

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25750142

研究課題名(和文)火山噴火の3次元降灰モデル開発と災害予測システムの提案

研究課題名(英文)Development of 3D numerical model for volcanic ash dispersal and risk map system

## 研究代表者

鈴木 雄治郎 (Suzuki, Yujiro)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：30392939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：爆発的な火山噴火では、噴煙が大気中を拡大し、火山灰が地表に堆積する。噴煙拡大ダイナミクスと火山灰降灰メカニズムの理解を目的に、数値の開発と、それを用いた大規模数値シミュレーションを行った。任意の大気条件の中で噴煙の流体成分と火山灰粒子を同時に解く3次元数値モデルを開発し、計算プログラム的高速化を行った。その結果、大規模噴火(ピナツボ1991年噴火)、中規模噴火(ケルート2014年噴火)、小規模噴火(新燃岳2011年噴火)といった幅広い噴火事例の噴煙高度や堆積分布などの観測データを再現することができた。また、噴煙高度に与える風の影響を定量化し、単純なモデルに必要な経験的パラメータを決定した。

研究成果の概要(英文)：To understand the dynamics of eruption cloud and the mechanism of volcanic ash associated with explosive volcanic eruptions, we have developed a numerical model and performed numerical simulations. The 3D model developed in this study solve the fluid dynamics of eruption cloud and the transport of volcanic ash in parallel. Our model can reproduce observed data of various eruptions into arbitrary atmospheric conditions: the strong eruption (the Pinatubo 1991 eruption), the moderate eruption (the Kelud 2014 eruption), and the weak eruption (the Shinmoe-dake 2011 eruption). Our model is considered to be a useful tool that links eruption condition and field observations. In addition, we have quantified the effects of wind on the heights of eruption cloud, and determined the empirical constants for the simple model of eruption cloud.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山噴火 噴煙 火山灰 災害予測 数値モデル

### 1. 研究開始当初の背景

爆発的火山噴火では、火山灰と火山ガスから構成される噴煙が大気中へと大量に放出される。上昇した噴煙の密度と成層大気の密度が釣り合うと、噴煙は傘型噴煙として水平方向に拡大する。火山灰は、この噴煙の上昇と水平方向拡大、そして大気中の風によって運搬される。2010・2011年のアイスランド噴火では、火山灰が大気中に拡散したため、ヨーロッパの大部分で航空路が閉鎖され莫大な経済損失が生じた。また、2011年の新燃岳噴火では、降灰地域の農作物が被害を受け、火山灰が市街地のインフラにも多大な影響を与えた。火山噴煙の挙動や火山灰輸送・降灰は大気中の乱流混合や固体粒子・気体の相互作用、噴煙内外での水の相変化、火山地形などの複合的な要因に支配されるため、数値シミュレーションによって再現・予測することが防災上有効である。

数値計算手法の発達と計算機能力の向上により、ドイツやイタリア等の複数のグループが噴煙挙動の3次元数値モデルの開発を試みていた。一方、日本では、研究代表者が中心となって流体近似3次元モデルの開発を行ってきた。これらのモデルでは、大気中の風の影響を考慮していなかったため、それらの影響を評価することができなかった。また、火山灰輸送・堆積の現実的モデルが求められていた。

### 2. 研究の目的

(1) 風の影響を含めた火山灰輸送・堆積の数値モデル開発を行うことを目的とする。噴煙規模と風の影響によって流れのパターンは多様であるため、様々な規模の噴煙を再現できるモデルの開発を目指す。

(2) 開発した数値モデルを用い、噴煙高度に与える大気風の影響を評価する。風による噴煙高度の変化は、噴煙と大気の混合効率化によると考えられているため、その混合効率を求める。

(3) 噴煙の数値モデルは、これまでに1次元モデル・3次元モデル合わせて10個以上が世界各国で提案されている。モデルによる結果の不確定性を評価し、噴煙モデルでの改良すべき点を明らかにする。

(4) 開発した火山灰粒子モデルを用い、個別の火山灰の堆積時間や温度履歴といった情報の収集を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 噴煙ダイナミクス・火山灰輸送のカップリングモデルの開発：研究代表者が科研費(若手研究 B(No.20710137))で作成した噴煙ダイナミクスの高精度流体モデルに、火山灰粒子をトレーサー粒子として扱う計算モジュールを組み込む。より現実的なモデルにする

ために、数 $\mu\text{m}$ から数 $\text{cm}$ まで非常に幅広い火山灰粒子サイズを扱えるようにする。また、大型計算機で効率的かつ高速で計算できるように、計算コードの並列化・最適化を行う。

(2) 「噴出条件 噴煙高度」の関係に与える風の影響の評価：様々な大気風を初期条件として与え、ある噴出率の噴火に対し噴煙高度がどのように変化するかを数値モデルを用いたパラメータスタディを行う。また、噴煙の1次元モデルで用いられている経験係数を3次元計算結果から決定し、1次元モデルによっても簡易に「噴出条件 - 噴煙高度」関係が求められるようにする。

(3) 噴煙モデルの比較研究：これまでに各国で提案されている9つの1次元モデルと4つの3次元モデル、3つの解析モデルに関し、同じ噴出条件・大気条件を与えたときに得られる噴煙高度を比較する。また、噴煙高度を与え、その高度を説明する最適な噴出率の推定を行う。特に、この国際プロジェクトのコーディネートをを行い、仮定する計算条件の選定を行う。

(4) ピナツボ噴火など代表的な噴火事例に関する長時間のシミュレーションを行い、火山灰トレーサーの堆積時間のヒストグラムを作成する。また、火山灰の平均的な冷却速度を求める。

### 4. 研究成果

(1) 風の影響を含めた噴煙ダイナミクスと火山灰輸送・堆積を同時に計算できる3次元モデルの開発に成功した。大規模シミュレーションにも成功し、小規模噴火(新燃岳2011年噴火)、中規模噴火(インドネシア・ケルト火山2014年噴火、図1)、大規模噴火(フィリピン・ピナツボ火山1991年噴火、図2)の噴煙高度や火山灰堆積領域の再現をすることができた。また、水蒸気噴火(御嶽山2014年噴火)・マグマ水蒸気噴火(口之永良部島2015年噴火)・超大規模噴火(阿蘇4噴火)

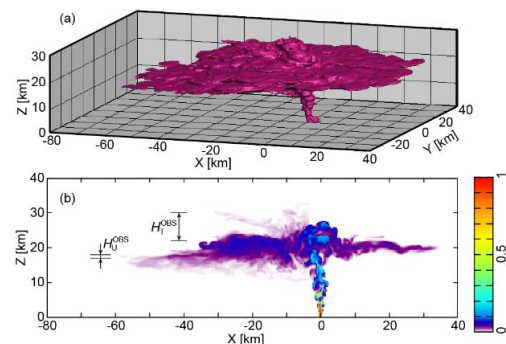


図1：ケルト火山2014年噴火のシミュレーション結果。(a)3次元の鳥瞰図と(b)断面図。

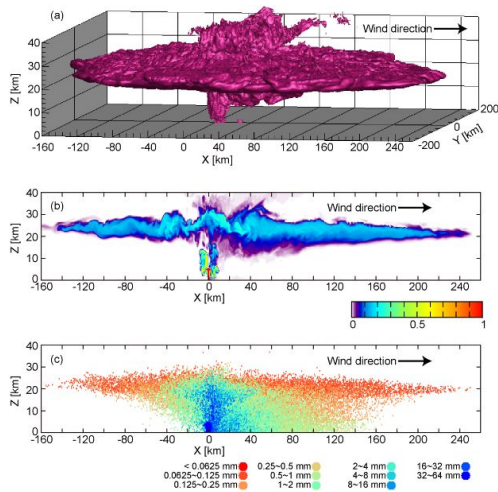


図2：ピナツポ火山 1991年噴火のシミュレーション結果。(a)3次元の鳥瞰図と(b)断面図，(c)火山灰粒子の分布図。

の試験的なシミュレーションに成功した。

(2) 8パターンの風の条件のパラメータスタディを行い，風が強くなるほど噴煙高度が低下することを明らかにした(図3)。また，風による噴煙・大気の効率を求め，これまでに考えられていたよりも非常に低い値であること，噴煙の最高高度で見た混合効率と噴煙の水平拡大高度(傘型噴煙高度)で見た混合効率が異なることを明らかにした。

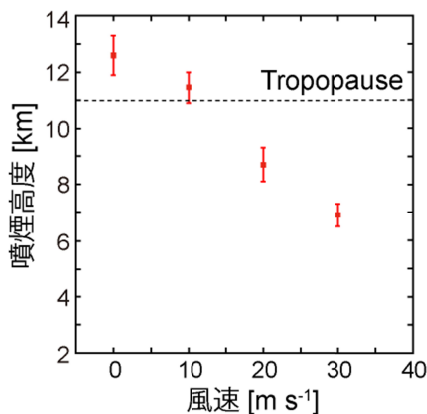


図3：3次元数値シミュレーションから得られた，大気の流れと噴煙高度の関係。

(3) これまでに提案されている噴煙の数値モデルの比較研究を行った。同じ計算条件を異なるモデルで計算すると，計算結果として得られる噴煙高度は，モデルが異なってもおよそ近い値となった(図4)。ただし，条件によっては最大10 km程度の差が生じることが分かった。これにより，噴煙モデルを防災利用する場合，そのモデル特性を十分に理解しなければならないことを明らかにした。

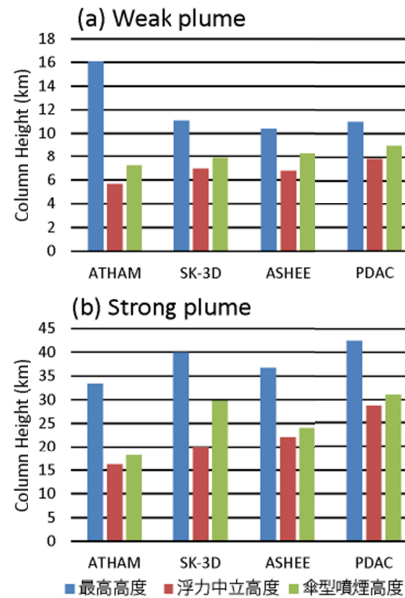


図4：4つの異なる3次元モデルを用いた噴煙高度計算。(a) 噴火強度が小さい場合と(b) 大きい場合。

(4) 火山灰粒子の噴出から堆積までの時間を，大規模シミュレーション結果を基にヒストグラムを作成した。その結果，堆積時間に2つのピークが存在した。これらのピークは，噴煙柱から直接降下する粒子と，傘型噴煙まで運搬された後に降下する粒子の違いを反映していると考えられる。堆積降下時間とそれに伴う冷却時間の違いは，堆積物から噴煙ダイナミクスを知る上で重要な情報となることが示唆された。

## 5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計8件)

Suzuki, Y. J., 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.*, 査読有, 10.1016/j.jvolgeores.2016.04.016, 2016.

Suzuki, Y. J. and T. Koyaguchi, Effects of wind on entrainment efficiency in volcanic plumes, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 120, 10.1002/2015JB012208, 2015.

Ayris, P. M., C. Cimarelli, P. Delmelle, F. B. Wadsworth, J. Vasseur, Y. J. Suzuki and D. B. Dingwell, A novel apparatus for the simulation of eruptive gas-rock interactions, *Bull. Volcanol.*, 査読有, 77, 104, 2015.

鈴木雄治郎, 火山噴火における混相流現

象(火山噴煙の数値シミュレーション), 混相流, 査読無, 29, 2, 106-113, 2015.  
Ayris, P. M., P. Delmelle, C. Cimarelli, E. C. Maters, Y. J. Suzuki and D. B. Dingwell, HCl uptake by volcanic ash in the high temperature eruption plume: Mechanistic insights, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 査読有, 144, 188-201, 2014.  
Suwa, H, Y. J. Suzuki, and A. Yokoo, Estimation of exit velocity of volcanic plume from analysis of vortex structures, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 査読有, 385, 154-161, 2014.  
Yokoo, A., Y. J. Suzuki and M. Iguchi, Dual infrasound sources from a Vulcanian eruption of Sakurajima volcano inferred from cross-array observation, *Seismological Res. Lett.*, 査読有, 85, 6, 1212-1222, 2014.  
Suzuki, Y. J. and T. Koyaguchi, 3D numerical simulation of volcanic eruption clouds during the 2011 Shinmoe-dake eruptions, *Earth Planets Space*, 査読有, 65, 581-589, 2013.

[学会発表](計15件)

Suzuki, Y. J. and A. Costa, Inter-comparison of volcanic eruption column models, WMO 7th International Volcanic Ash Workshop, Anchorage (USA), Oct. 19-23, 2015.  
橋本明弘・鈴木雄治郎・新堀敏基・石井憲介, 新燃岳 2011 年噴火事例における火山灰供給モデルの検討, 日本火山学会 2015 年秋季大会, 富山大学(富山県・富山市), Sep. 27 - Oct. 2, P32, 2015.  
Ayris, P. M., P. Delmelle, C. Cimarelli, Y. J. Suzuki and D. B. Dingwell, SO<sub>2</sub> and HCl uptake by volcanic glass in H<sub>2</sub>O-bearing pseudo-eruptive atmospheres, Goldschmidt 2015, Prague (Czech Republic), Sep. 18, 3086, 2015.  
Suzuki, Y. J. and A. Costa, Inter-comparison exercise of volcanic eruption column models, 26th IUGG General Assembly, Prague (Czech Republic), June 22 - July 2, IUGG-2642, 2015.  
石井憲介・鈴木雄治郎・新堀敏基・福井敬一・佐藤英一, 阿蘇巨大噴火の降灰シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), May 25, SVC46-P17, 2015.  
清杉孝司・小屋口剛博・鈴木雄治郎, 降下火砕堆積物の分布から供給源を推定する逆解析手法の確立: 鉛直拡散と噴煙形状の影響, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), May 25, SVC46-12, 2015.

小屋口剛博・鈴木雄治郎, 1次元火道流・3次元火山噴煙統合モデルを用いた爆発的噴火の推移予測, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), May 25, SVC46-15, 2015.  
Ayris, P., P. Delmelle, C. Cimarelli, E. Maters, Y. Suzuki and D. Dingwell, HCl uptake by volcanic ash in the high temperature eruption plume: mechanistic insights, American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, San Francisco (USA), 2014.12.19, AGU, V54D-06, 2014.  
Suzuki, Y. J., M. Iguchi, F. Maeno, S. Nakada, A. Hashimoto, T. Shimbori and K. Ishii, 3D numerical simulations of volcanic plume and tephra dispersal: Reconstruction of the 2014 Kelud eruption, American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, San Francisco (USA), 2014.12.19, AGU, V53E-02, 2014.  
Hashimoto, A., Y. Suzuki, T. Shimbori, K. Ishii and A. Takagi, Reconstruction of eruption column model based on the 3D numerical simulation of volcanic plume for 2011 Shinmoe-dake eruption, American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, San Francisco (USA), 2014.12.18, AGU, V43E-4940, 2014.  
石井憲介・鈴木雄治郎・福井敬一・新堀敏基・佐藤英一, 全球移流拡散モデルによるカルデラ噴火時の降灰シミュレーション, 第12回環境研究シンポジウム, 一橋大学(東京都・千代田区), 2014.11.18, 2014.  
石井憲介・桜井利幸・鈴木雄治郎・新堀敏基・福井敬一・佐藤英一, 気象衛星でとらえた傘型噴煙 - 2014年2月13日のケルフト火山噴火 -, 日本火山学会 2014 年秋季大会, 福岡大学(福岡県・福岡市), 2014.11.2, 日本火山学会, C1-08, 2014.  
橋本明弘・鈴木雄治郎・新堀敏基・高木朗充, 2011年1月26-27日新燃岳噴火に伴う火山灰輸送に関する数値実験, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜パシフィコ(神奈川県・横浜市), 4/28-5/2, 日本地球惑星科学連合, SVC50-03, 2014.  
清杉孝司・小屋口剛博・鈴木雄治郎, 火山灰拡散シミュレーションのための風データの検討, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜パシフィコ(神奈川県・横浜市), 4/28-5/2, 日本地球惑星科学連合, SVC50 P02, 2014.  
Suzuki, Y. J. and T. Koyaguchi, 3D numerical simulations of dispersion of volcanic ash using a Lagrangian model, EGU General Assembly 2014, Vienna (Austria), 4/27-5/2, European

Geophysical Union, EGU2014-10145,  
2014.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 雄治郎 (SUZUKI, Yujiro)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：30392939