

つくれ，地球型惑星！

長 沢 真樹子

〈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: nagasawa@th.nao.ac.jp

惑星の形成理論には、まだいくつか大きな問題が残されている。その一つに、巨大衝突によって形成された地球型惑星は、太陽系の惑星に見られるような円軌道を取りにくいという問題がある。ここで紹介する論文で、私たちは、原始惑星から惑星ができる段階に、原始惑星系円盤の散逸によって原始惑星系が乱されながら惑星形成が進むというダイナミカル・シェイクアップモデルを提唱し、数値多体計算によってその有効性を示した。原始惑星系が揺さられる過程と、成長した惑星がガス円盤の中を運動するなかで潮汐的な力を受けて円軌道になる様子を、地球型惑星の形成のシナリオを復習しながら見ていこう。

1. 地球型惑星への序章

1.1 目を天に、聞け、惑星の声

快速の惑星である水星、明けの明星の金星、生命の母である青き地球、赤く輝く火星。この4惑星は地球型惑星と呼ばれ、主として岩石でできている惑星である。これら惑星の軌道の外側には、主にガスでできている大きな二つの木星型惑星がある。惑星の王者の明るく大きい木星、驚異の輪をもつ土星。そしてさらに太陽系の奥深くの凍った領域には、氷と岩とでできている惑星が回っている。すなわち、古代の惑星世界を一気に広げた天王星、天体力学の勝利といわれた海王星、そして、太陽系の果てと思われていた冥王星である。

私たちが惑星と言われて思い起こすのは、何よりもまずこの九つの惑星であろう。しかし、惑星が存在するのは、何も太陽系のみではない。1995年以降、太陽系外で続々と木星型惑星が発見されていることを、そしてそれらが、太陽系の惑星から想像されるものと大きく異なっていたことを、すでに多くの読者はご存知のほうである。

太陽系外に惑星を探る試みは、20世紀の半ばに始まっていた。しかし、最初の太陽系外惑星（系外惑星）が発見されたのは、1995年、いまをさかのぼることわずか10年ほど前のことである。それ以来、すでに170個を超える系外惑星が発見されている。

系外惑星の探索に最もよく使われている技法は、ドップラーシフトである。しかし、よく知られているように、この技法には二つの難点がある。一つ目、惑星科学者がなによりも残念に思うのは、この技法では軌道面をどんな角度で見ているかわからないことである。したがって、惑星質量の下限はわかるが、絶対的な質量はわからない。ある惑星が木星より大きいことはわかっても、2倍大きいのか、10倍大きいのかかわからない。仮に木星と同じ質量なら、「おお、なにゆえに同じだ」と考えるし、また、100倍大きければ、「これはびっくり」と思う。しかし、今の段階ではそのどちらも許されない。二つ目の難点は、中心の恒星に対する惑星の影響が強い場合でないと思っつけにくいことだ。おまけに、惑星の公転周期が5年なら5年の観測、10年周期なら10年と、気長

に観測しないと中心星の運動周期が完結しない。1 周期の観測が完了しなくてもある程度のはわかるが、精度が悪い。そのため、水星のように中心星に近くにあり、かつ、木星の何倍も大きいといった奇態な惑星ばかりが発見されることになる。これでは、惑星としてのスタンダードがわからなくなる。

しかし最初の系外惑星の発見から 10 年以上が経過したいま、ひと周期を終えた惑星の報告数がかげのぼりに増加することは目に見えている。観測技術は、もう「地球軌道の地球型惑星」が発見できるところまで発達してきた。地球に住んでいる身として、やはり興味は地球型惑星にある。これからは地球型惑星を研究する時代である。太陽系外にある地球型惑星は地球と似ているのか、似ていないのか。生物が住める環境なのか、そうでないのか。何が惑星間の異同を決めるのか。それを決めるのは地球型惑星形成の歴史である。

太陽系における地球型惑星の形成進化について、私たちはおおよその物理とそのシナリオを理解している。少々変なところは片目をつぶって見過ごしてもいいのだが、これからどんどん地球型惑星が見つかるならば、細かいところまできちんと説明できなければ他の地球型惑星に対して恥ずかしい。そこでまず、地球型惑星が最終的に形成されるときに生じてしまう大きな離心率（つまり軌道が長い楕円になってしまう）の問題に取り組んでみた。

1.2 塵も積もれば惑星になるか

私たちの理解している地球型惑星成長のシナリオは、およそ次のようなものである。まず、原始惑星系円盤のダストから微惑星が形成される。ある程度、微惑星が大きくなると、その中でも大きいものがより強い重力で他の微惑星を集めて優先的に成長するようになる。つまり暴走成長が始まる。やがてその暴走は緩やかになり、それぞれ一つずつ領地をもつ大きな微惑星がお互いに軌道反発を繰り返しながら成長をする、寡占的成長の時

代を迎える。こうして他を圧倒してできる天体が原始惑星である。これらは、月ないし火星程度の質量をもっている。この質量がいわゆる孤立質量といわれるもので、太陽から遠いほど大きい。それぞれの軌道間隔は、ヒル半径（あるいはロッシュ半径の方が通じやすいかもしれない）と呼ばれる重力半径の 10 倍程度である。この状態で原始惑星はしばし安定の時期を過ごしたのち軌道が不安定となり、大衝突時代が訪れる。地球の月が形成されたのも、この火星サイズの天体の大衝突によると考えられている。

この最後の段階では、ほぼ太陽系のような地球型惑星系が作られる。大きめの惑星が二つ（金星、地球）できるのが普通で、一番大きい惑星は中心星から 1 天文単位 (AU) くらいの距離にできやすい。ただ一つ太陽系と違うのは、これら惑星軌道の離心率（円軌道からのずれ、0 が円軌道、1 が放物線）と軌道傾斜角（軌道の傾き）である。離心率は 0.1 から 0.2 程度、軌道傾斜角は 6 程度になるのが一般的である。「わずかにそれくらい」と思うかもしれないが、この軌道のゆがみは結構大きく、残念ながら、このような軌道をもつ惑星は地球に似ているとは言えない。

2. 原始惑星系をかき回せ！

2.1 もしも軌道がゆがんでいたら

もしもこのように軌道がゆがんでいるとしたなら、季節は、地軸の傾きよりも軌道上の位置によって決まるだろう。離心率が 0.2 もあったら、夏は金星軌道、冬は火星軌道に近づき、到底住みやすい環境になるとはいえない。凍りついたり、ぐつぐつ煮え立ったり、あるいは比熱の関係で凍りっぱなしという可能性もある、そんなところでは生命も発祥したくはあるまい。

もしも軌道がゆがんでいるなら、直してやればよい。一般的には、軌道運動に何らかの抵抗が働く場合、その軌道は円軌道に近づく。これまで多くの研究者が、抵抗を含めた計算を試みている。

まず挙げられるのは、ジョン・チェンバースの力学摩擦を含めた計算である²⁾。この研究では、計算に微小天体を多く含め、惑星の離心率を小さな天体に捨てることで、本体惑星の円軌道を達成しようと試みている。グレイグ・アグノールやウィリアム・ワード³⁾、小南淳子・井田 茂^{4),5)}は、それとは別種の抵抗源として、ガス円盤との間に生ずる潮汐的抵抗を考えている。抵抗は確かに離心率を小さくする。ただし、同時に別の問題も生み出してしまう。天体の軌道が円軌道に押さえられると、その当然の帰着として、原始惑星同士の衝突が妨げられ、惑星が成長しにくくなるのだ。その結果、火星のような惑星がたくさんできる。火星がたくさんある状態は、今日のように抵抗がない環境では安定ではなく、その間に激しい衝突が生じ、最終的にはやっぱり離心率が大きい惑星が生まれてしまう。

私たちが最も注目した研究は、小南・井田の計算である。そこでは、円盤による潮汐的な抵抗を円盤散逸に従って減衰させるところがすばらしい。つまり、抵抗が働きっぱなしだと惑星は成長できないし、抵抗がなければ円軌道に近くなれない。この困難を、彼らは「時間的に変化する抵抗力」を考えて回避しようというのである。円軌道の惑星を作るためには、初期にどんどん成長しながら円軌道に近づく「だんだん強くなる抵抗力」を考えると問題が楽になるが、自然は思いどおりにはならない。力学摩擦も、潮汐抵抗も、時間が経つにつれて減少する。このため、太陽系の惑星の軌道を再現するには、抵抗の強さを、時間の経過に対しかなり微妙に調整することが必要となる。しかしいくつかの例で、彼らは円軌道の地球型惑星の形成に成功している。

惑星進化の後期に強い抵抗を働かせるという考え方は常識的に無理がある。それならば、惑星進化の初期に、惑星の成長を促したほうがいい。つまり初期の強い抵抗に打ち勝って、原始惑星が衝突すればよい。それにはどうすればよいか？

2.2 天体力学のリベンジ、ダイナミカル・シェイクアップモデル

話がそれるように見えるかもしれないが、太陽系の小惑星帯を考えてみよう。細かく見ると、ここには実に面白い軌道分布がある。その分布は2 AU くらいからすっきりと始まり、3.3 AU くらいでふつりと終わる。その中には、小惑星がたくさんある位置もあるし、ひどく欠乏している場所もある。これには木星（や土星）との共鳴が関係している。2 AU の内端は、永年共鳴と呼ばれる共鳴で決まっている。外側の端は、2:1 の平均運動共鳴と呼ばれる共鳴で定められている。この帯域内で小惑星が多かったり少なかったりするものも、多くは平均運動共鳴によって決められるものである。

平均運動共鳴は、他の天体との軌道周期が整数比になるときに起きる。整数比だと、よく同じ場所でその天体と会合するので、同じようなキックを受け続けて、軌道が不安定になったり、本来不安定なはずのものが助けられたりするわけである。これに比べると、永年共鳴は少しこنگらかった複雑な共鳴である。天体が太陽と木星の二つだけで、重力以外に他の力が働かないならば、その軌道はケプラー軌道になり、天体は同じ楕円軌道上をいつまでも回り続ける。実際には、土星があったり、相対論的な力が加わったりするので、一周を終えても惑星は完全には同じ位置には戻らず、楕円軌道が少しずつずれていく。大まかに言うと、このずれの速度が二つの天体で等しいときに永年共鳴が起きる。楕円軌道の位置関係が常に同じになるから、偏った力を受けるのである（厳密な定義は、他に系の固有振動を考慮することも必要で、しごく面倒である）。この共鳴の特徴は、原因となる惑星から「離れたところで」生じることである。そしてその力は、小惑星の分布をはっきりと区分するほど強い。

これらの共鳴は、太陽系の固有の場所で起こり、その影響はローカルなものである。地球型惑

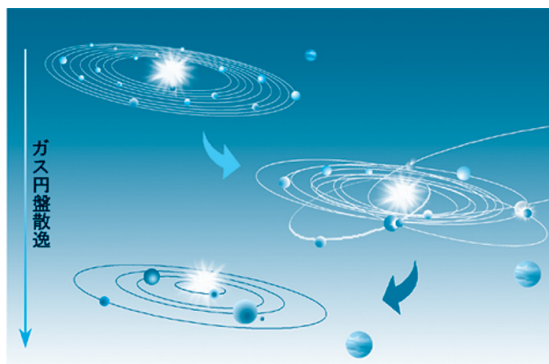


図1 ダイナミカル・シェイクアップモデルによる地球型惑星形成の概念図。上) 孤立状態にある原始惑星。中) 木星が成長し、ガス円盤が散逸し始める。共鳴が移動し、原始惑星が軌道交差する。下) 残っているガス円盤による潮汐的抵抗で惑星の離心率が下げられ、円軌道の地球型惑星が残される。

星の領域には、中心星から 0.6 AU の位置に木星による永年共鳴があるが、これは現在の惑星系をかき乱すようなものではない。ところが、過去にさかのぼると、そのとき太陽系のもっている原始惑星系円盤ガスの質量によって、楕円軌道運動のずれる速度が今とは異なり、現在 0.6 AU の位置にある永年共鳴が、実は 3 AU 程度のところにあったことがわかる。T-Tauri 型星の観測から、原始惑星系円盤のガスは、 100 万年から $1,000$ 万年の時間スケールで散逸することが知られている。つまり、この数百万年をかけて、 3 AU 程度のところにあった永年共鳴が 0.6 AU にまで動いてきたのである。永年共鳴は離心率を跳ね上げる。これが孤立している原始惑星系に影響を与えないはずはない。

筆者は天体力学が好きである。変な軌道の系外惑星が見つければ、まず摂動展開の本に手を伸ばすが、そこで軌道計算をしても、力学屋のおもちゃなのなんだのと言われ、評判は芳しくない。しかし、天体力学が巻き返すときはついに到来したのである。天体力学の基本たる永年共鳴、そう、これで軌道を揺さぶってやろう。私たちが考えた

のは、図1に示すストーリーである。

まず、円盤ガス内で太陽に近い側から原始惑星が成長し、ほぼ孤立状態を迎える(図1上)。太陽から遠い木星領域にある木星コアは、地球型惑星領域の原始惑星と比べるとその成長が遅れている。木星が円盤ガスを捕獲し大きくなると、 3 AU 程度に木星と円盤重力による永年共鳴が生じる。円盤ガスは数百万年で散逸する。それによりガス円盤の重力ポテンシャルが変化し、永年共鳴の位置は内側へと動いていく。共鳴がかかると原始惑星の離心率は上昇し、惑星が成長する(図1中)。この段階では、まだ十分にガス円盤が残っている。この円盤から受ける潮汐的な抵抗のために、共鳴が通り過ぎると惑星の離心率は速やかに小さくなる。共鳴は金星軌道を通り過ぎ、円盤ガスがなくなったあとは、完成した円軌道の地球型惑星が残されている(図1下)。これは、理屈の上では完璧なシナリオである。筆者らは、これをダイナミカル・シェイクアップモデルと呼ぶことにした。あとは計算してこれが本当かどうかを調べればよい。

3. 地球よ、円軌道になれ!

3.1 太陽系を狙い撃て

さっそく、計算の一例を見てみよう。図2は、原始惑星の軌道長半径(楕円の長半径で円軌道なら太陽からの距離)の進化を表したものである。実線を挟んでいる点線は、近日点と遠日点の位置を示していて、この幅を見ることで惑星の離心率がわかるという優れたものである。

はじめに 30 個程度の孤立質量の原始惑星を 0.5 AU から 3 AU 程度の範囲に並べておく。この状態から、ガスを指数関数的に減少させる。それにより、永年共鳴(点破線)は内側に移動する。共鳴が近づくと、原始惑星の離心率が跳ね上げられ、隣接する原始惑星と衝突を始める。衝突によって惑星は大きくなるが、始めはガスがたくさんあるので抵抗が強い。そのため離心率はすぐ

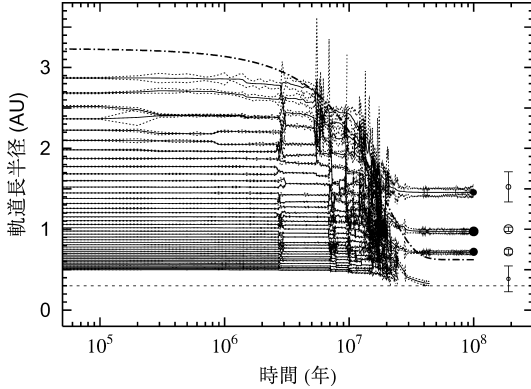


図2 ダイナミカル・シェイクアップモデルによる原始惑星の成長のシミュレーション例。縦軸は軌道長半径、横軸は時間。実線は軌道長半径、点線は近日点、遠日点の位置、一点破線は永年共鳴の位置。黒丸が最終的に形成された惑星。円の大きさは半径に比例。比較のために太陽系の地球型惑星（白丸）を右端に載せた。白丸にある縦線は地球型惑星の平均の近日点と遠日点を示す。

に小さくなる。しかし、離心率が下がると同時に抵抗を受けて軌道長半径も小さくなる。ガスが多いうちは、軌道の落ちる速さが共鳴の移動速度よりも速いため、原始惑星が移動した先にまた共鳴が追いかけてきて、また離心率が上昇する。こうして惑星は成長と落下を続ける。火星軌道程度の位置までくると、ガスはかなり少なくなるので、惑星の落下は離心率が上昇した当座の短い期間だけとなる。そして、図の場合、散逸が開始してから30万年程度で、四つの惑星が「円軌道」で完成する。

0.3 AUにある破線は計算領域の端を示している。あまり太陽に近い領域を含めると計算が重くなるので、近日点が0.3 AU以下の計算をはしなかった。しかしあとから考えれば、水星は0.38 AUにあり（離心率0.2）、ここで計算をやめたのは愚かであった。共鳴の届かない水星の離心率の大きい理由を証明できたのに、惜しいことであった。

計算中の惑星の落下は、私の予想外であった。

抵抗によって落ちるのだが、おかげで、小惑星帯の物質がきれいに掃き寄せられる。小惑星帯は、地球型惑星領域に比べて物質が欠乏し、予想される量の1万分の1しかないと言われているから、これはたいへん結構なことである。また、小惑星帯の物質は水を多く含み、その水の重水素と水素の比率は地球の海水のその比率に近いという意見もあり⁹⁾、この領域の原始惑星から地球ができるのは都合がよい。

3.2 地球がいっぱい

過去の研究によると、原始惑星が衝突していくつかの惑星になる過程は、本質的にカオティックである。ほんのわずかの軌道条件の違いから、毛色の違う惑星が形成され、どのような惑星系ができるかはそのときの運しだいである。とはいえ、統計的に見れば、やはりできやすい惑星系はある。そこで、初期の原始惑星の近日点経度を少しずつずらして、上記の計算を繰り返してみた。

図3は、30回の計算で作りに出された全部の惑星を、離心率と軌道長半径についてプロットしたものである。円の大きさは、惑星の半径に比例させてある。細かい惑星も入れて、平均的に3-4個の惑星が作られる。30例中25例において、すべての惑星の離心率が0.1以下となった。各計算で最

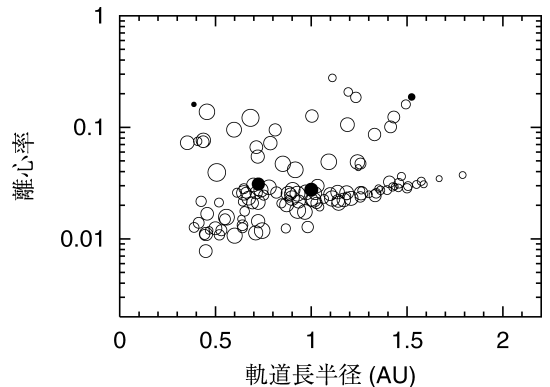


図3 30回の計算で作りに出された全惑星の離心率（縦軸）と軌道長半径（横軸）。円の大きさは惑星の半径に比例。白丸が計算で得られた惑星、黒丸は太陽系の地球型惑星。

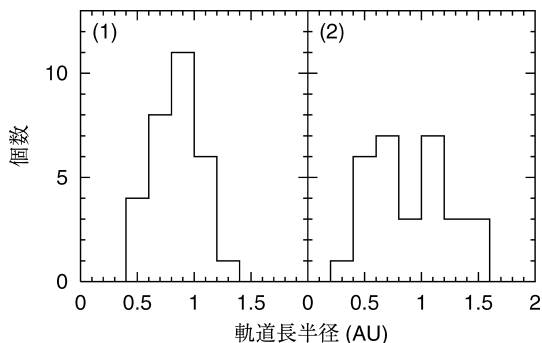


図4 それぞれの計算で作られた最大の惑星（左）と2番目に大きい惑星（右）の軌道長半径のヒストグラム。

大の惑星を抜き出してその位置をヒストグラムにしてみると、ちゃんと1 AUにピークをもつ（図4(1)）。二番目に大きい惑星は、ちょうど金星のように地球からちょっと離れた内側か、あるいはちょっと離れた外側に形成されやすい（図4(2)）。計算を繰り返してみると、どうも火星は、あまり衝突合体を経験しないで共鳴の後ろに散乱された原始惑星のようである。実のところ、惑星の位置や質量は、突き詰めればエネルギーや角運動量の保存から決まるので、何もダイナミカル・シェイクアップモデルでなくても、これらは太陽系類似になる¹⁾。ダイナミカル・シェイクアップモデルで重要なのは、抵抗が働いていても一般に離心率、軌道傾斜角が小さく、なおかつちゃんと育った惑星系が形成される点である。

3.3 そこにある限界

以上のように、ダイナミカル・シェイクアップモデルはうまく太陽系類似の惑星を再現することができる。だからといって、このモデルが何から何まで完璧であると主張するのは、いくらなんでも無理である。ダイナミカル・シェイクアップモデルがきちんと機能するには、やはりいくつかの条件がある。まず一つは、木星の影響が十分に力強くなければいけない。太陽系類似の地球型惑星系を形成するには、太陽系類似の木星が必要で、その離心率は今程度か、それより大きくなければ

いけない。二つ目に、ガス円盤の散逸の時間スケールが適度でなければならない。抵抗が働くには、木星形成の時まで地球型惑星領域に初期の数%はガス円盤が残っている必要がある。さっさと内側だけガスが散逸してはいけない。そして、抵抗のもとでも原始惑星の軌道交差を促進するためには、永年共鳴がある程度ゆっくり通過しなければならない。木星の離心率や円盤密度などにもよるが、指数関数の散逸の場合、500万年程度の時間スケールが必要である。

このことから容易に推測できるように、木星型惑星が太陽系類似ではない（むしろ今のところかなり違っている）系外では、ダイナミカル・シェイクアップで作られる地球型惑星は、太陽系の地球型惑星に似ているとは限らない。その場合に何が起きるかは、研究を進めて、またいつかお話をしたい。

4. 系外惑星と私たち

太陽系は、長い間、地球住人の知っている唯一の惑星系であった。惑星を作る理論は、太陽系を再現できるように構成され、太陽系の惑星系こそ宇宙の標準であると考えられてきた。系外惑星はその常識を揺るがせた。いくら太陽系外に変わった惑星が発見されているとはいえ、筆者は太陽系が標準から外れた特殊なものだと考えているわけではない。太陽系類似の惑星系は、まだ観測されていない大多数の惑星系の中にこそ存在するのである。これこそ、ドップラーシフトの限界を超え、より普通の惑星系を直接撮像で（質量の決定とともに！）探ろうとする今後のSPICA（Space Infrared Telescope for Cosmology & Astrophysics; JAXA, 宇宙赤外天文台）計画などに筆者がたいへん期待しているゆえんである。太陽系と似ているにしろ、似ていないにしろ、系外の惑星をたくさん知れば知るほど、比較によって、われわれはより深く太陽系を見つめ直せるのである。二次元世界の人は、三次元の中空に飛び上がってしまっ

た物体が姿を消す理由がわからないであろう。同様に、先人たちが頭を絞っても絞っても解決できなかった太陽系に残されている謎は、系外に飛び出した研究から解明されるに違いない。そしてわれわれは、米国の TPF (Terrestrial Planet Finder) 計画などのミッションから、地球型惑星発見の報告が一日も早くもたらされることを願っている。

謝 辞

筆者は共同研究者であるダグラス・リン教授 (UCSC), エド・トーマス博士 (CITA) に感謝する。議論を通じてさまざまな示唆をくださった井田 茂教授 (東工大), 小久保英一郎主任研究員 (国立天文台) にお礼を申し上げる。なお、この研究は科研費特定領域研究: MEXT-16077202 の援助のもとに行われた。また、共同研究者リン教授を通じて NASA (NAGS5-11779, NNG04G-191G), JPL (1228184), NSF (AST-9987417) にも支えられている。論文の出版に関しては、国立天文台出版委員会にその費用の半分の援助を受けた。それぞれの援助に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Kokubo E., Kominami J., Ida S., 2006, ApJ, in press
- 2) Chambers J. E., 2001, Icarus 152, 205
- 3) Agnor C. B. Ward W. R., 2002, ApJ 567, 579
- 4) Kominami J. and Ida S., 2002, Icarus 157, 43
- 5) Kominami J. and Ida S., 2004, Icarus 167, 231
- 6) Dauphas N., Robert F., Marty, B., 2000, Icarus 148, 508

Assemblage of Terrestrial Planets!

Makiko NAGASAWA

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka-shi, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: An outstanding issue concerning the conventional scenario for final terrestrial planet formation from the isolated protoplanets is that the giant impacts generally lead to modest eccentricity in the merger products. We investigate the effect of disk depletion and find that the eccentricity is excited through a sweeping secular resonance and is damped by a tidal interaction with the gas disk. With the separation between the excitation and damping processes, planets can attain small eccentricities analogous to our Solar System.