

## 流体で満たされたクラックの長軸モード振動周波数の解析式 An analytical formula for the longitudinal resonance frequencies of a fluid-filled crack

前田 裕太<sup>1\*</sup>, 熊谷 博之<sup>1</sup>  
Yuta Maeda<sup>1\*</sup>, Hiroyuki Kumagai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科研 / 名古屋大学  
<sup>1</sup> NIED/Nagoya University

流体で満たされたクラックモデル(Chouet, 1986)は火山性地震の振動周波数を説明するために最も一般的に用いられているモデルである。Kumagai and Chouet (2000)によってクラックを満たす流体の種類と複素振動周波数の関係が詳細に調べられて以来、様々な火山のLP・VLPイベントの複素振動周波数が流体の種類や状態、クラックサイズや形状などと結びつけて解釈されてきた。これまで、クラックモデルの計算は差分法(Chouet, 1986)あるいは境界積分法(Yamamoto and Kawakatsu, 2008)を用いた数値計算によって行われてきた。これらの計算では流体の物性やクラック形状を仮定する必要があった。振動周波数の変化について議論するためにはこれらのパラメータを変えて何度も計算を行わなければならない。手作業で行うスペクトルピークのモード判定も含めて時間のかかる解析になる。振動周波数は火山浅部における流体の状態を密接に反映したものと考えられ、その解釈を容易にすることは地震観測を浅部の流体の状態・振る舞いの理解に結び付ける上で重要である。我々は流体の物性およびクラック形状と振動周波数を関係づける解析式を長軸モード振動について導出したのでそれを報告する。

長軸方向の1次元の振動を考えた場合、クラックの厚さ方向に平均した圧力 $P$ は以下の方程式を満たす(Kumagai, 2009)。  

$$(d^2/dt^2)[P(x,t)+(2b/d)u_d(x,t)] = a^2(d^2/dx^2)P(x,t) \quad (1)$$

ここで $a$ は流体の音速、 $b$ は流体の体積弾性率、 $d$ はクラックの厚さ、 $u_d$ はクラック面上の変位である。(1)式を用いてクラック波の速度を求めるには $P$ と $u_d$ の関係を知る必要がある。Kumagai (2009)は $P$ と $u_d$ が比例すると仮定してクラック波の速度を表す式を導出した。我々はChouet (1986)の差分法コードを用いて $P$ と $u_d$ を出力し、その関係を調べた。その結果、両者は時間の関数としては比例するが空間的には比例せず、比 $u_d/P$ がおおよそ楕円型の空間分布になることが分かった。この結果を(1)式に代入すると $P$ に対する変数係数の1次元波動方程式が得られる。これを半解析的に解いた結果、波長 $2L/m$ ( $m$ :整数)の長軸モードの振動周波数を表す式として

$$f_m = (m-1)a/[2L\{1+2e_m(b/G)(L/d)\}^{1/2}] \quad (2)$$

が得られた。ここで $G$ は固体の剛性率、 $L$ はクラックの長さ、 $e_m$ は振動モードごとに決まる定数である。Chouet (1986)の差分法コードを用いて様々な $L/d$ に対する振動周波数を計算し、(2)式と比較したところ良い一致が得られた。したがって(2)式はクラック振動の周波数を適切に表現していると考えられる。

(2)式を用いると流体の音速 $a$ 、体積弾性率 $b$ 、クラック形状 $L/d$ 、およびクラックサイズ $L$ に応じて振動周波数がどのように変化するかを議論することができる。例えばフィリピン・タール火山では4万個を超える群発LPイベントが観測されたが、その振動周波数は0.7-0.9 Hzとほとんど変化が見られなかった。タール火山のLPイベントは水蒸気のクラック振動で説明されるので流体物性はほぼ一定と考えて良いが、クラックに流入する水蒸気の量が変化すれば振動周波数は変化するものと期待され、周波数を一定に保つ機構の解明が課題であった。(2)式によれば $L/d$ が大きい場合、振動周波数 $f_m$ は $(d/L^3)^{1/2}$ に比例する。したがってクラック体積が変化しても $d$ が $L^3$ に比例して変化すれば振動周波数は変化しない。一方、浮力と弾性力の釣り合いによって形状が決まるクラックを考えると $d$ は $L^2$ に比例する。この場合、クラック体積の変化に対する周波数の変化率はゼロではないが比較的小さくなり、タール火山のLPイベントについて推定された5 MPaの圧力下での600 Kの水蒸気の場合、クラック体積が4倍程度変化しても観測周波数を0.7-0.9 Hzの範囲に保つことができる。(2)式は他の火山のLP・VLPイベントに対しても適用可能であり、振動周波数の解釈のために広範に利用できるものと期待される。

### 引用文献

- Chouet (1986), JGR, 91, 13967-13992.  
 Kumagai (2009), Encyclopedia of Complexity and Systems Science (Springer-Verlag), pp.9899-9932.  
 Kumagai and Chouet (2000), JGR, 105, 25493-25512.  
 Yamamoto and Kawakatsu (2008), GJI, 174, 1174-1186.

キーワード: 流体で満たされたクラックモデル, LP イベント, 振動周波数, タール火山  
 Keywords: Fluid-filled crack model, LP events, Resonant frequency, Taal volcano

## 中距離スケールの空振伝播特性と火山活動把握への意義

## Characterization of middle-distance infrasound propagation and its utility for grasping volcanic activity

市原 美恵<sup>1\*</sup>, 岩國 真紀子<sup>2</sup>, ラカンナ ジョルジオ<sup>3</sup>, 武尾 実<sup>1</sup>, 井口 正人<sup>4</sup>, リペペ マウリチオ<sup>3</sup>Mie Ichihara<sup>1\*</sup>, Makiko Iwakuni<sup>2</sup>, Giorgio Lacanna<sup>3</sup>, Minoru Takeo<sup>1</sup>, Masato Iguchi<sup>4</sup>, Maurizio Ripepe<sup>3</sup><sup>1</sup> 東大・地震研, <sup>2</sup> 日本気象協会, <sup>3</sup> フィレンツェ大学, <sup>4</sup> 京大・防災研<sup>1</sup>ERI, University of Tokyo, <sup>2</sup>JWA, <sup>3</sup>University of Florence, <sup>4</sup>DPRI, Kyoto University

今や、火山観測の主要な項目の一つになっている空振の観測・研究は、二つの異なるスケールに集中して行われている。一つは、火山近傍(10km以内)、もう一つは、数百から数千kmも離れた長距離観測である。その間をつなぐ、中距離(数十km)の研究は極めて少ない。東京大学地震研究所による霧島火山周辺の空振観測網では、約40km離れた桜島からの空振もよく観測される。各観測点と、桜島の昭和火口から3.5kmの観測点との振幅比には、季節変化と思われる全体の年周変化と、爆発毎の大きなばらつきが見られている。これは、大気構造の変化によるものと推測されるが、爆発源からの放射パターンの変化も寄与しているのかも知れない。この観測に端緒を開き、本研究では、中距離における空振伝播特性を理解することを目指す。伊豆大島やストロンボリを含め、多くの活動的な火山は離島にある。これらの火山が大噴火を起こすと、島内に入ることができなくなり、近傍の観測点も壊れてしまう、という事態も考えられる。そのような時、近づきうる最近接の陸上観測は、多くの場合、中距離スケールにある。

本研究では、2012年11・12月における桜島の爆発空振を扱う。この期間には、霧島の定常観測網に加え、霧島と桜島の中間地点である国分市、反対方向(南南西)の指宿市、その東方向の垂水市など、様々な方向、距離、高度において、臨時観測を行った。指宿市の観測波形は、霧島の波形と全く異なっており、振幅も非常に小さかったり、検出できないこともあった。霧島方向と垂水市の観測点の波形と、桜島島内の波形は、互いにほとんど変わらない場合もあったが、時によっては、40kmより離れたところで明瞭な波のスプリッティングが見られた。これらの特徴を理解するために、鹿児島の高層気象データを用いて、温度・風速・風向を考慮した波線計算(田平: [http://www.senior.aichi-edu.ac.jp/mtahira/IFS/IFS\\_propagation.htm](http://www.senior.aichi-edu.ac.jp/mtahira/IFS/IFS_propagation.htm))を行った。空振の伝播速度は、風の影響で風下方向に大きくなる。一般に、気温は上方で低くなり、音速は低下するが、上空の風速が大きければ、風下方向で実効的な音速が上昇する逆転層が形成される。本観測期間中、風は東方向に流れる傾向があり、霧島方向や垂水市方向でそのような逆転層が見られ、指宿市の方向では希であった。逆転層が形成されると、空振の上方への伝播は跳ね返され、波がそれより下の層に捕獲される。霧島の高度の高い観測点で大きな振幅が観測された日には、ちょうどそのくらいの高度に波線が捕獲されるような大気構造になっていた。また、波のスプリッティングが見られた日には、通常より高い高度から反射する波線が計算された。さらに、逆転層が霧島連山のピークよりも高ければ、向こう側の観測点でも大きな振幅が観測されるが、低い場合には、桜島側に比べて顕著に振幅の落ちていることも分かった。このように、中距離の空振伝播では、大気構造の影響と地形の影響が結合して現れるため、両者を考慮した解析が必要となる。さらに、構造が時々刻々と変化するところがやっかいである。現段階では、1日2回、1地点のみの大気構造を用いているが、より定量的な解析の為には、時空間分解能の高い大気構造データが不可欠である。

次に、一つの爆発イベントによる空振に注目する。それは、最初の大きなパルスと、緩やかに減衰する後続波からなっており、時として、小さい爆発がいくつか、後続波に重なることがある。一続きのシグナルの継続時間は5~10分程度であり、この間では大気構造は大きく変化しないと考えるだろう。実際に、最初のパルスと後の小さいパルスの振幅比は、観測点間でほとんど同じであることが多い。一方で、後続波部分の最初のパルスに対する振幅比やその時間変化は、観測点毎に大きく異なっており、15kmより遠くで、非常に大きく見られることがある。後続波・パルス振幅比が、全観測点で同じような挙動をする場合もあることから、観測点固有の地形効果や大気の不均質の散乱によって必然的に起こる現象ではなさそうである。むしろ、この現象は、パルス(爆発音)と、後続波(ジェットノイズ)が異なった放射パターン・音源を持っていることの一つの証拠ではないかと考えている。Matoza et al. (2009)は、スペクトル構造の相似性から、火山噴火に伴う連続空振が乱流ジェット的一种である可能性を指摘した。そのようなジェットノイズは、上方に強く放射され、また、音源も火口ではなく、上空になる。火口からの直達波が届きにくい中距離観測点では、爆発音が弱くなり、相対的に、ジェットノイズが大きく観測されている可能性がある。中距離空振観測の意義の一つとして、さらに詳細に検討していきたい。

キーワード: 空振, 火山, 噴火, 大気構造, 爆発, ジェット

Keywords: infrasound, volcano, eruption, atmospheric structure, explosion, jet

## 桜島爆発1秒前の火映の明るさ変動

### Glow luminance change at 1 second before an explosion of Sakurajima volcano

相澤 広記<sup>1\*</sup>, 横尾 亮彦<sup>2</sup>, 為栗 健<sup>3</sup>, 井口 正人<sup>3</sup>

Koki Aizawa<sup>1\*</sup>, Akihiko Yokoo<sup>2</sup>, Takeshi Tameguri<sup>3</sup>, Masato Iguchi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学地震火山研究センター, <sup>2</sup>京都大学火山研究センター, <sup>3</sup>京都大学防災研究所火山活動研究センター

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University,, <sup>2</sup>Aso Volcanological Laboratory Institute for Geothermal Sciences Graduate School of Science Kyoto Uni, <sup>3</sup>Sakurajima Volcano Research Center, Kyoto University

活発な噴火活動を続ける桜島昭和火口に対し、2011年12月より、京都大学黒神観測室で新たな高感度カメラを用いた可視映像観測を行っている。GPS時刻をインポーズしたアナログ動画(30 frame/sec)をLinux PCを用いて時刻を問わずキャプチャ 動画変換し640 x 480サイズのwmv形式でHDDに記録し続けている。これらの中から噴火前後の動画を抜き出し丹念に調べたところ、爆発1秒前に火映の明るさが変動する事例を発見したので報告したい。

本予稿投稿時に於いては2011年12月下旬~2012年7月上旬までの可視映像を精査した。この期間中、噴火は約700回発生しており、この内、噴火前に火映が確認されたのは33イベントであった。火映のほとんどは2011年12月下旬~2012年1月上旬、2012年2月初旬と特定の時期に集中していた。爆発直前の火映の急激な明るさ変動は33イベント中、11イベントで見られた。これらの明るさ変動は、火口リムを噴出物が超えた時刻の0.3~1.0秒前から開始している。その多くが噴火直前に明るさが増加するタイプであるが、明るさが低下するタイプも2例見られた。

Tameguri et al. (2002)は地震波解析により、桜島南岳の爆発におよそ1秒先行して、火口直下深さ約2kmで爆発地震が開始することを示した。Iguchi et al. (2008)は桜島南岳、諏訪之瀬島、スメルの3火山で得られた地殻変動、地震、火山ガス観測の知見に基づき、火山爆発に共通するモデルを提案した。その特徴の一つは、火口底からのガス漏出から噴火が開始するという点である。ガス漏出は桜島南岳で爆発の60~120秒前、諏訪瀬で0.2~0.3秒前、スメルで2~3秒前と開始時間が異なり、これらの違いは爆発の規模と対応することを示唆している。Yokoo et al. (2009)は桜島南岳火口の爆発に伴う空振、可視映像、地震波解析から、火口底破裂の0.5~0.7秒前から火口底の膨張が生じていることを示唆した。本発表では可視映像を空振、ひずみ、地震データと突き合わせることで、過去に提出されてきた爆発モデルと、今回発見した火映の明るさ変動との対応を整理する予定である。ここで注意すべきは、これまでの研究の多くは「南岳火口」の爆発が対象であり、本発表で対象とする「昭和火口」でないという点である。そのため南岳の爆発モデルのタイムスケールが昭和火口では成立しない可能性も念頭に置き考察を進める予定である。さらに、爆発直前の火映の明るさ変動に種類がある理由も検討したい。

## 地殻変動で捉えた火道内対流と火山性ガス放出

### Magma reservoir? vent system within Miyake-jima volcano revealed by GPS observations

及川 純<sup>1\*</sup>, 中尾 茂<sup>2</sup>, 松島 健<sup>3</sup>, 木股 文昭<sup>4</sup>

Jun Oikawa<sup>1\*</sup>, Shigeru Nakao<sup>2</sup>, Takeshi Matsushima<sup>3</sup>, Fumiaki Kimata<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東大・地震研, <sup>2</sup> 鹿児島大学, <sup>3</sup> 九州大学, <sup>4</sup> 東濃地震科学研究所

<sup>1</sup>Tokyo University, <sup>2</sup>Univ. of Kagoshima, <sup>3</sup>Kyushu Univ., <sup>4</sup>Tono Research Institute of Earthquake Science

三宅島は、東京から南へ150km離れた火山島で、玄武岩質の活動的な火山であるが、2000年6月26日から1983年の噴火活動以来17年ぶりに火山活動が活発化した。この火山活動は、マグマ貫入期、山頂陥没期、山頂噴火期および脱ガス期の4つのステージに分けられている(S. Nakada, et. al, 2001)。6月26日に群発地震活動が始まり、大規模な地殻変動が起こり始め、7月8日には山頂噴火が起こった。この間、地震の震源移動や地殻変動の様子などから、マグマが三宅島の山頂直下から北西方向へ移動していったと推定されている(マグマ貫入期)。7月8日以降8月初めまで、山頂では火口の急速な陥没が起こった(山頂陥没期)。8月に入り、8月10日、18日、29日と大きな噴火を起こした(爆発期)。その後、噴火活動はほぼ収まったが、山頂火口より大量のガスの放出が始まった(脱ガス期)。本研究は、GPS測量でとらえた脱ガス期の地殻変動から、マグマ溜まりの位置を明らかにし、また、脱ガス量と地殻変動からわかるマグマ溜まりの体積変動量の比較することにより、脱ガスのメカニズムおよびマグマ溜まり-火道システムを明らかにする。

脱ガス期が始まった2000年9月から2001年1月までは大量のガス放出があり、特に二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)は平均して約4万トン/日の放出量があった。この期間のGPSデータを解析したところ、山頂火口壁のやや南側で深さ約5kmに地殻変動源があることがわかった。体積変動率は $-3.8 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/monthであった。れらが、山頂火口から放出されたSO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>がマグマ中に解けていた際に占める体積とほぼ等しいことから、マグマ溜まりの収縮は、マグマ溜まりから揮発性成分が脱ガスする事によって起こっていることが推定された。これより、次のようなマグマ溜まり-火道システムが考えられる。マグマ溜まりから山頂火口直下まではマグマで満たされた火道につながっており、火道内対流で揮発性成分に満ちたマグマが地表面直下まで運ばれ、脱ガスして火山性ガスを放出する。揮発性成分が抜けたマグマがマグマ溜まりまで運ばれ、実質的には放出された火山性ガスがマグマ溜まりの中で占めていた体積分が収縮している。本研究は、火道内対流でガス放出される様子を地殻変動で捉えた一つの例であろう。

キーワード: 火山噴火, 火山性ガス, 火道内対流

Keywords: Volcanic eruption, Volcanic gas, magma convection in conduit

## 火山噴煙の3次元シミュレーション：風による噴煙と大気の乱流混合効率の見積り 3-D numerical simulations of eruption clouds: Efficiency of turbulent mixing caused by environmental wind

鈴木 雄治郎<sup>1\*</sup>, 小屋口 剛博<sup>1</sup>Yujiro Suzuki<sup>1\*</sup>, Takehiro Koyaguchi<sup>1</sup><sup>1</sup> 東京大学地震研究所<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo

爆発的火山噴火において、噴煙の高度は単位時間にマグマから大気に供給される熱エネルギーの直接的指標であり、爆発的噴火過程や噴火強度を推定する上で貴重な情報源となる。したがって、実際の気象場での噴煙高度と火口での噴出条件を定量的に正しく関係付けることが、火山学上・防災上に強く要請されている。火山ガスと火砕物からなる火口からの噴出物は、上昇中に周囲の大気を取込み火砕物の熱で膨張させる。この膨張によって獲得された浮力が、噴煙上昇の原動力となる。したがって、上昇中の噴煙がどれだけ周囲の大気と混合するかが噴煙高度を決定する重要な要因となる。本研究では、噴煙の3次元数値シミュレーションによって、噴煙と大気の混合過程を明らかにすることを目的とする。

噴煙と大気の混合は、乱流ジェットや乱流ブルームでの乱流混合のアナロジーとして捉えることができる。一般に、周囲に風のない場合の乱流ジェット・ブルームでは、平均上昇速度 $U$ が増加するほど周囲流体を取込む速度 $U_e$ が増加する (Morton et al., 1956);  $U_e = kU$ 。ここに、 $k$ は混合効率を表し、エントレインメント係数と呼ばれる。密度成層のない流体中での乱流ジェットや乱流ブルームは自己相似性を持ち、 $k$ は一定値をとることが知られている ( $\sim 0.10$ )。一方、周囲に風がある場合の乱流ジェット・ブルームでは、風速 $U_w$ が増加するにしたがって周囲流体を取込む速度が増加する項が付け加わる (Hewett et al., 1971);  $U_e = kU + bU_w$ 。風によって促進される混合の効率 $b$ は、単純な系での室内実験から 0.3-1.0 であると指摘されている。自己相似性を持たず、大気が成層構造を持ち、非線形な密度変化をする噴煙の場合では、混合効率 $k$ 、 $b$ が室内実験から得られた値と等しい保証はない。そこで、周囲に風が無い場合とある場合の噴煙を3次元シミュレーションで再現し、その噴煙高度を $k$ 、 $b$ の値を仮定した定常1次元噴煙モデル (Bursik, 2001) の予測と比較することで、噴煙における実効的な混合効率の値を決定した。

噴煙再現のための3次元数値モデルは Suzuki et al. (2005) に従い、平坦な地表面にある円形の火口から噴煙が成層大気に高速噴出する場合を想定した。噴煙内の火砕物と火山ガスの速度差はゼロとし、噴煙は一つ流体として振舞うと仮定した。非線形な噴煙の密度変化は、その混合比によって比熱比を変化させて、噴煙と大気の混合流体を新たに一つの流体として状態方程式・エネルギー式を与えることで再現した。支配方程式は圧縮性流体のナビエ・ストークス方程式を適用し、計算スキームは一般的な圧縮性流体解析法の一つである Roe 法を用いた。計算精度を上げるためグリッド間の流束計算には MUSCL 法を適用した。時間積分は時間分割法を用いた。一般座標格子を用い、火口近傍と遠方の渦構造を高精度・高計算効率で再現した。

本3次元数値モデルについては、静止流体中に噴出する乱流ジェット・ブルーム室内実験における乱流混合の効率を定量的に再現することが確認されている (e.g., Suzuki and Koyaguchi, 2010)。また、風の影響が強い条件下の火山噴火 (例えば新燃岳 2011 年噴火) に対しても、数値計算結果は、噴出率と噴煙高度の関係や噴煙の形状に関する観測結果と良い一致を示し、乱流混合を精度よく再現していると考えられる。周囲に風が無い場合の噴煙高度に対する3次元数値モデルの計算結果は、混合効率 $k$ の値を 0.1 と仮定した定常1次元モデルの結果と一致する。このことは、室内実験で得られた自己相似性をもつ乱流ジェット・ブルームに対する混合効率 $k$ の値が鉛直に上昇する噴煙には適用可能であることを表す。一方、周囲に風がある場合の噴煙高度に対する3次元数値モデルの計算結果は、混合効率 $b$ の値を 0.2 - 0.3 と仮定した定常1次元モデル結果と一致する。この実効的な混合効率 $k$ の値は、室内実験から得られた値よりも有意に小さい。このことは、風の影響が強い条件下の噴煙に対するこれまでの定常1次元モデルの噴煙高度見積りが過小評価であった可能性を示している。

キーワード: 火山噴煙, 降灰モデル, 乱流混合, 火山防災

Keywords: eruption cloud, tephra dispersal, turbulent mixing, volcanic disaster prevention

## テフラ堆積物の粒径サイズ分布の高さ変化と初期サイズ分布の関係 Relationship between Stratigraphic Variations of Grain Size Distribution in Fall Deposits and Initial Size Distribution

入山 宙<sup>1\*</sup>, 寅丸 敦志<sup>2</sup>, 山本 哲生<sup>3</sup>

Yu Iriyama<sup>1\*</sup>, Atsushi Toramaru<sup>2</sup>, Tetsuo Yamamoto<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, <sup>3</sup>北海道大学低温科学研究所  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>2</sup> Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

In general, a stratigraphic variation in characteristics of grain size distributions of pyroclastic deposits may reflect the temporal behavior of the eruption intensity. However, quantitative methodology to link the stratigraphic variation and the temporal behavior of eruption intensity has not been established because of the complex coupling of several processes: eruption column dynamics, fallout process, sedimentation, erosion etc. In this study, we investigate only the effect of sorting process during settling on the stratigraphic variation of pyroclastic deposits.

In order to relate the variation of grain size distribution as a function of stratigraphic height to the sorting process during settling, we developed a theoretical argument from the view point of Lagrangian manner. If we assume that the terminal velocity of a particle is only a function of grain size and coagulation effect is negligible, an increasing rate of deposit layer equals the volume flux which is calculated from sedimentation rate, leading to an integrodifferential equation including the initial size distribution and the height in the deposit layer. If the initial distribution is given, the solution of the integrodifferential equation gives grain size distribution of deposits as function of height.

We carried out some simulations with our numerical model. In the simplest case that grains start to fall from a constant fallout height on an instantaneous time with no duration, grain size uniquely increases depending on stratigraphic height in deposits with no variance. Extending this simplest case to more realistic case with finite duration of falling, results show that the variation of grain size distribution takes non-zero value of variance. In these cases that fallout height and initial grain size distribution are constant with time, it is shown with the mathematical formalism that the values of  $M_d$  vary from coarse to fine from the bottom to the top, although this grading behavior has been qualitatively predicted.

From comparison with the stratigraphic variation data of pyroclastic deposits of the 2011 Shinmoedake subplinian eruptions, which have the single coarsest peak of the  $M_d$  value in a single eruption, we concluded that it is impossible to reconstruct this observed variations in the case of constant fallout height and initial size distribution with time. In order to successfully explain the observed grain size data, we need to give the temporal variation of fallout height or initial size distribution in future.

キーワード: 粒子サイズ分布, 層序変化, 火砕堆積物, 噴火強度

Keywords: grain size distribution, stratigraphic variation, pyroclastic deposit, eruption intensity

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: 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  
Friction properties controlling deposit shape of pyroclastic flows: insights from eruptions  
of Soufriere Hills volcano

前野 深<sup>1\*</sup>, SPARKS, R. Stephen J.<sup>2</sup>, HOGG, Andrew J.<sup>3</sup>, TALLING, Peter J.<sup>4</sup>  
Fukashi Maeno<sup>1\*</sup>, SPARKS, R. Stephen J.<sup>2</sup>, HOGG, Andrew J.<sup>3</sup>, TALLING, Peter J.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> ブリストル大学地球科学科, <sup>3</sup> ブリストル大学数学科, <sup>4</sup> サウザンプトン海洋研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>School of Earth Sciences, University of Bristol, <sup>3</sup>School of Mathematics, University of Bristol, <sup>4</sup>National Oceanography Centre, Southampton

Dense pyroclastic flows generated by the collapsing of lava domes are often encountered in effusive volcanic eruptions. Capturing the major characteristics of such flows is important to assess volcanic activities and hazards, but is a significant challenge because the mechanics of the grains and their interactions are incompletely understood. One approach has been to exploit the thinness of the flows relative to their length by employing a depth-averaged description in which the flow is assumed to have a constant bulk density. A key issue is the granular friction law that is introduced into depth-averaged models. Recent laboratory studies on dense granular flows suggest that rheology can be described by a friction coefficient. Variation of this coefficient with shear rate and pressure is captured through a dimensionless inertial number. Under the shallow water assumption how well this friction model works remains unclear when applied to pyroclastic flows.

Recent dome collapse events in Soufriere Hills volcano, Montserrat, provide good examples to study the dynamics of dense pyroclastic flows and to examine granular flow models, because of abundant geological and geophysical data. In this study, the July 2003 and May 2006 dome collapse events and resultant pyroclastic flow deposits are investigated. The most intense phase of the 2003 event produced the deposit  $170 \text{ M m}^3$  in 2.6 hours, and the shape of proximal submarine deposit offshore Montserrat is characterized by semicylindrical, steep-sided lobes. The 2006 event produced  $97.8 \text{ M m}^3$  in 35 min and the deposit is characterized by a more elongated shape in flow direction than the 2003 deposit and by channel and levee-like facies (Trofimovs et al., 2012, BV). Geophysical observation such as seismic and strain records also constrain the variation of discharge rates of pyroclastic flows during the events.

To investigate the factors controlling the shape of pyroclastic flow deposit, we used a 2D shallow water model with two types of Coulomb-type friction models. One had a constant friction coefficient, and another had a friction coefficient that depends upon the dimensionless inertial number of the motion. The models are applied to a simple system or the terrain of Soufriere Hills volcano. When the latter friction model was examined, the variation of deposit shape such as channel and levee-like facies was reproduced, depending on initial mass, discharge rate or slope angle. Also our numerical results suggest that the inertial number dependent friction model works better after the flow passing a slope break point where slope angle is equal to the friction angle at zero shear rate. Coupling effects of discharge rates, slope and granular friction properties may explain the different shapes of the pyroclastic flow deposits produced by dome collapse events in Soufriere Hills volcano.

キーワード: 火砕流, 堆積物形状, 摩擦, 溶岩ドーム崩壊, スフリエールヒルズ火山

Keywords: pyroclastic flows, deposit shape, friction, lava dome collapse, Soufriere Hills Volcano

## マグマ供給系のモデルによる噴火時系列の解析：マグマの温度変化の効果 Analysis of eruption sequences based on a model of magma plumbing system: Effects of variable magma temperatures

井田 喜明<sup>1\*</sup>, 及川 純<sup>2</sup>

Yoshiaki Ida<sup>1\*</sup>, Jun Oikawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> アドバンスソフト株式会社, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Advance Soft Co., <sup>2</sup> Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo

噴火がどんな規模と時間間隔で発生するかは、噴火機構の理解にとって、また噴火予知にとって基本的な問題である。この問題を著者らは簡単なマグマ供給系のモデルを用いて解析しようと試みている。解析の目的は噴火の時系列がどんな物理条件で決まるかを知ることであり、解析の基礎はマグマだまりの圧力に従って出口の通路が粘性的に開閉するというモデル (Ida, GRL, 23, 1457-1460, 1996) におかれる。昨年の連合大会では、この力学モデルを用いてマグマ供給量の周期的な変化に噴火時系列がどんな応答をするかを調べ、噴火の規模や時間間隔にある程度のばらつきが生ずることを示した。しかし、それは現実の噴火の多様性を説明するにはかなり不十分であったので、今回の発表ではマグマの温度変化の効果モデルを組み込んで解析を進める。

モデルの力学的な部分は、マグマの供給や放出とともに圧力が変動するマグマだまりと、圧力の変動に応じて開閉する出口通路から成る。マグマの圧力は蓄積量とマグマだまりの容量の差に応じて弾性的に変動し、出口通路は通過するマグマの圧力変化で周囲の岩石が粘性流動を起こすことによって開閉する。出口から流出するマグマの流量は、簡単な常微分方程式を解くことによって時間の連続的な関数として計算されるが、モデルの有する非線形性のために特定の短い時間に集中し、実質的には間欠的な噴火の発生を表現する。この力学的な応答に加えて、今回は熱がマグマだまりの周囲に熱伝導で逃げる効果を考慮する。マグマの温度は供給される高温のマグマとの混合と熱伝導による冷却の兼ね合いで決まり、マグマの粘性率の変化を通して流出流量に影響する。

計算結果を見ると、マグマの供給流量が一定なときには、マグマの温度は供給と冷却の兼ね合いで決まる一定値に収束し、出口通路の開閉やマグマの噴出などの力学的な過程にほとんど関与しない。しかし、供給流量が周期的に変動すると、マグマの温度は熱伝導に依存する独自の時間遅れをもって追従して噴出過程に影響する。計算される噴火の時間間隔や噴出量は、何回かの噴火を束ねて周期的にゆらいたり、全体的に増大や減少をする時期をつくったりしながら多様な変化をたどる。その間にマグマの温度も変動するが、その変化は相対的に緩やかである。噴火の時系列は供給の周期や熱伝導の大きさを敏感に反映して複雑な様相を示す。

計算結果の時間軸を拡大して個々の噴火の経過を見ると、噴火期間中の供給流量の時間変化は供給のピークの前後でほぼ対称になっている。供給流量はピークに向けてある時間をかけて増大し、ほぼ同じ時間の後に終息に至る。同一の噴火時系列の中で比べると、供給の継続時間は大きな噴火の方が短くなる傾向をもつ。噴火の最中にマグマの温度は多少上昇するが、その温度変化はわずかである。

現実の噴火の発生は極めて多様なので、そこから多くの噴火に共通する普遍的な性質を抽出するのは簡単ではない。また、噴火時系列の特徴について統計的な結論を引き出すには、大抵の火山で噴火事例のデータが少なすぎる。モデルによる解析を介在にして、このような困難を少しずつ解消するのが解析の当面の課題である。

キーワード: 火山噴火, 噴火時系列, マグマの温度, マグマだまり, マグマ供給系, 数値シミュレーション

Keywords: volcanic eruption, eruption sequences, magma temperature, magma chamber, magma plumbing system, computer simulation

## 低粘性マグマ中の気泡上昇と山体変形モデリング Modeling of gas bubbles rise in low viscous magma and volcanic deformation

川口 亮平<sup>1\*</sup>, 西村 太志<sup>1</sup>

Ryohei Kawaguchi<sup>1\*</sup>, Takeshi Nishimura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・地球物理

<sup>1</sup>Geophysics, Science, Tohoku Univ.

粘性の小さい玄武岩質マグマによるストロンボリ式噴火では、火道深部において気体が連結し、大きなガスラグとなつて上昇し、噴火が発生するというモデルが考えられている。このようなラグの上昇による山体変形の特徴は、水平断面あたりの平均密度が小さいラグが上昇することで、火道深部に減圧源が生じるため、火口から遠い観測点では収縮の山体変形が現れる(川口・他, 2011, JPGU)。しかし、ストロンボリ火山の傾斜変動観測では、火口から1 km程度離れた観測点でも噴火前に山体が膨張する様子が捉えられており(Genco and Ripepe, 2010)、スラグ流モデルではこのデータを説明できない。そこで、本研究では、マグマ内の気泡の上昇過程をモデル化し、火道内圧力分布の時空間変化を求めるとともに、地表での山体変形量の時間変化の特徴を調べたので報告する。

メルト中の気泡群の上昇とそれに伴う火道内マグマの上昇を次のようにモデル化した。断面積一定の円筒形火道内のある領域に一定半径の気泡が集まっている場合を考える。個々の気泡は周囲の気泡との相互作用なく、ストークス則に従った速度で上昇する。上昇に従って気泡周囲のマグマ圧力は減少するため、気泡は膨張し、それに伴う体積増加によってマグマヘッドの深さも上昇する。気泡内の気体を理想気体とし、等温過程と火道内のマグマの質量保存係から、気泡の深さと半径、およびマグマヘッドの深さの時間変化を求めることができる。なお、火道下部からのマグマの供給はなく、メルト中の揮発性成分の流入による気泡成長はないとする。

このような気泡の上昇によるマグマヘッドの上昇によって、火道上部に新たに圧力が加わる。また、気泡領域では平均密度が小さくなるため、気泡上昇に伴い領域内のボイド率が大きくなるにつれて、その下部のマグマ圧力は初期状態に比べてやや小さくなる。

初期状態で火道の最下部に多数の気泡の集まる領域があるとし、気泡領域の最上部がマグマヘッドの深さまで上昇した時に噴火が発生するとする。気泡の上昇速度は、ストークス則に従い気泡半径の二乗に比例して速くなるため、上昇に伴い気泡の上昇速度は加速していく。それに伴い、マグマヘッドも加速的に上昇していく。半無限均質弾性体の解析解(Bonaccorso and Davis, 1999)を用いて、火道内圧力分布から山体変形を数値計算した結果、気泡の初期深さと同程度に火口から離れた地点では、加速的なマグマヘッドの上昇に従って、山体変形の量も加速的に増加していくことがわかった。また、気泡の上昇開始から噴火発生までのマグマヘッドの上昇量および山体変形量は、気泡の初期半径または気泡領域内の気泡の数が大きいほど大きくなる。なお、気泡上昇による火道深部の減圧がスラグ流の場合に比べて小さくなるため、火口から離れた観測点でも収縮の山体変形が現れにくくなる。

気泡上昇モデルによる山体変形の特徴を既に報告されているストロンボリ火山の噴火に先行する傾斜変動データ(Genco and Ripepe, 2010)と比較した結果、火口から離れた観測点でも山体が膨張する傾斜変動の様子を再現できることが分かった。

キーワード: 開口型火道, 気泡上昇, 山体変形, ストロンボリ式噴火

Keywords: open conduit, gas bubble rise, volcanic deformation, Strombolian eruption

## 火山噴出物の組織解析についての展望 Perspective on textural study of volcanic products

寅丸 敦志<sup>1\*</sup>

Atsushi Toramaru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

噴出物の組織や化学組成のミクロな特徴は、目に見えない火道中でのマグマの運動の歴史を記録している。その記録を、化学組成・組織のデータから定量的に読み解く手法の開発が、この10年で格段に進んできた。その中には、マイクロライト組成、気泡やマイクロライトのサイズ分布に基づくマグマの飽和深度や上昇の際の減圧速度、マグマ滞在時間の推定などが含まれる。そして、その応用の成果として、リアルタイムで取得されている地表での地球物理的・化学的観測データと併せて、マグマが移動を開始してから噴出に至るまでのマグマの運動のイメージがより現実的に描けるようになってきた。こうした手法の発達、噴出物の組織や化学組成を再現する実験的研究、観察・測定技術、実験結果や観察結果を物理化学的に解釈する理論的研究が、相補的に進歩してきた結果である。しかし、そうした進歩にもかかわらず、物質科学的手法を利用して、マグマの運動を的確に予想し、また、地質学的情報と併せて、過去の噴火の推移を定量的に復元できるまでには至っていない。ましてや、噴出量や噴火様式の推移の指標となる観測量の発見さらにはそれらの間の関係性など、火山噴火研究の一つの目標である噴火現象に関する物質科学的基本法則の発見には程遠い状況である。こうした困難を意識したうえで、物質科学研究の現状を省みると、天然で見られる噴出物の組織や化学組成の特徴が定性的にも定量的にもおおかた理解できた訳では決してなく、その背後にある根本的な問題が数多く残されていることに気づく。例えば、気泡やマイクロライトのサイズ分布関数のさまざまな形の成因や、非平衡下で結晶化する際の結晶組成決定性の問題である。本講演では、それらの問題の一つであるマイクロライトの結晶サイズ分布(CSD)に関して現状と展望を語る。

CSDは、指数分布すなわち、横軸を結晶サイズ、縦軸を population density (決まった結晶サイズの範囲にある結晶数)として片対数でプロットすると、直線的になる場合がしばしばある。指数分布になるには、時間の指数関数として結晶核形成速度が増加する必要があるが、その増加速度を決める時間の係数は、均質核形成理論と減圧結晶化実験から予想される値よりはるかに小さくなる。また、多くのCSDは、大きいサイズでは指数分布より population density が大きくなり、小さいサイズでは小さくなり、指数分布からずれてくる。すなわち、指数分布のCSDは近似でしかなく、それと数学的に一致することの物理的理由を探ることに定量的意味はない。とはいえ、CSDが、結晶の核形成と成長の歴史を表していることに間違いはない。物理的にはCSDは、実効的冷却速度が大きくなれば傾きの絶対値と切片の値が大きくなる(細かい結晶が沢山形成することに相当する)から、傾きや切片の値は、時間スケールすなわち実効的冷却速度(減圧速度)や滞在時間の指標である。それ故、よく用いられるCSD法では、指数分布を仮定して、状況証拠的時間スケールを与えて、その傾きから結晶成長速度を推定するが、これは本末転倒と言える。講演者らは、結晶化のモデルを順問題として解き、その結果から、実効的冷却速度と結晶数密度(CSDの0次のモーメント)の関係を導き、それを用いて、結晶数密度から、実効的冷却速度を推定する方法を提案した。この方法では、核形成速度最大時の瞬間的な線形の冷却速度や減圧速度が推定できるが、CSDの最大値付近の接線の傾きと切片の情報しか利用していないことになる。しかし、CSDの形自体に、マグマの温度・圧力の時間変化に関してもっと多くの情報があるはずである。その情報を定量的に推定するために、Lagrange的なCSDの記述方法から出発し、温度圧力の非線形な時間変化を特徴づけるパラメータを未知数とした、逆問題を定式化する。講演では、その定式化と応用を示し、CSDインバージョンの方法を提案しその可能性について議論したい。

キーワード: 組織解析, 火山噴出物, 結晶サイズ分布

Keywords: textural study, volcanic products, CSD

## マグマ混合過程とビスカスフィンガリング: アナログモデル実験と境界面の幾何学 Magma mixing/mingling and viscous fingering: Analog model experiment and geometry of interfaces

高田 和佳<sup>1\*</sup>, 佐藤 鋭一<sup>1</sup>, 山崎 和仁<sup>1</sup>

Nodoka Takada<sup>1\*</sup>, Eiichi Sato<sup>1</sup>, Kazuhito Yamasaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学理学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University

マグマミキシングおよびミングリングは、火山・火成活動現象において良く知られた現象であり、その形成過程に関する様々な実験および理論的研究がなされてきた (e.g., Eichelberger, 1980; Koyaguchi, 1985; Wada, 1995)。特に粘性率が異なるマグマの混合過程 (例えば、フェルシックマグマとマフィックマグマの混合過程) における混合境界面は、多様で複雑な幾何学的パターンを示すが、これは、形成下の物理・化学条件の違いを反映していることが現象論的に知られている (e.g., De Rosa et al., 2002; Perugini et al., 2005; Sato and Sato, 2009)。従って、任意の物理・化学条件下での混合過程の複雑な特性を、混合境界面の幾何学的パターンとして一元的に法則化することは重要であり、本研究では、これを境界面の幾何学と呼ぶことにする。

このような境界面の幾何学は、実際の岩石における境界面の形態解析から、当時の混合過程に関する有用な情報を抽出することを可能にし、火山・火成活動現象のモデリングの発展に寄与することが期待される (e.g., Perugini and Poli, 2005; Sato and Yamasaki, 2012)。しかしながら、境界面の幾何学と、より現実的な地球科学的条件との関係に関する基礎研究はまだ十分ではない。特に、非平衡状態にある混合過程の動的情報 (e.g., 境界面の成長速度など) と幾何学的パターンの関係については、ほとんど分かっていない。本研究の目的は、この点を、アナログモデル実験と微分幾何学の観点から明らかにすることにある。

本研究では、フェルシックなマグマだまり / ポケットに侵入するマフィックマグマの混合過程を想定し、二種類の流体 (グリセリンと空気) の混合過程を、Hele-Shaw 装置に基づくアナログモデル実験により解析した。Hele-Shaw 装置で扱うのは、本質的に二次元流体 (ポテンシャル流れ) であるので、数的にはDLA (拡散律速凝集体) モデルが適用可能であり、このモデルから、境界線は不安定性による分岐現象を伴うことが指摘されている (e.g., Nittmann et al., 1985)。実験では、この不安定現象はビスカスフィンガリングと呼ばれる分岐現象として観測されるが、これは、実際のマグマ混合過程で形成された岩石においても報告されている (e.g., Perugini and Poli, 2005)。本研究により以下の点が明らかとなった。

(1) 以下の三種類のフラクタル次元を見積もった: (A) 高粘性流体の占有面積の次元  $D_h$ ; (B) 低粘性流体の占有面積の次元  $D_l$ ; (C) 混合境界の次元  $D_i$ 。  $D_i$  は、流体の粘性比に反比例することが分かった。これは、既存の解析結果と一致する (e.g., Allen and Boger, 1988)。さらに本研究では、 $D_h$  と  $D_l$  の和が保存量であり、また、 $D_i$  と  $D_l$  が比例関係にあることが示された。この結果は、例えば、混合境界の次元 (= 観測が容易な量) から、フェルシックあるいはマフィックマグマの面積に関する次元 (= 現在では観測が難しい量) を見積もれる可能性を示唆する。

(2) 枝分かれするビスカスフィンガリングにおいて、先端部分の曲率半径は、混合境界線の成長速度に依存することが示された。これは、分岐に伴い曲率半径が減少する場合 (つまり、成長速度が負の場合) においても成立する。この結果は既存の実験結果 (e.g., Matsushita and Yamada, 1990) を拡張し、また、理論との対応としては、微分幾何学に基づく曲率の発展方程式の結果 (e.g., Nakamura and Wadati, 1993) と一致する。この結果の応用として、マフィック岩に観測されるビスカスフィンガリングの曲率半径の測定から、形成当時の成長速度が見積もれる可能性が示唆される。

キーワード: マグマ混合, ビスカスフィンガリング, フラクタル次元, Hele-Shaw 装置, 曲率, DLA

Keywords: magma mixing, viscous fingering, fractal dimension, Hele-Shaw cell, curvature, DLA

## 高圧下での玄武岩マグマとリソスフェア-アセノスフェア境界への影響 Basaltic magmas at high pressures and the origin of the lithosphere-asthenosphere boundary

坂巻 竜也<sup>1\*</sup>, 鈴木 昭夫<sup>1</sup>, 大谷 栄治<sup>1</sup>, 寺崎 英紀<sup>2</sup>, 浦川 啓<sup>3</sup>, 片山 芳則<sup>4</sup>, 舟越 賢一<sup>5</sup>, WANG, Yanbin<sup>6</sup>, HERNLUND, John W.<sup>7</sup>, BALLMER, Maxim D.<sup>8</sup>

Tatsuya Sakamaki<sup>1\*</sup>, SUZUKI, Akio<sup>1</sup>, OHTANI, Eiji<sup>1</sup>, TERASAKI, Hidenori<sup>2</sup>, URAKAWA, Satoru<sup>3</sup>, KATAYAMA, Yoshinori<sup>4</sup>, FUNAKOSHI, Ken-ichi<sup>5</sup>, WANG, Yanbin<sup>6</sup>, HERNLUND, John W.<sup>7</sup>, BALLMER, Maxim D.<sup>8</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 大阪大学, <sup>3</sup> 岡山大学, <sup>4</sup> 日本原子力研究開発機構, <sup>5</sup> 高輝度光科学研究センター, <sup>6</sup> The University of Chicago, <sup>7</sup> University of California, <sup>8</sup> University of Hawaii at Manoa

<sup>1</sup> Tohoku University, <sup>2</sup> Osaka University, <sup>3</sup> Okayama University, <sup>4</sup> Japan Atomic Energy Agency, <sup>5</sup> Japan Synchrotron radiation Institute, <sup>6</sup> The University of Chicago, <sup>7</sup> University of California, <sup>8</sup> University of Hawaii at Manoa

Basaltic lavas rise buoyantly from the Earth's mantle to form the oceanic crust, and are an important source of terrestrial volcanism. The density and viscosity of basaltic magmas moderates igneous processes ranging from volcanic activity to fractionation, and is intimately linked to its atomic structure. Here we show that basaltic magmas undergo rapid densification with increasing pressure and exhibit a viscosity minimum near 4 GPa, correlated with an increase in coordination number for Si<sup>4+</sup> and Al<sup>3+</sup> cations. Magma mobility- the ratio of the melt-solid density contrast to the magma viscosity- exhibits a peak at 120-150 km depth that is up to an order of magnitude greater than values in the shallower lithosphere and deeper mantle. Thus the driving force for melt separation in Earth's asthenosphere diminishes as melts ascend, which could lead to excessive melt accumulation at depths of 80-100 km, providing a simple explanation for the occurrence of a seismically-observed Gutenberg discontinuity.

キーワード: 玄武岩, マグマ, 高圧, 密度, 粘度, 構造

Keywords: basalt, magma, high pressure, density, viscosity, structure