

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22363

研究課題名(和文) 二次イオン質量分析法で探る初期地球深部での超高压下元素分配

研究課題名(英文) Ultra-high pressure element partitioning at core formation conditions investigated by SIMS imaging

研究代表者

田川 翔 (Tagawa, Shoh)

東京工業大学・地球生命研究所・特任助教

研究者番号：60882826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球の起源物質の推定に繋がる「地球の金属核の形成過程」に着目し、実験を行った。まず、A)核形成における水・水素の影響に着目した。本研究により、水を含んだマグマオーシャンからコアが分離した際に、大量の水素が地球核へ分配される可能性が明らかになった。次に、その実験の結果を受け、B)Fe-FeH系の高压・高温における振る舞いを明らかにし、Fe-H系の惑星核における熱力学的物性の理解を広げた。更に、地球核形成時の条件を制約するために、C)リンや炭素の地球核・コア間の分配実験を行った。本研究で確立出来た実験分析手法やシミュレーションコードは、将来の研究の基盤となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

はやぶさ2が訪れたリュウグウは、大量の揮発性元素を含んでいることが明らかになった。そのような天体が地球の起源物質だとすると、果たして水はどこに消えたのか。本研究では、水は水素として地球核に分配されることを明らかにした。これは、海が存在の普遍性にも繋がる知見である。本研究の究極的な目標は地球の起源の解明である。惑星の金属核の形成プロセスは、惑星の形成における最大の分配現象であり、地球の元素存在度の確定に不可欠である。本研究は、世界に先駆け超高压下での水素の分配を明らかにした。今後、確立した実験技術を他の元素に応用することで、より詳細な地球の起源の理解が可能になると考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, I focused on the "core formation process of the terrestrial planets," which leads to estimating the Earth's original material, and I conducted high-pressure experiments and simulations. First, I focused on (A) the effects of water and hydrogen on the core formation process at ~50 GPa and 3500 K. This study revealed the possibility that a large amount of hydrogen (30-70 times sea water) is distributed to the Earth's core by reacting a water-bearing magma ocean and accreted planetesimal cores. Next, based on the results of the project (A), I clarified the (B) thermodynamical behavior of the Fe-FeH system at core pressures, testing the hypothesis of whether hydrogen exists in the Earth's core. Furthermore, we performed experiments on (C) distributing phosphorus and carbon between the Earth's core and magma ocean. The experimental methods using secondary ion mass spectrometry (SIMS) and simulation codes established in this study provided the basis for future research.

研究分野：高圧地球科学

キーワード：超高压・高温実験 二次イオン質量分析法(SIMS) コア-マントル分離 ダイヤモンドアンビルセル(DAC) メタル-シリケート分配 鉄・水素化物

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球の起源物質が何であるかは、地球科学の根本的な問である。

Ringwood (1966)以降、地球全体の化学組成のモデルは精密化されてきた(e.g. McDonough and Sun, 1995 *Chem. Geol.*)。その過程で、大きな役割を果たしているのが、地球核の分離条件での元素の分配係数である。特に、「核の分配が起きた温度・圧力・酸化還元条件はどうか」と、「その条件において各元素はどのような振る舞いをするのか」という点は、近年の高圧地球“化学”の主たる問題になっている。

しかしながら、分配係数が高圧まで求められた元素は少ない。特に、コア形成の酸化還元状態は異なるモデルが提唱され、制約できていない (e.g. Siebert et al., 2013 *Science* / Rubie et al., 2011 *EPSL*)。酸化還元条件は各元素の分配係数を変え、平衡の温度・圧力条件の推定も変える (Badro et al., 2015 *PNAS*)。結果、核に存在する微量元素や軽元素の推定量もモデル依存となり不確定となるため、地球の起源物質を理解する上での壁となっている。地球の起源物質の理解には、酸化還元状態に敏感な微量元素(リン)(e.g. Siebert et al., 2011 *GCA*)や、ボラチル(酸化剤としての水・還元剤としての炭素)の振る舞いを超高压実験から決定することが不可欠である。

2. 研究の目的

本研究ではまず、A)核形成における水・水素の影響に着目した。水を含んだマグマオーシャンからコアが分離した際に、水がどう振る舞うのか、理解するための研究を行った。

次に、その実験の結果を受け、B)Fe-FeH 系の高圧・高温における振る舞いを明らかにした。さらに、より地球核形成時の条件を制約するために、C)リンや炭素の地球核・コア間の分配実験をおこなった。

3. 研究の方法

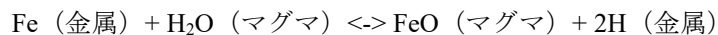
惑星内部の温度圧力条件を再現できる装置、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル(LH-DAC)を用いて実験を行った。水素量の決定のために SPring-8 BL10XU でその場 X 線回折測定をおこなっている。分配実験(項目 A、C)では、試料加工をする収束イオンビーム装置、試料中の元素分布を理解する EPMA・二次イオン質量分析法(SIMS)を組み合わせることで核形成時の温度・圧力での元素分配を明らかにした。さらに、得られた分配係数に、本研究で開発したコア形成のシミュレーションコードを適用することで、地球全体の水の量の理解に繋げた。

水素の高圧実験(項目 B)では、より高温・高圧まで実験を行い、地球の核に水素が存在しうるか検証する上での基礎的な情報となる、状態方程式・熱力学的特性を明らかにした。

4. 研究成果

A)核形成における水・水素の影響 (Tagawa et al. (2021) *Nature Communications*)

レーザー加熱式ダイヤモンドセルを用いて 30–60 万気圧・2,800–4,300 度の高圧高温状態を作り出し、地球核の形成条件におけるマグマと金属鉄の間で水素の分配実験に世界に先駆け成功した。マグマ中の水と金属中の水素について、以下の化学平衡が成立していたと考えられる。



ごく微小 (10 ミクロン程度) の高圧高温実験試料中に含まれる、金属鉄中の水素とマグマ中の水の量を、大型放射光施設 SPring-8 における X 線回折測定と北海道大学の同位体顕微鏡による微小領域化学分析 (図 1) によって、それぞれ決定することに成功し、コアとマンツルの間の水 (水素) の分配を明らかにできた。本研究により、水素は濃度にして 30 倍以上もマグマオーシャンより鉄に分配されやすかったことがわかった。この論文ではさらに、得られた結果をもとに、コア形成シミュレーションを行い (図 2)、地球は水素 (水) の巨大なリザーバーとなりえることを示した。

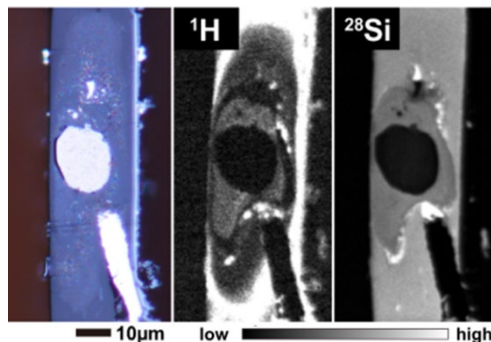


図 1 分配試料の光学顕微鏡像と本研究の手法による ¹H、²⁸Si の SIMS での濃度分析結果

本研究の実施にあたり、次の二点を新規に開発した。

① LH-DAC と SIMS の組み合わせによる分配実験

これまで、超高压試料の分配実験は、EPMA による分析が多く、定量可能な元素の種類や濃度に制限があった。本実験の実施に伴う技術開発により、LH-DAC 試料の SIMS における分析手順が確立した。更に、分析の手続きの工夫を積み重ねることで容易に多数の試料の分析が可能になった。この点は、分配実験を行う上での重要なブレークスルーであり、今後、本手法を応用することで、様々な元素の分配が明らかになると考える。

② コア形成シミュレーションコード

コア形成のシミュレーションを作成し、元素の分配係数を実際の地球の進化と結びつけて議論することが可能になった。同様の研究は、幾つかの研究室に先行されていたものの、国内では事例が少なく、コードの確立は喫緊の課題であった。本研究では、今後の拡張を踏まえ、Python で計算を実装した。さらに、進化計算ライブラリ DEAP の遺伝的アルゴリズムを組み込むことで、地球の起源物質の推定に資するコードを作成した。

結果は、NHK ニュース (2021 年 5 月 29 日) や JST サイエンスポータルでも紹介された。

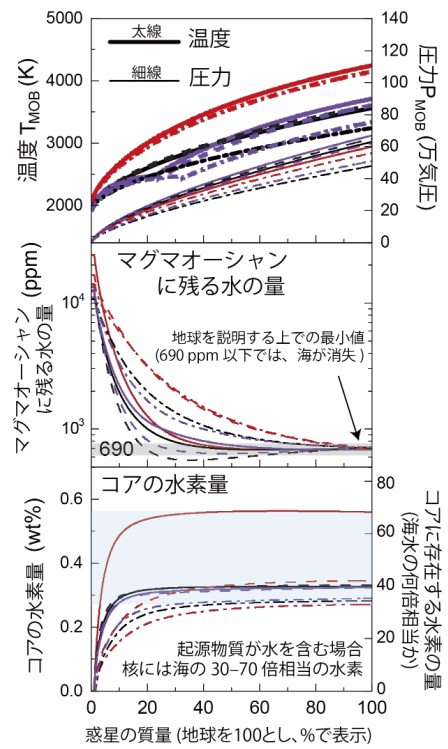


図 2 コア形成シミュレーション結果

B) 水素の状態方程式 (Tagawa et al. (2022a) *Geophysical Research Letters*)

上記 A) の結果によれば、水素は地球核の主要な軽元素候補である。しかしながら、地球核の圧力における鉄-水素系の高圧実験は、実験技術上の困難から実現していなかった。

そこで本研究では、実験技術から開発を行い、142 万気圧、3660 K までの FeH 系の状態方程式を構築した。本研究により、内核の密度を説明する最大の水素量は 0.8–0.9 wt% であること、この見積もりは内核の温度によらないことが分かった。また、高圧下での鉄中の水素濃度を X 線回折測定から精度よく推定することが可能になった。

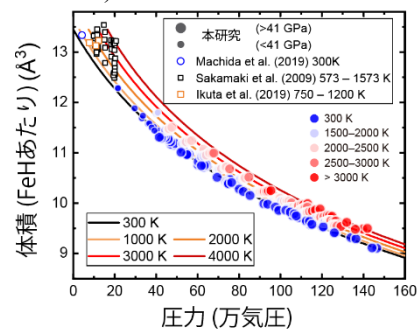


図 3 fcc FeH の圧縮挙動と温度依存性

C) リン・炭素のメタル・シリケート間分配実験

既存の DAC を用いた分配実験は、試料の微細さ(分析領域は、10 μm 四方を満たない)のため、シリケートや鉄に微量しか残らない「分配が偏る元素」の実験が困難であった。しかし、上記 A) の実験で開発した分配実験手法を応用すると、SIMS の高感度・高精度ゆえに、数 10 ppm 以下の濃度でも定量が可能になる。つまり、本研究で開発された実験手順を用いると、実験上の手続きはそのまま、地球の核形成に相当する圧力での分配実験が可能になる元素が、膨大に増える。

本研究ではまず、酸化還元状態に敏感と考えられる微量元素(リン)や、水とともに重要な揮発性元素である炭素の分配実験を行った。図 4 に ~34–61 GPa, 3800–4800 K で行ったリンの分配実験結果を示す。本実験の結果は、リンの分配係数の圧力依存性が高压で正から負に変化することを示し、他の親鉄性元素の分配と整合的であることが明らかになった。本研究の結果は、なぜ、地球と火星でリンのマンテル存在度が大きく異なるのかの説明を与える。

これらの結果は、今後、国際誌に投稿予定である。

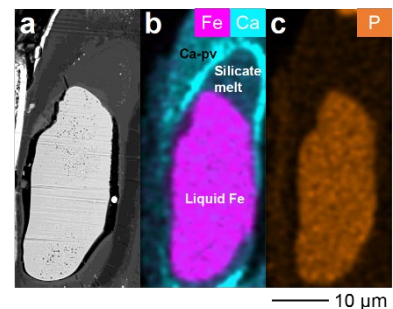


図 4 リンの分配実験結果の EDS 像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 ShohTagawa, NaoyaSakamoto, KeiHirose, ShunpeiYokoo, JohnHernlund3 YasuoOhishi, HisayoshiYurimoto | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Experimental evidence for hydrogen incorporation into Earth's core | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nature Communications | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-22035-0 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 Tagawa Shoh, Gomi Hitoshi, Hirose Kei, Ohishi Yasuo | 4. 巻 49 |
| 2. 論文標題 High Temperature Equation of State of FeH: Implications for Hydrogen in Earth's Inner Core | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Research Letters | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021GL096260 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 Yokoo Shunpei, Hirose Kei, Tagawa Shoh, Morard Guillaume, Ohishi Yasuo | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Stratification in planetary cores by liquid immiscibility in Fe-S-H | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nature Communications | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-022-28274-z | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

| |
|---------------------------------------------|
| 1. 発表者名 田川 翔・太田 健二・廣瀬 敬・坂本 直哉・五味 斎・大石 泰生 |
| 2. 発表標題 Fe-H 系の高圧状態図 |
| 3. 学会等名 第62回高圧討論会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 若松 達也・太田 健二・田川 翔・八木 貴志・廣瀬 敬・大石 泰生 |
| 2. 発表標題 ピコ秒超音波法を用いた100 GPa までの FeHx の縦波速度測定 |
| 3. 学会等名 第62回高圧討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>【プレスリリース】地球コアに大量の水素～原始地球には海水のおよそ50倍の水～ https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2021/7309/ 【研究内容解説】地球中心核の水素、日本アイソトープ協会"Isotope News"2022年4月号 https://www.jrias.or.jp/pdf/2204_TRACER_TAGAWA.pdf</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| | | |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織 | | |
| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|