

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 SO₂ 火山ガスからの考察 —

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 広**
宮 城 磯 治** 東 宮 昭 彦* 佐 藤 久 夫*
濱 崎 聡 志** 篠 原 宏 志*

Magma Ascending Model of 2000 Miyakejima Eruptions : Evidence from Pyroclastics of
August 18 and SO₂-rich Volcanic Gas

Kozo UTO *, Kohei KAZAHAYA **, Genji SAITO *, Jun'ichi ITOH **, Akira TAKADA *,
Yoshihisa KAWANABE *, Hideo HOSHIZUMI *, Takahiro YAMAMOTO **,
Isoji MIYAGI *, Akihiko TOMIYA *, Hisao SATOH *,
Satoshi HAMAZAKI ** and Hiroshi SHINOHARA *

Abstract

To understand the eruptive mechanism of the 2000 Miyakejima volcanic activity, we conducted intensive geological, petrographic, and mineralogical studies on the pyroclastics of the August 18 eruption. Volcanic ashes, which were rich in accretionary lapilli, covered most of the islands. Cauliflower-shaped bombs and lapilli were ejected along with accidental lava blocks. Black-colored angular scoriaceous particles with abundant vesicles 10–100 μm in diameter are found among ashes, comprising about 40 wt. % of total constituents. These bombs, lapilli, and black ashes have identical bulk chemical compositions and constituent mineral compositions, suggesting a common origin. Existence of oxidized ashes and accretionary lapilli attached to a large flattened bomb and chemically-reacted anhydrite particles trapped in the voids of bombs suggest that bombs were still hot and ductile when they were emplaced on the ground. We, therefore, conclude that the August 18 eruption was a phreatomagmatic eruption and cauliflower-shaped bombs and black ashes were essential magmatic materials. Significant SO₂ emissions from the volcano after August 18 also suggest convective upwelling of magmas to a shallower level beneath the volcanic edifice. We propose a magma-ascending model in which vesiculating magmas continuously ascend through the wall of subsided piston-like blocks.

Key words : Miyakejima volcano , phreatomagmatic eruption , petrography , SO₂ gas

キーワード : 三宅島火山 , マグマ水蒸気噴火 , 記載岩石学 , SO₂

* 産業技術総合研究所地球科学情報研究部門

** 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター

* Institute of Geoscience, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

** Research Center for Deep Geological Environments, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

I. はじめに

伊豆諸島三宅島火山は、2000年6月下旬より17年ぶりに活発な火山活動を開始した(Nakada and Fujii, 2000; JMA, 2000; Ukawa *et al.*, 2000; Kaidu *et al.*, 2000; 中田ほか, 2001 など)。今回の火山活動は、約20年周期で繰り返された過去の歴史時代噴火活動と大きく異なっていた。6月下旬から規模の大きな群発地震が発生し(JMA, 2000; Ukawa *et al.*, 2000)、島の西部を中心に地殻変動を引き起こしたものの(Ukawa *et al.*, 2000; Kaidu *et al.*, 2000)、島内では割れ目噴火に至らず、西方海底で小規模な噴火にとどまった(白尾ほか, 2000; 中田ほか, 2001)。その後、群発地震の震源は次第に北西方向に移動し(JMA, 2000)、三宅島の火山活動は収束に向かうかと思われた。ところが7月8日以降、山頂火口から極少量の火山灰を放出する小規模噴火が繰り返し発生し、それと同時に山頂火口がステップ状に陥没を開始した(中田ほか, 2001)。総噴出量はさほど大きくないにもかかわらず、8月中旬までの間に山頂部は直径1.6 kmの大きさで深さ約500 mも陥没した(中田ほか, 2001)。8月18日には、噴煙が上空約15000 mまで達するような最大規模の噴火が起こり、直径数 cm ~ 数十 cm の噴石が島の一周道路まで降下した。さらに8月29日には、きわめて低温ながら火砕流が発生し、海上にまで達した。その後、約3800名の全島民が島外に避難を余儀なくされた。それと前後して、8月下旬からきわめて高濃度の二酸化硫黄を含む火山ガスがほぼ連続的に放出されつづけており(風早ほか, 2001)、本稿を執筆中の2001年1月1日現在も、島民は帰島できない状況にある。

今回の噴火活動、特に最大規模の噴火においてマグマ物質が噴火に関与したか否かが、火山噴火予知連絡会においても大きな議論となり、特に8月下旬から9月上旬時点での噴火活動の見通しを考える上で重要な検討材料となった。我々、地質調査所の研究チームは、8月上旬の時点からマグマ物質が噴出した可能性を指摘してきたが、8月18日の最大規模の噴火は、マグマ物質が全噴出物量の約40%を超える量放出されたマグマ水蒸

気爆発であると判断し、それに基づくマグマ上昇モデルを提案した(Saito *et al.*, 2000; Miyagi *et al.*, 2000; Kazahaya *et al.*, 2000; 宮城ほか, 2001)。その後、9月に入り、気象庁と合同でヘリコプターからのCOSPECを用いた噴煙中のSO₂観測を行い、高濃度SO₂がマグマから放出されていると考えた(風早ほか, 2001)。

三宅島火山の噴火活動は現在も進行中であり、我々の研究も同じく進行中である。本論文では、地質調査所の研究チームを代表して、最大規模の噴火であった8月18日の噴出物についての島内での分布および産状、肉眼、光学顕微鏡、および各種の分析機器を用いた記載岩石学的な特徴を述べ、8月下旬現在での三宅島火山でのマグマ上昇過程を考察する。本論文で紹介する内容は、各分担者による研究が進行中のものであり、将来各分担に従い本論文化されるものである。従って、観測データについては、すべて未公表資料の引用という形を取った。また、研究の進行次第では、分担者毎にデータの解釈やモデルが異なりうることをあらかじめお断りしておく。また、今回の三宅島火山噴火活動の細かい経緯は、本特集の中田ほか論文に詳しいので、本論文では省略する。

II. 8月18日噴出物の分布および産状

8月18日の噴火は、17時02分に開始し、17時25分には噴煙が高度約15000 mに達した(気象庁地震火山部・三宅島測候所, 2000)。噴火開始後の約1時間は、鳴動・火山雷などを伴う爆発的な噴火が継続し、三宅島南西部から北西部にかけて火山豆石を含む大量の火山灰が降下・堆積した。この激しい噴火活動期をPhase 1と呼ぶことにする。18時には島北部にも火山灰降下が始まり、降灰は全島域に及んだ。19時から20時20分頃にかけて、島南東側を中心に広い範囲に緻密な噴石が落下した。この時期をPhase 2と呼ぶことにする。

火山灰の産状

8月18日噴火により放出された火山灰は、三宅島全域を覆っている。最大層厚は、三宅島西部の伊ヶ谷～阿古にかけての外周道路沿いで約10 cm弱であった(図1)。

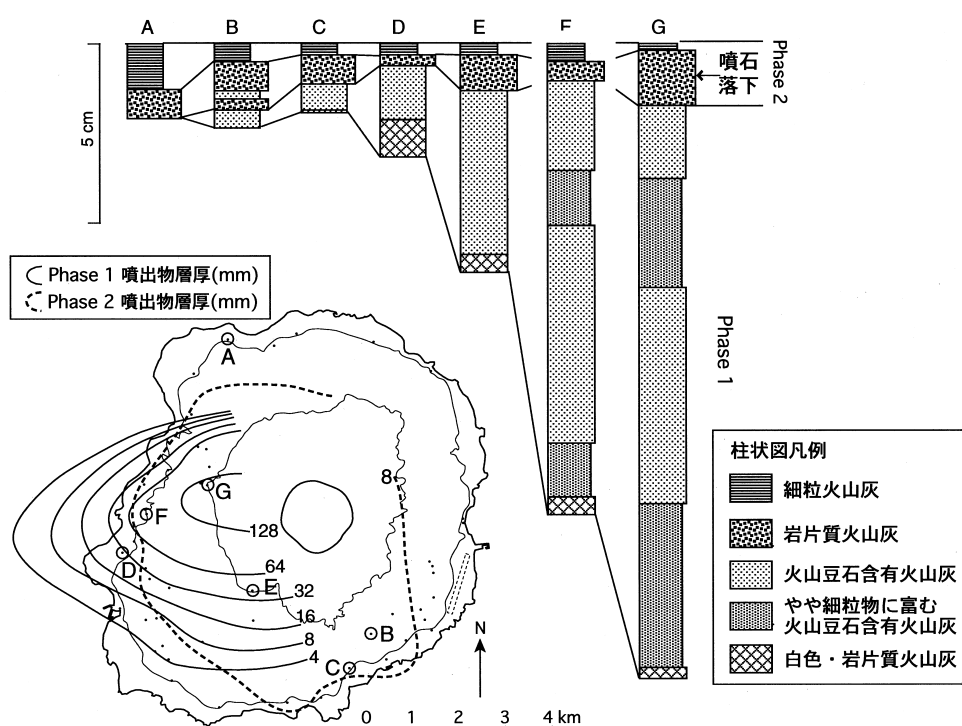


図 1 三宅島 2000 年 8 月 18 日噴出物の分布および模式柱状図。(高田・伊藤, 未公表資料)

Fig. 1 Distribution of eruptives on August 18, 2000 of Miyakejima volcano.
(Takada and Itoh, unpublished data)

この噴火により堆積した火山灰は、色調や火山豆石・スコリア片・岩片の粒度や量比から複数のユニットに区分でき、噴火 Phase 1 および 2 噴出物は、層相の違いにより識別可能である。

Phase 1 噴出物は、火山豆石を含む灰色～青灰色火山灰の複数のユニットからなる。等層厚線は、陥没火口から西方へ伸びる分布を示し、外周道路沿いでの最大層厚は 8 cm であった。一方、Phase 2 噴出物は、下部に極細粒火山灰の比較的乏しい岩片質のユニットがあり、その上に暗灰色細粒火山灰ユニットが重なる。

噴石の産状

8 月 18 日噴火では直径数 cm ～数十 cm の噴石が放出された(図 2)。それらは層序的には、Phase 2 噴出物下部の岩片質ユニットに対比され、カリフラワーに似た特徴的な形状を示す発泡度の悪いスコリア質火山弾と、角礫状の類質岩片に大別さ

れる。

カリフラワー状火山弾は、直径 40 cm 大から 1–2 cm まで様々だが、いずれも特徴的な外形を有する(図 3A–D)。即ち、やや丸みを帯び皺が入ったキャベツ状ないしカリフラワー状の外形を有し、冷却割れ目が放射状に入る。ほとんどすべての火山弾は完全な外形を保持しており、破片状に割れたものは見られなかった。直径が数十 cm を超える火山弾のなかには、接地した底部面が平面的で、側面および上面は緩やかな凸面に囲まれるものが認められ、表面に発達した割れ目は遅延発泡のため開口している。また、基底部の火山豆石を含む火山灰(Phase 1)噴出物および開口した割れ目を充填する細粒火山灰(Phase 2)噴出物は、高温酸化により黄褐色～赤褐色に変色している。以上のような産状から、高温状態で放出された本質岩片であると現場で判断した。

III. 噴出物の記載岩石学的特徴

現地で採集した噴石および火山灰は、つくばの地質調査所において、種々の方法を用いて構成物質の分類、割合、全岩および鉱物化学分析、鉱物X線分析、硫黄同位体分析などを行い、マグマ物質の有無、起源などの検討を行っており、原稿執筆段階でも継続中である。

1) 噴出物の粒度分析および形態観察

8月18日噴火の起源を知るため、火山灰の粒度分析を行い、粒度毎の構成物質を調べた(図4, 5)。火山灰の中央粒径は極細～粗粒砂サイズ(0–4ファイ: 1–1/16 mm)だが、細粒火山礫やシルトサイズの火山灰も同時に含むため分散度(deviation)が大きく、降下堆積物としては淘汰の悪い領域にプロットされる(図4)。ドライな環境で起こる玄武岩マグマの噴火では、降下火砕物の粉砕度(最大層厚の1/10地点での0ファイ以下の細粒成分の重量%)が10%以下となることが知られている(Walker, 1973)。これに対し、今回の降下火砕物には0ファイ以下成分が60%以上含まれており(図5)、玄武岩の噴火としては細粒成分が大量に生産されたことになる。その原因としてはマグマと地下水の接触爆発反応が最も考えやすい(Sheridan and Wohletz, 1983)。

8月18日火山灰は、黒色で細かい気泡の多い新鮮な玄武岩スコリア(黒色火山灰)、暗灰～灰色の新鮮な石質玄武岩、多様な発泡度と見かけの玄武岩スコリア、変質の著しい岩石、粘土鉱物、斜長石を主とする結晶片からなるほか、良く固結した火山豆石が含まれている。黒色火山灰の走査電子顕微鏡像を図3Eに示す。いずれの粒子も破断面で囲まれた鋭角な多面体の形態を示し、数～数十ミクロンの細かい気泡を多数有しており、本質物質と考えた。遊離結晶片はこの本質火山灰とそれ以外の岩片の両方に由来するので、これを各粒径毎の両者の比に応じて分配した上で、4.5ファイ以下の細粒成分は除く火山灰全体の構成質量比を求めると、8月18日火山灰の39%が本質物質、31%が石質玄武岩などの類質岩、30%が変質岩となる(図5)。

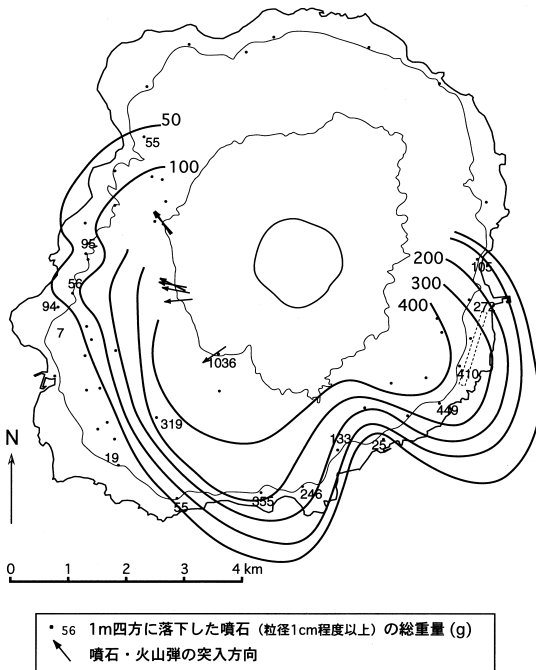


図2 8月18日噴石の1m四方あたりの総重量(g)および噴石の推定飛来方向。(伊藤・高田・嶋野, 未公表資料)

Fig. 2 Total weight(g) of ballistic blocks in the area of 1 m² for estimated flight direction. (Itoh, Takada and Shimano, unpublished data)

一方、類質岩片は、緻密な灰色の溶岩塊あるいは赤色酸化した発泡火山岩片で、破断面で囲まれたり、破片状に割れたりしており、山体を形成していた溶岩の破片と思われる。インパクトクレータ内に散在する岩塊を復元すると、飛翔時には直径1mを超えていたと思われるものも認められる。

噴石が地表に残したインパクト構造から判断すると、噴石は陥没火口の南部に開いた火口から放出されたと推測される(図2)。噴石の粒径は、陥没口縁から約1.5 km離れた村営牧場において最大50 cmであり、4 km離れた島を一周する都道沿いでも1–2 cmであった。この噴石の降下により坪田地区を中心として多数の自動車のガラスが割れる被害が出た。また、村営牧場の周辺では、家屋の屋根に多数の穴があいた。

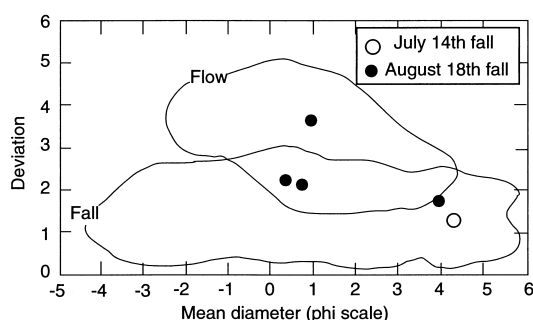


図 4 8 月 18 日噴出物の粒度特性。(山元・伊藤・高田, 未公表資料)

Fig. 4 Grain size characteristics of ashes of August 18. (Yamamoto, Itoh and Takada, unpublished data)
The flow and fall fields are taken from Walker (1971)

カリフラワー状火山弾および火山礫を切断して内部構造を観察した。内部は比較的緻密で、極微細な気泡が礫および火山弾全体に分布している。また、一部には緻密で灰色の石質岩片を核に持つ火山礫が認められた(図 3D)。大型の火山弾の内部はくしゃくしゃに折り畳まれたような皺の多い不均質な構造を持ち、数～数十 mm の溶岩片を若干量含む(図 3B)。地表あるいは地下浅部にしかない既存の溶岩片を火山弾の内部に取り込んでいることから、塑性変形可能なほど柔らかかったマグマ物質が火道内あるいは噴煙柱内において先に放出された類質物質を取り込んだあと、カリフラワー状の外形を形成したと考える。火山弾内の気泡中に硬石膏が取り込まれていることがあり、その薄片写真を観察すると、石基と反応して分解し、反応縁を形成している。このことは、火山弾が硬石膏を取り込んだときには、化学反応可能なほど高温だったことを示している。

2) 火山灰および火山豆石の X 線回折分析

火山灰および火山豆石の構成鉱物を把握するとともに、大型のカリフラワー状火山弾の下に付着した赤灰色の火山灰、火山豆石と周辺の青灰色のものとの違いを確かめるために、火口の南側中腹の村営牧場において採集した試料について X 線回折分析を行った。分析したのは、Phase 1 堆積物の

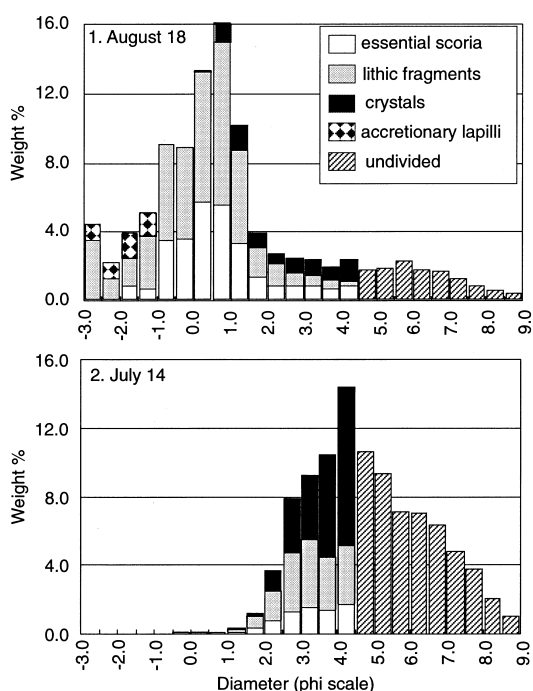


図 5 8 月 18 日噴出物の粒度分布および構成比。(山元・伊藤・高田, 未公表資料)

Fig. 5 Grain size distributions and compositional modes of ashes of August 18.

Lithic fragments are accessory basalt and hydrothermally altered rocks; crystals consist of plagioclase, olivine, pyroxene, and magnetite. (Yamamoto, Itoh and Takada, unpublished data)

青灰色の火山豆石混じりの火山灰と火山豆石、直径約 15 cm のカリフラワー状火山弾に敷かれた赤灰色の火山灰と火山豆石、同じ火山弾の上面の割れ目を充填する赤灰色火山灰、さらに Phase 2 の細粒青灰色火山灰の計 6 試料である。その結果を、図 6 に示す。スメクタイト、カオリン、硬石膏、低温石英(極少量ながらイライトといった変質鉱物や斜長石、かんらん石等の造岩鉱物が認められた。火山豆石とそれ以外の細粒火山灰とでは、その鉱物組成に若干の相違が認められた。即ち、火山豆石にはスメクタイトやイライトなどの粘土鉱物はほとんど認められないが、硬石膏が濃集している。一方、火山灰には硬石膏のピークはほとん

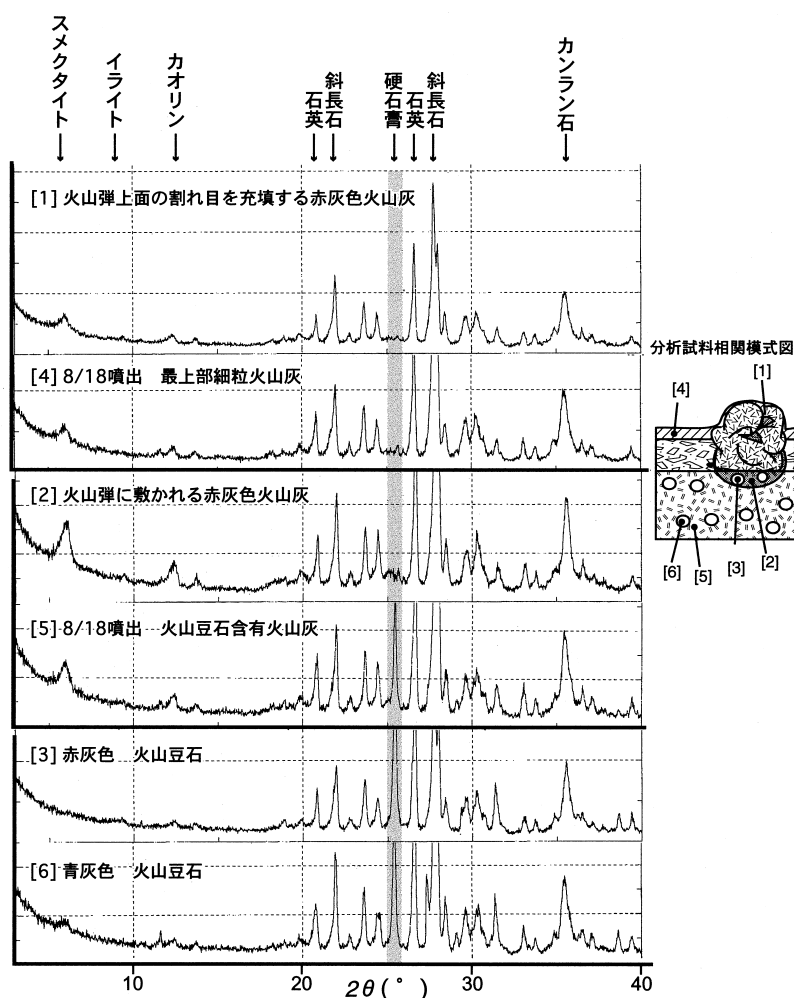


図 6 8 月 18 日火山灰および火山豆石の X 線回折分析結果。(伊藤・濱崎・高田, 未公表資料)

Fig. 7 X-ray diffraction analytical results for ash and accretionary lapilli of August 18. (Itoh, Hamazaki, and Takada, unpublished data)

ど認められない。この相違は、試料の色調の違いとは無関係であり、火山弾に接している赤灰色の火山灰、火山豆石が、火山弾から離れた場所から採取した青灰色の火山灰、火山豆石と基本的に同じ構成鉱物で同様なピーク強度（相対構成量比）を示すことである。このことは、火山灰、火山豆石とも色の違いにかかわらず起源が同じであり、赤灰色の火山灰、火山豆石は着地時にまだ高温で

あった火山弾により高温酸化を受け色に変質したという現地での推論を支持する。

3) 本質火山灰およびカリフラワー火山弾の全岩化学分析

本質物質と推定される火山弾、火山礫、火山灰が化学組成の上で均質かどうかを知るために、蛍光 X 線分析により主成分全岩化学組成の比較を行った。火山灰については、双眼実体顕微鏡下で

表 1 三宅島火山 2000 年 8 月 18 日噴出物の全岩化学組成（無水 100% に再計算）.

Table 1 Major element chemical composition of eruptives on August 18, 2000 of Miyakejima volcano (Normalized to water-free 100%).

	Bomb	Lapilli	Lapilli	Lapilli	Lapilli	Lapilli	Lapilli	Black Ash
SiO ₂	51.34	51.30	51.38	51.29	51.07	51.31	51.26	51.71
TiO ₂	1.14	1.12	1.14	1.14	1.13	1.14	1.17	1.20
Al ₂ O ₃	17.98	18.05	17.89	18.01	18.18	17.96	17.82	17.22
FeO*	11.30	11.19	11.30	11.36	11.30	11.32	11.39	11.64
MnO	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18
MgO	4.07	4.04	4.08	4.06	4.21	4.08	4.19	4.29
CaO	11.12	11.16	11.09	11.10	11.04	11.05	11.05	10.82
Na ₂ O	2.37	2.43	2.43	2.34	2.40	2.44	2.39	2.37
K ₂ O	0.41	0.40	0.41	0.41	0.39	0.40	0.41	0.43
P ₂ O ₅	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12	0.13	0.12

黒色で鋭角に角ばり細かく発泡した 0.5–1 mm サイズのものを数集めて分析試料とした。それ以外の火山弾，火山礫については，一部を粉碎して分析試料とした。その結果を表 1 に示す。すべての試料とも良く類似した化学組成を有し，SiO₂ が 50–51wt % で，歴史時代の噴出物の大半が 52–54 wt % であるのに比べ有意に低い値を持つ（図 7）。火山灰試料が多少 Al₂O₃ および CaO などに乏しいのは，遊離結晶として斜長石斑晶を取り去られたためと推定される。化学組成の均質性は，これら粒度の違う噴出物が，同一のマグマが異なる程度に破砕固結した同一起源の噴出物であることを示唆する。

4) 火山灰およびカリフラワー火山弾の鉱物分析

肉眼観察で本質物質と判断した黒色火山灰粒子（0.1–0.15 mm および 1–2 mm），火山礫（3 cm）および火山弾（13 cm）について，EPMA を用いた斑晶鉱物および石基鉱物の化学分析を行った。

火山弾，火山礫および 1–2 mm の黒色火山灰粒子は，斑晶鉱物として斜長石，かんらん石，普通輝石を含む。石基には，20 μm 以下の微結晶（斜長石，輝石，磁鉄鉱）と径 100 μm 以下の気泡が多数存在し，ガラス部分は非常に少ない（図 3F）。細粒（0.1–0.15 mm）の黒色火山灰粒子の石基も同様な組織を持つ（図 3G）。

斜長石斑晶（0.1–1 mm）の内部は比較的均質（An = 84–94）で，10–30 μm の Ab 成分に富む周辺部

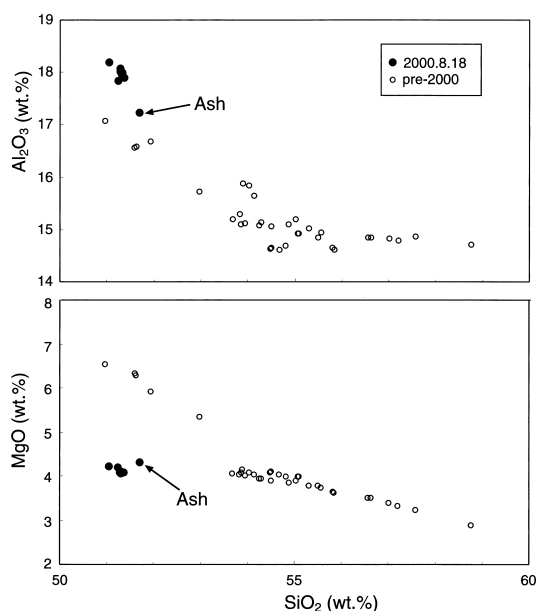


図 7 8 月 18 日噴出物の全岩化学組成。（川辺・伊藤・高田・斎藤・中野，未公表資料）

Fig. 7 Bulk chemical compositions of the essential materials of August 18. (Kawanabe, Itoh, Takada, Saito and Nakano, unpublished data)

を持つ。かんらん石微斑晶（0.3 mm >）は，広く均質な中心部（Fo = 69–71）を持つ。単斜輝石微斑晶（0.15 mm >）は，弱い正および逆累帯構造を示し，中心部の組成は En = 42–47，Wo = 36–41 を示す。

石基の斜長石の化学組成は、火山弾（13 cm）から細粒（0.1–0.15 mm）の黒色火山灰粒子までサイズにかかわらず $An = 60 - 70$ の範囲に集中している（図 8）。また、石基の輝石も、サイズにかかわらず同様な化学組成範囲を示している（図 8）。鉱物分析の結果も、火山弾、火山礫および黒色火山灰粒子は、同一起源のものであると考えて矛盾がない。

IV. 8 月 18 日噴火の解釈

1) 本質マグマ物質の存在

前章で述べた数々の特徴から、我々はカリフラワースト火山弾および黒色火山灰は、2000 年三宅島火山噴火の直接の要因となったマグマそのものであると判断した。その理由は、

1. 直径 40 cm の火山弾から 1 mm 程度の火山灰まで、肉眼および顕微鏡的特徴がきわめて類似しており、全岩化学組成もきわめて一致している。これらの特徴から、これらの噴出物は同一の起源を有していると判断される。これらすべてが火口内に存在した過去の噴出物と考えるより、今回の噴火で様々な大きさに破碎された本質マグマ物質と考える方が合理的である。

2. 火山弾は、着地時の圧力で塑性変形して扁平になったと推定される。さらに、着地後の遅延発泡により、上面に向かって膨張したような形態も示す。従って、火山弾の内部は着地時に塑性変形できるほど高温であったと判断される。

3. 火山弾の周辺の火山灰は、着地後の火山弾により加熱され高温酸化したため黄褐色に変化した。酸化再現実験結果と熱伝導計算から、着弾時に火山弾内部は 1000 °C はあったと推定される（Miyagi *et al.*, 2000）。

4. 火山弾の空隙に入り込んだ硬石膏が、石基と化学反応している。石基の化学組成が変化するためには、硬石膏を取り込んだ時点で火山弾がまだ未固結状態で十分高温である必要がある。

8 月 18 日の噴火では、噴煙は 15000 m まで上昇した。このような高い噴煙柱をあげるための爆発エネルギーを、単純に水蒸気爆発に求めるには大量の水蒸気の発生が必要であり、そのための気化

熱を何に求めるかが問題となる。この点で、今回の噴火が、浅所へ上昇してきたマグマと火山体下の滞留地下水層との相互反応によるマグマ水蒸気爆発と考えると、高い噴煙柱をあげる爆発エネルギーも容易に賄うことが可能である。

今回のカリフラワー状噴石は、小さな気泡に富むが全体に緻密で、マグマが水に触れて急冷したような外形組織を示し、マグマ水蒸気噴火に特徴的な形態を示す。一方で、火山灰も含め結晶度は比較的高くガラスの量は少ない。マグマは、8 月 18 日より前に上昇し、いったん火山体下で滞留し、脱水作用に伴い結晶化を進行させていたと考えられる。地下水がマグマからの熱を受け気化し準安定的な蒸気フィルムを作っていたと推定される。それが、8 月 18 日の噴火で安定が崩れ、マグマが破碎されてマグマと地下水の接触面積が急増し、急激な地下水の気化が起こり、高い噴煙柱を形成するような噴火になったと推定される。結晶度の高い玄武岩質本質岩片を含むマグマ水蒸気爆発は、1989 年の東伊豆沖海底噴火で起こっており（Yamamoto *et al.*, 1991）、同様のプロセスが働いた可能性がある。

2) 硫黄に富む噴火

8 月 18 日の噴火では、前述のように大量の硬石膏が放出された。それとともに大量の SO_2 ガスが火山ガスとして放出された。それ以降、高濃度の SO_2 に富む火山ガスが放出されるようになり、9 月中旬以降は、1 日あたり数万トンもの SO_2 が連続的に放出されている（風早ほか, 2001）。風早ほか（2001）にあるように、高濃度の SO_2 ガスはマグマから由来すると考えるほかなく、マグマ中に 2500 ppm 程度の SO_2 が含まれており、かつその全量が火山ガスとして放出されたとすれば、1 日あたり 1000 万トンオーダーのマグマが上昇脱ガスしている計算になる。

V. マグマ上昇モデル

三宅島においては、7 月上旬よりステップ状に山頂火口が陥没を繰り返し、8 月 18 日噴火の前までに、すでに直径 1.5 km、深さ 500 m の陥没火口が形成されていた。その間の噴出物量は陥没量に比

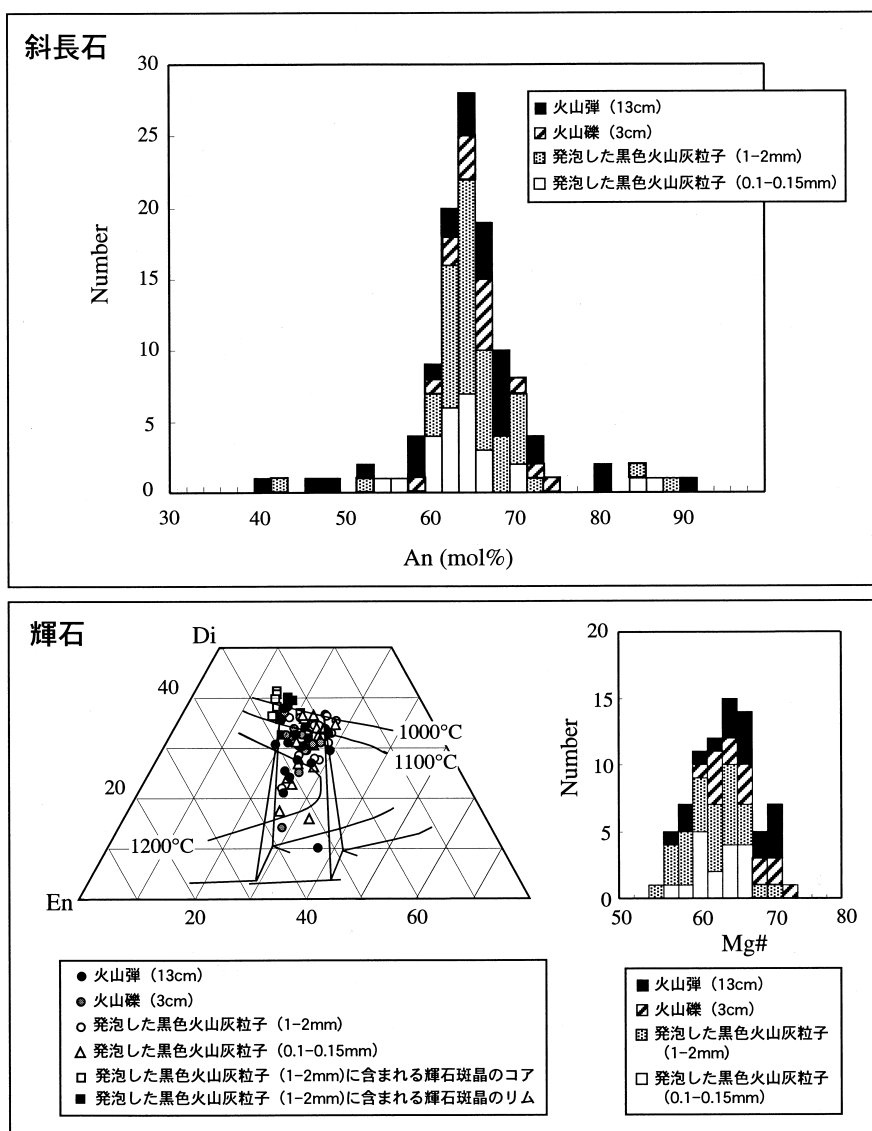


図 8 8月18日噴出物の斜長石および輝石の化学組成。(斎藤・伊藤・高田, 未公表資料)

Fig. 8 Chemical compositions of plagioclase and pyroxene of eruptives of August 18.
 (Saito, Itoh and Takada, unpublished data)

べ無視できるほど小さく、この陥没現象は、物が火口外に飛び出ることなく山頂下の物質が欠損した結果であることは疑いの余地がない。7月上旬の陥没時に山頂地形を保ったまま陥没したことから、少なくとも直径 500 m のほぼ円筒状の物質が真っ直ぐ下に落ちたと考ええると都合がよい。これ

までに報告されている多くの測地学的、地球物理学的観察から、6月の下旬以降、山頂下にあったマグマは、北西方向に岩脈となって移動したと考えられる(Yamaoka *et al.*, 2000; 古屋, 2001)。この質量移動を補うために山頂陥没したと考える点では、多くの研究者で一致している(Kazahaya *et*

al., 2000; 中田ほか, 2001; 古屋ほか, 2001)。しかし、その陥没の仕方に多少の異論があり、山頂下に大きな空間が発生し、そこに熱水蒸気が充満して、その過剰圧により8月中下旬の爆発的噴火が起こったという考え方もある(大島, 2000; 中田ほか, 2001)。しかし、我々は、山頂部の物質が直径500 m以上の円柱(ピストン)となって環状割れ目(シリンダー)の内側を陥没したと考えるモデルを提唱する(Kazahaya et al., 2000)。ピストンとシリンダーの間を通過して上昇したマグマと山体内の地下水との相互作用により、少なくとも8月中旬以降の噴火が引き起こされていると推定する。

環状の陥没火口を作りやすい潜在的要因

三宅島火山の火山体下の力学的構造を考える際に重要な要素が二つ考えられる。一つは、山頂下における高密度岩体の存在である。過去の三宅島の側噴火においては、しばしば直径1 cmを超える斜長石の巨斑晶とかんらん石斑晶が集合体となって放出されることが知られている(一色, 1960)。これらの結晶塊は、玄武岩マグマが地下浅所で結晶分化をした際にマグマポケットの底に沈積した沈積岩の破片であると推定されることから、山体内に密度3を超えるような高密度の岩体が存在していた可能性がある。通常の火山体の密度は2.5を超えることはないので、この高密度岩体は重力的に不安定な物質として存在することになる(高田, 2001)。過去の三宅島火山の側噴火で上述のはんれい岩質捕獲岩片がしばしば放出されることから、沈積岩から成る高密度岩体が、現在のマグマ溜まりより浅所に存在する可能性は高い。

もう一つの要因とは、中心部から放射状に伸びる過去の噴火火口列の存在である(一色, 1960; Isshiki, 1964)。三宅島火山の山体内には、割れ目噴火の火道を充填して固結した幅1~数m程度の放射岩脈が多数存在していると考えられる(中村, 1984)。岩脈が貫入する度に、島の体積は岩脈の幅×長さ分だけ増えるため、放射状岩脈の貫入による体積増加を補うために、島は陥没により表面積を増やすことを余儀なくされる。岩脈の卓越方向に指向性があるハワイなどではリフト帯となるが、

放射状割れ目噴火を起こす多くの玄武岩質火山島(例えば、レユニオン、ガラパゴスなど)ではリフト帯を作らず山頂部にほぼ環状の割れ目ないし陥没火口が形成されやすい(中村一明私信, 1980)。従って、三宅島は山頂に円形の陥没地形を作りやすい潜在的要素を有していたと考えられる。

以上の2点を結びあわせると、何らかの原因で環状割れ目が形成されると、山体内の高密度沈積岩体が環状割れ目の内側を重力落下することになる。今回、比較的大量のマグマが短時間のうちにマグマ溜まりから側方に流れたため、それより浅いところにある山体が急激に重力的に不安定になり、環状割れ目を形成して陥没したと考えるのは、推定される三宅島の山体構造を考えると定性的に無理のないモデルと言えよう。

浅所へのマグマの上昇の必要性

我々は、マグマが三宅島の山頂直下の比較的浅所(陥没火口底下500 m~1 km)に上昇してきたと考えている。その理由は、大きく二つである。一つは、噴出物と噴火形態からの要請である。8月18日の噴出物の観察から、同噴火において噴出物の約40%は本質マグマ物質だったと推定している。これらのマグマが山体直下、おそらく海水面付近の地下水と接触してマグマ水蒸気爆発を起こしたと考える。もう一つは、8月18日以降の大量のSO₂に富む火山ガスの連続放出である。ハワイやアイスランドにおいては、玄武岩マグマからのSO₂の脱ガスは、数十気圧程度より浅くなるまでは起こらないことが知られている(Moore and Schilling, 1973; Gerlach, 1986; Garcia et al., 1995)。斑晶かんらん石に含まれるメルト包有物中のSO₂量は、ハワイも三宅島も0.25 wt %程度とほぼ同じであり、元々のマグマ中のSO₂量も同程度であると考えられる(斎藤元治, 未公表)。三宅島のマグマのSO₂に対する飽和圧力は今のところ不明であるが、同じ玄武岩マグマであるハワイと同程度であるとすれば、マグマ中にほぼ同量含まれるSO₂は、ハワイと同様数十気圧即ち地表下数百mまでは、飽和することなくマグマ中に溶解したままの状態であることになる。大量のSO₂がマグマに由来するのであれば、マグマは非常に浅いところまで上昇

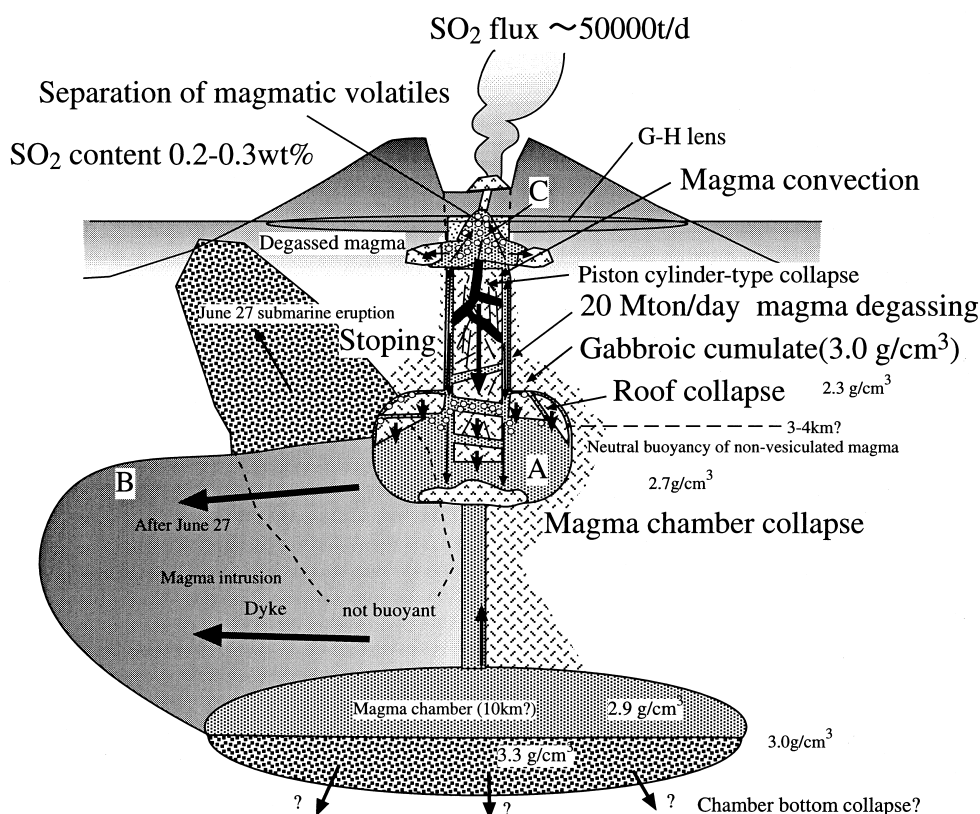


図 9 三宅島火山マグマプロセスモデル図 (Kazahaya *et al.*, 2000).
 A : 上部マグマ溜まり, B : 三宅島北西方向へのマグマ移動, C : マグマヘッド,
 G-H lens : 帯水層 (Ghyben-Herzberg lens)

Fig. 9 Schematic magmatic process of Miyakejima volcano (Kazahaya *et al.*, 2000)
 A : upper magma chamber, B : lateral magma intrusion toward Northwest, C : magma head,
 G-H lens: underground water reservoir (Ghyben-Herzberg lens)

して、SO₂を脱ガス中であると考えざるをえない。
 マグマ上昇モデル

以上のことを考慮に入れて、我々が提出したマグマ上昇モデルを図9に示す。6月下旬に三宅島西側に上昇貫入したマグマは、27日に一部海底に噴出した。その後、それとは別に、より深部において相当量のマグマが三宅島北西方向に貫入して流れ、三宅島直下のマグマ溜まりにおいて質量欠損が生じた。その際、マグマ溜まりは減圧したため、発泡し密度が低下した。それにより重力不安定が加速され、過去のマグマ貫入などによりマグマ溜まりの上盤に形成されていた密度の高い斑れ

い岩質沈積岩類を含む天井が崩壊した。マグマ溜まりの上盤は環状に割れ、割れ目の内側がピストン状のブロックとしてマグマ溜まり内に沈降することにより、雄山頂上部の陥没が開始した。ピストンの壁においては、割れ目の発生によりマグマがさらに減圧・発泡し、それによる密度減少に伴い上昇する。上昇したマグマは、空隙に富む火山体を構成している山頂直下500–1000m程度の深度まで達した段階で、周囲の地殻と密度的に釣り合い上昇を停止した。そして、火山体内に存在する帯水層と接触し、水蒸気爆発ないしマグマ水蒸気爆発を引き起こした。8月18日には最大規模の

噴火が発生し、8月29日には、きわめて弱いながらも火砕流が発生するに至った。その間もマグマの脱ガスにより火山ガスは供給されていたが8月初旬までは山体の海水準付近に形成されている帯水層にガス成分は吸収され、火山ガスは放出されなかった。8月中旬以降は帯水層そのものが徐々に高温化し、最終的に地下水がガス化し、マグマガスも地下水に吸収されることなく、放出されるようになった。脱ガスしたマグマは、密度を増し沈降を開始する。一方、地下深部からは発泡マグマが上昇を続け、マグマ対流システムが確立したため、火山ガスの連続的な放出が継続する事態となった。マグマ中の SO_2 濃度を0.25 wt%とし、かつ1日5万トン規模（風早ほか、2001）で連続的に放出されている SO_2 はすべてマグマ起源であるとすれば、それが完全に脱ガスするとしても最低2千万トン/日のマグマが上昇および脱ガスし続ける必要がある。8月下旬から5ヶ月以上にわたり連続的に高濃度 SO_2 ガスが放出されている訳であるから、2001年1月現在までに上昇・脱ガスしたマグマの総量は、30億トンあるいは 1 km^3 程度になると推定される。

VI. ま と め

三宅島2000年噴火の最大規模の噴火である2000年8月18日の噴出物の分布、産状、岩石・鉱物記載を行い、噴煙柱を約15000mの高度までもたらした噴火がマグマ水蒸気爆発であったことを明らかにした。その後、連続的に放出されている高濃度の SO_2 ガスの起源も考慮に入れて、今回の三宅島火山活動におけるマグマ上昇プロセスを構築した。その主な概要は以下のようにまとめられる。

- 1) 8月18日の噴火は、島の南西部を主軸として硬石膏に富む灰色火山灰を降下させたあと、南側を中心に噴石を放出した。
- 2) 火山灰の約40%は角ばった黒色スコリア片であり、細かい気泡を持つ。また、特徴的な外形を持つ直径1–40cmのカリフラワー状火山弾が認められ、黒色火山灰と同様な石基組織、全岩化学組成、鉱物組成を持ち、これらは同じマ

グマに由来すると考えられる。

- 3) 火山弾は、野外での産状および付着する火山灰、火山豆石を高温酸化させていることから、着地時には高温であったと判断される。
- 4) 以上の特徴から、8月18日の噴火は、マグマ物質を約40%含むマグマ水蒸気爆発であったと推定される。
- 5) その後、高濃度の SO_2 を含む火山ガスが連続的に放出されており、マグマが山頂下浅部まで連続的に上昇していると考えられる。
- 6) 6月下旬以降三宅島西側海域方向へ大量のマグマが貫入流出したため、マグマ溜まり上部の高密度岩体が密度不安定になり環状割れ目を生じながらピストン状に沈降した。その際、マグマが減圧発泡してピストンの壁沿いを上昇し、三宅島浅部において地下水と接触してマグマ水蒸気爆発を起こした。マグマは、対流システムを確立し、地下浅所で連続的に SO_2 を脱ガスしている。

謝 辞

三宅島火山2000年噴火の研究に当たっては、多数の諸機関の各位に多大なるご尽力を頂いている。気象庁、東京都、海上保安庁、自衛隊などの関係各位には、三宅島の現地調査、ヘリコプター観察、ガス観測などにおいてご便宜を図っていただいている。また、東京大学地震研究所の中田節也教授をはじめとする大学の地質研究チームとは、現地調査を一部共同で行うなどご協力を頂いた。また、同笹井洋一助教授には現地調査の際にご便宜を頂くと共に、ご議論いただいた。また、噴火予知連絡会メンバーをはじめとする多くの火山研究者とは、様々な場で噴火機構についてご議論いただいた。地質調査所の三宅島噴火特別研究チーム結成および実行に当たっては、通商産業省工業技術院（当時）のご配慮、ご支援を頂き、地質調査所においては小玉喜三郎所長をはじめとする関係各位にご支援、ご協力を頂いた。中野 俊主任研究官からは過去の三宅島噴出物の全岩組成に関する未公表資料を提供していただいた。以上の方々に厚くお礼する。

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．

- Garcia, M.O., Hulsebosch, T.P. and Rhodes, J.M. (1995) Olivine-rich submarine basalts from the southwest rift zone of Mauna Loa Volcano; Implications for magmatic processes and geochemical evolution. *Geophysical Monograph*, 92, 219–239.
- Gerlach, T.M. (1986) Exsolution of H₂O, CO₂, and S during eruptive episodes at Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, 91, 12177–12185.
- 一色直記 (1960) 5 万分の 1 地質図「三宅島」および同説明書。地質調査所, 85p.
- Isshiki, N. (1964) Mode of eruption of Miyakejima volcano in historic times. *Bull. Volcanol.*, 27, 29–48.
- 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, i–viii.
- Kaidu, 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, ix–xviii.
- Kazahaya K., Uto, K., Shinohara, H., Saito, G., Hirabayashi, J., Mori, H., Matsushima, N., Takada, A. (2000) Magmatic processes of the 2000 Miyakejima activity, Japan: A stoping model. *EOS*, F1259.
- 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一。地学雑誌, 110, 271–279.
- 気象庁地震火山部・三宅島測候所 (2000) 三宅島 2000 年火山活動の概要。日本火山学会講演要旨集 2000 年度秋季大会, 12.
- Miyagi, I., Tomiya, A., Hoshizumi, H., Kawanabe, Y., Itoh, J., Takada, A., Nakano, S., Uto, K. and Yamamoto, T. (2000) Petrological characterization of the 2000 Miyakejima ash: Identification of essential particles. *EOS*, F1259.
- 宮城磯治・東宮昭彦・星住英夫・伊藤順一・川辺禎久・佐藤久夫・斎藤元治・濱崎聡志・中野 俊・高田亮・山元孝広・宇都浩三・森下祐一・木多紀子 (2001) 三宅島 2000 年噴火・噴出物編一。地質ニュース, 557, 7–14.
- Moore, J.G. and Schilling, J.G. (1973) Vescicles, water and sulfur in Reykjanes ridge basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 41, 105–118.
- Nakada, S. and Fujii, T. (2000) Sequence and interpretation of caldera-forming event at Miyakejima volcano, Japan. *EOS*, F1258.
- 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—山頂陥没口と噴出物の特徴—。地学雑誌, 110, 168–180.
- 中村一明 (1984) 三宅島の側火山分布と地殻応力場の性質。火山 (三宅島噴火特集), 29, S16–S23.
- 大島 治 (2000) 三宅島火山 2000 年噴火の経緯と噴火機構の考察。日本火山学会講演要旨集 2000 年度秋季大会, 4.
- Saito, G., Kawanabe, Y., Uto, K., Takada, A., Itoh, J., Hoshizumi, H., Yamamoto, T., Tomiya, A., Miyagi, I., Satoh, H. and Hamasaki, S. (2000) Pre-eruptive magmatic eruption of Miyakejima volcano on August 18, 2000: Petrological evidence. *EOS*, F1259.
- Sheridan, M.F. and Wohletz, K.H. (1983) Hydrovolcanism: Basic considerations and review. In Sheridan, M.F. and Barberi, F. eds.: Explosive volcanism. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 17, 1–29.
- 白尾元理・中田節也・金子隆之・長井雅史・嶋野岳人・下司信夫・野上健治 (2000) 三宅島 2000 年噴火でできた海底火口群の潜水艇観察。日本火山学会講演要旨集 2000 年度秋季大会, 5.
- 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.
- 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, xix–xxvi.
- Walker, G.P.L. (1971) Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *J. Geol.*, 79, 696–714.
- Walker, G.P.L. (1973) Explosive volcanic eruption: A new classification scheme. *Geol. Rundsch.*, 62, 431–446.
- Yamamoto, T., Soya, T., Suto, S., Uto, K., Takada, A., Sakaguchi, K. and Ono, K. (1991) The 1989 submarine eruption off eastern Izu Peninsula, Japan: Ejecta and eruption mechanisms. *Bull. Volcanol.*, 53, 301–308.
- Yamaoka, K., Kimata, F., Fujii, N., Kudo, K., Takai, K., Kato, T., Tabei, T. and Nakano, S. (2000) Long-lasting dike intrusion causing large crustal deformation and active earthquake swarm in Izu volcanic islands, Japan. *EOS*, F1260.

(2001 年 1 月 30 日受付, 2001 年 3 月 14 日受理)