

室内岩石 AE 実験研究の進展 Advances in laboratory acoustic emission study

雷 興林^{1*}
LEI, Xinglin^{1*}

¹ 産業技術総合研究所
¹ Geological Survey of Japan, AIST, Japan

Acoustic emission (AE) is an elastic wave radiated by rapid cracking in solids. As a technology of nondestructive inspection, AE has a long history of development and has been applied in numerous areas including material sciences, medical sciences and engineering fields. In stressed rocks, macroscopic fracturing is preceded by a very complex pervasive evolution of some pre-failure damage. Thus, studies focusing on both fracture dynamics and pre-failure damage are a subject of interest and can be inferred from AE statistics as the number of AE events is proportional to the number of growing cracks, and the AE amplitudes are proportional to the length of crack growth increments in the rock. In Earth science, since the similarity in size distribution of earthquakes and acoustic emissions (AE) was found in the 1960s, many laboratory studies have been motivated by the need to provide tools for the prediction of mining failures and natural earthquakes. This report aims to draw an outline of laboratory AE studies in the last 50 years, which have addressed seismological problems, with special focuses on some key issues associated with fault nucleation and growth in brittle rocks.

The AE technique, which monitors the spatiotemporal distribution of AE events, is applied to the analysis of the micro-cracking activity inside the sample space, and it can be performed under an artificially controlled pressure, which is very important for the simulation of underground conditions. During the last five decades, a great number of studies were done following developments in experimental technology, AE monitoring technology, and data processing methodology. Fifty years ago, only the hitting time of an AE could be recorded with a single sensor or a small number of sensors. The rock fracture test was performed under simple loading conditions. Later, the number of sensors that could be used in a study increased and thus allowed the determination of the hypocentre of an AE. Developments in transient memory technique in the 1970s through to the 1980s lead to the ability to make a digital multichannel recording of the full waveform of an AE. Hypocentre location was improved greatly by the use of more precise arrival times obtained through waveform analysis. In addition, it became possible to determine the mode of fracture, i.e., the focal mechanism solution of an AE source. In the present day, AE are usually monitored by 16-32 sensors with digital waveform recording at up to a 200 MHz sampling rate and up to a 16 bit A/D resolution. The dead time of a recording is sufficiently short and continuous recording is possible by use of very large amounts of memory. The waveform of most events can be captured with multiple channels, even for the period of dynamic failure in which the AE rate may reach several thousand a second. Rock fracture experiments can be performed under triaxial compression conditions with controlled fluid injection and pore pressure. AE hypocentres are determined with a location error of a few mms. A focal mechanism solution can be determined for individual events or a group of events. As demonstrated by very recent studies progress in laboratory AE study, particularly studies focusing faulting nucleation, is shedding more and more light on earthquake seismology.

By summarising recent results, it can be concluded that the fault nucleation behaviour, including critical size, duration time, and AE productivity, depend on the heterogeneity of the area of weakness of the fault compared with that of the host rock. If the fault is as strong as the host rock then the fracture makes no difference and the rock remains intact. Furthermore, a homogeneous fault or rock mass appears to fracture in unpredictable ways without a consistent trend in precursory statistics, while inhomogeneous faults fracture with clear precursors related to the nature of the heterogeneity.

キーワード: AE, 前駆ダメージ, 岩石破壊, 地震素過程, 断層核形成, 断層先端ゾーン

Keywords: Acoustic emission (AE), Pre-failure damage, Rock fracture, Earthquake, Fault nucleation, Process zone

採掘空洞前方の岩盤中での大規模亀裂の形成を示唆する微小破壊の震源分布 Microfracture distributions indicating formation of large-scale cracks in the rock mass ahead of the mining front

直井 誠^{1*}; 森谷 祐一²; 中谷 正生¹; 村上 理³; Thabang Kgarume⁴; Thabang Masakale⁵; Luiz Ribeiro⁶; 矢部 康男²; 川方 裕則³; Anthony Ward⁶; Ray Durrheim⁴; 小笠原 宏³
NAOI, Makoto^{1*}; MORIYA, Hirokazu²; NAKATANI, Masao¹; MURAKAMI, Osamu³; THABANG, Kgarume⁴; THABANG, Masakale⁵; LUIZ, Ribeiro⁶; YABE, Yasuo²; KAWAKATA, Hironori³; ANTHONY, Ward⁶; RAY, Durrheim⁴; OGASAWARA, Hiroshi³

¹ 東京大, ² 東北大, ³ 立命大, ⁴ CSIR, ⁵ OHMS, ⁶ SeismoGen

¹ Univ. of Tokyo, ² Tohoku Univ., ³ Ritsumeikan Univ., ⁴ CSIR, ⁵ OHMS, ⁶ SeismoGen

採掘によって平板状空洞が形成され、それによる応力集中で誘発地震が多発する南アフリカ Cooke 4 鉱山 (旧 Ezulwini mine) の地表下 1km において Mw-4 程度まで検知可能な微小破壊 (Acoustic Emission; 以下 AE) 観測網を展開した。観測網は 24 台の AE センサと 6 台の 3 軸加速度計からなる。Naoi et al. (2013; Pageoph) では、この観測により得られた約 3 ヶ月分のトリガー波形データを用いて約 36 万イベントからなる震源カタログを作成し、その 90 % 以上が採掘前線から 10m 程度の領域内に密集していることを報告した。

本研究では、この観測網で得られた 9 ヶ月分のデータに対して、Naoi et al. (2013) と同様の手法で約 100 万イベントからなる AE カタログを作成し、さらに Double Difference 法による相対震源決定 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を行い、採掘前線付近の AE の空間分布の詳細を調べた。震源決定には、Horiuchi et al (2011) の自動走時検出・震源決定プログラムを用いた。相対震源決定に用いる走時差もこの検測結果を使用している。また、大量のイベントを効率よく再決定するために、解析領域を互いに重複する小領域に分割し、各領域中のイベントに対して再決定を行ってから重複して計算された震源を平均化する手法 (Hauksson and Shearer, 2005) を用いた。この処理により、上記 100 万個の震源の約 96% が再決定された。

得られた震源分布から、採掘前線前方に密集している AE は 3 次元的に広がった分布をしているのではなく、Dip, strike 方向に数十 m の広がりをもつ、複数の 2 次元的な AE 集中域 (以下 tabular cluster) で構成されていることがわかった。各 Tabular Cluster は AE 密度が低い領域で隔たれており、それぞれの cluster を空間的にひとまとまりの group として認識することができる。採掘域前方で起こる AE は空洞の存在による高差応力領域中でまんべんなく起こるのではなく、板状の Zone でのみ発生するようである。Tabular cluster は採掘前線に平行な走向を持ち、60-80 度程度傾斜している。これは採掘前線周辺で視認される、最大剪断応力の方向にできる同程度に大規模な剪断亀裂 (Gay and Ortlepp, 1979; Adams and Jager, 1980; Adams et al. 1981) に類似している。解析期間中、40m 程度採掘が進行した採掘パネル前方では、このような Tabular zone が平均 5m 間隔で 10 個形成された。

この観測では、地質調査によって断層の存在が確認された場所で、厚み数十 cm 程度の領域に強く密集した、非常に薄い面状分布を示す AE 活動も確認されているが (直井・他; 2013 連合大会)、Tabular cluster は、1-2m 程度の厚みのなかに散らばったような分布を示しており、その密集度は既存断層面上の活動とは明らかに異なる。Tabular cluster 内の AE 活動は、採掘が近づくと共に徐々に増加し、採掘前線が通過すると活動がなくなるという時間発展を示しており、既存の弱面を利用して起こった破壊というよりは、採掘にともなって形成される大規模 shear crack の形成過程で生じる AE と解釈できそうである。

キーワード: 微小破壊, 誘発地震, 岩石破壊

Keywords: Acoustic Emission, Induced Earthquake, Rock fracture

遅い陥入による粉体のアコースティック・エミッション統計と変形則 Deformation and acoustic emission of a penetrated granular bed

松山 和広¹; 桂木 洋光^{2*}

MATSUYAMA, Kazuhiro¹; KATSURAGI, Hiroaki^{2*}

¹九州大学大学院総合理工学府, ²名古屋大学大学院環境学研究科

¹Department of Applied Science for Electronics and Materials, Kyushu University, ²Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University

粉体の挙動は様々な地球物理現象に関係することが知られているが、その挙動については未解決な問題が多く残されている。本研究では、固体球を粉体層に低速で陥入させた際の粉体層の応答を実験的に調べた。特に、固体球にかかる抵抗力とその陥入時に発生するアコースティック・エミッション信号に注目し、それらの同時計測を行った。用いた実験系は、我々の以前の研究 [1,2] に用いたものと基本的には同様のものとなる。これらの先行研究では、抵抗力と容器壁を伝達する圧力成分の関係について議論したが、本研究では陥入に伴うミクロスコピックな変形に注目するためにアコースティック・エミッション信号の計測を行った。用いた粉体粒子はガラスビーズ（代表粒径：0.4?2 mm）で、陥入する固体球の直径は 10 -40 mm の範囲で変化させた。アコースティック・エミッション・センサー（NF AE-9913）を粉体層に埋め込み、その後、万能試験機（Shimadzu AG-100Nx）を用いて固体球をゆっくりと粉体層に押し込んだ。固体球にかかる抵抗力が陥入速度に依存しない（準静的領域）ように、陥入速度は十分小さい範囲にとられた（1 mm/s のオーダー）。この実験系を用いて粉体層における低速陥入による抵抗力とアコースティック・エミッション統計の詳細を実験的に調べ、特にそれらの従う「べき則」について見つかったいくつかの知見について報告する [3]。

まず、計測された抵抗力が陥入深さに対してべき的に依存することが明らかになった。本実験と先行研究の結果を組み合わせて考えると、このべき則の指数は粉体層のサイズすなわち容器サイズに依存することが明らかになった。得られた実験の傾向より、容器壁が小さい場合はより容器壁の影響が大きく出ることがわかり、このことは粉体の作る応力鎖による効果と考えられる。

また、計測されたアコースティック・エミッション信号は短いバースト型イベントから構成されていることがデータから明らかになった。更に、各バースト・イベントの最大振幅をイベント・サイズとして、アコースティック・エミッション・イベントのサイズ分布を求めると、べき分布となることが分かった。べき分布は地震統計のゲーテンベルグ・リヒター則と似ているが、アコースティック・エミッション・イベントの統計では、べき分布の特性指数が粉体粒子の粒径に依存して系統的に変化することが実験より明らかになった。具体的には、粒径が小さくなるほどべき指数は大きくなった。このことは小さな粒径で構成される粉体層が塑性的に振る舞い、大きな粒子による粉体層が脆性的であることを示唆している。更に本実験の結果は、小粒子による粉体層がより散逸的であることも整合的であった。より詳細に破壊のモードを調べるためにはアコースティック・エミッションと同時に磁気放射の計測も必要となるが、本研究では、とくにアコースティック・エミッションのみに注目した。本実験結果から地球物理現象に関わる現象のレオロジー特性を直接議論することは簡単ではないが、本研究により地球物理現象の多くと関係する（連続体とは異なる）粉体の特殊性の一部が明らかにされた。

[1] H. Katsuragi, Material, preparation, and cycle dependence of pressure behavior in a slowly plunged granular column, Chem. Eng. Sci., 76, 165-172 (2012).

[2] H. Katsuragi, Nonlinear wall pressure of a plunged granular column, Phys. Rev. E, 85, 021301:1-5 (2012).

[3] K. Matsuyama and H. Katsuragi, Power law statistics of force and acoustic emission from a slowly penetrated granular bed, Nonlin. Processes Geophys., 21, 1-8 (2014).

キーワード: アコースティック・エミッション, 準静的抵抗力, 粉体, べき則

Keywords: acoustic emission, quasi-static resistant force, granular matter, power law

乾燥亀裂パターンとして可視化される粘土ペーストの流れの記憶の多様性 Variety of memories of clay paste flows which can be visualized as desiccation crack patterns

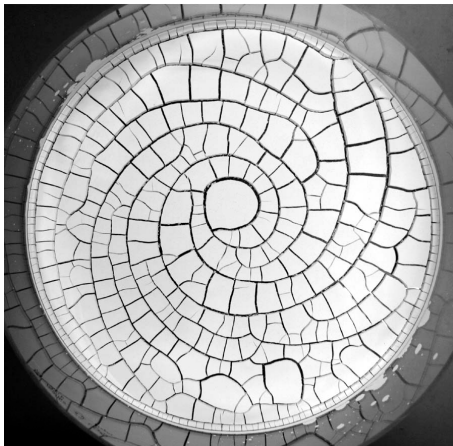
中原 明生^{1*}; 松尾 洋介¹; 大信田 丈志²; 大槻 道夫³; 狐崎 創⁴
NAKAHARA, Akio^{1*}; MATSUO, Yousuke¹; OOSHIDA, Takeshi²; OTSUKI, Michio³; KITSUNEZAKI, So⁴

¹ 日本大学理工学部一般教育教室(物理), ² 鳥取大学大学院工学研究科機械宇宙工学専攻, ³ 島根大学総合理工学部物質科学科物理分野, ⁴ 奈良女子大学大学院自然科学系物理学領域

¹ College of Science and Technology, Nihon University, ² Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Tottori University, ³ Department of Materials Science, Shimane University, ⁴ Graduate School of Human Culture, Nara Women's University

粘土と水を混ぜた粘土ペーストは高濃度の状態では塑性を持つゆえに、揺れや流れの方向を記憶できる。これまで実験してきた粘土ペーストでは、流れを体験した時に記憶として形成される構造は、乾燥破壊させると「乾燥前に体験した流れ」に「平行」に亀裂が走る形で視覚化された。ところが、ある種のペーストでは同じように流れを体験したはずなのに、乾燥破壊で視覚化した時に亀裂が走る方向が「乾燥前に体験した流れ」に「垂直」になっていることがわかった。同じように流れを体験したはずなのに、なぜ記憶として残る構造が流れに平行であったり垂直であったりと異なるのか、その違いを解明していく。

キーワード: 乾燥亀裂パターン, 粘土ペーストのレオロジー, 流れの記憶効果
Keywords: desiccation crack pattern, rheology of clay paste, memory effect of flow



フロントスラスト形成に先立つ予兆現象の発見：大規模超高精度砂箱実験の現況 Precursory Signal of Frontal Thrust Formation: Current status of Large Scale High Precision Sand Box Experiments

堀 高峰^{1*}; 阪口 秀¹; 山田 泰広²; 堂垂 達也²; 福元 豊³

HORI, Takane^{1*}; SAKAGUCHI, Hide¹; YAMADA, Yasuhiro²; DOTARE, Tatsuya²; FUKUMOTO, Yutaka³

¹ 海洋研究開発機構, ² 京都大学工学研究科都市社会工学専攻, ³ 京都大学大学院農学研究科

¹JAMSTEC, ²Department of Urban Management Engineering, Kyoto University, ³Graduate School of Agriculture, Kyoto University

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当たり、様々な試行錯誤を繰り返し、今年度7月に、ようやく装置の開発を終え、プロダクティブランの段階に入った。本装置開発の当初目的は、付加体のシーケンシャルスラストと隆起が作る構造に対して、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で生じる初期不整を十分にコントロールして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装置を開発した。しかし、皮肉なことに、装置の高精度化の結果、縮緬模様は一切形成されず、ほぼ直線的な構造のみが現れるようになった。ところが、フロントスラストの形成時に、その位置と走行方向にほぼ直線的な構造が確実に再現されるようになった結果、我々は、思わぬ発見をした。それは、フロントスラストの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である。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観察の結果と、砂箱実験を模擬した数値シミュレーション結果から、予兆現象の実体とフィールドでの観測可能性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

アナログモデル実験の高精度化に向けた取り組み New modelling devices to enhance the reproducibility of analogue model experiments

堂垂 達也^{1*}; 山田 泰広¹; 阪口 秀²; 堀 高峰²
DOTARE, Tatsuya^{1*}; YAMADA, Yasuhiro¹; SAKAGUCHI, Hide²; HORI, Takane²

¹ 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻, ² 独立行政法人海洋研究開発機構

¹Department of Urban Management, Kyoto University, ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

アナログモデル実験は、乾燥砂などの粒状体材料を用いて地質構造の形成過程を実験室スケールで再現する手法として100年以上にわたって用いられてきた。近年、デジタル画像解析手法の導入により、相似率に従って縮小されたモデル内部における変形量が、定量的に評価できるようになったのに加え、以前では不可能であった微小な変形量の検出が可能になってきた。

そこで我々は断層形成過程に着目した実験を行うことにより、断層形成前に微小なせん断帯が形成されることを確認した。しかしながら、以前は手作業によって作成されてきた縮小モデルには、不均質性が存在し、断層形成の位置、タイミング、形状などの再現性が高くないという問題が存在していた。

したがってこの問題を解決するために、初期の縮小モデルを自動的に作成することのできる装置を開発し、実験の再現性を確認する実験を行った。

本実験では、豊浦標準砂を用いて作成した初期モデルを可動壁を押し当てることによって短縮し、逆断層を複数形成させる実験を行った。初期モデルの作成には、手作業でふるいを通して作成する以前の手法と、新しく開発した装置を用いて作成する方法、双方の手法を用いてそれぞれ実験を5回ずつ行った。実験過程をモデル上方および側方からデジタル画像を撮影し、変形過程の再現性の確認を行った。結果として、以前の手法を用いた実験では、形成断層の分岐や、形成位置のばらつきがみられたのに対し、装置を用いて初期モデルを作成した実験では、形成断層の分岐は確認されず、また形成位置のばらつきも抑えられていた。

この結果は、新たな装置を用いて作成した初期モデルでは、手作業で作成したモデルに比べ、実験ごとの初期モデルの再現性が向上していること、初期モデル内部に存在する不均質性が抑えられていることを示唆しており、アナログモデル実験結果の精度向上に成功したといえる。

今後さらに新たな手法を用いたモデルに対して断層形成に着目した実験を行い、微小せん断帯の形成位置、タイミングの分布を明らかにする予定である。

キーワード: アナログモデル実験, 砂箱実験, 付加体, 実験再現性, 不均質性, 地殻変動

Keywords: analogue modelling, sandbox, reproducibility, accretionary prism, heterogeneity

高速剪断される粉体層の緩和過程と粉体層厚 Relaxation processes of granular layer at seismic slip rates and layer thickness.

桑野 修^{1*}; 中谷 正生²; 波多野 恭弘²; 阪口 秀¹
KUWANO, Osamu^{1*}; NAKATANI, Masao²; HATANO, Takahiro²; SAKAGUCHI, Hide¹

¹ 海洋研究開発機構, ² 東大・地震研
¹IFREE, JAMSTEC, ²ERI, University of Tokyo

A natural fault has the cataclasite core zone, along which shear deformation concentrates. Rheology of these granular matters thus provides us an important insight in considering the nature of friction on faults from a microscopic point of view. In the past two decades, experiments conducted at sub-seismic to seismic slip rates (mm/s to m/s) revealed two remarkable phenomena of high-velocity rock friction; very long critical slip distance (D_c) of the order of 1-10m/s and the considerable weakening due to mechanochemical effects by frictional heating [e.g., Di Toro et al., 2011, Nature]. Recently, Chambon et al.[2006, JGR] conducted friction experiment with very large shear displacement experiment on a thick granular layer, and reported significant slip-weakening behavior active over decimetric slip distances. However, the relation between long D_c observed in a thick granular layer and long D_c in the high-velocity friction is still not clear. Here, we report on laboratory experiments designed to explore transient responses of a thick granular layer following a step change in slip velocity at seismic slip rates. We use simple particle and choose relatively low normal stress to exclude the possible mechanochemical effects caused by frictional heat. We find that friction coefficient and layer thickness show similar response that is symmetry with respect to velocity changes, and D_c is of the order of 10m. It appears that these responses are attributed to dynamics of granular matter. We also report how magnitude of the relaxation and D_c are affected by the layer thickness.

キーワード: high-velocity friction, granular matter, rheology
Keywords: high-velocity friction, granular matter, rheology

上総層群第四紀シルト岩の間隙率および透水係数の有効圧依存性 Porosity and permeability under effective pressure for the Quaternary Kazusa Group siltstones

丸茂 春菜^{1*}; 上原 真一¹; 田村 幸枝²; 三橋 俊介²

MARUMO, Haruna^{1*}; UEHARA, Shin-ichi¹; TAMURA, Yukie²; MITSUHASHI, Shunsuke²

¹ 東邦大学大学院理学研究科, ² 東邦大学理学部

¹Graduate School of Science, Toho University, ²Faculty of Science, Toho University

上総層群は、房総半島中・北部に広く分布する海成の鮮新世 - 中期更新生の地層である。上総層群中の泥岩は第1次圧密段階であり、間隙率は37.9~55.5%で地質年代が古くなるにつれて減少している(井波, 1983)。また、上総層群の特徴として高間隙率異常が見られる層準であり、天然ガス鉱床と一致している。この高間隙率異常は、異常高間隙圧によって生成されたと推定されている。その発達過程については、天然ガスの生成と関連させて議論した研究もあるが、定量的に十分な検討がなされていないのが現状である。地下深部で異常高間隙圧が保持されると堆積盆地や付加体の圧密の進行が妨げられ、間隙率や透水係数が減少しない。また、異常高間隙圧は岩石中や堆積層内の流体や石油移動の駆動力となり、さらに断層面の摩擦強度にも影響する。このように、異常高間隙圧は様々な現象において影響を与えるため、その発達メカニズムを解明することは重要である。そこでわれわれは、Tanikawaら(2008)の単純な堆積-圧密過程を基盤とした一次元モデルを基に、上総層群での異常高間隙圧発達メカニズムを検証することを目指している。そのためにもまず本研究では、上総層群のシルト岩について、間隙率と透水係数の有効圧依存性を室内岩石透水実験を用いて求めた。

間隙率および透水係数の測定には、東邦大学の容器内岩石圧縮変形透水試験機を使用した。岩石試料には、上総層群の梅ヶ瀬層、大田代層、黄和田層、大原層および勝浦層の露頭より採取した岩石ブロックを直径約40mm、高さ約30mmの円柱形に整形したものを使用した。間隙流体は蒸留水、封圧媒体には油を使用した。間隙率測定では、封圧上昇時に試料から排出される水の量を測定することで有効圧下の間隙率を推定した。透水係数は、試料両端の圧力差を一定にし、定常状態における流量を測定することで求めた(定差圧流量法)。それぞれの測定は、有効圧が0 MPa~35 MPaの1サイクルの何点かの応力条件で行った。

各試料の間隙率は約34%~42%の値を示した。ただし、大原層の間隙率は大気圧下で55%と他に比べて高い値を示した。一方、透水係数は約 10^{-17} ~ 10^{-18} m²の範囲の値を示した。間隙率、透水係数はどちらも有効圧が上昇するにつれて減少する傾向がみられた。また、同じ有効圧でも、有効圧下降時の値は、上昇時の値に比べて小さい値を示す傾向がみられた。実験の結果に基づき、各層序の岩石について間隙率および透水係数を有効圧との関数として表した。また、間隙率と透水係数の関係について検討した。

キーワード: 上総層群, 間隙率, 透水係数, 異常間隙水圧, 室内岩石透水実験

Keywords: Kazusa group, porosity, permeability, laboratory experiment

沈み込み帯に存在する塩基性片岩のレオロジー Rheological properties of mafic schists: Implications for subduction dynamics

岡崎 啓史^{1*}; Hirth Greg¹
OKAZAKI, Keishi^{1*}; HIRTH, Greg¹

¹Department of Geological Sciences, Brown University

¹Department of Geological Sciences, Brown University

To understand the spatial and temporal distribution of deformation (e.g., underplating and exhumation of metamorphic rocks) and earthquakes in subduction zones, it is important to constrain the rheological properties of metamorphic rocks (i.e., altered oceanic crust and sediments), and how they evolve during metamorphic reactions following hydration, carbonation and dehydration of the down-going slab. Metamorphism of oceanic crust has stimulated hypotheses on the relationship between intra-slab earthquakes and slab-wedge coupling along plate boundaries in subduction zones. While it is well known that metamorphism has important effects on material fluxes and arc volcanisms at subduction system, it remains unclear how the formation of metamorphic minerals following fluid release influences rheology. Past experimental studies on mafic metamorphic rocks were mostly concentrated on phase equilibrium, thus there are few reports on the mechanical data for these metamorphic rocks.

We conducted triaxial deformation experiments on two mafic schists sampled from the Sambagawa metamorphic belt (Shikoku Island, Japan), using Griggs-type solid pressure- medium apparatus at Brown University. Both mafic schists are mainly composed of amphibole, albite, epidote, and chlorite with small amounts of titanite and phengitic mica. However, there are differences in the peak metamorphic condition (i.e., the maximum PT condition), amphibole composition and mineral abundance of minerals in the two schists. One, which was metamorphosed at greenschist facies (pressure of ~0.75 GPa and temperature of ~400 °C), has a relatively high chlorite content (~12 %) and actinolite is the dominant amphibole phase. The other, metamorphosed at the epidote-amphibolite facies (pressure of ~1 GPa and temperature of ~520 °C), has a lower chlorite content (<2 %) and hornblende is the dominant amphibole phase. Constant strain rate experiments and strain rate stepping experiments were conducted at confining pressures (P_c) from 0.76-2GPa, temperatures (T) from 300-600 °C and strain rates from 10^{-5} - 10^{-7} 1/s.

At conditions near the peak conditions of the greenschist ($P_c = 1$ GPa, $T = 400$ °C), differential stresses were higher than 1 GPa. The greenschist samples are weaker than the epidote-amphibolite samples under all experimental conditions. Both types of samples exhibit strain rate strengthening; frictional behavior that inhibits earthquake nucleation. Differential stress increased with increasing confining pressure, while friction coefficient decreased with increasing confining pressure and temperature. At $T = 400$ °C, the nominal friction coefficient (μ) for the greenschist samples was $\mu \sim 0.34$ at $P_c = 1$ GPa and $\mu \sim 0.30$ at $P_c = 1.5$ GPa; for the epidote-amphibolite, $\mu \sim 0.48$ at $P_c = 1$ GPa and $\mu \sim 0.42$ at $P_c = 1.5$ GPa. Stress exponents (n) for the greenschist samples at $P_c = 1$ GPa were $n \sim 26$ at $T = 300$ °C, $n \sim 36$ at $T = 400$ °C and $n \sim 34$ at $T = 500$ °C; for the epidote-amphibolite, $n \sim 31$ at $T = 400$ °C and $n \sim 21$ at $T = 500$ °C. Microstructures of recovered samples showed modest buckling and several localized shear zones. These features suggest that the deformation of mafic schist is accommodated by semi-brittle deformation resulting in strain localization on faults.

We also conducted deformation experiments in which temperature was increased above the thermal stability of chlorite (~800 °C) to simulate a prograde metamorphism in subduction zones. With increasing temperature during deformation, differential stress decreased and reached nearly 0 MPa. This suggests that such reaction-enhanced weakening of metamorphic rocks forms weak fault zones in subducting slab, which might promote detachment of oceanic crust from the subducting slab and allow underplating to forearc crust. The strain-rate strengthening behavior of these materials suggests that such faults would be relatively aseismic.

キーワード: 緑色片岩, 塩基性片岩, 変形実験, 沈み込み帯, 海洋地殻, 二重深発地震面

Keywords: mafic schist, subduction zone, deformation experiment, oceanic crust, semi-brittle deformation, intermediate depth earthquake

含水かんらん石多結晶体の変形における鉄の効果 Effect of iron content on the creep behavior of olivine under hydrous conditions

田阪 美樹^{1*}; ジー ママン マーク¹; コールステッド デイビット¹
TASAKA, Miki^{1*}; ZIMMERMAN, Mark¹; KOHLSTEDT, David¹

¹ アメリカ州立ミネソタ大学
¹University of Minnesota

Since iron and hydrogen play important roles in dynamic processes not only in Earth's mantle but also in Mars's mantle, we conducted triaxial compressive creep experiments on polycrystalline samples of olivine, $(\text{Fe}_{1-x}, \text{Mg}_x)_2\text{SiO}_4$, with $x = 0, 0.53, 0.77, 0.90$, and 1.0 under hydrous condition. A Paterson-type gas-medium apparatus was used for these experiments. The water contents, determined from Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analyses of larger Fo_{90} crystals embedded in the olivine aggregates, demonstrate that the samples are water-saturated both before and after deformation. The grain sizes of initial and deformed samples were determined using electron backscatter diffraction (EBSD).

Creep tests at 300 MPa confining pressure were conducted at temperatures from 1050 to 1200C at constant stresses in the range 25 to 315 MPa. The values of the pre-exponential term, stress and grain size exponents, and activation energy in the constitutive equation were determined for a wide range of iron concentrations. Samples with high Mg contents are finer grained ($1-2 \mu\text{m}$) than those with low Mg contents ($10-20 \mu\text{m}$). Furthermore, samples with high Mg contents ($x \geq 0.90$) exhibit a stress exponent of $n = 2$, whereas samples with low Mg contents ($x < 0.90$) deform with $n = 3$. This result is consistent with the dislocation-accommodated grain boundary sliding model of Langdon (1994), which predicts that fine-grained samples that do not contain sub-grains should exhibit $n = 2$ while coarser-grained samples that do contain sub-grains should exhibit $n = 3$. The flow stress decreases with increasing iron content of the olivine samples at constant temperature, strain rate, and grain size. Following the analysis of previous studies (Mackwell *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2009), we fit our creep data to the following flow law: strain rate = $A \sigma^n d^{-p} (1-x)^m f_{\text{H}_2\text{O}}^r \exp\{-[Q_0 + \alpha(1-x)] / RT\}$, where A is a material-dependent parameter, σ is stress, d is grain size, p grain size exponent, m iron content exponent, $f_{\text{H}_2\text{O}}$ water fugacity, r water fugacity exponent, Q_0 activation energy at $(1-x) = 0$, and α a constant. The dependence of strain rate on iron concentration is characterized by two parameters - directly, through the iron content exponent m and, indirectly, through the term $\alpha(1-x)$ in the activation energy. The values of m and α are determined by the rate-controlling mechanism of deformation and the charge neutrality condition for Fe-bearing olivine.

Keywords: olivine, iron content, creep, rheology, experiments, deformation

オリビン多結晶体のクリープ及び電気伝導の活性化エネルギー高精度測定 High accuracy measurement of activation energy of creep and electrical conductivity of olivine aggregate

仲小路 理史^{1*}; 平賀 岳彦¹; 三部 賢治¹
NAKAKOJI, Tadashi^{1*}; HIRAGA, Takehiko¹; MIBE, Kenji¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

マントル構成岩石を代表するかんらん岩のクリープ速度は、拡散速度の一番遅い元素である Si⁴⁺ の拡散によって律速されると考えられる。しかし、Sundberg and Cooper(2008) は、かんらん石のみではなく輝石を含む系での拡散クリープにおいて、変形を律速するのは、Si⁴⁺ の拡散ではなく、二番目に遅い拡散速度を持つ元素の拡散であると提案した。このように、マントル岩の変形に関して、その律速過程は必ずしも分かっていない。また、変形機構の特定の指標となる活性化エネルギーに関して、その見積もりには、大きな誤差を含んでいる。そのため、地球内部への外挿の際に、大きな不確定性を生む。以上の二つの問題を解決するべく、連続的に変化する温度下で、変形実験と共にインピーダンス測定実験を行った。

実験試料は、上部マントル物質を模擬したフォルステライト (90Vol%) + エンスタタイト (10Vol%) の合成多結晶焼結体である。実験中の試料の粒成長を抑制するために、予め 1360 °C 24 時間で、試料の焼鈍しを行った。実験中は、一定応力 20MPa の下、1360 °C から 1240 °C まで温度を変化させた。再現性の確認のために、炉内温度が 1240 °C まで到達した後、再び 1360 °C まで温度を上昇させた。変形実験と同時にインピーダンス測定も行った。印加電圧は交流 20V である。これを 1360 °C から 10 °C 毎に試料に印加し、その際の応答電流の値から試料内部のインピーダンスを求めた。

応力-歪速度の関係から粘性を求めた。粘性の逆数のアレニウスプロットをしたところ、実験温度の全領域において、線形分布を示した。これは、実験中に試料の変形メカニズムが変化しなかったことを示唆する。またインピーダンス測定実験によるデータから、試料内部の抵抗を決定し、電気伝導度を求めた。伝導が熱活性化過程であることを仮定し、温度と伝導度の積をアレニウスプロットしたところ、線形分布を示した。これら直線の傾きから活性化エネルギーを求めると、クリープは 627±15kJ/mol と電気伝導度は 297±12kJ/mol という値が得られた。このエネルギーの差は、試料内部で電気伝導を担う拡散種もしくは、拡散パスが異なることを示唆する。

Sundberg and Cooper(2008) によると、かんらん石+輝石系の試料の場合、変形メカニズムは、Si⁴⁺ による拡散ではなくて、Mg²⁺ と O²⁻ の拡散によると示唆されている。そこで、本研究で得られた活性化エネルギーと先行研究のものを比較する。Si⁴⁺ と O²⁻ の格子拡散の活性化エネルギーは、それぞれ約 530kJ/mol と約 340kJ/mol である (Dohmen et al. (2002))。また、Chakraborty et al. (1994) によると、Mg²⁺ の格子拡散の活性化エネルギーは約 400±60kJ/mol である。一方、本研究で得られた活性化エネルギーは、627±15kJ/mol であることから、本研究において変形を担っていたのは、Si⁴⁺ の格子拡散であると推察される。また、ten Grotenhuis et al. (2004) は、本研究と同様の試料を用いて、鉄なしかんらん石の電気伝導度を計測して、その活性化エネルギー 315±39kJ/mol、および伝導度が粒径が大きくなると共に低くなる結果を得ている。以上のことから、本研究の電気伝導による活性化エネルギーが 297±12kJ/mol であったこと、ten Grotenhuis et al. (2004) で用いられた試料の粒径が本研究の粒径と同程度であったことを考えると、本研究における電気伝導は Mg²⁺ の粒界拡散が寄与していたことが推察される。

キーワード: オリビン, クリープ, 電気伝導, 活性化エネルギー, 拡散, 多結晶体

Keywords: olivine, creep, electrical conduction, activation energy, diffusion, polycrystal

マントル物質の拡散クリープ下での粒界すべりと粒子回転の定量化 Quantification of grain boundary sliding and grain rotation during diffusion creep of mantle rocks

丸山 玄太^{1*}; 平賀 岳彦¹
MARUYAMA, Genta^{1*}; HIRAGA, Takehiko¹

¹ 東京大学、地震研究所、地球惑星科学専攻

¹ Department of Earth and Planetary Sciences, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震学的観測より、上部マントルにおいて地震波速度の異方性の存在が明らかになっている (Tanimoto and Anderson 1984)。これは、マントル流動による、かんらん石の結晶格子選択配向 (CPO) が原因であるとされている。一般的に、CPO は転位すべりに伴う粒子回転によって発達すると考えられている。しかし最近、我々はこれまで CPO が発達しないと考えられてきた拡散クリープ領域において、結晶選択配向 (CPO) の発達を報告した (Miyazaki et al. 2013)。しかしながら、CPO の発達メカニズムは明らかにされていない。そこで、拡散クリープ領域における CPO 発達メカニズムを微細組織の観察によって解明することを目的とし、大気圧下における高温圧縮変形試験を行った。

本研究では、真空焼結法によって、円柱状の多結晶体であるフォルステライト+ダイオプサイド 2 相系 (Fo80Di20 vol. %) とフォルステライト+エンスタタイト 2 相系 (Fo65En35 vol. %) を合成し、これらを試料とした。変形実験前に試料の側面を鏡面研磨し、その面にマーカーとなる溝を圧縮軸に平行となるように作成した。この試料の加工は収束イオンビームを用いて行った。大気圧下における高温圧縮変形試験は、温度 1300 °C、歪速度 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の条件で行った。変形実験後に、電界放出型走査型電子顕微鏡 (JEOL 6500F、東京大学ナノ工学研究センター) を用いて変形に伴うマーカーの移動を観察した。このマーカーの観察から、変形による粒子の移動を調べる。

試料表面のマーカー観察により、マーカーのオフセットを確認した。これは粒界すべりが生じた証拠となる。また、粒内のマーカーに歪が見られないことから、粒内変形はないと考えられる。さらに我々は、個々の粒子の回転を確認し、回転角度を定量化した。Fo80Di20 の場合、歪 3 %、7 %、14 % のとき粒子の平均回転角度はそれぞれ 1.2°、3.9°、6.5° となった。この結果から、歪量の増加に伴い回転量も増加することがわかる。さらに、Fo80Di20 の方が Fo65En35 よりも回転量が大きいことが明らかになった。これは、Fo 粒子の形状が原因であると考えられる。Fo80Di20 の場合 Fo 粒子は異方的である。一方、Fo65En35 の Fo 粒子は等方的である。異方的な粒子は結晶学的に制御された結果、長く直線的な粒界を持ったと考えられる。我々は、粒界すべりクリープ下における粒子回転のモデル (Beere 1978) を拡張し、すべりが容易であると考えられる長く直線的な粒界の存在によって粒子の回転が生じ CPO が発達すると仮定している。本研究の結果は、我々の CPO 発達モデルを支持するものと思われる。

キーワード: 粒子回転, 粒界すべり, CPO, クリープ

Keywords: grain rotation, grain boundary sliding, CPO, creep

カンラン石の結晶方位定向配列発達の高圧高温下その場観察実験：上部マントルの地震波速度異方性の強度発達 In-situ observation of crystallographic preferred orientation of olivine deformed in simple shear: Implications for the

大内 智博^{1*}; 西原 遊¹; 瀬戸 雄介²; 川添 貴章³; 西 真之¹; 丸山 玄太⁵; 肥後 祐司⁶; 舟越 賢一⁷; 鈴木 昭夫⁸; 亀卦川 卓美⁹; 入舩 徹男¹

OHUCHI, Tomohiro^{1*}; NISHIHARA, Yu¹; SETO, Yusuke²; KAWAZOE, Takaaki³; NISHI, Masayuki¹; MARUYAMA, Genta⁵; HIGO, Yuji⁶; FUNAKOSHI, Ken-ichi⁷; SUZUKI, Akio⁸; KIKEGAWA, Takumi⁹; IRIFUNE, Tetsuo¹

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ² 神戸大学理学研究科地球惑星科学専攻, ³ パイロイト大学地球科学研究所, ⁴ 東京工業大学地球生命科学研究所, ⁵ 東京大学理学研究科地球惑星科学専攻, ⁶ 高輝度光科学研究センター, ⁷ 総合科学研究機構東海事業センター, ⁸ 東北大学理学研究科地学専攻, ⁹ 高エネルギー加速器研究機構

¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ³Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth, ⁴Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, ⁵Graduate School of Science, University of Tokyo, ⁶Japan Synchrotron Radiation Institute, ⁷Research Center for neutron Science and Technology, ⁸Department of Earth and Planetary Materials Science, Tohoku University, ⁹Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization

The characteristics of the seismic anisotropy vary depending on the types of crystallographic preferred orientation (CPO) of olivine. Therefore, the pattern of the seismic anisotropy has been interpreted by taking into account the water- and pressure-induced fabric transitions of olivine in recent studies (Jung and Karato, 2001; Ohuchi et al., 2011). The fabric strength of olivine aggregates is also important when we evaluate the magnitude of the seismic anisotropy in the upper mantle. In the upper mantle, the steady-state fabric strength of olivine is expected to be achieved due to long time-scales of flows.

The dependency of the fabric strength of olivine aggregates on strain has been evaluated in only limited numbers of experimental studies (e.g., Bystricky et al., 2000). Bystricky et al. (2000) showed that total shear strains higher than 4 are needed to achieve the steady-state fabric strength of olivine (D-type fabric) at 0.3 GPa and 1473 K. However, it has been difficult to evaluate the detailed process of the development of fabrics because fabrics of recovered samples have been evaluated. Recently, we have developed experimental techniques for in-situ simple-shear deformation experiments using a D-DIA apparatus. In this paper, we briefly show that our recent experimental results on in-situ observations of stress, strain, and fabric developments in olivine samples.

Simple-shear deformation experiments on olivine aggregates at pressures $P = 2-3$ GPa, temperatures $T = 1290-1490$ K, and shear strain rates of $3E-4$ s⁻¹ were performed using a deformation-DIA apparatus installed at SPring-8. Shear strain (up to 5) was measured by the rotation of a platinum strain-marker, which was initially placed perpendicular to the shear direction. Differential stress, generated pressure, and CPO patterns of olivine samples were determined from two-dimensional X-ray diffraction patterns using software (IPAnalyzer, PDIndexer, and ReciPro: Seto et al., 2010; Seto, 2012). The CPO patterns of olivine in the recovered samples were also evaluated by the indexation of the electron backscattered diffraction (EBSD) patterns.

A-type olivine fabric was developed under dry conditions. The fabric strength increased with strain (<2), and steady-state fabric strength was achieved at shear strains about 2. The [010] axes strongly concentrated to the shear plane normal and its concentration increased with strain. Preferential alignments of the [100] and [001] axes were developed through increase in strain, though concentrations of the [100] and [001] axes were weaker than those of the [010] axes. Development of B-type olivine fabric was observed under wet conditions (~700 ppm H/Si). The fabric strength of B-type sample continuously increased with strain (up to 3). As same as the case of A-type samples, concentrations of the [010] axes were stronger than those of other axes in the B-type sample. Because the concentration of the [010] axes efficiently increases at strains larger than 1, seismic anisotropy (e.g., VSH/VSV) at shear strains = 1 is quite similar to that under the steady-state conditions.

Using the CPO data of the steady-state A-type fabrics, V_{SH}/V_{SV} of the asthenospheric upper mantle is estimated to be 1.027 (note that 70 vol.% of preferred-orientated olivine grains and 30 vol.% of random-orientated orthopyroxene grains are assumed in the calculation). This value is consistent with the global one-dimensional model reported by Visser et al. (2008). The V_{SH}/V_{SV} of the asthenospheric upper mantle is expected to have higher values in the case of B-type fabric (e.g., 1.035), which is harmonious with the global one-dimensional model reported by Panning and Romaniwics (2006). Our results show that seismic anisotropy in the upper mantle is mostly explained by the steady-state olivine fabrics (A- and B-types), and other effects (e.g., shape-preferred orientation of melt, CPO of other minerals) would be limited.

SIT38-13

会場:511

時間:4月30日 12:15-12:30

キーワード: カンラン石, 結晶方位定向配列, その場観察, 地震波速度異方性

Keywords: olivine, crystallographic preferred orientation, in-situ observation, seismic anisotropy

放射光単色 X 線と AE6-6 システムを用いた高圧下における antigorite の脱水反応と
変形挙動のその場同時観察
Simultaneous observations of dehydration and AE activities during the deformation of
antigorite at high pressures

岩里 拓弥^{1*}; 久保 友明¹; 肥後 祐司²; 加藤 工¹; 金嶋 聰¹; 上原 誠一郎¹; 今村 公裕¹
IWASATO, Takuya^{1*}; KUBO, Tomoaki¹; HIGO, Yuji²; KATO, Takumi¹; KANESHIMA, Satoshi¹; UEHARA, Seiichiro¹; IMAMURA, Masahiro¹

¹ 九大・理, ²JASRI

¹Kyushu Univ., ²JASRI

Intermediate-depth earthquakes are seismic activities at depths of 60-300 km, where subducting plates deform plastically rather than brittle failure. Because dehydration embrittlement (Raleigh and Paterson, 1965) may not work for serpentinite at pressures more than ~2 GPa, it is important to understand the mechanisms of shear instability at higher pressure. To conduct simultaneous observation of dehydration reaction, plastic flow and shear instability, we developed an in-situ observation system combined with synchrotron monochromatic X-ray and AE 6-6 system (multiple acoustic emission measurement for multi-anvil 6-6 type system) using Deformation-DIA (D-DIA) apparatus. Using this system, we carried out antigorite deformation experiments up to ~4.5 GPa and ~850 K including the condition of the antigorite dehydration to talc and forsterite.

Deformation experiments were conducted at high pressure and high temperature using a 1500-ton uniaxial press (SPEED Mk. II) with a D-DIA type guide block installed at BL-04B1, SPring-8 (Katsura et al., 2004; Kawazoe et al., 2011). 50 keV monochromatic X-ray were used to measure two-dimensional X-ray diffraction (2D-XRD) patterns and X-ray radiography images, which give reaction kinetics, differential stress, and strain. We developed MA 6-6 type system (Nishiyama et al., 2008) to monitor shear instabilities by AEs from maximum six piezoelectric devices positioned between first and second stage anvils. AE waveforms were recorded in trigger mode using six-channel 8-bit digital oscilloscopes at a sampling rate of 50MHz. Starting material of polycrystalline antigorite cylinder (1.7 mm in diameter and 2.7 mm in length) cored from high-temperature serpentinite (Eigami, Nagasaki, Japan) were first compressed at room temperature, then heated at constant load, and finally deformed with constant strain-rate mode. In some runs, dehydration occurred during heating or deformation. Microstructures of recovered samples were preliminarily observed by optical microscopy.

A total of ten deformation experiments of polycrystalline antigorite were conducted at 1.1~4.5 GPa, 300~850 K, and strain rates of $3.4\sim 6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. AEs were frequently generated from the sample during the cold compression. Relatively large AEs were also detected when heating the sample to 673 K, while AE activities became zero at higher temperatures. During the constant strain-rate deformation, the flow stress reached steady state at the sample strain of more than 5%, and no stress drops were observed until the final strain of ~30-40%. These flow behaviors and the flow strength are almost consistent with the previous study (Hilairet et al., 2007). We also detected AEs during the deformation stage although the frequency was lower compared to the cold compression and heating stages. The AE activities during the deformation became large at lower temperature and larger strain conditions. Optical microscopic observation revealed that some faults are present in the antigorite samples recovered from each stage. On the other hand, we observed dehydration reaction from antigorite to talc-like phase during the deformation at 800 K. The reaction was very slow and only one AE event was detected at the strain of ~25%. Because the faults were only observed in the relict antigorite region, the AE was possibly originated from antigorite. At higher temperature of 850 K, complete dehydration quickly occurred before the deformation. No AEs were detected during the dehydration and the following deformation of dehydrated materials to more than 30% strain. No faults were observed in the recovered sample. Our simultaneous observations of reaction and AE activities showed that the AE is not generated by dehydration of antigorite at more than ~2 GPa. Instead, the unstable fault slipping that generates AEs occurs during heating and deformation of antigorite without dehydration.

Keywords: Acoustic emission, In situ X-ray observation, deformation-DIA, antigorite, dehydration, stress and strain

高温高圧下における周期振動実験による地震波減衰測定 Seismic attenuation measurement by cyclic loading under high pressure and temperature

芳野 極^{1*}; 山崎 大輔¹; 肥後 祐司²; 舟越 賢一³

YOSHINO, Takashi^{1*}; YAMAZAKI, Daisuke¹; HIGO, Yuji²; FUNAKOSHI, Ken-ichi³

¹ 岡山大学地球物質科学研究センター, ² 高輝度光科学研究センター, ³ 総合科学研究機構東海事業センター

¹Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama Univ., ²JASRI, ³CROSS

The estimation of the mantle structure using seismic tomography method has been advanced by understanding of the detailed velocity structure of the Earth interior. On the other hand, Brillouin scattering in the DAC at very high pressure, X-rays inelastic scattering, sound velocity measurement of ultrasonic range in the large press is also improved. These developments can be expected this time as a further declaration of a picture of a more detailed Earth interior. However, as compared to the frequency band of MHz to GHz region, the frequency range of the seismic waves propagating through the earth interior is much lower. We should noted that it is greatly affected by the attenuation of seismic waves. Because the materials are not in a perfectly elastic body, energy loss inside the materials occurs in the wave propagation because of presence of grain boundaries, dislocations, and defects. Thus, seismic attenuation occurs as a function of frequency.

The attenuation of seismic waves (the determination of the Q^{-1}) of mantle material under high pressure has not been reported until recently mostly because it is an experimental quantification is very difficult. Temperature effects and particle size effects were reported for the first time systematically for olivine aggregates at high temperature under low pressure. However, for this system the upper limit of the generated pressure is low because it is a torsion test performed in the gas pressure. So the study of pressure -dependent and high-pressure mineral is difficult. The other group using the D-DIA type press having two differential ram measured Q^{-1} combining an in-situ observation and radiation uniaxial periodic vibration test. This system expands a possibility of experimental determination of Q^{-1} at much higher pressure. In Japan, the DIA type press was installed at SPring8 (D-DIA). Recently we started the measurement of Q^{-1} under high pressure using in situ image acquisition of the high time and spacial resolution at short period of oscillation cycle.

In this paper, some experimental developments for measuring seismic attenuation at high pressure and results of cyclic loading tests are introduced. Time resolved images of the sample and reference material obtained by a synchrotron X-ray radiography provide their strain as a function of time during cyclic loading. Attenuation is determined as the tangent of the angle of phase lag between the strain of the sample and the strain of the reference material. A newly installed short period sinusoidal cyclic loading oil pressure system enable us to determine minimal strain of the sample in a wide frequency range from 2 to 0.01 hertz on olivine aggregates at 1 GPa and up to 1673 K. The detectable minimum strain is around 5×10^{-5} . Several test experiments exhibited resolvable Q^{-1} (10^{-2}) above 1273 K. The results are generally consistent with previously reported data.

キーワード: 減衰, 高圧, 振動, Q 値, 剛性率

Keywords: seismic attenuation, high pressure, oscillation, Q value, shear modulus

アンチゴライトの非弾性的性質 Viscoelastic property of antigorite

山崎 大輔^{1*}
YAMAZAKI, Daisuke^{1*}

¹ 岡山大学
¹Okayama University

Seismological data reveals the structure and dynamics combined with mineral physics. For example, the velocity structures from observations are interpreted using the elastic properties of constituting minerals obtained from the laboratory measurements. Because the minerals in the earth is not perfect single-crystal but they contain a certain amount of defects (vacancy, dislocation, grain boundary), the viscoelastic relaxation is taken place by the viscous motion of the defects during the propagating the seismic waves with the frequency of 10^{-4} -10 Hz. Serpentine can be considered to be one of the candidate for the source of the fluid in the wedge mantle. In the present study, therefore, we examine the viscoelastic property of serpentine (antigorite) under uppermost mantle conditions by means of high pressure experiments.

Fine-grained polycrystalline antigorite (a few micrometer of grain size) sintered at 3 GPa and 550 degree C for 4 hours was used as a starting material for the attenuation experiment. We conducted the experiments by using D-DIA press with a short-period cyclic loading system, which was recently installed at BL04B1, SPring-8, Japan. D-DIA, which is a single stage of six-anvil compression device, applied pressure by forcing each of the six anvils to advance on the cubic pressure medium with a main ram. After pressure reaching to the target value of 1 GPa by the pumping the main ram, a sinusoidal stress and strain was applied by advancing and withdrawing the upper and lower anvils operated by the short-period cyclic loading system with the frequency between 0.01-2 Hz at 1 GPa and 500-750 degree C. At high temperature (>650 degree C), dehydration is expected. The strain was monitored directly from X-ray radiography of sample located in the pressure medium through the anvil gap during cyclic loading. In the present study, single crystal of forsterite was placed next to the sample along the stress axis of the sample and it can be used as the standard to estimate the stress by recording the X-ray radiography images displaying the lengths of standard and sample simultaneously.

The time lag of strain of sample against that of standard provided us the quality factor, Q, to be 5.4, 4.8 and 4.4 for the periods of 5, 10 and 20 s, respectively, at 600 degree C. Present preliminary results shows the temperature dependence of Q^{-1} . At 500 degree C, Q^{-1} s are ~ 0.5 log unit lower than those at 600 degree C. The present values is ~ 2 order of magnitude lower than that of olivine aggregates. The shear modulus was estimated to be 15-25 GPa in our experimental condition, which is much smaller than the shear modulus without attenuation (38.5 GPa). The large reduction in shear modulus due to attenuation was previously reported in the case of olivine.

アナログ物質を用いた多結晶体の非弾性実験：融点近傍における振る舞い Experimental study of anelasticity of a polycrystalline material near the melting temperature

山内 初希^{1*}; 武井 康子¹
YAMAUCHI, Hatsuki^{1*}; TAKEI, Yasuko¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

岩石の非弾性は、上部マントルの地震波速度・減衰 Q^{-1} 構造を解釈するために必要となる重要な物性である。しかし地震波の周波数、高温高圧下でおこなわれる岩石の非弾性実験は困難でデータが少ない。そこで我々は岩石のアナログ物質として有機多結晶体(ボルネオール, $C_{10}H_{18}O$) を使って実験をおこなっている。ボルネオールは融点が $204.5^{\circ}C$ と岩石に比べて低い。不純物としてジフェニルアミン ($(C_6H_5)_2NH$) を混ぜることで共融点が $43^{\circ}C$ とさらに低くなり、岩石よりも簡単にメルトを含む試料を作成できるというメリットがある。そしてボルネオール+ジフェニルアミン系のメルトの形状はオリビン+バサルト系のものでとてもよく似ている。[Takei, 2000]

McCarthy et al.(2011) ではボルネオール多結晶体試料を用いてさまざまな温度 ($20-50^{\circ}C$) ・さまざまな粒径で強制振動実験をおこない、ヤング率と減衰 Q^{-1} を周波数 $f=10^{-4}-2Hz$ で測定した。また、クリープ実験をおこなって粘性を測定し、マクスウェル周波数 f_m を求めた。得られた Q^{-1} を f_m で規格化した周波数に対してプロットすると、さまざまな温度・粒径でおこなった結果がすべてほぼ1本の曲線上にのることが示された。さらにオリビン多結晶体を用いた他の実験結果 (Gribb and Cooper, 1998, Tan et al., 2001, Jackson et al., 2002) も同じ曲線上にのることがわかり、多結晶体の非弾性には物質に依らない普遍性があることがわかった。しかしこの実験の規格化周波数の領域 ($f/f_m < 5 \times 10^4$) は地震波の規格化周波数領域 ($f/f_m = 10^6 - 10^9$) には届いていないため、マクスウェル周波数 f_m を用いた非弾性の規格化が地震波の周波数領域でも有効かどうかは明らかではなかった。

その後試料製法や実験装置に改良を加え、Takei et al.(in preparation) では McCarthy et al.(2011) よりも低温 ($0-20^{\circ}C$) ・高周波数領域 ($f=10^{-4}-50Hz$) でより精度の良い実験が可能となった。この実験では試料として純粋なボルネオール多結晶体の他にボルネオール+ジフェニルアミン多結晶体を用いた。そして McCarthy et al.(2011) と同様にマクスウェル周波数 f_m で規格化した周波数に対して Q^{-1} をプロットした結果、 $f/f_m = 10^4$ 以上の領域では温度や粒径、化学組成によって大きさの異なるピークがあらわれ、データが一本の曲線にはのらず大きくばらつくことがわかった。したがって地震波の規格化周波数領域では単純なマクスウェル周波数 f_m による規格化が当てはまらないことがわかった。このピークは温度が高いほど、また不純物を含むほど大きい。ボルネオール多結晶体の融点はジフェニルアミンを不純物として含むことで $204.5^{\circ}C$ から $43^{\circ}C$ に下がるので、同じ温度では純粋な試料よりも不純物を含む試料のほうが融点に近い。そして温度が高いほど、つまり融点に近づくほど Q^{-1} が大きくなることから、上部マントルのような高い Q^{-1} をもつ構造を理解するためには融点付近の多結晶体の非弾性のふるまいを理解することが重要と考えられる。

本研究では、ジフェニルアミンを不純物として含むボルネオール多結晶体を用いて融点 $43^{\circ}C$ をまたぐ温度範囲 ($20-46^{\circ}C$) で、また、周波数 $f=2 \times 10^{-4}-50Hz$ の範囲で上記の先行研究と同様の実験をおこなった。これまでの実験から、試料の粘性・非弾性などの物性が融点付近で徐々に変化していくという結果が得られた。これは、物性は融点を超えてメルトができた途端に急に変わるという今までの認識とは異なるものである。今後、融点付近の非弾性をさらに深く知るために粒径やメルト分率を系統的に変えて実験をおこなっていく予定である。

キーワード: 非弾性, 地震波減衰

Keywords: anelasticity, seismic attenuation

部分溶融系の体積粘性率・剪断粘性率の測定 Experimental study of bulk and shear viscosities of partially molten rock analogue

鈴木 彩子^{1*}; 武井 康子¹; 渡邊 俊一²
SUZUKI, Ayako^{1*}; TAKEI, Yasuko¹; WATANABE, Shun-ichi²

¹ 東京大学地震研究所, ² 海上保安庁海洋情報部

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Hydrographic & Oceanographic Dept, Japan Coast Guard

Deformation of partially molten rock is controlled by two independent viscosities: shear viscosity for shear deformation and bulk viscosity for compaction/decompaction. Bulk viscosity and its ratio to shear viscosity, h_b/h_s , play an important role in melt segregation dynamics in the upper mantle (Katz, 2008). However, that value has not been well constrained theoretically nor experimentally especially at small melt fractions. Most numerical studies have used the theoretically predicted value of $h_b/h_s = \sim f^{-1}$, where f is the melt fraction. Takei and Holtzman (2009a) theoretically obtained a constant value of h_b/h_s by taking into account a diffusion creep mechanism. The discrepancy between two models is significant at small melt fractions. There has not been experimentally determined value of h_b/h_s because very few experimental studies have been done about bulk viscosity although shear viscosity has been measured extensively. To discuss the validity of these models based on the experimental data, it is highly important to measure both bulk and shear viscosities by using the equivalent samples. In this study, we measured experimentally these two viscosities as functions of melt fraction using a partially molten rock analogue.

Samples were polycrystalline aggregates of borneol-diphenylamine binary with eutectic temperature of 316K, which has a quite similar equilibrium microstructure to olivine + basalt system (Takei, 2000). Initial melt fraction can be controlled precisely by the concentration of diphenylamine because of its simple eutectic reaction. Before deformation experiments, samples were annealed at 320K for ~100 hours in a sealed capsule to make those grain size large enough (~0.030 mm), resulted in negligible grain growth during the successive deformation tests at the same temperature.

To measure bulk and shear viscosities, we carried out two separate experiments. For bulk viscosity, compaction experiments were performed under the diffusion creep regime. A cylindrical sample was compacted uniaxially in a rigid sleeve ($e_{zz} < 0$, $e_{xx} = e_{yy} = 0$, where e is the strain). Melt was squeezed out from the partially molten sample into porous metals which contact with the sample at the top and bottom ends until melt fraction becomes nearly zero. Evolution of melt fraction in the sample was calculated from the sample length measured with digital gauge. Apparent viscosities as a function of melt fraction were proportional to $\exp(-af)$ with $a = \sim 30$ at $f > 4\%$, which is quite consistent with the olivine + melt systems (Renner et al., 2003). At $f < 3\%$, deviation of the viscosity from the exponential curve occurs, suggesting the possible effects of permeability and change of rate limiting process of the volumetric creep (Takei & Holtzman, 2009b). For shear viscosity, uniaxial deformation experiments were performed without a horizontal confining pressure ($s_{zz} < 0$, $s_{xx} = s_{yy} = 0$, where s is the stress). Melt fraction was nearly constant during the test. Deformation tests were conducted with some constant load steps under the diffusion creep regime. Apparent viscosity is evaluated from the stress and the strain rate at steady state.

From the two apparent viscosities obtained independently, we can calculate each bulk and shear viscosities as functions of melt fraction. We will test the predictions of models and discuss the possible viscosity ratio of the partially molten rocks in the upper mantle.

References:

- Katz RF (2008) J.Petrol., 49, 2099-2121.
- Renner J, Viskupic K, Hirth G, Evans B (2003) G³, 4, doi:10.1029/2002GC000369.
- Takei Y (2000) JGR, 105, 16665-16682.
- Takei Y, Holtzman BK (2009a) JGR, 114, doi:10.1029/2008JB005850.
- Takei Y, Holtzman BK (2009b) JGR, 114, doi:10.1029/2008JB005851.

キーワード: 粘性, 体積粘性率, 剪断粘性率, 部分溶融

Keywords: viscosity, bulk viscosity, shear viscosity, partial melt

地球マントルのレオロジーと粒成長における Mg-O 粒界拡散の役割 Role of Mg-O grain-boundary diffusion in rheology and grain-growth in the Earth's mantle

西原 遊^{1*}; 西 真之¹; 丸山 玄太²
NISHIHARA, Yu^{1*}; NISHI, Masayuki¹; MARUYAMA, Genta²

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ² 東京大学地震研究所
¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地球マントルの物質輸送、熱輸送の定量的理解には、構成物質のレオロジーやこれと密接に関連する粒成長の理解が欠かせない。これまでにマントル構成鉱物のレオロジーが幅広く研究されており、各鉱物単相のレオロジーの定量的理解は進みつつある。一方で、複数鉱物の集合体である多相系のレオロジーは、構成鉱物単相のレオロジーの単純な平均では記述できない場合が多く不明な点が残されている。マントル鉱物の結晶粒成長についても、粒界移動が直接律速過程となる単相系では比較的よくわかっているものの、多相系では異種鉱物の存在が粒界移動を妨げ異なるプロセスが粒成長を律速していると考えられ単相系のデータは現実の大部分のマントルには適用できない。最近、Sundberg and Cooper (2008) はハルツバーガイトの変形実験に基づき、カンラン石-斜方輝石界面での反応を伴った Mg-O の粒界拡散が歪を生み出す新しい変形機構のマントルでの重要性を指摘した。また、Tasaka and Hiraga (2013) はフォルステライト-エンスタタイト系の粒成長実験に基づき、この系の粒成長が Mg-O 粒界拡散に律速されている可能性が高いことを示した。これらの結果はいずれも、多相系のマントルのレオロジー、粒成長において Mg-O 粒界拡散が重要な素過程であることを示している。最近われわれのグループでは、高温高压下での反応帯成長実験によってフォルステライト (Mg_2SiO_4) と $MgSiO_3$ ペロフスカイトの Mg-O 粒界拡散係数を報告している (丸山ほか, 2013; Nishi et al., 2013)。本研究では、これらの結果を用いた理論モデルと変形実験、粒成長実験の比較により、Mg-O 粒界拡散が律速過程となる変形機構、粒成長機構の上部マントルと下部マントルにおける重要性を調べた。

上部マントルにおいてはカンラン石-斜方輝石界面での反応を伴った Mg-O の粒界拡散により (Sundberg and Cooper, 2008)、下部マントルではペリクレスの粒成長を伴った Mg-O の粒界拡散により変形する機構を考え、丸山ほか (2013) と Nishi et al. (2013) の結果を用いて Coble (1963) の提案した関係式によりその流動則を求めた。上部マントルについて得られた流動則は Tasaka et al. (2013) のフォルステライト-エンスタタイト二相系の変形実験結果より約 3 桁も大きな歪速度を示し現実的ではないことがわかった。下部マントルについては比較できる変形実験がないが、この変形機構は Xu et al. (2011) の仮定した Si 格子拡散クリープよりも大きな歪速度を示した。そのため下部マントルの大部分がこの機構により変形している可能性がある。

上部マントルの粒成長については、Tasaka and Hiraga (2013) がすでに、フォルステライト-エンスタタイト二相系の系統的な粒成長実験に基づいて、この系の粒成長が第一相粒界を通じた Mg-O 粒界拡散が律速する第二相粒成長に支配されていることを示している。これと同様に、Ardell (1972) の理論に基づき、下部マントルに相当する $MgSiO_3$ ペロフスカイト-ペリクレス系の粒成長速度係数を Nishi et al. (2013) の Mg-O 粒界拡散係数を用いて計算した。その結果、Yamazaki et al. (1996) の報告した $MgSiO_3+MgO$ 系の実験と矛盾のない結果が得られた。彼らの実験では実験初期の非平衡組織からの急速な成長に続いて、平衡組織達成後に Mg-O 粒界拡散の律速する粒成長が起こっていると解釈できる。この解釈に基づけば、従来の考えと異なり下部マントルの粒径は百万年で数百 μm に成長し得る。

キーワード: 上部マントル, 下部マントル, レオロジー, 粒成長, カンラン石, Mg ペロフスカイト
Keywords: Upper mantle, Lower mantle, Rheology, Grain-growth, Olivine, Mg-perovskite

第四紀上総層群シルト岩のスケンプトン係数と続成作用の関係 Relationship between Skempton's coefficient and diagenesis of the Quaternary Kazusa Group siltstones

三橋 俊介^{1*}; 上原 真一¹; 丸茂 春菜²; 田村 幸枝¹

MITSUHASHI, Shunsuke^{1*}; UEHARA, Shin-ichi¹; MARUMO, Haruna²; TAMURA, Yukie¹

¹ 東邦大学理学部, ² 東邦大学大学院理学研究科

¹ Faculty of Science, Toho University, ² Graduate School of Science, Toho University

スケンプトン係数(以下 B 値)は岩石や堆積物の基本的な物理特性である。B 値は、非排水条件における、岩石に働く封圧の変化量に対する間隙水圧の変化量の割合を示す。例えば堆積盆中の異常高間隙水圧の発達メカニズムを検討する上では、続成作用の過程においての堆積物や堆積岩の B 値の変化について考慮する必要がある(Tanikawa et al., 2008)。しかしながら、この性質はまだよくわかっていないのが現状である。本研究では続成作用と B 値の関係を明らかにすることを目的として、第四紀上総層群の各層準のシルト岩の有効圧下での間隙率の測定結果から B 値を算出し、その結果を比較した。また B 値を直接測定する実験も行い、上述の手法で算出した値と比較することで、これらの測定手法について検討した。

室内実験では上総層群の梅ヶ瀬層、大田代層、黄和田層、大原層及び勝浦層から採取したシルト岩を直径 40mm、高さ 30mm の試料に整形したものを使用した。室内実験は東邦大学の容器内圧縮変形透水試験機を用いて、温度は室温、封圧は 2MPa~35MPa の範囲で行った。間隙流体には蒸留水を用いた。上総層群各岩石試料について有効圧下での間隙率を測定し、有効圧の変化による岩石の体積の変化量は間隙体積の変化量に等しいという仮定のもとで岩石の圧縮率を求め、その結果を用いて B 値を推定した。また、B 値直接測定実験では非排水条件で封圧を載荷したときの間隙水圧の増加量を測定し、その結果から B 値を求めた。

間隙率より推定した上総層群全体の B 値の結果から、層準が下位になるほど B 値は低いという傾向が得られた。ただし、大原層は比較的下位に位置するにも関わらず、高い B 値を示した。これは異常間隙圧の発達など何らかの要因により他の層に比べて堆積物の圧密が十分に進行しなかったことを反映していると考えられる。B 値の有効圧依存性に注目すると、B 値は有効圧の増加にともなって単調に下がるのではなく、ある有効圧の範囲では増加することがわかった。この増加は過圧密過程から正規圧密過程への変遷にともなって圧縮率が増加することを主に反映している。B 値は岩石の圧縮率と間隙率に依存するが、上総層群シルト岩の場合は圧縮率の性質をより強く反映することがわかった。すなわち続成作用が進むと圧縮率は減少するため、B 値は減少する傾向がある。また、上総層群の岩石では、B 値直接測定実験の結果は間隙率より求めた B 値より高い値を示す傾向が見られた。これは、B 値直接測定実験においては有効圧を載荷した時間が短く定常状態に達していなかったためであると考えられる。

キーワード: スケンプトン係数, 続成作用, 上総層群, 間隙率, 圧縮率, 室内岩石実験

Keywords: Skempton's coefficient, diagenesis, Kazusa Group, porosity, compressibility, laboratory rock experiment

タルクの摩擦挙動における間隙圧変化の影響 Effects of pore pressure changes on frictional behaviors of talc

上原 真一^{1*}; 岡崎 啓史²; 清水 以知子³
UEHARA, Shin-ichi^{1*}; OKAZAKI, Keishi²; SHIMIZU, Ichiko³

¹ 東邦大学理学部, ²Department of Geological Science, Brown University, ³ 東京大学理学部

¹Faculty of Science, Toho University, ²Department of Geological Science, Brown University, ³Faculty of Science, The University of Tokyo

いくつかの沈み込み帯で発見されている低周波地震の発生メカニズムについて、これまで様々なモデルが提案されてきた。そのいくつかは、プレート境界における高間隙圧の存在の重要性について指摘している。それに加えて、プレート境界に分布する含水鉱物も重要な要素として注目されている。特に蛇紋岩については、岩石学的にも地震波の観測からも、沈み込み帯のプレート境界上盤のマントルウェッジ内に存在すると考えられている。しかしながら、タルクもプレート境界断層のレオロジーを考える上で重要な物質である可能性が高い。タルクは、沈み込むスラブ起源の流体と蛇紋岩の反応によって生成されることが知られている。また、タルクは天然の断層帯で存在が確認されている物質のうち最も強度の弱いもののひとつであり、少量でも断層のレオロジーに大きな影響を与える可能性が考えられる。しかしながら、タルクの摩擦特性が間隙圧にどのように影響を受けるかについて、定量的な検討はあまりなされていないのが現状である。本研究では、封圧 P_c 、間隙圧 P_p を制御して、タルクのプレカット試料による摩擦実験を実施した。実験には中国産のタルクについて、直径 20 mm の円柱形の試料を軸に対して 30° に切断したプレカット試料を用いた。プレカット面（摩擦滑り面）は#400のカーボナダムで研磨した。試料には、間隙水が摩擦面に行きわたるように直径 3 mm の穴を設けた。この試料を封圧下で、一定の軸変位速度（1 $\mu\text{m/s}$ ）で軸載荷することでせん断試験を行った。実験はいくつかの封圧 P_c （最大 110 MPa）・間隙圧 P_p （最大 100 MPa）条件で行った。せん断試験の途中で、 P_c または P_p をステップ状に変化させてそのときのせん断応力の変化の様子を調べた。

有効法線応力 σ ($=\sigma_t - P_p$, ここで σ_t は全法線応力) をステップ状に変化させたところ、摩擦係数は遷移的な変化を経て定常状態に達する様子が観察された。 σ が減少する場合、摩擦係数は一時的に増加したのち減少して定常状態に戻るが、 σ の 1 桁分の変化に対するその摩擦係数の遷移的な変化量は 0.2 から 0.28 の範囲の値をとった。これは先行研究による石英やウエスター花崗岩の場合の結果に近い結果である (Linker and Dieterich, *J. Geophys. Res.*, 1992; Hong and Marone, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2005)。一方 σ が増加する場合は (このとき摩擦係数は一時的に減少)、この値は小さくなった (0.12 以下、場合によっては負の値を示すこともあった)。これは、この場合のせん断応力の遷移的な変化量が石英や花崗岩によるものに比べて小さいことを意味する。この現象は、摩擦面の起伏の変形がより延性的に変形することに関係しているのかもしれない。

ここで示された摩擦特性は、スロースリップのメカニズムに関係する可能性がある。例えば間隙圧の増加による有効法線応力の減少によって断層滑りが引き起こされた場合、滑り面上で部分的に非排水状態となり膨張硬化 (ダイラタンシーハードニング) が起きることによって有効法線応力が増加する可能性がある。このとき、断層面がタルクに覆われている場合、通常の物質で覆われている場合に比べて、有効法線応力の増加に対する摩擦係数の一時的な減少量が小さくなる (摩擦係数があまり減少しない) ことが予想される。したがって、滑りに対する摩擦抵抗がより有効に働き、通常の地震性滑りよりも滑り速度が小さくなることが期待される。

本研究は、科研費補助金 (新学術領域) の援助を受けて実施した。ここにその感謝の意を表する。

キーワード: タルク, 摩擦実験, 間隙圧, 低周波地震

Keywords: talc, friction experiment, pore pressure, low frequency earthquake

微粒正長石多結晶体の焼結実験 Sintering experiments on fine-grained polycrystalline orthoclase

大平 茜^{1*}; 石川 正弘¹
OHIRA, Akane^{1*}; ISHIKAWA, Masahiro¹

¹ 横浜国立大学大学院環境情報研究院・学府

¹ Graduate school of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

カリ長石は花崗岩や変成岩の主要構成鉱物であり、その変形挙動を明らかにすることは大陸地殻のレオロジーを理解するうえで重要である。変形機構の1つである拡散クリープは鉱物種、結晶粒径、空隙等の因子が影響しており、室内実験においてはこれらの因子が制御された鉱物多結晶体が欠かせない。そこで正長石を原料に緻密な微粒正長石多結晶体を作製することを目的とした焼結実験を行った。

本研究では、正長石 ($\text{K}_{0.83}\text{Na}_{0.17}\text{Al}_{1.04}\text{Si}_{2.96}\text{O}_8$) をサブミクロンスケールに粉碎した。蛍光X線 (XRF) 分析により、微粒粉末からは粉碎機からの混染であると考えられるジルコニウムが最大 5.65wt.% 検出された。この微粒粉末を乾式にて一軸加圧成形 (室温, 20MPa) を行い、円柱状の成形体を超高温管状炉で温度 970 °C, 圧力 $\sim 4.1 \times 10\text{Pa}$ の条件下で4時間焼成した。またマッフル炉を用い同温で常圧焼結した試料との比較を行った。焼結体は XRF 分析, X線回折 (XRD) 分析を行い、組織観察には走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

真空焼結と常圧焼結の結果、それぞれ収縮率 52.2%, 44.5%, 空隙率 0.15, 0.17 の焼結体を得られた。SEM 観察から、いずれの焼結体も空隙が減少し緻密化している構造が確認された。XRD 分析の結果、結晶構造 (Al/Si 秩序無秩序) は成形体から変化せずに焼結していることが確認された。

本研究の結果、微粒粉末を用いることで真空下または常圧下の焼成で低空隙率の鉱物多結晶体を作製することが可能であることが分かり、無秩序型の長石であるサニディンが安定する温度で焼成しても、4時間の焼成では正長石が Al/Si 秩序無秩序相転移を起こさずに焼結することが確認できた。

キーワード: サブミクロン, 正長石, 焼結

Keywords: submicron, orthoclase, sintering

アノーサイト多結晶体の高温クリープへの微量添加物の効果 Doping effect on high-temperature creep of polycrystalline anorthite

谷部 功将^{1*}; 小泉 早苗¹; 平賀 岳彦¹
YABE, Kosuke^{1*}; KOIZUMI, Sanae¹; HIRAGA, Takehiko¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

内陸地震の発生準備過程には下部地殻の粘性変形が大きく関与していると考えられている。これまでのアノーサイトの流動則に関する研究と岩石微構造観察から、下部地殻（温度 400~700 °C、及びマイロナイトで見られる粒径数十 μ m 程度）では拡散クリープで変形すると考えられている。したがって、拡散クリープ下でのアノーサイトの正確な固さを決めることは非常に重要なことである。

これまでの先行研究ではアノーサイトの粒径、温度、応力、含水率の効果が詳細に調べられてきた。しかし、先行研究の試料に含まれる微量 (<1 wt%) の不純物の効果は考慮されてこなかった。セラミックスでは微量の不純物によって多結晶体の固さが大きく変化することが知られている。実際、我々が開発した不純物のほとんど含まれていないアノーサイト多結晶体は先行研究のアノーサイトよりも粘性率にして 2 ケタ固いことがわかっている。そこで、本研究ではこの不純物のほとんど含まれていないアノーサイトに微量の MgO を添加し高温クリープに対する影響を調べた。

MgO 入りアノーサイト多結晶体は粒径 50 nm 以下の CaCO₃, Al₂O₃, SiO₂, Mg(OH)₂ の微粒粉を真空焼結法を用いて作製した。MgO の量が 1 wt% となるようにした。この多結晶体に対し、応力一定実験を行った。実験条件は応力 10~100 MPa、温度 1150 °C~1380 °C、封圧 0.1 MPa とした。変形実験前後で走査型電子顕微鏡観察によって粒径を求めた。

実験前後の平均粒径は 1~2 μ m であった。応力-歪速度を対数プロットしたところ、両者に線形関係が見られた。その傾きから応力指数 $n = 1$ が得られ、拡散クリープ下で変形したと推測された。MgO 入りアノーサイトは純粋なアノーサイトよりも粘性率にして 1 ケタ以上柔らかいことがわかった。また、活性化エネルギー $Q = 702$ kJ/mol も純粋なアノーサイトよりも大きかった。固さの違いは粒界に偏析した Mg の影響と考えられる。

キーワード: アノーサイト多結晶体, 拡散クリープ, 微量添加物の効果
Keywords: polycrystalline anorthite, diffusion creep, effect of doping

強磁場プロセスを用いた配向性フォルステライト多結晶体の創製 Synthesis of textural polycrystalline forsterite using colloidal processing in a strong magnetic field.

小泉 早苗^{1*}; 平賀 岳彦¹; 鈴木 達²; 目 義雄²
KOIZUMI, Sanae^{1*}; HIRAGA, Takehiko¹; SUZUKI S., Tohru²; SAKKA, Yoshio²

¹ 東京大学地震研究所, ² 物質・材料研究機構

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²National Institute for Material Science

It is well known that the crystallographic preferred orientation (CPO) of minerals is commonly produced in the Earth's interior. Thus, it is important to understand the physical properties of the mineral aggregates that exhibit CPO. However, silicate minerals are often feeble magnetic and have small anisotropic susceptibilities so that it is difficult to apply a magnetic field effectively to rotate the mineral particles. Tendency of finer particles to spontaneously agglomerate due to strong attractive interactions (van der Waals forces) add further difficulty. We used a technique of slip casting in a high magnetic field (12T) to align certain crystallographic axis of mineral particles. For the particles to rotate easily in the solvent under a strong magnetic field, we improve the method of deflocculating. To control the surface potential of the particles, we applied various types of polymer modification. Vacuum sintering of the powders that were composed of the aligned particles was expected to produce a polycrystalline material aggregate that exhibits CPO. The resultant materials were characterized by X-ray powder diffraction (XRD), secondary electron microscope (SEM) and Electron Backscatter Diffraction (EBSD).

The specimen exposed to a strong magnetic field exhibits preferential A-axis alignment to the magnetic direction. Those synthetic specimens allow us to examine the effect of CPO on the physical properties of the earth's materials in future room experiments.

キーワード: フォルステライト, 多結晶体, 磁場, 配向, CPO

Keywords: forsterite, polycrystalline, magnetic field, orientation, CPO

下部マントル条件におけるパイロライトの多相粒成長実験 Grain growth experiment on pyrolite material under lower mantle conditions

今村 公裕^{1*}; 久保 友明¹; 加藤 工¹
IMAMURA, Masahiro^{1*}; KUBO, Tomoaki¹; KATO, Takumi¹

¹ 九大・理
¹ Kyushu Univ.

Grain size is a key parameter for understanding viscosity of Earth's mantle. Grain growth rate is one of important factors controlling the grain size. Especially, it is indispensable to examine grain growth kinetics in multiple phases because the grain growth rate of major phase drastically changes with the proportion of secondary phases (e.g., Hiraga et al., 2010). In the lower mantle, Mg-perovskite is major phase, and ferro-periclase, Ca-perovskite, and majoritic garnet are present as secondary phases (e.g., Irifune, 1994; Nishiyama and Yagi, 2003). The previous grain growth experiment (Yamazaki et al., 1996) in the two-phase system of MgSiO₃ perovskite and MgO periclase using Mg₂SiO₄ forsterite as a starting material suggests that the grain growth rate is too slow to explain the lower mantle viscosity constrained by geophysical observations. This inconsistency may arise from effects of the eutectoid transformation prior to the grain growth process (e.g., Solomatov et al., 2002). It is also necessary to examine effects of the chemical composition that affects the proportion of secondary phases and diffusivity. Here, we report preliminary results of the grain growth experiment on pyrolite material under lower mantle conditions.

High-pressure and temperature experiments were conducted using a Kawai-type multi-anvil apparatus (QDES) installed at Kyushu University. Starting material is a powder with pyrolite composition that was used in the previous phase equilibrium study (e.g., Irifune, 1994). We conducted annealing experiments at 25-28 GPa and 1600-1800 °C for 6-600 min. Chemical compositions, microstructures and grain sizes of recovered samples were examined using a FE-SEM with an energy-dispersive analytical system.

Four phases of Mg-perovskite, Ca-perovskite, ferro-periclase and majoritic garnet were present in recovered samples annealed at 25 GPa and 1600-1800 °C. The normalized grain size distribution in the recovered samples showed Gaussian-like shape and the largest grain size is smaller than three times of the mean grain size, suggesting that normal grain growth occurred. The grain growth rate is faster than that of the previous study (Yamazaki et al., 1996). Preliminary analysis of the kinetic data of Mg-perovskite obtained showed the smaller grain growth exponent of 4.3 than that reported in the previous study. On the other hand, three phases of Mg-perovskite, Ca-perovskite and ferro-periclase were present at higher pressure of 28 GPa and 1800 °C, in which the volume fraction of Mg-perovskite increased compared to the four-phases experiment. While the microstructure and the grain size distribution in the three-phase assemblage was similar to those of the four-phase assemblage, the grain size was larger probably due to the smaller proportion of the secondary phases. Our preliminary results provide some insights into the grain-size evolution in the lower mantle and suggest that further quantitative grain growth data with possible lower mantle conditions are needed.

Keywords: lower mantle, multi-anvil, pyrolite, grain growth

マントル鉱物多結晶体中の貴金属元素の拡散 Grain boundary diffusion of noble metal elements in mantle composites

松尾 直弥^{1*}; 平賀 岳彦¹
MATSUO, Naoya^{1*}; HIRAGA, Takehiko¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Eartquake Research Institute, The University of Tokyo

コアとマントルが地質時間を通して化学的に分離しているかは、現在も大きな議論がある。特に、マントル鉱物（シリケート）の結晶に入りにくい元素は、コアからマントルへの寄与は無く、コアとマントルの元素存在度は両者が分離した際の元素量で決定されたと予想されている。しかし最近の研究で、鉱物同士の隙間、つまり鉱物の粒界には、結晶に入りにくい元素が濃集し、高速で動き回ること（高速拡散）が予想されるようになってきた（Hiraga et al., 2004）。強親鉄性元素（HSE）は難揮発性であるが、マントル中には微量しか存在しないため、その大部分はコア中に存在していると考えられる（Wood, 2006）。したがって、もし HSE がコアからマントルへ移動することがあれば、マントル中の HSE 濃度は大きく変化する。すなわち、HSE はコアとマントルの化学的相互作用を見るためのトレーサーの役割を果たす。

本研究では、1 気圧・1360 °C の条件下でマントル鉱物中の金粒子の粒成長実験を行った。まずフォルステライトの粉に 10vol% の金粒子を分散させ、1 時間焼結して試料とした。これを複製し、各試料ごとに時間を変えて焼きなました後、走査型電子顕微鏡で観察した。その結果、混ぜる前は球状の形をしていた金粒子が多角形に変化していることが確認された。これは、金粒子とフォルステライト結晶間の界面張力のつりあいによると考えられる。また、各試料中の金粒子の粒径が、焼きなました時間とともに増大していることが分かった。これは、試料内全体の界面エネルギーを最小化するため、小さな粒子から大きな粒子へ原子が移動することで起こる Ostwald ripening によると考えられるため、フォルステライト結晶間の粒界を金原子が拡散していたことが示唆される。時間 t だけ焼きなました後の金原子の平均粒径を d 、初期の粒径を d_0 とすると、 $d^4 - d_0^4 = kt$ という関係があるので、測定した平均粒径から成長係数 k を求めた。さらに粒子の形状から金粒子とフォルステライト粒子の間の界面エネルギーなどを推定し、フォルステライト多結晶体中の粒界における金原子の濃度 c と金原子の拡散係数 D の積を求めた。

キーワード: 粒界拡散, 粒成長, コア-マントル相互作用

Keywords: grain boundary diffusion, grain growth, core-mantle interaction

部分融解がマンツルの粘性および電気伝導度に与える影響 The effect of partial melting on the mantle viscosity and electrical

末善 健太^{1*}; 平賀 岳彦¹
SUEYOSHI, Kenta^{1*}; HIRAGA, Takehiko¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

本研究では、中央海嶺下マンツル岩体の上昇時の圧力低下によって生じる部分融解に伴う粘性率と電気伝導度の変化を調べるために、マンツル模擬試料を作製し、大気圧下、高温における粘性率と電気伝導度を測定した。オリビン (50%) - 斜方輝石 (40%) - 単斜輝石 (10%) に 0.5vol% のスピネルを加えたレールゾライト試料を合成し、試料を一定荷重で変形させながら、ソリダスをまたぐ温度領域において緩やかに温度上昇させることで、各温度での粘性と、同時におこなうインピーダンス測定によって電気伝導度を算出した。特にメルト無しからメルト有りの系に転移する際、粘性と電気伝導度に連続的な変化がみられるかに注目した。温度領域は 1100~1390° C、メルト分率 (ϕ) は最大 0.09 まで上昇させ、メルト分率が大きくなるに従って、単斜輝石に富む組成になる。

測定の結果、粘性率は温度上昇に伴って連続的に低くなった。これにはメルト分率が増えることに伴う効果が重なっている。測定した粘性率を $\log(1/\eta)$ vs $1/T$ でプロットしたところ、直線的な関係がみられ、これまで知られている経験則の形で粘性率がよく表されていることが示された。

本実験の粘性率を解析すると、1220° C から 1340° C にかけての見かけの活性化エネルギーは 970 kJ/mol で、メルト分率の増加による見かけの活性化エネルギーは約 35 kJ/mol であった。これを差し引き、メルト無しの系の活性化エネルギーは 935 kJ/mol であることが分かった。この値は輝石の転位クリープの活性化エネルギーの値に近く、本実験では輝石が変形に大きく寄与していることが推定された。

一方電気伝導度は、ソリダスをまたいでメルトによる電気伝導度の上昇が確認できなかった。そして粒径依存性がみられたことから、本実験試料は粒径が小さいために粒界による電気伝導の寄与が強く、単斜輝石質メルトの電気伝導度を上回ったことがわかった。同じ温度において、これまでの研究で明らかにされている玄武岩質メルトと輝石を含まない系での粒界の電気伝導度と比べても、本実験における粒界の電気伝導度は 3~4 倍大きかった。これは本実験に含まれる輝石の粒界の存在が大きな影響を及ぼしていると考えられる。

本研究により、これまで検証されてこなかったメルトなし ($\phi=0$) から連続的に上記の流動則を適用できることを実証した。また、メルト増加率や連結性は岩石に含まれる輝石やスピネルの量に大きく依存し、鉱物モードがマンツル岩の融解時のレオロジーと電気伝導度に大きく影響することが分かった。

キーワード: レオロジー, レールゾライト, メルト, 粘性, 電気伝導度

Keywords: rheology, rhelzolite, melt, viscosity, electrical conductivity

Griggs 型固体圧式変形試験機の差応力測定値の較正 Stress calibration of Griggs-type deformation apparatus with solid salt assemblies

木戸 正紀^{1*}; 武藤 潤¹; 長濱 裕幸¹
KIDO, Masanori^{1*}; MUTO, Jun¹; NAGAHAMA, Hiroyuki¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹ Department of Earth Sciences, Tohoku University

岩石や鉱物の力学的性質は地球内部の温度と圧力を再現した変形実験を行うことによって定量的に調べることができる。岩石変形試験機には、使用する圧媒体の違いから固体圧式変形試験機、油圧式変形試験機、ガス圧式変形試験機などがある（例えば、Tullis and Tullis, 1986）。油圧試験機は高温での油の変質を防ぐため、500 °C以下に実験が制限される。固体圧試験機は柔らかい固体の圧媒体を用いているため、長期間安全かつ安定的に高封圧を得られるが、圧媒体と試料や載荷ピストンの間に生じる摩擦のため応力の測定精度は低い（例えば、Tullis and Tullis, 1986）。ガス圧試験機はロードセルが圧力容器の中にあるため、力学データの精度が最も高いが、国内では高压ガスの規制法規のため封圧 200 MPa以下に制限されている。従って、地殻深部や最上部マントルを構成する岩石鉱物の塑性流動変形に必要な高温・高压条件を得るためには固体圧試験機が必要となる。

近年、固体圧試験機とガス圧試験機を用いて封圧、温度、歪速度条件を等しくした金属試料の軸圧縮実験を行い、差応力測定値を比較することで固体圧試験機の較正則が示された（Holyoke and Kronenberg, 2010）。この較正則によって、固体圧試験機を用いて定常領域の差応力を± 30 MPaの誤差で求めることができるようになった。しかし、ガス圧試験機と固体圧試験機の定常領域に当たる歪 5%の応力値のみを比較することでこの較正則を求めているため、弾性領域や降伏領域、降伏後の歪硬化や歪軟化といった挙動を再現することはできない。岩石や鉱物の詳細な粘弾性挙動を明らかにするためには、あらゆる変形挙動に適用できる固体圧試験機の差応力測定値の較正則が必要である。

本研究では、東北大学所有の Griggs 型固体圧式変形試験機（固体塩アセンブリ）を用いてニッケルの軸圧縮実験を行い、差応力の測定を行った。試料として用いたニッケルは Holyoke, Kronenberg 両博士に提供して頂いた。実験は、封圧 300 MPa 及び 1200 MPa、温度 600 °C、700 °C、800 °C、歪速度 2×10^{-4} /s、 2×10^{-5} /s、 2×10^{-6} /s の条件で行った。その結果、先行実験（Holyoke and Kronenberg, 2010）と封圧の等しい差応力測定結果は先行実験の結果と± 30 MPa 程度の誤差でよく一致していた。しかし、封圧を増加させると差応力測定値が大きくなる傾向があった。得られたニッケルの力学データを嶋本（1987）の粘弾性構成則に基づいて解析し、様々な温度・歪における挙動を規格化したマスターカーブを作成した。Holyoke and Kronenberg (2010) のガス圧試験機によるニッケルの力学データについても同様に解析し、マスターカーブを作成した。固体圧試験機とガス圧試験機で同じニッケルを試料として用いており、温度、歪条件を規格化しているため固体圧試験機とガス圧試験機のマスターカーブの差は試験機の本質的な違いによるものと考えられる。固体圧試験機とガス圧試験機のマスターカーブの差から固体圧試験機の差応力測定値の較正則を導出した。較正則を固体圧試験機によって得られたニッケルの差応力測定値に適用したところ、ガス圧試験機の差応力測定値を定常領域だけでなく、弾性領域や降伏領域も± 30 MPa 程度の誤差で再現することができた。炭酸塩岩の力学データにも較正則を適用したところ、誤差は± 70 MPa と大きかった。また、ガス圧試験機と異なり固体圧試験機は封圧を上昇するほど差応力測定値が大きくなる傾向がある。封圧が固体圧試験機の差応力測定値に与える効果を調べて、較正則に組み入れる必要がある。

キーワード: レオロジー, 変形実験, 固体圧試験機の較正

Keywords: rheology, deformation experiment, calibration of Griggs-type apparatus

23GPaまでのCa-Pv及びMg-Pvのその場応力歪測定に関する予備的実験 Preliminary experiments on in-situ stress-strain measurements of Ca-Pv and Mg-Pv up to 23 GPa

辻野 典秀^{1*}; 山崎 大輔¹; 芳野 極¹; 櫻井 萌²; 西原 遊³; 肥後 祐司⁴

TSUJINO, Noriyoshi^{1*}; YAMAZAKI, Daisuke¹; YOSHINO, Takashi¹; SAKURAI, Moe²; NISHIHARA, Yu³; HIGO, Yuji⁴

¹ 岡山大学・地球物質科学研究センター, ² 東京工業大学・地球惑星科学専攻, ³ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ⁴ (財) 高輝度光科学研究センター

¹ISEI, Okayama Univ., ²Tokyo tech., ³GRC, Ehime Univ., ⁴JASRI

In order to discuss mantle dynamics in the Earth's interior, knowledge of viscosity of the Earth's lower mantle, which is the highest of the whole mantle, is important. Viscosity models of the Earth's lower mantle were reported by geophysical observations. However, observation values of viscosity have large variety (2~3 order magnitude). Although determination of viscosity of lower mantle minerals by high pressure experiments is needed to understand mantle dynamics, stress-strain relationship for MgSiO₃-perovskite (Mg-Pv) and CaSiO₃-perovskite (Ca-Pv), which are principal minerals of the Earth's lower mantle, are not reported due to difficulty of high pressure deformation experiments. In this study, we tried in-situ stress-strain measurements of Ca-Pv and Mg-Pv up to 23.0 GPa.

In-situ uniaxial deformation experiments were conducted using a deformation DIA apparatus (SPEED-Mk.II) as Kawai-type apparatus at SPring-8 BL04B1. Experimental conditions of Ca-Pv and Mg-Pv are 13.8 GPa, 1473 K and 23.0 GPa, 1273 K, respectively. cBN anvils, which was transparent material against X-ray, was used along X-ray path. Two-dimensional X-ray diffraction patterns were taken for 120-180 s using CCD detector. To calculate the stress magnitude from the X-ray diffraction data, we used a model of stress-lattice strain relationship (Singh et al. 1998),

$$d_{hkl}(\psi) = d_{0hkl} [1 + (1 - 3\cos^2\psi) \sigma / 6 G_{hkl}] \quad (1)$$

where d_{hkl} is the d-spacing measured as a function of azimuth angle ψ , d_{0hkl} is the d-spacing under the hydrostatic pressure, G_{hkl} is the appropriate shear modulus for a given hkl, and σ is the uniaxial stress. Pressure and stress were estimated using Ca-Pv (110) (200) and Au (111) diffraction in Pressure marker (Au : Fo = 1 : 2 volume ratio) at deformation experiments of Ca-Pv and Mg-Pv, respectively. An X-ray radiograph of the strain markers was taken using an imaging system composed of a YAG crystal and a CCD camera with an exposure time of 60 s.

Uniaxial stress of Ca-Pv at 13.8 GPa, 1473 K and $\sim 1.2 \times 10^{-5}$ /s and Mg-Pv at 23.0 GPa, 1273 K and $\sim 1.5 \times 10^{-5}$ /s were estimated as ~ 2 GPa and ~ 0.25 GPa, respectively. Stress of Mg-Pv was significantly smaller than that of Ca-Pv though temperature condition of Mg-Pv was lower than that of Ca-Pv. This fact is doubtful. This reason is thought that stress estimated by Au was much smaller than that of Mg-Pv because of framework made by Ringeoodite, which was polymorphic phase of Fo in pressure marker.

キーワード: その場観察実験, 変形実験, 応力, 歪, ペロブスカイト, 下部マントル

Keywords: In-situ measurements, deformation experiments, Stress, Strain, Perovskite, The Earth's lower mantle