

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03808

研究課題名(和文) 内核成長のダイナミクスから解き明かす10億年スケール地球ダイナモ進化

研究課題名(英文) Billion-year scale geodynamo evolution associated with dynamics of inner core growth

研究代表者

高橋 太 (Takahashi, Futoshi)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：20467012

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)：地球型惑星に関する数値ダイナモモデルを用いて、外核の対流によって生成される磁場構造とその時間変動を様々な時間スケールで調査した。内核成長による10億年オーダー、100万年オーダーおよび、1年オーダーという3つの時間スケールにおける磁場変動に着目した。10億年スケールについては、現在および過去の地球の核では対流構造を支配するメカニズムが大きく異なる可能性が示唆された。100万年スケールでは、逆転頻度と逆転に要する時間との相関について調査し、古地磁気学的記録との比較を行った。短周期変動については、データ同化による地磁気永年変化予測を行い、地球磁場変動モデルの作成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究における成果を各時間スケールでまとめると次の3点になる。(1) 内核の成長に伴う地球外核の特徴的な対流構造、ダイナミクスの変遷と、それらの変化に伴って実現される磁場構造とその永年変化から、地球の熱史と核のダイナミクスの関係を議論することができるようになった。(2) 100万年スケールの古地磁気学的データに基づいて、過去の地磁気逆転と地球ダイナモの特徴を規定する際に重要な指標を提供することができた。(3) 数年スケールで地球磁場の短期変動予測の実現可能性を示したことにより、より正確な地球磁場変動モデルの作成に寄与することができるようになった。

研究成果の概要(英文)：Dynamo action in the Earth's core is investigated based on numerical modeling of the geodynamo. In particular, we focus on spatial structure of the magnetic field and its secular variation in terms of three characteristic time scales, that is, annual, million-year, and billion-year scales. In annual scale, we have constructed a geomagnetic secular variation model using data assimilation approach. Then, in million-year scale, we have investigated correlation between frequency and duration of polarity reversals of the dipole field. Comparison with the latest paleomagnetic record was made, and then we have discussed the implications for the geomagnetic polarity reversals. Finally, in billion-year scale, we have studied core dynamics with various inner core size. It is suggested that dominant force balance in the past Earth's core is different from that in the present Earth's core.

研究分野：固体地球科学

キーワード：地球磁場 ダイナモ 地磁気永年変化 内核成長 10億年スケール コア

1. 研究開始当初の背景

地球磁場の時間変動は地球中心部の流体核(外核)における発電作用(ダイナモ作用)を反映し、数年から数千万年という非常に幅広い時間スケールに渡るスペクトルを示す。このようなスペクトルは、地球ダイナモがせいぜい10万年オーダーまでの比較的短周期な現象である流体核のダイナミクスのみならず、固体内核の対流や成長、マントル対流といった数億年間以上の長周期な現象の影響を受けて時間発展してきたことを示している。地球史における最も時間スケールの長い現象として、固体内核の成長が挙げられよう。内核の形成年代については諸説あるが、近年は10億年程度といった比較的若い年代が支配的となっている。

内核の形成はコアダイナミクスとダイナモに非常に大きなインパクトを与える。以下に大別すると、(I)コアの対流を駆動するエネルギーとして熱的浮力に加えて軽元素放出による組成的浮力が加わり、強い磁場を作る、(II)コアの対流とダイナミクスに幾何学的拘束が加わる、(III)内核の磁気拡散時間がダイナモ作用の新しい時間スケールとして加わり逆転を抑制する、等である。こうした効果は内核が形成された時点で階段状に顕在化するのではなく、内核の成長と共に連続的に変動するはずであり、10億年スケールの地磁気永年変化成分として地球磁場に含まれていると考えられる。

地球ダイナモと内核成長は時間スケールが大きく異なり、同時に取り扱うことはできない。従って、内核の成長による影響を調査するには様々な大きさの内核に対して離散的に計算を行う必要がある。注意しなければいけないことは、ダイナモシミュレーションでは内核サイズ以外にも複数のパラメータがあることである(特にエクマン数とレイリー数)。単純に内核サイズを変えるだけでなく、他のパラメータの時間変化も考慮して矛盾の無いように値を設定しなければ、パラメータ空間内で地球ダイナモの進化曲線を適切に追跡することにはならない。過去の研究ではこの点が考慮されておらず、ダイナモの進化を議論する上で問題であった。

2. 研究の目的

地球磁場の永年変化はパラメータに対する依存性、内核の構造(サイズや半球構造)、コア・マントル境界での境界条件、対流の駆動源の割合等に依存して変化する。本研究では、各種要因に対する様々な時間スケールでの永年変化の依存性を、系統的な数値ダイナモシミュレーションによって明らかにする事を目指す。特に、磁場の永年変化に関する内核サイズの依存性を明らかにすることが出来れば、10億年スケールという超長周期における地球ダイナモのダイナミクスの理解を大いに進める事が出来るであろう。また、ダイナモシミュレーションの永年変化と古地磁気永年変化を比較することで、各年代における古地磁気永年変化の支配的メカニズム(内核サイズ、内核・外核境界、コア・マントル境界の境界条件等)を議論できるようにする。各年代での古地磁気永年変化を説明し得るダイナモモデルとその条件を探し出すことが出来れば、古地磁気永年変化から当時の地球ダイナモの状態や、内核、コア・マントル境界の状況について推定できるかもしれない。更に、白亜紀超磁極期や太古代の古地磁気永年変化に対する解釈を補強あるいは、より正確な解釈を提供して、地球ダイナモの進化に対する拘束条件を与え得る可能性がある。本研究ではダイナモの数値シミュレーションと古地磁気学的データを結び付けることで100万年スケールでの地磁気永年変化の特徴づけを試みる。さらに、1年オーダースケールでの短周期地磁気永年変化を数値ダイナモモデルを用いて予測して、新しい地磁気永年変化モデルを作成することを目指す。

3. 研究の方法

地球の中心核を模した回転球殻内における電磁流体の対流によるダイナモ作用の数値シミュレーションを大規模かつ系統的に行い、得られたコア流れや磁場データを古地磁気学的方法も利用して解析する。計算機能力の都合上エクマン数等扱うことのできるパラメータの範囲は限定されるが、エクマン数に対しては依存性を確認するために、出来るだけ広い範囲(10^{-3} - 10^{-5})を採用する。各時間スケールについて以下の方法で研究を進める。

(1)10億年スケール:1次元熱史モデルを用いて、各種初期条件(温度、軽元素濃度等)下で内核の成長曲線を作成する。成長曲線に基づき各パラメータ(エクマン数、レイリー数)の相対的時間発展を統合的に決定し、内核成長を模した数値シミュレーションを系統的に行う。各成長曲線毎に10億年スケールのダイナモ進化モデルを作成し、各時代における磁場生成過程および永年変化の物理素過程を明らかにする。

(2)100万年スケール:得られた結果から双極子成分の逆転イベントを抽出し、逆転頻度と各逆転イベントに掛かった期間を求め、統計的に比較する。得られた結果を古地磁気学的方法と比較して、地球ダイナモの特徴について議論する。

(3)1年スケール:データ同化手法を用いて、地球磁場モデルを初期条件とする数値ダイナモシミュレーションを行えるようにする。数値シミュレーションによって既知の期間に対して5

年間程度の地磁気永年変化予測を行い、その予測精度の検証を行う。最も精度の良いモデルを用いて、5年先の地磁気永年変化予測モデルを作成し、新たな地磁気永年変化の標準モデルを提案することを目指す。

4. 研究成果

数値ダイナモシミュレーションに基づき、地球外核のダイナモ作用に起因する数年スケールから数億年スケールに渡る広帯域な地磁気永年変化のメカニズムを明らかにするための基礎となる結果をいくつか得ることができた。近年様々な観測や理論モデルから地球のコア-マントル境界(CMB)下に安定成層が存在することが示唆されているが、地球以外に安定成層の存在が強く示唆される惑星として水星がある。水星の磁場は地球磁場と大きく異なるため、水星と地球のダイナモ作用およびその永年変化の違いを理解することは固体天体のダイナモを理解する上でも重要である。本研究では安定成層と二重拡散対流、水星コアの温度圧力条件や組成を考慮した対流の駆動源を模したダイナモモデルを開発することで、水星ダイナモの特徴を全て再現することに成功した。得られた結果について詳細な解析を行った結果、水星のダイナモが作る磁場によるローレンツ力が流れ場に作用して、赤道対称・反対称成分間の非線形相互作用を促進することが本質的に重要であることが明らかになった(図1)。この結果は、対流によって生成された磁場自身が、対流構造に作用して磁場にとって都合の良い構造を維持するという、自己制御機構を持つことを示している。本研究成果は新規的かつ非常に独創的な結果として評価できると考えている。

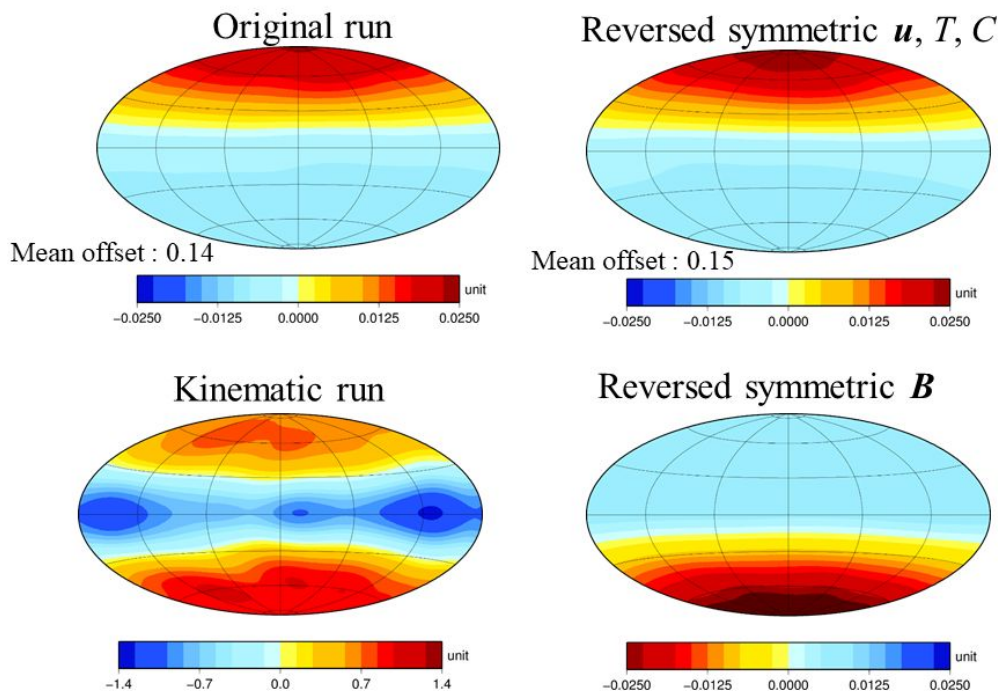


図1:水星ダイナモのシミュレーション結果。惑星表面での磁場動径成分の分布。(左上)が基準結果を示し、他の(右上),(左下),(右下)は各種条件を変えた計算結果。(左下)が磁場の非線形効果を除いた計算結果で、基準結果と大きく異なる構造を示している。

10億年スケールの変動については、内核成長に関する熱史計算の結果に基づいて各種パラメータを与え、離散的な内核サイズでのダイナモシミュレーションを進化曲線に沿って内部整合性を保ちながら行なった。様々なダイナモの進化モデルが得られたが、特筆すべきものとしては、生成される磁場の形態と磁場強度が短期間に急変するような結果を挙げることができる(図2)。このような進化を辿るような結果では、内核形成初期には強い双極子磁場が生成・維持され易い一方で、現在の内核よりも大きなサイズにまで内核が成長すると、強度が小さい非双極子型の磁場が生成・維持されるようになった。将来の地球ダイナモの10億年スケール進化に関する非常に示唆に富んだ結果であると評価することができよう。さらに、この結果は地球磁場の他に月磁場のような、比較的短時間でダイナモ作用が停止したような場合を説明する際のアイデアの一つとして用いることができるかもしれない。

また、内核の不均質成長を考慮した組成対流モデルによる対流シミュレーションを実施した

結果、内核の不均質成長モデルの違いによって外核の対流構造とその時間変化が大きく異なることが分かった。さらに、内核サイズの変化に伴う対流構造の違いが生じる物理的なメカニズムについて、詳細な解析・考察を行った。その結果、現在および過去の地球の流体核では、対流構造を支配するメカニズムが大きく異なる可能性を示唆する結果を得ることができた。

10000Ra₀

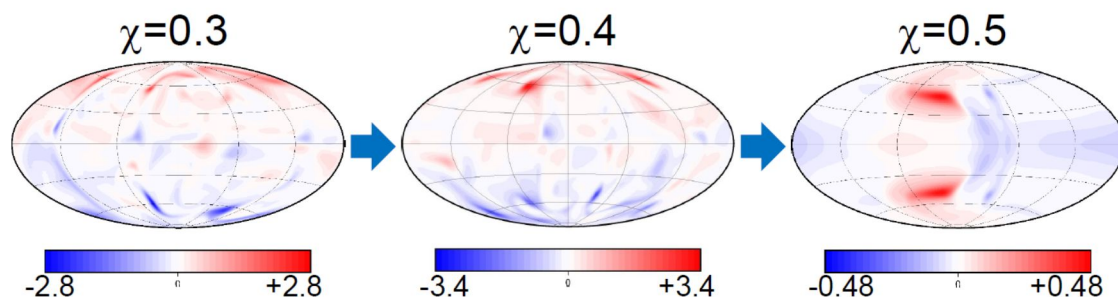


図2：内核成長に伴う磁場構造と強度の変遷。

100 万年程度の時間スケールについては、レイリー数を変えた数値実験を用いて双極子磁場の逆転イベントを抽出し、逆転頻度の違いを調査した。更に、逆転に要する時間について統計的に調査し、古地磁気学的記録との比較を可能にした。その結果、現在と同程度の逆転頻度では、逆転に要する時間は有意には変化しないことが明らかになった（図3）。本結果は地球ダイナモの特徴を評価する際の指標の一つとして用いることができると考えられる。今後、古地磁気学的な研究結果との比較を行うことで 100 万年スケールの地磁気永年変化を新たな視点で評価することができるようになる」と期待される。

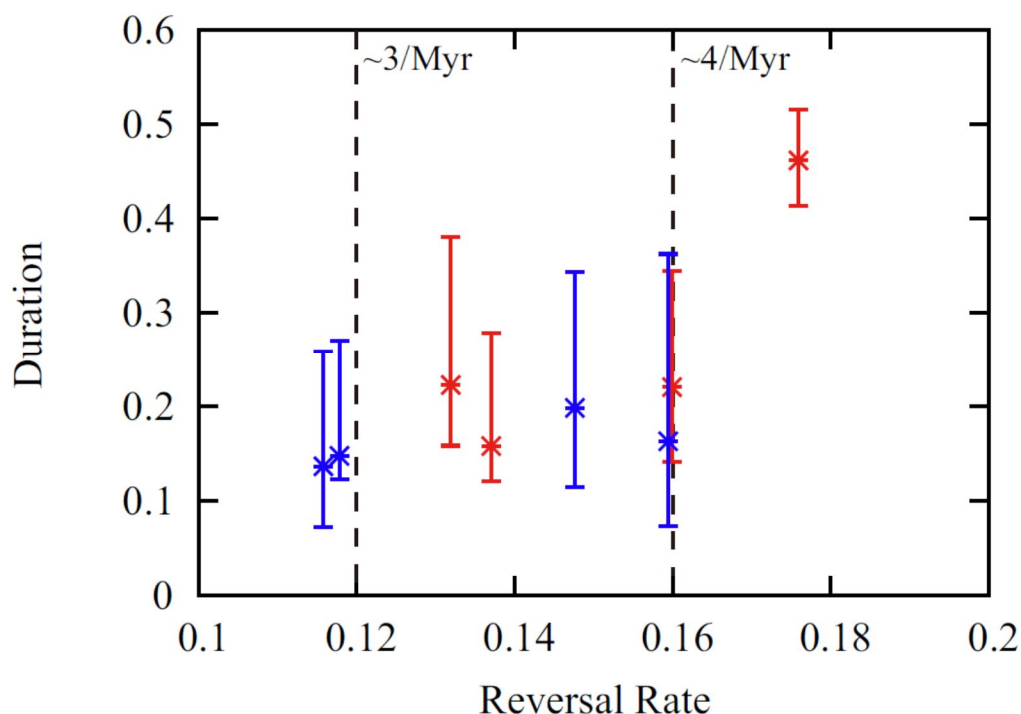


図3：逆転頻度（横軸）に対する逆転期間（縦軸）の関係図。逆転期間は逆転頻度に依存せずにはほぼ一定の範囲内にあることが示されている。

1 年程度のスケールについては、地磁気永年変化を正確に予測するための手法の開発を行った。衛星観測による高精度地球磁場モデルを、アンサンブルに基づく 4 次元変分法によってデータ

同化し、ダイナモモデルを用いて5年先までの地球磁場を数値的に予測した。手法の評価をするために2015年から4.5年の予測計算を行い、データ同化窓、誤差分散等の様々なパラメータの最適化を実施し、5年間で100 nT程度の精度で地磁気予報が可能であることが確認できた(図4)。さらに、予測された地表での全球分布も観測結果と整合的であることが確認された(図5)。これらの結果に基づき、2020-2025年の地磁気永年変化予測モデルを作成することができた。新規手法による地磁気永年変化モデルの作成に成功したことは、当該研究分野において非常に重要な貢献と評価することができ、今後の予測精度向上が大いに期待される結果である。

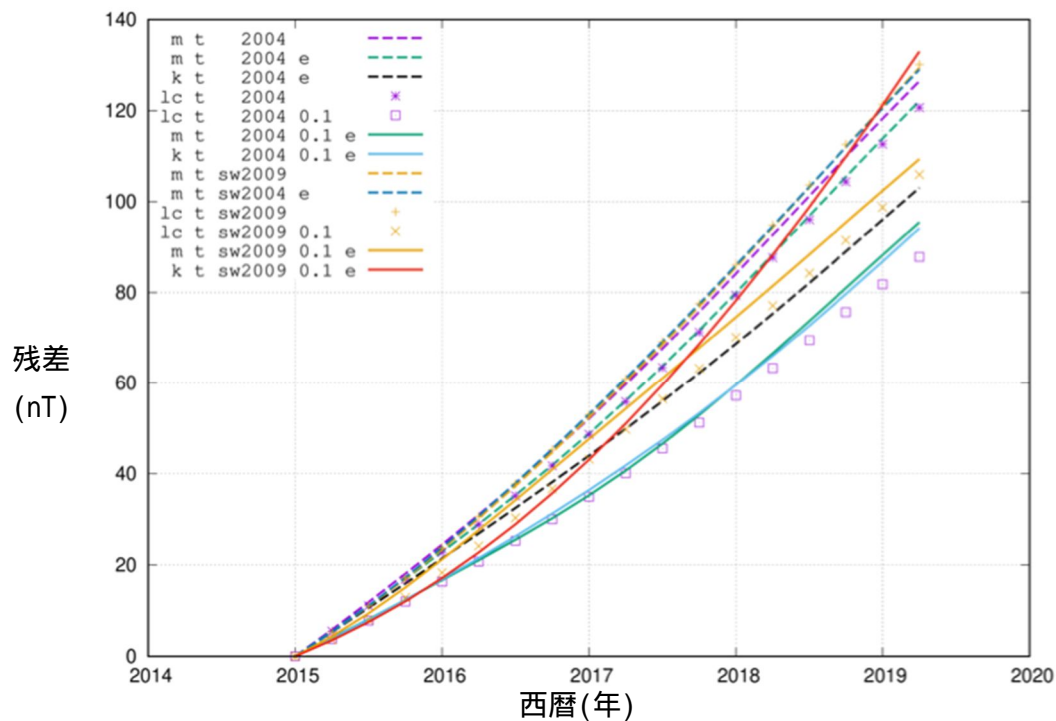


図4：地磁気永年変化予測の精度検証結果。2015年から4.5年間の地球磁場予測と観測値との差分の時系列。最適化されたモデルでは5年間で100 nT程度の誤差で予測が可能であることが確認された。

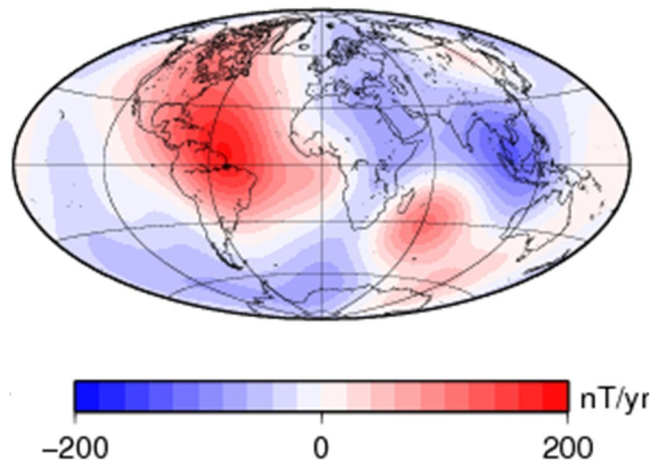


図5：モデルから予測された2019年3月における地球表面での地磁気永年変化の動径成分の分布。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Futoshi Takahashi, Hisayoshi Shimizu, Hideo Tsunakawa	4. 巻 10
2. 論文標題 Mercury's anomalous magnetic field caused by a symmetry-breaking self-regulating dynamo	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 10: 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-018-08213-7	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 -

〔学会発表〕 計26件（うち招待講演 1件/うち国際学会 14件）

1. 発表者名 谷口陽菜実、高橋太、竹広 真一
2. 発表標題 A comparison between top-down and bottom-up type convective flows in a rotating spherical shell with stress-free boundaries
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Futoshi Takahashi, Hisayoshi Shimizu, Hideo Tsunakawa
2. 発表標題 A symmetry-breaking self-regulating dynamo generating Mercury's anomalous magnetic field
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋太、眞鍋佳幹
2. 発表標題 Detection of jerk-like magnetic field variation in a numerical dynamo model using wavelet analysis
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兵藤史、高橋太、金嶋聡、清水久芳、網川秀夫
2. 発表標題 Numerical modeling of a lunar dynamo and its long-term evolution
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兵藤史、高橋太、金嶋聡、清水久芳、網川秀夫
2. 発表標題 "Sustainable dipolar morphology of a lunar dynamo driven by compositional convection"
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋太
2. 発表標題 Analysis of magnetic secular acceleration in a numerical dynamo model
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumi Hyodo, Futoshi Takahashi, Satoshi Kaneshima, Hisayoshi Shimizu, Hideo Tsunakawa
2. 発表標題 An effect of the Rayleigh number on morphology of a long-lived lunar dynamo driven by compositional convection
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Futoshi Takahashi, Hisayoshi Shimizu, Hideo Tsunakawa
2. 発表標題 Mercury 's Anomalous Magnetic Field as a Result of Symmetry-breaking Self-regulating Dynamo
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hinami Taniguchi, Futoshi Takahashi, Shin-ichi Takehiro, Hisayoshi Shimizu
2. 発表標題 Influences of the inner spherical boundary on the bottom-up type convection at the onset in a rotating spherical shell
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinya Nakano, Takuto Minami, Futoshi Takahashi, Masaki Matsushima, Hiroaki Toh, Hisayoshi Shimizu
2. 発表標題 Application of 4-dimensional ensemble variational method for geodynamo modeling
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口陽菜実、高橋太
2. 発表標題 Onset of top-down and bottom-up compositional convection in rotating spherical shells
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 眞鍋佳幹、高橋太
2. 発表標題 数値ダイナモモデルで検出されたジャーク様磁場変動の初期解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兵藤史、高橋太、金嶋聰、清水久芳、網川秀夫
2. 発表標題 熱史計算と整合的な月ダイナモ進化モデルの構築
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Futoshi Takahashi, Hisayoshi Shimizu, Hideo Tsunakawa
2. 発表標題 A dynamo model for small bodies considering different core crystallization regime
3. 学会等名 The 16th Symposium of SEDI (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Futoshi Takahashi, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Shin-ya Nakano, Takuto Minami, Hiroaki Toh
2. 発表標題 A brief introduction to a perspective of Japan's geomagnetic field modeling
3. 学会等名 Forecasting the geomagnetic secular variation with data assimilation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hinami Taniguchi, Futoshi Takahashi
2. 発表標題 The role of drifting columnar convection in kinematic dynamo problem
3. 学会等名 Forecasting the geomagnetic secular variation with data assimilation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋太
2. 発表標題 Morphology of dynamos by double diffusive convection with a stably stratified layer beneath CMB
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷口陽菜実、高橋太
2. 発表標題 Kinematic dynamo associated with a drifting columnar convection
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兵藤史、高橋太、清水久芳、綱川秀夫
2. 発表標題 熱史と整合的なダイナモモデリングを用いた月磁場の進化に関する予備的研究
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Futoshi Takahashi, Yuhji Yamamoto
2. 発表標題 Statistical property of the polarity reversals in numerical dynamo models with implications for the geomagnetic field reversals
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Futoshi Takahashi, Hisayoshi Shimizu, Hideo Tsunakawa
2. 発表標題 Anomalous is normal in planetary dynamos: A case of Mercury
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hinami Taniguchi, Futoshi Takahashi, Sin-ichi Takehiro, Hisayoshi Shimizu
2. 発表標題 An effect of the inner core on bottom-up type critical convective flows in a rotating spherical shell
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fumi Hyodo, Futoshi Takahashi, Satoshi Kaneshima, Hisayoshi Shimizu, Hideo Tsunakawa
2. 発表標題 Quantitative evaluation of the convection structure in the core with reference to a compositionally-driven lunar dynamo
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shin'ya Nakano, Takuto Minami, Futoshi Takahashi, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Hiroaki Toh
2. 発表標題 Iterative ensemble variational methods and its application for the prediction of geomagnetic secular variation
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Takuto Minami, Shin'ya Nakano, Ryosuke Nakashima, Hinami Taniguchi, Hiroaki Toh
2. 発表標題 Forecasts of geomagnetic secular variation using core surface flow models (2)
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuto Minami, Shin'ya Nakano, Futoshi Takahashi, Masaki Matsushima, Ryosuke Nakashima, Hisayoshi Shimizu, Hinami Taniguchi, Hiroaki Toh
2. 発表標題 Contribution to IGRF-13 from Japan: A secular variation model using a numerical dynamo model and 4DEnVar data assimilation
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

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			
フランス	パリ地球物理学研究所			