

噴煙シミュレーションによるインドネシア・ケルト火山 2014 年噴火の噴煙放出条件の決定

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噴煙の上昇や拡大が観測され、それらの観測値から噴火の強度を正確に見積もることが火山噴火ダイナミクスの理解と噴火推移予測につながる。本研究では、精密な観測データが得られているインドネシア・ケルト火山の2014年2月13日噴火について、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、火口での噴煙放出条件を決定した。噴出条件を変えたパラメータスタディを行った結果、噴煙の最高高度と水平拡大高度からは噴出率を $2-4 \times 10^7 \text{kg/s}$ とした場合に観測データを説明できることが分かった。また、噴煙の構造からは噴出率が $3-4 \times 10^8 \text{kg/s}$ と推定され、水平に拡大する噴煙の面積からは $7 \times 10^7 - 1 \times 10^8 \text{kg/s}$ と推定された。これらの噴出率推定値は、野外調査で見積もられた堆積物総量を噴火継続時間で割った推定値と整合的である。シミュレーション結果と比較する観測値によって噴出率の推定値に数倍のばらつきはあるが、3次元モデルを用いた放出条件の推定方法は、オーダーで変化する火山噴火強度の決定に有効であることを示した。

キーワード：火山噴火、噴煙、流体力学モデル、火山防災

1. はじめに

爆発的な火山噴火では、「噴煙柱」と呼ばれる上昇プルームと「傘型噴煙」と呼ばれる水平拡大する重力流の形成が特徴的に見られる。火口から破碎したマグマ（火砕物：火山灰・軽石）と火山ガスの混合物が高温・高速の状態ですべて噴出する。この噴出物は上昇過程で周囲の空気を取り込み、それらを熱膨張させる。その結果、噴煙と呼ばれる噴出物と空気の混合物は浮力を得て高層大気まで上昇する。噴煙密度が成層大気と釣り合う「浮力中立高度」に達すると上昇は弱まり、水平方向へと拡大し、傘型噴煙を形成する。

火山噴火ダイナミクスの解明には、限られた観測データから火口での噴煙放出条件を決定することが鍵となる。特に爆発的火山噴火においては、噴煙を直接観察することができるため、その観測データからいかにして噴煙放出条件を求めると火山学上の重要な問題となっている[1]。近年では、ひまわり8・9号などの人工衛星によって噴煙の上昇や拡大が、時間・空間的に高解像度で観測されるようになった。また、地上からの気象レーダー観測で、噴煙内部の構造が把握できるようになってきている。このような高精度データと火口での条件を定量的に結びつけるモデリング研究が必要である。

本研究では、これまでに開発した噴煙ダイナミクスの3次元流体力学モデルを用い、観測値から噴煙放出条件を定めることを試みた。そのため、精密な観測データが得られているインドネシア・ケルト火山の2014年2月13日噴火を例に、3次元シミュレーションを実行して噴出率を決定した。

2. 手法・計算条件

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擬似ガスモデル[2]を用いた。火砕物は非常に小さく、火砕物とガス成分（火山ガス・大気）は瞬時に動的・熱的に平衡状態になると仮定した。この仮定のもと、火砕物と気相の混合物は理想気体の状態方程式で表現することができる。噴出物・大気の混合比による噴煙の非線形な密度変化は、比熱と気体定数を混合比によって変化させることで再現した。

火山灰粒子の輸送・堆積を再現するために、トレーサー粒子を用いた。これらの粒子は、流体と同じ速度で噴出するが、その後流体と終端速度を相対速度としながら沈降していく。トレーサー粒子は周囲流体の影響を受けるが、トレーサー粒子から周囲流体への運動量・エネルギーの交換はないと仮定した。

差分化した流体の基礎方程式は、高速ジェットの数値計算で使われる Roe スキーム[3]を用い数値計算を行った。計算グリッドには一般座標系を用い、火口から離れるにしたがってサイズが増加するように設定した。地表には反射条件、上面・側面は自由流入・流出条件を課した。

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。 $1.0 \times 10^7 \text{kg/s}$ から $1.0 \times 10^8 \text{kg/s}$ の間の7パターンの噴出率を条件とした(表1)。噴出物の温度(1273K)、含水量(5wt%)、初期密度(2.89kg/m^3)、初速(173m/s)、圧力(1.0atm.)は全ての計算で共通の値を用いた。

3. 計算結果

噴出率を変えたパラメータスタディの結果、いずれの噴出率の場合でも、ほぼ鉛直に上昇する噴煙柱と水平に拡大する傘型噴煙が観察された (図1)。傘型噴煙は卓越する東風の影響を受け、西側に延びた。

噴出率によって噴煙構造は大きく異なった (図1)。Run 1と2では、ほぼ単一の層から構成される薄い傘型噴煙が高度17-18kmに形成したが(図1a,b)、Run 3と4では、

表1 計算条件

Run	MER (kg/s)	Vent radius (m)	Grid number
1	1.0×10^7	80	8.0×10^8
2	2.0×10^7	113	3.5×10^8
3	3.0×10^7	138	2.3×10^9
4	3.7×10^7	151	3.1×10^8
5	5.0×10^7	178	3.4×10^8
6	7.0×10^7	211	2.8×10^8
7	1.0×10^8	252	6.8×10^8

高度17-18kmの傘型噴煙に加えて高度30km程度に噴煙頂部から延びる水平拡大噴煙が形成した (図1c,d)。さらに噴出率が高いRun 5, 6, 7では、多層構造を持つ非常に分厚い傘型噴煙が形成した (図1e-g)。人工衛星観測は、火口から30km西の断面において2層からなる噴煙構造を示しており [4]、Run 3と4の結果が観測データと整合的である。

噴煙の最高高度も噴出率によって大きく異なった。噴煙頂部は強く振動し、その平均的な最高高度は、Run 1で20km程度、Run 2-4で25-30km、Run 5-7では30kmを超えた。人工衛星観測では、30km西の地点で26km程度であることが示されている [4]。従って、噴煙最高高度の観点から、Run 2-4が観測データを説明できる。

傘型噴煙の面積について数値計算結果と観測データを比較した (図2)。いずれの計算でも、傘型噴煙は噴火から1000秒程度までは急速に拡大し、徐々に拡大率は低下する。1000秒を過ぎると面積拡大率はほぼ一定になり、

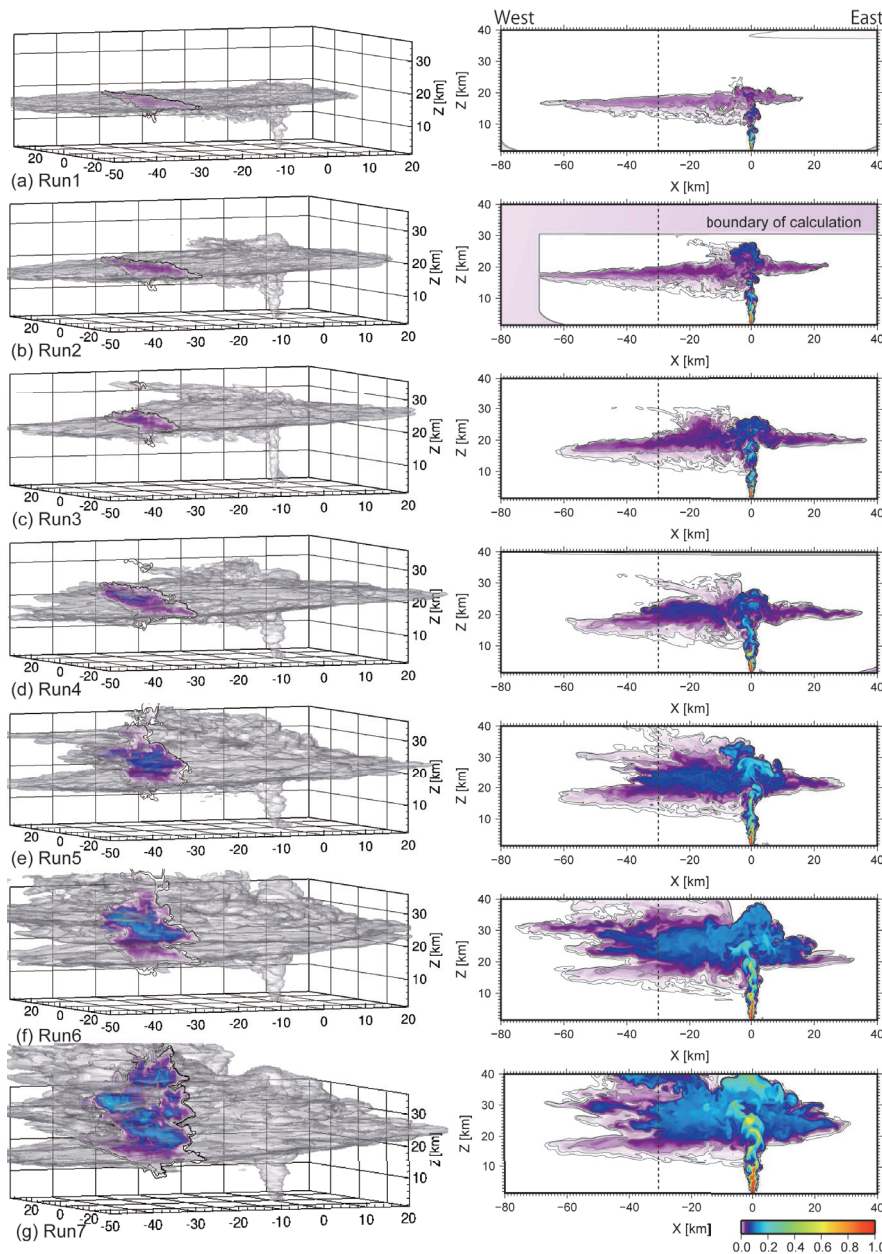


図1 ケルト火山噴火シミュレーションのパラメータスタディ結果 (Run 1-7)。噴火開始から1800秒後の結果;左図は噴出物の質量分率が0.02の等値面を、右図は火口を含む東西断面における噴出物の質量分率分布を表す。左図において、火口から西に30km離れた地点での南北断面分布をカラーマップで示す。右図のコンター線は噴出物の質量分率が 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} を表す。

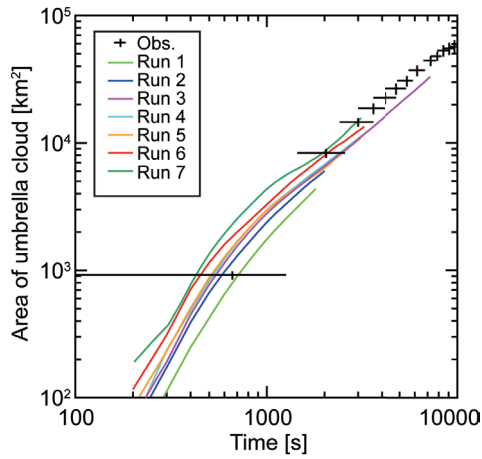


図2 Run 1-7 から得られた傘型噴煙面積の時間変化。観測データもプロットしている。

観測された拡大率とほぼ一致する。傘型噴煙面積の絶対値は、Run 1-5 の場合シミュレーション結果が観測値よりも小さく、Run 6 と 7 がほぼ一致した。

Run 3 から得られた傘型噴煙拡大の様子を図3 に示す。噴火から 50 分程度まではほぼ同心円状に拡大し、その後西側に伸びている様子が再現され、人工衛星画像とよく一致していることが分かる。

4. まとめ

3次元数値モデルを用い、ケルト火山2014年噴火に関する噴出率を変えたパラメータスタディを行った。その結果、噴煙構造からは $3-4 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ 、噴煙高度からは $2-4 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ 、傘型噴煙面積からは $7 \times 10^7 - 1 \times 10^8 \text{ kg s}^{-1}$ が観測値を説明できる噴出率であることが分かった。

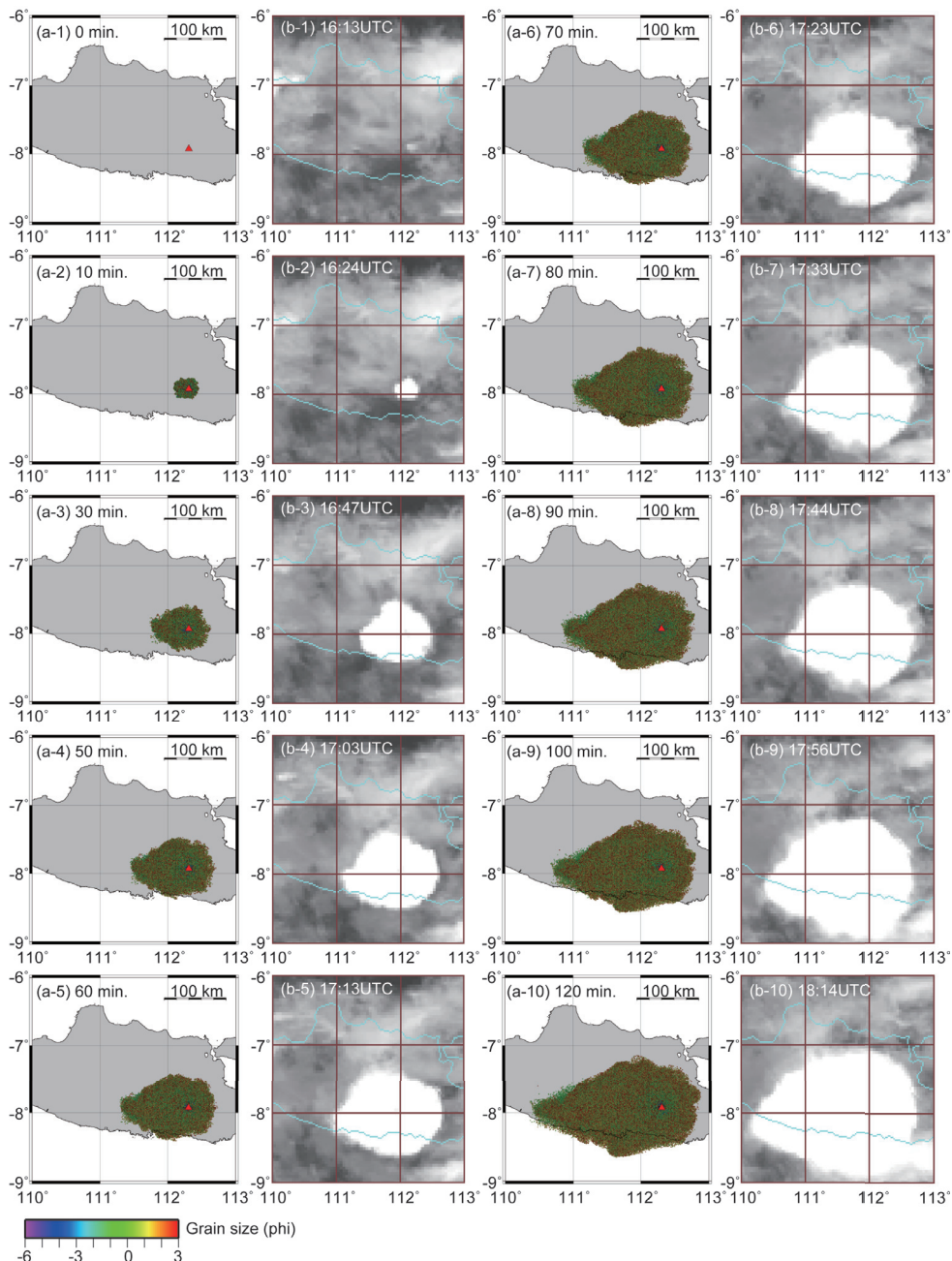


図3 Run 3 (噴出率 $3.7 \times 10^7 \text{ kg/s}$) のシミュレーション結果から得られた傘型噴煙拡大の様子。(a) シミュレーションによる大気中のトレーサー粒子分布。粒子の色は粒径を表す。(b) 人工衛星による可視光画像。人工衛星画像は気象研究所より提供を受けた。

た。これらの値は、噴火後の野外調査に基づいて見積もられた総噴出量 $3.3\text{--}6.6 \times 10^{11}\text{kg}$ [5] を噴火継続時間 2–2.5 時間で割った平均的な噴出率 $6.5 \pm 2.8 \times 10^7\text{kg s}^{-1}$ とおおよそ整合的である。噴煙構造、噴煙高度、傘型噴煙面積によって噴出率の推定値にばらつきが見られるが、計算上の仮定に関連すると考えられる。実際の噴火強度は一定ではなく、時間とともに変化した可能性が示唆される。また、擬似ガス近似を用いた本モデルでは捉えられない火山灰粒子沈降による、噴煙からの質量・運動量・エネルギー損失が影響している可能性も考えられる。本研究では、噴煙の 3 次元シミュレーション結果と観測データとの比較で噴煙の放出条件を推定できることを示した。

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。図 3 の人工衛星画像は気象研究所より提供を受けた。

文献

- [1] A. Costa, et al., “Results of the eruptive column model inter-comparison study,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol.326, pp.2–25, 2016.
- [2] 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.
- [3] P. L. Roe, “Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes,” *J. Comput. Phys.*, vol.43, no.2, 357–372, 1981.
- [4] N.I. Kristiansen, A.J. Prata, A. Stohl, S.A. Carn, “Stratospheric volcanic ash emission from the 13 February 2014 Kelud eruption,” *Geophys. Res. Lett.*, vol.42, no.2, pp.588–596, 2015.
- [5] F. Maeno, S. Nakada, M. Yoshimoto, T. Shimano, N. Hokanishi, A. Zaennudin, M. Iguchi, “A sequence of a plinian eruption preceded by dome destruction at Kelud volcano, Indonesia, on February 13, 2014, revealed from tephra fallout and pyroclastic density current deposits,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, in press.

Determination of the Mass Eruption Rate for the 2014 Mount Kelud Eruption Using 3D Simulations

Project Representative

Yujiro Suzuki Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Author

Yujiro Suzuki Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Using a three-dimensional fluid dynamic model for eruption cloud dynamics, we present numerical simulations of the development of a volcanic eruption column and umbrella cloud formed during the 13 February 2014 eruptions of Mount Kelud, Indonesia. We carried out a parametric study with different mass eruption rate (MER) at the vent. The model used in this study quantitatively reproduces the observed data and, in particular, the plume height and the horizontal expansion level and rate of the umbrella cloud. The simulation results suggest that on the basis of the plume height and structures and the horizontal expansion level of the umbrella cloud the mass eruption rate for the 2014 Kelud eruptions was $3 \times 10^7 - 4 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$. On the basis of the horizontal expansion rate of the umbrella cloud, on the other hand, the estimated MER was $7 \times 10^7 - 1 \times 10^8 \text{ kg s}^{-1}$. The difference between these two estimates implies the unsteadiness of eruption, the strong diffusion in the umbrella cloud, or the efficient entrainment of ambient air by eruption column. The present 3D model is applicable for the estimation of MER from observations.

Keywords: volcanic eruption, eruption cloud, turbulent mixing, volcanic hazard

1. Introduction

Explosive volcanic eruptions are characterized by the formation of an eruption column and umbrella cloud. In order to reconstruct or predict the progression of volcanic eruptions, estimations of eruption conditions at the vent from observable quantities such as plume heights have long been a major focus on research in volcanology [1]. In this study, we present 3D numerical simulations for the 2014 Kelud eruption. We aim to comprehensively explain the data obtained by various observations and to constrain the eruption conditions at the vent, in particular, the mass eruption rate (MER).

In Kelud volcano, Indonesia, a major Plinian eruption began at approximately 16:00 UTC on February 13 2014. The eruption had an estimated MER of $\sim 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ [2]. The eruption column reached $\sim 26 \text{ km}$ above sea level, and the umbrella cloud laterally spread as a gravity current at a height of 18–20 km. At the same time, the umbrella cloud was affected by an easterly wind and drifted.

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 1500 m. We used a combination of a pseudo-gas model for fluid motion and a Lagrangian model for particle motion [3]. We carried out seven simulations of eruption plumes with variable MER (Runs 1–7): 1.0×10^7 , 2.0×10^7 , 3.0×10^7 , 3.7×10^7 , 5.0×10^7 , 7.0×10^7 , and $1.0 \times 10^8 \text{ kg s}^{-1}$. The other parameters were kept fixed in all of the simulations.

3. Simulation Results and Comparison with the Observations

In all the runs, the eruption columns exceed 20 km high and the umbrella clouds show asymmetrical spreading; the radial lengths of the downwind umbrella clouds are longer than those of the upwind clouds (Fig. 1).

The results of Runs 1–4 show the horizontal spreading of the umbrella cloud at $\sim 18 \text{ km}$, whereas those of Runs 5–7 show thick layer of the umbrella cloud spreading above 20 km. The satellite measured its strongest signal in altitudes around 17–18 km, with the top of the umbrella cloud at 18–19 km [2]. The satellite measurements also indicated some higher spreading layers at 22–25 km. The results of Runs 3–7 show multiple layers of eruption cloud, whereas those of Runs 1 and 2 indicate only one layer at $\sim 18 \text{ km}$.

The satellite data revealed that some clouds reached a maximum height of $\sim 26 \text{ km}$. The maximum height in Run 1 is lower than the observed height, and those in Runs 5–7 exceed 30 km and are significantly higher than the observed height. The maximum height in Runs 2–4 are $\sim 25 \text{ km}$, which are consistent with the observations.

The area of the umbrella cloud can be estimated from the satellite observations. The areas of the umbrella clouds obtained from all the runs show the similar behavior as the observations. In detail, the results of Runs 6 and 7 seems more consistent with the observations, whereas those of Runs 1–5 are slightly smaller than the observations.

Through comparison, we conclude that the results of Runs 3 and 4 (MERs of 3.0×10^7 and $3.6 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$, respectively)

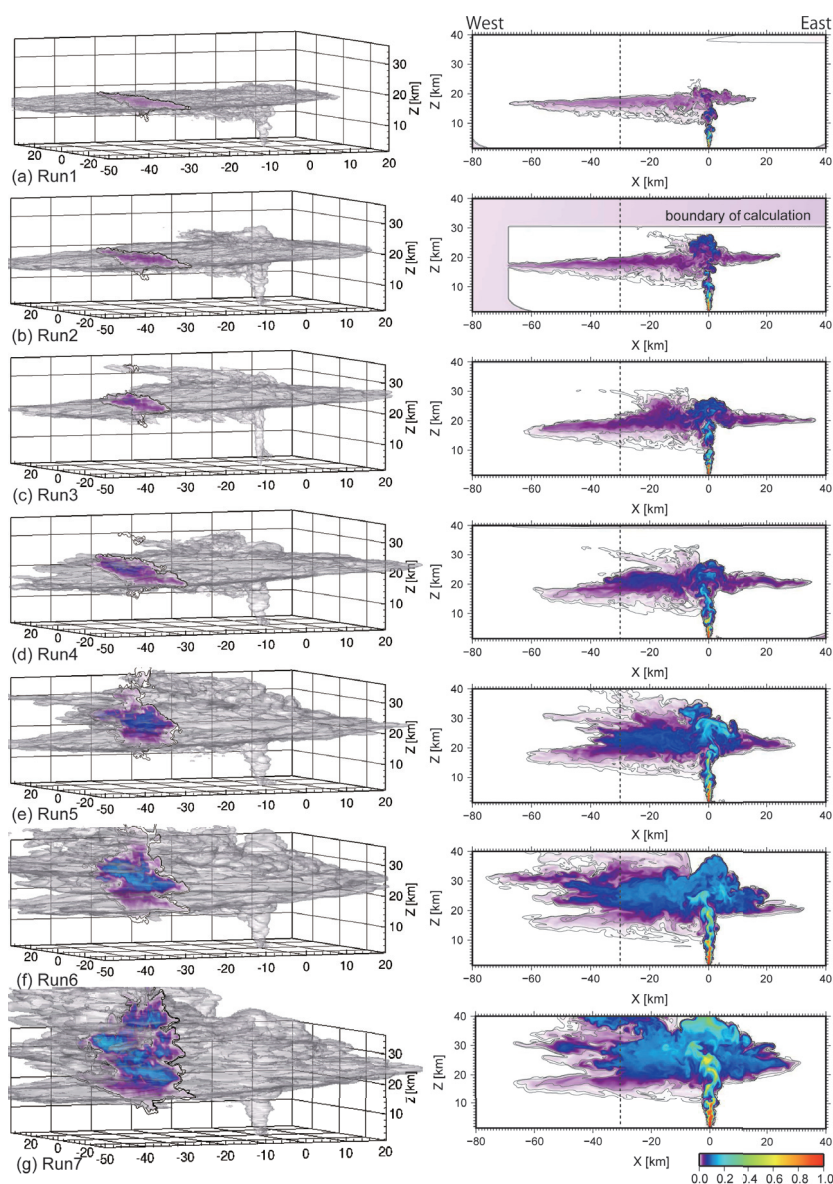


Fig. 1 Simulation results of Runs 1–7. Left column figures show iso-surfaces where the magma mass fraction is 0.02 at 1800 s from eruption initiation and their vertical cross-sections at $x = -30$ km. Right column figures show the vertical cross-sections of the mass fraction of the erupted material at $y = 0$ km.

explain the observed plume height, and the maximum spreading level of the umbrella cloud, whereas those of Runs 6 and 7 (MERs of 7.0×10^7 and 1.0×10^8 kg s^{-1} , respectively) explain the observed expansion rate of the umbrella cloud. The difference between two estimations implies the unsteadiness of the eruption, the strong diffusion in the atmosphere or the efficient entrainment of ambient air by eruption cloud. Although a systematic investigation of these effects will be required, the present method is useful for the estimation of MER from the observable data.

Acknowledgement

Part of this study was supported by KAKENHI (Nos. 24244069 and 25750142).

References

- [1] A. Costa, et al., “Results of the eruptive column model inter-comparison study,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol.326, pp.2–25, 2016.
- [2] N.I. Kristiansen, A.J. Prata, A. Stohl, S.A. Carn, “Stratospheric volcanic ash emission from the 13 February 2014 Kelud eruption,” *Geophys. Res. Lett.*, vol.42, no.2, pp.588–596, 2015.
- [3] Y. J. Suzuki and T. Koyaguchi, “3D numerical simulation of volcanic eruption clouds during the 2011 Shinmoe-dake eruptions,” *Earth Planets Space*, vol.65, pp.581–589, 2013.