

GPSにより観測された八丈島における地殻変動と そのダイク貫入モデルの推定 (2002年8月13~22日)

木股文昭*・メイラノイルワン*・深野慶太**

(2003年3月17日受付, 2003年12月9日受理)

Ground Deformation at Hachijo Island, Japan on 13-22 August 2002
Observed by GPS Measurements and Estimated Dike Intrusion Model

Fumiaki KIMATA*, Meilano IRWAN* and Keita FUKANO**

An earthquake swarm was observed near Hachijo Island, Japan, between 13 August and September 2002. Continuous GPS measurements at four sites on Hachijo Island detected the displacements accompanying the earthquake swarm. Eastward displacements of 2-6 cm were detected during the period of 13-16 August, after which the displacements tended toward the northwest. A dike intrusion model is proposed based on the observed ground deformation. The putative intrusion is located at 3.3 km depth under Hachijo-Fuji, and is a 2.2-m wide tensile dike of depth 3.3 km and is extended to 4.5 km deep. The dike intrusion model estimated from the ground deformation is consistent with a location and a dimension of the model based on the low-frequency earthquake mechanism proposed by Kumagai *et al.* (2003). We discuss three models of a dike intrusion, a point deflation, and a dike deflation from the eastward or southeastward displacements detected in the period of 16-22 August. From the ground deformation it is difficult to decide the priority of the models. According to the depth and volume changes of the estimated pressure source of three models, it is suggested that the deeper part of the first inflated dike turns to deflation on August 16.

Key words: ground deformation, Hachijo Volcano, GPS measurements, dike intrusion model

1. はじめに

GPS観測の実用化は地殻変動観測に大きな衝撃を与えている。既存の観測手法ではとても検出できなかった時間的にも空間的にも詳細な地殻変動がGPS観測により次々と観測されている。そして、観測事実の指摘だけでなく、国土地理院の全国観測網(GEONET)のように

充実したGPS観測網では地殻変動のソースメカニズムまで議論されている。

火山噴火過程の研究分野に関して、GPS観測が初めて捕えた火山噴火に伴う地殻変動は1989年伊東沖海底噴火である(Shimada *et al.*, 1990)。Kilauea火山(Hawaii)のようなホットスポットに位置する火山では、すでにSegall *et al.* (2001)により、連続GPS観測からダイク貫入過程が明確にされている。プレート沈み込み域に位置する三宅島でもマグマの貫入過程が詳細に解明されている。2000年三宅島噴火の契機になった2000年6月26~27日の群発地震発生と同時にわずか半日余りの短期間に数十cmに達する地殻変動が連続GPS観測で検出された(たとえば、Kaidzu *et al.*, 2000)。そして、検出された地殻変動から島内に複数のダイク貫入とより深部における減圧の球状圧力源やダイク収縮が詳細に推定されている(Meilano *et al.*, 2003; Ueda *et al.*, 2003)。

八丈島は伊豆諸島に位置しながらも、地震活動は他の伊豆諸島と比較し低く、地震観測開始以来、気象庁地震

* 〒464-8602 名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院環境学研究科 地震火山・防災
研究センター

Research Center for Seismology, Volcanology and
Disaster Mitigation, Graduate School of Environ-
mental Studies, Nagoya University, Furo, Chikusa,
Nagoya 464-8602, Japan.

** 〒104-0045 東京都中央区築地 5-3-1
海上保安庁海洋情報部海洋調査課航法測地室
Hydrographic and Oceanographic Department,
Japan Coast Guard, 5-3-1 Tsukiji, Chuo, Tokyo
104-0045, Japan.

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

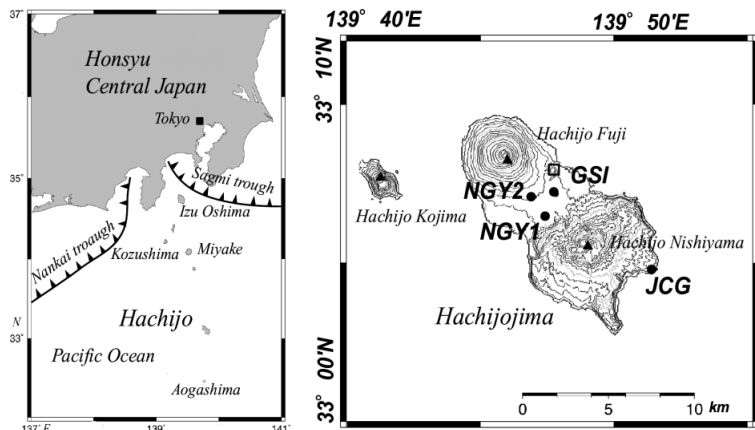


Fig. 1. The index map of Hachijo Island and location map of GPS and tiltmeter sites on Hachijo Island. The location of GPS and tiltmeter sites are shown as closed circles and open square, respectively. Contours are shown as every 50 meter in the location map and it is deduced from digital data by GSI.

カタログによればほとんど観測されていなかった（上野・他，2002）。しかし，2002年8月に顕著な群発地震が発生した。この地震活動はマグニチュードが最大4.1と小さいながらも，発生回数が最大1日あたり1825回（8月15日），1時間あたり252回（8月15日8時）に達した（気象庁，2003）。8月末までの約2週間に7000回の地震が観測された。

当時，島内の4点で連続GPS観測が実施されており，群発地震発生と同時に有意な地殻変動を検出した。本論ではGPSにより観測された地殻変動データを説明するモデルとしてダイク貫入モデルを検討する。

2. 連続GPS観測で検出された地殻変動

今回の群発地震発生まで，三宅島や大島，神津島といった火山活動の活発な伊豆諸島で，近代的な地震観測の開始以降，八丈島は地震活動がもっとも低調な火山島であった（上野・他，2002）。気象庁（1996）によれば，噴火の記録は15世紀から17世紀に周辺域の海底火山噴火も含め5回だけである。島内において，歴史に記録されるような大規模な群発地震は1698年以降に記録されていない。

気象庁（2002）によれば，今回の群発地震はまず八丈島北部，八丈富士（西山）直下の深さ10 kmに始まり，震源は南北方向に分布した。この群発地震は有感地震までに発達した。8月15日9時ころより，震源域は八丈島の北海岸へ移動し，その後さらに北から北西の沖合へ移動した。10月に北西沖で再び地震活動が活発化した。

Fig.1に示すように，八丈島はフィリピン海プレート収束速度を議論するうえで格好な場所に位置する。しかも最近の火山活動は，同じ伊豆諸島の大島や三宅島，神

津島と比較し，格段に低い。名古屋大学などでは，フィリピン海プレートの収束速度を解明する目的で，GPS受信機の導入と同時に年1~2回の臨時GPS観測を八丈島で1989年に開始した。そして，1994年には，本州の内陸に位置する高山観測点に対し，北西方向へ3 cm/yrの水平変動を八丈島で検出している（Kimata *et al.*, 1994）。地震学的に提案されていたフィリピン海プレート収束運動と概して一致する結果である。

2002年8月群発地震時，八丈島ではFig.1に示す4点でGPS連続観測が実施されていた。1992年に名古屋大学による八丈支庁観測点（八丈町大賀郷，NGY1点と称す）は，臨時観測から現地収録による連続観測に移行した。国土地理院の観測点（八丈町三根富士見，地理院のGPS観測点コード95113，GSI点と称す）は，1995年から連続観測が実施されている。海上保安庁水路部（当時，現海上保安庁海洋情報部）は八丈灯台（八丈町末吉，以下JCG観測点と称す）でデファレンシャルGPSの運用を目的として1998年からテレメータによる連続観測を実施している。また，名古屋大学では，八丈島北部にそびえる八丈富士による山岳波形成過程の解明と伝播遅延補正改善によるGPS観測の高精度化を目的として，2000年に八丈高層気象台構内（八丈町大賀郷）にGPS観測点（以下NGY2観測点と称す）を増設した。4点のGPS観測点中3点が島中央部の2 km内に集中し，観測点配置は非常に偏在している。

今回の群発地震発生と同時に，GSI観測点やJCG観測点において東南方向の水平変動が観測された（国土地理院，2002；海上保安庁海洋情報部，2002）。そして，ダイクの貫入角度，走向などを強く拘束してダイクの深さ3 kmで開口量 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ とその後 $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ の閉口と

なるダイクモデルが推定されている（国土地理院, 2002）。

名古屋大学の二つの観測点, NGY1 観測点と NGY2 観測点は, 現地収録システムとして運用されている。ゆえに迅速なモニターとしては機能しなかった。しかし, その後の解析で上述した GSI・JCG 観測点と同様な地殻変動を観測していたことが明確になった。

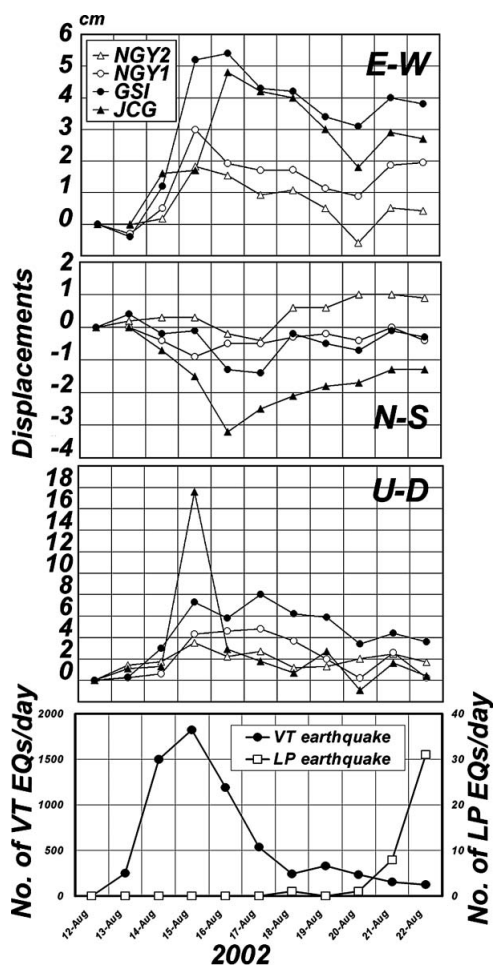


Fig. 2. Time series of station coordinates at four GPS sites on Hachijo Island and daily counts of earthquakes around Hachijo Island by JMA during the period 12–22 August, 2002. Time is shown as UT time. Daily station solutions are processed using with GIPSY software and referred to the GIS GPS station on Aogashima Island, in 40 km of south from Hachijo Island. Earthquake number is counted by Japan Meteorological Agency (JMA, 2003). Solid circles and open squares mean the numbers of volcano-tectonic earthquakes (VT EQ) and long-period earthquakes (LP EQ), respectively.

これら八丈島の GPS 観測点 4 点における変位を GPS 解析ソフト GIPSY-OASISII の PPP 機能 (Webb and Zumberge, 1993) により日単位で解析した。8 月 12–22 日の期間に各観測点における東西, 南北, 上下座標成分の時間変化を Fig. 2 に示す。八丈島の南 40 km に位置する国土地理院青ヶ島観測点 (観測点コード 960602) に対する変動である。Fig. 2 には八丈島周辺域における日別地震発生回数を一般的な地震と長周期波動の卓越した地震について, それぞれ示す (気象庁, 2003)。

まず, 有意な地殻変動が GPS 観測により 8 月 14 日から観測されている。群発地震は 13 日夜半から発生している。2000 年三宅島火山では, 6 月 26 日群発地震発生とほぼ同時に地殻変動を観測していた (たとえば, Meilano *et al.*, 2003)。今回の八丈島でも群発地震と同時に地殻変動が発生した可能性は高いが, 検討した GPS 解析が日単位であるため, 明確にできない。

地殻変動は主に東方向へ 1~5 cm の水平変動と 2~8 cm の隆起の上下変動として観測された。日単位の解析では, 計算上の標準偏差は mm 以下となる例が多い。一方, GPS 解析に見られる年周変化の議論 (たとえば Heki, 2001) で, 国土地理院の GPS 観測結果は, 経年変化と年周変化を取り除いた残差が, 水平成分で $\pm 2\sim 3$ mm, 上下成分で $\pm 5\sim 6$ mm を示す。ゆえに, 今回観測した 1~5 cm の水平変動と 2~8 cm の上下変動は有意な変動と考えられる。なお, JCG 観測点で検出した 15 日の 18 cm に達する隆起の上下変動は他の観測点での変動と比較し突出していること, しかもスパイク的な変化であることから観測異常値と考え, 今回の議論から省くことにする。

Fig.2 から明らかなように, 全観測点の全成分で観測された地殻変動は 15~16 日に最大の変位となる。一方, 地震発生は 14 日に 1,500 回を超え, 15 日に 1,825 回のピークを迎える。

観測された地殻変動は, 16 日以降にそれ以前の期間と比較し概して逆方向となり, 北西から西北西方向の水平変動と沈降の上下変動を示す。八丈富士南東部における傾斜計東西成分にも 16 日を境とする傾斜変動が記録されている (東京大学地震研究所, 2002)。13~16 日は $28 \mu\text{rad}$ の西落ち, 16~22 日は $5 \mu\text{rad}$ の東落ちの傾斜変動である。なお, 南北成分は観測されていない。

13 日から 16 日に観測した水平変動ベクトルを Fig. 3a に黒矢印で示す。図には気象庁 (2003) が求めた震央も 13~15 日の期間を○で, 16~22 日の期間を灰色の●で示す。16 日までの水平変動は概して東南東方向を示し, 南東端の観測点 JCG で南東方向へ 7 cm に達する。観測点中最北西端に位置する NGY2 観測点で水平変動はわ

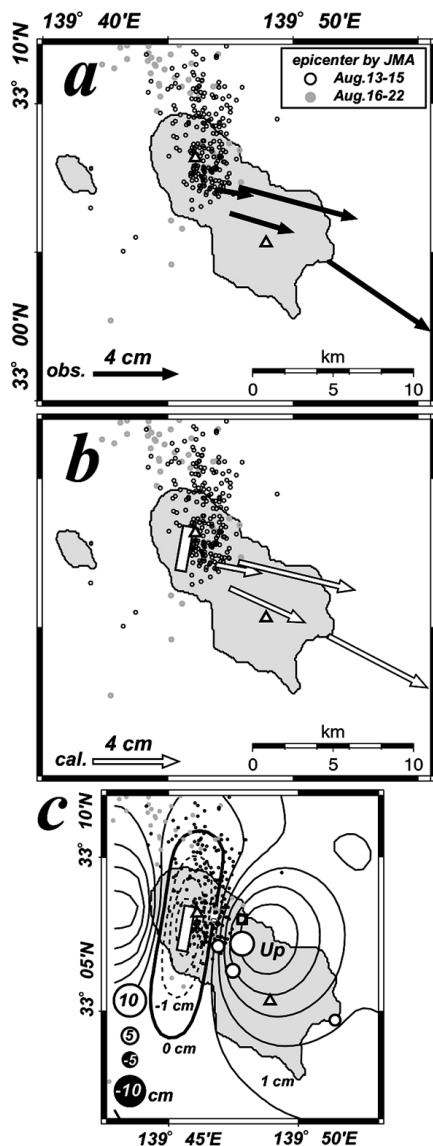


Fig. 3. Ground deformations and epicenter distribution observed on Hachijo Island in the period 13–16 August, 2002 and deformation calculated from the dike intrusion model. The epicenters determined by JMA are shown as the open circles in 13–15 August, 2002 and the grey solid circles in 16–22 August. A dike intrusion model is estimated from the ground deformation and epicenter distribution. The locations of GPS sites tiltmeter site, and volcanoes of Hachijo-Fuji and Hachijo-Mihara are shown as the closed circles, open square and open triangles, respectively. a: Observed horizontal displacement vectors at the GPS sites. The displacements are referred to Aogashima GPS site. Epicenters are shown as open circles and grey solid circles in the period

ずか 2 cm, しかも東方向となる。

一方, 16 日から 22 日までの水平変動は Fig. 4a に示すように, いずれの観測点でも北西方向へ 2~3 cm を観測している。なお, 20 日に各点とも西方向へ 1 cm のステップ状の変位を観測している。この時期, ちょうど台風が八丈島に接近, 通過し, 一時的に 10 m/sec を超える西風が吹いている。ゆえに, 大気遅延勾配による GPS 観測誤差の可能性が高い (木股・他, 1999; 村瀬・木股, 2002)。ゆえに, この変動については今回議論から省いた。

8 月 13 日から 22 日までに観測した地殻水平変動を Fig. 5a に黒矢印で示す。○は 13~22 日の震央である (気象庁, 2003)。16 日までの南南東へ 2~7 cm の水平変動と 16 日から 22 日までの北西へ 2~3 cm の水平変動の総和として, 22 日までに東から南東方向へ 1~4 cm の水平変動が検出されている。

次に上下成分について検討する。上述のように 15 日 JCG 観測点におけるスパイク的な隆起は観測もしくは解析上の誤差と考え, 今回の議論から省く。上下変動は, 全観測点でまず隆起を示し, GSI 観測点で 17 日に最大隆起 8cm を検出した。上下変動も水平変動と同様に, 16 日以降は隆起から沈降に転じ, 22 日には隆起も 4 cm に減じる。NGY1 と NGY2 観測点でも 16 日までに 2~4 cm の隆起が観測され, それ以降に沈降に転じる。NGY1 観測点と JCG 観測点は 22 日に上下変動が群発地震発生前のレベルに戻る。

3. 観測された地殻変動にもとづくダイク貫入モデルの推定

今回の八丈島群発地震では 13 日から有意な地殻変動が観測され, 16 日を境に地殻変動は概して逆センスとなる。1980 年代後半から 1990 年代に伊東周辺域で群発地震発生と同時に検出された地殻変動は, 地震活動終了後もダイク貫入による変位が残存する。(たとえば名古屋大学, 2002)。今回の八丈島での地殻変動は, 永久変位を残しながらも, 一部がその後当初とは逆方向に戻る傾向を示す。伊東周辺域での地殻変動とは明らかに異なるパターンである。

of 13–15 and 16–22 August, 2002 respectively. b: The location of the dike intrusion model estimated from GPS measurements and calculated horizontal displacement vectors from the model at the GPS sites. c: The vertical movements observed and estimated. The observed vertical movements are shown as the size scale of the circles. The calculated vertical movements are shown as the contours of every 1 cm.

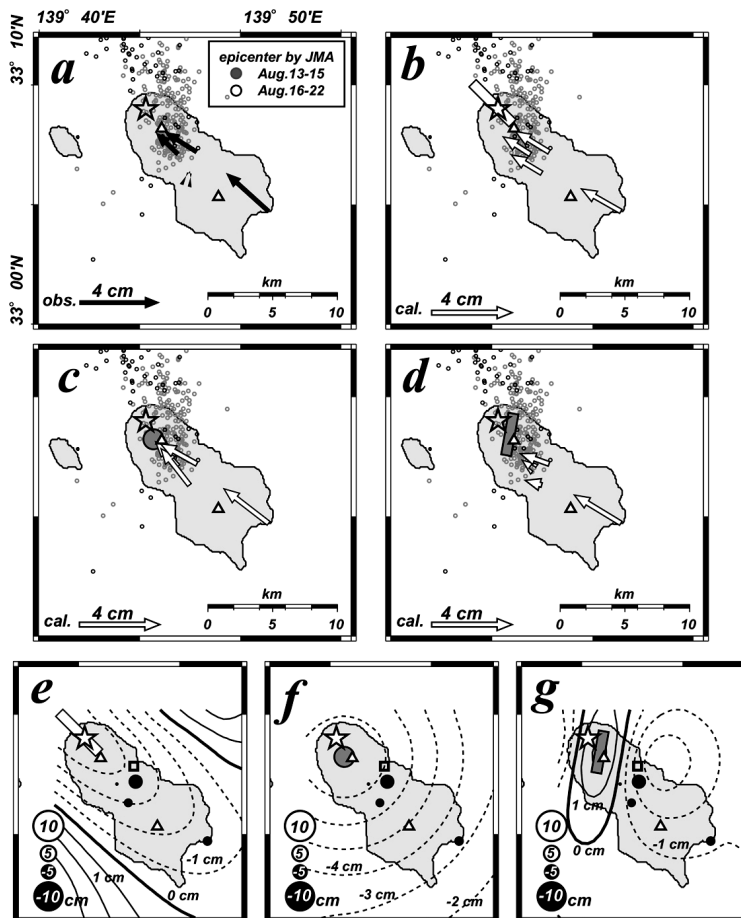


Fig. 4. Ground deformations and epicenter distribution observed on Hachijo Island in the period 16–22 August, 2002 and deformations calculated from the magma models. The notes are same as in Fig. 3. Dikes and a point pressure estimated from the ground deformation and epicenter distribution in the period, which are shown as the rectangles and circle. Three models of a dike intrusion (model 1), an inflation point source (model 2), and an deflation dike (model 3) are estimated. Open and grey solid means the inflated and deflated pressure sources respectively. The location of the epicenter of very long-period tremors determined by Kumagai *et al.* (2003) is shown as an open star. Epicenters are shown as open circles and grey solid circles in the period of 16–22 and 13–15 August, 2002, respectively. a: Observed horizontal displacement vectors at GPS sites. b: The location of the dike intrusion (model 1) and the calculated horizontal displacement vectors from the model. c: The location of the deflated point pressure (model 2) and the calculated horizontal displacement vectors from the model. d: The location of the deflated dike (model 3) and the calculated horizontal displacement vectors from the model. e: The vertical movements observed and estimated from the model 1. f: The vertical movements observed and estimated from the model 2. g: The vertical movements observed and estimated from the model 3.

そこで、13日から16日までと16日以降の2期間について地殻変動とそのメカニズムソースを議論する。

3-1 8月13～16日の地殻変動から推定するダイク貫入モデル

まず、この期間は群発地震が八丈富士直下に観測され、GPS観測ではFig. 3aに黒矢印で示すように東から東南方向の地殻水平変動ベクトルが検出される。東から

南東方向の水平変動ベクトルを球状圧力源で説明するには、八丈島のかなり西方沖に位置させる必要がある。ところが、群発地震の震源は八丈富士直下に位置する。また、最大の隆起を示すGSI観測点は観測網の最西端に位置していない。ゆえに地殻変動のソースメカニズムモデルとして球状圧力源よりもダイク貫入（開口クラック）を想定するのが適当と考える。

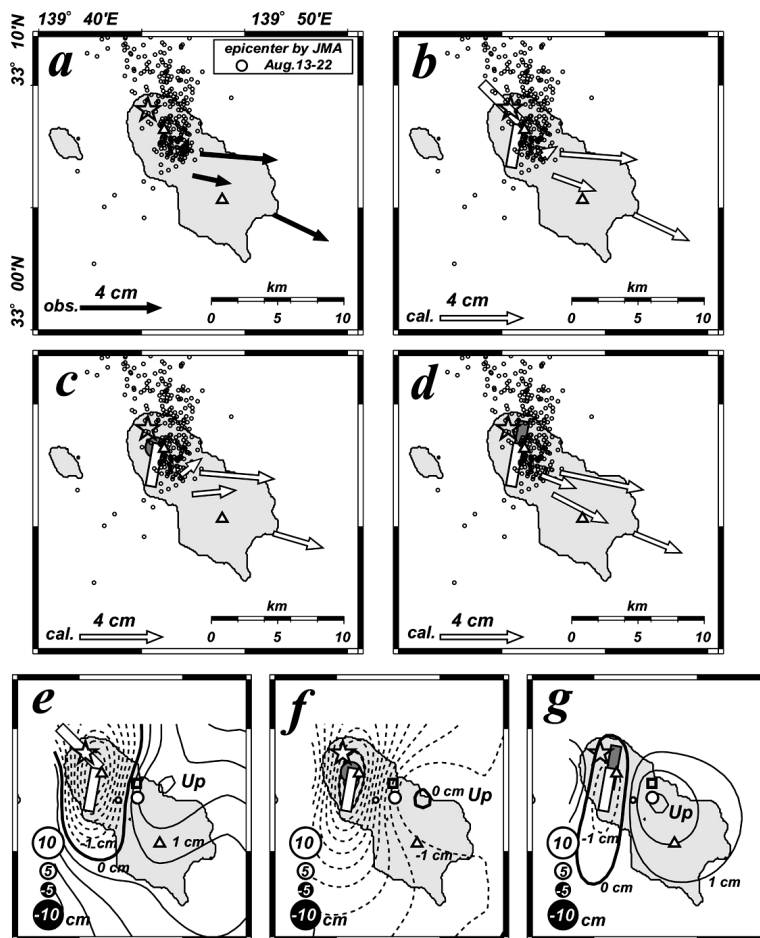


Fig. 5. Ground deformations and epicenter distribution observed on Hachijo Island in the period 13–22 August, 2002 and deformations calculated from the magma models. The notes are same as in Fig. 4. Epicenters are shown as the open circles in the period of 16–22 August, and the grey solid circles in the period of 13–15 August. a: Observed horizontal displacement vectors at GPS sites. b: The location of the first and second inflated dike (model 1) and the calculated horizontal displacement vectors from the model. c: The location of the first inflated dike and deflated point pressure (model 2) and the calculated horizontal displacement vectors from the model. d: The location of the first inflated dike and deflated dike (model 3) and the calculated horizontal displacement vectors from the model. e: The vertical movements observed and estimated from the first dike and model 1. f: The vertical movements observed and estimated from the first dike and model 2. g: The vertical movements observed and estimated from the first dike and model 3.

Fig. 3b に水平変動ベクトルから推定した半無限弾性体におけるダイク貫入モデル (Okada, 1992) の位置と、モデルから計算される地殻変動を Fig. 3c に示す。水平変動は観測値を黒のベクトル、計算値を白のベクトルで示す。上下変動は、観測した隆起を○、沈降を●で、計算結果をコンターで示す。図には気象庁地震火山部による震源分布 (上野・他, 2002) から、13~15 日までの震源を○、16 日以降について灰色の●で示す。推定したダイク貫入モデルの位置と規模を Table 1 と Fig. 6 に示す。Fig. 6 には気象庁による震源分布も示す。

長さ 3 km のダイク (以後ダイク 1 と称す) が八丈富士直下の深さ 3.3 km に南北方向に貫入し、開口量は 2.2 m に達する。ダイクの幅は 4.5 km である。観測された群発震源域 (東京大学地震研究所, 2002; 気象庁, 2003) の西端に位置する。貫入量は $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ となる。GSI 観測点と JCG 観測点での観測結果から推定されたダイク貫入モデルと概して一致する (国土地理院, 2002)。しかし、本論文でも観測点がわずか 4 点、しかもすべて推定したダイク貫入モデルの東側に位置するなど、モデル推定の誤差は小さくない。とりわけ、ダイクの幅と開口量は自

Table 1. Location and magnitude of the estimated dike intrusion models.

	dike 1	dike 2	dike 3	dike 4
intrusion date	August 13–16	August 16–22	August 16–22	August 16–22
horizontal location	139.7650 E 33.1430 N	139.7650 E 33.1430 N	139.7616 E 33.1373 N	139.7680 E 33.1550 N
length km	3.0	4.0		3.0
depth of dike top km	3.3	12.0	12	5.3
width km	4.5	16.0		2.5
tensile m	2.2	6.5		−3.0
strike anticlockwise wise from N deg.	170	−60		170
intrusion volume 10^6m^3	30	416	−140	21

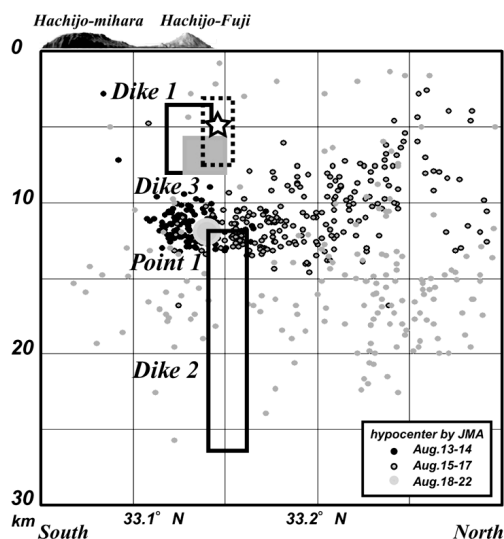


Fig. 6. A cross-sectional view of location of inferred sources and epicenters. The epicenters determined by JMA are shown as the solid circles in the period of 3–14 August, open circles in 15–17 August, and grey solid circles in 18–23 August, 2002. The open rectangles, solid rectangle and solid large circle mean an open crack, a closed crack and a deflation point source, respectively. Dike intrusion model estimated from very long-period tremors (Kumagai *et al.*, 2003) is shown as a square of a dashed line.

由度が大きい。また、ダイクの貫入角度も推定するデータが不足しているため、90度と仮定する。

前述したように八丈富士南東部の傾斜観測点において、同期間に $28 \mu\text{radian}$ の傾斜変動が観測されている(東京大学地震研究所, 2002)。一方、推定したモデルから計算される東西成分の傾斜変動は $25 \mu\text{radian}$ の西落ちとなり、観測値との差は $3 \mu\text{radian}$ に過ぎない。

以下に、ダイク貫入を推定した背景について述べる。

GSI と NGY2 観測点での水平変動ベクトルがほぼ東南東方向で、より南に位置する NGY1 観測点で南東方向に寄り、さらに南に位置する JCG 観測点で南東方向を示す。このことから、ダイクの走向はまず北もしくは北北東方向と考えられる。JCG 観測点で南東方向の水平変動ベクトルとなることから、ダイクの南端は JCG 観測点から北西方向に延ばしたところまでと考える。さらに、GSI 観測点での水平変動ベクトルと隆起量が最大になり、南東端の JCG 観測点でも 6 cm の水平変動が観測されていることから、ダイクの貫入深度と位置が拘束できる。

以上のことから、2002年8月13~16日、GPS観測で検出された東南東方向2~7 cmの水平と2~8 cmの上下変動は、八丈富士の直下、やや西側、今回の群発地震域の西側端をほぼ北方向に走向するダイク(ダイク1)の貫入で説明可能と考える。なお、ダイク北端の位置は地殻変動観測からは拘束できず、震源分布から推定した。Fig. 6からも明確なように群発地震震源は深さ12 kmに集中し、ダイク貫入位置は震源よりも浅く、深さ3~8 kmと地震活動がほとんど認められない位置に推定される。

2000年三宅島噴火の発端となった6月26~27日の群発地震を伴った地殻変動では数時間という急速なダイク貫入が推定されている(Meilano *et al.*, 2003)。また、ホットスポットの火山である Hawaii Kilauea 火山でも1997年1月や1999年9月の噴火時に推定されたマグマモデルも時間単位の急速なダイク貫入を示唆する(Segall *et al.*, 2001; Cervelli *et al.*, 2002)。これに対し2000年3月31日有珠火山噴火では、噴火口から数 km に設置された GPS 観測点で噴火2日前から有意な地殻変動が観測されている(高橋・他, 2002; 岡崎・他, 2002)。観測された地殻変動は時間的に一様でなく2日間にわたる緩やかなマグマの移動を示唆している。今回の八丈島火山ダイク貫入も2~3日間の期間が考えられ、2000年三宅島火山

噴火の急速なダイク貫入と異なる過程を示唆する。なお、後述する二本目のダイク貫入も含め、今回のダイク貫入時間依存モデルの議論は次稿を予定する。

3-2 8月16~22日の地殻変動から推定するダイク貫入モデル

次に、16~22日の期間について検討する。この期間は16日までの期間とほぼ逆センス、北西の水平変動と沈降の地殻変動を観測した。東西成分で2 cm 前後、南北成分で1 cm 前後、上下成分で数 mm から4 cm の沈降の変動である。16日までの変動と比較し、各観測点で検出した地殻変動は小さく、しかも比較的均一である。

逆センスの地殻変動から推定する圧力源として、1) 新たな場所にダイクが新たに貫入（モデル1と称す）、2) 新たな場所で球状圧力源が収縮（モデル2と称す）、3) 貫入したダイクで圧力が変化し膨張から収縮へ転化（モデル3と称す）などが考えられる。

たとえば、2000年三宅島噴火の契機となった6月26~27日の活発な地殻変動からもダイクが貫入から収縮へ転化することが推定されている。Meilano *et al.* (2003) は地殻変動観測から、わずかに半日の短期間に、3本のダイク貫入と、そのうちの1本が数時間で貫入から収縮に転化したと推定している。

当時、三宅島では島内12点でGPS観測が実施されていた。一方、八丈島ではわずか4点、しかも3点が近在するなどGPS観測網は三宅島と比較し明らかに優れない。ゆえに詳細な議論は困難である。しかし、それぞれのケースについて推定するメカニズムソースと計算される地殻変動を観測した地殻変動と比較検討する。

まず、新たなダイク貫入のモデル1を考察する。北西方向に観測された水平変動を島北西部におけるダイク貫入で説明するには、北西方向に伸びるダイクが必要である。観測した水平変動が島南西部のJCG観測点で最大となることから、ダイク貫入は深部と推定する。推定した新たなダイク貫入（ダイク2と称す）と計算する水平・上下変動をFig. 4b, 4cとFig. 6に示す。

図にはKumagai *et al.* (2003) が求めた低周波地震の震源域を☆で示す。深さは5 km が推定されている。18日以降、八丈島北部を震源とする低周波地震や超長周期地震が観測されている（上野・他、2002; Kumagai *et al.*, 2003）。この超長周期地震のソースメカニズムとして、八丈島北部のダイク貫入モデル、しかも玄武岩マグマで満たされているダイクが推定されている（Kumagai *et al.*, 2003）。低周波地震は、21日から増加し、9月上旬まで継続した。その反面、いわゆる普通の地震活動は18日以降に八丈島の北から北西方沖に移動し、島内の地震活動は減衰している。

NGY1の水平変動とNGY2の上下変動を除けば、観測した変動はモデルで再現されていると考える。しかし、Fig. 6に示すように推定したダイク2はそのトップが12 km と深く、幅15 km、開口量6.5 m と $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ に達する貫入量が必要となる。

次に、球状圧力源における収縮過程となるモデル2を検討する。推定した圧力源モデルと計算される地殻水平・上下変動をFig. 4c, 4fとFig. 6に示す。収縮の球状圧力源（ポイント1と称す）は、八丈富士の直下の12 km の深さに、 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ の収縮と推定する。ポイント1はちょうど震源の集中域に位置する。

水平変動はNGY1を除けば概して観測値と一致する。しかし、このモデルは、各観測点において大きな沈降の上下変動を示す。沈降量は島中央部に位置するGSI, NNGY1, NNGY2観測点で6 cm を超える。

最後に、貫入したダイクで増圧・膨張から減圧・収縮に転じたモデル3を考察する。Fig. 4d, 4gとFig. 6に示すように16日までに貫入したと考える八丈富士直下のダイク1の下部において収縮したとするモデルならば、観測された地殻水平・上下変動が説明できる。収縮した部分をダイク3と称する。ダイク3から計算される上下変動は上述してきた二つのモデルと比較し、もっとも観測結果と一致する。ダイク3は他のダイク2やポイント1と比較し5.3 km と浅いことから体積変化も最小となる。収縮の体積は $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ と計算され、貫入したダイク1の2/3に相当する。国土地理院(2002)が推定した閉口モデルは、本論文のモデルと比較し、閉口量が一致するが、深さが3 km とより浅く求めている。

3-3 8月13~22日の期間に観測された地殻変動と各ダイク貫入モデルの比較検討

16日以降22日までに観測した北西方向1~3 m の水平変動と数 mm ~4 cm の沈降の上下変動を説明する3モデルを検討してきた。ここでは、群発地震発生時の13日から22日までの期間に観測した地殻変動について考察する。

16日までの地殻変動から推定したダイク1に、モデル1、モデル2、モデル3を加えた結果をFig. 5b, 5eとFig. 5c, 5f、そしてFig. 5d, 5gにそれぞれ示す。それぞれのモデルで観測値とモデル計算値に最大でも1~2 cm の残差しか生じない。しいて強調すれば、モデル1とモデル2をそれぞれ加えた結果では上下変動は観測結果と少し異なる。計算結果はNGY2観測点が2 cm の沈降の上下変動を示し、観測結果は決して沈降を示していない。もっとも、GPS解析で上下成分は分解能が劣ることを考慮すれば、観測誤差の範囲とも解釈できる。

すなわち、地殻変動から16日以降に観測されている

北西方向への水平変動と沈降の上下変動を説明する3ケースのモデルについて、実施されていた地殻変動観測で適切に判断できるほどの分解能に満たないと考える。

13日過ぎに八丈島西海岸で発生した群発地震活動が、15日あたりから震源域を八丈島北方に移動する(気象庁, 2003)。しかし、Fig. 6などからも明らかのように、震源分布はダイク貫入が北もしくは北西方向へ移動したことを示唆するほど集中していない。

とすると、推定したダイクや球状圧力源の深さと体積変化量がモデルの妥当性を考察する上で重要になる。モデル1のダイク2, モデル2のポイント1はともに $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上の体積変化を必要とする。上述したように、伊東周辺域で頻発に貫入したと推定されるダイクと球状圧力源は 10^7 m^3 程度の体積増加である(たとえば名古屋大学, 2002)、今回のダイク2とポイント1で体積変化は一桁上まわる。地震モーメントは、今回の八丈島の群発地震が伊東の群発地震を上回ることはない。

八丈富士南東部で実施されていた傾斜変動観測は東西方向の1成分のみである。しかし、16~22日の期間、 $5 \mu\text{rad}$ の東落ちの傾斜変動が観測されている(東京大学地震研究所, 2002)。上述した3種類のモデルから傾斜変動観測点で東西成分の傾斜変動を計算すると、モデル3が東落ち、モデル1と2が西落ちとなる。モデル3の東落ちは、観測された $5 \mu\text{rad}$ よりも大きく $15 \mu\text{rad}$ に達するが、傾斜変動観測の極性はモデル3の妥当性を裏付けている。

4. 議 論

Kumagai *et al.* (2003) は本群発地震で発生した超長周期波動から貫入したダイクの大きさと形状を議論している。彼らは9月4日19:24に観測した超長周期波動をシュミレーションし、ダイクの深さと長さ、幅を推定し、玄武岩のダイクを議論している。彼らが考察したダイクをFig. 6に示す。ダイクは長さ2.2 m、幅4.4 kmで深さ2.6 km、ダイクの走向 $\text{N}15^\circ\text{W}$ と推定している。

確かにダイクの走向が 25° 異なる。その主たる原因として、まず、今回推定に利用した地殻変動観測データがダイク貫入東域に限定されていることと考えられる。しかし、重要なことは、Fig. 6からも明確のように、彼らが超長周期地震波動から推定したダイク貫入モデルと著者らが地殻変動から推定したダイクが、1 kmほどの誤差で、ほぼ同じ位置でほぼ同じ規模のことである。勿論、両者の観測時期が異なる。そして、著者らのモデルは最初に貫入したダイク1の下部で、16日以降に収縮を示唆する。しかし、貫入したダイクは少なくとも22日まで $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 程度が残存したと地殻変動から推定できる。

今回の結果と同様に超長周期波動と地殻変動の二つの観測から独自にほぼ同位置にメカニズムソースが推定された。

Hayashi and Morita (2003) は、伊東周辺域で1998年に観測された群発地震と地殻変動に基づき震源分布とその移動、ダイク貫入の一連のイベントを考察している。今回の八丈島群発地震でも、観測網に限界があるが、少なくとも17日まで、地震震源は明瞭な形で北方向へ移動している。震源の移動とダイク貫入の時間依存モデルを次の機会に考察したいと考える。

5. 結 論

伊豆諸島八丈島火山は、火山噴火と島内の顕著な群発地震活動の記録が400年前しかない。しかし、2002年8月に群発地震が観測され、地殻変動が島内4点のGPS連続観測点で検出され、その結果、ダイク状マグマの貫入が示唆される。

1) 8月13日に発生した群発地震に伴い、島内のGPS観測点で2~6 cmの東南東方向の水平変動と2~8 cmの隆起の上下変動が観測された。そして、16日以降はそれ以前と逆センスになる北西方向2~3 cmの地殻水平変動がGPS全観測点で観測された。

2) 13~16日の期間は、八丈富士直下で群発地震が発生すると同時に、群発地震の上部の深さ3 kmに最初のダイクが貫入した。

3) 16~22日の期間、北西方向への水平変動と沈降の上下変動のソースメカニズムとして、新たな場所におけるダイクの貫入、球状圧力源での収縮、貫入したダイクの収縮のモデルを検討した。GPS観測から検出された地殻変動は各モデルでも説明可能である。しかし、傾斜計東西成分で観測された16日までの西落ち、16日以降の東落ちの傾斜変動、および、これらのモデルの深さと体積変化量を考慮すると、最初に貫入したダイクの下部で貫入量の2/3に達する収縮を生じさせるモデルが妥当と考える。

4) 貫入したと推定するダイクは、長周期地震波動の発生メカニズムから推定されるダイク貫入モデル(Kumagai *et al.*, 2002)と位置と規模が一致する。

謝 辞

おわりに、GPS観測データや地震震源データを快く提供していただいた国土地理院、上野 寛さんをはじめとする気象庁地震火山課、観測点を提供いただく東京都八丈支庁、気象庁八丈測候所高層分室の関係者、名古屋大学による八丈島でのGPS観測を担当されている林 冬人氏、圧力源モデルの検討や表現などに利用したソフト

ウェアの MICAP-G (内藤・吉川, 1999), GMT (Wessel and Smith, 1991), カシミールの開発者の方々に深く感謝します。そして, 二人の匿名査読者と編集委員小川康雄氏から本稿をまとめるにあたり非常に有益な助言を得た。厚く御礼する。

引用文献

- Cervelli, P., Segall, P., Amelung, F., Garbeil, H., Meertens, C., Owen, S., Miklius, A. and Lisowski, M. (2002) The 12 September 1999 Upper East Rift Zone dike intrusion at Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **107**, 10.1029/2001 JB000602.
- Hayashi, Y. and Morita, Y. (2003) An image of a magma intrusion process inferred from precise hypocentral migrations of the earthquake swarm east of the Izu peninsula. *Geophys. J. Int.*, **153**, 159–174.
- Heki, K. (2001) Seasonal modulation of interseismic strain buildup in northeastern Japan driven by snow loads. *Science*, **293**, 89–92.
- 海上保安庁海洋情報部 (2002) GPS による地殻変動監視観測. 第 93 回火山噴火予知連絡会資料.
- 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.
- 木股文昭・仮屋新一・高井香里・加藤 賢 (1999) ロール規模の気象擾乱による GPS 測位解誤差—1997 年 3 月伊東地域の場合—. 日本測地学会第 92 回講演会要旨, 1999, 119–120.
- Kimata, F., Satomura, M., Sasaki, Y., Murata, I. and Fuse, K. (1994) GPS measurements in the Tokai region and Izu Hachijo island. *Proceedings of the CRCM '93*, 225–227.
- 気象庁 (1996) 日本活火山総覧 (2 版). 291–295.
- 気象庁 (2002) 関東・中部地方の火山活動 (2002 年 5 月～2002 年 9 月). 第 93 回火山噴火予知連絡会資料.
- 気象庁 (2003) 八丈島 2002 年報. 火山活動解説資料 (平成 14 年の活動). 1–5.
- 国土地理院 (2002) 八丈島 GPS 連続観測結果. 第 93 回火山噴火予知連絡会資料.
- Kumagai, H., Miyagawa, K., Negishi, H., Inoue, H., Obara, K. and Suetsugu, D. (2003) Magmatic dike resonances inferred from very-long-period seismic signals, *Science*, **299**, 203.
- Meilano, I., Kimata, F., Fujii, N., Nakao, S., Watanabe, H., Sakai, S., Ukawa, M., Fujita, E. and Kawai, K. (2003) Rapid ground deformation of Miyakejima Volcano on June 26–27, 2000 detected by kinematic GPS analysis. *Earth Planets Space*, accepted.
- 村瀬雅之・木股文昭 (2002) 伊豆諸島火山島の GPS 観測で検出される年周変動 (その 1). 日本火山学会講演予稿集 2002 年度秋季大会, 109.
- 名古屋大学 (2002) GPS 稠密観測による伊東周辺域の地殻水平変動. 地震予知連絡会会報, **68**, 230–233.
- 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.
- 岡崎紀俊・高橋浩晃・笠原 稔・石丸 聡・森 済・北川貞之・藤原健治・中禮正明 (2002) 高密度 GPS 観測による 2000 年有珠山噴火の地殻変動. 火山, **47**, 547–557.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018–1040.
- Segall, P., Cervelli, P., Owen, S., Lisowski, M. and Miklius, A. (2001) Constraints on dike propagation from continuous GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, **106**, 19301–19317.
- Shimada, S., Fujinawa, Y., Sekiguchi, S., Ohmi, S., Eguchi, T. and Okada, Y. (1990) Detection of a volcanic fracture opening in Japan using Global Positioning System measurements. *Nature*, **343**, 631–633.
- 高橋浩晃・岡崎紀俊・石丸 聡・森 済・松島 健・渡邊篤志・三浦 哲・中尾 茂・加藤輝之・木股文昭・笠原 稔 (2002) 2 周波 GPS 受信機による 2000 年有珠山噴火前後の地殻変動観測. 火山, **47**, 161–166.
- 東京大学地震研究所 (2002) 伊豆半島および伊豆諸島周辺の地震活動 (2002 年 5 月～2002 年 10 月). 地震予知連絡会会報, **69**, 216–218.
- Ueda, H., Fujita, E., Ukawa, M., Meilano, I. and Kimata, F. (2003) Magma intrusion and discharge process at the initial stage of the 2000 Miyakejima activity inferred from tilt and GPS data. *Geophys. J. Int.*, submitted.
- 上野 寛・池田 靖・長谷部大輔・上垣内 修・千場 充之・吉田康宏 (2002) 2002 年 8 月中旬から発生した八丈島近海の地震活動と長周期イベント. 日本地震学会ニュースレター, **14**–10, 3–5.
- Webb, F. H. and Zumbeke, J. F. (1993) An Introduction to GIPSY-OASYS II. *JPL Publ. D-11088*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena.
- 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 小川康雄)