

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610139

研究課題名(和文)惑星内核と外核の磁気流体相互作用の研究

研究課題名(英文) Magneto-hydrodynamic interaction between planetary inner and outer cores

研究代表者

竹広 真一 (Takehiro, Shin-ichi)

京都大学・数理解析研究所・准教授

研究者番号：30274426

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：惑星内核と外核の磁気流体運動の相互作用を理論的・数值的に調べ、惑星中心核内の流体運動の基本的な性質を解明した。まず、外核での磁場から内核内部運動への影響の理論的に考察し、外核からの磁場のジュール熱によって引き起こされる内核中の流れ場を解析的および数值的に求めた。次に、外核上部境界直下の安定成層へ下面からの流れ場がどの程度貫入するかを理論的に計算し、数値計算により貫入距離の理論的表現の正当性を確かめた。さらに、内核と外核の磁気流体結合数値モデルの数値実験を行い、内核中の流れ場がジュール熱によって赤道域で下降流、極域で上昇流が生成される様子を例示した。

研究成果の概要(英文)：In order to elucidate fundamental characteristics of fluid motion in planetary cores, magneto-hydrodynamic interaction between planetary inner and outer cores is investigated theoretically and numerically. First, inner core flows induced by Joule heating of the magnetic field penetrating from the outer core are obtained analytically and numerically. Second, penetration of fluid motions into the upper stably stratified layer near the top of the outer core is examined and the analytical expressions of penetration distance are derived. These expressions are validated by numerical calculations of magneto-hydrodynamic thermal convection in a rotating spherical shell. Finally, numerical experiments of the whole planetary central cores with a coupled inner-outer cores magneto-hydrodynamic fluid model are performed. It is shown that the inner core flows with upward and downward in the equatorial and polar regions respectively emerge.

研究分野：地球流体力学、惑星内部物理学

キーワード：内核外核境界 相変化 ジュール熱 ダイナモ過程 核マントル境界 安定成層 アルフベン波 貫入距離

## 1. 研究開始当初の背景

近年の地震波観測から内核の結晶構造の異方性が明らかとなっており、その有力な成因として内核内部の流体運動が考えられるようになってきている。その流れを引き起こす要因として内核表面への外核中の磁場の圧力の影響や外核中の熱輸送による内核の異方的な成長が考えられてきている。一方で、地球固有磁場の生成維持に寄与しているであろう外核中の流れは、地球全体の冷却に伴い内核が固化成長する際に主成分の鉄およびニッケルが選択的に凝結し、内核に取り込まれなかった軽成分が内核 - 外核境界に放出され、その浮力により生じると考えられている。このように地球の内核と外核の磁気流体力学的状態は互いに影響を及ぼしあいながら生成維持されていると考えられている。

地球内核と外核の磁気流体運動を同時に扱った研究はこれまでに行われておらず、内核あるいは外核のどちらかの熱的・力学的・磁気的狀態を与えてもう一方の状態を求める研究しかない。たとえば、外核の状態を与えたときの内核の流れ場を求める理論的な研究や、内核を等温の剛体球としたときの外核中の磁気ダイナモ計算が行われている。しかしながらこれらの研究は内核 - 外核間の相互作用を全て取り扱っているわけではない。

## 2. 研究の目的

本研究は、粘性と密度の高い内核と粘性と密度の低い外核の磁気流体運動の相互作用を理論的・数値的に調べることで、地球中心核内の流体運動の基本的な性質を地球流体力学的見地から解明するものである。内核-外核磁気流体結合モデルを構築し数値実験を行うことで、考えられる内核-外核間の相互作用を全て同時に扱おうという野心的な試みである。

## 3. 研究の方法

### (1) 内核-外核磁気流体結合モデルの定式化

モデルの構築と理論的考察の土台となる内核-外核磁気流体結合モデルの支配方程式と境界条件の定式化を行う。その方程式系に基づいて内核 - 外核間の相互作用についての考察を行う。特に、一方の熱的・流体力学的・磁気的狀態を与えたときの他方の磁気流体的応答を数値的に解くことにより、内核-外核間の相互作用の素過程を明らかにすることを旨とする。

### (2) 内球-球殻結合磁気流体モデルの構築と数値実験

上の定式化に基づいて、3次元内核-外核磁気流体結合モデルを構築する。既に構築している回転球殻磁気流体ダイナモモデルと回転球内の磁気対流モデルの2つを結合することにより内核-外核磁気流体結合モデルを構築する。このモデルを用いた

数値実験を行うことで、採り入れられた内核-外核相互作用の効果のために、これまでの研究で得られているものとはまったく異なるタイプのダイナモ解や内核中の流れ場が見いだされることが期待される。

## 4. 研究成果

### (1) 内核および外核における磁気流体の支配方程式と境界条件の定式化

スペクトル法による内核外核結合数値モデルを構築し、基本的な数値実験を行った。外核に対する内核の影響の素過程を調べるための数値実験として、内核表面での緯度方向に不均一な浮力フラックス分布を与えて外核内に生じる流れ場・磁場および熱的狀態を求めることを行った。その結果、一様な浮力フラックス分布および赤道で強い浮力フラックス分布の下では、自己維持的ダイナモ解がたやすく得られたが、極域で強い浮力フラックス分布を与えた場合には自己維持的ダイナモ解が見いだされなかった。

### (2) 外核での磁場から内核内部運動への影響の理論的考察

内核の表面が鉛直方向に変位することの影響を取り込んで、外核からの磁場ジュール熱によって引き起こされる内核中の流れ場を吟味した。その結果、内核外核境界における相変化の速度が十分に速ければ内核の地震波速度異方性を説明できる流れ場を引き起こせるが、相変化の速度が遅い場合には、地震波速度の異方性を説明するために都合の悪い内核外核境界付近に強い逆流が発生することが見いだされた。

### (3) 外核上部境界直下の安定成層の外核中の流れ場と磁場への影響

外核上部境界直下の安定成層の存在は外核中の磁気流体ダイナモ解の多様性の要因の一つである。この安定成層は内核外核の相互作用の結果として生じるとも考えられている。すなわち、惑星全体の永年冷却にともない内核外核境界において外核側に放出される軽元素が上昇し上部境界付近に蓄積することにより形成されていると推測されている。

まず、半無限平面領域で安定成層している一様磁場にさらされた回転ブシネスク磁気流体の振舞いを理論的に考察した。安定成層が十分に強い近似を施すことにより、下面境界からの渦運動に対して流体運動は慣性重力波に対応する速いモードとアルフベン波に対応する遅いモードの2つに分類されることを示した。このうち、より遠くまで安定成層中を伝播可能な遅いモードの成層中への貫入距離の解析的表現を提示した。この結果を踏まえて、回転球殻中の磁気熱対流の中立モードをの構造を計算し、それらの構造と解析的に求められた貫入距離を比較し整合的な結果を得ることができた。その結果を地球の状況と先行研究のダイナモ計算に適用し、安定成層を十分に貫く磁

気流体擾乱が存在しうることを議論した。

(4) 内核と外核の磁気流体結合数値モデルを用いたパラメータ数値実験

この結合モデルでは、内核の流れが外核中のダイナモ作用によって生成される磁場のジュール熱によって駆動される。その流れが内核外核境界での軽成分フラックス分布を通じて外核中の流れに影響を与える。数値計算に用いた無次元数の値はレイリー数 1000, プラントル数 1, エクマン数 0.0001, 磁気プラントル数 3, 内外半径比 0.35 である。内核と相互作用しない場合と内核と相互作用する場合について、3 倍の磁気拡散時間まで時間積分を行ったところ、どちらの場合もダイナモ作用によって磁場が生成維持される状態が得られた。最終状態の磁気エネルギーは同程度の大きさであった。内核と相互作用する場合には、内核外核境界赤道付近に生成される赤道反対称なトロイダル磁場が内核に貫入し、そのジュール熱によって赤道域で下降流、極域で上昇流が生成されている。このような流れは (2) において理論的に検討した内核中の流れの様子と整合的である。しかしながらその振幅が小さく、外核中のダイナモ作用への影響は小さいようにみえる。結果として、内核と相互作用しない場合と内核と相互作用する場合の外核中のダイナモ作用の様子に目だつた差は見られなかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

Sasaki, E., Takehiro, S., Yamada, M., Bifurcation structure of two-dimensional viscous zonal flows on a rotating sphere, *Journal of Fluid Mechanics*, 774, 2015, 224-244, DOI:10.1017/jfm.2015.262

Inubushi, M., Takehiro, S., Yamada, M., Regeneration cycle and the covariant Lyapunov vectors in a minimal wall turbulence, *Physical Review E*, 92, 2015, 23022, DOI:10.1103/PhysRevE.92.023022

Saiki, Y., Yamada, M., Chian, A. C.-L., Miranda, R. A., Rempel, E. L., struction of chaotic saddles by classification of unstable periodic orbits: Kuramoto-Sivashinsky equation, *Chaos*, 25, 2015, 103123, DOI: 10.1063/1.4933267

Takehiro, S., Influence of surface displacement on solid state flow induced by horizontally heterogeneous Joule heating in the inner core of the Earth, *Physics of the Earth and*

*Planetary Interiors*, 241, 2015, 15-20, DOI: 10.1016/j.pepi.2015.02.003

Takehiro, S., Penetration of Alfvén waves into an upper stably-stratified layer excited by magnetoconvection in rotating spherical shells, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 241, 2015, 37-43, DOI: 10.1016/j.pepi.2015.02.005

Hori, K., Takehiro, S., Shimizu, H., Waves and linear stability of magnetoconvection in a rotating cylindrical annulus, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 236, 2014, 16-35, DOI:10.1016/j.pepi.2014.07.010

Marti, P., Schaeffer, N., Hollerbach, R., Cebon, D., Nore, C., Luddens, F., Guermond, J.-L., Aubert, J., Takehiro, S., Sasaki, Y., Hayashi, Y.-Y., Simitev, R., Busse, F., Vantieghem, S., Jackson, A., Full sphere hydrodynamic and dynamo benchmarks, *Geophysical Journal International*, 197, 2014, 119-134, DOI: 10.1093/gji/ggt518

Jackson, A., Sheyko, A., Marti, P., Tilgner, A., Cebon, D., Vantieghem, S., Simitev, R., Busse, F., Zhan, X., Schubert, G., Takehiro, S., Sasaki, Y., Hayashi, Y.-Y., Ribeiro, A., Nore, C., Guermond, J.-L., A spherical shell numerical dynamo benchmark with pseudo-vacuum magnetic boundary conditions, *Geophysical Journal International*, 196, 2014, 712-723, DOI: 10.1093/gji/ggt425

Sasaki, Y., Takehiro, S., Nishizawa, S., Hayashi, Y.-Y., Effects of latitudinally heterogeneous buoyancy flux conditions at the inner boundary on MHD dynamo in a rotating spherical shell, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 223, 2013, 55-61, DOI: 10.1016/j.pepi.2013.07.003

Kimura, K., Takehiro, S., Yamada, M., Stability and bifurcation diagram of Boussinesq thermal convection in a moderately rotating spherical shell allowing rotation of the inner sphere, *Phys. Fluids*, 25, 2013, 08147-1-17, DOI: 10.1063/1.4819140

[学会発表](計 15 件)

Yamada, M., 2D Navier-Stokes equations on a sphere, *Naruto Workshop on Vortex Dynamics (招待講演)(国際学会)*, 2016年01月16日, Hotel Ad Inn Naruto(徳島・鳴門)

山田道夫, 微生物の運動と帆立貝定理,

数学協働プログラム「生命ダイナミクスの数理とその応用:理論からのさらなる深化」(招待講演), 2015年12月10日, 東京大学大学院数理科学研究科大講義室(東京・渋谷)

山田 道夫, 球面上の2次元 Navier-Stokes 流, 共共拠点研究会 RIMS1963-IMI2013(招待講演), 2015年12月07日, 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所(福岡・福岡)

Sasaki, Y., Takehiro, S., Penetration of magneto-hydrodynamic disturbances into a strongly stable outer layer caused by MHD dynamo in a rotating spherical shell. Japan SEDI symposium 2015(国際学会), 2015年09月25日, 東京大学地震研究所(東京・文京)

Takehiro, S., Sasaki, Y., Penetration of steady fluid motions into an outer stable layer excited by MHD thermal convection in a rotating spherical shell, Japan SEDI symposium 2015(招待講演)(国際学会), 2015年09月25日, 東京大学地震研究所(東京・文京)

Takehiro, S., Yamada, M., On extremum statistics in dynamical systems and two dimensional flows, 8th International Congress on Industrial and Applied Mathematics(ICAIAM)(国際学会) 2015年08月11日, Beijing (China)

M.Yamada, Stability of one-directional flow on a rotating sphere, 8th International Congress on Industrial and Applied Mathematics(ICAIAM)(国際学会), 2015年08月11日, Beijing (China)

竹広真一, ジュール加熱により引き起こされる地球内核中の流れについて, 日本地球惑星科学連合 2015年大会, 2015年05月27日, 幕張メッセ国際会議場(千葉・千葉)

竹広 真一, 上層に安定成層を伴う回転球殻中の磁気対流により引き起こされるアルフベン波, 2014年日本流体力学会年会, 2014年09月16日, 東北大学川内北キャンパス(宮城・仙台)

Takehiro, S., Influence of surface displacement on fluid motions induced by horizontally heterogeneous Joule heating in the inner core of the earth, The 14th symposium of SEDI, 2014年08月03日~2014年08月08日, 湘南国際村センター(神奈川・横須賀)

Takehiro, S. Propagation of Alfvén waves in an outer stably stratified layer excited by MHD thermal convection in a rapidly rotating spherical shell, The 14th symposium of SEDI, 2014年08月03日~2014年08月

08日, 湘南国際村センター(神奈川・横須賀)

Sasaki, Y., Takehiro, S., Penetration of magneto-hydrodynamic disturbances into an outer strongly stable layer caused by MHD dynamo in a rotating spherical shell, The 14th symposium of SEDI, 2014年08月03日~2014年08月08日, 湘南国際村センター(神奈川・横須賀)

堀 久美子, 竹広 真一, 清水 久芳, 回転円筒内の磁気対流の線形安定性と波動, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, 2014年04月28日, パシフィコ横浜(神奈川・横浜)

竹広 真一, ジュール加熱により引き起こされる地球内核中の流れに対する表面変位の影響, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, 2014年04月30日, パシフィコ横浜(神奈川・横浜)

竹広 真一, Influence of surface displacement on fluid motions induced by horizontally heterogeneous Joule heating in the inner core of the earth, pre-SEDI 2013(招待講演), 2013年09月28日, 湘南国際村センター(神奈川・横須賀)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
なし

## 6. 研究組織。

### (1) 研究代表者

竹広 真一 (TAKEHIRO SHIN-ICHI)  
京都大学 数理解析研究所 准教授、  
研究者番号: 30274426

### (2) 研究分担者

山田 道夫 (YAMADA MICHIO)  
京都大学 数理解析研究所 教授  
研究者番号: 90166736