

ブリッジマナイトのその場応力-歪測定

In-situ stress-strain measurement of bridgmanite

*辻野 典秀¹、山崎 大輔¹、櫻井 萌¹、XU Fang¹、肥後 祐司²

*Noriyoshi Tsujino¹, Daisuke Yamazaki¹, Moe Sakurai¹, Fang XU¹, Yuji Higo²

1. 岡山大学・惑星物質研究所、2. (財)高輝度光科学研究センター

1. Institute for Planetary Materials, Okayama University, 2. Japan Synchrotron Radiation Research Institute

In order to understand mantle dynamics in the Earth's interior, it is important to know the viscosity of the Earth's lower mantle. One dimensional viscosity models of the Earth's mantle were proposed by geophysical observations while there are large inconsistencies of viscosity (2~3 order magnitude) in the lower mantle between suggested models. Therefore it is important to determine viscosity of lower mantle minerals by high pressure experiments in order to understand mantle dynamics. In this study, we conducted in-situ stress-strain measurements of bridgmanite aggregate using Deformation-DIA type apparatus as Kawai-type.

In-situ measurements were conducted using SPEED-Mk.II, which is D-DIA apparatus, as Kawai-type apparatus at SPring-8 BL04B1. Mg-pure bridgmanite aggregates were used as starting material. Experimental conditions are 1473-1673 K and 27-28 GPa. Pressures were estimated by equation of state on bridgmanite (Katsura et al., 2009). WC second cubic anvils with slit or cone (5°) to take tomography and 2D X-ray diffraction, was used along X-ray path. X-ray radiographies of the strain markers were taken using an imaging system composed of a YAG crystal and a CCD camera. Two-dimensional X-ray diffraction patterns were corrected for 180-300 s using CCD detector. To calculate pressure and the stress magnitude of bridgmanite, (111) (112) (200) X-ray diffraction peaks were used.

Measured uniaxial stress and strain of bridgmanite during deformation experiments were 0.3-1.3 GPa and < 6 %. Flow law in dislocation creep is described by,

$$d\varepsilon/dt = A \sigma^3 \exp(-E^*/RT) \quad (1)$$

where $d\varepsilon/dt$ is strain rate, A is pre-exponent, σ is stress, E^* is activation energy, R is gas constant and T is temperature. Least squares fit of Eq. (1) to these viscosity data yielded $A = 10^{7.6 \pm 1.5}$ and $E^* = 372 \pm 40$ kJ/mol. This activation energy of flow law is similar to that of atomic diffusion of bridgmanite by Xu et al. (2011). This fact supported deformation mechanism could be dislocation creep controlled by dislocation climb.

キーワード：ブリッジマナイト、下部マントル、その場観察、粘性

Keywords: bridgmanite, lower mantle, In-situ measurements, viscosity

Diffusion creep and grain growth in forsterite + 15vol% enstatite aggregate

*仲小路 理史¹、平賀 岳彦¹、長尾 大道¹、伊藤 伸一¹、加納 将行¹

*Tadashi Nakakoji¹, Takehiko Hiraga¹, Hiromichi Nagao¹, Shin'ichi Ito¹, Masayuki Kano¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

In this study, we conducted grain growth and creep experiments on the same fine-grained forsterite + 15vol% enstatite aggregate under high temperature. We rapidly changed load applying to the sample for “stepped test”, which was aimed to infer creep mechanisms at a wide range of stress. We gradually changed temperature under application of a constant load for “gradual temperature change test” to collect vast numbers of stress/strain rate/grain-size/temperature data which allow their statistical analyses to obtain precise flow parameters such as pre-exponential factors and activation energies for given flow laws. Grain growth experiment with a long duration (= 500 h) at different temperatures was aimed to obtain a precise temperature dependency of grain growth. Dependency of n on stress was investigated from the results of stepped tests conducted at temperatures from 1150°C to 1370°C at stress ranging from 5 MPa to 300 MPa. We found monotonic decrease of stress exponent from 2 to 1 with increasing stress and its rapid increase to > 3 at high stress regime. We inferred that interface-reaction control diffusional creep and grain boundary (GB) diffusion creep worked sequentially at low stress, while GB diffusion creep and dislocation creep worked parallel at high stress condition. Activation energy of 432 kJ/mol for GB creep and pre-exponential factor of $6.15 \times 10^{11} \text{ um}^3\text{K/MPa/sec}$ were obtained from MCMC analyses mainly of the results of gradual temperature change tests. Grain growth experiment showed a monotonic increase in grains size of both forsterite and enstatite phases with increasing temperature at $> 1300^\circ\text{C}$.

Diffusivities estimated from creep and grain growth rates using classic GB diffusion creep and grain growth laws well coincide at all experimental ranges indicating that governing diffusional processes for creep and grain growth are identical. We compare our obtained diffusivities with the results of previous direct measurements on grain boundary self-diffusivities of MgO (*Gardes and Heinrich, 2011*) and Si (*Fei et al., 2016*) finding that MgO GB diffusion rather than Si explains our observations.

キーワード：上部マントルレオロジー、粒成長、拡散クリープ、かんらん石、拡散係数、律速元素

Keywords: upper mantle rheology, grain growth, diffusion creep, olivine, diffusivity, rate-controlling element

Creep behavior and high-pressure faulting during the olivine-spinel transformation in fayalite

*久保 友明¹、土井 菜保子¹、今村 公裕¹、加藤 工¹、肥後 祐司²、丹下 慶範²

*Tomoaki Kubo¹, Naoko Doi¹, Masahiro Imamura¹, Takumi Kato¹, Yuji Higo², Yoshinori Tange²

1. 九州大学、2. 高輝度センター

1. Kyushu University, 2. JASRI

Transformations from metastable olivine at large overpressures in cold subducting slabs may cause significant grain-size reduction and lead to the slab weakening and deep earthquakes. It is indispensable to investigate the coupling process between transformation and deformation under pressures of mantle transition zone. In the present study, we examined creep behaviors during the olivine-spinel transformation in fayalite (Fe_2SiO_4) up to ~ 14 GPa and observed some evidences for transformational faulting. Deformation experiments were conducted using a Deformation-DIA apparatus in the beamline of BL04B1 at SPring-8. After annealing polycrystalline fayalite at ~ 3.5 GPa and 900°C for 2 h, we observed the olivine-spinel transformation at ~ 6 -14 GPa and 873-1173 K with and without deformation (in uniaxial compression with constant strain rate of $3\text{-}5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). Stress-strain and transformation-time (strain) curves were simultaneously obtained from time-resolved measurements of two-dimensional X-ray diffraction patterns and X-ray radiography images using monochromatic X-ray (energy 50-60 keV). Overpressures needed for initiating the transformation increased with decreasing temperature from 1.5 GPa and 1173 K to 3.8 GPa at 973 K in the case of no deformation. When the sample was deformed, the overpressures decreased by ~ 0.5 -1 GPa, suggesting the enhancement of spinel nucleation by stress and/or deformation. Stresses in olivine, spinel, and the bulk sample (from stress marker arranged in tandem) were similar at the initial stage, and then spinel becomes dominant deformation phase at around 70% transformation. In these runs conducted at more than 973 K, transformation occurred at grain boundaries of parental phase, and the reaction rims were not formed. On the contrary, larger overpressures than ~ 5 GPa are needed to cause transformation at lower temperature of 873 K even with deformation, in which we observed faulting across the sample associated with lamellar intracrystalline transformations and micro fracture. The thin intracrystalline lamellae in olivine crystal developed almost parallel to the main fault and consisted of sub-micron fine-grained materials. This may correspond to transformational faulting as previously observed in germanate olivine at lower pressure conditions of ~ 5 GPa (Schubnel+, SCI13), however further studies with AE measurements and TEM analysis are needed to understand the detailed process. We did not observe clear evidence for the weakening of bulk sample due to the grain-size reduction as proposed in previous studies.

キーワード：高圧相転移、変形実験、D-DIA、X線その場観察、深発地震

Keywords: high pressure transformation, deformation experiment, D-DIA, in-situ X-ray observation, Deep Earthquakes

On ductile-to-brittle transition of ice-silica mixtures under compressive loading

*Minami Yasui^{1,2}, Erland M. Schulson², Carl E. Renshaw^{2,3}, Daniel Iliescu², Charles P. Daghljan⁴

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Thayer School of Engineering, Dartmouth College, 3. Department of Earth Sciences, Dartmouth College, 4. Geisel School of Medicine, Dartmouth College

On the bodies in the solar system such as Earth, Mars, and icy satellites, various landforms related to the flow and the fracture of ice-rock mixtures are found; for examples, glaciers on Earth, fretted terrains on Mars, relaxed craters and trough terrains on Europa and Ganymede. To clarify the formation processes and structures of these features, it is necessary to understand the rheological properties of ice-rock mixtures.

Ductile-to-brittle (D/B) transition is one of the most important rheological properties to determine the tectonic style on the bodies, flow features and fracture patterns. The D/B transition of water ice has been studied by some researchers and a theoretical model for the strain rate corresponding to the D/B transition was proposed [Schulson, 1990; Renshaw and Schulson, 2001]. This model indicates that the transitional strain rate depends on ice grain size, temperature, confining pressure, and degree of pre-cracks. However, the D/B transition of ice-rock mixtures has not been studied yet. In this study, we carried out compression experiments on ice-rock mixtures to examine the D/B transition. One of the parameters which is expected to affect the D/B transition of ice-rock mixture is a rock content. So we examined the effect of rock content on D/B transition and compared the experimentally observed transitional strain rates to predictions of the model proposed earlier.

The samples were prepared by mixing ice seeds (diameter < 850 μm) and amorphous silica beads with a diameter of 0.25 μm . To fill spaces and to reduce porosity of sample as soon as possible, the distilled water at 0° C was filled. The samples were frozen over a period of one day in a cold room set at -10° C. We made samples with silica volume fraction f of 0, 0.06, and 0.18. The sample has a cylindrical shape with a diameter of 30 mm and a height of 30 or 60 mm. We performed unconfined compression experiments under constant strain rate from 10^{-5} to 0.6 s^{-1} in a cold room at Ice Research Laboratory, Dartmouth College. The room temperature was set to be -10° C.

The deformation behavior, ductile or brittle, under compressive loading is characterized by the shape of stress-strain curve and by the relationship between peak stress on the stress-strain curve and strain rate. In the case of water ice, the peak stress increased exponentially with increasing strain rate in the ductile regime while it decreased with increasing strain rate in the brittle regime. In the case of ice-silica mixture with $f=0.06$, the peak stress change with strain rate was similar to that with pure ice ($f=0$), that is, the peak stress reached a maximum at the D/B transition. However, in the case of ice-silica mixture with $f=0.18$, the peak stress continued to increase with increasing strain rate. The stress-strain curves for $f=0.18$ remained ductile-like for all strain rates, so the D/B transition for $f=0.18$ was expected to be greater than the maximum strain rate (0.6 s^{-1}) explored in this study. Consequently, the transitional strain rates for pure ice and ice-silica mixtures were determined; 10^{-3} - 10^{-2} s^{-1} for pure ice, 10^{-2} - 10^{-1} s^{-1} for $f=0.06$ and $> 0.6 \text{ s}^{-1}$ for $f=0.18$. We found that the transitional strain rate increased with increasing silica volume fraction.

Finally, we compared the theoretical value predicted from the model by Schulson [1990] to the experimental value. In the case of pure ice, the theoretical transitional strain rate was in good agreement with the measured value. On the other hand, in the case of ice-silica mixtures the theoretical value was larger than the measured value. This might be caused by high sensitivity of the transitional strain rate to the stress exponent n , in the power law relationship between peak stress and strain rate ($d\varepsilon/dt = B\sigma_{\text{peak}}^n$).

Schulson [1990], *Acta Metall. Mater.* 38, 1963-1976.

Renshaw and Schulson [2001], *Nature* 412, 897-900, doi:10.1038/35091045.

Keywords: ductile-to-brittle transition, ice-silica mixtures, silica volume fraction, stress-strain curve, compressive strength

微細粒多結晶氷の変形における固体微粒子と結晶粒界の効果について

Effect of solid particles and grain boundary on deformation of fine-grained polycrystalline ice

*猿谷 友孝¹、中島 甲葵¹、繁山 航²、高田 守昌¹、本間 智之¹、東 信彦¹、東 久美子^{2,3}

*Tomotaka Saruya¹, Koki Nakajima¹, Wataru Shigeyama², Morimasa Takata¹, Tomoyuki Homma¹, Nobuhiko Azuma¹, Kumiko Goto-Azuma^{2,3}

1. 長岡技術科学大学、2. 総合研究大学院大学、3. 国立極地研究所

1. Nagaoka University of Technology, 2. SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Research), 3. National Institute of Polar Research

グリーンランド氷床の変化は全球規模の気候変動において大きな影響を持っている。氷床氷の挙動や質量変化を理解することは、海面上昇や海洋循環変動などの高精度予測に必要不可欠である。特にNEGISと呼ばれるグリーンランド北東部の氷流は周囲と比べて流動速度が大きく、その原因解明が求められている (Joughin et al., 2010)。氷床流動は大きな時空間スケールを持っているが、その流動則を支配するのは氷床を構成する多結晶氷のマイクロスケールの物理現象であることがわかってきた (Faria et al., 2014)。大粒径の多結晶氷の流動則は室内実験によってよく理解されているが、実際の氷床氷は様々な要因によって結晶組織が複雑化されている。氷床コアに局所的に分布するクラウドバンドと呼ばれる層は不純物を多く含んでおり、周囲と比べて結晶粒径が微細になっている。固体微粒子と氷の相互作用についてはこれまでも議論されてきたが

(Rempel and Worster, 1999, Durand et al., 2006)、多結晶氷や氷床コアにおける詳細な影響については未解明な点が多く残されている。

我々は微細粒多結晶氷の力学特性と固体微粒子の影響について調べるためにシリカをドーピングした人工氷（粉氷を加圧して得られた圧密氷）を用いて様々な温度圧力条件の下での塑性変形実験を行った。一連の実験の結果、1)シリカ含有氷は純水氷に比べて結晶粒径が小さいこと、2)シリカ含有氷の変形速度（歪速度）は純水氷に比べて速いこと、3)純水氷・シリカ含有氷ともに最小歪速度（定常クリープが）が現れないことが明らかになった。一般的な金属は不純物を含むと塑性変形しにくくなるという性質を持っているが、固体微粒子含有によって歪速度が大きくなるという本結果は金属とは逆の傾向である。大粒径の多結晶氷の塑性変形は転位クリープが支配的であることが先行研究から明らかになっており、様々な氷床流動モデルで採用されてきた (Cuffey and Paterson, 2010)。しかしながら、一般的に転位クリープは粒径に依らないため、本実験で得られた粒径依存性は結晶粒界が塑性変形に影響している可能性を示唆している。

本発表では様々な温度圧力条件下で行った塑性変形実験を元に、固体微粒子が多結晶氷の流動則や結晶組織に与える影響、そしてグリーンランド氷床流動の高速化との関連性について議論する。

キーワード：氷床流動、固体微粒子

Keywords: ice-sheet flow, solid particle

原子拡散から探る氷とその高圧相のレオロジー

Diffusion studies of water ice and its high-pressure phases: Implications for rheology

*野口 直樹¹、奥地 拓生¹

*Naoki Noguchi¹, Takuo Okuchi¹

1. 岡山大学惑星物質研究所

1. Institute for Planetary Materials, Okayama University

Water ice is a primary constituent of the crusts and mantles of the large icy bodies such as Galilean satellites and Edgeworth-Kuiper belt objects. Understanding rheological properties of water ice including its high pressure phases are essential to understanding the dynamics of the large icy bodies. The real icy crusts and mantle include other constituents such as ammonia, Mg- and Na- sulfates, methane hydrate, and non-water ices. The influence of the sub-constituents on the dynamics is never negligible. The dynamics model based on the unary water system, however, will give some important implications, and be the useful approximation.

Our motivation for the rheological studies of water ice is the first step to understanding the dynamics of the real large icy bodies. The differential stress driving the convections of the icy crust and mantle is very low below 0.01 MPa. The deformation experiments at low-stress conditions are technically difficult. Thus the rheological properties of water ices must be examined by another approach. Newtonian-rheological model is most plausible under such low-stress condition. The Newtonian-rheological properties can be inferred from their diffusivities and the theories of diffusion creep. The ordinary isotope-diffusion method using the mass-spectrometer cannot be applied to the ice diffusion study. To defeat this problem, we have developed the isotope-diffusion method using micro-Raman spectroscopy. First, to conduct the diffusion experiments, the method for the quantitative analysis of isotope tracers using micro-Raman spectroscopy was constructed. The diffusion experiment of poly-crystalline ice I_h under confining pressure was carried out by using this technique, and the grain boundary diffusion coefficient was constrained. Further, we applied this method to the high pressure experiment using diamond anvil cell, and the diffusion coefficients of high-pressure phases were determined. In my presentation, I would like to talk about our efforts to determining the rheological properties of the ices and its high pressure phases through the diffusion studies following a short review for the previous studies. In addition, I will also discuss the condition requires to trigger convection in the large icy bodies based on the results of the diffusion experiments.

キーワード : 氷、拡散、レオロジー、高圧、氷天体

Keywords: ice, diffusion, rheology, high pressure, icy bodies

モンモリロナイト-水系のコンシステンシー特性と降伏応力，粘性 Changes of viscosity and yield stress of montmorillonite-water system with reference to consistency limits

*藤本 光一郎¹、小椋 隆馬¹

*Koichiro Fujimoto¹, Ryuma Ogura¹

1. 東京学芸大学

1. Tokyo Gakugei University

Montmorillonite abundantly exists in the slip zones such as earthquake faults and landslides. Water contents are an important factor for controlling slip behavior, since montmorillonite contains a considerable amount of water molecules compared with other clay minerals. Clay-water system is known to act as a Bingham fluid and we estimated yield stress and Bingham viscosity at different water contents from 100 to 1000 % using a rheometer (Brookfield Rheometer). Starting material is montmorillonite (JCSS-3101; Na-montmorillonite from Tsukinuno, Yamagata Prefecture, NE Japan) provided by Japan Clay Science Society. Yield stress drastically decreases from ca. 20000 Pa (100% water content) to ca. 3000 Pa (600%), and it does not remarkable change at higher water content conditions. Bingham viscosity also large decrease from 1.6 Pa · s (100 % water content) to 0.4 Pa · s (600 %) and then it does not show remarkable change at higher water contents. Thus, there is an inflection point at 600%. The consistency limits of montmorillonite are accepted as ~ 10 %, 54 ~ 98 %, and 290 ~ 710 % for the shrinkage, plastic, and liquid limits, respectively. The inflection point is well correlated to liquid limit of montmorillonite.

キーワード：モンモリロナイト-水系、すべり集中帯、断層ガウジ

Keywords: Montmorillonite-water system, Slip zone, Fault gouge

モンモリロナイトの摩擦強度における湿度及び層間陽イオンの影響

Effect of humidity and interlayer cation on frictional strength of montmorillonite

*手塚 寛¹、片山 郁夫¹、佐久間 博²、田村 堅志²

*Hiroshi Tetsuka¹, Ikuo Katayama¹, Hiroshi Sakuma², Kenji Tamura²

1. 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻、2. 物質・材料研究機構

1. Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, 2. National Institute for Materials Science

【はじめに】

スメクタイトは断層近傍で普遍的に見られる鉱物で (Ohtani et al., 2000; Schleicher et al., 2006; Kameda et al., 2015)、低い摩擦係数で特徴づけられることから (Summers and Byerlee, 1977; Shimamoto and Logan, 1981)、断層運動において重要な役割を果たしていると考えられている (Ikari et al., 2007; Ujiie et al., 2013)。スメクタイトは、圧力・温度が増加するほど層間に含まれる水の量が減少するので、地下深部ほど含水量が減少すると考えられる (Bird, 1984)。また、天然には、層間に存在する交換性陽イオンの異なるスメクタイトが存在し、層間陽イオンの異なるスメクタイトの量比が深さによって変化することも知られている (Kameda et al., 2016)。したがって、水和状態や層間陽イオンの影響を評価することは、地下のスメクタイトの摩擦特性を理解する上で重要である。しかし、層間陽イオンを交換したスメクタイトについて、水和状態を制御して摩擦実験を行った研究はほとんど存在しない。そこで本研究では、Naモンモリロナイト (典型的なスメクタイト) と層間陽イオンをCaに交換したモンモリロナイトを用いて、水和状態を制御した条件下で摩擦実験を行った。

【手法】

水和状態は試料周りの湿度を制御することによって制御できるので、広島大学の二軸摩擦試験機に湿度制御システムを新設した。このシステムは、内部に試料をセットする圧力容器ユニットと、圧力容器内に蒸気を送り込む蒸気生成ユニットの2つのユニットから成る。圧力容器内の温度と圧力容器に送り込む蒸気の温度を独立に制御することにより、蒸気圧を独立に制御し、試料周りの湿度を制御した。本研究では、相対湿度 (RH) が10・30・50・70・90%の条件で、Naモンモリロナイトと層間陽イオンをCaに交換したモンモリロナイトの粉末を斑レイ岩ブロックの間に挟んでせん断させた。すべての実験で温度は95℃、垂直応力は10MPa、せん断速度は3 μm/sとした。

【結果】

NaモンモリロナイトとCaモンモリロナイトともに、湿度が増加するのに伴って摩擦係数が減少する傾向を示した。RH 10%ではNaモンモリロナイトが0.33、Caモンモリロナイトが0.25なのに対して、RH 90%ではNaモンモリロナイトが0.062、Caモンモリロナイトが0.037であった。また、同じ湿度では常に、CaモンモリロナイトよりもNaモンモリロナイトのほうが高い摩擦係数を示した。

【考察】

CaモンモリロナイトがNaモンモリロナイトよりも高い摩擦強度を示す傾向は、Behnsen and Faulkner (2013) と同様である。彼らによれば、水和エネルギーが小さいほど層間の距離が近く結合力が強まるため、Ca²⁺よりも水和エネルギーの小さいNa⁺を層間にもつNaモンモリロナイトのほうが高い摩擦強度を示す。湿度の増加に伴って摩擦係数が下がる傾向は、水和状態を変化させた先行研究 (Bird, 1984; Ikari et al., 2007) と調和的である。水和に伴う摩擦係数の低下を説明する主なメカニズムとして、層間の膨潤に原因を求める説 (Bird, 1984) と粒子間の膨潤に原因を求める説 (Moore and Lockner, 2007) がある。常圧でのXRDの結果によれば膨潤による層間距離の変化は湿度の増加に対して不連続に起きている (Morodome and Kawamura, 2009) のに対して、層間や粒子間の含水量を含めたモンモリロナイト全体での含水量は、湿度の増加に対して連続的に増加している (Xu et al., 2000)。つまり、粒子間の膨潤は湿度の増加に伴い連続的に

生じる。本研究で得られた摩擦係数の値は湿度の増加に対して連続的に減少していることから、湿度の増加に伴うモンモリロナイトの摩擦係数の減少は、主に粒子間の膨潤に起因するものと解釈できる。本研究の結果から、水和状態と層間陽イオンの影響が摩擦強度に大きな影響を与えることが分かる。特に、CaモンモリロナイトよりもNaモンモリロナイトの摩擦強度が高いという結果が完全に水和した状態だけでなく（Behnsen and Faulkner, 2013）、乾燥状態のモンモリロナイトにおいても得られたことは、地下深部での摩擦強度を考える上で重要である。

キーワード：モンモリロナイト、水和、湿度、層間陽イオン、摩擦強度

Keywords: montmorillonite, hydration, humidity, interlayer cation, frictional strength

モンモリロナイトの定方位度が摩擦強度に与える影響

Effect of preferred orientation on the frictional strength of montmorillonite gouge

*佐久間 博¹、河合 研志²、片山 郁夫³

*Hiroshi Sakuma¹, Kenji Kawai², Ikuo Katayama³

1. 物質・材料研究機構、2. 東京大学、3. 広島大学

1. National Institute for Materials Science, 2. University of Tokyo, 3. Hiroshima University

断層運動や地滑りの発生において、すべり面に粘土鉱物が存在する場合があることが、これまでの調査から明らかになってきている。粘土鉱物の多くは1 nmの厚みの層を最小単位とする平板状の結晶構造を持ち、比表面積が大きい。このような粘土鉱物の表面は水との親和性が高く、水存在下で膨潤する特徴を持つ。粘土鉱物の層間に水が入ると、その摩擦特性が変化するため、どのような環境の下で膨潤し、摩擦特性がどのように変化するかを知ることが重要である。

また、粘土鉱物はアスペクト比の大きな平板状の構造を持つことから、そのすべり面に対する定方位度によっても摩擦特性が変化することが予想される[1]。定方位度は粘土鉱物の生成条件によって異なるため[2]、様々な定方位度による摩擦強度を知ることが重要となる。本研究では、膨潤性の粘土鉱物の一つであるモンモリロナイトについて、乾燥条件下で定方位度により摩擦特性がどう変化するかを、2軸摩擦試験機により評価した。

試料として定方位度の異なる二種類のモンモリロナイト粉末を用意した。定方位度はX線回折により定量した。摩擦試験の前にモンモリロナイトの層間水の脱水状態を知るため、熱分析(TG-DTA)を実施した。それぞれの試料を70、100、120°Cのオープン中で一晩乾燥させ、乾燥度の影響を調べた。結果として、定方位度の低い試料では、120°Cの場合数時間以内で層間水の脱水がほぼ完了するが、定方位度の高いモンモリロナイト試料では、120°Cでも層間水の脱水に一晩以上の時間がかかり、層間水を保持しやすいことがわかった。これは、定方位度の高い試料の低ガス透過性が一つの要因と考えられる。

熱分析の結果を踏まえて、これらの試料を一晩オープンで乾燥し、すぐに湿度制御下のチャンバー内に移動し、二軸摩擦試験を実施した。摩擦試験においては法線応力を5 MPaから40 MPaまで変化させ、それぞれの応力下でせん断応力を測定した。

(1) 定方位度の高い試料について、乾燥度の違いによる摩擦強度の変化：低法線応力下では乾燥の程度が低いほど、せん断応力が減少した。一方で高法線応力下では100と120°Cの乾燥度に依存せず、せん断応力に差がほとんどなかった。このことは、乾燥度の低い試料では層間に部分的に水を含み摩擦強度が低いが、高法線応力下では層間水の脱水が起こり、摩擦強度が増大したと解釈できる。

(2) 定方位度の違いによる摩擦強度の変化：定方位度の高い試料の方が低い試料よりもせん断応力が大きく、法線応力依存性も大きいことがわかった。これらの結果は、乾燥下におけるモンモリロナイト表面の凝着力の影響を捉えている可能性があり、本発表で詳細を議論する。

References

- [1] Wintsch, Chrstoffersen, Kronenberg (1995) *J. Geophys. Res.*, **100**, B7, 13021-13032.
- [2] Wenk, Kanitpanyachoen, Voltolini (2010) *J. Struct. Geol.*, **32**, 478-489.

キーワード：二軸摩擦試験、法線応力依存性、水和、膨潤、粘土鉱物

Keywords: Double shear test, Dependence of normal stress, Hydration, Swelling, Clay minerals

bruciteの(001)面における真の接触面での摩擦特性

Frictional characteristics of brucite (001) plane on the real contact area

*奥田 花也¹、河合 研志²、佐久間 博³

*Hanaya Okuda¹, Kenji Kawai², Hiroshi Sakuma³

1. 東京大学理学部地球惑星環境学科、2. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、3. 国立研究開発法人物質・材料研究機構

1. Department of Earth and Planetary Environmental Science, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 3. National Institute for Materials Science

断層に多く存在する層状鉱物は、断層のすべりを支配すると考えられ、その摩擦特性を考察することは重要である。一般的な鉱物の摩擦係数が0.6-1.0であるのに対して層状鉱物の摩擦係数は0.2-0.4と低い値を持つ(Byerlee 1978; Behnsen and Faulkner 2012)。この弱い摩擦係数は結合力の相対的に弱い(001)面をせん断面に配向することによって支配されていると考えられている(Moore and Lockner 2004)。しかしながら(001)面が低摩擦であるという実験事実は与えられていなかった。そこでKawai et al. (2015)は、白雲母単結晶の(001)面での摩擦試験を行い、白雲母の(001)面の摩擦係数は不定配向試料の半分ほどであり、層状鉱物の低い摩擦係数には、すべり面となる(001)面の摩擦特性が重要であることを示唆した。しかしなぜ(001)面の摩擦係数が小さいのか？についてまだ理解されていない。層状鉱物の摩擦係数はGiese (1978)によって決定された静電的に(001)面の層間の結合エネルギー(Interlayer Bonding Energy, ILBE)に比例すると考えられてきた(Moore and Lockner 2004)が、近年の実験や理論計算によれば鉱物に固有のILBEと摩擦係数に比例関係はほとんど確認されなかった(Behnsen and Faulkner 2012; Sakuma and Suehara 2015; Kawai et al. 2015)。そのため鉱物に固有のILBEが変わる、層状鉱物の摩擦特性を説明する物理過程の理解が望まれている。本研究では、断層中の蛇紋岩に含まれており、かつ単位格子中の原子数が少なく大量の計算を行うのに適しているMgの水酸化物である層状鉱物bruciteの(001)面の真の接触面での摩擦特性を理論的に調べることを試みた。

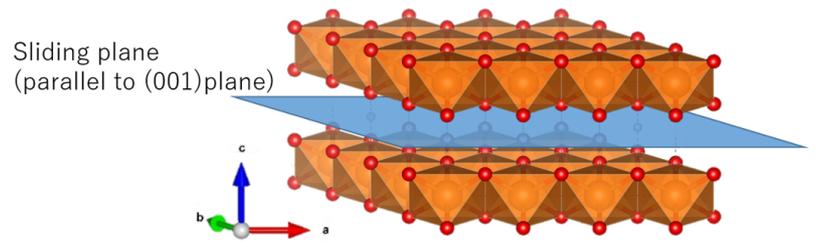
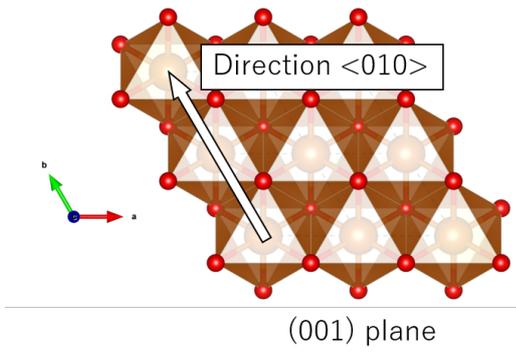
摩擦時における(001)面間のポテンシャルエネルギー面を第一原理電子状態計算によって求め、Zhong and Tomanek (1989)の手順に従って、(001)面の真の接触面における摩擦特性を調べる。具体的には、bruciteの二層を考え、その中間に存在する(001)面に平行な面をすべり面とし、片方の層をすべり面に対して水平方向及び鉛直方向に微小変化させILBEを計算し微分をとることによって、すべり面における真の接触面における垂直応力とせん断応力を求め、これらの関係からMohr-Coulombの破壊条件を用いて摩擦特性を見積もった。

予察的な結果によれば(001)面での<010>方向のすべりでは内部摩擦角=0.048、粘着力=0.371GPaという結果が得られた。

現在(001)面全面におけるILBEの計算を行っており、bruciteの(001)面の任意のすべり方向における摩擦特性を求め、摩擦特性の方向依存性を議論する。また佐久間ら(2016)や河合ら(2016)で求められている他の層状鉱物(lizardite, talc, pyrophyllite, muscovite)との比較も行い、鉱物間の真の接触面での摩擦特性の違いについて議論を行う。

キーワード：層状鉱物、(001)面、摩擦特性、層間結合エネルギー、第一原理電子状態計算

Keywords: Sheet-structure minerals, (001) plane, Frictional characteristics, Interlayer bonding energy, The first principles calculation of electronic structure



Evolution of the deformation band in the numerical sandbox experiment with 2.4 billion DEM particles

*古市 幹人¹、西浦 泰介¹、桑野 修¹、堀 高峰¹

*Mikito Furuichi¹, Daisuke Nishiura¹, Osamu Kuwano¹, Takane Hori¹

1. 海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We modeled a deformation mechanism of an accretionary prism using the numerical simulation of the sandbox experiment. We solved the motion of 2.4 billion solid particles with Discrete Element Method (DEM) on massively parallel supercomputer system. This huge number of particles enabled us to use the realistic parameters of the sand. Thus, we could successfully reproduce the prism evolution which was consistent with the lab sandbox experiment. One of the advantages of numerical simulation over the analog experiment is the ability to analyze the detailed deformation processes of the granular layer in 3D. We analyzed the mechanical state of particles inside the deformation band to reveal the relations between the growth mode and the wavelength of the deformation. From the results, we discuss the characteristic length to change the deformation mode between the discrete and continuous behaviors.

キーワード：付加体、砂箱実験、DEM

Keywords: accretionary prism, sandbox, DEM

断続振動下における粉体対流速度スケーリング Scaling of convective velocity in intermittently vibrated granular packing

*飯川 直樹¹、バンディ マヘッシュ²、桂木 洋光¹

*NAOKI IKAWA¹, Mahesh M Bandi², Hiroaki Katsuragi¹

1. 名古屋大学、2. 沖縄先端科学技術大学院大学

1. Nagoya University, 2. OIST

地上の室内実験で粉体に振動を加えると粒子の対流運動が生じる。この粉体対流と呼ばれる現象は、小惑星イトカワのようなレゴリスで覆われた天体表面においても起きる可能性がある[1,2]。そのため最近では、天体表面への応用を考慮し、重力依存性を内包した粉体の対流速度と振動強度の関係式[3]が提案されている。しかし、この関係式は粉体層に定常的な振動を与えた際に求められたものであり、粉体層が静止状態と流動状態を繰り返す、実際の天体表面のような断続振動下での対流速度に関する定量的な議論はこれまで十分になされてこなかった。そこで、本研究では粉体層に断続的な振動（タッピング）を加える実験を行い、その際の粒子の運動を解析することにより、断続振動下の粉体対流速度と振動強度との関係を調べた。

実験では、大小2種類の大きさ（直径がそれぞれ15 mm と10 mm）の円盤状物質を粉体構成粒子とし、これを重力方向に直立した実験容器内に2次元的に充填した。その後、電磁式加振装置を用いて実験容器に対して鉛直方向のタッピング（一周期の正弦波振動）を2秒間隔ごとに1,000回加えた。加える振動の強さは最大振動加速度と重力加速度の比を表す Γ ($\Gamma = A(2\pi f)^2/g$; A : 振動振幅, f : 振動数, g : 重力加速度) を用いて $\Gamma = 2.5, 5, 10, 20$, そのそれぞれの場合に $f = 50, 100, 200$ Hz と系統的に変化させ実験を行った。

解析では、各振動後の粒子配置の変化をスチールカメラによって取得し、粒子追跡法を用いて各粒子の速度を算出した。さらに、各粒子の速度から粒子の集団運動に対する渦度を算出することにより、断続振動下における対流形成を定量的に評価した。そして、対流運動時における粒子の平均速度 v を重力と粒子径が作る特徴速度 $(gd)^{1/2}$ で無次元化した速度 v^* と、振動と重力のエネルギーバランスを表す無次元パラメーター $S = (2\pi Af)^2/gd$ との間におけるスケーリング関係を求めた。

その結果、断続振動下においても、外部からの振動によって粉体層内の粒子が運動する場合には、粒子による対流（渦）運動が形成されており、その際の v^* と S の間におけるスケーリング関係は $v^* \sim S^{0.56}$ で表されることが分かった (Fig.1)。この結果は断続振動下においても対流速度がほぼ $S^{1/2}$ に比例することを示しており、定常振動下における対流速度のスケーリング関係[3]と整合的である。したがって、粉体層に加える振動の断続性が粉体粒子の対流運動に与える影響は小さいと考えられる。

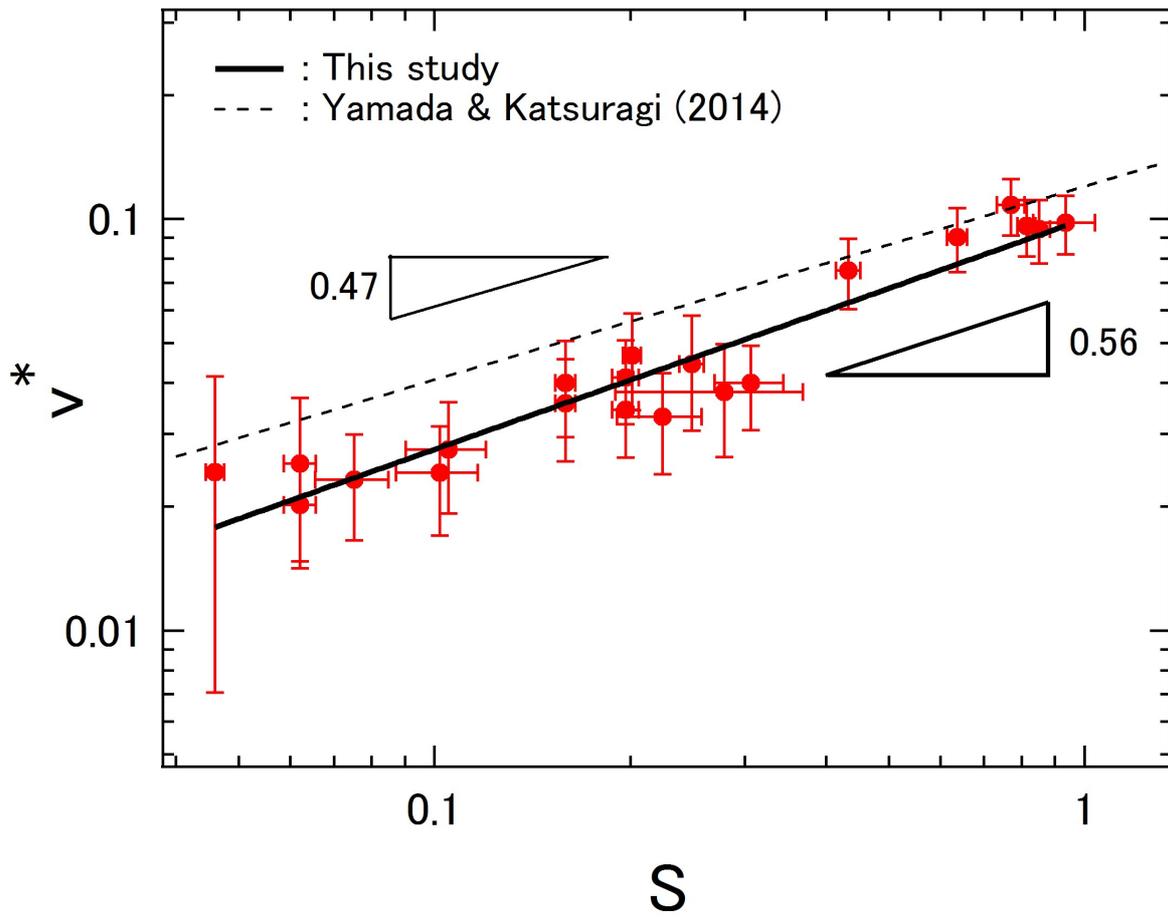
[1] H. Miyamoto *et al.*, *Science* **316**, 1011 (2007).

[2] T. M. Yamada *et al.*, *Icarus* **272**, 165 (2016).

[3] T. M. Yamada and H. Katsuragi, *Planet. Space Sci.* **100**, 79 (2014).

キーワード：粉体対流、スケーリング、レゴリス

Keywords: granular convection, scaling, regolith



脱水を伴う固着すべり時の応力降下と再来周期に関する反応速度論的研究 Kinetics study on stress drop and recurrence interval during stick-slip with dehydration

*岩崎 将明¹、武藤 潤¹、長濱 裕幸¹、佐々木 勇人²

*Masaaki Iwasaki¹, Jun Muto¹, Hiroyuki Nagahama¹, Yuto Sasaki²

1. 東北大学大学院理学研究科地学専攻、2. 東京大学地震研究所（大学院理学系研究科）

1. Department of Earth Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo (Graduate School of Science)

脱水反応を伴う岩石の変形実験から、物質の相変化および生じた水が岩石の力学的挙動に影響を与えることがわかってきた。特に、摩擦係数や間隙流体圧によって地震発生域の安定性は変化すると考えられている。力学的性質の変化から不安定すべりやひずみの局在化に及ぼしている影響に焦点を当てた研究が多く行われている（たとえば、Proctor and Hirth, 2015）。一方で、実験中の脱水反応によって生じる水の体積が、試験機と圧力計をつなぐ配管の体積と比較して小さいため、正確な測定が難しい。そのため、現在では間隙水を推定する、あるいは間隙流体圧を制御した実験を行うことで、力学的挙動を測定する手法がとられている（たとえば、Leclere et al., 2016）。この手法を用いた先行研究では、複数回のすべりイベントにわたって測定しているものはなく、脱水反応と再来周期を結びつける研究は行われてきていない。また、脱水反応を力学的性質からではなく、相変化における反応速度論的に議論した研究も少ない。Sawai et al. (2013) では蛇紋岩の脱水反応の際に反応速度論的モデルを適用し、実験中の脱水反応を議論している。しかし、同様に複数回のすべりイベントにわたって適用した研究はなく、再来周期について反応速度論的に議論した研究は行われてきていない。しかし、脱水反応が続いている中で複数回のすべりイベントが生じるならば、その再来周期を反応速度論的に記述することが可能だと考えられる。

本研究では佐々木ほか（2016）で行われた三軸圧縮試験機のデータを用いて解析を行った。この実験では、プレカット斑レイ岩ピストンで挟んだ焼石膏ガウジ試料について、封圧10~200 MPa、室温~180°C下でガス圧試験機による変形実験を行った。その結果、200 MPa, 70°Cでは、相転移せず、固着すべりを示し、力学強度は増加したのに対し、脱水条件付近と考えられる200 MPa, 110°C以上では固着すべりの挙動が衰え、歪弱化し、最終的に強度がおよそ0となった。

得られたデータから実験封圧における再来周期および応力降下量の計算を行った。その結果、脱水反応を示さない実験では、再来周期および応力降下量と封圧の間に線形比例の関係が見られた。一方で、脱水反応を示した実験では、一定封圧下にも関わらず、再来周期および応力降下量ともに、時間とともに減少が認められたため、有効封圧が減少していると考えられる。このことから、有効圧の法則を用いて、間隙流体圧の発展の推定を行った。更に、それを反応速度論的に議論するため、相変化を物理化学的に記述する際に用いられるAvramiの式で、実験開始時刻における間隙流体圧の変化に対してフィッティングを行った。その結果、間隙流体圧の発展がAvramiの式を用いて記述できることが分かった。異なる鉱物にも本研究と同様の速度論的なアプローチをすることで、脱水反応で生じる力学的性質の違いなどを評価することができると考えられる。

ゲルの摩擦実験におけるアスペリティ接触と摩擦構成関係

Asperity contact and constitutive relations in gel friction

*山口 哲生¹

*Tetsuo Yamaguchi¹

1. 九州大学大学院工学研究院

1. Graduate school of Engineering, Kyushu University

アスペリティ接触は、摩擦、とくにスリップの開始やスティックスリップ運動に重要な役割を果たすと信じられている。しかしながら、アスペリティを制御することによって巨視的な振る舞いや摩擦構成則への影響をみる研究は非常に少ない。そこで今回は、やわらかいゲル表面に位置や形状を精密に制御しつつ配置することによって、ミクロな接触状態とマクロなすべり挙動との関係を調べる研究を行った。すると、アスペリティの曲率半径を大きくするにつれて、摩擦構成則が速度強化から速度弱化に遷移することを見出した。また、十分な厚みをもつ試料に関しては、アスペリティ半径の増加、荷重の減少、すべり速度の上昇とともに、すべりの規模が大きくなり、イベント継続時間が減少することが分かった。また、本研究の結果をもとに、速度状態依存摩擦則を改良することによる摩擦挙動の説明も併せて試みた。

キーワード：摩擦構成関係、スティックスリップ、ゆっくりすべり、アスペリティ、室内実験

Keywords: frictional constitutive relation, stick-slip, slow slip, asperity, laboratory experiment

御嶽山と桜島における火山泥流レオロジーの比較

Rheological variety of mixtures of water and ash collected at Ontake and Sakurajima volcanoes

*黒川 愛香¹、三輪 学央¹、七山 太²

*Aika Kurokawa¹, Takahiro Miwa¹, Futoshi Nanayama²

1. 国立研究開発法人 防災科学技術研究所、2. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Most volcanoes are covered with volcanic ash fallen after various types of ash-dominated eruptions. Once the ash combines with water, it is likely to run down slopes. The flow is referred to as lahar, which is widely observed all over the world. Lahar is one of the volcanic phenomena that cause severe damage to surrounding environment, since the speed is generally far faster than that of lava and the onset time is hard to predict [E. Bézizal et al., 2013; S. Jenkins et al., 2015]. Sometimes it occurs just after an eruption [Nakayama and Kuroda, 2003] whereas a large debris flow, which broke out about 30 years after the latest eruption due to heavy rainfall, was reported [Ogiso and Yomogida, 2015]. Moreover, lahar-flow is occasionally accompanied by seismic signals [Walsh et al., 2016; Ogiso and Yomogida, 2015], so that understanding flow characteristics of lahar is important to investigate the relation between lahar-flow and seismicity leading to early detection of the onset in addition to the purpose of simulating the flow. Based on the background, we have performed rheological measurements of mixtures of volcanic ash and water, which are major compositions of lahar. The volcanic ash used in this study was collected at Sakurajima and Ontake volcanoes in Japan. The reason why the two volcanoes are focused is that lahar had flowed there after recent eruptions although the two types of volcanic ash are apparently different. In order to reveal key features in rheology and to compare rheological characteristics, the viscosity was measured changing the particle concentration and the shear rate. An important point of our findings is that the two types of mixtures show non-linear characteristics differently. For instance, Sakurajima samples show strong shear-thinning regardless of the particle concentration whereas the viscosity fluctuates in a longer time scale than rotational period of rheometer within a certain definite range of shear rate in the case of Ontake samples. Interestingly, the range of shear rate corresponds to that at which the relation between the viscosity and the shear rate shows positive slope or shear-thickening deviating from shear-thinning. Since these non-linear characteristics are considered to be induced by variations in particles such as size and shape [C. Chang and R. Powell, 1994; D. Genovese, 2012; S. Mueller et al., 2014], we mainly discuss the rheological changes of mixtures of volcanic ash and water with consideration for the particle size distribution.

伊豆大島溶岩のレオロジー特性

Rheological properties of Izu Oshima lava

*後藤 章夫¹

*Akio Goto¹

1. 東北大学東北アジア研究センター

1. Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University

Apparent viscosities were estimated for 1950-1951 and 1986 lava flows effused from summit crater, based on the observed lava flow thickness, lava surface velocity and slope angle (Murauchi, 1950; Minakami, 1951; Shirao, 1986). They ranged 1.7×10^4 Pa s (1063 °C) - 3.3×10^6 Pa s (1048 °C) in 1950, 5.6×10^2 Pa s (1125 °C) - 2.3×10^4 Pa s (1038 °C) in 1951 and 1.7×10^4 Pa s - 1.2×10^7 Pa s for LA lava in 1986 (no temperature data). These values are curious in that the viscosity of 1950 lava changed over two orders within 15 °C, and 1950 lava at 1048 °C had over two orders higher viscosity than 1951 lava at 1938 °C. Minakami (1951) also pointed out that the apparent viscosities from observation were several tens times higher than the measured viscosity in laboratory. Systematic study has not been done for Izu Oshima lava rheology thus far. In the present study the viscosity of natural rock samples from Izu Oshima lava, mainly 1986 LC lava, was measured by uniaxial compression viscometry with temperature and stress range between 1000 °C and 1100 °C and 0.057 MPa and 10 MPa, respectively, at Earthquake Research Institute, University of Tokyo. Cylindrical cores with 15 mm diameter and 30 mm high were used for viscosity measurements. Viscosity was derived from deformation rate and sample dimension using Gent's equation (Gent, 1960).

Contrary to the expectation before the experiment that the viscosity decreases continuously with increasing temperature, Izu Oshima lava becomes deformable drastically at around 1100 °C. Below this temperature viscosity changes continuously with temperature, although there are over one order scatters among used cores at the same temperature. Their minimum values are 2.1×10^{12} Pa s at 1059 °C and 1.7×10^{11} Pa s at 1082 °C. These values are almost at solid state and much higher than the observed viscosity. At the temperature that the sample becomes deformable, the main factor of the deformation was not viscous flow but brittle failure. Once the sample started to deform under constant stress, deformation rate increased with time. Or when the constant compression rate was applied, stress decreased drastically with time, which is in contrast with viscous flow that stress goes constant by balancing with applied strain rate. The drastic deformation tended to occur at lower temperature when the applied stress or strain rate was high. The samples after the drastic deformation had vertical cracks on its surface, and in case the compression stroke was large (a few mm) the middle of the cylindrical core was crushed and their surface skin pushed out brittly. Bistered surface gave us doubt that the oxidized strong surface layer sustained the applied stress before the drastic deformation, but the experimental result under reductive atmospheric condition ($\text{CO}_2 + 5\% \text{H}_2$) was similar with those done under atmospheric air, indicating the influence of oxidation is minor on the rheological behavior of the used sample.

The present study indicates the Izu Oshima lava was almost at solid state below 1100 °C, and above this temperature the main factor of the deformation was not viscous flow but brittle failure. These imply the displacement of Izu Oshima lava was not by Newtonian flow, and these rheological properties may be the source of the above mentioned curious observed viscosity.

Acknowledgements

I am grateful to Prof. Hiraga and his students K. Sueyoshi and K. Yabe for their supports on viscosity measurements. This study is supported by grant in aid for cooperative work from Earthquake Research

Institute, University of Tokyo.

キーワード : 伊豆大島、粘性係数、レオロジー
Keywords: Izu Oshima, viscosity, rheology

硬化過程におけるフォームの変形実験 -Tube Pumiceの履歴を探る- Deformation experiments of foam during solidification -exploring the history of tube pumice-

*大橋 正俊¹、市原 美恵¹、武田 志緒里²、桑野 修³、寅丸 敦志⁴

*Masatoshi Ohashi¹, Mie Ichihara¹, Shiori Takeda², Osamu Kuwano³, Atsushi Toramaru⁴

1. 東京大学地震研究所、2. 東京農工大学工学府機械システム工学専攻、3. 海洋研究開発機構、4. 九州大学大学院理学研究
院地球惑星科学部門

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo
University of Agriculture and Technology, 3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4. Department
of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

カルデラ形成を伴う破局的な噴火では、tube pumiceと呼ばれる噴出物が多く見つかる。tube pumiceとは
軽石の一種であり、一方向に伸長した気泡から構成される。このような特徴的な気泡構造には、カルデラ噴火
のダイナミクスに関する記録が残されている可能性があり、その形成機構の解明は重要である。

先行研究では、気泡変形を促進する流動のタイムスケールと、表面張力による形状緩和のタイムスケールの
競合を表すCapillary数 ($Ca=R\eta_0\varepsilon'/\Gamma$) を用いて、tube pumiceの形成機構が論じられてきた。Rは気泡
径、 η_0 は液体の粘性率、 ε' は歪み速度、 Γ は表面張力である。定常状態では、Caの大きい時（即ち、流動
のタイムスケールが形状緩和のタイムスケールよりも短い時）、気泡が引き伸ばされる（Rust and Manga,
2002）。しかし、Caがせん断変形中の気泡形状を特徴付けることを踏まえると、軽石に保存される気泡形状
を特徴付けるのは、この無次元数だけではない。せん断変形の中で気泡が伸びても、流動による応力が取り去
られた後に表面張力による形状緩和を受けると、流体が固まらなければ、気泡が球形に戻る。形状緩和による
変形量は、硬化のタイムスケールと表面張力による形状緩和のタイムスケールの競合で表されると考え、本研
究では、新たにPumice数 ($Pu=R\eta_0'/\Gamma$) を提唱する。 η_0' は液体の粘性率の増加率である。Puが大きい
時（即ち、硬化速度が速い時）、気泡構造をそのまま軽石に残すと予想される。

Puと保存される気泡形状の関係を調べるため、本研究は、硬化過程におけるポリウレタンフォームの変形実
験を行った。この材料は化学反応によって発泡し、時間経過にしたがって硬化する特徴を持つ。まず、内筒回
転式のレオメータを使用し、粘性率の変化を計測した（大橋他、火山学会、2016）。次に、一定の粘性率に
達した時に、規定量のせん断変形を加え、静置させた。硬化後の試料をX線CTスキャンにかけ、画像解析する
ことで、試料に含まれる気泡のサイズ分布や変形度の情報を得ることができる。大きな粘性応力の働く場で大
きな歪みを加えた実験では、小さな気泡まで伸びたtube pumice状の構造を得ることが出来た。しかし、画像
解析の制約上、この気泡構造から形状データを得ることができなかった。そのため、試料に与える歪みを小さ
くし、画像解析が可能な範囲内でサイズ分布や変形度を計測した。画像解析の結果、予想通り、Caだけでは硬
化後の気泡形状を説明できなかった。一方、Puが大きくなるほど、気泡の変形度が小さくなる傾向が見つ
かった。この傾向は、Pumice数の定義から予想される傾向とは逆である。

実験結果の定量的な議論をするため、先行研究の気泡変形モデルを拡張し、指数関数的な粘性率上昇を表す
項を加えて数値計算を行った。Caとひねり時間を固定し、変形—硬化後の最終変形度のPu依存性を調べた。ま
ず、予想通りPuが大きい場合には、せん断変形後の形状緩和量が減少した。また、非定常状態では、Puが大き
くなるほど、気泡が十分に伸びきらなくなることが分かった。発表では、以上の2つの振る舞いを詳細に説明
する。

tube pumiceのような気泡構造が残るには、せん断変形終了時点での気泡構造を残す必要があるため、その
時点でのPumice数が大きい必要がある。さらに、せん断変形終了時に気泡が伸長しているためには、その直前
において、十分に大きいCapillary数の下、大きな歪みが蓄えられなければならない。

キーワード：チューブパミス、気泡変形、レオロジー

Keywords: tube pumice, bubble deformation, rheology

フェーズフィールド法による発泡マクスウェル流体内き裂進展過程の数値解析

Numerical modeling of fracture of porous Maxwell fluid by phase-field method

*亀田 正治¹、丸山 祥吾¹、山中 晃徳¹、市原 美恵²

*Masaharu Kameda¹, Shogo Maruyama¹, Akinori Yamanaka¹, Mie Ichihara²

1. 東京農工大学 工学府 機械システム工学専攻、2. 東京大学 地震研究所

1. Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

発泡マグマの脆性破砕は爆発的噴火のカギを握る素過程である。天然の噴火における減圧時間の見積もりによると、その破砕は「脆性的破砕」(Kameda et al. JVGR 2013)の様式をとると考えられる。すなわち、固体的な破砕であるが、マグマのレオロジー的物性は流体的とみなせる時間スケールで生じている。また、最近、我々が行った室内実験から、脆性的破砕は、気泡分布の空間的な非一様性を主な要因とするき裂の進展によって引き起こされると考えられる(Kameda et al. in preparation)。

我々の仮説を数値シミュレーションとしてモデル化するために、ここでは、フェーズフィールド法(Spatschek et al. Phil. Mag. 2011)を用いて、粘弾性体内のき裂を連続体として表現することを提案する。フェーズフィールド法では、一般に秩序変数(以下PF変数)と呼ばれるパラメータを用いて、連続体内に存在するマグマと気泡(あるいはき裂)を分別する。本研究では、PF変数の時間発展は、局所的な弾性ひずみエネルギー、表面エネルギー、および、数値計算上必要な付加変数から構成されるAllen-Cahn方程式により求める。この場合、き裂の進展は、弾性ひずみエネルギーにより駆動される。数値シミュレーションのプラットフォームとしてはCOMSOLを用いた。PF変数の時間発展式は、我々の手で弱形式の形で定式化し、COMSOLのPDEソルバーを用いて解いた。応力/ひずみ場の時間発展は、COMSOLに実装されている有限要素法(FEM)ソルバーを用いて解いた。マグマのレオロジーは、線形マクスウェル粘弾性体と仮定した。

計算モデルとして、図1のような、気泡を含む球形のマクスウェル粘弾性体を考えた。計算負荷の低減のため、球全体の8分の1のみを計算領域とした。1個の大きな気泡を球の中心に置き、その近傍に、もう一つ小気泡を置いた。小気泡の配置として、3つの対称面から等距離の場合(Case 1)、および、対称面の一つに近づけた場合(Case 2)の2つをテストした。材料の物性値は、我々の行った過去の室内実験(Kameda et al. 2013)をもとに設定した。球の外側には、減圧として、等方的、かつ、時間とともにある一定値に到達する負圧を与えた。

気液界面の時間発展を図2に示す。この図から、気泡の配置は、き裂の進展に大きな影響をおよぼすことが分かる。進展は4つの過程に分けられる:まず、大気泡と正対する小気泡の表面部が尖ってくる。つぎに、その先端が大気泡に到達する。続けて、小気泡を偏らせて配置したCase 2のみに見られる現象として、小気泡を寄せた対称面に向かって平面状のき裂が急激に広がる。最後に、平面状のき裂が外側境界に向けて進み、鋭いき裂が開く。

発泡材料におけるき裂の進展を支配する主な要因として、気泡同士の相互作用による応力集中が考えられる。単一気泡に対する厚肉球殻理論によると、気泡周りの差応力は、半径で規格化した気泡中心からの無次元距離の3乗に反比例して減少する(Zhang Nature 1999)。複数の気泡が存在する場合、局所的な差応力は自身の作り出すものに加えて、隣接気泡が作り出すものが付加される。これは、大気泡近傍の小気泡表面に差応力の最大値が発生することを意味する。図2に示すき裂進展過程はこの局所的な応力集中で良く説明できる。

本計算から、発泡体におけるき裂進展過程は、気泡配置の影響を強く受けることが分かった。気泡配置の影響を考慮に入れた発泡マグマの破砕基準を考える必要があるかもしれない。

キーワード：爆発的噴火、破砕、フェーズフィールド法

Keywords: Explosive eruption, Fragmentation, Phase-field method

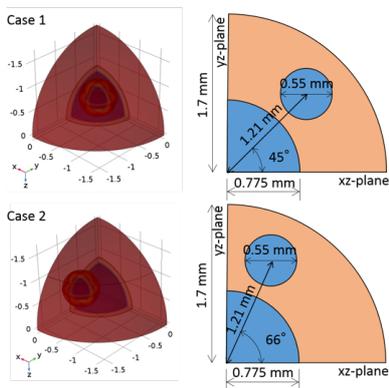
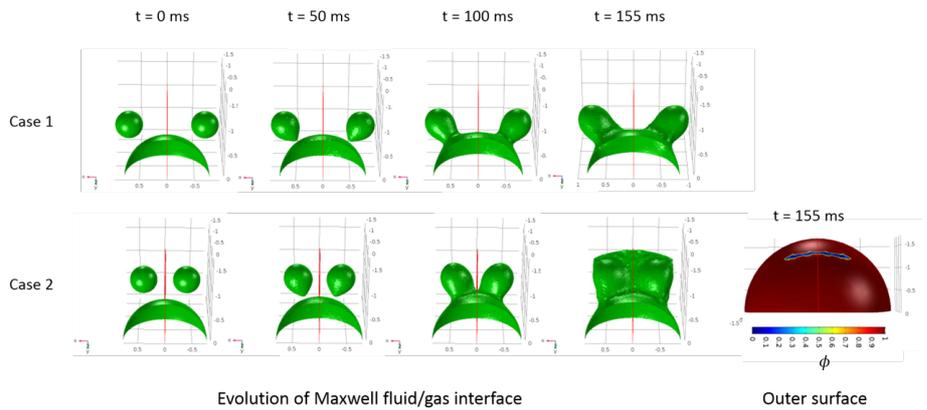


Fig. 1 Bubble arrangement in computational domain



Evolution of Maxwell fluid/gas interface

Fig. 2 Crack propagation in porous Maxwell fluid