

大気風の影響を含めた火山灰輸送シミュレーション

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

爆発的な火山噴火では、大気中に放出された火山灰が広範囲に分布し災害を引き起こす。火山灰の大気中での輸送過程と地表への堆積過程の理解することが防災上重要となる。本プロジェクトでは、噴煙ダイナミクスと大気風による火山灰輸送を再現する数値モデルを開発し、大規模シミュレーションを実施することで火山灰輸送過程の理解を目指している。大気と噴出物の2流体計算にトレーサー計算を組み合わせることで、噴煙ダイナミクスと火山灰輸送を同時に解くモデルをこれまでに開発してきた。昨年度は風がない場合のシミュレーションを実施し、火山灰粒子の基本的な振る舞いを再現した。今年度は比較的単純な風プロファイルをいくつか与えたシミュレーションを実行した。計算の結果、トレーサー粒子のサイズによって噴煙ダイナミクスと大気風の影響が異なる様子を捉えた。データを解析することで、トレーサー粒子が上昇から下降に転じる地点を決定した。この分布は火山灰粒子の落下開始地点と近似的に捉えることができ、気象モデル上で移流拡散計算をする場合の初期条件となる。

キーワード：火山噴火，火山灰，防災，固気混相流

1. はじめに

爆発的な火山噴火は多様な災害の原因となる。トンガ王国フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山の2022年1月15日の噴火では、噴火によって引き起こされた潮位変化が日本でも観測され、爆発的噴火の危険性が再認識された。最も広範囲に影響を及ぼす爆発的噴火の災害のひとつに火山灰の飛散と堆積が挙げられる。プリニー式噴火と呼ばれる連続的な爆発的噴火では、マグマの破片(火砕物)と火山ガスからなる混合物が火口から高速で噴出する。噴出物は乱流によって周囲の大気を取り込み、火砕物の熱で膨張させ浮力を獲得する。噴出物と大気が混合したものは噴煙と呼ばれ、上空数km～数10kmまで上昇する。火砕物は噴煙に運ばれ、噴煙から離脱すると大気中を降下する。火砕物は最終的に地表に落下して堆積する。

火砕物の大気中の分布と地表での堆積分布は、噴火の強度と大気風の風速に強く影響を受ける[1]。噴出率で代表される噴火強度が大きいかほど噴煙高度が高くなり、水平に拡大する噴煙(傘型噴煙)の拡大領域が広がる。その結果、火砕物は遠方まで運搬されて堆積分布も広がる。噴出率が非常に高い場合、噴煙は成層圏まで達するため、長期間に渡って上空に滞留する。大気風の火砕物分布に与える影響はより複雑になる。噴出率が同じであっても風速が大きくなるほど噴煙と大気の乱流混合が大きくなる。噴煙内に取り込まれる大気が多量になると、取り込んだ大気を上昇させるためのエネルギーが消費されるため、噴煙高度は低下する。その結果、火砕物の降下開始地点も低下する。一方、風速が大きくなるほど、噴煙から離脱した火砕物は遠方へと運搬される。このような火砕物の運搬と堆積の複雑な挙動を定量的に理解することが防災上求められている。

火砕物の運搬・堆積を再現するためには数値シミュレーションが非常に有効である。噴煙と大気の乱流混合は

3次元構造が強く支配する[2]。噴煙柱や傘型噴煙、風でたなびく噴煙は3次的に広がりを持ち、時々刻々変形する。また、噴煙の流れは火山ガス・火砕物・大気からなる固気混相流である。本プロジェクトでは、このような多次元・多相系の噴煙ダイナミクス・火砕物輸送の理解を最終的な目的としている。これまでに、噴煙ダイナミクスの3次元流体モデルを開発し、そこにトレーサー粒子を導入することで火砕物の運搬・堆積までを再現できるようになった[3]。特に、近年の代表的な噴火であるフィリピン・ピナツボ火山1991年噴火、新燃岳2011年噴火、インドネシア・ケルウト火山2014年噴火の噴煙ダイナミクスの再現に成功してきた[3, 4, 5]。開発したこのモデルを使用し、様々な噴出率や大気風条件の場合について火砕物の大気中での分布と地表での堆積分布を再現することを目的とした。

2. 手法・計算条件

数値計算にはSuzuki et al. [2]の流体計算にトレーサー粒子計算を組み込んだSuzuki and Koyaguchi [3]のモデルを使用した。平坦な地表にある円形の火口から、火山ガスと火砕物から構成される疑似流体を大気中に噴出することを想定した。噴出物と大気はそれぞれ異なる気体定数と比熱を持つ流体である。それらが混合した時、混合比に応じて気体定数と比熱を変化させる。それにより、噴煙密度の非線形変化を再現した。圧縮性 Euler 方程式で表される基礎方程式は、有限差分法で離散化し、Roe法[6]で流束計算を行った。空間積分にMUSCL法[7]を適用することで空間3次精度、時間積分に時間分割法を適用することで時間2次精度の計算をした。

トレーサー粒子は火口から噴出流体と同じ速度で1秒毎に放出させた。トレーサー粒子は球形を仮定し、その直径は 2^8mm (8ϕ)から 2^0mm (1ϕ)までの範囲でランダムに

与えた。トレーサー粒子は流体と終端速度を持って相対的に移動する。トレーサー粒子が地表に達した時点でその粒子の計算を停止し、そこを堆積地点とした。

噴煙ダイナミクスを定量的に正しく計算するためには、十分な分解能が必要となる。空間分割には一般座標系を用い、火口近傍では火口直径の $1/32\sim 1/16$ のグリッドサイズとし、火口から離れるにしたがってそのサイズが大きくなるように設定した。ただし、最大グリッドサイズは火口半径として、グリッドサイズの最大/最小の比率に制限をかけた。時間ステップは各空間グリッドサイズとそこでの流速+音速を用いて CFL 条件から算出した。

計算の初期条件は、標準的な中緯度大気または熱帯大気の密度・温度・圧力の鉛直分布を与えた。水平方向には一様と仮定した。大気風も初期条件として与えた。高さ方向に一様に 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s の場合を想定した。

地表面、火口、その他の側面と上面について異なる境界条件を与えた。地表面は滑り壁の条件とした。地表面のうち火口の内側では、圧力・密度・温度・速度を固定した流入条件を与えた。圧力は大気圧とした。噴出速度は噴出物の音速もしくは音速の2倍とした。噴出物の音速は、火山ガスと火砕物の質量比・マグマ温度から見積もられる。噴出速度と噴出物の物理量を固定して噴出率を変えた場合、それにともない火口半径が変化する。

マグマ中に含まれる火砕物と火山ガス（水蒸気）の質量分率はそれぞれ 0.96, 0.04 とし、マグマ温度を 1000 K に設定した。噴出圧力は大気圧 1.013×10^5 Pa とした。大気と火山ガスの気体定数はそれぞれ 287 J/(K・kg), 462 J/(K・kg) である。また、大気と火山ガスの定積比熱は 1348 J/(K・kg), 1100 J/(K・kg) とした。噴出率は 4×10^6 kg/s とした。

3. 計算結果

噴煙ダイナミクスと大気風によってトレーサー粒子が運搬・堆積する様子を再現することができた（図1）。風速 20 m/s の場合、噴煙は上昇過程で風の影響を受けてたなびいた。噴出直後の噴煙密度は大気密度より大きい、大気と混合すると周囲大気よりも軽くなって上昇した（図1b）。高度 8 km 程度で噴煙と大気の密度は釣り合う（密度中立点）が、余剰の運動量によってさらに上昇して最高高度 12 km まで達した。その後、噴煙は密度中立点である 8 km 近傍で水平方向に拡大した。水平に伸びる噴煙は、噴火開始から 1600 秒後には風下方向に水平距離 43 km まで達した。

計算したトレーサー粒子は、各時間での位置・速度の情報を保持している。トレーサー粒子は噴出した後、噴煙の浮力によって上空高くまで上昇する。噴煙の上昇が弱まるとトレーサー粒子は降下に転じる。粒子は噴煙から離脱すると大気中を風に流されながら地表へと降下した。鉛直速度が上昇から降下に転じた時点が火砕物の降下開始地点とみなせる。そのような降下開始地点を粒子サイズ毎にプロットした（図2）。 -4ϕ (16 mm 径) より大きな粒子は噴煙柱の途中より降下を開始した。 -2ϕ (4 mm 径)

$\sim 0\phi$ (1 mm 径) までの粒子は、噴煙柱上部まで達するものもあり噴煙柱の様々な高度から降下した。さらに細かい粒子は水平に拡大する噴煙にも存在し、そこから降下した。 8ϕ (4 μ m 径) など非常に細かい粒子は噴煙からほとんど離脱することなく上空に漂った。

図2で得られた降下開始地点に関し、500 秒間の粒子位置データをスタックし頻度分布を取ることでそのピーク高度が粒子サイズ毎に変化する様子を捉えた（図3）。 -6ϕ (64 mm 径) の非常に粗粒のものは、噴煙の下部からしか降下しない。粒径が大きくなるほどその降下開始地点は高い位置になっていることが分かる。細かい粒子の降下開始地点は水平拡大噴煙の高度 (8 km) に一致するが、粒径が小さいほどその分布幅も小さくなった。これらの分布は、同じ粒径であっても風がない場合[8]と異なることが見えてきた。

4. まとめ

トレーサー粒子を含めた流体モデルを用い、風がある場での噴煙挙動と火砕物輸送・堆積のシミュレーションを行った。その結果、火砕物が噴煙ダイナミクスと大気風の影響を受けて運搬され、堆積する様子を再現することができた。いくつかの風速の条件について計算を行うことで、火砕物が降下開始する地点についての基礎データを取得した。昨年度行った風がない条件での計算結果と比較することで火砕物輸送・堆積に与える風の影響について定量化することが今後できる。

謝辞

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。

文献

- [1] S. Carey, and R. S. J. Sparks, “Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns”, Bull. Volcanol., vol. 48, pp.109-125, (1986).
- [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] 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).
- [4] Y. J. Suzuki, and T. Koyaguchi, “A three-dimensional numerical simulation of spreading umbrella clouds”, J. Geophys. Res., vol.114, B03209, (2009).
- [5] Y. J. Suzuki, and M. Iguchi, “Determination of the mass eruption rate for the 2014 Mount Kelud

eruption using three-dimensional simulations of volcanic plumes”, J. Volcanol. Geotherm. Res., vol.382, 42-49, (2019).

[6] P. L. Roe, “Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes, J. Comput. Phys., vol.43, pp.357-372, (1981).

[7] B. van Leer, “Towards the ultimate conservative difference scheme III. Upstream-centered finite-difference schemes for ideal compressible flow”, J. Comput. Phys., vol.23, pp.263-275, (1977).

[8] 鈴木雄治郎, “火山噴火に伴う火山灰輸送シミュレ

ーション”, Annual Report of the Earth Simulator, (2021).

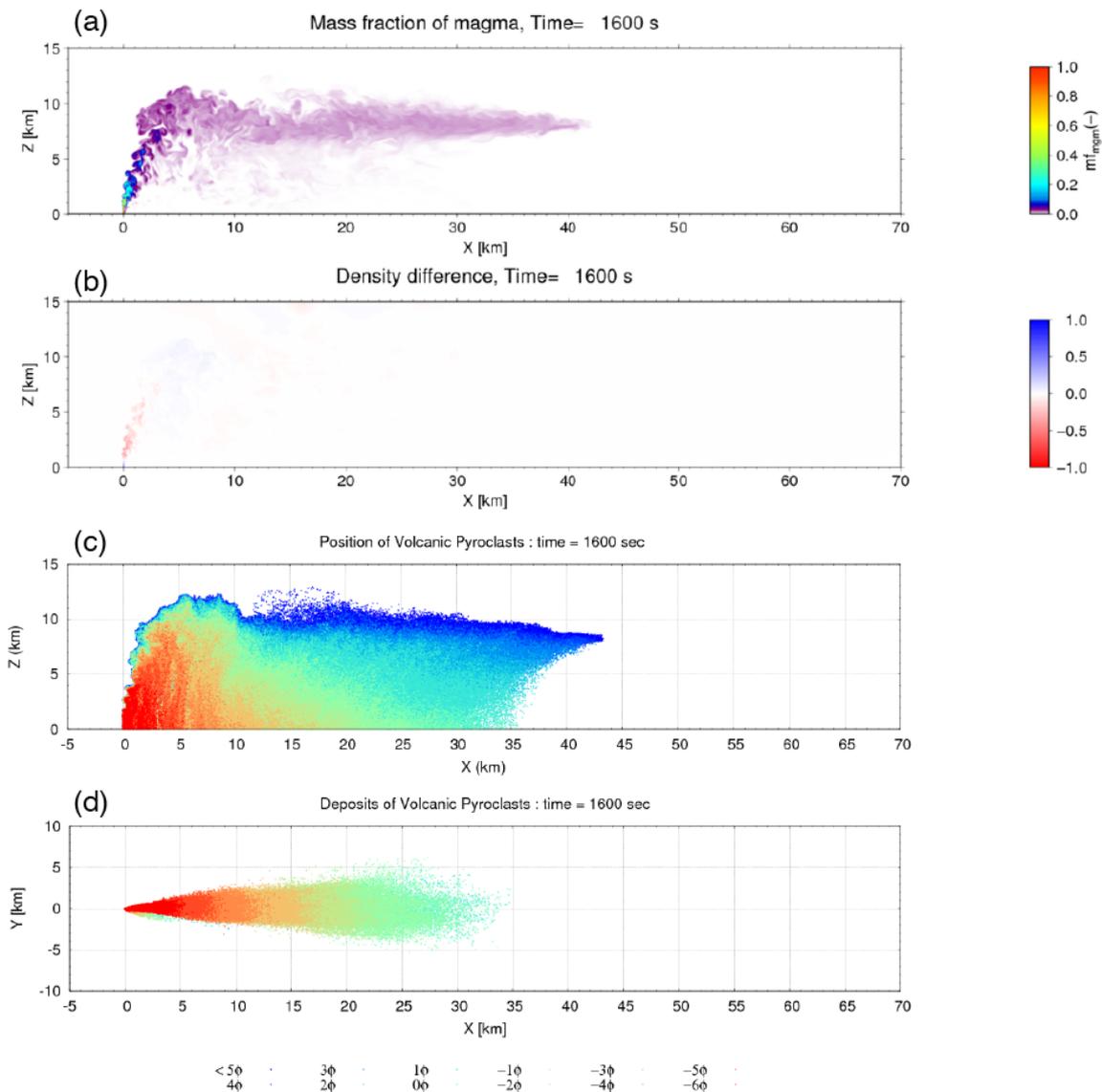


図1：火山噴煙モデルSK-3Dの計算結果。風速20 m/sのもとで噴出率が 4×10^6 kg/sの場合の、噴火開始から1600秒後の (a) 火口を含む断面における噴出物濃度分布と (b) 成層大気との密度差, (c) $x-z$ 断面に投影した大気中のトレーサ粒子分布, (d) 地表におけるトレーサ粒子の堆積分布. (c)と(d)の色は $\phi = -\log_2 D$ (D は粒子直径)で定義される ϕ スケールで表した粒子サイズ。

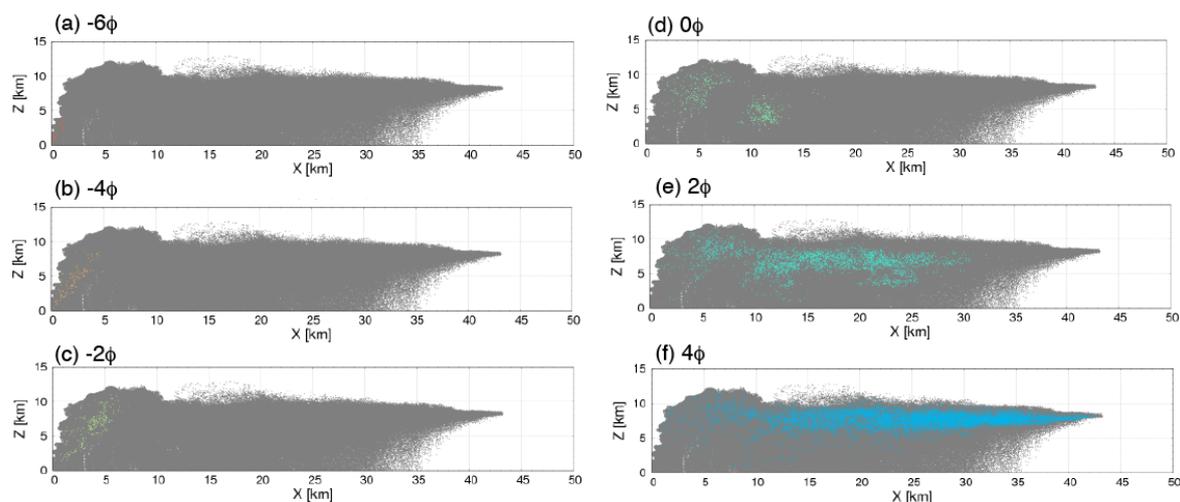


図2：図1cのトレーサー粒子のうち上昇から降下に転じた粒子の空間分布。灰色プロットは全粒子を示し、色付き粒子が上昇から降下に転じた粒子を表す。(a) -6ϕ 、(b) -4ϕ 、(c) -2ϕ 、(d) 0ϕ 、(e) 2ϕ 、(f) 4ϕ 。

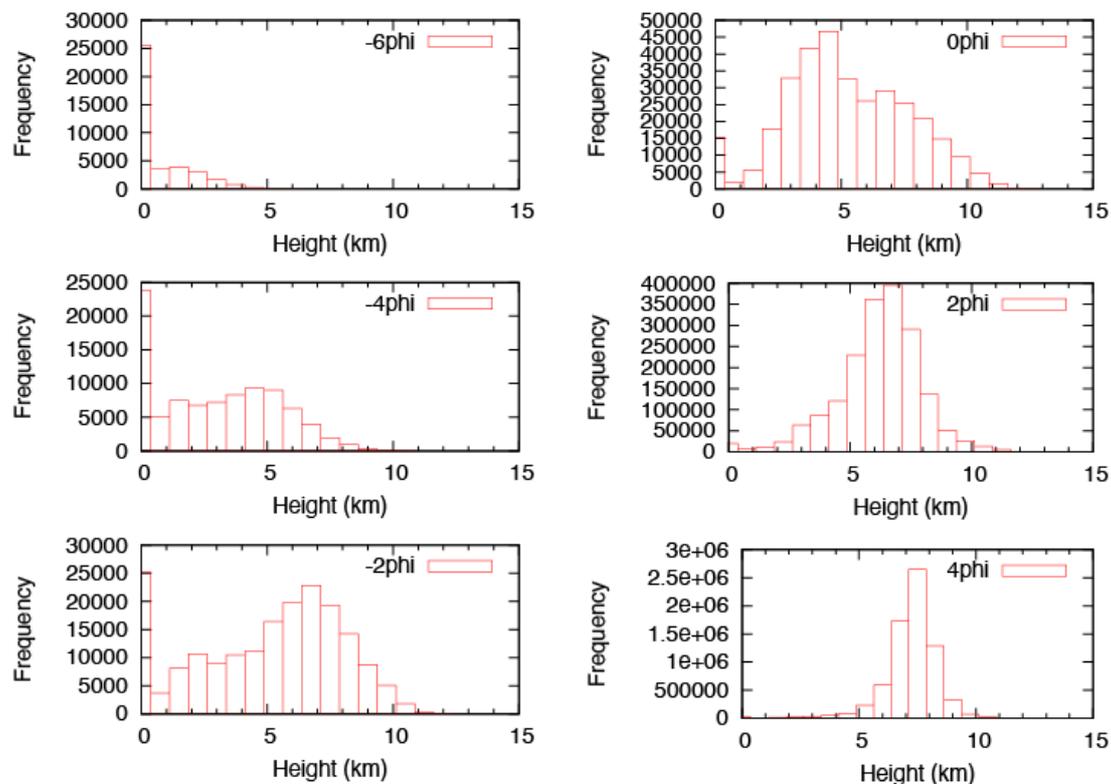


図3：火砕物が上昇から降下に転じた位置の頻度分布 (ϕ スケール毎)。火山噴煙モデルSK-3Dを用いた風速20 m/sのもとでの数値シミュレーションの結果。

Numerical Simulations of Volcanic Ash Transport Simulation in the Wind Field

Project Representative

Yujiro Suzuki

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Author

Yujiro Suzuki

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

In an explosive volcanic eruption, volcanic ashes released into the atmosphere are widely distributed. It is important for disaster prevention to understand the process of transporting volcanic ash in the atmosphere and their depositional patterns on the ground surface. In this project, we aim to understand the volcanic ash transport process by developing a numerical model. We performed numerical simulations with some relatively simple wind profiles. Simulation results showed that the influence of the eruption dynamics and the atmospheric wind differs depending on the size of the tracer particles. We determined the points where the tracer particles change from rising to falling phases. The distributions of these particles can be used as an initial condition for advection-diffusion calculation on meteorological models.

Keywords : volcanic eruption, volcanic ash, disaster prevention, two-phase flow

1. Introduction

Explosive volcanic eruptions cause a variety of disasters. One of the most widespread explosive eruption disasters is the scattering and deposition of volcanic ash. In a continuous explosive eruption called a Plinian or sub-Plinian eruption, a mixture of magma fragments (pyroclasts) and volcanic gas is injected into the atmosphere from the crater. A mixture of ejected material and entrained air is called eruption cloud. It rises from several kilometers to several tens of kilometers above the crater. Pyroclasts rise with the eruption cloud and fall into the atmosphere when they leave the eruption cloud. They are eventually deposited on the ground surface.

The distribution of pyroclastic materials in the atmosphere and the distribution of sediments on the ground surface are strongly influenced by the intensity of eruptions and the wind speed of the atmosphere [1]. As the eruption is more intense, the altitude of eruption cloud becomes higher and the area of horizontally expanding cloud (umbrella cloud) becomes wider. As a result, pyroclasts are transported far away and deposited on the wider area. It is required for disaster prevention to quantitatively understand the complicated behavior of transportation and deposition of pyroclastic materials.

The purpose of this project is to understand the multi-dimensional and multi-phase eruption dynamics and the mechanisms of volcanic ash transport. For this purpose, we are developing a three-dimensional fluid dynamics model of eruption cloud dynamics [2]. In this FY, we tried to reproduce the distribution of volcanic ash in the atmosphere and the distribution of sediments on the ground surface under various mass eruption rates and atmospheric wind conditions.

2. Method

The model of Suzuki and Koyaguchi [3], which incorporates the tracer particle calculation into the fluid calculation of Suzuki et al. [2], was used. It is assumed that a pseudo-fluid composed

of volcanic gas and pyroclastic materials is ejected into the atmosphere from a circular crater on a flat surface. The ejected material and entrained air were assumed to be fluids with different gas constants and specific heats. When they are mixed, the gas constant and specific heat were changed depending on the mixing ratio. The basic equation represented by the compressible Euler equation was discretized by the finite difference method.

Tracer particles were released from the crater at the same velocity as the ejected material every second. The tracer particles were assumed to be spherical, and their diameters were randomly given in the range of 2^{-8} mm (8ϕ) to 2^8 mm (-8ϕ). Tracer particles move relative to the fluid with terminal velocity. When the tracer particle reached the ground surface, the calculation of the particle was stopped, and it was set as the deposition point.

The initial conditions of the calculation gave the vertical distribution of density, temperature and pressure in the standard mid-latitude or tropical atmosphere. It is assumed to be uniform in the horizontal direction. Atmospheric wind was also given as an initial condition. We assumed the case of 10 m/s, 20 m/s, and 30 m/s uniformly in the height direction. The mass fractions of pyroclastic materials and volcanic gas contained in the magma were 0.96 and 0.04, respectively, and the magma temperature was set to 1000 K. The ejection pressure was set to atmospheric pressure 1.013×10^5 Pa. The ejection rate was 4×10^6 kg/s.

3. Simulation Results

We have reproduced how tracer particles are transported and deposited by eruption dynamics and atmospheric wind (Fig. 1). At a wind speed of 20 m/s, the volcanic plume was bent under the influence of the wind. At an altitude of about 8 km, the density of the eruption and the atmosphere were balanced, then the eruption cloud expanded horizontally.

From the simulation results, we also obtained the spatial distributions of marker particles in the atmosphere (Fig. 1c) and the depositional pattern of sediments (Fig. 1d). These

distributions were strongly dependent of the size of particles. Large particles separated from the lower parts of bending plume. Such particles were deposited near the crater. On the other hand, small particles reached to the top of volcanic plume and were transported by the horizontally moving cloud. After that, they separated from the cloud and settled on the wide area of the ground surface. Very fine particles were suspended in the horizontally moving cloud and they did not separate from the cloud.

We also estimated the heights where the marker particles start to descend towards the ground surface. The distribution of the points where the upward velocity changed from positive to negative depended on the particle size. The peak height of the distribution increases as the particle is larger. This distribution will be used as an initial condition for advection-diffusion calculation on meteorological models.

Acknowledgement

Part of this research was supported by a scientific research subsidy (problem number 25750142, 17K01323) and a comprehensive project for next-generation volcano research and human resource development.

References

- [1] S. Carey, and R. S. J. Sparks, “Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns”, *Bull. Volcanol.*, vol. 48, pp.109–125, (1986).
- [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] 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).

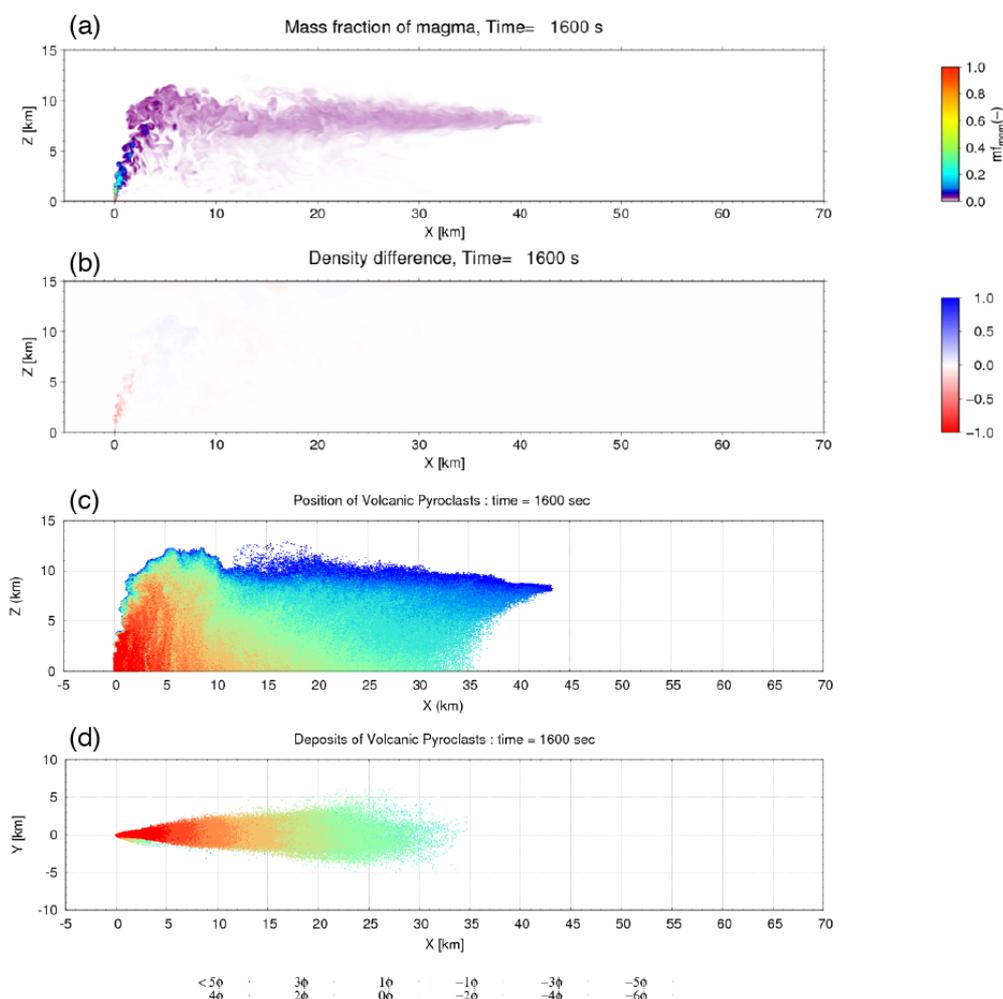


Fig. 1: Simulation results of 3D fluid dynamics model of eruption cloud. Spatial distributions of (a) mass fraction of the ejected material, (b) density difference from the stratified atmosphere, and (c) marker particles in x - z space. (d) The distribution of deposited particles on the ground.