

## 最近の噴火活動と噴火予知（物理観測の立場から）

渡辺秀文\*

### Prediction Research on Recent Volcanic Eruptions: A View from Geophysical Observation

Hidefumi WATANABE\*

In this report, we review prediction researches on the recent eruptions at Usu and Miyakejima volcanoes, based on three points of view: 1) basic understanding of magma-plumbing system, 2) detection of magma accumulation processes, 3) detection of magma movements by extensive observations.

Each volcano showed contrasting long-term precursors. Usu volcano showed no remarkable inflation before the beginning of seismic swarm activity while Miyakejima showed quasi-continuous inflation. Before both eruptions, we could clearly detect remarkable precursors and contributed to dispatch actual warnings leading to the quick evacuation of inhabitants. After the beginning of the eruption, however, it was difficult to predict the time developments of the activities, especially in case of Miyakejima volcano where a caldera collapse was accompanied by repeated explosive hydromagmatic eruptions, and followed by a huge amount of continuous degassing.

In order to make a successful long-term prediction or to predict a scale, style and time developments of volcanic eruption, we further need to elucidate magma-plumbing system and to understand particular processes operating in magma.

#### 1. はじめに

噴火予知の重要な5要素として、時期・場所・規模・様式・推移の予測がある。これまでの観測研究の蓄積により、適切な観測を行えば、火山活動の状態をかなり正しく把握でき、短期的な噴火の発生時期、場所をある程度予測できるまでになっている。しかし、中長期的な時期の予測や規模・様式・推移の予測は依然として困難な課題である。

噴火予知の5要素を実現するための戦略的研究課題として、マグマ供給システムの理解（マグマ溜りや火道などの構造、マグマ混合や組成の変化など）、噴火準備過程の把握（マグマ供給様式、揮発性成分の蓄積など）、マグマの動態の正確な把握（マグマの移動と地下水との相互作用など）が挙げられる（渡辺, 1997）。以下では、火山噴火予知計画が1974年に発足して以降ともに2回目の噴火であり、噴火予知計画の成果が試されることになった有珠山2000年噴火と三宅島2000年噴火について、こ

れらの観点からみた成果と課題を報告する。

#### 2. 有珠山2000年噴火

##### 2-1 噴火準備過程の把握

有珠山では、1977年噴火後も継続していた山頂直下潜在ドームの隆起活動が1984年4月に停止した。その後山体変動は収縮沈降に転じ、2000年3月27日の群発地震活動開始まで、明瞭な山体膨張は観測されなかった。有珠山周辺の地震活動も1984年以降低調であったが、1995年頃から有珠山山頂～北麓で発生する地震が増加傾向となった（Fig. 1）。一方、北麓の明治新山（四十三山）では1988年頃から噴気温度の上昇が観測されていた（室蘭地方気象台, 1999）。また、有珠山山頂域地下からのCO<sub>2</sub>フラックスが1998年から1999年にかけて約3倍に増加し、2000年噴火後は激減したことが捉えられた（Hernandez *et al.*, 2001）。

以上の知見および次節に述べる群発地震活動開始後に観測された顕著な地殻変動は、後述するように、有珠火山におけるマグマ供給システムの理解にとって重要な情報を与えるものであった。

##### 2-2 マグマの動態把握

3月27日に山頂西部で群発地震が始まり、29日夕方

\* 〒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.  
e-mail: watanabe@eri.u-tokyo.ac.jp

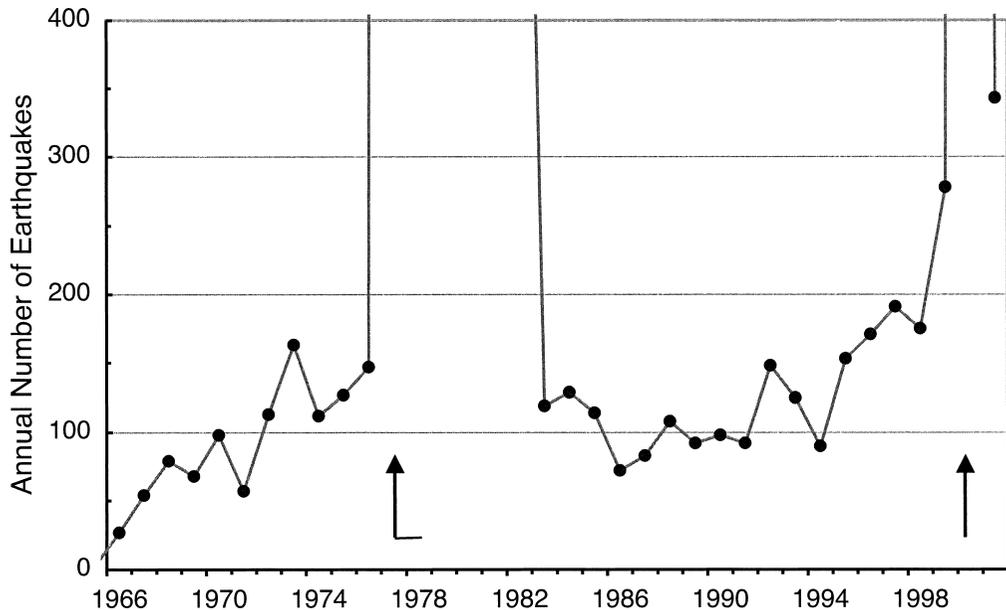


Fig. 1. Annual number of earthquakes that occurred around Usu volcano (data after JMA). Arrows indicate the eruptions in 1977–78 and 2000.

から 31 日午前にかけて、 $M$  3~4 のやや規模の大きな地震が山頂から南西山麓にかけて多発した。また、山頂西部では地表の亀裂も確認された。これらの観測結果に基づき、火山活動状況に関する情報にとどまらず、山頂西部での火砕流噴火ないし北西山麓でのマグマ水蒸気爆発が発生する可能性があるとのシナリオが示され、迅速な住民避難が実施された。

山頂西部を中心とする隆起膨張は、固定および臨時の GPS 観測、測角、水準測量により捉えられた (森・宇井, 2001)。これらの観測データから、変動源の深さは 2~3 km、山体膨張体積は約 5~6 千万立方メートルと推定される。一方、山頂西部を中心とする隆起膨張と同期して、国土地理院 GPS 観測網により広域に及ぶ収縮が捉えられた (村上・他, 2001)。これらの観測結果は、深部マグマ溜り (深さ~10 km) から山頂西部地下へのマグマの上昇貫入を示唆するものであった。

3 月 31 日 13 時 10 分に北西山麓で噴火が発生し、地質岩石学的調査分析により、噴出物は軽石を含み約半分が本質物質であり (東宮・他, 2001)、深さ約 2~3 km で粉碎し噴出したことが分かった (東宮・他, 2001; 鈴木・中田, 2001)。

噴火開始後は、山頂西部を中心とする隆起および広域に及ぶ収縮は停止し、噴火地点近傍を中心としてマグマ貫入による局地的な隆起膨張が続き、水蒸気爆発が繰り返して発生した。北西山麓の隆起活動は 4 月 3 日まで加速したが、その後急速に (指数関数的に) 低下し、7 月下旬

以降停止した (森・宇井, 2001)。

### 2-3 マグマ供給システムとドーム形成メカニズム

有珠山 1663 年噴火およびそれ以降に繰り返された噴火による噴出物の岩石学的研究に基づき、有珠山の地下にはデイサイト質マグマ溜り (深さ~6 km) と玄武岩質マグマ溜り (深さ~10 km) があり、1769 年以降の噴火は、下部の玄武岩質高温マグマが上昇して、上部のデイサイト質マグマを加熱することにより引き起こされたと考えられていた (Tomiya and Takahashi, 1995)。

前述の観測結果を総合すると、当初、デイサイトマグマは山頂西部地下 2 km 付近の深さまで上昇したが山頂へは噴出できず、北西山麓へ向けて割れ目が形成されたため、急減圧によって自破砕した発泡マグマが北西山麓から噴出したものと考えられる。その後、この割れ目を使ってマグマの貫入が継続したものと解釈される。

また、マグマ供給システムに関する重要な観測結果として、噴火開始後から 4 月中旬までの期間に、周期 12 秒の長周期振動が広帯域地震計によって捉えられたことが注目される。その振動源は山頂南西部の地下 5~6 km の深さに推定されること、振動振幅と北西山麓の隆起速度とが時間的に類似した変化をしていること、および振動メカニズムは体積成分が卓越することなどから、この 12 秒の振動はデイサイトマグマ溜りからのマグマの輸送に伴って励起されたものと解釈された (Yamamoto *et al.*, 2002)。さらに、噴火前後の群発地震を用いた 3 次元速度構造インバージョンによって、有珠山の地下約 6 km の

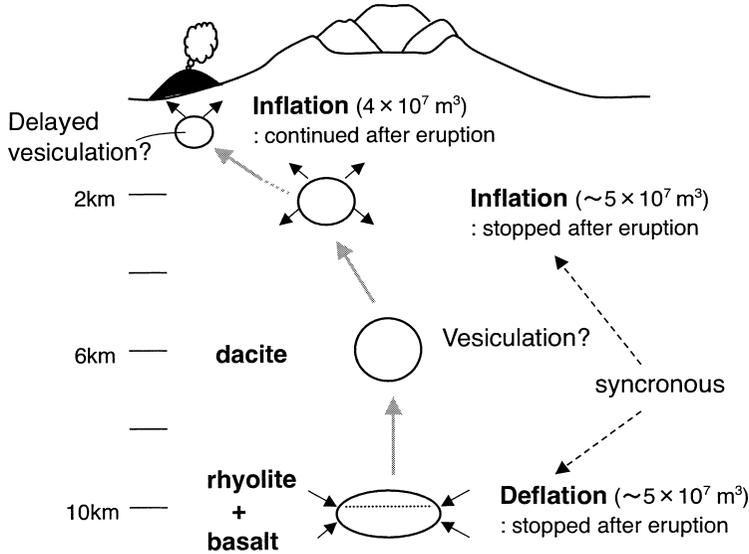


Fig. 2. A schematic image of the magma plumbing system of Usu 2000 eruption obtained by comprehensive observation.

深さに低速度領域が検出された（鬼澤・他，2002）。

噴火の準備過程に関する重要な観測事実は、群発地震活動が始まる前には明瞭な山体膨張が観測されず、群発地震活動開始後に、山体浅部へのマグマの上昇貫入と深部マグマ溜まりからのマグマの上昇（深部の収縮）が連動したことである。噴火後の静穏期にも深部からのマグマの供給・蓄積による山体膨張が観測されている、マウナ・ロア、伊豆大島、三宅島などの玄武岩質火山との違いが注目される。また、噴火開始後に、山頂西部を中心とする隆起膨張と広域に及ぶ収縮が停止した後に、北西山麓の局地的な隆起膨張が継続したことは、有珠火山における噴火後も継続する隆起活動のメカニズム解明にとって重要な示唆を与える。

以上に述べた有珠山 2000 年噴火に際して得られた観測事実は、山麓での噴火とドーム形成のメカニズムおよび有珠火山のマグマ供給システムの解明にとって重要な知見を与えるものである。有珠山 2000 年噴火のマグマ供給システムとドーム形成メカニズムについての模式図を Fig. 2 に示す。今後の重要な観測研究課題としては、想定されている浅部・深部マグマ溜りの探査、および浅部マグマ溜りの動態を把握し噴火準備過程を明らかにすることが挙げられる。

### 3. 三宅島 2000 年噴火

#### 3-1 噴火準備過程の把握

三宅島火山は、1469 年以来数十年ごとに山腹割れ目噴火を繰り返し、近年の噴火間隔は約 20 年であった。前回

の 1983 年噴火後に水準測量が繰り返され、噴火に伴い沈降した南西部がその後隆起を続けていることが捉えられた。変動源の位置などの詳細を明らかにするため、1990 年に実施された集中総合観測では GPS 観測が初めて実施され、1995 年集中総合観測における再測定により山頂南山腹を中心とする顕著な山体膨張が捉えられ、変動源の深さは約 9.5 km と推定された（三ヶ田・他，1996）。その後 GPS 連続観測が行われるようになり、1997～1999 年の期間における GPS 観測および水準測量データのインバージョンでは、膨張源の位置は山頂の南西 2 km の地下  $9.5 \pm 3.6$  km と推定された（西村・他，2002）。これらの結果は、1983 年噴火後の水準測量により判明していた三宅島南西部の相対的な隆起とも調和し、三宅島火山におけるマグマの蓄積過程を初めて明瞭に捉えたものであった。また、全磁力観測により、南山腹の地下浅部における噴火前の温度上昇も検知されていた（笹井・他，2001）。

#### 3-2 マグマの動態把握

三宅島 2000 年活動は、6 月 26 日の三宅島南山腹における群発地震の発生で開始した。その後、26 日夜から 27 日にかけて震源が三宅島西方へ移動した。これに伴い、三宅島西方海域へのダイク貫入を示す地殻変動も観測され、27 日午前には、三宅島の西側海域で小規模な海底噴火が発生し、島内の地震活動は低下した。ところが、7 月 3 日頃から山頂直下の地震が発生し始め、8 日には山頂部が大きく陥没し少量の火山灰を噴出した。この時点までは、観測・調査によってマグマの挙動をかなりよく捉

えることができたと言える。

しかし、その後の展開は予想を超えるものであった。山頂部の陥没は8月末まで進行し、最終的に直径1.6 kmのカルデラが形成された。この間、水蒸気爆発・マグマ水蒸気爆発が繰り返し発生した。8月18日に最大規模のマグマ水蒸気爆発が発生し、8月29日には低温の火砕流も発生したことから、噴火予知連絡会（伊豆部会）は、より強い火砕流を伴う噴火が今後も発生する可能性があるとの見解を公表した。これを受けて、9月初めには全住民の島外避難が実施された。8月下旬になると二酸化硫黄ガスの放出がめだつようになり、9月中旬以降急増し、最盛期の10月～12月には日量4万トンを超えた。2002年12月現在も日量数千トンの放出が継続している。

活動当初の三宅島から西方海域へのダイクの貫入は、地震、GPS・傾斜、重力などの総合的な観測によって検知され（酒井・他, 2001; Nishimura *et al.*, 2001; 藤田・他, 2002; 古屋・他, 2001）、27日に西方沿岸で発生した海底噴火については、マルチビーム・サイドスキャンソナーや潜水艇を用いた調査が行われ、海底で火口列と新鮮な噴出物が確認された（中田・他, 2001）。また、7月8日の山頂陥没に至る過程に関しては、地震、電磁気、重力観測により、地下での前駆的な陥没の進行が捉えられた（酒井・他, 2001; 笹井・他, 2001; 古屋・他, 2001）。

7～8月の陥没カルデラ形成に関しては、ヘリコプターからの観察、航空写真測量、航空機搭載合成開口レーダ

(SAR) 観測などにより火口の形状変化が捉えられた。また、陥没に伴うステップ状の傾斜変化（山本・他, 2001）、長周期（50秒）振動（菊地・他, 2001; Kumagai *et al.*, 2001）、自然電位の変動（笹井・他, 2001）などの特異な現象が世界で初めて観測された。さらに、重力絶対・相対ハイブリッド測定の繰り返しおよび連続重力絶対測定が初めて本格的に実施され、カルデラ形成・爆発期における火道内での密度の減少（空隙の増大）、脱ガス期におけるマグマの上昇・下降や地下水の移動などを示唆する重力変化を捉えることができた（Fig. 3: Furuya *et al.*, 2002）。これらのデータから、陥没のメカニズムおよび陥没に伴って発生している火山流体の移動に関する貴重な情報が得られた。

この間繰り返し発生した水蒸気～マグマ水蒸気爆発については、噴出物の地質岩石学的調査分析が迅速に行われ、噴出量は陥没量の数十分の一に過ぎないこと、初期の噴出物には変質鉱物が多く含まれ地下の熱水系の関与を示唆すること、後期の噴出物には本質マグマ物質も含まれることなどが分かった（中田・他, 2001; 宇都・他, 2001）。また、低温の火砕流に類似な現象を引き起こした8月29日の噴火から9月上旬にかけて、噴出物に付着する火山ガス成分の量と組成変化および二酸化硫黄放出量の増大に系統的な変化が見られ、地下水の関与の減少が明らかになった（風早・他, 2001）。

9月以降の火山ガスの大量放出に対しては、わが国では初めて、ヘリコプターを用いた高頻度でのCOSPEC

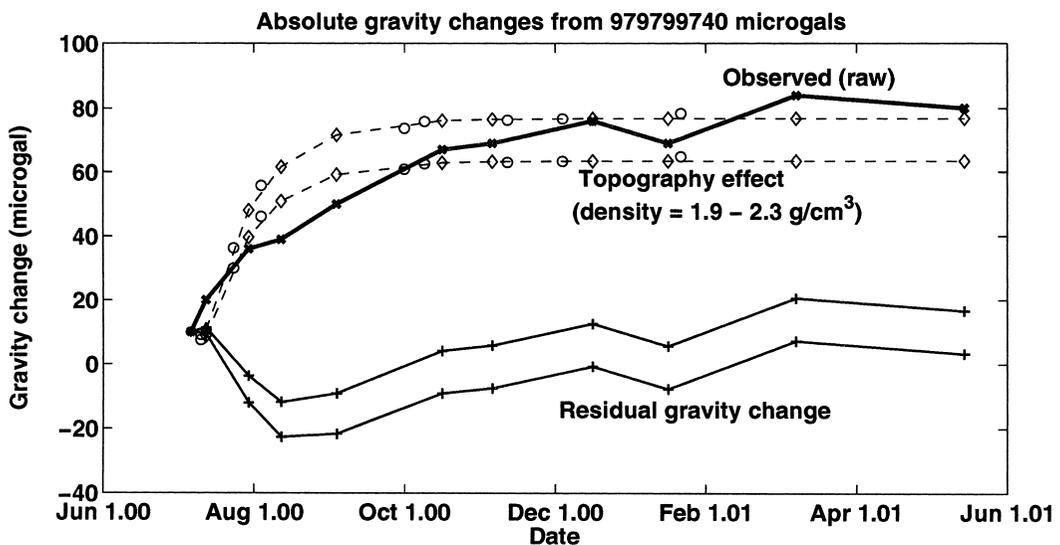


Fig. 3. Absolute gravity changes observed at the north coast of Miyakejima (Miyakejima Weather Station, JMA). Thick solid line indicates observed gravity and thin solid lines residual gravities after correction for the effect of caldera collapse. Note that the topography-corrected gravity data show a clear decrease during the period of active eruptions (Furuya *et al.*, 2002).

による二酸化硫黄ガス放出量測定が実施された。また、ガラス包有物分析により求められたマグマ中のガス成分濃度と二酸化硫黄ガス放出量などから、脱ガスしたマグマの量が見積もられた（風早・他，2001）。さらに、山体の収縮と脱ガス量の比較により、大量脱ガスに伴うマグマの収縮が山体の収縮を引き起こしている可能性が指摘された。これらの観測・解析結果に基づいて、火道内マグマ対流によるマグマ溜りの大規模な脱ガスなどのモデルが提案され（宇都・他，2001）、火山活動の短期および長期予測のための基礎データが提供された。さらに、重力絶対・相対ハイブリッド測定、全磁力観測、比抵抗探査によって、火道内のマグマの上昇・下降や火道周囲の熱水の状態変化を検知することに成功し、三宅島火山の活動状況の評価に資することができた。

今回の活動で特筆されることは、三宅島の火山活動に伴うマグマの移動と西方海域での群発地震活動との関連について詳細な情報が得られたことである。三宅島島内および周辺諸島での地震、GPS、重力観測によって、三宅島と神津島間の海域における開口変位を伴う群発地震活動が三宅島山頂の陥没カルデラ形成と密接な関連があることが明らかになった（酒井・他，2001；西村・他，2002: Fig. 4）。また、海底地震観測グループによって、三宅島-神津島海域における群発地震の震源精密決定と地

下構造を解明するための海底地震計を用いた共同調査が行われ、ダイクの貫入を示唆する板状の震源分布が得られた（酒井・他，2001）。しかし、三宅島の山頂陥没と噴火活動が活発であった2000年6~8月の期間、神津島-三宅島間の開口変位に伴う体積増加量は三宅島の体積減少量（収縮体積と陥没体積の合計）より有意に大きく（西村・他，2002）、三宅島からのマグマの流出と開口変位の因果関係については確定していない。

### 3-3 マグマ供給システム

前述のように、1983年噴火後の水準測量およびGPS観測により、山頂南西山腹を中心とする顕著な山体膨張が捉えられ、変動源の深さは約9.5 kmと推定されていた。また、2000年6~8月の火山活動最盛期には、山頂の南西~南にかけて2つの収縮源が推定され（深さ9.5 kmと3 km）、2000年9月以降の脱ガス期の収縮は、山頂南の深さ3 kmに収縮源が推定されている。これらは、三宅島火山のマグマ供給系を示唆する重要な知見であるが、深部および浅部変動源の大きさ、形状、実体（マグマ/熱水）およびそれらの関連などについては未解明である。

三宅島2000年噴火活動の予測については、噴火の準備過程を把握するという点ではある程度達成できたといえる。しかし、マグマの三宅島外への流出、陥没カルデラの形成および大規模なマグマ水蒸気爆発の発生など、噴火の様式と推移については十分な予測が行えなかった。これは、現状の噴火予測が歴史時代に発生した事例を参考にするとどまっていることと、噴火前に三宅島地下の巨大なマグマ溜りの存在について詳細な情報が得られていなかったことが大きい。このため、想定外の活動に対して、現象を多面的に検討することが不十分となった。マグマ溜りの位置や大きさなどについて詳細な情報が得られていないことは、大量脱ガスの推移を予測する上でもネックとなっている。

また、三宅島地下からのマグマの流出と三宅島-神津島海域での開口変位・群発地震活動との因果関係の解明は、これまでの観測調査結果だけでは情報不足で、困難である。三宅島直下および神津島に至る海域における地殻下部までの構造を詳細に探査することが必要である。

### 4. おわりに

有珠山噴火では噴火前兆現象の推移を確実に捉え、さらに適切な情報発信が行われた結果、噴火前の住民避難につながった。また、三宅島噴火でも、噴火前兆を捉えるとともに、当初のマグマの移動については確実に把握することができた。これらは噴火予知計画発足以来、観測網の整備や予知手法の開発等を通じて培われた大きな

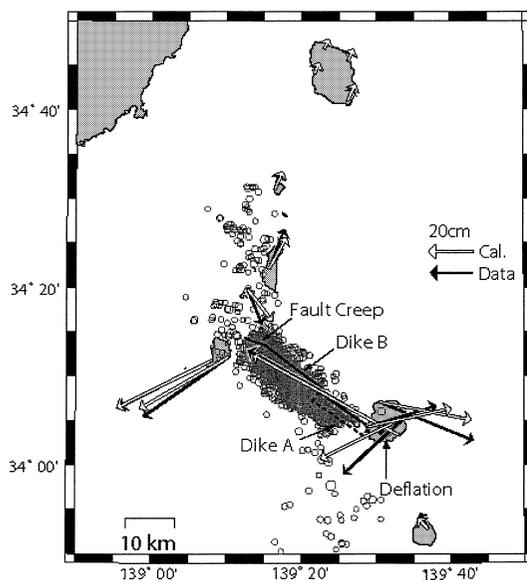


Fig. 4. Optimal fault model of ground deformation that accompanied the Miyakejima 2000 eruption. White and black arrows indicate calculated and observed displacements. Gray circles are epicenters of earthquakes ( $M \geq 3.5$ ) (Nishimura *et al.*, 2001).

成果である。しかし、噴火開始後の推移の予測については依然として解決すべき問題が残されていることも明らかになった。噴火の中長期的予測、様式や推移の予測などの困難な課題を解明するためには、時間空間的に視野を広げた基礎的観測研究が必要である。

三宅島噴火では、全島避難が行われて観測機器への電力供給も断絶し、一時観測が中断する事態が生じた。活動推移の把握をめざして観測を行うためには、長期間の悪条件下でも動作が保証される計測システムやデータ伝送システムの開発・整備の必要がある。また、三宅島における山頂カルデラ陥没とそれに引き続く多量の火山ガスの継続的放出は、わが国の観測研究史上初めて経験した活動様式であり、国外の火山活動との比較研究も重要であることを改めて示している。

火山防災の観点からは、有珠山噴火、三宅島噴火は観測研究と防災機関による監視、行政による防災対応の連携強化が一段と進んだ噴火であるという見方もできるが、この中で噴火時の火山観測研究のあり方に関して重要な問題も提起された。火山活動の危険性を考慮するあまり、必要な区域での調査観測が十分行えなかった面があった。規制区域内での調査と安全確保のあり方などについて早急に検討を進める必要がある。

#### 謝 辞

清水 洋教授および匿名査読者のご意見は、本論文を改善するのに有益でした。記して、感謝いたします。

#### 引用文献

藤田英輔・鶴川元雄・山本英二・岡田義光 (2002) 三宅島火山活動の発端となった岩脈貫入のシナリオ。震研彙報, 77, 67-75.

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.

Furuya, M., Okubo, S., Sun, W., Tanaka, Y., Oikawa, J. and Watanabe, H. (2002) Spatio-temporal gravity changes at Miyakejima volcano, Japan: Implications for caldera collapse, explosive eruptions and magma movement. *J. Geophys. Res.* (accepted).

Hernandez, P. A., Notsu, K., Salazar, J. M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M. and Perez, N. M. (2001) Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. *Science*, 292, 83-86.

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一。地学雑誌, 110, 271-279.

菊地正幸・山中佳子・纈纈一起 (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.

室蘭地方気象台 (1999) 定期火山情報, 第 3 号.

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.

三ヶ田 均・他 (1996) 三宅島での GPS 観測。1996 年度 GPS 合同シンポジウム報告書, 135-137.

村上 亮・小沢慎三郎・西村卓也・多田 堯 (2001) 2000 年有珠山噴火にともなうマグマモデル: GPS 連続観測を主とする地殻変動データによる推定。国土地理院時報, 95, 99-105.

森 濟・宇井忠英 (2001) 2000 年有珠山噴火の地殻変動と噴火活動について。自然災害科学, 19, 383-390.

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一。地学雑誌, 110, 168-180.

Nishimura, T., Ozawa, S., Murakami, M., Sagiya, T., Tada, T., Kaidzu, M. and Ukawa, M. (2001) Crustal deformation caused by magma migration in the northern Izu Islands, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3745-3748.

西村卓也・村上 亮・小沢慎三郎・石本正芳・鷲谷威・矢来博司・多田 堯・海津 優・鶴川元雄 (2002) 三宅島 2000 年噴火前後の地殻変動と変動源の推定—1983 年噴火後から 2001 年 5 月までの収縮・膨張源一。震研彙報, 77, 55-65.

鬼澤真也・大島弘光・森 濟・前川徳光・鈴木敦生・一柳昌義・岡田 弘 (2002) 有珠火山地域の 3 次元地震波速度構造。火山, 47, 495-506.

酒井慎一・山田知朗・井出 哲・望月将志・塩原 肇・卜部 卓・平田 直・篠原雅尚・金沢敏彦・西沢あずさ・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, J.・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.

鈴木由希・中田節也 (2001) マグマ上昇過程における発泡と結晶作用のタイミング—有珠山 2000 年噴火, マグマ水蒸気爆発の例一。震研彙報, 76, 253-268.

東宮昭彦・宮城磯治・星住英夫・山元孝広・川辺禎久・佐藤久夫 (2001) 有珠火山 2000 年 3 月 31 日噴火とその本質物。地質調査研究報告, 52, 215-229.

Tomiya, A. and Takahashi, E. (1995) Reconstruction of an evolving magma chamber beneath Usu Volcano since the 1663 eruption. *J. Petrol.*, 36, 617-636.

宇都浩三・風早康平・斉藤元治・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 (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一。地学雑誌, 110, 257-270.

渡辺秀文 (1997) 次期噴火への戦略。火山, 42, 475-476.

山本英二・鶴川元雄・藤田英輔・岡田義光・菊地昌江  
(2001) 三宅島 2000 年の火山活動におけるカルデラ形  
成期に発生したステップ状傾斜変動. 地学雑, **110**,  
181-190.

Yamamoto, M., Kawakatsu, H., Yomogida, K. and Ko-

yama, J. (2002) Long-period (12 sec) volcanic tremor  
observed at Usu 2000 eruption: Seismological detection  
of a deep magma plumbing system. *Geophys. Res. Lett.*,  
**29**, 9, 10.1029/2001GL013996.