

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400447

研究課題名(和文) 惑星形成理論の大転換: スノーライン惑星形成モデルが生み出す惑星系の多様性

研究課題名(英文) A new theory of planetary formation: diversity of planetary system through snow-line planetary formation

研究代表者

城野 信一 (Sirono, Sin-iti)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：20332702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：惑星の前段階である原始惑星が原始惑星系円盤の特定の場所でのみ形成された場合に、木星が形成される時間を調べた。その結果、原始惑星の形成場所が広い場合と比べて、かなり短い時間で木星が形成されることが分かった。原始惑星系円盤の寿命程度で木星型惑星のコアが形成されるため、ガスが主成分である木星の特徴を説明できる。また、先行研究と比べて異なる場所で木星が形成されることも明らかとなった。様々なパラメータ依存性を調査した。ガス面密度分布におけるピークの値が、臨界値を越えないと木星が形成されないことも分かった。

研究成果の概要(英文)：I investigated the timescale of Jupiter formation in the case that protoplanets are formed in a particular zone in a protoplanetary nebula. It was found that the timescale is shorter than the standard scenario in which protoplanets are formed uniformly in the nebula. The gas-rich nature of Jupiter can be explained because the timescale is comparable to the lifetime of a protoplanetary nebula. In addition, I found that the formation location is different from that shown in a previous study. I investigated parameter dependence of mass of the Jupiter's core. I found that the peak of the gas surface density distribution should exceed a critical value, otherwise a Jupiter's core cannot be formed.

研究分野：惑星科学

キーワード：木星型惑星 原始惑星系円盤 原始惑星

1. 研究開始当初の背景

研究代表者のそれまでの研究成果により、惑星の元となる微惑星および原始惑星が原始惑星系円盤の特定の領域でのみ形成される可能性が浮かび上がってきた。標準的な考え方では、時間のズレはあるもののこれらの始原天体は原始惑星系円盤のどこでも一様に形成されるものと考えられてきた。特定の領域でのみ原始惑星が形成されたとすると、その後の惑星系はどのようなものになるのだろうか？ここから本研究課題がスタートした。

2. 研究の目的

太陽系の惑星の形成過程においては、木星の形成がカギであると考えられている。木星が形成されると、その大きな質量によって周囲の天体の起動を乱し、衝突頻度を上昇させるからである。一方で木星の形成時間は標準的なモデルでは長過ぎてしまうという問題が従来から指摘されてきた。そこで本研究では、原始惑星系円盤の特定の領域でのみ原始惑星が形成された場合、木星型惑星のコア（10地球質量程度で、ひとたび形成されるとガス降着により急激に質量が増大する）がどこにどの程度の時間で形成されるのかを数値シミュレーションにより明らかにすることを目標とした。

3. 研究の方法

本研究課題を申請した際には、独自にシミュレーションコードを開発する予定であったが、予想外に時間がかかりそうであったので既存のN体シミュレーションコード(Mercuryコード)を用いて数値シミュレーションを行なった。多数コアを内蔵する計算機を本補助金によって導入し、パラメーターサーチを効率的に行なった。

原始惑星には太陽からの重力、他の原始惑星からの重力が作用する。これら以外に、ガス円盤からの重力も作用する。この力は、Paardekooper & Mellema (2006)において定式化され、Sandor et al.(2011)において用いられた表式を用いた。ガス円盤からの力はガスの面密度分布によって決定される。Sandor et al.(2011)においては、ガス円盤中にデッドゾーンと呼ばれる領域が存在し、その外縁部と内縁部において面密度分布にピークが存在するというモデルを用いており、本研究でもまずその面密度分布を用いてシミュレーションを行なった。

4. 研究成果

(1)まず始めに、先行研究である Sandor et al.(2013)の結果の再現を試みた。その結果、

非常に重要なことが明らかとなった。Sandor et al.(2013)で用いられた、ガス円盤からの重力の式の一部に誤りがあることが明らかとなった。その部分を正しく修正すると、計算結果が大きく変化することが明らかとなった。Sandor et al.(2011)においては、ガス円盤から受ける力が大きくなりすぎていたため、非常に短い時間で木星型惑星のコアが形成されていた。正しい式を用いると、形成時間スケールが百万年程となり、原始惑星系円盤の寿命と同程度となった(図1)。

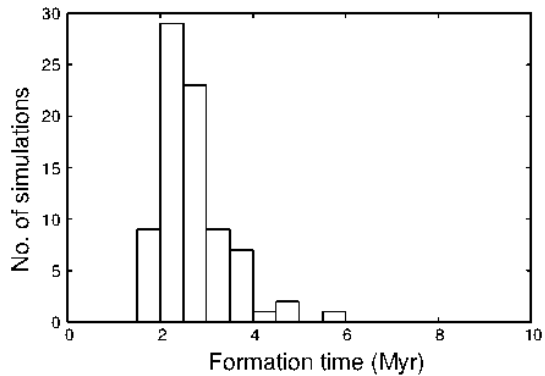


図1：木星型惑星コアの形成時間の頻度分布。200万年程度で形成されていることが分かる。これは原始惑星系円盤の寿命と同程度である。

また、形成場所も異なることが明らかとなった(図2)。Sandor et al.(2011)では二つあるデッドゾーン縁辺の内、外側において木星型惑星コアが形成されていたが、本研究において内側で形成されることが明らかとなった。

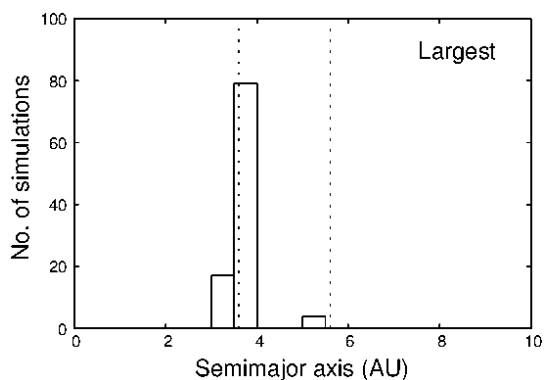


図2：形成された木星型惑星コアの位置の頻度分布。左右の破線はそれぞれ、デッドゾーンの内側境界、外側境界に対応する。

(2) ガス円盤から受ける力は、ガスの面密度分布によって決定される。そこで、ガス面密度分布のピークの高さを変化させてシミュレーションを行なったところ、10地球質量程度の木星型惑星のコアを形成するために必要なピークの高さが存在することが明らか

となった。

(3) ガス面密度分布はガスの粘性によって時間進化する。上記(1)および(2)においては、面密度分布が時間進化しないものとしてシミュレーションを行っていたが、円盤面密度分布時間進化の簡単なモデルを用いてN体シミュレーションと同時にガス面密度分布の進化を行い、ガスから受ける力が時間と共に変化するというより現実的なシミュレーションを行なった(図3)。

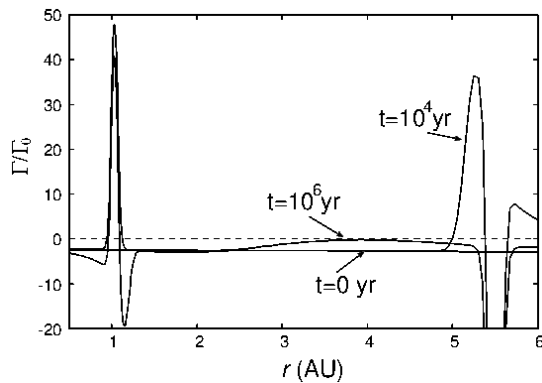


図3：ガス面密度分布の時間進化に伴う、ガスから受けるトルク分布の時間進化。1AUと5AUの2カ所にピークが存在するが、5AUのピークは短時間で消滅してしまう。結果として、木星型惑星のコアは1AUに形成される。

その結果、ガス面密度分布の時間進化の帰結としてデッドゾーン縁辺の外側におけるガス面密度分布ピークは急速に消滅し、内側のピークにて木星型惑星コアが形成されることが分かった。結局いずれの場合にも、二つあるピークのうち内側のピークにおいて木星型惑星コアが形成されることが分かった。

(4) 本研究の意義をまとめると以下の様になる。

木星型惑星コアが現実的な時間スケールで形成しうることが明確にできた。標準的なモデルでは時間がかかりすぎる問題が指摘されていたが、それは回避することが出来ることを示した。

木星の形成位置が先行研究の結果よりも太陽に近いであることが分かった。これはその後の惑星系形成において大きな意味をもつ。現在注目されている「グランドタックモデル」では、木星が形成場所から一度内側に移動し、その後外側に移動したと提案されている。一方で本研究の示唆は、木星は始めからかなり内側で形成され、その後何らかの理由で外側に移動した、ということである。太陽系物質の混合、小惑星帯の形成において重要であると考えられる。

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8件)

1: Sirono, S., Katayama, M. "Formation of Cores of Giant Planets at Convergence Zones of Planetary Migration", 査読有, *Astrophys. J.* 830, 65 (2016)

2: Okuzumi, S., Momose, M., Sirono, S., Kobayashi, H., and Tanaka, H., "Sintering-induced Dust Ring Formation in Protoplanetary Disks: Application to the HL Tau Disk", *Astrophys. J.*, 821, 82 (2016)

〔学会発表〕(計17件)

1: 城野信二, デッドゾーン縁辺における木星型惑星コア形成. 日本惑星科学会 2014 年秋季講演会, 東北大学片平ホール(宮城県), 2014 年 9 月 24 日

2: 城野信二, デッドゾーン縁辺における木星型惑星コア形成: ガス面密度分布依存性. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ(千葉県), 2015 年 5 月 26 日

3: 城野信二, デッドゾーン縁辺における木星型惑星コア形成: ガス面密度分布依存性. 日本惑星科学会 2015 年秋季講演会, 東京工業大学生命地球研究所(東京都), 2015 年 9 月 14 日

〔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:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

城野 信一 (SIRONO, Sin-iti)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授

研究者番号：20332702

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()