

2004–2005年浅間山火山活動に伴う地殻変動

青木陽介*・渡辺秀文*・小山悦郎**・及川 純*・森田裕一*

(2005年5月13日受付, 2005年11月4日受理)

Ground Deformation Associated with the 2004–2005 Unrest of Asama Volcano, Japan

Yosuke AOKI*, Hidefumi WATANABE*, Etsuro KOYAMA**, Jun OIKAWA* and Yuichi MORITA*

Ground deformation associated with the most recent eruptions in Asama volcano started on September 1, 2004, is reported. The ground deformation observed by continuous Global Positioning System measurements is modeled by dike intrusion for two different periods; one is between July, 2004, to March, 2005, which represents overall deformation during the unrest, and the other is between November, 2004, to March, 2005, which represents the deformation during the latter half of the unrest. We assumed a rectangular dike opening uniformly in elastic, homogeneous, and isotropic medium to model the deformation field. To solve a nonlinear optimization problem in which model parameters are nonlinear to observed deformation field, the Simulated Annealing inversion was employed. The uncertainties of and trade-offs between the model parameters are estimated by the Bootstrap method.

The results show that the deformation field is well modeled by a dike striking roughly east-west, strike of which is consistent with the regional stress field. Shape of the dike, that is, length, width, and thickness, is not well constrained due to the small amount of deformation, up to 10 mm, and the scarcity of GPS sites, but volume of the dike is well constrained to be 6.82 and 4.63 million cubic meters for the whole period and the latter half, respectively. The estimated depth of the dike tip is roughly 1 km below the sea level; the depth of hypocenters is consistent with a theory of dike-induced earthquakes that they occur near the dike tip due to the stress concentration. However, the comparison of the location of the modeled dike and the distribution of earthquakes clearly shows that the hypocenter distribution is inconsistent with the theory described above, that is, the hypocenters are distributed only in the eastern half of the modeled dike tip. The possible reasons for this inconsistency are either 1) earthquakes exist in the west half of the dike tip as well, but they are not detected due to the sparse distribution of seismometers at the west of the flank, 2) the western half of the modeled dike is not capable of generating earthquakes because the temperature is too high for brittle failure of rocks, or 3) the differential stress in the western half is so low that the area cannot reach the critical stress field even by the introduction of dike-tip stress concentration. Current geophysical observations cannot identify the reason but future development of geophysical observations is expected to solve the puzzle.

Key words: ground deformation, Asama volcano, dike intrusion, Global Positioning System, geodetic inversion

1. はじめに

浅間火山は長野・群馬県境に位置し、太平洋プレート
の東からの沈み込みにとまなう島弧火山の一つである
(Fig. 1a)。浅間火山では有史以来1108年と1783年に大
規模噴火をし、20世紀に入り1960年代まではブルカノ
式噴火を繰り返していたが、その後1973, 1982, 1983年

の中規模噴火活動を除いて活動は低下した。近年噴火活
動は低下していたのにも関わらず山頂直下においてマグ
マの何らかの動きを反映すると思われる火山性地震が観
測されていた(例えばSawada, 1994; Fujita and Ida, 1999;
Aoyama and Takeo, 2001)。

浅間火山においては地震活動だけでなく、マグマの何

* 〒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 Yayoi 1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.

** 〒389-0111 長野県北佐久郡軽井沢町大字長倉2125
東京大学地震研究所浅間火山観測所

Asama Volcano Observatory of Earthquake Research
Institute, University of Tokyo, 2125 Nagakura, Karui-
zawa, Nagano 389-0011, Japan.

Corresponding author: Yosuke Aoki
e-mail: yaoki@eri.u-tokyo.ac.jp

らかの動きを反映すると思われる地殻変動も観測されてきた。宮崎 (1990) は、山頂直下の海面高付近と山頂西側約 2 km の海面下 5 km 付近に球状圧力源をおくことにより観測された水準測量データをよく説明できることを示

した。また、近年では国土地理院 (2004) が GPS 連続観測により 1996 年以降マグマ貫入に起因すると思われる山体周辺での地殻変動を観測している。

2004 年噴火およびそれにともなう火山活動の経緯については中田・他 (2005) に詳しいが、ここに簡単に述べる。2004 年噴火に先駆け 2003 年 4 月に微噴火が複数回発生し、2004 年になってからも地震活動は高い状態で推移した。後に述べるように、2004 年 7 月末から浅間山を挟む全地球測位システム (GPS) 連続観測点間の距離の伸びが観測され 9 月 1 日の中規模噴火に至った。その後 9 月 14 日から微噴火および小噴火が発生し 16 日から 18 日にかけて連続的噴火が発生した。その後 9 月 23 日、29 日、10 月 10 日、11 月 14 日に主なブルカノ式噴火が発生した。噴火活動は 2004 年 12 月 9 日以来認められていない。

このように、浅間火山は噴火のない時期にもマグマの動きを示すと思われる観測事実が存在する活動的な火山であるため、地下におけるマグマ供給系を明らかにすることは重要である。浅間火山において大規模な噴火が起これば首都圏を含む広い範囲に降灰などの被害が及ぶ恐れがあるため、地下のマグマ供給系を明らかにすることを通して噴火規模を予測しておくことが、被害を最小限にとどめるためにも重要である。

この目的を達成する為に GPS などを用いて地表変形を観測することは一つの有効な手段である。なぜなら地表変形を計測することにより貫入したマグマの形や場所を明らかにすることができるからである (例えば Aoki *et al.*, 1999; Dzurisin, 2003)。

本論文では浅間火山の最新の噴火である 2004 年噴火とその前後に GPS 連続観測によって観測された地殻変動について報告する。本研究の目的は、2004–2005 年の一連の噴火活動に伴い、地下のどこにどのくらいの量のマグマが注入されたかを明らかにすることである。

2. GPS 観測とデータ解析

本研究に用いた GPS 連続観測点の分布を Fig. 1b に示す。国土地理院と東京大学地震研究所では 1990 年代半ばより GPS 連続観測を行い、貫入現象にともなうと思われる何回かの変動を記録してきた (たとえば国土地理院, 2004)。そのうち、本研究では 2004 年から 2005 年にかけての変動のみを考え、他の時期の変動については報告しない。GPS 連続観測点の数は 2004 年に飛躍的に増加した。東京大学地震研究所は 2004 年 2 月に ASM4 (Fig. 1b) の観測を開始し、2004 年 9 月 1 日の中規模噴火をうけて ASM5・ASM6 (Fig. 1b) 両点において 2004 年 9 月下旬より観測を開始した。国土地理院は 2004 年

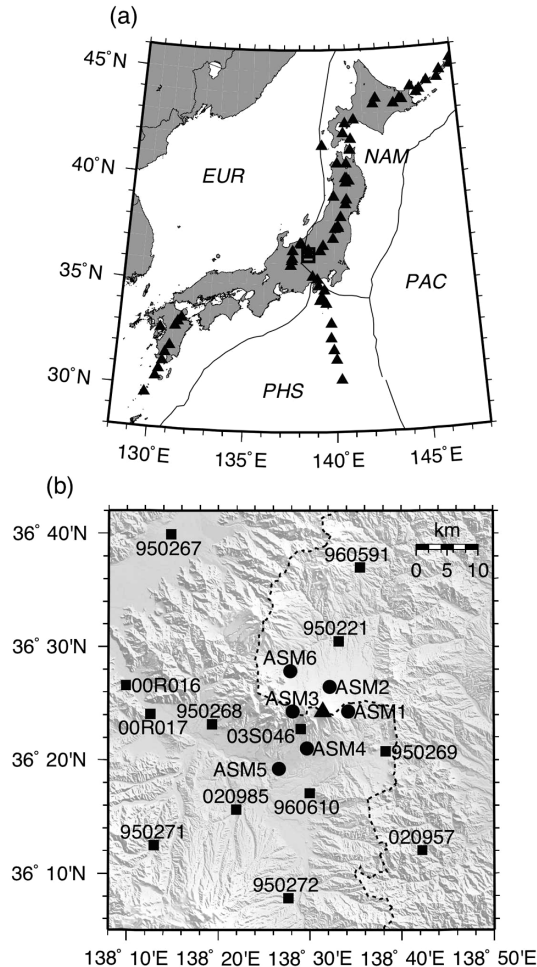


Fig. 1. (a) Tectonic setting around Asama volcano.

Triangles indicate the spatial distribution of active volcanoes. EUR, NAM, PAC and PHS stand for the Eurasian, North American, Pacific and Philippine Sea plates, respectively. A rectangle shows the area of Asama volcano shown in Fig. 1b. (b) Spatial distribution of continuous GPS sites analyzed in this study. The area is shown by the rectangle in Fig. 1a. Circles and rectangles are the sites operated by Earthquake Research Institute, University of Tokyo, and Geographical Survey Institute of Japan, respectively. A dashed line denotes the prefectural boundary.

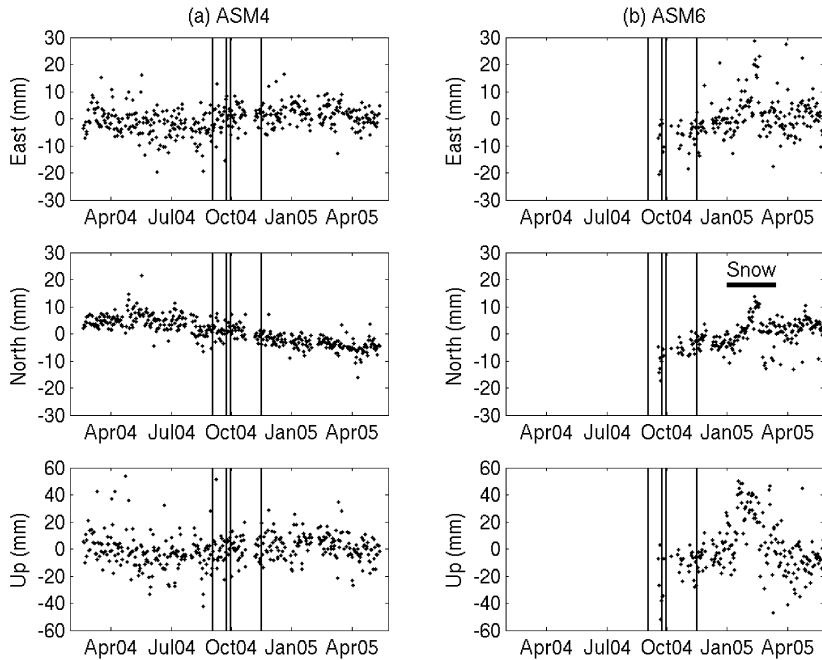


Fig. 2. An example of GPS time series for ASM4 and ASM6 with respect to 950272, locations of which are shown in Fig. 1b. Vertical bars mark the dates of moderate-sized eruptions. (a) Time series for ASM4. The middle panel, the north-south component, shows that the deformation started in late July, 2004, and has moved southward by approximately 10 mm until March, 2005. (b) Time series for ASM6 built in response to the first eruption on September 1, 2004. An apparent jump seen in all three components around February, 2005, is due to snow removal on the GPS antenna. Time intervals affected by snow accumulation on the antenna are shown by a solid line in the middle panel.

に 020957・020985・03S046 の各観測点 (Fig. 1b) において観測を開始した。このような観測点の増加により 2004 年から 2005 年にかけての火山活動にともなう地殻変動がより精密にモデル化できることが期待される。

各観測点では 30 秒ごとにデータをサンプリングしており、1 日ごとの各観測点の座標を GIPSY-OASIS II (Zumberge *et al.*, 1997) を用いて計算した。座標系は ITRF 2000 (Altamimi *et al.*, 2002), GPS 衛星の軌道情報は精密歴を用いた。座標決定の繰り返し誤差は水平成分で 3 から 5 mm, 鉛直成分で約 10 mm である。Fig. 2 に ASM 4・ASM6 観測点における座標変化の時系列を示す。基準点は国土地理院 950272 観測点 (Fig. 1b) である。この観測点は浅間山から十分離れているので一連の火山活動にともなう地殻変動はないと考えられる。後述のモデル計算では、950272 観測点の変位は 1 mm 以下である。Fig. 2a は ASM4 が 2004 年 7 月と 10 月に大きく変位し、全体として 2005 年 3 月までに東へ約 5 mm 南へ約 10 mm 変動したことを示している。Fig. 2b は ASM6 が

2005 年 1 月から 2 月中旬にかけて北北東へ約 15 mm 変位していることを示すが、これは GPS アンテナの上への積雪によるものであり、火山活動に起因するものではない。除雪後の 2 月中旬には 2004 年 12 月と比べ北へ約 5 mm 変位しているが、これは火山活動に起因するものと考えられる。

3. 変動場の計算とそのモデル化

3-1 変動場の計算

本研究では二つの期間について変位場を計算し、それを説明するモデルをそれぞれの変位場について提唱する。初めに、火山活動全体での地殻変動として 2004 年 7 月 1 日から 10 日までの各観測点の座標の平均と 2005 年 3 月 1 日から 10 日までの平均の差をとり (period 1), 火山活動全体の変位場をモデル化する。次に、2004 年 11 月 1 日から 10 日までの各観測点の座標の平均と 2005 年 3 月 1 日から 10 日までの平均の差をとり (period 2), 火山活動の後半の変位場をモデル化する。二つの期間につ

いて変動場をモデル化することにより、火山活動中のダイクの移動の検出可能性を探る。火山活動後半にはASM5・ASM6観測点が新たに加わっているために、より精度の良いモデル化が期待される。

3-2 変位場のモデル化

一般的に火山地域における地殻変動は球状圧力源 (Mogi, 1958) もしくはシート状に貫入するダイク (Okada, 1985) によってモデル化される。球状圧力源による変位場は圧力源の場所を中心とした等方的なものになり、ダイク貫入にともなう変位場は非等方的なものになる。2004年から2005年にかけての浅間山周辺の変位場は明らかに非等方的であり (Fig. 3), 観測された変位場はダイク貫入によるものと考えられる。したがって、本研究では、観測された変位場を均質な半無限等方弾性体に貫入した長方形のダイクによって説明することを試みる。貫入したダイクの厚さは均一であり、ダイク上面は地表面と平行であると仮定する。したがって、求めるべきパラメータはダイクの長さ・幅・上面の深さ・傾き・走向・水平位置 (パラメータ2つ)・開口量の8つである。これらのパラメータが与えられたときの変位場はOkada (1985) によって与えられる。

観測データとこれらのパラメータは非線形な関係にあるので、残差を最小とするようなモデルパラメータを求めるためには非線形逆問題を解かなくてはならない。我々は地殻変動データのインバージョンへの応用に実績がある (例えば Cervelli *et al.*, 2001) Simulated Annealing (Basu and Frazer, 1990) というアルゴリズムを用いてこの非線形逆問題を解いた。Simulated Annealing はそれぞれのパラメータについて決められた値の範囲内で残差を最小化するようなパラメータを探す。本研究で用いた各パラメータの範囲を Table 1 に示す。各パラメータの取りうる範囲は、それによって最適解が変化しないように十分大きな範囲をとった。なお、Table 1 最下段のダイク体積は求められたダイクの長さ・幅・厚さから求められるもので、インバージョンのモデルパラメータでない。Simulated Annealing は非線形問題を線形化するのではなく可能なモデルパラメータをランダムサーチによって求めることから、線形化して非線形問題を解く場合に比べて解が極小残差に対応するパラメータに収束しにくい。また、ランダムサーチが進むにつれて残差に応じてとりうるモデルパラメータの幅を狭くしていくことから、グリッドサーチ的に最適解を探すよりも高速に解が求められるという利点がある。

非線形インバージョンの場合、求められた最適解の誤差を求めることは簡単ではない。本研究では Simulated Annealing によって求められた最適解の誤差を Bootstrap

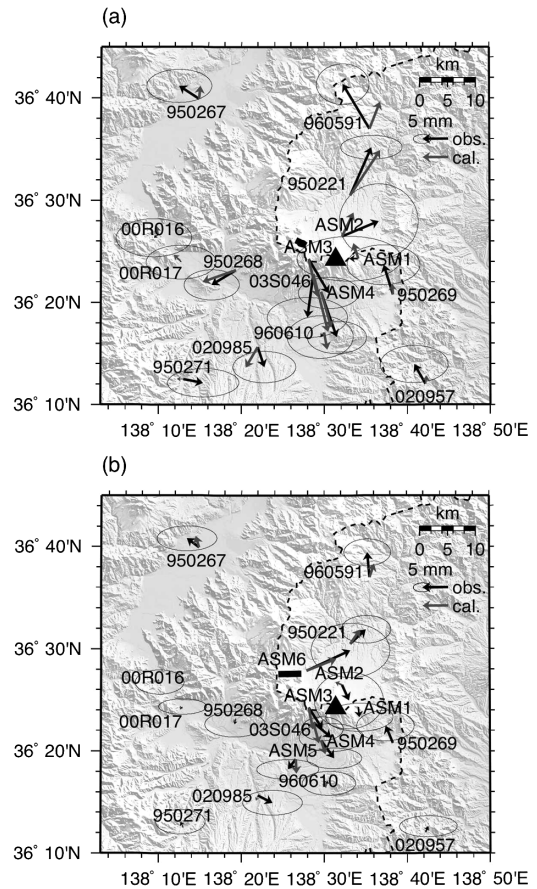


Fig. 3. Comparison of the observed deformation field with the modeled deformation field with a intruded dike for (a) period 1 (between July, 2004 and March, 2005) and (b) period 2 (between November, 2004 and March, 2005). Thick lines in each panel indicate the horizontal projection of the modeled dikes. 1- σ error ellipses of the observed deformation are also shown. Dashed line marks the prefectural boundary.

法 (Efron and Tibshirani, 1993) を用いて求めた。この方法は Cervelli *et al.* (2001) によって地殻変動データのインバージョンへの応用に実績があり、それぞれのパラメータの誤差だけでなくパラメータ同士のトレードオフを求めることもできる。Bootstrap 法は次のようにして推定されたパラメータの誤差を求める。

1. 観測データと最適なモデルパラメータによる計算値の残差 $r = \mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{d}_{\text{cal}}$ を求める。ここで \mathbf{d}_{obs} と \mathbf{d}_{cal} はそれぞれ観測値と最適なモデルパラメータから期待される計算値である。

Table 1. Possible bounds for dike parameters and estimated model parameters.

	Bounds		Optimum parameters: period 1			Optimum parameters: period 2		
	min.	max.	min.	opt.	max	min.	opt.	max
Length (km)	1.0	10.0	1.4582	2.1048	9.7789	1.1682	4.1991	9.4881
Width (km)	1.0	10.0	1.2072	4.0902	8.7898	1.1154	1.1705	9.2216
Depth (km) ^{a)}	0.1	5.0	0.3153	2.9552	4.8913	0.2754	3.0620	4.8804
Dip (degree) ^{b)}	45.0	135.0	79.3249	101.4544	114.5025	49.1766	60.6358	128.0546
Strike (degree) ^{c)}	-150.0	-30.0	-80.3305	-64.2152	-45.4881	-119.7827	-90.4974	-39.7402
East (km) ^{d)}	-10.0	5.0	-8.3559	-5.7142	-2.5557	-10.0000	-7.7100	2.0609
North (km) ^{d)}	-5.0	7.0	2.0797	3.0097	5.5172	1.3706	6.1322	6.5259
Open (m)	0.0	1.0	0.1053	0.7927	0.9475	0.0347	0.9412	0.8720
Volume (m ³) ^{e)}	N/A	N/A	4.63×10 ⁶	6.82×10 ⁶	10.4×10 ⁶	0.96×10 ⁶	4.63×10 ⁶	7.40×10 ⁶

Column 1 and 2: Minimum and maximum possible values for each model parameter, respectively.

Column 3 to 5: Optimal model parameters for the period 1 that represent the whole period of the activity (July, 2004, to March, 2005).

Column 4 represents the optimum values estimated by the Simulated Annealing, and columns 3 and 5 represent the minimum and maximum possible values within 95% confidence intervals estimated by the Bootstrap method.

Column 6 to 8: Same as column 3 to 5 except for that these columns are for the period 2 that represent the latter half of the activity (November, 2004 to March, 2005).

a) Depth to the top of the dike from the surface. Because the altitude of the surface in the area is about 2.0km above the sea level, the estimated depth must be subtracted by about 2.0km when it is translated to the depth below the sea level. For example, the top of the dike for the period 1, 2.96 km below the surface, should read about 1.0 km below the sea level.

b) 90 degrees for a vertical dike. A value less than and larger than 90 degrees indicate a north-dipping and south-dipping dike, respectively, for an east-west striking dike.

c) Measured clockwise from north, that is, a value of -45.0 indicates a northwest-southeast striking dike.

d) The location of the center of the dike measured from the summit of Asama volcano.

e) Calculated by multiplying length, width, and thickness of the dike obtained by the inversion.

2. \mathbf{r} をデータの重みに応じてリサンプルする。つまり、 Σ を共分散行列として、 $\mathbf{p} = \Sigma^{-1} \mathbf{r}$ をリサンプルしたベクトル \mathbf{p}^* を作る。たとえば $\mathbf{p} = [\mathbf{p}(1) \mathbf{p}(2) \mathbf{p}(3) \mathbf{p}(4) \mathbf{p}(5)]^T$ とすると、 \mathbf{p}^* はたとえば $\mathbf{p}^* = [\mathbf{p}(3) \mathbf{p}(2) \mathbf{p}(3) \mathbf{p}(1) \mathbf{p}(5)]^T$ などとなりうる。さらに $\mathbf{r}^* = \Sigma \mathbf{p}^*$ という作業により \mathbf{r}^* を求める。

3. $\mathbf{d}^* = \mathbf{d}_{\text{cal}} + \mathbf{r}^*$ により擬似的なデータベクトルを作り、そのデータを最も良く説明するモデルパラメータを Simulated Annealing により求める。

4. 1 から 3 の作業を多数 (本研究の場合 2,000 回) 行い、求められるモデルパラメータのばらつきを求める。

4. 結 果

4-1 最適なモデル

観測された変位場を最もよく説明するモデルパラメータを Table 1 に示し、ダイクの場所及び観測された変位と計算値との比較を Fig. 3 に示す。各観測点について座標決定の繰り返し誤差は、火山活動開始前 (2004 年 7 月以

前) の時系列について linear trend を仮定し、そこからのずれの標準偏差を繰り返し誤差とした。その大きさは時間変化しないと仮定したため、各観測点における変位の標準偏差は繰り返し誤差の $2^{1/2}$ 倍となる。また、成分間の相関はないと仮定した。Fig. 3 は火山活動期間全体の期間にまたがる地殻変動 (Fig. 3a) も 2004 年 11 月以降の地殻変動 (Fig. 3b) も山頂西側に鉛直に近いダイクが貫入することによってよく説明されることを示している。

4-2 モデルパラメータの誤差とパラメータ間のトレードオフ

地殻変動データを断層すべりやダイク貫入によってモデル化の際に求められたモデルパラメータの誤差やパラメータ間のトレードオフについて論じた研究は過去にあまりないが、得られた結果を解釈するにあたりモデルの不確かさを議論することは非常に重要である。特に本研究の場合、変動量が高々 10 mm と小さいためによく拘束されるパラメータとそうでないパラメータがあることが予想され、さらにパラメータ間のトレードオフも

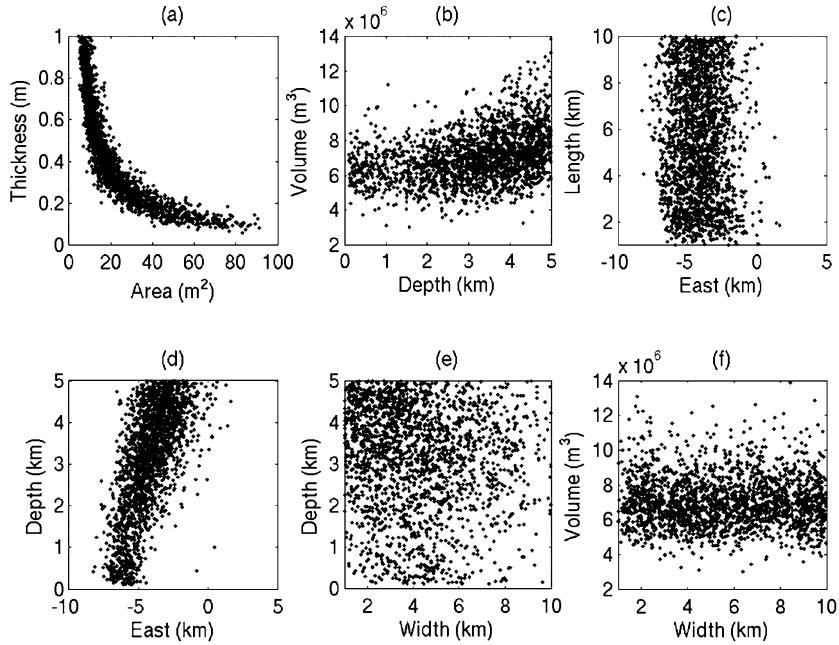


Fig. 4. An example of covariance scatter plots for the period 1. We show some selected parameter pairs only. Each panel indicates covariance between (a) area and thickness, (b) depth and volume, (c) east component of the location and length, (d) east component of the location and depth, (e) width and depth, and (f) width and volume, of the modeled dike, respectively.

あると考えられる。そのため、本研究では上に示した Bootstrap 法を用いてそれぞれのパラメータの不確かさ及びパラメータ間のトレードオフを求めた。

Table 1 はそれぞれのパラメータの 95% 信頼区間を示している。ダイク貫入の中心座標は 3 km 程度の精度で比較的良好に求まっているが、ダイクの長さ・幅といった形状については地殻変動データからはほとんど拘束されないことが分かる。これは変動量が小さいこと、山頂西方に GPS 観測点が少ないことがあげられる。

観測された変動場から貫入したダイクの形状を決めることは困難であるが、求められたダイクの長さ・幅・厚さから計算した体積は比較的良好に決定できる (Table 1)。ダイクからある程度離れた観測点の変位はダイクの形状に対してはほとんど感度がないがダイクの体積に対して高い感度があることから、貫入したダイクの体積は山体からある程度離れた観測点の変位によってある程度拘束されていると考えられる。

Fig. 4 は period 1 について、Fig. 5 は period 2 について求められた主なパラメータ間のトレードオフを示している。上にダイクの形を拘束できないのにも関わらず貫入したダイクの体積は比較的良好に拘束されると記しているように、ダイクの長さ・幅・厚さの間には強いトレー

ドオフがある。これはとりわけ period 1 について顕著である (Fig. 4a)。Period 2 についてはダイク面積と厚さの間に強いトレードオフがないが、これは観測点数が増えた為に変動場がよくモデル化できるようになったためという可能性もあるが、この場合は変動量が非常に小さい (Fig. 3b) ために変位場のモデル化が困難であるためと考えるのが妥当であろう。したがって、今後は period 1 について求められたパラメータ間のトレードオフ (Fig. 4) のみを論じる。

一般的に観測点がまばらに分布しているとき、ダイクの長さ・幅・厚さの間にトレードオフが生じるのと同時に (Fig. 4a)、深さと体積の間にもトレードオフが生じる。すなわち、ソースの深さを深く仮定すると貫入体積を大きく取ることにより同じようにデータを説明する。Fig. 4b にダイク上端の深さと貫入体積のトレードオフ関係を示す。Period 1 については両者に弱い正の相関があることが分かる。求められたダイク直上もしくはその周辺にも GPS 観測点が分布しているため、ダイクの形状と厚さ (Fig. 4a) ほどの強いトレードオフ関係は見られない。

仮に観測点が東西走向のダイクに対して東側に偏っていると、ダイクの西端の位置を拘束することができない

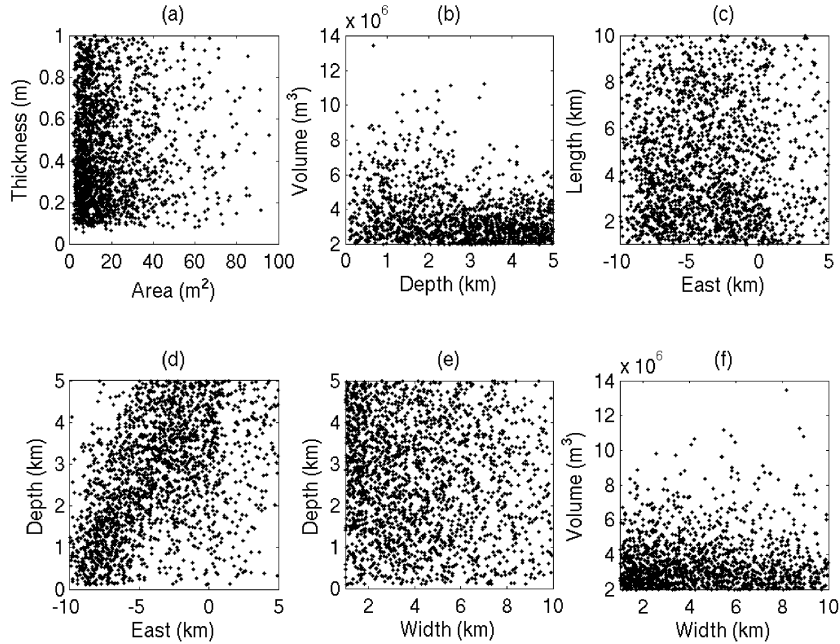


Fig. 5. Same as Fig. 4 except that these plots are for the period 2.

ため、ダイクの位置と長さの間にトレードオフが生じる。つまりこの場合はダイクの位置が東になるほど長さが短くなるはずである。Fig. 4c にダイクの東西方向の位置と長さのトレードオフ関係を示すが、この2つのパラメータに明確なトレードオフ関係は認められない。だが、Fig. 4d よりダイクの東西位置と深さにも、位置を東に置くと最適なソースは深くなるという相関があることが分かる。このことは、モデルが、ダイクに対して南東及び北東側（ダイクから遠い位置）の観測点のデータによって拘束されていることを示唆する。実際、GPS 観測点は山頂の南北、つまり求められたダイクに対しては南東側と北東側に比較的密に分布している。Fig. 4d はよりよい地殻変動データのモデル化の為に山頂西側により多くの GPS 観測点が必要であるということを強く示唆している。その他のパラメータの組み合わせについては Fig. 4e や 4f に示すように強いトレードオフ関係を示す組み合わせはない。

5. 議 論

5-1 ダイクの走向

変動場から求められるダイクの走向は Fig. 3 に示す両期間とも西北西-東南東および東西走向である。一般的にダイクは最小主応力の方向に開くように形成されるため、ダイクの走向は最大水平主応力の方向になる。浅

間山付近は太平洋プレートの沈み込みに伴い広域応力場は東西圧縮が卓越していると考えられるため（塚原・池田, 1991; Seno, 1999）、求められたダイクの走向はこのことと調和的である。

5-2 ダイク貫入位置の時間変化

Fig. 3 は period 2 について period 1 よりも西側でダイク貫入がおきていると示しているように見える。実際にダイクはこの火山活動中に西方に移動したのだろうか？ Table 1 に示すように period 2 については変動量が小さい為に、観測点が増えたのにも関わらずダイク貫入位置の不確実性が大きい。そのため、この火山活動中のダイクの水平移動については本研究の結果からだけでは議論できない。ただ、各観測点では1日ごとに座標値を計算しているので、Aoki *et al.* (1999) で用いたような手法を用いれば、データ量が増加しダイクの時空間的な移動がある程度つかめるかもしれない。

Fig. 6 は浅間山の北に位置する 950221 と南に位置する ASM4 の距離の時間変化を示す。求められたダイクの走向は東西走向であるので、浅間山を南北にはさむこれらの点の距離の時間変化は山体膨張や収縮のよい指標となる。Fig. 6 に示すように、ダイク貫入レートはこの火山活動中一定ではなく、2004年7月下旬と10月下旬に貫入レートが高かったと考えられる。2004年9月1日から中旬までの噴火活動と11月14日の中規模噴火はこれ

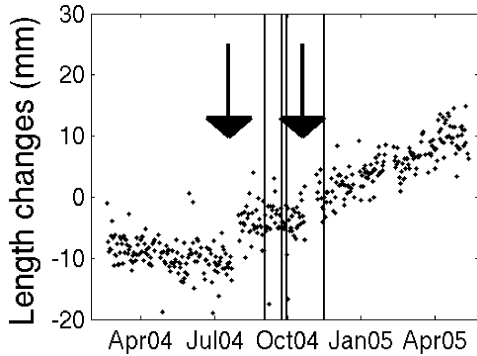


Fig. 6. Temporal changes of the baseline length between 950221 and ASM4. Because the modeled dike strikes approximately east-west, change of the baseline length between 950221 and ASM 4, spanning the volcano to the north-south, is a good indicator of inflation and deflation of the volcano. Vertical bars represent the time of moderate-sized eruptions. Arrows represent the time when the magma injection rate was high.

らの貫入イベントからともに約1ヶ月後に発生したことから、これらの噴火活動はダイク貫入イベントに何らかの形で誘発された可能性がある。では、地殻変動データからとらえられたダイク貫入イベントと噴火との間の1ヶ月間に地下ではどのようなプロセスが進行していたのだろうか？ 吉本・他(2005)は、噴出物の分析から9月の噴火に伴う噴出物はマグマ物質が含まれていたが、それ以降の噴火には含まれていないとした。したがって、11月14日の中規模噴火は10月に貫入した物質がそのまま噴出したわけではないことは明確である。9月の噴火に関しては7月下旬に貫入したマグマがそのまま地表まで噴出したのかもしれない。しかし、残念ながら火口周辺にGPS観測点がないために7月の貫入イベントから9月1日の噴火までの間にマグマがどのように移動したかは分からない。

5-3 噴出量と地殻変動との関係

浅間山2004年噴火における噴出物の量は約 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定される(中田・他, 2005)。地殻変動データから求めた2004年7月から2005年3月にかけてのダイク貫入体積は95%の信頼区間で 4.63×10^6 から $1.04 \times 10^7 \text{ m}^3$ の間であるので、ダイク貫入体積は噴出物の体積よりも有意に大きい。また、9月18日以降の噴火にはマグマ起源物質が含まれていない(吉本・他, 2005)ので、地下において貫入したダイクがそのまま噴出するわけではないのは明らかである。ダイク貫入が噴火をひきおこすメカニズムについては理論・観測両面からの今後の研究が必

要である。

5-4 地震活動と地殻変動との関係

ダイク貫入にともなう地震活動は主にダイク先端付近で発生する。このことはダイク先端付近の応力集中によって説明でき(例えばRubin and Gillard, 1998)、観測事実とも調和的である(例えばGillard *et al.*, 1996; Rubin *et al.*, 1998; Hayashi and Morita, 2003)。山本・他(2005)はこの火山活動にともなう群発地震の震源を精密に決定し、ダイク貫入により誘発された地震は海拔下約1 km付近に集中することを示した。地殻変動データから求められるダイク先端の深さは、period 1および2について共にそれぞれ地表から約3 kmである(Table 1)が、付近の標高がおおよそ2,000 mであることを考えると両者の結果は調和的である。

山本・他(2005)によって求められた震央は山頂から西北西へ約3 kmにわたって伸びている。彼らによって求められた震央も本研究によって求められたダイク貫入の場所も山頂西側に求められるが、地殻変動データから求められるダイク貫入の位置の方がより西側に求められる。地殻変動データから求められるダイク貫入位置の水平決定精度は3 km程度であるので、貫入したダイク先端付近で群発地震が発生するという仮説を否定することはできない。

また、山本・他(2005)の精密震源決定は、海拔下1 km付近にシート状に分布した震源から山頂に向かって伸びる震源分布を示している。これは噴火に先行して火道を上昇するマグマの軌跡を示していると考えられているが、地殻変動データからは火道を上昇するマグマに起因する変動は観測されなかった。浅部の力源に起因する変動を観測するためには力源の近くで観測を行わなくてはならないが、浅間山においてはすべてのGPS観測点が山頂から4 km以上離れていること、また期待される変動量が小さいことが理由である。

これまでに述べたことをまとめ、ダイク貫入と地震活動の関係をFig. 7に示す。ダイクは山頂西側に貫入し、貫入したダイクの東端付近からマグマが山頂へ向かって上昇し噴火に至ったと考えられる。海拔下1 km付近に分布する地震活動はダイク先端の応力集中によるものと考えられるが、地震活動は貫入したダイクの東側にしか観測されず、西側では観測されない。その原因としては

1) 実際には貫入したダイク先端の全域で地震が発生しているが、地震観測網が山頂付近に集中していて、ダイク西側に発生した地震については検知能力がない(山本・他, 2005)ために観測されない。

2) 貫入したダイクの西部は浅部でも温度が高い為に応力が集中しても地震を発生できない。

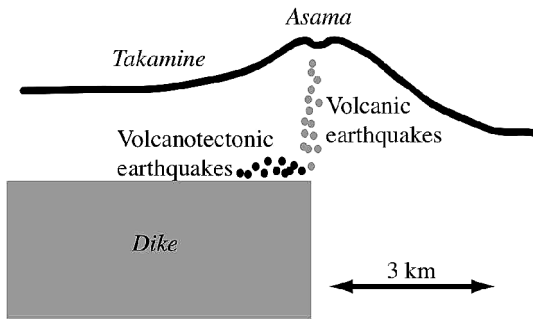


Fig. 7. A vertical view illustrating the relation between an intruded dike and earthquake locations.

3) 貫入したダイクの西部は貫入にともなう応力集中があっても地震を発生するほどに応力が高まらない。

といった可能性が考えられる。今後地震観測網の拡充により、より広い範囲の地震を検知することができるようになるであろう。また、それにより浅間山周辺の地下構造が明らかになることも期待される。2) に関しては、現在熱流量などのデータがなく地下の温度構造を直接知りうるデータはないが、地下の高温は低い地震波速度として現れるはずであり、今後の地震観測網の拡充により間接的に地下の温度構造を知ることができる可能性がある。地震観測網の拡充により 1) および 2) の可能性が否定されたならば、3) が原因である可能性が高まる。

6. まとめ

2004 年から 2005 年にかけての浅間山での火山活動に伴う地殻変動をダイク貫入にともなう変動としてモデル化することを試みた。我々は火山活動期全体にまたがる 2004 年 7 月から 2005 年 3 月までの期間と火山活動期後半の 2004 年 11 月から 2005 年 3 月までについて貫入したダイクの長さ・幅・厚さ・深さ・傾き・走向・水平位置をそれぞれ推定した。両期間とも変動量が最大で 10 mm 程度と小さいためによく拘束されるパラメータとそうでないパラメータがあり、いくつかのパラメータ間ではトレードオフがみられるが、観測された変位場は山頂西側に東西もしくは西北西-東南東走向のダイクを仮定することによって説明できる。ダイクの走向はよく拘束され、東西圧縮の応力場と調和的である。また、活動後期についてはダイクの位置がより西側に求まるが、ダイクの西方への移動を有意に示唆しているとはいえない。

地殻変動データから求められたダイク先端の深さは、ダイク貫入にともなう地震活動がダイク先端付近の応力集中にともない発生するという理論的知見と調和的である。だが、地震活動は求められたダイクの東側でしか観

測されていない。その原因は明らかになっておらず、それを明らかにするためには今後の地震観測網の充実と地下構造の明確化が必要である。

謝 辞

国土交通省国土地理院には GPS データを提供していただきました。大倉敬宏氏と 2 名の匿名査読者のコメントにより原稿が改善されました。いくつかの図は Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) を用いて作成されました。本研究は、文部科学省科学研究費補助金特別研究促進費 (1680002) を用いて行われました。

引用文献

- Altamimi, Z., Sillard, P. and Boucher, C. (2002) ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *J. Geophys. Res.*, **107** (B10), 2214, doi: 10.1029/2001JB000561.
- Aoki, Y., Segall, P., Kato, T., Cervelli, P. and Shimada, S. (1999) Imaging magma transport during the 1997 seismic swarm off the Izu Peninsula, Japan. *Science*, **286**, 927–930.
- Aoyama, H. and Takeo, M. (2001) Wave properties and focal mechanisms of N-type earthquakes at Asama volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **105**, 163–182.
- Basu, A. and Frazer, L. N. (1990) Rapid-determination of the critical-temperature in Simulated Annealing inversion. *Nature*, **249**, 1409–1412.
- Cervelli, P., Murray, M. H., Segall, P., Aoki, Y. and Kato, T. (2001) Estimating source parameters from deformation data, with an application to the March 1997 earthquake swarm off the Izu Peninsula, Japan. *J. Geophys. Res.*, **106**, 11,217–11,237.
- Dzurisin, D. (2003) A comprehensive approach to monitoring volcano deformation as a window on the eruption cycle. *Rev. Geophys.*, **41** (1), doi: 10.1029/2001RG000107.
- Efron, B. and Tibshirani, R. J. (1993) **An Introduction to the Bootstrap**. Chapman & Hall, New York, 436 pp.
- Fujita, E. and Ida, Y. (1999) Low attenuation resonance of a spherical magma chamber: source mechanism of monotonic volcanic tremor at Asama Volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3221–3224.
- 国土地理院 (2004) 浅間山周辺の地殻変動。火山噴火予知連絡会会報, **87**, 8–16.
- Gillard, D., Rubin, A. M. and Okubo, P. (1996) Highly concentrated seismicity caused by deformation of Kilauea's deep magma system. *Nature*, **384**, 343–346.
- 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.
- 宮崎 務 (1990) 水準測量によって明らかにされた日本の活動的火山の地殻変動。地震研究所彙報, **65**, 665–807.

- Mogi, K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36**, 99–134.
- 中田節也・吉本充宏・小山悦郎・辻 浩・卜部 卓 (2005) 浅間山 2004 年噴火と過去の噴火との比較による活動評価. *火山*, **50**, 303–313.
- Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1135–1154.
- Rubin, A. M. and Gillard, D. (1998) Dike-induced earthquakes: theoretical considerations. *J. Geophys. Res.*, **103**, 10,017–10,030.
- Rubin, A. M., Gillard, D. and Got, J.-L. (1998) A re-interpretation of seismicity associated with the January 1983 dike intrusion at Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **103**, 10,003–10,015.
- Sawada, M. (1994) B-type and explosion earthquakes observed at Asama volcano, central Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **63**, 111–128.
- Seno, T. (1999) Syntheses of the regional stress fields of the Japanese islands. *Isl. Arc*, **8**, 66–79.
- 塚原弘明・池田隆司 (1991) 本州中央部の地殻応力方位分布—応力区とその成因. *地質学雑*, **97**, 461–474.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.
- 山本眞紀・武尾 実・大湊隆雄 (2005) 2004 年浅間山噴火に先行する長周期地震活動と群発地震活動. *地球惑星科学関連学会合同大会*, V055–002.
- 吉本充宏・他 17 名 (2005) 浅間山 2004 年噴火の噴出物の特徴と降灰量の見積もり. *火山*, **50**, 519–533.
- Zumberge, J., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. and Webb, F. H. (1997) Precise point positioning for efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, **102**, 5005–5017.

(編集担当 大倉敬宏)