

令和元年6月2日現在

機関番号：14501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06859

研究課題名(和文) ガス惑星内部構造の推定に向けた磁気流体波動の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical studies on magnetohydrodynamic waves and implications for inferring Jupiter's internal structure

研究代表者

堀 久美子 (Hori, Kumiko)

神戸大学・システム情報学研究科・助教

研究者番号：30636858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：木星深部の金属水素層に存在しうる波動を理論的に調べた。特に、木星の自転軸に対して対称なパターンをもつような波に注目した。この波は地球深部の流体コアに存在していると考えられているが、他天体でも存在するかは不明である。三次元数値シミュレーションを用いて検討したところ、この波が木星深部に存在する可能性があることがわかった。その時間スケールは約十年で、木星表面近くにある分子水素層との境界で反射すると予想される。この波動によって、木星表面近くの流れや木星の自転が変動する可能性があることもわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球の除く他惑星では、その基本的な内部構造も十分にわかっているとは言えない。木星を現在周回中の NASA 探査機 Juno も、木星の内部構造の探査を課題の一つに掲げている。本研究では、木星深部で起きる波動やその反射を捉えることによって、金属水素層と分子水素層との境界がある深さを特定できる可能性を示した。これらは、惑星磁場の生成メカニズムや惑星進化の歴史の解明に向けて、重要な制約を与えると期待できる。

研究成果の概要(英文)：Theory suggests the metallic hydrogen region in Jupiter's deep interior may host waves. We considered a special class of waves whose transverse motions are confined to cylindrical surfaces aligned with the rotation axis of the gas giant and travel in radius perpendicular to the axis. This wave mode has been shown to travel within Earth's liquid iron core. Performing three-dimensional spherical numerical simulations for the Jupiter's magnetohydrodynamic fluid, we predicted its excitation on timescales of several years. The waves were found to be reflected at a transition to the molecular hydrogen region. Our simulations demonstrated that changes in zonal flow nearer the planet's surface, and possibly in the rotation period, might reveal its signal.

We further analysed the models to yield Rossby waves, which are best known to play a role in Earth's atmosphere, could travel eastwardly on timescales of months-years inside the gaseous planet.

研究分野：地球惑星内部物理学、地球惑星流体力学

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

1. 研究開始当初の背景

地球惑星内部物理学において、その一次元構造の解明は最も基礎的で重要な課題の一つである。しかし、地球を除く他惑星では、十分に解明されているとは言えない。例えば、木星や土星を始めとするガス惑星は、地球を始めとする岩石惑星とは種を異にし、その内部構造は大きく三層（分子水素、金属水素、氷と岩石の混合物）から成ると理論的に示唆されてきた。しかし、その境界の深さのみならず、そのような明瞭な境界の有無についても、未だ議論が続いている。その内部構造の探査を課題の一つとして、2016 年以来、NASA 木星探査機 Juno が木星の重力場や磁場の高精度測定を続けており、新たに得られた知見が報告されてきた (Bolton et al., Science 2017; Moore et al., Geophys. Res. Lett. 2017; Iess et al., Nature 2018)。今後数年で、観測データが劇的に増加・向上するだろうことを踏まえると、このようなデータから直接観測不可能な惑星深部物理量を推定するための原理や手法が、今後さらに必要になっていくと予想される。

一方、近年の地球コア（中心核）研究において、磁気流体力学的 (MHD) 波動に注目した解析や解釈が再注目されつつある (Gillet et al., Nature 2010; Buffett, Nature 2014; Chulliat et al., Geophys. Res. Lett., 2015; Hori et al., Geophys. Res. Lett. 2015)。地球型惑星の流体鉄コアにおけるダイナミクスとガス惑星の金属水素層におけるダイナミクスとは、高速自転する電気伝導性流体についての MHD 方程式系によって記述できるという点で酷似している。したがって、地球コアダイナミクス研究において築かれてきた理論や知見を、ガス惑星深部ダイナミクス研究へ応用できるはずである。その成功例の一つに、木星における磁場生成（ダイナモ）機構のモデル化をあげることができる。この理論モデルでは、木星金属水素の特徴の一つである圧縮性を考慮するよう MHD 方程式系が再定式化され（非弾性近似 MHD）、観測的に知られる木星固有磁場の特徴を再現することに成功した (Jones, Icarus 2014; Gastine et al., Geophys. Res. Lett. 2014)。このようなアプローチは、比較惑星学の視点から、各惑星の特徴をより明確にするという意味でも重要である。

2. 研究の目的

本研究の大目標は、MHD 波動に基づいたガス惑星内部構造の推定方法を提案することである。このために、本研究では以下の三点を明らかにすることを目指した：(1) 非圧縮性が仮定されていた回転 MHD 波動の理論において、圧縮性（非弾性近似）を考慮する、(2) その線形論を数値シミュレーションまたは観測のデータにおいて評価する、(3) MHD 波動を用いることで惑星深部に関するどの情報をどのように得られるかを示す。

3. 研究の方法

(1) 非弾性近似下での圧縮性回転 MHD 波動の定式化

木星のように高速自転している系にある低粘性の流体中では、自転軸方向に一様であるようなモードが卓越すると考えられる。その中で、軸対称モード（ねじれアルヴェン波）と非軸対称モード（ロスビー波）をそれぞれ検討した。従来のねじれアルヴェン波の理論 (Braginsky 1970) は非圧縮性流体に特化されていたが、それを圧縮性流体に修正した。また、圧縮性ロスビー波の理論 (Ingersoll & Pollard, Icarus 1982; Gastine et al., Phys. Earth Planet. Int. 2014) を、MHD 流体に発展させた。

(2) 木星ダイナモモデルの時間変動の解析

両 MHD 波が木星深部において実際に励起されるか評価するために、木星ダイナモモデル (Jones, Icarus 2014) における時間変動を解析した。この木星ダイナモモデルでは、標準的三層モデルと第一原理計算 (French et al., Astrophys J. Suppl. 2012) に基づいて、木星内部の密度や電気伝導度の一次元構造が理論的に仮定された。その全球シミュレーションにより、木星磁場の空間的な大規模構造をおおよそ再現できたことから、現段階で最も妥当と考えられている木星ダイナモモデルの一つである。本研究では、この数値シミュレーションで得られた速度場および磁場の数値データを、(1) で得た線形論に沿って解析した。

(3) 木星観測によるデータとの比較

検出可能性を評価するために、Juno 磁場観測の成果をうけて公開された木星磁場標準モデル JRM09 (Connerney et al., Geophys. Res. Lett. 2018) を用い、(2) の木星ダイナモ全球シミュレーションの数値データを解釈した。また、(2) における数値解析の結果、惑星表面近傍の東西帯状流や惑星自転速度への影響が示唆されたため（次節 4.(1) で後述）これら物理量に関する地上観測のデータや文献を収集した。

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

非弾性近似下での圧縮性回転 MHD 波動の定式化

ガス惑星内部におけるねじれアルヴェン波は、自转轴方向に平均した密度と磁場強度とに依存して、円柱座標系半径方向の内向きまたは外向きに伝播するだろうことを確認した。くわえて、金属水素層と分子水素層とが、ねじれアルヴェン波を介した角運動量交換により、力学的および電磁氣的に相互作用するだろうことが示唆された。これは、地球のコア・マントル間では電磁氣的(および地形的)相互作用が主要素と考えられていることと対比的である。

また、同様の非弾性近似下での磁気ロスビー波は、圧縮性ベータ効果または地形性ベータ効果のどちらかに由来することを確認した。その存在条件や二次元的伝播特性を検討した。

木星ダイナモモデルの時間変動の解析

上述の理論から期待された速度で伝播するねじれアルヴェン波を検出した(図1)。さらに、分子水素から金属水素への遷移によって、ねじれアルヴェン波が部分的に反射しうることが、場合によっては定常波が形成されうることが、新たにわかった。

分子・金属水素層の間の角運動量交換も確認した(図2)。これは、この波動により、木星の自転速度が変動することを示唆する。また、このような深部起源の波動のために、分子水素層上部における東西帯状流に緯度・時間変化が起こりうることともわかった。

非軸対称成分に関しては、経度方向の時間変動に、速い磁気ロスビー波と同スケールの変動を確認した(図3)。この速い磁気ロスビー波は、ねじれアルヴェン波の約1/10程度の時間スケールで、東向きに伝播する。深部域では圧縮性ベータ効果に起因するのに対し、分子水素層に近づくにつれて地形性ベータ効果が支配的になることもわかった。また、遅い磁気ロスビー波に相当する変動は認められなかった。

しかし、これらの変動が多波長・多周期成分から成りスペクトル構造が不明瞭であること、半径方向への伝播特性を十分に説明できないこと、などの課題が残った。今後、スペクトル推定法の改良や線形論の再検討が必要だろうことが示唆された。

木星観測データとの比較

Juno 磁場観測による木星磁場標準モデル JRM09 により、木星金属水素層の最上部・赤道域における磁場強度が 30 G 程度だろうということが示された。これを基にすると、上のダイナモモデルで検出されたねじれアルヴェン波は、約十年の時間スケールをもつだろうことがわかった。この帰結として、木星自転速度の時間変動は 0.01 秒程度と見積もられる。

また、木星半径比 0.96 程度における東西帯状流の時間変動は最大 10 % であることがわかった。Juno 重力観測により、木星表面で顕著な帯状東西流が半径比 0.95-0.97 まで伸びていると報告された(Kaspi et al., Nature 2018; Guillot et al., Nature 2018) ことを考慮すると、本研究で注目した深部起源波動のシグナルを惑星表面の流れ中に見出すことも、不可能ではないだろう。

木星の雲の構造や帯状東西流における数十年スケールの変動、また、木星自転速度の変化は、数十年にわたる地上観測から指摘されていた(Rogers, The Giant Planet Jupiter 1995; Higgins et al., Geophys. Res. Lett. 1996)。興味深いことに、木星表面層の変化が顕著である緯度帯や自転速度変化の振幅が、本研究のシミュレーション結果と類似することがわかった。しかしながら、本数値シミュレーションで得られた東西帯状流は観測値に比

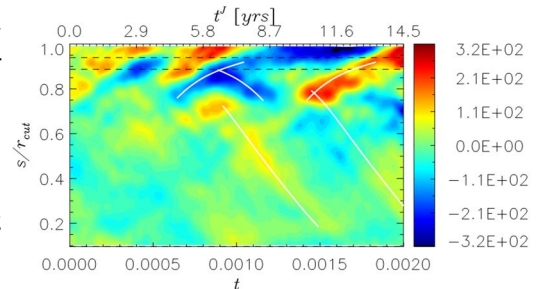


図1 木星ダイナモモデル内で検出されたねじれアルヴェン波(発表論文 より)。

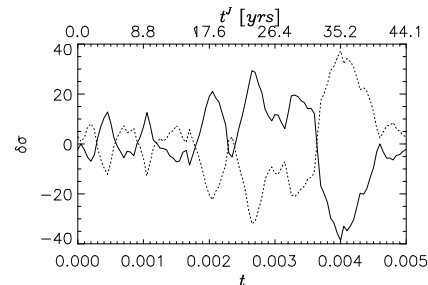


図2 木星金属水素層(実線)と分子水素層・遷移層(点線)の間の角運動量交換(発表論文 より)。

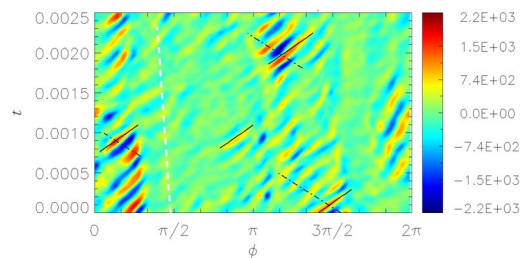


図3 木星ダイナモモデル内で検出された速い磁気ロスビー波(発表論文 より)。

速すぎるという問題等を抱えており、このような観測結果との直接的な比較には注意を要する。観測データにおいても、現状ではデータ長も間隔も十分ではなく、明確な時空間構造を認めるのは難しい。このような惑星深部起源の波動を捉えるためには、さらなる時系列データの蓄積が必要である。惑星周回衛星によるその場観測だけでなく、地上観測網による長期的な観測とそのデータセットの蓄積・整備が重要であることを再認識した。

(2) 国内外における位置付けとインパクト

MHD 波動を用いたガス惑星内部構造の推定方法の提案

地球や他惑星の内部構造の推定には、従来、重力場や弾性波などが用いられてきた。本研究では、MHD 波による内部構造推定の原理を提案した。特に、金属水素層と分子水素層の境界を、MHD 波の反射により特定できる可能性があることを示したことは意義深い。これまでも、エネルギー収支などに基づいて、この境界の深さの推定が試みられてきたが (Liu et al., Icarus 2008)、本研究の提案した原理では、電気伝導度分布における急激な変化を捉えることによって境界の深さを推定する。今後、観測データが蓄積されこのような波動が検出された際には、そのダイナモ機構や惑星進化史の解明に向け、大きな制約を与える。

地球深部物理学における知見の応用、地球との差異

地球コアダイナミクス分野では、地磁気永年変動や地球自転速度変動で顕著なシグナルを、非圧縮性ねじれアルヴェン波の理論に基づいて解釈することにより、流体コア内の磁場強度やマントル最下部の電気抵抗が推定されてきた (Gillet et al., Nature 2010; Schaeffer & Jault, Geophys. Res. Lett. 2015)。本研究は、同様の手法が木星においても有効であろうことを示した。原理的には、対象とする天体を地球と木星に限らないため、将来、他惑星や恒星へ応用していくことも可能である。

その一方で、地球コアにおける MHD 波と木星金属水素層における MHD 波との差異も明らかにした。地球のコア・マントル境界においては、ねじれアルヴェン波の反射波が認められないことが観測と数値シミュレーションの双方から報告され、その原因が議論されてきた (Gillet et al., Geophys. J. Int. 2017; Teed et al., Geophys. J. Int. 2019)。本研究により、木星の金属・分子水素層の境界ならば、ねじれアルヴェン波の反射が起こりうるということがわかった。これは、MHD 波の基礎理論を確認できたことを意味すると同時に、地球コアにおけるねじれアルヴェン波が特異であることを示唆する結果である。他惑星において検討したことで、地球における現象の特徴が明確になった好例と言える。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

K. Hori, R.J. Teed, C.A. Jones, Anelastic torsional oscillations in Jupiter's metallic hydrogen region, Earth and Planetary Science Letters, 査読有, Vol, 519, pp. 50-60, 2019.

DOI:10.1016/j.epsl.2019.04.042

〔要旨集〕(計1件)

K. Hori, R.J. Teed, C.A. Jones, Rotating MHD waves and their implications for planetary dynamos, APS-DPP (Division of Plasma Physics, Asia Pacific Physical Societies) Bulletin, 査読無, CD-112, 2018.

<http://aappsdp.org/DPP2018Program/pdf/CD-112.pdf>

〔学会発表〕(計9件)

K. Hori, TBA, The 2019 Macau Forum for Planetary Sciences: the Interiors of Jupiter and Saturn, 招待講演, 2019年11月(予定).

K. Hori, Rotating MHD waves and their implications for planetary dynamos, Waves, Instabilities and turbulence in geophysical and astrophysical flows 2019, 2019年7月(予定).

K. Hori, Anelastic torsional oscillations in Jupiter's metallic hydrogen region, Revealing Saturn's deep interior for the first time with Cassini, 2019年6月(予定).

K. Hori, Anelastic torsional oscillations in Jupiter's metallic hydrogen region,

UK SEDI (Study of Earth 's Deep Interior) 2019, 2019 年 5 月.

K. Hori, Rotating MHD waves and their implications for planetary dynamos, The 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2018), 招待講演, 2018 年 11 月.

K. Hori, Anelastic torsional oscillations in Jupiter 's metallic hydrogen region, The 16th Symposium on SEDI, 2018 年 7 月.

K. Hori, Waves in Jupiter 's metallic hydrogen region driven by anelastic rotating convection, The Workshop on Rotating Convection: from the Lab to the Stars, 2018 年 5 月.

K. Hori, Torsional oscillations in Jupiter 's metallic hydrogen region, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月.

堀 久美子, 地球コアにおける遅い磁気ロスビー波, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 招待講演, 2018 年 5 月.

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.researchgate.net/project/Waves-in-Earths-core>

<https://arxiv.org/abs/1901.10154>

アウトリーチ活動等

サイエンスアゴラ in Kobe 2018, 2018 年 11 月.

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁):

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : Robert J. Teed

所属研究機関名 : University of Glasgow

部局名 : School of Mathematics and Statistics

職名 : Lecturer

研究協力者氏名 : Chris A. Jones

所属研究機関名 : University of Leeds

部局名 : Department of Applied Mathematics, School of Mathematics

職名 : Professor

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、研究者個人に帰属されます。