

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2022

課題番号：17KK0085

研究課題名（和文）瞬間的な火山爆発噴火モデルの室内実験による検証

研究課題名（英文）Experimental study of an instantaneous volcanic eruption

研究代表者

鈴木 雄治郎（SUZUKI, YUJIRO）

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：30392939

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 6,600,000円

渡航期間： 11ヶ月

研究成果の概要（和文）：ブルカノ式噴火と呼ばれる瞬間的な火山爆発噴火の噴煙ダイナミクスを理解することを目的に、ブルカノ式噴火を模擬する流体実験装置を開発し、注入条件と最終高度の関係を調べた。室内実験結果と数値シミュレーション結果を比較したところ、注入時間の長さによって渦輪構造を持つ流れからStarting forced plume、乱流ブルームまで形態が変化する様子を捉えた。噴火継続時間に関する新たなスケーリングを導入することで、最終高度が連続的に変化することが分かった。さらに、室内実験や実際のブルカノ式噴火はサーマルよりもStarting forced plumeや乱流ブルームとして振る舞っていることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在も活発に噴火している桜島火山やその他の国内の多くの火山では、ブルカノ式噴火と呼ばれる瞬間的な爆発噴火の頻度が高い。そのような噴火で噴煙がどの高度まで上がり、そこから火山灰が拡散されるかは防災上非常に問題である。本課題の研究成果は、噴火条件と噴煙高度の関係が連続噴火のものとは異なることを示し、学術的に新たな知見となる。また、本研究の成果を火山灰輸送のモデルに組み込むことで、火山灰分布に関する精度の高いハザードマップを作成できると期待される。

研究成果の概要（英文）：In order to understand the plume dynamics of instantaneous volcanic eruptions called Vulcanian eruptions, we developed a fluid experiment apparatus that simulates a Vulcanian eruption and explored the relationship between injection conditions and final altitude. Comparing the results of laboratory experiments with those of numerical simulations, we observed that the morphology changes from a flow with a vortex ring structure to a starting forced plume and a turbulent plume, depending on the duration of injection time. By introducing a new scaling with respect to the eruption duration, the final altitude was found to vary continuously. Furthermore, it was suggested that laboratory experiments and actual Vulcanian eruptions behave more as Starting forced plumes and turbulent plumes than as thermals.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山噴火 爆発噴火 流体実験 火山防災 噴煙

様式 F - 19 - 2

1. 研究開始当初の背景

爆発的な火山噴火では、火山灰と火山ガスが火口から高温・高速で噴出することにより噴煙を形成する。噴煙は周囲の大気を取り込んで膨張させることで浮力を獲得し、大気中を上昇する。固体粒子である火山灰や軽石といった火山砕屑物は、大気中に浮遊したり地表に降り積もったりすることによって環境への影響を与える。また、火山砕屑物は農作物や各種インフラへの障害へと繋がり、経済活動や健康への影響も大きい。そのため、噴煙がどの高度まで上昇し、どの範囲に降灰するかを正確に見積もることが求められていた。

噴煙の高度は主に、噴出率で代表される噴火の強さと大気の流れの強さに支配される。特に、数十分から数時間噴火が継続するような連続噴火の噴煙高度に関しては、噴煙ダイナミクスの3次元シミュレーションの発達によって徐々に解明してきていた。しかし、ブルカノ式噴火と呼ばれる噴火継続時間が短い場合には、連続噴火のスケーリングとは異なり予測することが難しかった。このような瞬間的爆発噴火の再現は、3次元噴煙モデルの高精度化によって再現できるようになってきていた。また、噴煙を模擬した室内実験も行われるようになってきていて、数値計算と室内実験を組み合わせた瞬間的爆発噴火ダイナミクスに関する研究を進展させる環境が揃いつつあった。

2. 研究の目的

火山噴煙の挙動は噴出率と噴火継続時間で大きく異なる。噴火継続時間の長いプリニー式噴火は成層大気中を浮力で上昇するブルームで近似される。ブルーム挙動の次元解析により噴煙高度はおおよそ噴出率の1/4乗に比例する。一方、噴火継続時間の短いブルカノ式噴火は成層大気中のサーマルとして捉えられるが、その高度予測は難しい。ブルカノ式噴火のサーマル近似は噴火継続時間が非常に短い場合に限られる。桜島などで観察される実際のブルカノ式噴火では、その噴火継続時間は数秒から数十秒続くことも多く、サーマル近似が成り立たないと予想される。本課題では、ブルカノ式噴火がどのようにサーマルとブルームの中間的な状態として振る舞うのかを数値シミュレーションと室内実験を組み合わせて明らかにする。

3. 研究の方法

瞬間的爆発噴火における噴出条件と噴煙高度の関係を求めるため、室内実験装置を開発する。また、数値シミュレーション結果も合わせ噴煙ダイナミクスの新たなスケーリングについて調査する。

(1) 室内実験装置の開発

室内実験の実施にあたり、フランスのパリ地球物理研究所(IPGP)に渡航する。火山噴煙の室内実験に詳しいEdouard Kaminski氏とGuillaume Carazzo氏の指導のもとブルカノ式噴煙を模擬した実験装置を開発する。縦長の水槽内に成層構造を形成し、その上面から密度の異なる着色流体を瞬間的に注入する。側面から高精度で撮影し、着色流体の移動を追跡する。

(2) 数値シミュレーションとの比較

研究代表者が開発を続けている火山噴煙の3次元数値モデルを使用する。火山砕屑物と火山ガスを一つの流体として扱う擬似ガスモデルで、流体計算に影響を与えない粒子トレーサーを同時に計算することで火山灰粒子の挙動も再現する。様々な噴火条件を与えて数値モデルを大型計算機にて実行する。それにより、噴出条件と噴煙高度の関係や火山砕屑物の挙動を再現する。

4. 研究成果

(1) 室内実験装置の開発

ブルカノ式噴煙を模擬した水槽実験装置を開発した。高さ380mm、幅435mm×435mmの水槽に、純水と塩水の混合比を変えたものを注入することで、密度成層させた。ポンプでの注水後に流動が落ち着いた状態で、水槽底面から30mm毎に数ccのサンプリングを行う。サンプリングした塩水は高精度密度計を用いることで 10^{-5} g/ccの精度で密度を計測したところ、水槽底面から上面に向かってほぼ線形に密度が低下する構造を形成することができた。成層流体のほぼ中間的な密度の塩水を別途作成し、着色した後に成層流体の上面から毎分 10^{-1} Lの流量で下方向に注入した。注入流体は初期段階で下降するが、ある深度に達すると下降が止まった。その後、注入流体の先端(最下部)は振動し、周囲流体と密度が釣り合う深度で水平方向に拡大する様子が観察された。

注入時間を変化させた実験を複数行った結果、その挙動が変化する様子を捉えた。注入時間が非常に短い場合は、強い渦構造からなる先端を持ち、短く細い尾部が追従した。このような流れは渦輪(vortex ring)と呼ばれ、非常に短時間の火山噴火でも観察されることがある。一方、注入時間が長い場合は、乱流ブルームの初期段階に類似し、長い尾部を持ちながら下降を続けた。このような流れはStarting forced plumeと呼ばれ、実際の火山噴火の継続時間を考慮するとブルカノ式の噴煙はこのレジームに属すると考えられる。

(2) 数値シミュレーションとの比較

噴煙ダイナミクスの3次元モデルを用い、マグマ物性を入れ噴出条件を変えたパラメータスタディを行った。(1)の室内実験と同様に、噴火継続時間が短い場合には渦輪構造が観察された。室内実験に比べ長い尾部を持った。噴火継続時間を長くしていくと、Starting forced plumeの構造を持ち、徐々に乱流プルーム的な構造となった。

本課題の基課題である基盤研究(C)「瞬間的な火山爆発噴火の災害予測モデル提案」で実施した数値計算結果と室内実験結果を比較した(図1)。出口での浮力、成層の強度、出口直径からなる無次元空間で比較したところ、数値計算と術無い実験で異なる傾向が見られた。マグマ物質を模した数値計算では、噴出条件と噴煙高度の関係は単純な乱流プルームやサーマルのスケールリングとは異なる傾向が見られたが、室内実験ではそれらのスケールリングと明瞭な区別が難しかった。これらの違いは、噴煙密度の非線形変化に起因するものと考えられる。室内実験の系では、噴出流体の密度は周囲流体との混合比で線形に変化する。一方、マグマ物質では、周囲大気を少量でも混合すると密度は急激に低下する。これらの結果より、(a)マグマ物性を入れない流体を用いた短時間噴出の数値シミュレーション、(b)密度の非線形変化を考慮した室内実験の実施、が今後の課題として挙げられる。

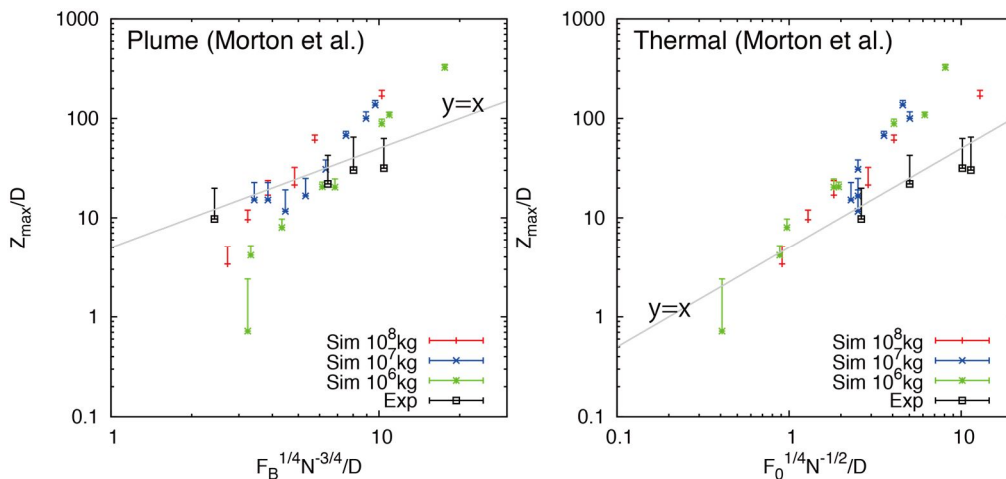


図1：室内実験結果と数値計算結果の比較。乱流プルーム(左図)とサーマル(右図)に関する無次元化した噴出条件と噴煙高度の関係。

さらに、噴煙高度が噴出時間に強く依存する様子を捉えた(図2)。連続噴出プルームの上昇時間スケールと高度スケールを規準にすると、時間スケールが短い場合(1未満)では噴煙高度は非常に小さくなる。連続噴出プルームの上昇時間スケールと同程度では、噴煙高度は急激に増加した。時間スケールが十分に大きい場合は規格化した噴煙高度は一定となり、連続噴出プルームでスケールリングできることが分かった。その時の規格化した噴煙高度は室内実験と数値計算で異なったが、その違いはマグマ物質による熱的な影響が起因すると考えられた。このような新たなスケールリングによって、室内実験の噴出時間は連続噴出プルームの上昇時間スケールと同等かそれより長いことが判明した。室内実験でサーマル的な振る舞いからプルームまでを連続的に捉えるには、噴出時間を数十~数百ミリ秒までコントロールできる装置の開発が求められる。

本課題の室内実験・数値計算結果から得られる形態観察とスケールリング解析により、実際の瞬間的爆発噴火の多くはサーマル的挙動よりも、Starting forced plumeや短時間の乱流プルームの挙動に近いことが示唆された。

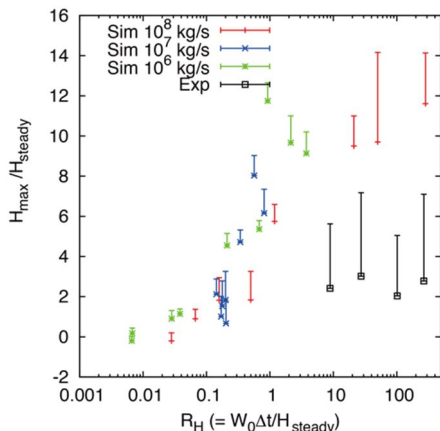


図2：連続噴出プルームの上昇時間スケールで規格化した噴出時間(横軸)と規格化噴煙高度の関係。数値計算結果と室内実験結果をプロットしたもの。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Suzuki Y. J., Costa A., Koyaguchi T.	4. 巻 47
2. 論文標題 Control of Vent Geometry on the Fluid Dynamics of Volcanic Plumes: Insights From Numerical Simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 2020GL087038-NA
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020gl087038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki Y.J., Iguchi M.	4. 巻 382
2. 論文標題 Determination of the mass eruption rate for the 2014 Mount Kelud eruption using three-dimensional numerical simulations of volcanic plumes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 42 ~ 49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jvolgeores.2017.06.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Koyaguchi Takehiro, Suzuki Yujiro J.	4. 巻 123
2. 論文標題 The Condition of Eruption Column Collapse: 1. A Reference Model Based on Analytical Solutions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 7461 ~ 7482
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2017JB015308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Koyaguchi Takehiro, Suzuki Yujiro J., Takeda Kai, Inagawa Satoshi	4. 巻 123
2. 論文標題 The Condition of Eruption Column Collapse: 2. Three-Dimensional Numerical Simulations of Eruption Column Dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 7483 ~ 7508
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2017JB015259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 鈴木雄治郎
2. 発表標題 火砕物供給関数の推定に向けて：火砕物の到達高度
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 鈴木雄治郎
2. 発表標題 阿蘇中岳2021年10月20日噴火の3次元数値シミュレーション
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Shimizu, H. A., T. Koyaguchi, Y. J. Suzuki, E. Brosch and G. Lube
2. 発表標題 Experimental validation of a two-layer model for pyroclastic density currents
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西條祥・小屋口剛博・鈴木雄治郎
2. 発表標題 降下火砕物インバージョンに向けた火砕物供給源モデルの開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新堀敏基・鈴木雄治郎・入山宙・石井憲介・佐藤英一・藤田英輔
2. 発表標題 移流拡散モデルによる大規模噴火を想定した降下火砕物予測の課題(その3)噴煙ダイナミクスモデルに基づく初期条件
3. 学会等名 日本火山学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, Y. J., A. Costa and T. Koyaguchi
2. 発表標題 Simulating dynamics of explosive very large eruptions
3. 学会等名 27th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, Y. J., A. Costa and T. Koyaguchi
2. 発表標題 The control of vent geometry on the dynamics of volcanic plumes
3. 学会等名 EGU General Assembly 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, Y. J. and S. Jenkins
2. 発表標題 Numerical simulations of eruption clouds for assessing volcanic hazard to cities in Japan
3. 学会等名 Cities on Volcanoes 10 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志水宏行・小屋口剛博・鈴木雄治郎
2. 発表標題 二層浅水波モデルに基づく火砕流ダイナミクスの数値的研究：流れの形態と堆積構造の変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村仁美・鈴木雄治郎・入山宙・中尾篤史・岩森光
2. 発表標題 島弧における火成活動・火山噴火プロセスの統合的理解に向けて
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木雄治郎・小屋口剛博
2. 発表標題 火砕降下物と噴煙ダイナミクスのカップリング計算：ピナツボ1991年噴火シミュレーション
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki, Y. J. and M. Iguchi
2. 発表標題 Numerical simulations of short-term eruption clouds
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. J. Suzuki
2. 発表標題 Numerical simulations of the 15 January 2022 eruptive plume of Hunga Tonga - Hunga Ha'apai volcano
3. 学会等名 The IAVCEI Scientific Assembly 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木雄治郎
2. 発表標題 トンガ2022火山噴火の噴煙3次元シミュレーション
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	カミンスキー エドワール	パリ地球物理研究所・地球流体ダイナミクス部門・研究員	
	(Kaminski Edouard)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	カラッツォ ギオーム (Carazzo Guillaume)	パリ地球物理研究所・地球流体ダイナミクス部門・研究員	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
フランス	Institut de physique du globe de Paris		