

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800274

研究課題名(和文) レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いた内核・外核物質の密度測定

研究課題名(英文) Density measurements of iron alloys at high pressure

研究代表者

桑山 靖弘 (Kuwayama, Yasuhiro)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教

研究者番号：00554015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いて、固体及び液体鉄合金のX線回折測定、X線非弾性散乱測定、電気伝導度測定などを行い、これらの物質の高温高圧下での構造、密度、弾性波速度、電気伝導度、熱伝導度を決定した。得られた密度、弾性波速度測定の結果によると、外核には約8%の軽元素が含まれていることが分かった。また、得られた電気伝導度および熱伝導度から、地球の核はこれまで考えられていたよりも急速に冷却していることが分かった。

研究成果の概要(英文)：I performed in-situ x-ray diffraction studies, inelastic X-ray scattering measurements on solid and liquid iron and iron alloys at high pressure and high temperature using a laser heated diamond anvil cell high pressure apparatus to determine the structure, density and sound velocity of these alloys. I also performed electrical and thermal conductivity of iron at high pressure and high temperature. The results on density and sound velocity measurements indicate the core density deficit (cdd), which is the perceived difference between the seismically-determined density of the outer core and the density of pure iron at core conditions, is about 8%. The obtained electrical resistivity of iron at high pressure and high temperature is lower than the expected values, implying that the high thermal conductivity of Earth's core, suggesting rapid core cooling and a young inner core less than 0.7 billion years old.

研究分野：高圧物質科学

キーワード：核 密度 状態方程式 鉄

1. 研究開始当初の背景

地震波観測により得られた核の密度分布と鉄の高圧下での密度を比較した研究によると、地球の内核および外核には鉄やニッケルのほかに軽元素と呼ばれる鉄よりも軽い元素が含まれていることが示唆されている(例えば Birch, 1964 など)。常圧下では、鉄にその他の元素が固溶すると、融点・密度・結晶構造・弾性定数など様々な物性が大きく変化する事がよく知られており、高圧下においても同様に、軽元素の存在はその物性に大きな影響を与えると考えられる。核中の軽元素の候補として、水素・炭素・酸素・珪素・硫黄などが考えられているが、どの元素がどの程度含まれているかについては全く分かっていない(Poirier, 1994 に詳しい)。

地震波観測により得られる内核及び外核の内部の密度分布は、弾性波速度分布と共に、核の化学組成を制約する上で数少ない情報の一つである。地震波観測から得られた内核と外核の密度分布や、内核-外核境界の密度不連続と比較し、核に含まれる軽元素の種類と量に制約を与えるうえで、核の構成物質の候補と考えられる鉄-ニッケル-軽元素合金の、核の圧力・温度条件下における密度データは必要不可欠である。特に、外核の組成を考えるうえで基礎となる液体純鉄の高圧下における密度測定はこれまで報告されたことがない。また、同様に、固体及び液体の鉄合金の高圧高温化における弾性波速度も、核の組成を決定するうえで非常に重要であるが、こちらもこれまでのところ液体に関する実験は非常に限られていた。

2. 研究の目的

本研究では、現在の地球の核の化学組成を決定する上で重要な、高圧高温化における液体及び固体の鉄合金の密度と弾性波速度を、ダイヤモンドアンビルセル高圧高温発生装置及び放射光X線回折測定と放射光非弾性散乱測定により決定し、現在の内核および外核の化学組成の決定に制約を与えることを目的とする。また、核の温度は、地球の冷却と共に低下し、それに伴い内核が成長していると考えられている。内核の存在は地球磁場の生成に重要な役割を担っていると考えられており、また、内核が成長する際により鉄にとんだ固体が内核-外核境界で結晶化することにより、外核の組成は時間と共に軽元素により富むようになっていくと考えられる。そこで、本研究では、核の冷却を考えるうえで重要なパラメータの一つである鉄の熱伝導率を、高圧高温下における電気伝導度を、ダイヤモンドアンビルセル高圧発生装置を使い測定することにより決定した。さらに、核の化学組成の進化を考える上では、核ができた当時から核に含まれる軽元素だけではなく、その後46億年の地球の歴史を通して、マントルとの反応により取り去られたり、また、取り込まれる軽元素もまた重要である。

本研究では、マントルとの相互作用で核に運ばれる可能性のある軽元素として、プレートの沈み込みによりマントル深部まで運ばれる水素に着目して実験を行った。

3. 研究の方法

鉄および鉄合金の高圧高温実験はレーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル高圧発生装置を用いて行った。高圧高温X線その場観察実験は放射光施設 SPring-8 の BL10XU において行った。また、同施設に置いて狡猾高温下でのX線非弾性散乱測定も行った。マルチメガバールの発生にはダブルベベルアンビルを用いた。試料の化学組成は電解放出型 SEM を用いた。断熱材にシリカガラス、KCl、 Al_2O_3 、単結晶サファイアディスクなどを使用し、ガスケット材には Re を用いた。高温発生は2台の SPI 社製ファイバーレーザーを用いた両側加熱法により行った。それぞれのレーザー出力はサンプルの両面の温度が等しくなるよう調整した。角度分散によるX線回折データは、新しく導入された Perkin Elmer 社製のフラットパネルディテクターにより測定した。X線回折測定においては、波長約 0.41 Å の放射光X線を入射X線とした。また、液体鉄合金のフォノンを放射光施設 SPring-8 に設置されている高分解能非弾性X線散乱分光器を用いることによりこれらの弾性波速度を決定した。また電気伝導度測定は四端子法を用いることにより行った。

4. 研究成果

本研究では、まず、Fe-6.5wt.%Si 及び Fe-9wt.%Si 合金の実験を行った。レーザー加熱ダイヤモンドアンビル高圧高温発生装置を用いて、地球の中心の温度圧力条件をカバーすると思われる、409 万気圧 5960K までの温度圧力領域で実験を行った。図 1 に、高圧下における Fe-9wt.%Si 合金の X 線回折パターンを示す。

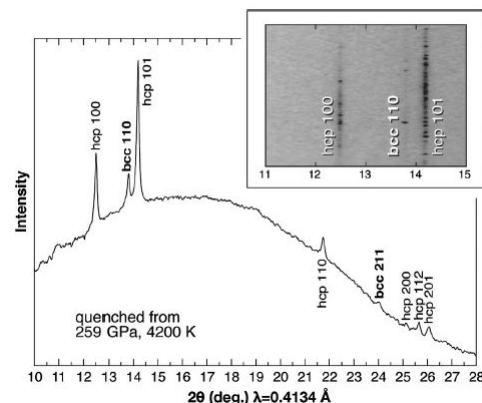


図 1 . 259 万気圧 4200K から温度クエンチした試料の X 線回折パターン

X 線回折測定の結果から、hcp 構造の Fe-9wt.%Si は内核-外核境界条件である 330 万気圧 4800K まで安定であり、また、それより高温では Si に乏しい hcp 相と Si に富む B2

相に分解することが分かった。また hcp 鉄合金中の Si の最大固溶量を決定するために Fe-6.5wt.%Si 合金の実験も行った。得られた X 線回折データを図 2 に示す。

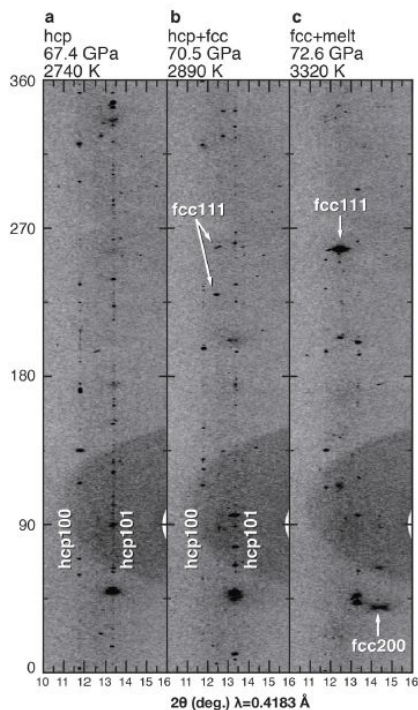


図 2 . Fe-6.5wt.%Si の X 線回折データ

核の軽元素が Si であるとした場合、核の密度欠損や、マントルの Mg/Si 比と Si の同位体比から推定される、核中の Si の量は 7%以下であると考えられている。本実験で得られた X 線回折測定実験結果から、核に含まれる Si の量が 7wt.%以下である場合、内核の結晶化で生ずる相は hcp 相であることがわかった。

核の軽元素の種類と量を見積もるうえで、鉄-軽元素合金の密度に加えて、それらの高圧高温下における弾性波速度を決定することは非常に重要である。本研究では、高圧高温下における鉄合金の高圧高温下における弾性波速度を決定するために、放射光施設 SPring-8 の非弾性散乱測定ビームラインとレーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル高圧高温発生装置を組み合わせた実験を行った。特に地震波観測により得られている、地球の外核の P 波速度と比較をし、核の軽元素を決定するには液体の弾性波速度を測定することが重要である。本研究では、レーザー加熱光学系の見直しをし、より高温を安定して発生することをできるようにし、また、システムを改善し、セットアップにかかる時間を大幅に短縮することにより、限られたマシンタイムにおける実験効率を格段上げた。本研究では液体鉄-炭素合金や、液体鉄の実験を行った。図 3 に得られた非弾性散乱スペクトルを示す。得られた結果から、液体 Fe-C 合金の音速は固体の鉄や Fe₃C 合金よりも格段に遅いことが分かった。また液体鉄の高圧

高温下における音速は衝撃圧縮実験の結果をもとにしたモデル計算で予測されていた値と近いことが分かった。得られた結果によると、地球の液体外核は炭素に極めて乏しいことが分かった。

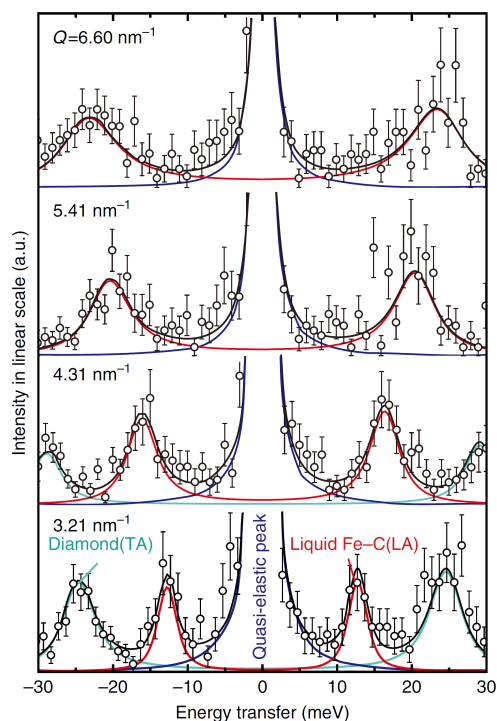


図 3 . 26 万気圧における鉄-炭素合金の非弾性散乱スペクトル

また、現在の核だけでなく、地球が誕生してから、これまでの核の冷却の歴史を知るうえで、核の物質の熱伝導率を決定することは非常に重要である。地球の内核は、地球の冷却に伴い、外核の液体金属が固化することにより成長している。また、外核の対流により地球磁場が形成されており、地球磁場は約 42 億年前より存在すると考えられている。これら地球の冷却過程を理解する上で、核の物質の電気伝導度及び熱伝導度を決定することは重要であるが、核の温度圧力条件におけるこれらの値はよくわかっていなかった。本研究ではレーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル高圧高温発生装置を用いて、高圧下における鉄の電気伝導度を 4500K の高温まで測定した。実験中の試料の様子を図 4 に示す。本研究では、4 端子法により電気伝導度を測定した。また試料の温度は輻射温度計により測定した。本研究のような、レーザー加熱装置による高温発生法を用いた場合、レーザーの吸収する試料表面が最も高温になる。輻射温度計を用いた実験の場合、試料表面の温度は輻射温度計によりモニターすることができるが、その内部の温度は測定することができない。もし仮に、試料内部に温度の低い部分があると、見かけ上、実際よりも高い電気伝導度が測定値としてえられてしまう懸念が

あった。そこで、本研究では、試料内部の温度分布の計算も行い、試料内部の温度分布は、実験結果に大きな影響を与えないことも確認した。図5に、計算により求められた試料内部の温度分布を示す。

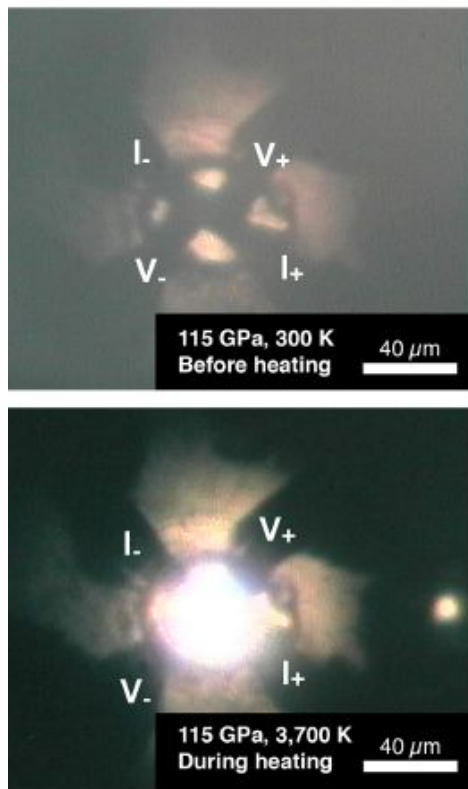


図4. 上：加熱前の試料の様子。下：加熱中の試料の様子。

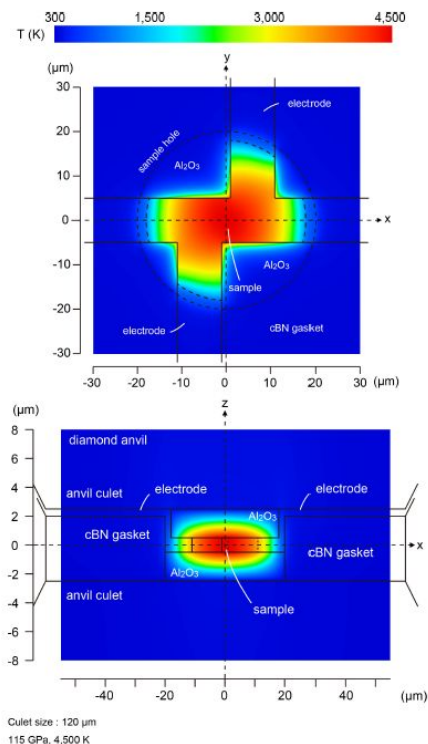


図5. 試料内部の温度分布

本研究で得られた結果から、地球の核の電気・熱伝導度はこれまで予想されていた値よりも約3倍大きいことがわかった。このことは核の熱・電気伝導は非常に活発であり、この熱伝導度から内核の誕生年代は約7億年前と推定される。これは、核の熱的、化学的進化を理解する上で非常に重要な新たな知見である。

最後に、核の形成後、現在に至るまでのマントルと核の反応による、核の化学組成進化について考える。Terasaki ら(2012, PEPI)によると、含水鉱物と核が反応することによって、含水鉱物中の水素が核へと取り込まれることが示唆された。従って、含水鉱物が実際に核と接する下部マントル最深部まで運ばれうるかを明らかにすることは核の化学進化の理解のために重要である。本研究では沈み込むプレートに含まれる含水鉱物の端成分の一つであるFeOOHについて、レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル高圧高温装置と放射光X線その場観察を用いた実験を行った。図6に得られたX線回折データを示す。

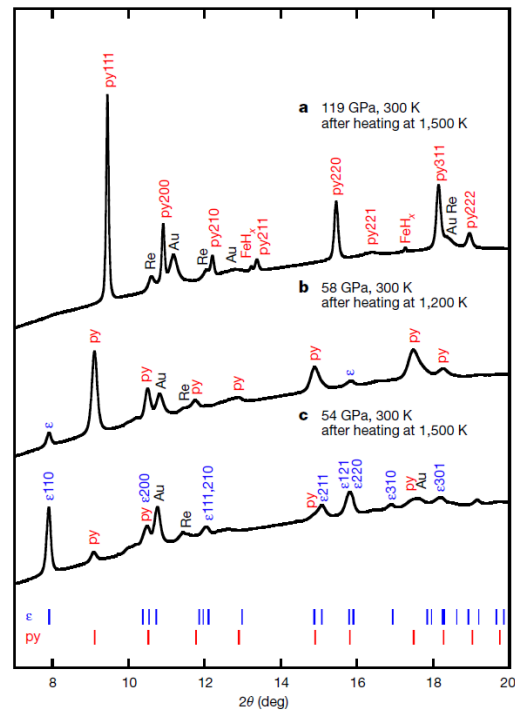


図6. 高圧高温下におけるFeOOHのX線回折データ

先行研究では、FeOOHはマントル深部で分解して水素を放出し、FeO₂を形成することにより水素をマントル最深部までは運ぶことはできないと報告していました。しかしながら、本研究では、より高圧下でFeOOHはこれまで知られていなかった高圧相へ相転移し、さらにマントル最深部の温度圧力条件まで安定であることが分かった。これによりプレート中のFeOOHは核-マントル境界まで運ばれうるということが分かった。さらに、核-マントル境界に達したFeOOHは、熱せられてさらに高温

になるが、本研究結果は、この際に FeH として水素が核へ取り込まれうることを示唆する。この FeOOH の反応は、核の化学組成進化だけでなく、マントルの酸素濃度進化を理解する上でも重要な結果である。本研究で得られた研究成果は、過去・現在・未来の核の熱的・化学的進化を理解する上での重要な基礎データとなるとともに、本研究により開発改良された技術は、今後の核の物質研究に大いに役立つと考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

1. Nishi, M., Kuwayama, Y., Tsuchiya, J., and Tsuchiya, T., The pyrite-type high-pressure form of FeOOH, *Nature*, in press (2017) 査読有
2. Kawaguchi, S. I., Nakajima, Y., Hirose, K., Komabayashi, T., Ozawa, H., Tateno, S., Kuwayama, Y., Tsutsui, S., and Baron, A. Q. R., Sound velocity of liquid Fe-Ni-S at high pressure, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, in press, doi:10.1002/2016JB013609 (2017) 査読有
3. Ohnishi, S., Kuwayama, Y. and Inoue, T., Melting relations in the MgO-MgSiO₃ system up to 70 GPa, *Physics and Chemistry of Minerals*, 44, 445-453, doi:10.1007/s00269-017-0871-8 (2017) 査読有
4. Ohta, K., Kuwayama, Y., Hirose, K., Shimizu, K. and Ohishi, Y., Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions, *Nature*, 534, 95-98, doi:10.1038/nature17957 (2016) 査読有
5. Nakajima, Y., Imada, S., Hirose, K., Komabayashi, T., Ozawa, H., Tateno, S., Tsutsui, S., Kuwayama, Y. and Baron, A., Carbon-depleted outer core revealed by sound velocity measurements of liquid iron-carbon alloy, *Nature Communications*, 6, 8942, doi:10.1038/ncomms9942 (2015) 査読有
6. Tateno, S., Kuwayama, Y., Hirose, K. and Ohishi, Y., The structure of Fe-Si alloy in Earth's inner core, *Earth and Planetary Science Letters*, 418, 11-19, doi:10.1016/j.epsl.2015.02.008 (2015) 査読有
7. Kimura, T., Kuwayama, Y. and Yagi, T., Melting temperatures of H₂O up to 72 GPa measured in a diamond anvil cell using CO₂ laser heating technique, *The Journal of Chemical Physics*, 140, 074501, doi:10.1063/1.4865252 (2014) 査読有
8. Ohta, K., Fujino, K., Kuwayama, Y., Kondo, T., Shimizu, K. and Ohishi, Y., Highly conductive iron-rich (Mg,Fe)O magnesiowüstite and its stability in the Earth's lower mantle, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 4656-4665, doi:10.1002/2014JB010972 (2014) 査読有
9. Fujino, K., Nishio-Hamane, D., Nagai, T., Seto, Y., Kuwayama, Y., Whitaker, M., Ohfuji, H., Shinmei, T. and Irifune, T., Spin transition, substitution, and partitioning of iron in lower mantle minerals, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 228, 186-191, doi:10.1016/j.epsl.2015.02.008 (2014) 査読有

[学会発表](計19件)

1. Nakajima, Y., Imada, S., Hirose, K., Kuwayama, Y., Shinmyo, R., Tateno, S., Tsutsui, S., Ushiyama, H. and Baron, A., Sound velocity of liquid Fe-Si alloy under high pressures, *Goldschmidt 2016*, 2016年06月26日~2016年07月01日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
2. Ohnishi, S., Kuwayama, Y. and Inoue, T., Melting relations in the MgO-MgSiO₃ system and the effect of other elements in the lower mantle, *Goldschmidt 2016*, 2016年06月26日~2016年07月01日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
3. Tsuchiya, T., Kuwayama, Y., Kawai, K. and Ishii, M., High-P, T elasticity of iron and some alloys, *Goldschmidt 2016*, 2016年06月26日~2016年07月01日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
4. 大西里佳, 桑山靖弘, 井上徹, Melting relations in the MgO-MgSiO₃ system under the lower mantle condition using a CO₂ laser heated diamond

anvil cell, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 05 月 22 日 ~ 2016 年 05 月 26 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市)

5. 土屋卓久, 桑山靖弘, 石井水晶, 河合研志, 鉄と鉄 炭素合金の高温高压弹性特性, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 05 月 22 日 ~ 2016 年 05 月 26 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市)
6. 大西里佳, 桑山靖弘, 井上徹, CO₂ レーザー両側直接加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いた MgO-MgSiO₃ 系の溶解関係, 第 56 回高压討論会, 2015 年 11 月 10 日 ~ 2015 年 11 月 10 日, JMS アステールプラザ (広島県・広島市)
7. 太田健二, 桑山靖弘, 廣瀬敬, 清水克哉, 大石泰生, 地球コア条件における鉄の電気伝導度, 第 55 回高压討論会, 2014 年 11 月 22 日, 徳島
8. 太田健二, 桑山靖弘, 廣瀬敬, 大石泰生, 地球中心核条件における純鉄の電気抵抗率, 日本地球惑星科学連合, 2014 年 04 月 29 日, 横浜
9. 大西里佳, 木村友亮, 桑山靖弘, CO₂ レーザー両側加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いた MgO-MgSiO₃ 系の熔融実験, 日本地球惑星科学連合, 2014 年 05 月 02 日, 横浜
他

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑山 靖弘 (KUWAYAMA, Yasuhiro)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教

研究者番号: 00554015