

地球-月系の起源

小久保英一郎 (国立天文台理論天文学研究系)

惑星・地球とその衛星・月はどのようにして形成されたのだろうか。太陽系は原始太陽系円盤と呼ばれるガスとダストの円盤から誕生すると考えられている。ダストからまずは微惑星と呼ばれる小天体が形成される。地球は微惑星が集積して形成される。この集積の最終段階での巨大な天体の地球への衝突によって月は形成される。ダストから微惑星、地球、そして月へ、その最新の形成シナリオを紹介する。

1 太陽系の特徴

地球は太陽系の第3惑星であり、月は地球の唯一の衛星である。この地球-月系がどのようにして誕生したのかは、天文学の大きな問題の1つである。この問題の答が大規模コンピュータシミュレーションなどにより明らかになりつつある。ここでは、最新の地球-月系の形成シナリオを見ていくことにする。

まず地球-月系の起源を考える上で基礎となる太陽系の特徴をまとめておく。太陽系には地球型(岩石)惑星、木星型(巨大ガス)惑星、天王星型(巨大氷)惑星の3種類の惑星がある。惑星の総質量は太陽質量の約1/1000倍しかない。また、惑星の軌道はほぼ円軌道で、軌道面はほぼそろっている。つまり、惑星の軌道は平面内の太陽を中心とする同心円だと考えられる。

このような特徴をもつ太陽系の形成から見ていくことにする。

2 太陽系形成シナリオ

現代的太陽系形成シナリオの2大基本概念は、(1)惑星系はガスとダストからなる太陽と比べて質量の小さい原始太陽系円盤か

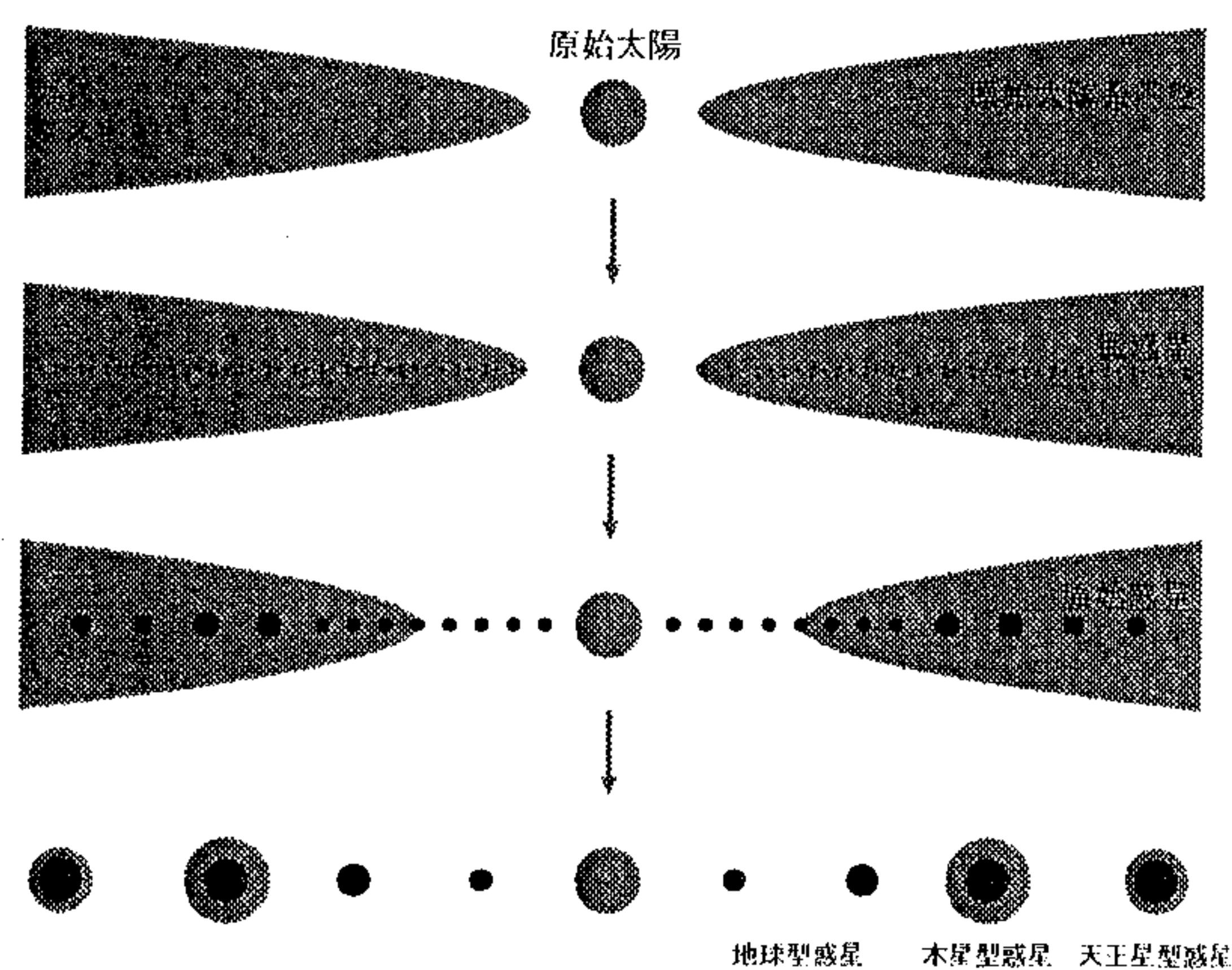


図1: 太陽系形成シナリオの概念図。

ら形成される、(2)先にダストから固体惑星が形成され、その後ガスを捕獲することによってガス惑星は形成される、である(e.g., Safronov 1969, Hayashi et al. 1985)。(1)は太陽系の質量の太陽集中、惑星軌道がほぼ同一平面上にあるという事実から自然に推測される。また、(2)は地球型惑星と天王星型惑星はもちろんのこと、木星型惑星でも重元素の存在比が太陽組成より大きなことから要請される。

図1に原始太陽系円盤からの太陽系形成の概念図を示す。まずシナリオの概要を説明す

る。(1) 原始太陽系円盤中のダストから第一世代のマクロな天体である微惑星($10^{15\text{--}18}\text{kg}$)が形成される。(2) 微惑星の衝突合体による成長により原始惑星とよばれる第二世代の天体($10^{24\text{--}26}\text{kg}$)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惑星と天王星型惑星は完成する。

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る。これは現在の太陽系の固体(ダスト)成分を適当にならしてガス(水素、ヘリウム)成分は質量でその100倍ある、としたものである。ガスとダストの質量比100は星間雲での代表的な値である。円盤の総質量は太陽質量の約1/100倍になる。

地球の形成に焦点をあてて太陽系形成過程を少し詳しく見ていくことにする。

3 微惑星の形成

サイズがkm以上に成長したダスト粒子を慣例で微惑星と呼ぶ。ダストから微惑星を作る方法としては次のダスト層の重力不安定説が有力である(e.g., Goldreich & Ward 1972)。(1) 太陽重力の鉛直成分に引かれダストが原始太陽系円盤の中心面に集まりダスト層を形成する。(2) 円盤内の乱流が弱くなるにつれて、ダストは落ち着きダスト層の密度は大きくなる。(3) ダスト層はある臨界密度を越えると重力的に不安定になりぶつぶつに分裂する。(4) 分裂したダスト層が収縮して微惑星が形成される。

ダスト層が重力不安定を起こすのは、ダスト層の密度が大きいとダスト層の自己重力がダスト層の回転の効果(遠心力・コリオリ力)やダストのランダム運動にうちかって、ダスト層の密度むらが成長することができ

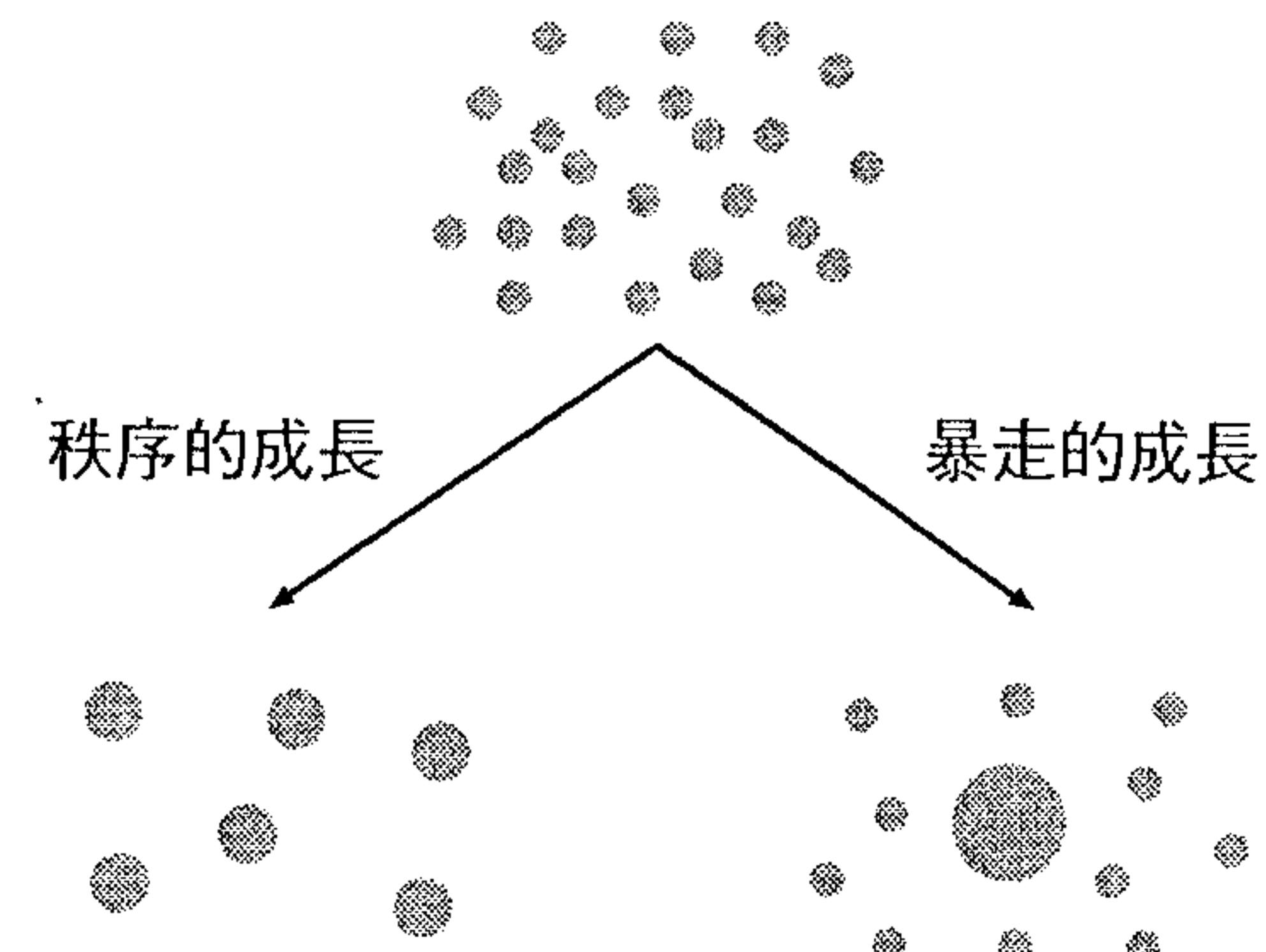


図2: 微惑星の成長モード。

るためである。微惑星形成の時間スケールは乱流の減衰の時間スケール($\sim 10^6\text{年}$ と見積もられている)くらいになる。

他にも段階的付着成長説という、重力不安定をかいさずにダストどうしをこつこつと地道に積み上げて微惑星を作るという説もある。

4 原始惑星の形成

微惑星は太陽のまわりを回りながらときどき衝突合体(集積)して成長していく。微惑星系の成長モードは暴走的成長(図2参照)である(Wetherill & Stewart 1989)。すなわち、微惑星系では大きな微惑星がますますまわりの他の微惑星より大きくなっていく。

微惑星系の成長モードが暴走的成長なのは次のように説明される。微惑星どうしの衝突断面積は、質量の大きいものほど重力フォーカシングの効果によって大きくなる。このとき質量 M の微惑星の相対成長率は

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \propto M^{1/3} v_{\text{rel}}^{-2} \quad (1)$$

となる(e.g., Kokubo & Ida 1996)。ここで v_{rel} は微惑星どうしの相対速度である。相対成長率は v_{rel} が M によらないとき、すなわ

ち微惑星が大きくなることによる v_{rel} への反作用が無視できるときは $(1/M)(dM/dt) \propto M^{1/3}$ となる。これは相対成長率が M の増加関数であること、すなわち、微惑星系の成長モードは暴走的成長になることを示している。

暴走的成長によって形成された大きな微惑星を原始惑星と呼ぶ。原始惑星はある程度大きくなると、周囲の微惑星を重力散乱で大きく振り回すようになる。振り回されてランダム速度が大きくなつた微惑星は集積しにくいで、原始惑星の成長は鈍る。原始惑星によって散乱された微惑星との相対速度は $v_{\text{rel}} \propto M^{1/3}$ となる (Ida & Makino 1993)。このとき、原始惑星の相対成長率は $(1/M)(dM/dt) \propto M^{-1/3}$ となる。つまり、相対成長率は M の減少関数になり、大きな原始惑星ほどゆっくり成長することになる。このためある程度大きくなると原始惑星の大きさはそろつてくることになる。このような成長モードは秩序的成長と呼ばれる (図 2 参照)。

このとき原始惑星の軌道間隔はヒル (ロッシュ) 半径の約 10 倍になる (Kokubo & Ida 1998)。ヒル半径は軌道運動する原始惑星の重力圏の大きさを示し、原始惑星の質量を M 、太陽からの距離を a とすると

$$r_H = \left(\frac{M}{3M_\odot} \right)^{1/3} a \quad (2)$$

となる。この軌道間隔は軌道反発という効果で決まる。軌道反発は原始惑星間の重量散乱と微惑星からの力学的摩擦の複合効果である。原始惑星どうしの重力散乱は原始惑星の軌道間隔を広げ、軌道離心率を大きくする。軌道離心率は重力散乱後、周囲の微惑星からの力学的摩擦により小さくなる。結果、原始惑星どうしはほぼ円軌道を保ったまま軌道間隔を広げることになる。

原始惑星どうしの成長モードが秩序的成

長になると原始惑星間の軌道反発の結果、隣どうしでは同じような大きさの原始惑星が決まった間隔で形成されることになる。ヒル半径は質量の $1/3$ 乗に比例しているので原始惑星が成長するに従って大きくなる。すなわち、原始惑星はお互いに軌道間隔を広げながら、たまに間引きもしつつ、成長することになる。このような成長モードは原始惑星の寡占的成長と呼ばれる (Kokubo & Ida 1998)。

原始惑星の軌道間隔 b がわかると、原始太陽系円盤のダスト成分の表面密度 Σ が与えられれば最終的に形成される原始惑星の質量を見積もることができる (Kokubo & Ida 2000)。中心から距離 a で幅 b のリング状の領域にあるダストが原始惑星になるとするとその質量 M は $M \simeq 2\pi ab\Sigma \propto \Sigma^{3/2} a^3$ となる。その形成にかかる時間 T は、 $T \propto M^{1/3} \Sigma^{-1} a^{1/2}$ となる。原始太陽系円盤の標準モデルを使うと原始惑星の質量は例えば、地球軌道で 10^{24} kg となる。その形成時間は 70 万年となる。

5 地球の完成

寡占的成長で地球領域に形成される原始惑星は火星サイズくらいである。これは原始惑星から金星や地球への進化にはもう一段階の集積、つまり原始惑星どうしの衝突が必要であることを意味している。つまり地球型惑星形成の最終段階は、残りの微惑星を集積しながらの原始惑星どうしの巨大衝突になる。

寡占的成長により形成される原始惑星系は長期的には安定ではない。原始惑星どうしの相互重力、もしくは木星型惑星からの重力摂動によって原始惑星系は不安定なる。原始惑星系が不安定になり、軌道交差が起ころうになれば、原始惑星どうしの衝突

が可能になる。

最新の N 体シミュレーションによると地球型惑星領域で数億年で十数個の原始惑星から数個の惑星を集積することは可能なようである (e.g., Chambers 2001)。しかし、巨大衝突によって形成された惑星の軌道離心率や軌道傾斜角が現在の地球型惑星のものより桁で大きくなってしまうという問題が残っている。これは巨大衝突の時代にも円盤ガスもしくは微惑星がある程度残っていれば解決できると考えられている。すなわち、衝突の結果大きくなった軌道離心率と軌道傾斜角をガス抵抗もしくは力学的摩擦によって小さくするのである。

6 地球-月系の特徴

ここまでで地球は形成された。次に月の形成について考える。

まずははじめに地球-月系の特徴をまとめ。地球-月系の力学的特徴は、他の衛星系に比べて衛星の惑星に対する質量比が大きいことと角運動量が大きいことである。月の質量は地球の質量の約 $1/80$ だが、他の衛星系では衛星の質量は最大でも惑星の質量の約 $1/1000$ にすぎない(冥王星のカロンは除く)。また、地球-月系の角運動量は、約 4 時間で地球が自転する場合の角運動量に相当する。

次に月の化学的特徴は地球に比べて鉄分が少ないことと揮発性元素(カリウム、鉛など)が少ないとされる。地球には中心に主に鉄からなるコアがあり、その質量は全質量の約 30% を占めると見積もられている。しかし、月では鉄コアはとても小さく全質量のわずか 4% 以下だろうと推定されている。

このような地球-月系の特徴を説明できる唯一の形成シナリオが巨大衝突説である (Hartmann & Davis 1975, Cameron & Ward 1976)。

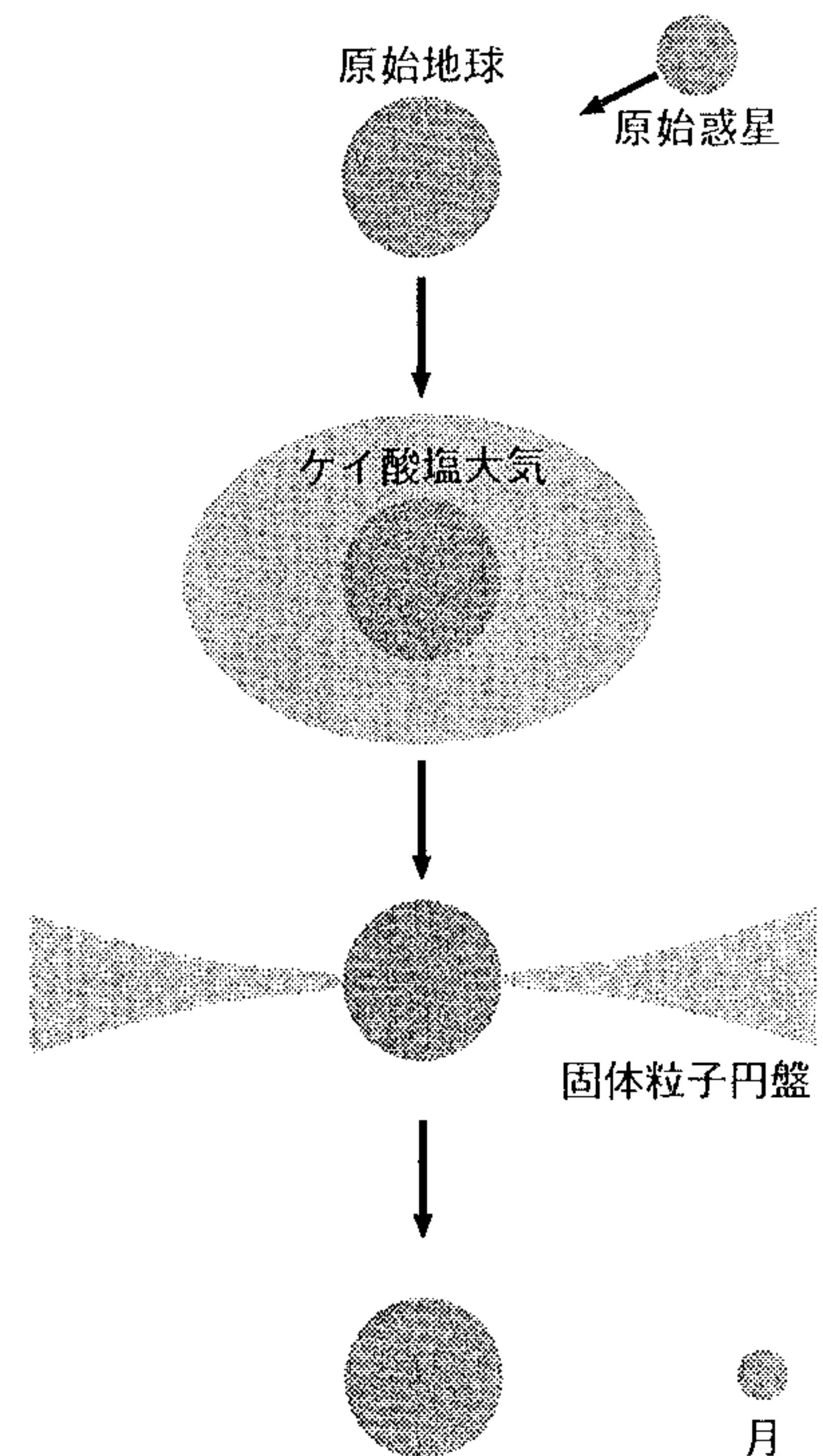


図 3: 巨大衝突説の概念図。

7 巨大衝突説

地球形成の最終段階は原始惑星どうしの衝突合体であった。この巨大衝突によって月は形成される。巨大衝突説では(図 3)、(1)まず火星くらいの大きさの原始惑星が原始地球に衝突する。(2)衝突により地球の周りに主に岩石(マントル)成分からなる気化したもしくは溶融状態の月材料物質が供給される。(3)材料物質が冷えるにつれて固体粒子でできた原始月円盤が形成される。(4)この原始月円盤から粒子の集積により月が形成される。

巨大衝突によりもたらされる角運動量は大きな地球-月系の角運動量を説明することができる。また、月の鉄と揮発性元素の欠損を説明することもできる。巨大衝突の SPH シミュレーションによると、衝突によって地

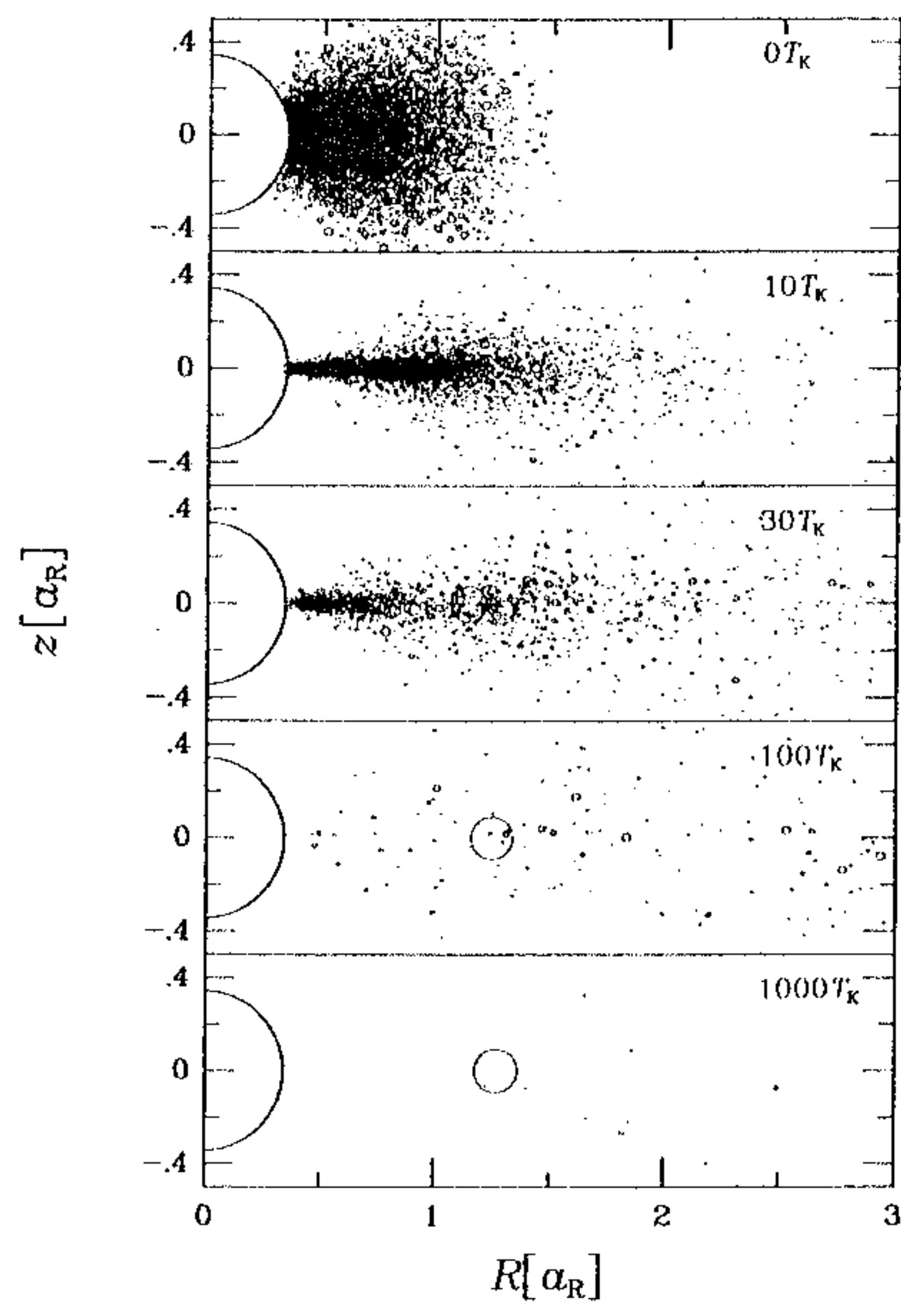


図 4: 原始月円盤からの月集積の N 体シミュレーションの例。長さの単位はロッシュ限界半径で、時間はロッシュ限界半径でのケプラー周期。

球の周りには主に原始惑星のマントル成分が残り、コア(鉄)の大部分は地球に落ちてしまう。そのために月材料物質の鉄分は少なくなる。そして、円盤からの月集積により月物質が高温になり、そのさいに揮発性元素が抜けるのである。

巨大衝突とそれに伴う原始月円盤の形成は SPH シミュレーションにより調べられている。最新のシミュレーションによれば、上記シナリオで仮定するように、火星くらいの原始惑星の衝突により月質量の数倍で鉄の割合が少ない原始月円盤が形成されることがわかっている (e.g., Canup & Asphaug 2001)。

8 原始月円盤からの月集積

巨大衝突によって形成された原始月円盤

は次のように進化する (図 4)(Kokubo et al. 2000)。(1) 円盤は粒子どうしの衝突によってランダム運動が小さくなり、動径方向・垂直方向に収縮する。(2) 円盤が収縮すると円盤の面密度が上がり、円盤は重力的に不安定になり、面密度のむらが成長する。(3) むらむらはロッシュ限界の中にあるので潮汐力によりのばされてしまい渦巻状になる(ロッシュ限界とは軌道運動している天体の自己重力と中心天体による潮汐力が釣り合う場所である)。(4) 渦状腕の及ぼす重力トルクによって月材料物質がロッシュ限界外に運ばれる。(5) ロッシュ限界の外側に運ばれた粒子は重力的に束縛し、アグリゲイト(重力的に束縛した粒子のかたまり)を形成する。(6) 同じような地球からの距離にできるアグリゲイトは次々と合体し、1つの大きなアグリゲイト、月の「種」がロッシュ限界の外側に形成される。(7) 月の種は形成後、ロッシュ限界のすぐ外側に居座り続け、内側から運ばれてくる粒子を独占的に集積しながら成長する。

このような円盤の進化から必然的に1つの大きな月がロッシュ限界の外側に形成されることになる。月の軌道はほぼ初期円盤の赤道面上でほぼ円軌道になる。

この月集積の時間スケールは約1ヶ月である。これは原始月円盤の角運動量輸送の時間スケールである。

原始月円盤から集積される月の質量は円盤の角運動量保存から決まる。初期の原始月円盤の角運動量は月集積過程で主に2種類の粒子、すなわち、集積される月と地球に落ちる粒子に分配される。集積される月と地球に落ちる粒子の軌道要素すなわち単位質量当たりの角運動量はほぼ決まっているため、角運動量保存によりそれぞれに分配される質量が決まる。月の質量は初期円盤の質量の 10-60% くらいで、この割合は初期円盤の単位質量あたりの角運動量に比例

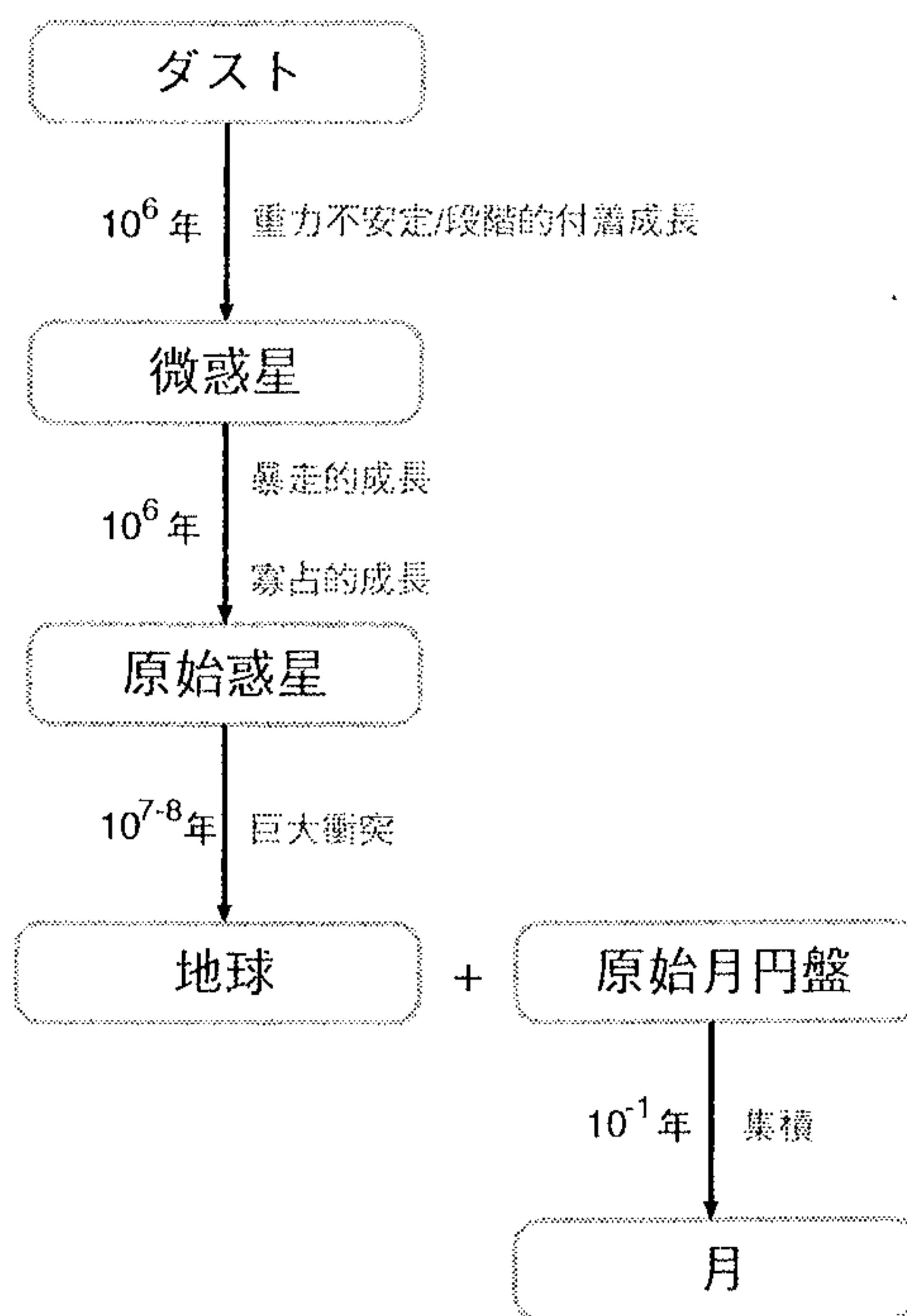


図 5: 地球-月系形成のフローチャート。

することがわかっている。

- R. M. Canup & E. Asphaug: Nature 412, 708, (2001).
- J. E. Chambers: Icarus 152, 205 (2001).
- P. Goldreich, & W. R. Ward: Astrophys. J. 183, 1051 (1972).
- W. K. Hartmann, & D. R. Davis: Icarus 24, 504 (1975).
- C. Hayashi, K. Nakazawa, & Y. Nakagawa: in *Protostars & Planets II* (D. C. Black, M. S. Mathews, Eds.), University of Arizona Press 1100 (1985).
- S. Ida & J. Makino: Icarus 106, 210 (1993).
- E. Kokubo & S. Ida: Icarus 123, 180 (1996).
- E. Kokubo & S. Ida: Icarus 131, 171 (1998).
- E. Kokubo & S. Ida: Icarus 143, 15 (2000).
- E. Kokubo, S. Ida, & J. Makino: Icarus 148, 419 (2000).
- V. S. Safronov: *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets*, Nauka (1969).
- G. W. Wetherill & G. R. Stewart: Icarus 77, 330 (1989).

9 おわりに

これまで原始太陽系円盤から地球-月系の形成過程を概観してきた。図5にまとめとして地球-月系形成のフローチャートを示す。ダストから微惑星、原始惑星、そして地球-月系への大きな進化の流れがわかつてもらえただろうか。

この地球-月系形成シナリオにはまだまだ洗練しないといけないところも多い。今回紹介したシナリオはさらに研究を進めるためのフレームワークだと思って欲しい。

References

- A. G. W. Cameron, & W. R. Ward: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 7th 120 (1976).