

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24244069

研究課題名(和文) 3次元噴煙モデルとレーダー観測による火山灰拡散降下モデルの高度化

研究課題名(英文) Development of a tephra-dispersal model using 3-dimensional eruption column model and radar observations

研究代表者

小屋口 剛博 (Koyaguchi, Takehiro)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：80178384

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,100,000円

研究成果の概要(和文)：爆発的火山噴火に伴う火山灰拡散過程は、航空機航行障害の原因となるため、その高精度観測と予測が急がれる。本研究では、申請者らが開発した3次元噴煙モデルとレーダー観測技術を応用し、「供給源の物理過程を考慮した火山灰移流拡散モデル」を開発した。具体的には、3次元噴煙ダイナミクス・火山灰輸送カップリングモデルの開発、火山灰移流拡散モデルに基づく逆解析手法の開発、レーダー観測による空中火山灰粒子分布の推定法の開発を行った。また、これらのモデルや解析手法を、霧島2011年噴火や最近の桜島の火山爆発などに伴う噴煙に適用した。

研究成果の概要(英文)：Tephra (volcanic ash) dispersal in the atmosphere causes a serious problem of aviation safety. Development of a model for an accurate forecast of tephra dispersal is desired. In this study, we have developed a new three-dimensional eruption column dynamics model, in which transportation and settling of particles are calculated, and a new diffusion-advection model of tephra dispersal, in which bending of source eruption columns is considered. We have also established a new method to determine the three-dimensional distribution of ash particles in eruption clouds based on radar observations. The models and the method of radar observations have been applied to actual volcanic eruptions (e.g., the Kirishima 2011 eruption and recent Sakurajima explosions). These developments of new techniques have improved the existing tephra dispersal model.

研究分野：火山学

キーワード：火山噴煙 火山灰降下 数値計算 気象レーダー観測 火山防災

#### 1. 研究開始当初の背景

爆発的火山噴火に伴う火山灰拡散過程は、航空機航行障害など、現代社会における重大な災害要因となる。火山灰の拡散や降灰による被害を軽減するためには、火山噴火中に迅速に大気中の火山灰の高精度観測を行うとともに、その観測結果に基づいて火山灰拡散予測を行うシミュレーションモデルが必要となる。しかしながら、旧来の火山灰移流拡散モデルでは、供給源となる火山噴煙のダイナミクスが十分に考慮されておらず、正確な予測が困難であった。また、大気中の火山灰の観測についても、最新のレーダー技術を有効に活用したものではなかった。

#### 2. 研究の目的

本研究では、申請者らが開発した3次元噴煙モデルとレーダー観測技術を応用し、「供給源の物理過程を考慮した移流拡散モデル」の高度化を行うことを目的とした。

#### 3. 研究の方法

上記目的達成のため、以下の3つの開発課題を遂行した。

- (1) 3次元噴煙ダイナミクス・火山灰輸送カップリングモデルの開発。
- (2) 火山灰移流拡散モデルに基づく逆解析手法の開発。
- (3) レーダー観測による空中火山灰粒子分布の推定法の開発。

#### 4. 研究成果

- (1) 3次元噴煙ダイナミクス・火山灰輸送カップリングモデルの開発

火山灰分布範囲を推定するためには、降下火山灰をもたらず噴煙のどこから、どれだけの量の火山灰が放出されたのかを知る必要がある。そのためには、火山灰の供給源となる噴煙高度と火口における噴出条件との関係、大気中の粒子分布と地表の堆積分布の関係を明らかにしなければならない。本研究では、これらの関係を数値的に再現するため、3次元噴煙モデルに大気中を沈降する粒子輸送モデルを組み込んだモデル（以下「噴煙・火山灰輸送カップリングモデル」と呼ぶ）を開発した。

噴煙・火山灰輸送カップリングモデルでは、火山灰粒子を模したトレーサーを約 $10^6$ 個放出し、噴火から数時間後までの大気中に浮遊する火山灰粒子と、地表に堆積した火山灰粒子の挙動を計算することができる。このモデルを用いることによって、噴煙高度と噴出条件の関係や、さらに、様々な噴出条件の噴火に対して、大気中の粒子分布と地表の堆積分布について野外調査データと比較可能なシミュレーション結果を得ることができるようになった。具体的には、ピナツポ 1991 年噴火、ケルート火山 2014 年噴火、霧島山新燃岳 2011 年噴火など、様々な規模の噴火事例の火山灰拡散過程を再現した (Suzuki and

Koyaguchi, 2013; Kozono et al., 2013, 2014; Suzuki et al., in press). また、カルデラを形成する超大規模噴火の仮想的事例について、火山灰拡散過程が気候に与える影響について検討した (Costa et al., 2018).

#### (2) 火山灰移流拡散モデルに基づく逆解析手法の開発

噴煙から供給された火山灰の挙動については、移流拡散モデルによって計算することができる。本研究では、移流拡散モデルに関連して、風の影響で曲がりながら上昇する噴煙から供給される火山灰移流拡散モデルの開発、および、移流拡散モデルに基づいて火山灰の拡散・堆積過程を逆解析する基礎理論の構築を行った。それぞれに関する成果概要は、以下の通りである

#### (2-1) 風の影響で曲がりながら上昇する噴煙から供給される火山灰移流拡散モデル

旧来の火山灰拡散モデルの多く (例えば Tephra2) は、火口から垂直に上昇する噴煙から離脱し、風により風下に流れる単純な移流拡散を仮定していた。Tephra2 を用いて、実際の高層気象場を条件に各高さから離脱した粒子が地表に於いてどのような分布を示すのかを計算し、地表で観測された堆積量を説明する最適な高さ方向の放出量分布を逆解析したところ、比較的火口に近いデータセットを用いた伊豆大島 1986 年噴火のケースでは、観測された堆積量分布をうまく説明する放出量分布を導くことができた (Mannen, 2014)。しかし、火口から数キロ~数十キロ離れたところのデータセットを用いた、霧島火山 2011 年噴火の事例では、堆積量分布を再現できなかった。この問題を解決するため、Tephra2 を改造し、風の影響により噴煙が曲がりながら上昇する場合の火山灰移流拡散モデル (wt) を開発した。この新モデル wt を霧島新燃岳 2011 年噴火事例について適用したところ、観測された気象場で噴煙高度 5km の条件が降灰分布を最も再現することが示された。

#### (2-2) 火山灰の拡散・堆積過程を逆解析するための基礎理論

上記の移流拡散モデルに基づく火山灰の拡散・堆積過程の逆解析においては、これまでグリッドサーチによって最適解を計算していた。しかしながら、噴煙の湾曲など、複雑な要因を含む移流拡散モデルに対して安定かつ適切なインバージョンを行うためには、逆解析手法を基礎理論のレベルから再構築する必要がある。本研究課題では、上記の火山灰移流拡散モデルを逆解析ツールとしてさらに発展させるために、移流拡散方程式に基づく逆解析の一般的な基礎理論に着手した。

基礎理論構築の手がかりとして、大気中の一点から同一粒径の火山灰を放出した場合

の移流拡散モデルによる堆積物分布の性質について系統的に調べた。その結果、降下火砕物の移流拡散において粒子の鉛直拡散と風による噴煙の湾曲が重要な要素になることが分かった。すなわち、粒子の鉛直拡散が無い場合、噴煙上の一点から放出された同一粒径の粒子の堆積物分布は二次元正規分布となるが、鉛直拡散がある場合には二次元正規分布ではなくなる。また、噴煙が風で湾曲する場合、同じ高度から放出された粒子でも遠方に堆積し、あたかも鉛直噴煙中のより高い高度から放出されたかのように誤認されることが分かった。

### (3) レーダー観測による空中火山灰粒子分布の推定法の開発

本研究では、国交省 MP レーダーを用いたリアルタイム桜島噴火監視・データ表示システム観測データを基にして、レーダーデータ 3次元解析ツールを開発し、噴煙の内部構造を可視化する体制を整えた。従来、気象レーダーによる噴煙の解析は PPI (Plan Position Indicator) や RHI (Range Height Indicator) などの 2次元断面に限られていたが、本研究により 3次元空間で噴煙の構造や時間変化を解析できるようになった。このレーダーデータ 3次元解析ツールにより、噴煙の内部構造を可視化しその時間変化を直感的に捉えることが可能になった。また、地上降灰量計の観測値を用いて、降灰強度推定手法である Z-RA 関係式 (Z はレーダ反射因子, RA は降灰強度) を導出し、レーダー観測から火山灰分布を定量的に評価する体制を整えた (Maki et al., 2016)。

本研究では、通常の気象レーダーに加え、Ka バンドドップラーレーダーを用いて、噴煙柱の発達・衰退に伴う内部の気流構造の観測を試みた。具体的には、2014 年に Ka バンドドップラーレーダーを用いて噴煙柱内の風速ベクトルの推定を行うことにより、噴煙柱の発達・衰退に伴う内部の気流構造の変化を明らかにしすることに成功した。この成果により、Ka バンドのレーダーにより通常の気象レーダーで観測できなかった濃度の薄い噴煙の水平移流を 1 時間程度観測できることが分かった。

レーダー観測研究に関連して、桜島火山において、光学式ディストロメータのパーシベルを用いた降下火山灰の粒径・落下速度測定を実施し、粒径分布、粒径と落下速度の関係など、気象レーダーによる噴煙の定量解析の基礎データを得た (小園他, 2015)。特に、桜島火山においては、これまでに計 50 以上の噴火事例についてパーシベルを用いた粒径・落下速度測定に成功しており、当該火山の噴火における降灰過程の特徴を明らかにすることができた。さらに粒径および速度が時間とともに系統的に小さくなっていくという降下火山灰の普遍的な性質を見出すことができた。

### (4) その他の成果

本研究課題の一環として、3次元噴煙モデルと 1次元噴煙モデルの比較研究を広範に行い、単純化された 1次元噴煙モデルで使用されている経験係数を具体的に求めることができた (Costa et al., 2016; Suzuki and Koyaguchi, 2015; Suzuki et al., 2016a)。その中で、火口近傍の流れが噴煙全体の高度を強く支配することなどの新知見が得られた。また、これらに加えて、火砕流発生条件、火砕流に伴う噴煙の挙動など噴煙ダイナミクスの一般的理論についても研究成果を得ることができた (鈴木, 2016; Suzuki et al., 2016b; Shimizu et al., 2017)。

### (5) まとめと今後の課題

本研究課題によって、「噴煙・火山灰輸送カップリングモデル」および「レーダーデータ 3次元解析ツール」が開発され、火山灰拡散降下モデルの高度化に向けた一定の成果を得ることができた。また、火山灰拡散降下モデルを実用化する上で、以下に述べるような課題が明らかになった。

(今後の課題 1) 本研究課題で開発された噴煙・火山灰輸送カップリングモデルは、計算負荷が非常に高く、現状では、火山灰拡散予測などの実用には向かない。迅速な火山灰拡散予測を行うためには、「噴煙・火山灰輸送カップリングモデル」と同様な数値予測を迅速に生成する「単純化モデル」を開発する必要があるが、本研究では、「単純化モデル」については数値コードの開発に至らなかった。中でも、「噴煙・火山灰輸送カップリングモデル」によるシミュレーションでは、比較的噴出率が高い噴火において、噴煙が傘型領域を形成し、火山灰の重力流による水平方向の輸送が重要な役割を果たすことが観察されたが、傘型領域における重力流のダイナミクスを支配する物理過程が十分に理解されていないことが判明した。今後、「噴煙・火山灰輸送カップリングモデル」と「単純化モデル」をつなぐ傘型領域に対する重力流モデルについて重点的な研究が必要となる。

(今後の課題 2) 仮に、上に述べた「単純化モデル」に基づく順モデルが完成した場合、そのモデルでは、傘型噴煙の形成などの複雑な物理過程を考慮する新たなパラメータを含むことになる。その場合、空中火山灰分布や地表堆積量に関する観測データからこれらのパラメータを特定する逆解析手法は、今以上に複雑になることが予想される。項目 (2-2) で着手した、逆解析手法の基礎理論の研究を発展させる必要がある。

### <引用文献>

「4. 研究成果」に含まれる全ての引用文献は、以下の「5. 主な発表論文等」に記載されている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 27 件)

Suzuki, Y.J., M. Iguchi, Determination of the mass eruption rate for the 2014 Mount Kelud eruption using three-dimensional numerical simulations of volcanic plumes, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 査読有, in press.

DOI:10.1016/j.jvolgeores.2017.06.011  
Costa, A., Y.J. Suzuki, T. Koyaguchi, Understanding the plume dynamics of explosive super-eruptions, *Nature Communication*, 査読有, Vol.9:654, 2018.

DOI:10.1038/s41467-018-02901-0

Shimizu, H.A., T. Koyaguchi, Y.J. Suzuki, A numerical shallow-water model for gravity currents for a wide range of density differences, *Progress in Earth and Planetary Sci.*, 査読有, Vol.4:8, 2017.

DOI:10.1186/s40645-017-0120-2

Costa, A., Y.J. Suzuki, 他 23 名, Results of the eruptive column model inter-comparison study, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 査読有, Vol.326, 2-25, 2016.

DOI:10.1016/j.jvolgeores.2016.01.017

Maki, M., M. Iguchi, T. Maesaka, T. Miwa, T. Tanaka, T. Kozono, T. Momotani, A. Yamaji, I. Kakimoto. Preliminary results of weather radar observations of Sakurajima volcanic smoke, *J. Disaster, Res.*, 査読有, Vol.11, 15-30, 2016.

鈴木雄治郎, 火山噴煙ダイナミクス:3次元数値シミュレーションモデルの発展と展開, 火山, Vol.61, 385-397, 2016.

DOI:10.18940/kazan.61.2\_385

Suzuki, Y.J., A. Costa, M. Cerminara, T. Esposti Ongaro, M. Herzog, A.R. Van Eaton, L.C. Denby, Inter-comparison of three-dimensional models of volcanic plumes, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 査読有, Vol.326, 26-42, 2016a.

DOI:10.1016/j.jvolgeores.2016.06.011

Suzuki, Y.J., A. Costa, 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, Vol.326, 120-126, 2016b.

DOI:10.1016/j.jvolgeores.2016.04.016

Suzuki, Y.J., T. Koyaguchi, Effects of wind on entrainment efficiency in volcanic plumes, *J. Geophys. Res.*, Vol.120, 6122-6140, 2015.

DOI:10.1002/2015JB012208

小園誠史・三輪学央・眞木雅之・前坂剛・味喜大介・井口正人, 桜島火山におけるパーシベルによる降下火山灰の観測, 京都大学防災研究所年報, 査読無し, Vol.58, 86-90, 2015.

11 Mannen, K., Particle segregation of an eruption plume as revealed by a comprehensive analysis of tephra dispersal, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 査読有, Vol.284, 61-78, 2014.

DOI:10.1016/j.jvolgeores.2014.07.009

12 Kozono, T., H. Ueda, T. Shinbori, K. Fukui, Correlation between magma chamber deflation and eruption cloud height during the 2011 Shinmoe-dake eruptions, *Earth Planets and Space*, 査読有, Vol.66, 139, 2014.

DOI:10.1186/s40623-014-0139-1

13 Kozono, T., H. Ueda, T. Ozawa, T. Koyaguchi, E. Fujita, A. Tomiya, Y.J. Suzuki, Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations, *Bull. Volcanol.*, 査読有, Vol.75, 695, 2013.

DOI:10.1007/s00445-013-0695-4

14 Suzuki, Y.J., T. Koyaguchi, 3D numerical simulation of volcanic eruption clouds during the 2011 Shinmoe-dake eruptions, *Earth Planets and Space*, 査読有, Vol.65, 581-589, 2013.

DOI:10.5047/eps.2013.03.009

[学会発表](計 67 件)

眞木雅之・小堀壮彦, 火山噴煙の三次元レーダーデータ解析ツール(ANT3D)の概要, 日本気象学会 2017 年度春季大会

Kim, Y., M. Maki, D.-I. Lee, Three-dimensional analyses of initial stage of convective precipitation with two X-band polarimetric radars, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会

Suh, S.-H., M. Maki, D.-I. Lee, T. Momotani, A. Yamaji, Physical parameters analysis of volcanic ash particles measured by 2D-Video Distrometer, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会

萬年一剛, 噴煙柱の風による曲がり考慮した降下テフラシミュレーションコードの開発, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会

Mannen, K., Development of wt: a new simulation code to describe pyroclastic fall deposit from bending eruption column under windy condition, IAVCEI 2017 General Assembly

眞木雅之・高橋忍, 火山灰雲の Z-RA 関係式, 日本気象学会 2016 年度春季大会

前坂剛・眞木雅之, Ka バンドドップラーレーダーで観測した噴煙内部の気流構造, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会

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

〔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〕

ホームページ等

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小屋口 剛博 (KOYAGUCHI Takehiro)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号: 8 0 1 7 8 3 8 4

### (2) 研究分担者

眞木 雅之 (MAKI Masayuki)

鹿児島大学・地域防災教育研究センター・

特任教授

研究者番号: 1 0 3 6 0 3 6 4

鈴木 雄治郎 (SUZUKI Yujiro)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号: 3 0 3 9 2 9 3 9

小園 誠史 (KOZONO Tomofumi)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 4 0 5 0 6 7 4 7

萬年 一剛 (MANNEN Kazutaka)

神奈川県温泉地学研究所・研究課・主任研究員

研究員

研究者番号: 7 0 4 1 6 0 8 0

前坂 剛 (MAESAKA Takeshi)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・観測予測研究領域・主任研究員

研究者番号: 7 0 4 5 0 2 6 0

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

( )