

GPS 測量結果から推定される雲仙岳の主要力源の位置

西 潔・小野 博尉・森 濟

MAIN PRESSURE SOURCE POSITION OF UNZEN VOLCANO DEDUCED FROM GPS SURVEYS

By Kiyoshi NISHI, Hiroyasu ONO and Hitoshi MORI

Synopsis

GPS surveys were carried out during January 1991 to February 1994 at Shimabara Peninsula Nagasaki Prefecture Japan, to detect the ground deformation caused by volcanic activity of Unzen Volcano.

Main results are as following.

- 1) During summit eruption, Shimabara Peninsula was inflating, and after the lava dome growing and repeated occurrence of pyroclastic flow, it changed to deflating.
- 2) Close correlation was found between the dilation of the Peninsula and the amount of discharged lava.
- 3) Main pressure source position is located applying the Mogi's model to the observed distance changes. The position of pressure source is at the shallow domain of the crust about 5km WWS of the active crater. Maximum observed displacement at the peninsula caused by the contraction of this pressure source is about 10cm.

1. はじめに

長崎県島原半島の雲仙岳は、1990年11月17日に198年の休止期を経て九十九島旧火口および地獄跡旧火口で噴火活動を開始し、1991年2月には屏風岩新火口を形成した。約半年間の山頂における間欠的な噴煙活動の後、1991年5月20日に地獄跡旧火口から溶岩ドームが出現した。以後、ドームの成長と崩落が続き、噴出物の総量は約1億9千万 m^3 (1994年2月現在)¹⁾に達し、活動は意外に長期化した^{2), 3)}。

噴火開始から2ヶ月後の1991年1月、雲仙岳の火山活動に伴う島原半島の地殻変動を検出する目的で、第1回のGPS測量を実施した。その後、1994年2月迄に10回の測量を実施した。

GPS測量は測線間の見通しは必要ないことから、測線間に山体が含まれるような火山地帯における測量に適しており、広範囲の測量結果を用いて、火山性地殻変動の力源位置を求めることが出来た。求められた力源による地殻変動と溶岩噴出量が良い相関を示すことから、この力源はマグマ溜まりと考えられる。筆者等は今回の測量によって、GPS測量では初めてマグマ溜まりの位置を求めることが出来たと考えている。

2. 測量方法

2.1 測点

測点分布を Fig. 1 に示した。島原半島の東側は、島原地溝帯の外側に2点、地溝帯の内側に1点の計3点、半島西側も同様に3点、さらに半島中央部の仁田峠に1点、および半島西方の飯盛山に1点の合計8点である。1991年1月の第1回からの測点は、愛野 (AIN)、北串 (KIT)、布津 (FUT)、九大観測所 (SEV) および三会 (MIE) 5測点であり、猿葉山 (SAR) は1991年2月の第2回、仁田峠 (NIT) は1991年5月の第4回、飯盛山 (IMA) は1993年10月の第9回からのそれぞれ測点である。

2.2 受信機、解析法

受信機はL1とL2波が受信可能なWild-Magnabox社のWM102型を使用し、3～4時間のデータを受信機内蔵のカセット磁気テープに収録した。1991年10月の第5回目の測量からは、筆者の一人(西)による収録用ソフトウェアにより受信機の出力を外部のパーソナルコンピュータの3.5インチFDDに収録した。この収録用ソフトにより一日2回の6～8時間の定時データの収集と、GPSデータの時刻を解読して行うパソコンの時計の修正を自動的に行った。

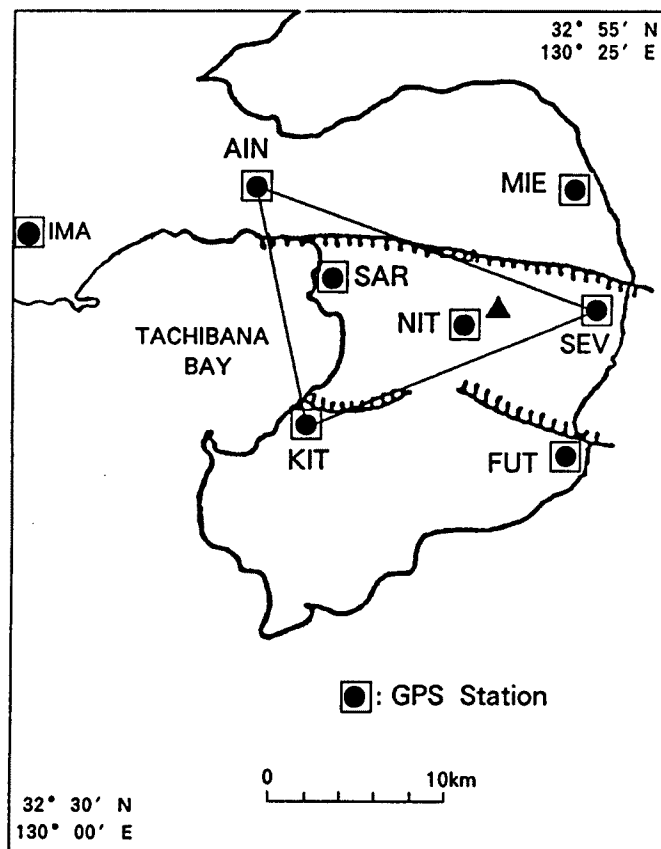


Fig. 1 Location of GPS stations at Shimabara Peninsula. A triangle of AIN-KIT-SEV indicates the area where dilatation is calculated. Small black triangle indicates the Fugen volcano.

基線解析ソフトウェアは受信機付属の PoPS Version 3.42 を使用した。
軌道情報は放送歴を用いた。基準点は九大観測所 (SEV) とし、座標値は大見 (1991)⁴⁾ による値を用いた。

3. 結果

3.1 面積歪の時間変化

島原半島の地殻変動の全体的な変化を知るために、半島西側の2点 (AIN, KIT) と東側の1点 (SEV) を結ぶ三角形の面積歪の時間的変化を Fig. 2 に示した。また、図の下段には、公表されている値^{1), 5)} に基づき測定の期間毎に換算し直した溶岩噴出量を示した。

測定を開始した1991年1月を基準にとると、すくなくとも同年3月迄の面積歪は増大している。1991年2月には、新たに屏風岩火口が形成されたが島原半島は膨張を続けていたことになる。

1991年6月の測定では、同年3月と比較して面積歪は減少している。即ち、島原半島が収縮状態に転じたことを示している。1991年の4月、5月には測定がないので、何時の時点から収縮状態に移ったかは不明である。しかし、1991年3月から同年6月までの火山活動を振り返ると、1991年5月20日の溶岩ドーム出現とそれに続く火砕流の発生が噴出物量の増大の面からは一つの転機であり、溶岩ドームの出現から火砕流の発生の初期の段階、即ち、1991年5月下旬から6月上旬に収縮に転じたものと考えられる。

収縮後の面積歪の減少は噴出物量の変化に対応したものとなっている。特に注目されるのは、1992年9月から1993年2月の間の面積歪の変化が停滞していることである。この間の噴出物量は $10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ 以下である。噴出物量がこの値以上の場合は収縮を続けるが、この値を下回ると、収縮は停滞する。収縮が停滞した理由は、地下深部からのマグマの供給量と火口からの噴出物量が等しいために地殻変動が平衡状態になったためと考えることが出来る。

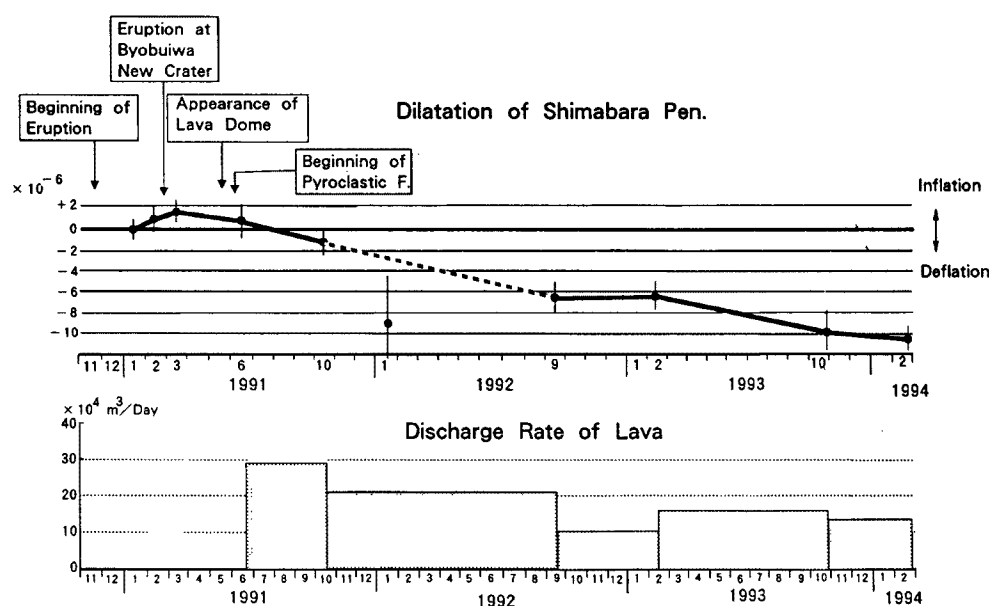


Fig. 2 Time changes of dilation of Shimabara Peninsula (upper figure) and the lava discharge rate of the Unzen volcano (lower figure).

3. 2 地盤変動をもたらす力源の位置

上述のような島原半島の収縮をもたらす力源の位置を求めるために、測定点間の辺長変化に茂木モデル⁶⁾を適用した。

半無限弾性体内の深さ h に半径 a の力源があり、 Δp の圧力変化による距離 r における水平変位 u_r は、次式で示される⁷⁾。

$$u_r = K \cdot \frac{r}{(r^2 + h^2)^{1.5}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K = \frac{3a^3 \cdot \Delta p}{4\mu}, \quad \mu : \text{rigidity}$$

(1式より、辺長変化は力源の位置 (r, h) と力源の強度に相当する K の関数として表される。力源の位置と強度 K を変化させ、辺長変化の理論値と GPS 測量から得られる観測値との差の自乗積算値を最小にする位置と強度を求めた。

観測値としては、1991 年 3 月～1994 年 2 月の辺長変化を用いた。

得られた力源の位置及び各測線の辺長変化の理論値と観測値を **Fig. 3** に示した。理論値と観測値との差

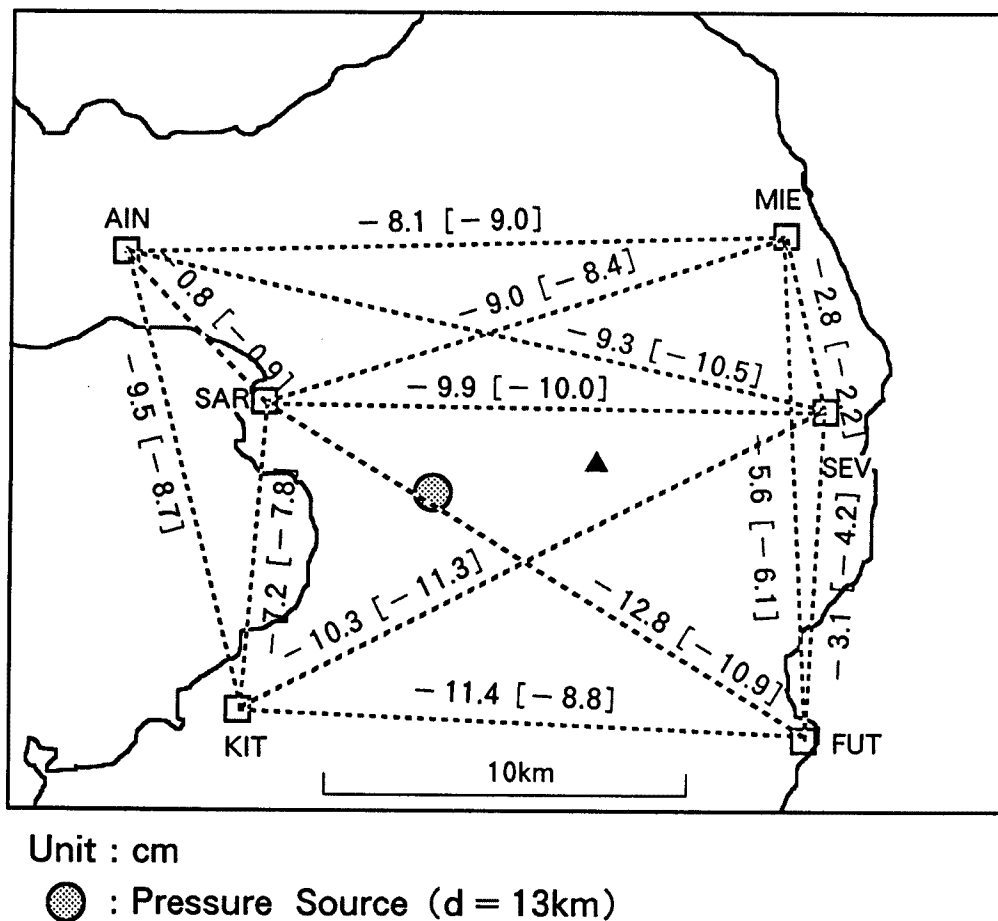


Fig. 3 Horizontal distance changes during Mar. 1991 to Feb. 1994. Numerals within square brackets indicate the calculated distance changes obtained from Mogi's model. Shaded circle indicates the calculated position of main pressure source.

は、多くの測線で 1ppm 程度であり GPS の精度と同程度である。即ち、辺長変化の観測値は茂木モデルによって説明される。

力源の位置は、普賢岳の西南西約 5 km の深さ 13km の地点となった。この位置を、島原半島西海岸の路線の水準測量結果から得られている力源の位置⁸⁾と比較すると水平位置では 1 km 程度の範囲で一致する。しかし、深さでは約 6 km 深くなっている。水準測量の結果は西海岸路線のみの結果であるのに対して、GPS 観測点は島原半島全域に分布しているので、この深さの相違は測量の範囲の相違によるのかも知れない。しかし、水平方向と比較して、深さについての分解能は十分ではなく、 ± 5 km 程度の変化では理論値と観測値の差の自乗積算値の変化はゆるやかである。従って、深さ 14km に絶対的な意味を持たせるのではなく、深さについては「10km 程度の地殻内浅部」とするのが妥当である。

3.3 島原半島の水平変位

各測点の水平変位を以下に示す方法によって求めた。

- 1) 先ず 3.2 で示した方法によって辺長変化から力源の位置と力源の強度 K を求める。
- 2) 次に 1) で求められた力源による基準点 (SEV) の変位を茂木モデルにより計算する。
- 3) GPS 測量の結果から得られている各測点の座標変化は、基準点 (SEV) の座標を固定して解いた結果であるので、2) で求められた基準点の変位を加え、基準点を固定したことによる誤差を補正する。

得られた結果を Fig. 4 に示した。最も変位の大きい地点は島原半島東南東の布津であり、西北西へ 3 年間で約 10cm 変位している。基準点 (SEV) も西南西へ約 7 cm 変位している。

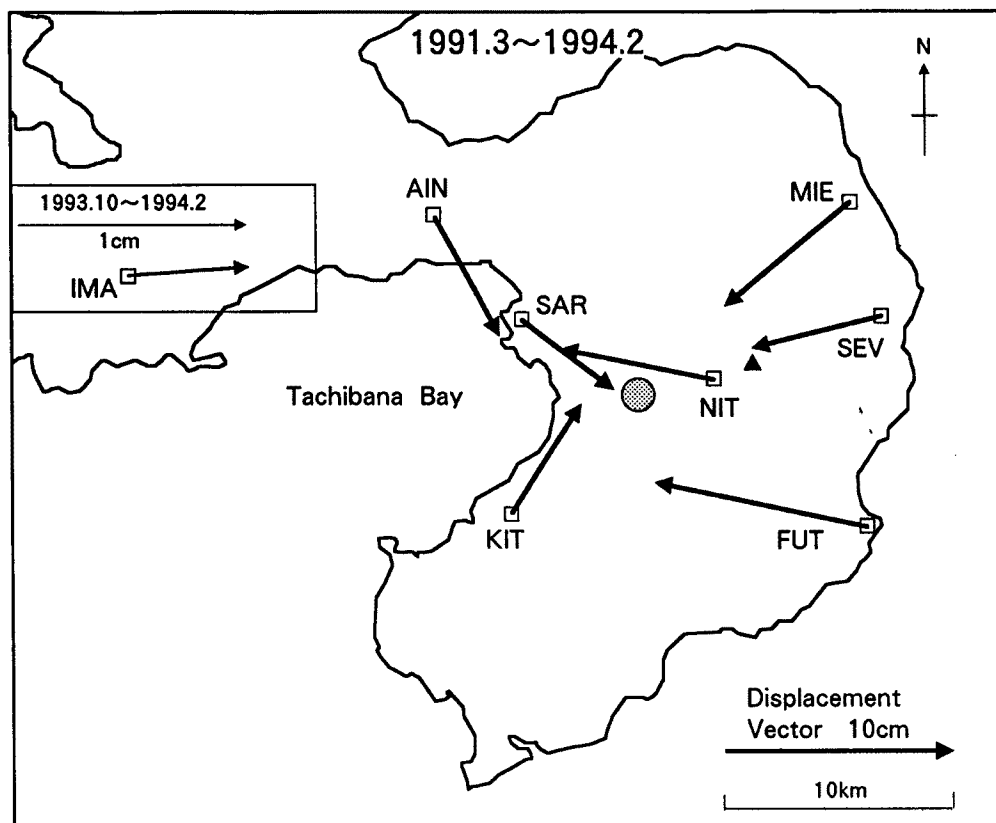


Fig. 4 Horizontal displacement vectors and calculated position of main pressure source (shaded circle).

変位ベクトルの先端は 3. 2 で求めた力源の方向に向いており、活動火口の直下や橋湾には向いていない。

4. 考察とまとめ

4. 1 地盤変動量と溶岩噴出量

島原半島の面積歪の時間的変化を示す Fig. 1 によれば、島原半島は少なくとも 1991 年 1 月の時点では膨張状態であったことがわかるが、これは水準測量結果とも符合している。1991 年 3 月に島原半島西海岸の水準路線のうち、北半分の水準測量が国土地理院によって実施された。結果を 1990 年 11 月と比較すると各水準点が隆起していた^{8), 9)}。即ち、この時期の島原半島は、山頂部での噴煙活動により噴出部の放出があったものの、地下深部からのマグマの供給はそれを上回っていたため地殻は隆起、膨張状態にあったものと考えられる。

島原半島が収縮状態に転じてからも、GPS 測量結果は水準測量結果と定性的には良い相関を示している。Fig. 5 に、水準測量結果から得られる地表面の変形体積⁸⁾、GPS 測量から得られる面積歪および溶岩の噴出量の関係を示す。水準測量と GPS 測量の実施時期は異なるので溶岩の噴出量はそれぞれの測量期間に換算して示した。地表面の変形体積は、圧力源の位置を水準測量結果から得られる圧力源の平均的な位置に固定し、茂木モデルを用いて西海岸路線の変動量から地表面の変形体積を求めたものである（文献 8 参照）。

図は、溶岩噴出量が $10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ 以上の場合に地盤は沈降収縮し、溶岩噴出量が $10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ 程度に減少すると地盤変動が停滞することを示している。この図から、

- 1) 島原半島の地盤変動はマグマの供給と溶岩噴出によるものであること、
- 2) 地下深部からのマグマの供給量に変化がなければ、溶岩噴出量が $10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ 程度以下では地殻は変動停滞あるいは隆起膨張状態となることが結論される。

水準測量結果を解析し、石原 (1994)¹¹⁾ は溶岩噴出量が $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{月}$ を下回るとマグマの蓄積が始まり地盤は隆起に転じるとしているが、GPS 測量による面積歪の時間変化からも同様の結論が得られた。今後、溶岩噴出量が $10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ 程度以下となっても地殻変動が停滞あるいは隆起膨張せず、沈降収縮を続ける場合は、深部からのマグマの供給率が低下したと判断される。

4. 2 力源の位置

求められた力源による地殻変動は 4. 1 で述べたように溶岩噴出量と良い相関を示すことから、この力源をマグマ溜まりと見なすことが出来る。

気象庁発表の震源分布¹⁰⁾ に力源の位置を加えたもの Fig. 6 に示した。力源は地震の発生していない領域にあり、マグマ溜まりでは地震は発生し難いであろうという考えと矛盾しない。地震の発生が橋湾から始まり雲仙岳直下へ至った経緯から、マグマ溜まりは橋湾直下にあると考えるのが自然ではあるが、現在の地盤変動から見る限りでは、力源（マグマ溜まり）は Fig. 4 にも示されているように橋湾ではなく、島原半島の西部にあると結論せざるを得ない。地盤の沈降・収縮をもたらす力源が島原半島西方の橋湾にあるとすれば、島原半島西海岸の測点（AIN, SAR, KIT）の変位ベクトルは西向き成分を持たなければならないが、変位ベクトルは東向きである。

このように、地盤変動の力源が橋湾には求められない原因としては、

- 1) 元来橋湾にはマグマ溜まりは存在していない
 - 2) 橋湾にもマグマ溜まりが存在していたとしても、現在の程度の溶岩噴出物量では島原半島西部のマグマ溜まりの収縮だけにとどまり橋湾直下のマグマ溜まりまで影響がでない
- が考えられる。1), 2) のいずれであるかは橋湾周辺での連続的な地盤変動観測と橋湾についての分解能の高い構造探査により明らかにされる。

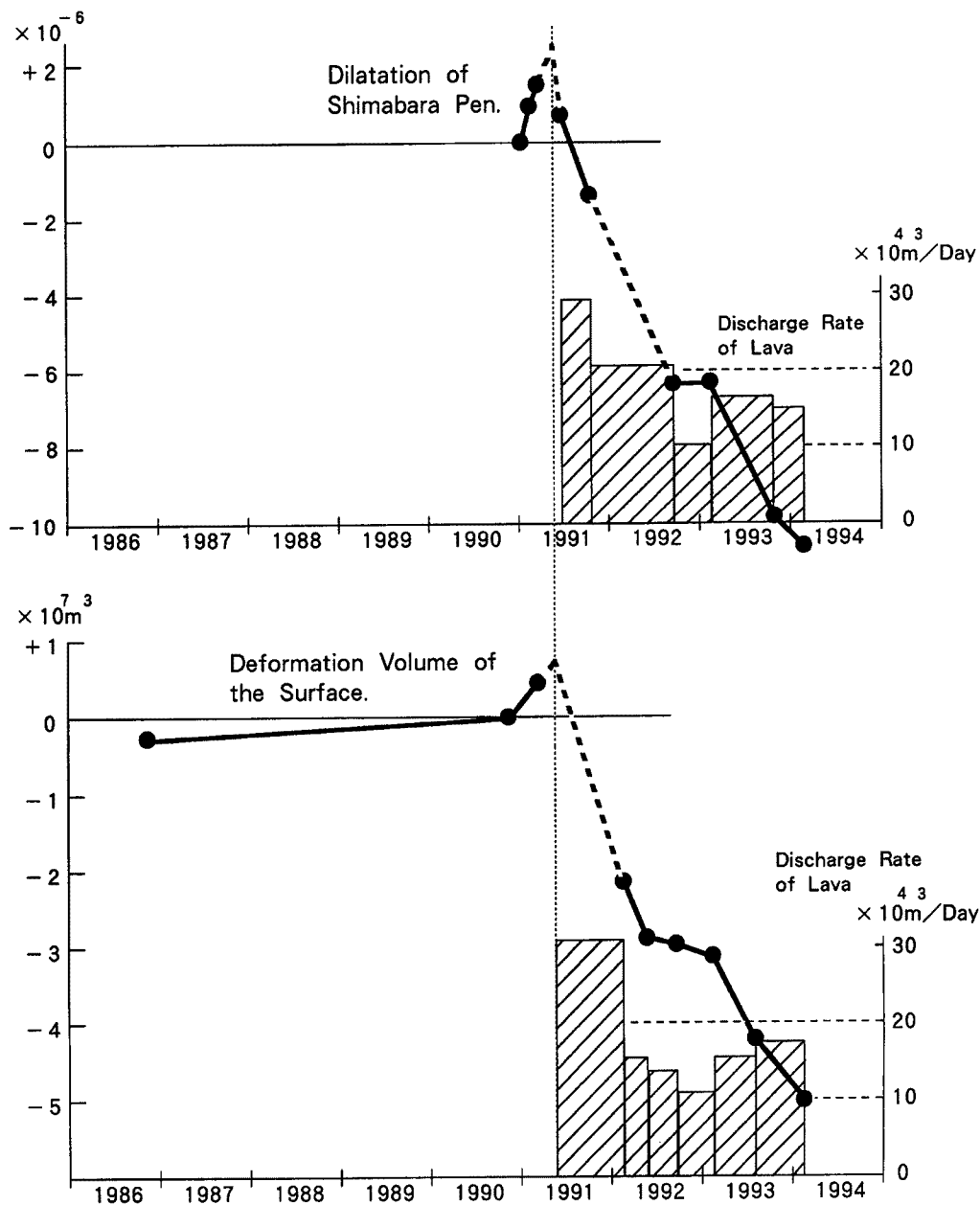


Fig. 5 Upper figure shows the relation between the dilatation of Shimabara Peninsula and the lava discharge rate of Unzen volcano. Lower figure shows the relation between the deformation volume of the surface of the ground⁸⁾ and the lava discharge rate of Unzen volcano.

4.3 まとめ

1991年1月～1994年2月の間の島原半島におけるGPS測量の結果次の点が明らかになった。

1) 島原半島の地盤変動量は溶岩の噴出量と良い相関を示すことから地盤変動は、マグマの供給と溶岩噴出によるものである。

2) 溶岩の噴出量が $10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ 程度で地盤変動が停滞し、供給量と平衡状態になることがGPS測量結果からも結論される。溶岩噴出量が $10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ 程度以下となっても地殻変動が沈降収縮状態の場合は、深部から

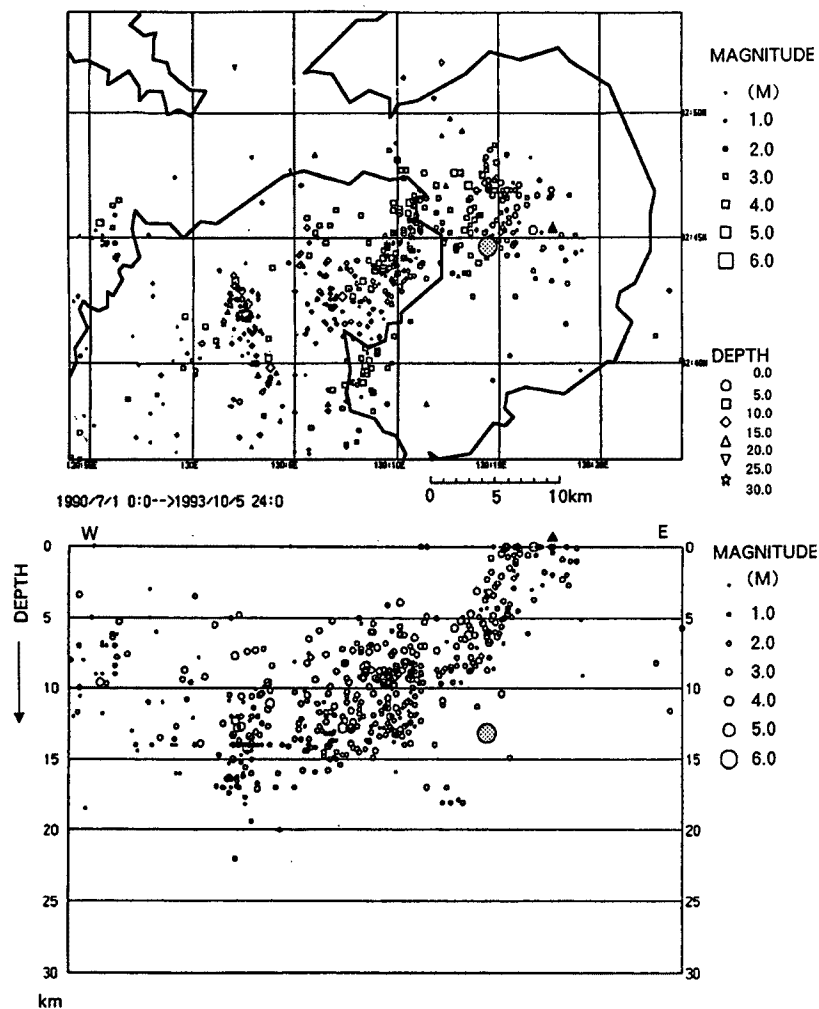


Fig. 6 Focal distribution (by JMA) and calculated position of main pressure source.

のマグマ供給量が低下したと判断される。

3) GPS 測量の結果から、現在の島原半島の地盤変動をもたらす主要力源は橘湾ではなく、活動火口の西南西約 5 km の位置にあり、深さは 10 km 程度の地殻内浅部と考えられる。この力源の収縮により、島原半島内では力源方向に最大で 10 cm 程度の水平変位が発生している。力源の状態変化を反映している地殻変動と溶岩噴出量が良い相関を示すことから、この力源をマグマ溜まりと見なすことが出来る。

謝 辞

本研究は次の方々のご指導とご協力により行うことが出来た。

加茂幸介京都大学名誉教授(元桜島火山観測所長)からは本研究の計画立案から全般にわたってご指導いただきました。桜島火山観測所石原和弘助教授からは、観測点の設置および結果の解析に関してご助力と助言をいただきました。桜島火山観測所江頭庸夫氏は観測点の設置と 1991 年 1 月～3 月の測量に尽力されました。桜島火山観測所高山鉄朗技官は観測点の設置に尽力されました。九州大学理学部付属島原地震火山観測所長の太田一也教授をはじめ清水 洋助教授、松尾 道氏、松島 健氏、福井理作技官の各位からは観測所における観測 (SEV 基準点) に関してご理解と格別の便宜をいただきました。雲仙ロープウェイ株式会

社，長崎県千々岩少年自然の家，島原市教育委員会，愛野町立愛野中学校，北串町立北串小学校，布津町立布津中学校，島原市立三会小学校の各位からは測点の設置と測量に際しご協力を戴きました。

ここに記して筆者一同厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所・建設省国土地理院：雲仙岳の溶岩噴出量・堆積土砂量の計測結果について，筑波研究学園記者会配布資料，1994 年 3 月 18 日
- 2) 太田一也：1990-1991 年雲仙岳噴火活動概況，地質学雑誌，第 97 巻，第 7 号，1991 年 7 月，pp.1-3.
- 3) 太田一也：1990-1992 年雲仙岳噴火活動，地質学雑誌，第 99 巻，第 10 号，1993 年 10 月，pp.835-854.
- 4) 大見士朗：別府島原地溝帯における GPS 測量一島原観測点の座標決定一，地震，1991，44，pp.263-266.
- 5) 九州大学理学部附属島原地震火山観測所・東京大学地震研究所：雲仙火山における日別溶岩噴出量の推定，火山噴火予知連絡会会報，55，1993，pp.112.
- 6) Mogi, K.: Relation between the Eruption of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surface around Them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.36, 1958, pp.99-134.
- 7) 山川宣男：内部力源による半無限弾性体の変形について，地震，1955，8，pp.84-98.
- 8) 加茂幸介・江頭庸夫・西 潔・高山鉄朗・石原和弘・小野博尉・外 輝明・迫 幹雄・山田年広・吉川 慎・森 済・鈴木敦生・木股文昭・宮島力雄・中島 勝・松島 健・内田和也・福井理作：雲仙普賢岳の噴火活動に伴う地盤変動，平成 4 年度・平成 5 年度科学研究費補助金研究成果報告書総合研究（A）「雲仙岳溶岩ドームの形成と崩落に関する総合的観測研究」（研究代表者：太田一也），1994 年，pp.38-53.
- 9) 建設省国土地理院：島原半島の地殻変動，火山噴火予知連絡会会報，50，1991，pp.57-63.
- 10) 気象庁：雲仙岳震源分布図，第 64 回火山噴火予知連絡会資料，1993 年 10 月
- 11) 石原和弘：雲仙火山の溶岩の噴出率と地盤の変動速度から推定されるマグマの供給率について，京都大学防災研究所年報，第 36 号 B-1，1993，pp.219-230.