

GPS 観測による 2000 年 7 月 14 日三宅島火山噴火に伴う地殻変動

坂東 信人*・仮屋 新一*・木股 文昭*・中尾 茂** ***・及川 純**
渡辺 秀文**・鶴川 元雄****・藤田 英輔****・河合 晃司*****
松島 健*****・宮島 力雄*・奥田 隆*

(2003 年 7 月 23 日受付, 2005 年 4 月 28 日受理)

Crustal Deformation Associated with the July 14, 2000 Eruption of Miyakejima
Volcano Detected by GPS Measurements

Nobuto BANDO*, Shinichi KARIYA*, Fumiaki KIMATA*, Shigeru NAKAO** *** , Jun OIKAWA** ,
Hidefumi WATANABE** , Motoo UKAWA**** , Eisuke FUJITA**** , Koji KAWAI***** ,
Takeshi MATSUSHIMA***** , Rikio MIYAJIMA* and Takashi OKUDA*

Based on GPS data at adjacent 15 stations, a process of the 2000 eruption at Miyakejima volcano is analyzed for the period before the first phreatic eruption on July 14. Consequently the following results are obtained: 1) Deflation was remarkable up to around a caldera collapse with a small eruption on July 8. The observed data are explained by a deflation source of $-1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ in volume, which was located 3 km south west of the center of the summit (i.e. the formerly highest peak of Oyama) at 6 km in depth. The location was close to the first deflation source detected by the kinematic GPS data on June 27, suggesting that the deflation started on June 27 at around 6 km in depth (Meilano *et al.*, 2003). 2) After then the volcano inflated slightly at a shallower depth, and resulted in a phreatic eruption on July 14. In this period, however, the deflation at 6 km in depth is assumed to have continued with a rate suggested by an exponential curve fitted to the data during June 29 and July 8. The inflation during July 8 and 12 was considered to be $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ in volume, which was located 2 km south-southwest of the center of the summit at 3.5 km in depth. The shallow inflation source was just below the source of low frequency tremors (Kikuchi *et al.*, 2001). It suggests a close correlation between the inflation source and occurrence of the tremors.

Key words: 2000 Miyakejima Volcano eruption, spherical source, deflation, eruption process, magma intrusion, GPS measurements

1. はじめに

三宅島火山は最近 60 年間に 1940 年, 1962 年, 1983 年

と約 20 年間隔で山腹噴火を繰り返した。1983 年の活動後、次の噴火過程を準備過程から明確にする目的で、各

* 〒464-8602 名古屋市千種区
名古屋大学大学院環境学研究科
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya
University, Chikusa, Nagoya 464-8602, Japan.

** 〒113-0032 東京都文京区
東京大学地震研究所
Earthquake Research Institute, University of Tokyo,
Bunkyo, Tokyo 113-0032, Japan.

*** 現在: 〒890-0065 鹿児島市郡元一丁目 21 番 35 号
鹿児島大学理学部
Present: Faculty of Science, Kagoshima University,
1-21-35, Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan.

**** 〒305-0006 つくば市
防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and
Disaster Prevention, Tsukuba 305-0006, Japan.

***** 〒104-0045 東京都中央区
海上保安庁海洋情報部
Hydrographic and Oceanographic Department,
Japan Coast Guard, Chuo, Tokyo 104-0045, Japan.

***** 〒855-0843 島原市
九州大学大学院理学研究科
Graduate School of Science, Kyusyu University,
Shimabara 855-0843, Japan.

Corresponding author: Fumiaki Kimata
e-mail: kimata@seis.nagoya-u.ac.jp

種の火山観測が強化されていた。このような背景から、2000年6月26日の群発地震の開始と同時に、島内に設置されたボアホール傾斜計観測網やGPS連続観測網により、急速な地殻変動が詳細に検出されることになった。

2000年三宅島噴火は最近3回の噴火とは異なり、直径2km弱、深さ0.5kmのカルデラを形成した。経緯として、6月26日の群発地震発生と同時にGPS観測で検出された数10cmに達する地殻変動、そして27日早朝の三宅島西海岸での小規模な海底噴火、7月8日のカルデラ陥没、7月14日の高温噴出物を伴う最初の噴火(中田・他, 2001)、8月18日の噴煙高度15kmに達する最大規模の噴火、そして8月末からの多量のガス放出があげられる。さらに、とりわけ6月28日から8月下旬の間を通じて、三宅島と神津島間における多量のマグマ貫入と大規模な群発地震発生に特徴づけられる。

上で述べた地殻変動観測から、2000年三宅島火山噴火活動として、6月26-27日の三宅島島内におけるダイクの急速な貫入(Meilano *et al.*, 2003; Ueda *et al.*, 2005)、その後の三宅島における圧力源の収縮と、三宅島と神津島間における巨大なダイクの貫入(Nishimura *et al.*, 2001; Ito and Yoshioka, 2002; Furuya *et al.*, 2003; Murase *et al.*, 2003; Yamaoka *et al.*, 2005)が推定されている。さらに、2000年噴火以前における噴火準備過程についても、水準測量やGPS観測により観測された地殻変動から圧力源の存在が推定されている(名古屋大学大学院理学研究科・他, 2000; 西村・他, 2002)。

一方、山科(2003)は噴火予知の観点から、三宅島火山

におけるGPS観測、とりわけ国土地理院観測網の結果に注目した。彼はその準リアルタイムモニター結果から、7月14日の噴火を初め、主な噴火に先立って生じた基線長の伸びの傾向について指摘している。国土地理院によるGPS観測点93059(島北西部)と93060(島南東部)間の基線解3成分と基線長の時間変化(Kaidzu *et al.*, 2000)をFig. 1に示す。山科(2003)の指摘のように、三宅島山頂部を横断する基線は6月26-27日以降、全体として短縮するが、7月14日や8月18日といった顕著な噴火の前に、短縮の変動が一時的に停止、もしくは伸張に転じている。

傾斜変動にも、山体のふくらみの傾向がこの期間に見出される。防災科学技術研究所の0266観測点(島北東部)の傾斜変動記録(Ukawa *et al.*, 2000; 山本・他, 2001)をFig. 1に示す。例えば7月8日以降、7月14日の噴火に先立ち、明らかに南西下がり(雄山方向の沈降)の傾斜変動が停滞もしくは南西上がり(雄山方向の隆起)に転じている。さらに、この期間には周期50秒という長周期地震が傾斜ステップを伴って観測されており、その震源モデルとして圧力源での間欠的な圧力増(菊地・他, 2001)やピストン運動(Kumagai *et al.*, 2001)などが考えられている。

すでに、西村・他(2002)は、国土地理院と防災科学技術研究所によるGPSデータに基づき、この期間には、深部における収縮の圧力源の活動以外に、三宅島南西部の地殻浅部に膨張の圧力源を推定している。彼らは、1997年から1999年までのGPS観測データと水準測量データ

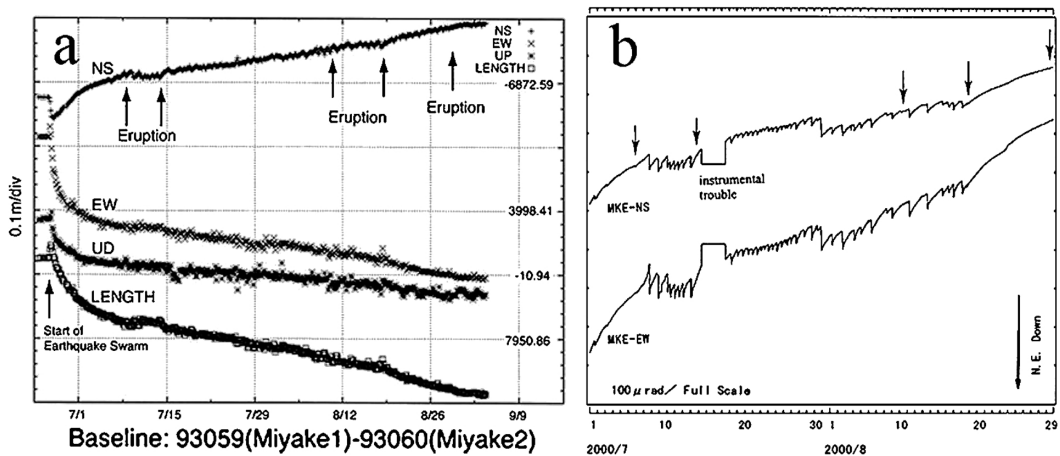


Fig. 1. Time series of the ground deformation detected by GPS measurements and ground tilt in Miyakejima in the period of June-August, 2000. Remarkable eruptions are shown by arrows. (A) Baseline coordinates and line length between the GPS sites of 93059 and 93060 (Kaidzu *et al.*, 2000), (B) ground tilt at MKE, same as the GPS site of 0266 (Ukawa *et al.*, 2000).

から推定された深さ 9.5 km の膨張の球状圧力源が、2000 年噴火時に収縮に転じたと仮定したうえで、本期間

の膨張の圧力源を深さ 1–2 km と推定している。また、彼らは、2000 年 5 月 15–22 日と 8 月 27–31 日の GPS 解析データを比較して得られた地殻変動から、三宅島と神津島間におけるダイク貫入と三宅島下の球状圧力源の推定を試み、収縮の球状圧力源を深さ 4.2 km に推定している (Nihsimura *et al.*, 2001)。

一方、岩石学的な研究からも、2000 年噴火では、複数のマグマソースが考察されている。Geshi *et al.* (2002) によれば、1469 年の噴火以降に存在し続けていた安山岩質マグマと深部の玄武岩質マグマが、それぞれ海底噴火と山頂噴火で噴出したと考えられている。

本稿では、7 月 8 日のカルデラ陥没以降、7 月 14 日の最初の高温噴出物を伴う噴火 (中田・他, 2001) までの期間について、中尾・他 (2000) と名古屋大学大学院理学研究科・他 (2000) による GPS 解析結果に基づいて、西村・他 (2002) の指摘する二つの圧力源、深部の収縮の圧力源と浅部の膨張の圧力源の体積変化量をより明確にする。

2. GPS 観測による 7 月 14 日前後の地殻変動

今回使用する GPS 観測点は、三宅島島内の 15 点である。観測点の内訳は、噴火活動以前から連続観測が実施

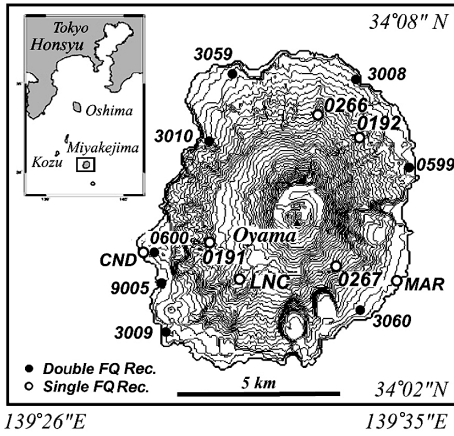


Fig. 2. Location map of the GPS continuous sites on Miyakejima Volcano, discussed in this study. Open and solid circles indicate the sites with single and double frequency GPS receivers, respectively. Contour lines represent every 20 m in height.

Table 1. Station coordinates, receivers and organization of GPS sites in Miyakejima.

Station ID	Longitude* (N)	Latitude* (E)	Height** (m)	Receiver	Organization
0191	139.4982	34.07633	319	Furuno MG2110	NIED
0192	139.5524	34.10931	203	Furuno MG2110	NIED
0266	139.5347	34.10931	284	Furuno MG2110	NIED
0267	139.5419	34.07448	375	Furuno MG2110	NIED
0599	139.5618	34.09378	29	Tri4000SSI	GSI
0600	139.4788	34.07578	40	Tri4000SSI	GSI
3008	139.5464	34.11742	54	Ashtec Z-XII3	ERI
3009	139.4808	34.05885	6	Ashtec Z-XII3	ERI
3010	139.4916	34.09987	67	Ashtec Z-XII3	ERI
3059	139.5038	34.12106	38	Tri4000SSE	GSI
3060	139.5472	34.05911	34	Tri4000SSE	GSI
9005	139.4807	34.06738	3	Tri4000SSE	JHD
CND	139.4768	34.07398	21	Ashtec Z-XII3	ERI
LNC	139.5123	34.07119	463	Ashtec Z-XII3	ERI
MAR	139.5585	34.07190	31	Ashtec Z-XII3	ERI

*: WGS84 system,

** : above sea level of Tokyo datum

NIED: National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

GSI: Geographical Survey Institute

ERI: Earthquake Research Institute, University of Tokyo

JHD: Hydrographic Department, Japan Coast Guard

されていた国土地理院、東京大学、防災科学技術研究所、海上保安庁水路部の12連続観測点と、6月末以降に東京大学・名古屋大学・九州大学が設置した臨時観測点から観測期間が十分な3点である。GPS観測点の配置をFig. 2に示す。そして、各観測点における座標値と使用した受信機の機種、担当する機関名をTable 1に記す。なお、国土地理院が運用するGPS観測点は5桁ないし6桁の観測点IDで称されるが、本論では下4桁のみの略称を利用した。観測点3059と3060には上に9が、観測点0599と0600には上に96がつく。

本論では、各観測点における1日毎の座標値の時間変化について取り上げ、連続観測点については中尾・他(2000)、臨時観測点については名古屋大学大学院理学研究科・他(2000)による解析結果を利用した。ともに国土地理院のつくばGPS点に対する相対的な変位である。この座標値の変化には、三宅島において3-4cm/yrと推定されるアムールプレートに対するフィリピン海プレートの収束運動も含まれる(小竹・他, 1998)。しかし、検討する期間が2ヶ月間を超えず、また観測した変動量が20cmに達することから、プレート収束運動は、相対的に観測量の5%以下と考えられる。したがって、ここではフィリピン海プレートの収束速度を考慮していない。

三宅島では、6月26-27日に今回の噴火の契機となった群発地震発生と急速な地殻変動が観測された。この地殻変動は6時間という短時間に3本のダイク貫入が推定されるほど、急速で複雑である。このような変動は一部

の観測点では28日も継続する。しかし、27日以降になると、すべてのGPS観測点で、島の内部方向への水平変動と沈降の傾向が観測されている(Kaidzu *et al.*, 2000; 中尾・他, 2000)。この地殻変動は、Fig. 1からも明らかのように、7月8日までに最大で50cmを上回る。

Fig. 1に示すように、地殻変動は急速に加速し、その後、概して穏やかに収束する。たとえば、2000年有珠火山噴火では最初のマグマ貫入後、新たなマグマ貫入が観測されず、観測された地殻変動は指数関数的に減衰している(森・他, 2002)。

そこで本論でも、全体的な収縮傾向を指数関数で近似することにし、6月29日から山頂噴火が始まる7月8日までの観測データを用いて、その係数を推定する。なお、Meilano *et al.* (2003)やUeda *et al.* (2005)によれば、6月27日に三宅島西海岸に $4 \times 10^7 \text{ m}^3$ ものダイクの貫入が推定されている。このダイク貫入に関連すると考えられる地殻変動が28日にも継続してGPS観測などで検出されている。そのため、今回の議論は29日からとした。この期間に観測された変位量 D_{day} を以下に示す指数関数で近似することにする。

$$D_{\text{day}} = D_0 + A \times (1 - \exp(-(Day)/B)) + C \quad \dots (1)$$

Day: 6月29日からの日数

D_0 : 6月29日の観測値

これに基づき、7月9-16日の期間における地殻変動について、観測値と近似した指数関数の外挿による推定値との残差を求めた。一例として、観測点3009(島南西

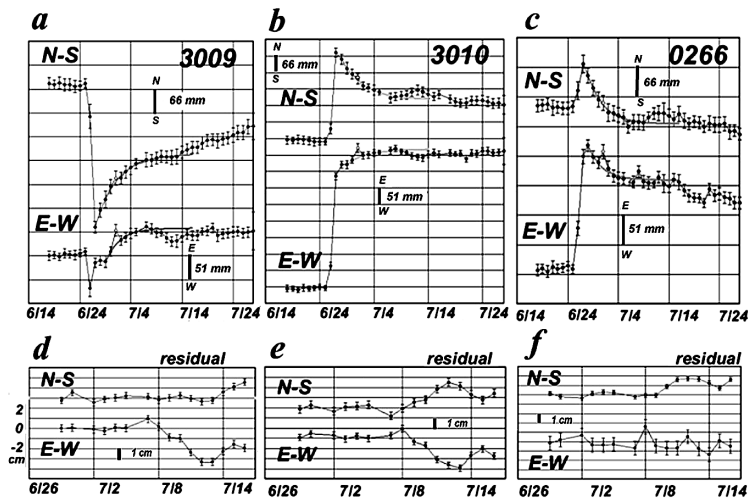


Fig. 3. Temporal changes of the horizontal coordinates at 3009, 3010 and 0266 GPS sites in the period from June 18 to July 27 after Nakao *et al.* (2000). Figures (a), (b) and (c) are observed GPS data and exponential curves fitted to the data in the period of June 29-July 8, and (d), (e) and (f) are residuals of observation from the exponential approximation.

部), 3010 (島北部), 0266 (島北東部) において観測された水平変位, その近似曲線, そして両者の残差を Fig. 3 に示す. 上下成分についても, 観測点 3009, 3010, 0266, 0191 (島西部) における観測結果と残差を Fig. 4 に示す. なお, 7 月 6 日は水平・上下成分とも, データ数がきわめて少なく, RMS も 10 cm と他の期間の結果と比較し 2 桁も大きくなることから, 図から省略した. また, 7 月 1 日の結果は○で示されるように, とりわけ東西成分において近似曲線から大きく外れるものが多い. したがって, この 2 日間のデータは, 指数関数で近似する際にも最初から省いた.

7 月 8 日までは指数関数で近似した値と実際の観測値の残差は標準偏差として水平成分で ± 5 mm, 上下成分でも ± 10 mm に収まる. 7 月 5 日までの期間は一つの指数関数で近似されるような地殻変動が主として進行していたと考えられる.

しかし, Fig. 3 から明らかのように 7 月 7 日以降になると残差は大きくなり, そして 10 日以降になると観測値は外挿した推定値から三宅島の膨張の地殻変動を示す方向に一方的にずれ, 7 月 12 日前後に最大のずれを示す. その残差は島西部に位置する観測点 3009 で西へ 3 cm, 島北部に位置する観測点 3010 で北へ 1-2 cm, 西へ 2-3 cm, 島北東部に位置する観測点 0266 で北へ 1-2 cm を示す. これらの水平変動ベクトルは概して島の内陸か

ら海方向を示し, 三宅島火山の膨張を示唆する.

GPS 観測では, 上下成分は観測精度が水平成分よりも劣ると考えられる. その上下成分でも, 11-13 日に各観測点で隆起が認められ, 三宅島の膨張が示唆される. 上下成分の変化をみると, それまで続いていた沈降が, 11 日か 12 日に概して緩和もしくは隆起に転じている. そして, 7 月 14 日の噴火以降, 沈降は再び加速する. Fig. 4 に示した観測点のうち, 7 月 8 日までに 40 cm を超える沈降を示す観測点 0191 では, 11-13 日の期間に 10 cm の隆起を生じている. 対照的に, 最も北側にあり, 8 日までの沈降が 10 cm と最も小さい観測点 0266 では 11-13 日に隆起は検出できず, 14 日には 2 cm ながらも沈降が観測されている.

Ukawa *et al.* (2000) は, Fig. 1 に示すようなボアホール傾斜計による地殻変動観測から, 2000 年三宅島火山噴火を 4 つのステージに区分した. それによると, カルデラ陥没の 7 月 8 日から最大の噴火が発生した 8 月 18 日までの期間に傾斜変動ステップが観測され, 2000 年三宅島火山噴火過程の第三ステージと呼ばれている. この期間, 山頂側が沈降を示す傾斜変動が概して観測されている. しかし, この期間の前半にあたる 7 月 8 日から 14 日までの期間には, Fig. 1 に示すように山頂方向への傾斜変動が緩和していることが明らかである. すなわち, GPS 観測で三宅島火山の収縮が一時的に緩和し膨張に

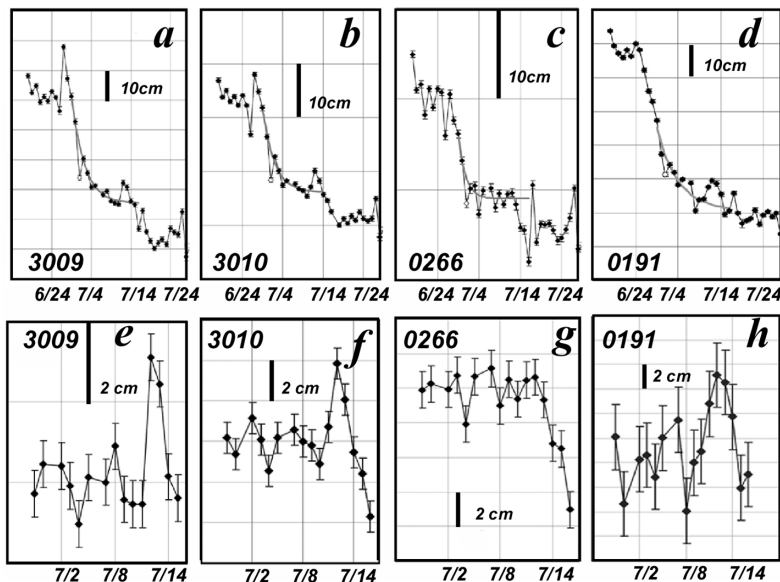


Fig. 4. Time series of the vertical coordinates at 3009, 3010, 0266 and 0191 GPS sites in the period from June 18 to July 27 after Nakao *et al.* (2000). Figures (a), (b), (c) and (d) are observed data and exponential curves fitted to the data in the period of June 29-July 8, and (e), (f), (g) and (h) are residuals of observation from the exponential approximation.

転じたと同様な地殻変動が観測されている。

もう一つの特徴は、GPSで観測された水平変動・上下変動とも、観測値と指数関数による近似値との残差が、7月12日に最大を示すことである。三宅島山体の膨張が最大になった12日のあと、14日に本格的な噴火が観測されたのである。

次に、6月29日から7月15日までの期間について、GPS観測から検出された地殻変動を詳細に検討する。まず7月8日までに観測された収縮の地殻変動を指数関数で近似し、その推定値と観測値の残差から、収縮以外の

地殻変動を考察する。

残差から求まる水平変動ベクトルについて、Fig. 5に6月29日-7月8日の期間、Fig. 6に7月8-15日の期間について示す。各ベクトルに付す楕円は7月8日までの各観測点で求まる東西・南北成分の残差の標準偏差である。7月1日と6日は、上述のように観測値が近似曲線から大きく外れるため省いた。7月8日までの期間、残差の水平変動ベクトルとして、数mm以内におおむね留まっている。すなわち、収縮の地殻変動が指数関数的に進行していたと考えられる。

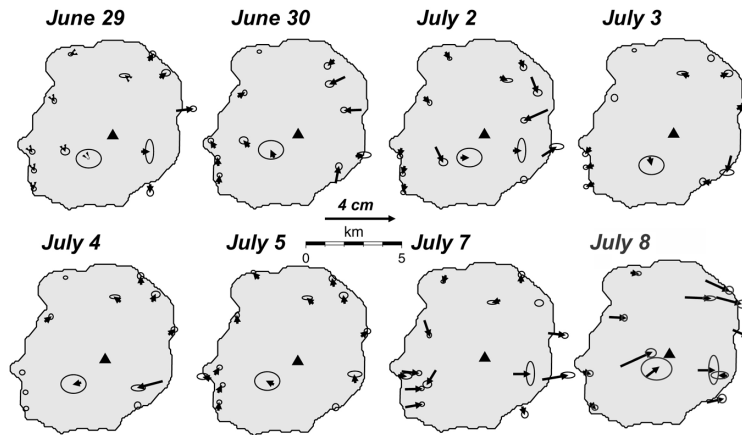


Fig. 5. Residuals of the horizontal displacements at each GPS site in the period of June 29-July 8. Standard deviations of the residuals in north-south and east-west components are shown as error ellipses of the horizontal vectors.

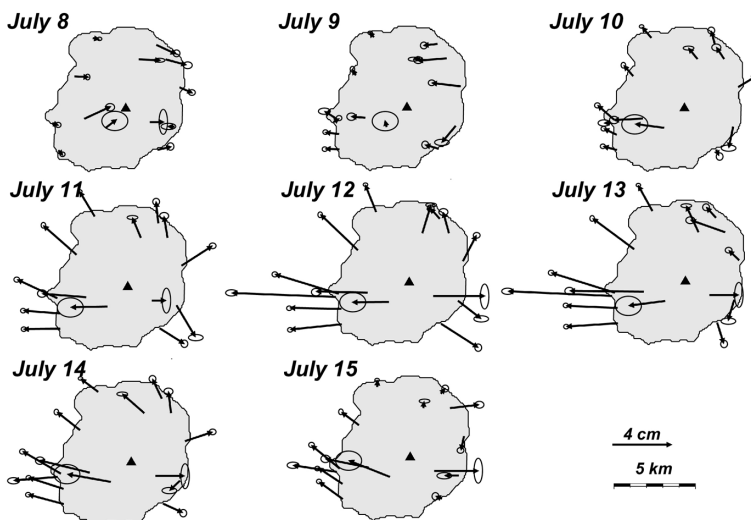


Fig. 6. Residuals of the horizontal displacements at each GPS site in the period of July 8-15. Error ellipses are the same as in Fig. 5.

これに対して、7月8日以降、残差は1cmを上回り、7月10日から島の膨張を示す水平変動がとりわけ島の南部域で顕著になり、この膨張の地殻変動は12日に最大となる。

Fig. 7 に 6 月 29 日に対する 7 月 8 日の地殻変動と、残差から計算される 7 月 8 日に対する 7 月 12 日の地殻変動を示す。

6 月 29 日-7 月 8 日の期間には 20 cm を超える収縮と沈降の地殻変動が島南西部を中心に観測された。一方、8-12 日は収縮と沈降の地殻変動が減衰しながら、島南西部を中心に最大 5 cm に達する膨張と隆起の地殻変動も検出される。

Kaidzu *et al.* (2000) によれば、7 月 8 日以降になると、三宅島から北西へ 30 km 離れた神津島や新島でも 10 cm を越える地殻変動が GPS により観測された。そして、8 月末までに三宅島と神津島の間に体積増にして 10^9 m^3 を超える巨大なダイクの貫入が推定されている (Nishimura *et al.*, 2001; Ito and Yoshioka, 2002; Furuya *et al.*, 2003; Murase *et al.*, 2003; Yamaoka *et al.*, 2005)。

詳細に検討すると、国土地理院による GPS 観測結果は、神津島と新島間で観測された地殻変動が時間的に一様に進行していないことを示す (Kaidzu *et al.*, 2000)。ダイク貫入過程の時間発展モデルを考慮した Ito and Yoshioka (2002) と Murase *et al.* (2003) によれば、7 月 8 日から 14 日の期間は、全期間を通して推定されるダイ

クの北西端にあたる新島・神津島間で主にダイクの貫入が進行している。ゆえに、本報告ではその影響を考慮せずに議論を進める。

3. 7 月 8 日までの収縮の圧力源モデルと 7 月 12 日の膨張の圧力源モデル

6 月 29 日-7 月 8 日の期間に GPS 観測で検出された地殻水平・上下変動から、球状収縮源 (Mogi, 1958) を推定した。Fig. 7e, f に推定した球状の圧力源の位置、そして圧力源から計算される水平変動ベクトル・上下変動コンターをそれぞれ示す。

球状の収縮源は、Fig. 7e に灰色の●で示されるように、雄山山頂から南西へ 3 km、深さ 6.0 km に位置し、 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ の体積減が推定される。一方、7 月 8 日以降の期間に推定される膨張の圧力源は、Fig. 7f に○で示されるように、雄山の南南西 2 km、深さ 3.5 km、体積増加量 $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ として推定される。当然ながら、圧力源の深さと体積増加量はトレードオフの関係にある。これまでの議論では、重力変化も含めた Furuya *et al.* (2003) を除けば、地殻変動観測データだけで議論している西村・他 (2002) と Meilano *et al.* (2003) が推定している圧力源は深さに $\pm 1 \sim 3 \text{ km}$ の誤差を有する。今回も同様な結果である。

今回の議論では、海拔 10 m から 500 m という観測点間の高度差を考慮していない。推定した圧力源の深さの

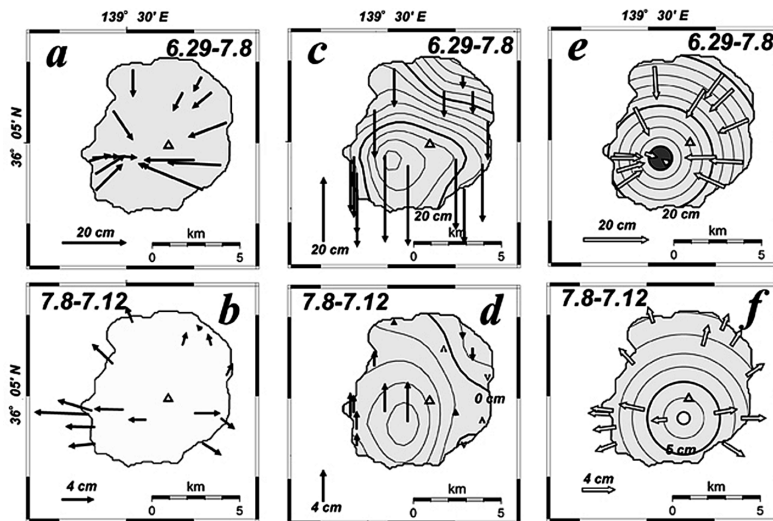


Fig. 7. Location map of the deflation and inflation spherical sources and ground deformation calculated from the point source models in the periods of June 29-July 8 and July 8-12, 2000. Figures (a) and (b) are observed horizontal displacements, and (c) and (d) are observed vertical displacements, and (e) and (f) are locations of the deflation and inflation spherical sources and calculation of horizontal and vertical movements.

誤差を考えると、観測点間の高度差を考慮するレベルに至っていないと考えられるからである。

次に浅部の膨張の圧力源について議論する。西村・他(2002)によると、この期間の増圧の圧力源は最適解でも深さが1.5 kmと浅い。そのため、その体積増加量は $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ と本稿の結果よりも一桁小となる。

しかし、彼らは上述したように、収縮の圧力源の位置と深さを2000年噴火以前に推定された膨張の圧力源に固定し、浅部の圧力源の位置および体積変化量を求めている。6月26–27日の地殻変動を詳細に検討したMeilano *et al.* (2003)とUeda *et al.* (2005)の結果にも、西村・他(2002)が仮定した深さ9.5 kmに収縮源は推定されていない。また、西村・他(2002)は、浅部の膨張の圧力源として、陥没カルデラの地下1–2 kmでの等方的な膨張すなわち地下の空洞が陥没した物質により満たされたことによる圧力増加を考えている。しかし、カルデラ陥没については、陥没量が8日に $0.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ と地表変形から推定され(長谷川・他, 2001)、その後増加し、14日には $2.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ に至ったと考えられている(Geshi *et al.*, 2002)。西村・他(2002)により推定された圧力源における体積増加と比較し、カルデラ陥没による体積減は2桁も大である。

4. 今回推定された圧力源と三宅島火山噴火で推定されている圧力源の関連

今回、私達が推定した深部における収縮と浅部における膨張の球状圧力源のうち、収縮の球状圧力源は、Meilano *et al.* (2003)により、6月26日群発地震が始まった直後、27日0時から推定された球状収縮源と位置と深さが一致する。したがって、27日から活動を開始した圧力源が、27日以降も収縮の活動を継続していたと考えられる。この深さは西村・他(2002)で得られたものにくらべて有意に浅い。

これまでも述べたように、西村・他(2002)においては、2000年噴火の際の深部収縮源は、噴火前の地殻変動観測から求められていた膨張源が収縮に転じたものであると仮定されている。しかし、2000年噴火以前の膨張の圧力源については、西村・他(2002)の結果より浅いモデルも考察されている。たとえば、1996–1999年間に三宅島島内の20余点で毎年繰り返されたGPS観測(名古屋大学理学部・他, 1998)から、Fig. 8に示すように、山頂の南西方向の深さ7 kmにシル状の圧力源が推定されている(名古屋大学大学院理学研究科・他, 2000)。また、木股(未発表)は1988年から1999年に実施された水準測量を三宅島験潮所における潮位観測と結合し、得られた上下変動から島南西部の深さ7.5 kmに球状圧力

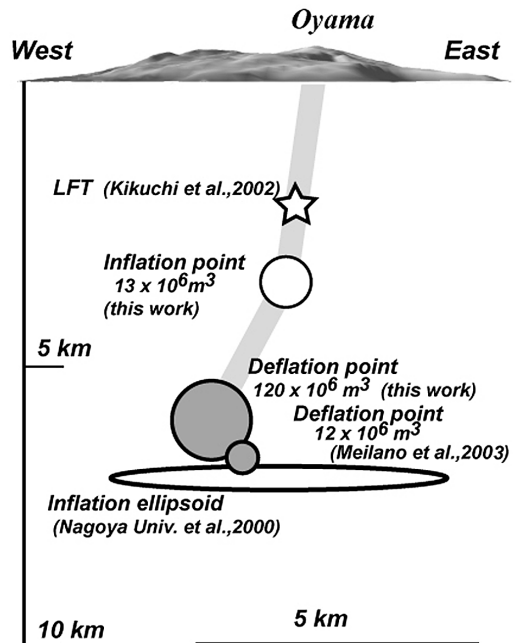


Fig. 8. A cross-sectional view of the pressure sources obtained. Open and large gray circles represent the deflation and inflation point sources discussed by the present paper, respectively. Small gray circle and star indicate the locations of the deflation source estimated from kinematic GPS measurements on June 26–27 by Meilano *et al.* (2003) and the hypocenter of long period seismic wave on July 14 by Kikuchi *et al.* (2001), respectively. Open ellipse shows the location of the inflation sill source estimated from the GPS measurements in the period of 1996–1999 by Nagoya University *et al.* (2000).

源を推定している。以上の観点から、今回推定した深さ6 kmの球状圧力源の方が、2000年噴火前の地殻変動から推定される圧力源や、2000年6月27日に推定された収縮の球状圧力源との関連が密接であると考えられる。

Miyasaka *et al.* (2005)は、火山岩中の集斑晶の鉱物組み合わせと組成に基づき、三宅島火山のマグマ供給系について考察している。彼らは、2000年噴火において、海底噴出物中に安山岩質マグマ由来の集斑晶、8月18日の噴火以降の山頂噴出物に玄武岩質マグマ由来の集斑晶を認めている。今回推定した収縮の圧力源は、6月26日の群発地震直後から活動が推定され、しかも深さが6.0 kmに推定されることを考慮すると、主として安山岩質マグマと考えられる。7月14日の噴出物にも安山岩質マグマ由来の集斑晶が認められることから、6月26日深夜から

始まった深さ 6–7 km における球状圧力源での収縮が、7 月 14 日の噴火まで主たるマグマ供給システムであると考える。

5. 7 月 8 日カルデラ陥没以降に観測された傾斜変動ステップや長周期地震波動との関連

8 日のカルデラ陥没以降、島内の 5 点に設置されたボアホール傾斜計では、明瞭な傾斜変動ステップが、8 月 18 日の最大規模の噴火まで断続的に 45 回観測されている (Ukawa *et al.*, 2000; 山本・他, 2001)。傾斜変動ステップは、島南部にその発生源があることを示唆している。そこで、Fujita *et al.* (2002) は、島南部の深さ 7 km に北西–南東方向に伸びるシルを考え、その体積変化で説明しようとしている。このモデルは今回議論してきた深部の圧力源と深さはよく一致する。しかし、私達の推定した圧力源は収縮であり、対照的に彼らのモデルは開口すなわち膨張となっている。これは基本的に収縮するものが、ある条件の下で一時的に膨張し、傾斜ステップを生じさせると解釈することができる。ただし、Fujita *et al.* (2002) は、わずか 5 点の傾斜変動観測点であり、圧力源の形状などに課題を有する。

傾斜変動ステップと同時に、50 秒程度の長周期波動を有する地震が発生している。長周期地震波動のパーティクルモーションから、震源が雄山南～南西方向の深さ 2–3 km に計算されている (菊地・他, 2001)。求められた震源 (Fig. 8 の☆) は今回推定された膨張の圧力源の上部に位置している。長周期地震波動の発生源モデルとしては、間欠泉モデル (菊地・他, 2001) とピストンモデル (Kumagai *et al.*, 2001) が提案されている。長周期地震波動の観測から提案された二つのモデルとも、雄山の南に多量のマグマ溜り、もしくは熱水溜りが必要となる。今回推定した深さ 3.5 km の膨張の圧力源は、このマグマ (熱水) 溜りに相当すると考えられる。長周期地震波動は深さ 2–3 km と考えられることから、膨張の圧力源直上で発生したと考える。

6. 結論

2000 年三宅島噴火の一連の活動の中から、本論では、6 月 29 日より 7 月 8 日のカルデラ陥没を含め 7 月 14 日の最初の高温噴出物を伴った噴火活動までの期間について、GPS による地殻変動観測データを検討した。観測された収縮の地殻変動を指数関数近似すると、7 月 8 日まで観測値との残差は小さくなるが、10 日以降は膨張を示す残差となる。12 日に膨張は最大 10 cm に達する。

1) 6 月 29 日から 7 月 8 日までの GPS 観測データから、雄山の南西 3 km, 深さ 6.0 km, 体積にして -1.2×10^8

m^3 の減圧の圧力源が推定される。Meilano *et al.* (2003) により 6 月 27 日にはほぼ同一場所の深さ 6.6 km に収縮の圧力源が推定されており、推定された圧力源での収縮の活動が 6 月 27 日以降に継続していたと考える。

2) カルデラ陥没の 8 日以降に観測された収縮の地殻変動には、指数関数近似からの残差として、わずかな膨張を示す地殻変動が検出される。この膨張の地殻変動から球状圧力源を仮定すると、増圧の圧力源として雄山の南南西 2 km, 深さ 3.5 km, 体積増 $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ が推定される。

3) 7 月 8 日以降に周期 50 秒の長周期地震が発生しているが、その震源は膨張の圧力源 (深さ 3.5 km) の直上に位置する。

なお、本稿では時間的に詳細なモデルとして十分に議論ができていない。現在、三宅島と神津島間に貫入したダイクの時間依存モデルを考察している。それと関連し、7 月 8 日以降、三宅島の島内で観測されたマグマ貫入過程を時空間的に詳細に議論したいと考えている。また、2000 年噴火前の準備過程に関しても、圧力源を詳細に調べることが必要であろう。

謝 辞

今回の議論に国土地理院 GEONET で運用されている GPS 観測点データも使用した。東京大学の山科健一郎、京都大学の橋本 学と大倉敬宏の各氏から本稿について、非常に懇切かつ適切な助言をいただいた。また、名古屋大学環境学研究科地震火山・防災研究センターの藤井直之教授をはじめスタッフの方からは日常的に助言をいただいた。さらに、考察の中で GMT (Wessel and Smith, 1991), MICAP-G (内藤・吉川, 1999), カシミールの解析支援ソフトウェア (杉本智彦, 2002) を利用した。記して、これらの関係者に深く感謝します。

引用文献

- Fujita, E., Ukawa, M., Yamamoto, E. and Okada, Y. (2002) Cyclic jerky opening of magma sheet and caldera formation during the 2000 Miyakejima volcano eruption, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1326, doi : 10.1029/2000GL013848
- Furuya, M., Okubo, S., Kimata, F., Miyajima, R., Meilano, I., Sun, W., Tanaka, Y. and Miyazaki, T. (2003) Mass budget of the magma flow in the 2000 volcano-seismic activity at Izu-Islands, Japan. *Earth Planets Space*, **55**, 375–385.
- Geshi, N., Shimano, T., Chiba, T. and Nakada, S. (2002) Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, **64**, 55–68.

長谷川裕之・村上 亮・政春尋志・松尾 馨・小荒井衛

- (2001) 三宅島山頂の陥落地形の計測. 国土地理院時報, **95**, 121-128.
- Ito, T. and Yoshioka, S. (2002) A dike intrusion model in and around Miyakejima, Niijima and Kozushima in 2000. *Tectonophysics*, **359**, 171-187.
- Kaidzu, M., Nishimura, T., Murakami, M., Ozawa, S., Sagiya, T., Yarai, 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.
- 菊地正幸・山中佳子・瀧瀬一起 (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.
- 小竹美子・加藤照之・宮崎真一・仙石 新 (1998) GPS 観測に基づくフィリピン海プレートの相対運動と西南日本のテクトニクス. 地震, **2**, **51**, 171-180.
- 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**, 687-690.
- Meilano, I., Kimata, F., Fujii, N., Nakao, S., Watanabe, H., Sakai, S., Ukawa, M., Fujita, E. and Kawai, K. (2003) Rapid ground deformation of the Miyakejima volcano on 26-27 June 2000 detected by kinematic GPS analysis. *Earth Planets Space*, **55**, e13-e16.
- Miyasaka, M., Nakagawa, M. and Nakada, S. (2005) Magma plumbing system of the 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, **67**, 254-267.
- Mogi, K. (1958) Relation between the eruption of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **36**, 99-134.
- 森 濟・木股文昭・山本圭吾・井口正人・味喜大介・宮島力雄・高山鉄郎・大島弘光・鬼澤真也・鈴木敦生・前川徳光 (2000) 有珠火山 2000 年噴火に伴う地盤変動. 平成 12 年度科学研究費補助金研究成果報告書「有珠山 2000 年噴火と火山防災に関する総合的観測研究」, 96-102.
- Murase, M., Nakao, S., Kato, T., Tabei, T., Kimata, F. and Fujii, N. (2003) Dike intrusion process of 2000 Miyakejima — Kozujima event estimated from GPS measurements in Kozujima — Niijima Islands, central Japan. 2003 AGU Fall Meeting.
- 名古屋大学大学院理学研究科・東京大学地震研究所・九州大学大学院理学研究科 (2000) GPS 観測による三宅島の地殻変動観測—2000 年噴火準備過程における地殻変動 (1995. 9-1999. 8). 第 89 回噴火予知連絡会資料.
- 名古屋大学理学部・東京大学地震研究所・九州大学理学部 (1998) GPS 観測による三宅島における地殻水平変動 (1995-1997 年). 火山噴火予知連絡会会報, **71**, 84-85.
- 内藤宏人・吉川澄夫 (1999) 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発. 地震, **2**, **52**, 101-103.
- 中尾 茂・及川 純・渡辺秀文・仮屋新一・木股文昭・鶴川元雄・藤田英輔・中禮正明・村上 亮・河合晃司 (2000) 三宅島における地殻変動—大学, 国土地理院, 防災科学技術研究所, 気象庁, 水路部の GPS データ統一解析. 日本地震学会講演予稿集 2000 年度秋季大会, A15.
- 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.
- Nishimura, T., Ozawa, S., Murakami, M., Saiya, 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. 地震研究所彙報, **77**, 55-65.
- 杉本智彦 (2002) カシミール 3D 入門. 実業之日本社, 148 p.
- Ueda, H., Fujita, E., Ukawa, M., Meilano, I. and Kimata F. (2005) Magma intrusion and discharge process at the initial stage of the 2000 Miyakejima activity inferred from tilt and GPS data. *Geophys. J. Int.* (in press).
- 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.
- 山本英二・鶴川元雄・藤田英輔・岡田義光・菊池昌江 (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. 地学雑誌, **110**, 181-190.
- Yamaoka, K., Kudo, M., Kawamura, M., Kimata, F. and Fujii, N. (2005) Long-lasting dike intrusion in the 2000 eruption of Miyakejima Volcano — Where did the magma come from? — *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **67**, 232-242.
- 山科健一郎 (2003) 2000 年三宅島火山噴火の活動予測の試み—噴火に先立つ山体のふくらみの検討. 火山, **48**, 35-42.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1991) Free software helps map and display data. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, **72**, 441, 445-446.

(編集担当 大倉敬宏)