特集「太陽系天体の種別とその概念整理」

太陽系天体の分類と起源

小久保 英一郎[1]

（**要旨**）太陽系の天体は質量，組成，軌道によって分類されている．太陽中心の公転運動をする太陽公転天体は質量によって大きく惑星と太陽系小天体に分類される．惑星はさらに組成によって，太陽系小天体はさらに軌道よって分類されている．ここでは私見も交えながら太陽系の天体を分類し，分類された天体の起源について太陽系形成の標準シナリオではどのように考えられているかを紹介する．そして，太陽系形成論の観点から準惑星の意義について考えてみたい．

1. はじめに

惑星，衛星，小惑星，彗星，と太陽系には大小様々な天体が存在する．一般に天体の分類には天体の物理量や運動状態が指標になる．太陽系の天体ではこれまで，天体の質量，組成，軌道が分類の指標として用いられてきた．これらの天体の特徴は互いに独立ではなく，多くの場合ある関係で結びついている．また，その関係はほとんどの場合，形成過程を反映していると考えられている．

現在でも太陽系の天体の分類は完成されたものではない．2006年夏に国際天文学連合総会で議論された惑星の定義に限らず，例えば衛星の定義もまだ定まってはいない．また，天体のどのような点に注目するかによって，研究者ごとに微妙に異なる分類が用いられることも多い．しかし，これまで特に混乱もなく研究が進められてきているのも事実だ．これは厳密な細かな分類があまり意味のないことを示しているのかもしれない．

ここでは私見も交えながら，あえて準惑星を導入しないで太陽系天体の分類を行う．そして分類された天体の起源について，現在の太陽系形成の標準シナリオを紹介する．そして最後に太陽系形成論をふまえて準惑星の意義とは何かについて考察する．

1. 国立天文台理論研究部

2. 太陽系天体の分類の概要

まず太陽系の定義をしておこう．ここでは太陽系は「太陽もしくは太陽中心の公転運動をする天体を中心とする公転運動をする天体群」とする．これは太陽に重力的に束縛されている天体群ということもできる．この定義によると太陽系の大きさは銀河系の中での太陽の潮汐半径の大きさ（$\simeq 2\times10^5$AU）となる．太陽系の天体で太陽以外の天体を太陽系天体とよぶことにする．

次に太陽系天体を軌道により大きく太陽中心の公転運動をする太陽公転天体と太陽以外の太陽系内天体中心の公転運動をする惑星公転天体に分ける（太陽系内天体は惑星とは限らないが代表して惑星を使う）．惑星公転天体系は重力的に一階層下の副系ということができる．太陽公転天体はさらに惑星と太陽系小天体，惑星公転天体は衛星とリング粒子に分類される．これらは主として質量による分類である．惑星と太陽系小天体の境界は水星質量だが，衛星とリング粒子との境界は定まっていない．以下に分類の概要をまとめておく．これ以降，本稿では太陽公転天体の分類に注目する．衛星の分類については本号の木村淳氏の解説を参照されたい．

太陽公転天体

- ●惑星
  - －地球型惑星
  - －木星型惑星

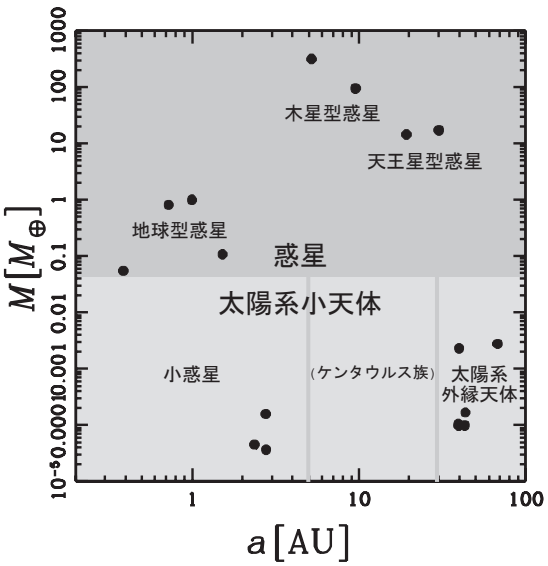

図1：　太陽公転天体の軌道長半径-質量関係

－天王星型惑星

●太陽系小天体

－小惑星

－太陽系外縁天体

－オールト雲天体

惑星公転天体

●衛星

●リング粒子

3. 太陽公転天体の分類

図1に太陽公転天体の分類の概要を示す．この図では8惑星と3大小惑星と名前のついている太陽系外縁天体のうち質量の大きなもの6個を示している（準惑星エリス，冥王星，セレスの3個も含まれる）．

3.1　惑星の分類

表1：惑星の分類

種類	地球型	木星型	天王星型
別名	岩石惑星	ガス惑星	氷惑星
存在範囲（AU）	0.4-1.5	5-10	20-30
質量（$M_\oplus$）	～0.1-1	～100	～10
主成分	岩石・鉄	ガス（H_2, He）	氷（H_2O, CH_4, NH_3）

太陽公転天体の中で質量が水星質量以上の天体が惑星である．惑星はさらに組成の違いから大きく地球型，木星型，天王星型（もしくは海王星型）の3種類に分類される（表1）．地球型惑星は別名岩石惑星で主に岩石と鉄からなっている．木星型惑星は質量のほとんどが水素，ヘリウムでガス惑星ともよばれる．天王星型惑星は表層に水素，ヘリウムを主成分とするガスがあるが，その質量は約10％しかなく，主に水，メタン，アンモニアの混合氷でできている．太陽系では水星，金星，地球，火星が地球型，木星，土星が木星型，天王星，海王星が天王星型に分類され，太陽系の内側から種類ごとに住み分けていることがわかる．また，質量も種類によって異なっていて，地球型惑星は～0.1-1$M_\oplus$，木星型惑星は～100$M_\oplus$，天王星型惑星は～10$M_\oplus$となっている．結局，惑星の分類は，組成を基礎にしているが軌道分布と質量での分類にもなっているわけだ．

3.2　太陽系小天体の分類

表2：太陽系小天体の分類

種類	小惑星	太陽系外縁天体	オールト雲天体
存在範囲（AU）	≲5	30-10^3(?)	～10^3(?)-10^4
分布形状	帯状	円盤状	球殻状

太陽系小天体は主に軌道から分類されている（表2）．大きく分けると木星軌道よりも内側にある小天体は小惑星とよばれる．小惑星が集中する2-3AUは小惑星帯とよばれる．また，海王星の軌道以遠の太陽系外縁部の小天体はまとめて太陽系外縁天体とよばれることになった．木星軌道と海王星軌道の間にある天体はケンタウルス族とよばれる．ケンタウルス族の寿命は短く，軌道進化の途上の一時的な種族だと考えられているのでここでは省いておく．さらに遠くの～10^3-10^4AUのオールト雲にある小天体はオールト雲天体である．これは彗星（核）とよばれることも多い．しかし彗星はもともと彗星活動（コマをもつ）を示す氷天体を指すものなので，分類名というより状態を指すものだと考えた方がよい．太陽系外縁天体とオールト雲天体の分布に明確な境界はなく，連続的だろうと考えられている．ここではふれないが小惑星と太陽系外縁天体は軌道によりさらに細かく分類されている．これらの小天体の分類は厳密ではなく重複もありまた文献によっても異なる．また，小天体の組成は軌道長半径に依存していて，概して外側ほど氷成分が多い．

それでは次に，これらの太陽系の天体がどのように形成されたと考えられているのか，その概略を見てみよう．

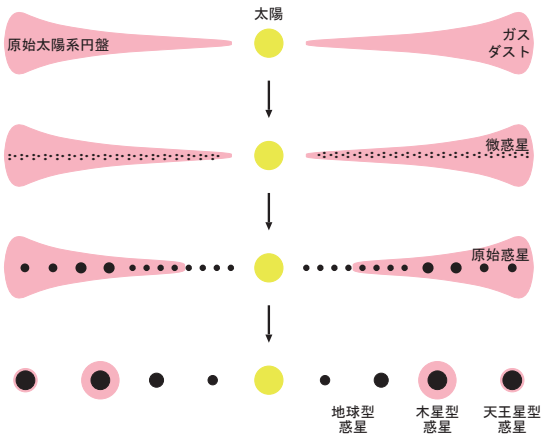

図2: 太陽系形成の標準シナリオ

4. 太陽系形成シナリオ

現在の太陽系形成の標準シナリオには2つの重要な仮定がある.

円盤仮説

- 惑星系は中心星と比べて小質量の星周円盤(原始惑星系円盤)から形成される.
- 円盤は太陽組成のガスとダストからなる.

微惑星仮説

- ダストの集積によって微惑星が形成される.
- 微惑星の集積によって固体惑星が形成される.
- 固体惑星にガスが降着することによってガス惑星が形成される.

この2つの仮説を基に考えられているシナリオは次のようなものである[1,2]. 図2に原始太陽系円盤からの太陽系形成の概念図を示す. 原始太陽系円盤とは太陽系の場合の原始惑星系円盤である. 正確には惑星形成は太陽系の内側ほど速く進むために外側ほど形成段階が遅れるが, この図では簡単のため全ての領域で同時に惑星形成が進むように描いてある. 形成は次のように進行する.

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. 地球型惑星は原始惑星の衝突合体によって形成される. 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形成される.

基本的な天体の組成の違いは, 天体が雪線の内側で形成されたか外側で形成されたかで決まる. 雪線とはH_2Oが氷になる太陽からの距離で原始太陽系円盤の場合は約3AUと考えられている. また, ガス惑星は原始惑星がガスが存在する間に十分大きく($\simeq 10M_\oplus$)なれた場所にだけ形成される. 観測から原始惑星系円盤のガスは10^6-10^7年で消失すると見積もられている. 太陽系の場合は, ちょうど約5-10AUがガス惑星形成の条件を満たしたのだと考えられている.

太陽系小天体は基本的に何らかの理由によって惑星になりそこねた微惑星や原始惑星の名残と考えられている. 小惑星帯と太陽系外縁部では, 何らかの理由で微惑星の面密度が下がり, さらに惑星による重力摂動によって微惑星のランダム速度が増大し, 衝突しても合体ではなく破壊になるようになってしまっている. また, オールト雲天体は惑星によって遠方に散乱された微惑星だと考えられている.

5. 固体天体の質量分布の進化

表3: 太陽系形成過程での固体天体の質量

種類	微惑星	原始惑星	固体惑星
質量 ($M_\oplus$)	$\gtrsim 10^{-12}$	~0.1-10	~0.1-10

ここで太陽系形成過程での天体の質量分布の進化について注目してみる. 上述したように固体惑星(地球型惑星, 木星型惑星のコア, 天王星型惑星)の形成過程はダストから微惑星, 原始惑星, そして惑星への固体成分の集積である. 微惑星段階以降のそれぞれの典型的な質量は表3の通りである. ここで微惑星の最小質量はダスト層の重力不安定による形成の場合の見積もりである[2]. ダストの付着合体成長による微惑星形成の場合はもっと小さな天体も微惑星とよばれることがある. また, 原始惑星の質量は寡占的成長によって孤立質量にまで成長した場合の値である[3]. 文献によって微惑星, 原始惑星の用語の使われ方はずいぶん違うので注意して欲しい.

ここで微惑星以降の惑星集積過程に注目する. 惑星集積過程では微惑星の質量分布は合体によってべき分布に緩和していくことが知られている. つまり, 微惑星の分布は

$$ndm \propto m^{-\alpha}dm \qquad (1)$$

となる. 衝突断面積において重力による引き付けが支

配的な場合は$\alpha \simeq 8/3$であることがわかっている[4].

また，この過程では集積だけなく破壊も起きる．太陽系小天体の起源のところで述べたように高速衝突の場合は集積ではなく天体の破壊になる．天体の破壊による質量分布の進化も調べられていて，これもべき分布に進化し，$\alpha \simeq 11/6$になることが知られている[5]. つまり，集積もしくは破壊途上の微惑星と原始惑星の質量分布の基本はべき分布である．よって，微惑星や原始惑星の名残である太陽系小天体の質量分布もべき分布になっていると考えられる．実際に観測によって小惑星や太陽系外縁天体の質量分布がべき分布でよく近似できることが確かめられている．

6. 準惑星の意義

ここで準惑星の定義について考えてみよう．準惑星は図1の質量について，惑星と太陽系小天体の間に入る分類である．つまり，これまで見てきた太陽系小天体の中で質量の大きなものを準惑星と分類する，ということである．

惑星と準惑星の境界は太陽系小天体のときと同じく水星質量になる。固体惑星の質量は周囲の使える固体成分を全て集めた質量と考えられるので，惑星とそれ以外では大きな質量差があるのが自然だ．実際，最小の惑星水星と最大の準惑星エリスとの質量比は約20倍もある．

では準惑星と太陽系小天体との境界はどうするのがいいだろうか．先に見たようにそもそも太陽系小天体の質量分布がべき分布だとすると，質量分布は連続的でさらに分布を分けるような非連続性はないということを意味する．よって，ある質量を決めてそれより大きい天体を準惑星と定義することは人為的であまり物理的な意味はないと考えられる．実際の質量分布を見ても準惑星と太陽系小天体の質量分布の間には惑星と準惑星の間のような間隙はない．ほんの少しの質量差で片や準惑星，片や太陽系小天体というのは混乱を招くだけではないだろうか．著者にはわざわざ準惑星を導入するより，この稿で示したように惑星と太陽系小天体にだけに分類しておくのが自然に感じられる．

7. まとめ

太陽系の天体の分類には質量，組成，軌道が使われている．惑星についてはこれらのどの指標を使っても地球型，木星型，天王星型と分類可能である．これは形成過程を反映している．太陽系小天体は，基本的に惑星形成過程の残存物でそれぞれの理由により惑星に集積されなかった微惑星もしくは原始惑星と考えられる．これらは軌道分布によって，小惑星，太陽系外縁天体，オールト雲天体と分類されている．また，形成論から見ると，これらの小天体の質量分布の基本は連続的なべき分布になっていると考えられる．このような観点から見ると，太陽系小天体の中の大きな天体をわざわざ準惑星と分類することは太陽系形成論的には特に意味のあることではないかもしれない．

謝　辞

この原稿を書く機会を与えていただいた榎森啓元氏，初稿に対して丁寧で適切な批評をいただいた田中秀和氏に感謝します．

参考文献

[1] 井田茂，小久保英一郎，1999，一億個の地球（岩波書店）
[2] Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II, 1100.
[3] Kokubo, E., Ida, S., 2000, Icarus 148, 419.
[4] Makino, J. et al., 1998, New Astronomy 7, 411.
[5] Tanaka, H. et al., 1996, Icarus 123, 450.