

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。

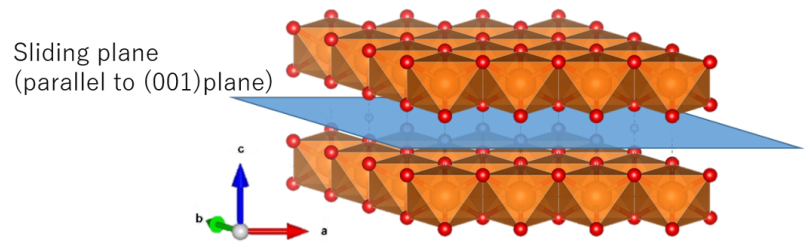
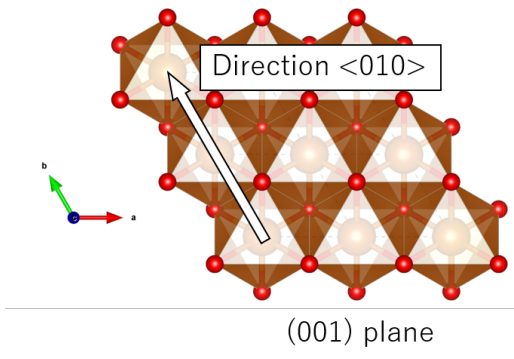
摩擦時における(001)面間のポテンシャルエネルギー面を第一原理電子状態計算によって求め、Zhong and Tomanek (1989)の手順に従って、(001)面の真の接触面における摩擦特性を調べる。具体的には、bruciteの二層を考え、その中間に存在する(001)面に平行な面をすべり面とし、片方の層をすべり面に対して水平方向及び鉛直方向に微小変化させILBEを計算し微分をとることによって、すべり面における真の接触面における垂直応力とせん断応力を求め、これらの関係からMohr-Coulombの破壊条件を用いて摩擦特性を見積もった。

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過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 の間の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。

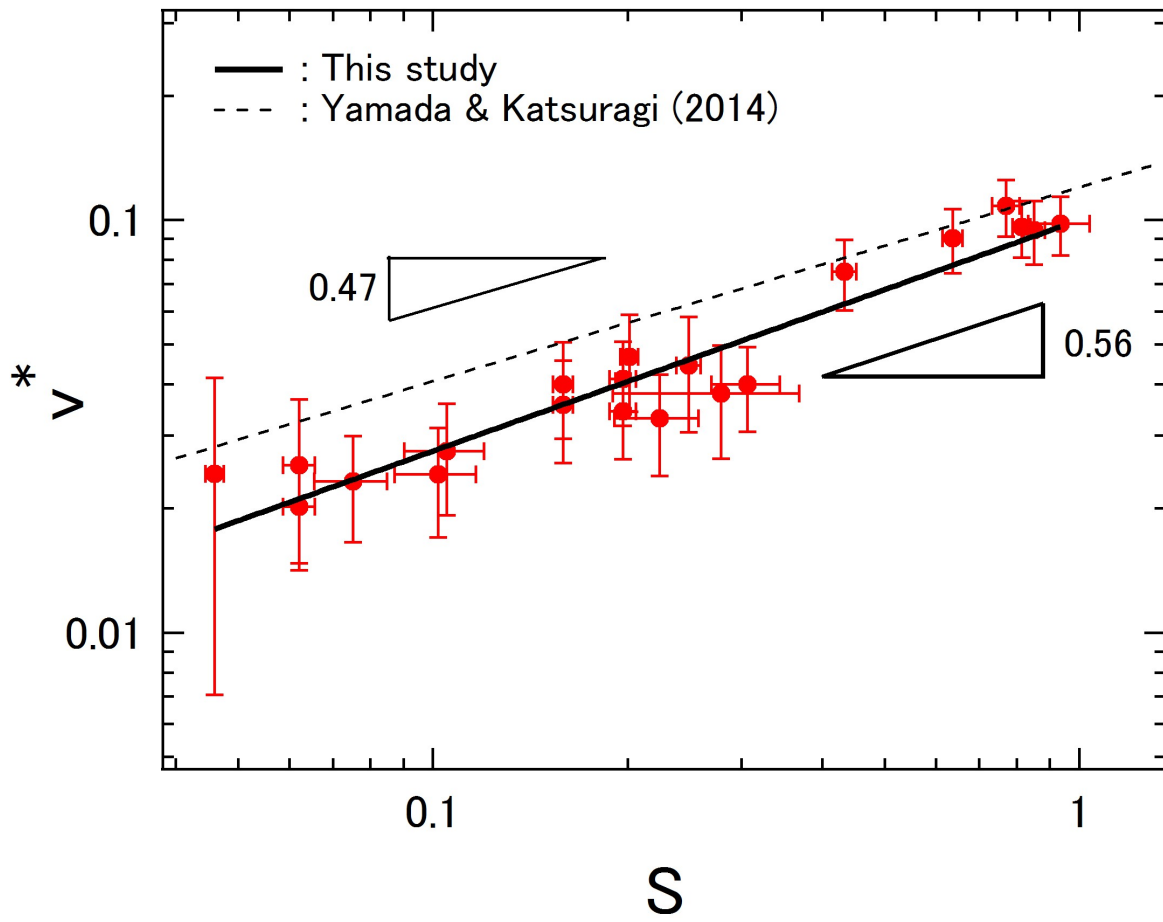
[1] H. Miyamoto *et al.*, *Science* **316**, 1011 (2007).

[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 1038 °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。せん断変形場で気泡が伸びても、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、破碎、フェーズフィールド法

Keywords: Explosive eruption, Fragmentation, Phase-field method

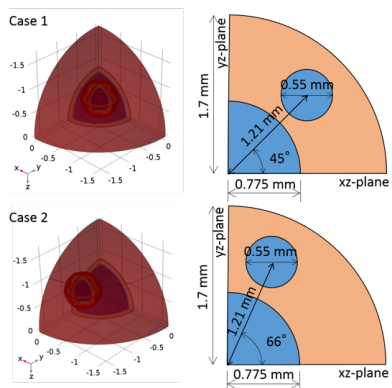


Fig. 1 Bubble arrangement in computational domain

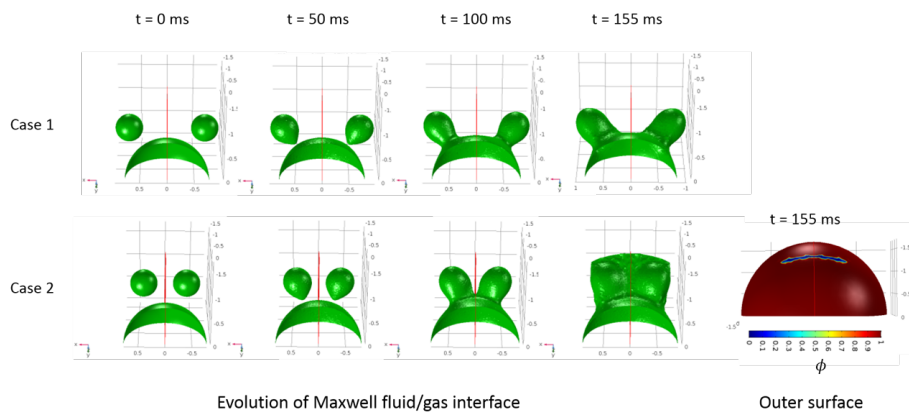


Fig. 2 Crack propagation in porous Maxwell fluid

Chemically induced formation of pull-apart structure of Cr-spinel

新井 翔¹、水上 知行¹、永治 方敬²、ウォリス サイモン³、森下 知晃¹、*曾田 祐介¹
Tsubasa Arai¹, Tomoyuki Mizukami¹, Takayoshi Nagaya², Simon Wallis³, Tomoaki Morishita¹,
*Yusuke Soda¹

1. 金沢大学、2. 東北大学、3. 名古屋大学
1. Kanazawa Univ., 2. Tohoku Univ., 3. Nagoya Univ.

Cr-spinel is known as the most rigid mineral among constituents of mantle peridotite. However, it is often seen that it forms pull-apart structures in deformed peridotite as a result of brittle fracturing. Understanding of mechanical conditions for fracturing of Cr-spinel could give a clue for stress estimation. Therefore, comprehensive study on the cause of fractures in Cr-spinel is important. In this study, we performed petrological and microstructural analyses of Cr-spinel and host deformed dunite in Higashi-akaishi ultramafic body in Sanbagawa metamorphic belt. The occurrence can be related to physical and chemical conditions in subduction zones.

Characteristic microstructures of Cr-spinel are developed as a function of an increasing amount of antigorite in the host dunite in the following order: chemical modification from rim to core, pull-apart structures, polycrystalline textures and, finally, disseminated clusters of micro-grains. The microstructural evolution of Cr-spinel implies that there are some chemical effects on the fracturing. The chemical modification of Cr-spinel shows a systematic trend characterized by an increase of Cr# (atomic ratio of Cr / (Al + Cr)) and a subsequent increase of Fe towards end member of magnetite. Extents of chemical modification along cracks are lower than those along rims, indicating that tensile cracks are formed after commencement of chemical modification along rims. The critical mineral chemistry for fractures is defined as $Al / (Cr + Al + Fe^{3+}) < 0.15$. EBSD analyses revealed that sub-grains are dominantly formed in the altered rims and also that tensile cracks are propagated from sub-grain boundaries. Recrystallized micro-grains contain minor sub-grain boundaries and show random orientations, suggesting that they are neoblasts formed by nucleation and growth. The formation of neoblasts is concomitant with Fe-rich parts of Cr-spinel.

The above observations indicate that dislocation-controlled recrystallization depends on chemical compositions of Cr-spinel. Climb velocity of dislocation depends on a self-diffusion coefficient of the slowest diffusing species and self-diffusion coefficient of the slowest Cr in Cr-spinel increases with increasing Cr#. Therefore, it is interpreted that the chemical modification characterized by the increase of Cr# enhanced dislocation motions resulting in the localized sub-grain formation to the chemically modified domains.

We estimated fracture stress (i.e. fracture toughness) of Cr-spinel using a fracture model for a cylinder with a peripheral crack, assuming the widths of chemically modified domains as the potential depths of sub-grain boundaries that act as preexisting cracks. Strength of Cr-spinel is variable depending on mineral chemistry and width of crack and the estimated values for two samples are 84 and 243 MPa. On the other hand, differential stress estimated from dislocation density of olivine is lower than these values. The discrepancy can be explained by concentration of stress due to difference of elastic coefficients of Cr-spinel and surrounding olivine. To support this idea, the maximum intragranular tensile stress in Cr-spinel based on fiber-loading theory is higher than the fracture stress from a cylinder model.

The microstructural analyses reveal that compositional change of Cr-spinel under hydration reactions enhances its plastic deformation to develop weak planar defects such as sub-grain boundaries and grain boundaries. Fracturing of Cr-spinel can be explained by the chemically induced defects and stress concentration due to the high elastic constant of spinel. It does not require an extremely large stress although the critical strength is variable depending on the Cr# of spinel.

コーサイトのX線その場観察変形実験

In situ deformation experiments of coesite

*土居 峻太¹、西原 遊¹、後藤 弘匡²、飯塚 理子³、鈴木 昭夫⁴、亀卦川 卓美⁵

*Doi Shunta¹, Yu Nishihara¹, Hirotada Gotou², Riko Iizuka-Oku³, Akio Suzuki⁴, Takumi Kikegawa⁵

1. 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター、2. 東京大学物性研究所、3. 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設、4. 東北大学大学院理学研究科地球科学専攻、5. 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所

1. Ehime University GRC, 2. ISSP, University of Tokyo, 3. GCRC, The University of Tokyo, 4. Department of Earth Science, Tohoku University, 5. KEKIMSS

大陸地殻は上部マントルと比較してSiO₂や放射性元素に富み、その運搬量は地球内部での化学組成分布や熱史に大きな影響を与える可能性がある。そして沈み込む大陸地殻の運搬量は大陸地殻の粘性率が決定すると考えられている。Gleason and Tullis (1995) の石英の変形実験によると深さ90 kmまでは石英の摩擦すべりや塑性変形が大陸地殻の変形を支配する。コーサイトは深さ90 ~ 270 kmの温度圧力領域で安定なSiO₂鉱物であり、その深さまで沈み込んだ大陸地殻の変形挙動を支配すると示唆されている。しかしコーサイトの粘性率に関する研究はRenner et al. (2001)のみであり、この先行研究の実験条件はGriggs型高压変形装置の性能により深さ120 kmより低い圧力領域に限られている。

本研究は将来的により高压での実験を見越し、D-DIA型高压変形装置を用いたコーサイトのその場観察一軸圧縮実験を高エネルギー加速器研究機構のPF-ARビームラインNE7Aで行った。出発試料及び回収試料の含水量測定と組織観察はフーリエ変換型赤外分光分析装置と走査型電子顕微鏡を用いてそれぞれ行った。二種類の出発物質を用いており、一つは粒径20 μm含水量460 wtppm以下の石英多結晶体、もう一つは粒径10 μm含水量10 wtppmのコーサイト多結晶体である。一辺7 mmの立方体(Mg,-Co)O圧媒体を切り欠き辺長5 mmのWCとcBNのアンビルで圧縮し高压発生した。φ3.0/2.5 mmの円筒状の黒鉛ヒーターで加熱し、WRe熱電対で温度測定した。高压下で一時間焼きなましを行い、石英試料はコーサイトに相転移させ、初期応力を取り除いてから一定ひずみ速度の一軸圧縮変形を行った。その場観察には50 keVの単色X線を用いた。ラジオグラフィ像はYAG蛍光体とCCDカメラを用いて、二次元回折像はX線を0.2 mm四方に絞って試料に入射しイメージングプレートで3 ~ 6分露光して取得した。ひずみはラジオグラフィ像から試料の長さを得ることで算出した。変形応力はSingh et al. (1998) の式とChen et al. (2015) に報告された室温下の剛性率を用いて算出した。圧力はAngel et al. (2001).; Galkin et al. (1987) に報告された熱弾性パラメータを用いて算出した。変形条件は温度800 ~ 1100 °C、圧力3 ~ 4 GPa、ひずみ速度 $6.7 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ である。

定常クリープが達成された変形条件で定常応力を求めた。結果から粘性率を算出すると800°Cで行った変形を除いた全てでRenner et al. (2001) とよく一致した。結果に流動則構成方程式をフィットすると応力指数nは 1.72 ± 0.38 、活性化エンタルピーH*は $99.5 \pm 27.7 \text{ kJ/mol}$ と求まった。Renner et al. (2001) のnは 2.9 ± 0.5 、H*は $261 \pm 45 \text{ kJ/mol}$ である。この不一致の原因は本研究とRenner et al. (2001) の双方において応力値が大きな誤差を持つことによる可能性がある。

Ichikawa et al. (2013) はRenner et al. (2001) の流動則パラメータを用いた数値シミュレーションにより、毎年 2.2 km^3 の大陸地殻が深さ270 kmまで運搬されると報告した。今回我々の得た流動則はn値が低いため、 $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ の天然のひずみ速度ではRenner et al. (2001) と比較して低粘性となり、大陸地殻の運搬量はより少なく見積もられることが予想される。

キーワード：コーサイト、その場観察、転位クリープ、大陸地殻
Keywords: coesite, in situ, dislocation creep, continental crust

Mechanical properties of ice-silica mixtures: Fracture toughness and elastic moduli

*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

Ductile-to-brittle (D/B) transition is a key rheological property to determine the tectonic style (flow features and fracture patterns) on the surfaces of icy bodies in the solar system such as Earth, Mars and icy satellites and it has been studied by numerical models, laboratory experiments, and field observations. The theoretical model of D/B transition indicates that the transitional strain rate is controlled by some factors; for example, a power law relationship between stress and strain rate in a ductile behavior, $d\varepsilon/dt = B\sigma^n$ ($d\varepsilon/dt$ is the strain rate and σ is the stress), fracture toughness, and coefficient of friction [Schulson, 1990; Renshaw and Schulson, 2001]. Particularly, fracture toughness is one of the most important factor to determine the critical strain rate corresponding to the D/B transition. The fracture toughness of water ice has been studied by laboratory experiments and depends on temperature, porosity, ice grain size, etc. For example, the K_{Ic} of non-porous fresh water ice is about $100 \text{ kPa m}^{1/2}$ at -10° C [e.g., Nixon and Schulson, 1987]. The tectonic features found on Mars and icy satellites has a rocky component with various contents in water ice. Thus, the fracture toughness of ice-rock mixtures is important to determine the tectonic style on icy bodies but it remains unclear. In this study, we measured the fracture toughness of ice-rock mixtures and examined the effect of rock content on fracture toughness. Furthermore, we also measured elastic moduli, Young's modulus and Poisson's ratio, which are closely related to fracture toughness.

The samples were prepared by mixing ice seeds with a diameter smaller than $850 \mu\text{m}$, amorphous silica beads with a diameter of $0.25 \mu\text{m}$, and distilled water at 0° C to fill spaces among the ice seeds and/or silica beads. The samples which had a cylindrical shape with a diameter of 30 mm and a height of 60 mm were frozen in a cold room at -10° C for more than one day. The specimens for the measurements of fracture toughness were shaped by cutting original cylindrical sample to a rectangular parallelepiped shape and the notch was made by cutting at the center of basal surface. We made samples with silica volume fraction, f , of 0, 0.06, 0.12, 0.18 and 0.34. Fracture toughness was measured using the method of three-point bending in a cold room at -10° C at Ice Research Laboratory, Dartmouth College. The elastic moduli were determined by measuring the ultrasonic velocity of both longitudinal and shear waves. After the measurements, the microstructure of recovered specimens were observed using a cryo-SEM. The fracture toughness, K_{Ic} , for pure ice was $99.8 \pm 18.5 \text{ kPa m}^{1/2}$, close to those of fresh-water ice obtained in previous studies at -10° C [e.g., Nixon & Schulson, 1987]. The values of K_{Ic} for each ice-silica mixture varied more than that of pure ice yet the fracture toughness increased with increasing silica volume fraction and scaled as the square root of silica volume fraction; i.e., $K_{Ic} \propto f^{0.5}$. Young's modulus, Y , increased linearly with increasing silica volume fraction over the range of silica volume fraction explored in this study. On the other hand, Poisson's ratio, ν , of pure ice and ice-silica mixtures were almost the same, irrespective of silica volume fraction. The average value was 0.33, consistent with that of polycrystalline granular ice at -5° C [Schulson and Duval, 2009]. Fracture toughness is related to Young's modulus and Poisson's ratio as $K_{Ic} = \sqrt{G_c(Y/1 - \nu^2)}$, where G_c is the critical value of the crack-extension force. In our experiments, we found that the increase in fracture toughness with silica volume fraction primarily resulted from the linear increase in Young's modulus with silica volume fraction given assuming the crack-extension force G_c was independent of silica volume fraction over the range of silica volume

fraction explored in this study.

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

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

Nixon and Schulson [1987] *J. Physique*, 48, 313-319.

Schulson and Duval [2009] *Creep and fracture of ice*, Cambridge University Press.

Keywords: fracture toughness, Young's modulus, Poisson's ratio, ice-silica mixtures, silica volume fraction

多孔質氷の流動則に対する空隙率の効果

Experimental study on the flow law of water ice with porosity higher than 50%

*矢部 みなみ¹、荒川 政彦¹、保井 みなみ¹

*Minami Yabe¹, Masahiko Arakawa¹, Minami Yasui¹

1. 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University

Small to middle-sized icy satellites in the solar system (diameter < several hundreds of km) are mainly composed of water ice and rocky debris and they have porosity over a wide range. On these satellites, various landforms caused by tectonic activities are found; for example, impact craters on icy satellites has a shallow depth, compared with those on rocky bodies such as the Moon. The shallow depth is expected to be caused by the difference of viscosity and deformation strength, that is the strength of water ice is smaller than that of rock. Thus, to understand the tectonic activities on small to middle-sized ice satellites, it is necessary to understand the deformation strength of ice-rock mixtures over a wide range of porosity. Flow law is one of the most important rheological properties to understand the formation processes of flow features found on icy bodies. Furthermore, a deformation strength is characterized by a flow law. Yasui and Arakawa (2010) examined the flow law of ice-silica mixtures with silica mass content of 0-50 wt.% and porosity of 0-20% and they reconstructed the flow law by introducing the factors of silica mass content and porosity. In this study, we focused on the effect of porosity over a range of porosity higher than that explored by Yasui and Arakawa (2010). We carried out creep tests of water ice with a porosity higher than 50% and examined the effect of porosity on the flow law of water ice.

The samples were made of ice grains with an average diameter of 20 μm : they were put in a stainless mold of inside diameter 25 mm and then compressed by a piston to control the porosity of 50, 60, and 65%. We performed creep tests under constant stress from 6.6 to 59 kPa in a temperature-controlled box or a cold room at Kobe University. The temperature was set to be -20 or -10° C.

In the case of water ice without porosity, the constant strain rate showing beyond a strain of 2% on the creep curve (a relationship between strain and time) was applied to the flow law. However, in the case of our porous water ice, the strain rate continued to decrease with increasing the time even beyond a strain of 2%. This was caused by the compaction during creep test: for example, the porosity of our porous water ice measured before and after the test was changed from ~50 to ~45% at the temperature of -10° C. Therefore, we examined the strain rate in increments of a strain of 0.02 over a range of strain from 0.02 to 0.16 on the creep curve to examine the flow law. As a result, the slope of the fitting line on the relationship between strain rate and stress increased with the increase of strain. In this study, we applied the strain rate at a strain of 0.14 on the creep curve to the flow law to examine the effects of porosity and temperature.

The flow law could be expressed as $d\varepsilon/dt = B\sigma^n$, where $d\varepsilon/dt$ is strain rate, σ is stress and B and n are constants. At same temperature, the strain rate increased with the increase of porosity, that is, the constant B exponentially increased with an increase in porosity: for example, the B of the porosity of 50%, $5.3 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}(\text{Pa})^{-n}$, was two orders of magnitude smaller than that of 65%, $1.4 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}(\text{Pa})^{-n}$. However, the slope of the fitting line became almost constant, irrespective of porosity. This means that the stress exponent n became almost constant, ~0.9, and it was about 1/3 as small as that of water ice without porosity ($n \sim 3$). In the case of same porosity, the strain rate increased as the temperature became higher while the stress exponent n became almost constant, irrespective of temperature. The B could be

expressed by using the activation energy Q as $B=B_0\exp(-Q/RT)$, where T is temperature, R is gas constant and B_0 is constant. The activation energy Q of our porous water ice was about 60 kJ/mol, irrespective of porosity, and it was a little smaller than that of water ice without porosity, 80 kJ/mol (Barnes *et al.*, 1971).

キーワード：流動則、水氷、空隙率、クリープ試験、活性化エネルギー、小・中氷衛星

Keywords: flow law, water ice, porosity, creep tests, activation energy, small to middle-sized icy satellites

輝石の量比の異なるかんらん岩を用いた鉱物混合層形成に伴う歪弱化の解明

Effect of pyroxene on the rheological weakening of olivine + orthopyroxene due to phase mixing

*田阪 美樹¹、Zimmerman Mark²、Kohlstedt David²

*Miki Tasaka¹, Mark E Zimmerman², David L Kohlstedt²

1. 島根大学、2. ミネソタ大学

1. Shimane University, 2. University of Minnesota

To understand the processes involved in rheological weakening due to phase mixing, we conducted torsion experiments on samples composed of iron-rich olivine + and orthopyroxene. Samples with volume fractions of pyroxene of $f_{px} = 0.1, 0.3, \text{ and } 0.4$ were deformed in torsion at a temperature of 1200°C and a confining pressure of 300 MPa using a gas-medium apparatus.

The value of the stress exponent, n , decreases with increasing strain, γ , with the rate of decrease depending on f_{px} . In samples with larger amounts of pyroxene, $f_{px} = 0.3$ and 0.4 , n the stress exponent decreases from $n = 3.5$ at lower strains of $1 \leq \gamma \leq 3$ to $n = 1.7$ at higher strains of $24 \leq \gamma \leq 25$. In contrast, for the samples with $f_{px} = 0.1$, the stress exponent decreases from $n = 3.5$ at lower strain decreases only to only $n = 3.0$ at higher strains. In samples with larger f_{px} , the value of p grain size exponent changes from $p = 1$ at lower strains to $p = 3$ at higher strains. Furthermore, Hansen *et al.* (2012) observed that $n = 4.1$ and $p = 0.7$ in samples without pyroxene ($f_{px} = 0$) regardless of strain. For samples with larger f_{px} , these values of n and p indicate that the deformation mechanism changes with strain, whereas for samples with smaller f_{px} no change in mechanism occurs.

The microstructures in our samples with larger amounts of pyroxene provide insight into the change in deformation mechanism identified from the experimental results. First, elongated olivine and pyroxene grains align sub-parallel to the shear direction with a strong crystallographic preferred orientation (CPO) in samples deformed to lower strains for which $n = 3.5$. Second, mixtures of small, rounded grains of both phases, with a nearly random CPO develop in samples deformed to higher strains that exhibited a smaller stress exponent and strain weakening. The microstructural development forming well-mixed, fine-grained olivine-pyroxene aggregates can be explained by the diffusivity difference between Si, Me (= Fe or Mg), and O, such that transport of MeO is significantly faster than that of SiO₂. These mechanical and associated microstructural properties provide important constraints for understanding rheological weakening and strain localization in upper mantle rocks.

キーワード：歪弱化、鉱物混合層

Keywords: rheological weakening, phase mixing

四国中央部汗見川流域における三波川変成帯の石英微細構造と古応力推定 Quartz microstructures and paleostress estimates in the Sanbagawa metamorphic belt, Central Shikoku, Japan

*上田 匡将¹、清水 以知子¹

*Tadamasa Ueda¹, Ichiko Shimizu¹

1. 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

The paleostress estimates for the ductile region of the Earth's crust largely depends on grain size piezometers of quartz. However, it has long been debated whether extrapolation of experimentally determined piezometric relationships to natural conditions is appropriate. Dynamic recrystallization theories predict temperature-dependent relationships between stress and grain size of quartz, but no systematic works have been made to apply the theories to naturally deformed rocks. We measured grain size of quartz in the Sanbagawa metamorphic belt, using electron back-scattered diffraction (EBSD) mapping, and applied a theory-based piezometric relationship. The samples were taken from the Asemi River route, Shikoku Island, Japan. The metamorphic grades increase northward from the chlorite zone through the garnet zone to the biotite zone and then decrease to the garnet zone. Sampling localities cover all these four zones. Except for the sample taken from the lowest metamorphic grade part of the chlorite zone, quartz shows undulatory extinction, subgrain boundaries, and crystallographic preferred orientations. Small quartz grains occur at the rims of coarse grains and sparsely inside the coarse grains. All the obtained grain size distributions were severely right skewed. The mean and the mode values were not well defined in both linear and logarithmic frequency diagrams because these values vary with the cutoff size. Instead, the grain sizes that occupy the largest area fractions were used for the 'average' grain size. The grain size of the largest area fraction ranged between ~20 and ~160 microns. Dynamic recrystallization of quartz is likely concurrent with the peak metamorphism, because grain size increases with increasing metamorphic grades. In addition, quartz fabrics show the top-to-west sense of shear in the south, whereas they indicate mainly top-to-east in the north. Previous geothermometric studies using Raman spectra of carbonaceous materials or the disappearance of pumpellyite yielded peak metamorphic temperatures ranging from ~330 to ~570 °C. The obtained stresses increase with decreasing metamorphic grades and reach ~100 or ~250 MPa at their maximum under the assumptions of intracrystalline or marginal nucleation models, respectively. The stress estimates with the marginal nucleation model are similar to or slightly lower than stress values calculated from a quartz flow law under assumptions of the possible plate convergence rate, temperature profile, and ranges of the crustal thicknesses of the subduction zone at the timing of the metamorphism.

キーワード：沈み込み帯、応力、石英の変形

Keywords: subduction zone, stress, quartz deformation

クラックを含む花崗岩の剪断変形中の弾性波速度のモニタリング

Monitoring of elastic wave velocity on the cracked granite during shear deformation

*久保 達郎¹、並木 敦子²、片山 郁夫¹

*Tatsuro Kubo¹, Atsuko Namiki², Ikuo Katayama¹

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. 広島大学総合科学研究科環境自然科学講座

1. Department of Earth and Planetary Systems Science Hiroshima University, 2. Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

[はじめに] 断層帯の力学的な破壊プロセスを理解するひとつの可能性として、これまで弾性波速度の変化が注目されている。弾性波速度はクラックの形成と閉鎖に強く依存するため、三軸圧縮試験においても差応力の上昇によるクラックの閉鎖や成長に伴い、弾性波速度の上昇が観察されている(Scholz et al. 1973)。また、天然の断層帯においてもLanders地震(1992)のあとで断層帯のP波、S波速度が増加しているなどの報告もある(Li et al. 1998)。地震の発生サイクルの中で弾性波速度の変化から断層帯における応力状態や固着に関する情報を得ることは、地震の予兆現象の観測に繋がると期待されることから、極めて重要な課題といえる。そこで本研究では剪断応力のかかった環境下における弾性波速度の変化を観察し、断層面ですべり現象が生じている最中の弾性波速度の応答をモニタリングすることを試みた。

[実験手法] 二軸摩擦試験機を用いて剪断試験を行なっている最中の弾性波速度のモニタリングを行った。垂直応力は油圧式手押しポンプで制御しながら加重をかけていき5, 10, 20 MPaに制御した。鉛直方向(剪断方向)の加重はモーターとギアシステムを用いており、ギアシステムにより様々な速度比で減速された回転運動を、ボールネジを用いて鉛直方向の往復運動に変換することで载荷した。天然の断層帯では母岩にも割れ目が多く発達することが期待されるため、試料に用いたサンプルは庵治花崗岩を600°Cで4時間の加熱処理を行い、熱亀裂を加えたサンプル間での剪断すべり実験を行った。弾性波速度測定では、摩擦面に垂直な方向でサンプルに直接圧電素子をはりつけた。入力波としては周波数1 MHzのバースト波を用い、断層面を含めサンプルを通過した波をオシロスコープで解析した。弾性波速度は試料の長さと同搬時間より算出した。

[結果と考察] 試料である花崗岩ブロックを通過する弾性波の速度は垂直応力の増加に伴い上昇した。これは試料中の垂直応力に直行する面方向に配列するクラックの閉鎖が原因であると考えられる。剪断変形を開始すると、弾性波速度は剪断応力の増加に伴い系統的に上昇した。これは主に剪断方向に直行する面方向のクラックが閉鎖することによる変化であると考えられる。また、剪断応力が定常状態に達すると、弾性波速度の変化はみられなくなった。透過波の波形から振幅の変化を観察したところ、振幅は垂直応力ならびに剪断応力の増加にともない増える傾向がみられたが、剪断応力が定常状態に達すると、速度と同様にほぼ一定の値を示した。これらのことは、地震発生サイクルの中で応力が蓄積されるインターサイスミックな期間において、断層帯周辺を通過する地震波の速度や振幅の変化を追うことで、すべりの準備過程を知るひとつの要素となりうる可能性を示していると考えられる。

キーワード：弾性波速度、摩擦実験、クラックを含む花崗岩、地震の評価

Keywords: elastic wave velocity, friction experiment, cracked granite, earthquake hazard assessment

Fractal Size Reduction and Critical Slip Displacement during Fault Slip

*平田 萌々子¹、武藤 潤¹、長濱 裕幸¹

*Momoko Hirata¹, Jun Muto¹, Hiroyuki Nagahama¹

1. 東北大学大学院理学研究科地学専攻

1. Department of Earth Science, Tohoku University

1. Introduction

To evaluate an occurrence of unstable slip, a systematic understanding of frictional instability is necessary. Critical slip displacement has been used to evaluate frictional instability of faults. The critical slip displacement is defined as the slip over which strength breaks down during fault slip or the slip distance, at a constant velocity, through which a population of contacts is destroyed and replaced by an uncorrelated set [Marone and Kilgore, 1994; Scholz, 2002]. Although previous studies have proposed various relationships between critical slip displacement and other factors [e.g., Sammis and Biegel, 1989; Marone and Cox, 1994], it is still open to debate that which factors dictate the critical slip displacement. In this study, we aim to theoretically clarify a factor that determines the critical slip displacement. Additionally, as fractured areas have a self-similar structure, we utilize fractal theory for understanding of the critical slip displacement. Through this study, it is clarified that comminution characterized by the fractal size reduction determines the critical slip displacement.

2. Fractal dimensions with comminution processes

A fractal dimension of surface roughness changes with comminution processes of materials: It takes on the values 3.0, 2.5, and 2.0 from high-velocity impact experiments, conventional milling, and finer grinding, respectively [Hukki, 1962; Rumpf, 1973; Nagahama, 1991, 1993; Muto et al., 2015]. Let us consider the underlying cause of changing in the fractal dimension of surface roughness. When rocks receive external force, a portion of work done externally is used for energy dissipation for fracturing. The energy per unit mass for fracturing is in proportion to the exponential function of a characteristic linear dimension with the fractal dimension of surface roughness as an exponent. Consequently, comminution processes influence the fractal dimension of surface roughness as well as dissipative energy for fracturing.

3. Relationship between critical slip displacement and shear strain

Shear strain for crushing gouge is defined as a ratio of a function related to particle size to shear stress [Draper, 1976]. The function can be approximately expressed as the maximum grain diameters after shearing with the fractal dimension as an exponent. The critical slip displacement is approximately proportional to the final maximum grain size [Dieterich, 1981]. Therefore, the relationship between the critical slip displacement and shear strain can be described as a linear function on a log-log plot. The slope of this function is related to the fractal dimension of the surface roughness. This relationship obtained from theoretical analysis is consistent with previous experimental datasets [Marone and Kilgore, 1993]. Thus, the fractal dimension of the surface roughness controlled determines the critical slip displacement.

4. Discussion –implication of dissipative energy

Fractal size reduction of materials also determined the surface roughness and particle size ranges. Through the theoretical analysis, it is clear that large dissipative energy means small critical slip displacement and/or high fractal dimension of surface roughness. The fractal dimension of the surface roughness ranges from two for smooth surfaces to almost three for rough surfaces [Avnir et al., 1983;

Nagahama, 1993]. Thus, small fractal dimension of surface roughness, or small dissipative energy, indicates that gouge particles with various size ranges compose smooth surfaces with filled opening areas.

5. Summary

From this study, it is obvious that the critical slip displacement is originally determined by fractal size reduction of materials. Difference in comminution processes produces the differences in dissipative energy for fracturing, particle size ranges, the surface roughness, and the critical slip displacement.

キーワード： 臨界すべり変位、散逸エネルギー、摩擦不安定性、フラクタル

Keywords: critical slip displacement, dissipative energy, frictional instability, fractal

濡れた粉体層における穴構造の荷重による変形様式

Mode of tunnel deformations induced by loading in wet granular layer

*篠田 明友子¹、藤原 慎一²、桂木 洋光¹

*Ayuko Shinoda¹, Shin-ichi Fujiwara², Hiroaki Katsuragi¹

1. 名古屋大学大学院環境学研究科、2. 名古屋大学博物館

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Museum, Nagoya University

Stable burrows in wet sediments dug by tidal and shore animals play important roles not only in the ecological behaviors of the animals, but also in material circulation in the substrate and the sediment conditions. Thus, the burrow stability problem has been a challenging topic in the fields of sedimentology and biology. Modern ocypodid crabs are known to dig deep burrows in a sandy beach (Seike and Nara, *Palaeogeog., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 252 (2007) 458). However, it has not been clarified that how stable these burrow structures are against the external loading.

For the quantitative understanding of strength of a burrow in sandy beach, we modeled it by a tunnel structure in wet granular layer, and focused on mechanical property of wet granular matter. According to the previous works, its mechanical property shows complex behavior. For example, tensile strength of wet granular column nonlinearly depends on liquid content (Scheel et al., *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20 (2008) 494236, Herminghaus, *Wet Granular Matter: A Truly Complex Fluid*, World Scientific (2013)). However, little is known about the strength of a tunnel structure formed in wet granular layer. In this study, we conducted a simple experiment to investigate the mechanical property of a tunnel structure in wet granular layer. In the experiment, we observed how the tunnel structure was deformed by slow uniaxial compression. During the compression, the projected cross section of the deformed tunnel was filmed by a CMOS camera. The compression force was also measured by a testing machine. In this experiment, we mainly varied following parameters: liquid content, packing fraction, initial diameter of the tunnel, and grain size. By analyzing the acquired movies, we examined the temporal evolution of a projected cross section of the tunnel structure. We found that the mode of tunnel deformations can be classified into three types: continuous shrink, shrink with collapse, and subsidence by collapse. The experimental result indicates that the mode of deformations is principally determined by the initial diameter of a tunnel and grain size.

Furthermore, based on a simple model of the force balance for tunnels in soil (Knappett and Craig, *Craig's Soil Mechanics*, Spon Press (2012)), we estimated the maximum shear stress applied to the tunnel structure. In addition, we defined two types of strengths characterizing a tunnel structure: yield and maximum stresses. As a result, we found that these strengths show qualitatively different dependences on experimental parameters.

Finally, we briefly discussed the condition to maintain a tunnel structure in a sandy beach environment by using the experimental result and information obtained in previous works (Seike, *Marine Biology*, 153, (2007) 1199-1206, Sassa and Watabe, *Report of the Port and Airport Research Institute*, 45, 4, (2006) 61-107).

中-高速条件下におけるRSF則パラメータのすべり速度・温度に対する依存性

Dependence of the Constitutive Parameters of RSF Law on Slip Velocity and Temperature at Subseismic Slip Velocities

*中野 龍二¹、堤 昭人¹

*Ryuji Nakano¹, Akito Tsutsumi¹

1. 京都大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Kyoto University

1. はじめに

摩擦抵抗の挙動はその面でのすべり速度によって異なるということが知られている。低速度域($<10^{-3} \text{ ms}^{-1}$)では摩擦係数の定常値はほぼ0.6から0.85の間におさまる[Byerlee, 1978]が、中速度域($10^{-3} < v < 10^{-1} \text{ ms}^{-1}$)では定常摩擦抵抗は速度弱・強化の両方を示し、高速度域($>10^{-1} \text{ ms}^{-1}$)では非常に大きい速度弱の傾向を示す。この弱・強化の原因として、摩擦発熱による温度の効果が考えられる。より良い地震予測を行うためには、これらの効果を考慮したモデルを使用したシミュレーションを行うことが必要とされるが、現状の摩擦構成則ではこれらの効果を十分に説明することはできない。

最も有益な摩擦構成則のひとつに、Dieterich [1979]やRuina [1983]によって発展させられた速度状態依存摩擦構成則(RSF law)がある。これは元々低速域での摩擦挙動を説明するために記述されたものであり、この構成則が中-高速度域においても適用可能かどうかは未だ明らかになっていない。加えて、先述のように、摩擦挙動はすべり速度だけではなく温度にも依存するため、RSF則と温度との関係性についても明らかにする必要がある。

本研究では、中-速度域での摩擦実験を行い、摩擦表面での温度の変動を考慮しつつ、その結果からRSF則のパラメータの推定を行った。

2. 方法

実験には京都大学の中-高速剪断摩擦試験機を使用し、室温、室内湿度条件下で1.5 MPaの垂直応力をかけつつ速度急変実験を行った。試料にはジンバブエ産の斑レイ岩を内径26 mm、外径40 mmの円筒形に加工したものを1対使用した。なお、今回の実験はガウジを試料間に挟み込まずに行った。また、速度急変実験を行うにあたって、IRPMと Δ RPMの2つの設定値を定義した。IRPMは急変前の試験機内のモータ回転速度を表し、10, 20, 50, 100 RPMの値をそれぞれ設定した。 Δ RPMは急変量を表し、80, 150, 200, 300, 400 RPMの値をそれぞれ設定した。実験は各IRPM・ Δ RPMの全組み合わせを行ったが、初期温度をそろえるため、次の組み合わせを行うのは前の組み合わせが終了し、試料面温度が室温にまで冷めてからとした。

RSF則の各パラメータは、準静的なパネ・ブロックモデルを仮定し、Sakamoto et al. [2005]によって改良されたLevenberg-Marquardt法を用いて推定を行った。摩擦表面での温度は、黒田[2005]の有限要素法を用いて計算を行った。

3. 結果

摩擦実験の結果は以下の通りである。(1) 摩擦係数の定常値はすべり速度が大きくなるにつれて減少する様子が確認された。これは、Tsutsumi and Shimamoto [1997]の結果と矛盾しない。(2) IRPMと Δ RPMの組み合わせが100と400の時に摩擦溶融が確認され、溶融面が発達する間大きなすべり強化が見られた。このことは、Hirose and Shimamoto [2005]の、溶融面形成の始まりは断層でのすべりを妨げる機構となり得るという主張と矛盾しない。

また、RSF則のパラメータについては、すべり速度によるものと温度によるもので似た傾向が確認された。すなわち、すべり速度(あるいは温度)が上がるにつれて各パラメータの値は線型的に増加した。この傾向

は、Nakatani [2001]やNakatani and Scholz [2004]による、RSF則のパラメータ a と b は絶対温度に比例するという主張と矛盾しない。ただし、今回の実験ではすべり速度が上がるにつれて摩擦表面での温度が上がってしまうため、両者のRSF則のパラメータに対する依存性については厳密には議論できていない。したがって、両者の依存性を区別して考えられるような実験を行うことが今後必要とされる。

キーワード：摩擦、速度状態依存摩擦構成則、中-高速、温度

Keywords: friction, rate- and state-dependent friction constitutive law , intermediate to high slip velocity, temperature

減圧結晶作用に伴う玄武岩質メルトの粘性率変化：富士山宝永噴火玄武岩質マグマの例

The effect of decompression-induced crystallization on viscosity of basaltic magma: A case study of Fuji 1707 basaltic magma

*石橋 秀巳¹、天野 大和¹

*Hidemi Ishibashi¹, Yamato Amano¹

1. 静岡大学理学部地球科学専攻

1. Faculty of Science, Shizuoka University

【序論】玄武岩質マグマの爆発的噴火では、穏やかなストロンボリ式噴火が一般的であるが、一方で稀に激しいプリニー式噴火を発生することが知られている。富士火山においても、マグマの化学組成が大きく変化しないにもかかわらず、穏やかなストロンボリ式からプリニー式まで多様な噴火様式がみられ、前者の例として864-866年貞観噴火が、後者の例として1707年宝永噴火があげられる。このような玄武岩質マグマの噴火様式に多様性を生じるメカニズムについては、未だ不明な点が多い。玄武岩質プリニー式噴火である宝永噴火のスコリアの特徴として、斜長石マイクロライトに富む(>30vol.%)ことがあげられる。これは、穏やかなプリニー式噴火のスコリア(貞観噴火長尾山スコリア)中にマイクロライトが少ないことと対称的である。プリニー式噴火のスコリアの方がマイクロライトに富む事実は、マグマ上昇速度のちがいのみによっては説明できず、プレ噴火条件のちがいを反映している可能性がある。それでは、プレ噴火条件のちがいはマグマの火道上昇過程(特に減圧結晶作用と粘性率変化)と噴火様式にどのような影響を及ぼすのだろうか?これを検討するため、本研究では様々な温度・メルト含水量の初期条件で玄武岩質メルトの減圧結晶作用シミュレーションを行い、火道上昇過程でのマグマの相変化および粘性率変化に及ぼすプレ噴火条件の効果について検討した。

【手法】本研究の減圧結晶作用シミュレーションは、rhyolite-MELTSプログラム(Gualda et al., 2012)を用いて行った。初期メルト組成には富士山宝永噴火の玄武岩のそれを用い、 fO_2 条件はNi-NiOバッファとした。一旦析出した結晶・気泡は、その後メルトとは反応しないものとした。メルトの含水量と温度の初期条件はそれぞれ、0.5-3wt.%, 1184-1094°Cの範囲で変化させ、初期圧力150MPaから0.1MPaまで0.1MPaステップで等温減圧させた。各圧力ステップにおけるメルトの粘性率はGiordano et al.(2008)の方法によって、相対粘度はEinstein-Roscoe式によってそれぞれ計算し、減圧過程におけるマグマ(メルト-結晶2相系)の粘性率を計算した。

【結果】初期温度条件の低下に伴い、減圧結晶作用の開始圧力(P_s)は増加し、1気圧でのメルトフラクション(F_{1atm})は減少した。 F_{1atm} は、1189°Cの場合には92wt.%であったのに対し、1094°Cでは40wt.%まで減少した。一方で、 P_s で規格化した圧力に対して、 F_{1atm} で規格化したメルトフラクションをプロットしたところ、初期条件によらず類似のパスを通ることがわかった。さらに、 F_{1atm} と P_s はともに初期温度と明瞭な相関を示すのに対し、初期メルト含水量とは明瞭な相関を示さなかった。このことから、減圧結晶作用におけるP-Fパスは主に温度によって決まっていることがわかる。

減圧に伴うメルト粘性率と相対粘度の変化も、初期温度に強い依存性を示した。初期温度が低いほど、減圧に伴うメルト粘性率・相対粘度の上昇率が増加する。1184°Cと1094°Cでは後者の方が、1気圧で到達するメルト粘性率が約2桁大きく、相対粘度は4桁以上大きい。結果として、1気圧で到達するマグマの粘性率では、1184°Cと1094°Cの間で6桁以上の差がみられた。

【考察】マグマがプリニー式噴火をおこす条件として、破碎することと、破碎時までに脱ガスしないことがあげられる。粘性率が高いほど、マグマが破碎するために必要な歪速度は小さくなり、またマグマから気泡が分離しにくいと考えられる。加えて、大量のマイクロライトの存在は、気泡同士の合体を妨害するため、脱ガスの抑制に貢献すると考えられる。したがって、初期温度が高いマグマでは、火道上昇中に形成されるマイクロライトが少量であり、メルト粘性率も低い値を維持するため、破碎しにくく脱ガスしやすい。結果として、激しい爆発的噴火をおこしにくいと考えられる。一方で、初期温度の低いマグマでは、火道上昇中に形成

されるマイクロライトが多く、メルト粘性率も著しく増加する。加えて、形成されるマイクロライトは気泡の合体・移動を妨害するため、脱ガス効率を下げる。この結果、マグマは気泡を多く含んだまま破碎しやすくなり、激しい爆発的噴火をおこし得る。以上の結果は、玄武岩質マグマのプレ噴火温度が、発生する噴火の爆発性に著しい影響を及ぼすことを示唆する。

キーワード：減圧結晶作用、玄武岩質マグマ、粘性率、富士火山、MELTS、噴火様式

Keywords: decompression-induced crystallization, basaltic magma, viscosity, Fuji volcano, MELTS, eruption style

固化過程におけるフォームの粘弾性特性とせん断変形挙動

Viscoelasticity and Shear Deformation of Foam during Solidification

*武田 志緒里¹、大橋 正俊²、桑野 修³、亀田 正治¹、市原 美恵²

*Takeda Shiori¹, Masatoshi Ohashi², Osamu Kuwano³, Masaharu Kameda¹, 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、3. 国立研究開発法人海洋研究開発機構

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

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

カルデラ噴火で見つかる軽石は、気泡が一方向に伸びたような特徴的な構造を持ち、Tube pumiceと呼ばれる。本研究は、カルデラ噴火におけるマグマの挙動の鍵を握ると考えられる、Tube pumiceの成因解明を目指す研究の一部を成すものである。Tube pumiceの成因解明にあたっては、マグマのアナログ物質として、硬質ポリウレタンフォームを用いて実験を行う。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、発泡剤、整泡剤などと混合し、樹脂化させると同時に発泡させた、発泡プラスチックである。ポリウレタンフォームは粘弾性体であり、火道を上昇するマグマと同様に、発泡、流動、固化の過程を持ち、それを常温・常圧下の化学反応によって再現する。マグマも流体と固体の両方の性質をもつ粘弾性体である。粘弾性体の挙動は、粘性率、気泡の体積分率、温度によって変化し、さらに変形速度などの時間スケールに依存する。そして、火道におけるマグマの粘弾性挙動は、火山の噴火様式を決定づける重要な要素となる。

ポリウレタンフォームをマグマのアナログ物質として用いるにあたって、まずポリウレタンフォーム自体の挙動を把握しておく必要がある。そこで、本研究は、反応過程におけるポリウレタンフォームにさまざまな時間スケールでせん断変形を与えて、粘弾性特性を定量化することを目的とする。本発表では、ポリウレタンフォームに振動変形を与えたときの挙動と、一方向へのせん断変形を与えたときの挙動を比較した結果を報告する。

実験試料は、東邦化学工業株式会社製のポリイソシアネート液(ハイセル360P)とポリオール液(ハイセルHW-408 整泡剤なし)を使用した。

粘弾性の測定は、高性能粘弾性計測装置(AR2000ex, TA Instruments製)をベースにした、共軸二重円筒系の内筒回転式レオメータを使用した。外筒は固定されていて、内筒はモーターに制御されて回転する。本研究では、内筒にはアルミニウム製円柱(半径7.5 mm)を使用し、外筒にはポリプロピレン製ビーカー(半径11.5 mm)を使用した。容器底面から内筒底面までの高さは8 mmとした。

測定中、試料は円筒間に満たされ、発熱を伴いながら膨張し、気泡の体積分率は60%程度に落ち着く。そこで、赤外線放射温度計を用いて外筒側面の温度変化を記録した。さらに、ビデオカメラを用いて膨張の様子を記録して、その映像から内筒に触れる試料の長さの変化を読み取った。試料の長さの変化と、モーターが計測したトルクと回転角を合わせて、振動変形では複素粘性率を算出し、一方向へのせん断変形では見かけ粘性率を算出した。

実験は2種類の実験を行なった。

まず、角周波数20 rad/sで内筒を振動させ、複素粘性率のひずみ振幅依存性を調べた。その結果、ひずみ振幅が0.01以下であれば、再現性が良いことがわかった。

次に、一つの試料に、ひずみ振幅0.001の振動変形と、一方向へのせん断変形を交互に与えて、複素粘性率と見かけ粘性率を測定した。多くの高分子について、角周波数とひずみ速度が同じときに、振動時の複素粘性率の絶対値とひねり時の見かけ粘性率は等しくなるというCox-Mertzの経験則が知られている(Marrucci, 1996)。気泡流においても、Cox-Mertzの経験則が成り立つことが、実験と近似的な理論から示されている(Llewellyn et al., 2002a)。その先行研究によると、気泡流における見かけ粘性率と複素粘性率の絶対値は、それぞれ無次元数であるキャピラリ数Ca(\propto ひずみ速度)または動的キャピラリ数Cd(\propto 角周波数)に依存する。しかし、本研究の測定の結果は、Ca数が0.1より大きい場合、見かけ粘性率が複素粘性率の絶対値より有意に小さくなり、Cox-Mertzの経験則は成り立たなかった。さらに、Ca数が大きいほど、見かけ粘性率はより大きく低下した。

Ca数の増加とともに見かけ粘性率が低下することは、せん断変形による気泡の伸長の影響として理解されている (Rust and Manga, 2002b). しかし、本研究では、理論の予測する以上に粘性率が大きく低下している。本研究で用いたポリウレタンフォームはボイド率が非常に大きいことから、見かけ粘性率の低下は、気泡間の相互作用による、さらなる気泡伸長が生じた結果であると考えている。

キーワード：フォーム、複素粘性率、見かけの粘性率、キャピラリ数

Keywords: foam, complex viscosity, apparent viscosity, capillary number

大規模超高精度砂箱実験と大規模砂箱数値実験ーフロントルスラスト形成に先立つ予兆現象

Large Scale High Precision Sandbox Experiments and Large Scale Numerical Sandbox Experiments - Precursory Signal Preceding to Frontal Thrust Formation

*桑野 修¹、西浦 泰介¹、堀 高峰¹、古市 幹人¹、阪口 秀¹

*Osamu Kuwano¹, Daisuke Nishiura¹, Takane Hori¹, Mikito Furuichi¹, Hide Sakaguchi¹

1. 国立研究開発法人 海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

我々は2011年から付加体形成のアナログ実験のための大規模超高精度砂箱実験装置の開発を行ってきた。実験系の高精度化にあたり、様々な試行錯誤を繰り返し、2014年に装置のプロトタイプが完成した。本装置開発の当初の目的は、付加体のシーケンシャルスラストと隆起が作る構造に関して南海トラフに見られるようなトラフ軸方向に「複雑に屈曲・分岐した縮緬模様」と、南米チリ沖に見られるような「直線的な構造」の違いが生じる要因を調べることであった。この目的を達成するためには、できるだけ大きな砂箱を使うことと、砂を敷き詰める過程を十分にコントロールし初期砂地盤の均質性を確保することで再現性の高い実験を行う必要があった。そこで、1m四方の砂箱に対して、砂粒1粒子以下の精度で所定の砂の敷き詰め厚さを確保する超高精度実験法を開発した。実験の高精度化の結果、断層をその形成位置も含めて確実に再現できるようになった。さらに、我々は断層形成前に砂層表面の粒子が不連続な微小変位を繰り返す現象を発見した。この微かな予兆現象を確実に捉えて理解し、フィールドでの観測可能性を検討したい。そのために荷重や変位の精密測定(800mmの範囲で、0.1 μm の分解能)を実現し、広範囲で表面現象を解析するためにカメラアレイを構築し、計測ノイズ低減のために装置自体を強化・改良した。その結果、断層形成に先立って、砂層表面の微小変位、傾斜変動などが捉えられた。この前駆現象のメカニズムに迫るため、表面現象しか観察できない室内砂箱実験に加えて、実スケール、2.4億粒子でのDEM砂箱シミュレーションを実施した。シミュレーションでも室内実験と類似の前駆現象が捉えられた。講演では室内実験とシミュレーションで捉えられた前駆現象を比較し、そのメカニズムを考察する。

キーワード：予兆現象、地震、砂箱実験、DEM simulation

Keywords: precursor, earthquake, sandbox experiment, DEM simulation

粒子画像分析法による粉碎粒子の粒子サイズおよび粒子形態特性評価に関する可能性検討(3)

Feasibility Study of Morphological Characterization to Comminuted Particles by A Particle Characterization Approach (3)

*笹倉 大督¹、菊知 千尋¹、桑野 修²

*Daisuke Sasakura¹, Chihiro Kikuchi¹, Osamu Kuwano²

1. スペクトリス株式会社 マルバーン事業部、2. 国立研究開発法人 海洋開発研究機構

1. Malvern Japan ,Div of Spectris Co.Ltd.,, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

断層破砕帯は過去の断層破壊による粉碎、摩耗によってできた断層ガウジと呼ばれる粒子でみだされている。断層ガウジの粒子サイズ分布や粒子形状は、断層の摩擦強度に影響すると考えられる。また、それらの粒子形態情報は、過去の断層活動による破砕の様式や度合いを知る手掛りになるだろう。断層破砕帯における粒子サイズ分布はべき分布となることが知られており、べき指数は破砕の様式や進行度を反映していると考えられている。今回、粉碎の度合いと粒子サイズおよび形状の関係を調べるために、模擬粒子を用いた剪断粉碎実験を行ったので報告する。

剪断粉碎実験は回転式剪断試験機を用いて、変位10mmから1mの範囲で行った。所定の変位量まで剪断した実験後の試料は回収後、乾式粒子画像分析装置

Morphologi G3-SE(Malvern

Instruments)を用いてサイズ分布および形状を、粒子径 $1\mu\text{m}$ -1mmの範囲で測定した。観察ステージ上への試料の分散は、乾式分散ユニット(SDU)を使用して乾燥粉体の状態で実施した。

測定の結果、変位量の増加とともに小粒径側から指数-1のべき分布が発達していくことが明らかになった。これは理論モデルを構築する上で重要な知見となる。

$1\mu\text{m}$ 以下の粒子サイズも測定可能なレーザー回折粒度分布測定装置による測定結果とも比較し、乾式粒子画像分析装置による粒子サイズ分布測定の有効性についても検討する。

キーワード：断層ガウジ、粒子径、粒子形状、粉碎、フラクタル分布

Keywords: Fault gouge, Particle size, Particls Shape, Comminution, Fractal Distributions