

雲仙岳 1991-92年噴火の噴出物量と6月3日, 8日の火砕流の発生機構

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

TAKARADA Shinji, KAZAHAYA Kohei, KAWANABE Yoshihisa, SAKAGUCHI Keiichi, SUTO Shigeru, YAMAMOTO Takahiro, SOYA Tatsunori and Unzendake Weather Station, JMA (1993) Volume estimation of 1991-92 eruption of Unzen Volcano, and initiation mechanisms of pyroclastic flows on June 3 and June 8, 1991. *Bull. Geol. Surv. Japan*, Vol. 44 (1), p. 11-24, 11 fig., 2 tab.

Abstract: Volumes of lava domes, pyroclastic flow deposits, ash fall deposits and total magma discharged at Unzen Volcano, Nagasaki, western Japan from May 23, 1991 to August 10, 1992 were estimated. Using video records, pictures from helicopter and aerial photos, volumes of domes and pyroclastic flow deposits were directly estimated. In order to estimate continuous volume variations indirectly, tremor energy due to pyroclastic flows were measured using 2397 seismic wave records. We assumed that collapse volume of dome is proportional to the tremor energy associated with pyroclastic flow. Average effusion rate of magma was estimated to be $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ from May 23 to July 14, 1991. If this effusion rate of magma is nearly constant, the volume of lava domes, pyroclastic flow deposits, ash fall deposits and total magma is calculated to be $4.8 \times 10^7 \text{ m}^3$, $7.7 \times 10^7 \text{ m}^3$, $2.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ and $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ (DRE), respectively on August 10, 1992.

The volume estimated from the tremor energy jumped on June 3 and June 8, 1991 as compared with the volume of pyroclastic flow deposits measured from image data. At the same time that these gaps occurred, a horseshoe crater was formed by landslide. Thus, we concluded that landslide triggered the larger pyroclastic flows on June 3 and June 8. On June 8, explosion occurred due to sudden pressure reduction caused by landslide. This explosion and the tremor due to landslide should affect the jump of the tremor energy.

To predict the disaster area due to pyroclastic flow, the relation between the volume calculated from tremor energy and the runout distances of pyroclastic flows were analyzed.

要 旨

雲仙岳火山で1991年5月から始まった火山活動の推移を定量化するために, 溶岩ドーム・火砕流堆積物・降下火山灰の体積と, マグマの総噴出量の経時変化の見積もりを行なった。噴出物量の推定には, 映像や空中写真から求めた実測値に加えて, 連続的に地震計に記録され

ている火砕流に伴う振動波形から求めた振動エネルギーを間接的に使用した。解析の過程で, '91年6月3日16:08と8日20:06の火砕流に伴って記録された振動波形のエネルギーが実際の溶岩ドームからの崩壊量から期待できる量よりも大きいことがわかった。このことは, 6月3日と6月8日の火砕流は溶岩ドームがのっていた不安定な山体斜面の滑り落ちが引き金となって発生し, 特に6月8日の場合は減圧によって爆発が起こったという

Keywords: Unzen Volcano, 1991-92 eruption, volume estimation, tremor energy, landslide, pyroclastic flow, H/L ratio

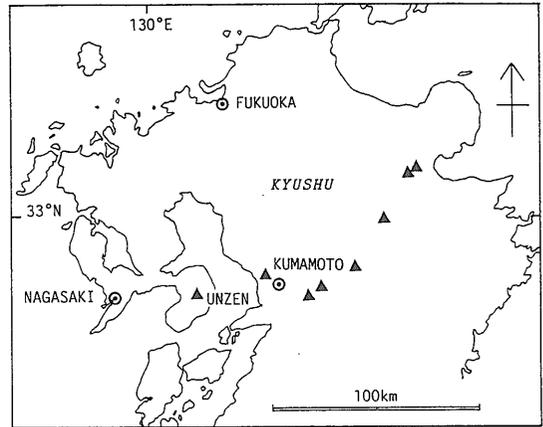
* 北海道支所
** 地殻熱部
*** 環境地質部
**** 地質部

モデルでうまく説明できる。また火砕流の流走距離を予測するために、振動エネルギーから個々の火砕流の体積を算出し、流走距離や H/L 比(比高と流走距離の比)との相関を明らかにした。

1. はじめに

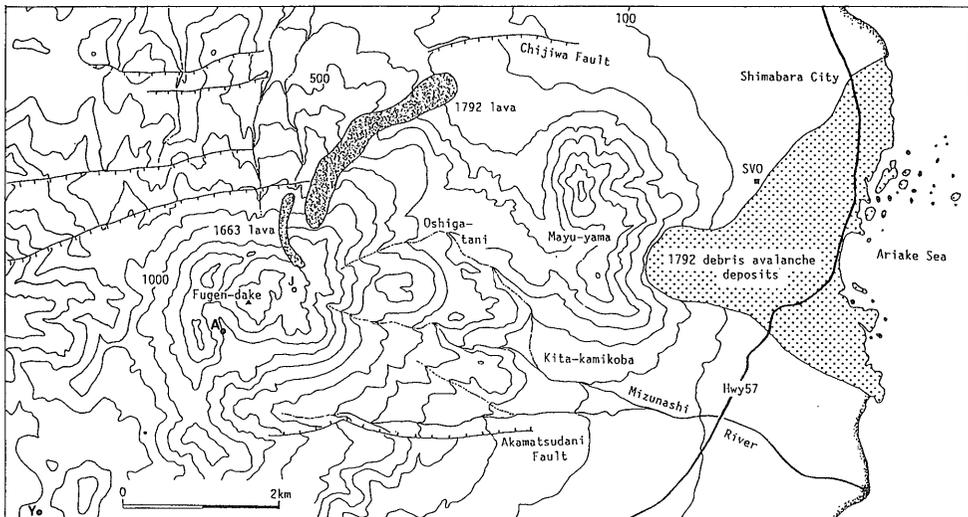
雲仙岳は、九州西部島原半島の中央部に存在する火山であり(第1図)、主に安山岩~デイサイト質の溶岩ドームおよび厚い溶岩流からなる(中田・田中, 1991)。雲仙岳は、東西方向の正断層が発達した雲仙地溝帯の中に成長している(中田・鎌田, 1988; 第2図)。主峰の普賢岳は、1663年と1792年の噴火で北東斜面に溶岩流を流出した。1792年の噴火では、東麓の眉山が崩壊して岩屑流が発生し、有明海に流れ込み津波が起こった。このとき、対岸の熊本地方の人々を合わせて15,000人の人々が亡くなった(太田, 1987; Siebert, *et al.*, 1987)。普賢岳では1990年7月4日(以下日付を7/4等と記述する)から火山性微動が始まった。'90年11/17からは、地獄跡火口(第2図のJ)と九十九島火口から水蒸気噴火が起こり、198年ぶりに噴火活動が再開した。'91年5/20には地獄跡火口からデイサイト質溶岩ドームが出現した。5/24からは、溶岩ドームの成長に伴う崩落によって、発泡度の低い本質岩片を主体とした block and ash flow タイプ(Fisher and Heiken, 1982)

の火砕流の発生が続いている。6/3 16:08の火砕流は、山麓の北上木場の集落を襲い43名の貴い命を奪った(第3図)。溶岩ドームには、出現の順番に対応して、第1ドーム~第7ドームの名称がつけられている。各々の溶岩ドームは、第1ドームから順に、'91年5/20, 6/9,



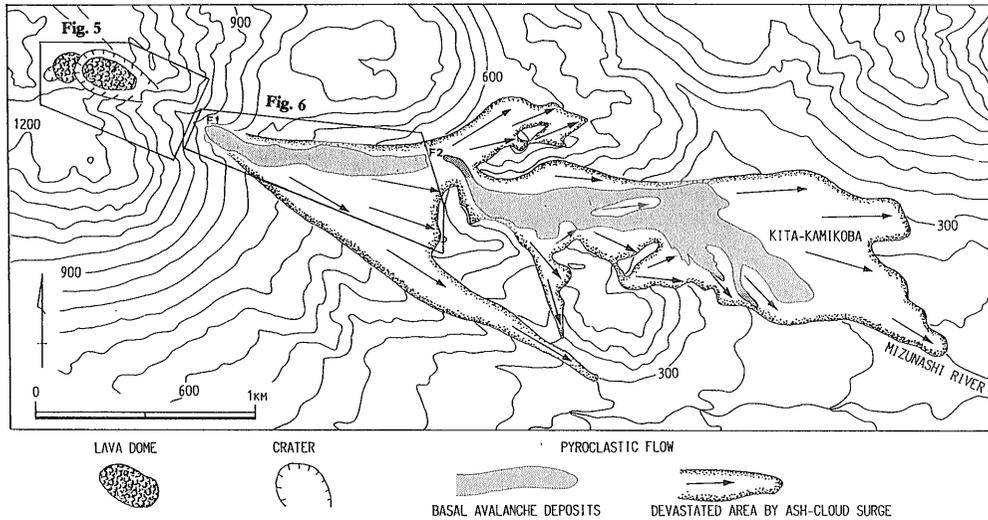
第1図 雲仙火山の位置
三角形は、別府-島原地溝帯内の後期更新世~完新世の火山を表す。

Fig. 1 Location of Unzen Volcano. Triangles are the Late Pleistocene-Holocene volcanoes in the Beppu-Shimabara graben.



第2図 雲仙火山の地形図
等高線の間隔は100m。Jは地獄跡火口。SVOは島原火山観測所。AとYは、それぞれあざみ谷と矢岳の地震計の位置を表す。

Fig. 2 Topographic map of Unzen Volcano. Contour interval is 100m. J=Jigoku-atocrater; SVO=Shimabara Volcano Observatory; A and Y=The site of seismograph at Azamidani and Yadake, respectively.



第3図 '91年6月3日の火砕流堆積物の分布

等高線の間隔は50m。水無川沿いの黒色の部分は火砕流堆積物本体の分布。その周囲のハッチで囲んだ部分は火砕サージ堆積物の分布を示す。矢印は倒木の方向を示す。F1とF2はそれぞれ第1段目と第2段目の滝を表す。溶岩ドーム周囲の直線で囲んだ部分は、第5図に示した領域を表す。F1とF2の間の直線で囲んだ部分は、第6図で示した範囲を表す。

Fig. 3 Distribution of the June 3rd pyroclastic flow deposits in 1991. Contour interval is 50 m. Dark area along Mizunashi river is the distribution of basal avalanche deposit (main part of pyroclastic flow). Hatched area is the distribution of ash cloud surge deposit. Arrows are the flow direction indicated by downed trees. F1=1st fall; F2=2nd fall. The areas shown in Fig. 5 and Fig. 6 are also expressed.

8/15, 9/17, 11/24, 12/3, '92年3/25に出現した(Ohta *et al.*, 1992)。'92年9月上旬の段階でも溶岩の流出は継続して、大規模な火砕流への警戒が続いている。今後の活動の推移を予測する上で、溶岩ドームや火砕流堆積物の体積を見積もり、地下からのマグマの供給量や噴出率の変化を把握することは重要である。

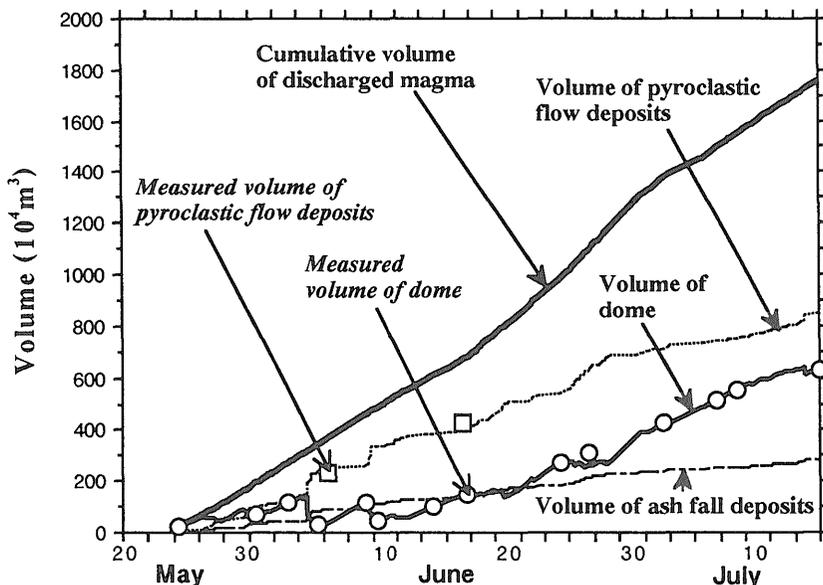
そこで我々は、映像や火砕流の振動波形の解析をもとに、雲仙岳1991-92年噴火の噴出物量の推定を行なっている(宝田ほか, 1991)。本論文では、'91年5/23~'92年8/10の溶岩ドームと火砕流堆積物、降下火山灰の体積およびマグマの総噴出量推定の手法および結果を紹介する。また、作業の過程で、6/3と6/8の火砕流に伴う振動波形のエネルギーが実際の溶岩の崩落から期待できる量よりも大きいことがわかった。このことから、6/3や6/8の火砕流が既存の山体の滑り落ちが引き金となって発生した可能性が高く、特に6/8の場合は、滑り落ちによる急激な減圧で爆発が起こったというモデルを示す。最後に、振動波形から求めた火砕流の体積と流走距離やH/L比との相関関係について示す。

2. 溶岩ドームと火砕流堆積物の体積

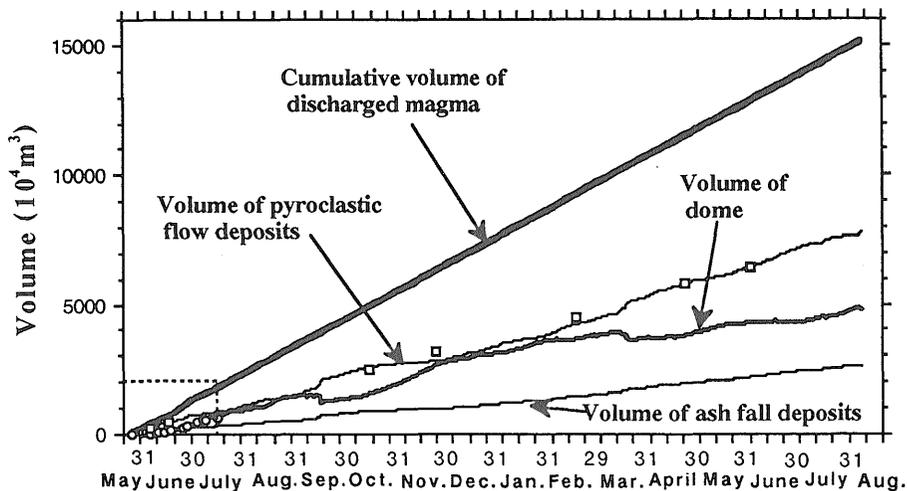
報道機関の報道映像、著者らがヘリコプターから撮影した写真や8ミリビデオ映像、空中写真をもとに、溶岩ドームと火砕流堆積物の体積の実測値を求めた(第4図a, b; 実測値○, □)。

溶岩ドームの体積の測定方法を、'91年7/8の溶岩ドームを例にとりて示す(第5図)。溶岩ドームの体積の推定のために、(1)分布を押さえ(第5図平面図)、(2)100mごとに断面図を書き(第5図A~Dの断面図)、(3)断面積を算出し、(4)断面の間隔(100m)をかけて区間ごとの体積を求め、それを積分して全体の体積とした。分布は、報道映像や、ヘリコプターで撮影した写真や8ミリビデオ映像、空中写真を用い、5000分の1の地形図に投影して求めた(第5図の5000分の1の地形図には、6/14の空中写真をもとに国土地理院が作成した雲仙岳火砕流・土石流現況図を使用した)。断面図を作成するためには、溶岩ドーム下部の既存の山体斜面の地形を推定する必要がある。第5図の細い等高線は6/3以前の既存の山体斜面の地形であり、太い等高線は6/8

(a)



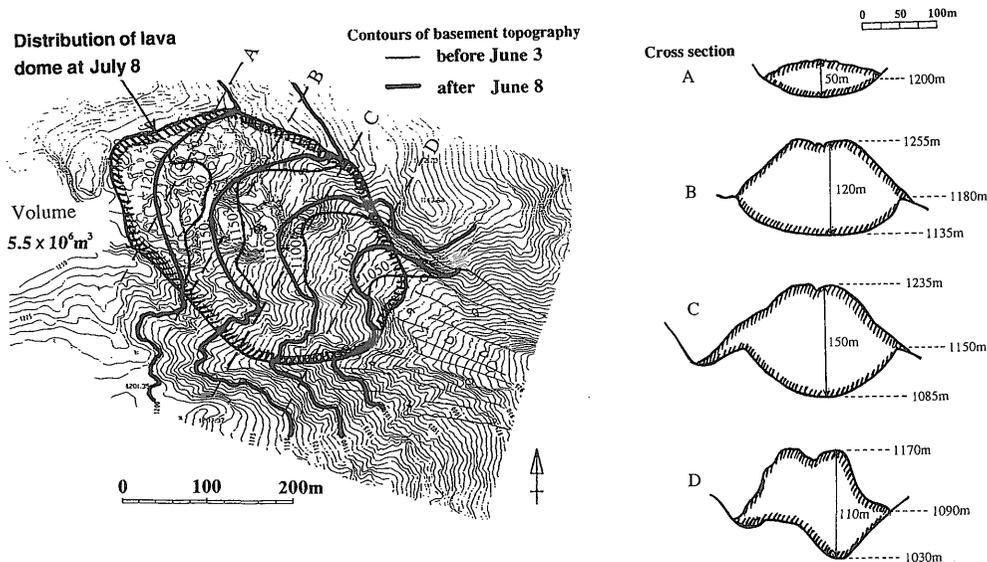
(b)



第4図 溶岩ドーム、火砕流堆積物、降下火山灰の体積およびマグマの総噴出量の時間変化

(a) '91年5/23~7/14, (b) '91年5/23~'92年8/10. ○と□は、それぞれ空中写真などを使って求めた溶岩ドームと火砕流堆積物の体積の実測値を表す。4つの線は火砕流に伴う振動波形の振動エネルギーを使って求めた各体積の変化曲線を表す。(b)の左下の長方形の枠は、(a)に示した拡大範囲を表す。

Fig. 4 Volume of lava dome, pyroclastic flow deposit, ash fall deposit and total magma. (a) from May 23 to July 14, 1991, (b) from May 23, 1991 to August 10, 1992. Open circles and squares indicate the measured volumes of lava dome and pyroclastic flow deposits obtained by the methods shown in Fig. 5 and Fig. 6. Four lines indicate the cumulative volumes of lava dome, pyroclastic flow deposit, ash fall deposit and total magma calculated from the records of seismic wave. Rectangle (dashed) at the lower left side of (b) indicates area shown in (a).



第 5 図 '91 年 7/8 時点での溶岩ドームの分布平面図と地形断面図

細い等高線は, 6/3 以前の溶岩ドームがのっていた既存の山体斜面の地形を表し, 太い等高線は, 6/8 以降の既存の山体斜面の地形を表す. 6/3 と 6/8 の火砕流に伴って, 既存の山体斜面は馬蹄形にえぐられ, 西側に後退した.

Fig. 5 Plan view and cross section of lava dome on July 8, 1991. Narrow contour lines indicate basement topography beneath the dome before June 3. Broad contour lines indicate basement topography after June 8. Associated with the pyroclastic flows on June 3 and June 8 are erosion of basement and formation of eastward facing horseshoe crater.

以降の地形である. 6/3 と 6/8 の火砕流に伴って, ドームがのっていた既存の山体斜面は西側に後退し, 馬蹄形にえぐれている. このことは, 6/7 と 6/16 の空中写真や, 報道の映像で確認できる. このときの既存の山体斜面の崩落量を推定した結果, 6/3 と 6/8 をあわせて約 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ となった. 以上の方法などを使って求めた溶岩ドームの体積のリストを第 1 表に示す. 例えば, 7/8 時点での溶岩ドームの体積は, この方法によると $5.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ となった. この方法による体積推定の誤差は数 10%~数% と考えられる. また, 6/1~6/4, 6/7~6/9 の間での体積減から, 6/3 と 6/8 の火砕流によって当時の溶岩ドームの大部分が崩落したことがわかる. 7/15 以降の溶岩ドームの体積は, 溶岩ドームの形態が複雑化したことや, 映像情報の不足などの理由で求めることができなかった.

6/7 と 6/16 時点で山体斜面に堆積している火砕流堆積物の体積の見積もりを, 溶岩ドームの体積の計算と同様の方法で行なった (第 6 図). この火砕流堆積物の体積には, 6/3 や 6/8 の火砕流に伴って崩落した, 後で明らかにするような既存の山体斜面の物質の体積も含まれている. 火砕流堆積物の体積の推定は, (1) 分布を押さ

え (第 6 図, 平面図), (2) 100 m おきに断面図を作成し (第 6 図 A~K の断面図), (3) 各々の断面積を算出し, (4) 断面積に間隔 (100 m) をかけて区間ごとの体積を求め, それを積分して全体の体積とした. 分布は, 空中写真やヘリからの観察, 報道映像をもとに 5000 分の 1 の地形図上に描いた. このとき, 本質質片を主体とした淘汰の悪い火砕流堆積物の本体 (第 3 図の黒色の部分) と, 比較的細粒の火山礫や火山灰を主体とした比較的淘汰のよい火砕サーージ堆積物 (第 3 図のハッチで囲んだ部分; Fisher, 1979) とを区別した. そして, 火砕流堆積物の本体には 0.7, 火砕サーージ堆積物には 0.2 の係数をかけて体積を溶岩換算値 (DRE) とした. 0.7 と 0.2 の係数は, デイサイト質の溶岩ドームの密度を $2100 \sim 2300 \text{ kg/m}^3$ (McBirney, 1984, p. 55), 火砕流堆積物の密度を約 1500 kg/m^3 (Wilson and Head, 1981; Beget and Limke, 1989), 火砕サーージ堆積物の密度を約 500 kg/m^3 として, 密度の比率から求めた. 火砕流堆積物の体積は, 6/7 までの累積値が $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (溶岩換算値=DRE=Dense Rock Equivalent; Walker, 1980), 6/16 までの累積値が $4.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (DRE) となった.

第1表 映像データによって求めた溶岩ドームの体積の実測値のリスト

Table 1 List of measured volumes of lava dome.

Date	Volume ($\times 10^4 \text{m}^3$)
May 20	0
23	23
30	71
June 1	113
4	31
7	115
9	43
14	98
16	146
24	270
26	313
July 2	430
6	510
8	550
14	630

3. 振動波形の解析による連続的な体積変化の見積もり

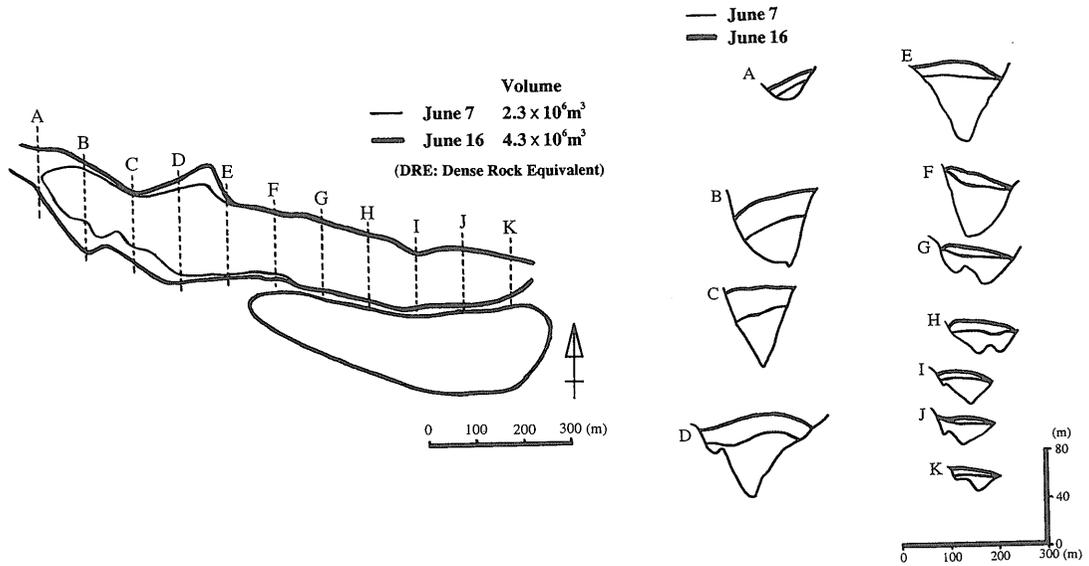
ある時点での噴出物の体積は求めることができたが、断続的に継続する溶岩ドームの成長と、崩壊に伴う火砕流の発生により、溶岩ドームと火砕流堆積物、降下火山灰の噴出物量は時々刻々と変化している。また、報道の映像やヘリコプターから撮影した写真や8ミリビデオ映像、空中写真によって、溶岩ドームや火砕流堆積物の体積を実測できる日時は、天候や噴煙の状態に左右される。さらに7月中旬以降は、目視観測や映像記録による溶岩ドームの体積の見積もりが困難になっている。このため、映像によるデータだけでは、連続的な体積変化を把握することは難しい。こうした状況の中で、体積変化を連続的に見積もるためには、別の方法が必要である。そこで

我々は、気象庁雲仙岳測候所が設置している地震計の波形記録を活用して、間接的に溶岩ドーム・火砕流堆積物・降下火山灰の体積、マグマの総噴出量の変化曲線(第4図)を求めることを試みた。

普賢岳周辺に設置された地震計には、火砕流に伴う振動波形が記録されている(第7図)。振動波形は、天候に左右されることなく連続的に得られている。火砕流が斜面を流下するときに、火砕流の中の火砕物が地面をたたくことによって、振動エネルギーが発生すると考えられる。今回の噴火の火砕流は、基本的にはすべて溶岩ドームの崩落によって発生している。この崩落した物質が持っていた位置エネルギーは、火砕流となって流走する過程で、運動エネルギーや、熱エネルギー、火砕物を破砕するためのエネルギー、振動エネルギーなどに変換される。このエネルギー分配の比率がすべての火砕流でほぼ一定であれば、火砕流に伴う振動エネルギーは崩壊物質がもっていた位置エネルギーと比例する。位置エネルギーは、崩壊物質の質量、重力加速度、比高(溶岩ドームから、火砕流が停止した地点までの標高差)の積で表すことができる。ここでは、近似的に火砕流の振動エネルギーは、溶岩ドームからの崩落物質の質量(体積)と比例するとした。

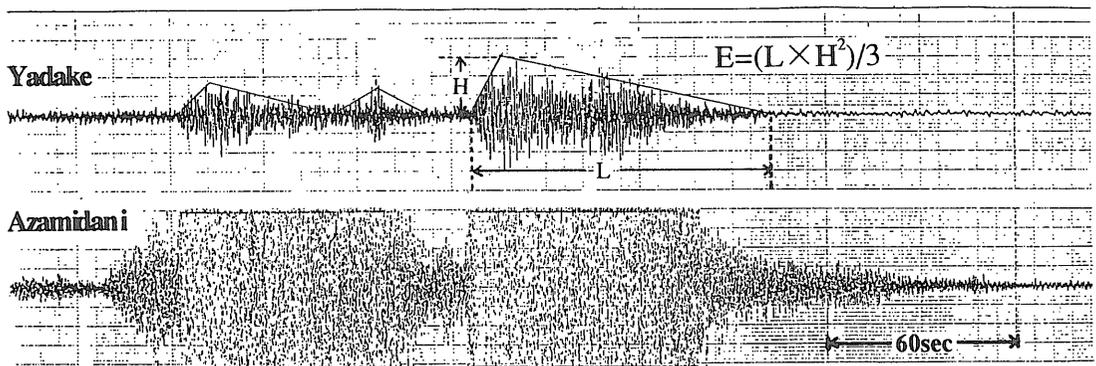
火砕流の振動エネルギーは、気象庁雲仙岳測候所のあざみ谷の地震計(第2図A点;倍率2000倍)の波形の振り切れが30秒以上継続したときの、矢岳の地震計(第2図Y点)の波形記録をもとに求めた(第7図)。その理由は、振り切れたあざみ谷の波形記録では波形の振幅を読み取れないため、そのかわりに矢岳の波形記録を使用した。矢岳の波形も振り切れている場合は、波形が完全に記録されている矢岳のス描きの波形データを参考にした。振動エネルギーは振幅の2乗に比例する。このため、以下の方法で火砕流に伴う振動波形の振動エネルギーを求めた(第7図)。(1)1つの波形をいくつかの三角形で近似する。(2)各々の三角形の底辺の長さ(L)と高さ(H)を測る。(3) $E = (L \times H^2) / 3$ として振動エネルギーを求める。ただし、あざみ谷の地震計の振り切れが30~60秒の波形は、数が多いため継続時間(30秒, 40秒, 50秒)ごとに50程度の波形を選び出して平均化し、日ごとの発生回数をかけて振動エネルギーとした。平均化すると、1回あたりの継続時間が30秒の溶岩ドームの崩落量は約4900 m^3 、40秒では約6400 m^3 、50秒では約9700 m^3 となった。継続時間が60秒以上の解析した波形の総数は2397であった。

'91年5/23~7/14の期間の各噴出物量の変化曲線(第4図a)は、以下の方法で推定した。(1)振動波形



第 6 図 '91 年 6/7 と 6/16 時点での水無川上流部 (標高 950 m ~ 550 m の範囲) の火砕流堆積物の分布平面図と地形断面図

Fig. 6 Plan view and cross section of pyroclastic flow deposits at the upper stream area of Mizunashi river on June 7 and June 16, 1991.



第 7 図 '91 年 5/27 14:03 の火砕流の発生に伴って, 矢岳とあざみ谷の地震計に記録された振動波形と振動エネルギーの算出方法
各々の地震計の位置を第 2 図に示す.

Fig. 7 Example of seismic wave produced by pyroclastic flows recorded at 14:03 on May 27, 1991 and calculation method of tremor energy. The sites of seismographs are shown in Fig. 2.

の解析によって求めた振動エネルギーを積算する。(2) 振動エネルギーの積算曲線の 4 分の 3 に, 火砕流堆積物の体積の実測値と一致するような比例係数をかけて, 火砕流堆積物の体積の変化曲線とする。(ただし, 4 章で

示すように, 6/3 と 6/8 の振動エネルギーは著しく大きい (第 9 図) ので, 体積の実測値にあわせるために, 求めた振動エネルギーの値を小さくする必要があった) (3) 後述の理由により, 振動エネルギーの積算曲線の 4 分の

第2表 マグマの平均噴出率の時間変化
Table 2 List of effusion rate of magma.

Date	Effusion rate ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$)
May 24	6~15
May 25	20
May 26 ~ 27	25
May 27 ~ June 8	30
June 9 ~ 12	27
June 13 ~ 16	25
June 17 ~ 24	40
June 25 ~ 30	50
July 1 ~ 2	40
July 3 ~ 5	25
July 6 ~ 8	35
July 9 ~ 14	32
July 15 ~	34

1に(2)と同じ比例係数をかけて、降下火山灰の体積の変化曲線とする。(4) 第1表の溶岩ドームの実測値とほぼ一致するように、マグマの噴出率を期間ごとに求め(第2表)、そのマグマの積算量から火砕流堆積物と降下火山灰の体積を引いて、溶岩ドームの体積の変化曲線とする。(5) 第2表のマグマの噴出率の積算から、マグマの総噴出量の変化曲線を求める。

上記(3)において、火砕流の流走中に舞上がる降下火山灰(ash cloud)からの fallout deposit; Fisher, 1979)の体積(DRE)を、溶岩ドームからの崩落量の1/4であると仮定して求めた。その根拠は、渡辺ほか(1991)で、5/29の火砕流に伴う降下火山灰の質量を約9万トン、6/3の場合を約50万トン、6/8の場合を約100万トンと見積り、これらの降下火山灰の質量が崩落した溶岩の約1/4であったことによる。事例が少ないために、すべての火砕流について、崩壊体積の約1/4が降下火山灰となるかどうかは不明であるが、ここでは作業仮説としてこの割合を使用した。

火砕流に伴う振動波形の振動エネルギーを使って描いた溶岩ドームと火砕流堆積物の体積の変化曲線は、'91年5/23~7/14の期間では、6/3と6/8を除けば、実測値と誤差の範囲でよく一致している(第4図a)。このことは、火砕流の振動エネルギーが溶岩ドームからの崩壊量と比例するという仮定が成り立っていることを示し

ていると考えられる。この方法によれば、'91年7/14までのマグマの総噴出量は $1.8 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、溶岩ドームの体積は $6.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、火砕流堆積物の総体積は、 $8.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、降下火山灰の総体積は、 $2.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ となった。

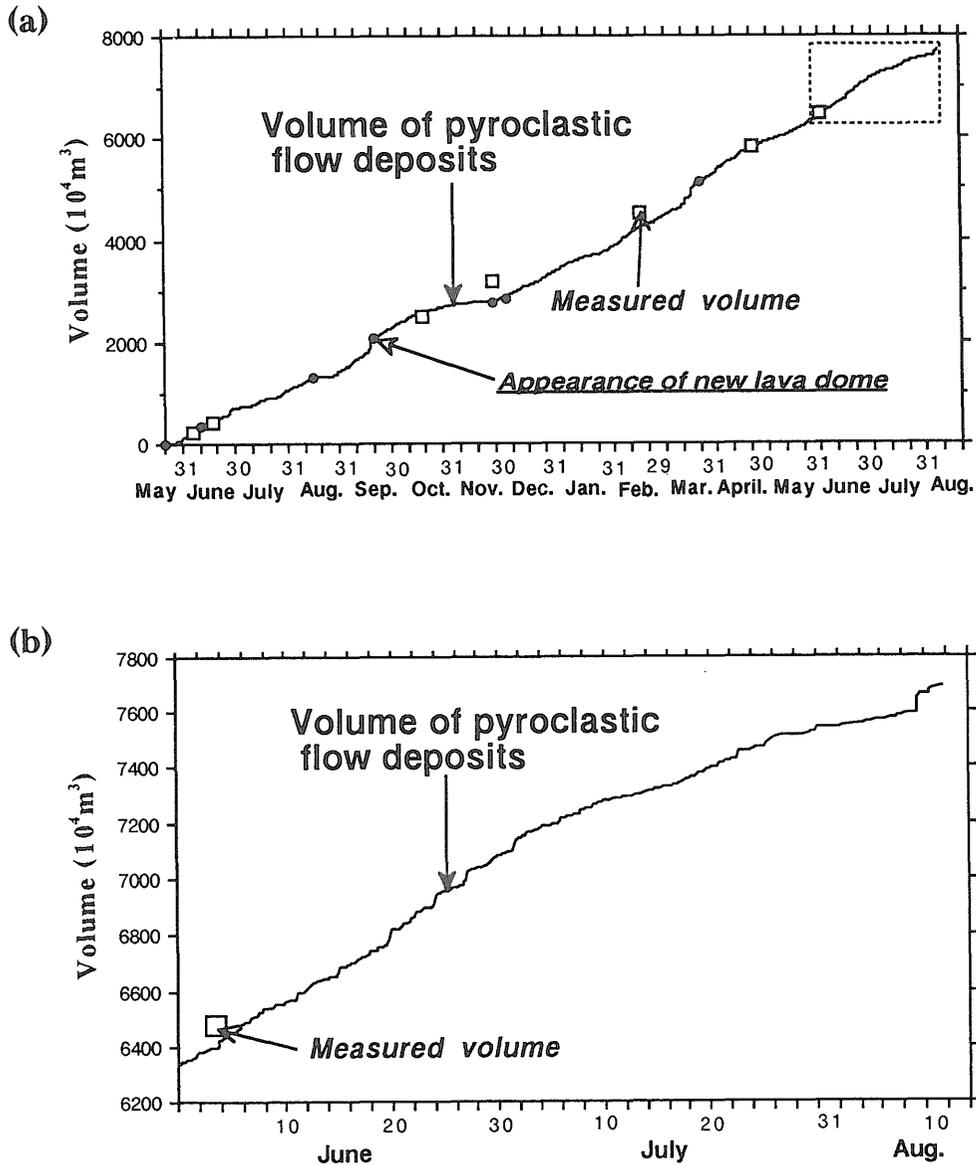
'91年7/15~'92年8/10の期間の各噴出量の変化曲線(第4図b)は、'91年7/15以降に溶岩ドームの体積の実測値が得られなかったため(2章)、以下の方法で推定した。(1) 振動エネルギーを積算する。(2) '91年5/23~7/14の期間で使用した比例係数が7/15以降も成り立つとして、同様に火砕流堆積物と降下火山灰の体積の変化曲線を求める。(3) 7/15以降のマグマの噴出率は、5/23~7/14までの噴出率の平均から、 $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ とする。(4) 噴出率の積算から、マグマの総噴出量を求める。(5) マグマの総噴出量から、火砕流堆積物の体積と降下火山灰の体積の累積値を引いて、溶岩ドームの体積とする。

この方法によって求めた火砕流堆積物の体積の変化曲線は、'91年10/15・11/25と'92年2/19・4/25に国土地理院が求めた実測値や、'92年6/3に建設省土木研究所が求めた実測値(第8図a)と誤差の範囲でよく一致している。この方法によれば、'92年8/10までのマグマの総噴出量は $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、溶岩ドームの体積は $4.8 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、火砕流堆積物の総体積は $7.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、降下火山灰の総体積は $2.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ となった(第4図b)。
'91年6/3・6/8・9/15の火砕流によって、溶岩ドームと火砕流堆積物の体積が大きく変化していることがわかる(第4図a, b)。また、新しい溶岩ドームの出現に対応して、火砕流の発生頻度が変化しているように見える(第8図a)。しかし、火砕流は平均して約530万 m^3/month の割合で発生し続けており、今のところ減少の傾向は見られない(第8図a)。また、この方法によれば、第8図bのように、火砕流堆積物の体積(火砕流の発生頻度)の詳細な変化を把握することが可能である。

4. 6/3・6/8の火砕流の発生機構

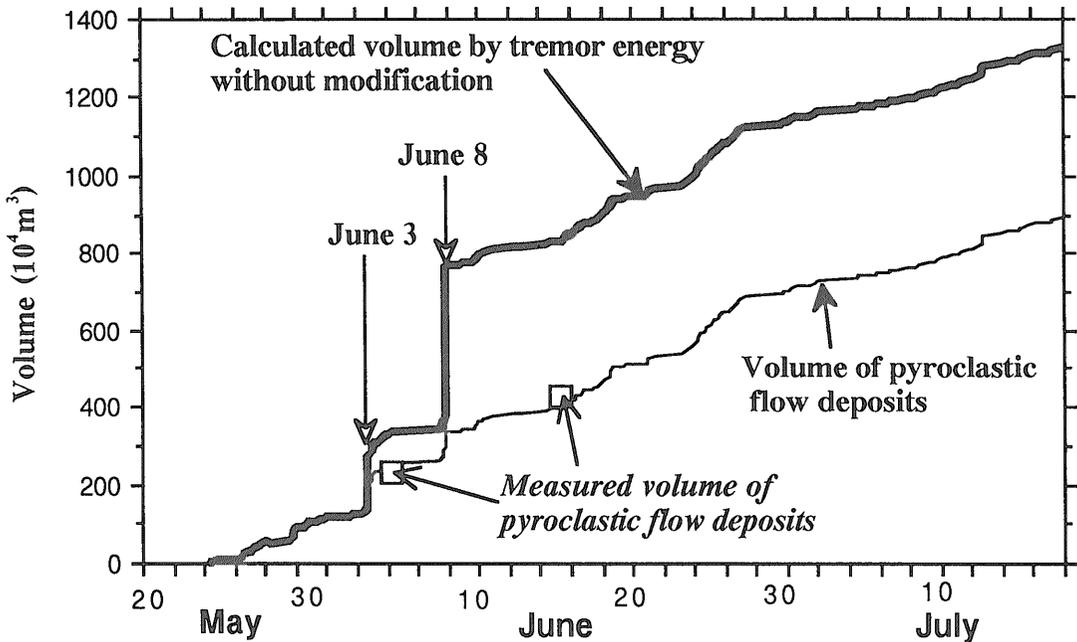
地震計の振動波形のエネルギーから求めた変化曲線(第9図の太い曲線)は、6/7と6/16の実測値(第9図の□)から期待できる火砕流堆積物の体積の変化曲線(第9図の細い曲線)と一致しない。この原因は、6/3と6/8の火砕流では、火砕流に伴う振動エネルギー以外のエネルギーも地震計に記録されたためであると考えられる。

このことは、(1) 6/3と6/8の火砕流に伴って溶岩ド



第 8 図 振動波形を使った火砕流堆積物の体積変化と新しく溶岩ドームが出現した日 (●)
 (a) '91 年 5/24~'92 年 8/10, (b) '92 年 6/1~8/10. 新しい溶岩ドームの出現に対応して, 火砕流の発生頻度に変化している.
 '91 年 6/7・6/16 の実測値 (□) は地質調査所, '91 年 10/15・11/25 と '92 年 2/19・4/25 の実測値は国土地理院, '92 年 6/3 の
 実測値は建設省土木研究所による. DRE への変換係数は 0.7 とした. (a) の右上の長方形の枠は, (b) に示した拡大範囲
 を示す.

Fig. 8 Volume variation of pyroclastic flow deposits using the record of tremor. And the date of appearance of new lava dome. (a) from May 24, 1991 to Aug. 10, 1992, (b) from June 1 to Aug. 10, 1992. Appearance of new lava domes changes the frequency of occurrence of pyroclastic flows. Measured data on June 7 and June 16, 1991 are from Geological Survey of Japan. Oct. 15, Nov. 25, 1991 and Feb. 19, April 25, 1992 data are from Geographical Survey Institute. June 3, 1992 datum is from Public Works Research Institute. Conversion ratio to DRE was 0.7. Rectangle in the upper right of (a) indicate area shown in (b).



第9図 地震計の波形のエネルギーを直接累積して求めた変化曲線(太い曲線)と、6/7と6/16の実測値(□)から期待される火砕流堆積物の体積の変化曲線(細い曲線)

6/3と6/8の火砕流では、火砕流に伴う振動エネルギー以外のエネルギーも地震計に記録されたと考えられる。

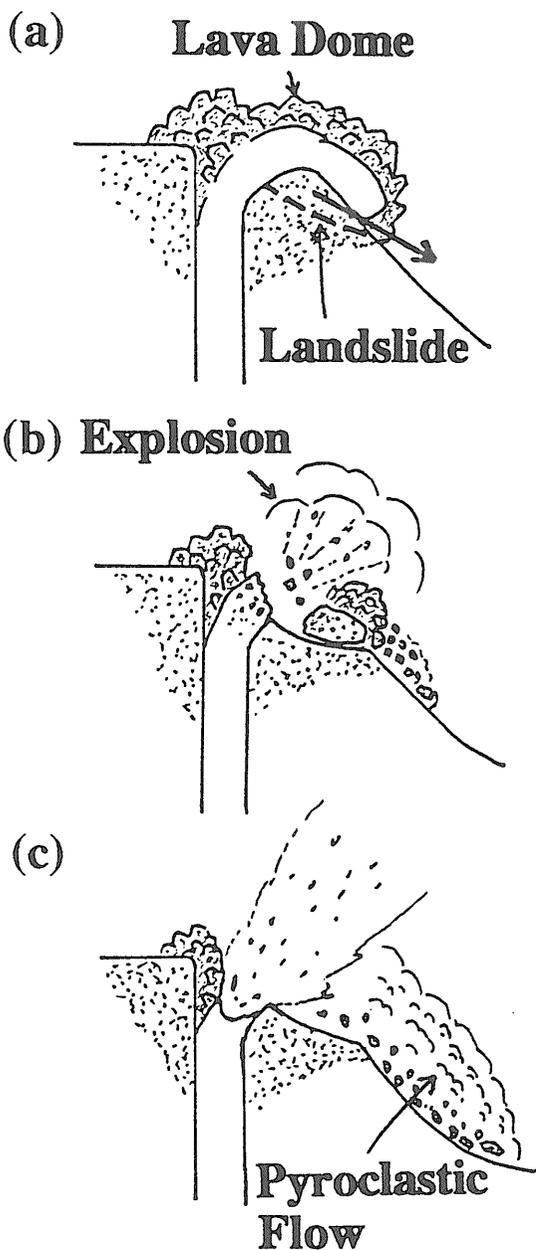
Fig. 9 The gaps between the volume of pyroclastic flow deposit using image data and the volume calculated from the tremor energy of June 3 and June 8 pyroclastic flows without modification. During the pyroclastic flows on June 3 and June 8, the excess energy due to landsliding or explosion increases the difference between the calculated and actual volumes.

ームがのっていた既存の山体斜面が馬蹄形にえぐられ、約 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積が失われたこと(第5図)、(2) 6/8の火砕流に伴って爆発が起こったこと(建設省九州地方建設局の赤外線映像)にもとづいて、第10図のような既存の山体の滑り落ちが引き金となったというモデルでうまく説明できる。6/3と6/8の火砕流は溶岩ドームをのせた不安定な山体斜面の滑り落ちが引き金となって発生した(第10図 a)。6/8の場合は、山体斜面の滑り落ちに伴う高圧のドーム内部や火道の切断によって、荷重の解放による火道内での急激な減圧で、爆発が起こった(第10図 b)。崩壊した高温の溶岩と山体斜面の物質は破碎されて火砕流となり、水無川をかけ下った(第10図 c)。この爆発のエネルギー(6/8)と滑り落ちに伴う振動のエネルギー(6/3と6/8)が、6/3と6/8に地震計に記録された、火砕流に伴う振動エネルギー以外のエネルギーであると考えられる。引き金となった既存の山体斜面の滑り落ちの原因は、(1) 高温の溶岩によって焼かれることによる脆弱化、(2) 泥水の噴出(報道映

像)を起こすような不透水層(すべり面)の存在、(3) 大量の溶岩が上部にのることによる斜面の不安定化などが考えられる。

5. 火砕流の体積と流走距離との相関

火砕流や岩屑流の比高(H)と水平流走距離(L)の比(H/L比)に対して、体積との相関をとると、体積が大きいほどH/L比が小さくなる(流動性が高くなる)傾向があることが知られている(Sheidegger, 1973; Hsü, 1975; Ui, 1983)。しかし、これまでの火砕流の相関図は、(1) 各々の火山体で発生した火砕流のデータが少ないために、流路や火砕流の温度などの条件が異なるいくつかの火山で発生した火砕流をまとめてプロットしている、(2) 火砕流が何波にも分かれて流下した場合でも、すべての火砕流の総体積をプロットしている、などの問題点があった。したがって、条件が同じ一つの火山で個々の火砕流の体積とH/L比の相関を明らかにした例はまだ存在しない。雲仙岳の場合は、'92年8月の



第 10 図 '91 年 6/8 20:06 の火砕流の発生機構のモデル
 (a) 既存の山体斜面の滑り落ちによる溶岩ドームの崩壊。
 (b) 高圧のドーム内や火道の切断による急激な減圧で発生した爆発。(c) 溶岩ドームと山体斜面の物質の破砕により火砕流が発生し、水無川を流下。

Fig. 10 Initiation mechanisms of pyroclastic flow on June 8, 1991. (a) landslide triggered the collapse of lava dome, (b) explosion due to sudden pressure reduction, (c) pyroclastic flow generated by broken up materials of lava dome and basement.

段階で 5000 回を越える火砕流が発生している (気象庁雲仙岳測候所のデータ) ため、条件の同じ一つの火山で発生した火砕流のデータのみを使うことができる。また、上記の振動エネルギーと体積との関係を使えば、個々の火砕流の体積と H/L 比との相関を明らかにすることが可能である。

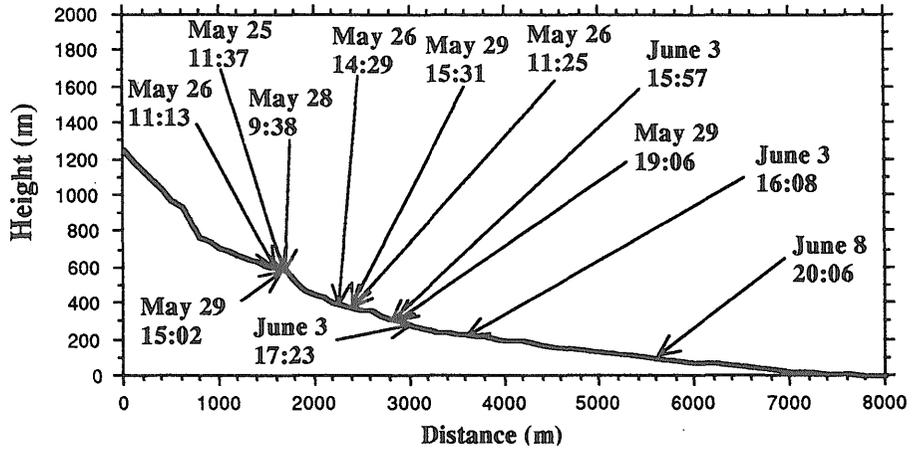
そこで、火砕流に伴う振動波形の振動エネルギーから、'91 年 5/25~6/8 の個々の火砕流の体積を算出し、火砕流の体積と流走距離の相関、体積と H/L 比の相関を調べた (第 11 図)。火砕流の流走距離は報道の映像や空中写真によって決めた (第 11 図 a)。6/3 16:08 の火砕流の流走距離は 3600 m, 6/8 20:06 の火砕流は 5600 m であった。個々の火砕流の体積は、振動波形の振動エネルギーに変化曲線の決定で用いた比例係数をかけて算出した。6/3 16:08 の火砕流の体積は約 $8.0 \times 10^5 \text{ m}^3$, 6/8 20:06 の火砕流の体積は山体斜面の崩落量を加えて約 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ であった。縦軸に流走距離、横軸に個々の火砕流の体積を log でプロットすると第 11 図 b のような相関関係があることが分かった。また縦軸に H/L 比、横軸に個々の火砕流の体積を log でプロットした場合は、第 11 図 c のようになった。これらの相関関係から、今後溶岩ドームの崩落が起こりそうな部分の体積を見積ることによって、火砕流の流走距離や H/L 比を予測することが可能となった。

6. 振動波形解析による体積推定の問題点

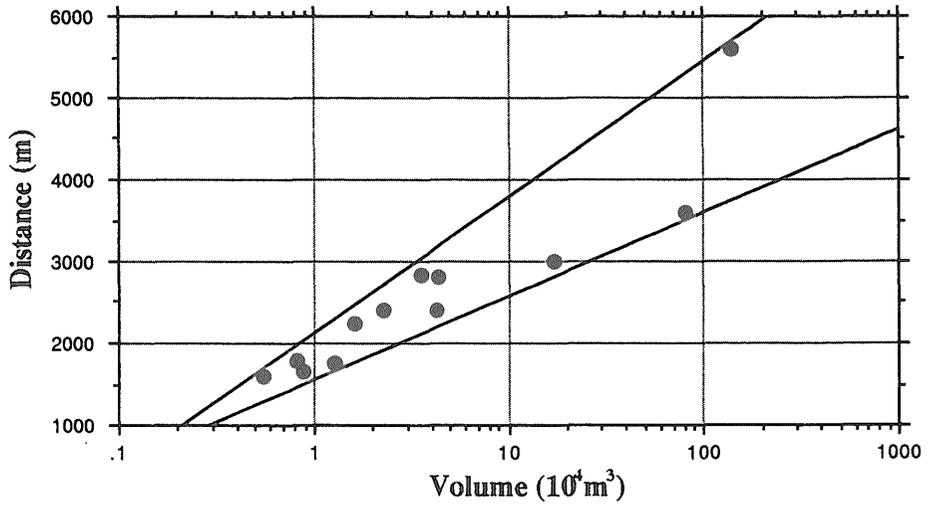
矢岳の地震計に記録された振動波形の解析により、噴出物量の経時変化をある程度の精度で見積ることができた。しかし、以下の 2 つの問題点が未解決であり、今後の検討材料として残される。'91 年 8 月下旬から、火砕流は水無川だけでなく北東側のおしが谷に沿っても流れ下るようになった。さらに 11 月下旬からは、火砕流は南側の赤松谷に沿っても流れ下っている。火砕流の流路が変化すれば、火砕流の中の火砕物が地面をたたくことによって発生する振動が地震計に到達するまでの経路が変化すると考えられる。このため同じ体積の火砕流でも、おしが谷や赤松谷を流れ下った火砕流は、水無川を流れ下っていた火砕流に比べて振動波形の形が変化すると考えられる。このため、振動エネルギーの値が流路ごとに異なる可能性がある。流路ごとに分離して係数をかけるなどの補正が必要である。

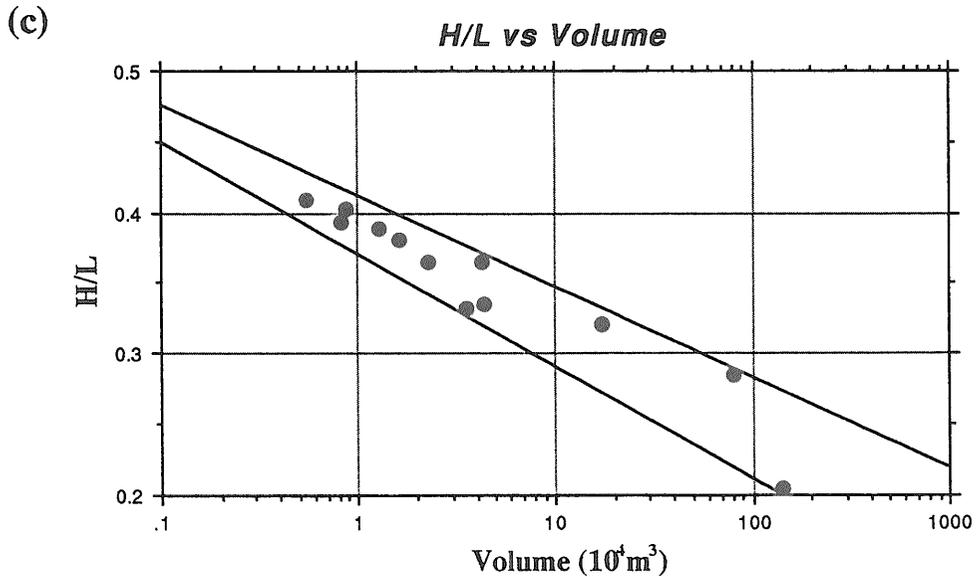
本論文では、火砕流堆積物とそれに伴う降下火山灰との量比を 3 対 1 と仮定した。しかし、この割合がすべての火砕流について成り立つかどうか、火砕流堆積物や降下火山灰の体積の見積りもりの事例を増やして検討してい

(a) *Runout distance of pyroclastic flows (May 25-June 8)*



(b) *Runout distance vs Volume*





第 11 図 火砕流の体積と流走距離, H/L 比との相関関係

(a) '91 年 5/25~6/8 の火砕流の流走距離. (b) 個々の火砕流の体積と流走距離の相関関係. (c) 個々の火砕流の体積と H/L 比の相関関係.

Fig. 11 Relation between the volume of pyroclastic flow and runout distance, H/L ratio.

(a) Runout distance of pyroclastic flows from May 25 to June 8, 1991. (b) Relation between the volume of pyroclastic flow and runout distance. (c) Relation between volume of pyroclastic flow and H/L ratio.

く必要がある。

7. まとめ

(1) 雲仙岳 1991-92 年噴火の '91 年 5/23~'92 年 8/10 の溶岩ドーム, 火砕流堆積物, 降下火山灰の体積およびマグマの総噴出量を見積った。写真や報道映像によって溶岩ドームの体積 (第 1 表) と, 火砕流堆積物の体積 (第 6 図) の実測値を求めた。さらに, 火砕流に伴って地震計に記録された振動波形の振動エネルギーを使って, 噴出物量の連続的な変化を間接的に見積った (第 4 図)。さらに, 溶岩ドームの体積変化から, '91 年 5/24~7/14 の期間のマグマの噴出率の変化を見積った (第 2 表)。この期間の噴出率の平均は, 約 $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ となった。'91 年 7/15 以降も, この噴出率がほぼ一定であるとすれば, '92 年 8/10 の段階では, 溶岩換算値 (DRE) でマグマの総噴出量は $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 溶岩ドームの体積は $4.8 \times 10^7 \text{ m}^3$, 火砕流堆積物の総体積は $7.7 \times 10^7 \text{ m}^3$, 降下火山灰の総体積は $2.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ と推定される。火砕流の発生頻度は, 新しい溶岩ドームの出現に応じて変化している (第 8 図)。火砕流は, 平均約 530 万 m^3/month の割合で発生し続けていて, 今のところ

減少の傾向は見られない。

(2) '91 年 6/3 と 6/8 の火砕流によって地震計に記録された振動波形の振動エネルギーは, 実際の溶岩の崩落量から期待できる量よりも大きい。この原因は, 6/3 と 6/8 の火砕流が山体斜面の滑り落ちが引き金となって発生し, 特に 6/8 の場合は滑り落ちによる減圧で爆発が起こったというモデルでうまく説明できる (第 10 図)。

(3) 振動波形の振動エネルギーから '91 年 5/25~6/8 の個々の火砕流の体積を算出し, 火砕流の体積と流走距離や H/L 比との相関を明らかにした (第 11 図)。その結果, 今後溶岩ドームの崩壊が起こりそうな部分の体積を見積ることによって, 火砕流の流走距離や H/L 比を予測することが可能になった。

謝辞 建設省九州地方建設局が撮影した, 6/8 20:06 の火砕流に伴う爆発の赤外線映像は, この火砕流の発生機構を考察する上で大変役立った。また, 地質調査所北海道支所の木村純子さんと澤田智永さんには, 振動波形の解析を手伝っていただいた。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- Beget, J.E. and Limke, A.J. (1989) Density and void ratio on emplacement of a small pyroclastic flow, Mount St. Augustine, Alaska. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 39, p. 349-353.
- Fisher, R.V. (1979) Models for pyroclastic surges and pyroclastic flows. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 6, p. 305-318.
- and Heiken, G. (1982) Mt. Pelée Martinique: May 8 and 20, 1902, pyroclastic flows and surges. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 13, p. 339-371.
- Hsü, K.J. (1975) Catastrophic debris streams (Sturztroms) generated by rock falls. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 86, p. 129-140.
- McBirney, A.R. (1984) *Igneous petrology*. Freeman, cooper and company, 504 p.
- 中田節也・鎌田浩毅(1988) 島原半島南部に分布する玄武岩・安山岩の成因関係. *火山*, vol. 33, p. 273-289.
- ・田中雅人(1991) 雲仙火山のマグマプロセス. *火山*, vol. 36, p. 113-121.
- 太田一也(1987) 眉山大崩壊のメカニズムと津波. *月刊地球*, vol. 9, p. 214-220.
- Ohta, K., Matsuwo, N. and Yanagi, T. (1992) The 1990-1992 eruption of Unzen Volcano. The Nishinippon & Kyushu University Press, 34-37.
- Scheidegger, A.E. (1973) On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics*, vol. 5, p. 231-236.
- Siebert, L., Glikken, H. and Ui, T. (1987) Volcanic hazards from Bezimianny- and Bandai-type eruptions. *Bull. Volcanol.*, vol. 49, p. 435-459.
- 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(1991) 雲仙岳1991年噴火の噴出物量と6/3・6/8の火砕流の発生機構. 日本火山学会講演予稿集1991年秋季大会 A 40, p. 40.
- Ui, T. (1983) Volcanic dry avalanche deposits-identification and comparison with nonvolcanic debris stream deposits. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 18, p. 135-150.
- Walker, G.P.L. (1980) The Taupo Pumice: product of the most powerful known (ultraplinian) eruption? *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 8, p. 69-94.
- 渡辺一徳・小野晃司・阪口圭一・高田 亮・星住英夫(1991) 普賢岳噴火で1991年5・6月に発生した火砕流に伴う火山灰. 日本火山学会講演予稿集1991年秋季大会 P 06, p. 144.
- Wilson, L. and Head, J.W. (1981) Morphology and rheology of pyroclastic flows and their deposits, and guidelines for future observations. In Lipman, P.W. and Mullineaux, D.R. eds., *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, no. 1250, p. 513-524.

(受付: 1992年6月23日; 受理: 1992年10月14日)