired from the image extracted every 10 minutes. (a) Daily mean heights with standard deviation. (b) Daily maximum heights. The broken line is the trend of daily maximum height after Division of Earthquake and Volcanology, JMA and Miyakejima Meteorological Observatory (2002). (c) Mean ascent velocity around the top of the Caldera wall. (d) Mean diameter of eruption column around the top of the Caldera wall.

た画像を用いて測定した噴煙高度を、一日ごとに平均した値である。Fig. 8(a)には、噴煙の頂部を一日あたり10回以上確認できた日のみを表示している。エラーバーは標準偏差を表す。

日平均高度には変動が見られる。まず、2000年9～10月から11月にかけて顕著に減少した。その後は横ばい状態がしばらく続いたが、2001年7～9月には再び増加した。2002年に入ると顕著に減少傾向が見られ、日平均高度が2000 mを超える日はほとんどなくなった。特に2002年4～5月、噴煙が上昇しやすい弱風時でも1000

～1500 mであった。4月4日には、噴煙が火口壁を超える前に蒸発して目視できない状態が数時間以上見られた。このような状態は、以前に観測されたことがなかった。

Fig. 8(b)は日最大高度で、日平均高度と同様に噴煙の頂部を一日あたり10回以上確認できた日のみを表示している。破線は、気象庁地震火山部・三宅島測候所(2002)の日最高高度データから5日ごとの最高値を抜出すことで変動傾向を示したものである。両者の変動傾向はおおむね似ているが、本研究の測定結果の方がより

大きな値を示す場合が見られる。

Fig. 8(c), (d) に、火口壁付近における噴煙の初期上昇速度と初期半径を示す。計測は、噴煙運動に対する風の影響が少ない無風または微風の日にいった。上昇速度や噴煙半径は変動しつつも減少し、2002年3月以降は2001年と比較して半分程度になった。

6. 議 論

6-1 本撮影システムの特徴と課題

噴煙の全容を観測するためには、噴煙の規模に応じた距離に観測点を設置することが重要である。しかし、噴煙の規模は短い時間スケールで大きく変化することがある。三宅島火山においても、2000年8月7日頃は陥没火口壁頂部付近の海拔1000m付近で消失する規模の噴煙が、8月中旬以降の弱風時には海拔3000mを超える規模に大きくなった。このため、撮影システムを設置していた三宅島坪田（火口から約2.6km）からでは噴煙到達高度の測定が困難となった。

このような噴煙活動の急な変化に対応するためには、機動性に富む噴煙観測システムが必要である。本撮影システムは安価で、運搬や設置を一人ででき、設置にかかる時間も短いことから、状況の変化に応じて柔軟に運用できる。このような特徴のため、連続的な噴気活動が始まった2000年8月7日の5日後には三宅島坪田で本撮影システムの運用を開始し、8月31日には三宅島から21km離れた御蔵島に新たな観測点を追加することができた。

しかし、御蔵観測点の設置以前に発生した、噴煙を高度14000mまで噴き上げた8月18日の噴火、噴煙が十分に上昇せず側方に流れた29日の噴火については、坪田からでは噴煙の全容を把握できず噴煙の根元付近のみが撮影された。また、降灰による視界不良のため、噴火活動の時間変化を十分に撮影できなかった。

一方、いくつかの技術的な問題点もある。たとえば、何らかの原因でPCのOSが停止した場合や電源供給が完全に絶たれた場合には、電話回線を通じた遠隔操作も不可能となる。この状況では、現地作業なしに撮影システムを復旧させることができないため、日頃からPCを安定に動作させる工夫が必要である。たとえばFig. 2のように処理を複数のPCに分散させて負荷を減らすことや、Table 2に示したように定期的にPCを再起動させることが有効である。また、画像ファイルのテレメータに関しては障害が起きやすい。たとえば、御蔵島で2000年9月から2001年7月まで行われていた、緊急時に用いられる衛星経由等の電話回線を使用した通信時には、本撮影システムにおいてダイヤルアップ接続を試みたまま

OSが停止する障害が多発した。このような状況では、テレメータを止めて現地収録のみを行うべきである。

6-2 2000年8月に起きた白色噴煙活動の変化

白色噴煙の活動は2000年8月に顕著に変化した。第I期に始まった弱い白色噴煙は、第II期に入ると本数を増やした。そして第III期になると、白色噴煙は合体して大量の火山ガスを放出する大きな噴煙へと発展した。このような変化は噴出口の発達過程を反映したと考えられる。まず、火口底の一部から微弱な噴煙が上がった。その後、噴煙は他の噴出口からも噴出し、最後にこれらの噴出口が結合して多量の火山ガス噴出を可能にする大きな噴出口が形成された。このような噴出口の発達が、8月18日や29日等に発生した比較的規模の大きな噴火や陥没の進行、地下水の影響とどのような関係にあるかは大変興味深い。現状では、地震活動や地殻変動と噴火活動との関係には諸説があるので（たとえば、Kumagai *et al.*, 2001; 菊地・他, 2001; 山科, 2003）、以下ではマグマ活動との詳細と関係する議論は避けて、火山ガスや熱測定など噴煙と直接関係するデータと比較しながら議論を進めることにする。

6-2-1 噴煙噴出口の発達

18日の噴火の前には、白色噴煙の本数が増加した。とくに18日07時30分から08時40分頃にかけて見られた方角(C)からの噴煙は、18日17時04分頃に始まった規模の大きな噴火の噴出口の方角に近い(Fig. 3(a), Fig. 6)。このような噴出口の発達は、18日噴火の発生に関与した可能性も考えられる。しかし、数日後の23日に見られた白色噴煙には、17日以前と大きな違いが見られない。このことは、18日の噴火が噴出口の発達に特別な寄与をしていないことを示唆する。第II期から第III期への移行も、18日ではなく26日に起きた。

18日の噴火は噴出口の発達に特別な寄与をしていないことが示唆されるが、一方で18日噴火は、第II期に発生した小噴火の特徴が変化する契機になったと考えられる。第II期前半の小噴火(14, 15, 16日)は、その開始が明瞭で火山灰の放出が数分以内に終了した。しかし18日をはさんだ後半の小噴火(24日)では、その開始と終了が不明瞭で火山灰の放出も数十分以上続いた。また、21日以降、パルス状の空振が間欠的、または連続的に発生するようになり、小爆発の頻度が急に高まったことが知られている(気象庁火山課, 2002)。この変化は、18日の噴火を契機に地下で火山ガスが流れやすくなり、圧力をあまり貯めずに火山ガスが放出されるようになったためと考えられる。

29日の噴火前後でも、白色噴煙の大きさや高さに大きな変化は見られない。噴火に先立つ26日頃には、白色噴

煙の半径、上昇速度、到達高度はすでに9月中旬以降の規模になっていた。このことは、29日の噴火を待たずに、26日の時点で大規模な火山ガス噴出口が形成されていたことを示唆する。一方、29日の噴火後には、それまでABの方角から上がっていた白色噴煙は、少量の火山灰を含む噴煙を常時放出する状態へと変化した。以上から、29日の噴火は地下での噴煙の形成過程に影響を与えて、噴煙中の火山灰量を増加させたものの、噴出口の大きさの発達には本質的な寄与をしなかったと考えられる。

なお、噴出口の発達は山頂の陥没過程と関係している可能性があるが、空中写真測量などの解析から、山頂陥没は白色噴煙が顕著に発達した8月以前にほぼ完了していた(Geshi *et al.*, 2002)。したがって、噴出口発達に対する陥没の寄与は大きくないと考えられる。

6-2-2 噴煙に対する地下水の関与

II期からIII期にかけて起きた噴煙の変化は、噴煙に対する地下水の関与で解釈できる。白色噴煙の規模が顕著に高まったのは8月26日頃からであるが、二酸化硫黄放出量が顕著に増大したのは9月以降である(風早・他, 2001)。この期間は、26日頃から地下水の沸騰が顕著になったために地下水が徐々に抜け、地下水の噴煙に対する関与が徐々に減少していた時期と考えられる。8月26日に行われたヘリコプターからの観測によれば、火口から泥流が流出しており、火口付近の温度は50℃以下で、噴煙の噴出温度が低かった(鍵山, 私信)。また、噴煙の規模は26日頃から顕著に増大したが、二酸化硫黄放出量はまだ少なかった。以上から、26日頃は噴煙に対する地下水の関与がまだ大きく、沸騰した多量の地下水が放出されていたと推定される。8月26日頃から9月中旬の間に、二酸化硫黄放出率は数万トン/日前後、火口温度は150~400℃前後までに上昇した(たとえば、気象庁火山課・三宅島測候所, 2002)。風早・他(2001)は、火山灰に含まれる塩化物イオンと硫化物イオンの比から、29日以降の噴火に対する地下水の関与が18日以前の噴火に比べて減少したと考えた。地下水が減少したことで、地下水に吸収される火山ガスの量と奪われる熱量が減少し、マグマから放出された火山ガスがそのまま火口から噴出できるようになった結果、9月以降も大きな噴煙が維持されたと解釈できる。

6-3 2000年9月以降の噴煙活動

三宅島火山噴煙の日平均到達高度および日最高到達高度は、変動しながらも長期的に減少する傾向が見られた。この傾向は、気象庁地震火山部・三宅島測候所(2002)による「噴煙高度(日最大)」や、COSPECによる二酸化硫黄放出量の測定結果(たとえば、篠原・他,

2002)にも見られ、火山ガス噴出量の長期的な減少の反映と考えられる。

本研究で計測した日最高高度と気象庁地震火山部・三宅島測候所(2002)とを比較すると、特に本研究で計測した噴煙高度が高い日に、三宅島測候所では500m前後低く測定される傾向が見られた。その理由として、測定方法の問題が考えられる。気象庁の噴煙高度計測は、三宅島島内に設置したカメラを用いて行うことがある。この場合、到達高度が高い噴煙に対しては噴煙頂部の見込み角が大きくなり過ぎるため、計測誤差も大きくなると考えられる。また、あらかじめ決められた時刻のみ測定が行われているため、この時刻以外に高く上がった噴煙が計測から漏れている可能性もある。

本研究では、2001年7~9月に噴煙高度が高くなったことがわかった。この変動は、COSPECによる二酸化硫黄放出量の測定結果(たとえば、篠原・他, 2002)には見られない。この原因として、噴煙周辺の大気に存在する水蒸気が噴煙運動に影響を与えた可能性が考えられる。Woods(1993)は、周辺大気が水蒸気に富む環境においては、噴煙の到達高度が水蒸気の凝結熱により増加しうることを数値計算から示した。2001年7~9月頃の三宅島火山の噴煙についても、高温多湿な周辺大気から噴煙へ水蒸気が大量に供給されたために、噴煙内で水蒸気の凝結による潜熱の放出が盛んに発生していた可能性がある。この他、三宅島火山の噴煙到達高度が逆転層に影響されていることが示唆されている(寺田・井田, 2002)。従って、噴煙の到達高度から火山学的に興味ある情報を得るためには、周辺大気の噴煙運動に対する影響を考慮した噴煙解析を行う必要があると思われる。このような噴煙解析手法については、別に発表する。

7. ま と め

小型・軽量で機動性に富む安価な自動噴煙撮影システムを構築し、三宅島火山噴煙の連続撮影を約2年間行った。これら噴煙画像から、2000年8月に白色噴煙活動が発達してゆく様子が明らかとなった。この発達は、噴出口の発達や地下水の噴煙に対する関与を反映していたと考えられる。噴出口の発達に対して、8月18日や29日の噴出量の大きな噴火は本質的な寄与をしなかったが、18日の噴火は、小規模な噴火の発生条件に影響を与えたと考えられる。また、26日に見られた噴煙規模の顕著な増大は、地下水の顕著な沸騰を反映したものと解釈される。2000年9月は、白色噴煙を海拔3000~4000mの高さまで噴き上げる活動を行ったが、その後の噴煙高度は長期的に低下する傾向が見られ、2002年の日平均高度は2000年9月の半分以下に低下した。この間、周辺大気の

水蒸気が原因と思われる噴煙高度の増加が見られた。

謝 辞

三宅村坪田の渡辺義宗氏、御蔵島の竹入啓司氏、御蔵島小中学校の徳山隆三氏、千木良康志氏、河野 修氏には、本撮影システムの設置場所をご提供いただいたほか、観測を継続するうえで格別の便宜を図っていただきました。北海道札幌市の石川 肇氏、東京大学地震研究所の中川茂樹氏、駒澤大学文学部の田中 靖氏には本撮影システムを改良する過程で多くのご助言をいただきました。御蔵島の日野正幸氏、東京大学地震研究所の及川純氏には噴煙の映像をご提供いただきました。東京大学地震研究所の鍵山恒臣氏には、熱映像等の資料を見せていただきました。編集委員の後藤章夫氏と匿名の査読者のコメントは、本論文を改善するために大変役立ちました。ここに記して感謝の意を表します。

なお、渡辺義宗氏におかれましては、病氣療養中のところ 2003 年 3 月 16 日に逝去されました。謹んでご冥福をお祈りします。

引用文献

- 荒牧重雄・早川由紀夫 (1984) 1983 年 10 月 3・4 日三宅島噴火の経過と噴火様式. 火山, **29**, s24-s35.
- Briggs, G. A. (1969) **Plume Rise**. Critical Review Series, Rep. TID-25075, At. Energy Comm. Washington, D.C., 81 p.
- Geshi, N., Shimano, T., Chiba, T. and Nakada, S. (2002) Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, **64**, 55-68.
- 平田安廣・中尾 茂・渡辺 茂 (1999) 地殻変動観測データの携帯電話によるデータ収集システムについて. 東京大学地震研究所技術報告, **5**, 116-119.
- 伊藤順一・星住英夫・川邊禎久・下司信夫・東宮昭彦 (2002) 三宅島 2000 年 8 月 29 日噴火による火砕流堆積物の産状. 地球, 号外, **39**, 142-149.
- 鍵山恒臣 (1978) 火山からの噴気による熱エネルギーと H₂O の放出量—Plume Rise からの推定—. 火山, **23**, 183-197.
- 風早康平・平林順一・森 博一・尾台正信・中堀康弘・野上健治・中田節也・篠原宏志・宇都浩三 (2001) 三宅島火山 2000 年噴火における火山ガス—火山灰の付着ガス成分および SO₂ 放出量から推測される脱ガス環境—. 地学雑誌, **110**, 271-279.
- 菊地正幸・山中佳子・瀧澤一起 (2001) 三宅島 2000 年噴火活動に伴う長周期地震のメカニズムとその解釈. 地学雑誌, **110**, 204-216.
- 気象庁地震火山部・三宅島測候所 (2002) 最近の三宅島の火山活動 (その 5) (演旨). 日本火山学会講演予稿集, 133.
- 気象庁火山課 (2002) 三宅島噴火に伴う空気振動. 火山噴火予知連絡会会報, **78**, 24-28.
- 気象庁火山課・三宅島測候所 (2002) 三宅島の火山活動—2000 年 6 月～2001 年 5 月—. 火山噴火予知連絡会会報, **78**, 4-8.
- 木下紀正・戸越浩嗣・吉野真人・町田晶一・高原弘幸 (1999) 離島火山の噴煙自動観測とデータベース化. 日本リモートセンシング学会第 26 回学術講演会論文集, 655-658.
- 小山田 恵・木下紀正・寺田暁彦・飯野直子・金柿主税 (2003) 三宅島内の火山ガス高濃度事象と八丈島高層風の特徴. 天気, **50**, 553-559.
- Kumagai, H., Ohminato, T., Nakano, M., Ooi, M., Kubo, A., Inoue, H. and Oikawa, J. (2001) Very-long-period seismic signals and caldera formation at Miyake Island, Japan. *Science*, **293**, 687-690.
- Morton, B. R., Taylor, G. I. and Turner, J. S. (1956) Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous source. *Proc. Roy. Soc., Ser. a.*, **234**, 1-23.
- 宮城磯治・東宮昭彦 (2002) 三宅島 2000 年火山灰粒子の特徴と本質物の特定. 火山, **47**, 27-31.
- 中田節也・長井雅史・安田 敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001) 三宅島 2000 年噴火の経緯—山頂陥没と噴出物の特徴—. 地学雑誌, **110**, 168-180.
- 篠原宏志・風早康平・松島喜雄・福井敬一・平林順一・尾台正信・中堀康弘・飯野英樹・森 博一 (2002) 三宅島火山の脱ガス活動 (その 1): 噴煙観測結果 (演旨). 日本火山学会講演予稿集, 129.
- 宝田晋治・西 祐司・高田 亮・松島喜雄・風早康平 (2001) 有珠火山 2000 年噴火の噴煙観測装置. 地質調査研究報告, **52**, 181-187.
- 寺田暁彦・井田喜明 (2002) 三宅島火山の噴煙高度変動と逆転層との関係. 地球, 号外, **39**, 121-129.
- 寺田暁彦・井田喜明 (2003) 三宅島火山の噴煙活動. 南太平洋海域調査研究報告, **37**, 40-49.
- 津久井雅志・早川由紀夫・川辺禎久・小山真人・由井将雄・白尾元理 (1987) テレビ報道の解析による 1986 年伊豆大島噴火 Phase 2 の記述. 火山, **32**, 219-235.
- Wilson, L., Sparks, R. S. J., Huang, T. and Watkins, N. (1978) The control of volcanic column heights by eruption energetics and dynamics. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1829-1836.
- Woods, A. W. (1993) Moist convection and the injection of volcanic ash into the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **98**, 17627-17636.
- Woods, A. W. and Kienle, J. (1994) The dynamics and thermodynamics of volcanic clouds: Theory and observations from the April 15 and April 21., 1990 eruptions of Redoubt Volcano, Alaska. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **62**, 273-299.
- 山科健一郎 (2003) 2000 年三宅島火山噴火の活動予測の試み—噴火に先立つ山体のふくらみの検討. 火山, **48**, 35-42.

(編集担当 後藤章夫)