

# 惑星系の多様性の起源

## —原始惑星系円盤質量による惑星の住み分け—

小久保 英一郎

〈国立天文台理論天文学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉  
e-mail: kokubo@th.nao.ac.jp

井田 茂

〈東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉  
e-mail: ida@geo.titech.ac.jp

太陽系以外の惑星の発見により惑星系は銀河系に普遍的に存在することが明らかになった。しかしその太陽系とは似て非なる様相は惑星系形成論に新たな疑問を投げかけている。なぜこのような惑星系が存在するのか。ここでは太陽系形成シナリオの基礎となる原始惑星の寡占的成長と木星型惑星の形成条件を質量の違う原始惑星系円盤に適應することによって、そこから形成される惑星系がどのような多様性をもつのかを議論する。

### 1. はじめに

1995年の最初の太陽系以外の惑星（以下系外惑星と呼ぶ）の発見からこれまでに100個を超える系外惑星が発見されている。今や銀河系に惑星系が普遍的に存在することは天文学の常識になった。これまでに発見されている系外惑星は質量からどれも木星型惑星だと考えられている。しかし、その軌道は軌道長半径が水星軌道より小さかったり（灼熱巨大惑星）、軌道離心率が彗星なみに大きかったり（大離心率惑星）、太陽系の惑星とは様相を大きく異にしている。

系外惑星の発見は惑星系形成論に新しい問題をつきつけた。これらの系外惑星系の存在はこれまで考えられてきた太陽系形成シナリオと矛盾しないのか。どのようにして惑星系の多様性は生み出されるのか。太陽系形成シナリオは現在の太陽系の起源を説明するためにチューニングされている。これは太陽系形成シナリオでは捨てられてきたパラメータが惑星系の多様性を生み出す可能性があるこ

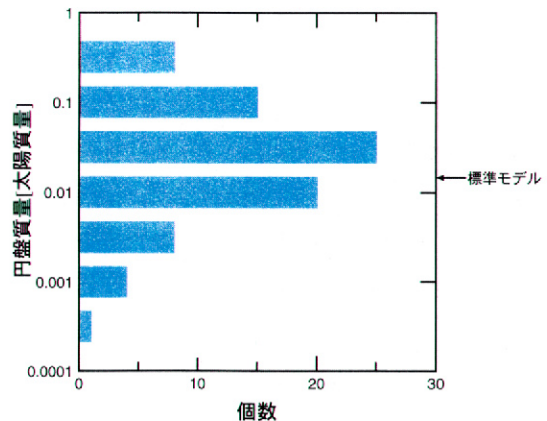


図1 おうし座とへびつかい座での原始惑星系円盤の質量の頻度分布<sup>1)</sup>。

とを意味する。例えば、太陽系形成の標準シナリオでは惑星系の母胎である原始惑星系円盤の質量は太陽質量の約1/100倍に固定されている。しかし、実は原始惑星系円盤の質量には太陽質量の1/1000–1/10倍というばらつきがあることが観測から明らかになっている（図1）<sup>1)</sup>。

銀河系に普遍的に惑星系が存在することが明らかになった今、惑星系形成の研究を太陽系だけでなく系外惑星系を含めた多様な惑星系に拡張する必要がある。そして、太陽系の起源も含めた一般化された惑星系形成論を構築していかななくてはならない。本稿ではその第1歩として、原始惑星系円盤の質量の違いによってどのような惑星系の多様性が生み出されるかについて考察する<sup>2)</sup>。まず基礎となる太陽系形成シナリオを概観し、太陽系内の惑星の並びがどのように説明されるかを紹介する。そしてそれを拡張することによってどのような惑星系の多様性が可能かを考える。

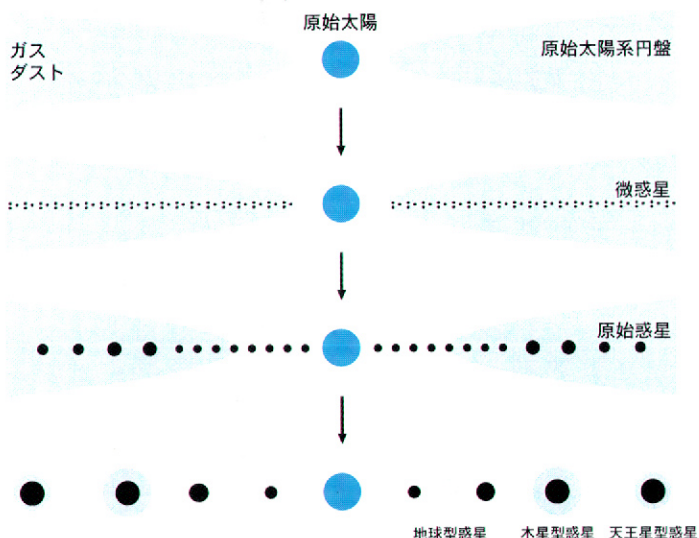


図2 太陽系形成標準シナリオの概念図。

## 2. 太陽系形成の標準シナリオ

太陽系の惑星は主成分の違いから3種類に分類される。内側から地球型(岩石)惑星(水金地火)、木星型(ガス)惑星(木土)、天王星型(氷)惑星(天海)である。これらの惑星はなぜこのような順に並んでいるかを考える。

太陽系(惑星系)は、中心星と比べて質量の小さいガスとダストからなる原始太陽系(惑星系)円盤から形成される。原始太陽系円盤の標準モデルは最小質量円盤モデルと呼ばれ、現在の太陽系の固体成分の分布からダスト分布を再構成したものである<sup>3)</sup>。ガス成分はダスト成分の約100倍とする。ダストの主成分は太陽からの距離によって変化する。雪限界線(円盤温度が水の昇華温度になる距離で、標準モデルでは約2.7AU)の内側では岩石質、外側では氷質になる。

図2に原始太陽系円盤からの太陽系形成の概念図を示す。標準シナリオの概要を説明する<sup>4)</sup>。

(0) 原始太陽のまわりにその誕生とともにガスとダストからなる原始太陽系円盤(約1/100太陽質量)が形成される。

(1) ダストから第1世代のマクロな天体である微

惑星( $10^{18-21}$ g)が形成される。

(2) 微惑星は太陽のまわりを公転しながら互いに衝突合体して成長する。微惑星の成長により原始惑星とよばれる第2世代の天体( $10^{27-29}$ g)が形成される。

(3) 地球型惑星は原始惑星の衝突合体により完成する。

(4) 原始惑星が原始太陽系円盤から重力によりガスをまとうことによって木星型・天王星型惑星は完成する。

この標準シナリオは大枠では物理的に無理なく太陽系形成を説明することに成功している。

このシナリオで太陽系の構造を生み出すのに重要な過程である原始(固体)惑星形成と木星型惑星形成について以下で少し詳しく見ていく。

## 3. 原始惑星の寡占的成長

太陽系の固体成分はダスト、微惑星、原始惑星、惑星と成長していく。原始惑星の成長は寡占的成長と呼ばれる<sup>5)</sup>。1個ではなく複数の支配的な原始惑星が優先的に成長するのでこのように呼ばれる。



寡占的成長では原始惑星は軌道反発と呼ばれる重力相互作用によりある軌道間隔を保ちながら成長する。この間隔は原始惑星のヒル(ロッシュ)半径(軌道運動する粒子の重力圏の大きさ)に比例する。寡占的成長で形成される原始惑星の質量

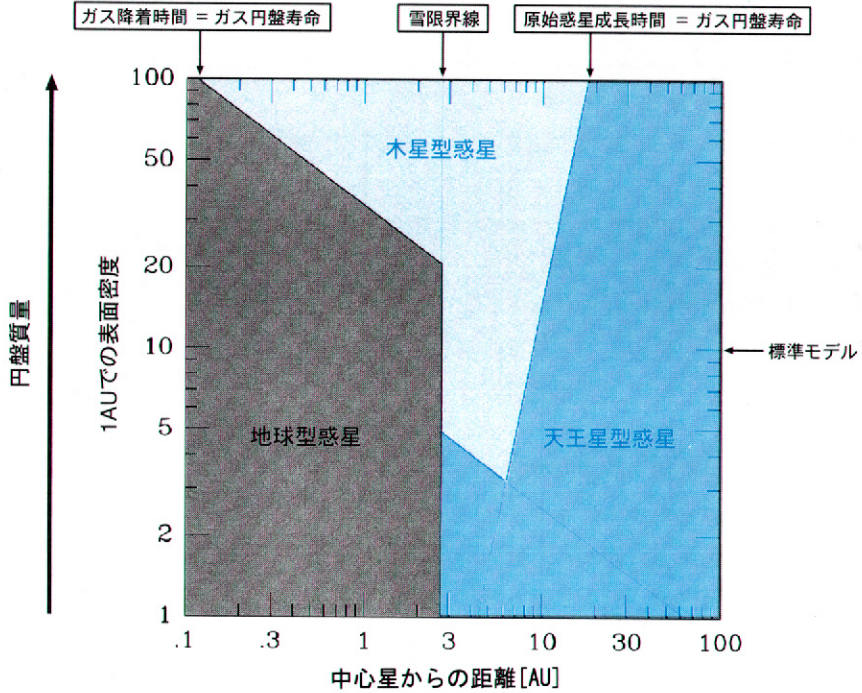


図3 惑星の住み分け図。横軸は中心星からの距離、縦軸は1AUでのダスト成分の表面密度(円盤質量に比例)。

は、微惑星の初期分布と原始惑星の軌道間隔が与えられれば見積もることができる。

原始惑星系円盤のダスト成分の初期分布を

$$\Sigma = \Sigma_1 \left( \frac{a}{1\text{AU}} \right)^{-\alpha} \text{ g cm}^{-2} \quad (1)$$

とする。ここで $\Sigma_1$ は1AUでの表面密度分布で円盤質量に比例し、 $\alpha$ は質量の分布則を決める(標準モデルは $\Sigma_1=10$ ,  $\alpha=3/2$ の円盤に相当する)。 $a$ は中心星からの距離である。微惑星の分布もこの分布に従うとする。このとき原始惑星の質量 $M$ と成長に要する時間 $T_{\text{grow}}$ はそれぞれ

$$M \propto \Sigma_1^{3/2} a^{(3/2)(2-\alpha)} \quad (2)$$

$$T_{\text{grow}} \propto \Sigma_1^{-9/10} a^{(9\alpha+16)/10} \quad (3)$$

となる。

ここで固体惑星の分布について説明しておく。

太陽系の固体惑星の分布が内側に地球型惑星、外側に天王星型惑星となるのは、惑星の材料である微惑星、さらにはその材料のダスト成分の違いからである。

#### 4. 木星型惑星の形成条件

固体惑星が自らの重力でガス円盤からガスをまとい木星型惑星になるには次の2つの条件を満たさなくてはならない。

[1] 固体惑星へのガス降着に要する時間 $T_{\text{cont}}$ がガス円盤の寿命 $T_{\text{disk}}$ よりも短い( $T_{\text{cont}} < T_{\text{disk}}$ )<sup>6)</sup>。

[2] 固体惑星の成長時間がガス円盤の寿命よりも短い( $T_{\text{grow}} < T_{\text{disk}}$ )。

どちらの時間スケールも固体惑星の質量に依存し、ガス降着時間は質量が大きいくほど短くなり、成長時間は質量が大きいくほど長くなる。固体惑星の質量と形成時間は寡占的成長では太陽からの距離によって決まる。式(2)と(3)から原始太陽系円盤の標準モデル( $\alpha=3/2$ )では $M \propto a^{3/4}$ ,  $T_{\text{grow}} \propto a^{59/20}$

となり、外側ほど質量は大きくなり形成時間は長くなる。よって条件 [1] により木星型惑星が形成可能な最小距離が決まり、条件 [2] によって最大距離が決まることになる。つまりちょうど条件 [1], [2] を満たす領域だけに木星型惑星が形成されることになる (図3)。そしてその内側と外側にそれぞれ木星型になるには小さ過ぎた地球型惑星と木星型になるには成長に時間がかかり過ぎた天王星型惑星が存在することになるわけである。

このように雪限界線、原始惑星の寡占的成長、木星型惑星形成条件を考慮することによって、太陽系で内側から外側へ向かって地球型、木星型、天王星型と惑星が並ぶことが自然に説明される。つまり、原始太陽系円盤の質量、質量分布、温度構造、ガス円盤の寿命によって太陽系の基本的な構造が決まることになる。

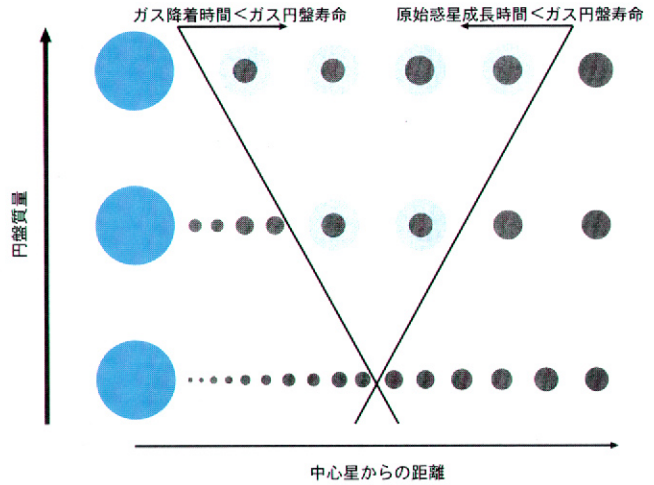


図4 円盤質量と惑星系の多様性. 左の大丸は中心星を表す. 一重丸は地球型・天王星型惑星を二重丸は木星型惑星を表す.

### 5. 惑星の住み分け

原始惑星の寡占的成長と木星型惑星の形成条件を質量や分布の違う一般的な原始惑星系円盤に適用することによって、その円盤で形成される惑星の住み分け、つまり惑星系の多様性を知ることができる<sup>2)</sup>。

図3は標準モデルと同じ質量分布 ( $\alpha = 3/2$ ) で円盤質量 ( $\Sigma_1$ ) が違う原始惑星系円盤から形成される惑星の住み分け図である。ここでは原始惑星の軌道間隔を10ヒル半径、中心星の質量を太陽質量、ガス円盤の寿命は  $T_{\text{disk}} = 10^8$  年、原始惑星へのガス降着時間は  $T_{\text{cont}} = 10^8 (M/M_{\odot})^{-5/2}$  年としている<sup>6)</sup>。この図で縦軸を決めると円盤の質量が決まる。さらにその円盤から形成される惑星系での惑星の住み分けが横軸で示されている。例えば、 $\Sigma_1 = 10$  (標準モデル) を見ると、 $a \leq 3\text{AU}$  で地球型惑星、 $3\text{AU} \leq a \leq 10\text{AU}$  で木星型惑星、 $10\text{AU} \leq a$  で天王星型惑星と分布することがわかる。これは太陽系での

惑星の住み分けをほぼ再現していることがわかる。

円盤質量が大きくなると木星型惑星の領域は広がっていく。これは惑星の材料物質が多いと質量の大きな原始惑星が速く形成されるためである。例えば  $\Sigma_1 \geq 30$  では複数の木星型惑星が形成されることがわかる。一般に3個以上の巨大惑星があると惑星系は惑星間の重力相互作用によって軌道不安定になりやすい。このような惑星系が軌道不安定になり、近接散乱が起きて一部が系外に放出されるとか中心星に落ちた後に残った軌道離心率が大きな惑星が、現在観測されている大離心率惑星と考えられる。また、このような質量の大きな円盤ではガスの量も多く、ガスとの相互作用で惑星は中心星付近まで移動する可能性がある。このような惑星はいわゆる灼熱巨大惑星に相当するだろう。円盤の質量が大きい場合は内側に木星型惑星、外側に天王星型惑星という惑星系が形成されることになる。ガス円盤の寿命を長くするのも円盤の質量を大きくするのと定性的に同じ効果がある。

逆に円盤の質量が小さい場合は木星型惑星は形



成されない。これは形成される固体惑星が小さくかつ形成に時間がかかるためである。この場合、雪限界線の内側に地球型惑星、外側に天王星型惑星という固体惑星系になる。

円盤の質量が中程度の適当な場合にのみ、内側から地球型惑星、木星型惑星、天王星型惑星という並びの太陽系型の惑星系になる。

円盤の質量以外にも質量分布 ( $\alpha$ ) の違いによっても形成される惑星系の多様性が生み出される。ここでは詳しく述べないが、中心集中しているような分布では内側に木星型惑星が形成されやすくなる。

## 6. まとめ

惑星系の多様性の起源を考えるために、原始惑星の寡占的成長と木星型惑星の形成条件を質量の違う原始惑星系円盤に適応し、そこからどのような惑星系が形成されるかを見てきた。標準モデルの質量分布則 ( $\alpha = 3/2$ ) の場合について原始惑星系円盤の質量と惑星系の多様性の関係を図4にまとめておく。質量の大きな円盤からは複数の木星型惑星をもつ惑星系が、中程度の円盤からは太陽系型惑星系が、質量の小さな円盤からは地球型と天王星型惑星のみの固体惑星系が形成される。

惑星系の多様性を生み出す要因は今回考えた原始惑星系円盤の質量だけではない。本稿ではガスとダストの質量比を一定 (約 100)、惑星集積率 (惑星になるダスト成分の割合) を 100% としているが、実はこれらも変わりえる。また、標準シナリオでは考えられていない形成途中の原始惑星の移動によっても惑星系はますます多様になるだろう。さらに孤立した単一星まわりではなく非孤立系での惑星系形成では外的要因 (連星系での伴星から摂動や星団での恒星遭遇の効果など) も重要である。

惑星系の多様性の起源を探る研究は始まったばかりである。まずは木星型の系外惑星の観測と比較検討し修正を繰り返しながら理論モデルを洗練させていくことになる。そして木星型惑星の分布

を説明できる理論モデルができたなら、それを用いて地球型惑星の分布を予測し、系外地球型惑星探査の指針を与えることができるだろう。

## 参考文献

- 1) Beckwith S. V. W., Sargent A. I., 1996, Nat 383, 139
- 2) Kokubo E., Ida S., 2002, ApJ 581, 666
- 3) Hayashi C., 1981, PTPS 70, 35
- 4) 井田 茂, 小久保英一郎, 1999, 一億個の地球 (岩波書店)
- 5) Kokubo E., Ida S., 1998, Icarus 131, 171
- 6) Ikoma M., Nakazawa K., Emori H., 2000, ApJ 537, 1013

### Towards a Theory for the Diversity of Planetary Systems

Eiichiro KOKUBO

*Division of Theoretical Astrophysics, National Astronomical Observatory, Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Shigeru IDA

*Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, Ookayama 2-12-1, Meguro-Ku, Tokyo 152-8551, Japan*

Abstract: The discovery of extrasolar planets revealed that planetary systems universally exist in the Galaxy. On the other hand, it brings new issues that how the extrasolar planets whose orbital properties are different from those of the planets in the solar system are formed and what the origin of the diversity of planetary systems is. We apply the oligarchic growth model of protoplanets and the condition of gas giant planet formation to the protoplanetary disks with various masses. We show the dependence of the planetary diversity on the initial disk mass.