

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03725

研究課題名(和文) 底部マグマオーシャンから始まる地球ダイナモの初期進化過程

研究課題名(英文) Early evolution of the geomagnetic field induced by a basal magma ocean dynamo

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：初期地球磁場の生成過程を3次元の数値ダイナモシミュレーションを用いて調査した。ダイナモが双極子の対称性を持つ解と四重極子の対称性を持つ解の発生条件および、その生成維持過程をキネマティックダイナモ問題およびMHDダイナモ問題の二種類について調べた。底部からの浮力によって対流が駆動されるモデルを用いて、速度場、磁場の対称性、反対称性を強制し、対称性間の相互作用を制限する場合と制限を課さない場合に対してMHDダイナモ計算を実施し、それぞれの結果を比較した。対称性間の非線型相互作用が磁場の形態の決定、速度場へのフィードバックに関して重要な役割を果たしていることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主な成果は次の3点になる。(1) 地球磁場の形態を決定する要素として速度場と磁場の対称性および、非線型相互作用が重要な役割を果たしている可能性があることが明らかとなったこと。(2) 相互作用の度合いが対流の駆動様式に依存して変動すること。(3) 過去の地球磁場の形態が現在とは大きく異なるものであった可能性が示唆されたこと。

研究成果の概要(英文)：The generation process of the ancient geomagnetic field was investigated using three-dimensional numerical dynamo simulation. In this study, we investigate the conditions for the generation of solutions with dipole-like symmetry and quadrupole-like symmetry in the dynamo region, and the generation and maintenance process by solving two types of problems: kinematic dynamo problems and MHD dynamo problems. It is found that non-linear interactions play an important role in determining the shape of the magnetic field and feeding back to the velocity field. This study suggests that the early geomagnetic field may have had a non-dipolar configuration.

研究分野：地球内部電磁気学

キーワード：地球磁場 ダイナモ コア 底部マグマオーシャン 初期地球

1. 研究開始当初の背景

地球磁場は地球中心部の流体核(外核, コア)の対流による発電作用(ダイナモ)を通じて生成・維持されており, 42 億年前には既に存在していた可能性が示されている。外核の対流を駆動するメカニズムとして熱対流と組成対流の二種類が存在する。熱対流はコアの冷却によって, 組成対流は内核の成長によってそれぞれ駆動され, 現在の地球磁場は主に組成対流によって生成されていると考えられている。一方, 内核が形成される以前は熱対流によるしかないわけだが, コアの温度・圧力条件下における鉄の電気伝導度・熱伝導度の値によれば, 熱対流を長期間駆動するにはエネルギーが不足し, 内核の形成年代も 10 億年前よりも若くなるなどの指摘が近年なされている。この結果, 熱対流によって地球磁場が長期間維持されるという考えには疑問が投げかけられている。

地球磁場が生成維持されている期間の 3/4 程度である約 30 億年間もの長期間, 内核の存在しない状態で地球磁場を維持するメカニズムは何であろうか。この問いに対する仮説として, (I) MgO の離溶による組成対流; (II) 底部マグマオーシャン (Basal Magma Ocean: BMO) の熱対流, 等が提案されている。仮説(I)はセンセーショナルではあったが, Mg の分配に温度依存性や酸素含有量依存性があるなど否定的意見がある。仮説(II)では地球磁場の生成過程として, 冥王代 太古代(約 40 - 25 億年前)では BMO, 原生代(約 25 - 5 億年前)では熱対流, それ以降は内核形成による組成対流という三段階のダイナモの遷移を提案している。BMO からコアへのダイナモ領域の遷移が起きたとすると, それは初期の地球内部進化史における一大イベントであり, その発生年代は内核の形成年代と同様に地球の熱史に対する強い拘束条件となる。遷移の影響は当然ながら地球磁場とその永年変化としてコア外部に現れると考えられるので, 古地磁気学的データに基づく検出と年代推定が期待される。しかしながら, これらを検証しようにもダイナモによって作られる磁場とその永年変化の特徴についての系統的な研究は十分にはなされていない。特に, BMO ダイナモについてはエネルギー論的な議論(エナジェティクス)のみで, ダイナモ理論に基づくダイナミクスの検討は為されていないのが現状である。

2. 研究の目的

BMO ダイナモは従来とは異なる第三のダイナモ仮説として, 初期の地球ダイナモに関する問題点を解決するポテンシャルを持つ仮説である。本研究では, BMO ダイナモを従来のエナジェティクスによるものからダイナミクスに基づく研究へと発展させる。これにより, ダイナモ領域の遷移を伴う 10 億年以上の超長周期ダイナモ進化をより定量的に議論することができるようにする。これが本研究の目的であり, かつ, 独自の視点である。

本研究では(1) BMO ダイナモ; (2) 内核が無いコアの熱対流によるダイナモ; (3)で考えられた, コアとマントルが磁氣的に結合した BMO ダイナモ, それぞれに対して系統的な数値ダイナモシミュレーションを行う。これらから, ダイナモ領域の遷移を議論し, 熱史計算とは独立な古地磁気学的データを用いて検証可能な指標の発見・作成を目指す。

さらに, (1) と(3) の比較によって, BMO が単独でダイナモとして機能し得るのか, またはコアマントルの結合が重要な要因であるのか, という BMO ダイナモの本質的性質を明らかにする。これは地球型惑星ダイナモの普遍的な理解へと繋がる独創性の高い目的であると考えられる。以上に加えて, 本研究によるアプローチは他の天体, 例えば, 過去の月のように熱対流で長期間維持することが難しいと考えられているダイナモの進化への適用・議論などの発展性がある。

3. 研究の方法

地球の中心核を模した回転球または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, BMO の対流, 磁場データを解析する。古地磁気学的な解析方法も利用することで観測データとの比較を可能にする。数値シミュレーションには九州大学情報基盤開発研究センターのスーパーコンピュータや高性能演算サーバシステムを用いる。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。

(1) BMO ダイナモの実現可能性を BMO で閉じた系でのシミュレーションによって検証する。BMO の厚さはせいぜい数百 km 程度であり, 半径 3480 km のコアに対して非常に薄い。理論的検討によると, このような場合はコアを完全導体と見なす薄い球殻としてシミュレーションを行えばよいことを確認している。薄い球殻でのダイナモは理論的にも非常に関心の高い問題である事から, BMO 領域の厚さをある程度変化させ, 各パラメータ(エクマン数, レイリー数等)に関する依存性を調査する。次年度以降の結果との比較のため, 地表に現れる磁場の時空間分布および振幅に関する解析を合わせて行う。

(2) 内核無しでの熱対流駆動型ダイナモの計算を行う。前年度と同様にシミュレーションを系統的に行い、地表に現れる磁場の時空間分布及び振幅を解析する。BMO ダイナモの解析結果との比較から、ダイナモ領域の遷移時に生じ得る磁場変動について検討する。BMO とコアが結合している場合のシミュレーションを開始し、比較を行う。

(3) 以下の3点に焦点をあてて、BMO 型、内核無し熱対流駆動型、BMO コア結合型それぞれのモデルによる結果をまとめる。必要な場合、追加のシミュレーションを随時行う。

- (i) 各ダイナモモデルにおける磁場生成・変動過程、永年変化について、古地磁気学的データとの比較が可能な形(仮想地磁気極とその分散等)で定量的評価を行い、その特徴を明らかにする。
- (ii) ダイナモ領域の遷移に伴う特徴的変動量とその検出可能性を明らかにして、超 10 億年スケールでの地球ダイナモの進化モデルを作成する。
- (iii) BMO 型、BMO コア結合型モデルの比較から、初期の地球ダイナモにおけるコア、BMO のダイナミクスを明らかにする。

4. 研究成果

冥王代 太古代といった古い時代における初期地球磁場の生成過程候補の一つと考えられている、マントル最下部に形成されるマグマオーシャン(底部マグマオーシャン)内で生じるダイナモ作用について、3次元 MHD ダイナモの数値シミュレーションを用いて初期的な検討を行った。線型モデルを用いた解析により、底部マグマオーシャン層は外核に比べて薄く、電気伝導度が低いことから、核と底部マグマオーシャンの拡散時間の違いを見積もった。その結果から、初手としてコアと底部マグマオーシャン間の電磁氣的結合を考慮しない分離型モデルを採用したダイナモシミュレーションを行うことにした。核を完全導体として扱うことで、核-マントルを電磁氣的に分離し、マグマオーシャンの厚さを核の半分とした。その結果、現在の地球磁場生成過程であるコアのダイナモ作用と同様な双極子型の磁場が生成・維持されることが確認された。

内部の磁場構造を調査した結果、特にトロイダル磁場について特徴的な構造を発見した。従来のモデルでは低緯度に強いパッチ状の磁場が赤道に関して反対称な形で分布することが知られていたが、本研究における結果ではそうしたパッチは存在せず、タンジェントシリンダー内部の低緯度域に強いトロイダル磁場が見られた(図1)。この構造はコアが完全導体であるために、自転軸に沿った磁力線がコア内部へ侵入出来ずにコア表面付近に溜まり、それらが東西方向に引き伸ばされることで生成されていると考えられる。こうした効果はダイナモ領域が薄くなるほど顕著になると推測されるので、冥王代 - 太古代といった年代の地球磁場は、現在と大きく性質の異なるダイナモによって生成・維持されていた可能性が示唆される。

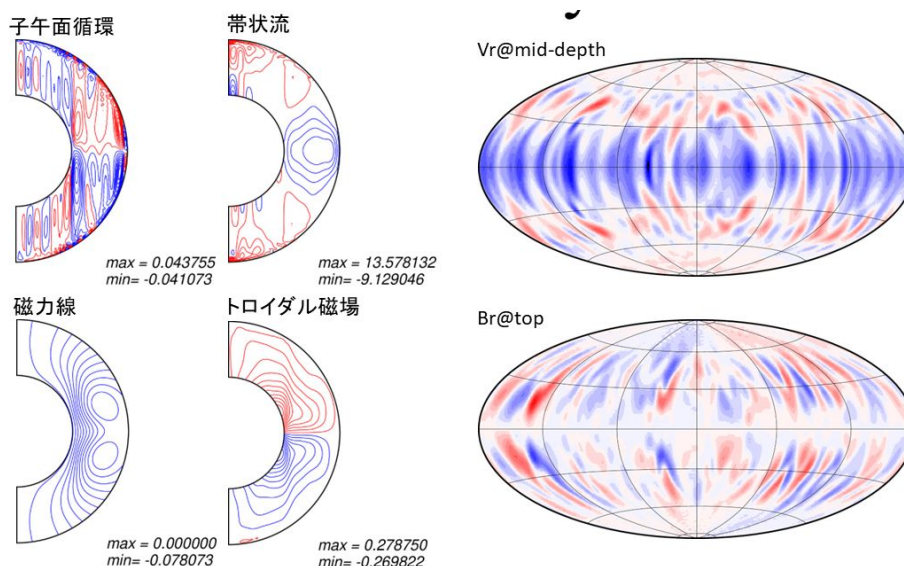


図1：底部マグマオーシヤンダイナモのシミュレーション結果。速度場構造(上)および、磁場構造(下)。(左): 子午面循環・磁力線;(中央): 带状流・トロイダル磁場;(右) 対流層中央での速度場動径成分分布・マグマオーシヤン表面での磁場動径成分分布。

初期地球磁場の生成過程を 3 次元の数値ダイナモシミュレーションを用いて調査した。底部マグマオーシャンの厚さと核半径は大きく異なり、核内部からの磁気エネルギー供給がマグマオーシャンダイナモの成立に重要であると考えられている。特に、差分回転によるオメガ効果が核内部の強いトロイダル磁場の生成過程として有望であり、核内で生成される磁場の形態と強さはマグマオーシャンダイナモに大きな影響をもつと期待される。本研究では核のダイナモが双極子的対称性を持つ解と四重極子的対称性を持つ解の発生条件および、その生成維持過程をキネマティックダイナモ問題を解いて調べた。古典的な流れ場を用いた場合四重極子的解が得られなかったことから、速度場には差分回転のエネルギーと対流のエネルギーが等分配された流れを用いた。速度場を固定したキネマティックダイナモ問題で定常解の探査を行った結果、双極子的解と四重極子的解に対する臨界磁気レイノルズ数が約 3 倍異なることが分かった。エネルギーのスペクトル解析を行った結果、いずれの解においても軸対称トロイダル磁場が卓越し、ポロイダル磁場からの寄与は小さかった（図 2）。ポロイダル磁場の生成過程について平均場理論に基づいて解析した結果、双極子的解についてはアルファ効果的過程で解釈が可能であった。一方、四重極子的解については非軸対称成分の寄与が大きいことから、簡単な平均場理論のみで解釈することは難しいことが明らかになった。

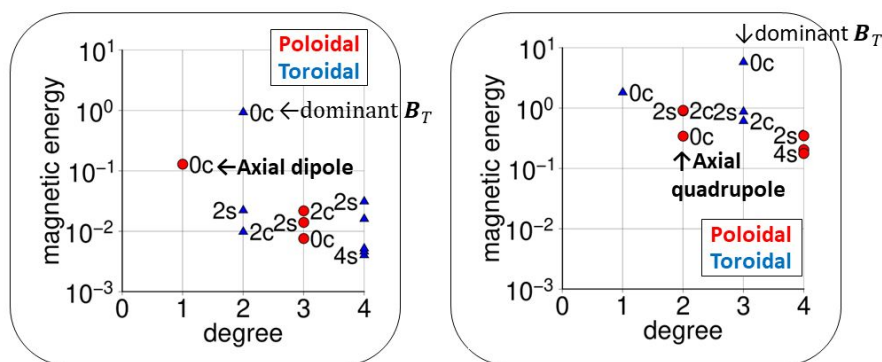


図 2 : 磁気エネルギースペクトル分布の次数依存性。(左): 双極子型解。
(右): 四重極子型解。赤がポロイダル成分, 青がトロイダル成分を示す。

核のダイナモが双極子的対称性を持つ解と四重極子的対称性を持つ解の発生条件および、その生成維持過程をキネマティックダイナモ問題および MHD ダイナモ問題の二種類を解くことによって調査した。底部からの浮力によって対流が駆動されるモデルを用いて、速度場、磁場の対称性、反対称性を強制し、対称性間の相互作用を制限する場合と制限を課さない場合に対して MHD ダイナモ計算を実施し、それぞれの結果を比較した。空間スペクトルの比較から、対称性の制限有と制限無の結果間には速度場および生成される磁場の構造に有意な差が見られた(図 3)。最も大きな違いが得られた場合では、制限有の場合には双極子型磁場が得られたのに対して、制限無の場合には半球型の特異な磁場が得られ、対称性間の非線型相互作用が磁場の形態の決定、速度場へのフィードバックに関して重要な役割を果たしていることが明らかになった(図 4)。本研究から初期の地球磁場の形態が非双極子的なものであった可能性があることが示唆される。

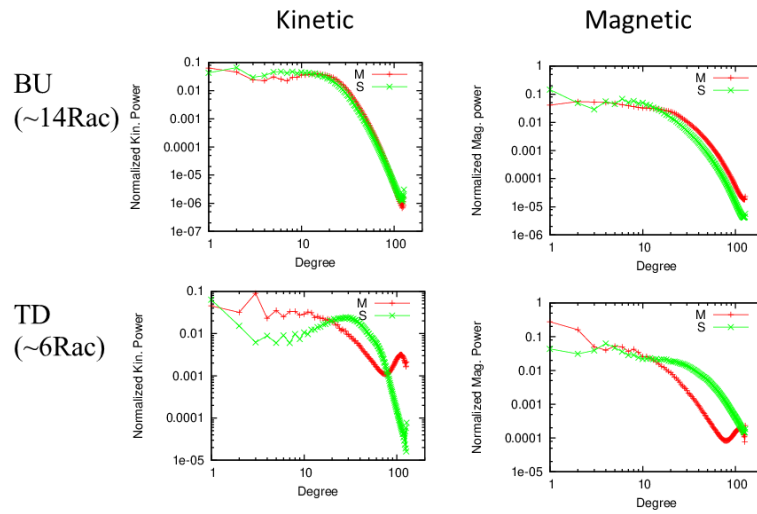


図3：エネルギースペクトル分布の次数依存性。(左)：運動エネルギー。(右)：磁気エネルギー。
 (上段)は下部加熱による対流モード,(下段)は一様シンク分布による対流モード。赤線は制限無し,緑線は制限有りの結果。

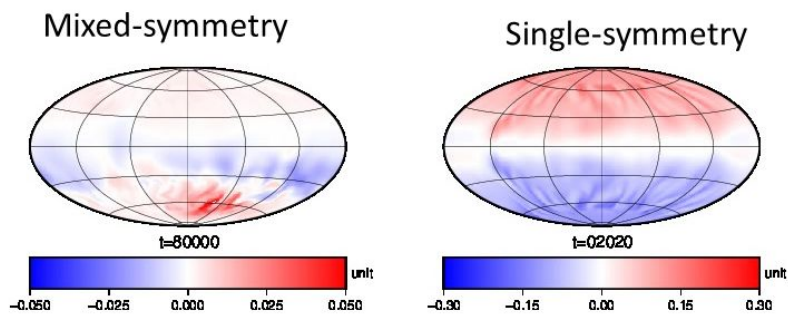


図4：マグマオーシャン表面での磁場動径成分分布。(左)：制限無しの結果。(右)：制限有りの結果。制限無しでは特異な半球ダイナモが得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋 太
2. 発表標題 Numerical study of dynamo action generating equatorially asymmetric magnetic fields
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 太
2. 発表標題 Recipes for anomalous planetary magnetic fields based on symmetry-antisymmetry interaction
3. 学会等名 惑星深部研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Futoshi Takahashi, Yuki Nonaka
2. 発表標題 On generation processes of the dipole/quadrupole-family magnetic field in kinematic dynamos
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋太、兵藤史、金嶋聡、清水久芳、綱川秀夫
2. 発表標題 A long-term evolution of a compositionally-driven dynamo: implications for a sudden decline in lunar paleointensity
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋太
2. 発表標題 On the relationship between dynamo action and symmetry properties about the equator
3. 学会等名 惑星深部研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Futoshi Takahashi, Hinami Taniguchi
2. 発表標題 Effects of driving mode of convection on a spherical dynamo action
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumi Hyodo, Futoshi Takahashi, Satoshi Kaneshima, Hisayoshi Shimizu, Hideo Tsunakawa
2. 発表標題 Termination of a lunar dynamo inferred from compositionally-driven dynamo models
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋 太
2. 発表標題 月のダイナモについて
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 地磁気・古地磁気・岩石磁気分科会 夏の学校
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋 太
2. 発表標題 A preliminary study of the Hadean geodynamo based on a Basal-Magma-Ocean-Dynamo hypothesis
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第150回総会及び講演会
4. 発表年 2021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