

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887023

研究課題名(和文) 固体と磁気流体乱流の共進化を考慮した微惑星形成理論の構築

研究課題名(英文) Modeling the coevolution of dust and magnetic turbulence in planetesimal formation stages

研究代表者

奥住 聡 (Okuzumi, Satoshi)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60704533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：惑星の形成は、固体微粒子(ダスト)がキロメートルサイズの微惑星へと成長することから始まる。本研究では、惑星形成の舞台であるガス円盤(原始惑星系円盤)の磁気乱流が微惑星形成にもたらす影響に注目し、磁気乱流の強度がダストの成長とともにどのように進化するかを理論的に調べた。具体的には、(1)磁気乱流の素となる円盤磁束の円盤内輸送をモデル計算によって調べ、定常状態では磁束強度に上限が存在することを発見した。(2)磁気乱流中でのプラズマ加熱に対する精密な理論モデルを構築し、プラズマ加熱が磁気乱流の安定化とダストの負帯電の促進を引き起こすこと、そしてその結果としてダストの成長が遅延することを発見した。

研究成果の概要(英文)：Planet formation begins with the growth of dust grains to planetesimals. In this research project, we have focused on the roles of protoplanetary disk turbulence in planetesimal formation processes and have investigated how the intensity of magnetic disk turbulence evolves with dust growth. Specifically, (1) we analyzed the transport of magnetic fluxes (the seeds of magnetic turbulence) within a protoplanetary disk, and found that there is an upper limit on the magnetic flux strength in a steady disk; (2) we for the first time modeled plasma heating by magnetic disk turbulence, and found that the heated plasma stabilizes the magnetic turbulence, promotes grains' negative charging, and thereby slows down the collisional growth of the grains.

研究分野：理論天体物理学

キーワード：惑星形成 微惑星 原始惑星系円盤 磁場 ダスト

1. 研究開始当初の背景

微惑星の形成は、惑星形成における最大の謎の1つである。微惑星形成の不定性の多くは、その舞台である原始惑星系円盤の乱流状態が惑星形成理論において不定なパラメータとして扱われていることを原因とする。円盤乱流の最も代表的な駆動源は、「磁気回転不安定性」と呼ばれる、円盤のプラズマと星間磁場との相互作用が引き起こす不安定性である。近年の磁気流体シミュレーションによって、磁気回転不安定駆動の乱流（以下、磁気乱流）の強度は、(1) 不安定性のもととなる磁場の磁束強度と、(2) 円盤ガスと磁場との結合力を決めるガスの電離度の2つの物理量によって決定づけられることが明らかになってきた。興味深いことに、円盤ガスの電離度は、微惑星のもととなるダスト粒子の量に大きく依存することが知られている。このことは、固体と乱流が相互に影響を及ぼし合いながら進化することを示唆している。

2. 研究の目的

原始惑星系円盤の乱流に関する最新の理論的理解に立脚し、固体と磁気乱流の共進化を統一的に理解することを目標とする。そのためのステップとして、(1) 円盤磁束の進化を記述する理論モデルを確立すること、(2) 微小なダスト粒子による電離度制御を組み込んだ乱流モデルを構築し、そのような乱流の中でのダスト衝突成長進化過程を明らかにすること、の2点を課題として掲げた。

3. 研究の方法

(1) 平均場理論による円盤磁束輸送の定式化

上述のとおり、円盤磁気乱流の強度は、円盤を貫く磁束の強度に依存する。同時に、乱流は円盤ガスの中心星方向への降着を引き起こし、これに伴い磁束は円盤内を移動する。このように、磁束輸送と円盤進化は互いに依存する関係にある。本研究ではこのような同時進化を解明するための第一ステップとして、磁束輸送を質量輸送と切り離して解析し、磁束強度のとりうる値の範囲に対して制約を与えることを試みた。具体的には、Lubow et al. (1994)によって提唱された、降着円盤上での磁束輸送の平均場モデルを採用した。このモデルは磁束の輸送過程を、ガス降着に伴う円盤内側方向への移流と、磁気拡散（乱流拡散を含む）による円盤外側方向への拡散、という2つの過程に分けて表現するものである。そしてこれらの輸送過程は、円盤内磁場の誘導方程式と、円盤外磁場の形状方程式という2つの方程式の組で記述される。本研究では、この方程式系の定常解および時間進化解を、数値計算・解析計算の両面から調べた。

(2) 弱電離プラズマの電場加熱を考慮した円盤電離モデルの導出

原始惑星系円盤のような低電離度のダストプラズマでは、微小なダスト粒子によるプ

ラズマ粒子の捕獲がガスの電離度を大きく低減させる。我々はこれまでの研究において、このような素過程を考慮してガスの電離度を正確・高速に計算する手法を開発し、ダストのサイズ分布の進化に応じて円盤電離度を決定する方法論を確立している(Okuzumi 2009)。また、与えられた電離度・磁束強度に対して乱流強度を予測する経験公式もすでに作成済みである(Okuzumi & Hirose 2011)。本研究ではこれらの理論手法とダストの衝突成長モデルを組み合わせ、乱流強度をフリーパラメータとして扱わないような定式化のもとでダスト進化を議論することを試みた。

本研究課題で我々が特に注目したのは、磁気乱流によるプラズマの加熱と、それによるガス電離度・ダスト帯電量の変化である。Inutsuka & Sano (2005)によって、磁気乱流に付随する電場が電子を高温に加熱し、それによって円盤内の電離度が大きく変化することが予想されていた。我々はこの予想に加えて、電子加熱が起こるとダストの帯電量が著しく負に偏ることを予備的な考察から発見した。ダストの負帯電は微小なダストの成長を律速するため、上記の効果は円盤ダストの進化を理解する上で潜在的に重要である。Inutsuka & Sano (2005)の予想は、円盤電離化学に対する従来の理解を大きく変更しうるものとして注目されてきたが、提唱から10年近く経過した現在に至るまでこれを検証する研究は行われていなかった。本研究ではこの課題に取り組むため、プラズマの電場加熱過程を組み込んだ新しい円盤電離モデルを構築した。このモデルの新しい点は、電場存在下での弱電離プラズマの速度分布関数を用いて電離化学反応（ダストへのプラズマ吸着を含む）の反応率を計算する点である。このような取り扱いによって、ガス電離度・ダスト帯電量に対する電場加熱の影響を定量的に評価することを目指した。

4. 研究成果

(1) 定常状態における円盤磁束分布と最大磁束強度

磁束移流と磁気拡散が釣り合う定常状態の解析から、定常状態では円盤内部に維持可能な磁束量に上限が存在することを明らかにした。具体的には、磁束輸送方程式の数値計算から、ある量を上回る磁束を初期の円盤に与えると、余剰分の磁束が時間の経過とともに円盤外部へと排出されることを経験的に発見した。磁束上限値の環境パラメータ依存性を一般的に調べるため、磁束輸送方程式の定常解を解析的に導出した。この結果、円盤の各位置における磁束強度の最大値が、円盤の最外縁半径と円盤外部磁場強度の関数として決定することを明らかにした。具体的には、円盤外縁半径を約100 AU、外部磁場（星間磁場）を約10 μG とすると、最大磁束強度は1-10 AU付近で1-100 mG程度、円盤が中心

星と接する0.01 AU付近では1 kG程度である。以上の成果によって、原始惑星系円盤のもちうる磁束強度を、定量的にかつ磁束輸送の物理に立脚したかたちで議論することが可能になった。

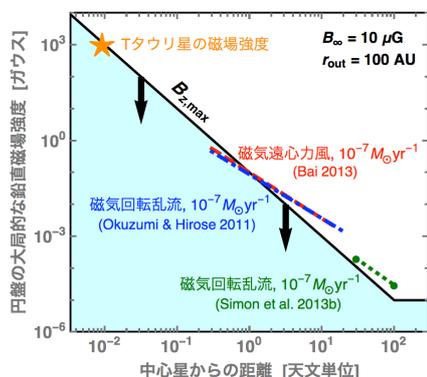


図1: 本研究で導かれた原始惑星系円盤の磁束強度の最大値(黒実線)。赤線・青線・緑線は、0.1太陽質量/100万年の定常ガス降着を引き起こすのに必要な磁束強度の理論値。星印は若い星の典型的な磁束強度を表す。論文⑤の図を改変。

さらに、得られた公式と磁気流体力学的な円盤降着モデルを組み合わせ、磁気乱流などによってもたらされうる最大の質量降着率がおおよそ0.1太陽質量/100万年であることを導いた(図1参照)。本研究の結果は、原始惑星系円盤の定常降着率がおおむね0.1太陽質量/100万年以下であるという観測事実と調和的である。

本項の研究成果を1編の論文にまとめ、査読付き国際学術誌において発表した(論文⑤)。

(2) 時間進化する原始惑星系円盤における磁束の輸送

前項の発見がさらに一般的な状況下でも成立するかを検証するため、粘性円盤モデルと呼ばれる時間進化する円盤モデルのもとで磁束輸送の解析を行った。この結果、「ガスの中心星への降着に伴う磁束移流」の時間スケールが、磁気拡散や円盤粘性進化の時間スケールより短くなる場合に、磁束の円盤内分布は定常状態におけるそれによく近似できることを明らかにした。以上の研究により、磁気乱流の強度を決定付ける円盤磁束強度の空間分布を、円盤形成からの経過時間の関数として理解することが可能になった。

本項の研究成果を1編の論文にまとめ、査読付き国際学術誌において発表した(論文④)。

(3) 電場加熱を考慮した弱電離ダストプラズマの電荷反応モデルの完成と、強電場中での電離度低下現象の発見

4節2項で述べたように、磁気乱流のつくる強電場が円盤電離バランスに与える影響

を解明するため、プラズマの電場加熱を考慮した電離化学反応モデルを構築した。原始惑星系円盤のような弱電離プラズマにおける、電場存在下での電子の速度分布関数は、Davydov分布(Maxwell–Druyvesteyn分布)と呼ばれる解析的な分布関数で表される。我々は、この解析表式を用いて、弱電離ダストプラズマでの電荷反応(気相中でのプラズマ再結合、プラズマのダスト表面への吸着、加熱電子による中性ガスの電離)の速度係数を電場強度の関数として厳密に計算することに成功した。これにより、円盤電離度およびダスト帯電量を、電場強度に応じて正確にかつ無矛盾に計算することを初めて可能にした。

上記の電離度計算手法を用いて、原始惑星系円盤の典型的な物理パラメータセットを仮定したいくつかの電離度計算テストを行った。その結果、微小なダストが豊富に存在する環境では、電場強度の上昇とともにガスの電離度が低下するという極めて興味深い現象を発見した。この現象の物理機構は以下の通りである。一般に、ダストを多量に含むプラズマ中では、ガスの電離度は「プラズマとダストの衝突頻度(ダストへの付着頻度)」に反比例する。このようなプラズマでは、電場がプラズマ粒子(特に電子)を加熱すると、プラズマとダスト粒子との衝突頻度が上昇する。このため電場強度上昇とともに電離度が減少するのである。重要なことに、この現象は、原始惑星系円盤での磁気乱流の発達に対して負のフィードバックが存在することを示唆する。なぜなら、円盤において強電場を生成するのは磁気乱流であり、かつ磁気乱流は電離度の低下とともに安定化されるからである。このような現象は、本研究で初めて明らかになったものであり、惑星形成論における画期的な発見であるばかりでなく、弱電離ダストプラズマの基礎研究においても新たな展開をもたらす可能性がある。

本項の研究成果を1編の論文にまとめ、査読付き国際学術誌において発表した(論文②)。

(4) 原始惑星系円盤における「乱流自己抑制領域」の特定と、ダスト静電反発に対するプラズマ電場加熱の効果の検証

前項の電離化学モデルと、磁気乱流の経験モデルを組み合わせ、磁気乱流によるプラズマの加熱が原始惑星系円盤の具体的にどの領域で効果的に作用するかを体系的に調べた。その結果、0.1μmサイズの微小なダストが豊富に存在する円盤では、「電場加熱領域」は中心星から80天文単位までにわたる広い領域(特に円盤赤道面の付近)に形成されることを明らかにした(図2)。この領域は、合体成長などによって微小なダストが円盤から除去されるにつれて縮小する。また、この領域における磁気乱流の飽和強度(乱流粘性係数)を、簡単なスケールリング則を用いて推定したところ、電場加熱を考慮しない場合に

比べて乱流粘性係数が2桁以上低下することが示された。この予測は、今後の詳細な磁気流体数値シミュレーションによって立証される必要があるものの、従来の円盤乱流に関する理解を大きく転換しうるものである。

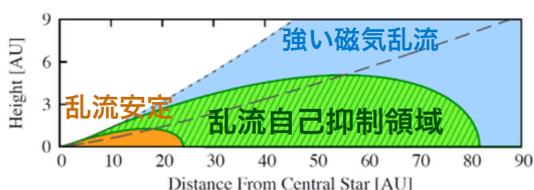


図2: 本研究で導かれた、原始惑星系円盤における「電場加熱領域」を表す2次元図。横軸は中心星からの距離、縦軸は赤道面からの距離(単位は天文単位)であり、緑色の領域が「電場加熱領域」(磁気乱流の自己抑制が起こる領域)を表す。橙色の領域は従来の磁気乱流安定領域、青色の領域は磁気乱流が十分に発達する領域をそれぞれ表す。投稿中論文(Mori & Okuzumi, arXiv:1505.04896v1)の図3を改変。

さらに、電場加熱領域におけるダストの成長に対する静電反発の効果調べた。具体的には、様々なサイズのダストに対して、それらの帯電量、静電反発エネルギー、相対運動エネルギー(乱流強度によって決まる)を無矛盾に計算した。一般に、ダストの衝突断面積は、静電反発エネルギーを相対運動エネルギーで割った量の関数であり、このエネルギー比が大きいほどダストの衝突合体はクーロン反発によって強く妨害される。我々の計算の結果、 $1\mu\text{m}$ 以下のダストのエネルギー比は、電場加熱を考慮しない場合に比べて最大4桁程度上昇することを明らかにした。この結果は、電場加熱によって(1)ダストの負帯電量が上昇することと、(2)磁気乱流強度が低下することの2つに起因する。また、このようなエネルギー比増加の帰結として、 $1\mu\text{m}$ 以下のダストの成長は電場加熱領域では実質的に禁止されることを明らかにした。電場加熱領域は円盤の上層部(赤道面から離れた領域)では消失するため、原始惑星系円盤における微小ダストの成長はこのような上層部でのみ可能である。このことは、微小ダストの成長進化が、従来の理論的理解に比べて遅く進行することを示唆している。事実、天文観測から推定されている微小ダストの進化時間スケールは、理論予想に比べて数桁長いことが知られている。我々の発見したダスト成長の遅延は、このような理論と観測の不一致を解消する可能性がある。今後は、電場加熱領域の空間構造を考慮に入れたダスト進化計算を実施し、上記可能性を定量的に検証していきたいと考えている。

本項の研究成果を1編の論文にまとめ、査読付き国際学術誌に投稿した(Mori & Okuzumi, arXiv:1505.04896v1)。

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 Tomida, K., Okuzumi, S., Machida, M. N., 2015, Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Protostellar Collapse: Nonideal Magnetohydrodynamic Effects and Early Formation of Circumstellar Disks, *The Astrophysical Journal*, 801, 117 (20pp.), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/801/2/117
- ② Okuzumi, S., Inutsuka, S., 2015, The Nonlinear Ohm's Law: Plasma Heating by Strong Electric Fields and its Effects on the Ionization Balance in Protoplanetary Disks, *The Astrophysical Journal*, 800, 47 (19pp.), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/800/1/47
- ③ 奥住 聡, 2014, ダストから微惑星へ: 衝突密度進化と急速合体成長, *日本惑星科学会誌 遊星人*, 23, pp.371-381, 査読有, <https://www.wakusei.jp/book/pp/2014/2014-4/2014-4-371.pdf>
- ④ Takeuchi, T., Okuzumi, S., 2014, Radial Transport of Large-Scale Magnetic Fields in Accretion Disks. II. Relaxation to Steady States, *The Astrophysical Journal*, 797, 132 (12pp.), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/797/2/132
- ⑤ Okuzumi, S., Takeuchi, T., Muto, T., 2014, Radial Transport of Large-Scale Magnetic Fields in Accretion Disks. I. Steady Solutions and an Upper Limit on the Vertical Field Strength, *The Astrophysical Journal*, 785, 127 (16pp.), 査読有, DOI:10.1088/0004-637X/785/2/127
- ⑥ Fujii, Y. I., Okuzumi, S., Tanigawa, T., Inutsuka, S., 2014, On the Viability of the Magnetorotational Instability in Circumplanetary Disks, *The Astrophysical Journal*, 785, 101 (8pp.), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/785/2/101

[学会発表](計24件)

- ① 奥住 聡, 原始惑星系円盤における電子の電場加熱に対する磁場の影響, 日本天文学会 2015年春季年会, 2015年3月18日~21日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)
- ② Okuzumi, S., Electric-field heating of plasmas and its effect on magnetorotational

turbulence in protoplanetary disks, The 2014 German-Japanese meeting on Exo-Planets and their formation, 2014年11月4日~7日, Heidelberg (Germany)

- ③ 奥住 聡, (微)惑星形成素過程の開拓, 日本惑星科学会 2014年秋季講演会, 2014年9月24日~26日, 東北大学片平キャンパス (宮城県仙台市)
- ④ Okuzumi, S., Nonlinear Ohm's law: Electric heating of plasmas and its effect on MHD in protoplanetary disks, Non-ideal MHD, Stability, and Dissipation in Protoplanetary Disks, 2014年8月4日~8日, Copenhagen (Denmark)
- ⑤ Okuzumi, S., Magnetic Turbulence and Dust Evolution in Protoplanetary Disks (招待講演), US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, 2014年5月20日~24日, 東京大学本郷キャンパス (東京都文京区)
- ⑥ 奥住 聡, 惑星形成過程における弱電離ダストプラズマの物理 (招待講演), 日本地球惑星科学連合 2014年大会, 2014年4月28日~5月2日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
- ⑦ 奥住 聡, 静電反発を考慮したダスト合体成長の大局的数値計算法, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, 2014年4月28日~5月2日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
- ⑧ 奥住 聡, 微惑星形成研究の進展と将来 (招待講演), 理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム, 2013年12月25日~27日, 東京大学柏キャンパス (千葉県柏市)
- ⑨ Okuzumi, S., The fate of planetesimals in turbulent protoplanetary disks, Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II, 2013年12月8日~12日, Kona (USA)
- ⑩ 奥住 聡, 原始惑星系円盤における大局磁場の輸送と進化, 日本惑星科学会 2013年秋季講演会, 2013年11月20日~22日, 石垣市民会館(沖縄県石垣市)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.geo.titech.ac.jp/~sokuzumi/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

奥住 聡 (OKUZUMI, Satoshi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：60704533

(4)研究協力者

竹内 拓 (TAKEUCHI, Taku)

東京工業大学・大学院理工学研究科・特任
准教授

研究者番号：40372651

森 昇志 (MORI, Shoji)

東京工業大学・大学院理工学研究科・大学
院生