

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 巨大惑星まわりの周惑星円盤へのガス・ ダスト降着

前田 夏穂¹, 大槻 圭史¹

2024年9月12日受領, 査読を経て2024年10月22日受理

(要旨) ガリレオ衛星をはじめとする巨大ガス惑星まわりの主要規則衛星は、周惑星円盤内でダストや微惑星などの固体物質が集積することで形成されたと考えられている。惑星まわりの流れ場に関する研究は活発に行われてきた一方で、衛星材料となる固体物質の周惑星円盤への供給については未だ不明点が多い。本研究では、惑星まわりの局所領域における高解像度数値流体計算とダストの軌道計算を用いて、周惑星円盤へのガス・ダストの降着過程の惑星質量依存性を調べた。衛星形成において重要なパラメータである降着ガス中でのダスト保持度に着目し、その惑星質量依存性を求めた。その結果、ダスト保持度は惑星質量が大きいほど、また原始惑星系円盤におけるダスト層の厚みが大きいほど、大きくなることがわかった。本研究の結果は、系外惑星を含む様々な質量の巨大ガス惑星の周惑星円盤へのダスト供給およびそこでの衛星・微衛星形成を考えるうえで重要となる。

1. はじめに

太陽系の惑星のまわりには多様な衛星が存在する。中でも、惑星の赤道面上をほとんど円に近い軌道で公転する衛星は規則衛星と呼ばれている。規則衛星の中でも比較的質量が大きいガリレオ衛星やタイタンは、巨大ガス惑星のガス集積時に形成される周惑星円盤の中で固体物質(ダストやペブル、微惑星など)が集積して形成されたと考えられており、このような衛星を特に巨大衛星と呼ぶこともある。衛星の形成過程や周惑星円盤の構造に関して、様々な研究が進められている[1-3]。衛星形成の場となる周惑星ガス円盤について、近年、数値流体シミュレーション技術の発展とともに、周惑星円盤近傍まで解像した研究が盛んに行われている。原始惑星系円盤から周惑星円盤へのガスの降着を調べた代表的な研究として、谷川氏らは多重格子法を用いることで計算資源を節約しつつ、惑星近傍までを高解像度で計算した[4, 5]。その結果、周惑星円盤に降着するガス

は円盤面に対し鉛直方向に流入し、円盤中心面では外向きに流出することがわかった。一方、衛星の材料となる固体物質の周惑星円盤への供給過程についてはまだ不明な点が多い[6, 7]。谷川氏らは、さまざまな大きさの固体粒子を原始惑星系円盤中心面上にのみ分布させ、数値流体計算結果を用いて粒子の軌道計算を行った[8]。その結果、中心面上における惑星ヒル圏¹から流出する流れによって、ガスに引きずられてほぼ一緒に運動する微小な粒子(≤ 1 mm)は周惑星円盤に降着できない一方、1メートル程度のサイズの粒子はガス抵抗をほど良い程度に受けて惑星ヒル圏近傍に運ばれた後にガス流から離脱するため、周惑星円盤への捕獲頻度が最も高くなることを示した。しかし、上述のように周惑星円盤には、惑星ヒル圏の極(鉛直上方)から流入したガスが降着する[4, 5]。本間氏ら[9]は原始惑星系円盤における微小な粒子の鉛直分布を考慮した軌道計算を行い、谷川氏らのシミュレーション[8]では中心面内からは降着しなかった微小な粒子も、この鉛直方向からの流れ

1. 神戸大学大学院理学研究科 惑星学専攻
nmaeda@tiger.kobe-u.ac.jp

¹中心星重力に対して惑星重力が支配的となる領域。

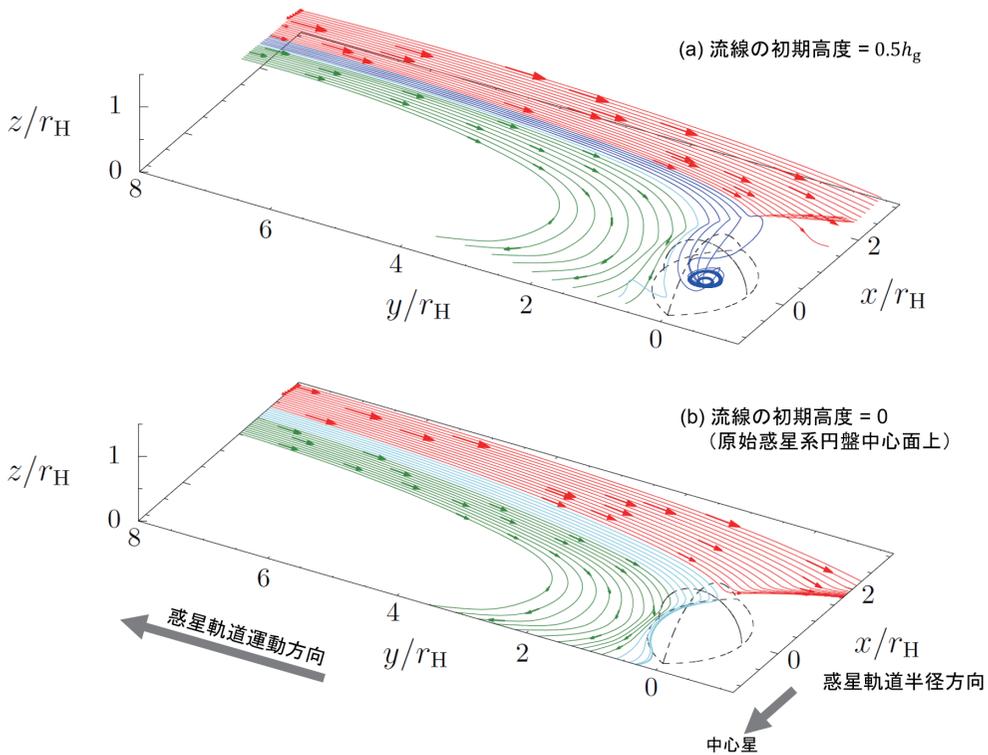


図1: ある初期高度 z_0 から惑星に接近するガスの流線. 破線で囲まれたレモン型の領域は惑星のヒル圏を表す. 流線の色は, 以下のようにその行先による種類を表している. 青: 周惑星円盤に降着, 水色: 惑星ヒル圏に一度入り再び流出, 緑: 惑星ヒル圏に接近した後Uターン(馬蹄形軌道), 赤: 素通り.

によって周惑星円盤に降着し得ることを示した.

一方で, これらの研究では惑星質量が土星質量程度の場合しか調べられておらず, 周惑星円盤への粒子降着の惑星質量依存性はよくわかっていない. また, 木星系と土星系における衛星系の違いや, 近年観測が可能となりつつある系外惑星の周惑星円盤へのダスト粒子供給過程, そこでの衛星形成等について理解するためにも, 周惑星円盤への固体の供給過程の惑星質量依存性を知る必要がある. そこで, 筆者らは[8, 9]の手法を様々な惑星質量の場合に拡張してシミュレーションを実施し, 周惑星円盤へのガスの降着過程の惑星質量依存性と, それに伴う微小な固体粒子(ダスト)の供給について調べた[10, 11].

2. 惑星まわりの3次元的なガスの流れ場

惑星を原点とする局所直交回転座標系における, 等温・非粘性流体の運動を考える. x 軸を惑星軌道半径方向, y 軸を惑星軌道進行方向, z 軸を惑星公転面に垂直な方向にとる. 多重格子法[12, 13]を用いることで, 原始惑星まわりの広範囲($x, y \in [-12h_g, 12h_g], z \in [0, 6h_g]$; h_g は原始惑星系円盤ガススケールハイト)の領域を考慮しつつ, 周惑星円盤付近を高解像度で計算することができる. 本研究では惑星近傍のガス流についてのシミュレーションを惑星質量を様々に変えて行った. 調べた惑星質量の範囲は, 最小質量円盤モデルで軌道半径が5.2 auの場合, $0.05 M_{Jup}$ から $1 M_{Jup}$ に対応する(M_{Jup} は木星質量).

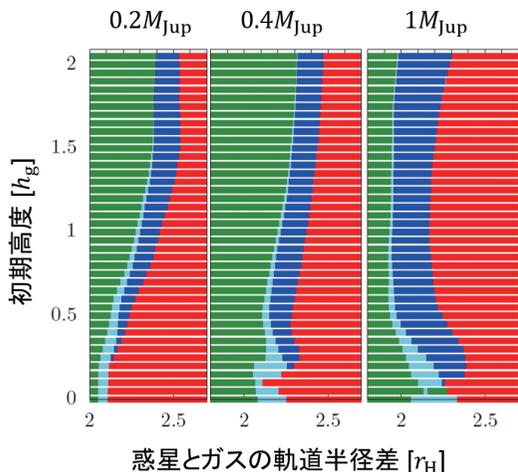


図2: ガスの源流域($y = 12h_g$)における流線の行先分布を、各惑星質量について示したものの、色の意味は図1と同じである。周惑星円盤に降着する領域(青色)は中心面付近を除いて鉛直方向に帯状に伸びていることから、本研究では“ガス降着帯”と呼ぶ。

まず、周惑星円盤に降着するガスの流れ場を調べるために、準定常状態において惑星に接近するガスの流線を解析した[10]。図1は、流線の一部をその行先によって分類し色分けしたものである。図1において青色の流線は周惑星円盤に降着するガスの流れである。ここでは惑星からの距離が $r < 0.2 r_H$ (r_H は惑星のヒル半径)となったガスを周惑星円盤に降着した、とみなしている。周惑星円盤に降着した流線の源流域をたどると、原始惑星系円盤面に対し鉛直(z)方向に帯状に分布している。ここではこれをガス降着帯と呼ぶ(図2)。ガス降着帯の分布や、 r_H で規格化した降着帯幅の惑星質量依存性を調べると(図2)、惑星軌道半径方向の幅が惑星質量とともに大きくなることがわかった。詳しい解析によると、ガス降着帯幅は、概ね惑星質量が $0.2 M_{Jup}$ の場合を境として、低質量側では惑星質量の $1/2$ 乗に比例、高質量側では惑星質量の $4/3$ 乗に比例することがわかった(詳細は文献[10]を参照)。

3. 周惑星円盤へのダストの降着

前節より、惑星質量が大きいほどガス降着帯の幅が大きくなることがわかった。ダストは周惑星円盤に降着するガスに引きずられてほぼ一緒に運動するた

め、ダスト降着帯はガス降着帯と類似した分布となり得る。そこで、この降着流による周惑星円盤へのダストの供給について調べるために、前節で得たガスの流れ場からダストにはたらくガス抵抗力を計算し、ダストが惑星に接近する過程の軌道計算を行った[11]。惑星の公転角速度を Ω 、ダストの降着帯に相当する動径位置でのダスト面密度を Σ_d とし、周惑星円盤へのダストの質量降着率 \dot{M}_d を、無次元捕獲頻度 P を用いて次のように表す。

$$\dot{M}_d = \Sigma_d r_H^2 \Omega P \quad (1)$$

我々はガス抵抗を考慮したダストの軌道計算により、 P を求めた。ダストの振舞は、ガス抵抗力の効き具合に依存する。本研究では、鉛直方向から周惑星円盤に降着する流れがダストの降着にどう影響するかに着目するので、ガス抵抗による運動への影響が大きいサイズ(0.1-10 mm)のダストについて軌道計算を行った。図2より、周惑星円盤に降着できるガスの流れは中心面には存在せず、円盤中心面よりも上方($z \geq 0.2 h_g$)に存在する。原始惑星系円盤中で、ダストは基本的に中心星重力の効果で中心面に沈殿しようとするが、乱流など鉛直方向へ巻き上げる作用があれば円盤上層に存在し得る。よって、初期に原始惑星系円盤上層に存在するダストほど、降着するガスに引きずられて周惑星円盤へ捕獲されやすく、捕獲頻度はダストスケールハイト(ダストの鉛直方向への巻き上がり度合いの指標)に依存することになる(図3)。さらに、図2よりガス降着帯は惑星質量が大きいほど軌道半径方向に幅広く分布するため、捕獲頻度は惑星質量が大きいほど大きくなる。ダストサイズはある程度以下になると強いガス抵抗により軌道がガス流線にほぼ一致するため、捕獲頻度のダストサイズ依存性はあまり大きくない。

4. 降着流に含まれるダストの割合

最近の研究[14, 15]から、周惑星円盤内での衛星・微衛星の形成を考えるうえで、周惑星円盤へ降着するガス流に含まれるダストの割合、つまり“周惑星円盤へのダスト・ガス降着率比”が重要なパラメータであることがわかってきた。周惑星円盤に降着した

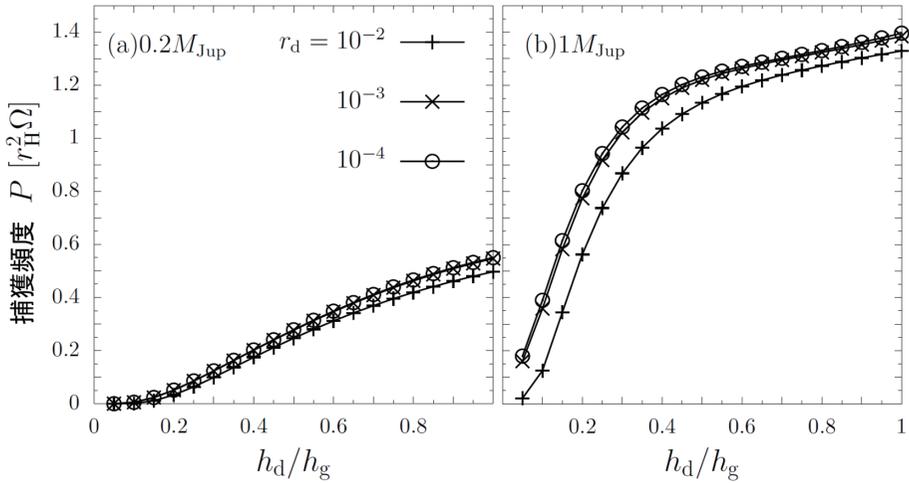


図3: ダストの周惑星円盤への無次元捕獲頻度 P のダストスケールハイト h_d に対する依存性(h_g はガススケールハイト). 記号はダストサイズ(単位はメートル)の違いを表す.

ダストは衝突合体で成長しながらガス抵抗を受けて惑星に向かって軌道減衰していく. このときダスト・ガス降着率比が十分高いと周惑星円盤内でダストがより多い状況となり, より短い時間でダストが成長し微衛星が形成され得る. 反対にダスト・ガス降着率比が低いと微衛星に成長する前にガス抵抗による軌道減衰で惑星に落下してしまう[14]. そこで, 2節・3節で得られた結果をもとに, 周惑星円盤へのダスト・ガス降着率比について考える. 周惑星円盤へのガスの質量降着率を \dot{M}_g とする. ここで, 質量降着率を, 降着帯の位置での面密度 Σ とそれ以外の部分 D とに分解($\dot{M} = D\Sigma$)すると², 周惑星円盤へのダスト・ガス降着率比は,

$$\frac{\dot{M}_d}{\dot{M}_g} = \frac{D_d \Sigma_d}{D_g \Sigma_g} \quad (2)$$

と表せる[16]. まず, 降着帯における面密度だが, これは, 惑星軌道周辺に惑星がつくるギャップの深さや幅, 降着帯との位置関係に依存する. ガスの動径分布におけるギャップの場合, その構造は原始惑星系円盤の粘性に依存し[17], ダスト分布のギャップの場合は, ガスギャップの形状とダストサイズに依

存する[18]. 本研究では惑星まわりの局所領域に着目しているため, 流体シミュレーションから得られるギャップと惑星質量の相関については不正確である. また, 降着帯の動径位置とギャップの形状の間にどのような関係性があるのかはまだわかっていない. そこで本研究では, 式(2)のダスト・ガス降着率比のうち面密度に依らない成分(D_d/D_g)に着目し, これを“降着ガス流のダスト保持度”と呼ぶこととする. ダストを含むガスが原始惑星系円盤から周惑星円盤へと降着する過程でダスト・ガス比が変わらなければ $D_d/D_g = 1$ であるが, 降着途上でダストが部分的に失われると $D_d/D_g < 1$ となる.

降着ガス流のダスト保持度の惑星質量依存性を解析的に導出すると(詳しくは文献[11]を参照),

$$D_d/D_g = 1.26P \left(\frac{r_H}{h_g} \right)^{-2} \quad (3)$$

ここで, P は図3で求めた無次元捕獲頻度で, 惑星質量, ダストスケールハイトに依存する. また r_H/h_g は惑星ヒル半径と原始惑星系円盤ガススケールハイトの比で, 惑星質量, 中心星質量, 惑星軌道長半径をそれぞれ M_p, M_c, a とすると

² D は(長さ)×(速度)の次元を持ち, 降着帯の幅と降着帯を通過するガスまたはダストの速度の積に対応する.

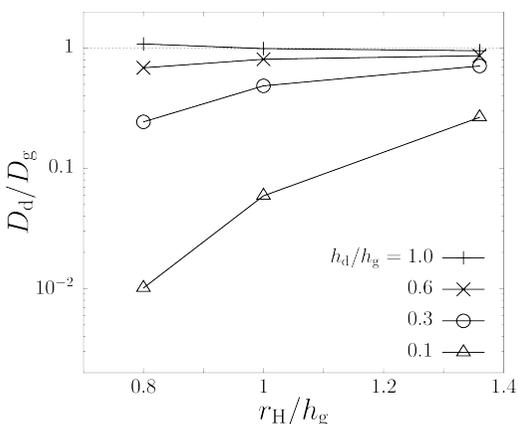


図4:周惑星円盤に降着するガス流のダスト保持度 D_d/D_g と惑星質量に関するパラメータ r_H/h_g の関係(式(4))に示すように $r_H \propto M_p^{1/3}$ であり, r_H/h_g が大きいと惑星質量が大きい場合に対応する). 点の種類はダストスケールハイトの違いを表す. ダストサイズは 10^{-4} mとしている.

$$r_H/h_g = (M_p/(3M_c))^{1/3} a/h_g \quad (4)$$

と表される. 捕獲頻度 P として, 3節の軌道計算から求めた値を代入すると, 図4に示す降着ガス流のダスト保持度の惑星質量依存性が求められた.

以下では簡単のため, 原始惑星系円盤中のダストが降着流に乗って周惑星円盤に降着する過程での乱流によるダストの拡散は考慮しないと仮定し, ダスト保持度の惑星質量およびダストスケールハイト依存性について議論を行う. 図4より, ダスト保持度は惑星質量とともに増加し, またダストスケールハイトが大きくなるにつれて増加することがわかる. 原始惑星系円盤内でダストが鉛直方向によく巻き上げられていて($h_d = h_g$) ガスに引きずられて一緒に降着するとき, 降着帯の位置におけるダストとガスの割合がそのまま降着流に乗って周惑星円盤に降着するはずであり, このとき $D_d/D_g = 1$ である. 一方で, ダストスケールハイトが小さい, すなわち原始惑星系円盤内でダストの鉛直方向への巻き上げが不十分だと, 降着ガス流にダストが乗り切れず, ダスト保持度は減少する. この効果は惑星質量が小さいほど顕著である. それは, 図2で示したガス降着帯の鉛直方向の下限が, 惑星質量が小さいほど高い高度にあるため, ダストが降着ガス流に乗って周惑星円盤に降着

するためには鉛直方向により巻き上げられていることを要するからである³. 結果として, ダストスケールハイトが惑星質量に依らず一定だと仮定すると, 降着流のダスト保持度は惑星質量とともに増加する.

しかし近年, 惑星重力が駆動する乱流がダストを巻き上げる効果が報告されており[19], 実際にはダストスケールハイトは惑星質量に依存すると考えられる. このような効果も含めたより現実的な降着流のダスト保持度の惑星質量依存性を求めるには, さらなる研究が必要である. また本研究で着目しなかったガス降着帯の位置におけるダスト・ガス面密度は, 周惑星円盤に降着するダスト・ガス降着率比を決定する重要なパラメータであり, ガス・ダストギャップやガス降着帯との位置関係などの詳細について, 観測や理論的研究による解明が待たれる.

5. 結論

本研究では, 周惑星円盤へのガスおよびダストの降着に着目し, 数値流体計算と軌道計算を組み合わせることで, 周惑星円盤内での衛星形成において重要な, 周惑星円盤に降着するガス流に含まれるダストの割合(ダスト保持度)について調べた. 結果として, 惑星質量が大きく, かつ原始惑星系円盤内でのダストの鉛直方向への巻き上げが効率的であるほど, 周惑星円盤に降着するガス流に含まれるダストの割合は大きくなり, 周惑星円盤内での微衛星・衛星形成に有利にはたらくことがわかった. 周惑星円盤へのガス・ダストの降着は衛星・惑星形成双方において重要であるが, 衛星形成モデル等の構築において必要な素過程の理解は最近徐々に明らかとなってきているところである. 形成中の惑星の観測的研究も盛んに行われる一方, 本研究のような一見地味だが基本的な研究は, 円盤・惑星・衛星を一つの系として統合的につなげる上で重要であり, 今後も進めていく必要がある. 本研究では等温ガスを仮定しており, ダストの組成進化については考えていない. 周惑星円盤への降着過程および降着後の軌道進化に伴う組成進化は, 形成される衛星の組成を考えるうえで

³ガス降着帯の下限の惑星質量依存性について, 具体的な依存性はよくわかっておらず, 今後の詳しい研究が必要である.

重要である[20]. 今後, 本研究のような手法に組成進化を組み入れていくことも必要である.

謝辞

本特集号への投稿を薦めてくださった野津翔太氏, 丁寧に査読してくださった桑原歩氏に感謝します. 共同研究者の谷川享行氏, 末次竜氏, 町田正博氏, 芝池論人氏には本研究を進める上で重要なご助言を多数いただきましたことを感謝します. また, 本研究を進めるにあたり, 国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの計算サーバを使用させていただきました. 本研究はJSPS 科研費22J10202(特別研究員奨励費), JP22H01286, JP23K22557(基盤研究(B))からの助成を受けています.

参考文献

- [1] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2002, AJ 124, 3404.
- [2] Sasaki, T. et al., 2010, ApJ 714, 1052.
- [3] Batygin, K. and Morbidelli, A., 2020, ApJ 894, 143.
- [4] Tanigawa, T. et al., 2012, ApJ 747, 47.
- [5] 谷川享行ほか, 2011, 遊星人 20, 262.
- [6] Fujita, T. et al., 2013, AJ 146, 140.
- [7] Suetsugu, R. et al., 2017, ApJ 839, 66.
- [8] Tanigawa, T. et al., 2014, ApJ 784, 109.
- [9] Homma, T. et al., 2020, ApJ 903, 98.
- [10] Maeda, N. et al., 2022, ApJ 935, 56.
- [11] Maeda, N. et al., 2024, ApJ 968, 62.
- [12] Machida, M. N. et al., 2005, MNRAS 362, 369.
- [13] Machida, M. N. et al., 2006, ApJ 645, 1227.
- [14] Shibaïke, Y. et al., 2017, ApJ 846, 81.
- [15] Shibaïke, Y. et al., 2019, ApJ 885, 79.
- [16] Tanigawa, T. and Tanaka, H., 2016, ApJ 968, 62.
- [17] Kanagawa, D. K. et al., 2017, PASJ 69, 97.
- [18] Zhang, S. et al., 2018, ApJL 869, L47.
- [19] Szulágyi, J. et al., 2022, ApJ 924, 1.
- [20] Ronnet, T. et al., 2017, ApJ 845, 92.

著者紹介

前田 夏穂

神戸大学大学院理学研究科 惑星学専攻 学術研究員. 同博士課程修了, 理学博士.

大槻 圭史

神戸大学大学院理学研究科 惑星学専攻 教授. 東京大学大学院理学系研究科 地球物理学専攻 博士課程修了, 理学博士. Planetary Science Instituteポスドク, 山形大学理学部助手, コロラド大学大気宇宙物理学研究所研究員を経て2009年7月より現職.