

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：13701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22366

研究課題名（和文）高温高压下のアンモニアのイオン伝導特性から探る天王星・海王星の多重極磁場の成因

研究課題名（英文）Origin of multi-polar magnetic fields at Uranus and Neptune investigated from ionic conductivity of ammonia under high pressure and high temperature

研究代表者

木村 友亮（Kimura, Tomoaki）

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：50624540

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）：天王星と海王星の多重極磁場の生成に大きく関与する氷やアンモニアの超イオン相を安定に生成するための高温高压発生技術を開発した。高温環境で正確な圧力決定が可能なSrB4O7: Sm²⁺圧力マーカーを作成した。この圧力マーカーと外熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いて、氷の7万気圧、600 Kを生成し、融解の様子を観察することに成功した。温度圧力を制御した時の物質相の解析に有効なラマン分光装置を導入した。温度上昇とともにラマン散乱のシグナル強度が著しく減少することを考慮して、高感度検出器を採用した。以上の高温高压発生技術を用いることで、超イオン相の同定と共にイオン伝導特性の決定が可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した高温高压発生技術を通して、天王星や海王星の主要物質である氷やアンモニアに惑星内部環境を提供することができる。今後、これらの物質相を同定した上で、イオン伝導特性を実験的に決定することで、マントル内部構造が明らかとなり、同時に天王星と海王星で観測されている多重極磁場の成因の解明につながる成果を得られることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：High-pressure and high-temperature generation technique has been introduced for producing the superionic phases of water-ice and ammonia which might be the origin of the multipolar magnetic field observed at Uranus and Neptune. We synthesized the powder of the pressure marker of SrB₄O₇: Sm²⁺ allowing us to determine the pressure even at the high pressure. We successfully observed the melting of water-ice at 7 GPa and 600 K by using the developed resistive heated diamond anvil cell. Raman scattering measurement system has also been introduced, which is useful to determine material phase at high pressure and high temperature. The ionic property of the superionic phase will be revealed by using the newly developed experimental technique, which is important to elucidate the generation mechanism of the planetary magnetic fields.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：超イオン伝導体 アンモニア 天王星 高温高压実験

1. 研究開始当初の背景

天王星と海王星は他の太陽系惑星とは異なる複雑な多重極磁場を示すことで知られている。この異質な磁場はマントルを構成する H_2O や NH_3 の対流によって生成される。ダイナモ理論は、非対流的なマントル深部の上に活発な対流層が位置する内部構造を提案し、この浅い領域のマントル対流が異質な磁場の生成に関わっていることを予想した [1]。高温高压実験は、 H_2O や NH_3 が惑星内部環境下で液体ではなく、超イオン固体相として存在できることを明らかにした。このことから、非対流相が超イオン相で形成されている可能性が示唆された [2,3]。しかし、超イオン相の電気 (イオン) 伝導特性は明らかになっていないため、超イオン相が磁場生成に与える影響については理解されていない。

2. 研究の目的

NH_3 や H_2O といった氷物質を対象とした試料の高温高压条件を生成する手法開発を目的とした研究を行った。開発した手法から氷物質のイオン伝導特性を決定することで、超イオン物質が惑星磁場に与える影響について議論を行うことが可能となる。

3. 研究の方法

高温高压発生に特化した外熱式ダイヤモンドアンビルセルの作成を行った。プラチナ製電熱ヒーター、熱電対、そしてイオン伝導率測定用の導線を試料まで配線できるように断面にスリットが入ったダイヤモンドアンビルセルを設計した。高温下でも高精度な圧力制御が可能なメンブレタイプダイヤモンドアンビルセルを採用した。高温下に対応した窒化珪素製の台座を採用した。試料に高温条件を安定に供給するために、不活性ガス雰囲気中でセルを封じることが出来るチャンバーを作成した。以上のような測定に必要な実験機器の設計と作成を行った。

4. 研究成果

(1) $\text{SrB}_4\text{O}_7: \text{Sm}^{2+}$ を使った圧力マーカーの合成と評価

試料の圧力決定を目的として、ルビー蛍光ピークの圧力シフトを利用したルビー蛍光法が一般的によく用いられるが、ルビーは高温条件ではピークがブロードになるため、正確な圧力決定が困難になる。本研究では、高温条件で正確に圧力を決定できるように、 $\text{SrB}_4\text{O}_7: \text{Sm}^{2+}$ 粉末を作成した。この物質のある蛍光ピーク (λ_1) は 900 K の高温条件まで明瞭に観察できることから、高温環境における圧力決定に適している [e.g., 4]。ホウ酸、炭酸ストロンチウム、酸化サマリウムを電気炉で加熱し、 $\text{SrB}_4\text{O}_7: \text{Sm}^{2+}$ 粉末を合成した。この粉末の XRD パターンは文献が示す $\text{SrB}_4\text{O}_7: \text{Sm}^{2+}$ の構造と合致していた [5]。そして、この粉末の蛍光スペクトルの圧力変化に対応するピーク波長のシフト量は文献値と一致していた [6]。

(2) H_2O の高温高压条件の発生

作成した外熱式ダイヤモンドアンビルセルと $\text{SrB}_4\text{O}_7: \text{Sm}^{2+}$ 粉末の圧力マーカーを用いて、高温高压発生のテスト実験を行った。試料には 20 GPa までの融解曲線がよく制約されている H_2O を選んだ。7 GPa まで加圧された H_2O は約 600 K で融解する様子が顕微鏡観察から確認できた。この融点は文献値と一致していることから [7]、正確に温度を測定できていることを確認できた。

(3) 高温高压環境下の試料用ラマン分光測定システムの導入

化学結合の分析に用いられるラマン分光法は物質の相関係の制約に有効なツールである。本研究では、高温高压環境の試料の分析に適したラマン分光装置を導入した。検出器に試料からの熱が伝わらないように 1.5 m 離れた位置に試料台を設置した。高温環境では、ラマン散乱のシグナル強度が著しく減少するため、高感度検出器 (浜松フォトニクス社製 CCD イメージセンサ: S7031-1007S) を採用した。ネオン標準ランプを使って波長校正を行った。以上の作業を通して、ラマン分光測定が行えるようになり、高温高压下の試料の相同定が可能となった。

これらの開発した装置を用いて、超イオン物質のイオン伝導特性の決定を目指した研究に展開し、今後、氷惑星の磁場生成機構の解明に大きく貢献することが期待できる。

<参考文献>

[1] Stanley and Bloxam, *Nat.*, **428**, 151-153 (2004).

[2] M. Millot et al., *Nat.*, **569**, 251-255 (2019).

- [3] T. Kimura and M. Murakami, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **118**, e2021810118 (2021).
- [4] F. Datchi et al., *J. Appl. Phys.*, **81**, 3333-3339 (1997).
- [5] S. V. Raschchenko et al., *High Press. Res.*, **33**, 720-724 (2013).
- [6] A. V. Romanenko et al., *J. Appl. Phys.*, **124**, 165902 (2018).
- [7] F. Datchi et al., *Phys. Rev. B*, **61**, 6536-6546 (2000).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kimura Tomoaki、Murakami Motohiko	4. 巻 118
2. 論文標題 Fluid-like elastic response of superionic NH ₃ in Uranus and Neptune	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2021810118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.2021810118	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 KIMURA Tomoaki	4. 巻 31
2. 論文標題 Earth and Planetary Material Science Advanced by Combining DAC Experimental and CO ₂ -laser Heating Techniques	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Review of High Pressure Science and Technology	6. 最初と最後の頁 247 ~ 247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4131/jshpreview.31.247	査読の有無 無
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12件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tomoaki Kimura
2. 発表標題 Sound velocity of superionic NH ₃ by Brillouin scattering in a CO ₂ -laser heated diamond anvil cell
3. 学会等名 9th Joint workshop on High Pressure, Planetary and Plasma Physics (HP4)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村友亮、村上元彦
2. 発表標題 H ₂ Oの超イオン相の弾性波速度測定
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角谷一樹, 久保田雅人, 永江峰幸, 丹羽健, 木村友亮, 坂田雅文, 佐々木重雄
2. 発表標題 メタンハイドレートsH相における メタン分子の51268ケージ占有数に関する考察
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角谷一樹, 久保田雅人, 木村友亮, 坂田雅文, 佐々木重雄
2. 発表標題 メタンハイドレートsH相の高圧ブリュアン散乱
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保田雅人, 角谷一樹, 永江峰幸, 丹羽健, 木村友亮, 坂田雅文, 佐々木重雄
2. 発表標題 硫化水素ハイドレートの圧力誘起相変化
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木重雄, 浅野雅人, 永江峰幸, 丹羽健, 木村友亮, 坂田雅文
2. 発表標題 高圧氷VII相の構造および弾性的性質への歪の影響
3. 学会等名 物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村友亮、村上元彦
2. 発表標題 アンモニアの超イオン相の弾性波速度測定
3. 学会等名 第61回高圧討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村友亮、村上元彦
2. 発表標題 ブリュアン散乱分光法を用いたアンモニアの超イオン相の弾性波速度測定
3. 学会等名 第7回愛媛大学先進超高压科学研究拠点(PRIUS)シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝俣麻, 夏目宏一, 永江峰幸, 丹羽健, 木村友亮, 坂田雅文, 佐々木重雄
2. 発表標題 クリプトンハイドレートの高圧X線回折およびブリュアン散乱分光測定
3. 学会等名 第31回日本エネルギー学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安井悠介, 松井宏樹, 木村友亮, 坂田雅文, 佐々木重雄
2. 発表標題 アルゴンハイドレートsII相, sH相の高圧ブリュアン散乱
3. 学会等名 第31回日本エネルギー学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木重雄, 久保田雅人, 永江峰幸, 丹羽健, 木村友亮, 坂田雅文
2. 発表標題 硫化水素ハイドレートの高圧X線回折およびラマン散乱分光測定
3. 学会等名 第31回日本エネルギー学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田明寛, 吉川裕太, 尾原幸治, 木村友亮, 松岡純
2. 発表標題 高密度アルミノケイ酸塩ガラスの物性と構造
3. 学会等名 日本セラミックス学会 第35回秋季シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>メディア報道</p> <p>チューリッヒ工科大学 HP掲載 タイトル: Two strange planets https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2021/03/two-strange-planets.html</p> <p>岐阜大学 HP掲載 タイトル: 岐阜大学工学部木下幸治准教授及び木村友亮助教が科学技術分野の文部科学大臣表彰を受賞しました https://www.gifu-u.ac.jp/news/news/2022/05/entry09-11511.html</p> <p>岐阜新聞 2022年5月8日掲載 タイトル: 岐阜大2教員に大臣表彰 科学技術分野で優れた研究成果 https://www.gifu-np.co.jp/articles/-/73782</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
---------	---------