

# SPring-8 NEWS

65  
2012.11

## 2 研究成果・トピックス

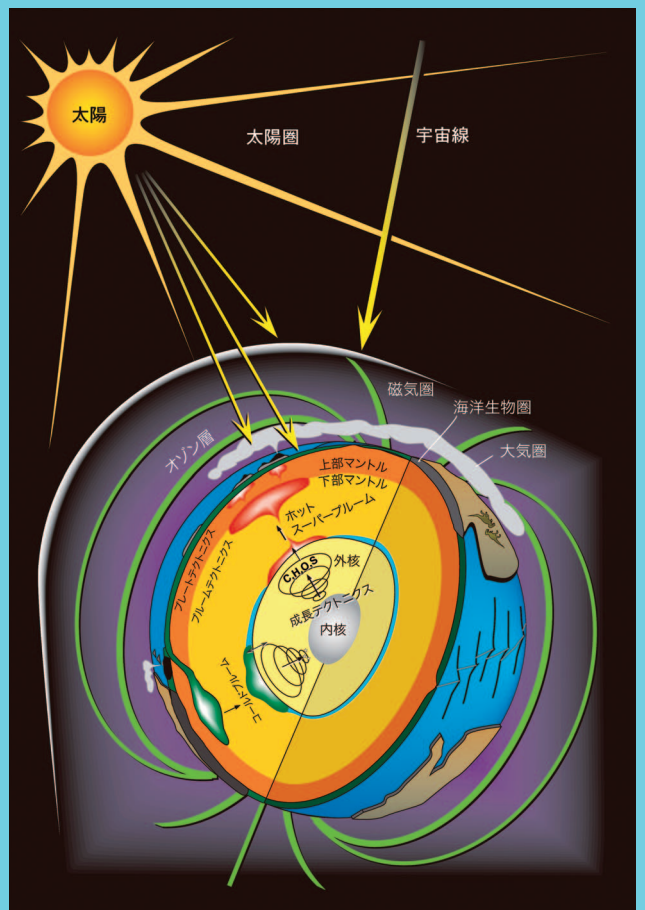
地球外核は二層に分かれて対流している?!  
～「地磁気の逆転」の謎に迫る新説登場～

## 5 お知らせ

光のひろば  
研究者インタビュー最前線

## 6 行事報告

文化財科学講演会  
－放射光・中性子で文化財を探る－  
第6回 放射光科学アジアオセアニアフォーラム  
－ケイロンスクール2012－



外核の対流とそれによって生じる地磁気（緑の線）

SPring-8 News アドレス

<http://www.spring8.or.jp/ja/sp8news>

SPring-8 独立行政法人 理化学研究所 (RIKEN)  
登録施設利用促進機関  
公益財団法人 高輝度光科学研究センター (JASRI)

# 研 究 成 果 ・ ト ピ ッ ク ス

## 地球外核は二層に分かれて対流している?! ～「地磁気の逆転」の謎に迫る新説登場～

### 地磁気の逆転

「方位磁針のN極は、常に北極を指し示す」。これは、地球が大きな磁石であるために生じる磁場(地磁気)によるもので、方角を知るのに利用されています。不変に思われる地磁気ですが、数万年～数十万年ごとに、磁極の南北が入れ替わっていることがわかっています。この「地磁気の逆転」は、1926年、松山基範<sup>もとのり</sup>博士が、SPring-8と同じ兵庫県にある、玄武洞の火山岩に南向きの磁気を発見したことで、明らかになりました。しかし、どうして「地磁気の逆転」が起こるのかは、現在でも謎とされています。

2011年11月、東京工業大学の廣瀬<sup>ひろせ</sup>敬教授らのグループは、地球内部の外核が二層に分かれて対流\*1している可能性を示し、注目を集めています。外核とは、地下2900～5100kmにある液体金属の層で、その対流によって生じる電流が地磁気を発生させていることがわかっています(電磁誘導\*2)。そして、もし

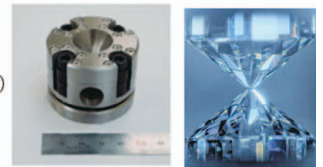
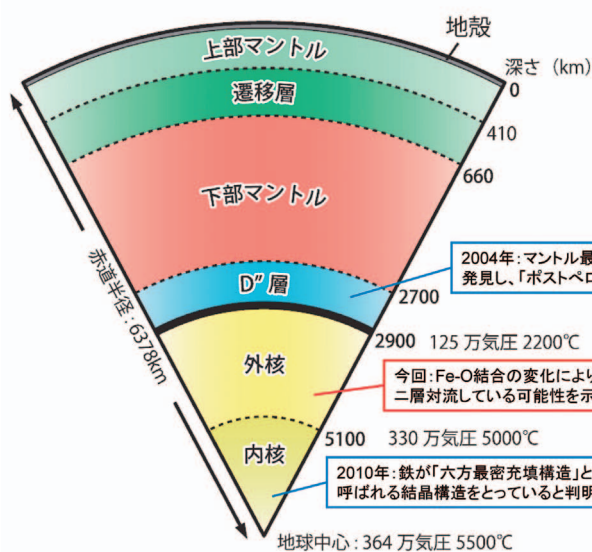
外核に二層対流があれば、地磁気の逆転現象を説明できるかも知れないというのです。

### 手つかずのままだった外核の研究

「ついに外核を研究することになりました」と話す廣瀬教授は、長年、地球内部を知りたいと研究を続けてきました(図1)。この研究の難しさは、実際にのぞき見ることのできない地球内部の環境を、実験室につくらなければならないことです。地球は

内部へ行くほど、圧力と温度が上がります。もっとも深い中心部では、364万気圧5500℃にもなります。廣瀬教授は、1999年から超高压超高温を発生させる「レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル」の改良に取り組んでおり、この装置をSPring-8のビームラインにセットして、地球内部と同様の環境をつくりながら、さまざまな鉱物の構造を解析してきました。

地球内部は、深くなるほど高压高温の環境です。そのため、実験しやすい浅い場所から解明



ダイヤモンドアンビルセル(左)  
内部のダイヤモンドの先端部(右)に試料を挟み、ネジを締めると高い圧力がかかる。

図1. 地球内部の層構造と廣瀬教授の研究成果

この記事は、東京工業大学 大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻の廣瀬敬教授にインタビューして構成しました。

されてきました。ところが廣瀬教授らは、外核よりも深い場所にある内核の研究にすでに着手し、成果を上げています。「外核は、地球内部で唯一、液体でできている部分です。原子が規則正しく配列している固体はX線回折法を使えば結晶構造を解析できますが、液体はそう簡単ではありません」。このような理由から、外核は手つかずのまま残されていたのです。

### 固体試料から液体の振る舞いを予想する

では、どのようにして外核の研究は可能になったのでしょうか。「固体は、原子の規則的な配列がどこまでも続いています。一方、液体は、原子が規則的に配列した小さな塊が、バラバラに存在しているイメージです。ですから、原子が規則的に配列している微小領域に限れば、固体と液体は同じように扱えるのです」。この発想から、固体試料を用いることになりました。

次に、実際に何を試料にするかが問題になりました。「実は、外核が何でできているかについては、いまだに論争が続いています。地球創成のプロセスから、鉄が主成分であることは確かですが、そこに混ざっている、鉄よりも軽い元素については、水素、炭素、酸素、硫黄、ケイ素の5種類の候補があります」。廣瀬教授は、外核の上にあるマントルに多く含まれている酸素を、外核の軽元素の主成分であると仮定し、酸化第一鉄(FeO)を使った研究をスタートさせました。

### 地球外核に二層対流の可能性

固体のFeOをレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルにセットし、外核に相当する圧力と温度にして、SPring-8の高圧構造物性ビームライン(BL10XU)で結晶構造を解析しました。その結果、ある条件下でFeOの結晶が、塩化ナトリウム型構造(B1)から塩化セシウム型構造(B2)に変化することがわかりました。「FeOが塩化セシウム型の構造をとることは、新たな発見でした。さらに、この実験に基づいて状態図(図2)を作成してみたところ、2つの構造の境界線が負の勾配(右下がり)をもっていることがわかりました。これが今回の研究における大きな発見でした」と廣瀬教授は言います。

B1とB2では構造や密度が異

なります。密度が変化する境界線が負の勾配をもつ場においては、対流運動が妨害されます(図3)。その結果、外核の対流は、2つの構造の境界で二層に分かれている可能性があります(図4)。

「外核が二層に分かれて各層ごとに対流している(二層対流)と仮定すれば、過去に繰り返された“地磁気の逆転”が起きるメカニズムを説明できるかも知れません」。地球が磁石として振る舞うのは、自由電子を持った外核の対流による電磁誘導が原因です。外核の対流の向きによって地磁気の向きが決まるので、地磁気の逆転には、外核の対流の逆転が必要です。二層対流では上下が独立して対流しているため、上層の対流はマントルによって冷やされ、温度が下がっていきます。一方、下層の温度

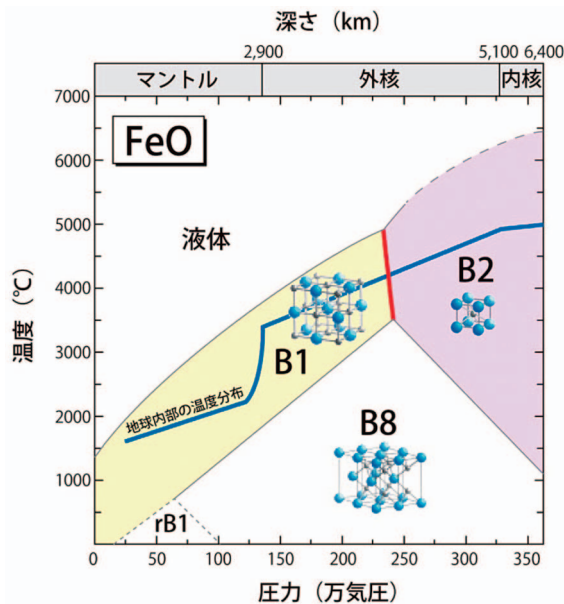
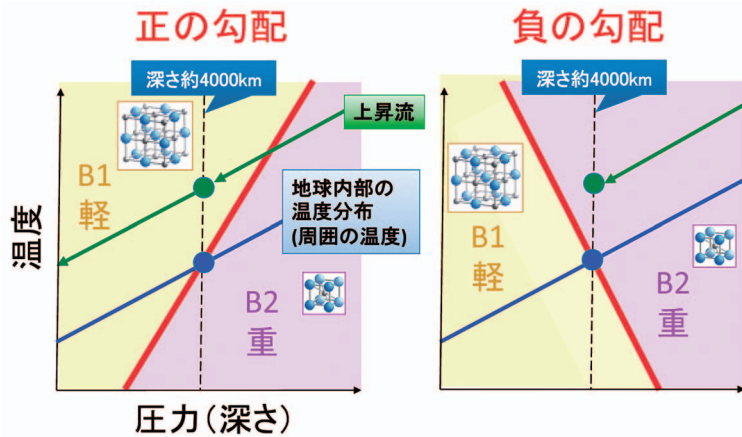


図2. 高圧高温下におけるFeOの結晶構造変化(状態図)

鉄原子(青)と酸素原子(灰色)の配列が、塩化ナトリウム型構造(B1)から塩化セシウム型構造(B2)へと構造変化することがわかった。その境界(赤線)は、負の勾配(右下がり)だった。このほか、B8はヒ化ニッケル型構造、rB1は歪んだ塩化ナトリウム型構造。





上昇流の中では、深いところで構造変化が起きて軽くなり、上昇が加速する

構造変化せず重いままで上昇が止まる

図3. 「正の勾配」と「負の勾配」の違い

青い線は、地球内部の深さに応じた平均的な温度変化を表している。これに対して、上昇流は周囲に比べて温度が高い状態を保って変化する（緑色の線）。

外核内部から外部に向かった高温の上昇流を考えた場合、周囲は深さ約4000kmの境界を境に構造が変わり、浅い部分では低密度の構造になる。ところが、上昇流内部では温度が高いため深さ4000kmまで上がって来ても構造変化は起こらず、高密度の構造のままである。そのため、周囲に比べて重たくなり、それ以上、上昇することができなくなる。

はほとんど変わりません。こうして温度差が大きくなると、二層対流は不安定になり大きく乱れます。しばらくして温度が一樣になると、再び二層対流になります。その時に、対流の向きが偶然逆転すれば、地磁気も逆転しているというわけです。

## 今後の地球研究

「地磁気の変動の歴史を知ること、地球の生命活動や進化を解き明かすことになるかもしれません」と、廣瀬教授は地磁気研究の意義は大きいと言います。

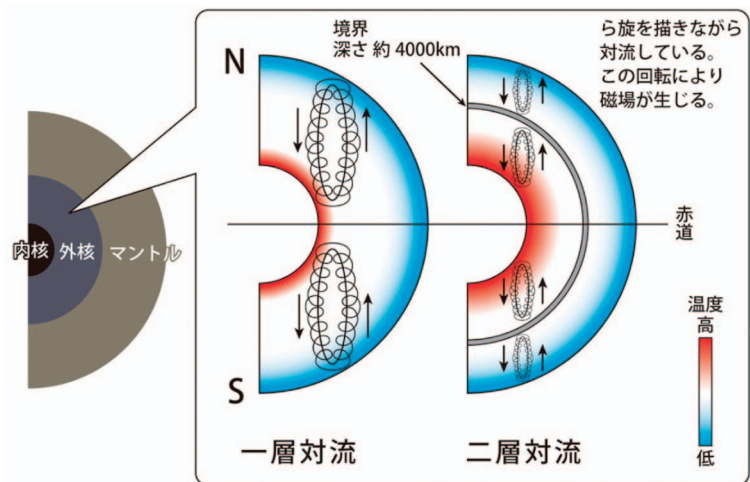


図4. 外核の対流様式

矢印は対流の向きを示す。外核内で構造変化が起こらない場合は一層対流となる（左図）。一方、外核液体中で、境界が負の勾配をもつ構造変化が起こると、二層対流となる（右図）。

## 用語解説

### \*1 対流

風呂を沸かしてしばらくすると、湯船の下のほうが冷たい。これは温められた水が、膨張して軽くなり上昇するためにおこる。流体のこのような流れを「対流」と呼ぶ。

### \*2 電磁誘導

コイルに磁石を出し入れすると、電流が流れる現象のこと。逆に、コイルに電流が流れると磁場が生じる。

取材・文：サイテック・コミュニケーションズ 池田 亜希子

# column コラム **ダイヤモンド鉱山から実験室へ**

「地球深部の岩石や鉱物が欲しければ、ダイヤモンド鉱山に行けばいいんです」と話す廣瀬教授は、かつて南アフリカなどのダイヤモンド鉱山に出向いて、岩石を採取していました。「ダイヤモンドの生成に必要な圧力は、地下150kmに相当する5万気圧以上です。ですからダイヤモンドを含む岩石は、150kmよりも深いところからマグマと一緒に地表に上がってきたはずです」。目的の岩石を探すために、ダイヤモンドを採取した後の砂利山で、石拾いをしたそうです。



南アフリカ共和国に囲まれた小国、レント王国のダイヤモンド鉱山にて

一度、鉱山の人から漬物石ほどの大きな石をたくさんもらったことがありました。日本に帰って調べてみると、その1つにたくさんのダイヤモンドが入っていました。とても印象的な出来事だったと振り返ります。

こうして世界中から岩石を集めても、自然界で手に入るものは、地下200kmがせいぜいです。もっと地球の深いところを知りたくて、今のように超高压超高温実験による研究をするようになったのです。

## 次号研究成果・トピックス予告

レアメタルフリーのナトリウムイオン蓄電池を実現 ～次世代蓄電池をめざして～（仮題）

### 光のひろばからの


<http://commune.spring8.or.jp/>

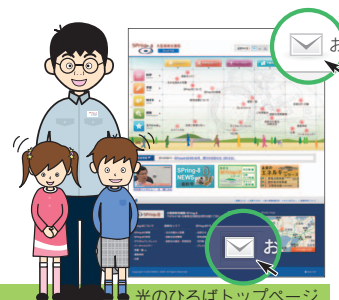
## お知らせ

いつも「光のひろば」をご覧くださいありがとうございます！

「光のひろば」は、SPring-8のことをより身近に感じていただくことを目的に、2011年2月に開設されたSPring-8の公式サイトです。SPring-8や光（放射光）について、「知りたい！」と思う皆さんが集う場所をイメージして「光のひろば」と名づけられました。

「光のひろば」には、のマークが配置されています。

「光のひろば」やSPring-8関連ニュースを見て、「これってどういうこと?」、「ここがもっと知りたいな。」ということがありましたらどうぞお気軽に  を押してください。『SPring-8から』や『バーチャルツアー』など、今あるコンテンツも色々な形で充実させていきたいと考えています。どうぞこれからも宜しくお願いします。



## 研究者インタビュー最前線！



ロブ ルイス先生



岸本 浩通氏

10月に公開された、X線イメージングのスペシャリスト、ロブ・ルイス先生に続き、11月下旬には、低燃費タイヤ開発に関わる岸本浩通氏のインタビューが公開予定です！お楽しみに。





# 行事報告

## 文化財科学講演会 — 放射光・中性子で文化財を探る —

(独)理化学研究所 播磨研究所と(公財)高輝度光科学研究センターは、(共)高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所、(一財)総合科学研究機構 東海事業センターとの共同主催で9月28日、放射光や中性子ビームを利用した文化財科学研究の成果を紹介する講演会を東京で開催し、約100名の方にご参加いただきました。

まず、放射光を利用した研究成果の紹介では、東京理科大学の阿部善也助教による「放射光マイクロビームを用いた古代ガラス中の赤色・黄色顔料の状態分析」、千葉大学の沼子千弥准教授による「放射光による古代ビーズの着色機構解明」、京都大学の杉山淳司教授による「放射光マイクロCTによる樹種識別」及び泉屋博古館の廣川守学芸課長による「SPring-8を利用した古代青銅鏡の蛍光X線分析」の4講演が行われました。続いて中性子ビームを利用した研究成果については、元興寺文化財研究所の増澤文武名誉研究員による「中性子イメージングによる出土品の内部観察」、高エネルギー加速器研究機構の神山崇教授による「中性子を用いた縄文式土器の研究」の2講演が行われました。



何れの講演も具体的な分析例が多く、画像を用いて紹介され、参加者からは「非破壊で物質の特性を評価できる放射光や中性子ビームの文化財科学への利用について、大いに参考となった」との感想をいただきました。

今後SPring-8 NEWSでは、京都大学の杉山淳司教授の研究成果を掲載する予定です。木製文化財の研究にSPring-8がどう活用されているのか、来年初夏の発行をお楽しみに。

今後SPring-8 NEWSでは、京都大学の杉山淳司教授の研究成果を掲載する予定です。木製文化財の研究にSPring-8がどう活用されているのか、来年初夏の発行をお楽しみに。

## 第6回 放射光科学アジアオセアニアフォーラム —ケイロンスクール2012—

アジア・オセアニア地域の大学院生や若手の研究員・技術者が放射光科学の基礎を学ぶことを目的としたケイロンスクール(Cheiron School)が放射光科学アジアオセアニアフォーラム(AOFSRR)、理化学研究所、JASRI、KEKの主催で9月24日から10日間の日程で開催されました。例年同様に、オーストラリア、タイ、中国、韓国、台湾、インド、シンガポール、ニュージーランド、ベトナム、マレーシア及び日本の11カ国から59名が参加しました。

今年は、米国Advanced Light SourceのDavid Attwood教授、SLACのJerome Hastings教授をはじめ、7カ国21名の講師陣を迎えてSPring-8スタッフの協力の下、講義、施設見学、ビームライン実験実習、専門家との少数討論クラス「Meet the Expert」により、ナノテクからバイオまで多彩な研究分野にわたる放射光科学の基礎から応用まで学ぶカリキュラムを提供しました。一方、近隣の茶道関係者の方々の御協力により、お茶会を開催し、日本文化に親しみながら参加者、講師、スタッフ間の交流を深める機会も提供しました。

参加者・講師の多くが、ケイロンスクールが、施設利用を前提とする放射光科学にとって必要不可欠な「実践的学習の場」として、そして、若手研究者にとって「国際交流と人的ネットワーク構築の機会」として有益であったことを挙げ、彼らを通じて、アジア・オセアニア地域にしっかりと根を張りつつあることがうかがえます。これまでの6年間で、461名の卒業生を送り出しました。そのうちの何名かが、第一線の研究者となり、講師に迎えられる日も、そう遠くないことでしょう。スクール開催にあたり御協力頂きました多くの方々に感謝いたします。



集合写真 (SPring-8中央管理棟屋上で撮影)