

第3章 この10年の主な地震（1999年～2008年）

1. 三宅島・神津島・新島近海における地震活動（2000年6月～8月）

山岡耕春（名古屋大学大学院環境学研究所地震火山・防災研究センター）

1. 活動の概要

2000年6月26日18時頃から三宅島直下で激しい群発地震活動が始まった。この活動は、1983年の三宅島噴火直前の群発地震活動と酷似しており、噴火が数時間後に差し迫っている可能性を強く示していた。このため気象庁は緊急火山情報を発表し、それを受けて村は住民に避難勧告を発令した。しかし、1983年の噴火とは異なり、陸上でマグマが噴出することなく、マグマの移動を表すと考えられる地震活動は、島の外側の北西方向へと拡大していった。結局マグマの流出は、6月27日に三宅島西沿岸沖で変色水として確認されたにとどまり、ごく小規模なものであった。一方、活発な地震活動はさらに三宅島から北西方向に拡大していき神津島近海にまで達した。7月1日には、一連の地震活動のうち最大のものであるM6.4の地震が神津島東方で発生した。地震活動域の北西方向への拡大は、三宅島からマグマが岩脈となって地下を水平に移動したものと解釈され、一時は神津島での火山活動への影響が心配されることとなった。

ところが、研究者や社会の注目が神津島付近に集まっていたところに、全く予想もしなかった出来事が発生した。それは三宅島におけるカルデラ形成であった。7月はじめから山頂直下での群発地震活動が顕在化していたところ、7月8日18時41分頃に、少量の火山灰噴出とともに山頂が大きく陥没し、直径約800mのカルデラが形成された。カルデラの面積と深さはその後も徐々に拡大していき、ついには直径1.6km、深さ約500mにも達した。カルデラの急速な成長とともに、地下水と高温のマグマとの接触によるマグマ水蒸気爆発が起こり、8月18日の噴火では、噴煙の高さが8000m以上に達するとともに、周辺に噴石を放出した。このような爆発的噴火により、三宅島の噴火活動が全島に被害を及ぼす可能性があることから、9月2日には全島に島外への避難指示が発令された。噴火活動は8月18日の噴火をピークに次第に収まっていったものの、その後は大量の火山ガスが放出され、1日当たりの二酸化硫黄の放出量は5万トンを超えることもあった。火山ガス放出は徐々に減少していったが、大量の放出は長期間継続し、また大量の火山灰による泥流も島内のあちこちで発生していたことから、東京都による防災対策が実施された。安全が確保されて、最終的に島民が三宅島に戻ることが出来たのは、2005年2月であった。この間、実に4年半におよぶ避難生活が続いたことになる。三宅島噴火災害については、東京都

の三宅島噴火災害誌(2007)¹⁾を参照してほしい。また噴火の時系列については、例えばNakada et al. (2005)²⁾を参照すると良い。

2000年の6月から8月まで続いた三宅島・神津島・新島近海の活発な群発地震活動は、かつてわれわれが体験したことの無い三宅島の大きな火山活動を背景としている。また、地震活動は、マグマが岩脈として三宅島から大量に移動したことにより引き起こされた、ひずみ・応力の大きな変化によるとされている。この岩脈の大規模な貫入によって、三宅島・神津島・新島を含む周辺域に大規模な地殻変動をもたらした。さらにこの大量のマグマの移動により、三宅島直下でマグマの圧力が減少し、山頂の陥没によるカルデラ形成につながったと考えられている。この様子を簡単にまとめたのが図1である。

図1には、1999年から2000年の2年間における三宅島・神津島・新島周辺における地震の震源分布、南北方向の震源の時系列、累積地震回数、神津島の南北移動量を示した³⁾。三宅島・神津島周辺の地震活動と地殻変動が非常に良く一致していることがわかる。ここでは、火山学的背景をふまえて、2000年6月から8月の三宅島・神津島周辺での群発地震活動についてまとめる。

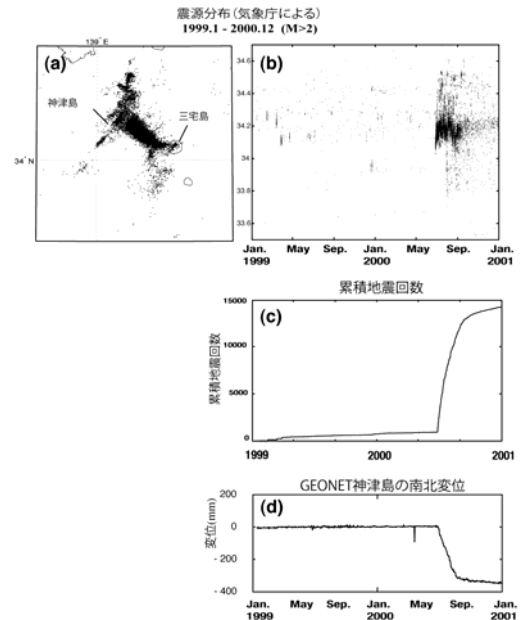


図1 三宅島・神津島・新島近海で発生した地震活動・地殻変動の概要。地震活動と地殻変動の変化が大変良い一致を示している。

2. 震源分布

2.1 震央分布

2000年6月から8月にかけての三宅島・神津島・新島近海の群発地震活動の活動域は海域であり、点在する島の上にしか地震計が設置されていない。海域における地震の震源を正確に決定するためには、活動域の直上に地震計を設置する必要がある。そのため群発地震活動の開始をうけて、東京大学地震研究所、海上保安庁水路部（現海上保安庁海洋情報部）、海洋科学技術センター（現独立行政法人海洋研究開発機構）では活動海域に自己浮上式の海底地震計を設置し、地震活動の観測を実施した⁴⁾⁵⁾。

図2には、酒井・他（2005）⁵⁾により決定された震源分布を示す。震源分布の広がりには次のような特徴がある。三宅島の島内においては島の中心である火口直下に震源のかたまりが見られる。これは三宅島の火山活動と直接関連する地震活動で、火口から直下のマグマだまりにつながる火道周辺の地震活動であろう。三宅島と神津島間に北西南東方向に連なる震源は、岩脈状のマグマが地殻へ貫入したことによる地震活動である。この期間の大部分の地震は、この領域で発生している。岩脈貫入による地震活動域の北西端からは北に延びる地震活動が、南東端からは南に延びる地震活動が見られる。いずれも岩脈の両端に集中する応力により活発化したものと見なすことが出来る。北側の活動は、式根島・新島を超え、利島沿岸にまで達し、20km以上も伸びている。南側の活動も同様に20km程度活動域が広がっている。

図2には、マグニチュード6を超えた地震の震源とメ

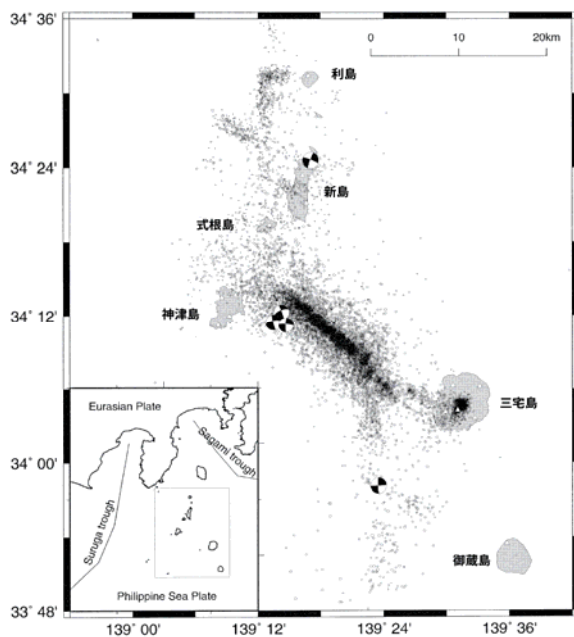


図2 三宅島・神津島・新島近海の群発地震活動の震央分布。マグニチュード6以上の地震のメカニズムも示してある⁵⁾。

カニズムが図示されている。いずれも北西南東方向に圧縮軸を持つ横ずれ型の地震である。岩脈は最大圧縮応力の方向に伸びる特徴があることから、地震を発生させる応力場と岩脈の貫入方向を支配する応力場が同一のものであることがわかる。

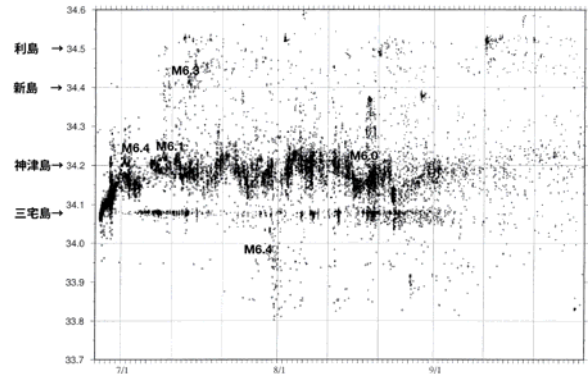


図3 三宅島・神津島・新島近海の地震活動の時空間分布。緯度に沿った震央の時間変化を示してある。

2.2 震央の時空間分布

図3には、これも酒井・他（2005）⁵⁾により決定された震源の時空間分布を示す。震源分布の緯度方向の時間変化が表示されている。顕著な特徴として、6月26日に三宅島で始まった地震活動が北西に移動していく様子がわかる。約1週間かけて北西に移動し、7月1日に移動した先端付近でM6.4の地震が発生している。岩脈の先端付近で比較的大きな地震が発生するのはしばしば見られる現象であるが、これは岩脈の貫入により先端付近に大きな応力集中が発生するからである。また、逆に大きな地震が発生することにより岩脈貫入の進展が阻害されると考えることも出来る。これは、岩脈先端で発生する地震により応力が解放されるからである。岩脈貫入をもたらす応力場と地震発生時の応力場が同一の応力場であることがそれを示している。岩脈貫入に伴う群発地震活動域では9月はじめまで地震活動が継続している。一般に岩脈の拡大が停止するとともに地震活動が収束に向かうことが期待されるのであるが、この活動はさらに2ヶ月も継続していたという大きな特徴がある。その間にマグニチュード6以上の地震がさらに2回も発生している。これは岩脈の伸張が停止した後も、岩脈へのマグマ供給が継続していたことを示唆している。後に触れる地殻変動データと合わせると、岩脈の幅が拡大し続けていた（太り続けていた）ことを示しているであろう。

図3の時空間分布からは、三宅島を中心として徐々に地震活動域が拡大していく様子が見られる。北向きには神津島に向けた活動域の拡大と、7月中旬のさらなる北方

への拡大が見られる。三宅島から神津島にかけて活動域の拡大が約 20km を 1 週間かけて拡大したのに対し、利島付近への拡大は非常に短い時間でなされたことがわかる。これは、三宅島から神津島への活動域の拡大が主にマグマの移動によるものであるのに対し、利島付近までの拡大は、単に応力場の変化による影響であることを示唆している。北方への地震活動域の拡大に伴い、7 月 15 日には新島付近で M6.3 の地震が発生している。一方、南方への震源域の拡大は 7 月 30 日に発生した M6.4 の地震が先導しているように見える。北方の活動において新島付近の M6.3 の地震の 1 週間ほど前から小さな地震が発生していたのとは対照的である。これは北方の活動が火山の周辺であったのに対し、南方の活動が火山から離れた場所で発生したことによる、応力への応答特性の違いを示している。

図 3 の時空分布を全体として眺めると、9 月上旬以降の地震活動が低下していることがわかる。この事実は、9 月以降に三宅島での大規模なマグマ水蒸気爆発が影を潜め、代わりに大量の火山ガスを静かに放出する活動に移ったこと同期している。おそらく、三宅島からの北西の岩脈へのマグマの移動は 9 月はじめには終了し、そのため地震活動が低下したこと、また三宅島の地下が安定した状態となり爆発的な噴火活動が収まったことを示しているのだろう。

2.3 震源の深さ分布

三宅島・神津島間で発生した群発地震活動は、岩脈の貫入によるものと考えられているため、震源の深さ分布については火山学的にも興味がある。震源の深さ分布については、海底地震計のデータを含めて決定した震源を図 4 に示す⁴⁾。図には、震源の深さを、岩脈の伸びの方向と見なすことが出来る震源分布の長軸方向と直角方向の断面に示した。断面の特徴としては、最深部における震源分布の幅が小さいのに対し、浅い部分では震源分布の幅が大きくなっていることがわかる。特に深さ 5 km よりも浅い部分で Y 字状に分かれていることがわかる。これは岩脈の本体は 5km から 15km であるのに対し、5km よりも浅い部分では、岩脈の貫入による応力変化で断層が広がったことと解釈できる。

このように、2000 年 6 月から 8 月にかけての、三宅島・神津島付近の地震活動は、震源分布を正確に決めて整理することにより、地殻へ貫入するマグマの移動に関し、非常に有用な情報を提供していることがわかる。

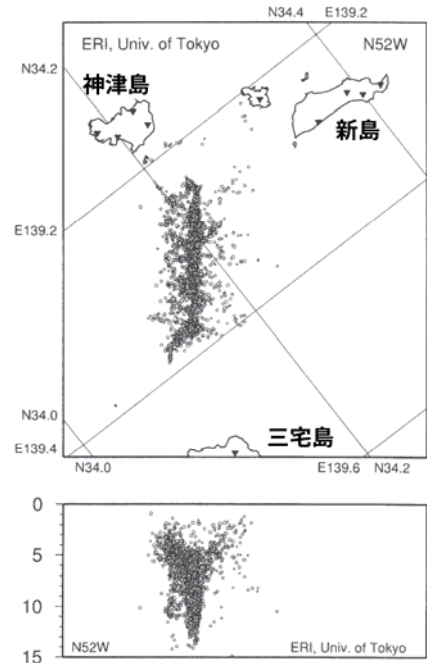


図 4 震源の深さ分布。群発地震分布の長軸と垂直方向の断面に投影したもの。

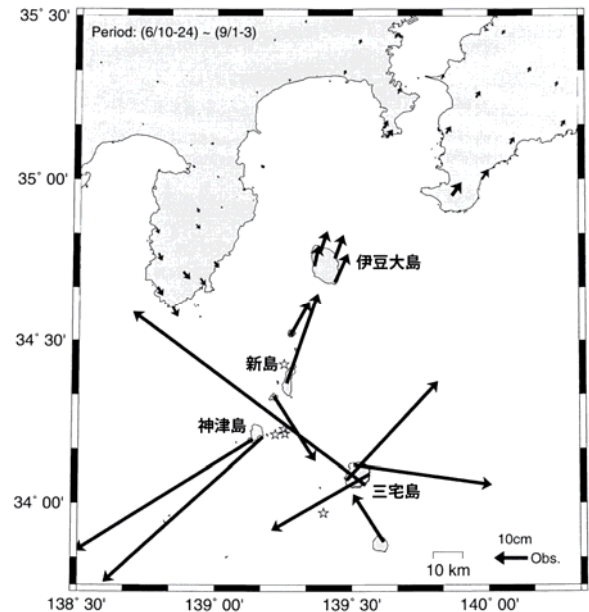


図 5 GEONET で捉えた、三宅島・神津島・新島近海の群発地震活動に伴う地殻変動⁸⁾。

3. 地殻変動

3.1 GPS による観測データ

2000 年 6 月から 8 月にかけての、三宅島・神津島・新島近海における群発地震活動に伴い非常に大きな地殻変動が GEONET により観測された^{6) 7)}。図 5 は地殻変動

が非常に大きかった9月上旬までの、伊豆諸島とその周辺における観測点の変位ベクトルを表したものである⁸⁾。図には、いくつかの特徴的な変動が見られる。まず、三宅島の収縮である。地震活動から想定されたように、この群発地震活動は三宅島からマグマが岩脈として外部へ流出したことが原因となっている。三宅島の収縮は、マグマの流出によるマグマだまりの圧力減少を表していると考えると良い。もう一つの特徴は、神津島と新島との距離が離れるような変動をしていることである。これは神津島と新島の間に向かって岩脈が貫入したことを示している。さらに、その変動は伊豆大島や房総半島でも見られるほど大きなものとなっている。詳細を見ると、いろいろと検討するべき課題はあるものの、今回の変動は、マグマ流出による三宅島の収縮と、岩脈貫入による新島・神津島間の距離の拡大など広域の地殻変動で特徴づけられている。

図6は、新島・神津島間の基線長変化の時系列を示したものである⁷⁾。6月末から新島と神津島間の距離が急速に拡大を始め、8月の中旬過ぎまで継続し、その後は鈍化している様子が見える。図3の地震活動も、詳細に見ると8月の下旬から若干活動が鈍化しているように見える。三宅島の火山活動も8月18日の噴火をピークに激しい噴火は収まり始めている。

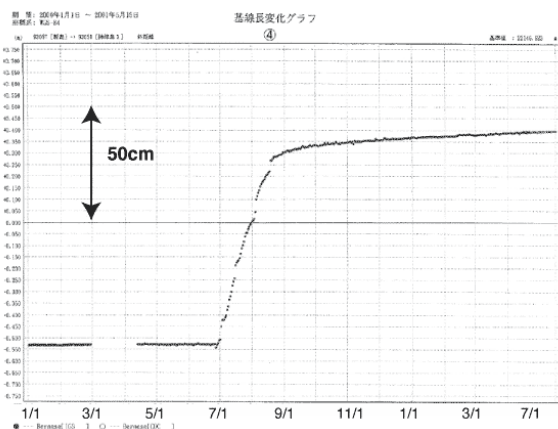


図6 GEONETにより得られた2000年1月から2001年7月にかけての新島・神津島(「神津島1」)間の基線長変化⁷⁾。

3.2 モデル

今回の岩脈貫入に伴う変動が非常に大きかったため、多くの研究者の関心を引き、地殻変動を説明するためのモデルが作られた。モデルの基本は、群発地震活動が活発であった2ヶ月間に三宅島と神津島間の貫入したマグマを、鉛直の岩脈としてモデル化したものである。活動の中心が海底であり、点在する島の上にはデータが

ないことから、モデル設定の自由度が大きい。これが多くのモデルが提案されたゆえんである。モデルとしては、変動源を一枚の岩脈として扱ったもの、岩脈に場所毎の貫入量に自由度を持たせたもの、岩脈直下にマグマだまりを仮定したもの、横ずれ断層の効果を入れたもの、等がある。また用いたデータも、伊豆諸島周辺のGPSデータ、関東から東海地方まで及ぶやや広域のGPSデータ、さらに重力変化のデータも用いられている。

Ito and Yoshioka(2002)⁹⁾は、三宅島・神津島・新島におけるGPSデータを用い、三宅島の下のマグマの収縮量と三宅島・神津島間のマグマ貫入量を見積もっている。岩脈についても一様な岩脈ではなく、場所毎の貫入量の違いをパラメータとして扱っている。その結果、三宅島・神津島間のマグマ貫入量は約1.1立方kmで、三宅島からのマグマ流出量は0.54立方kmとしている。Yamaoka *et al.* (2005)³⁾は、関東から東海地方にかけた、やや広域のGPSデータを用いている。広域のデータに合わせるためには三宅島・神津島間の岩脈だけでは説明が出来ないとし、岩脈直下からのマグマ上昇を提案してモデル化している。その場合岩脈貫入量は約2.0立方kmで、直下からのマグマ上昇量は約1.5立方km、三宅島からのマグマ流出は0.35立方kmとしている。一方、Murase *et al.* (2006)¹⁰⁾は、複数の岩脈を考慮しモデル化をし、岩脈貫入量として約1立方km、また三宅島での堆積収縮として0.2立方kmと推定している。Furuya *et al.* (2003)¹¹⁾は三宅島と神津島で測定した精密重力変化をデータとして用い、地殻変動だけでなく重力変化も説明できるモデルを提案している。その結果、三宅島・神津島間に貫入したマグマの質量は、三宅島から流出したマグマの質量の約1.3倍と見積もられ、三宅島・神津島間に新たなマグマ供給源を求める必要があるとしている。

4. まとめ

2000年6月から8月にかけての三宅島・神津島・新島近海の群発地震活動は、三宅島における17年ぶりのマグマ上昇に端を発し、三宅島直下のマグマが北西方向に岩脈として貫入したことにより引き起こされたものである。マグマ貫入は、2ヶ月にもおよび、貫入域の伸張が1週間で停止した後もマグマの貫入による岩脈幅の拡大が続いたことが地震活動や地殻変動の観測からあきらかになった。その間に、マグニチュード6を超える地震が5回も発生するなど群発地震活動としても、地殻変動としてもまれに見る大きな変動をもたらしている。この間の地震活動、地殻変動および三宅島で観測される火山活動は、三宅島直下のマグマの北西への流出と岩脈貫入というモデルによって、基本的には整合的に説明され、その盛衰の時期も非常によい一致を示している。このように、今

回の三宅島・神津島・新島付近の群発地震活動は、マグマの活動に関係した地震及び地殻変動が、各種の観測を総合することにより統一的な理解が得られることを示した非常に良い例となっている。なお、三宅島島内では、精力的な電磁気学的観測等がなされているが、ここでは群発地震活動を中心に扱ったため、取り上げることをしなかった。

参考文献

- 1) 東京都, 2007. 三宅島噴火災害誌, 262.
- 2) Nakada, S., M. Nagai, T. Kaneko, A. Nozawa, K. Suzuki-Kamata, 2005. Chronology and products of the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology*, **67**, 205-218.
- 3) Yamaoka, K., T. Kudo, M. Kawamura, F. Kimata, and N. Fujii, 2005. Dike intrusion associate with the 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology*, **67**, 231-242.
- 4) 東京大学地震研究所, 2001. 伊豆半島付近の地震活動 (2000年5月~2000年10月). 地震予知連絡学会報, **65**, 132-139.
- 5) 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.
- 6) 国土地理院, 2001, 伊豆半島およびその周辺の地殻変動, 地震予知連絡学会報, 65, 170-269.
- 7) 国土地理院, 2001, 伊豆半島およびその周辺の地殻変動. 地震予知連絡学会報, 66, 191-202.
- 8) Kaidzu, M., T. Nishimura, M. Murakami, S. Ozawa, T. Sagiya, H. Yarai, and T. Imakiire, 2000. Crustal deformation associated with crustal activities in the northern Izu-islands area during the summer, 2000. *Earth Planets Space*, **52**, ix-xviii
- 9) Ito, T. and Yoshioka S., 2002. A dike intrusion model in and around Miyakejima, Niijima and Kozushima in 2000. *Tectonophysics*, **359**, 171-187.
- 10) Murase, M., M. Irwan, S. Kariya, T. Tabei, T. Okuda, R. Miyajima, J. Oikawa, H. Watanabe, T. Kato, S. Nakao, M. Ukawa, E. Fujita, M. Okayama, F. Kimata, and N. Fujii, 2006, Time dependent model of magma intrusion in and around Miyake and Kozu Islands, Central Japan in June-August, 2000. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **150**, 213 - 231.
- 11) Furuya, M., S. Okubo, F. Kimata, R. Miyajima, I. Meilano, W. Sun, Y. Tanaka, and T. Miyazaki, 2003. Mass budget of the magma flow in the 2000 volcano-seismic activity at Izu-islands, Japan. *Earth Planets Space*, **55**, 375-385.