

地形を考慮した火山弾の到達距離

飯塚 雅哉・早川 由紀夫

The reach of volcanic bombs under the effect of topography

Masaya IIZUKA and Yukio HAYAKAWA

群馬大学共同教育学部紀要 自然科学編

第69巻 13—26頁 2021 別刷

地形を考慮した火山弾の到達距離

飯塚 雅哉・早川 由紀夫

群馬大学共同教育学部地学教室

(2020年9月30日受理)

The reach of volcanic bombs under the effect of topography

Masaya IIZUKA and Yukio HAYAKAWA

Department of Earth Science, Cooperative Faculty of Education, Gunma University,

Maebashi, Gunma 371-8510, Japan

(Accepted on September 30th, 2020)

1. はじめに

火山噴火において火山弾の落下は、人にも、構造物にも大きな被害をもたらす。火山弾の到達距離を取り扱った研究は古くからあり、実際の噴火から得られたデータをもとにした初速と射出角の関係はよくわかっている。Minakami (1942) は、浅間山のブルカノ式爆発で投げ出された火山弾の落下地点をマッピングして、その到達距離から火山弾の初速を計算した。一回の噴火における火山弾の初速は一定とし、火口壁の影響を考慮して初速を求め、射出角 45° で投げ出された火山弾が最も遠くまで到達するとした。井口ほか (1983) は桜島のブルカノ式爆発を解析し、投げ出された火山弾の初速は射出角ごとに異なるとして、約 63° のとき最大到達距離を獲得すると結論した。しかし、井口ほか (1983) が取り扱ったデータ数が少ないことや誤差が大きいことから、本論文では、簡単のためにも、一回の噴火における火山弾はすべての射出角において同じ初速で投げ出されると仮定する。

初速と射出角の関係に関する研究が進んだ一方で、火山弾の到達距離に地形が与える影響はあまり注目されていない。火山弾が同じ初速で投げ出されても、火口壁と斜度（山腹の傾斜）によって到達距離が大きく変化することを、本研究で示す。

2. 方 法

2.1 真空中での算出方法

本論文で使用する記号を表1に示す。真空中を運動する火山弾の水平成分、鉛直成分の運動方程式は以下のようなになる。鉛直上向きを正とする。

表1 本論文で使用する記号

使用記号	説明	単位
x	水平方向の距離	[m]
y	鉛直方向の距離	[m]
y_0	射出地点の標高	[m]
v_0	火山弾の初速	[m/s]
v	火山弾の速度	[m/s]
v_x	火山弾の速度(水平成分)	[m/s]
v_y	火山弾の速度(鉛直成分)	[m/s]
t	時間	[s]
g	重力加速度	[m/s ²]
m	火山弾の質量	[kg]
θ	射出角	[rad]
ρ_a	空気密度	[kg/m ³]
ρ_r	火山弾の密度	[kg/m ³]
S	火山弾の断面積	[m ²]
D	火山弾の直径	[m]
u	速度(流体との相対速度)	[m/s]
C_d	抗力係数	—
Re	レイノルズ数	—
μ	空気の粘性係数	[m ² /s]
T	気温	[K]
T_0	標高0[m]での気温	[K]
P_a	気圧	[Pa]

$$m\ddot{x} = 0 \quad \cdots\textcircled{1}$$

$$m\ddot{y} = -mg \quad \cdots\textcircled{2}$$

これらを変形していくと、

$$x = v_0 \cos \theta t \quad \cdots\textcircled{1}'$$

$$y = v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2} g t^2 \quad \cdots\textcircled{2}'$$

$t = 0$ 、 $\frac{2v_0}{g} \sin \theta$ のとき、 $y = 0$ になるため、 $t = \frac{2v_0}{g} \sin \theta$ のときが水平方向の到達距離となる。したがって、

水平方向の到達距離は、

$$x_{MAX} = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta \quad \dots \textcircled{3}$$

で求めることができる。

2.2 空気中での算出方法

空気中を運動する火山弾の水平成分、鉛直成分の運動方程式は以下のようになる。

$$m\ddot{x} = -\frac{1}{2} v_x^2 \rho_a S C_d \quad \dots \textcircled{4}$$

$$m\ddot{y} = -\frac{1}{2} v_y^2 \rho_a S C_d \text{sgn}(v_y) - mg \quad \dots \textcircled{5}$$

④、⑤の微分方程式を4次のルンゲクッタ法で近似計算を行うプログラム（弾道計算 ver.3）を作成した。近似計算には Excel2016 の VBA を利用した。今回は刻み幅を 0.01 [s] で計算する。レイノルズ数は、

$$R_e = D\rho_a u / \mu \quad \dots \textcircled{6}$$

とする。この時、水平方向の計算は $u = v_x$ 、鉛直方向の計算は $u = v_y$ とする。また、火山弾の形状は球形とし、抗力係数 C_d は、

$R_e < 3 \times 10^5$ のとき、

$$C_d = \frac{24}{R_e} (1 + 0.15R_e^{0.687}) + \frac{0.42}{1 + 4.25 \times 10^4 R_e^{-1.16}} \quad (\text{Clift and Grauvin の式}) \quad \text{とし、}$$

$R_e \geq 3 \times 10^5$ のとき、

$$C_d = \frac{24}{R_e} + \frac{2.6 \left(\frac{R_e}{5}\right)}{1 + \left(\frac{R_e}{5}\right)^{1.52}} + \frac{0.411 \left(\frac{R_e}{2.63 \times 10^5}\right)^{-7.94}}{1 + \left(\frac{R_e}{2.63 \times 10^5}\right)^{-8.0}} + \frac{0.25 \left(\frac{R_e}{10^6}\right)}{1 + \left(\frac{R_e}{10^6}\right)} \quad (\text{Morrison の式}) \quad \text{で計算した。}$$

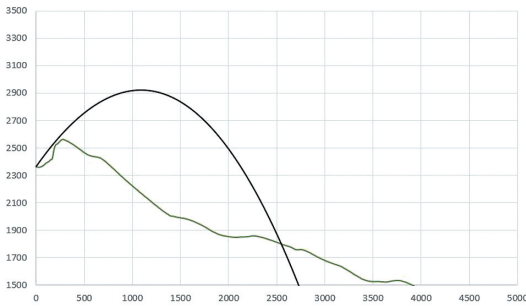
なお、標高の変化に伴う、気温、気圧、空気密度、空気の粘性率は以下のように求める。

$$T = T_0 - 0.0065 \times y \quad \dots \textcircled{7}$$

$$P_a = 101325 \times \left(\frac{1 - 0.0065 \times y}{T + 273.15 + 0.0065 \times y} \right)^{5.257} \quad \dots \textcircled{8}$$

$$\rho_a = \frac{0.0034837 \times P_a}{T + 273.15} \quad \dots \textcircled{9}$$

$$\mu = \frac{1.458 \times 10^{-6} \times (T + 273.15)^{1.5}}{T + 383.55} \quad \dots \textcircled{10}$$



初速	150	t の初期値 (t)	0
射出角	45	y の初期値 (y)	2363.9
円周率	3.141592654	x の初期値 (x)	0
重力加速度	9.8	vy の初期値 (vy)	106.066
回数	4000	vx の初期値 (vx)	106.066
地表の温度	20	時間の刻み幅 (h)	0.01
		t の終了	40
		直径 (d)	1
		岩石密度 (Lr)	2500
		質量 (m)	1308.997
		断面積 (S)	0.785398

図1 弾道計算 ver.3 の操作画面

弾道計算 ver.3 の操作画面を図1に示す。初速、射出角、火山弾の直径、温度、火山弾の密度、を入力すると、火山弾の軌道と到達距離を求めることができる。ただし、弾道計算 ver.3 ではコリオリ力、火山弾の表面の凹凸、標高の変化に伴う重力加速度の変化、火山弾の回転に関しては考慮していない。

2.3 既存の弾道計算アプリとの比較

弾道計算を行う先行アプリ Eject! がインターネット上で公開されている (Mastin, 2001)。図2は Eject! の操作画面である。初速 100[m/s]による投げ出しを、射出角 15°、30°、45°、60°、75°で試みた。

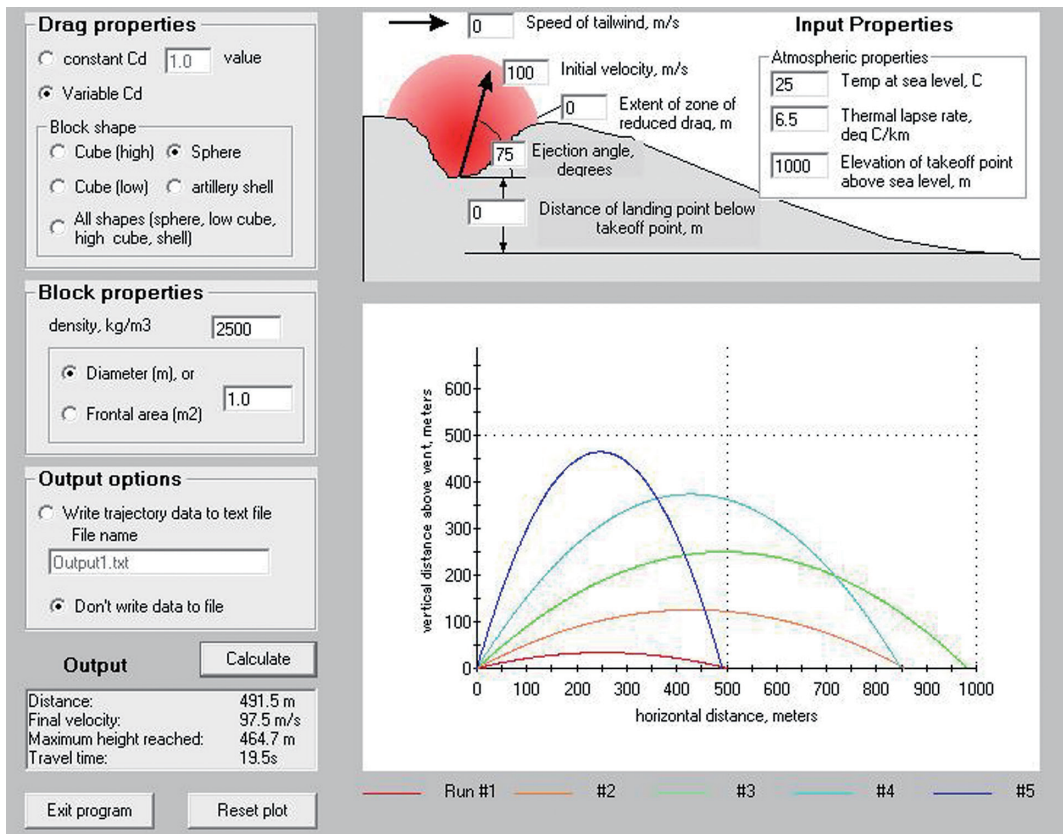


図2 Eject! の画面

Eject! は図 2 のように、粒径・粒子形状・初速・射出角・横風・爆発地点の標高・着地点の標高などのさまざまな初期条件を設定することで、火山弾の到達距離、最高高度、落下速度、滞空時間を求めることができる。火口からの距離が増えるにしたがって標高は一般に減じるが、Eject! では落下地点の標高をあらかじめ決めて入力しなければならない。このため最大到達距離を求める作業は試行錯誤になってしまう。弾道計算 ver.3 はこの欠点を補っている。弾道計算 ver.3 では図 1 のように火山の地形を地理院地図から CSV ファイルとして取り出すから、到達距離を一回で求めることができる。

Eject! と弾道計算 ver.3 の計算値の違いを図 3 と表 2 に示す。初期条件は初速 100[m/s]、気温 20℃、射出地点の標高 0[m]、追い風なし、地形は平坦として計算した。

火山弾の直径が十分大きいと、空気抵抗の影響が小さくなるため、Eject! と弾道計算 ver.3 で計算される到達距離の食い違いは 1% 以下になる。一方で、小さい火山弾は、Eject! の到達距離が約 20% 短い。Eject! では、大きい火山弾と小さい火山弾で抗力係数を使い分けているためであると考えられる。従って、小さい火山弾の到達距離は Eject! のほうが正確である。大きい火山弾に関しては Eject! がレイノルズ数の区間を区切って一定の数値を返していることと、0.1 秒ごとで近似計算をしているのに対し、弾道計算 ver.3 では 0.01 秒ごとの条件変化に応じて抗力係数を返している。そのため、大きい火山弾に関しては、弾道計算 ver.3 の方が正確である。

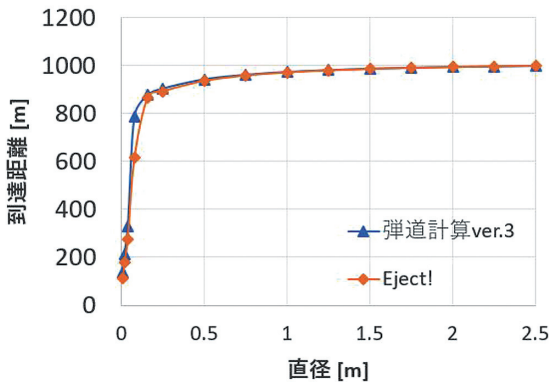


図 3 Eject! と弾道計算 ver.3 の計算値の違い

表 2 Eject! と弾道計算 ver.3 の計算値の違い

直径 [m]	到達距離 [m] (弾道計算 ver.3)	到達距離 [m] (Eject!)	一致率 [%]
0.01	137.1	112.3	81.9
0.02	214.0	177.4	82.9
0.04	328.4	276.8	84.3
0.08	787.7	615.8	78.2
0.16	876.9	867.6	98.9
0.25	904.1	893.1	98.8
0.50	942.7	936.5	99.3
0.75	961.6	959	99.7
1.00	973.7	972.2	99.8
1.25	981.3	980.7	99.9
1.50	987.1	986.7	100.0
1.75	991.2	991.1	100.0
2.00	994.5	994.5	100.0
2.25	996.6	997.1	100.0
2.50	999.0	999.3	100.0

3. 火山弾の到達距離

3.1 真空中での火山弾の到達距離

初速 100 [m/s] で投げ出された火山弾が真空中を飛行した場合の到達距離を計算した (図 4)。射出角が 45° のときに最大到達距離を記録する。③式からわかるように、火山弾の到達距離は質量にも体積にも依存せず、射出角と初速に依存する。 30° と 60° での到達距離は等しくなる。射出角 45° を対称の軸とする、線対称なグラフとなる。

射出角が 45° のとき $\sin 2\theta = 1$ で最大値をとるため、火山弾は初速に関係なく、 45° で最大到達距離を記録する。最大到達距離は初速の二乗を重力加速度で割った数値となる。簡易的に重力加速度を $10 \text{ [m/s}^2]$ と考えると到達距離は初速の 2 乗を 10 で割った数値になる。初速 100 [m/s] → 到達距離約 1000 [m]、初速 200 [m/s] → 到達距離約 4000 [m] のようになる。図 5 に、真空中で射出角 45° で投げ出された火山弾の初速と到達距離の関係を示す。

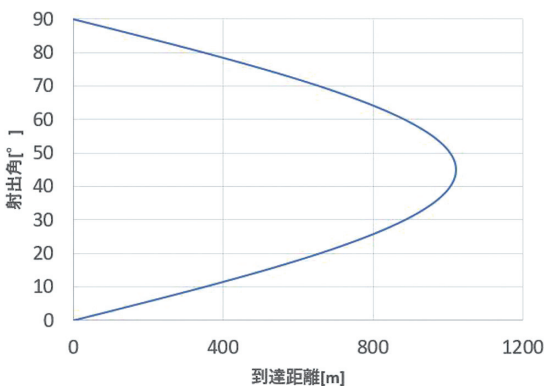


図 4 真空中における初速 100 [m/s] での火山弾の到達距離

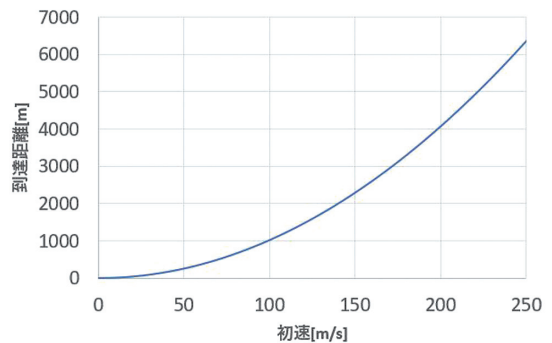


図 5 真空中での射出角 45° で投げ出された火山弾の初速と到達距離の関係

3.2 空気中での火山弾の到達距離

弾道計算 ver.3 を用いて空気中を飛行する火山弾の到達距離を計算した (図 6、図 7)。 $y_0 = 0 \text{ [m]}$ 、 $T = 293 \text{ [K]}$ 、 $\rho_r = 2500 \text{ [kg/m}^3]$ とした。図 6 は初速 100 [m/s] の到達距離を示し、図 7 は初速 200 [m/s] の到達距離を示す。ここでは、直径 0.125 [m]、直径 0.25 [m]、直径 0.5 [m]、直径 1.0 [m]、そして真空中での到達距離を示す。また、空気中における初速 100 [m/s] と初速 200 [m/s] における火山弾の直径・最大到達距離・射出角を、表 3 と表 4 に示す。

図 6 と図 7 を比較すると、初速が大きい方が空気抵抗の影響が大きいことがわかる。また、火山弾の直径が大きくなるにつれて、火山弾の運動は真空中の火山弾の運動に近づく。式④と⑤からもわかるように、進行方向の逆向きに働く力の大きさが、速度の 2 乗に比例し、火山弾の半径の大きさに反比例するからである。また、直径 0.125 [m] の小さい火山弾は、空気抵抗の影響を大きく受けて射出角 45° を軸とする対称性を失っている。この要因としてはレイノルズ数と抗力係数の関係性が考えられる。レイノルズ数が約 100 から約 300000 の間で抗力係数は一定で約 0.4 であるが、レイノルズ数が約 300000 で臨界レイノルズ数に達すると約 0.1 になる。射出角が大きいと水平方向の初速度が小さく臨界レイノルズ数を超えない。一方で、射出角が小さいと臨界レイノルズ数を超え、抗力係数が小さくなることで、減速しにくい。鉛直方向に関してこの

関係は逆になり、射出角が大きいと臨界レイノルズ数を超える。滞空時間が長くなると空気抵抗を受ける時間も長くなり、水平方向の速度は小さくなり飛距離が出なくなる。大きい火山弾に関しては最大到達距離を記録する射出角は $44^{\circ} \sim 45^{\circ}$ であるが、 30° と 60° を比較すると小さい火山弾と同様に 30° の到達距離がやや長く、対称性が失われている。

表3 初速 100[m/s]における火山弾の最大到達距離

直径[m]	0.125	0.25	0.5	1.0	真空中
最大到達距離[m]	860	904	943	974	1020
射出角[$^{\circ}$]	45	45	45	45	45

表4 初速 200[m/s]における火山弾の最大到達距離

直径[m]	0.125	0.25	0.5	1.0	真空中
最大到達距離[m]	2230	2598	3016	3401	4081
射出角[$^{\circ}$]	44	44	44	44	45

表3と表4の中で最も真空中に近い運動をする条件は、初速 100[m/s]、直径 1.0[m]の火山弾であり、真空中との最大到達距離の差は46[m]である。一方で初速 200[m/s]、直径 1.0[m]の火山弾では最大到達距離の差は680[m]と広がる。実際の火山噴火は空気中で起こるから、この差を無視することはできない。火山弾の到達距離を考察するときには、空気抵抗を考慮することが必須である。

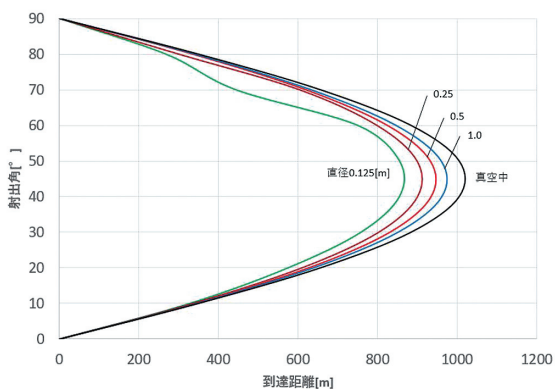


図6 空気中における初速 100[m/s]での火山弾の到達距離

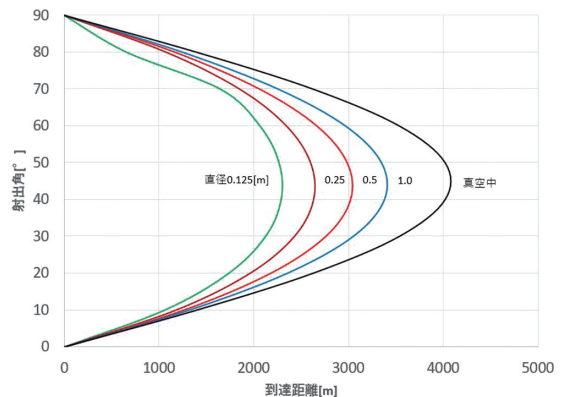


図7 空気中における初速 200[m/s]での火山弾の到達距離

3.3 火口壁の影響

浅間山の現在の火口縁標高を用いて火山弾の到達距離を計算する。北を0とし、時計回りに16方位に0~15の番号を付ける。中心から見た各方位の標高の変化を図8に示す。断面写真は火口中心でホバリングしたドローンで撮影した。ただし、火口は真円ではないため、火口壁までの距離は一定でない。

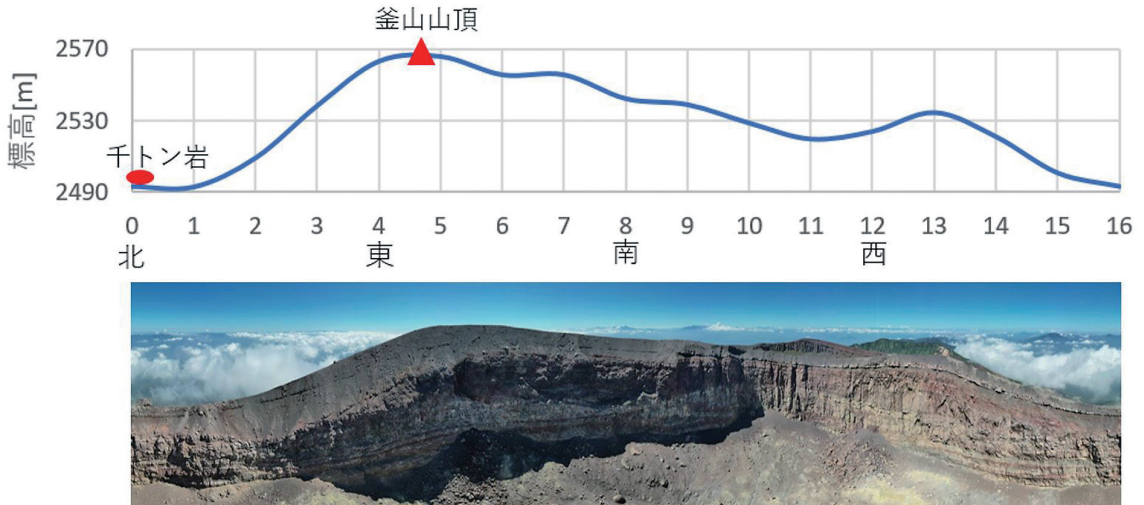


図8 浅間山火口の内壁断面と標高。断面写真は火口中心でホバリングしたドローンで撮影した。

火山弾の射出地点を火口底の中心に置き、火口壁までの距離と標高を考慮した場合、最も射出角が制限されない方位は北北東(1)であり、射出角が最も制限される方位は南(8)である。火口底は真円でなく、東西に長い。そのため標高が最も高い東南東(5)は火口底の中心から火口壁までの距離が長く、南(8)に比べて射出角が制限されにくい。

北北東(1)の標高2493[m]を基準とし、そこからの深さを火口壁の高さと考え、火口壁の高さを b と置く。北北東(1)の火口壁の高さを b_1 、南(8)の火口壁の高さを b_2 とする。 b_1 、 b_2 まで水平面での距離をそれぞれ a_1 、 a_2 と置く。簡易的に射出角を真空中で求める。水平距離を底辺、火口壁の高さを高さとして置き、斜辺 c を求める。斜辺は $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ で求められる。斜辺 c を飛ぶ間の重力の影響を考慮して、射出角を計算すると

$$\theta \geq \tan^{-1} \left(\frac{|b| + \frac{1}{2} \left(\frac{c}{v_0} \right)^2 g}{a} \right)$$

で求められる。 $|b|$ が大きくなると射出角の差は小さくなる。火口壁の高さ(射出

地点の深さ)とその時に取り得る最小射出角の関係を図9に示す。

次に、到達距離の差を考える。北北東(1)と南(8)での到達距離の差を x' とすると $x' = \frac{2v_0^2}{g} (\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2)$ で求める。射出地点の深さと最大到達距離を図10に示す。ただし、 $\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ で計算し、 $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$ の範囲においては $\theta = \frac{\pi}{4}$ で計算する。

現在の浅間山の火口壁の場合、射出地点が約-300[m]付近で最大到達距離の差が最も大きくなる。

現在の浅間山で、火口壁の影響のみを考慮して山腹地形を考慮せずに火山弾の到達距離を計算した(図11)。到達距離に最も差があるのは初速100[m/s]における北北東(1)の到達距離986[m]と南(8)の到達距離975[m]で、その差はわずか11[m]である。図11において現在の浅間山の射出地点は-129[m]であり、到達距離に差はほとんど出ないことがわかる。また、どの方位に関しても射出角が45°付近であるため、火口壁の影響は小さい。

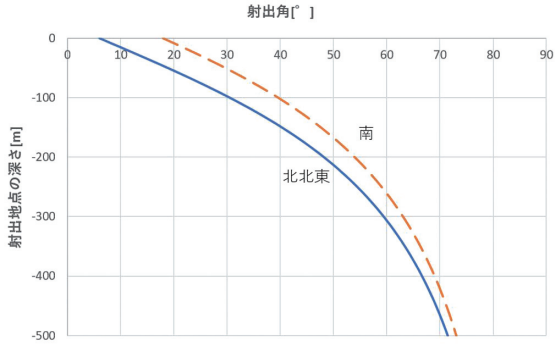


図9 浅間山の火口壁の高さ（射出地点の深さ）と最小射出角の関係。北北東(1)の標高 2493[m]を基準とし、0[m]とした。

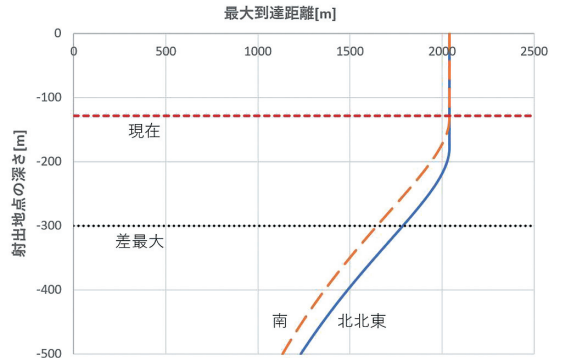


図10 浅間山の射出地点の深さと最大到達距離

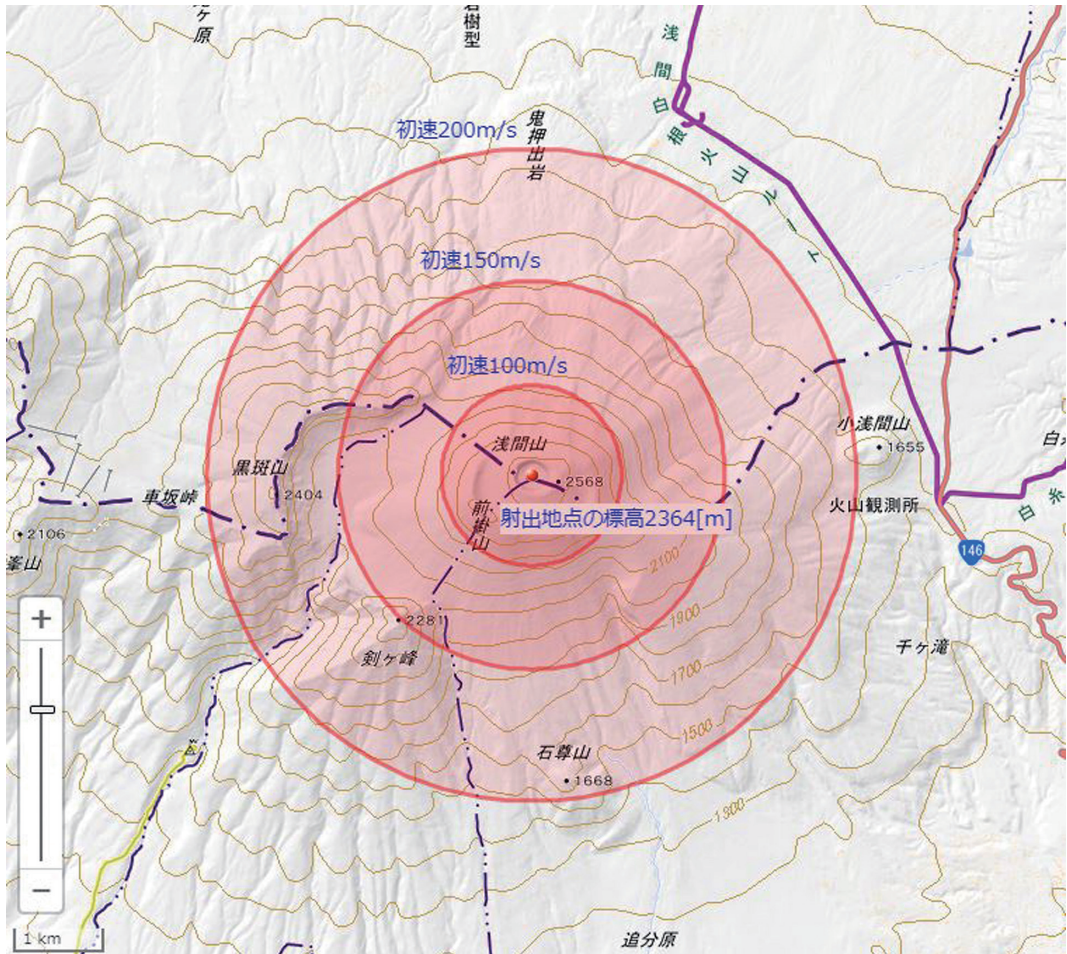


図11 浅間山の火口壁を考慮した火山弾の到達距離。山腹地形は考慮していない。地理院地図を利用した。

射出地点の標高を 171[m] 下げて、2193[m] に設定して計算すると到達距離に大きな差が出る (図 12)。初速 100[m/s] のときは、どの角度でも火口壁を越えることができない。初速 150[m/s] のとき到達距離の差は 130[m] であり、初速 200[m/s] のときの差は 361[m] である。爆発源となる火口底が低くなればなるほど、射出角が制限され、到達距離が短くなる。

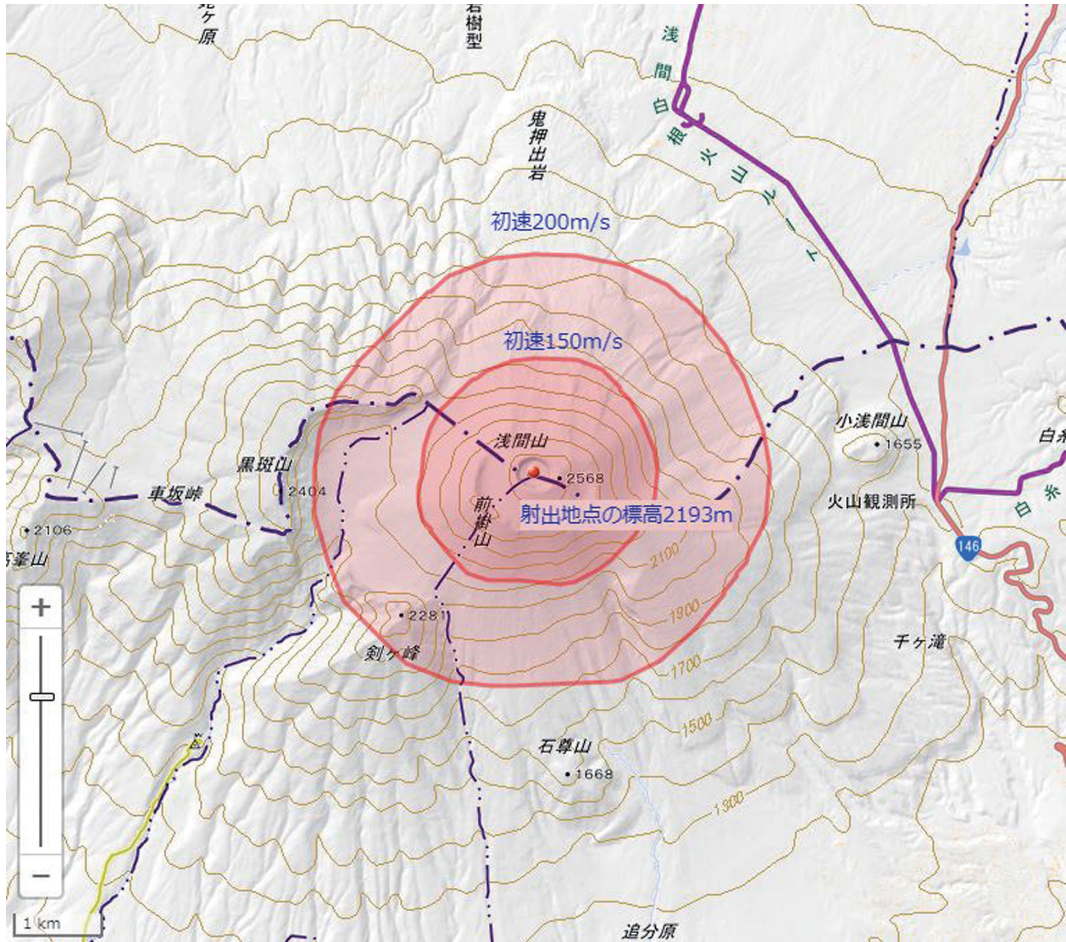


図12 浅間山の火口底を 171[m] 下げた場合の火山弾の到達距離。山腹地形は考慮していない。

また、今回は火口底の中心を射出地点として到達距離を調べたが、火口底の中心から、射出地点がずれた場合、射出地点と火口壁の距離が近いと射出角が制限されて到達距離が短くなる。一方で、遠いと射出角の制限が弱くなるが、到達距離は現在を示した図 11 とほとんど変わらない。

3.4 斜度の影響

斜度と最大到達距離と射出角の関係を簡易的に真空中で計算する。斜度を $\alpha\%$ とすると、斜面は

$$y = -\frac{\alpha}{100} x \quad \cdots \textcircled{11}$$

と表せる。式①' と②' から t を消去すると、

$$y = \tan \theta x - \frac{1}{2} g \left(\frac{x}{v_0 \cos \theta} \right)^2 \quad \cdots \textcircled{12}$$

となる。この⑫式と⑪式から y を消去すると、放物線と斜面の交点を求めることができる。交点は、

$$x = 0, \frac{2v_0^2}{g} \cos \theta \left(\sin \theta + \frac{\alpha}{100} \cos \theta \right)$$

となる。従って、到達距離は、

$$\frac{2v_0^2}{g} \cos \theta \left(\sin \theta + \frac{\alpha}{100} \cos \theta \right) \dots \textcircled{13}$$

となる。また、⑬からわかるように、最大到達距離を記録する射出角は初速に依存せず、斜度に依存する。⑬を微分すると、

$$\frac{2v_0^2}{g} \left(\cos 2\theta - \frac{\alpha}{100} \sin 2\theta \right) \dots \textcircled{14}$$

となる。式⑭の極大値を求めると斜度 10% で射出角は約 42° 斜度 20% で射出角は約 39° でそれぞれ極値をとり、最大到達距離を記録する。斜度を 20%、初速 100 [m/s] としたときの射出角 45° と 39° の比較を図 13 に示す。以上のことから、斜度が大きくなるにつれて、射出角は 45° より小さい方が到達距離は長くなり、到達距離の差は大きくなる。

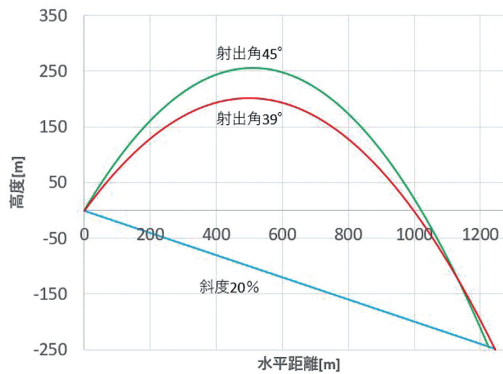


図13 斜度 20%、初速 100 [m/s] での射出角 45° と 39° の比較

3.2 と同条件で初速 200 [m/s] の場合、傾斜を 10%、20% で与えると最大到達距離と射出角は表 5、表 6 のようになる。表 3、表 4 と比較すると最大到達距離は初速 200 [m/s]、斜度 20%、直径 1.0 [m] において、470 [m] 差になる。傾斜によって最大到達距離が大きく変わることがわかる。

表 5 初速 200 [m/s]、斜度 10% における火山弾の最大到達距離

直径 [m]	0.125	0.25	0.5	1.0	真空中
最大到達距離 [m]	2495	2877	3321	3741	4511
射出角 [°]	36	43	42	42	42

表 6 初速 200 [m/s]、斜度 20% における火山弾の最大到達距離

直径 [m]	0.125	0.25	0.5	1.0	真空中
最大到達距離 [m]	2645	3065	3565	4051	4973
射出角 [°]	41	41	40	40	39

3.5 浅間山における火山弾の到達距離

浅間山の現在の火口底の中心、標高 2364[m] 地点を射出地点とした爆発で火山弾が到達する距離を計算した(表 7)。 $y_0 = 2364$ [m]、 $T = 293$ [K]、とし、 $D = 1.0$ [m]の火山弾を想定し、射出地点からの 16 方位の最大到達距離を示した。ただし、射出角は地形の影響を考慮して火口壁を飛び越える射出角をとっているため、一定でない。火山弾の到達距離は火口壁の高さよりもむしろ斜度(山腹地形)に大きく影響される。火山弾の到達範囲を地理院地図上に作図した(図 14)。

初速 50[m/s]では火山弾が火口壁を越えることができず、火山弾はどの方角でも火口の外に出ない。

初速 100[m/s]では、北の 1313[m](射出角 40°)が最も長く、西南西の 1003[m](43°)が最も短い。その差は 310[m]である。南西、南東方向には、それぞれ釜山と前掛山があり、標高が高く、傾斜が小さいため、到達距離が短くなっている。

初速 150[m/s]では山腹地形の影響を大きく受ける。北北東の 2743[m](射出角 38°)が最も長く、西北西の 2184[m](射出角 43°)が最も短い。その差は 559[m]と広がる。北北東は火口壁が低いことと斜面が急なため、到達距離が長い。一方で西北西は黒斑山があつて傾斜が緩いため、到達距離が短くなっている。

初速 200[m/s]では南東の 4387[m](射出角 41°)で最も長く、西の 3829[m](射出角 42°)で最も短い。その差は 558[m]である。初速 200[m/s]では火口壁の方角による射出角の差があまり生じない。西の車坂峠付近は標高が高いから凹むが、それ以外の方角は斜度があまり変わらないため、同心円に近づく。

図 15 に、2004 年 9 月 1 日のブルカノ式爆発で北西 1.6[km] 地点、黒斑山の上に生じた直径 6[m]の衝突クレーター(早川ほか、2006)を示す。図 14 に落としてみると、この衝突クレーターをつくった火山弾は初速 120[m/s]以上で火口から飛び出したことがわかる。

最大到達距離は、火口壁にぶつからずに最も遠くへ飛ぶ射出角を複数回の試行でみつけることによって求めた。東(4)を例に最大到達距離を記録する射出角の決定の方法を説明する(図 16)。射出角 41°以下では、火山弾は火口壁にぶつかってしまう。42°から火口壁にぶつからない。43°では斜度の影響によって 42°よりも到達距離が短くなるため、最大到達距離を記録する射出角は 42°になる。

火口壁の形状をより正確に考慮すると、初速によって制限される射出角が変わることがわかる。東(4)を例に挙げて、初速によって火口壁にぶつかる位置が違うことを図 17 で示す。初速 100[m/s]は、初速 150[m/s]や 200[m/s]のような直線的な軌道にならない。そのため、標高が最も高い地点(★)を超える軌道を描いたときが最も小さい射出角になる。一方で、直線的な軌道である初速 150[m/s]と 200[m/s]では手前の地点(▲)にぶつかってしまう。

表 7 浅間山における火山弾の最大到達距離

方位	初速[m/s](射出角)			
	50	100	150	200
北(0)	×	1313(39°)	2740(38°)	4345(38°)
北北東(1)	×	1310(41°)	2743(38°)	4341(38°)
北東(2)	×	1308(41°)	2731(40°)	4327(38°)
東北東(3)	×	1178(44°)	2728(40°)	4299(38°)
東(4)	×	1170(46°)	2578(42°)	4281(41°)
東南東(5)	×	1022(47°)	2491(43°)	4313(42°)
南東(6)	×	1149(47°)	2596(42°)	4387(41°)
南南東(7)	×	1157(47°)	2692(43°)	4364(41°)
南(8)	×	1148(48°)	2613(44°)	4335(43°)
南南西(9)	×	1068(49°)	2546(45°)	4203(44°)
南西(10)	×	1070(43°)	2253(40°)	4127(40°)
西南西(11)	×	1003(43°)	2480(42°)	3974(42°)
西(12)	×	1086(45°)	2356(42°)	3829(42°)
西北西(13)	×	1136(46°)	2184(43°)	3961(42°)
北西(14)	×	1187(46°)	2574(42°)	4221(41°)
北北西(15)	×	1288(42°)	2735(39°)	4317(39°)

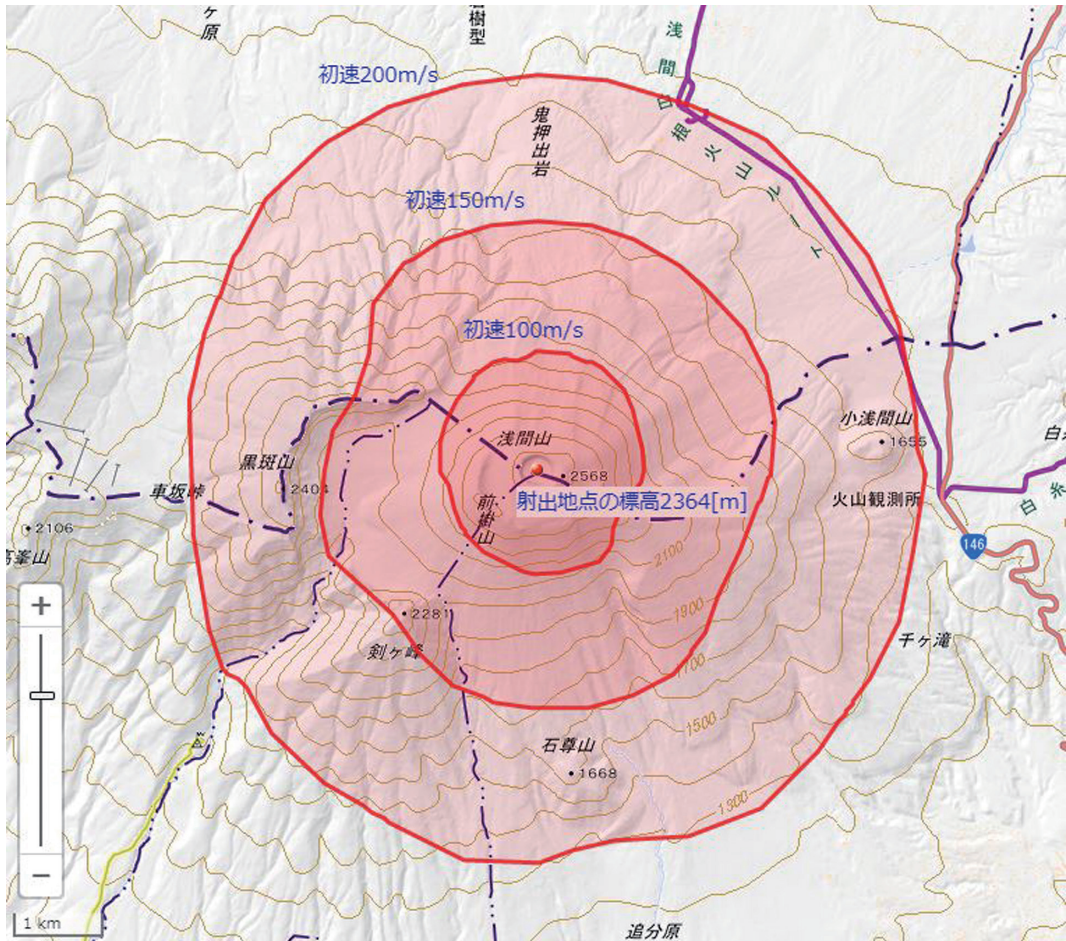


図14 浅間山の現在の地形における火山弾の到達距離



図15 2004年9月1日のブルカノ式爆発で北西1.6[km]地点、黒斑山の上に生じた直径6[m]の衝突クレーター。はずんで北西壁で止まっている直径0.8[m]の火山弾がつくった。

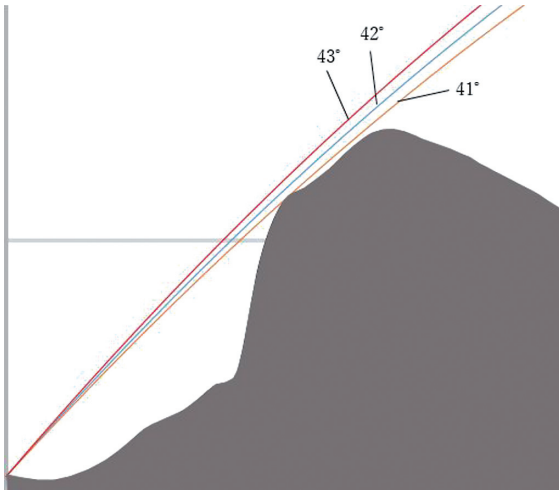


図16 東(4)における最大到達距離を記録する射出角

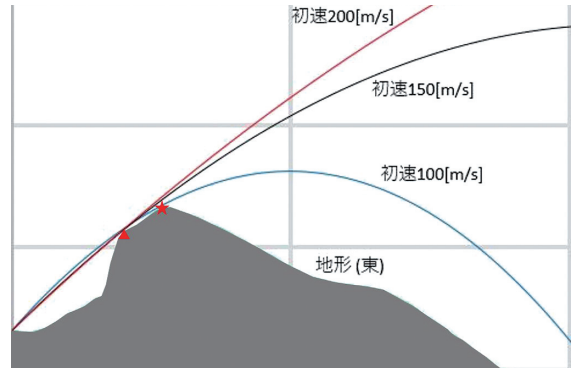


図17 東(4)における初速と火口壁にぶつかる位置の違い。初速 100 [m/s] では▲で火口壁にぶつかり、初速 150 [m/s]、200 [m/s] では★で火口壁にぶつかる。

4. まとめ

火山爆発で放出される火山弾の到達距離を考察した。空気中では、初速が小さければ小さいほど、直径が大きければ大きいほど、真空中の運動に近づく。空気中では真空中のような射出角 45° を軸とする対称性は失われ、 $\sin 2\theta$ が同じ値を取る射出角の場合は低く射出された方が遠くまで飛ぶ。 60° より 30° が遠くまで飛ぶ。

火口壁が与える影響を考えた。初速が小さいと射出角は制限されやすく、各方位での到達距離に差が出やすい。また、斜度（山腹地形）の影響も考えた。射出角 45° で最大到達距離を取るのではなく、 40° 付近で最大到達距離を取るようになり、到達距離が長くなる。

現在の浅間山において、火山弾の到達距離は斜度の影響を大きく受ける。標高が高い（斜度が緩い）西側と南東側で到達範囲が短くなる。その違いは火口壁による射出角の制限よりも斜度によるところが大きい。現在の浅間山の火口底と火口壁では、射出角による到達距離の差はあまり出ない。射出角が 45° 付近を取ることができている。火口底が上昇した場合の到達範囲はいまとほとんど変わらない。火口底が下降した場合は、射出角が制限されて到達距離が短くなる。

引用文献

- 早川由紀夫・前嶋美紀・宮永忠幸・長井隆行・湯浅(佐藤)成夫・新井雅之 (2006) 浅間山 2004 年噴火：噴出物調査とインターネット掲示板によるリスク・コミュニケーション. 地学雑誌, 115 巻 2 号, 149-171.
- 井口正人・石原和弘・加茂幸介 (1983) 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 巻 B-1, 4, 9-21.
- Mastin, L.G. (2001) A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-45, 16p, <https://pubs.usgs.gov/of/2001/0045/>
- Minakami, T. (1942) 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, 65-92.