

平成21年 5月 27日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18740116

研究課題名(和文) 専用シミュレータで探る地球型惑星の形成過程

研究課題名(英文) Exploring Formation of Terrestrial Planets by a Special-Purpose Simulator

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：地球のような岩石でできた惑星の形成の最終段階は原始惑星とよばれる火星サイズの天体の衝突合体と考えられている。この過程を専用シミュレータを用いてシミュレーションを行うことによって明らかにした。標準的な初期条件を用いた場合、内惑星領域では典型的に2個の地球サイズの惑星と1-2個の小さな惑星が形成されることがわかった。これは現在の太陽系と同じである。惑星の最大質量は原始惑星の全質量に比例する。また、惑星の自転角速度は分裂しない最大の角速度くらいになり、自転軸の傾きは90度のものが多いことがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,600,000	0	1,600,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	210,000	3,710,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：理論天文学、惑星系形成

1. 研究開始当初の背景

地球型惑星形成シナリオの第2段階(微惑星からの原始惑星形成)は、主に申請者らのグループによって重力多体問題専用計算機を用いた多体シミュレーションによって調べられてきた(例えば、Kokubo & Ida 1996, 1998, 2000, 2002)。これらの研究により、原始惑星形成過程の物理は明らかになり、現在では初期微惑星分布が与えられると、そこからどのような原始惑星が形成されるかわかるようになってきている。

本研究はこの次の段階の原始惑星からの地球型惑星形成を扱う。初期条件としては、一般化された原始惑星の寡占的成長モデルを使う(Kokubo & Ida 2002)。この段階については、先行研究は存在するが、原始惑星系の限られた初期条件でのケーススタディに限られている。しかし、この段階は確率的な過程であり、数例のケーススタディではその過程の物理を明らかにすることは不可能である。

本研究はこれまでの類似研究とは次の2点で異なる：(1)系統的に多様な初期条件を用

い、結果が初期条件にどのように依存するのか明らかにする、(2)1つの初期条件に対し、多数のシミュレーションを行なうことによって統計的な解析を行う。このようなアプローチをとることによって初めて原始惑星からの地球型惑星形成の背景の物理に迫ることが可能になる。

2. 研究の目的

惑星系形成の標準シナリオでは、地球型惑星形成の最終段階は、火星サイズの原始惑星どうしの衝突合体と考えられている。地球型惑星の特徴が決定されるこの重要な段階は、未だに形成の素過程が明らかになっていない。本研究では、高速専用シミュレータを開発し、多体シミュレーションにより、原始惑星から地球型惑星になるまでの形成過程を明らかにする。すなわち、原始惑星系のどのような条件が地球型惑星系のどのような特徴を決めるのかを明らかにする。そして、最終的には、海(大規模な液体の水)が存在可能な物理・軌道条件を満たす居住可能惑星の形成確率を見積もる。

3. 研究の方法

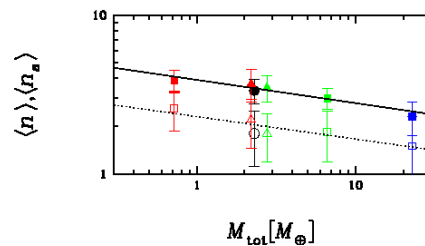
(1) 太陽系形成の場合の標準原始惑星系を初期条件とし、初期の原始惑星の角度分布を変えた多数のシミュレーションを行ない、形成される地球型惑星の個数、質量、軌道要素(長半径、離心率、傾斜角)、自転パラメータ(周期、赤道傾斜角)の統計をとる。まず基本物理過程を見るために、原始惑星系円盤のガスからの抵抗、地球型惑星領域外の巨大惑星(木星等)の重力は考えない。また、簡単のため完全非弾性衝突を仮定する。

(2) 多様な原始惑星系からの地球型惑星系形成のシミュレーションを系統的に行ない、地球型惑星系の物理量の原始惑星系の物理量への依存関係を明らかにする。また、ガス抵抗、巨大惑星の摂動、非弾性衝突の効果などを調べる。そして、最終的に居住可能惑星の形成確率を見積もる。

(3) 原始惑星からの地球型惑星形成過程は少数多体系であり、系の進化はカオス的ある。このような系を調べるためには多数のシミュレーションを行い、結果を統計的に解析する必要がある。シミュレーションを高速で実行するための専用シミュレータを自作し、高精度シミュレーションコードを使用する。

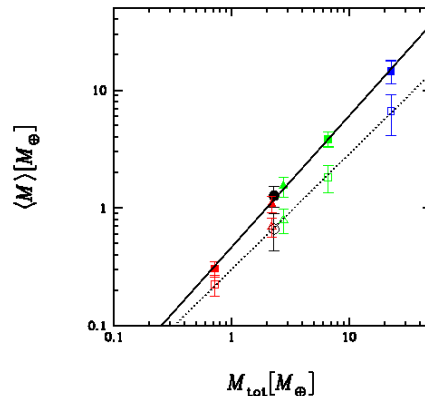
4. 研究成果

(1) 惑星の個数、質量、軌道要素について基本的な統計をまとめ、論文として発表した(Kokubo et al. 2006)。太陽系形成の場合の標準原始惑星系から典型的には、2個の地球サイズの惑星が地球型惑星領域に形成されることがわかった。また、地球型惑星の個数と質量を決める重要な原始惑星系のパラメータは全質量であることがわかった。惑星の個数は全質量の増加に伴い緩やかに減少し(図1)、質量は全質量にほぼ比例して増加す



る(図2)。

図1: 原始惑星全質量-惑星個数関係。実線は



全惑星数、点線は地球型惑星領域の惑星数

図2: 原始惑星全質量-惑星質量関係。実線は最大惑星、点線は第2位惑星の質量。

(2) 自転パラメータについて基本的な統計をまとめ、論文として発表した(Kokubo and Ida 2007)。太陽系形成の場合の標準原始惑星系から形成される地球型惑星の典型的な自転角速度は回転不安定の臨界角速度になることがわかった(図3)。また、赤道傾斜角の分布は等方的になる(図4)。これは形成直後の地球型惑星の自転軸は軌道面に近いものが多いことを示唆している。

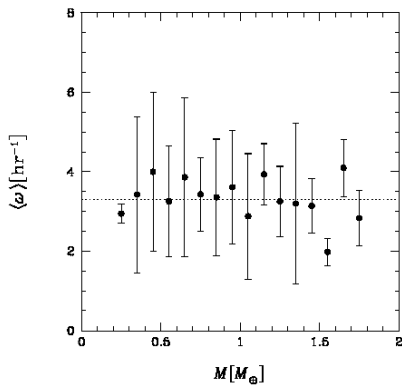


図3: 惑星質量-自転角速度関係。点線は回転不安定臨界角速度。

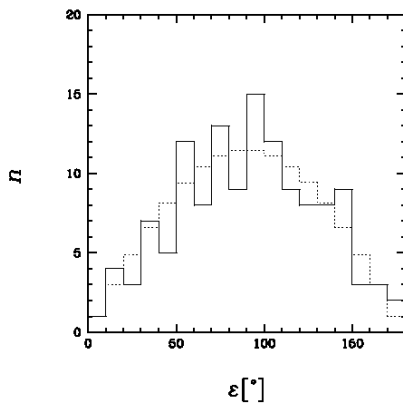


図4: 自転軸傾斜角-惑星数関係。点線は等分布。

(3) 原始惑星どうしの衝突シミュレーションから得られた衝突速度や角度を考慮した現実的な合体条件の下で、個数、質量、軌道要素、自転パラメータについての基本的な統計を求めた。これまでの完全非弾性衝突を仮定した場合と比較して、個数、質量、軌道要素についてはほとんど変わらないことが確かめられた。しかし、自転角速度については下がり、回転不安定の臨界角速度の70%くらいに抑えられることがわかった。赤道傾斜角の分布は等方的で変わらない。これらの結果は現在論文投稿準備中である。

(4) 初期原始惑星系の半径方向の分布範囲を変化させて、形成される地球型惑星の個数、質量を調べた。この場合もやはり、惑星の質量は原始惑星の全質量にほぼ比例することがわかった。また多くの場合、水が存在できる温度になる太陽からの距離範囲(ハビタブルゾーン)に惑星が少なくとも1個形成されることがわかった。これらの結果は現在論文投稿準備中である。

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5件)

- ① Machida, M. N., Kokubo, E., Inutsuka, S., Matsumoto, T., Angular Momentum Accretion onto a Gas Giant Planet, *The Astrophysical Journal*, 685, 1220-1236, 2008, 査読有
- ② Kokubo, E., Ida, S., Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets. II. Statistics of Planetary Spin, *The Astrophysical Journal*, 671, 2082-2090, 2007, 査読有
- ③ Higuchi, A., Kokubo, E., Kinoshita, H., Mukai, T., Orbital Evolution of Planetesimals due to the Galactic Tide: Formation of the Oort Cloud, *The Astronomical Journal*, 134, 1693-1706, 2007, 査読有
- ④ Michikoshi, M., Inutsuka, S., Kokubo, E., Furuya, I., N-Body Simulation of Planetesimal Formation through Gravitational Instability of a Dust Layer, *The Astrophysical Journal*, 657, 521-532, 2007, 査読有
- ⑤ Kokubo, E., Ida, S., Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets. I. Statistics of Basic Dynamical Properties, *The Astrophysical Journal*, 642, 1131-1139, 2006, 査読有

〔学会発表〕(計20件)

- ① Kokubo, E., Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets, Kona (USA), Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity, 2009.3.9-12
- ② Kokubo, E., Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets, San Francisco (USA), 2008 AGU Fall Meeting, 2008.12.15-19
- ③ Kokubo, E., Dynamics of Planetary Accretion, Nanjing (China), The Third East-Asia Numerical Astrophysics Meeting, 2008.11.10-13
- ④ Kokubo, E., Formation of Planetary Systems, Kyoto (Japan), Accretion and Outflow in Astrophysics 2008, 2008.1.8-11
- ⑤ Kokubo, E., Formation of Terrestrial Planets under a Realistic Accretion Condition, Kunming (China), The 10th Asian-Pacific Regional IAU Meeting, 2008.8.3-6
- ⑥ 小久保英一郎, 玄田英典, 井田茂, 現実的な条件合体のもとでの地球型惑星の自転, 日本天文学会春季年会, 2008.3.25, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑦ Kokubo, E., Genda, H., Ida, S.,

- Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets: Effects of Conditional Accretion, Suzhou (China), IAU Symposium 249 Exoplanets: Detection, Formation and Dynamics, 2007.10.25
- ⑧ Kokubo, E., Ida, S., Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets: Statistics of Planetary Spin, Santorini (Greece), Extreme Solar System, 2007.6.25-29
- ⑨ 小久保英一郎, 玄田英典, 井田茂, 地球型惑星の自転--合体条件の効果, 岐阜大学, 日本天文学会秋季年会, 2007.9.28
- ⑩ 小久保英一郎, 玄田英典, 井田茂, 原始惑星からの地球型惑星形成-不完全集積の影響, 高知大学朝倉キャンパス, 日本惑星科学会秋季講演会, 2007.9.26
- ⑪ 小久保英一郎, 井田茂, 最小質量円盤モデル再訪 - 巨大衝突による地球型惑星形成モデルから, 東海大学湘南キャンパス, 平塚, 日本天文学会春季年会, 2007.3.29
- ⑫ 小久保英一郎, 井田茂, 地球型惑星形成の原始惑星分布領域幅依存性, 兵庫県立美術館, 神戸, 日本惑星科学会秋季講演会, 2006.10.19
- ⑬ 小久保英一郎, 井田茂, 原始惑星からの地球型惑星形成-原始惑星分布領域幅依存性, 九州国際大学, 北九州, 日本天文学会秋季年会, 2006.9.21
- ⑭ 小久保英一郎, 井田茂, 巨大衝突による地球型惑星の自転, 幕張メッセ国際会議場, 地球惑星科学連合大会, 2006.5.16
- ⑮ 小久保英一郎, 井田茂, 地球型惑星の自転, 和歌山大学, 日本天文学会春季年会, 2006.3.29
- ⑯ Kokubo, E., Formation of Terrestrial Planets and the Origin of Water on the Earth, Niigata (Japan), International Symposium on Origins of Life and Astrobiology, 2005.7.1
- ⑰ Kokubo, E., From Protoplanets to Terrestrial Planets, Makuhari (Japan), Early Earth Symposium, 2005.5.20
- ⑱ Kokubo, E., Kominami, J., Ida, S., Terrestrial Planet Formation from Protoplanets, Waikoloa (USA), Protostars and Planets V, 2005.10.24-28
- ⑲ Kokubo, E., From Protoplanets to Terrestrial Planets: Statistical Properties of Assembled Planets, Cambridge (UK), 37th Annual Meeting of the AAS Division for Planetary Sciences, 2005.9.4-9

- ⑳ Kokubo, E., Protoplanets to Terrestrial Planets, Aspen (USA), Planet Formation and Detection, 2005.2.9

〔図書〕(計1件)

- ① 小久保英一郎, 福江純・粟野由美編「宇宙はどこまで明らかになったのか」, 太陽系起源最前線, 88-109, ソフトバンククリエイティブ, 2007

〔その他〕

- ① 本研究の成果も使用して製作されたCG映像「地球と月の誕生」が一般向けに以下のURLで公開されている。
<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/index.php?id=EarthAndMoon>



原始惑星の衝突(「地球と月の誕生」から)

- ② 本研究とその成果を使用して製作されたCGが倉敷科学センターのプラネタリウム番組「私たちは星のかけら～太陽系が生まれる～」として平成20年11月7日-平成21年3月1日に公開された。
<http://www2.city.kurashiki.okayama.jp/lifepark/ksc/pdf/gkake.pdf>

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：90332163

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし