

# 微惑星からの惑星形成

井田 茂

〈東京大学教養学部宇宙地球科学教室 〒153 東京都目黒区駒場3-8-1〉

近年、電波・赤外による他の原始太陽系の観測により、惑星系形成が天文学の分野でも議論されるようになってきている。ここでは、惑星科学者の考える惑星形成の“標準モデル”がどのように惑星系形成を説明しているかを紹介する。標準モデルでは、いまのところ、木星型惑星の形成時間の問題、惑星間隔（ボーデの法則）の問題という2つの大きな困難がある。それがどのような問題であるかを説明するとともに、それを一挙に解決する鍵となりそうな惑星の暴走的成長というアイデアについて説明する。

## 1. 惑星系形成の標準モデル

天文観測とは独立に、惑星系形成については、これまでいろいろの説が提出されてきた。現在では、“微惑星”仮説に基づいたモデルが標準的になっている。この“標準モデル”は、ソ連のSafronov<sup>1)</sup>が60年代末に原型を提出して、その後、林、中澤らの京都グループ<sup>2)</sup>、アメリカのWetherill<sup>3)</sup>らが体系化したもので、以下のようなものである(図1)。

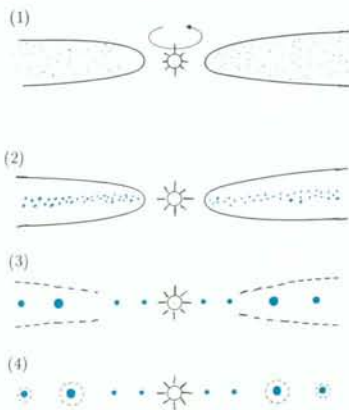


図1 標準モデルの模式図

まず、(1)星間雲が収縮して、原始太陽とそれを取り巻く円盤状の原始太陽系星雲が形成される。この原始太陽系星雲の質量は太陽質量の1/100かその数倍程度とする。この質量は、固体/ガス比を1/100として、現在の太陽系の固体成分の全質量を100倍して算出したものである。このようなモデルとしては、林モデル<sup>4)</sup>が有名である。次に(2)太陽系星雲の冷却に伴って、星雲内の固体微粒子(星間塵)は赤道面へ沈降し、薄い層を作る。この固体微粒子の層はある限界以上薄くなると、自己重力不安定をおこし、一気に半径1-10 km程度の多数の天体—“微惑星”と呼ぶ—が形成される。半径1-10 kmという大きさは、線形論における最大不安定波長程度ということで推定したものである。(3)この微惑星は太陽の周りを回りながら、お互いにととき衝突して合体し、やがて固体惑星が形成される。この過程を惑星集積過程と呼ぶ。惑星形成に於いては、この部分がいちばん時間がかかり、トータルの惑星形成時間は、集積過程(特に後半)に支配される。(4)内側の地球型惑星はこれで完成だが、外側の木星型惑星はもう一段階ある。小惑星帯以遠では温度が低くて水が凝結し材料物質が増えること、太陽重力の

影響が小さいので広い領域から材料物質を集められることより、地球より大きな（固体）原始惑星が作られる。この原始惑星が地球質量の数倍から十倍ぐらいになると、周りに存在する星雲ガスが原始惑星の強い引力で落ち込んで、固体原始惑星を芯とした厚いガス・エンベロープが形成される。星雲ガスはやがて散逸する。

## 2. 微惑星形成とTタウリ・ステージ

原始太陽が形成されつつある非常に初期では原始太陽系星雲はアクリーション・ディスクであったと考えられる。すなわち、原始太陽系星雲は乱流状態にあり、その乱流粘性によってガスが内側に落ちこんで、原始太陽が徐々に太っていく状態と考えられる。それが観測的には古典的Tタウリ型星に対応するのではないかとされている。それに対して、観測的に弱輝線Tタウリ型星と呼ばれる、ディスク・アクリーションが弱いと考えられるTタウリ星も多数見つかっている。これは古典的Tタウリ星でアクリーションが弱まったTタウリ星の次のステージに対応すると解釈されていて、この状態のディスクが標準モデルの出発点の原始太陽系星雲に対応するのではないかとされている。このようなTタウリ星のディスク質量は太陽質量の1/100~1/10程度と推定されており、標準モデルとよく対応していることは興味深い。

ディスク・アクリーションが弱まるためには、乱流がおさまらなければならないが、その原因は（実は、なぜ乱流になっていたかということも）現在のところよくわかっていない。しかし、おさまってくれないと、固体微粒子は沈澱できず、微惑星形成が出来なくなる。乱流中での、衝突合体による固体微粒子の成長というものも考えられるが、最近の計算<sup>5)</sup>によると、そんなことをしている間にガス抵抗によって、固体微粒子は太陽に落ちてしまうことが示されている。したがって、惑星を作るには、ディスク・アクリーションの強い古典的Tタウリ星からディスク・アクリーションの

弱い弱輝線Tタウリ星への移行は必然でなければならない。ほんとうにそのような移行があるのか、固体微粒子の沈澱ができるほどディスクは“静か”になるのかということは、観測、理論の絡みで今後の重要な問題である。もし、観測から、固体微粒子は沈澱しないとすると、標準モデルの前半の微惑星形成までのシナリオは根底から考え直さなければならない。

## 3. 惑星集積過程

ここでは、とにかく何らかの方法で微惑星ができたとして、惑星集積過程について考える。まず微惑星のランダム運動というものを考える。微惑星はまれにしか接近せず、ほとんどの時間は単に太陽の周りをケプラー運動している。ケプラー運動は、離心率  $e$ 、傾斜角  $i$ 、軌道長半径  $a$  で特徴づけられる。 $e$ 、 $i$  は赤道面内円運動（平均流）からのずれを表し、このずれの運動をランダム運動と定義する。すると微惑星のランダム速度  $V$  は

$$V \sim (e^2 + i^2)^{1/2} V_{Kepler} \quad (1)$$

のようにかける（ここで  $V_{Kepler}$  はケプラー回転速度）。原始惑星（惑星の種になる微惑星）がまわりの微惑星の衝突合体によって成長する典型的時間  $T_{grow}$ （質量が倍になる典型的時間）は、考えている原始惑星のランダム速度とまわりの微惑星のランダム速度  $V_m$  できまる。考える原始惑星の質量、表面での脱出速度、太陽からの距離を  $M$ 、 $V_{esc}$  ( $M$ )、 $a$  とすると、地球型惑星領域 (E)、木星型惑星領域 (J)（この領域では氷が凝結）それぞれで、成長する典型的時間は、

$$\begin{cases} 5 \times 10^6 \left(\frac{M}{M_E}\right)^{1/3} \left(\frac{a}{1\text{AU}}\right)^3 \frac{V_M^2 + V_m^2}{(V_{esc}(M)/2)^2} \left(\frac{\Sigma}{\Sigma_H}\right)^{-1} \\ \text{year (E)} \\ 5 \times 10^8 \left(\frac{M}{10M_E}\right)^{1/3} \left(\frac{a}{5\text{AU}}\right)^3 \frac{V_M^2 + V_m^2}{(V_{esc}(M)/2)^2} \left(\frac{\Sigma}{\Sigma_H}\right)^{-1} \\ \text{year (J)} \end{cases} \quad (2)$$

となる。ここで  $M_E$  は現在の地球質量、 $\Sigma$  は固体成分の表面密度で  $\Sigma_H$  は林モデルの表面密度である。

ランダム速度は、重力散乱による“heating”とガス抵抗による“cooling”の釣合いで決まる。外場系では、重力散乱によって、(回転速度のいずれによる)シア運動がランダム運動に転化され、ランダム速度は増大していくことが知られている。一方、原始太陽系星雲ガスは円運動をしているので、ガス抵抗によって、円運動からのずれであるランダム速度は減少していく。標準モデルでは、原始惑星と微惑星で各々独立に“heating”と“cooling”を釣り合わせて、平衡速度を

$$V_M \approx V_{esc}(M)/2, \quad V_m \approx V_{esc}(m)/2 \quad (3)$$

としていた。脱出速度  $V_{esc}$  は質量の 1/3 乗に比例するので、標準モデルでは、原始惑星のランダム速度は微惑星のランダム速度より大きい。

#### 4. 木星型惑星の形成時間の困難

現在の木星、土星、天王星、海王星の固体コアはどれも地球質量の十倍から数十倍と推定されているので、(2)式より、木星 ( $a=5$  AU)、土星 (9 AU)、天王星 (19 AU)、海王星 (30 AU) の固体コアの成長時間はそれぞれ、5 千万年、3 億年、28 億年、110 億年となってしまふ。この海王星の形成時間が太陽系年齢 (45 億年) よりも長くなってしまふことは、かねてから問題とされてきた。

一方、木星、土星についても問題がでてきた。木星型惑星は先に述べたように、原始太陽系星雲のガスを引きつけて、エンベロープを作った。ガス・エンベロープ質量は、固体コア質量とは対照的に、惑星によって大きく異なり、ガス・エンベロープの総質量に対する割合は、木星、土星、天王星、海王星でそれぞれ、90%、60%、10%、5%程度と推定されている。これは、(2)式のように、惑星形成時間は太陽から遠いほど長くなるので、木星 (の固体コア) が出来たときには、星雲

ガスはたっぷりあったのに、天王星、海王星が出来上がる頃には、星雲ガスが散逸してしまっていて、十分に捕獲できなかったためと考えられている (土星はちょうど星雲ガスが散逸するころにできた)。したがって、原始太陽系星雲の寿命は最低、土星形成時間の、5 億年はあると欲しい。ところが、最近の観測によると、原始星の周りのガス円盤の寿命は 1 千万年 (どう頑張っても 1 億年) 程度といわれていて、矛盾している。このように、標準モデルでは木星型惑星の形成時間が総じて長すぎるという問題がある。

#### 5. ボーデの法則の問題

標準モデルで考えているような、固体微粒子層の自己重力不安定によって、惑星の材料の微惑星を形成するというシナリオでは、材料物質がはじめからボーデの法則にあうような間隔で局在していたと考えるのは非常に難しい。従って、局在化は惑星集積過程のなかで進んでいったと考える他はなく、ボーデの法則の細かい係数は別として、惑星間隔がどれくらいになるかということは、惑星集積過程から必然的に決まるべきである。

ところが、標準モデルの惑星集積理論では、空間的局所化のスケールというものがでてこない。というのは、(2)式をみると、成長は質量が大きいほど遅い。この結果、質量分布をもった微惑星集団の成長では、質量分布のコントラストはどんどんなくなり、微惑星はみんな均等に大きくなって、原始惑星がたたくことができることになる (図 2(a))。このような原始惑星がお互いに衝突して数が減って、現在の惑星系ができたと考えられる。このような“秩序的成長”では、空間的局所化のスケールというものが簡単にはでてこない。これも大きな問題とされている。

#### 6. 救世主?—暴走的成長—

木星型惑星の形成時間、ボーデの法則の問題を解決するため、現在、原始惑星の暴走的成長とい

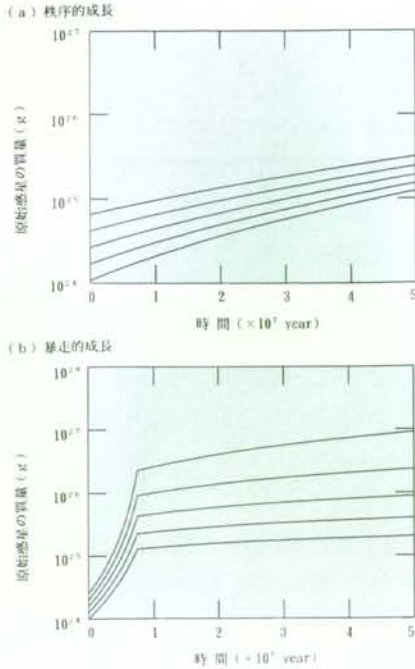


図2 惑星成長の模式図。5つの初期質量の違うテスト粒子(原始惑星)の典型的な成長曲線。(a)秩序的成長:原始惑星間にはじめあった質量比はどんどん縮まってくる。成長率は原始惑星の脱出速度 $V_{esc}(M)$ (の1/2程度)で決まる。(b)暴走的成長:質量比は拡大し、はじめ1番大きかった粒子が暴走的に成長する。成長率は微惑星のランダム速度 $V_m$ で決まる。 $V_m$ は、はじめ微惑星の脱出速度程度で圧倒的に成長が速いが、暴走した原始惑星がある程度おおきくなると、原始惑星による重力散乱が効いて、 $V_m$ は $V_{esc}(M)/(6\sim 8)$ 程度なり、成長は抑えられる。(はじめのフェイズと次のフェイズは本当はもっとなめらかにつながる)

うアイデアで、惑星集積理論の組み直しが進められている。ポイントは標準モデルで無視されていた原始惑星と微惑星の重力相互作用である。プラズマではイオンと電子は、クーロン相互作用を通して、運動エネルギーが同じになるように(等温になるように)緩和されていくことが知られている。つまり、質量の重いイオンの速度は質量の軽い電子の速度よりずっと小さくなる。それと同じことが、重力相互作用を通して、原始惑星と微惑星の離心率 $e$ 、傾斜角 $i$ で定義されたランダム速度でも起こるのではないかと考えられ、実際、 $N$ 体計算<sup>6)</sup>によって確かめられた。つまり、原始惑星のランダム速度 $V_m$ は常に微惑星のランダム速度 $V_m$ より小さく抑えられる。従って、成長時間は短くなり、また(2)式より $T_{grow} \propto M^{-1/3}$ となり、質量の大きい方が速く成長することになる。よって、微惑星集団の質量分布のコントラストはどんどん強くなり、少数の原始惑星が暴走的に成長することになる(図2(b))。

暴走的成長の場合、成長時間はどれくらい短くなるか考える。今の場合、 $V_m \gg V_m$ なので、 $V_m$ を

求めればよい。原始惑星が余り大きくないうちは、 $V_m$ は微惑星同士の重力散乱とガス抵抗の釣合いで決まり、(3)式のように微惑星の脱出速度程度になるが、原始惑星が成長してくると、 $V_m$ は原始惑星による重力散乱と微惑星へのガス抵抗の釣合いで決まるようになる。原始惑星による重力散乱と原始惑星へのガス抵抗の釣合いで決まる速度は(3)でみたように $V_{esc}(M)/2$ であるが、微惑星に対するガス抵抗は原始惑星に対するガス抵抗よりずっと強いので、平衡速度はそれより小さくなる。大ざっぱな見積によると、 $V_m$ は $V_{esc}(M)$ の1/(6~8)倍になる。(2)式より、惑星成長時間は速度 $V_{esc}(M)/2$ で決まっていた標準モデルの成長時間の1/10~1/20となることがわかる。よって、木星型惑星の形成時間の問題はクリアできることがわかる。

次にボーデの法則について考える。暴走的成長を考えると、惑星の間隔というスケールが暴走原始惑星間隔として自然にでてくる。暴走的成長とは、ある領域で1番大きい1つの微惑星が暴走的に成長し、原始惑星となるということで、この“あ

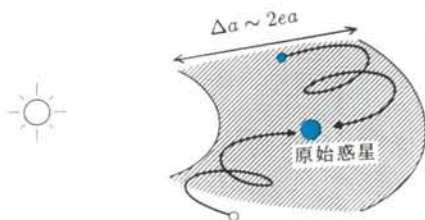


図3 原始惑星へ衝突可能な微惑星の領域。軌道長半径が斜線部の領域にある微惑星が図の原始惑星に衝突し得る。

る領域”とは原始惑星に衝突し得る微惑星の存在領域になる。微惑星の軌道は楕円なので、軌道の近日点と遠日点の間に原始惑星を含む微惑星が、原始惑星に衝突できることになる(図3)。この領域の幅  $\Delta a$ は、

$$\Delta a \sim 2ea \sim \frac{2V_m}{V_{Kepler}} a \sim \frac{V_{esc}(M)}{(3\sim 4)V_{Kepler}} a \quad (4)$$

のように与えられる。 $\Delta a$ は原始惑星の質量が大きくなると増大する。原始惑星の質量 $M$ がどれだけ大きくなれるかは、 $\Delta a$ 内の微惑星総質量、 $2\pi a \Delta a \Sigma$ 、が $M$ に等しくなるという条件によってもとまり、木星型惑星領域(J)で約 $10M_E$ 、地球型惑星領域(E)で約 $0.5M_E$ となる。原始惑星の質量がこの限界質量になると、自分に近づいてこれる微惑星は全て食べ尽くして、原始惑星の成長はとまる。この領域の外の微惑星はこの原始惑星には関係なく、そこではそのあたりで一番大きな微惑星が原始惑星へと成長し、同じように自分に近づく微惑星を食べ尽くして成長をとめる。このようにして、惑星の半径方向の間隔は、 $\Delta a$ 程度となることがわかる。もとまった限界質量を(4)式に代入すると、 $\Delta a$ は約 $0.6 \times a(J)$ 、 $0.2 \times a(E)$ となる。実際の太陽系では $\Delta a \sim 0.6 \times a(J)$ 、 $0.4 \times a(E)$ なので、特に木星型惑星で、非常に良くあっていることがわかる(地球型惑星領域では集積の最後の方でガスがなかった可能性があり、もしそうだと $V_m$ が若干

大きくなるので、地球型惑星もびったりあう)。

## 7. まとめ

以上みたように、標準モデルはかなり整合的に惑星形成を説明していて、問題となる木星型惑星の形成時間、惑星間隔(ボーデの法則)の困難も、暴走的成長を考えることによって、惑星形成論の筋道の中で必然的に説明できそうである。しかしながら、問題解決の鍵となる原始惑星と微惑星の相互作用については、まだきちんとわかっていない部分も多い。たとえば、少数の原始惑星による微惑星の散乱ということも、まだ定量的にきちんとわかっていないし、さらにはその際、微惑星がはねとばされ、原始惑星のまわりではギャップが作られ、原始惑星の成長は阻害されるかもしれないが、この効果もまだよくわかっていない。このような問題に威力を発揮するのは $N$ 体シミュレーションである。筆者らは、目下GRAPEにより、原始惑星と微惑星の相互作用について、計算を進めている。数年内には、暴走的成長モデルで木星型惑星の形成時間、ボーデの法則の問題が解決できるかにたいして、ある程度ははっきりした答がだせるであろう。

## 参考文献

- 1) Safronov, V. S. 1969, Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets, Nauka Press.
- 2) Hayashi, C., Nakazawa, K., & Nakagawa, Y. 1983, in 'Protostars and Planets II', D. C. Black & M. S. Matthews ed., Arizona press, 1100.
- 3) Wetherill, G. W. 1980, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 18, 77.
- 4) Hayashi, C. 1981, Prog. Theor. Phys. Suppl., 70, 35.
- 5) Watanabe, S. 1992, in preparation.
- 6) Ida, S. & Makino, J. 1992, Icarus, in press.