

## 結晶入りマグマの微視的粘度と巨視的粘度

The difference between microscopic viscosity and macroscopic viscosity of crystal-bearing magmas

\*河波 俊和<sup>1</sup>、佐伯 和人<sup>1</sup>

\*Toshikazu Kawanami<sup>1</sup>, Kazuto Saiki<sup>1</sup>

1.大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science Osaka University

マグマは、純粋な液体部分であるケイ酸塩のメルトに固体である鉱物の結晶または気体である揮発性のガスが含まれた混相流体である。そしてマグマに含まれる結晶や気泡の量はマグマの粘度に大きな影響を及ぼし、一般的に結晶の量が増えるにつれてマグマの粘度が急激に増加することが知られている。このマグマの粘度を正確に見積もることは火山現象の時間スケールや空間スケールを理解する上で重要であり、マグマの模擬物質を用いたアナログ実験や室内でのマグマの熔融実験などにおいて粘度の測定が盛んに行われている。本研究では、マグマのような混相流体の見かけの粘度に次の二つの種類があるのではないかと提案する。一つはマグマ中を結晶などの微小物体が動くときに感じる見かけの粘度で、これを「微視的粘度」と定義する。もう一つはマグマ全体としての見かけの粘度で、「巨視的粘度」と定義する。これまでの固液二相流体を用いたアナログ実験において、ストークスの式を使った落球法では微視的粘度の測定[1]を、回転粘度計を用いた測定では巨視的粘度の測定[2]を行っていたと考えられる。しかしながら、これまでの先行研究では一つの固液二相流体に対して、上記二つの粘度測定の双方から粘度を測定した実験は見られない。そこで本研究では、一つの固液二相流体に対して微視的粘度と巨視的粘度の両方を測定し、その違いを明らかにすることを目的とした。

試料と実験：結晶入りマグマの模擬物質として、液体部分にはコーンシロップ(比重1.4 粘度 約7Pa・s at 23°C)を、結晶部分は2種類のサイズ(1.5mmφ, 3.0mmφ)の球形プラスチックビーズ(比重0.934)を用いた。微視的粘度の測定(落球法)では3種類のサイズのステンレス球(1.5mmφ比重9.62, 5mmφ比重7.96, 9.52mmφ比重7.95)と、試料を入れて測定を行う容器として、51mmφの100mlガラスビーカーを用いた。また巨視的粘度の測定には自作の共軸二重円筒回転粘度計を使用した。試料については上記の物質を用いて、流体に含まれる浮遊粒子(ビーズ)のサイズ2種類、その含まれる量(体積分率)を5種類(0, 5, 10, 20, 30%)変えて合計10種類の試料を用意した。次に測定条件については、落球法ではステンレス球のサイズを3種類変えて、微視的粘度を測定した。回転粘度計を用いた測定では、すり流動化の挙動を調べるために、モーターにかける電圧の値を3種類(1.0V, 1.5V, 3.0V)変えて、巨視的粘度の測定を行った。

結果：回転粘度計のモーターにかける電圧が1Vの条件下での粘度測定値はすり流動化の影響が十分に小さいと考えられたので、その値を巨視的粘度の代表値とした。浮遊粒子1.5mmφは、体積分率が約20%以下で、浮遊粒子に対する落球の相対サイズが1.0、3.3の条件において、微視的粘度の値は巨視的粘度の値の約0.7~0.9倍になることがわかった。また、相対サイズが6.4の条件では、30%までの体積分率において微視的粘度と巨視的粘度の値は同程度になることが示唆された。浮遊粒子3.0mmφは、体積分率が約20%以下で、浮遊粒子に対する落球の相対サイズが0.5、1.7、3.2の条件において、微視的粘度の値は巨視的粘度の値の約0.6~0.9倍になることがわかった。

[引用文献]

[1] Milliken WJ et al. (1989) Physicochem Hydrodynam, 11(3), 341-355.

[2] Gaudio PD et al. (2013) Geochemistry Geophysics Geosystems, 14(8), 2661-2669.

## シリケートメルトにおける気泡の合体：数学的定式化とその場観察実験

Bubble coalescence in silicate melts: mathematical formulations and experimental observations

\*寅丸 敦志<sup>1</sup>、マソッタ マッテオ<sup>2</sup>

\*Atsushi Toramaru<sup>1</sup>, Matteo Masotta<sup>2</sup>

1.九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、2.地球物理学および火山学国立研究所

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2.National Institute of Geophysics and Volcanology, Rome, Italy.

Bubble coalescence deeply affects the dynamics of conduit flow during volcanic eruptions by modifying the rheology of the magma and through the development of structural heterogeneity. To model bubble coalescence in silicate melts, we present a new set of equations that describe the efficiency of the coalescence process as a function of the timescales for diffusive growth and melt-film drainage from bubble-bubble interfaces. The frequency of bubble coalescence is controlled by the timescales of these two processes, which is in turn regulated by the composition and viscosity of the silicate melt. When the vesicularity is less than half, coalescence efficiency varies as a function of the diffusivity of degassing volatiles in melts. At higher vesicularity, the coalescence efficiency is controlled by the melt film drainage. The model predicts an exponential decay of the bubble number density (BND) with time and the exponential bubble size distribution (BSD) function at stagnant conditions, and is in good agreement with in-situ experimental observations of bubble coalescence in basaltic, andesitic and rhyodacitic melt for lower vesicularities. The formulation can be used to estimate an original value of BND formed by a nucleation event using BSDs measured by the textural analysis for pyroclasts which experienced the bubble coalescence. In addition, from values of slopes of approximated BSDs, we can estimate the timescale of magma ascent or the laps time from the onset of bubble coalescence to the quenching. These textural observations for original BNDs and magma ascent timescales allow us to understand roles played by bubble coalescence in controlling the eruption styles and the shifts, using the combined method of geophysical monitoring and modelling.

キーワード：気泡合体、気泡数密度、気泡サイズ分布

Keywords: bubble coalescence, BND (bubble number density), BSD (bubble size distribution)

スラグ流実験にみられるノコギリ波状圧力変動(STW): 火山振動系の理解に向けて  
Sawtooth wave-like pressure changes (STW) appeared in a slug flow experiment: Toward  
understanding of volcanic oscillation systems

\*菅野 洋<sup>1</sup>、市原 美恵<sup>1</sup>

\*Yo Kanno<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>1</sup>

1. 東京大学地震研究所

1. The Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

We are developing a laboratory eruption experiment system to investigate multi physics of volcano eruptions. In this study, we focus on a sawtooth wave-like pressure change (STW) observed in a preliminary system that is a syrup eruption experiment. The STW is cyclic pressure changes of which a cycle consists of a gradual pressure increasing stage and an abrupt pressure drop stage. STWs have been observed at many active volcanoes as geodetical signals including tilt, displacement [Genco and Ripepe, 2010; Ohminato et al., 1998].

An apparatus for a slug-flow experiment was designed based on the syrup eruption experiment. This apparatus was equipped with a gas chamber (volume,  $V_c$ ) and a vertical pipe for a slug flow. Initially the pipe was partially filled with the syrup to the height of  $H_s$  from the end. Then, gas was injected at a constant mass flux ( $Q_{in}$ ) to the chamber to flow into the pipe pushing up the syrup in the pipe. Two representative flow patterns were observed in the pipe. One was characterized by alternate layers of syrup slugs and gas slugs ascending in the pipe, which we called a slug flow. The other was characterized by repetitive transitions between the slug flow and an annular flow, which we called a slug-annular flow oscillation. The STW was observed during the slug-annular flow oscillation.

Pressure change in the chamber and acoustic waves at the vent of the pipe were measured. These measurements were assumed to correspond to geodetic and infrasonic observations at actual active volcanoes. In the experiment, the flow patterns were also constrained by image analyses. The occurrences and features of the STW in the chamber pressure were investigated with taking  $V_c$ ,  $Q_{in}$ , and  $H_s$  as the experimental parameters. The results showed that the STWs were observed if there were sufficiently large  $V_c$  and  $Q_{in}$ , and that the STW changed from periodic to non-periodic cycles with increasing  $Q_{in}$ .

A mathematical model was constructed based on the experimental results of the pressure changes and the flow behaviors in the pipe. The model took account of the compressibility of the gas in the chamber, and the nonlinearity of the pressure loss in the pipe flow due to the interaction between the ascending liquid slugs and falling liquid film along the pipe wall. The dependence of the occurrence, the period, and the amplitude of the periodic STW on the experimental parameters were well explained by the model. The model has a mathematically similar aspect compared to existing models for the volcanic oscillation.

Moreover, not only the periodic STW but also the non-periodic STW was observed in this experiment. The non-periodic STW behavior has not been captured by the present model. According to the image analyses, we inferred that the non-periodic behaviors were caused by the interaction between the ascending liquid slugs and surface disturbances of the falling liquid film. From these results, we obtain an insight that irregularity of actual eruptions can be caused not only by fluctuations in ascending flow but also by influences of descending flow such as a fall back, a drain back and a magma convection of magma in the conduit.

キーワード：火山、室内実験、数理モデル

Keywords: Volcano, Laboratory experiment, Mathematical model

## 脱ガスによるマグマ密度変化を考慮した火道流の力学系

A dynamical system of conduit flow with magma density change due to gas escape

\*小園 誠史<sup>1</sup>、小屋口 剛博<sup>2</sup>\*Tomofumi Kozono<sup>1</sup>, Takehiro Koyaguchi<sup>2</sup>

1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.東京大学地震研究所

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

溶岩ドーム噴火において、結晶化によるマグマ粘性変化と脱ガスによるマグマ密度変化は火道流に正のフィードバックメカニズムをもたらす。具体的には、マグマ噴出率が増加すると、結晶化の遅れによってマグマの実効粘性が減少し（火道壁による摩擦抵抗の減少）、あるいは脱ガスの非効率化によってマグマ密度が減少する（マグマ荷重の減少）ことで、さらに噴出率が増加するというメカニズムである。これらのフィードバックメカニズムは、火道流において周期的変動や流動パターンの急激な変化などの複雑な現象をもたらす。マグマ粘性変化が火道流に与える効果については、既に先行研究で火道流の力学系のモデリングに基づき詳細に調べられている一方で、マグマ密度変化の効果については、一次元火道流モデルの数値解析によってその効果の重要性が指摘されているが、まだ十分に理解されていない。そこで本研究では、脱ガスによるマグマ密度変化が考慮された火道流の力学系に関するモデルを新たに開発することで、マグマ密度変化が火道流のダイナミクスに与える効果を調べた。

本研究のモデルでは、円筒火道内の流れの変動量を鉛直空間方向に平均化し、その火道が弾性変形する母岩に囲まれたマグマ溜まりと結合しているシステムを考える。このモデルによってマグマ噴出率 ( $Q$ ) とマグマ溜まり圧力 ( $P$ ) の時間発展を記述することができる。マグマ溜まりにおいては、 $P$  の時間微分 ( $dP/dt$ ) がマグマ溜まりへのマグマ供給量と火道へのマグマ流出量 (i.e.,  $Q$ ) の差に比例し、その比例係数はパラメータ  $C = G/V_{ch}$  として表される。ここで  $G$  は母岩の剛性率、 $V_{ch}$  はマグマ溜まりの体積である。火道流においては、運動量保存式によって  $P$  と  $Q$ 、マグマ粘性、マグマ密度の関係が記述される。本研究では、マグマ粘性と密度の変化の効果を考慮するために、火道内のマグマ上昇中に粘性、密度が階段状にそれぞれ増加、減少する仮定のもとで、火道内の平均粘性と平均密度を計算した。ここで、粘性と密度が階段状に変化する位置はそれぞれ結晶化の時間スケール ( $t_c$ ) と脱ガスの時間スケール ( $t_g$ ) によって決定され、これらのタイムスケールは結晶成長率やマグマのガス浸透率などのマグマの性質によって支配されている。以上のようにして開発されたモデルを用いることで、 $P$  や  $Q$  の時間発展がパラメータ  $C$ 、 $t_c$ 、 $t_g$  にどのように依存するのかを系統的に調べることができる。

本研究のモデルに基づき、まず  $P$  と  $Q$  の時間微分が  $0$  となる固定点における  $P$  と  $Q$  ( $P_f$  と  $Q_f$ ) の関係を求めることができる。粘性と密度の変化によるフィードバックメカニズムは、 $P_f$  と  $Q_f$  の関係において、低  $Q_f$  と高  $Q_f$  の領域で傾きが正となり、中間領域で傾きが負となる  $S$  字型のカーブをもたらす。この場合、傾きが負の領域における固定点が不安定ならば、 $P$  や  $Q$  の時間発展が周期的変動を示す。密度変化が  $P_f$  と  $Q_f$  の関係にもたらす重要な効果として、傾きが負の領域における  $P_f$  の値がリソスタティック圧よりも非常に低くなるという特徴が挙げられる。本研究では、 $P_f$  と  $Q_f$  の関係におけるこの特徴によって、マグマ噴出率  $Q$  が周期変動中において  $0$  に達する場面があることを明らかにした。この状況は噴火の停止に相当すると考えることができる。この  $Q$  が  $0$  になるか否かはパラメータ  $C$ 、 $t_c$ 、 $t_g$  に依存することから、本研究のモデルに基づき、マグマ物性や地質条件のパラメータに関する、噴火停止の臨界条件を求めることができる。

キーワード：火道流、力学系、脱ガス

Keywords: Conduit flow, Dynamical system, Gas escape

## 火山噴出物解析と地球物理観測のカップリング：新燃岳2011年噴火の例

Linking petrological and geophysical observations: A case study of the 2011 eruption of Shinmoedake volcano

\*奥村 聡<sup>1</sup>、小園 誠史<sup>2</sup>、小屋口 剛博<sup>3</sup>、長井 雅史<sup>4</sup>

\*Satoshi Okumura<sup>1</sup>, Tomofumi Kozono<sup>2</sup>, Takehiro Koyaguchi<sup>3</sup>, Masashi NAGAI<sup>4</sup>

1.東北大学大学院理学研究科地学専攻地球惑星物質科学講座、2.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、3.東京大学地震研究所、4.国立研究開発法人防災科学技術研究所

1.Division of Earth and Planetary Materials Science, Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Three sub-plinian eruptions were observed during the 2011 eruption of the Shinmoedake volcano, which were well monitored by tiltmeter, GPS, and weather radar (e.g., Shimbori and Fukui 2012; Kozono et al., 2013). To link petrological information to geophysical observations and understand the evolution of magma ascent processes during sub-plinian eruptions, we investigated pumices from these eruptions. At the Nakadake volcano, we observed deposits of the 2011 eruption and collected pumice samples. We primarily investigated gray pumice although two types of pumice (gray and white pumice) were found in the deposits, because this type of pumice reflects major eruptive magma (Tomiya et al., 2013). Two to four pumice lapilli for each subunit were polished, and bulk groundmass and matrix glass compositions were measured. The analytical results showed that the bulk groundmass composition was almost constant for all three sub-plinian eruptions, whereas the composition of the matrix glass changed systematically. Considering that the matrix glass composition reflects the degree of microlite crystallization, we obtained the variation in microlite crystallinity during the three sub-plinian eruptions. The microlite crystallinity decreased from the early stage of the first eruption to the end of the second eruption. The final eruption showed microlite crystallinity similar to that of the first sub-plinian eruption. The porosity obtained from image analyses showed good correlation with microlite crystallinity, i.e., the samples with high and low porosity had low and high microlite crystallinity, respectively. The petrological data above indicate the following scenario. During the first sub-plinian eruption, magma experienced outgassing and microlite crystallization, resulting in the formation of relatively low porosity magma with high microlite crystallinity. The degree of outgassing decreased during the second sub-plinian eruption and the microlite crystallinity decreased. The magma erupted by the final sub-plinian eruption experienced outgassing and crystallization similar to that of the first sub-plinian eruption. The variation in microlite crystallinity can be explained by considering the change in magma decompression rate and/or the change in the final pressure at which the magma is quenched (e.g., Riker et al., 2015).

Linking the petrological and geophysical observations allows us to understand more details of temporal evolution of explosive eruptions. Geodetic data indicated that the magma fluxes were almost constant during the three sub-plinian eruptions, whereas the pressure in the magma chamber monotonically decreased corresponding to the eruptions (Kozono et al., 2013). These observations are counterintuitive because it is commonly expected that the flux decreases in response to the decrease in the pressure of the magma chamber under the assumption of magma chamber of constant volume. However, these paradoxical observations (at least those from the first and second sub-plinian eruption) may be qualitatively explained by considering that magma fragmentation pressure increased, as recorded in the groundmass of pumices, i.e., the decrease in microlite

crystallinity observed from the first to the second sub-plinian eruption. According to the steady conduit flow model (Kozono and Koyaguchi, 2009; Koyaguchi, 2016), even when the magma chamber pressure decreases, the magma flux can be kept constant if the fragmentation pressure slightly increases so that the length of gas-pyroclastic flow regime in the conduit increases, i.e., the level of the fragmentation surface descends.

キーワード：噴火ダイナミクス、マグマ破碎、噴出物・地球物理観測

Keywords: Eruption dynamics, Magma fragmentation, Petrological and geophysical observations

玄武岩質マグマの注入によって誘発された桜島火山2015年の噴火活動：岩石学的モニタリングデータからの推定

AD 2015 eruptive activity induced by basalt input at Sakurajima volcano: Inference from petrological monitoring data

\*松本 亜希子<sup>1</sup>、中川 光弘<sup>1</sup>、井口 正人<sup>2</sup>

\*Akiko Matsumoto<sup>1</sup>, Mitsuhiro Nakagawa<sup>1</sup>, Masato Iguchi<sup>2</sup>

1.北海道大学大学院理学研究院、2.京都大学防災研究所火山活動研究センター

1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

九州南部に位置する桜島火山は、2006年6月に昭和火口において噴火活動を再開し、火山爆発を繰り返してきた。2014年にはその活動は低調になっていたが、2015年1月より山体が明瞭に膨張しはじめ、活動も活発になり、6月までに火山爆発回数が700回を超えた。また、8月15日にはダイク貫入イベントが起きたため、大規模噴火への移行が懸念された。このように、2015年の活動は、活発化の後にダイク貫入に至るというこれまでにない活動推移を辿っており、マグマ供給系に何らかの変化があった可能性がある。そこで、我々は2015年1月～6月の噴出物(火山礫)の岩石学的特徴を明らかにし、地球物理学的データと比較することで、2015年の活動の活発化の要因について検討する。

2015年の火山礫試料は、緻密岩片・スコリア・軽石、少量の強変質岩片からなる。斑晶鉱物として斜長石・斜方輝石・単斜輝石・磁鉄鉱を含み、一部の試料には少量のかんらん石が認められる。かんらん石の殆どは反応縁を持たずFo80-81を示し、共存する斜方輝石(Mg#62-74)・単斜輝石(Mg#67-78)と組成的に非平衡である。全岩化学組成はSiO<sub>2</sub>=58.3-59.0wt.%と最も苦鉄質であり、ハーカー図では2006年以降の昭和火口噴出物の組成トレンド上にプロットされる。石基ガラス組成においても、2014年以前と比べると顕著にSiO<sub>2</sub>量が低下しており、さらに2015年の中でも時間と共に苦鉄質になる傾向がある。

2015年噴出物の岩石学的特徴が2006年以降の昭和火口噴出物と類似しており、全岩化学組成トレンドも調和的であることから、2015年の活動においても、2006年以降の昭和火口の活動と同様のマグマシステムが活動していると考えられる。2014年以前と比べると、全岩化学組成および石基ガラス組成が明らかに苦鉄質な組成を示すことから、2015年から玄武岩質マグマの注入が顕著になったと解釈される。地球物理学的データと比較すると、2015年1月以降、噴出マグマ中の玄武岩質マグマの影響が増大するにつれ、山体が明瞭に膨張し、活動も活発化している。その後、ダイク貫入イベントへ移行していることから、2015年1月以降の活発化は、玄武岩質マグマの新たな注入が引き起こした可能性が高いといえる。

キーワード：桜島火山、火山ガラス組成、全岩化学組成、時間変化

Keywords: Sakurajima volcano, glass chemistry, whole-rock chemistry, temporal change



## マグマ供給・噴出系モデルと観測データに基づく噴火推移予測の数理

Mathematical formulation of forecasting volcanic eruption sequence based on physical models and field observations

\*小屋口 剛博<sup>1</sup>、小園 誠史<sup>2</sup>

\*Takehiro Koyaguchi<sup>1</sup>, Tomofumi Kozono<sup>2</sup>

1.東京大学 地震研究所、2.東北大学大学院理学研究科

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

火山噴火の推移予測を行う手法を開発するため、火道流モデルとマグマ溜り物理過程モデルを考慮したマグマ供給・噴出系の順問題・逆問題モデルの定式化を行った。

火山噴火の性質は、マグマ噴出率 (Q) とマグマ溜りの圧力 (P) が時間の経過とともにどのように推移するかによって特徴付けることができる。火道流モデルによると爆発的噴火におけるマグマ噴出率とマグマ溜りの圧力の関係 (Q-P関係) は、気泡流から噴霧流への流動様式の変化が起こる圧力 (マグマの破碎圧力) に強く依存する。さらに、このマグマの破碎圧力はマグマの破碎メカニズムやマグマからの脱ガス過程に依存する。また、非爆発的噴火におけるQ-P関係は、脱ガス過程による密度変化や上昇途中における結晶化による粘性変化に依存する。一方、マグマ溜りの物理モデルによると、Q-P関係は、マグマ溜りの実効圧縮率やマグマ溜りの体積にも強く依存する。マグマ溜りの実効圧縮率は、マグマ溜り内での気相の量によって著しく変化するため、マグマの揮発成分やマグマ溜りの圧力によって大きくその値が変化する。火山噴火の推移は、これらの火道流ダイナミクスとマグマ溜りの物理過程の組み合わせの結果、著しい多様性を持つ。

噴火推移を予測するためには、これらの多様なQ-P関係を生成する順問題モデルのパラメータ (マグマの破碎圧力、火道中のマグマの密度・粘性、マグマ溜りの実効圧縮率、マグマ溜りの体積) を観測データに基づいて決定する必要がある。ここでは、そのようなパラメータ推定を行うためのモデルを逆問題モデルと呼ぶ。一般に、マグマ供給・噴出系の逆問題モデルは、地殻変動とマグマの噴出量 (または噴出率) の観測データからマグマ溜りの圧力変化と体積変化の積、およびマグマ溜りの実効圧縮率を推定する問題として定式化される。これらの観測データに、マグマの物性や揮発成分に関する岩石学的情報および震源分布などによるマグマ溜りの体積に関する制約条件などを加えることによって、如何に精度良く順問題モデルのパラメータを推定できるかが、噴火推移予測の鍵となる。推定可能なパラメータの種類は、Q-P関係の特徴をはじめとする火道流モデルの数理的性質に強く依存している。例えば、火道流がQ-P関係が比例関係となるポワズイユ流に近似される場合、噴火衰退時の噴出率や地殻変動量の減衰の時定数に関する観測量から、マグマの粘性、マグマ溜りの深さと体積、マグマ溜りの実効圧縮率、火道径を組み合わせた量が推定される。また、噴火の終息に向かって噴出率が急激に減少するタイプの爆発的噴火のQ-P関係の振る舞いからは、火道径やマグマの破碎圧力が推定できる場合がある。本発表では、爆発的および非爆発的噴火のQ-P関係を整理・分類し、それぞれの噴火様式について、どのようなパラメータ推定が可能かを特定することによって、マグマ供給・噴出系モデルに基づく噴火推移予測の可能性を議論する。

キーワード：噴火推移、物理モデル、マグマ供給系

Keywords: volcanic eruption sequence, physical model, magma plumbing system

## 測地データと火道流モデルの比較

## Comparison between geodetic data and volcanic conduit flow models

\*西村 太志<sup>1</sup>\*Takeshi Nishimura<sup>1</sup>

1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

1980年代に始まる火道流モデルは、岩石学的分析や実験的結果に基づくミクロスケールの現象モデルを取り入れ、近年急速にその精緻化が進み、実際の噴火現象の巨視的振る舞いについての考察に広く使われてきた。本報告では、火道流モデルのアウトプットである火道やマグマ溜まりの流体の圧力の時空間変化について、それを実際の火山で検証できる測地データに着目し、火道流モデルと比較する。また、問題点と今後の展望を考察する。

高感度の傾斜計や歪み計、中長期変動に強いGPS (GNSS) などの測地観測のデータ解析からは、火山性圧力源の位置と大きさ、形状が理解される。ただ、一般的には測地観測点は地表にあるので深さ方向の分解能は必ずしも高くない。そのため、火道内部のマグマ圧の詳細な時空間分布を得ることは難しく、火道流モデルから期待される特徴的な圧力源変動に着目して考察する必要がある。

火道流モデルでは、マグマ上昇中の気泡成長によりマグマ全体の体積や上昇速度が増加することが予見されている。気泡成長はマグマ上昇に伴う減圧により加速的に進行することから、山体変形にも加速的な変化が期待される。一方、マグマ上昇中に気泡内のガスが系外に排出される際には上昇速度などの加速が起きないため、山体変形は穏やかに進むことが予測される。諏訪之瀬島やスメル山のブルカノ式噴火、セントヘレンズ山や雲仙岳などの溶岩ドーム形成時等の測地データは、このような特徴に合致している。しかしながら、霧島山のブルカノ式噴火のように、噴火直前に圧力源が下方に移動するという報告もある。また、低粘性マグマの爆発現象であるストロンボリ式噴火は、気泡合体した大気泡が火道内を上昇するスラグ流モデルにより説明されることが多いが、噴火直前に観測される加速度的な傾斜変動は、このモデルでは再現できない。

噴火中の火道内では、下方の粘性流から浅部のガス流へと遷移する間に、マグマ破碎が起きると考えられる。粘性流とガス流では粘性が大きくことなるため、このマグマ破碎面の上方と下方では火道壁に及ぼされる圧力が大きく異なる。したがって、噴火が進行するに従ってマグマ破碎面が下方に伝播するとすれば、この移動を測地データで検知できることが期待される。例えば、桜島のブルカノ式噴火時の歪み記録を解析すると、マグマ破碎面の後退速度は約3.0m/sと見積もられる。ただし、火道流モデルにもとづく破碎条件の空隙率が0.9以上の非常に大きな値となるという問題点がある。

以上のように、マグマ上昇や火山噴火が起きるその場での状態を測定できる測地データには、火道流モデルから予見される特徴を認めることができる。ただし、一方で、基本的特徴の不一致や定量的説明が困難な例もある。地下のマグマ供給系は複雑な形状をしており、そのサイズが大きいマグマ溜まりの効果が測地データには大きく出ている可能性がある。測地データとの比較の際には、浅部の火道内プロセスだけでなく深部プロセスも考えることが必要であろう。

キーワード：火道流モデル、測地データ

Keywords: Volcanic conduit flow model, geodetic data

溶岩ドーム噴火：シナブン（インドネシア）vs. 雲仙普賢岳  
Lava dome eruption: Sinabung (Indonesia) vs. Unzen (Japan)

\*中田 節也<sup>1</sup>

\*Setsuya Nakada<sup>1</sup>

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

現在インドネシア，スマトラ島のシナブン火山で進行中の溶岩ドーム噴火で観測された噴火の推移は，1990年から1995年まで起こった雲仙普賢岳噴火と類似している。この2火山の溶岩ドーム噴火の観測や噴出物の分析から得られたデータから，両噴火の類似点や相違点を抽出し，両溶岩ドーム噴火の推移や相違点を支配した基本的な要因が何であったかを検討する。

シナブン火山では2010年8月に有史最初の水蒸気噴火が発生し，2013年9月の再噴火後，ブルカノ式噴火を伴うマグマ水蒸気噴火を繰り返す，2013年12月末から山頂に溶岩ドームが成長し始めた。溶岩ドームは崩落を繰り返しながら成長し，長さ3kmにも達する溶岩流に成長した。溶岩崩落によって火砕流が頻繁に発生した。2014年9月頃から内成的成長をするようになり，2015年秋からは小規模なブルカノ式噴火に移行し，2013年の溶岩出現から2年経った現在も噴火を継続している。噴火に先立って，火山性地震の震源は時間とともに浅くなり，それと共に，山体膨張が次第に顕著になった。噴火開始と同時に膨張から収縮に転じ，収縮の割合は時間とともに小さくなった。溶岩供給率は初期の約6m<sup>3</sup>/sから時間とともにほぼ単調に減少した。約2m<sup>3</sup>/sを下回った頃から主に内成的成長になった。

一方，雲仙普賢岳では1990年に水蒸気噴火が発生し，その後マグマ水蒸気噴火を経て，1991年5月に溶岩ドームが山頂に出現し，成長と溶岩崩落（火砕流発生）を繰り返した。溶岩ドームは外成的成長と内成的成長を繰り返した。溶岩供給は，初期の約6m<sup>3</sup>/sを上限にして，時間とともに減少したが，大まかに2波観測された。溶岩供給率が約2 m<sup>3</sup>/sを下回ると溶岩ドームは内成的成長をした。噴火活動の最後に溶岩尖塔が出現した。火山性地震の震源は溶岩ドーム出現に向けて，西方から次第に山頂に近づき，時間とともに浅くなった。水準測量やGPS観測によると，噴火に先行して，山体が膨張し，噴火の開始とともに収縮し始めた。収縮の割合は時間とともに減少し，噴出率の減少の仕方と類似した。

シナブン火山と雲仙普賢岳で発生した溶岩ドーム噴火では，いずれも，地下からマグマがゆっくり火口に接近すると共に，水蒸気噴火からマグマ水蒸気噴火を経て，溶岩ドーム噴火に至ったことで共通している。ただし，前者では溶岩ドーム噴火に先行して，噴煙高度が10kmに達するブルカノ式噴火が発生したことで，噴火の末期と考えられる現在，小規模なブルカノ式噴火が断続的に発生していることで異なる。

溶岩はシナブン火山では角閃石安山岩（SiO<sub>2</sub>量が58-60%）であり，雲仙普賢岳では黒雲母角閃石デイサイト（63-65%）であるが，石基ガラスの組成はSiO<sub>2</sub>量が75-80%といずれも高シリカ流紋岩である。ただし，磁鉄鉱などから推定されるメルトの温度はそれぞれ>900℃と<850℃である。揮発性成分量の違いはまだ明らかではないが，シナブン火山のマグマの方がより高温で結晶質であることが特徴である。このように，両溶岩ドーム噴火は爆発度に違いがあるものの，マグマの接近から噴火の推移まで大局的にはよく似ており，溶岩噴出率の変化が溶岩ドームの成長をコントロールしたと言える。また，より爆発的な噴火を伴い，長い溶岩流を形成したシナブン火山では，メルトがより高温であったことが影響しているかもしれない。

キーワード：溶岩ドーム噴火、雲仙普賢岳、シナブン火山

Keywords: Lava dome eruption, Unzen volcano, Sinabung volcano

## 物質科学アプローチによる大規模噴火の理解とモデル化

## Understanding of caldera-forming eruption from geological and petrological approaches

\*下司 信夫<sup>1</sup>\*Nobuo Geshi<sup>1</sup>

1.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

1.Geological Survey of Japan, The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

陥没カルデラを形成する巨大火砕噴火の推移やその駆動メカニズムを理解するためには、カルデラ陥没に至るマグマ溜まりの減圧プロセスや、マグマ溜まり天井の崩壊をもたらすマグマ溜まり内の圧力変化や火道の構造変化、あるいはそれらが進行するタイムスケールを考慮しなければならない。近代火山学が成立して以来、そのような陥没カルデラ形成を伴う大規模噴火はほとんど発生していないため、その推移の復元やマグマ溜まり内プロセス、あるいは壁岩の破壊プロセス等の理解は、過去の大量噴火噴出物を用いた物質科学的なアプローチに頼らざるを得ない。噴出物の層序やその層相の解析といった地質学的手法を用いた噴火推移の復元の結果、多くの陥没カルデラの噴火推移は陥没開始に先立つ前駆的な噴火とそれに引き続く巨大火砕流の噴出というパターンをとることが知られている。もちろん、これらのパターンにはさまざまなバリエーションがあり得る。10~100km<sup>3</sup>を超えるマグマを噴出する噴火では、多くの場合陥没カルデラが形成される。陥没カルデラの形成は、多量のマグマがマグマ溜まりから短時間に噴出した結果マグマ溜まり内のマグマ圧が低下し、マグマ溜まり壁岩の破断とマグマ溜まり内への陥没が発生したことを示している。侵食された多くの陥没カルデラの構造や、陥没カルデラ内で行われた多数のボーリング調査の結果は、陥没カルデラを厚い火砕流堆積物が埋積していることを示している。その厚さはしばしば1kmを超えることがある。大規模噴火に先立ちこのような深い凹地形が存在していたとは考えにくいことから、陥没カルデラ内の厚い火砕流堆積物の存在は、陥没カルデラの沈降は巨大火砕流と同時に発生したことを示唆する。カルデラ内の火砕流堆積物はしばしば大規模なカルデラ壁の崩壊堆積物と指交関係にあることから、大規模火砕流の噴出とカルデラ陥没が同時に進行したことが示唆される。巨大火砕流の噴出に前駆する噴火は、大規模なプリニー式噴火である場合（例えば、幸屋火砕流に先立つ幸屋降下軽石）や小規模な火砕流、あるいはその両方（入戸火砕流に先立つ大隅降下軽石と妻屋火砕流など）が認められることがある。これらの前駆噴火によってマグマ溜まりの減圧が進行し、マグマ溜まり天井の破壊と陥没を引き起こしたと考えられる。もしそうならば、前駆噴火を通じてマグマ溜まり内が減圧し、前駆噴火から大規模火砕流噴火に移行するときにマグマ溜まり天井を破断するに十分な減圧量に達したはずである。大規模噴火の駆動メカニズムを理解し、そのモデル化を行うためには、前駆噴火におけるマグマ溜まりの減圧の進行を、噴出物の物質科学的な検討により定量的に評価する試みが必要である。また、もしそのような顕著な圧力変化がマグマ溜まりに生じた場合、それが噴火中の地盤変動等にどのように反映されるかについても検討することが必要だろう。さらに、前駆噴火と大規模火砕流の噴出はほぼ連続的あるが、いくつかの事例ではわずかな時間間隙があるとの解釈も提示されている。地質学的手法から前駆噴火と大規模火砕流のあいだの時間間隔や、前駆噴火の継続時間、大規模火砕流の噴出継続時間などを推測することも、噴火のモデル化とその駆動メカニズムの理解のためには欠かせない。

キーワード：大規模噴火、カルデラ、マグマ

Keywords: large-scale eruption, caldera, magma

## 大量のマグマが短期間に地殻に蓄積する可能性の力学的検討

The possibility of rapid and huge magma accumulation in the crust from dynamical point of view

\*藤田 詩織<sup>1</sup>、清水 洋<sup>2</sup>

\*Shiori Fujita<sup>1</sup>, Hiroshi Shimizu<sup>2</sup>

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附属地震火山観測研究センター

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University,

2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

カルデラを形成し、100 km<sup>3</sup>以上のマグマを噴出するような巨大噴火の発生には地殻内への大量のマグマ蓄積が必要である。巨大噴火による数100~数1000 km<sup>3</sup>の一度のマグマ放出(町田・新井 1992) は地殻内に大量のマグマが蓄積されていたことを示す。さらに、Takada (1999) はマグマの噴出量と蓄積量の比の推定から、噴出量の数倍のマグマの地殻へ蓄積されている可能性を示している。カルデラ火山の噴出物量と噴火間隔

(Salisbury et al, 2011) から巨大噴火のマグマ蓄積率は、平均的に0.001~0.01 km<sup>3</sup>/year程度と求められるものの、その蓄積過程はほとんど明らかにされていない(Jellinek & DePaolo, 2003)。

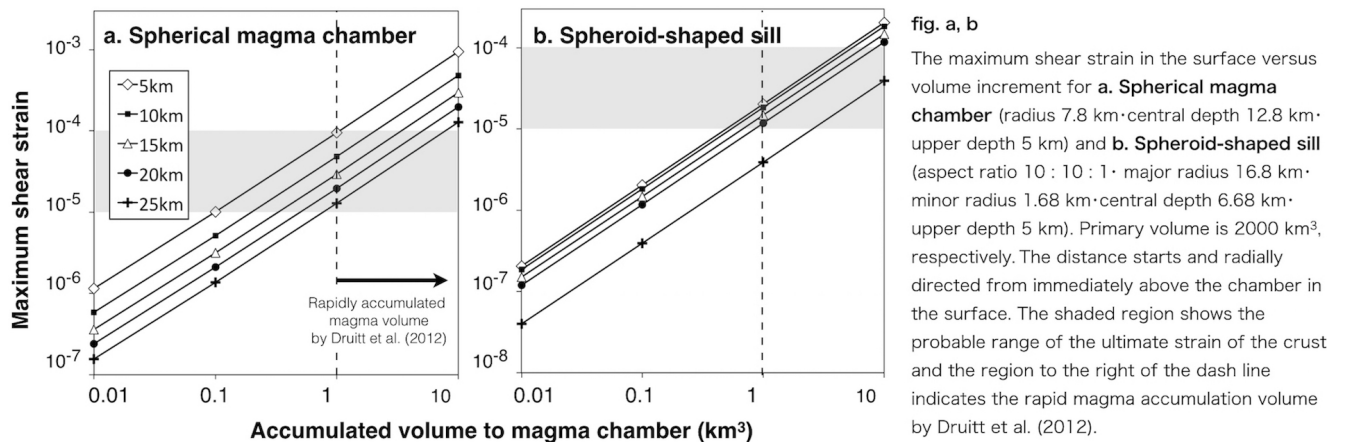
Druitt et al. 2012は40-60 km<sup>3</sup>のマグマを噴出しカルデラを形成したSantorini火山噴出物中の斜長石結晶の元素組成を調べ、噴火前の100年で数km<sup>3</sup>の大量のマグマが蓄積した可能性を指摘している。この場合のマグマ蓄積率は0.01~0.1 km<sup>3</sup>/yearであり、上記の平均的なカルデラ火山のマグマ蓄積率と比較して1オーダー大きい。100年程度の短期間にこの現象が起こると仮定すると、地表では大量のマグマ蓄積による大きな地殻変動が検知できる可能性があるため、火山噴火予測に重要である。しかし、岩石学的手法により導かれたマグマの短期間の急激な蓄積が、力学的制約を満たすかどうかについては検討されていない。そこで、本研究は短期間に地殻に蓄積できるマグマの上限値を推定することを目的とし、有限要素法(Marc Mentat, ver. 2012)による数値計算により推定を行った。Druitt et al. 2012が結論づけた約100年は地殻のMaxwell緩和時間に比べ十分に短いため、地殻は弾性体として扱った。

解析は、マグマだまりの壁に圧力を与えて膨張させ、マグマだまり周辺の歪みを計算して地殻の限界歪み $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$ (Rikitake, 1975)と比較する方法を用いた。仮説として、マグマ蓄積量に大きく影響するパラメータはマグマだまりの形状と、新たなマグマを蓄積する前にすでに存在していたマグマだまりの体積(以下、初期体積)だと予想した。そこで、100~2000 km<sup>3</sup>の異なる初期体積を持つ球状マグマだまりおよび回転楕円体形状のシルのモデルを作成し計算を行った。マグマだまりの上端の深さは全て始良カルデラのマグマだまり深度である5 km(安田ほか, 2015)に固定した(したがって、中心の深さは初期体積により異なる)。地表面を自由表面、地殻は全て等方均質と仮定し、 $\lambda = \mu = 40$  GPa(茂木, 1957)の値を用いた。重力の影響は無視した。合わせて、比較のために解析解である球状圧力源モデル(Mogi, 1958)とシルを表す開口断層モデル(Okada, 1992)の二つについても同条件で計算を行った。これらのモデルはマグマ蓄積前のマグマだまり体積が限りなく小さい(初期体積 $\sim 0$ )ことを前提に成り立つ。

解析の結果、最大剪断歪みは球状圧力源・シルの両方で初期体積の増加に伴って指数関数的に減少した。最も大きな歪みは初期体積 $\sim 0$ の解析解モデルによる計算値であった。初期体積2000 km<sup>3</sup>のマグマだまりを膨張させた際の地表における最大剪断歪みをfig.a,bに示す。マグマだまりの形状によらず体積増加量と最大剪断歪みの値は比例したが、同体積で比較するとシルの方が切片が小さかった。そのため同じ体積のマグマが蓄積する場合、シルの方が地殻の限界歪みに達しにくく、球状圧力源より多くのマグマを蓄積できると考える。しかしながら、初期体積が2000 km<sup>3</sup>と大きくても体積増加量が約1 km<sup>3</sup>を超えると歪みは地殻の限界歪みを超えている。地殻の歪みの値が地殻の限界歪みを越えるとき、地殻は降伏して塑性変形する、あるいは脆性破壊が発生するため、地殻を弾性体として扱うことはできない。つまり、Druitt et al. 2012の主張する数km<sup>3</sup>のマグマが100年程度の短期間で蓄積する場合の地殻変動については、マグマだまりの形状および初期体積の有無に関わらず脆性破壊や塑性変形を考慮した議論が必要である。

キーワード：巨大噴火、マグマ蓄積、地殻、ひずみ、応力、カルデラ

Keywords: large volcanic eruption, magma accumulation, crust, strain, stress, caldera



## 放送衛星信号波による火山活動監視

## Volcano monitor using broadcast satellite signals

\*瀧口 博士<sup>1</sup>、後藤 忠広<sup>1</sup>、原田 昌武<sup>2</sup>、雨谷 純<sup>1</sup>、里村 幹夫<sup>2</sup>

\*Hiroshi Takiguchi<sup>1</sup>, Tadahiro Gotoh<sup>1</sup>, Masatake Harada<sup>2</sup>, Jun Amagai<sup>1</sup>, Mikio Satomura<sup>2</sup>

1.情報通信研究機構電磁波計測研究所、2.神奈川県温泉地学研究所

1.Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, 2.Hot Springs Research Institute of Kanazawa Prefecture

活火山の内部活動は外部からはわかりにくく、噴火が起きるまでその活動状況を正確に捉えるのは困難である。噴火による災害被害軽減のためにも、火山の活性化状況を常時監視する手法の開発が望まれる。いわゆる活火山と言われる火山の多くは、平常時から山体及び火口から水蒸気放出によって内部の熱エネルギーの大部分を放出しており、活動が活発化するにつれて、その熱エネルギー放出が増大する。この熱エネルギー変化を長期的に観測することで、火山活動の推移を予測することが可能と考えられる。大気中を通過する電波は、真空中を通過する場合と比べ、媒体の屈折率に応じて伝搬時間に遅れが生じる。この変化はVLBIなどの観測によって平地でも数cmから数10 cm変化することが分かっており、火山活動によって生じる熱量変化が極めて大きいことを考えると、大気中の屈折率変化を測定することで、火山内部の活性化上状況を推測可能と考えられる。情報通信研究機構では、火山上空を通過する放送衛星の信号を観測することで、大気中の屈折率変化を観測する手法を考案した。本稿では、考案したシステムの詳細について述べるとともに、箱根において神奈川県温泉地学研究所と共同で試験観測を行ったので、その結果についても述べる。

謝辞：実験に協力頂いた情報通信研究機構 相田政則氏、久保岡俊宏氏に感謝します。

キーワード：火山、VLBI、放送衛星

Keywords: volcano, VLBI, broadcast satellite

## 御嶽火山周辺のGNSS観測と有限要素法によるモデリング

FEM modeling and GNSS observation around Mount Ontake volcan

\*伊藤 武男<sup>1</sup>、松廣 健二郎<sup>1</sup>\*Takeo Ito<sup>1</sup>, Kenjiro Matsuhira<sup>1</sup>

1.名古屋大学大学院環境学研究科附属 地震火山研究センター

1.Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

On September 27, 2014, Mount Ontake volcano was erupt. The eruption took 63 lives and represented the worst volcanic disaster in post-World War II Japanese history. Before this eruption, the GNSS observations are a few around Mount Ontake volcano. Especially, the number of GNSS observation within 4km from the summit of mount Ontake volcano is only one, which is belong to JMA. After the eruption, we establish GNSS observation network around mount Ontake volcano. New GNSS observation network around mount Ontake volcano are consist of six continues GNSS sites. Two and four continues GNSS sites started at 2014 and 2015, respectively. We also make seven campaign GNSS sites where are located at eastern side of mount Ontake volcano. These campaign GNSS sites are observed at July 2015.

In order to explain the observed crustal deformation, we make FEM model considering topography, such as shape of the mount Ontake volcano. In this poster, we introduce the new GNSS observation and FEM model for mount Ontake volcano.

キーワード：GNSS、御嶽火山、有限要素法

Keywords: GNSS, Mount Ontake volcano, FEM



桜島火山の噴火前後に観測される傾斜変動の特徴—気象庁あみだ川観測点データの解析—  
Characteristics of tilt changes during eruption at Sakurajima: analysis of tilt data at  
Amidagawa station, Japan Meteorological Agency (JMA)

\*中島 稜介<sup>1</sup>、西村 太志<sup>1</sup>

\*Ryosuke Nakajima<sup>1</sup>, Takeshi Nishimura<sup>1</sup>

1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

## 1. はじめに

火山噴火直前の山体の膨張、噴火後の収縮に伴い、傾斜計に火口方向への隆起、沈降がしばしば観測される。このような変化は火山灰の噴出によるマグマ物質の地下での移動現象を表していると考えられるので、傾斜変動の記録は噴火メカニズムの解明や噴火の予知に役立てられている。しかしながら、噴火時の傾斜変動の時間変化についてはあまり調べられていない。そこで、本研究では桜島における噴火前後の傾斜の時間変化の特徴とともに、噴出量との関係性を調べる。

## 2. データ・手法

気象庁はあみだ川(SFT)、瀬戸(SKD)、横山(SKA)に2010年よりボアホール傾斜計を島内に設置している。本研究は、昭和火口から約3km離れた山腹に設置され、爆発に伴う傾斜変動を明瞭に記録しているあみだ川の南北データを使用する。まずBaytap08(Tamura et al., 2008)を用いて潮汐主要4分潮を含む短周期潮15成分を除去した。鹿児島地方気象台の噴火・爆発リストを参照し、2015年4月から5月の噴煙高度が2000mより大きい爆発的噴火を選択した。さらに、噴火直前、直後に異なる噴火が発生せず、隆起、沈降が明瞭に見えるものを選び、24個のイベントを抽出した。

## 3. 結果

傾斜計の記録をみると、全イベントで爆発発生1分から2分前に火口方向が急激に隆起し、爆発発生後数十秒から数分後に沈降に転じる傾斜変動で特徴付けられることがわかった。爆発に先行する隆起は火道やマグマだまりの増圧過程を、噴火直後の火口方向隆起は火山灰の噴出に伴い火道内部で鉛直上向きの力がはたらいていることを示唆し、引き続き沈降はマグマの噴出に伴う火道やマグマだまりの収縮を表していると考えられる。隆起・沈降による傾斜変動量や隆起・沈降時間を読み取ると、隆起時の傾斜変動量は2nradから10nrad、沈降時の傾斜変動量は2.5nradから37nrad、隆起時間は約1分から3分半、沈降時間は約10分から140分と広い範囲の分布を示した。また、傾斜変動量が大きいイベントは収縮開始直後に急激に沈降するケースが多く、沈降時間が80分以上の4イベントはほぼ一定の割合で沈降する場合のみであった。しかし、沈降中に山体が何らかの影響を受け一時的な隆起を示すイベントも見受けられた。

次に、噴火・爆発リストによる噴煙高度、噴煙量と比較した。しかしながら、それらと傾斜変動量や隆起・沈降時間の間に良い相関は見受けられなかった。そこで、単位時間当たりの傾斜変動量に着目すると、隆起から沈降に転じた直後(<10分)に急速に沈降するイベント(Aタイプ)と徐々に沈降するイベント(Bタイプ)に大別された。さらに、収縮開始直後の沈降速度と噴煙高度、噴煙量の関係を調べたところ、特にAタイプに正の相関が見られた。爆発直前の隆起速度に関しても同様に噴煙高度、噴煙量と正の相関が得られた。

## 4. まとめ

桜島において、噴火前後の傾斜変動の特徴を調べた結果、爆発発生数分後まで火口方向の隆起がみられた。また、噴出量に関する記録と比較すると、変動量と噴煙高度、噴煙量の関係性は認められなかった一方で、変動速度と噴煙高度、噴煙量の間には正の相関があることがわかった。

キーワード：傾斜、噴煙高度、桜島、爆発

Keywords: Tilt, Plume height, Sakurajima, Explosion

噴火微動・爆発地震の高周波地震波から推定される震源振幅と噴煙高度との関係性

Relationship between eruption plume heights and seismic source amplitudes estimated of eruption tremors and explosion events

\*森 亜津紗<sup>1</sup>、熊谷 博之<sup>1</sup>

\*azusa mori<sup>1</sup>, Hiroyuki Kumagai<sup>1</sup>

1.名古屋大学大学院環境学研究科

1.Nagoya University Environmental Studies

噴火に伴い観測される微動や火山性地震について解析・解釈することは、噴火の規模の推定及び噴火現象の物理的理解において重要である。本研究ではそれらの中でも噴火微動と爆発地震に着目し、噴火現象のメカニズムの理解と即時的な噴火の規模の把握を行うことを目的としている。

先行研究では、噴火に伴う微動について噴火の規模との関係性が調査されてきた。McNutt (2004)では、微動の規模指標であるReduced displacement (DR)と噴火の規模指標である火山爆発度指数(VEI)との関係性が調べられたが、VEIの値に対するDRの値に幅があり、VEIを過大評価または過少評価する問題が指摘されている。さらにDRでは、(1)その推定値が微動の周波数に依存する、(2)微動の継続時間について考慮されていない、といった問題がある。Kumagai et al. (2015)ではエクアドルのトゥングラワ火山の噴火微動・爆発地震について、高周波帯(5-10 Hz)でのS波の等方輻射の仮定に基づく震源決定法(ASL法)を用いて震源振幅( $A_s$ )、およびその時間積分値である累積震源振幅( $I_s$ )を推定した。その結果、爆発地震については $I_s$ が $A_s$ に線形比例し、噴火微動については $I_s$ の対数が $A_s$ に比例するという震源特性をもつことを明らかにした。しかし、トゥングラワ火山で推定されたこれらの関係が普遍的に成立するのか確認されておらず、 $A_s$ と $I_s$ それぞれがどのような物理量と関係しているのかも解明されていない。

そこで本研究では、日本の火山で観測された噴火微動・爆発地震について $A_s$ と $I_s$ の関係性を調べた。その解析には、防災科学技術研究所のV-netで公開されている気象庁火山観測網の連続波形データを使用した。桜島(2013年8 - 2015年9月)、口之永良部島(2015年5月29日)、御嶽山(2014年9月27日)の噴火の際に観測された噴火微動・爆発地震の地震波形データに、5-10 Hzのバンドパスフィルタをかけエンベロープ波形とした。震源を火口と仮定し、ASL法を用いて $A_s$ と $I_s$ を推定した。さらに $A_s$ と $I_s$ の関係について調査し、 $A_s$ と最大噴煙高度の関係についても調べた。

トゥングラワ火山で推定された関係と同様に、本研究でも爆発地震では $I_s$ が $A_s$ に線形比例するという結果が示された。さらにこれらの値はKumagai et al. (2015)の爆発地震の値と分布が類似していることから、トゥングラワ火山で推定された爆発地震の比例関係は普遍的に成立している可能性が高い。次に、最大噴煙高度が判明しているイベントについて $A_s$ と最大噴煙高度を比較したところ、噴煙高度が $A_s$ に比例関係をもつことが分かった。この結果は、 $A_s$ から噴煙高度を推定できる可能性を示唆している。また、 $I_s$ は噴出量と関係をもつ可能性があるが、噴出量についてのデータが少ないため両者の関係性について現時点ではまだ明らかにできていない。ただし $I_s$ が噴出量と、 $A_s$ が噴煙高度と比例すると仮定すると、噴火微動の $I_s$ の対数が $A_s$ に比例するという関係式から、噴出量の対数が噴煙高度に比例するという関係式が得られる。この関係式とMastin et al. (2009)で示された噴出量と噴煙高度についての関係式と比較した。その結果 $A_s$ と噴煙高度については、この比較から推定される比例係数の値と上記解析から求めた値がほぼ一致し、 $A_s$ と噴煙高度が比例関係にあるという仮定を支持する結果となった。しかし、爆発地震を伴うブルカノ式噴火と噴火微動を伴うプリニー式噴火では、噴煙高度と $A_s$ の関係性が異なる可能性がある。したがって、今後は $I_s$ と噴出量の関係について調査してだけでなく、噴火様式の違いを考慮し、噴煙高度と噴出量・噴出率を結びつけるような噴火モデルを用いて $A_s$ と $I_s$ の解釈を行う。そして、 $A_s$ と $I_s$ を用いた噴火の規模指標の確立を目指す。

## 2次元降下堆積モデルにおける堆積物GSDの層序変化に対する風の影響

The influence of the downwind on the stratigraphic GSD variation in the 2D fall and sedimentation model

\*入山 宙<sup>1</sup>、寅丸 敦志<sup>2</sup>

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

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

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University,

2.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University

The stratigraphic variation of grain-size distribution (GSD) in pyroclastic fall deposit indicates the temporal variation of GSD of settling particles, and may reflect the temporal variation of the eruption. The temporal variation of eruption, especially the temporal variation of the source GSD, affect the temporal and spatial variations of GSD in the umbrella cloud. In order to relate the stratigraphic variation of GSD to the temporal variation of source GSD, it is necessary to take into account the fractionation process from the umbrella cloud and the transportation process of ejected particles.

We developed two-dimensional fall and sedimentation (2DFS) model in order to relate the temporal variations of GSDs between the source and the sediment. Our model deals with the influence of the fractionation from an umbrella cloud and the advective transportation caused by the downwind on the sediment GSD. In this study, we assess the influence of the downwind velocity on the sediment GSD and thickness as functions of stratigraphic height and distance from the source vent by numerically calculating the analytical representation.

As a result, in the same particle size at the same distance from the source vent, the number of particles of sediment in the 2DFS model with downwind is larger than that one without downwind due to the effective shortening of fractionation times. This difference in the particle number affects the thickness of sediment. Similarly, travel time of particles, which settle at a certain distance from the source vent, with downwind is shorter than that one without downwind.

Without downwind, the order of settling particles is from the largest particles to the finer particles resulting in the normal grading structure. However, with downwind, it is possible to settle from the finer particles than the largest particles due to the dominancy of advective lateral transportation by downwind rather than by sedimentation with size sorting. This suggests that the reverse grading structure of the pyroclastic fall deposit may result from the downwind effect.

キーワード：降下火砕堆積物、層序変化、爆発的噴火の時間発展、風の影響、逆級化構造

Keywords: pyroclastic fall deposit, stratigraphic variation, temporal variation of explosive eruption, effects of downwind, reverse grading structure

マグマ混合から噴出のタイムスケールの噴出時期による変化-新燃岳2011年噴火の準プリニー式噴火期の例-

Changing timescale from magma mixing to ejection with eruptive timing-An example from the Shinmoe-dake 2011 eruption-

\*鈴木 由希<sup>1</sup>、坂井 剛善<sup>1</sup>、市原 美恵<sup>2</sup>

\*Yuki Suzuki<sup>1</sup>, Takeyoshi Sakai<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>2</sup>

1.早稲田大学, 教育・総合科学学術院, 地球科学専修、2.東大・地震研

1.Department of Earth Sciences, Faculty of Education and Integrated Arts of Sciences, Waseda University, 2.ERI, Univ. of Tokyo

Investigating mechanism and timescale of eruption triggering is one of the important tasks in volcanology. Injection of high temperature magma into the low temperature magma reservoir triggered the Shinmoe-dake 2011 eruption, by remobilizing the mush-like, immobile low temperature magma (Suzuki *et al.*, 2013). Some studies (Tomiya *et al.*, 2013; Suzuki *et al.*, 2013) already reported timescale from magma mixing to eruption for this eruption, by using zoning (diffusion) profiles in magnetite phenocrysts originated from the low temperature magma; that varies between 0.7h and 15.2h in Suzuki *et al.* (2013) which investigated several magnetite phenocrysts in a pumice clast erupted in the late stage of the second sub-Plinian (Jan 27AM) event. However, it remained unsolved whether timescale from magma mixing to eruption has correlation with eruption timing. If the timescale is constant throughout the 2011 eruption, it means magma mixing occurred repeatedly (e.g. Nakamura, 1995). We here focus on three sub-Plinian events (Jan 26PM, 27AM, 27PM) that occurred intermittently in the climactic phase of the 2011 eruption. To answer above question, we examined a succession of sub-Plinian deposit (Layer 2-5, Nakada *et al.*, 2013).

In this preliminary study, only Layer2-low, Layer3-low and Layer4-low ("low" means lower part of each unit) were investigated. According to Suzuki *et al.* (2014, JpGU meeting), Layer-2low and Layer-3low are from the first sub-Plinian event, and Layer-4 low is from the second sub-Plinian event. Magnetites included in ash size particles (500-1400 $\mu$ m) were investigated. Relatively large magnetites are preferable to read chemical and thermal history, and maximum size of magnetite phenocryst in thin sections of hand-size pumice reaches 300 $\mu$ m (Suzuki *et al.*, 2013). The ash particles (both pumice and free crystal) including large magnetite can be more than 500 $\mu$ m. The reason why we used ash size particles was to randomly pick up magnetites with various histories and mount them on single microscope slide. For EPMA analyses, we used magnetite whose rim is in contact with groundmass and whose 2D size is more than 150 $\mu$ m to minimize cut-section effect. To acquire zoning profiles, point analyses were carried out at 5 $\mu$ m intervals and 10 $\mu$ m intervals for marginal part (up to 20 $\mu$ m from rim) and inner part, respectively. Number of investigated magnetite reached ca. 20 for each eruptive unit.

Although shapes of zoning profiles have a variation for 20 crystals, all show reverse zoning in MgO. Maximum MgO contents in reversely zoned parts do not systematically change with eruptive unit, which is consistent with the continuous ejection of equally mixed magmas of the same endmember magmas (Suzuki *et al.*, 2013). We found two tendencies this time. First, most magnetites from Layer2-low have reversely zoned parts only in the marginal parts (e.g. up to 20 $\mu$ m from the rim), which differs from magnetites of other units. This might indicate timescale from mixing to eruption was mostly shorter in mixed magmas erupted as Layer2-low deposit. This could happen if major magma mixing occurred only in the beginning of the whole sub-Plinian activity. The second point is related to MgO contents of the unzoned inner parts. The MgO contents for 20 grains show bimodal distribution only in Layer2-low. In addition, minimum MgO contents for 20 magnetites seem lower in

Layer2-low. This might show the different thermal and chemical history of the remobilized low temperature magmas depending on the stage of whole sub-Plinian activity. Additional analyses for other eruptive units (Layer2-up, Layer3-up, Layer4-up and Layer5) and calculation of absolute timescale from mixing to eruption are necessary to confirm above models.

キーワード：噴火誘発、新燃岳、マッシュ状珪長質マグマ、マグマ混合、磁鉄鉱、拡散プロファイル

Keywords: Eruption triggering, Shinmoe-dake, Mush-like felsic magma, Magma mixing, Magnetite, Diffusion profiles

## 石英に捕獲されたメルト包有物の非露出赤外分光分析法の開発

A new technique to analyse unexposed melt inclusions in quartz

\*吉村 俊平<sup>1</sup>、中川 光弘<sup>1</sup>\*Shumpei Yoshimura<sup>1</sup>, Mitsuhiro Nakagawa<sup>1</sup>

1.北海道大学・地球惑星科学

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University

&lt;はじめに&gt;

珪長質巨大噴火の発生メカニズムを理解するには、噴火準備段階におけるマグマの温度・圧力・共存する流体組成などの物理化学条件とその時間進化を詳細に解明することが不可欠である。Anderson et al. (1989)以来、石英のメルト包有物の揮発性成分分析が広く行われるようになり、噴火の引き金として、深部起源の高温流体が重要な役割を果たしている可能性が示唆されてきた (e.g., Bachmann et al., 2009)。しかしながら、メルト包有物の両面研磨薄片の作製は難しく、データ数が少ないことから、いまだに流体挙動を詳細に解明し、その役割を明らかにするには至っていない。そこで我々は、簡便でかつ定量性の損なわれない方法として、メルト包有物をホスト石英ごと顕微FTIRで分析し、あとから石英のスペクトルを差し引くことで、純粋なメルトの赤外吸収スペクトルを取得する方法を開発することにした。これは、かんらん石のメルト包有物を非露出状態で分析する方法を開発したNichols & Wyszczanski (2007 chem. geol.) に倣ったものであり、本研究はその石英版である。

&lt;原理&gt;

赤外ビームがホスト石英とメルト包有物の両方を透過する場合、得られる合成スペクトル  $f$  は、両者の純粋スペクトルの線形和  $f = d(qz) * f(qz) + d(mi) * f(mi)$  になっていると考えられる。ここで、 $f(qz)$ 、 $f(mi)$  は、それぞれ石英とメルト包有物の単位厚さ当たりのスペクトルであり、 $d(qz)$ 、 $d(mi)$  は実効厚さである。合成スペクトル  $f$  には、石英の結晶構造を反映した特徴的なピークが含まれ、その吸光度は石英の厚さ  $d(qz)$  と比例関係にあると考えられる。そこで、あらかじめこの関係を確立しておけば、合成スペクトルから  $d(qz)$  を見積もることができ、それを薄片全体の厚さ  $d$  から差し引くことで、 $d(mi)$  を得る。そして、 $d(mi)$  と揮発性成分の吸光度から、その濃度を計算することができる。この方法では、濃度はビーム透過経路の石英/メルト比に依らず、1つの値として得られることになる。したがって、高圧を保持している可能性の高い、ごく小さな包有物の分析にも利用可能と考えられる。

&lt;検証実験と結果&gt;

本手法の有効性を、以下の予備実験により検証した。まず、石英に特徴的なピークがどの波数に現れるか、そしてその吸光度は厚さに比例するかどうかを確認するため、玉山鉱山産石英の両面研磨薄片を作製し、赤外分光分析を行った。その結果、1500~2200  $\text{cm}^{-1}$  の間にピークが複数本存在し、いずれも吸光度と厚さの間に比例関係を有することが確認された。比例定数は結晶方位には依存しなかった。そのうち、1790  $\text{cm}^{-1}$  のピークは他のピークと干渉せず、吸光度を測定しやすいことから、これを  $d(qz)$  の指標として使用することとした。

次に、石英とメルトの合成スペクトルが純粋スペクトルの線形和になるかどうかを確認するため、石英結晶の薄片に和田峠黒曜石の薄片を重ね合わせ、分析を行った。その結果、合成スペクトルは純粋スペクトルの線形和になっていることが確認された。黒曜石の含水量は、石英/メルト比によらず、1つの値に計算された。

そして、実際にメルト包有物の含水量を求めることができるかどうかを、鬼首カルデラ起源の石英遊離結晶を用いて検証した。まず、直径150  $\mu\text{m}$  のメルト包有物を両面に露出させた薄片を作製し、10  $\mu\text{m}$  径のビームで分析し、含水量を決定した (4.4 wt%)。CO<sub>2</sub> は検出されなかった。次に、ビーム径を様々に変えて同じ包有物を分析し、石英寄与率が様々な合成スペクトルを取得し解析した。その結果、含水量は3550, 4500, 5250  $\text{cm}^{-1}$  いずれのピークでも、石英寄与率  $d(qz)/d$  が増加するほど低く見積もられた。例えば3550  $\text{cm}^{-1}$  では、石英寄与率が24% のとき、全含水量は2.3 wt% と計算された。一方、4500, 5250  $\text{cm}^{-1}$  では、同じ石英寄与率のとき、含水量はそれぞれ真の値の63, 84%であった。これは、合成スペクトルが純粋スペクトルの線形和にならないこと、そしてその非線形の程度はピークごとに異なることを意味する。なぜ、そうなるのか現在調査中である。

キーワード：メルト包有物、石英、FTIR

Keywords: melt inclusion, quartz, FTIR

## マグマだまりの固化全過程：モデル実験によるアプローチ

## Laboratory experiments on the whole process of magma chamber solidification

\*高橋 大地<sup>1</sup>、隅田 育郎<sup>1</sup>\*Daichi Takahashi<sup>1</sup>, Ikuro Sumita<sup>1</sup>

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

初期に完全に熔融し、熱対流しているマグマだまりはどのように冷却、固化するのだろうか。また固化過程と固化組織の間にはどのような関係があるのだろうか。マグマだまりの固化、冷却過程は、これまでに実験的、理論的に調べられて来た(Brandeis & Marsh, 1989; Worster et al., 1990)が、固化の全過程を調べたものは少ない。そこで本研究ではワックスをマグマのモデル物質として用い、その冷却、固化過程の全過程を調べた。

アクリルセル(内寸：高さ&幅が80mm、奥行き10mm)に凝固点約37℃のワックス(PEG1000)を入れ、下からヒーター(70℃)で加熱する。熱対流(レイリー数 $Ra=2.4 \times 10^7$ 、プラントル数 $Pr=700$ )が定常状態になってからヒーターを切る。その後、セルは冷却され、固化が進行する。固化過程はカメラでインターバル撮影し、熱電対とサーミスターを使って温度を測定した。実験は以下の3通りの熱境界条件下で行った：Case A(上から室温で冷却、下は断熱)、Case B(上から氷で冷却、下は断熱)、Case C(下から室温で冷却、上は断熱)。

本実験では、3つの大きな特徴が観察された。(1)3つの実験で固化が完了するまでの時間の違いは約5%と小さい。(2)ヒーターを切った直後の対流パターンは3つの実験で同じであったが、Case AとCase Cでは固化が始まってから早い段階で対流パターンが変化し、中央で1つの上昇流と左右で下降流のパターンになった。一方で、Case Bではヒーターを切った直後の対流パターンのまま固化が進行し、対流が停止する直前にパターンが変化した。(3) 固化は対流の温度場と対応して、下降域において速く進行する様子が観察された。Case AとCase Cでは2つのセルを形成して固化が進行し、最終的にセルの中心に大きな渦模様の固化組織を形成した。Case CではCase Aに比べて渦模様の位置がセルの上部に形成した。Case Bでは3つのセルを形成して固化が進行し、最終的に小さく不明瞭な渦模様を形成した。

以上の実験結果を考察する。(1) 熱境界条件を変えても完全に固化するまでに要する時間は同程度であった。これは境界の温度が低いと固化は早く開始するが、その後は熱境界層が厚くなるため熱輸送が低下し、固化の進行が遅くなるためと考えられる。(2) 固化前に対流パターンが変わったCase AとCase Cでは固化が開始するまでの時間( $\tau_s$ ) > 対流がセルを一周する時間( $t_{turn\ over}$ )であった。一方で固化前に対流パターンが変わらなかったCase Bでは $\tau_s < t_{turn\ over}$ であった。これらの結果は対流パターンが変わるためには少なくともその時間を要することと整合的である。(3) 本実験では固化組織は固化前に対流の温度場と対応していた。温度場不均一の水平スケールを4 cmとすると、温度場が均一になるための熱拡散時間は約4時間と見積もられる。一方で対流停止後、固化が完了するまでの時間は15-18min程度であり、熱拡散時間よりも十分に短い。このため、対流の温度場のパターンと対応する固化組織が形成したと理解される。以上と同じ条件が満たされれば、マグマだまりでも同様な現象が起きる可能性があるかと推察される。

キーワード：マグマだまり、固化過程、熱対流、固化組織

Keywords: magma chamber, solidification process, thermal convection, solidification texturing



## 模擬Tube pumiceの生成を目指したポリウレタンフォームの粘弾性実験

### Rheological experiments of polyurethane foam toward simulating tube pumice

\*大橋 正俊<sup>1</sup>、市原 美恵<sup>1</sup>、寅丸 敦志<sup>2</sup>、桑野 修<sup>3</sup>

\*Masatoshi Ohashi<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>1</sup>, Atsushi Toramaru<sup>2</sup>, Osamu Kuwano<sup>3</sup>

1.東京大学地震研究所、2.九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、3.独立行政法人海洋研究開発機構

1.The Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, 33 Kyushu University, 3.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

カルデラ形成を伴う大規模噴火ではtube pumiceと呼ばれる噴出物が見つまっている。tube pumiceとは軽石の一種であり、一方向に伸びたチューブ状の気泡形状に特徴がある。このような気泡構造は、火道内でのマグマ上昇に伴う発泡、流動、破碎の過程で気泡の変形、または、連結によって形成されると考えられており、カルデラ噴火に至るプロセスの情報を記憶している可能性がある。本研究は、tube pumiceの成因を明らかにすることを最終目標としている。大橋他（2015, 火山学会）では、ポリウレタンフォームを減圧膨張させる予備実験を行った。ポリウレタンフォームには常温常圧条件下で、発泡、流動し、固化する特徴があり、火道内での軽石形成過程を模擬するのに適した物質だと考えられる。したがって、ポリウレタンフォームを用いてtube pumice 構造を再現することで、その成因に迫ることができると期待される。本発表ではそのための準備として、ポリウレタンフォームの成分調整とレオロジー試験を行い、X線CTスキャンを用いて気泡の内部構造を観察した結果を報告する。

実験材料：ポリウレタンフォームは、ポリイソシアネート液とポリオール液を、触媒や整泡剤と一緒に混合して発泡反応と樹脂化反応を同時に行わせて得られる、プラスチック発泡体である。整泡剤には気泡の合体を抑制し、均質で微細なセル構造を作る効果がある。セル構造を避けるため、本研究では（株）東邦化学工業の協力を得て整泡剤を含まないポリウレタンフォーム原液を調合し、これを使用した。この原液では気泡は楕円形になり、合体が促進されるため通常より大きい気泡が形成された。

実験手法：ポリウレタンフォームの膨張-固化過程における粘弾性時間変化を計測する。レオメータ

(AR2000ex)を使用し、治具として内筒回転式の二重円筒を作製した。ポリウレタンフォームが固着した治具は再利用できないので、使い捨てできるようにする。外筒（直径 $\phi=23\text{mm}$ ）に透明なポリプロピレン製ビーカーを、内筒（ $\phi=15\text{mm}$ ）にアルミ製円柱を用いた。ポリウレタンフォームが膨張する様子をビデオカメラで撮影するとともに、赤外線放射温度計をビーカー横に設置し、ビーカー側面の温度測定を行った。レオメータで計測されたトルクと回転角、並びにビデオ映像から計測された内筒の浸液長、二重円筒のギャップから、歪と応力を計算した。さらに振動試験では、それらの振幅と位相から弾性を表わす貯蔵弾性率 $G'$ と粘性を表わす損失弾性率 $G''$ を得た。レオメータ実験は以下の3つの方法で行った。まず周波数3.16Hz、歪み振幅0.1%の下、内筒を振動させ、 $G'$ と $G''$ の時間変化を検討した。次に、一つの測定サイクル内で周波数を31.6Hz→3.16Hz→0.316Hzと変化させ、弾性率の周波数依存性を検討した。3つ目の実験では、材料の硬化途中、0.2 ( $\text{s}^{-1}$ )の歪み速度条件で歪み量を0から10まで変化させた。代表的なサンプルは(株)島津製作所のinspeXio SMX-225CTでX線CTスキャンを行い、気泡構造を観察した。

結果及び考察：計測開始初期は、試料は液体状態であり、 $G''$ が $G'$ よりも大きい。材料のゲル化に伴いトルクが徐々に上昇し、約20分で $G'$ と $G''$ は等しくなる。その後 $G''$ は徐々に減少し、 $G'$ は一定値 $10^{6.3}\text{ Pa}$ に落ち着く。粘度とは異なり、マグマの剛性率( $G'$ の固体状態 $G'$ の極限值)は温度や組成によらずほぼ一定の値(約10 GPa)をとることが知られている(Dingwell and Webb, 1989)。本実験で使用したポリウレタンフォームの剛性率は、マグマより4桁ほど低い剛性率を持つことが分かった。また、材料の粘性を表わす $G''$ は、反応初期には微減しその後ゲル化に伴い徐々に上昇した。微減した時間は材料の温度が高い時間と一致しており、小岩井他、1989に従う。つまり、反応初期には、ポリマー形成による粘度上昇よりも温度上昇による粘度減少の方が勝っていたのでありと考えられる。2つ目の実験では、周波数が遅く低くなるにつれ $G'$ と $G''$ のクロスポイントに達する時間が遅くなることがわかった。クロスポイントに達した時間には、材料の緩和時間がその時の角周波数の逆数になっていると解釈できる。この測定結果により、材料の緩和時間が次第に遅くなり、固体的に振

舞うように遷移していく時間スケールが定量化されたと言える。最後にX線CTスキャン画像を撮ったところ、大変形を加えた3つ目の実験サンプルに含まれる気泡はチューブ状に伸びていた。

キーワード：ポリウレタンフォーム、チューブパミス、レオロジー、X線CT撮影

Keywords: Polyurethane foam, Tube pumice, Rheology, X-ray tomographic imaging

## 不均一な気泡分布をともなう発泡マグマ破碎過程の解明

## Mechanism of fragmentation of vesicular magma with non-uniform distribution of bubbles

\*丸山 祥吾<sup>1</sup>、青木 ヤマト<sup>1</sup>、黒川 紀章<sup>1</sup>、吉田 広志<sup>1</sup>、亀田 正治<sup>1</sup>、市原 美恵<sup>2</sup>、奥村 聡<sup>3</sup>、上杉 健太郎<sup>4</sup>\*Shogo Maruyama<sup>1</sup>, Yamato Aoki<sup>1</sup>, Noriaki Kurokawa<sup>1</sup>, Hiroshi Yoshida<sup>1</sup>, Masaharu Kameda<sup>1</sup>, Mie Ichihara<sup>2</sup>, Satoshi Okumura<sup>3</sup>, Kentarou Uesugi<sup>4</sup>

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

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

火山の「爆発的噴火」は、マグマの脆性破碎によるマグマ内ガスの急激な放出によって引き起こされると考えられている。そこで本研究では、脆性破碎、特に、発泡マグマ模擬材料(以下：試料)のバルク的な性質が流体的であるにかかわらず固体的な挙動を示す「脆性的破碎 (brittle-like fragmentation)」(Kameda et al. JVGR 2013)に着目し、そのメカニズムに対するマグマ内の気泡分布構造の影響を調べた。これまでの実験 (Shida et al. IAVCEI 2013; 亀田ら 地惑連合大会 2014) から、脆性的破碎を引き起こすき裂の進展は、試料内部における気泡分布の不均一な分布をきっかけに生じていると推察される。

試料の材料には、酸素気泡を含む水あめを用いた。これは、水あめの剛性率はマグマに近く、また、マグマ同様に幅広い粘度を持たせることができるためである。破碎の発生には急減圧装置を用いた。これは、試料を入れる圧力容器とプラスチック膜から構成されている。圧力容器に試料を入れ、目標圧力まで容器内に窒素ガスを充填する。その後、プラスチック膜に貼り付けられたニクロム線を通電加熱し、その熱でプラスチック膜を破ることで、急減圧を行う。

試料は、直径約20 mm、高さ約10 mmの半球状である。各試料は粘度が10, 50, 100 MPa・s, の三通り、試料のポイド率は数%~数10%の範囲に設定した。目標圧力は約2MPa, 減圧特性時間(容器内圧力が目標圧力の1/eになる時間)は約3 msとした。

試料の内部構造を把握するために、高輝度光科学センター(Spring-8)のビームラインにてX線マイクロCT撮影を行い、試料の透過像(15.5 $\mu$ m/pixel)を取得した。透過像から得たシノグラムを、CBP法を用いて再構成することで断面図を取得した。CT撮影は、加圧前、加圧後、急減圧後の3つのタイミングで行った。また急減圧時には高速度ラジオグラフィ(100fps)、高速度可視光カメラ(10,000fps)による撮影を行い、急減圧を受ける試料の挙動を動的に捉えた。

高速度可視光カメラにて撮影した、破碎の一例を図1に示す。この試料の粘度は50 MPa・s, 加圧後の平均ポイド率は7.6 %である。図1から、手前の部分で破碎が起こっている事が分かる。図2に断面図から得た、三次元像を示す。図2を見ると、手前には主に大きい気泡と、それに隣接している小さい気泡が存在しており(緑破線)、この二つの気泡が図1に示す破碎を引き起こしたと考えられる。

一方、同じ粘度の試料においても、全体的に中型の気泡が存在しており、全体的に破碎が起こるケースや、小さい気泡のみ存在しており、破碎が起こらなかったケース、も存在した。以上より、粘度が同じ場合においても、内部の気泡構造の違いにより、破碎する場合と破碎しない場合がある、ということが確認できた。

次に、急減圧を受ける試料の応力場について有限要素解析を行った。これまでの数値計算(黒川ら 地惑連合大会 2015)から、応力集中による臨界脆性度(Ichihara et al. JGR 2010)の上昇が破碎につながるということが分かっている。これまで用いた計算ジオメトリは球殻モデルであったため、今回は実験に用いた試料の三次元像を計算ジオメトリとし、応力場計算を行った。計算プラットフォームはCOMSOL Multiphysics ver5.0を用いた。用いた三次元モデル(図2)は、加圧後のCT撮影により得られた、断層画像を積み上げることで作成した。この方法によって、実際に急減圧実験に用いられた試料の表面や内部構造を再現した三次元モデルを作成することが可能である。ただし、コンピュータ資源の制約から、計算には破碎に大きく関与したと思われる気泡と、その周辺をトリミングした領域(図2)を用いた。計算に用いた各物理量は、急減圧実験のものを使用した。

計算結果(図3)をみると、大気泡と小気泡の間では応力集中が起こっており、実験結果を支持していた。また、試料の表面応力場の計算結果と、可視光による高速度カメラ撮影によって得られた破断面の画像を比較すると、周りよりも応力が高い部分と、破碎が起こった部分は一致していた。よって、応力計算により破碎箇所

の再現を行うことが可能である, ということが示唆された.

キーワード: マグマ、破碎、X線CT撮影、有限要素解析

Keywords: Magma, Fragmentation, X-ray CT, FEA

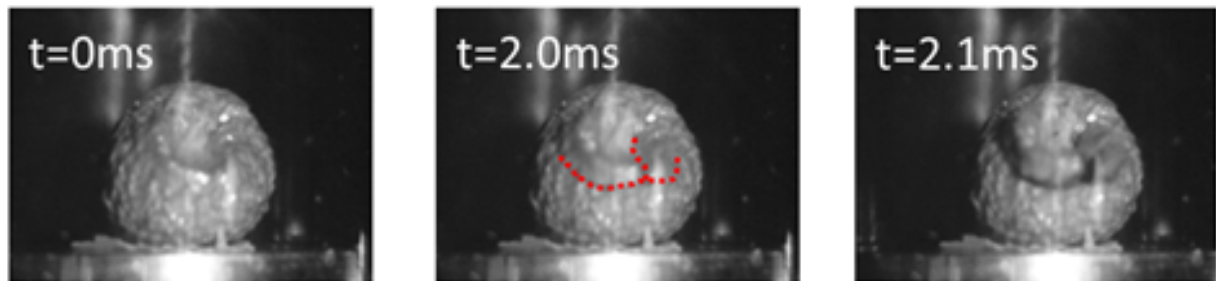


Fig.1 High-speed video images of fragmentation

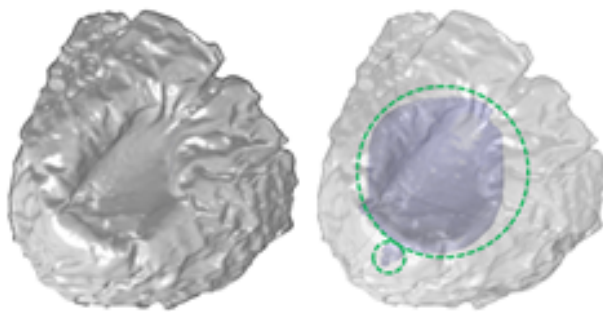


Fig.2 Surface and primary pores

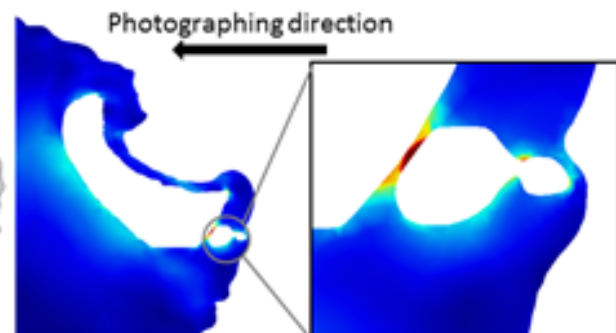


Fig.3 Stress at primary pores