

浅間山 2004 年 9 月 1 日噴火の窓ガラス被害報告と
爆発エネルギー推定

横尾亮彦***・前野 深*・谷口宏充***

(2004年10月13日受付, 2005年4月9日受理)

Asama Explosion of September 1st, 2004—On the Damage to
Glass Windows and Estimation of Explosion Energy

Akihiko YOKOO***, Fukashi MAENO* and Hiromitsu TANIGUCHI***

At 20 : 02 JST on September 1st, 2004, Asama volcano erupted and produced a strong air wave (205 Pa at 7.6 km away from the summit). The wave induced some damages to glass windows in buildings located within about 11 km of the summit. The detailed situations about these damages are reported in this paper. The explosion energy of this eruption and diameter of crater are estimated to be 1.4×10^{12} – 2.2×10^{12} J and about 75 m, respectively, based on the assumption that scaling laws obtained by charge explosion experiments were applicable to the case of explosive volcanic eruption.

Key words: Asama volcano, air wave, glass breakage, explosion energy

1. はじめに

群馬県と長野県の県境に位置する浅間山(標高 2,568 m)は古くから爆発的な噴火を繰り返しており, 噴火による山体周囲での建造物の窓ガラス破損は, 昭和以降だけでも 9 回を数える(長野測候所追分支所, 1930; 気象庁, 1991). 1950 年噴火での窓ガラスの被害状況は, Sakuma (1951) によりまとめられ, 火口からの距離や窓ガラスの向きとガラス破損との関係が検討された. 1973 年噴火による地域別のガラス破損枚数の記録は気象庁(1973)に残されている. しかし, どこで, どのようなサイズの, また, どのような種類のガラスが割れたのか, といった具体的な情報を詳細に提示している報告例はあまりない. これは, 浅間山に限ったことではなく, 日本の噴火災害記録の中から“窓ガラスの破損があった”と

いう事実以外を, 研究者が過去にさかのぼって得ることは容易でない. 窓ガラスのサイズや種類は, ガラスが破損するかしないかを決定する直接的な因子の一つであり(Baker *et al.*, 1983), 火山噴火による空気振動とガラスの破損被害との関連性を理解する上で大切な情報である. つまり, 今日, 噴火に対する防災や減災が社会から強く要請されていることを考えれば, 噴火が起きるたびに, これが引き起こした被害状況を精査し, その結果を多くの研究者の共有資産として積み重ねていくことは重要であろう. このとき, Taniguchi (1993) や谷口・他(2000)らが指摘しているように, 爆発的噴火のエネルギー評価を行い, 噴火災害との関連性を理解することも, 今後の火山防災につながる大切な作業のひとつとして挙げられよう. そこで本報告では, 浅間山の 2004 年 9

* 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
東北大学大学院理学研究科地学専攻
Institute of Mineralogy, Petrology, and Economic
Geology, Graduate School of Science, Tohoku Uni-
versity, 6-3, Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai
980-8578, Japan.

** 現所属: 〒891-1419 鹿児島市桜島横山町 1722-19
京都大学防災研究所附属火山活動研究センター
Present Address: Sakurajima Volcano Research Cen-
ter, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto

University, 1722-19, Sakurajima-Yokoyamacho, Ka-
goshima 891-1419, Japan.

*** 〒980-8576 仙台市青葉区川内 41
東北大学東北アジア研究センター
Center for Northeast Asian Studies, Tohoku Uni-
versity, 41, Kawachi, Aoba-ku, Sendai 980-8576,
Japan.

Corresponding Author: Akihiko Yokoo
e-mail: yokoo@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

月1日噴火で発生した窓ガラス破損状況を可能な限り詳細に記載し、また、野外爆発実験の知見を用いた9月1日噴火のエネルギー評価を試みた。

2. 浅間山 2004 年 9 月 1 日 噴火

2004年9月1日20時02分、浅間山は山頂火口で爆発的噴火を行い、山腹まで赤熱した噴石を飛散させ、また、山体から北東方向の広い範囲に火山灰や火山礫を降下させた。9月1日噴火の噴出量は 1×10^5 t程度であったと推定されている(気象庁, 2004)。その後、9月半ばには火口底に上昇してきた新溶岩が確認されるなど(国土地理院, 2004)、2004年10月現在も浅間山は活発な噴火

活動を継続している。

浅間山に設置されている気象庁の空振観測点(3点)のうち(Fig. 1)、火口に近い2点(A点、D点)の空振記録はスケールオーバーし(>63.2 Pa)、7.6 km離れたO点で最大振幅205 Paを記録した。噴火直後に行われた、浅間山周囲の16都県の公立小中学校350校を対象とした爆発音・空振の有無、状況についての調査結果からは、やや東に偏した爆発音・空振の感知範囲が判明した(前野・他, 2005)。爆発音が聞こえた調査対象地点のうち、山体から最も遠いところは90 km程離れた新潟県大和町である。9月1日噴火の可聴域は、ほとんど爆発音を伴わなかった前回の1982年噴火のもの(吉留, 1982)

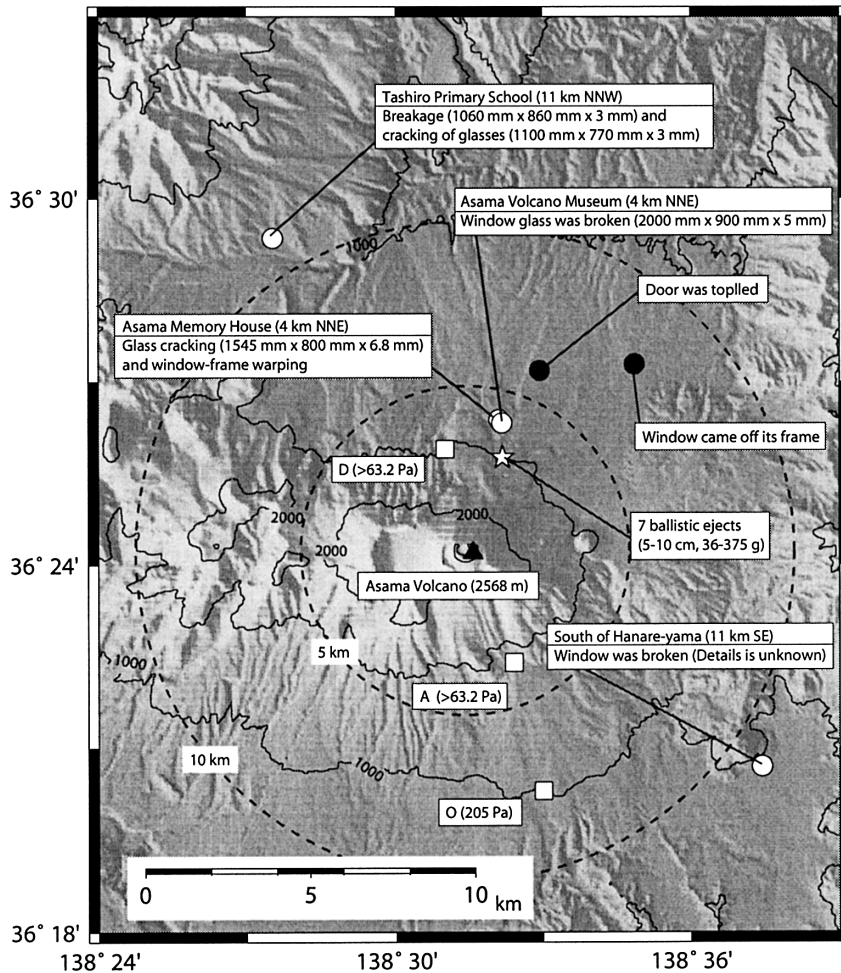


Fig. 1. Disaster distributions around the Asama Volcano by the September 1st eruption. Six places suffered from the air wave; damage to glass windows (open circles) and others (closed circles). Three squares represent the volcano-acoustic stations equipped with a low-frequency microphone by the Japan Meteorological Agency, and the star shows the location where 7 ballistic rocks were discovered by our investigation.

よりも広いが、能登半島に外聴域が現れた 1973 年噴火のもの（気象庁，1973）に比べると半分以下の広さではない。

9 月 8 日に行った現地調査では、火口から北北東へ 2.7 km の地点 (Fig. 1) で 5~10 cm の噴石 7 個を発見した（重量 36~375 g）。これらの噴石はいずれもが灰色の緻密な安山岩質角礫 ($\text{SiO}_2 = 59.7 \sim 60.1 \text{ wt.}\%$) であり、一部は褐色から赤色に変色していた。降灰分布軸である東北東方向へは、火口から 4 km の距離まで噴石が飛散したとの報告（気象庁，2004）があるが、それ以外の方向への噴石飛散距離は不明である。噴火前後（2003 年 6 月，10 月と 2004 年 9 月 3 日）に撮影された空中写真を比較すると、火口から 1.6 km 強の距離までは 1 m 以上の噴石と噴石落下の際に形成されたクレーター状地形が確認された。しかし、これ以遠は植生限界よりも低い標高のために噴石の認知が困難であり、詳細な飛散状況は把握できていない。

3. 窓ガラス破損

3-1 空気振動と窓ガラス破損

爆発によって励起された空気振動で窓ガラスが破損しうるか否かを考える際には、当該地点での空気振動のピーク圧力と、正の圧力 (Δp^+) のインパルス ($I = \int \Delta p^+(t) dt$) の両方を考える必要があるとされている (Baker *et al.*, 1983)。さらに、ガラスの種類やサイズ、あるいは窓枠、壁への設置状況などもガラスが破損するかに影響を与えることが分かっている。ところが、上記の因子の中に窓枠や壁への設置状況といった定量的評価が困難なものが含まれているため、これらの因子それぞれがガラス破損に対してどの程度寄与しているのかを具体的に明らかにすることはできていない。そのため、ガラス破損のしきい値として、爆発事故や大規模

爆発実験結果をもとにした平均的、経験的なピーク過剰圧が提示されているにすぎない (Table 1)。

火山噴火による窓ガラス破損の有無は、当該地点での過剰圧推定に対して有効とする考えがあり (Taniguchi, 1993)、近年ではハザードマップ作成に生かす試みなどもある (Saito *et al.*, 2001)。しかし、Table 1 に示したように、ガラス破損に対応するしきいピーク圧力値は 1 桁以上の幅を有しており、窓ガラスの破損状況だけから当該地点での空気振動ピーク圧を推定するのは少々問題であろう。これに加えて、地形や植生、建造物による反射や回折現象に伴うフォーカシングもあり、現在のところ、ガラス破損と噴火の性質とを直接結びつけることは難しいと考えられる。

3-2 9 月 1 日噴火による窓ガラス破損

9 月 1 日噴火では、公表されているだけで 3 件の空振による窓ガラス破損被害が生じた。そのうちの 2 件（浅間火山博物館と田代小学校）について、より詳しい状況を知るために現地での聞き取り調査を、残りの 1 件（浅間記念館）については観察者に対するアンケート調査をそれぞれ実施した。さらに、山頂から 20 km の範囲についても現地聞き取り調査を行った結果、未公表であった窓ガラス破損 1 件（南南東 11 km）の存在について知ることができた。また、直接的な窓ガラスの破損とは異なるものの、空気振動による家屋の入口扉の倒壊が 1 件（北北東約 6 km）、窓が窓枠からはずれる事例が 1 件（北東約 7.5 km）発生していたことも判明した (Fig. 1)。

3-2-1 浅間火山博物館

火口から北北東へ約 4 km の地点にある浅間火山博物館では (Fig. 1)、空気振動により 1 階出入り口のガラス 1 枚が破損し、破損したガラス片はあまり飛び散ることなく、建物内外へ 50 cm 程飛散した (Fig. 2a)。博物館担当者の証言では、少なくとも当日の朝には当該ガラスに

Table 1. Relationship between the overpressure and damage to glass windows.

Overpressure [Pa]	Damage to glass windows	References
100-300	Minimum damage to glass panels	Kinney and Graham (1985)
200	Breakage of large window glass already under strain	Clancey (1972)
600	Occasionally, glass breakage	Yamamoto (1961)
700	Breakage of small window glass under strain	Clancey (1972)
800-1000	Almost all window glass are broken	Yamamoto (1961)
1000	Typical pressure of glass failure	Clancey (1972)
1000-1500	Typical window glass breakage	Clancey (1972)
3500-7500	All type of windows shattered	Clancey (1972)
4500	breakage of all window panes (3 mm thickness)	Ito (1989)



Fig. 2. Photos of (a) glass breakage at the Asama Volcano Museum taken by Kyodo News, (b) a view from a broken window at Tashiro Primary School and (c) a glass crack at the Asama Memory House taken by M. Enomoto.

ひび等が入っていなかったことは確認済みとのことであった。また、特にガラスの下半分が無くなった、とのことであるが、Fig. 2aを見る限り、ガラスの縦方向全体にわたって中央部分が破損したように思える。ガラスの走行方向と浅間山山頂方向とのなす角は約 30° である。割れたガラスの位置からは入り口のひさが遮蔽物となって、山頂だけでなく山容すら望めない。ガラスは $2000\text{ mm}\times 900\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ （縦、横、厚さ）の普通板ガラス（網なし）であり、アルミサッシにはゴムのシール材で固定されていた。

3-2-2 田代小学校

田代小学校は火口の北北西 11 km に位置している（Fig. 1）。3階建て校舎の1階の教室の窓ガラスが1枚破損し、同教室のもう1枚の窓ガラスでは噴火前にあったひびが伸長した。破損した窓ガラス（網なし）のサイズは $1060\text{ mm}\times 860\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ で、アルミサッシにゴムのシール材で固定されていた。窓ガラスの上部 $2/3$ 程度が破損し、 $15\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 程度の破片一つが窓から 50 cm ほど離れた教室内で発見された以外は、ほとんどすべての

破片が校庭側へ $120\text{--}150\text{ cm}$ 程度の距離まで飛散した。事前にひびが入っていた窓ガラスのサイズは $1100\text{ mm}\times 770\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ である。いずれの窓ガラスも、ガラスの走行と山頂方向のなす角度はおおよそ 60° であり、校舎横の神社の林に遮られるため、山頂はかろうじて望める程度である（Fig. 2b）。

3-2-3 浅間記念館

前述の火山博物館とほぼ同じ地点に位置する（北北東へ約 4 km 、Fig. 1）。南東側のアルミサッシが建造物内へ 6 cm 折れ曲がり、ガラスにひびが入る被害が生じた（Fig. 2c）。ガラスは網入りで、サイズは $1545\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 6.8\text{ mm}$ である。アルミサッシへの固定方法は、ゴムパッキンかシリコンコーティングのいずれか不明である。当該窓は山体に面していないため、回折した空気振動により被害が生じたと考えられる。また、窓ガラスが割れずにすんだのは、窓から 6 cm の位置にある防犯シャッターによって、アルミサッシのたわみが制限されたためと考えられている（浅間記念館榎本光男氏、私信）。

3-2-4 軽井沢町離山南

詳細な位置と破損状況は不明である。噴火直後、窓ガラスが破損したとの連絡が警察にあり警察官が派遣されている。ところが、離山（標高 $1,255\text{ m}$ ）が障壁となって当該窓から直接浅間山山頂が望めないことから、警察はこの窓ガラス破損が噴火による被害でない判断し、公表するに至らなかった。しかし、反射・回折などの効果により、直接山頂が望めるということが必ずしも窓ガラス破損の必要条件にはなりえず（Sakuma, 1951; 京都大学防災研究所附属桜島火山観測所, 1990）、実際、1929年9月の噴火では離山南側の小学校でガラス8枚が破損したという報告が残されている（長野測候所追分支所, 1930）。また、山頂からの距離はおおよそ 11 km と、田代小学校とほぼ同距離であることから、本事例は空振による被害であると考えられる。

4. 爆発エネルギー

前述の通り、窓ガラス破損とピーク圧力の直接的な因果関係を決定するのは難しい。しかし、爆発的な火山噴火のエネルギーと、誘引された火山災害（たとえば窓ガラスの破損や噴石飛散状況）との関連性を知ることは、今後の火山防災につながる有益な事項であると考えられる（Taniguchi, 1993; 谷口・他, 2000）。そこで、ここでは、野外爆発実験の結果（スケーリング則）が火山噴火に適用可能であるという仮定の下、9月1日の火山噴火の爆発エネルギーの推定を試みる。

9月1日噴火の噴出物は、本質物質の占める割合が少

量であったことから (高橋・信州大学浅間火山 04 年噴火調査グループ, 2004), 放出物の大部分は既存の火口内堆積物であったと考えられる。つまり, 噴出物量 1×10^5 t (気象庁, 2004) のほとんどが火口内からもたらされ, 火口底にはクレーター状地形が形成されたはずである。火口内堆積物の平均かさ密度を $1500 \sim 1600 \text{ kg/m}^3$ 程度とすると, 噴火による欠損体積は $6 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ほどになる。9 月 16 日に国土地理院が撮影した SAR 画像からは, 火口底に溶岩ドームが出現した以外の顕著な地形変化は読み取れない。これは, 噴火によって形成されたクレーター状地形が溶岩ドーム (直径 100 m: 国土地理院, 2004) によって隠されてしまったためであろう。そこで, 9 月 1 日噴火によって形成されたクレーター状地形を, 直径 $D < 100$ [m], 深度 d [m] の倒立円錐型であったと考えてみる。すると, その体積 V [m^3] は

$$V = \frac{\pi d D^2}{12} \quad (1)$$

で表され, これを噴火による欠損体積 $6 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4 \text{ m}^3$ とみなすことで, 直径 D と深度 d の関係が決定されることになる。ここでは, Goto *et al.* (2001) によるクレーター直径 D と爆発エネルギー E_{exp} [J] の関係

$$\log D = 0.32 \times \log E_{exp} - 2.06 \quad (2)$$

を用いることで (Fig. 3a), 直径 D とスケール化深度 d' [$\text{m/J}^{1/3}$] (深度 d を爆発エネルギー E_{exp} の 1/3 乗で除して規格化したもの) との関係として Fig. 3b に図示する。スケール化深度が $0.004 \text{ m/J}^{1/3}$ 以下, という式 (2) の適用範囲を考えると, 噴火によって直径 70~100 m 程度のクレーター状地形が形成され, そのときの爆発エネルギーが $1.6 \times 10^{12} \sim 4.7 \times 10^{12} \text{ J}$ であったと推定される。

Baker *et al.* (1983) は自由空間における TNT 爆薬の爆発について, 爆発によって励起される空気振動のピーク過剰圧 ΔP [Pa] とスケール化距離 l' [$\text{m/J}^{1/3}$] (実距離 l [m] を爆発エネルギーの 1/3 乗で規格化) の関係を図示している。これによると, ピーク過剰圧が $10^2 \sim 10^3 \text{ Pa}$ の範囲で

$$l' = 240 \times \Delta P^{-0.96} + 0.07 \quad (3)$$

である (ただし, Baker *et al.* (1983) の Figure 2-45 から読み取った)。この式に, 気象庁の O 点で観測されたピーク過剰圧値 (205 Pa) を適用すると, 当該地点のスケール化距離 l' は $1.52 \text{ m/J}^{1/3}$ となり, 火口から O 点までの距離が 7.6 km であることから, 9 月 1 日噴火のエネルギーは $(7600/1.52)^3 = 1.3 \times 10^{11} \text{ J}$ と見積られる。しかし, この値はさきに推定した爆発エネルギー E_{exp} (Fig. 3

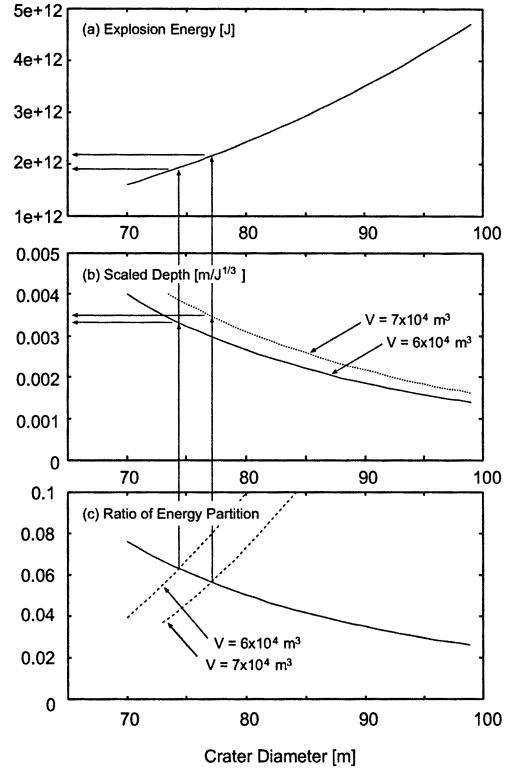


Fig. 3. The relationships between the crater diameter (D ; m) and (a): Explosion energy (E_{exp} ; J) calculated using eq. (2), (b): scaled depth of explosion (d' ; $\text{m/J}^{1/3}$) under the assumption of crater's volume; $V = 6.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ and $7.0 \times 10^4 \text{ m}^3$, and (c): ratio of energy partition for blast from explosion energy (ϵ_{blast}). Dashed lines in (c) are derived by applying the results from field explosion experiments (eq. (4)). See text in details.

a) よりも一桁ほど小さい。これは, 空振データから推算した $1.3 \times 10^{11} \text{ J}$ というエネルギーは, 火山噴火自体の爆発エネルギー E_{exp} の一部分, つまり, 空気振動を励起した (空振励起に分配された) エネルギーしか反映されていないためである。

ところで, 爆発実験の結果 (Goto *et al.*, 2001) から推定される空振へのエネルギー分配率 ϵ_{blast} とスケール化深度 d' との関係は $0 < d' < 0.01$ の範囲において

$$\epsilon_{blast} = \exp(-0.45 - 700 \times d') \quad (4)$$

で表すことができ, 爆発のスケール化深度が大きくなるほど空振へのエネルギー分配率が小さくなる。9 月 1 日噴火において仮定されるクレーター直径 D とスケール

化深度 d' との関係 (Fig. 3b) を考慮すれば, ϵ_{blast} は $6 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4 \text{ m}^3$ というそれぞれの体積条件下では Fig. 3c の点線のように計算される. 一般的には, クレーター直径 D が大きくなるほど, クレーター形成 (山体の破壊や噴石の放出) に費やされるエネルギーが大きくなり, その分, 空気振動へ分配されるエネルギーは小さくなると考えられるだろう. しかし, ここではクレーターの体積 V を固定して考えているために, 直径 D が大きくなるにつれて深度 d (およびスケール化深度 d' (Fig. 3b)) が小さくなり, その結果, 式 (4) にしたがって空振へのエネルギー分配率 ϵ_{blast} が大きくなる. ところで, クレーター直径から推算した爆発エネルギー (Fig. 3a) と空振データから推算したエネルギー (空振を励起したエネルギー) から計算される ϵ_{blast} は Fig. 3c の実線のように表される. 爆発実験の結果が火山噴火に適用可能であるという仮定の下では, 両者の交点が浅間山の 9 月 1 日噴火に対する制約条件となる. つまり, 9 月 1 日噴火によって形成されたクレーターの直径は $74 \sim 77 \text{ m}$ であり, これに対応する爆発エネルギーとして $1.4 \times 10^{12} \sim 2.2 \times 10^{12} \text{ J}$ が得られる (Fig. 3a). このとき, 式 (1) よりクレーターの深さが $42 \sim 45 \text{ m}$ と計算され, クレーター底で爆発が起きたとすればスケール化深度は $0.0034 \sim 0.0035 \text{ m/J}^{1/3}$ となる (Fig. 3b).

噴石飛散の観点からこの爆発エネルギー E_{exp} の妥当性について簡単に検討する. 野外爆発実験では, 爆発によって飛散した土塊の飛散距離や飛散物の重量が測定され, その結果はスケール化深度 d' に対してスケール化距離 I' , スケール化重量 w' [$\text{kg/J}^{1/3}$] をパラメータとしてプロットされている (Fig. 4). Fig. 4 の点線はそれぞれのスケール化深度の爆発に対応した土塊の飛散距離限界を表しており, スケール化深度が $0.003 \sim 0.004 \text{ m/J}^{1/3}$ あたりで最大となる結果が得られている (谷口・他, 2000). これを参考にすると, 先に得られたスケール化深度 ($0.0034 \sim 0.0035 \text{ m/J}^{1/3}$) に対応する噴石の飛散限界はスケール化距離でおおよそ $0.04 \text{ m/J}^{1/3}$ と予想される. このスケール化距離に爆発エネルギー E_{exp} ($1.4 \times 10^{12} \sim 2.2 \times 10^{12} \text{ J}$; Fig. 3a) の $1/3$ 乗を乗じることで, 9 月 1 日噴火による噴石はおおよそ $4.5 \sim 5 \text{ km}$ 程の距離まで飛散するという結果が得られる. ちなみに, 野外爆発実験で用いられた爆薬のエネルギーは最大で $4.7 \times 10^7 \text{ J}$, 飛散物の計量限界は 10 g であることから, 飛散距離限界線 (Fig. 4 の点線) はスケール化重量 $2.8 \times 10^{-5} \text{ kg/J}^{1/3}$ 以上の飛散物 (噴石) に対して有効である. つまり, ここで想定する噴石の重量は $2.8 \times 10^{-5} \times E_{exp}^{1/3} = 0.3 \text{ kg}$ である. 実際に我々が噴石を発見した場所は火口から 2.7 km の距離であり, 確かにこの限界距離を越えていない. また, 火口

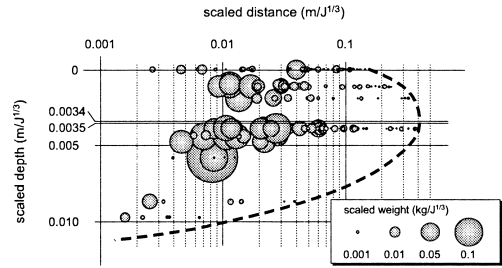


Fig. 4. Relationships among scaled distance (I' ; $\text{m/J}^{1/3}$), scaled depth (d' ; $\text{m/J}^{1/3}$), and scaled weight of ballistics (w' ; $\text{kg/J}^{1/3}$) with an empirical limit of the maximum scaled distance of ballistics (broken line). These bubbles are resulted from several charge explosion experiments ($7.4 \times 10^4 \sim 4.7 \times 10^7 \text{ J}$). This figure is modified from Taniguchi *et al.* (2000).

から 4 km の地点で 320 g の噴石 (東京大学地震研究所嶋野岳人氏, 私信) が発見されていることに特に矛盾しない. もちろん, ここで使用した経験式 (2)~(4) や爆発実験の結果自身が有している誤差や物理的背景についてきちんと検討しなければならないが, 上述の手順で推定されたエネルギー量やクレーター直径はおおむね正しい値であると考えてよさそうである. 言い換えれば, ダイナマイト爆発と火山噴火という本質的な違いはあるものの, 爆発や噴火で発生する緒現象のうち, 空気振動や噴石の飛散といった地表面象の類似性は大きいことが考えられる.

5. 結 論

浅間山は 2004 年 9 月 1 日 20 時 02 分過ぎに噴火し, 山体周囲の広い範囲で空気振動が感知された. この空気振動により, 公表・未公表併せて 4 件の窓ガラスの破損被害が発生した. これらのうち火口から最も遠いところは約 11 km の距離であり, また, 直接山頂を望めない窓ガラスが破損している状況もあった.

爆発実験結果が火山噴火に適用できるという仮定の下, 火口形状を倒立円錐で近似し, 噴出物量から欠損体積を求めて, 爆発エネルギーの推算を行った. さらに, 空振へのエネルギー分配の妥当性を考慮することで, $1.4 \times 10^{12} \sim 2.2 \times 10^{12} \text{ J}$ の値が得られた. このときの噴石飛散距離の限界は $4.5 \sim 5 \text{ km}$ 程度と見積もられ, 実際の噴石飛散距離と特に矛盾しなかった.

謝 辞

聞き取り調査の際には, 浅間火山博物館, 田代小学校

の関係者を始めとした、多くの方々にご協力いただいた。国土交通省には空中写真の使用を許可していただき、その判読には田中倫久氏のご協力があった。共同通信社、榎本光夫氏には写真の使用を許可していただいた。また、大島弘光氏と匿名の査読者、ならびに、後藤章夫氏からの建設的なご意見は本稿を改善する上で大変役に立った。以上の方々に感謝します。本研究の一部には文科省科研費補助金(特定領域研究(2)課題番号14080203 研究代表者: 谷口宏充)を使用した。

引用文献

- Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J. and Strehlow, R. A. (1983) **Explosion hazards and evaluation**. Elsevier, Amsterdam, 807 p.
- Clancey, V. J. (1972) Diagnostic features of explosion damage. 6th Int. Meeting of Forensic Sciences, Edinburgh.
- Goto, A., Taniguchi, H., Yoshida, M., Ohba, T. and Oshima, H. (2001) Effects of explosion energy and depth to the formation of blast wave and crater: field explosion experiment for the understanding of volcanic explosion. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4287-4290.
- 伊藤一郎 (1989) 発破の安全対策と公害問題. 新・発破ハンドブック (工業火薬協会編), 山海堂, 349-385.
- Kinney, G. F. and Graham, K. J. (1985) **Explosive shocks in air**. Springer-Verlag, New York, 269 p.
- 気象庁 (1973) 火山報告 昭和 48 年 1~3 月. **13-1**, 121 p.
- 気象庁 (1991) 日本活火山総覧. 気象庁, 484 p.
- 気象庁 (2004) 浅間山の火山活動に関する火山噴火予知連絡会拡大幹事会見解. 気象庁 報道発表資料 平成 16 年 9 月 9 日.
- 国土地理院 (2004) 合成開口レーダー観測により浅間山火口底のマグマを確認. 国土地理院 2004 年記者発表 9 月 20 日.
- 京都大学防災研究所附属桜島火山観測所 (1990) 桜島火山の爆発的噴火によるガラスの被害調査報告. 火山噴火予知連会報, **47**, 96-102.
- 前野 深・横尾亮彦・菅野繁広・紺谷和生・小暮昌史・谷口宏充 (2005) 通信調査にもとづく浅間山 2004 年 9 月 1 日噴火における空気振動の分布域. 東北アジア研究, **9**, 243-252.
- 長野測候所追分支所 (1930) 浅間山麓被害調査. 験震時報, **4**, 193-196.
- Saito, T., Eguchi, T., Takayama, K. and Taniguchi, H. (2001) Hazard predictions for volcanic explosions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **106**, 39-51.
- Sakuma, S. (1951) Damage on window-panes by the air-waves of explosion of Volcano Asama on Sept. 23, 1950. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **24**, 605-615.
- 高橋 康・信州大学浅間火山 04 年噴火調査グループ (2004) 浅間火山 2004 年 9 月 1 日噴火の噴出物について. 地質学会学術大会講演要旨 (増補版), S-4.
- Taniguchi, H. (1993) Recent situation and plan for the explosion energy estimation of phreatomagmatic explosion. In *Proceedings of the International Seminar of Physics of Vapor Explosions*, edited by M. Akiyama, 263-269.
- 谷口宏充・他 18 名 (2000) 火山爆発計測プロジェクト '99. 1999 年野外爆発実験成果報告書, 39 p.
- 山本祐徳 (1961) 爆発と被害. 工業火薬, **22**, 42-45.
- 吉留道哉 (1982) 昭和 57 年 4 月 26 日 浅間山の噴火. 気象, **302**, 13-14.

(編集担当 小川康雄)