

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05270

研究課題名(和文) ダイナモ理論で明らかにする古地磁気永年変化と地球深部ダイナミクスの関係性

研究課題名(英文) Study of paleosecular variation in association with dynamics of the Earth's deep interior based on dynamo theory

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：MHDダイナモの数値シミュレーションを用いて、地球磁場の永年変化に関する研究を行った。その結果、コア-マントル境界下の安定成層については、地震学的に考えられているものよりも薄いほうが地球磁場の観測結果と整合的な結果を与えることが分かった。双極子磁場の逆転頻度を古地磁気永年変化モデルを用いて解析した結果、数値モデルと古地磁気学的データにおいて、モデルパラメータ同士に絶対値としては大きな差が見られるが、似通った変化のトレンドが確認された。この結果から、逆転頻度のような長周期トレンドを決定する共通のプロセスが、ダイナモモデルと地球ダイナモに存在することが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We have studied long-term/short-term geomagnetic secular variation using numerical models of MHD dynamo. Concerning thickness of a stably stratified layer beneath the core-mantle boundary, a thinner stably stratified layer is preferred to that with seismically inferred thickness, because strong attenuation of the magnetic field intensity and its secular variation through the layer is observed in numerical models. Parameter values of a paleosecular variation model derived from dynamo models show a trend similar to paleomagnetic data in spite of difference in its absolute values. The results suggest a common core dynamics in both numerical dynamos and the geodynamo determining a long-term trend such as polarity reversal frequency.

研究分野：地球惑星内部電磁気学

キーワード：地球ダイナモ コア 地磁気永年変化 安定成層 逆転頻度

1. 研究開始当初の背景

地磁気の時間変動は中心部の流体核(外核)における発電作用(ダイナモ)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的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。

火山岩を使用した近年の古地磁気学的研究では、古地磁気永年変化を太古代にまでさかのぼって復元することが可能になっている。古地磁気永年変化を定量的に評価する量として仮想地磁気極(VGP: Virtual Geomagnetic Pole)の角度分散が用いられる。VGPの角度分散はサンプルの緯度に対して明瞭な依存性を示すことが知られている。このVGP角度分散の緯度依存性は双極子型の赤道面对称性を持つ成分(Dipole Family)と四重極子型の対称性を持つ成分(Quadrupole Family)からの寄与の線型結合によって良く表現することができ、Model Gとして広く使われている。VGP角度分散で見た古地磁気永年変化は扱う年代によって変動し、過去5百万年間(0-5 Ma)や白亜紀超磁極期中(80-110 Ma)、白亜紀超磁極期前(110-195 Ma)とでその様子が大きく異なる。古地磁気永年変化の緯度依存性の大きさは双極子磁場の安定性との関連性が示唆されており、双極子磁場の逆転が全く無かった白亜紀超磁極期間は緯度以前性が著しく大きい。原生代初期から太古代(2.45-2.82 Ga)における古地磁気永年変化も同様に大きな緯度依存性を示しており、その時代の双極子磁場の極性が安定であったことが示唆されている。理論的には、内核が存在することによって双極子磁場がより安定化するとされている。現在の見積もりでは内核の年齢は高々10億年程度であり24.5-28.2億年前に双極子磁場が白亜紀超磁極期と同程度に安定であったとは、ダイナモ理論からは考え難い状況である。

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、第一に、各種要因に対する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、双極子磁場の安定性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、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。第二に、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。各年代毎の古地磁気永年変化を最も良く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。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積極的・系統的に結び付け、更に地球ダイナモとの関連付けを試みる事が本研究の主たる目的である。

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う。比較的短周期な変動については、数年~数十年の時間スケールの現象について解析を行い、数値ダイナモモデルのダイナミクスを検討する。長周期永年変化に関しては、得られた磁場データに対して古地磁気学的手法を適用して解析する。内核のサイズ、半球構造、電気伝導度、コア・マントル境界の熱化学条件、安定成層、核の二重拡散対流等を考慮した場合に得られる古地磁気永年変化をVGPの角度分散として定量化し、Model Gを用いてモデル化する。Model Gのパラメータとシミュレーション結果とを比較し、Dipole FamilyとQuadrupole Familyを用いるModel Gによる古地磁気永年変化を解釈することの妥当性を検討する。その後、Model Gのパラメータと逆転頻度、各種要因との関係性を評価する。

4. 研究成果

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、数値ダイナモシミュレーションを用いて基礎となる結果が得られた。短周期変動に関しては、コア-マントル境界(CMB)下に外核の10%程度の厚さを持つ安定成層を与えることによって有意に減衰することが確認された。この結果は地震学的な観測から推定される厚さの安定成層が存在することを再考する必要があることを示唆する。一方で、地球磁場観測から推定される程度の厚さ(~170 km)の安定成層を与えた場合、短周期成分に有意な減衰は見られなかった。以上の結果より、CMB下の安定成層については、地震学的に考えられているものよりも薄いほうが地球磁場の観測結果と整合的な結果を与えることが分かった。

地磁気ジャークは内部に起源を持つ地球

磁場の短周期変動として良く知られているが、その成因は明らかになっていない。ダイナモシミュレーションを利用することで、ジャーク発生のメカニズムに迫ることが出来る可能性があると考え、本研究ではジャークのような磁場変動が数値ダイナモモデルにおいて確認できるかについて検証を行った。解析結果の1例を図1に示す。これはコア-マントル境界上のある地点における磁場東向き成分とその1階微分(SV)、2階微分(SV)及び2階微分の差分(SA)である。SAの増減が急峻に見られるところでジャークが発生している可能性があると考えられ、ダイナモシミュレーションによってジャーク様磁場変動が検出された初めての例である。しかしながら、変動の時間スケールが実際の地球磁場とは異なることには注意が必要である。エクマン数や磁気プラントル数といったパラメータの違いに起因すると推測される。

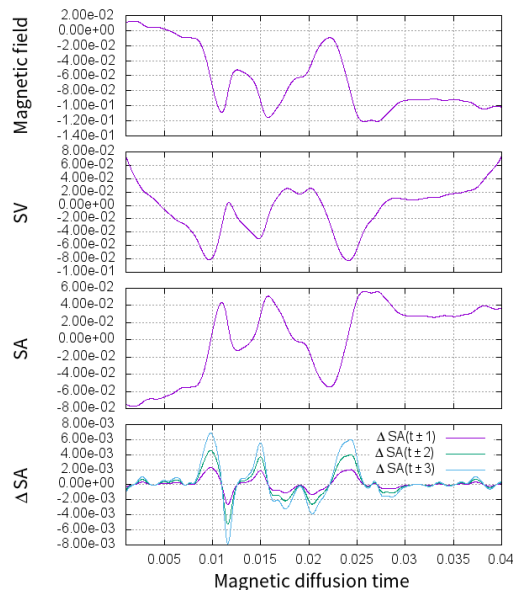


図1：コア-マントル境界上のある地点における磁場東向き成分、永年変化(SV)、永年加速(SA)、SAの差分(ΔSA)。

長周期変動については数百万年間程度の長時間シミュレーションを数例行い、双極子磁場の逆転頻度を古地磁気永年変化モデル(Model G)を用いて解析した。図2に示すのは軸双極子モーメント、双極子の傾き、極性時間スケール、逆転頻度の時系列データの1例である。この例では過去5百万年間の地球磁場の逆転頻度と同様な値が得られている。この時系列データをModel Gを用いて解析し多結果、数値モデルと古地磁気学的データにおいて、モデルパラメータ同士に似通った変化のトレンドが見られることが確認された。その一方で、絶対値としては大きな差があることも確認できた(図3)。

地球以外に安定成層の存在が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

モ作用及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仮定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再現することに成功した。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の影響が大きいことが分かった。

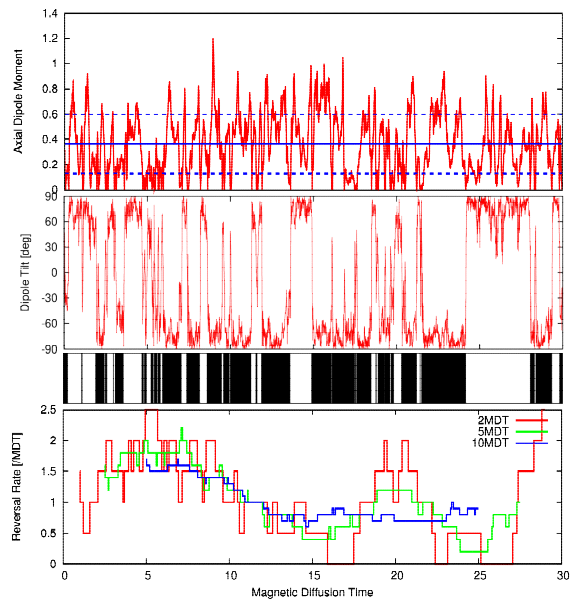


図2：ダイナモシミュレーション結果の1例。上から軸双極子モーメント、双極子軸の傾き、極性時間スケール、移動平均を取った逆転頻度を示す。

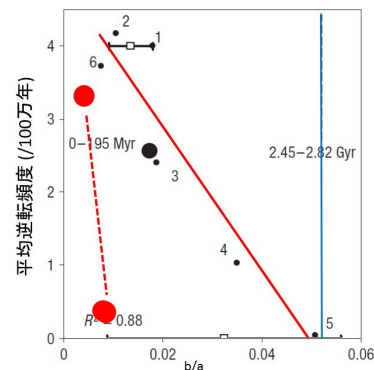


図3：ダイナモシミュレーションによるmodel G パラメータと古地磁気データとの比較。Biggin et al. (2008) に加筆。赤丸と破線がダイナモモデルによる結果、黒丸と実線が古地磁気データによる結果を表す。

最後に、国際共同研究の成果として数値ダイナモのベンチマークモデルの作成について記す[論文]。本研究に用いた数値ダイナモコードはベンチマークモデルを高精度で再現することが確認され、数値コードおよび、得られた結果の信頼性を示すことができ

たと考える。

<引用文献>

Biggin, A. J., Strik, G. H. M. A., Langereis, C. G., Evidence for a very-long-term trend in geomagnetic secular variation, *Nature Geosci.* 1, 395-398, 2008

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 6 件)

H. Matsui, E. Heien, J. Aubert, J. M. Aurnou, M. Avery, B. Brown, B. A. Buffett, F. Busse, U. R. Christensen, C. J. Davies, N. Featherstone, T. Gastine, G. A. Glatzmaier, D. Gubbins, J.-L. Guermond, Y. Hayashi, R. Hollerbach, L. J. Hwang, A. Jackson, C. A. Jones, W. Jiang, L. H. Kellogg, W. Kuang, M. Landeau, P. H. Marti, P. Olson, A. Ribeiro, Y. Sasaki, N. Schaeffer, R. D. Simitsev, A. Sheyko, L. Silva, S. Stanley, F. Takahashi, S. Takehiro, J. Wicht, and A. P. Willis, Performance benchmarks for a next generation numerical dynamo model, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 17, 1586-1607, doi:10.1002/2015GC006159, 2016. 査読有 (主著者以降アルファベット順).

[学会発表](計 48 件)

F. Takahashi, Effects of a thin stably stratified layer below the core mantle boundary on the dynamo action in the core, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari, Japan.

F. Takahashi, Effects of a stably stratified layer on dynamos driven by double diffusive convection, AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, U.S.A, 2016.

(Invited) F. Takahashi, and Masaki Matsushima, Mercury's magnetic field model required to infer core dynamics, BepiColombo 14th Science Working Team Meeting, Tokyo, Japan, 2016.

(Invited) F. Takahashi, Dynamos driven by double diffusive convection with a stably stratified layer and inhomogeneous core-mantle boundary heat flow, The 15th symposium of Study of the Earth's Deep Interior, Nantes, France, 2016.

F. Takahashi, Long-term secular variation in dynamo simulations, International Session of JpGU Meeting 2016,

Makuhari, Japan, May 2016.

(Invited) F. Takahashi, Numerical dynamo simulations and magnetic field observations of the Earth, Moon and planets to infer core dynamics, 26th IUGG General Assembly, Czech, Prague, 2015.

F. Takahashi, Dynamo model explanation for Mercury's unusual magnetic field, MESSENGER-BepiColombo Joint Science Meeting, Berlin, Germany, June 2015.

[図書](計 2 件)

高橋 太, コアダイナミクスシミュレーション, 鳥海光弘, Simon Wallis, 入船徹男, 岩森光, 小平秀一, 小宮剛, 坂口秀, 鷺谷威, 末次大輔 (編集), 図説 地球科学の事典, 192-193, 朝倉書店, 2018.

高橋 太, 惑星固有磁場, 井田茂, 田村元秀, 生駒大洋, 関根康人 (編集), 系外惑星の事典, 262-263, 朝倉書店, 2016.

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/ftakahashi/igeomag/>

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし