

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540239

研究課題名（和文）

非軸対称な原始惑星系円盤におけるダストダイナミクス

研究課題名（英文）

Dust dynamics in non-axisymmetric protoplanetary disks

研究代表者

渡邊 誠一郎 (SEI-ICHIRO WATANABE)

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（和文）：惑星系は原始星の周りを公転する円盤状のガス雲である原始惑星系円盤の中で誕生した。円盤内のダスト粒子は相互衝突で成長し、やがて数 km 以上の半径を持つ微惑星を形成したと考えられている。しかし、そのダストから固体微惑星までの成長過程はよく分かっていない。本研究では、原始惑星系円盤における（磁気）流体不安定によって生ずる非軸対称な流れ（渦）によって、ダストの運動と成長がどのような影響を受けるかを考察した。その結果、定常状態におけるダストの面密度分布などを半解析的に求め、長寿命な高気圧性の渦においては、ダストは中心付近に集まって、微惑星を形成するに十分な量となることが分かった。このような過程で微惑星が形成された場合、その後の惑星形成過程は従来のものとは異なり、半径 100 km 以下の微惑星ができにくいなどの特徴があることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Planetary systems are formed in protoplanetary disks, disk-like nebulae rotating around protostars. Dust grains in the disk are thought to grow through mutual collision to form solid planetesimals with radii greater than a few km. However, the growth process from dust to planetesimals is controversial for more than 30 years. This work investigates dust behavior in non-axisymmetric flows (vortices) derived from (magneto-) hydrodynamic instabilities in the protoplanetary disks. The semianalytic formula of dust surface density distribution is obtained. Dust is found to be concentrated around the center of an anticyclonic vortex whose age is long enough. The density of dust near the center of the vortex is large enough for dust grains to settle down to the midplane of the disk and planetesimals will be formed. This kind of planetesimal formation makes large difference in the following planetary accretion process, such as smaller number of planetesimals with radii less than 100 km.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学、天文学

キーワード：惑星起源・進化、理論天文学、宇宙物理、光学赤外線天文学、微惑星、固体微粒子

## 1. 研究開始当初の背景

原始惑星系円盤の進化、とりわけ、ダストの空間分布・サイズの進化は、惑星形成の初期条件を明らかにする上で不可欠である。近年 Spitzer 宇宙望遠鏡などによる若い星の Spectral Energy Distribution (SED) 観測によって、波長  $10\mu\text{m}$  前後の赤外線超過は標準的な T タウリ星に比べて弱い  $100\mu\text{m}$  には赤外線超過がある Transitional disks とよばれる円盤が多数発見されつつある。Transitional disks は、円盤の内側の領域に半径数 AU から数十 AU 穴が空いていて、本来ならそれらの領域にあるダストから放射されるべき赤外線が欠如した状態にあると考えられている。そして穴が空く原因は、その領域にあるダスト粒子が巨視的なサイズ（微惑星あるいは半径  $10\text{cm}$  以上のダストアグリゲート）にまで成長したためと考えるのが一般的である。しかし、その証明は未だなされていない。

申請者は、原始惑星系円盤における中心星による円盤表面の加熱過程を調べ、円盤の質量降着率が低下すると、円盤の光学表面の高さの変化が不安定（熱的不安定）を引き起こし、円盤の動径方向内向きに波動が伝搬することを発見した。このような円盤では輝度温度が動径方向に単調に減少せず、波動付近に極大値を持ち、その外側には低温の影領域が広がる。熱的不安定円盤の SED は時間変化し、transitional disks に似た形を持つことがわかった。また、リング状の波動はシア不安定であり、渦を形成することを明らかにした。ただし、現段階では、熱的不安定の原因を探る目的のため、不安定に伴って生じると予測される非軸対称な流れの効果やダストの成長の効果は取り入れられていない。

よって、transitional disks など最近の精密な SED の観測から、微惑星の形成状況などを知るには、従来の軸対称なモデルから、非軸対称な構造を考慮したより詳細なモデルへと進展させることが必要となる。このため本研究を行うこととした。

## 2. 研究の目的

本研究では、原始惑星系円盤中の熱的不安定などによる渦生成によって生ずるガスの流れを明らかにし、それによって引き起こされるダストダイナミクスの数値シミュレーションを行い、

- (1) 円盤中の渦などのガスの流れの中でダストがどのように濃集・成長するか
- (2) 微惑星形成が可能となる状況や条件
- (3) 氷粒子の蒸発を考慮に入れたダスト分布を求めることを目的とする。

特に (3) については、今後の ALMA 等の観測との比較によって、transitional disks

の SED の解釈につなげられるモデルを作ることとする。また、コンドライト隕石の粒子構成をシミュレーション結果と比較し、隕石の成因や種類の起源を検討する。

## 3. 研究の方法

原始惑星系円盤におけるダストダイナミクスを、熱的不安定などによる渦形成がある場において定量的に扱う手法を確立した。まず、渦のある場におけるダスト分布の進化を扱う数値コードの開発と計算を行った。続いて、ダスト分布の進化の計算を進め、微惑星の形成条件や円盤の SED の進化について、円盤の面密度分布や中心星の質量を変えて計算を行い、原始惑星系円盤におけるダストダイナミクスと微惑星形成について総括した。

原始惑星系円盤における熱的不安定の計算結果、および渦形成のシミュレーションの結果に基づき、生成される渦の流れ場を解析的に与えるモデル化を行った。モデルは数値流体計算と比較し、流れ場が妥当であることを確認した。次にそのような流れ場において、ダストの渦への流入過程、渦中心への落下過程、渦中心での微惑星形成過程をガス・ダスト 2 流体モデルによってシミュレートした。安定で寿命が長い高気圧性渦の中では、ダストはコリオリ力によって渦中心へとらせんを描いて落下することが知られている。落下速度はダストのサイズに依存し、メートルサイズ以下なら大きいダストほど落下速度は速くなる。このため渦中心ではダストの面密度が上昇するだけでなく、大きなサイズのダストが選択的に濃集することが予想される。このため、シミュレーションではダストのサイズを変えて計算を行った上で、ダストの合体成長については、直接計算するのではなく、合体・分裂が釣り合っサイズ分布が準定常状態に達しているとして、面密度に応じてサイズ分布を与える手法を採った。

渦中心では、ケルビン・ヘルムホルツ不安定に対して中立安定なダストの鉛直分布を取るものとして、中心面密度が臨界密度を超えれば微惑星が形成するものとする。渦の寿命に応じて、渦中心で生成される微惑星の量が求められる。渦の生成・消滅に関しては、乱流粘性散逸時間を渦の寿命の期待値とする統計的なモデルを採用することで、中心星へと落下するダストの割合と渦に捕獲され微惑星に取り込まれるダストの割合を計算する。

計算コードの開発と計算は、本経費で購入した解析用 PC を使用した。数値流体シミュレーションは、早稲田大学の研究者を研究協力者として、研究打ち合わせを行い、半解析的な扱いと数値流体計算を比較しながら進めた。ダストダイナミクスに関しては、北海

道大学、神戸大学および東京工業大学の研究者を研究協力者として、研究打ち合わせを行った。また、数値計算コードの開発やテスト計算・パラメータサーチなどは大学院生（河村恵里）が担当した。

円盤の面密度分布、乱流粘性係数、中心星質量、ダスト集合体の限界成長半径などのパラメータを変化させて、渦の存在下でのダスト分布の進化の計算を進め、微惑星の形成条件を系統的に調べる。微惑星形成段階でかなりの量のダストが残存すると予測された場合には、ダストを主な質量供給源とした微惑星成長過程を考察する。一方、円盤のSEDの進化についても、熱的不安定のステージから微惑星形成に至る過程において調べ、観測されている transitional disks のSEDと比較を行う。

計算によって求めた微惑星を構成するダストのサイズ分布をコンドライトに含まれるダストのサイズ分布と比較することで、コンドリュールが濃集する条件を議論できる。

#### 4. 研究成果

原始惑星系円盤における熱的不安定の計算結果、および渦形成のシミュレーションの結果に基づき、生成される渦の流れ場を単純な定常楕円渦をケプラーシアとなめらかにつなぐように与えた。定常楕円渦の短軸/長軸比  $\varepsilon$  はエンタルピーの等値線が流線と相似となる条件から渦度  $\omega$  と関係づけられる。次にそのような流れ場において、 $\varepsilon$  をパラメータとして、ダストの渦への流入過程、渦中心への落下過程、渦中心での微惑星形成過程をガス・ダスト2流体によって計算した。安定で寿命が長い高気圧性渦の中では、ダストはコリオリ力によって渦中心へとらせんを描いて落下する。その落下速度はダストのサイズに依存し、メートルサイズ以下なら大きいダストほど落下速度は速くなる。また、サイズの大きなダストが選択的に渦の中心部に濃集することが確認された。渦におけるダストの面密度分布が半解析的に与えられることを見だし、定常状態では渦内のダスト面密度分布は近似的に楕円渦短径の2乗に反比例することを明らかにした。初期に一樣なダスト密度の渦において、中心部のダスト面密度が重力不安定を起こすに十分にまで上昇するのに要する時間は、半径がガスの平均自由行程（1 AU 付近で数 cm 程度）までのダストアグリゲートであれば、ダスト半径に反比例し、1mm 程度のサイズのダストなら、数百ケプラー時間（ $\varepsilon$  に弱く依存）であった。これは安定な高気圧性渦の寿命より短いため、渦中心のダスト面密度は微惑星形成に必要な値を超え、渦による微惑星形成が可能であることが分かった。

次に、結果を Inaba & Barge 2006 に基づいた流体コードによる既存数値シミュレーション結果と比較して、解析的に与えたガスの流れの妥当性や得られたダストの面密度分布の整合性を確認した。ダストからの反作用が無い場合の数値シミュレーションとの比較から、解析解に使用した渦のガス流は非常に良い近似であるものの、渦中のダスト密度の増加は数値流体シミュレーションの方が解析解よりもゆるやかに進行することが明らかになった。これは、数値流体シミュレーションにおいては乱流拡散もしくは数値拡散によって、ダストの中心集中が抑制されるためと考えられる。また、数値流体シミュレーションでは、渦運動は非定常であり、その影響も両者の差の原因となっていると考えられる。しかし、半解析解はダストの中心集中の上限を与えるため、これを用いて、渦における微惑星形成の効率を計算することが可能となる。このため、いくつかの渦生成の数値シミュレーションの結果に基づいて、渦の生成率を与え、微惑星の生成率を計算した。また、渦中心でダスト面密度が自己重力不安定を引き起こす臨界値を越えた場合の重力不安定の進行についても解析的に検討を進めた。

渦の大きさから重力不安定を起こす面密度に達するダストの総質量を求めることができる。渦の大きさは原始惑星系円盤のスケールハイト程度とし、太陽系のもととなった原始惑星系円盤の標準モデル（林モデル）に従えば、1 天文単位の領域においては、形成される1つの渦において月質量の程度のダストが中心集中することが分かる。これらは重力不安定により微惑星を形成すると考えられる。このように集中した領域に生成された微惑星は重力相互作用により短時間で集積し、周囲のダストも合体することで、月質量から水星質量（0.01–0.05 倍の地球質量）の原始惑星に成長することが分かった。また、渦による面密度の上昇により、形成される初期の微惑星半径は 100 km 以上となることが分かった。よって、原始惑星系円盤の非軸対称な不安定性を明らかにし、動径方向に対して渦生成率が明らかになれば、新たな描像の惑星形成過程が記述できると期待される。

渦によるダスト集積過程では、ダストサイズの大きなものほど選択的に渦の中心付近に濃集する。渦中心付近では光学的に厚くなり、乱流加熱による温度上昇が起こる。この場合、氷粒子の蒸発などが期待される。そこでまず、中心星の放射を受けて動径方向に落下するダストが、昇華に伴うサイズ変化によって軌道変化を生じ、ダストリングを形成する問題をイェナ大学や神戸大学、北海道大学の研究者とともに明らかにした。これをもとに渦の中の氷ダストが昇華する場合の運動

について計算を行うことで、ダストの物質密度を高めつつ、微惑星を形成できることを考察した。

#### 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, H. Kimura, S. Watanabe, T. Yamamoto, and S. Muller, Sublimation temperature of circumstellar dust particles and its importance for dust ring formation *Earth Planets Space*, **63**, (2011), 1067-1075. 査読有り, doi:10.5047/eps.2011.03.012
- ② H. Kobayashi, H. Kimura, S. Yamamoto, S. Watanabe, and T. Yamamoto, Ice sublimation of dust particles and their detection in the outer solar system. *Earth Planets Space*, **62(1)**, (2010), 57-61. 査読有り, doi:10.5047/eps.2009.03.001
- ③ S. Watanabe and D. N. C. Lin, Thermally induced waves in protoplanetary disks and their implication for planetary formation. *AIP Conference Proceedings*, **1158**, (2009), 27-30. 査読無し, <http://proceedings.aip.org/resource/2/apcpcs/1158.jsp>
- ④ E. Kawamura and S. Watanabe, Size distribution of dust grains in vortices in a protoplanetary disk. *AIP Conference Proceedings*, **1158** (2009), 133-134. 査読無し, <http://proceedings.aip.org/resource/2/apcpcs/1158.jsp>

[学会発表] (計 9 件)

- ① E. Kawamura, S. Watanabe, and S. Inaba, Dust condensation time and total dust mass in a vortex in protoplanetary disks by an analytical approach, American Geophysical Union Fall Meeting 2011, San Francisco (USA)
- ② 渡邊誠一郎、小林浩、諸田智克、荒川政彦、月惑星探査に基づく太陽系年代学の構築. 日本惑星科学会 2011 年秋季講演会、2011.10.24、相模女子大学 (神奈川県相模原市)

県相模原市)

- ③ 河村恵里、渡邊誠一郎、稲葉知土、渦による微惑星形成：解析解から惑星系を議論する. 日本惑星科学会 2011 年秋季講演会、2011.10.24、相模女子大学 (神奈川県相模原市)
- ④ 渡邊誠一郎、惑星探査と宇宙惑星科学コミュニティ、地球惑星科学連合 2011 年大会 (招待講演)、2011.5.26、幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市)
- ⑤ 河村恵里、渡邊誠一郎、稲葉知土、渦の周りの流れ場とダストの面密度分布進化について：解析モデルと数値シミュレーションの比較、地球惑星科学連合 2011 年大会、2011.5.25、幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市)
- ⑥ 河村恵里、渡邊誠一郎、渦による微惑星形成：数値シミュレーション結果と解析解の比較、日本惑星科学会 2010 年秋季講演会、2010.10.06、名古屋大学 (愛知県名古屋市)
- ⑦ E. Kawamura, S. Watanabe, Dust surface density evolution in a vortex in protoplanetary disks by an analytical approach, Ishigaki International Conference on Evolving Theory for Planet Formation, 2010.6.22, Ishigaki, Okinawa
- ⑧ 渡邊誠一郎、地球惑星科学におけるモデルとシナリオ、地球惑星科学連合 2010 年大会、2010.5.23、幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市)
- ⑨ 河村恵里、渡邊誠一郎、原始惑星系円盤内の渦におけるダストの面密度分布進化、日本惑星科学会 2009 年度秋季講演会、2009.9.29、東京大学 (東京都文京区)

#### 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

なし

##### (3) 連携研究者

なし