

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：83501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01256

研究課題名(和文) 画像解析と数値モデルに基づいた噴石の運動メカニズムの解明

研究課題名(英文) Transport mechanism of ballistic projectiles based on image analysis and numerical models

研究代表者

常松 佳恵 (Tsunematsu, Kae)

山梨県富士山科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：90722207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は噴石の運動メカニズムについて画像解析と数値計算技術を駆使して解析を行い、重要な知見を得ること、それを防災対策に結び付けることが目的であった。数値モデルを、地形効果を考慮できるように改良し、このモデルを用いて行ったミュレーションの結果を観測された噴石のインパクトクレータの分布と比較することによって、噴出時の方向、角度、速度と着地時の速度およびエネルギーを明らかにすることができた。

使用された数値モデルは、共同研究者らの要望もあり、ソフトウェア"Ballista"とし、Web上で公開した。Ballistaは防災研究やハザードマップの作成など実際の防災の現場において活用されている。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to understand the mechanism of ballistic transport using the technology and skill of image analysis and numerical simulations. The outcome should be fruitful for the measure of hazard mitigation due to volcanic eruptions. A numerical model of ballistics was improved to include topographic effect and this improved model was used to simulate the distribution of ballistic blocks on the ground of the 2014 Ontake eruption. The simulated distribution of blocks was compared to the distribution of impact craters obtained from the pictures after the eruption, and the ejection direction, angle and velocity were estimated. Using these ejection conditions, we also estimated the landing velocity and energy.

This numerical model is released online as a software "Ballista" by adding graphical user interface. The Ballista software is now utilized in studies or works for making hazard maps.

研究分野：Physical Volcanology

キーワード：噴石 画像解析 水蒸気噴火 Ballista

### 1. 研究開始当初の背景

2014年の御嶽山の噴火では噴石により多くの犠牲者が出た。このように多数の犠牲者を出すに至った原因は、その脅威が知られていなかったことにある。どのくらいの大サイズの粒子が噴火によって噴出されるのか、粒子がどのくらいで速度で降下するのか、どの程度の殺傷能力もしくは破壊力を持っているのか、などの基礎的な情報が一般にはほとんど知られていなかった。

噴石に関する数値モデルとしては“Eject!”という単体粒子の軌道を計算するモデルがアメリカ地質調査所のホームページで公開されており(Mastin 2002) 広く使われている。しかし、複数の粒子を計算できるモデルは研究成果としては公開されているものの、数値モデルは公開されておらず、利用が進んでいない。

### 2. 研究の目的

本研究は、(1) 噴石と呼ばれる粒子の運動に関して、どのくらいの大サイズの粒子が噴火によって噴出されるのか、噴出速度と着地速度はどれくらいかなどの粒子運動に関するメカニズムを画像解析と数値モデルから明らかにすること。(2) 得られた粒子運動のメカニズムを基に数値モデルの改良を行うこと。(3) 数値モデルを用いた噴石のハザードマップ作成と防災対策への応用の働きかけを行うことを目的として研究を進めた。

### 3. 研究の方法

#### 3-1 御嶽山の噴火における放出速度、着地速度の推定

御嶽山 2014 年の噴火の際には噴火発生時には監視カメラなどはあったものの、噴石の運動をスケール入りで記録できた画像はほとんどなく、そこから速度などを求めることは不可能に近かった。そのため、噴石のインパクトクレータの分布と数値モデルによる計算結果を比較することによって、噴出時の初速度を求めた。

計算には Tsunematsu et al. (2014) の数値モデルをベースに、粒子の空気抵抗、地形効果を含めたものを用いた。粒子の空気抵抗を含む場合の計算では Alatorre-Ibargüengoitia and Delgado-Granados (2006) による空気抵抗と重力の項を含む以下の計算式を用いた。

$$m \frac{D\vec{v}}{Dt} = - \frac{AC_D \rho_a (\vec{v} - \vec{u}) |\vec{v} - \vec{u}|}{2} - m \vec{g}$$

ここで、 $m$  は粒子の質量、 $A$  は空気の流れに直行する方向の粒子の断面積、 $C_D$  は粒子の抵抗係数、 $\rho_a$  は空気の密度、 $g$  は重力加速度、 $v$  は粒子の速度、 $u$  は周囲の流れの速度である。国土地理院がホームページ上で公開した噴火時の火口分布から、詳細な火口位置を考慮し、同じく国土地理院が公開している 10 m

メッシュの 数値標高モデル (DEM) を用いることによって地形効果を考慮した。数値計算に必要な噴石の大きさに関しては、現地調査において山小屋の屋根を貫通する被害をもたらしていた噴石の多くが直径 20 cm 程度であったためサイズを 20 cm とした。噴石の密度に関しては現地で採取したものの重量を水中および大気中で測定し、6 つの粒子の平均値を求めたところ  $2300 \text{ kg/m}^3$  を得たのでこれを計算に用いた。

比較のために利用したインパクトクレータの分布は Kaneko et al. (2014) が写真判読を用いて作成したデータを利用した。

#### 3-2 阿蘇山 2015 年のストロンボリ式噴火における噴石運動メカニズムの推定

噴石の運動に関するメカニズムの解明を行うため、阿蘇山の 2015 年 4 月 25 日の噴火をビデオカメラで記録し、画像から粒子の運動速度や抵抗に関する情報などを解析して粒子の放出深度やガスの流れの影響等に関する考察を行った。

ビデオ観測は図 1 のように阿蘇山の中央火口丘の南西側、火口を見下ろせる崖の上で行った。



図 1: 阿蘇山の火口周辺地図。A と書かれた地点にカメラを設置して観測を行った。

得られたビデオデータはフレームごとに静止画像へ切り出しを行い、これらの画像から噴石の軌跡を抽出した。画像のフレームレートは約 30 FPS、得られた画像の解像度は  $1920 \times 1080$  ピクセルであった。これらの画像はカメラによる歪曲を補正し、画像解析に用いられた。

画像のピクセル値と実際の長さの関係は噴火当時に作成された数値標高データ (DEM) を用い、画像の傾きなどを考慮して導かれた。その結果、水平方向は  $5.8 \text{ cm/pixel}$ 、鉛直方向は  $3.9 \text{ cm/pixel}$  という解像度を得た。

ビデオから切り出した画像は撮影した時間の情報を所持しているため、噴石運動の時間発展を追うことができる。よって、各粒子において、時間( $t$ )、水平方向の座標( $x$ )、鉛直

方向の座標(y)の情報を取得してそれらが描く放物線状の軌跡を得た。

注目した噴火イベントは2015年4月25日の午後7時から8時の間に起こった5つのイベントである(図2)。

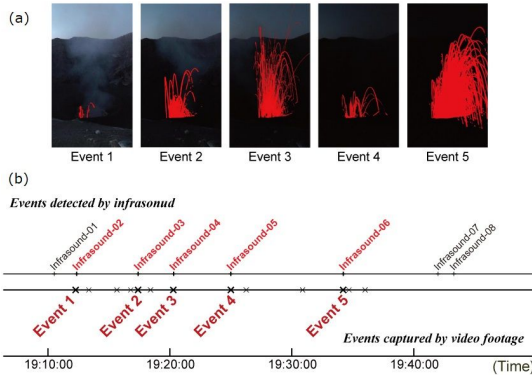


図2: 阿蘇山2015年4月25日のイベントのうち、本研究で注目したイベント

本研究では空振・地震によるエネルギーと軌跡の高さや噴出イベントの特徴との比較を行いたかったため、空振で捉えられたイベントに対応するものをビデオ画像からも抽出して解析に用いた。

#### 4. 研究成果

4-1 御嶽山の火口は地獄谷周辺とその北西の尾根に複数形成された。噴石がどの火口から噴出したのかは不明であったが、その後のヘリコプターからの写真等で黒い噴煙を噴き上げていた中央の火口から噴出したと仮定して計算を行った。(図3)



図3: 御嶽山の2014年噴火の火口周辺の地図。

計算では噴石が噴出した方向と角度を計算結果とインパクトクレータの分布と比較することによって決定した。

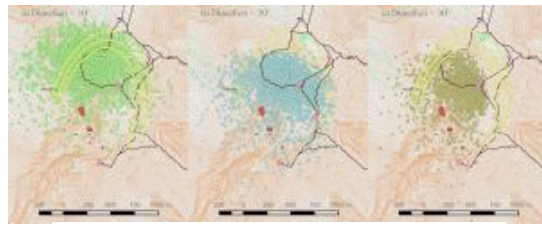


図4: 方向を北から(a)10度、(b)20度、(c)30度と変化させて計算を行った結果を実際のインパクトクレータの分布(黄色の線)と比較した。

図4の通り、噴出した方向を北から10度、20度、30度と変化させて計算を行った結果、20度の場合が実際のインパクトクレータの分布とよく合うことから、方向は北から20度とした。また、図5の通り、鉛直方向から噴出角を20度、40度、60度、80度と傾けて計算を行った結果、20度の場合が最もよく実際のインパクトクレータの分布と合うことから噴出角度は鉛直方向から20度とした。

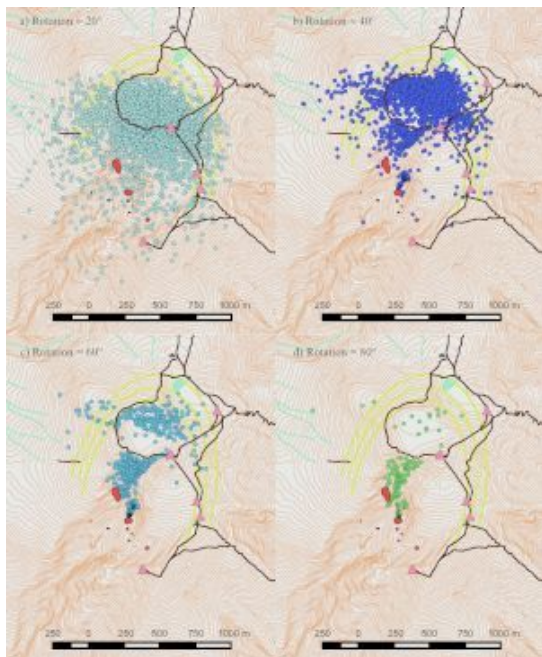


図5: 角度を鉛直方向から(a)20度、(b)40度、(c)60度、(d)80度と変化させて計算を行った場足の粒子の分布を実際のインパクトクレータの分布(黄色の線)と比較したもの。

このように得られた「北から時計回りで20度、鉛直方向からも20度」という計算条件を用い、噴出速度と粒子の抵抗係数を変化させて噴石のシミュレーションを行った(図6)。

Kaneko et al. (2016) で得られたインパクトクレータの分布から噴石の最大到達距離は1kmほどと考えられたため、図6のグラフから粒子の到達距離が1kmになるところを読み、噴出速度を推定した。Alatorre-Ibargüengoitia and Delgado-Granados (2006) から実験によって求められている空気抵抗の最小値(0.62)と最大値(1.01)に対応するところの噴出速度を読むことにより、今回の噴火の噴出速度は145-185 m/s



であったことが推定できる。

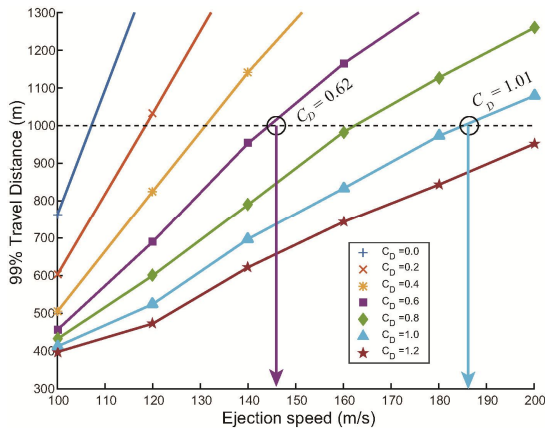


図 6：噴出速度を変化させて計算を行った場合の火口から 99 パーセントの粒子が移動した水平距離。点線は Kaneko et al. (2016) で求められた噴石の最大到達距離。

さらに、噴出速度 145 - 185 m/s でシミュレーションした場合の着地速度を求めると、噴出速度と着地速度の関係を表すグラフ(図 7) からその速度は 83-85 m/s、これを基に計算した着地の際の各粒子の運動エネルギーは  $3.8 \times 10^4$  to  $4.5 \times 10^4$  J と推定された。

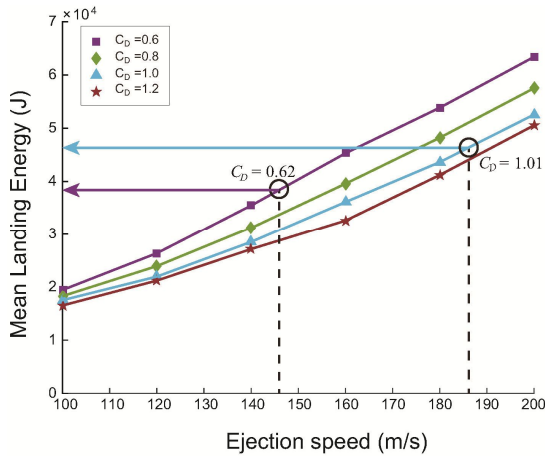


図 7：噴出速度を変化させて計算を行った場合の火口から 99 パーセントの粒子が移動した水平距離。点線は Kaneko et al. (2016) で求められた噴石の最大到達距離

求められた着地速度は時速 300km 程度になり、着地時の運動エネルギーの推定値は Spence et al. (2005) による鉄筋コンクリートの屋根を噴石が貫通するエネルギーの基準値である 10000 J を超える値であった。

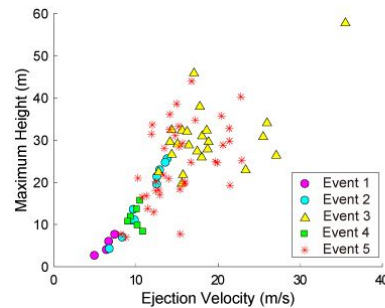
4-2 阿蘇山におけるビデオ観測の結果からは、噴石の噴出された深さの情報、噴出時の速度、最高到達地点、粒子の大きさの情報などを 5 つの噴出イベントについて、合計 82 本の軌跡を抽出することによって得た。また、今回のイベントにおけるガスの効果を調べるた

め、ガスの流れを反映していると考えられる空振および地震のエネルギーを求めた。

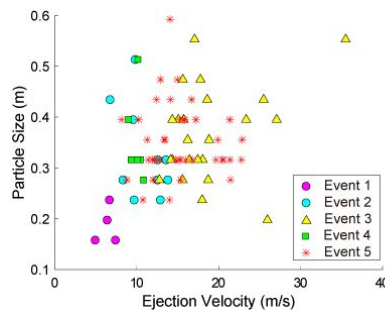
噴石が噴出した深さを求める際には、軌跡を火道内に延長した場合にそれらが一番細く集約される深さを噴出深度とした。その結果、どのイベントについても 11~13m という狭い範囲に深度が求められた。一方、空振や地震から求められる深度は 200m ほどと軌跡から求められる深度よりもかなり深い。これは火道内のマグマが約 200 m の深さで発泡などの何か振動を生む要因を発生させ、深さ 11~13m で実際に破碎したマグマを噴出させたのではないかと考えられる。今回のデータだけでは火道内のマグマの流れは解析できないが、今後、今回のようなストロンボリ式噴火のメカニズムを解明する手掛かりになると考えられる。

各軌跡から得られた噴出速度、粒子サイズ、最高到達点の関係を図 8 に示す。

(a)



(b)



(c)

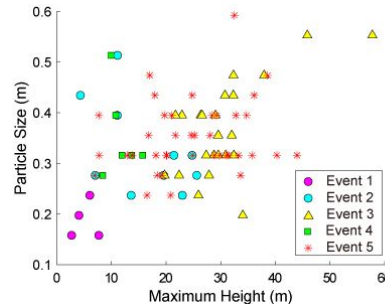


図 8: (a) 噴出速度に対する最高到達地点の高さ。(b) 噴出速度に対する粒子の大きさ。(c) 最高到達地点の高さと粒子のサイズ。

ここで得られた噴出速度の大きさは、今までの研究で得られたストロンボリ式噴火の噴出速度は、他の多くの火山におけるストロ

ンボリ式噴火の観測結果が数 m/s ~ 100 m/s であることから (Harris et al., 2012) 同等か小さい方に分類される。

噴出速度と最高到達地点の間には相関が見られるが、粒子サイズとの間には特に目立った相関がみられない。これは、粒子サイズによる速度のソーティングが火道内でほとんど行われていなかったことを示唆している。また、軌跡から求められた噴出深度にバリエーションがあまりないことを考えると、各粒子の噴出速度はガスやマグマの流れの様相が支配している可能性が高い。この結果も今後ストロンボリ式噴火のメカニズムを解明していく上で重要な手掛かりになると考えられる。

本研究では得られた軌跡とシミュレーションとの比較も行った。シミュレーションに用いた式は御嶽山の時と同じものを用い、抵抗係数  $C_D$  も Alatorre-Ibargüengoitia and Delgado-Granados (2006)の実験結果から得られた噴石の係数の範囲とした。

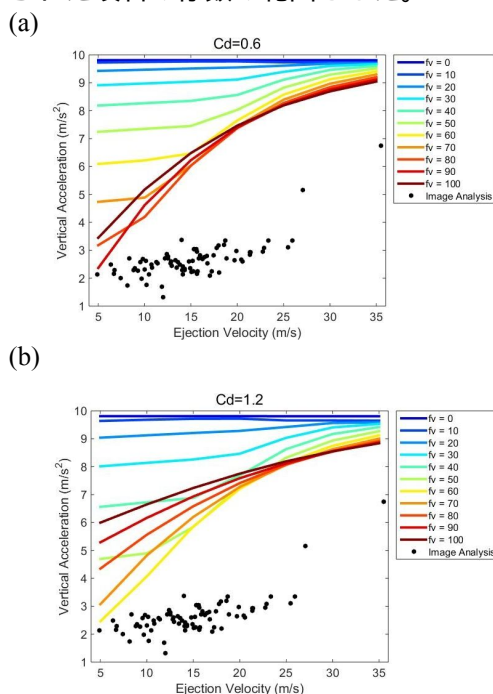


図 9: 軌跡から求められた加速度 (黒点) と、数値計算によって求められた加速度 (カラー線)。数値計算結果のラインの色はガスの流速の違いを表す。(a) 抵抗係数が 0.6 の場合。(b) 抵抗係数が 1.2 の場合。

図 9 に示したように、シミュレーションとの比較では、観測によって求められた加速度値がシミュレーション結果と交わる部分が見られなかった。このことは前述の抵抗項と重力項に何らかの効果を足さなくては実際の粒子の運動を表現できないことを示唆している。その可能性として考えられるのは噴出時に粒子の運動に影響を及ぼす圧力項である。de' Micielli Vitturi et al. (2017) は圧力項を含む数値モデルを採用することによって水蒸気噴火のようなガス放出の多い噴火における噴石の運動を再現し、実際の噴火によ

く合う結果を得た。今後はストロンボリ式噴火だけでなく、他の噴火様式でもガスの関与などを詳しく見ていき、どのような数値モデルが妥当か検討する必要がある。

#### 4-3 数値モデルのソフトウェア化とネット上での無償配布

先に挙げたような御嶽山や阿蘇山を例に用いて行われた研究で用いた数値モデルは、改良の余地はあるものの、実際の噴火における噴出および着地速度、噴石による影響範囲を予測するツールとして有用である。他の研究者やハザードマップ等を作成する技術者などに公開して利用を促すため、ユーザーが使いやすいようにグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)を作成して通常のソフトウェアのような形式にし、Github と呼ばれる無料のプログラムコード公開サイトにアップロードした。

(<https://github.com/kaetsunematsu/BallistaGUI>) ここには Java で書かれたソースコードの他、User Guide も置いてあり、ユーザーが自由にダウンロードして使用することができるようになっている。

2016 年にニュージーランドのタウポで行われた噴石に関するワークショップでは、ニュージーランド全国から集まった科学者がこのソフトウェアを利用し、実際のデータを組み込んで計算を行った。すでにニュージーランド・日本の学生や技術者などがこれを用いた研究や防災関係資料の作成を行っている。

#### <引用文献>

- Alatorre-Ibargüengoitia M. A., Delgado-Granados H. (2006) Experimental determination of drag coefficient for volcanic materials: calibration and application of a model to Popocatepetl volcano (Mexico) ballistic projectiles. *Geophys Res Lett* 33 (11) L11302
- de' Michieli Vitturi M., Esposti Ongaro, T., Tsunematsu, K (2017) Phreatic explosions and ballistic ejecta: a new numerical model and its application to the 2014 Mt. Ontake eruption, IAVCEI 2017 Abstracts, p246
- Kaneko T., Maeno, F., Nakada, S. (2016) 2014 Mount Ontake eruption: characteristics of the phreatic eruption as inferred from aerial observations, *Earth, Planets and Space*, 68:72
- Mastin LG (2001) A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-45, 16 pp. Retrieved 1 January 2016 from <http://pubs.usgs.gov/of/2001/0045/>
- Spence R. J. S., Kelman I., Baxter P. J.,

Zuccaro G., Petrazzuoli S. (2005) Residential building and occupant vulnerability to tephra fall, Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 477-494

- Tsunematsu K, Chopard B, Falcone J, Bonadonna C (2014) A numerical model of ballistic transport with collisions in a volcanic setting. Comput Geosci 63:62–69
- Tsunematsu, K. Ishimine, Y., Kaneko, T. Yoshimoto, M. Fujii T., Yamaoka K. (2016) Estimation of ballistic block landing energy during 2014 Mount Ontake eruption, Earth, Planets and Space, 68:88

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

〔学会発表〕(計 11 件)

〔図書〕(計 1 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

出願状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://github.com/kaetsunematsu/Ballista>  
GUI

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

常松 佳恵 ( TSUNEMATSU, Kae )

研究者番号 : 90722207

### (2)研究分担者

吉本 充弘 ( YOSHIMOTO, Mitsuhiro )

研究者番号 : 20334287

### (3)連携研究者

市原 美恵 ( ICHIHARA, Mie )

研究者番号 : 00376625

金子 隆之 ( KANEKO, Takayuki )

研究者番号 : 90221887