

## 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 5月28日現在

機関番号：12608  
研究種目：若手研究（B）  
研究期間：2011～2012  
課題番号：22740292  
研究課題名（和文） 高精度ダイナモシミュレーションスキームの開発：超低粘性ダイナモの実現  
研究課題名（英文） Low viscosity dynamo simulations by a high-order and high-accuracy scheme  
研究代表者  
高橋 太（TAKAHASHI FUTOSHI）  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：20467012

## 研究成果の概要（和文）：

地磁気生成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コードを開発した。ベンチマーク問題を解くことによって、本コードの精度を確認した。地球のコアの状態に近い強磁場状態を再現し、強磁場の効果によって、低粘性状態において典型的なシート状の流れに加えて、大規模な流れ場が生じることを発見した。磁場生成過程の詳細な解析手法を開発し、強磁場が生成される領域に現れる流れ場の構造の特徴を明らかにした。また、高温高圧実験の結果に基づく数値シミュレーションによって外核の二層構造の可能性を示した。

## 研究成果の概要（英文）：

In order to understand the mechanisms and dynamics of the geomagnetic field generation process, we developed a new high-order, high-accuracy code for numerical simulation of the geodynamo. First we confirmed validity of the code by solving a dynamo benchmark problem. Then, we reproduced a dynamo solution in a low-viscosity, strong magnetic field regime, where the large-scale flow structure is preferred due to effects of the strong magnetic field as well as thin sheet-like plumes. We found a characteristic flow structure, by which the strong magnetic field is generated, by a detailed analysis of magnetic field generation process developed in this study. In addition, based on high-pressure, high-temperature experimental results, we showed a possibility of two-layered structure of the Earth's core.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

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：地球ダイナモ、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低粘性状態で実施することが必要不可欠である。我々はこれまでに地球シミュレータを使用することにより、地球ダイナモの低粘性シミュレーションに成功した。しかしながら、低粘性のダイナモシミュレーションは従来の方法では精度、安定性の面に問題があり、超低粘性でのシミュレーションを行うには高精度スキームの開発が必要であると考えていた。

## 2. 研究の目的

(1) 地球シミュレータを用いて超低粘性ダイナモシミュレーションを比較的コストで実現できるようにするために結合コンパクト差分法による高精度コードを開発する。

(2) 従来よりも低粘性の状態かつ、ダイナミクスの観点においても地球のコアに近い状況でのダイナモ計算を実施し、磁場生成過程の詳細及び、そのダイナミクスを明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 動径方向に対して6次精度結合コンパクト差分法を採用したMHDダイナモの数値シミュレーションコードの開発を行う。特に、本研究で採用する方法は境界付近の取り扱いに注意を要するので、適切な処理方法を選択する。コードの精度はベンチマーク問題を様々な解像度で解くことで確認する。解像度に対する残差の依存性から精度の次数を評価する。

(2) 地球シミュレータを利用することによって、可能な限り低粘性の状態での高精度かつ高解像度のMHDダイナモシミュレーションを行い、地球コアで期待されるものと同様なダイナミクスを再現する強磁場解をシミュレーションで実現する。その結果を詳細に解析することで強い磁場がどのような流れ場によって効率的に生成されているかを調べ、地球磁場の生成・維持に重要な役割を果たしていると思われる物理素過程を明らかにする。

(3) 地球コアに含まれる主要な軽元素の候補に酸素がある。コアの深部に相当する温度・圧力条件下では酸化鉄がより密度の高い相へ相転移を起こすことが実験的に示された。加えて、発見された相転移ではクラペイロン勾配が負の値を持つことが明らかにされ、コアの対流パターンに大きな影響を持つことが示唆されている。そこで負のクラペイロン勾配を持つ相転移効果がコアのダイナミクスに及ぼす影響を熱対流シミュレーション

によって調べる。

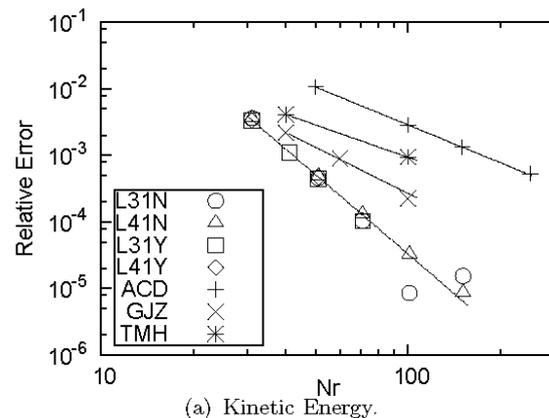
## 4. 研究成果

(1) 6次精度を持つ結合コンパクト差分法に基づく高速回転球殻中の3次元電磁流体(MHD)ダイナモの高次精度シミュレーションスキームを開発し、地球シミュレータをはじめとする大規模並列計算機で高速に実行可能な計算コードを開発した。

(2) 計算コードの信頼性をベンチマーク問題を解くことで確認した。図1に磁場無での熱対流問題に対する結果を示す。精度を評価した結果、四次精度であることが確認され、従来及び他の研究グループのコード(二次精度)に比べて高い精度が得られていることが分かった(図1)。

(3) 同様に磁場を取り入れたMHDダイナモのベンチマーク問題を解き、従来のスキームに比べて高次の精度が達成されていることを確認した。

(4) 地球コアのダイナミクスは低い粘性と強い磁場、弱い慣性力によって特徴づけられる。そのような解を発見することに成功し、強磁場の生成領域の分布及び、磁場構造を明らかにした。流れ場に対しては強い方位角方向の磁場によって細かいスケールの渦の生成が



抑制され、大規模な西向きの流れと、いくつかの細いプルームが卓越する対流構造が実現された(図2)。

図1. ダイナモベンチマーク問題の運動エネルギー値に対する相対誤差の動径方向のグリッド数依存性。L31N, L41N, L31Y, L41Yが本研究による高精度スキームの結果。ACD, GJZ, TMHは従来のスキーム及び他のグループ等による結果。

(5) 強い磁場構造が作られる物理素過程を理解するために磁場生成過程を詳細に調べる必要がある。そこで、磁気エネルギーの生成

項に着目した新たな解析手法を開発し、詳細に磁場生成過程の解析を行った。その結果、磁力線に沿う方向に流れの勾配があり、磁力線を引き延ばすことで効果的に運動エネルギーが磁気エネルギーに変換されることで強磁場が作られていることが明らかになった。

(6) それぞれの効果による磁気エネルギーと運動エネルギーへの寄与をエネルギーバランスに基づいて調べた。その結果、地球のコアで期待されているローレンツ力、コリオリ力、及び浮力がバランスしている磁気地衡流平衡状態が成り立っていることが確認できた。この結果から一連の解析結果の地球のコアダイナミクスへの適用可能性が示された。

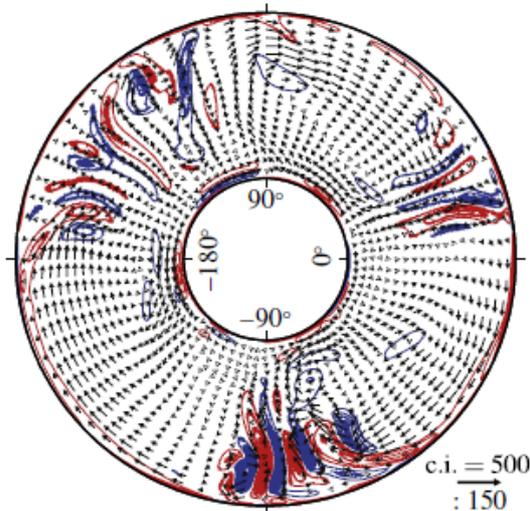


図2. 強磁場の影響下にある流れ場の構造。北から見た赤道断面内における渦度の回転軸方向成分の分布(赤:反時計回り渦、青:時計回り渦)と流れの水平成分(矢印)の分布。

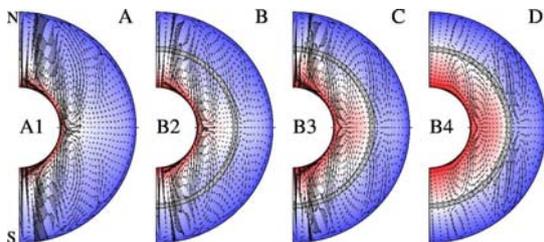


図3. 相転移効果による負のクラペイロン勾配及び密度変化効果を組み込んだ熱対流シミュレーションの結果。子午面断面において経度方向に対する平均を取った流れ場(矢印)と温度場(赤:高温、青:低温)の分布。AからDの順番に相転移による相浮力パラメ

ータの値を大きくしている。Dのケースではコア全体に渡って二層対流が実現されている。

(7) 酸化鉄(FeO)に対する高温高圧実験によって新たに発見された相転移の各種物性パラメータを用いて熱対流シミュレーションを行った。その結果、相浮力パラメータの値によっては相転移境界の上下で対流構造が分断される二層対流構造が実現されるパラメータ領域があることが分かった(図3)。地球のコアの主要な軽元素が酸素であればダイナモ作用にも影響があることが推測される。従って、今後は磁場の効果を組み込んだMHDダイナモの数値シミュレーションによって二層対流構造の効果を調査する必要がある。

(8) 二層対流構造が実現された場合では相転移境界をまたいで熱境界層が形成されることを発見した。その結果として上層と下層が互いに孤立して果熱輸送効率が下がることが分かった。この結果は二層対流構造は核の冷却を遅らせる効果を持っていること示唆している。従って、二層対流モデルを考慮した熱史計算において内核の形成年代が遅れることが予想されなど、地球の熱史に対して非常に大きなインパクトを持っていることが示唆される。

#### 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 3件)

- ① F. Takahashi, and H. Shimizu, A detailed analysis of a dynamo mechanism in a rapidly rotating spherical shell, *J. Fluid Mech.*, doi:10.1017/jfm.2012.154, 印刷中, 2012, 査読有.
- ② F. Takahashi, Implementation of a high-order combined compact difference scheme in problems of thermally driven convection and dynamo in rotating spherical shells, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyna.*, **106**, 231-249, 2012, 査読有.
- ③ H. Ozawa, F. Takahashi, K. Hirose, Y. Ohishi, and N. Hirao, Phase transition of FeO and stratification in Earth's outer core, *Science*, **334**, 792-794, 2011, 査読有.

[学会発表] (計 11件)

- ① F. Takahashi, Large-scale flows, sheet plumes and strong magnetic fields in a rapidly rotating spherical dynamo,

American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, 2011 年 12 月 7 日, San Francisco, USA

- ② F. Takahashi, Interplay between large-scale flows and sheet plumes in spherical shell dynamo, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2011 年 11 月 4 日, 神戸.
- ③ F. Takahashi, Mercury's internal magnetic field as a challenge of dynamo theory, MESSENGER BepiColombo Joint Workshop, 2011 年 9 月 5 日, 京都.
- ④ F. Takahashi, Strong field dynamo action in the Earth's core, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 26 日, 千葉.
- ⑤ F. Takahashi, Dynamics of the Earth and planetary dynamos revealed by numerical dynamo simulations, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 26 日, 千葉.
- ⑥ F. Takahashi, Implementation of a high-order combined compact difference scheme in problems of thermally driven convection and dynamo in rotating spherical shells, American Geophysical Union 2010 Fall Meeting, 2010 年 12 月 17 日, San Francisco, USA.
- ⑦ F. Takahashi, High-order and high-resolution geodynamo simulation using a combined compact difference scheme, 第 128 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2010 年 11 月 3 日, 那覇.
- ⑧ 高橋 太, 比較惑星ダイナモ: 観測とダイナモモデル, 太陽天体ダイナモ研究会, 2010 年 9 月 28 日, 名古屋.
- ⑨ F. Takahashi, Implementation of a high-order combined compact difference scheme in problems of thermally driven convection and dynamo in rotating a spherical shell, The 11<sup>th</sup> Symposium of Study of the Earth's Deep Interior, 2010 年 7 月 18 日, Santa Barbara, USA.
- ⑩ 高橋 太, 惑星磁場のメカニズム, 宇宙における生命の総合的考察とその研究戦略 第三回研究会, 2010 年 6 月 10 日, 京都.
- ⑪ F. Takahashi, High-order combined compact difference scheme in dynamo simulation, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 25 日, 千葉.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 太 (TAKAHASHI FUTOSHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 20467012

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者