

領域移流拡散モデルによる1914（大正3）年桜島噴火を想定した火山灰拡散および降灰予測 Tephra-Fall Predictions with the JMA Regional Atmospheric Transport Model for the 1914 Eruption at Sakurajima Volcano

新堀 敏基^{1*}; 白土 正明²; 長谷川 嘉彦³; 橋本 明弘¹; 高木 朗充¹; 山本 哲也¹; 山本 哲¹
SHIMBORI, Toshiki^{1*}; SHIRATO, Shomei²; HASEGAWA, Yoshihiko³; HASHIMOTO, Akihiro¹; TAKAGI, Akimichi¹; YAMAMOTO, Tetsuya¹; YAMAMOTO, Akira¹

¹ 気象研究所, ² 鹿児島地方気象台, ³ 気象庁

¹Meteorological Research Institute, ²Kagoshima Local Meteorological Office, ³Japan Meteorological Agency

気象研究所では2014年度から5年計画で、大規模噴火を想定した気象庁領域移流拡散モデル（JMA-RATM）による予測技術の研究を実施し、気象庁で運用している降灰予報の高度化に資することを計画している。今から100年前の1914（大正3）年1月12日に発生した桜島噴火（大正噴火）は、20世紀に国内で発生した最大規模の噴火であり、この噴火に伴う降灰は東北地方まで確認された（長谷川, 1914; 大森, 1916）。大規模噴火に対する現在のJMA-RATMの予測可能性を調べるため、大正噴火を想定した火山灰拡散・降灰予測を行った。初期値の噴煙柱モデルは山科（1999）、安井・他（2006）、井口（2014）などにに基づき、噴煙の高度3000~18000 m、噴火の継続時間38時間で噴出物（火山灰・礫）の総量 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ を仮定した。気象場は2013年3月28日以降の領域拡張された気象庁メソ数値予報モデルの解析値を入力値として用い、季節ごとに噴火開始から72時間先までの予測計算を実行した。この結果、火山灰の密度として軽石（ 1 g/cm^3 ）を仮定した場合、桜島島内では風が弱いときは1 m以上、東風の卓越する夏季では桜島西方の鹿児島市内で数10 cm、南西風が卓越する場では大阪、名古屋、東京でも1 mm~0.1 mmオーダーの降灰が予想され、火山灰は大正噴火と同様に東北地方、さらに北海道まで移流・拡散する可能性が示された。

本発表では、桜島大正噴火を想定した火山灰拡散・降灰予測の結果を踏まえ、大規模噴火に対する現在のJMA-RATMによる予測可能性とその課題について報告する。

参考文献

- 長谷川謙, 1914: 桜島山噴火概況報告. 気象要覧 臨時増刊, **170**, 中央気象台, 1-16.
井口正人, 2014: 大正噴火から100年を迎えて. 桜島大正噴火「防災」100年式典講演資料.
大森房吉, 1916: Accumulation and transportation of ashes thrown out during the Sakura-jima eruptions of 1914: The Sakura-jima eruptions and earthquakes II. 震災予防調査会紀要, **8**, 113-133.
山科健一郎, 1999: 桜島火山1914年噴火の噴煙高度—目撃資料の検討. 火山, **44**, 71-82.
安井真也・高橋正樹・石原和弘・味喜大介, 2006: 桜島火山大正噴火の記録. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **41**, 75-107.

キーワード: 移流拡散モデル, 火山灰拡散, 降灰, 降灰予報, 桜島, 1914年

Keywords: Atmospheric Transport Model, volcanic-ash dispersal, tephra fall, Volcanic Ash Fall Forecast, Sakurajima volcano, 1914

火山灰拡散シミュレーションのための風データの検討 Evaluation of wind data for tephra dispersion simulations

清杉 孝司^{1*}; 小屋口 剛博¹; 鈴木 雄治郎¹
KIYOSUGI, Koji^{1*}; KOYAGUCHI, Takehiro¹; SUZUKI, Yujiro¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan

火山灰の拡散・堆積プロセスを理解することは、地表に降下した火山灰から噴火条件を再構築する上で必要な火山学的に重要な課題である。また、火山灰の拡散は科学的な問題であるだけでなく社会的・経済的にも重要な関心事である。こうした背景から、火山灰の拡散・降下過程について移流拡散モデルが開発されている(例:TEPHA2, PUFF, FALL3D)。これら移流拡散モデルのシミュレーション結果は入力される風データに影響される。例えば、PUFFを用いた霧島2011年噴火のケーススタディでは、低い時空間解像度の風データ(NCEP/NCAR再解析データ)を使った場合よりも、高い時空間解像度の風データ(気象庁メソ客観解析データとERA Interimデータ)を使ったシミュレーションの方が、東へ約900km流れた噴煙のより細かい構造を再現できた(Kiyosugi and Koyaguchi 2012)。

入手可能な風データには、気象庁のメソ客観解析データ、ヨーロッパ中期予報センターのERA Interimデータ、アメリカ海洋大気庁のNCEP/NCAR再解析データなどがある。これらのデータでは、データ同化の方法や計算モデル、時空間解像度などに違いがある。気象庁のメソ客観解析データは、同化窓6時間の静力学メソ4次元変分法でデータ同化を行って初期値を作成し、非静力学モデルで5kmグリッド、鉛直15層、3時間ごとの気象場を計算したものである。一方、ヨーロッパ中期予報センターのERA Interimデータは、同化窓12時間の4次元変分法のデータ同化によって初期値を求め、 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ グリッド、鉛直37層、6時間ごとの気象場を計算したものである。また、アメリカ海洋大気庁のNCEP/NCAR再解析データは、3次元変分法によるデータ同化を行い、 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ グリッド、鉛直17層、6時間ごとの風データを計算したものである。

これらの入手可能な風データのうち、どのデータが火山灰の拡散モデルに適しているかの判断は一般に難しい。さらに、これらの風データに加え、気象予測モデル(例:the Weather Research and Forecasting model, WRF)を用いてより細かい解像度の風データを数値的に作成することも可能である。WRFモデルは、複数の研究機関が共同で開発したオイラー形式圧縮性非静力学モデルである。WRFモデルは、数mから数kmのスケールの広い範囲に応用可能である。

このような背景から、本研究では火山灰の移流拡散モデルのシミュレーションに最適な風データの作成を進めている。降灰や火山灰の拡散を再現するためには、空間解像度が火山の近傍で数100m程度、遠方で数km程度、鉛直方向には数十層程度あり、さらに大気場と噴煙との相互作用を再現できることが望ましい。こうした条件を満たすため、入手可能な風データを初期入力値として、WRFを用いた数値計算を行い、興味のある地点(火山および風下側)を中心にしたデータ同化や気象データ以外の観測データを用いたデータ同化を行うことにより、高解像度の風データの作成を行っていく。

キーワード: 火山灰拡散シミュレーション, 気象予測モデル

Keywords: Tephra dispersion simulation, Weather forecast model

火山噴火に伴う空振波形記録の分類と噴火映像解析 Classification of infrasound waveforms and analysis of video images at volcano eruption

佐藤 佑輔^{1*}; 横尾 亮彦¹
SATO, Yusuke^{1*}; YOKOO, Akihiko¹

¹ 京都大学大学院理学研究科
¹ Graduate School of Science, Kyoto University

空振波形解析は、爆発的噴火の研究において近年発達しつつある手法である。本研究では、バヌアツ共和国ヤスール火山における 2011 年 9 月の噴火活動を対象とし、空振波形の相互相関による噴火イベントの分類を行い、それぞれのタイプごとに噴火映像の比較を行った。ヤスール火山の山頂クレータ内には複数の火孔が存在し、1~3 分間に 1 回程度の頻度で空振を伴う噴火を繰り返している。

ここでは山頂クレータ上に設置したある観測点で最大振幅が 50 Pa を超えたイベントを解析対象とした。21 日 15 時台の 1 時間での発生回数は 29 回を数える。最大振幅をとる時刻の 1 秒前から 5 秒間の波形について、29 例すべての波形間で相互相関解析を行った。結果、互いに 0.75 以上という高い相関係数をとるタイプ A (13 例)、B (12 例) と、他のイベントとあまり強い相関を示さないタイプ C (4 例) に分類された。タイプ A と B の波形には、増圧開始から最大振幅をとるまでの時間と、最大正圧に対する最大負圧の比に違いがあった。増圧にかかる時間の平均はそれぞれ、タイプ A が 0.15 秒、タイプ B が 0.22 秒、最大負圧に対する最大正圧の比はそれぞれ 2.4、1.6 であった。

これらの空振イベント発生時刻における、山頂クレータ内のふたつの火孔での噴火映像の解析を行った。これらの火孔ではそれぞれ、タイプ B の噴火が 13 例、タイプ C の噴火が 4 例発生していた (タイプ A の噴火は右手前の火口で 1 度だけ)。各火孔上を水平方向に横切る直線を解析領域とし噴出物がそこに達する 2 秒前から、噴火が収束するまで RGB 値と輝度を読み取った。噴火が発生し赤色マグマや噴煙などの噴出物が到達すると、RGB、輝度のいずれの値も噴火前の時間帯に比べて大きく上昇し、その後時間が経過して、水蒸気や火山灰の放出が緩やかになるとともに下降する。噴火タイプごとに R 値と輝度を比較したところ、タイプ B は他の噴火と比べて非常に大きな値をとっていた。タイプ A の噴火は、他のタイプと比べ、輝度の上昇が小さく、噴火後すぐに下降した。タイプ C は噴火ごとに異なっており共通した特徴はみられなかった。タイプ B の噴火では赤色マグマと白色噴煙の噴出が多く、タイプ A の噴火では比較的濃い、灰褐色の噴煙が多いといえる。また、空振波形との比較から、灰褐色の噴煙噴出に伴う空振波形は、赤色マグマや白色ガスのものより増圧速度が速く、正圧ピーク後にとる負圧ピークが小さいといえる。

キーワード: 空振, 火山噴火

Keywords: infrasound, volcano eruption

1 次元浅水波方程式による火砕流モデリングにおける流れの先端部の数値的取り扱い Numerical treatment of dry bed problem in the model of pyroclastic flows based on the 1-D shallow-water equations

志水 宏行^{1*}; 小屋口 剛博¹; 鈴木 雄治郎¹
SHIMIZU, Hiroyuki^{1*}; KOYAGUCHI, Takehiro¹; SUZUKI, Yujiro¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

爆発的火山噴火において、火口から噴出する火砕物と火山ガスの混合物は、初期鉛直運動量を失う高さで大気よりも高密度の場合、火砕流となって地表を流動する。火砕流のダイナミクスは近似的に非粘性重力流として定式化が可能である。非粘性重力流は、先端部で流れの駆動圧（浮力による圧力）と周囲の流体からの抵抗圧（動圧）がほぼバランスする（先端条件）という特徴をもつ（例えば、Benjamin, 1968）。この先端条件から、非粘性重力流のダイナミクスは流れの密度（ ρ_c ）と周囲の密度（ ρ_a ）の比 ρ_c/ρ_a によって特徴づけられることがわかっている（例えば、Ungarish, 2009）。 $\rho_c/\rho_a \sim 1$ の場合には、流れの先端部は大きな高さを持って流動する。そして、 ρ_c/ρ_a が 1 から大きくなるに従って、流れの先端部の持つ高さは徐々に小さくなる。火砕流内部では ρ_c/ρ_a は幅広い時空間的なバリエーションを持つため、火砕流のダイナミクスの定量的振る舞いを単純な重力流モデルで記述することが難しい。そのため、火砕流の到達距離や時間発展を予測することは未だにできない。本研究は様々な ρ_c/ρ_a に対する非粘性重力流の統一モデルの開発を目的とする。

厚さの薄い非粘性重力流に対する単純化された基礎方程式は浅水波方程式として知られている。非粘性重力流の浅水波方程式を解く数値的モデルには、大きく見て 2 種類ある。1 つめを shock front condition model (SFC model) と呼び、もう 1 つを artificial bed-wetting model (ABW model) と呼ぶ。SFC model は、先端部に境界条件として先端条件を適用するモデルであり、先端部で常に浅水波方程式と先端条件を連立して流れの時間発展を計算する。このモデルでは、 ρ_c/ρ_a を先端条件に関するパラメータとして扱う（例えば、Ungarish, 2009）。ABW model は、先端部より先の領域に高さ ϵh_0 の仮想流体を設置し、それを先端部が受ける周囲からの抵抗（動圧を生み出すソース）の代替物とするモデルである。ここで h_0 は特徴的な高さスケールである。このモデルでは、先端条件に関する唯一のパラメータはこの ϵ である（例えば、Toro, 2001; Larrieu et al., 2006; Doyle et al., 2007）。本来ならば SFC model のように先端部に ρ_c/ρ_a の関数として先端条件を課すべきところを、ABW model ではパラメータ ϵ を与えるということで非常に単純化し、先端部でも浅水波方程式のみを解くだけで流れの時間発展を簡単に安定して解くことを可能にしている。しかし、ABW model のパラメータ ϵ がどれくらいの大さの ρ_c/ρ_a の先端条件に相当するのかわかっている。また、ABW model の ρ_c/ρ_a に関する適用範囲も明らかではない。従って本研究では、これらの問題を解決するために、2 つのモデルで単純な 1 次元のダム・ブレイク問題を解き、広範囲なパラメータ・スタディを行った。

本研究では、SFC model と ABW model の数値計算結果を系統的に比較することによって、 $\epsilon \sim 8.62 \cdot 10^{-2} \cdot (\rho_c/\rho_a)^{-1.87}$ という ρ_c/ρ_a と ϵ の対応関係を得た。また、ABW model は、 $15 < \rho_c/\rho_a$ の場合に適用できることもわかった。一方、 $1 < \rho_c/\rho_a < 15$ では、先端部の前の仮想流体上を非物理的な衝撃波が伝播してしまうことがわかった。このことから、ABW model には、密度比が比較的小さい重力流に対して流れのプロファイルに関する正しい解を示さないという適用限界があることがわかった。

キーワード: 火砕流, 重力流, 浅水波方程式, 数値シミュレーション, 火山防災

Keywords: pyroclastic flows, gravity currents, shallow-water equations, numerical simulation, volcanic disaster prevention

楕円体体積震源のモーメントテンソル Moment tensor representation of elliptical volume sources

水野 尚人^{1*}; 日下部 哲也²; 市原 美恵²; 亀 伸樹²
MIZUNO, Naoto^{1*}; KUSAKABE, Tetsuya²; ICHIHARA, Mie²; KAME, Nobuki²

¹ 東京大学理学部, ² 東京大学地震研究所

¹School of Science, The University of Tokyo, ²Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

A moment tensor inversion is a powerful tool to extract source information from seismic and geodetic observations. However, widely-used moment tensor representation for volumetric sources has been limited to a few basic geometries such as a sphere, a flat crack, and a cylinder. These sources give particular diagonal component ratios: $(M_1:M_2:M_3)=(1:1:1)$ for a sphere, $(1:1:3)$ for a crack, and $(2:2:1)$ for a cylinder. When different component ratios are obtained from the inversion analysis, they are interpreted as combination of these simple geometries without considering internal pressure balance.

Although the moment tensor representation for elliptical sources was obtained 30 years ago (Davis, 1986), the solution has been rarely applied in volcanology. We consider two disadvantages of Davis (1986). The one is that the theories to relate the actual volume change to moment tensor have been proposed but not unified, which has caused some confusion. The accompanying paper (Ichihara et al., 2014, this meeting) presents a unified explanation based on the representation theorem and makes a clear link among volume change, geometry, and moment tensor. In this context, we have confirmed the applicability of Davis (1986) to the observed moment tensor.

The other disadvantage is that researchers have to search in the numerical table to find a geometry fitting to the observed moment tensor. Here we develop a facilitative tool that diagnoses the diagonal part of observed moment tensors to given the aspect ratios and the apparent compressibility. In addition, if the density and the compressibility of the internal material are given, the tool estimates mass change inside the source, which is an important parameter in volcanology.

This tool will provide a reference model satisfying pressure balance and help improving the volumetric source modeling beyond the conventional kinematic summation of simple sources.

キーワード: モーメントテンソル, 体積震源, 火山性地震, マグマ

Keywords: moment tensor, volumetric source, volcano seismology, magma

体積震源モーメントテンソルの表現定理に基づく統一的な理解 Volume source representations: a possible unified explanation based on the representation theorem

市原 美恵^{1*}; 日下部 哲也¹; 亀 伸樹¹; 水野 尚人²; 熊谷 博之³

ICHIHARA, Mie^{1*}; KUSAKABE, Tetsuya¹; KAME, Nobuki¹; MIZUNO, Naoto²; KUMAGAI, Hiroyuki³

¹ 東京大学地震研究所, ² 東京大学理学部, ³ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ²School of Science, The University of Tokyo, ³Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

The moment tensor inversion is a powerful tool to extract source information from seismic and geodetic observations. A moment tensor for earthquake faulting has been determined and its non-diagonal components give the seismic moment (rigidity \times slip \times fault area), which is one of essential source parameters of an earthquake. The sum of the diagonal components (the trace) of a moment tensor represents volumetric change at the source. A moment tensor determined for a volcanic source frequently has non-zero trace. However, it has been failed to uniquely relate the diagonal components to the actual volume change, which remains a critical issue in volcanic seismology (Kazahaya et al., 2011). For example, two different volume changes DV and dV have been proposed for the seismic moment of a spherical source geometry; DV comes from the moment tensor definition of a seismic fault having opening displacements whereas dV is obtained from the equivalence of resultant displacement fields due to the former moment tensor and an isotropically expanding sphere in an elastostatic equilibrium.

The difference between DV and dV has been discussed in the last decade. Muller (2001) considered an open crack of a spherical shell shape and showed that DV is the volume of the opening and dV is only the part opening outward. Aki and Richards (2002) and Richards and Kim (2005) adopted Eshelby's approach which considers virtual operations consisting of cutting, stress-free transformation, elastic straining, and welding, and concluded that the difference is due to whether the volumetric change occurs in an unconfined condition (DV) or in a confined condition (dV). Kumagai et al. (2013) reconsidered this problem and concluded that the displacement field due to a spherical source does not coincide with that due to a three-perpendicular-crack source though they both are represented by isotropic moment tensors. They also extended the insights into sources in a bimaterial medium. It is worth mentioning that the approaches of AR2002 and RK2005 give a conceptual explanation on how to adjust DV to the actual volume change dV for a sphere, but not for arbitrarily shapes. Here we address how to make such adjustments for general geometries on the basis of the representation theorem. Our imaginary operation below gives a unified explanation for the two different volumetric changes and newly proposes a method of estimating dV of the inversion results for arbitrary source geometries.

We start with the representation theorem that gives the displacement field by two terms (without a body force): a surface integration on the source region with convolution of the surface displacement and the gradient of the Green's function normal to the surface (1), and that with convolution of the surface traction and the Green's function (2). Only (1) has been considered for the seismic fault because (2) vanishes due to the balance of the traction at the contacting surfaces of a fault. On the other hand, (2) does not vanish in the case of a volumetric source, and therefore a quantitative adjustment is required to include the effect of (2) into (1). We here demonstrate that such an adjustment is always realized by introducing an additional imaginary volumetric change, which works as 'displacement glut' in our representation of moment tensor. Our representation is found to be mathematically equivalent to the rather conceptual 'stress glut' representation proposed by Backus and Mulcahy (1976). We present a unified explanation for the existing various representations and propose a method to practically evaluate the moment tensor components from the boundary conditions of the volumetric source. The proposed representation will be useful in connecting dynamical models of volcanic processes and moment tensors.

キーワード: モーメントテンソル, 体積震源, 表現定理, グリーン関数, 火山性地震, 爆発震源

Keywords: Moment tensor, Volumetric source, Representation theorem, Green's function, Volcano seismology, Explosion source

X線CT撮影による発泡マグマ模擬材料遅れ破碎の観察 X-ray CT observation of delayed fragmentation of vesicular magma analog

志田 司¹; 青木 ヤマト^{1*}; 亀田 正治¹; 市原 美恵²; 奥村 聡³; 上杉 健太朗⁴
SHIDA, Tsukasa¹; AOKI, Yamato^{1*}; KAMEDA, Masaharu¹; ICHIHARA, Mie²; OKUMURA, Satoshi³; UESUGI, Kentaro⁴

¹ 農工大・工・機シス, ² 東大・地震研, ³ 東北大・理・地学, ⁴ 高輝度光科学研究センター

¹Mech. Systems Eng., TUAT, ²ERI, Univ. of Tokyo, ³Earth Sci., Tohoku Univ., ⁴JASRI

爆発的火山噴火のトリガとされる発泡マグマの破碎メカニズムの解明を目的として室内実験を行った。特に、2011年の新燃岳噴火など、爆発的噴火の際に噴出するマグマの多くの粘度が低いことから、流体的な性質を帯びるマグマが脆性的な破碎を起こす原因を明らかにすることを目指した。

天然のマグマのレオロジー（剛性率、粘度）、ポイド率を模擬可能な酸素気泡入り水あめを試料とし、破碎のきっかけとなる急減圧を与える装置を用いて、減圧にともなう試料の挙動を観察した。この装置は、試料を設置した容器を加圧し、電磁バルブで大気（エアバッグ）に開放することで、容器内の圧力を急激に減少させることができるものである。本実験では、特に、発泡体内気泡分布の不均一性が破碎に与えるを明らかにするため、高輝度光科学研究センター（JASRI）のビームラインBL20B2に装置を持ち込み、X線撮影（2048×644pixels, 8μm/pixel）により、0.1degピッチで0degから180degまで1800枚の透過像を取得し、CT再構成により減圧前の発泡体内空隙構造を詳しく調べた。減圧時の試料の動的挙動をラジオグラフィ撮影（撮影速度200fps）によりとらえた。

試料は、外径20mm程度の半球状である。初期圧力（ p_0 ）は約1.5MPa、減圧特性時間（ t_{dec} 、容器内と大気圧との圧力差が初期状態の1/eになる時間）は約50ms、試料の粘度は約 1×10^8 Pa s、加圧後の試料の平均気相体積（ポイド）率（ ϕ_0 ）は約10%でそろえ、内部の気泡分布の異なるいくつかの試料を用いて観察を行った。

実験では、直径1mm程度の気泡が比較的均一に分散して存在する試料は破碎せず、直径10mm程度の大気泡の周りにいくつかの小気泡を含む構造をしているサンプルのみ破碎が生じた。このときの破碎開始時間は960msであり、この時刻は、減圧特性時間に比べても、試料のMaxwell粘弾性緩和時間（粘度/剛性率=150ms）に比べても大きく遅れている。ラジオグラフィ撮影を参考に、破断箇所の構造を調べたところ、小気泡が連結、あるいは、切欠きが存在しているところから破壊が進んだことが推察できる。容器の減圧によって生じる大気泡回りの周応力によって、これらの部分からまず延性的にき裂が進展し、成長にともなうき裂先端部の試料物性が脆性遷移することで急激な破断にいたると考えられる。

以上の結果から、バルクの試料の性質が粘性流体的となる条件でも、試料内部の不均一な気泡分布をきっかけに脆性的な破碎が生じることを明確に示すことができた。

粘弾性母岩中におけるマグマ輸送のモデル実験：粘性率依存性 Model experiments on magma migration in a viscoelastic host rock : effect of viscosity

竹口 いくみ^{1*}; 隅田 育郎¹
TAKEGUCHI, Izumi^{1*}; SUMITA, Ikuro¹

¹ 金沢大学大学院 自然科学研究科

¹ Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

部分溶融により発生したマグマは浮力によって地殻のマグマ溜まりへ、最終的に地球表層へと上昇する。その際、支配的な物理過程は変化し、アセノスフェアでは粘性変形であるダイアピル上昇、リソスフェアでは弾性破壊であるダイク貫入がマグマ輸送のメカニズムとされてきた (Rubin, 1995)。粘性変形と弾性破壊によるマグマ輸送は多くの研究がなされているが、その遷移領域における理解は十分ではなく、浮力クラックの形と速度を決定する要因については未だに不明点が多い。私達は柔らかい寒天を使ったモデル実験によりこの遷移領域におけるマグマ輸送の研究を進めている (Sumita and Ota, 2011)。本発表では、マグマの粘性率が粘弾性体中のマグマ輸送に与える影響について調べた実験結果について報告する。

本実験では、(1) 使用する寒天のレオロジー測定と (2) 注入実験、の 2 つを行う。注入実験は直径 160mm、長さ 250、500mm のアクリルの円柱内の寒天 (母岩) に CsCl 水溶液に増粘剤を加えたもの (マグマ) を上部からシリンジを用いて注入することで行う。その際、注入する体積・寒天との密度差・注入速度をそれぞれ 1ml、0.108g/ml、0.1ml/s に固定し、実験パラメーターとして寒天の濃度を 0.04~0.5wt%、注入流体の粘性率を 10^{-3} ~650Pa・s と 5 桁変化させる。寒天の濃度を 1 桁変えることにより、剛性率、降伏応力が 3 桁変化する。クリープ試験により寒天はバネとフォークトモデルを直列につないだ粘弾性モデルで近似できることが分かっている。実験の様子は互いに直交する 2 方向と円柱下方からビデオカメラで撮影し、観察する。

寒天の剛性率が小さくなると、クラックの形が 2 次元 (板状) から 3 次元 (頭が膨れたもの) へと遷移した。2 次元から 3 次元へと遷移する臨界剛性率は 10Pa 程度であり、粘性率が高くなると臨界剛性率は小さくなる。この臨界剛性率の値は、歪が ~1 程度になる時の力の釣り合いから求まる剛性率 $G = \Delta \rho g V^{1/3}$ ($\Delta \rho$: 密度差、 g : 重力加速度、 V : クラック頭の体積) の値と整合的である。クラックは膨れた頭と薄いシート状の尾からなり、クラックが長くなるに従い次第に頭が薄く小さくなり、減速する。特に硬い寒天あるいは高粘性率流体を注入した実験ではクラックが実験容器内で停止した。この停止距離は寒天の降伏応力、流体の粘性率が大きくなると短くなり、クラックの形が 2 次元的になることと対応している。また注入流体の伝播距離は時間に対して冪乗則的に長くなる。冪の値は流体粘性率が小さくなるに従い、 $1/3$ から 1 へと遷移した。冪の値 $1/3$ はクラックが長くなるに従ってクラックが一様に薄くなり減速するスケーリングに対応する (Taisne et al 2011)。傾きが $1/3$ より大きくなるのは、クラックの形が 3 次元的になることと対応付けられる。以上の実験より、マグマの粘性率は粘弾性体中のクラックの移動速度ばかりでなく、クラックの形、減速の仕方、停止距離を支配することが分かった。

引用文献:

Rubin, A. M., 1995, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 23, 287-336.

Sumita, I. and Y. Ota, 2011. Earth Planet. Sci. Lett., 304, 337-346.

Taisne, B. et al., 2011, Bull. Volcanol., 73, 191-204.

キーワード: 粘弾性, マグマ上昇, レオロジー, クラック
Keywords: viscoelasticity, Magma ascent, rheology, crack

Bubble growth and resorption in magma: insights from dissolved water distributions in volcanic glass

Bubble growth and resorption in magma: insights from dissolved water distributions in volcanic glass

MCINTOSH, Iona^{1*} ; LLEWELLIN, Ed² ; HUMPHREYS, Madeleine² ; NICHOLS, Alex¹ ; BURGISSER, Alain³ ; SCHIPPER, C ian⁴

MCINTOSH, Iona^{1*} ; LLEWELLIN, Ed² ; HUMPHREYS, Madeleine² ; NICHOLS, Alex¹ ; BURGISSER, Alain³ ; SCHIPPER, C ian⁴

¹IFREE, JAMSTEC, Japan, ²Department of Earth Sciences, Durham University, United Kingdom, ³ISTerre, Universite de Savoie - CNRS, France, ⁴SGEES, Victoria University, New Zealand

¹IFREE, JAMSTEC, Japan, ²Department of Earth Sciences, Durham University, United Kingdom, ³ISTerre, Universite de Savoie - CNRS, France, ⁴SGEES, Victoria University, New Zealand

Volcanic eruptions are driven by the growth of gas bubbles in magma, which grow and shrink as volatile species exsolve from and dissolve back into the melt in response to changes in the local environment, particularly in pressure and temperature. This movement of volatiles, particularly water, is recorded in the glass around vesicles and recent studies have used this record to interpret natural samples. Here we investigate the processes that control bubble growth and resorption in magma, by measuring the distribution of dissolved water in experimentally-vesiculated volcanic glasses. Water concentration profiles obtained using SIMS-calibrated BSEM imaging and water speciation data obtained using FTIR spectroscopy, are interpreted in the context of the known pressure and temperature history of the samples.

Samples are found to have undergone partial bubble resorption during the quench to glass at the end of experiments, as a result of increasing water solubility with decreasing temperature. Analysis of the lengthscale and timing of the resulting water concentration profiles demonstrates that the majority of resorption occurs above the glass transition. This quench resorption is associated with a reduction in bubble volumes that creates characteristic textures, such as buckled melt films between adjacent vesicles and reoriented cracks around resorption halos. Highly disequilibrium water speciation ratios within resorption halos are found to be diagnostic of quench resorption and can preserve evidence of pre-quench bubble growth

Quench resorption can increase sample water concentrations and ratios of molecular to hydroxyl water species, and reduce bubble volumes and sample porosities. Studies based on these parameters must therefore consider the potential impact of quench resorption, which is expected to be greatest for samples with high water concentrations, slow quench and low initial sample porosities. Water speciation data offer a way to investigate these impacts in unconstrained natural samples and could provide a tool for forensic interrogation of their eruptive history.

キーワード: Bubble growth, Bubble resorption, Water speciation, FTIR, SIMS, Backscatter SEM

Keywords: Bubble growth, Bubble resorption, Water speciation, FTIR, SIMS, Backscatter SEM

発泡カインेटックスを考慮した 1 次元マグマ流れの定式化と衝撃波管問題への応用 Formulation of the 1-D magmatic flow including vesiculation kinetics

寅丸 敦志^{1*}
TORAMARU, Atsushi^{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

これまで、火道流ダイナミクスのモデル化や数値計算では、マグマの発泡（ガス量の変化）に関しては溶解度に従った平衡が仮定されていた。しかし、実際には、気泡の核形成・成長のカインेटックスのために、必ずしも平衡が成り立っているわけではない。また、運動量保存に関しては、多くの場合定常状態が仮定されていた。減圧過程と発泡カインेटックスの相互作用、その結果生じる速度・圧力変化の基本的特性を知ることは、天然での爆発現象の時間発展やそれに関連する波動の励起を理解するために必要である。本研究では、気泡形成のカインेटックスを考慮した一次元の均一 2 流体モデルを定式化し、その基本的性質を調べたので、その結果を報告する。

均一流体を仮定するので、定式化の方針として、そのメリットを生かして、1 流体の定式化にできるだけ沿う。すなわち、1 流体では、密度の時間変化を記述する質量保存の式を、状態方程式を介して圧力の時間変化の式に変換するので、その方針に従う。発泡のカインेटックスを含める今回の定式化では、密度が圧力だけでなくガス量の関数でもある点だけが異なる。ガス量は、発泡のカインेटックスで決定される。定式化は基本的に次の 3 つの方程式系から成る。1) 圧力方程式（質量保存）、2) 運動方程式（運動量保存）、3) 発泡カインेटックスの構成式。結果として、圧力と速度に関して 1 流体の場合と異なるのは、圧力変化の式に、発泡による反応項が加わることだけである。この方程式系は、圧力、速度、液相中ガス濃度（すなわち気相ガス量）に関する偏微分方程式系になり、数値的に解くことが出来る。

定式化の正当性と基本的性質を理解するために、ショックチューブ問題を数値的に解いた。移流項に関しては改良 CIP 法を用いた。高圧側の初期ガス量が多く発泡のカインेटックスが無視できる場合には、圧力は通常の 1 流体と同様に、低圧側に進む衝撃波と高圧側に進む希薄波が形成され、解析解と一致する。それに対し、高圧側の初期ガス量が少なく発泡カインेटックスが効いてくる場合には、低圧側では同様の振る舞いを示すが、高圧側では希薄波フロント、核形成圧力フロント、核形成イベントが、それぞれ異なる速度で伝播することがわかった。それぞれの伝播速度は、核形成圧力（気液界面エネルギー）や気泡成長速度、高圧側での初期ガス量に依存する。発泡のカインेटックスが働く場合とそうでない場合での基本的な違いは、前者の場合、ガス生成の圧力が飽和圧力より小さくなることであり、気泡の核形成から噴出して急冷されるまでの時間が短くなる。逆に発泡が平衡で進行する場合は、噴出までにより長い時間を必要とし、気泡同士の合体や気液間の相対運動、脱ガスなどの影響を受けやすいと考えられる。このことは、発泡のカインेटックスが、爆発的噴火や非爆発的噴火といった噴火様式の遷移を支配している可能性を示唆している。

キーワード: 火道流, 発泡カインेटックス, 気泡核形成, 衝撃波管
Keywords: conduit flow, vesiculation kinetics, bubble nucleation, shock tube

伊豆半島, カワゴ平火山の流紋岩質マグマの噴火条件 Pre-eruptive conditions of rhyolitic magma from Kawagodaira Volcano, Izu Peninsula

高島 惇^{1*}; 石橋 秀巳¹
TAKASHIMA, Jun^{1*}; ISHIBASHI, Hidemi¹

¹ 静岡大学大学院理学研究科

¹ Graduate school of science, Shizuoka University

カワゴ平火山は、伊豆半島の天城火山北西部に位置する流紋岩質の単成火山であり、3060?3190 年前に噴火したとされている。同火山の噴火活動は四つのステージ(ステージ 1:火砕サージ噴火、ステージ 2:プリニー式噴火、ステージ 3:火砕流噴火、ステージ 4:溶岩流出)に区分でき、一連の噴火で噴火様式が変化している。このような一連の噴火における爆発的から非爆発的への噴火様式の変化は、珪長質マグマの噴火では珍しくない現象である。この変化の原因として噴火直前のマグマの状態や火道上昇過程での脱ガス効率が大きく影響していると考えられているが、そのメカニズムの詳細については今も研究が続いている。本研究では、カワゴ平火山のプリニー式噴火・火砕流噴火・溶岩流出の三つの噴火様式による噴出物のサンプル採取を行い、それぞれについて岩石記載及び EPMA による鉱物・ガラスの化学組成の測定を行った。そして、各噴火様式の噴出物について、それぞれ噴火直前におけるマグマの温度・圧力・含水量状態を見積もり、これに基づいてカワゴ平火山の噴火様式変化のメカニズムについて考察した。

カワゴ平火山の噴出物は噴火様式に関わらず同一の斑晶組み合わせとモード組成を示した。斑晶は固相全体の 15% を占め、斜長石・角閃石・斜方輝石・マグネタイトからなり、石基はガラス質で 85% を占めていた。カワゴ平火山に含まれている角閃石は不連続なゾーニングを有していた。このゾーニングはコアとリムに区分することができ、それぞれのゾーニングを化学組成で比較すると、噴火様式に関わらず Al の量に顕著な違いが見られ、値が 1.2 と 1.7 の二つの集団に分離している。

角閃石 Al 含有量圧力計を適用し圧力を求めると、コアは 200?300MPa で、リムは 100MPa 付近で結晶化したことが分かった。また、斜長石-角閃石地質温度計から求めた温度は、噴火様式で違いは見られず平均温度は 859 °C であった。そして斜長石-メルト地質含水量計から求めた含水量は、噴火様式間でほとんど差はなく、5wt.%前後に集中した。この含水量は、100MPa における流紋岩質メルトの H₂O 溶解度と概ね一致する。

地質温度計・圧力計によると、マグマは 200MPa?300MPa から 100MPa 程度まで減圧される間、温度は大きく変化しなかったことがわかった。このことから、噴火様式の変化は 100MPa よりも低圧領域での過程によって生じたと考えられる。また、見積もったメルト含水量が 100MPa における溶解度と概ね一致することから、この圧力で既に発泡が開始していたと考えられる。そして、少なくとも角閃石及び斜長石のリム部分の成長が完了するまでの間、マグマは深さ 2.5-3km に停滞していたと考えられる。このマグマの停滞の間に気泡はより上部へと浮上していき、マグマ溜まりの上部に気泡に富む部分、下部に気泡に乏しい部分という気泡のゾーニングが形成された。このゾーニングが、初期の爆発的から後期の非爆発的への噴火様式の変化と関連していた可能性がある。

キーワード: 東伊豆単成火山群, 流紋岩質マグマ, 噴火様式, ホルンブレンド

Keywords: Higashi-Izu monogenetic volcanic field, rhyolitic magma, eruption style, hornblende