

## 特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス：その1」

# 周惑星円盤の形成：衛星系形成過程の解明へ向けて

谷川 享行<sup>1</sup>，大槻 圭史<sup>2</sup>，町田 正博<sup>3</sup>

2011年9月15日受領，2011年10月14日受理。

(要旨) 木星のような巨大ガス惑星の衛星の多くは、軌道面がそろっておりかつほぼ円軌道であることから、惑星の周りにかつて存在したガス円盤(周惑星円盤)の中で固体微粒子・小天体が衝突合体成長を繰り返し形成したと考えられている。近年の数値流体計算の発達により、ガス惑星の成長過程において、惑星へと降着するガスが惑星を取り囲む円盤状構造を形成する、という具体的描像が明らかにされつつある。しかし、衛星形成の母体となるその周惑星円盤への物質供給プロセスについての研究はなく、これまでに提案されている衛星系形成モデルでも物質の供給率やその分布は、それが衛星形成を決定づけるにもかかわらず、なおざりそのまま研究が進められているのが現状である。そこで、最近筆者らは高解像度数値流体計算を用いた研究を行い、その結果、周惑星円盤へのガス降着に対する理解が大きく進んだ。ここではそれについて解説する。さらに、周惑星円盤形成が巨大ガス惑星という惑星系最大惑星の形成過程そのものであり相互に密接に関連していることから、衛星系形成過程の解明に必要となる惑星系形成の未解決問題を指摘しつつ今後の衛星系形成研究の展望を述べる。

## 1. 周惑星円盤は衛星系の母体

木星の4大衛星であるガリレオ衛星をはじめとして、太陽系の外惑星には衛星が多数存在している。特に、公転軌道がほぼ円軌道で母惑星の赤道面に沿っている衛星が比較的惑星に近い領域に多数存在しており、それらは規則衛星と呼ばれている。規則衛星はその姿から、惑星形成時に惑星の周りに存在していた円盤、すなわち“周惑星円盤”の中で形成したと考えられている。また、規則衛星は全衛星質量の大部分を占め、衛星系を理解するうえでまずその形成過程を理解することが重要であるため、その母体となった周惑星円盤の構造を理解する必要がある。

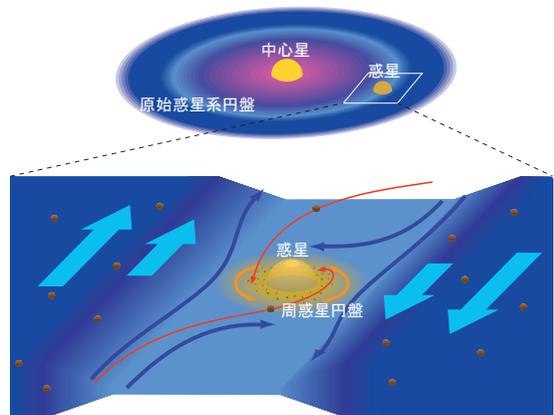


図1：周惑星円盤の概念図。原始惑星系円盤中でガス惑星がガスを捕獲して成長する過程の副産物として周惑星円盤は必然的に形成される。ガス惑星が成長する間は周惑星円盤へは常に質量供給が行われ、規則衛星はこの周惑星円盤の中で形成されたと考えられている。

## 2. 衛星系形成理論の現状

では、衛星系の母体となる周惑星円盤内の構造はど

うなっていたのだろうか？ 太陽系も原始惑星系円盤の中で形成されたと考えられており、その円盤モデルとして標準とされてきた「林モデル」(もしくは「最小質量復元円盤モデル」)は、現在の太陽系の惑星を復元

1. 惑星科学研究センター／北海道大学低温科学研究所  
tanigawa@cps-jp.org  
2. 惑星科学研究センター／神戸大学大学院理学研究科  
3. 九州大学大学院理学研究科

可能な質量を持つように提案された。

このアナロジーで、周惑星円盤でも最小質量復元円盤モデル(以下最小質量モデル)が提唱された[1]。しかし、最小質量モデルを衛星系に適用すると、最小質量モデルでも実は周惑星円盤の面密度は高いため、円盤が冷えにくく、その結果、周惑星円盤は高温になり、衛星の主成分であるH<sub>2</sub>O水が気化してしまい、そもそも衛星材料物質として利用できない、という問題点が指摘された[2]。つまり、温度の観点からは、最小質量モデルでも質量が大きすぎるのである。

一方、原始惑星系円盤中で成長するガス惑星へのガス降着に関して、数値流体計算を用いた研究がいくつか行われた[3-5]。その結果、周惑星円盤はガス惑星形成の副産物として必然的に形成し、また原始惑星系円盤から惑星へ質量を輸送するために経由すべき存在であることが明らかになってきた(図1参照)。つまり、ガス惑星が成長する間は常に周惑星円盤への質量供給が続いていることになる。すなわち、常に質量供給があるため、全衛星系を復元するために必要な質量を周惑星円盤は一度に持っている必要はなく、最小質量モデルよりも円盤質量を小さくすることが可能となる[2]。これにより、円盤を低温に保つことができ、「周惑星円盤中でH<sub>2</sub>Oが固体として存在する」という、衛星形成のための必要最低条件をクリアできる解は存在しそうだ。

では、そのような状況、すなわち材料物質が常に供給され続ける質量の軽い円盤の中で衛星を作ることではできるのか？この問いに対し、CanupとWard(2002)[2](以下CW02とする)により示された描像を示す。まず、周惑星円盤を $\alpha$ モデルと呼ばれる乱流粘性により進化をする降着円盤モデルと仮定し、周惑星円盤の降着率(=惑星成長率)やガス/ダスト比をいろいろ振ってみて、円盤の温度や衛星成長のタイムスケールなどを見積もった。その結果、降着率やガス/ダスト比を現実的な範囲内で低くすることで、H<sub>2</sub>Oが固相で存在できる程度に低温で軽い円盤が実現でき、かつその状況においても衛星形成が可能であることが示された。すなわちCW02は、周惑星円盤への質量供給は常に行われる、という数値流体計算により新たに示された描像を発展させた結果、最小質量モデルでH<sub>2</sub>Oが固相で存在できなかった問題を解決しつつ、さらにその状況下で衛星形成が可能であることを示した。

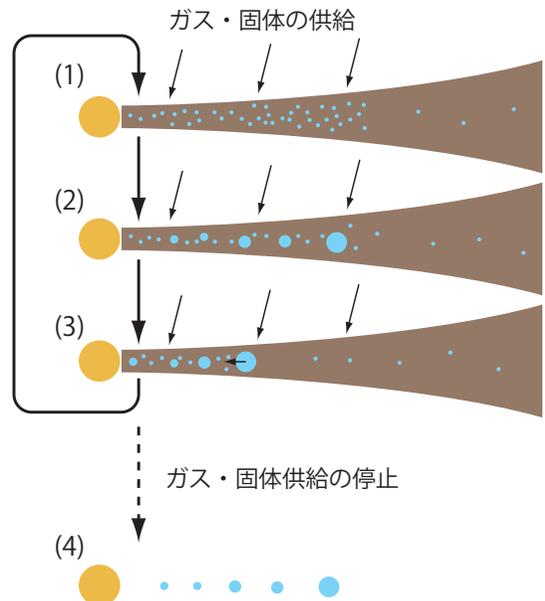


図2：周惑星系円盤中の衛星形成過程[2, 6]。(1)原始惑星系円盤からのガス降着に伴い、周惑星円盤へは定常的にガス・固体が供給される。(2)外側ほど材料物質が豊富なため原始衛星は早く大きく成長。(3)大きく成長した衛星は周惑星円盤ガスとの重力相互作用により内側へ移動し惑星へ落下。原始惑星系円盤からの供給が続く限り(1)-(3)を繰り返す。(4)供給が止まった時点の最後の世代が現在ある衛星系となる。

CanupとWard(2006)[6](以下CW06)は、上に示された描像を、 $N$ 体計算を用いた衛星集積シミュレーションにより確認した。それによると、定常的にガス・ダストが供給される周惑星円盤内で、衛星は成長と惑星への落下を常に繰り返す(図2参照)、また出来上がる衛星系の質量はガス/ダスト比 $f$ と乱流粘性を決めるパラメータ $\alpha$ の比 $f/\alpha$ により概ね決まることが示された。ただしこれらのモデルでは、周惑星円盤への質量の供給が原始惑星系円盤から周惑星円盤の表面のある半径より内側全体に一律に行われる(惑星からの距離依存性がない)と仮定していることに注意しておきたい。この仮定を変えれば当然結果も変わるであろう。

さらに近年、運動方程式を直接数値積分せずに、天体力学的な効果のある程度取り入れた $N$ 体の合体成長進化モデルが衛星系形成に適用された[7]。直接 $N$ 体計算に比べて圧倒的に計算時間が短いことを生かしてモンテカルロシミュレーションを行い、形成される衛星のサイズ・位置を統計的に求めたところ、現実の木星系と土星系を良く再現出来る可能性が示された<sup>1</sup>。

1. 周惑星円盤の内側が惑星と接続しているかどうか(円盤の内縁)

このモデルも基本的には、降着フラックス分布は惑星からの距離に依存せず一様とした過去の研究を踏襲しており、その分布次第で結果は変わりうる。

では、これらのモデルで仮定した定常物質供給モデルは妥当なものなのか？通常の降着円盤モデルでは質量は円盤中を外から内へ順に運ばれるが、数値流体計算によると、原始惑星系円盤から一気に周惑星円盤の惑星近傍へと降着する流れが存在することが示唆されており [8, 9], Canup と Ward はその描像を元にモデルを構築した。しかし、その降着フラックス分布は数値計算から明らかになっていないため、CW02 では単純化のため降着フラックスが惑星からの距離に関して変化しないと仮定したが、実はこれに対する強い根拠はない。数値流体計算により周惑星円盤への降着の様子を示した計算はあるが、解像度が不足している上、その流れ場に対して解析も不十分であったため、この重要な量である降着フラックス分布は求められていないのが現状である。周惑星円盤への質量降着フラックス分布は、周惑星円盤中の質量分布を決め、それゆえ出来上がる衛星系の姿を大きく変える可能性があるため、CW02 などでは仮定されている質量フラックス分布を検証することは重要である。なお、周惑星円盤構造を示した研究はいくつか存在するが [9-11], 実効的粘性係数(主に磁気回転不安定乱流によるマクロな粘性(>分子粘性))の不定性に結果が大きく依存するため、それらも安心して依存できるモデルとはなっていない。

### 3. 我々のアプローチ

周惑星円盤形成過程に関する現状の理解不足に対して、筆者らが最近の行った研究 [12] を紹介する。今求めたい量は周惑星円盤への降着フラックス分布であるが、まずは、それを得るために必要となる解像度向上の工夫 (3.1 節), 周惑星円盤への降着流の基本構造 (3.2 節) を記述した後の 3.3 節で降着フラックス分布について述べる。

#### 3.1 超高解像度数値流体計算

従来の研究での解像度不足を解決するために、多重

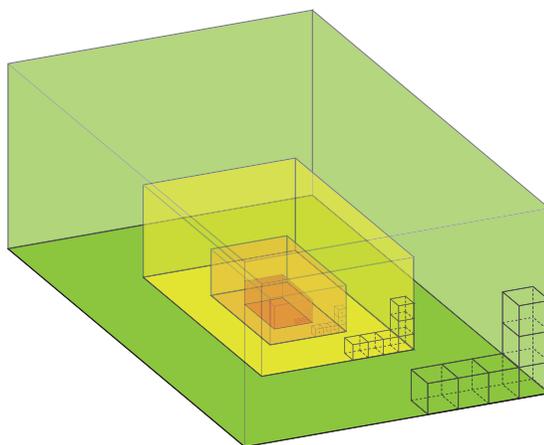


図3: 多重格子法概念図。全体の計算領域は広く設定し、より細かい格子の小さな計算領域を多段に重ねることで、必要な領域のみ高い解像度で効率良く計算することが可能となる。

格子法を用いて飛躍的に解像度を高めた3次元数値流体計算法を採用した。通常メッシュ法ベースの数値流体計算では数値計算メッシュを一つ設定するだけだが、多重格子法では、大きさ・解像度の異なる複数のメッシュを多段に入れ子で設定することで、高い解像度が必要な領域のみ効率的に計算することが出来る計算手法である (図3)。これにより、広域的な影響<sup>2</sup>も考慮しつつ惑星近傍まで十分な解像度を得ることが可能となった。具体的には、入れ子の段数を11にすることで、実効的な最小格子サイズは全計算領域の約6万分の1となり、これは惑星半径 (= 惑星の公転半径の約1/10000) のさらに1/4程度に相当する。

#### 3.2 原始惑星系円盤から周惑星円盤へ

では得られた結果を紹介していく。まず、降着の概要を説明する (図4)。原始惑星系円盤から周惑星円盤への降着は、非軸対称ポテンシャル中で衝撃波を多重に発生しながらの複雑な流れになっているが、ここで最小限理解しておくべき点をまとめると以下の2点になる。(a) 中心面付近では原始惑星系円盤からは流入できず、上空からしか流入できない。上空から周惑星円盤へ降着する描像は、より解像度の低い過去の研究でも示唆されていたが、今回の高解像度計算結果に対する詳細な解析によりそれがより決定的となった。また中心面で降着が許されないのは本研究で初めて明らかとなった。2. 太陽周りの円盤の中を回っているという効果。

メの有無)が木星系と土星系の違いを決める、という仮説に基づいて調べた結果。ただし、仮定したモデル化(原始衛星の種の置き方)に結果が依存している。本号の論文(佐々木他)も参照。

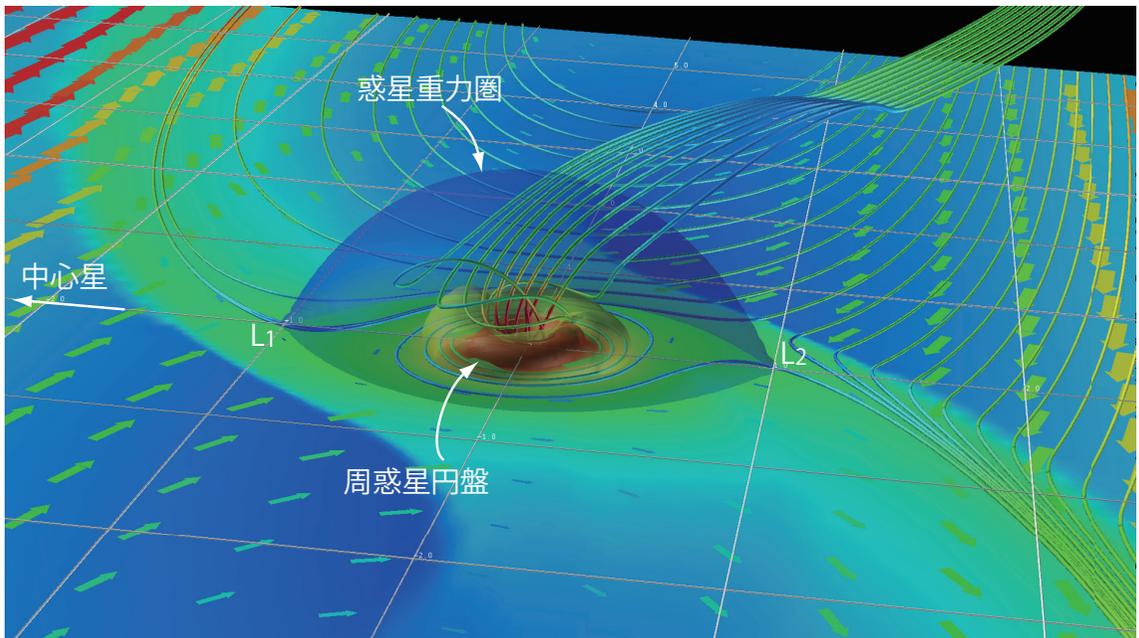


図4：原始惑星系円盤中でガスを捕獲して成長しつつあるガス惑星周囲のガスの流れ。中心面より上半分のみ作画。中心面の色はガス密度、色のついた線は中心面と上空(原始惑星系円盤の1スケールハイトの位置を始点)の流線で、流線の色は流速、青い半透明のレモン形状の面はヒル圏(惑星重力圏)、黄色と赤の半透明の面は等密度面。中心面のヒル圏の外側で密度が急激に変化している部分(青から緑)は衝撃波面(の中心面断面)、ケプラーシア(太陽周りの公転半径が違うことによる速度差)で惑星重力圏に超音速で近づいてきたガスが惑星重力圏にぶつかることにより立つ弧状衝撃波で、実際には中心面を先端として上空に向かって反った形状をしている(流線の速度が急激に減少している位置が衝撃波面)。中心面をヒル圏へ近づくガスは衝撃波面で速度が急激に減少したあと、惑星重力圏内に降着することができず、再び原始惑星系円盤中をヒル圏から遠ざかっている。上空のガスはヒル圏の外の衝撃波面を斜めに通過するために、水平方向の運動量が大きく減少せず、ヒル圏の中に侵入し、その後惑星重力により強く引っ張られて中心面へ向かって落下し、周惑星円盤表面で衝撃波を立てる。

かになった。(b)正味では原始惑星系円盤から周惑星円盤へと降着しているにもかかわらず、中心面付近では惑星重力圏外へ流出していることが明らかになった。この流出は、二つのラグランジュポイント $L_1$ 、 $L_2$ を通じて、即ち重力ポテンシャルの山を越えて惑星重力圏の内外を移動するのに必要なエネルギーが最小となる点を通して起きる<sup>3</sup>。

### 3.3 周惑星円盤へのガス降着分布

さらに我々は、CanupとWardが天下一的に仮定し、過去の数値流体計算でも得られていなかった周惑星円盤表面への降着フラックス分布を、数値計算により直接求めた。この解析で一つのポイントとなるのは、周惑星円盤面に落下する直前の超音速流領域で降着フラックスを測っている点である。周惑星円盤構造自体は、

3. 我々の用いた座標系では線形近似を用いたので $L_1$ と $L_2$ のポテンシャルエネルギーは等しくなっているが、実際には惑星から見て中心星方向にある $L_1$ の方がその逆側にある $L_2$ よりもわずかに低い。

現時点で理解の乏しいマクロな粘性に依存しているため、結果はその不定性に依存している。しかし、周惑星円盤へ降着する直前の超音速流領域で調べることで、衝撃波後面(=周惑星円盤)構造の不定性による影響を免れることができる。これにより、不定性の小さい降着フラックス分布を得ることが可能となった。得られた結果を図5に示す。

まず降着フラックス分布 $\bar{f}_0$ は、惑星からの水平距離 $\bar{R}$ にほとんど依存しないことが分かった(図5左)<sup>4</sup>。一方で、降着するガスの角運動量を見ると、降着した位置でのケプラー回転による角運動量に比べて小さく、さらに $\bar{R}$ 依存性がケプラー回転のそれよりも強いことが明らかになった(図5右)。この角運動量分布から、円盤表面に降着した場所ではケプラー回転することができないためより内側へ移動しようとし、かつこの内側への移動はより内側へ落下したガスほど顕著である

4. 記号の上の $\bar{\quad}$ は規格化した値、 $\overline{\quad}$ は回転角方向に平均した量であることを示す[12]。

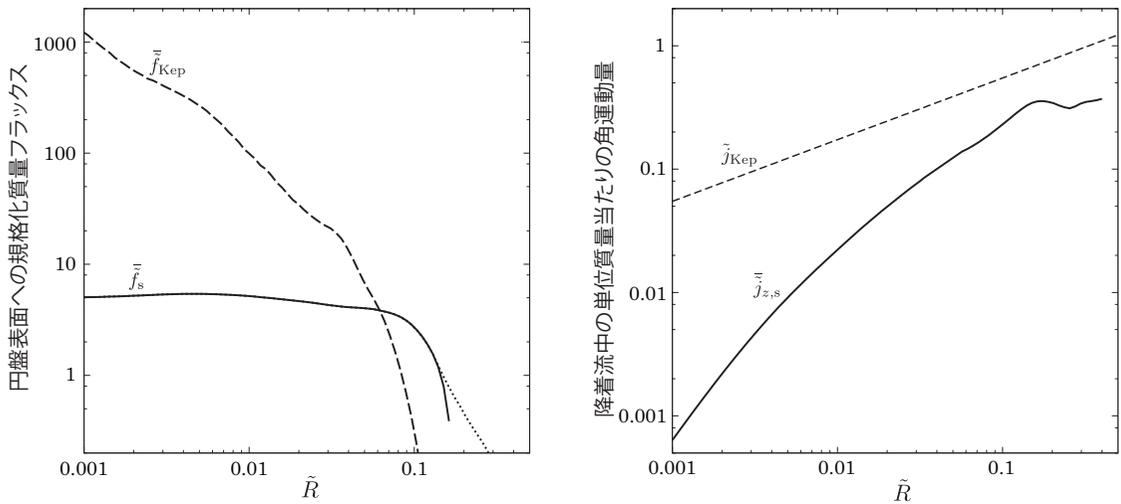


図5：左：周惑星円盤表面へ降着するガスの質量フラックスの分布。横軸は惑星からの距離を惑星のヒル半径で規格化したもの ( $\tilde{R}$ ) で、現在の木星半径は $\tilde{R} \approx 0.0013$ に相当する。回転角方向に平均化している。実線( $\bar{f}_s$ )は数値計算結果から直接得られた値、波線( $\bar{f}_{\text{Kep}}$ )は降着する物質がもつ角運動量 $\bar{j}_{z,s}$ (右図)を考慮して求めた実質的な降着フラックス分布。右：周惑星円盤表面へ降着するガスの持つ角運動量 $\bar{j}_{z,s}$ の分布。波線は惑星周りのケプラー回転をする場合の角運動量。いずれの図も投稿中の論文[12]より。

ことが示唆される。これにより、降着したガスはより内側へ質量集中することが予想される。そこで、このより中心への質量集中を調べるために、円盤表面に降着したガスは角運動量を保存したままケプラー回転でつりあうことのできる位置まで移動し、その移動した場所に落ち着き、降着はその位置に行われた、と仮定する。そうして $\bar{f}_s$ ,  $\bar{j}_{z,s}$ から計算した実効的な質量フラックス分布が $\bar{f}_{\text{Kep}}$ である(図5左)。単純な質量フラックス $\bar{f}_s$ ではほぼフラットだった分布が、 $\bar{f}_{\text{Kep}}$ ではより中心に集中していることが分かる。ここで、CW06 [6]などで用いられている分布と比較する。CW06が仮定していた質量フラックス分布は、 $\bar{f}_s$ でみると概ね正しいが、降着するガスの角運動量がケプラー回転のそれに比べて大きく異なるため、実効的な質量フラックス $\bar{f}_{\text{Kep}}$ で見ると彼らの仮定は正しくない。CW06では、質量は外側で多く供給されるため、外側で衛星は早く成長していたが、実効的にはより内側に集中した質量供給になるため、衛星成長の彼らの描像が定性的に変わる可能性がある。

#### 4. 周惑星円盤にかかるフィルター：固体のサイズ分別効果

定常質量供給円盤モデルにおいて、周惑星円盤中の固体/ガス比が衛星形成において重要な要素となるが [6]、その値は太陽組成と比べて大きく変化する可能性があることが、我々の計算で得られた流れ場から示唆される。まず、中心面付近では原始惑星系円盤から周惑星円盤へガスは降着できないことが我々の計算により明らかになった。原始惑星系円盤中では固体成分は太陽重力により中心面付近に沈殿する傾向にあるため、周惑星円盤へ降着するガス中には逆に固体成分が枯渇すると考えられる。これは、固体/ガス比を減少させるセンスである。これは中心面に沈殿することによる“ろ過”もしくは“上澄み液の抽出”と言える。一方で、周惑星円盤の中心面付近のガスは、徐々にヒル圏から流出していることが明らかになった。周惑星円盤中の固体成分は、円盤ガスからのガス抵抗により徐々に惑星へと移動することが考えられるため、外向きへのガス流からは取り残されて周惑星円盤にとどまる可能性がある。これは遠心分離の逆の様な効果と言え、固体/ガス比を増加させるセンスである。これら2つの効

果は逆センスに働き、またそれぞれ固体のサイズにも依存するため、結果的に周惑星円盤中で固体成分を増加させられるかは現時点では不明であり、今後の研究が望まれる。

## 5. 周惑星円盤の温度分布の見積もり

我々の計算ではガスの状態方程式を等温として行っていたため、周惑星円盤の温度は不明であった。そこで、エネルギー的な議論から簡単に見積もってみる。ガスが周惑星円盤表面へ降着する時の衝撃波で運動エネルギーが熱エネルギーに変換されるが、同時に輻射により冷却され、そのバランスで温度が決まるであろう。降着するガスの速度は、ヒル半径よりも十分に内側であればほぼ惑星への自由落下速度となることが我々の数値計算から分かっているため、それを用いて平衡温度  $T_{\text{eq}}$  を求めると、

$$T_{\text{eq}} \simeq 1000 \left( \frac{r}{10R_J} \right)^{-1/4} \left( \frac{M_p}{M_J} \right)^{1/2} \left( \frac{a}{5\text{AU}} \right)^{-3/4} \left( \frac{\alpha_{\text{dep}}}{1} \right)^{1/4} \text{K} \quad (1)$$

となる ( $r$ は惑星からの距離、 $R_J$ ,  $M_J$ は現在の木星半径および質量、 $M_p$ は惑星質量、 $a$ は惑星の軌道長半径、 $\alpha_{\text{dep}}$ は我々のシミュレーションで得られた降着率に係る係数で、具体的には原始惑星系円盤の散逸やギャップ(次節参照)の形成により降着域のガス密度が低下する度合いを表した係数)。我々の計算による質量フラックスは、ギャップが未発達で降着が激しい時期に相当しているため比較的高温になっている。例えば10倍の木星半径付近で $\text{H}_2\text{O}$ が固相(氷)で存在するためには、降着率が我々の計算の設定(ギャップをあける前の降着が活発な状況)の典型的な値( $\sim 10^4$ 年で木星質量)から3桁ほど減少する必要がある(同じく $\sim 10^7$ 年)。このことから、衛星形成はかなり降着が減衰した惑星系形成後期に行われたことが示唆される。

この温度分布は、周惑星円盤内における磁気回転不安定性(MRI)にも影響を与える。ガスの温度が1000K程度になると弱く熱電離し始めてMRIが活性化される。その結果、ガス円盤内に磁気乱流が発生し、それがマクロな粘性として働くことで、円盤面密度が進化する[13-15]。近年、周惑星円盤においてもMRI

活性かどうかに関する研究が行われ始めており[16]、これらも考慮した周惑星円盤の長期進化モデルの構築が今後求められる。

## 6. 衛星系形成過程解明へ向けての今後の展開

最後に、衛星系形成過程の解明に向けて必要と思われる点、およびそれらに関連する惑星系形成過程における未解決な点を(それぞれが相互に関連しているが)ここでは3つに分けて挙げておく。

### 6.1 ガス惑星系への質量供給率の長期時間進化

ここまで周惑星円盤の構造に焦点を絞って紹介してきたが、それを取り巻く環境も時間的に変化し、周惑星円盤もその影響を受ける。具体的には、周惑星円盤の中心天体であるガス惑星自身はそもそも時間とともに成長し、また周惑星円盤を取り巻く原始惑星系円盤自身も粘性進化や光蒸発などで原始惑星系円盤全体の大きなスケールで進化し、かつ成長するガス惑星からの重力的な影響も原始惑星系円盤は受けるため、周惑星円盤はそれらすべての影響を受ける。このような環境下にあることを考慮に入れて、周惑星円盤へのガス降着率及びその時間進化を正しく理解することは衛星系形成過程において必要となるが、それは容易ではない。そこでまず、ガス惑星成長進化の基本描像をおさらいしておく。

**(1) ガス捕獲** コア集積モデルによると、固体原始惑星が約10倍の地球質量程度になると、惑星大気質量が大きくなり大気自身の重力が強まることで、大気は静水圧平衡を保てなくなり重力崩壊を起こす。その結果、惑星は原始惑星系円盤ガスを一気に捕獲し始め大きく成長する[17-19]。しかし、惑星が捕獲可能な領域(降着域)は、原始惑星系円盤中の限られた領域のみであり、降着域の広さが降着率を決める[5, 12]。この降着域は惑星重力圏内の衝撃波を含むガス流の細かい構造で決まるので、降着率を正しく求めるためには高解像度数値流体計算を用いる必要がある。また、ガス降着により惑星が持つ太陽周りの角運動量も変化することで惑星の軌道にも影響を及ぼす。

**(2) ギャップ形成** ガス惑星の成長に伴いその重力的影響が強まることで惑星軌道付近の原始惑星系円盤ガスを強く散乱し惑星軌道から遠ざけ、惑星軌道付近の

ガス密度が低下する<sup>5</sup>。このドーナツ状に密度が減少した領域を“ギャップ”<sup>6</sup>とよぶ。このギャップの形成により、降着域のガスが希薄になり成長率が鈍る。このように、惑星は成長に伴い身の回りからガスを遠ざけようとするため、自らの成長によって成長を抑えるようになる。この惑星成長率がほぼそのまま周惑星円盤へのガス降着率であるため、このガス惑星の長期質量進化を正しく追うことが衛星系形成過程において重要である。これを求めるには、成長に伴うギャップの発達により成長が抑えられる、という負のフィードバックを正しく決定する必要があるが、現時点ではいくつかの単純化の近似を含む半解析的モデルによる研究[20, 21]しかない状態である。

**(3) type II 移動** type II 移動とは、ガス惑星と原始惑星系円盤との間の重力相互作用の結果、惑星自身の公転半径が大きく変化してしまう現象の一種で、ギャップが深く発達している状態での移動を指す[22]<sup>6</sup>。このtype II 移動は、ギャップを隔てて惑星軌道の内側と外側で物質のやり取りがなくなると考えられており、惑星は原始惑星系円盤の中に自ら開けたギャップにはまったまま円盤粘性進化に身を任せる形で惑星も移動する。このtype II 惑星移動によりギャップ領域の密度分布が変化することで影響を受けるため、惑星(周惑星円盤)へのガス降着率は、惑星移動の効果も考慮する必要がある。

**(4) ギャップをすり抜けるガス** さらに、ギャップが形成されると惑星軌道を挟んでガスは移動できないと広く考えられているようだが、実際には惑星軌道を通るガスが存在する[3]。これは、惑星が惑星軌道の外側の円盤から押されるのをかわす働きをし、結果的にtype II 移動を弱める。さらにグローバルな密度進化も当然影響を受ける。この効果自体は10年以上も前から指摘されたあと、現在まで定量的な議論がなされていない。

以上のように、上にあげた4つの効果を矛盾なく決めるという問題は、惑星近傍のガス降着流の微細構造、ギャップ構造、グローバルな円盤粘性進化など、空間・時間的にマルチスケールな問題となっており、周惑星

円盤へのガス降着率を正しく求めることは容易でないことが理解できる。現在筆者らはこのモデル化に取り組みつつある。

**関連する重要事項** ガス惑星と原始惑星系円盤の共進化が重要であるということを、これまでは衛星系形成過程からの視点で説明してきた。しかし、この共進化はそもそも惑星系の最も重い天体であるガス惑星の最終質量と軌道長半径を決めるプロセスでもあるため、惑星系形成においても最重要課題の一つである。現在提案されている惑星系形成の惑星質量・軌道長半径を理論的に予測する研究はこの共進化についてきちんと考慮されているものがなく、今後の進展が待たれる。また、惑星形成の最終段階におけるガス惑星の質量・軌道進化は、惑星系全体に重力的な影響を及ぼし、小天体などにその痕跡を残している可能性もあり、現在の太陽系小天体観測においても重要となるかもしれない。さらにALMAなどで円盤観測が飛躍的に進展することが予想されている現在において、観測的にも重要性が増している(遷移円盤(transitional disk)など)。もし観測した円盤の中に面密度分布が動径方向に急激に変化しているものがあつたとするならば、その構造からここで述べたようなガス惑星によるものなのか、光蒸発の様な別のプロセスによるものなのかを推定することも可能となるかもしれない。

## 6.2 原始惑星系円盤中の固体のサイズ分布

我々が第3節で示した計算はガスのみの計算であるが、衛星形成を起こすには周惑星円盤中に固体を供給する必要がある。既に第4節で述べたように、ガスと固体の相互作用を考慮すると、周惑星円盤への降着流と周惑星円盤からの流出流において、固体のサイズに依存したフィルター効果が生じることが予想され、周惑星円盤中における固体/ガス比が原始惑星系円盤中のそれに比べて大きく変化する可能性がある。よって、周惑星円盤中の固体/ガス比を定量的に決めるためには、まず原始惑星系円盤中における固体のサイズ分布が必要である。

惑星サイズの天体が既に存在している原始惑星系円盤中において、固体のサイズ分布は微惑星の衝突時の合体・破壊プロセスで決まる[23]。このプロセスは微惑星のランダム速度(ケプラー回転速度からのずれ)に依存する。この速度は、原始惑星が微惑星を重力散乱

5. 重力は引力であるが、ケプラー重力場の中で公転する天体同士が引きつけ合うと、角運動量の交換により結果的に軌道長半径が遠ざかる。

6. ギャップを形成しない程度の小さな惑星が原始惑星系円盤との重力相互作用により移動する現象はtype I 移動と呼ばれる。

による増加と、円盤ガスとのガス抵抗による減少の釣り合いで概ね決まるため、原始惑星サイズは重要である。固体惑星(ガス惑星の固体コア $\leq$ 数十地球質量)の成長率を調べる目的ではいくつかの研究がおこなわれているが[24, 25], ガス惑星サイズ(～数百地球質量)の影響下での固体天体のサイズ分布を調べた研究は行われておらず今後の研究が待たれる。またこのサイズ分別効果は、衛星形成過程のみならず、木星・土星の重元素濃度が太陽組成に比べて高いという事実を理解するうえでも重要となるであろう。

### 6.3 ガス惑星が作る円盤ギャップの縁におけるガスと固体の相互作用

原始惑星系円盤内では通常は、圧力勾配が外向きに働いているため、ガスはケプラー速度より若干遅く回転している。一方固体はケプラー速度で回転しようとするため円盤ガスから向かい風を受け角運動量を失い徐々に中心星へ向かって落下する。しかし、ギャップ領域のすぐ外側の縁ではガスの面密度勾配が急激に変化し圧力勾配の向きが通常とは逆向きになりうるため、そこを回転している固体からすると局所的に追い風となり、固体成分は外側へ移動する。この効果により、ギャップのすぐ外の縁に固体成分が蓄積し<sup>7</sup>, 固体/ガス比が局所的に増加する。ここで、様々な現象が起こる。まず、固体の数密度が高いため衝突頻度が高く、サイズに依存して成長や破壊が進み、サイズ分布が変化する。また、惑星が近いため重力散乱により、ガス抵抗の効果が弱まる大きなサイズでは大きく軌道が乱されて、周囲の固体との相対速度が増加し、成長・破壊に影響を与える。さらに、重力散乱された固体は、ガス抵抗によって軌道が戻されるが、ガスの運動・密度分布も惑星から大きく影響を受けているため、通常ならガスは円軌道静水圧平衡を仮定できるところが出来ないため、ガス抵抗力が簡単に求められない。このように、惑星軌道のすぐ外の惑星へとガス・固体が降着する領域付近では、固体が溜まることで様々な物理プロセスが進行しており、周惑星円盤への物質供給を知るためには、今後これらを一つ一つ解決していく必要がある。

7. 内側の縁では固体の移動の向きが逆になるため蓄積しない。

## 謝辞

本稿を執筆する機会を与えてくださった木村淳氏に感謝いたします。田中秀和氏、奥住聡氏、犬塚修一郎氏からは様々な視点から有益なコメントを頂いた。竹内拓氏は査読者として原稿にコメントを頂き、本稿の改善に大いに役立った。3次元流体結果の可視化にはサイバネットシステム株式会社の宮地英生氏にご協力頂いた。以上の方々にも感謝の意を表します。本研究は、グローバルCOEプログラム「惑星科学国際教育研究拠点の構築」により運営されている惑星科学研究センター(CPS)、および日本学術振興会科学研究費補助金(23740326)の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] Lunine, J. I. and Stevenson, D. J., 1982, *Icarus* 52, 14.
- [2] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2002, *Astron. J.* 124, 3404.
- [3] Lubow, S. H., et al., 1999, *Astrophys. J.* 526, 1001.
- [4] D'Angelo, G. et al., 2002, *Astron. and Astrophys.* 385, 647.
- [5] Tanigawa, T. and Watanabe, S., 2002, *Astrophys. J.* 580, 506.
- [6] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2006, *Nature* 441, 834.
- [7] Sasaki, T. et al., 2010, *Astrophys. J.* 714, 1052.
- [8] Bate, M. R. et al., 2003, *MNRAS* 341, 213.
- [9] D'Angelo, G. et al., 2003, *Astrophys. J.* 586, 540.
- [10] Ayliffe, B. A. and Bate, M. R., 2009, *MNRAS* 397, 657.
- [11] Machida, N. M. et al., 2010, *MNRAS* 405, 1227.
- [12] Tanigawa, T. et al., 2011, *Astrophys. J.*, submitted.
- [13] Balbus, S. A. and Hawley, J. F., 1991, *Astrophys. J.* 376, 214.
- [14] Sano, T. et al., 2000, *Astrophys. J.* 543, 486.
- [15] Okuzumi, S. and Hirose, S., 2011, *Astrophys. J.*, 742, 65.
- [16] Fujii, Y. I. et al., 2011, *Astrophys. J.*, 743, 53.
- [17] Mizuno, H., 1980, *Prog. Theor. Phys.* 64, 544.
- [18] Pollack, J. B. et al., 1996, *Icarus* 124, 62.
- [19] Ikoma, M. et al., 2000, *Astrophys. J.* 537, 1013.

- [20] Tanigawa, T. and Ikoma, M., 2007, *Astrophys. J.* 667, 557.
- [21] Ward, W. R. and Canup, R. M., 2010, *Astron. J.* 140, 1168.
- [22] Ward, W. R., 1997, *Icarus* 126, 261.
- [23] Kobayashi, H. and Tanaka, H., 2010, *Icarus* 206, 735.
- [24] Inaba, S. et al., 2003, *Icarus* 166, 46.
- [25] Kobayashi, H. et al., 2010, *Icarus* 209, 836.