



Title	1977 年有珠山噴火で生じた噴煙柱の解析
Author(s)	小野, 忍; ONO, Shinobu; 大島, 弘光 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 70, 153-161
Issue Date	2007-03-15
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.70.153">https://doi.org/10.14943/gbhu.70.153</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/20431">https://hdl.handle.net/2115/20431</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	70_17_P153-161.pdf



## 1977年有珠山噴火で生じた噴煙柱の解析

小野 忍

北海道伊達高等学校

大島 弘光

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター

(2007年1月26日受理)

## Analysys of the eruption columns formed by the 1977 eruption of Mt.Usu

Shinobu ONO

Hokkaido Date High School

and

Hiromitsu OSHIMA

Institute of seismology and Volcanology, Graduate School of Sciences Hokkaido University

(Received January 26, 2007)

The 1977 eruption of Mt.Usu generated four high-altitude eruption columns which produce BIG I ,BIG II ,BIG III and BIGIV tephra-fall deposits respectively. Expressing the initial eruption velocity in terms of the solid mass eruption rate, the initial temperature, the initial radius and the initial gas fraction from the conservation of solid particles, we apply a steady plume model to the four eruption columns. The initial velocity increases with initial gas mass fraction and initial temperature for the solid mass eruption rate estimated from the volume of deposits, the apparent density of tephra and the eruption duration. For three eruption columns depositing BIG I ,BIG II and BIG III, the initial temperature and initial gas mass fraction are estimated at 600K and  $>0.11$ . The eruption column depositing BIGIV is formed at 800K and  $>0.15$ . The estimated initial temperature are low and initial gas mass fraction are high in comparison with general physical properties of dacitic magma. These inadequate values suggest that the growth of eruption columns take the influence of pyroclasts fallout from the column and thermal disequilibrium between pyroclasts and gases.

### I. はじめに

1977年8月7日から8月9日にかけて、有珠山で4度にわたって大規模な軽石噴火が発生した。これら4度の軽石噴火で降下した火砕堆積物は BIG I , BIG II , BIG III , BIGIV と名づけら

れ (Katsui et al.,1978), いずれの噴火も数時間にわたって続き, 噴煙の頂部は高度 10,000m 前後に達した.

このような噴煙柱の運動は, 静止流体中を上昇する定常プルームで近似することができる. 定常プルームの噴煙柱への適用は Wilson(1976)によって始められ, Wilson et al.(1978,1980), Sparks(1986)などによる研究を経て, Woods(1988)が流体力学的, 熱力学的に統一されたモデルで噴煙柱を定式化した. だが, モデルパラメータである初期速度や初期温度などの実測は難しく, 噴火の発生頻度も低いため, このモデルで実際の噴煙柱を解析した例は少ない. 小野(1996)は, 1929 年駒ヶ岳噴火, 1962 年十勝岳噴火や 1977 年有珠山噴火の噴煙柱に関して, 調査された火砕物の体積や見かけ密度をもとに, このモデルを用いて解析を行った.

このうち 1929 年駒ヶ岳噴火で生じた噴煙柱の解析結果と考察は大島ほか(2004)によって報告されている. 本報告では, 1977 年有珠山噴火で形成された 4 度の噴煙柱の解析結果のまとめ, 考察を行う.

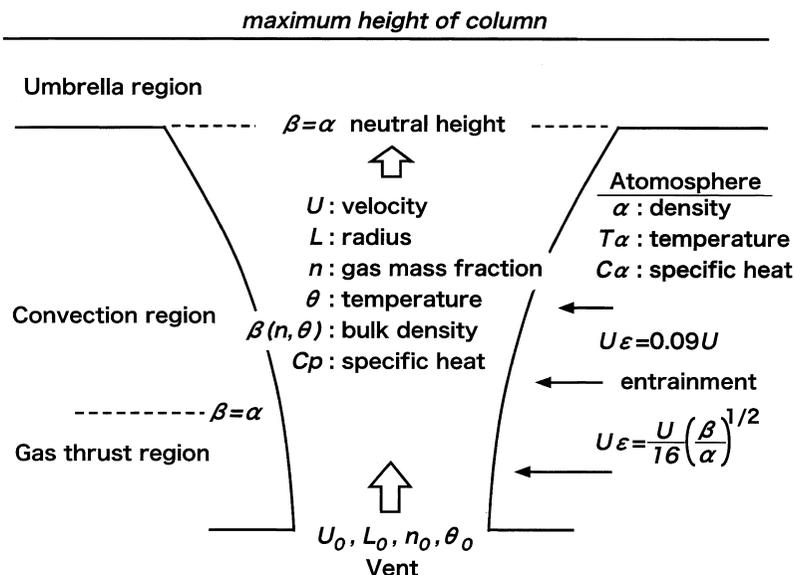


Fig. 1. Schematic representation of steady plume model and model parameters. The structure of the plume is subdivided into gas thrust, convective and umbrella regions based on the dominant force that control plume motion. The boundaries of each region are defined by height where column density is equal to atmosphere density.

## II. 定常プルームモデル

爆発的噴火で形成される噴煙柱は, 火口から噴出した火砕物と火山ガスが大気を取り込みながら静止流体中を上昇している強制プルームの特徴を持つ. ここで火砕物 (固相), 火山ガスと取り込まれた空気 (気相) の間の相対運動を無視し, 熱平衡を仮定すると, これらの混合物は同じ

温度と上昇速度をもった1つの相として扱うことができる。また混合物の上昇は1次元的で、長時間にわたって続き、上昇中に火砕物の落下・離脱はないと考えると、噴煙柱の半径は、混合物の上昇速度、温度および混合物に占める気相の重量比で記述できる (Woods,1988)。

このような定常プルームと見なされる噴煙柱は、混合物の運動を支配する駆動力から3つの領域に分けられる (Fig.1)。火口直上の Gas thrust region (ガス推進域) では、噴出時に持つ運動量が推進力となって混合物は重力に逆らい上昇する。Convective plume region (対流域) では、混合物の上昇にともない取り込まれた大気は、火砕物によって加熱され膨張し、混合物の密度は周囲の大気より小さくなり、浮力で上昇する。そして、噴煙柱の密度が大気より再び大きくなり慣性で上昇するのが Umbrella region (かさ型域) である。

### Ⅲ. 解析結果

降下火砕堆積物 BIG I, BIG II, BIG III および BIG IV をもたらした噴煙柱について、最高到達高度や持続時間は新井田ほか (1982) に詳しい。また、降下堆積物の体積は鈴木 (1981) によって見積もられ、その見かけ密度は鈴木ほか (1982) によって調べられている。これらの値と噴火終了後目視観測された火口径や気象要素を Table 1 にまとめた。

**Table 1.** Some characteristics of BIG I, BIG II, BIG III and BIG IV tephra-fall deposits and observational data on eruption columns and meteorological conditions.

Tephra-fall deposit	BIG I	BIG II	BIG III	BIG IV	References
Date	7 August	8 August	8 August	9 August	
Onset time of eruption (JST)	9:10	15:20	23:40	11:40	Niida et al. (1982)
Termination time of eruption (JST)	11:13	18:00	1:55	14:20	
Eruption duration (s)	7380	9600	8100	9600	
Eruption column height (m)	12000	10000	11000	9100	Niida et al. (1982)
Crater	1	2	3	4	Katsui et al. (1978)
Crater radius (m)	50	50	100	50	
Volume of tephra	2.43E+07	2.25E+07	2.72E+07	4.30E+06	Suzuki (1981)
Mean apparent density of tephra (kg/m <sup>3</sup> )	750	1100	1250	800	
Surface temperature (°K)	293.0	292.0	291.2	293.9	JMA (1980)
		Sapporo (18:00)	Sapporo (21:00)	Muroran (12:00)	
Surface Atmospheric pressure (hPa)	1005	1000	998	993	Suzuki (1985)
Tropopause height (m)	11000	9500	9500	9000	Niida et al. (1982)

ところで火砕物の質量保存則から、定常プルームを記述する4つのパラメータの初期値は、観測される降下火砕物体積 $Q$ 、火砕物の見かけ密度 $\rho$ および噴火継続時間 $\tau$ と、次式によって結びつけられる(小野, 1996).

$$(1-n_0)\beta_0 U_0 \pi L_0^2 = \frac{1}{\tau} \rho Q \quad (1)$$

$$\frac{1}{\beta_0} = \frac{1-n_0}{\sigma} + \frac{n_0 R \theta_0}{P_0} \quad (2)$$

ここで $U_0$ は初期上昇速度、 $L_0$ は初期半径、 $n_0$ は初期気相重量比、 $\theta_0$ は噴煙の初期温度である。また、 $\beta_0$ は混合物の初期正味密度、 $R$ は混合物の気体定数、 $P_0$ は混合物の圧力(地表の大気圧)、 $\sigma$ は火砕物の密度である。

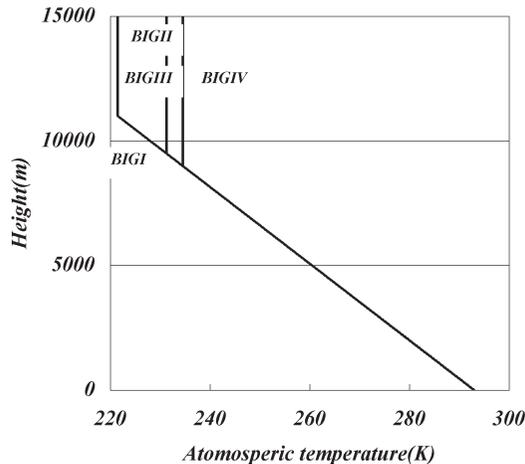


Fig. 2. Ambient atmospheric temperature profile.

解析にあたっては、周囲の大気は静止乾燥大気と仮定した(Fig. 2)。また上式を用いて、初期気相質量比に対する初期上昇速度 $U_0$ を見積もった。BIG Iについて初期気相質量比に対する初期上昇速度をFig. 3に示す。初期気相重量比が大きいほど、また初期温度が高いほど、初期上昇速度は大きい。初期気相重量比の増大や、初期温度の上昇は、混合物の正味密度の低下を引き起こし、混合物の重量噴出率は減少する。さらに、初期気相重量比の増大は、混合物中の固相重量を低下させる。このため固相噴出率を維持するために、初期速度が大きくなる。

初期気相重量比と混合物の上昇速度が0となる高度(噴煙柱高度と呼ぶ)の関係をFig. 4に示す。噴煙柱高度は初期気相重量比によって劇的に変化し、最大高度をもつ。最大高度に達する以前の噴煙柱高度は、初期気相重量比の増加とともに徐々に上昇するが、噴煙柱崩壊を示唆するように低高度で混合物は上昇速度を失う。一方、最大高度に達した後の噴煙柱高度は初期気相重量比の増加とともに緩やかに降下するが、その高度は圏界面を越え、成層圏に達する噴煙柱が形成

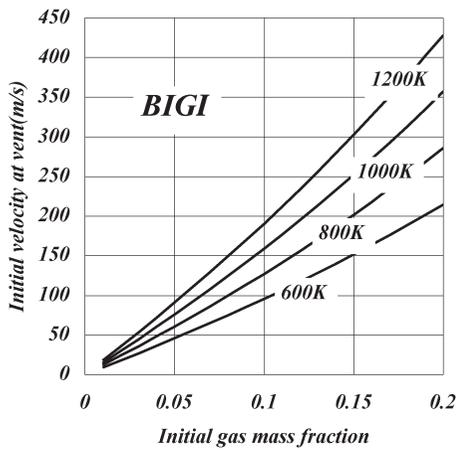


Fig. 3. Initial velocity as function of initial gas mass fraction for BIG I plume. Four curves are shown for initial temperature 600K, 800K, 1000K and 1200K with initial column radius 50m and solid mass eruption rate of  $2.47 \times 10^6$  kg/s.

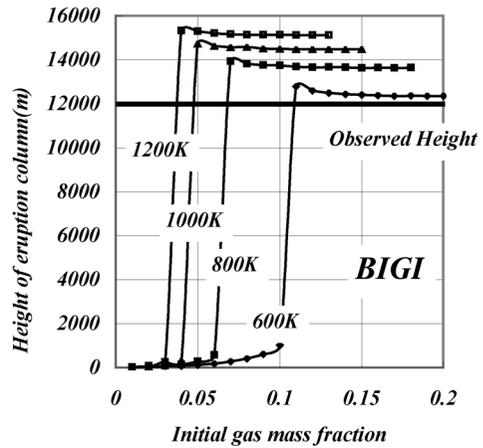


Fig. 4. Height of column top as function of initial gas mass fraction for BIG I plume. Marks indicate a calculated height for initial temperature 600K, 800K, 1000K and 1200K with initial column radius of 50m.

される。この噴煙柱高度の大局的な変化パターンは初期温度に依存しないが、初期温度が高くなるほど噴煙柱高度も高くなる反面、最大高度となる初期気相重量比は小さくなる。

計算された噴煙柱高度と観測高度を比較すると、初期温度が 600K で、初期気相重量比が 0.11 より大きい場合に両者の一致が良い。このとき、Fig.3 から初期速度は 106m/s 以上と求まる。初期温度が 600K より高くなると、形成される噴煙柱の高度は初期気相重量比によらず観測高度をはるかに上回る。

Table 2. Initial model parameters and calculated maximum plume height.

Eruption	Radius $L_0$ (m)	Temperature $T_0$ ( $^{\circ}$ K)	Gas mass fraction $n_0$	Velocity $U_0$ (m/s)	Maximum Plume height (m)
BIG I	50	600	0.11	106	12,795
BIG II	50	600	0.11	112	11,930
BIG III	100	600	0.17	76	13,270
BIG IV	50	800	0.15	26	9,425

BIG I と同様に、BIG II、BIG III、BIG IV について計算高度と観測高度の比較から推定した、初期気相重量比、初期温度、初期速度、および計算された最高高度などをまとめて Table 2 に示した。BIG II、BIG III の初期温度は BIG I 同様 600K で、初期気相重量比（初期速度）は各々 0.11 (112m/s) および 0.17 (76m/s) 以上と求められた。一方 BIG IV の噴煙柱は初期温度 600K では

噴煙柱は形成されず、初期温度が 800K、初期気相重量比（初期速度）は 0.15（26m/s）以上と見積もられた(Fig.5, Fig. 6).

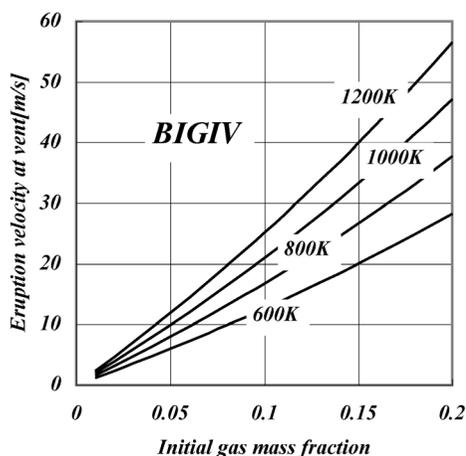


Fig. 5. Initial velocity as function of initial gas mass fraction for BIGIV plume. Four curves are shown for initial temperature 600K, 800K, 1000K and 1200K with initial column radius 50m and solid mass eruption rate of  $3.58 \times 10^6$  kg/s.

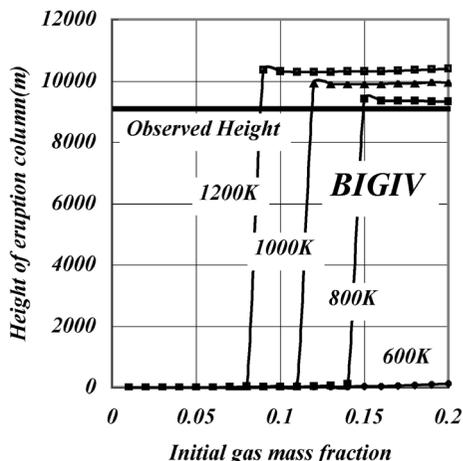


Fig. 6. Height of column top as function of initial gas mass fraction for BIGIV plume. Marks indicate a calculated height for initial temperature 600K, 800K, 1000K and 1200K with initial column radius of 50m.

## V. 考 察

解析により求められた4つのパラメータを比較すると、類似性と差異が認められる。ここでは、いくつかの違いについて検討を行う。

まず、初期気相重量比、初期半径および初期温度が等しい BIG I と BIG II の初期速度の違いである。BIG II の火砕物の重量噴出率は、BIG I より大きい。火砕物の重量噴出率と(1)式で見積もられる初期速度の関係を示した Fig. 7 を見ると、初期速度は火砕物の重量噴出率に比例することがわかる。従って重量噴出率の大きい BIG II の初期速度は大きくなる。

つぎに、BIG I や BIG II に比べ火砕物の重量噴出率が大きい BIG III の初期速度が小さいことである。これに加えて初期速度を大きくする初期気相重量比も BIG I, II に比べて BIG III は大きい。ここで、Fig. 8 に示した火砕物の重量噴出率と混合物の運動量噴出率の関係をみると、初期速度が小さいにも関わらず、初期火口径が大きい BIG III の運動量噴出率は、BIG I BIG II に比べ大きいことがわかる。運動量噴出率が大きいために、上昇速度を失う前に浮力を獲得でき、初期速度が遅くても噴煙柱が形成されたと考えられる。このことは、火砕物の重量噴出率が高いほど、噴煙柱の形成に大きな運動量噴出率が必要であることを示している。

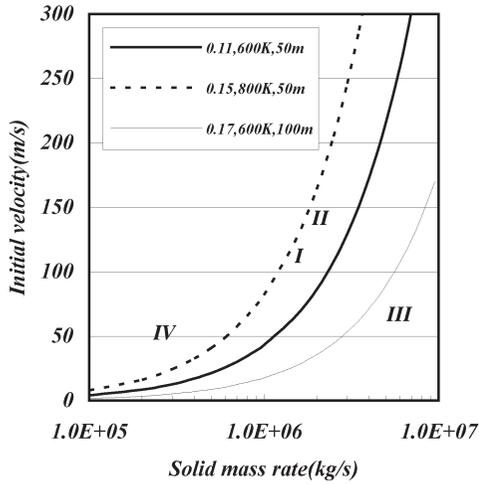


Fig. 7. Initial velocity as function of solid mass eruption rate.

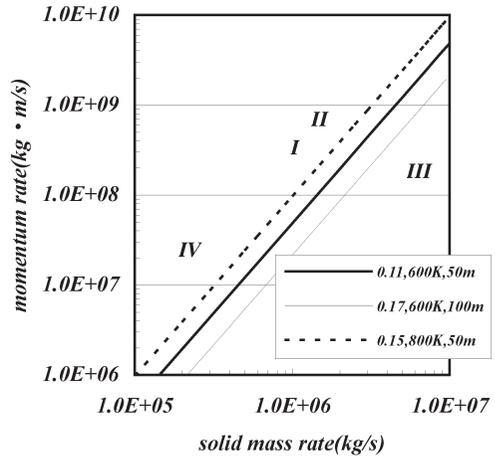


Fig. 8. Initial momentum flow rate as function of solid mass eruption rate.

最後に、火砕物の重量噴出率が BIG I , BIG II , BIG III に比べて 1 オーダー小さい BIG IV では、初期温度 600K で噴煙柱が形成されなかったことである。これは、火砕物の重量噴出率に初期速度が比例することから、重量噴出率の小さい BIG IV では噴煙柱の形成に必要な初期速度に達しなかったことに起因している。このため初期温度を高くし、初期速度を大きくすることによって噴煙柱が形成されたと考えられる。

ところで、一般的なマグマの物性と比べると、推定された初期気相重量比は大きく、初期温度は低い。初期温度が高くなると、初期気相重量比が小さくても噴煙柱は形成できるが、噴煙柱高度は観測高度に比べ高くなる (Fig.4, Fig. 6)。噴煙柱からの固相の離脱や固相の粒径分布は、噴煙の振る舞いに大きな影響を及ぼす(Woods and Bursik,1991)。このような固相の離脱を考慮することで噴煙柱高度がより低く求まるかもしれない。

Table 3. Total mass flux, bulk density, plume radius at the neutral height and thickness of umbrella region.

Eruption	Total mass flux $m$ (kg/s)	Bulk density $\beta$ (kg/m <sup>3</sup> )	Radius $r$ (m)	Thickness $\Delta h$ (m)
BIG II	1.28E+08	0.47	1,355	3,080
BIG IV	6.92E+07	0.63	890	3,090

また、火道中のマグマの上昇過程は、噴煙柱の形成に大きな影響を与えるので、これら結びつけた解析も今後の課題である。

ところで BIG II と BIG III の噴煙柱は札幌の気象用レーダーでも捕捉され、エコーの動きから火口から 20km 程度離れた噴煙の拡大速度は、各々 7m/s および 6m/s と推定されている(気象庁, 1980). 上層風の影響や降下火砕物などの離脱を無視すると、Convective region から Umbrella region へ流入する混合物の全質量流入率を  $\dot{m}$  としたとき、Umbrella region の成長は、質量保存則から

$$\frac{d}{dt}(\pi r^2 \Delta h \beta) = \dot{m} \quad (3)$$

と表される(Sparks et al.1986). ここで  $r$  は Umbrella region の半径、 $\Delta h$  は Umbrella region の厚さ、 $\beta$  は Umbrella region 内の混合物正味密度である。ここで  $\beta$  と  $\Delta h$  が時間に依存しないと仮定すると(3)式から Umbrella region の拡大速度は

$$\dot{r} = \frac{\dot{m}}{2r\beta\pi\Delta h} \quad (4)$$

で与えられる。 $r$ 、 $\dot{m}$  および  $\beta$  を、Convective region と Umbrella region の境界での噴煙柱の半径、全流入量、正味密度とし、 $\Delta h$  を境界から噴煙頂部までの高さとする( Table 3 ), BIG II, BIG III における Umbrella region の拡大速度は最大で 9~14m/s 程度と見積もられ、レーダーエコーで噴煙の拡大速度が観測された地点での拡大速度は 1m/s 以下と推定される ( Fig. 9 ). この値は観測地に比べかなり小さい。観測された値は、上層の平均風速に近く、噴煙の拡大速度は、一般場の影響を受けている。

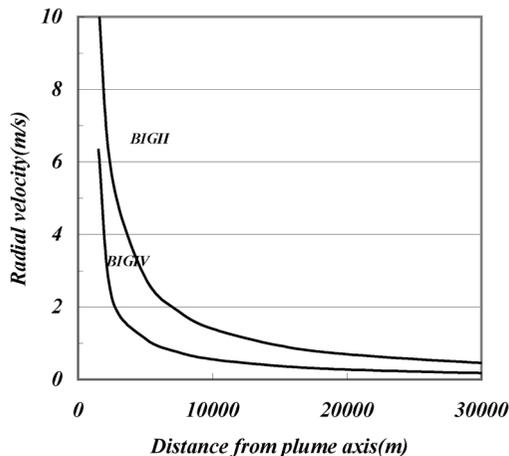


Fig. 9. Radial velocity of umbrella region for BIG II plume and BIG IV plume.

## VII. ま と め

1977年有珠山噴火で BIG I ~BIG IV を降下堆積させた噴煙柱を Woods(1988) の 1 次元定常モデルを用いて解析した。解析にあたっては、降下火砕堆積物の体積と見かけ密度、および噴火継

続時間から質量保存則を用いて、初期速度を見積もった。また初期半径は火口半径とし、観測された噴煙柱高度を満たすように初期温度、初期気相重量比を推定した。

推定された初期温度は600K、初期気相重量比は0.11~0.17である。しかし、一般的なマグマの物性から判断すると、初期気相質量比は大きく、初期温度は低い。逆に初期温度を1200Kとすると、初期気相重量比は0.04~0.09と半減するが、求められた噴煙柱高度は観測高度をはるかに越える。これは、固相（火砕物）の離脱など熱エネルギーの系からの散逸を考慮していないことが原因の1つと考えられ、Woods and Bursik (1991) による再解析も必要であろう。また、数値シミュレーション (Dobran et al., 1993) による降灰開始時刻や降灰範囲や降灰量の予測も必要であろう。一方、災害予測の観点からは、解析的な手法による噴煙のダイナミクスの解明を進めるとともに、数値シミュレーションによる予測が必要だろう。

## 文 献

- Dobran, F., A. Neri and G. Macedonio, 1993. Numerical simulation of collapsing volcanic columns, *J. Geophys. Res.*, **98**, 4231-4259.
- Katsui, Y., Y. Oba, K. Onuma, 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, T. 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.*, **18**, 385-408.
- 気象庁観測部地震課, 1980. 有珠山噴火活動調査報告 (1977年8月~1978年12月) - 災害時自然現象報告書一, 気象庁技術報告, 第99号, 203pp.
- 新井田清信・鈴木建夫・勝井義雄, 1982. 有珠山1977年噴火の推移と降下火砕堆積物, 火山, 第2集, **27**, 97-118.
- 大島弘光・小野忍・西田泰典, 2004. 北海道駒ヶ岳の1929年噴火で生じた噴煙柱の定常ブリュームモデルによる解析, 北海道大学地球物理学研究報告, **67**, 157-166.
- 小野 忍, 1996. 1次元定常流モデルによる噴煙柱の解析-1977年有珠山噴火・1962年十勝岳噴火・1929年北海道駒ヶ岳噴火, 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士論文, 43pp.
- Sparks, R. S. J., 1986. The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns, *Bull. Volcanol.*, **48**, 3-15.
- 鈴木建夫, 1981. 降下火砕堆積物の“層厚一面積”曲線, 火山, 第2集, **26**, 9-23.
- 鈴木建夫, 1985. 有珠山1977年降下火砕堆積物の渦動拡散モデルによる解析, 火山, 第2集, **30**, 231-251.
- 鈴木建夫・新井田清信・勝井義雄, 1981. 有珠山1977年輕石火山灰の堆積様式, 火山, 第2集, **27**, 119-140.
- Woods, A. W., 1988. The dynamics and thermodynamics of volcanic eruption column, *Bull. Volcanol.*, **50**, 169-191.
- Woods, A.W. and B.I. Bursik, 1991. Particle fallout, thermal disequilibrium and volcanic plumes, *Bull. Volcanol.*, **53**, 559-570.