

研究種目：基盤研究（B）  
研究期間：2006～2008  
課題番号：18340131  
研究課題名（和文） 高精度ダイナモシミュレーションによる地磁気逆転メカニズムの解明  
研究課題名（英文） Understanding of a Mechanism of Geomagnetic Field Reversals  
by Highly-Precise Numerical Simulations of the Geodynamo  
研究代表者  
本藏 義守（HONKURA YOSHIMORI）  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：00114637

## 研究成果の概要：

地磁気逆転メカニズムの解明に向けて、地球ダイナモの高精度数値シミュレーションを実施した。速度場と磁場の特徴的長さスケールに着目して、地球コア内における粘性散逸とオーム散逸を見積もった。磁場の極性が逆転するとき、逆転に至らずに元に戻るエクスカージョンのときには、磁場生成過程に明らかな違いがあることを示した。また、コア-マントル境界における熱流束分布及びその大きさがコアのダイナミクス及び磁場強度に対していかに影響するかを示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2007年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野： 固体地球電磁気学

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： 地球ダイナモ，地磁気逆転，数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

地球磁場の生成・維持機構を解明するためには、高速回転球殻中における3次元電磁流体ダイナモの数値シミュレーションを実施することが必要不可欠である。我々は地球シミュレータを使用することにより、地球ダイナモの高精度数値シミュレーションを実施し、実際の地球コア内と同じと考えられる準テイラー状態を再現することに成功した。同時に、双極子磁場の自発的逆転も再現した。しかしながら、研究開始当初は、地磁気逆転

のメカニズムを十分に解明するには至っておらず、さらにデータの蓄積が必要であると考えていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、地球ダイナモの超高精度数値シミュレーションを実施することにより、現実の地球コアのダイナミクスが再現されている状態において、地磁気逆転メカニズムを解明することである。

### 3. 研究の方法

(1) 東京工業大学において平成 18 年から構築・運用された TSUBAME Grid Cluster は、当初から 40 Tera Flops 以上（現在は 77.48 Tera Flops）の計算力を持ち、Terabit 級の接続ネットワークによるグリッド基盤である。高速ネットワークにより多数のコンピュータを接続して仮想的に構成される高性能コンピュータ上で地球ダイナモの超高精度数値シミュレーションを実施するために、グリッドコンピューティング用計算コードを開発する。

(2) TSUBAME Grid Cluster において地球ダイナモの超高精度数値シミュレーションを行い、その結果を解析することにより、地球磁場の極性が逆転するとき、磁場がどのようにふるまうかを調べる。多数の極性逆転およびエクスカージョンを再現した場合、個々の物理素過程を明らかにする。

(3) 地球コアのダイナミクスは薄い境界層を通してマンツルの影響を受けている。特に、白亜紀には長期間、極性逆転がなかった時代があり、コア内のダイナモ過程がコア-マンツル境界を通して、マンツル対流の強い影響下にあったと考えられる。そこで、コアのダイナミクスに及ぼすコア-マンツル境界の熱的・力学的条件を調べる。

### 4. 研究成果

(1) 東京工業大学の TSUBAME Grid Cluster において、高速回転球殻中の 3 次元電磁流体 (MHD) ダイナモの高精度数値シミュレーションを実施するために、グリッドコンピューティング用の計算コードを開発した。

(2) 速度場と磁場の特徴的な長さスケールに着目して、これまでに実施した数値シミュレーションの結果を解析した。エクマン数が非常に低くなると、それに応じて非常に小さな長さスケールの流れが卓越する。そして、その小さなスケールの対流がダイナモ作用によって磁場を生成する。しかしながら、磁場の長さスケールはあまり変化しない。結果として、速度場と磁場との間にスケール分離が生じることがわかった (図 1)。ダイナモ作用に対する磁気プラントル数の影響はあまり大きくないことから、速度場と磁場とのスケール分離に対してはエクマン数の寄与が大きいと判断した。

(3) エクマン数が小さくなり、スケール分離が進むと磁気レイノルズ数の実効値が大きくなる。したがって、磁気プラントル数の小さい場合でも、エクマン数が小さければ、スケール分離によってダイナモ作用を維持す

る方向に働くことがわかった。

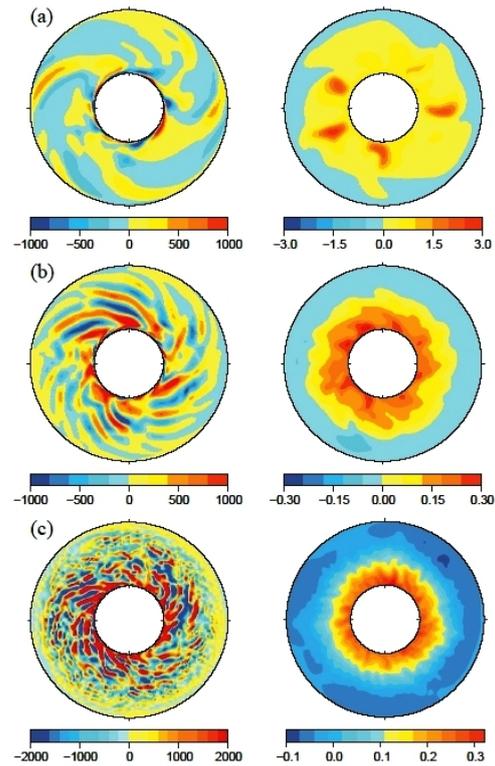


図 1. 北から見た赤道面における (左) 渦度と (右) 磁場の回転軸方向成分の分布. (a) エクマン数  $E = 2 \times 10^{-4}$ , 磁気プラントル数  $Pm = 2$ , レイリー数  $Ra = 1.5 \times 10^6$ , (b)  $E = 2 \times 10^{-5}$ ,  $Pm = 1.5$ ,  $Ra = 2 \times 10^7$ , そして (c)  $E = 2 \times 10^{-6}$ ,  $Pm = 0.5$ ,  $Ra = 5 \times 10^8$ .

(4) このスケールリングの結果をもとにして、地球コア内における粘性散逸とオーム散逸を見積もった。この方法によって見積もられたオーム散逸は他の方法による見積もりとほぼ一致した。他方、粘性散逸はオーム散逸と同等かそれよりずっと小さくなる。このようなスケールリングによる見積もりは他の惑星コアに対しても適用でき、ダイナモ作用の理解につながると考えられる。

(5) 現実の地球コアのダイナミクスが再現されている状態において、磁場の極性逆転における磁場の振る舞いを調べた。磁場の極性が逆転するとき、逆転に至らずに元に戻ってしまうエクスカージョンのときには、コア内部における磁場生成過程に違いがあることがわかった。エクスカージョンのときも磁場極性逆転のときも、初期段階では、低緯度コア深部の高気圧対流セルによって、逆極性の磁場が生成される。エクスカージョンの場合、動径方向の流れによって逆極性の磁場がコア浅部に運ばれる。その結果、コア表面で磁気

双極子の軸が回転軸から大きく離れたかのような磁場分布となり、地球表面では磁場の極性の変化として捉えることができる。しかしながら、逆極性の磁場は継続して生成されることはなく、同様の過程によって元の極性の磁場が運ばれ、結果として逆極性の磁場はなくなる。つまり、エクスカージョンが完了する。一方、極性逆転の場合、逆極性の磁場が継続して生成される。そのため、逆極性の磁場は連続的にコア浅部へ運ばれる。そして、子午面流によって両極方向へ逆極性の磁場が広がる。さらに、コア表面付近の逆極性の磁場は対流セルに伴う流れによって極付近に集められることによって強度が増し、極性逆転が完了する（図2）。

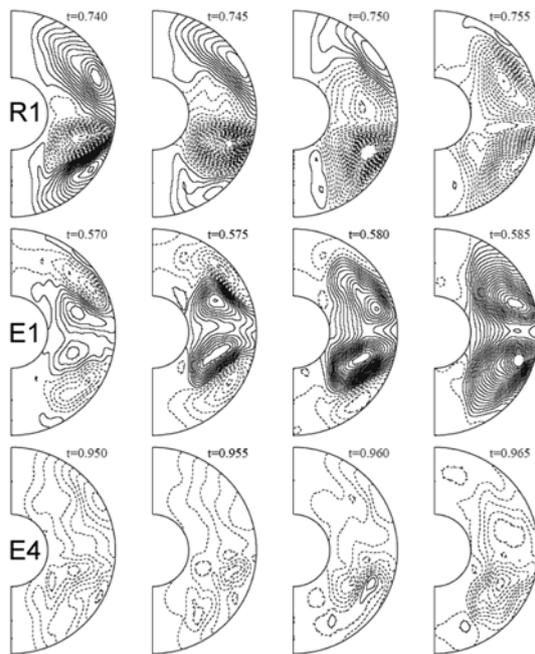


図2. 磁場の極性逆転 (R1) およびエクスカージョン (E1 と E4) における軸対称ポロイダル磁場の時間変化。子午面内の磁力線が描かれている。実線が反時計回り、そして破線が時計回り成分を示す。

(6) 内核の北側および南側における活発な対流が赤道面対称性の破れを引き起こすことが磁場の極性逆転のトリガーになることも示唆されているが、そうではないことを再確認した。

(7) 地磁気逆転の統計的性質はパラメータやコア-マントル境界 (CMB) における境界条件に依存する。特にCMBにおける熱的境界条件である熱流束分布およびその大きさは地球の熱史を通して変遷している。そこで、CMBにおける様々な熱流束分布を課す

ことにより、コア・ダイナミクスおよび磁場強度にどのように影響するかを調べた。エクマン数が大きいとき、熱流束分布の振幅が大きいと磁場が維持されなくなることがわかった。同じ振幅でも、エクマン数が小さいときには、磁場が維持されることがわかった。

(8) 上記の結果から、以後はエクマン数が実地球のように十分に小さい場合を調べた。熱流束分布が赤道面対称な場合、その振幅が大きいほど、そして波長が長いほど生成される磁場は強くなり、双極子磁場を強くすることがわかった。一方、熱流束分布が赤道面半対称な場合、磁場強度は変わらないが、双極子磁場の傾きに影響を与えることがわかった。このように下部マントルの熱的不均質が地球磁場強度、そして双極子磁場の安定性に影響することが明らかになった。今後は、磁場の極性が逆転するようなパラメータにおいて、さらに境界条件の影響を調べる必要がある。

## 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)

- ① Takahashi, F., H. Tsunakawa, M. Matsushima, N. Mochizuki, and Y. Honkura, Effects of thermally heterogeneous structure in the lowermost mantle on the geomagnetic field strength, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **272**, 738-746, 2008. 査読有
- ② Takahashi, F., M. Matsushima, and Y. Honkura, Scale variability in convection-driven MHD dynamos at low Ekman number, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **167**, 168-178, 2008. 査読有
- ③ Takahashi, F., M. Matsushima, and Y. Honkura, A numerical study on magnetic polarity transition in an MHD dynamo model, *Earth Planets Space*, **59**, 665-673, 2007. 査読有
- ④ Takahashi, F., M. Matsushima, and Y. Honkura, Distinctive difference between the polarity reversal and excursion in an MHD dynamo model, in *2007 Annual Report, Research Center for the Evolving Earth and Planets, COE21 Program, Tokyo Institute of Technology*, 2007. 査読無
- ⑤ Takahashi, F., M. Matsushima, and Y. Honkura, Dipolar and non-dipolar dynamos in a thin spherical shell geometry, in *2006 Annual Report, Research Center for the Evolving Earth and Planets, COE21 Program, Tokyo Institute of Technology*, 2006. 査読無

- ⑥ Matsushima, M., Reexamination of a scale-similarity model for the subgrid-scale flux in the Earth's core, *Geophys. Astrophys. Fluid Dynam.*, **100**, 363-377, 2006. 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① Takahashi, F., H. Tsunakawa, M. Matsushima, N. Mochizuki, and Y. Honkura, Effects of thermally heterogeneous structure in the lowermost mantle on the geomagnetic field strength, The 11<sup>th</sup> Symposium of Study of the Earth's Deep Interior, 2008 年 7 月 28 日, Kunming, China.
- ② Matsushima, M., F. Takahashi, and Y. Honkura, Fluid flow near the Earth's core surface derived from geomagnetic field models (2), 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 28 日, 千葉.
- ③ Takahashi, F., H. Tsunakawa, M. Matsushima, N. Mochizuki, and Y. Honkura, Effects of thermally heterogeneous structure in the lowermost mantle on the geomagnetic field strength, American Geophysical Union 2007 Fall Meeting, 2007 年 12 月 12 日, San Francisco, U.S.A.
- ④ Matsushima, M., F. Takahashi, and Y. Honkura, Fluid flow near the Earth's core surface derived from geomagnetic field models with constraint of radial dependence, American Geophysical Union 2007 Fall Meeting, 2007 年 12 月 12 日, San Francisco, U.S.A.
- ⑤ Takahashi, F., H. Tsunakawa, M. Matsushima, N. Mochizuki, and Y. Honkura, Effects of thermally heterogeneous structure in the lowermost mantle on the geomagnetic field strength, 第 122 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2007 年 10 月 1 日, 名古屋.
- ⑥ Matsushima, M., F. Takahashi, and Y. Honkura, Fluid flow near the Earth's core surface derived from geomagnetic field models with constraint of radial dependence, 第 122 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2007 年 9 月 30 日, 名古屋.
- ⑦ Takahashi, F., M. Matsushima, and Y. Honkura, Magnetic field intensification by lateral variation of the core-mantle boundary heat flow in numerical dynamos, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 21 日, 千葉.
- ⑧ Matsushima, M., F. Takahashi, and Y. Honkura, Fluid flow near the Earth's core surface derived from geomagnetic field models, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 21 日, 千葉.
- ⑨ Takahashi, F., M. Matsushima, and Y. Honkura, Scale variability in convection-

driven dynamos at low Ekman number, American Geophysical Union 2006 Fall Meeting, 2006 年 12 月 14 日, San Francisco, U.S.A.

- ⑩ Matsushima, M., F. Takahashi, and Y. Honkura, Fluid flow near the Earth's core surface derived from geomagnetic field models, American Geophysical Union 2006 Fall Meeting, 2006 年 12 月 14 日, San Francisco, U.S.A.
- ⑪ Takahashi, F., M. Matsushima, and Y. Honkura, Scale variability in convection-driven dynamos at low Ekman number, 第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2006 年 11 月 5 日, 相模原.
- ⑫ Matsushima, M., F. Takahashi, and Y. Honkura, Fluid flow near the Earth's core surface derived from geomagnetic field models, 第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2006 年 11 月 5 日, 相模原.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

本藏 義守 (HONKURA YOSHIMORI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 00114637

### (2) 研究分担者

松島 政貴 (MATSUSHIMA MASAKI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 20242266

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

高橋 太 (TAKAHASHI FUTOSHI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・産学官  
連携研究員