

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01994

研究課題名（和文）地球マントル中心核境界および氷惑星深部における水の挙動

研究課題名（英文）Water behavior at the core-mantle boundary and the interior of the icy planet.

研究代表者

西 真之（Nishi, Masayuki）

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10584120

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、地球・惑星内部の水の挙動の理解を目的とした実験を行った。超高温高圧下で進行する水と金属鉄の化学反応を詳細に調べ、金属鉄の表面に「さび(酸化鉄)」が生成されることを明らかにした。このことは、地球内部を循環する水が、金属鉄から成る地球中心核の表面に酸化鉄つくることが示唆される。また、様々な化学組成の含水鉱物を実験試料として用い、含水鉱物の超高温高圧下でのふるまいを調べた。その結果、地球深部の含水鉱物は周囲の環境に応じてその化学組成を大きく変えることや、水素と酸素とアルミニウムからなる水酸化アルミニウム（AlOOH）は190万気圧で結晶構造が変化（相転移）することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球内部を循環する水が、金属鉄から成る地球中心核の表面に酸化鉄つくることが示唆された。地球内部の対流運動や中心核-マントル境界の性質、地震波異常の起源などを知るうえで重要な知見となると期待される。また、これまで実験的に検証されることのなかった地球マントル圧力を超える超高压に耐える含水鉱物が存在することが分かった。地球より大きな惑星の内部はこのような超高压環境が想定されるため、地球以外の惑星内部の水の挙動に関する新たな知見となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, the chemical reaction between metallic iron and a limited water supply at ~120 GPa was investigated using the laser-heated diamond anvil cell technique. Contrary to the results of earlier studies, the formation of FeO instead of FeO₂Hx without intermediate phases was observed. Also, we found that -AlOOH transforms into a new phase with orthorhombic symmetry, named -AlOOH, at 190 GPa.

研究分野：高圧地球科学

キーワード：マントル 水 中心核 含水鉱物

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水は地球の表層だけではなく地球の内部においても重要な成分であり、地球の進化に大きな影響を及ぼしている。地球表層に存在する水は岩石との化学反応を通じて含水鉱物をつくり、プレートの沈み込みにより水をマントルへと運ぶ。近年、地球の主要元素から構成され、マントル深部の圧力条件下で安定な含水鉱物が複数発見された。これらの研究結果は、いまだに全容が解明されていない地球内部における水の循環を明らかにするための新たな知見となると期待されている。特に、核 マントル境界は岩石と液体金属鉄が超高温で接する地球内部最大の化学的不連続面であることから、地球内部の水循環により中心核付近に輸送された水が関与する大規模な化学反応が考察されている。しかしながら、上記の考察は実験による証明が難しく、推測の域を出ていない。

また、近年明らかになってきた含水鉱物の広い温度圧力安定性は、地球だけではなく他の惑星内部の構造にもかかわる可能性がある。太陽系の外惑星である天王星、海王星等の氷惑星の内部構造は、氷や水のマントルと、岩石質の中心核から成るモデルが広く支持されている。しかしながら、このような惑星内部に相当する高圧環境下で熱力学的に安定な含水鉱物の存在は全く理解されていない。

2. 研究の目的

本課題では、上記したマントル 中心核を含めた水循環モデルを評価・再構築することを目標とし、その理解の基盤となる多成分系における含水鉱物の相転移、安定領域、および周囲物質との相互作用を解明する。また、地球マントルの圧力条件を超える、超高压下で安定な含水鉱物を合成し、系外惑星を含む地球より大きな惑星内部の水の存在形態を考察する。

3. 研究の方法

本研究では安定した均質加熱で大容量試料を扱うことができる特徴を持つマルチアンビル型装置と、100 万気圧を超える圧力発生を可能とするダイヤモンドアンビルセルの 2 種類の高圧発生装置を相補的に用いた。また、放射光 X 線による相同定、格子体積の決定、反応カイネティクスの解明、を試みた。

4. 研究成果

(1) 超高压下における金属鉄と水の反応メカニズム

プレートの沈み込みに代表されるマントルの対流運動により、鉱物に含まれる水は地球の内部を循環する。しかしながら、超高温高圧環境である中心核付近に到達した水がどのような挙動をとるかはよく分かっておらず、中心核 マントル境界におけるブルームの発生や地震波超低速度層の起源、また液体金属鉄(中心核の構成物質)への水の溶け込みなど、水が地球深部環境に及ぼす様々な影響が活発に議論されている。本研究では、ダイヤモンドアンビルセルを用いた高圧発生技術と、大型放射光施設 SPring-8 の構造物性ビームライン BL10XU に設置されたレーザー加熱システムおよび放射光 X 線を使用し、地球中心核—マントル境界付近に相当する 120 万気圧において、金属鉄と水の化学反応の様子を観察した。数秒間隔で得られた X 線回折パターンの時間変化や、電子顕微鏡による回収試料の組織観察から、高圧下における金属鉄と水の反応は水素化鉄および酸化鉄の生成を引き起こすことが分かった。本研究結果は、地球深部の水循環により、中心核—マントル境界に酸化鉄に富む層が形成されることを示唆する。このような酸化鉄に富む層内では地震波の伝播速度が極めて遅いため、地震学的観測で広く認識されているこの領域の超低速度層の成因を上手く説明する。

(2) 超高压に耐える新規水酸化アルミニウムの発見 (Nishi et al. 2020, Icarus)

地球の内部には海水の数倍の量の水が貯蔵されていると見積もられている。これは地球深部のマントルを構成する鉱物が、結晶構造の中に水を取り込むことがあることによる。しかし、地球より大きな惑星深部の超高压力環境で、水と共存する鉱物がどのようにふるまうかはよくわかっていない。本実験では、様々な化学組成の含水鉱物を実験試料として用い、大型放射光施設 SPring-8 設置のマルチアンビル型装置とレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルにより、含水鉱物の超高温高圧下でのふるまいを調べた。

その結果、地球深部の含水鉱物は周囲の環境に応じてその化学組成を大きく変えることや、水素と酸素とアルミニウムからなる水酸化アルミニウム (AlOOH) は 190 万気圧で結晶構造が変化(相転移)することがわかった。水酸化アルミニウムの相転移は第一原理電子状態計算に基づく数値シミュレーションでも検証された。また、地球マントルの底の約 2 倍の圧力(270 万気圧)・2000 度を超えても水酸化アルミニウムは脱水分解することはなかった。

この研究結果により、これまで実験的に検証されることのなかった地球マントル圧力を超える超高压に耐える含水鉱物が存在することが分かった。地球より大きな惑星の内部はこのような超高压環境が想定される。

たとえば太陽系の外惑星である天王星、海王星のような氷惑星の内部構造は、氷や水のマントルと岩石質の中心核からなるとするモデルが広く支持されており、含水鉱物の材料となる水と鉱物はいくらかでもある。従来、超高压下で分解すると考えられてきた含水鉱物は、これらの氷惑星の内部構造モデルにおいて考慮されていなかった。本研究から分かる通り、含水鉱物が脱水分解する圧力は全くの未知であり、氷惑星の中心核は含水鉱物を多量に含む可能性がある。また、近年の観測技術の発展により次々と報告されている太陽系外惑星のスーパーアースの内部構造と水の分布を考えるうえで重要な知見となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nishi M., Kuwayama Y., Hatakeyama T., Kawaguchi S., Hirao N., Ohishi Y., Irifune T.	4. 巻 47
2. 論文標題 Chemical Reaction Between Metallic Iron and a Limited Water Supply Under Pressure: Implications for Water Behavior at the Core Mantle Boundary	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 89616
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020GL089616	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 NISHI Masayuki	4. 巻 30
2. 論文標題 Water Transport into the Deep Mantle by Hydrous Phases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Review of High Pressure Science and Technology	6. 最初と最後の頁 95 ~ 101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4131/jshpreview.30.95	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 Nishi Masayuki, Kuwayama Yasuhiro, Tsuchiya Jun	4. 巻 338
2. 論文標題 New aluminium hydroxide at multimegabar pressures: Implications for water reservoirs in deep planetary interiors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113539 ~ 113539
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.icarus.2019.113539	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 Nishi M., Tsuchiya J., Kuwayama Y., Arimoto T., Tange Y., Higo Y., Hatakeyama T., Irifune T.	4. 巻 124
2. 論文標題 Solid Solution and Compression Behavior of Hydroxides in the Lower Mantle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 10231 ~ 10239
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JB018146	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 Xu Chaowen、Nishi Masayuki、Inoue Toru	4. 巻 104
2. 論文標題 Solubility behavior of -Al ₂ O ₃ and -Fe ₂ O ₃ at high pressures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1416 ~ 1420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2019-7064	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 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 西真之
2. 発表標題 Role of deep water cycle on the core-mantle interaction
3. 学会等名 惑星深部理論研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西真之, 山本幸一郎, 周佑黙, 入船徹男
2. 発表標題 Polycrystalline diamond sintered from ultradispersed nanodiamonds
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西真之, 畑山達郎, 入船徹男
2. 発表標題 核 マントルの相互作用における水の影響
3. 学会等名 第60回高压討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西真之, 桑山靖弘, 土屋旬
2. 発表標題 マルチメガパールの新含水高压相 -A100H
3. 学会等名 日本鉱物科学会2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 國本健広, 西真之, 入船徹男,
2. 発表標題 ナノ多結晶ダイヤモンドを備えた6-8-2加圧方式によるマントル最下部に至る高压発生
3. 学会等名 第61回高压討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高市合流, 西真之
2. 発表標題 下部マントルにおける含水ペリドタイト-地殻物質間の水の挙動
3. 学会等名 第61回高压討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 國本健広, 西真之, 入船徹男
2. 発表標題 High-pressure generation to 150 Gpa in multianvil apparatus using the 6-8-2 system with nano-polycrystalline diamond anvils
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint 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〕

-

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
研究 分担者	土屋 旬 (Tsuchiya Jun) (00527608)	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授 (16301)	
研究 分担者	桑山 靖弘 (Kuwayama Yasuhiro) (00554015)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任助教 (12601)	

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