

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740311

研究課題名(和文)地球の自転速度の変動が、地球外核対流と地球磁場に与える影響を知る

研究課題名(英文)Studies of effects of rotational speed change on core convection and geodynamo

## 研究代表者

宮腰 剛広 (MIYAGOSHI, Takehiro)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員

研究者番号：60435807

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：氷期 間氷期サイクルの気候変動により生じると考えられる自転速度変動を考慮した地球ダイナモシミュレーションを行い、地球外核対流と地磁気が自転速度変動によりどのような影響を受けるかをスーパーコンピュータによる数値シミュレーションで調べた。特に約2万年の周期を持つ変動(磁場散逸時間でありかつミランコビッチ周期の一つにも非常に近い)について詳しく調べた。その結果、地磁気の変動が生じる事が分かり、またその過程もほぼ明らかになった。特にジュール散逸の変動が重要である。またこれに伴いコア マントル境界の熱流量も変動する事が分かった。

研究成果の概要(英文)：We performed numerical geodynamo simulations including rotational speed variation associated with climatic changes with ice and non-ice ages, and studied the effect of rotational speed variation on the core convection and geodynamo. We focused on the variation of about twenty thousand years (which is the magnetic diffusion time and nearly equal to one of the Milankovitch cycle). The magnetic field variation is caused by it, and we also found the process of the magnetic field variation. The Joule heating is important for the magnetic field variation. Also we found that the heat flux at the core-mantle boundary changes by rotational speed variation.

研究分野：地球内部ダイナミクス

キーワード：地球ダイナモ 地球回転変動 地磁気変動 数値シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

地磁気の強さは一定不変ではなく、さまざまな時間スケールで変動している事が、海洋堆積物などの古地磁気記録から明らかになってきた。特に、数万年の周期において、数十%というかなり大きな変動が生じている事が明らかになってきた。

地磁気は高エネルギー宇宙線が地表に到達する事や、太陽風が地球大気に直撃して散逸する事を防ぎ、地球のハビタブル環境を維持する役割を果たしている。この保護効果は地磁気の強さに依存するため、地磁気強度の変動を予測する事は地球環境の理解の一助となる可能性がある。しかしながら、これまでに明らかになってきた地磁気変動でメカニズムがはっきりと分かったものはまだない。

これまで、地磁気変動の原因は、主に地球内部(外核内)に起因するものであると考えられてきており、外核外を起源とする原因については殆ど考察された事が無かった。しかし浜野(1992)[引用文献]は、気候変動(氷期-間氷期サイクル)と地磁気変動のパターンに類似性がある事を見出し、さらにこれらの説明として、氷床の消長により引き起こされる地磁気変動を提案した。氷期-間氷期サイクルに伴い、大陸氷床の消長が生じると、氷期では高緯度地域に氷床が形成される事になり、これは地表面の水の質量が自転軸周囲に偏った事になり慣性モーメントが減少し、自転速度が増大する。間氷期は逆の事が起こり自転速度が減少する。ダイナモ作用を通じて地磁気を生み出している地球の外核内の液体金属の運動は、自転の影響を極めて強く受ける。例として自転により生じるコリオリ力に対する、外核内の液体金属の粘性力の比(Ekman数と呼ばれる無次元パラメータ)は、たったの $10^{-15}$ であり、コリオリ力の影響が非常に強い事が分かる。そのため自転速度の変動は、ごく僅かでも外核内の液体金属の運動に大きな影響を与え、結果としてその運動が引き起こしているダイナモ過程および地磁気にも大きな影響を与える可能性がある。

しかしながら、これまでに自転速度変動を考慮した地球ダイナモシミュレーション研究は行われた事が無かった。そこで我々は、世界で初となる自転速度変動を考慮した地球ダイナモシミュレーションを行い、自転速度の変動が外核内対流や地球ダイナモ過程、地磁気に与える影響を調べた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでにまだ行われた事のない、自転速度変動を考慮した地球ダイナモシミュレーションを行って、地球コア内の対流や地球ダイナモ過程、地磁気の影響を受けるかどうか、受けるとすればそれはどのようなものかを調べる事である。

### 3. 研究の方法

地球の外核内の液体金属の振る舞いは、電磁流体力学の方程式に支配されている。これは8つの独立成分(圧力、密度、磁場ベクトル3成分、流れの速度ベクトル3成分)を持つ連立非線形偏微分方程式系である。これをスーパーコンピュータを用いた大規模数値シミュレーションで解く事により、コア対流、地球ダイナモ過程、地磁気の振る舞いを調べる。外核は、内核とマントルに挟まれた球殻であり、ここに計算格子を設定して電磁流体力学方程式を解く。計算には海洋研究開発機構に設置されているスーパーコンピュータである地球シミュレータを用いた。

ベースとなる地球ダイナモシミュレーションモデルは、陰山聡教授(神戸大学)によって開発されたYin-Yangダイナモモデル[引用文献<sup>2</sup>]を用い、自転速度変動が扱えるように拡張した。

浜野(1992)[引用文献]においては、ミランコピッチ周期により引き起こされる数万年~数十万年の周期を持つ氷期-間氷期サイクルによる地磁気変動について考察している。そのため本研究においても、自転速度変動の周期や地磁気変動の時間スケールにおいて、ミランコピッチ周期を念頭に置いた計算を行い、地磁気変動のメカニズムを調べた。

### 4. 研究成果

本研究では特に、地磁気の散逸時間と同程度の2万年の周期(これはまたミランコピッチ周期の一つに非常に近い周期でもある)の自転速度変動が生じた場合について、地球ダイナモシミュレーションを行い、外核内の対流や地磁気に与える影響を調べた。Ekman数は $1.9 \times 10^{-5}$ 、対流の活発さを表す無次元パラメータであるRayleigh数は $1.5 \times 10^8$ 、プラントル数(=動粘性率/熱拡散率)および磁気プラントル数(=動粘性率/磁気拡散率)はそれぞれ1とした。また自転速度変動の振幅は2%とし、正弦波形の変動とした。計算は約20万年分を行った。

シミュレーションの結果、自転速度変動はまず経度方向の流れ成分に影響を与える事が分かった。この流れの乱れの振幅は、自転速度変動が無いとした場合の対流速度と同程度であった。浜野(1992)[引用文献]の見積もりでは、氷床による自転速度変動が生じた場合、コア内に生じる流れの乱れの大きさは、元々の対流速度と同程度から10倍程度と見積もられているので、この点でこの見積もりの場合にほぼ近い流れの乱れが生じた事になる。

この流れの乱れの元で、外核内の全磁気エネルギーが20~30%変動し、古地磁気学から得られている変動とほぼ同じ位の変動が生じる事が分かった。また、地磁気のダイポール成分も、磁気エネルギーと同様変動するが、両者の強さがピークになる(変動の山の)時間と弱くなる(変動の谷の)時間で、磁場の

ダイポール成分とより高次のモード成分の強さを比較した所、変動の山の時間ではダイポール成分が高次モード成分と比べて相対的に強く、変動の谷の時間では逆に高次モード成分がダイポール成分より相対的に強くなる事が分かった。地磁気エクスカッションとして知られる現象(地磁気が非常に弱くなるが、極性の反転は生じずまた元の強さ程度に回復する)の際に、このような特徴が見られており、シミュレーションによって地磁気エクスカッション現象の特徴を捉えられている可能性がある。

さらに、地磁気変動に伴い、コア マントル境界の熱流量が 10%程度変動する事が分かった。これは事前に全く予想していなかった現象であり、数値シミュレーションを行う事で初めて明らかになった。

自転速度の変動により、どのように地磁気変動が生じているのかを調べるため、コア内の全磁気エネルギーが増加している時間と減少している時間各々について、全磁気エネルギーを変化させる二つの要因である(i)対流エネルギーから磁気エネルギーへの変換率(ii)磁気エネルギーから熱エネルギーへの変換率(ジュール散逸)を調べた。通常予想されるのは、磁気エネルギーが増大している時は(i)が大きく、減少している時は(i)が小さくなる事であるが、シミュレーション結果を解析すると、磁気エネルギーが増大している時よりも減少している時の方が、(i)が大きくなる事が分かった。つまり全磁気エネルギーが減少している時間にもかかわらず、対流は磁気エネルギーが増大している時間よりもより活発に磁場を増幅している事になる。ここで鍵となる重要な量が、(ii)のジュール散逸である。ジュール散逸の時間変化を調べてみると、全磁気エネルギーが増大している時間から減少している時間にかけて、こちらも増大しているのだが、その増大は(i)の量を上回る事が分かった。このため、磁気エネルギーが増大している時間は(i)-(ii)が正となり、減少している時は(i)-(ii)が負となる。以上より、自転速度変動による地磁気の変動においては、対流エネルギーから磁気エネルギーへの変換率よりも、ジュール散逸の変化が重要な役割を果たしている事が分かった。またコア-マントル境界の熱流量の時間変動と、ジュール散逸の時間変動のグラフを比較してみると、(ジュール散逸の変動の方が細かい振動が多いものの)全体の形や各々がピークに達する時間はほぼ同じである。ここで各々のピークの値において、ジュール散逸により発生する熱量はコア-マントル境界の熱流量の約 3 割を占める事が分かった。このように、ジュール散逸はコア-マントル境界の熱流量の変動の原因としても一定の役割を果たしている事が分かった。

ジュール散逸項と、対流エネルギーから磁気エネルギーへの変換率の項を比較してみ

ると、前者は対流渦の空間スケールの 2 乗に反比例するのに対し、後者は 1 乗に反比例する。つまりジュール散逸の方が、対流渦の空間スケールの変化の影響を遥かに大きく受ける事になる。磁気エネルギーが増大している時間と減少している時間それぞれにおいて、電流および磁場の値は分かっている。そのためジュール散逸の変化を説明するためにどの位の対流渦のスケールの変化が必要となるかは計算する事ができ、それは約 10%の変化が必要という事が分かった。各々の時間において、対流渦の経度方向のモード数からサイズを計算してみると、確かに約 10%減少している事が分かった。

以上より、自転速度変動による地磁気変動のプロセスをまとめると、まず自転速度変動は対流の経度方向の流れを変化させる。またこれに伴って対流渦のスケールが減少していく。ジュール散逸と、対流エネルギーから磁気エネルギーへの変換率では、対流渦のスケールへの依存性が異なり、前者が後者よりもずっと大きく影響を受けるため、対流渦のスケールが大きいうちは対流エネルギーから磁気エネルギーへの変換率がジュール散逸を上回って磁気エネルギーが増大する事になるが、ある大きさ(約 10%減少)まで対流渦が小さくなったところでこの大小関係が逆転し、ジュール散逸が上回るため、磁場の減少が引き起こされる事が分かった。

また、Ekman 数を約 10 倍にした計算も行った。この場合、自転速度変動の振幅の大きさが元のモデルと同じ(2%)では、磁場の変動が生じない事が分かった。さらに、振幅をこの 3 倍にしても同様に磁場の変動が生じない事が分かった。現在モデルで用いている Ekman 数は、現実の地球外核内のものよりも大きな値を用いている。これは、現実の Ekman 数における磁気乱流を計算する事は、現在のスーパーコンピュータの能力を遥かに超えているためである。この結果から示唆される事は、磁場変動の程度は Ekman 数に依存し、Ekman 数が小さいほどより小さな振幅でも磁場変動が生じる事を示唆している。これは、Ekman 数が回転の効果を表す無次元パラメータである事からも直観的に理解出来る。3 倍までは磁場変動が起こらないという事が分かったが、何倍にすれば磁場変動が生じるのかという所までは押さえられなかった。これが分かれば、もう 1~2 通り Ekman 数を変化させた結果を付け加えて、Ekman 数と磁場変動に必要な振幅の関係をグラフに書く事により、実際の Ekman 数のもとではどうなるかをその外挿として理解できる可能性がある。

得られた研究成果の一部は、物理学分野で最も権威のある雑誌の一つである Physical Review Letters(アメリカ物理学会発行)に掲載された。また掲載号の「Highlighted Articles」の一つに選ばれた。本論文の内容について海洋研究開発機構からプレスリリースが行われ、多数の新聞等に成果が紹介さ

れた。

<引用文献>

- 1 浜野 洋三、科学、vol.62, pp. 14-18, 1992.
- 2 Kageyama, A., and Sato, T., *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5, Q09005, 2004.

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 1 件)

- 1 Takehiro Miyagoshi & Yozo Hamano, "Magnetic Field Variation Caused by Rotational Speed Change in a Magnetohydrodynamic Dynamo", *Physical Review Letters*, Vol. 111, Number 12, Article No. 124501, 2013, doi:10.1103/PhysRevLett.111.124501

[学会発表](計 6 件)

- 1 Takehiro Miyagoshi and Yozo Hamano, "Numerical Studies of Core Convection, Geodynamo, and Geomagnetic Field Variation with HPCs", AOGS (Asia Oceania Geosciences Society) 11th Annual Meeting, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Hokkaido, Japan, 01 Aug 2014
- 2 宮腰剛広、浜野洋三、"Geomagnetic field variation caused by length-of-day variation associated with glacial cycles", SEDI (Study of the Earth's Deep Interior) Pre-Symposium 2013, 湘南国際村センター、神奈川県三浦郡葉山町、2013 年 9 月 28 日
- 3 宮腰剛広、浜野洋三、「HPC による地球ダイナモシミュレーション研究」、日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (「HPC と固体地球科学の未来」セッション)、幕張メッセ国際会議場、千葉県千葉市、2013 年 5 月 20 日
- 4 Takehiro Miyagoshi and Yozo Hamano, "Magnetohydrodynamic numerical simulation of geodynamo with length-of-day variation", American Geophysical Union Fall Meeting 2012, Moscone Center, San Francisco, USA, 05 Dec 2012
- 5 宮腰剛広、浜野洋三、"Magnetohydrodynamic numerical simulation of geodynamo with length-of-day variation", 地球電磁気・地球惑星圏学会第 132 回総会・講演会、札幌コンベンションセンター、北海道札幌市、2012 年 10 月 23 日
- 6 宮腰剛広、浜野洋三、「自転速度変動により生じる地磁気変動の MHD ダイナモシミュ

レーション」、日本流体力学会年会 2012、高知大学、高知県高知市、2012 年 9 月 16 日

[その他]

ホームページ等

[http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20130911/](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20130911/)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮腰 剛広 (MIYAGOSHI, Takehiro)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部  
ダイナミクス研究分野・主任研究員  
研究者番号：60435807