

氏名・(本籍)	かとうひろふみ 加藤浩文
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第1256号
学位授与年月日	平成4年3月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	A Study on Magnetic Field Generation by Magnetosconvection in a Model Planet (モデル惑星内のMHD熱対流による磁場生成に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教授 大家 寛 教授 斎藤 尚生 教授 福西 浩 助教授 森岡 昭 助教授 岡野 章一

論文目次

Acknowledgments

Abstract

Contents

1. Introduction

1.1 Geodynamo theory

1.2 Present study

1.2.1 Plane boundary model

1.2.2 Spherical shell model

- 2. Magnetoconvection between plane boundaries
 - 2.1 Role of helicity in dynamo theory
 - 2.2 Basic equations and boundary conditions
 - 2.3 Algorithm for solving equations
 - 2.4 Results and discussion
 - 2.4.1 Convection caused by a simple perturbation
(non-magnetic case)
 - (a) Temporal evolution of kinetic energy
 - (b) Velocity field
 - (c) Distribution of helicity density for the rotating case
 - (d) Generation of ωz
 - (e) Distribution of helicity density for the non-rotating case
 - (f) Temperature field
 - 2.4.2 Convection with a complicated perturbation
 - (a) Temporal variation of kinetic energy
 - (b) Velocity field
 - (c) Distribution of helicity density
 - (d) Temperature field
 - 2.4.3 Magnetic case
 - (a) Temporal evolution of kinetic and magnetic energies
 - (b) Velocity and magnetic fields
 - (c) Geometric relation between the velocity
and magnetic field vectors
 - (d) Kinetic and magnetic energy spectra
3. Magnetoconvection in a spherical shell
 - 3.1 Toroidal and Poloidal fields
 - 3.2 Basic equations and boundary conditions
 - 3.3 Methods of numerical analysis - Algorithm for simulation
 - 3.4 Results and discussion
 - 3.4.1 Velocity field
 - (a) Effect of rotation on convection
 - (b) Distribution of helicity density
 - (c) Magnetic field

4. Discussion

4.1 Check for the boundary effects in the results

4.2 Necessity of small-scale dynamo

4.3 Possible direction for future studies

Figures

5. Conclusion

References

論文内容要旨

1. 序論

古地磁気学の結果より、地球磁場は10億年以上存在していることが示されている。一方、地球の核の磁気拡散時間は数万年と見積もることができる。したがって地球磁場は、地球形成時に地球が獲得した化石磁場ではない。さらに、地球の核の温度は、Currie 点よりも高いと考えられ、このことは地球磁場が永久磁場ではないことを示している。また、地球磁場は過去において数十年から数十万年にわたる様々な時間スケールをもつ永年変化をしたことが知られ、現在、地球の主磁場の存在とその時間変化は地球ダイナモ過程によるものであることが判明している。すなわち、地球外核内の電気伝導性流体の運動が地球磁場を生成維持する過程である。地球ダイナモや太陽ダイナモにおいては伝導性流体のヘリカルな流れと差動回転が重要な役割をはたす。これらの流れは回転する球殻内の対流がかかわっていて、地球ダイナモ過程を明らかにするためには、回転する球殻内での MHD 熱対流の研究が必要となる。

本論文では回転する系での MHD 熱対流の計算機シミュレーションを行ない、回転が対流運動や磁場生成に及ぼす影響を調べた。本研究は二つの部分からなる。一つは水平平板間の MHD 熱対流の研究であり、単純な条件のもとでのシミュレーションにより回転の効果の素過程を調べた。もう一つは球殻内の MHD 熱対流の研究であり地球ダイナモ問題により適した、現実的なモデルを扱った。

2. 水平平板モデル

この節では、系の角速度ベクトルが重力ベクトルと反平行なモデルを扱う。

はじめに磁場がない場合を考え、系の回転が対流運動に及ぼす影響を調べた。ここでは kinetic helicity 密度の分布に注目した。対流運動の速度が小さい場合には得られた helicity 密度の分布は中央の水平面に対して反対称となる。これは線形理論の結果と一致する。対流の速度が大きくなると移流によって渦が運ばれ helicity 密度の分布は中央の水平面に対して対称に近いものとなる。この移流の helicity 密度への効果を定量的に調べるために、初期に単純な形の擾乱をあたえ、渦度の z 成分の時間変化に対する三つの項、すなわち、Coriolis 力の項、渦度の輸送の項そして渦度の引き伸ばしの項の寄与を調べた。渦度の z 成分は系が回転している場合には Coriolis 力によって効果的に作られ、回転の効果を表わす良い指標となる。計算の結果、時間発展の初期の対流速度の小さいときには Coriolis 力が他の 2 項よりも大きく、反対称な helicity 密度が実現するが、時間とともに非線形項(移流項)が大きくなり、輸送の項が helicity 密度の分布を対称に近いものに変えることが示された。さらに、初期擾乱として複雑な形のものを用いて、いくつかの Taylor 数に対する計算を行ない、回転の影響の強さによって対流の性質がどのように変化するかを調べた。回転の影響が強まるにつれ対流の水平方向のスケールは小さくなり、ヘリカルな構造が強まることが示された。

次にシミュレーションは磁場がある場合を扱った。ここでは初期に弱い磁場が系に与えられその時間発展が調べられた。その結果、回転がない場合には磁場エネルギーは初期の成長の後ほとんど単調に減少して行くが、回転がある場合には磁場エネルギーの減衰は小さく、流体運動による磁場生成が起こっていることが示された。どちらの場合も、磁場エネルギーの飽和レベルは初期磁場の数倍であり、系は運動エネルギーが磁場エネルギーに卓越した Kinematic な状態となる。速度ベクトル u と磁場ベクトル B の幾何学的な関係を調べるために、 u と B のなす角の頻度表を与えた。回転がない場合には、2次元のロール状の対流の構造を反映して、 u と B は時間とともにお互いに垂直になろうとする。一方、回転がある場合には、 u と B のなす角の分布は一様に近く、このような u と B の幾何学的な関係が誘導方程式の誘導項を通して磁場生成に寄与することが判明した。

3. 球殻モデル

ここでは、地球磁場ダイナモのより現実的なモデルとして、回転する球殻内での MHD 熱対流のシミュレーションをおこなった。球殻の内半径と外半径の比は0.4とし、重力加速度は r に比例するとする。球殻の外部は絶縁体とし、球殻の内部は球殻と同じ電気伝導度を持つ固体であるとするとする。

このモデルにおいて浮力や回転の強さを表わすパラメーターを変えて計算を行ない、系の回転が対流や磁場生成に及ぼす効果を調べた。

回転がある場合に得られた速度場は、次のような性質を示す。

- 1) 軸がほぼ系の回転軸と平行なロール状の対流パターンが現われる。このロールの経度方向のスケールは、回転がない場合に比べて小さい。
- 2) 赤道面に対して対称な対流運動が現われる。
- 3) 回転がない場合に比べて強い差動回転が現われる。
- 4) 対流パターンは西方移動する。
- 5) helicity 密度は回転がない場合に比べて大きい。
- 6) 北半球において、経度方向に平均した helicity 密度は、内核に接し軸が回転軸と一致する円筒の外側では負の値を取り、この円筒の内側では正の値を取る。

これらの性質を持つ速度場は、磁場生成を行なうことが予想される。しかし、磁気 Prandtl 数を 1 とした計算では磁場は時間とともに減衰し、成長にはならない。磁気 Prandtl 数を大きく (磁気拡散率を小さくする) と磁場は成長するが得られた磁場はかなり間欠的なもので、球面調和関数の高次のモードにも大きな振幅を持つ。この得られた磁場の空間的な性質は双極子磁場が卓越する地球磁場の性質とは異なると結論される。さらに、地球外核における磁気拡散率の値は、動粘性率や熱拡散率の値よりも大きいと考えられ磁気 Prandtl 数を 1 よりも大きくする扱いは、地球ダイナモ問題では適切ではない。研究の結果は微視的に多数の渦が合成された合成された状態、すなわち、マイクロ状態を取り入れる必要を示唆している。

4. 結論

上で述べたように、得られた流体運動は、回転する球殻内での熱対流の特徴的な性質であるヘリカルな流れと差動回転を含み、磁場を生成する性質を備えた流れと考えられる。しかし、適度な大きさの磁気 Prandtl 数に対して磁場の再生成は起こらなかった。この原因として、トロイダル磁場からポロイダル磁場を作り出す α -効果が、本モデルにおいて不十分であるためと考えられる。本モデルは large-scale model であり、small-scale の現象の効果は取り入れられていない。ポロイダル磁場からトロイダル磁場を作り出す ω 効果は、large-scale の差動回転によるもので、本モデルにおいても、トロイダル磁場の複雑な時間変化から ω 効果は起こっていると考えられる。 α -効果を十分とり入れポロイダル磁場の減衰しないシステムとして発展する状況を必要とすることが判明した。

small-scale の速度場と磁場の相互作用による α -効果を取り入れる事により、より効果的なダイナモ作用が起こり、現実に近い地球ダイナモ過程を再現することができる見通しが得られた点は、本来基礎過程を究明する事を目的とした本研究の大きな成果である。

論文審査の結果の要旨

加藤浩文提出の論文は、地球磁場成因となる地球外核におけるダイナモ過程を解明するため導電性流体の力学とその磁場誘導過程を計算機シミュレーションによって究明したものである。実際の地球外核におけるダイナモ過程をシミュレーションすることが究極の目的であるが、本研究はその究極に向ってのステップをふんでモデルを立てている、したがって、対象をモデル惑星として取り上げている。

計算機シミュレーションはまず平行境界にとり囲まれた直方体系の中の熱対流に対し

- i) 回転及び磁場効果がない場合
- ii) 回転が存在し磁場効果がない場合
- iii) 回転と磁場効果の両者が存在する場合

について究明した。

その結果熱対流だけでは磁場を生む要因となる有効な渦が発生しない事、また回転がある系では渦が微細にわかれつつ発達すること、そしてこの微細にわかれた渦が磁場を成長させることが判明した。これらの結果は、特にヘリシティ分布、及び磁場ベクトルと流体の速度ベクトルの間になす角度分布状態等のパラメーターを使って定量的に表す手段も開発することができた。

続いて研究は、地球外核モデルについて進められ、平行境界のシステム同じ i)～iii) の条件について検討した。その結果、回転によってデーラー・プラウドマンの効果により軸に平行に渦対流が発達することが判明した。平行境界モデルと異なる要素はコリオリ力以外に遠心力が各部分で有意に作用するため、こうした作用の総合的結果として、本研究で取扱っている範囲の大規模渦対流にあっては、現実を説明するような磁場が発生し得ないことも判明し、地球磁場の本格的な発生はさらにこのモデルに、微小渦を加えてゆく事にあたることを指摘している。これら全て地球磁場の成因という極めて重要な問題に対して、その核心に向う成果を得ていて本人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有する事を示している。よって加藤浩文提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。