

## 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<sup>1\*</sup>, 小屋口 剛博<sup>1</sup>, 鈴木 雄治郎<sup>1</sup>  
Koji Kiyosugi<sup>1\*</sup>, Takehiro Koyaguchi<sup>1</sup>, Yujiro Suzuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> 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、大気中で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<sup>1\*</sup>, 新堀 敏基<sup>1</sup>, 山本 哲也<sup>1</sup>, 横田 崇<sup>1</sup>, 加藤 幸司<sup>2</sup>

Akimichi Takagi<sup>1\*</sup>, Toshiki Shimbori<sup>1</sup>, Tetsuya Yamamoto<sup>1</sup>, Takashi Yokota<sup>1</sup>, Koji Kato<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 福岡管区気象台

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Fukuoka 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/m<sup>3</sup>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<sup>1\*</sup>, 小屋口 剛博<sup>1</sup>, 鈴木 雄治郎<sup>1</sup>

Satoshi Inagawa<sup>1\*</sup>, Takehiro Koyaguchi<sup>1</sup>, Yujiro Suzuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 地震研

<sup>1</sup> 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<sup>1\*</sup>, 柴田直人<sup>1</sup>, 齋藤務<sup>1</sup>  
Kazuaki Hatanaka<sup>1\*</sup>, SHIBATA, Naoto<sup>1</sup>, SAITO, Tsutomu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 室蘭工業大学

<sup>1</sup>Muroran 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<sup>1\*</sup>, 橋本 武志<sup>1</sup>

Ryo Tanaka<sup>1\*</sup>, Takeshi Hashimoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学

<sup>1</sup> 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  $10^{10} \text{ m}^3$  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<sup>1\*</sup>, 上田 英樹<sup>1</sup>, 長井 雅史<sup>1</sup>

Tomofumi Kozono<sup>1\*</sup>, Hideki Ueda<sup>1</sup>, Masashi NAGAI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>NIED

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<sup>1\*</sup>, 井口 正人<sup>1</sup>

Takeshi Tameguri<sup>1\*</sup>, Masato Iguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学火山活動研究センター

<sup>1</sup> 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<sup>1\*</sup>

Satoshi Okumura<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Department 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<sup>1\*</sup>, BURGISSER, Alain<sup>2</sup>, WHITE, James D.L.<sup>3</sup>

C Ian Schipper<sup>1\*</sup>, BURGISSER, Alain<sup>2</sup>, WHITE, James D.L.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IFREE JAMSTEC, <sup>2</sup>ISTO-CNRS France, IS-Terre CNRS France, <sup>3</sup>University of Otago

<sup>1</sup>IFREE JAMSTEC, <sup>2</sup>ISTO-CNRS France, IS-Terre CNRS France, <sup>3</sup>University 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  $4.05 \times 10^5$  to  $8.30 \times 10^6$  cm<sup>-3</sup>, and are roughly inversely proportional to porosity. Darcian permeability ranges from  $2.95 \times 10^{-13}$  to  $3.87 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>. 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<sup>1\*</sup>, Takeshi OHBA<sup>1</sup>, ISSA<sup>1</sup>, Moussa NSANGO NGAPNA<sup>3</sup>, Yuka SASAKI<sup>1</sup>, Gregory TANYILEKE<sup>2</sup>, Joseph Victor HELL<sup>2</sup>

Boris Chako Tchamabe<sup>1\*</sup>, Takeshi OHBA<sup>1</sup>, ISSA<sup>1</sup>, Moussa NSANGO NGAPNA<sup>3</sup>, Yuka SASAKI<sup>1</sup>, Gregory TANYILEKE<sup>2</sup>, Joseph Victor HELL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Tokai University, Japan, <sup>2</sup>IRGM, Cameroon, <sup>3</sup>Earth Science Department, University of Douala, Cameroon

<sup>1</sup>School of Science, Tokai University, Japan, <sup>2</sup>IRGM, Cameroon, <sup>3</sup>Earth 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<sup>1\*</sup>, 長谷中 利昭<sup>1</sup>, 森 康<sup>2</sup>

Hideto Yamasaki<sup>1\*</sup>, Toshiaki Hasenaka<sup>1</sup>, Yasushi Mori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 熊本大・院・自然科学研究科, <sup>2</sup> 北九州市立自然史・歴史博物館

<sup>1</sup>Grad School Sci & Tech, Kumamoto Univ., <sup>2</sup>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<sup>1\*</sup>, 志田 司<sup>1</sup>, 亀田 正治<sup>1</sup>, 市原 美恵<sup>2</sup>

Mitsuaki Tsugo<sup>1\*</sup>, Tsukasa Shida<sup>1</sup>, Masaharu Kameda<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京農工大学工学府機械システム専攻, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Mechanical System Engineering, TUAT, <sup>2</sup>ERI, 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<sup>1\*</sup>, Chertkova Nadezda<sup>1</sup>

Shigeru Yamashita<sup>1\*</sup>, Nadezda Chertkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター

<sup>1</sup>Institute 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 SiO<sub>2</sub> 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% SiO<sub>2</sub>) 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 H<sub>2</sub>O (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