

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04106

研究課題名(和文) 動的モード分解による地球コア磁気流体波の検出

研究課題名(英文) Detecting magnetohydrodynamic waves within Earth's fluid core by Dynamic Mode Decomposition

研究代表者

堀 久美子 (Hori, Kumiko)

核融合科学研究所・研究部・准教授

研究者番号：30636858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：地球や他惑星の深部に存在する磁気的波動のシグナルを捉えるため、データ科学的手法の一つである動的モード分解を応用した。その妥当性を数値シミュレーションの数値データを用いて確認し、地球惑星物理学的研究における有効性を二種の観測データ(地磁気永年変化と木星赤外放射変動)において示した。その結果、地磁気永年変化には周期約6年の軸対称な振動と70-140年の西方伝播波動が存在しそうなこと、そして、木星赤外放射変動には半周期3-7年の軸対称な振動が存在することがわかった。これらはそれぞれ、地球深部コアそして木星深部金属水素層で励起された磁気的波動のシグナルとして解釈可能であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体力学分野をはじめ他分野で応用が広がった動的モード分解を、地球惑星物理学分野に導入した。また、このデータ科学的技術を物理解釈のためにいかに活用できるか、という新たな一例と方法論を示した。その結果は、地球コアおよび他惑星深部における磁気的波動の検出を示唆するものである。今後さらに検証を進めその波動特性を解析していくことで、ダイナモ(磁場形成維持)機構の解明につながる情報を得られる、と期待される。多方、今回の結果は、数百年来認識されてきた木星表層変動現象が、このガス惑星深部における振動に起因することを示唆する。この成果は、国内外の一般向けメディアで報道された。

研究成果の概要(英文)：We have utilised dynamic mode decomposition (DMD), an algorithm to approximate modes of the Koopman operator, to identify the intrinsic signals of magnetohydrodynamic (MHD) waves that could arise from deep interiors of the Earth and planets. They have the potential to open up a novel window to probe the hidden interiors but their clear identification has been hindered. Focusing on linear theory, we examined the data-driven technique in numerical simulations of MHD convection and dynamos, and then applied to geophysical and astrophysical data, such as geomagnetic secular variation and Jupiter's infrared emission. Here one variant, called Hankel DMD or high-order DMD, was adopted to distinguish either standing or travelling wave modes. We found DMD indeed enabled to extract tiny wave signals in the limited spatiotemporal datasets and to reveal their global nature of torsional Alfvén waves in the Earth and Jupiter, and possibly of slow magnetic Rossby waves.

研究分野：地球惑星内部物理学、磁気流体力学

キーワード：地球惑星内部物理学 磁気流体波動 地磁気変動 ダイナモ 国際研究者交流

1. 研究開始当初の背景

地球磁場がいかにより形成・維持されているかを説明することは、ダイナモ理論の最重要課題である。数理的理論や大規模数値シミュレーションによる研究が多くなされてきた一方、これらを観測的に制約する情報を十分に取得できているとは言えない。特に、それら情報の取得法（例えばダイナモ内部磁場強度・構造の推定法）が確立していない。このために注目されているのが、ダイナモ内部領域に存在する磁気流体波（以下 MHD 波）である。これらを観測的に検出することができれば、ダイナモ理論の制約につながる。

近年の地磁気観測・モデリング研究や MHD 理論研究の進展により、流体コア中 MHD 波の複数波動モードの存在が徐々に示唆されるようになった (e.g. Buffett 2015; Chulliat et al. 2015; Aubert & Finaly 2019; Gillet et al. 2022)。しかしながら、それらの決定的な同定には至っていないように思われる。

そこで、本研究では、近年進展著しいデータ科学・データ駆動型技術に着目した (e.g. Brunton & Kutz 2020)。特に動的モード分解 (dynamic mode decomposition; 以下 DMD) を用いることで、現在入手可能な時系列データからでも流体コア内 MHD 波の検出・同定を試みられるのではないかと考えた。DMD は、クープマン作用素の数値的近似形を与え、大規模データセットの特徴構造抽出や低次元モデル化に有益であることが、流体力学分野等で知られている。

2. 研究の目的

地球外核（流体コア）中に MHD 波が存在するか、明らかにすることを目的とした。そのために、時系列データ解析手法の一つとして DMD を導入し、流体コア内 MHD 波の検出を試みた。その過程で、地球ダイナモ内の磁場強度・一次元構造を逆推定することが可能か、検討した。

同時に、他惑星や恒星への応用を念頭におき、その方法論を確立することを目指した。

3. 研究の方法

(1) DMD の実装

原論文 (Schmid 2010; Rowley et al. 2009) やその後の進展 (e.g. Kutz et al. 2016; Avila & Mezic 2020) を元に、動的モード分解のアルゴリズムを実装し、その精度と妥当性を擬似データにおいて精査した。精査の基準としたのは、観測量（入力）と DMD 後に再構成された予測量（出力）との残差、観測量・サンプリング数に対する予測量の収束性、などである。特に本研究では、進行波と定在波とを分離するため、ハンケル動的モード分解（または高次動的モード分解；以下 HDMD）を採用することにした。他スペクトル推定法（フーリエ変換・主成分分析）に比較して、HDMD が増幅・減衰波や進行・定在波をより正確に抽出することを、確認した。

(2) 回転 MHD 波のノーマルモード計算

本研究では、流体コア内ダイナモ領域に期待される MHD 波の中でも特に、ねじれアルヴェン波（ねじれ振動）と磁気ロスビー波に注目した。これらはそれぞれ、高速回転する球状の系で励起される MHD 波動として、最も基本的な軸対称モードと非軸対称モードである (e.g. Jault & Finlay 2015; Hori et al. 2023a, 発表論文リスト 1 番目)。両波動モードとも自転軸に対してほぼ二次元的な構造をもつため、本研究では、円柱座標系 (s, ϕ, z) における二次元円筒状モデルを採用した（ここで s, ϕ, z はそれぞれ、半径方向、方位角方向、軸方向）。これにより、三次元球モデルに比較して、計算コストを抑えることができる。任意の背景磁場 $\vec{B} = (\vec{B}_s(s), \vec{B}_\phi(s), 0)$ および背景流 $\vec{U} = (0, \vec{U}_\phi(s), 0)$ に対して、各波動モード中立波の固有値（周波数）と固有関数（空間構造）とを求める数値計算コードを、作成した。このコードの妥当性・精度を、先行研究 (Canet et al. 2014; Maffei & Jackson 2016) や解析解（一部 Hori et al. 2020b, 発表論文リスト 2 番目）に対し確認した。

(3) 球殻 MHD 数値シミュレーションにおける評価

流体コア内の回転 MHD 波を検出可能か評価するため、上述の (1) および (2) で作成したコード群を用いて、球殻 MHD 数値シミュレーションの数値データの再解析を行なった。ここで

は、典型例として、地球流体コア中の磁気対流、対流駆動型ダイナモ、および木星深部の対流駆動型ダイナモの三種類の数値シミュレーションを扱った。いずれの例も、過去の解析によって、ねじれ振動または磁気ロスビー波の励起が確認されたものである (Teed et al. 2014, 2015; Hori et al. 2015, 2018, 2019; また貴会 2014-2016 年度若手研究 B, 2017-2018 年度研究活動スタート支援)。これら先行研究では、局所的分散関係式とフーリエ解析に基づいて議論され、各波動モードが同定された。これに対し、本研究によって、大域的ノーマルモード解と DMD 解析に基づいた議論・同定が可能となることがわかった (Hori et al. 2020a, 発表論文リスト 3 番目)。

(4) 地球惑星物理学的データへの適用

これらのツール・方法論を地磁気等データに実際に適用し、流体コア回転 MHD 波動の抽出を試みた。対象としたデータは、すでに一般公開されている地磁気永年変化モデルと、それから推定・データ同化された流体コア表面流モデル (以下コア流) である。過去約 150 年間のデータセットとして cov-obs (Gillet et al. 2015, Gillet & Aubert 2019; 以下 cov-obs2019) を、過去数千年間のデータセットとして pfm9k (Nilsson et al. 2020, 2022) と cov-lake (Hellio & Gillet 2018) を採用した。各モデルから円柱座標系 (s, ϕ, z) で磁場の半径方向成分 \hat{b}_s や流れ場の方位角方向成分 u_ϕ の時空間データセットを作成し、それらのアンサンブル平均量を解析対象とした。

並行して、他惑星の観測データへの適用を検討した。地球の次に最も可能性が高いと予想されることから、木星を対象とすることにした。しかしながら、当時の全球磁場データ・永年変化モデル (Connerney et al. 2022) では本研究の目的・解析に適しなかった。そこで、赤外データに注目した。地上望遠鏡観測網によって過去約 34 年間にわたる赤外撮像画像が蓄積され、それらから木星下部大気熱放射 (波長 $5 \mu\text{m}$ 帯における輝度) の時空間データセット $L(\theta, \phi, t)$ が作成された (Antuñano et al. 2018, 2019)。ここで θ は緯度を表す。

以下の 4 節では、地磁気・コア流 covobs2019 (\hat{b}_s, u_ϕ) と木星赤外 $5 \mu\text{m}$ 輝度 (L) の解析結果を示す。

4. 研究成果

(1) 主な成果、当初予期されなかった新たな知見、課題と今後の展望

① 地磁気永年変化・コア流の軸対称成分

地磁気データ同化モデル covobs2019 の軸対称成分データセット $[\hat{b}_s(s, t), u_\phi(s, t)]$ に対し HDMD を実行した結果、流体コア中のねじれ振動に伴うシグナルを検出した。これまでも、ねじれ振動の存在は、過去数十年間のコア流モデル $u_\phi(s, t)$ のデータセットから示唆されてきたが (e.g. Gillet et al. 2010)、元データである地磁気データセットではそのシグナルを有意に認められないことが指摘されていた。HDMD の固有値に周期 6-7 年のシグナルが有意に存在すること、固有関数は先行研究における流れ場 u_ϕ 構造を再現しつつこれに微弱な地磁気 \hat{b}_s 変動が伴っていること、そして、検出されたシグナルの特徴が最大 3.9 mT のポロイダル磁場 $\overline{B}_s(s)$ を背景とするねじれ振動ノーマルモード解と大きく矛盾しないこと、などがわかった (図 1; Hori et al. 2023a, 発表論文リスト 1 番目)。

② 地磁気永年変化・コア流の非軸対称成分

同モデル covobs2019 の非軸対称成分データ $[\hat{b}_s(s, \phi, t), u_\phi(s, \phi, t)]$ に同様の方法論で HDMD を適用し、磁気ロスビー波に関するシグナルの検出を試みた。この波動モードは、東西進行方向によって伝播速度が異なるため、伝播速度 (または周波数) とその方向を共に求めるためにデータを各東西波数 m に関する複素物理量として表現した。そのデータセット $[\hat{b}_s(s, m, t), u_\phi(s, m, t)]$ に対して HDMD を適用した結果、西方移動する波状のシグナルが少数個、見つかった。そして、その特徴が、最大 10 km/yr の帯状流 $\overline{U}_\phi(s)$ と最大 $7\text{-}12 \text{ mT}$ のトロイダル磁場 $\overline{B}_\phi(s)$ を背景とする遅進磁気ロスビー波ノーマルモード解と酷似していること、がわかってきた (図 2)。今後、その詳細を検討し、投稿論文に仕上げていく計画である。

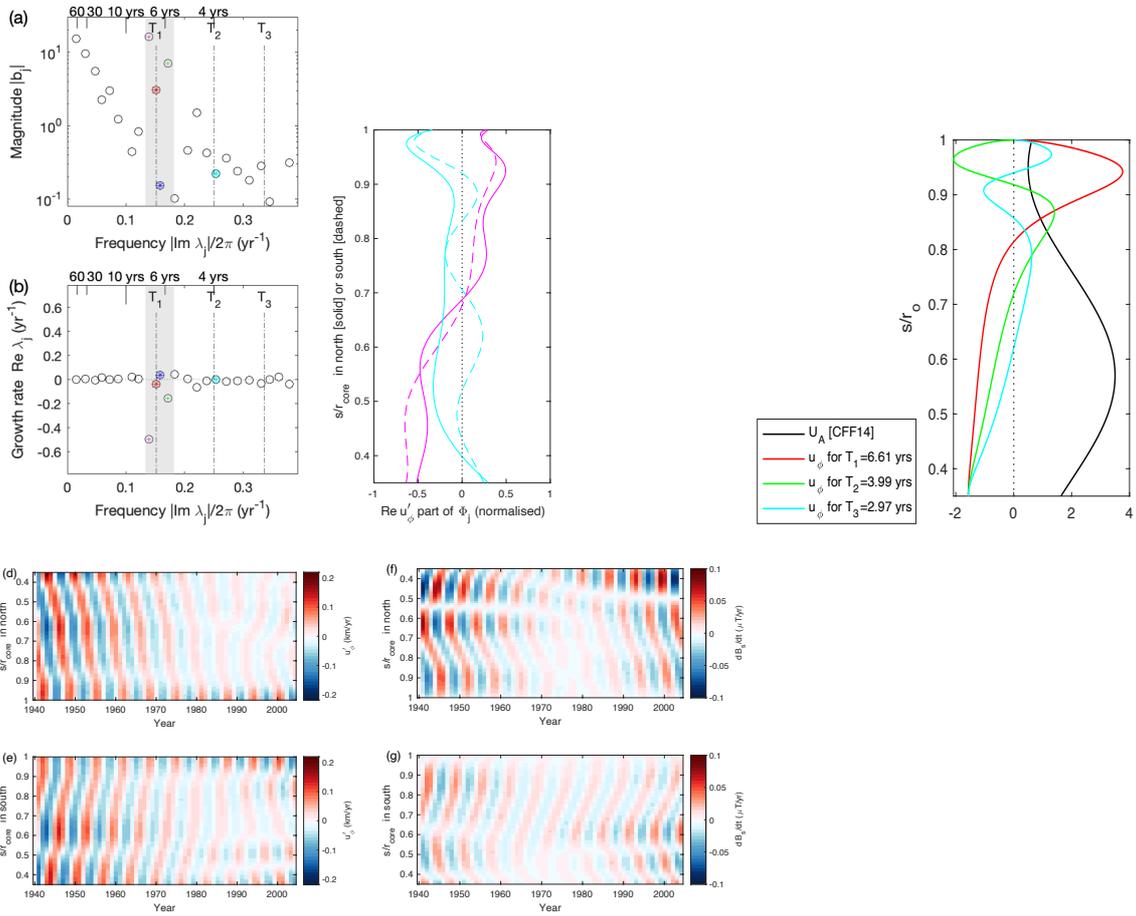


図 1 (左) 地磁気永年変化・コア流データで検出されたねじれ振動シグナル. (右) ノーマルモード解 (背景場 CFF のときの第 1-3 モード). Rev. Mod. Plasma Phys. 2023, fig. 5 と A1a を改訂.

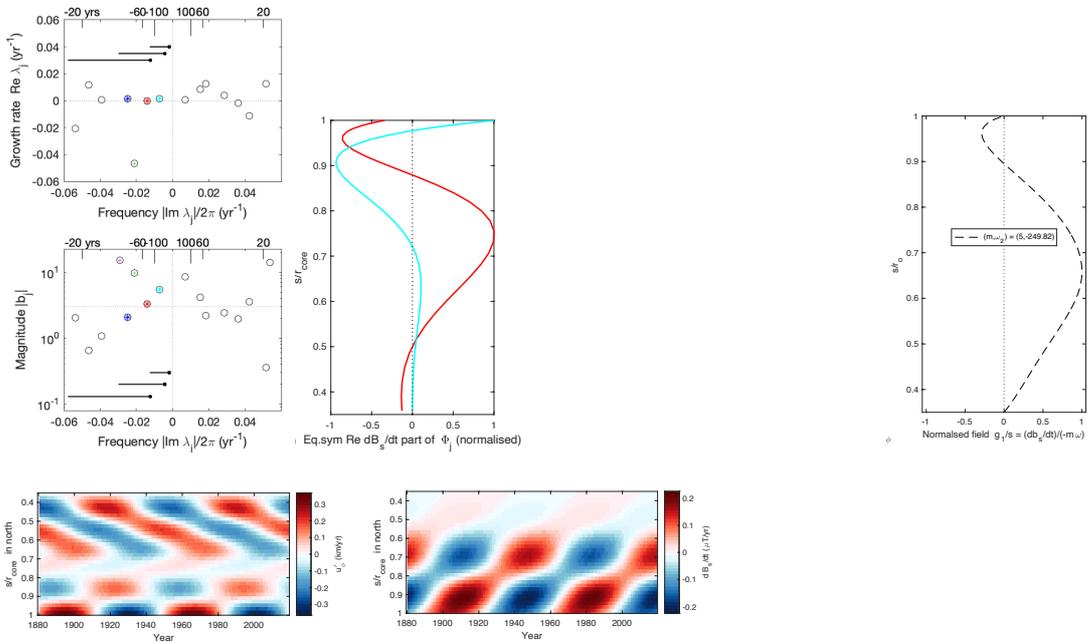


図 2 (左) 地磁気永年変化・コア流データで見つかった、東西波数 $m=5$ の西方向伝播波動シグナル. (右) 遅進磁気ロスビー波ノーマルモード解 (背景帯状流 covobs・背景磁場 HJT のときの第 2 モード).

③ 木星大気赤外変動の軸対称成分

当初予定していなかったものの、上述の ① で成果を得たこと、また、同時期に関連研究 (Antuñano et al. 2019; Orton et al. 2023) が報告されたことから、木星赤外 $5\ \mu\text{m}$ 輝度の軸対称成分データセット $L(\theta, t)$ に ① の HDMD を応用した。その結果、半周期約 6.5 年または 3.1 年の波状シグナルが有意に認められること、その周期・緯度構造・伝播速度が木星深部ダイナモ領域 (上端) で期待されるねじれ振動によって一部説明されること、などがわかった (図 3; Hori et al. 2023b, 発表論文リスト 2 番目)。しかしながら、深部ダイナモ領域における MHD 波動と、赤外変動が示唆する表層大気現象・力学とをつなぐ物理メカニズムは不明である。今後、流体力学的数値シミュレーションを基に検討していく予定である。

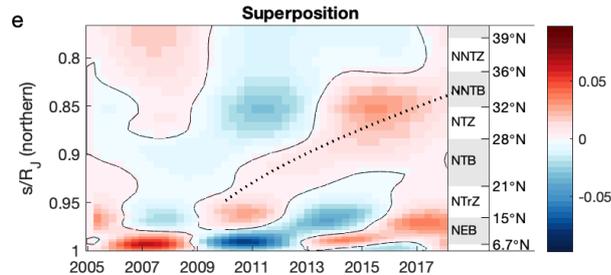


図 3 木星赤外輝度データで検出されたねじれ振動シグナル。
Nat.Astron.2023, fig.3e を転載.

(2) 国内外における位置づけとインパクト

① DMD の地球惑星物理学分野への導入、物理解釈のための方法論

DMD は流体力学分野を始め医工学系分野ですでに应用され、地球惑星物理学分野においてもその活用が広がり始めた (Chi-Durán & Buffett 2023; Li et al. 2024)。本研究は、これらにさきがけ、地磁気データおよび惑星撮像データに対して初めて適用した。

他方、DMD をはじめとするデータ駆動型技術やその応用研究においては、物理解釈のためにこれら技術をいかに活用できるかという点が、課題として残る。本研究は、DMD がノーマルモードなどに注目した大域的解析に適していること、また、微小波動シグナルの抽出といった線形論に基づく解析に適していることを例示した。DMD によるデータ解析方法論の提案という意味でも、本研究は意義深い。

② 他惑星深部 MHD 波の初検出、木星探査ミッションへの貢献、表層気象力学との関連

地球以外の他惑星において初めて、深部ダイナモ領域で励起されたであろう MHD 波のシグナルを検出した。地球深部における励起は、地磁気永年変化データやそのコア流モデルの解析から、支持され確認されてきた。理論的には他惑星でも励起可能であることを、代表者らはこれまでに指摘してきた (Hori et al. 2019; また貴会 2017-2018 年度研究活動スタート支援)。本研究は、これら理論と NASA Juno 磁場観測などを基にして、そのシグナルを実際のデータ中に見出したものである。Juno 磁場チームによる追試・検証も進みつつある (Bloxham et al. 2024)。また同時に、本研究によって、表層気象力学との関連が示唆された。その結果として、長年謎とされてきた木星表層の長期変動現象の一因を提唱することとなった。その成果は、プレスリリースの後に 29 カ国以上の一般向けメディア (e.g. BBC Radio) で報道され、専門家を越えたインパクトがあった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 K. Hori, A. Nilsson, S.M. Tobias	4. 巻 7
2. 論文標題 Waves in planetary dynamos	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41614-022-00104-1	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 該当する
1. 著者名 Kumiko Hori, Chris A. Jones, Arrate Antunano, Leigh N. Fletcher, Steven M. Tobias	4. 巻 7
2. 論文標題 Jupiter's cloud-level variability triggered by torsional oscillations in the interior	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 825 ~ 835
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-023-01967-1	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 該当する
1. 著者名 堀 久美子, S.M. Tobias, R.J. Teed	4. 巻 --
2. 論文標題 動的モード分解によるねじれアルヴェン波の抽出	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本流体力学会 年会 2020 論文集 / arXiv:2009.13095v1 [physics.flu-dyn]	6. 最初と最後の頁 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2009.13095	査読の有無 無
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 該当する
1. 著者名 K. Hori, S.M. Tobias, C.A. Jones	4. 巻 904
2. 論文標題 Solitary magnetostrophic Rossby waves in spherical shells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R3(1-14)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.743	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 該当する

[学会発表] 計15件(うち招待講演 9件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Kumiko Hori, Chris A. Jones, Steven M. Tobias
2. 発表標題 Jupiter's torsional oscillations, tropospheric variability, and dynamic mode decomposition
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kumiko Hori, Chris A. Jones, Arrate Antunano, Leigh N. Fletcher, Steven M. Tobias
2. 発表標題 Torsional oscillations in Jupiter and their link to tropospheric variability
3. 学会等名 The 28th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kumiko Hori
2. 発表標題 TBA
3. 学会等名 Geophysical and Astrophysical Fluids and Dynamos (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kumiko Hori
2. 発表標題 TBA
3. 学会等名 The 8th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2024) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kumiko Hori, Chris A. Jones, Steven M. Tobias
2. 発表標題 Torsional oscillations in Jupiter and their link to tropospheric variability
3. 学会等名 The 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPS-DPP 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kumiko Hori
2. 発表標題 Jupiter's torsional oscillations triggering cloud-level variability
3. 学会等名 RIMS Satellite Seminar/IIS U-Tokyo Symposium "Mathematical modelling of turbulent flows in astrophysical and geophysical phenomena" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chris A. Jones, Kumiko Hori, Arrate Antunano, Leigh N. Fletcher, Steven M. Tobias,
2. 発表標題 Torsional oscillations in Jupiter
3. 学会等名 Isaac Newton Institute program DYN2 on "Frontiers in Dynamo Theory: from the Earth and the Stars" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kumiko Hori
2. 発表標題 Magnetic Rossby waves and torsional Alfvén waves in planetary dynamos
3. 学会等名 The 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPS-DPP2021) Virtual (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kumiko Hori, Chris A. Jones, Steven M. Tobias
2. 発表標題 Magnetic Rossby waves and torsional Alfvén waves in planetary dynamos
3. 学会等名 The International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) - the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI) Joint Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kumiko Hori, Steven M. Tobias, Chris A. Jones
2. 発表標題 磁気ロスビー波ソリトン
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会 Virtual
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀 久美子
2. 発表標題 動的モード分解によるねじれアルヴェン波の抽出
3. 学会等名 日本流体力学会 年会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kumiko Hori
2. 発表標題 Slow magnetic Rossby waves, solitons, and the gyre in Earth's core
3. 学会等名 The 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2020) Virtual (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀 久美子
2. 発表標題 近年の惑星ダイナモ研究の紹介: スケーリング則や波
3. 学会等名 惑星圏研究会 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀 久美子
2. 発表標題 球殻における磁気ロスビー波ソリトン
3. 学会等名 2020年日本地球惑星科学連合大会 Virtual
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kumiko Hori
2. 発表標題 Torsional oscillations in Jupiter's metallic hydrogen region
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2020 Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>神戸大学プレスリリース https://www.kobe-u.ac.jp/ja/news/article/2023_05_19_01/ University of Leeds News https://eps.leeds.ac.uk/math/news/article/5938/research-solves-mystery-of-jupiter-s-stunning-colour-changes</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			
英国	リーズ大学	レスター大学	グラスゴー大学	
スウェーデン	ルンド大学			
スペイン	バスク大学			