

火山噴煙ダイナミクスにおける火口形状の影響

課題責任者

鈴木 雄治郎 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

爆発的火山噴火では火山噴煙が大気中へと放出されるが、そのダイナミクスは火口の形状に影響を受ける可能性がある。噴煙は周囲大気より重いままだと火砕流として地表を流れ、大気を混合して浮力を得ると噴煙柱として上昇する。火砕流の発生条件と噴煙高度を正確に見積もることが噴煙ダイナミクス理解の鍵となる。本研究では、火山噴煙の3次元流体力学モデルを用いた大規模シミュレーションを行い、火口形状を変えた場合の噴煙高度・火砕流発生条件を解析した。火口のアスペクト比を変えたパラメータスタディの結果、火口のアスペクト比が大きい（火口幅が狭い）と、噴煙はより安定して火砕流が発生しにくくなった。火口のアスペクト比は、火口付近に形成する高濃度噴煙の噴水構造の有無にも影響した。噴水構造の有るレジームと無いレジームによって、アスペクト比に対する噴煙高度の応答も異なることが明らかになった。この応答の違いは、レジームの違いによって噴煙と大気の混合メカニズムが異なる可能性を示唆する。

キーワード：火山, 噴煙, 火砕流, 流体力学モデル, 火山防災

1. はじめに

爆発的火山噴火では、火砕物（火山灰や軽石）と火山ガスの混合物が火口から高速で大気中に放出される。火砕物を含む噴煙の初期密度は大気より大きく、初期運動量を失うと地表を流れ下り火砕流となる。一方、上昇過程で周囲の大気を取り込むと、火砕物の熱によって取り込んだ大気を膨張させ、噴煙柱として上昇を続ける。噴煙柱はその密度が大気密度と釣り合う浮力中立高度に達すると上昇をやめ、傘型噴煙として水平方向に拡大する。噴出条件が与えられた時、噴煙は火砕流となるか噴煙柱となるか（火砕流発生条件）、どの高度まで噴煙柱が達するか（噴煙高度）が火山学上のみならず防災上もっとも重要な問題のひとつである。

火砕流発生条件と噴煙高度は主に火口での噴出率に依存するが、火口の形状にも依存する可能性が指摘されてきた[1, 2]。火口形状が異なると、乱流による大気の混合効率が変わり、その結果、火砕流発生条件と噴煙高度も変化する可能性がある[3]。Suzuki and Koyaguchi [4]は、火口半径が大きい場合、火口付近に radially suspended flow (RSF) と呼ばれる噴水構造ができ、それが噴煙の安定性に強く影響することを数値計算によって示した。火口形状が噴煙ダイナミクスに与える影響を理解するためには、RSF のような3次元構造を捉えた上で噴煙柱レジームと火砕流レジームを含む広いパラメータ空間での解析が必要となる。

2. 手法・計算条件

噴煙の放出から乱流による大気の混合・噴煙柱もしくは火砕流の発生までを直接再現することを目的に、Suzuki et al [5]で提案された疑似ガスモデルを用いた。このモデルでは、火砕物とガス成分は瞬時に平衡状態に

なるとした理想気体近似を用いている。火砕物の噴煙からの分離や地表への堆積を無視したこのようなモデルは、本研究のような流体力学的な性質を捉える上で効率的に計算することができる。また、この理想気体近似によって、圧縮性ナビエ・ストークス方程式を解くための一般的な数値解法を適用できる。

噴出率を固定し、火口形状のみを変化させた噴出条件を与えた。火口形状は円形もしくは矩形とし、アスペクト比 $AR = L_{max}/L_{min}$ で定義した。ここに、 L_{max} と L_{min} は火口における最大長さ（長辺）と最小長さ（短辺）である。円形の場合は $AR = 1$ となる。噴出率 (MFR: Mass Flow Rate) が 10^9 kg/s の場合では、アスペクト比が1 (Run 1), 10 (Run 2), 91 (Run 3), 200 (Run 4) の4つの計算を行った。また、噴出率が $10^{9.5}$ kg/s の場合には、アスペクト比が1 (Run 5) と 111 (Run 6) の2つの計算を行った。噴出速度 256 m/s、初期温度 1053 K、初期密度 3.5 kg/m³ は共通の値を用いた。火口での噴出条件は時間によって変化しない。平坦な地表を仮定し、標準的な熱帯大気の成層構造を初期条件として与えた。計算条件を表1に示す。

表1 計算条件

Run	MFR (kg s ⁻¹)	L_{max} (km)	L_{min} (km)	AR L_{max}/L_{min}
1	10^9	1.2	1.2	1
2	10^9	3.4	0.33	10
3	10^9	10	0.11	91
4	10^9	15	0.075	200
5	$10^{9.5}$	2.2	2.2	1
6	$10^{9.5}$	20	0.18	111

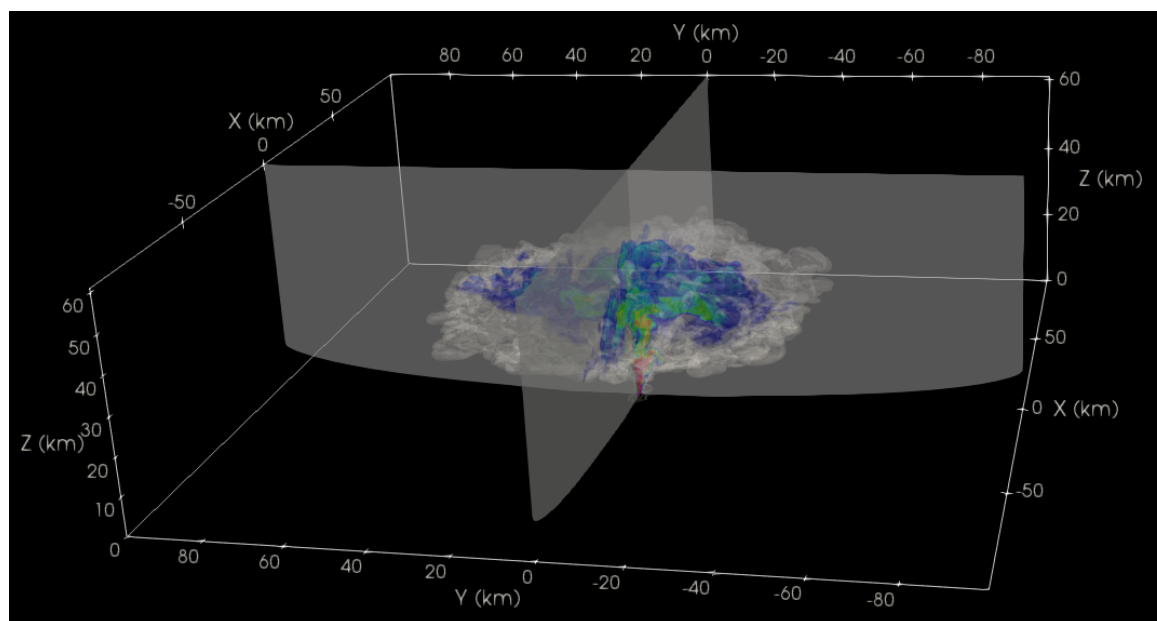


図1 火山噴煙の3次元シミュレーション結果(Run 1)。噴火開始後800秒における噴出物の質量分率が0.2wt%の等値面と、火口を含む直行する2断面における噴出率の質量分率分布を示す。

3. 計算結果・議論

シミュレーションの結果、火口形状のアスペクト比が噴煙の流れのパターンや噴煙高度・火砕流発生条件に影響を与えることが観察された。図1にRun 1の計算で得られた噴煙の3次元構造を示す。火口から噴出した噴煙は高度30km程度まで達し、水平方向に拡大して傘型噴煙を形成した。

噴出率が 10^9 kg/sの場合、火口形状に関わらず安定した噴煙柱が形成した(図2a-d)。アスペクト比が小さい場合(Run 1, 2)、火口近傍に噴出物の高濃度領域からなる噴水構造(RSF)が形成した(図2a, b)。RSFの最上部付近(~5 km)で周囲の大気と急激に混合し、噴出物の質量分率は不連続に減少した。一方、アスペクト比が大きい場合(Run 3, 4)、RSFは見られず、噴煙の質量分率は高さとともに徐々に減少した(図2c, d)。

RSFレジームに属するRun 1, 2とnon-RSFレジームに属するRun 3, 4では、アスペクト比に対する噴煙柱上部での噴出物質量分率の応答が異なった。RSFレジームでは、アスペクト比の増加とともに噴煙柱上部での噴出物濃度は増加した(図2aとbの比較)。一方、non-RSFレジームでは、アスペクト比の増加とともに噴煙柱上部での噴出物濃度は減少した(図2cとdの比較)。また、アスペクト比増加にともなうRSFレジームからnon-RSFレジームへの遷移では、噴煙柱上部の噴出物濃度は大きく増加した(図2bとcの比較)。

噴煙柱上部の噴出物濃度の違いは、噴煙柱高度にも反映される(図3)。RSFレジームでは、アスペクト比に従い噴煙高度は増加する。一方non-RSFレジームでは、アスペクト比の増加とともに噴煙高度は低下する。また、アスペクト比増加に伴うRSFレジームからnon-RSFレジームへの遷移で、噴煙高度が増加した。これらの噴煙濃度と噴煙高度の相関は、大気の混合が少ないほど

噴煙がそれらを上空に運搬するためのエネルギーが少なく済む、と解釈できる。アスペクト比に対する噴煙柱上部の噴出物濃度と噴煙高度の応答が、RSF/non-RSFレジームで正反対であることは、それぞれのレジームでの乱流混合のメカニズムが異なることを示唆している。

噴出率が $10^{9.5}$ kg/sで円形火口からの噴出の場合、噴出率 10^9 kg/sの場合と異なり噴煙柱は部分的に崩壊して火砕流を発生させた(図2e)。火口付近にRSFが形成し、大部分の噴出物は大気と混合して軽くなり、噴煙柱として上昇を続けた。RSFの一部噴煙は十分な大気と混合することができず、重いまま火砕流として地表に落下した。火砕流は小規模のため、その流下過程で大気を取り込み再び上昇した。噴出率が $10^{9.5}$ kg/sであっても火口が高アスペクト比の場合(Run 6; $AR = 111$)、RSFは形成されず、すべての噴出物が噴煙柱として上昇した。

以上の結果は、アスペクト比はRSFの形成を支配し、火砕流の発生条件にも影響することを示す。アスペクト比が大きい場合、火口の最小長さスケール L_{min} が小さくなる。 L_{min} が小さいと、中心軸付近の高濃度領域が噴煙・大気の境界層で簡単に侵食され、全体が浮力を得ることになる。その結果、より安定的な噴煙柱となると説明できる。より定量的に理解するためには、図4に示すようなRSFレジームとnon-RSFレジームの全く異なる流れの構造を、渦構造も含めてさらに解析することが必要となる。

謝辞

本報告書はSuzuki et al. [6]の研究に基づく。本研究の一部は、科学研究補助費(課題番号25750142, 17K01323)と次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの補助を受けた。

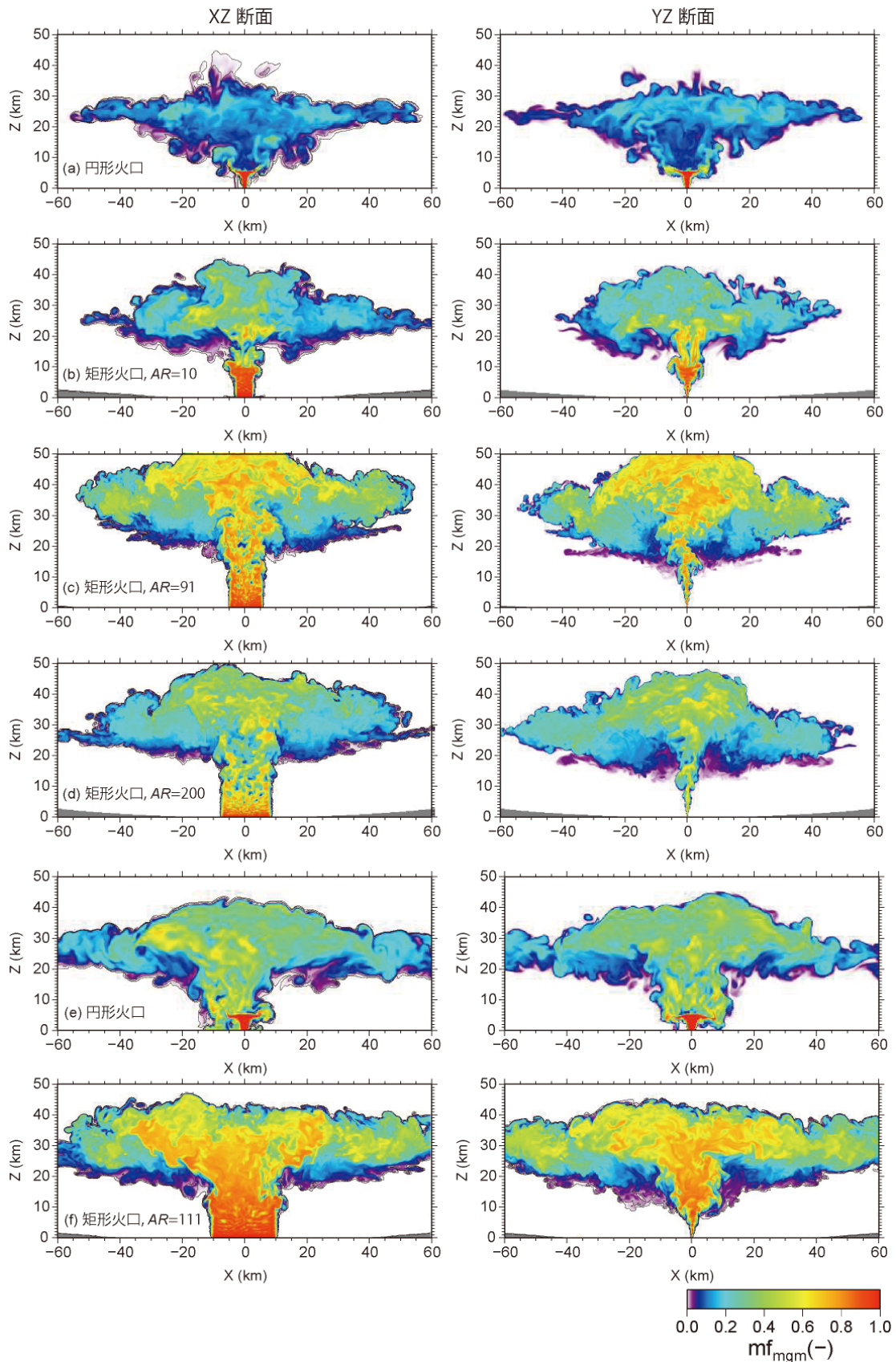


図2 噴出を 10^9 kg/s に固定した場合 (a-d) と $10^{0.5}$ kg/s に固定した場合 (e, f) の、火口形状を変えた火山噴煙の3次元シミュレーション結果。噴火開始800秒後におけるXZ断面(左列)とYZ断面(右列)での噴出物の質量分率分布。

文献

- [1] L. S. Glaze, S. M. Baloga, and J. Wimert, “Explosive volcanic eruptions from linear vents on Earth, Venus, and Mars: Comparisons with circular vent eruptions”, *J. Geophys. Res.*, 116, E01011, (2011).
- [2] A. W. Woods, “A model of the plumes above basaltic fissure eruptions”, *Geophys. Res. Lett.*, 20(12), 1115-1118, (1993).
- [3] 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.*, 221-222, 1-13, (2012).
- [4] 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.*, 110, B08201, (2005).
- [5] A. Costa, Y. J. Suzuki, and T. Koyaguchi, “Understanding the plume dynamics of explosive super-eruptions”, *Nature Communications*, 9:654, (2018).
- [6] Y. J. Suzuki, A. Costa, and T. Koyaguchi, “Control of vent geometry on the fluid dynamics of volcanic plumes: insights from numerical simulations”, *Geophys. Res. Lett.*, submitted.

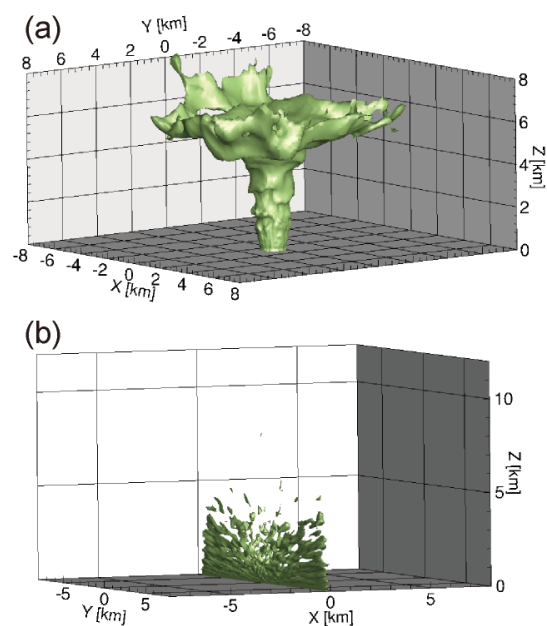


図4 円形火口(a)と矩形火口(b)から噴出した噴煙の高濃度部分。噴出物の質量分率が80w%の等値面。

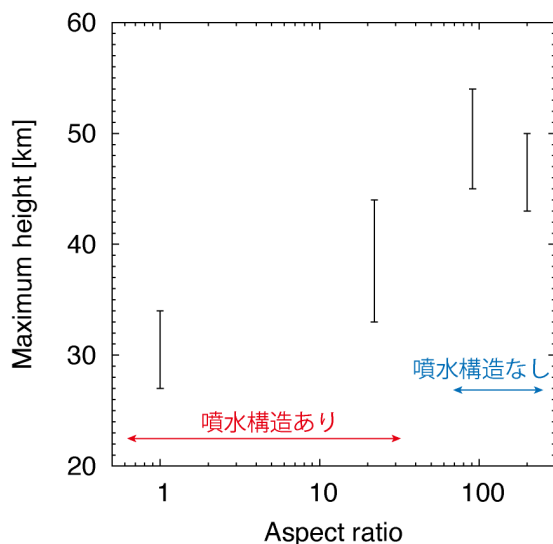


図3 火口のアスペクト比に対する噴煙の最高高度。噴出率 10^9 kg/s の計算シリーズ (Run 1-4)。

Control of Vent Geometry on the Fluid Dynamics of Volcanic Plumes

Project Representative

Yujiro Suzuki

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Author

Yujiro Suzuki

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Explosive volcanic eruptions eject hot mixtures of gas and ash, forming eruption clouds. Eruption clouds can either become buoyant and rise upward as volcanic plumes, or flow downward along the ground, resulting in devastating pyroclastic flows. Understanding the dynamics of eruption clouds is an important focus of volcanology research and hazard assessment. We present numerical simulations of eruption clouds using a three-dimensional numerical model to investigate the effects of volcanic vent geometry on plume stability and height. Our simulation results indicate that plume height depends on the shape of the volcanic vent and can have different dynamics even for the same eruption intensity. The efficiency of the mixing inside the cloud largely controls the critical conditions for the generation of pyroclastic flows; above a critical mass flow rate, clouds ejected from circular vents can generate pyroclastic flows, whereas those ejected from thin fissure vents develop stable volcanic plumes.

Keywords : volcanic plume, vent geometry, plume height, column collapse condition

1. Introduction

Large explosive volcanic eruptions can produce Plinian-type buoyant plumes and/or pyroclastic flows. The hot mixture of volcanic gas and solid pyroclasts that is ejected from the vent entrains ambient air owing to turbulent mixing, significantly reducing its density because the mixed air is heated and expands. When the erupted mixture entrains a small amount of air, the eruption cloud remains heavier than the ambient air and therefore collapses, resulting in pyroclastic flows. In contrast, when the erupted mixture entrains a large amount of ambient air, the eruption cloud becomes lighter than the surrounding atmosphere and rises, developing a buoyant plume. To estimate plume heights and stability is one of the central issues in volcanology.

The dynamics of volcanic plume can be affected by geometry of volcanic vent [1,2]. In particular, when the vent radius is large, the dense unmixed part of eruption cloud can generate “fountain-like structure”, known as radially suspended flow (RSF), and its flow structure largely changes stability of eruption column [3]. To understand the effects of vent geometry on plume dynamics, we aim to directly simulate volcanic plumes using a direct 3D numerical model.

2. Method and Simulation Inputs

we numerically simulated circular and fissure vents with different aspect ratios. To quantify the effects of vent geometry, we introduced a dimensionless parameter: the aspect ratio of the vent, $AR = L_{\max}/L_{\min}$, where L_{\max} and L_{\min} are the fissure length and width, respectively. We employed a pseudo-gas model in which the solid pyroclasts were assumed to be well-coupled with the gas phases [4]. The numerical model was based on the time-dependent solution of Navier-Stokes equations for compressible flows.

We focused on two eruption intensities with parameters close to the critical condition required for column collapse [5]. The first eruption type had a mass flow rate (MFR) of 10^9 kg s^{-1} , and the second had an MFR of $10^{9.5} \text{ kg s}^{-1}$. Circular and fissure vent geometries of different dimensions were considered, and the length of the fissure was varied. For fixed vent geometry, exit velocity, and magmatic properties, the vent radii and fissure widths can be determined for a given MFR.

3. Results

The simulation results show that the flow patterns of volcanic plumes are controlled by the volcanic vent geometry. when the MFR was set as 10^9 kg s^{-1} , the eruption clouds developed stable columns, and did not produce pyroclastic flows (Fig. 1), regardless of the vent geometry. The plumes from circular vents ($AR=1$) were associated with highly concentrated flow of the erupted mixture above the vents, called as RSF. The large vortices at the top of the RSF entrained a significant amount of ambient air, and the mass fraction of the erupted mixture was significantly reduced in this region. For high-aspect-ratio fissure vents ($AR = 91$ and 200), a sheet-like buoyant flow developed, and none RSF was observed (Fig. 1c and d).

When the MFR is set at $10^{9.5} \text{ kg s}^{-1}$, the volcanic plume ejected from a circular vent was less stable than those with an MFR value of 10^9 kg s^{-1} (Fig. 1e). In this case, a small portion of the ejected mixture was seen to collapse from the top of the RSF, falling to the ground. In contrast, the volcanic plumes from vents with higher aspect ratios (i.e., the 20-km-long fissure; $AR=111$) were more stable and did not develop RSF structures or pyroclastic flows (Fig. 1g).

Acknowledgement

This report is based on the work by Suzuki et al. [6]. This study was partially supported by KAKENHI (Grant No. 25750142 and 17K01323) and MEXT “Integrated Program for Next Generation Volcano Research and Human Resource Development”. Figure 1 was created using the Generic Mapping Tools (GMT) software package.

References

- [1] L. S. Glaze, S. M. Baloga, and J. Wimert, “Explosive volcanic eruptions from linear vents on Earth, Venus, and Mars: Comparisons with circular vent eruptions”, *J. Geophys. Res.*, 116, E01011, 2011.
- [2] A. W. Woods, “A model of the plumes above basaltic fissure eruptions”, *Geophys. Res. Lett.*, 20(12), 1115–1118, 1993.
- [3] 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.*, 221–222, 1–13, 2012.

- [4] 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.*, 110, B08201, 2005.
- [5] A. Costa, Y. J. Suzuki, and T. Koyaguchi, “Understanding the plume dynamics of explosive super-eruptions”, *Nature Communications*, 9:654, 2018.
- [6] Y. J. Suzuki, A. Costa, and T. Koyaguchi, “Control of vent geometry on the fluid dynamics of volcanic plumes: insights from numerical simulations”, *Geophys. Res. Lett.*, submitted.

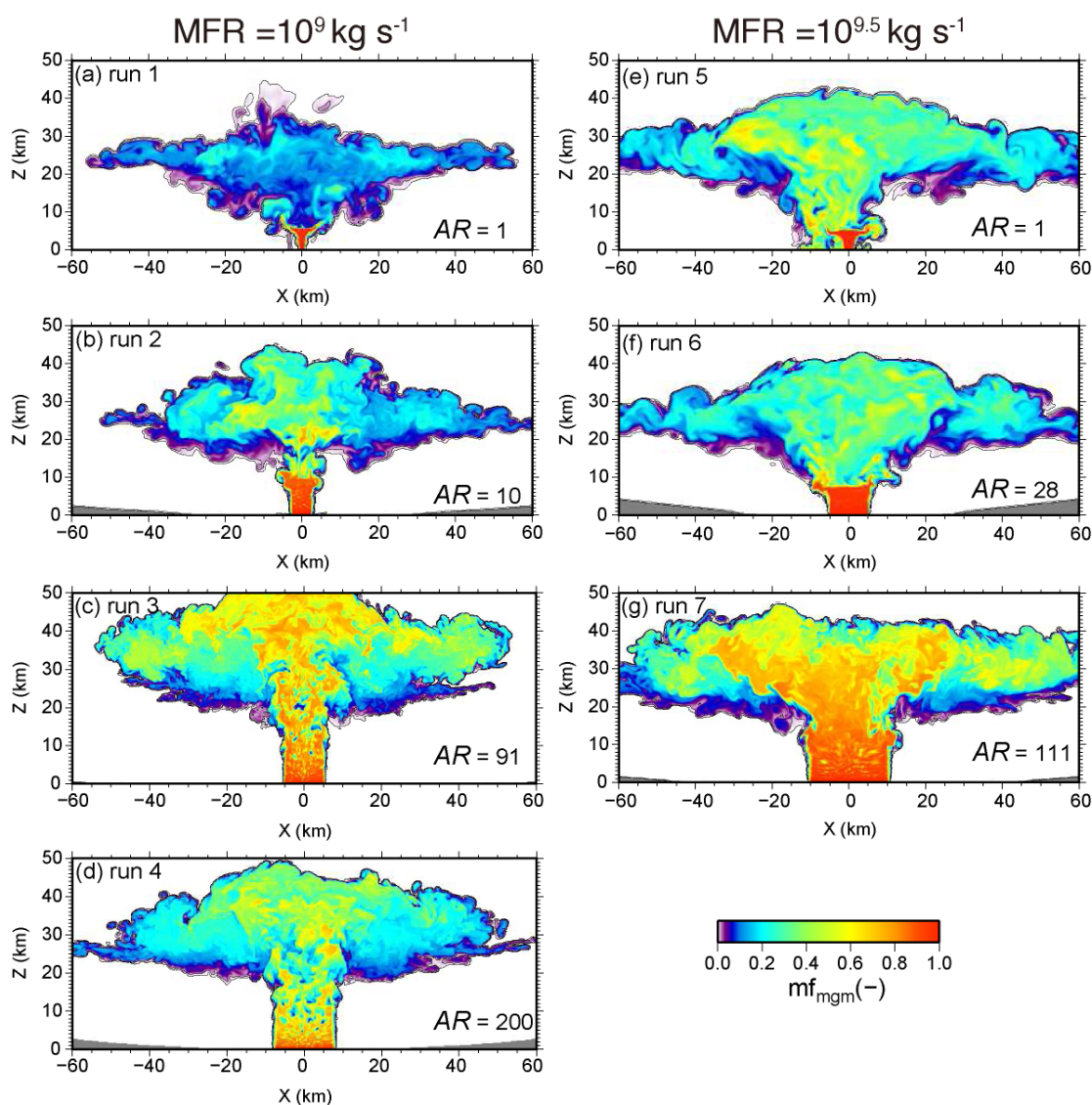


Fig 1. Simulation results for plumes with two Mass Flow Rates (a–d: 10^9 kg s^{-1} , e–g: $10^{9.5} \text{ kg s}^{-1}$) and varied vent geometry (a, e: circular vent, b–d, f, g: fissure vent). The panels show vertical cross-sections ($y = 0 \text{ km}$) of the mass fraction of the erupted mixture (mf_{mgm}) at $t = 800 \text{ s}$.