

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 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：2012～2014

課題番号：24710199

研究課題名(和文) 粉体の摩擦則を考慮した火砕流のモデル化と災害評価への応用

研究課題名(英文) Modeling pyroclastic flows considering a granular friction law and its application to hazard assessments

研究代表者

前野 深 (Maeno, Fukashi)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：20444078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：粉体の流れの物理量により表される無次元数を用いた摩擦則を導入し、浅水流近似のもとで濃密な火砕流のモデル化を行った。改良した火砕流数値モデルを天然の実例へ適用した結果、従来のモデルでは難しかった堆積物分布や形状を再現することができるようになった。火砕流堆積物の形成過程の理解だけでなく、噴火発生時の火砕流挙動の即時予測やハザード評価の際にも、適切な粉体摩擦則を導入した数値モデルを用いることが重要であることが本研究により示された。

研究成果の概要(英文)：Dense pyroclastic flows were modeled under the shallow layer approximation, where a granular friction model with a dimensionless number related to physical parameters of the flow (friction angles, grain-size, flow velocity and thickness) was employed. When the model was applied to actual examples of pyroclastic flows, the model could successfully reproduce the major characteristics of the deposits such as distribution and shape. This study showed the importance of introducing the granular friction law into numerical models when we analyze formation processes of pyroclastic flow deposits, and assess pyroclastic flow behaviors and resultant hazards.

研究分野：火山地質学

キーワード：火砕流 火山噴火 粉体流 堆積物 摩擦

## 1. 研究開始当初の背景

火山噴火に伴い発生する「火砕流」は、火山砕屑物（火山灰・軽石・溶岩片）と火山ガスからなる高温（数百以上）・高速の流れであり、流路にあるものを破壊して焼き尽くす極めて危険な火山現象である。1991年雲仙普賢岳噴火の際に発生した火砕流災害の例に見られるように、多くの活火山において火砕流が甚大な災害を引き起こす脅威が存在する。火砕流の挙動や流路、分布域を適切に評価できる数値モデルを構築することは、火砕流災害を未然に防ぐために不可欠であり、また噴火堆積物をもとに過去に発生した噴火の過程や災害を読み解く上でも重要である。

火砕流は異なる種類やサイズの粒子を含む混相流体であり、その流れの物理を本質的に解明することは容易ではない。しかし、火砕流をシンプルな物理モデルで記述する試みは古くからある。基本的なアイデアは、火砕流の巨視的な振る舞いを、斜面を流れる粉粒体の流れに近似するというものである。粉体流の全体的な挙動は、流れの密度や速度などの物理量を深さ平均した浅水流型のモデルで記述できることが知られており、一見複雑な火砕流の性質をこの粉体流モデルに置き換えて理解しようという研究はすでに1990年代から始まっている。このモデルの特徴は、火砕流本体を流体と同様に扱うことであり、最も重要な点は適切な粉体流の摩擦則を導入することである。

しかし従来提案されている火砕流数値モデルはこの点が十分に克服できていない。例えば米国で開発された TITAN2D は、浅水流モデルに動摩擦係数を一定としたクーロンの摩擦則を導入したモデルであるが、実際の火砕流分布域と比べて流走距離を過大に見積もるなど、顕著な食い違いが生じる。近年進展してきた粉体物理の分野で提案されている摩擦則では、粉体流の摩擦係数はもはや一定でないことが示されており、このような新しい知見がモデルに十分反映しきれていないことが大きな問題として顕在化している。一方日本国内に目を向けると、雲仙普賢岳の実例をはじめ、多くの火砕流の事例があるにもかかわらず、火砕流モデルの開発・改良を主とした研究、モデルを具体事例に適用して現象の理解を試みる研究は多くない。現在、日本国内の火山ハザードマップに反映される火砕流の危険度に関する評価には、エネルギー・コーンモデル（山体の高度と傾斜をもとに火砕流の到達距離を半経験的に推定する手法）が採用される場合が多い。このモデルはおよその最大到達距離を見積もるのみで、粉体としての火砕流の性質は考慮されず、地形に応じた火砕流の速度の変化、どのような流路をたどる可能性があるかなど、条件に応じて変化する火砕流の挙動を捉えることはできない。

火砕流の挙動の予測は、火山防災における最重要課題の一つであるが、その発生・流動・堆積過程を定量的に評価できるモデルや手法は十分に確立されていない。火砕流のモデル化を難しくする要因は、火砕流そのものの理解が不十分なことに加え、主に粒子濃度に起因する粉体流の様々な性質を統一的に記述できる摩擦則（抵抗則）が見出されていないことである。本研究では、従来の火砕流モデルでは考慮されていない摩擦係数の物理量依存性に着目し、「慣性数」と呼ばれる無次元数に依存する摩擦則を導入する。定常的に斜面を流れる粉体流の慣性数  $I$  は  $\gamma d / \sqrt{P/\rho}$  ( $\gamma$ : せん断速度、 $d$ : 粒子サイズ、 $P$ : 圧力、 $\rho$ : 粒子密度) で定義され (Jop et al., 2006)、深さ方向に積分した形式では、 $5Vd/2h\sqrt{gh}\cos\theta$  ( $V$ : 流速、 $h$ : 層厚、 $g$ : 重力加速度、 $\theta$ : 傾斜) と表現される。

## 2. 研究の目的

本研究では、浅水流型の二次元火砕流数値モデルに、摩擦係数の物理量依存性を考慮した上記粉体摩擦則を導入し、改良を行う。そして、実際に火砕流イベントが詳細に捉えられた事例、堆積物の保存状態が良い事例を対象とし、モデルを適用して数値シミュレーションを実施し、観察・観測データを制約条件としてモデルの妥当性について検証する。またこれらの結果をもとに、火砕流の災害評価手法についても考察する。

## 3. 研究の方法

### (1) 火砕流モデルの改良

従来の二次元浅水流理論にもとづく研究をもとに、摩擦係数の物理量依存則を考慮した火砕流数値モデルを完成させる。また、異なる摩擦則を導入したモデルを用いた場合の結果と比較しつつ、室内粉体実験—計算機実験—天然の堆積物の間にある関係に考察を与える。

### (2) 火砕流の観測・堆積物データ

火砕流の代表的事例（スプリエールヒルズ火山）を対象とし、火砕流発生時の観察・観測データおよび堆積物の地質データ（流路、到達距離、層厚分布、継続時間など）のキャラクタリゼーションを行い、初期条件・境界条件に制約を与える。

### (3) 火砕流モデルの天然の系への適用

新たなモデルを(2)の事例に適用し、火砕流の再現性とモデルの妥当性について検討する。平成24年度は(1)と(2)について、平成25~26年度に(2)と(3)を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 火砕流モデルの改良

室内での粉体流実験で観察された現象について、浅水流型モデルによる再現実験を行い、数値モデルと摩擦則適用の妥当性について検討した。主に異なる粉体摩擦則（係数一定

摩擦則と、摩擦係数の物理量依存性を考慮した摩擦則)が計算結果に及ぼす影響について調べた結果、定常流に近い粉体流が生じる条件の下では、後者の摩擦則を用いた場合に流走距離や流れの先端形状などについて良い再現性が得られたが、非定常性が強い場合には前者の摩擦則において再現性が良いことがわかった。この研究により、物理量依存性を考慮した摩擦則の有用性が示され、その適用限界についての理解が進んだ(Maeno et al., 2013, Physics of Fluids, 図1)。またこの研究では、実験結果とスケーリング解析をもとに、初期条件と堆積物形状を結び付ける無次元パラメータを導き、粉体柱崩壊の物理に関する新たな知見が得られた。一方、単純な系を用いた数値実験からは、火砕流が Slope break point (粉体摩擦角と山体傾斜角が等しくなる点)を通過後に三日月状もしくは堤防状の形態を有する堆積物が形成・発達していくことを見出し、堆積物形状の特徴に、流走面の傾斜変化と粉体摩擦角が深く関係していることが明らかになった。

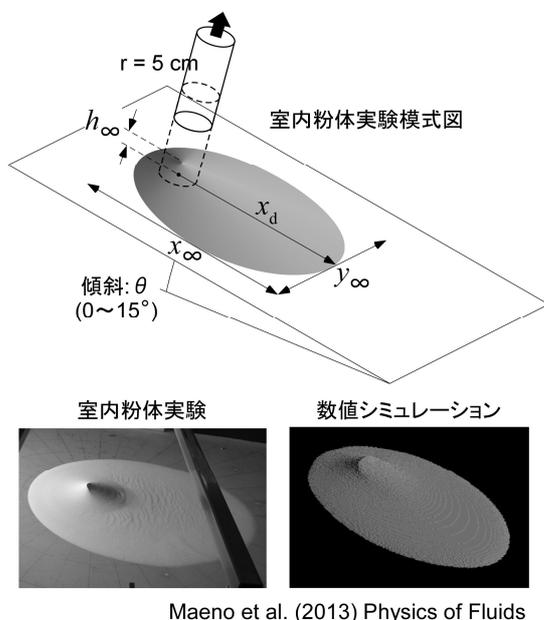


図1(上)室内粉体実験の模式図(下)浅水流型モデルを用いた数値シミュレーションにより再現された堆積物(Maeno et al., 2013)。

### (2) 火砕流の観測・堆積物データ

スフリエールヒルズ火山(カリブ海モンセラート島)では、1990年代の噴火開始以降、比較的規模の大きな溶岩ドーム崩壊とそれに伴う火砕流がしばしば発生している。その中でも2006年イベントは、火砕流堆積物の地質データや崩壊時の地球物理学的観測データが豊富に存在し、それらを制約条件にした解析が行えるという利点がある。2006年5月20日のイベントでは、およそ  $115 \times 10^6 \text{ m}^3$  の崩壊物質が海に流れ込んだ(Trofimovs et al., 2012)。この崩壊に伴い発生した火砕流の流走・堆積過程について地質・観測データをも

とに考察し、数値シミュレーションに必要な初期条件、境界条件に関する情報を整理した。

2006年崩壊イベントにより生じた崩壊物質の大半は(水中)火砕流となりモンセラート島東方沖に堆積した。その約30-50%は島の近傍に定置し、堆積物は2つの高まりと堤防構造、それに流走方向に長く伸びた地形的特徴を有する。構成物は、塊状で淘汰が悪く粗粒粒子に富む。一方、残りの50-70%は混濁流として長距離流走し、細粒物質に富むタービダイトとして遠方に広く堆積した。粉体流モデルで検討するのはこのうち粗粒粒子に富む近傍堆積物の特徴である。

地震データにもとづく、崩壊開始から終了までおよそ3時間だが、次第に規模が大きくなり、主要な崩壊は35分間で発生したと推定される。また、その35分間には2~3回のピークが存在し、崩壊が段階的に発生したことが示唆される。崩壊量と地震の強度(および単位時間あたりの回数)変化をもとに、主崩壊時の平均崩壊率(火砕流の初期流量)を見積もると、 $4.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。これらの地震波の強度とその継続時間から推定される火砕流の流量変化と、地形データをもとに、火砕流の発生・流走過程および堆積物形状の再現を試みた。

### (3) 火砕流モデルの天然の系への適用

溶岩ドーム崩壊イベントに伴った火砕流とその堆積物の形成過程について、浅水流型火砕流モデルを用いて数値実験を行い、堆積物の観察事実(分布、形状)との整合性およびモデルの妥当性について考察した。摩擦モデルについては、一般的に用いられる係数一定型クーロン摩擦モデルと、摩擦係数の物理量依存性を考慮して無次元慣性数を導入した摩擦モデル(Maeno et al., 2013)を用いた場合について調べ、両モデルが結果に及ぼす影響について考察した。初期条件は、溶岩ドームが一気に崩壊して粉体流が発生する constant mass 型と、火砕流流量(崩壊量)を観測データ(地震の強度変化および継続時間)に従う形でインプットする flux function 型について検討した。Flux function は、waxing/waning phase を有し、2つまたは3つのピークで特徴づけられる。流出体積、火砕物平均粒径、摩擦角などの物理量については従来の研究をもとにした範囲で検討することとし、観察・観測データと矛盾しない初期条件、境界条件のもとでの多数のパラメータ・スタディを行った。地形データについてはモンセラート島の標高データおよび沖合水深データを結合したものをを用いた。

数値シミュレーションの結果、慣性数依存摩擦モデルを適用し、初期条件として flux function (2ピーク)、流出体積およそ  $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、摩擦角  $8-10^\circ$ 、平均粒径  $1 \text{ mm}$  という条件のもとで、火砕流堆積物の特徴、すなわち堤防状の構造を有し、流走方向に長く伸びた堆積物形状とその分布をよく再現できることがわかった(図2)。

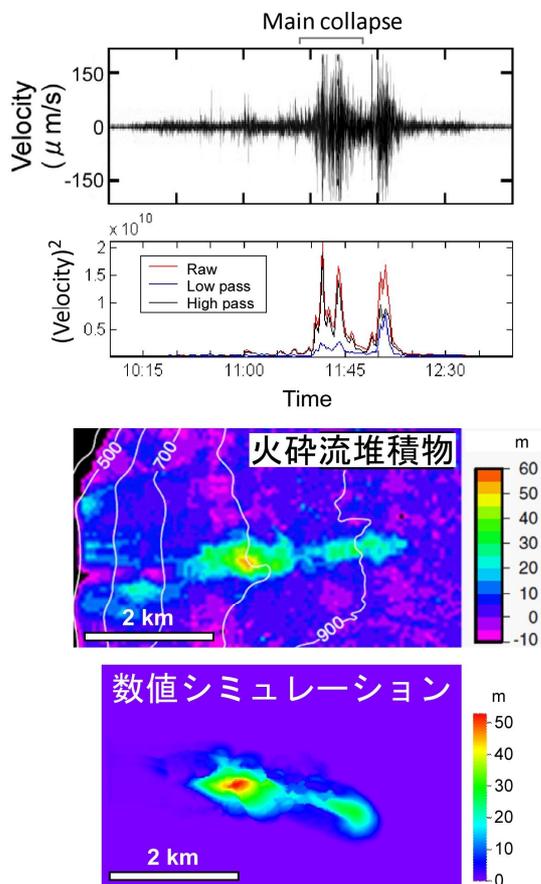


図2 (上) 溶岩ドーム崩壊型火砕流(カリブ海スフリエールヒルズ火山)の数値シミュレーションの初期条件として用いた崩壊時の地震データ(高周波成分)(下)慣性数依存摩擦則を導入した浅水流モデルにより、火砕流の堆積物形状(厚さ分布)や流走距離が良く再現されるようになった。

また、慣性数依存摩擦則を用い、slope break point を超えて流走する時にのみ堤防状構造が形成された。これは、単純系での数値実験で得られた結果とも調和的である。

スフリエールヒルズ火山の研究により、堆積物の厚さ分布、形状の生成過程に、火砕流流量の変化が大きく関係していること、堆積物形状の再現には、慣性数の効果(粉体の流れの物理量)を摩擦則に導入する必要があることが明らかとなった。また、火砕流モデルを用いることにより、火砕流の初期条件、給源過程に対して制約を与える、インバージョンが可能になった。当該火山では2003年にも大規模な溶岩ドーム崩壊が起き火砕流堆積物が形成されたが、堆積物形状は2006年と大きく異なる。火砕流モデルを用いた検討の結果、この違いは流出率(～崩壊率)の違いで説明できる可能性があることがわかり、火砕流モデルが給源過程の推定にも有用であることを示した。

#### まとめ

粉体摩擦角や粒子サイズなどの粉体流の物理量に依存した慣性数により表現される

摩擦モデルを浅水流型数値モデルに導入することにより、火砕流堆積物の特徴を良く再現できることがわかった。従来広く用いられている係数一定型摩擦則による粉体流モデルでは流走距離を過大評価する傾向があったが、慣性数依存摩擦モデルを導入することによりこの点が改善された。ただし、単純化した初期条件のもとでは堆積物の再現は難しく、天然の系に適用する際には、火砕流の初期流量変化を、地震観測データなどをもとに時間関数で表現するなどして、観測・観察データを用いて初期条件に制約を与えることが重要であることがわかった。

また、粉体摩擦角や粒子サイズの効果についてパラメータ・スタディを行うことにより検討し、堆積物形状に及ぼす効果を具体的に明らかにすることができた。一方、火山体の斜面角度や地形が火砕流の挙動や堆積物の特徴に及ぼす影響についてはまだよくわかっていない点が残されており、他の事例をもとに今後さらに検討する必要がある。

本研究のモデルや手法を用いることにより、火砕流の流速や堆積物形成の時間発展の様子など、堆積物の野外観察結果のみからは構築できない火砕流の流走・定置のダイナミクスに大きな制約を与えられる可能性がある。また、噴火発生時の火砕流挙動の即時予測や、火砕流の流走距離に注目したハザードマップ作成の際にも、適切な粉体摩擦則を導入した数値モデルによる評価が重要であることが本研究により示された。研究成果の一部は国際誌で公表した。また、国内および国際会議においても発表した。

#### 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4件)

1. Maeno, F., Nagai, M., Nakada, S., Burden, R., Engwell, S., Suzuki, Y. and Kaneko, T., Constraining tephra dispersion and deposition from three subplinian explosions at Shinmoedake volcano, Kyushu, Japan, 2011., *Bulletin of Volcanology*, 76, 823, doi:10.1007/s00445-014-0823-9, 2014. (査読有)
2. Maeno, F., Hogg, A.J., Sparks, R.S.J. and Matson, G.P., Unconfined slumping of a granular mass on a slope., *Physics of Fluids*, 25, 023302, doi:10.1063/1.4792707, 2013. (査読有)
3. Maeno, F., Nakada, S., Nagai, M. and Kozono, T., Ballistic ejecta and eruption condition of the vulcanian explosion of Shinmoedake volcano, Kirishima, Japan on 1 Feb, 2011., *Earth Planets Space*, 65, 609-621, 2013, doi:10.5047/eps.2013.03.004. (査読有)
4. Maeno, F., Suzuki-Kamata, K. and Kiyokawa

S., Kikai caldera and southern Kyushu: products of a large silicic magmatic system, in IAVCEI 2013 Fieldtrip Guidebook. 火山, 58, 1-26, 2013. (査読有)

〔学会発表〕(計 9 件)

1. 前野 深, 濃密な粉体流の流動・堆積過程のモデル化と火砕流への応用, 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), 5月27日, 2015.
2. 前野 深・Sparks, R.S.J.・Hogg, A.J.・Talling, P., スフリエールヒルズ火山2006 年溶岩ドーム崩壊イベントに伴った火砕流の堆積過程: 粉体流モデルからの洞察, 日本火山学会2014 年秋季大会, 福岡大学(福岡県福岡市), 11月3日, 2014.
3. Maeno, F., R.S.J Sparks, A.J. Hogg and P. Talling, Depositional process of a dense pyroclastic flow from the 2006 dome collapse event at Soufriere Hills Volcano, Montserrat: insights from granular flow simulation, Cities on volcanoes 8, Yogyakarta, Indonesia, 9月8日, 2014.
4. Maeno F., Sparks, R.S.J., Hogg, A.J. and Talling, P.J., Friction properties controlling deposit shape of dense pyroclastic flows: insights from recent dome collapse events in Soufriere Hills Volcano, Montserrat, IAVCEI Scientific Assembly, かがしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市), 7月21日, 2013.
5. Maeno, F., R.S.J Sparks, A.J. Hogg and P. Talling, 火砕流堆積物の形状をコントロールする粉体の摩擦特性: カリブ海スフリエールヒルズ火山における溶岩ドーム崩壊イベントからの洞察, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 5月20日, 2013.
6. Maeno, F., A.J. Hogg, R.S.J. Sparks and G.P. Matson, Unconfined slumping of a granular mass on a slope, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, California, USA, 12月6日, 2012.
7. 前野 深・A.J. Hogg・R.S.J. Sparks・G.P. Matson, 斜面での粉体柱の崩壊現象について, 日本火山学会 2012 年秋季大会, エコールみよた(長野県御代田町), 10月16日, 2012.
8. Maeno, F. Slumping of a granular mass on an unconfined slope, Soft matter physics and solid earth sciences: unifying concepts, 東京大学地震研究所(東京都文京区), 6月6日, 2012.
9. 前野 深・A.J. Hogg and R.S.J. Sparks, 斜面上での粉体柱崩壊現象のモデル化とその地質学的意義, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 5月20日, 2012.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

前野 深 (MAENO, Fukashi)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号: 20444078