

●●●●あの論争は…いま？ (3) ●●●●

惑星系の起源—Cameron モデル対京都モデル—

The Origin of the Solar System: Cameron Model vs. Kyoto Model

小久保英一郎

〈国立天文台理論研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kokubo@th.nao.ac.jp

論点：太陽系の起源

論争の始まりと終わり：1970年代から現在まで

主な対立説：Cameron モデル（大質量円盤起源）、京都モデル（小質量円盤起源）

現在有望な説：京都モデルが標準モデルと認められている

はじめに

地球をはじめとする太陽系の惑星はどのようにして誕生したのでしょうか。この基本的な問題は2世紀以上の長い歴史をもちます。そして前世紀後半からは現代科学として、太陽系の起源が論じられるようになり、今日も続いています。

太陽系形成は星間雲の重力分裂により始まりです。まず系の中心部にガスの収縮により太陽が形成されます。そしてその周囲に副産物として円盤が形成されます。これが惑星系の母体となる原始惑星系円盤です。1970年代以降、太陽系形成モデルには、原始惑星系円盤の質量の大小により、二つの考え方があります。

一つは1太陽質量くらいの大質量円盤を起源とするもので、A. G. W. Cameronにより提唱されたので、通称Cameronモデルと呼ばれます¹⁾。

もう一つは1/100太陽質量の程度の小質量円盤を出発点とする、京都もしくはモスクワモデルと呼ばれるものです^{2), 3)}。この名前はモデルが研究された大学の所在地からきています。現在は、こちらが太陽系形成の標準モデルとなっています。

ここでは二つのモデルを比較しながら、それぞれの基本概念を簡潔に説明したいと思います。

美しい太陽系

起源を考える前に、説明すべき太陽系の特徴を簡単にまとめておきましょう。まず全体としての系の特徴です。太陽系の質量は約1/1,000太陽質量です。そのほとんどが木星と土星に集中しています。一方、惑星のもつ軌道角運動量は太陽の自転角運動量の約200倍にもなります。つまり、太陽系では、質量は太陽に角運動量は小質量の惑星に配分されているわけです。

次に惑星を見てみます。太陽系の惑星は3種類に分けられます。内側から地球型（水星、金星、地球、火星）、木星型（木星、土星）、天王星型（天王星、海王星）です。地球型惑星は岩石と鉄からなる固体惑星です。木星型惑星は水素・ヘリウムを主成分とするガス惑星です。その中心には岩石や水できた固体コアがあると考えられています。天王星型惑星は氷（水、メタン、アンモニア）の惑星です。表層に水素・ヘリウムガスがありますが、全質量に占める割合は約10%に過ぎません。

表1 Cameron モデルと京都モデルの比較

モデル	別名	円盤質量 [M_{\odot}]	ビルディングブロック	木星型惑星形成時間 [年]
Cameron	円盤不安定	~1	原始ガス惑星	10^3
京都	コア集積	~0.01	微惑星	10^7-10^8

これらの惑星の軌道はほぼ同一平面上にあり、円に近い形をしています。さらに無数の小天体（小惑星、カイパーベルト天体、オールト雲彗星）が太陽を取り囲んでいます。

このような特徴をもつ秩序立った美しい太陽系はどのようにして形成されたのでしょうか。二つの形成モデルを見ていきましょう。表1にそれぞれのモデルの比較をまとめておきます。小質量円盤を起源とする京都モデルとモスクワモデルの違いは、地球型惑星形成時に円盤のガス成分が残っているかいないかですが、以下ではまとめて京都モデルとして説明します。

Cameron モデル—原始ガス惑星仮説

Cameron モデルでは惑星系は1太陽質量くらいの原始惑星系円盤から形成されたと考えます。図1にモデルの概念図を示します。このモデルの要は、最初に大きなガス天体である「原始ガス惑星」を円盤の重力不安定により形成することにあります。

- (0) 太陽形成の副産物として約1太陽質量の原始惑星系円盤が形成される。
- (1) 円盤が重力不安定により分裂し、分裂片が収縮し原始ガス惑星が形成される。
- (2) 原始ガス惑星の中では、ダストが中心部へ沈殿集積し固体コアを形成する。

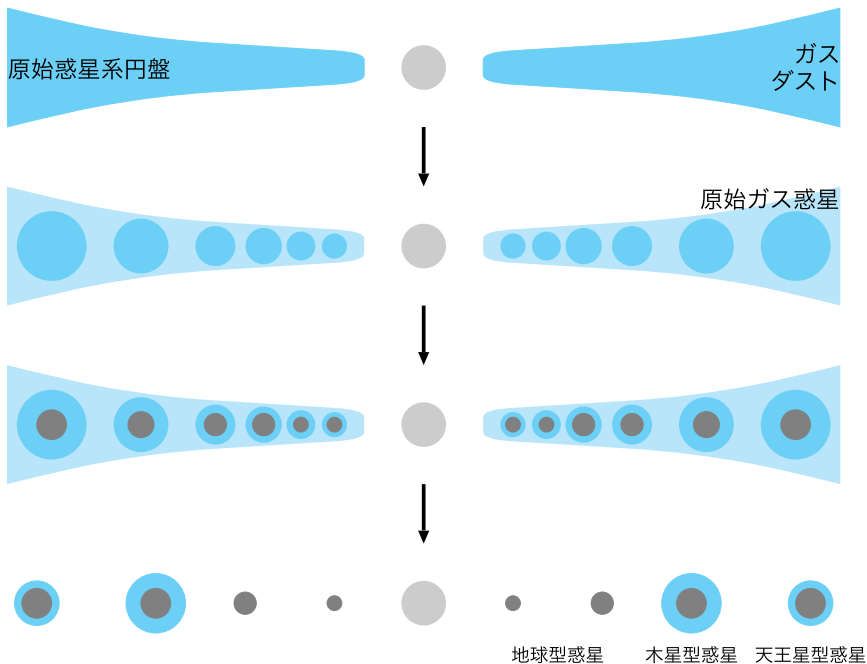


図1 Cameron モデルの概念図

(3) 原始ガス惑星からガスをはぎとった固体コアから地球型、天王星型惑星は形成される。木星型惑星は適度にガスを減少させることにより形成される。

つまり、このモデルでは円盤からまず原始ガス惑星を作り、そこからガスをはぎとることによって、地球型や天王星型惑星を形成するのです。木星型惑星にするにも、円盤組成より数倍から10倍くらい重元素を濃縮させる必要があります。このモデルの長所は木星型惑星を 10^3 年という短い時間で形成できることです。しかし、大きな問題点があります。原始ガス惑星の組成は円盤組成と同じとされます。つまり、ダスト成分とガス成分の質量比は1:100くらいです。そうすると、例えば、地球質量くらいの固体コアをもつ原始ガス惑星の質量は100地球質量にもなります。原始ガス惑星からガスをはぎとる方法として、原始ガス惑星どうしの衝突や近接散乱、太陽の潮汐力、太陽風、太陽紫外線、さらには高温円盤からの加熱、

近傍の大質量星からの紫外線、などが提案されていますが、100地球質量もの大きな天体の重力圏からほぼすべてのガスをはぎとることは難しいと考えられています。

つまり、このモデルの大きな問題は、地球型、天王星型惑星といった重元素の濃縮した惑星の形成の困難にあります。そして当然、彗星のような固体小天体の形成も難しくなります。また、そもそも仮定されているような、大質量で重力的に不安定な円盤が、星形成に続き自然に形成されるのかも疑問視されています。

京都モデル—微惑星仮説

Cameron モデルに対して、京都モデルでは1/100太陽質量程度の原始惑星系円盤を考えます。この円盤のモデルは「最小質量」円盤モデル、もしくは考案者(林 忠四郎氏)の名前をとって林モデルと呼ばれます。最小質量というのは、現在の太陽系を形成するのに必要最小限の固体質量を

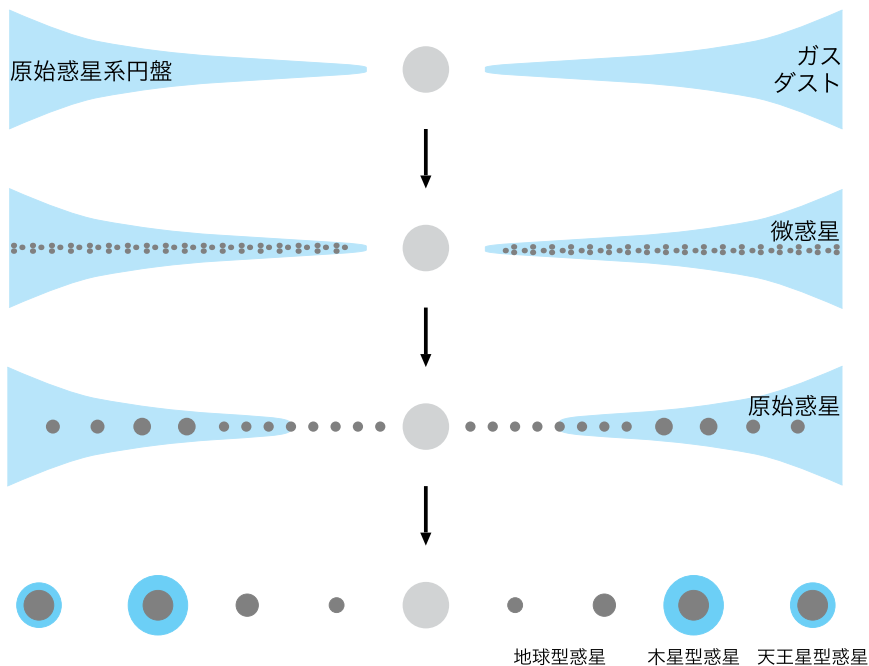


図2 京都モデルの概念図

含む円盤という意味です。このモデルの鍵はダストから形成される km サイズの小天体「微惑星」です。形成モデルは以下ようになります。

- (0) 太陽形成の副産物として約 1/100 太陽質量の原始惑星系円盤が形成される。
- (1) 円盤赤道面付近にダスト層が形成される。ダスト層は重力不安定により分裂し、分裂片が収縮し微惑星が形成される。
- (2) 微惑星の合体集積により原始惑星が形成される。
- (3) 地球型惑星は原始惑星の巨大衝突により、木星型惑星は原始惑星が円盤からガスをまとくことにより形成される。ガスをまといきれなかった原始惑星が天王星型惑星になる。

ここでは木星型惑星を作るのに、まず固体コアを作り、その後にはガスを付加する、という2段階を考えています。これによって、京都モデルでは自然に太陽からの距離によって3種類の惑星が形成されます。また、彗星などの小天体も、微惑星の生き残りと考えれば自然に説明できます。しかし、京都モデルにもさまざまな問題点があります。例えば、林モデルを使って見積ると、海王星の形成時間が太陽系年齢よりも長くなってしまいます。また、ガスの中で固体成分を成長させていくわけですが、その間にガスからのさまざまな抵抗を受けて太陽に落ちてしまう、という落下問題もあります。

しかし、いろいろ問題はありますが、総じて京都モデルのほうが自然に太陽系形成を説明できると考えられていて、標準モデルと呼ばれています。Cameron の名誉のために述べておきますが、彼は近年は京都モデルを標準モデルと認めていて、自ら論文に“... it does not appear promising to pursue the giant gaseous protoplanet scenario further.”（これ以上、原始ガス惑星モデルを追求しても将来があるとは思えない）と書いています⁴⁾。

最近、京都モデルと Cameron モデルのハイブリッドも提案されています。それは、木星型惑星は Cameron 式で、地球型惑星は京都式で形成しようというものです。

異形の惑星系の起源？

近年、太陽系以外の惑星系（系外惑星系）が発見されています。今では惑星数は 160 個を超えています。これらの惑星のほとんどは質量から木星型惑星と考えられていますが、軌道長半径が水星より小さかったり（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）と、太陽系の木星型惑星とはかなり違う、異形の惑星であることがわかってきました。このような太陽系とは違う多様な惑星系の形成モデルはどう考えるといいのでしょうか。

灼熱巨大惑星の発見は、Cameron モデルに再びスポットを当てることになりました。中心星に近いところに木星型惑星が存在するという事は、原始惑星系円盤の質量が大きかったことを示唆します。そして、そのような円盤は重力的に不安定な可能性があります。しかし、最近、Cameron モデルでは形成が困難な固体コア質量の大きい灼熱巨大惑星が発見され、旗色はあまりよくありません⁵⁾。

京都モデルでは、惑星系の多様性を説明するのに、原始惑星系円盤の初期状態、特に質量の違いが考えられています。京都モデルで研究されてきた惑星系形成の素過程を、重力的に不安定にならない程度の大質量円盤に適用することで、異形の惑星の起源を説明しようと、モデルの一般化が進められています⁶⁾。

ま と め

惑星系の形成モデルには、原始惑星系円盤の初期質量の大小により、Cameron モデルと京都モデルがあります。現在、標準とされているのは京都モデルです。京都モデルでは微惑星をビルディン

グブロックとして、まず固体惑星を形成し、それにガスを付加することで木星型惑星を形成します。しかし、標準モデルといっても、まだ作業仮説に過ぎない面もあり、多くの未解決問題が残されています。関係研究者は、系外惑星系の起源も視野に入れながら、日々それらの問題に取り組んでいます。京都モデルは、今まさに、多様な惑星系の起源も説明できる一般化された惑星系形成モデルに止揚されつつあります。

太陽系の起源だけでなく、月の起源などこの分野でも多くの先駆的な研究を行った **Cameron** は昨年 10 月、星界へと旅立ちました。生前、月の起源の研究会でお会いしたときに、「よくやっているね、次のシミュレーションを楽しみにしているよ。」と祖父が孫を見るような温かい眼差しで声をかけてもらいました。ご冥福をお祈りします。

参考文献

- 1) Cameron A. G. W., 1978, *The Moon & the Planets* 18, 5
- 2) Hayashi C., Nakazawa K., Nakagawa Y., 1985, *Protostars & Planets II*, eds. Black D. C., Matthews M. S. (The University of Arizona Press, Tucson), p. 1100
- 3) Safronov V. S., 1969, *Evolution of Protoplanetary Cloud and Formation of Earth and Planets* (Nauka, Moscow)
- 4) Cameron A. G. W., 1988, *ARA&A* 26, 441
- 5) Sato B., et al., 2005, *ApJ* 633, 465
- 6) Kokubo E., Ida S., 2002, *ApJ* 581, 666

「あの論争はどうなった？」テーマ大募集

編集委員会では、シリーズ「あの論争は…いま？」について、読者の皆さんからのテーマのリクエストを受け付けております。

論争に限らず、「あの天文学上の問題は解決したのか？」というテーマでもかまいません。ご提案いただいたテーマにふさわしい専門家に易しく解説していただきます。リクエストは、toukou@geppou.asj.or.jp まで。