

令和元年6月5日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05304

研究課題名(和文)連鎖集積による惑星系の構造形成の研究

研究課題名(英文)Structure Formation of Planetary Systems by Chain Accretion

研究代表者

小久保 英一郎 (Kokubo, Eiichiro)

国立天文台・理論研究部・教授

研究者番号：90332163

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、惑星系形成の作業仮説である「連鎖集積シナリオ」にそって、複数の惑星から構成される惑星系の構造形成の素過程を調べ、太陽系と系外惑星系の構造の起源を明らかにすることである。

進化するガス円盤中での現実的な合体条件を考慮した微惑星集積のシミュレーションが可能な汎用GPU(グラフィックプロセッシングユニット)で加速された実験装置「惑星系形成シミュレータ」を構築した。現在、ガス捕獲によって成長するガス惑星1個とその外側の微惑星円盤からなる系を用いて、連鎖集積の素過程である第1ガス惑星形成の外側の微惑星円盤の進化への影響について調べている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系も含めて、銀河系に存在する多くの惑星系は複数惑星系である。このような惑星系の軌道構造の起源を理解することは惑星系形成論の重要な課題である。惑星系形成の作業仮説である「連鎖集積シナリオ」では最初に形成された巨大惑星がその後の形成過程を支配すると考える。その素過程をシミュレーションによって調べている。この過程を理解することで太陽系の起源に迫ることができる。また、シミュレーションのために開発したGPUを用いたシミュレーションコードは公開予定である。これは今後のこの分野の研究に貢献できると考えている。

研究成果の概要(英文)：The goal of this project is to investigate the elementary process of structure formation of planetary systems with multiple planets along with a working hypothesis "chain accretion scenario" and understand the origin of the orbital architecture of the solar and exoplanetary systems.

We have developed a fast N-body simulation system "planet formation simulator" that consists of an N-body simulation code for planetesimal accretion and a general-purpose graphic processing unit (GPU) that accelerates gravity calculation. The simulation code takes into account the realistic evolution of disk gas and accretionary condition of planetesimals. Using it we are now investigating the effect of the first gas giant on the formation of the second one, namely, the evolution of outer planetesimals, which is the important elementary process of the chain accretion scenario.

研究分野：惑星系形成論

キーワード：惑星系形成 太陽系 惑星集積 多体シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

太陽系の起源は現代天体物理学に残されている重要課題である。現在の太陽系では、太陽に近いほうから岩石（地球型）惑星（水星、金星、地球、火星）、ガス（木星型）惑星（木星、土星）、氷（海王星型）惑星（天王星、海王星）と組成の違う惑星が並んでいる。また、岩石惑星とガス惑星の間には小惑星帯が、氷惑星の外側には太陽系外縁天体が存在する。太陽系の構造の起源を考える上で鍵となるのは、質量の大きなガス惑星の配置である。現在の太陽系の基本的な構造は木星と土星の軌道によって決定されているといえる。ではどのようにして木星や土星は現在の軌道に形成されたのだろうか。

また、銀河系には太陽系以外にも惑星系（系外惑星系）が普遍的に存在していることが明らかになっている。1995年の最初の発見以来、1900を超える系外惑星系が発見されている。系外惑星系の多くは太陽系とは全く異なった構造をしていて、惑星系の構造は多様であることが明らかになってきている。これらの多様性はどのようにして生み出されたのだろうか。惑星系の構造形成の理解は重要課題になっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、惑星系形成の作業仮説である「連鎖集積シナリオ」に沿って複数の惑星から構成される惑星系の形成の素過程を大規模惑星集積シミュレーションを行うことによって理論的に明らかにすることである。そして、この結果を応用することによって、太陽系の構造の起源を解明すること、さらには多様な太陽系外惑星系の構造の起源を明らかにすることである。また、大規模惑星集積シミュレーションのために汎用 GPU(グラフィックプロセッシングユニット)を用いた専用実験装置「惑星系形成シミュレータ」を開発する。

3. 研究の方法

作業仮説「連鎖集積シナリオ」にそって、複数惑星系の構造形成の素過程を調べ、太陽系と系外惑星系の構造の起源を明らかにする。

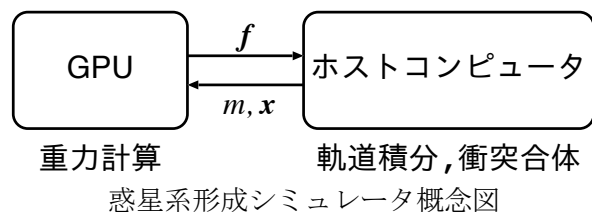
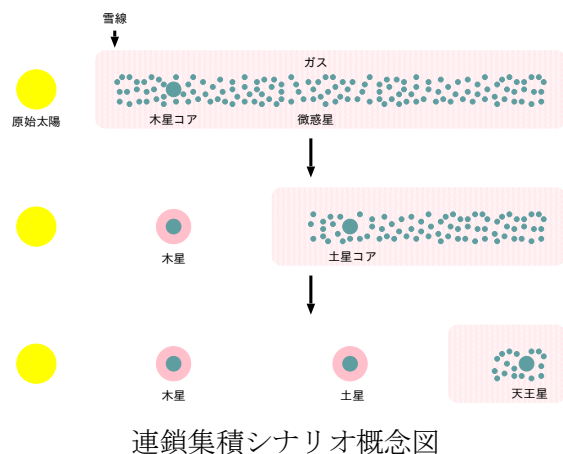
連鎖集積シナリオとは、原始惑星系円盤の雪線を始まりとして、太陽系の内側から外側に向かって、内側で先に形成された惑星がすぐ外側の惑星の形成を制御する、というモデルである。シナリオの素過程として、(1)雪線における氷によるダスト面密度増加の第1ガス惑星(木星)形成への影響、(2)第1ガス惑星の重力摂動の第2ガス惑星(土星)形成への影響、(3)第1第2ガス惑星の重力摂動の氷惑星(天王星、海王星)形成への影響、が考えられる。

このシナリオの素過程を調べるために、汎用 GPU(グラフィックプロセッシングユニット)を用いた専用実験装置「惑星系形成シミュレータ」を構築し、機械語レベルで最適化された高速多体シミュレーションコードを開発し、上記素過程の惑星集積の大規模多体シミュレーションを系統的に実行する。

4. 研究成果

惑星系の構造形成の実験を行うための実験装置「惑星系形成シミュレータ」を構築した。惑星系形成シミュレータは微惑星集積多体シミュレーション専用のシステムで、ホストコンピュータと汎用 GPU (グラフィックプロセッシングユニット)からなる。シミュレーションでは進化するガス円盤中での微惑星とガスとの相互作用を取り入れており、現実的な進化する原始惑星系円盤中での微惑星集積を扱うことが可能である。また、微惑星衝突の数値シミュレーションによって明らかにされた微惑星の合体条件を実装しており、非合体の効果を入れた微惑星集積を調べることができる。このような現実的な微惑星集積の大規模多体シミュレーションはこれまでにない。また、汎用 GPU Nvidia Tesla P100 (倍精度浮動小数点演算性能: 4.7 Tflops)を用いることで、微惑星どうしの重力相互作用の演算を加速し、高速に大規模シミュレーションを実行可能である。コードは機械語レベルで最適化されている。これらのコードはすべて公開予定である。

当初計画通り複数の汎用 GPU を調達できず、また、コード開発と最適化に予想外に時間を要



したため、本研究の実施期間で予定していたすべての連鎖集積シナリオの素過程を調べることはできなかった。しかし、ここで開発した惑星系形成シミュレータを用いた研究は継続しており、これから順次当初計画に沿って研究を進め、成果をまとめていく予定である。特に現在は、ガス捕獲によって成長するガス惑星 1 個とその外側の微惑星円盤からなる系を用いて、連鎖集積の素過程である第 1 ガス惑星形成の第 2 ガス惑星形成、すなわち外側の微惑星円盤の進化への影響について調べている。第 1 惑星の重力摂動によって外側の微惑星の空間分布と軌道要素分布がどのように変化し、第 2 ガス惑星の核集積がどのような影響を受けるかについて明らかにする予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 5 件)

1. [Eiichiro Kokubo](#), Formation of Terrestrial Planets, LIFE3E'2019: SEARCH FOR LIFE, FROM EARLY EARTH TO EXOPLANETS, 2019.
2. [Eiichiro Kokubo](#), Formation of Terrestrial Planets by Giant Impacts, Solar System | Exoplanet Science Synergies in the Horizon 2061 Perspective, 2019.
3. [Eiichiro Kokubo](#), Formation of Terrestrial Planets, IAU Symposium 345: Origins: From the Protosun to the First Steps of Life, 2018.
4. [Eiichiro Kokubo](#), The Standard Scenario of Solar System Formation and its Problems, Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting, 2018.
5. [Eiichiro Kokubo](#), Formation of Terrestrial Planets, Formation of the Solar System and the Origin of Life, 2017.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

太陽系と系外惑星系の構造と起源について、カルチャーセンター等で一般向けに講演を行った。
2018. 9. 8 NHK カルチャー町田教室 月と太陽系の起源
2018. 6. 30 NHK カルチャー町田教室 惑星の起源
2018. 4. 7 朝日カルチャーセンター中之島教室 新世界-見えてきた系外惑星系
2017. 1. 14 早稲田大学エクステンションセンター 惑星系形成論入門
2017. 1. 7 早稲田大学エクステンションセンター 太陽系と系外惑星系

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：Douglas Lin

ローマ字氏名：Douglas Lin

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。