

Weakening mechanism and energy budget of laboratory earthquakes

*Alexandre Schubnel¹, François Passelègue², Nicolas Brantut³, Soumaya Latour⁶, Harsha Bhat⁴, Stefan Nielsen⁵, Raul Madariaga¹

1.Laboratoire de géologie, Ecole Normale Supérieure, Paris, France, 2.University of Manchester, UK, 3.University College London, UK, 4.IPGP, France, 5.Durham University, France, 6.IRAP, Toulouse, France

The dynamics of earthquake ruptures in subduction zone are expected to be partially governed by the dehydration of minerals during shear heating. In this study, we conducted and compared results coming from stick-slip experiments on Westerly granite, serpentized peridotite, and serpentinite. Experiments were conducted under triaxial loading at confining pressures of 50 and 100 MPa. The angle between the fault plane and the maximum stress was imposed to be equal to 30 degrees. Using a dual gain system, a high frequency acoustic monitoring array recorded particles acceleration during macroscopic stick-slip events and premonitory background microseismicity. In addition, we used an amplified strain gage located at 3 mm to fault plane to record the dynamic stress change during laboratory earthquakes. In all rocks, we show that increasing the stress acting on the fault leads to an increase of the seismic slip, which in turns leads to a decrease in the dynamic friction coefficient. However, for a same initial stress, displacements are larger in serpentized peridotite and in serpentinite than in Westerly granite. While the partial melting of the fault surface is observed in each rock tested, the dynamic friction drop is larger in peridotite and serpentinite. This larger friction drop is explained by the dehydration of antigorite, which leaves a partially amorphised material and leads to the production of a low viscosity melt. Finally, using theoretical assumptions, we show that the radiation efficiency of laboratory earthquakes is larger in peridotite and serpentinite than in granite. This calculation is supported by larger elastic wave radiation, and by microstructural analysis.

Keywords: friction, dehydration, critical weakening distance

Revisiting the slip-weakening friction: probe into the true source properties from off-fault measurements

*Shiqing Xu¹, Eiichi Fukuyama¹, Futoshi Yamashita¹, Kazuo Mizoguchi², Shigeru Takizawa¹, Hironori Kawakata³

1.Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev., 2.Centr. Res. Inst. Elect. Pow. Ind., 3.Ritsumeikan University

Slip-weakening friction, as evidenced by earlier pioneer rock fracture/friction experiments, has been widely used for numerically simulating earthquake ruptures, and for estimating earthquake source properties from seismological observations. Despite the great success, the accuracy of this constitutive relation is poorly known in the lab: measurements made close to the fault (yet still off the fault) were often assumed without validation to be the direct recordings of on-fault properties. Until recently, several works challenged this assumption, and showed that it may even lead to incorrect interpretation of rupture mode at speed close to the Rayleigh wave speed. This raises a concern on how to probe the true source properties on the fault using off-fault measurements, which was generally overlooked in the geophysical community.

To answer the question, we utilize a large-scale direct shear apparatus at NIED to monitor near-fault strain change during labquakes. By comparing our strain data with common slip-weakening model predications at various locations progressively away from the fault, we see systematically a decrease in apparent peak friction and an increase in apparent breakdown zone size. These features reflect the smearing out of the strain field away from the sharp rupture front. On the other hand, the initial strain before failure and the residual strain after the breakdown process are less sensitive to the sampling location, because the strain field is more homogeneous at those locations without sharp features. By fitting the strain data with templates created from a specific slip-weakening model, we are able to estimate the true source properties during labquakes within the framework of that model. If more data points were available, it would be even possible to probe the true "rupture distribution function" (Andrews, JGR 1976). In any case, our study suggests that care be taken when interpreting measurements during labquakes, especially when sharp features are involved during the rupture breakdown process (e.g. at a scale more than two times smaller than the source-recorder distance). Given the well-known Lorentz contraction effect, we may never be able to directly measure certain rupture properties at speed very close to the limit speed, which ultimately requires some indirect approaches.

Keywords: Slip-weakening friction, Dynamic rupture, Friction experiment

粒子回転の可視化による粉体振動層における対流現象の理解

Understanding characteristics of granular convection by visualizing rotation of individual particles in tapped granular bed

*光井 能麻¹、飯川 直樹¹、BANDI Mahesh²、桂木 洋光¹

*Noa Mitsui¹, Naoki Iikawa¹, Mahesh BANDI², Hiroaki Katsuragi¹

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.沖縄科学技術大学院大学

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

Granular material is defined by a collection of athermal particles, and it sometimes behaves like fluid despite solid property of each particle [1]. One of the fluid-like behaviors is convection of granular bed induced by vertical vibration, and it can be observed in laboratory experiments with various types of particles and vibrations. Recent studies propose that granular convection relates to resurfacing process of small asteroids covered with regolith (e.g., [2]). Thus the mechanism of the granular convection is not only physical but also geophysical problem.

One of the ways to understand the mechanism of granular convection is to monitor all degrees of freedom (DOF) of individual particles as well as to monitor the collective motion such as convection. The considered DOF of individual particles are (1) translational and (2) rotational velocities of each particle and (3) contact forces applied between particles besides body forces. However, in most of laboratory experiments, only translational velocities have been monitored (e.g., [3]). Recent study has visualized contact forces by using photoelastic discs [4,5]. However, they have not monitored rotational motion of particles. Particularly, although the particle rotation has not been measured well so far, it could significantly relate to the mechanism of granular convection.

In this study, we are going to monitor all these DOF in granular convection by using photoelastic discs. We use bidisperse photoelastic discs to make two-dimensional granular layer. Then, vertical intermittent tapping is applied to the granular layer by using an electromagnetic vibrator. We conducted experiments with several tapping conditions (duration and the maximum acceleration of tapping impulse). The photoelastic discs are painted with a fluorescent paint along the diameter to visualize the rotation by using ultraviolet-light illumination [6].

All DOF of individual particles in each tapping can be obtained as follows. Figure shows three types of pictures taken in this experiment. They are taken by using (a) white light source, (b) ultraviolet-light illumination, and (c) white light source under cross-polarized mode, respectively. Translational velocity and associated vorticity of granular convection are obtained by analyzing (a). The rotational velocities of individual particles are obtained by analyzing (b). In addition, the contact forces can be computed by (c). As the first step, we will focus on the analysis of (a) and (b) in this study, and understand the relation between granular convection and rotational velocities of individual particles.

[1] Jaeger, H. M., S. R. Nagel, and R. P. Behringer (1996) *Rev. Mod. Phys.*, 68, 1259-1273.

[2] Yamada, T., K. Ando, T. Morota, and H. Katsuragi (2015) arXiv: 1508.06485.

[3] Shukla, P., I.H. Ansari, R.M. van der Meer, D. Lohse, and M. Alam (2014) *J. Fluid Mech.*, 761, 123-167.

[4] Iikawa, N., M. M. Bandi, and H. Katsuragi (2015) *J. Phys. Soc. Jpn.* 84, 094401.

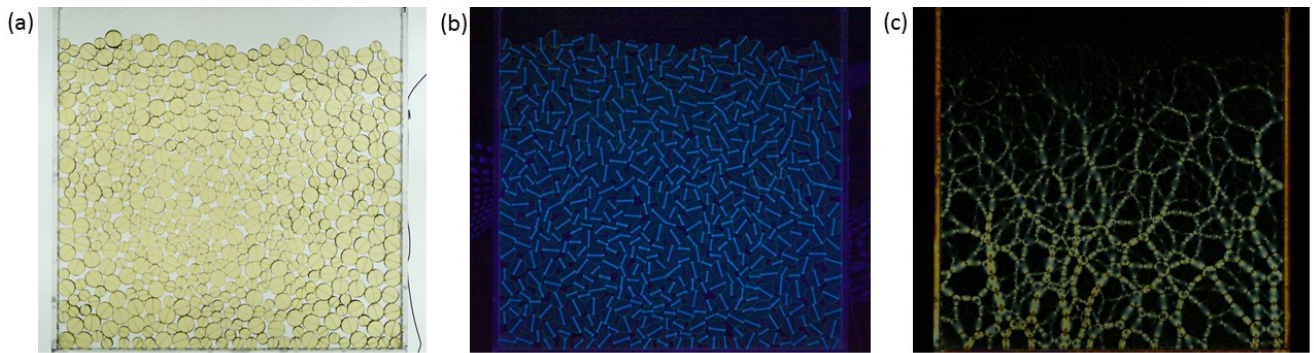
[5] Bandi, M. M., M. K. Rivera, F. Krzakala, and R. E. Ecke (2013) *Phys. Rev. E.*, 87, 042205.

[6] Puckett, J. G., and K. E. Daniels (2013) *Phys. Rev. Lett.* 110, 058001.

Figure. Samples of photos taken by using (a) white light source, (b) ultraviolet-light illumination, and (c) white light source under cross-polarized mode, respectively.

キーワード：粉体、粉体振動、回転

Keywords: granular matter, granular convection, rotation



Granular friction: Triggering slip motion with small vibrations

*Valerie Vidal¹, Henri Lastakowski¹, Jean-Christophe Géminard¹

1.Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon - CNRS

We investigate experimentally the influence of mechanical vibrations on the characteristics of granular friction. The experimental system consists of a slider and a cantilever spring, pulled at constant velocity over a granular layer. The slider mass, spring stiffness and pulling velocity are chosen such that without mechanical perturbances, the slider exhibits a classical stick-slip motion. Horizontal vibrations are then applied to the whole system. When increasing either the amplitude or frequency of the vibrations, the amplitude of the stick-slip motion decreases, until the system exhibits a transition to a continuous slip motion. Previous numerical studies pointed out the acceleration of imposed vertical vibrations as the governing parameter for the transition, with a value of the order of the gravitational acceleration. In contrast to these results, we show that the quantity that controls the frictional properties is the characteristic velocity, and not the acceleration, of the imposed mechanical vibrations. The critical velocity at which the system undergoes the transition to a continuous slip motion is very small, of the order of 100 microns/s. Thus, when the system is statically loaded, the typical acceleration of the vibrations which trigger large slip events is much smaller than the gravitational acceleration. These results may be relevant to understand dynamic earthquake triggering by small ground perturbations.

Keywords: granular friction, stick-slip motion, vibrations, dynamic earthquake triggering

マグマの流動から破壊への遷移を表現するためのレオロジーモデル

A new rheological model of magma for representing transigion from flow to fracture

*市原 美恵¹*Mie Ichihara¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Whether a flowing magma with increasing strain rate becomes brittle or ductile is an important but puzzling problem in considering eruption dynamics. The criterion of the brittle/ductile transition that is currently used in volcanology is thoroughly based on the linear viscoelastic model assuming small deformation. However, flow of magma to fracture is not in the linear regime, and the current model to describe the phenomenon reveals inconsistency. Here the problem is re-considered and a new constitutive equation for magma is proposed.

Magma rheology is frequently represented by the linear Maxwell model, which consists of a viscous element and an elastic element in line. It behaves elastically in a short time or in high-frequency oscillation, and viscously in a long time or in low-frequency oscillation. The dynamic viscosity is defined in oscillatory deformation as the amplitude ratio of the stress to the strain rate and is a function of frequency. For both of magma and the Maxwell model, the dynamic viscosity is constant in the low-frequency viscous regime, and decreases as frequency increases in the elastic regime. The frequency separating the viscous and elastic regimes is inversely proportional to the low-frequency limit of the dynamic viscosity.

There are two well-known rheological laws that generally hold for polymeric fluids including magma. The one is time-temperature superposition, which indicates that change of rheology with decreasing temperature is equivalent with increasing frequency. The other is what is called Cox and Merz rule: the steady-state viscosity as a function of strain rate under continuous flow is the same as the dynamic viscosity as a function of frequency and it decreases with increasing strain rate.

Combining the two laws has led the idea that flowing magma may enter the glassy (elastic) regime either by cooling or increasing strain rate (Dingwell, 1996). This idea has significantly influenced modeling of volcanic phenomena. Although the viscosity increases with cooling, it decreases with increasing strain rate. It is not clear whether transition to the glassy state with decreasing viscosity by increasing strain rate is the same as that by cooling.

In the area of non-linear physics, on the other hand, the glassy state is regarded as the jammed state and the glassy to ductile transition is linked to yielding (Trappe et al., 2002). In this view, a material goes from a glassy state to flow with increasing strain rate, which is opposite to the concept in volcanology. Moreover, Miyazaki et al. (2006) shows that the dynamic viscosity in the oscillatory flow either decreases or increases as the strain rate amplitude increases depending on how it is increased, that is the product of the frequency and the strain amplitude is increased whether by increasing the frequency or by increasing the strain amplitude.

The linear Maxwell model does not represent the Cox and Merz rule or non-linear behavior in large deformation. Here a new phenomenological model is proposed, which consists of the Maxwell model with a viscous element having variable viscosity and an equation representing change of the viscosity by forcing and relaxation. It can represent the behavior similar to the Cox and Merz rule. Using the new model, it is shown that not the strain rate but the strain acceleration is essential for bringing the flow to the brittle regime.

キーワード：マグマ、流動と破壊、レオロジー、火山噴火

Keywords: magma, flow and fracture, rheology, Volcanic eruption

動力学的不安定現象の高精度発生予測

High precision prediction of dynamic instabilities

*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

建物の倒壊、地すべり、地震といった動力学的不安定現象の発生予測は、被害を抑えるために極めて重要である。しかしながら、数多くの研究がなされているものの、これは一般に難しいと考えられている。一方、オイラー支柱や飛び移り座屈のようないくつかの1自由度力学系では、不安定化（倒壊や動的な陥没）に近づくに従って、システムの共振周波数が0に近づくことが知られている。本研究では、適用の範囲を広げ、最終的に地震発生予測につなげるため、飛び移り座屈を生じるシステムを多自由度に拡張する。動的な陥没過程の発生に先行して、システムの固有モードを計測することにより、どのくらい確実に発生を予測できるかを調べる。また、我々が取り組んでいる断層すべりの室内実験系にも適用することで、その適用範囲についても調べる。

キーワード：座屈、地震、発生予測、臨界減速

Keywords: buckling, earthquake, prediction, Critical slowing down

粘弾性体におきる地震の模擬実験：粘性緩和で最大マグニチュードが決まる

Earthquake model experiments in a viscoelastic fluid: A scaling of decreasing magnitudes of earthquakes with depth

*並木 敦子¹、山口 哲生²、隅田 育郎³、鈴木 岳人⁴、井出 哲⁵

*Atsuko Namiki¹, Tetsuo Yamaguchi², Ikuro Sumita³, Takehito Suzuki⁴, Satoshi Ide⁵

1.広島大学 総合科学研究科 環境自然科学講座、2.九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門、3.金沢大学 大学院自然科学研究科 自然システム学専攻、4.青山学院大学 理工学部、5.東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

1.Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, 2.Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Kyushu University, 3.Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 4.Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University, 5.Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

沈み込み帯では、地震の発生の仕方が深度と共に変わる。浅い方から固着の弱い領域、大地震が発生する領域、マグニチュードの小さい深部低周波微動の発生する領域が存在する。更に深い領域では地震を起こさないすべりが起きておりとしばしば仮定されるが、地震の発生が深さと共に消える原因はあまり定量的に議論されていない。そこで本研究では深さと共に周囲の温度が上がり、岩石のレオロジーが変わると、地震の発生にどの様に影響するかを実験により明らかにした。緩和時間を持つマクスウェル流体的な粘弾性物質にせん断速度を変えながら変形を与え、変形の様子を観察する実験を行った。その結果、歪速度が十分速い場合には、断続的に弾性応力を解放する地震のような現象が、遅い場合には粘性流動が観察された。その境界では、たまった歪の一部だけが断続的に解放され、残りの歪は蓄積していく現象が観察された。

この結果を実際の沈み込み帯に応用すると、地震が発生する浅部と地震が発生しない深部の間に地震は発生するものの、その歪の一部は蓄積する層が存在すると推測できる。実験の結果から、地震が発生する条件は緩和時間以内に蓄積された弾性応力が断層面の強度を上回るか否かで決まる事がわかっている。ここで、地球深部ではその高い温度により粘性率が下がり、緩和時間が短くなる事が推測できる。その場合、地震を起こす為に必要な歪速度が深度と共に速くなる事が予測される。地震を起こすアスペリティの歪速度は沈み込み速度とアスペリティのサイズの比で決まる為、地震を発生させ得るアスペリティの最大サイズは深度と共に小さくなると思われる。この結果は大地震を起こす領域よりも深部において、マグニチュードの小さい深部低周波微動が観測される事を説明する。この領域では蓄積された歪のある部分は粘性緩和により解放されないと推測できる。また、深部低周波微動が観測されるよりも深部では、地震の起きないすべりが起きているのではなく、上盤はプレートと共に粘性流体的に沈み込んでいると考えられる。

参考文献：

Namiki, A., T. Yamaguchi, I. Sumita, T. Suzuki, and S. Ide (2014), Earthquake model experiments in a viscoelastic fluid: A scaling of decreasing magnitudes of earthquakes with depth, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 3169–3181, doi:10.1002/2014JB011135.

キーワード：粘性緩和、せん断変形、マクスウェル流体

Keywords: Viscous relaxation, Shear deformation, Maxwell fluid

地球型惑星の沈み込み帯における条痕作用

Striation process at subduction zones of terrestrial planets

*江口 孝雄¹*Takao Eguchi¹

1.防衛大学校 応用科学群 地球海洋学科

1.Dept. of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy

We consider the basic nature of dynamics at zonal convergence boundaries between separate lithospheres on the terrestrial planets.

In this study the surface of the terrestrial planet considered is covered with several spherical rigid lithospheres having non-negligible individual horizontal motions relative to the deeper planetary structure.

We can analyze the basic aspects of various features at lithosphere boundary zones using the classical concept of plate tectonics.

Smaller-scaled convex topography and/or irregular shallow structure of the underthrusting-side lithosphere at the contacting interface of the consuming boundaries would cause a sort of striation (or wear-related) process with the elastic and inelastic deformation.

The continuous striation process should record the direction of the relative lithosphere motions on the planer interface.

However, in the case of tightly coupled boundaries with the intermittent history of greater seismic events, the striation process may not be a steady state problem.

On the earth, a large number of marine surveys have been unveiling the detailed characteristics of both the topography and sub-surface structure of oceanic lithospheres around subduction zones.

Recent studies of sophisticated multichannel seismic prospecting identified fine-scaled non-uniform topography of the plate-interface just beneath the fore-arc overriding lithosphere at the Japan trench and Nankai trough subduction zones, etc.

Using engineering methods and survey results, we can decode the details of the strain-rate dependent (seismic/aseismic) striation process on the lithospheric-interface with the local convex topography etc. at the terrestrial subduction zones.

For the striation process, we should incorporate the effect of both the spherical bending and subsequent buckling of the downgoing-side lithosphere with the age-dependent EET (effective elastic thickness).

Although the spherical buckling at the consuming boundary requests a specific geometry of surface curvature mainly depending on the EET, the past tectonic history including the deeper material flow regime etc. would also influence the three dimensional morphology of the downgoing lithosphere.

Furthermore, the difference of the elastic constants between the overriding and underthrusting lithospheres may affect dynamically on the striation and on the other seismological phenomena.

We then discuss mathematically the strain-rate dependent striation process using a simplified mechanical model for the larger inter-lithosphere seismic events.

キーワード：条痕作用、摩耗、非弾性変形、球殻座屈、沈み込み帯

Keywords: striation process, wear, inelastic deformation, spherical buckling, subduction zone

間隙水圧下での三軸圧縮試験による庵治花崗岩の弾性波速度測定

Measurements of elastic wave velocity of Aji granite during triaxial compression tests under pore pressure

*財間 寛太¹、片山 郁夫¹*Kanta Zaima¹, 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

1. Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

弾性波速度は地下構造を把握するための重要な物性のひとつである。例えば、地熱発電では、地熱流体がトラップされた地熱貯留層の評価において重要な役割を担っている。さらには、水圧破碎によって形成される人工的な地熱貯留層の評価においても欠かせない物性である。これまで多くの弾性波速度の研究がなされてきており、例えば、封圧に対する効果 (Nur and Simmons, 1969)、破壊に至るまでの軸応力の効果 (Gupta, 1973; Bonner, 1974; Lockner et al, 1977; Yukutake, 1989; Ayling et al. 1995)、流体飽和度の効果 (Nur and Simmons, 1969) などが報告されている。しかしながら、間隙水圧をかけた状態での破壊過程の弾性波速度についてはほとんど調べられていない。そこで本研究では、間隙水圧をかけた状態での三軸圧縮試験中の速度、振幅、周期の変化を調べ、水圧破碎における人工貯留層評価につなげることを目的として実験を行った。試料には庵治花崗岩を長さ40mm、直径20mmの円柱形に成形したものをを用いた。三軸圧縮破壊試験には、広島大学の容器内変形透水試験機を用いて、変位速度0.01mm/min、Dryな条件では封圧20MPa、Wetな条件では間隙流体として水を用いて、封圧20MPa、間隙水圧10MPaで実験を行った。間隙水圧はシリンジポンプを用いて一定に保ち、シリンジポンプの流体の体積変化からおよその空隙率変化を算出した。弾性波の測定では、サンプル両側面に直接圧電素子をはりつけて行うパルス透過法を採用した。オシロスコープで記録した波形から弾性波速度 (V_p , V_s)、振幅、周期を算出し、それぞれの変化を考察した。弾性波速度測定では、破壊過程におけるサンプル内のクラックの閉鎖・成長・生成による系統的な変化が見られ、変形初期には既存のクラックの閉鎖のため弾性波速度は若干早くなるのに対し、変形後期にはクラックの生成・成長により弾性波速度は著しく低下した。また、Dryでは V_p/V_s は変形の進行とともに低下するのに対し、Wetな実験では V_p/V_s は上昇した。これは、O'Connell and Budiansky (1974) のクラックモデルと調和的であり、含水条件では新たに生成したクラックを水で充填するため V_s の低下が著しく、相対的に V_p/V_s は増加する傾向が確認された。また、O'Connell and Budiansky (1974) のモデルからcrack densityを見積もると、間隙水圧下ではDryの実験に比べクラックはできにくいという傾向を示した。弾性波の振幅と周期においてはP波、S波ともに破壊に近づくにつれ、振幅が減衰するとともに波長が長くなる傾向がみられた。P波においては、クラック内に水が存在するほうがクラック面での弾性波の散乱が小さくなり、破壊過程での減衰が小さくなった。一方、S波の振幅は水の存在には強い影響は見られなかった。さらに、圧縮軸に対して垂直な振動方向をもつS波は、P波と比べ変形初期に振幅が大きくなることから、圧縮による水平方向のクラックの閉鎖に敏感に反応するためと考えられる。シリンジポンプの流体の体積変化から求めた空隙率変化と弾性波速度変化においては相関関係がみられ、弾性波速度の変化率からおよその空隙率を見積もることが可能であり、地下の水の量を知る上で有益な情報となると考えられる。

キーワード：弾性波速度、三軸圧縮破壊、クラック密度、間隙水圧

Keywords: elastic wave velocity, triaxial deformation, crack density, pore pressure

震源域の準静的破壊過程における超臨界流体の役割—1965-1967松代群発地震の事例—

Role of super critical fluids in quasi-static fracture process of earthquake nucleation
-case of 1965-1967 Matsushiro earthquake swarm-*榎本 祐嗣¹、山辺 典昭²、奥村 暢朗³*Yuji Enomoto¹, Tsuneaki Yamabe², Nobuo Okumura³

1.信州大学 繊維学部 Fii、2.信州大学 繊維学部、3.(株)コンボン研究所

1.Shinshu Univeristy, Department of Textile Engineering, Fii, 2.Shinshu University, Department of Textile Engineering, 3.Genesis Research Institute, Inc.

1965-1967年松代群発地震は長期にわたって活動が継続したため、地震・地殻変動のメカニズムの知見のみならず、地震由来の電磁気（地磁気、発光、大気電場）変動の特徴を知る好都合の機会となった。地震発生機構に関しては炭酸ガス・水噴火説が受け入れられているが、電磁気変動に関して諸説あるものの、発生機構と調和的な統合モデルは未だない。そこで、この地震を事例として地震準備過程における超臨界流体の役割を考究してみた。

松代群発地震では、深部マグマの冷却に伴って放出された炭酸ガス・水を主成分とする超臨界流体が地下15Kmあたりの不透水層を破壊して上昇、臨界点31°C7.4MPaの炭酸ガスが表層近くで水から脱ガス化、体積が約500倍に膨張して圧力が増し、岩盤内のクラックを押し広げたと考えられている（例えば笹井、CA研究会論文1994など）。

岩石が破壊した直後のクラック新生面からは荷電粒子（主にエキソ電子）が放出されることが知られている（Enomoto & Hashimoto, Nature 1990; Kawaguchi, JJAP 1998）。放出粒子のエネルギーは1-3eV程度で、クラック隙間に流入したガス分子に電子付着して帯電したガス流れを生じる(Scudiero *et al.*, Phys. Chem. Minerals 1998)。このプロセスが上述の炭酸ガス・水噴火説と融合することで、地震電磁気現象を説明できるはずとの作業仮説たてた。そして万能試験機を用いて松代の地殻構成岩である石英閃緑岩（板厚:20mm）をギロチン破壊（破壊荷重：約1200kgf）させ、同時に高圧(0.3-0.8MPa)の炭酸ガスを流し帯電ガス流を測定する実験を行った。その結果、継続時間が約2msecで200-700nAのパルス状電流の発生を確認できた。

松代群発地震の地下2-4kmの浅い震源域に分布する間隙水に溶け込んだ炭酸ガスの発泡・膨張によってクラックを水平方向に押し広げながら鉛直方向に伸び、それらが連動してM=4-5相当の断層面に広がるとき、400-1600Aの電流が発生して数nTから18nTの磁場を誘導することがラボ実験から推測できた。この磁場変動量は観測値（Yamazaki & Rikitake, BERI 1970）に相当している。こうして地下の浅い震源域で発生するパルス状の高電圧(15-20kV)・交流電流(3-4mA)は、森林帯が誘電体バリアとなって放電発光することも模擬実験で確かめることができた。

松代群発地震では地下浅いところで炭酸ガスの超臨界状態からの相変化が有感地震や電磁気変動の引き金となったといえる。松代群発地震がユニークな発生機構による地震であったことには違いないが、深部で超臨界流体の同様な相変化が、地震に伴う物理化学相互作用の引き金を担うことは十分考えられることであろう。水の超臨界点は374°C、22.1MPaである。プレート境界で巨大地震が起きる領域の温度は150°Cから350°Cと推定されている。その領域に隣り合う深部流体は、まさに超臨界流体からの相変化が起りうる環境にある。これらの現象が震源核の準静的破壊過程での電磁気相互作用とどう関わるのか、今後の検討課題としたい。

キーワード：破壊、超臨界流体、フラクトエミッション

Keywords: Fracture, Super critical fluids, Fractoeission

地震モーメントテンソルから求める応力場推定について

Estimating stress field from seismic moment tensor data based on the flow rule in plasticity theory

*松本 聡¹

*Satoshi Matsumoto¹

1.九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

Stress field is a key factor controlling earthquake occurrence and crustal evolution. A method that slip data on many pre-existing faults reveals relative stress tensor in a region have been applied many regions. On the other hand difficulty of the method arises due to non-linear relation of slip vector to traction on a fault.

Here, we show stress field in a region with seismic activity can be estimated from sum of seismic moment tensors in the region based on classical equation in plasticity theory. Seismic activity is a phenomenon relaxing crustal stress and creates inelastic deformation in a medium due to faulting, which suggests the medium could behave as plastic body. The simple mathematical manipulation make easy to estimate stress field in a region and to develop inversion method in further studies.

キーワード：地震モーメントテンソル、応力場

Keywords: seismic moment tensor, stress field

動的再結晶粒径と転位クリープから見積もった沈み込み帯逆断層深部の応力状態

Stress states in the deep part of subduction megathrust estimated from dynamically recrystallized grain size and dislocation creep flow laws of quartz

*清水 以知子¹、上田 匡将¹

*Ichiko Shimizu¹, Tadamasa Ueda¹

1. 東京大学大学院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, University of Tokyo

Strength of the continental lithosphere has been extensively studied, but little is known about stress states in subduction zone megathrusts. In this paper, we estimate paleo-stress in a Cretaceous subduction zone of the Sanbagawa belt in southwest Japan, using grain size piezometers and dislocation creep flow laws of quartz.

Laboratory studies showed that recrystallized grain size in dislocation creep is primarily controlled by the applied stress but physical basis of the piezometric relations is still in debate. Theoretical models predict that the steady-state grain size in dynamic recrystallization (DRX) is not only dependent on stress, but also on temperature. The common idea among existing theories is that competition between grain-boundary formation, and grain growth determines the steady-state grain size. For grain growth, grain boundary migration driven by strain-energy (ρ GBM), or that driven by surface-energy (γ GBM), have been considered. Both processes result in overall coarsening, but in the case of ρ GBM, strain-free small grains grow with the expense of larger deformed grains, while in γ GBM, small grains shrink and larger grains grow. A simple nucleation-and-growth model with ρ GBM produces a left-skewed distribution on a section that is approximated by a log-normal distribution with a single scaling parameter, d_c (Shimizu, 1999). In addition to subgrain rotation (SGR) nucleation and grain growth by ρ GBM, surface-energy drags were also taken into account in the revised theoretical piezometer (Shimizu, 2012).

We analyzed microstructures of quartz schists (meta-chert) taken from the Asemi-gawa root, central Shikoku. The grain size of quartz was measured by tracing grain boundaries on microphotographs and by mapping crystallographic orientations using the electron back-scattered diffraction (EBSD) method (Ueda & Shimizu, 2016, JpGU). Observed grain size distributions (GSDs), which were characterized by increasing numbers with decreasing grain size, were far different from bell-shaped distributions known for static grain growth driven by surface energy, and more like the theoretical distribution derived for the nucleation-and- ρ GBM model.

To estimate differential stress, we applied the revised theoretical piezometer (Shimizu, 2012) assuming that the grain size at the largest volume fraction corresponds to d_c . The paleo-stress estimates were also done by extrapolating dislocation flow law of wet quartz to the peak metamorphic temperatures. Preliminary results obtained for the sample in the garnet zone (ca. 500 °C) were within reasonable agreement with the dislocation creep model, whereas direct application of the experimental piezometer proposed by Stipp and Tullis (2003), re-calibrated by Holyoke & Kronenberg (2010), gives considerably smaller estimates.

References

Holyoke, C.W. and Kronenberg, A.K. (2010). *Tectonophysics*, 494, 17-31.

Shimizu, I. (1999). *Philosophical Magazine A*, 79, 1217-1231.

Shimizu, I. (2012) In: "Recrystallization", edited by Krzysztof Sztwiertnia, InTech, ISBN 978-953-51-0122-2, pp. 371-386.

Stipp, I. and Tullis, J. (2003). *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2088-2092.

キーワード：差応力、動的再結晶、転位クリープ、結晶粒径分布、石英、三波川変成帯

Keywords: differential stress, dynamic recrystallization, dislocation creep , grain size distribution, quartz, Sanbagawa metamorphic belt

石英の粒径依存型クリープと粒径非依存型クリープに関する実験的評価

Experimental evaluation of grain-size-sensitive creep and grain-size-insensitive creep of quartz

*福田 惇¹、Holyoke Caleb²、Kronenberg Andreas¹

*Jun-ichi Fukuda¹, Caleb W. Holyoke², Andreas K. Kronenberg¹

1.Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University、2.Department of Geosciences, University of Akron

1.Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University, 2.Department of Geosciences, University of Akron

Plastic deformation of polycrystalline materials is categorized into two main mechanisms; one controlled by grain boundary process which depends on grain size (grain-size-sensitive creep; GSS creep) and the other controlled by intragrain dislocation process which does not depend on grain size (grain-size-insensitive creep; GSI creep). Studies of experimentally deformed and naturally deformed rocks suggest that in general, the transition between GSS and GSI creep can occur in the grain size of the micrometer order.

Quartz controls the ductile strength of continental rocks because of its abundant existence and weakness. Therefore, a lot of experimental studies have been done to construct the flow laws of quartz ductile deformation. Most experiments used large grain aggregates such as a few hundred μm of each grain, which promote GSI (dislocation) creep. The stress exponents were 3~4 and the microstructures exhibit elongated grains and/or recrystallized grains with host large grains. The host grains still constitute the large volume of the aggregates, leading to GSI creep. The mechanical properties of GSS creep are not well known. In this study, we use fine-grained quartz to experimentally demonstrate GSS creep and its transition to GSI creep.

We hot pressed fine-grained quartz powder of $\sim 2 \mu\text{m}$ in a solid-pressure-medium deformation (Griggs-type) apparatus at 1.5 GPa and 900°C. We observed systematic grain growth from 2 μm to 25 μm with increasing annealing times from 1 hour to 240 hours. The hot-pressed samples show polygonal grain shapes, tight grain boundaries, and no lattice preferred crystallographic orientations (LPOs). Next, strain-rate stepping experiments were performed under 1.5 GPa, 900-600°C, and the strain rates of $10^{-3.5}$ - $10^{-6.0}$ /sec. At 900 and 800°C, the stress exponents determined were $n=1.5\sim 2.0$ (av. 1.7) regardless of the different hot press durations. At temperatures down to 600°C, the stress exponents increased up to 5. The microstructure of the samples shows undulatory extinction and recrystallized fine grains of 1 μm . The crystallographic orientations have weak LPOs that reflect some crystal plasticity and recrystallization. The later stage of deformation appears to be controlled mostly by GSS creep of finely recrystallized grains, as indicated by low stress exponents. Temperature stepping experiments show corresponding two trends; one at 900-750°C and the other at 700-550°C. The activation energies for the high temperature data were 160-200 kJ/mol (av. 180 kJ/mol) with the stress exponents of 1.7. The strength changes by pressure stepping corresponded to the water fugacity changes. The obtained water exponent is $r=1$ with $n=1.7$.

We extrapolate our GSS creep data to natural conditions together with previous flow laws for quartz dislocation creep. Under mid-crustal conditions where the temperature and strain rate conditions are around 400°C and 10^{-14} /sec, respectively, the transition from dislocation creep to GSS creep is predicted at a grain size of $\sim 10 \mu\text{m}$. This result is consistent with observations for natural quartz deformed by GSS creep. Our data indicate that the transition from dislocation creep to GSS creep occurs at crustal conditions for fine-grained quartz-rich rocks.

キーワード：石英レオロジー、流動則、地殻強度、Griggs式変形試験機

Keywords: Quartz rheology, Flow law, Crustal strength, Griggs-type deformation apparatus

鉍物混合層形成にともなう歪み弱化

Rheological weakening due to phase mixing of olivine + orthopyroxene aggregates

*田阪 美樹^{1,2}、Zimmerman Mark²、Kohlstedt David²*Miki Tasaka^{1,2}, Mark E Zimmerman², David L Kohlstedt²

1.新潟大学、2.ミネソタ大学

1.Niigata University, 2.University of Minnesota

To understand the processes involved in rheological weakening due to phase mixing in olivine + orthopyroxene aggregates, we have conducted high-strain torsion experiments on samples of iron-rich olivine + orthopyroxene. Samples with volume fractions of pyroxene, $f_{px} = 0.3$, were deformed at a temperature of 1200°C and a confining pressure of 300 MPa using a gas-medium apparatus to total shear strains up to $\gamma \approx 26$.

Values for the stress exponent of $n \approx 3$ and grain size exponent of $p \approx 1$ at lower strain ($1.9 \leq \gamma \leq 4.2$) and $n \approx 2$ and $p \approx 3.5$ at higher strain ($\gamma \geq 24$) were determined from a linear least-squares fit to the strain rate, stress, and grain size data using a power-law creep equation. These values of n and p indicate that our samples deformed by dislocation-accommodated grain boundary sliding at lower strain, with an increased contribution of diffusion creep at higher strain.

The microstructures observed in samples deformed to lower strain are consistent with structures induced by a dislocation-accommodated creep mechanism, while the microstructures observed in samples deformed to higher strain are compatible with structures observed following diffusional creep. In samples deformed to lower strain, elongated olivine and pyroxene grains aligned sub-parallel to the shear direction, and dynamically recrystallized grains formed in both phases. In contrast, in samples deformed to higher strains, mixtures of small, rounded grains of olivine and pyroxene were developed. The mechanical and microstructural evolution observed in this study are an important step toward understanding dynamic processes of strain localization and rheological weakening during plastic deformation of the lithosphere necessary for the initiation and persistence of plate tectonics.

キーワード：鉍物混合層、かんらん石輝石多結晶体

Keywords: phase mixing, olivine and orthopyroxene aggregates

融点直下から部分溶融に至るまでの多結晶体の非弾性の温度依存性：メカニズムの解明と地震学への応用を目指して

Temperature dependence of polycrystal anelasticity at near-solidus temperatures: toward clarification of the underlying mechanism and applications to seismology

*山内 初希¹、武井 康子¹

*Hatsuki Yamauchi¹, Yasuko Takei¹

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震波トモグラフィによって観測される地震波構造から地球内部の温度やメルト量などを定量的に見積もるためには、温度・メルト量・粒径などのパラメータが岩石の非弾性に及ぼす影響を理解する必要がある。しかし、高温高圧下での岩石の非弾性実験は難しく、パラメータを系統的に変えて取得した非弾性データは少ない。データの不足を補い多結晶体に共通する非弾性メカニズムを解明する目的で、我々は岩石のアナログ試料（ボルネオール）を用いて、岩石による実験よりも広い周波数範囲で強制振動実験を行ない弾性定数と減衰を測定してきた。

多結晶体の減衰スペクトルは一般に、周波数に対して単調に変化する“バックグラウンド”と、高周波数側に存在する幅の広い“ピーク”の足し合わせで表現される。低周波数側ではバックグラウンドが卓越するが、これはほとんどの非弾性実験で観察されている。そして、それらはマクスウェル周波数 $f_M (= M_0/\eta)$ （ M_0 は非緩和弾性定数、 η は拡散クリープの粘性）によるスケーリング則に従うことから、バックグラウンドでは物質の拡散に律速される粒界滑りが支配的なメカニズムであるといえる。一方で、ピークのスケーリング則やメカニズムは未解明である。地震波帯域ではピークが卓越するため、その解明が必要である。

我々は、ピークの挙動と部分溶融との関係に注目する。岩石による非弾性実験では、メルトを含む条件下で大きなピークが得られている。また、最近のアナログ試料を使った実験では、融点より低い温度でも、融点に近い温度ほど、ピークの振幅と幅が大きくなることが報告されている[Takei et al., 2014]。Takei et al. [2014]の結果は、メルトが存在しなくても融点直下では地震波の減衰が増大し速度が低下する可能性を示唆しているが、彼らのデータは融点より低温（ $T/T_m < 0.93$; T_m は融点）のものであるため、部分溶融がピークに与える影響を直接的に明らかにしてはいない。上部マントルの地震波構造を理解するためには、融点の直上と直下の両方で非弾性の測定を行ない、メルトの有無が非弾性に与える影響を調べることが重要である。

本研究では、アナログ試料を用いて広周波数範囲（ $2 \times 10^4 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz}$ ）の強制振動実験を行ない、非弾性の温度依存性を融点の直下から直上まで（ $0.88 < T/T_m < 1.01$ ）詳しく調べた。同じ温度範囲で超音波実験とクリープ実験を行なって、非緩和弾性定数と拡散クリープの粘性を測定し、 f_M を計算した。また、部分溶融試料の超音波速度から、波の周波数より高周波の帯域（ $f > 700 \text{ kHz}$ ）に存在する非弾性緩和の強度を求めた。得られた結果は以下のようにまとめることができる。(1)バックグラウンドの持つ非弾性緩和の総量は実験条件に依らず一定であるのに対して、ピークの総量はソリダスに近づくにつれて増大し、単純なマクスウェルスケーリング則には従わないことがわかった。(2)この増大がソリダス以下の温度から生じていることから、ピークはメルトの有無には関係しない固体状態の何らかのメカニズムにより生じていることが分かった。このことは、melt squirt flowがピークより十分高い超音波帯域に存在するという、超音波測定の結果とも調和的である。(3)部分溶融を経験しメルトのネットワークができた試料では、融点より低い温度でも、融点以上と同様の大きなピークを保つというヒステリシスが見られた。これは、高速拡散パスの存在がピークの増大に深く関わっていることを示唆する。これらの結果はピークのメカニズム解明の糸口となると期待される。地震学への応用として、温度によるピークの増大が地震波の速度と減衰に与える影響についても議論する。

キーワード：非弾性、地震波速度と減衰、部分溶融

Keywords: anelasticity, seismic wave velocity and attenuation, partial melting

転位が岩石非弾性に与える影響：アナログ物質を用いた実験的研究

Effect of Dislocations on Rock Anelasticity: Experimental Approach by Using an Analogue Material

*佐々木 勇人¹、武井 康子¹、マッカーシー クリスティーン²、鈴木 彩子¹

*Yuto Sasaki¹, Yasuko Takei¹, Christine McCarthy², Ayako Suzuki¹

1.東京大学地震研究所、2.コロンビア大学ラモント・ドアティ地質研究所

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University

地震波トモグラフィなどの観測から地球内部の状態を推定するには、地震波の速度分散と減衰を引き起こす岩石非弾性のメカニズムを理解することが必要となる。地球内部における非弾性の主なメカニズムとしては、多結晶体中での粒界すべりと転位の移動によるものの2つが提案されている。粒界すべりについては理論的・実験的研究 [1-4] が最近盛んになされている。一方で、転位と非弾性との関係についての実験的研究 [5, 6] はごくわずかであり、しかも粒界すべりの影響と区別することも難しい。本研究の目標は、多結晶体の非弾性が転位の有無によりどのように変化するかを実験的に調べ、転位が非弾性に与える影響を定量的に評価することである。岩石のアナログ物質としてボルネオール ($C_{10}H_{18}O$, 融点 $T_m = 204^\circ C$) 有機多結晶体を実験試料に用いて [3], 広周波数帯域 (10^2 - 10^4 Hz) での非弾性を高精度で測定した。

はじめに、アナログ多結晶体試料に対して1軸圧縮のクリープ実験を行ない、差応力 $\Delta\sigma$ を 0.27-2.3 MPaの範囲で系統的に変えて各差応力での定常歪速度を測定し、流動則を求めた。大気圧下では、差応力 $\Delta\sigma$ が 1 MPa以下では拡散クリープが生じるが、更に高差応力下では粒界に割れが生じてしまった。そこで、土質力学の分野で用いられている、低摩擦の1軸載荷機構を有する最大封圧 1 MPaの3軸圧力セル (佐藤剛司氏による設計) を導入し、封圧 $P_c = 0.8$ MPaにおいて、融点規格化温度 $T/T_m = 0.66$ ($T = 40^\circ C$) および 0.68 ($T = 50^\circ C$) でクリープ実験を行なった。その結果、 $\Delta\sigma < 0.90$ MPaでは応力指数が $n \sim 1$ の線形クリープ (粒界拡散クリープ [3]), $\Delta\sigma > 2.0$ MPaでは $n \sim 5$ のベキ乗則クリープが支配的となる流動則を $T/T_m = 0.68$ で得て、 $T/T_m = 0.66$ では遷移応力が更に高応力側であった。ベキ乗則クリープ領域で約30%の歪を与えた試料の微細構造には、粒界の屈曲や非一様な粒径分布が観察された。これらは転位が関与した粒界移動によるものと見られ、転位クリープによって多結晶体中に転位が導入されたと考えられる。

上記で得られた流動則に基づき、同一の試料を、拡散クリープ、中間的なクリープ、転位クリープが支配的となる3つの差応力 (0.27, 1.4, 2.1 MPa) で順に変形し、それぞれの変形の終了直後から、強制振動実験装置 [3] を用いて、試料の非弾性と (拡散クリープ領域での) 粘性を繰り返し測定した。 $P_c = 0.8$ MPa, $T/T_m = 0.68$ での各予変形後、差応力下で室温まで冷却した試料を強制振動実験装置に取り付け、大気圧下、 $T/T_m = 0.59$ - 0.66 (10 - $40^\circ C$) の範囲で温度を変えて非弾性測定を行なった：微小振幅 (~ 0.04 MPa) の1軸圧縮応力を周波数 $f = 10^2$ - 10^4 Hzで正弦的に加え、各周波数 f でのヤング率 $E(f)$ と減衰 $Q^{-1}(f)$ を測定した。粘性は、同時に加えている一定のオフセット応力 ($\Delta\sigma = 0.27$ MPa) に対する変形から測定した。実験の結果は以下のようにまとめられる。(1) 拡散クリープ下での変形 (歪 $\Delta\varepsilon = 0.7\%$) 後は、同じ条件での先行研究 [3] と非常に調和的なヤング率と Q^{-1} スペクトルを得た。(2) 中間的なクリープおよび転位クリープ下での変形 ($\Delta\varepsilon = 3.6\%$, 12%) 後は、ヤング率の低下と減衰 Q^{-1} の増大が有意にとらえられ、その変化量は予変形での差応力が高いほど大きかった。(3) 更に、時間の経過とともにヤング率と Q^{-1} は回復し、最終的には拡散クリープ後に得られたヤング率と Q^{-1} スペクトルに収束した。これらの結果から、転位による非弾性への影響がとらえられたと考えている。

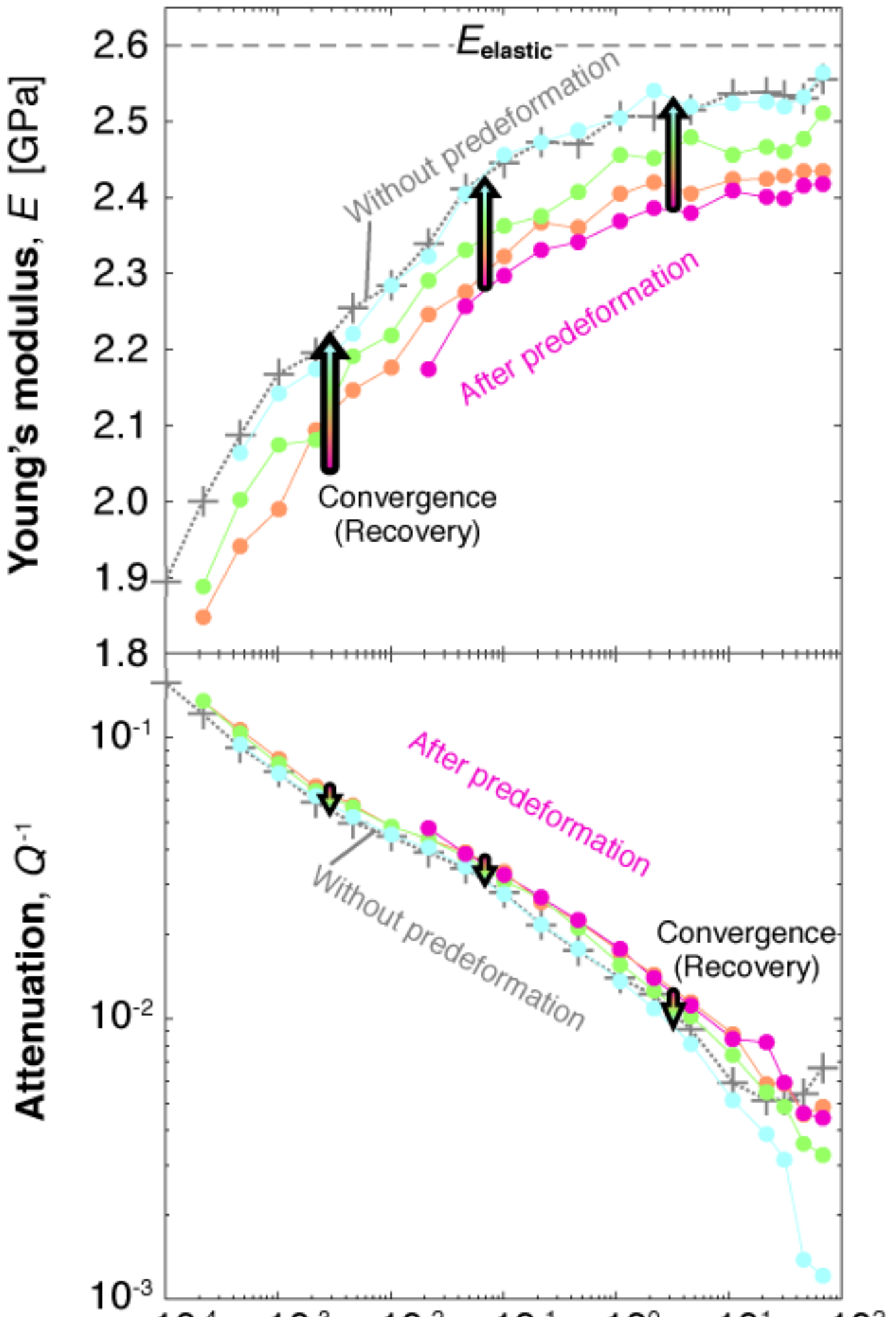
[1] Morris and Jackson, 2009, *J. Mech. Phys. Solids*

[2] Jackson et al., 2014, *PEPI*

- [3] Takei *et al.*, 2014, *JGR*
- [4] Gribb and Cooper, 1998, *JGR*
- [5] Guéguen *et al.*, 1989, *PEPI*
- [6] Farla *et al.*, 2012, *Science*

キーワード：非弾性、転位、地震波減衰、アナログ実験、多結晶体、欠陥

Keywords: anelasticity, dislocation, seismic attenuation, analog experiment, polycrystal, defect



高圧下における低温高応力塑性変形によるオリビンのファブリック

Fabric transition in olivine due to temperature and stress at high pressures

*鈴木 彩子^{1,2}, Mei Shenghua¹, Kohlstedt David¹, Durham William³, Dixon Nathaniel³*Ayako Suzuki^{1,2}, Shenghua Mei¹, David L Kohlstedt¹, William B Durham³, Nathaniel A Dixon³

1.ミネソタ大学、2.東京大学地震研究所、3.マサチューセッツ工科大学

1.University of Minnesota, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.Massachusetts Institute of Technology

The crystallographic fabric induced by deformation of mantle rocks reflects the dominant dislocation slip system and results in both rheological and seismic anisotropy in the upper mantle. The strength of the individual slip systems in olivine single crystals and the development of crystallographic fabric in olivine aggregates have been studied experimentally mainly in the high-temperature creep regime, with few measurements in the low-temperature plasticity regime. While a climb-controlled mechanism is important at higher temperatures and lower stresses, the dislocation slip mechanism in the low-temperature plasticity regime is considered to be glide-controlled. At low temperatures and high stresses, deformation of olivine aggregates follows an exponential flow law because dislocation motion requires a stress-dependent activation enthalpy for overcoming the Peierls barrier. In order to understand deformation mechanism and the dominant slip systems in the low-temperature plasticity regime, we investigated fabric evolution in olivine aggregates deformed experimentally at different temperatures changing from low to high at high pressures.

Samples were polycrystalline aggregates of San Carlos olivine with a grain size of 5-10 μm . Deformation experiments were carried out using the D-DIA apparatus at X-ray beamline X17B2 in the National Synchrotron Light Source (NSLS), Brookhaven National Laboratory. Samples were deformed to strains of 20-30% at a constant displacement rate of $0.1\text{-}6.8 \times 10^{-5}$ /s, temperatures of 673-1573 K, pressures of 4-9 GPa, and differential stresses of 0.6-3.8 GPa. Creep data at the highest temperature ($T = 1573$ K) and lowest stress indicated a dislocation, power-law creep mechanism, while creep results at lower temperatures ($T < 1273$ K) and higher stresses revealed an exponential flow mechanism (Mei et al., 2010).

After deformation experiments, we determined the crystallographic fabric (CPO, crystallographic preferred orientation) in the deformed samples using electron backscattered diffraction (EBSD). At the highest temperature ($T = 1573\text{K}$) and lower stresses ($\sigma < 1$ GPa), the poles of the (010) planes concentrated parallel to the maximum principal stress. This concentration of (010) planes is more dispersed at a temperature of 1473 K. In contrast, at lower temperatures ($T < 1373$ K) and higher stresses ($\sigma > 2$ GPa), the poles of the (100) planes concentrated parallel to the maximum principal stress. The change of crystallographic fabric in deformed samples is roughly consistent with the change of deformation mechanisms based on the analyses of mechanical data as stated above. This transition in slip plane associated with a change in temperature and stress is consistent with a difference in dominant slip systems of (010)[100] at higher temperatures and low stresses and (100)[001] at lower temperatures (Bai et al., 1991; Durham and Goetze, 1977; Tielke, 2016), indicating that the dominant slip system in the glide-controlled low-temperature plasticity regime differs from that in the high-temperature climb-controlled creep regime.

キーワード：低温塑性、すべり系、オリビン

Keywords: low-temperature plasticity, slip system, olivine

高圧変形その場観察実験によるhcp金属の格子選択配向の研究

Lattice-preferred-orientation of hcp metals studied by high-pressure deformation experiments

*西原 遊¹、大内 智博¹、川添 貴章²、丸山 玄太¹、瀬戸 雄介⁴、肥後 祐司⁵、舟越 賢一³、丹下 慶範⁵*Yu Nishihara¹, Tomohiro Ohuchi¹, Takaaki Kawazoe², Genta Maruyama¹, Yusuke Seto⁴, Yuji Higo⁵, Ken-ichi Funakoshi³, Yoshinori Tange⁵

1.愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター、2.バイロイト大学、3.総合科学研究機構、4.神戸大学、5.高輝度光科学研究センター

1.Geodynamics Research Center Ehime University, 2.Bayreuth Geoinstitut, 3.CROSS, 4.Kobe University, 5.JASRI

地球の内核は極方向に伝播するP波速度が赤道方向のそれよりも約3%速いという顕著な異方性を持つことが知られており、これを説明する様々なモデルが提案されている (e.g. Sumita and Bergmann, 2009)。多くのモデルでは内核を構成するFeの高圧相であるhcp-Feの変形誘起格子選択配向を異方性形成の素過程とみなしている。過去にDACまたはD-DIA装置を用いた一軸圧縮実験での格子選択配向の報告はあるが、この場合結果の解釈にすべり系の容易度を仮定したモデル計算が必要で明快な結論が得られていない (e.g. Merkel et al., 2004)。本研究では、D-DIA装置を用いてhcp-Feおよびアナログ物質であるhcp-Coとhcp-Znの剪断変形実験を行いこれによって発達する格子選択配向を決定することを目指した。

出発物質にはあらかじめ焼結したbcc-Fe、hcp-Co、hcp-Znのディスクを用いた。実験はSPring-8、BL04B1に設置されたSPEED-MkII-Dを用いて行った。Fe、Co、Znの実験の圧力はそれぞれ14-18 GPa、3 GPa、2 GPa、温度はそれぞれ723 K、673 K、573 Kである。45°で切断したAl203円柱で試料を挟みセル全体の一軸圧縮により試料を剪断変形させた。変形中の試料の2次元回折パターンを50-60 keVの単色X線とイメージングプレートを用いて取得した。2次元回折パターンをソフトウェアReciPro (瀬戸, 2012) で解析し試料の格子選択配向を求めた。Fe試料を用いた実験では、高圧下で加熱後に得られた単相のhcp-Feのほぼランダムな組織から変形の進行とともに徐々に格子選択配向が発達していく様子が観察された。最終的に得られた選択配向は、剪断面法線方向に $\langle 0001 \rangle$ が、剪断方向に $\langle 112(_)0 \rangle$ が配列する底面すべり支配のパターンが約35°逆回転したものであった。いっぽうCo、Znを用いたより低圧での実験では、剪断面法線方向に $\langle 0001 \rangle$ が配列する底面すべり支配のほぼ理想的なパターンが得られた。Fe試料の実験におけるパターンの理想的角度からのズレの原因は、14-18 GPaの高圧下ではピストンの水平方向のすべりが摩擦によって抑制されたことであると推定される。地球内核の異方性は、次数2的対流パターン(Wenk et al., 2000)での変形でhcp-Feの底面すべりが支配的となることで解釈できるかもしれない。

キーワード：hcp金属、格子選択配向、内核

Keywords: hexagonal-close-packed metal, lattice preferred orientation, inner core

濡れた粉体層における穴構造の力学特性

The mechanical property of a tunnel structure 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, 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)). The origin of this nonlinear response of wet granular matter to external loading has not yet been revealed sufficiently. Moreover, 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 deformed when it was uniformly loaded from the top of the layer with a very slow loading rate. By taking and analyzing the movies of deforming tunnel structures, we examined the temporal evolution of a projected cross section of the tunnel structure. Furthermore, based on the discussion of stability of tunnels in the soil (Knappett and Craig, *Craigs Soil Mechanics*, Spon Press (2012)), we estimated the maximum shear stress applied to the tunnel structure at each state. The experimental result showed that the mode of deformation depends on both liquid content and packing fraction. Particularly, the liquid-content dependence of the mechanical response is not monotonic. In addition, we defined two types of strengths characterizing a tunnel structure: yield and maximum stresses. As a result, we found that these strengths strongly depend on packing fraction. Besides, they show qualitatively different liquid-content dependence in relatively high liquid content regime. Finally, we briefly discussed a possible application of the experimental result for estimating the upper limit size of 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).

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(2)
Feasibility Study of Morphological Characterization to Comminuted Particles by A Particle
Characterization Approach (2)

*笹倉 大督¹、桑野 修²

*Daisuke Sasakura¹, 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 海洋研究開発機構

1.Malvern Japan ,Div of Spectris Co.Ltd,., 2.JAMSTEC

断層破碎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碎の様式や度合いを知る手掛りになるだろう。断層破碎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、べき指数は破碎の様式や進行度を反映していると考えられている。また、断層ガウジの粒子サイズ分布の測定から、過去の断層運動時の破壊エネルギーを見積る試みもなされている。

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10m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 μ 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粒子サイズ分布が変化し、変位10cm以上ではべき指数が変位とともに変化することが捉えられた。1 μ 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、粒子サイズ、粒子形状、粉碎、フラクタル分布

Keywords: Fault gouge, Particle size, Particle Shape, Commutation, Fractal Distributions

大規模超高精度砂箱実験

- フロントスラスト形成に先立つ予兆現象の精密測定 -

Large Scale High Precision Sand Box Experiments:

Precise Measurements of Precursory Signal Preceding to Frontal Thrust Formation

*桑野 修¹、堀 高峰¹、阪口 秀¹、西浦 泰介¹、古市 幹人¹、山本 美希¹、山田 泰広¹

*Osamu Kuwano¹, Takane Horii¹, Hide Sakaguchi¹, Daisuke Nishiura¹, Mikito Furuichi¹, Miki Yamamoto¹, Yasuhiro Yamada¹

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 μ m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。講演では、砂箱実験で見られたスラスト形成の予兆現象についての詳細測定、観察の結果について報告し予兆現象の実体についての考察を行う。

キーワード：予兆現象、地震、砂箱実験

Keywords: precursor, earthquake, sandbox experiment

低浸透率層を含む二層系の液状化実験：層厚依存性

Liquefaction experiments with a low permeability upper layer : dependence on layer thicknesses

*水野 萌¹、隅田 育郎¹*Moe Mizuno¹, Ikuro Sumita¹

1. 金沢大学大学院自然科学研究科

1. Graduate school of Natural Science and Technology, Kanazawa University

地下水に浸かっている緩い地盤は地震発生時に液状化しやすく、その上部が細粒層に覆われていると、特徴的な水平の長さスケールを持った噴砂や火炎構造が形成されることが良く知られている。土質力学の分野では水平振動下における液状化のモデル実験が行われており、細粒層厚/粗粒層厚の比が大きくなるに従い噴砂の数や面積が減少することが報告されている(山口他, 2008)。しかしこれらの結果の物理的な解釈はなされていない。また層厚比にのみ着目しており、各々の層厚が及ぼす影響については十分に分かっていない。本研究では、二層の厚さの組み合わせを変えたセルを用いて液状化のモデル実験を行い、層厚と液状化・噴砂現象の関係を定量的に調べ、その物理を明らかにすることを目的としている。

液状化モデルのセルとして、ケースに粒径の異なる二種類のガラスビーズを入れて水で満たしたものをを用いる。上層の粒径は0.05mm、下層の粒径は0.22mmである。上層の浸透率は下層の32分の1となり、低浸透率層を形成する。各層厚を0~40mmの範囲で変化させ、14種類のセルを用いて実験を行った。実験方法としてはセルをよく振り攪拌した後、振動台の上に固定し5秒間鉛直振動を与える。振動条件として周波数を100Hz、加速度を 30m/s^2 (重力加速度の約3倍)とした。実験は高速カメラを用いて撮影し、詳細な画像解析を行った。

圧密に加えて、火炎構造の形成と噴砂が大部分の実験で起きた。これらは二層境界における重力不安定の結果と理解できる(Yasuda & Sumita, 2014, 2016)。下層よりも上層が厚くなると火炎構造や噴砂が形成されず、圧密のみが起きた。下層厚が22~26mmの場合に限定して上層厚依存性を詳しく調べたところ、上層が厚くなると、火炎構造の波長は増大し、振幅成長率は減少するという傾向がみられた。火炎構造の波長には上限値が存在するようである。また火炎構造の最大振幅には極大値があり、上層が十分厚くなると最大振幅が減少するという傾向が見られた。振幅成長率の値を用いてすべての実験結果を分類すると、下層が薄い場合には成長率が上層厚と下層厚の両方に依存するが、下層が十分厚い場合には主として上層厚に依存することが分かった。実験結果を理論的に考察する。粉粒体同士の間摩擦応力 σ はクーロンの摩擦の法則 $\sigma = \mu \Delta \rho \phi g z \dots (1)$ に従い、深さ z に比例して増大する。ここで μ は摩擦係数、 $\Delta \rho$ は粒子と水の密度差、 ϕ は充填率、 g は重力加速度、 z は深さである。振動によって与えられる慣性力と摩擦力の比は「慣性力/摩擦力 $\propto 1/z$ 」となり、臨界深さ z_c で深では「慣性力 $<$ 摩擦力」のため、液状化しないと考えられる。そのため、上層が厚くなるに伴って二層境界付近の粒子層は流動化しにくくなると考えられる。

粘性流体のRayleigh-Taylor不安定の線形論(Whitehead & Luther, 1975)の結果によると、不安定の波長 λ および振幅成長率 p は次式で表される。 $\lambda \propto \varepsilon^{1/3} h \dots (2)$, $p \propto \varepsilon^{-2/3} h \dots (3)$ ここで、 ε は二層境界直上の上層と二層境界直下の流動層との実効粘性率の比、 h は流動層の厚さである。以上より上層厚の増大に伴い λ は増大、 p は減少するという結果は、 ε が大きくなることで説明できる。測定した λ と p の値を式(2)(3)に代入して ε を求めると、上層が厚くなるにつれて ε が3から495へと増加するという結果が得られた。上層厚の増大に伴う ε の増加はクーロンの摩擦の法則から推測される結果と整合的である。本実験結果は、上層厚の増大に伴って二層境界直上の粒子間の摩擦が増大し、流動化した粉粒体の実効的な粘性率が増大したためと理解できる。

キーワード：液状化、地震、低浸透率層、重力不安定、層厚依存性

Keywords: Liquefaction, earthquakes, low-permeability layer, gravitational instability, thickness dependence

摩擦の不安定性に関するエネルギー的評価と剪断に伴う組織発達の定量的評価
Energetic Assessment of Frictional Instability
and Quantitative Evaluation of Microstructural Development with Shear

*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.Dept. Earth Science, Tohoku Univ.

1. Introduction

Frictional instability has been evaluated empirically by using a frictional parameter (velocity dependence) on the basis of the rate and state dependent friction law (Dieterich, 1979; Ruina, 1983). In addition, shear development in a gouge layer influences frictional instability (e.g., Byerlee et al., 1978; Logan et al., 1979; Ikari et al., 2011; Onuma et al., 2011). Ikari et al. (2011) pointed out a possibility that velocity dependence of friction changes with shear. However, it is difficult to accurately observe shear structures developed in recovered gouge samples and deal with shear zone development in gouge statistically. Therefore, the underlying theoretical relation between frictional instability and shear development has not been clear yet. In the present study, we aim to clarify (1) relation between frictional instability and shear development by energetic analysis, and (2) process of shear development toward frictional instability of gouge through theoretical and experimental analysis.

2. The energetic criterion for frictional instability

Deformation of particles progresses in an energetically efficient way (Rowe, 1962). Thus, both energy ratio defined as a ratio of input mechanical energy to output energy, and hence dissipation energy of particles become minimum. Stability of a mechanical system is influenced by energy. If a frictional system represented by a spring-slider model experiences frictional damping, the stored energy in the system decreases leading to stable slip. In contrast, if the system experiences negative frictional damping, the stored energy increases leading to unstable slip. Negative frictional damping indicates that friction force works to the direction of motion and might be related to shear development. Because the stored energy coincides with the difference in energy during deformation, the stored energy can be represented by the energy ratio between input energy to output energy through deformation. Thus, the energetic criterion for frictional instability is obtained from the relation between the stored energy and mechanical behavior of the frictional system.

3. The friction experiments

We analyzed data of friction experiments using simulated fault gouge (Hirata et al., 2014) to obtain energy ratio of gouge during friction experiments in gas apparatus. The cylindrical samples with dry quartz powder as gouge were loaded under 140, 160, and 180 MPa of confining pressures. Data about stress and strain in major and minor principal axes were recorded through strain gauges placed onto samples. The values of energy ratios of gouge were obtained based on these values.

4. Results and discussion

We clarified that the output energy has a linear relationship with input mechanical energy, but energy ratios changed slightly with shear. Change in the energy ratio which is a function of internal friction angles implies shear development. R1-shear angles from major principal stress axis can be estimated using internal friction angles (Morgenstern and Tchalenko, 1967). Thus, the energy ratio controlled by the internal friction angle closely related to shear development. R1-shear angles we estimated show that R1-shears becomes more parallel to a rock-gouge boundary

before the occurrence of unstable slip. At 140 MPa of confining pressure, R1-shear was inferred to be developed almost parallel to the boundary (3 degrees to the boundary) at the top of a sample as deformation proceeds. The reduction of shear angles with respect to shear zone boundary with progressive shear is consistent with previous works (e.g., Gu and Wong, 1994).

5. Summary

We investigated relation between frictional instability and shear development energetically. Our results revealed that (1) the energetic background for their relation; (2) the efficacy of the energetic criterion for frictional instability; and (3) shear development in gouge in situ.

キーワード：摩擦の不安定性、Roweの理論、組織発達、模擬断層ガウジ、摩擦実験、エネルギー的評価

Keywords: frictional instability, Rowe's theory, microstructural development, simulated fault gouge, friction experiments, energetic assessment

コスタリカ沖未固結堆積物の差応力下の物性と異方性の分布

Distributions of physical property and anisotropy of unconsolidated sediments off Costa Rica under differential stress

*比嘉 咲希¹、橋本 善孝¹

*Saki Higa¹, Yoshitaka Hashimoto¹

1.高知大学

1.Kochi University

Static moduli of rock are used in borehole stability to evaluate elevated pore pressure and tectonic stress distribution. The static and dynamic moduli of the same rock may significantly differ from each other. The main reason is likely to be the difference in the size of strain between the dynamic and static tests. In the dynamic properties the strain is about 10^{-7} , while static strain may be about 10^{-2} .

The purpose of this study is to reveal the relationship between static and dynamic moduli of unconsolidated sediments obtained from off Costa Rica, and to evaluate anisotropy of static moduli using shear strain. To achieve this purpose, we obtained (1) static Vp/Vs using volumetric strain and shear strain from experiments in differential stress, and (2) dynamic Vp/Vs from dynamic wave propagation experiments. Then Poisson's ratio was calculated using Vp/Vs. Using Poisson's ratio, static and dynamic Young's moduli were transformed.

Used materials are unconsolidated sediments obtained by IODP expedition 344. We focused on reference site U1414, frontal prism U1412, mid-slope U1380. Materials were remodeled into cylinder shape for the experiments.

Equipment of laboratory experiment consists of pressure vessel, three syringe pumps, computer, transducer, oscilloscope, displacement gauge. In laboratory experiment, pore fluid pressure was kept 1MPa. Effective pressure was controlled by changing axial pressure and confining pressure. We calculated in-situ effective pressure using sample depth, bulk density and assumption of hydrostatic pressure of pore pressure. We conducted 4-5 steps of experiment with isotropic pressure up to in-situ effective pressure. Between each isotropic condition, differential stress experiments were conducted. In differential stress experiments, axial pressure was increased and radial pressure was kept in constant; increment of differential stress is three times as large as increment of effective pressure. Axial strain was calculated from a value of axial displacement gauge. Volumetric strain and porosity were calculated from remaining volume of pore fluid pressure in a pump. When strain reached at equilibrium condition, waveform, a value of axial displacement gauge and remaining volume of pore fluid pressure were recorded.

In the results, static Vp/Vs ranges 1.5-1.6, and dynamic Vp/Vs covers 2.0-2.1. Using each Vp/Vs, Poisson's ratio, static and dynamic Young's moduli were calculated. The ratio of dynamic to static Young's moduli (K) was about 0.6. Dynamic physical properties can transform into static physical properties using K value. Dynamic S-wave velocity was about 25% slower than static S-wave velocity systematically in all samples.

Shear strain of samples from U1414 was larger than that of samples from sites U1412 and U1380. Shear strain is described by the difference between axial strain and radial strain, suggesting anisotropy in reference site is larger than that in wedge.

キーワード：静的物性、コスタリカ、未固結堆積物

Keywords: static moduli, Costa Rica, unconsolidated sediments

土質試料および岩石の力学的分岐と塑性指数

Plasticity index and mechanical bifurcation of soils and rocks

*金子 尚人¹、武藤 潤¹、長濱 裕幸¹

*Naoto Kaneko¹, Jun Muto¹, Hiroyuki Nagahama¹

1. 東北大学理学部地学専攻

1. Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University

In the field of soil mechanics, triaxial compression test is widely used to investigate mechanical properties of soils. Yielded specimens characterized by Mohr's stress circles have various deformation patterns depending on loading stages and stress ratios in spite of the same ground materials. Failure patterns of ground materials bifurcationally change to diamond, bulge and a pair of oblique shear patterns. The symmetry of deformation patterns (e.g. shear band patterns) has been illuminated by bifurcation analysis of governing equation of soil mechanics based on Cam-clay model. On the other hand, plasticity index, an empirical parameter to characterize the range of water contents where the soil exhibits plastic property, is known to describe mechanical characteristics (e.g. compressibility) of soils. However, it is an unknown theoretical relationship between mechanical bifurcation controlling the evolution of deformation patterns and plasticity index. Also the theoretical relationships between the empirical laws of soil strength and plasticity index have not been clear yet. Hence, we show that plasticity index theoretically determines deformation patterns of soils by Cam-clay model, and we prove that the index closely affects the bifurcation formulas on the basis of Shibi and Kamei (2002)'s bifurcation analysis. From the view point of the plasticity index, deformation facies representing various deformation patterns of rocks in geologic condition are controlled by mean ductility and ductility contrast, as quantitatively proposed by Uemura (1981).

キーワード：塑性指数、変形パターン、分岐

Keywords: plasticity index, deformation patterns, bifurcation

アナログ実験による柱状節理の形態的遷移についての研究

Analogue experiments for understanding of factors controlling morphological transition in columnar joints

*濱田 藍¹、寅丸 敦志²

*Ai Hamada¹, Atsushi Toramaru²

1.九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2.九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University,

2.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

溶岩流および溶結凝灰岩に見られる柱状節理には、一層の岩体内でコラムの幅、形状、発達方向が明瞭に異なる2つの形態が隣接して観察され、Colonnade(コロネード、コラムの幅が比較的大、直線的、規則的な配列)およびEntablature(エンタブラチャー、柱の幅が比較的小、曲線的、不規則的な配列)と呼ぶ。柱状節理は冷却固結にともない熱応力が蓄積された結果、ある等温面に対して垂直にクラックが形成すると考えられているが、形態遷移の再現を試みたアナログ実験例はなく、Entablatureのような曲線的で方向性の変化に富んだ形態の領域においても、上記のクラックの形成過程が適用されるのかは明らかではない。本研究ではアナログ物質としてデンプンと水の混合物を用いた乾燥実験により曲線的な構造の再現を行い、X線CT撮影画像をもとにクラックの伸展過程および水の濃度分布とクラックの関係を調べ、さらにコラムの幅の変化を再現した実験結果の幾何学的解析も合わせて、天然で見られる柱状節理のColonnade-Entablature形態遷移の概念モデルを提案する。実験1：片栗粉と水の混合物の上方からランプを点灯して乾燥させ、混合物中を伸展するクラックと混合物内の水の濃度分布の時間変化をX線CT解析装置で撮影し観察した。混合物の質量変化より算出した乾燥速度の変化には、(1)上澄み液の蒸発(2)混合物表面からの一定の蒸発(3)クラックの伸展に伴う混合物内部での水の移動に伴う蒸発、の3つの時間領域があることが分かった。(3)の時間領域では混合物内には直線的なクラックが内部に向かって伸展し、乾燥速度が時間の $-1/2$ 乗に比例することから、混合物中の水の移動は拡散過程で進行していることがわかった。クラックフロントは時間の $1/2$ 乗に比例して進行していることから、クラックの伸展はある決まった水の濃度において起こることがわかった。実験2：混合物を直角三角柱型の容器に入れ、1つの面を樹脂で塞いで、直角をなす他の2つの乾燥面を通してのみ乾燥が起こるようにした。クラックの時間発展をX線CT解析装置で観察したところ、クラックはそれぞれの乾燥面に垂直に伸展し始め、直線的に伸展したあと、2つの乾燥面の2等分面付近で交わることなく、曲がった構造が形成された。混合物内の水の移動が拡散過程で進行すると仮定し、ある等濃度面に垂直にクラックが伸展するとした場合のクラックの形態計算結果と比較すると、クラックの伸展は初期濃度の0.6倍程度の濃度で起こることが分かった。実験3：1方向からの乾燥によるクラックの発達途中で乾燥速度を瞬間的に増加させた場合、乾燥速度増加後のコラムの数は増加し、コラムの断面積は減少した。乾燥速度強制増加後には、既存のコラムの3重点もしくは4重点に新しいコラムの形成(コラムの核形成)が起こっていることが分かった。以上の3つの乾燥過程を利用したアナログ実験結果から、天然のマグマの冷却に伴う柱状節理の形成に関して

1、クラックフロントの伸展は拡散過程で進行する。

2、2つの冷却面から冷却する矩形領域において熱が拡散過程で進行すると、ある等温度面に垂直に節理形成が起こり、その節理が出会う岩体の中央付近では曲がった構造が形成される。

3、冷却速度の急激な増加はコラムの核形成を起こし、コラムの幅を小さくする。

上記の結果および岩体最上部を冷却面として岩体内部を鉛直方向に伝わる熱輸送 Q_1 およびクラックを冷却面として岩体内部を水平方向に伝わる熱輸送 Q_2 を仮定して、柱状節理の形態遷移のシナリオを提案する。大分県豊後大野市杵子岩は高さ約100mの一層の火砕流堆積物(阿蘇4溶結凝灰岩)内の上部にColonnade、中央にEntablature、下部にColonnadeの順番に配列した形態的に異なる3つの部分から成る構造が見られる。EntablatureはUpper Colonnadeから発達する直線的なクラックを起点にクラックが発達し放射状の構造を作り出し、この放射状構造は水平方向にいくつか隣接して見られる。Upper Colonnadeの冷却は、岩体最上部を冷却面としてより高温の岩体内部から鉛直上方向に伝わる熱輸送 Q_1 が拡散過程により進行し、ある温度 T_c になった位置でクラックが等温面に垂直に進展し、Colonnadeが形成される。クラックがUpper Colonnade内を

Entablatureの上部まで伸展するとクラック自身が新たな冷却面となり、熱輸送 Q_1 に加えて水平方向に伝わる熱輸送 Q_2 が卓越してくる。すると、クラック先端付近の等温面の形状が下に凸になり、温度 T_c となる等温面に対して垂直にクラックが伸展する。この際、 Q_1 から Q_1+Q_2 の熱輸送に遷移することで、急激な冷却が起こりコラムの核形成が誘発され、Upper Colonnadeよりも幅の小さなコラムが放射状構造を形成した。これは、天然の観察事実と調和的である。

キーワード：柱状節理、形態遷移、アナログ実験

Keywords: Columnar jointing, Morphological transition, Analogue experiment

3相系マグマのレオロジー則と粘性-脆性遷移：桜島昭和溶岩の例

Rheological law and viscous-brittle transition of 3 phase magma; a case study for the 1946 andesitic lava from Sakurajima volcano, Japan

*石橋 秀巳¹、三輪 学央²、三井 雄太¹

*Hidemi Ishibashi¹, Takahiro Miwa², Yuta Mitsui¹

1.静岡大学理学部地球科学専攻、2.防災科学技術研究所

1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.NIED

結晶および気泡を含む3相系マグマである桜島昭和溶岩について、1300-1130Kの温度、 $10^{-2.5}$ - $10^{-5.5}$ s⁻¹の歪速度の条件で一軸圧縮変形実験を行った。実験の初生物質として用いた溶岩は気泡を20vol.%程度含み、固相は47 vol.%の流紋岩質ガラスと23vol.%程度のマイクロライト、30vol.%程度の斑晶からなる安山岩質溶岩である。実験は、東京大学地震研究所の一軸圧縮試験機を用いて行った。実験温度において2時間程プレヒーティングした後に変形実験を行い、変形終了後15分以内に873K以下まで冷却し、サンプルを回収した。変形実験中、サンプルの高さと応力をモニターし、これらのデータからGent(1960)の式を用いて粘性率を計算した。また、粘性率の歪速度依存性を検討するため、一定温度化で段階的に変形速度を変化させた。

1300-1160Kの温度範囲において、温度低下および歪速度増加に伴って粘性率が $10^{7.3}$ - $10^{11.3}$ Pa sの範囲で低下した。この粘性率の歪速度依存性は、べき乗則流体のレオロジー則でうまく説明できる。相対粘度[=マグマの粘性率/メルトの粘性率]は、メルト含水量を0.2wt.%とすると、温度に依らずおよそ100程度の値を示した。

1130Kの実験では、歪速度が 10^{-4} s⁻¹の条件下では粘性流体的なふるまいを示したが、 $10^{-3.5}$ s⁻¹の歪速度では脆性破壊した。結晶量は、温度に依らずおよそ0.53の値で一定であった。

実験結果から物質の粘性-脆性遷移を特徴づけるデボラ数Deを算出したところ、この溶岩は $De < 10^{-2.65}$ の条件では粘性流体的にふるまったが、 $De \sim 10^{-2.65}$ で脆性的破壊した。このことから粘性-脆性遷移の臨界デボラ数はおよそ $10^{-2.65}$ であると考えられる。臨界デボラ数と結晶量の関係は、Cordinnier et al. (2012)で示された結晶を含むマグマについての基準と整合的であった。また、臨界デボラ数と粘性率の測定結果から、この溶岩で粘性-脆性遷移のおこる臨界応力は $10^{7.4}$ Pa程度と見積もられる。一方で、本研究で定量化したレオロジー則を用いて桜島昭和溶岩の流動速度を見積もったところ、約1273Kにおける計算値が、萩原ほか(1946)による野外での実測値と一致した。この温度は、岩石学的制約と整合的であり、この結果から本研究のレオロジー則は妥当であると考えられる。溶岩中で発生する応力の最大値が、粘性-脆性遷移のおこる臨界応力値を超えることはなかった。このことから、桜島昭和溶岩の表面においてブロック状構造が発達するためには、応力集中の発生が必要であると考えられる。

キーワード：レオロジー則、溶岩流、脆性-粘性遷移、マグマ、桜島火山

Keywords: Rheological law, Lava flow, brittle-viscous transition, magma, Sakurajima volcano

三軸圧縮試験における庵治花崗岩のひずみ挙動及び変形特性

Strain Behavior and Deformation Property of Aji Granite under Triaxial Compression Tests

*澤山 和貴¹、片山 郁夫²*Kazuki Sawayama¹, Ikuo Katayama²

1.九州大学大学院工学府地球資源システム工学専攻、2.広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

1.Department of Earth Resources Engineering, Kyushu Univ., 2.Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima Univ.

岩石の変形により破壊に至るプロセスは、地震の発生メカニズムや地殻の強度と関連することから、これまでも多くの研究が行われてきた。近年では、これらの研究成果は地下資源の生産率を向上させる水圧破砕法にも応用されている。このうち、地下の岩盤を水圧破砕させることで人工的に地熱資源を造成し、これを発電に用いる高温岩体発電は、日本の消費電力の約半分をまかなえるポテンシャル（天然資源を含む）を持つと推定される。しかし、この発電方法には、フラクチャの造成や誘発地震などの点で課題があり、基礎研究は未だ不十分である。本研究は、三軸圧縮試験によって、花崗岩のひずみ挙動及び変形特性に対して封圧と間隙水圧が及ぼす効果を調べ、高温岩体発電を実現するうえでの基礎データを構築することを目的とした。三軸圧縮試験は、容器内変形透水試験機を用い、封圧10–40MPa、間隙水圧10–30MPa、ひずみ速度 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の条件下で変形中のひずみ測定を行った。なお、間隙水圧はシリンジポンプによって試験中も一定に保っており、その体積変化から試料中の空隙体積変化も測定した。試料は細粒な庵治花崗岩（直径20mm、長さ40mm）を用い、これに2軸のひずみゲージ（10mm×2枚）を接着し、データロガーによって変形中のひずみを測定した。得られた応力とひずみの関係から応力-ひずみ曲線を作成し、その解析によって、最大応力、ダイラタンシー開始応力（マイクロクラックが生成することにより体積膨張が始まる応力）、ヤング率、ポアソン比、非弾性体積ひずみを求めた。その結果、最大応力ならびにダイラタンシー開始応力は、封圧が高いほど増加し、間隙水圧が高いほど減少する傾向が確認された。弾性定数であるヤング率は、封圧の上昇にともなって増加し、間隙水圧の上昇にともなって減少する傾向がみられたが、ポアソン比は封圧や間隙水圧によってほとんど変化しなかった。体積膨張（ダイラタンシー）の程度を示す非弾性体積ひずみは、乾燥状態の試験では封圧が低いほど促進されるのに対し、間隙水圧下の試験では有効圧が低い（間隙水圧が高い）ほど抑制される傾向がみられた。前者は、封圧によって周方向の膨張が抑制されていると解釈できるが、後者は正味の側圧（有効圧）が高いほど周方向の膨張が促進されており、前者と矛盾する。この傾向は、有効圧では説明できないプロセスが存在することを意味しており、間隙水が試料内部の応力集中を緩和させている可能性を示唆している。間隙水による応力集中の緩和によりダイラタンシーが抑制され、間隙水圧が高いほどその効果が大きいと考えられる。また、いずれの間隙水圧下の試験でも、最大応力の96–97%の応力を超えるとシリンジポンプによって試料内に注入している水の体積が急増する傾向が確認された。これは、このしきい値を境に試料内のマイクロクラックが連結しマクロな流路となるようなネットワークが形成されたことを意味している。また、注入水体積の増加は最大応力付近で止まり、その後、巨視的な破壊を迎えてもほとんど注入水体積が変化しないことが確認された。これは、最大応力時にはすでに巨視的な破壊後と同様の体積の空隙が形成されており、空隙の体積はマイクロクラックの局在化や断層の形成によらず、最大応力後ほとんど変化しない可能性があることを示している。これらの結果をもとに原位置での水圧破砕試験を考えると、間隙水圧が高いほどダイラタンシーが抑制されることから、間隙水圧が高くないように遅い注入速度で水圧破砕を行った方がより効率的に地下にフラクチャを造成できることが予想される。また、最大応力の96–97%の応力において試料内の注入水体積が急増することから、空隙体積の急増した後、すなわち、注入速度一定ではそれによって間隙水圧の低下した後破壊が起こる可能性が考えられる。

キーワード：応力-ひずみ曲線、ダイラタンシー、間隙水圧、三軸圧縮試験、花崗岩、高温岩体発電

Keywords: Stress-strain relationship, Dilatancy, Pore pressure, Triaxial compression test, Granite, Hot Dry Rock power generation

電子線後方散乱回折 (EBSD) によって測定した三波川変成帯の石英粒径分布

Grain size distribution of quartz in the Sanbagawa metamorphic belt analyzed by the electron back-scattered diffraction (EBSD) method

*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

天然の変形岩の動的再結晶粒径は古応力見積りに用いられている。しかし、これまでの粒径測定 (e.g. Stipp and Tullis, 2003) には、光学顕微鏡による粒界—亜粒界の識別の難しさや、粒径の代表値の定義の違い (e.g. 算術平均なのか二乗平均平方根なのか、など) に起因する曖昧さが残っていた。

本研究では光学顕微鏡と後方散乱電子回折 (EBSD) とで粒径測定をおこなった。粒界は、光学分析では顕微鏡写真上で消光角の違いに従ってマニュアルでトレースし、EBSDでは結晶方位が 12° 以上異なる場合を粒界として自動認識した。EBSDマッピングはステップサイズを0.5, 1, 2, 8ミクロンで行った。粒径は円相当径で定義した。

分析試料は三波川変成帯ザクロ石帯の石英片岩で、四国中央部汗見川地域で採取されたものである。試料中で粗粒な石英は面構造に斜交する形態定向配列と、結晶内変形を示す。細粒な石英は粗粒な石英の周縁部に形成されている。

得られた粒径分布は、光学顕微鏡でもEBSDでも、右裾が長い形態を示した。したがって、定義によって粒径の代表値は大きく異なってくる。この粒径分布は、静的粒成長で知られる釣鐘型のものとは大きく異なる。しかし、簡単な核形成—粒成長モデルで右裾が長い粒径分布が生まれることが示されている (Shimizu, 1999)。得られた粒径分布のモード値は分析手法とステップサイズによって異なり、~10から~50ミクロンの幅がある。モード値が良く定義できないので、最も大きな面積を占める粒径クラスを粒径の代表値とした。この値はShimizu (1999)の核形成—粒成長モデルにおける長さスケールと関係づけられ、また、大きな粒の測定値を反映するためより安定的に測定できる値である。実測値は110から120ミクロンであった。

得られたデータに、温度依存性を考慮したShimizu and Ueda (2016, JpGU)の再結晶粒径差応力計と、調査地域の温度見積もり (516.4°C、Bayssac et al, 2002) を適用し、結晶内核形成、周縁部核形成のモデルそれぞれで29 MPaと62 MPaの差応力値を得た。これらの応力は、温度依存性を考慮せず、二乗平均平方根を粒径の代表値としたHolyoke and Kronenberg (2010)の再結晶粒径差応力計で得られる応力値 (17 MPa) よりも高い。本発表では、三波川変成帯のその他の部位の石英片岩から得られた結果も併せて紹介する。

参考文献:

Holyoke C. W., Kronenberg A. K., 2010, *Tectonophysics*, v494, p17

Shimizu, I., 1999. A stochastic model of grain size distribution during dynamic recrystallization., *Philosophical Magazine* A79, 1217-1231.

Stipp M., Tullis J., 2003, *GRL*, v30, no.21, 2088

キーワード: 石英、再結晶粒径差応力計、三波川変成帯

Keywords: quartz, recrystallized grain size piezometer, Sanbagawa metamorphic belt

高温高压下における斜長石のレオロジーと水の効果

Effect of water on rheology of plagioclase under high temperature and high pressure

*木戸 正紀¹、武藤 潤¹、小泉 早苗²、長濱 裕幸¹*Masanori Kido¹, Jun Muto¹, Sanae Koizumi², Hiroyuki Nagahama¹

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

1.Department of Earth Science, Tohoku University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. Introduction

Rheological behaviors of rocks depend on pressures, temperatures and chemical environment. Particularly, water is known to play an important role in rheology of rocks in terms of physical and chemical aspects by previous experiments. Here, two ways of water effects are considered. Pore fluid pressure reduces the effective stress of rocks supported by mineral frame. Water also reduces the strength of plastic deformation of minerals by increasing concentration of lattice defects. Moreover, tomographic observations have shown that there are fluid-rich zones beneath active fault zones and strain concentration zones in the middle-lower crust (e.g., Nakajima et al., 2010). It is proposed that water affects crustal deformation and earthquake occurrence (e.g., Iio et al., 2009). However, the effect of water on rheology has not yet been revealed quantitatively for lower crustal materials under pressure conditions equivalent to the lower crust. Moreover, in most of previous studies, experiments were performed under two end-member cases: water saturated or anhydrous conditions. Thus, it has not been understood in the environment that water is gradually introduced into samples similar to natural lower crustal condition.

2. Deformation experiment

In this study, we performed deformation experiments on synthetic anorthite (An) aggregates using the Griggs-type solid medium deformation apparatus. We added 0.5 wt% water to samples and infiltrated under high temperature and high pressure. Times for infiltration of water into samples were changed to investigate the variation of deformation behaviors associated with diffusion of water. Strain rate stepping test was performed at a temperature of 900 °C and a confining pressure of 1.0 GPa. Strain rates were 1st: 10^{-5} , 2nd: $10^{-4.5}$ and 3rd: 10^{-5} s⁻¹. Constant strain rate tests were also performed at a strain rate of 10^{-5} /s, temperature of 900 °C and confining pressures of 0.8 and 1.1 GPa. The experimental conditions in the present study were roughly equivalent to the environment of the middle-lower crustal fluid-rich zones. Thus, the present study is suitable for investigating the effect of water on plastic deformation in such zones.

3. Results

In all experiments, wet samples were weaker than an anhydrous sample. Strain weakening was observed in experiments at a strain rate of 10^{-5} /s at all confining pressure conditions. Strengths tended to decrease with infiltration time or strain magnitude. Photomicrographs after the experiments of wet An deformed under confining pressure of 1.0 GPa were taken. Almost no deformation was observed in the upper part of the sample, and deformation was concentrated in the lower part.

4. Discussion and implication

We compared the measured differential stresses with predicted values by the flow law for wet An obtained by low pressure experiments (~0.4 GPa, Rybacki et al., 2006). The estimated stress values were higher than the measured values in our experiments under similar conditions. Moreover, because recovered samples were deformed in their lower part intensively, actual strain rates might be higher and estimated stress values became higher for that part than those estimates. This implies that the chemical effect of water, such as fugacity, in higher pressure condition might be larger

than those predicted by lower pressure experiments. Present study shows that measured differential stresses of hydrous samples tended to decrease with infiltration time or strain magnitude. It is assumed that plastic deformation is promoted by increase of water-related defects by water diffusion into samples. The results of present study indicate that the strength of lower crust become lower than previous studies.

キーワード：斜長石、変形実験、水のフガシティー、地殻強度

Keywords: plagioclase, deformation experiments, water fugacity, strength of the crust

上部マントルの温度圧力条件下におけるアコースティックエミッション測定に関する技術開発
Technical developments on acoustic emissions monitoring under the upper mantle conditions

*大内 智博¹、雷 興林²、肥後 祐司³、丹下 慶範³、入舩 徹男^{1,4}

*Tomohiro Ohuchi¹, Xinglin Lei², Yuji Higo³, Yoshinori Tange³, Tetsuo Irifune^{1,4}

1.愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター、2.産業技術総合研究所、3.高輝度光科学研究センター、4.東京工業大学地球生命科学研究所

1.Geodynamics Research Center, Ehime University, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.Japan Synchrotron Radiation Research Institute, 4.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

The subduction zone produces a major fraction of the Earth's seismic activity. Intermediate-depth earthquakes within the subducting slab form a double seismic zone. The mechanisms of intermediate-depth (> 40 km depth) and deep-focus (> 300 km) earthquakes are fundamentally different from those of shallow (≤ 40 km) earthquakes. This is because the frictional strength of silicate rocks is proportional to the confining pressure and it exceeds the upper limit of the stress level in the upper mantle (< 600 MPa: Obata and Karato, 1995) at pressures higher than 1 GPa (~30 km depth). The causes of intermediate-depth and deep-focus earthquakes have been attributed to dehydration of hydrous minerals (e.g., Peacock, 2001) and anticrack faulting during the phase transformation of olivine (e.g., Green et al., 1992), respectively. To understand the mechanisms of failure of rocks under the upper mantle conditions, experimental techniques on acoustic emission (AE) monitoring have been adopted to multianvil apparatuses or Griggs apparatuses.

Green et al. (1992) conducted AE monitoring by using a Griggs apparatus combined with an AE sensor. Dobson et al. (2002, 2004) and Jung et al. (2006) adopted 2 or 4 AE sensors to a multianvil apparatus. However, the three-dimensional location of AE hypocenters have not been determined in the experiments because of not enough number of sensors used in the experiments, even though determination of the location of AE hypocenter is critical in the judgement of brittle failure of the sample surrounded by the solid pressure medium. De Ronde et al. (2007) adopted 8 AE sensors to a multianvil apparatus and they succeeded to determine the position of AE sources. Recently, Gasc et al. (2011) succeeded to develop an experimental setup that allows determining the position of AE source by using DIA-type multianvil apparatus combined with 6 AE sensors. Schubnel et al. (2013) adopted the experimental setup reported by Gasc et al. (2011) to a D-DIA apparatus installed at a synchrotron facility, and they succeeded to measure strain and stress of the sample and AE signals. We have developed an experimental setup that is optimized for the determination of the location of AE hypocenters in a synchrotron D-DIA apparatus.

Similar to Schubnel et al. (2013), we developed an AE monitoring system optimized for a D-DIA apparatus installed at BL04B1, SPring-8. One of big difference between previous systems and our system is the use of the MA 6-6 system (Nishiyama et al., 2008). In our system, the AE sensors were pasted to the backside of the second-stage anvils. Use of the second-stage anvil as a wave guide enables us to shorten the distance between the sample and the AE sensors, namely, attenuation of AE waveforms is reduced. Another advantage of our system is the large-volume cell assembly (sample diameter: 3mm; length: 4mm). Because the error on the hypocenter location is usually a couple of millimeter (e.g., Gasc et al., 2011), use of a sample having a large volume is critical when we judge whether a hypocenter locates inside of the sample or not. We succeeded to conduct experiments on AE monitoring during the deformation of olivine aggregates at pressures 1-3 GPa and temperatures 600-1100 degC. Pressure, stress, and strain were measured in situ by using x-ray diffraction patterns and radiographies. AEs were also recorded continuously on six sensors, and

three-dimensional AE source location were determined. We will report some the details of experimental results, and we will consider further improvements on the system.

キーワード：アコースティックエミッション、D-DIA、地震

Keywords: acoustic emission, D-DIA, earthquake

低温条件におけるリングウッドイトの変形実験

Deformation experiments of ringwoodite at low temperature conditions

*今村 公裕¹、久保 友明¹、加藤 工¹、亀卦川 卓美²、肥後 祐司³、丹下 慶範³

*Masahiro Imamura¹, Tomoaki Kubo¹, Takumi Kato¹, Takumi Kikegawa², Yuji Higo³, Yoshinori Tange³

1.九州大学、2.高エネルギー加速器研究機構、3.高輝度光科学研究センター

1.Kyushu University, 2.Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization, 3.Japan Synchrotron Radiation Institute

Seismic tomography images that some subducting slabs horizontally stagnate near 660km discontinuity (e.g., Fukao and Obayashi, 2013). However, it has been difficult to explain the large deformation of deep slabs in mantle transition zone because the flow law of constituent minerals such as ringwoodite has not been determined yet. Low temperature plasticity (Peierls mechanism) could be a dominant deformation mechanism in cold subducting slab. In order to construct the flow law of ringwoodite in this deformation mechanism, we conducted deformation experiments of $(\text{Mg}_{0.9}, \text{Fe}_{0.1})\text{SiO}_4$ ringwoodite at low temperature conditions. Here, we report its preliminary results.

High-pressure deformation experiments were conducted at 9-13 GPa and 500°C in constant-strain rate mode by Deformation-DIA apparatus installed at NE7 and BL04B1 beamlines in synchrotron facilities of PF-AR and SPring-8, respectively. We synthesized a polycrystalline ringwoodite with height of 1.2 mm and diameter of 0.9 mm at 22 GPa and 1400°C for 180 min from a single crystalline San Carlos olivine using a Kawai-type multi-anvil apparatus in Kyushu University. This was recovered and used as a starting material for the deformation experiment. Differential stress and axial strain of ringwoodite samples were estimated from the distortion of Debye ring and radiography image using 50 keV monochromatic X-ray.

Although deformation experiments were performed outside the ringwoodite stability field, we did not observe the back transformation up to at least 500°C. The sample stress almost reached steady state at the strain of about 3%, and then slightly increased under strain up to ~20%, suggesting the strain hardening. The effect of pressure was negligible in our experimental condition. The flow stresses of ringwoodite obtained at 500°C were 2.6-5.1 GPa at the constant strain rates of $1.2-5.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, which is smaller than those obtained at room temperature in the previous study (Nishiyama et al., 2005). Preliminary analysis of the creep data indicates that the stress exponent is about 6. The relatively large stress exponent may suggest that ringwoodite was deformed in low-temperature plasticity regime although further experiments are needed to construct the quantitative flow law.