

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740326

研究課題名(和文) 巨大惑星周りの衛星系の起源：周惑星円盤構造の決定

研究課題名(英文) Origin of Satellite Systems around Giant Planets: Structure of Circumplanetary Disks

研究代表者

谷川 享行 (Tanigawa, Takayuki)

北海道大学・低温科学研究所・特任助教

研究者番号：30422554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円、(間接経費) 510,000円

研究成果の概要(和文)：ガリレオ衛星などの巨大ガス惑星周りの衛星系は、ガス惑星形成時に大量にガスを捕獲する過程において、惑星の周りに存在したと考えられている”周惑星円盤”の中で形成したと考えられている。本研究では衛星系の形成過程を理解するために、高精度数値流体計算や軌道計算を用いて、原始惑星系円盤からの周惑星円盤へのガス降着流、周惑星円盤の構造、および、原始惑星系円盤中からの固体物質の供給を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Natural satellite systems around giant planets, such as Galilean moons, are thought to be formed in circumplanetary disks, which are believed to have existed when the giant planets were actively growing by capturing gas of protoplanetary disks. In order to understand the formation processes of satellite systems, I performed high-resolution hydrodynamic simulation and orbital numerical simulation, and obtained the structure of circumplanetary disks in detail and how solid particles, which are the building materials of the satellites, are delivered to the circumplanetary disks.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星の起源・進化 衛星形成

## 1. 研究開始当初の背景

我々の太陽系において、木星・土星などの外惑星は、惑星の赤道面付近をほぼ円軌道で公転する多数の衛星が存在する。これらはその見た目の類似性から「ミニ太陽系」と喩えられることがあるように、その形成理論においても、従来はその太陽系形成理論と同様の議論がなされてきた。

従来の衛星形成過程は、復元円盤モデル、すなわち現在の衛星系を再現するのに十分な質量をもつ円盤の存在を仮定して研究が行われてきた(e.g., Stevenson et al. 1986)。しかし、その仮定の下では様々な困難(高い空間密度による円盤の高温化及び主要な材料物質 H<sub>2</sub>O の気化、高密度のガスと形成された衛星との相互作用による惑星への落下、速い集積時間による内部の高温化とカリストの未分化の矛盾)が生じることが明らかになってきた。

一方、ガス惑星へのガス降着流に関する数値流体力学的研究(e.g., Tanigawa and Watanabe 2002; D'Angelo et al. 2002; Machida 2008)によると、周惑星円盤は原始惑星系円盤から惑星本体へ物質を運ぶ中間経路として存在しており、周惑星円盤には絶えず物質が供給されていることが明らかにされた。その結果を受け、復元円盤モデルのように衛星系全体を形成するに足る質量を周惑星円盤は最初から保持している必要はなく、周惑星円盤へ常に物質供給がある状況下で徐々に衛星集積が進む、と考えられるようになってきた(Canup and Ward 2002, 2006)。

このように、衛星形成の母体である周惑星円盤のガス構造が明らかになりつつあるなかで、衛星の材料となる固体物質が、原始惑星系円盤から周惑星円盤中へどのように供給され、周惑星円盤内でどのように分布するかについての研究は行われていない。この状況下で、申請者は惑星周りのガス流の流体計算(Tanigawa and Watanabe 2002)、原始惑星大気のガス抵抗を考慮した微惑星の惑星への衝突率に関する軌道計算(Tanigawa and Ohtsuki 2010)を行っており、これらの手法を融合発展させ衛星形成過程の解明に適用する、という着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究における目的は、ガス惑星形成時に惑星周囲に存在し衛星系形成の母体となったと考えられている“周惑星円盤”の構造を明らかにし、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、主にガスからなる周惑星円盤に、衛星材料物質である固体成分がどのように供給され、円盤内でどのように分

布するのかを決定する。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。本研究により衛星のサイズ、数、位置、集積時間および集積加熱に伴う衛星内部進化過程などへの予測が可能となる。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず数値流体シミュレーションにより周惑星円盤ガスの構造を明らかにする。その後、得られたガスの速度・密度場に基づいて原始惑星系円盤の中を運動している粒子が周惑星円盤へ捕らえら得る様子を粒子シミュレーションにより求める。

本研究では、原始惑星系円盤という太陽周りの大きな円盤の中で、空間スケール比でおよそ 1/1000 という小さな円盤(周惑星円盤)に粒子が捕獲・降着する様子を調べる必要がある。このように、高い空間解像度が必要な問題では数値計算量が莫大になるため、必要とする精度を得ることは難しい。そこで本研究では、多重格子法および局所近似回転座標系(惑星近傍の太陽重力場を線形近似して表現する手法)を用いることで、太陽重力場中を回転しているという本質は押さえつつ計算量を大幅に減少させることができ、実効的な解像度が劇的に向上する。今回、多重格子は11段用いた。

粒子軌道計算には、衝撃波を通過した直後などに起こる急激なガス抵抗の変化にも対応できるように、Runge-Kutta-Fehlberg法を用いたステップ幅の調整を行い求めた。

## 4. 研究成果

まず周惑星円盤ガスの構造について数値流体シミュレーション結果(図1)を解析した結果、惑星への実質的なガス降着は、原始惑星系円盤の比較的上空(円盤スケールハイト程度より上)から周惑星円盤外縁部を飛び越えて一気に惑星近傍の周惑星円盤へと落下していることが明らかになった。一方、中心面付近のガスについては、原始惑星系円盤から周惑星円盤へ流入することができず、逆にヒル圏内からラグランジュポイント付近から流出していることが分かった。さらに、上空から周惑星円盤への降着流に関して、質量と角運動量の降着フラックス分布を惑星からの距離の関数として数値計算より求め、それらをべき関数でのフィットを行った。これを、例えば動径方向1次元粘性円盤モデルに適用することで、本研究のような高解像度数値計算では得ることのできない周惑星円盤の長期進化を追うことが可能となり、衛星形成環境の時間進化を調べることが可能となる。

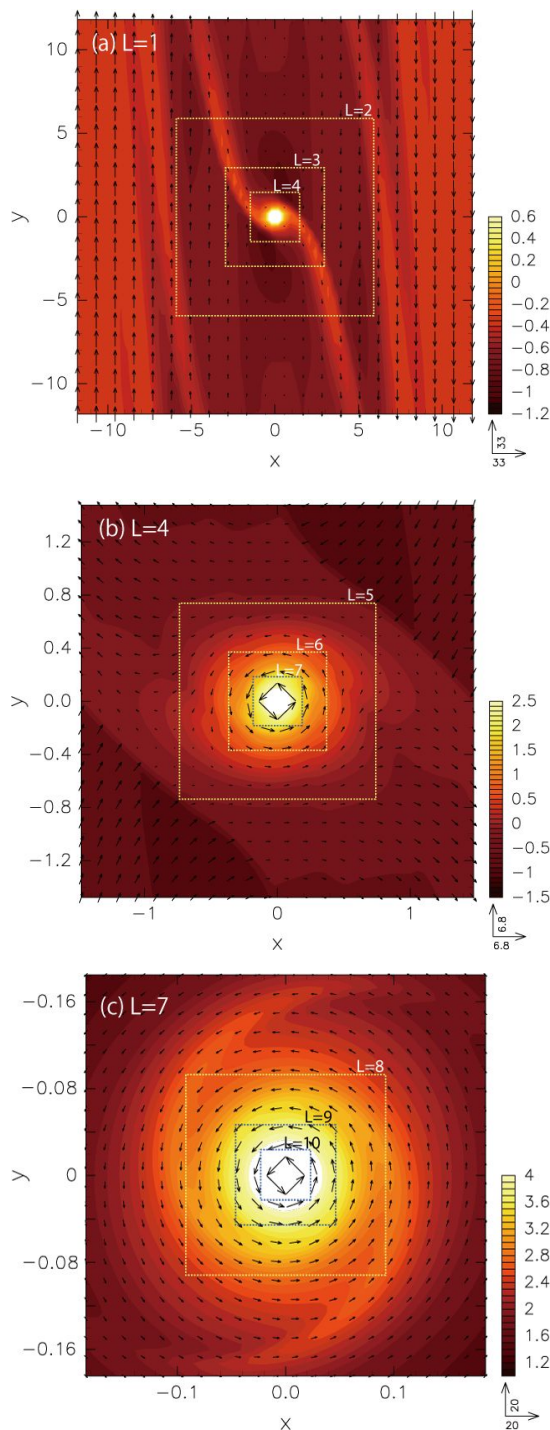


図 1：多重格子法を用いた高解像度数値流体シミュレーションにより得られた周惑星円盤ガスの密度・速度場。色は規格化した中心面密度の対数。L は多重格子の段数を表し、L が1つ大きくなると計算領域が半分になり解像度が倍になる。

次に、粒子軌道計算による結果（図 2）を解析したところ、典型的な原始惑星系円盤モデルで、惑星が 5AU にある場合、10m サイズの天体が最も降着効率が高い事が分かった。定性的には 10m を境にサイズ小さくなるにつれ

て天体はガスとよくカップルして周惑星円盤への降着が妨げられ、サイズが大きくなるにつれてガス抵抗の効果が弱まり捕獲効率が下がる。1cm 以下のサイズのダストは、ガスの流れに強く影響を受けるため、周惑星円盤へは降着できないことも分かった。また、固体のサイズが大きくなるにつれて、周惑星円盤中に捕獲される位置が惑星に近づくことが分かった。

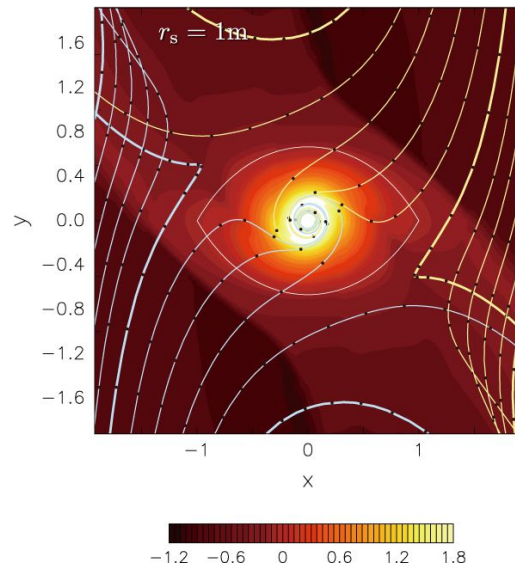


図 2：原始惑星系円盤中を運動する粒子が周惑星円盤へ降着する様子。黄色と青の線が粒子の軌道。軌道状の黒点は等時間間隔を表す。色はガス密度の対数。

## 5 . 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 6 件）

- (1) Tanigawa, Takayuki; Maruta, Akito; Machida, Masahiro N., Accretion of Solid Materials onto Circumplanetary Disks from Protoplanetary Disks, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 784, Issue 2, 2014, article id. 109, 13 pp., DOI: 10.1088/0004-637X/784/2/109
- (2) Fujii, Yuri I.; Okuzumi, Satoshi; Tanigawa, Takayuki; Inutsuka, Shu-ichiro, On the Viability of the Magnetorotational Instability in Circumplanetary Disks, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 785, Issue 2, 2014, article id. 101, 8 pp., DOI: 10.1088/0004-637X/785/2/101
- (3) Morbidelli, A.; Szulágyi, J.; Crida, A.; Lega, E.; Bitsch, B.; Tanigawa, T.; Kanagawa, K., Meridional circulation of gas into gaps opened by giant planets in

three-dimensional low-viscosity disks, Icarus, 査読有, Volume 232, 2014, 266-270,

DOI:10.1016/j.icarus.2014.01.010

- (4) Fujita, Tetsuya; Ohtsuki, Keiji; Tanigawa, Takayuki; Suetsugu, Ryo, Capture of Planetesimals by Gas Drag from Circumplanetary Disks, The Astronomical Journal, 査読有, Volume 146, Issue 6, 2013, article id. 140, 13 pp., DOI: 10.1088/0004-6256/146/6/140
- (5) Tanigawa, Takayuki; Ohtsuki, Keiji; Machida, Masahiro N., Distribution of Accreting Gas and Angular Momentum onto Circumplanetary Disks, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 747, Issue 1, 2012, article id. 47, 16 pp., DOI: 10.1088/0004-637X/747/1/47
- (6) Suetsugu, Ryo; Ohtsuki, Keiji; Tanigawa, Takayuki, Temporary Capture of Planetesimals by a Planet from Their Heliocentric Orbits, The Astronomical Journal, 査読有, Volume 142, Issue 6, 2011, article id. 200, 11 pp., DOI: 10.1088/0004-6256/142/6/200

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) Tanigawa, T., Maruta, A., and Machida, M. N., Structure of Circum-Planetary Disks embedded in Protoplanetary Disks, Exoplanets and Disks II, H25.12.8-12, Hawaii
- (2) 谷川享行、丸田有希人、町田正博、周惑星円盤中の固体分布、日本惑星科学会 2013 年秋季講演会、H25.11.20-22、石垣市
- (3) Tanigawa, T., Maruta, A., and Machida, M. N., ACCRETION OF SOLID PARTICLES ONTO CIRCUM-PLANETARY DISKS, Protostars and Planets VI, H25.7.15-20, Heidelberg
- (4) Fujii, Y., Okuzumi, S., Tanigawa, T., and Inutsuka, S., EXPOSING THE LONG LIVES OF SATELLITE FORMING DISKS, Protostars and Planets VI, H25.7.15-20, Heidelberg
- (5) 谷川享行、丸田有希人、町田正博, Formation Processes of Regular Satellites around Giant Planets, 地球惑星科学連合 2013 年大会, H25.5.19-24, 千葉市
- (6) 谷川享行、小林浩、町田正博、田中秀和、大槻圭史、原始惑星系円盤中における固体原始惑星へのダスト・微惑星降着、日本天文学会 2013 年春季年会, H25.3.20-23, 埼玉
- (7) 谷川享行、大槻圭史、町田正博, 原始惑星系円盤から周惑星円盤へのガス降着流: ギャップの効果, Japan Geoscience

Union Meeting 2012, H24.5.20-25, 千葉市

- (8) 谷川享行、小林浩、町田正博、原始惑星系円盤中における固体原始惑星へのダスト降着流、日本惑星科学会 2012 年秋季講演会、H24.10.24-26, 神戸
- (9) 谷川享行、大槻圭史、町田正博、原始惑星系円盤の形成: 原始惑星系円盤からのガス降着流の解析、日本惑星科学会 2011 年秋季講演会、H23.10.23-25, 相模原
- (10) Tanigawa Takayuki, Ohtsuki Keiji, Machida Masahiro, Gas Accretion Flow onto Circum-Planetary Disks and the Disk structure, Asia Oceania Geosciences Society Meeting 2011, H23.8.8-12, Taipei
- (11) Tanigawa Takayuki, Ohtsuki Keiji, Machida Masahiro, Gas Accretion Flow onto Circum-Planetary Disks and the Disk structure, Japan Geoscience Union Meeting 2011, H23.5.22-27, 千葉市

〔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)  
北海道大学・低温科学研究所・特任助教  
研究者番号: 30422554
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし