

# 火山噴煙シミュレーションによる噴火強度と噴煙高度の関係の定量化

課題責任者

小屋口剛博 東京大学 地震研究所

著者

鈴木雄治郎 東京大学 地震研究所

小屋口剛博 東京大学 地震研究所

爆発的火山噴火では、火山灰など火口からの噴出物が大気中を上昇・拡大し、地表に降り積もる。大気中での噴出物滞留は深刻な航空路障害の原因となるため、噴煙のダイナミクスを理解し、噴煙高度を定量的に予測することが望まれている。そこで、本研究では、火口での噴火強度と噴煙高度の定量的関係を大規模シミュレーションによって求めた。噴出率を変えたパラメータスタディの結果、噴火が強くなるほど噴煙高度が単調に増加する、というこれまでの単純モデルでの予測とは異なる傾向が見られた。火口での噴出率が  $4 \times 10^7 \text{kg/s}$  より小さい、もしくは  $10^8 \text{kg/s}$  より大きい噴火では、噴出率の増加とともに噴煙高度が増加した。一方、噴出率が  $4 \times 10^7 \text{kg/s}$  から  $10^8 \text{kg/s}$  の間では、噴出率が増加しても噴煙高度は変化しない、もしくは低下した。これらの「噴出率-噴煙高度」関係の傾向の変化は、火口付近でジェットのような構造を持つ場合（噴出率  $< 4 \times 10^7 \text{kg/s}$ ）と噴水構造を持つ場合（噴出率  $> 10^8 \text{kg/s}$ ）、それら2つの遷移レジーム（ $4 \times 10^7 \text{kg/s} < \text{噴出率} < 10^8 \text{kg/s}$ ）に対応することが明らかになった。

キーワード：火山噴煙, 乱流混合, 疑似ガスモデル

## 1. はじめに

爆発的火山噴火は、噴煙柱と呼ばれる上昇ブルームと水平に拡大する傘型噴煙の形成で特徴付けられる。爆発的噴火では、マグマ溜まりから火口をつなぐ火道中で、急減圧に伴う気泡の発生によって液体マグマが破碎し火山灰や軽石といった火砕物が生成する。火砕物と火山ガスの混合物は火口から高速で噴出し、周囲の大気を取り込む。噴出物の熱容量は大きく、取り込まれた大気は噴出物の熱によって瞬時に膨張し、噴出物と混合大気からなる噴煙は浮力を得て上昇を続ける。この上昇ブルームが噴煙柱と呼ばれる。噴煙密度が成層大気と釣り合う「浮力中立高度」に達すると、噴煙は上昇をやめ重力流として水平方向に拡大し、傘型噴煙を形成する。

火砕物は噴煙柱と傘型噴煙によって運搬される。火砕物は傘型噴煙の下部から離脱すると、大気の流れによって運ばれ、地表に堆積する。火砕物の堆積は、農作物や交通網・インフラへダメージを与え、場合によっては呼吸器系の疾患へもつながる。また、非常に細かな火砕物は長期に渡り大気中に滞留し、航空路の障害となる。爆発的火山噴火に伴うこのような災害を軽減するためには、噴煙のダイナミクスを明らかにし、噴出条件と噴煙高度・傘型噴煙拡大速度・降灰範囲の定量的な関係を明確にすることが必須である。中でも、噴煙高度（噴煙最高高度と傘型噴煙高度）は、火砕物の滞留高度や堆積分布を強く支配するため、火口での噴出条件と噴煙高度の関係を正しく見積もることが重要になる。

火口での噴出条件と噴煙高度の関係については、これまで、噴煙ダイナミクスの1次元モデル（例えば、[1]）によって、噴火強度（噴出率）が大きくなるほど噴煙高度は高くなることが示されていた。ただし、これらの1次元モデル

では、噴煙内の物理量水平分布や大気を取り込み効率に関して単純なモデル化が施されている。本研究では、このような単純化を用いず、物理量水平分布や大気混合効率を直接計算できる3次元シミュレーションを用い、噴出率と噴煙高度の関係を求めた。

## 2. 手法・計算条件

噴出率を変えた噴煙の3次元シミュレーションを行い、噴煙の最高高度 ( $H_T$ ) と傘型噴煙高度 (the maximum spreading level;  $H_{MSL}$ ) を見積もった。これらの高度は、時間平均した噴出物濃度分布から求めた [2]。

噴煙の3次元シミュレーションには、火砕物とガス成分をひとつの流体として扱う疑似ガスモデル [3] を用いた。このモデルでは、火砕物は非常に小さく、火砕物とガス成分は瞬時に動的・熱的に平衡状態になると仮定している。噴出物と大気の混合比によって比熱と気体定数を変化させることによって、噴煙の非線形な密度変化を再現した。数値計算は一般座標系を用い、火口から離れるにしたがってグリッドサイズが増加するようにした。支配方程式である双曲型偏微分方程式は差分法、MUSCL法 [4] で高次精度化して Roe スキーム [5] で数値的に解いた。計算は3～12億個の計算格子数で実行した。

噴出条件は火口で境界条件として与え、定常的に噴出が続く場合を想定した。  $2.0 \times 10^7 \text{kg/s}$  から  $4.0 \times 10^8 \text{kg/s}$  の間の5パターンの噴出率に対して実行した (表1)。噴出物の温度 (1000K)、含水量 (2.84wt%)、初期密度 ( $7.72 \text{kg/m}^3$ )、初速 (230m/s)、圧力 (1.0atm) は全て共通の値を用いた。

表1 計算条件

| Run | MER (kg/s)        | Vent radius (m) | Grid number       |
|-----|-------------------|-----------------|-------------------|
| 1   | $2.0 \times 10^7$ | 60              | $7.8 \times 10^9$ |
| 2   | $4.0 \times 10^7$ | 84              | $5.5 \times 10^8$ |
| 3   | $1.0 \times 10^8$ | 134             | $3.1 \times 10^8$ |
| 4   | $2.0 \times 10^8$ | 189             | $2.7 \times 10^8$ |
| 5   | $4.0 \times 10^8$ | 267             | $2.7 \times 10^8$ |

### 3. 計算結果

噴出率を変えたパラメータスタディの結果、噴出率によって噴煙下部の構造が大きく変わる様子が観察された。噴出率が小さい場合と大きい場合の代表的な結果 (Run 1 と 5) を以下で示す。

#### 3.1 Run 1

図1は、噴出率を  $2.0 \times 10^7$  kg/s とした場合のシミュレーション結果 (400–2400s 間で時間平均した断面図) を示す。噴煙柱は高度 20km 以上まで上昇し、傘型噴煙の先端は火口からの水平距離 25–28km まで達した。

噴煙下部では、ジェットのような構造が特徴的に見られた。高濃度・高密度・高速 (図 1a–c) の中心軸領域 (“inner core”) が低濃度・低密度・低速の周縁部剪断層 (“outer shear layer”) に囲まれる構造が観察された。inner core は高さとともに outer shear layer に浸食され、高度 5km 程度で消滅した。

噴煙上部では、噴煙密度が大気密度より小さくなり (図 1b の赤色領域)、上昇速度は増加した (図 1c)。高度 15km 程度で噴煙と大気の密度は釣り合うが、余剰な上向き運動量を持つため、さらに上昇を続ける。その結果、

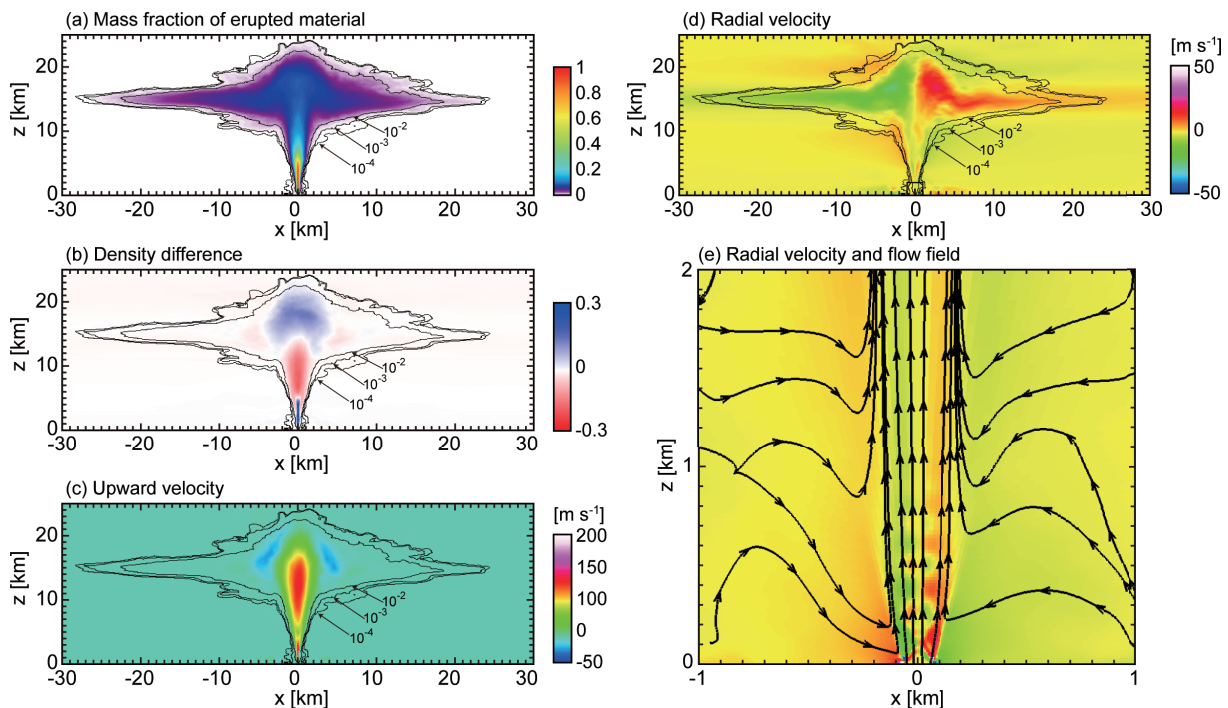


図1 噴出率  $2.0 \times 10^7$  kg/s のシミュレーション結果。火口を含む断面における、(a) 噴出物の質量分率、(b) 成層大気との密度差、(c) 上昇速度、(d) 水平速度、の 400–2400s で時間平均した分布を示す。火口付近の水平方向と流線を拡大図 (e) で示す。図 a–d の実線は噴出物の質量分率が  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  のコンターを表す。

噴煙柱の最上部に大気よりも重い領域が形成した。最上部の噴煙が負の浮力によって減速すると、噴煙は浮力中立高度まで流れ落ちて横方向に拡大した。

#### 3.2 Run 5

図2は、噴出率を  $4.0 \times 10^8$  kg/s とした場合のシミュレーション結果 (1000–2400s 間で時間平均した断面図) を示す。噴煙柱は高度 40km まで達し、傘型噴煙の先端は火口からの水平距離 80–100km まで拡大した。

噴煙下部では、Run 1 で見られたジェット構造と大きく異なり、噴水 (fountain) のような構造が見られた。噴水構造内部は、高濃度・高密度・高速 (図 2a–c) という特徴を持つ。噴水構造の頂部側面に発生する大きな渦構造によって周囲の大気と急激に混合し、浮力を得て上昇する。その結果、噴水構造の頂部で噴出物濃度や上昇速度が急変する。

噴煙上部では、軽くなった噴煙が強い上昇流となり (図 2b, c)、浮力中立高度 (~15km) を大きく超えて噴煙柱頂部に達した。傘型噴煙の拡大速度も、Run 1 の場合 (図 1d) に比べ大きい値を持った (図 2d)。

#### 3.3 流れのレジームと噴煙高度

Run 1–5 の解析の結果、噴出率が  $4.0 \times 10^7$  kg/s より小さい場合にはジェット構造を持ち、 $1.0 \times 10^8$  kg/s よりも大きい場合には噴水構造を持つことが分かった。これら 2 つのレジームの間では、遷移的なレジームとなった。

ジェットレジームと噴水レジームの遷移は、初期運動量を失う高さまでに inner core が outer shear layer によって浸食されるかどうかで決まる [6]。その条件は臨界リチャ-

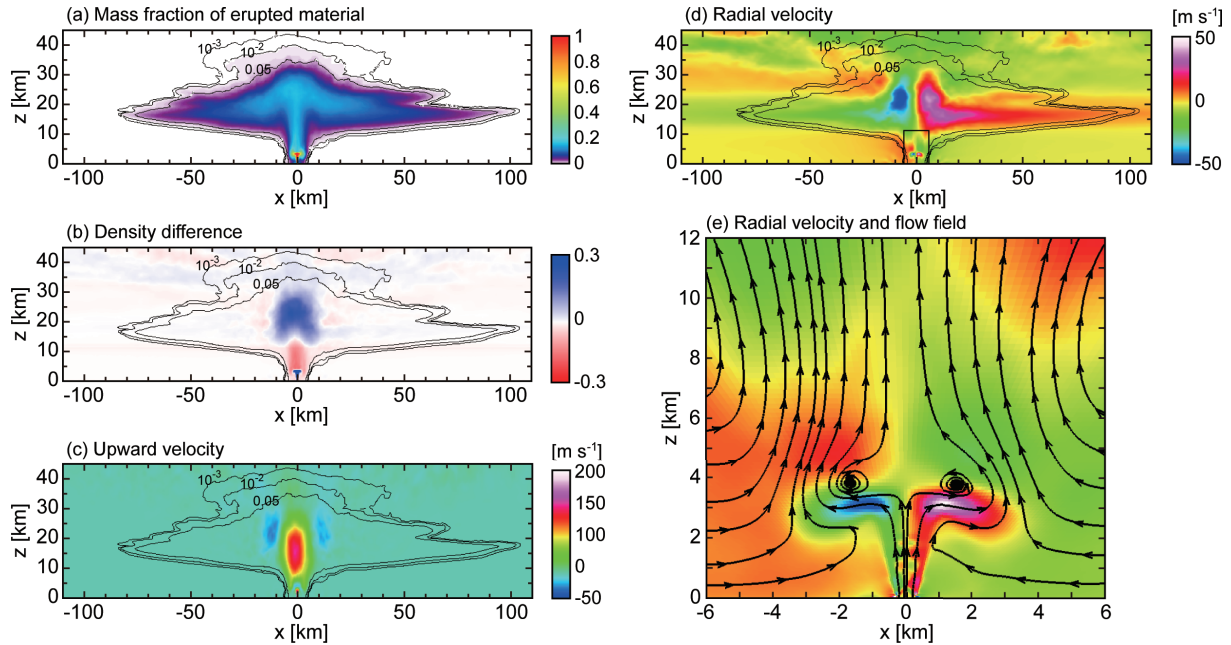


図2 噴出率  $4.0 \times 10^8 \text{ kg/s}$  のシミュレーション結果。火口を含む断面における、(a) 噴出物の質量分率、(b) 成層大気との密度差、(c) 上昇速度、(d) 水平速度、の 400-2400 s で時間平均した分布を示す。火口付近の水平方向と流線を拡大図 (e) で示す。図 a-d の実線は噴出物の質量分率が 0.05,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$  のコンターを表す。

ドン数で近似的に与えられる。

$$Ri_{\text{crit}} = \frac{1}{2(a_1 M + a_2)}$$

ここに、 $a_1$  と  $a_2$  は経験的係数、 $M$  は火口でのマッハ数である。火口でのリチャードソン数は噴出速度  $w_0$ 、噴出物密度  $\rho_0$ 、大気密度  $\rho_a$ 、火口半径  $R_0$  で与えられる。

$$Ri \equiv \frac{(\rho_0 - \rho_a)gR_0}{\rho_a w_0^2}$$

$Ri = Ri_{\text{crit}}$  がレジームの遷移条件となる。Suzuki and Koyaguchi [6] の結果から求められた  $a_1 = 1.3-3.4$ ,  $a_2 = 0.16-4.7$  と、Run 1-5 に用いたマッハ数・噴出物密度をこの関係式に代入すると、噴出率が  $1.2-21.0 \times 10^7 \text{ kg/s}$  が遷移条件となり、Run 1-5 から得られた遷移条件  $4.0-10.0 \times 10^7 \text{ kg/s}$  と整合的である。

噴出率と噴煙高度、レジームの関係を図3に表す。噴煙最高高度と傘型噴煙高度は噴出率に対し似た傾向を示した。噴出率が  $4.0 \times 10^7 \text{ kg/s}$  以下の場合、流れはジェット構造を持ち、噴出率とともに噴煙高度は単調に増加した。また、噴出率が  $1.0 \times 10^8 \text{ kg/s}$  以上の場合、流れは噴水構造を持ち、噴出率とともに噴煙高度が単調に増加した。噴出率が  $4 \times 10^7 \text{ kg/s}$  から  $1 \times 10^8 \text{ kg/s}$  の間では、流れは遷移レジームに属し、噴出率が増加しても噴煙高度はあまり変化しない、もしくは低下した。

以上で示した「噴出率-噴煙高度」関係の傾向の変化は、ジェットレジームと噴水レジームで噴煙と大気の混合効率が異なることを示唆する。1次元モデルを用いると、一定の混合効率(図3中の  $k$ )を与えたときの噴出率と噴煙高度の関係を得ることができる(図3の曲線)。従って、混合効率を変えた1次元モデルの計算結果と3次元計算結果を比較することで、3次元噴煙の実効的な混合効率を

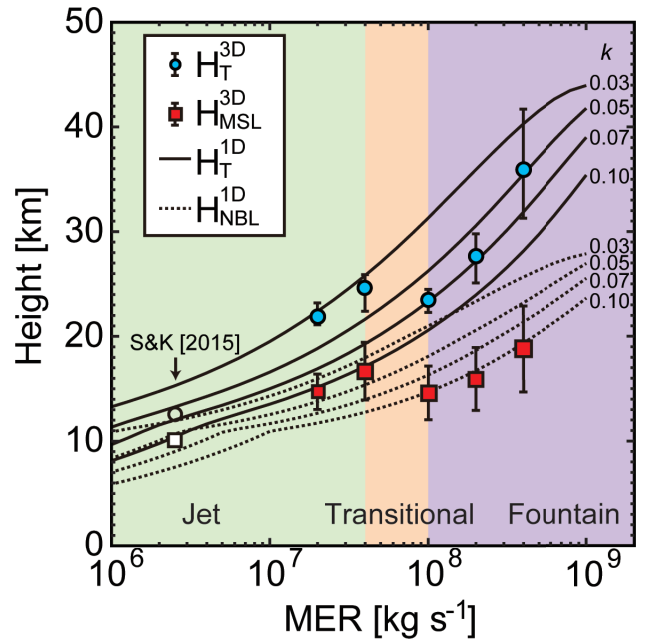


図3 噴出率をパラメータとしたときの噴煙高度と流れのレジーム。

見積もることができる。噴煙最高高度を用いて実効的な混合効率  $k$  を見積もると、ジェット構造を持つ場合は 0.03 程度であり、噴水構造を持つ場合の 0.05-0.07 より小さい。また、傘型噴煙高度を用いて  $k$  を見積もると、ジェット構造を持つ場合は 0.03-0.05 であり、噴水構造を持つ場合の 0.10 より大幅に小さい。ジェットレジームの噴煙に比べて噴水レジームの噴煙が高い混合効率を持つという結果は、火口付近の流れ場(図1e, 2e)において、噴水構造を持つ場合に、その頂部の渦によって混合が促進されるという観察事実と整合的である。



#### 4. まとめ

3次元数値モデルを用い、噴出率を変えたパラメータスタディを行った結果、火口付近の流動様式が噴煙高度に影響することが分かった。このことは、噴煙高度の観測結果から噴出率を推定する場合、あるいは、噴出率を仮定して噴煙高度を予測する場合に、火口付近の流動様式を考慮しなければならないことを示す。防災上、「噴出率－噴煙高度」関係の推定には、膨大な計算資源が必要な3次元シミュレーションよりも、計算が容易な1次元モデルが使用される。1次元モデルで定量的に正しい「噴出率－噴煙高度」関係を求めるためには、噴出率の大小や噴煙最高高度・傘型噴煙高度によって仮定する混合効率の値を適切に調整しなければならない。本研究に加え、3次元モデルを用いた更なるパラメータスタディによって実効的な混合効率の決定することが必要となる。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究補助費（課題番号 25750142, 24244069）を使用した。

#### 文献

- [1] A.W. Woods, “The fluid dynamics and thermodynamics of eruption columns,” *Bull. Volcanol.*, vol.50, no.3, pp.169-193, 1988.
- [2] Y. J. Suzuki, A. Costa, and T. Koyaguchi, “On the relationship between eruption intensity and volcanic plume height: Insights from three-dimensional numerical simulations,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, in press.
- [3] Y. J. Suzuki, T. Koyaguchi, M. Ogawa, and I. Hachisu, “A numerical study of turbulent mixing in eruption clouds using a three-dimensional fluid dynamics model,” *J. Geophys. Res.*, vol.110, B08201, 2005.
- [4] B. van Leer, “Towards the ultimate conservative difference scheme III. Upstream-centered finite-difference schemes for ideal compressible flow,” *J. Comput. Phys.*, vol.23, no.3, pp.263-275, 1977.
- [5] P. L. Roe, “Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes,” *J. Comput. Phys.*, vol.43, no.2, 357-372, 1981.
- [6] Y. J. Suzuki, and T. Koyaguchi, “3-D numerical simulations of eruption column collapse: Effects of vent size on pressure-balanced jet/plumes,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol.221-222, pp.1-13, 2012.

# Quantification of the Relationship between Eruption Intensity and Volcanic Plume Height

Project Representative

Takehiro Koyaguchi Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Authors

Yujiro Suzuki Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Takehiro Koyaguchi Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Height of plumes generated during explosive volcanic eruptions is commonly used to estimate the associated eruption intensity (i.e., Mass Eruption Rate; MER). In order to quantify the relationship between plume height and MER, we performed a parametric study using a three-dimensional numerical model of volcanic plumes for different MER. The results indicate that the flow pattern in the lower region of the plume systematically changes with MER. For MERs  $< 4 \times 10^7$  kg/s, the flow in the lower region has a jet-like structure (the jet-like regime). For MERs  $> 10^8$  kg/s, the flow shows a fountain-like structure (the fountain-like regime). Within each of the two flow regimes, the plume height increases as the MER increases, whereas plume heights remain almost constant or even decrease as MER increases in the transitional regime ( $4 \times 10^7$  kg/s  $<$  MERs  $<$   $10^8$  kg/s). The distinct relationships between the two regimes reflect the fact that the efficiency of entrainment of ambient air in the jet-like regime is substantially lower than that in the fountain-like regime.

**Keywords:** volcanic eruption, eruption column, turbulent mixing, volcanic hazard

## 1. Introduction

During explosive eruptions, a large amount of a mixture of solid pyroclasts (volcanic ash) and volcanic gases are ejected from volcanic vent into the atmosphere. The ejected mixture entrains ambient air and expands because of the heating from the pyroclasts, becoming buoyant and developing an eruption column. As the mixture rises, its density becomes equal to the atmospheric density at the so-called neutral buoyancy level (NBL), because of the atmosphere stratification. Finally, the mixture reaches the top of the column exhausting its momentum and radially spreads around the NBL.

The relationships between the mass eruption rate (MER) and plume height are commonly derived under the assumptions that the entrainment velocity at the edge of eruption column is approximately proportional to the mean plume velocity along the flow axis at each height and its proportionality coefficient, representing the efficiency of air entrainment, is considered as a constant (e.g., [1]). On the other hand, a recent study by Suzuki and Koyaguchi [2] showed that the flow pattern and the efficiency of air entrainment in the lower part of eruption column can fundamentally change depending on the MER. In this study, we carried out a set of numerical simulations of volcanic columns using a 3D fluid dynamic model for different MERs in order to clarify whether or not these changes near the vent control the plume heights.

## 2. Method and Simulation Inputs

The simulations were designed to describe the injection of a mixture of pyroclasts and volcanic gas from a circular vent located at 0 km above sea level in a windless atmosphere (Mid-latitude atmospheric conditions). Details of the model and numerical procedures are described in Suzuki et al. [3]

In the present analysis, we estimated two characteristic heights of the eruptive plume from the simulation results: the total (or maximum) eruption column height ( $H_T$ ) and the maximum spreading level ( $H_{MSL}$ ). The  $H_T$  is defined as the highest level of an assigned concentration threshold. The  $H_{MSL}$  is defined as the height with the maximum radial injection of the erupted material, which was estimated using horizontally and temporally averaged profiles of the mass fraction of the erupted material.

We carried out five simulations of eruption plumes with variable MERs:  $2.0 \times 10^7$ ,  $4.0 \times 10^7$ ,  $1.0 \times 10^8$ ,  $2.0 \times 10^8$ , and  $4.0 \times 10^8$  kg/s. The other parameters were kept fixed among the simulations. Magmatic temperature and water content were assumed to be 1000 K and 2.84 wt%, respectively. The initial density of the ejected material was  $7.72 \text{ kg/m}^3$ , and the exit velocity was 230 m/s corresponding to the Mach number of 2.0.

## 3. Simulation Results and Geological Implications

Simulation results show two distinct flow regimes develop near the vent depending on the MER [4].

Figure 1 shows the time-averaged, vertical cross-sections obtained for the low MER ( $2.0 \times 10^7$  kg/s). The eruption column

develops over 20 km in height. The edge of umbrella cloud reaches 25–28 km from the central axis of the flow. In the lower column, the eruption column has an inner core with a high concentration of the erupted material, which is surrounded by an outer shear layer having a lower particle concentration (Fig. 1a). The inner core is progressively eroded by the outer shear layer with height and disappears at about 5 km. Above this height, the cloud mixes with ambient air and becomes buoyant. At  $z > 15$  km, the cloud collapses outward and downward.

Figure 2 shows the results for the high MER ( $4.0 \times 10^8$  kg/s). The flow pattern in the lower column is significantly different from that for the low MER. The lower column has a fountain-like structure below 5 km in the high MER case. This fountain-like structure is characterized by a suspended flow with a high concentration of the erupted material and density larger than that of the surrounding ambient. The erupted material is mixed with the ambient air by the large-scale eddy around the top of the fountain.

The flow regimes and their plume heights ( $H_T$  and  $H_{MSL}$ ) are illustrated as a function of MER in Fig. 3. When the MER is equal to or larger than  $10^8$  kg/s, the flow is clearly in the fountain-like regime. On the other hand, the case with  $MER = 2.0 \times 10^7$  kg/s is characterized by jet-like structures. The plume heights,  $H_T$  and  $H_{MSL}$ , against MER have a similar trend. For  $MER < 4.0 \times 10^7$  kg/s (the jet-like regime) and for  $MER > 10^8$  kg/s (the fountain-like regime), and plume heights increase as MERs increase. For  $4.0 \times 10^7$  kg/s  $< MER < 10^8$  kg/s (the transitional regime), however, plume heights remains almost constant or even decrease as MERs increase.

The present simulations show that the plume heights largely depend on the flow patterns near the vent. The variations in plume heights suggest that the efficiency of entrainment substantially change as the flow pattern changes from the jet-like regime to the fountain-like regime. The curves in Fig. 3 represent the  $H$ -MER relationships for different efficiencies turbulent mixing between eruption cloud and ambient air (i.e., entrainment coefficient). The results indicate that the value of entrainment coefficient in the jet-like regime is substantially smaller than that in the fountain-like regime. This implies that the characterization of mixing efficiency depending on flow regimes is necessary for a better estimation of MER inferred from plume heights.

## References

- [1] A.W. Woods, “The fluid dynamics and thermodynamics of eruption columns,” *Bull. Volcanol.*, vol.50, no.3, pp.169-193, 1988.
- [2] Y. J. Suzuki, and T. Koyaguchi, “3-D numerical simulations of eruption column collapse: Effects of vent size on pressure-balanced jet/plumes,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol.221-222, pp.1-13, 2012.
- [3] Y. J. Suzuki, T. Koyaguchi, M. Ogawa, and I. Hachisu, “A numerical study of turbulent mixing in eruption clouds

using a three-dimensional fluid dynamics model,” *J. Geophys. Res.*, vol.110, B08201, 2005.

- [4] Y. J. Suzuki, A. Costa, and T. Koyaguchi, “On the relationship between eruption intensity and volcanic plume height: Insights from three-dimensional numerical simulations,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, in press.

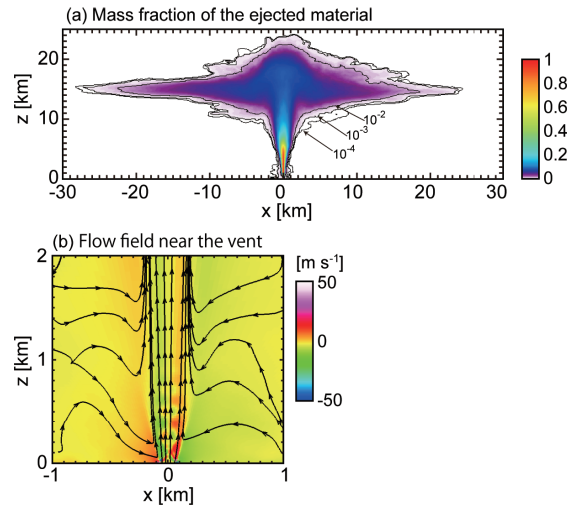


Fig. 1 Cross-sections for the case of  $MER = 2.0 \times 10^7$  kg/s.

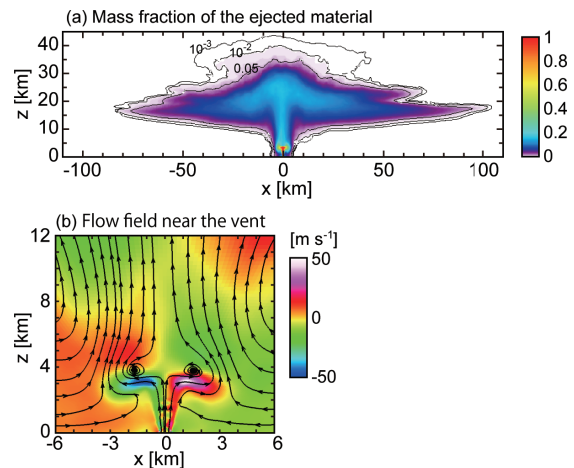


Fig. 2 Cross-sections for the case of  $MER = 4.0 \times 10^8$  kg/s.

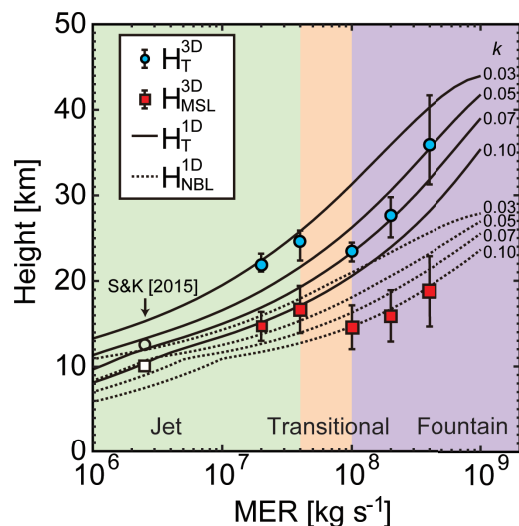


Fig. 3 Characteristic heights of volcanic plume as a function of the MER for the simulation results.