

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540239

研究課題名（和文） ダストダイナミクスが決める惑星形成の初期条件

研究課題名（英文） The initial condition of planetary formation determined by dust dynamics.

研究代表者

渡邊 誠一郎 (WATANABE SEI-ICHIRO)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号：50230967

研究成果の概要：

惑星の材料物質の分布を明らかにするために、原始惑星系円盤でのダストダイナミクスを明らかにする基礎研究を進めた。まずは、中心星の光を表面に受けた円盤の熱的な安定性を調べた。その結果、質量降着率が一定値を下回ると、円盤表面に熱的波動が形成され、内側へ伝搬することが明らかになった。その前面では内部領域の温度が上昇してリング状の高まりが形成され、背面では影領域となって温度が低下することがわかった。波動の伝搬時間は数十年で、その変化は円盤のスペクトルエネルギー分布の変化として観測可能であることを指摘した (Watanabe & Lin, 2008)。さらに、その波動伝搬に伴い、円盤のスペクトルエネルギー分布の10年スケールの経年変化および、高分解能の遠赤外線撮像観測によるリングの移動が観測可能であることを予測した。また、その不安定により生じる渦におけるダスト集積を解析した。

一方、惑星集積過程におけるダスト円盤の形成に関しては、ダストの昇華を考慮した天体力学計算を進め、外側領域でダストが生成されると、ポインティング・ロバートソン効果によってダストは内側領域へと供給され、温度上昇によるダスト昇華によってダストリングが形成されることを明らかにした。ダストの濃集度は、中心星光度やダスト組成（光学特性）によって変化することが明らかになった (Kobayashi *et al.* 2008)。さらに、ダストの移動と濃集度を半解析的に定式化した (Kobayashi *et al.* 2009)。さらにダストの生成過程・破壊過程を微惑星ダイナミクスから与え、質量分布関数の変化を記述する計算コードを開発し、これを用いて惑星集積時のダスト生成の様子を解析している。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：惑星科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：原始惑星系円盤、ダスト、微惑星、太陽系形成論、吸収係数、
計算機シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間で生成されたダスト(固体微粒子)が原始惑星系円盤(以下、円盤と呼ぶ)に持ち込まれて、惑星を造る材料物質となった。惑星集積過程の出発点を明らかにするためには、円盤におけるダストの振る舞いを明らかにする必要がある。従来の太陽系形成論の研究では、初期材料物質分布として、現在の各惑星の固体質量を、現在の軌道の周りのリング領域に滑らかに分布させた「最小移動」モデルを採ってきた。ところが、近年、太陽系外惑星のいわゆるホットジュピターの発見や、太陽系のエッジワース・カイパーベルト天体の平均運動共鳴位置への掃き寄せの発見によって、惑星が集積過程において、その軌道半径を大きく変化させる可能性が明らかになり、「最小移動」の仮定は成り立たないことが分かってきた。

ALMAが拓く分解能 1 AU時代においては、これまでほとんど観測的な実証の無い微惑星形成・惑星集積過程に関して、定量的な制約を与える観測が期待される。成長過程の惑星を直接観測することは困難であるが、ダストの観測を通じて間接的に惑星成長の様子をあぶり出すことは可能である。そのためには、様々な質量の星の周囲の円盤における、微惑星形成期および惑星集積期のダストのサイズ/動径方向分布の進化を体系的に研究することが急務である。

ダストが関与する素過程に関する論文は、数多いが、それらを総合して、微惑星形成に至る過程を扱った研究は少ない。太陽質量の若い星(Tタウリ星)と中質量星の若い星(Herbig Ae/Be型星)について、それぞれの円盤におけるダスト進化の違いが論じられている。それによると、Tタウリ星周りの円盤ではガスの散逸時間に比べてダストが中心星に落ちる時間が短いのに対して、Herbig Ae/Be型星では、中心星からの強い紫外線によって星雲ガスが先に散逸することなどが指摘されている。しかし、この論文では、微惑星形成や円盤内縁付近の物理は扱われていないため、Tタウリ星周囲での惑星形成条件は明らかでない。ダストの移動と微惑星形成の関係については、半解析的なダスト分布の時間進化の自己相似解に基づいて、局所ダスト面密度がダスト層の重力不安定を起こす条件を示した研究がある。しかし、関与する物理過程を明確化し、ダスト分布の時間進化を精密に扱う必要がある。特に中心星放射がダストに及ぼす影響については、従来の考察が不十分なもので、いくつか見落とされている過程がある。

2. 研究の目的

ダストとガスおよび光の相互作用の素過程の最新の知見に基づき、原始惑星系円盤におけるダストダイナミクスを総合的に明らかにする。特に

- (1) 中心星放射を受ける原始惑星系円盤の安定性を明らかにし、渦生成の可能性を探る、
- (2) 渦におけるダストの集積と面密度の増加を明らかにし、微惑星形成条件を探る、
- (3) ダスト蒸発の効果を考慮して、中心星の放射を受けるデブリ円盤におけるダストの移動を明らかにし、ダスト分布を求める、ことを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 中心星の放射を表面に受けている静水圧平衡にある原始惑星系円盤を考える。円盤の光学表面は中心星からの放射を経路積分して、光学的厚さを直接計算し、それがちょうど1となる高さとする。円盤は各半径で円盤内部温度と表面の過熱層温度の2温度モデルを採用する。そして、各時間・各半径において、過熱層からの放射(斜め放射も考慮)と円盤内部からの熱放射の差によって円盤内部の熱量変化を記述する方程式を解くことで、円盤内部温度の変化を記述する。さらに温度に応じてスケールハイトを決めて、新たな鉛直方向の静水圧構造を求める。以上の過程を繰り返す。これによって、円盤の熱進化を追い、熱的安定性や波動の伝搬を追う。
- (2) 原始惑星系円盤において、ポテンシャル渦度が極値を持つと、非軸対称な不安定が生じ、渦が形成されると期待される。このような渦における微惑星形成を明らかにするために、解析的な式により局所的に厳密な渦のガスの流れを与えて、そのもとでのさまざまなサイズのダストの振る舞いを半解析的に調べる。そして、中心の面密度が十分に高くなる領域における微惑星の生成量を見積もる。
- (3) ダストに働く放射の力(放射圧やポインティング・ロバートソン効果)を与え、ダストの運動方程式を与える。一方で、各領域の温度に応じてダスト表面からの蒸発量を計算し、ダスト半径の変化の方程式を与える。この2式を半解析的に解くことでダストのサイズ変化と軌道半径・離心率変化を同時に解く。さらにこの結果をもとに、特定の初期条件を与え、ダストの面密度の変化を計算する。

4. 研究成果

(1) 円盤の質量降着率が 10^{-8} 太陽質量/yr 程度では、円盤に熱的不安定が存在し、熱的波動が中心星方向に伝搬することが明らかになった (論文④、発表①、⑥、⑦)。

まず質量降着のない円盤で、初期に平衡温度構造を与えて、円盤内部領域の温度構造の変化を調べた。すると初期の温度構造は自発的に不安定化し、1—20 AU 付近でいくつかの昇温領域とその背後の降温領域がセットになって生じ、それが波動となって中心星方向に伝搬することが明らかになった。系はやがて準周期変動の状態に至った。その状態では、波動は数十 AU 付近で形成され、成長しながら内側へ伝搬し、10 AU から 1 AU まではほぼ一定の振幅のまま伝搬し、0.5 AU 付近で中心星が点源ではなく大きさを持つ効果によって減衰することを繰り返す。図 1 には、この準周期状態における 0.1 AU から 100 AU の範囲での円盤中心領域の温度分布の時間変化 (図の奥行き方向) を示した。波動の伝搬に要する時間は熱緩和時間 (t_{th}) 程度であり、典型的なパラメタの場合、およそ 50 年に対応する。

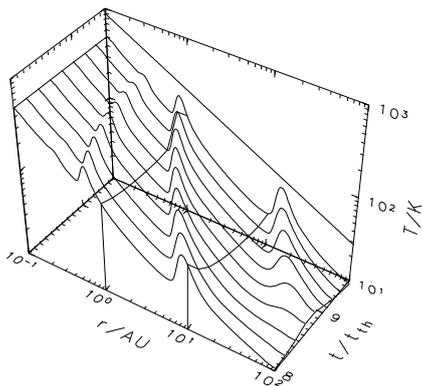


図 1：準周期状態での熱的波動の伝搬の様子。中心領域温度 (T) の時間変化 (本文参照)。

円盤の質量降着率を 10^{-8} 太陽質量/yr としても結果はほとんど変わらなかったが、 10^{-7} 太陽質量/yr とすると円盤は安定化され、ほぼ定常状態が実現された。これは、中心星に斜めに加熱される円盤では加熱率が厚み変化に敏感なことが熱的不安定を引き起こしているため、降着による円盤内部での熱発生が厚み変化を抑制し、不安定を緩和させていることを示している。

円盤の熱的不安定はダストの吸収係数等の詳細にはよらず普遍的に存在することが分かった。また熱的波動は軸対称計算ではリング状だが、ポテンシャル渦度の動径分布が極値を持つため、非軸対称な不安定により渦を生成することが分かった。

さらに円盤の光学表面付近でダストが放射圧を受けて外側に移動する効果を入れたダスト大循環のシミュレーションを行っており (発表④)、ダスト落下問題に一つの回答を与えるものと考えている。

(2) 円盤中に形成される高気圧性渦における惑星材料ダストの集積を数値計算し、渦中心のダスト面密度は 1mm サイズの場合、約 1000 年程度で、初期の 16 倍に達し、自己重力不安定が可能な値に達することが明らかになった (発表②)。

渦の内部では、1cm 以下のサイズのダストの落下速度が渦中心からの距離に比例することが分かった。その結果、ダストの面密度は渦中心からの距離の 2 乗に反比例する平衡分布に近づく。ケプラーシアから渦への流入を計算することで、渦内のダスト量の時間変化を計算した。渦中心でダストの面密度の 16 倍程度になるとダストは円盤中心面へと沈殿して微惑星を形成することができる。渦の寿命 (およそ 1000 年) 程度で、約 1 mm の大きさのダストがこの臨界面密度に達することができる。

この結果から、1つの渦による微惑星の生成量を見積もることができる。ダストサイズが 1 mm で渦の短径が円盤のスケールハイトであるとする、1 AU では、 2×10^{25} g となる。個数にするとおおよそ 10^4 個の微惑星が形成されることになる。

(3) 惑星集積時に生成される破片がカスケード的に破碎されていくことで生成されるデブリ円盤の水ダスト面密度分布を、水ダストの昇華を考慮して計算し、昇華がはじまる半径付近にダストリングが形成されることを明らかにした (論文①、②、発表③、⑤)。

ダストの生成領域が、十分外側のみにある場合、破碎されたダストは中心星の放射を受け、ポインティング・ロバートソン効果によって、円盤内側領域へと落下する。内側で、ダストの昇華のタイムスケールがダスト落下のタイムスケールに近づくと、ダストの落下速度は小さくなり、やがて粒径減少によって、放射圧により外向きに運ばれる。このためダストは昇華領域にリング状に溜まり、光学的厚さのピークが生じる。ダストの面数密度および光学的厚さに対して解析的な表式を求めた。

中心星の光度に対して、ダストリングの位置と光学的厚さの外側円盤に対する増幅率の変化を計算した。その結果、中心星光度が太陽光度の 1—30 倍では、ダストリングの位置は 20—30 AU で大きく変化せず、光学的厚さの増幅率は 2 倍程度である。中心星光度が太陽光度の 30 倍を超えると、ダストリングの位置は外側へ移動し、増幅率も増加することが明らかになった。

- (4) さらに惑星の破壊過程におけるダストの質量分布関数進化を計算しつつある。破壊過程の詳細によらず、サイズ分布が決まること、ダスト生成にはカタストロフィックな破壊による破片よりもクレーター形成に伴う破片の寄与が大きいことなどが明らかになっている。この計算と(3)の計算を組み合わせることにより、惑星集積の後期仮定におけるダスト生成量の見積もりを行い、デブリ円盤の観測結果との比較を行っていく予定である。
- (5) 研究成果(3)での氷ダストの昇華の取り扱い、地球大気における高層雲の形成に応用できるものである。ハドレーセルの大気の流れによって熱帯収束域から対流圏界面付近で高緯度側へと運ばれる雲粒子の昇華過程を計算し、それに基づく熱帯高層雲の解析モデルを提案した(論文③)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① H. Kobayashi, S. Watanabe, H. Kimura, and T. Yamamoto, Dust ring formation due to sublimation of dust grains drifting radially inward by the Poynting-Robertson drag: An analytical model, *Icarus* in press, 2009, 査読有り。
- ② H. Kobayashi, S. Watanabe, H. Kimura, and T. Yamamoto, Dust ring formation due to ice sublimation of radially drifting dust particles under the Poynting-Robertson effect in debris disks, *Icarus* **195**, 871–881, 2009, 査読有り。
- ③ K. K. Tanaka, T. Yamamoto, S. Watanabe, and K. Nakajima, Analytic model of upper tropospheric clouds in tropical Hadley cell. *Earth Planets Space* **60**, 219–228, 2008, 査読有り。
- ④ S. Watanabe and D.N.C. Lin, Thermal waves in irradiated protoplanetary disks, *The Astrophysical Journal* **672**, 1183–1195, 2008, 査読有り。

[学会発表] (計 7 件)

- ① S. Watanabe (2009.3.8). Thermally induced waves in protoplanetary disks and its implication for planetary formation. *Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity, the 2nd Subaru International*

Conference, Kailua-Kona, USA.

- ② 河村恵里、渡邊誠一郎 (2008.11.3)、原始惑星系円盤内の渦におけるダストのサイズ分布、日本惑星科学会秋季講演会、福岡市。
- ③ 小林浩、田中秀和、山本哲生 (2008.11.3)、デブリ円盤における衝突の効果、日本惑星科学会秋季講演会、福岡市。
- ④ 藤原大輔、渡邊誠一郎 (2008.11.1)、ダスト循環モデルによる原始惑星系円盤内縁領域でのダストの動径方向移動。日本惑星科学会秋季講演会、福岡市。
- ⑤ H. Kobayashi (2008.6.16). Dust ring formation due to ice sublimation in debris disks. *Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting, Busan, Korea.*
- ⑥ S. Watanabe and D.N.C. Lin (2008.3.11). Thermally induced waves in irradiated protoplanetary disks. *39th Lunar and Planetary Science Conference, League City, USA.*
- ⑦ 渡邊誠一郎、D.N.C. Lin (2007.9.26)、原始惑星系円盤における熱的波動の伝搬と SED の変化、日本惑星科学会秋季講演会、高知市。

[図書] (計 1 件)

- ① 渡邊誠一郎、檜山哲哉、安成哲三(編集)、『新しい地球学』、名古屋大学出版会、2008, pp341。

[その他]

ホームページ等

<http://epp.eps.nagoya-u.ac.jp/~seicoro/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 誠一郎 (WATANABE SEI-ICHIRO)
名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号：50230967

(2) 研究分担者

小林 浩 (KOBAYASHI HIROSHI)
北海道大学・低温科学研究所・博士研究員
研究者番号：40422761

(3) 連携研究者

なし