

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21540248

研究課題名（和文） 惑星系の構造の起源

研究課題名（英文） The Origin of the Architecture of Planetary Systems

研究代表者

小久保 英一郎 (KOKUBO EIICHIRO)

国立天文台・理論研究部・准教授

研究者番号：90332163

研究成果の概要（和文）：太陽系の構造の起源として、木星、土星、天王星、海王星が次々と連鎖的に形成される「連鎖集積シナリオ」を提案する。このシナリオを検証するために、重力多体問題専用計算機を用いて専用の太陽系形成実験装置「太陽系形成シミュレータ」を構築した。これを用いて連鎖集積シナリオの基礎となる原始惑星の寡占的成長の大域的シミュレーションを行い、雪線（氷凝縮による面密度の不連続）がある場合の寡占的成長について調べた。

研究成果の概要（英文）：We propose a chain accretion scenario for the origin of the architecture of the giant planets in the solar system, in which planetary accretion proceeds sequentially from Jupiter to Neptune. To inspect this scenario we develop a special simulator "solar system formation simulator" that utilizes a special-purpose computer for many-body problems. Using this simulator we investigate globally the oligarchic growth of protoplanets that is an important base of the scenario. We find that even with the snow line (surface density jump due to ice condensation) the oligarchic growth model holds.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：惑星系形成論

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：惑星系形成、太陽系、系外惑星

1. 研究開始当初の背景

太陽系形成の標準的なシナリオでは、太陽系は太陽形成の副産物として形成された原始惑星系円盤から形成されたと考えられている。原始惑星系円盤からの太陽系形成は次の3段階からなる。

- (1) 原始惑星系円盤内のダスト(ちり)の集積によって微惑星とよばれる km サイズの小天体が形成される。
- (2) 微惑星の衝突合体によって原始惑星とよばれる天体が形成される。
- (3) 原始惑星どうしの衝突によって地球型惑星が、原始惑星がガスを降着することによってガス惑星と氷惑星が完成する。

地球型惑星形成の素過程は応募者らのグループによって多体シミュレーションを用いて研究され、理解が進んでいる。しかし、ガス惑星・氷惑星の形成過程、特に形成される軌道がどのように決定されるかは未だに素過程が明らかになっていない。木星型惑星は雪線(H_2O が凝縮する位置で約3天文単位)の外側で形成されると考えられている。雪線の外側では H_2O が氷として存在するために、固体成分が多くなり、大きな原始惑星が形成されるために、原始惑星は重力によってガスを降着することができる。しかし、雪線とガス惑星形成位置との関係は未だ明らかになってはいない。

また、1995年の最初の発見以来、300を超える系外惑星系が発見されている。これらの惑星の多くは、その質量から太陽系の木星のようなガス惑星であると考えられている。その軌道は、水星より内側だったり、彗星のように軌道離心率が大きかったり、太陽系のガス惑星とは大きく異なっている。これらのガス惑星の軌道の多様性がどのようにして生み出されるのかも不明な点が多い。

2. 研究の目的

太陽系の構造の起源として、「連鎖集積シナリオ」を提案する(図1)。これは雪線によって木星形成が制御され、木星によって土星形成が制御され、木星・土星によって天王星・海王星形成が制御される、というように雪線から連鎖的に惑星形成が外側に進んでいくという考えである。このシナリオを作業仮説として、大規模惑星集積シミュレーションを用いて各過程の探査を進め、本研究では具体的に以下の問題について明らかにしたい。

(1) 太陽系の構造の起源

- ・雪線がある場合にどのように寡占的成長が進むか
- ・なぜ木星は現在の場所に形成されたのか
- ・なぜ土星は現在の場所に形成されたのか
- ・なぜ天王星・海王星は現在の場所に形成されたのか
- ・なぜ小惑星帯は現在の場所に形成されたのか
- ・地球型惑星形成への影響

(2) 系外惑星系の構造の起源

- ・連鎖集積シナリオの雪線位置への依存性
- ・連鎖集積シナリオの原始惑星系円盤質量への依存性

3. 研究の方法

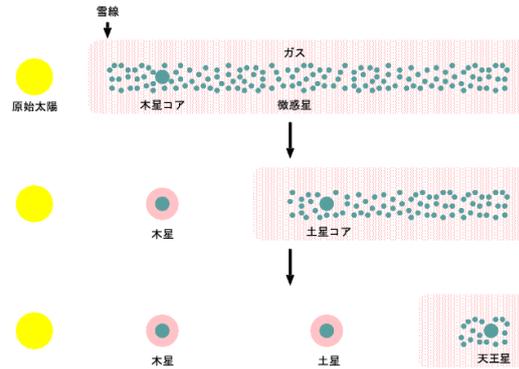


図1: 連鎖集積シナリオの概念図。

太陽系の構造の起源を調べるには、雪線(約3天文単位)、木星(軌道半径約5天文単位)、土星(軌道半径約10天文単位)という大域的領域で、惑星形成過程での重力相互作用を正確に評価する必要がある。この計算量は膨大で、これまでの先行研究では部分的にしか重力を考慮しないなどの近似が用いられてきた。しかし、この過程は重力相互作用が本質的に重要であるので、これらの研究からは構造形成過程の背景の物理を理解するのは困難だった。

本研究では、この問題を解決するために最新の重力多体問題専用計算機 GRAPE-DR を用いて専用の太陽系形成実験装置「太陽系形成シミュレータ」を自ら構築し、専用的高速多体シミュレーションコードを機械語レベルで開発する。太陽系形成シミュレータを用いることによって、初めて大域的なシミュレーションを行うことが可能になる。また、初期条件には太陽系だけでなく太陽系以外での惑星系形成も考慮し、可能な範囲の広い初期条件を採用する。このような一般的なアプローチの惑星系形成過程の研究はこれまでにない。

4. 研究成果

(1) 連鎖集積シナリオを検証するためには、大域的な惑星集積のシミュレーションを行う必要がある。これを可能にするため、専用シミュレータ「太陽系形成シミュレータ」を構築した(図2)。太陽系形成シミュレータは、重力多体問題専用計算機 GRAPE-DR と並列ホストコンピュータからなり、PCI Express で接続されている。ホストコンピュータでは粒子の軌道積分、衝突判定、合体処理を行い、GRAPE-DR ではシミュレーションでもっとも時間のかかる粒子間重力相互作用の計算を行う。GRAPE-DR の新ライブラリの調整と太陽系形成シミュレータ用のシミュレーションコードの最適化を行った。しかし、新ライブ

ラリでは GRAPE-DR の動作が不安定になり、長期大規模惑星集積シミュレーションを行うことがまだできない。現在、不安定になる原因を解明中である。今後もメーカーと協力してライブラリの調整を行い、太陽系形成シミュレータのハードウェアを安定化させる予定である。そして安定化した後に、当初計画していた大規模惑星集積シミュレーションを実施し、連鎖集積シナリオを検証する。

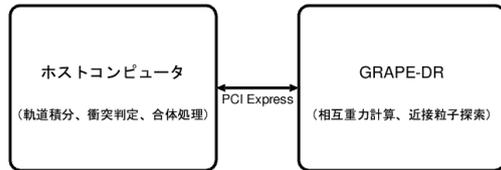


図2: 太陽系形成シミュレータの概念図。

(2) 試験として、安定に動作する比較的小規模のシミュレーションによって、微惑星円盤中に雪線が存在する場合に原始惑星の寡占的成長がどのように進むかについて実験を行っている。雪線が存在し、面密度に不連続がある場合も寡占的成長が理論通り進むことを確認した(図3)。図3では雪線は3天文単位にあり、そこで微惑星の面密度が4倍になっている。惑星集積の時間尺度では微惑星は半径方向にあまり拡散しないので、雪線のすぐ外側に大きな原始惑星が形成される。この原始惑星の質量は寡占的成長モデルによる見積りとほぼ合っている。この原始惑星が第1ガス惑星(木星)のコアになると考えられる。さらにその外側に形成されつつある原始惑星は第1ガス惑星のコアがガス降着を開始すると、一部は第1ガス惑星に衝突し、残りは第2ガス惑星(土星)のコアになると考えられる。コアへのガス降着も考慮した長期シミュレーションは太陽系形成シミュレータが安定してから行う予定である。この結果は現在投稿準備中である。

(3) 連鎖集積シナリオに関連する研究として、必要に応じて太陽系形成シミュレータを用いて、ダスト層の重力不安定による微惑星形成、地球型惑星形成の最終段階、コアへのガス降着の素過程についての研究を行った。

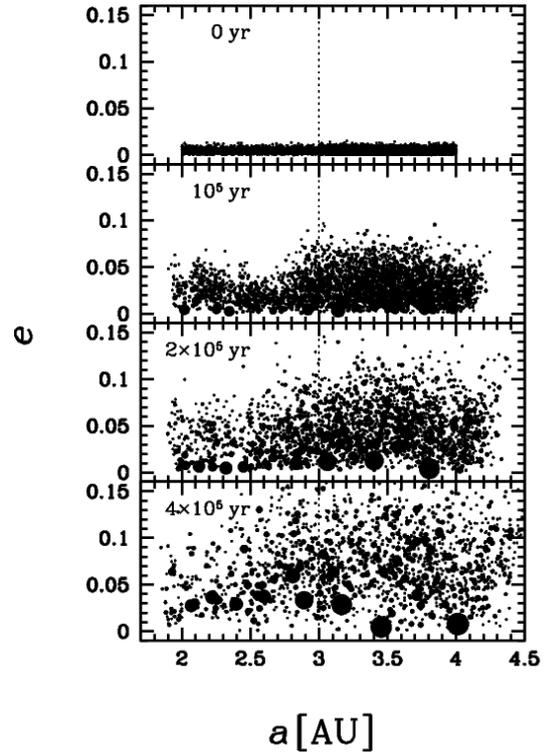


図3: 雪線を含んだ微惑星系での原始惑星の寡占的成長の多体シミュレーションの例。横軸は軌道長半径(天文単位)、縦軸は軌道離心率。雪線は3天文単位。上から初期状態、10万年後、20万年後、40万年後を示す。丸の大きさは天体の大きさに比例している。

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 Genda, H., Kokubo, E., Ida, S., Merging Criteria for Giant Impacts of Protoplanets, *The Astrophysical Journal* 査読有, 744, 2012, 137(8pp), DOI:10.1088/0004-637X/744/2/137
- ② Michikoshi, S., Kokubo, E., Inutsuka, S., Secular Gravitational Instability of a Dust Layer in Shear Turbulence, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 746, 2012, 35(12pp), DOI:10.1088/0004-637X/746/1/35
- ③ Michikoshi, S., Kokubo, E., Inutsuka, S., N-Body Simulation of Planetesimal Formation through Gravitational Instability of a Dust Layer in Laminar Gas Disk, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 719, 2010, 1021-1031, DOI:10.1088/0004-637X/719/2/1021
- ④ Kokubo, E., Genda, H., Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets under a Realistic, Accretion Condition,

The Astrophysical Journal Letters,
査読有, 714, 2010, L21-L25,
DOI:10.1088/2041-8205/714/1/L21

- ⑤ Machida, M. N., Kokubo, E., Inutsuka, S., Matsumoto T., Gas Accretion onto a Protoplanet and Formation of a Gas Giant Planet, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 405, 2010, 1227-1243, DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.16527.x
- ⑥ Michikoshi, S., Kokubo, E., Inutsuka, S., N-Body Simulation of Planetesimal Formation through Gravitational Instability and Coagulation. II. Accretion Model, The Astrophysical Journal, 査読有, 703, 2009, 1363-1373, DOI:10.1088/0004-637X/703/2/1363

[学会発表] (計7件)

- ① Kokubo, E., Formation of Terrestrial Planets: The Basic Dynamical Model, MISASA IV Solar System Exploration and New Geosciences -Perspective for the Next Decade-, 2012.2.24-26, 倉吉未来中心, 鳥取県
- ② Kokubo, E., The Final Stage of Terrestrial Planet Formation, The First Kepler Science Conference, 2011.12.5-9, NASA Ames Research Park, カリフォルニア州, アメリカ
- ③ 小久保英一郎, 玄田英典, 衝突破片による地球型惑星の共面円軌道化, 日本天文学会秋季年会, 2010.9.23, 金沢大学, 石川県
- ④ Kokubo, E., Formation of Terrestrial Planets: The Basic Dynamical Model Evolving Theory for Planet Formation, 2010.6.20-26, A N A インターコンチネンタル石垣リゾート, 沖縄県
- ⑤ 小久保英一郎, 玄田英典, 衝突破片による地球型惑星の円軌道化, 日本天文学会秋季年会, 2010.3.27, 東広島, 広島県
- ⑥ Kokubo, E., Planetesimal Dynamics Winter Workshop on Planetary Astrophysics, 2009.12.12-19, 北京, 中国
- ⑦ Kokubo, E., Formation of Terrestrial Planets: The Basic Dynamical Model, The Dynamics of Discs and Planets, 2009.8.17-21, Cambridge, UK

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小久保 英一郎 (KOKUBO EIICHIRO)
国立天文台・理論研究部・准教授

研究者番号 : 903332163

(2) 研究分担者
該当なし

(3) 連携研究者
該当なし