

# 磁気回転不安定性による微惑星形成についての MHD + 粒子シミュレーション

加藤真理子<sup>1</sup>、藤本正樹<sup>2</sup>、井田茂<sup>1</sup>

東京工業大学<sup>1</sup>、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部<sup>2</sup>

marikok@geo.titech.ac.jp

概要：ダストから微惑星、そして惑星が形成されると言われているが、それぞれの過程において様々な問題が残されている。そのうちの一つが微惑星形成問題であり、ダストが微惑星形成前に原始星へ落下してしまう、というものである。一方、惑星形成の現場である原始惑星系円盤内に磁場が存在するとき磁気回転不安定性が起きる。この不安定性は乱流状態を作り出すものとして注目されている。本研究では、この不安定性とそれによって作り出されるガス速度場中のダストの運動を同時に調べるために、3次元 MHD シミュレーションと粒子計算を組み合わせを行った。その結果、ある局所領域にダストが濃集積することがわかった。本研究ではさらに、ダストの重力場を解き、自己重力不安定を経て微惑星が形成される可能性を追究した。本研究のようなシミュレーションによって、他のモデルにおける微惑星形成過程やダスト密度変化によるガス電離度の変化等について調べることも可能であり、惑星形成過程の深い理解につながる。

## 1 はじめに

原始惑星系円盤とはガスとダストから成り、円盤内でダストが衝突・合体を繰り返して、微惑星、そして惑星が形成されると考えられている。円盤ガス圧力は原始星から離れるほど低いため、圧力勾配の分遠心力は小さくなり、ガスはケプラー回転より遅く回転する。したがって、ケプラー回転をするダストはガスの向かい風を受けて角運動量を失い、原始星方向へ移動する。ダストサイズが1 $\mu$ mのオーダーのとき移動速度は最大で、微惑星形成前にダストが円盤内から消滅する。一方で、太陽系や多くの系外惑星の存在は惑星形成が稀なことではないことを示しており、いかにしてダストが落下せずに微惑星サイズ( $\sim$ km)にまで成長するのが大問題となっている。

この問題に対して、近年では円盤内の磁場が引き起こす、磁気回転不安定性(Magneto Rotational Instability; MRI)が注目されている。MRIによって作り出される乱流中での $m$ サイズのダスト集積・自己重力不安定を介した微惑星形成が示唆されている。しかし、初期ダスト量やダストサイズ、乱流レベルによってこの結果は変わるため、問題は解決されたとは言えない状況である。

これまでは主に力学・流体力学的に議論されていた円盤進化過程や惑星形成過程において、磁場の効果が注目され始め、MHD シミュレーションが多く行われるようになってきた。その多くが全

計算領域内で MRI 成長率が一樣となるモデルを考えている。しかし、ガス電離度が低い円盤内では、成長率は円盤垂直方向の磁場の大きさに依存するので、成長率が領域によって異なる場合も考えられる。また、近年の計算機の発展に伴い、電磁流体とダストの運動を同時に解くことが可能になったものの、まだほんのわずかしが行われていない。そこで本研究では、電磁流体とダストの運動を自己無撞着に解く計算プログラムを作成し、成長率が領域によって異なる場合における微惑星形成の可能性を調べた。

## 2 MHD + 粒子シミュレーション

電離率をオーム散逸項に考慮に入れた resistive-MHD 方程式と超粒子の運動方程式を同時に解くことで、ガスとダスト( $m$ サイズ)の運動を調べる。ガス-ダスト間の運動量交換を計算するのに、格子点上に定義されたガス速度とラグランジュ的に動く超粒子の速度から、超粒子の位置でのガス速度場と格子点における超粒子の速度場を求めなくてはならない。この際に、プラズマ粒子シミュレーションで用いられる方法(Particle-In-Cell 法、Cloud-In-Cell 法)を応用した。本研究では、ダスト密度が増加し飽和した時点からダストの自己重力を考慮に入れ、重力不安定が起きるかどうか調べる。ダストの重力ポテンシャルは、格子点上に定義されたダスト密度

からポアソン方程式を解くことで得られる。このとき Fast Fourier Transform(FFT)を用いている。計算領域は、原始惑星系円盤の赤道面付近の局所領域を考える。境界条件は、回転・垂直方向には周期境界を、動径方向には差動回転によって生じるずれを考慮に入れた周期境界 (Shearing Box Model) を用いる。

本研究では、磁場の垂直成分の大きさが動径方向によって異なり、MRI が起きる領域 (不安定領域) と起きない領域 (安定領域) とが存在する場合を考える。そのため、MRI 成長波長に対して、動径方向により広がった計算領域を必要とする。本計算では  $950 \times 100 \times 50$  の格子の上に約  $10^8$  個の粒子を配置し、ベクトル並列型計算機 sx9 を 1 ノード (16CPU) 使用し、メモリ約 200Gbyte、約 200 時間 (重力場を解いた run は計 300 時間) で計算した。

### 3 シミュレーション結果

電磁流体とダストの運動を同時に解き、MRI 成長から微惑星形成の一連を計算することが出来た (図 1、2)。領域によって異なる成長率を持つ MRI はケプラー回転状態とは異なる準定常状態を作り出す。この準定常状態下ではガスとダストの回転速度差が逆転する領域が形成され、その領域外端でダストが集積する。ダスト密度の最大値は初期の約 1,000 倍を超え (図 3)、ダストの自己重力を解くと自己重力不安定が起き微惑星が形成される (図 2)。この微惑星形成プロセスは、これまでに提唱されてきたモデルとは異なり、新たな発見といえる。

### 4 まとめ

電磁流体とその中で運動するダストの運動を自己無撞着に解き、さらにダストの重力場も計算するプログラムを開発することで、MRI 成長から微惑星形成までの一連の様子を調べることが出来た。しかし、形成される微惑星のサイズを調べるためには、より高い解像度が必要である。他にも考慮に入れるべき点 (電離率の時間変化など) はいくつかあり、大規模計算機による長時間計算が必要不可欠である。また、円盤のグローバル構造 (温度やダストサイズ分布、形成される微惑星の分布等) を考慮に入れるためには、高解像度グローバル・シミュレーションを行う必要があり、次世代計算機の発展に期待される。

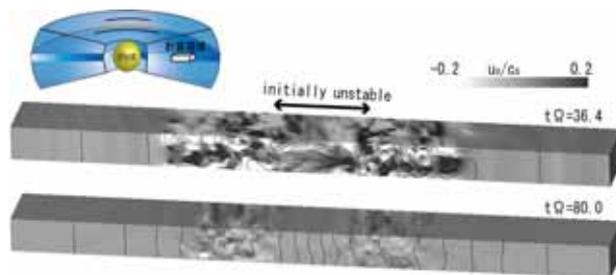


図 1: MRI 成長の様子。  
色 - ガス動径方向速度、線 - 磁力線  
中央部分では初期垂直磁場が大きく MRI 成長率が大きい、その両側では初期垂直磁場が弱く MRI は起きない。

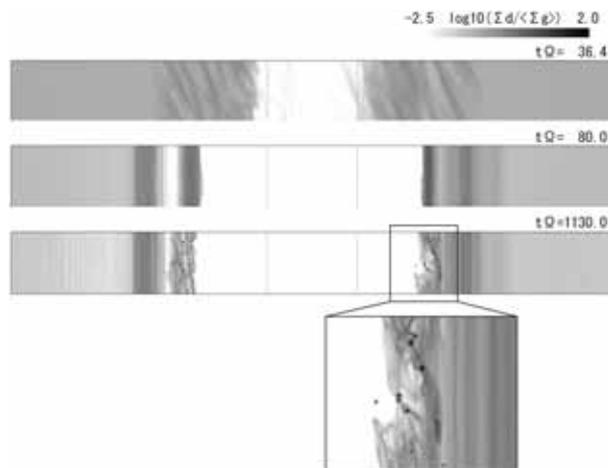


図 2: ダスト集積と自己重力不安定の様子  
色 - ダスト面密度 (円盤真上から見た図)  
ケプラー時間 ( $t$ ) = 1130.0 の図より微惑星が形成されていることがわかる。

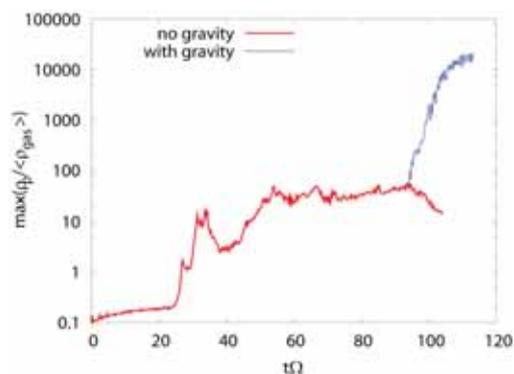


図 3: ダスト密度増加の様子  
赤 (実線) - ダスト重力場なし  
青 (点線) - ダスト重力場あり

### 参考文献

[1] M. T. Kato, K. Nakamura, R. Tandooro, M. Fujimoto & S. Ida, *Astrophysical Journal*, 691, 1697, 2009