

# 惑星集積のダイナミクス

小久保英一郎 (国立天文台理論研究部)

## 概要

固体惑星は微惑星とよばれる小天体が衝突合体して形成される。この惑星集積過程は惑星系の構造と形成時間スケールを決める重要な過程である。惑星集積過程で惑星成長と構造形成のモードを決めるのは微惑星系の運動状態である。微惑星の運動は微惑星間の重力相互作用すなわち2体緩和によって進化する。基本進化として粘性加熱と力学的摩擦による進化がある。

## 1 はじめに

太陽系は原始太陽系円盤とよばれる太陽まわりのガスと塵(ダスト)からなる円盤から形成されたと考えられている [1]。ダストから微惑星とよばれる小天体が形成され、これが固体惑星の材料となる。微惑星は太陽のまわりを公転しながら相互重力で軌道を乱し合い、ときに衝突合体しながら成長していく。この過程を惑星集積過程という。この過程で微惑星がどのように成長していくかは、微惑星がどのような運動をしているかに依存している。ここでは惑星集積過程を考える上で基礎となる微惑星系の基本ダイナミクスについて、多体シミュレーションの例を交えながら概説する。

## 2 太陽系形成の標準シナリオ

はじめに太陽系形成の標準シナリオを概観する。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(水星、金星、地球、火星)、木星型(ガス)惑星(木星、土星)、天王星型(氷)惑星(天王星、海王星)である。

標準シナリオでは、太陽系はガスとダストからなる原始太陽系円盤から形成されたと考える。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 [1]。形成段階は大きく3段階に分けられる。

1. ダストの集積によって微惑星が形成される。
2. 微惑星の衝突合体によって原始惑星が形成される。
3. 原始惑星の衝突合体によって地球型惑星が完成する。原始惑星が原始太陽系円盤から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。

ダストの成分は雪線 (~ 3AU) の内側では岩石質、外側では氷質になる。雪線とは円盤の温度が  $\text{H}_2\text{O}$  の昇華温度になる位置である。この成分の違いに対応して雪線の内側では岩石惑星、外側では氷惑星が形成される。そして氷惑星が重力でガスをまとったものがガス惑星となる。

標準シナリオで、微惑星から固体惑星が形成される過程を惑星集積過程という。ここで惑星系の基本構造と形成時間スケールが決まることになる。

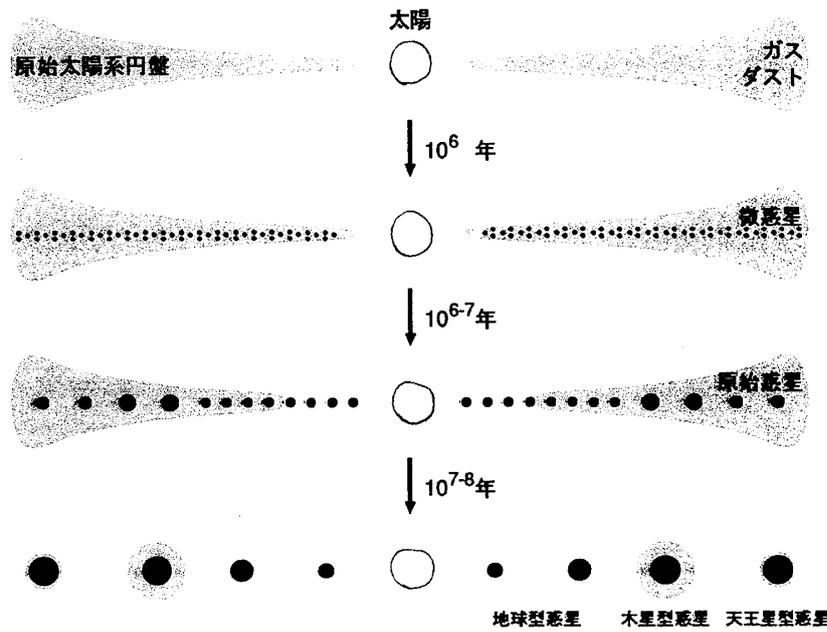


図 1: 太陽系形成標準シナリオの概念図。時間は進化の時間スケール。

### 3 惑星集積過程

惑星集積過程では、微惑星の成長時間  $T_{成長}$  に比べて、重力相互作用による系の進化時間  $T_{緩和}$  が圧倒的に短い。つまり、惑星集積は重力的に緩和している系の中で進むことになる。

微惑星系では、中心に質量の大きな支配的な天体 (太陽) があり、そのまわりに円盤状に公転しながら重力相互作用する粒子 (微惑星) がある。微惑星の運動方程式は

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = -GM_{\odot} \frac{\mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_i|^3} + \sum_{j \neq i}^N Gm_j \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^3} + \mathbf{f}_{衝突} + \mathbf{f}_{外力} \quad (1)$$

となる。ここで  $m$  は微惑星の質量、 $M_{\odot}$  は太陽の質量である。右辺は左から太陽重力、微惑星間重力、衝突 (合体) の効果、その他の外力を表している。微惑星の基本運動は太陽まわりのケプラー運動である。惑星集積過程では、ケプラー軌道要素の中で軌道長半径  $a$ 、軌道離心率  $e$ 、軌道傾斜角  $i$  が重要になる。微惑星の基準面内の円運動からのずれの運動をランダム運動、その速度  $v$  をランダム速度とよぶ。ランダム速度の大きさは

$$v \simeq (e^2 + i^2)^{1/2} v_K \quad (2)$$

となる (動径方向と垂直方向の成分はそれぞれ  $e$  と  $i$  に比例する)。ここで  $v_K$  は円軌道のケプラー速度である。

粒子が有限のサイズをもつということも微惑星系の重要な特徴である。そのため微惑星は衝突したり、合体したりする。これは普通の恒星系の重力多体系では無視できる。また、合体があるために質量分布が変化し、さらにそれによって重力相互作用が変化し運動状態が変化する。このような運動の進化と質量の進化の相互作用が問題を難しくかつおもしろくしている。

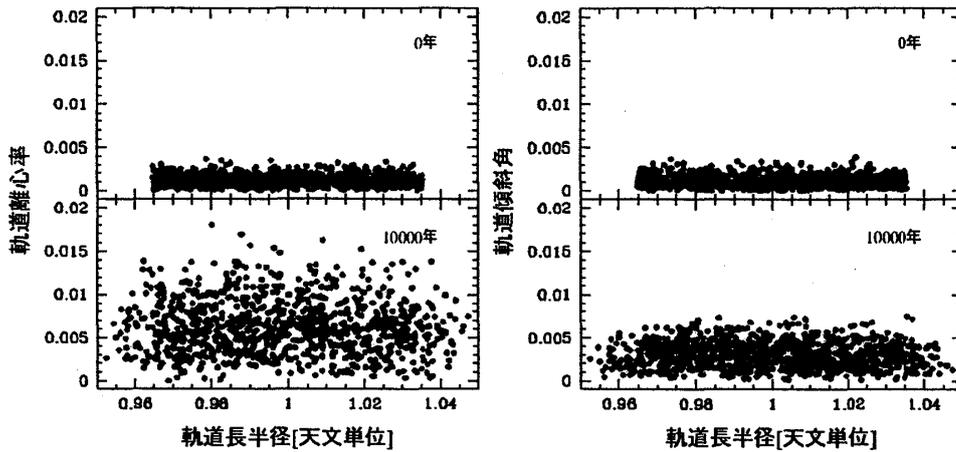


図 2: 初期状態と 1 万年後の粒子の軌道長半径-軌道離心率 (左) と軌道長半径-軌道傾斜角面 (右) 上での分布。

テスト微惑星 (質量  $M$ 、半径  $R$ ) がフィールド微惑星 (質量  $m < M$ 、個数密度  $n$ ) を集積して成長する場合の成長率は

$$\frac{dM}{dt} \simeq n\pi R^2 \left( 1 + \frac{2GM}{Rv^2} \right) vm \quad (3)$$

となる [2]。右辺括弧内の第 2 項は衝突断面積が重力によって大きくなる効果 (重力フォーカシング) を表している。微惑星系では重力フォーカシングの効果が卓越する。この場合、微惑星の成長時間は以下ようになる。

$$T_{\text{成長}} \equiv \frac{M}{dM/dt} \propto M^{-1/3} v^2 \quad (4)$$

ここで  $n \propto v^{-1}$  を使った。粒子系では系のスケールハイト  $h$  は  $i$ 、すなわちランダム速度に比例するので、 $n \propto h^{-1} \propto v^{-1}$  となる。微惑星の成長モードが微惑星系のランダム速度に依存しているのがわかる。すなわち、 $v$  がどのように  $M$  に依存するかによって、成長モードが暴走的になるのか秩序的になるかが決まる。

## 4 2 体緩和のダイナミクス

微惑星の軌道は微惑星の重力相互作用で進化する。微惑星系は恒星力学の分類でいえば衝突系になる。すなわち、微惑星どうしの重力散乱によって、微惑星の軌道が進化する。これは 2 体緩和とよばれる。惑星集積過程を考える上で重要な微惑星系の 2 体緩和による基本的な進化を解説する。以下の基本進化は微惑星系だけのものではなく、公転運動する自己重力粒子系に共通の性質である。

### 4.1 粘性加熱

最初に中心天体まわりの重力相互作用している等質量の粒子からなるリングを考える。以下、衝突は無視する。  $10^{24}g$  の粒子 1000 体からなる系を例にする (図 2、3)。初期条件は、リ

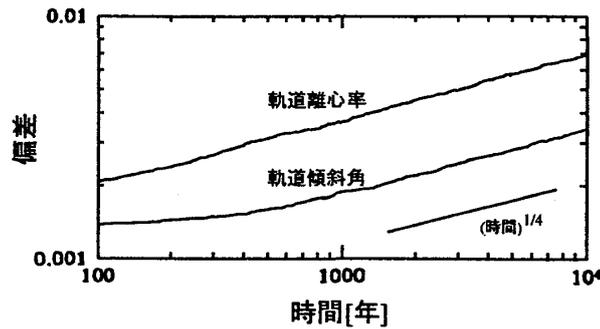


図 3: 粒子の軌道離心率と軌道傾斜角の偏差の時間進化。

リングの平均軌道長半径  $a = 1\text{AU}$ 、幅  $\Delta a = 0.07\text{AU}$ 、粒子の  $e$  と  $i$  の偏差  $\sigma_e = \sigma_i = 0.0014$  である。

図 2 は初期状態と 1 万年後の系のスナップショットである。粒子の  $a$  は散乱によって増加したり減少したりする。そして酔歩によってリングは拡散していく。 $e$  と  $i$  も散乱の条件によって増減するが、平均では大きくなっていく。つまり、 $\sigma_e$  と  $\sigma_i$  は時間とともに大きくなる。このとき  $e$  と  $i$  の分布はレイリー分布に緩和する [3]。偏差はある程度以上大きくなると時間  $t$  の  $1/4$  乗に比例して増加する (図 3)。これは以下のように説明される。2 体緩和の時間スケールは以下のように与えられる [4]。

$$T_{\text{緩和}} \equiv \frac{v^2}{dv^2/dt} \sim \frac{v^3}{G^2 n m^2 \ln \Lambda} \quad (5)$$

ここで  $n \propto v^{-1}$  なので  $T_{\text{緩和}} \propto v^4$  となり、結果上記の時間依存になる。この時間進化は円盤系の特徴である。ランダム速度が大きくなることを、分子運動論との類似から系が熱くなるともいう。この効果は自己重力による「粘性加熱」といわれる。これは 2 体緩和の 2 次の効果になっている。

このとき  $\sigma_e/\sigma_i \simeq 2$  ( $\sigma_i$  の単位はラジアン) となる。これはランダム速度が等方的な場合の値 1 より大きくなっている。これは中心天体のケプラーポテンシャル中での粒子の 2 体緩和の特徴で、差動回転の影響である [5]。

ここまでをまとめると、自己重力粒子リングは動径方向に拡散しながら、ランダム速度を大きくしていくことになる。垂直方向のランダム速度の増加 ( $i$  の増加) により垂直方向の厚みも増す。

## 4.2 力学的摩擦

次にこの自己重力粒子リングの中に 1 つだけ他の粒子より十分に質量の大きな粒子があるとす。この粒子は「力学的摩擦」によってほぼ基準面でのほぼ円軌道に進化する。図 4 は図 2 と同じ初期条件に、リング粒子の質量の 100 倍で初期軌道要素  $a = 1\text{AU}$ 、 $e = 0.01$  の大粒子を加えたもののスナップショットである。2000 年後に大粒子の  $e$  がほぼ 0 まで減少している。力学的摩擦はエネルギー等分配の効果である。粒子間の重力相互作用によってランダム運動の運動エネルギーはどの粒子も等しくなるようになる。運動エネルギーは

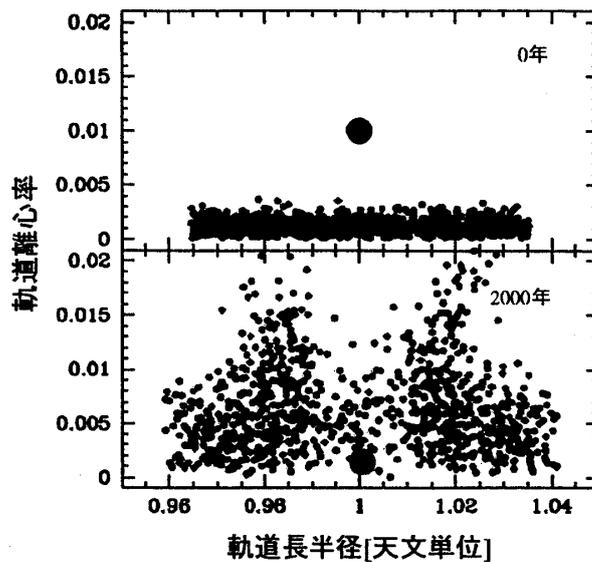


図 4: 大粒子が 1 個ある場合の初期状態と 2 千年後の粒子の軌道長半径-軌道離心率面上での分布。

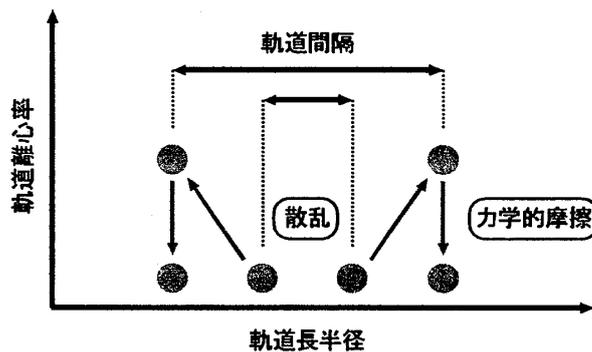


図 5: 軌道反発の模式図。

$(1/2)mv^2$  なので質量  $m$  の大きな粒子の  $v$  は小さくなる。つまり、 $e$  と  $i$  が小さくなる。また、逆に大きな粒子のまわりの小さな粒子の  $e$ 、 $i$  は大きくなる。力学的摩擦は 2 体緩和の 1 次の効果になっている。

以上の粘性加熱と力学的摩擦が 2 体緩和による粒子系の進化の基本である。

### 4.3 軌道反発

簡単な応用問題として、大きな粒子が 2 個あったらどうなるか考える。問題は、多数の小粒子の中で重力相互作用する 2 大粒子の軌道はどのように進化するのか、ということになる。答えは、2 大粒子は軌道間隔  $b$  が小さい場合は、ほぼ円軌道を保ちながら  $b$  を大きくする、「軌道反発」というものである [6]。重力で引きあっているのに離れていくのはおかしいと思うかもしれない。これは以下のように説明される (図 5)。大粒子の軌道の  $e$  と  $i$  は小粒子からの力学的摩擦によりほぼ 0 になっている。ほぼ円軌道の粒子どうしが散乱

すると、 $b$  と  $e$  は大きくなる。これはエネルギー保存と角運動量保存から導くことができる。 $e$  は散乱後に小粒子からの力学的摩擦により再び小さくなる。このとき  $b$  は変化しない。結果、2 粒子は円軌道のまま  $b$  を大きくすることになる。つまり、軌道反発は 2 体重力散乱と力学的摩擦の複合効果である。

## 5 まとめ

惑星系形成過程の中で惑星集積過程は惑星系の構造と形成時間スケールを決める重要な過程である。微惑星系の重力相互作用による運動の進化の時間スケールは、成長の時間スケールに比べて圧倒的に短く、緩和した系の中で集積は進む。微惑星系における 2 体緩和の効果の基本は粘性加熱と力学的摩擦である。また、複合効果として軌道反発がある。このような速度分布と空間分布の進化の中で質量分布の進化すなわち惑星成長は進んでいく。つまり、2 体緩和過程の理解は惑星集積過程の素過程の理解につながる。

現実の微惑星系はもっと複雑である。粒子の重力相互作用以外にも、衝突や外力により軌道は変化する。外力としては伴星や成長した惑星からの重力、ガスとの相互作用などがある。衝突や外力の性質により、系は多様な進化を見せる。今後はこのような現実的な系の運動の進化の素過程を明らかにしていく必要がある。

## 参考文献

- [1] Hayashi, C., Nakazawa, K., Nakagawa, Y., in *Protostars and Planets II* (ed. Black, D. C., Mathews, M. S.), Univ. of Arizona Press (Tucson), (1985), 1100.
- [2] Kokubo, E., Ida, S., *Icarus* 123 (1996), 180.
- [3] Ida, S., Makino, J., *Icarus* 96 (1992), 107.
- [4] Binney, J., Tremaine, S., *Galactic Dynamics*, Princeton Univ. Press (Princeton), (1987).
- [5] Ida, S., Kokubo, E., Makino, J., *MNRAS* 263 (1993), 875.
- [6] Kokubo, E., Ida, S., *Icarus* 114 (1995), 247.