

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03719

研究課題名(和文) GPUクラスターを用いた1億粒子シミュレーションによる惑星形成過程の解明

研究課題名(英文) Research for planet formation process by 100 million particle simulation using GPU cluster

研究代表者

押野 翔一(Oshino, Shoichi)

国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特任専門員

研究者番号：80631655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新しい計算法の開発と最新の計算機を構築することによりこれまで以上の粒子数を用いた微惑星集積過程の研究を行うことを目的としている。本研究により、はじめて100万粒子を超える惑星形成N体計算が可能となった。大粒子数(1000万粒子)を用いたN体計算では、これまでよりも惑星の成長が早い結果が得られており、今後この過程について詳細を明らかにする。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a new calculation method and to study the planetary formation process by using the largest number of particles and the latest accelerators. By this study, it became possible to calculate the planetary formation of N-body simulations more than 1 million particles for the first time. In the N-body calculation using the large number of particles (10 million particles), the result of earlier growth of the planet has been obtained than ever, and this process will be clarified in detail in the future.

研究分野：惑星形成

キーワード：惑星形成 重力多体問題 ハイパフォーマンスコンピューティング GPUコンピューティング GPGPU
数値シミュレーション N体計算 理論天文学

1. 研究開始当初の背景

地球型惑星 (地球や金星のような岩石惑星) やガス惑星 (木星・土星) および氷惑星 (天王星・海王星)

の固体核 (コア) は、微惑星(km サイズの岩石・氷の塊)同士の衝突・合体成長 (以下、集積) を経て、形成される。微惑星の集積過程は、天体同士の重力相互作用で決まる。これまでに、重力多体計算 (粒子間の重力相互作用を計算し、粒子の運動を計算する数値積分法: 以下、N 体計算) によって、微惑星集積は2段階の成長モードを経験することが知られている (Kokubo & Ida, 1998; 2000, Icarus):(1) 微惑星が選択的に急激に成長する「暴走成長段階」と (2) 成長した微惑星が一定間隔に並び、ゆっくりと成長する「寡占的成長段階」。現在では、こうした微惑星→惑星の成長過程の枠組みは広く受け入れられており、太陽系のみならず、近年、発見され始めている太陽系以外の惑星系形成を議論する土台となっている。

しかし、これまでの N 体計算は、現実的な計算時間で計算できる微惑星の数 (以下、粒子数) の限界から、初期に数 100km サイズ (惑星サイズの 1/10 程度) の「巨大な微惑星」を仮定している。これは、イトカワ (直径 ~1km) に代表される、微惑星の生き残りである実際の小惑星のサイズに比べて2桁以上大きい。また、統計的手法で微惑星のサイズ分布の進化を調べた研究によると、1-10km が典型的な微惑星サイズであり、1-10km サイズの微惑星は従来の描像と異なり、寡占的成長が途中で頭打ちとなる可能性が示唆されている (e.g. Kobayashi et al.2010, Icarus)。もしこれが実際に起こるのであれば、これまでの惑星形成理論を大幅に修正する必要があり、それを確かめるためには、「現実的なサイズの小さな微惑星」 (=現在の一万倍の粒子数) を取り扱えるアプローチが必要となる。

2. 研究の目的

過去の「惑星形成」に関する N 体計算は、粒子数 1000-1 万体に限定されていた。N 体計算では、粒子の運動の時間積分 1 ステップあたり $O(N^2)$ の重力計算のコストが生じる (1 万体系なら 1 億回の重力計算/1 ステップ)。宇宙の大規模構造のような粒子同士の近接遭遇が起こらない系 (無衝突系) では約 2 兆粒子を用いた N 体計算がなされているが (Ishiyama et al. 2012, SC12)、これは遠方粒子からの力をまとめて計算するツリー法により計算コストが $O(N \log N)$ に抑えられていることと、粒子の運動の時間積分に必要なステップ数が少なく済むためである。一方、星団や惑星系のような近接遭遇の効果が系の進化に重要な「衝突系」では、短い時間ステップ (膨大なステップ数) と近似を用いない計算が必要となる。そのため、衝突系では 10 万体系程度が現実的な時間で計算可

能な粒子数の限界である。さらに惑星系の場合、系の進化を追うためにより多くのステップ数が必要なため 1 万体系程度が現実的な時間で計算可能な粒子数となっている。本研究では、新しい計算法の開発と最新の計算機を用いて、「衝突系」の惑星系で 1 万体系の壁を越えて、世界で初めて、「現実的な微惑星サイズ」 (=1 億体系) での大規模な N 体計算を実現する。

1 億体系の「衝突系」の計算を行う上で問題となるのは、(1) ステップ数が多い点、(2) 1 ステップあたりの計算量が多い点である。この問題を解決するために、本研究では「無衝突系」の計算で用いられる手法と「衝突系」で用いられる手法を組み合わせた計算法 P³T 法 (Oshino et al.2011,PASJ)を用いる。P³T 法とは、天体の重力圏 (ヒル半径) の 3 倍以内は従来通りの N 体計算 (計算コスト $O(N^2)$)、それ以上は「無衝突系」の計算で用いられる Tree 法 (遠方領域にある粒子からの重力は空間 8 分割で計算;計算コスト $O(N \log N)$)を採用した手法である。この手法を用いると、衝突系に必要な高精度を保ちつつ、系全体は Tree 法で高速に計算することが可能となる。また、本研究で最も計算コストのかかる Tree 法の計算部分に、安価且つ並列化で高速演算可能な GPU (グラフィックプロセッシングユニット)を導入し (Bedorf et al. 2013)、1 億粒子による惑星形成シミュレーションを実現する。

3. 研究の方法

本研究では、1 億粒子での惑星形成シミュレーションを可能とするために、GPU を使用する高速な N 体計算コードの開発と、それを実行するための GPU クラスタ構築を両輪として研究を進める。N 体計算コードについては、研究協力者が開発した GPU に対応した並列 Tree コード「Bonsai」と研究代表者が開発した P3T コードを組み合わせることで短期間の開発が可能である。研究期間の始めで、必要な機材、コードの開発を行い、100 万~1000 万粒子での惑星形成シミュレーションを実行する。研究期間の後期では、最終的な目標である 1 億粒子シミュレーションを行いながら、前期で行ったコード開発、惑星形成シミュレーションの解析を行い成果発表を行う。

4. 研究成果

惑星形成用大規模 N 体シミュレーションコードについての研究成果をまとめ、論文として出版した (Iwasawa et al. 2017)。図 1 は本コードの並列計算におけるパフォーマンスを示している。1000 コア程度までスケールすることが示されており、スーパーコンピュータを用いた大規模計算が可能となっている。図 2 は計算精度の時間進化を示している。各種の計算用パラメータを適切に設定することで、惑星形成シミュレーションに十分

な計算精度を保てることがわかった。当該コードは PENTACLE という名称をつけ、GitHub にて公開しており、自由に利用できるような環境を整えた。また、GPU 版コードについてもほぼ開発は終了しており、最新版の GPU に合わせた最適化を行っている。GPU に加え、Xeon Phi を利用できるようなコードの修正を計画しており、今後のスーパーコンピュータに対応できるように引き続きシミュレーションコードの開発を継続していく。

また、本コードを用いた超高解像度惑星形成 N 体シミュレーションを実行している。粒子数 100 万粒子 (粒子質量 10^{21} g 程度) までは先行研究と同じ進化経路をたどっているが、1000 万粒子 (粒子質量 10^{20} g 程度) では集積速度が早くなる領域がみられた。

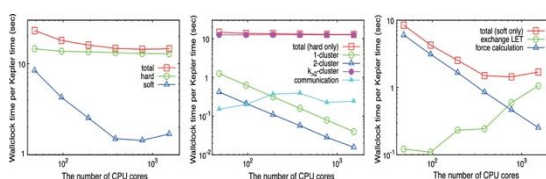


図 1 パフォーマンス

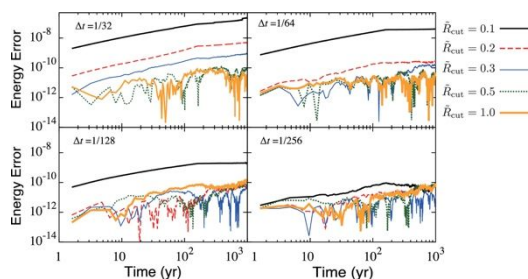


図 2 計算精度

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 1 件)

Iwasawa, Masaki; Oshino, Shoichi; Fujii, Michiko S.; Hori, Yasunori
 PENTACLE: Parallelized particle-particle particle-tree code for planet formation
 Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 69, Issue 5, id.81
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2017PASJ...69...81I/doi:10.1093/pasj/psx073

[学会発表](計 9 件)

押野 翔一

GPU を用いた超高解像度の惑星形成 N 体シミュレーション

日本天文学会 2018 年春季年会

押野 翔一

GPU を用いた超高解像度の惑星形成 N 体シミュレーション
 計算科学研究センター 25 周年記念シンポジウムおよび第 9 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム - 計算科学の発展と将来 -
 2017 年 10 月

堀 安範

GPU-accelerated High-resolution N-body Simulations for Planet Formation Toward 100 Million Particles
 JpGU-AGU Joint Meeting 2017

押野翔一

大規模 N 体計算による惑星形成：100 万粒子を用いた微惑星集積
 日本天文学会 2017 年春季年会

押野翔一

大規模 N 体計算が切り拓く惑星形成 II：100 万粒子を用いた微惑星集積
 日本惑星科学会 2016 年秋季講演会

堀安範

大規模 N 体計算が切り拓く惑星形成 I：PENTACLE (1,000 万粒子シミュレーションに向けて)
 日本惑星科学会 2016 年秋季講演会

押野翔一

High-resolution N-body simulation for planet formation
 New Directions in Planet Formation 2016

堀安範

大規模 N 体計算が切り拓く惑星形成：1 億粒子、そしてその先へ
 日本地球惑星科学連合 2016 年大会

押野翔一

大規模 N 体計算が切り拓く惑星形成研究の新時代
 日本天文学会 2016 年春季年会

6. 研究組織

(1) 研究代表者

押野 翔一 (OSHINO, Shoichi)
 国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特任専門員
 研究者番号：80631655

(2) 研究分担者

岩澤 全規 (IWASAWA, Masaki)
 国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究機構・研究員

研究者番号：10650038

堀 安範 (HORI, Yasunori)
国立天文台・光赤外研究部・特任助教
研究者番号：40724084

藤井 通子 (FUJII, Michiko)
東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准
教授
研究者番号：90722330