

SIT039-01

会場:301A

時間:5月24日 08:30-08:45

水和化非晶質シリカの力学挙動と変形組織について Deformation textures and mechanical behavior of hydrated amorphous silica

堤 昭人^{1*}

Akito Tsutsumi^{1*}

¹ 京都大学大学院理学研究科

¹ Kyoto University

Previous experiments have discussed the possibility that fault weakening at rapid slip velocities is caused by faulting processes such as frictional melting, thermal decomposition of the fault material, or silica-gel formation. Among these processes, silica-gel formation may be distinguished from the others because the weakening has occurred even at relatively low slip velocities ($V > 0.01$ mm/s) [Goldsby and Tullis, 2002; Di Toro et al., 2004], under which conditions transformation reactions (e.g., melting, decomposition, etc) are unable to proceed because of low temperatures. Goldsby and Tullis [2002] and Di Toro et al. [2004] have suggested that the weakening is caused by formation and thixotropic behavior of a silica gel (hydrated amorphous silica) layer within a siliceous rock sample. Despite the general acceptance that frictionally generated silica gel plays an important role in the weakening process of siliceous materials, there exists little information on the frictionally generated material (described as fine grained amorphous silica by Di Toro et al. [2004]) on a fault of quartz-rocks; consequently it remains unclear whether the material could behave as a fluid, and whether flow processes contribute to fault weakening. In this study, to better understand the mechanical properties of frictionally generated fault material within quartz-rock, we conducted a series of friction experiments on chert and a synthetic quartz crystal at intermediate to high slip velocities.

We conducted a series of friction experiments on chert at intermediate to high slip velocities ($V = 0.87 - 104$ mm/s) and at low normal stress of 1.5 MPa to better understand the process of fault weakening by silica-gel formation, as identified in previous friction experiments on quartz-rocks. Fault weakening in chert samples occurred in association with the formation of a 0.1-mm-thick fault gouge layer that contains a thin, foliated layer of fine-grained material and a cataclastically fragmented zone characterized by clast?matrix texture. MFT-IR and XRD analyses reveal that the fault gouge consists of a mixture of hydrated amorphous silica and quartz grains. The mechanical behavior of the fault gouge at a small magnitude of strain (shear strain = 0.008), as examined independently of the friction experiments using a rheometer, is characterized by a negative dependence of shear stress on strain rate with a notable hysteresis behavior.

キーワード: 非晶質シリカ, 岩石摩擦, シリカゲル, チャート

Keywords: silica gel, amorphous silica, rock friction, chert

SIT039-02

会場:301A

時間:5月24日 08:45-09:00

断層ガウジ摩擦の速度強化の起源 Origin of velocity strengthening in granular friction

波多野 恭弘^{1*}

Takahiro Hatano^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ERI, University of Tokyo

A simple theory for a constitutive law of granular matter is presented. Starting from the energy balance equation together with the kinetics of grains, the energy dissipation rate in granular matter is estimated, which leads to a constitutive law for steady-state kinetic friction. Our theory indicates that a lower density system is stronger than a higher density system, albeit somewhat counterintuitive. This is a direct consequence from the fact that the grain rearrangement, which causes energy dissipation, is more frequent in a system of low density. Thus, the velocity-strengthening nature of granular friction is naturally explained by the negative shear rate dependence of the density. The present theory also qualitatively explains the experimental observation in which a system containing less gouge layer tends to be velocity-weakening.

キーワード: 断層ガウジ, 摩擦法則, レオロジー, shear transformation zone

Keywords: fault gouge, friction law, rheology, shear transformation zone

SIT039-03

会場:301A

時間:5月24日 09:00-09:15

アンティゴライトガウジの変形構造とその温度・速度依存性 Temperature- and velocity-dependent deformation structures of antigorite gouges

高橋 美紀^{1*}, 清水 以知子²

Miki Takahashi^{1*}, Ichiko Shimizu²

¹ 産業技術総合研究所, ² 東京大学大学院理学系研究科

¹Geological Survey of Japan, AIST, ²Graduate School of Science, Tokyo Univ.

On the shear deformation of granular materials, we should consider two types of the deformation mechanism; one is the friction that uses surface of the grains for sliding, the other is the creep, intra-crystal deformation. Which mechanism of them becomes to dominate the shear deformation will depend on the deformation conditions, temperature and sliding velocity. It was well known that serpentine, a type of phyllosilicate minerals, showed not only friction-type deformation style but also creep-type deformation style (Reinen et al., 1994). However, temperature-velocity dependence of their deformation mechanisms had not been enough clarified.

The deformation mechanisms of antigorite gouge (high-T type serpentine) were investigated by a velocity-step change technique, under various temperature-velocity conditions (refer to Takahashi et al., 2011, in S-SS29 at this year JpGU Meeting for details of the experimental procedure). One of the main results is a drastic change in the deformation style from the creep-type to the friction-type at around 450 deg.C, caused by partially dehydration reaction of the antigorite. This partial, small amount of forsterite (a product of dehydration reaction of the serpentine) had a possibility to control the strength and the behavior of the antigorite gouge sliding even though the dehydration was limited.

In this presentation, we will focus on the gouge structures relevant to the deformation styles. A preliminary SEM observation found streaky alignments of the sub-micron sized forsterite particles along the Riedel shears at the temperature higher than 450 deg.C. That revealed that the serpentine at the shear-localized zone were reacted preferentially. Using EDS analysis, here, we will report results of detail observations on the distributions of the forsterite particles in the antigorite gouge, supporting a possibility of the shear-induced dehydration during the deformation.

Reference: Reinen et al., 1994, Pure and Applied Geophysics, v. 143, p. 317-358.

Keywords: shear-induced dehydration, serpentine gouge, frictional deformation, creep type deformation

SIT039-04

会場:301A

時間:5月24日 09:15-09:30

結晶を含むマグマの粘性率測定実験：伊豆大島1778年玄武岩の例 Experimental investigation on viscosity of crystal-bearing magma; a case study for the 1778 Izu-Oshima basalt

石橋 秀巳^{1*}, 佐藤 博明²

Hidemi Ishibashi^{1*}, Hiroaki Sato²

¹ 東京大学・院理・地殻化学実験施設, ² 静岡大学防災総合センター

¹ Geochemical Research Center, Univ. Tokyo, ² CIREN, Shizuoka Univ.

マグマのレオロジー的性質、特に粘性率は、マグマの流動を支配する決定的な物性である。そのため、マグマの粘性率に関する知識は、マグマの流動の関わるあらゆる現象について理解するうえでも極めて重要であるといえる。ところで、マグマは一般にケイ酸塩メルト中に結晶や気泡などの粒子が浮遊するサスペンションであり、これらの浮遊結晶がマグマの粘性率変化や非ニュートン流体的ふるまいを引き起こす。特に結晶は、マグマのふるまいを流体的から固体的へと劇的に変化させるために、マグマの粘性率を評価するうえで極めて重要である。しかし、マグマ中の結晶が形成するテクスチャーと粘性率との定量的関係に関する理解は未だ極めて不十分であるのが現状である。著者らは、浮遊結晶がマグマの粘性率に及ぼす影響の理解を目的とし、マグマの高温その場粘性率測定と急冷試料のテクスチャー解析を行っている。本講演では、伊豆大島1778年噴火の玄武岩について行った高温粘性率測定実験の結果について報告する。

本研究で Starting material として用いた伊豆大島1778年溶岩はほぼ無斑晶質で、 $\text{SiO}_2 = 52.7\text{wt}\%$ 、 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 3.0\text{wt}\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.8\text{wt}\%$ 、 $\text{FeO}^*(= \text{FeO} + 0.9\text{Fe}_2\text{O}_3) = 14.8\text{wt}\%$ 、 $\text{MgO} = 4.8\text{wt}\%$ のやや Fe に富むソレライト質玄武である。実験は、神戸大学の常圧高温粘性率測定装置を用いて行った。基本的な測定・解析方法は Ishibashi (2009) および Ishibashi and Sato (2010) に従う。実験は、酸素フュガシティーは Ni-NiO バッファー、温度は約 1258-1122 °C の条件で行った。測定後、溶融試料の一部を回収・急冷・研磨し、EPMA による化学分析と組織観察を行った。

本実験条件下での伊豆大島1778年溶岩の初相鉱物は斜長石で、そのリキダスは約 1188 °C であった。そして、約 1151 °C でピジョン輝石が、約 1111 °C で普通輝石と磁鉄鉱がそれぞれ晶出をはじめた。1188 °C 以下では、結晶量は温度低下に伴って単調に増加し、約 1178 °C で 1.1 % (斜長石)、約 1162 °C で 3.6 % (斜長石)、約 1140 °C で 13.4 % (斜長石 10.7 % + ピジョン輝石 2.7 %)、約 1122 °C で 28.8 % (斜長石 19.5 % + ピジョン輝石 9.3 %)、約 1101 °C で 38.1 % (斜長石 23.1 % + ピジョン輝石 10.4 % + 普通輝石 4.0 % + 磁鉄鉱 0.6 %) であった。斜長石の平均アスペクト比は 0.25 であるが、より扁平な結晶も多く含まれる。

ビンガム流体モデルを用いてこの溶岩の粘性率を近似したところ、ビンガム粘度は 1258 °C で 42 Pa s から 1122 °C で 1765 Pa s まで、温度低下に伴って単調に増加した。1101 °C では測定できなかった。これらの粘性率測定値と、メルト相の粘性率 [Shaw (1972) の方法によって、温度と化学組成から見積もった] との比である相対粘度は、リキダス以上の温度ではほぼ 1 であったが、サブリキダス温度では結晶量の増加に伴って増加した。等方的形状の結晶の影響をよく再現する Einstein-Roscoe (ER) 式 (ただし、最密充填密度 $F_m = 0.6$ を採用) と比較したところ、本研究データの方が結晶量増加に伴う相対粘度の増加率が大きかった。このちがいは主に、浮遊結晶の形状の違いを反映したものと考えられる。ER 式をより一般化した Krieger-Dougherty (KD) 式 (Krieger and Dougherty, 1958) ;

$$\ln \text{ relative viscosity} = -vF_m \ln (1-F/F_m)$$

(ここでは F は結晶量、 v は intrinsic viscosity) と比較したところ、 $vF_m = 2.3$ 、 $F_m = 0.49$ の値を得た。この vF_m の値は、ER の式における値 2.5 と近い。したがって、本研究結果の ER の式からの逸脱は主に F_m の変化だけで説明できる。今回得られた F_m の値は、同じ平均アスペクト比をもつランダムに配向した扁平楕円体の理論値よりも小さい。これは、平均よりも扁平な結晶がより強くマグマの粘性率に影響を及ぼしていることを示している。

降伏応力は少なくとも結晶量 0.13 で発生し、結晶量に伴って増加する。この臨界結晶量は、同じ平均アスペクト比をもつランダムに配向した扁平楕円体の理論値よりも小さい。この違いの原因も、結晶形状分布のちがいによると考えられる。結晶は、その形状が扁平になるほどに、より少量でもネットワークを形成可能になる。このため、平均より非常に扁平な少量の結晶が、降伏応力の発生に強く寄与したと考えられる。これらの結果は、マグマの粘性率におよぼす結晶形状分布の影響の重要性を示唆している。

キーワード: 粘性率, 結晶, テクスチャー, 非ニュートン流体, 伊豆大島, 玄武岩

Keywords: viscosity, crystal, texture, non Newtonian fluid, Izu Oshima, basalt

SIT039-05

会場:301A

時間:5月24日 09:30-09:45

脆性・塑性遷移領域における浮力駆動されるクラックの実験 Experiments on buoyancy-driven crack around the brittle-ductile transition

隅田 育郎^{1*}, 太田 ゆかり¹

Ikuro Sumita^{1*}, Yukari Ota¹

¹ 金沢大学 理学部 地球学科

¹Earth Sciences, Kanazawa University

岩石の脆性塑性遷移は大陸地殻では深さ15 km程度で起きると考えられている。従って、それよりも深部から上昇してくる流体（マグマ、水）は周囲の岩石のレオロジーの変化に応じて、上昇の様式が変わるはずである。一般に岩石が塑性流動する領域では流体はダイアピル状に、脆性破壊する領域ではダイク状に上昇すると考えられている (Rubin, 1993, EPSL)。それではその遷移領域ではどのように上昇するのだろうか？ここでは寒天を用いて脆性塑性領域の岩石をモデル化し、パラメータスタディーを行なった結果について報告する (Sumita and Ota, EPSL, in press)。

本実験では寒天に密度の高い水溶液を注入する。寒天は脆性破壊する岩石のモデルとして用いられてきたゼラチンと似たレオロジーを持つ。本実験では、寒天の濃度を0.06-0.4wt%と変えることによりその堅さを制御した。0.4wt%の寒天は降伏応力が高く、弾性的に振舞うが、0.06wt%の寒天はそれよりも降伏応力が3桁、剛性率が4桁小さくなり、粘弾性的性質が強く表れる。本実験では、寒天と混和する水溶性の一定体積(1cm³)の流体を水槽の上部から注射器で注入し、その形状を観察し、速度を測定した。

高濃度(0.4wt%)の寒天の中では、ゼラチンを用いた実験(例: Takada 1990, JGR)と同様、流体は板状のクラックを形成し移動していった。しかし不混和(例: 油)な流体を用いる場合と異なり、注入した流体の一部がクラックに残されていくため、Taisne and Tait, (2009, JGR)と同様に、移動速度が減速し、やがて停止した。寒天の濃度を低下させると、クラックヘッドが次第に膨れ、蛇行、分岐しながら移動する様式に遷移した。ここで、ヘッドはダイアピル状に近付くが、流体が通過した後は、それが塞がりダイクを形成する。寒天の濃度をさらに低下させると、クラックは再び直線的に移動するようになった。また上記の形状変化に伴い、減速率が小さくなり、停止するまでの距離が長くなった。次に寒天濃度が一定の下、流体の密度を増大させたところ、同様にクラックヘッドが次第に膨れ、停止するまでの距離が長くなることが分かった。上記の実験で得られた結果を Hirata (1998, PRE) にない、寒天濃度と密度差のパラメータスペースで整理した。その結果、移動形態の変化が寒天の降伏応力と流体の浮力との釣り合いで理解できることが分かった。

本実験から、脆性塑性遷移帯ではヘッドはダイアピル状であるが、通過した後はダイクになるという描像が得られる。即ち、ダイクが残されている場合でもヘッドはダイアピルであった可能性がある。また同じ深さにおいても、浮力(密度差、体積)に応じて、多様な形状の流体が同時に存在しうることが推察される。

キーワード: 脆性塑性遷移, クラック, 実験, 浮力

Keywords: brittle ductile transition, crack, experiment, buoyancy

SIT039-06

会場:301A

時間:5月24日 09:45-10:00

粒界すべりと動的粒成長を伴う「超塑性」的岩石流動

Superplastic rock deformation accompanied with grain boundary sliding and dynamic grain growth

平賀 岳彦^{1*}, 宮崎 智詞¹, 田阪 美樹¹, 吉田 英弘²

Takehiko Hiraga^{1*}, Tomonori Miyazaki¹, Miki Tasaka¹, Hidehiro Yoshida²

¹ 東京大学地震研究所, ² 物質材料研究機構

¹University of Tokyo, ²NIMS

最近、我々のグループはフォルステライト系の超塑性を発現することに成功した (Hiraga et al. 2010)。実験試料の微細構造観察によって、二次粒子（ペリクレスや輝石）が引っ張り方向へ垂直に衝突・合体することが分り、それは粒界すべりに伴う粒子スイッチングによってうまく説明できる。二次粒子の合体によりフォルステライト粒子の成長を阻害していた二次粒子の数が減少、結果として両相の成長が起きる。この合体と成長をゼナー則および動的粒成長則に基づいて定量化した。これによると、約8割の粒子が粒子スイッチングに参画し、また最大連結粒子数はスイッチング一回あたりの歪み（=0.55）から推定したスイッチング回数予想される連結粒子数に一致した。これを類似した構造をもつ花こう岩質マイロナイトに適用したところ、岩石の受けた歪みは2以上であることが読みとれた

キーワード: 超塑性, 粒界すべり, 動的粒成長, マイロナイト

Keywords: superplasticity, grain boundary sliding, dynamic grain growth, mylonite

SIT039-07

会場:301A

時間:5月24日 10:00-10:15

粒径依存型クリープにおける2相系のレオロジー The effects of secondary mineral to grain-size sensitive creep

田阪 美樹^{1*}, 平賀 岳彦¹
Miki Tasaka^{1*}, Takehiko Hiraga¹

¹ 東京大学 地震研究所

¹ Univ. of Tokyo, ERI

天然の岩石は一般的に複数の鉱物の集合体であるため、一相目の鉱物のみならず二相目の鉱物が加わった多相系における岩石の振る舞いを調べるのが重要となる。二相目の粒子の量比により変化することが期待されるパラメーターは粒径、粘性、変形機構などが挙げられる。特に、粒径は粒径依存型の変形において重要な役割を果たし、粘性や変形機構を直接的に変化させる重要なパラメーターである。Hiraga et al. (2010a) は、フォルステライト（第一相：Fo）+ エンスタタイト（第二相：En）系の粒成長実験を行い、エンスタタイトの量比を変化させると、平均粒径が変化する事を求め、エンスタタイトとフォルステライトの粒径比はゼナー則により説明可能であることを示した。彼らは、ゼナー則と粒成長則を用い、二相目の量比が変化した時の粘性差を予想した。

ゼナー則は異相粒子同士がお互いの粒成長（粒界面移動）を阻害する機構であり、二相系における粒径は、 $d_1/d_2 = b/f_2^m$ （式1）と表わされる。ここで d_1 は第一相の粒径、 d_2 は第二相の粒径、 f_2 は第二相の体積分率、 b と m は定数である (Smith, 1948)。

本研究では、Hiraga et al. (2010a) の結果を踏まえ、フォルステライト+エンスタタイトの二相系において、フォルステライトとエンスタタイトの割合を Fo:En(97:3)~Fo:En(4:96) まで系統的に変化させた試料を作成した。これらの試料を用いて粒成長則と変形における二相目粒子の影響を求めた。

粒成長の速度を示す粒成長は、 $d^n - d_0^n = kt$ （式2）と表わされ、 d は成長後の粒径、 d_0 は成長前の粒径、 k は粒成長係数、 n は粒成長指数である。実験から二相目粒子の割合が大きい程 k は小さいことが分かった。つまり二相目粒子が多いほど粒成長は遅いことになる。この二相目粒子の割合と粒径変化は、粒成長係数 K のモデルに基づき、ゼナー則（式1）により説明可能であることが分かった。

さらに、これらの試料を使い変形実験を行い、二相目粒子の割合を変化させた変形実験の結果から、二相目粒子の影響は以下の3つが考えられる。1) 変形中の粘性変化は上記で求めた粒成長則（式2）に基づく変形中の粒径変化と、実験から求められるフォルステライトとエンスタタイトの粘性差により説明可能である。2) フォルステライトとエンスタタイトの粒径比はゼナー則により決定され、変形後も保存される。3) エンスタタイトの増加にともない変形を支配する流動則は、転位クリープ律則の粒界すべりクリープから拡散クリープ律則の粒界すべりクリープに変化することが分った。

ここで重要なことは、第二相粒子が含まれることで粒径が小さくなり、全体として粒径依存型粒界すべり卓越拡散クリープが起き、逆に第二相粒子が少ないと転位クリープにシフトすることが見られたことである。このような違いは、鉱物モードによって変形機構が変化し、またモードによってレオロジーに大きな違いが生じることを意味する。

キーワード: かんらん岩, フォルステライト, 粒径, 変形機構, ゼナー則

Keywords: peridotite, forsterite, grain size, deformation mechanism, Zener relation

SIT039-08

会場:301A

時間:5月24日 10:15-10:30

微細粒酸化物多結晶体の超塑性変形挙動 Superplasticity in Fine-grained Oxide Ceramics

吉田 英弘^{1*}

Hidehiro Yoshida^{1*}

¹ 物質・材料研究機構

¹ National Institute for Materials Science

材料科学の分野において、超塑性とは多結晶体が巨大な延性（引張り伸び値で数百%以上）を示す現象を指す。それゆえ超塑性は主に金属材料の加工成形・接合技術として応用されている。一方、セラミックス（金属酸化物多結晶体）は金属材料と比較して一般に脆性であるが、平均粒径を 1 μm 程度以下に微細化することで、高温で超塑性を発現し得る。セラミックスにおける超塑性は若井らにより 1986 年に実証され、それ以降様々な系で超塑性変形挙動が確認・調査されてきた。微細結晶粒セラミックスにおける超塑性変形は、主に粒界すべりおよび粒子の再配置によって生じるが、この変形機構は同時に動的粒成長および粒界損傷（キャビテーション）の核生成・成長を伴う。動的粒成長は変形応力の増加とキャビテーション核生成の促進をもたらし、キャビテーションは破壊の起点となることから、これらのファクターはセラミックスの超塑性変形能を決定する支配要因とみなされる。講演では、微細結晶粒を有する酸化物多結晶体の超塑性変形とその微細組織について概観する。

キーワード: 超塑性, 酸化物, 粒界, 延性, 粒成長, 拡散

Keywords: superplasticity, oxide, grain boundary, ductility, grain growth, diffusion

SIT039-09

会場:301A

時間:5月24日 10:45-11:00

超マフィック岩中の極細粒断層岩 mylonitic pseudotachylyte の変形機構 The deformation mechanisms of ultramafic ultrafine fault rock "mylonitic pseudotachylyte"

上田 匡将^{1*}, 小畑 正明¹, 清水 以知子², 唐戸 俊一郎³, 小澤 一仁²

Tadamasa Ueda^{1*}, Masaaki Obata¹, Ichiko Shimizu², Shun-ichiro Karato³, Kazuhito Ozawa²

¹ 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻, ² 東京大学地球惑星科学専攻, ³Geology&Geophysics, Yale Univ.

¹Earth&Planetary Science, Kyoto Univ., ²Earth&Planetary Science, Univ. Tokyo, ³Geology&Geophysics, Yale Univ.

粒径の減少は岩石の弱化に大きく寄与するため、マクロに見た岩石変形の大部分を細粒な剪断帯が担うということがあり得、剪断集中のメカニズム・細粒物質のレオロジーが地球科学上重要である。細粒で塑性変形した天然に産する変形岩と言えばマイロナイトであり、特に再結晶で形成したネオブラスト量比の多いウルトラマイロナイトが変形集中帯を表すと考えられ重要である。

本発表ではイタリア北西部 Balmuccia かんらん岩に産するシュードタキライト及び、ウルトラマイロナイト様組織を持つシュードタキライト（以下これを mylonitic pseudotachylyte という作業的用語で呼ぶ。再結晶を被ったシュードタキライトは動的再結晶細粒化によってのみ形成した狭義のマイロナイトとの弁別が難しい場合が多く、発表者らはシュードタキライト由来が強く示唆されるマイロナイトを上記用語でグルーピングして研究している。）、つまりいずれも断層の地震による溶融を経て形成した断層岩、を紹介し、その細粒剪断帯としての変形を議論する。

Balmuccia かんらん岩は主にスピネルレゾライトから構成される。同岩体にはシュードタキライトや mylonitic pseudotachylyte からなる断層、及び溶融していないマイロナイト剪断帯などがネットワーク状に発達する。シュードタキライトは一般に断層脈と注入脈から構成されるが、調査地域では溶融由来の組織をよく残したシュードタキライトほど注入脈ネットワークが発達し、断層物質の組織が mylonitic pseudotachylyte 組織に近づくほどその断層の注入脈が稀になるという傾向がある。このため、mylonitic pseudotachylyte が溶融由来であるとの認定は難しいが、溶融由来組織と mylonitic pseudotachylyte 組織を同一断層面上に持つ断層がまれにあり、今回紹介する mylonitic pseudotachylyte は総合的な判断から溶融を経て形成したものであると言える。また、mylonitic pseudotachylyte 断層の壁岩ではしばしば、断層に向かってのかんらん岩の動的再結晶細粒化の進行が見られる。この、壁における動的再結晶ネオブラスト部は、かんらん石、斜方輝石、単斜輝石、スピネル、ホルンブレンドから構成される。

Mylonitic pseudotachylyte はポーフィロクラスト状のクラスト（かんらん石、スピネル、輝石）と極細粒の基質からなる。基質は、粒径 submicron～数 micron 程度で、かんらん石、斜方輝石、単斜輝石、スピネル、ホルンブレンド、土斜長石、ドロマイト、少量の硫化物、からなる多相混合物である。これらの鉱物の粒界はしばしば三重会合点を形成し、細粒ではあるながらもほぼ組織平衡に達していると判断できる。

Mylonitic pseudotachylyte と一部再結晶した溶融由来組織を残しているシュードタキライト共通の組織に、われわれが「Opx フリンジ」と呼んでいる組織がある。これはかんらん石結晶表面のある特定の面方向にのみ斜方輝石が形成するという組織である。Opx フリンジは、かんらん石に向かって凸な粒界を持っている細粒な斜方輝石結晶の集合体であり、大きなかんらん石結晶のまわりほど厚く成長している。変形・再結晶の程度の小さいシュードタキライトでは基質・クラストともに Opx フリンジが見られ、mylonitic pseudotachylyte ではポーフィロクラストかんらん石にのみ Opx フリンジが見られる。注入脈をもった mylonitic pseudotachylyte 断層では、変形の小さい注入脈部基質において Opx フリンジによるかんらん石-斜方輝石互層構造が見られるが、変形の大きな断層脈部基質においてはそのような構造は見られず構成鉱物がランダムに分布し、粒径も細粒になっている。（このことから、Opx フリンジ構造は変形によって破壊され、よりランダムな、細粒な構造に変化していると考えられる。）また、Opx フリンジは異方的に発達しているため、変形時の応力ないし歪を駆動力にして、ないしは感じながら形成したものと考えられる。

Mylonitic pseudotachylyte のもうひとつの特徴は、基質のかんらん石が結晶定向配列を持つことである。Mylonitic pseudotachylyte 基質には、この結晶定向配列と調和的な、集合的な光学的異方性が偏光顕微鏡観察によって認定できる。複数回の地震活動を記録した断層においてはより古い mylonitic pseudotachylyte 部がより顕著な光学的異方性を示す。

本発表ではこれらの組織を紹介しつつ、その形成条件・変形プロセスについて議論する。

キーワード: シュードタキライト, ウルトラマイロナイト, かんらん岩, 格子定向配列, 極細粒多相混合物, 非等方組織

Keywords: pseudotachylyte, ultramylonite, peridotite, lattice preferred orientation, ultrafine polyphase aggregate, anisotropic texture

SIT039-10

会場:301A

時間:5月24日 11:00-11:15

輝石内部の化学・組織パターンから読み解くマントルかんらん岩の変形史 Deformation history of mantle peridotites decoded from chemical and textural patterns in pyroxenes

小澤 一仁^{1*}, ボディニエ ジャンルイ², ガリド カルロス³, 永原 裕子¹
Kazuhito Ozawa^{1*}, Jean-Louis Bodinier², Carlos J. Garrido³, Hiroko Nagahara¹

¹ 東京大学地球惑星科学専攻, ² モンペリエ大学, ³ グラナダ大学

¹University of Tokyo, ²Lab. Tec. Universite de Montpellier, ³CSIC, University of Granada

Al and Ca contents in pyroxenes have been used as useful geothermobarometers for peridotites because of their different dependences on P and T, particularly in the garnet and plagioclase stability fields. The geothermobarometry is often problematic because of complicated kinetic processes in adjustment of the mineral composition in response to P-T changes and deformation (P-T-d history). However, the disturbance caused by kinetic processes provides rich information on the P-T-d history of mantle rocks. The modification of Al and Ca contents in pyroxenes during P-T changes occurs by two main mechanisms: (i) diffusive exchange of their components with or net mass transfer to/from the surrounding minerals and (ii) exsolution of other phases, such as pyroxenes and garnet, within crystals. Both mechanisms usually result in primarily concentric Al and Ca distribution patterns in crystal grains with some effects of crystallographic anisotropy. Deformation affects kinetic processes through the creation of fast diffusion paths inside the crystal such as localized high concentration of dislocations and tilt/twisted boundaries and even formation of new grain boundaries by recrystallization. It could result in non-concentric or striped Al and Ca distribution patterns, which potentially record coupling/decoupling of deformation with P-T changes. On these bases, the combined examination of the crystallographic orientation and the distributions of Al and Ca content in pyroxene crystals provides a powerful tool to unravel the P-T-d history of mantle rocks.

On the basis of this concept, orthopyroxene megacrysts as large as one to a few cm from Pyrenean peridotite massifs (Fabries et al., 1991) were examined with EPMA and FE-SEM attached with EBSD system to estimate their P-T-d history. The megacrysts are in a garnet websterite near the host peridotite from Bestiac, a thin websterite in spinel peridotite from Sem, and a spinel websterite in contact with spinel peridotite from Lherz massifs. Megacrysts were examined because they record the prolonged P-T-d history up to the higher temperature approaching the solidus and/or the higher pressure and temperature approaching the depth of derivation in the mantle.

The orthopyroxene megacrysts from the Pyrenean peridotites and pyroxenites have wide core region rich in exsolution lamellae of clinopyroxene, garnet, or spinel, which are absent in the marginal zone. The cores have high averaged Al and Ca content including lamellae than the outermost rim with or without a marginal high. These concentric features suggest overall cooling at various pressures depending on the mineral assemblage. Overlapping with such concentric variation, striped disturbances accompanied with distortion of lamellae and tilt boundaries are noticed particularly in the marginal zone of the megacrysts. Such stripes are nearly parallel to (001) and rich in Al with or without Ca enrichment as high concentration of clinopyroxene lamellae. In detail, the most of lamellae are asymmetric featuring gradual increase in Al from one side towards the high followed by rapid decrease on the other side. When the Ca enrichment overlaps with the Al high, clinopyroxene lamellae are mostly restricted on the Al-rich side. The location of tilt boundary almost coincides with the Al high, but is often shifted to the Al-poor side by a few to 10 microns. These features of striped zoning in the marginal zone indicate that the tilt boundaries were in motion during Al (and Ca) enrichment in orthopyroxene, probably corresponding to a short heating. Combined this with the overall Al and Ca zoning, it is inferred that deformation and P-T change were coupled in the latest stage of cooling of Pyrenean peridotite massifs.

キーワード: 変形史, マントル, 輝石, 化学不均質, 亜粒子・亜粒界

Keywords: deformation history, mantle, pyroxene, chemical heterogeneity, subgrain/subboundary

SIT039-11

会場:301A

時間:5月24日 11:15-11:30

つぶつぶ岩石はいったいどれくらい軟らかいのか？ 天然変形岩中の微細構造からの制約

Are very-fine-grained polymineralic rocks extremely soft? Constraints from microstructures in naturally deformed rocks

竹下 徹^{1*}, 岡本 あゆみ¹

Toru Takeshita^{1*}, Ayumi Okamoto¹

¹ 北海道大学

¹ Hokkaido University

従来、地殻の強度断面は、ある深さの岩石は摩擦すべり則に従う破壊強度と転位クリープ則に従う塑性強度の内、より小さな強度を持つ変形機構で変形するとされ、その深さの強度が求められた。その結果、石英の流動則に支配されると考えられる大陸地殻上部では、地表から10数kmまでは摩擦すべりで、それ以下では転位クリープ変形するとされ、脆性-塑性転移点における差応力は数百MPaに達することが予測された。従来の地殻の強度断面は今なお用いられることが多いが、これには2つの大きな問題点があることが明らかである。1つは、地殻浅部では確かに破壊（断層形成）が優勢であるが、岩石の破壊実験で得られるような高応力は地震を生じるような破壊に必要な差応力であり、内陸地震を引き起こしている断層帯で数千年に1度だけ達成されるものである。それ以外の地震間の期間（inter-seismic period）では、差応力は破壊強度よりもはるかに低いレベルにある。問題は、このような低応力で十分速い変形が起こらなければ従来の強度断面は妥当なわけであるが、以下に述べる実際の断層帯では圧力溶解クリープにより、かなり高速の変形が低応力で生じていると推察される。もう1つの問題は、地殻の強度断面では、例えば地殻上部が石英1相からなると仮定されているが、実際の地殻は多相系であり、その場の温度・圧力条件により様々な化学反応が特に流体を含んだ岩石中で生じている。レオロジーにとって重要なことは、フィロ珪酸塩等の摩擦係数が低い鉱物が大量に出来ることにより生じる反応軟化であるが、この効果は従来の地殻の強度断面では無視されている。

上記の低応力で優勢になる圧力溶解クリープの速度がどの程度になるかは実験により明らかにする必要があるが（例えば、Niemeijer and Spiers, 2005）、我々は天然変形岩の微細構造観察から歪速度をある程度拘束したいと考えている。また、同時に変形時の温度・圧力条件を知ることも、断層帯の深部から浅部に至る変形過程・機構を明らかにする上で重要である。歪速度を拘束するためには、圧力溶解クリープによる歪を解析し、それを変形時間で割る必要がある。歪マーカーとなる微細構造の1つとしては、歪フリッジがある（Ring and Brandon, 1999）。一方、変形時間を拘束するのには閉鎖温度の低いフィッシュトラック年代等を用い冷却速度を求め、圧力溶解クリープが生じる温度範囲にあった時間間隔を求めることになる。また、天然では石英層（例えば石英脈）と細粒多相系が互層し、褶曲している場合が多いが、この時石英層は転位クリープで変形しコンピーテント層として振る舞い、細粒多相系層は圧力溶解クリープで変形し、インコンピーテント層となっている（例えばTakeshita and Hara, 1998）。このような場合では、細粒多相系層の層厚（orthogonal thickness）の変化から両者の粘性係数比を求めることが出来るかもしれない。

しかし、現段階ではいまだ天然の微細構造に基づいて、圧力溶解クリープの歪速度に制約を与えることは困難である。講演では、おそらく天然の脆性-塑性の転移の条件下で、圧力溶解クリープあるいは変成反応に律則されるクリープが高速で生じたことを示唆する様々な微細構造を紹介する。それらは、アスペクト比の大きい歪フリッジ、新期の白雲母や緑泥石の成長で特徴付けられるシェアバンドおよびランダム石英c軸ファブリックを示す沈殿石英集合体などである。さらに、微小破壊（あるいはすべり）と圧力溶解クリープによりおそらく高速で変形したであろう微細粒アクチノライトからなる断層岩や、緑泥石が網目状に発達してすべり面を形成する断層岩（フィロナイト、Jefferies et al., 2006）も紹介し、これらの岩石の形成において流体を介した元素移動（メタソマティズム）が極めて重要なことも述べる。

キーワード: 圧力溶解クリープ, 大陸地殻の強度断面, 脆性-塑性転移, 多相系岩石, 化学反応軟化, メタソマティズム

Keywords: pressure solution creep, strength profile of the continental crust, brittle-ductile transition, polymineralic rocks, reaction softening, metasomatism

SIT039-12

会場:301A

時間:5月24日 11:30-11:45

溶液-沈殿機構による斜長石の変形: 領家帯内部剪断帯からの知見 Deformation of plagioclase accommodated by solution-precipitation process

福田 惇一^{1*}, 奥平 敬元²

Junichi Fukuda^{1*}, Takamoto Okudaira²

¹ 阪大・理・宇宙地球, ² 阪市大・院理・地球

¹Dept. Earth & Space Sci., Osaka Univ., ²Dept. Geosci., Osaka City Univ.

斜長石は上部～下部地殻に広く存在している。そのため斜長石のレオロジー特性は、地殻強度を理解する上で重要である。特に歪集中帯における斜長石の変形は、岩石全体の強度を支配し、その変形機構は主に、grain-size-insensitive creep (転位クリープ) と grain-size-sensitive creep (拡散クリープ and/or 粒界すべり) の二つの機構に分類されてきた。Grain-size-insensitive creep は、結晶方位定向配列 (CPO) のパターンで特徴づけられるいくつかのすべり形を示す (斜長石では例えば Kruse et al., 2001)。実験的に示唆されているように、この二つのクリープの遷移条件は、P-T 条件、含水量、応力などに依存して、一般に 15-70 μm の粒径で起こるとされている (Rybacki and Dresen, 2004)。

上記のクリープに加えて、近年では溶液-沈殿クリープが地殻で卓越することが提案されている (例えば Imon et al., 2002; Wintsch and Yi, 2002)。溶液-沈殿クリープは、中上部地殻において広く産出する石英について論じられてきた (例えば Hippert, 1994; Vernooij et al., 2006)。一般に鉱物の溶液-沈殿機構は、高応力下で溶解が、そして相対的に低応力下で沈殿が起こると考えられている。このとき CPO の発達には、Bos and den Brok (2000) によってシュミレートされているように、溶解と成長速度、化学ポテンシャル勾配、溶液の拡散速度に依存する。この点においては、溶液-沈殿機構は圧力溶解に類似している。また、天然試料の観察から、溶液-沈殿クリープは反応によっても起こることが示唆されている (Imon et al., 2002)。

長石類の溶液-沈殿クリープに関して、CPO は形成されるのか (Heidelbach et al., 2000; アルバイトの変形実験による)、されない (または保存されない) のか (Menegon et al., 2008; 天然カリ長石の観察による)、その研究例は少ない。地殻に普遍的に産出するにも関わらず、長石類の溶液-沈殿クリープに関する知見は、長石類を含めた鉱物の grain-size-sensitive creep や insensitive creep に関する研究や、石英の溶液-沈殿クリープに関する研究と比較して、圧倒的に限られている。

上記の点を受けて本研究では、領家帯内部剪断帯における花崗岩質マイロナイト中に含まれる斜長石に注目する。斜長石のテクスチャー、組成、結晶学的方位に関する情報を得る。これらの情報を、現在までに多く報告されている石英の溶液-沈殿機構に関する情報と比較する。そして、斜長石の溶液-沈殿クリープと次いで起こりうる grain-size-sensitive creep について議論する。

キーワード: 溶液-沈殿クリープ, 組成変化, 結晶学的方位, 緑色片岩相

Keywords: solution-precipitation creep, compositional change, crystallographic orientation, green-schist facies condition

SIT039-13

会場:301A

時間:5月24日 11:45-12:00

アメリカ西海岸におけるアセノスフェアの密度, 温度, 弾性定数の推定 Probing asthenospheric density, temperature and elastic moduli below western United States

伊藤 武男^{1*}, Simons Mark²
Takeo Ito^{1*}, Mark Simons²

¹ 名古屋大学, ² カリフォルニア工科大学
¹ Nagoya Univ., ² Caltech

Ocean tides are a well-known phenomena resulting from periodic variations in the gravitational attraction of the Sun and the Moon. The Earth's response to ocean tidal loads (OTL) is controlled by internal variations of density and elastic parameters. In principle, observations of the Earth's OTL response can be used to constrain our models of Earth's internal structure. Tidally-related displacements on the surface of the Earth consist of two primary components, solid Earth body tides (SEBT) and the OTL response. SEBT are characterized by sub-meter amplitude and very long wavelength (tens of thousands kilometers and longer). SEBT are relatively insensitive to spatial variations in elastic structure, with less than one millimeter of variation. Hence, we consider SEBT as sufficiently known, and remove an a priori model of SEBT from our observations. In contrast, the OTL response has a richer spatial structure including power at regional length scales (a few hundred kilometers) with typical amplitudes on the centimeter scale. Although, the characteristic amplitude of the OTL response is smaller than SEBT, we show here that the sensitivity of the OTL response to reasonable variations in structure has amplitudes on the centimeter scale, an order of magnitude larger than for SEBT and within the range detectable using the global positioning system (GPS).

Large and dense GPS arrays have been deployed around the globe to improve the spatial-resolution of Earth's surface strain field. Measurement of the OTL response with GPS has dramatically improved in recent years, with an attainable measurement accuracy of better than 1 mm. OTL responses are reasonably well-predicted by global ocean tidal models, derived from assimilation of satellite altimetry and tide-gauge observations, and convolved with the elastic response of the Earth. In traditional GPS processing, these effects are modeled and removed from sub-daily GPS time series. Here, instead of modeling these offsets out, we estimate the OTL response directly from the data.

Using the OTL response as derived from GPS observations made throughout the western United States, we infer depth-dependent material property variations in the mantle down to about 350-km-depth. Seismologists are already adept at producing shear wave velocity (V_s) and compressional wave velocity (V_p) models. For the crust and uppermost mantle, these models are relatively insensitive to density. Typically, estimates of density and elastic moduli for Earth's interior are obtained by combining and/or scaling V_s and V_p models. This conversion step is fraught with uncertainty as to how to scale the inferred seismic velocities to account for both thermal and chemical effects. In contrast, by considering the spatial variation of the horizontal and vertical response (amplitude and phase) to OTL, we can independently constrain the depth-dependence of density and elastic moduli. Such an ability to constrain density variations in the Earth's interior is essential to our understanding of mantle convection and evolution of the overlying tectonic plates.

We present the first depth-dependent model for the crust and upper-most mantle that constrains independently density and elastic moduli below the western United States and nearby off shore regions. This model is unique since it is the first to be derived solely from geodetic observations of surface displacements induced by ocean tidal loads. Our observations require strong gradients in both density and elastic shear moduli at the top and bottom of the asthenosphere but no discrete structural discontinuity at 220 km depth. We find that at least regionally, there is a low-density anomaly in the asthenosphere of about 50 kg/m^3 , corresponding to a temperature anomaly of about 300 C. Such a temperature anomaly can also explain differences in inferred elastic structure relative to globally averaged radial seismic models.

Keywords: ocean tidal loads, density, temperature, elastic moduli, asthenosphere, GPS

SIT039-14

会場:301A

時間:5月24日 12:00-12:15

アセノスフェア条件下でのかんらん石の結晶方位定向配列における水の効果 Effect of water on the crystallographic preferred orientation of olivine under the asthenospheric mantle conditions

大内 智博^{1*}, 川添 貴章¹, 西原 遊², 入船 徹男¹
Tomohiro Ohuchi^{1*}, Takaaki Kawazoe¹, Yu Nishihara², Tetsuo Irifune¹

¹ 愛媛大学・地球深部研究センター, ² 愛媛大学・上級研究員センター

¹Geodynamics Research Center, Ehime Univ., ²Senior Research Fellow Center, Ehime Univ

かんらん石の流動及び塑性変形は、上部マントルの構造やダイナミクスを考える上で最も重要な要素のうちの一つである。転位クリープによって発達する、かんらん石の結晶方位定向配列（CPO）は、上部マントルにおける弾性異方性の主要な原因のひとつと考えられている。沈み込み帯における地震波速度異方性の特徴のとして、速い S 波の振動方向が前弧側では海溝と平行であり、その一方で背弧側では海溝と垂直方向であるといった点が挙げられる（例えば Smith et al., 2001; Nakajima and Hasegawa, 2004）。この速い S 波の振動方向の回転の原因としては、マントルウェッジにおける流れが前弧から背弧側にかけて大きく変化（90°）するといったモデルが従来より提案されてきた（例えば Russo and Silver, 1994）。このモデルでは、A-type のかんらん石ファブリック（即ち (010)[100] すべり系によって発達するファブリックであり、流れと平行な方向に速い S 波の振動方向が生じる）のみが地震波速度異方性の原因となっているといった仮定をしている。しかし、マントルウェッジにおけるそのような流れの変化を支持するようなデータは十分に報告されていない。

近年、高温高压下の岩石変形実験により、かんらん石は A-type のみならず、B-, C-, E-type といったファブリックをもつことが示されてきた（Jung and Karato, 2001; Katayama et al., 2004）。特に、B-type ファブリックは、流れと垂直方向に速い S 波の振動方向が生じるといった特性をもつ。これらの結果に基づいて、速い S 波の振動方向が前弧側では海溝と平行であり、その一方で背弧側では海溝と垂直方向であるといった原因は、それぞれの領域において B-type ファブリックおよび C-type（または E-type）ファブリックが発達していることによるといったモデルが提案されている（Karato, 2003; Kneller et al., 2005）。現在において、このモデルは広く受け入れられてきている。しかし、従来の変形実験はリソスフェア条件（0.5-2 GPa）において行われているため、仮にかんらん石のファブリック発達に圧力効果があつた場合には、それらの実験結果をそのままマントルウェッジに当てはめることはできなくなる。実際、無水条件下においては、圧力効果によってかんらん石ファブリックが変化するという実験結果が報告されている（Jung et al., 2009; Ohuchi et al., 2011）。

最近、我々は高压下での鉱物の LPO を実験的に検証することを目的として、D-DIA 型変形装置 + MA6-6 システムに対応した、単純せん断変形実験用セルを開発した。本研究では、そのセルを用いることにより、かんらん石ファブリックに対する水の効果をアセノスフェア条件下において実験的に検討した。圧力 2-7 GPa、温度 1400-1670 K、歪速度 1E-5 から 1E-4 /s の条件下において、含水かんらん石多結晶体の単純せん断変形実験を行った。

予想的な実験結果によれば、いずれの温度圧力条件下においても、無水条件および中程度の含水条件下においては A-type ファブリックが発達した。その一方で、含水条件下（高含水条件）B-type に類似したファブリックが発達した。これらの結果は、リソスフェア条件下（< 2 GPa）のみならず、アセノスフェアにおいても、かんらん石 LPO において水は非常に重要な役割を果たすことを示している。また、速い S 波の振動方向の変化がかんらん石の水の量の違いによってもたらされる可能性を示唆している。

キーワード: かんらん石, 結晶方位定向配列, 水, 地震波速度異方性

Keywords: olivine, crystallographic preferred orientation, water, seismic anisotropy

SIT039-15

会場:301A

時間:5月24日 12:15-12:30

上部マントル深部でのカンラン石のレオロジー

Rheology of fine-grained forsterite aggregate under deep upper mantle conditions

西原 遊^{1*}, 大内 智博², 川添 貴章², Spengler Dirk¹, 田阪 美樹³, 平賀 岳彦³, 亀卦川 卓美⁴, 鈴木 昭夫⁵, 大谷 栄治⁵
Yu Nishihara^{1*}, Tomohiro Ohuchi², Takaaki Kawazoe², Dirk Spengler¹, Miki Tasaka³, Takehiko Hiraga³, Kikegawa Takumi⁴,
Akio Suzuki⁵, Eiji Ohtani⁵

¹ 愛媛大学上級研究員センター, ² 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 高エネ研 PF, ⁵ 東北大学

¹SRF Center, Ehime University, ²GRC, Ehime University, ³ERI, University of Tokyo, ⁴PF, KEK, ⁵Tohoku University

地球のマントル中で重要な拡散クリープと転位クリープの2つの変形機構は、格子選択配向の有無や粘性率の応力依存性において顕著に異なっている。このため、マントル中で卓越する変形機構を解明することは非常に重要である。これまでに上部マントル深部条件でのカンラン石の流動特性についていくつかの報告があるが(e.g. Kawazoe et al., 2009, Durham et al., 2009)、これらはすべて転位クリープの観察であり、高温高压下の拡散クリープによる変形挙動は全くわかっていない。このため、本研究ではカンラン石の端成分 forsterite (Mg_2SiO_4) の細粒多結晶を試料として高温高压変形実験を行い、上部マントル中における支配的な変形機構を解明することを目指した。

実験は高エネルギー加速器研究機構、PF-AR、NE7 に設置されている DIA 型変形装置 (D-CAP) を用いて行った。直径 1.5 mm、高さ 1.0 mm に成型した平均粒径約 1.7 μm の forsterite (90%) + enstatite (10%) 焼結多結晶を、先端 5 mm の WC 及び cBN アンビルを用いた MA6-6 加圧方式により加圧し、(Mg,Co)O 圧力媒体に組み込んだグラファイト発熱体により加熱した。加熱中の温度は WRe 熱電対により測定した。実験中の試料の差応力は 50 keV の放射光単色 X 線を用いた 2 次元 X 線回折により、歪は X 線ラジオグラフィにより決定した。

温度 1573 K、圧力 3-5.5 GPa、歪速度 7×10^{-6} - $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の条件で、応力-歪曲線を決定することに成功した。回収試料の含水量が 50 H/10⁶ Si 以下で「無水」とみなせる条件下での歪速度-差応力の関係を 1 気圧でのデータ (Tasaka et al., unpublished data) と組み合わせて解析した結果、カンラン石の拡散クリープの活性化体積 (V_{dif}^*) は約 9 cm^3/mol と求められた。従来、転位回復実験に基づく推定値 ($V_{\text{dif}}^* = 6 \text{ cm}^3/\text{mol}$) から、約 200 km 以深で拡散クリープが卓越すると議論されてきた (e.g. Karato and Wu, 1993)。今回変形実験により直接得られた V_{dif}^* をもとに見積もると、拡散クリープが卓越する深さは上部マントルのより深部に限られることが示唆される。

SIT039-16

会場:301A

時間:5月24日 12:30-12:45

メージャライトガーネット中の Si-Al 相互拡散 Si-Al interdiffusion in majoritic garnet

西 真之^{1*}, 久保 友明², 大藤 弘明¹, 加藤 工², 西原 遊¹, 入船 徹男¹

Masayuki Nishi^{1*}, Tomoaki Kubo², Hiroaki Ohfuji¹, Takumi Kato², Yu Nishihara¹, Tetsuo Irifune¹

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ² 九州大学

¹GRC, Ehime Univ., ²Kyushu Univ.

It has been suggested that the mineral transformations in subducting plates are kinetically inhibited and therefore low-pressure phases could metastably survive without transforming to its high-pressure phases (e.g., Sung and Burns, 1976). Kinetic studies on the high-pressure transformations have suggested that olivine, pyroxene, and garnet metastably survive without transforming their high-pressure phases in cold subducting plates. Especially, the formation of majoritic garnet from pyrope garnet and pyroxene (the pyroxene-garnet transformation) is very slow and phase relation of subducting plates is possibly different from the equilibrium phase relation. However, quantitative kinetic data for the pyroxene-garnet transformation have not been obtained yet. Here we report $\text{Si}^{4+} + \text{M}^{2+} \rightleftharpoons 2\text{Al}^{3+}$ ($\text{M} = \text{Mg} + \text{Fe} + \text{Ca}$) interdiffusion rate in majoritic garnet, which controls kinetics of the pyroxene-garnet transformation. Based on the experimental results, we discuss the density of subducting plate.

We carried out four experiments at 17 GPa and temperatures of 1550-1700C (every 50C) for 5-50 hours using a multi-anvil apparatus. Pressure was generated by the double-stage system and the truncated edge length of the second-stage anvils was 8.0 mm. Garnet diffusion couples having different chemical compositions were used as starting material. One is natural single-crystalline pyrope garnet, and the other is polycrystalline majoritic garnet synthesized from pyrope-minus olivine glass at 17 GPa and 1600C. The diffusion couples were contacted each other and surrounded by MgSiO_3 enstatite powder and Ni capsule. The sample assembly is composed of sintered (Mg,Co)O and ZrO_2 pressure mediums, a cylindrical LaCrO_3 heater, and a Mo electrode. Temperature was monitored with a W3%Re-W25%Re thermocouple. The diffusion profiles of run products were obtained using an analytical transmission electron microscope (ATEM, JEOL JEM-2010) with an EDS detector (Thermo-NORAN Vantage-ES). Thin foils perpendicular to the diffusion interface for ATEM analyses were prepared by a focused ion beam (FIB) apparatus (JEOL JEM-9310FIB). Water content of the majoritic garnet polycrystalline before and after diffusion experiments were determined by FT-IR spectroscopy on the basis of the Paterson calibration [1982], which yielded 20-40 wt.ppm H_2O .

The pyroxene-garnet transformation requires long-distance $\text{Si}^{4+} + \text{M}^{2+} \rightleftharpoons 2\text{Al}^{3+}$ diffusion comparable to the grain size of original garnet. The results indicated that, if we consider the grain size of 1 mm for the original garnet, the transformation requires high temperatures of more than 1500C comparable to a normal mantle geotherm. This suggests that the pyroxene-garnet transformation would be kinetically inhibited in cold subducting plates and large amount of metastable regions exist in the subducting plate around the mantle transition zone.

キーワード: 相転移カインेटクス, 拡散, 沈み込むスラブ, メージャライト, 輝石, ガーネット

Keywords: transformation kinetics, diffusion, subducting slab, majorite, pyroxene, garnet