

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740334

研究課題名(和文)地磁気短時間変動のシミュレーション

研究課題名(英文) Numerical simulations of geomagnetic short-timescale variations

研究代表者

桜庭 中 (Sakuraba, Ataru)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50345261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：地球の液体金属コアの対流と、そこで生じる地磁気生成過程の数値シミュレーションを、高解像度の数値モデルをもちいておこない、いくつかの特徴的な地磁気変動を再現した。コアのねじれ振動については、自転軸に対して内向きと外向きに伝搬する進行波がみられ、コア乱流による励起が示唆された。地磁気西方移動は、高波数でかつ低緯度でのシグナルにおいて顕著であり、分散性の存在が示唆された。そこで粘性ゼロの回転流体球内に軸対称の磁場が存在したときの磁気不安定問題を線形解析し、遅い電磁流体波動の東西方向の伝搬特性を調べ、磁気西方移動との関連を議論した。

研究成果の概要(英文)：I performed numerical simulations of convection and geomagnetic field generation processes in Earth's liquid metallic core to reproduce several characteristic geomagnetic secular variations. The numerical result exhibits torsional oscillations that are composed of traveling waves toward and out of the Earth's rotation axis, suggesting that they are created by turbulence in internal core convection. The result also shows clear westward drift in the core-surface magnetic field particularly in high-wave number components and in the low latitudes, and I pointed out existence of dispersion in the westward drift. In order to figure out this dispersion property, I conducted linear stability analysis of axisymmetric magnetic field in an inviscid rotating fluid sphere, and discussed possible relations between westward propagation of slow hydromagnetic wave and the geomagnetic westward drift.

研究分野：数物系科学

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：地磁気永年変化 地球ダイナモ 西方移動 ジャーク ねじれ振動 数値シミュレーション 磁気不安定

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 地球の深部は、光で見えることも、試料を採取することも不可能であり、いまだに多くの謎が残されている未知の領域と言える。限られた観測量の中で、地磁気は、地球の最深部に位置する液体金属コアの対流運動を直接的に反映しているだけでなく、古地磁気データや歴史データをもちいることで、地球内部のダイナミクスの変遷に関する情報をもそこから引き出すことが可能であり、大変貴重である。したがって、地磁気とその変動を、コアの対流運動と直接結びつける理論研究は、地球の成り立ちや、過去・現在・未来の地球の活動を知る上で重要である。

(2) 金属コアの対流が一体どのように磁場を生み出すのかという「地球ダイナモ」の研究は、主に数値シミュレーションによって進展してきたが、これまでのモデルは、コアの粘性が大きすぎるという問題を抱えていた。いっぽうで、地球シミュレータを始めとする大型計算機により、粘性をあらゆる無次元数であるエクマン数を  $10^{-6}$  以下に抑えたダイナモのシミュレーションが、日本の研究者によって実現されるようになった (Kageyama et al., Nature, 2008 など)。とくに私は、粘性を小さく抑えるいっぽう、地球のコアがもう一つの重要な性質である、強い磁場強度をモデルによって再現することに成功した (Sakuraba and Roberts, Nature Geosci., 2009)。こうして地球ダイナモ研究は、高解像度でより現実的な数値モデルをもちいることにより、新しい局面に入ろうとしていた。

## 2. 研究の目的

(1) 地磁気はさまざまな時間スケールで特徴的な変動を示す。もっとも顕著な変動は地磁気の逆転であるが、歴史上磁極が反転したことはなく、観測データが限られている。いっぽう、数年～数十年スケールの短時間変動については、過去 400 年程度は歴史データが存在し、また過去 30 年については衛星データが蓄積されており、比較的詳細に分析されている。またこの程度の短時間変動は、高解像度のダイナモモデルでもじゅうぶんにカバーできると考えられる。そこで本研究では、以下にあげる 3 つの特徴的な地磁気変動 ( 永年変化 ) に着目し、それを数値モデルで再現することで、地球深部のダイナミクスに関して、新しい知見を得ることを目指す。

コアのねじれ振動：液体コアの流速の東西方向成分を、経度方向および自転軸方向に平均化したものは、ちょうど仮想的な円筒面の回転角速度に対応する。こうした同心円状の円筒の回転変動が、半径方向にアルフベン速度で伝搬するのがねじれ振動と呼ばれる現象で、地球の自転周期変動のうち数年より長い時間スケールの変動との関連性が指摘

されている。これまで地磁気永年変化からねじれ振動を復元する研究がなされてきたが、そもそもそれがどのように励起され、どのようにコアの中を伝搬するのにはよくわかっていない。数値モデルによってねじれ振動の特性を明らかにすることは、たとえば地球コア内部の磁場強度を推定する際に必要な理論的基礎を与える。

地磁気ジャーク：1 年程度のうちに突発的に起こる地磁気変化曲線の乱れであるが、その原因は明らかでない。ねじれ振動との関連性が指摘されているが、地球ダイナモの直接数値シミュレーションでそれを再現した研究はまだない。

地磁気西方移動：地磁気のパターンがゆっくりと西向きに移動しているように見えることは古くから指摘されていて、とくに大西洋からインド洋にかけての赤道付近で顕著である。この現象と、コア内部の対流パターンや磁場の構造との関係性は興味深い研究テーマであり、それを高解像度のダイナモシミュレーションで再現することは意義がある。

(2) これらの地磁気変動は、対流を駆動する浮力の大きさも含め、おそらくコア・マントル境界の境界条件の影響を強く受けていると考えられる。そこでシミュレーション結果と観測データとの比較を通して、マントル最下部の状態 (ダイナミクス、物性、熱力学的状態など) を推定することも、本研究の目標の一つである。

## 3. 研究の方法

(1) まずすでに実績のある、低エクマン数・低磁気プラントル数 (磁気散逸と粘性散逸の比) の地球ダイナモモデルの大規模数値シミュレーションを、海洋研究開発機構の地球シミュレータをもちいておこなう。エクマン数を下げることはもちろんだが、磁気プラントル数 (本研究では 0.2) を下げることで、流れと磁場の短時間変動を、磁気散逸の効果が顕著でないようなパラメータ領域で見ることができる。

(2) ねじれ振動と磁気西方移動については、フーリエ変換を系統的におこなって、波動解析を試みる。位相速度とその分散性を求めて、波がどのように励起・伝搬しているかの物理的根拠を推定する。

(3) ジャークについては、実際に仮想的な観測点をモデル中におき、磁場変動の時間変化の特性を総合的に解析する。

(4) 磁気西方移動の原因を、コア内に流れる西向きの基本流による移流効果の他に、磁気流体波動に求める説が古くから唱えられてきた。しかし回転球内に生ずる遅い磁気流

体波と呼ばれるものは、これまで系統的に調べられてこなかったため、磁場変動を本当に波としてとらえていいのかどうかの物理的根拠があいまいなままであった。そこで本研究では、粘性をゼロとおいた磁気地衡流近似のもと、回転流体球中に適当な軸対称トロイダル磁場を仮定し、その磁気不安定を線形解析する。これによって、球というジオメトリの中での磁気流体波の伝搬特性を予想することができる。

#### 4. 研究成果

(1) ねじれ振動を特徴づける円筒の回転速度は半径（自转轴からの距離）と時間の関数である。まずフーリエ変換によって内向き伝搬成分と外向き伝搬成分とにわけ（図1）、それぞれについて位相速度（の逆数）を半径と振動周期の関数として求めた（図2）。コ

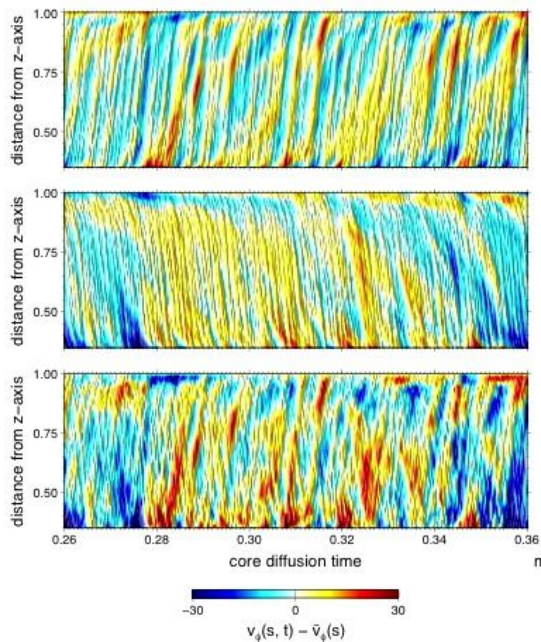


図1. さまざまな半径（縦軸）をもつ円筒面の回転速度の擾乱を時間（横軸）の関数としてカラーコンターで示した図。上が内向き伝搬成分，中央が外向き伝搬成分，下がそれらの重ねあわせである。

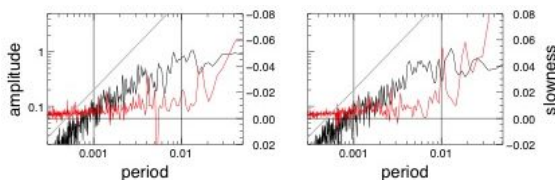


図2. 図1の半径0.4での時系列データをフーリエ変換した図。黒線が振幅，赤線が位相を動径座標で微分したもので、ねじれ振動のスローネス（位相速度の逆数）に相当する。左が内向き成分，右が外向き成分である。

ア対流の大規模循環のターンオーバー時間（図示したケースでは約0.05無次元時間）よりもじゅうぶん短い時間スケールでは、位相速度はほぼ周期によらず、分散性をもたない。いっぽう位相速度は半径の関数であり、これは円筒を貫く平均磁場強度で決まっている。以上のことから、図1にみられるような波の伝搬はアルフベン波であり、ねじれ振動の理論にほぼ一致していることがわかった。波のパワースペクトル（図2）が周期のべき乗で近似できることから、乱流的なコア対流がねじれ振動を励起しているという描像が強く示唆された。

(2) 磁気西方（または東方）移動を特徴づけるコア表面の磁場は、緯度と経度と時間の関数である。磁場データを経度方向にフーリエ展開し、その展開係数の振幅と位相（図3）から、西方移動の平均速度を緯度の関数とし

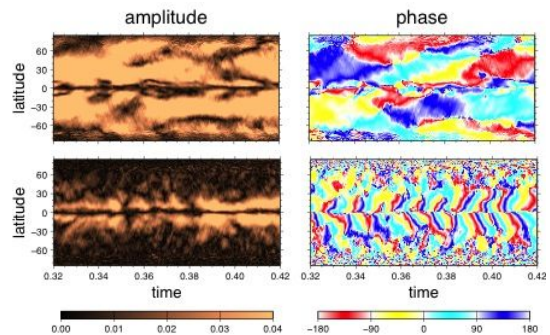


図3. コア表面の動径磁場のフーリエ展開係数。上が  $m=1$  成分，下が  $m=6$  成分。左が振幅，右が位相。

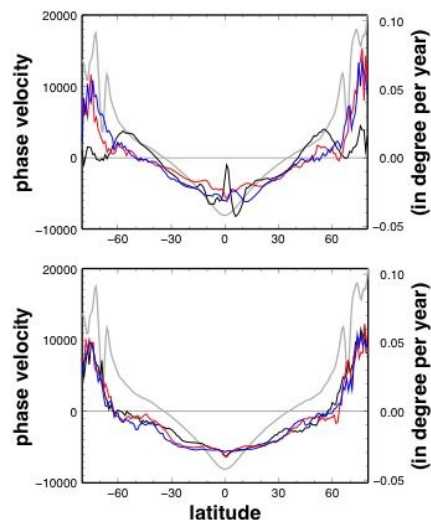


図4. 推定した磁気西方（東方）移動の位相角速度を緯度の関数として示した図。上段は低波数成分（黒が  $m=1$ ，赤が  $m=2$ ，青が  $m=3$ ），下段は高波数成分（黒が  $m=4$ ，赤が  $m=5$ ，青が  $m=6$ ）。灰色の線はコア表面直下の東西風をあらわす。低緯度には西向きの流れがある。

て求めた(図4)。その結果、高波数成分( $m > 4$ )では、低緯度にきれいな西方移動のシグナルがみられ、それはほぼ剛体回転に近いことがわかった。このことは、西方移動が単なる移流の効果ではなく、コア内部をも含めた、なんらかの平均的な流れをあらわしていること、したがって地磁気の西方移動の速さが、直接コア表面の局所的な流速を示しているわけではないことを示唆する。いっぽう低波数( $m < 3$ )成分については、高波数成分に比べて位相速度の変動が大きく、単純な移流の結果として論じることが難しいことがわかった。ただし位相速度の長時間平均をとると、コア表面直下の平均流に一致する傾向が見られた。

(3) 粘性ゼロの回転磁気流体球に、軸対称のトロイダル磁場を仮定して、磁気不安定の線形安定解析をおこなった。トロイダル磁場を赤道付近に局在させると、不安定を引き起こす臨界磁場強度が低下し、臨界波数も大きくなる傾向が見られた。不安定モードの伝搬

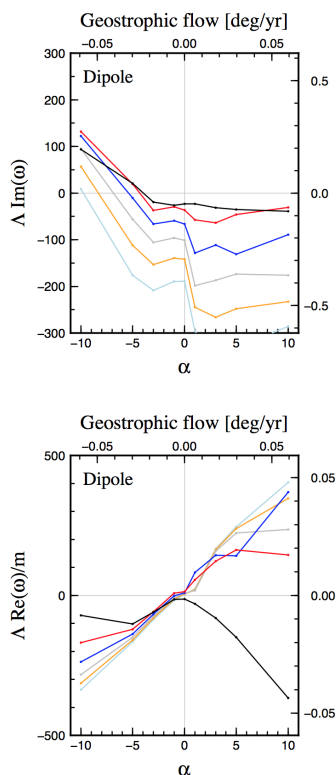


図5．単純な赤道対称なトロイダル磁場を基本場としたときの遅い磁気流体波動の固有モード。上がモードの成長率で正になると不安定になる。下が位相速度で正が東方移動をあらわす。磁場強度は一定に保ち、地衡流の大きさ(横軸)を変えた計算例。コア表面の低緯度付近で西向き地衡流を与えると、モードは不安定化する傾向がある。線の色は波数をあらわし、黒( $m=1$ )、赤( $m=2$ )、青( $m=3$ )、灰( $m=4$ )、橙( $m=5$ )、淡青( $m=6$ )と波数が大きくなる。

は多くの場合東向きで、実際の地磁気変動の速度スケールに比べるとずっと遅い。ところが、自转轴からの距離だけの関数である東西風(地衡流)を基本場に付加すると、とくに自转轴から離れたところ(コア表面の低緯度)で流れが西向きだった場合、不安定化が助長され、波の伝搬方向は西向きになる(図6)。これは移流による効果であるが、その効果の度合いは波数によって異なる。波数が大きい極限では単純な移流として理解可能で、地衡流が速くなればなるほど伝搬速度も速くなるが、波数が小さいと(たとえば  $m < 3$ )、波の伝搬が流れよりも遅くなる傾向が出てくる。こうした特徴は、地球ダイナモの非線形数値シミュレーション結果にも見られたことから(図4)、この線形解析は、実際のコア対流の物理をある程度よく記述していると考えられる。

(4) ジャークについては、数値シミュレーションデータをもとに、仮想的な観測点での磁場3成分の永年変化をプロットするに留まり、詳細な解析は行えなかった。ただし実際の地磁気ジャークとは時間スケールが異なるものの、のこぎりの刃状の磁場変動曲線が普遍的にみられた。

(5) コア・マントル境界での境界条件を系統的に変える研究は、研究時間と計算機リソースの関係上できなかった。マントル最下部の電気伝導度については、これまでと同様、不導体と近似するモデルの他に、薄層近似をもちいて、有限の電気伝導度の効果を取り入れるモデルも考察した。

## 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0件)

〔学会発表〕(計8件)

桜庭 中, 回転流体球における磁気不安定と地磁気西方移動, 地球電磁気・地球惑星圏学会秋季大会, 2013年11月5日, 高知大学(高知).

桜庭 中, 遅い電磁流体波動と地磁気西方移動, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月19日, 幕張メッセ(千葉).

桜庭 中, 地磁気西方移動の起源, 地球電磁気・地球惑星圏学会秋季大会, 2012年10月22日, 札幌コンベンションセンター(北海道).

A. Sakuraba, Westward drift, torsional oscillations and jerks in a low viscosity numerical geodynamo model, SEDI (Study of Earth's Deep Interior) Symposium, 2012年7月2日, リーズ(イギリス).

桜庭 中, 地球ダイナモモデルにおける

西方移動，ねじれ振動およびジャーク，日本地球惑星科学連合 2012 年大会，2012 年 5 月 25 日，幕張メッセ（千葉）。

A. Sakuraba, Numerical simulations of geomagnetic field variations: from jerks to superchrons, AGU Fall Meeting 2011, 2011 年 12 月 7 日，サンフランシスコ（アメリカ）。

桜庭 中，Simulating geomagnetic field variations: from jerks to superchrons, 地球電磁気・地球惑星圏学会秋季大会，2011 年 11 月 4 日，神戸大学（兵庫）。

A. Sakuraba, Numerical simulations of short-timescale geomagnetic field variations, IUGG General Assembly, 2011 年 7 月 2 日，メルボルン（オーストラリア）。

〔図書〕（計 1 件）

A. Sakuraba and P. H. Roberts, On thermal driving of the geodynamo, in "The Earth's Magnetic Interior" (Eds. E. Petrovsky et al.), IAGA Special Sopron Book Series 1, pp.117-129, Springer, 2011.

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

桜庭 中 (SAKURABA, Ataru)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号：5 0 3 4 5 2 6 1

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし