

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、キャピラリー数

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