

TOPICS NEWS & EVENTS / 海外出張報告 / 最新研究紹介 / 先端超高压研究拠点 PRIUS NEWS

NEWS & EVENTS

第11回PRIUSシンポジウム

GRCが運用する共同利用・共同研究拠点(先進超高压科学研究拠点:PRIUS)の第11回PRIUSシンポジウムが、2025年2月27日(木)～2月28日(金)の2日間にわたり、対面方式で愛媛大学にて開催されました。



PRIUSシンポジウムは毎年年度末に拠点の活動報告を兼ねて開催しており、今回のシンポジウムでは、招待講演を含めた30件の研究発表が行われ、約70名の参加者がありました。今回は通常の成果報告に加えて、小原真司氏(NIMSマテリアル基盤研究センター量子ビーム回折グループグループリーダー)による特別講演と「量子ビームを用いた最先端測定」をテーマとした特別セッションが行われました。



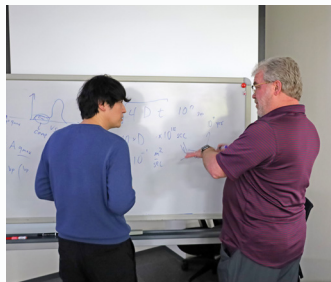
また、初日の夕方に開催されたポスターセッションに続いて同一会場で懇親会が行われ、参加者の間で交流を深めることができました。

第八回惑星深部研究会

2025年3月13日(木)～15日(土)の3日間、愛媛大学GRCにて第8回惑星深部研究会を開催しました。学内外から合計13件の発表があり、参加者はオンライン参加を含めて約40名にのぼりました。



今回の研究会では、核-マントルの熱・化学的相互作用、核ダイナミクス、地磁気ダイナミクス、マントル深部地震波、マントル鉱物の選択配向特性、同位体進化、地殻の化学組成など、多岐にわたる研究発表が行われました。特に、本研究会の特色である一人あたりの発表に十分な時間を設ける形式により、各研究についてじっくりと議論を深めることができました。



また、初日に開かれた懇親会は、参加者同士の親睦を深める貴重な機会となりました。

次回の研究会は8月に高知で開催予定です。

神林勇和さんがKeio Astrobiology Camp 2025にてポスター賞を受賞

2025年3月17日(月)～19日(水)に行われた、Keio Astrobiology Camp 2025にて、神林勇和さん(現学部4年・グレオ研)が大学生の部でポスター賞を受賞しました。

Keio Astrobiology Campは、慶應義塾大学先端生命科学研究所が主催するもので、「宇宙生物学」をテーマとし、国内外で活躍する最先端の研究者による講演、専門家との意見交換、施設見学等が行われています。

【受賞タイトル】エンスタントコンドライト小惑星の形成と衝突による進化



GRCホームページリニューアル

GRCのホームページをリニューアルいたしました。今後も研究活動やイベントの情報を随時発信してまいりますので、ぜひご覧ください。 <https://www.grc.ehime-u.ac.jp>



Asia Research Newsに、土屋卓久センター長の研究成果が掲載されました

Asia Research NewsのEditor's Choiceに、土屋卓久GRCセンター長の研究成果 "Missing nitrogen: a dramatic game of cosmic hide-and-seek deep within our planet"のプレスリリース記事が取り上げられました。<研究内容の詳細は、5ページをご覧ください>

地球中心を超える超高圧力領域で9つの物質の圧縮特性を決定

GRC超高圧科学部門の境毅准教授は、高輝度光科学研究センター、大阪大学大学院基礎工学研究科附属極限科学センター、大阪公立大学との共同研究によって、9つの物質(鉄、銅、モリブデン、タングステン、レニウム、白金、金、酸化マグネシウム、塩化ナトリウム)

について、地球中心圧力を超える最大430万気圧までの圧力と体積の関係(状態方程式)を決定することに成功しました。状態方程式は高圧実験において“圧力計”として用いられますが、本研究でこれら9つの状態方程式が相互に整合的となったため、数百万気圧の極高圧実験においてどの物質を“圧力計”として使うかによって生じていた今までの圧力値推定の矛盾が解消されました。

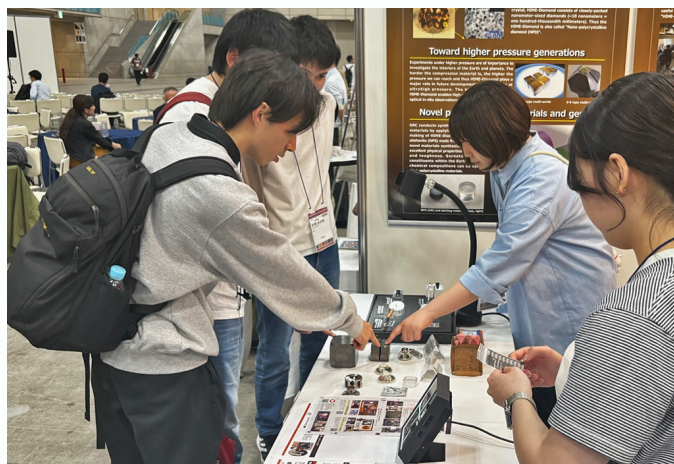
本研究の結果は地球中心圧力を超える極高圧領域に適用可能な“圧力計”を提供します。これにより、天王星や木星、あるいはスーパーアースのような系外惑星といった地球よりも大きな惑星の深部に対応するような圧力をより正確に見積もることが可能になり、今後の惑星深部研究に役立ちます。また惑星科学に限らず、超伝導研究に代表される高圧物質科学分野にも広く用いられることが期待されます。<研究内容の詳細は、7ページをご覧ください>

月の火山活動の起源をシミュレーションによって解明

GRC数値系地球科学部門の亀山真典教授は、東京大学大学院総合文化研究科の于賢洋大学院生(現在、NTT研究所)と小河正基准教授(研究当時)、東京大学大学院理学系研究科の西山学客員共同研究員、海洋研究開発機構の宮腰剛広主任研究員からなる研究チームの一員として、月内部の数値シミュレーションにより、観測から知られていた月の局地的な長期間の火山活動が、マグマの上昇メカニズムの変化が原因となって引き起こされていたことを示しました。この成果は、月内部構造解明を目指す月震計ネットワークなど、今後の月面探査計画における科学的意義付けに寄与します。<研究内容の詳細は、9ページをご覧ください>

JpGU2025ブース出展

2025年5月25日～30日まで幕張メッセにて開催された、日本地球惑星科学連合2025年大会(JpGU2025)において、今年度もGRC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。今回はDAC&核の顔はめパネルもご用意し、たくさんの方に楽しい写真を撮っていただきました。





ブースの様子。今年も多くの方にお越しいただきました。



口頭・ポスターともに、GRCに所属する多数の学生が発表し、会場は活気に溢れていました！

また、毎年恒例のJpGUクイズラリーにも参加し、ヒメダイヤ製リング&入船教授著絵本「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。

<参加者の声>

今回が初めての学会参加で、指導教員の先生からはお祭りみたいな大きなイベントだと同っていたので胸を躍らせながら参加しました。実際参加してみると本当に熱気のある学会で、積極的に意見交換や質問が出来ました。私は理論計算を主に行っているのが高压高温実験の手法について質問することが多々あり、自分が知らなかったような実験のセッティングのお話も聞くことができ、大変勉強になりました。また発表を聞きながら自分の研究と照らし合わせたり、応用できそうなことに考えを巡らせたりすることもでき、今後の研究の視野が広がる貴重な経験になりました。(学部4年 梶原 萌)

今回JpGU2025に参加して、研究テーマは違っていても自分と同じ実験装置や分析手法を使っている人たちと議論を交わしたり、今まで触れることのなかった分野の研究の発表を見たりすることで、新たな視点や知識を得ることができてとても勉強になりました。ブースでは、一般の方や企業の方などとも交流することができて貴重な経験になったと共に、自分の研究を分かりやすく人に伝えることの楽しさや難しさを感じることができました。今回の学会を通して、自分の研究へのモチベーションをさらに高めることができたため、得られた経験を糧に、これからの研究をより一層頑張りたいと思います。(学部4年 大西 黎)

土屋卓久センター長がSpringer Nature Editorial Contribution Award 2025を受賞

土屋卓久センター長が出版社”Springer Nature”の”Editorial Contribution Award 2025”を受賞しました。この賞は、学術誌”Physics and Chemistry of Minerals”の編集者としての貢献に対して送られたものです。

GRCフロンティアセミナー

The 89&90th GRC International Frontier Seminar

2025.5.20 (Tue.)

”What’s up with quartz?”

Dr.Alexandre Schubnel (Professor,Ecole Normal Supérieure-PSL University)

Ms. Giulia Mingardi (PhD student,Ecole Normal Supérieure-PSL University)



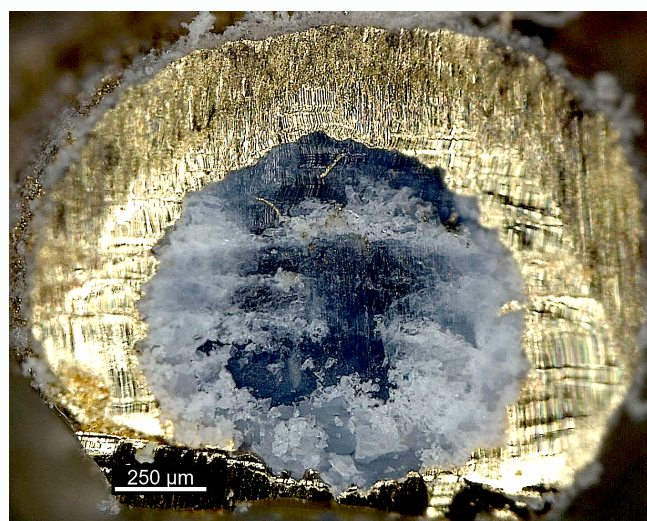
第1回PIASセミナー

GRCが所属する愛媛大学先端研究院では、最新の研究成果を学内外に紹介し、愛媛大学内の共同研究や学外産学連携、自治体連携の契機作り、さらには一般の方々へのアウトリーチを目的として、PIASセミナーを主催しています。

2025年6月4日には、第1回PIASセミナーとして、GRC大内智博准教授による講演が行われました。本セミナーでは、プレスリリースを行った最新の研究成果を中心に紹介しており、毎月最終水曜日の夕方にオンラインで開催しています。どなたでもご参加いただけますので、ぜひ先端研究院ホームページ(<https://www.ehime-u.ac.jp>)をご覧ください。

GRC+PIASイメージコンテスト2024

”GRC+PIAS(愛媛大学先端研究院)イメージコンテスト2024”の結果をホームページで公開しています。ご応募くださったみなさま、ありがとうございました！



第一位：青いナノ多結晶ダイヤモンド(國本健広さん)



海外出張報告

令和6年度海外出張報告

実験系地球科学部門：助教 Youyue Zhang

令和6年度は、私にとって非常に充実した一年となりました。愛媛大学に移籍してからのこの一年間、ほぼ2ヶ月ごとに実験や学会発表のため出張を重ね、そのうち2回は海外出張であり、いずれも印象深く、大いに学びを得る機会となりました。

まず、2024年12月1日から6日にかけて、岡山大学惑星物質研究所の准教授・石井先生、特任助教・趙彬さんとともに、二国間交流事業(中国NSFCとの共同研究)の一環として、中国の武漢理工大学を訪問しました。中国側の代表である准教授・呉也先生が所属する高温高压物理研究所は、主に物理を専門とし、gas gun法を用いた動的高圧衝撃実験を行っています。訪問初日は、研究所内の歴史を感じさせる重厚なgas gunを見学しました。実験室の壁にはいくつか新しい凹みがあり、それが見学の直前に発生した小さな事故の跡であると呉也先生から説明を受けました。それを見た石井先生と私は「衝撃実験も、我々が扱う大圧機実験と同じくらい危険ですね!」と思わず同じ感想を口にしました。高圧の世界は、危険と挑戦に満ちていますが、それがまた魅力でもあります。高圧実験とは、一種の大冒険なのかもしれません。

物理を専門とする研究所ですが、呉也先生や准教授・徐豊先生ら若手研究者は、物理実験手法を応用し、地球内部物質の物理特性の研究にも取り組んでいます。中日間の研究交流会の後、徐豊先生の案内で、本プロジェクトの核心である高時間分解能(精度1ps)の時域ブリルアン散乱測定システムを見学しました。実験台の上には多くの光学機器が整然と配置され、最終的に光はダイヤモンドアンビルセル(DAC)の試料室へと導かれます。徐豊先生は、「彬は修士時代にこの装置の構築に関わっていました。」と笑顔で話し、趙彬さんは「その頃は主に荷物を受け取っていただけです。届く荷物が多すぎて、開梱作業ばかりしていましたよ。」と冗談を交えて応じました。装置の構築とともに研究者が成長していく様子が伝わり、実験



石井先生(右から3番目)、趙彬さん(右端)、および武漢理工大学高温高压物理研究所のメンバーとの集合写真



Dr. Sergio Speziale(左端)、Dr. Sergey Lobanov(左から2番目)、Dr. Enrico Mazotto(右端)との集合写真

研究の道のりは長いものの、一步一步が確かな足跡となることを実感しました。本プロジェクトの最終目標にはまだ道のりがありますが、多くの技術を学び、新たな可能性を見出すことができたこの訪問を通じて、多くの学びを得ることができました。

2025年2月後半には、私が長く待ち望んでいた、研究テーマに直結する実験のため、ドイツへ出張しました。私はこれまで一貫して惑星物質の熱特性の研究に取り組んできました。この研究の重要性を学術界に広めたいと考えており、同じ志を持つDr. Enrico Mazottoは、一昨年から私を彼の勤務するGFZ Helmholtz Centre for Geosciences(ドイツ地球科学研究センター)に招待しようとしていました。しかし、燃油費の高騰による航空券の高額化が障壁となり、なかなか実現できずにいました。そこで、入船先生と桑原先生のアドバイスを受け、ELSIの国際交流プログラムに申請し、旅費の3分の2の支援を受けることができました。この貴重な機会を活かし、私は以前から興味を持っていた実験を行うことにしました。

GFZでは、DAC実験の専門家であるDr. Sergey LobanovおよびDr. Sergio Spezialeと協力しました。SergeyさんがGFZで構築したレーザーシステムは、超高輝度のwhite beam「Supercontinuum」(400nm-2400nmのブロードバンド)を有しており、DAC内の試料の光学吸収を測定することができます。さらに、YAGレーザー加熱と組み合わせることで、高温高压下での熱放射率測定が可能です。今回の実験では、私が自信を持って合成した試料を持参しました。厚さ0.5mmで完全に透明な美しい試料でした。しかし、Sergeyさんから「同じ成分の試料をGFZで合成した際、安定したレーザー加熱ができず、高温下での熱放射率測定が困難だった」と聞かれ、不安がよぎりました。それでも、自分の試料の品質を信じ、測定を強く希望しました。実際に試料を見たSergeyさんは驚嘆し、「こんな試料は見たことがない!」と感嘆の声を上げました。Sergioさんの協力のもと、厚みが均一で両面が滑らかな試料薄片を作製し、無事にレーザー加熱と光学測定を実施しました。結果として、これまでの研究で到達できなかった高温領域での測定に成功し、良い結果を得ることができました。やはり、高品質なマントル高压相試料の合成に時間

をかける価値はあると再認識しました。GRCで合成した試料が、惑星科学の未解決問題を解決する手助けとなれば、これ以上の喜びはありません。今後もこの方向性で研究を進めていきたいと強く思いました。

GFZでの生活を通じて、異なる研究文化も体験しました。ドイツの研究者は家庭を大切に、仕事と生活のバランスを重視していました。日中は集中して効率的に働き、日没後は家族との時間を大切にする生活スタイルです。私もこのリズムに従い、健康的な2週間を過ごしました。また、GFZのあるポツダムは「Potato King」と呼ばれたプロイセン王の領地であったため、毎日ポテト料理の洗礼を受けました(e.g.,揚げポテト、茹でポテト、マッシュポテト等々)。そんな中、イタリア出身のSergioさんとEnricoさんが本格的なイタリアンレストランへ案内してくれ、美味しいピザが私を救ってくれました。このディナーは、今回のドイツ出張で最も印象的な食事となりました。やはり

ヨーロッパの美食といえばイタリアですね。寛大なSergioさんは、ディナーに参加した全員の分を支払いましたが、Enricoさんにウインクを送り、自分の分は自腹で払わせるという場面もありました。Enricoさんも快く財布を取り出し、まるでイタリアン・マフィアのような粋な計らいでした。短い2週間のドイツ滞在でしたが、実験研究においても、異国の文化に触れる意味でも、多くのことを学び、非常に貴重な経験となりました。

今年の2度の海外出張を通じて、多くの技術を学び、惑星科学への新たなアプローチを発見することができました。また、GRCの高圧技術を海外の研究機関に紹介し、新たな共同研究の可能性を探ることができたことにも、大きな達成感を感じています。やはり、研究者は積極的に外に出て交流するべきですね! 燃油費が一日も早く下がり、若手研究者にもより多くの国際交流の機会が訪れることを願っています。

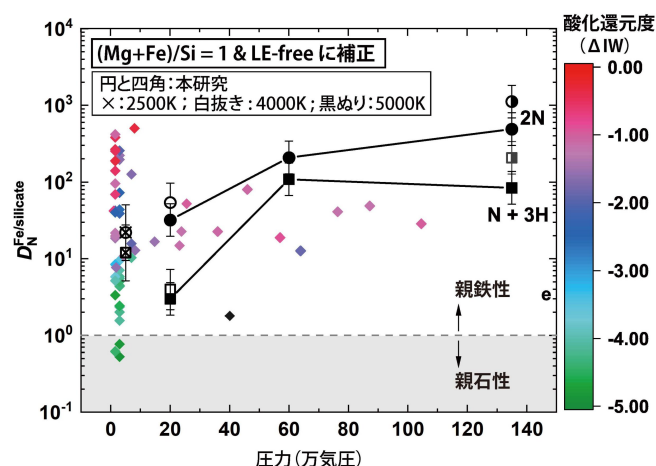
最新研究紹介

地球の奥深くで繰り広げられる 元素のかくれんぼ

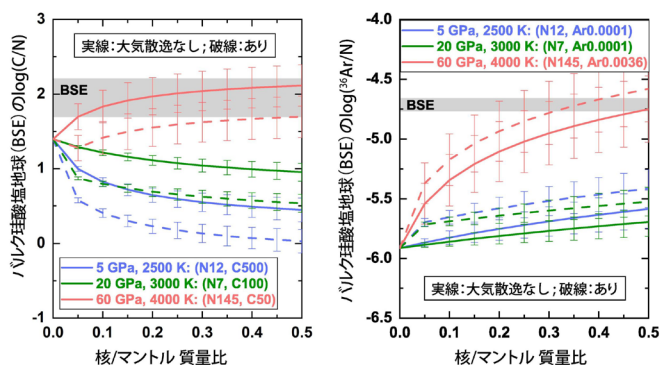
地球の歴史は推理小説のようなものです。その最大の未解決な謎のひとつに「窒素はどこへ行ったのか?」という問題があります。地球科学者たちは、長い間、この惑星の岩石質の外層(マントル)には、炭素や水などの他の揮発性元素に比べて、異様に少ない量の窒素しか含まれていないことに注目していました。非常に不思議なことに、地球のうちで岩石からできている部分全体(バルク珪酸塩地球)のC/N比と $^{36}\text{Ar}/\text{N}$ 比は、地球の形成期にこれらの揮発性成分をもたらしたとされる隕石において見出されるものよりも、はるかに高い値を示します。何十年の間、この「消えた窒素」の問題は研究者を困惑させてきました。この謎に一つの道標を与えたのが本研究です。

この謎を理解するためには、46億年という年月を巻き戻す必要があります。46億年前のできたてホヤホヤの地球は灼熱の熔融した火の球で、1,000kmを超える深さのマグマオーシャン(熔融した珪酸塩の海)が渦巻いていました。この時期、鉄のような重い金属が沈んで中心に核を形成し、軽い鉱物成分が上昇して固化し珪酸塩マントルを形成しました。この過程は核マントル分離と呼ばれており、これによりよく知られている地球の層状構造が形成されました。窒素、炭素、アルゴンなどの揮発性元素も、この壮大な物質進化のプロセスに巻き込まれたと考えられています。つまり、これらの元素が核に閉じ込められたり、マントルに溶け込んだり、宇宙空間に失われたりして、最終的に現在の地球の姿となったのです。

なかでも窒素は特に謎めています。窒素は現在の大気の78%を占めている我々にとってかなり身近な元素ですが、地球の岩石マントル全体における濃度は、1~5ppm(1ppm = 0.0001%)という衝撃的な少なさになります。一方、炭素とアルゴンは、これらの元素を地球にもたらしたと思われる始原的な隕石(コンドライト)よりも、窒素に対してはるかに豊富に存在していることが分かっています。この原因について、例えば、地球形成後に窒素だけ宇宙空間に散逸してしまった、或いはそもそも地球には窒素はそれほど運ば



【図1】高温高圧下における窒素の金属/珪酸塩分配係数($D_{\text{Fe/silicate N}}$)の計算結果
液体鉄と熔融珪酸塩のどちらに元素が溶けやすいかを表す比率を分配係数とよぶ。この図は、窒素は熔融珪酸塩と比較して液体鉄に対しより親和的であり、その親和性は圧力によって高まるが、温度によって減少することを示している。



【図2】核形成に伴うバルク珪酸塩地球のC/N比及び $^{36}\text{Ar}/\text{N}$ 比のモデリング結果
本計算結果を用いたモデリングから得られた、核のサイズとバルク珪酸塩地球のC/N比及び $^{36}\text{Ar}/\text{N}$ 比の関係。C/N比は低圧(5~20万気圧)で核-マントル分離が生じた場合減少し、高圧(60万気圧)で生じた場合増加する。また $^{36}\text{Ar}/\text{N}$ 比は、低圧(5~20万気圧)で生じた場合わずかに増加し、高圧(60万気圧)で生じた場合で有意に増加する。

れてこなかったなど、科学者たちはこれまで多くの仮説を提唱してきました。しかし、本研究では、「もし地球のコアが窒素の大部分を奪ってしまったとしたら?」という、異なる問いに着目しました。

このアイデアを検証するため、「スーパーコンピュータ」を使って地球初期のマグマオーシャン内部の極限状態を再現しました。地表の圧力の135万倍(135万気圧)の圧力を加え、5000ケルビンの温度まで加熱した際(これは若くドロドロに溶けた地球の数1000キロメートルの深さに相当します)の窒素の挙動をシミュレートしました。そして第一原理分子動力学と呼ばれる量子力学の手法と、統計物理学に基づく熱力学積分法とよばれる方法を組み合わせて液体のエネルギーを計算し、窒素が鉄に富んだ核と結合するのを好むのか、珪酸塩成分(マグマオーシャン)に溶け込むのを好むのか、追跡しました。

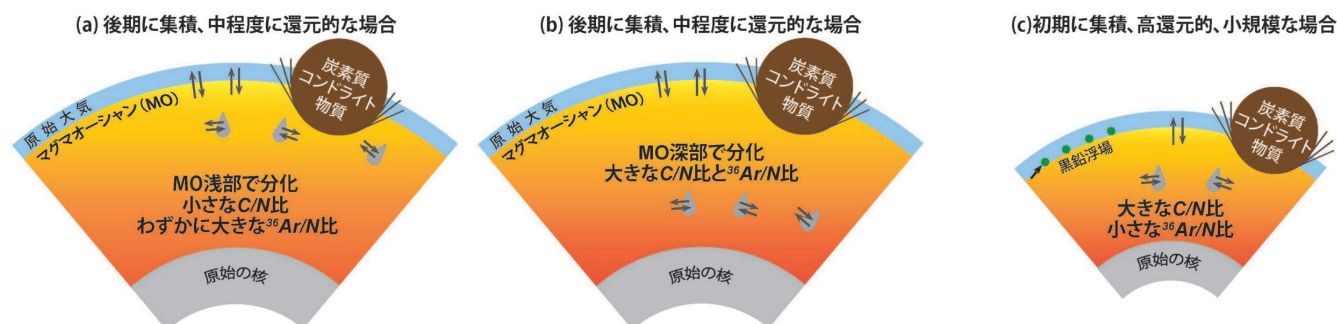
結果は驚くべきものでした。マグマオーシャン深部の強烈な熱と圧力の下では、窒素は「金属好き」となるという結果が得られました(このような元素の性質を「親鉄性」とよびます)。具体的には、60万気圧の圧力では、窒素はマグマオーシャンにとどまるよりもコアに吸収される可能性の方が100倍以上高いことがわかりました。ま

た圧力が高くなるにつれてこの傾向は非線形的に強まりました。この振る舞いはこれまで明確に示されたことはなく、以前の実験研究が相反する結果を示した理由の一つと考えられます。

しかし、なぜ窒素は高圧力の下で高い親鉄性を示すのでしょうか?シミュレーションの結果、ミクロなメカニズムが明らかになりました。マグマオーシャンの溶けた珪酸塩の中では、窒素原子は最初、アンモニウムイオン(NH_4^+)のように形態をとっており、自分自身や水素原子と結合していました。しかし、圧力が高まるにつれて、それらはバラバラになり、窒素は代わりにシリコン(珪素)原子と結合し、窒化物イオン(N^{3-})として熔融珪酸塩におけるネットワーク構造の中に溶け込むようになります。一方、金属核では、窒素は鉄原子間の隙間に入り込み、より中性原子のように振る舞います。この挙動により、より多くの窒素がマグマオーシャンから核に向けて移動することとなります。

本研究では窒素について調べるだけにとどまらず、これまでの研究と組み合わせ、炭素はやや親鉄的(金属を好む性質)であるものの、マグマオーシャン深部の条件下では窒素よりも親石的(岩石を好む性質)になることを発見しました。また不活性元素であるアルゴンは、金属をあまり好まないこともわかりました。この結果、核を好む度合いは窒素>炭素>アルゴンという順番になります。この性質から、最初に紹介した2つの謎を解き明かすことができるかもしれません。

これを定量化するために、本研究では46億年前の地球集積モデルの構築を行いました。地球が炭素質コンドライトから揮発性物質を得たと仮定すると、このような始原物質から地球の質量の5~10%が供給されるだけで、十分な窒素、炭素、アルゴンが地球に供給されることがわかりました。核の形成がマグマオーシャンの深部(例えば60万気圧の条件)で起こった場合、窒素の80%以上が核に沈み込み、マントルには観測結果と同じ1~7ppmが残ることになります。炭素はマントルに残り、その結果C/N比が高くなります。一方、アルゴンは核とマントルの両方から拒絶され、大気中に偏って濃縮することになります。このことにより、バルク珪酸塩地球の高い $^{36}\text{Ar}/\text{N}$ 比が説明されます。



【図3】地球形成期における原始地球への揮発性物質の供給に関する概念図

バルク珪酸塩地球のC/N比及び $^{36}\text{Ar}/\text{N}$ 比が、原始地球における核マントル分化深度と酸化還元条件によって大きく変化する様子を示す概念図。現在の地球の観測結果と一致するように、2つの比を同時に増加させることができるのは、マグマオーシャン深部で分化が生じた場合のみであることが分かる。

この発見は、地球の揮発性の起源に関する我々の理解を塗り替えるものです。何年もの間、科学者たちは、地球でみられる奇妙な元素比率について、地球形成時に特殊な隕石が集積したことを意味している、或いは宇宙に窒素が放出されたことを意味しているなどと、様々に議論をしてきました。今回の研究からは、もっと単純なストーリーが提案されます。すなわち、地球の揮発性物質は炭素質コンドライトから来たが、その行方は超高压力下における核形成の物理・化学プロセスによって封印されたというものです。核マントル分離による化学分化が生じた深さが最も重要で、浅いマグマオーシャンでは観測された比率は再現されず、深いマグマオーシャンでは地球の実際の痕跡が完全に再現されました。このことから、バルク珪酸塩地球とコンドライトの揮発性元素比が異なるのは、それらの供給源が異なるのではなく、集積時期が異なっていたことを反映しているのではないかという議論につながります。

この核形成プロセスによって、地球の大気と岩石層に生物必須元素が十分に存在するための前提条件の一つである、バルク珪酸塩地球における窒素の存在量が決定されました。地球に生命が誕生するまでには長い時間がかかったと考えられていますが、核とマントルが分離した数十億年前には、すでに生命にとって不可欠な環境が整っていたのかもしれません。

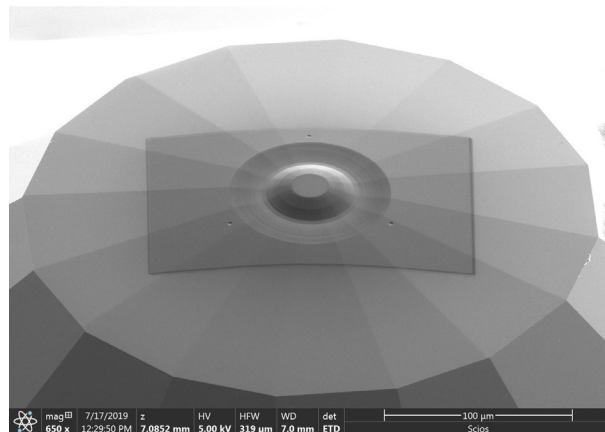
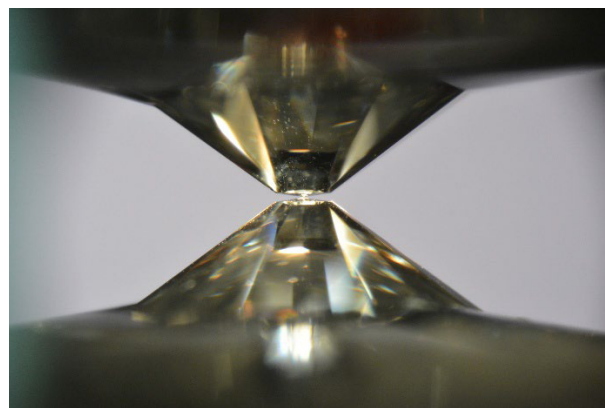
「地球の窒素は失われたわけではなかった」というのが、本研究の結論です。窒素は何十億年もの間、核に閉じ込められたまま見え隠れしていたのです。この発見は、地球の歴史が岩石や化石だけでなく、想像を絶する圧力の下で原子が有する嗜好性(好き嫌いの性質)の中にも記録されていることを物語っているのです。(数値系地球科学部門: 土屋 卓久)

Nitrogen-carbon-argon features of the silicate Earth established by deep core-mantle differentiation. Shengxuan Huang and Taku Tsuchiya, Earth and Planetary Science Letters, 657, 119291, doi:10.1016/j.epsl.2025.119291

地球中心を超える超高压力領域で 9つの物質の圧縮特性を決定

地球に限らず惑星の内部は高压力状態にあります。中心に近い惑星深部ほど高い圧力になり、地球の中心圧力は365万気圧に達します。一方、木星のようなガス惑星や天王星のような氷惑星、あるいはスーパーアースと呼ばれる岩石型の系外惑星など地球の何倍もの質量をもつ惑星深部は、地球の中心圧力を大きく超える圧力の世界が広がっています。物質に圧力をかけると単純に縮んでいくだけではなく、元素の並び方(結晶構造)や物理的性質が大きく変化します。高压実験を行って惑星深部の環境を実験室に再現することで、惑星の内部で何が起きているのかを調べることができますが、惑星のより深い部分を調べるにはより高い圧力を発生させる必要があります。

静的圧縮による高压実験装置としてはダイヤモンドアンビルセル(図1)が広く利用されています。しかし一般的なダイヤモンドアンビ



【図1】(上)ダイヤモンドアンビルセル。写真は試料設置前の上下のダイヤモンドのみの状態を横から見たもの。(下)集束イオンビーム加工装置(FIB)で加工したダイヤモンドアンビルの先端の電子顕微鏡写真。中央凸部の先端の平らな部分(キュレット部)のサイズは20 μm (マイクロメートル)になっている。(1マイクロメートルは1ミリメートルの1/1000)

ルセルによる発生圧力は300万気圧程度が限界であり、さらなる高压力の発生には技術開発が必要でした。

また、静的圧縮実験においてどの程度の圧力が達成できているかを決定するには、圧力標準物質の状態方程式を用いますが、実験例の極めて少ない数百万気圧領域ではほとんどの物質の状態方程式が十分に分かっていませんでした。このため、どの圧力標準物質を選択したかで結果が異なり、圧力標準物質の相互の整合性がない、といった難しい問題がありました。

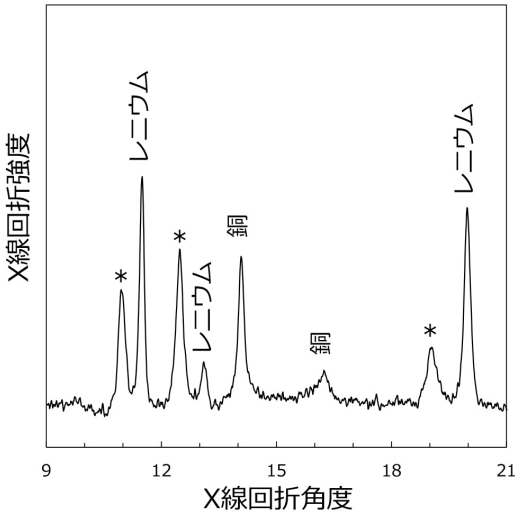
本研究では、この2つの問題を解決するために特殊な先端形状を持つダイヤモンドアンビルを用いて地球中心圧力を超える静的圧縮実験を可能にし、9つの物質について300~400万気圧領域での状態方程式を決定しました。図1(下)は、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター設置の集束イオンビーム加工装置(FIB)でダイヤモンドを加工して作製された特殊な先端形状の一例で、試料を加圧する微小な突起上の構造があることが特徴です。先端の平坦部分はわずか20マイクロメートルで、この微小な先端形状が圧子となり、400万気圧を超える圧力発生が可能となりました。また、加圧される試料もFIBで数マイクロメートル程度の円盤状に微細加工されており、さらに本研究では圧力標準物質となる複数の試料を同時に充填しています(図2)。加圧された試料は大型放射光

施設SPring-8のビームラインBL10XU およびBL37XU において粉末X線回折測定(図3)を行い、格子体積を決定しました。様々な試料の組み合わせで圧縮実験を繰り返すことで、9つの物質の体積体積関係を明らかにしました(図4)。この体積一体積関係は、圧力の絶対値とは別に、ある物質Aがある体積まで圧縮されているときに、同じ状態にある別の物質Bの体積はどの程度まで圧縮されているか、という相互の関係を示すものです。これによって、既存の圧力標準物質による“圧力計”が相互に整合的であるかどうかの判断が可能になります。その一例として、動的圧縮実験において最近提案されていた銅、鉄、白金、金についての状態方程式(=圧力計)が、銅、鉄、金の3つは誤差の範囲内で整合的ですが、白金は400～500万気圧の圧力領域において約7%程度の大きい圧力を与えていたことが明らかとなりました。

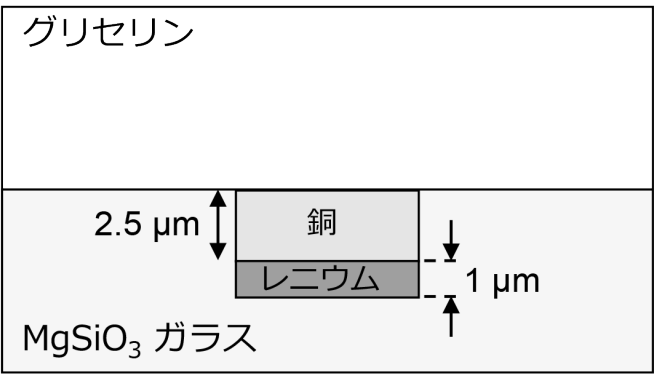
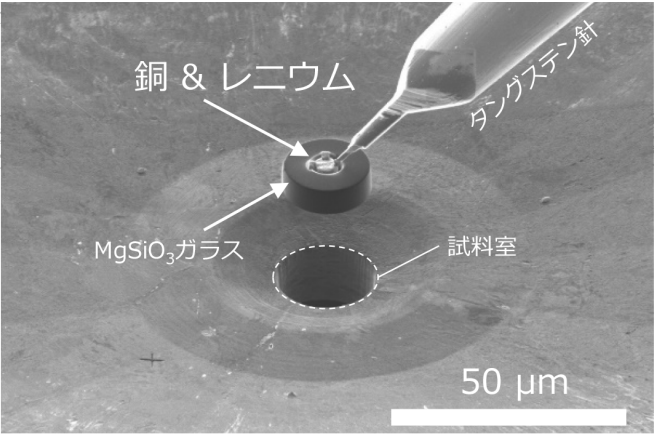
また、銅の状態方程式を基準として、9つの物質で相互に整合的な状態方程式を決定しました(図4)。これらの9つの状態方程式すなわち圧力計は、本研究の高圧実験の測定結果により校正されているため、地球中心圧力を超える400万気圧の圧力領域において圧力値の矛盾が解消されています。また、この実験で求めたレニウムの状態方程式は第一原理計算による結果と良い一致を示すことが確認され、より信頼性の高い圧力計として提案されています。

今回得られた結果は地球中心圧力を超える圧力領域での高圧実験において「今どれだけの圧力が発生できているのか？」という疑問に答えるものであり、研究を行う上での重要な基盤となります。今後、この実験・測定技術を惑星構成物質に適用することで、より詳細な惑星深部構造の議論が可能になると期待されます。愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターでは 2024年度より超高圧科学部門を立ち上げ分野横断的な研究を推進することを目的として活動しています。本研究が対象とした数百万気圧の圧力領域は、高圧超伝導研究においても様々な物質が超伝導状態を発現する重要なフロンティアとなっています。今回の成果は、巨大惑星深部科学に限らず、高圧下における超伝導研究や電子物性研究といった物性物理学分野においても活用されることが期待され、重要な情報および実験技術を提供するものです。(超高圧科学部門: 境 毅)

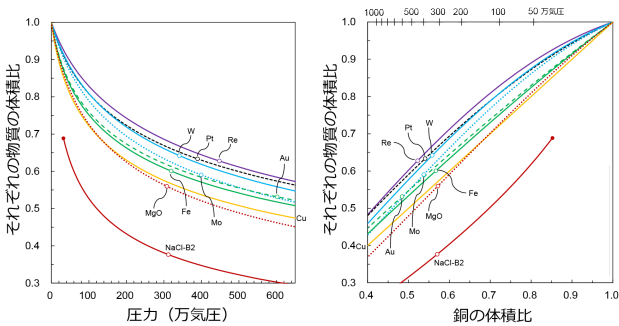
The equations of state of nine materials up to 0.43 TPa for extreme pressure science. Takeshi Sakai, Hirokazu Kadobayashi, Yuki Nakamoto, Haruhiko Dekura, Naoki Ishimatsu, Saori Kawaguchi-Imada, Yusuke Seto, Oki Sekizawa, Kiyofumi Nitta, Katsuya Shimizu, Communications Materials, 6, doi:10.1038/s43246-025-00792-5



【図3】430万気圧における銅とレニウムのX線回折パターン。*印は試料の周囲にあるレニウムガスケットからの回折線。



【図2】(上)レニウムガスケットに開けた試料室の穴に試料を充てんする直前の電子顕微鏡写真。(下)試料部分の断面模式図。この実験ではマグネシウムケイ酸塩 (MgSiO₃) ガラスに埋め込んだ銅とレニウムを試料室穴に挿入した後、隙間を埋めるようにグリセリンを充填した。



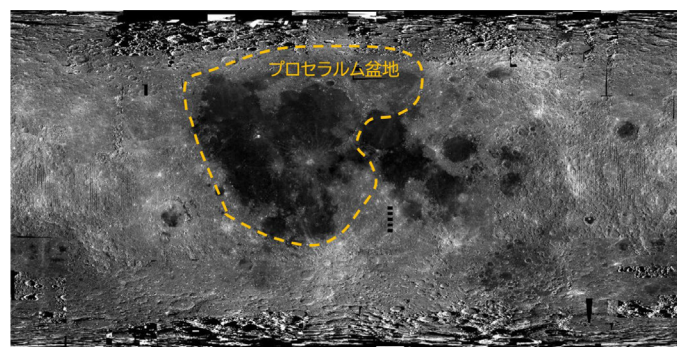
【図4】(左) 9つの物質の圧縮曲線(=状態方程式)。(右)銅の体積比に対するそれぞれの物質の体積比。体積比は大気圧での体積に対する比率。それぞれの曲線上の白抜き丸は本研究における最高圧力でのデータ点を示す(銅と金を除く)。

月の火山活動の起源を シミュレーションによって解明

私たちが夜空を見上げると、満月の月では「うさぎが餅をついて」黒っぽい模様が見えます。これはかつて月で噴出していたマグマの名残であり、これまでの調査から、月には活発な火山活動があったことが知られています。特に我々が「うさぎ」と「臼」と認識する場所はプロセラルム盆地と名付けられており、その大部分を占める地域(図1)では火山活動は約40億年前から活発になり、約35億年前にピークを迎えた後も数十億年間継続したことが観測により明らかになっています。サイズが小さく内部が冷えやすい月という天体において、これほど長期的に火山活動が続いた理由はこれまで明らかになっていませんでした。

本研究では、火成活動(マグマの生成・移動の効果)をマントル対流モデルに反映させた2次元モデルを用いて月内部の進化をシミュレーションすることで、月で発生していた30億年にも及ぶ長期的な火山活動の再現に成功しました。加えて、マグマの上昇メカニズムが時代とともに移り変わることで、およびマントル上部に放射性元素濃集域が存在する場合にはその地域下で局所的に長期的な火山活動が維持されることがわかりました(図2)。

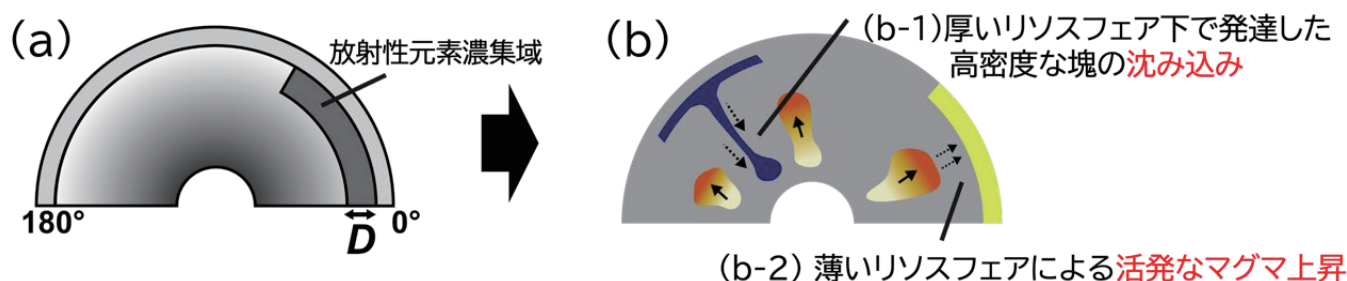
本研究によって構築されたモデルでは、まず初期の火山活動は深部に存在した放射性元素がマントル内部を温めることによって生成されたマグマが自ら上昇することで引き起こされます(図3、5.6億年)。このマグマはマグマに濃集する性質を持つ高密度物質を深部からマントル上部に運び、マントル上部にはそのような高密度物質が濃集した領域が形成されます(図3(d)、7.6億年の矢印)。そのような高密度な塊は次第にその重さによって(重力的不安定性)、再び深部へ沈み込んでいきます(図3(d)、11.2億年の矢印)。この沈み込みによって誘発された受動的な上向きの対向流がマグマ上昇を駆動し、比較的新しい時代の火山活動を引き起こしている



【図1】月表面のマップ。黄色の点線で囲われた地域がプロセラルム盆地と言われている場所。写真はGlobal Orthomosaic 474mであり、観測元は日本の宇宙科学研究所(ISAS-JAXA)による月周回衛星「かぐや」(JAXA-SELENE TC Instrument Team)、作成・掲載元はUSGS Astrogeology Science Center。

ことがわかりました。このような火山活動は、特に初期条件としてマントル上部に放射性元素濃集域を設定した場合にはその地域下で局所的に顕著に見られることもわかりました(図4)。

本研究によって、たとえ小さい天体である月であっても内部は長期的に流動的な環境であった可能性を示しました。このよう描像は、月と同じくサイズが小さいながら活発な火山活動が存在していた過去を持つ水星などの惑星の内部進化の理解に寄与できます。また、地殻直下に放射性元素に富んだ領域が存在し、それが月全体にわたる内部の不均質性と密接に関係している可能性を提示しました。今後、世界各国で月探査が活発化することが予想されています。NASAのアルテミス計画や中国の月面着陸プロジェクトなど様々な国でプロジェクトが発表されており、日本でもインド宇宙機関(ISRO)との共同プロジェクトによる月極域探査機(LUPEX)がここ数年以内に打ち上がる予定です。そのような月探査におけるサイエンス・ターゲットの選定において、本研究が示唆したマントルの状態の評価は、日本が現在掲げている「月面での科学研究・技術実証



【図2】(a) 初期条件として与えた放射性元素濃集域の例。(b) 長期的な火山活動を駆動する後期のマグマ上昇メカニズム。(b-1) 初期の火山活動で形成された高密度な塊が沈み込むことによってできた対向流がマグマ上昇を駆動。(b-2) マグマ上昇は放射性元素によってリソスフェアが薄くなった地域にて顕著。

PRIUS NEWS

PRIUS利用者の声

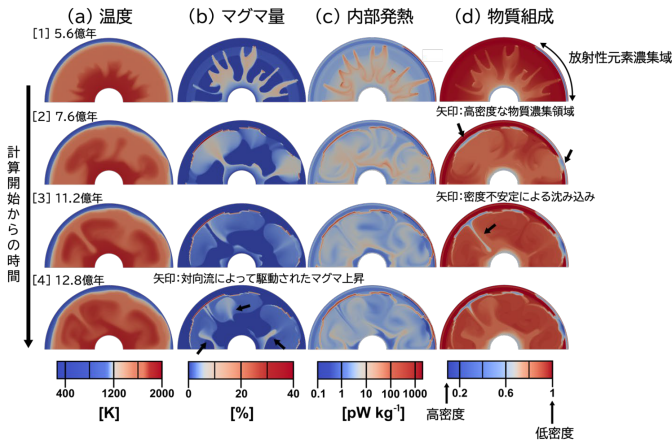
ケイ酸塩メルトおよびガラス中の鉄のスピン状態の研究

増野 いづみ

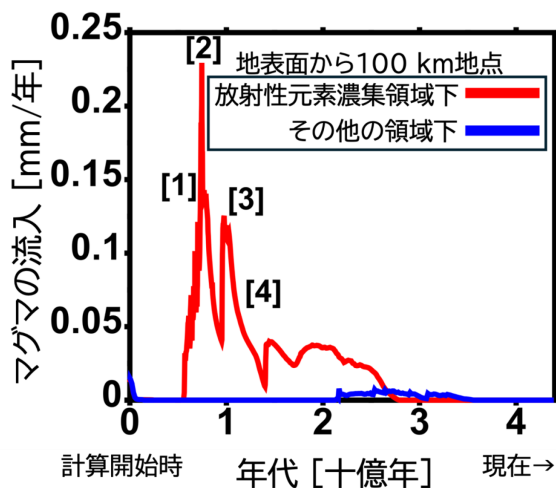
(岡山大学惑星物質研究所・特任助教)



岡山大学惑星物質研究所の増野いづみと申します。私はダイヤモンドアンビルセル高压発生装置(DAC)を用いて地球の下部マントルに存在しうるとされている物質の物性に関する研究を行っています。PRIUSの若手提案共同研究(設備利用型)によるサポートにて、集束イオンビーム(デュアルビーム)加工装置(FIB)、DAC用のCO2レーザーおよびファイバーレーザー加熱システムを利用させていただき、下部マントル条件下におけるケイ酸塩メルトおよびそのアナログ物質であるガラス中の鉄の挙動、特に鉄のスピン状態とその物性に関しての実験を実施しました。その他にもDAC中の試料の圧力測定に顕微ラマンや近赤外レーザーラマン分光システムなども併せて使用させていただきました。私が学生であった時からGRCの研究環境にとても興味がありましたが、DACの高圧回収試料観察を効率的に行うことが出来る場所を探していたところ、PRIUSに行き着きまし



【図3】シミュレーションによる月内部の変化。図中の[1]-[4]の時代は図4の[1]-[4]と対応している。



【図4】シミュレーションによって示された地表面から深さ100km地点のマグマの流入(火山活動の指標)。図中の[1]-[4]の時代は図3の[1]-[4]と対応している。

ミッションに関するフィジビリティスタディテーマ」にて打ち出している「月震計ネットワークによる月内部構造の把握」の科学的意義を高める成果といえます。(数値系地球科学部門: 亀山 真典)

Long-Lasting Volcanism of the Moon Aided by the Switch in Dominant Mechanisms of Magma Ascent: Role of Localized Radioactive Enrichment in a Numerical Model of Magmatism and Mantle Convection. Ken'yo U, Masanori Kameyama, Gaku Nishiyama, Takehiro Miyagoshi, and Masaki Ogawa, Geophysical Research Letters, 52, e2025GL115215, doi: 10.1029/2025GL115215

た。GRCの実験室は整然として動線がよく、初めての滞在でもとても利用しやすく感じました。2025年度初めには、PRIUSのサポートにてDAC回収試料分析を行なったペリドタイトガラスの高圧電気伝導度および放射光メスバウアー測定実験の結果に関して国際雑誌に論文として発表することができました(Mashino et al., 2025, GRL)。

私が訪問した際には、何かしらのセミナーやワークショップが開催されており、オープンで活気ある様子が短い滞在でも伺い知ることができました。年度末に開催されているPRIUSシンポジウムでも幅広い分野の研究発表があり、とても良い刺激になりました。滞在中、実験の合間にはGRCの先生方・ポスドクの皆様ともお話しする機会もあり、有意な訪問となりました。最後になりますが、このような共同研究環境を提供してくださった関係者の方々に感謝申し上げます。特に受け入れの境先生には実験、測定、手続き等々、多大なるお力添えをいただきました。また井上先生にはFIB装置の使用に関して大変お世話になりました。この場をお借りし重ねてお礼申し上げます。

火成活動とマントル対流による月の内部進化のモデリング

于 賢洋

(東京大学大学院総合文化研究科
令和7年3月博士後期課程修了)

2022年4月より3年間、博士課程においてPRIUS共同研究としてGRCの亀山真典教授と共に、数値シミュレーションを用いた月内部の進化の解明について研究してきました。後述いたしますが、亀山教授のみならず、PRIUSの事務の皆さまやリサーチ・アドミニストレーター(URA)の方には様々な場面においてサポートいただき、本当に感謝しております。

私の博士課程における研究テーマは「火成活動とマントル対流による月の内部進化のモデリング」です。月は天体サイズが小さく岩石惑星と比較して内部進化が単純であり、地球から最も近い天体であるゆえ、観測事実が充実しています。このような月を対象とした研究は



岩石惑星の形成・進化の理解に向けた第一歩として期待されています。私の博士課程では亀山教授との共同研究により、月マントルの進化を反映している観測事実、具体的には火山活動史と半径変化史(月全球の膨張と収縮)に注目し、これらの両方を説明できる数値モデルを構築することで、上記の研究目標を達成しました。特に、本研究では天体内部でマグマが生成され、それが浮力によって上昇する過程(火成活動)を月内部モデルで初めて考慮したことが特色であり、それによって2つの観測事実を同時に説明可能になったことが成果として挙げられます。本研究により今後、岩石惑星内部におけるマグマ上昇プロセスの理解がより深まるものと考えています。

この度、PRIUS共同研究での成果により博士課程在学中に2本の論文を国際誌に掲載し、博士号取得時に一高記念賞という賞を受賞することができました。これは亀山教授のご指導あってこそだと考えております。また、幾度となくミーティングやPRIUSシンポジウムにて愛媛大学に足を運ばせていただきました。その都度事務の皆さまには大変お世話になりました。シンポジウムにて発表した際には教員の皆さまから多くのフィードバックをいただきました。加えて、プレスリリースの際にはURAの方と何度もやり取りをさせていただき、出版に至るまでご尽力いただきました。このようにPRIUSの皆さまには多方面にてお力添えをいただきました。この場をお借りして、改めて厚く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。



NEWS LETTER

vol. 71 2025年6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 1
TEL 089-927-8165 / FAX 089-927-8167
<https://www.grc.ehime-u.ac.jp>

Instagram



@PIAS_EHIME_U