

太陽系の起源について

金光研究室 阿萬 光哉

1 序論

「この地球に産まれた奇跡」と言った台詞を誰しも耳にし、感じたことがあるだろう。母なる大地、地球。その地球を含んだ太陽系の起源は、宇宙の起源、生命の起源とともに、今を生きる私達の根底に存在する部分であるだろう。今から約 46 億年前に誕生した太陽系。しかし太陽系起源論の歴史は浅く、標準モデルが確立したのは 1980 年代である。1995 年に初めて太陽系以外の惑星（系外惑星）が発見され、近年の観測技術の進化に伴い太陽系外の惑星の観測が急速な発展を見せている。それに伴い、太陽系起源論もますます活発になってきている。

2 太陽系の起源

宇宙空間の星々の間には所々、ガス（主に水素ガスとヘリウムガス）とダストの集まった星間雲と呼ばれる部分が存在する。この星間雲の一部が惑星系、つまり太陽や地球のふるさとである。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ぶ。分子雲の中でも局地的に密度の高い部分は分子雲コアと呼ばれ、46 億年前、超新星爆発（太陽質量の約 8 倍以上の星の終わり）などの影響で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。この分子雲コアの重力収縮により原始惑星系円盤が形成される。太陽系の成り立ちを考えるにあたって、太陽系の母胎となる星間雲の様子、原始惑星系円盤の進化について考える。

2-1 星間雲から生まれた

太陽の元となる分子雲コアは回転しながら激しく重力収縮を繰り返した。収縮が進むと分子雲コアの中心部の温度、圧力、密度がしだいに高くなり、やがて収縮はおだやかになり輝く星が形成された。「原始太陽」の誕生だ。できたばかりの太陽は今の 10 倍くらいの大きさであったと考えられている。しかし中心部の温度は低かったので、水素を燃やしてヘリウムに変える反応（核融合反応）はまだ始まっていなかった。一方、原始太陽の周りに残された星間雲は回転による遠心力によって周囲に円盤を作った。これが「原始太陽系円盤」だ。このようにして分子雲コアの重力収縮により、中心には原始太陽（原始星）、そのまわりには公転運動をする原始太陽系円盤（ガス円盤）が形成される。円盤の大きさは半径 100AU で、質量は太陽質量の 1/100 ほどであった。

2-2 原始太陽系円盤の様子

原始太陽の誕生から数十万年、星間雲ガスの降り積もりが続き、円盤の質量が増大し、それが終了してしばらくの間は、原始惑星系円盤内は自己重力不安定により活発な乱流が生じている。強い乱流と原始太陽の引力によりガスはどんどん中心星に向かって落ちていき、中心星の質量降着率が増大し成長させる。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ので、この段階ではダストは円盤の垂直方向に沈殿することができない。

2-3 微惑星の誕生

ガス円盤が誕生して数十万年。やがて分子雲コアからのガスの降り積りがなくなると、原始惑系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。すると乱流は弱くなり円盤の垂直方向の

質量降着率が減少する。この段階になって初めて惑星形成が可能になる。ガスに対するダストの割合が増加して、初期に比べ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。沈殿が進むとダスト層が分裂し、大きさ数kmの微惑星を形成する。この頃の微惑星は数百億個にも達した。

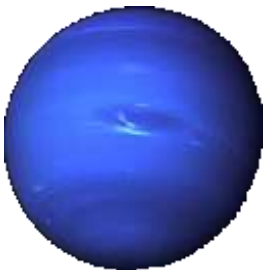
2-4 微惑星から惑星へ

ガス円盤が誕生して約 100 万年後。微惑星はそれぞれの重力により軌道が形成され、衝突を繰り返す、より大きな微惑星になっていく。微惑星の成長は、大きな微惑星ほど重力が強く、他の微惑星を吸収しやすいので成長の早い暴走成長である。暴走成長により生まれた特に大きな微惑星が「原始惑星」である。我々の太陽系の場合、お互いの衝突・合体の結果、数十個の原始惑星から数個の惑星が誕生した。これが地球型惑星である。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、地球質量の 5~20 倍の大きさに成長すると核の重力によりガスを引き付け、その大気の重力により暴走的にガスを取り込み、巨大なガス惑星である木星型惑星が形成されていった。

3 太陽系外縁部

本研究では太陽系最果ての惑星である「海王星」と 10 年ほど前まで太陽系の外であると思われていた「エッジワース=カイパーベルト天体」に着目した。

3-1 海王星 (Neptune)



海王星は 1846 年に発見され、1989 年ボイジャー 2 号によって探査された。

太陽からの平均距離：30.068964 AU (4,504,000,000 km)

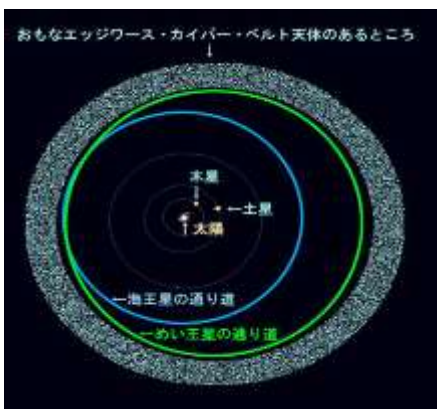
赤道半径：24764 km 公転周期：164 年 288 日

表面温度：-218℃ 衛星：13 個 (トリトン etc)

成分：中心核は氷と水素などを含んだ岩石で、厚い大気は水素、ヘリウム、メタンなど

3-2 エッジワース=カイパーベルト天体 (Edgeworth-Kuiper Belt Object) (EKBO)

(Trans-Neptunian Object とも呼ばれる)



1992 年 8 月に最初のエッジワース=カイパーベルト天体 (1992QB1) が発見された。この天体は太陽からの平均距離が 41.2 AU、比較的円に近い軌道で公転し、公転周期は 296 年と見積もられている。冥王星までが太陽系の領域とされていたが、エッジワース=カイパーベルト天体から太陽系内に落下した微小天体は短周期彗星になることが分かった。エッジワース=カイパーベルト天体は彗星の巣である小天体の集まりである。現在、エッジワース=カイパーベルト天体は狭義では 30~50 AU、広義では数百 AU とされ、一万 AU~

AU はオールトの雲と定義されている。エッジワース=カイパーベルト天体は太陽系が生まれてきた時の状態を保っていると考えられているので、太陽系起源論を議論するにあたって非常に重要な天体である。エッジワース=カイパーベルト天体は現在までに 1000 個以上発見されている。日本では Edgeworth-Kuiper Belt Object の頭文字を読み、EKBO と呼ばれたりする。

4 シミュレーション

本シミュレーションでは、惑星系形成過程の最終段階の惑星集積において、太陽と海王星の重力にエッジワース=カイパーベルト天体がどのように影響され、現在の軌道に至るのかを観察できるようなコンピュータシミュレーションを作る。

まずエッジワース=カイパーベルト天体の質量は太陽と海王星の質量に比べると非常に小さなものであるので考えないものとする。数値計算をする上で次のような単位にした。

長さの単位：1AU=1.496×10¹¹m 重さの単位：太陽質量=1.989×10³⁰kg

こうすると重力定数G=6.672×10⁻¹¹ [m³ kg⁻¹ s⁻²]なので、G=1になるように時間の単位を決めようとする、

$$s = \sqrt{\frac{(1.496 \times 10^{11})^3}{(1.989 \times 10^{30}) \times (6.672 \times 10^{-11})}} = 5.023 \times 10^6 \text{ 秒}$$

になるので時間の単位=0.159年となった。これらの単位を用いて、運動方程式の数値積分を行いエッジワース=カイパーベルト天体の軌道をシミュレーションした。その際、運動方程式の数値積分には、定評のあるルンゲ・クッタ法を使い計算を行った。このシミュレーションに使用する運動方程式は以下の2つである。

太陽—海王星間での万有引力 (G=1)

$$\frac{dx}{dt} = u$$

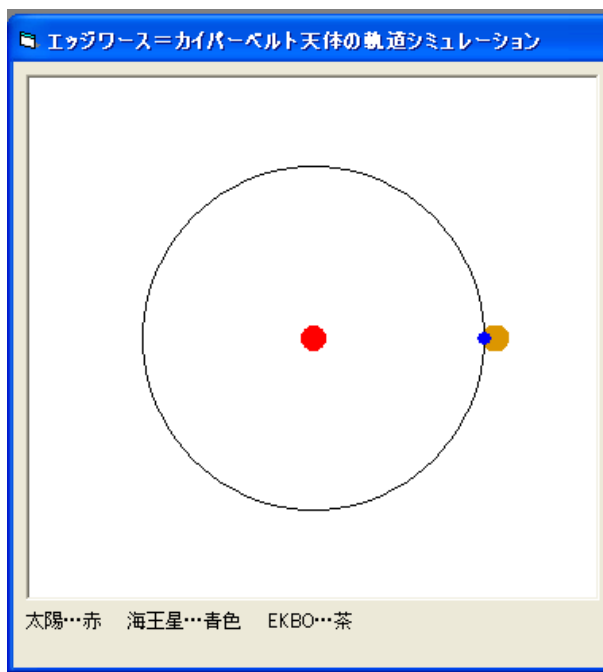
$$\frac{du}{dt} = -\frac{M(x-x')}{r^3}$$

エッジワース=カイパーベルト天体—太陽と海王星間での万有引力 (G=1)

$$\frac{dx}{dt} = u$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{M1(x-x1')}{r^3} - \frac{M2(x-x2')}{r^3}$$

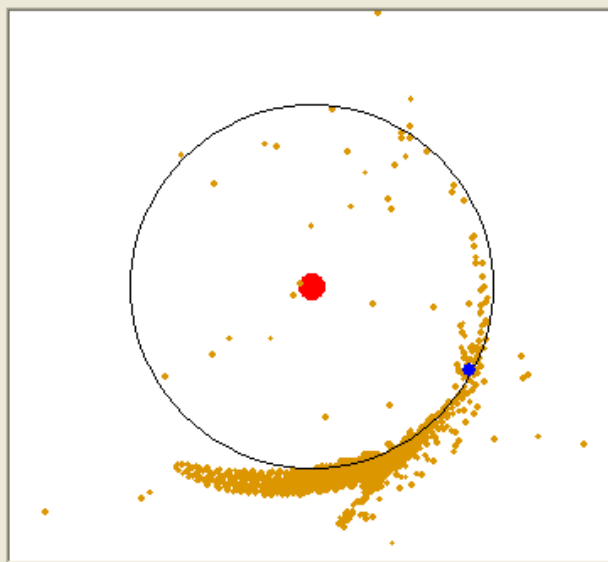
コンピュータで計算する際、太陽—海王星間また、エッジワース=カイパーベルト天体—太陽と海王星間での万有引力を数値積分するのにそれぞれ上式のように二階微分方程式を一階の連立微分方程式に分けて計算を行った。



開始直後のEKBOの様子

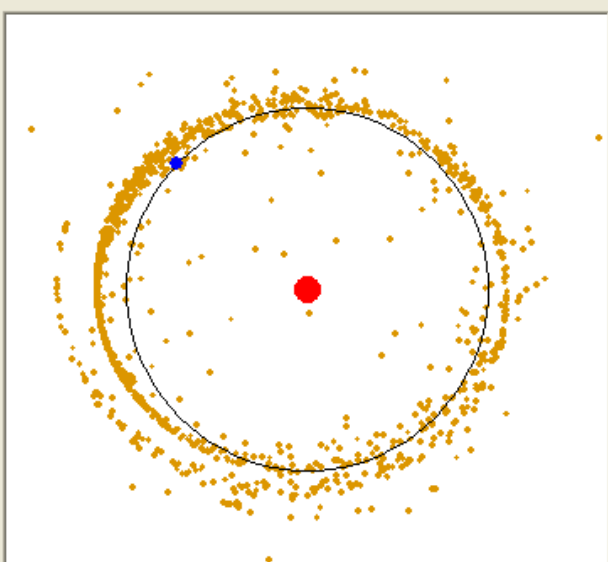
海王星を30AUの地点に配置し、その外側に1200個のエッジワース=カイパーベルト天体を配置し、x軸方向に0.012(AU/1ステップ)、y軸方向に0.619(AU/ステップ)の初速を与えてシミュレーションを行った。シミュレーションを開始した直後から、エッジワース=カイパーベルト天体は海王星と同方向(半時計周り)に公転を開始した。

■ エッジワース=カイパーベルト天体の軌道シミュレーション



太陽…赤 海王星…青色 EKBO…茶

■ エッジワース=カイパーベルト天体の軌道シミュレーション



太陽…赤 海王星…青色 EKBO…茶

1000 ステップ (159 年後) の EKBO の様子

1000 ステップ後 (159 年後) のエッジワース=カイパーベルト天体の様子を見て、ばらけが見られるようになってくる。これは、太陽や海王星の引力を受けて内側や外側にはじき飛ばされたりしたものである。冥王星のように海王星と共鳴関係にあるエッジワース=カイパーベルト天体を共鳴天体 (レゾナント) と呼ぶ。エッジワース=カイパーベルト天体から内部太陽系に落ち込みつつある天体をケンタウルス族と呼ぶ。海王星の重力によりエッジワース=カイパーベルト天体からはじき飛ばされたはぐれものの天体を散乱天体 (スキッタード) と呼ぶ。内側にはじき飛ばされたケンタウルス族などを至近散乱天体、外側に飛ばされ大きな軌道周期を持つものを拡散散乱天体と呼ぶ。海王星の軌道の内側にくることもなく、海王星の影響をそれほど受けずに大きく外側を円軌道に近い形で回っている天体を古典的天体 (クラシカル、キュビワノ) と呼ぶ。

8000 ステップ (1272 年後) の EKBO の様子

8000 ステップ後 (1272 年後) のエッジワース=カイパーベルト天体の分布を見ると、海王星の軌道が 30AU なので、40AU 前後、つまり現在のエッジワース=カイパーベルト天体の位置と同じくらいの位置に分布していることが見てとれる。

5 考察

今回はエッジワース=カイパーベルト天体が太陽や海王星の重力によりどのような軌道をとるかをシミュレーションしたが、さらに、原始惑星系円盤からそれぞれの惑星が形成され、太陽の重力の影響を受けどのようにして現在の軌道に至るかをコンピュータシミュレーションしたり、冥王星などの大きな天体と小さな天体とではその質量により軌道形成にどのような違いが出るのか、などをシミュレーションできるようにしたい。エッジワース=カイパーベルト天体の研究は太陽系起源論の重要な鍵を握っているので、今後、エッジワース=カイパーベルトの研究が進んでいくことで、太陽系の謎がどんどん解けていこう。