

三重県中央構造線コア試料中のカタクレーサイト化の進展に伴う流体を介した元素移動

Element migration via fluids with progress of fracturing along the Median Tectonic Line, Mie Prefecture, southwest Jap

金子 由実^{1*}, 竹下 徹¹, 渡部 悠登¹, 藤本 光一郎², 重松 紀生³Yumi Kaneko^{1*}, Toru Takeshita¹, Yuto Watanabe¹, Koichiro Fujimoto², Norio Shigematsu³¹北海道大学, ²東京学芸大学, ³産業技術総合研究所¹Hokkaido University, ²Tokyo Gakugei University, ³AIST

白亜紀に形成された領家帯と三波川帯の境界となっている中央構造線においては、上盤の領家岩石中で温度の低下とともに変形が局所化し、その結果マイロナイトからカタクレーサイトまでの多様な断層岩が見られる。本研究では深度473.9 mで中央構造線を貫き、三波川帯の上部破砕帯まで掘削された三重県飯高観測井から得られた、トーナライトを原岩とするカタクレーサイト試料(深度450-470 m)について、蛍光X線分析による全岩化学組成分析に基づき、体積変化と元素移動を明らかにした。また、画像解析の手法等を用いて元素移動に伴う鉱物組み合わせの変化を詳細に明らかにした。すべての岩石はいったん流動変形を受けてマイロナイトとなっているが、その後温度低下の過程で様々な程度にカタクレーサイト化を受けている。鏡下観察により試料をカタクレーサイト化の程度(割れ目密度(本/))に基づき、比較的未変形であり原岩に近いもの、弱変形、中変形、強変形(フィロナイト)に分類した。本研究では、ポイントカウンタによるカタクレーサイト試料の鉱物モード分析を行った。この際、正確な鉱物モード組成を得るために、斜長石を白雲母化の度合いで未変質斜長石・中変質斜長石・最大変質斜長石に分類し、EDSの元素マッピング(Kを持つ部分を白雲母とした)と画像解析を用いて斜長石中の斜長石と白雲母の面積比を求めた。強変形試料におけるガウジ部については、EDSの元素マッピングの画像解析を行い、各鉱物の面積を求めた。これによりガウジ部に斜長石、石英、普通角閃石が破砕片として、緑泥石、方解石、チタナイトが沈殿鉱物として存在することが明らかになった。カタクレーサイト化の進行に伴う元素移動を解析するために、主要元素重量%について、アイソコン法を用いて体積変化と元素変動率を求めた。本研究では、Alを不動元素と仮定した。体積変化については、断層岩の密度変化が無いと仮定し、次式により見積もりを行った。 $V = [(1/S) - 1] \times 100$ 。このときSはアイソコン図の原点と不動である元素のプロットを結んだ直線の傾きである。各元素の増減とカタクレーサイト化の関係については、次式を用いて元素変動率を求めた(元素変動率) $= (El_f / Al_f) / (El_h / Al_h)$ 。このときElは任意の元素、Alは不動な元素であり、f, hは断層岩、比較的未変形な岩石である。アイソコン法による解析は「最も未変形な原岩に近いトーナライトと弱変形断層岩」、「弱変形断層岩と中変形断層岩」、「弱変形断層岩と強変形断層岩」の組み合わせについて行い、それぞれについて24%の体積増加、26%および19%の体積減少という結果が得られた。カタクレーサイトにおいてはSiO₂の増減が最も顕著であるので、未変形から弱変形における体積増加は石英の沈殿、弱変形から中変形及び強変形における体積減少は石英の溶解と流体の岩石外への移動によるものだと考えられる。カタクレーサイト化に伴う各元素変動は、Si, Naは未変形から弱変形にかけて増加し、弱変形から中変形及び強変形にかけて減少した。未変形から弱変形では、斜長石の白雲母化によって放出されたSi, Naは流体に溶解し、カタクレーサイト化によってできた空隙に流体が侵入し沈殿するため増加した。一方、弱変形から中変形及び強変形では強圧縮により流体が外部に移動するため減少したと考えられる。Fe, Mg, Ca, Tiは未変形から弱変形にかけて減少し、弱変形から中変形及び強変形にかけて増加した。ガウジ部では、強圧縮にもかかわらずFe, Mg, Ca, Tiに富む鉱物が流体から沈殿していると考えられるが、これらの元素の絶対量が増加している要因については、現段階では不明である。

キーワード: 元素移動, カタクレーサイト, アイソコン図

Keywords: element migration, cataclasite, isocon diagram

平尾台カルストに露出するカタクレサイト脈の成因 Mechanism of cataclasite occurring in Hiraodai Karst region

石山 沙耶^{1*}, 安東 淳一¹, 中井 俊一², 太田 泰弘³
Saya Ishiyama^{1*}, Jun-ichi Ando¹, Shun'ichi Nakai², Yasuhiro Ota³

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 東京大学地震研究所, ³ 北九州市立自然史・歴史博物館

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ³Kitakyushu Museum of Natural History and Human History

地殻流体は、沈み込み帯で生じている地震・火山活動に密接に関係していると考えられており、現在では多角的な見地から地殻流体に関する研究が進められている。本研究では、地表に露出するカタクレサイト脈を対象として、流体の存在が起因となって生じた岩石破壊の素過程を明らかにした。

研究対象としたカタクレサイト脈は、平尾台カルスト中に発達する。平尾台カルストを構成する石灰岩は、平尾花崗閃緑岩による接触変成作用を受けて粗粒な方解石からなる大理石となっている。薄片観察を行うと、この脈の近傍の方解石のみに多量の流体包有物が認められる事が分かる。また、カタクレサイト脈内部に存在する破砕礫には、かなり円摩されたものが多く含まれており、脆性破壊時に大規模な流動が脈内で発生した事も分かる。以上の観察事実は、このカタクレサイト脈の形成に流体が関与した事を強く示唆している。本研究では、方解石の変形微細組織観察と流体包有物に対する地球化学的な研究を行い、大理石岩体を破砕させた流体の起源、及び破砕に至るプロセスを明らかにする事を試みた。対象とした試料は、1) 非変形の大石、そしてカタクレサイト脈内を構成する2) 脆性破壊を受けた大理石岩片(変形角礫)と3) 基質部を構成する方解石(変形細粒部)である。変形微細組織観察には主に偏光顕微鏡とTEMを、流体包有物の均質化温度・氷点の測定には加熱冷却台(heating/freezing stage)を、また流体包有物の起源を明らかにする為に四重極型 ICP-MS を用いた微量元素濃度測定と、マルチコレクタ型 ICP-MS を用いた Sr 同位体比測定を行った。ICP-MS を用いた測定は平尾花崗閃緑岩中の斜長石に対しても行った。

以下に主要な結果をまとめる。1) 変形細粒部を構成する方解石は等粒状で、その粒径は約 100 μm と約 300 μm にピークを持つ分布を示す。後者の粒径分布は変形角礫を構成する方解石のそれと類似する。2) 流体包有物は、変形角礫・非変形部では二次包有物が顕著であり、変形細粒部では二次包有物の他にも初生包有物がみられる。また、3) 変形角礫は変形細粒部より明らかに多くの転位のからみが形成されている。4) 流体包有物の均質化温度は、変形角礫より変形細粒部中のものが高い傾向にある。氷点は両者とも 0 にピークを持ち、塩濃度の低い流体である事が分かる。更に、5) 変形細粒部の流体包有物と平尾花崗閃緑岩中の斜長石が同一の Rb-Sr アイソクロンにのると仮定して Rb/Sr 年代を求めると、平尾花崗閃緑岩の形成年代と近い値を示す。これらの結果は以下の事を示唆する。1) 大理石岩体は明らかに流体による差応力を受け破砕流動を起こし、2) 基質部を構成する破砕された細粒な方解石は流体の存在下で結晶成長した。3) 流体包有物の低い塩濃度、斜長石における Rb-Sr 年代及び Sr 同位体初生比、変形細粒部の高い希土類元素濃度は、この破砕を引き起こした流体が花崗岩マグマに関与した流体である可能性を支持する。

キーワード: カタクレサイト, 地殻流体, 水圧破砕, Sr 同位体比, 流体包有物

Keywords: Cataclasite, Geofluid, Hydrofracturing, Sr isotope, Fluid inclusion

粘土鉱物の非晶質化と結晶度 Amorphization of clay minerals and crystallinity

藤本 光一郎^{1*}, 福地 里菜¹
Koichiro Fujimoto^{1*}, Rina Fukuchi¹

¹ 東京学芸大学
¹Tokyo Gakugei University

粘土鉱物の底面反射のピークの半値幅は結晶度の指標としてしばしば用いられる。結晶度がよいほど、底面の格子間隔のばらつきが小さく、半値幅が小さくなると考えられるからである。

一方、粘土鉱物は粉碎によって容易に非晶質化することもよく知られている。非晶質化に伴い、結晶構造が乱れ、結晶度（底面反射ピークの半値幅）も大きくなることが予想されるが、詳細な解析はあまりされていない。

我々は、日本粘土学会の標準粘土試料（JCSS-1101b カオリナイト（関白）、JCSS-5101 セリサイト（鍋山）、JCSS-3501 合成サポナイト（クニミネ工業））を遊星型ボールミルによって粉碎し、

非晶質化させた。それに伴って、底面反射ピークの半値幅を測定した。

その結果、若干の半値幅の増加（結晶度の低下）は見られるものの、それほど顕著な変化は見られなかった。また、粉碎後の粘土粒子の形状を走査型電子顕微鏡で観察したが、粉碎した微細な粒子が形成されるものの、完全に底面反射が消えた試料においても、元の形状を保った粒子も多く見られた。これらの事実から、非晶質化の過程について考察する。

キーワード: 粘土鉱物, 非晶質化, 結晶度
Keywords: Clay minelas, Amorphization, Crystallinity

タルクおよび蛇紋岩の摩擦特性における間隙水圧と応力履歴の影響 Effect of pore pressure and stress paths on frictional properties of talc and serpentinite under high normal stress

上原 真一^{1*}, 清水 以知子², 岡崎 啓史³, 中谷 正生⁴

Shin-ichi Uehara^{1*}, Ichiko Shimizu², Keishi Okazaki³, Masao Nakatani⁴

¹ 東邦大学理学部, ² 東京大学理学部, ³ 広島大学大学院理学研究科, ⁴ 東京大学地震研究所

¹Faculty of Science, Toho University, ²Faculty of Science, The University of Tokyo, ³Graduate School of Science, Hiroshima University, ⁴Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Pore fluid pressure is a critical parameter governing the overall mechanical strength of plate boundary faults. Recent geophysical observations have suggested the importance of fluids in seismogenic processes. Previous works on rock mechanics have suggested that the yield strength of rocks is governed by effective stresses $S_e = S - aP_p$, where S is total stress, P_p is pore fluid pressure, and a is a factor between 0 and 1. The observations in the brittle regime are well accounted for by $a = 1$ [1]. However, it is not well documented how pore fluid pressure influences frictional properties of faults at the brittle-ductile transition zone. Ductile deformation might play important roles in contacts of topographies of fault surfaces, or asperities, at the brittle-ductile transition zone, and therefore there is a possibility that a in the effective stress law may not be 1 and/or pore pressure distributions on the slip surfaces may be inhomogeneous and time-dependent due to reduction of permeability between the slip surfaces. It is also expected that shear stress may depend highly on stress history in the brittle-ductile transition zone. It is generally difficult to conduct laboratory friction experiments at high pressures and temperatures that are comparable to the middle to lower crust and mantle. To overcome the limitation of experimental conditions, we conducted friction experiments by using talc and serpentinite (antigorite) as an analogue material, which shows brittle-ductile transitional behaviors at relatively low pressures and temperatures. In addition, investigating frictional properties of these rocks under high stress is important because these rocks receive attention as a material giving important influences on fault mechanics. Cylindrical samples of talc (Gvangjsih, China) and serpentinite (Nagasaki), 20mm in diameter, were cut at an angle of 30° to the sample axis. The surfaces were ground with carborundum (#400 and #80 for talc and serpentine specimens, respectively). A small hole (3mm in diameter) through the center of each piece ensured adequate communication of the water between the pre-cut surfaces with the rest of the pore pressure system. The specimen was loaded by a triaxial apparatus and sheared under an axial displacement rate of 1 $\mu\text{m/s}$. We used water as a pore fluid. All measurements were performed under conditions of room temperature. Experiments were conducted under several paths of confining pressure and pore pressure. The results indicate a possibility that the shear stresses of these rocks under high normal stress may not be able to be simply explained by an effective stress law with $a = 1$, and stress paths affect the shear stress.

This research is supported by Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas, KAKENHI (21109005), JSPS.

References: [1] M.S. Paterson and T.-F. Wong, Experimental rock deformation - the brittle field, 2nd ed., 2005.

キーワード: 摩擦特性, タルク, 蛇紋岩, 間隙圧, 室内実験

Keywords: frictional property, talc, serpentinite, pore pressure, laboratory experiment

真空焼結法による高緻密細粒下部地殻鉱物多結晶体の作製 Synthesis of highly dense and fine-grained lower crustal minerals by vacuum sintering technique

小泉 早苗^{1*}, 平賀 岳彦¹
Sanae Koizumi^{1*}, Takehiko Hiraga¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

It is important to fabricate polycrystalline rock-forming minerals which have controlled crystallographic orientation, grain size, sample shape, mineral composition, chemistry (e.g., trace elements), and phases (including melt) for investigating the physical and chemical properties of the Earth' interior by room experiments. The vacuum sintering method at ambient pressure has been applied. We developed synthesis method of a wide variety of polycrystalline minerals, including single phase aggregates of anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) and, two phase composite of anorthite + diopside ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), anorthite + quartz (SiO_2) with homogeneous microstructure, which are good analogues for lower crustal composites.

キーワード: 多結晶体, 下部地殻, 鉱物

Keywords: polycrystal, lower crust, mineral

高圧下におけるフォルステライト反応帯成長実験 Growth kinetics of forsterite reaction rim at high pressure

丸山 玄太^{1*}, 西原遊², 西真之¹, 大内智博¹, 松影香子¹, 川添貴章¹

Genta Maruyama^{1*}, Yu Nishihara², Masayuki Nishi¹, Tomohiro Ohuchi¹, Kyoko N. Matsukage¹, Takaaki Kawazoe¹

¹ 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター, ² 愛媛大学 上級研究員センター

¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²Senior Research Fellow Center, Ehime University

地球内部では、地震波の研究から沈み込むスラブやブルームの上昇による物質輸送が起きていると理解されている。このような地球マントルでの物質輸送を正しく理解する上で、地球マントルを構成する鉱物中の元素拡散の情報が欠かせない。なぜなら、元素拡散は鉱物の流動特性を支配する重要な素過程であるからだ。塑性変形メカニズムの1つである拡散クリープによって変形する鉱物の歪速度は、鉱物を構成する主要元素のうち最も拡散の遅い元素によって律速される。過去の研究から、かんらん石中の主要構成元素の拡散速度は少なくとも1 GPa以下の低圧力条件では、Siが最も遅いと考えられている(e.g. Hirth and Kohlstedt 2003)。しかし、元素拡散速度への圧力の効果は明らかにされていない。本研究は、上部マントルの主要鉱物であるかんらん石の主要構成元素の拡散を評価することを目的として、かんらん石の端成分であるフォルステライトの反応帯成長実験を高圧力条件下で行った。

本研究では、フォルステライト反応帯を化学反応 MgO (ペリクレーズ) + MgSiO_3 (エンスタタイト) \Rightarrow Mg_2SiO_4 (フォルステライト) から成長させる。出発物質は、ペリクレーズの単結晶とエンスタタイトの粉末または焼結体とした。この反応帯の幅と粒径から反応帯成長律速元素の拡散係数を求めることができる。出発物質のペリクレーズとエンスタタイトの間に、白金ペーストを配置した。この白金ペーストは、フォルステライトを構成する主要元素のうち、最も拡散の遅い元素を特定するマーカーの役割を果たす。無水条件での実験を行うため、出発物質は白金のカプセル内に封入した。実験条件を圧力 5.7-12.7 GPa, 温度 1673, 1873 K, 保持時間 0-780 分とし、マルチアンビル型高圧発生装置を用いて実験を行った。回収試料の組織観察には走査型電子顕微鏡を使用した。

全ての実験条件において、圧力・温度に依存せず白金マーカーは、ペリクレーズとフォルステライトの境界に位置することを確認した。この結果から、フォルステライトを構成する主要元素のうち、最も拡散の遅い元素は、Siである。フォルステライト中におけるOの拡散は、過去の研究から非常に速いことがわかっている。このためMgが反応帯成長を律速する主要構成元素である可能性が高い。Gardes et al. (2011)は、1.5 GPaにおける反応帯成長実験に基づき、本研究と同様にフォルステライト中でSiが最も拡散の遅い主要構成元素であると結論づけた。本研究の結果は、Siの拡散が上部マントル全領域におけるかんらん石の歪速度を律速することを示唆する。

本研究では、粒内拡散と粒界拡散のどちらがフォルステライト反応帯成長を律速するか特定できなかった。そのため粒内拡散律速、粒界拡散律速それぞれを仮定してMgの拡散係数を計算した。粒内拡散律速で反応帯が成長する場合、Mgの粒内拡散係数の活性化体積は $10 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ 程度である。また、粒界拡散律速で反応帯が成長する場合、Mgの粒界拡散係数の活性化体積は $10 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ 以上である。

Keywords: forsterite, high pressure, rim growth, diffusion

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

In-situ observation of crystallographic preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear

大内 智博^{1*}, 西原 遊², 瀬戸 雄介³, 川添 貴章⁴, 西 真之¹, 丸山 玄太¹, 肥後 祐司⁵, 舟越 賢一⁵, 入船 徹男¹

Tomohiro Ohuchi^{1*}, Yu Nishihara², Yusuke Seto³, Takaaki Kawazoe⁴, Masayuki Nishi¹, Genta Maruyama¹, Yuji Higo⁵, Ken-ichi Funakoshi⁵, Tetsuo Irifune¹

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ² 愛媛大学上級研究員センター, ³ 神戸大学地球惑星科学科, ⁴ パイロイト大学バイエルン地球科学研究所, ⁵ 高輝度光科学研究センター

¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²Senior Research Fellow Center, Ehime University, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ⁴Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth, ⁵Japan Synchrotron Radiation Institute

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-induced olivine fabric transitions in recent studies (Jung and Karato, 2001). The fabric strength of olivine aggregates is also important when we evaluate the magnitude of the seismic anisotropy in the upper mantle. In the actual 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 processes of the developments of fabrics because fabrics of recovered samples have been used. 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 $P = 1-2$ 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. The MA6-6 system (Nishiyama et al., 2008) with a truncated edge length of the second-stage anvils of 5 mm was adopted for the experiments. A sectioned sample of anhydrous olivine aggregates (diameter = 1.5 mm; thickness = 300-500 μ m) was placed into a nickel capsule and then sandwiched between two alumina pistons. 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 using a JEOL JSM-7000F at Ehime University. The CPO patterns determined from two-dimensional X-ray diffraction patterns were consistent with those obtained from the EBSD analyses.

A-type olivine fabric was developed at high temperatures (1490 K). CPO patterns showing A-type fabric were observed at strains higher than 1. The fabric strength increased with strain (< 3). Steady-state fabric strength was achieved at shear strains about 3. Strain softening was observed in most of samples due to the developments of CPO of olivine. Developments of B-type and C-type-like fabric were observed at low temperatures (< 1440 K) in relatively wet samples (about 300-400 ppm H/Si in olivine: caused by absorption of water in olivine during deformation).

It has been reported that the developments of the A-type fabric, which is the most commonly observed olivine fabric in natural peridotites (Ismail and Mainprice, 1998). The threshold shear strain of 3, which is needed for the achievement of steady-state fabric strength, corresponds to 100 Myr of mantle flow (under the assumption of a shear strain rate of $1E-15$ s⁻¹). Our results implies that overwriting of an olivine CPO pattern due to a change of the deformation condition requires a long time-scale (i.e., 100 Myr or longer). The seismic anisotropy observed in the upper mantle would reflect the olivine CPOs formed within 100 Myr ago.

キーワード: カンラン石, 結晶方位定向配列, その場, 単純剪断変形

Keywords: olivine, crystallographic preferred orientation, in-situ, simple-shear deformation

せん断応力下におけるかんらん石の高圧相転移 High-pressure phase transition of olivine in shear stress condition

田中一徳¹, 近藤 忠^{1*}, 亀卦川卓美²

Kazunori Tanaka¹, Tadashi Kondo^{1*}, Takumi Kikegawa²

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 物質構造科学研究所

¹Earth and Space Sci., Osaka Univ., ²IMSS, KEK-PF

High-pressure phase transition has been considered to be a possible trigger of deep focused earthquakes which were observed in subducting slab. In the deep slab condition, considerable shear stress was expected due to the sinking force by own weight. However, phase transition in a non-hydrostatic condition was not fully understood at the condition of deep transition zone. In this study, we tried to develop a new method for deformation experiment in a high-confinement pressure corresponding to the lower mantle condition and investigated its effect to high pressure phase transition in olivine. High-pressure experiments were conducted using laser-heated diamond anvil cell (LHDAC). Starting materials are single crystals of natural olivine (San Carlos, USA) and pyrope garnet (Czecho). They were thinned to have a wedge-shaped plate and single-sided coated with metallic iron to stabilize laser heating. Then a set of two plates are confined in a sample hole of rhenium gasket with surrounding pressure medium of sodium chloride to make a direct contact on tilt boundary to compression axis. The shear stress at the contact surface was estimated by major pressure difference between sample center and edge of the sample and was to be around 0.4-0.6 GPa. In-situ X-ray diffraction experiments to evaluate stress evolution in the sample under pressures and temperatures using a LHDAC were performed at KEK-AR-NE1A station, Tsukuba, Japan. After the sample was compressed to the nominal pressure at room temperature, it was heated to the temperature around high-pressure phase boundary. Pressures were determined using the equation of state of sodium chloride (Brown, 1998). The X-ray diffraction pattern at each condition was collected on an imaging plate. High temperatures generated by a Nd:YAG laser driven in multimode were measured based on the emission spectra from the heated area of about 50-70 microns in diameter. We observed high pressure phase of wadsleyite and/or ringwoodite in the laser-scanned area up to 23GPa and 1600K. The result of Hall-Williamson analysis (Hall, 1949) from the X-ray diffraction pattern for high pressure phase indicated a significant non-homogeneous strain or shear stress in the high pressure phase than that in single plate experiments, which suggest this method can generate appropriate stress in the sample. The quenched samples were recovered to ambient condition to make thin sections for observation by a scanning electron microscope. High-pressure phase in the heated sample was localized on the contact region between two plates. No significant textural evolution was observed in the outer rim of the same sample. This result is contrasted to the report by Kubo et al. (1998) in which nucleation starts from outer rim of the single crystal sample in a hydrostatic condition. Planar shear bands without phase transition were also observed in the low temperature less than 1000K and 34GPa. Our results indicate that shear stress promotes the transition to high pressure phase and also induces a possible shear instability in the deep slab.

キーワード: 相転移, せん断変形, 高温高圧

Keywords: phase transition, shear stress deformation, high pressure and high temperature

放射光 X 線と A E 6 - 6 システムを用いた反応、流動、剪断不安定のその場同時観察手法の開発

In-situ observations of reaction, plastic flow, and shear instability by using synchrotron X-rays and the AE 6-6 system

岩里 拓弥^{1*}, 久保 友明¹, 肥後 祐司², 土井 菜保子¹, 加藤 工¹, 金嶋 聡¹, 上原 誠一郎¹, 西原 遊³, 舟越 賢一²

Takuya Iwasato^{1*}, Tomoaki Kubo¹, Yuji Higo², Naoko Doi¹, Takumi Kato¹, Satoshi Kaneshima¹, Seichiro Uehara¹, Yu Nishihara³, Ken-ichi Funakoshi²

¹ 九大・理, ²JASRI, ³ 愛媛大・地球深部研

¹Kyushu Univ., ²JASRI, ³GRC, Ehime Uni.

Intermediate-depth earthquakes are seismic activities in Wadati-Benioff zone at depths from 60 km to 300 km, where subducting plates deform plastically rather than brittle failure. Dehydration embrittlement of serpentinite (Raleigh and Paterson, 1965) is an important mechanism for the seismicity at lower pressures than ~2.2 GPa. To understand the fault mechanisms above this pressure, there have been some acoustic emission (AE) measurements with multi-anvil apparatus to monitor shear instabilities (e.g., Dobson et al., 2002; Jung et al., 2006 and 2009; Gasc et al., 2011). However in these studies, the relationships among dehydration, plastic flow and shear instability were unclear because quantitative flow and reaction kinetics data could not be obtained simultaneously. To conduct quantitative measurements of these processes, we developed a new 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. In this study, we report results of some preliminary experiments using this system.

In this system, deformation experiments with constant strain rate mode are 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 BL04B1, SPring-8 (Katsura et al., 2004; Kawazoe et al., 2011). 50 keV monochromatic X-ray are used to measure two-dimensional X-ray diffraction (2D-XRD) patterns and X-ray radiography images of sample. Reaction kinetics can be monitored by time-resolved 2D-XRD measurements. Stress and strain of sample are determined by d-value variations with azimuth angle from 2D-XRD patterns and by distance of strain markers from X-ray radiography image, respectively. 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. The multiple AE measurements enable us to determine characters of the seismic event such as origin time and location of seismic source, and focal mechanism.

In the present study, two kinds of experiments were performed at high pressure and room temperature using the new AE 6-6 system, where an X-ray transparent cBN anvil was used as one of the second-stage anvils in down-stream side to collect 2D-XRD patterns. One is cold compression of quartz beads (grain size ~0.1 mm). Another is in-situ X-ray observation of constant strain rate deformation of polycrystalline antigorite cylinder cored from high-temperature serpentinite (Eigami, Nagasaki, Japan). A total of four PZT transducers were used to monitor AEs arising from the sample. AE waveforms were recorded using a four-channel 8-bit digital oscilloscope, which has a resolution of 1000-10000 point at a sampling rate of 50MHz. The AE recording was triggered when the amplitude of the signal was higher than a threshold level.

In the quartz beads experiment, the sample was pressed to 20 ton (~2 GPa) with monitoring AE by three AE detectors (East, West, and Bottom anvils). Many AEs were recorded during cold compression. The AE frequencies became maximum at the load of about 7 ton, and no AEs were recorded at more than 12 ton. These data suggest that the quartz beads were compacted to almost zero porosity by reaching 12 ton. Differences in arrival time from two detectors (E and W) indicate that most sources of those events were located within the sample.

Three deformation experiments of polycrystalline antigorite were conducted with a strain rate of about $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ at pressures of ~0.1-3 GPa. We observed that the constant flow stress of ~2 GPa reached at the sample strain of more than 5%. AE events were not recorded during the deformation stage. These results suggest that mechanical behavior of antigorite is plastic flow under this condition, which is consistent with previous studies (e.g., Escartin et al., 1997).

Keywords: acoustic emission, stress and strain, deformation-DIA, in situ X-ray observation, high pressure, antigorite

物性測定による岩塩中の水の存在形態-岩塩試料の合成-

Synthesis of wet halite rock for the study on brine morphology via physical property measurement

北野 元基^{1*}, 渡辺 了¹

Motoki Kitano^{1*}, Tohru Watanabe¹

¹ 富山大学大学院理工学研究部

¹Department of Earth Sciences Faculty of Science, University of Toyama

岩石中の粒界水は岩石の流動特性・輸送特性に影響を及ぼし、その影響は水の存在形態に強く依存している。これまで水の存在形態は岩石と水の二面角が支配し、60度以上では連結しないと考えられてきた。しかし、含水岩塩を用いた低温 SEM 観察 (Schenk et al., 2006) や電気伝導度測定 (Watanabe, 2010) は、二面角が 60°以上でも、薄膜状の粒界水が連結を保つことを示している。地殻中でもこのような粒界水が存在しているかもしれない。この粒界水の存在を広い温度圧力範囲で調べるために、含水岩塩の電気伝導度、弾性波速度測定を行う。今回は試料の合成について報告する。

含水岩塩試料は、水を付着させた NaCl 粉末 (20-40 μm) を 40 分間圧密 (室温, 140MPa) した後、アニール (180 , 180MPa) することによって合成する。測定試料は次の条件を満たす必要がある。(1) 水の形態変化による物性変化を見るため、粒成長など固体の構造変化が小さいこと。(2) 弾性波速度から水の形態変化を推定するため、空隙率が小さいこと。このことは FTIR 測定による含水量の推定からも要請される。圧密により直径約 9mm, 長さ約 6mm の円柱試料が得られる。この空隙率は 5-8% であり、試料全体が不透明である。どれだけのアニール時間によって 2 つの条件を満たす試料が作成できるかを明らかにするため、アニール時間を 40 から 160 時間まで変えて、合成試料の空隙率および粒径分布を調べた。また、アニールに伴う電気伝導度の変化も調べた。

アニール時間 40 時間の試料に対して 80 時間の試料は平均粒径が 1.2 倍になり、粒径分布幅が狭くなった。また、80, 120, 160 時間アニールした試料では粒径分布のピークが変わらず、80 時間以降は顕著な粒成長がないことを示している。アニールに伴う電気伝導度の変化は、二面角の変化に伴う水の移動や粒成長の構造変化を反映していると考えられる。ほぼ定常的な値に達するのに要した時間は 150 時間であった。アニール時間が長いほど試料の透明度が増し、160 時間アニールした試料は全体が透明になった。この試料内の 9 点で FTIR 測定を行い、水による吸光度を求めると差は 4.2% 以下であった。試料内部での水の分布はほぼ一様であると考えられる。150 時間以上のアニールによって物性測定に適した含水岩塩試料が合成できることが分かった。