



特集記事・3

鉄～宇宙・地球・生命・文化・未来～

地球コアの鉄

Iron in Earth's Core

廣瀬 敬

Kei Hirose

東京工業大学地球生命研究所
所長・教授

東京大学大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻 教授

1 地球や惑星の内部

地球の中心部にはコアと呼ばれる、主に金属鉄でできている部分がある。地球のみならず、すべての惑星、さらには月などの衛星や大きめの小惑星にも、同じような金属鉄を主成分とするコアがあることが知られている。小天体を除くとどの天体の中心部にもコアが普遍的に存在するのは、鉄の宇宙存在度が高いからである。

コア（核のこと。液体の外核と固体の内核の総称）の大きさは天体ごとにまちまちである。地球の場合、半径6400kmのうち、中心部の半径3500kmがコアである（図1）。体積にして15%、質量にしておよそ30%に相当する。月のコアの割合はずっと小さい。一方、水星のコアは全体の体積の約7割を占めるとされる。水星のマントルがわずかであるのは、水星が他の天体と巨大衝突を起こした際に、マントルが吹き飛ばされたためと言われている。

鉄は、酸化鉄としてマントルの岩石の成分の1つにもなっている。地球の場合、その量は重量にして8%程度であるが、

鉄は岩石の密度や物性を大きく変える重要な成分である。マントルや地殻の岩石中の主成分元素として、鉄は唯一の遷移金属元素であり、岩石に色がついているのも鉄の働きによる。

2 地球内部の高圧と高温

地球の内部は高圧と高温の世界である。深さ2900kmにある岩石のマントルと金属コアの境界は135万気圧・～4000ケルビン（つまり地球コアの環境はこれより高圧高温）、深さ6400kmの地球中心は364万気圧・～5000ケルビンの超高圧高温下にある。ほんのわずかな時間だけ高圧高温状態を作り出す、衝撃圧縮実験を除くと、そのような高圧高温環境下での実験は近年まで困難であった。

静的圧縮法によって、試料を高圧高温状態にする装置はいくつか知られているが、最も高圧高温の発生が可能なのはレーザー加熱式ダイヤモンド・アンビル・セルと呼ばれるも

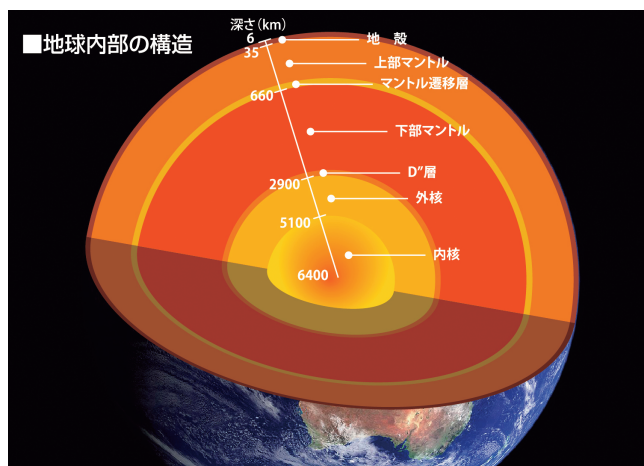


図1 地球内部の構造。外核は液体の金属コア、内核は固体。

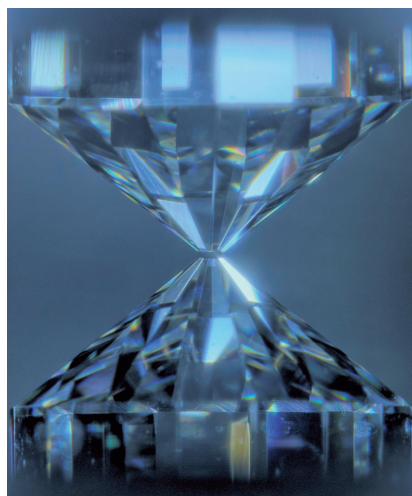


図2 加圧用のダイヤモンドアンビル。2つのダイヤモンドの間に試料を挟んで超高圧へ加圧、さらにレーザーで加熱する。地球中心に相当する高圧高温が発生可能。

のである(図2)。先端が尖った、2つの対向するダイヤモンドに試料を挟んで加圧し、さらにダイヤモンドを通して試料に近赤外線レーザーを照射して加熱する。

私たちのグループは、このレーザー加熱式ダイヤモンド・セルを用いて、地球深部の物質の結晶構造、密度、融解温度、物性などを調べる実験を行い、2004年には地球のマントル最下層(深さ2600kmから2900km)の主要鉱物ポストペロフスカイトを発見するなどの成果を挙げてきた¹⁾。同時に、コアに相当する超高压・超高温の発生を目指し、技術開発に取り組んできた。

その結果、2005年には270万気圧・2000ケルビン程度だった高压高温の発生限界が²⁾、2010年には、世界で初めて、地球中心の高压高温を超える、370万気圧・5700ケルビンの実験に成功した³⁾。この技術により、現在では地球内部のあらゆる高压高温条件を実験室で静的に発生することが可能になっている。

ちなみに、このレーザー加熱式ダイヤモンド・セルでは、ダイヤモンドが小さいこと、さらには超高温発生にはレーザーを集光せざるを得ないことから、超高压高温になる試料の大きさは直径が数十ミクロン、厚みが10ミクロン以下に過ぎない。ゆえに、20年ほど前までは試料の測定手法が限られていた。しかし、その後の放射光施設の充実とその利用技術の格段の進歩により、高輝度のエックス線を用いたさまざまな測定が行われるようになった。以下ではそれらの測定も紹介する。

3 地球コア中の鉄の構造

地球科学では、地球深部の物性を予測したり、地震学データを解釈する上で、地球深部物質の結晶構造(つまり状態図)を知ることがまずは重要である。コアの主成分である鉄の高压高温下の状態図については、研究が盛んに行われてきた。

常圧常温で鉄は体心立方格子(bcc)構造をとるが、高温もしくは高压下では別の構造になる(図3)。1気圧高温では面心立方格子(fcc)構造(さらに高温では常磁性のbcc構造)、15万気圧以上の室温では六方最密充填(hcp)構造になることはよく知られている。ところが、圧力と温度を両方上げた場合に安定な結晶構造がどうなるかということについて、最近まで活発な議論が続いていた。過去に、hcp構造に加え、double-hcp(dhcp)構造、斜方晶系構造などさまざまな構造が高压高温下で報告された。

この論争にほぼ決着をつけたのが、私たちが2010年に報告した、地球中心を超える377万気圧・5700ケルビンまでの鉄の状態図である³⁾(図3)。高压高温下における安定な結晶構造を知るには、高压高温その場観察で調べる必要がある。

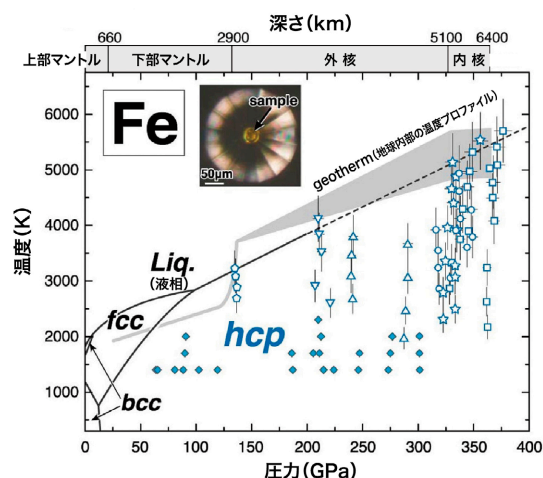
特に鉄の場合、室温であっても減圧過程で構造が変化し、常圧常温に戻るとほぼ必ずbcc構造になってしまうため、高压高温その場観察が必須である。私たちの実験では、まず試料に室温で高压をかけてhcp構造にしたあと、最高で5700ケルビンまで加熱したが、他の構造は一切現れなかった。過去に報告されたdouble-hcp(dhcp)構造や斜方晶系構造は、それぞれ試料が水素と合金を作った、一部が酸化していたことが原因と解釈されている。

4 固体コアの謎

地球の中心には、固体のコア(内核)があり、その半径は1200kmである(図1)。月の半径は1700kmなので、月よりひと回り小さい。地震波観測によって、この内核が発見されたのは1936年のことであった。余談だが、最近まで太陽系の一番外側の惑星とされていた冥王星が発見されたのが1930年だったので、「地球中心は太陽系の果てよりも遠い」と言われたこともあった。実際、冥王星には2年前にNASAの探査機ニューホライズンズが接近し、ハート型の地形などが大きな話題になった。一方、地球内部へ探査船を送ることは不可能であり、地震波データなどに頼るほかない。

鉄の結晶構造があきらかになったことは、内核の地震波データを解釈して、内核がどう成長してきたのか、内核中でどのような運動があるのかなどを理解する第一歩になった。

しかし、内核の構造はとても複雑で、まだまだ謎が多い。中でも興味深いのが、西半球と東半球の対照性である。西半球では、内核を通過する縦波のうち、赤道方向に伝播するものよりも極方向に伝わるものの方がスピードが速い。一方、東半球ではこの傾向がほとんど見られないのである。そもそも



※実験は複数回実施。グラフ中のマークの違いはこれによるもの。

図3 鉄の高压高温下の状態図。Tateno et al.¹⁰⁾より一部改変。コアの条件下ではhcp構造が安定。

も西半球と東半球はロンドンのグリニッジ天文台を基準に西と東に分けているもので、人間の都合で定義しているものである。この分け方が、地球中心部の内核の特徴と一致している理由はあきらかにされていない。また、極方向に伝わる波が速いのは、hcp構造を持つ鉄の結晶の向きがバラバラではなく、c軸が極方向を選択的に向いているからと解釈できる。しかし、なぜ鉄の結晶が特定の方向を向いているのかについては諸説あって議論が決着していない。

5 1 コアの化学組成

上で述べてきたように、コアの主成分は金属鉄である。5%程度のニッケルも含まれていると考えられている。しかし、特に液体コア（外核）の組成はそれらばかりではない⁴⁾。

地震波観測を基にした外核の密度と、高压実験で得られるコアの圧力下での金属鉄の密度を比べると、前者はおおよそ10%も小さいことがわかっている（図4）。また、観測される縦波速度も鉄の速度よりも4%速い。これらは外核中には原子比にして2割程度の鉄より軽い元素が含まれていることを意味している。それら軽元素の候補として、水素・炭素・酸素・ケイ素・硫黄が有力とされている。どれも高压高温下では親鉄性の強い元素であり、未だにコアの軽元素は特定されていない。実はこの問題が最初に指摘されたのは1952年であり、65年が経過した今でも、地球科学の第一級の問題として残されている⁴⁾。

私たちはこの問題の解決に向け、軽元素を含む液体鉄や鉄合金の縦波速度の測定、それらの密度測定、そしてそれらの結晶化実験を行っている。一般に、液体に関する高压実験は固体のそれより難しい。温度をより高温まで上げる必要がある上、液体が逃げないうちに測定する必要もある。

図5に、液体の鉄-炭素合金の縦波速度を、非弾性散乱測定と呼ばれる手法を用いて、70万気圧まで決定した結果を示

す⁵⁾。70万気圧で測定した際の温度は2700ケルビンである。より高压で行われた過去の衝撃圧縮実験で測られた液体鉄の速度を低压へ外挿した値と比べると、液体鉄に炭素が含まれることによって速度が速くなっていることがわかる。私たちの結果をコアの圧力まで外挿して、地震波速度の観測値と比べると、観測を説明するのに必要な液体鉄中の炭素の量は原子比にして4-5%である。しかし、この量の炭素では外核の密度を説明するのに十分ではない。つまり、炭素は重要なコアの軽元素ではあり得ないという結論を得ることができた。

液体鉄合金の結晶化実験も、コアの軽元素を特定するのに有力な手段の1つである。上で紹介したように、液体の外核の密度は純鉄よりも10%小さい。一方、固体の内核の密度を鉄と比べると、その差は数%に過ぎない。つまり、内核は軽元素に乏しい。そこで、鉄-軽元素の2成分共融系の状態図を考えた場合、液体コアの組成は共融点よりも鉄側にある必要がある（図6）。

図7に、鉄-硫黄合金の結晶化実験で得られた試料の断面を示す⁶⁾。レーザー加熱実験の場合、内側から外側へ向かってゆるい温度勾配があるため、融解と結晶化が同時に起こる。中心部にある液体から結晶化した固体がその周辺部に存在している。コアの圧力下で、鉄中の硫黄量を変えて液体鉄-硫黄合金を結晶化させると、固体相がFeからFe₃Sへと変化する。固体相が変化するところが共融点である。実験は254万気圧まで行い、共融点における硫黄量が重量で5%程度であることがわかった。圧力効果を考えると、外核-内核境界の330万気圧では共融点における硫黄量はさらに少ないはずである。一方、外核の密度欠損（鉄の密度との差）を説明するには10%以上の硫黄が必要である。つまり、硫黄もコアの主要な軽元素ではあり得ないことになる⁶⁾。

コアの軽元素は未だに特定できていないが、私たちは酸素と水素が最有力と考えている。その理由は、これらが鉄と合

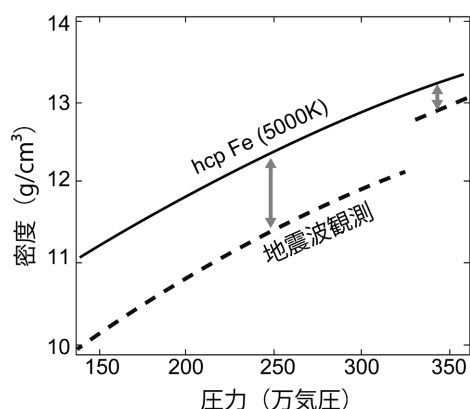


図4 hcp構造の鉄の密度と地震波観測で得られた外核と内核の密度の比較。液体コアの密度は鉄よりも10%軽い。コアの圧力下では固体鉄と液体鉄の密度差は1%程度である。

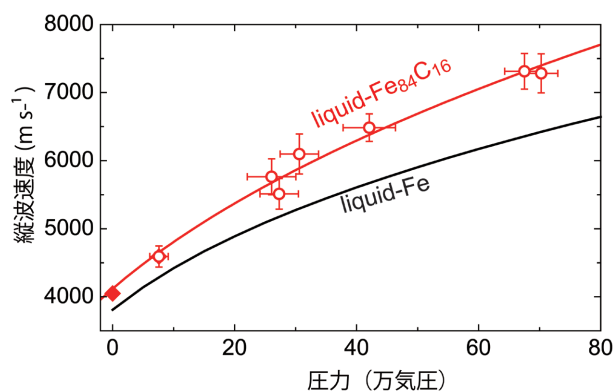


図5 高压高温下で測定された液体鉄-炭素合金の縦波速度と液体鉄の速度の比較。炭素が液体鉄に入ることによって、速度が増す。Nakajima et al.⁵⁾より一部改変。

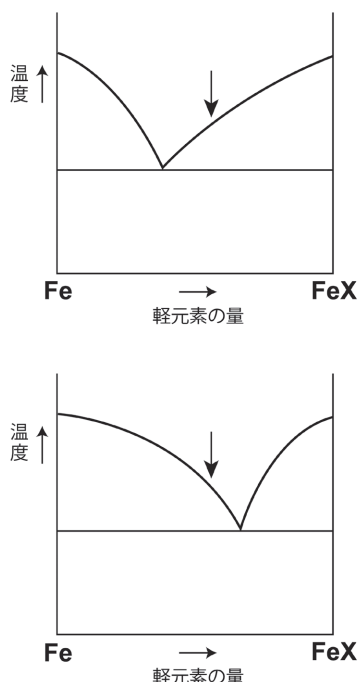


図6 鉄-軽元素の2成分系の模式的状態図。液体コアが矢印の組成を持つ場合、共融点が鉄側にある場合(上图)は液体より軽元素に富む固体相が結晶化する。一方、共融点が軽元素に富む側にある場合(下图)は固体鉄が結晶化する。内核(固体コア)は液体コアよりも軽元素に乏しいので、下图のようにしている必要がある。

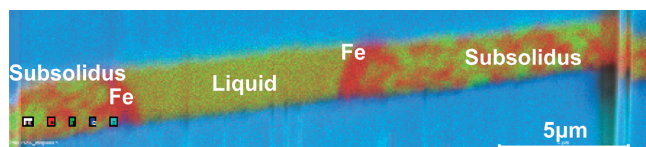


図7 34万気圧におけるFe-9wt% Sの結晶化実験⁶⁾。中ほどに液体だったFe-13wt% S合金があり、外側(低温側)で固体Feを結晶化させていることがわかる。

金を作った場合、(1) コアの圧力下での共融点が酸素(もしくは水素)に富んでおり、内核と外核の差を説明できること、(2) 特に水素はコアの融点を大きく下げたため、比較的低温でも外核が液体でいられること⁷⁾、そして(3) コアの第一原理計算によれば、外核の密度と縦波速度を同時に説明できること⁸⁾、である。

仮に外核の軽元素が酸素と水素であった場合、それは金属鉄がマントルから分離してコアを作ったとき、水がたくさんあったことを示唆している。地球の海の質量は、全体のわずか0.02%に過ぎない。一方、近年の惑星形成に関する理論モデルによれば、海水の何十倍もの水が地球形成時に運ばれてきた可能性が高い。つまり、地球の水の大部分はコアに水素と酸素という形で鉄と合金を作っており、表面にある海水はコアに入らなかった残りなのかもしれない。

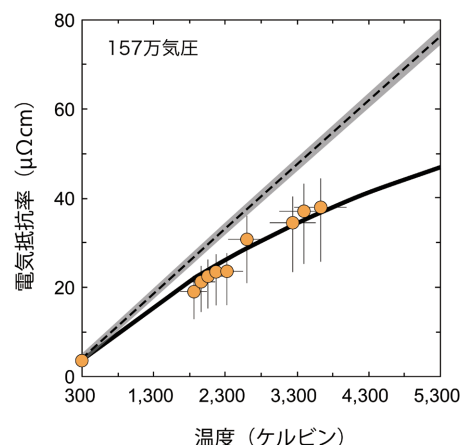


図8 157万気圧における鉄の電気抵抗率測定⁹⁾。従来、金属鉄の抵抗率はBloch-Grüneisen則に従って、温度の上昇分に比例して上がっていく(灰色の帯)と考えられていたが、超高压高温下で実測すると、高温で頭打ちになっていくことがわかった。これは抵抗率の飽和によるものと考えられる。

6 コアの対流と地球磁場の形成

地球の磁場は、外核中の対流によって作られた電磁誘導磁場である。地球史45億年のうち、少なくとも35億年前から現在と大きく変わらない強さの磁場が存在していたことがわかっている。42億年前にすでに存在していたという報告もあるが、現在それは論争中である。

問題は対流のメカニズムである。一般に金属は熱伝導率が高く、熱対流を起こすには大量の熱を奪う(コア内部には熱源がないので、マントルがコアを十分に冷やす)必要がある。しかし、少なくとも地球史の前半は熱対流によってコアが対流していたと考えられていた。

私たちは最近、レーザー加熱式ダイヤモンド・セルを用いて、コアの超高压高温下で鉄の熱伝導率の決定に成功した⁹⁾。私たちが実際に測ったのはコアの高压高温下での鉄の電気抵抗率である。よく知られたBloch-Grüneisen則によれば、金属の電気抵抗率は、ごく低温状態を除くと、温度の上昇に比例して上がっていく(図8)。実際、超高压下でも室温付近では、抵抗率が温度の一次関数として表される。しかし、数千ケルビンもの高温になると、もはや一次関数ではなく、抵抗率が頭打ちになっていくことがわかった。これは抵抗率の飽和として知られたことではあったが、地球コアの研究でその効果が考慮されたことはなかった。電気抵抗率が思ったより小さいことは伝導率が高いことを示す。金属の熱伝導率は、これもよく知られたWiedemann-Franzの法則を使って、電気伝導率から簡単に計算できる。

その結果を見ると、コアの熱伝導率が以前の推定値の3倍以上大きいことがあきらかになった。つまり熱対流を起こす

には3倍以上速くコアが冷える必要がある。こうなると初期地球の温度が高くなりすぎる。これはコアの新しいパラドックスと呼ばれていた。

一方、熱対流以外のメカニズムが、組成対流と呼ばれるものである。結晶化に伴って密度が小さい（もしくは大きい）液体が生じればそれが浮き上がって（沈んで）対流を生む。しかしこれまでは、今からおよそ6億年前に内核が誕生するまで、液体コアの結晶化は起こっていなかった（つまり組成対流は起き得ない）と考えられてきた。

初期地球から組成対流を生むメカニズムとして、ごく最近私たちが提案したのが、コア最上部での二酸化ケイ素の結晶化である¹⁰⁾。これが起きれば、軽い二酸化ケイ素を結晶化した残りの金属液体は重たくなって下へ沈んでいく。前節で、コアの軽元素は水素と酸素という話をしたが、これは現在のコアの話であって、地球ができた頃の液体コアにはさらにケイ素も入っていた可能性がある。実際、金属コアがマントルから分離した（コアができた）際、マントルは大規模に融けていて、地球は深さ1000kmを超すマグマの海に覆われていた可能性が高い。その深さまでマントルが溶融するには3500ケルビン以上の高温が必要であり、その場合大量のケイ素と酸素が液体コアへと入っていく。

私たちの実験でわかったことは、ケイ素と酸素を含む金属鉄が冷えていくと、最初に結晶化するのは金属ではなく、酸化物の二酸化ケイ素であるということである。私たちの考えるコアの進化と磁場形成のシナリオは以下の通りである¹⁰⁾。地球の初期、コアには水素に加えてケイ素と酸素が含まれ、冷却とともに二酸化ケイ素を結晶化した。これがコアの対流を生み、地球磁場がおそらく40億年以上前から誕生した。結晶化はその後ずっと続き、磁場は維持され続けた。6億年前に地球の中心で内核が誕生した。二酸化ケイ素の結晶化をほぼ終え、ケイ素が液体コアにはほとんどなくなり、現在のコアの軽元素は水素と酸素である。

今後さらに

コアは地球深部の研究の最前線であり、まだ解かれていない謎がたくさん残されている。すでに紹介したように、内核（固体コア）に見られる複雑な構造、特に西半球・東半球の構

造はコアの進化を教えてくれるはずだが、成因はわかっていない。外核（液体コア）は均質ではあるが、その化学組成については65年以上前からずっと議論が続いている。その化学組成は地球の原材料物質やコアの形成イベントを雄弁に物語るはずであり、地球科学の重要な課題である。

コアの体積にして95%は液体である。しかし現状では、超高压下にある液体鉄や鉄合金の密度や構造、物性については、まだほとんど実験がなされていない。固体鉄に関しても、その高压高温下での粘性率の見積もりには10桁の幅があり、内核中での動きについて現状では憶測の域を出ない。今後も新しい実験にチャレンジしていきたい。

参考文献

- 1) M.Murakami, K.Hirose, K.Kawamura, N.Sata and Y.Ohishi : Science, 304 (2004), 855.
- 2) Y.Kuwayama, K.Hirose, N.Sata and Y.Ohishi : Science, 309 (2005), 923.
- 3) S.Tateno, K.Hirose, Y.Ohishi and Y.Tatsumi : Science, 330 (2010), 359.
- 4) K.Hirose, S.Labrosse and J.Hernlund : Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 41 (2013), 657.
- 5) Y.Nakajima, S.Imada, K.Hirose, T.Komabayashi, H.Ozawa, S.Tateno, S.Tsutsui, Y.Kuwayama and A.Baron : Nature Commu., 6 (2015), 8942.
- 6) Y.Mori, H.Ozawa, K.Hirose, R.Sinmyo, S.Tateno, G.Morard and Y.Ohishi : Earth Planet. Sci. Lett., 464 (2017), 135.
- 7) R.Nomura, K.Hirose, K.Uesugi, Y.Ohishi, A.Tsuchiyama and A.Miyake : Science, 343 (2014), 522.
- 8) K.Umemoto and K.Hirose : Geophys. Res. Lett., 42 (2015), 7513.
- 9) K.Ohta, Y.Kuwayama, K.Hirose, K.Shimizu and Y.Ohishi : Nature, 534 (2016), 95.
- 10) K.Hirose, G.Morard, R.Sinmyo, K.Umemoto, J.Hernlund, G.Helffrich and S.Labrosse : Nature, 543 (2017), 99.

(2017年10月13日受付)