

特集「太陽系天体の種別とその概念整理」 力学的側面から見た太陽系天体

吉川 真¹

(要旨) 国際天文学連合で採決された惑星と準惑星の定義において、この2つの種別を区別するのは「その天体の軌道近くから他の天体を排除したかどうか」である。文字通りにこの定義を当てはめると、水星から海王星までの惑星は、惑星ではなくなってしまう。なぜならば、これらの天体の軌道付近には、小惑星や彗星といった太陽系小天体が多く存在するからである。ここでは、天体の軌道運動に着目して、“さすらいの天体”と“共鳴天体”というものを定義し、これらを除いて考えれば、惑星と準惑星の区別がこの定義で可能であることを示す。

1. 太陽系天体

観測技術の進歩に伴って、多数の太陽系天体が発見されてきた。特に、「小惑星」と呼ばれる天体の発見数が急激に増えているのだが、そのことが、ついに冥王星を惑星の定義からはずすという事態にまで発展することになったのである。

ここで、細かいことを抜きにすれば、小惑星とは、「惑星ではないが太陽の周りを直接公転していて、望遠鏡では常に点状に観測される天体」である。とりあえず、惑星の定義が自明だとすると、惑星の周りを回っている衛星は小惑星ではないし、表面からガスや塵を吹き出すために必ずしも点状に観測されない彗星も小惑星ではない。簡単に言えば、岩の塊のようなイメージの天体が小惑星である。そのような小惑星は、一昔前の知識では火星と木星軌道の間の小惑星帯と呼ばれる場所に存在しているというものであったが、最近、太陽系の広い領域に発見されるようになった。例えば、地球軌道に近い領域にもたくさん存在していることが分かり、そのような天体の地球衝突が、重要な問題として認識されるようになった。「地球接近天体」である。一方、はるか冥王星軌道付近にも多数の小惑星があることがわかってきた。最初に発見されたのは、1992年のことで、第1号の1992 QB1が発見されてから、現在、1200個ほど発見されている。この後者の発見が、冥王星を惑星の定義からはずすことになったわけである。

これらは、カイパーベルト天体とかエッジワースカイパーベルト天体あるいはTrans Neptunian Objectと呼ばれているが、日本語では「太陽系外縁天体」と呼ばれることになったものである。

ただし、この「小惑星」という分類も必ずしもはっきりしたものではない。おそらく冥王星軌道付近に発見されている太陽系外縁天体は揮発性成分に富んでいないはずで、仮に軌道が変わって太陽のそばまで来ようになれば、きっと彗星として観測されることであろう。逆に、昔は彗星だったが、ガスや塵が出尽くしてしまって、今や小惑星として観測されている天体もある。さらには、小惑星が惑星の引力に捕まってその衛星となっているようなことも考えられる。ということで、小惑星、彗星、衛星という区分は、あまり明確な区別ではないのである。特に、小惑星帯にある小惑星と、冥王星軌道付近の太陽系外縁天体とは、性質上かなり異なっていることが想像されるので、両方を「小惑星」と呼ぶことに抵抗を感じる人も多い。ただし、国際天文学連合のマイナー・プラネット・センターでは、小惑星帯の小惑星も太陽系外縁天体も同じ小惑星番号を付しているのであるが。

以上のように、本当は太陽系的小天体をうまく分類することは難しいのであるが、実は、自明であると思われていた惑星についても定義が難しかったのである。それが、2006年8月の国際天文学連合総会における冥王星の問題と、その後の「混乱」につながっているこ

1. 宇宙航空研究開発機構

とになる。我々が改めて認識したことは、太陽系天体は、惑星、衛星、小惑星、彗星など、一見明確に区分されているようであるが、実際には天体の性質は「連続的」なのであって、どこで区切りをいれるのかはあまり明確ではないということである。そのような状況のもとで「準惑星(Dwarf Planet)」という新たな区分が入ることになり、混乱が生じているのである。

2. 惑星の定義における問題

国際天文学連合で決議された惑星の定義を記すと次のようになる。

A planet is a celestial body that (a) is in orbit around the Sun, (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape, and (c) has cleared the neighbourhood around its orbit.

また、これを和訳したものは、例えば国立天文台のWebを参考にして記すと、次のようになる。

太陽系の惑星とは、「太陽の周りを回り(衛星ではなく)」、「十分大きな質量を持つために自己重力が固体としての力よりも勝る結果、重力平衡形状(ほぼ球状)を持ち」「その軌道近くから他の天体を排除した」天体である。

準惑星については、この惑星の定義のうち、最後の「その軌道近くから他の天体を排除した」という部分が「排除していない」となるだけである。つまり、惑星と準惑星は、いずれも「太陽の周りを回り(衛星ではなく)」、「自己重力のために球形をしている」天体であるが、惑星は自分の軌道の周りに他の天体がなく、準惑星は自分の軌道の回りに他の天体があるというわけである。

この定義については、実はどの部分についても問題がある。まず、「太陽の周りを回り(衛星でなく)」という部分であるが、一見、非常に明確な定義に見えるが、実は「衛星」の定義が難しい。例えば、誰でも「月は地球の衛星」と思っているが、月に加わる引力は、太陽からの引力の方が地球からの引力よりも倍くらい大きい。つまり、月は、地球ではなくて太陽の引力に支配されているわけである。また、「形が球形」というのも、どのくらい球に近ければよいのかとか、自己重

力によって形が決まったことをどのように証明するか等の問題がある。このように厳密には難しいのであるが、この2つの条件については、見た目で大ざっぱには判断できるものであり、それなりに納得したつもり

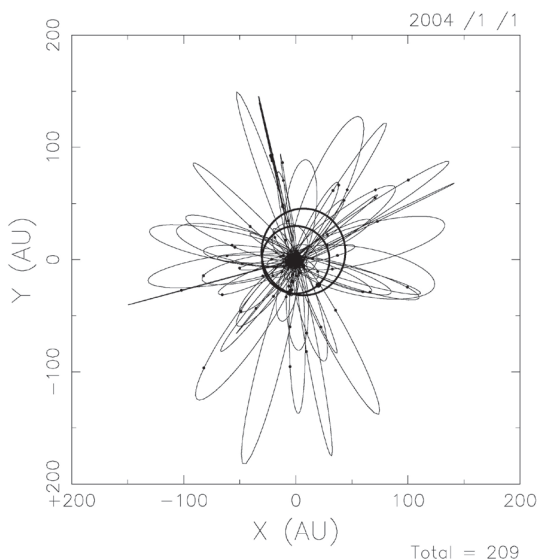


図1: 短周期彗星の軌道。中央付近の比較的円形に近い2つの軌道は、海王星と冥王星の軌道である。黄道面に投影。

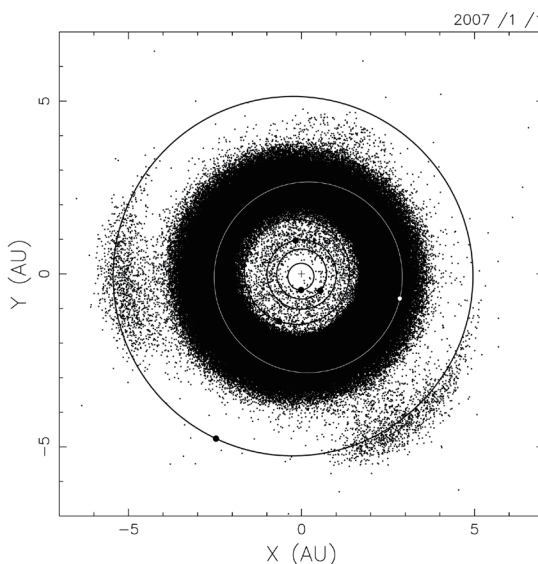


図2: 木星軌道付近までの小惑星の分布。中心が太陽で、黄道面に投影した図。軌道は、内側から水星、金星、地球、火星、Ceres(白抜きの軌道)、木星である。

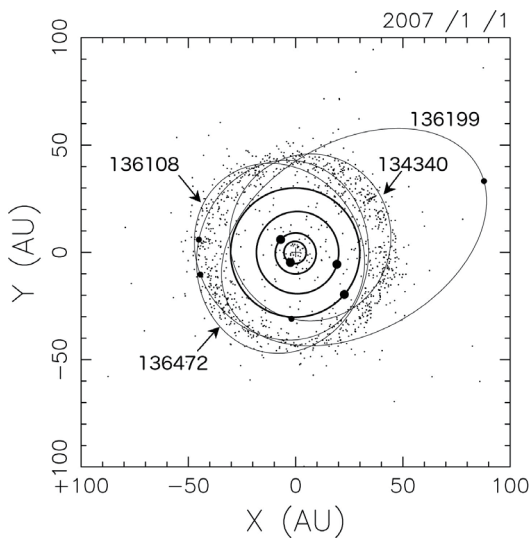


図3: 木星から太陽系外縁天体までの天体の軌道と分布. 中心が太陽で, 黄道面に投影した図. 太い線で描かれた軌道は, 内側から木星, 土星, 天王星, 海王星. また, 数字は小惑星の確定番号であるが, 134340は冥王星, 136199はErisである.

になれる. ところが, 3つ目の「自分の軌道近くから他の天体を排除」しているかどうかで惑星か準惑星かを区別することについては, 見た目には判断がつかない. ここでは, この点に絞って議論したい.

まず, 図1に彗星の軌道を描いたものを示す. この図は, 短周期彗星と呼ばれる, 公転周期が200年程度以下の彗星約200個の軌道を描いたものである. この図を見れば分かるように, 彗星の軌道は, 惑星の軌道付近にたくさん存在するわけである.

図2には, 木星軌道までの惑星と小惑星が描いてある. これも見れば分かるように, 小惑星が惑星軌道の周りに多数存在するのである. 火星軌道の内側に多数見られるものが既に述べた地球接近小惑星であるが, これらは水星, 金星, 地球, 火星の軌道のそばに存在する. また, 木星軌道上で木星の前後にも集団となった小惑

星が存在することが分かる. ちょうど, 太陽と木星を結ぶ線分を一辺とする正三角形を木星の軌道面上に描いたときに, 太陽と木星でないもう1つの頂点付近を中心とした分布をなしている. これは, トロヤ群小惑星と呼ばれている. 明らかに木星軌道付近に存在する.

図3には, 太陽系外縁天体の分布が描いてある. 海王星軌道の内側にばらばら見られるのがCentaur Objectsと呼ばれるもので, 海王星軌道の外側が太陽系外縁天体である. 外側の惑星についても, その周りに多数の天体が分布していることは明らかである.

ということで, 惑星と呼ばれるためには, 自分の軌道の周辺には他の天体がいはいけないのであるが, 図1, 2, 3を見ると, 明らかにそうはなっていないのである. これはちょっと困ったことになった.

3. どう解釈するか

国際天文学連合で採択された惑星の定義を厳密に当てはめると, 冥王星だけでなく他の惑星も惑星ではないということになってしまう. では, どう考えればよいのであろうか. 前節で述べたことをもう一度整理してみると, 表1のように排除されていない天体があるということである.

この中には, 軌道が大きく変化しやすく, たまたま惑星の軌道のそばに存在する天体がある. そのような天体をここでは, “さすらいの天体”と呼ぶことにしよう. 太陽系の天体は, 互いに万有引力を及ぼしあいながら運動しているので, 厳密に言えばすべての天体の軌道は変化している. しかし, その変化の程度は天体によって全く異なっていて, 惑星のようにあまり変化しないものから, 彗星のように大きく変わってしまうものがある. “さすらいの天体”とは, 太陽系の年齢に比べれば非常に短いタイムスケールで軌道が大きく変わってしまう天体のことであり, これは, 現在ではたまたま惑星の軌道のそばにあるだけで, 未来にはど

表1: 惑星の軌道付近から排除されていない天体

天体名	どの惑星のそばに存在するか	“さすらいの天体”か?	“共鳴天体”か?
彗星	水星～海王星	YES	
地球接近小惑星	水星～火星	YES	
トロヤ群・ヒルダ群	木星		YES
Centaur Objects	土星, 天王星	YES	
太陽系外縁天体	海王星	少なくとも一部は YES	少なくとも一部は YES

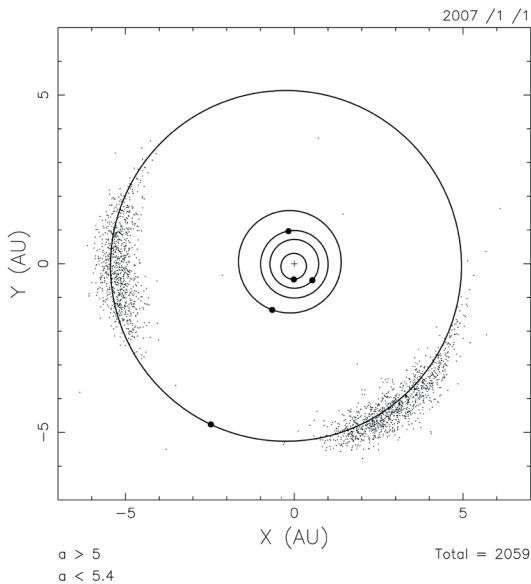


図4: トロヤ群の分布. 図2にプロットした小惑星のうち, 軌道長半径が5AUから5.4AUまでのもののみプロットした. これはトロヤ群の厳密な定義ではないので, この図にはトロヤ群以外の天体も若干含まれる.

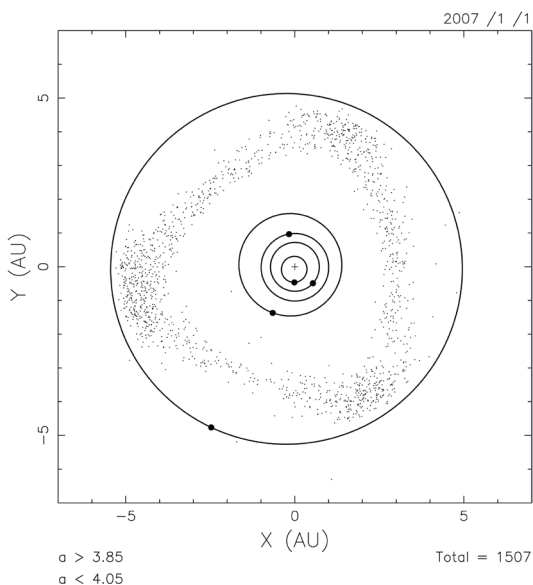


図5: ヒルダ群の分布. 図2にプロットした小惑星のうち, 軌道長半径が3.85AUから4.05AUまでのもののみプロットした. これはヒルダ群の厳密な定義ではないので, この図にはヒルダ群以外の天体も若干含まれる.

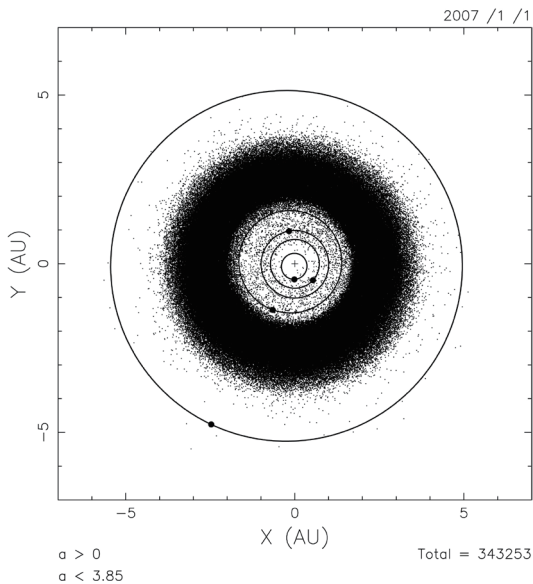


図6: トロヤ群とヒルダ群を除いた小惑星の分布.

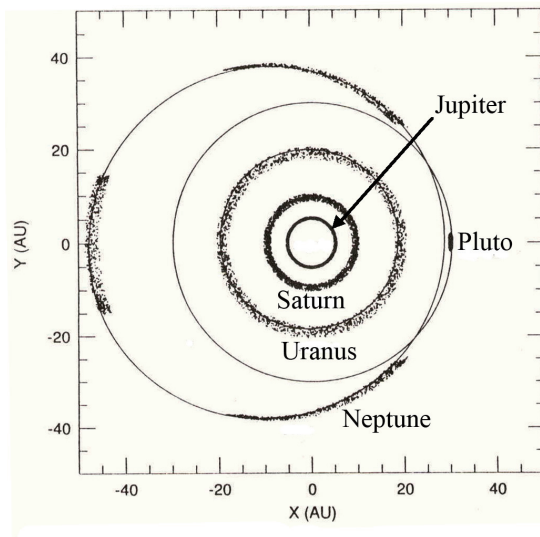


図7: 海王星が冥王星の近日点経度と同じ経度にあるときの木星・土星・天王星・冥王星の位置. x軸方向が冥王星の近日点方向になっている. 100億年にわたる数値計算による. 図の出典: [1].

こかに行ってしまうと考えられる。専門的な言葉で言えば、軌道がカオスになっていると言ってもよい。そのような天体は、彗星、地球接近小惑星、Centaur Objectである。これらは除外して考えることにしよう。

次に、平均運動共鳴というものに着目する。平均運動とは、天体の公転運動における平均の角速度のことであるが、2つの天体の平均の角速度が簡単な整数比になっている場合を平均運動共鳴と呼ぶ。簡単に言えば、2つの天体の公転周期が簡単な整数比になっていると言ってもよい。ここでは簡単のために、“共鳴天体”と呼ぶことにしよう。最も簡単な例が既に述べたトロヤ群小惑星で、これは平均すると木星と同じ公転周期で公転している。この状態を1:1の平均運動共鳴と呼ぶ。このような平均運動共鳴にある小惑星は多いのであるが、もう1つ有名なものにヒルダ群というものがある。ヒルダ群に属する小惑星は、軌道長半径が4AU付近の値を持っており、木星が太陽の周りを2周するときには3周するというものである。したがって、ヒルダ群小惑星と木星とは、3:2の平均運動共鳴となっている。

トロヤ群とヒルダ群に属する小惑星のみをプロットしてみると図4、図5のようになる。トロヤ群は明らかであるが、ヒルダ群についても、木星に接近しない分布になっているということが実感できよう。ここで、トロヤ群とヒルダ群を除いた分布図を作成してみると図6のようになり、図2と比較してみると、図6ならば木星は自分の軌道付近から他の天体を排除したと言ってもよさそうに思える。なお、水星軌道から火星軌道にかけては小惑星が残っているが、これらはすべて“さすらいの天体”であるので、図6ではプロットされているが、すでに除外して考えているものである。

太陽系外縁天体についてはどうであろうか。最も単純な疑問は、海王星は惑星なのかという疑問である。なぜなら、冥王星の周りには多くの太陽系外縁天体が存在するので冥王星は惑星ではなくなってしまったわけだが、海王星の軌道周辺にも少なくとも冥王星の軌道が存在する。したがって、海王星も自分の軌道付近から他の天体を排除していないのである。

よく知られていることであるが、海王星と冥王星は、3:2の平均運動共鳴にある。このことで、海王星と冥王星が衝突することを避けているのである。そのことを、最も端的に示したものが図7[1]である。この図は、海王星が冥王星の近日点経度と同じ経度に来たときに、

惑星が存在する場所をプロットしたものである。この図を見れば明らかなように、冥王星は海王星と接近することを避けている。

太陽系外縁天体には、このような海王星と3:2の平均運動共鳴にあるものが多く存在するが、その存在理由は、この冥王星のケースと同様なのであろう。ただし、太陽系外縁天体が必ずしもすべて共鳴状態にあるわけではないので、もう少し検討が必用である。

4. まとめ

国際天文学連合の惑星の定義文に出てきた「その軌道近くから他の天体を排除した」という言葉をめぐって少し考察してきた。その結果、“さすらいの天体”と“共鳴天体”を除いて考えると、この言葉が意図していることが割と明確になることがわかった。つまり、太陽系小天体から“さすらいの天体”と“共鳴天体”を除くと、水・金・地・火・木・土・天・海の惑星軌道周辺には天体は存在しないし(ここでは、衛星は最初から除外している)、準惑星に分類された冥王星、Eris、Ceresの周りには太陽系小天体が多く分布することになるのである。これで、少しは惑星と準惑星の区別がはっきりしたであろうか。

参考文献

- [1] 中井宏, 木下宙, 1995, 第27回天体力学研究会集録, 1.