

九重火山の地殻変動

中坊真*・小野博尉*・迫幹雄*・橋本武志*・須藤靖明*・大倉敬宏*・
吉川慎*・宇津木充**・坂中伸也***・Anthony W. Hurst*

*京都大学大学院理学研究科

**国土地理院測地第一課

***秋田大学工学資源学部

要旨

1995年10月に九重火山で生じた水蒸気爆発以後、我々は繰り返し光波辺長測量とGPS測量を行ってきた。最も大きく変化したSGM-HSS測線(1.1km)では、約6年間で70cm以上も収縮し、多くの測線ではほぼ直線的な辺長の変化が現在も継続している。茂木モデルの減圧源が硫黄鉱山のあった硫黄山の噴気地帯直下600mの位置に求まった。これらの地殻変動と噴気による放出エネルギーの時間変化との間に相関関係がみられることから、これらの継続的な地殻変動は噴気活動に伴う地熱貯留層の減圧に起因していると考えられる。

キーワード：九重火山、地殻変動、噴気活動、GPS、EDM、ラピッドスタティック

1. はじめに

火山地域における地殻変動の観測は、一般的にマグマの移動や蓄積・放出に伴う圧力変化によって生じる地盤の上下・水平変動を捉えるために行われる(茂木, 1958, 西他, 1995)。しかし、火山地域で地盤変動を生じる原因は、マグマに起因するものだけではなく、地震活動や熱水などの地熱流体に起因するものがある(例えば, Carnec and Fabriol, 1999; Massonnet et al., 1997)。火山周辺で生じる地殻変動が、何に起因するのかを特定するには、他の諸観測の結果を十分考慮する必要があるだろう。

本稿では、水蒸気爆発以後に観測された九重火山の地殻変動の原因は、噴気活動に伴う地熱貯留層の減圧によるものであることを、ブリュームライズ法(鍵山, 1986)を用いた噴気活動の放出エネルギーの見積もりとその時間変化から示す。また、九重火山の特異な地殻変動の時間変化を、より詳細に調べるために、稠密なGPSの高速静止測量(Rapid Static method)を行ったので、その結果についても報告する。

2. 九重火山の火山活動

九重火山群は、阿蘇火山から北東に約30km離れた場所に位置し、別府-島原地溝内の豊肥地熱地域に存在する。九重火山群は、16以上の溶岩ドーム状火山体から形成されている。星生山の東側には活発な噴気地帯が広がっており、通称硫黄山と呼ばれている硫黄鉱山の跡地がある。従来からの噴気地域はA・B・Cと3つの領域に分けられ、以前から地熱活動の研究がなされてきた。江原(1981)によると、九重火山では、数10年から100年程度の間隔で噴気活動の活発化があり、気象庁(1975)にまとめられた歴史上の記録からその活動周期を 72 ± 18 年と見積もっている。

1995年10月11日に、九重火山群を構成している星生山の東山麓において、突然水蒸気爆発が起こった(Sudo et al., 1998)。九重火山周辺には噴気地帯や温泉などが数多く点在し、もともと地熱地帯において噴気活動が活発であったが、この時に生じた新火口は、かつて硫黄鉱山のあった旧噴気地帯から南に数百m程度の場所に生じた。最初の数ヶ月は、新火口からの噴

気エネルギーが数GWに達する噴気を放出していたが、3ヶ月後には大幅に減少し、水蒸気爆発前の数倍程度の放出量(数百MW)を保ったまま、現在にいたるまで継続している。

中田ほか(1996)は、最初の1995年10月11日の水蒸気爆発による降灰の体積は約20000m³であり、12月18-22日の2度目の灰噴出による降灰の体積は、約5000m³と見積もっている。

波多江ほか(1997)は、火山灰中のマグマに由来する新鮮なガラス含有率を定量的に分析し、12月20日以後に噴出した灰から、有意に新鮮なガラスが増加したことを明らかにした。しかしながら、1996年2月以降は、灰の噴出は確認されていない。

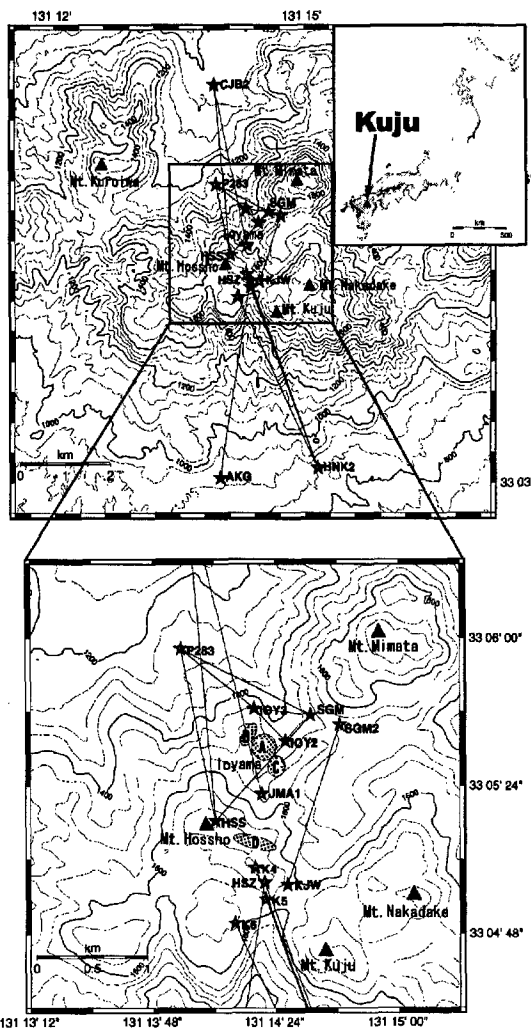


Fig. 1 Location Map of Kuju Volcano, the Iwoyama geothermal area (A, B, C and 1995 craters D) and refractors of EDM network.

1995年10月に生じた水蒸気爆発の直後に、大学合同観測班が組織され、その測地班によって光波辺長測

量網が設置された(西他, 1996)。その後、水蒸気爆発に伴う地殻変動を明らかにする目的で、辺長測量(Fig.1)とGPS測量を繰り返し実施してきた。水蒸気爆発以前の九重火山の地殻変動観測はなされていなかったが、富士山(2001)によって、水蒸気爆発前2ヶ月間の硫黄山周辺の地殻変動が、SARの干渉画像から得られている。これらの結果と、我々の地殻変動の結果とを合わせて考察を行う。

3. 観測と結果

3.1 EDM 観測

1995年10月の水蒸気爆発直後に、Fig.1に示す光波辺長測量網(EDM network)が設置され、10月17日から繰り返し測量が行われている。

地質調査所は、1995年の水蒸気爆発以後に独自の辺長測量網を設置しており、Fig.1にEDM観測網に加えて、地質調査所が設置したプリズムをK1-K6として示している。1996年4月から、このプリズムも含めて測量を行った。

辺長測量に使用した機器は、ライカのDI3000である。測量の際に、測定点側で気圧と気温を観測し、補正を行っている。通常は気象補正のための気象観測は測線の両端で行い、その平均値を用いて補正を行うが、反射プリズムまでのアクセスが容易ではないなどの問題から、両端で気象観測を行うことは不可能であった。しかしながら、ほとんどの測線長が1.5km以内で短いことから、測定誤差は1-3mm程度におさまった。3kmを超える測線は0.5-1cm程度の誤差があるが、それでも変化量に比べると十分小さい。

新火口から北側の測点(P283, HSS, SGM, SGM2, IOY2, IOY3, KJW)を含む測線は、283-IOY3を除くほとんどの測線で縮みの傾向が見られる。一方、新火口から南側の測点(AKG, HNK, HSZ, K4, K5, K6)を含む測線は、すべて伸張の傾向を示している。これらの変化は、硫黄山周辺に収縮力源を想定すると、大まかな傾向を説明できる。

多くの測線で、水蒸気爆発から最初の3ヶ月間は急激な変動を示している。それ以後は、ほぼ直線の傾向が続いている。

最も大きく変化した測線は、SGM-HSS(1.1km)測線で、約6年間で約73cm収縮し、現在でも1ヵ月に1cmの割合で変化し続けている。

多くの測線において季節変化が見られるが、中でもSGM-HSSの測線は、他の測線の季節変化と比べて、1-2cm程度の大きな振幅を持っている。Fig.3は、季節変化が良くわかるように、辺長の時間変化から直線的なトレンドを差し引いた残差を示した。季節変化

のパターンは測線によって異なるが、大まかな傾向として冬季に収縮し、春に伸張するようなパターンが見られる。P283 基準点近傍で測定された雨量の月別変化（九州大学・糸井龍一氏提供）と、辺長測量時に測定した気温と気圧の変化を並べて表示してあるが、辺長の季節変化のパターンと明瞭な相関は見られない。このことから、季節変化の原因は、一般的に考えられる気温や気圧の変化に起因する測定誤差や、単純に気象条件に起因するような変化ではないと考えられる。

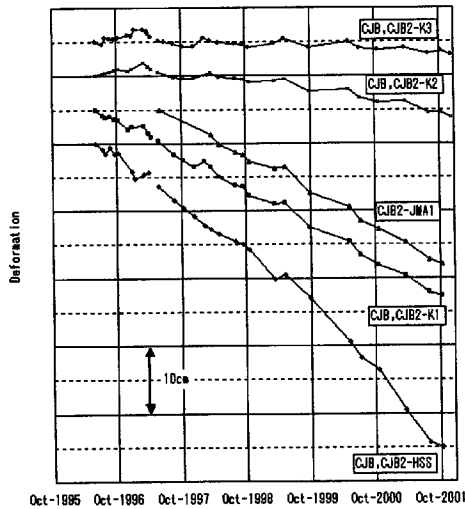


Fig. 2 (a) Temporal variation of slope distances in the northern network from CJB.

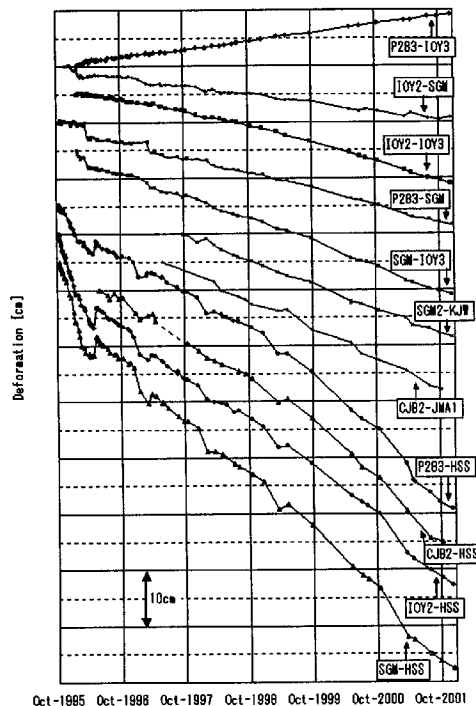


Fig.2 (b) Temporal variation of slope distances in the northern network

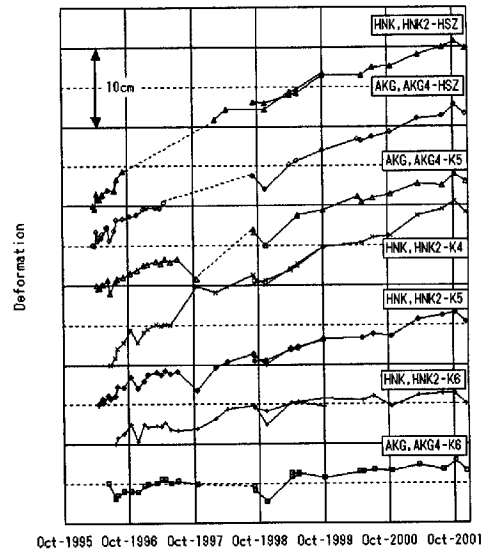


Fig.2 (c) Temporal variation of slope distances in the southern network.

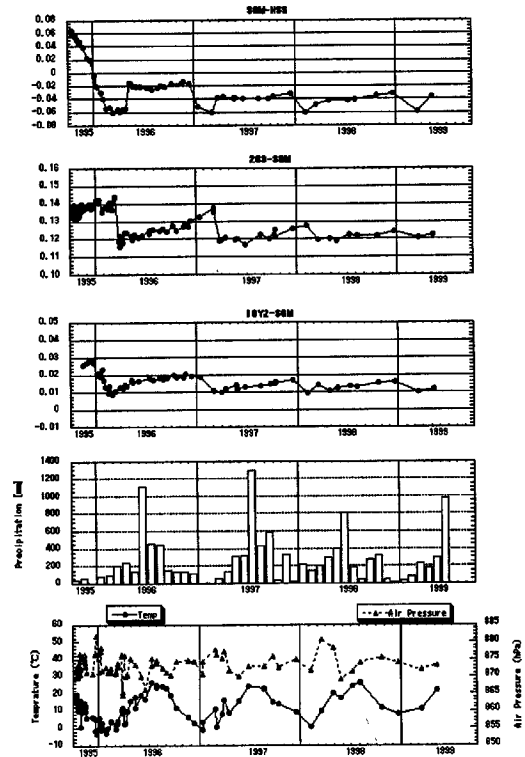


Fig. 3 Seasonal changes of the slope distance, precipitation, air pressure, and air temperature at P283.

3.2 GPS 観測・解析・結果

1 回目の GPS 観測は 1999 年 2 月 17-26 日、2 回目は 2001 年 4 月 13 日-27 日、3 回目は 2001 年 7 月 14 日-30 日の期間で行われた。GPS 受信機は、1 回目はライカ社製の System 300、2 回目以降は同社製の

System 500 を用いた。サンプリング間隔は、いずれも 15 秒であるが、2001 年 7 月の高速静止測量の際には、1 秒サンプリングで記録している。

硫黄山周辺の GPS 観測点位置図を Fig. 4 に示す。高速静止測量法の観測点を含めると、GPS の観測点数は全部で 31 点になる。★印で示しているのは、EDM 基準点として併用している点である。

解析ソフトはライカ社製の SKI Ver. 2.1 を使用した。計算に用いた衛星の軌道情報は、IGS が FTP で提供している精密暦を利用した。また、基準点を計算する際に、The Astronomical Institute of the University of Berne (AIUB) が FTP で提供しているグローバル電離層モデルを用いた。

最初の基準点を国土地理院の GPS 連続観測点である大分九重(970833)に置いた。この基準点の WGS84 系の初期座標を決めるために、九州に隣接している IGS の観測点(筑波(TSKB), 韓国(Suwon), 中国(Shanghai))をリファレンス点として、大分九重の座標を 1 日ごとに計算して、10 日分の平均値を用いた。それぞれの IGS 基準点の初期座標は、ITRF2000 による速度ベクトルデータから計算して使用している。基線長が長いために、得られた座標値のばらつきが大きかったので、平均値から大きく外れる値は、平均化する際に除外した。

国土地理院の大分九重の連続観測点は、九重火山の GPS アレイ観測点よりも、数 km ほど離れているので、測定精度を向上させる目的で、副基準点を光波測量基準点の一つである P283 に置いた。

一般的に、地殻変動を検出するための GPS 観測では、データ数を多くして精度を向上させるため、通常数日間から数週間の連続観測を行うが、火山地域では様々な制約から連続観測を行うことは困難であることが多い。そこで、15 分~30 分の観測で一回の測量を終えることのできる高速静止測量法(Rapid static method)を用いて、多点の精密 GPS 観測を試みた。高速静止測量法を実際に実施したのは、2 回目と 3 回目の GPS 観測である。高速静止測量法とは、通常の静的干渉測量法(Static method)とは原理的には同じだが、リファレンス点を数 km 以内に置くことによって、波長の整数倍の不確定性(Ambiguity)の問題や電離層や大気中の水蒸気に起因する信号の遅延誤差を小さくし、測定時間を通常の静止測量法よりも短くすることができることに特徴がある。そのため、火山地域のように高密度に観測点を展開する場合には有効である(例えば、Shepherd et al., 1998)。

高速静止法による観測を行う際に、SGM と KJW の 2 点をリファレンス点として使用することにより、測量点との距離を数百 m 以内におさえて、水平位置の測

定精度をほぼ 5mm 以内で測量することに成功した。事前に高速静止測量法の測定精度を確認するために、火山研究センターの周辺で、数百 m の観測点網を設置して九重での高速静止測量法と同様の測量を短時間で繰り返した。15 分の測定時間で、同じ点で繰り返した場合、水平方向の標準偏差は約 3mm 以下で鉛直方向の標準偏差は 6mm 以下であった。

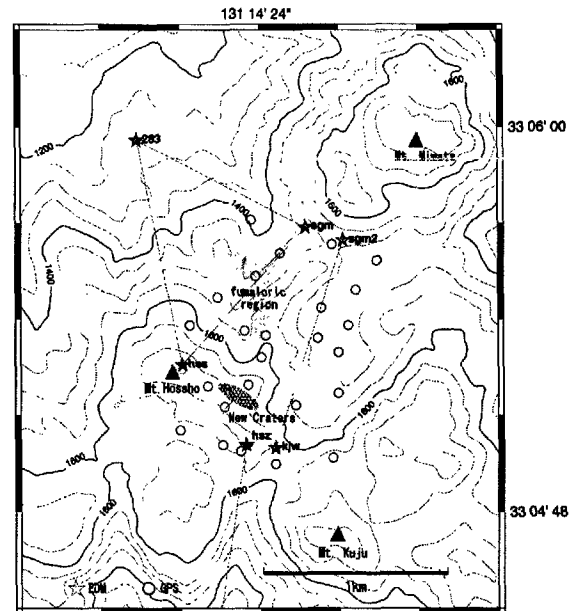


Fig. 4 Location of observation points around the Iwoyama geothermal field. ★ shows EDM and GPS stations. ○ shows rapid static GPS points.

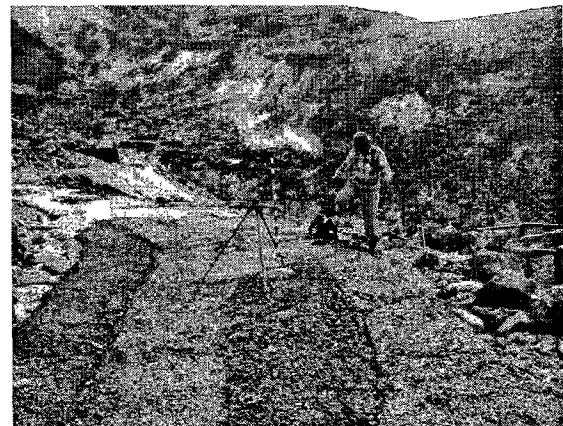


Photo 1 Setting a GPS antenna with a pole onto a pin that has a hole in the center of it, Iwoyama geothermal field.

九重の場合は、地形の影響で空が狭く衛星の受信状況があまりよくない観測点があったが、測定の際に GDOP が悪い場合は測定時間を長く取ることで誤差が大きくなることを回避した。リファレンス点となる SGM と KJW 観測点では、3 日間以上の静止測量法で

高精度の測量を行っている。また、アンテナの基準点への設置方法を、アンテナを取り付けたポールを中央に穴をあけたピンに差し込むことで、設置精度を維持しながら簡便化した(Photo 1)。このことにより、1日で1班8点、3班で24点の基準点を測量することが可能になった。基準点用に用いているピンは、セメントで岩着している。観測者が、測量基準点の位置と操作を熟知していれば、1人で1日8点以上測量することが可能である。

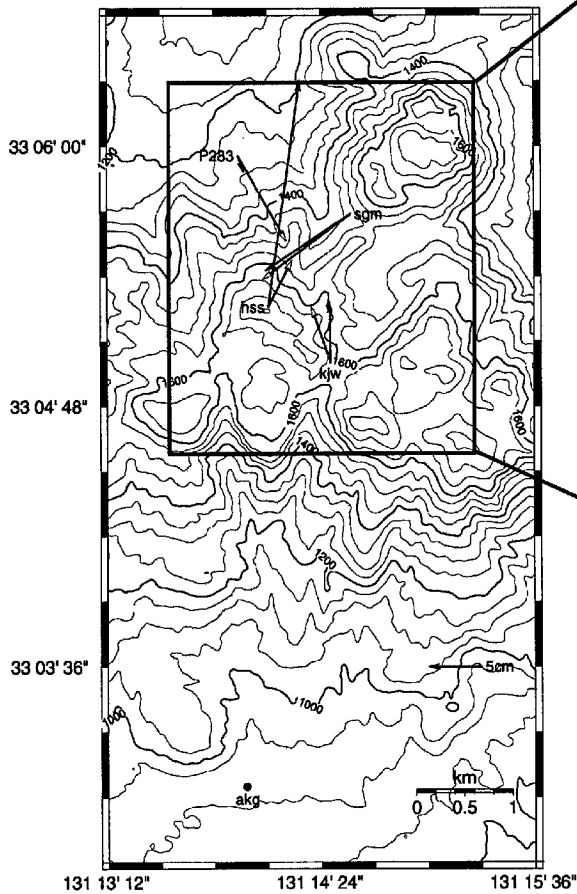


Fig.5 (a) Horizontal displacements are depicted as solid arrows detected by GPS from Feb. 1999 to Jul. 2001. Theoretical displacements of Mogi model are shown as open arrows. AKG is the fix point.

ただし、受信できる衛星の数が少ない場合や、GDOPの値が悪い場合は、Ambiguityの問題を避けるために観測時間を延長するか、衛星配置の条件が良い時間帯に再測する必要がある。2回目のキャンペーンで行った最初の高速静止測量では、4点以上の再測を行う必要があったが、サンプリング間隔を1秒に設定して収録データ数を増やすことにより、測定精度の向上と、再測の回数を低減することが出来た。

Fig. 5 (a)は、1999年2月から2001年7月までの約2年5ヶ月間の水平変動、Fig.5(b)は、2001年4月か

ら2001年7月までの約3ヶ月間の水平変動を、それぞれ示している。観測された変位ベクトルは、AKG観測点を不動点として黒い矢印として表示している。白抜きの矢印は、後述するように茂木モデルでの計算値である。

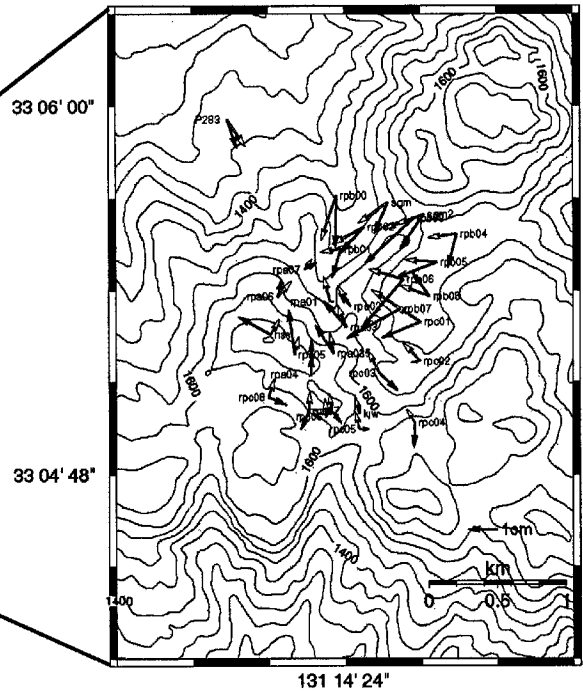


Fig. 5 (b) Horizontal displacements are depicted as solid arrows detected by GPS from Apr. 2001 to July. 2001. Theoretical displacements of Mogi model are shown as open arrows. AKG is the fix point.

Fig. 5 (a)では、HSSが最も大きく変動しており、約21cm北北東に移動している。この期間で、EDMのSGM-HSSの測線では辺長が約26cm収縮しており、同測線のGPSの辺長変化は28cm変化しているので、ほぼ同様の変化が捉えられている。他の測線についても、GPSで得られた辺長の変化は、EDMで得られた結果と調和的な結果が得られた。また、南北のEDM観測網では、それぞれ変化の傾向が伸張と収縮が異なっていたが、GPSの水平ベクトルの傾向から、その原因が硫黄山の噴気地帯周辺の収縮に起因していることが明確となった。

Fig.5 (b)では、Fig. 5(a)の期間で得られた結果とほぼ調和的な傾向が得られているが、HSSの水平ベクトルの方向が、周辺の測点やこれまでEDMやGPSで得られた傾向とは異なっていることから、誤差に起因するものか、異常値である可能性が強い。全体的な水平変動の傾向は、これまで得られた結果と同様に、従来から存在する硫黄山噴気地域の収縮傾向で説明できる。

新火口の南側の測点が南北に矢印がばらついているが、これは測定誤差の範囲なので、3ヶ月間の変動量そのものが小さいことに起因すると思われる。今後より長い期間の変動を比較することによって、誤差に対する変動量が大きくなるので、こういった変動のばらつき

が解消されることが期待される。

Table 1に観測点の緯度経度(2001年4月)とGPS測量で得られた結果を示す。鉛直方向の変動については、アンテナ定数の補正や誤差についての検討がまだ不十分であるので、掲載していない。

Name	Lat.[deg]	Lon.[deg]	Alt.[m]	1999Feb-2001Jul		2001Apr-2001Jul	
				NS[cm]	EW[cm]	NS[cm]	EW[cm]
P283	33.102640	131.229901	1313.26	0.6	-1.6	0.3	0.4
472	33.254043	131.347276	487.93	1.1	-1.6	0.3	0.9
474	33.009029	131.286085	579.95	0.1	-1.7	-0.2	0.1
707	33.270273	131.121133	381.22	0.2	-1.4	0.5	0.1
708	33.078860	131.385845	518.93	-0.3	-0.6	-0.5	0.8
833	33.127844	131.206797	976.29	-0.8	-1.6	0.0	0.0
akg	33.054200	131.230683	946.99	0.0	0.0	1.3	0.1
cjb	33.119280	131.222034	1104.54	0.0	-2.6	0.5	-0.6
hss	33.090963	131.232734	1790.54	3.0	20.8	1.9	-1.1
hsz	33.086805	131.236707	1751.82			0.9	0.4
kjw	33.086657	131.238560	1681.58	-0.1	5.6	1.6	0.1
rpa01	33.092745	131.236650	1574.20			1.3	0.2
rpa02	33.092513	131.237986	1628.32			1.8	-0.4
rpa03	33.091367	131.237724	1658.48			2.2	-0.7
rpa035	33.089935	131.236874	1710.76			2.3	-0.6
rpa04	33.088797	131.235369	1738.68			2.5	0.1
rpa05	33.089852	131.234308	1769.11			2.9	-0.2
rpa06	33.093038	131.233215	1661.40			1.9	0.2
rpa07	33.094495	131.234951	1567.39			1.6	0.5
rpb00	33.098530	131.237067	1424.94			-0.5	0.0
rpb01	33.095612	131.237357	1498.72			0.3	-0.3
rpb02	33.096798	131.238881	1490.93			0.4	-0.8
rpb03	33.097264	131.242146	1539.80			-0.2	-1.7
rpb04	33.096424	131.244977	1492.83			0.2	-0.3
rpb05	33.094900	131.243676	1497.45			0.8	-1.4
rpb06	33.093950	131.241474	1504.08			-0.3	-1.4
rpb07	33.092370	131.241278	1507.58			0.3	-1.8
rpb08	33.093053	131.243186	1500.20			2.2	-0.5
rpc01	33.091634	131.242579	1503.35			0.8	-1.3
rpc02	33.089523	131.242555	1548.08			1.3	-0.3
rpc03	33.088879	131.239866	1578.26			0.7	0.7
rpc04	33.086149	131.242199	1710.93			0.5	0.0
rpc05	33.085813	131.238572	1669.29			1.3	0.4
rpc06	33.086472	131.236358	1696.30			1.7	0.3
rpc07	33.086814	131.235234	1680.36			0.7	-0.2
rpc08	33.087563	131.232605	1678.49			1.0	0.7
sgm	33.098144	131.240445	1509.84	-8.0	-5.2	0.2	-0.4
sgm2	33.097483	131.242824	1545.31			0.2	-0.8
knh	33.129022	131.190847	909.53			0.3	0.6

Table 1 The result of GPS survey and the location of the stations in 2001 Apr. Latitudes and Longitudes are presented in WGS84 coordinates. Fix point is AKG station.

4. 解析

光波辺長測量の結果と、GPS 測量の結果から 50m メッシュのグリッドサーチによって茂木モデル(点力源モデル)の減圧源を求めた。EDM の場合は、期間を変化の大きい最初の 3 ヶ月(1995 年 11 月~1996 年 2 月)と、直線的な変化をしている期間(1997 年 10 月~2001 年 12 月)とに分けて解析を行ったが、圧力源の位置の違いは誤差の範囲であった。GPS は 3 回の GPS 観測のうち、1 回目と 3 回目の期間(1999 年 2 月~2001 年 7 月)と 2 回目と 3 回目の期間(2001 年 4 月~2001 年 7 月)でそれぞれ計算を行った。

求めた計算値と観測値との残差をコンター図で示す(Fig. 6)。EDM と GPS で得られたどの期間のデータも、最も残差の小さい領域が、星生山の北東に位置する既存の噴気地帯の直下付近に位置していることがわかる。このことから、減圧源はほとんど移動していないことが分かる。観測値と茂木モデルによる計算値は、EDM の場合は Table 2, 3 に変位量で、GPS の場合は Fig. 5 (a), (b) に、計算値を白抜き矢印で示している。Fig.5 (a)の観測された水平変位ベクトルと茂木モデルによる変位ベクトルを比較すると、方向はほぼ合っているが、変位量が大きく異なっている。特に、P283 観測点が大きな変位で計算され、HSS 観測点が小さく計算されている。一方で、Fig. 5 (b)の方向は多少ばらついているが、変位量に関してはそれほど大きな食い違いは無い。

計算値と観測値が大きく外れている原因の一つは、

力源の深さが地表から 600mと浅いために、地形や圧力源の複雑な形状、不均質性などの影響を強く受けていると考えられる。例えば、Fig. 6 の残差の鉛直分布を見てみると、地表付近まで残差の低い領域が伸びている。また、Fig. 5 (a)のように、HSS が局所的に大きく動いている理由の一つとして、減圧源の領域が局所的に浅部まで伸びていることが予想される。今後、高速静止法による稠密で長期間の地殻変動データを新たに追加して、地形や圧力源の形状を考慮に入れた、より複雑な地殻変動モデルを構築する必要があるだろう。

Sudo et al.(1998)は、水蒸気爆発の際に生じた新火山口列が雁行割目状の形態をしていたため、左横ずれ断層によって生じた可能性について述べている。このことから、Okada(1992)によるプログラムを利用し、新火山口列の直下に断層を仮定して観測値を説明できるような断層パラメーターを探してみた。しかしながら、観測値をよく説明できるようなパラメーターは見つからなかった。このことから、新火山口列で水蒸気爆発が発生した際に、強度の弱い古い断層部分を破壊して開口したために、雁行割目が生じたと考えられる。

Table 2 Results of model calculation by point source. (11/Nov/1995-22/Feb/1996)

From	To	Obs[cm]	Mogi[cm]
ioy2	sgm	-1.7	-1.4
283	sgm	-3.4	-2.8
ioy2	hss	-12.4	-11.9
283	hss	-8.0	-7.8
sgm	hss	-14.4	-15.7

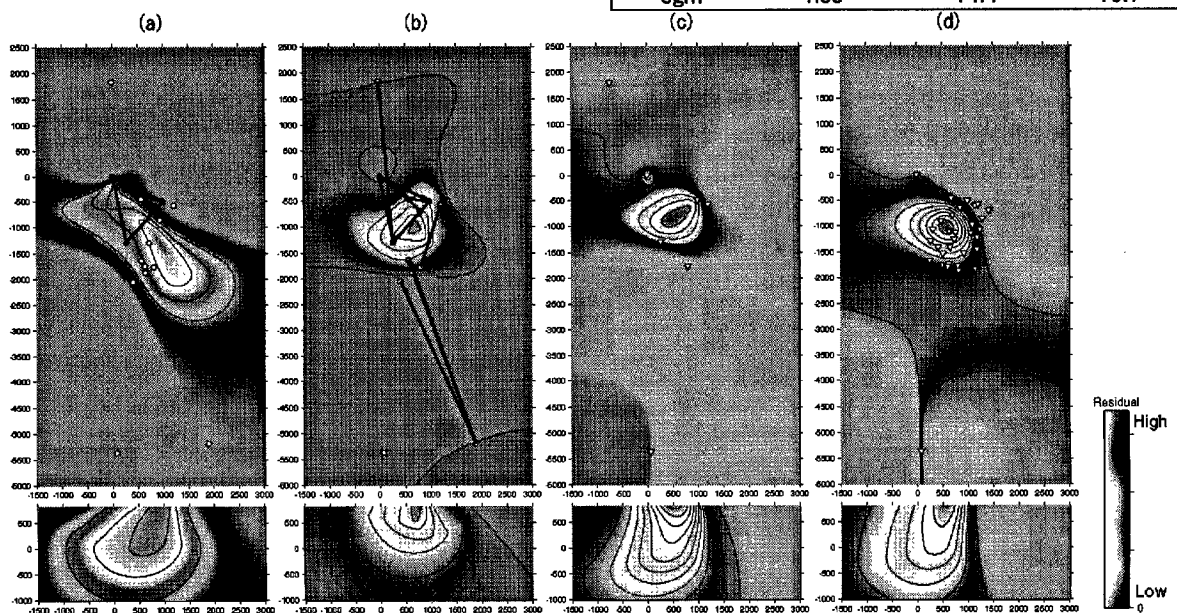


Fig. 6 Map of average residual strain (EDM) and displacements (GPS) versus horizontal and vertical source position. (a) EDM (11/Nov/1995-22/Feb/1996) (b) EDM (13/Oct/1997-7/Nov/2001) (c) GPS (Feb/1999-Jul/2001) (d) GPS (Apr/2001-Jul/2001)

Table 3 Result of model calculation by point source.
(13/Oct/1997-7/Nov/2001)

From	To	Obs[cm]	Mogi[cm]
sgm2	kjw	-18.4	-34.9
cjb2	k3	-1.2	9.2
cjb2	k2	-5.9	-8.2
cjb2	k1	-21.4	-24.9
cjb2	hss	-35.5	-15.3
ioy2	sgm	-5.8	-2.7
sgm	ioy3	-17.9	-21.2
ioy2	ioy3	-13.0	-12.9
283	sgm	-11.8	-21.0
ioy2	hss	-36.7	-25.2
283	hss	-38.8	-26.1
sgm	hss	-44.1	-37.1
283	ioy3	6.3	-0.6
hnk2	hsz	9.5	7.6
hnk2	k4	9.4	6.2
hnk2	k5	8.7	8.8
hnk2	k6	2.2	5.8

5. 収縮力源と継続的な地殻変動

茂木モデルの収縮力源はC領域の直下に位置している。C領域は、噴気地域の中でも最も活動が優勢な場所で、1961年には500-600℃のほぼ純粋なマグマ水を含んだ水蒸気を放出していた(Mizutani et al., 1986)。1995年の水蒸気爆発以前も350℃程度の高温酸性ガスを放出しており(田口ほか, 1996)、水蒸気爆発以後の直接測定でも300℃以上の噴気温度を保っている(平林ほか, 1996)。その後の観測でも、C領域の噴気活動が最も優勢である。

この噴気地域の直下にある収縮力源が、どうして継続的な地殻変動を引き起こしているのだろうか？この問題を解決するために、噴気と辺長の時間変化の相関について考えてみる。

Fig. 7(a)は、プリュームライズ法(Kagiya, 1981)による新火口(d crater)からの噴気の放出エネルギーと、その放出エネルギーに相当する水蒸気の放出量の時間変化を示している。水蒸気爆発直後は、数GWを超えるようなエネルギーを放出していたが、数ヶ月で急速に噴気エネルギーが減少した。その後、盛衰を繰り返しながら、徐々に衰えつつある。

Fig. 7(b)は、EDMのSGM-HSS測線の変化率を示している。測定ごとの平均変化率をプロットしているので、測定間隔が短くなると見かけ上の誤差が大きくなる。したがって、水蒸気爆発直後は測定間隔が数日~1週間と、測定頻度が多かったのばらつきが大きい、Fig. 2(b)からも明らかなように、水蒸気爆発直後は変化率が大きく、数ヶ月後にほぼ一定になるのが分かる。

これら2つの時間変化には、強い相関が見られる。このことは、噴気活動によって地殻変動が生じていることが、推察できる。

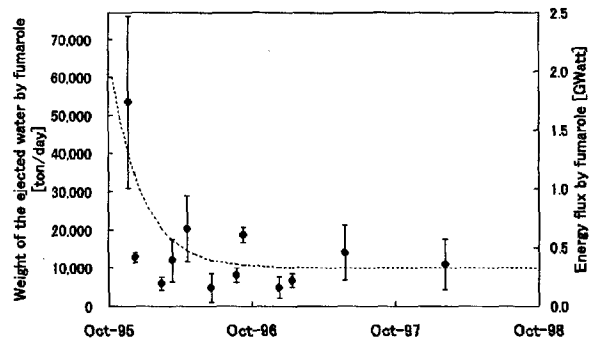


Fig. 7 (a) Temporal variation of fumarolic energy flux and equivalent weight from new craters for the first three years.

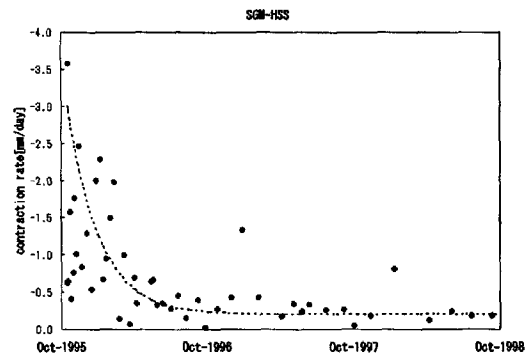


Fig. 7 (b) Contraction rate of the slope distance (SGM-HSS) during the same period as (a).

次に、単純なモデルを用いて噴気活動と地殻変動との関係を定性的に説明することを試みる。地熱流体の放出によって、収縮している貯留層について考えてみよう。噴気活動に伴う地熱貯留層の体積の時間変化は、以下のように表せる。

$$\Delta V = Q\Delta t, \quad (1)$$

ここでQは放出されている流体の流量である。ΔVは貯留層の体積変化量である。ここで、留意しなければならないのは、Qは体積変化に寄与している流体の流量を意味することである。(例えば、噴気による放出エネルギーが深部からの供給とつりあっているときは、噴気の放出が続いていたとしてもQの値はゼロになる。)

茂木モデルによると、辺長の変化は貯留層の圧力に比例している。

$$\Delta L \propto \Delta V. \quad (2)$$

すなわち、辺長の変位速度は以下のように表現できる。

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} \propto Q. \quad (3)$$

この比例関係は、Qが一定であれば、地殻変動の変位速度は一定であることを意味している。

これまでは、減圧の原因がすべて地熱流体の放出によるものと仮定して考察を行ったが、マグマの関与についても検討してみる。

1995年の水蒸気爆発の際に放出した灰について、波多江ほか(1998)と中田ほか(1996)による研究では、新鮮な火山ガラスが1995年12月20日以降から増加したと述べている。このことは、水蒸気爆発以後の活動にマグマが関与した可能性が高いことを示しているが、継続的な地殻変動に関しては、マグマの影響は限られていると考えられる。なぜなら、噴出した全ての灰の体積は多くとも $3 \times 10^4 \text{m}^3$ であり、この量は後述するように、噴気によって放出された水の体積よりもずっと少ない。さらに、新鮮な火山ガラスの含有量は、火山灰全体の0.4wt%を上回することはなかった。また、1996年の2月以降の降灰は確認されていないが、地殻変動はそれ以降もずっと継続している。このことから、継続的な地殻変動の原因は、噴気活動にともなう地熱流体の放出に起因するものだと考えられる。

6. 考察

6.1 九重火山の3つの活動ステージ

1995年の水蒸気爆発以後、我々が現在観測している現象は、おそらく地熱流体の放出に伴う地熱貯留層の減圧過程を見ているのであろう。一方で、水蒸気爆発以前はどういうステージにあったのだろうか？また、60-100年という活動周期から考えると、これまでの活動はどのように理解でき、今後どのように推移するのだろうか？これらの問題について考察してみる。

1) 地熱流体の蓄積過程 [~1995年10月まで]

富山(2001)はSAR干渉画像による水蒸気爆発前数ヶ月間の地殻変動を求めた。水蒸気爆発前数ヶ月間の硫黄山周辺では、わずかながら隆起が認められるので、地熱流体の蓄積によって地熱貯留層の増圧が生じ、膨張が起こったと考えられる。この隆起が生じている部分は、地殻変動から求められた減圧源の近傍に見られることから、現在減圧を継続している地熱貯留層が、水蒸気爆発前までは、増圧傾向にあったことが推測できる。もし、九重火山が1995年の水蒸気爆発のような活動を今後も繰り返すとすると、硫黄山周辺の隆起・沈降をモニターしていれば、今後の水蒸気爆発の中・長期的予測が可能である。

2) 水蒸気爆発直後の地熱流体の放出と急激な減圧過程 [1995年10月~1996年2-3月]

1995年10月11日に水蒸気爆発を起こしてから、数週間後には急激に噴気量が衰えたが、1995年12月18日に再度灰噴火を行って、噴気の活発化が見られた。EDM観測でも、12月18日以降は一時的に変化率が大きくなった。その後、徐々に噴気活動は衰え、それとともに辺長測量的変化率も小さくなった(Fig.7)。このことから、水蒸気爆発

からの数ヶ月間は、水蒸気爆発によって大量の地熱流体が放出され、それにとまって地熱貯留層の流体圧が急速に減圧したことが推測される。

一方、この急激な減圧のステージの終盤には、1996年1月に筋湯方面で、1996年3月に硫黄山周辺で群発地震が観測されており、九重火山周辺の地震活動が一時的に高まっていた。群発地震は、一般的に間隙流体圧の増圧が原因の一つだと考えられているので、地熱貯留層での急激な減圧の進行と、噴気活動の一時的な活発化や群発地震など、この時期の活動は、不安定な状態であったといえるだろう。3) ほぼ定常的な地熱流体の放出と減圧過程 [1996年3月以降]

新火山からの噴気活動は徐々に衰えつつあるが、既存の噴気地帯(特にC領域)からの噴気量は1995年10月の水蒸気爆発前よりも増加しており(江原ほか,2000)、噴気の放出エネルギーの総量としてはそれほど変化していないと思われる。水蒸気爆発前よりも地熱流体の放出量が増加したために、地熱域の直下にある地熱貯留層の減圧が、現在も緩やかに継続しており、そのことが辺長の直線的な傾向をもたらしていると考えられる。

しかし、その変動の原因が地熱貯留層の減圧にあるとすると、その流体の体積は限られているので、永遠に地殻変動が続くとは考えられない。先述した江原(1981)によると、硫黄山周辺で水蒸気爆発は、60-100年の周期で繰り返していると考えられる。仮にこの周期が、浅部地熱貯留層の流動システムに起因しているとするれば、まずその浅部貯留層の物質収支を考えてみることによって、流動システムについての理解を試みる。

6.2 物質収支の見積もり

ここでの物質収支の物質とは、大部分が水を主成分とした地熱流体である。第一次近似として、物質は全て水であるとして考える。新火山から放出される噴気を、White et al. (1971)による水の状態図から 2.8MJ/kg で 160°C の水蒸気に飽和した過熱蒸気であるとする、最初の3年間での水の放出量は、約 $1.5 \times 10^7 \text{ton}$ である。これに相当する噴気の体積は、減圧源での温度圧力条件が分からないので、一意的に決まらない。しかし、全ての水が液体とした場合の体積 $1.5 \times 10^7 \text{m}^3$ が下限である。一方で、同じ期間の茂木モデルの収縮体積は、 $1 \times 10^6 \text{m}^3$ である。つまり、噴気による放出量の体積は、茂木モデルによる収縮体積よりも一桁大きい。このことは、噴気として放出されている大部分の地熱流体が外部から供給され、減圧を起こしている地熱貯留層はより深部からの供給路にある通過点であることを示唆する。つまり、放出量と供給量のバランスが崩れれば、この通過点である浅部地熱貯留層が減圧を起こしたり、増圧に転じたりする。現在減圧を続けている貯留層が、供給

量あるいは放出量が変化して増圧に転ずるようなメカニズムがあれば、60-100年という周期性を説明できる可能性がある。

放出過程が周期の半分の期間継続して、地殻変動も一定の割合で変化すると仮定すると、茂木モデルを仮定した場合の収縮体積は、30-50年の期間で $1.0\text{-}1.7\times 10^7\text{ m}^3$ になる。この体積は、半径約130-160mの球の体積と、等価である。

坂中ほか(2001)は、C領域の付近に帯磁源を求め、その帯磁の原因は、冷却に伴う熱電磁気効果に起因すると解釈している。この帯磁源は、我々が推定した地殻変動の減圧源とほぼ同じ位置である。このことは、噴気活動によって減圧を生じている地熱貯留層が、同時に冷却をしていることを意味している。地磁気の帯磁傾向も、光波辺長測量的変化と同様に、直線的な変化をしていることから、おそらく同じ現象を見ているのであろう。今後は、地磁気観測から得られた熱的な変化と地殻変動の両方を含めた九重火山の統一的なモデルを構築していく予定である。

7. まとめ

光波辺長測量とGPS測量の繰り返し観測から、従来から存在する噴気地帯を中心として、地殻変動の収縮が捉えられた。また、水蒸気爆発直後数ヶ月間は活発な噴気活動を伴って急激な地殻変動がおり、その後噴気活動の衰えとともに辺長の変化率も小さくなったが、そのまま6年間にも及ぶ直線的な変動が継続している。これらの事実から、九重火山で生じている地殻変動は、噴気活動に起因するものと考えられる。

謝辞

小林芳正先生には、本研究の当初において、親身にご指導いただいた。北海道大学の森濟氏・京都大学桜島観測所の井口正人氏には、GPS受信機と解析ソフトウェアを使用させていただいた。九州大学の糸井龍一氏から九重周辺の気象データを提供していただいた。元桜島観測所の西潔氏・江頭庸夫氏には、観測方法や解析手法の初歩から丁寧にご指導いただいた。地質調査総合センター(旧地質調査所)が設置したEDM用プリズムを利用させていただいた。国土地理院のGPS電子基準点のRinexデータを利用させていただいた。以上の方々に、記して謝意を表します。

参考文献

江原幸雄・藤光康宏・西島潤・福岡晃一郎・川口昌宏・工藤貴久・柴田寛(2000), 九重火山1995年水蒸気爆発とその後の水蒸気放出に伴う熱的变化, 九大地熱研究報告, 第9号, pp. 87-95.

坂中伸也・田中良和・宇津木充・橋本武(2001), 九重硫黄山での地磁気変化による噴気火道の形状推定, 秋田大学工学資源学部研究報告, 第22号, pp.25-38.

神宮寺元司・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, 第41巻, pp. 23-29.

田口幸洋・糸井龍一・甲斐辰次・渡辺公一郎・江原幸雄・筒井智樹(1996), 噴出物から見た1995年九重硫黄山の噴火過程, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査・研究(研究代表者 小林芳正)」, pp. 75-82.

富山信弘(2001), 合成開口レーダ画像の差分干渉処理による地殻変動の抽出, 熊本大学大学院自然科学研究科修士論文

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, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査・研究(研究代表者 小林芳正)」, pp. 33-40.

西潔・石原和宏・加茂幸介・小野博尉・森濟(1995), GPS測量による雲仙火山のマグマ溜りの推定, 火山, 40, 43-51.

西潔・小野博尉・中坊真・平林順一(1996), 地殻変動観測から推定される九重火山の浅部力源, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査・研究(研究代表者 小林芳正)」, pp. 105-113.

波多江憲治・渡辺公一郎・渡辺一徳・筒井智樹・本村慶信(1997), 九重火山1995-96年噴火活動に伴う火山灰中の発泡ガラス含有量の経時変化, 火山, 第42巻, pp. 345-353.

平林順一・大場武・野上健治(1996), 九重山1995年10月噴火と地球化学的研究, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査・研究(研究代表者 小林芳正)」, pp. 63-73.

Carnec, C., Fabriol, H. (1999), Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, using SAR Interferometry, Geophys. Res. Lett., 26, 9, pp. 1211-1214.

Ehara, S., Yuhara, K., Noda, T. (1981), Hydrothermal system and the origin of the volcanic gas of Kuju-Iwoyama Volcano, Japan, deduced from heat discharge, water discharge and volcanic gas emission data, Bull. Volcanol. Soc. Jpn., 26, pp.

- 35-56.
- Kagiyama T. (1981), Evaluation methods of heat discharge and their applications to the major active volcanoes in Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 9, pp. 87-97.
- Massonnet, D., Holzer, T., Vadon, H. (1997), Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed using SAR Interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 8, pp. 901.
- Mizutani, Y., Hayashi, S. and Sugiura, T., Chemical and isotopic composition of fumarolic gases from Kuju-Iwoyama, Kyushu, Japan. *Geochkchemical Journal*, Vol.20, pp. 273-285.
- Mogi, K. (1958), Relations of eruptions of various Volcanoes and the deformation of the ground surfaces around them, *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 36, pp. 99-134.
- Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a halfspace, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, pp. 1018-1040.
- Shepherd, J. B., Herd, R. A., Jackson, P. and Watts, R. (1998), Ground deformation measurements at the Soufriere Hill Volcano, Montserrat: II: Rapid Static GPS measurements June 1996-June 1997, *G. R. L.*, Vol. 25, 18, pp. 3413-3416.
- Sudo, Y. (1998), Ono, H., Hurst, A. W., Tsutsui, T., Mori, T., Nakaboh, M., Matsumoto, Y., Sako, M., Yoshikawa, S., Tanaka, M., Kobayashi, Y., Hashimoto, T., Hoka, T., Yamada, T., Masuda, H., Kikuchi, S., Seismic activity and ground deformation associated with 1995 phreatic eruption of Kuju Volcano, Kyushu Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 81, pp. 245-267.
- White, D. E., Muffler, L. J. P. and Truesdell, A. H. (1971), Vapor-dominated hydrothermal system compared with hot-water system, *Econ. Geol.*, 66, pp. 75-97.

Ground deformation at Kuju Volcano

Makoto NAKABOH*, Hiroyasu ONO*, Mikio SAKO*, Takeshi HASHIMOTO*,
Yasuaki SUDO*, Takahiro OHKURA*, Shin YOSHIKAWA*, Mitsuru UTUGI **,
Shin'ya SAKANAKA*** and Anthony W. HURST*

*Graduate school of Science, Kyoto University

**Geophysical Survey of Japan

***Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

Synopsis

A phreatic eruption occurred at Kuju volcano in October 1995. We deployed EDM and GPS networks around the active craters of the volcano just after the eruption. Slope distances of the survey lines in the northern network have tended to contract, whereas those in the southern one tended to extend. The maximum contraction observed in the northern network was 70 cm over 6 years. A spherical volume decrease just beneath the fumarolic area is a plausible model for these changes in slope distances. A noteworthy feature is that over 6 years after the phreatic eruption ended, the deflation rate is still approximately linear. We also estimated the thermal energy discharge by fumaroles in the new craters. Temporal variation of the energy discharge is well correlated with the observed deflation rate. It is strongly suggested that the ground deformation around Iwoyama is caused by the deflation volume of a geothermal reservoir.

Keywords: Kuju Volcano, Ground deformation, Fumarolic activity, GPS, EDM, Rapid static method