

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03770

研究課題名(和文)火砕物の運動に関する包括的な数値モデルの開発

研究課題名(英文)Development of a comprehensive numerical model for pyroclast transport

研究代表者

常松 佳恵 (Tsunematsu, Kae)

山形大学・理学部・准教授

研究者番号：90722207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：火砕物の運動に関する包括的な数値モデルの開発を目指して、火砕物の大きさに関連した運動の違いを把握するとともに、把握した法則を数値モデルに組み込むことを目的として行われた。野外・室内での実験と実験によって得られた画像や監視カメラ画像の解析などから大きさに関わる火砕物の運動の違いを解明し、特に運動に影響を及ぼす要因は空気抵抗であることが分かった。一方で、大きな要因ではないかと疑われていた揚力については空気抵抗に比べて火砕物の飛距離に及ぼす影響は小さく、無視できるほどであることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、火山防災における噴石や火山灰などの火砕物の影響範囲についての予測に貢献する数値モデルの改良を行った。また、数値モデルを用いて実際に噴火した際の火山岩塊の飛距離やエネルギーを推定し、火山災害軽減に関する啓発をする結果となった。特に桜島の2020年6月4日の噴火では居住地の中に岩塊が落下したことから、着地エネルギーなどを推定し、その結果は新聞で報道された。また、本研究によって問題提起された火砕物の大きさによる運動の違いは、抵抗係数の違いだけでは説明できないパラドックスも含んでおり、学術的にも注目を集めている分野である。引き続き研究を続けていくことが望まれる。

研究成果の概要(英文)：This study was conducted with the aim of developing a comprehensive numerical model to simulate pyroclasts transport. To this end, we also aimed to understand how the pyroclast size affects its motion, and to incorporate the natural laws acting on pyroclasts into our numerical model. From field experiments, laboratory experiments and computer image analysis, we have clarified what the differences in pyroclasts transport are dependent on size, and found that air friction is the most important factor controlling the travel distance of pyroclasts. On the other hand, although we suspected lift to be one of the major controlling factors in pyroclast travel distance, we found that lift had only a small effect.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山岩塊 火砕物 飛距離 着地エネルギー 空気抵抗 揚力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

火山岩塊 (Ballistic Projectiles) と火山灰 (Ashes) はどちらも爆発的噴火によって噴出されるマグマの破片でありながら、その運動はスケールの違いなどから別々の現象として捉えられてきた。そのため、降灰や火山岩塊の落下が人間生活に及ぼす影響予測も別々に行われてきた。ただし、本来ならば火山岩塊や火山灰といった大きさの違いに関係なく、同じ物理法則で考えられる現象のはずである。よって、これらの火砕物は一つの数値モデルで表すことが可能なはずである。しかし、火砕物を一つの数値モデルで表すには、火砕物の大きさによる違いなどを、どのパラメータで表すことができるのか、を考える必要があった。そこで、本研究では移流拡散モデルの拡散によって違いが表されるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究では火山岩塊や火山灰の大きさの違いを表す物理モデルを作成するため、その違いがどのように火砕物の運動に表れ、それを数式などでどのように記述できるかを明らかにすることを目的とした。

また、このような違いを表す物理モデルを用いて、噴火時の噴出速度や噴出角を推定し、さらにはその推定を入力値としてシミュレーションに適用し、今後噴火が起こった際の影響範囲や着地時のエネルギーを計算して防災に生かすことを考えた。

3. 研究の方法

火砕物の大きさによる飛翔の違いを明らかにし、さらに数値モデルを防災に役立てるため、本研究では実験や野外における調査および実際の噴火の観測などを行い、実験や噴火観測によって得られた画像データを解析して火砕物の飛翔に関する物理の解明や影響範囲予測などを行った。

TrashCano 実験

Trash すなわちポリバケツを火道もしくは火口に見立て、そこから火砕物に見立てたボールや3D 模型を噴出させてそれらの軌道を観察する実験である。ポリバケツの中に液体窒素を封入したペットボトルを入れ、液体窒素が膨張してペットボトルの内圧が強度を上回ることによって爆発を起こす。これらの実験ではカメラを 2 台以上利用してそのポジションと仰角を正確に記録しておき、3 次元で軌道が取れるような解析を行った。

風洞試験

火砕物の大きさに左右されるパラメータとして飛翔に一番大きな影響を与えるものが、空気抵抗係数である。空気抵抗は火砕物の形状や表面の滑らかさなどによって決まるとされているが、その大きさはレイノルズ数に依存する。火山灰の抵抗係数についての計測結果はあるものの、それより大きな火山岩塊に特化した抵抗係数の計測は世界でもほとんど行われておらず、本研究では実際の火山岩塊を用いた風洞試験を行い、抵抗係数、揚力係数などを計測した。特に、回転を与える場合や与えない場合による違いと、大きさによる違いに注目して計測した。

地上踏査と空中写真による火砕物の分布調査

本研究ではハザードマップなどを作成するための噴出条件の推定や影響範囲等予測も目的としていたが、そのためには実際の噴火によってどのような範囲に岩塊や火山灰が飛んだかを調査する必要がある。そのため、空中写真や無人航空機 (UAV) による写真を用いて過去の噴火によってもたらされた火山岩塊や火砕物の分布を調査し、そこから噴出条件を推定する作業を行った。特に、蔵王火山 1895 年の噴火や、吾妻火山 1331 年噴火における火山岩塊の分布、さらに 2014 年の御嶽山の噴火によって形成されたインパクトクレータの分布を求め、岩塊の影響がどのような範囲に及んだかを調べ、それをシミュレーション結果と比較することで噴出角・速度といった噴出条件を求めた。

噴火中の火砕物の飛翔観測と最近の噴火における岩塊のスピード推定

本研究で注目したことの一つにガスの流れの影響がある。火砕物が噴出する際には、爆発の勢いをガスが火砕物に伝え、その結果火砕物の運動速度が大きさなどによって変化するものと予想された。そこで桜島において火砕物が実際に火口から噴出する所を、ハイスピードカメラを用いて観測した。さらに、2020 年 6 月には約 30 年ぶりに桜島から噴出した岩塊が居住区域に達した。この噴火を受けて、岩塊の噴出速度を監視カメラの画像と岩塊の飛距離分布などから予想した。

4. 研究成果

TrashCano 実験

TrashCano 実験では、約 60 個のボールの軌道を 3 次元で捉えることができ、その結果からは

ボールの大きさに依存した明らかな飛距離の違いが得られなかった。代わりに、噴出時のボールの力積が、ボールの大きさによって左右されることが明らかになった。

風洞試験

風洞試験では蔵王山の 1895 年噴火における火山岩塊を用いて風洞試験を行った。また、風洞試験には実際の火山岩塊は重すぎるため、その形状を 3D スキャナで計測し、そこから 50%、150% の大きさの模型を作成して、50、100、150% の 3 種類の大きさの試験体で風洞試験を行った。その結果レイノルズ数の違いによる岩塊の抵抗係数、揚力係数が計測された。今まで、火山岩塊の飛翔を計算する数値モデルには抵抗係数のみが考慮されている状態であったが、この際に受けて揚力係数も考慮できる形に改良し、抵抗係数と揚力係数の飛距離に与える影響を調べた。その結果、抵抗係数が一番飛距離に影響を及ぼし、揚力係数が飛距離に及ぼす影響は抵抗係数の 10 分の 1 程度とかなり小さいことが分かった。また、火山岩塊が回転をした際には周囲のガスの流れが安定するため、レイノルズ数に依存せず一定の抵抗を示すことが分かった。

地上踏査と空中写真による火砕物の分布調査

蔵王山における 1895 年の噴火の噴出物調査

蔵王山では 1895 年 2 月、8 月、9 月に水蒸気噴火が御釜火口から起こった。この噴火では火山灰や火山岩塊を噴出し、堆積物は今も御釜の周辺で見ることができる。この分布を調査した結果、岩塊の落下地点の分布を取得した。また、この岩塊の分布を数値モデル Ballista を用いてシミュレーションした結果を比較して、この噴火における岩塊の噴出角・速度を求めることができた。今後、火山活動が活発化した際にはこれらの噴出条件を基にシミュレーションを行って火山岩塊による影響範囲を予測することができる。

吾妻山 1331 年（大穴）噴火の噴出物調査

吾妻山では 1331 年に大穴火口からブルカノ式噴火が起こり、蔵王山と同様火山灰や火山岩塊を噴出した。この噴火では非常に密度が高く、エッジのシャープな火山弾・岩塊が噴出したことが分かっていたが、この分布が明確に把握されていなかったため、UAV によって大穴火口周辺の写真を撮影し、野外調査と合わせて火山弾・岩塊の分布を取得した。さらに、数値モデル Ballista を用いてシミュレーションを行い、その結果と比較することで噴出条件を求めた。大穴火口は浄土平と呼ばれる観光地としてよく知られた場所に近く、近年は大穴火口周辺の噴気活動が活発になって来ており、2019 年には火山性微動などが観測されるなどしてレベルが 2 に上がったこともある。そのため、次の噴火による影響範囲や落下の際のエネルギーを予測する際に、本研究の成果が基礎データとなることが期待される。

御嶽山 2014 年噴火のインパクトクレータの分布調査

御嶽山の噴火による噴石の分布は Kaneko et al.(2016)によって空中写真から大雑把に求められていたが、それはいくつかの地点での火山岩塊の単位面積あたりの個数を調べて、おおよその等数密度線を書いたに過ぎなかった。また、Tsunemastu et al. (2016)は Kaneko et al. (2016)の結果を基にこの噴火における噴出速度を推定していたが、比較の際に用いた分布の情報の精度があまり良くなかったため、得られた結果の精度も良くなかったのではないかと考えられる。よって本研究ではこの噴火における噴石の落下地点の分布を見直すため、噴火当時に取られた複数の写真からインパクトクレータの分布を取得した。この時に取得されたインパクトクレータの数は 6000 にも及び、このデータを用いて新たな噴出速度推定を行うことができた。

噴火中の火砕物の飛翔観測と最近の噴火における岩塊のスピード推定

火砕物の飛翔に関しては、実験などで解明できる点もあるとはいえ、実際の噴火でどのような状況になっているかは分からない。したがって、噴火を直接観測し、TrashCano 実験や野外での観察などから得られた結果が実際の噴火で起こっているかどうかを確かめる必要があるため噴火観測を行った。観測では 2 台のハイスピードカメラを用いたが、どれくらいのズームが最適か分からず、二つのカメラのズームを変えて観測していたため、ズーム倍率が低い方のカメラでは岩塊の飛翔を捉えることができず、高倍率ズームのカメラでのみ岩塊の飛翔を捉えることができた。この観測で注目すべき点は、火山灰を多く含んだ噴煙と火山岩塊の噴出のタイミングがずれていたことである。火山灰のような小さな粒子の噴出と火山岩塊の噴出が同じ爆発のメカニズムでは表されないことを示唆している。

2020 年 6 月 4 日に起きた桜島の噴火では火山岩塊が 3.4 km 離れた居住区域に達し、直径 6 メートルほどの大きなインパクトクレータを形成した。岩塊の大きさは着地時に破砕してしまっていたが、現地に残されていた破片から 70 cm 以上であることが分かった。この噴火による岩塊の飛翔の様子は火口から 6.5 km ほど離れた国交省の監視カメラで捉えられており、その映像を解析して岩塊が火口の上空約 1.8 km の標高 2870 m 地点まで届いたことが分かった。この高さまで鉛直上向きの軸の中心に岩塊が噴出したと考えて、居住区域に到達した岩塊の噴出速度と着地速度を推定したところ、噴出速度の平均は約 110 m/s とブルカノ式噴火の中ではあまり大きくないものの、岩塊の着地速度は 150 m/s に達し、非常に大きなエネルギーを持って飛来したことが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsunematsu Kae, Ishii Kyoka, Yokoo Akihiko	4. 巻 71
2. 論文標題 Transport of ballistic projectiles during the 2015 Aso Strombolian eruptions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-019-1029-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujita E., Iriyama Y., Shimbori T., Sato E., Ishii K., Suzuki Y., Tsunematsu K., Kiyosugi K.	4. 巻 14
2. 論文標題 Evaluating Volcanic Hazard Risk Through Numerical Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 604 ~ 615
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2019.p0604	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 常松佳恵, 瀬尾和哉
2. 発表標題 火山岩塊の空力学的特性と飛翔メカニズムの研究
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsunematsu, K., Fujita, E., Kubo, T., Miyagi., Y., Yoshimoto, M., Honda, R., and
2. 発表標題 Ballistic Risk Assessment of Climber Movement on Mountains
3. 学会等名 27th IUGG General Assembly
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kae Tsunematsu, Ben M Kennedy, Christopher A Gomez, Rebecca H Fitzgerald, BastienChopard
2. 発表標題 Keywords:Statistical Analysis of the Distribution of Ballistic Deposits using theBALLISTA Model
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 K. Tsunematsu, K. Seo, M. Kawakami
2. 発表標題 Numerical simulation of ballistic trajectories based on wind tunnel experiments
3. 学会等名 JpGU - AGU joint meeting 2020, Online
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shusaku Saruta, Kae Tsunematsu, Isao Motoyama
2. 発表標題 Dynamics of ballistic projectiles based on Trashcano experiment
3. 学会等名 JpGU - AGU joint meeting 2020, Online
4. 発表年 2020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
研究分担者	山田 大志 (Yamada Taishi) (60804896)	京都大学・防災研究所・助教 (14301)	

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
研究 分 担 者	横尾 亮彦 (Yokoo Akihiko) (70420403)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	

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1件

国際研究集会 JPGU-AGU Joint meeting 2020	開催年 2020年～2020年
---------------------------------------	--------------------

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