

# 惑星系の進化

金光研究室 土橋 健太郎

## 1、序論

近年、大型観測機器や高度な観測技術の進歩に伴って、我々の住む太陽系外の惑星系の観測が急速な進展を見せている。そのなかで、1995年以降、発見されている系外惑星は多様であり、これまでの太陽系の考えがあてはまらないような異様なものも多くみつがっている。これからの観測によって、さまざまな進化の惑星系における基本的な形成の過程や、統一的な惑星系形成理論を議論することができる。そして、この宇宙に多数存在するであろう惑星系の一つとしてのわれわれの太陽系の形成を考えることができる。

本研究では、惑星形成論での分子雲から原始惑星系円盤を経て惑星へといたる過程の基本的な理論に基づき、われわれの太陽系だけではなく、惑星系形成に関する普遍的なモデルをシミュレーションによって視覚化し、考察する。

## 2、惑星系形成

銀河系の星星の間にただよう巨大なガスと塵の雲、すなわち星間雲が太陽や惑星のふるさとである。星間雲のなかでも分子の良く観察されるものを分子雲と呼んでいる。分子雲のうちには局所的に特に密度の高い箇所が点在し、このような場所は分子雲コアとよばれ、この分子雲コア自体が重力収縮を起こして星や惑星系を作ると考えられている。分子雲コアの温度は10Kと大変低く、平均的な大きさは $10^4$  AU (AU:天文単位、 $1.50 \times 10^{13}$  cm)で、質量は4太陽質量くらいとみなされている。この分子雲コアの収縮により原始惑星系円盤が形成される。惑星系の進化を考えるにあたって、惑星系を生む母胎となる原始惑星系円盤の進化を考える。

### I、形成段階

分子雲コアの収縮開始直後には、ガスはまず中心星へと直接降り積もる。その後大きな角運動量をもったガスは遠心力に妨げられて中心に落下できず、中心星の周囲に円盤状に降り積もり円盤を形成する。こうして、分子雲コアの重力収縮により、中心には星、そのまわりには回転するガス円盤が形成されることになる。この段階では、円盤の質量はまだ小さい。

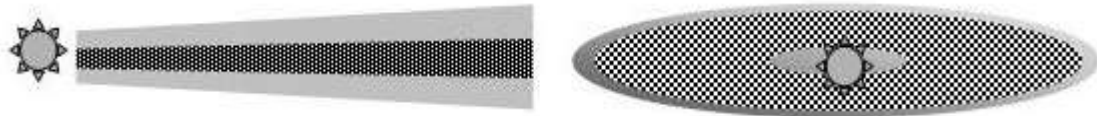
### II、active disk 段階

降り積もりが続き円盤の質量が増大し、それが終了してしばらくの間は、円盤は自己重力不安定により激しい乱流状態になる。その乱流の大きな粘性効果によって、ガスはどんどん中心星に向かって落ちていき、中心星を効率よく成長させる。このときダストは、ある程度の大きさまでは成長するが、衝突速度が大きいため、cmサイズを超えると壊れてしまい、ガスとあまり変わらない速度で中心星に落下していく。また乱流が激しい間はダストはガスに引きずられてかき回される。よって、この段階では、ダストは中心星の鉛直方向に沈殿することができない。



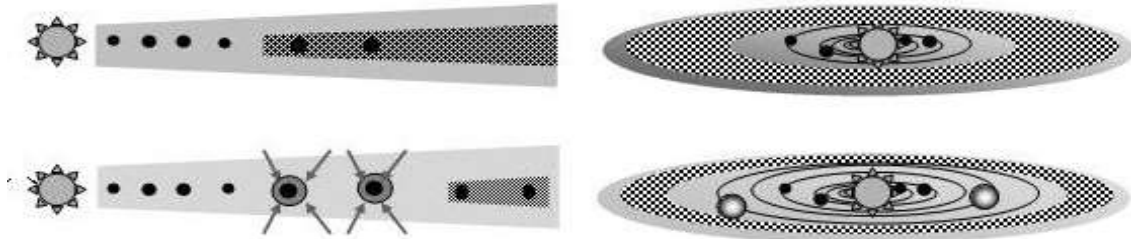
### III、passive disk 段階

やがて何らかの原因で分子雲コアからのガスの降り積もりがなくなると、円盤の質量は減少し、自己重力不安定に対して安定化される。その結果、乱流は弱くなり質量降着率は減少する。この段階になって初めて惑星形成が可能になる。ガスの乱流が弱まり、乱流速度が音速の 1/1000 になると円盤内ではガスに含まれていたダストが中心星の重力の鉛直方向に引かれ円盤の中心面に向かって沈殿を開始する。すると、まずガスに対するダストの割合が増大して、最初に比べてダストの質量比が増加していく。その結果、ダストはガスの乱流を受けにくくなり、沈殿が加速される。沈殿がさらに進みダスト層のスケールハイトが初期の  $10^4$  程度になると、ダスト層は自己重力不安定により分裂し質量  $10^{18}$  g、大きさ数kmサイズの微惑星を形成する。



### IV、惑星集積

微惑星は相互に衝突合体を繰り返しながら成長していく。この成長の基本の様式は、少数の微惑星がいったん他の微惑星に比べて質量が大きくなり、加速度的に成長が進行する暴走成長である。地球型惑星はこのような微惑星の集積により形成された。木星型惑星もその中心核は同様の微惑星集積により形成された。また、地球質量の数倍から 10 倍もの大きさに成長すると重力が非常に強くなり、周りの円盤ガスを自身に引きつけて、外層を形成し木星型惑星となる。中心星が太陽と同程度の場合、中心星から 3 天文単位より遠くでは氷が凝結し始め、これらも原始惑星を形成する材料となりうる。また、惑星の重力圏の大きさに比例した間隔を保ちながら成長する。



## 3、シミュレーション

シミュレーションでは惑星形成過程の passive disk 段階までにおいて、すでに微惑星が形成される環境が十分に整えられていると仮定する。最後の段階の惑星集積について、多数の微惑星から惑星系に至るまでを調べた。

今回のシミュレーションでは従来の地球型惑星と木星型惑星に加えて巨大氷惑星も区別するようにしている。中心星が太陽質量程度であると、3 天文単位より遠くでは温度が低いので氷が凝結し、固体成分にさらに材料物質が増える。3 天文単位から 10 天文単位まではダストは固体成分に加えて氷も含んだ状態であり、10 天文単位以上では固体成分に占める氷の割合がずっと増加していると仮定して実行した。また、これに伴う各 3 領域 ( $R < 3AU$ ,  $3 \leq R < 10$ ,  $10 \leq R$ ) において全ガス密度/ダスト密度の比を円盤内で変化させ、より現実的な惑星系を形成させ考察できるようにした。

原始惑星系円盤内において、核（微惑星）となるカーネルをランダムに与え、様々な条件下で最終的に形成された惑星系の形態を表す。画面上では、原始惑星系円盤の断面右半

分の部分において惑星系を表示する。生成された惑星の表示は浮かせて表示し、中心星からの距離は対数表示になっている。

また、形成過程において、実際はダスト層において形成された微惑星は、同時にダスト層内の様々な場所で互いに衝突が起こり、合体成長が行われていくのであるが、シミュレーションにおいてはランダムに得られたカーネルを次々に打ち込んでゆき、そこでとなりあったカーネル同士を衝突合体させていくという方法を用いた。

ここで、

$$\begin{aligned} \text{カーネルの初期質量} &= 10^{-15} \\ \text{降着限界質量} &= 10^{-30} \end{aligned}$$

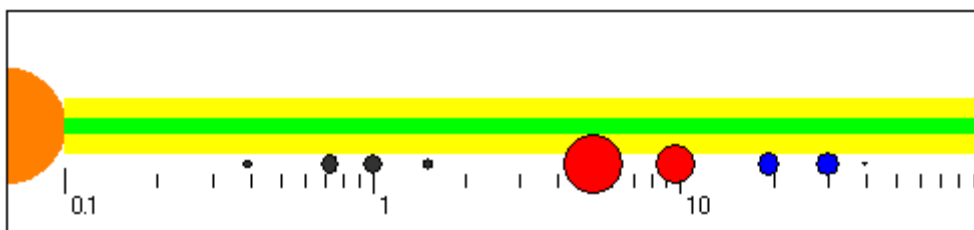
とする。また、中心星は太陽質量程度であるとする。これにダストの中心密度、乱数種、全ガス密度/ダスト密度 (比) [ $R < 3$ ,  $3 \leq R < 10$ ,  $10 \leq R$  : 単位 AU]、空洞比 (円盤の何%がなくなったら終了するか) を様々に与え、惑星系の形成を調べる。

#### 4、結果と考察

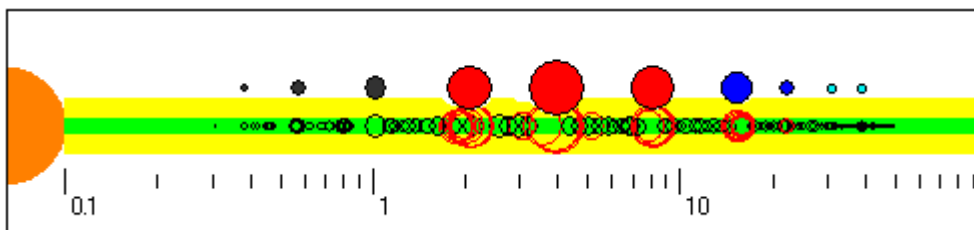
シミュレーションの実行結果の一部を以下に示す。いずれのモデルも終了条件は98.0%である。また、比較のために太陽系モデルも示す。

モデル	中心密度	全ガス密度/ダスト密度 (比)		
		$R < 3[\text{AU}]$	$3 \leq R < 10[\text{AU}]$	$10 \leq R[\text{AU}]$
1	0.006	100.0	180.0	140.0
2	0.006	200.0	360.0	280.0
3	0.01	100.0	180.0	140.0
4	0.002	100.0	180.0	140.0

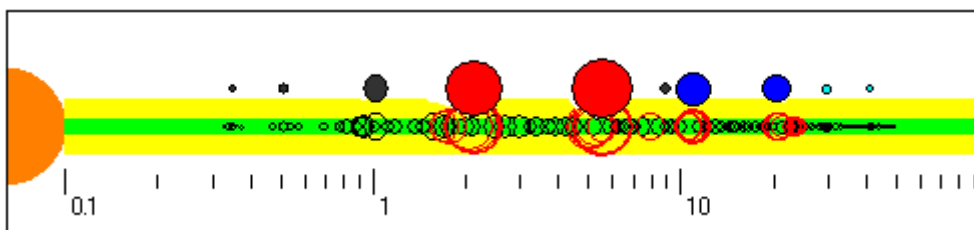
太陽系モデル



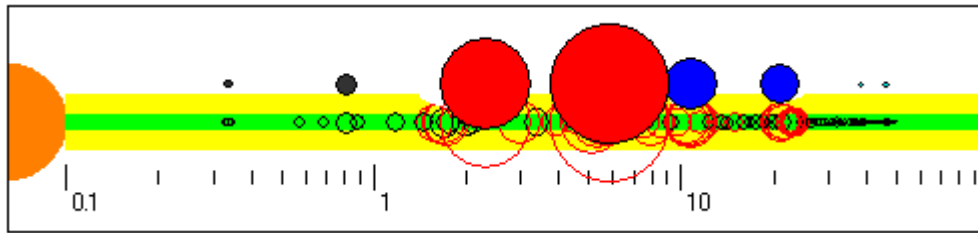
モデル1



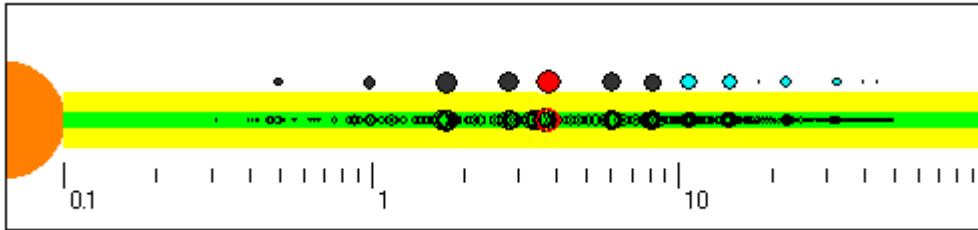
モデル2



モデル3



モデル4



#### A、太陽系と4つのモデルの比較

モデル1のときの結果が太陽系に最も近い形態であることがわかる。このことから、われわれの太陽系の誕生した原始惑星系円盤を推測することができる。

#### B、中心密度・・・モデル1.3.4

中心密度の数値を変化させると、生成された惑星の質量の大きさに変化が見られた。中心密度の少しの変化で惑星系の惑星質量が大幅に増加した。中心密度が大きくなると、地球型惑星、木星型惑星、巨大氷惑星ともに質量が増加した。また中心密度が下がると逆に小さな惑星が多数生成された。中心密度が増加すると惑星の材料となる物質が伴って増加し、逆に中心密度が減少すると材料となる物質が集まらず小さな惑星しかできないため、それぞれがあまり合体せずそれにより多数の惑星が生成されると考える。

#### C、全ガス密度/ダスト密度（比）・・・モデル1.2

円盤に存在するガスの比率を変化させると、一つ一つの惑星質量が増加し、生成される惑星の数が減った。

#### D、空洞比、乱数種

空洞比が大きくなれば多数の惑星が生成され、小さくなれば惑星が少数しか生成されなかった。他に乱数をさまざまに変化させると惑星のできる位置が少しずれたりとは本質的には変化しないが細かい変化が見られた。

また、最近多数見つかった中心星の近くを公転するホットジュピターのような惑星は、モデル3のような比較的重い原始惑星系円盤から誕生し、なんらかの理由により中心星の近くに移動したのではないかと推測することができる。

これらのことから原始惑星系円盤の初期条件によって、形成される惑星系の様態が多様になることがわかる。これから発見されるであろう多数の惑星系の現在の様態と結びつけることにより、その惑星系がどのような原始惑星系円盤から生まれたのかを考察、議論することができると思う。

今回のシミュレーションでは原始惑星系円盤の化学的なガス密度、温度、組成などを考慮していない。これらは惑星の特性を決める重要な要素であり、これらを含めたプログラムに改良していく必要がある。また、今後は観測データなどと比較しながら、惑星の骨格を決めると考えられる質量（ガス、ダスト）の空間分布をさまざまに検証していきたい。