

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月30日現在

機関番号：82706  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2010～2011  
 課題番号：22740301  
 研究課題名（和文） 自転速度の非定常性及び境界上の拡散率の非一様性を取入れた地球ダイナモモデルの構築  
 研究課題名（英文） Development of geodynamo model with length-of-day variation and non-uniform of diffusion rate at boundary  
 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・地球内部ダイナミクス領域・研究員  
 研究者番号：60435807

研究成果の概要（和文）：地球自転速度の変動が地球磁場変動を生じさせる可能性が指摘されているが、これまで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てこなかった。本研究ではこの効果を考慮したシミュレーションを行い、その結果自転速度変動の振幅よりずっと大きな変動が磁場に生じる事、自転速度変動と磁場変動は同位相ではなくずれている事、自転速度変動周期の違いにより磁場変動の様子には違いが現れる事等が分かった。

研究成果の概要（英文）：Correlation of geomagnetic field variation with length-of-day variation has been pointed out. However, there are no geodynamo models which take an effect of length-of-day variation into consideration. We have done geodynamo simulations which can deal with length-of-day variation. We found magnetic field variation arises and its amplitude is larger than that of length-of-day variation. There is a phase gap between length-of-day variation and geomagnetic field variation. We also found magnetic field variation is affected by the period of length-of-day variation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：固体地球物理学、太陽物理学、大規模計算機シミュレーション  
 科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学  
 キーワード：地磁気変動、地球回転変動、地球ダイナモ

1. 研究開始当初の背景

地球の磁場の強さは常に一定ではなく、さまざまな変動が見られる。最近数十万年の間では、数万年周期で数十%ほどの磁場強度変動が見られる。一方最近百数十年程の間では、1%程度の変動が見られる。

これらの磁場変動は、地球の自転速度変動により生じているという説が提唱されている(e.g., 浜野, 科学 vol.62, pp.14-18, 1992)。

数万年周期以上の変動については、ミランコビッチ周期による気候変動と地球磁場変動の関係が指摘されている。ミランコビッチ周期で地表が太陽から受け取る日射量が変動すると、氷期-間氷期のサイクルが生じる。氷期時は極付近に水が氷結して集中し、間氷期にはそれが融解するため、地球表面上で質量分布の変動が生じる。これはマンツルの慣性モーメントを変化させ、その結果地球の自

転速度が変化し得る。この変動は地球外核内の液体金属の対流にも影響を及ぼす。浜野(1992)の見積もりによると、外核対流が受ける変動の大きさは外核対流の対流速度と同程度から約 10 倍程度と、外核対流にとって非常に大きなものである。外核対流は地球磁場を生み出しているため、外核対流の変動はそのまま地球磁場の変動に直結し得る。この過程は、人類にとって身近な気候変動という現象と、普段は殆ど意識する事のない地球深部の外核の対流、そして地球磁場が直接に結びついて変動するという点でも興味深いものである。さらにこの過程は地球表層から外核への 1 方向だけではなく、地球磁場の変動が地球大気への宇宙線の入射量を変化させ、それが雲の形成のされやすさに影響し、気候変動に影響を与える可能性がある。つまり双方向で相互作用のある過程である可能性が考えられる。

しかしながらこれまでに、地球の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は、国内外で行われていない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、自転速度変動を扱う事の出来る地球ダイナモモデルを構築し、スーパーコンピュータによるシミュレーションによって自転速度変動が地球外核の対流に与える影響、及び地球磁場に生じる変動を詳しく調べる事である。

## 3. 研究の方法

地球磁場は地表面から地下 2900km 以深に位置する外核における液体金属の対流により生み出されている。本研究目的の達成のためには、外核の液体金属の対流運動とそれによって生み出される磁場との相互作用を計算する必要がある。外核は直接覗いて観察する事が出来ず、対流運動についての直接的な観測情報は地上からは殆ど得る事が出来ない。そのため、液体金属の対流と磁場との相互作用を記述する基礎方程式(電磁流体力学方程式)を直接解いて現象を調べる。この方程式は、8つの独立変数(圧力または温度、密度、流れベクトル 3 成分、磁場ベクトル 3 成分)を持つ連立非線形偏微分方程式であり、解析的な取扱いはほとんど不可能である。そのため数値シミュレーションによる解析が非常に有効なものとなる。しかしながら、外核の液体金属は極端な物理状態に置かれており、数値シミュレーションを困難なものにしている。特に粘性率が低く、レイノルズ数は  $O(10^8)$  程度と推定されている。すなわち強い磁気乱流状態にあるため、計算には高い解像度が必要となる。そのため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「地球シミュレータ 2」を使用し、

大規模数値シミュレーションを行った。

計算モデルには研究代表者が以前より用いてきた、神戸大学の陰山聡教授が開発したインヤン格子ダイナモモデル(Kageyama and Sato, 2004, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5, Q09005)をベースとして用いた。本モデルはこれまでに低粘性領域の地球ダイナモの解析でも実績を挙げている(Kageyama et al., 2008, *Nature*, 454, 1106, Miyagoshi et al., 2010, *Nature*, 463, 793)。本モデルをベースとして、自転速度変動の効果を含むようにモデルを拡張した。(境界上の熱拡散率等の非一様性についても取り入れる予定だったが上記モデルの計算が予想以上に大規模かつ結果が複雑なものになり研究に時間を要したため取り入れられず、今後の課題である。)

インヤン格子は、球を合同な二つの領域に分割してそれぞれに格子を張り、お互いを組み合わせる事で球全体を覆う格子系である。領域分割は球の中緯度部分をくりぬいた形(野球ボールを縫い目に沿って分割したような形)となる。この格子系を用いる事により、通常の球座標格子で生じる困難を回避し、計算効率を大きく上昇させる事が可能となる。通常の球座標格子では、赤道付近と極域付近で格子幅が大きく異なり、極域付近に格子が集中するのでその微小な格子幅で 1 ステップあたりの積分時間が決まってしまう。計算全体の精度としては赤道付近の格子幅しかないにもかかわらず、極域への無駄な格子集中のため計算効率が著しく損なわれるという問題があった。インヤン格子では、極域を避けた 2 領域で球全体を覆うため、どこの格子幅もほぼ赤道付近と同程度となり、計算効率が飛躍的に高まる。計算には差分法を用い、空間微分は中心差分を採用し、時間積分には 4 次精度ルンゲ=クッタ法を用いた。

以上のインヤン格子ダイナモモデルを、自転速度変動を扱えるように拡張した。自転速度変動が存在する場合、電磁流体力学方程式中の運動方程式の力の項に 1 点修正が加わり、さらに全く新しい項が 1 つ付け加わる。コリオリ力項の中の自転速度は従来のダイナモモデルでは定数として扱われてきたが、時間変動するように修正される。さらに、密度に”位置ベクトル”と”自転速度の時間微分”の外積を掛けた全く新しい項が加わる。これは自転速度が変化(加速もしくは減速)する時に、媒質が元の運動状態に留まろうとする働きである。例えば自転が加速している時(時間微分が正)、この新しい項の符号は負となり、加速に対して元の運動状態に留まろうとする働きであると解釈出来る。減速の場合も同様である。

ミランコビッチ周期は複数の周期を持つものであるが、いきなり複数の周期を導入すると結果の解析が難しくなる上に変動の物

理の本質が掴みづらくなる為、自転速度の変動は単一の周期のみ持つものとした。関数系は正弦波で与えた。変動の周期および振幅はフリーパラメータとし自由に変えられるようにした。本研究では振幅は自転速度の2%とした。周期については長周期と短周期の場合について計算を行った。長周期は外核の磁場散逸時間とほぼ同じとした。これは地球では約2万年に相当する。この長さはミランコビッチ周期の1つでもある。短周期はその百分の一とした。同様に地球では約200年に相当する。

外核-内核境界と外核-マントル境界には温度差がある。これと動粘性及び熱拡散係数、システムサイズなどで決まる無次元数(レイリー数)が十分に高ければ、球殻内で液体金属の熱対流が発生する。さらに微少な磁場の擾乱を与える。対流が十分に強ければ、電気抵抗による磁場の散逸に抗して液体金属対流が磁場を増幅及び維持する事が可能となる。本モデルでは微小擾乱磁場の増幅と強磁場の形成及び維持までのダイナモ過程を全て一貫して解き、変動を解析している。

#### 4. 研究成果

計算の無次元パラメータについてであるが、レイリー数(システムサイズの熱境界層厚さに対する比の3乗、流れスケールと対流駆動の強さを現す)は $1.5E8$ 、エクマン数(=粘性力/コリオリ力)は $1.9E-5$ とした。格子点数は255(動径方向)×130(緯度方向)×386(経度方向)×2(Yin and Yang)である。プラントル数(=運動拡散係数/熱拡散係数)及び磁気プラントル数(=運動拡散係数/磁気拡散係数)は共に1とした。

まず自転速度変動が無い場合に上記パラメータでどうなるかを調べた。その結果対流により磁場が成長し、充分時間が経過した後では外核内の磁気エネルギーが対流運動エネルギーよりも数倍大きくなり、充分強いダイナモが維持される解が得られた。磁場のダイポール成分も他の高次モードに比べて強くなった。エクマン数が低い事により回転効果が強く働き、対流構造は自転軸方向にそってほぼ一様な構造となった。以上のように、強いダイナモが発生し前提条件として問題の無い解が得られた。

次に長周期の自転速度変動が存在する場合のシミュレーションを行った。対流と磁場が十分に発達した状態から変動を与えた。その結果、外核内の磁気エネルギー及び対流運動エネルギーに変動が生じる事が分かった。磁気エネルギーの変動幅は約30%であり、自転速度変動(2%)よりずっと大きい。対流運動エネルギーの変動は20%程度である。磁気エネルギーと対流運動エネルギーは同位相で変動するのではなく、位相が $\pi$ 異なる(磁気

エネルギーが最大の時に対流運動エネルギーが最小になる)。

また、磁気エネルギーと自転速度変動の位相も異なる。位相の違いはちょうど $\pi/2$ である(よって磁気エネルギーが最大もしくは最小となる時間と、自転速度変動のそれらは一致しない)。自転速度が最も急激に減少している時に磁気エネルギーは最大となる。このため、自転速度の時間微分との比較では、磁気エネルギー最大の位相と自転速度変動微分の最小の位相が一致する。自転速度変動の微分は「3. 研究の方法」で述べたように、運動方程式中に新たに現れる重要な量である。自転速度変動と磁場変動の位相が一致しないという事実は、氷床消長の時間変動と地磁気変動を比較して調べる上で重要な手掛かりになるのではないかと考えられる。また磁場のダイポール成分は磁気エネルギーと同位相で変動し、振幅も磁気エネルギーとほぼ同程度(約30%)であった。このように磁場のダイポール成分の変動は、外核内の磁場やダイナモの時間変動を良く反映している事が分かった。地表からの観測では磁場のポロイダル成分(地球では大部分がダイポール成分)しか実測出来ず、外核内には実測出来ないトロイダル成分も存在するが、自転速度変動に伴うダイポール成分の変動はトロイダル成分を含む外核内の磁気エネルギーやダイナモの変動をよく反映しているため、ダイポール成分の変動の観測で外核内のダイナモの変動をよく捉えられると考えられる。

次に短周期(磁場散逸時間の1%、地球では約200年に相当)の場合についてシミュレーションを行った。この場合、外核内の対流運動エネルギーは約35%変動するが、外核内磁気エネルギーにはほとんど変動が生じない事が分かった。磁場のダイポール成分には変動が見られるが、その振幅は約1%で、長周期の場合よりもかなり小さい。

解析の結果、周期によるこの結果の違いは、自転速度変動の周期がスピニアップ時間よりも長いのか短いかで生じている事が分かった。短周期のケースの場合、その自転速度変動周期はスピニアップ時間よりも短い。この場合、マントルからの回転変動の影響は外核内部まで十分に染み込めず、磁気エネルギーは殆ど変化しない。但しコア-マントル境界が揺さぶられる事により、ダイポール磁場成分には僅かな揺らぎが生じるものと考えられる。一方長周期の場合は、スピニアップ時間よりも自転速度変動周期がずっと長く、外核奥深くまで自転速度変動の影響が染み込めるため、大きな磁気エネルギー変動が生じるものと考えられる。

以上のように、長周期の場合は磁場に数十%、短周期の場合は1%程度と、周期によって磁場の変動の様子が異なる事が分かった。

これは「1. 研究開始当初の背景」で述べた、観測されている磁場変動と傾向が合う事が分かった。国内外を含め、自転速度変動を考慮した初めてのダイナモモデルによる成果のため、本成果のインパクトは大きなものであると考える。今後は自転速度変動が実際のミランコビッチ周期のように複数の周期を持つ場合など、より現実の地球の変動に近いモデルを調べていきたい。

#### 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, Akira Kageyama, Tetsuya Sato, “Formation of sheet plumes, current coils, and helical magnetic fields in a spherical magnetohydrodynamic dynamo”, *Physics of Plasmas* (査読有), vol. 18, 2011, article no. 072901 (total 10 pages), DOI: 10.1063/1.3603822

[学会発表] (計 3 件)

① 宮腰剛広、陰山聡、「高解像度地球ダイナモシミュレーション」、第 47 回 CG・可視化研究会(CAVE 研究会)、2011 年 6 月 15 日、海洋研究開発機構横浜研究所

② Takehiro Miyagoshi, Yozo Hamano, “MHD geodynamo model including effect of length-of-day variation”, Japan Geoscience Union Meeting 2011 (International Session), 2011 年 5 月 26 日、幕張メッセ

③ 陰山聡、兵藤守他 4 名中の 4 番目「先端的固体地球シミュレーションコードの開発」、平成 22 年度地球シミュレータセンター利用報告会、2011 年 2 月 3 日、海洋研究開発機構横浜研究所

#### 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・地球内部  
ダイナミクス領域・研究員  
研究者番号：60435807