

## 三宅島 2000 年噴火の経緯 山頂陥没口と噴出物の特徴

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\*

Chronology of the Miyakejima 2000 Eruption : Characteristics of Summit  
Collapsed Crater and Eruption Products

Setsuya NAKADA \* , Masashi NAGAI \* , Atsushi YASUDA \* , Taketo SHIMANO \* ,  
Nobuo GESHI \*\* , Marekazu OHNO \*\*\* , Takako AKIMASA \* ,  
Takayuki KANEKO \* and Toshitsugu FUJII \*

### Abstract

The 2000 eruption of Miyakejima volcano started with a submarine eruption of basaltic andesite on the morning of June 27, which occurred following earthquake swarms during the previous night. The main phase of the summit eruption began, being associated by a sudden subsidence of the summit area on July 8. Continuous collapsing of the summit area that had continued until mid-August, resulted in the formation of a caldera with the volume of about 0.6 km<sup>3</sup>. Phreatic (or phreatomagmatic) eruptions took places during the growth of the caldera, although the total volume of eruptives was about 11 million m<sup>3</sup>, which is smaller by one magnitude than the caldera volume. Eruptives are enriched with hydrothermally altered materials such as smectite and kaolinite.

The manner of the first collapse suggests the existence of a large open space under the summit just before the subsidence. Judging from geophysical observation results, the open space may have ascended in the manner of stoping. Successive formation of open spaces at deeper levels is likely to have caused the continuous collapse of the summit area. These open spaces may have been generated by magma's migration from under Miyakejima to the west. The migration is considered to have continued by August 18.

It is likely that an inflow of underground water to the open spaces generated a hydrothermal system, where the open spaces acted as a sort of pressure cooker that built up overpressure of eruptions. The hydrothermal system was broken by the largest eruption on August 18, and the eruption column rose about 15 km above the summit. A boiling-over type of eruption occurred on August 29, whereby sufficient overpressure of steam was not built up, resulting in the generation of low-temperature ash cloud surges moving very slowly.

---

\* 東京大学地震研究所

\*\* 東京大学大学院理学系研究科

\*\*\* 日本大学文理学部地球システム科学科

\* Earthquake Research Institute, University of Tokyo

\*\* School of Science, University of Tokyo

\*\*\* Department of Geosystem Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University

Key words : Miyakejima eruption , submarine eruption , caldera formation , hydrothermal system, eruption products

キーワード : 三宅島噴火 , 海底噴火 , カルデラ形成 , 熱水系 , 噴出物

## 1. はじめに

三宅島では最近 300 年間は約 20 年毎,あるいはその倍の休止期を置いて噴火が起こっていた(宮崎,1984)。これらの噴火では,貫入イベントでマグマが噴出しないうちがあった以外,玄武岩溶岩の溢流的な噴火と火口から放出されたスコリアの堆積が起こった(津久井,2000;津久井ほか,2001)。また,海岸に達した溶岩が海水と接触してマグマ水蒸気爆発を起こした。2000年7月から本格的になった噴火活動では,山頂にカルデラと呼べるサイズの陥没口が形成され,火口から玄武岩溶岩が流出することなく水蒸気爆発(ないしマグマ水蒸気爆発)を2ヶ月間足らずにわたって繰り返した。また,その後,連続的に多量の二酸化硫黄の放出が続いた。噴火による火山灰の噴出量に比べて山頂の陥没口の容積がはるかに大きい。今回の陥没・噴火イベントの発生は,三宅島に限らず,これまでの島弧における火山の噴火活動に関する理解を越えたものであった。この噴火によって,新たな火山学的見地が多く得られた。

本稿では,本陥没・噴火イベントの概要と噴出物とカルデラの成長に関する地質学的観測・観察結果について解説し,他分野の観測解析結果を含んで噴火現象を総合的に説明する一つのモデルを提案する。なお,地質学的観測結果の内容は総合観測班地質グループとして行われたものであり,詳細についてはそれぞれ別報として公表される予定である。

## II. 噴火の経緯

噴火の経緯は表1に示すように,表面現象から大きく4つのステージに分けることができる。すなわち,海底噴火とマグマの北西移動が開始した「マグマ貫入期」,山頂噴火が起こった7月8日後8月始めまでの陥没が急速に進んだ「山頂陥没期」,

8月10日から噴火が断続的に繰り返した「爆発期」,そして,9月から開始した「脱ガス期」である。また,爆発期と脱ガス期の間には漸移的な時期を設けることができる。以下にこれらのステージ分けに基づいて噴火の経緯を簡単に紹介する。表1には地球物理学的な変化も合わせて示した。後者は概ね表面現象と対応するが,最も大規模な噴火が起こった8月18日が地下の現象変化の大きな境目である。これらについては,JMA(Japan Meteorological Agency)(2000),Ukawa *et al.* (2000),Kaidzu *et al.* (2000),本特集に掲載されている論文などがより詳しい。

### 1) マグマ貫入(陥没準備)期

三宅島では2000年6月26日午後6時頃から島内の地震活動が急激に高まり,噴火の接近が検知された。防災科学技術研究所の傾斜計では地震の活発化とともに急速でかつ複雑な変化が起こった。その後,島内での噴火は発生せず,地震の西方移動が観測されると同時に,27日午前中に三宅島の西方沖(大鼻の西方約1.2km地点)で変色海域が認められた(図1)。これに前後して,変色海域と山頂部を結ぶ線とそれよりやや南よりの三宅島西岸には地割れが複数箇所確認された(総合観測班による)。GPS観測の結果は,地割れ地帯を挟んで南北に地盤が水平移動したことを明瞭に示した(地震研究所,未公表資料)。図1に示すように27日未明までの地震は海底噴火の地点の真下で発生している。このことは,まさにマグマがこの地震域を通過したことを裏付けている。7月始めに行った海上保安庁水路部のサイドスキャナーによる調査(海上保安庁水路部,記者発表資料)や,地震研究所が7,9月に潜水艇を使って行った海底調査の結果から,変色海域の下で海底噴火が発生していたことが明らかとなった(白尾,2000,口絵解説参照)。海底には水冷破砕を受けた脆いスパッターからなる4つの火砕丘が西北西から東南東に

表 1 三宅島 2000 年噴火の時系列 .

Table 1 Timetable of Miyakejima 2000 eruption.

2000	Eruptions	Volcanic activity	Stages
June	27: Submarine eruption	26: Earthquake swarm within island, soon, migrated to W	Magma intrusion stage
July	8: Eruption (<1km) w/ summit subsidence	4-8: Earthquake swarm below summit July 8	Summit subsidence stage
	14-15: Eruptions	High seismicity and shrinkage of island Periodic tilt changes with seismic bursts High seismicity and deformation E of Kozushima	
Aug.	10: Eruption (>3km)	Enlargement of collapse crater (caldera) Continuous decrease in geomagnetic intensity	Explosion stage
	18: Eruption (~15km) 29: Ash-cloud eruption (~4km)	Aug. 18 Decreasing seismicity Stagnant geomagnetism	
Sept.	9-10: Ash eruption	Seismicity declined	Transition to degassing stage
	Intermittent ash emission	Stagnant but still continuous change in GPS	Degassing stage
Oct.		Continuous steaming Abundant SO <sub>2</sub> emission	

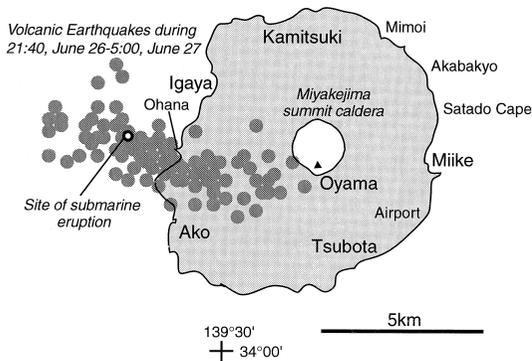


図 1 三宅島と海底噴火口の位置図 .

山頂陥没口(カルデラ)の輪郭は 2000 年 9 月末現在のものを示す . 震源分布は 6 月 26 日から 27 日未明までに起こったもの (JMA, 2000 による) .

Fig. 1 Map showing the location of submarine eruption on June 27 and epicenters of earthquakes that occurred from 9:45 of June 26 to 5:00 of June 27 (after JMA, 2000)  
Outline of the summit collapsed crater (caldera) is of early September.

配列しており、火砕丘の中央部では、噴火 2 ヶ月後でも 140 を上回る熱湯水が確認された。噴出した溶岩は玄武岩質安山岩で 1983 年の溶岩と酷似した組成を持つ (安田ほか、投稿中)。

一方、神津島沖に移動した地震は次第に活発化し、顕著な地殻変動を伴いながら、8 月 18 日の噴火まで続いた (酒井ほか、2001; Kaidzu *et al.*, 2000) (表 1)。

## 2) 山頂陥没期

6 月 27 日午前、地震活動が西方に移った後、一旦三宅島は静かになっていたが、7 月 4 日から島内の地震活動が再活発化した。地震回数は次第に多くなり、8 日の午後 6 時 40 分過ぎに山頂で噴火が起こった。噴煙は 2, 3 筋の斜め上空に突き上げるもので 10 分後にはほぼ収まった。この噴火で島の東側にわずかの降灰が認められた (図 2)。翌日午前の山頂観察や上空からの観察によると、直径約 800 m 程度の陥没口が出現しているのが確認された (口絵 1, 写真 1-a)。陥没口の底には、陥没前の地表地形がそのまま残されており、地下に存

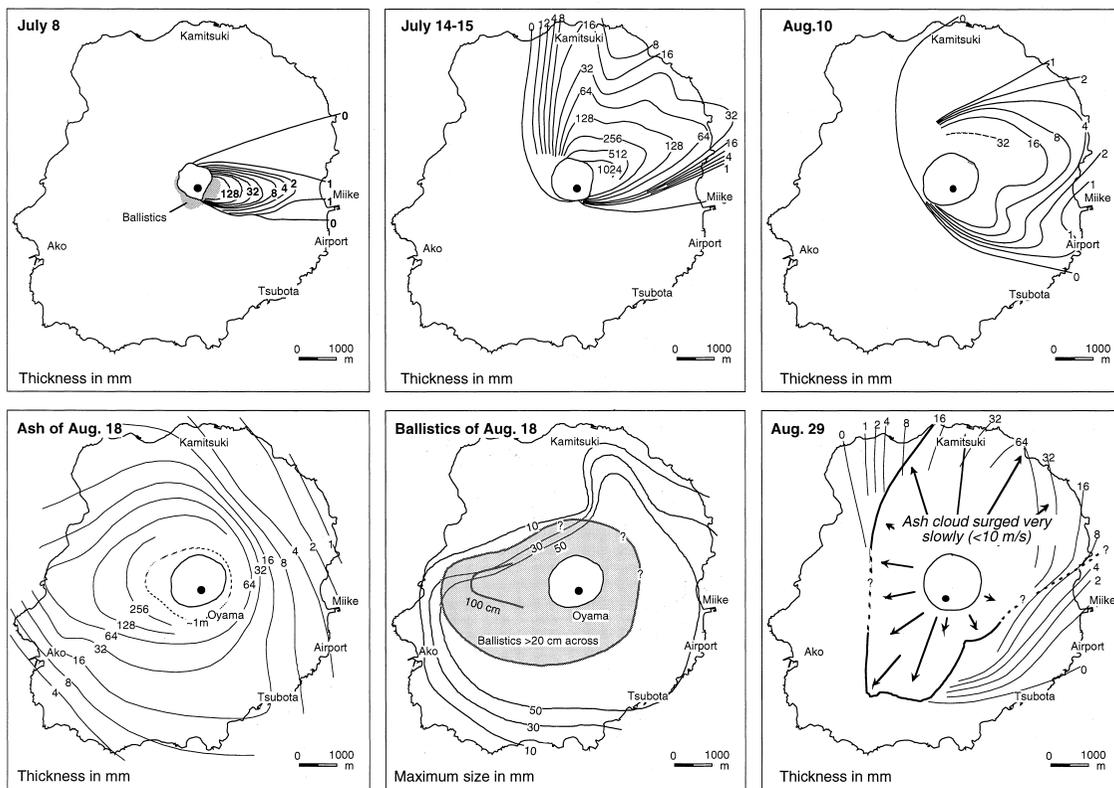


図 2 主な噴火の堆積物のアイソパックと 8 月 18 日噴火の投出物最大径。  
総合観測班地質グループ（長井雅史の原図）による。陥没口の黒丸は推定される火口の位置を示す。

Fig. 2 Isopack maps of eruption products ( volcanic ash ) for the main eruption events and sizes of ballistics of the Aug. 18 eruption. Simplified from the original maps summarized by Masahi Nagai. Black dot in the summit caldera represents the estimated emission point of eruptives.

在していた空洞に地表部分がそのまま沈下したと考えられる。陥没口の南東側、長径約 700 m、短径約 400 m の楕円部が 200 m 足らず陥没し、そこに対して北西側のブロックが滑りながら移動してきたことがわかる（口絵 1、写真 1-a）。地上調査によると、陥没口の縁では多数の亀裂が陥没口壁と平行に存在しており、観測の間も崩落が盛んに進行していた。

その後、山頂陥没口は次第に大きさを増すと同時に、地震がパースト的に発生した直後に山頂部の膨張を示す傾斜変動が瞬時に起こるといって「傾斜ステップ」が 1 日に 2 回程度で繰り返し起こった（Ukawa *et al.*, 2000）。7 月 14 日午前 4 時過ぎ

からは水蒸気爆発が断続的に起こった。噴火は 15 日の昼過ぎまで続いた。火山灰は島の北東を中心に厚く堆積した（図 2）。ANN が 14 日午後 6 時頃に上空から撮影したビデオによると、噴火口は陥没口の南東壁際であり、直径 250 m 程度の火砕丘が壁によりかかって成長しており、その中央部の直径約 100 m の火口から断続的に上昇するコックステールジェットが認められた。この後、噴火は 8 月 10 日まで認められなかった。

陥没口は噴火が起こらなくても直径、深さとも成長し続けた。当初陥没口の底に認められた元の地表地形は 14 ~ 15 日の噴火では消えていた。これは噴出物の堆積、および陥没口の周囲からの崩

落堆積物が覆い隠したためである（口絵1，写真2-a）。

### 3) 爆発期

8月10日午前6時半頃，山頂陥没口から噴火が起こった。三宅島測候所は，それに先立つ8月7日に陥没口南側壁面から水蒸気が上昇しているのを観測した。10日の噴煙高度は約6 kmに達した（口絵1，写真3-a）。この噴火は断続的に午前10時頃まで続いた。風下の北東側では降灰があった（図2）。上空からの観察によると，噴火は陥没口の南東側の壁際に開口した直径50 m程度の火口から起こっていた。これは，ほぼ14～15日火口の位置に相当する。噴出物は東壁に厚くへばりつくように堆積していた。地震研究所の古屋正氏が測候所から撮影したビデオ画像によると，この噴火では火砕サージ様の噴煙が山の斜面を，噴煙柱の根元からリング状にゆっくり移動するのが認められた。また，逆に，一旦リング状に溢れ出した噴煙が引き戻され陥没口に吸込まれる現象も認められた。噴火後の観察では，火口周辺の堆積物や立ち木の状態からは典型的な火砕サージ堆積物の証拠は一切認められなかった。

#### 〔8月18日噴火〕

8月18日の噴火はそれまでで最大の規模であった。噴煙高度は約15 kmに達し，全島に降灰し，多くの場所に噴石が降った（図2）。三宅空港や村役場の駐車場に止めてあった多くの乗用車の窓ガラスが噴石で割れるなどの被害が出た。噴火は午後5時過ぎに開始し，午後6時過ぎが最も活発な噴火活動があったと考えられ，その頃に噴石が降ったと考えられる。また，降灰は午後8時半頃まで続いた。噴石落下時には，ほとんどの人はすでに家屋の中に避難していたため，住民への直接的被害は皆無であった。陥没口南西～南縁では，厚さ2 mを越す火山灰が堆積し樹木が完全に覆われた。南西山腹の村営牧場付近でも厚さ50 cm程度の火山灰が堆積し，直径1 mを越える岩塊が降り注ぎ，一面，インパクトクレーターで埋めつくされた。牧場の牛舎に岩塊が直撃したため，屋根には無数の穴が開き，支柱を直撃された牛舎は倒壊するなどした。また，牛舎の外にいた牛は噴石

の直撃を受けた。現地調査によると，噴石には古い溶岩の岩片とやや丸いカリフラワー状の形状を示す火山弾状のものが認められた。前者が量的に多くサイズも大きいものが目立った。後者はピンク色の火山灰に覆われていることが多いが，着地時に大きな変形を受けた証拠は認められなかった。また，それら「火山弾」の着地時に家屋や立ち木が熱的影響を受けた証拠は認められなかった。伊ヶ谷の南の周回道路にも直径50 cm程度の岩塊1個が着地し，アスファルト路面に直径約1 m深さ約50 cmの穴を開けた。また，噴火の時間にグアムから成田空港に向かっていた旅客機のジェットエンジンに噴煙が入り込み被害を与えた。

噴石被害が住宅地にまで及んだことで多くの住民は不安を隠せず，状況を知ったマスコミや一部の科学者は，島で住民が生活し続けることの危険性を指摘した。29日の火砕流騒ぎはこれらの不安に，全島避難という結論を加えた。

#### 〔8月29日噴火〕

8月29日の噴火は午前4時半頃から始まり，5時半頃まで続いた。有色噴煙の高度は4 km程度であったが，それまでに比べて，噴煙は十分に上昇せず島の北東と南西方向に流れた（図2）。スナップショットを見る限りは火砕流噴煙に近いもの（口絵1，写真3-b）であったが，横方向に言う速度は極めて遅いものであった。地震研究所が海底調査中に島の北西側から撮影したビデオ画像を解析した結果によると，その速度は時速10 kmを下回った。また，地震研究所やアジア航測（株）千葉達朗氏の現地での観測結果によると，南西部への噴煙の移動は4回あった。気象庁によると，島の北端に位置する三宅測候所では，この火山灰に包まれた時間帯（午前5時から5時半過ぎまで）に気温が約3°上昇し，湿度が約25%低下した。

地震研究所の及川 純・上島 誠両氏は観測点へのデータ回収のため，この噴煙の中を2台の車で周回道路東側を北に移動中であった。彼らによると，午前5時前，サタドー岬（図1）周辺で降灰のため真っ暗になり，一旦車を止めて様子をつかがった。車の下を火山灰が移動するのを感じたが，特に車内で熱気を感じるようなことはなかつ

た。その後、視野が開けたので島の北東部まで車で進んだが、午前5時過ぎ、美茂井の民宿「すずらん」前で堆積した大量の湿った火山灰（堆積直後でも泥々状態）によって車1台がスタックしたため車を捨てて一方の車に移動した。この時、車外でも熱気は特に感じられなかった。住人は彼らと同じように道路をぞろぞろと歩いていだし、2階の窓から顔をのぞかせる人たちもいた。その日のヘリコプターによる上空からの観察（大島 治氏による）や洋上からの遠望観察結果でも、噴煙移動に伴う倒木や熱的影響が島の北東部や陥没口縁の樹木に認められなかった。

このように29日噴火は一見火砕流様の噴煙であったが、温度が低いこと、横に這う速度が極めて遅いこと、および、後に述べる堆積学的特徴からは、火山学的に定義される火砕流とは異なる現象であった。

#### 4) 脱ガス期

8月中旬頃から、住民から刺激臭がするとの報告があった。新聞配達をする人の衣服が酸で焼けたように穴が開いたとの報告も寄せられた。観測班がすでに14日に行った雄山南西の登山道での噴出物観察でも、硫酸ミストが強く調査中に危険を感じるほどであった。東京工業大学、地質調査所、および、気象庁のコスベックを使った観測では、9月始めから徐々に二酸化硫黄の放出量が増加し、9月10日過ぎには日量数万トンのレベルにまで達した（風早ほか、2001）。この放出量は増減を繰り返しながら、少なくとも、本稿執筆時（2001年1月末）まで継続している。東京都の観測などによると三宅島の周回道路でも多い時には数10 ppmの二酸化硫黄を検出した。

8月29日以降は大きめの噴火は起こってはいない。しかし、断続的に火山灰混じりの噴煙が観察され、9月10日頃には火山灰が混ざった活発な噴煙が連続的に放出された。9月下旬、10月下旬、1月初旬にも有色噴煙がそれぞれ短時間観察された。これら断続的な噴煙は継続時間が短いために、火口壁の崩落などに伴った火山灰放出である可能性がある。12月下旬から1月中旬にかけては火映現象も隣接する御蔵島や神津島から観測された。

このような有色噴煙以外の時期は連続的に白色噴煙が火口から約2 km程度の高さまで放出され続けた（口絵1、写真3-c）。気象庁によるヘリコプターからの観測によると、火口温度は9月以降次第に上昇し12月下旬で約400 近くになった。多量の二酸化硫黄の継続的な放出や火口の温度の上昇は地下のマグマから活発な脱ガスが継続したことを示している。

### III. 噴出物の特徴

#### 1) 分布と噴出量

7月8日以降の噴火による火山灰の堆積状況は総合観測班地質グループとして、8月末まで噴火イベント毎に調査された。9月の全島避難以降、上陸して堆積物調査をすることが不可能となった。ここではその概略のみを示すことにする。図2には、7月8日、14～15日、8月10日、18日、29日の堆積物の等層厚図を示す。7月中の降灰は南西の風に流されて、島の北東側を中心に堆積している。また、8月18日噴出物は風が弱く噴煙高度が大きいために全島を覆っている。一連の噴火の後半に放出された噴石に関しては、火口から3～4 km内の範囲に5 cm以上のものが到達した。直径20 cm以上の岩塊はほぼ火口から等距離に分布するが、それ以下大きさの噴石はいびつな分布範囲を示している。後者は火山灰と一緒に噴き上げられた噴煙柱から直接飛来したものと考えられる。現地での噴石の堆積構造から推定される飛来方向は火口を指さずこれを支持しているように見える（長井ほか、準備中）。一方、西海岸の都道に達した岩塊は、当時、最も低くなっていたカルデラ縁の凹地から飛びだしてきたように見える。

8月末までの総噴出量は約1100万 m<sup>3</sup>と算出される（表2）。この値には海域に堆積したものや、陥没が進行する陥没口に堆積したものは含まれていないが、それを考慮したとしても次項に述べる山頂の陥没口の容積より桁で小さい。

#### 2) 堆積物の特徴

7月8日の火山灰は特徴的に赤色の岩片からなり、後の噴火の産物に比べて細粒物質を欠き、噴出物量が少ないのが特徴である。細粒物質の欠如

表 2 三宅島 2000 年噴火の噴出物量 .

Table 2 Volumes of eruption products of the Miyakejima 2000 eruption events.

	x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	x10 <sup>6</sup> t
July 8	0.097	(0.16)
July 14-15	2.1	(3.2)
Aug. 10	0.23	(0.35)
Aug. 13	0.062	(0.093)
Aug. 14	0.013	(0.019)
Aug. 18	5.2	(7.8)
Aug. 29	~3.5	(~5.3)
Aug. 30	~-0.01	(~-0.01)
Sep. 9-10	<0.1	(<0.1)
Total	~11	(~17)

(Note: eruptives deposited inside the caldera and under the sea are not included. Specific gravity of 1.6 was assumed.)

は、水蒸気が介在した噴火によく見られる特徴とは異なり、火口での破碎作用がほとんど起こらなかったためであると考えられる。すなわち、空洞へ地表部分が落ち込んだために、空洞を埋めていた気体が、陥没口の環状割れ目から押し出され、割れ目に付近の土砂が舞上げられて生じた「土ぼこり」のような噴火であったと考えられる。これに対して、7月14日以降の噴出物は極めて細かい黒色の火山灰であり、水蒸気爆発ないしマグマ水蒸気爆発の特徴的な堆積物といえる。堆積物には直径2 cm までの火山豆石をいくつかの層として挟むことが多い。14日の堆積物はやや黄褐色を呈する。堆積時、あるいは堆積後に降雨があった場合には、水に浸かった火山灰は隙間を失って灰色の強固な塊となった。しばしば、サンクラックを伴っているので降灰の時間間隙を読み取ることができる。また、緻密になった火山灰では気泡が残されてベシキュラー・タフとなっている。8月18日の火山灰はいくつかのフォールユニットが観察され、噴石が放出された時期に対応する堆積物は石質岩片に濃集している。また、特徴的に大豆大の堅い豆石を多く含んでいる。8月29日の堆積物は南西山腹（村営牧場付近）では特徴的に黄褐色の薄層を少なくとも4枚含む。これは観察された噴煙の横殴り回数に対応する。しかし、堆積物はそれまでの降下火山灰堆積物と同様に淘汰の良い細粒の火山灰であり、火砕流に特徴的な淘汰の悪

い地層や横方向に移動しながら堆積したために生じる特徴的な堆積構造は認められない。

### 3) 熱水の関与

火山灰は主に変質がやや進んだ古い溶岩の破片からなるが、中には結晶質の新鮮な火山岩片や、量は少ないが発泡した新鮮なガラスも認められる。スメクタイトやカオリナイトなどの熱水変質鉱物が8月までの直径1 mm 以上の噴出物には10%以下程度含まれたが、9月の噴出物からは認められていない（安田ほか、準備中）。また、特徴的に硬石膏、焼石膏、石膏の石膏類が認められる。これらの石膏類は水に容易に溶けたり、乾燥すると析出したりする。このため、同一イベントの噴出物でも、豆石の有無、降雨を伴ったかどうかなどの産状によって、出現する石膏類の形態が異なっている。

東工大草津白根火山観測所が行った火山灰の付着成分の分析結果では、8月までの噴出物は、水溶性の硫酸イオンが多量に含まれ、塩素イオンが極めて少ない（風早ほか、2001）。また、9月に入ってから噴出物は、硫酸イオンが急減し塩素イオンが急増している。前者は水蒸気爆発特有の性質であり、後者はマグマ水蒸気爆発特有の性質である（例えば、Nogami *et al.*, 2001）。8月29日噴出物ではそれ以前の火山灰に比べやや塩素イオン濃度が上昇する傾向が認められ、Nogamiらのモデルに従うと、水蒸気爆発からマグマ水蒸気爆発への過渡的なものと解釈できる。

以上のように、7月中旬から8月中旬までの噴出物の特徴は、大量の水蒸気が関与した噴火であったことを物語っている。さらに、噴出物中に熱水変質鉱物が多く含まれ、熱水による化学的分化を受けた水溶性成分を付着している。これらの特徴は、噴火が熱水が強く関係した爆発であったことを物語っている。この考察は、笹井ほか（2001）の電磁気学的考察や菊地ほか（2001）の地震学的な解析結果とも矛盾しない。すなわち、マグマから脱ガスした二酸化硫黄は8月18日噴火までは熱水に吸着されていたが、8月29日以降は、後で述べるように、地下の熱水系が崩れたため直接大気にもたらされたと考えることができる。

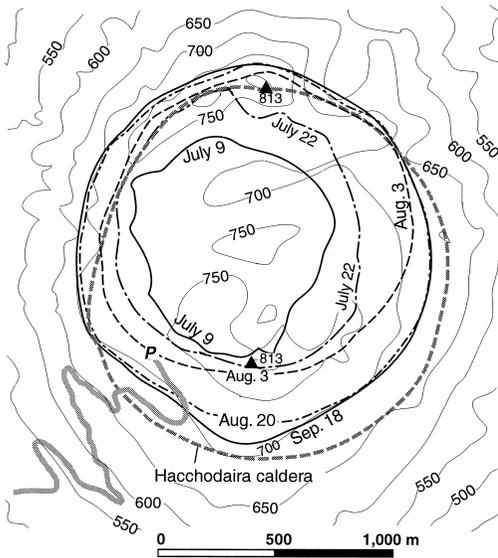


図 3 山頂陥没口の時間変化

下司信夫ほか(未公表資料)の原図を参照にした。

Fig. 3 Temporal variation of the summit collapsed crater (caldera)

Modified from the original map by Nobuo Geshi.

#### 4) 8月18日噴出物

8月18日の「火山弾」は、全て、多孔質部を含むやや結晶質の新鮮な玄武岩である。黒色の部分の中に赤色酸化した部分を不規則に含む。これは村営牧場付近では大きいもので径30cm、カリフラワー状の円形のものから多角形を呈して不規則な形状のものまで存在する。既存の溶岩などに由来する鋭利な破断面を持つ岩塊とは明瞭に区別できる。この玄武岩質「火山弾」は化学組成上極めて均質でSiO<sub>2</sub>が約51%あり(安田ほか, 投稿中; 宇都ほか, 2001), 三宅島の歴史時代の玄武岩質溶岩の中ではFeO\*/MgO比で見ると最も低い部類に当たる。また、6月27日に海底に噴出した玄武岩質安山岩とはSiO<sub>2</sub>のほかAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やK<sub>2</sub>Oなどの含有量が明らかに異なっており、起源的にも別物であると判断される(安田ほか, 投稿中)。

この「火山弾」が、今回の噴火の本質物質であるとする積極的な考え方(宇都ほか, 2001)と、

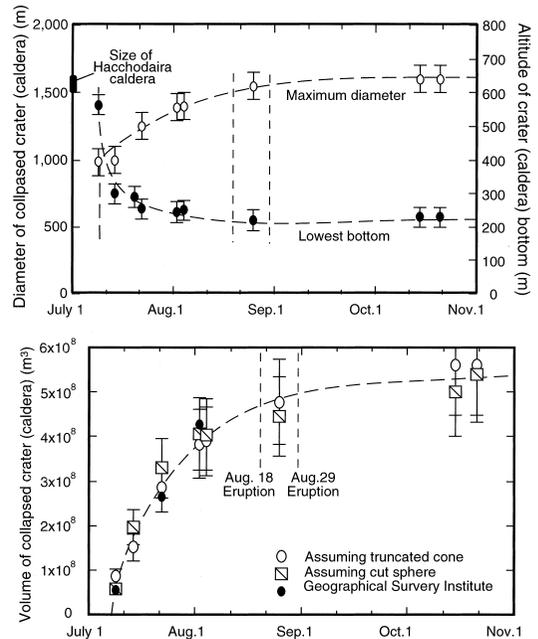


図 4 山頂陥没口の大きさの時間変化

国土地理院の記者発表資料を使用した。

Fig. 4 Temporal change of dimensions for the summit collapsed crater (caldera)

古い火山弾が噴き飛ばされたものとする考え方がある。仮に本質物質である場合には、最初に今回の噴火イベントを引き起こしたマグマと、それ以降の規模の大きい噴火(マグマ水蒸気爆発)に関与したマグマとは別ものであることになる。

#### IV. 陥没口の発達過程

7月9日からの陥没口の形状変化を平面図上で図3に示した。また、それらの大きさや容積の時間変化を図4に示した。陥没口の拡大・沈降が7月中に急速に進んだことがわかる。また、拡大は8月に入ってからも継続したが、8月18日の噴火以降は火口がある南部のみが大きく成長している。

陥没開始当初に地形を保ちながらほぼ楕円形に陥没が起こったことは、陥没に先立って浅所に存在した空洞に向かって山頂部が落ち込んだ可能性を指摘した。このことは、古屋ほか(2001)による重力の観測結果、および笹井ほか(2001)の電

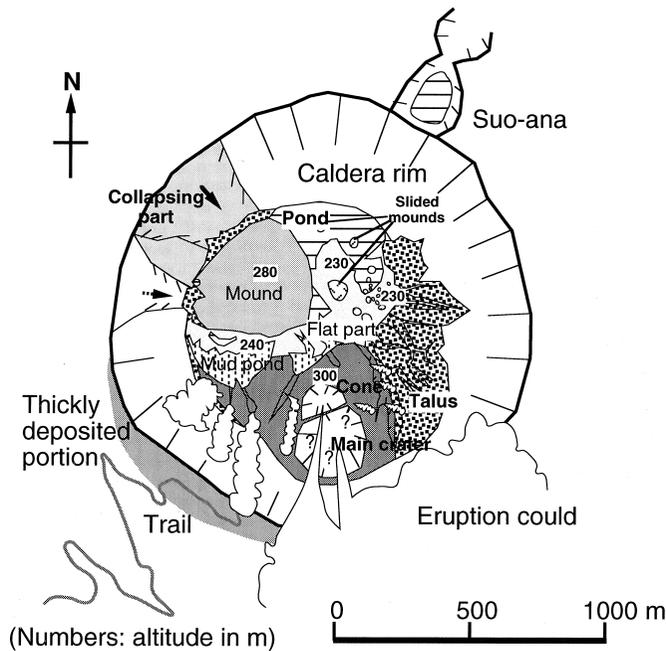


図 5 10月初めの陥没口（カルデラ）内部の様子．  
金子隆之原図を参考にした．

Fig. 5 Topographic feature of the bottom inside the summit collapsed crater (caldera) in early October.  
Modified from the original illustration by Takayuki Kaneko.

磁気観測結果から提案されている，陥没開始直前に山体上部に空洞が存在したとするモデルとは調和的である。地震研究所の震源決定結果によると，7月8日夕方の陥没イベントに向けて次第に震源が浅くなっていく様子を読み取れる。また，大路池の地下水源では7月初めから中旬にかけて，地下水の電気伝導度が急速に上昇し，その後，ゆっくり上昇した（三宅村，未公表資料）。電気伝導度が上昇した時期は，山頂陥没が開始する直前から陥没が急速に進行した時期に当たる。地下水の電気伝導度は海水か火山ガスの流入によって上昇している。このため，地下の空洞の形成と上昇に伴って，三宅島の地下水系に大きな変動があったと推定される。これらのことは空洞が，ストーピングのように，深部から浅部に次第に移動してきたことを示していると考えられる。

一方，それ以降のすり鉢状の形状と，陥没口径・深さの時間的な進行は，陥没がアリ地獄に進ん

だことを意味すると理解される。すなわち，陥没開始当初にあった浅部の空洞は埋められたがさらに空洞が深部に発達し続けたため，山体上部がその空洞に順次落ち込んでいったためと理解できる。陥没口はその後の地上からの複数回の観察によると，すり鉢から風呂桶（平らで広い底面）のような形状で成長が進んだ（口絵1，写真1-b，c）。底には周囲の壁の崩壊によってできた土砂や岩塊の塊がいくつもの山のようなロープを作ったり，岩屑なだれに特有のハンモッキー地形が出現した。また，しばしば，中心側がより沈降するため出現したと考えられるステップ状の断層地形も出現した（口絵1，写真2-a）。

噴火口の位置は最初に陥没した楕円体部のほぼ南限に当たる元の雄山山頂付近である。噴火口は噴火を通して南東側から南側へと移動した（図5）。噴火によって火口底に火砕丘を形成しているのがしばしば確認された。8月10日噴火の直後の上空

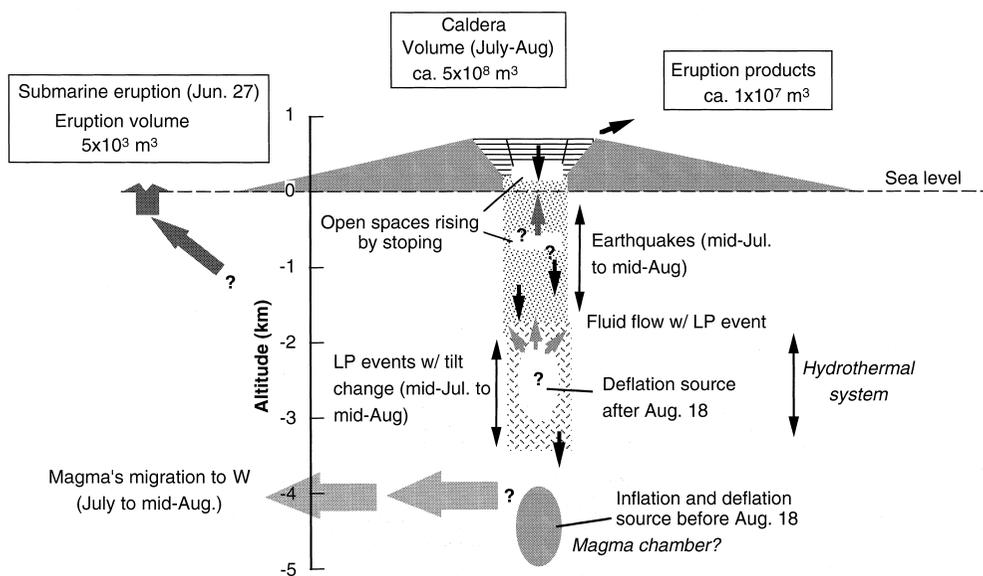


図 6 三宅島 2000 年噴火の地下システム（東西断面．左が西）．  
地質および地球物理学的データのまとめ．地震の震源震度と GPS 圧力源は，それぞれ地震研究所資料（酒井ほか，未公表；大湊，未公表）と国土地理院資料（村上，未公表）による．流体移動については笹井ほか（2001）を参考にした．

Fig. 6 Cross-section showing geophysical and geological data related to the underground system of the Miyakejima 2000 eruption.  
The pressure sources of GPS are after unpublished data of the Geographical Survey Institute.

からの観察では，陥没口底の火口付近では泥流が発生していたし，周回道路で噴火を目撃した千葉達朗氏によると，火山灰の降灰と同時に熱泥流が赤場峠に流れ込んだ。これらのことから判断すると，この日の噴火は水蒸気を多量に含んだものであったと推定される。

爆発期に入ってから，噴出物が陥没口内部の南側を埋めたが，噴出物の堆積量が少ない北から北東側では陥没が進行したためより深くなり，火口から流れ出した熱泥流が溜って，池が形成された（口絵 1，写真 2-b，c）。8 月末までに形成された陥没口はほぼ円錐台を逆にした形状に近く，南側に火砕丘が発達したため，北に向かって高度を減じている。陥没口は最終的に 2500 年前にできたとされる八丁平カルデラ（津久井ほか，2001）と大きさも場所もほぼ同じになった（図 3）。八丁平カルデラが今回の活動で再生されたことになる。

## V．陥没の原因

9 月頃までの山頂部の陥没量は約 6 億  $m^3$  と推定される。これは総噴出量より数十倍大きい値である。このように噴出量に対して陥没量が桁違いに大きい陥没イベントの例はホットスポット火山で数例報告されたことがある（高田，2001 を参照）が，島弧火山において，このようなイベントは報告されたことがない。しかし，今回のような水蒸気の関与が大きい爆発の特徴である，細粒の火山灰が固まってできた強固な灰色火山灰堆積物は，「かた」とよばれて伊豆諸島の玄武岩火山に広く分布する。このため，良く似た陥没・噴火イベントが伊豆諸島の玄武岩火山では過去に繰り返していた可能性が高い。

今回の噴出物の特徴から，熱水が噴火に強く関与したものであると考えられることから，次から次に形成された空洞に地下水が流入して加熱され，

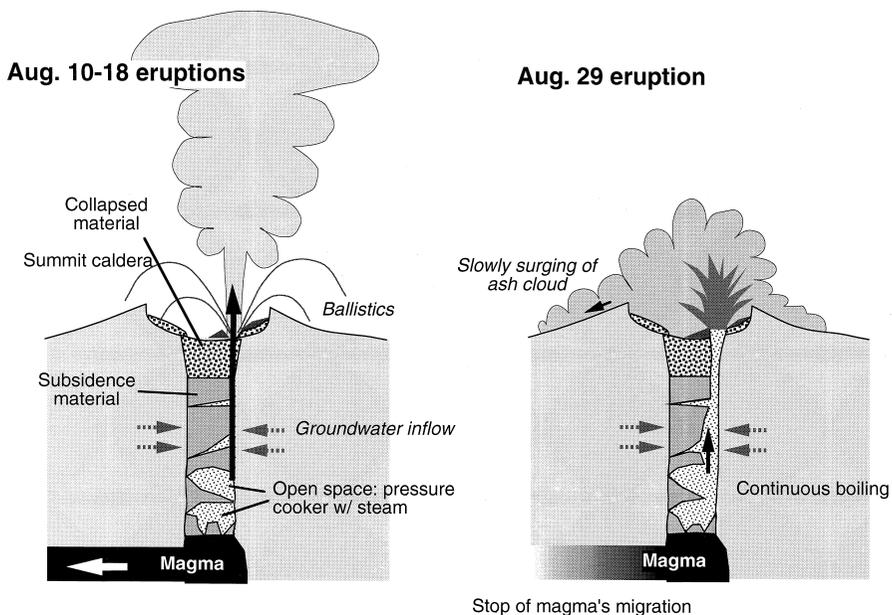


図 7 8月18日噴火と29日噴火のモデル(東西断面).  
詳細は本文参照.

Fig. 7 Illustration Cartoon showing eruption model for the August 18 and 29 eruptions.  
Details are given in the text.

熱水の溜りになった可能性が高い。熱水が蓄えられた巨大な空洞が存在した可能性は以下に述べる理由からも支持される。すなわち、傾斜ステップに伴われた長周期地震の震源の深さが約3-5 kmにあり(図6)、地震波の特性から見て震源域の体積膨張に伴ったものである(菊地ほか, 2001)。また、傾斜ステップに伴って観察される電磁気学的変動は地下2 km付近の流体の急速な移動で説明できる(笹井ほか, 2001)。地下に空洞ができて続けるのは、何らかの原因で、マグマ溜りを含む火山体の地下の一部が急に体積欠損したためであると考えられる。

地下に体積欠損が急激に生じた原因としては、マグマのような流体が下方が横方向に移動したためであると考えるのが最も理解しやすい。神津島沖での地震活動の活発化と伸張を示す地殻変動は、三宅島における陥没・噴火活動の活発化や収縮を示す地殻変動と極めてよい相関が認められた(表1)(Kaidzu *et al.*, 2000)。このことから、山岡

(2000)や古屋ほか(2001)などは、三宅島火山地下のマグマ溜りからマグマが神津島沖に連続的に移動し続けたモデルを提案している。当初(6月27日)の海底噴火が移動する地震源のほぼ直上で起こったこと、および、神津島沖の地震活動がマグマ脈の貫入で説明できること(酒井ほか, 2001)からも、神津島の地震地殻変動が三宅島からのマグマ移動と連動したことは疑う余地がないと思われる。国土地理院のGPS測定結果から推定される収縮源は長周期地震源よりも深い、約5 kmの深度に求まる(図6)(村上, 未公表)。マグマ溜りからマグマの側方移動が連続的に起こり、それによってできた隙間に向かって火山体の陥没が起こり、地下の空洞が形成され続けたとすれば、2-3 kmの長周期震源と約5 kmの収縮源はそれぞれ空洞とマグマ溜りに相当すると見なすことができる。地震研究所ほかの資料によると、今回の陥没・噴火イベントまでの数年間に行われていたGPSの観測結果からは、三宅島火山の地下約5 kmの位置に

膨張源が存在し、そこでマグマの蓄積が起きていたと考えられている。

一方、高田(2001)や宇都ほか(2001)はマグマ溜りの底が周囲の母岩に比べて密度が大きく、ある長期間を経ると必然的にマンテルへ沈降するモデルを提案しているが、特に、地下水や熱水などとの反応を考慮したモデルとはなっていない。また、宇都ほか(2001)は8月18日以降にマグマが浅部まで上昇してきたと考えている。

## VI. 噴火様式の変化

8月18日と29日噴火の大きな違いは、18日の噴煙高度が高く噴石を降らせたのに対し、29日では高度が低く噴煙が主に横に移動したことである。気象庁の資料によると空振計や微動の最大振幅は18日の方が大きい。表2に示すように、噴出物量は両者で大きく異なるわけではない。29日の横に移動する噴煙は一種の噴煙柱の崩壊であると見なすことができる。噴煙が火口から上昇する際に、周囲の空気を十分に取り込み暖めて浮力を稼ぐことができなければ噴煙柱は崩壊する。噴煙柱が崩壊するためには火口からの脱出速度が減少するか火口径が拡大することが提案されている(Wilson *et al.*, 1980)。上空観察や空撮映像からは、29日噴火後の火口が18日噴火の後の火口に比べて特に拡大したという積極的な証拠は認められない。恐らく脱出速度が29日噴火では高い噴煙柱を作るには十分ではなかった可能性が高く、このことが18日との空振や微動の振幅の違いとなって現れていると考えられる。

熱水を蓄えた空洞は過剰圧を蓄える容器、すなわち圧力釜として働くと考えられる(図7)。18日の噴火を境に、傾斜ステップが消え地震活動や電磁気変化がそれまでと著しく異なり始め、放出される二酸化硫黄や硫酸ミストの量が増えた。また、これを境に山頂直下(2 km以浅)の地震が起らなくなった。29日噴火では、それまでの噴火に比べ、火山灰付着成分の塩素濃度が上昇し始めた。これらの事実は、それまでに地下で確立されていた熱水系が崩れ、マグマからのガスが途中でトラップされることなく、直接放出され始めたこと

を示していると考えられる。すなわち、地表まで穴があき、空洞に熱水が溜められることがなくなったと考えられる。

熱水系が崩れることによって、29日噴火は18日噴火のような高い過剰圧を蓄えて起こる噴火ではなく、より小さい過剰圧で、一種の「吹きこぼれ型」の噴火を起こした可能性が高い(図7)。その結果、火口からの脱出速度が十分ではなく、高い噴煙柱が立たなかったものと考えられる。8月18日噴火以降にGPS収縮源はそれ以前より浅所に移動した(図6)。このことは、8月18日まではマグマの移動が起きてマグマ溜りが収縮していたが、それ以後はマグマ溜りの上にある空洞の方が地表への開口によって収縮し始めたためであると考えることが可能かもしれない。

## VII. ま と め

今回の三宅島で起きた陥没・噴火イベントの地質学的観測観察結果と他の観測結果とを合わせると以下のようにまとめることができる。

- 1) 今回の山頂部の陥没イベントは、三宅島の地下にあったマグマが神津島沖に連続的に逃げたために地下にできた空洞が引きがねとなって起きたと考えられる。当初移動したマグマは1983年マグマと酷似した玄武岩質安山岩である。
- 2) 7月8日の陥没開始直前には、巨大な空洞がストーピング式に火山体上部まで上昇してきており、その後も空洞が地下深部で成長し続けた可能性が高い。陥没口は当初に大きく成長し8月中旬までにほぼ成長をやめた。
- 3) 噴出物から見て、噴火活動には、これらの空洞で発達した熱水系が強く関与したと考えられ、8月18日噴火を境に地下の熱水系が崩れたと考えられる。
- 4) 8月29日の横に這う灰雲は熱水系が崩れたために低い過剰圧で起きたもので、一種の吹きこぼれ型の噴火であったと考えられる。
- 5) その後、マグマからの脱ガスで生じた多量の二酸化硫黄は、地下の熱水系の破壊によって熱水に吸収されることなく、直接火口から放出され続けたものと考えられる。

## 謝 辞

今回の噴火に当たり、気象庁、海上保安庁、自衛隊、東京都、三宅村など関係機関には、ヘリコプターによる上空からの観察や現地での観測・観測を支援していただいた。現地調査は川辺禎久、野上健治、中野 俊、宮城磯治、萬年一剛、大場 司、伊藤順一、高田 亮、田村聖、伊藤弘志氏らの協力で行われた。アジア航測(株)千葉達朗氏とは現地においてさまざまな情報交換をした。平林順一・野上健治両氏には火山灰の付着成分についての分析結果をお教えいただいた。朝日航洋(株)からは写真の使用を快く許可していただいた。以上の方々に感謝します。

## 文 献

- 古屋正人・大久保修平・田中愛幸・孫文科・渡辺秀文・及川 純・前川徳光(2001): 重力の時空間変化でとらえた三宅島2000年火山活動におけるカルデラ形成過程. 地学雑誌, 110, 217-225.
- Japan Meteorological Agency (JMA)(2000): Recent seismic activity in the Miyakejima and Niiijima-Kozushima region, Japan. The largest earthquake swarm ever recorded. *Earth Planets Space*, 52(8), i-viii.
- Kaidzu, M., Nishimura, T., Murakami, M., Ozawa, S., Sagiya, T., Yurai, H. and Imakiire, T.(2000): Crustal deformation associated with crustal activities in the northern Izu-islands area during the summer, 2000. *Earth Planets Space*, 52(8), ix-xviii.
- 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SO<sub>2</sub>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.
- 宮崎 努(1984): 歴史時代における三宅島噴火の特徴. 火山, 29(三宅島噴火特集), S1-S15.
- Nogami, K., Hirabayashi, J., Ohba, T., Ossaka, J., Yamamoto, M., Akagi, S., Ozawa, T. and Yoshida, M. (2001): Temporal variations in constituents of volcanic ash and adherent water-soluble components in the Unzen Fugendake eruption during 1990-1991. *Earth Planets Space*, 54, in press.
- 酒井慎一・山田知朗・井出 哲・望月将志・塩原 肇・ト部 卓・平田 直・篠原雅尚・金沢敏彦・西澤あずさ・藤江 剛・三ヶ田 均(2001): 地震活動から見た三宅島2000年噴火時のマグマの移動. 地学雑誌, 110, 145-155.
- 笹井洋一・上嶋 誠・歌田久司・鍵山恒臣・ZLOTNICKI Jacques・橋本武志・高橋優志(2001): 地磁気・地電位観測から推定される三宅島火山の2000年活動. 地学雑誌, 110, 226-244.
- 白尾元理(2000): 三宅島2000年噴火. 地学雑誌, 109(5), 口絵1.
- 高田 亮(2001): 玄武岩質火山成長に伴うカルデラ形成・重力崩壊モデル. 地学雑誌, 110, 245-256.
- 津久井雅志(2000): 2000年三宅島火山の山頂陥没事件. 科学, 70, 922-925.
- 津久井雅志・新堀賢志・川辺禎久・鈴木裕一(2001): 三宅島火山の形成史. 地学雑誌, 110, 156-167.
- Ukawa, M., Fujita, E., Yamamoto, E., Okada, Y. and Kikuchi, M. (2000): The 2000 Miyakejima eruption: Crustal deformation and earthquakes observed by the NIED Miyakejima observation network. *Earth Planets Space*, 52(8) xix-xxvi.
- 宇都浩三・風早康平・斎藤元治・伊藤順一・高田 亮・川辺禎久・星住英夫・山元孝弘・宮城磯治・東宮昭彦・佐藤久夫・濱崎聡志・篠原宏志(2001): 三宅島火山2000年噴火のマグマ上昇モデル. 8月18日噴出物および高濃度SO<sub>2</sub>火山ガスからの考察. 地学雑誌, 110, 257-270.
- Wilson, L., Sparks, R.S.J. and Walker, G.P.L.(1980): Explosive volcanic eruptions. IV. The control of magma properties and conduit geometry of eruption column behaviour. *Geophys. J. Royal. Astron. Soc.*, 63, 117-148.
- 安田 敦・中田節也・藤井敏嗣(2001): 2000年三宅島噴出物のmelt inclusionに記録されたS濃度とfO<sub>2</sub>環境. 火山, 投稿中.
- 山岡耕春(2000): 三宅島・神津島の地下で、何がおこっているのか. 科学, 70, 926-935.
- (2001年1月30日受付, 2001年3月7日受理)