

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	磁気流体力学シミュレーションを用いた原始惑星系円盤の乱流・熱構造の理解
Title(English)	Understanding the turbulent and thermal structure of protoplanetary disks with magnetohydrodynamic simulations
著者(和文)	森昇志
Author(English)	Shoji Mori
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11059号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:奥住 聡,井田 茂,綱川 秀夫,中本 泰史,野村 英子,廣瀬 重信
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11059号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	森 昇志	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	奥住 聡	准教授	野村 英子	准教授
	審査員	井田 茂	教授	廣瀬 重信	海洋研究開発機構
		綱川 秀夫	教授		主任研究員
中本 泰史		教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は “Understanding the turbulent and thermal structure of protoplanetary disks with magnetohydrodynamic simulations (磁気流体力学シミュレーションを用いた原始惑星系円盤の乱流・熱構造の理解)” という題目であり、全4章から成る。

第1章 “General Introduction” では、太陽系外惑星ならびに原始惑星系円盤の観測と、惑星および原始惑星系円盤構造に関する理論モデルをレビューし、これらをふまえて本研究の目的を述べている。惑星の形成の場である原始惑星系円盤の乱流構造や温度構造を理解することは、惑星の材料物質である固体粒子の成長と組成進化を解明する上で重要な課題である。円盤の乱流および温度構造は、円盤ガスの磁気流体力学的な振る舞いに大きく影響を受けるが、その影響は不明な点が多い。本論文の目的は、原始惑星系円盤の電離構造を適切に考慮した磁気流体力学シミュレーションに基づいて、円盤の乱流および熱構造を理解することである。

第2章 “Effects of Electron Heating on the Magnetorotational Instability” では、原始惑星系円盤の磁気流体力学的乱流 (磁気乱流) 中での電子の加熱が磁気乱流に及ぼすフィードバックについて述べている。磁気乱流に付随する電場がプラズマ粒子を加熱すると、プラズマ粒子のダストへの衝突頻度が増加し、結果として円盤ガスの電離度が低下することが近年の理論研究により示されている。筆者の過去の解析的な研究により、この効果が原始惑星系円盤の外側 (中心星から概ね 10 天文単位以遠) の領域における磁気乱流を抑制しうることが示されていたが、数値実験による検証はこれまで行われていなかった。筆者は、電子加熱による電離度低下の効果を取り入れた円盤局所磁気流体シミュレーションを行い、この効果を介して磁気乱流が自己抑制化されることを実証している。さらに、自己抑制化された磁気乱流の強度を定量的に予測することを可能にする解析公式を導出している。

第3章 “Temperature Structure of the Inner Regions of Protoplanetary Disks” では、原始惑星系円盤の内側領域の温度構造を、非理想磁気流体力学に基づき調べている。円盤の内側 (中心星から概ね 10 天文単位以内) の領域では、ガスの力学的エネルギーの散逸に伴う熱の発生が円盤内部の温度に大きな影響を与える。惑星形成の理論研究で広く用いられている粘性降着円盤モデルは、円盤の内部に一樣に乱流が存在し、かつ乱流の運動エネルギーの散逸が局所的に起こると仮定している。しかし、このような理想化された熱散逸が原始惑星系円盤の現実的なダイナミクスのもとで実現されるかどうかは長らく不明であった。筆者はこのような背景のもと、原始惑星系円盤の内側領域で重要となる3つの非理想磁気流体効果 (オーム抵抗、ホール効果、両極性拡散) を考慮した磁気流体力学シミュレーションを用いて、円盤の鉛直方向のエネルギー輸送・散逸構造を広い円盤パラメータ領域にわたって系統的に調べた。その結果、円盤内部ではオーム散逸によって磁気乱流の生成が抑制されることに加えて、ホール効果などによって増幅される大局的な磁場が散逸を経験せずに円盤表面から外部へ排出されることを明らかにしている。さらに、これらのシミュレーション結果を用いて、円盤の鉛直方向の温度構造を解析的に求めた。その結果、円盤内側領域での磁気流体力学的な加熱は、一般に無視できるほど非効率であるという結論を導いている。

第4章 “Discussion and Summary” では、本研究の結果をまとめるとともに、それらを総合して描かれる原始惑星系円盤の乱流・熱構造の描像を提示している。具体的には、第2章で得られた磁気乱流強度の解析式を用いて、円盤の外側領域における乱流強度の動径分布を推定し、中心星から 80 天文単位までの広い領域にわたって電子加熱の効果が磁気乱流強度を低下させることを示している。また、第3章で得られた結果を用いて、円盤内側領域における氷の昇華線 (スノーライン) の時間進化を計算し、スノーラインが円盤形成から数十万年のうちに地球軌道より内側に到達することを示している。これらの結果を踏まえて、電子加熱による磁気乱流の抑制が微惑星形成を促進しうること、スノーラインの早期の移動が地球をはじめとする岩石惑星の形成モデルに大きな制約を与えることについて議論を行っている。

以上の通り、本論文は現実的な磁気流体力学シミュレーションに基づき、原始惑星系円盤の乱流・温度構造に対する新たな描像を提示した。本論文の結果は従来の惑星形成研究で採用されてきた単純な仮定を覆すものであり、今後の惑星形成や円盤ダイナミクスの研究の新しい指針を与えるものである。よって、博士 (理学) の学位を与えるにふさわしいものと認める。

注意: 「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。