

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11334

研究課題名(和文) 計算機の中の惑星探査：計算機の中の惑星リングの実現にむけて

研究課題名(英文) Planetary Exploration in the Computer: Toward the Realization of Planetary Rings in the Computer

研究代表者

台坂 博 (DAISAKA, Hiroshi)

一橋大学・大学院経営管理研究科・教授

研究者番号：80399295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：リングを構成している粒子数と同じ大粒子数を用いたシミュレートを実現するためのリング粒子系で効率よく重力計算できる手法の確立と検証を行った。計算機環境の変化により、目標としていた粒子数を用いた大規模計算は実施できなかったが、将来、大規模計算を行うための手法を確立することができた。また、土星リングの未解明の問題についても取り組み、土星リングのサイズ分布の解明や土星リングスポーク構造の解明、などの成果を得て、査読雑誌に掲載することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星リングの研究は主に探査機による探査に依存しているが、計算機で実際のリングを構成している粒子数と同じ大粒子数を用いたシミュレートを実現できれば、リング内で発見されている構造形成を直接、シミュレートすることが可能となり粒子形成の理解を進めること、また、未知の構造の示唆を与えることも可能である。リング系の大粒子数のシミュレーションを実現するための手法は他の中心重力場系でも有効な方法であり、また、ミドルウェアへの実装により本研究の成果が多くの研究者が享受できる。

研究成果の概要(英文)：We established and verified a method to efficiently calculate gravity in a ring particle system to realize a simulation using the same number of large particles as the number of particles that make up the ring. Due to changes in the computer environment, we were unable to perform the large-scale calculations using the targeted number of particles, but we were able to establish a method to perform large-scale calculations in the future. We also worked on unresolved problems of Saturn's rings, and obtained results such as clarification of the size distribution of Saturn's rings and the structure of Saturn's ring spokes, which were published in peer-reviewed journals.

研究分野：計算科学、天文学

キーワード：惑星リング シミュレーション ヘテロ型アクセラレータ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

土星リングに代表される惑星リングはいわゆるガス惑星(木星、土星、天王星、海王星)の周辺に発見され、未だ謎に満ちている。土星リングは約 20 年間、カッシーニ探査機によって詳細な探査が行われ、リングの中の様々な構造が発見されてきた。例えば、レコードの溝に例えられるような、幅 10-100km をもった多数の円環、その中のさらに細かい 100m スケールの構造の存在、さらには、プロペラのような模様の構造が発見されている。しかしながら、これらの構造の形成機構の理解は途上にある。カッシーニ探査機は 2017 年 9 月にグランドフィナーレを飾り探査は終了した。次の探査計画は未定であり、探査によって新たな知見を得ることを期待するのは難しい。

一方、現在のスーパーコンピュータの計算能力は、1 兆体の粒子を用いた N 体シミュレーションを可能にする。惑星リングは多数の粒子から構成されている。1 兆体は、現実的な粒子の大きさで幅 100km の土星リングの表現が可能な数である。幅 100km のリングには、様々な内部構造が含まれる。そのため、1 兆体の粒子を用いたリングシミュレーションの実現の可能性、計算機で現実的なリングを再現して調べられるのかは検討する価値がある。

N 体シミュレーションの欠点の一つは、粒子間の重力相互作用に多大な計算コストがかかるため、(計算時間は粒子数の 2 乗に比例)扱える粒子数に制約があることである。そのため、これまで行われたリングシミュレーションの多くは、(1)周期境界条件を課してリングの一部のみを考慮する方法、(2)リングを弧状に分割してその一部を計算する方法、(3)リング全体を考えるが粒子を大きくする、とその組み合わせなど、近似手法が導入されてきた。しかしながら、(1)や(2)はリングの楕円形状の形成機構などリング全系の構造を表現することは困難であり、(3)は粒子半径で見たときのリングの幅が非常に狭く、リングとは言えない、などの問題がある。そのため、リングの構造形成や進化の詳細を調べるためには、現実のリングの粒子の条件(大きさや質量)で、リング全体をリングと呼べる幅をもった粒子系で表現したシミュレーションが本質的に必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、現実的な惑星リングを表現できる粒子数を用いてリング全体の N 体シミュレーションを可能とする手法を確立する。惑星リング系のシミュレーションに最適な重力計算のアルゴリズムの検討と開発、ミドルウェア(FDPS)への実装、惑星リングの N 体シミュレーションコードを開発し、PEZY 社製 PEZY-SC2 を使ったシステム(海洋研究機構に設置されていた暁光システムを想定)上で、1 兆体の惑星リングの N 体シミュレーションを実施し、手法の有用性を実証する。さらにはリングの進化や内部構造の形成機構の解明を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) リング系に適合した重力計算アルゴリズムの開発

大規模計算を実現するための問題の一つは、重力計算で使われるツリー法で、現在使われている空間構造の分割の仕方がリング系にあっていないことである。リングはほぼ 2 次元的な円盤形状で、かつ、リングの幅が軌道半径に比べて小さいため、通常のデカルト座標を用いた空間分割が不適切、また、リング粒子はケプラー回転に移動するため、デカルト座標を用いた空間分割では粒子はすぐに領域外に移動してしまう。従来手法が使えるのかは自明ではないため、系に適合した方法を開発する。

#### (2) 大粒子数を用いた N 体シミュレーションによる実証

開発したアプリケーションプログラムを用いて、1 兆体の惑星リングの N 体シミュレーション計算を海洋開発研究機構の暁光で実施開発したアルゴリズムの有用性を実証する。

#### (3) N 体シミュレーションによるリング系の進化の解明

開発したコードにより、リング内に構造形成がおきるのか、また、リングの拡散はどのようにしておきるのか、のシミュレーションを行い、リング粒子系の進化の解明を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 重力計算で用いられるツリー法のアルゴリズムの改良

問題であった、リング系においても重力計算を効率的に行える手法を開発した。主な改良点は、円筒座標系の導入、粒子とともにケプラー回転する回転系座標を導入、数ステップの間、同じツリー構造を利用する方法である。この方法を用いた数値計算コードを開発した。検証として、数百から千万体粒子を用いた計算を実施した。

本計画では、大規模計算の実施は海洋研究機構に設置されていた暁光システム(PEZY 社製 SC2 プロセッサと多数搭載したスーパーコンピュータ)を前提として準備を進めていた。しかしなが

ら、本研究が開始されると同時に曙光が撤去されてしまった。PEZY 社製 PEZY-SC2 の後継機で計算を実施できる可能性があり準備を進めていたが、実施期間内に大規模計算による検証は達成できなかった。しかしながら、重力計算を効率的に行える手法は確立できており、今後、富岳等のスーパーコンピュータを用いての計算が実現可能である。

本研究で開発された手法はミドルウェア (FDPS) へ実装されている。これにより、多くのユーザーが改良された手法を利用することが可能になった。また、改良された手法は、いわゆる中心重力場系の N 体シミュレーションに有効方法であり、同様な系である惑星形成の N 体シミュレーションにも有効な方法である。

### (2) 土星リングのサイズ分布の解明

リング全系計算に向けた計算の一環として、これまでに行ってきた局所系の計算によるリング諸問題の解明を進めた。その一環として、リング粒子のサイズ分布の問題を解明した。土星リングはいろいろな大きさの粒子からなるが、小さい粒子の量はサイズ分布から期待された量より少ないことがカッシーニの観測などにより示唆されている。その理解として粘着力が提案されている。その効果を調べるために局所系の N 体シミュレーションを行い、粒子間の衝突速度を調べ、土星メインリングでの粒子間衝突は、大きい粒子の表面にくっついた小さい粒子を再放出するには小さく、観測結果を説明しうることを明らかにした。この成果は、査読論文として報告した。

この研究ではリング個々の場所での条件を変えたシミュレーションから結論を得ている。実際はリング粒子は半径方向への拡散があるため、その影響も考慮する必要がある。そのためには全系でのシミュレーションによる検証が必要となる。

### (3) 土星リングスポーク構造の解明

さらに、リング系シミュレーションに向けたリング構造形成の解明の一環として、土星リングで発見されているスポーク構造（車輪のスポークのような構造）の解明の研究を行った。

この研究では、ダストの凝集力の温度依存性を考慮したモデルを構築し、過去に提唱されたモデルでは説明が難しかった、観測されているすべての特徴を説明することに成功した。この成果は、査読論文として報告した。

### <引用文献>

- ① 岩澤全規, 行方大輔, 坂本亮, 中村孝史, 木村耕行, 似鳥啓吾, 野村昴太郎, 坪内美幸, 牧野淳一郎, “粒子法シミュレーションコード開発のためのフレームワーク (FDPS) の開発”, 第 167 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 2018
- ② Keiji Ohtsuki, Hiroshi Kawamura, Naoyuki Hirata, Hiroshi Daisaka, Hiroshi Kimura, “Size of the smallest particles in Saturn’s rings”, Icarus, 2019
- ③ Naoyuki Hirata, Hiroshi Kimura, Keiji Ohtsuki, “Dust release from cold ring particles as a mechanism of spoke formation in Saturn’s rings”, Icarus, 2022

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Keiji Ohtsuki, Hiroshi Kawamura, Naoyuki Hirata, Hiroshi Daisaka, Hiroshi Kimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Size of the smallest particles in Saturn's rings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.icarus.2019.06.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kawamura, H., Ohtsuki, K., Hirata, N., Daisaka, H.	4. 巻 2132
2. 論文標題 Impact Velocity Between Particles in Saturn's Rings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 LPI Contribution	6. 最初と最後の頁 1146-1147
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Naoyuki Hirata, Hiroshi Kimura, Keiji Ohtsuki	4. 巻 378
2. 論文標題 Dust release from cold ring particles as a mechanism of spoke formation in Saturn's rings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114900-114920
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.icarus.2022.114920	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Keiji Ohtsuki, Hiroshi Kawamura, Naoyuki Hirata, Hiroshi Daisaka
2. 発表標題 Impact Velocity Between Particles in Saturn's Rings and Implications for the Minimum Particle Size
3. 学会等名 AOGS 15th Annual Meeting（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川村浩司, 大槻圭史, 平田直之, 台坂博
2. 発表標題 土星リング粒子の衝突速度と最小粒子サイズ
3. 学会等名 日本天文学会秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩澤全規, 行方大輔, 坂本亮, 中村孝史, 木村耕行, 似鳥啓吾, 野村昴太郎, 坪内美幸, 牧野淳一郎
2. 発表標題 粒子法シミュレーションコード開発のためのフレームワーク(FDPS)の開発
3. 学会等名 第167回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会
4. 発表年 2018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
研究分担者	大槻 圭史  (Keiji Ohtsuki)  (00250910)	神戸大学・理学研究科・教授   (14501)	
研究分担者	岩澤 全規  (Iwasawa Masaki)  (10650038)	松江工業高等専門学校・情報工学科・講師   (55201)	
研究分担者	牧野 淳一郎  (Makino Junichiro)  (50229340)	神戸大学・理学研究科・教授   (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	似鳥 啓吾  (Nitadori Keigo)  (80600824)	国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・技師     (82401)	

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