

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には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 $10^{-5} / \text{s}$, 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 $10^{-5} / \text{s}$ 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.