特集「若い惑星および周惑星円盤・ 衛星形成研究最前線」 その2 周惑星円盤におけるダスト

芝池 諭人

2024年6月17日受領, 査読を経て2024年8月14日受理

(要旨) ガス惑星の形成におけるガスの集積段階は,かつては数値流体計算による理論的研究しかでき なかった.しかし,近年の巨大望遠鏡の建設や観測技術の向上により,ガス集積の途中段階にあると考 えられる惑星を検出し,その観測的な制約を得ることが可能になってきた.ガス集積の副産物である周惑 星円盤についても,アルマ望遠鏡によりダストの熱放射が観測されており,現在盛んに研究が行われてい る.本稿では,周惑星円盤でのダストの振る舞いと放射について,実際の検出例とその解釈などの観測的 側面と,円盤内でのダスト進化の予測などの理論的側面の,両面から総説する.

1.惑星のガス集積と周惑星円盤, ダスト

ガス惑星は巨大な質量で系の惑星形成過程を左 右するため、ガス惑星の形成過程の理解は極めて重 要である、ガス惑星形成には、コア集積シナリオと 重力不安定シナリオの二通りがある.図1に、コア集 積シナリオにおける惑星のガス集積過程の流れと. その中でのダストの振る舞いを示した、ガス惑星は、 数~数十地球質量程度の質量を持った固体の惑星 コアが、自らの周囲の原始惑星系円盤のガスを大量 に集積することで形成される. ガス集積中には、集 積による重力エネルギーの解放により発生する熱が 圧力勾配を作り惑星の重力と釣り合うことで、惑星 近傍に準静的なエンベロープ様の構造を作る.一方 で. 惑星は重く成長するにつれて原始惑星系円盤と 角運動量を交換し、自らの軌道上にガス面密度の低 い溝,「ギャップ」を作る. 結果, 惑星周囲のガス面密 度が下がり、ガス集積率も下がる、この段階では、惑 星周囲の構造はガスの不透明度(opacity)に依存し て変わる. ガスの不透明度が大きく, エンベロープ中 の熱が逃げにくい場合には、ガスの圧力勾配によっ

1.国立天文台 アルマプロジェクト yuhito.shibaike@nao.ac.jp てエンベロープの形状が保たれる.一方で,ガスの 不透明度が小さく,冷却が効く場合には,ガスが冷 えて集積するガスに対抗する力が遠心力のみとなり, 上下方向に潰れて円盤となる場合があると考えられ る.後者の場合に惑星周囲に形成される回転円盤 を,「周惑星円盤」と呼ぶ.なお,重力不安定シナリオ によりガス惑星が形成される場合でも,ガス集積時 にエンベロープあるいは周惑星円盤が惑星周囲に形 成されると考えられている[1].

このような惑星のガス集積過程の中で、ダストは 重要な役割を果たす.エンベロープから周惑星円盤 に移行する条件はまだ検証の段階だが、最近の輻射 輸送流体計算によれば、ガスの冷却時間(cooling timescale)が惑星の軌道時間(orbital timescale) よりも少なくとも一桁短くなければ、同円盤は形成さ れない[2].ガスの冷却時間はガスの不透明度によっ て決まるため、その不透明度を決める惑星近傍のダ ストの量が重要となる.

また、周惑星円盤形成後には、衛星形成の観点か らもダストの振る舞いの理解が重要である.太陽系 で言えば、木星の四つの巨大衛星(イオ・エウロパ・ガ ニメデ・カリスト)は、周惑星円盤内でダストから形成 されたと考えられている.すなわち、ダストが原始惑 星系円盤内で惑星に成長するように、木星形成時に



図1:「コア集積シナリオ」における惑星のガス集積過程の流れとダ スト

(1) 原始惑星系円盤内でダストから成長した惑星コアはガス を集積する.(2) 十分に重く成長すると, 原始惑星系円盤に ギャップを開く.この時, 惑星周囲にエンベロープを持ち, 温 度が下がると周惑星円盤となる.エンベロープと周惑星円盤 のダストの熱放射が観測可能である.(3) ダストは周惑星円 盤内で巨大衛星へと成長する.やがて原始惑星系円盤が散 逸して惑星のガス集積が止まると, 周惑星円盤も消える.なお, 「重力不安定シナリオ」の場合も,(2)以降は(定性的には)変 わらない[1].

周囲に存在した周惑星円盤の中でダストが大きく成 長して巨大衛星は形成した.他にも、土星のタイタン とイアペタスや、天王星の巨大衛星も、それぞれの惑 星の周惑星円盤内で形成された可能性がある.衛星 形成についてこれまで数多くの理論的側面からの研 究がなされてきた.周惑星円盤でのダスト進化は当 然同円盤のガスの流れに強く依存するが、数値流体 計算によって、衛星形成が起きるような小さなスケー $u (\leq 0.1 R_{\rm H}; R_{\rm H}: ヒル半径^1)$ から、原始惑星系円 盤からガスが流入する大きなスケール(数ヒル半径程 度)を同時に扱うのは非常に難しく、周惑星円盤のガ ス構造は、ダスト成長や衛星形成への影響を議論で きるほどまでの詳細が、理論的に明らかになってい ない、結果として、衛星形成シナリオは乱立しており、 どれが正しいのか理論的側面からは判別できてい ない(本特集の藤井氏の記事[3]を参照のこと).

一方で、近年、ようやくガス集積中の惑星や周 惑星円盤を観測することが可能となった. PDS 70 系(第四章を参照のこと)では、ガス集積中と考えら れる二つの惑星が原始惑星系円盤内に見つかって おり²、その片方からは周惑星円盤のダストの熱放 射と考えられる、(サブ)ミリ連続波がアルマ望遠鏡 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array; ALMA)によって観測された[8]. 従って、今 後同様の観測から、惑星のガス(とダスト)の集積過 程や周惑星円盤の形成、そして同円盤内でのダスト の振る舞いに対して、観測的な制約を得ることが期 待される. そして、この制約によって初めて、衛星形 成理論も次の段階へと進めるだろう.

このように、惑星のガス集積過程、そしてそれに 続く周惑星円盤内での衛星形成において、ダストの 振る舞いを理解することは大変重要である.本稿で は、まず、従来の衛星形成論の文脈で議論されてき た、周惑星円盤へのダストの供給と同円盤内でのダ ストの進化について、理論的観点からこれまでの理 解をまとめる.その後、ようやく可能になりつつある、 形成中の惑星及び周惑星円盤のダストに関する観測 について、最新の内容を含めて解説する.さらに、原 始惑星系円盤内の惑星としては唯一の周惑星円盤 検出例であるPDS 70 cについて、ダストの理論と観 測を組み合わせることで得られる制約について、筆 者の最近の研究を紹介しつつ議論する.

¹(惑星の)重力圏の大きさを示す長さ、定義は、 $R_{\rm H} \equiv \left\{ M_{\rm p}/3M_{\star} \right\}^{1/3} a_{\rm p}$ (M_{\star} :中心星質量、 $a_{\rm p}$:惑星軌道半径). ²ガスが惑星に集積する際の加熱により発せられる水素輝線(Ha線) が観測されている[4,5] (青山氏・橋本氏の本特集記事[6,7]も参照の こと).



図2:周惑星円盤へのダスト供給と同円盤内でのダスト進化

横軸は、木星およびPDS 70 cでのおおよその距離関係を示す. 縦軸は、おおよそのガスの面密度(灰色領域)及びおおよそのガスやダスト の高度(矢印,丸印)を示す. 原始惑星系円盤内をガス圧勾配により恒星に向かって移動してきたペブルは、ギャップ外縁のガス圧極大に溜 まってしまい、そのままでは周惑星円盤には供給されない. しかし、溜まったペブルは成長して微惑星となり、かつ0.1-1 µm程度の大きさの ダストを破壊により形成する. この小さなダストはガス圧勾配の影響を受けにくく、拡散によりギャップ内に進入する. そして、沈降に逆らって 十分に高く巻き上げられたダストは、ガス流と共に周惑星円盤へと運ばれる. また、ギャップの外でガスの大きな流れ「子午線流」に乗ったダ ストは、ギャップを"飛び越えて"ガスと共に周惑星円盤へと供給される. 一方で、微惑星もガス圧勾配の影響が小さいため、別の惑星などに よる散乱でギャップ内に進入し、いくつかは周惑星円盤に捕獲される. 捕獲の際に周惑星円盤との摩擦で微惑星表面の氷が蒸発し、その水 蒸気が同円盤内で再凝縮することでダストを生成する. これらの方法で周惑星円盤に供給されたダストは、同円盤内で再び成長してペブル となり、同円盤のガス圧勾配により今度は惑星に向かって移動する. 図中の*R*_H, auはそれぞれヒル半径と天文単位.

2. 周惑星円盤へのダスト供給

まずは、周惑星円盤へのダスト供給について、理 論的側面からの理解を紹介する.惑星はすでに十 分に成長しており、原始惑星系円盤にはギャップが 開いている状況を考えよう.図2に、この時の周惑星 円盤へのダスト供給と同円盤内部でのダストの進化 について示した概略を示す.周惑星円盤は、原始惑 星系円盤と同様にガスとダストからなる回転円盤で あり、原始惑星系円盤で起こる力学的な現象は周惑 星円盤でも起こると考えてよい.そのため、周惑星 円盤においてダストが1 cm程度の大きさまで成長し た「ペブル」になると、ガスからの摩擦力の効果を強 く受けてその軌道半径が減少する、すなわちペブル が起こる[9]. ペブルの移動(落下)時間は,およそ10³ 年程度と見積もられており[10], これは周惑星円盤 自体の進化(惑星の進化によって決まる時間)よりも はるかに短い.したがって,周惑星円盤内にダストが 存在し続け,衛星形成が起きたり,ダストの熱放射 が実際に観測されたりするためには,原始惑星系円 盤から周惑星円盤へのダストの供給が常に起きてい なければならない.一方で,惑星周囲にギャップが できていると,ペブルは原始惑星系円盤内のギャッ プの縁に存在するガス圧力の極大部分に溜まってし まい,同円盤内にリング構造を形成して,容易には ギャップ内に進入できないはずである[11].

考えられるダストの周惑星円盤への供給方法は二 つある.一つは,原始惑星系円盤に生じたギャップ の縁において,そこに溜まったペブル同士の衝突破



図3. 木星及びPDS 70 Cの周惑星円盤 Cのダスト運化デ測 ダスト進化計算[20]による、木星及びPDS 70 cの周惑星円盤内での各半径での(最大)ダスト半径を示す。ガスとダストの流入が定常的に 続く周惑星円盤を仮定した場合の、準定常な軌道半径方向の分布である。青、赤、緑色の曲線は、周惑星円盤に流入するガス流のダスト/ガ ス質量比xがそれぞれ10⁻²,10⁻³,10⁻⁴の場合を示し、これらは数値計算から予測される典型的な値である[24]。それ以外のパラメーターについ ても、それぞれの系での典型的な推測値を選んだ。各色の縦線は、それぞれのxの値の場合の水氷が蒸発する雪線の位置を示す。

壊などで、0.1-1 µm程度の大きさのダストが形成さ れ、それがガスと共に周惑星円盤に供給される方法 である.この小さなダストはガスとよく結合³している ので、ガスが惑星へ降着する流れに乗って、周惑星 円盤に進入することができる.原始惑星系円盤内に 存在する惑星の近傍の局所的な流れを計算した三 次元数値流体シミュレーションによれば、0.1-1 µm 程度のダストを含んだガスは、惑星周囲の重力圏(ヒ ル球)に沿って原始惑星系円盤の中心面付近から上 昇し、上空から周惑星円盤に流れ込む[12].このガ ス流の「根元」はギャップ内にあるので、ガスの乱流 によるダストの拡散効果(及びガスと結合してギャッ プ外から中へと流れる別のガス流に乗る効果)により ガスの圧力勾配に逆らってギャップ内に進入可能な 0.1-1 µm程度の大きさのダスト⁴でなければ、周惑 星円盤に供給されないことにも注意しておく[15]. ま た,惑星が存在する原始惑星系円盤全体の流れを 計算する,大域的な三次元数値流体シミュレーショ ンも最近は行なわれるようになってきている.それに よれば,原始惑星系円盤の中心面と上層を動径方向 に循環する流れ(子午線流:Meridional Flow)にダ ストが乗り,局所計算で予測されるよりも多くのダス トが惑星近傍に供給される可能性も,示唆されてい る[16].

もう一つは、ガスの影響を受けにくい微惑星とし て供給される方法である.高い軌道離心率を持った 微惑星が、ギャップ内に進入して周惑星円盤によっ て捕獲される際、ガスとの摩擦により水氷が蒸発 し、それが周惑星円盤内で再凝縮してダストになる [17]⁵.これは、木星や土星の巨大衛星の材料の起源 としてこれまで検討されてきたシナリオであり、系外 惑星の周惑星円盤に対しても有効であろう.ガス圧 極大に溜まったペブルの成長により、惑星の近くで 微惑星の形成が期待できることも[18]、このシナリ オの強みである.

これら二つのダスト供給方法は、どちらが主要で あるか未だわかっていない.なぜなら、小さいダスト による周惑星円盤への流入については、ガスの流れ

³ここで言う「結合」とは、化学的なものではなく、ガスとダストの間の摩 擦がよく働くことで、ダストがガスと同じように運動する状態を指す. ⁴ダストのギャップ内への進入条件は、ガスの圧力勾配付近のガスの 乱流強度aとダストのストークス数St(ダストのガスに対する制動時 間/ケプラー周期で定義される、ダストの大きさの無次元量)の比a /Stが、1より大きくなることである[13].また、ストークス数が10⁻³とな るダストの大きさは、ガス面密度によるが、10 μm程度である。した がって、典型的な乱流強度を10⁻³と考えれば、10 μm程度がギャップ 内に進入可能なダストの限界の大きさとなる[11].実際には、この限 界値より小さなダストが主要となるだろう.原始惑星系円盤内でのダ スト進化の文脈では、ギャップ内に進入するダストについて「ダスト漏 れ」現象として近年研究が進んでいる[14].

⁵微惑星の氷に含まれる岩石ダストも氷の蒸発とともに周惑星円盤に 放出される.

自体が数値流体計算の設定(不透明度,粘性,など) により変わるため、供給されるダスト量に不定性が あるためである.そして、微惑星の捕獲についても、 周惑星円盤に飛んでくる微惑星の量が他の惑星等 による原始惑星系円盤内の微惑星の擾乱に強く依 存しており、不定性が大きい.

3. 周惑星円盤でのダスト進化

第二章で述べた通り、ダストがいかにして周惑星 円盤に供給されるのか、まだよくわかっていない.し かし、現実に巨大衛星は存在し、周惑星円盤内での ダストの成長を示唆するミリ波帯で連続波も観測さ れている.そこで、ひとまず0.1-1 µm程度の大きさ のダストがガスと共に周惑星円盤に供給される場合 を想定し、同円盤内でのダスト進化を考える.

第二章で概説したとおり、 周惑星円盤に供給され たダストが成長すると、中心の惑星に向かって移動 する[19]. 図3は、筆者のダスト成長モデルによる周 惑星円盤でのダスト半径の進化の一例である[20]. このモデルでは、ガスとダストが周惑星円盤に定常 的に流入していることを仮定しており、図3は、各軌 道での最大ダスト半径の定常分布を示している.こ こでは、中心の惑星が木星の場合とPDS 70 c(第四 章参照)の場合について示しているが、基本的な描 像は同じである. 周惑星円盤に流入するガス流の中 でダスト/ガス質量比(x)が一様に分布していると考 えると、ダスト(とガス)は流入領域の外縁付近に集 中して流入することになる.図3を見ると、周惑星円 盤の外縁付近では曲線が縦向きになっている. これ は、流入した 0.1-1 μm程度の大きさのダストがそ の場で合体成長していることを示している. そして、 ダストの大きさが1 cm程度のところで、図3の曲線 は横向きになる.これは、1 cm程度の大きさまで成 長したダストはそれ以上大きくならず、 周惑星円盤内 を内側に移動することを示している. 移動する際の ダストの大きさは、供給されるダストの量(x)によっ て変わる. そして,水氷が蒸発する軌道,すなわち雪 線(snow line)を越えると、衝突による臨界破壊速 度が下がり[21],破壊が卓越してダストの大きさは落 下に従って減少する⁶. なお、周惑星円盤の温度は主 に粘性加熱により決まり、同円盤の外側領域のみ原 始惑星系円盤からの輻射により温度が決まる.惑星 からの輻射やガス集積によるショック加熱の影響は 小さい[20].

もし,惑星に落下するまでに、ダストの成長によっ てガスから受ける摩擦力の定性的な振る舞いが変 わったり7. ダスト/ガス面密度比が大きくなることに よる流体力学的な不安定性が生じたりすると8.ダス トは微衛星(~km)へと成長し、さらには衛星の形成 へとつながる⁹. しかし、これらの微衛星形成の条件 を満たすには高いダスト/ガス流入質量比が必要で あり達成が難しく[19]、衛星形成という観点からは、 非常に大きな問題である.ただし. 第二章で述べた ように, 周惑星円盤には微惑星としても衛星の材料 が供給される、この捕獲された微惑星は、 周惑星円 盤内のペブルを集積して衛星へと成長できる可能性 がある、この場合、材料をダストだけに頼るよりも、 衛星の形成は容易となるだろう[17.19]. なお. 捕獲 微惑星から蒸発した水蒸気の再凝縮によって氷ダス トが供給される場合は、供給されるダストの動径方 向分布がガスと共に供給される場合と異なる.「ダス トは供給後にペブルに成長し惑星に向かって移動す る という大きな流れは変わらないが. 供給方法が定 まっていない以上、どちらのダスト分布が正しいの か理論的に決定することは困難である. 今後の観測 的な制約、特に周惑星円盤の空間分解が可能な将 来の望遠鏡による観測が待たれる.次の章では、周 惑星円盤のダストの観測についての現状と将来の展 望を述べる。

4. 周惑星円盤のダストの観測

ガス集積中の惑星は原始惑星系円盤に埋もれて おり、その観測には多くの困難がある.しかし、惑星 は十分に成長するとギャップを作るため、ギャップ内 の惑星とその周惑星円盤であれば観測可能である. 完全にガスがなくなると集積が終わってしまうため、 その前の適度にギャップの開いた状態を狙い、惑星

⁶ダストの衝突による臨界破壊速度は、仮定するモノマーの大きさや 表面の組成により大きく異なるため[21],この描像は変わりうる。 ⁷ダストが受けるガス抵抗がエプスタイン則からストークス則に変われ ば、より容易にダストの移動よりも成長が卓越するようになる[22]. ⁸この不安定性はストリーミング不安定という[23], ⁹木星の場合は、ガリレオ衛星が形成されるはずである。



図4:PDS 70 cのダスト連続波放射

(左) アルマ望遠鏡によるバンド7(855 µm), ~0.02秒角*での連続波観測. 惑星cの位置におよそ100 µJy/beamのダスト放射が見られ るが, 惑星bの位置にダスト放射は見られない[5,25]. 橋本氏がBenisty氏らによるアルマ望遠鏡を用いた観測結果を基に作成した図を筆 者がさらに改変[ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)/Benisty et al.]. (右) バンド10(353 µm), 0.01秒角での周惑星円盤のダスト放射強度 予測図. この波長・空間分解能での放射強度は, 左図とは異なることに注意. 筆者のダスト進化計算[20]を基に, 植田氏が輻射輸送計算 (RADMC-3D[30])を行い作成. 両図の左下の白丸は空間分解能を示す. 図中のauは天文単位. (*引用元に明記されていないため[25]か らの推量.)

と周惑星円盤の観測を実現する.第二・三章で述べ たように、1 mm-1 cm程度の大きさのダストはガス 圧勾配でギャップ外縁に溜まるが、0.1-1 µm程度の 大きさのダストはギャップ内に進入する[11]. この小 さなダストは、周惑星円盤内で数密度が上がること で促進される合体成長により、最大で1 cm程度の大 きさに成長し、アルマ望遠鏡などの(サブ)ミリ波電 波望遠鏡で観測が可能になる(図4左).

周惑星円盤のガスとダストは、ガス集積中の惑 星そのものより大きな構造を持ち、もし空間分解で きれば多くの情報を得られる可能性がある.しか し、周惑星円盤の大きさはせいぜい1天文単位程度 であり、アルマ望遠鏡をもってしても解像はかなり 厳しい.従って、周惑星円盤の観測では同円盤全 体からの放射を扱うことになる.これは、原始惑星 系円盤の観測でいえばアルマ望遠鏡以前の時代に 相当し、当時用いられた手法を周惑星円盤の観測 とその解釈に転用できる.解像できない原始惑星 系円盤の観測に威力を発揮したのが、様々な波長 での天体の明るさを表すスペクトルエネルギー分布 であり、これは惑星と周惑星円盤にも有効である [26]. 全体放射に大きく貢献する周惑星円盤の外側 領域は(図5下及びその解説を参照のこと), 原始惑 星系円盤とほぼ同じ温度であると考えられ、 ギャッ プが開いていない段階では、周惑星円盤のスペクト ルエネルギー分布への寄与は原始惑星系円盤の寄 与に埋もれてしまう.一方で、十分にギャップが開 いていれば、ガス集積中の惑星の光球と周惑星円 盤では温度が異なるため、アルマ望遠鏡などのミリ 波帯での観測で同円盤の情報を得られる[27].加 えて、ジェームズ・ウェッブ望遠鏡(James Webb Space Telescope; JWST)の中間赤外装置(Mid-InfraRed Instrument: MIRI)などにより、中間 赤外超過も観測可能である.しかし、ジェームズ・ ウェッブ望遠鏡の近赤外線カメラ(Near-InfraRed Camera; NIRCam)やすばる望遠鏡による近赤外 や可視光の観測では、主に惑星の光球からの寄与 を見ることになる. ただし, 惑星(と周惑星円盤)から 空間的に十分に離れた場所では、中心星からの放射 光を散乱して光っている低温のダストを,惑星と空間



図5:PDS 70 cの周惑星円盤のダスト放射予測 ダスト進化・放射計算[20]による、アルマ望遠鏡の各バンドでの光学的厚み(上)と周惑星円盤中心からのダスト放射フラックス密度の累積値(下). バンド3, 7, 10の波長はそれぞれ35 mm, 855 µm, 353 µm. 下図の黒線はバンド7での観測値 (86±16 µJy [25]).上下図ともに、観測値を再現できる、周 惑星円盤へのダストガス流入質量フラックス比xが10⁻²の場 合を示した[20].

分解して近赤外線で捉えることも可能だろう.実際 に、PDS 70系においては、原始惑星系円盤外側の ダストリングからPDS 70 c(の周惑星円盤)へと掛か るダストの「橋」がジェームズ・ウェッブ望遠鏡の近赤 外線カメラにより観測されており、ダストの惑星・周 惑星円盤への供給について重要な示唆を与えている [28]¹⁰. なお、惑星と周惑星円盤から出た赤外線より 短い波長の放射は、それらの上空にダストが残って いるとよく吸収される(減光)ため、それらの探索には (サブ)ミリ波による観測が望ましい[29]. その意味で も、(サブ)ミリ波で観測可能な周惑星円盤でのダス トの振る舞いについて理解することは重要である.

原始惑星系円盤内のガス集積中の惑星周囲に周 惑星円盤が見つかった唯一の例であるPDS 70 cに ついて、より詳しく説明する、若いTタウリ型星PDS 70(0.76太陽質量, 年齢540万年, 地球からの距離 113パーセク)の周囲には、原始惑星系円盤の大きな ギャップ内に、近赤外線の直接撮像観測で二つの ガス集積中の惑星b (中心星から20.6天文単位)と c (34..5天文単位)が発見されている[4.5]. このうち 周惑星円盤と思われるサブミリ波のダスト連続波が 検出されているのは、より長周期の惑星cのみである (図4左)[7,25]. アルマ望遠鏡による波長855 µm (バンド7)の観測で、惑星cの位置におよそ100 µJy/beam の放射が見られるが、空間分解能は周惑星円盤より も大きく、同円盤と外側リングとの間隔(~0.04秒角) より小さいため、このピーク強度が同円盤全体から の放射のフラックス密度とおよそ一致すると考えて良 い. このフラックス密度から予測される周惑星円盤 内のダスト質量は約 0.007-0.031 M_E (M_E:地球質 量)であり、これは月の質量(0.012 M_E)程度、そして ガリレオ衛星の総質量(0.066 M_E)の半分以下であ る.

図5は、アルマ望遠鏡のバンド7で観測されたダス ト放射のフラックス密度を再現できるパラメーター 設定の場合の、周惑星円盤内でのダスト進化・放射 の計算例である[20]. 内側への移動によりダストの 面密度が下がっているため. ほとんどの(サブ)ミリ 波帯で周惑星円盤は光学的に薄いと考えられる(図 5上)、下図は、ダスト放射の周惑星円盤全体からの フラックス密度に対する各軌道rからの貢献を,同円 盤内側から積分した量を示す. この分布がおおよそ rの2乗に比例することから、ダスト放射のフラックス 密度は、ダスト存在領域の表面積に強く依存すると わかる、つまり、周惑星円盤のどれくらい広い領域に ダストとガスが降り注ぐかが重要であり、それは流 入するガスの持つ角運動量によって決まる. そして. その角運動量は,惑星のボンディ¹¹半径とヒル半径 の比によって決まると考えられている[31]. つまり. 周 惑星円盤からのダスト連続波の明るさは、ガス集積 中の惑星の特性を強く反映していると言える.

¹⁰ただし、ここでの空間分解能は0.03-0.06秒角くらいのため、PDS 70 cから0.04秒角ほどしか離れていない外側のダストリングとの間の 構造を完全に分解できていない可能性がある[28].

¹¹惑星表面からの脱出速度とガスの熱運動速度(音速)が一致する長 さ. 定義は $R_B \equiv GM_p/c_s^2$ で、Gは万有引力定数、 c_s は惑星付近の原 始惑星系円盤の温度で決まる音速.

なお、ここまでの議論は、周惑星円盤内での動径 方向のガスの流れがダストの挙動に影響しないこと を前提としている。数値流体計算によっては、円盤面 において螺旋状に惑星から離れるようにガスが流れ ており、それに乗ってダストが円盤外向きに移動する と主張する研究もある[32].さらには、ガスは周惑星 円盤ではなく惑星直上に降り注ぎ、結果として同円 盤全体が"Decretion"円盤になるという説もあり、 この場合もダストは惑星に向かって移動せず同円盤 外側へと移動する[33].このようなガス円盤構造の 違いによるダスト放射への影響の検討も、今後の課 題である.

では、周惑星円盤を空間分解して観測することは 可能だろうか?まず, 原始惑星系円盤は空間分解で き、0.04秒角ほど離れたギャップ縁と周惑星円盤 も、空間的に分解して観測することが可能である(図 4左). 図4右は、アルマ望遠鏡のバンド10(353 µ m)で,(現実的な範囲で)現状最も高い空間分解能 である0.01秒角でPDS 70 cを観測した場合に期待 される、ダスト放射の強度マップと空間分解能の比 較である、空間分解能が予測される周惑星円盤の半 径と同程度の現状では、同円盤の構造を解像するこ とはできないが、同円盤の大きさに制約を与えること ができるかもしれない.特に,第二・三章で述べたよ うに、ダストは周惑星円盤に流入後は惑星に向かっ て移動すると考えられるため、同円盤のダスト存在 領域はダストとガスの流入領域に一致し、それら流 入領域の大きさを決定する(現在は理論的予測しか ない)流入ガスの角運動量に、直接的な制約を与え る可能性がある.将来的には、次世代大型電波干渉 計(The Next Generation Very Large Array; ngVLA)による周惑星円盤の解像が期待される.

ここまでは原始惑星系円盤内にある周惑星円盤 の観測について述べた.しかし,原始惑星系円盤内 に位置しないにも関わらず周惑星円盤内にダストを 保持している惑星質量天体も発見されている(橋本 氏の記事[7]の表2にまとめられている).例えば,GQ Lupi bは,公転面が約30度原始惑星系円盤からず れているにも関わらず[34],周惑星円盤のダストと 考えられるスペクトルエネルギー分布の赤外超過が, ジェームズ・ウェッブ望遠鏡の近赤外線カメラで観測 されている[35].この天体は恒星から117天文単位 の位置にあり、約600年に一度原始惑星系円盤から ダストの供給を受けることができると思われるが、そ れだけで観測された赤外超過を説明できるほどのダ ストを周惑星円盤に獲得できるだろうか?また、自由 浮遊惑星OTS 44や、恒星周囲の原始惑星系円盤か ら完全に外れている惑星質量天体SR 12 cからも、 PDS 70 cと同様に(サブ)ミリ波のダスト熱放射が 観測されている[36,37]. なぜこれらの天体は長期間 ダストを自らの周囲に保持できているのだろうか?こ の謎の解明は今後の課題である.そして、原始惑星 系円盤からの放射や減光の影響を受けないことか ら、今後もこのような"はぐれ"惑星質量天体の周惑 星円盤の発見が期待される.

5.周惑星円盤のダストによる 惑星特性の制約

周惑星円盤のダストの観測とその解釈から, 形成 中の惑星の理解に貢献できるだろうか?第四章で述 べたように、周惑星円盤のダスト放射の特性は惑星 の特性に強く依存しているため、同円盤のダスト放 射の観測から惑星の特性に対して制約を与えること ができるはずである。2024年7月までに受理された 論文で報告されている, 原始惑星系円盤内にある惑 星の周惑星円盤からのダスト放射の(サブ)ミリ波で の明確な検出は、一つの波長(855 μm)且つ一つの 惑星しかない. 中間赤外の超過はいくつかの惑星で 見られるが、周惑星円盤由来である確証は得られて いない. 現在, 複数のグループがPDS 70 cの他のミ リ波帯の波長での観測に挑んでおり、855 μmより 短いサブミリ波の観測で周惑星円盤が検出されるこ とが期待される.もしこれが実現すれば、周惑星円 盤内のダストのサイズ(大きさ)分布や温度に対して 直接的な制約を与えることができるだろう.

では、PDS 70 cの単一波長での観測から、惑星の 特性を制約できるだろうか?筆者らは、ダストの大き さや量などのフリーパラメーターを、ダスト進化モデ ルを通して周惑星円盤へのダスト供給量という(第三 章で述べたように)理論的制約のあるパラメーターに 変換することで、惑星の質量やガス集積率に制約を 与えることに成功した[21].

図6左は、惑星の質量とガス集積率を変えた際



図6:ダスト進化・放射モデルによるPDS 70 cの周惑星円盤のフラックス密度

(左) 惑星質量及びガス集積率を変えた場合に予測される855 µmのダスト連続波フラックス密度(カラースケール)と, 観測値を再現する両 特性の領域(赤:ダスト放射(86±16 µJy [25]), 黒:その他の観測・推定手法). 紫点は, ダスト放射観測による推定と従来の推定の両者を 満たす惑星の特性の例.(右) 周惑星円盤内の乱流強度αと同円盤へのダスト/ガス流入質量比xを変えた場合の観測値を再現する領域と, そこから得られる惑星の特性への制約(紫線). 共に[20]の図を改変. 図中のSED, TTS, M」はそれぞれ、スペクトルエネルギー分布, Tタウリ 型星, 木星質量を指す. 詳細は[20]を参照のこと.

に予測される、PDS 70 cの周惑星円盤からのダ スト放射のフラックス密度である. フラックスは惑 星質量とガス集積率におよそ比例しており、赤線 部分の惑星質量Mpとガス集積率Mgであれば、実 際に観測されたフラックス密度(86±16 µJy)が再 現される. 例えば、M_n = 10M_I(M_Iは木星質量)と $\dot{M}_{g} = 2 \times 10^{-7} M_{\rm f} {\rm yr}^{-1} ({\rm yr} {\rm i} {\rm f} {\rm f}) の場合(紫点) であれ$ ば、他の手法(赤外線のスペクトルエネルギー分布、 Ηα輝線幅, 軌道安定性など)による推定とも整合的 である[4,38,39]. また, Ha輝線強度から推定され るガス集積率(青山氏・橋本氏の記事[6.7]を参照の こと)は、ダスト放射による推定値より小さいが、これ はHa輝線(656 nm)が 0.1-1µm程度の大きさのダ ストによる減光の影響を受けていると考えれば、定 性的には整合的である.図6右は、左図で固定して いた周惑星円盤の乱流の強さ(a)と同円盤へのダス ト/ガス流入質量比(x)を変化させた場合の、観測を 再現できる惑星質量とガス集積率の領域を示してい る. 筆者らのモデル計算は、乱流が強いほどダスト フラックスが下がると予測した.また、周惑星円盤へ のダスト供給が難しいことを考えれば、流入するダス

トとガスの質量比xは、太陽組成である10⁻²を上回る ことはないだろう¹². これらの制約から. 右図の茶色 の領域より左あるいは下には、惑星質量とガス集積 率は位置しない. 従って, $M_{\rm p}\dot{M}_{\rm g} \ge 4 \times 10^{-6} M_{\rm I}^2 {\rm yr}^{-1}$ (紫実線), $\dot{M}_{g} \ge 2 \times 10^{-8} M_{I} \text{yr}^{-1}$, 及び $M_{p} \ge 5 M_{I}$ (紫点線)という制約が得られる.これは、ミリ波のダ スト放射から惑星の特性に制約を得た。初の事例で ある. また, 同様の計算を惑星bに対しても行い. ダ スト放射が非検出であることから. 惑星質量とガス 集積率に対して緩い制約を得た.惑星bは,惑星cよ りも質量またはガス集積率が小さいか、あるいは周 惑星円盤の乱流が強いかダスト/ガス流入質量比が 小さい、というものである、さらに、この両惑星に対 する制約と、Ha輝線の検出強度が惑星cより惑星b の方が高いことを考えると[38], PDS 70系全体とし て、一つのシナリオを描くことができる、すなわち、 惑星c近傍には原始惑星系円盤外側のダストリング

¹²数値流体計算で予測されるガス流でのダストの運動を調べると, 実際に x≤0.01 が妥当である[24]. ただし, この計算はギャップ外か らの子午線流によるダスト流入や[16], 微惑星捕獲は考慮されてい ない[17].

から豊富なダストの供給があり、それにより強いダス トの熱放射とHa輝線の減光が生じているが、より 原始惑星系円盤内側の惑星bにはダストの供給が少 なく、ダストの熱放射もHa輝線の減光も弱い、とい うものである(図4左).これは、ジェームズ・ウェッブ 望遠鏡の近赤外線カメラにより発見されたPDS 70 cへのダストの「橋」とも整合的である.また、中心星 PDS 70の周囲には微かなダスト円盤が検出されて おり(図4左)、両惑星の周惑星円盤ダストについて理 解することは、系全体のダスト進化を考える上でも大 きな役割を果たすだろう.

6.おわりに

以上,近年急速に観測が進んでいるガス集積中の 惑星とその周囲の周惑星円盤について、特に同円盤 のダストに注目して、現状の理解をまとめた、この研 究トピックは、毎月のように新たな観測や理論的解 釈が報告されるなど、現在とても活気がある。約30 年前に原始惑星系円盤と惑星が初めて太陽系外に 発見されたのち、それらの観測例が爆発的に増え、 円盤・惑星形成の理論的研究も一気に進んだ. それ を思えば、ガス集積中の惑星や周惑星円盤が数例 報告されている現在は、惑星のガス集積過程と周惑 星円盤, そして同円盤における衛星形成過程の理解 が爆発的に進む、まさに前夜であると思われる.さ らには、2030年頃には木星系の衛星に探査機が相 次いで到着予定である. そして, 宇宙観測では, 初の 「系外衛星」の発見に向けた観測も進んでいる. ガス 惑星・周惑星円盤・衛星についての統一的理解が、す ぐそこに迫っていると言えるだろう.本稿,そして本 特集がその一助となれば、筆者としても幸いである.

7.謝辞

丁寧かつ大変有益なコメントをして頂いた査読 者の武藤恭之氏に深く御礼を申し上げます,また, 本記事の第五章は,筆者が第一筆者である文献 [20]の内容から構成されています.この論文の共筆 者であり,たくさんの実りある議論をして頂いた, Christoph Mordasini氏に深く御礼を申し上げ ます.そして,図3の作成にご助力いただいた橋本 淳氏と植田高啓氏に深く感謝致します. 最後に,本 稿の執筆機会を与えてくださった,遊星人編集長 の三浦均氏,編集の青山雄彦氏,橋本淳氏,野津 翔太氏に深く感謝致します.本研究はJSPS科研費 JP22H01274, JP23K22545, JP24K22907の助成 を受けたものです.

参考文献

- Szulágyi, J. et al., 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 464, 3158.
- [2] Krapp, L. et al., 2024, arXiv preprint, arXiv:2402.14638.
- [3] 藤井悠里, 2024, 遊星人 33, 306.
- [4] Keppler, M. et al., 2018, Astronomy & Astrophysics 617, A44.
- [5] Haffert, S. et al., 2019, Nature Astronomy 3, 749.
- [6] 青山雄彦, 2024, 遊星人 33, 288.
- [7] 橋本淳, 2024, 遊星人 33, 297.
- [8] Isella, A. et al., 2019, The Astrophysical Journal 879, L25.
- [9] 井田茂と中本泰史, 2015, 惑星形成の物理—太陽 系と系外惑星系の形成論入門—, 基本法則から読 み解く物理学最前線6(共立出版社).
- [10] Zhu, Z. et al., 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 479, 1850.
- [11] Bae, J. et al., 2019, The Astrophysical Journal 884, L41.
- [12] 谷川享行ほか, 2011, 遊星人 20, 262.
- [13] Zhu, Z. et al., 2012, The Astrophysical Journal 755, 6.
- [14] Stammler, S. M., 2023, Astronomy & Astrophysics 670, L5.
- [15] Homma, T. et al., 2020, The Astrophysical Journal 903, 98.
- [16] Szulágyi, J. et al., 2022, The Astrophysical Journal 924, 1.
- [17] Ronnet, T. and Johansen, A., 2020, Astronomy & Astrophysics 633, A93.
- [18] Shibaike, Y. and Alibert, Y., 2020, Astronomy & Astrophysics 644, A81.
- [19] 芝池諭人, 2019, 遊星人 28, 313.

- [20] Shibaike, Y. and Mordasini, C., Astronomy & Astrophysics 687, A166.
- [21] 和田浩二, 2009, 遊星人 18, 216.
- [22] Okuzumi, S. et al., 2012, The Astrophysical Journal 752, 106.
- [23] Youdin, A. N. and Goodman, J., 2005, The Astrophysical Journal 620, 459.
- [24] Maeda, N. et al., 2024, The Astrophysical Journal 968, 62.
- [25] Benisty, M. et al., 2021, The Astrophysical Journal 916, L2.
- [26] Eisner, J. A., 2015, The Astrophysical Journal 803, L4.
- [27] Choski, N. and Chiang, E., 2024, arXiv preprint, arXiv:2403.10057.
- [28] Christiaens, V. et al., 2024, Astronomy & Astrophysics 685, L1.
- [29] Chen, X. and Szulágyi, J., 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 516, 506.
- [30] Dullemond, C. P. et al., 2012, Astrophysics Source Code Library, record ascl: 1202.015.

- [31] Ward, W. R. and Canup, R. M., 2010, The Astronomical Journal 140, 1168.
- [32] Drążkowska, J. and Szulágyi, J., 2018, The Astrophysical Journal 866, 142.
- [33] Batygin, K. and Morbidelli, A., 2020, The Astrophysical Journal 894, 143.
- [34] Wu, Y.-L. et al., 2017, The Astrophysical Journal 836, 223.
- [35] Cugno, G. et al., 2024, The Astrophysical Journal 966, L21.
- [36] Bayo, A. et al., 2017, The Astrophysical Journal 841, L11.
- [37] Wu, Y.-L. et al., 2022, The Astrophysical Journal 930, L3.
- [38] Aoyama, Y. and Ikoma, M., 2019, The Astrophysical Journal 885, L29.
- [39] Wang, J. J. et al., 2021, The Astrophysical Journal 161, 148.



芝池 諭人



国立天文台アルマプロジェクト特 任研究員.東京工業大学理学院 地球惑星科学系博士課程修了. 博士(理学).スイス連邦ベルン大 学物理学科及びNCCR PlanetS ポスドク研究員を経て,2023年10 日本天文学会,宇宙電波懇談会,日本地球惑星科 学連合,Swiss Society for Astrophysics and Astronomy, European Astronomical Society に所属

月より現職.専門は惑星形成論.日本惑星科学会,