

火山噴火に伴う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、多量の火山灰が大気中に放出される。火山灰は噴煙によって上空へと巻き上げられ、噴煙から離脱した火山灰は大気風によって広範囲に拡散する。したがって、噴煙ダイナミクスによる火山灰の上昇と大気風による火山灰の移流拡散の両方をつないで解くことによって、火山灰の火口からの放出から地表への堆積までを正しく再現・予測できる。この結合には、噴煙ダイナミクスモデルによって火山灰の噴煙からの離脱情報を取得し、それを初期条件として移流拡散計算を行うことになる。本研究では、これまでに開発した噴煙ダイナミクスと火山灰粒子トレーサーの3次元カップリングモデルを用い、火山灰が火口から噴出し、噴煙内を上昇、その後噴煙から離脱する様子を再現した。火山灰が上昇をやめ降下に移る高度は、粒径サイズによって大きく異なった。これらの粒子分布データは、一次近似的に移流拡散の初期条件として扱える可能性があり、今後さらなる解析が必要となる。

キーワード：火山噴火，火山灰，防災，固気混相流

1. はじめに

火山において噴煙を放出するような噴火は爆発的噴火と呼ばれる。特に、継続的に噴煙を放出するような場合はプリニー式噴火と呼ばれ、一般的に噴火の強度と規模が大きい。プリニー式噴火では、マグマの破片である火山灰や軽石・火山弾が火山ガスとともに音速に近い高速で火口から噴出する。火砕物と呼ばれるこれらの固体粒子が噴出物に含まれるため、火砕物と火山ガスからなる噴出物は大気よりも密度が大きく、上昇とともに運動量を失う。しかし、噴出物は上昇とともに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急膨張させる。その結果、噴出物と大気の混合物（噴煙）は大気よりも密度が低下し、浮力を得て上昇を続け、噴煙柱を形成する。上昇する噴煙は成層大気中で噴煙密度が大気密度と釣り合う高度（浮力中立点）に達すると、浮力を失い水平方向へと拡大する。

水平拡大する噴煙の構造は大気風の影響の大小によって異なる。大気風の影響が小さい場合、噴煙は浮力中立点で同心円状の傘型噴煙を形成する。このような噴煙はフィリピン・ピナツボ火山の1991年噴火のような大規模噴火で観察される[1]。一方、大気風の影響が大きい場合、噴煙は大きくたなびき風下へ一方向に延びる。この場合、噴煙上昇部である噴煙柱も風下へと大きく曲がった構造となる。湾曲した噴煙柱と風でたなびく噴煙構造は、霧島山新燃岳の2011年噴火はじめ比較的小規模な噴火で観察されている[2]。大気風の影響が中間的な場合には、鉛直に延びる噴煙柱と風下側に偏る傘型噴煙で構成される。インドネシア・ケルト火山[3]の2014年噴火やチリ・カルブコ火山の2015年噴火[4]に代表されるこのような噴煙構造は、頻度は少ないものの数年毎に観察される。

噴煙ダイナミクスは、保存則と状態方程式・エネルギー式によってモデル化される。Woods[5]は成層大気中での噴煙柱に関する1次元モデルを提案し、火口での噴出条

件を与えたときの噴煙内速度分布や噴煙高度を求めた。Bursik et al. [6]は、傘型噴煙に関する単純な重力流モデルを提案し、傘型噴煙の拡大則を求めた。Suzuki et al. [7]は、噴煙の3次元流体モデルを提案し、噴煙柱と傘型噴煙を同時に再現することに成功した[8]。

噴煙から離脱した後の火砕物輸送は、移流拡散としてモデル化される[9]。移流拡散モデルでは、噴煙から放出された火砕物は大気風に流されつつ終端速度で沈降する。同時に、多数の火砕物からなる群は大気拡散によって大気中でのその分布は拡大し、最終的に地表に堆積する。一般に、大気中では水平方向の拡散が卓越し($10^4 \text{ m}^2/\text{s}$)、鉛直方向の拡散は無視できるくらい小さいと考えられるため、水平の円盤状に拡大する移流拡散モデルが提案されている[10]。近年では、大気の高精度数値予報と移流拡散をカップリングさせたモデルが現業で使用されている[11]。

移流拡散モデルの結果は、初期条件として与える火砕物分布 (Source condition) に強く依存する。そのため、Source conditionをどう与えるかが近年の火山学で大きな問題となっている。Suzuki [9]は、Source Conditionに関する単純なモデル式を提案した。

$$P(z) = AY \exp(-Y)$$

ここに、 $P(z)$ は拡散比率、係数 A と、粒子サイズ毎の終端速度で決まる関数 Y で表現される。このモデル式では、噴煙の上昇速度が高度とともに単調に減少することが仮定されている。浮力の変化によって上昇速度の減少が単調でないことは噴煙柱1次元モデル[5]で示されていて、3次元モデルからは更に複雑な速度構造を持つことが示されている[8]。本プロジェクトでは、将来的にSource conditionに相当する関数を3次元計算から求めることを目指している。本研究では、単純な条件における火砕物トレーサーの計算を行い、噴煙内部での存在分布を求めることを目的とする。

2. 手法・計算条件

本研究では Suzuki et al. [7] によって開発された高精度の3次元数値モデル SK-3D を用いて噴煙ダイナミクスの計算を行った。このモデルは、圧縮性ナビエ・ストークス方程式を基礎方程式とし、理想気体の状態方程式とエネルギー式を与えた疑似ガス (pseudo-gas) モデルである。噴出する火山ガスと火山灰を一つの理想気体として扱い、大気と混合した場合には噴出物と大気の混合比によって比熱比を変化させることで噴煙の状態変化を表現している。基礎方程式は有限差分法で離散化し、空間3次精度・時間2次精度の圧縮性流体スキームを用いた。

シミュレーションにおいて十分な空間分解能を得るために一般座標系を使い空間を分割した。火口近傍で最小のグリッドサイズにし、火口から離れるにしたがって鉛直方向と水平方向それぞれに等比でグリッドサイズを大きくした。ただし、グリッドサイズは火口半径よりも大きくならないように制約を与えた。地表面は摩擦なしの境界条件とし、その中心にある円形の火口から定常の噴出条件を与えた。計算領域の側面と上面は流入・流出条件とした。水平方向に均質な中緯度大気を初期条件とした。

流体計算と同時に、トレーサー粒子の計算を行った[2]。トレーサー粒子は火口から噴出流体と同速度で1秒毎に放出される。放出されるトレーサー粒子は球形を仮定し、その直径は 2^{-8} mm (8ϕ) から 2^8 mm (-8ϕ) までの範囲でランダムに与えた。トレーサー粒子は各地点での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。

表1：計算条件

Variable	Value
Exit velocity	337 m/s
Magma temperature	1000 K
Water fraction	6 wt%
Exit density	3.65 kg/m ³
Pressure	1.013×10 ⁵ Pa
Vent radius	32.1 m
Mass eruption rate	4.0×10 ⁶ kg/s
Vent elevation	0 m
Gas content of volcanic gas	462 J/(K·kg)
Specific heat of volcanic gas	1348 J/(K·kg)
Specific heat of pyroclasts	1100 J/(K·kg)

噴出条件を表1に示す。マグマ物質の温度 T と噴出物中に含まれる火山ガス (水蒸気) の質量分率 n 、圧力 P を与えたとき、噴出物の密度 ρ_0 が以下の状態方程式より見積もられる。

$$\rho_0 = P / (nR_g T_0)$$

ここに R_g は水蒸気の気体定数 (462 J/K kg) である。火口での噴出率 \dot{m}_0 と火口半径 R_0 ・噴出速度 w_0 ・噴出物密度 ρ_0 の関係は以下となる。

$$\dot{m}_0 = \pi R_0^2 \rho_0 w_0$$

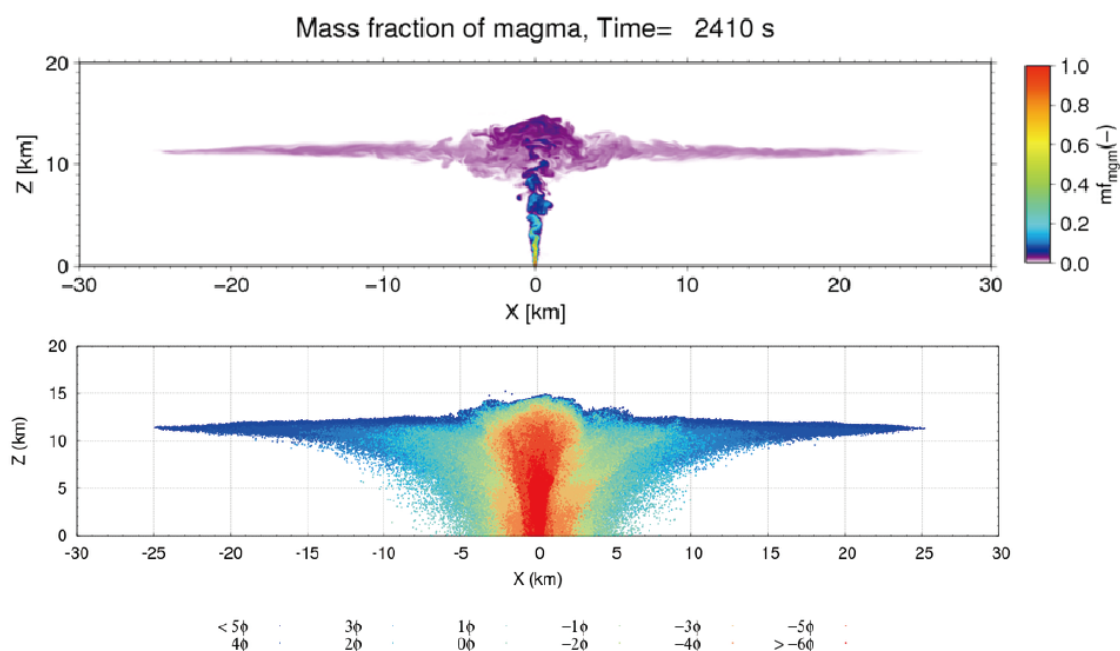


図1：火山噴煙モデル SK-3D の計算結果。風速ゼロの条件で噴出率が 4×10^6 kg/s の場合の、噴火開始から 2410 秒後の (上図) 火口を含む断面における噴出物濃度分布と (下図) $x-z$ 断面に投影した火砕物トレーサーの分布。下図の色は $\phi = -\log_2 D$ (D は粒子直径) で定義される ϕ スケールで表した粒子サイズ。

3. 計算結果

大気の流れがゼロの場合について3次元シミュレーションを実行した。計算の結果、噴煙柱と傘型噴煙が形成した(図1上)。噴火開始から400秒後に最高高度15 kmまで達し、水平方向への拡大を開始した。その後、噴煙柱はほぼ定常的な形状を維持した。傘型噴煙は高度11 kmで水平に同心円状に拡大し、噴火開始から約40分後にはその半径は25 kmまで達した。傘型噴煙は中心軸から離れるに従ってその厚さが減少する構造を持った。

噴煙の拡大に伴う火砕物が輸送される様子も再現された(図1下)。非常に細粒の火砕物(青色プロット)は傘型噴煙によって運搬され、噴火開始後40分の時点では噴煙から離脱しなかった。水色から黄色で表される中間的サイズの火砕物は、傘型噴煙によって水平方向に運搬されつつも噴煙から離脱し大気中を落下しはじめた。橙で示される粗い粒子は、傘型噴煙に流入せずに噴煙柱頂部から離脱し降下した。非常に粗い粒子(赤)は噴煙柱頂部に達せず、噴煙柱の中間部から降下した。以上のように、粒子サイズによって噴煙からの離脱パターンが大きく異なった。

トレーサー粒子が上昇から下降に転じる地点を落下開始地点と仮定できる。この落下開始地点の高度について頻度分布を作成した(図2)。1 ϕ 毎の粒子サイズそれぞれについて高さを階級としたヒストグラムになる。階級の数に粒子サイズ毎の総粒子数をスタージェスの公式に入力することで決定した。いずれの粒子サイズでも、大半の粒子がある高度にピークを持つような分布となった。-6 ϕ ~-2 ϕ の比較的粗い粒子では、粒径が小さくなるほど分布のピーク高度は高くなった。それより細かな粒子では、ピーク高度は約10~11 kmで変化しなかった。このことは、粗い粒子は噴煙柱の途中から降下を始め、細かな粒子は噴煙柱頂部もしくは傘型噴煙から降下を開始している図1での観察事実と整合的である。また、0 ϕ より大きな粒子では、低高度から高高度までその分布が広がるが、それより小さな粒子の分布は高度10 kmの上下数kmに限定されている。0 ϕ より小さな粒子は噴煙柱から降下することはほとんど無く、傘型噴煙から降下する、もしくは傘型噴煙内部に滞留することを示す。

4. まとめ

流体とトレーサーの結合モデルを用いることによって、火砕物の降下開始地点の情報を取得することに成功した。その頻度分布はSuzuki[9]で提案されたSource conditionと似た形状を持っていることが確認された。ただし、本研究で得た火砕物の降下開始高度の分布がSource conditionとして扱えるかどうかについては更に解析を進める必要がある。

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] R. E. Holasek, S. Self, and A. W. Woods, "Satellite observations and interpretation of the 1991 Mount Pinatubo eruption plumes", *J. Geophys. Res.*, vol.101, no.B12, pp. 27,635-27,655, (1996).
- [2] 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).
- [3] N. I. Kristiansen, A. J. Prata, A. Stohl, and S. A. Carn, "Stratospheric volcanic ash emissions from the 13 February Kelut eruption", *Geophys. Res. Lett.*, vol.42, 588-596, (2015).
- [4] F. Reckziege, and others, "Forecasting volcanic ash dispersal and coeval resuspension during the April-May 2015 Calbuco eruption", *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol.321, pp. 44-57, (2016).
- [5] A. W. Woods, "The fluid dynamics and thermodynamics of eruption columns", *Bull. Volcanol.*, vol.50, pp.169-193, (1988).
- [6] M. I. Bursik, S. N. Carey, and R. S. J. Sparks, "A gravity current model for the May 18, 1980 Mount St. Helens plume", *Geophys. Res. Lett.*, vol.19, no.16, pp.1663-1666, (1992).
- [7] 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).
- [8] Y. J. Suzuki, and T. Koyaguchi, "A three-dimensional numerical simulation of spreading umbrella clouds", *J. Geophys. Res.*, vol.114, B03209, (2009).
- [9] T. Suzuki, "A theoretical model for dispersion of tephra", *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, D. Shimozuru and I. Yokoyama, ed., TERRAPUB, pp.95-113, (1983).
- [10] C. Bonadonna, G. Macedonio, and R. S. J. Sparks, "Numerical modelling of tephra fallout associated with dome collapses and Vulcanian explosions: application to hazard assessment on Montserrat", *The eruption of Soufriere Hills volcano, Montserrat, from 1995 to 1999*, T. H. Druitt and B. P. Kokelaar, ed., Geological Society, London, vol.21, pp.517-537, (2002).
- [11] 新堀敏基・石井憲介, "気象庁移流拡散モデル設計書", 気象研究所技術報告, vol.84, (2021).

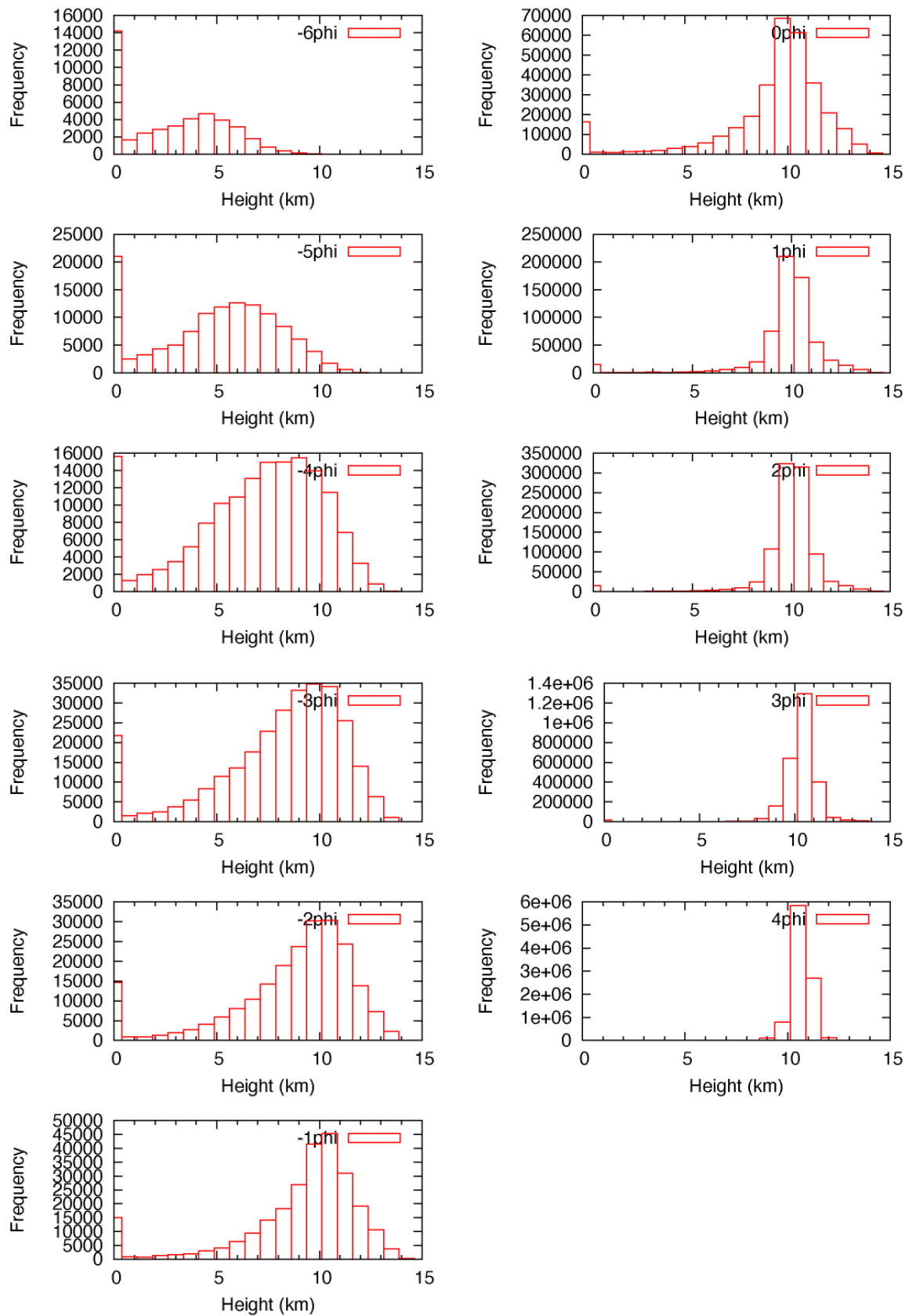


図2：火山噴煙モデルSK-3Dのシミュレーションで得られた火砕物が上昇を停止した位置の分布。 ϕ スケール毎に各高さにおける頻度分布を示す。

Numerical Simulations of Volcanic Ash Dispersal

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, a large amount of volcanic ash is injected into the atmosphere. Volcanic ashes are transported in eruption columns and umbrella clouds and are diffused widely by the atmospheric wind. For volcanic hazard assessment, it is important to correctly reproduce and/or predict from the ejection of volcanic ash to the deposition on the ground surface. The advection-diffusion model of volcanic ash must be related to the dynamics model of eruption cloud. For this coupling, we performed some numerical simulations by using SK-3D to estimate the positions in which the volcanic ashes start falling. Simulation results indicated that the particle distribution as a function of height depends on the particle size. This particle distribution may be treated as an initial condition for advection-diffusion model in a first-order approximation.

Keywords : volcanic eruption, volcanic ash, hazard assessment, multiphase flow

1. Introduction

An explosive volcanic eruption generates a stable plume called as eruption column and a horizontally spreading cloud called as umbrella cloud. In such an eruption, a large amount of volcanic ashes are emitted from volcanic vent into the atmosphere. Volcanic ashes are transported by eruption column and umbrella cloud. Once volcanic ashes are separated from eruption clouds (i.e., eruption column and umbrella cloud), they are dispersed by the atmospheric wind and deposited on the ground surface. For aviation safety and hazard assessment, it has been required to reproduce and/or predict the spatial distribution of volcanic ashes into the atmosphere and the depositional patterns on the ground.

Many numerical studies tried to reproduce ash transport [e.g., 1]. Volcanic ashes are raised by eruption column and has been described as a simple function [2]. However, the velocity profiles are not simple and therefore ash distribution in eruption cloud should be estimated by dynamical model of eruption cloud. On contrast, ash dispersal in the atmosphere can be described by advection-diffusion model [2]. In the advection-diffusion model, the distribution where volcanic ashes separate from clouds is needed as an initial condition.

In our project, we aim to combine the dynamical model of eruption cloud and the advection-diffusion model of ash dispersal. For this purpose, in this study, we carried out numerical simulations by the dynamical model we have developed and estimated the ash distribution in eruption clouds.

2. Method and Simulation Inputs

We used a 3D fluid-dynamical model called as SK-3D [3]. In SK-3D, the ejected mixture of volcanic ash and gas are treated as a single gas (i.e., pseudo-gas assumption). Because of this assumption, the high-accuracy scheme for compressible flow can be applied to the eruption cloud dynamics. This model employs Lagrangian marker particles of various sizes to calculate ash particle transport [1].

3. Results

We performed numerical simulations of eruption in the mid-latitude atmospheric condition with a mass flow rate of $10^{6.6}$ kg/s. Simulation results show an eruption column and radially spreading umbrella cloud. Small particles were suspended in the eruption cloud and transported by umbrella cloud. On the other hand, large particles were separated from the eruption column. Middle-size particles reached to the top of eruption column and flowed into umbrella cloud, and then were separated from the umbrella cloud.

Fig. 1 shows the frequency distributions of particles whose vertical velocity is within ± 1 m/s. These particles are considered to start falling from the cloud. Although these distributions do not coincide with that of separation points from eruption cloud, they may be treated as an initial condition for advection-diffusion model in a first-order approximation. Additional simulations and further analyses are required to propose a new source condition for ash dispersal simulations.

Acknowledgement

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". Figure1 was created using the Generic Mapping Tools (GMT) software package.

References

- [1] 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).
- [2] T. Suzuki, "A theoretical model for dispersion of tephra", *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, D. Shimozuru and I. Yokoyama, ed., TERRAPUB, pp.95-113, (1983).

- [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)

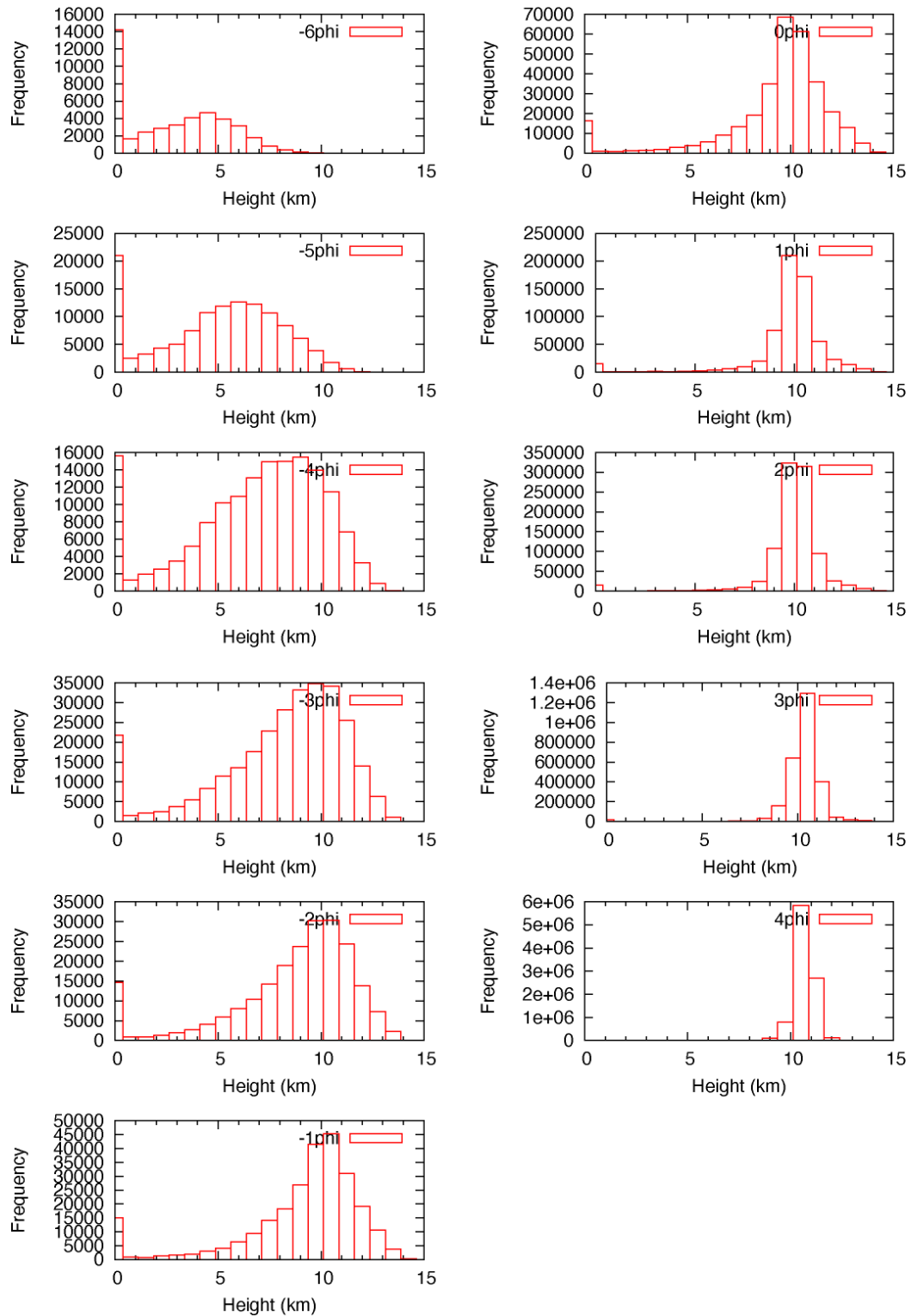


Fig.1: Frequency distribution of the height where the upward velocity of marker particles changes from positive to negative based on simulation results by SK-3D.