

3次元輻射磁気流体力学計算を用いた原始惑星系円盤の熱力学構造の研究

廣瀬重信 (独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域)

利用カテゴリ XT4B

本研究では、シアリングボックスと呼ばれる手法で、原始惑星系円盤の一部（動径スライス）を取り出し、それをシミュレーションボックスとする。シミュレーションボックスは、円盤の回転系に乗っていて、コリオリ力と潮汐力のほかに、垂直方向の重力がはたらく。本研究では、特に、この垂直方向に生じる成層構造（温度、密度、加熱率の垂直構造）に着目し、そこでの力学平衡・熱平衡を考える。

基礎方程式は、磁気散逸を考慮した輻射磁気流体力学方程式で、輻射輸送に関しては、流束制限つき拡散近似を用いる。また、原始惑星系円盤は、中心星から可視光による照射を受けているがこれに関しては、吸収と散乱の効果をモデル化し（本年度改良点、後述）、単位質量あたりの加熱率をテーブル化した上で、内部エネルギーのソース項として加える。

原始惑星系円盤では、ダストと呼ばれるサブミクロンサイズの固体微粒子が、オパシティと電気抵抗の双方をコントロールしている。後者に関しては、電気抵抗は、ガス温度と電離度の関数として表されるが、電離度は、中心星からX線による電離とダスト表面への電子吸着の電離平衡によって決まるからである。したがって、ダストの量が、原始惑星系円盤の熱力学構造を決定していると言っても過言ではない。本研究では、ダストのガスに対する質量比をパラメータとするが、簡単のため、空間的に一様とする。また、円盤の赤道面付近ではダストとガスは熱平衡にあるが、上部では両者の衝突頻度が短いため両者の温度は異なりうるため、そのための熱平衡計算も行う（本年度改良点、後述）。

本年度の成果（1）：輻射輸送計算方法の改良

本年度は、まず、数値計算方法の改良を、以下の二点について行った。

一つ目の改良点は、中心星からの可視光照射によるガスの加熱率の計算である。昨年度までは、可視光照射の輻射輸送に関しては、簡単のため散乱を無視し、入射角を適当に設定して吸収のみを考慮した解析的な取り扱いを行い、単位体積あたりの加熱率を求めて内部エネルギーのソース項として加えていた。しかし、実際には、散乱アルベドは0.5程度であり、散乱の効果を無視することはできない。そこで、今年度は以下の方針で、散乱光の効果も加えた、中心星からの可視光照射による加熱率をまずテーブル化しておき、それを輻射磁気流体力学計算で時間ステップごとに採用することにした。すなわち、輻射磁気流体力学計算を行う前に

- (a)昨年度の計算結果をもとに、円盤ダストの密度分布を、可視光吸収面高さの関数としてモデル化する。
- (b)モデル化したダストの密度分布を動径方向に拡張し、グローバルなダスト円盤モデルを構築する。
- (c)そのダスト円盤モデルに対して、モンテカルロ法を用いて、散乱光も考慮した中心星からの可視光照射の輻射平衡計算を行う。
- (d)その輻射平衡計算から、シアリングボックスを設置する半径における、可視光照射による加熱率（単位質量あたり）を、表面からの柱密度（と可視光吸収面高さ）の関数と求め、テーブル化する。を行っておく。そして、輻射磁気流体力学計算では、時間ステップごとに、
- (e)円盤ダストの垂直方向の平均密度分布をもとに、可視光吸収面高さ、各高さにおける表面からの柱密度を求める。
- (f)それらからテーブルを参照し、各高さにおける単位質量あたりの加熱率を求める。
- (g)それに、質量密度を乗じて、局所的な単位体積あたりの加熱率を求め、それをエネルギー方程式に加える。

という作業を行う。さらに、ここでは、昨年度まででない以下の二つの工夫を行った。

- (h)可視光照射の輻射輸送計算からは、昨年までの「単位体積あたりの」加熱率ではなく、「単位質量あたりの」加熱率を求める。これは、平均密度分布に基づいた輻射輸送計算結果から得られる加熱率から、局所的な温度変化を出来るだけ正確に求めるための処置である。

(i) 輻射輸送計算に用いる平均密度分布を求める際に、昨年までのように、密度の単純な水平方向平均を取るのではなく、「密度の逆数の水平方向平均」の逆数として求めた。これは、輻射輸送計算における輻射拡散係数は、密度の逆数に比例することを反映させるためである。

二つ目の改良点は、ダスト温度とガス温度の計算方法である。昨年までは、簡単のため、ダストとガスは熱平衡にあり、同じ温度を共有すると仮定していた。この仮定は、原始惑星系円盤では、密度の高い赤道面付近では正しいが、密度の低い上空では必ずしも正しくない。実際には、光学的に薄いガスの冷却は分子輝線を通してしか起きないため、ガス温度の方が高くなりうる。この分子輝線は、実際に観測で受かるため、数値シミュレーション結果と観測の比較のためにも、ガスとダストの温度を正しく求めることは必要である。このために、ダストとガスに関する以下の熱平衡を考え、それから、ダストとガス温度を求めることにした。

(j) ダストは、中心星からの可視光吸収によって加熱される、熱放射（赤外線）によって冷却される

(k) ガスは、磁気乱流散逸によって加熱され、分子輝線によって冷却される

(l) ダストとガスは、ダスト表面からのガス分子の蒸発と、ガス分子のダストへの衝突によって、エネルギー交換を行う。

以上、二点の改良点に関しては、現在テスト中であるが、間もなく本計算で採用できる見込みである。

本年度の成果（２）：デッドゾーンを持つ原始惑星系円盤における乱流構造のモデリング

原始惑星系円盤では温度が低いため、内部には電気抵抗が高く磁気乱流が抑制される「デッドゾーン」と呼ばれる領域が存在する。本研究では、電気抵抗分布を変えて複数の数値シミュレーションを実行し、それらの結果をコンパイルすることにより、原始惑星系円盤の乱流構造が、電気抵抗分布の特徴的スケールと、垂直磁場の強さのみによって、うまくモデリング出来ることが見出された

(Okuzumi and Hirose 2011)。

この結果は、原始惑星系円盤内での、ダストと乱流構造の共進化（ダストは自由電子を吸着することにより乱流を抑制し、一方、ダストの沈殿合体成長はバックグラウンドの乱流に影響を受ける）を考える上で、重要な情報となる。

本年度の成果（３）：デッドゾーンを持つ原始惑星系円盤の磁場構造

原始惑星系円盤におけるデッドゾーン内では、電気抵抗が高く磁気乱流が抑制される一方で、速度シアによるトロイダル磁場の増幅は起きる。ここでは、電気抵抗分布に関して、さらに広いパラメタサーベイを行った結果、トロイダル磁場の増幅が強く起こるためデッドゾーン内でも強いストレスが働く、という、これまで考えられなかった平衡磁場構造が存在することを新たに見出した。

来年度は、これらの平衡磁場構造と、動径方向への磁気拡散を整合的に取り扱える数値モデルを構築する予定である。