

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¹、佐伯 和人¹

*Toshikazu Kawanami¹, Kazuto Saiki¹

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¹、マソッタ マッテオ²

*Atsushi Toramaru¹, Matteo Masotta²

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¹、市原 美恵¹

*Yo Kanno¹, Mie Ichihara¹

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¹、小屋口 剛博²*Tomofumi Kozono¹, Takehiro Koyaguchi²

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¹、小園 誠史²、小屋口 剛博³、長井 雅史⁴

*Satoshi Okumura¹, Tomofumi Kozono², Takehiro Koyaguchi³, Masashi NAGAI⁴

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¹、中川 光弘¹、井口 正人²

*Akiko Matsumoto¹, Mitsuhiro Nakagawa¹, Masato Iguchi²

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SiO₂=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SiO₂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¹、小園 誠史²

*Takehiro Koyaguchi¹, Tomofumi Kozono²

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¹*Takeshi Nishimura¹

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¹

*Setsuya Nakada¹

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6m³/sから時間とともにほぼ単調に減少した。約2m³/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6m³/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 m³/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（SiO₂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SiO₂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¹*Nobuo Geshi¹

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。10~100km³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であるが、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¹、清水 洋²

*Shiori Fujita¹, Hiroshi Shimizu²

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 km³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 km³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 km³/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 km³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km³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 km³/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 km³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 ~ 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 ~ 0 の解析解モデルによる計算値であった。初期体積2000 km³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 km³と大きくても体積増加量が約1 km³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km³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

