

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025
課題番号：21H04968
研究課題名：超高压実験による地球コアの軽元素組成の解明
研究代表者氏名（ローマ字）：廣瀬 敬 (HIROSE Kei)
所属研究機関・部局・職：東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授
研究者番号：50270921

研究の概要：

本研究は、主にダイヤモンドセル装置を用いた実験により、地球コアの超高压高温下で鉄合金の特性を明らかにし、コアの軽元素組成を解明することを目的とする。具体的には、5つの軽元素（硫黄・ケイ素・酸素・炭素・水素）を含む、液体と固体の鉄合金の密度・地震波伝播速度・状態図・元素分配をコアの圧力下で得る。それらを観測と比較し、8つの独立な制約を使って、コアの軽元素組成を絞り込む。

研究分野：高压地球科学、地球惑星深部物質科学

キーワード：コア、地球深部、超高压、軽元素、水

1. 研究開始当初の背景

地球コアはその中心部に固体の内核とその外側に液体の外核を持つ。鉄を主成分とし、5%程度のニッケルに加え、多量の軽元素を含むとされる。1952年から現在まで70年に渡り、コアの軽元素の正体について活発に議論されて来たが、未だに地球科学の第一級の問題として残されている。コアの軽元素組成は、現在のコアの状態だけでなく、そのダイナミクスと地球史を通じた磁場形成メカニズム、地球全体の化学組成、地球集積・コア形成プロセスなどの理解に向けて大きな意味を持つ。

2. 研究の目的

本研究では、これまでコア組成の解明を阻んで来た実験技術的な問題を克服し、ダイヤモンドセル高压発生装置を用いた実験により、地球コアの超高压高温下での鉄合金の特性を明らかにする。また第一原理計算で実験を補う。具体的には、硫黄・ケイ素・酸素・炭素・水素の5つの軽元素を単独もしくは複数含む、液体と固体の鉄合金に対し、密度・地震波伝播速度・状態図・元素分配をコアの圧力下で得る。それらを観測と比較し、8つの独立な制約を使って、外核・内核の5つの軽元素組成を解明する。外核と内核組成は軽元素の分配係数を使って、一方から他方の計算が可能である。

3. 研究の方法

実験・計算で得られる液体・固体鉄合金の密度・速度を、コアの地震学的観測（外核の①密度・②縦波速度、内核の③密度・④縦波・⑤横波速度）と比較し、観測を説明する外核と内核それぞれの軽元素組成の可能な範囲を得る。さらに、⑥鉄のリキダス相領域、⑦液体鉄中のケイ素と酸素の同時溶解度、⑧金属（コア）とシリケート（マントル）間の軽元素の分配を使って、外核の可能な組成範囲をさらに絞り込む。

4. これまでの成果

1) コアの具体的な軽元素組成の初の見積もり Hirose et al. (2021)は、本研究の目的であるコアの軽元素組成決定の手法を論じた上、本研究開始時点での既存のデータをまとめて、世界で初めて、コアの軽元素組成の可能な範囲を具体的な数字をもって示した。外核組成は $\text{Fe} + 5 \text{ wt\% Ni} + 1.7 \text{ wt\% S} + 0\text{--}4.0 \text{ wt\% Si} + 0.8\text{--}5.3 \text{ wt\% O} + 0.2 \text{ wt\% C} + 0\text{--}0.26 \text{ wt\% H}$ とし、可能な組成幅は広いもののケイ素・酸素・水素の3つが主要な軽元素である可能性を論じた。

2) Fe-FeH は共融系 Fe-FeH 系はこれまで連続固溶体系と考えられていた。しかし本研究により、Fe-FeH 系の融解開始温度が端成分 FeH の融解温度よりも十分低いことが明らかとなり、 $>40\text{GPa}$ では共融系であることが初めてわかった (Tagawa et al., 2022)。さらに Fe-FeH 系の共融点組成（水素濃度）と固体-液体鉄間の水素の分配を見積もることに成功した (Oka et al., 2022; Hikosaka et al., 2022)。共融点の水素濃度は外核中の水素量の上限を与え、かつ外核-内核間の水素の分配が推定可能になるという意味で、これらは重要である。また、Fe-H 合金の状態方程式・縦波速度の測定と理論計算を超高压まで行い、内核の水素量を制約した。さらに水素と硫黄が多く含まれている場合は液体不混和が起きること、それが外核最上部の E' 層を説明し得ることもわかった (Yokoo et al., 2022)。

3) 内核の結晶化と外核組成の強い制約 Fe-FeH 系の共融点組成が得られたことにより、軽元素に乏しい内核が結晶化するために外核組成がとるべき範囲が絞り込まれた。そして、この組成範囲と、外核で観測される密度・縦波速度を説明する化学組成範囲がほとんど重ならないことがわかった (Sakai et al., 2022; Oka et al., 2022)。これは、外核組成の強い制約になる。さらに、外核と内核の境界に存在する低速度層 (F 層) も外核の結晶化に起因すると考えることにより、外核組成は狭い範囲に絞り込めることがわかった。

4) バルク地球の水素同位体比 水素を含む鉄合金の実験で水素濃度を SIMS (二次イオン質量分析法) で定量するにあたり、水素は常圧常温で鉄から逃げてしまうため、実験回収試料のクライオ (極低温) 測定が必須である。本研究では、クライオ SIMS を使った水素の 3 次元マッピングの開発に成功し、高压高温実験試料の分析から Fe-H 系を中心に水素を含む鉄合金の状態図・元素分配の決定が進んでいる。さらに高压下での金属鉄-シリケート間の水素の同位体分別を調べた結果、コアはマントルよりもかなり低い水素の同位体比を持つことがわかった。地球全体の水素同位体比を代表するのが海水ではなくコアであることを考えると、地球の水の起源の見直しを必要とする重要な結果である。

5) 現時点でのコアの軽元素組成の推定 本研究の成果を使って、Hirose et al. (2021) によるコア組成の推定を見直したところ、現時点で、外核の組成は $\text{Fe} + 5 \text{ wt\% Ni} + 1.7 \text{ wt\% S} + 1.0\text{--}1.6 \text{ wt\% Si} + 3.0\text{--}4.7 \text{ wt\% O} + 0.21\text{--}0.46 \text{ wt\% C} + 0.19\text{--}0.32 \text{ wt\% H}$ ($\text{Fe}_{0.68\text{--}0.70}\text{Ni}_{0.04}\text{S}_{0.02}\text{Si}_{0.02\text{--}0.03}\text{O}_{0.08\text{--}0.13}\text{C}_{0.01\text{--}0.02}\text{H}_{0.09\text{--}0.14}$) と見積もられ、コアの主要な軽元素は水素と酸素とわかった (コアの質量の 95% は外核)。また内核組成は $\text{Fe} + 5 \text{ wt\% Ni} + 1.4 \text{ wt\% S} + 1.0\text{--}1.6 \text{ wt\% Si} + 0.02\text{--}0.05 \text{ wt\% C} + 0.13\text{--}0.22 \text{ wt\% H}$ ($\text{Fe}_{0.80\text{--}0.85}\text{Ni}_{0.04}\text{S}_{0.02}\text{Si}_{0.02\text{--}0.03}\text{H}_{0.07\text{--}0.11}$) と原子比にして水素が軽元素として卓越している。

6) マントル最下部の水 当初予見していなかった成果として、クライオ SIMS の技術開発中に、沈み込む海洋プレートによってマントル深部へと輸送された水は、マントルの底の超高温下でもスラブから脱水しないことを発見した。これも、マントル最下部の大きな地震波速度異常の成因の見直しを必要とする重要な成果である。

5. 今後の計画

本研究の主目的である「コアの軽元素組成の解明」に関して、コアの組成を狭い範囲に絞り込むことに既に成功している。今後は、未だにコア組成の探索に使用できていない 3 つの制約 (内核 = 固体鉄合金の密度・縦波・横波速度) に関する研究を加速させ、内核組成 (そしてそこから分配係数を使って計算される外核組成) を絞り込む。同時に、現段階でコアの硫黄量の見積もりは始原的隕石組成に基づいており、本研究が明らかにする鉄-硫黄合金の特性と地震学的観測による見積もりへと置き換える必要がある。また、F 層の成因も検証が必要であり、特に外核最下部条件における液体鉄合金の密度・縦波速度の決定が重要である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. Oka, K., Ikuta, N., Tagawa, S., Hirose, K., & Ohishi, Y., Melting experiments on Fe-O-H and Fe-H: Evidence for eutectic melting in Fe-FeH and implications for hydrogen in the core, *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL099420 (2022).
2. Tagawa, S., Helffrich, G., Hirose, K., & Ohishi, Y., High-pressure melting curve of FeH: Implications for eutectic melting between Fe and non-magnetic FeH, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024365 (2022).
3. Hikosaka, K., Tagawa, S., Hirose, K., Okuda, Y., Oka, K., Umemoto, K., & Ohishi, Y., Melting phase relations in Fe-Si-H at high pressure and implications for Earth's inner core crystallization, *Scientific Reports*, 12, 10000 (2022).
4. Sakai, F., Hirose, K., & Umemoto, K., Melting experiments on Fe-C-O to 200 GPa: Liquidus phase constraints on core composition, *Geochemical Perspectives Letters*, 22, 1–4 (2022).
5. Yokoo, S., Hirose, K., Tagawa, S., Morard, G., & Ohishi, Y., Stratification in planetary cores by liquid immiscibility in Fe-S-H, *Nature Communications*, 13, 644 (2022).
6. Hirose, K., Wood, B., & Vočadlo, L., Light elements in the Earth's core, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 645–658 (2021).

7. ホームページ等

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~hirose/>