

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740303

研究課題名(和文)二重拡散対流で駆動されるダイナモとコアの成層構造の理解

研究課題名(英文)Effects of double diffusive convection and stable stratification on the geodynamo

研究代表者

高橋 太(Takahashi, Futoshi)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20467012

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文):地球外核表層に存在する安定成層がダイナモに与える影響を理解するために、外核対流の駆動源として熱と組成を同時に扱うダイナモの数値コードを開発した。異なる拡散係数を持つ熱と組成による浮力源を同時に考慮した結果、組成による寄与が40%程度以上あれば地球磁場と同様な双極子型の磁場が生成されることが分かった。双極子磁場が維持されるような場合に対し、熱的/組成的な安定成層を組み込んだ計算をそれぞれ行った。結果、コア・マントル境界の磁場分布に大きな違いが生じ、安定成層の起源が熱的なものである可能性を示した。また、拡張された円盤ダイナモの安定性解析から亜臨界ダイナモと磁場生成効率との関係性を明らかにした。

研究成果の概要(英文):To understand effects of a stably stratified layer beneath the core-mantle boundary on the geodynamo and its origin, we performed dynamo simulations in a rotating spherical shell. We have developed a dynamo code to simulate thermal and compositional convection. Two driving agents have different diffusivities and thus, convection is treated as double diffusive convection. When energy injection from compositional buoyancy occupies at least 40 % of the total injection, an Earth-like dipolar magnetic field is maintained. Then, a stably stratified layer due to thermal or compositional effects is imposed in dynamo simulations, which should yield dipolar magnetic fields in case of no stably stratified layer. Consequently, it is implied that the origin of the stable layer might be thermal. Furthermore, we have carried out stability analysis of an extended disk dynamo model and find a relation between subcritical behavior of the dynamo and efficiency of the magnetic field generation process.

研究分野：地球惑星内部電磁気学

キーワード：地球ダイナモ コア 二重拡散対流 安定成層

1. 研究開始当初の背景

地球の最深处であるコアでは液体金属である外核の対流運動による電磁誘導現象(ダイナモ作用)を起こしており、過去 30 億年間以上に渡り地磁気を絶えず生成・維持している。外核の対流様式として熱対流と化学(組成)対流の二者がある。前者はコアの永年冷却に伴いコア・マントル境界(CMB)から熱が逃げる効果と内核が内核外核境界(ICB)で固化する際の潜熱が、後者は外核に含まれる軽元素が ICB から放出される効果が主な駆動源となっている。熱/化学対流の強さはそれぞれ CMB での熱流束、内核の成長速度によって決まるが、両者の間にはコアの組成、熱史に依存する関係性があることが知られている。熱/化学対流のダイナモ作用による地磁気生成への寄与は地球の熱史とともに変化するが、現在は化学対流が支配的であると見積もられている。

しかしながら、これまでの地球ダイナモの数値シミュレーションは複数の対流の駆動源の存在を十分に考慮しながら行われてきたとは言いがたい。多くのモデルが寄与の小さい熱対流を主に採用しており、スケリング則も多くが熱対流を使った計算に基づいて与えられている。一方で熱と化学組成の輸送を支配する方程式はいずれも移流拡散型方程式であり、拡散係数の値が同じであれば両変数は全く同じ型の方程式に従うことになる。この特徴を利用して“codensity”という物理量を導入して熱と化学組成を同時に取り扱える手法が考案されている。“Codensity”を使ったアプローチはダイナモシミュレーションにも利用されているが、熱と化学組成による効果を分離することができないため物理的解釈が難しいこと、各拡散係数は本来 2 桁以上異なっている等の難点がある。従って“codensity”を用いたシミュレーションでコアのダイナミクスがどの程度良く再現されているかは明らかでない。また、地震波速度構造から CMB の直下約 100-300 km では安定成層が存在している可能性が示されている。安定成層は内核の成長による放出やマントルからの供給によって軽元素が蓄積して形成されたと考えられているが、モデル計算では化学組成起源では地震波速度構造とは逆の速度構造異常を与えるという矛盾が指摘されており、温度構造に起源を持つ可能性も残されている。安定成層の存在はコアの対流様式、ひいてはダイナモに大きな影響を持ち得ることが示されているが、従来の“codensity”による数値モデルでは起源による効果の違いは明らかにできず、安定成層の有無、起源、熱/組成の輸送過程等の詳細に対する議論は限定的なものに留まっている。

2. 研究の目的

二重拡散対流で駆動されるダイナモの数値シミュレーションを用いて CMB 直下の安定成層構造がコア対流、ダイナモ作用、観測される磁場とその永年変化へ与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) まず始めに安定成層の無い二重拡散対流によるダイナモモデルを用いて、熱と組成の拡散係数のパラメータに対する依存性を他のパラメータ(エクマン数、磁気プラントル数等)は固定して一桁程度の範囲で調査する。解は磁気レイノルズ数、エルザッサー数、ロスビー数等の無次元数や空間パワースペクトルを用いて特徴づけを行い、解の比較もこれらに基づいて行う。その後同様な調査をエクマン数、磁気プラントル数を一桁程度変えて行う。

(2) 安定成層無し(無成層)の二重拡散対流モデルで得られた結果を参考にして入力パラメータを選択し、各種安定成層を組み込んだダイナモシミュレーションを実施する。熱的安定成層、化学的安定成層の違いによる効果を調査する。安定成層の厚さによる効果を知るために、異なる層の厚さを用いてシミュレーションを行う。磁場への影響は形状の変化、CMB でのパワースペクトル等から評価する。

(3) 二重拡散対流のダイナモモデルから、解の安定性と分岐、亜臨界性の存在が示唆された。これらを調査するために拡張された円盤ダイナモモデルに対して、亜臨界ダイナモの発生条件と磁場の生成効率との関係について、安定性解析を行う。

(4) CMB におけるトロイダル磁場を推定する方法を検討し、ダイナモモデルからその適用可能性の評価を行う。

4. 研究成果

(1) 地球コアのダイナミクスをより精密にモデル化するために熱対流と化学(組成)対流を同時に組み込んだ数値モデルを作成し、二重拡散系での地球型ダイナモの数値シミュレーションを可能にした。

(2) 熱的プラントル数を 0.1、組成的プラントル数を 1 とし、磁気プラントル数を 3 に固定した。従って熱拡散率と組成拡散率の比は(熱拡散)/(組成拡散) = 10 となる。エクマン数は 0.0003, 0.0001 の二通りとした。以上の条件で熱的、組成的レイリー数を変化させてダイナモの数値シミュレーションを行った結果、熱と組成によるダイナミックな寄与の割合によって生成される磁場の形態が大きく異なってくるのが分かった。組成対流の割合が大きい場合には地球磁場のような双極子型のダイナモが得られるのに対して、

熱対流による寄与が卓越する場合には非双極子型のダイナモが実現した。

(3)流れ場の構造を調査した結果、熱対流が卓越する場合にはレイノルズ応力によって帯状流が効果的に生成され、回転軸に沿って柱状対流が発達するのを妨げていることが明らかになった。その結果、流れ場のヘリシティが減少し、双極子磁場を効率良く生成することが出来なくなり、非双極子磁場が卓越するという一連のメカニズムを明らかにすることが出来た。

(4)これらの結果から、現在の双極子型の地球ダイナモに対する組成対流の寄与の下限値として 30%という値を得ることが出来た。更に本研究結果から、現在よりも固体内核が小さく熱対流による寄与がより大きかった過去の地磁気の形態は非双極子型であった可能性が示唆される。

(5)以上の結果に基づき、双極子型磁場が維持されるようなレイリー数の組み合わせの範囲内(すなわち組成対流が卓越する場合)で、安定成層を組み込んだダイナモシミュレーションを行ったところ、安定成層の種類によって CMB の対流及び磁場構造に大きな違いが現れることが分かった。

(6)安定成層が組成的なものである場合、強く成層して対流が抑制される結果、表皮効果によって弱く大規模な磁場しかコアの外で見ることができない。このような場合は永年変化も小さい。一方、熱的安定成層では、成層に対して組成的な浮力が勝る場合には有意な対流が生き残り得る。その結果、比較的強く、細かな構造の磁場が確認された(図 1)。以上の結果から、地球の外核に 100 km 以上の厚さの安定成層が存在する場合、それが組成的な起源であるとは考えにくい。

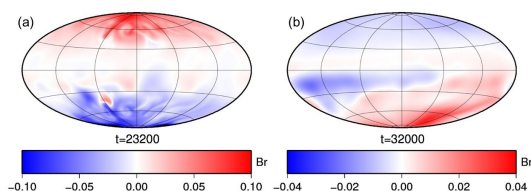


図 1. CMB での磁場の動径成分の分布。(a)熱的安定成層の場合。(b)組成的安定成層の場合。

(7)二重拡散対流によるダイナモによる結果のうち、分岐や亜臨界性を示唆するような解を発見した。そのような現象を支配する物理的な要因を抽出するために、拡張した円盤ダイナモモデルを用いて安定性解析を行ったところ、磁場生成の効率が高くなるようなパラメータの時に亜臨界性を示すことが明らかになった。

(8)ダイナモモデルを用いて CMB におけるトロイダル磁場を推定した結果、分布及び振幅について良好な結果を得ることが出来た。しかしながら、低緯度地域では推定精度が中高緯度に比べて著しく低くなる。検討の結果、これは推定時に磁場の拡散効果を考慮していないためであることが分かった。

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 2 件)

- 1 F. Takahashi, Testing a toroidal magnetic field imaging method at the core-mantle boundary using a numerical dynamo model, *Earth Planets Space*, **66**, 157, doi:10.1186/s40623-014-0157-z, 2014, 査読有.
- 2 F. Takahashi, Double diffusive convection in the Earth's core and the morphology of the geomagnetic field, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **226**, 83-87, doi:10.1016/j.pepi.2013.11.006, 2014, 査読有.

[学会発表](計 13 件)

- 1 F. Takahashi, Testing a toroidal magnetic field imaging method using a numerical dynamo model, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2014 年 10 月 31 日, 長野県松本市.
- 2 F. Takahashi, Double diffusive convection in the Earth's core and the morphology of the geomagnetic field, The 14th Symposium of Study of the Earth's Deep Interior, 2014 年 8 月 7 日, Hayama, Kanagawa, Japan.
- 3 高橋 太, ダイナモモデルにおけるコア-マントル電磁結合と LOD 変動, 地球惑星科学連合大会, 2014 年 04 月 30 日, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市.
- 4 F. Takahashi, H. Shimizu, H. Tsunakawa, Stability, bifurcation and subcritical behavior of an extended disk dynamo model: implications for the past Martian dynamo, American Geophysical Union Fall Meeting, 2013 年 12 月 9-13 日, San Francisco, CA, USA.
- 5 F. Takahashi, H. Shimizu, H. Tsunakawa, Stability, bifurcation and subcritical behavior of an extended disk dynamo model: implications for the past Martian dynamo, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2013 年 11 月 5 日, 高知県高知市.
- 6 高橋 太, Electromagnetic core-mantle coupling and length-of-day variation in dynamo simulation: A preliminary result, SEDI 2013 Pre-Symposium, 2013

- 年 9 月 28 日, 神奈川県葉山町.
- 7 F. Takahashi, Double diffusive convection in the Earth's core and the morphology of the geomagnetic field, Japan Geoscience Union Meeting, 2013 年 5 月 21 日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市.
 - 8 F. Takahashi, A numerical study on thermo-compositionally driven dynamo models, American Geophysical Union Fall Meeting, 2012 年 12 月 5 日, San Francisco, CA, USA.
 - 9 F. Takahashi, A numerical study on thermo-compositionally driven dynamo models, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2012 年 10 月 23 日, 北海道札幌市.
 - 10 高橋 太, 熱・組成対流で駆動される地球ダイナモの数値シミュレーション, 地磁気・古地磁気・岩石磁気夏の学校, 2012 年 9 月 12 日, 兵庫県養父市.
 - 11 F. Takahashi, H. Shimizu, A detailed analysis on a dynamo mechanism in a rapidly rotation spherical shell, The 13th Symposium of Study of the Earth's Deep Interior, 2012 年 7 月 3 日, Leeds, UK.
 - 12 高橋 太, 二重拡散対流と安定成層を考慮した地球ダイナモモデル, 地球惑星科学連合大会, 2012 年 5 月 25 日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 太 (TAKAHASHI FUTOSHI)
九州大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 20467012