

ダスト再配置に伴う原始惑星系円盤の固体面密度分布の進化

Evolution of surface density distribution of solid components in protoplanetary disks

福井 隆 [1]; 田中 秀和 [2]; 倉本 圭 [1]

Takashi Fukui[1]; Hidekazu Tanaka[2]; Kiyoshi Kuramoto[1]

[1] 北大・理・宇宙; [2] 北大低温研

[1] CosmoSci., Hokkaido Univ.; [2] ILTS, Hokkaido Univ.

T Tauri 型星の SED 観測から、降着期の原始惑星系円盤の典型的な半径は数百 AU で、その固体面密度分布は中心星からの距離 r にほぼ反比例することが知られている (Kitamura et al. 2002). 一方、太陽系の各惑星の固体質量および軌道半径の分布から、その母胎となった原始太陽系星雲の半径は 40 AU 程度で、固体面密度分布は $r^{-3/2}$ に比例することが推測される (Hayashi 1981). この分布は、複数の系外惑星系から復元された原始惑星系円盤のダスト面密度分布 (Kuchner 2004) と整合的であることから、惑星形成段階の円盤に共通の性質であると考えられる. このような降着段階および惑星形成段階にある円盤中の固体質量分布差は、ダストがガス抵抗を受けることにより中心星方向へ落下し、円盤規模の再配置を経験することにより説明される可能性がある.

ダストの再配置過程はダスト粒子のサイズに強く依存する. ダストが付着成長によって m サイズやそれ以上にまで順次成長していくことを想定した再配置シミュレーション (Stepinski and Valageas 1997) では、 $r^{-3/2}$ に比例した固体面密度分布は再現されていない. ダストアグリゲイトの衝突実験 (Blum 2004) から、ダストが付着可能な衝突速度には上限が存在することが知られている. この速度を付着限界速度と呼ぶ. この効果を考慮すると、最も高速で中心星方向へ落下する m サイズよりもずっと小さな時点で、ダストの成長が抑制される可能性がある. 円盤全域でダストが mm サイズ (コンドリュールの典型的サイズ) であると仮定した再配置シミュレーション (Youdin and Shu 2002) では、ガス抵抗によるダストの動径落下は外側ほど速く、そのためダストが時間とともに円盤内側の領域で濃集するという結果が得られた. これにより固体面密度分布は大きく変化し得るが、最終的に得られる分布の形は円盤ガスの構造 (面密度および温度分布) に強く依存し、やはり $r^{-3/2}$ に比例した分布は一般には再現されない.

本研究では、ダストサイズの代わりに、ダストの付着限界速度が外惑星領域で一定であることを仮定する. この枠組みにおいては、円盤各位置におけるダストのサイズは円盤ガスの乱流によって決定される. 円盤ガスの乱流はダスト間に相対速度を生じさせ (Weidenschilling 1984), この相対速度のためにダストは互いに衝突し合体成長する. ダスト間の相対速度はサイズと共に増加し、やがて付着限界速度に等しくなるとダストはそれ以上衝突合体できなくなる. こうして円盤各位置においてダストが達し得る最大サイズが決まる. 付着成長過程の数値シミュレーション (Dullmond and Dominik 2005) によれば、大きなダストほどダスト総質量に占める割合が大きくなる傾向がある. よって、円盤各位置におけるダストの典型的サイズとして、この最大サイズを用いる.

こうして決定されたダストサイズからガス抵抗の大きさを計算すると、乱流の強度に関係するパラメータ (Shakra and Snyaev 1973) が円盤全域で一定の場合、ダストの動径落下速度は $r^{1/2}$ に比例する. このような動径速度の分布の下では、ダストの動径 1 次元輸送方程式は定常解として $r^{-3/2}$ に比例したダスト面密度分布を持つことが解析的に示される. これはダストの初期分布や円盤ガスの構造にほとんど依存しない.

次に、この再配置過程の過渡状態について調べるため、 r^{-1} に比例するダスト面密度分布を初期条件に用いた数値シミュレーションを行った. その結果、円盤の外縁領域ではダストが動径落下することによりダスト面密度が減少し、逆に中心星から数十 AU までの惑星形成領域では外側からダストが供給されることにより面密度が増加する. このため、ダスト面密度分布は時間とともに急になり、数十万年程度の時間スケールで $r^{-3/2}$ に比例する分布が実現されることが分かった.