

GPS 連続観測結果が示唆する浅間火山のマグマ供給系

村 上 亮*

(2005年3月2日受付, 2005年9月29日受理)

Magma Plumbing System of the Asama Volcano Inferred
from Continuous Measurements of GPS

Makoto MURAKAMI*

Continuous GPS measurements around the Asama volcano, central Japan, show a repetition of episodic inflations and deflations of the edifice. A correlation is found among plume height, seismicity and crustal deformation measured by the GPS. During the inflation period, increase of seismicity and rise of plume height were observed. A planar magmatic source situated at about 2 km depth below the surface was inferred from the GPS data during both the inflating and deflating periods. It is also suggested that a buoyant bubble-rich magma surges episodically into the magma reservoir, then it loses the buoyancy through degassing process, and finally drains back to the further depth. Inflations of the edifice preceding the eruption were registered in the GPS data before both 2003 and 2004 crises, showing the usefulness of crustal deformation data for the prediction of the volcanic unrest of the Asama volcano.

Key words: crustal deformation, Asama volcano, GPS, magma plumbing system, degassing

1. はじめに

全国を対象にした国土地理院の本格的な GPS 連続観測は 1996 年に開始され, これまでにプレート運動, 各種の地震活動, および有珠山や三宅島の火山活動などに伴って発生した地殻変動を検出し, 地球科学の発展に大きく貢献している. 浅間山の近傍にも, 嬬恋 (950221), 東部 (950268), 軽井沢 (950269) などの観測点が設置され, 連続観測が続けられてきた. これらの観測データから, 浅間山の火山活動の消長に呼応した山体の膨張・収縮の反復が明らかになり, マグマ移動が頻繁に発生している可能性の高ことがわかってきた. 本稿では, GPS データを他の火山観測結果と比較することによって, 次第に理解の進んできた浅間山の地下のマグマ供給系について議論する.

2. 浅間山周辺の GPS 連続観測

浅間山 (2,568 m) は, 東北日本弧と伊豆マリアナ弧に沿う火山フロントの会合点付近に立地する活動的な火山

で, 有史以来多くの噴火が記録されている. 最近でも, 2004 年 9 月の噴火から始まった火山活動が現在 (2005 年 6 月) まで続いている. 1930 年代や 50 年代の活動期には, 山体周辺で水準測量が行われ, 山頂付近の隆起を示唆する結果も得られているが (宮崎, 1990), これまでの測地学的なデータは期間的にも空間的にも限られており, 火山活動に伴う地殻変動の詳細が十分明らかになっているとはいえない.

1990 年代に急速に整備の進んだ国土地理院の GPS 観測網は, Fig. 1 に示すように, 山頂から約 10 km の距離に 4 点の観測点が設置され, ほぼ東西南北から山体を取り囲む配置となっている. 複雑な空間分布を示すことの多い火山性地殻変動を見落とさなく捕捉するためには, 十分とはいえないものの, 山頂付近地下数 km 程度の深さの力源の活動を検出することに目的を絞れば, 現状でもある程度の有効性が期待できる.

これまでの観測結果から, 山体を取り巻く観測点間の距離が伸張・短縮を繰り返していることが明らかとなっ

* 〒305-0811 茨城県つくば市北郷 1 番
国土交通省国土地理院 地理地殻活動研究センター
Geography and Geodynamics Research Center, The
Geographical Survey Institute, 1-Kitasato, Tsukuba,

Ibaraki 305-0811, Japan.

e-mail: mcopy@gsi.go.jp

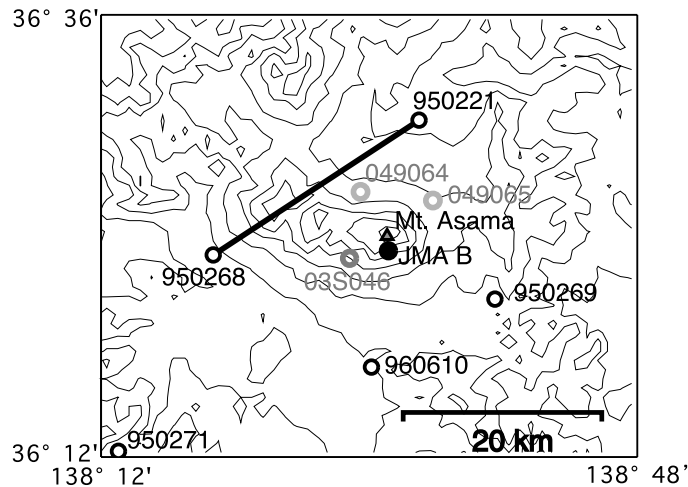


Fig. 1. A location map of observation sites around the Asama volcano (elevation 2568 m). Black open circles with site identification numbers indicate permanent GPS stations operated by the Geographical Survey Institute (GSI). The station 03S046 is a site operating since February 2004, whereas 049064 and 049065 are those installed after the September eruption. The black solid circle indicates the location of seismometer (JMA station B) operated by the Japan Meteorological Agency (JMA *et al.*, 2004). The solid line connecting 950221 and 950268 is the baseline whose distance change is plotted in Fig. 2. The elevations of the GPS sites, 950221, 950268, 950269, 950271 and 960610 are 970.82 m, 696.46 m, 947.68 m, 820.29 m and 748.00 m, respectively.

た(村上, 2003). そのような変化の代表として, 北東-南西方向から山体をはさむ, 嬭宍 (950221) と東部 (950268) 間の距離の推移を Fig. 2 に示す. 後の便宜のために, 基線長の伸張や短縮が持続した 1 区切りの活動単位ごとに, A から G まで期間分けした. なお, 期間 E については, その中で, 小規模な膨張イベントが近接して 2 回発生した可能性もある. 図には, 気象庁軽井沢測候所が観測した噴煙高度や火口近傍の気象庁地震計 (JMA-B, Fig. 1 参照) で測定された地震数の推移も時間軸を揃えて示してある (気象庁地震火山部火山課・軽井沢測候所, 2004). 薄くハッチをかけた伸張の時期には, 噴煙高度が高くなる傾向がある. 地震数についても, 伸張期にはいずれも増加しており, 短縮期にもかかわらず地震が多かった期間 F のような例外はあるものの, 両者の間には, ゆるやかな連動性があるようにみえ, 火山活動と地殻変動の間に関連性があることを示唆している. これまでも, 多くの火山において山体の膨張や収縮が観測されているが, これらは, 地下のマグマの活動と関係がある場合が多く, 浅間山の地下でも, 同様に火山性のプロセスが進行している可能性が高い. 本稿では, GPS によって観測された地殻変動の推移を詳細に振り返り, 地下で発生している現象について, 放出ガス量など, 他の観測結果も参照しながら検討を加える.

3. 地殻変動の力源の推定

前節でみたように, 浅間山周辺で発生した地殻変動は発生時期によって, いくつかの期間に区切ることができる. Fig. 2 の期間分けにしたがいが, 各期間の地殻変動に対応する力源の位置や形状の推定を試みることにする. 地殻変動の規模は, Fig. 2 からわかるように, いずれの期間においても 1~2 cm 程度と小さい. しかし, 最近の GPS 連続観測は, 解析手法の改良により精度が著しく向上しており, 日々の座標値の水平成分の標準偏差は数 mm 程度にまで小さくなっている (Hatanaka, *et al.*, 2003). 浅間山周辺で観測された水平変動は, 観測誤差に比べて十分大きく, 真の地殻変動であるとみなしてよい. 一方, 上下成分については, 観測誤差が水平成分に比べて 2 倍程度に大きいことに加え, 予想される変動は水平変動の半分程度以下である. これを観測値に含めるとかえって推定を不安定にする恐れがあり, 用いないことにする.

本稿では浅間山の火山活動に注目しているので, 観測された地殻変動の中から, 浅間山の活動に起因する成分のみを抽出した解析が必要である. 全国の GPS 観測の水平成分の検討から, 日本列島全体にわたって広域的な水平歪の蓄積が進行していることが知られている. また, その速度分布は一律ではなく地域性があることも指摘されている. 本州中央部付近に注目すると, 新潟から

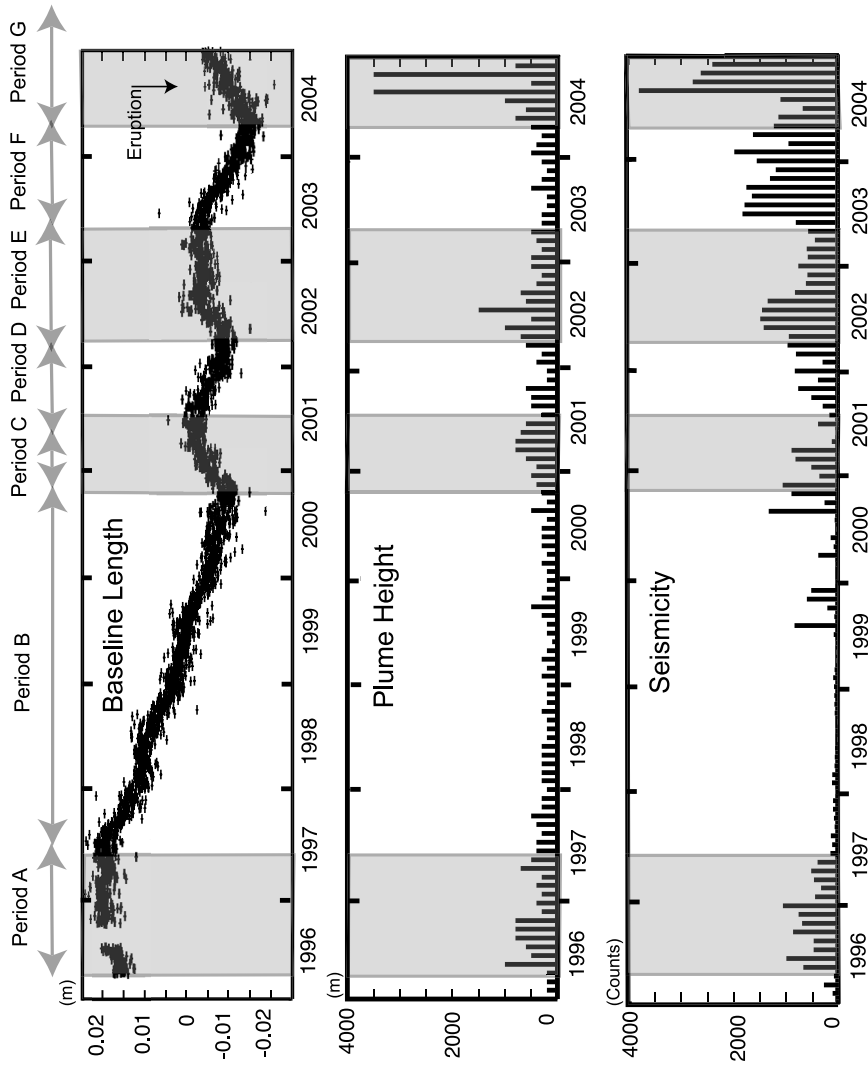


Fig. 2. Time series plots of distance change between 2 GPS sites (950221 and 950268) spanning over the Asama volcano. Plume height and seismicity measured at JMA-B in Fig. 1 (Japan Meteorological Agency *et al.*, 2004) are also plotted. The hatched periods are those during which the distance extended. There is a correlation between extension of the distance and plume height growth. Likewise, correlation between GPS and seismicity is recognizable except during Period F, while seismicity was high despite the shortening of the distance. The overall change during 1996 to 2004 was a slight contraction.

神戸にかけて大きな東西圧縮性の歪速度が卓越する帯状の領域が存在している (Sagiya *et al.*, 2000). 浅間山は、その帯の南側に位置しており、山体の周辺では平均して1年あたり0.2 ppm程度程度の歪の蓄積が進んでいる。浅間山周辺のGPS点間の距離は20 km程度であるので、このような成分の寄与は、1年間で4 mm程度に達する可能性があり、それらを観測値から取り除かなければならない。

最初に、周辺の広域変動の傾向をみるため、浅間山の北西に位置する長野を固定点とし、山頂を中心とする辺長100 kmの正方形領域内のGPS観測点の地殻変動を求めた。広域変動場を、観測点の水平位置を変数とした以下の式で近似することにする ($u = a_u x + b_u y + c_u xy + d_u$, $v = a_v x + b_v y + c_v xy + d_v$; ただし、 u, v は緯度方向、経度方向の地殻変動、 x, y は、観測点の緯度及び経度、 $a_u \sim d_u, a_v \sim d_v$ はそれぞれ係数)。まず、山頂を中心とする30 km以内の観測点の変動量を用いて最小二乗法により、係数を推定した。その後、決定された値を用いて、山頂から30 km以内の点の広域応力場に対応する地殻変動量を推定し、実際に観測された地殻変動から広域場に相当する分を差し引いた残りを浅間山に起因する火山性変動と考えることにした。この処理は、各期間ごとに実施した。

以上のような手順を経て推定された6つの時期の水平地殻変動分布をFig. 3に示す。各期間は、Fig. 2の区分に対応している。ただし、1997年4月以前の期間Aについては、当時は、観測点数が現在よりさらに少なく、力源推定が難しいので解析の対象としていない。Fig. 3の変動パターンは、Fig. 2において短縮期であったB, D, Fには、山体の収縮が、また、伸張期であったC, E, Gには、山体の膨張が、それぞれ発生していたことを示している。

これらのデータをもとに、力源の推定を行う。ただし、観測点数に限られているため、力源の位置や形状に関するパラメータの全てに自由度を与えると、意味のある解を安定的に得ることが困難となる。したがって、恣意的にならない範囲でいくつかのパラメータを部分的に拘束したうえで推定を行い、結果を吟味しながら力源の絞込みを試みる。推定計算はMatsu'ura and Hasegawa (1987)の手法に従う。

Fig. 3でみるように、観測された変動の空間分布が山頂西側を中心とする放射状パターンであることを意識したうえで、できるだけ簡単なモデルによって変動を再現することをめざす。このような変動分布を発生させる候補のうち、最も単純なモデルは、等方球状圧力源 (茂木モデル; Mogi, 1958), およびダイクである。どちらの候補がより適切かを探るため、期間ごとに、それぞれを仮

定して推定を行い、結果を比べることにする。観測値としては、浅間山固有の変動にとくに敏感なFig. 3内の6点のGPS観測点における水平変動のみを用いる。

等方球状圧力源の推定においては、観測点の空間配置上の制約がより深刻に作用し、深さ方向の拘束力が十分ではない。このため、中心の地表からの深さを1 km, 3 km, 5 kmに固定して、水平位置と膨張・収縮量を推定した。一方、ダイクについては、地震分布 (及川・他, 2005)を参考にして水平方向の長さを2 kmに、また、深さ方向の幅については、2 kmにやや強く拘束し、残りのパラメータである水平位置、上端の地表からの深さ、走向、傾斜、開口 (収縮時は閉口量)には大きな自由度を与えて推定した。このように形状は強く拘束したが、ダイクの面積と開口量の積 (すなわち膨張体積)は、比較的安定して決定される性質があるため、膨張量の推定には大きな影響はないと思われる。なお、弾性論に基づく地殻変動量の計算手法は、Okada (1985)にしたがった。

Table 1に観測点の水平変位の重み付き残差が最小になるように行った拘束付き推定の結果をまとめる。球状圧力源は、いずれの期間においても、浅いほど残差が小さくなるようにみえるが、その差はわずかである。一方、ダイクについては、特に拘束することなく深さを推定することができた。上端の深さは、地表から1.4~3 kmの範囲に収まっており、結果として、妥当な推定が行われたと判断できる。

もともとの観測情報量に限界があるため、推定結果には、2つのモデルのどちらかを決定的に排除するほどの明瞭な差があるわけではない。しかし、推定結果を判定する指標の一つである残差は、期間Bを除き、ダイクのほうが一貫して小さい。

推定の様子をより詳しくみるため、例として、期間Gの双方の結果をFig. 4に示す。この図から、山体の東に位置する950269 (軽井沢)以外の観測点については、球状圧力源およびダイク共に、比較的良好に観測値を説明していることがわかる。しかし、950269は、他点に比べて観測値と計算値のずれが大きいようにみえる。Fig. 3をみると、この点が周囲と異なった傾向を示すのは、全ての時期に共通した性質であることに気づく。Fig. 5にこの観測点の位置の時系列を示す。この点の山頂付近からの距離は他点と同様であるから、山頂西側に等方圧力源を仮定する場合は、周囲の点と同期した変動が、東西方向に現れることが期待される。しかし、Fig. 5の時系列では、そのような傾向を一切認めることができない。一方、ダイクの変動パターンには指向性があるから、Fig. 4で推定されたような配置のダイクであれば、東西性の水平地殻変動が950269付近に現れなくてもかまわ

ない。球状圧力源を想定した場合は、当然その出現が期待される東西方向の変動が、実際には、一貫してみられないことは、モデルを絞り込む際の有効な拘束条件になると考える。また、Fig. 4 のダイクとほぼ重なる形で、地震が帯状に東西方向に連なった配列をしている（及川・他, 2005）ことも、ダイクモデルに有利な材料である。これらを、総合的に判断して、力源としてダイクのほうが実態に近いと判断し、これ以降は、ダイクを仮定して議論を続ける。

なお、Fig. 5 をよくみると、950269 の変動は、長期的に北向きの動きが支配的であり、それに加えて、時折エ

ピソディックな北向きの変動が発生している。しかし、Fig. 2 および Fig. 3 にみられるように他の点には同期して現れる火山性変動との同調性は、はっきりとしない。なお、観測点の周辺には、地すべりや樹木による遮蔽など、観測上の問題がないことが確認されている。したがって、この点の変動の原因は、仮に火山性としても、山頂西側の力源とは独立した、別の要因によるものと思われる。しかし、現時点ではその詳細は不明である。

期間ごとに、ダイクを推定した結果をまとめて Fig. 6 と Table 2 に示す。ダイクを仮定したことにより、軽井沢 950269 では推定変動が現れていない。各時期に推定

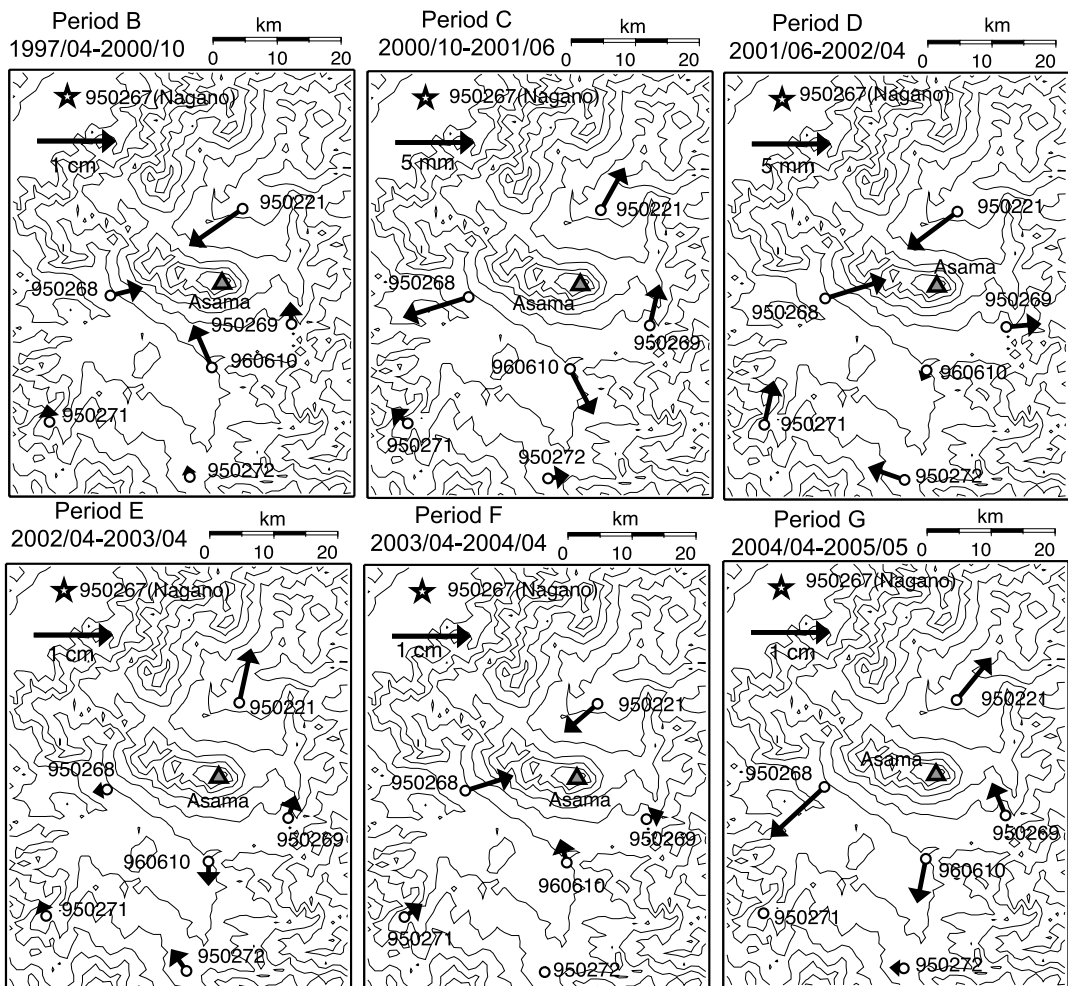


Fig. 3. Horizontal displacements around the Asama volcano for each period. The regional tectonic trend, which is an east-westward compression, is already removed in the figures. Note that the scales of displacements are different for periods. The horizontal displacements are basically of radial pattern. The similarity of the patterns of different periods suggests a common volcanic source that is persistently in activity extending over individual periods of extension and contraction.

されたダイクの水平位置は、山頂から数 km 西に集中して分布している。Fig. 6 の観測値と計算値ベクトルの方向のずれの大きさから見積もる推定位置の不確かさは、およそ数 km 程度である。また、深さについても、推定の信頼度の目安は、経験的におよそ 2~3 km 程度と考えられる。期間ごとに推定された結果は、ほぼこの範囲にばらついており、推定誤差を考えると、全期間を通じて同じ力源が活動していたと考えても矛盾は生じない。また、推定されたダイクの走向がほとんど北西-南東方向に揃っていることも同じ力源の活動を示唆する有力な材料である。加えて、収縮が起こっているという事実は、

Table 1. Comparison of residuals of fitting assuming point sources and a dike for each period.

Period B	mogi_1km	mogi_3km	mogi_5km	dike
Depth (km)	1.0	3.0	5.0	2.0
Residual	6.25X10 ³	6.82X10 ³	7.27X10 ³	7.95X10 ³
Volume (m3)	-8.1X10 ⁶	-8.8X10 ⁶	-9.8X10 ⁶	-8.9X10 ⁶
Period C	mogi_1km	mogi_3km	mogi_5km	dike
Depth (km)	1.0	3.0	5.0	2.4
Residual	2.06X10 ³	2.10X10 ³	2.20X10 ³	1.48X10 ³
Volume (m3)	1.8X10 ⁶	1.9X10 ⁶	2.1X10 ⁶	3.3X10 ⁶
Period D	mogi_1km	mogi_3km	mogi_5km	dike
Depth (km)	1.0	3.0	5.0	3.4
Residual	3.09X10 ³	3.14X10 ³	3.45X10 ³	2.04X10 ³
Volume (m3)	-1.7X10 ⁶	-1.8X10 ⁶	-1.8X10 ⁶	-2.5X10 ⁶
Period E	mogi_1km	mogi_3km	mogi_5km	dike
Depth (km)	1.0	3.0	5.0	1.4
Residual	4.53X10 ³	4.79X10 ³	5.50X10 ³	3.15X10 ³
Volume (m3)	1.6X10 ⁶	1.8X10 ⁶	2.2X10 ⁶	2.5X10 ⁶
Period F	mogi_1km	mogi_3km	mogi_5km	dike
Depth (km)	1.0	3.0	5.0	3.3
Residual	2.94X10 ³	3.05X10 ³	3.29X10 ³	9.22X10 ²
Volume (m3)	-2.9X10 ⁶	-3.0X10 ⁶	-3.3X10 ⁶	-4.5X10 ⁶
Period G	mogi_1km	mogi_3km	mogi_5km	dike
Depth (km)	1.0	3.0	5.0	1.4
Residual	8.95X10 ³	9.22X10 ³	9.78X10 ³	3.89X10 ³
Volume (m3)	3.7X10 ⁶	3.8X10 ⁶	4.2X10 ⁶	6.1X10 ⁶

The depth refers to the topographic surface, which is about 1000 meters above the mean sea level and is measured downward. The residual in the table is the sum of squares of differences between the observed and synthesized values multiplied by the weights. The hatch indicates the minimum value for the period.

その前提として、それ以前のいずれかの時点における、同じ場所の膨張を要請するから、狭い空間範囲の中で、短期間に膨張・収縮が繰り返されている場合は、同一力源の活動を考えることが自然である。以上の考察から、浅間山の地殻変動の原因として山頂西側地下の単一の力源の膨張・収縮を考えることにする。

ここで、浅間山の火山性変動の重要な特徴と思われる点について述べておく。それは、膨張後に逆向きの収縮性的変動が発生し、時として後続の収縮のほうが大きい場合もあることである。GPS 連続観測によって、これまでも多くの火山で地殻変動が検出され、ダイクやシルの活動が推定されているが、そのような変動の多くには残存性が認められる（例えば伊豆半島東方沖；西村, 2002）。大きな変動の後に余効的な逆向きの変動が伴った事例も見出されているものの（例えば有珠山 2000 年噴火後の地殻変動；高橋・他, 2002）、ほとんどの場合、後続の逆向き変動は、元の変動の半分以下の規模であって、最初の変動より大きな逆向きの変化が長期間続いた例は珍しい。浅間山は、必ずしも噴火を伴わずに物質の出入りが反復しているという点で興味深い。

4. 議論：地殻変動解析結果から推定されるマグマ供給系

4-1 発泡マグマの間歇的上昇モデル

浅間山山頂西側地下の同一の場所で推定されている膨張や収縮にかかわった体積は 1 回あたり約 $2 \times 10^6 \sim 9 \times 10^6 \text{ m}^3$ である (Table 2)。また、期間 B~期間 G の全体を通じて膨張および収縮量を通算すると、それぞれ $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ および $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ であり、収縮の方がやや勝っているが、両者の規模はほぼ同じである。

これらの情報から推定される地下の輸送メカニズムの性質について考察する。地殻変動は、出入りしている物質を特定する手段とはならないが、期間 G には、噴火により溶岩が噴出したことから、筆者は、膨張を引き起こしている主要な物質はマグマであると考え。2004 年 9 月から 10 月にかけて火口内に噴出した溶岩の体積は、航空機合成開口レーダー (SAR) 観測 (大木・他, 2005) から、 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度と見積もられている。2004 年噴火で噴出した溶岩量が、繰り返し発生している膨張時の体積増加量 (Table 2) と同じオーダーであることは、山体を膨張させている物質をマグマと結びつける重要な証拠と考える。

この仮定が正しいとすると、マグマがより深部から上昇してきたことになるが、マグマは浮力獲得に必要な気泡を多く含んでいると考えられ、マグマ溜まりに到達した直後から、気泡内のガスがマグマ溜まりの周囲に放出

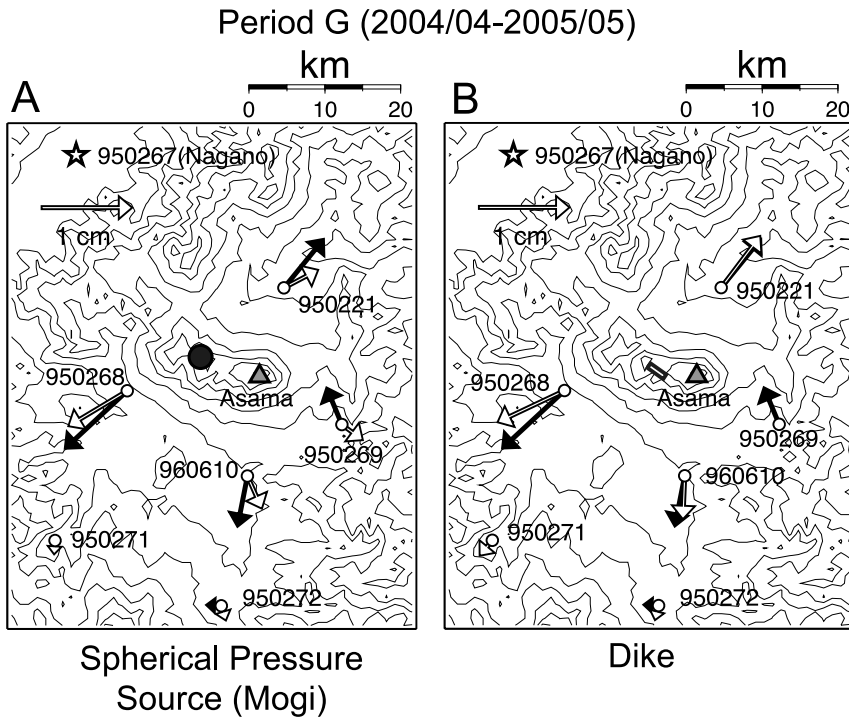


Fig. 4. Comparison of models assuming a point source (A) and a dike (B) for the Period G. Solid arrows indicate observations, whereas open arrows illustrate displacements simulated by the best-fit model for each. The both models generally explain the observations well except 95269 whose northward displacement is unexplained. A point source predicts an eastward movement at this site, which is not the case as seen in Fig. 5, suggesting that the dike model is more realistic.

され始める可能性が高い。また、上昇の結果、母岩からの封圧が深部に比べて小さいため、溶解していた揮発成分も脱ガスして放出されるから、マグマは揮発成分を大量に喪失するであろう。この過程を通じて、マグマの比重が増し、浮力を失って結局は深部に還流するかもしれない。このようなプロセスを考えることによって、地殻変動やその他の観測結果が説明できる可能性がある。

まず、長期的な経過について考察する。今までみてきたとおり GPS 観測がカバーする最近の 10 年間においては、膨張と収縮が繰り返されている。これは最近に限った現象ではなく、おそらく、浅間山では、より深部からマグマが地表下 2 km 程度まで上昇し定置するプロセスが何度となく反復されていたことであろう。このようにして、時間の経過とともに安定したマグマ溜まりが形成されていったと考えられる（以下の議論においては、このマグマ溜まりを浅部マグマ溜まりと呼ぶ）。

上昇し浅部に定置したマグマでは、気泡中に含まれていた揮発成分がまず最初に抜けるため、膨張時にはガス放出の一時的な活発化がみられるはずである。実際、放

出 SO₂ 観測結果をみると、山体が膨張していた期間 E や期間 G に対応する時期に、放出量が増えていることがわかる（平林・他, 2004）。また、Fig. 2 のように膨張期に噴煙高度が増すことも、マグマ上昇時の気泡からの急速な脱ガスに対応する現象として解釈が可能である。一方、メルトに溶解している揮発成分も封圧の減少による溶解度の低下から脱ガスするであろうから、揮発成分の離脱の進行によってマグマの比重は徐々に増加し、最終的には、マグマが周囲の母岩より重くなって浮力を失い、深部に向かっての還流が始まる可能性が高い。これは、比較的長時間をかけてゆっくり進行すると考えられる。また、マグマ内での移動に時間のかかる小さな気泡からの気体の放出も、ゆっくりした脱ガスの原因となりうる。このような緩やかな脱ガスは、収縮期に進行していると考えられる。

ここで考えているようなマグマの還流が起こりうるためには、その流動性が保たれていることが必要であり、それには、熱伝導冷却による固化が生じていないことが要請される。したがって、マグマ溜まりには直ちには冷

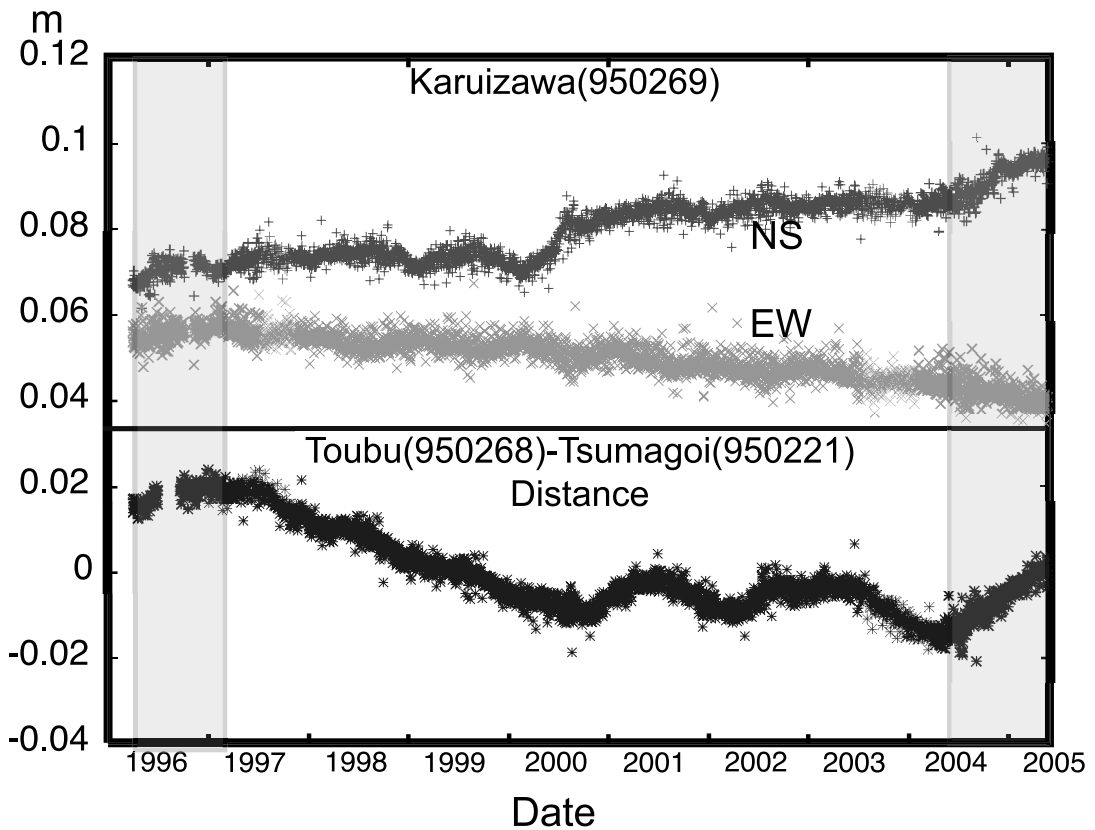


Fig. 5. Time series plots of longitudinal and latitudinal displacements at 95269. Eastward or westward movements, which a point source model predicts, are not verified. Episodic displacements to the north occurred during the hatched periods, but the temporal conformity with the volcanic activity which was seen in the distance change between 950221 and 950268 (Fig. 2) is unclear.

却しない程度の厚みが必要であるが、その条件の達成はそれ程困難なことではないと思われる。

4-2 放出ガス量との整合性

4-2-1 収縮期

最初に、収縮期について考察する。浅間山の火山ガス観測頻度が、2004年噴火以前は頻繁ではないため、脱ガスの時間的推移は、必ずしも明らかではないが、火山活動が低調であった1995年頃の SO_2 放出量は100 ton/day程度である(平林・他, 2004)。この時期のGPSデータはないものの、噴煙高度が低かったことから、この時期を収縮期として議論を進める。

考察の第一段階として、収縮期に放出されている揮発性物質が、浅部マグマ溜まり内において占めていた体積を計算する。ここで、マグマ溜まり内での揮発性物質の存在形態として2つの場合が考えられる。最初の可能性は、ガス成分がメルトに溶存していた場合であり、もう1つの可能性は、マグマが上昇した時点から既に気泡が

存在し、その中に揮発性物質が含まれていた場合である。いずれの場合も、体積への寄与は水によるものが支配的である。しかし、浅間山から放出されているマグマ起源の水の量は不明であり、議論を始めるためには、水のマグマへの溶存量を仮定する必要がある。ここでは、脱ガス前のマグマへの水の溶解濃度を1 wt.%と仮定して、以降の検討を進める。一方、硫黄成分については、山口・他(2005)によって2004年9月23日の放出物のメルト包有物から浅間山のメルトの硫黄濃度の数値(SO_2 に換算して0.33 wt.%)が推定されているので、それを採用する(これ以降、簡単のため、マグマには、結晶は含まれていないと仮定する)。なお、 SO_2 や他のガスの体積の寄与は、 H_2O に比べて小さく、揮発成分の体積の検討においては、 H_2O についてのみ考える。

最初に、放出ガス成分がメルトに溶存していた場合をみることにしよう。脱ガスが100%であると仮定すると、放出される SO_2 と H_2O の重量比は、約1:3であるから、

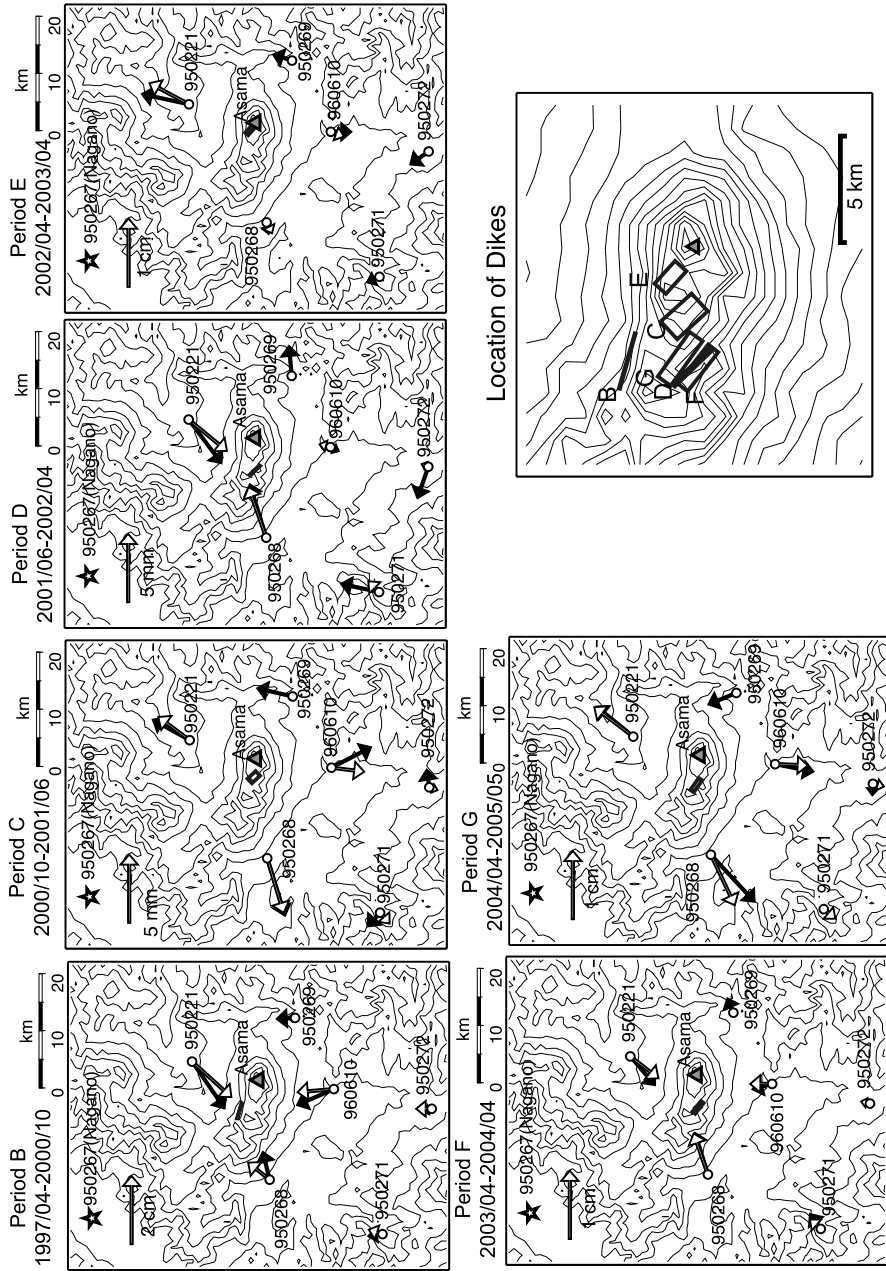


Fig. 6. Inflation and deflation sources derived from the inversion of GPS measurements assuming dikes. Periods refer to the designations in Fig. 2. Note that the scales of displacements are different among the periods. The periods A, C, E and G are those of extension, whereas B, D and F are of contraction, respectively. Solid arrows indicate observations, whereas open arrows illustrate displacements simulated by the best-fit model for each period. The horizontal positions of dikes fall into a small area, which are a few kilometers west of the volcano summit. The proximity among the estimated dikes for different periods strongly suggests that inflation and deflation are caused by a common planar magma reservoir. The estimated parameters are summarized in Table 2.

Table 2. Summary of dike parameters.

Period	B	C	D	E	F	G
Date	1997/04-2000/10	2000/10-2001/06	2001/06-2002/04	2002/04-2003/04	2003/04-2004/04	2004/04-2005/05
Latitude (deg)	36.4252	36.402	36.394	36.403	36.39415	36.402
Longitude (deg)	138.477	138.495	138.467	138.507	138.46885	138.457
Depth (km)	2.0	2.4	3.4	1.4	3.3	1.4
Length (km)	2.7	1.9	2.4	1.4	2.3	2.6
Width (km)	2	2	2.1	2.0	2.1	1.4
Strike (deg)	286	317	316	312	308	305
Dip (deg)	91	124	94	70	106	121
Opening (m)	-1.7	0.86	-0.5	0.8	-0.9	1.7
Volume (m ³)	-8.9X10 ⁶	3.3X10 ⁶	-2.5X10 ⁶	2.5X10 ⁶	-4.5X10 ⁶	6.1X10 ⁶

The depth refers to the topographic surface, which is about 1000 meters above the mean sea level. The length and the width are the lateral and vertical along-dip sizes of the dike, respectively. In this configuration, the dip smaller than 90 degrees means a dike dipping to the south west.

SO₂放出が日量 100 ton の場合、毎日 300 ton の水が放出されているはずである。メルト中の水のモル体積を 20 cm³ (Lange and Carmichael, 1990) として、マグマ中に占めている体積を計算すると 1 日あたり 3.3 × 10² m³ となる。1 年分に換算すると、1.2 × 10⁵ m³ である。

また、ガスが気泡中に存在していた場合の揮発成分の体積は、気体の状態方程式を用いて計算する。ここでは、泡中の揮発性物質の構成比（重量）が、メルトに溶存している比率と同じと仮定して計算を進める。圧力を地下 2 km に相当する 500 気圧 (50 MPa)、マグマの絶対温度を 1,300 K として、1 日に放出されている 300 ton の水の占める体積を計算すると 3.6 × 10³ m³、1 年分では 1.3 × 10⁶ m³ となる。

メルトに溶存している場合も、気泡内に存在する場合も揮発成分の占める体積は、観測されている収縮量（1 年あたり数百万 m³; Table 2 を参照）より小さい。したがって、浅部マグマ溜まりの収縮は、揮発性物質を失うという直接的効果以上に、マグマの深部への還流など別の要因が必要である。

次に、メルトに溶存していたガスが放出されている場合の供給マグマ量を試算する。マグマ中の SO₂ 濃度として、ここでも山口・他 (2005) による推定値 (0.33 wt.%) を用い、期間 F のように収縮が 1 年間継続した場合を想定すると、日量 100 ton の SO₂ を 1 年間継続して放出するためには、100 ton/day × 365 day ÷ 0.0033 = 1.1 × 10⁷ ton のマグマがその供給源として必要である。密度を 2.5 × 10³ kg/m³ とすると、体積はおよそ 4.4 × 10⁶ m³ となる。この量は、観測されている収縮量と同程度の大きさである。この一致は、SO₂ が放出の直前までメルトに溶解しており、それが脱ガスし地表に放出され、その結果浮力を失ったマグマが深部に還流していると考えられる際に都合

がよい。

一方、マグマ内に気泡が既に存在していた場合については、既に計算したとおり、1 年分の揮発物質が気体の状態で占めていた体積は 1.3 × 10⁶ m³ である。一方、収縮が 1 年続いた代表例として期間 F を取り上げると、その収縮量は 4.5 × 10⁶ m³ であったから、気泡内のガスを放出してマグマが還流したとすると、マグマは、体積にして約 30% の気泡を含んでいたことになる。この値は、マグマ中の気体の含有率としてそれほど極端な値ではないが、これだけの気泡を含有したマグマは大きな浮力を持っているはずであり、収縮期のマグマ溜まりに安定的に存在している可能性は低い。したがって収縮期のガス成分の供給源としては、気泡ではなく、メルト中に溶存している揮発物質の寄与が支配的であると考える。

これまでの議論で、重要なポイントは、いずれの場合にしても、揮発性物質を失うという直接的効果だけでは、収縮量を説明できず、還流など、マグマ溜まりからマグマが流出していると考えざるをえない点である。マグマがより浅部や水平に移動してもよいが、その場合は、Fig. 3 とは異なるパターンの地殻変動がみられることが期待され、マグマは下方に還流している可能性が高い。

4-2-2 膨張期

2004 年 9 月噴火後は、平均すると 2000 ton/day 程度の SO₂ 放出が続いている (2005 年 6 月現在)。また、日によっては、3,000 ton/day を越えることもあり、収縮時より 1 桁大きい大規模なガス放出が観測されている (平林・他, 2004)。同様の SO₂ の大量放出は 2003 年頃の膨張時にも観測されている。このように、膨張時には、極めて大量の硫黄成分が放出されている。

マグマ溜まりに、この間マグマの供給がないとすると、活発な脱ガスの進行中は、揮発物質を喪失すること

によってマグマの体積は減少するはずである。しかし、実際には、GPS 観測データが示すようにマグマ溜まりは膨張しており、ガス放出による収縮を上回る規模で、物質が注入されていることになる。先に議論したように、2004年噴火では膨張時の体積増加 (Table 2) と同じオーダーの量の溶岩が噴出したことから、筆者は、膨張の主たる原因はマグマの上昇であると考え。

放出ガスの起源としては、収縮期と同様に、ガスがメルトに溶解していた場合と気泡中に存在していた場合の2通りが考えられるが、まず、マグマに溶解している場合について、必要マグマ量の計算を行い、観測されている膨張量と見合った大きさであるかどうかを検討することにしよう。日量2,000 tonの放出が240日(2004年9月~2005年5月)間続いた場合を計算すると、ガスの供給源としておよそ $5.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ 程度のマグマが必要である。これは測地学的に観測されている膨張量 (Table 2) の少なくとも10倍以上の量であり、メルトだけの上昇が膨張と火山ガス放出を引き起こしたとする脱ガス過程では説明が困難である。

活動期の膨大な SO_2 放出量を説明するためのメカニズムとして、次のような2つの可能性が考えられる。一つめは、深部マグマ溜まりと浅部マグマ溜まりとの間に対流が発生しているモデルである。下降成分に比べて上昇成分がやや卓越した対流が一時的に発生し、その結果、マグマ溜まりの僅かな膨張を伴いながらマグマが循環し、大量の揮発成分が輸送されるという仕組みである。これと類似のメカニズムは、活発な脱ガスが継続的に発生している他の火山の揮発性成分輸送機構として提案されている(例えば、風早・篠原, 1996; Kazahaya *et al.*, 1994)。もう一つの可能性は、対流を伴わないものである。これによれば、揮発成分の気泡を大量に含んだマグマが短期間に上昇して浅部マグマ溜まりに一定期間止まるが、徐々に脱ガスして浮力を失い深部に下降する。浅間山ではそれが数年ごとに繰り返され、膨張と収縮が回復されると考えるモデルである。

このどちらも、定性的には、大量の SO_2 の輸送と、山体の膨張の両方を説明できる。現在のところ、両者の一方を明らかに排除する明確な拘束条件は得られていない。しかしながら、筆者には、浅間山の場合には、気泡を含んだマグマの間歇的な上昇を考える2つ目のモデルのほうが、より実現性が高いと思われる。

その理由は、対流が頻繁に消長するメカニズムを想像しにくいことである。Fig. 2でみるように、膨張は長くても1年程度しか続いている。また、その発生頻度は1~2年に一度であり、地殻変動のリズムは小刻みである。先の計算によれば対流によって1年間に $6 \times 10^7 \text{ m}^3$

程度のマグマを循環させれば、放出ガス量に見合う揮発成分を輸送しうることになるが、このような大量のマグマの対流が短時間に開始したり停止したりする物理過程は、実現の可能性が低いように思われる。

4-2-3 発泡マグマの間歇的上昇メカニズム

ここで、Fig. 2に立ち返り、上昇マグマと還流マグマの量的なバランスを考察する。収縮レートが複数の収縮期を通じて、ほぼ一定であることに注目する(期間B: -8.6 mm/year , 期間D: -11.8 mm/year , 期間F: -12.4 mm/year)。このことは、4-2-1節の議論において収縮の原因として推定した脱ガス後のマグマ還流が、安定した現象であることを示唆している。したがって、還流は、途切れることなく膨張期も含めて一定したレートで継続している可能性が高い。膨張期には、上昇マグマがもたらす膨張によって一時的に収縮がマスクされているが、この期間にも脱ガスによる還流は続いていると考える。

以上のようなマグマ供給の収支の詳細をみるため、その一例として、長期間にわたる供給量と還流量の平均が釣り合っている場合のマグマ量の時間推移をFig. 7に示す。この図では、脱ガスマグマが1年あたり $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の速度で継続的に還流しており(例えば、期間F)、1年おきに、その倍のレートでマグマが注入されている場合を想定している。サイクル全体で平均すれば、供給量と流出量の総量は釣り合っているが、膨張期だけに注目すると、そのときの供給レートは、観測された膨張レートの2倍である。

なお、観測膨張量は、上昇してきたマグマ成分の全てが寄与しているとは限らないことにも注意が必要である。これまでに検討したように、上昇してきたマグマには多くの気泡が含まれている可能性が高い。しかし、マグマ内で気泡が速やかに移動し、気泡内のガスの周囲の母岩への浸透や火道を通じての排出が高速に行われる場合は、マグマ溜まりの膨張に対して、気泡成分はほとんど寄与せず、測地学的に観測される膨張はメルト(結晶は無視している)の体積が反映されていると考えられる。

次に、気泡による輸送機構の可否を調べるため、上昇マグマ内において気泡の閉める体積の割合をチェックしてみよう。浅部への上昇直後で分離前の気体成分の体積を計算する。 SO_2 と H_2O の比率について、これまでの議論と同様に、重量比で1:3と仮定すると、1日2,000 tonの SO_2 の放出に対応する水の放出量は6,000 tonである。浅部マグマ溜まりの圧力を500気圧(地下2km)、温度を1300Kとして、気体の状態方程式を用いて気体成分の体積を計算すると2004年9月噴火後に放出されたガスの総量(日平均2,000 ton \times 240日)が気泡内に存在していたと考えた場合の体積は、 $1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ となる。一方、

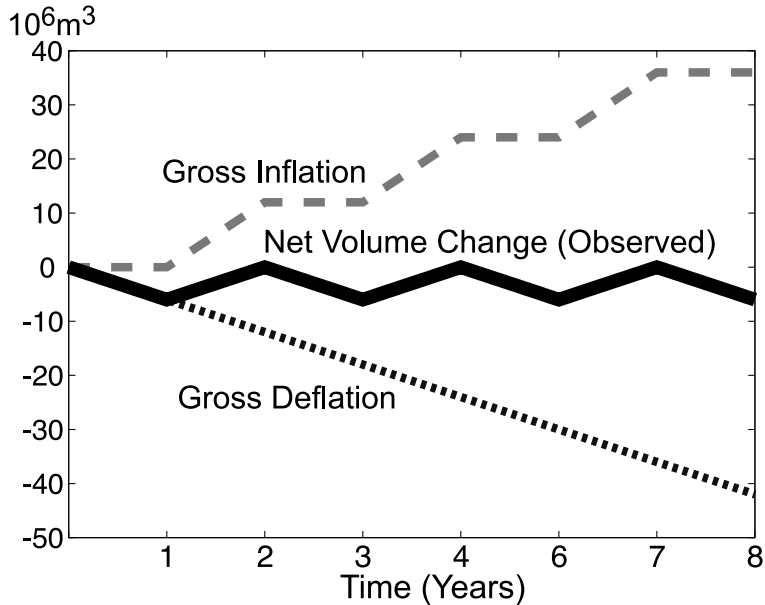


Fig. 7. Schematic illustration for the volume change of the magma chamber caused by episodic supply surges with a constant drain back. In this figure, I assume a constant outward flow (drain back of magma), whose contribution to the chamber volume is seen as a downward straight line, and episodic magma supplies repeating every 2 years, which appear as steps. That we observe through geodetic measurements is the sum of those two contributions as indicated by the thick line in the figure, which qualitatively simulates the behavior of length change in Fig. 2.

これに相当する期間 G の（マスクされた収縮分まで考慮した）真の膨張量を計算する。測地的に観測された膨張量 (Table 2) に、常時進行している収縮による寄与を加えた膨張体積を計算すると、およそ $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 程度と見積もることができる。揮発成分の体積のほうが大きい、ほぼ同程度である。測地的観測から推定した膨張体積は、上昇したメルトの体積に相当すると考えられるから、上昇直後で気泡の離脱が始まる直前のマグマパッチ内で、気泡の占める体積の割合は、63%程度であると考えることができる。気泡の体積比率がちょうどこの程度になると、気泡が連結してマグマからの気体の散逸の効率が飛躍的に高くなり (Eichelberger *et al.*, 1986), ガスが高速にマグマから離脱して浮力が急速に失われる結果、マグマの上昇がこの深さで停止しているのかもしれない。

4-2-4 2004 年噴火時の地殻変動の推移の詳細

GPS の連続観測が始まったのは 1996 年 4 月であるが、Fig. 2 からわかるように、膨張イベントがこれまでに 4 回観測されている。では、2004 年だけ、やや大きな噴火を伴った理由は何であろうか。筆者は、今回は、発泡度が特に高かったため、マグマが大きな駆動力を獲得

し、噴火に至ったのではないかと考える。2004 年噴火時の SO_2 放出量が、その前回の膨張時である 2003 年頃に観測された放出量に比べて格段に多い (平林・他, 2004) ことは、今回のマグマの発泡度の高さを示唆している。

ここで、もう少し詳細に、2004 年噴火前後の地殻変動の推移をみることにしよう。Fig. 8 は、Fig. 2 にも示した 950221-950268 間の基線の 2004 年 1 月～2005 年 5 月末までの距離変化時系列である。太い破線で、距離変化のおおよそのトレンドを示した。ここでは、9 月 1 日の噴火開始以降 10 月初め頃まで一時的に基線の伸びが停滞していることに注目する。この時期は、航空機合成開口レーダー (SAR) 等の観測から、溶岩の火口内への流出が推定された時期に合致している (大木・他, 2005)。

このことについて、次のように考えてみよう。膨張が開始した 4 月頃以降、深部からのマグマの上昇レートは他の時期の膨張イベントと同様に、ほぼ一定であったとする。4 月以降 9 月の噴火までは、マグマの上昇がマグマ溜まりまでであったため、一定の速度でマグマ溜まりが膨張したのである。しかし、溶岩が噴出した 9 月以降の 1 カ月程度の期間中は、上昇してきたマグマがそのまま地表に達して流出したため、マグマ溜まりは膨張せ

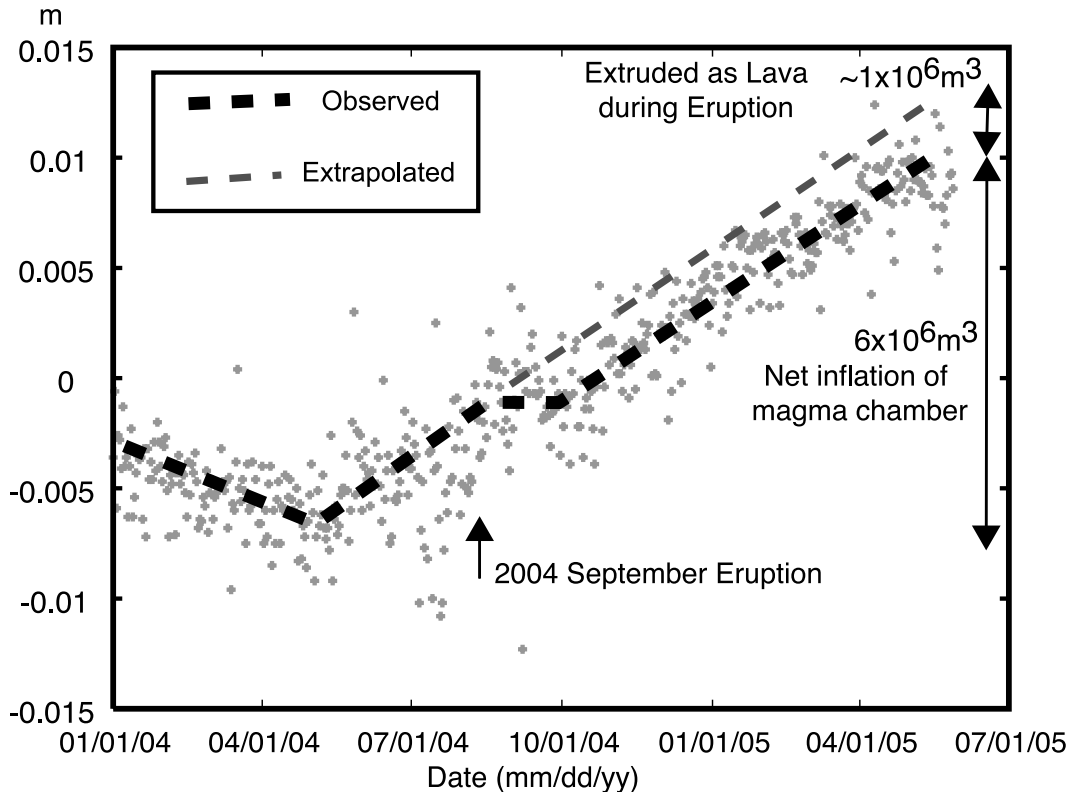


Fig. 8. Close-up view of the distance change of the same baseline of Fig. 2. Before spring of 2004 the baseline was contracting. Then, around May the length change turned to the extension and it continued for several months until the September eruption. After the eruption the baseline length stayed constant for about a month and then the expansion resumed. It is suggested that the halt of expansion corresponds to the extrusion of magma at the summit crater as observed by airborne SAR measurement (Oki *et al.*, 2005).

ず、その間は伸びが停滞したと考えることができる（実際には継続的な還流による僅かな収縮が生じていたかもしれないが、短期間であるため、観測誤差に隠れて判然としない）。9月初めから10月中旬にかけて噴出したマグマの量は、航空機 SAR による溶岩の形状の計測から $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ と見積もられている（大木・他, 2005）。一方、2004年4月から9月までのトレンドを延長した図の細い破線と実際に観測された変動（太い破線）との差を計算し、その値と期間 G の期間全体の伸張量との比を求め、期間全体の膨張量 $6.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Table 2) を比例配分して9月頃に地表に放出されたマグマ量を推定すると、約 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度と見積もることができる。この量は、SAR で観測された噴出溶岩量の約 1/3 であるが、計算の精度を考えると、両者の結果は整合しているとみてよい。また、噴出した体積のほうが大きいのは、噴火時の発泡による溶岩の体積増加を反映しているとも考えられる。

以上のことから、マグマの上昇は4月頃から始まりほぼ同じレートで続いていたが、9月に上昇してきたマグマパッチの発泡度が特別に高かったため、一気に上昇して噴火に至ったという可能性を指摘できる。しかし、発泡度の差に原因を帰するとしても、噴火に先行する数ヶ月の膨張期間を経た後に、一段と発泡の進んだマグマが上昇してくる理由は現時点では明らかではない。

以上の議論は Fig. 9 のようにまとめることができる。このモデルによって、膨張時および収縮期を通じた全期間のマグマの量的な関係について解釈が、一応は、可能となったと考える。しかし、このモデルの弱点は、上昇時には高度に発泡し気泡中に大量の硫黄分を含んだマグマについての物質的な証拠が確認されていないことである。ここで展開した議論は、多くの仮定を経たものであり、得られた結論は、このような解釈もありうるという作業仮説の域を出ていないものである。しかし、異なる観測量を統一的に説明できており、今後、新しい観測結

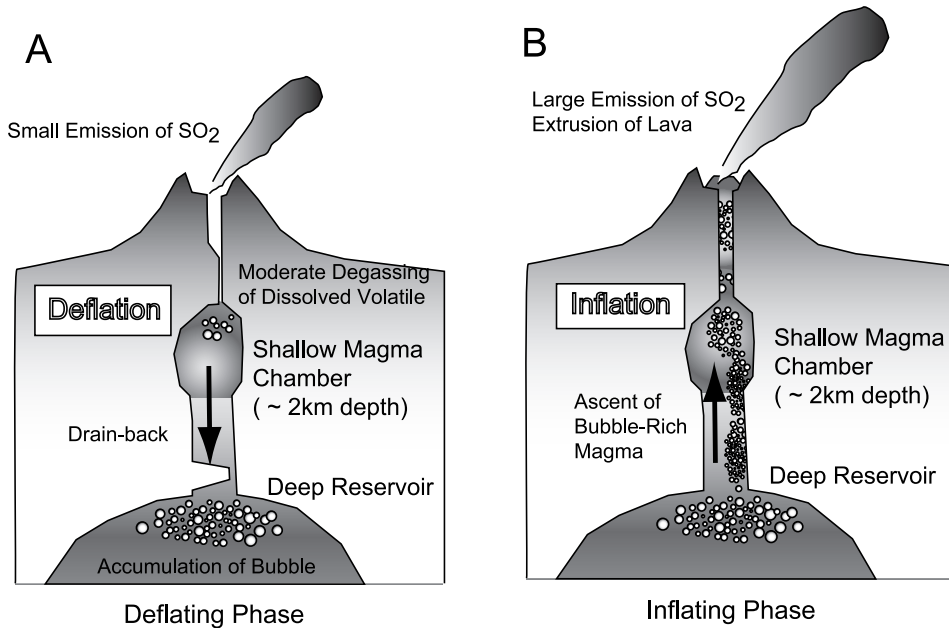


Fig. 9. Schematic illustration of episodic magma ascent model. A: During the deflating period, the shallow magma chamber deflates due to moderate degassing of dissolved volatile. Small emission of volcanic gases is observed. B: During the inflating period, a bubble-rich magma ascends from the deeper magma reservoir causing large emission of gases, the inflation of the shallow magma chamber and occasional lava extrusions.

果が得られたり、地殻変動が新たな進展を迎えた場合に、活動メカニズムについてさらに詳細な検討を展開する際の出発点としての一定の役割を果たすことが期待される。

5. 今後の観測体制

これまでの議論から、浅間山の地下において間歇的なマグマの供給と深部への還流が1-2年に一回の頻度で繰り返し発生している可能性の高いことが示された。浅間山のGPS連続観測は1996年4月に開始されたが、火山噴火予知及び防災の観点からは、GPS観測開始以降に発生した2003年3月および2004年9月の噴火の両方で、先行する数ヶ月程度の膨張フェーズが確認できた意義が大きい。噴火に至る過程が毎回同じである保証はないが、浅間山では、将来においても、噴火に先立つ膨張過程が捉えられる可能性がある。GPSの観測点配置をさらに充実させ、解析の即時性も高めながら連続観測を継続することが重要と考える。

このような背景から、マグマの注入や流出過程をより詳細に探る目的で、山体に近い南麓の標高約1800mの地点に新しく連続観測点(03S04, 位置はFig. 1参照)を設置し2004年2月から観測を開始した。また、2004年9

月噴火直後から、山体周辺にさらに2点のGPS連続点(049064および049065)を設置し、観測を続けている(Fig. 1)。本論文の執筆時である2005年6月現在も浅間山の膨張は続いており、今後、火山活動のステージの変遷と共にデータがさらに蓄積されることによって、特に浅部を含めた浅間山の地下のマグマ供給系のより詳しい姿が明らかになっていくものと考えられる。

6. まとめ

GPS連続観測結果を地震、噴煙高度および放出ガス量データとあわせて考察した結果、浅間山の地下では、間歇的なマグマの供給と、より深部への還流が繰り返し発生している可能性が高いことがわかった。マグマの上昇は平均すると2年に1回程度の頻度で発生しているが、必ずしもその都度噴火するわけではない。噴火に至る上昇と、そうでない上昇との差は、マグマの発泡度である可能性がある。GPS観測開始より後に発生した、2003年3月および2004年9月の両噴火の前には、少なくとも数ヶ月前程度の膨張の期間があったことが確かめられた。浅間山では、噴火に至る準備過程が地殻変動としてGPSによって捉えられる可能性があり、観測点配置をより充実させ、解析の即時性も高めながら連続観測を継続する

ことが重要である。

謝 辞

地震数データおよび噴煙高データは気象庁から提供を受けた。また、浅間山固有の変動の抽出のため実施した広域の変動の除去は、鍵山恒臣博士との議論がきっかけとなっている。浅間山の噴出物のメルト包有物分析による硫黄濃度の測定方法とデータの意味付けについて、山口佳昭博士から詳細なご教示を受けた。篠原宏志博士ともう一名の匿名の査読者の注意深くしかも刺激に満ちた建設的なレビューによって、本稿は著しく改善された。これらを記して、心からの謝意を表する。

引用文献

- Eichelberger, J. C., Carrigan, C. R., Westrich, H. R. and Shannon, J. R. (1986) Non-explosive silicic volcanism. *Nature*, **323**, 598–602.
- Hatanaka, Y., Iizuka, T., Sasawa, M., Yamagiwa, A., Kikuta, Y., Johnson, J. M. and Rocken, C. (2003) Improvement of the analysis strategy of GEONET. *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **49**, 1–37.
- 平林順一・及川光弘・野上健治・鬼沢真也・風早康平・森 俊哉 (2004) 浅間からの SO₂ 放出量. 日本火山学会 2004 年度秋季大会講演予稿集, p195.
- 風早康平・篠原宏志 (1996) 活火山からの過剰な脱ガスについて —そのマグマ過程と機構—. 地質学論集, **46**, 91–104.
- Kazahaya, K., Shinohara, H. and Saito, G. (1994) Excessive degassing of Izu-Oshima volcano: magma convection in a conduit. *Bull. Volcanol.*, **56**, 207–216.
- 気象庁地震火山部火山課・軽井沢測候所 (2004) 浅間山の火山活動—2004 年噴火の概要—. 第 41 回自然災害科学総合シンポジウム報告書, iii-1-9.
- Lange, R. and Carmichael, I. (1990) Understanding magmatic process, modern methods of igneous petrology, Nicholls, J. and Russell, J., Eds., *Mineral. Soc. Am.*: 25–59.
- Matsu'ura, M. and Hasegawa, Y. (1987) A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **47**, 179–187.
- 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. 地震研究所集報, **65**, 665–807.
- 村上 亮 (2003) 浅間山火山の活動の消長に同期した地殻変動. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, V055–014.
- Mogi, K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformation of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **36**, 99–134.
- 西村卓也 (2002) 伊東沖と岩手山における火山性力源による地震のトリガリング. 地学雑, **111**, No. 2, 166–174.
- 及川 純・井田喜明・辻 浩 (2005) 浅間山で発生する火山性地震の震源分布: 1996 年 11 月–1999 年 5 月の場合. 地球惑星科学関連学会 2005 合同大会予稿集, V055–001.
- Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seis. Soc. Am.*, **75**, 1135–1154.
- 大木章一・村上 亮・渡辺信之・浦部ぼくろう (2005) 航空機搭載型合成開口レーダー (SAR) 観測による浅間火山 2004 年噴火に伴う火口内の地形変化. 火山, **50**, 401–410.
- Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T. (2000) Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure and Applied Geophys.*, **157**, 2303–2322.
- 高橋浩晃・岡崎紀俊・石丸 聡・森 濟・松島 健・渡辺篤志・三浦 哲・中尾 茂・加藤照之・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**, 161–167.
- 山口佳昭・清水翔太・山口珠美・太田靖 (2005) 浅間火山 2004 年 9 月 1 日噴火噴出物の斑晶メルト包有物および硫化物. 地球惑星科学関連学会 2005 合同大会予稿集, V056–015.

(編集担当 後藤章夫)