

# Evolution of Protoplanetary Disks Due to Dust Growth and Settling

## ダスト沈殿成長による原始惑星系円盤の進化

Hidekazu Tanaka, Youhei Himeno and Shigeru Ida

Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

田中秀和, 姫野洋平, 井田茂

東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

Theoretical models of the SED evolution of protoplanetary disks play essential role in deriving detail information from observational data on protoplanetary disks. We investigate the thermal and SED evolution of disks due to dust growth and settling, performing numerical simulations of dust growth and settling. Our results are summarized as follows. (i) The absorption surface of a minimum-mass nebula disk goes down with sub-micron dusts. The descending time of the absorption surface is about one million yr. (ii) The descent of the absorption surface does not change the disk temperature much. The disk temperature is lower than 1/2 of that of the Hayashi model. This indicates the existence of icy planetesimals in Earth-forming region. (iii) The decay of the infrared excess in the SEDs with the time scale of millions yr can be explained by dust growth and settling. This indicates the possibility of the much longer life time of protoplanetary disks than ten million yr.

## 1 はじめに

### 1.1 原始惑星系円盤の観測と惑星形成論

原始惑星系円盤の性質の解明において, SED (spectral energy distribution) 観測は大きな役割を果たしてきた. SED 観測データの解析結果より, 原始惑星系円盤の質量は主に 0.001 太陽質量から 0.1 太陽質量の間に分布していると考えられている (e.g., Beckwith et al. 1990). 更に, SED の赤外ミリ波領域での光度超過が中心星年齢とともに減少する様子から, 原始惑星系円盤の寿命は百万年から 1 千万年程度と考えられている. 一方, 円盤ガス面密度の動径分布などのより詳細な情報は, 高空間分解能のミリ波干渉計による観測により最近得られるようになってきた (e.g., Kawabe et al. 1993; Saito et al. 1995; Mundy et al. 1996; Guilloteau et al. 1999; Kitamura et al. 2002). 北村らによる最新結果によると, 面密度動径分布のべき指数は多くの場合 -1 から 0 の間の値をとる. この面密度分布は, 原始惑星系円盤の標準的なモデルである林モデル (Hayashi 1981) に比べてなだらかな分布である. このなだらかな分布と彼らが得た 100AU での面密度とを合わせて考えると, 惑星形成の現場である数 AU 付近での円盤ガス面密度は林モデルに比べて大幅に小さくなる. 林モデルの円盤は太陽系の惑星を形成するための必要最小限の質量しかもたないので, この 1AU 付近の円盤面密度の結果はこれらの原始惑星系円盤では木星のような巨大ガス惑星はつくられないことを示している. また, 惑星形成理論によると, 1 千万年以下という短い原始惑星系円盤寿命の間に, 10AU 以遠で木星型惑星を形成することは非常に困難であるとされている (e.g., Kokubo and Ida 2002; Inaba et al. 2003).

### 1.2 円盤観測とダスト成長

原始惑星系円盤の観測結果は, このように惑星形成過程に強い制約条件を与えている. しかし, 上で述べた観測からの円盤寿命や円盤面密度の情報は簡単な円盤モデルを用いた解析を通して得られたも

のであるため、それらの値に大きな不定性を含んでいる可能性がある。原始惑星系円盤の情報の多くは、円盤内に含まれた  $\text{H}_2\text{O}$  氷やシリケートを主成分とするダスト固体粒子から放射される熱輻射の観測から得られている。このため、ガス面密度の情報を得る上で円盤内に含まれるダスト粒子の状態を特定する必要がある。従来の観測結果の解析においては、ダスト粒子は星間ガスと同様に 0.1 ミクロンサイズであると簡単化されてきた。しかし、ダスト粒子のサイズが何桁も異なれば、輻射強度を説明するために必要なダストやガスの総量も大幅に変わってしまう。

実際に、原始惑星系円盤内でダスト粒子のサイズは何桁も変わる。惑星形成理論においては、ダスト粒子は原始惑星系円盤内での互いの衝突合体を通じて成長していくと考えられている。ダスト粒子がミリメートル程度にまで成長すると、それらはガス円盤の赤道面付近に濃集していく。このダスト粒子が濃集した密度の高い層が自己重力で分裂することで、惑星の材料であるキロメートルサイズの微惑星が形成されたと考えられている (e.g., Goldreich and Ward 1973)。固体粒子がこのような成長を遂げたとして、固体粒子による輻射吸収係数は何桁も減少し、そこから放射される輻射強度も激減する。このダスト固体粒子の成長による輻射吸収係数の減少のより、観測されている円盤光度の減少が引き起こされている可能性もあるであろう。以上より、惑星形成の現場である原始惑星系円盤の観測結果の解析においては、ダスト固体粒子の成長を考慮することが不可欠である。現在または将来の原始惑星系円盤観測結果の解析のために、ダスト成長による原始惑星系円盤の温度や SED の進化理論モデルを構築することが本研究の目的である。

原始惑星系円盤のダスト成長過程は、惑星形成理論の分野で多くの研究者によって調べられてきた (e.g., Weidenschilling 1980, 1984; Nakagawa et al. 1981, 1986; Mizuno et al. 1988; Miyake and Nakagawa 1995)。これらの従来の研究では、ガス円盤赤道面に形成されたダスト層やその重力不安定によってつくられる微惑星が注目されていた。しかし、円盤からの放射を考える上では、ガス円盤上層部で成長せず取り残された、ミクロンサイズのダストが重要になる。従来の研究によると、このような小さいダストは全体に比べごく少量であるが、これらは円盤の吸収係数または光学的厚さの値を左右しうる。本研究では、この上層部に浮いた少量のダストにも注目して、ダストの沈殿成長過程を高精度の数値シミュレーションにより調べた。更に、その計算結果から、原始惑星系円盤の光学的厚さや温度分布、SEDなどを求め、これらの進化の様子を調べた。本研究では、第1ステップとして、乱流のない原始惑星系円盤におけるダスト成長過程を調べた。このようなダスト成長は、弱輝線 T タウリ星まわりのガス円盤において実現されるであろう。

## 2 ダスト沈殿成長過程の数値シミュレーション

太陽質量の恒星まわりの受動的円盤内でのダスト沈殿成長の数値計算を行った。円盤半径は 130AU とする。ガス円盤は厚さ方向には等温を仮定した。このとき、ガス密度は厚さ方向の分布はスケールハイト  $H = \sqrt{2}c_s/\Omega_K$  をもつガウス分布型となる。ここで、 $c_s$ ,  $\Omega_K$  は等温音速とケプラー回転角速度である。この音速を計算する上で温度分布は日下モデルの分布を用いた (Kusaka et al. 1970)。一方、円盤 SED を計算する際に必要な温度分布は、Chiang et al. (2002) の 2 層モデルを用いてより正確に求めた。しかし、後でみるように、2 つの方法で求めた温度分布に大きな差異はなかった。

ダストの成長沈殿過程の基礎方程式は中川ら (1981) と同様のものを用いた。この方程式は、いわゆる成長方程式にダスト沈殿を記述するための移流項を含んだものである。本研究では、ダストの動径方向の移動は無視した。動径方向移動は主にダスト層内で起こるのだが、この層は、サイズの大きいダストからなるため光学的に薄い。このため、動径方向移動の無視は、円盤 SED などの結果にはあまり効かないであろう。ダストの沈殿速度は円盤厚さ方向の重力とガス抵抗の釣り合いで決まる。ダスト間の衝突速度は、沈殿速度の差とダストのブラウン運動の速度それぞれの 2 乗和の平方根で与えた。ダスト間衝突時の合体確率は不定性が大きいので、パラメータとしていろいろな値に対して数値計算を行った。数値計算において、ダストサイズは 0.1 $\mu\text{m}$  から 1km までを対数的に 500 分割し、円盤厚さ方向の空間軸 ( $z$  軸) は赤道面からスケールハイトの 2.5 倍の高さまでを 250 等分割した。円盤の各半径 (19 点) において、高さ  $z$  の空間 1 次元でのダスト沈殿成長の数値計算を行った。

ダストの成長沈殿の数値計算結果を用いて、吸収係数のデータより各波長に対する円盤の光学的厚さを求める。吸収係数は、各サイズのダストからの寄与の和を取ることで得た。各サイズに対する

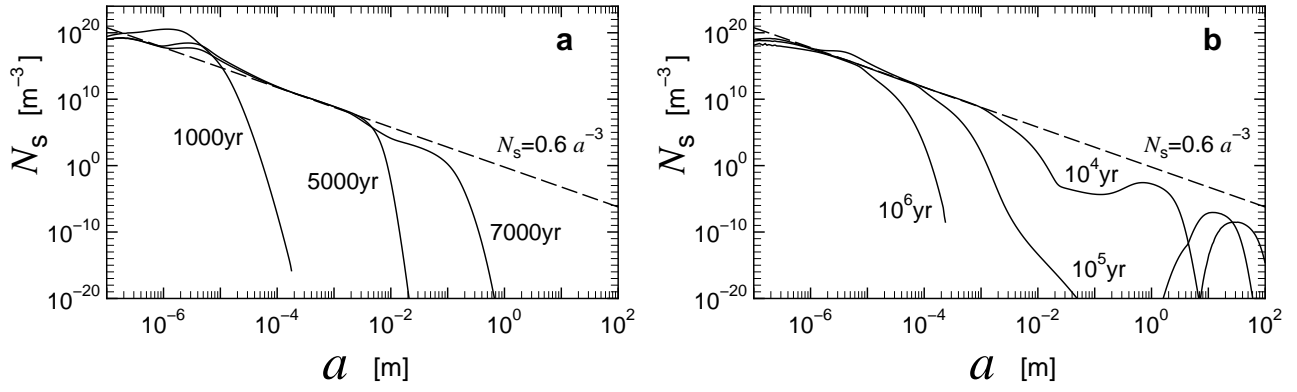


図1：成長によるダストサイズ分布の進化.

ダストの吸収係数は Mie 理論に従って算出した．原始惑星系円盤の温度分布と SED の算出には，上で述べたように，Chiang et al. (2002) の 2 層モデルを用いた．

### 3 結果

#### 3.1 ダストの沈殿成長

まず，林モデルの面密度分布を持つ円盤を考え，中心星から 8AU の距離の地点でのダスト沈殿成長の数値計算結果をみてみよう．また，合体確率は 1 としてある．数値計算の結果，空間  $z$  とダスト半径  $a$  の 2 次元に対するダスト個数分布  $n(a, z)$  が各時間で得られる．ダスト成長の様子をみるために，各ダスト半径で個数分布を  $z$  で積分して得られる，面数密度サイズ分布  $N_s(a) = \int n(a, z) dz$  を導入する．8AU での数値計算の結果から得られた，面数密度サイズ分布の時間進化を図 1 に示した．図 1(a) は前半の進化（7000 年まで）を，図 1(b) は後半の進化（1 万年以降）を表している．

この前半では，沈殿によるダスト層形成は起こっておらず，主に成長のみが起こっている．この成長期に，半径  $0.1\mu\text{m}$  の粒子から  $10\text{cm}$  程度の粒子がつけられている．ダストのサイズ分布  $N_s(a)$  は指数-3 のべき分布になっており，フィッティングにより

$$N_s(a) = 0.6p_s^{-1}a^{-3} \quad (1)$$

と得られる．合体確率  $p_s$  に対する依存性は  $p_s$  を変えた計算により確かめた．成長の特徴的な時間  $t_{\text{grow}}$  は， $5\Sigma_g/(\Sigma_d p_s \Omega_K)$  で与えられる．ここで， $\Sigma_g$  と  $\Sigma_d$  はそれぞれガスと固体の面密度である．林モデルの場合，成長時間は  $900(r/8\text{AU})^{3/2}$  年と見積もられ，図 1(a) の結果と大体一致する．

1 万年以降は，主に沈殿が進む沈殿期であり，赤道面にダスト層が形成されている．ダストが，沈殿時間  $t_{\text{settle}} = \Sigma_g/(\rho_s a \Omega_K)$  と成長時間を等しくするような半径  $a_{\text{crit}}$  まで成長したとき，成長期から沈殿期に移行する．上の計算の場合， $a_{\text{crit}}$  は  $1\text{mm}$  でその時の成長時間と沈殿時間は 5000 年となり，数値計算結果と大体一致している．沈殿期では，大きいサイズのダストから先に沈殿しダスト層に吸収されていく．それぞれの時間でどのサイズまで沈殿するかは上の沈殿時間の表式から求められ，それは数値計算と合う．時間とともに沈殿が進み， $10^7$  年では  $\mu\text{m}$ -サイズのダストのみが残る．沈殿期におけるダストサイズ分布も (1) 式で与えられる．但し，サイズ分布の上限は時間とともに小さくなっていく．

同様な計算を太陽からの距離を変えて円盤全体に対して行った．また，円盤面密度や温度，ダストの物質密度などのパラメータを変えた計算も行った．その結果，これらのパラメータに依存せずどの場合でも，(1) 式のサイズ分布が実現されることが明らかになった．

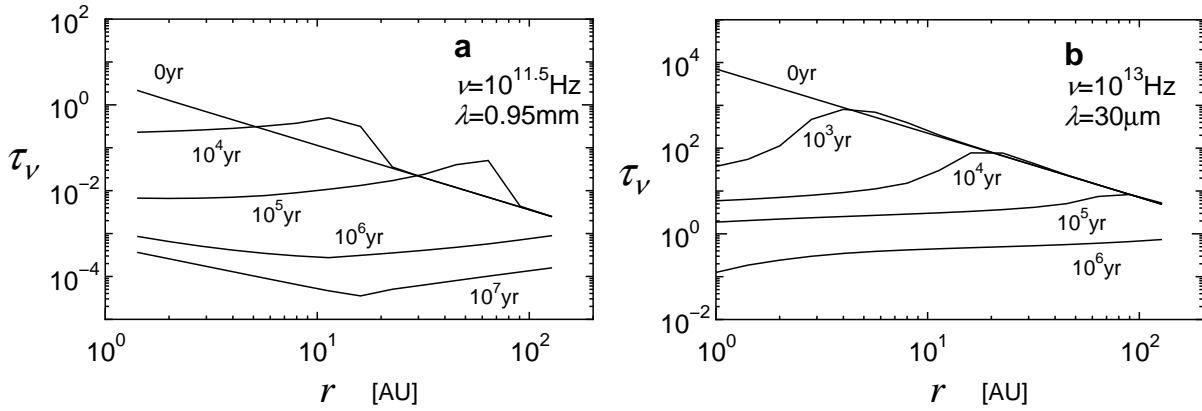


図2：円盤光学的厚さの動径方向分布。ダスト成長により，光学的厚さの動径分布は平坦化される。

### 3.2 原始惑星系円盤の光学的厚さ

次に，林モデルの円盤全体に対して行った計算から，各時間における円盤の光学的厚さ  $\tau_v$  の動径分布を求めた。振動数  $10^{11.5}\text{Hz}$  と  $10^{13}\text{Hz}$  に対する光学的厚さの結果を図2に示す。円盤面密度は円盤内側で大きいので，初期の光学的厚さは中心星からの距離とともに減少している。これに対し1万年程度以降は，光学的な厚さが平坦な分布になっている領域が内側につくられ徐々に広がっていく。そして10万年以降は円盤全体でほぼ一定になる。この光学的厚さの平坦化は，光学的に厚い円盤内側で早く粒子成長が進み，光学的厚さの減少が進むためである。数値計算結果によると光学的厚さの平坦化は振動数や円盤モデルにあまり依存せず，非常に一般的に実現する。「はじめに」で述べたように，空間分解されたミリ波観測では「平坦な円盤面密度分布」が報告されている (Mundy et al. 1996; Kitamura et al. 2002)。ミリ波観測の解析では円盤面密度が光学的厚さに比例することを仮定していることから，直接的には観測結果も光学的厚さが平坦であることを示している。従って，我々の結果は彼らの観測結果と調和的であり，また観測された原始惑星系円盤の面密度はより中心集中した分布であることが示唆される。

### 3.3 原始惑星系円盤の温度分布と SED

得られたダスト分布と光学的厚さより，原始惑星系円盤の温度分布と SED を Chiang et al. (2002) の2層モデルを用いて計算することができる。2層モデルは，受動的円盤において，中心星の輻射を直接受ける円盤表面の光学的に薄い層と円盤内部それぞれに対して温度を決めて輻射を計算するものである。林モデルのガス面密度を持つ円盤の，ダスト成長による温度分布の結果を図3に示す。Chiang et al. (2002) にもみられるように，円盤内部の温度は円盤表面の層の温度に比べて半分以下になる。これは，円盤内部は中心星の光を直接受けることができず，円盤表面からの輻射によってのみ加熱されるためである。また，ダスト成長と沈殿によって中心星の輻射を受ける円盤表層は大幅に降下していくが，円盤表層と内部のそれぞれの温度はあまり変化しないこともわかる。従来標準なものとして用いられてきた林モデルの円盤温度は，2層モデルにおける円盤表面の温度と大体一致する。一方，内部の温度は Kusaka et al. の温度に近い。2層モデルはこの2つを組み合わせたものといえるであろう。

光学的厚さがある程度ある百万年以前には，ダスト質量の殆んどは円盤表層ではなく円盤内部に含まれている。従って，微惑星形成時や惑星集積の初期には，固体成分は林モデルの温度分布の半分以下の温度になっているであろう。H<sub>2</sub>Oが氷になる領域は林モデルでは2.7AU以遠であったが，我々の計算によるとその境界は0.4AU付近となる。すなわち，1AU以内にも氷微惑星が存在していたという結果となる。この結果は地球型惑星の組成にも大きな影響を与える。

以上を用いて，林モデルの面密度をもつ円盤のモデル SED を計算しその進化の様子を調べた。図4に得られた SED を示す。10万年までは，SED の変化は殆んどみられないが，それ以降円盤のルミノシティは全波長領域で徐々に減少していき，1千万年では大幅に減少している。原始惑星系円盤の観測で見られる  $10^6$ - $10^7$  年での円盤光度の減少は，我々の結果が示すダスト成長による光度減少で説明できる

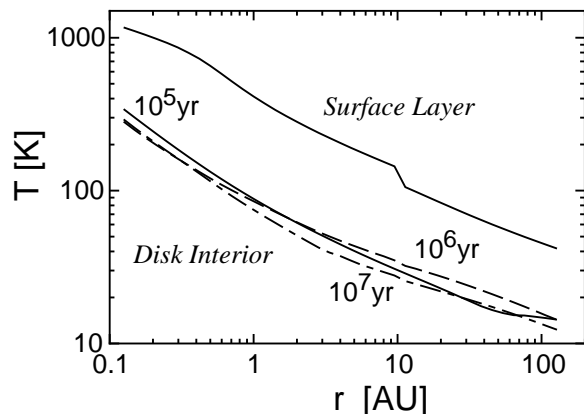


図3：円盤表層と円盤内部の温度分布.

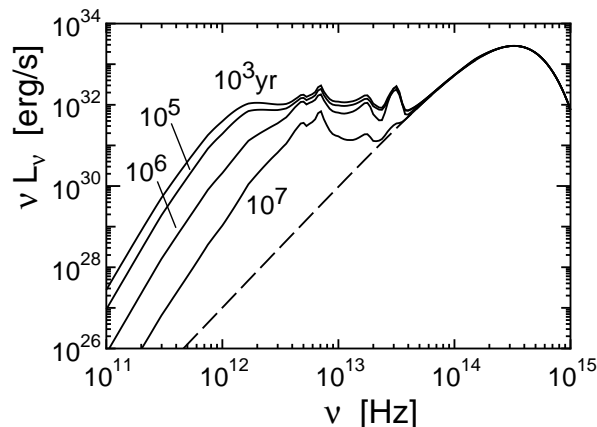


図4：ダスト成長による円盤 SED の進化.

かもしれない。従って、円盤のガス成分の寿命は1千万年より長い可能性もある。我々の計算における光度減少と観測にみられるものをさらに詳しくみると異なる点もある。図4において、ミリ波領域では1千万年までに3桁程度の光度減少が起きているのに対して、赤外領域では1桁程度しか減少していない。一方、観測では、ミリ波領域と赤外領域で同程度の光度減少がみられている。我々の計算で、赤外領域の輻射は主に円盤表層からきており、また、その表層ではダストがミクロンサイズ以上には成長せず浮いている。すなわち、赤外領域での放射強度は表層での小さいダストによって比較高く保たれている。本研究では第1ステップとして簡単のため乱流の効果を見捨てた。乱流により表層でのダスト成長が促進され、ダスト半径が $10\mu\text{m}$ 以上になれば $\text{H}_2\text{O}$ 氷のピークが消えるため、赤外領域で放射強度は更に減少するであろう。

## 4 まとめ

受動的円盤におけるダスト成長に関する本研究の結果は以下のようにまとめられる。

1. 原始惑星系円盤内におけるダスト成長の結果、普遍的なダストサイズ分布  $N_s(a) = 0.6p_s^{-1}a^{-3}$  が実現される。
2. 円盤の光学的厚さの動径分布は、円盤内側での早いダスト成長により平坦になる。観測でみられる平坦な面密度の円盤は、このダスト成長による平坦化された光学的厚さの分布をみている可能性がある。
3. 中心星からの光を直接受けない円盤内部は、林モデルの温度の半分以下になる。1千万年以前では、固体成分の温度はこのように低温になっているため、氷粒子は1AU以内にもできるようになる。よって、惑星集積初期には地球形成領域でも氷微惑星が存在したと考えられる。
4. 観測で見られる百万年から千万年での円盤光度の減少は、ダスト沈殿成長により説明できるかもしれない。ガス円盤自体の寿命は千万年より長い可能性がある。

## 参考文献

- Beckwith, S. V. W., Sargent, A. I., Chini, R. S. and Guesten, R. 1990. *AJ.* **99**, 924-945.  
 Goldreich, P. and Ward, W.R. 1973. *ApJ.* **183**, 1051-1062.  
 Guilloteau, S., Dutrey, A. and Simon, M. 1999. *A&A* **348**, 570-578.  
 Hayashi, C. 1981. *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **70**, 35-53.

- Inaba, S., Wetherill, G., and Ikoma, M. 2003. *Icarus* **166**, 46-62.
- Kawabe, R., Ishigro, M., Omodaka, T., Kitamura, Y. and Miyama, S. 1993. *ApJ*. **404**, L63-L66.
- Kitamura, Y., Momose, M., Yokogawa, S., Kawabe, R., Tamura, M., and Ida, S. 2002. *ApJ*. **581**, 357-380.
- Kokubo, E. and Ida, S. 2002. *ApJ*. **581**, 666-680.
- Kusaka, T., Nakano, T. and Hayashi, C. 1970. *Prog. Theor. Phys.* **44**, 1580-1595.
- Miyake, K. and Nakagawa, Y. 1995. *ApJ*. **441**, 361-384.
- Mizuno, H., Markiewicz, W.J. and Voelk, H.J. 1988. *A&A* **195**, 183-192.
- Mundy, L., Looney, G., Erickson, L.W., Grossman, W., Welch, A., Forster, W.J., Wright, J.R., Plambeck, M.C.H., Lugten, R. L., and Thornton, D. D. 1996. *ApJ*. **464**, L169-173.
- Nakagawa, Y., Nakazawa, K., and Hayashi, C. 1981. *Icarus* **45**, 517-528.
- Nakagawa, Y., Sekiya, M., and Hayashi, C. 1986. *Icarus* **67**, 375-390.
- Saito, M., Kawabe, R., Ishigro, M., Miyama, S., Hayashi, M., Handa, T., Kitamura, Y., and Omodaka, T. 1995. *ApJ*. **453**, 384-392.
- Weidenschilling, S.J. 1980. *Icarus* **44**, 172-189.
- Weidenschilling, S.J. 1984. *Icarus* **60**, 553-567.