

原始惑星系円盤におけるダストと乱流場の相互作用

古谷 眸 (筑波大学大学院 数理物質科学研究科)

Abstract

原始惑星系円盤において、ダストがサブミクロンサイズからセンチメートルサイズへ成長するにあたり、衝突破壊問題が指摘されている。衝突破壊は乱流渦に追従することによって加速されたダスト同士の相対速度が、限界付着速度を超えてしまうため生じる問題である。しかし、乱流渦中のダストの運動は、ダストサイズに依存するため、相対速度は乱流場とダストの運動を統合的に解いて決めなくてはならない。ダストとガスの相対速度の緩和時間を乱流渦の時間スケール (コルモゴロフ時間) で規格化した無次元量を Stokes 数といい、乱流渦に対するダストの追従性を表す指標となる。Stokes 数が 0 の時、ダストは乱流渦と共に運動する。Stokes 数が 0 から大きくなるにつれて、ダストは乱流渦から弾き飛ばされ、渦度の小さい領域に集中し、強い空間相関が誘起される。Stokes 数が 1 のオーダーにおいて、もっとも極端な空間相関が現れることが示唆されている (Pan et al. 2011)。しかしながら、先行研究では、乱流のカスケードと散逸について、粘性流体の正しい支配方程式 (Navier-Stokes 方程式) は解いておらず、格子サイズで決まる数値粘性によって疑似的に扱っているため、この結論が正しいか否かはわからない。そこで我々は、Navier-Stokes 方程式を直接解く 3 次元大規模直接数値計算 (DNS) を行っている。これによって、ダストの相対速度と衝突確率を正確に見積もることが可能となる。本講演では先行研究との比較を行い、ダストの衝突破壊問題を解決する可能性について議論する。

1 Introduction

原始惑星系円盤とは、新たに生まれた恒星の周囲を回転するガス円盤のことであり、主な成分としてはガス (水素、ヘリウム)、1%程度のダストである。サブミクロンサイズのダストが衝突合体等の過程を経てキロメートルサイズの微惑星となり、重力相互作用によって微惑星同士が衝突合体を行うモデルが標準的な惑星形成のモデルと考えられている。しかし、惑星形成の過程には各空間スケールにおける諸問題が示唆されており、一貫した現実的なモデルは存在していない。

近年、極めて低い内部密度を持つ氷ダストの塊を考えることによって衝突破壊問題、跳ね返り問題、中心星落下問題を回避し、ダストから微惑星へと形成される可能性が指摘された (Kataoka et al. 2013)。一方でシリケートダストの塊が衝突破壊されずに微惑星のサイズまで合体成長するのは困難であると指摘されている (Wada et al. 2013)。理由は、岩石と氷の物性値の違いによってシリケートダストの塊の臨界速度は氷ダストより 1 桁小さく、原始惑星系円

盤中におけるダスト同士の衝突速度を超えてしまうからである。

最大衝突速度はダストの運動で決まり、ダストが乱流渦に追従することによって加速されたダスト同士の相対速度が臨界速度を超えてしまうと考えられていた。しかし、乱流渦中のダストの運動は、ダストサイズに依存するため、相対速度は乱流場とダストの運動を統合的に解いて決めなくてはならない。

Pan et al. (2011) はダストとガスの相対速度の緩和時間を乱流渦の時間スケール (コルモゴロフ時間) で規格化した無次元量 Stokes 数を考慮することによって、乱流場とダストの運動を統合的に解いた。この無次元量は乱流渦に対するダストの追従性を表す指標となり、Stokes 数が 0 の時、ダストは乱流渦と共に運動し、Stokes 数が大きくなるにつれて、ダストは乱流渦から弾き飛ばされる。弾き飛ばされたダストは渦度の小さな領域に集中し、強い空間相関が誘起されると示唆されている。しかし、粘性流体の正しい方程式 (Navier-Stokes 方程式) は解いておらず、粘性を、格子サイズで決まる数値粘性によって疑似

的に取り扱っていることが問題である。

そこで本研究では、Navier-Stokes 方程式を直接解き、乱流渦から弾き飛ばされたある空間内におけるダストの凝集を考慮することによって、シリケートダストの合体成長の可能性に着目した。先行研究である Pan et al.(2011) を紹介し、本研究と先行研究の比較を行う。

2 先行研究 Pan et al.(2011)

Pan et al. (2011) では、ガスの運動はオイラー方程式を解き、ダストの運動は以下の方程式を解くことによって、原始惑星系円盤におけるダストと乱流場の相互作用の効果を求めた。

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\mathbf{u}(\mathbf{x}_p(t), t) - \mathbf{v}}{\tau_p} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u}(\mathbf{x}_p(t), t)$ はダスト位置におけるガスの速度で、 τ_p は摩擦によるダストのガスに対する緩和時間である。 τ_p はダスト半径とガスの平均自由行程の関係から決定することができ、エプスタイン則を用いている。ENZO コードを用いて (O'Shea et al. 2005)、3 次元圧縮性乱流を等温環境下で、ガスとダストの支配方程式を解いている。しかし、ダストの衝突、ダストからガスの back-reaction は解いていない。

乱流渦に対するダストの追随性を表す無次元量 Stokes 数 (St) は以下のように定義される。

$$\text{St} \equiv \frac{\tau_p}{\tau_\eta} \quad (2)$$

ここで、 τ_η はコルモゴロフタイムスケールで、 $\tau_\eta = (\nu/\bar{\epsilon})^{1/2}$ と定義される。 ν は動粘性係数であり、 $\bar{\epsilon}$ は平均エネルギー散逸率である。Stokes 数は [0.08:3000] から 16 種類のダストを各々 8.4 万個ずつ入れたものを計算している。

円盤ガスの初期条件は原始太陽系円盤標準モデル (林モデル) に基づいた物理量を設定している (Hayashi et al. 1985)。先行研究では中心星から 5[AU] の距離における状態を初期条件として用いている。いくつか列挙すると、 $T=125[\text{K}]$, $\rho_g = 2.0 \times$

$10^{-11}[\text{g}/\text{cm}^3]$ であり、ダストの内部密度は $\rho_d = 1.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ である。

得られた結果から、Radial Distribution Function (RDF) を用いて解析を行った。RDF とはあるダストから距離 r に他の粒子が存在する確率であり、二点相関関数と本質的に同じ定義である。ダストが一様に分布している場合には、RDF の値は 1 となる。

図 1 はこの先行研究で求めた、各 Stokes 数における RDF の値を表すグラフである。横軸はダスト同士の距離をコルモゴロフスケール (最小渦のサイズ) で規格化したものであり、縦軸は RDF の値である。

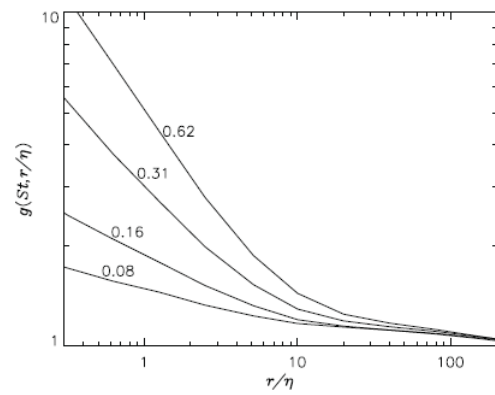


図 1: 先行研究によって求められた Stokes 数が 1 以下の小さなダストのグラフ RDF の値の Stokes 数とスケールに対する依存性

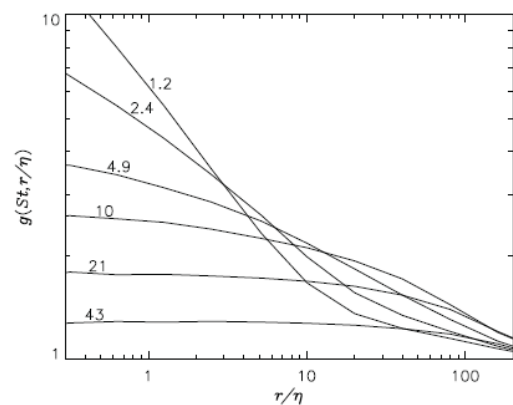


図 2: 先行研究によって求められた Stokes 数が 1 以上の小さなダストのグラフ RDF の値の Stokes 数とスケールに対する依存性

図 1、図 2 より、ダスト同士の距離が小さいスケール ($r/\eta \sim 1$) では、Stokes 数が 1 付近で RDF の値が最大値となっているのがわかる。これはコルモゴロフスケールの渦によって弾き出された Stokes 数が 1 付近 (ダストサイズ $\sim 25[\mu\text{m}]$) のダストの凝集が見えている。しかし、図 2 のスケールが大きい方 ($r/\eta \geq 10$) を見ると、ダストの振る舞いが異なっている。Stokes 数が大きい (ダスト半径の大きい) ダストの RDF の値のピークがスケールの大きい方へとずれているのがわかる。これが意味することはサイズが大きいダストは大きな乱流渦によって弾き出され、ある一定の場所に凝集しているということである。

一方、Stokes 数が大きすぎる ($St \sim 43$) とダストは完全に乱流渦とは独立に運動するため、凝集が見られず、RDF の値はダストが一様に分布している値である 1 にほぼ等しい。

ダストの乱流渦への追従性を考慮することで、ダストが強い渦度の間へと凝集することが判明し、更に、ダストサイズに対応して、異なるサイズの乱流渦によって凝集する効果が得られた。この効果より、ダストサイズが異なるもの同士の衝突確率は、同じダストサイズ同士の衝突確率より低いと指摘されている。

3 本研究の特徴

3.1 先行研究の問題点

Pan et al. (2011) では Navier-Stokes 方程式を解いておらず、以下のようなオイラー方程式を解いている。

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \mathbf{f} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u} は流速、 p は圧力、 \mathbf{f} は外力項である。粘性項が入っていないオイラー方程式を数値粘性によって擬似的に粘性流体を解いているため、真の粘性拡散の挙動とは異なると予想される。Pan et al.(2011) では、 $r/\eta \geq 10$ からスケールの大きい方に向かうあたり、綺麗に収束し、かつ、RDF は 1 まで下がっていない。しかし、Navier-Stokes 方程式を解いた計算では (Enohata et al. in prep)、各 Stokes 数によっ

て様子が異なり、ダストの分布が一様とされる RDF の値 1 へと向かう。この違いから、ダストの運動を正しく評価するには、Navier-Stokes 方程式を解く必要があることが示唆される。本研究では、以下の Navier-Stokes 方程式を用いて、ガスの運動を解く。

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \Pi + \mathbf{f} \quad (4)$$

ここで、 $\nabla \cdot \Pi$ は粘性項である。

3.2 研究手法

本研究では、ガスを連続の式、Navier-Stokes 方程式 (式 (4))、理想気体の状態方程式を 8 次中心差分を用いて空間積分し、時間発展はルンゲクッタ法にて時間積分している。数値安定性を保つために 8 次精度の陽的 low-pass フィルターを用いる (Kenedy et al. 1994)。初期条件として、先行研究と同様に原始太陽系円盤標準モデル (林モデル) に基づいた物理量を設定している (Hayashi et al. 1985)。中心星から 10[AU] における物理量を設定し、直接数値計算 (DNS) を行う。物理量として、 $T=100[\text{K}]$, $\rho_g = 2.14 \times 10^{-12}[\text{g}/\text{cm}^3]$, ダストの内部密度は $\rho_d = 1.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ であり、ガスは水素分子ガスとした。速度場は、十分な時間が経った乱流場を初期場とする。しかし、テスト計算では、速度場は 20[m/s] の速度ゆらぎをあたえた。Stokes 数が 1 のとき、10[AU] の位置におけるダストサイズは 10[μm] である。境界条件は周期境界条件で 3 次元の Box である。Box サイズは林モデルに基づいた、典型的な乱流渦のサイズとした。

ダストは式 (1) をルンゲクッタ法で解く。先行研究と同様にダストの衝突、ダストからガスへの back-reaction、重力の効果は取り入れない。

現在、開発中のコードを用いて、ダストなしの 3 次元圧縮性乱流のガスのテスト計算を行った。初期条件として、密度場一様 ($\rho_g = 2.14 \times 10^{-9}[\text{kg}/\text{m}^3]$)、速度場は 20[m/s] の速度ゆらぎをあたえた。 $t=0[\text{s}]$ から $t=7 \times 10^7[\text{s}]$ まで計算し、密度場、速度場の進化を見た。

図 (3) の速度場 (左図) を与え、 $t=7 \times 10^7[\text{s}]$ 後の速度場は右図のようになる。密度場は一様だった図 (4)(左図) が速度ゆらぎによって、右図のように発展した。

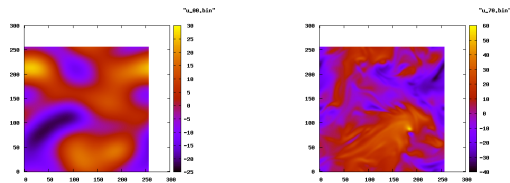


図 3: $t=0[s], 7 \times 10^7[s]$ の速度場

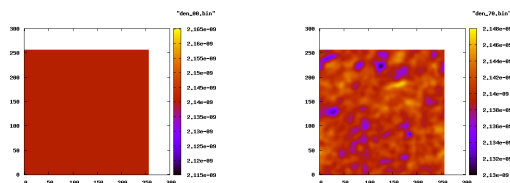


図 4: $t=0[s], 7 \times 10^7[s]$ の密度場

4 Summary

原始惑星系円盤における衝突破壊問題を解決するために乱流渦とダストの相互作用に着目し、先行研究である Pan et al.(2011) を紹介した。この先行研究では、ガスとダストの運動の数値計算を行い、RDF を用いて解析を行った。ダストの乱流渦への追従性を考慮することによって、ダストが乱流渦に弾かれ、凝集する結果が得られた。この結果より、凝集した領域でダスト同士の衝突確率が上昇し、衝突破壊問題の解決の可能性が示唆される。

しかし、Pan et al. (2011) では Navier-Stokes 方程式を解いていない。そこで、本研究では 3 次元直接数値計算 (DNS) を行っている。今後、ダストを入れたコードを作成し、Pan et al. (2011) との比較を行う。開発中のコードにダスト運動を実装し、Pan et al. (2011) では求められていなかったダストの相対速度、衝突確率を計算する。より現実的なシリケイトダストの合体成長について調べていく予定である。

Acknowledgement

本研究を行うにあたり、多くのご指導を頂きました梅村雅之教授に深く感謝いたします。また、基礎

物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Enohata, K., et al. 天文学会 2015 秋季年会発表予定
- Kataoka, A., et al. 2013, A&A 557, L4
- Kennedy, C. A., & Carpenter, M. H., 1994, Applied Numerical Mathematics, Vol.14
- Hayashi, C., Nakazawa, K., & Nakagawa, Y. 1985, Protopostars and Planets II, 1100
- O'Shea, B. W., et al. 2005, Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol. 41
- Pan, L., et al. 2011, ApJ, 740, 6P
- Wada, K., et al. 2013, A&A 559, A62