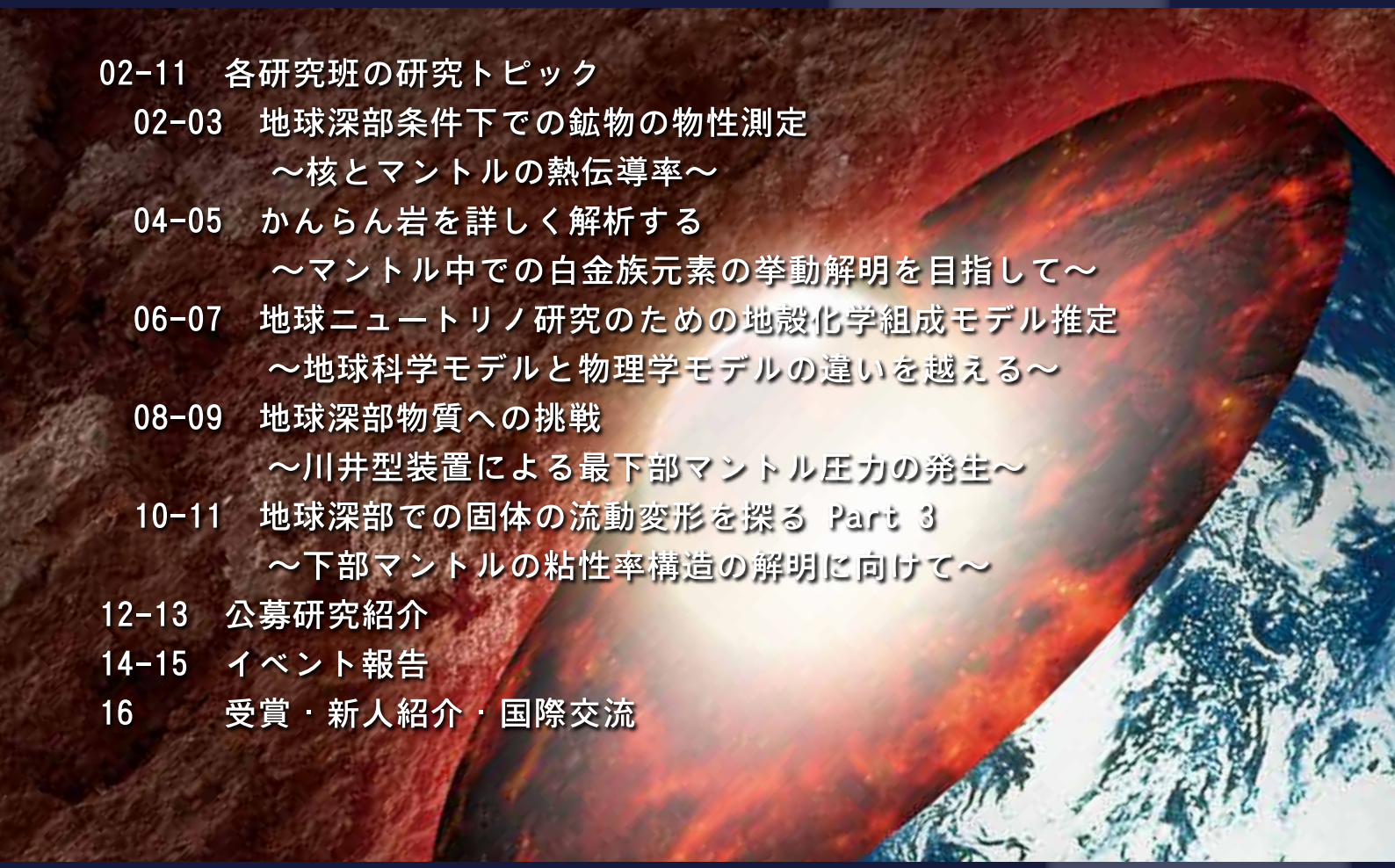
新学術 核ーマントル共進化ニュースレター
No. 6
平成30年8月31日発行

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

核ー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



02-11　各研究班の研究トピック
02-03　地球深部条件下での鉱物の物性測定
～核とマントルの熱伝導率～
04-05　かんらん岩を詳しく解析する
～マントル中での白金族元素の挙動解明を目指して～
06-07　地球ニュートリノ研究のための地殻化学組成モデル推定
～地球科学モデルと物理学モデルの違いを越える～
08-09　地球深部物質への挑戦
～川井型装置による最下部マントル圧力の発生～
10-11　地球深部での固体の流動変形を探る Part 3
～下部マントルの粘性率構造の解明に向けて～
12-13　公募研究紹介
14-15　イベント報告
16　受賞・新人紹介・国際交流

太田　健二

東京工業大学
理学院
地球惑星科学系

核とマントルの熱伝導率測定

地球ができたばかりの約 46 億年前、地球はマグマオーシャンと呼ばれるマグマの海に地表全てが覆われるほどに高温の世界であったと考えられています。地球の原材料の分化を促したマグマオーシャンは、その熱を宇宙空間へ放出することで固化し、地殻、マントルと核が形成されました。形成当初は融けた鉄合金のみからなっていた核は地球が時代と共に冷えることで、地球 46 億年史のある時代に中心部に固体の鉄合金からなる内核ができました。液体核の対流は地球の磁場の源です。その核を覆う岩石のマントルも岩種の違いによって上部マントル、マントル遷移層、下部マントル、D"（ディー・ダブルプライム）層という層構造をなしています。地球表層付近には液体の水やマントルとは違った特徴をもつ地殻が存在し、プレート運動とそれに伴う地殻変動が起こっています。このような地球の熱進化とダイナミックな運動の源は、地球中心から地表へと向かう巨大な熱流であるといえます（図 1）。

地球中心核は地球内部で最も高温の領域です。現在の核は融体金属からなる外核（地表からの深さ 2900~5200 km，圧力 135~330 万気圧，温度 3800~5000 ケルビン）と、固体金属からなる内核（深さ 5200~6400 km，圧力 330~360 万気圧，温度 5000~6000 ケルビン）で構成されています。正確な誕生年代には未だ論争がありますが、地球の磁場は約 42 億年前から存在したという主張もあります。核からマントル、地殻へと流れる熱の量を決定することは、核とマントルの対流やプレート運動などのダイナミクスの解明や地球の熱進化過程を辿り現在の地球の形成要因を解き明かすための重要な研究であると私は考えています。熱伝導率は物質中の熱の伝わりやすさを表す物理量であり、核とマントルの熱伝導率は、核とマントルの境界を貫く熱の流れる量（熱流量）を大きく支配します。そのため、私の研究室では核とマントルを構成する物質の熱伝導率を実際の地球深部の高い温度高い圧力条件下で計測することに取り組んでいます。

では、地球の深い場所の環境をどうやって再現しているのでしょうか？私の研究グループでは高温高圧発生装置としてダイヤモンドアンビルセル（DAC）という道具を使っています（ニュースレター No.2、No.3、No.4、No.5 をご参照下さい）。DAC には 0.15 カラットほどの単結晶ダイヤモンドが 2 つ対面で取り付けられています。2 つのダイヤモンドの間に測定したい試料を挟み、圧縮することで高い圧力をかけることができます。非常にシンプルな装置ですが、地球の核、マントルにかかる圧力を再現可能です。さらにダイヤモンドを通して試料に赤外線レーザーを当てることで、太陽の表面温度と同等の温度を DAC の中に再現することができます。試料の高温高圧下での熱伝導率の測定には次の 2 つの方法を用います。まず、核を構成する鉄合金のような金属において、熱の大部分は自由電子が運びます。そのため、自由電子による熱伝導率は Wiedemann-Franz の法則（$\kappa = \sigma LT$：κ は電子熱伝導率，σ は電気伝導度，L はローレンツ定数，T は絶対温度）と呼ばれる関係式によって電気伝導度（電気の伝わりやすさを表す物理量）と温度の関数として近似できます。核の物質の熱伝導率を決定するために、DAC 内部に細かい電気回路を作り、鉄合金の電気伝導度を実際の核の温度圧力条件で測り、上記の法則を使って熱伝導率を求めました（図 2）。いっぽう、マントルを構成する鉱物の多くは電気伝導度の低い絶縁体物質です。絶縁体は金属とは異なり，構成原子の熱振動による熱伝導（格子熱伝導）が支配的ですので、金属のように電気伝導度から熱伝導率を推定することは出来ません。そこで、DAC 内のマントル鉱物の高温高圧下その場熱伝導率測定手法として、パルス光加熱サーモリフレクタンス法を新たに開発しました。

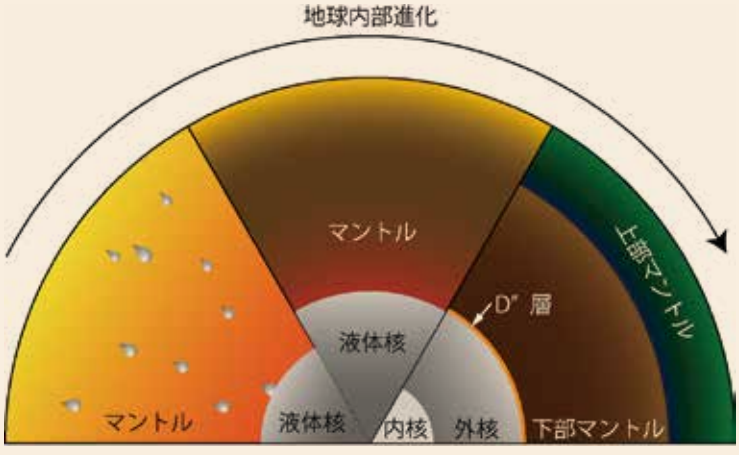
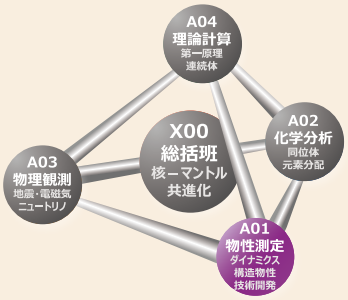


図 1．地球内部進化の模式図：地球の核ーマントル分化過程（左）、核ーマントル分化後の内核未形成時（中央）、現在の地球内部構造（右）。現在の地球は表層から順に、地殻、上部マントル、マントル遷移層、下部マントル、D" 層、外核、内核で構成されています。

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圧条件のもとで実験的に収集します

～地球内部の熱進化の解明に向けて～

この方法はもともと微小な集積回路の熱伝導率を測るために考案されたもので、金属の光の反射率が温度によって変化するサーモリフレクタンス効果を利用した手法です。ディスク状に成形した鉱物試料の両面に金属膜を貼り、片側にサーモリフレクタンス効果を計測するレーザー、もう片側には温度の擾乱を与えるためのパルスレーザーを照射します。パルスレーザーが試料の片側を瞬間的に加熱し、その温度変化を反対側のレーザーで検出し、試料内部の熱の伝導を可視化することで熱伝導率を求めます（図3）。この手法を用い、マントル全域に相当する圧力での熱物性測定が初めて可能となりました。

上記の方法を用いて、私達の研究グループは核を構成すると考えられている合金に対して伝導度測定実験を行いました。これまでに、純鉄、鉄ーニッケル合金、鉄ーケイ素合金、鉄ーケイ素ー硫黄合金、鉄ー水素合金について調べています。これらの実験結果から導き出される核（例えば、鉄ーニッケルーケイ素合金を仮定すると）の核ーマントル境界条件での熱伝導率はおよそ 90 W/m/K で、十数年前の教科書に載っている値よりも数倍大きく、最近のいくつかの研究例と調和的な結果です。ニッケル、ケイ素の代わりに水素や硫黄が核に含まれていたとしても私達が主張する核の伝導度に大きな違いはありません。核―マントル境界における熱流量は、（熱伝導率）×（温度の深さ変化率）×（核表面の面積）で表されますので、この高圧実験によって得られた鉄合金の熱伝導率の結果は熱流量が従来の見積もりより数倍大きいことを意味します。その結果として内核の年齢が 10 億歳以下ととても若いこと、マントルの底が大規模に融解しているという解釈が導かれます。マントルに対しても、そこで存在度および重要度が高い鉱物いくつかについて熱伝導率の測定を行いました。例えば、地球のマントルにはブリッジマナイトと呼ばれる鉱物がもっとも多く存在しています（ニュースレター No.5 をご参照ください）。ブリッジマナイトはマントルの底で核と接しているはずです。そのブリッジマナイトの熱伝導率を実験によって測定すると、約 10 W/m/K という値が得られました。このマントル底部の熱伝導率とマントル底部の温度構造から核ーマントル境界を貫く熱流量を求めると、上述した核の熱伝導率から推定される値と同程度となります。

約 46 億年前に地球が誕生してから現在の姿へと進化する過程、そして地球の未来の姿を推定することは私が今最も興味を抱く研究テーマです。実は、地球深部の熱伝導率に関する実験あるいは理論的研究は、世界的に熾烈な競争の最中にあり、その結果次第で地球熱進化に対する我々の認識は大きく変わる可能性があります。地球中心核とマントルの熱伝導率は、地球史 46 億年を通した核・マントル・地殻の熱的進化、また地球深部の現在の温度構造、その将来予測を行う上で不可欠な情報です。今後、更なる研究の進展を目指して日々頑張っていきたいと思います。

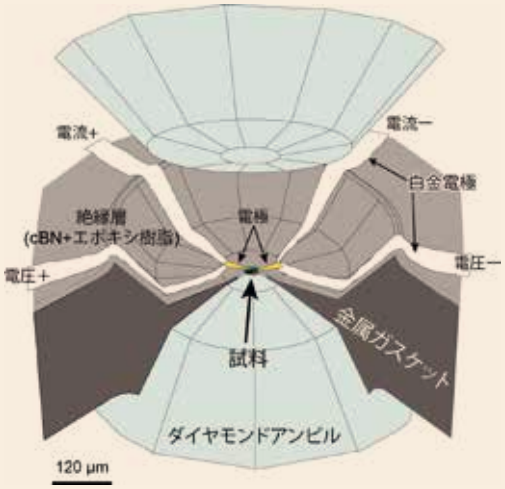


図 2. DAC を用いた高圧その場電気伝導度測定の概略図。人間の髪の毛の直径が 50～80 μm なので、どれほど試料が小さいか、お分りいただけるでしょう。

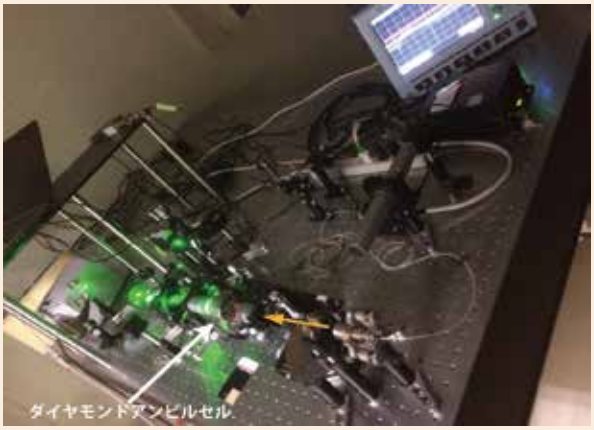
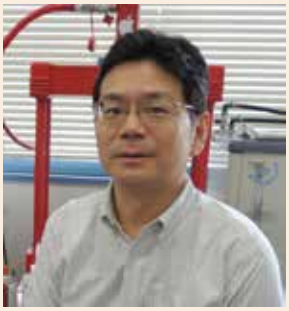


図 3. サーモリフレクタンス法を用いた高圧下その場熱伝導率測定装置。緑色の光がサーモリフレクタンス効果を検出するレーザー、オレンジ色の矢印が熱を加える赤外線パルスレーザー。光検出器とオシロスコープを用いることで、試料の温度の時間変化を可視化しています。白い矢印の先に DAC が設置されています。DAC は直径 5 cm、高さ 5 cm で手のひらに乗る大きさです。

秋澤　紀克

東京大学
大気海洋研究所



小木曽　哲

京都大学
人間・環境学研究科

かんらん岩を詳しく解析する

我々が生活する地殻の下にはマントルが拡がっていますが、未だにマントルの直接採取は達成されていません。マントルに行くことは、宇宙に行くことよりもはるかに難しいのです。しかし、間接的な方法を用いることでマントルを手に入れることができます。その代表的な方法が、捕獲岩の採取です。捕獲岩とは、マグマが地表に向かう際に取り込んだマントルの“かけら”です。捕獲岩はかんらん岩と呼ばれる岩石からなり、我々はその研究を行っています。研究を行う上で我々が特に注目しているのが、かんらん岩中の白金族元素含有量です。白金族元素は鉄にとても溶けやすい（強親鉄性）元素であるので、地球誕生時に核とマントルが分離した時、鉄を主とした金属からなる核に多く取り込まれる一方で、ケイ酸塩鉱物からなるマントルにはほとんど入らなかったと予想されていました。しかし、かんらん岩の白金族元素含有量を分析してみると、実は予想に反して白金族元素が多く含まれる場合が多々あり、その組成は、地球形成時の特徴を残しているコンドライト質隕石に類似するということもわかってきました。この矛盾点を説明する仮説として、(1) 核とマントルが分離した後、まだ溶けていたマントルにコンドライト質隕石が降ってきた、(2) 核―マントル境界付近において、核の物質が固体マントル中に取り込まれるような反応が起きている、(3) 白金族元素を運ぶことのできる媒体（メルトや流体）により、核に含まれた白金族元素をマントル中に運び込む、など様々考えられます。我々は、かんらん岩の白金族元素含有量に着目することで、地球への後期隕石衝突（仮説 1）、または核―マントルの相互作用（仮説 2 や 3）の実態解明に寄与したいと考えています。

ここで簡単にかんらん岩の主な構成鉱物について触れておきます。かんらん岩の中で一番多い鉱物はかんらん石で、約 7〜8 割を占めます。かんらん石は 8 月の誕生石であるペリドットという宝石としても親しまれています。残り約 2〜3 割は単斜輝石や斜方輝石と呼ばれる輝石類からなります。その他にも様々な鉱物を含む場合がありますが、かんらん岩は主にかんらん石と輝石類からなると言えます。上に述べたように、白金族元素は強親鉄性元素であるため、かんらん石や輝石類などのケイ酸塩鉱物にはほとんど入っていません。では、かんらん岩中のどこに白金族元素が入っているのでしょうか？実は、かんらん岩中には微少量（大抵 1%以下）の硫化鉱物や白金族鉱物が含まれています。それらの鉱物は白金族元素をとても多く含むことができるため、その量によりかんらん岩の白金族元素含有量が左右されます。つまり、硫化鉱物や白金族鉱物がどのように形成されたかを明らかにすることができれば、先に述べたかんらん岩の白金族元素過多問題の解明につながると期待できます。そこで、我々はかんらん岩に微少量含まれる硫化鉱物や白金族鉱物の詳細な解析を行っています。

研究に用いたかんらん岩サンプルは、タヒチ（フレンチポリネシア）で採取された捕獲岩です。タヒチはソサイエティ・ホットスポットと呼ばれる火山活動が活発な場所にあります。その周辺にはマクドナルド、マルケサス、ピトケアン、アルゴなどのホットスポットが集中しているだけでなく、これらを含むフレンチポリネシア全体で海底地形が高まっています（南太平洋超海膨）。また、地震学や地球電磁学的観測によって明らかにされた地下構造には、まるで核―マントル境界からマントルが湧き上がってくるような異常も検出されているため、タヒチを含むフレンチポリネシアは多くの地球科学者が関心を持っている地域です（図 1）。

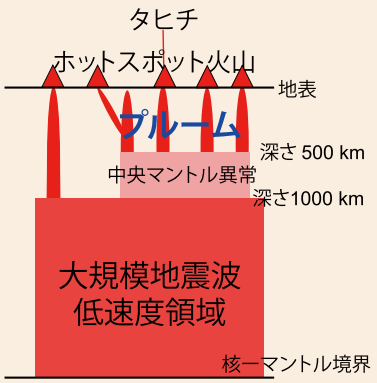


図 1. フレンチポリネシア下のマントル構造の概念図 (JAMSTEC 大林氏から提供)。

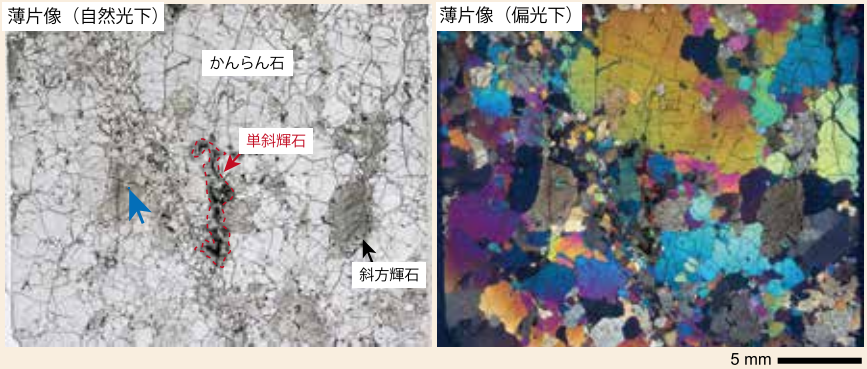
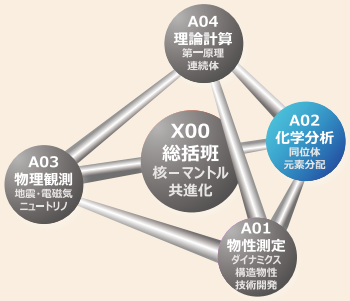


図 2. タヒチ産かんらん岩捕獲岩薄片像。青矢印で示す箇所は、図 3、4 で示す炭素質ガラスや不透明鉱物の小さな包有物がある場所を指しています。

研究項目トピック



研究項目A02：化学分析

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

～マントル中での白金族元素の挙動解明を目指して～

研究に用いた捕獲岩サンプルの薄片像を図 2 に示します。図 2 右側のように偏光下（特定の方向にのみ振動する光を当てた状態）で岩石薄片を見ると、とてもカラフルで幻想的なかんらん岩の姿が現れます。このサンプル中では単斜輝石が脈状に延びており（赤点線で示す箇所）、特徴的な化学組成を示すことから、これはタヒチ直下のマントル中で炭素を含むメルトによる変質作用（交代作用）を被ったと考えることができます。これは先行研究と調和的な結果であり、上に述べた仮説 3 の実態に迫ることができると期待されます。

一方で、図 2 に示す薄片のスケールでは、我々の研究対象である硫化鉱物や白金族鉱物は全く存在しないように見えます。しかし、さらに細かなスケールでの観察と物理・化学的な解析を通して、～1 μm サイズの非常に小さな硫化鉱物や白金族鉱物と期待できる不透明鉱物を多数見つけることができました。図 2 の青矢印で占めした部分には交代作用で形成された単斜輝石があります。この単斜輝石を収束イオンビームで切り出し（切り出した部分は青矢印の先に四角で示していますが、とても小さいためよく見えないことに注意してください）、放射光 X 線を用いた CT スキャンで作成した三次元像を図 3 に示します。図3で藍色の部分はガラス、黄緑色の部分は不透明鉱物からなる丸い包有物です。ガラスや不透明鉱物は面上に並んでいます。このような組織の特徴から、ガラスや不透明鉱物のもととなったメルトが小さな割れ目沿いに侵入し、温度が高かったために割れ目が閉じてしまい、その際に取り残されたメルトがガラスや不透明鉱物をつくったと解釈できます。これは、単斜輝石が形成された後も交代作用が続いていたことを示しています。さらに、図 3 において矢印で示されたガラスと不透明鉱物からなる包有物を収束イオンビームで切り出し、電子顕微鏡とそれに付属する元素分析装置を用いて化学分析した結果を図 4 に示します。この包有物では炭素を含むガラスが不透明鉱物の周りを覆っています。図 4 を見ると、不透明鉱物の元素分布にはムラがあり、いくつかの違う鉱物相に分かれていることがわかります。このように、肉眼では一つの不透明鉱物に見えますが、電子顕微鏡を用いて詳しく解析することによって複数の鉱物相により織り成される自然の造形美を観察できたことは、天然物質を扱う研究の一つの醍醐味であると言えます。さて、この解析において最も重要なことは、白金族元素であるプラチナ、イリジウム、ロジウムを含む白金族鉱物を不透明鉱物の中から発見したことです。この白金族鉱物が炭素を含むガラスに覆われていることから（図 4）、プラチナ、イリジウム、ロジウムが、炭素を含むメルトによる交代作用によってマントル中で動いたことが明らかになりました。ここで紹介したようなメルトの存在は、様々な場所で採取されたかんらん岩の研究において報告されています。今後、私たちが見つけた白金族元素の移動がどの程度普遍的にマントル中で起きているのか明らかにするために、交代作用を受けたかんらん岩の白金族元素ホスト鉱物の詳細な解析と同定をさらに進めていく予定です。そして、仮説 3 を実証することを通して核ーマントルの相互作用解明につなげていきたいと考えています。

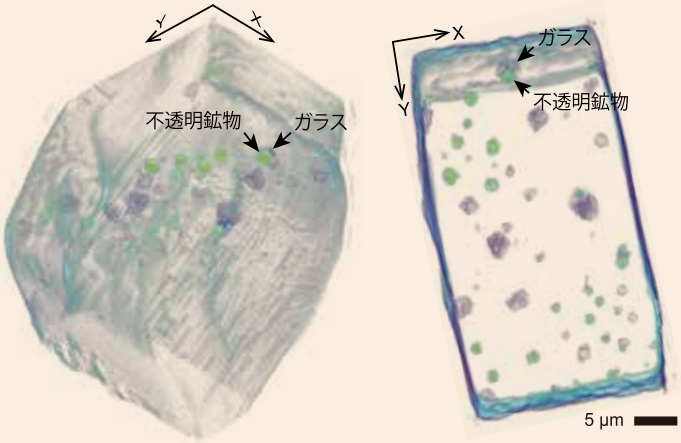


図 3. 収束イオンビームで切り出された単斜輝石の三次元像。放射光施設 SPring-8 で撮像されました。右側の像は、左側の像を上部から見たものです。

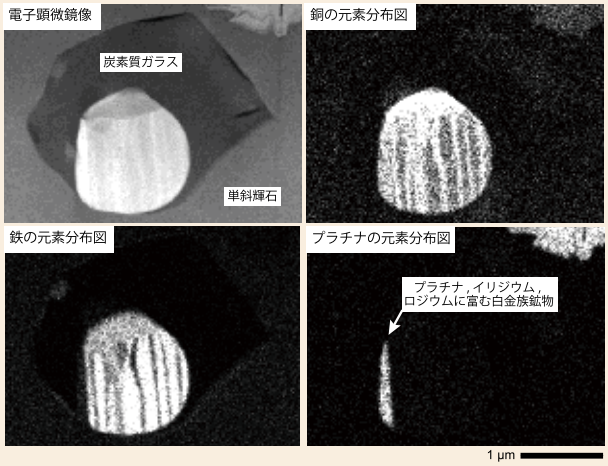
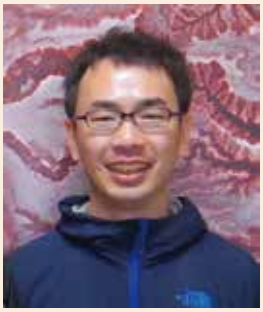


図 4. 炭素質ガラス＋不透明鉱物の包有物解析結果。不透明鉱物は様々な鉱物相に分かれています。

竹内　希
東京大学
地震研究所
海半球観測
研究センター



上木　賢太
海洋研究開発機構
地球内部物質循環
研究分野

地球ニュートリノ研究のための地殻化学組成モデル推定

地球内放射性物質の崩壊を起源とする地球ニュートリノは、これまでの地球観測では得られない地球化学組成の情報を提供するため、地球科学者が物理学者と共同で研究を推進しています。しかし地球科学と物理学では、モデル推定の考え方やモデルの記述法に大きな違いがあるため、研究推進の障害になっていました。この重要な学際研究を推進するため、私たちは「地球科学モデル」と「物理学モデル」の違いを解消するよう試みました。

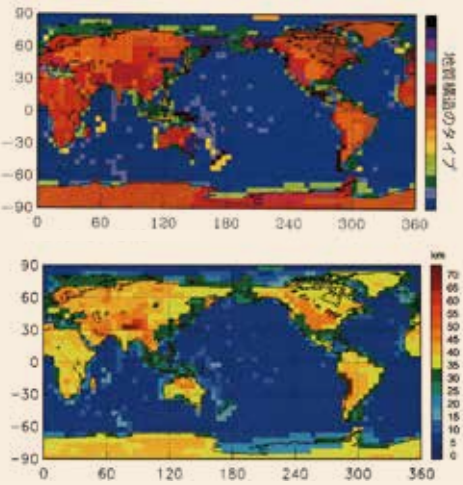
地球科学のモデルには３つの大きな特徴があります。一つはモデルの記述にしばしば不明確な概念を用いる点です。例えば大相撲の決まり手はここで言う概念に相当します。決まり手は、土俵上で発生した現象を記述するのに不可欠なものですが、かといって明確な定義はありません。しかるべき人が見ればほとんどの場合同じカテゴリーに分類されますが、意見が分かれることもあります。日常的な地球に関する記述でも、「平野」「余震」「梅雨」など、厳密な定義のない概念を使っていることに気づきます。学術的な地球科学も同様で、例えば地表の地質構造区分を大相撲の決まり手と同様に分類分けし（図１ａ上）、これを用いてモデルを記述しています。

二つ目の特徴は、モデルの推定でしばしば洞察が用いられることです。例えばある人の顔を見てその人が男性か女性かを判断するのは、ここで言う洞察を用いた推定の例になります。判断の基準をまぎれもない言葉で表現することはできないものの、ほとんどの場合正解が得られます。地球科学でも、例えば地質構造区分モデル（図１ａ上）での構造境界線は洞察に基づいて引いています。

三つ目の特徴は、多くの地球科学モデルでは、最もありそうな推定値だけが提示される点です。推論過程に用いる概念や洞察や観測データ等に不確定性がある以上、一般的には推定値を一つだけに特定することはできません。しかし特に概念や洞察の不確定性を定量化することが困難なので、尤もらしい推定値だけを示しているのです。例えば先ほどの地質構造区分モデルと地震学的観測データを用いて地殻の厚さ分布モデル（図１ａ下）が推定されていますが、推定値の誤差は示されておらず、なおかつ示すのは容易ではありません。

一方で物理学のモデルは、多くの場合モデルの記述や推定過程が明確で、なおかつ推定値の取りうる幅を、確率密度関数などを用いて定量的に示すことが特徴です。例えば神岡の KamLAND と呼ばれるニュートリノ検出装置において、検出器を通過する地球ニュートリノフラックスを推定したモデル（図1b）を見ると、ウラン (U) やトリウム (Th) の崩壊に由来するフラックスの最もありそうな値だけでなく、それとは異なる Th/U 比や量がどの程度の確率で観測と整合するのかを定量的に示しています。私たちの最終目的は、KamLAND における地球ニュートリノフラックスの「物理学モデル」を構築することです。これまでの地球ニュートリノフラックスモデルは、地殻化学組成分布の「地球科学モデル」を用いて推定されてきましたが、地球科学モデルを入力として物理学モデルは推定できません。私たちは地殻化学組成分布の「物理学モデル」を推定する手法を提案し、実際に推定を実施しました。

(a)



(b)

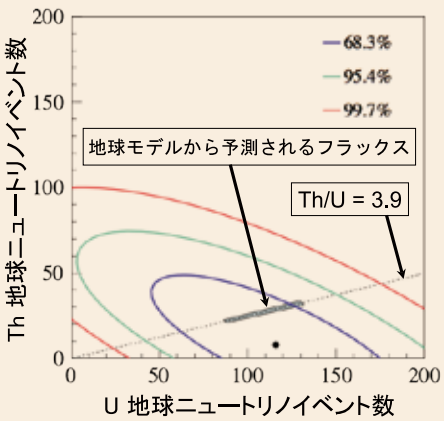
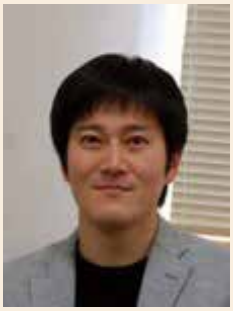


図 1. (a) 地球科学のモデルの例。地表の地質構造区分モデル (上) と、これを用いて推定された地殻の厚さ分布モデル (下)。(b) 物理学のモデルの例。神岡の検出装置 (KamLAND) での観測から推定された、U 及び Th の崩壊に起因する地球ニュートリノフラックス（イベント数換算で表す）モデル。確率密度分布を等高線で表している。

研究項目トピック



飯塚　毅

東京大学
理学系研究科
地球惑星科学専攻

榎本　三四郎
ワシントン大学
物理学科

東京大学
国際高等研究所
カブリ数物連携
宇宙研究機構

～地球科学モデルと物理学モデルの違いを越える～

従来の地殻化学組成モデルの問題点を解決するためには、モデル導出過程において概念や洞察を極力使わないこと、使わざるを得ない時はその定義や内容を明確に表現することが必要です。この考えに基づき、我々は推定手法の改善を行いました（図 2a）。新たな推定手法に基づき、地球化学組成分布モデルを確率密度関数で表しました。

従来の「地球科学的」手法にはいくつかのバリエーションがありますが、基本的な手順は図 2a 上に示した通りです。まず地球物理観測によって得られた地震波速度分布モデルから、地殻の地質構造区分モデルを作成することから始めます。図 1 a のように定義される水平方向の区分だけでなく、上部･中部･下部地殻という鉛直方向の区分も定義します。地震波速度を参考にしながら、それぞれの地質構造区分にどの岩相がどの割合で存在するかを推定し、これを用いて岩相分布モデルを構築します。そして、岩相毎の化学組成の情報を用い、地殻化学組成分布モデルを得るのです。しかし地質構造区分という概念を使うこと、構造区分や岩相分布モデルの構築に地質学的洞察が使われることから、得られた化学組成モデルの確率密度を評価することは容易ではありません。従来の研究では何とか誤差評価を実施してきましたが、その意義には疑問があります。

これに対し私たちは図 2a 下に示したような推定手法を提案しました。まず上部・中部・下部地殻という概念を用いず、地震波速度から直接的に岩相を推定するようにしました。また地震波速度から岩相を推定する際に、岩相別の地震波速度とともに必要とされる地質学的洞察の内容をまとめ、先験的情報として定量的かつ再現性のある表現で記述しました。この先験的情報と地震波速度分布の情報をベイズ統計により処理し、岩相分布モデルを確率密度関数の形で書き表しました。さらに実際のサンプルを用いて求められた岩相別の化学組成確率密度関数の情報を加えることにより、地殻化学組成分布モデルを確率密度関数で書き表しました。地質構造区分という概念を用いずに岩相分布モデルを推定しましたが、得られたモデルは地質学的洞察と整合的です（図 2b）。また我々の地殻化学組成モデルから計算される地球ニュートリノフラックスの大きさは、従来のモデルから計算されるものからあまり変わりませんが、純粋な統計的推論を経て確率密度関数が求められている点が重要です。

地球科学の推論方法はやや特殊であり、これが他分野との学際研究の妨げになっている感があります。本手法は地球ニュートリノ研究という特殊な応用を意識したものですが、同様の基本理念に基づいて丁寧に地球科学の成果を書き下せば、様々な学際研究に有効であると考えます。我々の成果が、そのような研究の起爆剤となることを期待しています。

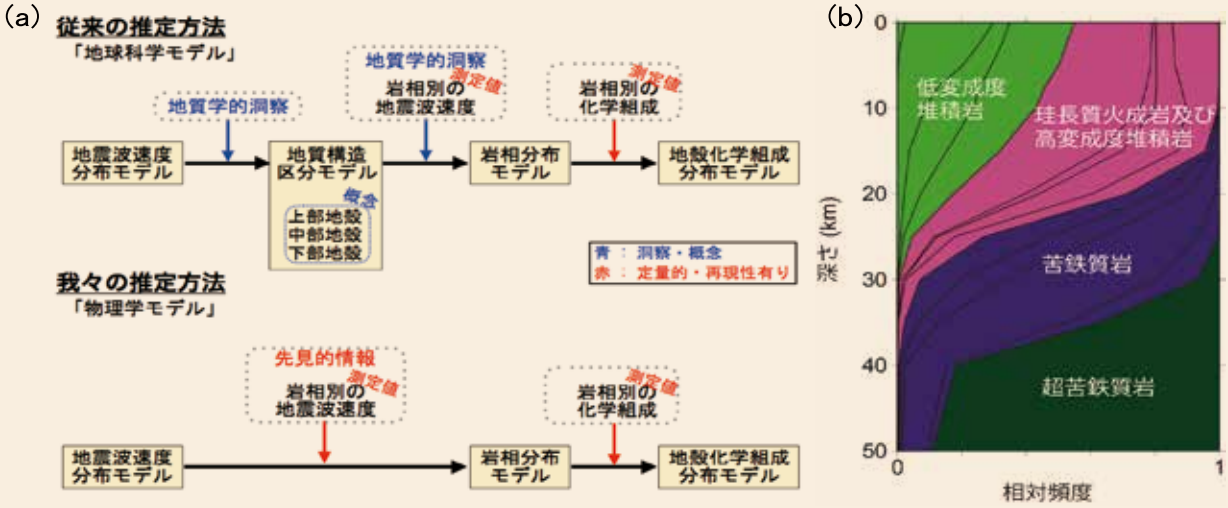


図 2. (a) 地殻化学組成モデルの従来の推定手法（上）と我々の推定手法（下）の比較。我々の推定手法を用いると、統計的推論を通じ岩相分布や地殻化学組成分布のモデルが確率密度関数として示される。(b) 我々の岩相分布モデル。

山崎　大輔

岡山大学
惑星物質研究所

地球深部物質への挑戦

私たち人類のみならず地球上の全ての生命は、火山・火成活動や地震活動によって大きな影響を受けます。それらの活動の源は地球内部にあり、地球内部の構造や活動を理解することは、地球生命の行く末にとって本質的に重要です。そして理解を深めようと思えば思うほど、私たちの興味が地球の中心に向かって行くことを止めることができません。さて、実際に地球内部を深くへと進んでいくと圧力と温度が高くなり、核―マントル境界（深さ約2900 km）ではその圧力は 136 万気圧、温度は 3000 から 4000 度に達します。一方、地球内部の物質を扱う私たちの研究では、実際の物質サンプルを手にしたいと考えるのが自然の欲求です。しかし、実際の物質を手にするための掘削によって達成された最大の深さは、現在のロシア北部のコラ半島における約 12 km しかなく、約 10 km に達した掘削坑も数カ所しかないのです。こうなると私たちの願いは叶えるためには、実験室内で高温高圧状態を人工的に再現するほかありません。特に、核―マントル境界は、温度が急激に上昇する熱的な境界だけでなく、岩石で構成されているマントルと鉄合金で構成されている核が接する物質的な境界でもあります。この境界は密度上昇や温度変化という観点においては地表でのそれらの変化よりも大きく、地球における最大の境界であると言えます。

地球内部は第 1 次近似的には層構造をしており、浅部から、地殻、マントル（上部マントル、マントル遷移層、下部マントル）、外核、内核に分けられます。また、先に核―マントル境界と書きましたが、マントルから核に突然変わるわけではありません。両者の間には、D" 層と呼ばれる厚さ 200 km 程度の層があり、この層の中で温度や物質の様子が急激に変わるため、境界層と呼ばれています。2004 年に東京工業大学（現チューリッヒ工科大学）の村上さんたちが、下部マントルの主要構成鉱物であるブリッジマナイト（ケイ酸塩ペロフスカイト：$(Mg, Fe)SiO_3$、ニュースレター No. 5 参照）が約 120 万気圧で分子構造が変わる（相転移する）ことを発見しました。この相転移した物質（ポストペロフスカイト）は、D" 層を構成している主要物質であると現在では考えられています。したがって、ポストペロフスカイトの物性を解明することが、マントル内の運動を理解する鍵となるのです。

高圧力を発生するために、地球科学分野ではダイヤモンドアンビルセル（ニュースレター No. 2~5 を参照）と川井型マルチアンビル装置が高圧実験装置として用いられています。ポストペロブスカイトの発見にはダイアモンドアンビルセルが用いられましたが、より精度の高い物性測定には、比較的大きな試料を用いることが一つの重要な要素と考えられるので、川井型マルチアンビル装置による実験的研究に期待がかけられています。しかしながら、現状の川井型マルチアンビル装置での実験技術では、ポストペロフスカイトの安定領域である 120 万気圧の発生は困難であり、我々は実験技術開発により発生可能な圧力の限界を拡張する研究を行っております。川井型マルチアンビル装置は、高圧力の発生あるいは光学的測定という点ではダイヤモンドアンビルセルと比べて劣っているのですが、高圧下における高温発生時の温度安定性や均質性に優れています。

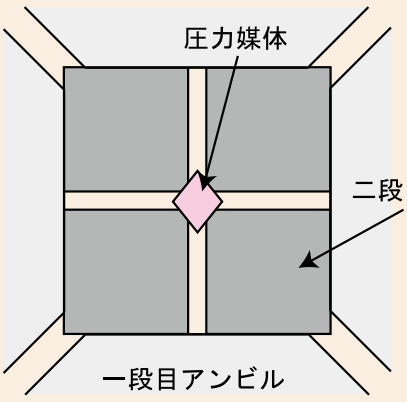


図 1. 川井型マルチアンビル装置における 2 段目アンビル組み上げ部分を模式的に表しています。

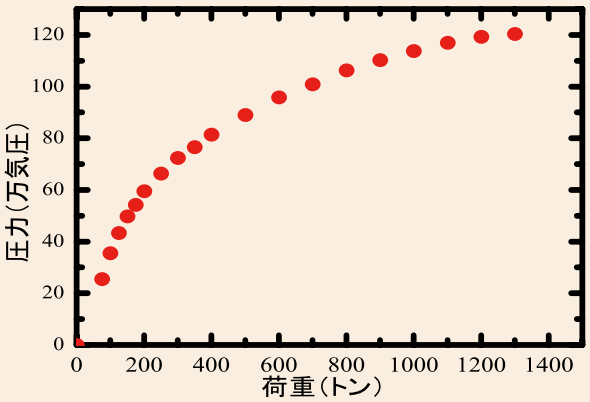
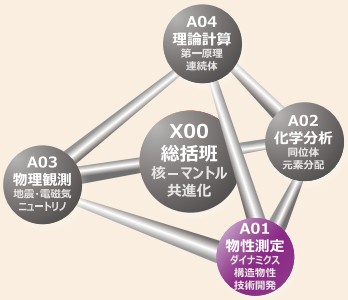


図 2. 焼結ダイヤモンドを用いた実験における圧力発生。荷重に対する発生圧力を表しています。

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圧条件のもとで実験的に収集します

～川井型装置による最下部マントル圧力の発生～

川井型マルチアンビル装置は、6 個の一段目アンビルで立方体空間を形成し、その内部に 8 個の立方体 2 段目アンビルを組み込み、この 2 段目アンビルよって正八面体の圧力媒体を圧縮する機構になっています（図 1）。高圧力の発生には、2 段目アンビルに高硬度の材質を利用する必要があり、通常の川井型マルチアンビル装置での実験では、超硬合金がアンビル材として用いられています。一般に超硬合金には焼結のための接合材（バインダー：コバルトなど）が用いられており、この接合材が硬度に影響を与え、発生圧力を左右します。アンビル材として一般的に用いられる超硬合金（タングステンカーバイト WC：炭化タングステン）を 2 段目アンビルに用いた場合、その発生圧力の上限は約 30 万気圧程度です。一方で、最近は接合材の不要な超硬合金が開発され、2017 年にバイロイト大学の石井さんらはこれを用い、室温下で約 60 万気圧、1000 度以上の高温下では約 50 万気圧の発生に成功しました。しかし、ポストペロフスカイトの研究に必要な 120 万気圧の圧力発生には、超硬合金アンビル適切はではないという認識に達しました。そこで私たちは、より硬い材質である焼結ダイヤモンドに注目しました。焼結ダイヤモンドの利用は、80 年代末期からはじまり、徐々にその発生圧力の拡大がなされてきました。当初は立方体の一辺が 10 ミリメートルであったが、1998 年に岡山大学の伊藤先生らが一辺の長さが 14 ミリメートルのアンビルを導入し、高圧プレスで駆動できる荷重上限が高まりました。その結果、発生可能圧力も大きく上昇し 100 万気圧を超えるまでになっています。技術開発班では、2 段目アンビルに焼結ダイヤモンドを用いた川井型マルチアンビル装置において、ガスケット材やセル構成の最適化などの実験技術を改良し、圧力発生の上限のさらなる拡大を試みています。

現在までのところ、複数回におよぶ試験の末、D" 層の圧力領域である 120 万気圧の発生に成功しました。図2には、代表的な試験の結果がプレス荷重に対する発生圧力として示されています。このときの圧力は、一定のプレス荷重で約 1000 度まで加熱を行った後室温まで冷却し圧力測定を行った結果です。最終的には、プレス荷重 1300 トンにて 120.3 万気圧の圧力発生が確認されました。図 3 は高圧下（荷重 250 トンと 1200 トン）で X 線ラジオグラフィ法によって観察されたサンプルの様子を表しています。本実験で用いた焼結ダイヤモンドはコバルトを接合材としているために、X 線透過能が低いですが、若干の X 線が透過します。そのため、焼結ダイヤモンドアンビルに囲まれている試料部分の観察も可能となっています。250 トンではアンビルとアンビルの隙間は約 0.4 ミリメートルであり、試料の観察に利用している X 線サイズ（0.1 ミリメートル）よりも充分大きいですが（図 3A）、1200 トンにおいては約 0.08 ミリメートルとなり X 線サイズよりも小さくなっています（図 3B）。このような極端に狭いアンビル間の隙間はアンビル材の強度不足による変形に主に由来しています。この現象は、回折 X 線の収集効率を著しく低下させますし、圧力発生効率をも低下させる原因となります。

今回の試験により、川井型マルチアンビル装置を用いて D" 層の上部に相当する圧力条件は再現することに成功しましたが、まだマントルの底での圧力には達していません。さらに温度条件を再現することもまだなされていません。前述したような高圧下でのアンビルの変形が軽減されるような高硬度のアンビル材、例えば、ヒメダイヤ（ニュースレター本号記事参照）、の開発・利用と、高温発生を発生する高圧セルの開発が今後の課題であると考えております。

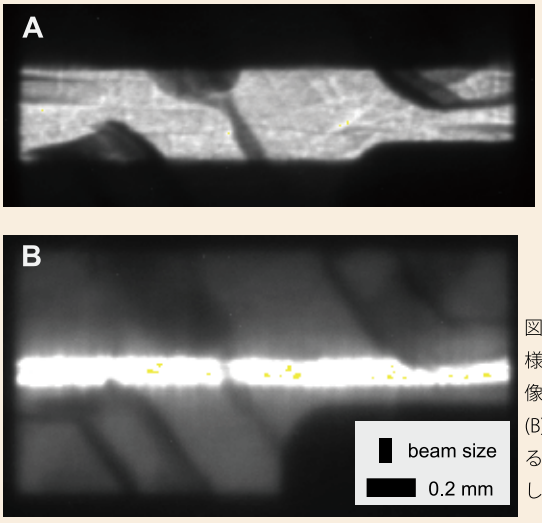


図 3. 高圧下における試料部の様子を示す X 線ラジオグラフィ像。(A) 250 トン、(B) 1200 トン。(B) においては暗部を鮮明にするために、コントラストを調整しています。

辻野　典秀

岡山大学
惑星物質研究所

地球深部での固体の流動変形を探る Part 3

日本とハワイが一年に約 8 cm ずつ近づいているということを聞いたことはないでしょうか？このような現象は、地球内部の深さ 2900 km までを占める岩石層であるマントルが対流することで引き起こされています。このマントルは、岩石層とも呼ばれていることからわかるように、固体である鉱物からできています。これは、地震波のS波（横波・せん断波）がマントル中を伝搬していることからも確認できます。一方で、地質学的時間スケール（100 万年~10 億年といった時間スケール）では、マントルは流体のように振る舞い、対流しています。この様な振る舞いは、キャラメルを金槌で叩くと固体の様に割れますが、万力でゆっくり力を加えると割れずに形を変えていく現象に似ています。このマントル対流は、とても長い時間スケールの話であり、我々の生活とはかけ離れたものの様に思われますが、我々の生活に多大な影響を及ぼす現象を引き起こしています。例えば、東日本大震災を引き起こしたプレート境界型地震、日本列島に数多く存在する島弧火山活動、ハワイやアイスランドのようなホットプルームによるホットスポットという火山活動などです (図 1)。そのため、レオロジーと呼ばれる流体としての振る舞い方を知ることは、地球のこれまで歴史やこれから起きることを知るための重要なカギとなります。

マントルは地震学的観測及び鉱物学的検討によって、深さ 410 km（14 万気圧に相当）までの上部マントル、深さ 410-660 km（14 万気圧から 24 万気圧に相当）までの遷移層、深さ 660-2900 km（24 万気圧から 136 万気圧に相当）までの下部マントル、に分けられます。これら 3 つの層を構成する主要な鉱物は、化学組成が全く異なるものではありません。主な組成は $(Mg,Fe)_2SiO_4$ であり、上部マントルではカンラン石 (宝石名：ペリドット)、遷移層はウォズレアイト・リングウッダイトという異なった結晶構造をとっています。これは、地球深部ほど温度と圧力が高くなり、安定な結晶構造が異なるためです。このように、組成は同じであるが、結晶構造が異なるものを多形と呼んでいます（これは、石墨とダイヤモンドの関係と同じです）。下部マントルでは、$(Mg,Fe)_2SiO_4$ が二つの鉱物に分解し、$(Mg,Fe)SiO_3$ 組成であるブリッジマナイトと $(Mg,Fe)O$ の組成であるフェロペリクレースになることが知られています。それぞれの層で主要となる構成鉱物の結晶構造が異なるため、そのレオロジー特性も変わってきます。

さて、先に述べた 3 つの層からなる地球マントル全体の対流様式の詳細を知るために、地震波トモグラフィー（地震波速度を用いたマントルの断層写真）による観察が盛んに行われるようになり、下降流である沈み込むスラブ (海洋プレート) や上昇流であるホットプルームの形が明らかになりつつあります。また、地球表面のプレート運動は GPS 観測や超長基線電波干渉法 (VLBI) によって実証されました。この地震波トモグラフィーとプレートの動きから地球内部のマントルの運動・対流をある程度推定することが可能です。しかし、様々な仮定をおいた推定なので、推定確度を上げるためには、実際の地球内部の高温・高圧力環境を実験室で再現し、得られたマントル鉱物の鉱物学的知識と観測結果を組み合わせることが重要になります。特に、マントルの対流を読み解くには、それぞれのマントル鉱物のレオロジーに関する知識が必要不可欠になります。

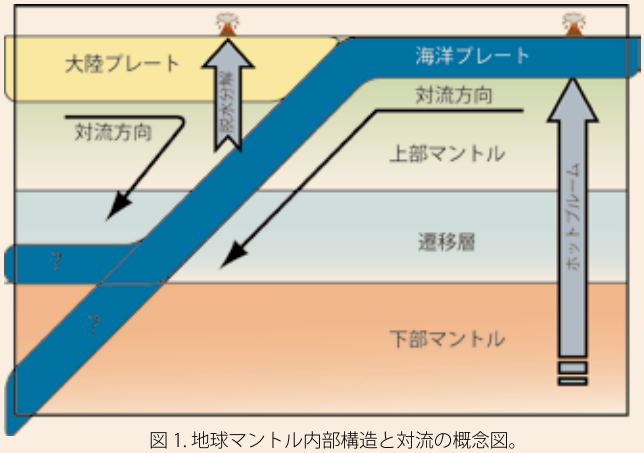


図 1. 地球マントル内部構造と対流の概念図。

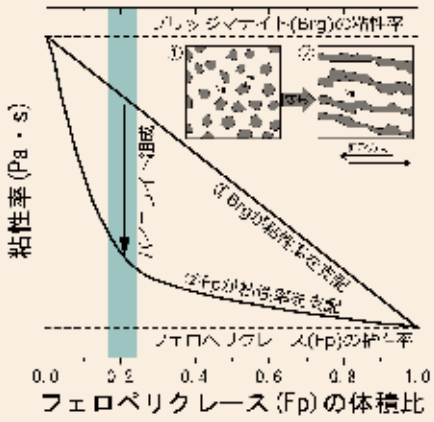
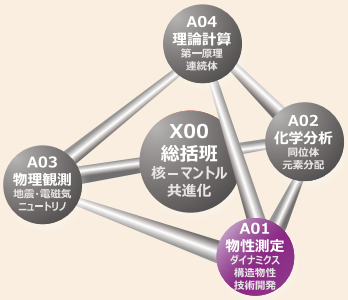


図 2. 下部マントルの組織による粘性率の変化。

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圧条件のもとで実験的に収集します

～下部マントルの粘性率構造の解明に向けて～

今回、我々は、地球マントルのおよそ 70% を占める下部マントルと呼ばれる最下層について着目しています。先ほども述べたように下部マントルは主に二つの鉱物によって構成されています。一つは下部マントルのおよそ 70% を占めるブリッジマナイトと呼ばれる鉱物で、共有結合でできた SiO_6 八面体が連結しているため、地球マントルの主要構成鉱物の中で最も固い鉱物の一つであると考えられています。一方で、もう一つのフェロペリクレースは下部マントルの約 20% を占め、主にイオン結合でできた岩塩 (NaCl) 型結晶構造であり、地球マントルで最も軟らかい主要構成鉱物であると考えられています。下部マントルの大部分は硬いブリッジマナイトでできているため、フェロペリクレースが均等に分布し孤立している平衡組織下では、ブリッジマナイトによって全体の粘性が支配され、その結果、下部マントルは上部マントルや遷移層に比べ硬いと考えられています。しかしながら、下部マントルで大歪が発生するとフェロペリクレースが優先的に変形して硬いブリッジマナイトの粒子間に層が形成され、その結果、フェロペリクレースが全体の粘性を支配すると、下部マントルは上部マントルや遷移層よりも軟らかくなる可能性があります (図 2)。そのため、多くの研究者が下部マントルの歪量とともに変化する粘性率構造を明らかにしようと試みていますが、この下部マントルの温度・圧力条件 (>1600℃、>24 万気圧) での変形実験は困難を極めます。

そこで、我々は、川井式マルチアンビル装置を変形装置に改造した D111 ガイドブロックと放射光を同時に用いることにより、下部マントルの歪量とともに変化する粘性構造を明らかにすることを目指しています。川井式マルチアンビル装置は日本で生まれた装置であり、現在、下部マントルの最下部近くまでの圧力条件 (>120 万気圧) を再現可能な装置です（ニュースレター本号参照）。この川井式マルチアンビル装置は、ニュースレター No.3 で詳しく紹介されているように、イギリスのユニバーシティーカレッジロンドンの David Dobson 教授らによって、D111 型変形装置として改良・実用化されました。我々はこの実用化された D111 ガイドブロックを大型化し、2017 年 3 月に放射光施設である高エネルギー加速器研究機構（PF-AR NE7A ビームライン）に設置されている Max-III マルチアンビルプレスに導入しました (図 3)。放射光施設は巨大な顕微鏡と呼ばれ、放射光と呼ばれる高強度X線を使って、川井型セルの内部のレントゲン写真（X ラジオグラフィー）やX線回折像を取得することが可能です。D111 ガイドブロックと放射光を組み合わせることで、高温高圧実験中の試料をその場で観察することが可能となりました。さらに、我々は今年 6 月に立ち上げ実験として、ブリッジマナイト単相の一軸圧縮実験を行いました。図 4 は、ブリッジマナイト単相の一軸圧縮実験のX線ラジオグラフィー (レントゲン写真) の結果です。レントゲン写真ですので、重い元素がある部分は暗く見えます。大部分を占める影の部分は、タングステンカーバーイド (WC、炭化タングステン) から出来ている二段目アンビルで、この二段目アンビルの隙間から、単体で高い発熱効率が得られるランタンクロマイト ($LaCrO_3$) ヒーターや Pt（プラチナ、白金）歪マーカーが黒く見えます。試料のブリッジマナイトは Pt 歪マーカーに挟まれており、変形実験によってブリッジマナイトが約 20% 上下方向に圧縮変形したことが分かります。このことから、我々は下部マントル条件のその場観察による変形実験の方法を確立できたと考えています。今後、これらの技術を総動員し、下部マントルを模したブリッジマナイトとフェロペリクレースの二層からなる試料の変形実験を行うことで、下部マントルの複雑な粘性構造を明らかにすることを目指しています。

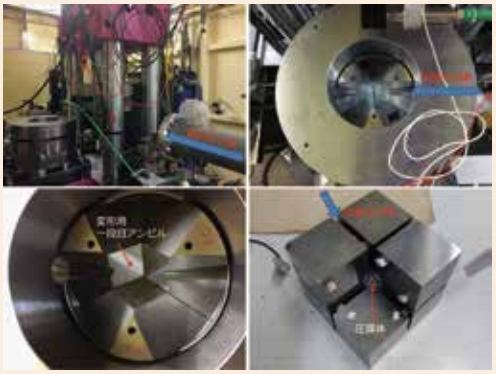


図 3. PF-AR NE7A ハッチ内の MAX-III マルチアンビルプレス・川井セルを載せた D-111 ガイドブロック・D-111 ガイドブロック一段目・川井型セルの分解写真。

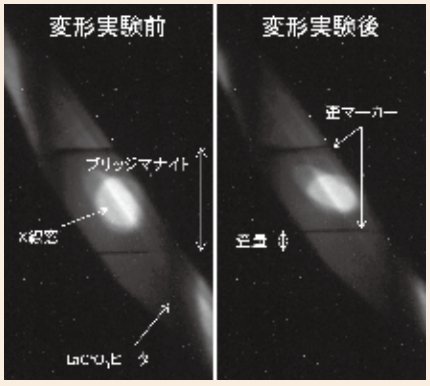


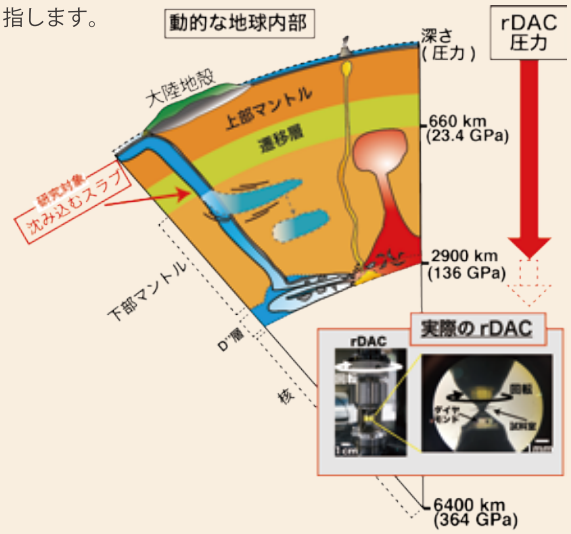
図 4. その場観察変形実験で得られたX線ラジオグラフィー。ブリッジマナイトが最大で約 20% 一軸圧縮変形されたことを確認。

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 3

回転式ダイヤモンドアンビル装置による沈み込んだスラブ内レオロジーの検証

東真太郎［九州大学　理学研究院］

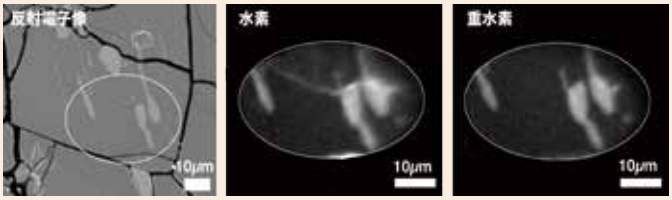
近年の地震波観測の進展により、地球内部の動的構造（ダイナミクス）が次々と明らかになっています。その中で、マントルに沈み込んだスラブが遷移層から下部マントル上部で滞留するなど特異な振る舞いを示すことが分かってきました（図参照）。このスラブの振る舞いが地球史を通して地球内部全体の物質循環とその進化に決定的な影響を及ぼしたことは想像に難くありません。しかし、地球深部で流動する物質の性質（レオロジー）の理解は、変形実験装置の実験可能圧力範囲の限界（25 万気圧程度、下部マントルの最上部に相当）によって手つかずの状態で残されたままです。そこで我々のグループは地球中心圧力の実現と大歪変形実験を目的とした変形実験装置「回転式ダイヤモンドアンビル装置（rDAC)」を開発しました（図ならびに NL4 号参照）。本研究では、この rDAC を用いて、下部マントル深部に至るスラブのレオロジーを明らかにするための実験的研究に取り組み、地球深部の物質循環においてスラブが果たす役割の理解を目指します。



二次イオン質量分析法とイオン注入法を融合した軽元素定量分析及び同位体比分析

伊藤正一　［京都大学　大学院理学研究科］

地球は、内部に水や炭素といった軽元素を豊富に含む惑星であると考えられています。そして、この軽元素の分布の違いが存在することが、地震波速度の分布などからいわれています。しかしながら、地球内部におけるこれら軽元素の詳しい分布などは、よくわかっていません。また、地球内部には大きく分けて岩石質のマントルと金属からなる核が存在しますが、この軽元素の分布の要因や鉱物間の分配はよくわかっていません。本研究では、各領域班と密接に連携し、同位体顕微鏡を用いて高温高圧合成試料の鉱物に含まれる微量な水や炭素といった軽元素の定量分析や同位体比分析手法を開発し、これらの要因を明らかにすることを目指しています。



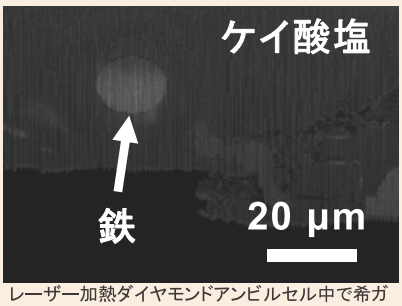
高温高圧含水実験試料の水素、重水素イオンイメージ像（白い濃集部に水素の分布と重水素の分布がみられる）。J-PARC 佐野博士との共同研究。

高温高圧実験と超高感度希ガス分析から制約する地球内部始源的リザーバーの在処

角野浩史［東京大学　大学院総合文化研究科］

希（貴）ガスは、他の元素と異なりほとんど化学反応せず（貴）、地球全体では非常に少ない（希）という特徴を持っており、地球内部の化学的構造の理解に重要な役割を果たしてきました。火山岩や天然ダイヤモンドなどに含まれる希ガスの同位体比からは、地球形成時の痕跡を留めている始源的な領域が地球深部にあることが示唆されていますが、それがどこかはよく分かっていません。

この課題では、「地球のコアは形成時の始源的希ガスを保持しているか？」を明らかにするために、コア形成環境（30 万気圧、3,000℃程度）を再現して鉄とケイ酸塩に希ガスを溶け込ませ、顕微レーザーアブレーション装置と希ガス質量分析計を用いて定量します。先行の公募研究では、レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルなどの高温高圧発生装置で調製できる試料が小さく、また含まれる希ガスもきわめて微量であることに苦労しました。今課題では、より大きな試料を作る、小さな試料から希ガスを効率よく抽出する、希ガス分析をより高感度化する、に特に力を入れて、始源的な希ガスの在処を明らかにすることを目指します。



レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル中で希ガスを溶かし込んだ鉄とケイ酸塩試料

高速２次元測温法から探る核マントル物質の融解現象

新名良介［東京大学　理学研究科］

我々の住む地球の内部でとりわけ興味深い場所が核マントル境界と呼ばれる領域です。深さおよそ 2900 km 付近にあるこの領域では、高い温度で融けた金属鉄（外核）が岩石（マントル）と接していると考えられています。この核マントル境界は約百万気圧の圧力と数千度を越えるようなとても高い温度の状態にあるので、ここで岩石も融けているのかどうか、融けているならどんな化学反応を起こしているのかを理解するには、実験室における高温高圧実験が有力なツールとなります。本計画はダイヤモンドアンビルセルという高温高圧発生装置（ニュースレター No.3 参照）に、高速温度測定システムを組み合わせることで、核マントル境界における物質の融解現象を理解しようとするものです。高温状態にある物体が出す輻射光を、スキャニング技術と高速検出器を組み合わせて測定する高速２次元測温法により、試料内温度分布を高い時間分解能で決定します。

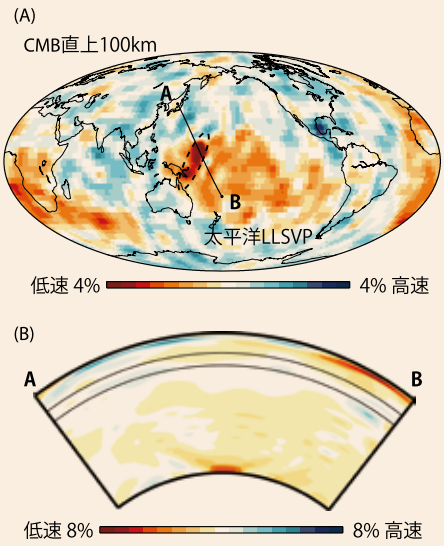
公募研究紹介

0～31 年度の公募課題として採択された研究計画を紹介します。

波形インバージョンによるCMB局所異常解明

大林政之［海洋研究開発機構　地球深部ダイナミクス研究分野］

核マントル境界（CMB）上には、太平洋下に図 (A) で見られるように地震波S波速度が数パーセント遅い広大な場所があり太平洋 LLSVP と呼ばれています。この太平洋 LLSVP の西側の境界に沿って非常に強い低速速度異常（図 (A) の破線で囲まれた部分）があること分かりました。これはトンガ、ケルマデックで起きた地震による ScS 波（CMB で反射する S 波）と SKS 波（CMB で屈折する S 波）の走時異常を日本と中国の高密度な地震観測網データを用いて比較した結果明らかになりました。図 (B) の断面図を見るとこの低速度異常は CMB の直上にだけ見られ、その高さは 200km に限られています。異常の大きさは 6%を超え、太平洋 LLSVP の低速度異常の大きさが 2～3%と比べ 2 倍以上に達します。このような大きな異常はこの場所で一部物質が溶けていることを示唆しています。今後は地震波形を用いてこの異常の詳細をさらに調べる計画です。

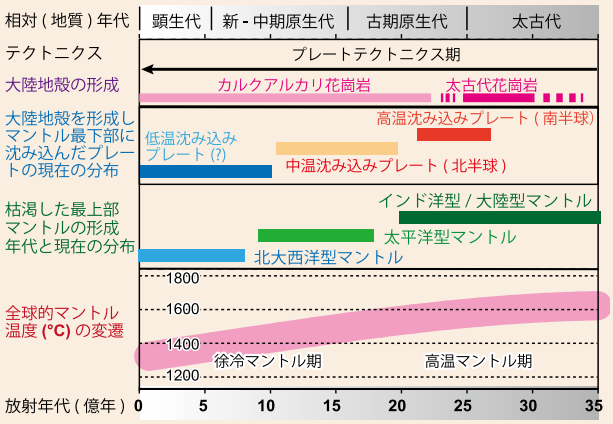


(A) CMB 直上 100km の S 波速度不均質構造。青が高速度異常、赤が低速度異常を表す。(B)(A) で示された線AB に沿った地表からCMB までの断面図。

マントル35億年の水・化学・熱進化解明

木村純一［海洋研究開発機構　地球内部物質循環研究分野］

35 億年前から現在までに噴出したマントル由来の玄武岩などのマグマには、地球内部におけるマントルの水量の変化、冷却の歴史、成分変化（マントル水・熱・化学進化）が記録されています。これらを解読するため、マグマの化学組成をデータとして、今まで独立に推定してきたマントル中の始源マントル・枯渇マントル・リサイクリング輝石岩の組成割合・マントルの温度・マグマ分離深度・部分融解度・含水量を一度に推定する方法を開発します。そのうえで、太古代から現在にいたる玄武岩の化学データから、35 億年間のマントル水・熱・化学進化を明らかにします。得られた結果を、地球化学理論計算に基づく同位体進化やマントルダイナミクスのシミュレーションに取り込むことによって（データ同化）、マントルの熱的化学的進化を制約する事を目指します。

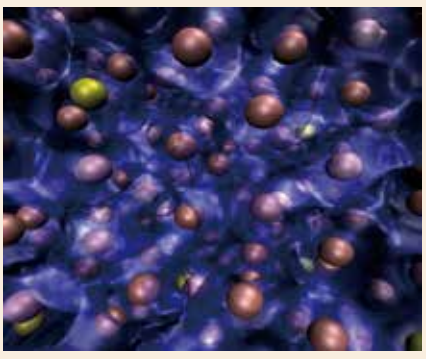


地球史 35 億年の大陸形成と沈み込み物質，上部マントル形成とマントル温度変遷

軽元素含有による液体鉄合金の輸送特性変化に関する第一原理的研究

大村訓史［広島工業大学　工学部］

第一原理分子動力学シミュレーションというコンピュータシミュレーションの手法は、実験が行えないような高温高圧環境をコンピューター上で作りだすことができ、その上、実験では見ることのできない現象（例えば、原子一つ一つの動きなど）を見ることができます。そのため、この手法は地球内部とくに内核や外核のような非常に深い場所、つまり高温高圧下にある物質の性質を知るのに大いに力を発揮します。この研究では、地球外核をターゲットとし，外核に含まれる軽元素が電気伝導度や熱伝導度などの輸送特性にどのような影響を与えるかを明らかにします。外核の輸送特性は、地球の内核がいつ形成され、それがどのように成長していくかという地球深部の進化過程を知るための重要な情報です。本研究によって、外核に含まれる軽元素が地球の進化にどのような影響を与えているのかを明らかにします。

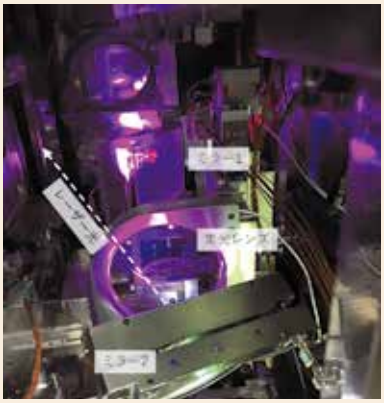


シミュレーションボックス内の液体鉄合金系の原子配置と電子密度の空間分布

ハイパワーレーザーショックとXFELを用いた溶融鉄合金の総合的理解

尾崎典雅［大阪大学　大学院工学研究科］

ナノ秒（10^{-9} 秒）という非常に短い時間の高出力レーザーパルスを試料に集光照射すると、数万度・数百万気圧といった超高温高圧の物質状態を容易に生成できます。地球の中心（コア）はケイ素や硫黄、酸素や水素などの軽元素を含む鉄合金で構成され、また超高温高圧の固体状態と液体状態に分かれていると考えられています。この液体領域における流体運動が地球磁場の起源とされています。しかしながら溶融した鉄合金の超高温高圧物性実験データはこれまであまり取得されてきませんでした。そこで高出力レーザーの利点を生かして、地球コアの振る舞いの理解に直結する溶融鉄合金の極限環境下の物性（圧縮特性、電気伝導度、熱伝導度など）を明らかにします。さらに X 線自由電子レーザー（XFEL）という新しいツールを用いて、超高温高圧下における鉄合金の構造や相変化の解明に取り組みます。



XFEL 実験プラットフォームにおける真空チャンバー内の様子。

ワークショップ「ナノ多結晶ダイヤモンドの超高圧科学への応用」

平成 30 年 2 月 28 日（水）～3 月 1 日（木）に、愛媛大学においてワークショップ「GRC 1st NPD Workshop ナノ多結晶ダイヤモンドの超高圧科学への応用」が、愛媛大学先進超高圧科学研究拠点（PRIUS）および文部科学省科学研究費助成事業新学術領域研究「核ーマントル共進化」技術開発班の共催という形で開催されました。ナノ多結晶ダイヤモンド（NPD）はヒメダイヤの愛称で親しまれている愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）が開発した「世界最硬」ダイヤモンドです。NPD は現在様々な分野の研究や工業的応用がすすめられ、国内外で多くの先進的な成果があがっています。

発表者は大学（理学・工学）や国の研究機関から企業までの幅広い分野から招待され、14 件の口頭発表が行われ、全体では 40 名程度の参加者がありました。例えば、世界で最も硬い乳鉢「ヒメダイヤ乳鉢」を用いて粉砕した半導体ダイヤモンドを用いることにより超高圧下で従来にない高い温度を発生できることを示した最近の成果に関する紹介、NPD を用いた超高圧発生に関する研究、また、高圧下での X 線吸収スペクトル法（XAS）では NPD を利用することで単結晶ダイヤに由来するノイズ（グリッジ）がない精密測定が可能となりますが、そもそも最近の学生はグリッジを知らないというほどに NPD が不可欠かつスタンダードツールとして普及してきたというエピソードなどが紹介されました。最後に行われた総合討論では、新たな微細組織をもつ NPD やその特性、有効性について活発な議論が行われ、今後の課題についても議論する初めての機会となりました。

なお NPD を利用した共同研究は、海外のグループとの間でも多数すすめられており、今回のワークショップの成果をもとにして、初めての国際シンポジウムの松山での開催を来年予定しています。

第二回若手研究集会

第一回若手研究集会後に、継続して研究集会を開こうという声があったため、第二回を東北大にて 2018 年 3 月 5 ～ 7 日に開催しました。年度末の忙しい時期でしたが、総勢 14 名に参加していただきました。第一回では学生への参加を促さなかったという反省点から今回は学生にも参加を募り、参加者のうち半数近くを学生が占めました。研究集会初日は東北大学にて、理学研究科の中村美千彦教授による「見えてきたマグマの結晶核形成」という演題で、火山噴出物から探る火山の噴火ステージについて勉強しました。続いて、東北大学東北アジアセンターの平野直人准教授による「プチスポット海底火山を使ったアセノスフェア集中観測」という演題で、海底火山噴出物について勉強しました。火山に特化した講演で、普段あまり聞くことのない内容であったため、参加者にとって大変興味深い講演でした。5 日～ 7 日にかけては山形蔵王に場所を移し、学生や若手研究者による講演を中心に研究集会を引き続き行ないました。また、愛媛大学の土屋卓久教授、新潟大学の Satish 教授にも第一原理計算から探る元素分配や安定同位体を利用した深部地球化学に関する講演をお願いしました。集会を通じて学会では聞けないような初歩的な質問から各々の興味に応じた質問など参加者からの幅広い反応があり、活発な議論が行われ、盛況のうち終えることができました。第三回は新潟大学がホストとなり、8 月 22~24 日に新潟県佐渡島で行われました。会の様子は次号のニュースレターで報告します。最後になりましたが、本集会を開催するにあたり愛媛大スタッフには多大なご協力をいただきました。また、参加した学生への統括班からの旅費支援があり、この場をお借りし御礼申し上げます。

一般公開講演会「物理で明かす地球の深部、化学でひも解く地球の歴史、地震で探る日本の地下」

2018 年 3 月 25 日 (日) に、愛媛大学南加記念ホールにおいて、本学術領域と新学術領域「スロー地震学」ならびに愛媛大学 GRC との 3 者共催による一般公開講演会を開催しました。本領域代表の土屋卓久愛媛大 GRC 教授による「地球深部の理解はどこまで進んでいるのか」、本領域 A02-1 同位体班長の鈴木勝彦 JAMSTEC 上席研究員による「化学を使って地球の歴史をひも解いてみよう」、そして、「スロー地震学」領域代表の小原一成東京大学地震研究所長による「スロー地震の発見とその意義～四国から世界へ発展した奇妙な「揺れ」の研究 ～」の 3 講演を行い、地球内部の構造・ダイナミクスの最新研究成果について、それぞれ物理・化学・地震学に基づき一般向けに紹介しました。

土屋卓久教授（領域代表）の講演

イベント

平成29年度国際シンポジウム兼成果発表会

2018 年 3 月 26 ～ 29 日に、科研費新学術領域研究「核 - マントル相互作用と共進化～統合的地球深部科学の創成～」の平成 29 年度国際シンポジウム兼成果発表会が愛媛大学南加記念ホールにおいて開催されました。

会場前では桜が満開となり見頃を迎えるなかで、招待講演者 9 名を含む総勢 87 名が参加し、39 件の口頭発表と 31 件のポスター発表が行われました。参加者のうち、海外からの参加者は 9 名（アメリカ、イタリア、スイス、オーストラリア、フランス）、学生は 11 名を数えました。平成 27、28 年度の成果発表会とは異なり、英語を発表言語とした国際シンポジウムとして開催され、講演プログラムは研究項目のくくりを取り払って研究内容の関連性を優先して構成されました。地球のマントル・核について、それらの相互作用・進化に関わる観測・計算・実験による最新の研究成果が発表され、活発な議論が交わされました。ポスターセッションは、コアタイムが二日間に渡って設けられ、研究分野を超えた意見交換がなされました。初日に愛媛大学内で行われた懇親会では、道後の地ビールが振る舞われ、和やかな雰囲気の中研究者同士の交流が深まりました。また、最終日には愛媛大学 GRC のラボツアーも行われました。

今回の国際シンポジウムは本新学術領域研究の研究期間の中間点で開催され、領域全体のここまでの成果を確認し今後の方向性を見定める意味合いを持っていましたが、多くの重要な成果が報告され学際的研究が進みつつある現状は今後の新学術領域研究の進展に大きな期待を抱かせるものでした。

日本地球惑星科学連合大会（JpGU2018）

5 月 20 日から 24 日に千葉県の幕張メッセ国際会議場で日本地球惑星科学連合大会 (JpGU2018) が開催され、本学術領域の関係者が、以下のように多くの科学セッションを企画しました。「核 - マントルの相互作用と共進化」（A03-2 飯塚毅）、「地球・惑星マントルの構造とダイナミクス」（A01-1 芳野極）、「惑星の核：構造、形成、進化」（A01-2 寺崎英紀）、「地球深部における揮発性物質の循環―沈み込み帯からホットスポット」（A02-1 佐野有司）、「固体地球化学・惑星化学」（A02-1 下田玄）、「固体地球と気候の間の多様な相互作用」（A04-1 中川貴司）「地球内部での液体の特性とその役割」、（H28-H29 公募研究 坂巻竜也）。特に本学術領域に最も関係が深い「核 - マントルの相互作用と共進化」では、国際会議室という大会場で 42 件の口頭発表を 3 日間かけて行いました。また、ポスター発表も 39 件ありました。

展示ブースでは、ニュースレターやパンフレットをお配りしただけでなく、たくさんの方が「地球の中身はどうなってるの？」というアンケートにご回答下さり、数多くの魅力的な地球の想像図をうかがい知ることができました。

Asia Oceania Geoscience Society (AOGS) 2018

2018 年 6 月 3 日～ 8 日にかけて、ハワイ州ホノルルにて、アジア・オセアニア地球科学会 (AOGS) が開かれ , 当領域のメンバーである土屋（愛媛大）、河合（東大）らがコンビーナーを務める核マントル境界の構造やダイナミクスに関するセッションが行われました。観測や理論計算、実験より得られた核マントル領域に関する新たな知見をもとに当領域からの発表者も含め約 50 名が活発に質疑応答を行いました。

Core Mantle coevolution Award

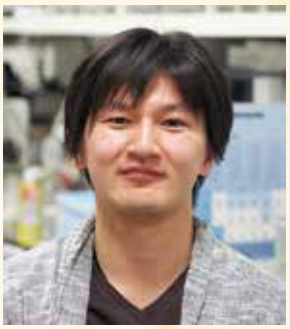
受賞

Doornbos Memorial Prize

野村龍一［愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター，A02-1同位体班］

7月8~13日にカナダ・エドモントン市で開催された地球深部研究（SEDI: Study of the Earth's Deep Interior）国際シンポジウムにて、野村助教にDoornbos Memorial Prize（ドーンボス記念賞）が授与されました。この賞は、1970~90年代に地球深部構造研究に活躍したオランダ人地震学者ダーク・ドーンボス（Durk Doornbos, 1943-1993）を記念し、2年に1度、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。野村助教は、地球深部に相当する高圧条件でのダイヤモンドアンビル実験装置を用いた物質の融解と変形に関する先駆的研究が評価されました。

なお、前回のSEDIでは、A02-2元素分配班の舘野繁彦研究員（東京工業大）が同賞を受賞しています。



日本地球惑星科学連合2018年大会　学生優秀発表賞

Anselme Borgeaud さん（東京大学博士課程3年）"Waveform inversion for the 3-D S-velocity structure of the mantle transition zone beneath Central America using USArray data"

柿澤翔さん（愛媛大学博士課程3年）"Alに富む superhydrou phase Bの安定性及び置換様式"

奥田善之さん（東京工業大学博士課程1年）"Thermal conductivity and compressibility of iron and aluminum-bearing bridgmanite: implications for spin-crossover of iron"

若松達也さん（東京工業大学博士課程1年）"Sound velocity measurements on bridgmanite at lower mantle pressures"

Core Mantle coevolution New members

新メンバー

入谷良平　特任研究員

計画研究A03-1　地震・電磁気班

2018年4月より東京大学地震研究所海半球センターに特任研究員として着任しました。博士課程では同研究所において、考えられる数多くの答えの候補から最適な答えを見つけ出す手法の一つであるシミュレーティド・アニーリング（疑似焼きなまし法）を用いた地震波解析手法を開発し、全世界的に展開されている大規模地震観測網で取得されたコアフェーズの解析に適用することで、内核における地震波の減衰、及び地震波速度構造の不均質性について研究してきました。この研究では新手法を用いたことで、内核上層400 kmの領域の連続的な地震学的構造推定が可能になり、これまで分からなかった内核構造の細かな不均質性を明らかにすることができました。

本プロジェクトでは最新のグローバル地震観測アレイデータを用いて、より詳細な内核の地震学的不均質構造を研究すると共に、他分野の研究者と議論を深めることで内核の成長モデルや、外核及び下部マントルとの相互作用の解明に貢献したいと思っております。

Core Mantle coevolution International Activities

国際交流

国際セミナー

"Optimal control in MHD: towards kinematic and dynamic dynamos"、Andrew Jackson博士（ETH Zürich）、4/10、東京大学地震研究所

"Magma genesis in Hawaii plume: melting experiments on basalt/peridotite layered sample up to 8 GPa"、高橋栄一博士（中国科学院広州地球化学研究所）、5/16、愛媛大学GRC

"Experimental Discovery of Superionic Water with dynamic compression"、Marius Millot博士（Lawrence Livermore National Laboratory）、5/25、愛媛大学GRC

"Silicon abundance in the Earth's core constrained by a multi-technique approach"、Daniele Antonangeli博士（Sorbonne Université）、5/25、愛媛大学GRC

国際レクチャー

"Physics and Chemistry of the Earth's mantle"
桂智男博士（BGI, University of Bayreuth）、2/22-2/23、愛媛大学GRC

"Recent Advancements in Multi-anvil High-pressure Science"
Yanbin Wang博士（GSECARS, University of Chicago）、3/22-2/23、愛媛大学GRC

"Phase Diagrams of Earth's Material"
Sujoy K Ghosh博士（Indian Institute of Technology）、7/2-7/4、東北大学理学部

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
核ー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/