

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05232

研究課題名（和文）マントル遷移層スラブの軟化と深発地震に関する実験的研究

研究課題名（英文）Experimental study on syn-deformational reaction processes at high pressures: Implications for slab weakening and deep earthquakes

研究代表者

久保 友明 (Kubo, Tomoaki)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：40312540

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 108,400,000円

研究成果の概要（和文）：長年未解決とされてきた遷移層スラブの軟化と深発地震の発生という2つの問題を取り上げ、非平衡相転移と変形の相互作用というダイナミックな観点から実験研究を行った。世界に先駆けて、D-111型高压変形装置と放射光単色X線、AE測定システムを組み合わせたその場観察手法を開発し、遷移層圧力下の定量的変形場でオリビン-スピネルおよびポストスピネル相転移実験に成功し、非平衡相転移が岩石の軟化や変形の局所化、さらにはせん断不安定化を誘起するプロセスを見出した。また2段階で起こるポストスピネル相転移やMORB層のポストガーネット相転移が遷移層スラブのレオロジーを支配するという新たな概念を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体地球の最大の特徴であるプレートテクトニクス型マントル対流について、長年未解決とされてきた深発地震の発生と深部プレートの軟化という2つの問題を取り上げ、岩石の相転移と変形の相互作用というダイナミックな観点から実験研究を行った。世界に先駆けて、D-111型高压変形装置と放射光単色X線、AE測定システムを組み合わせたその場観察手法を開発し、マントル遷移層の変形場を再現して相転移実験を行うことに成功した。本研究により、沈み込んだ海洋プレートがマントル遷移層では岩石の相転移によって地震を引き起こしつつも、下部マントルでは逆にその強度を失い非地震性化していくプロセスが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Reaction-deformation coupling in deep rocks are potentially important processes to understand the plate-tectonic mantle convection in the Earth. We developed high-pressure deformation techniques with D-DIA and D-111 type multi-anvil devices, which enables us to conduct in-situ observations of the coupling processes up to lower mantle pressures combined with synchrotron radiation at PF-AR NE7A and SPring-8 BL04B1 beamlines. Based on these techniques, we clarified the processes of the reaction-induced shear instability and rheological weakening associated with the olivine-spinel and the post-spinel transformations. We also found that the two-stage post-spinel transformation and the post-garnet transformation have important roles on the slab rheology. These findings give a new perspective on deep slab dynamics including deep earthquakes, slab stagnation, and MORB segregation around the upper and lower mantle boundary.

研究分野：地球惑星内部科学

キーワード：地球内部物質 相転移 変形破壊 高温高压 放射光

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

固体地球で駆動するプレートテクトニクス型のマントル対流を理解する一つの鍵が、マントル遷移層（深さ約 400-700km、圧力 13-25 GPa）を通過する沈み込んだ海洋プレート（遷移層スラブ）の挙動である。遷移層ではほぼ全ての鉱物が高压相転移を起こし、プレートの密度と強度が複雑に変化する。遷移層スラブは大きく折れ曲がりながら深さ 700km 付近まで地震活動が続けるが、それ以深ではプレートとしての強度を失ったようにふるまい地震も全く起こらなくなる(図 1)。その挙動は海溝後退などを通じて表層プレート運動にも影響を与え、またマントルの対流様式と物質循環を考える上でも極めて重要である。特に 410km 地震波不連続面に相当する Mg_2SiO_4 オリビン-スピネル相転移、660km 不連続面に相当するポストスピネル (Mg_2SiO_4 スピネルから $MgSiO_3$ ブリッジマナイト+ MgO ペリクレイスへの分解) 相転移が遷移層スラブの性質を大きく変化させる可能性があり、これまでに数多くの研究が行われてきた。しかし依然として以下に示す 2 つの大きな未解決問題が残っている。

1 つは冷たいスラブの軟化である。1990 年代以降の地震波トモグラフィ観測により遷移層から下部マントルにかけてのスラブ変形の多様性が明らかにされたが(e.g., Fukao-Obayashi, JGR13)、対流シミュレーション研究によれば、低温にしてはかなり軟らかい遷移層スラブを導入しないとその変形挙動が実現できないと指摘されている(e.g., Nakakuki+, PEPI10)。冷たいスラブがどのようにして軟化するのか？ 遷移層スラブの軟化プロセスについて未だ物質科学的な実証がされていない。もう 1 つがスラブ内における深発地震の発生（深さ 300km-680km, 図 1）である。塑性流動が卓越する遷移層圧力下でなぜ地震が起こるのか？ 逆に下部マントルではなぜ起こらないのか？ これは約 90 年前の和達清夫による深発地震面の発見以降、未だ解決されていない固体地球科学最大の謎の 1 つである。

いずれの問題もこれまでの静的なアプローチ（相平衡と弾性特性から深部スラブの密度バランスを考える）だけでは不十分で、非平衡相転移と塑性流動が相互作用するダイナミックな性質を解明する必要がある。しかし高压下での変形実験が困難であったため、アナログ物質を用いた高压下での実験に頼らざるを得なかった。本研究では D-111 型高压変形装置を中心に新たな技術開発を進めてそこをブレイクスルーし、遷移層スラブの未解決問題を直接的に実験研究する。

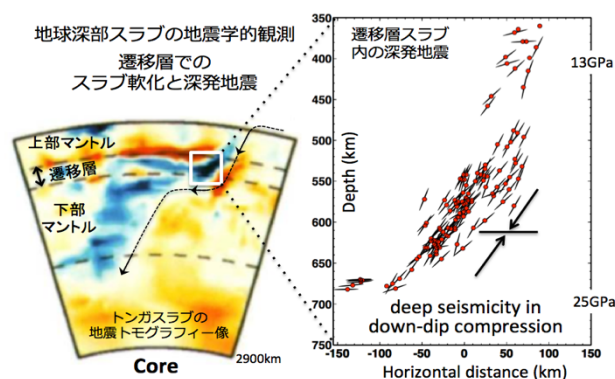


図1 沈み込んだスラブはマントル遷移層領域で変形し(左、トンガスラブの例 Karason-van der Hilst, 2000)、その内部では深発地震が起こっている(右、震源分布と主応力軸の向き Kaneshima+, PEPI2012)。なぜ冷たいスラブが軟化し、高压下で断層運動するのか？ 非平衡相転移と変形の相互作用プロセスを実験研究する。

2. 研究の目的

これら 2 つの未解決問題にはともに反応誘起の細粒化が深く関わっていることが指摘されてきたが、直接的な実験研究がなくそのプロセスの詳細は不明のままであった。その状況を打破するために本研究では以下の 3 点を目的とし研究を進める。1) D-111 型高压変形装置と放射光単色 X 線、AE 測定システムを組み合わせた遷移層圧力下における変形-相転移実験手法の確立、2) 遷移層圧力下の定量的な変形場でオリビン-スピネルおよびポストスピネル相転移実験を行い、細粒化と軟化、変形の局所化と不安定化プロセスを解明する、3) これらの実験研究に加え衝撃変成隕石で見られる相転移プロセスの解明、またスラブ地震学の成果を組み合わせ、両相転移が遷移層スラブの変形と多様性、深発地震発生に果たしている役割を解明する。

3. 研究の方法

上記の研究目的をふまえ、本研究では高压地球科学と隕石鉱物学、放射光科学、スラブ地震学の研究者が連携して、以下に記す主に 4 つの手法で研究を進める。

(研究 1) 遷移層圧力下における変形-相転移実験技術の開発

これまでに D-DIA 型装置をベースに開発してきた変形-相転移実験手法を遷移層圧力条件に適用するため、新たに D-111 型装置を九州大学に導入し 8 端子川井型 AE 測定システムの開発を行う。その技術を放射光施設設置の高压変形装置に適用し、あわせて X 線カメラと入射スリットの自動化を行いながら、放射光単色 X 線による変形-相転移その場観察手法を確立する。

(研究 2) 相転移と変形の相互作用プロセスの放射光その場観察

主に、(1) アナログ物質のオリビン-スピネル相転移(圧力 5-15GPa)、(2) マントル物質のオリビン-スピネル相転移(17-23GPa)、(3) マントル物質のポストスピネル相転移(23-25GPa)の 3 つに着目し、変形場での相転移その場観察実験を行う。相転移速度曲線と応力-歪み曲線および AE 活動をモニタしながら、相転移にともなう軟化や変形の局所化、剪断不安定化現象を実験的に明らかにする。また研究の進行状況に応じて、非オリビン成分の相転移とスラブレオロジーへの影響も合わせて検討する。

(研究 3) 変形-相転移実験試料および衝撃変成隕石の微細組織観察

高压変形実験を行った試料および衝撃を受けた隕石中に見られる変形場での相転移微細組織を FE-SEM および FIB-TEM 技術を用いて分析する。スラブの変形-相転移に似たプロセスは衝撃を受けた隕石中にも存在しており、両者を比較検討することで複雑な変形-相転移相互作用プロセスの詳細を明らかにする。

(研究 4) スラブ地震学と深部岩石ダイナミクスによる遷移層スラブ挙動の解明

深発地震からの地震波およびその変換波を解析することで、準安定オリビンの存在領域や 660km 不連続面と震源分布との相対関係、深発地震の主応力軸の配向性、660km 不連続面の凹凸や多重不連続面などを調査する。これらスラブ地震学で得られる情報を、研究 2 と 3 で得られる岩石鉱物の相転移と流動に関するダイナミックな性質に基づいて検討し、相転移が遷移層スラブのダイナミクスにどのような影響を与えているか明らかにする。

4. 研究成果

上述した 4 つの研究手法を組み合わせ得られた研究成果を、下記の 7 つにまとめる。本研究で開発した実験技術を生かし、その新たな展開によって得られた成果も含まれる（成果 6 と成果 7）。

成果 1) 下部マントル最上部条件までの変形-相転移実験技術の確立

世界最大級の D-111 型高圧変形装置を九州大に導入し、8 端子川井型 AE 測定システムを開発して組み込むことに成功した。従来の D-DIA 型高圧変形装置と 6 端子 MA6-6 型 AE 測定システムとあわせて、最上部マントルから下部マントル最上部までの幅広い圧力深さ領域(深さ~30-800km, 圧力~1-28GPa)において、定量的な塑性流動および変形破壊実験を行うことが可能となった(図 3)。これらのシステムを放射光施設 PF-AR の NE7 および SPring-8 の BL04B1 ビームラインにおいて放射光その場観察と組み合わせることにも取り組んだ。その結果、遷移層圧力の変形場で相転移する試料の応力-歪み曲線、相転移速度曲線、AE 活動を同時にモニタすることが可能となり、深発地震や遷移層スラブの軟化現象に深く関わる反応誘起の岩石軟化やせん断不安定化プロセスを、世界に先駆けて直接的に実験研究できるようになった。特に PF-AR の NE7 ビームラインでは X 線カメラと入射スリットの自動化に取り組んだ結果、約 1 分毎の時分割測定が可能となり、不安定スベリにともなう応力降下の検出に威力を発揮した。現在、これらの手法を挿入光源の放射光と組み合わせることで、ミリ秒毎の超高速時分割測定が検討されており、放射光実験地震学といった新たな研究領域の開拓が期待される。

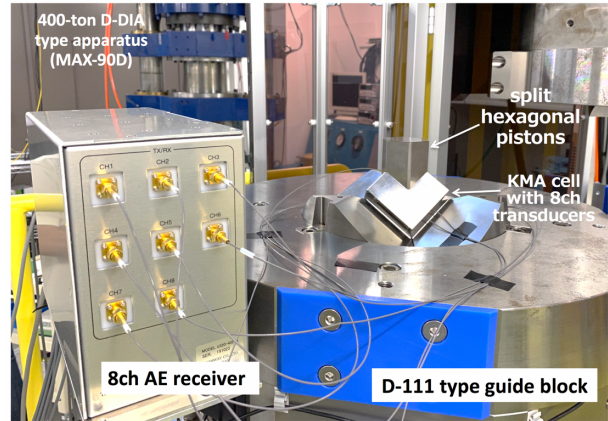


図3 1000-ton D-111 type high-pressure deformation apparatus installed at Q-dai (QDES-2). 8ch AE receiver is attached with D-111 type guide block to monitor shear instability at mantle transition zone conditions. The AE receiver can also be used with D-DIA type apparatus (6ch AE in MAX-90D).

成果 2) オリビン-リングウッドイト相転移がスラブ軟化と深発地震を誘起することの実証

成果 1 の技術をもとに、深発地震頻度が最大となる圧力~20GPa の条件で温度を変えた系統的な実験を行い、オリビン-リングウッドイト(スピネル)相転移が誘起するせん断不安定化と超塑性のプロセスを明らかにした。まず、速度論的に相転移が進行しない(~760°C以下)準安定オリビンの強度が予想以上に大きいことがわかった(比較的大きい活性化体積と大過剰圧のため)。準安定オリビンの変形により転位の絡まりによる変形ラメラが卓越し、そこにリングウッドイトのナノ粒子が incoherent に粒内核生成する(nano-polycrystalline lamella, NPL)。それは超塑性流動による局所変形を引き起こし、特に~760-890°Cの低温条件では AE と stress drop をともなう不安定スベリを引き起こす(図 4 下 unstable nano shear band, NSB)。それ以上の温度では NSB が安定化(stable NSB)して AE 活動が停止し(図 4 左上)、さらに incoherent 界面をもつ NPL への 2 次的核生成が卓越して、効率的にバルク細粒化と超塑性による均質軟化が進行する。これらの現象を詳しく解析した結果、相転移の潜熱と NSB の摩擦熱が正のフィードバックを起こす条件に限って NSB が不安定スベリすること明らかになった。スラブ条件ではそれは~800°C以下に相当し、地震学的に検出された準安定オリビン領域や深発地震分布とも調和的である。これは世界に先駆けた直接的な変形-相転移実験による重要な結果であり、ここで明らかになった詳細なプロセスは、遷移層スラブの岩石軟化と深発地震といった一見相反する力学挙動をうまく説明できる。

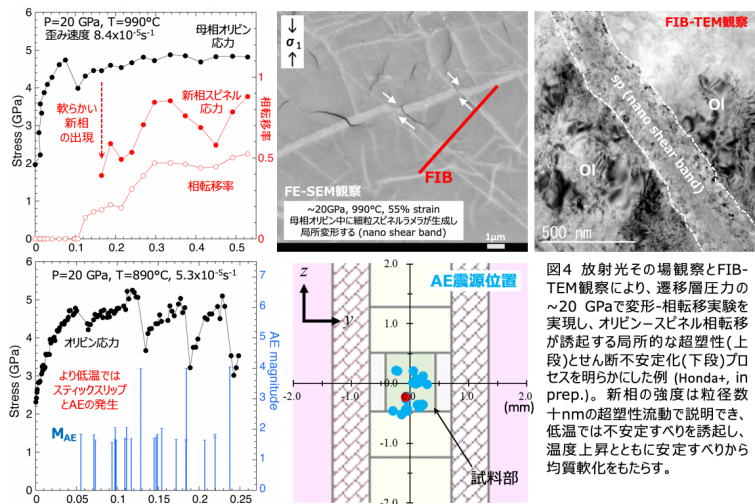


図4 放射光その場観察とFIB-TEM観察により、遷移層圧力の~20 GPaで変形-相転移実験を実現し、オリビンスピネル相転移が誘起する局所的な超塑性(上段)とせん断不安定化(下段)プロセスを明らかにした例(Honda+, in prep.)。新相の強度は粒径数十nmの超塑性流動で説明でき、低温では不安定スベリを誘起し、温度上昇とともに安定スベリから均質軟化をもたらす。

成果 3) ポストスピネル相転移による下部マントルスラブ軟化の実証：超塑性と弱相連結の重要性

成果 1 の技術をもとに、定量的変形場におけるポストスピネル相転移の系統的な実験に成功した。本研究で得られた細粒ブリッジマナイトの強度は、これまで得られていた転位クリープ強度よりも非常に小さく、拡散クリープや粒界スベリでしか説明できない。アナログ物質や机上の空論に限られていたポストスピネル

共析分解相の超塑性現象を、世界で初めて実証した(図5)。さらに、温度や過剰圧条件によって、共析コロニーサイズ、共析ラメラ幅、粒状化したときの粒径が系統的に変化し、相転移軟化の機構が変化することを見出した。低温大過剰圧ではそれらのサイズすべてが小さくなり超塑性流動が起こるが、比較的高温では低過剰圧で相転移が進行し粗粒の共析コロニーが生成され、転位クリープで塑性変形する。そのときコロニー中ではより硬いブリッジマナイトに応力が集中し、動的再結晶による粒状化が選択的に起こる。結果として弱相であるペリクレイスの連結が促進され岩石軟化が起こることがわかってきた。特に後者は、従来全く想定されていなかった新たな軟化機構である。

成果4) 2段階で起こるポストスピネル相転移と二重地震波不連続面

深発地震からの地震波およびその変換波などを用いたスラブ地震学により、ポストスピネル相転移が原因とされる660 km地震波不連続面の微細構造を解析した結果、特に冷たいスラブ内部に限って不連続面が二重に分裂していることが明らかになった。以前から特に低温では、スピネル相リングウッダイトがアキモタイト+ペリクレイスを経てからブリッジマナイト+ペリクレイスになる相平衡が示唆されていたが、低温のため実証されていなかった。本研究では準安定条件下でそれらのカイネティクスを明らかにするという独自の手法で、スラブ条件下ではポストスピネル相転移が2段階に分かれて進行することを明らかにし、それによって二重不連続面を説明できることがわかった(図6)。そして2段階で反応が進行すると、すでに相分離が完了しているアキモタイト+ペリクレイス分解相を利用してブリッジマナイト+ペリクレイスがovergrowthするため、共析コロニーが通常より劇的に粗粒化することを見出した。成果3とあわせて考えれば、比較的温暖なスラブでも、冷たいスラブコアでも、両条件ともに粗粒なブリッジマナイト+ペリクレイス共析コロニーが出現し、結果として弱相ペリクレイスが連結したスラブ軟化が大規模に起こりやすことが示唆された。これら成果3と4は本研究独自の実験手法が生かされた結果であり、上下マントル境界を通過するスラブの大規模な軟化現象を説明する上で新たな概念を提供するものである。

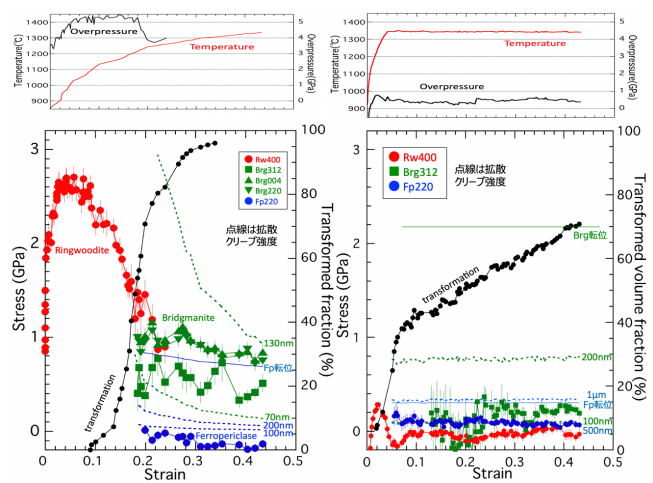


図5 下部マントル圧力の~28 GPa(左図)および~23GPa(右図)で、一軸圧縮変形場におけるポストスピネル相転移を放射光その場観察し、相転移速度曲線と応力-歪み曲線を測定した。それにより分解粗粒相が超塑性流動することを世界で初めて実証した。過剰圧が大きい左図では、分解したブリッジマナイトとペリクレイスの流動応力は異なるが、より小さい過剰圧下(右図)では粗粒の共析コロニーにおけるブリッジマナイトの選択的な粒状化により弱相のペリクレイスが連結することで、試料全体を軟化させている。

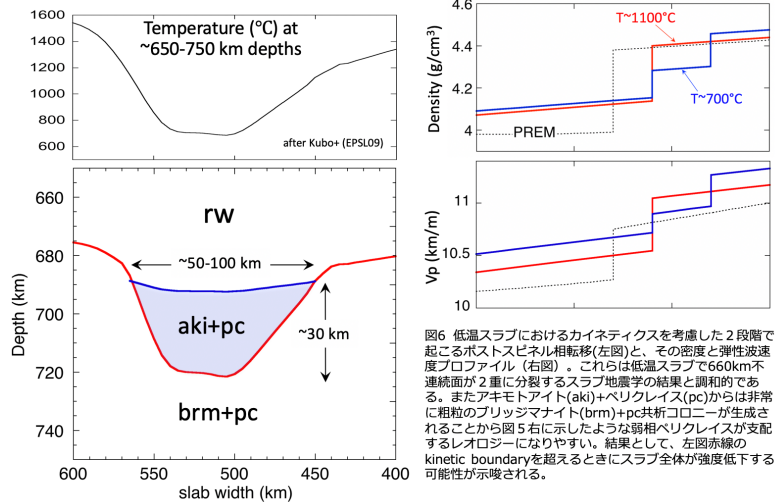


図6 低温スラブにおけるカイネティクスを考慮した2段階で起こるポストスピネル相転移(左図)と、その密度と弾性波速度プロファイル(右図)。これらは低温スラブで660km不連続面が二重に分裂するスラブ地震学の結果と調和的である。またアキモタイト(aki)+ペリクレイス(pc)からは非常に粗粒のブリッジマナイト(brm)+pc共析コロニーが生成されることが図5右に示したような弱相ペリクレイスが支配するレオロジーになりやすい。結果として、左図赤線のkinetic boundaryを超えるときにスラブ全体が強度低下する可能性が示唆される。

成果5) 衝撃変成隕石に記録された変形と相転移プロセスの解明：深部スラブ現象との類似性

衝撃変成を受けた隕石に見られる高圧鉱物や相転移組織、変形組織を系統的に調査し、相平衡および非平衡両方の観点から、衝撃イベントの温度・圧力・時間条件の制約を行った。これまで着目されてこなかった残留温度や残留応力による逆相転移の影響も考慮したことが特徴である。その中で特に成果2で得られたオリビン-スピネル相転移実験試料との比較を行ったところ、

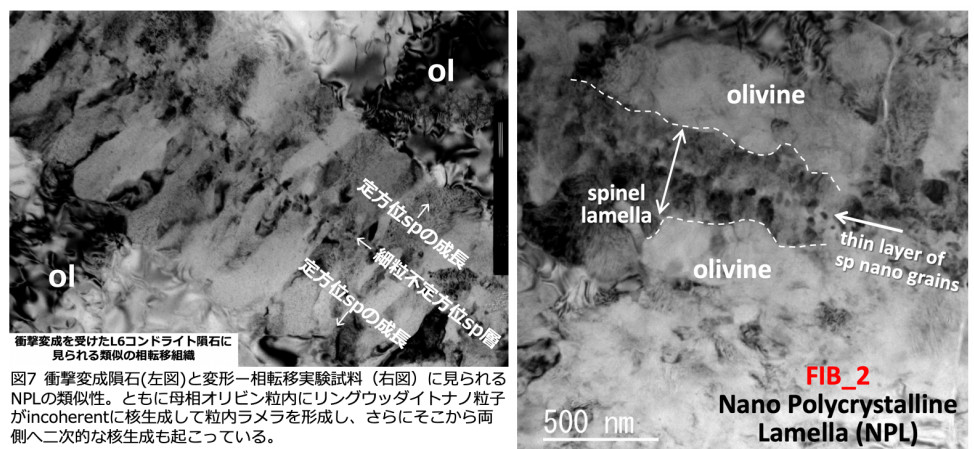


図7 衝撃変成隕石(左図)と変形-相転移実験試料(右図)に見られるNPLの類似性。ともに母相オリビン粒内にリングウッダイトナノ粒子がincoherentlyに核生成して粒内ラメラを形成し、さらにそこから両側へ二次的な核生成も起こっている。

成果2で見出されたincoherentな粒内核生成(NPLの形成)とそこからの二次的な核生成が、衝撃変成隕石でも起こっていることが示された(図7)。衝撃変成隕石および深部スラブ現象ともに、これまでは結晶方位関係のあるトポタクティックな単結晶的ラメラのcoherent核生成が着目されていたが、本研究によって、多結晶ナノ粒子のincoherentな粒内核生成(NPL)が変形-相転移相互作用に重要な影響を及ぼすことが見出された。また隕石には衝撃溶融脈も存在し、固相反応による相転移に加えメルトからの高圧相の結晶化も見

られる。その観点から成果2の実験試料を検討した結果、NSBの不安定スベリに関して、少なくとも本実験条件においては従来指摘されているようなメルトの関与は考えにくく、相転移の潜熱と摩擦熱のフィードバックにより固相状態で不安定スベリが誘発されることが明らかになった。

成果6) 遷移層スラブにおける玄武岩層とカンラン岩層のレオロジーコントラスト：深部 MORB の行方

成果4でも用いられたスラブ地震学的手法により、SP変換波などを用いて下部マントルスラブ周辺の地震波散乱体を系統的に調査することで、地球深部における沈み込んだ海洋地殻物質(MORB)の分布や挙動が本研究で明らかになってきた。沈み込んだMORBの地球内部での循環は、マントルの化学的不均質成分の混合や海洋島玄武岩のソースを検討する上で極めて重要である。以前から、MORB層がその直下のスラブカンラン岩層よりも硬ければ、マントル遷移層下部でスラブ本体から剥離し上下マントル境界付近に滞留するという重要な指摘がされてきた。しかし、特にレオロジー特性が不明であったため、未解決のままであった。このトピックは本研究の当初の計画には含まれていなかったが、成果1の技術を用いて遷移層MORBの強度を直接的に明らかにし、成果2-4を通じてわかってきたスラブカンラン岩層の強度変化と比較して検討した(図8)。その結果、遷移層MORBの主要鉱物であるメジャライトガーネットは、パイエルス機構および転位クリープ領域ともに、カンラン岩層の主要鉱物であるリングウッドイトよりも塑性的に硬いことがわかった。しかし上下マントル境界付近でポストガーネット相転移により少量のCa-ペロプスカイトが析出すると、MORB層は劇的に軟化しリングウッドイトと同程度以下の強度になることが見出された。申請者の過去の研究成果から、ポストガーネット相転移のカイネティクスは極めて遅くスラブ条件では平衡に進行せず低密度のまま大きな正の浮力をもつことが指摘されている。つまり、遷移層MORBの挙動は、密度、粘性ともにポストガーネット相転移のカイネティクスに大きな影響を受けることになる。平衡に進行しなければ、低密度高粘性を維持しながら上下マントル境界を通過し、そこで剥離して滞留しやすくなる、という新たな概念が浮かび上がってきた。

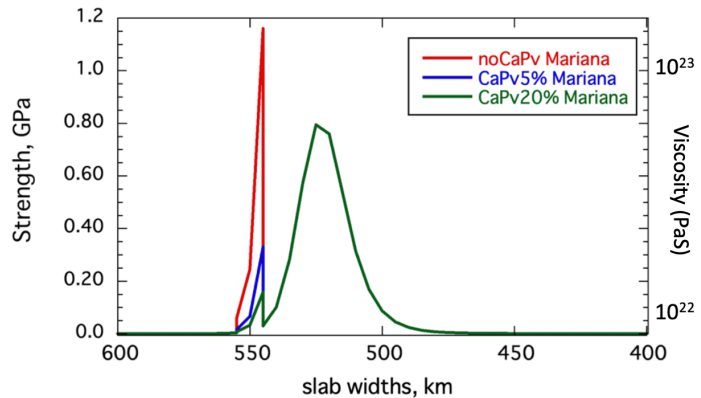


図8 高温変形実験によって得られた、マントル遷移層最下部における低温スラブ(図6)断面のカンラン岩層とMORB層の強度プロファイル比較(横軸545kmがスラブモホ、550±5kmがMORB層)。同じ圧力では、MORB主要鉱物のメジャライトガーネットがカンラン岩層の主要鉱物リングウッドイトよりかなり硬いが、MORBでCa-ペロプスカイト(CaPv)が少量でも析出すると大きく強度が低下する(青線および赤線)。このことは、上下マントル境界を通過するスラブでMORB層の剥離を検討するうえで非常に重要である。

成果7) 遷移層スラブ以外の高圧相転移：変形との相互作用の多様性について

本研究で着目する高圧相転移と変形の相互作用プロセスについて、より普遍的に検討するために、成果1)の技術を用いて、マントル遷移層で起こる相転移以外の反応についても実験研究を行った。例えば、1)海洋地殻玄武岩のエクロジヤイト化に関連したローソナイトの脱水反応、2)エクロジヤイトのガーネット化に関連した輝石-ガーネット相転移、3)緑泥石のポリタイプ構造変化と脱水反応、4)アナログ物質を用いたポストペロプスカイト相転移、等である。

このうち2)や3)では、変形や反応にともなう活発なAE活動が観察された。2)についてはガーネットの動的再結晶による細粒化が不安定化を引き起こしているようである。また3)では圧力誘起のポリタイプ変化によってすべり面に垂直な方向に不連続な収縮が起こり、垂直応力が瞬間的に減少してせん断不安定化にいたるプロセスを検討している。

また4)の多形相転移はマントル最下部D''層の粘性と地震波異方性に重要であるが、これまでshear mechanismによるトポタクティックな粒内ラメラの形成が重要な相転移機構と指摘されてきた。しかし我々はカイネティクスを考慮した相転移実験を行うことで、D''層の高温低過剰圧条件では、粒界に核生成してa軸方向に巨大に異方成長する機構が卓越することを見出した(図9)。差応力場でこのa軸成長が起こったときに結晶方位選択配向が実現するかどうかについて検討を行っている。

地球深部岩石の相転移と変形の相互作用はマントル対流やプレート物質循環に大きな影響を与える。その相互作用は普遍性よりも多様性のほうが顕著であり、本課題で確立した技術を駆使して、個々のテクトニックセッティングとそこで起こる反応に応じた実験研究を続けていく必要がある。

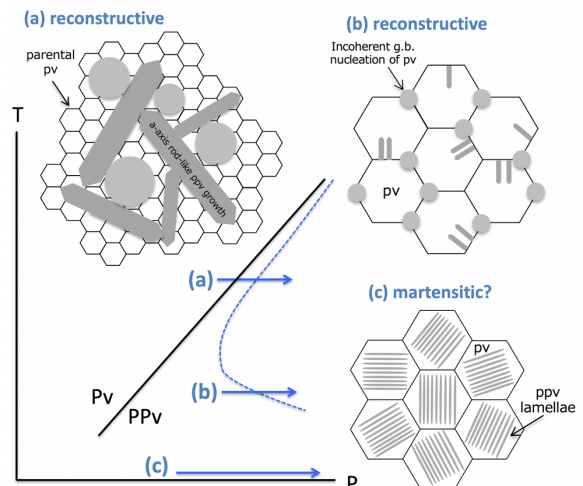


図9 カイネティクスを考慮したNaNiF₃ポストペロプスカイト相転移実験から示唆される相転移プロセスの温度変化。従来はトポタクティックな粒内ラメラ(c)が形成が指摘されていたが、D''層の高温低過剰圧条件では、a軸方向に異方成長する(a)のタイプの相転移が卓越することが実験的に明らかになった。今後、差応力場の相転移実験を行って、a軸成長のppv相が選択配向する可能性を検討する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Tomoaki Kubo, Ko Kamura, Masahiro Imamura, Yoshinori Tange, Yuji Higo and Masaaki Miyahara	4. 巻 9
2. 論文標題 Back-transformation processes in high-pressure minerals: implications for planetary collisions and diamond transportation from the deep Earth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-022-00480-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Miyahara Masaaki, Tomioka Naotaka, Bindi Luca	4. 巻 8
2. 論文標題 Natural and experimental high-pressure, shock-produced terrestrial and extraterrestrial materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-021-00451-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Thomson, Andrew; Nishihara, Yu; Yamazaki, Daisuke; Tsujino, Noriyoshi; Hunt, Simon; Tsubokawa, Yumiko; Matsukage, Kyoko; Yoshino, Takashi; Kubo, Tomoaki; Dobson, David	4. 巻 -
2. 論文標題 Preliminary results from the New Deformation multi-anvil press at the Photon Factory: insight into the creep strength of calcium silicate perovskite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Core-Mantle Coevolution: A Multidisciplinary approach (AGU Geophysical Monograph Series)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 岩里 拓弥, 久保 友明, 肥後 祐司	4. 巻 8
2. 論文標題 D-DIA型高圧変形装置を用いたMA6-6 型AE測定システムの開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPRING-8/SACLA利用研究成果集	6. 最初と最後の頁 214-218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18957/rr.8.2.214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Kaneshima	4. 巻 218
2. 論文標題 Seismic scatters in the lower mantle near subduction zones	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophys. J. Int.	6. 最初と最後の頁 1873-1891
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggz241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計61件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 中林真梨萌, 久保友明, 後藤佑太, 本田陸人, 坪川祐美子, 柴崎裕樹
2. 発表標題 マントル遷移層 MORB の塑性変形実験
3. 学会等名 第63回高圧討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuta Hiramoto, Tomoaki Kubo, Yuta Goto, Rikuto Honda, Yumiko Tsubokawa
2. 発表標題 Uniaxial deformation of ringwoodite under hydrous conditions
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yumiko Tsubokawa, Tomoaki Kubo, Yuji Higo, Yoshinori Tange, Yu Nishihara, Rikuto Honda
2. 発表標題 Uniaxial deformation and transformation of high-pressure clinoenstatite under mantle transition zone condition
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuta Goto, Tomoaki Kubo, Rikuto Honda, Yuki Shibazaki, Yu Nishihara, Yuji Higo, Yoshinori Tange, Masaaki Miyahara
2. 発表標題 Role of ferropericlasite and akimotoite in rheological weakening of subducting slab across the upper and lower mantle boundary
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Rikuto Honda, Tomoaki Kubo, Masaaki Miyahara, Takuya Iwasato, Yuji Higo, Yuta Goto, Yuichiro Mori, Yumiko Tsubokawa, Akio Suzuki, Yuki Shibazaki
2. 発表標題 The olivine-ringwoodite transformation under uniaxial stress: Implications for seismicity and rheological weakening in deep slabs
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Mori, T. Kubo, R. Honda, T. Iwasato, Y. Higo, Y. Tange
2. 発表標題 Experimental investigation of the pyroxene-garnet and olivine-spinel transformations under shear deformation using synchrotron radiation and acoustic emission techniques
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保友明, 山下紅弓, 宮島延吉, 丹下慶範, 肥後祐司
2. 発表標題 ポストペロフスカイト相転移における incoherent 粒界核生成と柱状成長
3. 学会等名 日本鉱物科学会 2020年年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森悠一郎(研究発表優秀賞), 久保友明, 岩里拓弥, 肥後祐司, 丹下慶範, 宮原正明
2. 発表標題 差応力場におけるFe ₂ SiO ₄ のオリピンスピネル相転移機構と変形の局所化
3. 学会等名 日本鉱物科学会 2020年年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保友明, 本田陸人, 森悠一郎, 岩里拓弥, 肥後祐司
2. 発表標題 D-DIA型およびD-111型高压変形装置を用いたAE測定技術の開発
3. 学会等名 第61回高压討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山内幸子, 久保友明, 森悠一郎, 白石令, 坪川祐美子, 森裕紀, 肥後祐司, 丹下慶範
2. 発表標題 高温高压下の一軸圧縮変形場における緑泥石のAE活動
3. 学会等名 第61回高压討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白石令, 武藤潤, 久保友明, 森悠一郎, 本田陸人, 肥後祐司, 丹下慶範
2. 発表標題 高温高压下におけるローソナイトの変形挙動
3. 学会等名 第61回高压討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ikeahara, M., Kubo, T., Iwasato, T., Higo, Y., Imamura, M., Tange, Y.
2. 発表標題 Stable fault slip in antigorite-olivine aggregates at high pressures
3. 学会等名 Japan Geoscience Union meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保友明、本田陸人、後藤佑太、坪川祐美子、辻野典秀、肥後祐司、柴崎裕樹
2. 発表標題 放射光を用いた高時空間分解能での深部岩石ダイナミクスその場観察手法 の検討
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 久保友明	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 458
3. 書名 高圧力の科学・技術事典(入船他 編)「地球内部物性：相転移カイネティクス」	

1. 著者名 安東淳一、久保友明、山崎大輔	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 664
3. 書名 鉱物・宝石の科学事典(日本鉱物科学会 編)「地球深部鉱物のレオロジーとカイネティクス」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮原 正明 (Miyahara Masaaki) (90400241)	広島大学・先進理工系科学研究科(理)・准教授 (15401)	
研究分担者	鈴木 昭夫 (Suzuki Akio) (20281975)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	肥後 祐司 (Higo Yuji) (10423435)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・回折・散乱推進室・主幹研究員 (84502)	
研究分担者	坪川 祐美子 (Tsubokawa Yumiko) (40824280)	九州大学・理学研究院・助教 (17102)	
研究分担者	金嶋 聡 (Kaneshima Satoshi) (80202018)	九州大学・理学研究院・教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関