

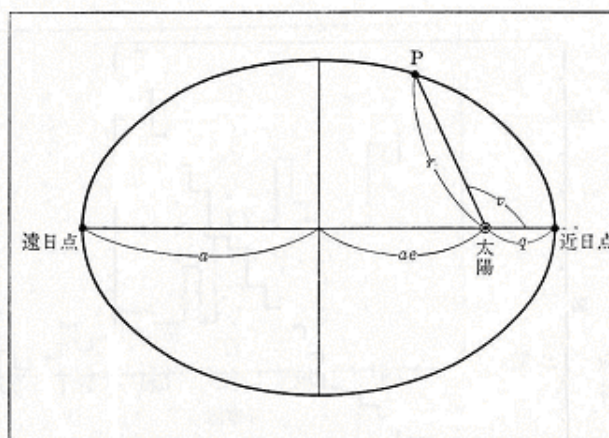
彗星の軌道とその起源

渡部 潤一 < jun.watanabe@nao.ac.jp >

濱根 寿彦 < hamane@astron.pref.gunma.jp >

(1) 太陽系天体の軌道要素

太陽系内天体は、太陽の強力な重力によって支配されている。太陽の質量に比べて、彗星や小惑星といった小天体の質量は、ほぼ無視できる。したがって、太陽が不動として、小天体は、その周りを動くと考えて問題がない。その場合、天体は太陽をひとつの焦点とした二次曲線（楕円または放物線、双曲線）軌道を描く。その軌道上で、太陽に最も近づくところを近日点、反対に最も遠くなる場所（楕円軌道の場合）を遠日点と呼ぶ。軌道の傾き、歪み具合、大きさ、近日点の方向、ある時刻における天体の位置などを示すため、軌道要素というパラメータが用いられる。ここでは、彗星に限らず一般的に用いられる軌道要素について説明しよう。

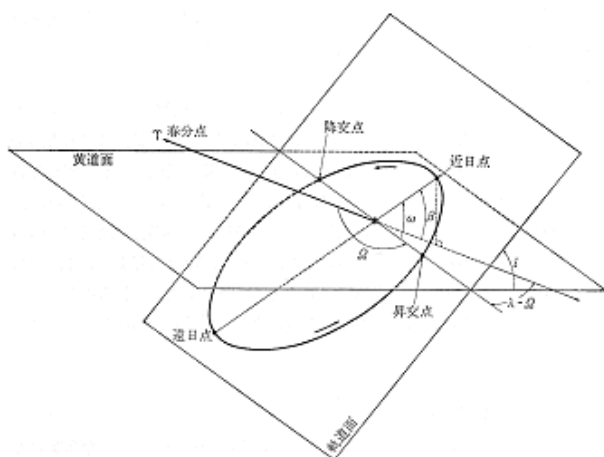


軌道要素には、その軌道の形や向き、天体の位置を記述する6個の定数が用い

られる。楕円軌道の場合、その楕円の大きさを表すのが長半径 a 、歪み具合を示すのが離心率 e である。長半径の代わりに焦点の一つにあたる太陽にどの程度まで近づくか、という量を持つてくることがある。これを近日点距離 q と呼ぶ。楕円軌道の場合には、長半径と近日点距離との間に $q = a(1-e)$ という関係が成り立つ。ちなみに離心率 e が0の時には軌道は円であり、1のときには放物線、1よりも大きいと双曲線となる。

一方、軌道が存在する平面を決めるのに、その基準として地球の軌道平面（これを黄道面と呼ぶ）をとる。この平面上で春分の日における太陽の方向を経度（黄経）の原点とする。この原点から、軌道の存在する平面が黄道面と交わる方向までの黄道上の経度差を昇交点黄経と呼ぶ。ここで、黄道面と交わる方向は180度異なる2つの方向に存在するが、そのうち天体が黄道面を南から北へ通過する昇交点の方向を採用する。また、黄道面と楕円軌道面の成す角度を軌道傾斜角 i と定義する。このふたつの量で軌道面が定まる。さらに、昇交点から軌道上を近日点まで測った角度を近日点引数と定義し、軌道平面上における軌道の向きを定めることになる。これらの3つの量を軌道要素の中でも角度要素と呼ぶことがある。以上の5つの数値によって、軌道の空間的な位置を定義している。

ただ、これだけでは実際の天体の軌道上の位置を知ることはできない。そのため、軌道の近日点を通過する時刻（近日点通過時刻 T ）か、あるいは特定の時刻における天体の軌道上の経度に相当する量（平均近点離角 l ）を定義する。彗星の場合には、前者の近日点通過時刻を用いるのが普通である。



【楕円軌道の軌道要素】

他の天体の引力の影響で、軌道要素は時間変化をしていく。太陽が圧倒的に大きな影響を与えているとはいえ、木星などの軌道に近づく彗星の場合は、その影響は無視できない。太陽以外の天体の重力的な影響を摂動という。摂動がある場合、定数である軌道要素は時間とともに刻々と変化することになる。そのため、ある時刻における瞬間の軌道要素を、接触軌道要素と呼び、その瞬間 (EPOCH) を軌道要素と併せて示するのが普通である。

一方、彗星の軌道はこういった惑星の摂動などを考慮しても、まだ説明できないずれが残る。これはガスや塵が非等方的に放出され、その反作用を彗星本体である核が受ける、いわばロケット効果によるものである。この効果は、かつては原因が分からなかつたいきさつから、非重力効果と呼ばれている。周期彗星では、この非重力効果のパラメータを位置推算に取り入れるのが普通である。

軌道長半径を表す単位には、地球と太陽の平均距離である 1.49597870×10^8 kmを用いる。この距離を1天文単位 (1 AU = 1 astronomical unit) という。これは太陽系程度のスケールを表す距離の単位として、天文学一般に用いられている。

(2) 彗星の軌道

彗星の軌道は惑星のように円軌道に近いものはまれで、一般に非常にゆがんだ楕円軌道または大きな放物線軌道あるいは弱い双曲線軌道が多い。そのために、惑星軌道と交差あるいは接近することが多く、軌道は力学的に不安定である。軌道から彗星を分類する場合、短周期彗星 (楕円軌道で周期が200年以下のもの) と長周期彗星 (200年以上のもの) に分けるのが慣習である。しかし、長周期の方にはいわゆる放物線軌道や、二度と太陽系に戻ってこない彗星が含まれるので、用語としては適当ではないといわれる。国際天文学連合総会第20委員会などでも用語の検討が進んでいるが、とりあえず慣習に従う。

短周期彗星の軌道は黄道面に存在し、中でも遠日点が木星付近にあるものが多い。これを一時は木星族の彗星と呼んだこともあるが、今では後述するように別の意味で用いられている。短周期彗星には、エンケ彗星のように、3.3年という短い周期で回帰するものだけでなく、ハレー彗星のように76年もの長い周期を持つものまで、様々である。ただ、軌道傾斜角が小さい、黄道面付近に存在する短周期彗星と、ハレー彗星のように逆行する短周期彗星を、最近では区別し、前者を木星族彗星 (Jupiter Family Comets) あるいは黄道彗星 (Ecliptic Comets)、後者をハレー型彗星 (Halley Type Comets) と呼ぶようになってきている。現在見つかった短周期彗星は200個弱に上る。

一方、長周期彗星の中には放物線に近く (つまり、離心率が1に近く) その遠日点が数千天

文単位から数万天文単位という途方もないものが多い。また、基本的には短周期彗星とは違って軌道が黄道面とはほとんど無関係である。これらは、一般に後述するような理由でオールト彗星 (Oort Comets) と呼ぶ。

短周期彗星のうち、黄道面に近いところを順行する一群 (木星族彗星) と、ハレー型彗星およびオールト彗星の一群とは、その起源が次のように異なっていると考えられている。

(3) 彗星のふたつの故郷

彗星がどこからやってきているかを、その軌道から考えたのがオランダの有名な天文学者ヤン・ヘンドリック・オールトである。放物線軌道の彗星を丹念に調べ、その遠日点が、数万天文単位付近に集中していることを見だし、ここが彗星の故郷であると考えた。これが現在「オールトの雲」と呼ばれるものである。オールトの雲は球殻状なので、全方向から彗星がやってくること、つまり黄道面とは無関係であることも説明できる。いわゆる長周期彗星のほとんどは、このオールトの雲からやってきていると思ってまちがいない。

一方、オールトよりも早く、冥王星のやや外側に彗星の故郷がある、と主張した天文学者がいた。アイルランドの天文学者ケネス・エセックス・エッジワースである。彼は、短周期彗星が太陽系の惑星が存在する面 (黄道面) に集中していることから、オールトのような球殻状の故郷ではなく、冥王星の外側に黄道面にそったベルト状の彗星の故郷があると考えたのである。後に、アメリカの天文学者ジェラルド・カイパーも同様の考えを述べている。この考えは、しばらくはオールトの雲の影に隠れて、かえりみられることはなかった。オールトの雲からやってきた彗星のうち、たまたま惑星、主に木星に接近したものが軌道を変えられ、短周期彗星になると考えれば、特にこういった別の故郷を考えなくてもよいと思われたからである。短周期彗星の遠日点が木星付近に集中しているのは、この接近遭遇のためと考えられた。しかし、1980年代から、従来のオールトの雲では短周期彗星を説明できないことがあきらかになりはじめた。当時から急速に進歩しはじめたコンピューター・シミュレーションが、理論的に短周期彗星がオールトの雲では説明できないことがはっきりしてきたのである。そして、1992年に最初の天体が発見され、エッジワースとカイパーのアイデアが正しかったことが証明された。すなわち冥王星の外側にはオールトの雲とは別な彗星の故郷がある、という説が実証された。これがエッジワース・カイパー・ベルトと呼ばれているものである。

現在、観測される長周期彗星はオールトの雲から、短周期彗星のうち黄道面に近いところを順行する一群 (木星族彗星) は、エッジワース・カイパー・ベルトから、そして短周期彗星のうち、ハレー型彗星は、オールトの雲からやってきた彗星が、惑星に近づいて軌道を変えられたものであることがはっきりしてきたのである。

(4) 故郷からの道筋

・エッジワース・カイパー・ベルトから木星族短周期彗星へ

短周期彗星のうち黄道面に近いところを順行する一群 (木星族彗星) はエッジワース・カイパー・ベルトを故郷としている。こういった短周期彗星は、物理的な寿命が短いので、定常状態を考えると、次から次へと供給されているはずである。すると、木星族彗星への進化を示す途中の

彗星はあるのだろうか。実は、ケンタウルス族と呼ばれている一群の小天体がある。最初に発見されたのは、小惑星第2060番カイロンだ。この小惑星は土星の外側にあり、遠いときには天王星軌道にも達する。軌道計算でも、通常の小惑星のように安定ではない。数百万年程度の安定性しかないのである。ということは、カイロンはどこからか、比較的最近やってきたはずなのである。そして発見後10年を経て、この小惑星の周りに明らかに本体から放出されたと思われる塵のコマが見つかったのである。こうなると、その定義から彗星と考えざるを得ない。現在では、他にもこういった天体が多数、発見されている。カイロンの他には彗星的な活動を示している天体はないが、現在では軌道の安定性などから、これらケンタウルス族の天体はすべて、エッジワース・カイパー・ベルトから何らかの原因で内側へ落ち込んできたものとされている。太陽系の外側のベルトから内側へと軌道を変えながら短周期彗星へとすすんでくる途中の天体なのである。その成分といい、軌道の様子といい、まさに短周期彗星とエッジワース・カイパー・ベルトを結ぶ接点とっていいだろう。

・ オルトの雲からハレー彗星型短周期彗星へ

一方、放物線軌道に近い彗星は、確実にオルトの雲付近を起源にしている。初期に考えられたように、惑星に接近・捕獲されてハレー型の短周期彗星になったものも存在する。短周期彗星の中で、軌道傾斜角が大きなものはオルトの雲起源と考えていいだろう。その代表は、もちろんハレー彗星である。ハレー彗星の軌道傾斜角は162度と、ほぼ逆行軌道である。他に、しし座の流星群を生み出すテンペル・タートル彗星や、ペルセウス座流星群の母彗星であるスワフト・タートル彗星などもオルト起源と考えられる。それぞれ、遠日点付近で大型の惑星と接近するような軌道を持つ場合も多い。

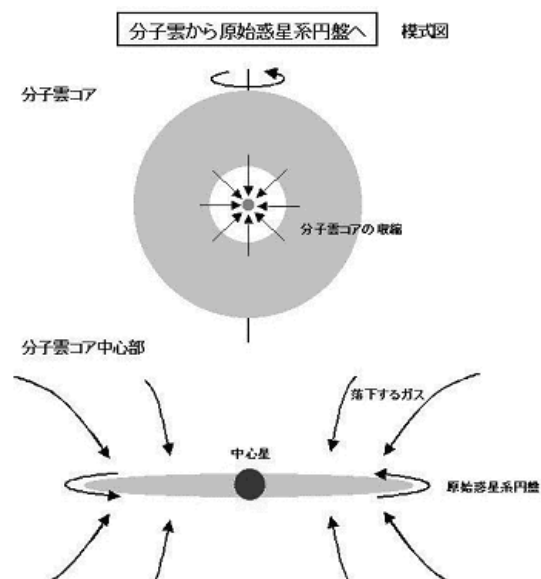
(5) 太陽系の形成と彗星の起源

(a) 分子雲から原始惑星系円盤へ

銀河系には、岩石質の芯が氷に包まれた微小な塵（ダスト）を含むガスででき、 H_2 をはじめとしてCOや H_2O 、 NH_3 などの分子を豊富に含む星間雲（分子雲）がある。星形成領域の観測などにより、太陽はこのような分子雲の濃い部分（分子雲コア）からでき、惑星はダストからできたと考えられている。

分子雲コアは、太陽の数倍の質量で約1光年の広がりがあり、ゆっくりと回転している。何かのきっかけで自己重力によってつぶれ始めると、真っ先にできる中心部に向かってガスが次々に落下する。このとき、分子雲コアの回転軸に向かって落下するガスには遠心力が効き、遠心力と重力が釣り合うところで落下が止まる。

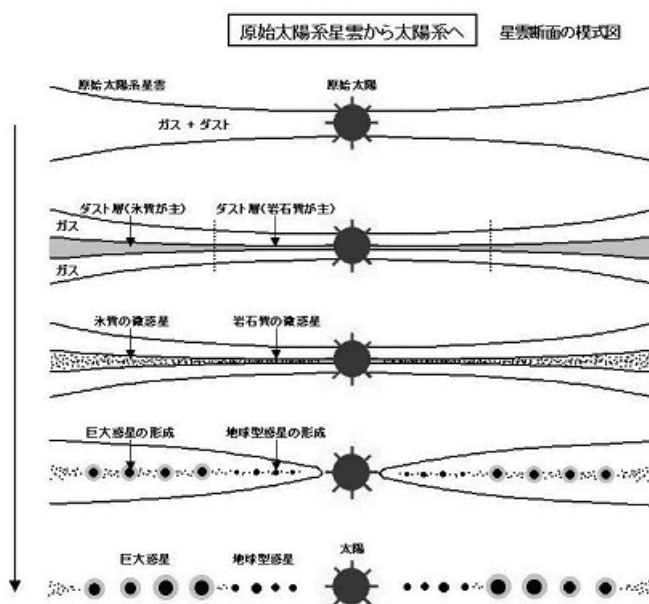
一方、回転軸方向にはガスは自由落下する。こうして、星の原型である中心部（中心星）の周り



に、回転軸方向につぶれたガス円盤（降着円盤）ができる。この円盤には乱流が生じていて、これに乗ってダストが踊っている。円盤のガスは乱流摩擦などが原因で徐々に内側に落ちていき、中心星に付け加わっていく。やがて分子雲コアからのガスの落下が収まると乱流も収まって、重力と遠心力の合力の方向である赤道面に向かってダストが沈み始める。また、円盤のガスはほぼケプラー回転するようになる。惑星はこのような静かなガス円盤（原始惑星系円盤）の中でできたと考えられている。

(b) 原始惑星系円盤から惑星系へ

太陽系の原型となる原始惑星系円盤を特に原始太陽系星雲と呼ぶ。星雲のガスとダストの分布は、現在の惑星の固体部分を粉々にして岩石質のダストを作り、その質量分布が滑らかになるようにばら撒いた後、分子雲のガス/ダスト比を使ってガスの分布を決めるという手法で求められる。さらにH₂OやNH₃などが凍る領域では、これらを氷質のダストとして加える。星雲の温度分布が中心星（原始太陽）によるダストの加熱で決まるとすれば、数AUより遠い領域でこれら氷質のダストが主な固体成分となる。こうして予測された星雲は現在の惑星を作るぎりぎりの物質になるので、最小質量モデルと呼ばれる。その質量は太陽の約 1/100 で、観測的に知られている原始惑星系円盤の典型的な質量と同じである。次に、この原始太陽系星雲から出発する太陽系形成の「標準モデル」を見てみよう。



ダストが星雲の赤道面に沈むと、そこにダスト円盤ができる。沈降が進んでダスト円盤が薄くなるとダスト同士の引力（自己重力）が潮汐力を上回り、重力的に不安定になる。やがてダスト円盤が多数のダスト集合体に分裂し、この集合体が固まって小天体になる。これが惑星の材料であり、微惑星と呼んでいる。微惑星の密度を岩石程度と仮定すると、その大きさは約 10km となる。これは典型的な小惑星の大きさである。

ガス円盤中の微惑星には、重力とガス抵抗の 2 つの力が働く。微惑星同士の相対速度はガス抵抗によって小さくなり、緩やかな衝突によって重力的に結びつく（衝突合体）。衝突合体を繰り返して微惑星が大きくなると、周囲のガスが重力で引き留められて大気になる。これを原始惑星と呼ぶ。岩石質の惑星（地球型惑星）は、原始惑星そのものか原始惑星が衝突合体してできたものであると考えられている。

原始惑星が大きくなると重力も強くなり、大気が増える。原始惑星の質量が地球質量の 5~10 倍を超えると圧力で大気を支えきれなくなり、星雲ガスが際限なく、落ち込み始めて、ガスも惑星の材料となる。こうして、木星などの巨大惑星が誕生した。星雲ガスはやがて消失する。原因

は明らかにされていないが、主系列星となった太陽の激しい活動によって吹き払われたとする考えなどがある。

(c) 小天体の起源

小天体は、その多くが取り残された微惑星やその複合体である。

現在の火星と木星の軌道の間にあたる、原始太陽系星雲の中でも氷質のダストが加わるか加わらないかの領域では、その内や外と比べて微惑星の衝突頻度が低く、原始惑星ができるのが遅れた。この領域の微惑星や原始惑星は先にできた木星の重力で振り回されるだけでなく、星雲ガスが消失した後にはガス抵抗もなくなるので相対速度が大きくなり、衝突すると壊れるようになる。小惑星と小惑星帯はこのようにしてできたと考えられる。

一方、海王星軌道より遠い領域でもやはり衝突頻度が低かったため、微惑星は成長しきれなかった。このような起源の氷小天体が数多く存在する領域をエッジワース・カイパーベルトと呼ぶ。冥王星はその中の最大の天体であると考えられている。

ところで、惑星ができた領域の微惑星すべてが惑星の材料になったわけではない。残りがあった。巨大惑星ができた領域の残存微惑星は、惑星の重力に振り回されて四方八方に放り出され、数万 AU の遠方に遠日点がある長楕円軌道に入ったと考えられている。これが存在すると予測されている氷小天体の大集団で、オールトの雲と呼ばれている。

(d) 彗星

エッジワース・カイパーベルトやオールトの雲の天体は、氷質の微惑星そのものか、微惑星が衝突合体した氷小天体であると考えられる。これらが何らかの原因で太陽から数 AU まで“落ちて”くると、温められた氷成分がガス化して吹き出し、尾ができるはずである。これが彗星である。

惑星形成論に従えば、エッジワース・カイパーベルト起源の彗星は、基本的には黄道面近くを惑星と同じ向きに公転し（順行）、公転周期が比較的短いはずである。木星族などの短周期彗星はこの種のものであろう。これに対し、オールトの雲起源の彗星は軌道面がばらばらで、順行するものも逆行するものもあり、公転周期が比較的長いはずである。長周期彗星のうちかなりのものがこの種の彗星なのであろう。

一般に、彗星の軌道は惑星重力の影響で変化するので、その起源によらず、二度と戻って来なくなるものや、長周期彗星から短周期彗星になったり、逆のことが起きたりするものがある。しかし、いずれにしても、彗星は長い間太陽から遠く離れた場所にあり、それができた原始太陽系星雲の環境を物語る物質科学的な情報をいわば氷漬けにした状態で保っていると考えられる。46億年の間、氷小天体ができただ時のままの状態にあったと考えるのは慎重を要するが、基本的には、彗星のガスの化学組成やダストの組成を調べれば、オールトの雲起源の彗星からは30 AUよりも内側の領域の物理化学的な情報が、エッジワース・カイパーベルト起源の彗星からはそれよりも遠方の領域の情報が得られると期待される。

【参考文献】

- Oort, J. H. , Bull. Astron. Inst. Neth., vol. 11, p. 91-110 (1950)
- Edgeworth, K. E., Mon. Not. R. Astron. Soc., vol. 109, p. 600-609 (1949)