

火山爆発により放出される火山岩塊・レキの到達距離

井口 正人・加茂 幸介

ON THE RANGE OF BLOCK AND LAPILLI EJECTED BY THE VOLCANIC EXPLOSIONS

By Masato IGUCHI and Kôsuke KAMO

Synopsis

Effect of some parameters on the range of volcanic blocks and lapilli is examined. They are topography, diameter and maximum initial velocity of blocks, inclination of explosion axis and velocity of wind for the former, and velocity of wind and column height for the latter.

Some examples of calculated results under certain parameters are as follows. The range of blocks ejected south to the active crater increases by 3, 6 and 9% due to the fair wind of which velocity is 10, 20 and 30%, respectively. Also, the range does by 34, 60 and 69% (maximum) due to the inclination of explosion axis of which angle is 15, 30 and 51 deg, respectively. Air fall of lapilli could attain a range of 3.5, 6.9 and 10.4 km from the active crater when the column height is 3000 m and the velocity of wind is 10, 20 and 30 m/s, respectively. When the column height is 4000 m, the range of lapilli above mentioned increase by about 30%.

1. はじめに

火山碎屑物の落下は土地・建物等の破壊・埋没を引き起こす。桜島火山においては1955年以後の山頂噴火期に火山碎屑物の落下による被害が頻発している。噴火予知が確立されていない現状では、火山碎屑物の落下範囲を予測しておく必要がある。

今回は¹⁾、爆発により放出された火山岩塊の弾道を解析することにより初速度と射出角の関係を明らかにし、空気の抵抗を無視し得る大きさ（直径 1 m 以上）の岩塊の到達範囲を求めた。しかし、集落のある地域において落下が確認された多くの火山碎屑物の最大径は 1 m 未満であり²⁾、空気の抵抗を無視してその到達距離を議論することは適当でない。したがって、現実に被害を惹起する大きさの火山碎屑物の落下範囲を予測するためには、噴煙柱高度や風向・風速などの外的条件を考慮すべきである。今回は、岩塊（径 64 mm 以上）、レキ（径 2~64 mm）に分けて、その運動に影響を与えるパラメータの変化による到達距離の変動を検討する。

2. 方法

岩塊およびレキの運動は次の3つの過程に分かれると考えられる。

- I vent から爆発によりある初速度で放出される過程
- II 上昇する噴煙ガス中の運動過程
- III 大気の抗力を受けながら落下する過程

しかし、岩塊とレキではその運動を支配する力が異っており、上記 I~III の過程の取扱いは同等でない。すなわち、質量の大きい岩塊の運動には慣性力が卓越しており、噴煙ガス中の飛行時間はきわめて短い。したがって、岩塊は噴煙ガスの上昇による影響はほとんど受けず、I→III の過程を経て地表に落下するとみな

することができる。一方、質量の小さいレキの運動には、噴煙ガスおよび大気の影響が大きい。レキの上昇運動は、vent から放出速度とはほとんど無関係に噴煙の上昇運動に支配され、最大径 7 cm 以下のものが噴煙とともに上昇する可能性がある（付録参照）。したがって、レキの到達距離を議論する上ではレキは II→III の過程を経て地上に落下するとみなして差し支えないものと考えられる。ここでは、レキは噴煙上昇によって噴煙の最大高度まで達すると仮定した。初期条件を最大高度から初速度 0 で落下するものとし、III の過程についてのみ計算した。

2.1 大気中における岩塊・レキの運動方程式

大気中を飛行する岩塊・レキには、大気との相対速度の 2 乗に比例する抗力と、重力が働くと考えられる。したがって、風向 ($-\varphi_w$)、風速 (V_w) の水平一様風の中を岩塊・レキが飛行する場合の運動方程式は、次のように表される^{3), 4)}。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= \delta \lambda (\dot{x} - V_w \cos \varphi_w)^2 \\ \ddot{y} &= \delta \lambda (\dot{y} - V_w \sin \varphi_w)^2 \\ \ddot{z} &= \delta \lambda \dot{z}^2 - g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

δ は $\dot{x} - V_w \cos \varphi_w$, $\dot{y} - V_w \sin \varphi_w$, $\dot{z}$ の正負によりそれぞれ -1, +1 の値をとる。その他の変数の説明は Table 1 にまとめて付す。ここで

Table 1 Explanation of symbols

a	:	largest orthogonal dimension of lapilli
b	:	second largest orthogonal dimension of lapilli
C_D	:	drag coefficient
d	:	diameter of block
g	:	gravitational acceleration
H	:	height of volcanic cloud
H_p	:	column height
H_v	:	height of vent
m	:	mass of block and lapilli
S	:	cross-sectional area of block and lapilli
T_p	:	time when lapilli starts to fall
T_3	:	time when the volcanic cloud is emitted
T_4	:	time when the velocity of volcanic cloud becomes minimum
v	:	initial velocity of block
V_g	:	uprise velocity of volcanic cloud
$V_{\max}$	:	maximum initial velocity of block
V_t	:	terminal velocity of block and lapilli
V_w	:	velocity of wind
x, y, z	:	rectangular coordinate system
X_m	:	range of block and lapilli
ρ_a	:	density of air
ρ_b	:	density of block and lapilli
ρ_g	:	density of volcanic cloud
μ	:	ratio of cross-sectional area to mass
μ_s	:	ratio of cross-sectional area to mass for the spheres
θ	:	angle of ejection of block
θ_{opt}	:	optimum ejection angle
θ_i	:	angle of inclination of explosion axis
ψ	:	direction of ejection of block
ψ_i	:	direction of inclination of explosion axis
ψ_w	:	direction of wind

$$\lambda = \frac{c}{m} \dots\dots\dots (2)$$

であるが、断面積と質量の比¹⁾を導入することにより、

$$\lambda = \frac{1}{2} C_D \rho_a \mu \dots\dots\dots (2)'$$

$$\mu = \frac{S}{m} \dots\dots\dots (3)$$

と表される。飛行物体が球の時、(3)式は

$$\mu_s = \frac{3}{2\rho_s d} \dots\dots\dots (3)'$$

となる。球でない場合は、 $\mu > \mu_s$ であるから、より大きい空気抵抗を受けることになる。

2.2 初期条件

岩塊の場合、初期値は過程Ⅰにより与えられる。そこで、岩塊が x 軸方向に初速度 (v)、射出角 (θ) で放出されるとすれば、初期条件は

$$t=0 \quad x=y=0, \quad z=H_p \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = 0 \\ \dot{z} = v \sin \theta \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

となる。岩塊の初速度は射出角に依存する¹⁾。爆発の主軸が鉛直から角度 (θ_1) だけ傾いている場合は、次の関係が成り立つ。

$$v = V_{\max} \sin^{1.5}(\theta - \theta_1) \dots\dots\dots (6)$$

レキの場合、火口の直上に上昇した噴煙性の高度 (H_p) から初速度 0 で落下するとすれば、初期条件は

$$\left. \begin{array}{l} t=T_p \quad x=y=0, \quad z=H_p \\ \dot{x}=\dot{y}=\dot{z}=0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

と与えられる。

2.3 到達距離

岩塊の運動は、(5)式の初期条件から(1)式を解くことにより、次のようになる^{1),3)}。

$$\left. \begin{array}{l} x = V_w t \cos(\varphi_w - \varphi) + \frac{1}{\lambda} \log \{ \lambda t (v \cos \theta - V_w \cos(\varphi_w - \varphi)) + 1 \} \\ z = \frac{1}{\lambda} \log \sin \left(\sqrt{\lambda g} t + \cot^{-1} \sqrt{\frac{\lambda}{g}} v \sin \theta \right) + \frac{1}{\lambda} \log \sqrt{1 + \frac{\lambda}{g} v^2 \sin^2 \theta} \quad (z \geq 0) \\ z = -\frac{1}{\lambda} \log \cosh \left(\sqrt{\lambda g} t + \tan^{-1} \sqrt{\frac{\lambda}{g}} v \sin \theta \right) + \frac{1}{\lambda} \log \sqrt{1 + \frac{\lambda}{g} v^2 \sin^2 \theta} \quad (z < 0) \end{array} \right\} \dots\dots (8)$$

($t > 0$)

また、レキの運動は、風向を x 軸として(7)式の初期条件から(1)式を解くことにより、

$$\left. \begin{array}{l} x = V_w(t - T_p) - \frac{1}{\lambda} \log(1 + \lambda V_w(t - T_p)) \\ z = -\frac{1}{\lambda} \log \cosh(\sqrt{\lambda g}(t - T_p)) + H_p \end{array} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

となる。到達距離は、(8)、(9)式から求められる弾道方程式と地表面の交点から決まる。

3. 到達距離の計算結果

3.1 岩塊の到達距離

岩塊の到達距離への影響を検討した変数を次に列挙する。

① 桜島火山の山体の地形

- ② 岩塊の直径
- ③ 岩塊の最大初速度
- ④ 爆発の主軸の鉛直からの傾き
- ⑤ 風速

ここで、岩塊の直径として噴煙により上昇しない大きさ 0.1 m 以上を採用した (付録参照)。最大初速度は前回¹⁾と同じ範囲の値である。また、爆発の主軸の傾きは、岩塊が火口壁を越えることを考慮して 0~55° とした。さらに、風速は、台風接近時を考慮して 0~40 m/s とした。以上、変数の効果をみるための設定条件を Table 2 にまとめて示した。なお、岩塊の形状として球を仮定した ($\mu=\mu_s$, $C_D=0.2^{(3)}$)。重力加速度は 9.79 m/s² とした。

(1) 山体の地形の効果 (case 1)

山体の地形の効果を検討するために、火口から人家の多い 8 集落への地形断面を考慮して (8) 式から計算された岩塊の到達距離を Table 3 に示した。火口の南側への到達距離が大きく、北側へは小さく 190 m の差がある。これは、火口と海岸線の間の平均勾配が、南側の方が約 8° 大きいためである。case 2 以下では、一定の初速度を与えた時の到達距離が最も大きい方位 N166°E の地形断面に沿って計算を行っている。

Table 2 Parameters in each case of calculation for the range of block

	V_{max} m/s	θ deg	ψ_i deg	θ_i deg	ψ_i deg	d m	V_w m/s	ψ_w deg	Remarks
case 1	220	63	8 directions*	0	—	1.0	0	—	effect of topography
case 2	220	63	166	0	—	0.1-1.0	0	—	effect of diameter
case 3	100-300	63	166	0	—	0.2 0.6 1.0	0	—	effect of V_{max}
case 4	220	35-90	166	0-55	166	1.0	0	—	effect of explosion axis
case 5	220	63	166	0	—	0.2 0.6 1.0	0-40	166	effect of velocity of wind

* 27, 87, 122, 166, 220, 288, 314, 339 deg

Parameters ψ , ψ_i , ψ_w are directions measured clockwise from the north

Table 3 Range of block in the 8 directions of densely populated area

Direction deg	Mean angle of inclination deg	Range of block ($d=1.0$ m) km
27	8.9	2.63
87	10.1	2.74
122	9.3	2.74
166	16.5	2.79
220	13.2	2.76
288	9.1	2.69
314	9.1	2.70
339	9.9	2.60

Directions are measured clockwise from the north. Condition of calculation is as follows.

$V_{max}=220$ m/s, $\theta=63$ deg, $\theta_i=0$ deg, $d=1.0$ m and no wind

(2) 岩塊の直径の効果 (case 2)

岩塊の直径の変化により、到達距離へ及ぼす空気抵抗の影響を見積った。最大初速度 220 m/s 時の岩塊の直径と到達距離の関係を Fig. 1 に示した。同図中に点線により示した、空気抵抗を無視した場合の到達距離を基準にとると直径 1 m の岩塊の到達距離は10%減、また直径 0.6 m の岩塊については15%減である

が、直径 0.2 m の岩塊の到達距離は 34% 減となり空気抵抗の影響が顕著にあらわれる。

(3) 最大初速度の効果 (case 3)

岩塊の最大初速度と到達距離の関係を Fig. 2 に示した。直径 60 cm の岩塊の場合、10 m/s の最大初速度の増加により約 180 m 遠方に到達する。また火口の南方 2.7 km の距離にある集落に到達する可能性のある岩塊の最大初速度は、直径 100 cm の場合 220 m/s、直径 60 cm の場合 230 m/s、さらに直径 20 cm の場合は 300 m/s である。

(4) 爆発の主軸の傾きの効果 (case 4)

火山爆発の場合、2.2 で述べたように岩塊の初速度は射出角、すなわち爆発の主軸となす角度に依存しており、爆発の主軸が鉛直にある時、桜島火山の山体斜面の平均的な勾配を考慮すると、最大到達距離を与える射出角は 61° である。爆発の主軸の傾きによって、最大到達距離とそれを与える射出角は変化する。その様子を Fig. 3(b) に模式的に示した。

爆発の主軸の傾きに伴う最大到達距離の増加を、爆発の主軸が鉛直方向にある時の最大到達距離との比によって Fig. 3(a) に示した。爆発の主軸の傾きが 51° の時、最大到達距離は 69% 増の極大値を示す。また、主軸の傾斜方位と反対方位では到達距離が 7% に減少する。

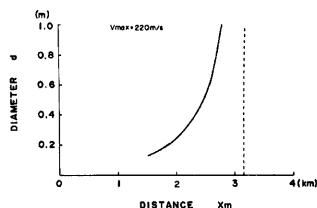


Fig. 1 Effect of diameter of block on the range in the case of $V_{\max}=220$ m/s, $\theta=63$ deg, $\psi=166$ deg, $\theta_i=0$ deg and no wind

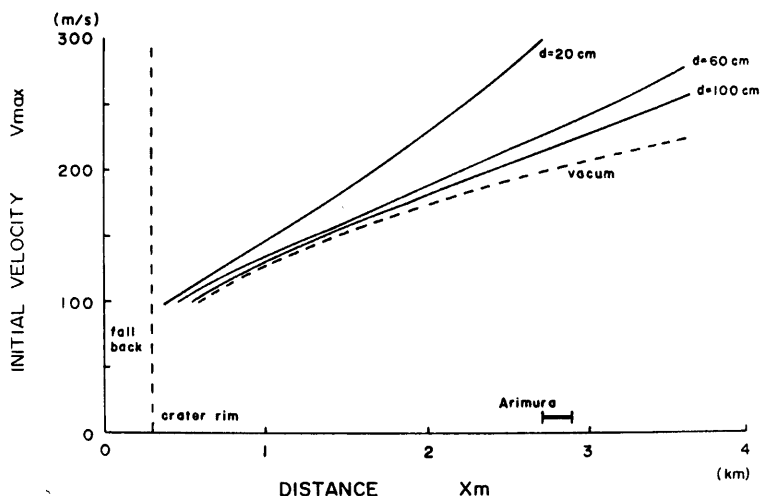


Fig. 2 Effect of maximum initial velocity on the range of block for various values of the diameter, 0.2, 0.6, 1.0 m in the case of $\theta=63$ deg, $\psi=166$ deg, $\theta_i=0$ deg, and no wind

(5) 風速の効果 (case 5)

風速の変化による到達距離の変動を無風時の到達距離との比によって Fig. 4 に示した。例えば、直径 60 cm の岩塊の到達距離は追風 20 m/s 時に 6% 増加し、向風 20 m/s 時に 8% 減少する。直径 20 cm の岩塊の場合は、追風 20 m/s 時に 16% 増加し、向風 20 m/s 時に 17% 減少する。このように、岩塊の直径が小さくなるにつれて風の影響を受け易いことがわかる。

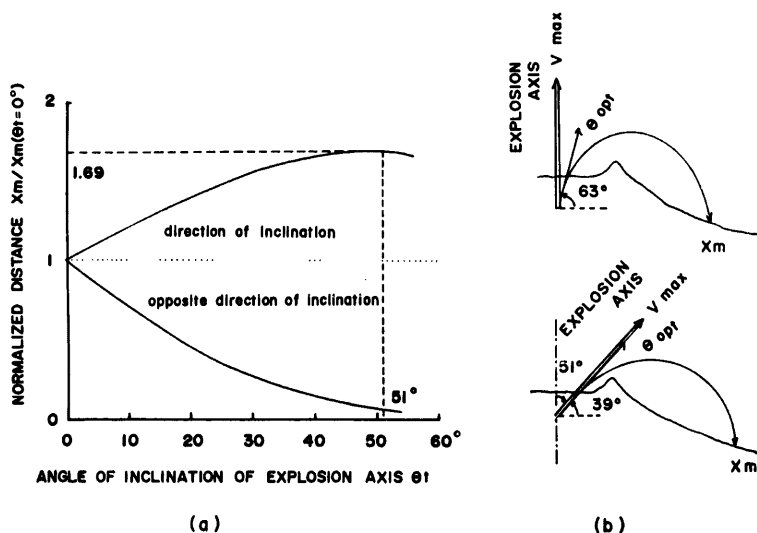


Fig. 3 (a) Effect of angle of inclination of explosion axis on the range of block in the case of $V_{max}=220$ m/s, $\theta=63$ deg, $\psi=166$ deg, $\psi_i=166$ deg, $d=1.0$ m and no wind. The vertical axis is the normalized range by the value in the case that the explosion axis is not inclined.
(b) Change of range and optimum ejection angle of block due to inclination of the explosion axis

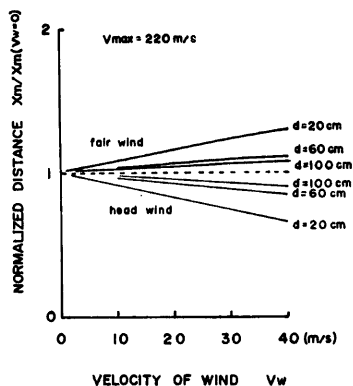


Fig. 4 Effect of velocity of wind on the range of block for various values of the diameter, 0.2 m, 0.6 m, 1.0 m in the case of $V_{max}=220$ m/s, $\theta=63$ deg, $\psi=166$ deg, $\theta_i=0$ deg, $\psi_w=166$ deg. The vertical axis is the normalized range by the value in the case of no wind.

3.2 レキの到達距離

レキの到達距離への影響を検討したパラメータは、

- ① 風速
- ② 噴煙柱高度

である。岩塊は、観察される形状から球として取扱ったが、実際に観察されるレキの大半は扁平であり、球

として取扱うことは適当でない。付録に示したように、実際のレキの断面積と質量の比 (μ) は、球の場合の 1.5~7.0 倍である。そこで $\mu=7\mu_s$, $C_D=1.17^9$ とし計算した。設定条件は Table 4 にまとめて示した。ただし、防災上問題となるのは、風の影響により、標高の低い海岸部の集落または市街地にレキが達する場合であるから、地表面の標高は海面に等しいとして到達距離を求めた。

Table 4 Parameters in each case of calculation for the range of lapilli

	a m	H_p m	V_w m/s				ρ_s kg/m ³	Remarks
case 6	0.01	3000	0-40				2500	effect of velocity of wind
case 7	0.01	0-5000	10	20	30	40	2500 700	effect of column height

(1) 風速の効果 (case 6)

最大径 1 cm のレキの到達距離に及ぼす風速の影響を Fig. 5 に示した。ここでは噴煙柱高度を 3000 m としている。風速 10 m/s 時のレキの到達距離は 3.5 km であり、火口南方の海岸線までレキが落下する可能性がある。風速 20 m/s の時は、到達距離は 6.9 km に、30 m/s の時は 10.4 km に増加する。

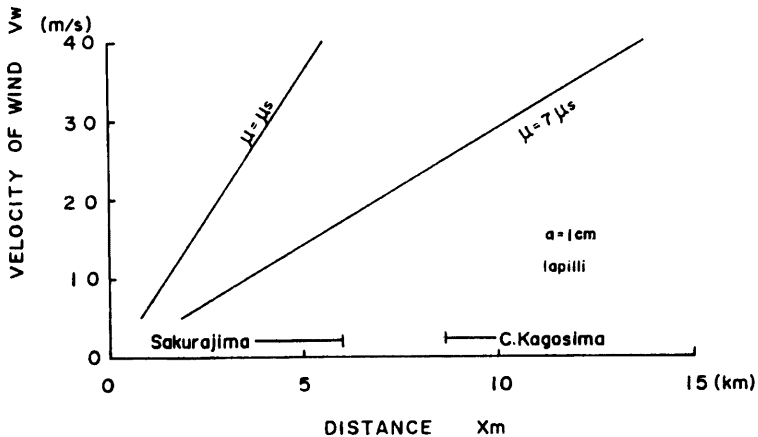


Fig. 5 Effect of velocity of wind on the range of lapilli in the case of $a=0.01$ m, $H_p=3000$ m, $\rho_s=2500$ kg/m³

(2) 噴煙柱高度の効果

最大径 1 cm のレキと軽石の場合について、噴煙柱高度の到達距離への影響を風速をパラメータとして Fig. 6 に示した。風速 10 m/s 時に、噴煙柱高度が 2000 m から 3000 m に増加すると、レキの到達距離は 2.3 km から 3.5 km に増大する。また、軽石の場合は 4.0 km から 6.0 km に増大する。

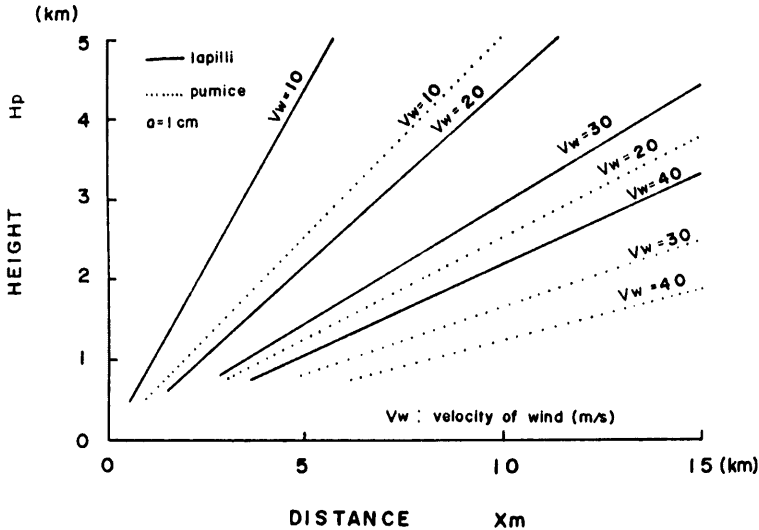


Fig. 6 Effect of column height on the range of lapilli for various values of velocity of wind, 10, 20, 30 and 40 m/s in the case of $a=0.01$ m and $\rho_b=2500$ kg/m³ for lapilli and $\rho_b=700$ kg/m³ for pumice

4. 計算結果と実測値の比較

4.1 岩 塊

岩塊の到達距離への影響が大きいパラメータは、最大初速度と爆発の主軸の傾きである。以下、この2つのパラメータについて求められた計算結果と実際に確認された岩塊の分布とを比較する。

1955年以後の山頂噴火により放出された岩塊の分布と、無風であり、かつ爆発の主軸が鉛直にある時の直径1mの岩塊の到達範囲を最大初速度の contour により Fig. 7 に示した。実際に落下した岩塊については、直径1mの岩塊の到達距離との誤差が10%以下となるように、直径50cm以上のものを選び、1955~1981年の噴石分布²⁾に1982~1983年に到達距離と大きさが確認されたものを加筆した。3.1に示したように、爆発の主軸の傾き及び気象条件により変動があるが、計算結果および実際の岩塊の分布から中規模以上の爆発により火口から概略3km以内の範囲に岩塊が落下すると考えられる。

爆発の主軸が鉛直から傾いた場合の落下範囲が2, 3の火山について報告されている^{6), 7)}。爆発の主軸を傾けることにより実際の岩塊の落下分布を説明できる例を Fig. 8 に示した。最大初速度を120 m/sとして、爆発の主軸を鉛直からN82°Eの方角へ15°傾斜させた場合の到達範囲を実線により、また傾斜させていない場合を破線により示してある。実際の岩塊の分布は、写真撮影された落下点と地形図との対応をとることにより求めた¹⁾。主軸を傾斜させることにより34%の到達距離の増加が認められる。逆に、主軸の傾きを考慮しないで最大到達距離から最大初速度を求めると140 m/sとなり20 m/sの誤差が生じる。このことは、最大到達距離から最大初速度を求める場合は、岩塊の分布範囲全体を考慮し、爆発の主軸の傾きを求めなければならないことを意味する。

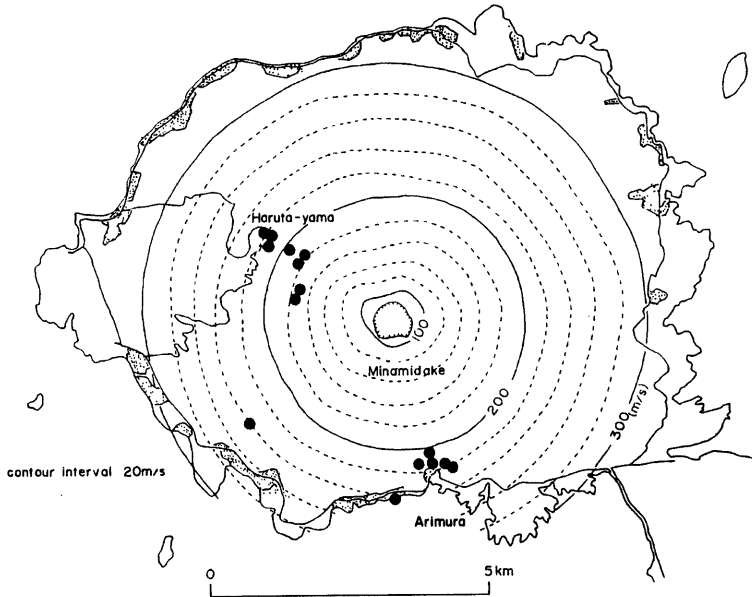


Fig. 7 Distribution of fallen position of volcanic block ($\phi > 0.5$ m) which diameter and range were really measured during period 1955 to 1983 and calculated range of block denoted by contours of maximum initial velocity, 100 to 300 m/s in the case of $\theta = 63$ deg, $\theta_i = 0$ deg, $d = 1.0$ m and no wind

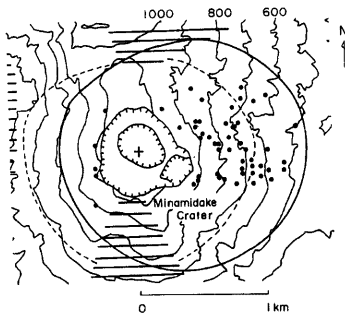


Fig. 8 Distribution of fallen positions of volcanic block ejected by the explosion on Oct. 7, 1982 and calculated range in the case of $V_{max} = 120$ m/s. The positions of fall are determined by 2 still cameras and topographical map¹⁾. Solid line denotes the calculated range when the explosion axis is inclined by 15 deg in the direction of N82°E and dashed line denotes the calculated one when the explosion axis is not inclined.

4.2 レキ

3.2 (1) において得られた理論曲線と海岸線の近傍において実際に落下が確認された最大径 1 cm のレキの到達距離と爆発時の風速を Fig. 9 に示した。爆発時の風速は、噴火時刻に最も近い時刻の 900~700 mb の指定気圧面 (高度 1000~3000 m 相当) の風速の平均値により代表させた。桜島火山においては中規模以上の爆発により噴煙柱が 3000 m 以上に達している⁸⁾、 $H_p = 3000$ m として計算した。レキの形状は、岩塊に比べて扁平なので、断面積と質量の比を球の場合の 7 倍とすれば、風速によりレキの到達距離を説明で

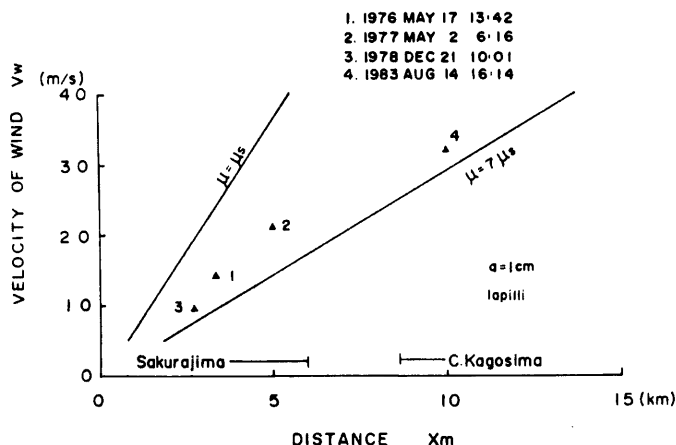


Fig. 9 Really observed positions of fallen lapilli are plotted on the Fig. 5 (calculated) for comparison. Velocity of wind is mean one 1000 to 3000 m above the crater at the time of explosion.

きる。強風は、冬季や台風等低気圧接近時に観測される。例えば、台風時に東風・風速 30 m/s であれば、鹿児島市街地にレキが落下する (Fig. 9 に 4 と示す)。

5. ま と め

噴火予知が確立されていない現状において火山災害の防災資料の一つとして、岩塊・レキの運動に影響を及ぼすパラメータの変化による到達距離への効果を見積った。

岩塊の到達距離に最も影響を与えるパラメータは最大初速度と爆発の主軸の傾きである。直径 0.6 m の岩塊は最大初速度が 230 m/s 以上の時、火口から 2.7 km 以上の距離に到達する。また、爆発の主軸の鉛直からの傾きにより最大 69% の到達距離の増加の可能性がある。

レキの到達距離は、主に風速と噴煙柱高度の影響を受ける。噴煙柱高度が 3000 m 以上に達し、火口上空の風速が 10 m/s 以上ならば、火口から 3.5 km 以上の距離に最大径 1 cm のレキが落下する。

高層気象データを提供された鹿児島地方気象台に厚く御礼申し上げます。なお、本研究に要した経費の一部は科学研究費補助金によるものである。

参 考 文 献

- 1) 井口正人・石原和弘・加茂幸介：火山弾の飛跡の解析—放出速度と爆発圧力について—，京都大学防災研究所年報，第 26 号 B-1, 1983, pp. 9-21.
- 2) 江頭庸夫：山頂噴火に伴う噴石の分布，噴火災害の特質と Hazard Map の作製およびそれによる噴火災害の予測の研究（文部省科学研究費自然災害特別研究），1981, pp. 169-170.
- 3) Minakami, T.: On the Distribution of Volcanic Ejecta. (Part 1.) The Distribution of Volcanic Bombs ejected by the Recent Explosions of Asama, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 20, 1942, pp. 65-92.
- 4) Self, S., Kienle, J. and Huot, J. P.: Ukinrek Maars, Alaska, II. Deposits and formation of the 1977 craters, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 7, 1980, pp. 39-65.

- 5) White, F. M.: Fluid Dynamics, McGraw-Hill, 1979, pp. 426-438.
- 6) Shteynberg, G. S. and Solov'yev, T. S. V.: External Ballistics of Volcanic Eruptions, Izvestiya, Earth Physics, Vol. 14, 1978, pp. 270-279.
- 7) 和田卓彦・菊池茂智・小野博尉：1979年9月6日の阿蘇火山爆発について，火山 第2集，第25巻第4号，1980，pp. 245-253.
- 8) 気象庁地震課火山室：全国の火山活動状況，火山噴火予知連絡会会報，第26号，昭和58年3月，pp. 92-93 など.
- 9) 石原和弘・井口正人・加茂幸介：火山の爆発過程における噴煙および火山ガスの放出について，京都大学防災研究所年報，第26号 B-1, 1983, pp. 1-7.

付 録

噴煙上昇に伴うレキ・軽石の運動

噴煙により鉛直上方にレキ・軽石が加速される場合の運動方程式を次に示す。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} = \ddot{y} = 0 \\ \ddot{z} = \lambda(\dot{z} - V_g)^2 - g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付-1)$$

また，噴煙の上昇速度 (V_g) は次のように表わされることがわかっている⁹⁾。

$$\left. \begin{aligned} T_3 < t < T_4 \quad V_g \propto H^{-3} & \quad (\text{膨張過程}) \\ (V_g \propto (t - T_3)^{-3/4}) & \\ T_4 < t < T_p \quad V_g = \text{const} \quad (20 \sim 35 \text{ m/s}) & \quad (\text{対流過程}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付-2)$$

火口底からの高度約 300m において膨張過程から対流過程に移行するので⁹⁾，レキ・軽石は主に対流過程により上昇すると考えられる。静止噴煙ガス中のレキの終端速度を V_t とすれば， $V_g + V_t > 0$ の条件が満たされれば，レキ・軽石は噴煙の上昇に伴って上昇する。

以下，静止噴煙ガス中のレキ・軽石の終端速度を求める。終端速度は，

$$V_t = -\sqrt{\frac{g}{\lambda}}$$

$$\lambda = \frac{1}{2} C_D \rho_g \mu \dots\dots\dots (付-3)$$

と表わされる。 μ は断面積と質量の比である。レキの形状が球に近似できれば，

$$\mu = \frac{3}{2\rho_s d} (= \mu_s) \dots\dots\dots (付-4)$$

と表わされるが，実際に落下が確認されたレキは形状が扁平であり，球として取扱えない。そこで，1975年以後に採取されたレキと軽石の断面積と質量を測定し，断面積と質量の比と最大径の関係を Fig. 10 に示した。断面積は，レキ・軽石の最大の面積をもつ断面を楕円形に近似することにより求めた。すなわち，断面積 (S) は，

$$S = \frac{\pi}{4} ab \dots\dots\dots (付-5)$$

である。レキおよび軽石の密度をそれぞれ 2500 kg/m^3 ， 700 kg/m^3 として，球の場合の断面積と質量の比と最大径の関係を基準曲線として同図中に示した ($\mu = \mu_s$)。レキについては， $\mu = 1.5 \sim 7.0 \mu_s$ ，また軽石については， $\mu = 1.1 \sim 5.7 \mu_s$ という結果が得られた。

(A3) 式から最大径と終端速度の関係を求め，Fig. 11 に示した。ここで， $\mu = 7 \mu_s$ ， $\rho_g = 1.0 \text{ kg/m}^3$ ， $g = 9.79 \text{ m/s}^2$ とした。また，Raynolds 数が 10^5 のオーダーの時，球の抗力係数は，0.5であるが，扁平になるにつれて増加することを考慮して， $\mu = 7 \mu_s$ のレキ・軽石の抗力係数として，円盤の抗力係数1.17を採用した。噴煙の上昇速度を 25 m/s とすれば，最大径 7cm 以下のレキは噴煙により上昇する可能性がある。同様にして，軽石の場合は噴煙により上昇し得る最大の大きさは 23 cm である。

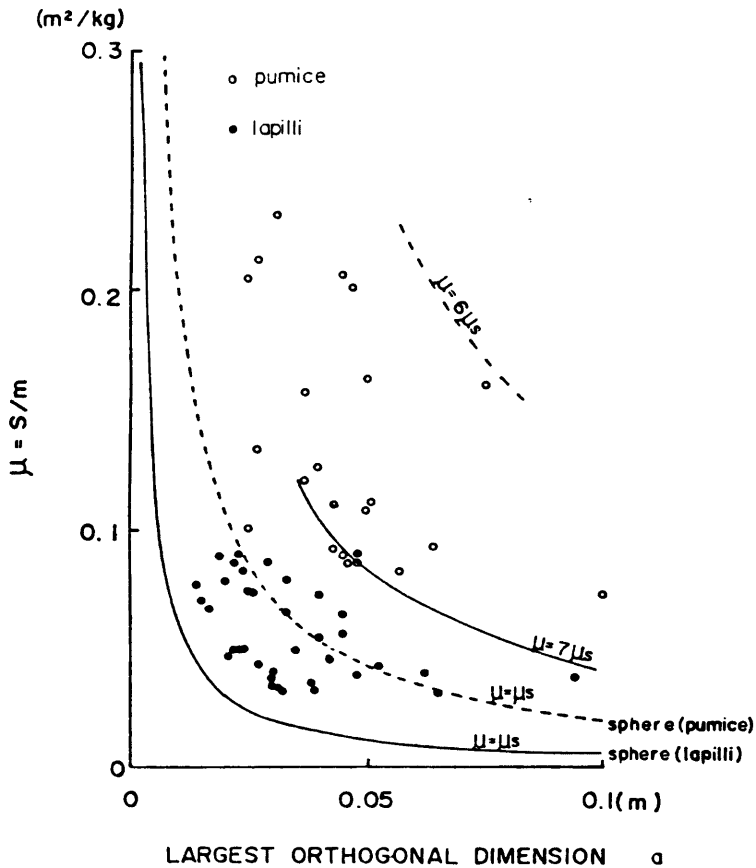


Fig. 10 Measured μ -parameters of the lapilli and the pumice ejected by the summit eruption of Sakurajima and calculated curves of μ -parameter versus largest orthogonal dimension in the case of $\mu = \mu_s$ and $\mu = 7\mu_s$

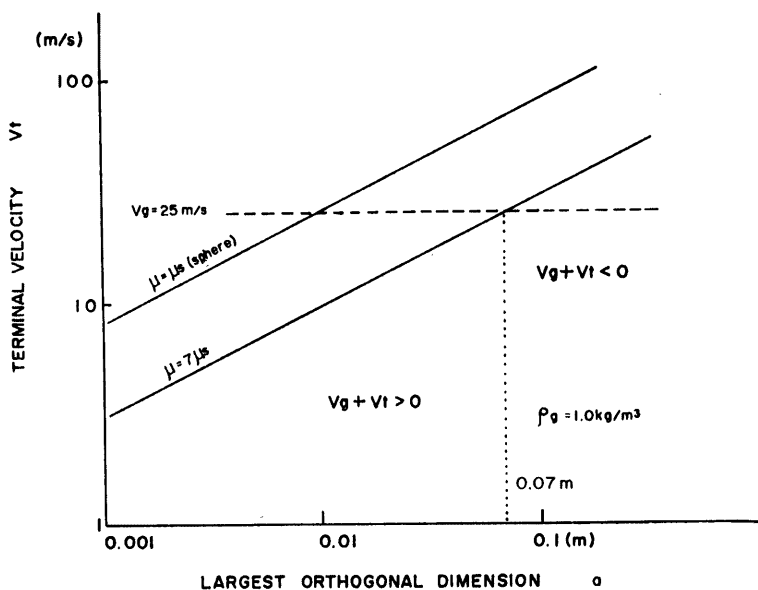


Fig. 11 Relationship between terminal velocity of lapilli in the still volcanic cloud and largest orthogonal dimension in the case of $\rho_g = 1.0 \text{ kg/m}^3$, $\rho_b = 2500 \text{ kg/m}^3$ and $\mu = 7/8$.