

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¹、後藤 忠広¹、原田 昌武²、雨谷 純¹、里村 幹夫²

*Hiroshi Takiguchi¹, Tadahiro Gotoh¹, Masatake Harada², Jun Amagai¹, Mikio Satomura²

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¹、松廣 健二郎¹*Takeo Ito¹, Kenjiro Matsuhira¹

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¹、西村 太志¹

*Ryosuke Nakajima¹, 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

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、噴煙量と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、噴煙量と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¹、熊谷 博之¹

*azusa mori¹, Hiroyuki Kumagai¹

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¹、寅丸 敦志²

*Yu Iriyama¹, Atsushi Toramaru²

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 dominance 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¹、坂井 剛善¹、市原 美恵²

*Yuki Suzuki¹, Takeyoshi Sakai¹, Mie Ichihara²

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 μ 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 μ m (Suzuki *et al.*, 2013). The ash particles (both pumice and free crystal) including large magnetite can be more than 500 μ 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 μ m to minimize cut-section effect. To acquire zoning profiles, point analyses were carried out at 5 μ m intervals and 10 μ m intervals for marginal part (up to 20 μ 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 μ 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¹、中川 光弘¹*Shumpei Yoshimura¹, Mitsuhiro Nakagawa¹

1.北海道大学・地球惑星科学

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University

<はじめに>

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。

<原理>

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。

<検証実験と結果>

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 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 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 μm のメルト包有物を両面に露出させた薄片を作製し、10 μm 径のビームで分析し、含水量を決定した (4.4 wt%)。CO₂ 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 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 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 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¹、隅田 育郎¹*Daichi Takahashi¹, Ikuro Sumita¹

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(τ_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¹、市原 美恵¹、寅丸 敦志²、桑野 修³

*Masatoshi Ohashi¹, Mie Ichihara¹, Atsushi Toramaru², Osamu Kuwano³

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 (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される。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ということがわかった。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¹、青木 ヤマト¹、黒川 紀章¹、吉田 広志¹、亀田 正治¹、市原 美恵²、奥村 聡³、上杉 健太郎⁴*Shogo Maruyama¹, Yamato Aoki¹, Noriaki Kurokawa¹, Hiroshi Yoshida¹, Masaharu Kameda¹, Mie Ichihara², Satoshi Okumura³, Kentarou Uesugi⁴

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 μ 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

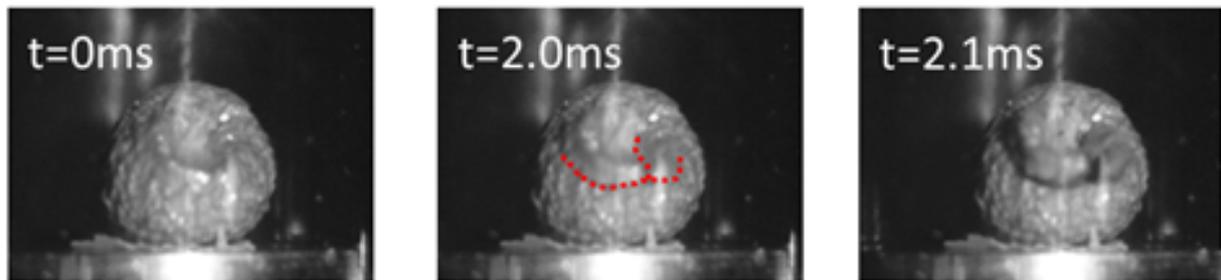


Fig.1 High-speed video images of fragmentation

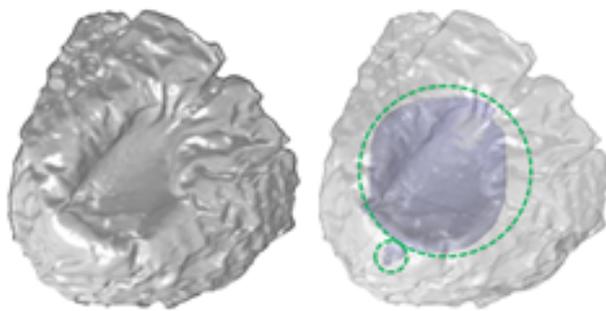


Fig.2 Surface and primary pores

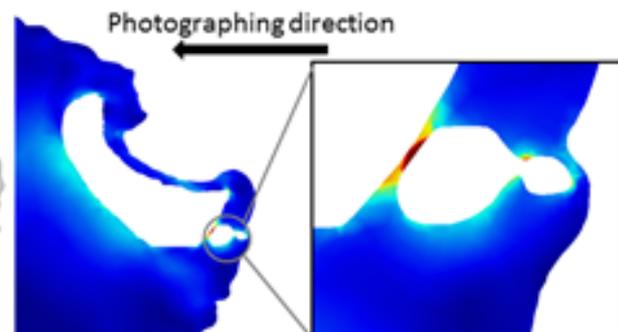


Fig.3 Stress at primary pores