# 特集「太陽系天体の種別とその概念整理」 太陽系外縁天体の起源と進化

# 小林浩1

(要旨) 2006年8月にプラハで開かれた国際天文学連合において惑星定義がなされた. 冥王星は惑星ではなく, それまでやと呼ばれていたが日本でも正式に太陽系外縁天体と命名された天体群の一員となった. この分類 は太陽系外縁部の我々の理解が深まってきたことによるものと認識している.本稿では,これまでに明らか にされた太陽系外縁天体の力学的特徴とそれが示す太陽系の歴史について紹介する.

# 1. 外縁天体の力学的特徴

外縁天体の力学的特徴についてまとめる.外縁天体 は大きく分けて3つのグループに分類される(図1参照). 一つ目のグループとして共鳴天体(resonant objects) を紹介する.共鳴天体は公転周期が海王星の公転周期 と整数比になっている外縁天体である.このような天 体には天体力学において平均運動共鳴と呼ばれる一種 の共鳴現象が起こる.海王星と平均軌道共鳴の位置に あると,天体は安定にこの軌道に留まることができる. 特に数が多いのは、39.5天文単位の3:2の平均軌道共 鳴に入った共鳴天体である.この共鳴天体は,離心率 が0付近から0.3付近まで一様に分布する(グラフで縦 長に分布する).傾斜角も同様な分布である.

次のグループは、近日点距離が35天文単位よりも内 側に入る離心率が大きいグループである.これらは、 散乱天体(scattered-disk object)と呼ばれ、過去に海 王星と近接遭遇して重力散乱された天体の集まりであ る.数値シミュレーションによると10<sup>8</sup>年程度で海王 星と近接遭遇するため、海王星との近接遭遇によって 軌道は変えられており、散乱天体の軌道分布には過去 のその天体の軌道分布の情報は残っていない[1].

最後に,古典的天体(classical object)を紹介する. 軌道長半径が42天文単位から48天文単位で,近日点距 離が35天文単位より大きい(離心率が小さい)天体で ある.海王星やその他の惑星が今の軌道にあるなら ば,古典的天体は惑星によって軌道が大きく変わらな い領域にあるが,離心率や傾斜角は平均0.1程度と非

1. 北海道大学低温科学研究所

常に大きい、もともと小さい離心率や傾斜角の天体が あったとすると、惑星からの摂動や天体同士の自己重 力によってこのような大きい離心率や傾斜角を実現す ることはできない. また, このように大きい離心率や 傾斜角の天体は相対速度が大きく、衝突しても合体で きずに壊れてしまう. つまり, 現在の外縁天体は惑星 形成途中の天体の集まりではない、また、多数の微惑 星が中心星の周りを公転している時、重力相互作用に より力学的に緩和すると離心率や傾斜角の分布はレイ リー分布になる、しかし、観測されている古典的天体 の傾斜角分布は一つのピークのレイリー分布ではフィ ットできず、2つのピークによるフィットが必要であ る[2, 図2参照]. そのため古典的天体を傾斜角により2 つの種族に分類し、傾斜角が小さい(0.1ラジアン程度 まで)分布を持つ種族を「力学的に冷たい種族(cold population)」、傾斜角が大きい(0.1ラジアン以上)を 「力学的に熱い種族(hot population)」と呼んでいる. 「力学的に冷たい種族」はサイズが小さく、赤く、「力 学的に熱い種族」はサイズが大きく、赤から灰色と2 つの種族では傾斜角だけでなくサイズや色が違うこと も示唆されている[3, 4].

すでに軌道長半径が50天文単位より外側では観測可 能であるが、35天文単位よりも近日点が大きい天体は ほとんど観測されていない.なんらかの理由で50天文 単位より遠方では、天体がないことが指摘されている. 一方で、近年の観測により少数ではあるが、軌道長半 径が50天文単位よりも大きく近日点距離が35天文単位 よりも大きいセドナやエリスなどの天体も観測されて



図1: 太陽系外縁天体の軌道分布.上の2つの図中に近日点距離が30天文単位(点線)と35天文単位(破線)の軌跡を表示した.破線 よりも、離心率が大きい天体が散乱天体である.また、左の上下の図にある縦線は海王星の公転周期とその位置の天体の公 転周期が整数比になる位置を示した(線についたラベルは公転周期の比を表す).このライン付近の天体が共鳴天体である. 最後にこのラインから外れ、破線よりも離心率が小さい天体が古典的天体である.外縁天体の軌道要素は、2007年12月28日 のMPC のリスト(http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Centaurs.html とhttp://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/TNOs. html)から引用した.

いる.

最後に外縁天体の総質量は0.01-0.1地球質量程度で ある[5, 6]. この質量は,最小質量太陽系円盤モデル から予測される質量の0.1-1%程度でしかない.外縁 天体のいる40-50 天文単位の領域には,天体がそも そも小質量しか存在しなかったのだろうか,もしくは, 最初は10地球質量程度あったが大減少が起こったのだ ろうか.

### 2. 外縁天体が示す太陽系の歴史

#### 2.1 共鳴天体が示す海王星の移動

海王星の軌道が太陽から離れていく(外側に移動す る)と天体を平均運動共鳴に捕獲する.海王星の移動 と共に共鳴位置も移動し,共鳴捕獲された天体は引き ずられて動く.このようにして動いている間に離心率 が上昇する.現在の3:2の共鳴に入っている共鳴天体 の最大離心率は0.3程度である.過去に23天文単位に いた海王星に共鳴捕獲された天体が,現在の位置ま で引きずられて来ると,離心率は0.3程度になる[7,図3 参照].そのため,海王星は少なくとも20天文単位程 度から現在の位置の30天文単位まで移動したのだろう.

海王星の軌道周期と天体の軌道周期の整数比の差が 1や2の場合は(たとえば、3:2 や5:3),共鳴捕獲の 確率が高く、多くの天体が共鳴捕獲されている.軌道 周期の整数比の差が3以上の高次の平均運動共鳴にも 数は少ないが捕獲された天体が確認されている.この ような高次の共鳴に捕獲するには、捕獲される前の天 体の離心率は0.1程度以上でないと共鳴捕獲されない [8].このことは現在の古典的天体の離心率と同程度の 大きさの離心率を海王星の移動前から古典的天体が持



図2: 黄道面付近(0.1ラジアン以内)で見つかった古典的天体の軌道傾斜角(*i*)の分布. 傾斜角が大きい天体は発見の可能性が小さいのでsin*i*をかけて補正している. 0.05ラジアン程度でピークを持つが傾斜角が大きい天体も有意に存在する.



図3: 海王星が23天文単位から30天文単位まで10<sup>7</sup>年程度の時間をかけて移動した時の小天体の軌道分布.黒丸は小天体を表し、白丸は海王星を表す.縦線は海王星との平均軌道共鳴の位置を示す(ラベルは軌道周期の比).軌道共鳴に天体が捕獲されているのがわかる.また,離心率が小さいものから大きいものまでまんべんなく分布している.初期の天体の軌道は,離心率0.05,傾斜角0.05ラジアン,軌道長半径30-50 天文単位としてシミュレーションを行なった.

っていたことを示唆している.

#### 2.2 古典的天体の起源

古典的天体の大きい離心率や傾斜角を説明するモデ ルは、いくつか提唱されている。例えば、海王星の周 りに仮想的に存在した原始惑星が海王星に散乱されて 系外に飛ばされる過程で、古典的天体と近接遭遇し離 心率や傾斜角を上昇させるモデルが提唱されている [9]. また他には、原始惑星系円盤の散逸に伴い永年共 鳴により離心率や傾斜角が変動する位置が移動し、そ の位置が古典的天体の領域を通過するとき古典的天体 の離心率や傾斜角が上昇するモデルも提唱されている [10]. これらのモデルでも、大きい離心率や傾斜角は 説明できるが傾斜角の分布が説明できない.また、残 った古典的天体の総質量も大きすぎる.以下では、他 のモデルを詳しく紹介する.

#### 2.2.1 外惑星の移動

外惑星(木星,土星,天王星,海王星)が形成された 後,海王星より外側にはまだ微惑星が残っているだろ う.この微惑星を介在して,それぞれの惑星が重力的 相互作用することにより,木星は内側に移動し,土星, 天王星,海王星は外側に移動する.この海王星の外側 への移動により共鳴天体は現在のような軌道分布を持 つようになるが,海王星移動は古典的天体にも影響を 与える.

海王星移動により、外縁天体領域に微惑星が2つの 方法で輸送される、海王星による共鳴捕獲により古典 的天体の領域まで引きずられて、そこで共鳴から解放 された天体は古典的天体の軌道になる. このように輸 送された天体は軌道傾斜角が小さく、「力学的に冷た い種族」になる[11]. また、海王星との近接散乱を経 験した天体でも、海王星の移動の間に古典的天体のよ うな軌道になることができる. このような天体は傾斜 角が大きく、「力学的に熱い種族」となる[12]、この2 つの方法での輸送確率は非常に小さいため、輸送され る天体の総量は現在の少ない外縁天体の総量と同程度 である。一方、もともと外縁天体の位置である40-50 天文単位にいた天体は海王星移動の影響をほとんど受 けない、そのため、もともと外縁天体領域にあった天 体の総質量は減少しない.また.外縁天体領域に微惑 星円盤が残っていると、海王星の移動は止まらず動き

続けてしまう[13]. 何らかの効果でもともと40-50天 文単位にあった天体が減らされたのだろう.

#### 2.2.2 恒星遭遇

恒星は集団で生まれる.このような生まれたばかり の星の半数以上が原始惑星系円盤を伴っており,原始 惑星系円盤の中で惑星系は形成する.初期に密集して いた恒星はお互いの重力によって相互作用を繰り返し, 弾き出され,現在の太陽のような近隣に恒星がいない 星になる.もし我々の太陽が生まれた当時,比較的濃 い星生成領域に生まれていたとしたら,その集団から 抜け出す時には,100天文単位程度まで接近する他の 恒星の近接遭遇を受けただろう[14,15].

若い太陽系が他の恒星と近接遭遇すると、太陽の周 りを公転する天体は恒星の強い重力の影響を受ける。 太陽の近くを公転している天体は、太陽の強い重力に 守られているため、遭遇した恒星の影響は弱い.しか し、太陽から離れた外側の領域では、遭遇した恒星の 影響を強く受ける. 遭遇恒星の最接近距離の1/3より も太陽に近い場所を公転している天体の軌道はほとん ど乱されない[14, 図4参照]. このような天体は恒星が 通過した影響をほとんど受けずに微惑星の衝突・合体 により、微惑星から惑星へと成長していくだろう、一方、 それよりも遠くを公転している天体は、遠くなるに従 い急激に軌道の乱れが大きくなる(軌道離心率や傾斜 角が大きくなる). 恒星遭遇により軌道を乱された天 体は、外縁天体と同じ程度まで離心率や傾斜角が大き くなる. そのため、これらの天体の衝突の速度は非常 に大きく、その後は合体成長して惑星へと成長するこ とはできない. 若い太陽系から100天文単位程度の距 離を他の恒星が通過したとすると、太陽からに30天文 単位よりも近い場所で惑星が形成され、恒星から離れ た場所では惑星になれない天体群の帯状領域ができる. これは、現在の太陽系に非常に似た状態である[14].

詳しく恒星遭遇後の天体の軌道分布と古典天体の力 学的特徴を比べてみる.恒星遭遇の影響により,40-50天文単位程度の軌道長半径を持つ天体の離心率は非 常に大きくなる(図4参照).このような離心率が大き い天体は近日点が小さい(35天文単位以内)ので,ガス 抵抗によって中心星に向かって落下したり,海王星に 跳ね飛ばされて取り除かれる.その結果,少数の古典 的天体のように小さな離心率で近日点距離が大きい



図4: 100天文単位を恒星が通過した後の天体の軌道分布.初期に円軌道だったが、25天文単位より外側では離心率が非常に大きくなっている.一方、25 天文単位よりも内側では離心率は小さいままである.破線は、近日点距離が35 天文単位の軌跡を示す.また、40-50 天文単位の領域にある離心率の大きい天体はガス抵抗によって内側に落下したり、海王星に散乱されて取り除かれる.その結果、40-50 天文単位には古典的天体のような軌道を持つ少数の天体だけが残る.

(35天文単位以上)天体だけが生き残り,恒星遭遇の 前に外縁領域にいた天体の1割以下しか残らない[15]. 恒星遭遇の後に残る古典的天体は,「力学的に熱い種 族」のような大きい軌道傾斜角を持つ.傾斜角が小さ い「力学的に冷たい種族」は海王星が内側から移動し てくる時に輸送されたのだろう.この場合,「力学的 に熱い種族」と「力学的に冷たい種族」は別の場所で 作られたことになる.違う場所で作られたために色や サイズが異なる天体の種族が生まれたのかも知れない [15].

#### 2.3 なにがおこったのか?

外縁天体の軌道分布が教えてくれた太陽系の起源の 一番大きなことは、海王星の外側移動だろう.この移 動に伴って共鳴天体は平均運動共鳴に捕獲されたのだ ろう.

この海王星の移動の前の外縁天体はどのような軌道 分布や総質量になっていたのだろうか. 高次の平均運 動共鳴にも天体は捕獲されていることから,海王星の 移動前に現在の離心率程度の古典的天体が存在してい たのだろう[8]. また,海王星は離心率や傾斜角が小さ い微惑星円盤の中では、円盤が続く限り移動し続ける. 海王星が現在の位置で止まっていると言うことは、外 縁天体領域の微惑星は大きい離心率や傾斜角を持って いて、総質量もそれほど大きくなかったことを示唆す る.そして、海王星の移動は、現在の外縁天体の場所 では影響は小さいため、外縁天体の総質量を減らすこ とはできない.このような考察から、海王星が移動す る前に外縁天体が恒星遭遇による影響を受けている可 能性は高いだろう.

その後,海王星と周りの微惑星との相互作用により 移動する。海王星の周りの微惑星円盤の質量が大きい ほど海王星の移動速度は速くなる。海王星の移動に必 要な微惑星円盤の質量はシミュレーションと理論計算 から数10地球質量程度と見積もられている。この微惑 星円盤は現在は残っていないため、惑星に跳ね飛ばさ れてオールト雲を形成する天体になったのだろう。ま た、微惑星円盤のサイズ分布も移動に影響を及ぼす。 微惑星のサイズが小さく、数が多い場合は滑らかな移 動をするが、サイズが大きい微惑星が交じっている場 合には海王星は移動中に加速や減速をする。海王星が 移動する時、滑らかな移動中に加速したり、減速した りしたほうが、共鳴捕獲しすぎないため、現在の共鳴 天体や古典的天体の分布に近い分布になる.このこと は、海王星が移動する前に比較的大きい天体が形成さ れていたことを意味する.

このような大きなサイズの微惑星がどのような運命 をたどったのかは非常に興味深い.太陽系の外縁で見 つかっている比較的大きな天体(エリスやセドナ)は このような天体だったのだろうか.ただ,エリスやセ ドナは,大きな軌道長半径を持つにも関わらずに近日 点距離が大きく海王星と軌道交差しないので,海王星 によるものではなく初期の恒星遭遇の時に外縁に持っ て行かれた可能性も高い.

## 3. 太陽系外縁天体とデブリ円盤

系外惑星系においてデブリの円盤は、星のスペクト ル(SED)の赤外線超過から示唆されている。また、そ の一部は電波から可視まで様々な波長で直接の高い分 解能の観測によって確認されている.デブリ円盤の中 心星の年齢は10<sup>7</sup>-10<sup>9</sup>年程度であり、円盤内のガス成分 はすでにほとんどない.このようにガスがない円盤で は、中心星ができた時に円盤になったダストは衝突に よる破壊に伴う輻射圧やPoynting-Robertson効果によ り中心星の年齢よりもずっと短い時間で取り除かれる. そのため、もともとあったダストではなく、一度大き な天体になり、それが壊れてできたデブリだろう.

太陽系外縁天体は軌道離心率や傾斜角が非常に大き く,相対速度が大きい.そのため,衝突により外縁天 体は合体せずに壊れてデブリを生成する.このように 生成されたデブリは観測されるようなデブリ円盤を形 成している可能性が高い.

太陽系外縁天体では100km程度の天体が観測されて いる.一方,デブリ円盤ではミクロンサイズのデブリ が主に観測されている.そのため,単純に両者を比較 することはできないが,できる限りの比較を試みる.

一部のデブリ円盤は高い分解能の観測により円盤の 形状が観測されている.このようなデブリ円盤は帯状 (リング状)の領域で観測されており、太陽系外縁天体 の帯状分布とよく似ている.両者の分布形状が似てい ることから、デブリ円盤の存在する帯状領域には外縁 天体のような大きさの微惑星が存在し、これらの衝突・ 破壊によりデブリを生成していることが推測される. しかし, 観測されているデブリ円盤がこのメカニズム により作られたとして微惑星帯の総質量を見積もると 外縁天体の総質量に比べてずっと大きい. これらのデ ブリ円盤は, 我々の太陽系の外縁天体の衝突・破壊と は根本的に異なる別のメカニズムによって作られたも のだろうか. それとも, 例えば, これらの星が生まれ た星生成領域の数密度が小さかったため恒星の近接遭 遇を受けなかったなどの外的要因によってこのような 大きな総質量の微惑星帯が存在しているのだろうか.

デブリ円盤は外側に数100天文単位まで広く分布し ているが、太陽系外縁天体は50天文単位程度で切れて いるようである. 微惑星帯の分布は外縁天体のように 4050天文単位程度に分布していても、サイズが小さい デブリは輻射圧を強く受けるため軌道が楕円化する. この輻射圧の効果で、50天文単位に微惑星帯があった としても100天文単位程度の大きさのデブリ円盤はで きるだろう. しかし、がか座の $\beta$ 星の持つ円盤のよう に700天文単位程度まで広がる円盤は50天文単位で切 れた円盤からでは説明できないだろう. がか座の $\beta$ 星 の周りに太陽系のような外縁天体領域があるならば、 50天文単位より大きいと推測される. もしかすると太 陽系の外縁天体領域もデブリ円盤の様に50天文単位で 切れておらず外側に広がっているのかも知れない.

### 4. 今後の展望

太陽系外縁天体は太陽系の歴史を残している.現在 までの研究から,かなり確実に海王星は外側に移動し たことは示されている.しかし,その他のことはまだ まだ研究途中と言わねばならない.さらに多くの外縁 天体がこれから見つかり,理論的な研究と詳細な比較 をすることで太陽系外部の惑星形成の歴史が明かにな っていくだろう.

そして,将来的に太陽系の様に暗いデブリ円盤の観 測も可能になれば,太陽系に似た外縁天体領域を持つ デブリ円盤と太陽系外縁天体が比較できるようになる. その結果,太陽系における木星以遠の惑星形系成過程 のシナリオは一般的な惑星系での外惑星形成シナリオ に拡張されていくだろう.

# 謝 辞

このような執筆の機会を与えていただき榎森啓元さんに感謝の意を表したい.また、本稿をわかりやすく 改訂していただいた査読者の布施哲治さんにも併せて 感謝したい.

# 参考文献

- M. J. Duncan, H. F. Levison, & S. M. Budd, 1995. Astrophysical Journal, 110, 3073.
- [2] M.E. Brown, 2001. Astronomical Journal 121, 2804.
- [3] H.F. Levison and A. Stern, 2001. Astronomical Journal 121, 1730.
- [4] C.A. Trujillo and M.E. Brown, 2002. Astrophysical Journal 566, L125.
- [5] Bernstein, G. M., Trilling, D. E., Allen, R. L., Brown, M. E., Holman, M., & Malhotra, R. 2004, Astronomical Journal, 128, 1364.
- [6] Gladman, B., Kavelaars, J. J., Petit, J.-M., Morbidelli, A., Holman, M. J., & Loredo, T. 2001, Astronomical Journal, 122, 1051.
- [7] Malhotra, S. 1995. Astrophysical Journal, 448, 138.
- [8] Lykawka, P. S., & Mukai, T. 2007, Icarus, 186, 331.
- [9] Petit, J.-M., Morbidelli, A., & Valsecchi, G. B. 1999. Icarus, 141, 367.
- [10] Nagasawa, M., Ida, S. 2000. Astronomical Journal 120, 3311.
- [11] H.F. Levison and A. Morbidelli, 2003. Nature 426, 419.
- [12] R.S. Gomes, 2003. Icarus 161, 404.
- [13] R.S. Gomes, A. Morbidelli and H.F. Levison, 2004. Icarus 170, 492.
- [14] H. Kobayashi and S. Ida, 2001. Icarus 153, 416.
- [15] Kobayashi, H., Ida, S., & Tanaka, H. 2005, Icarus, 177, 246.