

光波測距による雲仙普賢岳の1991-1992年噴火時の山体変動観測

齋藤英二* 須藤 茂** 曾屋龍典** 風早康平****
川辺禎久** 星住英夫*** 渡辺和明* 遠藤秀典**

SAITO Eiji, SUTO Shigeru, SOYA Tatsunori, KAZAHAYA Kohei, KAWANABE Yoshihisa, HOSHIZUMI Hideo, WATANABE Kazuaki and ENDO Hidenori (1993) Geodetic monitoring using EDM before and during the 1991-1992 lava extrusion of Fugen-dake, Unzen Volcano, Kyushu, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan.* vol.44(10), p. 639-647, 5fig., 1tab.

Abstract: Geodetic monitoring of Fugen-dake, Unzen Volcano using EDM (Electro-Optical Distance Measuring Instrument) started 10 days before the May 20 eruption and continued through 1991. The purpose of the monitoring was to define how the cone responds to magmatic processes such as intrusions and eruptions. Five reflector stations were set around the summit of Fugen-dake. Measurement were recorded from six observational stations; four on the southern side and two points on the northern side of Fugen-dake.

The first shortening of the slope distance on line T1-F2 was recorded on May 13, 1991. An abrupt increase in the rate of deformation along with sustained high level release of seismic energy, reported by Japan Meteorological Agency, prompted a prediction of lava extrusion which was announced on May 17. The rate of shortening of the slope distance was rather consistent, about 10cm/day before the May 20 eruption. The rate changed to about 6cm/day after the beginning of the lava extrusion and the rate decreased after May 27 to about 0.1cm/day. Net shortening on this line was about 130cm at the end of 1991. Since vertical angle measurements showed no evidence of subsidence, we believe that the shortening of the slope distance resulted from expansion of the summit area of the Fugen-dake cone. Calculation of horizontal deformation vectors using multiple measurement lines indicates that the deformation was caused by magma intrusion just beneath the summit of Jigoku-ato crater. The deformation area is restricted to a narrow zone centered around the summit crater of the cone. Hence, the expansion was probably caused by localized magma intrusion at a shallow level within the cone.

要 旨

雲仙, 普賢岳の噴火活動に伴う山体変動をとらえるため, 1991年2月から順次光波測距測線を設置し, 繰り返し観測を行っている。現在まで観測を継続している測線は, 普賢岳南側に6測線(このうち1測線は自動連続観測), 北側に4測線である。普賢岳南側では, 1991年5月の最初の溶

岩ドーム出現前後に最大で10cm/日の大きな山体変動をとらえた。この急激な変動は5月12~13日頃から始まったとみられ, マグマの地下浅所への貫入, 地獄跡火口からの噴出に至る過程で生じたものと推定される。急激な変動は5月末頃には約1mm/日に減速し, 1992年4月現在まで間欠的な変動が継続している。間欠的な変動とマグマの供給量等の諸現象との関係は不明瞭である。また, 複数の
Keywords: Unzen Volcano, Fugen-dake, EDM, Distance changes (contraction), Magma intrusion, Ground deformation.

*地質情報センター

**環境地質部

***地質部

****地殻熱部

測線の距離変化から概略の変動ベクトルと変動範囲を求めたところ、変動の力源はおおよそ地獄跡火山付近になること、山体変動は地獄跡火山付近でより大きいことが明らかになった。

1. はじめに

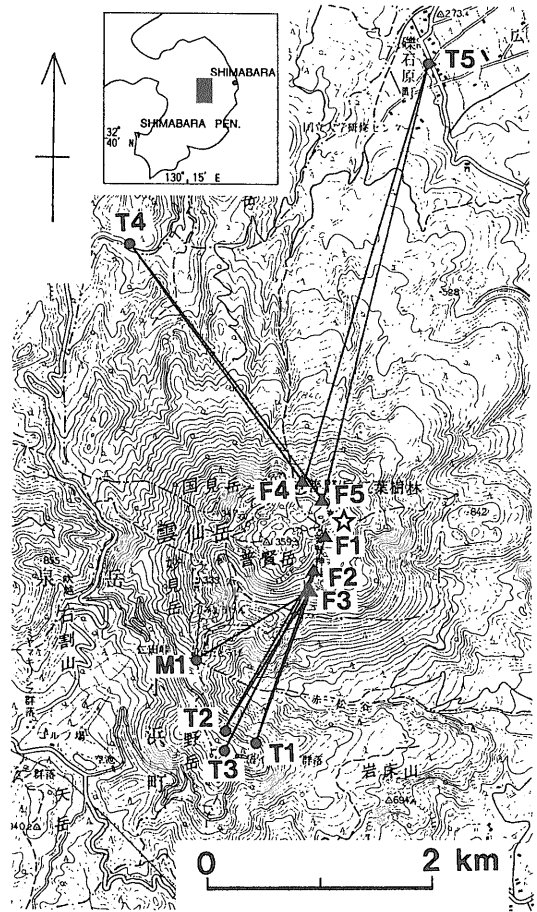
噴火活動に関連して、火山体やその周辺地域に地殻変動が生ずることは、いくつかの火山で行われた測地学的観測により知られている。しかしながら、それらの例の多くは、頻繁に噴火を繰り返す玄武岩火山の結果であり (Fiske and Kinoshita, 1969; Murray, 1990 など)、安山岩・デイサイト火山の例は少ない (Swanson *et al.*, 1985)。筆者らは、安山岩・デイサイトからなる雲仙、普賢岳で、噴火活動による山体変動をとらえるため、1991年2月から光波測距測線を順次増設して繰り返し観測を行ってきた。普賢岳南斜面において1991年5月20日の最初の溶岩ドーム出現前後にマグマ貫入、噴出に伴う顕著な変動をとらえた。観測初期の経過の概略は既に報告したが (斎藤ほか 1991)、普賢岳の噴火活動は、その後も溶岩の噴出と崩落を繰り返しながら続いており、活動の推移を見まもる意味において山体変動観測がより注目されるようになった。筆者等は、1991年10月に距離測定を自動化した新測線を設置して観測密度を向上させた。さらに、1992年1月には、普賢岳北側にも測線を設け、南北両側からの観測体制を整えた。本報告では、5月のドーム出現以降1992年4月20日までの各測線の測定結果について中間報告する。

2. 観測網の概要および測定方法

光波測距観測網の位置を第1図に示した。各測点の設置年月日、観測方法等は第1表の通りであり、1991年2月から1992年4月までに11測点 (観測点6地点、反射鏡点5地点) を設置した。このうち最初に設置した F1 反射鏡点は、屏風岩火山および地獄跡火山からの噴出物により埋積または破損され、3月15、16日の2回の測定値を得たのみで測定不能となった。

反射鏡点は、F2では石突き部を露岩に固定した三脚上に反射鏡を設置し、F2以外では露岩上に直接反射鏡を固定した。露岩との固定にはモルタルを使用した。

反射鏡はすべてプリズム定数0mmのコーナーキューブ型を使用した。反射鏡数は、F2では測定開始当初は2素子であったが、火山灰や火山ガス等による反射光の減衰時でも測定できるよう6素子に増設した。F3は6素子、F4、F5は、それぞれ T4 方向に3素子、T5 方向に6素子とした。観測点は、T3を除いてすべて舗装道路上や駐車場または



第1図 光波測距測線の位置図。星印は溶岩ドームが出現した地獄跡火山

国土地理院発行の5万分の1地形図「島原」を使用

Fig. 1 Geodetic network used to monitor the deformation of Fugen-dake, Unzen volcano.

Solid circle: Instrument station; Solid triangle: Reflector stations; Star: Jigoku-ato crater, from where the lava started to extrude on May 20, 1991.

道路に面したコンクリート被覆上に金属錘を打って定点とした。T3は地面にコンクリートで固定された堅牢な鉄製脚の中心を測点とした。

距離測定は、器械が固定されている T3以外では器械高を1.5mに統一し、その中心から反射鏡までの斜距離を測定した。気象補正のための気温と気圧の測定は、すべて観測点のみで行った。また、本研究では斜距離の相対的な変

第1表 観測点および反射鏡点一覧

○ EDM 手動, ◎ EDM 自動, △ 測角

Table 1 A list of monitoring stations and method of geodetic measurement.

Open circle: Manually operated EDM; Double circle: Automatic EDM; Triangle: Vertical angle measurement.

Reflector station Instrument station	F1 Feb. 9, 1991	F2 May 9, 1991	F3 Oct. 3, 1991	F4 Jan. 24, 1992	F5 Jan. 24, 1992
T1 Feb. 9, 1991	○ △	○ △	○ △		
T2 May 23, 1991		○ △	○ △		
T3 Oct. 3, 1991		◎			
T4 Jan. 24, 1992				○ △	○ △
T5 Jan. 24, 1991				○ △	○ △
M1 Oct. 3, 1991			○ △		

化をとらえているため、水平距離への変換や測地的補正は行っていない。

T3-F2測線は観測機器を常設した自動測定測線であり、10分間隔で測定している。測定された斜距離、気温および気圧のデータは、パーソナルコンピュータに一時蓄えられ、電話回線を通じて筑波の地質調査所に送られる。解析には気温の鉛直勾配の小さい日の出、日の入り前後の時間帯(6~8時, 17~19時)の測定データのみを用いた。

光波測距儀は、T1, T2, T4, T5 および M1からの隔測測定では ジオジメータ422LR, トプコン GTS5, 測機舎 SET3およびウイルド DI20を使用した。このうち、前3機種は測角機能も有するトータルステーションである。T3からの自動測定にはジオジメータ6000型を用いた。公称測距精度はそれぞれ ±(5mm+5ppm), ±(3mm+2ppm), ±(3mm+2ppm), ±(3mm+1ppm), ±(5mm+1ppm)である。なお、使用機器の交換に際しては、ほぼ同時刻同条件で測定を行い、機種交換の影響のないことを確認した。

鉛直方向の大きな変動の有無を監視するため、T1, T2, M1では毎回、T4, T5では間欠的に反射鏡に対する鉛直角の測定を行っている。なお、鉛直角の最小読み取り角は、各機種により2~5秒の違いがある。鉛直角の5秒の変化は、T1-F2間の高低差に約4cmに相当する。また、

気象条件により、光波測距は可能でも視通が悪く、目標が必ずしも明瞭に捉えられていない場合も多く、鉛直方向の10cm以下の変動の議論は困難である。

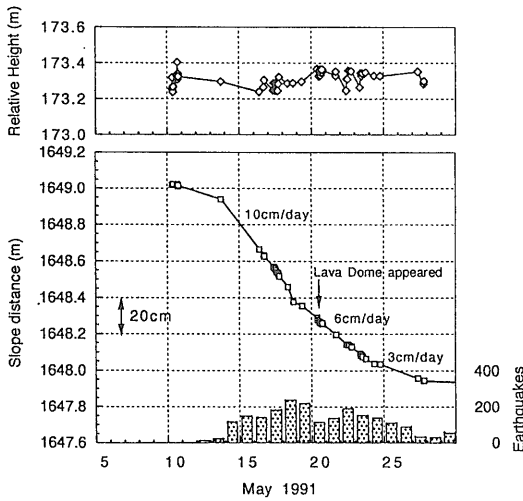
3. 測定結果

3-1 1991年5月の溶岩噴出開始時前後の変動

第2図に1991年5月の T1-F2の斜距離変化を示した。T1-F2の第1回の測定は5月10日に行った。8時32分~10時43分および16時37分~18時43分の測定結果から、測距精度を上回る有意な変動がみられないことを確認した。しかしながら、その後5月13日の測定で約7cm, 16日にはさらに30数 cmの斜距離短縮を観測した。約10cm/日の急激な斜距離の変化は溶岩ドームの出現が確認された20日頃まで続き、その後の変動速度は24日まで約6cm/日、27日まで約3cm/日に漸減した。5月10日から溶岩ドーム出現を挟む27日までの斜距離短縮は約110cmとなった。この間の鉛直方向の変化は、前述のように測距精度に比べて鉛直方向の測定精度が悪いが、有意な変化はみられなかった(第2図上)

3-2 1991年6月以降の変動

T1-F2および順次増設した測線の斜距離変化を第3図に示した。T1-F2の距離変化は、6月に入ると約1mm/日に減速した。この値は5月24日から27日のその約30分の



第2図 1991年5月のT1-F2間の斜距離(中)および高低差(上)の変化と雲仙岳測候所・気象庁地震火山業務課(1992)による日別地震回数(下)。

Fig. 2 Change in the slope distance (middle) and relative height (upper) between T1-F2 of May 1991 and histogram (lower) of the daily number of small earthquakes. Earthquake data are from Unzen Weather Station and Japan Meteorological Agency (1992).

1に相当する。また、5月22日にT1の西北西約300mの地点に設置したT2からの観測結果も同様の値と傾向を示した。

8月と9月は、反射鏡上部に簡易に取り付けた降灰保護用の覆いが、風により反射鏡前面に移動したために欠測が多くなった。しかしながら、測定値は第3図に示したように大局的には、7月の約1mm/日の平均短縮速度の直線上にあり、9月末頃までその傾向が続いたとみられる。

10月初旬から下旬にかけては、約20日間に10mm以下の変化のみで、距離短縮に鈍化傾向が現われた。10月3日より測定を開始したF3の測定結果にも有意な変動はみられなかった。

10月下旬から1月下旬は、T1-F2, T2-F2共に約1mm/日, T1-F3, T2-F3, M1-F3で0.3~0.7mm/日の短縮傾向を示した。10月21日より測定を開始したT3-F2の自動測距結果も、一部に原因不明のばらつきがあるが、T1-F2, T2-F2の結果とおおむね同様の傾向を示した。

1992年1月末より4月中旬までは、T1-F2など普賢岳南側の測線の距離変化は鈍化傾向にある。

1992年1月末から普賢岳北側のT4, T5からF4, F5の測定を開始したが、1月の測定後まもなく反射鏡が故障し2月初旬に修理を行っているため、1月と2月のデータの比較は厳密にできない。したがって、反射鏡修復後の2月中旬以降のデータについてのみ検討が可能である。普賢岳南側の測線に比べて測線の距離が長く、また高低差が大きいため斜距離のばらつきが大きめだが、T4-F5の測線で1mm/日程度の縮み傾向がみられる。

4. 考察

4-1 変動の方向と量

T1とT2の2方向からの測定により、T1とT2に対するF2の相対的な変動ベクトルが得られる。T1-F2, T2-F2の距離変化量をそれぞれ v_1, v_2 , F2からT1とT2の間の挟角を θ とすると、T2方向から変動方向までの角 δ および変動量 v は、

$$\tan \delta = \frac{\cos \theta - \gamma}{\sin \theta} \quad \left(\text{ただし, } \gamma = \frac{v_1}{v_2} \right)$$

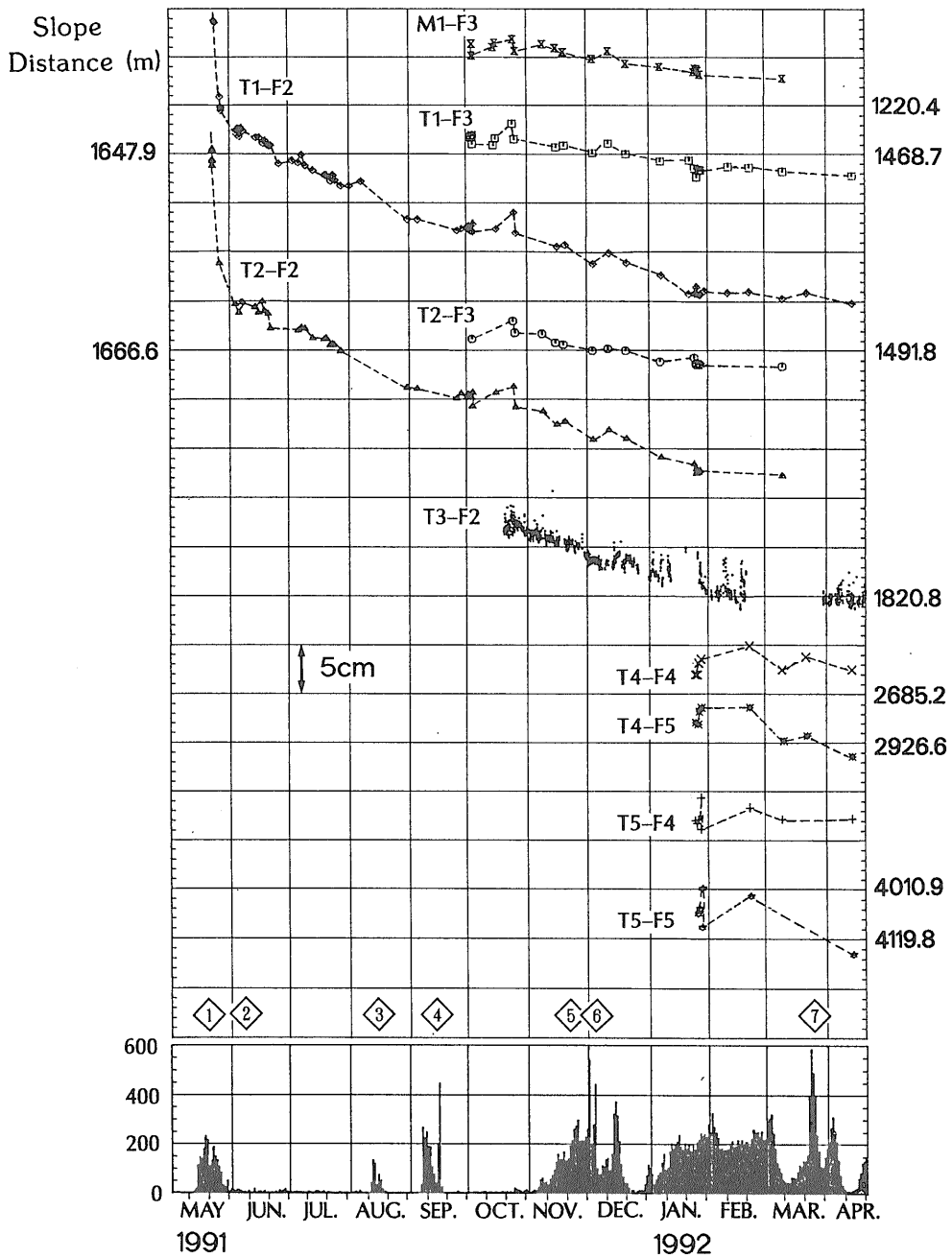
$$v = \frac{v_2}{\cos \delta}$$

で求められる。

F3についてはさらにM1からの測定値も使い、また、F4, F5についてはT4とT5からの測定値を用いて同様の手法で変動ベクトルが得られる。第4図は、上式に方位の要素を加えて座標変化として表わした結果である。変動ベクトルには気象条件の違いなどのわずかな測量誤差が大きく影響するため、同一日の測定で、複数の観測点からの測定時間差がより小さいデータのみを解析に用いた。

F2の変動ベクトルは、大局的には南南西から南西を示し、1991年5月22日から1992年3月10日までに38cmの変動量が算出された(第4図c)。この変動方向は地獄跡火口からT1, T2の方向とおおむね等しい。F3についてはT1, T2およびT1, M1の2組から求めた変動ベクトルを示す。(第4図d) T1とT2から求めた変動ベクトルはばらつきが大きい。これはこの間の変動量が小さいことと挟角が小さいことに由来するものと考えられる。T1とM1の測定値から求めた変動ベクトルは、挟角が大きいためより明瞭に求められた。変動の方向はほぼ南向きであり、1991年10月4日から1992年3月10日までの変動量は約3cmである。同期間におけるF2の変動量は約8cmであった。

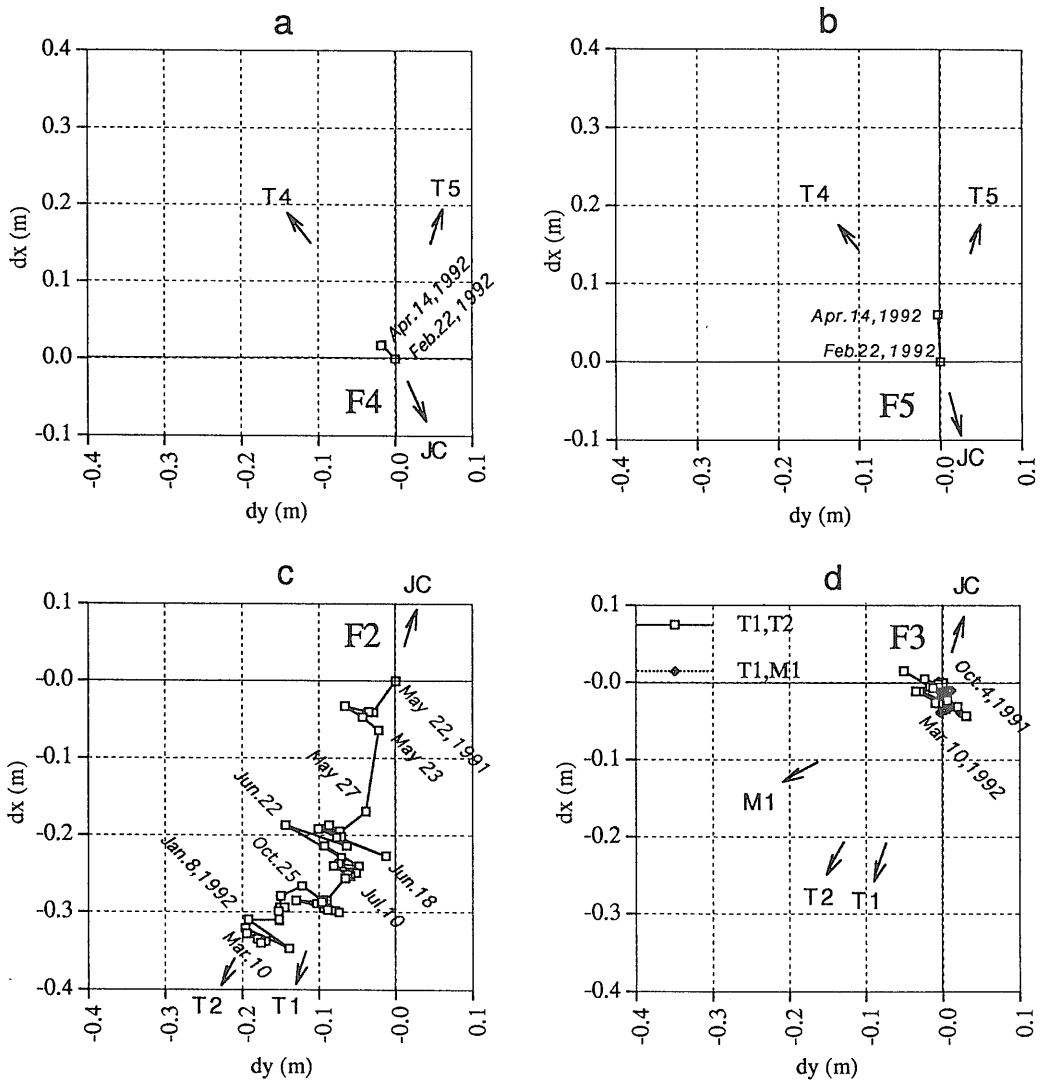
普賢岳北側では、1992年2月22日から4月14日までにF4が北西に約2cm, F5が北に約6cm移動したことを示す結果を得た(第4図a, b)。



第3図 1991年5月末以降の各測線の斜距離の変化(上)と雲仙岳測候所・気象庁地震火山業務課(1992)による日別地震回数(下)。

図中の菱形と数字は主なドームの出現日とドームの通し番号を示す。

Fig. 3 Changes in the slope distances for each EDM survey line and the histogram(lower) of the daily number of small earthquakes. Earthquake data are from Unzen Weather Station and Japan Meteorological Agency(1992).



第4図 F2, F3, F4およびF5の変動ベクトル。

変動ベクトルは、F2はT1とT2の測定結果から、F3はT1とT2およびT1とM1から、F4, F5はT4とT5からそれぞれを計算した。JCは地獄跡火口の方角

Fig. 4 Horizontal deformation vectors of F2, F3, F4 and F5 reflector stations.

The vectors were calculated using two slope distances; T1-F2 and T2-F2 for F2 vector, T1-F3, T2-F3 and M1-F3 for F3 vector, T4-F4 and T5-F4 for F4 vector and T4-F5 and T5-F5 for F5 vector, respectively. JC: The direction to the Jigoku-ato Crater.

以上の結果から普賢岳山頂部の変動は、地獄跡火口附近からおおむね放射状に外側に向かうことを示していると判断される。今後、変化量の小さい、または測定期間の短い測線の測定を長期間継続し、再度解析を行って詳細な変動傾向を明らかにする必要がある。

4-2 山体変動の範囲

地獄跡火口から火口南側の F2までの水平距離は約400m、F3までは約580mである。同様に火口北側の F5は約250m、F4は約450mに位置する。1992年2月～4月のデータを比較すると、変動量は火口に近い測点ほど明らかに大きい。この傾向は空中写真解析により山頂部の変位計測を行った安田ほか(1991)の結果とも調和的である。本研究に比べて測線が長くまた山頂域に測点がない他の辺長測量の結果(小牧ほか, 1992, 竹田ほか, 1992)に顕著な変動がとらえられていないことも、一連の山体変動が山頂近傍の比較的狭い範囲で生じたことを示す。

4-3 変動の時期

山体の変動は現在(1992年5月)も継続して観測されている。しかしながら普賢岳の山体の急激な変動は、今回の報告する期間内においては、溶岩が地表に噴出を開始した前後の限られた時期にのみ認められた。

急激な山体変動の開始時期は以下の様に推定される。すなわち、1991年5月13日に初めて検出された T1-F2間の斜距離の短縮は、その速度が約10cm/日のまま5月19日まで続いたことが確認されている。一方、5月10日の観測値は、T1-F2間の斜距離は誤差の範囲程度の変化しか示していない。ここで約10cm/日の短縮速度を5月13日の測定時以前に延長し、5月10日の斜距離と同じになる点を求めると、その時期は5月12日～13日にかけてとなる。この時期は、それまでほとんど観測されていなかった火口直下付近の地震が多発し始めた時期と一致する(第2, 3図)(雲仙岳測候所・気象庁地震火山業務課, 1992; 九州大学理学部付属島原地震火山観測所・国立大学火山観測機関・合同観測班, 1991)。この2つの現象は、後に述べるように密接な関係があるものと考えられる。以上のことから、山体の急激な変動の開始は、光波測距データが得られなかった時期ではあるが、5月12～13日にかけてであったものと推定される。

溶岩の噴出が目視により確認された5月20日には、T1-F2間の斜距離の短縮速度は約6cm/日程度に落ちており、少なくとも5月23日まではこの速度が継続した。5月13日～19日の間の10cm/日から5月20日～23日の6cm/日へと短縮速度が変化したのは5月19日夜となり、後に述

べるようにこの頃に溶岩が噴出を開始した可能性がある。

山体の急激な変化が終了した時期は、視界不良による欠測日が多いため特定することは、困難である。5月27日以降は、T1-F2間の斜距離の短縮速度が約1mm/日と、それ以前に比べて著しく小さくなったことから、急激な変動は5月27日か、それより少し前に止まったものと判断される。この時期は、それまで多発していた山頂直下の地震の数が急減した時期に相当する。

4.4 変動の要因

既に記したように、今回行った雲仙普賢岳の山体変動観測により、1991年5月20日の溶岩噴出開始の前後それぞれ1週間に、普賢岳南斜面の山体が南方へ急激に押出されたことが明らかになった。また、その後も継続された観測により、変動速度は著しく落ちたことが確かめられたものの、短縮傾向は変わらずに続いていること、山体の北側も外側に押出されていること、変動の範囲は地獄跡火口を中心とする狭い範囲に限られていることなどが確認された。

一方、山体の変動については次の様な事実も明らかにされた。すなわち、普賢岳山頂部の空中写真解析の結果、1991年5月の溶岩噴出開始時期を挟んで、地獄跡火口を含む東西もしくは北西-南東方向に伸びた狭い範囲で陥没が生じ、それより外側の地域では山体は南北方向に膨張したことが認められた。このグラ-ベン状の落込みの東端は、比較できる空中写真がないので不明であるが、西方の変動範囲は地獄跡火口から400-500mまでしか及んでいないことが明らかにされている(安田ほか, 1991)。また、1991年5月18日に国土地理院によって撮影された空中写真には、地獄跡火口の南北両側に、東-西もしくは北西-南東方向に延びる割れ目が明瞭に認められる(国土地理院, 1991)。

さらに5月20日前後のそれぞれ1週間には、地獄跡火口直下で、それまでほとんど観測されていなかった地震が多数観測され、その後は地震の数は少ない状態が続いた(雲仙岳測候所・気象庁地震火山業務課, 1992; 九州大学理学部付属島原地震火山観測所・国立大学火山観測機関・合同観測班, 1991)。この一連の地震の震源の深さは、地震計の設置数が多い九州大学理学部付属島原地震火山観測所・国立大学火山観測機関・合同観測班(1991)によれば、最も深いものでも海拔0m付近かそれより浅く、太田(1991)によれば5月12日の微小地震の震源の深さは火口直下800m付近であったとされている。

以上の観測データを総合的に判断すると、1991年5月の

普賢岳山体の急激な変動の要因は以下のように考えられる。すなわち、地獄跡火口直下の海拔0ないし数100m地点からマグマが上昇を開始した。上昇は5月12~13日にかけて始まり、火道の形成による山体の破壊活動を伴い山体は押し広げられるように変動した。5月18日には地表の断裂が確認されており、当時の模式的な断面を第5図に示した。第5図中の?印付近までのマグマの上昇は、岩石の破壊を伴わなかったものと考えられるが、その詳細は明らかでない。なお、以上のモデルは、今後震源の深さがより精密に決定された段階で再度考察を加える予定である。

5月20日に確認された溶岩の地表への噴出開始後も、約1週間にわたって急激な変動が継続したことについては、①その間も火道の拡大を続けた、または②火道拡大は5月20日で終了したが、山体変動が終了するまで時間差があったことが考えられる。その後、5月20日から23日にかけては噴出した溶岩の写真が連日撮影されており、その体積の見積を行うことが可能である。それによれば、この間の溶岩の噴出率はほぼ8~9万 m³/日であった。その後、5月25日~27日にかけては20~25m³/日へと急激に増大していた(宝田ほか, 1993)。一方 F2の移動速度は、5月23日頃を境にむしろ下降気味にある。したがって、溶岩噴出率の増大のみで普賢岳南斜面のこの間の変動を説明することは困難なように思われる。

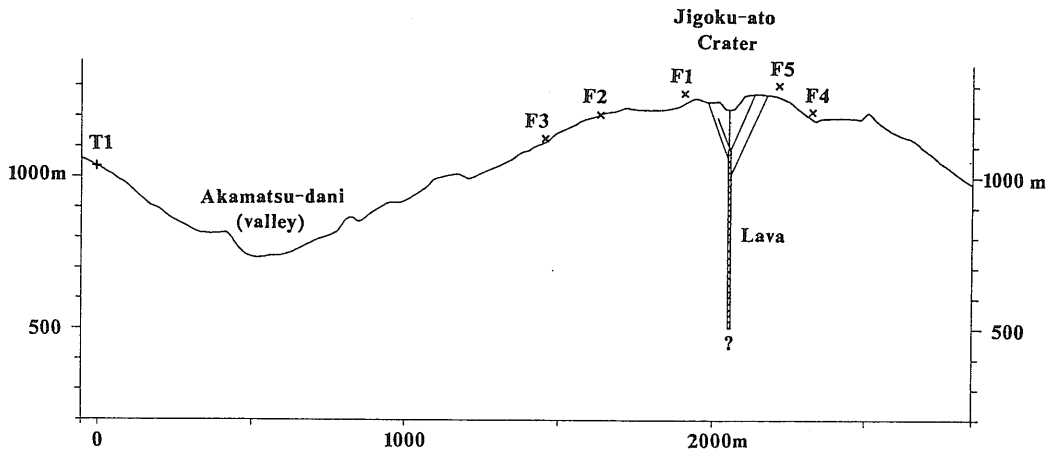
1991年5月27日以降1992年4月までの間に、変動速度が変化することが何度か認められたが、それらの変化時と他の事象(地震の発生回数や新たな噴火口の形成など)との間の関係は明瞭でない。

そのほか、火道を挟んだ南北両側の変動の過程や速度が必ずしも同じとは限らないことなど、不確定な要素も多く、より詳細な議論はできない。

5. まとめ

雲仙、普賢岳の噴火活動に伴う山体変動をとらえるため、光波測距測線を設置して繰り返し観測を行った結果、以下の成果が得られた。

- (1) 1991年5月に普賢岳南斜面の測点においてとらえられた最大約10cm/日の急激な変動は、地獄跡火口直下の海拔0ないし数100m地点から上昇を開始したマグマによって火道の形成が行われた結果生じ、その変動の開始時期は5月12~13日にかけてと推定される。
- (2) 1991年5月末以降の普賢岳南斜面の測点の距離短縮は、おおむね約1mm/日に減速したが、10月と1992年2月の短縮速度の減速期間を含む間欠的な変動と溶岩の噴出率等の諸現象との関係は明瞭でない。
- (3) 各測線ごとに得られる距離変化量から反射鏡点の変動ベクトルを算出した結果、地獄跡火口付近を力源とする結果が得られた。



第5図 測線 T1-F2を含む地形断面と1991年5月18日の模式断面。

+ : 器械点, × : 反射鏡点, F2以外の反射鏡の位置はこの断面上に投影したもの。

Fig. 5 Schematic cross section through T1, F2 and Jigoku-ato crater on May 18, 1991.

Plus: Instrument stations, Cross: Reflector stations. Locality of the station excluding F2 were projected on this section.

(4)地獄跡火口からの距離の異なる複数の反射鏡点の変動速度の違いから、変動の範囲が普賢岳山頂部の比較的狭い範囲であることが確かめられた。

謝辞：本観測に当って、気象庁には日別地震回数資料を、雲仙岳測候所には火山の活動状況の情報を頂いた。地質調査所地質部の山元孝広技官、北海道支所の宝田晋治技官および地殻化学部の宇都浩三技官には現地での作業を手伝って頂いた。手動観測の一部は、島原市の上田測量株式会社、長崎市の扇精光株式会社によった。自動連続観測システムの構築は、科学技術庁振興調整費によった。記して謝意を表する。

文 献

- Fiske, R.S. and Kinoshita, W.T. (1969) Inflation of Kilauea Volcano prior to its 1967-1968 eruption. *Science*, vol.165, p. 341-349.
- 国土地理院 (1991) 1:5,000火山基本図「雲仙岳」の一部 (平成3年応急修正)。
- 小牧和雄・菊池新市・河和 宏 (1992) 雲仙岳における GPS 連続観測。地球惑星科学関連学会 1992年合同大会予稿集, p.134
- 九州大学理学部付属島原地震火山観測所・国立大学火山観測機関・合同観測班 (1991) 雲仙岳火山活動状況 (1991年2月~5月)。火山噴火予知連絡会会報, no.50, p.46-56.
- Murray, J.B. (1990) High-level magma transport at Mount Etna volcano, as deduced from ground deformation measurements. *Magma transport and Storage*. (Ryan, M.P. ed., 1990), John Wiley & Sons Ltd, p.357-383.
- 太田一也・松尾道・清水 洋・馬越孝道 (1991) 1990-91年雲仙噴火活動概況。火山学会 1991年秋期大会講演 予稿集, p.34
- 斎藤英二・渡辺和明・須藤 茂・星住英夫・遠藤秀典 (1991) 雲仙, 普賢岳の光波測距 (速報)。地質ニュース, no.443, p.67.
- (1991) 光波測距による普賢岳の山体変動の測定。リモートセンシング学会誌, vol.11, no.3, p.57-60.
- (1991) 雲仙火山1990-1991年噴火に伴う山体変動 (光波測距)。火山学会1991年秋期大会講演予稿集, P.20
- Swanson, D.A., Casadevall, T.J., Dzurisin, D., Holcomb, R.T., Newhall, C.G., Malone, S.D. and Weaver, C.S. (1985) Forecasts and predictions of eruptive activity at Mount St. Helens, USA: 1975-1984. *J. Geodynamics*, 3, p. 397-423.
- 宝田晋治・風早康平・川辺禎久・阪口圭一・須藤 茂・山元孝広・曾屋龍典・気象庁雲仙岳測候所 (1993) 雲仙岳1991-1992噴火の噴出物の噴出物量と6月3日, 8日の火砕流の発生機構。地質調査所月報, vol.44, p.11-24.
- 竹田豊太郎・小山悦朗 (1992) 雲仙火山西麓における光波測距。地球惑星科学関連学会1992年合同大会予稿集, p.137
- 雲仙岳測候所・気象庁地震火山業務課 (1992) 雲仙岳の火山活動 (5)。火山噴火予知連絡会会報, no.53, p.32-36.
- 安田 聡・須藤 茂・遠藤秀典 (1991) 雲仙, 普賢岳 1990-1991噴火に伴う山体変動 (空中写真解析)。火山学会1991年 秋期大会, 1991, p. 67
- (1991) 空中写真解析による普賢岳の山体変動測定 (空中写真解析)。リモートセンシング学会誌, vol.11, no.3, p.61-64

(受付：1993年7月22日；受理：1993年9月16日)