

平成27-31年度 文部科学省 科学研究費助成事業  
新学術領域研究

# 核-マントルの相互作用と共進化 ～統合的地球深部科学の創成～

## CoreMantle evolution

02-09 各研究班の研究トピック

02-03 核-マントル境界 (CMB) における物質相互作用  
～CMBの化学的なインターフェースとしての役割～

04-05 かんらん岩のオスミウム同位体から探るマントル内部の化学構造  
～南太平洋イースター島、タヒチ島の野外調査報告～

06-07 溶融した鉄とケイ酸塩間の希ガスの分配実験  
～地球深部の始原的地球化学リザーバーの在処を探る～

08-09 核マントル相互作用のメカニズムを探る  
～地球の核を味わうしゃぶしゃぶ法～

10-14 イベント報告

15 新人紹介

16 受賞報告・国際交流・編集後記



芳野 極

岡山大学  
惑星物質研究所

## 核 - マントル境界 (CMB) における物質相互作用

我々の住む地球の内部には主に鉄を主体とする金属の核が中心部にあり、岩石でできているマントルがその周りを取り囲んで存在しています。この成層構造は 46 億年前に岩石と金属が入り混じった未分化な隕石が集積して惑星が形成される過程の初期に、密度の大きな溶融鉄が岩石から重力分離して形成されたと考えられています。核の外側の部分は外核と呼ばれ、軽元素を含んだ溶融鉄合金からなっており、ダイナモ運動により地球磁気圏を形成して太陽風や宇宙線から地球の生命を守っています。一方、岩石のマントル部分は高温の核と低温の表面の温度差に駆動され対流しており、地震や火山活動を引き起こし、地上に住む我々の生活にも大きな影響を与えています。このように、核とマントルは地球の中で別々の役割を果たしていますが、重力的に分離し安定な状態にある現在の核とマントルの間で大規模な相互作用が起きているのかどうか実感することはできません。

我々が核とマントルの相互作用を探索するためには、地表で手に入る岩石から情報を引き出すことが有効な方法です。太平洋上の火山島などの一部の火山ではマントルの最下部からブルームと呼ばれる上昇流が上がってきた物質が融解して噴出していると考えられ、その噴出物である海洋島玄武岩には、金属核とマントルの相互作用の痕跡が含まれていることが期待されています。最近の化学分析の発展によって、核に由来した岩石を探索できる高精度の測定が可能になってきました。これにはタングステン (W) 同位体比を利用します。ハフニウム (Hf) という元素は金属には分配されないという性質があり、地球誕生初期に核が分離したとすると、核には Hf の放射壊変によって生まれる

$^{182}\text{W}$  が枯渇します。つまり、核とマントルが相互作用しているならば、核 - マントル境界 (CMB) 由来の岩石は  $^{182}\text{W}$  が少ない特徴を持つことが期待されます。最近の研究では、海洋島玄武岩の多くは、顕著に  $^{182}\text{W}$  が枯渇していることが分かってきたことから、核とマントルが物質的に相互作用している可能性が出てきています (ニュースレター No. 8、6-7 ページ参照)。

CMB は地球内部最大の不連続面であり、核とマントル間の物質のやりとりが可能な唯一のインターフェース (境界面) です。ここではマントル物質中に核の物質が取り込まれる可能性がありますが、本当に CMB においての相互作用が可能であるかは検証する必要があります。それでは、密度成層した CMB でどのようにして核の物質がマントルに漏れてくるのでしょうか? CMB における核を構成する元素、物質がマントルに漏れる過程は、界面エネルギーに駆動された浸透メカニズムと濃度勾配に駆動された元素拡散過程が考えられます。下部マントルを構成する鉱物であ

るフェロペリクレス ( $\text{Mg,Fe}$ )O については、常圧でも安定な鉱物であり実験が容易なことから、これらの過程に関する 2 種類の研究がこれまでに行われてきました。1つは、フェロペリクレスの単結晶に溶融鉄を接した実験で、この実験により溶融鉄がフェロペリクレスに浸透していくことが確認されました。もう1つは、フェロペリクレスの端成分である  $\text{MgO}$  の多結晶体に W の金属を接した実験で、粒界を高速で W が拡散することが示されました。しかしながら、これらの実験は下部マントルで圧倒的に多い主要鉱物であるブリッジマナイトを対象としていないため、実際にどの程度金属核物質が漏れているのかは正しく評価できない状況でした。

我々は CMB で安定に存在する可能性が高いケイ酸塩鉱物のブリッジマナイトまたはブリッジマナイトとフェロペリクレスを両方含む岩石 (ポストスピネル) を用いて、これと接する溶融鉄の成分の浸透や拡散が起こるのかを 2 種類の実験によって検証しました。

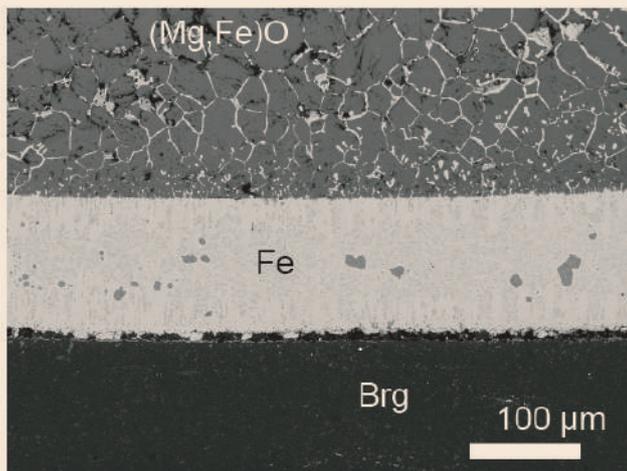
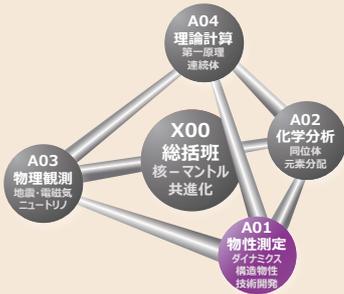


図1. 鉄合金メルトの下部マントル物質への浸透実験の回収試料の後方電子散乱像。フェロペリクレス ( $\text{(Mg,Fe)O}$ ) には鉄合金メルト (図中の白い部分) が粒界を浸透しているのに対し、ブリッジマナイト (Brg) に対しては鉄合金メルトの浸透は起きていない。

研究項目トピック



## 研究項目A01: 物性測定

核とマンツルの構造と運動を支配する鉱物学的・物質科学的実験データを、地球深部に相当する高温高压条件のもとで実験的に収集します

### ～ CMB の化学的なインターフェースとしての役割～

実験はマルチアンビル型高压装置を用いてブリッジマナイトが安定な圧力 25 GPa で行いました。1つ目の実験では、溶融鉄合金を (Mg,Fe)O とポストスピネルで挟んで浸透が起こるか検証しました。その結果、先行研究で浸透が報告されたフェロペリクレスに対しては粒界を通じて溶融鉄が浸透することが再確認された一方で、ブリッジマナイトとポストスピネルに対しては全く浸透は起こりませんでした(図1)。このことは、ケイ酸塩鉱物であるブリッジマナイト-金属界面の界面エネルギーが大きいことを示しており、界面駆動による浸透では、核の物質はケイ酸塩を主体とするマンツルに付加することは難しいことが分かりました。

2つ目の実験では、ポストスピネルを W とレニウム(Re)で挟んで、高温で粒界拡散が起こるのかを検証しました。W と Re はともに親鉄元素(岩石よりも金属鉄に選択的に分配される性質を持つ元素)であり、このような元素の下部マンツルの岩石中の拡散挙動は知られていませんでした。多結晶体中に W、Re をトラップするための白金(Pt)をちりばめた試料を用意しました。Pt 粒子中の W、Re の濃度と拡散源からの距離との関係をレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法(LA-ICPMS)で測定することによって、粒界拡散係数を求めました。実験は温度 1873K から 2173K の範囲で行い、温度依存性を決定しました。その結果、強親鉄元素である Re に比べて弱い親鉄性を持つ W はポストスピネル中を高速で粒界を拡散することが分かりました。結果をもとに CMB における温度(4000K)での拡散係数を計算すると、CMB では W のマンツルへの拡散が効果的に起こることが予想されました。また、酸化状態ではより多量の W が拡散することも

分かりました。このことから、 $^{182}\text{W}$  に枯渇した海洋島玄武岩の同位体組成の特徴は粒界拡散によって核からもたらされた W に由来する可能性があることが初めて示されました。海洋島玄武岩は過去にマンツルに沈み込んだプレート(スラブ)の成分を含んでいると考えられています。このことから、酸化物質からなる沈み込んだスラブが CMB に滞留している間に W を大規模に拡散によって取り込んだ可能性も考えられます(図2)。

多くの地球化学者は地球形成初期のマンツルの化学組成を持った始原的なリザーバー(貯蔵庫)が地球史を通じて下部マンツルに保持されていると考えています。一方で、地球物理学者はマンツル対流モデルの結果から、マンツルはよくかき混ぜられておりそのようなリザーバーは存在しないと考えています。この不一致を説明できる BEAMS モデルも提唱されていますが(詳細はニュースレター No.7 をご覧ください)、柔らかい部分に囲まれた硬い部分

が下部マンツルに存在しうかは実験的には検証されていません。最近、Rizo et al. (2016) は、いくつかの海洋島玄武岩が正の W 同位体異常を持つことを明らかにし、始原的なリザーバーが保持されている可能性を示しました。これは地球化学者のコンセンサスと一致したことから、センセーションを巻き起こしました。ところが、この分析結果には問題があることが指摘され、実際、現代の海洋島玄武岩で正の同位体異常を持つ結果は、その後、一つも報告されてきていません。一方で、負の  $^{182}\text{W}$  同位体異常と  $^3\text{He}$ (ヘリウム3)の同位体異常に相関があることが報告されています。もし、 $^3\text{He}$  が W と共に外核からマンツルに拡散過程によって供給されるのであれば、始原的なリザーバーが下部マンツルに存在しなくても核-マンツル相互作用だけで海洋島玄武岩で報告されている同位体異常を説明できるかもしれません。これを検証するためには、今後希ガスの拡散の研究も進めていく必要があります。

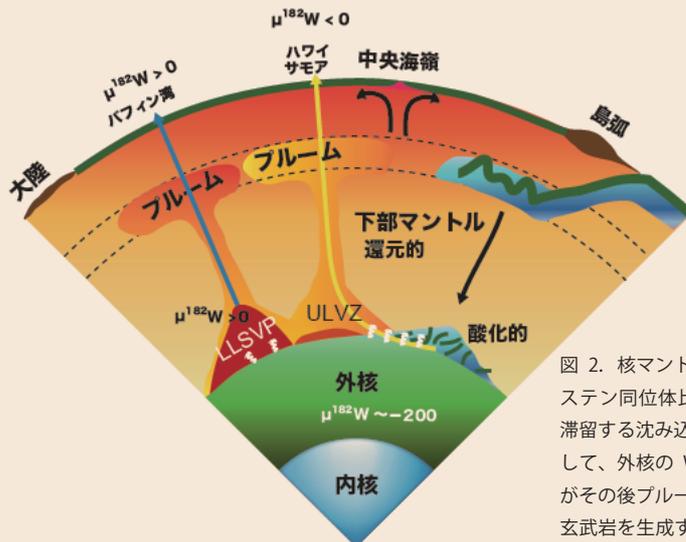


図2. 核-マンツル相互作用によるタンゲステン同位体比の進化モデル。CMB に滞留する沈み込んだ酸化的なスラブに対して、外核の W が拡散する。この物質がその後ブルームにより上昇し、海洋島玄武岩を生成する。低い  $^{182}\text{W}$  同位体比 ( $\mu^{182}\text{W}$ ) を持つ外核の影響を受け、海洋島玄武岩は負の  $^{182}\text{W}$  同位体異常を示す。



**藤田 遼**  
東京工業大学  
理学院  
地球惑星科学系



**秋澤 紀克**  
東京大学  
大気海洋研究所



## かんらん岩のオスミウム同位体から探るマントル内部の化学構造

地球全体の大部分を占めるマントルは、海洋域においても数キロメートルと厚い地殻に覆われているため、人工的な掘削によってマントル構成岩石を直接採取することは未だ達成されていません。そのため、マントルの化学組成や不均質構造を理解するための物質的な手がかりとして、マントルの部分融解液（マグマ）が冷え固まった玄武岩が広く用いられてきました。特に、上部マントル物質の上昇に伴う減圧融解によって形成された中央海嶺玄武岩と、より深部から上昇してきた高温マントルブルームが融解して形成された海洋島玄武岩の比較から、マントルブルームの発生源と考えられるマントル最下部の化学組成は、上部マントルの平均的な化学組成と異なる可能性が指摘されています。

それに対して、マントルの化学組成を推定するために用いられる物質には、深海性かんらん岩やオフィオライト、マントル捕獲岩のように、何らかの地質学的過程を経て地表にもたらされたかんらん岩があります。玄武岩がマントルの部分融解液であるのに対して、かんらん岩はその溶け残り物質と考えられるため、かんらん岩から得られる相補的な情報を活用して、マントル内部の不均質構造に制約を与えることは非常に重要です。特に、海洋島に噴出するマグマによって地表へ運ばれた海洋島マントル捕獲岩は、海洋島玄武岩を生成したマントルブルームに由来する可能性があり、その場合、マントル最下部の化学組成や同位体組成を直接反映することが期待されます。しかし、産出地域が限られること、試料サイズが小さいこと、液相濃集元素に乏しく二次的な変質の影響が大きいことなどの理由から、多くの海洋島マントル捕獲岩は、マントルブルームと成因的に無関係な海洋リソスフェアの断片であ

ると見なされ、詳細な地球化学的研究は敬遠されてきた現状があります。

そこで我々は、かんらん岩に含まれる強親鉄性元素の存在度と強親鉄性元素の一つであるオスミウムの同位体比に着目して研究を進めています。これらの元素は固相濃集性が極めて高く、マグマやその他流体が関与した変質作用の影響を受けにくいいため、かんらん岩の初源の情報色が濃く記録されています。現在は、最も活動的なホットスポットとして知られるハワイ諸島に産するマントル捕獲岩の解析を中心に進めていますが、マントル最上部に由来する深海性かんらん岩やオフィオライトを構成するかんらん岩（蛇紋岩）に比べて、低い 187 オスミウム同位体比を持つ試料が多い傾向が見出されています。もし、このような傾向がその他のホットスポットでも普遍的に見られるならば、マグマ研究から議論されてきた上部マントルと最深部マントルの組成差や不均質性の形成過程について、異なる視点から制約を与えることが可能となります。そのため、今回は太平

洋域の代表的ホットスポットとして知られるイースター島、タヒチ島産のかんらん岩捕獲岩サンプリングに向けた調査を行いました。

イースター島は東太平洋海嶺から約 350 キロメートル東にある島で、ナスカプレート上に存在します（図 1）。現在マグマ活動はイースター島の西側海域に見られ、海嶺の非常に近くに存在するホットスポットであることが特徴です。イースター島は主に、3 つの楯状火山（ラノカウ火山、テレバカ火山、ポイケ火山）によって形成されており、それぞれナトリウムやカリウムに比較的富んだソレライト～アルカリ玄武岩系列のマグマ活動が知られています。また、イースター島に見られる岩石は玄武岩から流紋岩まで多様であり、比較的浅いマグマだまりでかなりの結晶分化作用を受けていると考えられています。島の全長は 20 キロメートルほどと小さく、そのほとんどが溶岩流でできており、マグマの結晶化年代は 100 万年以下と非常に新しい島です。

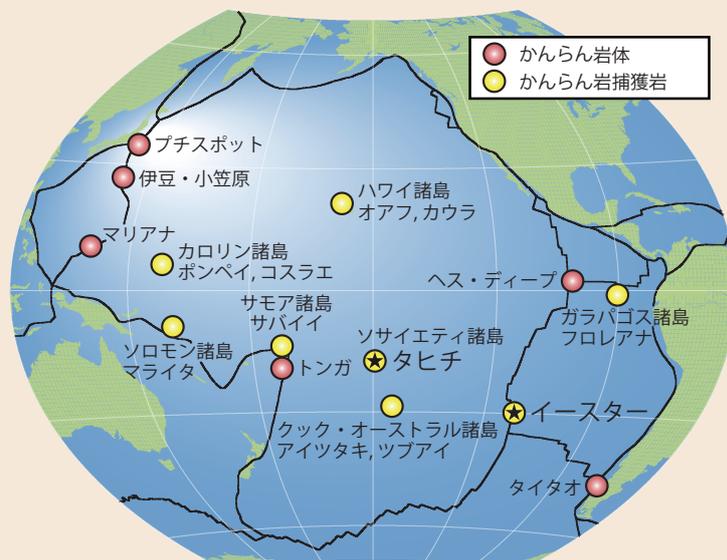


図 1. タヒチ島、イースター島の場所とかんらん岩の産出地域。

研究項目トピック

石川 晃  
東京工業大学  
理学院  
地球惑星科学系



## 研究項目A02: 化学分析

マンツル由来物質や高圧合成試料の微小領域分析により、核-マンツル間の元素分配や同位体分別を制約します

### ～南太平洋イースター島、タヒチ島の野外調査報告～

イースター島は巨大な石像であるモアイ像が数多く存在する島として有名であり、その考古学的価値の高さから島のほとんどが世界遺産に指定された国立公園となっているため、地球科学的な研究例は非常に少ないのが現状です。今回の調査は、ラパ・ヌイ博物館、ラパ・ヌイ国立公園の許可を得るため、チリ・カトリック大学のユージェニック・ベロソ教授との共同研究として、学生のパウリナ・ベルガラさんの協力のもと、現地研究者、住民に対してプレゼンテーションを行うところから始まりました。その結果、調査活動を行う許可は無事に得ることができましたが、サンプルの持ち帰りについては、詳細な試料採取候補地の写真と GPS によって得た緯度/経度情報を提出した後に審査を仰ぐ必要があり、滞在中に試料採取を行うことはできませんでした。また国立公園内では、ハンマーを使って岩石を割る行為自体が禁止されているため、露頭表面を観察することしかできませんでした(図2)。訪れたすべての露頭における丹念な観察にもかかわらず、かんらん岩捕獲岩を発見するには到りませんでした。数か所の露頭でかんらん石を多く含む溶岩を見だし、かんらん石捕獲結晶が含まれている可能性があるサンプル候補地として申請を行いました。

タヒチ島は南太平洋にある5つの火山列のうちの一つであるソサイエティ諸島に属する島であり、太平洋プレート上に存在します(図1)。現在の火山活動はタヒチ島から50キロメートル南東の海底に確認されています。タヒチ島はソサイエティ諸島の中では比較的新しくマグマの結晶化年代は古くても170万年ほどです。タヒチ島の火山は活動時期によって噴出するマグマの組成、特にカリウムやナトリウムなどのアルカリの量が異なることが知られて



図2. イースター島での調査風景。

おり、これらはマグマの由来深度が異なっている結果と考えられています。また、溶岩流に多くのかんらん石斑晶がみられることも特徴です。タヒチ島はイースター島と比べると植生に富み、島全体に森林が広がっているため、溶岩流は主に大きな河川によって削られた断崖にて観察することができます。また、タヒチ島ではこれまでに島の北側にあるいくつかの大きな河川の転石として、かんらん岩捕獲岩が報告されています。そのため、今回は過去の報告を参考にしつつ、島全土にわたって、河川沿いに調査を行いました。調査の結果、以前報告のあった河川では多くのかんらん岩捕獲岩が確認できました(図3)。また一部の地域では、溶岩流の露頭にも確認することができました。さらに、試料数は少ないですが、かんらん岩捕獲岩がこれまで報告されていない島の西側にある河川沿いにも確認できました。

今回タヒチ島の調査では研究に十分な量の試料採取ができましたが、イースター島の調査は規制が非常に厳しく、

調査申請においても予期できない障害が多かったのが印象的でした。しかし、イースター島が代表的なホットスポットの一つとして貴重な研究対象であることを考慮すると、今回の訪問で地質調査許可の申請が無事得られたことは地球深部科学の発展にとって重要な一歩であったかもしれません。



図3. タヒチ島産かんらん岩捕獲岩。



角野 浩史・田中 友崇

東京大学  
総合文化研究科

## 溶融した鉄とケイ酸塩間の希ガスの分配実験

希ガス(貴ガス)は、ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドンからなる 18 族元素の総称です。その名のとおり、ほとんど化学反応しない点で他の元素と一線を画し(貴)、地球全体では非常に少ない(希、稀)という特徴を持っています。希ガスの安定同位体のうち、ヘリウムの同位体  $^4\text{He}$  やアルゴンの同位体  $^{40}\text{Ar}$ 、キセノンの同位体  $^{129}\text{Xe}$  などには、放射性同位体である  $^{235}\text{U}$  や  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{129}\text{I}$  などの壊変で生じた放射壊変起源同位体が含まれている一方、放射壊変やその他の核反応によりほとんど生成しない  $^3\text{He}$ 、 $^{36}\text{Ar}$ 、 $^{130}\text{Xe}$  などは、ほぼ全てが地球が形成したときから存在している始原的な同位体です。化学反応をしないため、ホストとなる物質や温度圧力条件が変化しても同位体比は影響を受けず、その起源を反映した同位体比が保存されやすいこと、存在量が少ないため放射壊変起源同位体の付加を敏感に反映して同位体比が変動することから、希ガスは地球内部の化学的構造を探る上で極めて有用な地球化学的トレーサーです。

地球形成当初のヘリウム同位体比 ( $^3\text{He}/^4\text{He}$  比) は  $120 R_A$  (ただし  $R_A$  は大気中のヘリウム同位体比  $= 1.4 \times 10^{-6}$ ) であったことが、隕石などの分析から分かっています。一方で現在の地殻を構成している岩石は、溶融したマグマとして上昇してきた際に、もともと含まれていたヘリウムが大気中に逃げてしまい(このように、揮発性の高い物質が失われることを脱ガスといいます)、その後岩石中のウランやトリウムのアルファ壊変により  $^4\text{He}$  が生成・蓄積した結果、 $0.02 R_A$  以下という低い値を持ちます。またマントルは、やはりウランやトリウムが含まれているために  $120 R_A$  より低くはなっているものの、大気や地殻より高いヘリウム

同位体比を保っています。これは地殻と異なり、もともと含まれていた始原的なヘリウムが完全に脱ガスせずに残っているためです。このマントルのヘリウム同位体比は中央海嶺玄武岩を分析して知ることができますが、地球のどこでもほぼ一定の、 $8 R_A$  という値が得られています。これと、地震波などの物理観測で明らかにされている大規模な循環(ニュースレター No.7)、マントル対流の計算機シミュレーション(ニュースレター No.4)などから、マントルの大部分はよく混ざっており、均一なヘリウム同位体比をもつと考えられています(図1)。

ところがハワイ諸島などのホットスポットと呼ばれる火山では、 $8 R_A$  より高いヘリウム同位体比が観測されます。これは火山活動を引き起こしているマントル深部からの上昇流が、対流しているマントルに比べて、より始原的なヘリウムを多く残している場所から上昇してきたことを意味します(図1)。同様に他の希ガスの同位体比からも、地球史の早い段階でマントル対流から隔離された始原的な部分が存在していることが要請されます。この地球化学リザーバー(貯蔵庫)として、近年有力な候補の一つとして核が考えられています。溶融した初期地球の内部で、鉄を主とする重い金属が中心に向かって沈降して核とマントルが分離したときに、始原的なヘリウムの一部は核に取り込まれます。その後マントルは地殻の形

成に伴い大規模に脱ガスし、始原的なヘリウムの大半を失ったと考えられています。そのため核のヘリウム濃度は、脱ガスを経験した現在のマントルより高くなり得えます。核のウランとトリウムの濃度はマントルに比べて低いと予想されていることを考えると、核のヘリウム同位体比もマントルより高くなります。ある見積みでは、溶融した鉄(核)とケイ酸塩(マントル)間のヘリウムの分配係数(ある元素について平衡にある、二つの相における元素濃度の比。ここでは分配係数  $=$  (鉄中の元素濃度) / (ケイ酸塩中の元素濃度) とします)が  $10^{-4}$  より大きければ、 $^3\text{He}$  に相対的に富む始原的なヘリウムが核からマントルの底へ供給されることで、ホットスポット火山で観測される高いヘリウム同位体比を説明できるとされています(図1)。

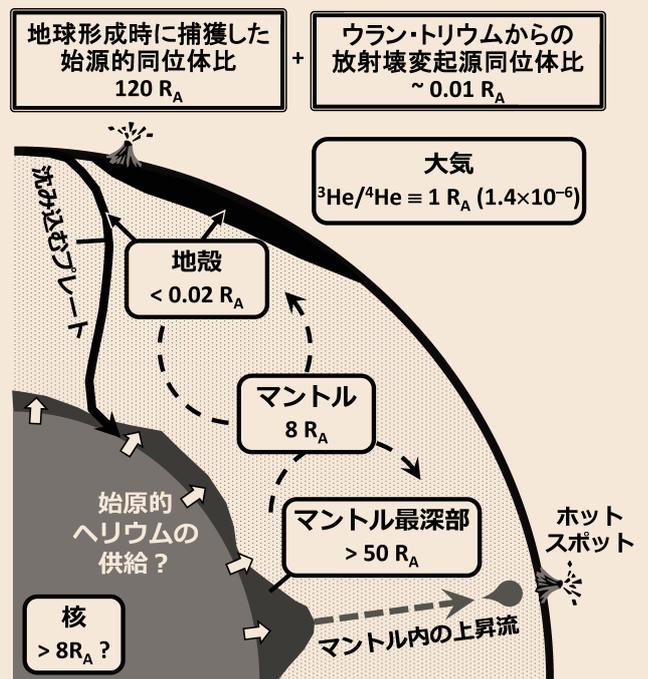
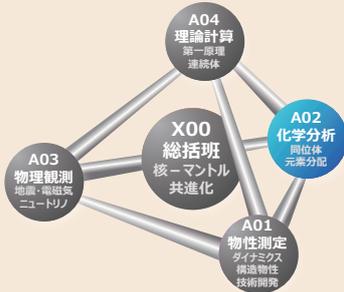


図1. 地球各部のヘリウム同位体比 ( $^3\text{He}/^4\text{He}$  比)。

研究項目トピック



## 研究項目A02: 化学分析

マンツル由来物質や高压合成試料の微小領域分析により、核-マンツル間の元素分配や同位体分別を制約します

### ～地球深部の始原的地球化学リザーバーの在処を探る～

そこで私たちは、高温高压下で溶融した鉄とケイ酸塩に希ガスを分配させ、それぞれの希ガス濃度を測定することで分配係数を決定しようとしています。これまでも同様の研究はありましたが、希ガスを純粋なガスとして大量に導入したため、天然の「希」ガスとかけ離れた高濃度での分配をみている可能性や、鉄とケイ酸塩と完全に分けて分析できていない可能性が指摘されています。私たちの実験では、天然の条件にできるだけ近い濃度で希ガスを導入するため、まず希ガスを溶け込ませた希ガス入りケイ酸塩ガラスを調製し、それを鉄とともにマルチアンビル高温高压実験装置で3万～28万気圧(1万気圧は約1GPa)、1700～2200℃に数分間保持した後、急冷して回収しました。走査型電子顕微鏡、顕微ラマン分光装置、電子線マイクロアナライザ(EPMA)を用いて、凝集した希ガスの微小な気泡や化学組成の不均質などを確認した後、鉄とケイ酸塩それぞれに含まれる希ガスを、顕微レーザーアブレーション装置と超高感度希ガス質量分析計を用いて測定しました(図2)。現時点では、ヘリウム以外の希ガスについて3万～6万気圧での分配係数しか得られていませんが、圧力によらず(1)  $10^{-6} \sim 10^{-3}$  程度であることと、(2) アルゴンで最も高く、ネオン、クリプトン、キセノンの順に低いことが分かりました(図3)。従ってヘリウムの分配係数も  $10^{-4}$  程度と予想されますが、この値は核が始原的リザーバーとなり得るか否かの値と同等ですので、確かな結論を得るためにはやはりヘリウムについて実測する必要があります。しかしヘリウムは原子半径と質量が小さいために高温高压実験のカプセルから逃げやすいようで、鉄では検出限界(5ppb)以下でした。従って、実験中にいかにヘリウムを捕まえておくかが

今後の課題です。より高温高压を目指すことも今後の課題ですが、圧力が高くなるほど試料も小さくなるため、希ガス分析もさらに高感度化して、より小さい試料でも分析できるようにする必要があります。

この研究は本新学術領域の A01-2 構造物性班(鍵裕之)、A01-3 技術開発班(桑原秀治)、A02-1 同位体班(野村龍一)、A02-2 元素分析班(三部賢治、館野繁彦)

の方々との共同研究であり、高温高压科学の分野と精密地球化学分析の分野が高レベルで融合した、まさに本領域ならではの研究と言えます。「核は始原的希ガスを保持しているか?」という問いへの答えを得るまでの道のりはまだまだ長いですが、この研究を今後も推進し、始原的地球化学リザーバーの在処を明らかにすることを目指します。



図2. マルチアンビル高温高压実験試料の希ガス分析の様子。

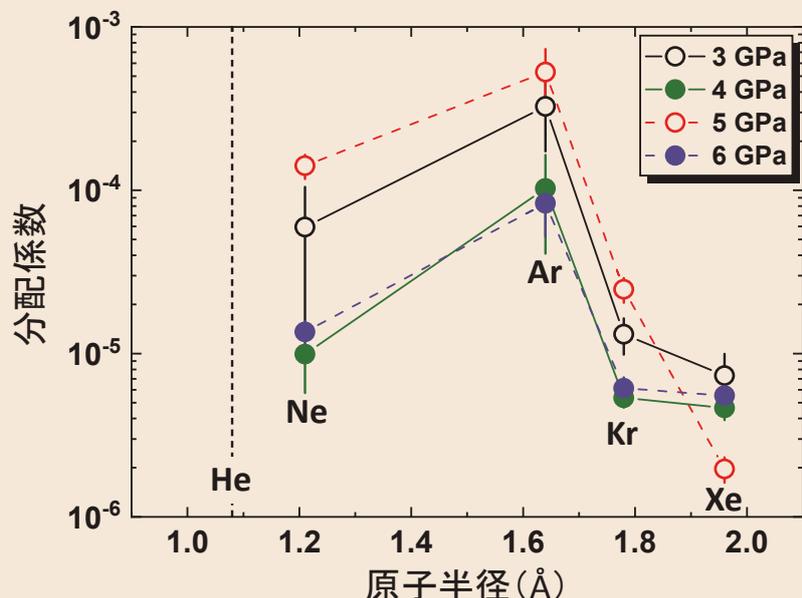


図3. 実験により得られた溶融鉄-ケイ酸塩間の希ガスの分配係数と希ガスの原子半径との関係。



ジョン ハーンランド

東京工業大学  
地球生命研究所

## 核マントル相互作用のメカニズムを探る

地球が何十億年も前に形成されたとき、集まった物質の衝突が広い範囲で融解を引き起こしました。このぐらぐら沸いた鍋のような初期の地球で、重い金属が地球の中心に沈み、鉄を主成分とした核を形成しました。地球の全歴史に渡って核とそれを取り囲むマントルの間で大量の熱の交換をしたという有力な証拠がある一方で、通常、研究者らはマントルと核の間での物質の交換自体は無視できると考えてきました。なぜなら金属でできた核は非常に重く、それを持ち上げてマントル内に戻すには莫大な力が必要だからです。

しかし、どうやら私たちは間違っていました。ハワイのような場所でマントルから噴出した溶岩の同位体の測定により、研究者たちの意見は変わりつつあります。同位体とは、同じ元素であるが原子核中の中性子の数が異なる関係のことをいいます。ある元素の同位体の存在比（同位体比）を一種の「指紋」として使用して、物質がどのように作られたのか、どこから来たのかを特定できます。地球の深部由来の溶岩から一緒に見つかった2種類の元素の同位体比は、核がマントルに何らかの形で混ざりこんでいると仮定した場合にのみ、うまく説明でき

ることが発見されました。この2つの元素はタングステンとヘリウムです。これらの元素はマントルと核で明らかに異なる同位体比を示すと予測されています（ニュースレター No. 8、6-7ページ参照）。見つかった指紋は、まさに核から物質がやってきたと考えるしか説明のしようがなかったのです。

しかしまだ問題があります。研究者らが溶岩からタングステンとヘリウム以外の核由来の物質を見つけようとしても、彼らは何も見つけられませんでした！これにより、研究者らは、なぜ核由来とされる元素の同位体比が、特定の元素でしか見られない理由を探し始めました。

その理由は、原子の交換による同位体平衡が起きたからかもしれません。すべての物質は、固体でさえも、原子は永久に固定されているわけではありません。原子は時間の経過とともに場所から場所へと飛び回っています。高温で二つの物質を互いにぴったり接触させると、原子が飛び回っているだけで、接触している界面をはさんで原子がゆっくりと交換されます。同じ元素であれば同位体に関係なくランダムに交換されるため、最初に二つの物質がそれぞれ異なる同位体組成を持っていても、

長い時間をかけて徐々に等しい同位体組成を持つようになっていきます。それはトランプをシャッフルするようなもので、長い時間が経つと順序がばらばらになり、同位体が物質間で均等に混ざり合います。

原理的には核とマントルが地球の奥深くで互いに接触している場合、それらは地球の歴史の数十億年という時間をかけて異なる同位体の原子を交換できたでしょう。同位体平衡を経た岩石がマントルの上部に流れ込み、部分的に溶けて溶岩を生成したため、溶岩は核の同位体の指紋を持っていますが、核由来のそのほかの金属を含んではいません。

しかし、まだ別の問題も見つかっています。原子のランダムな拡散だけでは、同位体平衡が起きるマントル物質の量はかなり少なそうです。ただ核とマントルが接触していただけでは厚さ数メートルの岩石だけしか影響を受けていなかった可能性が指摘されています。これは、地球の様々な場所の溶岩で見られる同位体の変化を説明するには不十分です。

最近、このジレンマに対する解決策が見つかりました。核とマントルの接触面はのっぺりとした平面ではなく自然に凹凸が

研究項目トピック



## 研究項目A04:理論計算

第一原理計算や連続体シミュレーションにより解釈・モデル化し、実験や観測をサポートします

## ～地球の核を味わうしゃぶしゃぶ法～

でき、砂浜に水をかけるように外核の液体金属はマンツルの岩石のすき間に「しみ込む」ことができます（粒界拡散といいます。本ニュースレター・芳野の記事を参照ください）。核-マンツル境界の温度圧力条件での実験により、溶けた金属は結晶質の岩石のすき間に浸透することが実証されました。もし金属が最大1kmくらいまで岩に染み込めたら、その混合物全体で同位体平衡が達成できる可能性があります。タングステンとヘリウムだけが核由来の元素として見つかっているのは、このしみ込む速度がとても速いからです。その後、金属が核に戻っていくと、マンツル内に残された岩は、核の同位体の特徴を保持しています。それがマンツル上部に運ばれて溶けると、タング

ステンとヘリウムの同位体の観測結果を説明できるようになるわけです。

解決すべき最後の問題は、どうやって重い金属をマンツル側にしみ込ませるかです。これを可能にするような力はどこにあるのでしょうか？

最も有望な答えは、重い金属をマンツル側に持ち上げるのではなく、マンツルの岩石を核に「押し込む」ことです。マンツル内の岩石の流れと循環を駆動する力は、自然にいくつかの場所で岩石を核まで押し下げます。マンツル対流は、岩石を核マンツル境界から深さ最大1kmまでの領域に押し込むことができそうです。

しゃぶしゃぶのよう

なものを想像しましょう。核を味わうには、マンツルの岩石を核の液体に浸し、その風味を吸い取ります。次に、岩を浅いマンツルまで運んで戻し、溶かして溶岩を生成し、そこで核の風味を直接測定できます。これは、肉のスライスを温かい鍋に浸して、出汁をしみこませ、鍋から肉を持ち上げて口に入れて風味を楽しむ動作によく似ています。

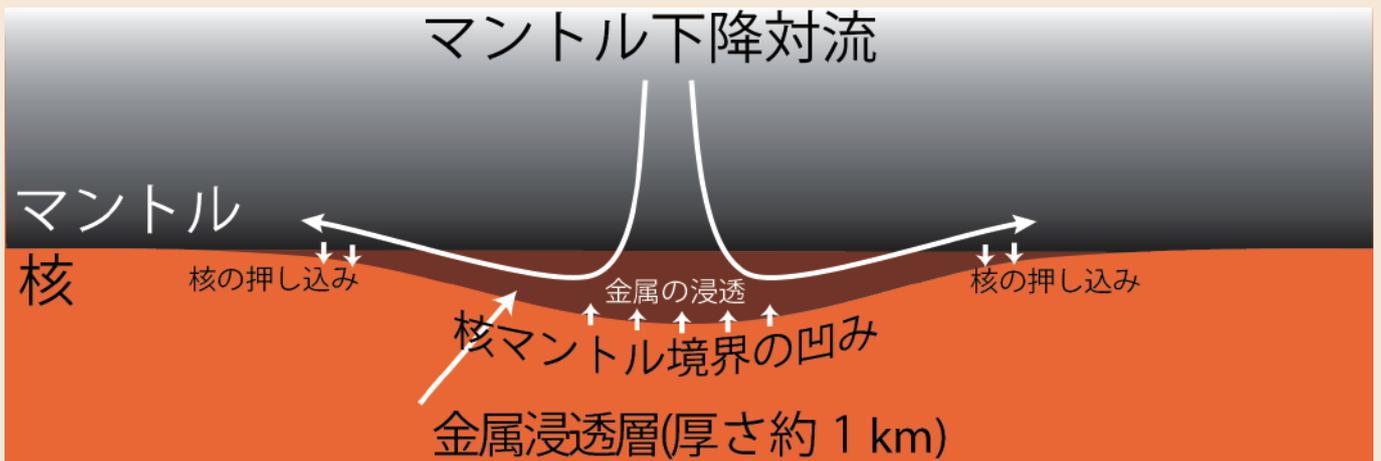


図. マンツル下降対流が地球中心核を押し込む様子（茶色の部分）。核まで入り込んだマンツルの岩石に金属が粒界拡散により浸透し、タングステンやヘリウムの同位体平衡が起きる。

## 国際ワークショップ「タイにおける地球物理学的観測－現在と未来－」

2019年8月1日と2日にバンコクにあるマヒドン大学理学部で国際ワークショップ「タイにおける地球物理学的観測－現在と未来－」を開催しました。日本人11名（タイ在住の橋爪道郎博士を含む）、タイ人47名（研究者8名、大学生31名、大学院生8名）の計58名が参加しました（集合写真）。

開会の挨拶のあと、マヒドン大学が主催している「タイの大学生物理学夏の研究経験」の一環として、タイ全国から参加した大学生向けに土屋領域代表による講義「量子力学からの地球深部科学」が行われました。この講義では、地球深部科学の現状の簡単な紹介から第一原理計算に基づく地球深部物質科学の最前線の一端が解説されました（写真1）。講義には大学生だけでなくマヒドン大学の教職員も参加し、活発な質疑応答がなされ、講義が終わった後も多くの学生が土屋領域代表を取り囲んで熱心に質問をしていました（写真2）。

引き続いてワークショップが始まり、最初のセッションでは、タイにおける臨時広帯域地震観測（Thai Seismic Array, TSAR）の概要とそのデータを用いた地殻・マントル・内核の構造に関する解析結果が発表されました（写真3、4）。

午後の最初のセッションでは、日本側の参加者が地球化学・地震学・鉱物物理学による地球深部研究成果の発表とこれまでのタイ・マヒドン大と日本の研究機関でなされてきた共同研究の歩みが紹介されました（写真5）。午後二つ目のセッションでは、タイ側の参

加者がタイにおける定常地震観測・電磁気学的構造解析の結果・古地震学から見たタイの活動層・地球化学的分析に基づくタイ中央部における過去の火成活動に関する研究発表が行われ、活発な議論がなされました。

2日目のエクスカージョンでタイ気象庁地震観測部門を見学させていただき（写真6）、さらに会議室をお借りして今後の共同研究計画や学生教育の振興について意見交換を行いました（写真7）。二日間の短い期間ではありましたが、この科研費新学術「核－マントルの相

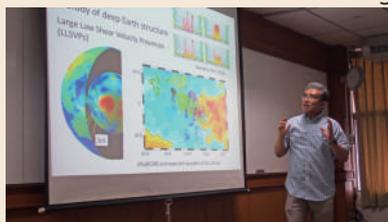
互作用と共進化」をきっかけとして日本とタイとの国際交流がさらに深まることを期待させるワークショップとなりました。



1



2



3



4



5



6



7



## イベント

## 合同班会議

2019年11月22日(金)～2019年11月24日(日)に新潟大学にて、A01-2 構造物性班、A02 化学分析班(同位体班と元素分配班)、A03-1 地震・電磁気観測班の合同班会議を開催いたしました。総勢30名の参加となり、21件の口頭発表と4件のポスター発表がありました。

化学分析の2班からは、同位体異常と異常の見られる地域の下のマントルとの関係、地震波速度構造と高温高压実験の結果のリンク、深部マントルの進化：太古代後期のマントルオーバーターンの可能性などの話題が提供され、それらを中心に活発な議論の場となりました。具体的には次の項目について多数の発表がされました。

- (1) 内核・外核に関する話題：核の軽元素の挙動、これまではほとんど無いと考えられていた内核表面における地震波速度異方性の可能性や地球核表面流モデルにおける電気伝導率の影響
- (2) 下部マントルの高压相における水素や窒素同位体を使用した軽元素の貯蔵庫の検討

(3) タングステンやネオジウム、鉛などの同位体異常地域の下部マントルの不均質性と地震波低速度異常の関係

(4) 地球外物質やマントル由来の Cr, Ti, Ca などの安定同位体異常を使用した地球材料物質の起源解明やマントルの不均質性の議論

(5) マントルトモグラフィモデルの比較検討用 web-based tool “SubMachine” の紹介

複数回にわたる合同班会議の中で、今回特筆すべき点は、これまで研究対象としてこなかった Cr, Ti, Ca などの安定同位体が、地球の形成過程や進化について重要な手がかりになるという議論がなされたことです。本領域研究の目標である「核-マントルの相互作用と共進化」の解明に向けて新たな一歩を踏み出すことができました。

最後に本新学術領域研究で新潟大学にて導入立ち上げを行った質量分析計 MAT253 と四種硫黄同位体分析システムを紹介する実験室見学会を行い、3日間にわたる本合同班会議を終了しました。

世話役：M. Satish Kumar (新潟大学)、鈴木勝彦 (JAMSTEC)、田中聡 (JAMSTEC)、鈴木昭夫 (東北大学)

参加者：Anupam Banerjee、天川裕史、飯塚理子、Yihe Li、石川晃、井上徹、鍵裕之、柿澤翔、菅野萌子、Kiran Sasidharan、Christine Houser、小木曾哲、佐野亜沙美、下田玄、George Helffrich、Silpa A.S.、高澤栄一、高橋俊郎、館野繁彦、田中友崇、土屋卓久、出倉春彦、日比谷由紀、松島政貴、三平舜、渡邊駿



## 第4回若手集会

2019年8月21日から23日にかけて、第四回若手集会が北海道様似郡様似町幌満にて開催されました。今回の若手の会は、東京大学の小澤一仁教授の案内による幌満かんらん岩体を中心としたアポイ岳ジオパーク巡検および幌満かんらん岩体に関する講演と、参加者の研究発表から構成され、領域内外から学生14名を含む総勢23名の参加がありました。アポイ岳ジオパークを舞台に、マントル物質やダイナミクスに関する理解と議論を進めました。

参加者は21日朝に新千歳空港で集合し、若手会の舞台となる様似町まではチャーターバスでの移動となりました。若手の会は、様似町役場の前に整備された「かんらん岩広場」の見学からスタートしました。かんらん岩広場には、アポイ岳ジオパークに分布する様々なかんらん岩や深成岩が組織や構造が分かりやすいように切り出され、美しく研磨されたかたちで展示されています。まずは参加者がそれぞれ自分の目で大型標本を観察した後、小澤教授の解説のもと、さらに詳細に岩石の構造を観察しました。

かんらん岩広場で観察の基礎を学び、いよいよ天然のかんらん岩の露頭へと向かいました。若手会初日の2つめの見学地は、かんらん岩の採石場です。この採石場では、工業資材としてかんらん岩の採掘を行っています。今回は東邦オリビン工業株式会社から立ち入り許可を頂き、採石場内で露頭観察を行ったほか、ハンマーを振るってサンプル採取を行いました。先ほどかんらん岩広場でしっかりと解説を受けていたこともあり、採石場で採取できた様々なかんらん岩の組織や成因に関する議論が盛り上がりました。採石場での観察が終わると、宿泊先およびポスターセッションの舞台となる「アポイ山荘」へと移動しました。アポイ山荘のかんらん岩を利用した露天風呂や、現地の海産物や農作物もふんだんに使った豪華な夕飯を堪能したあとは、小澤教授によって、幌満の多様なかんらん岩を産んだ地球科学プロセスに関する講演が行われました。幌満かんらん岩体とはどのようにして形成されたのか？かんらん岩からどのような情報が読み取

れるのか？など、ミクロからマクロまで様々なスケールの議論からなるエキサイティングな講演でした。小澤教授の講演終了後も、参加者による懇談や議論は続きました。

2日目は天気心配されましたが好天に恵まれ、お弁当持参でアポイ岳に向かいました。アポイ岳では、ダナイト・ハルツバーナイト・レールゾライト・ウェールライト・はんれい岩といった様々な岩相を観察することができ、その見分け方を露頭で学ぶことができました。どのような岩相なのか初見ではわからなかった参加者もいましたが、巡検を進めるうちに目も慣れてきて、岩相の移り変わりがわかるようになったのは印象的でした。また、1日目の小澤教授による解説内容を実際に露頭で確認することで地質構造や研究例の理解も進みました。例えば、小澤教授の講演に登場した、幌満岩体の熱履歴

解析に使用されたかんらん岩中の直方輝石を観察することが出来ました。この直径1cmを超える直方輝石は、実際に露頭で観察すると非常に大きく感じられました。標高810mのアポイ岳山頂では、お弁当を食べました。風が強くなり気温も下がってきたことや、山頂はダケカンバなどの樹林帯になっていて眺めあまり良くないこともあり、食事を終えるとすぐに次の露頭へと向かいました。アポイ岳山頂からさらに尾根沿いに吉田岳の方に向かい、規則的に互層したかんらん岩とはんれい岩の見事な露頭を観察しました。はんれい岩は風化に対して強く、相対的に盛り上がっているのかんらん岩と区別がつかず。この露頭で2日目の巡検の予定を終え、下山の途につきました。途中厳しい上りの区間もありましたが、離脱や怪我などする参加者もなく、無事巡検を終えることができました。



## イベント

朝からの登山で皆さんさすがに疲れた表情を見せていたため、巡検後は、休憩と入浴の時間となりました。この時間にも参加者同士での議論が進んだほか、現地の方々と交流する参加者の姿も見られました。昨夜と同様の豪華な夕食の後、参加者によるポスターセッションが開催されました。幌満かんらん岩の研究をはじめとしたフィールドベースの研究、高精度分析や超高压実験、理論計算など様々な内容について活発な議論が繰り広げられました。昨日に続き、参加者間での議論は夜も続きました。

最終日となる3日目はまずアポイ岳ジオパークビジターセンターを訪問し、ジオパークを構成する岩石や動植物、そして様似地域の歴史に関する展示を見学しました。当初のプログラムではビジターセンター訪問後は海岸付近で日高衝上断層の露頭などを見学する予定でしたが、荒天のため、風雨の影響が少ない山側に位置する石灰岩やチャートの露頭を見学することとなりました。これらの生物起源の岩石は、本来は海洋底で形成される岩石です。北海道中央部が大陸縁の沈み込み帯だった時代に付加体として陸側に付け加わった海洋プレートの一部を、現在陸上の露頭として観察していることとなります。これらの付加体が形成されたのち、この大陸縁に現在の北海道東

部が衝突したことで形成されたのが、日高山脈、そして日高かんらん岩体だと考えられています。日高山脈や北海道の形成履歴を物語るこれらの露頭を観察して巡検は終了となりました。空港に移動するバスの車内では最後に小澤教授からコメントを頂き、新千歳空港で解散となりました。さわやかな気候の北海道での2泊3日での巡検とポスターセッションを通して、マントルに関する議論と参加者間の親睦が深まりました。若手会の回数を重ねることで、研究面も含めた様々な交流が進むとともに、参加者の輪も広がってきています。今後の研究面や人的交流のさらなる進展が楽しみです。

今回の若手集会の開催に関して巡検案内と幌満かんらん岩体に関する講演の依頼を快諾して頂いた東京大学理学系研究科小澤一仁教授、研究会の企画及び現地での巡検についてサポート頂いた加藤聡美様をはじめとした様似町とアポイ岳ジオパークの関係者の皆様、そして、採石場での巡検とサンプリングの許可を頂いた東邦オリビン工業株式会社に感謝いたします。今回も、新学術領域事務局から様々な面で多大な支援を頂きました。ありがとうございます。

(上木賢太・海洋研究開発機構、秋澤紀克・東京大学大気海洋研究所)



## A04-1 理論計算班研究集会

お盆も過ぎ、さてこれから残暑と台風がやってくるかなという 8 月下旬、高知県しもの郷において A04-1 理論計算班の研究集会が開かれました。しもの郷とは、廃校を修繕した交流・宿泊施設で、黒板や百葉箱、二宮金次郎像などがたいへん懐かしい雰囲気を醸し出しています。山をだいぶ登ったところにあり、すぐそばに小さな川も流れているせいか夏とは信じられないくらいの涼しさで、研究集会にぴったりの場所でした。

この研究集会には理論計算班のメンバーを中心に東京大学や東京工業大学、愛媛大学の研究者と学生 10 人が集まり、それぞれの研究についての発表を行うとともに、活発な議論を交わしあいました。主な話題となったのは、電子の運動を量子力学に則り計算する第一原理計算（あるいは量子化学計算）によって、地球深部における物質の性質やそこで起きる化学反応を予測する研究と、地球深部の構造を地震波データから調べる研究でしたが、なかには火星の地殻の形成過程といった変わり種の話題もありました。私自身は、地球内部におけるマグマの生成を高温高压実験によってできる限り再現し、マグマの組成や性質を決定する、という研究を行っているため、理論計算や地震学といったアプローチの最先端を知るとても貴重な機会となりました。なにしろ

地球の深部というものは、私たちが目で見ることも手で触れることも叶わない大きな謎でありますから、さまざまなアプローチからの研究結果を統合して、全体像を形作っていくことが肝要だと思います。今回の研究集会は、普段自分が研究を行なう視点とは異なる視点からの研究結果を知り、地球深部についての新しい認識が得られ、とても充実したものとなりました。

研究集会の最終日は生憎の雨でした

が、初日の夜は満天の星空が見え、二日目は研究集会の休憩時間に川へ行くなど、自然と触れ合うこともできました。ごつごつとした大きな石の合間を縫って流れる水を眺めながら、この光景も地球の営みの一部なのだなあと感慨深くなり、地球の進化や地球深部と表層の関係など、さまざまに思いを巡らせることのできた二泊三日でした。（近藤望・愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター）



Core Mantle coevolution

New members

新メンバー

## 天川裕史 東京大学特任研究員

### 計画研究A02-1 同位体班

2019年度より A02-1 化学分析・同位体班に特任研究員として参加することとなりました。これまでは希土類元素(REE)、とりわけネオジム(Nd)同位体に重点を置いた海洋における物質循環研究に従事していました。このように書くと、本新学術領域研究とはあまり縁がない研究者との印象を受けるかと思えます。しかしながら、以前東京都立大学において宇宙化学に係わる研究室にスタッフとして在籍した経歴もあり、惑星の進化さらには地球のコア-

マントル-地殻の進化のプロセスについても常々関心を寄せておりました。従いまして、このように本領域研究に参加する機会を頂き、大変感謝しております。今後の研究と致しましては、これまで培ってきた Nd 同位体比の高感度、高精度測定の実験を生かし、隕石のネオジム同位体比 ( $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) に関する研究を推進し、地球のマントル-地殻の進化プロセスに関する知見を得ようと考えております。



## 柿澤翔 東京大学特任研究員

### 計画研究A01-2 構造物性班

2019年10月より A01-2 構造物性班の特任研究員として参加させていただくことになりました東京大学大学院附属地殻化学実験施設の柿澤です。博士課程は、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターで過ごし、マルチアンビル型高压発生装置や放射光 X 線・中性子回折を用いて水素を含む鉱物について研究を行ってきました。水素は、宇宙で一番豊富に存在している元素であることから、地球内部のマントルや

核にも存在していると考えられています。そこで本プロジェクトでは、高温高压下における鉄水素化物の結晶構造解析を通じて、核中に含まれる水素の振る舞いを明らかにする研究を行っております。鉄水素化物は、常圧で水素を吐き出してしまうため、高温高压下の放射光 X 線や中性子回折によるその場観察実験を使った研究を進めていきたいと考えております。どうぞよろしくお願いたします。



## Anupam Banerjee 新潟大学特任助教

### 計画研究A02-2 元素分配班

私は、インドのバンガロールにあるインド理工科大学で 2018年12月に学位を取得し、2019年7月に新潟大学の特任助教に着任しました。私の研究目標は、地球表層と地球内部での様々な過程、およびそれらの相互作用がもたらす地球内部の大規模な化学的不均質性の形成過程を理解することです。ICP-MS・TIMS・RIMS などの分析手法によって、天然岩石の Nd・Sr 放射起源同

位体比や Ca・S 安定同位体比、主成分・微量元素濃度を高精度で分析し、これらのデータから化学的不均質性の形成過程を理解するための指標を確立することを目指します。そして、マントル不均質性の起源と進化、地球史を通じたマントルの化学的進化、地球深部でのメルト生成と沈み込んだ地殻物質および炭素・硫黄の循環との関連性の解明に取り組みます。



## 日本鉱物科学会賞

山崎大輔 [岡山大学, A01-3技術開発班]

A01-3 技術開発班の山崎大輔准教授 (岡山大学) が、2018 年度日本鉱物科学会賞第 21 回受賞者に選ばれました。

日本鉱物科学会は、日本鉱物学会と日本岩石鉱物鉱床学会が統合され 2007 年に設立されました。野外調査、実験、分析、数値計算など様々な手法で、地球や惑星を構成する鉱物や岩石の構造・特性や成因などの解明を目指している学会です。日本鉱物科学会賞は、鉱物科学およびその関連分野で顕著な研究業績をあげた会員 (毎年 2 名以内) に贈

呈し、その業績を称えるものです。

今回の山崎准教授の受賞は、超高压発生開発技術、二相構成物の流動則、鉄高压相のレオロジーなどの優れた研究成果により地球深部の物質の状態やダイナミクスの解明への顕著な貢献が認められたものです。

山崎准教授は、日本鉱物科学会 2019 年年会期間中に「構成物質のレオロジーに基づく核・マントルのダイナミクスの研究とそのための高圧実験技術開発」と題した受賞講演を行いました。



## 日本高圧力学会学会賞

土屋卓久 [愛媛大学, 領域代表・A04-1理論計算班]

領域代表・A04-1 理論計算班の土屋卓久教授 (愛媛大学) が、2019 年度の日本高圧力学会学会賞に選ばれました。

日本高圧力学会は高圧力を手段として用いる物理、化学、地球科学、材料科学、生物科学などの広範な分野の会員からなる学際的学会で、1959 年から毎年開催されている高圧討論会の活動を背景に 1989 年に設立されました。同学会では「高圧力の科学・技術の進歩に貢献し、内外から高い評価を受ける

顕著な研究成果を挙げた」会員 1 名に学会賞を授与しており、令和元年の受賞者として土屋教授が選出されました。受賞理由は「第一原理計算に基づく独自の計算技術の開発と高圧地球科学の新しい展開への多大な貢献」で、理論分野からは初の受賞者となりました。

土屋教授は、第 60 回高圧討論会の開催期間中に「第一原理計算に基づく超高压地球科学の新展開」と題した受賞講演を行いました。



## 日本質量分析学会 2019年同位体比部会 最優秀口頭発表賞

田中友崇さん (東京大学修士課程 2 年) “高温高压下における溶融鉄-ケイ酸塩間の希ガス分配実験手法の決定”

## 日本高圧力学会 第60回高圧討論会 ポスター賞

上田千晶さん (愛媛大学博士前期課程 2 年) “グラッシーカーボンからのナノ多結晶ダイヤモンド合成と圧縮挙動”

三守秀門さん (愛媛大学博士前期課程 1 年) “Cavity つきアンビルによる高压下屈折率測定”



田中さん(右)と指導教員の角野さん(左) 三守さん(左)と上田さん(右)



## 国際セミナー

"Experimental constraints on the crystallography and seismic velocity of calcium perovskite", Andrew Thomson 講師 (University College London)、11/20、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

ニュースレター第 9 号をお届けします。最終号となりますが、内容は通常と変わらず、研究トピックやイベントを中心に構成しまし

た。成果については、各研究項目とも取りまとの真最中で、別の機会にご覧いただけるのではないかと思います。

(編集: 田中聡、西原遊、舟越賢一、西真之、野村龍一、小木哲吾、渡辺寛子、土屋旬、山田朗)

平成27-31年度 文部科学省 科学研究費助成事業 新学術領域研究

核-マントルの相互作用と共進化~統合的地球深部科学の創成~

事務局 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

Tel: 089-927-8165 E-mail: contact@core-mantle.jp Home Page: http://core-mantle.jp/