

雲仙岳1991-93年噴火の火砕流堆積物の体積推定*

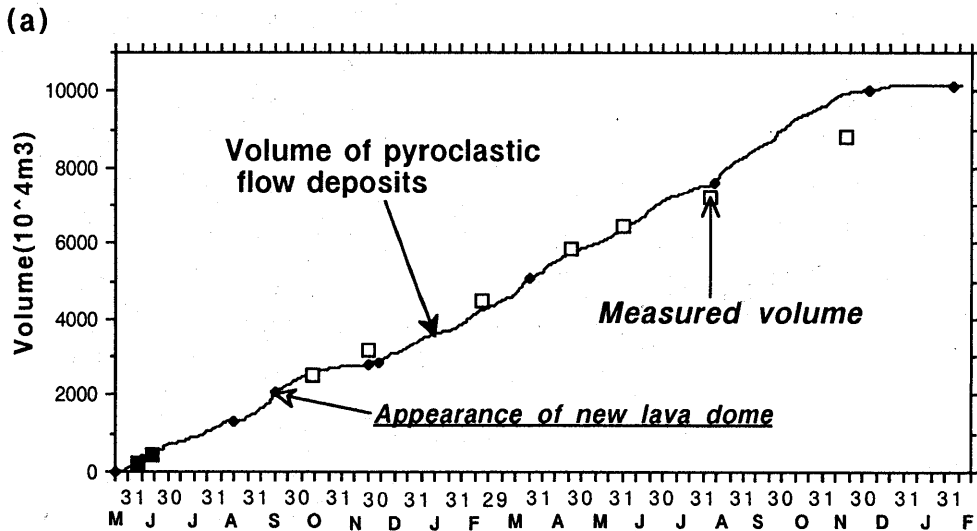
地質調査所**
気象庁雲仙岳測候所

1. はじめに

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、火砕流堆積物の体積の経時変化の見積りを行った。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。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。

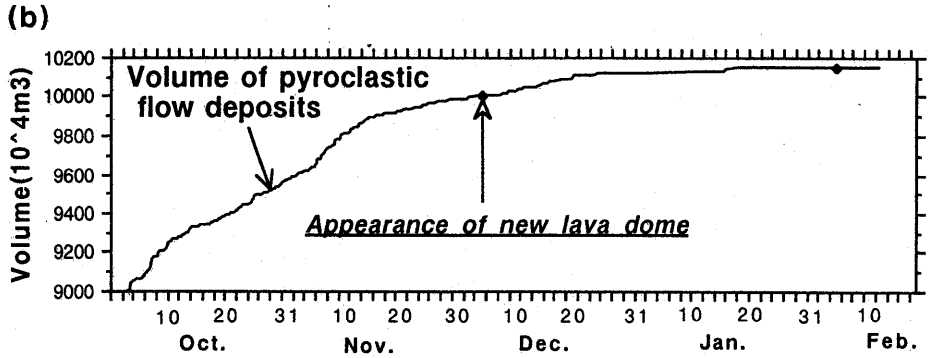
2. 火砕流堆積物の体積の実測値

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、火砕流堆積物の堆積の実測値を求めた（第1図a, b;実測値■）。



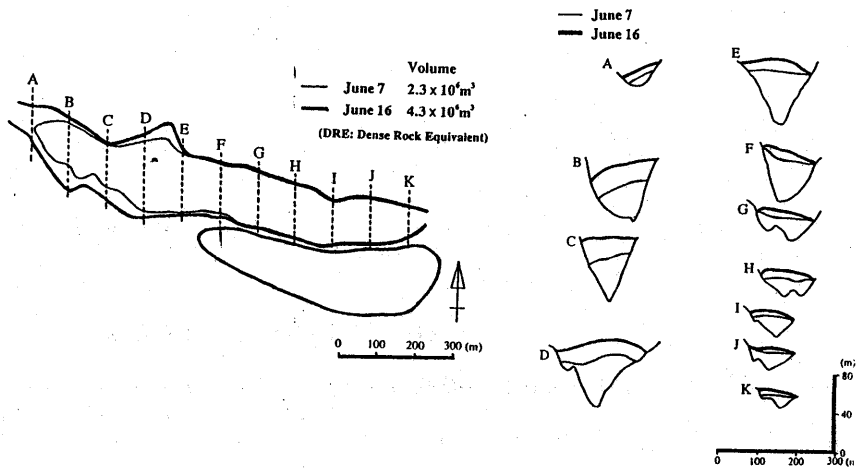
* Received 17 June, 1993

** 宝田晋治・須藤 茂・風早康平・川辺禎久・阪口圭一・山元孝広・曾屋龍典



第1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~'93年2/11, (b) '92年10/1~'93年2/11。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。'91年6/7・6/16の実測値(■)は地質調査諸所, '91年10/15・11/25と'92年2/19・4/25・11/17の実測値は国土地理院, '92年6/3の実測値は土木研究所, '92年8/7は長崎県島原振興局による(□)。DREへの変換係数は0.7とした。(b)は、(a)の右上端部分の拡大図を表す。

Fig. 1 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 Feb. 11, 1993, (b) from Oct. 1, 1992 to Feb. 11, 1993. Appearance of new lava domes changes the frequency occurrence of pyroclastic flows. Conversion ratio to DRE is 0.7. (b) indicate the enlargement of upper-right part of (a)



第2図 '91年6/7と6/16時点での水無川上流部(標高950m~550mの範囲)の火砕流堆積物の分布平面図と地形断面図。

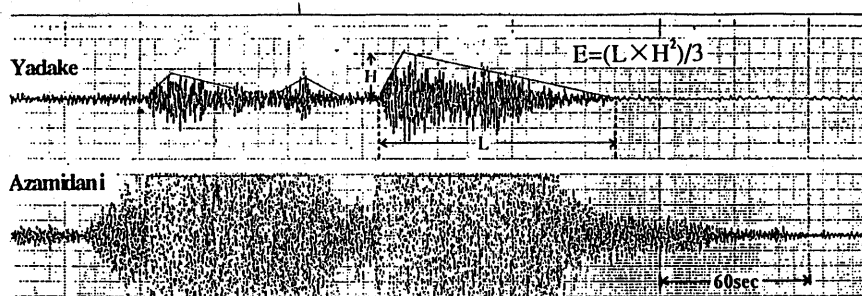
Fig. 2 Plane view and cross section of pyroclastic flow deposits at the upper stream area of Mizunashi river on June 7 and June 16, 1991.

'91年6月7日と6月16日（以下6/7, 6/16と略する）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りを行った（第2図）。火砕流堆積物の体積の推定は、(1)分布を押さえ（第2図, 平面図）, (2)100mおきに断面図を作成し（第2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（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, 空中写真やヘリから観察, 報道映像をもとに5,000分の1の地形図上に描いた。このとき, 本質岩片を主体とした淘汰の悪い火砕流堆積物の本体と, 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ジ堆積物とを区別した。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 $2,100\sim 2,300\text{kg}/\text{m}^3$ （McBirney, 1984, p.55）, 火砕流堆積物の密度を約 $1,500\text{kg}/\text{m}^3$ （Wilson and Head, 1981; Beget and Limke, 1989）, 火砕サージ堆積物の密度を約 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 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。

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, 火砕流堆積物の体積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, 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。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, 間接的に火砕流堆積物の体積（第1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3図）。振動



第3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。

Fig. 3 Example of seismic waves produced by pyroclastic flows recorded at 14:03 on May 27, 1991 and calculation method of tremor energy.

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、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、火砕物を破碎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。

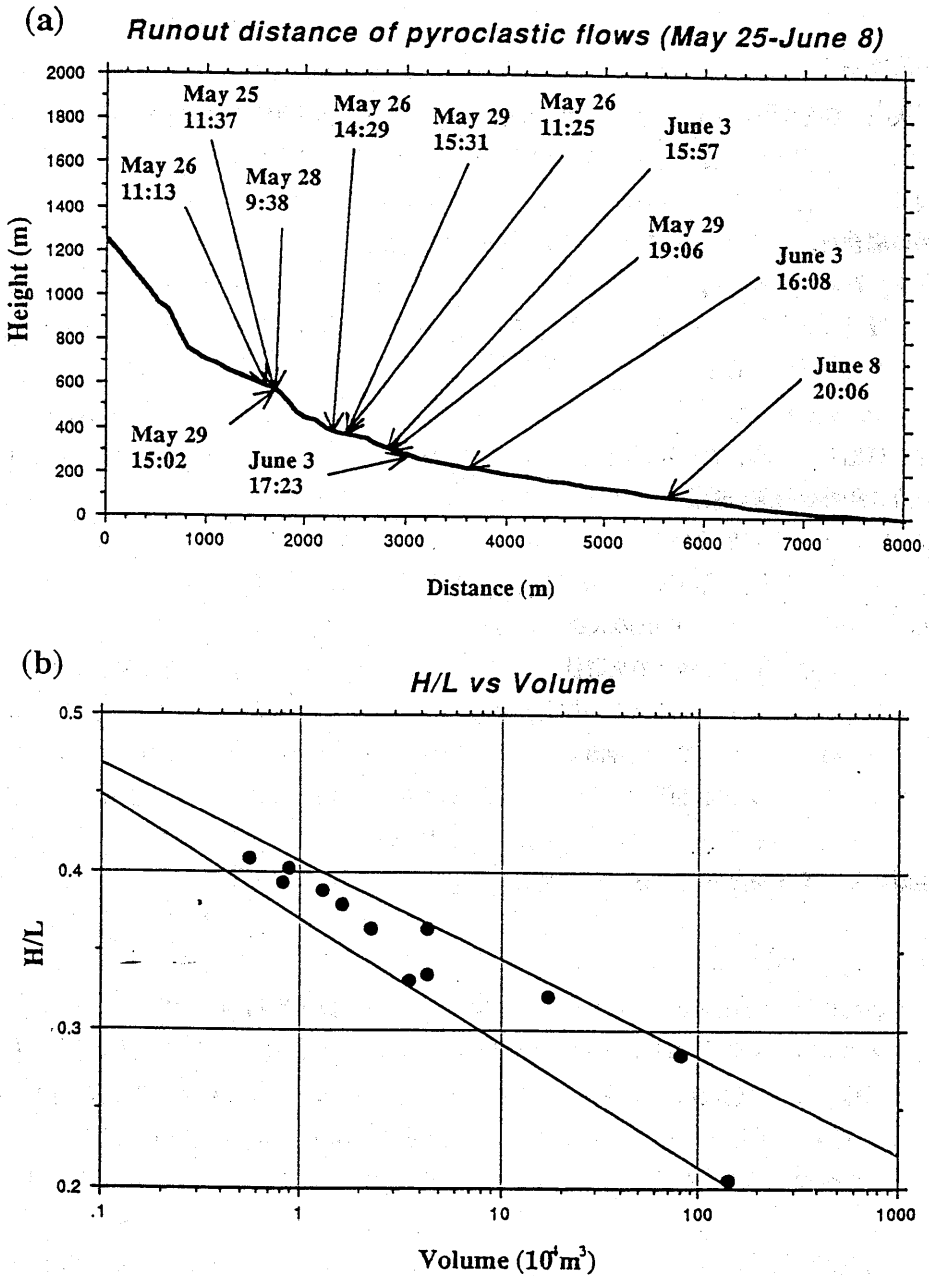
火砕流の振動エネルギーは、気象庁雲仙岳測候所のあざみ谷の地震計（A点）の波形の振り切れが30秒以上継続したときの、矢岳の地震計（Y点）の波形記録をもとに求めた。その理由は、振り切れたあざみ谷の波形記録では波形の振幅を読み取れないため、そのかわりに矢岳の波形記録を使用した。矢岳の波形も振り切れている場合は、波形が完全に記録されている矢岳のス描きの波形データを参考にした。振動エネルギーは振幅の2乗に比例する。このため、以下の方法で火砕流に伴う振動波形の振動エネルギーを求めた（第3図）。(1)1つの波形をいくつかの三角形で近似する。(2)各々の三角形の底辺の長さ（L）と高さ（H）を測る。(3) $E = (L \times H^2) / 3$ 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4,900 m^3 、40秒では約6,400 m^3 、50秒では約9,700 m^3 となった。'93年2/11までの継続時間が60秒以上の解析した波形の総数は約3,000であった。

'91年5/23～'93年2/11の期間の各噴出物量の変化曲線（第1図a）は、以下の方法で推定した。(1)振動波形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、'91年6/3と6/8の振動エネルギーは著しく大きいので、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；宝田ほか、1993）。

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、'92年8/7に長崎県島原振興局が求めた実測値（第1図a；□）と誤差の範囲でよく一致している。しかし、'92年11/17の場合は、国土地理院が求めた実測値に比べて、振動波形の解析で求めた値は約10%大きくなっている。これは、堆積量が増すにつれて、次第に火砕流堆積物の下部が圧密を受け、見かけ上、体積の実測値が小さくなったことが原因の一つであると考えられる。

この方法によれば、'93年2/11までの火砕流堆積物の総体積は $1.0 \times 10^8 \text{m}^3$ （DRE）となった（第1図）。火砕流の発生頻度は、新しい溶岩ドームの出現に対応して変化しているように見える（第1図a）。また、変化曲線から、第1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. 火砕流と体積と流走距離との相関



第4図 火砕流の体積とH/L比の相関関係。(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H/L比の相関関係。

Fig. 4 Relation between the volume of pyroclastic flow and H/L ratio. (a) Runout distance of pyroclastic flows from May 25 to June 8, 1991. (b) Relation between volume of pyroclastic flow and H/L ratio.

4. 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されている (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、'93年4月の段階で7,000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4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4図 a)。6/3 16:08 の火砕流の流走距離は3,600m、6/8 20:06 の火砕流は5,600m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 $8.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、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 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、第4図 b のような相関関係があることがわかった。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もることによって、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。

しかし、これらの相関関係は、今のところ噴火初期の火砕流のデータしか使用していない。今後は、ヘリや地上からのビデオ映像、自衛隊の目視観測のデータなどを使って、より詳しく体積と流走距離の相関関係を調べていきたいと考えている。

5. ま と め

- (1) 雲仙岳1991-93年噴火の'91年 5/23~'93年 2/11 の火砕流堆積物の堆積を見積った。写真や報道映像によって火砕流堆積物の体積の実測値を求めた (第1図)。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3図)。'93年 2/11 の段階では、火砕流堆積物の総体積は $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ (DRE) 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1図 a) ように見える。
- (2) 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4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もることによって、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。

参 考 文 献

- 1) 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, 349-353.
- 2) Hsü, K.J. (1975) : Catastrophic debris streams (Sturztroms) generated by rock falls., *Geol. Soc. America Bull.*, vol.86, 129-140.
- 3) McBirney, A.R. (1984) : Igneous petrology. Freeman, cooper and company, 504.
- 4) Scheidegger, A.E. (1973) : On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides., *Rock Mechanics*, vol.5, 231-236.
- 5) 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年噴火の噴出物量と6/3・6/8の火砕流の発生機構, *地調月報*, 44, 11-24.
- 6) Ui, T. (1983) : Volcanic dry avalanche deposits identification and comparison with nonvolcanic debris stream deposits., *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 18,135-150.
- 7) Walker, G.P.L. (1980) : The Taupo Pumice : product of the most powerful known (ultraplinian) eruption?, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 8, 69-94.
- 8) 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, 513-524.