

地殻変動から推定される 2004 年浅間山噴火前後の
浅部マグマ供給系高木朗充*・福井敬一*・藤原健治*・上田義浩**・飯島 聖**・
山本哲也*・坂井孝行*・菅野智之***・瀧山弘明***

(2005年4月19日受付, 2005年8月21日受理)

Magma Supply System of the 2004 Eruption at Asama Volcano Estimated
by Crustal Deformation DataAkimichi TAKAGI*, Keiichi FUKUI*, Kenji FUJIWARA*, Yoshihiro UEDA**, Sei IJIMA**,
Tetsuya YAMAMOTO*, Takayuki SAKAI*, Tomoyuki KANNO*** and Hiroaki KATAYAMA***

A geodetic observation network with GPS and EDM at Asama volcano detected pre- and co-eruptive crustal deformation. Observed horizontal displacements by GPS before the 2004 eruption indicated radial pattern outward from the active summit crater. An east-west baseline indicated secular extension with 7 mm/yr from 2002 to the occurrence of the 2004 eruption. Rapid extension of 10 mm was detected at the baseline near the summit, which may suggest magma discharge into the shallower chamber.

We estimated the magma supply system from the observed geodetic data assuming buried two pressure sources. One is at a height of 2200 m above sea level beneath the summit crater (Source A) and another is 1.5 km east of the summit at sea level (Source B). Our data indicated that before the first eruption discharged magma from the deeper to source B was $200 \times 10^3 \text{ m}^3$, and from source B to source A was $14 \times 10^3 \text{ m}^3$. Total amount of increase in volume of source A was estimated to be more than $50 \times 10^3 \text{ m}^3$ by EDM and GPS data by the end of the eruptive activity.

These small but significant signals could be observed only in our network near the crater. Our results indicated that dense geodetic observation near the active crater or vent could give important and interesting data to clarify and monitor the active volcano.

Key words: Asama volcano, magma supply system, GPS, EDM

1. はじめに

浅間火山では、2004年9月1日に中規模噴火が発生した。この噴火により、火山礫は最大で山頂から北東約6 kmの範囲に到達し、噴出させた火山灰は約5万トンであった(東京大学地震研究所, 2005a)。浅間山の中規模噴火の発生は1983年以来であった。その後、3回の中規模噴火を含む断続的な噴火活動が同年12月まで続いた。

これまで、浅間山の測地学的なアプローチによる詳細なマグマ供給系の研究は、宮崎(1990)以外にはほとんど行われていない。その理由は噴火準備期の浅間火山が、伊豆大島(高木, 2002等)や三宅島(防災科学技術研究所・国土地理院, 2004等)のような膨張の変動が定常状態である火山ではないということ、また、最後に発生した中規模噴火は21年前のことで、GPSのような革

* 〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1
気象研究所地震火山研究部
Seismology and Volcanology Research Department,
Meteorological Research Institute, 1-1, Nagamine,
Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.

** 〒389-0115 長野県北佐久郡軽井沢町追分1151-2
Karuizawa Weather Station, 1151-2, Oiwake, Karuizawa, Nagano 389-0115, Japan.

*** 〒100-8122 東京都千代田区大手町1-3-4
気象庁地震火山部
Seismological and Volcanological Department, Japan
Meteorological Agency, 1-3-4, Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122, Japan.

Corresponding author: Akimichi Takagi
e-mail: atakagi@mri-jma.go.jp

新しい測量技術がまだ整っていなかったため、その時起きていたかもしれない噴火前の微小な変動を、当時は検知する能力がなかったためと考える。

宮崎(1990)は、1935~1939年等の水準測量結果を基に、活発な噴火活動期の深部マグマ供給系について詳細な考察を行っている。水準測量は山体の上下変動を観測するのに最も精密な測定手法ではあるが、観測に人的・時間的な負担が大きく観測の頻度を高められないこと、あるいは遠隔観測が不可能なことから、噴火活動直前の浅部マグマ供給系による短期的な山体変動を水準測量から把握することは困難である。

我々は、2000年9月に浅間山で地震回数が増加したのを機に、GPS観測を開始した。その結果、2004年9月から始まる噴火活動に先行して発生した山体変動を捉えることができた。また、2003年に降実施している繰り返し光波測距観測においても変動を観測した。これらは、浅間山の噴火活動に伴って観測された、初めての詳細な山体変動である。

本小論では、これらの観測結果を基に、噴火前から噴火活動期の浅間火山の浅部マグマ供給系を力学的に推定した。

2. 観測網

山体の変動を観測するために、GPS観測と光波測距(EDM)観測を実施した。GPS観測は、連続観測と繰り返し観測を行った。連続観測は山体変動の時間推移を把握する目的で主に山腹以下で行い、繰り返し観測は山頂部周辺の空間的な分解能を高めるために行った。また、光波測距観測は、GPS観測と比較してデータの情報量は少ないものの、山頂部に接近できない時においても変動をモニタリングできる利点があるため、GPS観測と併用した。

2-1 GPS連続観測

気象研究所では、地震活動が活発になった2000年9月に、GPS連続観測点3点(C点、KWS、ONI)を整備した(Fig. 1, Table 1)。その後、噴火直前に期待される山体浅部へのマグマ供給に伴う変動を検知する目的で、より山頂に近いE、G点が整備された。現在気象研究所が管理するのは、山頂から1.5~3.0kmの距離にある山腹のC、E、Gの3点で、それらは山頂を取り囲むように配置されている(Fig. 1)。装置は1周波型の古野電気MG2110(藤原・他、2002)で、データのサンプリングは30秒(2004年10月以降は15秒)、マスク角は15度である。基線解析は古野電気CAP-Win2を使用した。瞬発的な地殻変動の発生様式を時間的に高分解能で把握することも目的のひとつとしていたため、解析処理は1時間毎

に行った。以上は2-2で述べるGPS繰り返し観測でも同様である。

3点のうちC点とE点の観測データは、衛星携帯電話式テレメータシステムを用い4時間に一度伝送される。G点は噴火2ヶ月前の2004年7月16日に新設され、同年8月10日までのデータが回収されたが、テレメータ化される前に噴火活動が始まり、さらに積雪期に入ったために、2005年3月現在、まだテレメータ化されていない。これら3点からなる基線長は、3.3~3.9kmである。またこの3観測点の標高差は大きくなく(Table 1)、気象要因の基線解析誤差は小さい。

一方、気象庁火山監視・情報センター(以下、火山センター、あるいはJMAと略す)も火山活動の監視のために、2001年9月以降、気象研究所が当初設置したKWS、ONIにTAKを加え、気象研究所と同様のシステムでGPS連続観測をおこなっている(Fig. 1, Table 1)。この3点は浅間山を囲むように配置され、測線距離が

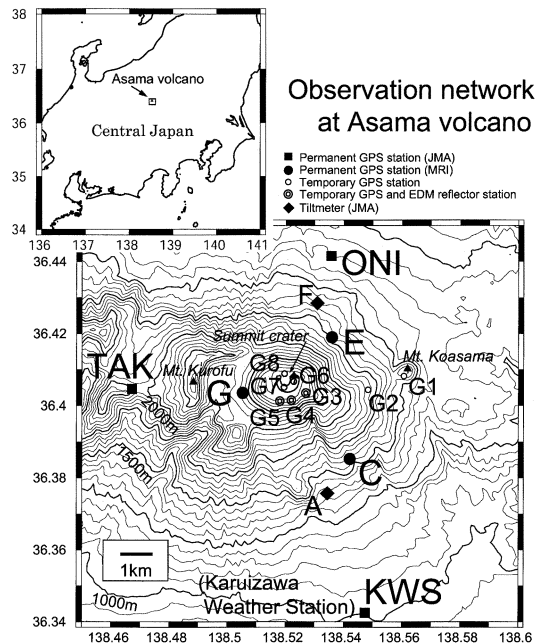


Fig. 1. GPS and electronic distance measurement (EDM) observation network around Asama volcano.

図 1. 浅間山のGPS及び光波測距観測網。黒丸: GPS連続観測点(気象研究所) 黒四角: GPS連続観測点(火山センター) 白丸: GPS繰り返し観測点 二重丸: 光波測距用反射鏡を備えたGPS繰り返し観測点 菱形: 傾斜計(火山センター)

Table 1. Location of GPS and EDM observation sites.

表 1. GPS 及び EDM 観測点.

Station code	Site	Latitude [Deg.]	Longitude [Deg.]	Height [m]	Note
KWS	Weather Station	36.34167N	138.54722E	1010	Permanent point. Managed by JMA.
TAK	Takamine	36.40833N	138.46944E	1985	Permanent point. Managed by JMA.
ONI	Onioshidashi	36.43889N	138.54444E	1348	Permanent point. Managed by JMA.
C	C	36.38428N	138.54156E	1584	Permanent point.
E	E	36.41831N	138.53650E	1715	Permanent point.
G	G	36.40394N	138.50531E	2183	Permanent point.
G1	Koasama	36.40825N	138.56081E	1626	Temporary point. Installed by ERI.
G2	Sannotorii	36.40439N	138.54847E	1826	Temporary point.
G3(M3)	Maekake-E	36.40347N	138.52697E	2443	Temporary point. Combined with EDM point.
G4(M2)	Maekake-S	36.40150N	138.52200E	2443	Temporary point. Combined with EDM point.
G5(M1)	Maekake-W	36.40119N	138.51803E	2455	Temporary point. Combined with EDM point.
G6	Crater-E	36.40669N	138.52292E	2568	Temporary point. Installed by ERI.
G7	Crater-S	36.40511N	138.51961E	2546	Temporary point. Installed by ERI.
G8	1000-ton Rock	36.40889N	138.51978E	2502	Temporary point.

7.4~11.1 km とやや広域である。なお、この 3 基線からは、今回の火山活動に伴う変動を検知することができなかった。

国土地理院は 2 周波型 GPS 連続観測システムの全国観測網 (GEONET) を展開しているが、浅間山周辺での測線距離は 19~28 km で火山センターと比べさらに広域な配置となる (2004 年の新観測点の整備により、現在は 8~13 km となった)。

2-2 GPS 繰り返し観測

連続観測の他に、より浅部でのマグマ供給系を把握する目的で、山頂周辺部を中心にベンチマークを設置し、気象研究所、火山センターと軽井沢測候所は共同で、2002 年から 1 年に 2 回の割合で繰り返し観測 (キャンペーン観測) を実施している。毎年少しずつ観測点を増やし、観測網は 2004 年現在で 8 観測点となった。これらのうち、三の鳥居 (G2)、火口東 (G6) と火口南 (G7) は東京大学浅間火山観測所のベンチマークを借用している。Table 1 及び Fig. 1 に各観測点ベンチマークの位置を示す。観測は 2002 年 7 月から噴火直前の 2004 年 7 月までに合計 6 回実施している。

2-3 光波測距観測

火山活動が活発化した時や積雪期等、山頂周辺部で GPS による山体変動観測ができなくなる事態を想定し、光波測距観測のための反射プリズムを設置した。観測点は山頂火口中央から南~南東約 1 km の前掛山 (浅間山の旧山体総称であるが、ここでは山頂釜山の南側に広がる外輪を指す) の標高 2,440~2,450 m にあり、約 500 m 間隔で M1, M2, M3 の 3 点設置されている。この 3 点

は GPS 繰り返し観測点とのハイブリッドで、それぞれ G5, G4, G3 に対応する。反射鏡はいずれの観測点も 3 素子 (ソキア APS31) である。

機械点は軽井沢測候所 (KWS) 庁舎の測風塔 (標高 1,015 m) とし、整準台を据え付け、天候状態が良好な時に測距儀を設置して測定を行った。測距儀はジオメーター社 6000 型 (1 周波型、変調周波数 14.984651 MHz) である。反射鏡までの斜距離は約 7 km である。測定は、主に気象状態が静穏な日没後で反射点が見通せる時に行ったが、冬季には反射点での積雪や凍結により、十日以上測距できない日が続くこともあった。観測回数は、初回の 2003 年 5 月から 2005 年 3 月までに 202 回であった。観測の頻度は、噴火前まではひと月あたり 8 回程度であったが、噴火後はひと月あたり 12 回程度に高めた。

光波測距では大気状態の変化を補正する必要がある。通常は機械点で測定した気象データを光路の代表として補正計算することが多い。この方法は、斜距離の相対変動を見る時、機械点と反射点の距離や標高差が小さい時に限ってはさほど問題を生じない。ところが、今回のように距離が 7 km と長く、標高差が約 1,500 m と大きい場合には、光路上の気温、気圧が大きく変化するため、相当な誤差が生じる。よって、気象補正により正確な斜距離を算出するには、この気象状態の不均質性を考慮しなければならない。そこで、気象庁で気象の予測のためにを行っている数値予報計算で使用されるグリッドポイントデータの気象要素を、時間・空間的に内挿して補正する方法を用いた (高木・他, 2005)。その結果、S/N が大幅に改善され、変動がなかったと推定される時期の測定値

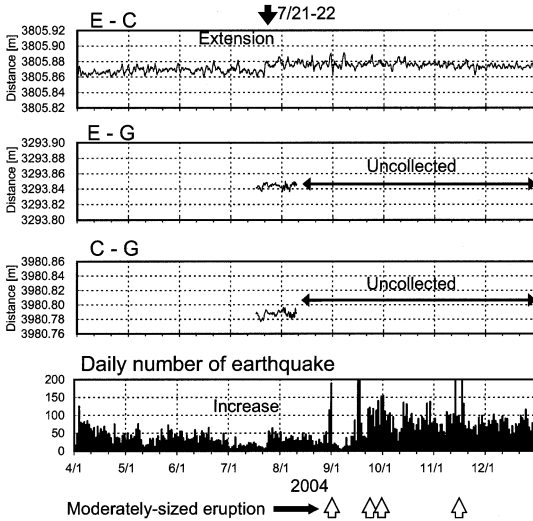


Fig. 2. Time series of the baseline lengths observed by three permanent GPS points from April to December, 2004 with daily number of volcanic earthquakes. Rapid extension with 10 mm was observed at E-C baseline between 21 and 22, July.

図 2. GPS 連続観測点 (C, E, G) の基線長変化, 2004 年 4~12 月. 下段に日別地震回数を示す. 7 月 21~22 日に E-C 点間の基線はステップ状に伸びた. ほぼ同時に地震回数も増加した.

で確認したところ, 従来は ± 10 mm 以上であった標準偏差が, この処理により ± 5 mm 程度以内となった. さらに, 数日~十日程度の気象擾乱が原因と思われる短周期の振動や, 夏季に斜距離が伸びるように見える長周期の年周振動ノイズがほぼ除去できた.

3. 観測結果

3-1 GPS 連続観測

Fig. 2 に, 噴火活動期を含む 2004 年 4 月~12 月の期間の E-C 点, E-G 点, 及び C-G 点間の基線長変化と, 日別地震回数を示す. ただし E-G 点, 及び C-G 点間のデータは, G 点を設置した 7 月 16 日から, 噴火前にデータを回収した 8 月 10 日までの約 1 ヶ月分しかない. 7 月 21~22 日に E-C 点間の基線長がステップ状に 10 mm 程伸びている. 図は平滑化して表示しているが, 平滑化する前のデータを見ても, 衛星配置に起因する 12 時間周期の振動が重畳しているものの, 約 24~36 時間程度を要して伸張していることがわかった. G 点の設置は E-C 点間のこのステップ状変化が生じる 5 日前であった. そのため, E-C 点間のステップに対応する

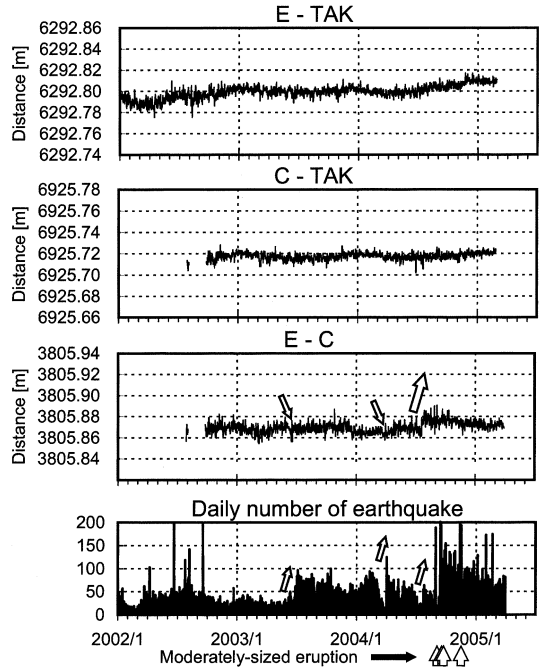


Fig. 3. Time series of the baseline lengths observed by three permanent GPS points and daily number of volcanic earthquakes. The baseline between E and TAK has an inclination to extend.

図 3. GPS 連続観測点 (C, E, TAK) の基線長変化, 2002~2005 年. E-TAK 間の測線のみ, 約 7 mm/yr の割合で伸張傾向である. 下段に日別地震回数を示す. 図中の白矢印は, 地震活動の変化を伴った基線長変化発生を示す (表 2).

変化が E-G 及び C-G 点間でも起こっていたかは, 直前までの長期傾向と比較することができないため何とも言えない. しかし, 仮にステップ変化が生じていたとしても, E-C 点間の変動量と比べると明らかに小さい. また, E-G 点間よりも山頂から遠い E-C 点の基線の方が, ステップ変動量が大いことは, 圧力源が山頂よりも E-C 点の基線寄り (東寄り) にあるか, E-C 点方向 (南北方向) に伸張させやすい形状である可能性を示唆する.

なお, 国土地理院の GEONET や東京大学地震研究所の GPS 観測網のうち, 山体を挟む南北の基線において同様に 7 月下旬に伸張傾向は見えるが, 観測点が山体から遠すぎてこのような短期間のステップ状には見えない. また, E-C 点の基線のほぼ延長線上には KWS と ONI が位置するため, これと関わる基線 C-ONI, E-KWS, 及び ONI-KWS 間も確認したが, 変動は見られ

Table 2. Step changes of GPS baseline accompanied with seismicity.

表 2. 地震活動の変化を伴った GPS 基線長変化.

Date	Amount of change	Change of seismicity
2003/6/11 - 6/18	-10mm	2003/6/10 Increase
2004/3/22 - 3/31	-5mm	2004/4/3 Increase
2004/7/21 - 22	+10mm	2004/7/26 Increase

なかった。

E-C 点のステップ変動から 5 日後の 7 月 26 日には地震活動が活発化し、日別の地震回数はそれまでの 3 倍程度に増加した。これに対応して、火山センターは、31 日に浅間山の火山活動レベルを 1 から 2 へ引き上げた (気象庁地震火山部, 2004)。また、噴煙量の増加、火山ガス放出量の増加、赤熱現象の確認を含む火口内温度の上昇等、表面現象の活動度も 7 月下旬から高まった (気象庁, 2004)。地震活動の活発化に 5 日ほど先駆して、山体変動が観測されたことは興味深いことであり、また表面現象の活発化からもこの山体変動がマグマ供給に由来していることを強く示唆している。しかし、両者の活動に 5 日の時間的隔たりがあったことの解釈は今のところできていない。

2005 年 3 月現在、G 点には 2004 年 12 月までの連続データが現地に収録されたままであるが、火山活動が静穏でないためデータ回収はできていない。山頂に最も近い連続観測点から噴火活動中のデータが回収され解析されれば、新たな現象の発見の可能性がある。

なお、浅間山では、地震回数の増加とステップ状の山体変動の例は、2003 年 6 月と 2004 年 3 月にも E-C 点の基線で認められる (Table 2, Fig. 3)。この時は地震活動に伴って約 5~10 mm 短縮した。これらは 2004 年 7 月の伸張とは逆のセンスである。基線長のノイズレベルは標準偏差 2~3 mm であるからこの変化は有意である。なお、この 3 回の変動発生時に顕著な気象擾乱は発生しておらず、気象の擾乱が誤差要因となる可能性はない。

これらの現象は興味深いものであり、2004 年 7 月のイベントについては、噴火直前のマグマ活動に起因する地殻変動と地震活動を捉えているものと予測できる。しかし、基線が短縮した他の 2 例についての解釈は容易ではないため、その因果関係の考察は機会を別に設けることとし、本論では現象発生時の指摘だけにとどめる。

次に、山体の長期変動の傾向を見るために、火山センターの観測点 TAK (高峰高原) を利用し、これと C 点及び E 点からなる基線長の推移をとりあげる。Fig. 3 は、2002 年~2005 年 3 月の基線長変化である。上から順に

E 点-TAK, C 点-TAK, E 点-C 点間の基線長変化を示す。これらは 1 時間毎に基線解析処理した結果が 25 時間の移動平均によって平滑化されている。日別の地震回数と、4 回発生した中規模噴火もあわせて示す。

E 点-TAK の基線長は 3 年間で約 2 cm 伸びており、1 年あたりにすると 7 mm 程度の伸びを示していることがわかる。一方、C 点-TAK, 及び E-C 点の基線長は、観測初期に欠測期間がありデータの蓄積も少ないが、この期間を通して長期的な変動傾向は無かったか、あったとしても E 点-TAK の基線長の変化よりはかなり小さいと言える。従って、この変動の圧力源は、先に述べた C-E 点間のステップ変動を起こした圧力源とは異なると考えられる。

村上 (2004) によると、国土地理院の GEONET では、浅間山周辺の観測点のうち、E 点-TAK の基線と同じく浅間山西側をまたぐ基線で同様の伸張傾向が最も感度良く観測されている。村上 (2004) はこの変動の力源を浅間山西方数 km の黒斑山直下の海拔下、1~3 km のダイクの成長で説明している。青木・他 (2004) もこれに近い解釈である。E 点-TAK の基線長変化は、このような深部のマグマ供給系の動きを捉えていた可能性がある。

なお気象要素に起因する誤差の補正には限界があり、基線解析の結果は標準偏差 2~3 mm の振幅を持ち、また数日周期の振動の重畳や同程度の振幅の季節的な年周変動を含んでいる可能性もある。しかし、観測された伸張傾向は国土地理院の基線長においても確認されており、有意な変化と考えられる。

3-2 GPS 繰り返し観測

1 回の GPS 繰り返し観測では 2~6 日間のデータを取得し、1 時間毎の基線解析を行った後、データを吟味した上で同一時間帯の時間値を平均した。周辺部の連続観測点 6 点も同様に処理を行い、14 観測点分を 1 観測のデータセットとした。基線解析の処理は、各基線長がすべて 10 km 以内となるように、観測網の中央に位置する G5 を基準点として行った。解析結果と繰り返し観測期間中の標準偏差を Table 3 に示す。なお、各観測点と基

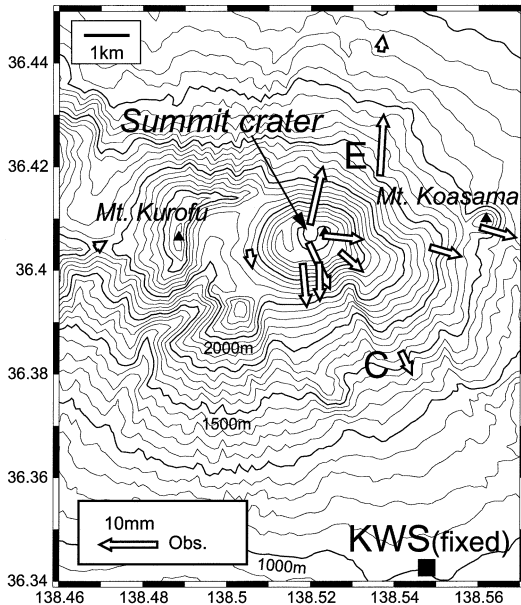


Fig. 4. Horizontal displacement vectors detected by repeating GPS measurements, from April to July, 2004.

図 4. GPS 繰り返し観測による浅間山の水平変位分布, 2004 年 4~7 月. 山頂火口を中心に, 山頂部周辺及び山麓部でも放射状の変動をした. 固定点は KWS (軽井沢測候所).

準点 (G5) との標高差は最大で 1,500 m にもなり, 鉛直方向の大気状態の不均質性のため上下成分の解析結果には大きな誤差を含む. よって図表には水平成分の変動分布のみを示し, 今後の議論でも水平成分だけを用いることとする. 念のため上下成分の観測誤差が小さい山頂部周辺に限った観測点の上下変動分布を確認したが, 全ての期間において明瞭な変動パターンを確認することはできなかった.

2002 年の観測開始以来, 5 回目の観測 (2004 年 4 月 26-28 日) までに, 火口近傍に限ればやや収縮の傾向が見えたものの, 明瞭な変動は確認されなかった. しかし, 5 回目と噴火前の 6 回目 (2004 年 7 月 28-30 日) の間に, それまでには確認されたことなかった, 山頂火口を中心とする明瞭な放射状の変動パターンが見られた (Fig. 4). 図は山体から最も遠い KWS (軽井沢測候所, 山頂の南約 8 km) を固定点として示した. 変動量は山頂近傍の繰り返し観測点 (G3~G8) で 5~10 mm 程度であるが, 概ね標高 2,200 m 以下の観測点 (繰り返し観測点 G1, G2, 及び連続観測点の E, C, G, ONI, TAK) にも, 山頂周辺部と同程度の変動量が観測された地点がある. このう

ち, E 点の変動には 7 月 21-22 日に E-C 点間で起こった伸張に対応するステップ状変動も含まれている. 山頂近傍の明瞭な放射状膨張変動からは山頂直下の浅部圧力源の存在が想像されるが, 2,200 m 以下の観測点の変動も説明するには, この圧力源だけでは難しそうである.

3-3 光波測距観測

Fig. 5 に 2003 年 5 月以降の, KWS から反射点 M1~3 の斜距離変化を示す. 3 測線に共通に見られる, 振幅も周期も一致する小さな変動は, 山体固有の変動ではなく, 気象補正で完全に除去し切れていない若干の季節変動ノイズである. 2004 年 5 月頃までは, 3 測線とも山体の膨張を示すような斜距離の短縮傾向はみられず, むしろやや伸張傾向だった可能性もある. 2004 年 6 月頃から, 各測線で火山活動に伴うと思われる変動が見られ, 徐々に斜距離が短縮した. なお, 11 月中旬の M2 と M3 の測定値の不連続は, 11 月 14 日に発生した 4 回の中規模噴火による噴石等の反射点への衝突によるものと推定される. 衝突によって生じた斜距離の縮みは, M2 で 67 mm, M3 で 13 mm であった. これ以降, M2 の測定時の信号が弱くなったが, これは衝突によりプリズム正面の方向が機械点方向からはずれたためと思われる.

Fig. 6 に, 衝突による不連続を補正した 2004 年 1 月以降の 3 点の斜距離の変動を示す. さらに太線は 31 日間の重みつき平滑処理 (時間ウィンドウの中で中心日より離れるほど, 直線的に重みを減じる) をした後の変化を示す. 3 点のうち M2 の変動量が最も大きく, 2004 年 6 月頃から 2005 年 3 月までに 20 mm の短縮であった. 変動の推移は, 12 月までは単調短縮傾向であったが, その後は停止ないしはやや伸張傾向である. 噴火活動は 12 月まで継続したので, 光波測距による測線の短縮傾向は, マグマ活動と深い関係があることが示唆される. 一方, M1 と M3 もほぼ同様の变化傾向ではあるが, 変動量は M2 の半分以下であり, 12 月までに M1 で約 10 mm, M3 で約 7 mm の短縮であった. この違いは, M1~3 は山頂火口中央部からほぼ等距離に配置されているものの, M2 は山頂部と機械点を結ぶ線上に位置していることで, 山頂火口中央部の圧力源による変動を最も感度よく捉えたために生じたと考えられる.

噴火活動開始以後の山頂部周辺の山体変動モニタリングは, この光波測距観測以外に行われておらず, 噴火開始後の浅部マグマ供給系を議論する上では, 貴重なデータとなった.

4. 圧力源モデルの考察

これらの観測事実を力学的に説明できる圧力源モデルを考える. もう一度, 2004 年浅間山における山体変動

Table 3. Horizontal displacement data of GPS sites in Asama volcano, 2002–2004. Reference point is G5.

表 3. GPS 繰り返し観測で求めた水平変位量, 2002~2004 年. 2002 年 7 月の観測に対する変動. 括弧内は各観測期間内における標準偏差. 解析の基準点は G5.

Station code	Component	Date	2002/7/30	2002/10/16	2003/5/6	2003/10/16	2004/4/26	2004/7/28
		~	2002/7/31	2002/10/18	2003/5/11	2003/10/21	2004/4/28	2004/7/30
		Displacement (Standard deviation) [mm]						
KWS	EW		0.0 (10.7)	-8.5 (5.2)	-5.3 (5.6)	-13.7 (4.4)	-18.8 (6.9)	-10.1 (6.3)
	NS		0.0 (10.3)	-3.6 (9.3)	-0.9 (7.8)	-2.4 (9.0)	2.6 (8.5)	1.0 (11.4)
TAK	EW		0.0 (9.1)	4.5 (7.1)	0.0 (3.9)	-1.8 (5.1)	-8.1 (3.4)	-13.8 (4.3)
	NS		0.0 (6.8)	2.5 (2.8)	-2.9 (3.5)	-5.2 (4.4)	-2.8 (5.5)	-4.7 (5.8)
ONI	EW		0.0 (6.3)	-1.6 (4.9)	-8.1 (6.8)	-6.1 (3.2)	-18.7 (5.7)	-0.9 (4.7)
	NS		0.0 (11.7)	-4.7 (5.7)	-3.4 (10.0)	-5.4 (6.1)	-1.2 (13.8)	-1.7 (8.2)
C	EW		0.0 (6.0)	-7.6 (2.8)	-6.5 (4.7)	-11.5 (2.8)	-17.0 (5.1)	-11.4 (5.7)
	NS		0.0 (8.9)	2.2 (5.7)	2.5 (4.4)	0.2 (5.6)	4.4 (6.4)	3.5 (6.9)
E	EW		0.0 (6.3)	-2.5 (4.2)	-0.5 (4.4)	-0.9 (3.4)	-5.3 (4.7)	6.1 (2.7)
	NS		0.0 (10.7)	-3.2 (8.6)	1.0 (5.5)	1.0 (5.3)	4.9 (10.2)	11.0 (6.2)
G	EW			0.0 (3.4)	-0.4 (1.9)	-5.2 (2.6)	-11.2 (1.8)	4.4 (2.6)
	NS			0.0 (2.2)	-0.9 (2.0)	-4.2 (3.0)	-2.7 (6.1)	-2.4 (3.0)
G1	EW		0.0 (8.1)		-5.3 (5.6)	-11.4 (4.3)	-14.2 (5.0)	-8.9 (4.1)
	NS		0.0 (7.3)		-5.4 (5.9)	-6.9 (6.0)	-1.2 (8.3)	2.5 (6.0)
G2	EW			0.0 (3.2)	5.5 (4.4)	1.7 (3.4)	-3.5 (4.5)	2.9 (3.3)
	NS			0.0 (6.2)	4.2 (4.5)	1.1 (5.5)	5.6 (6.8)	9.0 (4.9)
G3	EW		0.0 (3.6)		2.2 (1.2)	-0.7 (1.6)	-2.0 (1.2)	1.6 (1.6)
	NS		0.0 (4.1)		4.3 (1.6)	1.7 (1.8)	0.7 (4.1)	2.7 (1.8)
G4	EW		0.0 (2.3)		2.2 (0.9)	-0.1 (0.8)	-3.5 (1.0)	-1.7 (0.9)
	NS		0.0 (1.4)		2.2 (0.9)	-0.6 (1.0)	3.8 (4.8)	2.6 (0.8)
G5	EW		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NS		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
G6	EW		0.0 (2.6)	8.7 (1.3)	7.9 (1.3)	8.1 (0.9)	1.4 (1.1)	0.0 (1.5)
	NS		0.0 (4.4)	8.1 (2.9)	-4.2 (1.6)	-14.3 (1.7)	-20.0 (5.6)	-14.9 (1.7)
G7	EW				0.0 (1.3)		5.0 (1.1)	7.1 (1.5)
	NS				0.0 (1.7)		1.0 (6.3)	3.5 (2.1)
G8	EW					0.0 (1.9)	-8.9 (1.4)	-5.4 (1.4)
	NS					0.0 (2.8)	4.7 (6.9)	4.3 (2.4)

を整理すると、以下のとおりである。カッコ内は事象を捉えた観測種目である。

- (1) 2004 年 7 月 21–22 日に、E–C 点間でステップ状の膨張変動があった。一方、2002 年 1 月から 2005 年 3 月は、E–TAK 間の測線の上に、7mm/yr 程度の伸びが見られた。(GPS 連続観測)
- (2) 2004 年 4 月下旬 (4/26–28) から 7 月下旬 (7/28–30) の間に、山頂部周辺のみならず、他の観測点でも 0~10mm の膨張変動があった。(GPS 繰り返し観測)
- (3) 2004 年 6 月以降山頂部の膨張傾向が継続し、12 月頃まで継続した。(光波測距観測)

これら 3 つの観測事実を説明する力学モデルを以下に推定する。

4-1 浅部~やや浅部の圧力源

GPS 繰り返し観測で 2004 年 4 月~7 月に捉えられた変動 (Fig. 4) は、圧力源を山頂火口直下の浅部だけでなく、やや浅部にも置かなければうまく説明できない。そこで先験的に 2 つの点力源を仮定し、Mogi (1958) による弾性変形の解析式 (茂木モデル) の重ね合わせによる計算結果の変位ベクトルと観測値の変位ベクトルの差の

自乗和が最小になるように、グリッドサーチ手法で圧力源パラメータを求めた。山体の剛性率は 4×10^{10} Pa とした。上下動成分は観測誤差が大きいため、水平成分のみを用いた。解析ツールは、パーソナルコンピュータのウィンドウ上で視覚的に操作して解を求められる火山用地殻活動解析支援ソフトウェア MaGCAP-V (福井・他, 2005) を用いた。解析の結果、浅部の圧力源は火口直下の海拔 2,200 m (山頂直下 350 m) で体積増加量は $14 \times 10^3 \text{ m}^3$ と求まり、それよりやや浅部の圧力源は山頂火口の東方約 1.5 km の海拔下 200 m で体積増加量は $200 \times 10^3 \text{ m}^3$ となった。Fig. 7 には、観測された変位 (白矢印) と、それを最もよく説明できる 2 つの点力源から計算された変位 (黒矢印) を示した。また 2 つの圧力源の位置も示す。今後、この浅部 (海拔 2,200 m) の圧力源をソース A、やや浅部 (海拔付近) の圧力源をソース B と呼ぶことにする。

これまでの研究では、マグマ供給系の存在をソース B が推定された山の東側に想定することはあまり例がなく、比較的大きな変化量を見せた E 点の観測値にソース B の最適値が引き寄せられたことが疑われた。しかし、

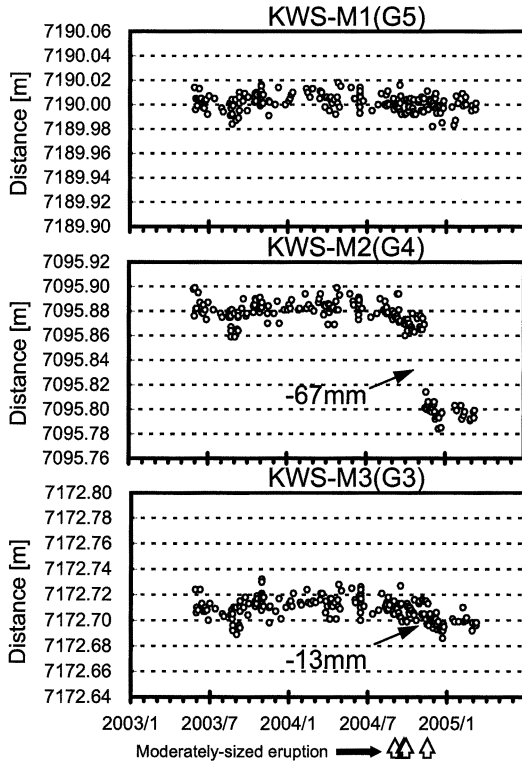


Fig. 5. Time series of slope distances by EDM with weather elements correction. Anomalous gaps in November, 2004 at M2 and M3 were due to the hitting of the ballistic ejecta to the reflectors on the November 14 eruption.

図 5. 光波測距観測による浅間山南の測線 (KWS-M1, 2, 3) の斜距離変化, 2003~2005 年. 気象予測のための数値計算で使用される気象要素で補正済み. M2, M3 は 11 月 14 日中規模噴火の噴石の衝突が原因と思われる, 測定値の不連続 (-67 mm と -13 mm) がある.

E 点を除外して最適値計算してもその結果はほぼ変わらず, ソース B が山頂の東側にあるのは間違いないと考えられる. また E 点を除いてもソース B の位置が変わらなかったことは, 7 月 21-22 日に起きた E-C 点間のステップ変動の圧力源も, ソース B であったことを意味する. 4 月下旬~7 月下旬の E-C 点間の伸びは 15 mm 程度 (E は北に約 10 mm, C は南に約 5 mm) であったので, ステップ変動 10 mm はその約 3 分の 2 にあたると.

E-C 点間の明瞭なステップ変動に対し, 同じ日の他の観測点の変動は明瞭でない. その理由は, この測線がソース B の直上を通っており, その変動に対して最も感度の高い基線だったからだと考えられる. ソース B の増

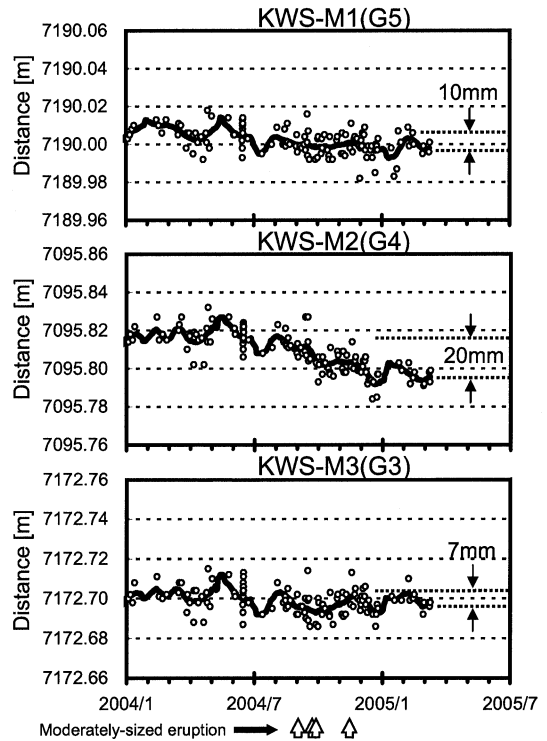


Fig. 6. Slope distance change by EDM from January, 2004 to March, 2005. Artificial gaps in November were eliminated. Bold curve represents variation with smoothing processing.

図 6. 光波測距観測による斜距離変化, 2004 年~2005 年 3 月. 丸印は測定値を, 太線は重み付き平滑処理による変動を示す. 2004 年 6 月頃から 12 月頃まで斜距離短縮の傾向が見られ, とくに M2 の測線で明瞭である.

圧による弾性変形で E-C 点の基線長が 10 mm 伸びた場合の E-TAK, C-TAK の基線長変化を計算すると, いずれも 3 mm 以下となり, 検出は困難である.

なお, 水平成分の変動から推定された圧力源から期待される山頂付近の観測点の隆起量は, KWS を固定にした場合, 4~18 mm になるが, 観測誤差はこれを上まわり, 山頂部付近の隆起傾向を認めることはできなかった.

圧力源の形状は点力源の他, 岩脈を想定した開口割れ目の試算 (Okada, 1992) もおこなったが, 変位パターンが明瞭な放射状であることからわかるように, 点力源で計算した最適値による残差自乗和の方が小さかった. また, 山頂直下の極めて浅い圧力源を求めるにあたり, 観測点の標高が 1,000~2,500 m と広く分布していることを考えると, 単純な半無限媒質を仮定した茂木モデル

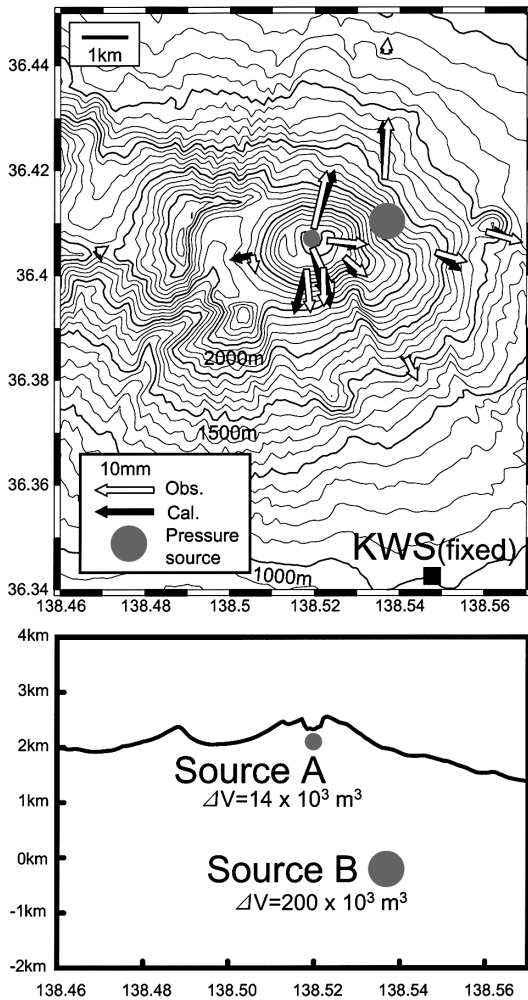


Fig. 7. Observed and calculated horizontal displacements. Two pressure sources were evaluated by finding the best fitting location.

図 7. 2004 年の GPS 観測による水平変位分布から推定される 2 つの圧力源。丸印が圧力源の最適位置、白矢印が水平変位の観測値、黒矢印が、圧力源から計算される水平変位。

の計算結果からは、解の信頼性が低いことは明らかである。このため、各観測点の標高を半無限媒質の境界面とみなし、それぞれの観測点での弾性変動量を計算することにより最適解を求める方法（標高補正茂木モデルのグリッドサーチ）に基づき計算した（福井・他, 2003）。念のため地形を考慮した有限要素法による計算も行ったが、標高補正茂木モデルによる結果と数%の違いが生じる程度であった。

ところで、気象庁傾斜計 F 点（山頂から北北東約 3

km, Fig. 1) では、2004 年 9~11 月に発生した中規模噴火に先行して山上がりに $0.1 \mu\text{radian}$ 程度の傾斜変動が観測されている（瀧山・他, 2004）。GPS 観測で推定された 7 月下旬のソース B の圧力増加では、F 点で期待される傾斜変動量は約 $4 \mu\text{radian}$ と見積もられる。これは、傾斜計の検知能力を上まわる量であるにもかかわらず、観測はされなかった。この原因の詳細はいまのところわかっていないが、観測点周辺地盤の感度の影響、あるいは中規模噴火に先行して傾斜変動を発生させるソースメカニズムが異なる可能性等が考えられる。例えばソース B の圧力増加はマグマの充填である可能性が高いのに対し、中規模噴火に先行する地殻変動時にはガス圧の上昇も含めた考察が必要になるものと思われる。

4-2 深部の圧力源

山体の北西をまたぐ E-TAK の基線に、7 mm/yr 程度の長期的な伸びが見られるが、他の基線には見られない（Fig. 3）。このことは、浅間山北西部の深部の圧力源の存在を示唆し、ソース B による E-TAK の変動は小さいという先の計算結果とも矛盾しない。村上 (2004) や青木・他 (2004) によって指摘されている、黒斑山直下の海拔下 1~3 km 程度に上端を持つダイクの変動を見ている可能性が高い。本研究では定量的な決定はできなかったが、これをソース C と呼ぶことにする。

荒牧 (1968) によれば、古期成層火山であった黒斑山は、現在東側が破壊されているものの、等高線を復元して推定した山頂火口の位置は、現在の山頂火口の西方約 2 km の湯の平丸山付近となる。我々の観測結果は、その時代に形成された深部のマグマだまりの変動を見ている可能性がある。また、宮崎 (1990) によると、1935-1939 年の間に初めて山頂越えで行った水準測量では最大で 40 mm の隆起が観測され、山頂火口西方約 2 km を中心とする明瞭な隆起が認められている。この測量を実施した時期は、20 世紀前半の噴火エネルギーの放出が極大を迎える時期であった。2004 年の噴火の活動度はこの時期の活動度にははるかに及ばないものの、現在の山頂火口西方での膨張傾向は、1935-1939 年に見られた隆起活動と同じ現象を見ている可能性がある。

4-3 噴火前後の山頂部変形

GPS 繰り返し観測からは噴火活動開始以前の圧力源モデルしか得られなかったが、山頂部に対する光波測距観測は噴火後も行われていたので、噴火前後での圧力源モデルを吟味することができる。ただし、M2 以外の変動量が大きくないこともあり、3 点の斜距離変化だけからユニークに力源パラメータを決定することは困難である。そこで噴火前の GPS と光波測距データの比較も参考に、噴火前後の山頂部変形を検討する。6 月初め頃か

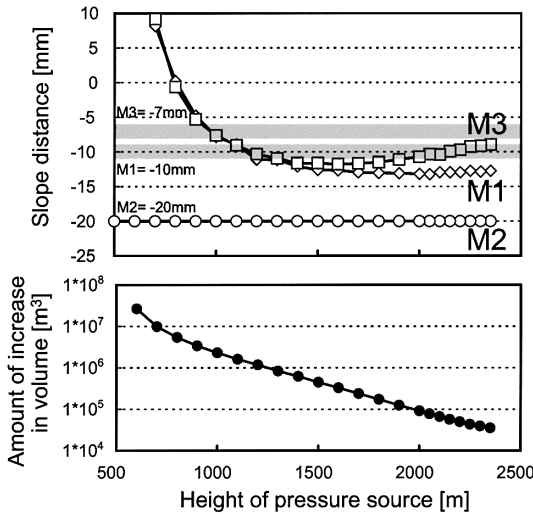


Fig. 8. Relationship between calculated slope distance (M1, M2, and M3) and amount of increase in volume versus height of pressure source.

図 8. 圧力源の深さと、斜距離変化 (M1, M2, M3) 及び圧力源の体積変化量の関係。浅間山火口直下で、M2 の斜距離変化量が -20 mm となるような M1 と M2 の変化量と体積変化量も求めた。圧力源の深さが標高 $1,000\text{ m}$ 以上に存在しないと観測結果 (M1: -10 mm , M2: -20 mm , M3: -7 mm) を説明するのは難しい。

ら始まった短縮傾向を M2 について見ると (Fig. 6), 12 月末までの 7 ヶ月間は 3 mm/月 のほぼ一定の割合で短縮が継続しているように見える。4 月下旬～7 月下旬に M2 と同じベンチマーク (G4) でも行われた GPS 繰り返し観測の結果を見ると、その間の変位量は 6 mm 程度であり、変位方向は光波測距の機械点でもある KWS 方向とはほぼ一致していた (Fig. 7)。このことから、4 月下旬～7 月下旬に行った GPS 繰り返し観測で検出された 6 mm の変動は、実際には、6 月～7 月下旬の 2 ヶ月間で起こっていたと思われる。

山頂部周辺での GPS 観測はその後実施できていないが、光波測距観測では 7 月以降も同様な変動が見られていた。そこで GPS 観測データを基に算出されたソース A の体積増加が 6～7 月の 2 ヶ月で起こったとし、この増加率を外挿すると、12 月までの総計で約 $50 \times 10^3\text{ m}^3$ の体積膨張があったと考えられる。但しこれは圧力源がソース A で、その位置が標高 $2,200\text{ m}$ から変化しなかった場合の話であり、この仮定が正しい保証はない。

そこで、山頂火口直下の様々な深さに点力源を仮定して変動量を計算し、KWS から観測された斜距離の変化

を満たすような圧力源の深さと体積変化量を推定することとした。圧力源の深さは、標高 0 m , $500\sim 2,000\text{ m}$ の 100 m 毎, $2,000\sim 2,350\text{ m}$ (ほぼ山頂の標高) の 50 m 毎の 24 通りである。変動量を計算するにあたっては、山頂部周辺に限った複雑な地形の領域内に観測点と圧力源が配置されるために、地表面を水平と仮定して算出する解析解では正しい結果は期待できない。そこで弾性体モデルを仮定して有限要素法を用いた試算を行った。有限要素法のソリッドモデルは、火口底や山体形状を正確に再現し一辺を 50 m のメッシュで分割して作成した。山体は完全弾性体で剛性率を $4 \times 10^{10}\text{ Pa}$, 山体のポアソン比を 0.25 , 火口内容岩の密度を $2,500\text{ kg/m}^3$ とした。計算は ANSYS 社の ANSYS ver. 7.0 による。モデルの節点数は約 10 万である。

最も大きな斜距離の変化を示したのは M2 の -20 mm であったので、これを満たす体積増加を、仮定された各圧力源深度に対して求め、その時の M1 及び M3 の斜距離変化量を計算した。Fig. 8 は、各圧力源の深さ (標高) で期待される M1 と M3 の斜距離変化量と体積増加量である。観測結果 (M1 = -10 mm , M2 = -20 mm , M3 = -7 mm) を完全に同時に満たす深さは存在しないが、観測結果にある程度の誤差範囲があることを考えれば、圧力源の深さは標高 $1,000\text{ m}$ 以上に存在しないと観測結果を説明するのは難しい。体積増加量は最も多く見積もったとして、標高 1000 m に圧力源がある場合の約 $2,000 \times 10^3\text{ m}^3$ となる。

圧力源をソース A より浅くした場合、計算値はソース A を圧力源とした時よりも M1, M3 の変動をよく再現する。しかしソース A の深さは標高 $2,200\text{ m}$ であり、火口底の標高が約 $2,350\text{ m}$ であることを考えると、現実にはソース A よりも浅い圧力源は考えにくい。従って、12 月まで光波測距で観測された変動を説明する圧力源は標高 $1,000\sim 2,200\text{ m}$ の間にあり、総体積増加量は最も深い場合で約 $2,000 \times 10^3\text{ m}^3$, 最も浅い場合で約 $50 \times 10^3\text{ m}^3$ となる。

ところで、噴火後の 9 月中旬には火口底に溶岩が出現し、10 月には最大で火口底最深部から 100 m 程度まで (国土地理院, 2005), 体積にして $2,100 \times 10^3\text{ m}^3$ も蓄積したため、火口近傍の反射点付近の地形が、溶岩荷重によって変形を受けている可能性があった。この影響を評価するため、有限要素法により変形のシミュレーション計算を行った。火口底に蓄積した溶岩量は、上面が 10 月の平均的な高さである $2,375\text{ m}$ (国土地理院, 2005) とし、物性パラメータや境界条件等は前述と同様にした。その結果、蓄積後の M1～3 の変位はともに火口中心下方に向き、変位量は 0.07 mm と微小なものであった。火

口内の蓄積溶岩は自重沈降で周辺山体を微量量、下方内向きに変形させているという計算結果になり、光波測距観測結果とは変動方向、量とも一致しないことを確認した。

5. 浅部マグマ供給系モデル

山体変動を力学的に解釈した以上のことから、2004 年浅間山噴火時のマグマ供給系を以下のように考え、浅間火山の浅部マグマ供給系モデルの提案を行う (Fig. 9)。

浅間山山頂北西部の深部では、連続的にマグマが充填されているマグマだまり (ソース C) が存在する。本研究では、その存在を定量的に決定できなかったが、村上 (2004)、青木・他 (2004) により、黒斑山直下の海拔下 1~3 km 程度に上端を持つダイク状のマグマだまりの存在が指摘されている。また、東京大学地震研究所 (2005b) によると、この領域の海拔下 1~1.5 km に震源域が存在することも明らかにされている。

噴火前の 4 月~7 月に浅間山山頂の東方約 1.5 km の

海拔付近で $200 \times 10^3 \text{ m}^3$ のマグマが供給され膨張した (ソース B)。このうち 7 月 21~22 日の短時間にその 3 分の 2 程度が瞬発的に充填された。東京大学地震研究所 (2005b) によると、噴火前の震源分布は、山頂西方のソース C 方向から前掛火山直下に伸び、そこから山頂火山直下の標高 1,000 m までまっすぐ立ち上がっており、地震活動とマグマ供給系との関係が示唆されている。推定されたソース B は、震源分布から推定されるマグマ供給経路から外れることになる。しかし、東京大学地震研究所 (2005b) によると、ソース B とほぼ同じ領域では、10 月 28 日に周期 5 秒の長周期地震が発生している。また火山直下の震源分布も火山直下からソース B の方向に向かって東に下がる傾斜を示している。これから東京大学地震研究所 (2005b) は、浅間火山の西方以外の、別の系統のマグマ供給路の存在の可能性を示唆している。また下鶴・他 (1975) は、1973 年噴火の 3 年前から、詳細な震源は求められていないが山頂東方の浅部において局所的な地震活動があったことを報告している。予想さ

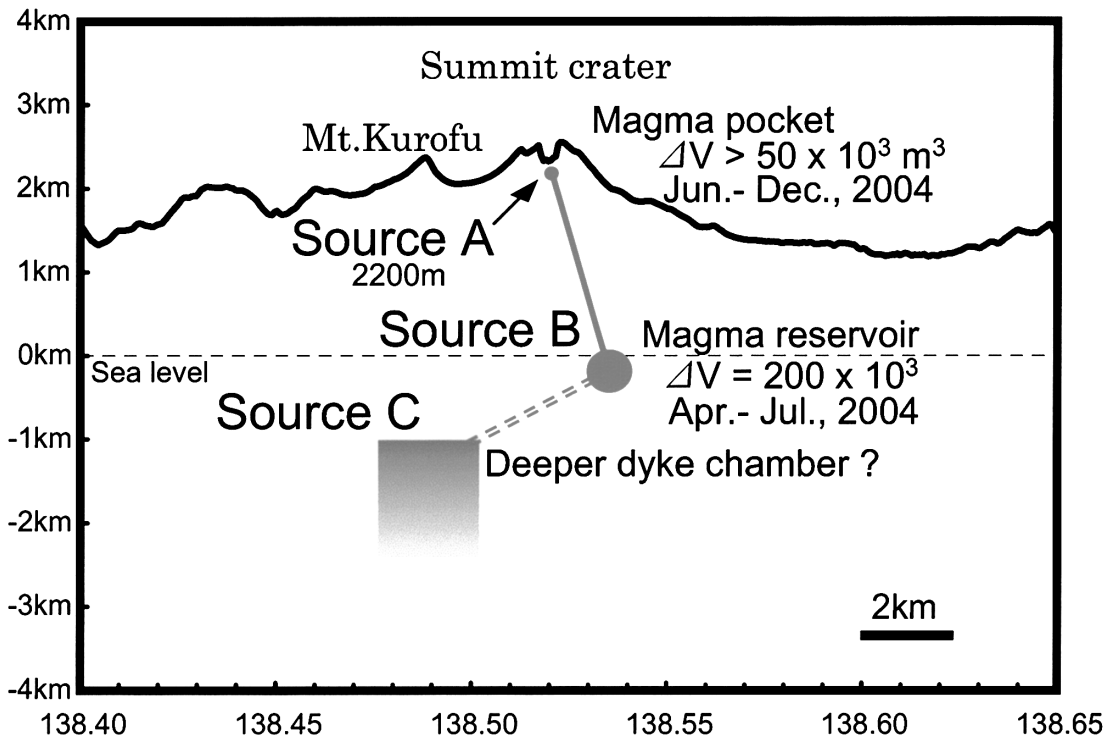


Fig. 9. A model of magma supply system of Asama volcano during the 2004 eruption series estimated from GPS and EDM data.

図 9. 2004 年浅間山噴火時のマグマ供給系の概念モデル。2004 年 4~7 月にかけて浅間山西方の深部マグマだまり (Source C) から、山頂東方約 1.5 km の海拔付近にあるマグマだまり (Source B) に $200 \times 10^3 \text{ m}^3$ のマグマが供給された。その後、2004 年 6 月以後に Source B から山頂火山直下海拔 2,200 m のマグマポケット (Source A) にマグマが供給され、2004 年 12 月までに少なくとも $50 \times 10^3 \text{ m}^3$ の体積増加があった。

れる震源域はまさにソース B に一致する。下鶴・他 (1975) はこの地震発生のメカニズムを仏岩溶岩の断層に起因する可能性を指摘しているが、マグマ活動に起因する地震の可能性もあったのではないかと考える。

地殻変動観測からは、ソース C からソース B へ至る間のマグマ供給を裏付けるデータはいまのところ観測されていない。しかし、あえてこれ以外の供給路のマグマ供給系を提案する証拠も我々は持ち合わせていない。一方で高橋 (1997) は岩石学的な研究結果から、山頂西方の黒斑山系のマグマ供給路の他に、より東方からの別系統の供給路の存在を指摘し、それらは火口直下で混合していると考えている。このことから現在の山頂の東より推定されたソース B は、東からのマグマ供給系に関連するという可能性もある。しかし現段階では、ソース B がソース C から供給を受けているのか、あるいはソース B がソース C とは別系統のマグマ供給系なのか、それを結論づけるデータは得られていない。

2004 年 6 月頃から山頂火口直下の標高 2,200 m 付近のマグマポケットにマグマ供給が始まり (ソース A), 7 月下旬までに $14 \times 10^3 \text{ m}^3$ の体積増加となり、9 月 1 日の噴火に至った。その後 12 月の噴火活動終了まで、噴火活動により溶岩噴出を繰り返しながらも、マグマ供給による体積膨張は継続した。ソース A が成長を続けていたものとすれば総計で約 $50 \times 10^3 \text{ m}^3$ の体積増加があった。また、噴火活動中の膨張源がソース A より深かったとした場合、その深さは少なくとも標高 1,000 m 以上にあり、その体積増加量の上限は $2,000 \times 10^3 \text{ m}^3$ と見積もられた。つまり、マグマの供給と噴火活動による噴出物の収支である約 $50 \times 10^3 \text{ m}^3 \sim 2,000 \times 10^3 \text{ m}^3$ のマグマが、火口直下のマグマポケットに蓄積されたと推定される。

ソース B の存在は 2004 年 4 月下旬と 7 月下旬の GPS 繰り返し観測により推定されたが、成長開始時期がその間のいつだったのかは不明である。連続観測では、7 月 21-22 日の短期間でのマグマチャージは確認できるものの、成長の開始時期までは特定できない。しかし、より浅部のマグマポケット (ソース A) の成長開始が光波測距観測から 6 月頃からであったと推定できるので、ソース B の成長開始は遅くとも 6 月以前だったと考えることが妥当である。

6. ま と め

時間・空間的に高密度な GPS 観測及び光波測距観測網を構築し、2000 年より観測を開始した。この観測網により 2004 年噴火前後における山体変動データが得られた。

GPS 観測から、山頂火口を中心とする放射状の山体変

動が 2004 年 4~7 月の間に観測された。それにより推定された圧力源 (ソース A) は山頂直下の海拔 2,200 m で、体積増加量は $14 \times 10^3 \text{ m}^3$ であった。また、6 月以前に膨張が始まったと考えられるやや浅部の圧力源 (ソース B) は浅間山山頂の東方約 1.5 km の海拔付近に求まり 7 月末までの体積増加量は $200 \times 10^3 \text{ m}^3$ と推定された。ソース B の体積増加の 3 分の 2 は、7 月 21-22 日の短期間に行われた。

光波測距観測から、山体直下浅部の体積膨張は、噴火前の 2004 年 6 月頃から噴火停止の 12 月頃まで継続していたと推定された。これを引き起こした圧力源の体積増加量の総計は、仮定する圧力源の深度により約 $50 \times 10^3 \text{ m}^3 \sim 2,000 \times 10^3 \text{ m}^3$ と見積もられた。

山頂の北西部を横断する GPS 測線に見られた長期的な伸張傾向は、山頂の北西側のさらに深部の圧力源 (ソース C) の存在を示唆しているものとする。

限られた観測機材、時間、人員の中で効率的な地殻変動観測を達成することにより、本研究では浅間火山の浅部マグマ供給系を明らかにした。一般に、山体変動観測において、空間的に高密度な観測点が配置できれば、マグマだまり等の圧力源の位置や形状が高精度で決定することが可能になる。一方、時間的分解能が高い観測 (連続観測) では、マグマ供給系の時間推移が把握できる。今後、マグマ供給系の把握を目的とする研究を行う場合、両者のバランスを適切に行って最も有効な地殻変動観測を行う必要がある。

謝 辞

本研究の観測には、軽井沢測候所の全面的な協力を得た。また気象庁火山監視・情報センターには観測の協力を頂いた。図の一部作成に GMT ソフトウェア (Wessel and Smith, 1995) を使用した。東京大学地震研究所浅間山火山観測所には、GPS 観測のためにベンチマークを使用させて頂き、また小山悦郎氏には多くのアドバイスを頂いた。一名の匿名査読者、及び査読者の一人である北海道大学の高橋浩晃氏からの御意見は本稿を改善する上で大変役に立った。特に高橋氏には細部にわたり懇切丁寧な助言を頂くとともに、新たな多くの議論の糸口となるヒントを与えて頂いた。また、東北大学の後藤章夫編集担当委員には粗稿の構成等についての的確な指摘を頂いた。ここに記して感謝致します。

引用文献

青木陽介・渡辺秀文・小山悦郎 (2004) 2004 年浅間山噴火に先行する地殻変動。日本火山学会 2004 年度秋季大会予稿集, 205.

- 荒牧重雄 (1968) 浅間火山の地質. 地団研専報, 1, 1-45.
- 防災科学技術研究所・国土地理院 (2004) 2000 年三宅島噴火活動に関連する地殻変動の変動源モデルの推定. 火山噴火予知連絡会会報, 87, 28-34.
- 藤原健治・田中圭介・北川貞之・湯山弘之・松島 功・内田直邦・中禮正明・徳永規一・増成友宏 (2002) 有珠山周辺に展開した準リアルタイム GPS 観測システムについて. 火山, 47, 695-698.
- 福井敬一・坂井孝行・山本哲也・藤原健治・高木朗充・中禮正明 (2003) 標高補正茂木モデルの有用性とその限界. 日本火山学会 2003 年秋季大会予稿集, 35.
- 福井敬一・山本哲也・藤原健治・高木朗充・坂井孝行・赤坂 望 (2005) 火山用地殻活動解析支援ソフトウェアの開発 (2). 2005 年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, V055P-033.
- 湯山弘明・中禮正明・内藤宏人・近澤 心 (2004) 2004 年浅間山噴火に伴う傾斜変動について. 日本火山学会 2004 年度秋季大会予稿集, 208.
- 気象庁 (2004) 日本の主な火山活動. 平成 16 年 7 月地震・火山月報 (防災編), 30-35.
- 気象庁地震火山部 (2004) 浅間山火山観測情報第 2 号.
- 国土地理院 (2005) 航空機搭載型合成開口レーダによる浅間山火口底の観測結果. 第 100 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1) 浅間山, 69-72.
- 宮崎 努 (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. 震研彙報, 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.
- 村上 亮 (2004) GPS が捉えた浅間火山 2004 年 9 月噴火前のマグマ移動. 日本火山学会 2004 年度秋季大会予稿集, 204.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018-1040.
- 下鶴大輔・内堀貞雄・行田紀也・小山悦郎・宮崎 努・松本時子・長田 昇・寺尾弘子 (1975) 1973 年の浅間山噴火活動について. 震研彙報, 50, 115-151.
- 高木朗充 (2002) GPS 地殻変動データから伊豆大島のマグマだまりを探る. 月刊地球, 号外 No. 39, 83-89.
- 高木朗充・福井敬一・長谷川嘉彦・上田義浩・飯島 聖 (2005) 光波測距観測の数値予報気象モデルに基づく補正手法—浅間山への適用—. 2005 年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, V055-007.
- 高橋正樹 (1997) 日本列島第四紀島弧火山における地殻内浅部マグマ供給システムの構造. 火山, 42, S175-187.
- 東京大学地震研究所 (2005a) 2004 年噴火活動の推移. 第 100 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1) 浅間山, 35-40.
- 東京大学地震研究所 (2005b) 噴火直前の群発地震と火山性地震の震源分布. 第 100 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1) 浅間山, 22.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1995) New version of the generic mapping tools. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, 76, 329.

(編集担当 後藤章夫)