#### 第26回惑星圏シンポジウム(SPS2025)集録

「巨大ガス惑星周りの衛星形成」

#### 国立天文台 芝池諭人

本講演は、巨大ガス惑星(太陽系では木星と土星)の持つ衛星の起源をレビューする。衛星の起源は 大きく分けて四つ、1) 巨大衝突、2) 周惑星円盤(内)、3) リング、4) 捕獲、であり、1)から4)の 順に衛星-惑星質量比が大きくなる。巨大ガス惑星の衛星の起源は、2)から4)である。2)を起源と する衛星は、巨大衛星つまり木星のガリレオ衛星と土星のタイタン(及びイアペタス)、3)は土星の 中型衛星(及びタイタンとイアペタス)、4)は木星と土星の不規則衛星、があてはまる。以下、それ ぞれの起源について詳しく説明する。

2) 周惑星円盤(内)

ガス集積中の惑星周囲にできる小さなガス円盤を周惑星円盤(CPD)と呼ぶ。CPD内での衛星形成 シナリオは、微衛星集積とペブル集積の二つに分けられる。微衛星集積シナリオは、"Gasstarved disk"モデルが基本となる。このモデルでは、継続的にCPDに供給されるダストが合体成 長により微衛星、そして衛星へと成長とするが、同時にTypel移動により惑星に落下する。成長と 落下が繰り返され、CPDガス消失時に残った衛星が現在の巨大衛星である、としている。このモ デルは、現在の衛星の特徴を概ね再現できるが、微衛星の成長に困難がある。すなわち、CPDに 供給されたダストは、微衛星にまで成長する前に、惑星に落下してしまう。このダスト落下問題 を回避するため、1) 外向き流でダスト落下を防ぐ、2) 層流でダスト成長効率を上げる、3) 微惑 星を捕獲する、が提案されている。1)の外向き流の起源としては、ガスの粘性と遠心力半径外の Decretion円盤である。2)の層流は、磁気円盤風により(CPD表面で)CPDの角運動量輸送が起き る一方、円盤面では乱流が抑えられるため生じる。3)では原始惑星円盤で形成された微惑星が CPDへと運ばれ捕獲される。一方で、惑星へと落下するダスト(ペブルと呼ぶ)を衛星の種が直接集 積するシナリオも提唱されている。いずれにせよ、現在は衛星形成のシナリオが乱立状態にあ り、どれが正しいか判別するには、より詳細な観測的制約が必要となる。例として、より詳細な カリストの重力場測定による内部分化の同定や、ガス集積中の惑星とCPDの連続波及び放射輝線 強度の観測などが考えられる。

3) リング

現在よりも重いリングの端から一つずつ土星の中型衛星が形成されたと考えられ、実際に簡単な 解析解で質量-距離関係を説明可能である。必要な条件としては、A) 重いリングの形成とその後の 拡散と消失、B) Roche半径での衛星形成と外側への移動、C) 土星内部の強い潮汐散逸、がある。 タイタン質量の分化した天体がロッシュ半径内に進入することで氷のリングができること、そし てタイタン軌道の現在の速い移動速度が「可変Q+共鳴固定」による大幅な軌道変化を示唆してい ることから、土星の中型衛星に対して、これらの条件は満たされていたと考えられる。 4) 捕獲

不規則衛星の特徴として、高い軌道傾斜角と多数の逆行衛星が挙げられ、これらを説明可能な 「小天体の捕獲」が不規則衛星の起源であると考えられる。木星と土星軌道周辺に小天体を多数 持ち込む必要があり、小天体を擾乱する両惑星の軌道進化と大いに関係がある。

以上、多様な衛星形成シナリオを紹介したが、さらなる理解には観測による制約が重要である。 太陽系内衛星の探査・計測、系外のガス集積惑星やCPDの観測、(将来的には)系外衛星の観測、 による衛星形成シナリオの制約が期待される。

#### 追加スライド:この講演のトピックは…

Multiple Column x Row approach for Science requirement & Mission strategy



Making borderless teams and finding/investigating seeds for future explorations!

#### ✓ 衛星形成シナリオは乱立状態



✓「創造」だけでは限界があり、
 「水」・「おひさま」、そして
 「かぜ&つち」といった「観測
 (測定)可能な現象」への影響
 を検証し、観測による制約を得ることが大切

#### 太陽系の衛星



#### 小さな衛星

- 木星:アマルテア群、不規則衛星 計~100個
- ・ 土星: 羊飼い衛星、不規則衛星
   計~150個

系外衛星:未発見



Giant impact



### 惑星のガス集積と周惑星円盤(CPD)

✓ ガス集積中の惑星周囲にできる小さな円盤を
 周惑星円盤 (Circumplanetary disk; CPD)と呼ぶ
 ✓ 木星と土星の巨大衛星はCPD内で形成

3D流体計算の例



(芝池 2024)

ガス惑星とCPD,衛星の形成の流れ

ギャップ

惑星

ダスト

原始惑星系円盤

ガス集積

(1)

(2)

中心星

### 微衛星集積シナリオ



50



### 1. 外向き流でダスト落下を防ぐ

A. 粘性により外向き流が発生
 → ダストの溜まり場ができ、
 SI不安定で微衛星に

#### 訂正:遠心力半径より外側ではDecretion円盤

- B. 惑星磁場を介して惑星の角運動量が
  - CPDに伝わり、Decretion 円盤に
  - → 円盤外側でダストが滞留し、重力不安定 で微衛星に



(Batygin & Morbidelli 2020)



#### 3. 微惑星捕獲

Surface density (g cm<sup>-2</sup>)



例:土星の成長による微惑星の擾乱

(Ronnet et al. 2018)

# ペブル集積シナリオ





✓ 捕獲された(大きな)微惑星が、CPD内を落下するペブルを集積して成長する

(Shibaike et al. 2019)

ガス・ダスト

 $\dot{M}_{\rm d}/\dot{M}_{\rm g}$ 

ガス惑星

✓ ダスト進化モデルを簡易化しCPD内のペブル分布を推定 → 微惑星のペブル集積による成長を計算 → ガリレオ衛星の特徴(質量・軌道・氷/岩石比・内部の分化/部分分化)を説明可能 (調整は必要)

### 乱立する衛星形成シナリオ



(Shibaike & Alibert 2025)

✓ それぞれに「都合の良い」CPDの仮定に基づいた、さまざまな形成シナリオが乱立 → どれが正しいか判別するには、より詳細な観測的制約が必要

### カリストの内部分化による制約

- ✓ 集積(衝突)する物体の大きさにより、形成時の衛星の内部温度進化が異なる (Monteux et al. 2014)
   → カリストの「部分分化」が、形成シナリオの制約になるかも
  - ✓ 微衛星集積シナリオ

✓ (ゆっくり)ペブル集積シナリオ





### ガス集積中の惑星とCPDの観測



(Haffet et al. 2019, Benisty et al. 2021, Bae et al. 2022, Christiaens et al. 2024, Yoshida, .., Shibaike et al. 2024)

# リングからの形成

• リングの端から一つずつ衛星が形成







(Blanc,..., Shibaike et al. accepted)

✓ 簡単な解析解で質量-距離関係を説明可能 (Qは定数)

 $q \propto \begin{cases} (\Delta/\Delta_{2:1})^{9/5} & \text{for } \Delta < \Delta_{2:1} \\ \left(\frac{\Delta+1}{\Delta_{2:1}+1}\right)^{3.9} & \text{for } \Delta > \Delta_{2:1} \end{cases}$ (1)

# リングシナリオの条件

#### ▶ 必要な条件

- A. 重いリングの形成とその後の拡散、消失
- B. Roche半径での衛星形成と外側への移動
- C. 土星内部の強い潮汐散逸
- ✓ 重いリングの形成



✓ Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)計算
 ✓ タイタン質量の分化した天体がロッシュ半径内に進入
 → 土星中型衛星の総質量の氷リングが形成

✓ 強い潮汐散逸



 ✓ 土星の潮汐がリングから衛星との作用を引き継ぐ
 ✓ タイタン軌道の現在の速い移動速度は、「可変 Q+共鳴固定」による大幅な軌道変化を示唆

#### 可能なシナリオの提案



#### 不規則衛星

✓ 不規則衛星の特徴

軌道傾斜角(度

- 高い軌道傾斜角
- 多数の逆行衛星
- →小天体の捕獲が不規則衛星の起源

✓ 木星・土星軌道にたくさんの小天体を持ってくる必要
 → 木星・土星の軌道進化にも示唆

例:ニースモデルにおける小天体の捕獲



### その他の小型衛星

✓ 木星の内側衛星(アマルテア群)



Adrastea



(Takato et al. 2004)



- Amalthea
- ✓ すばる望遠鏡による観測



- アマルテアとテーベ
   の近赤外スペクトル
   → Dタイプ小惑星と
   類似
- ・アマルテアの 3µm の 深い吸収
  - → カリスト(non-ice) と類似
  - → 含水鉱物?

✓ 土星の内側衛星



(Charnoz et al. 2010)

- ✓ 中型衛星とは異なる質量-距離関係
  - →異なる起源を示唆
  - → 現在のリングから形成した



#### ✓ 衛星の起源は大きく分けて4つ

- 1. 巨大衝突
- 2. 周惑星円盤(内)
- 3. リング
- 4. 捕獲
- ▶ 巨大惑星(木星・土星)の衛星の起源は、2,3,4
- ✓ それぞれ形成シナリオが乱立
- ✓ 観測による制約が重要!
  - 太陽系内衛星の探査・観測
  - 系外のCPD、さらには系外 衛星の観測



(Blanc, ..., Shibaike et al. accepted)



#### ✓ この講演の内容は、以下のレビュー論文/ブックチャプターをもとにしています

Blanc, …, Shibaike et al. accepted "Understanding the formation of Saturn's moons in the context of giant planet moons formation scenarios"

土星、そして巨大惑星の衛星の形成理論のレビュー 2025/3/3の arXiv 参照

#### Astrophysics > Earth and Planetary Astrophysics

[Submitted on 3 Mar 2025]

Understanding the formation of Saturn's regular moons in the context of giant planet moons formation scenarios

Michel Blanc, Aurélien Crida, Yuhito Shibaike, Sebastien Charnoz, Maryame El Moutamid, Paul Estrada, Olivier Mousis, Julien Salmon, Antoine Schneeberger, Pierre Vernazza

This article explores the different formation scenarios of the Kronian moons system in the context of a highly dissipative Saturn, with the objective of identifying the most likely of these scenarios. First, we review the diversity of objects – moons and rings – orbiting solar system giant planets, and the diversity of their architectures, which formation scenarios must reproduce. We then identify in this broader context the specific features of the Saturn system, such as the particularly large spectrum of its moon masses, the uniqueness of Titan and the presence of both dense and tenuous rings, before discussing the applicability of the different giant planet moon formation scenarios to the Saturn case. We discuss each of the most relevant scenarios and their respective merits. Finally, we tentatively propose a "favorite" scenario and we identify the key observations to validate this scenario to possibly alternative ones.

Comments: 44 pages, 13 figures, accepted for publication in Space Science Reviews, as a part of the collection "New Vision of the Saturnian System in the Context of a Highly Dissipative Saturn" presenting the results from the ISSI Workhop "New Vision of the Saturnian System in the Context of a Highly Dissipative Saturn"

Subjects: Earth and Planetary Astrophysics (astro-ph.EP) Cite as: arXiv:2503.01351 [astro-ph.EP]

(or arXiv:2503.013511 [astro-ph.EP] for this version) https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.01351

Submission history From: Yuhito Shibaike [view email] [v1] Mon, 3 Mar 2025 09:43:06 UTC (3,030 KB) Shibaike and Alibert 2025

"Origin of Ganymede and the Galilean moons".
JUICEミッションに向けた本"Ganymede"の、
ガリレオ衛星の形成理論のレビューの章を担当
2025年2月よりケンブリッジ大学出版から販売中

