

平成22年 6月 1日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740252

研究課題名 (和文) 衝突過程を考慮した地球型惑星形成の研究

研究課題名 (英文) Terrestrial planet formation including impact process

研究代表者

玄田 英典 (GENDA HIDENORI)

東京大学・大学院理学系研究科・特任助教

研究者番号：90456260

研究成果の概要 (和文)：

地球のような岩石惑星がどのように作られたのかを解明するために、惑星形成において、極めて重要なプロセスである、天体の長期軌道進化と天体同士の衝突という2つのプロセスを考慮した数値計算コードを世界で初めて開発した。このコードを用いて岩石惑星が作られる過程を詳細に調べ、形成される惑星の数や質量などの統計量を導いた。それらの結果から、太陽系の地球型惑星における一般性・特殊性を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

We have made the hybrid code including both the orbital evolution and impact process of the protoplanets. Such two processes are fundamental to the planet formation. Using this hybrid code for the giant impact stage, we systematically investigate the terrestrial planet formation, and derive the important statics such as the final number of the terrestrial planets, their mass, spin states, and so on. From these outcomes, we discuss the generality and specificity of the terrestrial planets.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星形成、天体衝突、大規模数値計算、地球型惑星

## 1. 研究開始当初の背景

地球型惑星形成には、大きくわけて3つのステージが存在する。図1のように、ダストとガスからなる原始惑星系円盤から km サイズの微惑星が形成されるステージ、それら微惑星が集積して、火星サイズの原始惑星にまで成長するステージ、数十個の原始惑星が互いに衝突合体をし、現在の地球型惑星にまで成長するステージ、である。最終ステージである巨大天体衝突ステージは、現在の地球型惑星の特徴、例えば、惑星の数やその質量、巨大衛星の有無などを決定することから、近年注目を集め、20本を超える多くの論文が発表されている(例えば Kokubo et al. 2006)。

巨大天体衝突ステージにおける研究の流れは2つある。1つは、太陽のまわりを公転する複数個の原始惑星の長期軌道進化を追うN体シミュレーションであり、もう1つは、原始惑星同士の衝突を再現する流体シミュレーションである。特に後者では、月の起源として有力視されているジャイアントインパクト説と関連して月が形成される衝突条件などが調べられている。

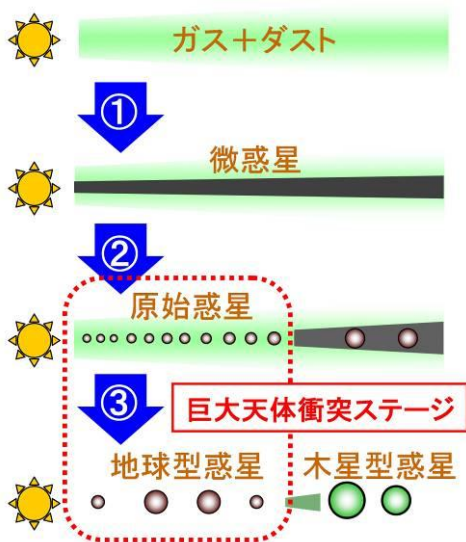


図1 地球型惑星形成の描像

## 2. 研究の目的

原始惑星の軌道進化と、原始惑星同士の衝突は、互いに深く関係しあっているため、本来は、両方のプロセスを同時に解かないと、本質を見失う可能性がある。そこで、本研究では、太陽のまわりを公転する原始惑星の軌道進化 (N体コード) と、その際に起こる原始惑星同士の衝突 (流体コード) を一連の計算で扱うことのできるハイブリッドコードを開発する。そして、この計算で最終的に得られた結果 (例えば、地球型惑星の個数や質

量分布、コア/マントル比の大きな水星のような惑星の形成確率など) から、現在の地球型惑星の特徴における普遍性と特異性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

原始惑星の軌道進化を追うN体コードを作成する。すでに方法論的に確立されている4次精度のエルミート解法 (Makino & Aarseth 1992) を用いることによって、衝突イベントを見逃すことなく長期軌道積分 (~1 億年) を精度よく計算する。

すでに開発済みである衝突計算コード (SPHコード) と新たに作成したN体コードを使い、ハイブリッドコードを作成する。ハイブリッド化にあたっては、巨大天体衝突ステージを一連の計算で実行することができるよう各コード間のデータの受け渡しに最善の注意を払う (図2)。特に、衝突によって変化した惑星の質量、自転速度と向き、コア・マントル比、衛星形成の有無などを次回の衝突まで情報を保持させる。このことにより、巨大天体衝突ステージ全体を通して、これら惑星の物理パラメータの進化を追うことが初めて可能となる。

重力多体専用計算機 (GRAPEシステム) を購入し、ハイブリッドコードを用いてできるだけ多くの初期条件で系統的な巨大天体衝突ステージの計算を行う。

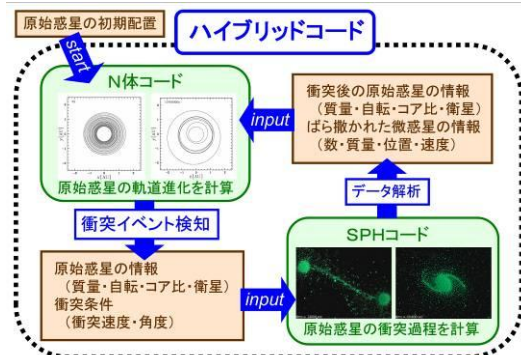


図2 ハイブリッドコードの概要

## 4. 研究成果

地球型惑星の様々な特徴に影響を与える巨大天体衝突ステージにおいて、原始惑星同士の衝突過程を詳細に追い、かつ精密な長期間の軌道進化を計算することのできるコードを世界で初めて開発した。図3は、その計算コードを用いて原始惑星の軌道進化を解いた結果の一例である。

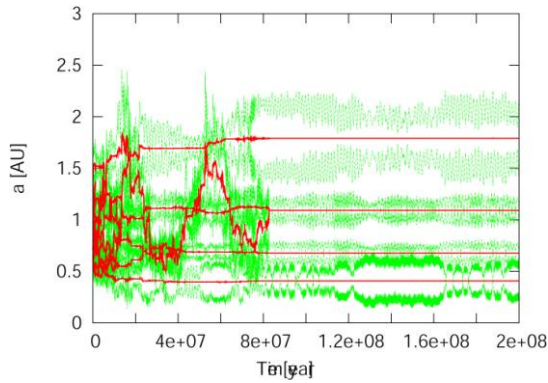


図3 原始惑星の軌道進化

このような計算を、初期条件の異なる 10 通りの場合について計算をし、データを解析し統計量を議論した結果、主に以下のことが明らかとなった。

(1) 地球型惑星の基本的性質

最終的に形成される地球型惑星の数は、4 個程度となることがわかった。また内側 2 つは比較的大きく、外側 2 つの惑星は小さいことがわかった。これは現在の地球型惑星の質量分布と非常に調和的である。

(2) 地球型惑星のスピン

ハイブリッドコードは、衝突過程の詳細を組み込んでいるため、衝突によって惑星のスピンがどのように獲得されていくかも追うことが可能である。その結果、最終的に形成される地球型惑星の自転速度は、完全合体を仮定していた従来の研究 (Kokubo & Ida 2007) よりも約 50%ほど遅く、現在の地球-一月系の角運動量相当の自転速度となる可能性が極めて高いことがわかった。このことは、複数回起こる巨大天体衝突のうち少なくとも 1 回は、月のような巨大な衛星が必然的に形成されることを意味する。

一方、自転軸の傾きは、天体衝突が三次元的にランダムであることから、等方分布となることがわかった (図 4)。このことから、形成直後の地球型惑星の自転軸は、直立しているよりもむしろ倒れている方が確率的には高いことがわかった。

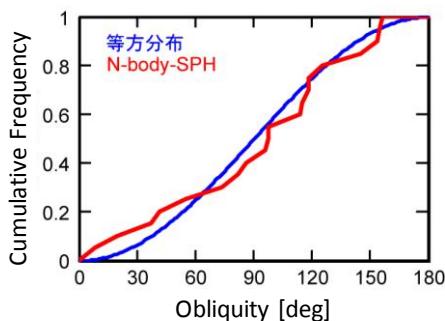


図4 自転軸の傾きの分布

(3) コア・マントル比

確率は決して高くはないが、高速度で原始惑星同士が衝突すると、原始惑星のマントルが選択的に吹き飛び、相対的に惑星の金属コアの量が増える (図 5)。特に、太陽に近い場所では、公転速度が高いため、確率的に高速度の衝突が起こりやすい。最終的に形成された地球型惑星のコア質量比を調べたところ、現在の水星のような大きな金属コアを持つ惑星が地球型惑星形成領域の内側で形成されやすいことが分かった。

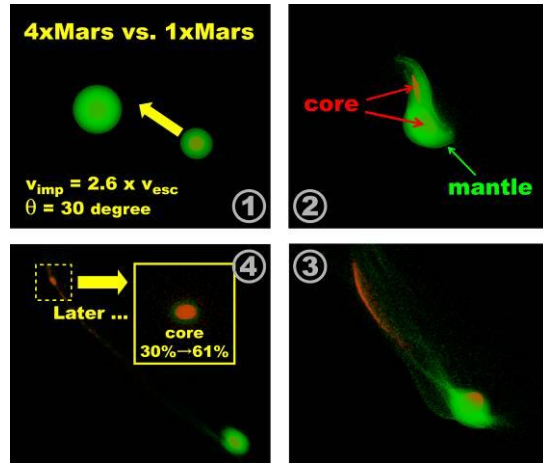


図5 高速度衝突によるマントルのはぎとり

(4) 衝突デブリ

高速度衝突だけでなく、ごく一般的な衝突においても、程度の差こそあれ、物質がまき散らされる。巨大天体衝突ステージを通じて、どの程度の物質がばらまかれるのかについて調べたところ、0.4 倍の地球質量程度と、従来考えられていたよりも、多くの物質がばらまかれることが分かった。このようにばらまかれた物質は、最終的に形成された地球型惑星の軌道に大きな影響をおよぼすと考えられる。特に、巨大天体衝突で上がってしまった惑星の離心率を現在の小さい値にまで下げてくれるかもしれない。

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 Kokubo, E. and Genda, H., 2010, Formation of terrestrial planets from protoplanets under a realistic accretion condition, 2010, Astrophysical Journal 714, L21-L2, 査読有.
- ② Genda, H. and Ikoma, M., 2008, Origin of the ocean on the Earth: early evolution of water D/H in a

hydrogen-rich atmosphere. Icarus, 194, 42-52, 査読有.

- ③ 玄田英典、生駒大洋、2008、地球の海の起源～現状整理と D/H の初期進化～、遊星人 17、238-243、査読有

〔学会発表〕(計 21 件)

- ① Genda, H., Kokubo, E. and Ida, S., Giant impact and terrestrial planet formation, Asia Oceania Geosciences Society, Singapore, 2008.
- ② 玄田英典、小久保英一郎、井田茂、天体衝突を考慮した軌道計算コードの開発、日本惑星科学会秋季講演会、九州大学、2008.

〔図書〕(計 1 件)

- ① 玄田英典、大気の起源 (第 6 章 5 節)、シリーズ現代の天文学 第 9 巻「太陽系と惑星」、渡辺潤一 他編、日本評論社、2008.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

玄田 英典 (GENDA HIDENORI)

東京大学・大学院理学系研究科・特任助教  
研究者番号：90456260

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし