

九重硫黄山, 1995年噴火後の山体変動

斎藤 英二*・須藤 茂*・渡辺 和明*

(2002年8月9日受付, 2003年4月7日受理)

Ground Deformation after the 1995 Eruption of Iwoyama, Kuju Volcano

Eiji SAITO*, Shigeru SUTO* and Kazuaki WATANABE*

Soon after the beginning of the 1995 eruption from the south of Iwoyama in Kuju volcano, GPS and EDM instruments were set around the newly opened craters and fumarolic zone around Iwoyama to observe ground deformation. The data of repeated measurements of GPS and the continuous automatic EDM clearly show the deflation around the fumarolic zone on Iwoyama and no significant deformation around the new craters. Volume changes and locations of Mogi models were calculated for every two years from 1995 to 2001. They were estimated to be around 500~600 meters in depth from the surface and 250 thousand cubic meters of deflation, respectively for the entire monitoring period. The deflation is likely to occur by over effusion from the upper middle part of the geothermal convection system. This type of deflation would cause contraction of the peripheral area of the geothermal field to make new cracks to introduce eruption in this area.

1. はじめに

1995年10月に大分県の九重火山の星生山の北斜面で噴火が始まった。その後も噴気活動が続いたことから、この噴火がマグマ噴火に繋がる可能性も考えられた。一般に安山岩・デイサイトマグマの地下浅部への貫入・上昇が起きれば、山体が膨張することが予想される。このため山体変形の観測により活動推移の基礎情報を得る必要があった。筆者らは、変動の実体を明らかにするため、噴火の1カ月後からGPS観測と連続光波測距 (Electro-optical Distance Measurement, 以下 EDM と略す) による山体の変動観測を始めた。その結果、これまでのところ、マグマが浅所に上昇してきたことを示す変動は認められなかった。一方、1995年噴火口の北側の、以前から活動している噴気地帯を中心とした地域では、収縮変動が継続していることが明らかになった。本論では、これまで行ってきた測定の結果を示すとともに、得られた変動の特徴について報告する。

2. 九重火山と1995年噴火の状況

九重火山は、大分県西部に位置し、東西約15kmにわたって20以上の火山体が分布する複合火山である。山体は主として安山岩・デイサイトの厚い溶岩流または溶岩円頂丘からなり、周囲には火砕流堆積物が広く分布する (小野, 1963; 鎌田, 1997)。本火山群中の最高峰である中岳 (1,791 m) は、九州島の最高峰でもある。

有史の噴火としては、江戸時代のものがいくつか報告されているが、それらはいずれも水蒸気爆発であったらしい。また、腐食土層の¹⁴C年代測定により、過去2000年間には、およそ200~500年間に1回程度の頻度で水蒸気爆発が起こっていたと推定されている (伊藤・他, 1997)。

本火山群の中央付近に位置する硫黄山では、1995年噴火以前から、激しい噴気活動が継続して認められている。18世紀末には噴気から硫黄を採取したとされ (竹内編, 1980)、噴気の放出はかなり古くから続いていたことがわかる。また、本火山群の西方の大岳および八丁原では地熱発電所が稼動している。

硫黄山での噴気の最高温度は、1960年代の測定で508°Cの報告がある (Mizutani *et al.*, 1986)。火山ガスや温泉水の同位体分析によるいくつかの研究 (松葉谷・他, 1975; 北岡・他, 1996など) によると、噴気にはマグマ由来の蒸気が混入しており、硫黄山付近の地下では、それらと天水とが混合して熱水対流系が形成されて

* 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7
産業技術総合研究所 地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, AIST, 7-Central, 1-1-1
Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan.
Corresponding author: Eiji Saito
e-mail: e.saito@aist.go.jp

いると考えられている (江原, 1994).

1995年10月11日に、硫黄山の南方にある比較的急な星生山の北斜面で噴火が始まった。噴火口は、斜面の傾斜と直交するように、ほぼ東西方向に雁行状に並んでおり、全体の長さは約300mであった。この噴火では、明瞭な前兆現象は把握されず、また噴火開始が夕方であり目撃例が少なかったために、活動開始時の詳細は明らかではない。地表調査により、火口の周囲には爆発的噴火により放出された礫と、湿った細粒の泥状物質が堆積しているのが確認された (星住・他, 1995)。その後、噴気量は次第に減少し、また活発な火口の数も少なくなった。噴気活動は2002年6月の時点でもなお継続している。また、硫黄山付近の噴気活動は、この噴火を挟んでも大きな変化はなく、同様に継続している。

この噴火は、水蒸気噴火であり、大量の本質物質を含むマグマ噴火ではなかった。しかしながら、水蒸気爆発で始まった活動が次第にマグマ噴火に移行する例は、雲仙や西インド諸島・マルチニーク島のプレー火山、同じくモンセラート島のスプリエールヒルズ火山などで認められており (太田, 1993; Traineau *et al.*, 1994; Young *et al.*, 1998)、活動の推移を注意深く見守る必要があった。実際、1995年12月20日頃から放出された火山灰中に新鮮な火山ガラスが認められ、マグマが関与している可能性が考えられた (中田・他, 1996)。

3. 測定方法

観測点配置図を Fig. 1 に示す。GPS 観測点は、硫黄山を囲むように、また、EDM 測線は、1995年噴火口および硫黄山の噴気地帯を挟むようにそれぞれ設置した。なお、これ以外にも山体南側の EDM 観測と新火口列を挟む GPS 連続観測を行った (須藤・他, 1997)。この GPS 連続観測は1996年5月から11月まで行われており、少なくともこの間は、新火口列の開口変位などの動きがないことが確かめられた。

GPS 繰り返し観測は、1995年11月に観測点設置と最初の観測を行った。2回目以降6回までは4カ月ごとに測定し、それ以降は2年ごとに行った。1回目の観測はトリンブル社の4000SSiを2台使用し、牧の戸峠のGP1を基準として行った。2回目以降は長者原のGP9にトリンブル社の4000SSiを、GP1点にライカ社のSR399を設置し、火口近傍の測定はライカ社のSR399で行った。火口近傍の各点での観測は、約20分の高速静止測量法で行った。基線解析ソフトウェアはライカ社のSKI (バージョン2.3) を用いた。火口近傍各点の相対位置精度は、カタログ情報に基づく、水平成分で ± 2 cm程度と推定される。

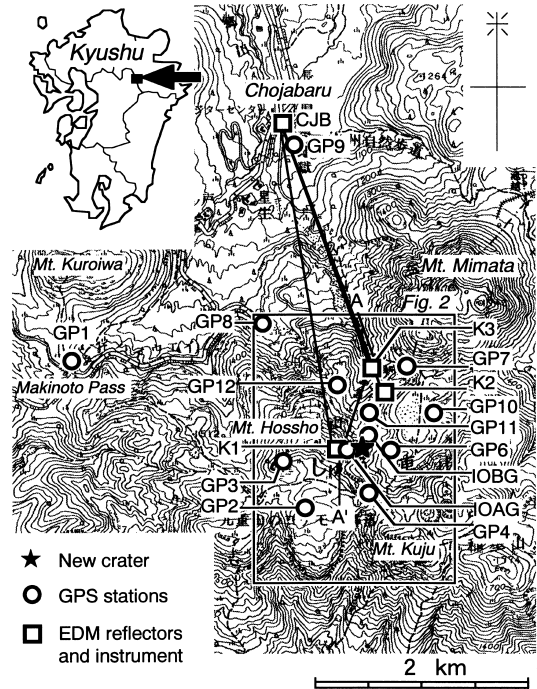


Fig. 1. Observation network of the ground deformation around Iwoyama area in Kujū volcano. A-A': Section shown in Fig. 6. The quadrangle area in the center is shown in Fig. 2. 1:50,000-scale topographic maps "Kujū" and "Miyano-haru" published by GSI (Geographical Survey Inst. of Japan) were used.

EDM用反射鏡は、1995年11月に設置した。反射鏡は、K1とK2では専用で作成したステンレス製のホルダーに、K3では純正のプラスチック製ホルダーにそれぞれ収め、モルタルで露岩に接着した。

光波測距儀は、1995年12月に九重町田野にある長者原ヘルスセンターの3階(CJB)に設置した。初期に設置した光波測距儀は、ソキア社のRED2Lであり、目標をK2点に固定して行ったが、PCとRED2L間の通信障害が多く発生したため、十分なデータが得られなかった。1996年3月に光波測距儀をライカ社のトータルステーションTCM1100に変更した。同装置にはモーターが内蔵されており、方向の異なる複数目標の測定が可能である。測定制御には独自に作成したプログラムを用いた。2000年12月には、光波測距儀をライカ社のTCA1100に交換し、制御ソフトウェアをライカ社のAPSWinLiteにした。TCM1100およびTCA1100の公称測距精度は、いずれも $\pm(2\text{ mm} + 2\text{ ppm})$ である。

斜距離の測定は、2000年12月までは20分間隔で行い、それ以降は1時間間隔で行った。気象補正のための

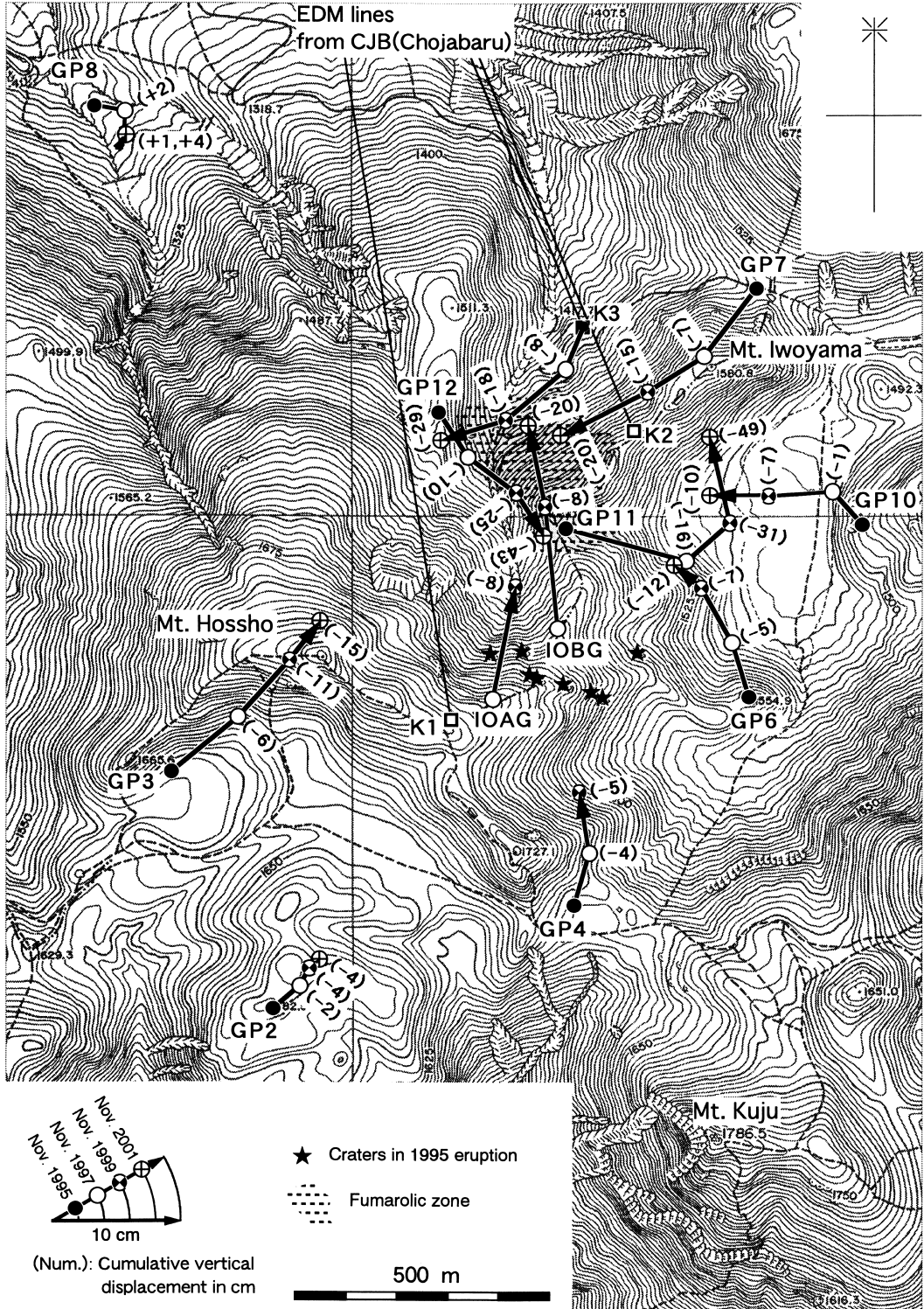


Fig. 2. Horizontal displacement vectors calculated by repeated GPS observations. A Volcanic Base Map "Kujurenzan" published by GSI was used.

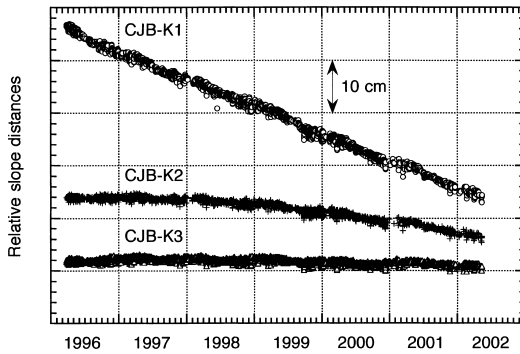


Fig. 3. Temporal changes in relative slope distances from CJB to K1, K2, and K3.

気温と気圧のデータは、器械点の屋外に設置した温度センサーおよび屋内の気圧センサーからそれぞれ取得した。APSWinLite 移行後は、気温、気圧一体型のセンサーを屋外に固定して取得した。斜距離などの観測データは、一時的に現地の PC 内に蓄積され、任意時刻に茨城県つくば市の地質調査総合センター（旧地質調査所）から電話回線経由で回収した。

斜距離の観測データには気象補正が必要であるが、今回の観測では、器械点の気象データのみで行ったため、測定用のレーザービームが通過する上空の気象要素とのずれによる見かけの斜距離変化が生じやすい。この影響を小さくするため、20分～1時間間隔で測定された斜距離データのうち、気温の鉛直勾配が比較的小さいとされる日没からその2時間後までのデータのみを最終的に採用した。なお、K3では1996年7月からGPS観測も行って変動を確認している。

4. 測定結果

4-1 GPS

Fig. 2 に、1995年11月から2年ごとの変動ベクトルを示す。基準は、硫黄山の西約3kmのGP1点である。測定時期はいずれも11月上旬から12月上旬であり、ほぼ同じ季節での比較を行っているため、1年周期の季節変化があったとしても、その影響は小さいものと考えられる。なお、GP10～GP12は1996年3月に、K3は1996年7月に最初の観測を行ったため、1995年11月から1997年11月までの各点の変動量は外挿して求めた。また、IOAGとIOBGは1996年5月から11月までのGPS連続観測から得られた変位量を用いて外挿した。したがって、これらの測点の1995年11月から1997年11月の結果には、測定誤差の他、外挿による誤差が含まれる。

硫黄山付近を中心とした、少なくとも半径1km程の範囲においては、測定期間を通して継続的に収縮が続い

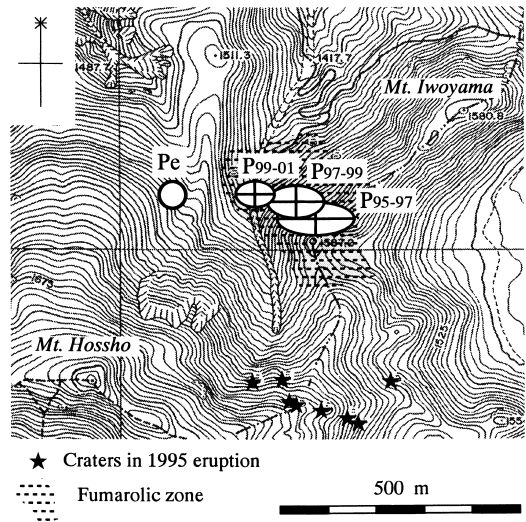


Fig. 4. Estimated location of the deflation sources during 1995 and 2001. P₉₅₋₉₇, P₉₇₋₉₉, P₉₉₋₀₁, and P_e denote the locations of Mogi models estimated by the GPS deformation data in 1995–1997, 1997–1999, 1999–2001, and by the analyses of EDM data between 1998 and 2002, respectively. Oval shapes of P₉₅₋₉₇, P₉₇₋₉₉ and P₉₉₋₀₁ shows the parameter estimate of the error 1 σ calculated by the bootstrap method. A Volcanic Base Map “Kujurenzan” published by GSI was used.

ていることがわかる。変動中心部のGP11を除くと、変動が比較的大きい測点の変位方向は、大局的には各期間いずれも硫黄山の噴気地帯に向いている。GP11は最初の比較期間は南東に向き、その後、北西に転じている。GP6やGP7、K3では、変動の向きが少しずつ変化していて、収縮源が北西方向に動いたと考え、傾向が合うようにも見える。このことについては、後述する。

4-2 EDM

Fig. 3 に EDM の測定結果を示す。前述したように、日没からその2時間後までのデータのみを抽出してプロットしてある。CJBとK1の間の斜距離は、1996年3月から2001年12月までに32cm短縮した。短縮の割合は、観測期間内においては、1.4cm/100日であり、ほぼ一定であった。CJB-K2は、1997年頃までは変化は認められなかったが、1998年頃から徐々に短縮傾向が現れ、2002年2月までに約7cm短縮した。CJB-K3では、観測開始から1997年頃まで僅かな伸び傾向が、それ以降現在まで縮みの傾向があるが、変化量は1cm程度で小さい。

Table 1. Estimated depth and deflation volume calculated from the data of repeated GPS measurements.

Power source	Depth (m)	dV (10 ³ m ³ /2yr)
P ₉₅₋₉₇	503 ± 37	-256 ± 26
P ₉₇₋₉₉	585 ± 39	-251 ± 33
P ₉₉₋₀₁	550 ± 29	-249 ± 15

P₉₅₋₉₇, P₉₇₋₉₉, and P₉₉₋₀₁ indicate deflation sources estimated by 1995–1997, 1997–1999, and 1999–2001 GPS data, respectively. The error of each parameter shows 1 σ calculated by the bootstrap method.

5. 変動力源位置の推定

5-1 GPS による変動力源位置の推定

GPS 結果に, 球状力源の弾性変形モデル (山川, 1955; Mogi, 1958) を適用し, 1995~1997 年, 1997~1999 年および 1999~2001 年の 3 期間について, それぞれグリッドサーチを行って収縮源の 3 次元位置と体積変化量を求めた. なお, 1995~1997 年における収縮中心付近のいくつかの測点の変位量は, 前述したように外挿して求めているため, これらの結果には 2 分の 1 の重みを与えて計算した. また, この地域の平均標高を 1,500 m とし, 地形は無視した.

Fig. 4 の P₉₅₋₉₇~P₉₉₋₀₁ は, 各期間の収縮中心の水平位置である. 楕円の長径と短径は, 200 サンプルのブートストラップ法を用いて計算した推定誤差 1 σ である. 深度と体積変化量の結果は, Table 1 に示した.

水平位置の 1 σ の最大値は, P₉₅₋₉₇ の東西成分の ±80 m であり, 1995~1997 年の推定精度は他の 2 期間と比べて劣る. この原因は, 前述したように収縮中心付近の測点の観測値に推定量が加わっていることと, GP11 の特異な変動の影響を受けたためと考えられる.

3 期間の収縮中心の水平位置は, 推定誤差範囲を含め, 全て噴気地帯内に求められており, この地域を中心に収縮が進んでいることは明らかである. また, 深度と体積変化量には明瞭な時間依存性は認められず, 推定誤差範囲内でほぼ一定と判断された.

P₉₅₋₉₇ と P₉₉₋₀₁ の水平位置は, 推定誤差中心間で約 140 m の隔たりがある. P₉₇₋₉₉ はその間に収まっており, 収縮中心が時間とともに西北西方向に移動したように見える. これは, Fig. 2 で明らかなように, 変動ベクトルの方向が, 噴気地帯の北側の K3 や GP7 では時計回りに, 南側の GP4 や GP6 では反時計回りに, それぞれ変化していることを反映したためであるが, 実際にそのような

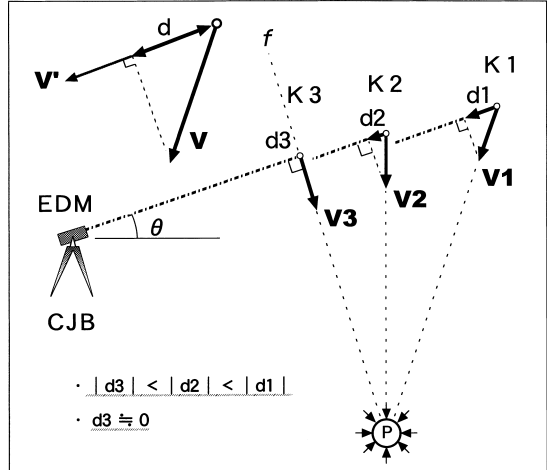


Fig. 5. Schematic section showing how to estimate the depth of a deflation center using EDM data. The deflation center exists on the plane perpendicular to the survey line CJB-K3, and between K1 and K3 under the ground, taking account of the EDM data shown in Fig. 3.

現象があった可能性がある.

5-2 EDM による変動力源位置の推定

Fig. 3 で明らかなように, CJB-K1 間の斜距離は大きく短縮しているが, CJB-K2 はその 4 分の 1 程度, CJB-K3 は 1 cm 程度の小さな変化のみであった. これらの違いは, 変位方向が 1 点に収束する球状力源を仮定した場合には, 互いの三次元的な位置関係から Fig. 5 のような概念で説明される.

EDM の斜距離変化量 d は, 反射鏡地点における変位ベクトル V の, EDM 測線方向のベクトル V' への投影成分であり,

$$d = V \cdot V' / |V'|$$

で表される. V と V' が直交する関係においては, d は 0 である. K3 を通り, 測線に直交する面 (以下 f 面) 上では, 球状力源の圧力変化による変形があっても斜距離変化として捉えられない. f 面より前または背後に力源があった場合は, 投影成分があるため, 斜距離変化が生じる. したがって, 収縮する球状力源の中心が K3 を通る f 面付近にあると考えれば, 測線ごとの斜距離変化パターンの違いは説明できる.

K1~K3 の斜距離変化量の違いは, 球状力源の位置が f 面上のどこにあるかで決まる. そこで, f 面上に任意のグリッドを想定し, 実際の斜距離変化量を説明するのに最も都合の良い力源位置を探した. 斜距離変化量は, 特に変化が一定している 1998~2002 年の変化を使用した.

その結果を Fig. 4 の P_e で示す。GPS により推定された力源位置を、 P_{97-99} と P_{99-01} の中間位置とすると、 P_e はそれより約 200 m 西方である。

P_e の深度を 600 m とした場合、K1, K2 および K3 の斜距離変化量の計算値は、それぞれ -15 cm, -7 cm および 0 cm となった。K2 と K3 の実際の斜距離変化量はそれぞれ -6 cm と -1 cm であり、観測値と計算値は ± 1 cm の違いであった。また、K3 の実変位量の計算値は 22 cm であり、1997~2001 年の GPS 結果から得られた 24 cm に近い値になった。

一方、K1 の斜距離変化量の計算値は観測値より 6 cm 少なく、f 面上のグリッドの何れに力源を仮定しても、少なく求められる傾向は変わらなかった。この原因は、地形の影響などにより、K1 にやや複雑な動きがあったためと考えられる。

いずれにしても、この方法による力源位置の推定は、3 点のみの、しかも変位方向に対して直交に近い変位成分に基づいているため、細かな議論は困難である。しかしながら、 P_e から 500 m 以上離れた位置に力源を仮定すると、明らかに斜距離変化量の観測値を説明できなくなることから、噴気地帯の地下 500~600 m 付近に向かって収縮しているのは間違いないであろう。

5-3 EDM による 1997 年以前の斜距離変化と力源

Fig. 3 によると、1997 年前後で斜距離変化の傾向に僅かな違いが認められる。すなわち、1997 年以前はそれ以降と比べて、1) CJB-K1 の斜距離の短縮速度が大きい、2) CJB-K2 の斜距離変化はほとんど認められない、3) CJB-K3 は伸張傾向にある、などである。いずれも微妙な差ではあるが、Fig. 5 に当てはめて考えると、K2 を通る f 面を考えることで、2) と 3) の傾向は説明できる。すなわち、1996 年から 1997 年頃の収縮源は、1998 年以降の斜距離変化から推定した P_e 点より南東側にあった可能性がある。1995~1997 年の収縮中心付近の GPS 観測点の変位量は、前述したように、外挿して求めており、確度の高い実変位は与えられないため、ここではこれ以上の詳細な解析は行わない。しかしながら、このような微妙な変化からも、収縮中心が時間経過とともに北西方向に移動した可能性が示唆される。

6. 山体収縮と流体放出の関係

1995 年からの 2 年ごとの GPS 繰り返し測量結果から、各期間の力源位置および体積変化量が求められた。また EDM による斜距離変化量からも力源位置が推定された。これらの独立した 2 つの測定方法から求められた力源の位置は、硫黄山噴気地帯の地下約 500~600 m で一致した。また、GPS 結果から求められた体積減少の割

合は、観測期間中、ほぼ一定であることがわかった。次にこのような変動をもたらした原因について検討する。

6-1 収縮の原因

1995 年噴火後の測地学的観測結果のみから、収縮の原因を特定することは困難であるが、以下では、地下浅部に存在する流体の減少の問題に着目し、一つの可能性を示す。

硫黄山付近の地下には熱水対流系の存在が推定されている (江原, 1994)。それによると、気液 2 相の熱水対流系は地表から地下 2 km まで分布しているとされる。本研究で推定した収縮源の位置および深度は、江原 (1994) の熱水対流系の上部に相当する。したがって、熱水対流系が存在するとすれば、一連の収縮は、その上部が収縮したために生じたと考えるのが妥当であろう (Fig. 6)。系内には高温・高圧の熱水や蒸気があるものと考えられるが、これらが 1995 年噴火を境に、より大量に系外に噴気として流出したために収縮したものと考えられる。

6-2 熱水対流系から噴気として放出される流体の量

硫黄山および 1995 年火口から噴気として放出される流体の 98% 以上は水とされ (平林・他, 1996)、その量については、これまでいくつかの報告がある。Fig. 7 は、それらを簡略化して表したものである。

1995 年噴火直後の放出量は著しく多いことがわかる。平林・他 (1996) によると、1 日当たりの放出量は、噴火の 2 日後の測定で約 10 万トンであった。しかし 1 カ月後には、4.4 万トン、4 カ月後には 2.5 万トンに急減した。1998 年 3 月時点で 1.5 万トンの測定結果がある (齋藤・他, 1999)。その後、噴気量が急激に減少した報告がないことから、1 日当たり数千から 1 万数千トン程度の流体が継続的に放出されているものと考えられる。

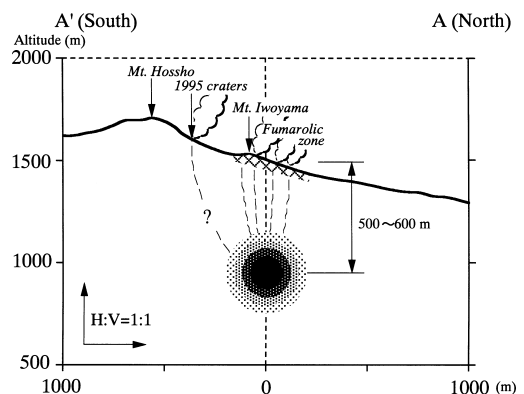


Fig. 6. Schematic diagram showing the relation between the fumarolic zone, newly opened craters and deflation center on a north south section. Location of section A-A' is shown in Fig. 1.

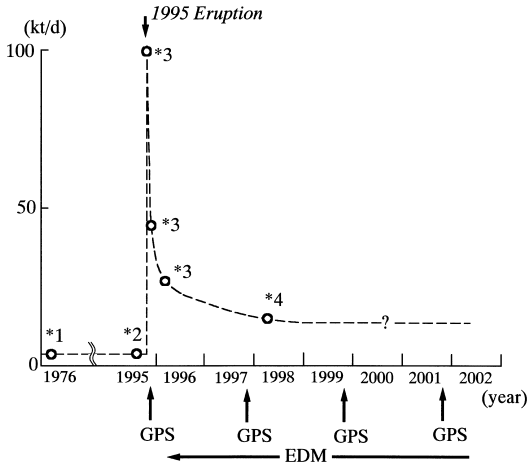


Fig. 7. Time series of the estimated volume of gas emitted from newly opened craters and Iwoyama fumarolic zone. *1: Ehara *et al.* (1981), *2: Jinguji and Ehara (1996), *3: Hirabayashi *et al.* (1996), *4: Saito *et al.* (1999). Periods of the repeated GPS measurements and period of continuous EDM observations are also shown.

一方、噴火前の測定では、1日当たり約3000トン（江原・他，1981；神宮寺・江原，1996）の測定結果がある。噴気量がかなり減少した1998年時点と比較しても、1995年火口を含む硫黄山全体から噴気として放出される流体は、噴火前の5倍である。噴気の放出は、1995年噴火直後に著しく多く、その後数カ月の内に急激に減少したが、地盤の変動量にそれほど大きな差はなかった。この原因は、地盤を構成する固体と熱水流体の流動性の違いによるものと考えられる。

6-3 変動と噴気として放出される流体の収支

噴気として放出される流体量を1.5万トン/日とし、それと同量の体積の水を考えると、 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ であり、この規模の水は明らかに地下から失われた。この内の大部分は、外からの流入により補われて、体積減少に貢献しない。残りの一部の不足により、熱水対流系が収縮した可能性がある。この比率は不明であるが、これまでに得られた結果から、次のような推定は可能である。

弾性モデルによる体積の減少量は、2年当たりの平均で $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、日量換算で約 340 m^3 である。これは、噴気として放出される水量の約2.3%に当たる。つまり、この約2.3%の不足分により収縮したとの考えが成り立つ。

6-4 収縮と噴火の関係

熱水対流系内には多数の亀裂や空隙が存在し、その内部に高温・高圧の熱水や蒸気が存在するものと考えられる。今回、硫黄山付近で観測された収縮は、これらが噴

気として過剰に放出されることで減少し、亀裂や空隙が閉じる方向に動いた結果生じたものと考えられる。すなわち、収縮中心部では、空隙の縮小により噴気通路を閉ざすような方向に変化している可能性がある。一方、周辺部では、中央部の収縮に伴ってRadial strainは伸張場に置かれる。このような経過は、周辺部での割れ目の形成による水蒸気爆発の発生確率を上げることになるかもしれない。1995年噴火の火口列は、噴気地帯の縁辺部に当たり、引っ張り破壊の破断面が生成したと解釈しても矛盾しない方向に連なっている。また、1995年噴火前に、噴気中に占めるマグマ流体の割合が徐々に減少していた指摘もあり（北岡・他，1996）、収縮によって噴気通路がより閉鎖され、深部のマグマ流体の圧力が増して噴火に至った可能性も考えられる。残念ながら1995年噴火以前の地盤変動データがないため、噴火以前から収縮があったかどうかは不明であるが、噴気放出は、はるか前から続いており、長年にわたりそのような現象が徐々に進行していた可能性はある。1995年噴火後は、それ以前より約5倍の噴気量が継続して観測されており、山体収縮の変動速度も噴火前より大きい可能性がある。したがって、今後も噴気量の増減に注意を払うと同時に、噴気量と山体変動の継続的な観測が必要と考える。

7. まとめ

1995年10月の九重硫黄山の噴火後、山体変動観測を継続して行った。1995年11月から2001年11月までの2年ごとの繰り返しGPS測量から、弾性力学的解釈に基づき、各期間の力源の位置および体積変化を推定した。また、1996年3月から2002年2月までのEDM結果を説明できる力源の位置を推定した。さらに、変動観測から求められた体積変化と水の収支との関係を調べた。これらのことから、以下のような現象が明らかになった。

- 1) GPS, EDMの2つの観測手法により求められた力源の中心の位置は、概ね硫黄山噴気地帯の地下約500~600mであった。
- 2) 観測期間中の力源周辺の体積減少率は、約 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3/2$ 年で、ほぼ一定であった。
- 3) 収縮力源が西北西に約140m移動した可能性がある。
- 4) 噴気の過剰放出による収縮が、割れ目の発生をもたらす水蒸気噴火に至る可能性を想定した。

今回、九重硫黄山付近で観測された山体の収縮は、時間経過とともにゆっくり進行する現象であるが、このような特性を弾性変形で近似できるかどうかの根本的な問題は残る。また、単一の球状力源の仮定に基づき、力源位置が移動した可能性を述べたが、この場合の力源位置

は、地表で観測された変動ベクトルの収束点の意味しかない。したがって、力源の移動は、より複雑な変形過程の一端、あるいは、複数の力源の相互作用などにより見掛け上もたらされた可能性がある。これらを明らかにすることは今後の課題である。

謝 辞

長者ヘルスセンター（飯田高原観光株式会社）には、長期間、EDM 設置と観測にご協力頂いた。大分県農業技術センターには、気象データを頂いた。須藤靖明氏、中坊 真氏をはじめとする京都大学火山研究センターの方々および九州大学の江原幸雄氏・西島 潤氏との情報交換は本研究を行うに有意義であった。気象研究所の福井敬一氏には、変動解析に当たって有益な情報を提供頂いた。産業技術総合研究所地質調査総合センターの宇都浩三氏、風早康平氏には、粗稿の校閲をして頂いた。また、本稿編集担当の東北大学地震・噴火予知研究観測センターの西村太志氏、三浦 哲氏および1名の匿名査読者氏には、粗稿の改善のための多くのご助言を頂いた。以上の方々に深謝の意を表します。

引用文献

- 江原幸雄 (1994) 冷却するマグマ直上に発達するマグマ性高温地熱系—九重火山におけるケーススタディー—。地質学論集, **43**, 169-177.
- 江原幸雄・湯原浩三・野田徹郎 (1981) 九重硫黄山からの放熱量・噴出水量・火山ガス放出量とそれらから推定される熱水系と火山ガス起源。火山, **26**, 35-56.
- 平林順一・大場 武・野上健治 (1996) 九重火山 1995 年 10 月噴火と地球化学的研究。1995 年 10 月九重火山噴火の水蒸気爆発の発生機構と火山活動推移の調査・研究。平成 8 年度科研費研究成果報告書, 63-73.
- 星住英夫・川邊禎久・鎌田浩毅・齋藤英二 (1995) 九重火山 1995 年 10 月の噴火による噴煙及び火口の調査と噴火堆積物の検討。火山噴火予知連会報, **63**, 48-50.
- 伊藤順一・川辺禎久・井村隆介・星住英夫 (1997) 活動履歴調査。平成 7 年九重火山噴火に関する緊急研究, 平成 7 年度科振費報告書, 115-130.
- 神宮寺元治・江原幸雄 (1996) 最大噴気直径を利用した火山噴気放出量及び放熱量測定法。火山, **41**, 23-29.
- 鎌田浩毅 (1997) 宮原地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)。地質調査所, 1-127.
- 北岡豪一・大沢信二・由佐悠紀・日下部 実 (1996) 九重硫黄山における深部循環熱水の沸騰による化学及び同位体組成の変化。温泉科学, **46**, 156-175.
- 松葉谷 治・上田 晃・日下部 実・松久幸敬・酒井均・佐々木 昭 (1975) 薩摩硫黄島および九州の二, 三の地域の火山ならびに温泉についての同位体化学的調査報告。地質調査所月報, **26**, 375-392.
- Mizutani, Y., Hayashi, S. and Sugiura, T. (1986) Chemical and isotopic compositions of fumarolic gases from Kuj-Iwoyama, Kyushu, Japan. *Geotherm. J.*, **20**, 273-285.
- 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・渡辺一徳・渡辺公一郎・木村慶信・壇原 徹 (1996) 九重火山, 1995 年 10 月-1996 年 1 月噴火: 地質と岩石。1995 年 10 月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動推移の調査・研究, 平成 8 年度科研費研究成果報告書, 33-39.
- 小野晃司 (1963) 5 万分の 1 地質図幅「久住」及び同説明書。地質調査所, 1-106.
- 太田一也 (1993) 1990-1992 年雲仙岳噴火活動。地質雑, **99**, 835-854.
- 齋藤元治・風早康平・篠原宏志・松島喜雄 (1999) 九重火山の火山ガス放出量の時間変化。日本火山学会講演予稿集, **2**, 140.
- 須藤 茂・齋藤英二・渡辺和明・高田 亮 (1997) 山体変動調査。平成 7 年九重火山噴火に関する緊急研究, 平成 7 年度科振費報告書, 35-40.
- 竹内理三編 (1980) 角川日本地名大辞典 (大分県)。角川書店, **44**, 1071-1075.
- Traineau, H., Boudon, G. and Bourdier, J. L. (1994) マルチニーク島のプレー火山—その発達史と活動史—。地質ニュース, **483**, 15-25.
- 山川宣男 (1955) 内部力源による半無限弾性体の変形について。地震, **2**, 8, 84-98.
- Young, S. R., Sparks, R. S. J., Aspinall, W. P., Lynch, L. L., Miller, A. D., Robertson, R. E. A. and Shepherd, J. B. (1998) Overview of the eruption of Soufriere Hills volcano, Montserrat, 18 July 1995 to December 1997. *Geophy. Res. Lett.*, **25**, 3389-3392.

(編集担当 西村太志)