

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—

西村卓也^{1)*}・村上 亮¹⁾・小沢慎三郎¹⁾・石本正芳¹⁾・鷺谷 威¹⁾・矢来博司¹⁾・多田 堯¹⁾・
海津 優¹⁾・鶴川元雄²⁾

¹⁾ 国土地理院

²⁾ 防災科学技術研究所

Crustal deformation and source estimation before and after the 2000 Miyakejima eruption

—Inflation and deflation sources from the 1983 eruption to May 2001—

Takuya Nishimura^{1)*}, Makoto Murakami¹⁾, Shinzaburo Ozawa¹⁾, Masayoshi Ishimoto¹⁾,
Takeshi Sagiya¹⁾, Hiroshi Yurai¹⁾, Takashi Tada¹⁾, Masaru Kaidzu¹⁾ and Motoo Ukawa²⁾

¹⁾ Geographical Survey Institute

²⁾ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Abstract

We analyzed crustal deformation data measured by leveling and continuous GPS on and around Miyakejima from 1983 to 2001. The observed deformation of Miyakejima shows its inflation before the 2000 eruption. It is modeled by an inflation (Mogi) source located at a depth of 9.5 km, 2 km southwest of the summit crater. The estimated volume increase of the inflation source was 0.2 km³ during the period between the 1983 eruption and the 2000 eruption.

The shrinking and subsidence of Miyakejima after the eruption until the middle of 2001 characterize the deformation associated with the 2000 eruption except for two periods. One exception occurred just after the start of the earthquake swarm on June 26, 2000. The other occurred just after the summit collapse on July 8, 2000. The shrinking and the subsidence are explained by two deflation (Mogi) sources, that is, a shallow source at a depth of 2.9 km and a deep source at a depth of 9.5 km. Although both the deep and the shallow sources deflated from June to August 2000, only the shallow source deflated at a rate of $6.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ after September 2000, when the summit crater started to emit volcanic gas.

The observed expansion of Miyakejima just after the summit collapse is modeled by an inflation source at a depth of 1-2 km beneath the collapsed caldera. This inflation might be due to the filling of the vacant space beneath the summit with the material of the collapsed summit, as was suggested by FURUYA *et al.*, (2001), filled.

Key words: GPS, Leveling, Miyakejima, Inflation, Deflation

1. はじめに

2000 年 6 月 26 日に始まった三宅島の火山活動は、GPS 連続観測により準リアルタイムの地殻変動観測が行われた。日本国内で火山噴火の前から GPS 連続観測

が行われていたのは、北海道の有珠山の噴火について二例目であり、マグマの移動や噴火のメカニズムに関する多くの新しい知見が得られている。例えば、三宅島 2000 年噴火に伴う地殻変動の解析から、群発地震の開始とと

*e-mail: t_nishimura@gsi.go.jp, (Visiting Researcher at U.S.G.S 345 Middlefield Road, MS977 Menlo Park, California 94025, USA)

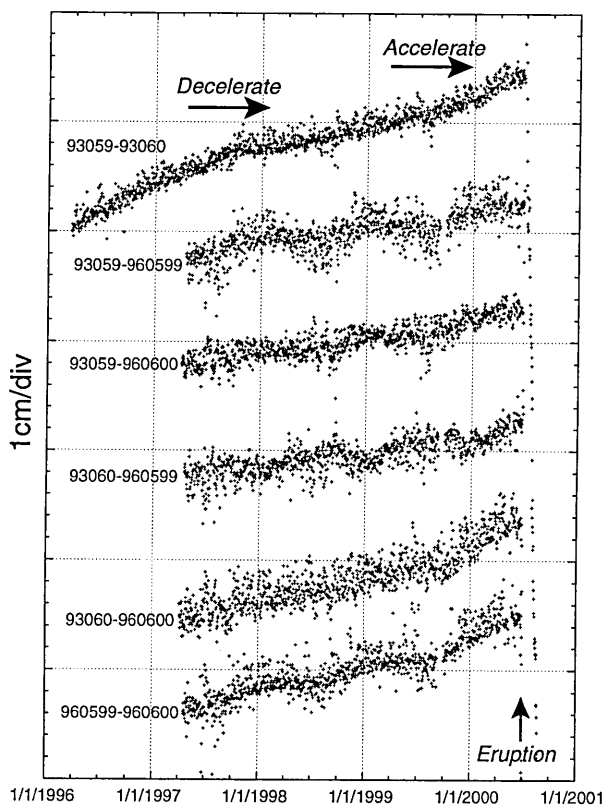


Fig. 1. Temporal changes of GPS baseline length in Miyakejima. Station codes of GPS baselines are shown as numerals. Location of GPS sites are shown in Fig. 3.

もに三宅島の西部へダイクが貫入すると同時に地下での収縮が発生し、マグマは三宅島から北西へと移動して神津島東方沖まで達したという研究結果が得られている(例えば山岡, 2000; 中尾・他, 2000; 小沢・他, 2001; NISHIMURA *et al.*, 2001).

本論では、GPS 連続観測データと水準測量のデータから、2000 年噴火前のマグマ蓄積過程における地殻変動と 2000 年噴火にともなう地殻変動を報告する。そして、観測された地殻変動から変動源の推定を行い、その火山学的意義についての議論を行う。特に、2000 年 7 月 8 日の山頂陥没の直後に観測された島の膨張に注目してモデル化を行う。なお本論では、中田・他 (2001) の定義に従い、噴火の活動のステージとして、6 月 26 日の地震活動の開始から 7 月 8 日の最初の山頂噴火までを「マグマ貫入期」、7 月 8 日から 8 月上旬までを「山頂陥没期」、8 月 10 日から噴火が断続的に繰り返した期間を「爆発期」、そして 9 月以降を「脱ガス期」と呼ぶことにする。

2. GPS と水準測量による地殻変動と変動源の推定

2.1 2000 年噴火前の地殻変動

国土地理院では、1994 年から三宅島内の 2 点で GPS 連続観測を開始し、1996 年にはさらに 2 点の観測点を増設して計 4 点で地殻変動の監視を行っている。三宅島の観測点を含む全国約 1000 点からなる国土地理院の GPS 連続観測点網は、GEONET と呼ばれている (MIYAZAKI *et al.*, 1998)。GPS 観測の開始から 2000 年噴火の前まで、三宅島内の各観測点を結ぶ基線は緩やかな伸びを示していた(例えば国土地理院, 2000)。Fig. 1 は、三宅島内の 6 基線の基線長変化を示したものである。全ての基線で伸びが観測されているが、その変動速度は必ずしも一定ではない。伸張の速度は、1997 年秋に鈍化しているが、1999 年秋ころに加速して噴火に至った。Fig. 2 は 1998 年 1 月から 2000 年 5 月までの南関東から伊豆諸島にかけての GEONET 観測点の水平変位速度を示したものである。三宅島と伊豆大島では、プレート運動によると考えられる青ヶ島、八丈島、御蔵島と同様な北北西への移動に加えて、放射状の火山体の膨張を示す局地的な変動が重なっていることを読み取ることができる。また、新島や神津島では、観測点毎に変動方向のばらつきが見られ、これらの島々の複雑な火山性地殻変動を示唆している(例えば KIMATA *et al.*, 2000)。

三宅島のより詳細な地殻変動を理解するためには、水準測量のデータが利用できる。国土地理院は、1979-1986 年のほぼ毎年、三宅島の海岸部の一周道路で一等水準測量を行った(多田・中村, 1988)。1988 年以降には東京都によって海岸部の一周道路および三宅島山腹を一周する鉢巻林道において、2-3 年毎に水準測量が行われている(国土地理院, 2000)。国土地理院 (2000) や多田・中村 (1988) などによって既に指摘されているように、水準測量から得られた上下変動の第一の特徴としては、1983 年の噴火をはさんだ期間の測量を除いて三宅島の南西側に対して北東側が相対的に沈降していることが挙げられる。また、局所的ではあるが 1983 年の割れ目噴火が発生した島の中央部から南西域にかけてと山頂付近の沈降、島の南部における隆起も特徴的である。このような特徴の空間的なパターンはそれほど時間変化していない。

多田・中村 (1988) は、三宅島の南西側に対する北東側の沈降は、火山体のインフレーションとして解釈でき、点圧力源(茂木モデル)を用いることによってモデル化が可能であることを明らかにした。本研究においても、上下変動の大局的なパターンは時間変化していないことと、GPS 観測による水平変動のパターンも等方的な膨張を示していることから、茂木モデルを仮定し圧力源の位置と大きさのパラメータ推定を行った。

パラメータ推定には MATSU'URA and HASEGAWA

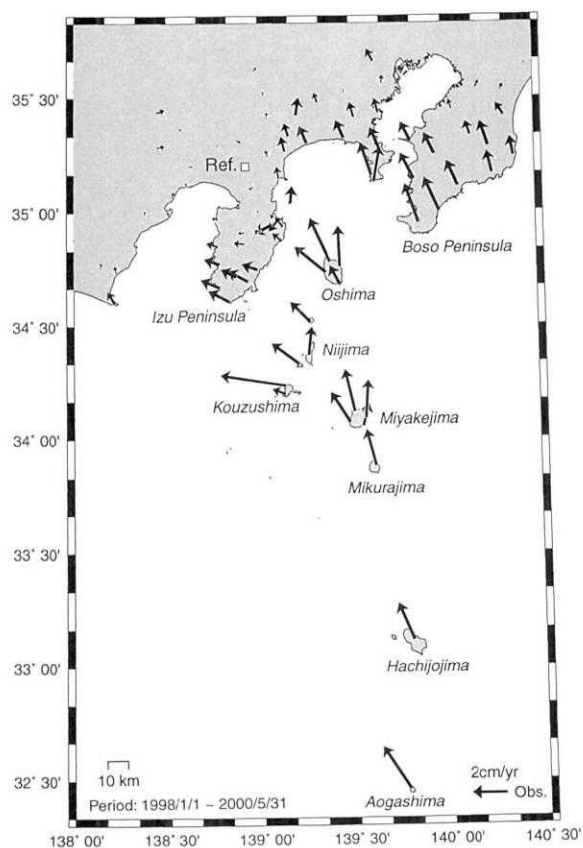


Fig. 2. Horizontal velocity vector of continuous GPS sites in Kanto and on the Izu Islands. Data period of velocity estimation is from January 1998 to May 2000. All vectors show a relative displacement rate with respect to a GPS station at the root of Izu Peninsula denoted as Ref.

(1987) によって定式化されたインヴァージョン手法を用いた。地殻変動の理論値の計算には、半無限弾性体を仮定した Okada (1992) による定式化を用い、点圧力源を一つだけ仮定した。パラメータ推定は、水準測量の繰り返し期間毎に行うことも可能であるが、期間毎の点圧力源の深さと体積増加量がばらついてしまう。そこで、まず三宅島内の4点でGPS連続観測が行われようになった後のデータを用いて点圧力源の4つのパラメータ(緯度、経度、深さ、体積増加量)を推定した。用いたデータは1997年6月から1999年6月までのGPS観測点の1年あたりの平均的な水平変動速度および上下変動速度と1997年6月と1999年6月に行われた2回的水準測量による上下変動から換算した1年あたりの上下変動速度である。上下変動のデータのうち山頂付近の八丁平カルデラの内部にある2つの水準点では沈降が観測されている。カルデラ内での沈降は、干渉 SAR により伊豆大島でも観測されており、単一の点圧力源や開口割れ目

では説明できない(村上・他, 2000)。三宅島では伊豆大島ほどの詳細なパターンは得られていないが、ここでは簡単のため山頂付近の2点のデータは、インヴァージョンには用いない。また、インヴァージョンのデータは、水平、上下変動とも、図中に示した基準点に対する相対変動として扱っている。

このようにして得られた点圧力源の位置と地殻変動の観測値と計算値を Fig. 3 に示す。点圧力源の位置は、山頂火口の南西2kmの地下9.5kmと推定された。また体積増加率は $6.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ となった。次に緯度、経度、深さのパラメータを上で求めた値に固定し、1983年11-12月から1988年5-6月までと1988年5-6月から1997年6月までの水準測量のデータを用いて体積増加量のパラメータのみを推定した。Fig. 4 に両期間の地殻変動の観測値と計算値を示す。観測値と計算値はおおむね整合しており、点圧力源の位置を固定しても、上下変動を説明することが可能であることがわかる。

Table 1 は推定した3つの期間における点圧力源パラメータのまとめたものである。圧力源の体積増加率は、時間とともに減少している。このことは、上で述べたGPS基線の伸張が1997年秋ころから鈍化したことや1983年の噴火直後には急激なインフレーションが発生していたこと(多田・中村, 1988)と調和的である。Table 1 の体積増加率を用いて、1999年6月から2000年噴火の直前までの増加率は1997年から1999年までの増加率に等しかったと仮定すると、1983年噴火から2000年噴火までに地下9.5kmのマグマだまりに蓄えられたマグマの増加量は、 0.20 km^3 となる。

2.2 2000年噴火最盛期(6-8月)の地殻変動

2000年7月上旬から8月下旬までの爆発的な山頂噴火が発生していた期間には、三宅島島内のGPS基線で2cm/日に達するような地殻変動が観測されていた(KAIDZU *et al.*, 2000)。Fig. 5 に三宅島内のGPS基線の一例を示すように、6月26日に始まった急速な変動が徐々に減速した後、7月中旬から8月下旬までは直線的に島の収縮が続いていた。この期間の地殻変動は、前述のように多くの研究者によって解析が行われている。本稿では、NISHIMURA *et al.* (2001) のモデルについて説明する。

Fig. 6 は、NISHIMURA *et al.* (2001) が前節と同じインヴァージョン手法を用いて、変動源のパラメータを推定した結果である。データは、2000年6月13-22日と2000年8月27-31日の差をとることによって得られた三宅島や新島、神津島から房総、伊豆半島までのGPS観測点での変位ベクトルを用いた。なお、国土地理院の観

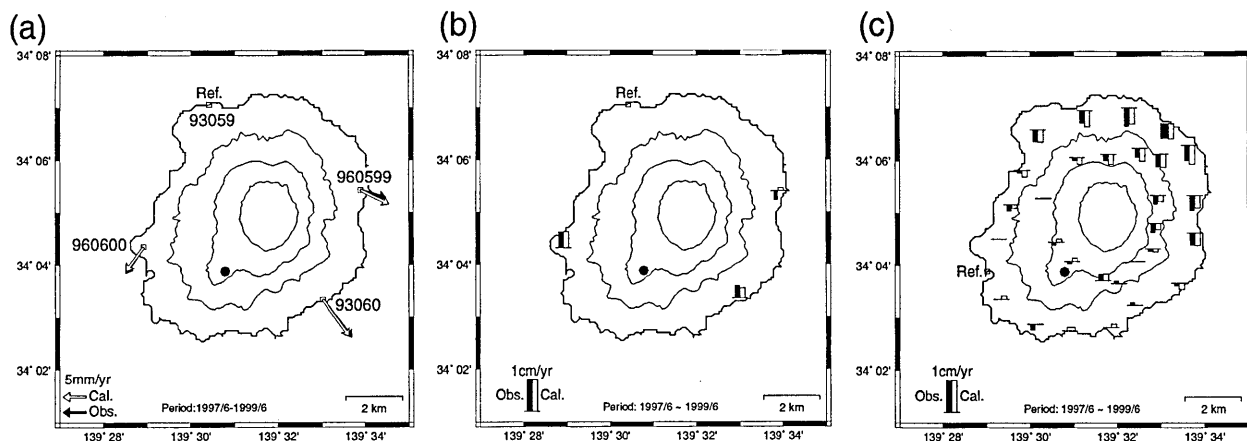


Fig. 3. Observed and calculated displacement rates on Miyakejima from July 1997 to July 1999. A solid circle means the estimated location of a point inflation source. (a) Horizontal displacement rate at four GPS stations. Station codes of GPS sites are shown. (b) Vertical displacement rate at four GPS stations. (c) Vertical displacement rate measured by leveling.

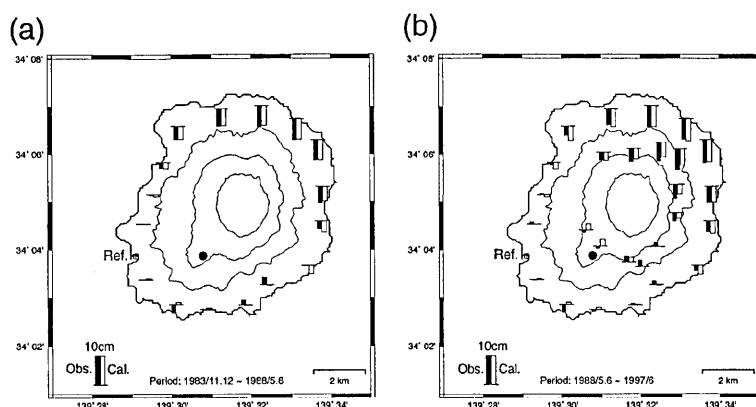


Fig. 4. Observed and calculated displacement measured by leveling. (a) Data period is from November and December 1983 to May and June 1988. (b) Data period is from May and June 1988 to June 1997.

測点に加え防災科学技術研究所の三宅島内3点のデータも用いているが Fig. 6 には表示していない。観測された変位ベクトルには、5個のM6クラスの地震を筆頭に多くの群発地震による地殻変動が含まれている。これらの地震の全てを地殻変動のデータから分離してパラメータ推定するのは難しい。そこで、まず気象庁の震源分布と防災科学技術研究所 Freesia Project による広帯域地震波形を用いたメカニズム解析結果 (FUKUYAMA *et al.*, 2001) を用いて地震による地殻変動を計算し、観測された変位ベクトルから差し引くことによって、地震の影響を取り除いたデータセットを作成した。地震による地殻変動を計算する際には、5つのM6クラスの地震については矩形断層、その他のものについては点震源とし、それぞれ Fig. 6 に示した細線の矩形領域と灰色の丸に対

応している。点震源として考慮した地震は、気象庁と防災科研の震源リストから発信時刻が同一であるものを選び、地震数は1349個である。これらの地震のマグニチュードは3.4から5.7の範囲となっており、おおむねマグニチュード4以上の地震については、もれなく地震による変動を計算できた。

次に、地震の影響を取り除いたデータセットを用いて、三宅島直下の点圧力源、三宅島から神津島にかけての開口割れ目、開口割れ目の北西端から延びる断層のすべりを仮定してそのパラメータを推定した。開口割れ目は、酒井・他 (2001) によって求められた帯状の震源分布に合致するように位置を強く拘束した。三宅島から神津島にかけての地震活動域の南東部では、6月28日までに地震活動がほぼ収束したのに対し、北西部では8月末

Table 1. Parameters of a point inflation (MOGI) source before the 2000 eruption.

Period	Latitude(°)	Longitude(°)	Depth(km)	Rate of Volume Increase($10^6\text{m}^3/\text{yr}$)
1997/6-1999/6	34.064 ± 0.007	139.513 ± 0.003	9.5 ± 3.6	6.4 ± 6.1
1988/5.6-1997/6	34.064	139.513	9.5	9.8
1983/11.12-1988/5.6	34.064	139.513	9.5	14.8

Uncertainties are one sigma. Bold numbers represent fixed value in inversion.

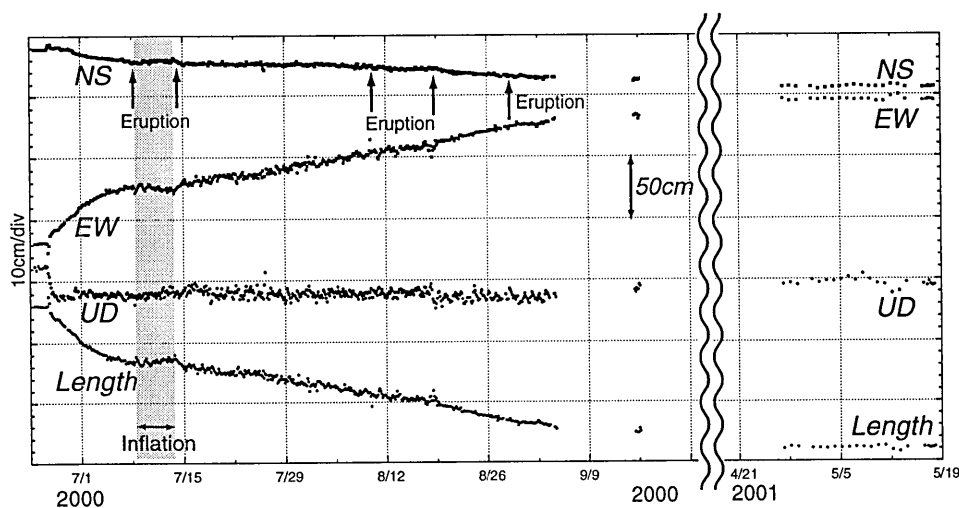


Fig. 5. Temporal changes in the component of the baseline 93059-93060. A power failure on Miyakejima suspended observations from September 2000 to April 2001.

まで活発な活動が続いていた。この地震活動度の違いから、開口割れ目を Fig. 6 中の Tensile Fault A と B に示すような 2 つの領域に分割した。開口割れ目の北西端から延びる断層のすべり (Fig. 6 の Shear Fault) の存在を直接示す証拠はないが、この断層すべりがなければ式根島や伊豆半島の変動を説明することができなかった。

インバージョンの結果から、(1) 収縮源は三宅島山頂の南南西 2 km の深さ 4.2 km に位置し、その体積減少量は 0.12 km^3 であること、(2) 三宅島から神津島にかけての群発地震発生域の全長 27 km にも及ぶ開口割れ目の体積増加量は 1.02 km^3 に達すること、(3) 開口割れ目の北西端からのびる断層では、 $M_w 6.6$ に相当する右横ずれの断層運動が生じたことがわかった。(3) の断層運動は、データセットであらかじめ地震の影響を取り除いているので、非地震性のすべりでなければならない。三宅島の山頂陥没量 0.60 km^3 (長谷川・他, 2001) と収縮源の体積減少量を合計すると 0.72 km^3 に達する。一方、噴火による総噴出量は 0.01 km^3 程度 (中田・他, 2001) なので、

残りのマグマは、三宅島から北西へと移動して神津島東方沖までダイク状に貫入したと考えられる。この貫入ダイクの体積増加量は、三宅島での体積減少量より大きく、神津島東方沖の地殻下部にもともとマグマが存在していたことを示唆している。

2.3 2000 年 9 月以降の地殻変動

2000 年 9 月以降の脱ガス期の地殻変動の進行速度は、2000 年 6-8 月の活動の最盛期に比べて一割程度かそれ未満となっている。よって 2000 年 9 月以降の地殻変動をある程度広域に見る場合、フィリピン海プレートのプレート運動など定常的な地殻変動は無視できない。ここでは、三宅島および神津島付近の変動源の推定を行うため、2000 年 9 月から 2001 年 5 月までの観測された地殻変動から Fig. 2 に示した 1998 年 1 月から 2000 年 5 月までの平均的な地殻変動速度の 8 か月分を差し引いたもの (Fig. 7a) を用いて解析を行う。2000 年 6-8 月の地殻変動を示した Fig. 7b と Fig. 7a を比較すると、神津島と新島間の拡大や三宅島の収縮といった変動の特徴が似

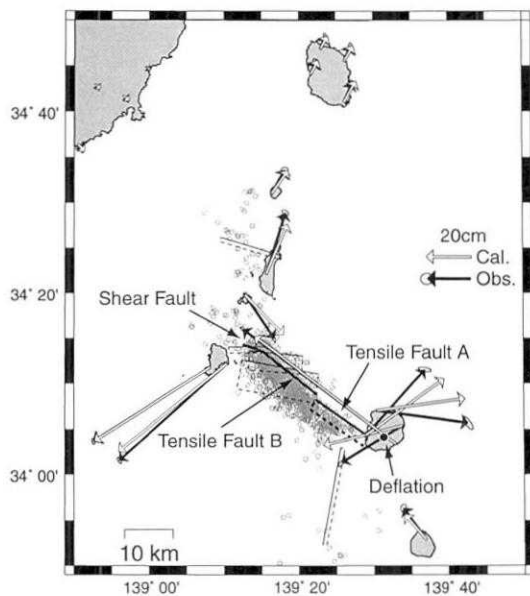


Fig. 6. Fault model estimated from the observed displacement for the period from June 13-22, 2000 to August 27-31, 2000. Gray circles and thin rectangles are earthquakes used for calculating coseismic displacement. Thick rectangles are aseismic faults including tensile faults. Error ellipsoids mean 3-sigma. Solid sides of rectangles are upper edges of rectangular faults.

通っており、2000年6-8月と脱ガス期で変動源の位置がそれほど変化していないことを示唆する。よって前節と同じ方針で変動源のパラメータの推定を行う。しかし、脱ガス期にはFig. 6に示したTensile Fault Aの領域ではほとんど地震が発生せず、全体で見ても地殻変動を伴うような大きな地震は発生していない。よって、三宅島の点圧力源と神津島東方沖の開口割れ目、その北西端から伸びる断層すべりの3つの要素のみを仮定して、インバージョンを行った。

Fig. 8にインバージョンの結果得られた変動源モデルと水平変動ベクトルの観測値および計算値を示した。三宅島の収縮源(Fig. 8中のDeflation)は、山頂火口の南の約1 km深さ2.9 kmに位置し、体積減少量は $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ と推定された。一方、神津島東方沖の開口割れ目(Tensile Fault)では、この期間も開口が続き 0.22 km^3 の体積増加となった。また、断層の北端で $M_w 6.0$ に相当する右横ずれの断層運動が続いていると推定される。三宅島の体積減少量に対し神津島東方沖での体積増加量は約14倍であり、三宅島からのマグマの移動だけでは説明できない。この事実は、神津島東方沖の深部に起源を持つマグマの存在を強く示唆するものである。

2.4 山頂噴火の直後に見られた特異な地殻変動

三宅島の地殻変動は、マグマ貫入期の初期を除いて収縮が続いているが、唯一の例外が山頂陥没期の初期である。Fig. 5の時系列中のInflationと示した期間では、全体のトレンドとは反対に変動しており、この基線が伸びていたことがわかる。他の基線でも同様の傾向があることから、この期間には三宅島が膨張していたといえる。膨張していた期間は観測点によって異なるが、いちばん長い観測点でも、7月8日の最初の山頂噴火の直後から7月14日の二回目の山頂噴火の前までになる。

この期間の三宅島の膨張を引き起こす力学的なメカニズムとして、山頂の陥没によって地表の荷重が減少したことによる地殻のリバウンドか、何らかの原因により地下で膨張が起こったことが考えられる。点荷重による半無限弾性体の表面の変形は、ビジネスの問題として知られておりLOVE(1934)によって解析解が与えられている。そこで、地表での点荷重または点圧力源を仮定した2つのモデルで、インバージョンを行った。点荷重モデルと点圧力源モデルの場合の観測値、計算値と変動源の位置をそれぞれFig. 9a, 9bに示す。データは国土地理院に加えて防災科学技術研究所が設置した三宅島島内の4点でのGPS観測点における、7月9日の午後4時30分と7月12日の20時30分をそれぞれ中心とする24時間平均値の差を用いた。国土地理院のGPS観測網と防災科学技術研究所のGPS観測網は別々に基線解析されているので、示したベクトルは国土地理院のGPS観測点については南伊豆、防災科研の観測点については三宅島神着に対する相対変動とした。なお、図には示していないが、神津島東方沖の変動源による三宅島島内の地殻変動も無視できないので、前節の仮定と同様に神津島東方沖のダイクとその北端での断層すべりのパラメータも同時に推定している。

点荷重を仮定した場合は、山頂火口の西1.5 kmでF/Eが -580 と推定された。ここでFは下向きを正とした荷重、Eはヤング率である。多田(1982)にしたがって地殻浅部のヤング率を15 GPa、密度を 2.0 g/cm^3 とすると 0.44 km^3 の体積を持つ荷重が地表から取り去られたことになる。一方、点膨張源を仮定した場合は山頂火口の西0.7 kmの深さ0.5 kmで $6.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ の体積増加という結果になった。

3. 議 論

3.1 期間による膨張・収縮源の位置

Fig. 10は、本研究で求めた三宅島の圧力源(膨張・収縮源)の位置を全てプロットしたものである。これらは、1983年噴火の前後における圧力源(多田・中村, 1986)

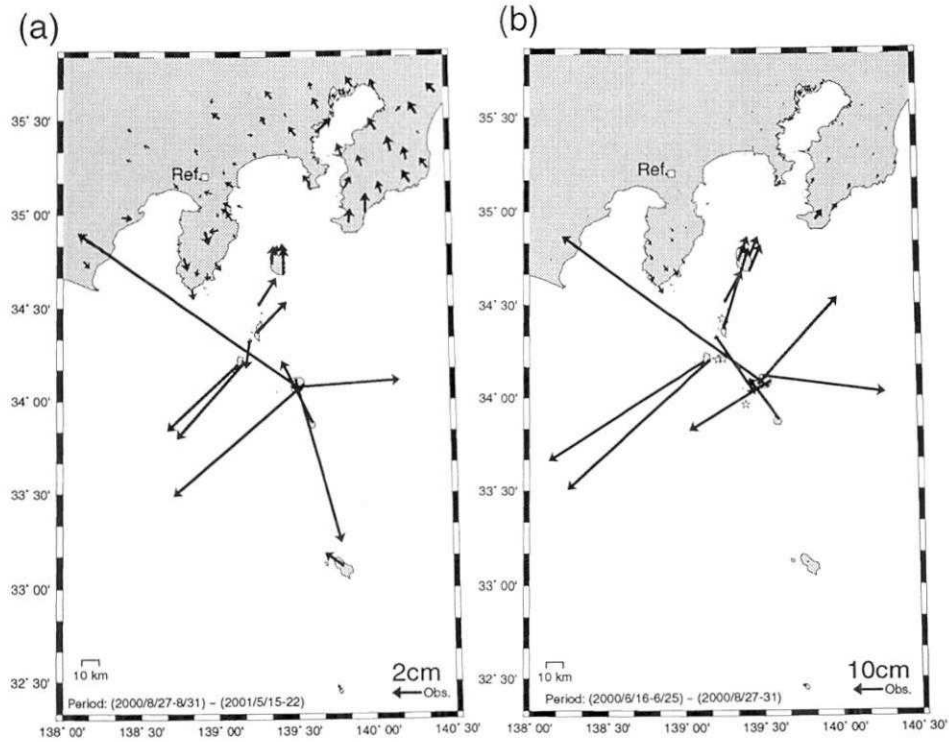


Fig. 7. Horizontal displacement of continuous GPS sites associated with the 2000 volcanic activity of Miyakejima. The secular displacement shown in Fig. 1 is removed from the observed displacement. (a) Data period is from August 27-31, 2000 to May 15-22, 2001. (b) Data period is from June 16-25, 2000 to August 27-31.

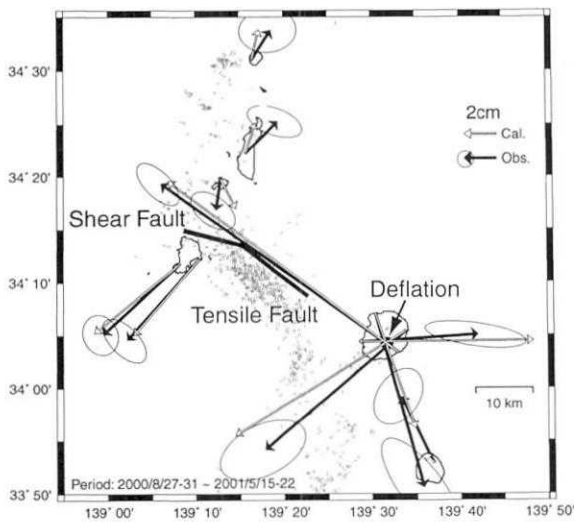


Fig. 8. Fault model estimated from the observed displacement for the period from August 27-31, 2000 to May 15-22, 2001. Error ellipsoids mean 3-sigma.

も含めて山頂火口の南から南西部に位置する。しかし、各期間における圧力源の位置を詳細に見ると、圧力源の深さは1997-1999年では9.5 kmであったのに対し、2000年6-8月では4.2 km、脱ガス期(2000年8月-2001年5月)では2.9 kmと浅くなっている。また、水平位置

も時間の経過とともに北東方向に移動している。この3つの期間の圧力源は、ある程度長い期間存在し体積変化量も大きいことから、ある程度大きな体積を持った流体だまりの膨張・収縮を表していると考えられる。しかし、1つの流体だまりが、このような短時間に大きく移動するとは考えにくい。2000年6-8月の圧力源の位置は、他の2つの期間の位置の間にあり、2つの流体だまりによる変動を1つの圧力源と仮定したため、その中間の位置として推定されたとも考えられる。そこで、1997-1999年と脱ガス期の圧力源の位置の2点に圧力源を仮定し、2.2節のデータセットを再度インヴァージョンした結果をTable. 2に示す。インヴァージョンの残差は2個を仮定した場合の方が1割小さくなり、本解析の期間を通して深さ9.5 kmと2.9 kmに計2個の流体だまりがあるとしても矛盾はない。収縮源での体積減少は、深さ9.5 km(以下、深部だまりと呼ぶ)と2.9 km(以下、浅部だまりと呼ぶ)でそれぞれ、 0.22 km^3 と $4.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ という結果になった。2つの体積減少量を合計すると 0.26 km^3 となり、1つだけ仮定した場合の倍以上の減少量となる。

地殻変動からは、流体だまりの流体がマグマなのか熱水なのかを断定できない。しかし、深部だまりは1983年

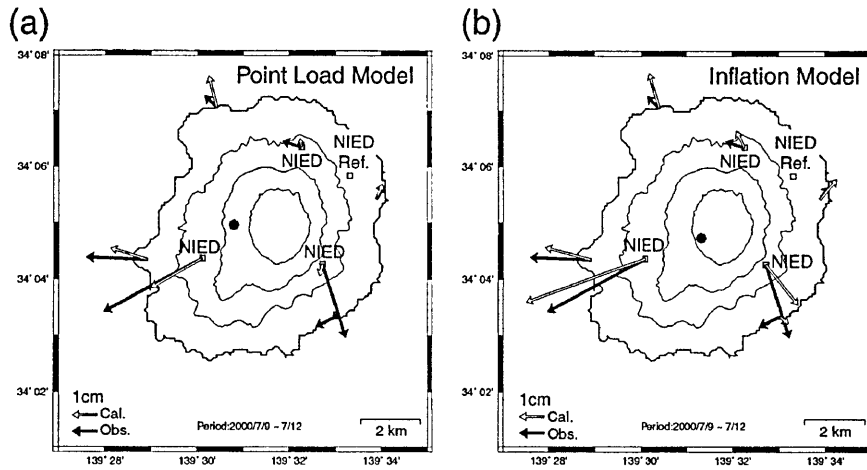


Fig. 9. Observed and calculated displacements from July 9, 2000 to July 12, 2000. Black circles mean the estimated location of the assumed source. NIED indicates GPS station operated by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention(NIED). The other stations are operated by Geographical Survey Institute (GSI) (a) Case of a point load. (b) Case of a point inflation source.

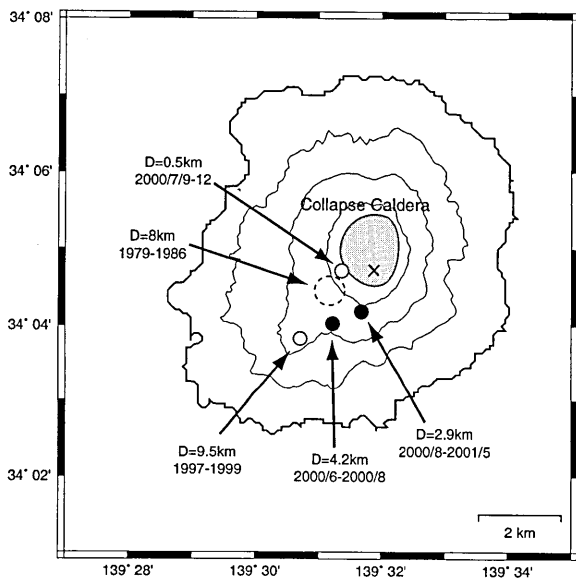


Fig. 10. Estimated location of the inflation and deflation sources. Black and white circles mean inflation source and deflation source, respectively. A broken circle is the location of the inflation and the deflation sources estimated by TADA and NAKAMURA (1986). Depth and period of the each source are indicated by arrows.

噴火から 2000 年噴火前までの間、安定して体積増加していたことを考えると、三宅島火山のマグマを供給するマグマだまりと推測することができる。一方の浅部だまりは、熱水だまりとマグマだまりの 2 通りの解釈が成り立つ。菊地・他 (2001) は、山頂陥没期や爆発期に観測された傾斜ステップや地震波形に見られる 50 秒パルス (UKAWA *et al.*, 2000) を、地下 2-3 km に扁平な円筒状

の容器で流体が急加圧したというモデルによって説明しており、本解析で得られた浅部だまりの位置とほぼ一致する。彼らの提唱する「間欠泉システム」モデルに従えば、浅部だまりは熱水だまりであるといえよう。しかし、宇都・他 (2001) は、マグマの密度から深さ 10 km と 3-4 km に 2 つのマグマだまりが存在するモデルを提唱しており、浅部だまりは浅いほうのマグマだまりに対応する。

脱ガス期においては、浅部だまりのみが収縮しており体積減少速度は $6.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ になる。村上・他 (2001) は、この体積減少速度が火山ガスの放出量とマグマの脱ガスによる体積減少速度 (風早・篠原, 1994) と同程度であることから、脱ガス期の三宅島の収縮は、マグマの脱ガスによると提案している。この提案が正しければ、浅部だまりもマグマだまりであることが有力である。

3.2 山頂噴火直後の三宅島膨張のメカニズム

3.2 節で三宅島の膨張源として仮定した点荷重と圧力源のどちらが妥当か考えてみる。点荷重モデルの場合、陥没した山頂で荷重の減少が起こるはずであるが、推定された位置は西に外れている。また、山頂の陥没は、7 月 8 日から 8 月中旬まではほぼ直線的に進行し、最終的な陥没量 0.60 km^3 に至ったことが明らかになっている (長谷川・他, 2001)。推定された荷重の体積 0.44 km^3 は、最終的な陥没量の 7 割に相当するが、陥没の開始からわずか 4 日でこれほどの荷重が消失したとは考えにくい。また、インヴェージョンの残差も点圧力源を仮定した場合と比べて 3 割程大きくなる。よって 7 月 8 日から 12 日まで

Table 2. Parameters of deflation (Mogi) source from June to August, 2000.

Model	Latitude(°)	Longitude(°)	Depth(km)	Volume Decrease(10 ⁶ m ³)	Normalized RMS(10 ⁴)
SingleSource Model	34.067 ±0.0002	139.521 ±0.0004	4.2 ±0.05	123.7 ±2.7	2.497
Double source Model	34.064	139.513	9.5	223.1±7.2	2.207
Deep source Shallow source	34.070	139.528	2.9	41.9±0.9	

Uncertainties are one sigma. Bold numbers represent fixed value in inversion.

Table 3. Parameters of inflation/deflation sources during July 8-July 12.

Model	Volume change of shallow reservoir (10 ⁶ m ³)	Volume change of deep reservoir (10 ⁶ m ³)	Latitude of inflation source (°)	Longitude of inflation source (°)	Depth of inflation source (km)	Volume change of inflation source (10 ⁶ m ³)	AIC
Inflation only			34.079 ±0.004	139.522 ±0.004	0.5±1.1	0.66±0.25	240.04
Inflation + Shallow reservoir	-7.03±18.34		34.074 ±0.009	139.527 ±0.002	2.4±1.2	6.28±17.56	239.51
Inflation + Deep reservoir		-9.15±7.53	34.080 ±0.004	139.524 ±0.004	1.4±1.3	1.18±0.92	238.69
Inflation + Shallow and deep reservoirs	-6.53±10.00	-2.43±9.23	34.077 ±0.011	139.526 ±0.004	2.1±1.8	2.92±7.97	240.44

Uncertainties are one sigma.

の三宅島の膨張は、山頂陥没による荷重の減少ではなく、山頂直下の膨張源によって引き起こされたといえる。

この期間の膨張源の位置は、前節で議論した浅部だまりと深部だまりとは有意に異なる。Table 3は3.1節で議論した浅部だまりや深部だまりを考慮して、複数の膨張・収縮源を仮定した場合の膨張源のパラメータを示したものであるが、どのモデルにおいても、膨張源の深さは2.5 kmより浅く水平位置は山頂から1 km以内に推定される。また、膨張源より深いところに存在する浅部・深部だまりでは、この期間においても収縮が起っていたことがわかる。Table 3には、パラメータ数の異なるモデルの優劣を評価する時に用いられるAIC(坂本・他1983)の値を示したが、深部だまりと増圧源の2つ圧力源を考慮したモデルがわずかに他のモデルよりも

優れていることがわかる。

古屋・他(2001)は、重力と地殻変動のデータから山頂陥没前の7月6日には、山頂直下の深さ1.7 kmに空洞があったことを示した。この空洞の位置は、ここで推定された増圧源と調和的である。以下では、増圧源は陥没前に存在した空洞が上部からの陥没物質により埋められたために増圧したという仮説から増圧源の半径を考察する。圧力源における球の半径(a)および圧力変化(ΔP)と体積変化量(ΔV)の関係は、

$$\Delta V = \pi a^3 \Delta P / \mu \quad (\mu: \text{剛性率})$$

と与えられる(山科, 1986)。ΔVを1×10⁶ m³、μを30 GPa、空洞が大気圧から静岩圧まで増圧したとしてΔPを40 MPaとすると、増圧源の半径は約600 mとなる。古屋・他(2001)によると空洞の半径は約300 mであるが、体積変化量の推定の誤差範囲や7月6日以降に空洞

が拡大していた可能性を考えると両者は矛盾しないと考えることができる。

4. まとめ

1983年以降の水準測量と1998年以降のGPSによる三宅島とその周辺での地殻変動を解析し、三宅島2000年噴火前から噴火、山頂陥没、脱ガスにいたるまでの変動源の推定を行った。1983年噴火と2000年噴火の間には、深さ9.5 kmにある深部マグマだまりが0.20 km³だけ体積増加したが、2000年6-8月の火山活動の最盛期には深部マグマだまりと深さ2.9 kmにある浅部流体だまりが共に収縮したことが明らかになった。さらに、2000年9月以降の脱ガス期の収縮は、浅部流体だまりで発生している。2000年7月8日の山頂陥没直後に一時的に観測された三宅島の膨張は、陥没カルデラの地下1~2 kmでの等方的な膨張によるもので、地下の空洞が陥没した物質によって満たされたことによる圧力増加によって説明できる。

謝 辞

本稿で用いた震源分布は気象庁によって提供されたものである。加藤照之教授と大久保修平教授の査読コメントは本書の改定に有益でした。ここに記して感謝します。

追悼の辞

本論文受理後に、共著者の多田 堯博士が亡くなられた。三宅島の地殻変動が、点圧力源（茂木モデル）の膨張・収縮によって説明できることを示したのは、故人の業績（多田・中村，1988）である。故人の御冥福をお祈りいたします。

参考文献

- Fukuyama, E., M. Ishida, S. Horiuchi, H. Inoue, S. Hori, S. Sekiguchi, T. Eguchi, A. Kubo, H. Kawai, H. Murakami, S. Yamamoto, and K. Nonomura, 2001, NIED moment tensor catalogue January - December, 2000, *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **217**, 1-131.
- 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.
- 長谷川裕之・村上 亮・政春尋志・松尾 馨・小荒井衛, 2001, 三宅島山頂の陥没地形の計測, *国土地理院時報*, **95**, 121-128.
- 国土地理院, 2000, 伊豆半島およびその周辺の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, **64**, 178-200.
- Kaidzu, M., T. Nishimura, M. Murakami, S. Ozawa, T. Sagiya, H. Yari, and T. Imakiire, 2000, Crustal deforma-

tion associated with crustal activities in the northern Izu-islands area during the summer, 2000, *Earth Planets Space*, **52**, ix-xviii.

- 風早康平・篠原宏志, 1994, マグマの上昇・噴火における揮発性成分の役割, *地質学論集*, **43**, 53-62.
- 菊地正幸・山中佳子・瀬瀬一起, 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.
- Kimata, F., S. Karaiya, M. Fujita, K. Matsumoto, T. Tabei, J. Segawa, and A. Yamada, 2000, Estimated pressure source on Kozu Island volcano, South Central Japan, from GPS measurements (July 1996-August 1999), *Earth Planets Space*, **52**, 975-978.
- Love, A.E.H., 1934, A treatise on the mathematical theory of elasticity (4th. ed), Cambridge, pp.643.
- Matsu'ura, M. and Y. Hasegawa, 1987, A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **47**, 179-187.
- 村上 亮・小沢慎三郎・中川弘之・藤原智・飛田幹男, 2000, 伊豆大島火山カルデラの沈降モデル, *地球惑星科学関連学会2000年合同大会予稿集*, Vb-017.
- 村上 亮・西村卓也・小沢慎三郎, 2001, 2000年9月以降の三宅島の収縮とガス放出との関係, *地球惑星科学関連学会2001年合同大会予稿集*, V0-033.
- 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, 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.
- Nishimura, T., S. Ozawa, M. Murakami, T. Sagiya, T. Tada, M. Kaidzu, and M. Ukawa, 2001, Crustal deformation caused by magma movement in the northern Izu Islands, Japan, *Geophys Res. Let.*, **28**, 3745-3748.
- Miyazaki, S., Y. Hatanaka, T. Sagiya, and Tada, T., 1998, The nationwide GPS Array as an earth observation system, *Bull. Geogr. Survey Inst.*, **44**, 11-22.
- 中尾 茂・木股文昭・及川 純・渡辺秀文・松島 健, 2000, GPS連続観測で観測された三宅島6月26日マグマ貫入イベント, *日本地震学会2000年度秋季大会講演予稿集*, P. 171.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- 小沢慎三郎・宮崎真一・西村卓也・村上 亮・鷺谷 威・矢来博司・海津 優, 2001, 伊豆諸島群発地震に伴う地殻変動データの時間発展インバージョン, *地球惑星科学関連学会2001年合同大会予稿集*, Jo-P004.
- 多田 堯, 1982, 山を削ると地殻は隆起する, *地震*, **35**, 427-433.
- 多田 堯・中村一明, 1986, 1983年三宅島噴火に関連した地殻変動とその解釈—INFLATION・DEFLATION モデル—, *火山*, **33**, 173-184.
- 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・金沢俊彦・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.
- 坂本慶行・石黒真木夫・北川源四郎, 1983, *情報量統計学*, 共立出版, 236頁.
- Ukawa, M., E. Fujita, E. Yamamoto, Y. Okada, and M. Kikuchi, The 2000 Miyakejima eruption: Crustal deformation and earthquake observed by the NIED Miyakejima observation network, *Earth Planets Space*, **52**, xix-xxvi.

三宅島 2000 年噴火前後の地殻変動と変動源の推定

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, 2001, 三宅島 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—, 地学雑誌, **110**, 257-270.
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.
山科健一郎, 1986, 応力場と火山噴火, 火山, **30**, S101-S119.
(Received July 2, 2001)
(Accepted December 20, 2001)