愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター　ニュースレター　vol. 69

NEWS LETTER

AUGUST 2024

EHIME UNIVERSITY GRC GEODYNAMICS RESEARCH CENTER

TOPICS　新センター長挨拶 / NEWS & EVENTS / 着任挨拶 / 最新の研究紹介 / 先端超高圧研究拠点 PRIUS NEWS

新センター長のご挨拶

この度2024年4月より、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）、センター長を拝命いたしました。どうぞよろしくお願いいたします。

地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）は、2001年に特色ある先端研究を担う研究センターとして設置され、今年で24年目を迎えました。2008年にはグローバルCOEに採択、また2013年には我が国唯一の超高圧科学に特化した共同利用・共同研究拠点に認定されました。この間、特別推進研究や新学術領域研究といった大型科研費の研究代表者や領域代表者を輩出し、高圧力科学の先端的な研究を推進するとともに、共共拠点として国内外の研究者に対し独自の技術や装置の提供を行い高圧力科学の発展に貢献してきました。

昨年度から今年度にかけても、①超高圧材料科学部門を超高圧科学部門に改組して専任教員を配置することで、従来GRCが主に進めてきた地球科学分野での活動のみならず物理・化学・材料科学などの他分野との連携強化のための体制を整備した（5月から超高圧科学部門に石松直樹教授が着任しました）、②全学の数理情報分野の共同研究基盤の強化と共共拠点活動への貢献を目的として、緊密に連携を行っている先端研究高度支援室内に数理情報部門を設置した（今年度中に専任教員が着任予定）、③愛媛大学内の先端研究センターを束ねる新部局として先端研究院が誕生しGRCもそこに加わることとなった、という3つの大きな変化がありました。

このような中で設立から23年を経て今回初めてのセンター長の交代となります。大変に身が引き締まる思いですが、全身全霊で職務を全うするつもりでおりますので、皆様どうぞよろしくお願いします。

私自身は、GRC設立後4年を経た2005年4月にGRCに着任し、その後一貫して主に第一原理電子状態計算法を軸とした理論的・数値的手法に基づき、地球惑星物質の高温高圧挙動に関する研究を進めてまいりました。新たな高圧相転移の発見や、高温高圧下での熱力学特性・熱弾性特性・輸送特性など各種物性の計算とそのための新たな手法開発に取り組んできました。GRC内で多数派の実験系ではありませんが、気づいたらセンター内で最も古株となっており、そのため次期センター長を務めることとなった次第です。

これまでは数値系を中心に物事を考えがちでしたが、センター長となったからには、今後はGRC全体のことを考えなければなりません。センター長のまず第一の役目は、センター構成員にとってより研究を進めやすい環境を構築していくことだと思っております。予算獲得等含め、できることは精力的に実行したいと思います。またGRC内の実験系地球科学部門、数値系地球科学部門、超高圧科学部門の連携を今まで以上に強化するとともに、先端研究院の設立にあわせて他の研究センターとの連携の機運も高まっていますので、これまでにはなかった学内異分野との共同研究なども精力的に進め、これらを通じ全学の先端研究の底上げや我が国の超高圧科学分野のさらなる発展に貢献できればと考えています。GRCのさらなる進化を目標にこれらの活動を進めていきたいと思っておりますので、GRCをさらに盛り上げていくために、センター構成員の皆様、また日頃よりお世話になっている関係各所の皆様には、ぜひ引き続きのご協力をよろしくお願いいたします。

地球深部ダイナミクス研究センター 教授　土屋 卓久

NEWS & EVENTS

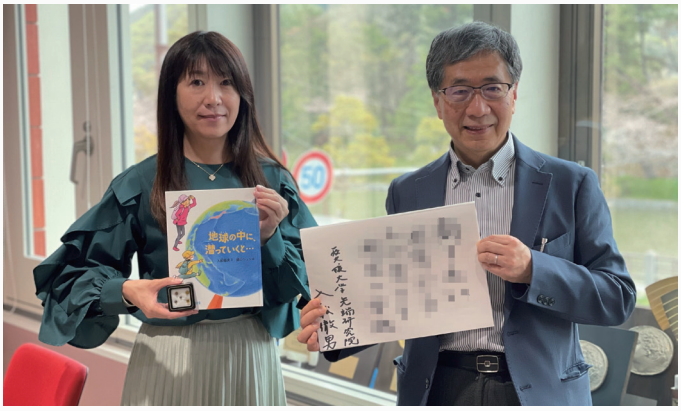
入舩GRC教授が南海放送「坂の上のラジオ」出演

入舩徹男GRC教授・愛媛大学先端研究院院長がこのほど南海放送本社を訪れ、同社のラジオ番組「坂の上のラジオ」において、佐伯りさアナウンサーと約1時間トークを行いました。

番組冒頭では、この4月に発足した先端研究院について紹介するとともに、2025年に松山市で開催予定の「第29回高圧力科学と技術に関する国際会議」(AIRAPT-29)についてもその概要を説明しました。その後、専門の高圧地球科学に関する研究内容を「みかんの皮にも及ばない」、「日本沈没」、「鉛筆からダイヤモンド」をキーワードとして、一般向けに解説しました。トークはradikoで視聴できます。

https://radiko.jp/podcast/episodes/78b63043-9542-43a1-9398-4036b9eb3871

【坂の上のラジオ】
https://blog.rnb.co.jp/sakanoue



色紙には何と書いてあるのか?ぜひ放送をご視聴ください!

土屋旬教授のエッセイがNature Geoscienceに掲載

Nature誌の姉妹誌であるNature Geoscience誌では、編集者の依頼により地球科学分野で顕著な業績をあげている研究者に、その分野の最近の研究に関する随筆(Essay)を依頼しています。

GRCの土屋旬教授は第一原理計算に基づく地球内部での含水鉱物の挙動に関して世界をリードする研究成果をあげており、地球深部における含水鉱物の構造変化が、マントル物質の特性やそのダイナミックに重要な影響を与えるという、最近の自身の理論予測とそれを支持する実験結果について解説しています。

知の拠点【すぐわかアカデミア。】にてGRC制作動画が公開

国立大学共同利用・共同研究拠点協議会サイト内の、知の拠点【すぐわかアカデミア。】に、本センターの制作動画が公開されました。

2回目となる今回は、「すぐにわかる地球深部水の謎」と題して、本センターの装置等の紹介を交えながら、地球深部水について一般の方や中高生にも分かりやすく説明する楽しい動画となっています。先生方の熱演も見どころです!ぜひご覧ください。

【すぐにわかる地球深部水の謎 Youtube動画
https://www.youtube.com/watch?v=1Kxj9jQJbPE

グリーンバックでの撮影の様子

JpGU2024大会にブース出展

2024年5月26日～31日まで幕張メッセ(千葉県千葉市)にて開催された、日本地球惑星科学連合2024年大会(JpGU2024)において、今年度も展示ブースを出展いたしました。

ブースでは、実験材料等・合成物の展示、ホログラムディスプレイでの装置紹介、VRを利用したGRCラボツアーなどを行いました。1日目の一般公開では、小～高校生の方も多く訪問いただき、ヒメダイヤに触ったり、実験材料の重さに驚かれたりしながら、熱心にお話を聞かれる姿が印象的でした。

また、毎年恒例のJpGUクイズラリーにも参加し、昨年度と同様にヒメダイヤ製リング&入舩GRC教授著絵本「地球の中に、潜っていくと」(サイン付)を賞品として提供しました。

【JpGU2024参加者の声】

今回JpGUに参加し、初めてのポスター発表を行ったことで、非常に充実した経験を得ることができました。専門知識を持つ方々と自分の研究テーマについて議論することはとても

楽しく、今後の研究にて役立つ質問や意見を頂くこともでき、たいへん有意義でした。また、自分の研究に興味を持ってくださる方も多く、研究のモチベーションが高まりました。発表以外にも、自分の研究テーマの背景となる惑星形成に関する最新の研究成果など、興味深い発表も聴くことができました。全体を通して、学会で得られる学びの重要性と自分の研究を発信することの意義を再確認する良い機会となりました。今後も学会には積極的に参加していきたいと思います。

（M1 秋元 拓斗）

初めての学会でしたので、緊張と楽しみが混ざった感情を抱えながらJpGUに参加しました。オーラルセッションでは、私の研究テーマと関わるXANESやケイ酸塩メルトについてのお話を聴くことができ、たいへん勉強になりました。ポスターセッションでは、私と近い専門の方から多くの質問やコメントをいただきました。様々な意見を交わす中で、今までなかった視点を得られ、たいへんありがたかったです。また、他大学の学生や若手研究者の方々と研究についてのお話する中で研究への熱意が感じられ、とても良い刺激を得ることができました。

（M1 櫻原 瑞穂）

私は今回初めて学会に参加し、地学の中でも幅広い分野があることを実感し、私と共通の研究手法の方だけでなく、多様な研究分野の方とも交流できたことはとても良い経験となりました。口頭発表を見学した際は、数値計算で研究している方の計算手法の改良の発表はとても興味深く、知識だけでなく見やすいスライド・わかりやすい発表の仕方についても参考になりました。また、ポスターセッションでは貴重なご意見をいただき、今の私がどこまで理解できているのか明確に把握することができました。今回貴重な経験をさせていただき、大変勉強になったため、今後の研究に活かしていきたいと思います。

（B4 稲垣 喜久代）

GRC展示ブースの様子。何度も人だかりができていました！

先端研究院シンポジウムが開催されました

2024 年 7 月 11 日に、愛媛大学南加記念ホールにて、愛媛大学先端研究院発足記念シンポジウム「愛媛から世界に発信する先端研究」が開催され、本センターの土屋卓久教授がセンター概要説明、大内智博准教授が最新の研究を発表しました。

愛媛大学が令和 6 年 4 月に立ち上げた先端研究院は、いずれも文部科学省により共同利用・共同研究拠点に認定されている沿岸環境科学研究センター（CMES）、地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）、プロテオサイエンスセンター（PROS）に加え、宇宙進化研究センター（RCSCE）、アジア古代産業考古学研究センター（AIC）の愛媛大学を代表する 5 つの先端研究センターと、本センター入舩徹男教授（先端研究院院長）が室長を務める先端研究高度支援室から構成されています。このシンポジウムは、先端研究院発足を記念して開催されたものです。

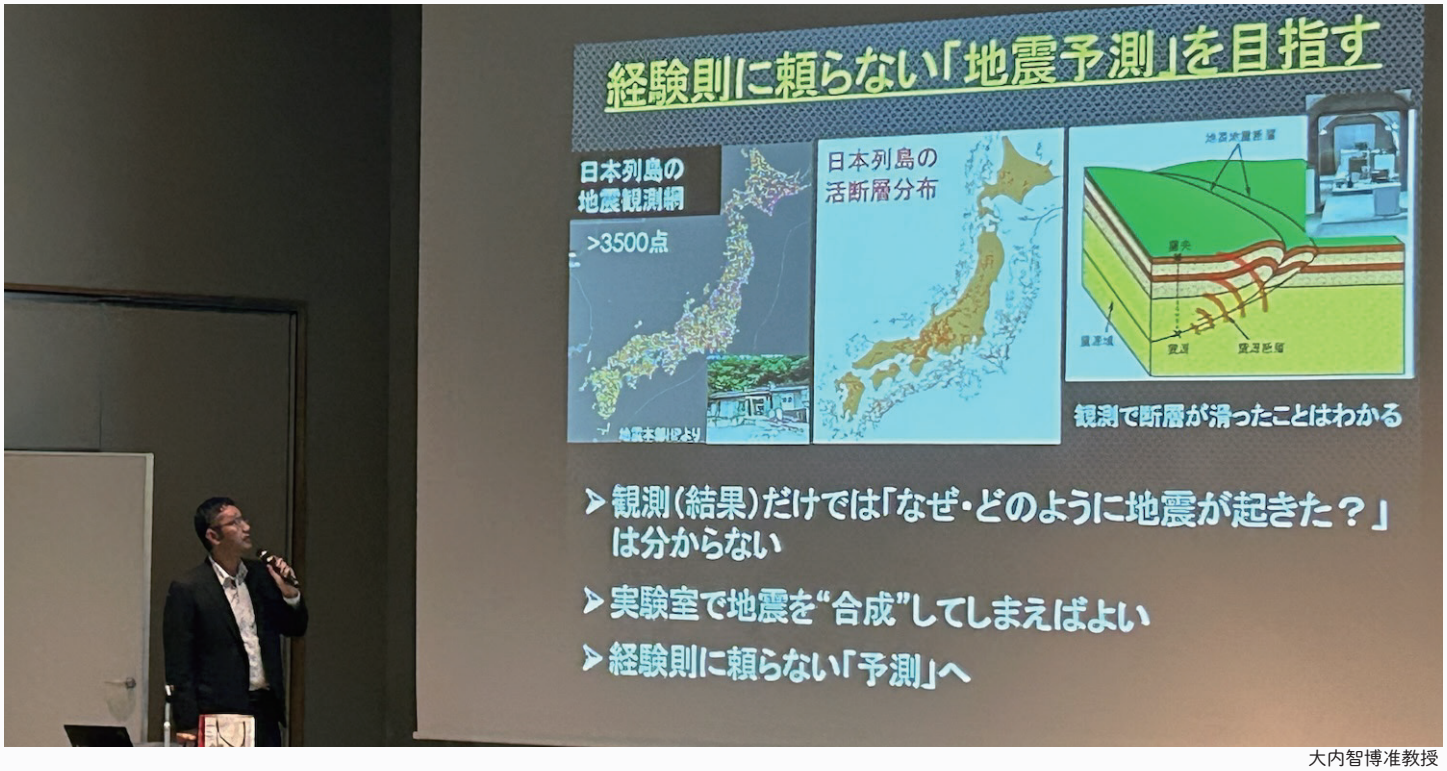
シンポジウム後は和やかな雰囲気の中、懇親会が開かれ分野の異なる研究者の親睦が深まりました。

GRC も先端研究院 SNS（インスタグラム）で積極的に情報を発信していきますので、ぜひご覧ください。たくさんのフォローをお待ちしております！

【先端研究院ホームページ】
https://www.eu-pias.ehime-u.ac.jp

【先端研究院公式インスタグラム】
@PIAS_EHIME_U

@PIAS_EHIME_U



大内智博准教授

入舩徹男先端研究院院長

土屋卓久GRCセンター長

着任挨拶

Naoki ISHIMATSU

2024年5月1日付けで教授として着任いたしました石松直樹と申します。私は1990年4月に出身の静岡県浜松市を離れ、富山大学理学部物理学科に入学し、同大学院修士課程の修了まで富山市に6年間滞在しました。富山ではX線トポグラフィーによるGaAs単結晶の格子欠陥観察を行いました。その後、東京工業大学 大学院総合理工学研究科 材料科学専攻の博士後期課程に進学し、Gd/Fe多層膜の厚み方向の磁気構造をX線共鳴磁気散乱により決定する研究テーマに従事して博士号を1999年3月に取得しました。1999年4月より日本原子力研究所関西研究所の博士研究員として2年半在籍し、ダイヤモンドアンビルセルを使った高圧発生技術に初めて触れました。2001年10月から広島大学の大学院理学研究科の物理科学専攻電子物性研究室に助手、助教、特定准教授として22年と8か月在籍し、この度GRCへ参りました。

私は放射光を使ったX線吸収分光法（XAS）とX線磁気円二色性（XMCD）などのXASの関連手法の高圧下測定から、金属、合金、金属間化合物の構造物性研究を進めています。XASは内殻電子が外殻の非占有電子状態に励起される過程を経るため、例えば吸収元素の電子殻を特定した電子状態、価数や局所構造が検出できる優れた手法です。近年はこの手法を用いて、①不規則合金の元素を区別した合金構造の可視化、②遷移金属-希土類化合物の水素誘起の新奇磁気構造の発現と磁石材料への応用、③2段式アンビルによる超高圧下のXAS測定、④NPDアンビルを用いた高圧下X線ホログラフィー法の開発等を行っています。

高圧科学の魅力の一つは常圧下では得られない新奇物性の発現です。一方で私は、圧力を横軸とすることで物性の変化が系統的に観測できることにも高圧の意義を感じます。例えば①の研究では、FeとNiが結晶格子点をランダムに配置した強磁性の不規則Fe-Ni合金において、最近接Fe-Fe原子間距離が他のFe-Ni、Ni-Ni原子間距離よりも長いことをXASと逆モンテカルロ法の解析により見出しています。この不規則合金を加圧すると磁化の減衰に伴ってFe-Fe間距離の伸長が減少し、常磁性相に入ると他の原子間距離と同程度となる系統的な圧力依存性が得られました。この結果は磁気体積効果と呼ばれる強磁性発現に伴うマクロな体積膨張を、原子スケールにおけるFe-Fe間距離の伸長と関係づけた高圧下測定ならでは成果といえます。一方、不規則合金を特徴づける構造の理解はまだ道半ばです。その達成には、Fe-Fe間の伸長だけでなくこれらの原子対の結合角度や原子変位の方向で記述できるnmスケールの中距離構造の可視化が重要です。不規則合金の合金構造の解析技術が開発できれば同じFe-Ni合金で形成される地球内核の構造決定にも役立つと考え、GRCの最先端の機器を活用しつつ研究を発展させたいと考えています。

これまでも何度か述べてきましたが、高圧下XASがここまで発展した理由の一つにGRCが開発した材料であるヒメダイヤ（NPD）が挙げられます。多結晶体ダイヤモンドであるNPDはXAS測定時のX線エネルギースキャンで常時Bragg回折が生じるので、単結晶ダイヤモンドのアンビルで課題であったグリッチと呼ばれるノイズが発生しません。この結果として、試料の状態が良ければ高圧下でもNPDならば常圧下と遜色ないXASスペクトルが得られます。NPDを作製するGRCに私が所属することで、より高い圧力下での新奇物性の観測や、XAS測定以外へのNPDの適用がこれまで以上に容易となりました。私は高圧下XAS測定をさらに発展できる期待とともに責任も感じています。GRCは地球科学分野の世界的な研究拠点でありますが、ここの高圧装置群は物質科学や材料工学にも応用できる充実した研究環境です。この研究環境を活用して私がこれまで進めてきた高圧下でのX線吸収分光研究を発展させつつ、GRCの教育研究活動にも貢献できればと考えております。皆様には引き続きお世話になりますがご指導ご鞭撻のほどどうぞよろしくお願い申し上げます。

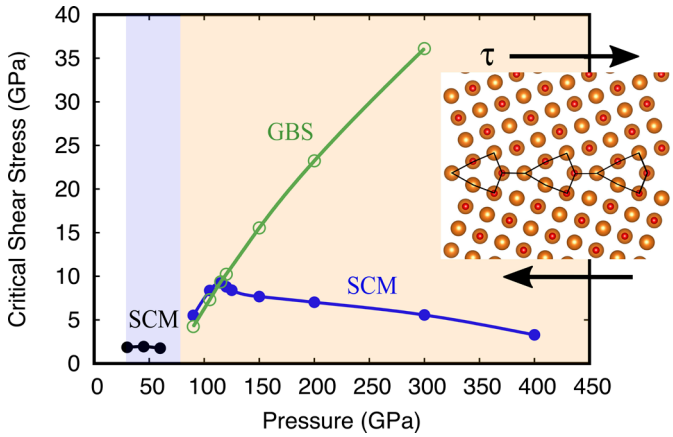
惑星内部において結晶粒界は脆弱化する

地球型惑星のマントル対流とそれよって引き起こされるプレートテクトニクスは、マントル岩石の塑性変形によって支配されている。この変形は、鉱物の結晶格子中の欠陥（格子欠陥）のミクロな運動によって生じることが知られており、従って格子欠陥の圧力下での物理的性質は、地球のような惑星内部のダイナミクスに大きな影響を与えると言える。

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターとユトレヒト大学地球科学部の共同研究チームは、大規模並列計算機を用いて「第一原理計算法」と呼ばれる量子力学シミュレーションを実行し、惑星深部の極高圧力下での粒界の謎めいた挙動に新たな光を当てた。「第一原理計算法」は、化学結合を非常に正確に計算する理論的手法で、実験では扱いにくい惑星内部の極限状態における物質の性質を調べるための強力な研究ツールとなっている。

この研究を主導した愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターの元研究員のリッターベックス博士と共同研究者は、上記の理論鉱物物理学的アプローチに基づき、地球の下部マントルで2番目に多く、また地球型太陽系外惑星”スーパーアース”のマントルにおいても豊富に存在すると考えられている鉱物である(Mg,Fe)Oフェロペリクレースの傾角粒界の機械特性と熱力学的特性について調べた。本研究では第一原理計算法の基礎をなす通常の密度汎関数理論に加え、鉄原子の電子状態をより高精度で記述するために内部無撞着LDA+U法と呼ばれる特別な計算手法も適用し、シミュレーションの高い信頼性を実現した。

シミュレーションの結果、地球型惑星内部における非常に高い圧力条件では、結晶粒子間の変形を支配する粒界運動のメカニズムが圧力によって強く影響を受けることが見出された（図）。惑星マントルの深部では、高い圧力によって結晶粒界面の構造変化が引き起こされ、この構造変化が結晶粒界運動のメカニズムや方向を変える引き金となる。また、これに伴い数百万気圧の圧力下において粒界の著しい機械的脆弱化が生じた（図）。通常高い圧力が加わると、物質中の原子の配列が稠密になり、物質はより固く変形しにくくなると思われるが、今回得られた結果はこの直感的な概念に反するものであり、世界的にも初めて得られた興味深い発見と言える。シミュレーションの詳細を解析することにより、この粒界の脆弱化現象は、非常に高い圧力下において粒界が運動する間に、粒界の遷移的状態の構造が変化することによって生じることが分かった。本研究ではこれらの結果に基づき、スーパーアースなどの太陽系外惑星では、マントルの深度が増加するにつれて構成物質の粒界弱化により粘性が低下するという、従来の惑星深部ダイナミクスの概念を覆す新たなモデルを提案した。



（図）30万気圧から400万気圧までの圧力範囲における {310}[001] 対称傾角粒界の機械特性
せん断結合粒界移動（SCM）及び粒界すべり（GBS）に対する臨界せん断応力の大きさ（粒界の強度）を示す。SCMまたはGBSのいずれの場合においても、対応粒界の強度が圧力によって大きく変化し、その結果、広い圧力範囲にわたって粒界が強靭化したり脆弱化したりすることが分かる。特にスーパーアースなどの系外惑星マントルの圧力条件（約120~400 GPa = 約120~400万気圧）では、SCMが生じる場合、深さ（圧力）が増すにつれて粒界の脆弱化が観察される。

本研究では、さらにバルクと粒界間の鉄原子の分配挙動について、熱力学的モデリングを行った。その結果、高温高密度の地球下部マントルに存在する多結晶フェロペリクレースにおいて、結晶粒径が鉄の粒界偏析を制御する重要な因子であることを明らかにした。2価の鉄イオン（Fe^{2+}）は地球内部の高い圧力下で磁性を持つ状態から磁性のない状態へと変化する電子スピン転移を起こすため、MgOペリクレースに鉄イオンが含まれ(Mg,Fe)Oフェロペリクレースとなると、密度や地震波速度などの物理的性質が大きく変化することが知られている。しかしこれまでのところ、粒界内のFe^{2+}イオンのスピン状態に関する研究はまったく行われていなかった。今回のモデリングにより、フェロペリクレースの傾角粒界に濃集した2価鉄イオンの電子スピン状態は、高圧力下における粒界構造の変化に強く影響を受けることが明らかとなった。すなわちマイクロメートル以下の小さな粒径を持つフェロペリクレース多結晶体中のFe^{2+}イオンのスピン転移は、バルク内の鉄イオンに比べ数十GPa高い圧力で生じる。従って、鉱物の細粒化が生じるようなマントル内部の活発に運動している領域では、より安定であまり運動していない領域（そのような領域では鉱物の粗粒化が生じる）と比較して、フェロペリクレースに含まれるFe^{2+}イオンのスピンクロスオーバーが数百km深部で生じている可能性がある。

本研究により、惑星マントルに相当する温度圧力条件における多結晶フェロペリクレースの流動特性および熱力学的

特性に対する粒界の効果に関し、幾つもの新たな知見が得られた。地球惑星深部ダイナミクスの理解をさらに進めるためには、実験や電子顕微鏡観察と並んで、本研究のような理論的モデリングによる系統的な調査とデータの取得が重要となると考えられる。（数値系地球科学部門: 土屋 卓久）

"Atomic-scale study of intercrystalline (Mg,Fe)O in planetary mantles: Mechanics and thermodynamics of grain boundaries under pressure"
S. Ritterbex, T. Tsuchiya, M. Drury, and O. Plumper, J. Geophys. Res. Solid Earth, 129, 5, e2023JB028375, doi:10.1029/2023JB028375

地震後の地殻変動を支配するプロセスを解明

私達が住む地表の"硬い"プレート（厚さ50km）は、ゆっくりと流れる"軟らかい"マントルに浮いています。プレート同士が衝突したり、プレートが地下深くへ沈み込む過程で地震が発生します。地震が発生した際にプレートの一部が壊れて「ずれ」が生じると、それを埋めようとして軟らかいマントルが流動を開始します。この流動は長期間継続するため、地震が発生した周辺の地表では、地震後も地殻変動が継続して起きることとなります（余効変動）。例えば2011年の東日本大震災の直後では、宮城県の沿岸部では1m程沈降し、その5年後には40cm程の隆起が起きました。そのような余効変動は、被災地の復興の妨げとなりました。

余効変動の際に測定されるマントルの粘性（10^{18}Pa・s程度）は、通常のマントルの粘性（10^{20}Pa・s）よりも圧倒的に低いことが一般的に知られています。余効変動の際のマントルの粘性が低ければ低いほど、より激しい地殻変動をもたらします。余効変動は数年～数十年の間継続し、時間の経過とともにマントルの粘性は上昇しつつ通常値（10^{20}Pa・s）に近づいていくことも知られています。これらの特徴から、余効変動はマントルの主要構成鉱物であるカンラン石の遷移クリープ現象によるものであろうと推測されてきました。遷移クリープ現象とは、その物質がもつ"本来の粘性"よりも低い粘性で流動する現象ですが、限られた条件（その物質の変形量がごく小さい場合）でしか出現しません。この遷移クリープ現象は、実験室ではごく限られたタイムスケールでしか出現しないため、深さ50km以深のマントルの高圧環境下（>2万気圧）でのカンラン石の遷移クリープ現象の詳細を観察するのは技術的に困難でした。

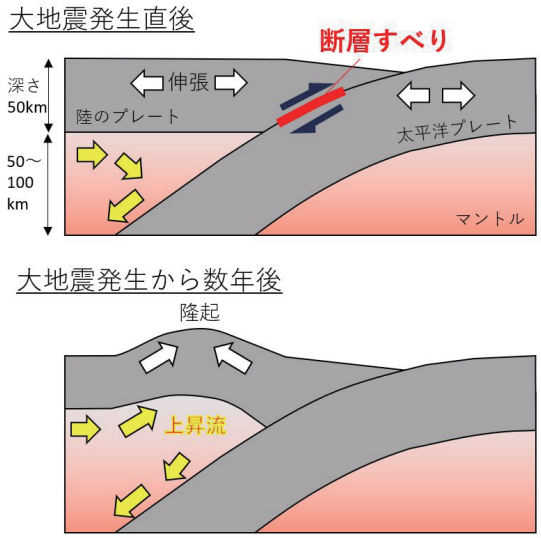


図1: 余効変動とは
上側：太平洋プレートと陸のプレートの境界で断層がすべり、大地震が発生した直後の地下構造のイメージ図。断層すべりによって、それぞれのプレートが伸張しようとする。
下側：大地震発生から数年後の地下構造。高温のために流動性が高いマントルの上昇流が生じ、それによってプレートの隆起が進行する。特に太平洋側ではその隆起が顕著に進行する。図はSun et al. (2014 Nature) に基づく。

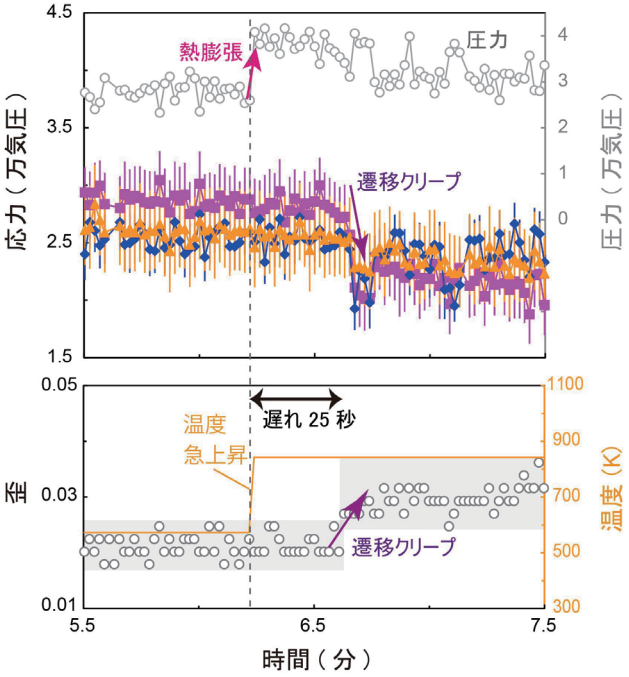


図2：カンラン石の遷移クリープ現象
2.5万気圧の圧力下にて、温度を570ケルビン（約300℃）から870ケルビン（約500℃）へ急上昇させた場合（経過時間6.2分）に、カンラン石が被る応力（上図）と歪（下図）の時間変化をその場観察した実験結果の一例。熱膨張による圧力の急上昇（2.5から4万気圧）が温度急上昇と同時に起きた。その25秒後に、遷移クリープによる応力の低下と歪の上昇が観察された。なお、応力はカンラン石の複数の回折線（青：021、ピンク：101、オレンジ：130）より決定しているため、回折線の種類によって得られる応力値は多少異なる。

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）の大内智博准教授、入舩徹男教授と、高輝度光科学研究センターの肥後祐司研究員らの研究グループは、余効変動に強い影響を及ぼすマントル最上部（深さ50～100km）の圧力条件下（2～4万気圧）でのカンラン石の変形実験を大型放射光施設SPring-8のBL05XUにて行いました。この実験ではSPring-8で開発中の次世代X線と、GRCが導入した

移動型の高圧発生装置を組み合わせて用いることで、実験室では2分間程度しか継続しないカンラン石の遷移クリープ現象を0.4秒の高い時間分解能にて観察することに成功しました。これにより、カンラン石の遷移クリープ現象は理論モデル（バーガースモデル）で説明可能であり、大地震後に余効変動が数年～数十年間継続する現象は当モデルで説明できることが明らかとなりました。本研究の結果より、今後は余効変動による地表の地殻変動がより正確に予測可能となるものと期待されます。（実験系地球科学部門：大内 智博）

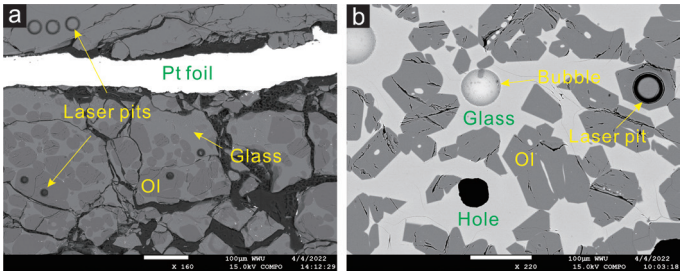
"Transient creep in olivine aggregates at shallow mantle pressures: Implications for time-dependent rheology in post-seismic deformation"
Tomohiro Ohuchi, Yuji Higo, Noriyoshi Tsujino, Yusuke Seto, Sho Kakizawa, Yoshinori Tange, Yamato Miyagawa, Yoshio Kono, Hirokatsu Yumoto, Takahisa Koyama, Hiroshi Yamazaki, Yasunori Senba, Haruhiko Ohashi, Ichiro Inoue, Yujiro Hayashi, Makina Yabashi and Tetsuo Irifune, Geophys. Res. Lett. 83, 12, 7567–7575, doi: 10.1029/20 24GL108356

カンラン石が解き明かす月玄武岩形成過程

カンラン石は冷却過程で玄武岩質マグマから最初に結晶化する鉱物であり、第一遷移元素（Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn）（以下、FTREsと略）、Ga、そしてGeのカンラン石－マグマ間の分配係数（分配係数は異なる2相間の質量濃度比で表される）に関する正確な知見は、玄武岩形成過程を定量的に理解するのに必要です。しかし、月玄武岩のFTREsをはじめとした微量元素に関する実験的研究は少なく、地球に関する研究例がほとんどでした。地球と比較して、月内部は金属鉄が飽和するほど還元的な環境であることがこれまでの研究から示唆されており、また月玄武岩は地球の玄武岩に比べて鉄に富んでいるという特徴があります。そのため、月玄武岩の形成環境を理解するためには玄武岩質マグマの酸化状態や鉄含有量がカンラン石－マグマ間の微量元素の分配に与える影響を調べる必要がありました。

FTREs、Ga、そしてGeのカンラン石－玄武岩質マグマ間の分配係数に及ぼす酸素フガシティー（酸化の度合いを表す指標）と鉄含有量の影響を評価するため、愛媛大学やオランダ、中国、ドイツの研究者らの協力を得て、Jiejun Jing博士（日本学術振興会外国人特別研究員）は酸素雰囲気炉を用いて1気圧下で高温実験を行いました。その結果、ほとんどの第一遷移元素の分配係数は試料中の鉄含有量の影響を受けないことがわかりました。一方で、実験で得られたCrの分配係数は、実験試料よりも鉄含有量がはるかに高い月試料のカンラン石とその中にあるメルト包有物から推定されるCrの分配係数と比較して有意に高いことがわかりました。また、Niの分配係数は、金属鉄が不飽和な酸化的な条件ではほぼ一定でしたが、金属鉄存在下では急激に減少しました。

新たに得られた微量元素の分配係数を用いて、Jing博士らは月玄武岩の形成過程を再考しました。その結果、月玄武岩中のカンラン石がCrに富む性質は、溶融した月マントル（マグマオーシャン）中でCrに乏しい鉱物のカンラン石と斜方輝石が結晶化、沈降した後、浅いマグマに酸化鉄と共にCrが濃集し、そこからカンラン石が結晶化したことで形成したものであると結論付けました。また、Tiに富む月玄武岩中のカンラン石のCo/Ni比がTiに乏しい月玄武岩のカンラン石に比べて高いことは、前者が月マントルの還元的環境下（金属鉄飽和条件下）で形成したことで説明できることがわかりました。（実験系地球科学部門：Jiejun Jing）



回収試料断面の反射電子像
カンラン石（Ol）とケイ酸塩メルト（ガラスとして急冷）を1気圧、1400℃のガス混合炉から急冷回収した試料の断面組織。出発試料粉末は化学的に不活性なカプセルに充填され、炉内でさまざまな酸素フガシティー条件下で72時間加熱した。円状のレーザー照射痕は、レーザーアブレーションICP質量分析装置による微量元素の分析の痕である。

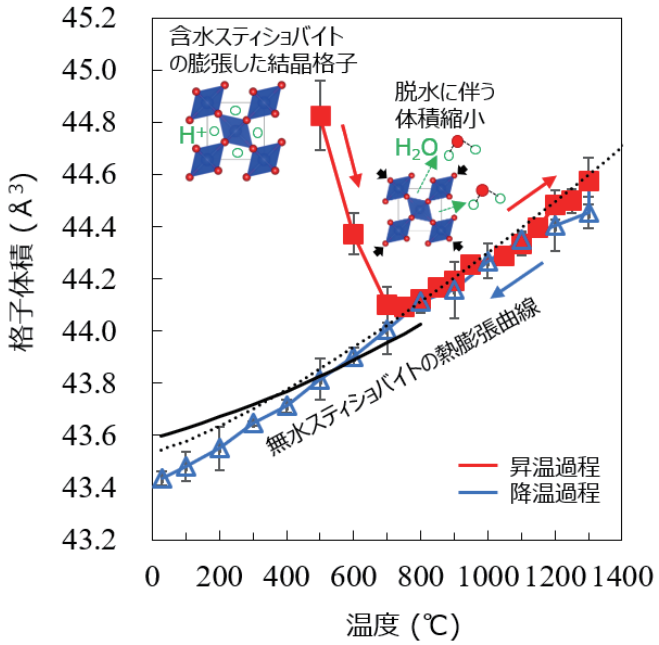
"Experimental investigation of first-row transition elements partitioning between olivine and silicate melt: Implications for lunar basalt formation"
Jing, J. J., Su, B. X., Berndt, J., Kuwahara, H., & van Westrenen, W., Geochim Cosmochim Acta, 373, 211-231,doi: 10.1016/j.gca.2024.03.028

地球深部の高圧シリカ鉱物には水が入らない

沈み込み帯では海水と反応した海洋プレート内の名目上無水鉱物（NAMs）や含水鉱物によってマントル内部に水が輸送されます。そのため水を含む鉱物の安定領域や含水量を明らかにすることは、地球深部の水循環プロセスを理解する上で非常に重要です。地表を構成する地殻（大陸地殻・海洋地殻）に普遍的に含まれるSiO_2鉱物は、地表では石英として安定ですが、上部マントルから下部マントルの幅広い温度圧力条件ではスティショバイトとして安定です。近年の研究で、Alを含まない純粋なスティショバイトに1wt%を大きく超える多量の水が保持されることが示され、下部マント

ルにおける主要な水輸送の担い手として期待されています。これは水飽和系では、スティショバイトの格子体積が水の溶解に伴い過剰に膨張すること（過剰体積）が観察されていることから示唆されています。しかし、よく制御された高温高圧下の水飽和条件下でその観察する技術がなかったため、過剰体積が見られる温度圧力条件は先行研究によって異なっており、含水スティショバイトの安定性は不明瞭でした。

そこで我々は、水飽和系におけるマルチアンビル装置を用いたその場X線観察のための実験手法を開発し、10-30 GPa・最高1300℃までのSiO_2スティショバイトの格子体積を調査しました。実験の結果、加熱開始後に最初に結晶化した含水スティショバイトの体積膨張率は最大で3.8%でしたが、過剰体積は温度の上昇および時間経過に伴い急速に減少することが分かりました。そして700℃以上ではほぼ無水の値と等しくなりました。さらにその後降温しても、過剰体積は観察されませんでした。これらのことは、SiO_2スティショバイトへの水の溶解は準安定的な現象である可能性を示しており、少なくとも下部マントル最上部ではSiO_2スティショバイトは安定相として水輸送の担い手になる可能性は低いことが明らかとなりました。(実験系地球科学部門：高市 合流、西原 遊)

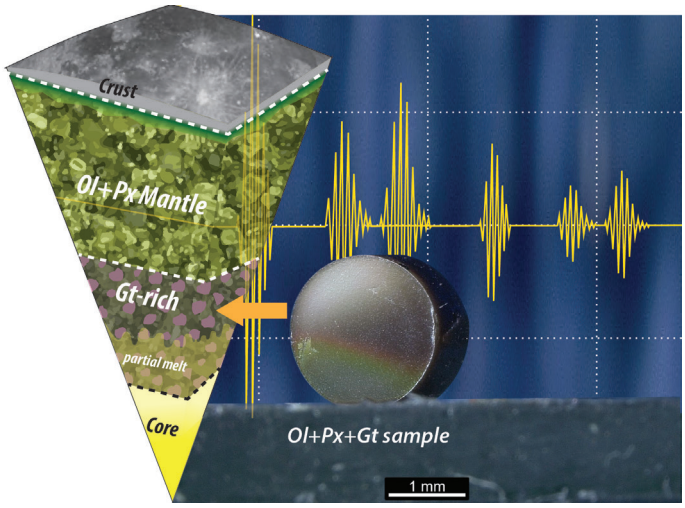


含水SiO_2スティショバイトの脱水と格子体積変化
23万気圧で最高1300℃まで加熱した際の格子体積の変化。500℃で最初に晶出した結晶は多量の水を含み大きな体積を示したが、その後の加熱で不可逆的に脱水し無水スティショバイトと同等の体積を示した。

"Limited stability of hydrous SiO_2 stishovite in the deep mantle"
Goru Takaichi, Yu Nishihara, Kyoko N. Matsukage, Masayuki Nishi, Yuji Higo, Yoshinori Tange, Noriyoshi Tsujino, Sho Kakiza, Earth Planet. Sci. Lett., 640,118790, doi: 10.1016/j.epsl.2024.118790

月深部を解き明かす：ガーネットに富む月マントル？

現在の月は、中心に金属核があり、その上にカンラン石（Ol）や輝石（Px）などの鉱物からなるマントルが地殻下に広がる内部構造を持っていると考えられている（Wieczorek et al.,2006）。このような月の内部構造は、月探査で得られたサンプルや深部地震の記録の分析から推定されてきた（Weber et al.,2011）。豊富な文献があるにもかかわらず、月マントル深部にあるガーネット（Gt）の存在については、長年議論が続いている。ガーネットの存在について考えると、50年前に初めて提唱された極めて重要な疑問（Anderson, 1975）には、いまだに答えが出ていない。ガーネットを含む現実的な月マントル物質の音速は、月深部の地震波観測と適合しているのだろうか？



月マントル深部におけるガーネットに富む層
核ーマントル境界の上にガーネットに富む層がある月内部の模式図と本研究で合成した月マントル試料の写真

この疑問に答えるため、愛媛大学の研究者らはまず、地球深部ダイナミクス研究センターのマルチアンビル型高圧発生装置「ORANGE-2000」を用いて、月マントルを模擬したガーネットに富む岩石試料（Ol+Px+Gt）を高温高圧下で合成した。この試料を大型放射光施設SPring-8の高温高圧ビームラインBL04B1において、月深部と同様の圧力・温度条件下で音波の伝搬速度を測定する実験を行った。実験結果と

モデリングを組み合わせることで、研究者らは、月マントルを模擬したガーネットを大量に含む試料の音速は、深さ740～1260kmの月深部の地震波および密度分布と一致すると結論づけた。さらに、ガーネットをほとんど含まない岩石組成では、これらの深さで観測された月のマントルの地震波速度と密度を説明することはできないと結論づけた。

これらの興味深い結果は、月の組成や形成（Jing et al., 2022）、内部温度、金属核や現在は存在しない月のダイナモなど、月とその内部の力学に大きな影響を与える。(実験系地球科学部門：Steeve Gréaux)

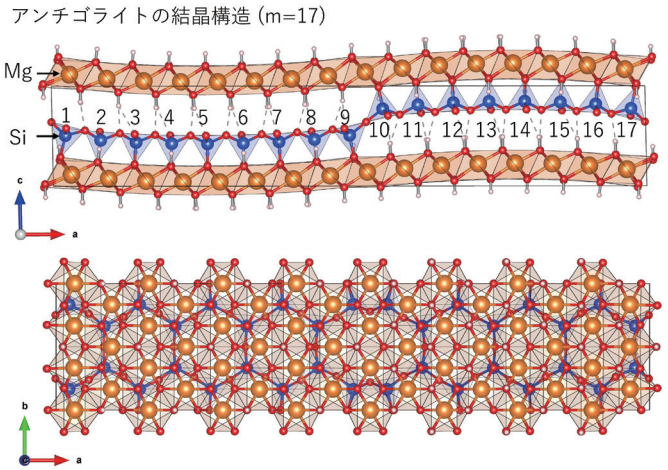
"Sound velocities in lunar mantle aggregates at simultaneous high pressures and temperatures: Implications for the presence of garnet in the deep lunar interior"
Marisa C. Wood, Steeve Gréaux, Yoshio Kono, Sho Kakizawa, Yuta Ishikawa, Sayako Inoué, Hideharu Kuwahara, Yuji Higo, Noriyoshi Tsujino, Tetsuo Irifune, Earth Planet. Sci. Lett., 641, 118792, doi: 10.1016/j.epsl.2024.118792

沈み込み帯における含水鉱物の脱水現象に新知見

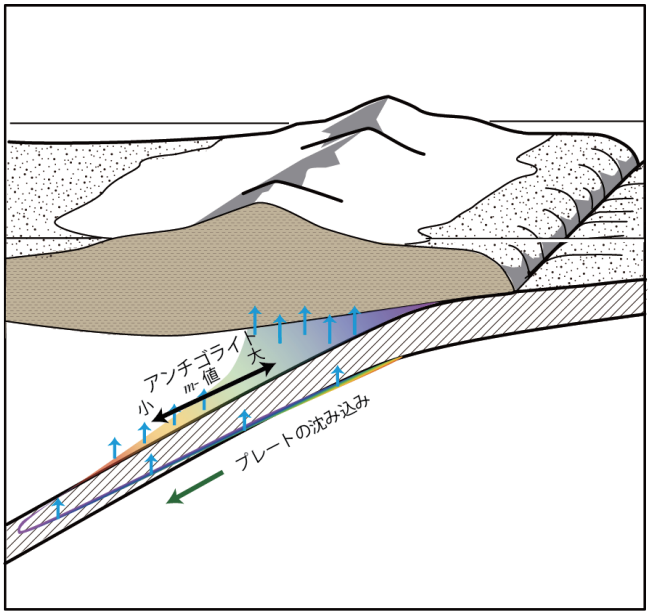
アンチゴライトは、地球上で最も豊富な含水鉱物である蛇紋石の一種である。この鉱物は沈み込む海洋プレートにおける地球深部への水の主要な運搬役であると広く考えられている。その結晶構造はa軸に沿って波状の構造を持ち、自然界では異なるm値（m=13-24）を持ついくつかのポリソームが確認されている（ポリソマティズム）。m値はその1波長に含まれるSiO_4四面体の数として定義され、八面体層と四面体層の間の長さの違いによって制御される（図1）。この長さは主にMgO_6八面体とSiO_4四面体のサイズに起因するため、圧力と温度の関数として変化すると予測される。しかしながら、アンチゴライトのm値が地球内部の高圧高温条件下どのように変化するかはよくわかっていない。

本研究では第一原理電子状態計算法を用いて物質の安定性を司る自由エネルギー量（エンタルピー）を計算し、異なるm値をもつアンチゴライトの安定性を比較した。その結果、アンチゴライトの安定なm値は徐々に減少していくことが判明した。言い換えると、アンチゴライトは圧力と共に徐々に脱水しながら短い波長をもつ構造へと変化する。

このことは、地球深部に沈み込んでいる海洋リソスフェア中のアンチゴライトの構造が、徐々に常圧や地表近くの圧力条件で観察されるアンチゴライト(m=17)とは異なるポリソーム構造に進化している可能性を示唆している（図2）。このようなm値の変化は、都度軽微な脱水反応を伴う。沈み込み帯における岩石・鉱物中の水の量が変化することによって、アンチゴライトのポリソマティズムは、二重地震帯の観測など、稍深発地震の分布に影響を与える可能性がある。（数値系地球科学部門: 土屋旬）



【図1】アンチゴライト（m=17）の結晶構造
m=17のアンチゴライトの結晶構造を示す。a軸に沿って一波長内に存在する四面体の数がm値を表す。オレンジ：Mg, 青：Si, 赤：O, ピンク：H



【図2】沈み込み帯におけるアンチゴライトのm値変化（模式図）
第一原理計算によるとアンチゴライトのm値は高圧下で小さくなる傾向があるため、沈み込み帯においては深度が上がるにつれてm値の減少が予想される。

"First-principles investigations of antigorite polysomatism under pressure"
Jun Tsuchiya, Taiga Mizoguchi, Sayako Inoué and Elizabeth C. Thompson,Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 129, e2023JB028060, doi:10.1029/2023JB028060

PRIUS利用者の声

津野究成研究員（アリゾナ州立大学）

地球型惑星は、太陽系の歴史の初期に核とマントルに分化したことはよく知られており、このプロセスとして、珪酸塩の大規模な融解（マグマオーシャンの形成）による鉄合金メルトの効率的な分離が広く受け入れられている。一方で、シングルステージの核マントル分離を想定した場合、鉄合金メルトはマグマオーシャンより下層の、溶融しなかった珪酸塩マントル中を通過する必要があります。この場合、マグマオーシャンからの鉄合金メルトの分離よりも非効率的であり、(1)鉄合金メルトの珪酸塩マントル中への浸透による分離、(2)金属ダイアピルの形成による鉄合金メルトの沈降、(3)珪酸塩マントルの剪断変形による鉄合金メルトの相互接続ネットワークの形成などのプロセスが考えられます。今回、PRIUSのサポートによりORANGE3000を使用した高温高圧実験をおこなう機会を得ることができ、火星サイズの原始惑星における鉄硫黄合金メルトの珪酸塩マントル（リングウッダイト、メージャライトガーネット）中の浸透による核マントル分離の可能性を探りました。回収試料はGRC設置のラマン分光装置を用いて珪酸塩の相同定を、同じくGRC設置FE-SEMを用いて組織観察をおこない、リングウッダイト、メージャライトガーネット中の鉄硫黄合金メルトの二面角を測定しました。この分析をGRCで終わらせることはできなかったのですが、FE-SEMによる組織観察の結果、鉄硫黄合金メルトのリングウッダイト、メージャライトガーネット中の二面角は60度よりかなり大きいであろうという結果が得られました。これにより、鉄合金メルトは珪酸塩マントル中への浸透による分離ではなく、他のプロセスを考慮しなければいけないと考えられます。

この度は、PRIUSのサポートにより桑原秀治先生と共同研究をおこなう機会を得ることができ、また、今後の共同研究の可能性についても議論することができました。また、新名亨先生には、住友重工製の6000tonプレス（BOTCHAN）を見学、そして実験のコツも教えていただき、私の所属するアリゾナ州立大学（ASU）のFORCE（Facility for Open Research in a Compressed Environment）に最近設置されたICHIBAN（BOTCHANと同型）をどのように使用していくかの参考にさせていただくことができました。ASU所属の研究者のBOTCHAN視察に関し、GRCでの研究、実験を含めた訪問を提案していただいた入舩徹男先生、また、GRCの多くの方々からも実験や手続きに関するサポートをいただき、感謝の気持ちしかありません。今後ともよろしくお願いいたします。

共同利用・共同研究拠点”先進超高圧科学研究拠点 Premier Research Institute for Ultrahigh-pressure Sciences (PRIUS)”ではGRCの先進的実験技術や数値計算技術、また世界トップレベルの超高圧装置群や微小領域分析装置類などを活用し、「共同利用・共同研究施設として、高圧力を利用した地球惑星科学、物理学、化学、材料科学、生命科学等の分野の学際的研究を行い、かつ、大学の教員その他の者で拠点の目的たる研究と同一の分野の研究に従事する者に利用させることにより、先進的な超高圧科学研究の総合的推進を図る」（愛媛大学先進超高圧科学拠点規則より）ことを目的として研究活動を行っております。共同利用・共同研究についての詳しい内容・お問い合わせについては、本センターホームページをご覧ください。 >> https://www.grc.ehime-u.ac.jp/prius

EHIME UNIVERSITY
GRC
GEODYNAMICS RESEARCH CENTER

NEWS LETTER

vol. 69　2024年8月（年2回発行）

愛媛大学
地球深部ダイナミクス研究センター
〒790-8577 愛媛県松山市文京町2-5
愛媛大学城北キャンパス理学部構内 総合研究棟 I
TEL 089-927-8165 / FAX 089-927-8167
https://www.grc.ehime-u.ac.jp