

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13635

研究課題名(和文)放射光X線高圧下その場観測と局所微量分析による鉄-ケイ酸塩間の水素分配の決定

研究課題名(英文) Determination of hydrogen partitioning between metal and silicate by in situ synchrotron X-ray observation under high pressure and micro-area analysis

研究代表者

桑原 秀治 (Kawahara, Hideharu)

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：50505394

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では惑星分化過程における核-マントル間の水素分配に制約を加えることを目的とした。当初予定していた放射光その場観測実験が難航したため、急冷回収した試料を分析する方向へ方針転換した。

高圧実験は2GPa、1923 Kの条件で行い、鉄と酸化物、水酸化物混合粉末から成る試料を窒化ホウ素またはSiO₂カプセルに封入し、さらに白金管で覆った。

回収試料の急冷ケイ酸塩ガラスに含まれる水量は0.25質量%水を含んだ出発試料の場合では0.13-0.24質量%、0.5質量%水を含んだ出発試料では0.53質量%であり、実験条件下では水素の大部分がケイ酸塩に分配されたことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球の海は地球質量の0.023%しかなく、これに対して惑星材料物質と考えられている始原天体は数質量%の水を含んでいると推定されている。地球の海と始原天体における水量の不一致の解決策として水素に富む金属核の存在が指摘されてきたが、この仮説を検証するためには惑星形成過程において水素が核に取り込まれた可能性について明らかにしなければならなかった。

本研究課題で得られた成果は惑星がまだ小さかった場合の核形成過程において、圧力や温度の低い初期段階では水素は核ではなく、マントルに分配されることを示唆するものである。今後より、高温高圧下での実験により地球核が水素の貯蔵層となりうるのか検証することが望まれる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to constrain the distribution of hydrogen between the core and mantle during planetary differentiation. Since in-situ observation experiments using synchrotron radiation, which were originally planned, were not successful, we decided to analyze quenched experimental samples.

The high-pressure experiments were carried out at 2 GPa and 1923 K. The samples were encapsulated in boron nitride or SiO₂ capsules. The starting sample consisted of a mixture of iron and oxide powders with Mg(OH)₂ as a hydrogen source. The capsule was sealed in a platinum tube to prevent water loss from the capsule during the experiment.

The amount of water in the quenched silicate glass of the recovered sample was 0.13-0.24 mass% for the starting sample containing 0.25 mass% water and 0.53 mass% for the starting sample containing 0.5 mass% water, suggesting that most of the hydrogen was partitioned to the silicate under the experimental conditions.

研究分野：固体地球科学

キーワード：核 マントル 水素 分配

1. 研究開始当初の背景

1980年代以降、微惑星衝突によって形成する脱ガス水蒸気大気の温室効果[e.g., Matsui and Abe, 1986, *Nature*]や原始惑星同士の巨大衝突によって岩石惑星が溶融し、マグマオーシャンが形成する[e.g., Tonks and Melosh, 1992, *Icarus*]とされる理論が確立されてきた。このマグマオーシャン中で金属核、マントル、大気が分離し、地球型惑星が誕生したとされている[e.g., Wood et al., 2006, *Nature*]。このように地球型惑星形成理論の大枠が確立されつつある一方で次の未解明問題が残されている。地球の核の密度が鉄 - ニッケル合金に比べて低いのはなぜか[e.g., Ringwood, 1979, *Origin of the Earth and the Moon*]。地球マントルの酸化還元度はどのように決まったか[e.g., Frost et al., 2008, *Philos. Trans. Royal Soc. A*]。地球の海洋質量はどのように決まったのか[e.g., Matsui and Abe, 1986, *Nature*]。これらの問いに答える上で本質的に重要な過程は地球型惑星分化時における核 - マントル間の水素分配反応である。地球型惑星形成期には上述のようにH₂Oを主成分とする水蒸気大気が存在していた可能性が高く[e.g., Ikoma and Genda, 2006, *ApJ*]、またH₂Oはマグマへの溶解度が高いことから、マグマオーシャン中では金属鉄とケイ酸塩液相間で水素分配反応が起きると考えられている[e.g., Fukai, 1984, *Nature*]。

2. 研究の目的

本研究では高温高压下における金属鉄 - ケイ酸塩液相間の水素分配について実験的な制約を加えることを目的とした。

3. 研究の方法

マルチアンビル高压発生装置を用いて金属鉄中の水素固溶量を放射光 X 線高压下その場観測にて格子体積を測定することで見積り、実験回収試料中の急冷ケイ酸塩相中の水素量を二次イオン質量分析装置によって求める、ということを試みた。

しかし、鉄中の水素量の見積りに当初検討していた放射光 X 線を用いた高压下その場観測実験では水素を飽和に近い量まで加えないと格子体積から水素量の見積りを行うことが難しいこと、そして X 線を透過させ、かつ液相中の水素封入を両立させるカプセル材が見つからなかったこともあり、放射光その場観測実験から急冷回収した実験試料を分析する方向へ実験の方針転換を行った。

高压実験は 2GPa、1923 K の条件で行い、試料は窒化ホウ素もしくは SiO₂ ガラスカプセルに封入した。出発試料には鉄およびエンスタタイトコンドライト、または中央海嶺玄武岩組成の酸化物混合試料に水素源として Mg(OH)₂ を H₂O 換算で 0.25 または 0.5 質量%になるよう加えた。カプセルは白金に封入し、加熱実験中に水がカプセル外に散逸するのを防ぐようにした。回収試料の化学分析は海洋研究開発機構高知コア研究所に設置されている電子線プローブマイクロアナライザを用いて行い、ケイ酸塩ガラス中の水素の定量は京都大学理学研究科に設置されている二次イオン質量分析装置を用いて行い、化学汚染を極力減らすために分析試料はインジウムに固定した。

4. 研究成果

回収試料の急冷ケイ酸塩ガラスに含まれる水量は 0.25 質量% 含んだ出発試料の場合では 0.13~0.24 質量%、0.5 質量%水を含んだ出発試料では 0.53 質量%であり、実験条件下では水素の大部分がケイ酸塩に分配されたことが示唆された。急冷実験では液体鉄に分配された水素量を推定することができない点が不利ではあるが、今後はより結果を精査するため、金属鉄を含まない試料と比較実験を行い、急冷ケイ酸塩ガラス中の水素量の比較から金属鉄 - ケイ酸塩液相間の水素分配係数の推定を行っていく必要があると考えている。

また、本研究課題で得られた実験的知見を基に、惑星形成期における炭素、フッ素、そして塩素といった揮発性元素の核 - マントル間分配や鉱物 - マグマ間分配についても明らかにすることができ、論文として国際学術誌に投稿することができた。具体的には分化した微惑星ではマントルにも飽和に近い量の炭素が分配され、その量が現在月や地球マントルで推定されている炭素量と整合的であることが示唆された[Kuwahara et al., 2019, *GRL*; 2021, *GRL*]。親鉄性に非常に乏しいフッ素や塩素については地球のマグマオーシャン固化過程における固相 - 液相分配を調べた。その結果、フッ素は下部マントル主要鉱物である

リッジマナイトに液相と同程度の量が分配され、塩素はそのほとんどが液相に濃集することが明らかとなった。このことはマグマオーシャン固化と共に、マントルの F/Cl 比が上昇することを示唆しており、塩素に富む表層物質が宇宙空間に散逸したと仮定すると、惑星材料物質であるコンドライトに比べて高い地球マントルの F/Cl 比が説明できる、と結論づけた[Kuwahara et al., 2019, EPSL]。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kuwahara H., Itoh S., Nakada R., Irifune T.	4. 巻 46
2. 論文標題 The Effects of Carbon Concentration and Silicate Composition on the Metal Silicate Partitioning of Carbon in a Shallow Magma Ocean	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 9422 ~ 9429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL084254	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 該当する
1. 著者名 Kuwahara Hideharu, Kagoshima Takanori, Nakada Ryoichi, Ogawa Nobuhiro, Yamaguchi Asuka, Sano Yuji, Irifune Tetsuo	4. 巻 520
2. 論文標題 Fluorine and chlorine fractionation during magma ocean crystallization: Constraints on the origin of the non-chondritic F/Cl ratio of the Earth	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 241 ~ 249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.05.041	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 該当する
1. 著者名 Hideharu Kuwahara, Ryuichi Nomura, Ryoichi Nakada, Tetsuo Irifune	4. 巻 284
2. 論文標題 Simultaneous determination of melting phase relations of mantle peridotite and mid-ocean ridge basalt at the uppermost lower mantle conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 36-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2018.08.012	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 該当する
1. 著者名 Kuwahara Hideharu, Itoh Shoichi, Suzumura Akimasa, Nakada Ryoichi, Irifune Tetsuo	4. 巻 48
2. 論文標題 Nearly Carbon Saturated Magma Oceans in Planetary Embryos During Core Formation	5. 発行年 2021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) 10.1029/2021GL092389	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 桑原秀治、伊藤正一、中田亮一、入船徹男
2. 発表標題 高压下における鉄 - ケイ酸塩液相間の炭素分配係数の再評価と地球内部の炭素分布への制約
3. 学会等名 2019年度日本地球化学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideharu Kuwahara, Shoichi Itoh, Ryoichi Nakada, Tetsuo Irifune
2. 発表標題 Metal-silicate partitioning of carbon in a shallow magma ocean: Implications for the distribution of carbon in the Earth during the core formation
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideharu Kuwahara, Akimasa Suzumura, Shoichi Itoh, Ryoichi Nakada, Tetsuo Irifune
2. 発表標題 The effects of carbon concentration and silicate composition on the metal-silicate partitioning of carbon in a shallow magma ocean
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

地球のフッ素、塩素の量はどのように決まったのか？ https://research.ehime-u.ac.jp/ja/environment_geoscience/20200218-01.html
惑星形成期における核 - マントル間の炭素分配 https://research.ehime-u.ac.jp/ja/environment_geoscience/20200218-02.html
地球や月といった天体のマントルに含まれる炭素量はどのように決まったのか？ https://research.ehime-u.ac.jp/ja/environment_geoscience/20210601-01.html

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
---------	---------