

# 特集「若い惑星および周惑星円盤・衛星形成研究最前線」 周惑星系円盤における衛星系形成

藤井 悠里<sup>1</sup>

2024年6月17日受領, 査読を経て2024年7月24日受理

(要旨) 衛星には、大小さまざまなものがあり、形成メカニズムも多様である。木星や土星の様なガス惑星の衛星のうち、少なくともガリレオ衛星やタイタンの様な巨大衛星は周惑星円盤で形成されたと考えられている。周惑星円盤は、ガス惑星の集積の際に、その周りに形成されるガス円盤である。周惑星円盤には、原始惑星系円盤からガスや固体(ダストやペブル、微惑星など)が流入する。周惑星円盤で形成された衛星は、円盤ガスとの相互作用で角運動量を失うと、惑星に落下してしまうため、円盤の構造は、衛星の数や軌道を決めるためにも重要である。本稿では、周惑星円盤の構造や進化に関する近年の研究について解説し、巨大衛星系の構築について議論する。

## 1. これまでに発見されている衛星

天文学辞典(日本天文学会)<sup>1</sup>によると、衛星の定義は以下の通りである。「惑星、準惑星、太陽系小天体を周回する人工物ではない天体を衛星と呼ぶ。リングを構成するような氷や岩石、ダストは、衛星とは呼ばない。」惑星の衛星に限定すると、これまでに人類が発見した衛星の数は少なくとも182個である<sup>2</sup>。太陽に近い岩石惑星である水星と金星には衛星は発見されていない。地球には直径約3500 kmの月がある。火星にはフォボス(直径約22 km)とダイモス(直径約13 km)という小さな衛星が2つ周回している。木星には、ガリレオ衛星と呼ばれる月や水星と同じくらいのサイズの大きな衛星4つの他に、小さな衛星(5番目に大きな衛星は約250 km)が68個ある。土星の衛星は66個で、中でも一際大きいタイタンは、土星衛星全体の95%以上の質量を占める。木星や土星の衛星は近年においても新たな発見が続々と報告されているのは驚きである。天王星には27個、海王星には

14個の衛星がある。これ以外にも、軌道は計算されていないが探査機などで発見された衛星が報告されている。系外惑星の周りには衛星は発見されているだろうか。系外衛星の候補天体については、複数の報告例があるが[e.g., 1]、既に衛星である可能性を棄却する観測・解析があるものもあり、未だ確実な検出には至っていない。また、浮遊惑星に衛星が付随している可能性を示す観測も報告されているが[2]、重力マイクロレンズ法を用いた浮遊惑星の観測は再現できないため、十分な検証をすることができない。系外衛星候補のほとんどは、海王星サイズであると見積もられている。もし、これらの候補天体が実際に衛星だった場合、そのように大きな衛星は、主惑星の周りの周惑星円盤で形成されたのだろうか。それとも、原始惑星系円盤で形成された別の惑星が連星の様に捕獲されたのだろうか。近年の観測技術の発展を持ってしても、系外衛星に関する知見はほとんど得られていないため、本稿では、太陽系の衛星系

1. 京都大学  
fujii.yuri.2z@kyoto-u.ac.jp

<sup>1</sup><https://astro-dic.jp/>

<sup>2</sup>確定番号がついた衛星衛星の数. (<https://www.nao.ac.jp/new-info/satellite.html>)

を中心に、衛星系の形成について議論する。

## 2. 衛星の形成メカニズム

衛星の形成には様々なメカニズムがあると考えられている。それぞれの衛星形成メカニズムの概要は、図1のイラストにまとめられている[3]。ここで、円盤と表現する場合は、周惑星円盤(ガス円盤)を指し、氷や岩石などの固体で構成される天体は、リングと表現することにする。上から順番に、巨大衝突(giant impact)では、惑星と原始惑星の衝突により、氷や岩石のリングが形成され、そこから衛星が生まれる。次の周惑星円盤(CPD)では、巨大惑星の集積時に形成される周惑星円盤にダストや微惑星といった衛星の材料が流入し、円盤内で衛星系が形成されると考えられている。リングにおける衛星形成では、中心惑星のロッシュ限界に入った天体が潮汐破壊されることで、衛星の材料物質が供給され、潮汐進化でロッシュ限界から滲み出した固体成分から衛星が形成される。一番下は、惑星の近くに来た小天体が惑星の重力に捕獲されて衛星になるというメカニズムである。それぞれの形成方法ごとに、衛星のサイズや軌道に、図に示されているような特徴が表れやすい。

地球の月はジャイアントインパクトで形成されたとする説が有力である[4,5]。火星の衛星は小天体の衝突で生じたリングから形成された説と小天体が捕獲された説があり、JAXAのMMXミッション[6]によって、火星衛星の起源が明らかになることが期待されている[7]。木星、天王星、海王星の衛星は、図2に示す様に、内側ほど小さく、外側に行くほど大きくなっている。この特徴は、図1の3つ目のリングモデルでうまく説明できることが示されている[8-11]。さらに、天王星の衛星に関しては、固体のリングではなく、巨大衝突で生じた水蒸気が広がりながら冷えて再凝縮する過程を考慮すると、質量分布を見事に再現することができる[12]。木星のガリレオ衛星や土星のタイタンの様に巨大な衛星は、本特集のテーマである周惑星円盤で形成されたと考えられている[13-17]。形成中のガス惑星は、原始惑星系円盤の中にあるため、その周惑星円盤には、ガスやダストが供給されると考えられている。惑星や周惑星円盤への

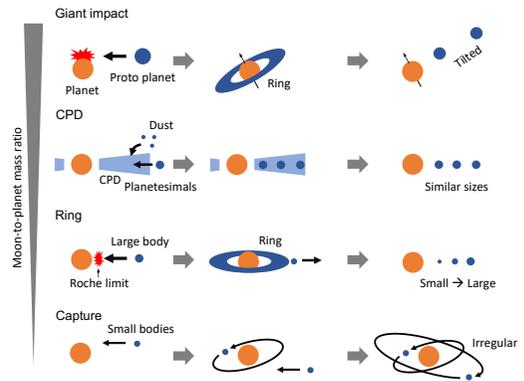


図1: 衛星の形成メカニズムについてまとめた概念図。(芝池論人氏提供[3]).

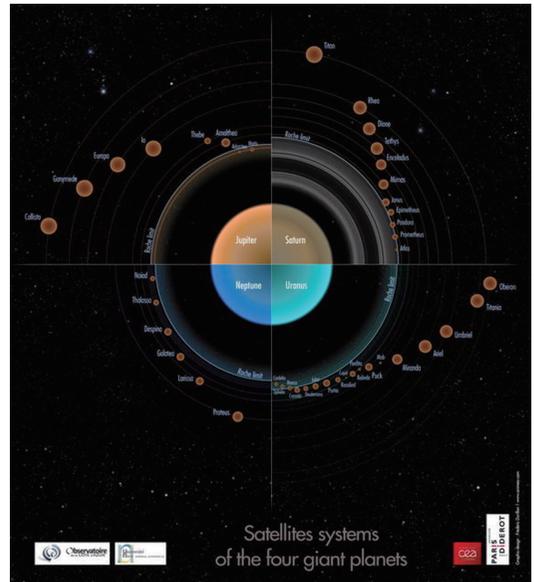


図2: 木星、土星、海王星、天王星の半径を揃えた場合のロッシュ限界と衛星の大きさや軌道を示す。(Sebastien Charnoz氏提供[8, 9], ©Frédéric Durillon - Animea Studio <https://www.youtube.com/watch?v=jCoEC6chPFE>).

ガス降着については、青山氏、橋本氏、そして、周惑星円盤へのダスト供給に関しては、芝池氏による本特集記事で議論される。周惑星円盤における衛星形成については、谷川享行氏ら[18]、佐々木貴教氏ら[19]、芝池論人氏[20]による過去の遊星人の記事についても参照されたい。

### 3. 周惑星円盤の構造と進化

周惑星円盤の面密度や温度構造は、原始惑星系円盤からの質量流入と周惑星円盤の角運動量輸送メカニズムによって決まる。しかし、周惑星円盤の角運動量輸送メカニズムは明らかになっていない。 $\alpha$ 粘性モデルの乱流粘性の起源としては、磁気回転不安定性による磁気乱流を想定することが一般的である。しかし、磁気乱流の発達には、ガスが十分に電離している必要がある。原始惑星系円盤においては、非理想磁気流体力学効果のために、磁気回転不安定性による乱流が発達する領域が制限されることが知られている[e.g., 21-23]。原始惑星系円盤と比較して、周惑星円盤はサイズスケールが小さく磁気拡散のタイムスケールが短いため、磁気乱流の発達には、より高い電離度が必要になる[24]。

代表的な衛星形成のモデルであるCanup & Ward (2002, 2006)[13, 14]による円盤モデル(以下CW円盤モデル)では、磁気乱流が想定されていた。しかし、銀河宇宙線と単寿命放射性核種による電離を考慮した電離度計算によると、CW円盤モデルで磁気乱流が発達し得るのは円盤上空に限られる[25]。さらにX線による電離を加味しても、円盤内にダストがある場合にはガリレオ衛星で最も外側のカリストの軌道の倍以上( $\sim 60$ 木星半径)、ダストがない場合でも40木星半径より外側でないと赤道面まで十分に電離することができない[26]。また、磁気回転不安定性によって磁場が増幅されると、磁気乱流の発達が妨げられることが知られている[27]。この効果を考慮すると、磁気乱流による角運動量輸送が期待できる領域が狭くなる[24]。

Keith & Wardle (2014)[28]は、あらゆる半径で粘性定数 $\alpha$ の値が一定とは限らないため、磁気乱流の飽和レベルと粘性定数 $\alpha$ の値との関係[29]を用いて、ガス降着率から、円盤の温度、面密度を矛盾なく計算する方法を導出した。その結果、円盤の温度はいずれの半径でもCW円盤モデルや「林モデル」のアナロジーである「最小質量円盤モデル」[30]より高く、面密度はCW円盤モデルよりも常に大きいことが分かった。円盤内側( $\sim 30$ 木星半径以内)では温度が高く、熱電離によって磁気乱流が駆動されるため、 $\alpha = 10^{-3}$ で定数のモデルと同じ円盤構造になる。円盤外

側( $\sim 30$ 木星半径以遠)では、 $\alpha$ の値が小さくなるため、面密度が大きくなり、それに伴い温度も高くなる。

磁気回転不安定性以外の効率的なガス降着メカニズムがない場合には、原始惑星系円盤からの流入により、周惑星円盤にはガスが積もり、やがて重力的に不安定になる。そして、重力不安定乱流によって円盤が加熱される<sup>3</sup>と熱電離によって磁気乱流が発達し、急激に周惑星円盤の面密度が下がる。よって、降着率が数年間にわたり数桁上がる期間と再びガスが溜まる期間の繰り返しが $10^4$ - $10^5$ 年くらいの周期で繰り返されると予想されている[31]。

CW円盤モデルでは、原始惑星系円盤から周惑星円盤への質量流入は30木星半径以内に一律に与えられていたが、Tanigawa et al. (2012)[32]の高解像度流体力学シミュレーションによって、周惑星円盤への質量流入の3次元的な描像の詳細が明らかにされた。また、彼らの解析により、質量流入率は原始惑星系円盤における惑星の軌道付近の面密度に比例することがわかった。よって、惑星軌道に沿って原始惑星系円盤に溝ができる、原始惑星系円盤が散逸するといった進化段階に合わせて、周惑星円盤への質量流入率を半径依存性込みで計算することができる。

半径依存性の不定性から粘性定数 $\alpha$ の値を一定と仮定したとしても、粘性係数は $\nu = \alpha c_s H$  ( $c_s$ は音速、 $H$ は円盤のスケールハイト)で与えられるため、周惑星円盤内のガス降着率は温度に依存する。また、温度・密度領域によって、オパシティが変化するため、それによっても温度構造が変わり得る(e.g., [28]の図1)。これを踏まえ、著者たちは、熱電離による磁気乱流や重力不安定性による乱流が発達しない領域の $\alpha$ の値を底地としてパラメータに取り、Tanigawa et al. (2012)[32]の質量流入率を用いて周惑星円盤の異なる進化段階における円盤構造を計算した[33]。 $\alpha$ の底地が $10^{-3}$ の場合には、原始惑星系円盤の進化初期に相当する激しい質量流入がない限りは、定常円盤になるが、 $\alpha$ の底地が $10^{-4}$ や $10^{-5}$ の時は、周惑星円盤の内側の面密度が高くなることによる温度上昇で、熱電離による磁気乱流が駆動され

<sup>3</sup>重力不安定性による乱流が局所的に熱に散逸すると仮定している。

る。その領域は磁気乱流の緩急が時間変化する準定常状態になると予想され、磁気乱流の駆動により、円盤の面密度と温度に上限が与えられる。

周惑星円盤の形成に関する輻射流体学シミュレーションでは、円盤温度が数千度におよぶ非常に高温になることが報告されているが[34]、磁気乱流の駆動を考慮すると、円盤の温度は自己制御されると考えられる[33]。このモデルでは、周惑星円盤では磁気乱流が発達しないから温度が低く保たれるという予想[25, 31]に反し、面密度が大きくなるために円盤温度が高くなるという計算結果になった。しかし、ここで注意すべきは、粘性加熱を起こす乱流の起源が明らかにされていない点である。ガスが積もり続けられ、やがて重力不安定乱流によって円盤温度が上昇し、熱電離による磁気乱流が生じるというところは正しいかもしれないが、底地によって降着率が決まっている領域に関しては、角運動量輸送と粘性加熱は分けて考えるべきである。特に、赤道面が乱流でない場合は、赤道面付近の温度は上がらない[35, 36]。磁気乱流が発達するほど電離度が高くなくても、大局的な磁場による磁気遠心力風で角運動量が輸送される。その他のガス降着メカニズムとしては、星に励起された渦状腕が検討されている[37, 38]。

## 4. 巨大衛星系の構築

巨大衛星を持つガス惑星という点で共通している木星と土星であるが、それぞれの衛星系の構造は異なっている。木星には4つのガリレオ衛星があるが、土星には巨大衛星はタイタンしかない。ガリレオ衛星は $\sim 30$ 木星半径以内のコンパクトな軌道に収まっているが、タイタンと土星の間には20土星半径ほどの距離がある。ガリレオ衛星のうち木星に近いイオ、エウロパ、ガニメデが4:2:1の平均運動共鳴であるラプラス共鳴に入っていることも、形成メカニズムを明らかにする上での制限となる。

円盤中で大きく成長した衛星は、周惑星円盤との重力相互作用により内側の軌道に移動していき、中心の惑星に落下してしまうことが多い。N体計算を用いた研究から、衛星がラプラス共鳴軌道に入るには、内側の衛星の移動を止める何らかのメカニズム

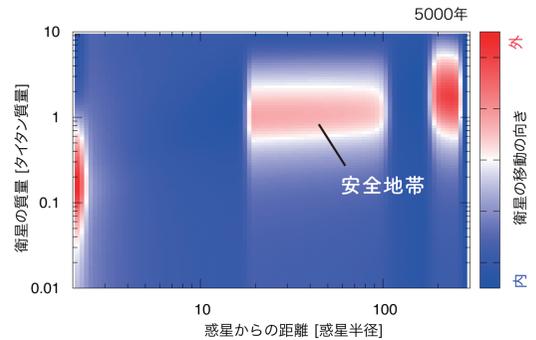


図3: 衛星の移動の向きを示す図[40]。横軸は惑星半径で規格化した惑星からの距離、縦軸はタイタンの質量で規格化した衛星の質量である。青い領域が衛星の移動の向きが惑星の向きになっている領域である。「安全地帯」と示した領域では衛星がほとんど移動しないため、惑星への落下を免れる。例として、ガスが散逸し始めてから5000年後の円盤構造の場合を示しているが、赤と青の領域の分布は円盤の進化とともに変化する。(この図の上にN体シミュレーションの結果を重ねた動画: <https://youtu.be/cJ7DxHxzxVc>)

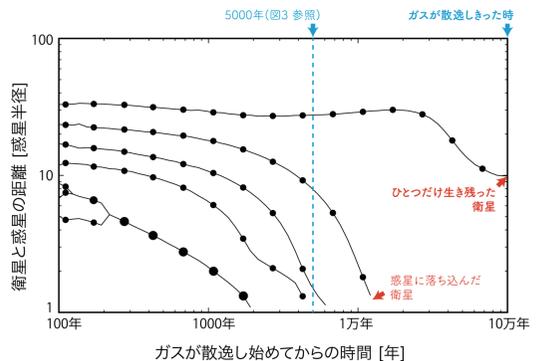


図4: 衛星と惑星の距離(衛星の軌道半径)の時間変化のシミュレーションの一例[40]。縦軸は惑星の半径を単位とした惑星からの距離、横軸は周惑星円盤が散逸し始めたときからの経過時間を表す。ほとんどの衛星は惑星落下してしまうが、一番外側の衛星がひとつだけガスが散逸しきるまで生き残った。この衛星は「安全地帯」に一時的に位置していた(図3参照)。

が必要であること、また内側の衛星を止めることができれば、遠くから移動してきた衛星は移動速度が速すぎない限り、2:1の平均運動共鳴の連なりとして捕獲可能であることが示された[14, 16, 39]。これは、ガリレオ衛星の形成に好都合である。

一方で、円盤散逸などによって惑星に落下せず衛星が生き残る場合には、最終的に複数の衛星が得られる場合が多く、タイタンのようにひとつだけ残すことは難しいことが明らかにされている[14, 16]。

#### 4.1 タイタンだけの生き残り

この問題を解決するために、著者たちが行った、土星-タイタン系の形成に関する研究[40]について紹介する。

周惑星円盤が存在している間は、type I移動で衛星の軌道が大きく変化しうる。よって、ガス流入がなくなった後の散逸期の周惑星円盤の進化をモデル化した。円盤の面密度は、 $\alpha=10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ , または $10^{-5}$ を仮定し、原始惑星系円盤からのガス流入と粘性進化をつり合わせた定常解を一旦求め、流入がなくなり周惑星円盤が散逸するまでの時間進化を計算した。温度分布は粘性加熱と放射冷却のつり合いから計算した。type I移動の向きや速さは、円盤の面密度と温度分布の半径依存性に強く依存する[41-43]。図3は円盤ガスが散逸し始めてから5000年後の円盤構造における、様々な質量の衛星の移動の向きを示すダイアグラムである。図中で安全地帯と示したように、タイタン質量の衛星が、惑星に落下せず円盤に留まれる領域がある。図4は原始惑星系円盤からの質量流入が止まって周惑星円盤が散逸し始めた時に、タイタン質量の衛星が7個あった場合のN体シミュレーションの結果を示している。内側にあった衛星は全て惑星に落下してしまい、一番外に位置していた衛星のみが、円盤が散逸するまで生き残った。安全地帯とは、温度分布の半径依存性のベキが急である領域で、氷またはダストによってオパシティが決まっている温度・密度領域に対応する。この研究の目的は、1つだけ衛星を残す方法をデモンストレーションすることであったので、初期条件として敢えて多くの衛星を置いた。決して、タイタンのように大きな衛星が7個も形成可能であると主張したいわけではないことを述べておく。実際には、それほど材料が豊富にある訳ではないと考えられる。また、初期に衛星を配置した位置よりも外側に衛星を置いた場合、安全地帯に複数の衛星が滞り、円盤散逸まで生き残る可能性もある。しかし、円盤の外側は材料が少ないため、巨大衛星の形成は困難だろうと考えている。また、最初からタイタン質量の衛星を置かずに、半分の質量の衛星9個からシミュレーションを始めた場合にも、2つの合体でタイタン質量になった衛星がひとつだけ生き残る様子を再現できた。図4で、形成された衛星の軌道は現在のタイタンの軌道の半分ほどの

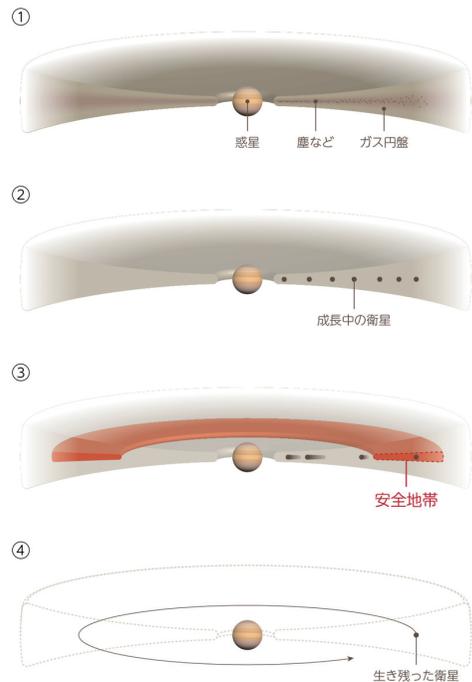


図5: 巨大衛星がひとつだけ形成されるメカニズムの模式図[40]. (1)周惑星円盤が形成される。(2)円盤の中で固体成分が衛星に成長する。本研究ではこの状態から計算を始めた。(3)Type I移動で衛星の軌道が次第に変化する。多くのものは惑星に落下するが、安全地帯に位置する衛星だけが惑星からの距離をたもち続ける。(4)円盤のガスが散逸し、安全地帯で生き延びた衛星は安定した軌道をもち生き残る。(©国立天文台)

位置であるが、近年の研究では、タイタンは形成から現在までの間に、潮汐による軌道進化で6土星半径付近から現在の位置まで移動可能であると示唆されている[44, 45]。図5は、我々が提唱する土星-タイタン系の形成シナリオの模式図である。

#### 4.2 ガリレオ衛星のラプラス共鳴

4節の冒頭で述べたように、ガリレオ衛星のラプラス共鳴軌道を再現するには一番内側の衛星イオのtype I移動を止める必要がある。著者らの円盤モデル[33, 40]では、温度が1000-2000K付近でダストが蒸発してなくなることでオパシティが変化する位置で、円盤の温度分布が急激に立ち上がるため、面密度分布に極大ができる。この位置で衛星の移動を止められるかどうか検討したところ、外側から移動し

てくる複数の衛星を2:1の平均運動共鳴に捕獲可能であることがわかった[33]. しかし、この構造は円盤が高温の時のみに現れるため、円盤の温度が下がって構造がなくなった時に捕獲された衛星が生き残れるかどうかは不明である. Arakawa & Shibaie (2019) [46] は、光泳動によって円盤内側のダストが枯渇し、その領域の電離度が上がることで、磁気乱流が生じ、降着率が上がって面密度構造に極大ができるというシナリオを提唱した. このモデルは高温な円盤を要しない. 4.1で述べたような安全地帯でイオの移動を止めて平均運動共鳴にエウロパやガニメデを捕獲することや、一番外側のカリストの移動を遅らせて共鳴軌道に入らないようにすることも可能かもしれない. 光蒸発によって、周惑星円盤の散逸が外側から加速されるために、カリストがガニメデに追いつく前に円盤が散逸可能という研究結果もある[47].

イオの移動を止める方法として、最も有力であると考えられているのが、木星とその周惑星円盤との非接続である. 元々は、木星のスピンを遅くするメカニズムとして着目されていたが、木星の磁場と周惑星円盤のガスが結合して角運動量をやりとりすることで、周惑星円盤の中心に穴があく場合がある[48-50]. 外側から移動してきた衛星が、周惑星円盤の内縁で止まると、ガリレオ衛星のような衛星系を形成することができる[15-17, 51]. ガリレオ衛星の形成に関しては、ペブル集積を応用したShibaie et al. (2019)[17]のモデルが、現状、衛星の軌道や質量、組成や内部構造を最も良く説明できるモデルである. ただし、木星の近傍のガスが取り除かれていることがこのモデルの肝となるので、周惑星円盤内縁の電離度が十分かどうか検証する必要がある.

#### 4.3 木星系と土星系の作り分け

Sasaki et al. (2010)[15]は、4節の冒頭に述べた木星と土星の巨大衛星系の違いを原始惑星系円盤に惑星軌道に沿って溝ができるかどうかの違いによって説明するというアイデアを提唱した. 彼らは、古典的Tタウリ型星と弱輝線Tタウリ型星の降着率と磁場強度の関係から着想を得て、惑星への質量降着率が高い時期には強い惑星磁場が生成され、周惑星円盤のガスが磁場に沿って降着するため(磁気

圏降着)、周惑星円盤に内縁ができると仮定した. 土星と比べて質量が大きく軌道が内側の木星の場合は、その軌道に沿って溝ができるため、それに伴って、周惑星円盤へのガス流入がなくなる. よって、内縁がある周惑星円盤で形成された衛星が $10^5$ 年の時間スケールで移動する前に、103年の時間スケールで周惑星円盤が素早く散逸する[15]. 一方、土星の軌道沿いには溝が形成されないため、原始惑星系円盤の散逸とともにガス降着が穏やかになって、土星の円盤の内縁が消失してから衛星が形成された.

ガス惑星の磁場強度と質量降着率の関係についての知見は、近年アップデートされている. ガス惑星の磁場強度は、惑星内部の構造と温度・圧力で決まるため、惑星が十分に質量を獲得してからの表面への質量降着では磁場の強度はほとんど変化しない可能性がある. また、ガス惑星の表面の磁場強度は惑星の質量に依存することが明らかにされている[52]. 著者らの研究では、集積直後の土星の磁場は木星の磁場の100分の1程度の強さだったという計算結果になった[53, 54].

磁場強度が一定の場合は、ガス降着が弱い方が、周惑星円盤に内縁が形成されやすいと考えられている[50, 55, 56]. ただし、惑星磁場と円盤ガスが結合するためには、惑星近傍のガスが十分電離されている必要がある. 衛星の移動を止めるためには、円盤赤道面のガスを取り除く必要があるが、3節の議論に戻ると、惑星の近傍で周惑星円盤の赤道面を電離するには、熱電離が起きるほど円盤の温度が高い必要がある[24, 26, 28, 33]. 著者たちは、上述の磁場強度の違いと周惑星円盤の電離度進化に着目した木星系と土星系の起源について論文を投稿中である[53, 54].

## 5. 衛星形成の理解へ向けて

周惑星円盤における衛星形成を理解するためには、周惑星円盤の構造と材料物質の供給について明らかにしなければならない. 周惑星円盤の構造は、生き残る衛星の数や軌道といった力学的な特徴を決めるために重要である. また、材料物質となる固体成分の質量分布によって、衛星形成の時間スケールや衛星の大きさや数が大きく異なり得る.

周惑星円盤の構造を矛盾なく決めるためには、ガスや固体の流入率および円盤内部の角運動量輸送メカニズムを明らかにする必要がある。質量流入に関しては、Tanigawa et al. (2012)[32]を皮切りに、より多くの物理を取り入れた高解像度シミュレーションが進められている。円盤の角運動量輸送メカニズムや惑星磁場と円盤構造の関係については、原始惑星系円盤における研究で得られた知見が周惑星円盤に応用され、例えば、周惑星角運動量輸送メカニズムとしては、磁気円盤風が有望であることが示されている[57]。

観測では、周惑星円盤の発見から、周惑星円盤の特徴を観測から明らかにする時代に入りつつある。観測データを利用して、円盤の降着率メカニズムに関する理論の検証や精密化が図られると、周惑星円盤の温度分布を理論的に導出できるようになる。さらにその妥当性を検証するためには、周惑星円盤の空間分解が望まれる。温度分布が明らかになると、衛星の化学的・地質学的な議論を形成論と絡めた研究を本格的に始めることができる。まだまだ、磁場による周惑星円盤の内縁形成と氷衛星の形成の両立など、円盤温度に関する未解決問題もあり、衛星形成過程の解明には、観測による制限が不可欠である。

惑星形成の分野では、星形成から原始惑星系円盤の形成・進化、惑星の形成までを包括的に研究する動きがあるが、衛星形成についても、Sasaki et al. (2010)[15]のように、原始惑星系円盤の進化と惑星および周惑星円盤の形成・進化を衛星の形成とリンクさせた包括的な視点で研究を進めていく必要がある。

系外惑星の多様性と惑星形成論の発展と同様に、思いもよらない系外衛星たちが発見され、ますます衛星形成の理論が発展する時代を心待ちにしている。

## 謝辞

有益なコメントをくださった査読者の谷川享行氏、本稿を執筆する機会を与えてくださった青山雄彦氏、橋本淳氏、野津翔太氏、そして、図を提供してくださった芝池論人氏、Sebastien Charnoz氏、図を作成してくださった国立天文台に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Kipping, D., 2022, *Nat. Astron.* 6, 367.
- [2] Bennett, D. P. et al., 2014 *ApJ* 785, 155.
- [3] Blanc, M. et al., submitted to *Space Science Reviews*.
- [4] Canup, R. M. and Asphaug, E., 2001, *Nature* 412, 708.
- [5] Hosono, N. et al., 2019, *Nat. Geosci.* 12, 418.
- [6] Kuramoto, K. et al., 2022, *Earth Planets Space* 74, 12.
- [7] Usui, T. et al., 2020, *Space Sci. Rev.* 216, 49.
- [8] Charnoz, S. et al., 2010, *Nature* 465, 752.
- [9] Crida, A. and Charnoz, S., 2012, *Science* 338, 1196.
- [10] Hyodo, R. et al., 2015, *ApJ* 799, 40.
- [11] Ishizawa, Y. et al., 2019, *ApJ* 885, 132.
- [12] Ida, S. et al., 2020, *Nat. Astron.* 4, 880.
- [13] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2002, *AJ* 124, 3404.
- [14] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2006, *Nature* 441, 843.
- [15] Sasaki, T. et al., 2010, *ApJ* 714, 1052.
- [16] Ogihara, M. and Ida, S., 2012, *ApJ* 753, 60.
- [17] Shibaike, Y. et al., 2017, *ApJ* 846, 81.
- [18] 谷川享行ほか, 2011, *遊星人* 20, 262.
- [19] 佐々木貴教ほか, 2011, *遊星人* 20, 254.
- [20] 芝池論人, 2019, *遊星人* 28, 313.
- [21] Sano, T. et al., 2000, *ApJ* 543, 486.
- [22] Bai, X., 2013, *ApJ* 772, 96.
- [23] Gressel, O. et al., 2015, *ApJ* 801, 84.
- [24] Fujii, Y. I. et al., 2014, *ApJ* 785, 101.
- [25] Fujii, Y. I. et al., 2011, *ApJ* 743, 53.
- [26] Turner, N. et al., 2014, *ApJ* 783, 14.
- [27] Okuzumi, S. and Ormel, C., 2013, *ApJ* 771, 43.
- [28] Keith, S. and Wardle, M., 2014, *MNRAS* 440, 89.
- [29] Sano, T. and Stone, J. M., 2002, *ApJ* 577, 534.
- [30] Mosqueira, I. and Estrada, P. R., 2003, *Icarus* 163, 198.
- [31] Lubow, S. H. and Martin, R. G., 2012, *ApJL* 749, L37.
- [32] Tanigawa, T. et al., 2012, *ApJ* 747, 47.

- [33] Fujii, Y. I. et al., 2017, AJ 153, 194.
- [34] Szulágyi, J. et al., 2016, MNRAS 460, 2853.
- [35] Hirose, S. and Turner, N. J., 2011, ApJL 732, L30.
- [36] Mori, S. et al., 2019, ApJ 872, 98.
- [37] Rivier, G. et al., 2012, A&A 548, A116.
- [38] Zhu, Z. et al., 2016, ApJ 832, 193.
- [39] Ogihara, M. and Kobayashi, H., 2013, ApJ 775, 34.
- [40] Fujii, Y. I. and Ogihara, M., 2020, A&A 635, L4.
- [41] Tanaka, H. et al., 2002, ApJ 565, 1257.
- [42] Paardekooper, S.-J. et al., 2011, MNRAS 410, 293.
- [43] Ogihara, M. et al., 2015, A&A 579, A65.
- [44] Fuller, J. et al., 2016, MNRAS 458, 3867.
- [45] Lainey, V. et al., 2020, Nat. Astron. 4, 1053.
- [46] Arakawa, S. and Shibaïke, Y., 2019, A&A 629, A106.
- [47] Oberg, N. et al., 2020, A&A 638, A135.
- [48] Takata, T. and Stevenson, D. J., 1996, Icarus 123, 404.
- [49] Batygin, K., 2018, AJ 155, 178.
- [50] Hasegawa, Y. et al., 2021, ApJ 923, 27.
- [51] Batygin, K. and Morbidelli, A., 2020, ApJ 894, 143.
- [52] Hori, Y., 2021, ApJ 908, 77.
- [53] Fujii, Y. I. et al., 2023, PPVII, ES-07-0007.
- [54] Fujii, Y. I. et al., under review.
- [55] Hartmann, L. et al., 2016, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 54, 135.
- [56] Takasao, S. et al., 2022, ApJ 941, 73.
- [57] Shibaïke, Y. and Mori, S., 2023, MNRAS 518, 5444.

---

## 著者紹介

---

### 藤井 悠里

京都大学大学院人間・環境学研究科 助教. 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻博士課程修了. 博士(理学). 東京工業大学ELSI 研究員, コペンハーゲン大学ニールス・ボーア研究所 研

究員, 名古屋大学高等研究院 S-YLC特任助教を経て, 2021年1月より現職. 日本天文学会, 日本惑星科学会, 生命の起原および進化学会に所属, 生命の起原および進化学会運営委員を努める.