

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

- 02-07 各研究班の研究トピック
- 02-03 地球の中心を超えて
～2段式ダイヤモンドアンビルセルの開発～
- 04-05 タイ王国における広帯域地震観測計画
～日本人による地震観測事始～
- 06-07 熱伝導のコンピュータシミュレーション
～地球深部熱流量の決定に向けて～
- 08-11 公募研究紹介
- 12-13 新人紹介
- 14-15 イベント報告・受賞
- 16 国際交流・編集後記



境 毅

愛媛大学
地球深部ダイナミクス
研究センター

地球の中心を超えて

地球や惑星の内部は高圧力の世界になっています。海の底で水圧がかかるように、地面の下ではその深さより上にある物質の重さがのしかかってくるからです。地球科学分野における高圧発生技術は、地球深部の環境を実験室で再現するという目的のもと、発展してきました。なかでも最も硬い物質であるダイヤモンドを土台（アンビル）として用いて試料を挟み込むことで高い圧力を発生するダイヤモンドアンビルセル（DAC：Diamond Anvil Cell）という装置は、地球の下部マントルから核の領域に相当する数 100 万気圧の圧力を発生することができる実験装置として広く使われています。深ければ深いほど圧力も高くなり、地球の中心の圧力は 364 万気圧になります。一方で、地球より大きな惑星の内部は、当然圧力も非常に高くなります。例えば天王星や海王星の中心圧力は 700~800 万気圧に達すると推定されています。近年は太陽系の外にも惑星が多数発見されていて、なかでも地球の数倍から 10 倍程度の質量を持つ惑星はスーパーアースと呼ばれ注目されています。地球の 10 倍の質量のスーパーアースでは、マントル領域においても圧力が 1000 万気圧を超えると考えられています。こういった惑星の内部がどうなっているのかを調べるためには、このような極高圧環境を実験室に再現する技術が必要となりますが、DAC を用いた実験でも、さすがのダイヤモンドでも強度に限界があり、400 万気圧以上の圧力発生はできていません。

そこで登場したのが、2 段階ダイヤモンドアンビルセル（dsDAC：double-stage DAC）です。ドイツの研究グループが 2012 年に報告したこの手法では、

1 段目のダイヤモンドで発生した圧力（封圧）の中に、さらに小さな 10 ミクロン（100 分の 1 ミリ）程度の半球状のダイヤモンドを 2 段目として配置しています。2 段目のダイヤモンド（マイクロアンビル）は封圧がかかった状態になることで強度が向上しており、その状態でさらに試料を加圧する、というものです。彼らはこの手法で 600 万気圧を超える圧力発生に成功し、さらについて最近では 1000 万気圧に到達したと報告しました。この手法の開発は大きなブレイクスルーでしたが、日本、アメリカ、中国など様々な研究グループが挑戦していますが、当該グループ

以外では全く成功しておらず、まだまだ汎用的な技術にはなっていないのが現状です。何が難しいのかというと、簡単に言えば、取り扱う部品がとにかく小さいということです。そこで私たちのグループでは、ミクロンスケールでの正確な加工を可能にする集束イオンビーム加工装置（FIB 装置）を用いて 2 段目のダイヤモンドや試料を整形することで、dsDAC を再現性・信頼性に優れた高圧力発生技術として確立しようとしています。

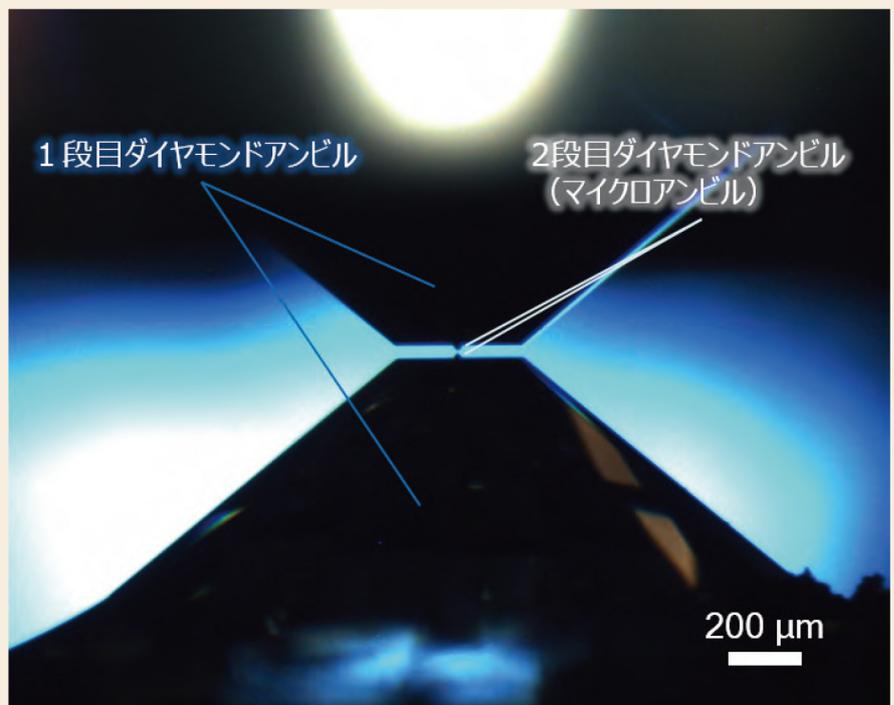
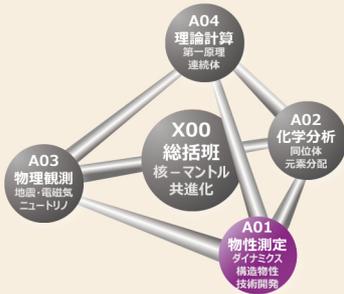


図1. 2段階ダイヤモンドアンビルセル内部の顕微鏡写真。上下の大きなアンビルが1段階、中央の小さい突起が2段階のマイクロアンビル。マイクロアンビルは光学顕微鏡ではよく見えないほど小さい（図2参照）。1段階と2段階は親亀子亀の関係。

研究項目トピック



研究項目A01: 物性測定

核とマント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

～2 段式ダイヤモンドアンビルセルの開発～

図 1 と 2 に私たちの研究で使用したマイクロアンビルの一例を示します。通常ダイヤモンドアンビルは先端の平らな部分（キュレット）で試料を挟んで圧力を発生します。1 段目のキュレット径は 350 ミクロンです。その中心に 20~30 ミクロン程度のマイクロアンビルが乗っています。マイクロアンビルにもキュレットがあって、キュレット径はたったの 3 ミクロンです。この 3 ミクロンの平面の位置を上下アンビルでピッタリ合わせて、試料を加圧します。試料も同じようなサイズになりますから、それを用意するのも設置するのも手作業では不可能です。しかし FIB 装置を利用することで、これらの作業が再現性良く繰り返し行えるようになりました。この技術開発については Review of Scientific Instruments 誌に掲載され、加工の美しさもあってか、編集者が選ぶ注目論文に選出されました。

FIB 装置を用いても、このような立体加工を正確に行うというのはなかなか時間のかかる、骨の折れる作業です。あるときなどはホテルを予約していたにもかかわらず、徹夜で作業をしてマイクロアンビルを作成し、朝方チェックアウトをするためだけにホテルに行った、ということもありました。いまでは私の所属する愛媛大学にも最先端の FIB 装置が導入され、よりよい形状を作り出すために日々格闘しています。

マイクロアンビルは、形状だけではなく、素材も重要です。ひと口にダイヤモンドといっても、宝石などにみられる単結晶と、小さな単結晶の集合体である多結晶のものがあります。特に多結晶のなかのひとつひとつの結晶のサイズがナノオーダーになったものをナノ多結晶ダイヤモンド（NPD）とい

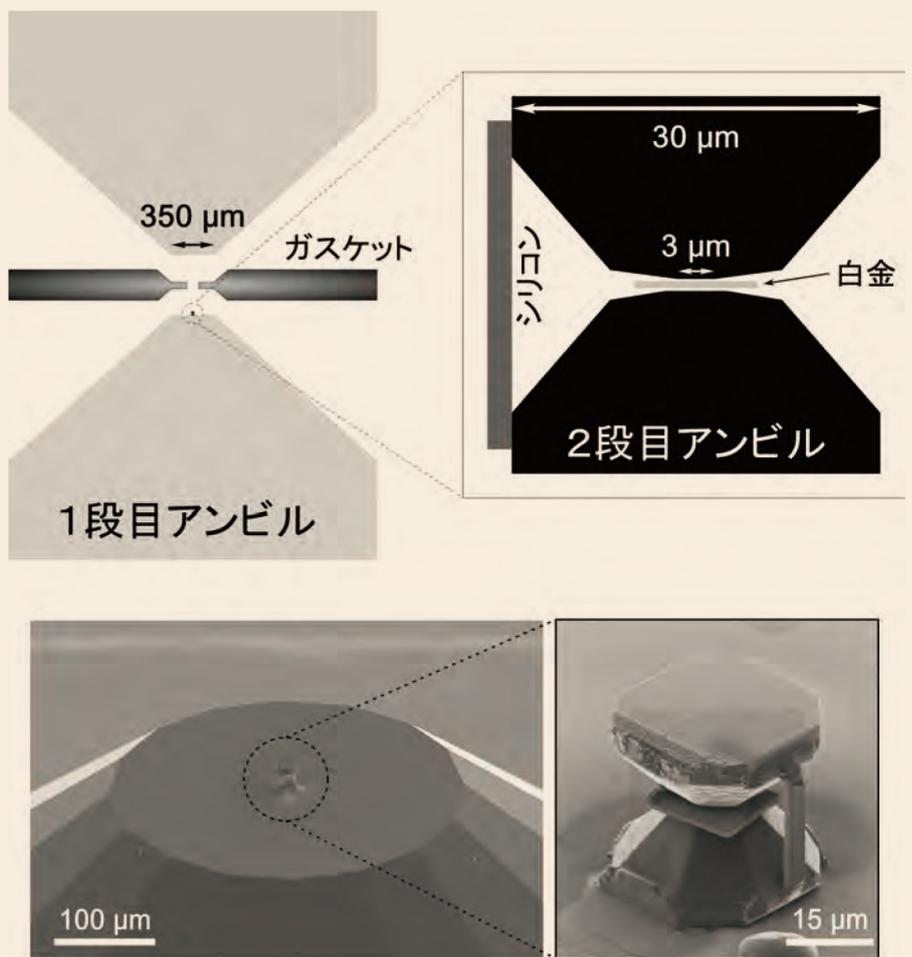


図2. 2 段式ダイヤモンドアンビルセルの模式図と電子顕微鏡写真

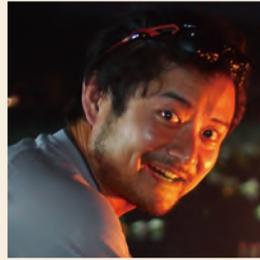
います。この素材は 2003 年に愛媛大学で開発され、単結晶のダイヤモンドよりも硬いダイヤモンドとして有名になりました。実は、上述のドイツのグループもマイクロアンビルにこの多結晶ダイヤモンドを用いているのです。私たちのグループの発生圧力はようやく従来の DAC の限界を超えるかどうかというところで、ドイツグループにはリードを許していますが、多結晶ダイヤモンドの合成技術や

FIB 装置を用いた微細加工技術では私たちは負けていないと思っています。500 万気圧以上の圧力領域では、数多くの物質で新構造・新規物質ができると理論予測されており、地球科学のみならず物性物理学にとってもまだ見ぬフロンティアです。私たちはこの技術開発の先にある新発見を夢見て、期待に胸を膨らませています。



田中 聡

海洋研究開発機構
地球深部ダイナミクス
研究分野



河合 研志

東京大学大学院
理学系研究科

タイ王国における広帯域地震観測計画

タイで地震の観測をするというと「なんでそんなところで」と言われそうですが、今までできなかったことをするために、見ず知らずのところへ行くというのは地震研究の醍醐味の一つです。おかしな言い方になりますが、私たちはタイで発生する地震を調べに行くのではありません。私たちが見たいと思っているのは、インドネシアやフィリピンの地下 2900km の地点にあるマントルと核の境界部分です。そして、そのために捉えようとしているのは、南太平洋のフィジーやソロモン、西太平洋の小笠原諸島で起きる地震の波です(図1, 2参照)。もちろん、タイにも地震研究者はいますし、日本の研究者が自由に使える地震記録も多少は公開されています。だけど、足りないんです。自分たちの知りたいという欲求を満足させるには、データが足りないんです。データが足りなければ、自分で取りに行くしかありません。

海外で地震観測のような仕事をする

には、相手国や協力者の選択も重要です。国によっては、GPS を使って位置を測ることを認めてくれなかったり、日本とは違い正確な地図が自由に手に入らなかったり、挙げ句の果てには、せっかく観測して得られた地震記録を持ち出すことすら認められないところだってあるのです。政治的、経済的に不安定な国、日本にあまりよくない感情を抱いている地域もあるかもしれません。また、たとえそうでなくても、全く見ず知らずの人に協力してくれるなんて、うまい話がそうそうあるわけはありません。今回は色々検討したり伝手を頼ったりして、タイで観測をさせていただくことになりました。そして、地震計を置く場所を探しに、タイの研究者と共同で、田中と河合が2015年11月、海洋研究開発機構の研究者が12月、田中が2016年1月と合計3回にわたってタイ全国を回ってきました。図3に、私たちがたどってきた道筋を示します。

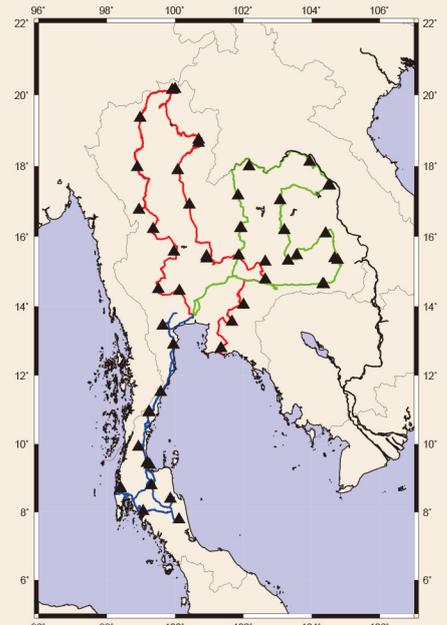


図3. 予備調査ルート。黒い三角は、観測点候補地。赤線(2015年11月のルート)、緑線(2015年12月のルート)、青線(2016年1月のルート)

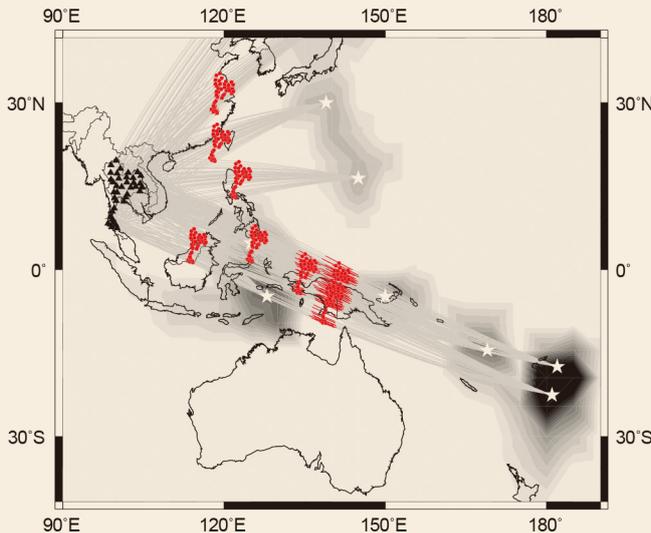


図1. 期待される地震の発生域(濃い灰色)、期待される震源位置(白い星)からの地震波の伝播経路(灰色の線)と調査可能な核・マントル境界部分(赤丸と赤線)。図2に赤線で示した地震波が核の表面で反射する地点が赤丸。

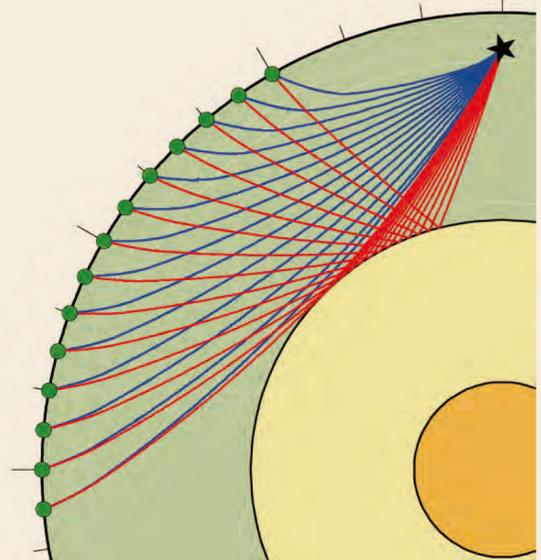


図2. 想定している地震波の伝わる経路を地球の断面図に投影した。青線は震源(星印)から観測点(緑の丸印)までマントル(薄緑の領域)内を伝わる波、赤線は核(クリーム色の領域)の表面で反射して地表に戻ってくる波の経路。

研究項目トピック



研究項目A03:物理観測

地震・電磁気・地球ニュートリノの観測技術を駆使し、核とマントルにおける物質の移動と変形などに関する実証データを取得します

～日本人による地震観測事始～

私たち自身もタイに行くことが初めてで、見るもの聞くもの驚くことばかりでした。訪問時期として選んだのは、雨季も終わり野外活動がしやすくなる11月から1月ですが、当然、私たちにとっては暑い！車やホテルの中は、エアコンが効いているとはいえ、屋外に出ると容赦はありません。食べ物の味は、辛い・酸っぱい・甘いのがはっきりしています。二、三日で慣れたので、美味しゅう頂戴いたしました。もっとも、同行してくれたタイの方々を気を使って、辛さを抑えてくれたおかげでもあります。しかし、行くたびに私の舌もおかしくなってきたのか、最近日本で食べるカレーの辛さのレベルが上がってきました。一方、タイの人でも辛いものが苦手な方がいたのは、とても意外でした。

タイ全国を移動するために、鉄道やバスなどの公共交通機関は使わず、運転手付きのレンタカーを手配していただきました。タイでは日本で発行される国際免許証も有効ですし、日本と同じ左側通行なので、理屈の上では自分で運転しても構わないのですが、細かい運転習慣が違うので、特に市街地では渋滞が酷すぎて運転する気にはなれません。一方、予想外に（失礼！）街と街を結ぶ道路の整備は行き届いて

おり、どこかの国より車の揺れも少なく、長時間の移動もそれほど苦にはなりません。また、ガソリンスタンドには、カフェのチェーン店とセブン・イレブンが大抵一緒に併設されていて、蚊除けローションなどのちょっとした買い物には一向に困ることはありません。バンコクの市街地ではいたるところにセブン・イレブンやファミマが目につきましたし、どんな田舎でも必ずコンビニがありました。

さて、肝心の地震観測点の場所を決めるための視点ですが、日本と外国では考え方がかなり違います。日本では、人工的な地面の揺れを極力避けるために人里離れた地盤のしっかりしたところ、できれば岩盤がむき出しになっている場所を探します。もちろん、ケースバイケースで、設置する時間が限られている場合は、原則や理想と相容れない場所を選ぶ場合もあります。しかし、外国では観測機材が盗まれない「安全な」場所に高い優先順位をつけなければいけません。特に商用電源がないところは、太陽電池とバッテリーで電気を供給するので、人気のないところに人目につくように置いたりすると、太陽電池を盗んでくれと言わんばかりに、泥棒にとって格好の餌食になってしまいます。まして地面に埋まった地震計

やケーブルなんて欲しがっているのかと思われるのですが、田舎に持って行けばクズ鉄として結構な値段がつくかもしれないのです。そういうわけで、タイの共同研究者と相談した結果、幹線道路から離れた小中学校の敷地に設置させていただくべく、タイの国中40カ所以上を回りました。しかし、いくら安全な場所が良いと言っても、あまりに人工的な振動が大きい場所では地震計を置くだけ無駄になってしまいますので、携帯型の地震計を持参して地面の揺れの程度を確認しながら場所を決めました。対応してくれた小中学校の先生方はみなさん親切で協力的でした。面白かったのは、一緒に写真を撮っていた時、女性の先生方は話している時そのまま、にこやかに写真に収まってくれるのに（例えば、写真1）、男性の先生方の多くはそれまでの親しげな態度から打って変わって急にしかめっ面、険しい表情になってしまうことでした（例えば、写真2）。

現在、2016年11月からの本観測に備えて、バンコク近郊2カ所で予備観測を行っています。その辺の事情は本観測の様子とも合わせて、別の機会にご紹介したいと思います。



写真1. にこやかな女性の先生方と記念撮影。男性陣は調査旅行の参加者。



写真2. 急にしかめっ面になってしまった先生（真ん中の方）と記念撮影。



出倉 晴彦

愛媛大学
地球深部ダイナミクス
研究センター

熱伝導のコンピュータシミュレーション

これを読んでいる皆さんはタイトルの「熱伝導」という言葉から何をイメージしますか。なんだか小難しい用語に聞こえるかもしれませんが、でも、熱伝導は身の回りにありふれた現象なのです。熱い鉄板の上に肉を置くことを想像してください。肉はジュージューと音を立てて焼けていきますね。肉の底と鉄板の表面ではこのとき何が起きているのでしょうか。鉄板表面では、それを構成する原子たちが激しくブルブルと揺れています。それらの原子は、肉の底を形成している原子の集団をバンバンと叩き、肉の底面の原子は激しく揺れ始めます。その揺れは次に底付近にいる肉の原子たちを揺り動かす、そしてまた隣の肉の原子を揺り動かす……、これを繰り返して最終的に肉表面の原子にまでその揺れが伝わります。これが「熱伝導」現象です。読者の皆さんが毎日フライパンで食べ物に火を通すときはこの現象を見ていることになります。そして、原子の揺れの伝わりやすさを示す指標が、本稿の主題である「熱伝導率(κ)」と呼ばれるものです。熱伝導は身近な現象であることがお分かりいただけたでしょうか。

さて、この熱伝導現象、実は私たちが住む地球の奥深くでも起きているのです。地球は多くの隕石が集積して今の形になったと考えられています。地球の形成時には莫大なエネルギーが蓄えられました。そのエネルギーは長い年月をかけて、そして今も、地球の外へと放出され続けています。地表面から流れ出るそのエネルギー量はおよそ46兆ワットといわれています。日本の家庭用電子レンジの消費電力は1100

ワット程度ですから、地表からの熱流量はおよそ400億台もの電子レンジをフル稼働させるエネルギーに相当します。このことから、地球そのものが熱を生み出す巨大な装置であるといえるでしょう。さて、核からマントルそして地表へと運ばれる熱流は、地磁気発生、マントル対流、そしてプレート運動など、地球内部で起きているさまざまな現象と密接に関係しています。地球内部の熱の流れを考える際、地球構成物質の κ が重要な役割を果たします。特にマントルは地球全体の体積の8割以上を占めているため、その κ を決定することは上述の現象を理解するうえで重要です。

マントル構成鉱物の κ はどのくらい分かっているのでしょうか。マントルは地球表面から数百kmも深くにありま

す。そこは高温高压の世界です。マントルの深部の圧力は、私たちが地表で受けている圧力(大気圧)の100万倍以上もあります。これは、1cm四方の小さなブロックの一つの面に200トンのジャンボジェット機を5台も載せたときにかかる圧力と同程度です。また、マントル深部の温度は3000度以上に達すると考えられていますが、これは太陽の表面温度の半分ほどに相当する高温です。このような極限環境下では、鉱物の κ を精度良く決定することは容易ではありません。しかし近年になって、高温高压発生装置を用いた実験や、コンピュータシミュレーションによる研究が精力的に行われ、マントル深部の κ についての理解が飛躍的に進みつつあります。

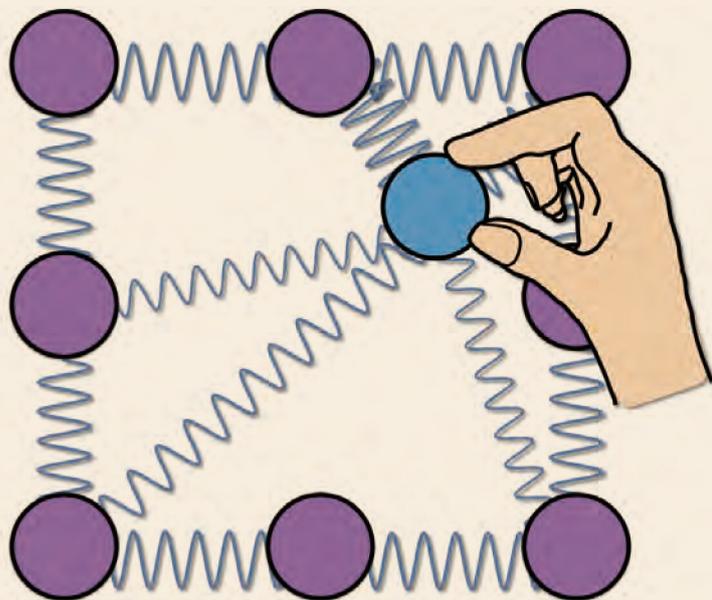


図1. 注目する原子(青)を引っ張ることでバネの強さを知る

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

～地球深部熱流量の決定に向けて～

以下では、筆者が用いている κ の計算方法のエッセンスを紹介したいと思います。肉を鉄板で焼くことを再び考えましょう。肉が熱せられて原子が振動し、それが肉全体へ徐々に広がっていくのでしたね。このことから、物質中の熱の伝わり方を調べるためには、その物質を構成している原子の振動についての理解が必要だと分かります。原子振動は周りの原子と「おしくらまんじゅう」をすることで生じています。着目する原子を周囲にいる原子が叩くと、叩かれた原子はその分だけ激しく振動します。反対に、叩いた側の原子はその分だけエネルギーが低くなり、振動は弱まります。つまり、振動は原子毎に時々刻々と強まったり弱まったりしています。そのため、熱伝導現象を理解するためには、原子振動を引き起こす原因となっている原子同士に働いている力の詳細を知ることが必要不可欠となります。

原子間力はどのようにして調べたらよいのでしょうか。結晶を構成する原子は低温ではほぼ規則正しく配置していて、どの原子もほとんど動いていません。これでは原子間に働いている力はよく分かりません。このことは、伸び縮みしていないバネを見ただけではそのバネの強さは分からないことと同じ事情です。ではバネの強さを調べるにはどうしたらよいのでしょうか。簡単です。実際にそのバネを引っ張ってみれば良いのです。コンピュータシミュレーションにより、それと同じことができます。着目している原子を実際に少し動かして、その原子が周りから受ける復元力を計算するのです(図1)。その際、力をどのようにして計算するのが問題となります。「力を計算する」と口に

することは簡単ですが、具体的にどうしたらよいでしょうか。筆者は、原子などのマイクロな世界を記述する「量子(りょうし)力学」と高精度コンピュータシミュレーションとの併せ技を用いてそれを実行しています。シミュレーションでは、物質を原子核と電子の集合体とみなし、全エネルギーや各々の構成要素間に働く力を直接計算することが可能です。その際、実験をしないと分からない情報は使いません(このような計算手法は「第一原理計算」と呼ばれています)。こうして原子間に働く力をコンピュータで計算することで、原子の振動特性、そして κ を決定することができます。

酸化マグネシウム(MgO)の κ をこの手法を用いてさまざまな温度圧力下で計算した結果を図2に示します。一

般に κ は温度や圧力によって物質毎にいろいろな値をとります。圧縮すると κ は増加します。一方、温度が上昇すると κ が低下します。熱いと原子たちは激しく振動し、原子間の相互作用がより強くなり振動が伝わりにくくなるからです。このシミュレーションによりMgOの κ は室温大気圧下の値 $\sim 70 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ から最下部マントルの温度圧力条件下(~ 136 万気圧, ~ 4000 度)の値 $\sim 40 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ へと大きく変動することが分かります。このように、コンピュータシミュレーションと量子力学の理論とを駆使することで、熱伝導現象を原子レベルから理解することが可能となってきました。今後、高压実験研究者と協力して地球の熱輸送特性をより一層明らかにしていきたいと思えます。

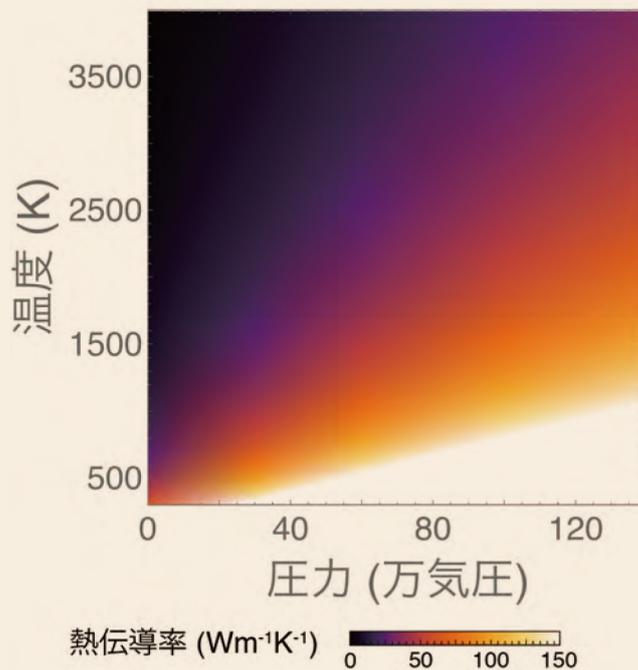


図2. シミュレーションによって得られたMgOの熱伝導率

本学術領域では、平成 28~29 年度、平成 30~31 年度の 2 期にわたって、当初の参加メンバー以外の方々から研究テーマを募集しています。本号では平成 28~29 年度の公募課題として採択された 12 件の研究計画を紹介します。

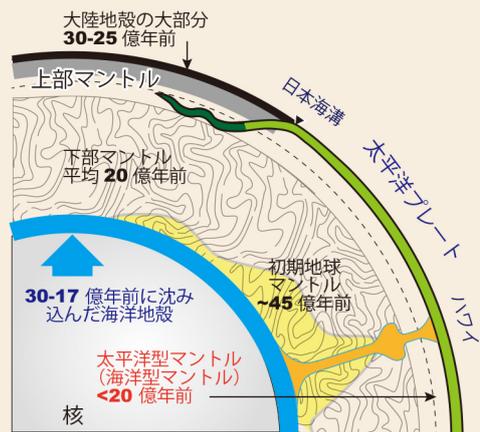
マントル35億年の熱・化学進化解明

木村純一 [海洋研究開発機構 地球内部物質循環研究分野]

地球は 46 億年前に微惑星の衝突と集積によって形成され、衝突によって発生した熱で全球融解（マグマオーシャン）を経験しました。その後の冷却に伴って、地球内部を構成する物質が単純なものから複雑なものへと進化した（物質の分化が進んだ）と考えられていますが、その進化の道筋には様々なモデルが提唱されています。本研究では、プレートテクトニクスがはっきり確認できる 36 億年前から現在までに噴出したマグマ（玄武岩など）の化学成分から、マグマを生成した上部マントルの温度

と化学組成の時間変化を解明します。マントルの冷却史と化学的不均質の進化を解き明かし、マントルにおける対流・熱移動・物質分化モデルに物質科学から制約を与えることをめざします。

地殻からマントルにおける代表的な構造の区分名とおおよその形成年代（推定値）



地球内核の組成と異方性の解明

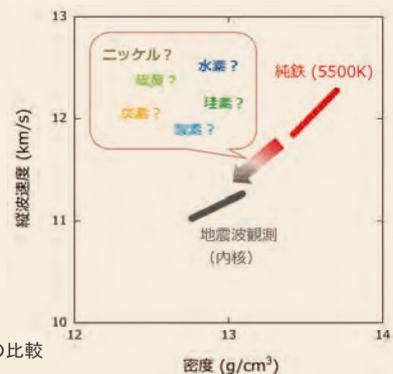
坂巻竜也 [東北大学 大学院理学研究科]

本研究では、地球の最深部にある内核を構成する物質（鉄や鉄合金など）を地球深部と同じ環境、すなわち超高温高圧状態下（圧力：330 万気圧～365 万気圧、温度：絶対温度 5500 度）において、密度と縦波の伝播速度の同時測定を行います。地球の内核における純粋な鉄の密度-縦波速度の関係（赤線）は、地震波観測によって調べられている地球の内核（黒線）よりも縦波速度・密度共に大きくなっています（図を参照）。この不一致を解消するためには、

純鉄の縦波速度と密度を共に減少させる成分が内核中に必要です。そこで、ニッケル、水素、硫黄、珪素、炭素、酸素などから最適な元素・量比・組み合わせを決定していきます。

このように地震波観測から得られている内核の密度・縦波速度と比較することによって、手元に取り出せない内核の化学組成の推定を試みます。

純鉄と地球内核の密度-縦波速度の比較

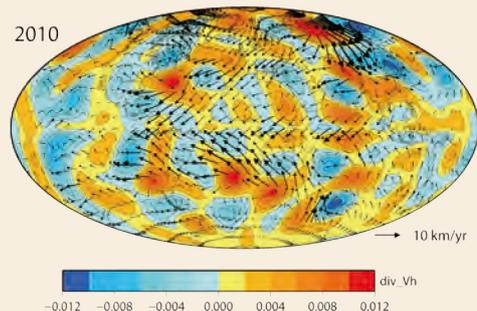


地磁気データで明らかにする核-マントル結合の時空間変動

松島政貴 [東京工業大学 理学院]

なぜ地球に磁場が存在するかという問題は、あのアインシュタインが「物理学において最も重要で未解決の問題の一つ」として挙げたとされています。今日では、電気伝導性流体である外核内の流れが磁場を横切る→誘導起電力が発生する→電流が流れる→磁場を作る、というメカニズムが有力です（ダイナモ作用）。すると、地磁気の分布と時間変動から、逆に、外核の流れの情報を得ることができます。一方、マントルには所々に鉄が染み出しているかもしれず、核から伸びる磁力線が

マントルを引きずって（核-マントル結合）、外核内の流れの規模や形が時間や場所で変動する可能性が指摘されています。本研究では、観測に基づいて作られた地磁気モデルを使い、年ごとに外核最上部付近の流れを推定することにより、核-マントル結合の時空間変動を明らかにすることを目的としています。



地磁気の分布と時間変動から得られた 2010 年の外核最上部での流れの様子。矢印は流れの水平成分、等値線は湧き出し（赤）と沈み込み（青）の分布を表す。

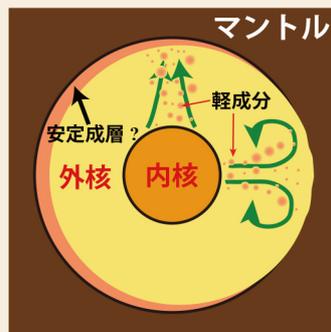
公募研究紹介

核マントル境界直下の安定成層の形成および破壊に関する流体力学的研究

竹広真一 [京都大学 数理解析研究所]

地球深部には主に融けた鉄からなる流体核が存在し、その内部の流れによって地球磁場が生成維持されていると考えられています。その最も有力な流れの原因は、地球全体の冷却に伴って内核が固化成長する際に、鉄に混じって溶けていると考えられている酸素や硫黄などの軽成分が放出されることです。外核底部から放出された軽成分は浮力を得て外核中を上昇するため対流運動が生じるのです。しかしながら、上昇

していった軽成分はマントルというフタまで達した後に、フタの下に蓄積して外核本体とは別個の層（安定成層）を形成するか、それとも流れによって再びかき混ぜられてしまうのかがよくわかっていません（図参照）。本研究は、このような安定成層が形成されるか否かを流れの数値シミュレーションと理論的考察によって明らかにし、さらには地球磁場生成問題などの解明へ寄与することを目指しています。



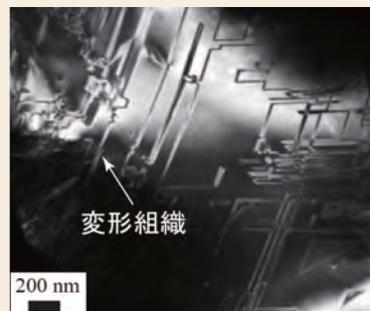
外核の底から上昇する軽成分が外核の最上部に蓄積して安定成層になる、もしくはかき混ぜられて層ができない、様子を示す漫画。

下部マントル条件下におけるブリッジマナイトの結晶方位定向配列に関する実験的研究

大内 智博 [愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター]

プレートの移動や沈み込みの原因となっているマントル対流が起きることにより、地震波速度が伝わる方向によって変化するという現象（地震波速度異方性）がマントル内で起きることが知られています。この地震波異方性の有無は、変形のマクロな素過程を特定する上での重要な手がかりとなります。2014年に私達は、マントル遷移層中部（深さ540km）の温度圧力条件下におけるリングウッドイト（マントル中部の

主要構成鉱物）の変形実験に成功し、流動が起きても結晶方位が一定の方向に並びにくい特異な性質をリングウッドイトが持っていることを見出しました。この研究を進展させ、下部マントルの主要構成鉱物であるブリッジマナイトの流動に関する研究を行います。

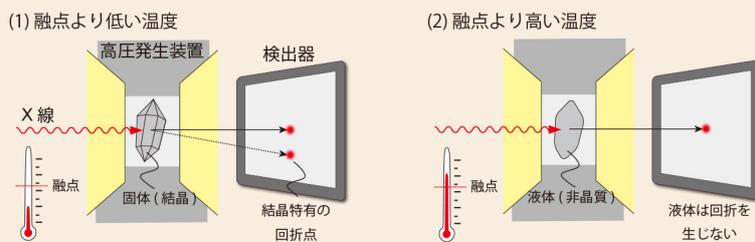


変形したリングウッドイト結晶の微細組織。線状の幾何学模様が変形が生じた構造（矢印）。

従来手法を統合した下部マントルにおける融解現象の理解

新名良介 [東京工業大学 地球生命研究所]

2014年頃、小笠原諸島の西之島で火山活動が活発になり、わずか数年で島の面積が2倍以上に成長し、人々を驚かせました。固体である山や大地は長い間動きませんが、地中から噴出するマグマは液体です。どろどろと素早く流れ、西之島のように地形を一瞬にして変えてしまいます。それでは、直接目で見ることのできない地球の中でもこのような液体による激しい活動が起こっているのでしょうか？それを知るには、地下深くの、とても圧力が高



い環境で、岩石が固体から液体になる温度（融点）を調べることが重要になります。本計画は、液体になるときの形の変化の観察や、X線回折点の消失を観

察する（図を参照）など、様々に提唱されている手法を、実験をもとにそれぞれ比較し、どの手法がより正確な融点を決定できるのかを調べるものです。

超高感度レーザー希ガス局所分析から制約する核-マントル共進化

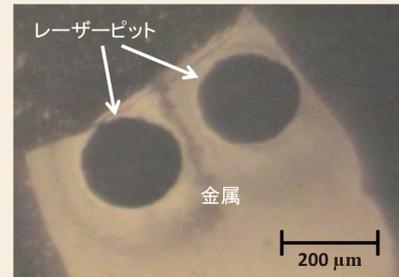
角野浩史 [東京大学 大学院総合文化研究科]

希ガス（貴ガス）は、ほとんど化学反応をしないため他の元素と挙動が異なり（貴）、地球全体では非常に少ない（希）元素ですが、地球内部の化学的構造を探る上では重要です。例えば地球形成時の痕跡を留めている領域がマントルの底にあることは、希ガスの同位体比から示唆されています。しかし希ガスが地球内部で、どこにどのように存在しているかは、よく分かっていません。これは希ガスを高温高压下で鉱

物などに溶かしても、微量ゆえに分析が難しいためです。

この課題では、地球の核形成環境（30万気圧、3,000℃程度）を再現して共存する金属とケイ酸塩に希ガスを溶け込ませます。その後、細く絞ったレーザーで穴を開けて希ガスを抽出し（図）、超高感度化した質量分析計で希ガスの量を測ります。これにより、核形成時の希ガスの振る舞いと、地球内部の希ガスのありかを明らかにすることを

指しています。



希ガスを溶かした金属にレーザーで開けた穴

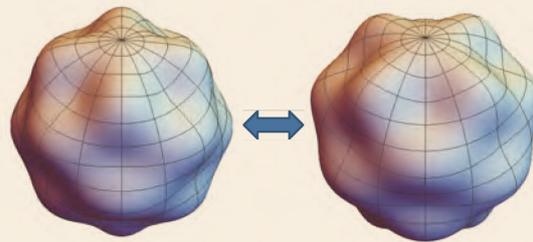
地球自由振動の解析による核-マントル境界領域と内核の構造に関する研究

須田直樹 [広島大学 大学院理学研究科]

地球自由振動とは大地震によって地球全体がまるで釣鐘をついた後のように振動する現象で、固有の周期と振動様式を持つモードと呼ばれる多数の振動から成ります（図）。地球深部に振動エネルギーを持つモードの解析から核-マントル境界付近や内核の構造についての情報が得られます。これまで地球自由振動の解析は、内核が固体であることや地震波速度が伝わる方向によって違うこと（地震波速度異方性）など地球深部構造の研究に大きく貢献してきました。しかし、近年では地震

波の解析に比べるとその貢献の度合いは極めて小さいと言わざるを得ません。本研究ではデータ量を増やすだけでなく理論と解析の両方に見直しを行うこ

とで、地球深部構造について新たな発見をすることを目的とします。



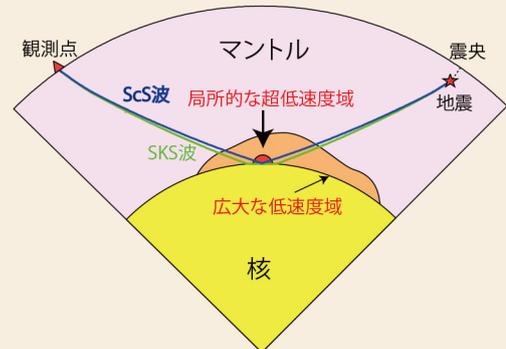
周期 707 秒のモードの振動模式図

CMBにおける局所低速度異常領域のグローバルマッピング

大林政行 [海洋研究開発機構]

核マントル境界（CMB）上には、アフリカ大陸と太平洋下に地震波S波速度が数パーセント遅い広大な場所があります。この異常域の中や境界付近にはシャープな速度異常が局在することが見つかっていて、それは温度や化学組成に多様な変化があることを表し、地球内部の運動を探る鍵である考えられています。図のようにCMBで反射するS波（ScS波）と屈折するS波（SKS波）は、地震の震央と観測点の間の地表に沿った距離がだいたい6000~8000km（地球の中心で測った角度がおおよそ60~

80°）では、マントル内のほぼ同じ場所を伝搬するので、ScS波反射点付近に存在する局所的な異常を検出することが出来ます。本研究では世界中の地震波データを使いScS波とSKS波を比較解析することで局所的な速度異常をマッピングし、温度や化学組成の原因解明に貢献します。



震央距離 70 度のScS（青）、SKS（緑）波の伝達経路。ScS波の反射点付近に低速度異常がある場合、ScS波の到達時間が遅くなる。

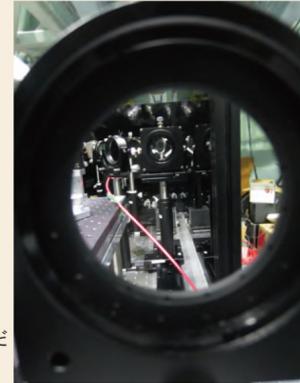
公募研究紹介

ハイパワーレーザー衝撃圧縮を用いた溶融鉄合金の輸送特性解明

尾崎典雅 [大阪大学 大学院工学研究科]

米粒 1 つ分のエネルギーはおおよそ 70 カロリー (~300 ジュール) です。この一見小さなエネルギーを、ナノ秒 (10^{-9} 秒) の短時間に集約し、集光レンズを用いて 1mm^2 の面積に照射するハイパワーレーザーの方法を用いると、大気圧の数百万倍に達する動的超高压が実現されます。この衝撃波による断熱不可逆的な圧縮過程では、非常に短い時間で瞬間的に圧力が上昇するため、圧力と同時に温度も上昇します。この

特性を活かせば、数百万気圧・1 万度までの広範な領域における極限環境下溶融鉄の特性を調べることができるようです。本研究計画では、ピコ秒 (10^{-12} 秒) 時間変化を検知できる独自のその場観測システムを用いて、動的圧縮下での鉄合金の光反射率変化を観測し、溶融核の輸送特性 (電気伝導度と熱伝導度) を明らかにすることに挑戦します。



真空チャンバー側の光路から臨んだ超高速その場観察システムの様子

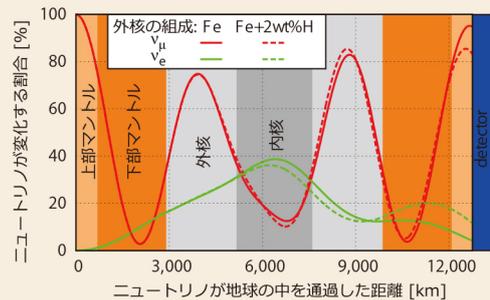
ニュートリノ振動を用いた地球深部の化学組成構造の測定

武多昭道 [東京大学 地震研究所]

地球の外核は 90 パーセント程度が鉄とニッケルからできていて、残りは別の元素からできていると考えられています。しかし、地面に深い穴を掘って調べたわけではありませんから、これはあくまでも仮説です。

ニュートリノを使うと、外核の組成を直接測定することができるようになります。ニュートリノには、3 つの種類がありますが、時間と共に他の種類に変化するという、他の素粒子にはない特徴を持っています。

地球を貫通してやってくるニュートリノが他の型に変化する割合を測定すると、地球内部の電子の密度分布を測定することができます。これと核子の密度分布を組み合わせることで、地球内部の平均的な組成 (陽子と核子の比率) の分布を得ることができます。私たちは本新学術領域と連携して、この研究を進めています。



地球の中心を通過する、40 億電子ボルトのエネルギーをもったミュー型ニュートリノ (ν_{μ} , 赤線) が、電子型ニュートリノ (ν_e , 緑線) に変化する様子。実線・点線は、それぞれ外核の組成が鉄・鉄に 2% の水素が混ざった場合。

二次イオン質量分析法とイオン注入法の融合による元素定量分析法の開発

伊藤正一 [京都大学 大学院理学研究科]

地球や惑星を構成する核、マントルの状態や対流に大きな影響を与える「水」の循環を明らかにすることは固体地球の内部の動きと進化の理解に不可欠です。しかし、試料に吸着した水による汚染や揮発性成分であるために分析困難だった固体試料中の微量水定量分析は、未踏の分析領域でした。本研究課題では、計画研究の各班から提供いただける高温高压実験生成物や天然マントル試料の鉱物やガラスの含水量を推定するため、イオン注入法による標準試料を作成し、二次イオン質量分

析法による局所水素定量分析手法を組み合わせた分析手法の開発を行います。これにより、惑星内部の水の挙動の解

明に新展開をもたらすことを目指します。

同位体顕微鏡 (二次イオン質量分析計)

水素分析に特化した仕様



京都大学地球惑星科学専攻宇宙地球化学講座設置の同位体顕微鏡の写真。微量結晶水の分析に特化した仕様となっています。

岡田卓 特任助教

計画研究A01-2 構造物性班

2016年4月に東京大学・大学院理学系研究科・地殻化学実験施設に特任助教として赴任しました。ダイヤモンドアンビル高压装置とレーザー加熱を組み合わせて地球深部の高压高温状態を実験室で再現し、物質の挙動を調べています。一般的な加熱用レーザー(Nd:YAGレーザーやファイバーレーザー、波長:~1ミクロン)は、遷移金属元素を含む物質を効率よく加熱できますが、非金属元素のみの化合物(例

えばマグネシウムケイ酸塩や氷など)を加熱することは困難です。そこで、約10ミクロンの波長をもつ炭酸ガスレーザーを用いて、窒素やアンモニアとマントル鉱物との反応や融解実験などを進めています。7月より、宝石鑑別を行う民間会社へ転出することになりました。現在は Gemologist になるべく新たな勉強・修行に明け暮れています。



賞雅朝子 特任技術研究員

計画研究A02-1 同位体班

2016年4月からJAMSTECの特任技術研究員に着任しました。東京大学地震研究所でタングステン同位体トレーサーを用いたコア・マントルの相互作用や地球深部の進化について研究を行い、学位を取得後、地震研究所の特任研究員・放射線医学総合研究所の研究員などに在籍し、高精度の同位体比分析手法の開発などにあたってきました。本プロジェクトでは、タングステン

(W)に加えて、オスミウム(Os)ネオジウム(Nd)の同位体比を用いて、核・マントルの共進化を明らかにしていきたいと考えています。



秋澤紀克 特定研究員

計画研究A02-2 元素分配班

2016年4月から京都大学に特定研究員(受入研究者:小木曾哲教授)として着任しました。それまではポスドクとして金沢大学に在籍し、博士号もそこで取得しました。

これまで、掘削船乗船や、オフィオライト(かつての海洋地殻-マントルの化石)が露出するオマーンに行くことで、地表から10km程度深部由来のはんれい岩やかんらん岩を直接採取し、薄片観察と化学組成分析を通して研究

を遂行してきました。本プロジェクトにおいても、天然の岩石を用いた研究を続けていきます。より深部(~150km!)マントル由来のかんらん岩(例えば、キンバーライト中のマントル捕獲岩)を用いて、マントルにおける強親鉄性元素の挙動の実体解明を目指します。そして、マントルが“実際に”どのような化学的変遷を辿ってきたのか考えていきます。



新メンバー

三好崇之 特任研究員

計画研究A03-1 地震・電磁気観測班

2016年4月、東京大学地震研究所附属半球観測研究センターの特任研究員として着任しました。

神戸大学在学中から「なぜそこで地震が起こるのか」という問題に取り組み、特に西日本に沈み込むフィリピン海プレートの中で発生する地震について、地震データ解析と数値シミュレーションからその発生メカニズムを明らかにしてきました。

最近、この経験を生かしてアジョイントトモグラフィーといわれる手法で地球内部構造の推定を行っています。これは、観測点で記録された地震観測波形と大型計算機で計算した理論波形を比較し、観測波形をよりよく説明する地球内部構造を推定する方法です。新しい構造モデルを構築することで地球深部に潜む謎を解き明かしていきたいと思います。



上木賢太 特任研究員

計画研究A03-2 ニュートリノ班

2016年4月に特任研究員として東京大学地震研究所に着任しました。

私は東京大学理学系研究科で博士号を取得後、東京工業大学及び海洋研究開発機構に在籍し、マントル溶融やマグマ物性などを計算する数値モデルを構築するほか、野外調査や岩石の分析に基づいた天然のデータの解析も行うことで、地球内部のマグマプロセスに関する研究を行ってきました。

地震研究所では、地球物理データを

もとに日本列島の地殻やマントル浅所のマグマや岩相の分布を推定し、さらに地球化学データを用いて化学構造、特にウラントリウム分布を推定する研究に携わることで、ジオニュートリノ観測の精度向上やデータ解釈に貢献して行きます。



Sutthipong Noisagoon 特任研究員

計画研究A03-1 地震・電磁気観測班

私は2016年7月から東京大学地震研究所に特任研究員として赴任しました。6月にタイのマヒドン大学理学部で博士の学位を得たばかりです。学位論文では、遠くで発生した地震の記録や脈動と呼ばれる地面の揺れを使ってタイの地殻構造を調べ、2014年5月にタイの北部チェンライで発生したマグニチュード6.5の地震とその余震を研究しました。現在の主な任務はタイにおける臨時地震観測網の設置とその準備で

す。また、こちらに来てタイの地下深さ数百キロメートルにあるマントル遷移層の研究も始めました。私が参加する地震観測によって、核やマントルの構造研究に役立つデータの取得に貢献したいと思っています。なお、タイでは普段お互いのことをニックネームで呼び合っています。私のことはチャンプと呼んでください。



平成27年度成果発表会

2016年3月28日(月)~29日(火)に東京大学地震研究所第1会議室において、本学術領域の成果発表会を開催いたしました。今回は約50名の出席者を集め、土屋領域代表による全体報告の後、初年度ということもあり、各班

の立ち上げ状況や先行して行われていた研究成果の報告が主な内容でした。質疑応答も活発だったので予定していた時間を少々オーバーしましたが、今後の方針を検討する上で大変有意義でした。

また、イェール大学の唐戸俊一郎教授による核・マントル境界での未解決問題についての特別講演や、東京大学の武多昭道博士によるニュートリノを用いた地球の組成・密度に関する研究の現状報告も行われました。



本学術領域の総合報告をする土屋領域代表



成果発表会、会場全景

公開講演会「地震と物理で探る地球の内部」

2016年4月29日(金・祝)に愛媛大学南加記念ホールにおいて、愛媛大学GRCと東京大学地震研究所の連携・協力協定を記念した公開講演会を開催いたしました。この講演会では、世界で初めて四国直下で発見された「深部低周波微動」という特殊な地震について、この現象を発見した小原一成地震研所長の講演が行われました。合わせて、量子力学を駆使した地球深部の構造と進化の最新の研究成果をGRCの土屋卓

久教授が、ニュートリノなどの素粒子を用いた新しい地球内部研究について、地震研の田中宏幸教授が紹介しました。学内外から多数の参加者があり、特に地域の高校生から研究手法や熊本地震についての多くの質問がありました。



小原一成教授(東京大学地震研所長)の講演

日本惑星科学連合大会 (JpGU2016)

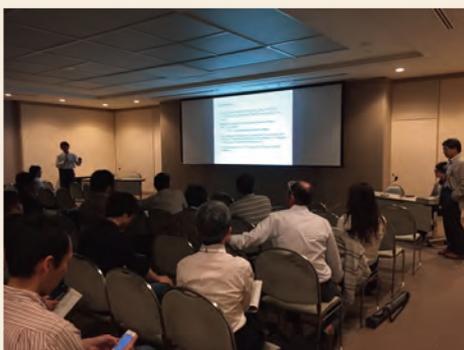
2016年5月22日(日)から26日(木)に千葉県の幕張メッセ国際会議場で日本惑星科学連合大会(JpGU2016)が開催され、本学術領域の関係者が二つの科学セッションを企画しました。また、展示ブースを出展し、多くの皆様にお越しいただきました。

一つ目のセッションは、田中聡

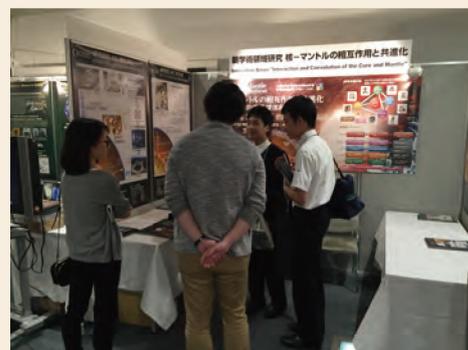
(A03-1 地震・電磁気観測班)と土屋卓久(本学術領域代表)が呼びかけた「核-マントルの相互作用と共進化」です。5月23日に開催され、主に本学術領域の参加者による24件の口頭発表と20件のポスター発表がありました。二つ目のセッションは、芳野極(A01-1 ダイナミクス班)と中川貴司(A04-1 理論計

算班)などが呼びかけた「地球と惑星深部の構造と活動」です。5月22日に開催され、18件の口頭発表と10件のポスター発表がありました。

展示ブースではポスターや配布資料を準備して、会場を訪れた高校生を始め、学会参加者の皆さんに本領域の背景や狙いを説明させていただきました。



セッション「核-マントルの相互作用と共進化」の発表風景



展示ブースの風景

イベント

2016年ゴールドシュミット国際会議

6月26日から7月1日にかけて、横浜市のパシフィコ横浜でゴールドシュミット国際会議 (Goldschmidt2016) が開催されました。この会議は地球化学に関する大きな会議で、固体地球に限らず、大気、海洋、環境など化学をキーワードとした様々な研究テーマが取り上げられます。今回は、59 か国から約3800 名の方が参加しました。本学術領域関係者は以下のようなセッションを企画し、そこでも最新の成果が発表され、活発な議論が交わされるなど、非常に盛況な会議でした。

04a: Deep Earth: Dynamics, Nature and Evolution (地球深部:活動、特質、進化)
 04c: "Water" : The Role and Influence of Hydrogen-Bearing Phases in Planetary Interiors (水:惑星内部での水素を含んだ相の役割と影響)
 18c: Mineral Physics of the Earth's Interior: Constraints on the Chemistry and Physics of our Planet from Experimental and Computational Studies (地球内部の鉱物物理:実験とコンピューター科学が制約する私達の惑星の化学と物理)



「地球深部」セッションにおける講演の様子

A04-1理論計算班 合同研究集会

2016年8月18日～20日にかけて、しもなの郷(高知県)にて、A04-1理論計算班の合同研究集会を行いました。この研究集会は、A03-1地震・電磁気班からも多数の参加者があり、総勢約20

名での開催となりました。各セッションでは、最新の研究成果や研究の進捗状況が報告され、活発な質疑応答がなされました。合宿形式で行われたので、セッション後も深夜まで研究や

人生に関する深い議論が交わされました。また、四国の大自然の中、フィールドワーク等も行われ、班を越えた研究内容の相互理解や交流が深まったと感じられる貴重な3日間となりました。



研究集会参加者の集合写真



研究集会での発表の様子

Core Mantle coevolution

Award

受賞

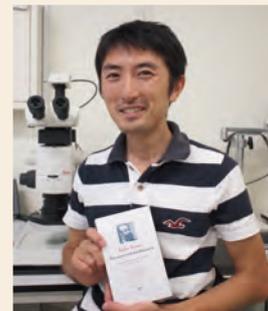
Doornbos Memorial Prize

館野繁彦 [岡山大学惑星物質研究所, A02-2元素分配班]

2016年7月24日から29日にフランス・ナント市で開催された地球深部研究 (SEDI) 国際シンポジウムにて、館野繁彦特任准教授は Doornbos Memorial Prize (ドーンボス記念賞) を受賞されました。この賞は、1970年代から90年代にかけて地球深部構造の研究に活躍したオランダ人地震学者ダーク・ド

ンボス (Durk Doornbos, 1943-1993) を記念し、地球深部研究で卓越した業績を挙げた若手研究者に贈られます。今回、館野さんは、地球中心部(内核)に相当する高温・高圧条件における鉄・鉄合金の安定相や結晶構造に関する先駆的研究結果が評価されました。

館野さんと記念品 (ジュール・ベルヌ著「地球中心への旅」)



ほかの受賞

International Summer Institute: Using particle physics to understand and image the Earth 優秀発表賞

Zhihua Xiong さん (愛媛大 PD) "Ab initio prediction of potassium partitioning into the Earth's core"

日本地球惑星科学連合 2016 年大会 学生優秀発表賞

中村佳博さん (新潟大博士課程 3 年) "Pressure-temperature-time dependence of structural evolution of CM to graphite: Implication for fast graphitization in metamorphic terrain"

国際レクチャー

“(Part I) High pressure devices and typical applications. An introduction. (Part II) Water and ice: A case for neutrons and x rays.”

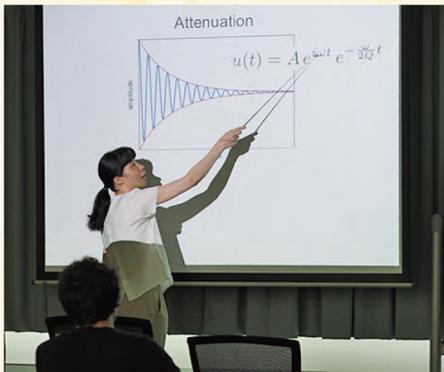
Stefan Klotz 教授 (ピエール&マリー・キュリー大学)、6/2、6/9、東京大学理学部化学本館

“Seismological constraints on the Earth’s physical property”

Miaki Ishii 教授 (ハーバード大学)、6/16、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

“Material transport in the deep Earth’s mantle”

Konstantin Litasov 教授 (ノボシビルスク州立大学)、7/8、7/11、東京大学理学部化学本館



Ishii 教授による国際レクチャーの風景

海外派遣成果報告

派遣者：Zhihua Xiong (愛媛大学博士研究員)、Longjian Xie (岡山大学博士院生)、白旗 豊 (東北大学博士院生)

派遣先：イタリア・グランサッソ科学研究所主催 夏季研究所「素粒子物理学を用いた地球内部研究」

7/11-21 に、イタリア・ラクイア市にあるグランサッソ科学研究所が主催した夏季研究所 (Summer Institute) に参加しました。この研究所はニュートリノやミュオンなど素粒子を利用した地球内部研究の人材育成を目的とし、地球内部の熱的活動や放射性元素の挙

動に興味を持つ若手の物理学者・地球科学者約 30 名が集いました。参加国もバラエティーに富み、アメリカ、カナダ、メキシコ、フランス、ドイツ、スペイン、イタリア、チェコ、スロバキア、スイス、オーストリア、ロシア、日本、中国、韓国、インドと 16 カ国を数えました。物理学

と地球科学の著名な先生方から地球内部に関する基本的な理論の講義の後、実習や各々の研究発表を行いました。多くの国の若手研究者と研究分野の枠を超えた交流ができました。将来の国際共同研究を企画立案する際に大いに役立つと期待しています。



夏季研究所参加者の集合写真



グランサッソ国立研究所地下実験施設の見学

国際セミナー

“Atmosphere-mantle interactions using noble gases”

Colin Jackson 博士 (カーネギー研究所)、6/3、6/9、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

“Earthquakes great and small: how they become large and how they evade detection”

Miaki Ishii 教授 (ハーバード大学)、6/17、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

海外研究者受け入れ

Colin Jackson (カーネギー研究所、博士研究員)、5/3-6/6、東京大学

Stefan Klotz (ピエール&マリー・キュリー大学、教授)、5/26-6/12、東京大学

Miaki Ishii (ハーバード大学、教授)、6/12-24、愛媛大学

Tao Sun (中国科学院、教授)、6/15-7/2、愛媛大学

Sourav Misra (インド工科大学、博士院生)、7/7-17、東北大学

Sujoy Kanti Ghosh (インド工科大学、助教授)、6/28-7/16、東北大学

海外派遣

グランサッソ科学研究所 (イタリア)

Longjian Xie (岡山大学、博士院生)、7/10-18

Zhihua Xiong (愛媛大学、博士研究員)、7/10-23

白旗豊 (東北大学、博士院生)、7/10-23

ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン (イギリス)

西原遊 (愛媛大学、准教授)、8/17-31

久保友明 (九州大学、准教授)、8/17-22

芳野極 (岡山大学、准教授)、8/17-22

Fang Xu (岡山大学、博士院生)、8/17-31

新学術領域「核-マントル共進化 (略称)」のニュースレター第 2 号をお届けします。今号には、各研究項目からの話題だけでなく、今年度から採択された個別の研究計画 (公募研究) や新たに参加してくださった若手研究者

の紹介、各イベントや国際交流活動の報告なども加わり、ずいぶんページが増えてしまいました。原稿を執筆していただいた皆さまに感謝いたします。このように多岐にわたる本学術領域の活動も軌道に乗って参りまし

た。読者の皆様には引き続き愛読いただけたら、編集委員一同、頑張ってます。

(編集：田中聡、小木曾哲、西原遊、舟越賢一、西真之、野村龍一、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/