

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：34305

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K14378

研究課題名（和文）大規模シミュレーションによる小惑星カリクロのリング構造の研究

研究課題名（英文）N-Body simulation of ring structures of centaur Chariklo

研究代表者

道越 秀吾（Michikoshi, Shugo）

京都女子大学・データサイエンス学部・准教授

研究者番号：60572229

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：ケンタウロス族カリクロの周囲に二重のリング構造の存在が発見された。小天体で確認された初めてのリング構造である。本研究の目的は、大規模数値シミュレーションによって小惑星周囲のリングの詳細な構造や形成過程、リングがなぜ維持されるのかそのメカニズムを解明することである。本研究では、大規模N体シミュレーションを行なった。その結果、土星の環に存在すると考えられる自己重力ウェイク構造と同等の複雑で動的な微細構造が生じることがわかった。この構造の存在は、系の進化過程などを特徴づけるため重要である。これらとシミュレーションと観測との比較から系の状態に関する予測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、リング系の研究としては初めて実スケールを考慮した大域的N体シミュレーションを行った。土星のリングの研究は数多くあるが、実スケール大域的N体シミュレーションは行われていなかった。シミュレーションと観測の比較により種々の予測を行った。これらは将来の観測で検証される可能性がある。また、今回検討した細いリング、いわゆるリングレット状の構造においても、自己重力ウェイク構造が発生することがシミュレーションで確認された。土星の環においても、カッシーニの間隙などに同様のリングレットが存在しており、それらにも自己重力ウェイク構造が発生していることを示唆しており、今後の研究の発展につながる。

研究成果の概要（英文）：A double ring structure was discovered around the centaur Chariklo. This is the first ring structure that has been confirmed on an asteroid. The purpose of this study is to elucidate the detailed structure and formation process of the ring around the asteroid by global N body simulations. The results show that a complex and dynamic microstructure called the self-gravity wake that appears to exist in Saturn's rings arises. The existence of this structure is important because it characterizes the evolution time scale of the system. The comparison of these results with simulations and observations led to predictions about the state of the system.

研究分野：惑星科学

キーワード：太陽系 小惑星 リング シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

2014年に土星と天王星の間の軌道を周回するケンタウロス族の小惑星 Chariklo の周囲に、リング構造の存在が確認された(Braga-Ribas et al. 2014)。惑星以外で確認された初めてのリング構造であった。リングの背景を通過する恒星の減光を見る掩蔽観測による発見であるため、撮像はされていないが、ギャップで隔てられた2本のリング構造が存在していると考えられている。また減光度から推定されるリングの面密度は土星や天王星のリングに匹敵するほど高い。その後、小惑星 Chiron や小惑星 Quaoar の周囲にもリングが存在する可能性が指摘されており、小惑星リングの構造や形成過程、物理機構を理解することは重要である(Ortiz et al. 2015)。

Chariklo のリングはわずかに楕円構造となっている可能性があり、それを手掛かりにリングの構造に対する制限が解析的に見積もられた(Pan and Wu 2016)。また、数値シミュレーションを元に形成モデルの考察が行われている(Araujo et al. 2016, Hyodo et al. 2016)。しかし、リングの詳細な構造についての検討は行われていなかった。

2. 研究の目的

土星のリング構造の研究は、これまで数多く行われている。それらの理論を Chariklo のリングに適用すると、重力不安定が発生することが予想される(Pan and Wu 2016)。土星のリングでは重力不安定が発生して局所的な構造の乱れが生じて、リング全体は破壊されず形状が維持される(Salo et al. 1995)。しかし、Chariklo のような細かいリングにおいて重力不安定が発生したときにどうなるかわかっていない。したがって、Chariklo のリングにおいて、重力不安定が働くかどうか、またその場合、全体的な形状が維持されるかを調べる必要がある。

系の年齢は形成過程を考える上で基本的で重要な情報の1つである。リングは粒子間の衝突等によって次第に拡散し密度が薄くなっていくため、拡散時間を考えると年齢の目安を与えられる。単純な見積もりによると拡散時間は、Chariklo 自身の力学的年齢よりも短いことが予想されている(Pan and Wu 2016)。しかし、この見積もりでは、上記の重力不安定性が考慮されていない。これを考慮すると見積もりが大きく変わる可能性がある。また、形成過程によってはリング近傍にまだ未発見の衛星が存在する可能性もある。リング近傍の衛星はリングの拡散時間に影響を与えうる。この効果も先行研究では詳しく検討されていない。これらを考慮した、正確なリングの拡散時間を求める必要がある。

以上の問題点を踏まえて、次の4点を明らかにすることを本研究の目的とした。

(1) 重力不安定による微細構造の発生

土星のリングでは重力不安定に起因する微細構造の存在が知られている。しかし、これまでの研究では Chariklo において同様の微細構造が存在する可能性の検討は行われていない。本研究では数値シミュレーションにより、Chariklo に土星と同様の微細構造が形成されているか明らかにする。

(2) リング物質の物理的性質

重力不安定は、微細構造の形成とともに、リングの分裂による衛星形成を引き起こす可能性がある。土星のリングの研究によると、リングが分裂するかどうかは、粒子サイズや密度、速度分散といったリング物質の性質に依存していると考えられている。しかし、現状では観測的にはリング物質やその性質には全く制限がついていない。そこで数値シミュレーションによりリング分裂しない条件を考えることにより、物質の物理的性質に制限をつける。リング物質の性質は形成過程を考える重要な情報となる。

(3) リングの拡散時間

先行研究では、一様で構造の無いリングを仮定していたが(Pan and Wu 2016)、重力不安定による微細構造が存在する場合は、リングの寿命の見積もりに大きな影響を与える。微細構造が存在していることが明らかとなった場合は、それを考慮した新しい寿命の見積もりを行う。また、土星リングのギャップ内には衛星が存在することから、二重リングを隔てるギャップにも衛星が存在している可能性がある。そこでリング近傍に未発見の衛星が存在する場合の構造や、拡散過程を考察する。

(4) リング形成モデルの構築

これらの研究により、リング構成物質の物理状態、リングの拡散時間、近傍の衛星の性質などが明らかとなる。これらはリングの形成過程に密接に関係していると考えられる。これらを整合的に説明する形成モデルの構築を試みる。

3. 研究の方法

まず、リングの大規模N体シミュレーションを進めるためのコードを開発する。GPUやスーパーコンピュータなどで粒子系シミュレーションコードを効率的に開発するためのライブラリであるFDPSを用いた(Iwasawa et al. 2016)。

従来の土星のリングの研究などでは、ローカル計算が用いられてきた。これはリング全体ではなく一部を抜き出してせん断周期境界条件を課して計算することで計算速度を向上させる手法である。しかし、ローカル計算は局所的な詳細構造の解析には適するものの、リング全体に及ぶ大きな構造が現れる場合は、正しく計算できない。Charikloのリングの場合は、現れる構造の相対的な大きさが小さくない可能性があるため局所計算の妥当性は自明でない。また、本研究の目的の一つであるリングと衛星の相互作用はローカル計算では適切に取り扱うことができない。

そのため、本研究ではリング全体を計算対象とするグローバル計算を行う。土星のリングの研究では、グローバル計算を行うのに必要な粒子数が非常に多いため、実スケールのグローバル計算はこれまで行われていなかった。Charikloのリングの場合、土星に比べて系の大きさが比較的小さいためGPUや並列計算機を使えばグローバル計算が可能であると見積もられる。

掩蔽観測により、リングの光学的厚さ、幅、直径などが分かっている。しかし、リングを構成する粒子のサイズや密度には全く制限がつかない。土星のリングの研究により、粒子の物理的性質は、リング全体の力学的性質に大きな影響を与えることが予想される。そこで、様々なリング粒子の性質の場合で数値シミュレーションを行い、重力不安定が発生し微細構造が形成されるかどのようなパラメータで長期的にリング構造を維持できるかを調べる。

4. 研究成果

(1) リング用のグローバルシミュレーションコードの開発

本研究を遂行するためのリング用大規模シミュレーションコードを完成させた。粒子間の相互重力と非弾性衝突を考慮したシミュレーションを行うことができる。粒子衝突について、跳ね返り時の運動量変化を接触による反発力によって表現するSoft sphereモデルを採用した。また、シミュレーションコードの機能としては、非弾性衝突をオフとすることで、リング以外の研究にも展開できるような柔軟性の高いコードを開発した。

(2) グローバルシミュレーションにおける自己重力ウェイク構造の発生の確認

観測的に推定されている情報からシミュレーションパラメータを設定して、シミュレーションを行った結果、広範なパラメータ領域において、自己重力ウェイク構造が発生することが、大規模数値シミュレーションにおいて確認された(図1右)。これらは、シミュレーション内での時間スケール、すなわちリングが数10公転周期する程度の時間は維持された。形状の特徴から土星のリングにおいて存在すると考えられる、自己重力ウェイク構造と同様のものである。よって、リングレットのような細い構造においても、自己重力ウェイク構造が発生することが確かめられた。重力不安定が発生してかつ後述する粒子密度条件を満たす場合は常に自己重力ウェイク構造が発生した。

(3) リングを構成する粒子の密度に関する推定

リングの構造の定性的な性質は、中心天体すなわち小惑星Charikloと、リングを構成する粒子の物質密度の比で決まることがシミュレーションで確かめられた(図1左)。もし、中心天体とリング粒子の物質密度が同一であった場合は、リングは、数公転周期以内の時間で速やかに分裂して、その形状が維持されない。それは、リングがロッシュ限界を超えた場所になってしまい、潮汐力よりも自己重力の効果が強くなりリング構造を維持できず分裂して衛星になるためである。リングが長時間維持されるためには、リング粒子の密度が中心天体の半分より小さい必要があることがわかった。これはリング粒子が中心天体よりも軽い物質であることを意味する。

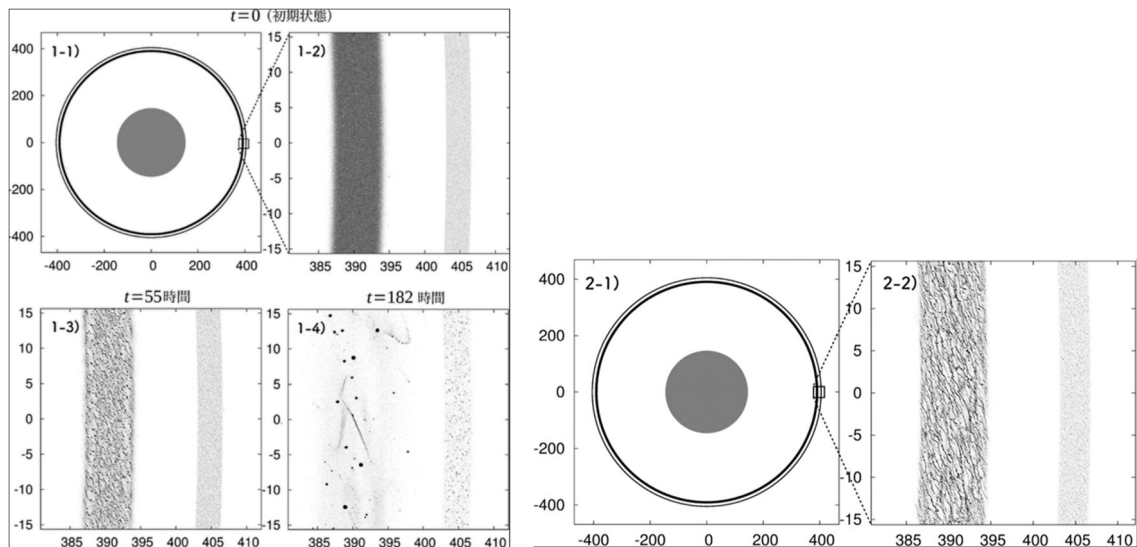


図 1 左図が Chariklo とリング粒子の密度が一致する場合のシミュレーションである。右図が Chariklo に比べてリング粒子の密度が 50%低い場合のシミュレーションとなる。

(4) リングを構成する粒子のサイズに関する推定

粒子サイズは面密度や粘性係数などリングに関する情報に関わるため重要である。リングを構成する粒子サイズが、構造のスケールに寄与することが数値シミュレーションからわかった。自己重力ウェイク構造では、図に示すように、粒子が密集した領域との間に粒子が少ない空隙領域が形成される。この空隙のサイズは、粒子サイズが大きくなるほど大きくなる。掩蔽観測においては、その観測精度が十分であれば、空隙は光学的厚みの時間変動として現れるはずである。ところが、観測では変動はなく滑らかな時間推移が観測されている。したがって、観測では検出できないほど、空隙が小さいと考えられる。観測精度から逆算すると粒子サイズは最大でも 13.7m 以下であると見積もられた。また Pan & Wu (2016) による Apse alignment についての理論研究から導かれた面密度推定値を合わせると、粒子サイズは 3.8m 以上であると推定される。以上のように、粒子サイズに関する推定値の下限と上限の制限が与えられた。

(5) リングの寿命に関する推定と未発見の衛星の推定

従来研究では、形成過程に関する理論から形成から数百万年は経過していると推定されている (Braga-Ribas et al. 2014, Pan and Wu 2016)。今回の研究では、自己重力ウェイク構造が発生することが明らかとなった。自己重力ウェイク構造はその空間構造からトルクを生じ角運動量輸送が発生し、リングの物質拡散を引き起こす。つまり、高い密度は長時間維持できずに速やかに密度は低下する。その時間を見積もるとおよそ 113 年となった。

そこで、近傍に衛星が存在する可能性を議論した。衛星とのリンドブラッド共鳴によって、角運動量輸送が発生する (Goldreich and Tremaine 1982)。これによってリングが長時間維持できる可能性があることがわかった。

(6) シミュレーションから得られた Chariklo・リング系の状態や形成過程の推定

これらの結果より、リングを構成する粒子は本体より低密度の物質でできている可能性がある。リングの起源として、元は Chariklo の中心部分が岩石質などの密度の高い物質でできており、表層に氷などのやや低密度の物質で覆われていたが、衝突などによって表面が剥ぎ取られて、それがリングになったという仮説があるが、今回のシミュレーション結果と整合的である (Hyodo et al. 2016)。

(7) 衛星リング相互作用による密度波発生シミュレーションの実施

リングと衛星の相互作用によって角運動量輸送が生じるとは予想されるが、確かめられてはいなかった。本研究では、自己重力を考慮したリンドブラッド共鳴の数値シミュレーションを実施し密度波が形成されることを確認した。

- (1) Araujo, R. A. N., Sfair, R., & Winter, O. C. (2016). The rings of Chariklo under close encounters with the giant planets. *The Astrophysical Journal*, 824(2), 80.
- (2) Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., Snodgrass, C., Roques, F., Vieira-Martins, R., ... & Lambas, D. G. (2014). A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature*, 508(7494), 72-75.
- (3) Goldreich, P., & Tremaine, S. (1982). The dynamics of planetary rings. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 20(1), 249-283.
- (4) Hyodo, R., Charnoz, S., Genda, H., & Ohtsuki, K. (2016). FORMATION OF CENTAURS ' RINGS THROUGH THEIR PARTIAL TIDAL DISRUPTION DURING PLANETARY ENCOUNTERS. *The Astrophysical Journal Letters*, 828(1), L8
- (5) Iwasawa, M., Tanikawa, A., Hosono, N., Nitadori, K., Muranushi, T., & Makino, J. (2016). Implementation and performance of FDPS: a framework for developing parallel particle simulation codes. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68(4), 54.
- (6) Michikoshi, S., Fujii, A., Kokubo, E., & Salo, H. (2015). Dynamics of Self-gravity Wakes in Dense Planetary Rings. I. Pitch Angle. *The Astrophysical Journal*, 812(2), 151.
- (7) Michikoshi, S., & Kokubo, E. (2017). Simulating the smallest ring world of Chariklo. *The Astrophysical Journal Letters*, 837(1), L13.
- (8) Ortiz, J. L., Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., Alvarez-Candal, A., Santos-Sanz, P., Morales, N., ... & Thirouin, A. (2015). Possible ring material around centaur (2060) Chiron. *Astronomy & Astrophysics*, 576, A18.
- (9) Pan, M., & Wu, Y. (2016). On the mass and origin of Chariklo's rings. *The Astrophysical Journal*, 821(1), 18
- (10) Salo, H. (1995). Simulations of dense planetary rings: III. Self-gravitating identical particles. *Icarus*, 117(2), 287-312.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Michikoshi, Shugo; Kokubo, Eiichiro	4. 巻 481
2. 論文標題 Global N-body simulation of galactic spiral arms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 185-193
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/sty2274	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Michikoshi, S., Kokubo, E.	4. 巻 842
2. 論文標題 Dynamics of Porous Dust Aggregates and Gravitational Instability of Their Disk	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 61-61
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aa7388	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tatsuma, M., Michikoshi, S., Kokubo, E.	4. 巻 855
2. 論文標題 Gravitational Instability of a Dust Layer Composed of Porous Silicate Dust Aggregates in a Protoplanetary Disk	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 57-57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aaaccf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Michikoshi, S., Kokubo, E.	4. 巻 897
2. 論文標題 Coherent Stellar Motion in Galactic Spiral Arms by Swing Amplification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 65-73
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab9369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 道越 秀吾、小久保 英一郎	4. 巻 31
2. 論文標題 低密度ダストからなるダスト層の重力不安定と微惑星形成	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌遊星人	6. 最初と最後の頁 124-130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14909/yuseijin.31.2_124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Michikoshi, S., Kokubo, E.	4. 巻 837
2. 論文標題 Simulating the smallest ring world of Chariklo	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 13-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa6256	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 道越秀吾
2. 発表標題 N-Body Simulation of Chariklo Rings
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 道越秀吾, 小久保英一郎
2. 発表標題 乱流中の多孔質ダストの運動とダスト層の重力不安
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 道越秀吾
2. 発表標題 ダスト・ガス相互作用による流体不安定と微惑星形成
3. 学会等名 宇宙生命計算科学連携拠点第3回ワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 道越秀吾
2. 発表標題 惑星の環の重力多体シミュレーション
3. 学会等名 粉体力学研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関