

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：51201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800229

研究課題名(和文) 巨大惑星衛星系の起源：周惑星円盤への材料物質供給機構の解明

研究課題名(英文) Origin of satellite systems around giant planets: Supply of building material of satellites to circumplanetary disks

研究代表者

谷川 享行 (Tanigawa, Takayuki)

一関工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：30422554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：木星や土星のような巨大ガス惑星は、規則衛星(軌道面がそろいほぼ円軌道の衛星)を多数持つことが知られている。この衛星系の起源については、ガスを捕獲して大きく成長する段階において惑星の周りに存在していた周惑星円盤の中で成長したと考えられている。ガスの円盤が存在できることは近年の数値流体シミュレーションにより知られるようになってきている。しかし、衛星の材料である固体物質がどのように周惑星円盤へ供給されるかはよくわかっていない。そこで、周惑星円盤への衛星の材料物質である固体の供給過程について調べた。

研究成果の概要(英文)：Satellite systems around giant planets are believed to be formed in circumplanetary disks, which would exist when the giant planets are actively growing. However, there are no research on how solid material, which is building block of the satellites, is delivered to the circumplanetary disks. We thus study the physical mechanisms of how solid material is supplied to the circumplanetary disks from protoplanetary disks.

研究分野：惑星系形成理論

キーワード：衛星 周惑星円盤 巨大ガス惑星

1. 研究開始当初の背景

我々の太陽系の外惑星（木星・土星など）には、惑星の赤道面付近をほぼ円軌道で公転する衛星が多く存在する。その太陽系との幾何学的類似性から、衛星系は惑星周りに存在していた“周惑星円盤”の中で形成されたと考えられている。

これまでの衛星形成モデルは、周惑星円盤へ物質（ガス・固体）の供給率およびその分布を天り的に仮定することで周惑星円盤をモデル化し、その中で衛星形成を推定するに過ぎなかった(Canup and Ward 2002, 2006)。これら既存のモデルで仮定している物質供給率・分布の根拠は薄弱であり、言うなれば結果を現実と整合させるために仮定を調整したという状態である。

しかし近年、大規模数値流体計算によって原始惑星系円盤中における周惑星円盤構造が明らかになってきた(Tanigawa et al. 2012)。これにより、原始太陽系円盤中での惑星系形成過程という全体的なシナリオの中で、周惑星円盤構造が必然的に得られる、という描像が示された。

一方で、衛星形成を調べる上で衛星材料物質である固体の供給プロセスは必須であるが、まだ試みられていない。申請者は、微惑星など小天体の原始惑星への衝突率に関する軌道計算(Tanigawa and Ohtsuki 2010)も行っており、これを周惑星円盤にも応用し、流体計算と融合発展させ、衛星形成過程の解明を試みようという考えに至った。

加えて、2012年にESA(欧州宇宙機関)により木星氷衛星探査機JUICEが選定(2022年打ち上げ予定)されたことにより、本計画のような衛星系の基礎的研究の重要性は高まってくる状況にあると言える。

2. 研究の目的

本研究における目的は、衛星系形成の母体であり、かつ巨大惑星形成段階において原始惑星系円盤からの物質輸送経路でもある“周惑星円盤”への物質供給機構を解明し、衛星系形成過程の基礎を確立することである。具体的には、原始惑星系円盤から周惑星円盤への質量供給率、およびその時間進化を決定する。これらは衛星系形成過程を決定づける基礎的知見であるにもかかわらず、そこをなおざりのまま研究が行われているのが現状である。本研究により天り的な仮定無しで、衛星のサイズ、数、位置、および衛星集積履歴などを求めることが初めて可能となる。

3. 研究の方法

本研究計画では、ギャップ構造（原始惑星系円盤中の惑星軌道上に形成される低ガス密度領域）に着目する。惑星の成長に伴ってギャップ構造が発達することより、惑星軌道上のガス密度が低下し、惑星の成長率が鈍る。衛星形成の母体である周惑星円盤は、原始惑

星系円盤から惑星へ至る物質輸送経路となっているため、ガス惑星の成長率の時間進化を理解することによって、衛星系形成環境としての周惑星円盤の時間進化を理解するための基礎となる。そこで、原始惑星系円盤中でその円盤ガスを捕獲しながら成長するガス惑星の長期的進化を調べる。本研究計画開始以降に発表されたいくつかの論文(e.g., Kanagawa et al. 2015)によりと、ギャップ構造は以前考えられていたほど深くは発達しないことが明らかになってきた。それらの研究により得られた知見、特にギャップの深さ（面密度の低下の度合い）を表す表式を利用し、原始惑星系円盤の長期的進化を調べる。以前の申請者による研究(Tanigawa & Ikoma 2007)をベースとして、ギャップ深さに関する表式を組み込み、原始惑星系円盤全体の長期的進化を考慮しつつ、ガス惑星の成長及び周惑星円盤への質量供給率の長期的進化を求める。

4. 研究成果

近年提案されたギャップの深さに関する表式を組み込んでガス惑星の成長進化を調べた結果、ガス惑星は従来考えられていたよりもギャップの発達による成長抑制効果が効かず活発な成長が継続し、大きく成長してしまうことが明らかになった(図1)。例えば、広く使われてきた原始惑星系標準円盤モデルを使ってガス惑星の成長を調べると、木星の位置では10倍の木星質量程度まで成長してしまうことが明らかになった。これは、これまで太陽系形成の初期状態が分かっているために仮定されてきた標準円盤モデルが、そもそも異なっていることを示している。衛星系の形成はガス惑星形成に付随するプロセスであるため、ガス惑星の形成過程の長期的進化についてより詳細に調べた。

その結果から、太陽系を再現しうる原始惑星系円盤モデルを新たに提案した。具体的には、

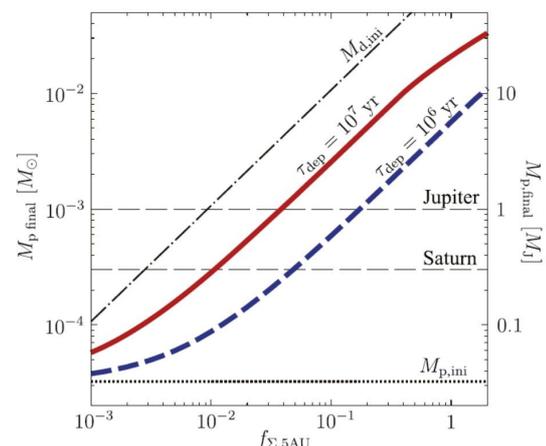


図1 横軸は原始惑星系円盤の規格化初期面密度、縦軸はガス惑星が成長の結果到達する最終的な質量

木星の位置(太陽から 5AU の距離)において、惑星質量を木星質量程度にとどめるためには、その領域でのガス円盤面密度が低く抑えられている必要がある。その一方で、円盤全体の質量が小さいと、それに比例して原始惑星系円盤中に含まれる重元素(固体成分)も小さくなるため、固体惑星及びガス惑星のコアの質量が現在の太陽系と矛盾する。太陽系においてガス惑星の質量と固体惑星の質量の両方を満たしうるシナリオを、本研究による計算結果から提案する。まず、初期初期状態として 10AU 程度のサイズで太陽組成の初期円盤が存在するとする。円盤がコンパクトなためガス密度は高いため、固体成分は速やかに微惑星へと成長し、運動がガスから分離する。ガスは粘性進化により大部分が太陽に降着するため、固体の質量は円盤中に維持したままガス密度が低下する。そのまま微惑星が大きく成長することで、固体はガス惑星の固体コアサイズ(約 10 地球質量)まで成長し、ガス捕獲を開始する。この時点では円盤ガス質量が低下しているため、ガス惑星としては木星質量程度に抑えることが可能となる。本研究により明らかになった木星の成長履歴をもとに、衛星系形成環境としての周惑星円盤の進化を調べることで、今後衛星系形成過程がより明らかになることが期待できる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

Kanagawa, K. D.; Tanaka, H.; Muto, T.; Tanigawa, T.; Takeuchi, T.、Formation of a disc gap induced by a planet: effect of the deviation from Keplerian disc rotation、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有、Vol. 448, 2015, pp.994-1006, DOI:10.1093/mnras/stv025

Kanagawa, Kazuhiro D.; Muto, Takayuki; Tanaka, Hidekazu; Tanigawa, Takayuki; Takeuchi, Taku; Tsukagoshi, Takashi; Momose, Munetake, Mass Estimates of a Giant Planet in a Protoplanetary Disk from the Gap Structures, The Astrophysical Journal Letters, 査読有、Vol.806, 2015, id. 15, 6pp, DOI: 10.1088/2041-8205/806/1/L15

Tanigawa, Takayuki; Tanaka, Hidekazu, Final Masses of Giant Planets. II. Jupiter Formation in a Gas-depleted Disk, The Astrophysical Journal, 査読有、Vol.823, 2016, id.48, 14pp, DOI: 10.3847/0004-637X/823/1/48

Kanagawa, Kazuhiro D.; Muto, Takayuki; Tanaka, Hidekazu; Tanigawa, Takayuki; Takeuchi, Taku; Tsukagoshi, Takashi; Momose, Munetake, Mass constraint for a planet in a protoplanetary disk from the gap width, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、Vol. 88, 2016, id. 43, 7pp, DOI: 10.1093/pasj/psw037

Uyama, Taichi; Tanigawa, Takayuki; Hashimoto, Jun; Tamura, Motohide; Aoyama, Yuhiko; Brandt, Timothy D.; Ishizuka, Masato, Constraining Accretion Signatures of Exoplanets in the TW Hya Transitional Disk, The Astronomical Journal, 査読有、Vol. 154, 2017, id. 90, 6pp, DOI: 10.3847/1538-3881/aa816a

Kanagawa, Kazuhiro D.; Tanaka, Hidekazu; Muto, Takayuki; Tanigawa, Takayuki, Modelling of deep gaps created by giant planets in protoplanetary disks, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、Vol. 69, 2017, id. 97, 18pp, DOI: 10.1093/pasj/psx114

Kadono, Toshihiko; Tanigawa, Takayuki; Kurosawa, Kosuke; Okamoto, Takaya; Matsui, Takafumi; Mizutani, Hitoshi, Correlation between fragment shape and mass distributions in impact disruption, Icarus, 査読有、Vol. 309, 2018, pp.260-264, DOI: 10.1016/j.icarus.2018.03.014

Kurokawa, Hiroyuki; Tanigawa, Takayuki, Suppression of atmospheric recycling of planets embedded in a protoplanetary disc by buoyancy barrier, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有、Vol, TBD, 2018, DOI: 10.1093/mnras/sty1498

[学会発表](計 4 件)

Tanigawa, Takayuki; Tanaka, Hidekazu, Final Masses of Giant Planets II: Jupiter Formation in a Gas-Depleted Disk, American Astronomical Society, ESS meeting #3, 2015

谷川 享行、巨大惑星周りにおける衛星系形成、天体力学N天体力学研究会 2016、

2016 (招待講演)

谷川 享行、巨大惑星周りの衛星系形成、
第 46 回天文・天体物理若手夏の学校、
2016 (招待講演)

Tanigawa, T.; Tanaka, H., A possible
scenario of the formation of our solar
system in a gas depleted disk,
European Planetary Science Congress
2017, 2017

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷川 享行 (TANIGAWA, Takayuki)

一関工業高等専門学校・未来創造工学科・

准教授

研究者番号：30422554