

| Title | 火山岩塊の運動再考 (3):放出火山岩塊に対する風の効果と岩塊の初速度についてのモデル計算 |
|------------------|---|
| Author(s) | 鈴木, 建夫; 新井田, 清信; 西田, 泰典; 大島, 弘光; 室伏, 誠 |
| Citation | 北海道大学地球物理学研究報告, 71, 1-18 |
| Issue Date | 2008-03-15 |
| DOI | 10.14943/gbhu.71.1 |
| Doc URL | http://hdl.handle.net/2115/32756 |
| Туре | bulletin (article) |
| File Information | 71-1.pdf |



北海道大学地球物理学研究報告 Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan. No.71, March 2008, pp.1-18

火山岩塊の運動再考(3)

- 放出火山岩塊に対する風の効果と岩塊の初速度についてのモデル計算 -

鈴木 建夫 職業能力開発総合大学校 新井田 清信 北海道大学理学研究院自然史科学専攻 西田 泰典・大島 弘光 北海道大学理学研究院地震火山研究観測センター 室伏 誠 職業能力開発総合大学校通信システム工学科

(2007年12月21日受理)

Reconsideration of volcanic block kinematics (3)

- Model calculations considering the effects of the wind and the initial velocity of volcanic block -

Takeo Suzuki

Polytechnic University

Kiyoaki NIIDA

Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

Yasunori NISHIDA, Hiromitsu OSHIMA

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

and

Makoto Murofushi

Department of Telecommunication Systems Engineering, Polytechnic University (Received December 21, 2007)

From the volcano-energetics point of view, it is very important to evaluate the velocity, direction and distribution of ejected volcanic blocks. However, in most cases, it is hard to measure directly such quantities during the eruption. Therefore, the volcanic blocks landed on and around the crater have been investigated to reproduce dynamic aspects of eruption after the eruption. In the present paper, ballistic curves of the volcanic blocks are numerically analyzed for various combination of parameters, such as direction of the explosion principal axis of ejection, velocity and direction of the wind, air resistance to the block and dependence of direction of the initial velocity of ejection. The calculations are made on the basis of a generalized ballistic equation of ejected blocks, in which the wind velocity and the air resistance to the block are treated as vector quantities. Calculated results lead to the following characteristic conclusions: (1) The winds above 20 m/s along the direction of ejection plays the major role in the ballistic curves, while the lower wind velocity is less effective. (2) Spatial distribution of the landed blocks is mainly affected by the direction of the explosion principal axis. The distribution of the volcanic blocks which was spread to the specific direction is described by inclination of the explosion principal axis. (3) The spatial distribution of the small size blocks depends remarkably on the air resistance.

I. はじめに

一連の本研究において,鈴木ら (2007a) は,まず従来の放出火山岩塊の弾道学で用いられて きた運動方程式の問題点,すなわち空気抵抗力がベクトル量であることを正しく加味していない ことを指摘して,新たにそのことを加味し,かつ風の効果を考慮した一般性のある運動方程式を 提出した.続いて鈴木ら (2007b) はその運動方程式を用い,空気抵抗力の違いによる岩塊の着 地角度への効果,火口高度の違いによる大気密度の弾道曲線に与える効果,爆発主軸の傾きによ る弾道曲線の違いなどのシミュレーションを行った.

本稿においては、鈴木ら(2007a)が提案した風速場における運動方程式を用いて、弾道曲線 に対する風速の効果の数値シミュレーションを行う.また火山岩塊の着地角度の基本的性格を知 るために、空気抵抗値ゼロのもとでの岩塊の着地角度について考察する.

これまで火山岩塊の放出メカニズムに興味を持った研究者らは、着地岩塊の分布が、方位によ らず一様な初速度を仮定した放出モデルでは説明出来ない場合があることに薄々気づいていたが、 その具体的処理法にまで踏み込まなかった.本稿では、井口ら(1983)が提唱した火山弾の初速 と射出角度の関係式を一般化した「放出速度方位依存モデル」を用いて、噴出速度が方位に依存 する場合の岩塊分布について考察する.

さらに, Minakami (1942) が着目した岩塊の受ける空気抵抗を見積もる上で重要な最小岩塊 の分布について論ずると共に,最大岩塊の分布を作りだす原因が放出メカニズムにあることを想 定した初速度直径依存性を取り込んだ「放出速度方位依存・直径依存モデル」によるシミュレー ションを試みる.

Ⅱ. 放出火山岩塊に対する風の効果

風速 ベクトル U の場における飛行物体が,速度の2乗の空気抵抗の下で飛行速度ベクトル V で運動をする場合,鈴木ら (2007a) において論じたように,大気との相対速度ベクトルは W = V-U である. この場合の空気の抵抗力ベクトル F は k' を抵抗値とすると,

 $\mathbf{F} = -k'W^2(\mathbf{W}/W) = -k'W\cdot\mathbf{W}.$ (1)

したがって、この場合の運動方程式は、

$$m\frac{\mathrm{d}\mathbf{V}}{\mathrm{d}t} = m\mathbf{g} - k'W \cdot \mathbf{W} \,. \tag{2}$$

これを*x、y、z*で表現すると、

$$m\frac{\mathrm{d}^{2}x}{\mathrm{d}t^{2}} + k'W\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} - U_{x}\right) = 0,$$

$$m\frac{\mathrm{d}^{2}y}{\mathrm{d}t^{2}} + k'W\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} - U_{y}\right) = 0,$$

$$m\frac{\mathrm{d}^{2}z}{\mathrm{d}t^{2}} + k'W\left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\right) + mg = 0.$$
(3)

ただし,

W =
$$\sqrt{(dx/dt - U_x)^2 + (dy/dt - U_y)^2 + (dz/dt)^2}$$
. (4)

これが, Matuzawa (1934) が指摘した,「空気中を飛行する物体に働く抵抗は飛ぶ方向に反対な力であってベクトル量である」,を考慮した場合の風速場 U における運動方程式である.

この運動方程式に含まれる抵抗値はk' = mkであり、Matuzawa (1933) で指摘されている大気密度の高度変化を考慮に入れた場合、鈴木ら (2007b) において論じたように、k値は火口底の高度をH、火口底からの高さをzとすると、

$$k = \frac{K_d \rho_0 \sqrt{1.07 - F}}{\rho' d} [1 - \frac{\beta}{T_0} (H + z)]^A.$$
(5)

ただし,

$$A = rac{
ho_0 T_0}{p_0 eta} g$$
 ,

.1 . .

 K_d :火山岩塊の形による空気抵抗係数, $\rho_0: H+z=0$ における大気密度,

d:火山岩塊の直径, ρ':火山岩塊の密度, F:火山岩塊の縦横比,

 $T_0: H+z = 0$ における大気温度, β :大気の温度勾配,

 $p_0: H+z = 0$ における大気圧, g: 重力加速度.

したがって、風速場 $U = U_x i + U_y j$ において放出された岩塊の弾道曲線は、下記の連立微分方程 式を、zの関数としてのkを考慮に入れて数値積分すれば求めることが出来る.

$$\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} + kW(v_x - U_x) = 0,$$

$$\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} + kW(v_y - U_y) = 0,$$

$$\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} + kWv_z + g = 0.$$
(6)

ただし,

$$W = \sqrt{(v_x - U_x)^2 + (v_y - U_y)^2 + {v_z}^2}.$$

1. 風の効果を考慮した運動方程式の具体的数値解法

数値計算に用いた具体的手法は,

 $t = t_j$ において、岩塊の位置が (x_j, y_j, z_j) で、速度が (v_{xj}, v_{yj}, v_{zj}) であるとすると、大気との相対速度は、

$$W_{j} = \sqrt{(v_{xj} - U_{xj})^{2} + (v_{yj} - U_{yj})^{2} + v_{zj}^{2}}.$$
(7)

dt時間の速度変化は,

$$dv_{xj} = -k_j W_j (v_{xj} - U_{xj}) \times dt ,$$

$$dv_{yj} = -k_j W_j (v_{yj} - U_{yj}) \times dt ,$$

$$dv_{zj} = -(g_j + k_j W_j v_{zj}) \times dt .$$

$$(8)$$

位置の変化は、

$$dx_{j} = (v_{xj} + dv_{xj}/2) \times dt,$$

$$dy_{j} = (v_{yj} + dv_{yj}/2) \times dt,$$

$$dz_{j} = (v_{zj} + dv_{zj}/2) \times dt.$$
(9)

したがって、 $t = t_i + dt$ における岩塊の速度は、

$$\left. \begin{array}{c} v_{xj+1} = v_{xj} + dv_{xj} ,\\ v_{yj+1} = v_{yj} + dv_{yj} ,\\ v_{zj+1} = v_{zj} + dv_{zj} . \end{array} \right\}$$
(10)

岩塊の位置は,

$$\left. \begin{array}{l} x_{j+1} = x_j + dx_j, \\ y_{j+1} = y_j + dy_j, \\ z_{j+1} = z_j + dz_j. \end{array} \right\}$$
(11)

したがって、 $t = t_i + dt$ における岩塊と火口との水平距離は、

$$r_j = \sqrt{x_{j+1}^2 + y_{j+1}^2} \tag{12}$$

となる. この計算において, g_j , k_j , および (U_{xj} , U_{yj})等の数値は, 岩塊が通過する高度の関数 として与える.

2. 風上・風下方向へ飛来する岩塊の弾道曲線への風速効果

高度 H = 0m の火口から初速 $V_o = 250$ m/s, 仰角 $\theta = 40^\circ$ で直径 d = 0.8m, 密度 $\rho' = 2.5$ g/cm³の岩塊を,岩塊の形状による抵抗係数 $K_d = 1.0$ とおいて放出した場合の弾道曲線を Fig. 1 (a) に示した.実線は風速 0m/s の場合の弾道曲線で,放出方向が風下方向の場合を+の風速と して表現し,風上方向の場合を-の風速として表現した.風速 40m/s の場合,到達距離に対す る風の効果はおおよそ±30%であることが知れる.火口高度が 3000m の場合を Fig. 1 (b) に示 した.この場合の到達距離に対する風速 40m/s の効果はおおよそ±25%である.到達距離に対 する風速の効果をまとめて示したのが Fig. 2 である.火口高度が 0m の場合と 3000m の場合に ついて,直径 0.8m, 0.4m, 0.2m の岩塊の到達距離と風下方向への風速との対応を示している. 到達距離は風速の増加と共にほぼ直線的に大きくなり,風下方向への風速の効果は風速 10m/s

4



Fig. 1.(a). Ballistic curves of volcanic block for various wind velocities (U). Altitude of the crater (H) is assumed to be 0[m]. Coefficient of the air resistance $K_d = 1.0$, diameter of the block d = 0.8[m], projection angle $\theta = 40^{\circ}$ and initial velocity of the block $V_o = 250$ [m/s] are also assumed.





Fig. 1.(b). The same as in Fig.1(a), but for H = 3 [km].

Fig.2. Landing distance along the downwind direction as a function of the wind velocity for various diameters of blocks (d) and altitudes of the crater (H). $K_d = 1.0$, d = 0.8 [m], $\theta = 40^{\circ}$ and $V_o = 250$ [m/s] are assumed.

当たり 140m~170m 程度放出岩塊の到達距離を伸ばし、放出岩塊の分布域を風下方向へ拡げる ことを示している.

3. 岩塊の弾道曲線に対する横風の影響

岩塊の放出方向に対して真横の風が弾道曲線に与える影響をシミュレートしたものが Fig. 3 (a) である. 真横の風は岩塊の到達距離に殆ど影響を与えないことがわかる. この岩塊が着地す る際の飛来方位を知るために,弾道曲線を水平面(x-y面)に投影したものを Fig. 3 (b) に示 した. 風速が 40m/s の場合は直径 0.8m の岩塊でも,岩塊の飛来方位は火口方向から風上方向 へ約 30° ずれた方向から飛来することが明らかとなった. さらに横風効果の傾向を確かめるため に,風速 20m/sの風下方向と 60° 異なる方向へ放出された岩塊の弾道曲線と,風速 10m/sの風



Fig. 3.(a). Ballistic curves of volcanic blocks for various southward side wind velocities. Horizontal axis shows distance along the eastward ejection direction. $K_d = 1.0$, d = 0.8 [m], $\theta = 40^{\circ}$ and $V_o = 250$ [m/s] are assumed. Note that almost the same ballistic curves are calculated.



Fig. 4.(a). Comparison of two ballistic curves which depend on the wind direction. Horizontal axis shows distance along the ejection direction. The wind comes at an angle of 60° with respect to the ejection direction (wind velocity is 20 [m/s]), and a block is ejected along the wind direction (wind velocity is 10 [m/s]). $K_d = 1.0$, d = 0.8 [m], $\theta = 40^\circ$ and $V_o =$ 250 [m/s] are assumed.



Fig. 3.(b). Horizontal projection of the ballistic curves. Parameters used are the same as in Fig.3(a).



Fig. 4.(b). Horizontal projection of the ballistic curves. Parameters used are the same as Fig.4(a).

火山岩塊の運動再考(3) - 放出火山岩塊に対する風の効果と岩塊の初速度についてのモデル計算-7

下方向へ放出された岩塊の弾道曲線を比較したのが Fig. 4 (a) である. この二つの弾道曲線は 殆ど重なっている. このことは、岩塊の到達距離に与える風の効果は、風速の岩塊放出方向成分 の大きさに依存することを示している. この時の弾道曲線の x-y 面に投影した図を Fig. 4 (b) に示した.

Ⅲ.「一様放出モデル」による解析

火口から放出される火山岩塊の放出初速度が,岩塊の放出方向や岩塊の大きさによらずに,一 様な初速度を持って放出されると考えた場合を「一様放出モデル」と名付けることにする.風の 効果が無視出来る場合は,その場合の岩塊分布域は火口に対してほぼ同心円となり,風の効果を 考慮すると岩塊分布域は風下側へ移動することが考えられる.

1.「一様放出モデル」による岩塊分布域に対する風速効果

「一様放出モデル」において、高度 H = 0m の火口から初速 $V_o = 250$ m/s、仰角 $\theta = 40^{\circ}$ で 直径 d = 0.8m、密度 $\rho' = 2.5$ g/cm³の岩塊を、空気抵抗係数 $K_d = 1.0$ とおいて放出した場合の 岩塊分布域(高度 0m 面上)を Fig. 5 に示した。図には風速 0m/s、20m/s、60m/sの三つの場 合の岩塊分布域を示した。これによって明らかとなったことは、風速 20m/s 以下の場合は、岩 塊分布域の形に風速の効果はあまり明確には現れないことである。「一様放出モデル」で岩塊分 布域の形に風速の効果が明確に現れるのは、風速が 60m/s 程度の極めて強風の場合である。ま た岩塊に与える風の効果は、岩塊分布域をほぼ平行に風下へ移動させることが確かめられた。



Fig. 5. Distribution of volcanic blocks for various wind velocities. Isotropic ejections are assumed. $K_d = 1.0$, d = 0.8 [m], $\theta = 40^{\circ}$ and $V_o = 250$ [m/s] are also assumed.



Fig. 6. Diameter of the minimum size blocks as a function of landing distance is shown for various initial velocities V_o and wind velocities U ('Isotropic initial velocity model' : initial velocity of ejection does not depend on the angle from the explosion principal axis).

2.「一様放出モデル」による最小岩塊分布に対する風速効果

最大分布距離が 3km である場合の最小岩塊(その地点に着地した岩塊の中で最も小さい岩塊) の着地距離に与える風速効果を示したものが Fig. 6 である.最大分布距離 3km で観測される岩 塊の直径が 0.8m である場合,この岩塊に対する風速効果は小岩塊の直径と最大着地距離の関係 (最小岩塊曲線)に現れる.即ち Fig. 6 では、3km で観測される岩塊の直径が 0.8m である場合, 無風であれば直径 0.2m の岩塊は 1.2km 付近に着地するが、20m/s の追い風では 1.4km 付近に、 40m/s の追い風であれば 1.6km 付近に着地するはずである.したがって、最小岩塊の分布を測 定すれば、Fig. 6 の図から風の効果の推測が可能となる.

3.「一様放出モデル」がつくる岩塊の着地角度

空気抵抗ゼロの場合は、放出地点と同一水平面上での最大到達点が 2km ならば、最大到達地 点での岩塊の着地角度(=放出仰角)は 45°で、それに対応する放出速度は 140m/s である. こ のとき、中間地点である 1km 地点に着地する物体について考えると、岩塊の放出速度が 140m/s の場合は放出角度が 75°と 15°の場合のみである. 一方、1km を最大到達点とする物体の放出 仰角は 45°で、その放出速度は約 99m/s である. これを整理すると、最大到達距離の半分の 1km 地点に着地する物体は、1km から 2km 地点の間に到達出来る放出初速度、すなわち 99m/s から 140m/s の範囲にあり、Fig. 7 はその着地角度が 15°から 75°の範囲内にあることを示して いる. このように分布の最大到達地点より内側の地点に着地するのは、その地点と最大到達地点 の間に達することが出来る放出初速度を持った岩塊と云うことになる. Fig. 8 は、最大到達距 離で標準化した各地点での着地角度の範囲を示している. 空気抵抗効果が存在する場合でも、放 出点からの距離と着地角度の関係は基本的に、Fig. 8 に示したものと同様な関係にある.

そこで、空気抵抗がゼロでない場合の「一様放出モデル」がつくる岩塊の着地角度について考





Fig. 7. The ballistic curves of zero air resistance in maximum landing distance 2 [km]. (V_{o} = 140 [m/s])

Fig. 8. Landing angle in zero air resistance standardized by maximum landing distance.





える。放出火山岩塊の空気抵抗については、Katsui et al. (1978) において報告されている空気 抵抗値 $k = 6 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ が、着地角度を測定した付近に着地していた最大級岩塊 $d = 0.7 \text{m}^{-2}$ 0.8mに対応すると考えると、 K_a 値はほぼ 1.5 である. この K_a 値をもとにすると、鈴木ら (2007b)の空気抵抗式における空気抵抗値は、Matuzawa(1933) p331 式の値の約 6 倍とな る. Fig. 9 は、「一様放出モデル」を用いて、空気抵抗値を $K_d = 1.5$ とした場合の岩塊の最大 着地角度と、Matuzawa (1933)の空気抵抗式による岩塊の最大着地角度を比較した図である. 実線が鈴木ら(2007b)の空気抵抗式による曲線で、点線が Matuzawa (1933)の空気抵抗式に よる曲線である. 0.4m 岩塊と 0.2m 岩塊の最大着地角度の曲線も同時に示してある. この仮定 のように、平均直径 0.8mの岩塊が最大 2km の範囲に分布している場合、鈴木ら(2007b)の 空気抵抗式によるとその放出速度は 234.8m/s, Matuzawa (1933)の空気抵抗式によると 150.7m/s と予想される。分布範囲各地点で最大着地角度が測定出来たなら、鈴木ら(2007b) と Matuzawa (1933)のどちらが妥当であるか、Fig. 9 を用いて検証できることになる. すな わち、1.5km 地点では、鈴木ら(2007b)の空気抵抗式によれば 0.8m 岩塊の最大着地角度は 77 °で, 0.4m以下の岩塊はこの地点に到達していない.一方, Matuzawa (1933)の空気抵抗式に よれば、1.5km 地点では、0.8m 岩塊の最大着地角度は 67°で、最大着地角度 65°の 0.4m 岩塊 も発見されるはずである.

Ⅳ.「放出速度方位依存モデル」がつくる岩塊分布域や最小岩塊および着地角度

井口ら(1983)の岩塊射出角度と初速の関係式を拡張して、角度依存パラメータを M と置くと、爆発主軸の方向と岩塊放出方向の間の角度が φ の場合は、岩塊の放出速度 V₀は、

$$V_o = V_{o\,\text{max}} \cos^M \phi \tag{13}$$

で表される.ただし、爆発主軸の水平面からの角度がψ、爆発主軸の方位とその岩塊の放出方位 の方位差がΩ(水平面上投影角度)で、岩塊の放出仰角がθの場合、爆発主軸の方向と岩塊放出 $\cos\phi = \cos\phi\cos\Omega\cos\theta + \sin\phi\sin\theta. \tag{14}$

(15)

また、爆発主軸の傾きを鉛直からの角度Θで表すと、

 $\Theta=90^\circ-\phi$

である.以下,本論文で用いる記号および用語の説明は Table 1 にまとめて付す.また 5 個の 角度 (ϕ , ϕ , Ω , θ , Θ)の関係を Fig. 10 に示す.

(13) 式は、すでに鈴木ら(2007b)において「放出速度方位依存モデル」として表した式をさらに一般化したもので、火山岩塊の分布域形状の解析から、より方位依存性の強い噴火メカニズム解明の可能性が得られるかも知れないと考えて提出するものである。井口ら(1983)の桜島火山における観測結果は *M* = 1.5 の場合に対応する.

爆発主軸からの角度 ¢ に従って放出速度(初速度)が減少する様子が角度依存パラメータ *M* によってどの程度異なるかを Fig. 11 に示した.角度依存パラメータ *M* の違いがどの様な火山 岩放出メカニズムに対応するかについては、ここでは論じない.

爆発主軸:The explosion principal axis;放出岩塊の初速度が最大となる方向 爆発主軸の方向: Direction of the explosion principal axis 爆発主軸の傾き(鉛直軸からの角度): Θ ; Inclination angle of the explosion principal axis 爆発主軸の傾き(水平面からの角度): ϕ ; Standing-up angle of the explosion principal axis $\phi = 90^{\circ} - \Theta$ 爆発主軸の方位: Azimuth of the explosion principal axis Azimuth is measured clockwise from the north on the horizontal plane. 岩塊の放出方向: Direction of an ejected block 岩塊の放出仰角: θ ; Projection angle of block 岩塊の放出方位: Azimuth of an ejected block 爆発主軸の方向と岩塊の放出方向との間の角度: ¢ ; Angle between the explosion principal axis and the direction of ejected block 爆発主軸の方位と岩塊の放出方位の間の角度;Ω ; Azimuth difference of the explosion principal axis and the direction of ejected block 角度依存パラメータ:M; Angle dependence parameter $V_o = V_{o \max} \cos^M \phi$ (13) 式で定義される. 直径依存パラメータ:N; Diameter dependence parameter 中間直径パラメータ: d_m ; Intermediate diameter parameter $V_o = V_{o\,\text{dmin}} \{1 - (1/2) (d/d_m)^N\}.$ (16)式で定義される. 放出岩塊の初速度が角度依存性と直径依存性の双方を持つ場合の初速度は, $V_{o} = V_{o\,\text{dmin}} \{1 - (1/2) (d/d_{m})^{N}\} \cos^{M} \phi.$ 「一様放出モデル」: 'isotropic initial velocity model' 「放出速度方位依存モデル」: 'anisotropic initial velocity model' 「初速度直径依存モデル」: 'diameter dependent initial velocity model' 「放出速度方位依存・直径依存モデル」 : 'anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model' ; 放出岩塊の初速度が角度依存性と直径依存性の双方を持つ場合を想定し, 「放出速度方位依存モデル」と「初速度直径依存モデル」統合したモデルである.

10



Fig. 10. Coordinate system used in the present study. Θ : the inclination angle of the explosion principal axis. θ : the projection angle of block. Ω : the azimuth difference of the explosion principal axis and the direction of the ejected block. ϕ : the angle between the explosion principal axis and the direction of ejected block. ϕ (= 90° - Θ): the standing up angle of the explosion principal axis.



Fig. 11. Anisotropic initial velocity model: initial velocity of ejection depends on the angle from the explosion principal axis of the ejection. Angle dependence parameter M is shown in eq. (13). In the model, initial velocity of the blocks (V_o) does not depend on the size of volcanic blocks (d), but depends on the ejected angles (θ) .

1.「放出速度方位依存モデル」がつくる岩塊分布域

爆発主軸に傾きが無く ($\Theta = 0^{\circ}$), かつ無風の場合について,角度依存パラメータ M の違い で岩塊分布域がどのていど異なるかを Fig. 12 に示した.次に,角度依存パラメータ M = 1.5, 無風状態で,爆発主軸が垂直 ($\Theta = 0^{\circ}$)の場合,爆発主軸の傾きが南方に $\Theta = 20^{\circ}$ の場合,爆



Fig. 12. Distribution of volcanic blocks for two angle dependence parameters (*M*), assuming the maximum initial velocity $V_{o \max} = 370$ [m/s], $\Theta = 0^{\circ}$ (the explosion principal axis is vertical) and the windless condition.



Fig. 13. The same as in Fig.12, but for various inclination angles of the explosion principal axis (Θ). $K_d = 1.0$, M = 1.5, d = 0.8 [m] and $V_{o \max} = 370$ [m/s] are assumed under the windless condition.



Fig. 14. The same as in Fig.12, but for various inclination angles of the explosion principal axis (Θ). $K_d = 1.0$, M = 5.0, d = 0.8 [m] and $V_{o \max} = 370$ [m/s] are assumed under the windless condition.



Fig. 15. Effect of the crater terrain on distribution of volcanic blocks ejected isotropically under the windless condition. $K_d = 1.0$, d = 0.8 [m] and $V_a = 250$ [m/s] are assumed.

発主軸の傾きが南方に $\Theta = 40^{\circ}$ の場合の岩塊分布域を Fig. 13 に示した. さらに,角度依存パラ メータM = 5.0の場合についての岩塊分布域を Fig. 14 に示した.角度依存パラメータM = 5.0,爆発主軸の傾きが南方に $\Theta = 40^{\circ}$ の岩塊分布域は爆発主軸の傾き方向に伸びた長楕円となっ ている.このことから,特定方向に長楕円の岩塊分布域を作る放出メカニズムとしては,岩塊放 出初速度の角度依存性が大きく,その上爆発主軸の傾きが大きいことが考えられる.

一方,岩塊分布域については、火口近傍の地形による遮蔽効果によって、分布域が狭まる効果 がよく知られている。角度依存パラメータ *M* = 1.5、無風状態で、爆発主軸は垂直、火口近傍 の地形が北側 70 度の壁、南側 40 度の壁を想定した場合の岩塊分布域を Fig. 15 に示した。火 口近傍地形の 40 度の壁では遮蔽効果は現れないが、70 度の壁では確実に遮蔽効果は現れる。 この場合の岩塊分布域は遮蔽効果が現れる特定方向がつぶれる(狭まる)形となる。

2.「放出速度方位依存モデル」がつくる最小岩塊分布

直径 0.8m の岩塊が 3km の最大分布域を構成している 5 種類の状況についてシミュレーションを行った. $K_d = 1.0$, M = 1.5, 無風状態においては, 爆発主軸垂直における最大放出速度は $V_{omax} = 434$ m/s であり, 爆発主軸の傾きが $\Theta = 20^{\circ}$ では $V_{omax} = 330$ m/s, $\Theta = 40^{\circ}$ では $V_{omax} = 289$ m/s と求められる. この条件における岩塊各サイズの最大到達距離を Fig. 16 に示した. 爆発主軸傾きの違いは最小岩塊の分布にほとんど影響を与えないことが判明した. 次に, 無風・爆発主軸垂直状況での空気抵抗係数を $K_d = 1.5$, 1.0, 0.7 と変化させた場合の岩塊各サイズの最大到達距離を Fig. 17 に示した. 空気抵抗係数を小さく設定すると,大岩塊の分布域が同じ場合でも小岩塊の分布域は拡がることが明らかとなった.



Fig. 16. Diameter of the blocks as a function of the maximum landing distance for various inclination angles of the explosion principal axis (Θ) and the maximum initial velocities ($V_{o \max}$). $K_d = 1.0$, M = 1.5 and H = 0 [m] are assumed under the windless condition.



Fig. 17. Diameter of the minimum size blocks as a function of landing distance for various coefficients of the air resistance (K_d) , the maximum initial velocities $(V_{o \max})$. Vertical explosion principal axis $(\Theta = 0^{\circ})$, M = 1.5 and H = 0[m] are assumed under the windless condition.

3.「放出速度方位依存モデル」が作る岩塊の着地角度

同様に, 直径 0.8m の岩塊が 3km の最大分布域を構成している 5 種類の状況における岩塊の 着地角度をシミュレーションした. Fig. 16 に対応するのが Fig. 18 であり, Fig. 17 に対応する



Fig. 18. Landing angle as a function of landing distance is shown for various inclination angles of the explosion principal axis (Θ) and diameters of blocks (d). $K_d = 1.0$, M = 1.5 and H = 0 [m] are assumed under the windless condition.



Fig. 19. Landing angle as a function of landing distance is shown for various air resistances (K_d) and diameters of blocks (d). $\Theta = 0^{\circ}$, M = 1.5 and H = 0 [m] are assumed under the windless condition.

のが Fig. 19 である. 爆発主軸の傾きは岩塊の着地角度に大きな影響を与えることが, Fig. 18 から読みとれる. 一方, 空気抵抗係数の違いは岩塊の着地角度にさほど大きな影響は与えないことが Fig. 19 から読みとれる.

V. 山麓に撒布される火山岩塊の最小直径・最大直径

Minakami (1942) は、山麓に撒布された火山岩塊の最小直径に着目した. これは解析に用いられた空気抵抗値、およびそれを用いて推定された放出速度の妥当性を補強するものである. 一方、放出火山岩塊のサイズ分布が岩盤破壊によるならば、多数分布している岩塊サイズの数倍の岩塊が生成される可能性もゼロではない. これらの岩塊の空気抵抗を考えると、観測された分布域をかなり離れた距離の場所に希に巨大岩塊が飛来することも考えられる. もし、それが正しければ火山防災の上では非常に困った事になるだろう. 他方では、放出岩塊の初速獲得メカニズムとして、小さな岩塊は容易に大きな初速を獲得出来るが、岩塊が大きくなると初速の獲得が次第に困難になることも考えられる. この場合は、分布域界は中級サイズの岩塊で構成されることになるだろう. この様に考えると、火山岩塊の放出メカニズムを考えるためには、分布する岩塊の最小直径のみならず最大直径の観測も大切な要素となるのではないだろうか.

1.火山放出岩塊の「初速度直径依存モデル」

放出岩塊の初速獲得メカニズムが不明な状態で,放出岩塊の初速度が直径に依存する関係をどのような形式に仮定するかと云うことは、かなり無理なことである.そこで、岩塊は大きくなるに従って小さな岩塊と比べて大きな放出速度を獲得しづらくなると考え、微小岩塊が獲得する初速度 *V_{odmin}* と (1/2) *V_{odmin}* に対応する中間の大きさの岩塊直径 *d_m* (以下「中間直径パラメータ」と称する)を想定し、シミュレーション用の「初速度直径依存モデル」として、次の初速度直径依存式を提案する.



Fig. 20. Diameter dependent initial velocity model in eq.16.

火山岩塊の運動再考(3) - 放出火山岩塊に対する風の効果と岩塊の初速度についてのモデル計算- 15

$$V_{o} = V_{o\,dmin} \{ 1 - (1/2) (d/d_{m})^{N} \}.$$
(16)

この初速度直径依存式で表現される岩塊の直径と初速度の関係を Fig. 20 に示す. もちろん, それぞれの曲線がいかなる初速獲得メカニズムに対応するかは不明である.

2.「放出速度方位依存・直径依存モデル」による最小岩塊・最大岩塊の分布

以下では、「放出速度方位依存モデル」と「初速度直径依存モデル」を組み合わせた「放出速 度方位依存・直径依存モデル」がつくりだす最小岩塊・最大岩塊の分布について考察する.

無風・爆発主軸垂直条件($\Theta = 0^{\circ}$)で、直径d = 0.8mの岩塊の最大到達距離が 3km となる 場合の一つである $K_d = 1.0$, M = 1.5, $d_m = 0.9m$, N = 2.0, $V_{o\,dmin} = 717m/s$ がつくりだす 岩塊の径と最大到達距離の関係を基準にして比較を試みる。第1に d_m をパラメータとした、岩 塊の径と最大到達距離の関係を Fig. 21 に示す。その結果、到達距離 1500m~2500m の範囲で は、 d_m が変化しても曲線の下半分(最小岩塊曲線:小岩塊の最大到達距離)には殆ど影響を与 えないが、曲線の上半分(最大岩塊曲線:大岩塊の最大到達距離)は d_m が大きくなると、最大 到達距離が大きくなる。即ち、同じ地点で期待される最小岩塊は変わらないが、最大岩塊の直径 は大きくなることを示している。以下、この曲線を最小・最大岩塊曲線と称する。最大到達距離 の条件に満たない岩塊は全てこの最小・最大岩塊曲線の左側(到達距離が短い側)の地点に降下 する。第2に爆発主軸の傾き角度 Θ が最小・最大岩塊曲線に与える効果を検証したものを Fig. 22 に示した。 Θ の変化は最小・最大岩塊曲線にほとんど影響を与えないことが分かる。第3に、 直径依存パラメータNが最小岩塊・最大岩塊曲線に与える効果を Fig. 23 に示した。N が変化



Fig. 21. Diameter of blocks as a function of landing distance for various intermediate diameter parameter (d_m) . $\Theta = 0^\circ$, $K_d = 1.0$, M = 1.5, N = 2.0 and H = 0 [m] are assumed under the windless condition. See text for definitions of diameter dependence parameter N and d_m .



Fig. 22. The same as in Fig. 21, but for various inclination angles of the explosion principal axis (Θ) and initial velocities of minimum size block ($V_{o \text{ dmin}}$). $K_d = 1.0$, M = 1.5, $d_m = 0.9$ [m], N = 2.0 and H = 0 [m] are assumed under the windless condition.



14 M=1.5 M=5.0 1.2 1 Diameter of block (m) 0.8 0.6 0.4 0. 2 0 500 1500 2500 3000 3500 n 1000 2000 Maximum landing distance (m)

Fig. 23. The same as in Fig.21, but for various diameter dependence parameters (N). $K_d = 1.0, \ \Theta = 30^{\circ}, \ M = 1.5, \ d_m = 0.9 \ [m], \ H = 0 \ [m]$ and $V_{o \ dmin} = 503 \ [m/s]$ are assumed under the windless condition.



Fig. 24. The same as in Fig. 21, but for angle dependence parameters (*M*). $K_d = 1.0$, $\Theta = 30^\circ$, N = 2.0, $d_m = 0.9$ [m], H = 0 [m] and $V_{o \text{ dmin}} = 503$ [m/s] are assumed under the windless condition.

Fig. 25. The same as in Fig.21, but for various air resistance (K_d) and initial velocities of minimum size block $(V_{o \text{ dmin}})$. $\Theta = 30^{\circ}$, M = 1.5, N = 2.0, $d_m = 0.9 \text{ [m]}$ and H = 0 [m] are assumed under the windless condition.

しても曲線の下半分にはあまり大きな影響を与えないが,最大岩塊を示す曲線(曲線の上半分) はNが小さくなると同じ地点で期待される最大岩塊の直径が大きくなることを示している.第 4 に,角度依存パラメータ M が分布曲線に与える効果を Fig. 24 に示した. M を大きく変化さ せても最小・最大岩塊曲線にほとんど影響を与えないことが分かる.第5 に,岩塊の空気抵抗 係数 K_d を変化させた場合を Fig. 25 に示した. K_d が小さくなると小岩塊の最大到達距離が大き くなる様子が示されている.

以上のことから明らかとなったことは、岩塊分布域の大きさが等しくても分布する岩塊が全体 として大きなものであれば、大きな空気抵抗係数と大きな初速度を考えなければならず、分布す る岩塊が全体として小さなものであれば、小さな空気抵抗係数と小さな初速度を考えることにな 火山岩塊の運動再考(3) - 放出火山岩塊に対する風の効果と岩塊の初速度についてのモデル計算-17

る. これにより,岩塊分布域内で観測される岩塊の大きさ分布を説明出来る条件を考慮すること で,放出火山岩塊に共通した空気抵抗係数を追いつめ,信頼できる火山岩塊放出速度の推定がで きる見通しがほぼ整ったことになる.

Ⅵ. おわりに

本報告では,鈴木ら(2007a)において提案されている風の効果を考慮した運動方程式を用いた数値解法によって,各種のシミュレーションを行った.

(1) 放出火山岩塊の運動に作用する風速場の効果については、ほぼ風の岩塊放出方向成分だけ を考慮すれば良く、岩塊の放出方向に対する横風成分は軌道方向を多少変化させる程度である。 岩塊分布域に対する風の効果は分布域を風下方向へほぼ平行移動する効果として現れる.また、 岩塊分布域の変化は風速が 20m/s 以下では顕著ではない.

(2) 放出岩塊の降下角度について,最も単純なモデルで考察したところ,最大到達地点では降 下角度はほぼ一意であるが,その内側では最大値と最小値を持つことを確認した.

(3)特定方向に長く拡がった岩塊分布域は、「放出速度方位依存モデル」によって、角度依存 パラメータ *M* が大きく、爆発主軸の傾きが大きな場合に形成されることが明らかとなった.

(4)爆発主軸の傾きが大きくなるにしたがって,着地角度は岩塊の大小にかかわらず全体に低 角度へ移行する.

(5)爆発主軸の傾きは最小岩塊曲線にはほとんど影響を与えず,岩塊の空気抵抗が小岩塊の分 布に強い影響を持つことが確認された.したがって,最小岩塊分布の観測は岩塊の空気抵抗仮定 の検証に重要な意味をもつことが明らかとなった.

(6)火山岩塊の生成が岩盤破壊メカニズムに支配されるならば、巨大岩塊が生成される可能性 もゼロではない.この場合、「一様放出モデル」および「放出速度方位依存モデル」では、場合 によっては観測された分布域をかなり離れた距離の場所に希に巨大岩塊が飛来することも考えら れる.もし、それが正しければ火山防災を考えると非常に困った事になるだろう.本報告では、 着地した岩塊の大きさ分布を作りだす原因が放出メカニズムにも支配されることを想定して、ご く単純な「初速度直径依存モデル」を考え、「放出速度方位依存モデル」と「初速度直径依存モ デル」を組み合わせた「放出速度方位依存・直径依存モデル」によるシミュレーションを試みた. このモデルを用いると、分布域の各地点における最小岩塊および最大岩塊を示すことが出来る.

(7) 爆発主軸の傾きは最小・最大岩塊曲線にほとんど影響を与えない.

(8) 中間直径パラメータ *d_m* や直径依存パラメータ *N* を変化させると最大岩塊を示す曲線に大きな変化が現れる.

本報告において提出した3種の火山岩塊放出速度モデルを用いて、実測された岩塊分布域の 形、最小岩塊や最大岩塊の分布および岩塊の着地角度を総合的に説明しようとすれば、そこから 野外実験的に放出火山岩塊の空気抵抗値等が推定されると考える. 謝辞 著者らは職業能力開発総合大学校名誉教授の村瀬 勉氏には本報告の草稿を読んで頂き, また有益な指摘と助言をくださったことに、深く感謝いたします.

文 献

- 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-, 京大防災研 究所年報, 26, B-1, 9-21.
- Katsui,Y., Y.Oba, T.Suzuki, Y.Kondo, T.Watanabe, K.Niida, T.Uda, S.Hagiwara, T.Nagao, J.Nishikawa, M.Yamamoto, Y.Ikeda, H.Katagawa, N.Tsuchiya, M.Shirahase, S.Nemoto, S.Yokoyama, T.Soya, T.Fujita, K.Inaba and K.Koide, 1978. Preliminary report of the 1977 eruption of Usu Volcano, J.Fac.Sci., Hokkaido Univ., Ser.4, 18, 385-408.
- Matuzawa, T., 1933. Fluggeschwindigkeit einiger vulkanischen Bomben, Bull.Earthq.Res.Inst., Univ. Tokyo, 11, 329-346.
- Minakami, T., 1942. On the Distribution of Volcanic Ejecta (Part1) The Distribution of Volcanic Bombs Ejecta by the Recent Explosions of Asama, *Bull.Earthq.Res.Inst., Univ.Tokyo*, 20, 65-92.
- 鈴木建夫・新井田清信・西田泰典・大島弘光・室伏誠,2007a. 火山岩塊の運動再考(1)-放出火山岩塊の運動方程式-,北海道大学地球物理学研究報告,70,53-65.
- 鈴木建夫・新井田清信・西田泰典・大島弘光・室伏誠,2007b. 火山岩塊の運動再考(2)-放出火山岩塊の空 気抵抗と爆発主軸の傾き効果-,北海道大学地球物理学研究報告,70,67-83.

付記

訂正1 鈴木ら (2007a) の (8) 式を, 次のように訂正します.

誤
$$m \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} + K' W (\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} - U_x)^2 = 0$$

正 $m \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} + K' W (\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} - U_x) = 0$

訂正 2 鈴木ら(2007b) p75 および p83 における引用論文の著者名を次のように訂正します.

誤 Щтейнберг → 正 Штейнберг

この件につましては、国立極地研究所名誉教授楠 宏先生からご指摘を頂きました. 有り難う ございました.

訂正3 鈴木ら(2007b)のp70における式を,次のように訂正します.

誤
$$A = \frac{\rho_0 T_0}{\rho_0 \beta} g \longrightarrow$$
 正 $A = \frac{\rho_0 T_0}{p_0 \beta} g$