

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^{1*}, 熊谷 博之¹
Yuta Maeda^{1*}, Hiroyuki Kumagai¹

¹ 防災科研 / 名古屋大学
¹ 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^{1*}, 岩國 真紀子², ラカンナ ジョルジオ³, 武尾 実¹, 井口 正人⁴, リペペ マウリチオ³Mie Ichihara^{1*}, Makiko Iwakuni², Giorgio Lacanna³, Minoru Takeo¹, Masato Iguchi⁴, Maurizio Ripepe³¹ 東大・地震研, ² 日本気象協会, ³ フィレンツェ大学, ⁴ 京大・防災研¹ERI, University of Tokyo, ²JWA, ³University of Florence, ⁴DPRI, 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)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^{1*}, 横尾 亮彦², 為栗 健³, 井口 正人³

Koki Aizawa^{1*}, Akihiko Yokoo², Takeshi Tameguri³, Masato Iguchi³

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

¹Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University,, ²Aso Volcanological Laboratory Institute for Geothermal Sciences Graduate School of Science Kyoto Uni, ³Sakurajima 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^{1*}, 中尾 茂², 松島 健³, 木股 文昭⁴

Jun Oikawa^{1*}, Shigeru Nakao², Takeshi Matsushima³, Fumiaki Kimata⁴

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

¹Tokyo University, ²Univ. of Kagoshima, ³Kyushu Univ., ⁴Tono 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(SO₂)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 -3.8×10^6 m³/monthであった。れらが、山頂火口から放出されたSO₂, H₂O, CO₂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^{1*}, 小屋口 剛博¹Yujiro Suzuki^{1*}, Takehiro Koyaguchi¹¹ 東京大学地震研究所¹ERI, 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(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^{1*}, 寅丸 敦志², 山本 哲生³

Yu Iriyama^{1*}, Atsushi Toramaru², Tetsuo Yamamoto³

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, ²九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, ³北海道大学低温科学研究所
¹Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, ² Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, ³Institute 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^{1*}, SPARKS, R. Stephen J.², HOGG, Andrew J.³, TALLING, Peter J.⁴
Fukashi Maeno^{1*}, SPARKS, R. Stephen J.², HOGG, Andrew J.³, TALLING, Peter J.⁴

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

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²School of Earth Sciences, University of Bristol, ³School of Mathematics, University of Bristol, ⁴National 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 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 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^{1*}, 及川 純²

Yoshiaki Ida^{1*}, Jun Oikawa²

¹ アドバンスソフト株式会社, ² 東京大学地震研究所

¹ Advance Soft Co., ² 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をモデルに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^{1*}, 西村 太志¹

Ryohei Kawaguchi^{1*}, Takeshi Nishimura¹

¹ 東北大・理・地球物理

¹Geophysics, 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ポ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^{1*}

Atsushi Toramaru^{1*}

¹九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

¹Department 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^{1*}, 佐藤 鋭一¹, 山崎 和仁¹

Nodoka Takada^{1*}, Eiichi Sato¹, Kazuhito Yamasaki¹

¹ 神戸大学理学研究科地球惑星科学専攻

¹Department 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^{1*}, 鈴木 昭夫¹, 大谷 栄治¹, 寺崎 英紀², 浦川 啓³, 片山 芳則⁴, 舟越 賢一⁵, WANG, Yanbin⁶, HERNLUND, John W.⁷, BALLMER, Maxim D.⁸

Tatsuya Sakamaki^{1*}, SUZUKI, Akio¹, OHTANI, Eiji¹, TERASAKI, Hidenori², URAKAWA, Satoru³, KATAYAMA, Yoshinori⁴, FUNAKOSHI, Ken-ichi⁵, WANG, Yanbin⁶, HERNLUND, John W.⁷, BALLMER, Maxim D.⁸

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

¹ Tohoku University, ² Osaka University, ³ Okayama University, ⁴ Japan Atomic Energy Agency, ⁵ Japan Synchrotron radiation Institute, ⁶ The University of Chicago, ⁷ University of California, ⁸ 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 Si⁴⁺ and Al³⁺ 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

火山灰追跡モデル PUFF を用いて計算された堆積物の分布に対する鉛直方向の粒子拡散の影響

Effects of vertical diffusivity of particles on distribution of deposits calculated by the tephra-tracking model PUFF

清杉 孝司^{1*}, 小屋口 剛博¹, 鈴木 雄治郎¹
Koji Kiyosugi^{1*}, Takehiro Koyaguchi¹, Yujiro Suzuki¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

火山灰の拡散・堆積プロセスを理解することは、降下火砕堆積物から噴火条件を推定するために重要であるだけでなく、航空網の混乱や農作物、社会基盤、建築物等への降灰被害に備えるためにも必要である。こうした背景から航空安全や降下火山灰の分布予測のための火山灰移流拡散モデルが開発されている（例えば PUFF や TEPHRA2 や FALL3D）。本研究は、大気中の粒子拡散の素過程物理を適切に考慮した移流拡散モデルを構築することを最終的な目的としている。

既存の移流拡散モデルのうち、実際の堆積物評価に多く利用されている TEPHRA2 モデル（Bonadonna et al., 2005）では鉛直方向の粒子の拡散が小さく、無視できると仮定している。この仮定の下では、大気中の一点から放出された単一粒径からなる複数の粒子は水平方向のみに拡散し、地表に堆積する粒子量の分布は二次元正規分布となる。また、降下火砕物全体の堆積量の分布は、異なる高さから放出された異なる粒径の粒子がとる二次元正規分布の重ね合わせとして表される。この仮定は地質学的データの分析を容易にするものの、鉛直方向の粒子の拡散が堆積物の分布に及ぼす影響について検証が不十分であるため、その適用範囲は慎重に評価される必要がある。今回の発表では、鉛直方向の拡散も考慮した PUFF モデル（Searcy et al., 1998）を用いて、大気中の鉛直方向の粒子拡散が地表における堆積量分布に与える影響について系統的に調べた。

PUFF モデルは、ラグランジュ粒子の風と重力による移流と、大気中の乱流による拡散を計算することによって火山灰粒子の動きを再現するモデルである。粒子の移流は、各粒子位置における局所的な風速と終端降下速度ベクトルから次時間ステップでの位置を計算することで再現される。また、水平方向と鉛直方向の粒子の拡散は、それぞれの方向に異なる歩幅を与えたランダムウォークモデルで再現される。本研究では、一様風速の大気中で火口上の一点から放出された単一粒径からなる複数の粒子の移流拡散を全粒子が地表に着地するまで計算した。

上記の計算において、放出された粒子は拡散によって時間とともに拡大する「粒子群」を形成する。粒子群の中心は風速の大きさと水平方向へ移動し、粒子の終端速度の大きさと降下する。水平方向の拡散の影響は鉛直方向の拡散の影響よりもはるかに大きいので、粒子群は上下につぶれた楕球状の形態となる。鉛直方向へ厚みを持った粒子群では、底部の粒子と頂部の粒子の堆積に時間差が生じる。また、粒子群の底部の粒子が着地した後も、頂部の粒子が着地するまで粒子群は風によって水平方向に移動し続ける。その結果、最終的な降下堆積物の分布は風下側へ伸張り、風下側ほど若干幅が広がる形状を示す。地表での堆積量の分布を二次元正規分布と比較するため、分散及び正規分布からのズレの指標である歪度と尖度を風向きと平行な方向と直交する方向の2方向に投影して調べた。地表での堆積量の分布は二次元正規分布と比べ、風向きに平行な方向で分散と歪度、尖度が大きく、風向きに直交する方向で尖度が大きくなる。この二次元正規分布からの相違は、細かい粒子や低い高度から放出された粒子、また、大きい風速の条件ほど顕著である。

以上の結果は、火山灰の堆積量分布をより正確に再現するためには、鉛直方向の拡散を考慮した火山灰拡散モデルを用いる必要があることを示している。このように、鉛直方向の拡散を考慮した PUFF モデルでの堆積量分布と二次元正規分布との相違を定量的に見積もることによって、TEPHRA2 モデルの適用限界（供給源の高度、粒径、風速）を評価することができる。

火山噴煙の高さの即時的な把握の検討

Immediate estimating plume height of volcanic eruption by not using visual observation

高木 朗充^{1*}, 新堀 敏基¹, 山本 哲也¹, 横田 崇¹, 加藤 幸司²

Akimichi Takagi^{1*}, Toshiki Shimbori¹, Tetsuya Yamamoto¹, Takashi Yokota¹, Koji Kato²

¹ 気象研究所, ² 福岡管区気象台

¹Meteorological Research Institute, ²Fukuoka District Meteorological Observatory

噴火に伴う噴煙の高さの推移を速やかに把握することは、防災上重要である。高く上昇した噴煙は航空機の航行の影響を与えるほか、上昇する噴煙とともに持ち上げられた火山礫の落下範囲は一般に高い噴煙の時ほど風に流されて広域に及び、時に周辺に被害を及ぼすことがある。2011年2月14日に発生した霧島山新燃岳の噴火では、火口から16km離れた地点に火山礫が落下し被害が生じたが、この噴火発生時は悪天により噴煙の様子が十分に把握できていない。このように、悪天時においてもカメラ等による遠望観測や気象レーダー等によるリモートセンシング観測によらず、噴煙の高さを速やかに把握することが求められている。

Sparks et al. (1997) は、多くの噴火事例から噴煙の高さは噴出率の約0.25乗に比例する経験式を示した。またLighthill (1978) は観測される圧力変化は噴出率の時間微分に比例すると考えた。以上から空振観測で得られた圧力変化の積分量が噴出率と比例するという仮定のもと、2011年1月26~27日の新燃岳の噴煙の高さ推定を試みた。気象レーダーで見積もられた噴煙の高さ(新堀・他, 2013) 推移に対して、いずれの空振観測点においても高い相関(約0.75)が得られた。ただし、べき数は0.25乗には一致せず0.35~0.41となった。また噴出する噴煙の体積に対する重量密度係数は、150~300kg/m³で最も高い相関となった。これらの係数を適切に決定することで、空振観測により噴煙高度の高さを即時的に定できる可能性がある。

噴火時の実際の噴出状態は、噴出率の定常成分と振動成分に分離されると考えられる。噴煙高度には定常成分の寄与は大きいと考えられるが、本検討では振動成分のみを対象に解析したにもかかわらず、結果的には噴煙高度と高い相関が得られた。これは、両成分の間に何らかの線形関係が成り立っているものと推測され、それを明らかにすることも重要である。

本講演では、空振の他、地震、傾斜観測のデータによる解析結果も報告する。

謝 辞

理論的な考察において、京都大学防災研究所の井口先生、東京大学地震研究所の市原先生に貴重な助言をいただきました。感謝の意を表します。

キーワード: 噴煙の高さ, 即時把握, 空振, 噴出率, 新燃岳

Keywords: plume height, immediate estimating, infrasound pressure, mass flux, Shinmoedake

不足膨張噴流が形成する内部構造と乱流混合過程に与える影響についての3次元数値モデルを用いた研究

Numerical study on internal structure and turbulent mixing of overpressured jets

稲川 聡^{1*}, 小屋口 剛博¹, 鈴木 雄治郎¹

Satoshi Inagawa^{1*}, Takehiro Koyaguchi¹, Yujiro Suzuki¹

¹ 東京大学 地震研

¹ ERI University of Tokyo

爆発的火山噴火において、噴煙が安定した噴煙柱を形成するか、崩壊して火砕流を形成するかを予測することは、火山学上のみならず防災上も重要な課題である。火砕流の発生条件は乱流混合過程と火口直上の上昇速度によって決定される。一般に、火砕物と火山ガスで構成される火口からの噴出物は、周囲の大気より高密度であり、初期運動量を失うと火砕流として流れ下る。一方、火口から噴出物が高速度で上昇した場合、初期運動量を失う前に周囲の大気を効率よく取り込み、取り込んだ大気が火砕物の熱で膨張するため、噴出物と大気の混合物は大気より低密度になり、噴煙柱として上昇する。近年、噴出する火砕物と火山ガスの混合物が圧縮性を持つという事実が火砕流の発生条件に影響を与えるということが指摘されている（例えば、Koyaguchi et al., 2010）。圧縮性を持つ噴出物が大気圧以上の圧力で火口から放出されると、噴煙は膨張波や衝撃波を含む複雑な内部構造を形成して加速し、その内部構造は噴煙と大気の乱流混合に影響を与える。本研究では大気圧以上の圧力を持って音速で火口から放出される噴煙に焦点を絞って、その火口直上での乱流混合過程、および圧縮性流体としての振る舞いについて3次元数値モデル (Suzuki et al., 2005) を用いて解析した。

圧縮性流体が大気圧以上の圧力を持って音速でノズルから放出されると、噴出後の膨張によって加速され、超音速流となる。この超音速流はノズル直上に流れにほぼ垂直なマッハディスク衝撃波を形成する。軸部の超音速上昇流はマッハディスクを通過すると急減速し亜音速流となる。一方、軸部を囲んで樽状にパレルショックが形成され、その外側に噴流境界が形成される。パレルショックと噴流境界に挟まれたジェット周縁部では、軸部の上昇流がマッハディスクで減速した後もマッハ2程度の高速度を保って上昇する。Solovitz et al. (2011) は、このような複雑な内部構造が噴流の乱流混合に与える影響について実験的に調べた。この実験結果によると、マッハディスクより上部における超音速乱流ジェットの混合効率は、火口から直接亜音速流れとして噴出する乱流ジェットの混合効率に比べて最大40%程度減少する。我々は、実験において観察された圧縮性流体の振る舞いやジェット周縁部の高速度領域の混合過程を数値的に再現することを目的とした。

本研究の数値計算結果は、従来の実験的研究によって明らかにされた内部構造を半定量的に再現できた。具体的な例として、Solovitzらの実験条件、すなわち温度258 Kの空気が圧力2.55 atmの条件かつ音速で大気中にノズルから放出されるとして数値計算を行ったところ、実験の観察結果と計算結果が半定量的に一致した。ノズル直上にマッハディスクが形成され、上昇速度がマッハ2.5程度からマッハ0.5程度に急減速した。軸部を囲むようにパレルショックが形成され、ジェット周縁部に高速度領域が筒状に形成された。このジェット周縁部の高速度領域は、マッハ2程度の高速度を持ち、ノズル半径の20倍程度の高さまで維持された。

今回得られた数値計算結果について、さらに詳細に解析したところ、噴流境界に渦構造が形成され、それがジェット周縁部の高速度領域と大気との混合過程を著しく促進していることが分かった。Solovitz et al. (2011)の実験結果に対する混合効率の解析は、ある高さにおけるジェットの断面全体の平均的な混合効率を求めたものであり、数値計算で観察されたジェット周縁部の局所的混合効率を求めたものではない。爆発的火山噴火においては、ジェット周縁部の局所的混合が、噴煙柱の安定化をもたらす可能性がある。

キーワード: 火山, 噴煙, 数値シミュレーション, 火砕流

Keywords: volcano, eruption cloud, numerical simulation, pyroclastic flow

超音速ジェット周りに発生するノイズの周波数解析 Frequency analysis of noise around supersonic jet

畠中 和明^{1*}, 柴田直人¹, 齋藤務¹
Kazuaki Hatanaka^{1*}, SHIBATA, Naoto¹, SAITO, Tsutomu¹

¹ 室蘭工業大学

¹Muroran Institute of Technology

ノズルから不足膨張の状態で噴出される超音速自由噴流周囲には、乱流混合ノイズ、スクリーチトーン、広帯域ショック関連ノイズの三種類のノイズが発生することが知られている [Tam, 1995]。特にスクリーチトーンは特定周波数に非常に強いピークを持ち、騒音やノズル近傍構造物の音響疲労破壊といった問題を引き起こすため、Pawell[1953]によってその存在が報告されてから、ノイズの発生条件やその振幅・周波数特性に関する実験的・数値解析的研究が多数行われ、現象の解明が進められている。スクリーチトーンは、ノズル圧力比が2~6程度のショックセル構造を伴う噴流で主に発生するため、ノイズに関する研究もこの圧力比範囲で行われることが多く、ノイズの観測にはマイクロフォンがよく用いられる。本研究では、より高い圧力比範囲を対象とした実験的研究を行う。音響場の測定にはマイクロフォンに加えて、密度場の可視化画像を解析する手法を用い、その有用性を調べることを目的とする。

実験装置として、大気開放された出口径5mmの円形ノズルに高圧エアシリンダーから空気を供給する配管系を構築した。高圧空気はレギュレータで圧力調整され、ノズル上流に圧力変換器を設置した。ノズル下流にコンデンサマイクロフォン(RION UC-54)を設置し、騒音計(RION UN-14)を通してPCにてデータ収集を行った。ノズル形状としてストレート、拡大、収縮の三種類について実験を行った。さらに、画像解析を行うための可視化手法にシュリーレン法を用いて観測を行った。噴流周囲の音響場を感度よく捉えるため、光学系には、レンズを2枚使用して平行光を作り出す通常の手法に比べて密度変化に対する感度が4倍となるダブルパッセージ方式を採用した。

可視化画像からは、圧力比2~6において、噴流中のある一点を中心とした同心円状の明暗の縞が明瞭に観測された。縞の間隔と音速から求めた周波数は、マイクロフォンで観測したスクリーチの周波数とよく一致することが確認され、画像解析手法の有効性が確認された。

圧力比の上昇に伴い、スクリーチの周波数は低くなるのと同時に音圧レベルも下がり、本実験では圧力比が6を超えると周波数空間での明確なピークが確認できなくなった。しかし可視化画像では、ノズル出口付近から斜め上方向に指向性を持つ音波が発生しているのが確認された。この音波の周波数を調べると、本実験で使用したマイクロフォンでは検出できない高周波数帯であることが分かった。可視化画像で解析を行った結果、この音波の周波数は圧力比に関して明確な傾向を持たず、広い周波数帯域に広がっていることが分かった。これらの周波数特性や音波の指向性は、乱流混合ノイズの特徴と一致する。

本研究では、超音速自由噴流周りの音響場について、マイクロフォンによる音響解析及び可視化画像を使用した周波数解析を行った。スクリーチトーンの測定で両者の解析結果は良い一致を示し、画像解析が噴流周りの音響場を調べる際に有効な手段であることを示した。また、高い圧力比の噴流音響場について、マイクロフォンで検出できない高い周波数を持つ音波に画像解析を適用し、その特性を調べた。その結果、指向性や周波数特性から、乱流混合ノイズと見られるという結論を得た。

キーワード: 超音速自由噴流, ジェットノイズ, 周波数解析

Keywords: Supersonic free jet, Jet noise, Frequency analysis

霧島新燃岳 2011 年噴火，噴火様式遷移の原因 ~ 1次元定常火道流モデルによるアプローチ ~

Transition in eruption style during the 2011 eruption of Shinmoe-dake: implications from a steady conduit flow model

田中 良^{1*}, 橋本 武志¹

Ryo Tanaka^{1*}, Takeshi Hashimoto¹

¹ 北海道大学

¹ Hokkaido University

九州南部の鹿児島県と宮崎県の県境部に位置する霧島山新燃岳は、2011年1月に噴火した。一連の噴火において、噴火様式は、マグマ水蒸気爆発、準プリニー式噴火、溶岩噴出、ブルカノ式噴火の順に遷移した。本研究の目的は、この噴火様式の遷移の原因を推測することである。特に、準プリニー式噴火から溶岩噴出への遷移、溶岩噴出の停止に着目した。火道やマグマ溜まりの状態、マグマの浸透性を定量的に評価するために、1次元定常火道流モデルを用いた。本研究では、Kozono and Koyaguchi (2010) で提案された、溶岩噴出を念頭に置いたモデルに準拠して数値計算を行った。このモデルでは、円筒火道中を等温の気液2相流が上昇することを仮定している。また、火道からの脱ガス機構として、鉛直、側方方向への気相の散逸が取り入れられている。マグマの粘性は液相に溶解した揮発性成分量と結晶量に依存するとしている。

まず、このモデルに新燃岳 2011 年噴火で実測または推定された物理量を適用し、マグマが破碎しないための条件を推定した。マグマ溜まりの含水率は破碎の有無を大きく左右するが、噴火に伴って初期含水率が低下した可能性は低い。従って、本研究では、特に火道半径および空隙率 浸透率関係について検討した。その際、マグマは気相の体積分率がある閾値を超えた時に破碎するものとし、その閾値を Proussevitch *et al.* (1993) に基づいて 0.75 と設定した。ただし、閾値を 0.7, 0.8 と設定して計算した結果、求められる浸透率は閾値に対して敏感ではないことが示された。また、Papale (1999) によって提案された、ひずみ速度に依存する破碎機構を用いても検討を行った。

次に、マグマ溜まりの深さを固定して、未破碎かつ定常火道流となるマグマ溜まりの圧力と mass-flow-rate の関係を数値的に調べた。その結果から、溶岩噴出が停止した原因は、噴出にともなってマグマ溜まりの圧力が低下したことで、mass-flow-rate のジャンプが生じたためであると推測した。

さらに、溶岩噴出を停止させるために必要なマグマ溜まりの圧力低下量と、実際に観測された溶岩噴出量を、茂木モデルに適用することで、マグマ溜まりの絶対体積を 10^{10} m^3 のオーダーと推定した。ただし、本研究では以下に示す要因を考慮していないので、この推定は上限値であると考えべきであろう。(a) マグマ溜まり周縁部の剛性率が一般的な地殻のそれよりも低い可能性；(b) マグマ溜まりにおけるマグマの圧縮性の効果；(c) 溶岩噴出に伴って、マグマ溜まりに深部からマグマが補填されていた可能性。新燃岳の圧力源付近において、上記推定に相当する規模の低速度異常域が報告されていないことは、これらの機構が寄与していた可能性を示唆するものと言える。

霧島山新燃岳 2011 年サブプリニー式噴火における火道流のダイナミクス Conduit flow dynamics during the 2011 sub-Plinian eruptions of Shinmoe-dake volcano

小園 誠史^{1*}, 上田 英樹¹, 長井 雅史¹
Tomofumi Kozono^{1*}, Hideki Ueda¹, Masashi NAGAI¹

¹ 防災科学技術研究所

¹NIED

2011 年霧島山新燃岳噴火初期においては、噴煙の形成と火山灰の拡散を伴う 3 回のサブプリニー式噴火が生じた。これらのサブプリニー式噴火では、傾斜計による地殻変動観測や気象レーダによる噴煙エコーの観測、岩石学的・地質学的観測などの多項目観測によって、噴火の強度や継続時間、噴出率、マグマの性質や地質条件に関する正確な情報を得ることができた。本研究では、これらの情報と火道流モデルの解析を組み合わせることによって、新燃岳のサブプリニー式噴火期における火道流のダイナミクスを調べた。

サブプリニー式噴火中においては、噴煙のレーダエコーと傾斜変動の間に強い相関が見られた。C バンド気象レーダによる噴煙エコーの計測(新堀・福井, 2012)によると、1 月 26 日の 16:00-18:30 と 1:50-4:40, 1 月 27 日の 16:20-17:40 において、海拔高度約 6.5-8.5 km の噴煙の連続的な形成が観測された。防災科研のポアホール式傾斜計のデータでも、サブプリニー式噴火に同期した傾斜変動が観測され、またその変動が生じた時間はレーダエコーで捉えられた噴煙形成の時間とほぼ一致していることがわかった。ここで、この傾斜変動源は深さ約 10km の球状収縮源であり、これはマグマの地表への流出に伴うマグマ溜まりの収縮過程を示唆している。これらの観測事実から、サブプリニー式噴火中においては、深いマグマ溜まりと地表を連結するマグマ供給系が連続的に存在していたことがわかった。

本研究では、マグマ破碎に伴う気泡流から噴霧流への遷移を考慮した一次元定常火道流モデルを用いて、サブプリニー式噴火期におけるマグマ溜まりと地表間のマグマ供給系をモデル化した。新燃岳のサブプリニー式噴火に関しては、火道流を支配する重要なパラメータであるマグマ噴出率が、測地学的手法によって正確に約 $1.5 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$ と推定されている(Kozono et al., 2013)。この噴出率一定のもとでは、火道流モデルを用いて、火道流がマグマ溜まりと地表における境界条件を満たした状態でのマグマ溜まりの圧力(p_{ch})と火道の長さ(L)の関係(“ p_{ch} - L relationship”)を得ることができる。この関係がリススタティック圧と深さの関係に近いとき、その場合の火道流は現実的に存在し得ると考えられる。本研究では、岩石学的観測によって制約されているマグマ溜まりでのマグマの性質が固定されたうえで、火道の半径、マグマ破碎の臨界体積分率、脱ガス浸透率、結晶成長率の各パラメータを変化させた場合の p_{ch} - L relationship を系統的に調べた。その結果、 p_{ch} - L relationship は特に火道の半径に強く依存して大きく変化し、その半径が約 5m の場合において、 p_{ch} - L relationship がリススタティック圧と深さの関係に近くなることが明らかになった。以上のことから、新燃岳噴火では比較的幅の狭いマグマの流路によってマグマ溜まり-地表間のマグマ供給系が形成されていた可能性がある。

謝辞: 気象研究所の新堀敏基様・地磁気観測所の福井敬一様より、気象レーダに基づく噴煙エコー高度の観測データのご提供を頂きました。記して感謝いたします。

キーワード: 火道流, 新燃岳, サブプリニー式噴火, 数値モデル

Keywords: conduit flow, Shinmoe-dake, sub-Plinian eruption, numerical model

桜島火山昭和火口の噴火に伴う前駆地震の特徴

Characteristics of precursory volcanic earthquakes to eruptions at the Showa crater of Sakurajima volcano

為栗 健^{1*}, 井口 正人¹

Takeshi Tameguri^{1*}, Masato Iguchi¹

¹ 京都大学火山活動研究センター

¹ Sakurajima Volcano Research Center, Kyoto Univ.

2006年6月に桜島南岳山頂火口の東側斜面にある昭和火口において58年ぶりに噴火が発生した。昭和火口の噴火活動は活動期と休止期を繰り返したが、2009年以降、噴火活動が活発化し、爆発回数が急激に増えた。2010年には1,055回、2011年には1,091回、2012年には919回の爆発的噴火が発生している。昭和火口における爆発的噴火は南岳山頂火口の爆発と比較すると小さいが、爆発回数の増加とともに規模が大きくなっている。噴火の数十分～数時間前からひずみ計において山体膨張が観測され、その圧力源の深さは0-1.5kmである(Iguchi et al., 2013)。さらに、2011年頃から昭和火口の爆発的噴火や比較的火山灰放出量の多い噴火の前に、顕著な前兆的地震活動が見られるようになってきた。本講演では噴火の前駆地震群発の特徴と地盤変動との関連について発表する。

前駆地震は噴火の30分～2時間ほど前から発生し始め、時間とともに発生間隔が短くなっていく。噴火の15分ほど前から地震の振幅が大きくなり、発生数も増加する。噴火直前には微動のようなパターンもある。この地震の継続時間は10-20秒、卓越周波数は5-6 Hzで、明瞭なS波は見られない。桜島火山の火山性地震の分類ではBH型に属する地震である。震源決定を行ったところ、昭和火口直下の海水面下0.5 kmであった。南岳山頂火口の活動で発生するBH型地震の震源は2 km付近であり、この地震の震源はそれより浅く、BL型地震の発生位置と同じ深さである。爆発の数時間前から地震が発生し始め、回数および振幅が増加する点は、南岳における爆発的噴火の前に発生する第一種群発地震と類似している。

この前駆地震群発は規模の大きな爆発や火山灰放出量の多い噴火の前に発生する傾向があり、昭和火口の噴火の中では規模が大きいため、ひずみ計で山体膨張が明瞭に観測される。膨張開始の30分～1時間後に地震が発生し始めることが多い。膨張速度は噴火の約30分前から低下もしくは停止することがあり、前駆地震群発は膨張速度が低下した際に活発化する。膨張の継続時間が短い噴火の際には群発的な地震活動は見られず、散発的に地震が発生するのみである。前駆地震群発は膨張速度の低下と膨張の継続時間に関係していると言える。また、前駆地震の震源は地盤変動の圧力源と同様の深さである。このことから、前駆地震群発は噴火前に圧力源が膨張することで蓄積された過剰圧力の解放によって発生しているものと考えられる。

キーワード: 桜島火山, 爆発的噴火, 前駆地震

Keywords: Sakurajima volcano, explosive eruption, precursory earthquake

火砕性黒曜石に残されたマグマ中でのガス移動の証拠 Evidence of permeable gas transport in magma from obsidian pyroclasts

奥村 聡^{1*}

Satoshi Okumura^{1*}

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Department of Earth Science, Tohoku University

Permeable gas flow through connected gas bubbles in magma is thought to control the rate of outgassing from silicic magma and hence the style and explosivity of volcanic eruptions. Recent experimental studies (Okumura et al., 2009; Caricchi et al., 2011) demonstrated that gas permeability in magma starts to increase at a vesicularity of ca. 30 vol%; this vesicularity can be achieved at a depth of a few kilometers for typical rhyolite magma. This result supports the field observations of volcanic gases that indicate outgassing from magma at depths of a few to several kilometers (Edmonds et al., 2003; Ohba et al., 2008). In addition to these experiments and observations, this study exhibits that permeable gas transport occurs at a depth of a few kilometers on the basis of volatile content and bubble microstructure in obsidian pyroclasts.

In this study, obsidian pyroclasts were collected from the Kemanai pyroclastic flow deposit of the Heian eruption at Towada volcano. The obsidians were doubly polished and its water contents were measured using FT-IR microspectrometer. Obsidian pyroclasts were divided into two major groups, i.e., clear and dark brown obsidians. Clear glassy fragments include deformed and elongated bubbles and some fragments show banding structure. The bands with brown color seem to be formed along highly elongated bubbles but the bands continue even if the bubbles disappear. The composition of major elements is the same in clear and brown parts. In contrast, water content profiles perpendicular to the bands show the increase in water content from 2 wt% in the clear part to 3-4 wt% in the center of brown bands. The concentrations of hydroxyl group and molecular water show positive correlation and the equilibrium temperature (quenched temperature during cooling process) estimated from water speciation is approximately 500 degC. The width of hydration layer is 70-100 um, which can be explained by diffusion time of 100 ky, 7 hrs and 5 min at temperatures of 25, 500 and 1000 degC, respectively.

The analytical results of this study indicate that the hydration occurred at temperatures >500 degC. When we assume magma temperature of 1000 degC (Hunter and Blake, 1995), the depth at which hydration occurred is estimated to be 1600 m (40 MPa) on the basis of water content of 2 wt%. Because the hydration layer has high water content (3-4 wt%), permeable gas transport is expected to occur even at deeper part. If magma temperature decreases before the hydration, the estimated depth at which hydration occurred may be shallow (600 m at magma temperature of 500 degC). However, bubble collapse and space disappearance along brown bands imply that magma temperature is high enough to heal bubble networks even after the hydration. If magma temperature is 500 degC, healing timescale is >100 yrs (Yoshimura and Nakamura, 2010). This timescale is much longer than the timescale of volcanic eruption and water diffusion profile in the bands would be annealed during the healing. Therefore, magma hydration is inferred to be induced by permeable gas transport at a depth of a few kilometers.

キーワード: 火砕性黒曜石, 浸透流, ガス移動, マグマ, 水

Keywords: obsidian pyroclast, permeable flow, gas transport, magma, water

Magma permeability and magma-slurry mingling during the 1963-67 eruption Magma permeability and magma-slurry mingling during the 1963-67 eruption

Schipper C Ian^{1*}, BURGISSER, Alain², WHITE, James D.L.³

C Ian Schipper^{1*}, BURGISSER, Alain², WHITE, James D.L.³

¹IFREE JAMSTEC, ²ISTO-CNRS France, IS-Terre CNRS France, ³University of Otago

¹IFREE JAMSTEC, ²ISTO-CNRS France, IS-Terre CNRS France, ³University of Otago

Processes observed during the extremely well documented eruption of Surtsey, Vestmannaeyjar, Iceland, 1963-67, highlighted the effects of interaction between erupting magma and abundant seawater on eruption dynamics. As the 50th anniversary of this canonical eruption approaches, however, many specific aspects of the eruption dynamics remain only qualitatively characterized. We present a detailed micro-CT 3D textural analysis of lapilli and ash from Surtsey, and use mingling and thermodynamic theory to quantitatively describe Surtseyan jets.

Fine lapilli (-2.0 phi) have total porosity ranging from 24 to 59 % (with one dense, impermeable outlier of 6 %), > 98 % of which is connected. Bubble number densities range from 4.05×10^5 to 8.30×10^6 cm⁻³, and are roughly inversely proportional to porosity. Darcian permeability ranges from 2.95×10^{-13} to 3.87×10^{-11} m². Ash particles (3.0-3.5 phi) are generally blocky in outline, with surfaces often bounded by broken vesicles on one or more sides; however, blocky particles lacking any sign of vesiculation are also present. Groundmass textures vary from nearly holocrystalline tachylite to hypocrySTALLINE sideromelane, with many larger clasts having a transitional texture characterized by patches of both.

Nearly all the lapilli have ash-packed vesicles around their exteriors. Such ash could easily have been entrained mechanically during transport, deposition and/or reworking, or drawn into the exterior vesicles by capillary action. More enigmatic, however, is when the vesicles deep within lapilli contain fine ash particles, ranging from a few grains adhering to vesicle walls, to cases where the vesicles are densely packed with poorly-sorted ash.

Based on careful examination of textures, we explore the hypothesis that a proportion of the ash in lapilli may in fact have been entrained during hydrodynamic mingling of magma erupting through a slurry of previously-erupted material in a flooded vent. We use such a scenario to explain the typical Surtseyan cypressoid jets of steam and pyroclasts. The slurry entrained into the newly erupted pyroclasts was vapourized to steam by magmatic heat, and then discharged from the same pyroclasts during dispersal.

Analyses based on thermodynamics and fragmentation criterion suggest that for a narrow but plausible range of magma porosity and magma-slurry mingling regimes, entrainment and vapourization of slurry may also have assisted in driving part of the fragmentation process. The hypothesis presented here is consistent with classical qualitative models of Surtseyan jet dynamics, and works toward explaining specific details about how magmatic and external factors contribute individually and cooperatively to shallow subaqueous eruption dynamics.

キーワード: magma, permeability, magma-water interaction, Surtsey, microtomography, mingling

Keywords: magma, permeability, magma-water interaction, Surtsey, microtomography, mingling

Water control on variation in eruptive style during the first eruptive episode of the Barombi Mbo Maar, Cameroon Water control on variation in eruptive style during the first eruptive episode of the Barombi Mbo Maar, Cameroon

Boris Chako Tchamabe^{1*}, Takeshi OHBA¹, ISSA¹, Moussa NSANGO NGAPNA³, Yuka SASAKI¹, Gregory TANYILEKE², Joseph Victor HELL²

Boris Chako Tchamabe^{1*}, Takeshi OHBA¹, ISSA¹, Moussa NSANGO NGAPNA³, Yuka SASAKI¹, Gregory TANYILEKE², Joseph Victor HELL²

¹School of Science, Tokai University, Japan, ²IRGM, Cameroon, ³Earth Science Department, University of Douala, Cameroon

¹School of Science, Tokai University, Japan, ²IRGM, Cameroon, ³Earth Science Department, University of Douala, Cameroon

The first eruptive episode of the Barombi Mbo Maar is represented by about 60m thick pyroclastic material. Approximately 20m of this display a contrasting bedding and grading in sustained thinly well-bedded succession of ash- and lapilli-beds, low concentration turbulent pyroclastic flow, bombs- and highly vesiculated scoria-rich bed, and lithic- and xenolith-rich explosive breccia, while the other part, under the lake level is mainly covered by the vegetation. The sequence of volcanic activities that sustained the settling of these materials developed subsequently in four eruptive phases: phreatic ? phreatomagmatic - strombolian - phreatomagmatic. This variation in eruptive style is consistent with recent studies of the deposit stratigraphy, regarding lithofacies from individual accessible beds of the deposit unit, the grain-size distribution and the componentry. Our results suggest that eruption style changes can be interpreted as follows: initially, a rising magma interacted with potential surface water coming from the collapse of part of an ancient maar wall to produce series of phreatic eruption. The scar of this older maar visible at the west of the Barombi Mbo Maar is consistent with this observation. Assuming that the volume of water was important, the phreatic activity continuously produce ash and lapilli and ended with a phreatomagmatic style represented stratigraphically by a pyroclastic surge. In the course of the eruptive activity, water might have become exhausted giving rise to a more strombolian style mixed by phreatomagmatic material, as suggest by the presence of several centimeter- to decimeter-sized of spatter bombs and vesiculated scoria, mantle xenoliths and country rocks above the surge layer. The eruption would have generated cracks in the basement rocks through which water was re-supplied into the hydrothermal system after a short repose period. Then a new magma source interacted with the groundwater and the phreatomagmatic activity continued with more violence, unraveling the crystalline basement to produce the phreatomagmatic ash, mantle xenolith and country rock fragments-rich explosive breccia.

キーワード: Barombi Mbo Maar, Eruptive styles, Phreatomagmatic eruption, Strombolian activity, Stratigraphy, Cameroon

Keywords: Barombi Mbo Maar, Eruptive styles, Phreatomagmatic eruption, Strombolian activity, Stratigraphy, Cameroon

阿蘇 4 小谷軽石流堆積物と直前に噴出した高遊原溶岩の岩石学的比較 Petrological comparison between the earliest product of Aso-4 pyroclastic flow and its precursory lava extrusion, in cen

山崎 秀人^{1*}, 長谷中 利昭¹, 森 康²

Hideto Yamasaki^{1*}, Toshiaki Hasenaka¹, Yasushi Mori²

¹ 熊本大・院・自然科学研究科, ² 北九州市立自然史・歴史博物館

¹ Grad School Sci & Tech, Kumamoto Univ., ² Kitakyusyu Mus. of Nat. & Hum. History

本研究は阿蘇-4 火砕流堆積物サブユニットのうちの一つである小谷(おやつ)軽石流堆積物を対象として岩石記載, 微量元素を含めた全岩化学組成分析を行い, 阿蘇-4 火砕噴火の直前に噴出した高遊原溶岩との比較, 考察によって阿蘇-4 火砕流堆積物と高遊原溶岩のマグマ供給系の関係性を議論した。小谷軽石流堆積物は阿蘇-4 火砕流堆積物のうち初期に噴出したサブユニットであり, 阿蘇-4 火砕噴火直前に流出した高遊原溶岩との関係性を議論することは大規模火砕噴火の物理化学過程を知る重要な手掛かりとなる。

小谷軽石流堆積物の軽石の斑晶鉱物は, 斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石, 普通角閃石, 不透明鉱物から成り, 高遊原溶岩と斑晶鉱物組み合わせは同じである。しかし, 普通角閃石について前者は斑晶サイズ(>0.3 mm) のものが多いが, 後者は微斑晶サイズ(<0.03 mm) でオパサイトの反応縁を持っている。斜長石について前者は清透で自形のものが多いのに対し, 後者はほとんどが融食形である。また, 全岩化学組成では, 前者は $\text{SiO}_2=67\sim69$ wt.%, 後者が $\text{SiO}_2=63\sim67$ wt.% であり, 共に分化トレンドを示すが, 小谷軽石流堆積物は高遊原溶岩のトレンドの延長線上にプロットしない。

小谷軽石流堆積物の化学組成幅は結晶分別作用によって作られた可能性があることが分かった。化学組成のプロットから読み取れるトレンドの傾きは小谷軽石流堆積物と高遊原溶岩では大きく異なり, このことから全岩分配係数が異なると推測され, 阿蘇-4 火砕流堆積物と高遊原溶岩の分化の物理化学条件が異なることが示唆された。

高遊原溶岩は阿蘇-4 成層マグマ溜まりの一部が大噴火に先行して流出したという考えがあったが, 本研究は阿蘇-4 火砕流堆積物と高遊原溶岩のマグマ溜まりは異なる可能性を明らかにした。

キーワード: 阿蘇-4 火砕流堆積物, 高遊原溶岩, マグマ供給系

Keywords: Aso-4 pyroclastic flow deposits, Takayubaru lava, magma supplying system

減圧による発泡マグマ模擬材料の破碎に対する試料構造の影響 Mechanism of delayed fragmentation of vesicular magma by decompression

津郷 光明^{1*}, 志田 司¹, 亀田 正治¹, 市原 美恵²

Mitsuaki Tsugo^{1*}, Tsukasa Shida¹, Masaharu Kameda¹, Mie Ichihara²

¹ 東京農工大学工学府機械システム専攻, ² 東京大学地震研究所

¹Mechanical System Engineering, TUAT, ²ERI, Univ. of Tokyo

マグマの破碎は爆発的噴火のトリガとされ、火山噴火様式を決めるカギとなる現象である。我々は破碎発生メカニズムを調査するために、マグマの模擬材料（酸素気泡を混入した水あめ）を急減圧して破碎させる室内実験を行ってきた。その実験における破碎発生の有無を、気泡壁にかかる差応力の推定値が臨界差応力を超える時の脆性度（「臨界脆性度」と呼ぶ）[Ichihara and Rubin, 2010] を用いて評価した結果、以下のことが分かっている。「脆性破碎」は加えられる差応力の大小に関わらず、試料が固体的な性質を示すと考えられる臨界脆性度が十分大きい値（0.9 から 1.0 の間）で起こっている。そして、臨界脆性度が 0.9 よりも小さいとき、臨界差応力程度の差応力が加えられた試料は破碎を起こさず、流体的に膨張する。一方、臨界差応力よりも十分大きな差応力（1.5 倍程度以上）を加えられた試料は「遅れ破碎」を起こす。実際のマグマ破碎はこの遅れ破碎の繰り返しであるとみられる。よって、本研究では、「遅れ破碎」の原因を突き止めることを目指す。

「遅れ破碎」は、固体/液体遷移の緩和時間（粘性率を剛性率で除したのもの）よりも後に発生する破壊を示す。さらに、気泡を含んだマグマの減圧では、粘性流動による気泡膨張によってマグマに加わる応力が緩和される。この粘性流体中における気泡膨張の特性時間は、初期気泡内圧力、粘性率、そしてポイド率の関数である。「遅れ破碎」の発生時刻を粘性流体中の気泡膨張特性時間を用いて整理した結果、「遅れ破碎」の発生時刻は、すべてこの特性時間より小さかった。ゆえに、「遅れ破碎」は膨張した気泡同士の連結によってマグマを分裂させる液体的破碎ではなく、差応力によってマグマを破壊する固体的な破碎（脆性的破碎）である。

遅れ破碎の原因を解明するために、試料の構造を変化させた急減圧破碎実験を行った。変化させる構造は(1) 試料のサイズ、(2) 試料内の気泡径、(3) 試料ポイド率およびその偏りの3つである。

ポイド率を 3~28%、臨界脆性度の推定値を 0.5（流体的変形）~1（固体的変形）の範囲として、試料サイズを 25 ml 程度に小さくして実験を行ったところ、破碎に必要な臨界値を超える差応力が加わり、かつ、臨界脆性度が 0.9 程度と高い場合でも破碎が起こさない試料が存在した。以前の実験で用いていた 100 ml 程度の体積を持つ試料は、同様の実験条件を与えたすべてのケースで破碎が起こっていた。試料の断面を観察したところ、サイズが小さいものの方が、同じサイズの気泡が均一に分布していた。試料内の気泡が均一に存在すると、すべての気泡周りに均一に応力が加わる。試料内の応力集中がなくなり、破碎しない場合が発生したと考えられる。

次に気泡径を変化させて実験を行った。試料内の気泡は、過酸化水素を混ぜた水あめに二酸化マンガンを加えることで発生させている。二酸化マンガン投入時の水あめの温度を高くすると平均気泡径が大きくなることが分かっている。このことを利用して、平均気泡径の大きい試料と小さい試料を作成し、2つの試料を並べて急減圧し、2つの試料の挙動を同時に観察した。すべての実験において、2つの試料の破碎の有無は同じになった。したがって平均気泡径の大きさは破碎の有無に影響しないと言える。

臨界脆性度の推定値が 0.9 付近の実験結果を整理したところ、ポイド率が 8% を下回る条件では破碎が起こっていないことが分かった。また高速度カメラで撮影した画像を確認したところ、破碎の生じている試料の内部に大きな気泡が確認された。そこでポイド率の低い試料に人工的に大きな空隙を作り、減圧実験を行った。その結果、欠陥を内包させた試料のみ破碎した。

これまで、均質な空間ポイド率を仮定して、気泡壁の差応力を計算し、臨界脆性度の推定に用いてきた。本研究の結果は、この推定方法の問題を示しており、脆性破碎を発生するために必要な臨界脆性度は、これまでの推定値よりも 1 に近いのかも知れない。一方、臨界脆性度の推定値が低い条件でみられる遅れ破碎は、試料内部のポイド率分布の偏りをきっかけとして、差応力と脆性度が局所的に増大することにより生じている、ということも示唆される。

キーワード: 破碎, 粘弾性, 室内実験, 脆性度

Keywords: fragmentation, viscoelasticity, analogous experiment, brittleness

新燃岳 2011 年噴火のデイサイトメルトへの水の溶解度 Experimental determinations of water solubility in the Shinmoe-dake 2011 dacite melt to 150 MPa

山下 茂^{1*}, Chertkova Nadezda¹
Shigeru Yamashita^{1*}, Nadezda Chertkova¹

¹ 岡山大学地球物質科学研究センター

¹Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University

Water is the first dominant volatile within a volcano, and hence its solubility in a melt is fundamental to how explosive the eruption will be. Published solubility data for water are rather sparse, particularly for moderate SiO₂ content melts, however. This has resulted in insufficient data coverage in composition space, rendering water solubility not to be precisely modeled if a melt is subject of partial crystallization (hence of composition change).

In this study, water solubility in dacite melt (68.3 wt% SiO₂) was experimentally determined at 1000 degree C and 50-150 MPa in an internally heated pressure vessel. A groundmass separate of white-colored pumice from the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Kirishima volcano group, was equilibrated with O-H fluid, and the water content in the quenched glass was determined by near-infrared spectroscopy. Oxidation-reduction state was controlled to near the Ni-NiO buffer, so that the O-H fluid was present as nearly pure H₂O (more than 99 mol%). Temperature condition of 1000 degree C was desired since the water-saturated liquidus was experimentally located between 950 and 1000 degree C at the pressure range 50-150 MPa.

Experimental result shows that at 1000 degree C, the water solubility in the dacite melt monotonously increases with pressure, from 4.4 plus-minus 0.3 mol% (2.4 wt%) at 50 MPa through 6.0 plus-minus 0.3 mol% (3.3 wt%) at 100 MPa to 6.8 plus-minus 0.3 mol% (3.9 wt%) at 150 MPa. These values are practically the same as the previously published solubility data for water in rhyolite melts at 1000 degree C (4.2 mol% at 50 MPa, 6.3 mol% at 100 MPa; Yamashita, J. Petrol., 40, 1999). Thus, the water solubility was insensitive to the change of melt composition during groundmass crystallization in the Shinmoe-dake 2011 eruption. This would provide a rigorous petrological base for quantitatively modeling of degassing/explosive behavior in the Shinmoe-dake 2011 eruption as a continuum problem.

キーワード: 水, 溶解度, ケイ酸塩メルト, デイサイト, 赤外分光, 高温高圧実験

Keywords: water, solubility, silicate melt, dacite, infrared spectroscopy, high-pressure and high-temperature experiment