



Title	火山岩塊の運動再考（4）：浅間火山1938年および有珠火山1977年噴火における放出火山岩塊の解析
Author(s)	鈴木，建夫；新井田，清信；西田，泰典 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告，71，19-38
Issue Date	2008-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.71.19
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/32757
Type	departmental bulletin paper
File Information	71-19.pdf



火山岩塊の運動再考 (4)

－ 浅間火山 1938 年および有珠火山 1977 年噴火における放出火山岩塊の解析 －

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 (4)

－ Data analysis of ejected volcanic blocks with special attention to the
1938 Asama and the 1977 Usu eruptions －

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)

Spatial distribution of volcanic blocks, as well as landing distance from a crater, landing angle and diameter of the blocks has been well investigated on and around the crater in cases of the 1938 Asama and the 1977 Usu eruptions by some researchers. Then, this paper reproduces detailed kinematic aspects of the eruptions so as to interpret the above-mentioned field data, on the basis of a generalized ballistic equation of ejected volcanic blocks proposed by the present authors. Calculations are made for combination of various parameters, such as air resistance to the blocks, direction of the wind, orientation dependence of the initial velocity and

so on. The observed wind velocities are referred in the calculation. Comparison between the calculated and the observed results leads to the following conclusion:

(1) In the 1938 Asama eruption, the distribution of volcanic blocks shows that the direction of the explosion principal axis is due east ($N90^\circ E$) and its inclination angle is 30° . The angle dependence of the initial velocity ($M = 1.5$) is almost the same as that in the Sakurajima volcano. (2) In the 1977 Usu eruption, direction of the explosion principal axis is $N170^\circ E$ and its inclination angle is 20° , and the angle dependence of the initial velocity is large as much as $M = 5.0$. (3) The air resistance to the blocks is estimated as about $K_d = 0.5$ in both the eruptions. This value is valid in other volcanic eruptions because the air resistance seems to be same everywhere.

I. はじめに

鈴木ら (2007a, b; 2008) の研究の適応例として, 放出岩塊の分布域, 岩塊直径分布, 着地角度などのデータがそろっている 1938 年浅間火山噴火および 1977 年有珠火山噴火について, 放出岩塊の受けた空気抵抗値, 爆発主軸の傾き, 放出速度方位依存の度合いなどについて復元を試みる. なお, 数式の記号, 座標系などは鈴木ら (2007a, b; 2008) と共通である. また本論に出てくる「一様放出モデル」, 「放出速度方位依存モデル」, 「初速度直径依存モデル」および「放出速度方位依存・直径依存モデル」は, 同様に鈴木ら (2007a, b; 2008) において定義されている.

II. 浅間火山 1938 年の放出火山岩塊

1935 年から 1941 年の間に浅間火山において, 300 回以上の爆発が発生したが, その中で最も顕著な 1935 年 4 月 20 日, 1937 年 4 月 16 日, および 1938 年 6 月 7 日の爆発で噴出した火山岩塊について, Minakami (1942) は落下域その他の報告と解析を行っている. 中でも 1938 年 6 月 7 日の爆発で噴出した火山岩塊については, 落下域と共に岩塊の着地角度や分布する岩塊の最小直径などの測定結果が報告されている. Minakami (1942) の Table XII に記載されている角度は, 本文の記述から着弾地表面との角度であることが知れるので, 斜面の角度約 10° を加算したものが水平面に対する着地角度となる. また, 浅間火山の噴出口は周りが狭くて高い火口壁で囲まれており, 東側で水平から約 50° 以上, 西側で約 70° 以上の角度で放出された岩塊でなければ, 噴石が火口壁の外へ放出されることはない. 従って, 浅間火山においては火山岩塊の分布域に対するこの効果は顕著である. 本論での 1938 年 6 月 7 日岩塊の解析に当たっては, Minakami (1942) の Fig. 19 に示されている最小岩塊の分布の解析から始め, 着地角度の解析, 岩塊分布域の解析へと進めてゆくことにする. その解析にあたっては, 単純なモデルによる解析から始め, 他の要素を組み入れた解析へと順次進めてゆく.

1. 浅間火山における 1938 年 6 月 7 日の風の間

放出火山岩塊の解析に当たって、風の間の影響を見積もることは重要な事である。1938 年 6 月 7 日の風の間としては、当日 10 時の館野における高層気象のデータをもとに、浅間火山の火口高度 2,200m, 岩塊弾道通過高度、および岩塊着地点高度 ($>1,300\text{m}$)などを考慮して、高度 1,000m~4,000m 間の平均風速場として ($U_e = 10.2\text{m/s}$, $U_n = -3.5\text{m/s}$)を解析に用いる。 U_e は風下風速の東向き成分であり、 U_n は風下風速の北向き成分である。

2. 最小岩塊の分布

(a) 「一様放出モデル」による解析

岩塊の空気抵抗係数 K_d 値に対して、直径 1m の岩塊が着地距離 4,500m に到達する初速度条件 V_0 を求め、その初速度条件のもとで他の小岩塊が到達出来る距離 (以下「最小岩塊曲線」と称する) を求め、Fig. 1 に示した。鈴木ら (2008) の「一様放出モデル」で、Minakami (1942) の Fig. 19 で示された 1938 年浅間火山噴火の岩塊直径と岩塊到達距離の関係を説明しようとすると、実線で示した $K_d = 0.3$, $V_0 = 220\text{m/s}$ および $K_d = 0.2$, $V_0 = 212\text{m/s}$ が解の候補となる。

(b) 「放出速度方位依存モデル」による解析

「放出速度方位依存モデル」を用いて、上記の「一様放出モデル」による解析と同様に、岩塊の空気抵抗係数 K_d 値を種々に変えて、直径 1m の岩塊が 4,500m に到達する初速度条件 $V_{0\max}$

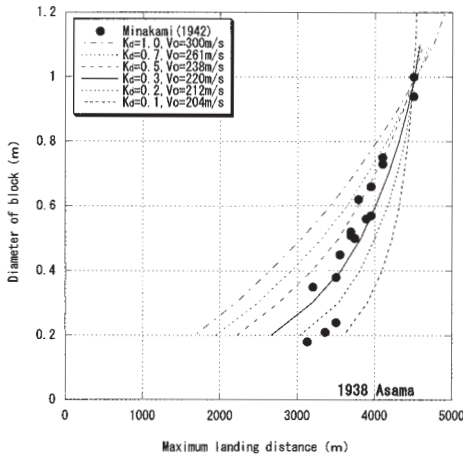


Fig. 1. Solid circles show the observed diameter of blocks as a function of landing distance in case of the 1938 Asama eruption (Minakami, 1942). Eastward component of 10.2m/s and southward component of 3.5m/s are the in-situ wind condition. Other symbols show the calculated relationship based on an 'isotropic initial velocity model' (Suzuki et al., 2008). The in-situ wind velocity is used in the calculation. Coefficient of the air resistance K_d and the initial velocity of ejection V_0 are shown in the figure.

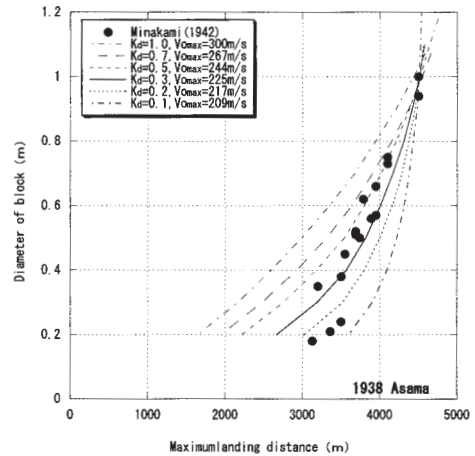


Fig. 2 The same as in Fig.1, but for an 'anisotropic initial velocity model' (Suzuki et al., 2008). Maximum initial velocity of ejection $V_{0\max}$ and K_d are shown in the figure. The azimuth of the explosion principal axis (notation β is used here-after) $\beta = \text{N}90^\circ\text{E}$, inclination angle $\theta = 30^\circ$ and angle dependence parameter $M = 1.5$ are assumed.

を求め、その初速度条件のもとで最小岩塊曲線を求めた。この「放出速度方位依存モデル」においては、爆発主軸は $N90^\circ E$ （真東）方向に $\theta = 30^\circ$ とし、角度依存パラメータは $M = 1.5$ とした（Fig. 2）。この「放出速度方位依存モデル」で Minakami (1942) の Fig. 19 を説明しようとする、実線で示した $K_d = 0.3$, $V_{o\max} = 225\text{m/s}$ および $K_d = 0.2$, $V_{o\max} = 217\text{m/s}$ が解の候補となる。この結果は一様放出モデルによる解析結果と大差ない。

(c) 「放出速度方位依存・直径依存モデル」による解析

岩塊の空気抵抗係数 K_d 値を種々に変えて、岩塊の最大到達距離が 4,500m となる岩塊の初速度条件 $V_{o\min}$ を求め、その初速度条件のもとで他の大小岩塊が到達出来る距離を求めて、Fig. 3 に示した。この「放出速度方位依存・直径依存モデル」においては、爆発主軸の設定は、上記の「放出速度方位依存モデル」同様に、 $N90^\circ E$ （真東）方向に $\theta = 30^\circ$ とし、角度依存パラメータは $M = 1.5$ とした。このモデルで 3,000m 付近の $d = 0.2\text{m}$ 小岩塊を説明出来る最小岩塊曲線は、 $K_d = 0.3$, $V_{o\min} = 266\text{m/s}$ であるが、全体的に Minakami (1942) データをほぼ説明しているのは、Fig. 3 において実線で示した $K_d = 0.7$, $V_{o\min} = 337\text{m/s}$ および $K_d = 0.5$, $V_{o\min} = 298\text{m/s}$ である。

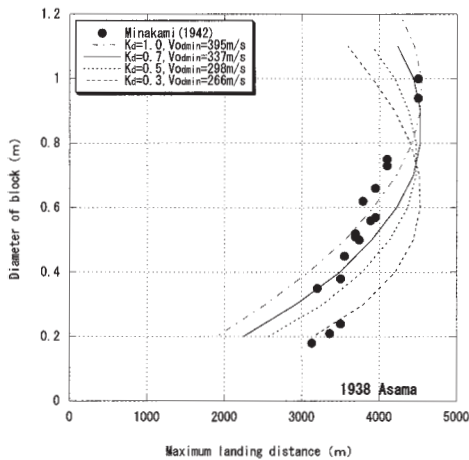


Fig. 3. The same as in Fig.1, but for the 'anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model' (Suzuki et al., 2008). Initial velocity of the minimum size block $V_{o\min}$, and K_d are shown in the figure. $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$, angle dependence parameter $M = 1.5$, intermediate diameter parameter $d_m = 1.5\text{[m]}$, diameter dependence parameter $N = 2.0$ are assumed.

3. 岩塊の降下角度

Minakami (1942) において着地角度が測定された岩塊は、 $d = 0.52\text{m}$, 0.65m , 0.74m の 3 個なので、 $d = 0.5\text{m}$, 0.7m の岩塊について着地距離と着地角度の関係（以下「着地角度曲線」と称する）を求め Minakami (1942) のデータと比較した。

(a) 「一様放出モデル」による解析

2. 最小岩塊の分布解析 (a) で候補となった、 $K_d = 0.3$, $V_o = 220\text{m/s}$, および $K_d = 0.2$, $V_o = 212\text{m/s}$ のいずれの着地角度曲線も、浅間火山 1938 年岩塊の降下角度のデータと大きく異なることが、Fig. 4 に示されている。

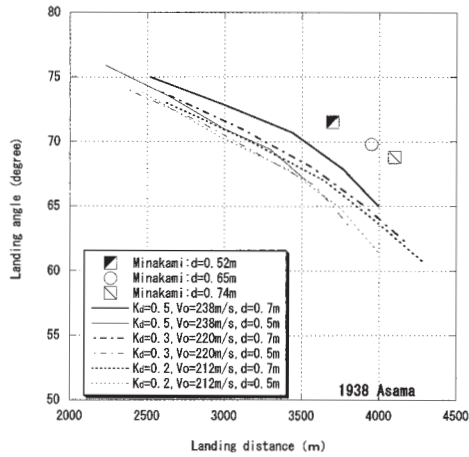


Fig. 4. Observed (three large size symbols) and calculated landing angles as a function of landing distance. Calculations are made for various K_d , V_o and diameter of blocks d , based on the isotropic initial velocity model.

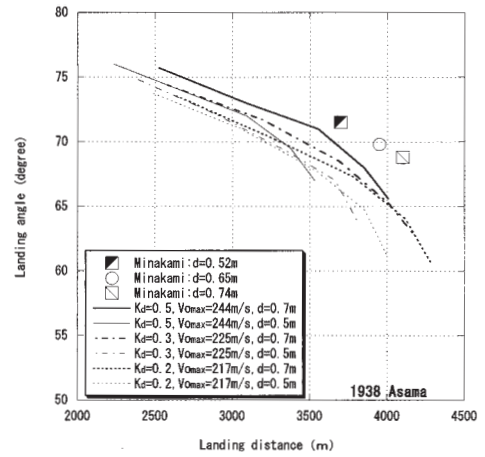


Fig. 5. The same as in Fig.4, but for the anisotropic initial velocity model. K_d , $V_{o\max}$ and d are shown in the figure. $\Theta = 30^\circ$ and $M = 1.5$ are assumed.

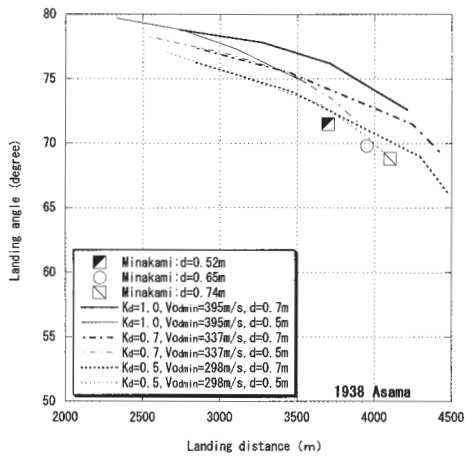


Fig. 6. The same as in Fig.4, but for the anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model. K_d , $V_{o\max}$ and d are shown in the figure. $\beta = N90^\circ E$, $\Theta = 30^\circ$, $M = 1.5$, $d_m = 1.5$ [m] and $N = 2.0$ are assumed.

(b) 「放出速度方位依存モデル」による解析

「放出速度方位依存モデル」による解析結果を Fig. 5 に示すと、上記の「一様放出モデル」による解析よりはやや改善されているが、2. 最小岩塊の分布解析 (b) で候補となった、 $K_d = 0.3$, $V_{o\max} = 225\text{m/s}$ 、および $K_d = 0.2$, $V_{o\max} = 217\text{m/s}$ のいずれの着地角度曲線も浅間火山 1938 年岩塊の降下角度のデータとかなり異なることがわかる。

(c) 「放出速度方位依存・直径依存モデル」による解析

2. 最小岩塊の分布解析 (c) で候補となった、 $K_d = 0.7$, $V_{o\min} = 337\text{m/s}$ 、および $K_d = 0.5$, $V_{o\min} = 298\text{m/s}$ の作る着地角度曲線を Fig. 6 に示した。これらはいずれも、「一様放出モデル」や「放出速度方位依存モデル」の結果と異なり、Minakami (1942) のデータより大きな角度を

示している. この着地角度曲線は理論的に着地角度の上限を示すので, $K_d = 0.7$, $V_{o\min} = 337$ m/s, および $K_d = 0.5$, $V_{o\min} = 298$ m/s は有力な候補として残る.

4. 岩塊の分布域

(a) 「一様放出モデル」による解析

Fig. 1 において実線で示した $K_d = 0.3$, $V_o = 220$ m/s 条件における直径 1 m 岩塊の岩塊分布域を測定結果と比較したものが Fig. 7 である. 「一様放出モデル」なので, 火口周辺地形効果と風速効果 ($U_e = 10.2$ m/s, $U_n = -3.5$ m/s) が直接に岩塊分布域に現れている.

(b) 「放出速度方位依存モデル」による解析

Fig. 2 において実線で示した $K_d = 0.3$, $V_{o\max} = 225$ m/s 条件における直径 1 m 岩塊の岩塊分布域を Fig. 8 に示した. 「放出速度方位依存モデル」による爆発主軸の傾き効果 ($N90^\circ E$ 方向に $\theta = 30^\circ$, 角度依存パラメータ $M = 1.5$) が明確に現れた岩塊分布域を示している.

(c) 「放出速度方位依存・直径依存モデル」による解析

Fig. 3 において実線で示した $K_d = 0.7$, $V_{o\min} = 337$ m/s, および細い点線で示した $K_d = 0.5$, $V_{o\min} = 298$ m/s 条件における岩塊分布域を Fig. 9 に示した. 岩塊分布域を構成するのは直径 $d = 0.7$ m ~ 0.8 m の岩塊である. 「一様放出モデル」および「放出速度方位依存モデル」と大きく異なるのは, これより大きな岩塊も全てこの岩塊分布域の中に着地することである.

(d) 東山麓の一部突出した分布域について

Minakami (1942) で報告されている 1938 年 6 月 7 日爆発の火山岩塊分布域は, 他の噴火の火山岩塊分布域と比較してその一部が東に約 1,000 m も突出した特異な形状をしている. この

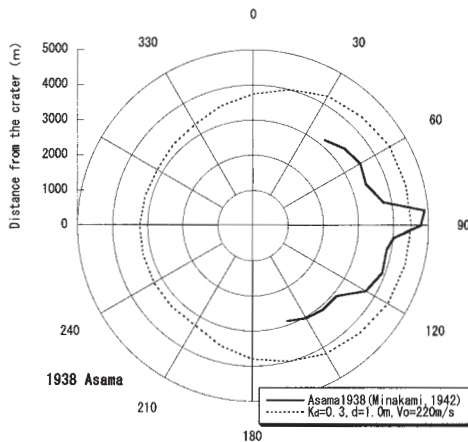


Fig. 7. Distribution of observed volcanic blocks for the 1938 Asama eruption (thick solid curve) is compared with that of the calculated ones for the isotropic initial velocity model.

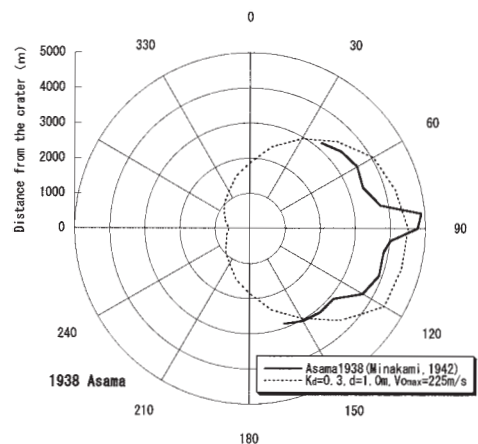


Fig. 8. Distribution of observed volcanic blocks for the 1938 Asama eruption (thick solid curve) is compared with that of the calculated ones for the anisotropic initial velocity model. $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$ and $M = 1.5$ are assumed.

現象の説明の一つとして試みたものを、Fig. 10 に示した。これは、Fig. 8 に示した「放出速度方位依存モデル」($K_d = 0.3$, 爆発主軸 $N90^\circ E$ 方向に $\theta = 30^\circ$, $M = 1.5$, $V_{o\max} = 225\text{m/s}$ 条件)において、 $N90^\circ E$ 方向へ放出した岩塊直径が $d = 1.5\text{m}$ で、他の方向へ放出された岩塊はすべて直径が $d = 0.5\text{m}$ であったと想定した場合の岩塊分布域である。計算結果は測定結果をよく説明しているが、Minakami (1942) は特にこれを支持するような観測記述も、否定するような観測記述もしていない。

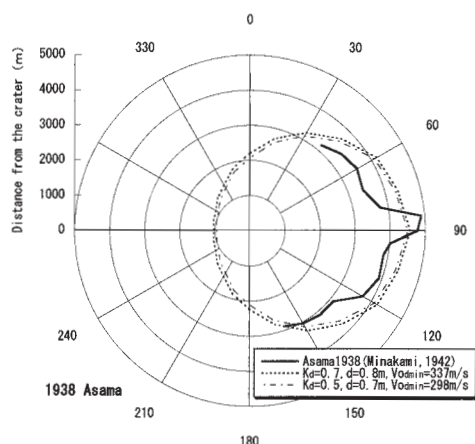


Fig. 9. Distribution of observed volcanic blocks for the 1938 Asama eruption (thick solid curve) is compared with that of the calculated ones for the anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model. $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$, $M = 1.5$, $d_m = 1.5\text{m}$ and $N = 2.0$ are assumed.

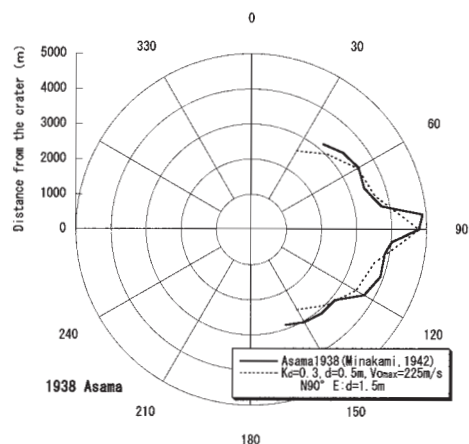


Fig. 10. Comparison between observed distribution of blocks (thick solid curve) and a preferred model based on the anisotropic initial velocity model. In the model calculation, diameter of block (d) is assumed to be 1.5m in the $N90^\circ E$ direction, while $d = 0.5\text{m}$ in other directions. $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$ and $M = 1.5$ are also assumed.

5. 直径 7.5m の巨大岩塊

Minakami (1942) において、1938 年 6 月 7 日爆発時の放出火山岩塊として、爆発火口から南東 300m 地点に落下した直径 7.5m の巨大岩塊の記述がある。この巨大岩塊を東方山麓浅間山付近に落下した岩塊と同じ爆発イベントによるものと解釈して、解析することを試みた。Minakami (1942) の Fig. 19 のデータを山麓に分布する岩塊直径の下限とし、300m 地点の直径 7.5m 岩塊を上限として、「放出速度方位依存・直径依存モデル」による解析を行った。

これまでの解析作業から、岩塊分布域を大まかに説明する条件として、爆発主軸が真東に $\theta = 30^\circ$ 傾き、角度依存パラメータが $M = 1.5$ のモデルが見いだされている。これをもとにして、「初速度直径依存モデル」のパラメータ中間粒径 d_m と直径依存パラメータ N の組み合わせ候補を探し出すべく、Fig. 11 (a) に着地距離と岩塊直径の関係（以下「最小・最大岩塊曲線」と称する）を示した。最小岩塊曲線に強い影響を持つパラメータは、空気抵抗の係数 K_d 値である。Minakami (1942) の Fig. 19 のデータを説明する K_d 値は $K_d = 0.3 \sim 0.5$ であり、300m 地点

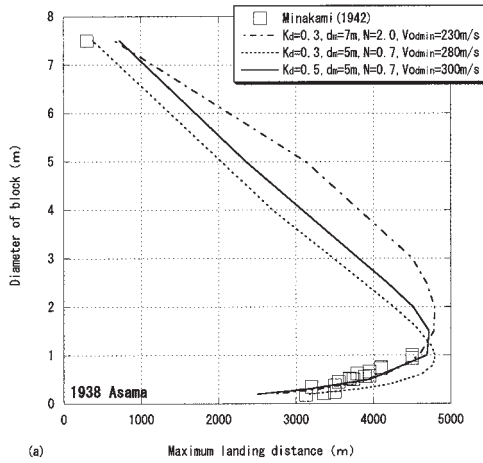


Fig. 11(a). Large hollow squares show relationship between the observed diameter of blocks and landing distances in case of the 1938 Asama eruption (Minakami, 1942), while other symbols show the calculated relationship based on the anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model. $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$ and $M = 1.5$ are assumed.

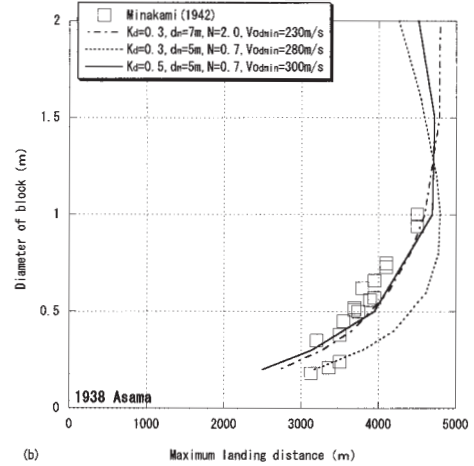


Fig. 11(b). Lower part of Fig.11(a) is magnified.

の直径 7.5m 岩塊を説明出来る d_m 値は $d_m = 5m \sim 7m$ である。Fig. 11 (b) は Minakami (1942) の Fig. 19 に対応する部分を拡大して示したグラフである。

Fig. 11 (a) に示したパラメータ組み合わせ 3 組が作りだす着地角度を, Fig. 12 (a), (b), (c) に示した。曲線は各地点における着地角度の上限を示すので, Fig. 12 (a) の組み合わせでは説明条件を満たさない。Fig. 12 (b) はよく満たし, Fig. 12 (c) はほぼ満たしていることが明らかである。

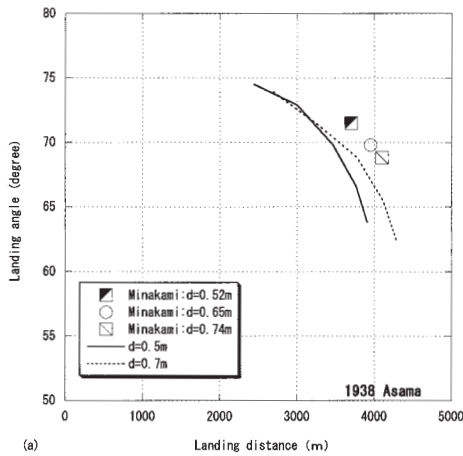


Fig.12(a). Observed (three large size symbols) and calculated (other symbols) landing angles as a function of landing distance. The observed data are obtained for the 1938 Asama eruption. Calculations are made for diameter of blocks (d), based on the anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model. $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$, $K_d = 0.3$, $M = 1.5$, $d_m = 7.0[m]$, $N = 2.0$ and $V_{o\min} = 230[m/s]$ are assumed.

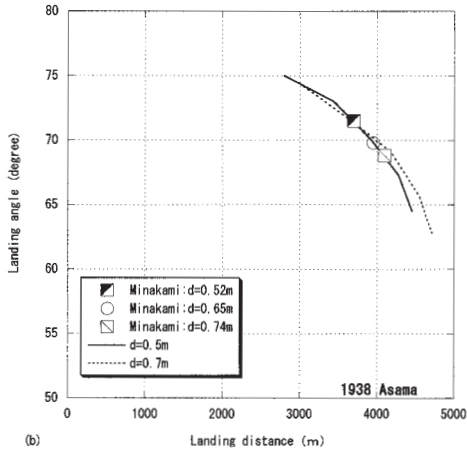


Fig. 12(b). The same as in Fig.12(a), but for $d_m = 5.0$ [m], $N = 0.7$ and $V_{o\text{dmin}} = 280$ [m/s].

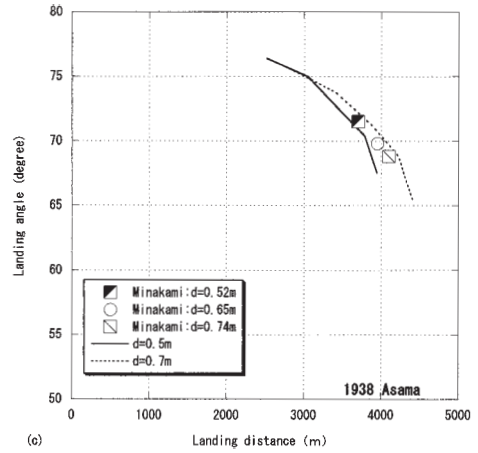


Fig. 12(c). The same as in Fig.12(a), but for $K_d = 0.5$, $d_m = 5.0$ [m], $N = 0.7$ and $V_{o\text{dmin}} = 300$ [m/s].

Fig. 12 (b) に対応する直径 1m と 0.3m の岩塊分布域を Fig. 13 (a) に示した. 東方山麓小浅間山付近の他方向と明らかに異なる分布域の形の説明として, この方向にのみ直径 1m 級岩塊が放出されたが, 他方向へは 0.3m 級の岩塊が放出されたとの仮定で, 岩塊分布域を合成し Fig. 13 (b) に示した. Fig. 12 (c) に対応する作業を, 同様に行い Fig. 13 (c), (d) に示した. さらに, Fig. 12 (b), (c) に示したパラメータ組合せ 2 組が想定する, 直径 7.5m の巨大岩塊の

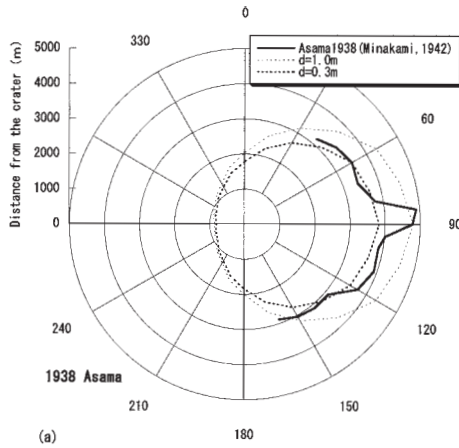


Fig. 13(a). Comparison between distribution of observed volcanic blocks for the 1938 Asama eruption (thick solid curve) and that of the calculated ones based on the anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model. $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$, $K_d = 0.3$, $M = 1.5$, $d_m = 5.0$ [m], $N = 0.7$ and $V_{o\text{dmin}} = 280$ [m/s] are assumed.

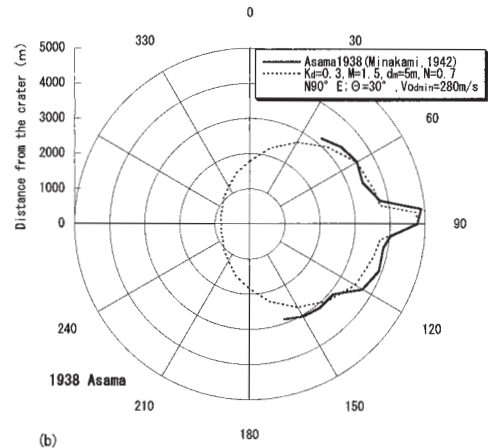


Fig. 13(b). The same as in Fig.13(a), but for that diameter of the block (d) is assumed to be 1.0 [m] in the $N90^\circ E$ direction, while $d = 0.3$ [m] in other directions. $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$, $K_d = 0.3$, $M = 1.5$, $d_m = 5.0$ [m], $N = 0.7$ and $V_{o\text{dmin}} = 280$ [m/s] are also assumed.

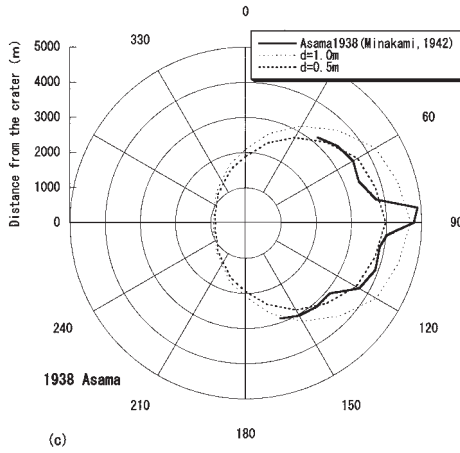


Fig. 13(c). The same as in Fig.13(a), but for $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$, $K_d = 0.5$, $M = 1.5$, $d_m = 5.0$ [m], $N = 0.7$ and $V_{o\text{dmin}} = 300$ [m/s].

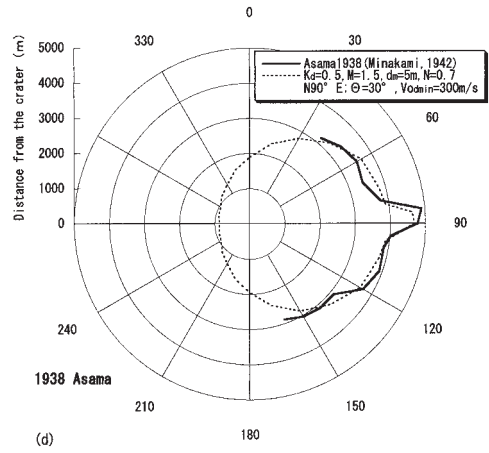


Fig. 13(d). The same as in Fig.13(c), but for the diameter of the block (d) is assumed to be 1.0 [m] in the $N90^\circ E$ direction, while $d = 0.5$ [m] in other directions.

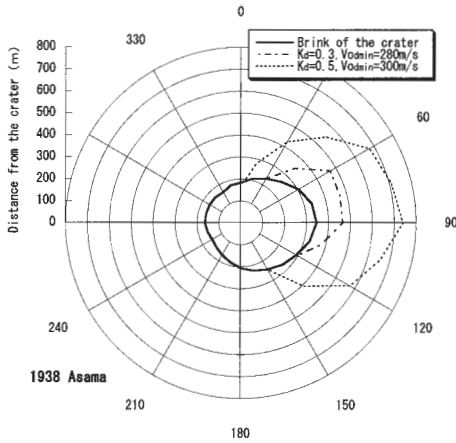


Fig. 14. Thick solid circle shows the observed distribution of big volcanic blocks ($d = 7.5$ [m]) for the 1938 Asama eruption, while dotted and dashed circles show the calculated ones based on the anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model. $\beta = N90^\circ E$, $\theta = 30^\circ$, $M = 1.5$, $d_m = 5.0$ [m] and $N = 0.7$ are assumed.

着地可能域を Fig. 14 に示した。

6. 浅間火山 1938 年噴火解析のまとめ

浅間火山における 1938 年噴火の解析作業から、岩塊分布域を大まかに説明する条件として、爆発主軸がほぼ真東に $\theta = 30^\circ$ 傾き、井口ら (1983) が報告している桜島火山における火山弾と同程度の角度依存性 $M = 1.5$ を持った岩塊放出が推定される。また、火口壁上に放出された巨大岩塊 (直径 7.5m) の放出を山麓に分布する最小岩塊・最大岩塊と共通したイベントによるものと仮定して解析した結果として、空気抵抗係数 $K_d = 0.3 \sim 0.5$ 、角度依存パラメータを $M = 1.5$ 、中間直径パラメータ $d_m = 5$ m、直径依存パラメータ $N = 0.7$ 、微小岩片の初速度約 $V_{o\text{dmin}} = 300$ m/s であると推定した。

Ⅲ. 有珠火山 1977 年の放出火山岩塊

Katsui et al. (1978) は、有珠火山 1977 年 8 月 9 日噴火の際に第 4 火口から放出された火山岩塊の着地角度を測定し、その解析結果として空気抵抗係数として $k = 6 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 、および初速度 $V_0 = 230 \text{m/s}$ を得たと報告している。「一様放出モデル」では最大着地角度は最大岩塊によってつくられるので、鈴木ほか (2007b) においては、この空気抵抗係数を着地角度測定地区における最大級岩塊 (直径 $0.7 \text{m} \sim 0.8 \text{m}$) に対応するものとして、 $K_d = 1.4 \sim 1.6$ を放出火山岩塊の K_d 値候補として報告している。

有珠火山 1977 年噴火の際の岩塊分布域について、Katsui et al. (1978) に報告されている岩塊分布域は火口障害壁効果は考えられないにもかかわらず、南南東に伸びた形をしている。岩塊分布域のこの特徴的な形に注目すると、解析に当たっては「放出速度方位依存モデル」の採用は欠かせない。また、分布する岩塊直径の上限下限を示すデータもあるので、「初速度直径依存モデル」もはずせない。したがって、有珠火山 1977 年放出火山岩塊の解析に当たっては最初から、「放出速度方位依存・直径依存モデル」を用いて解析を行った。

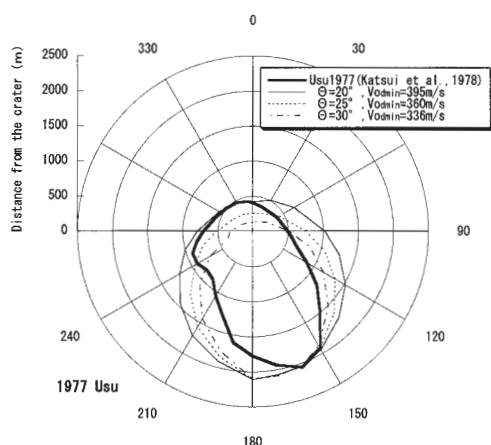


Fig. 15. Comparison between distribution of observed volcanic blocks for the 1977 Usu eruption (thick solid curve; Katsui et al., 1978) and that of the calculated ones for various inclination angles of the explosion principal axis (Θ) and initial velocities of minimum size block ($V_{0\text{dmin}}$). Westward component of $2.6 [\text{m/s}]$ and southward component of $1.3 [\text{m/s}]$ are the in-situ wind condition. Calculations are based on the anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model, considering the in-situ wind condition. $\beta = \text{N}170^\circ\text{E}$, $K_d = 1.0$, $M = 5.0$, $d_m = 0.9 [\text{m}]$ and $N = 2.0$ are assumed.

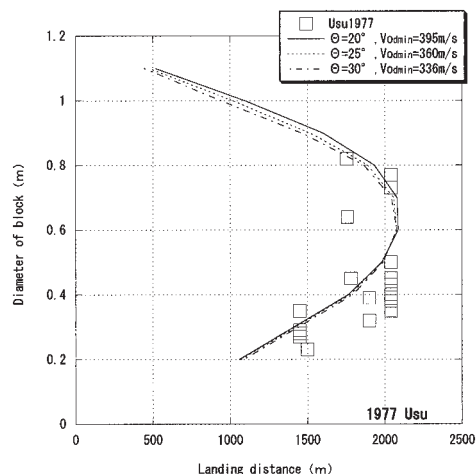


Fig. 16. Diameter of blocks as a function of landing distances. Large squares denote the observed data (the 1977 Usu eruption), while other symbols show the calculated results for various inclination angle of the explosion principal axis (Θ) and initial velocities of minimum size block ($V_{0\text{dmin}}$) based on the anisotropic initial velocity + diameter dependent initial velocity model, $\beta = \text{N}170^\circ\text{E}$, $K_d = 1.0$, $M = 5.0$, $d_m = 0.9 [\text{m}]$ and $N = 2.0$ are assumed.

1. 有珠火山における 1977 年 8 月 9 日の風の間

有珠火山 1977 年 8 月 9 日の風の間としては、当日 09 時の札幌における高層気象のデータをもとに、有珠火山の火口高度 360m と弾道曲線通過高度を考慮して、高度 0m~1,300m 間の平均風速場として ($U_e = -2.6\text{m/s}$, $U_n = -1.3\text{m/s}$) を解析に用いる。以下に解析の手順に従って記述する。

2. 岩塊の分布域の解析

有珠火山 1977 年噴火の岩塊分布最大分布距離は、ほぼ南南東方向に 2,070m であるので、爆発主軸の傾き方位を N170°E とし、空気抵抗係数は $K_d = 1.0$ と置き、「放出速度方位依存モデル」の角度依存パラメータを $M = 5$ として、主軸の角度を $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ と変化させた場合の分布域の形状を Fig. 15 に示した。爆発主軸の傾き θ を大きくすれば岩塊分布域の中は狭くなり、同時に火口北西側の分布域も狭くなる。この時の最小・最大岩塊曲線を Fig. 16 に示した。特徴的なことは、他のパラメータを固定して爆発主軸の傾き角度を変化させても、最小・最大岩塊曲線はほとんど変化しないことである。また、このパラメータの組み合わせでは最小岩塊の分布をあまり良く説明出来ない。このパラメータの組み合わせによる着地角度曲線を Fig. 17 (a), (b), (c) に示した。対照とする着地角度のデータは、有珠火山 1977 年噴火の放出岩塊の着地角度測定を野帳の記載の見直しから行ったものである。その結果、着地角度測定数は 13 個であるが、同時に岩塊直径が測定されていたのはそのうちの 6 個であった。 $d = 0.2\text{m}$ の着地角度曲線と $d = 0.6\text{m}$ の着地角度曲線の間に全ての測定データがほぼ入る条件は、爆発主軸の角度は $\theta = 20^\circ$ と $\theta = 25^\circ$ の場合であることが分かる。

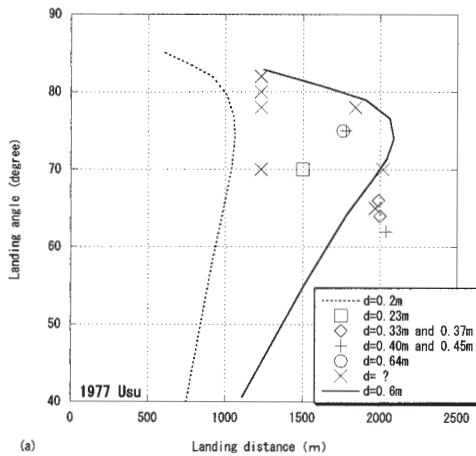


Fig. 17(a). Landing angle as a function of landing distance for various diameters of volcanic blocks d . $\beta = \text{N}170^\circ\text{E}$, $\theta = 20^\circ$, $K_d = 1.0$, $M = 5.0$, $d_m = 0.9[\text{m}]$, $N = 2.0$ and $V_{o \text{ dmin}} = 395[\text{m/s}]$.

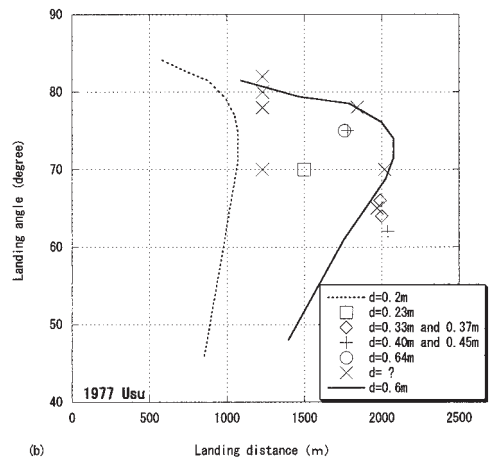


Fig. 17(b). The same as in Fig.17(a), but for $\theta = 25^\circ$ and $V_{o \text{ dmin}} = 360[\text{m/s}]$.

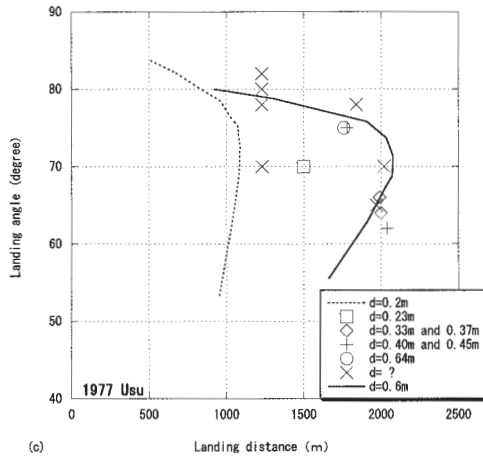


Fig. 17(c). The same as in Fig.17(a), but for $\theta = 30^\circ$ and $V_{o\text{dmin}} = 336[\text{m/s}]$.

3. 岩塊直径の距離分布の解析

有珠火山 1977 年噴火の岩塊直径の距離分布のデータを説明出来るパラメータの組み合わせを求めて、爆発主軸の角度を $\theta = 20^\circ$ に固定し、空気抵抗係数の K_d 値を 1.0 および 0.4 とした場合について、岩塊直径の距離分布のデータをどこまで説明出来るかを示したのが Fig. 18 である。 $K_d = 1.0$ の最大岩塊曲線で大岩塊の着地距離は説明出来るが、小岩塊 ($d = 0.2\text{m} \sim 0.4\text{m}$) の着地距離は $K_d = 1.0$ の最小岩塊曲線では説明出来ない。 $K_d = 0.4$ では、「初速度直径依存モデル」の中間直径パラメータを $d_m = 1.0\text{m}$ および 1.5m とした場合の最小・最大岩塊曲線である程度説明は可能かもしれない。試みに、このパラメータの組み合わせによる岩塊分布域を Fig. 19 に、

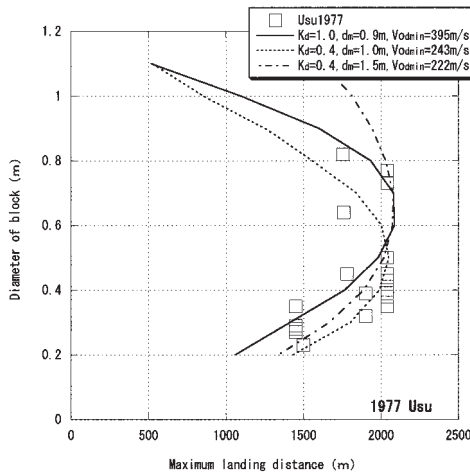


Fig. 18. The same as in Fig.16, but for coefficient of the air resistance (K_d), intermediate diameter parameter (d_m) and initial velocity of minimum size block ($V_{o\text{dmin}}$). $\beta = \text{N}170^\circ\text{E}$, $\theta = 20^\circ$, $M = 5.0$ and $N = 2.0$ are assumed.

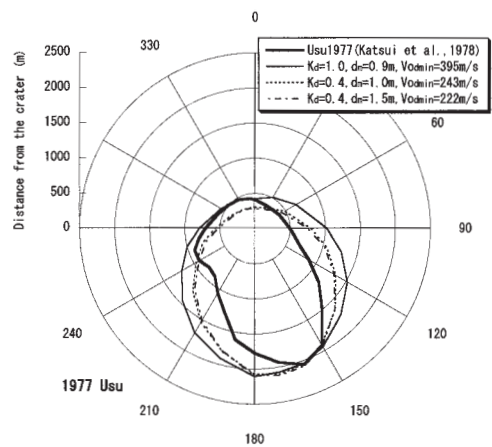


Fig. 19. The same as in Fig.15, but for coefficient of the air resistance (K_d), intermediate diameter parameter (d_m) and initial velocity of minimum size block ($V_{o\text{dmin}}$). $\beta = \text{N}170^\circ\text{E}$, $\theta = 20^\circ$, $M = 5.0$ and $N = 2.0$ are assumed.

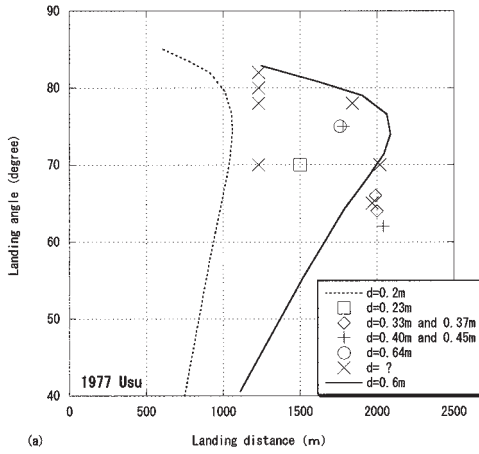


Fig. 20(a). The same as in Fig.17(a). $\theta = 20^\circ$, $K_d = 1.0$, $d_m = 0.9$ [m] and $V_{o\text{dmin}} = 395$ [m/s].

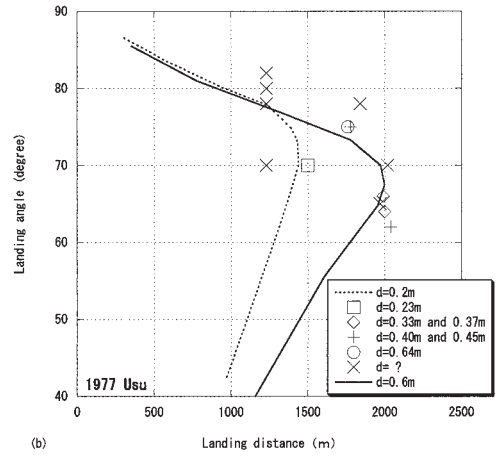


Fig. 20(b). The same as in Fig.17(a), but for $K_d = 0.4$, $d_m = 1.0$ [m] and $V_{o\text{dmin}} = 243$ [m/s].

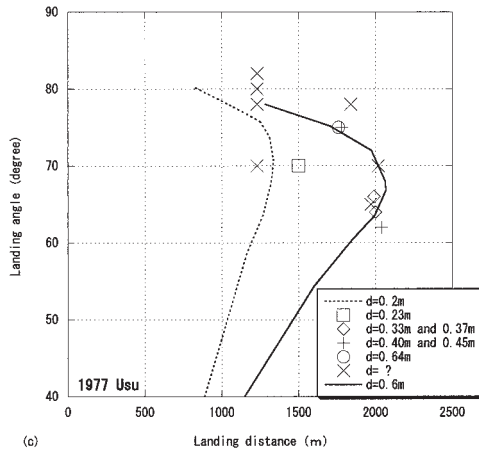


Fig. 20(c). The same as in Fig.17(a), but for $K_d = 0.4$, $d_m = 1.5$ [m] and $V_{o\text{dmin}} = 222$ [m/s].

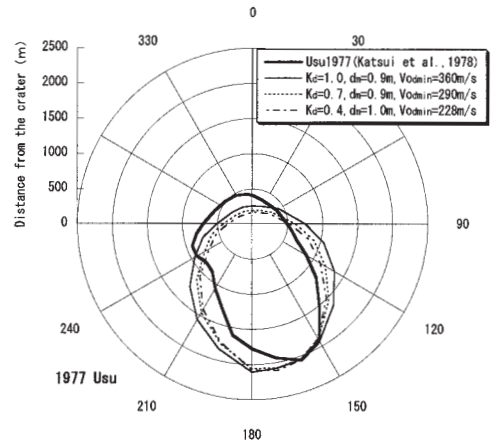


Fig. 21. The same as in Fig.15, but for coefficient of the air resistance (K_d), intermediate diameter parameter (d_m) and initial velocity of minimum size block ($V_{o\text{dmin}}$). $\beta = N170^\circ E$, $\theta = 25^\circ$, $M = 5.0$ and $N = 2.0$ are assumed.

岩塊の着地角度曲線を Fig. 20 (a), (b), (c) に示すが、計算結果は測定データを大略説明するものとなっている。

4. 爆発主軸の傾き $\theta = 25^\circ$ における空気抵抗係数

爆発主軸の角度を $\theta = 25^\circ$ に固定し、空気抵抗係数の K_d 値を $K_d = 1.0$, 0.7 , 0.4 と変化した場合の岩塊分布域を Fig. 21 に、最小・最大岩塊曲線を Fig. 22 に、また着地角度曲線を Fig. 23 (a), (b), (c) に示した。上記の爆発主軸の角度 $\theta = 20^\circ$ の場合に比べてほとんど変化が見られない。

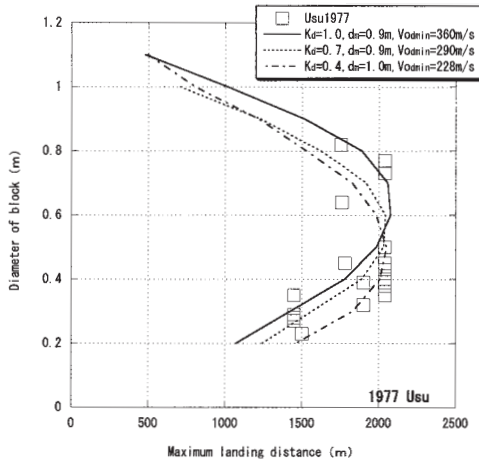


Fig. 22. The same as in Fig.16, but for coefficient of the air resistance (K_d), intermediate diameter parameter (d_m) and initial velocity of minimum size block ($V_{o\text{dmin}}$). $\beta = N170^\circ\text{E}$, $\theta = 25^\circ$, $M = 5.0$ and $N = 2.0$ are assumed.

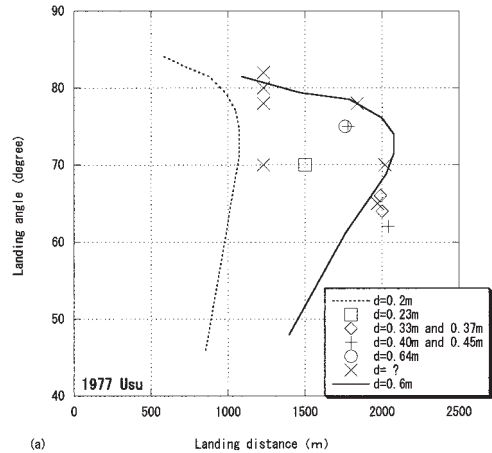


Fig. 23(a). The same as in Fig.17(b). $\theta = 25^\circ$, $K_d = 1.0$, $d_m = 0.9\text{ [m]}$ and $V_{o\text{dmin}} = 360\text{ [m/s]}$.

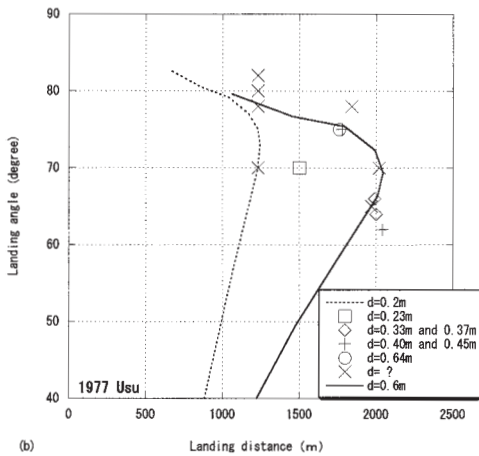


Fig. 23(b). The same as in Fig.17(b), but for $K_d = 0.7$ and $V_{o\text{dmin}} = 290\text{ [m/s]}$.

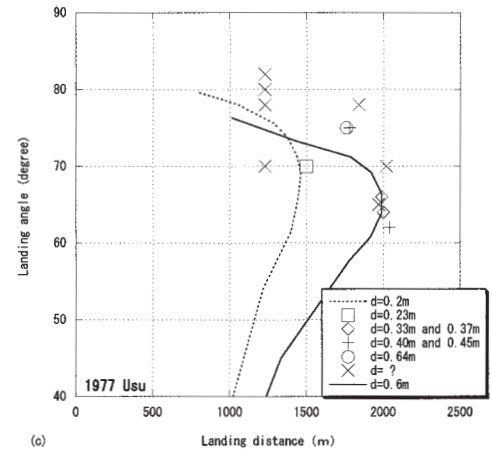


Fig. 23(c). The same as in Fig.17(b), but for $K_d = 0.4$, $d_m = 1.0\text{ [m]}$ and $V_{o\text{dmin}} = 228\text{ [m/s]}$.

5. 空気抵抗係数 K_d 値と直径依存パラメータ N の組み合わせ

空気抵抗係数 K_d 値と直径依存パラメータ N の組み合わせとして ($K_d = 1.0$, $N = 2.0$), ($K_d = 0.7$, $N = 1.3$), ($K_d = 0.4$, $N = 0.7$) が作りだす最小・最大岩塊曲線を Fig. 24 に示した。 K_d 値を大きな値に仮定すると, 最大岩塊の分布は説明出来るが, 最小岩塊の分布は説明出来ない。一方, K_d 値を小さな値に仮定すると最小岩塊の分布は説明出来るが, 最大岩塊の分布は説明出来ない。また, 直径依存パラメータ N の仮定を変えても説明の改善にはあまり役立たない。

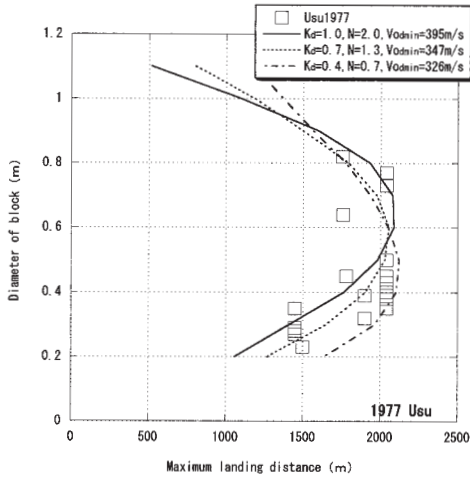


Fig. 24. The same as in Fig.16, but for coefficient of the air resistance (K_d), diameter dependence parameter (N) and initial velocity of minimum size block ($V_{o\text{dmin}}$). $\beta = N170^\circ\text{E}$ and $\Theta = 20^\circ$ are assumed.

6. 空気抵抗係数 K_d 値と中間直径パラメータ d_m の組み合わせ

空気抵抗係数 K_d 値と中間直径パラメータ d_m の組み合わせとして ($K_d = 1.0$, $d_m = 0.9\text{m}$), ($K_d = 0.7$, $d_m = 0.95\text{m}$), ($K_d = 0.4$, $d_m = 1.1\text{m}$) などが作りだす最小・最大岩塊曲線を Fig. 25 (a) に示し, ($K_d = 0.5$, $d_m = 1.0\text{m}$), ($K_d = 0.4$, $d_m = 1.2\text{m}$), ($K_d = 0.3$, $d_m = 1.4\text{m}$) などが作りだす最小・最大岩塊曲線を Fig. 25 (b) に示した. Fig. 25 (b) に示された最小・最大岩塊曲線は, 有珠火山 1977 年噴火の岩塊直径と着地距離データを説明出来るパラメータの組み合わせの候補として有力であることを示している. Fig. 25 (b) に示されたパラメータの組み合わせを用いて着地角度曲線を計算すると, Fig. 26 (a), (b), (c) が得られた. いずれも,

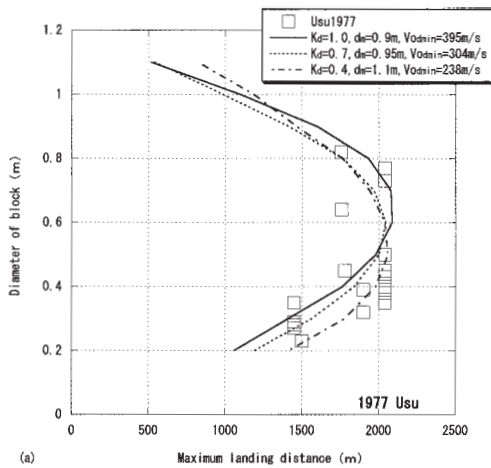


Fig. 25(a). The same as in Fig.16, but for coefficient of the air resistance (K_d), intermediate diameter parameter (d_m) and initial velocity of minimum size block ($V_{o\text{dmin}}$). $\beta = N170^\circ\text{E}$ and $\Theta = 20^\circ$ are assumed.

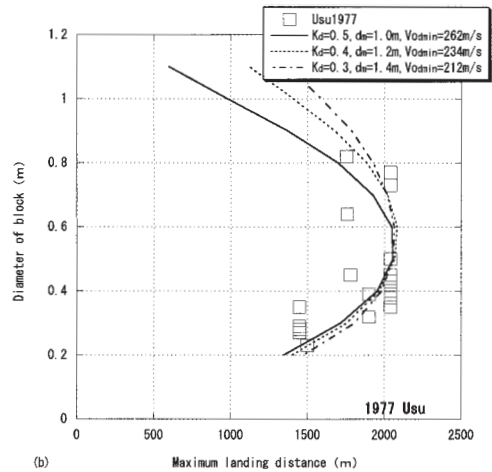


Fig. 25(b). The same as Fig.25(a), but for different values of K_d , d_m and $V_{o\text{dmin}}$.

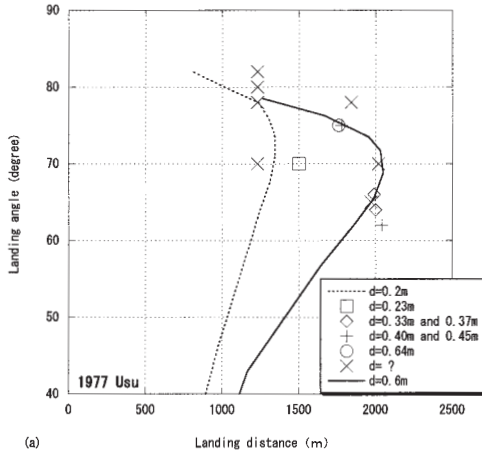


Fig. 26(a). The same as in Fig.17(a), but for $K_d = 0.5$, $d_m = 1.0$ [m] and $V_{o\text{dmin}} = 262$ [m/s].

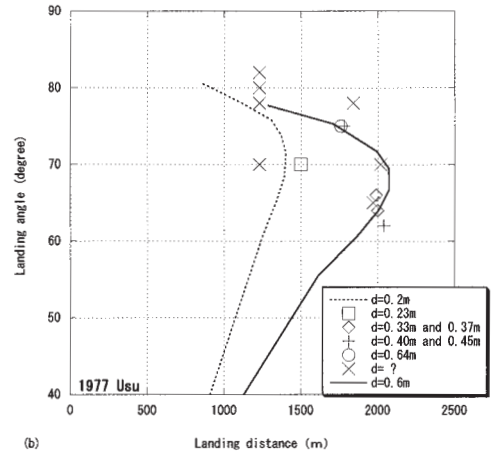


Fig. 26(b). The same as in Fig.17(a), but for $K_d = 0.4$, $d_m = 1.2$ [m] and $V_{o\text{dmin}} = 234$ [m/s].

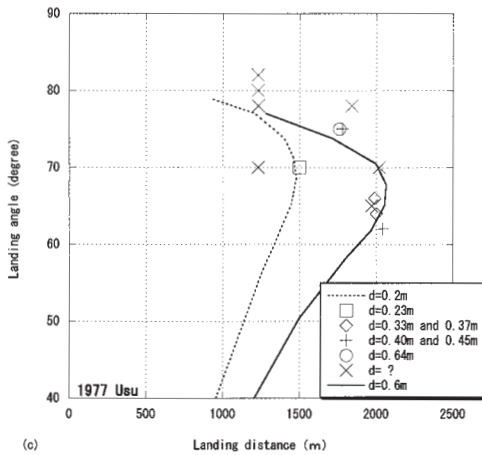


Fig. 26(c). The same as in Fig.17(a), but for $K_d = 0.3$, $d_m = 1.4$ [m] and $V_{o\text{dmin}} = 212$ [m/s].

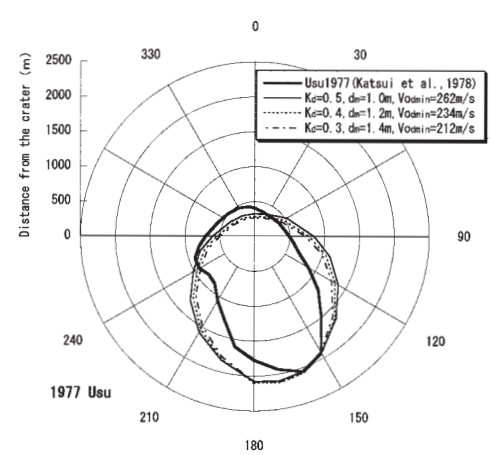


Fig. 27. The same as in Fig.15, but for coefficient of the air resistance (K_d), intermediate diameter parameter (d_m) and initial velocity of minimum size block ($V_{o\text{dmin}}$). $\beta = N170^\circ E$ and $\theta = 20^\circ$ are assumed.

有珠火山 1977 年噴火の着地距離と着地角度のデータをほぼ説明出来るパラメータの組み合わせの候補である。このパラメータの組み合わせによる岩塊分布域を Fig. 27 示した。

7. 有珠火山 1977 年噴火解析のまとめ

以上の解析の総括として、有珠火山 1977 年噴火の放出岩塊データを全体としてほぼ説明出来るモデル候補は、「放出速度方位依存・直径依存モデル」における、爆発主軸の方位 $\beta = N170^\circ E$, 角度 $\theta = 20^\circ$, 空気抵抗係数 $K_d = 0.5$, 角度依存パラメータを $M = 5$, 中間直径パラメータ d_m

= 1.2m, 直径依存パラメータ $N = 2$, 微小岩片の初速度 $V_{o\text{dmin}} = 247\text{m/s}$ であると結論する。あらためて, このパラメータの組み合わせによる最小・最大岩塊曲線を Fig. 28 に, 着地角度曲線を Fig. 29 に, 岩塊分布域を Fig. 30 に示した。

この場合, この噴石の放出メカニズムが火口付近での噴煙による加速であるなら, この速度は噴煙柱の火口付近での噴出速度に対応することになるであろう。

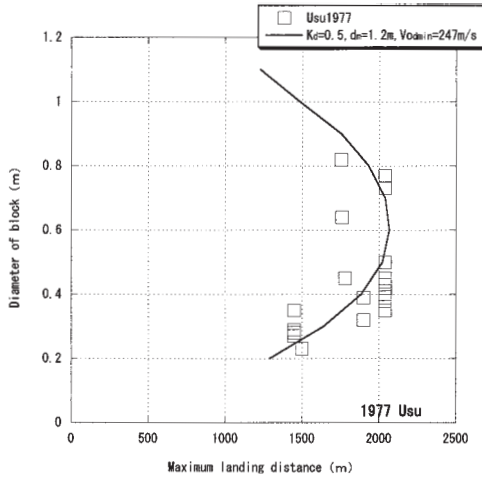


Fig. 28. The same as in Fig.16, but for coefficient of the air resistance (K_d), intermediate diameter parameter (d_m) and initial velocity of minimum size block ($V_{o\text{dmin}}$). $\beta = \text{N}170^\circ\text{E}$ and $\Theta = 20^\circ$ are assumed.

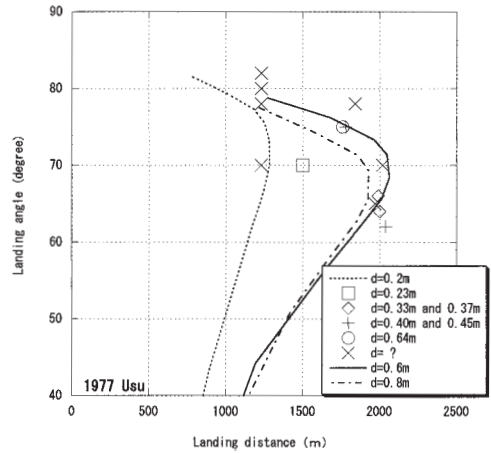


Fig. 29. The same as in Fig.17(a), but for $K_d = 0.5$, $d_m = 1.2[\text{m}]$ and $V_{o\text{dmin}} = 247[\text{m/s}]$.

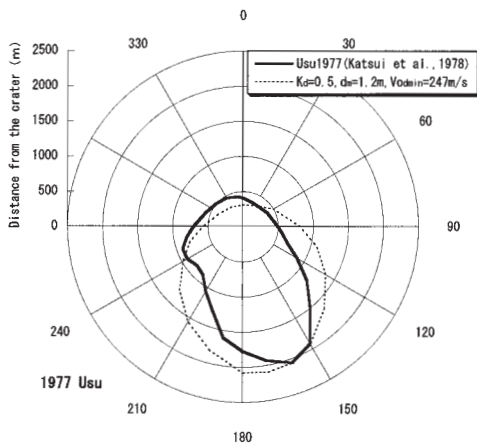


Fig. 30. The same as in Fig.15, but for coefficient of the air resistance (K_d), intermediate diameter parameter (d_m) and initial velocity of minimum size block ($V_{o\text{dmin}}$). $\beta = \text{N}170^\circ\text{E}$ and $\Theta = 20^\circ$ are assumed.

IV. おわりに

1938 年 6 月 7 日浅間火山噴火で噴出した火山岩塊, および 1977 年 8 月 9 日有珠火山噴火で噴出した火山岩塊について, 放出岩塊の受けた空気抵抗値, 爆発主軸の傾き, 放出速度方位依存の度合いなどについて復元を試みた結果は次のようにまとめられる.

(1) 浅間火山における 1938 年噴火の解析作業から, 岩塊分布域を大まかに説明する条件として, 爆発主軸が真東に $\theta = 30^\circ$ 傾き, 井口ら (1983) が報告している桜島火山における火山弾と同程度の角度依存性を持った岩塊放出が推定される. また, 火口壁上に放出された巨大岩塊 (直径 7.5m) の放出を山麓に分布する最小岩塊・最大岩塊と共通したイベントによるものと仮定して解析した結果, 放出火山岩塊の空気抵抗 K_d 値が 0.3~0.5 と推定された.

(2) 1977 年有珠火山噴火の際の放出岩塊は, その分布域が南南東に長く伸びた特徴的な分布の形をしているので, 岩塊分布域の解析から始め, 最小・最大岩塊, 着地角度の解析へと進めた. パラメータの組み合わせの中から, ほぼ最適と思われる岩塊の空気抵抗値は $K_d = 0.5$, 爆発主軸は N170°E 方向に $\theta = 20^\circ$, 方位依存パラメータは $M = 5.0$, 中央直径パラメータは $d_m = 1.2\text{m}$, 直径依存度パラメータは $N = 2.0$, 微小岩片の初速度は $V_{0\text{dmin}} = 247\text{m/s}$ などの数値の組み合わせが測定されたデータを総合的に説明出来る最適なパラメータ値の組み合わせとなった. 特徴的なことは, 桜島火山や浅間火山における放出岩塊と異なり, 大きな角度依存性を持った放出が推定される.

(3) 放出火山岩塊の空気抵抗値の K_d 値は, 火山ごと噴火ごとに異なる性質のものではないので, 放出火山岩塊共通の空気抵抗値として $K_d = 0.5$ 程度を考慮するのがよいと考えられる.

(4) 「一様放出モデル」では最大着地角度は最大岩塊によって作られるので, Katsui et al. (1978) に報告されている空気抵抗値 $k = 6 \times 10^{-4}\text{m}^{-1}$ は, これまでは着地角度を測定した地区での最大級岩塊直径 0.7~0.8m に対応すると考えてきた. しかし, 放出火山岩塊共通の空気抵抗値としてはほぼ $K_d = 0.5$ 程度であるならば, この空気抵抗値 $k = 6 \times 10^{-4}\text{m}^{-1}$ は, その地区に多数降下した小岩塊直径 0.2~0.3m に対応させるほうが妥当であると考ええる.

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, 有益な指摘と助言をいただきました. 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.

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.

鈴木建夫・新井田清信・西田泰典・大島弘光・室伏誠, 2008. 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－, 北海道大学地球物理学研究報告, **71**, 1-18.