

太陽系の外縁部での出来事

小林 浩¹

これまで惑星系形成の過程において他の恒星の摂動が考慮されることは少なかったが、恒星の誕生と惑星系の形成を一連の流れとして考えれば、惑星系形成中に他の恒星と遭遇する可能性は高い。この恒星遭遇が我々の太陽系にどのような影響を与えただろうか。また、その影響は現在の太陽系にどのように残っているのだろうか。

1 惑星系形成と恒星摂動

惑星系は、大雑把に以下の3つのステップで形成されたと考えられている。

- 原始惑星系円盤の中で固体成分が集まり、微惑星形成
- 微惑星が集積し原始惑星の形成
- 一部の原始惑星が地球型惑星になり、大きい原始惑星がガスを集積し巨大ガス惑星になる

この過程の中では、他の恒星の摂動が惑星系にもたらす効果は考えられていない。恒星は集団で生まれ、この集団は恒星同士が重力的な相互作用により拡散し、解体する。また、このような生まれたばかりの若い恒星の半分以上が原始惑星系円盤を持っていることも観測的に確認されている。現在の太陽系は他の恒星との距離は遠く恒星との近接遭遇は起こらないが、若い惑星系は星団の解体の過程の中で多かれ少なかれ他の恒星の摂動を受ける。

恒星が数密度 n の星団で生まれたとき、 q_* の最接近

を受ける確率 P は、

$$P \sim 0.5 \left(\frac{q_*}{100\text{AU}} \right)^2 \left(\frac{n}{10^4\text{pc}^{-3}} \right) \left(\frac{t}{3 \times 10^8\text{年}} \right)$$

である。ここで t は星団の蒸発時間(解体時間)である。密度の濃い星生成領域であるオリオン座の星生成領域では $n \sim 10^4\text{pc}^{-3}$ であるため、比較的濃い星団で恒星が生まれたならば、100AU程度の近接遭遇を経験している可能性は高い。

2 カイパーベルトの分類

近年、多数の小天体が太陽から40-50AU離れた位置に観測されている。この小天体の帯はカイパーベルトと呼ばれている。カイパーベルト天体は太陽系の外側の惑星の進化の記録を残している天体として注目されている。今回は、カイパーベルト天体の軌道分布から太陽系の外縁部で起こったであろうイベントを探り出す。

図1に、カイパーベルト天体で軌道が確定している

1. ここで簡単に軌道について説明を加える。カイパーベルト天体はケプラーの法則に従い太陽の周りを楕円軌道で公転する。厳密には惑星摂動などにより同じ楕円を描く訳ではない。そのため、ある瞬間の位置と速度と接触する軌道で天体の軌道を表す。天体の軌道は6個の軌道要素により決まる。その中で、本論文では軌道長半径、軌道離心率、軌道傾斜角の3つが重要である。軌道長半径は楕円の長軸半径であり、楕円軌道の最接近距離(近日点距離)と最離距離(遠日点距離)の平均距離である。また、離心率は0のときは円軌道(楕円の長軸と短軸が等しい)で大きくなると楕円の短軸と長軸の差が大きい楕円になる。離心率が1になると放物線軌道になる。軌道傾斜角は、天体の軌道面と基準面のなす角度である。太陽系では基準面は地球の軌道面や不変面(太陽系の全角運動量ベクトルと垂直な面)を用いる。

1. 名古屋大学大学院環境学研究所

天体の軌道分布を軌道長半径と軌道離心率の平面と軌道長半径と軌道傾斜角の平面で示す¹。カイパーベルト天体は軌道分布から力学的に3つのグループに分けられる。それぞれのグループは天体の軌道要素により以下のように分類される。

- 古典的カイパーベルト
($42\text{AU} < a < 48\text{AU}$, $q > 35\text{AU}$)
- 共鳴カイパーベルト ($a \simeq a_{3:2} \simeq 39.2\text{AU}$)
- 散乱カイパーベルト ($q < 35\text{AU}$)

ここで、 a は軌道長半径、 q は近日点距離を表す。また、 $a_{3:2}$ は、海王星と3:2の平均軌道共鳴（海王星が3回公転する間にちょうど2回公転する天体）にある天体の軌道長半径を示している。図1では、白丸印と黒丸印が古典的カイパーベルト、十字印が共鳴カイパーベルト、白三角印が散乱カイパーベルトを表している。

古典的カイパーベルトは、力学的に安定で 10^9 年以上の時間で海王星と近接遭遇し軌道が大きく変化することがない天体である。共鳴カイパーベルトは、主に海王星と平均軌道共鳴にある天体であり、主に海王星の軌道と3:2の共鳴にある。この3:2の共鳴には、冥王星も含まれており冥王星族（Plutinos）とも呼ばれる。散乱カイパーベルトは近日点距離が35AU以下と海王星に近く、海王星と近接遭遇して跳ね飛ばされた天体だと考えられている。

古典的カイパーベルトは、この3つのグループの中で一番最初に発見されたカイパーベルトで、最も多く発見されている。軌道長半径 a と近日点距離 q と軌道離心率 e の間には $q = a(1 - e)$ という関係がある。古典的カイパーベルトは $q > 35\text{AU}$ かつ $42\text{AU} < a < 48\text{AU}$ という条件から、古典的カイパーベルト天体は離心率は0.3以下である。一方、古典的カイパーベルトの軌道傾斜角は制限はなく、0.6ラジアン程度の古典的カイパーベルトも発見されている。軌道傾斜角の分布は2つのピークを持ち、0.1ラジアン程度の力学的に“冷

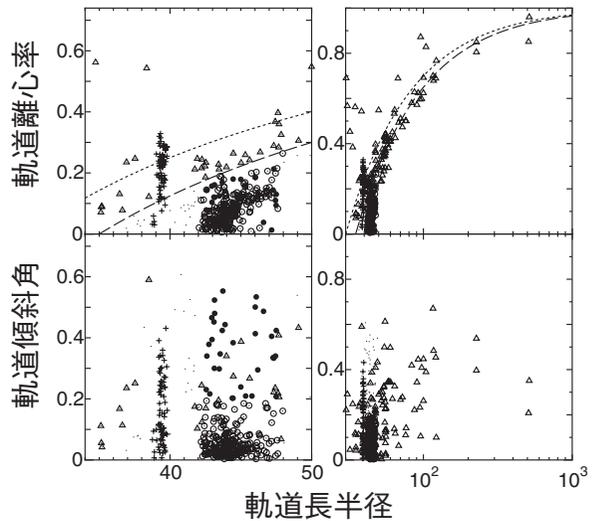


図1：カイパーベルト天体の軌道分布。十字印は共鳴カイパーベルト、白三角印は散乱カイパーベルト、白丸印と黒丸印は古典的カイパーベルトを表す。古典的カイパーベルトはさらに分類され、黒丸印は“熱い種族”を白丸印は“冷たい種族”を表す。点は、これらのグループへの判別が難しい天体である。軌道離心率のグラフには近日点距離が30AU（点線）と35AU（破線）の軌跡も示した。また、軌道傾斜角はラジアン単位を用いた。

たい種族”と傾斜角が0.2-0.6ラジアン程の力学的に“熱い種族”の2つの種族にさらに分類されている[1]。図1では、白丸印が“冷たい種族”，黒丸印が“熱い種族”を表している。この2つの種族はサイズや色の違いも観測から示唆されており、起源が違う可能性がある。

3 カイパーベルトが教えてくれること

カイパーベルト天体は成長途中の微惑星だろうか？ 時間が経てば惑星へと成長していくだろうか？ その問いへの答は否である。なぜならばカイパーベルト天体は軌道離心率や軌道傾斜角が大きい。このような乱れた軌道を持つ天体はランダム速度が大きいいため天体同士の衝突は非常に激しい。そのためカイパーベルト天体同士の衝突により合体・成長できない。つまり、カイパーベルト天体は成長途中の微惑星ではなく成長できない状態にさせられた、微惑星の集団と考えられる。

カイパーベルト天体として100-1000km程度のサイズの天体が観測されている。このような100km以上の天体はカイパーベルトに 4×10^4 個程度あると観測から見積もられている（実際に発見されているのは1000個以下）[2]。さらに天体のサイズ分布も考慮してカイパーベルト天体の総質量を見積ると0.1地球質量程度と予測される。最小質量円盤モデルと言う現在の太陽系の惑星をつくるために最低限必要な材料物質を原始太陽系星雲が持っていたとする円盤モデルでは、カイパーベルト領域40-50AUで地球質量の10倍程度の質量の材料物質が存在したことが予測されている。もし太陽系が最小質量円盤モデルの円盤から形成されたとすると、カイパーベルトは元の1%程度まで大減少したことになる。そして、軌道長半径が50AUより大きい古典的カイパーベルト天体は、観測能力的には可能だが、発見されていない。つまり、太陽系は外に向かうにつれて急激に物質が激減させられているようである。

共鳴カイパーベルトの変わった軌道分布は海王星が外側に移動したことにより形成されたと考えられている[3]。海王星が外側に移動すると共鳴の位置に天体を“捕獲”する。捕獲された天体は引きずられながら

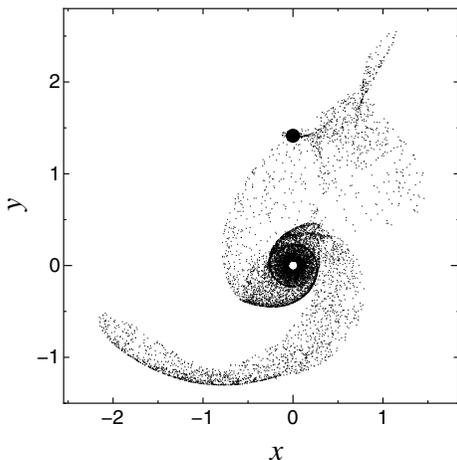


図2：恒星遭遇を受けた微惑星円盤。点は微惑星を表し、黒丸は遭遇した恒星を表す。恒星は近日点を通過し太陽に対して 90° 回転した場所にいる。長さの単位は恒星の最接近距離 q_s で規格化されている。

離心率も上げられる。そのため捕獲されてから移動した距離が長いほど離心率は大きくなる。観測されている共鳴カイパーベルトの0.3ほどの離心率を説明するためには、海王星は10AU程度外側への移動することが必要になる。つまり、共鳴カイパーベルトの軌道分布は現在の海王星は太陽からの距離が20AUの位置から現在の位置である30AUまで移動したことを示唆している。

このように海王星が移動すると共鳴カイパーベルトだけでなく古典的カイパーベルトにも影響をもたらす。海王星は周りの微惑星と近接遭遇し跳ね飛ばすことで角運動量をもらい、外側に移動すると考えられている。このメカニズムで移動するとき、微惑星との近接遭遇は連続的に起こらないので海王星はスムーズに動かず、ふらふらと外側に行く。このふらつきにより一度、共鳴に捕獲した天体を共鳴から逃がしてしまうことがある。このように天体が共鳴から逃れることで、カイパーベルト天体と同程度の質量の天体をカイパーベルト領域に輸送できる[4]。これらの輸送された天体の軌道傾斜角は小さく、このメカニズムで力学的に“冷たい種族”が形成される。

カイパーベルト天体の観測により我々は太陽系外縁部（カイパーベルトや海王星）の形成の歴史解明へのヒントをもらった。その一方で謎も深まった。カイパーベルトの大減少はどのようにして起こったのか？力学的に“熱い種族”はどのようにして生まれたのか？この2つの謎を解明するためにはこれまで考えられてこなかった新しい効果を考えることが必要となる。

4 数値シミュレーション

恒星が若い太陽系にもたらした影響を調べるため、面数密度 $n_s \propto r^{-1.5}$ である10,000体の微惑星円盤を持つ星と他の恒星が遭遇する場合の数値シミュレーションにより調べた。ここで r は太陽からの距離を表す。

恒星が接近すると、最接近の位置付近で微惑星の軌道は非常に乱される（図2参照）。中心星から遠く離

れ恒星遭遇に近い円盤の外側部分では、微惑星が遭遇恒星に連れ去られたり、系外に跳ね飛ばされたりし、微惑星円盤は剥ぎ取られる。残った微惑星も軌道が大きく乱される。一方、中心星の深いポテンシャルの中にある微惑星円盤の内側部分では、微惑星の軌道はそれほど乱されない。図3では、微惑星の恒星遭遇後の離心率と傾斜角を示している。初期の微惑星はすべて円軌道（離心率0）、同一平面上（傾斜角0）と置いている。円盤の内側 $a/q_* \lesssim 0.25$ では、離心率や傾斜角の上昇は非常に小さい。ここで、 a は微惑星の軌道長半径で、 q_* は恒星の最接近距離である。そして、円盤の外側に向かう（ a/q_* が大きくなる）につれて、離心率や傾斜角は急上昇する。また、円盤の外側では同じ軌道長半径 a でも離心率や傾斜角が広い範囲に広がっている。これは円盤の外側の微惑星は遭遇恒星が最接近している時の速度と近い速度を持っているため、非常に遭遇恒星に接近する微惑星とあまり接近しないまま遭遇恒星が去って行く場合があるためである。

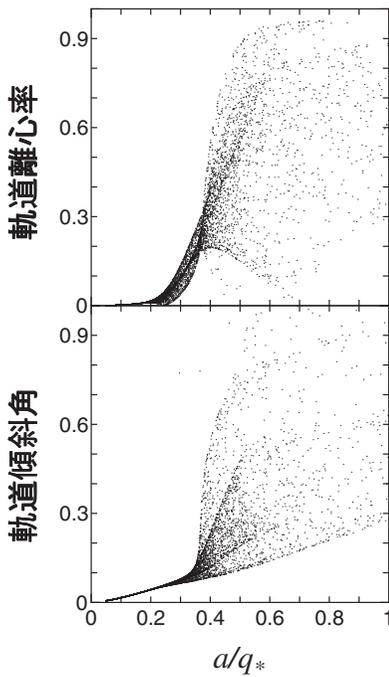


図3：恒星遭遇の後の微惑星円盤の軌道分布。横軸は恒星の最接近距離 q_* で規格化された軌道長半径。

図4では、微惑星円盤中の各軌道長半径を持つ微惑星の数を示した。恒星遭遇が起こると円盤の外側で微惑星の数が減る。また、 $a=30\text{AU}$ で微惑星の数が増えるのは元々 $a=30\text{AU}$ 付近にいた微惑星は移動せず、外側にいた微惑星が内側に移動したためである。このように微惑星の数は変化するが、肝心のカイパーベルト領域である $a=42\text{-}48\text{AU}$ ではほとんど変化しない。しかし、重要なことはカイパーベルト領域では非常に微惑星の離心率が上がっている。このことが微惑星の大減少に一役買うことになる。

海王星が移動してきたにしろ、その場で形成したにしろ、現在の位置（30AU）にある場合、 10^9 年のスケールの時間では海王星は5AU以内に近づく天体を跳ね飛ばしてしまう[5]。恒星遭遇により微惑星の離心率があげられると、多くの天体が軌道長半径は42-48AUだが近日点距離は35AU以下になり 10^9 年のタイムスケールでは海王星に跳ね飛ばされ排除される。

観測から見積もられた、カイパーベルト天体の総量は最小質量円盤モデルの1%程度のである。見積もりの不定性から考えると0.1-10%程度の量がカイパーベルトに残っていると考えられる。そのため恒星遭遇の

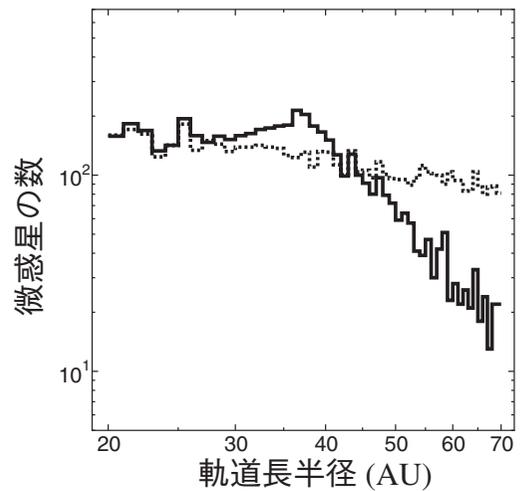


図4：最接近距離 q_* が100AUの恒星遭遇の後の軌道長半径1AU間隔にある微惑星の数（実線）と恒星遭遇の前の微惑星の数（点線）。

後に古典的カイパーベルトに0.1-10%の量の微惑星が残る恒星遭遇を探した。その結果、恒星遭遇の最近距離が $q_*=80-100\text{AU}$ 程度ならば初期の0.1-10%程度のカイパーベルトを実現できる。

また、遭遇恒星の軌道と初期の微惑星円盤の間の角度が $50-70^\circ$ ならば、古典的カイパーベルトに残る微惑星の軌道傾斜角は0.2-0.6ラジアンとなり、力学的に“熱い種族”をつくることができる(図5参照)。最近距離が80-100AUの恒星遭遇が起こるとカイパーベルトの大減少が説明でき、このような恒星遭遇のうち10%程度が力学的に“熱い種族”もつくることができる。恒星遭遇がカイパーベルト天体を激減させ、残った微惑星が力学的に“熱い種族”を形成した後に、海王星の移動による共鳴捕獲により共鳴カイパーベルトを、共鳴から逃げた天体で力学的に“冷たい種族”を形成し、現在のカイパーベルトは完成する[4,6]。

5 太陽系外縁部形成のシナリオ

私が提唱する、カイパーベルトや海王星などの太陽系外縁部の形成のシナリオをまとめる。

1 カイパーベルト形成

- 原始太陽系星雲中のチリが円盤の赤道面に集まり自己重力不安定を起こし微惑星が形成されたとすると、観測されているカイパーベルト天体と同じサイズ(直径100km)の微惑星ができる。これが現在のカイパーベルトだとすると 10^6 年程度のタイムスケールでカイパーベルトは形成される。

2 恒星遭遇

- 恒星遭遇によりカイパーベルトが乱される。恒星遭遇は、星生成領域での恒星の集団が解散するタイムスケールで起こるので、惑星系形成開始から 10^7-10^8 年程度たったとき起こるだろう。
- 力学的に“熱い種族”形成、カイパーベルトの

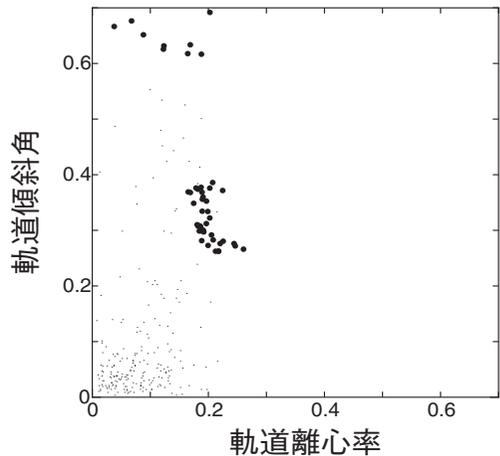


図5：最近距離 $q_*=100\text{AU}$ の恒星遭遇の後、古典的カイパーベルト($42\text{AU} < a < 48\text{AU}$, $q < 35\text{AU}$)に残る天体の軌道分布を軌道離心率と軌道傾斜角の平面で表した。軌道傾斜角はラジアンの単位を用いた。

合体・成長を阻害

3 海王星の移動

- 木星がガス捕獲し巨大質量を持ったことが引き金となり、海王星は外側に移動するだろう。木星が巨大惑星になるのは 10^7-10^8 年程度の時間がかかるだろう。
- 共鳴カイパーベルトと力学的に“冷たい種族”の形成

4 海王星の清掃

- 海王星は 10^9 年程度の時間で $q < 35\text{AU}$ の天体を跳ね飛ばす。そのとき、系外に跳ね飛ばされず残ったものが散乱カイパーベルトになる。
- カイパーベルトの大減少

このモデルで重要なことは、恒星遭遇が海王星の移動に先んじて起こる必要があることである。なぜならば海王星の移動の後に恒星遭遇が起こると共鳴カイパーベルトや力学的に“冷たい種族”が恒星摂動により壊れてしまうからである。

6 さらに恒星遭遇の効果

恒星遭遇によりカイパーベルトを激減させ、残った天体が力学的に“熱い種族”を形成する。そして、その後の海王星の移動によるカイパーベルト天体の輸送により力学的に“冷たい種族”が形成されたとすると、2つの種族は別の場所で生まれた微惑星の生き残りと言える。力学的に“熱い種族”は、恒星により傾斜角を上げられたもので、元々カイパーベルトにいた天体である。そのため、生まれた場所は40-50AU程度の場所である。しかし、力学的に“冷たい種族”はカイパーベルトの内側から輸送されてきたもので、だいたい30AU付近で生まれた天体である。このように違う場所で生まれれば、サイズや色が変わるだろう。

恒星遭遇はカイパーベルトだけでなく海王星の移動についても影響を及ぼす可能性がある。海王星は微惑星と重力的相互作用をすることにより移動する。一度、海王星が動き出すと微惑星円盤が存在し続ける限り、動き続けてしまう[7]。恒星遭遇はこの問題も解決する可能性を秘めている。微惑星円盤の外側の微惑星は近日点を内側に大きく移動し、このため海王星により微惑星は除去されることになった。海王星が移動するときほとんどの近日点距離が小さくなった微惑星は移動中の海王星に跳ね飛ばされ、海王星が現在の位置にたどり着いてから跳ね飛ばすものは少なくなる。またこのように近日点距離が内側に動いた微惑星は角運動量も小さくなり、単位質量当たりの角運動量が現在の位置での海王星よりも小さい微惑星が主となり最接近距離が $q_*=80-100\text{AU}$ の恒星遭遇を経験した微惑星円盤中では海王星は現在の位置である30AUより外側では微惑星から角運動量をもらいづらくなる。そのため海王星は現在の位置で止まる可能性がある。

さらに海王星の形成時間についての問題もある。海王星の形成時間を見積もると 10^{12} 年程となり、太陽系の年齢までに形成できない[8]。この見積もりは現在の位置で海王星を形成する場合で移動前の20AUの位

置での形成時間は0.3倍程度になるが、それでも太陽系年齢までに海王星は形成されない。海王星の移動中の微惑星集積が海王星の形成時間問題を解く鍵になると考えている。

このように恒星遭遇、カイパーベルト、海王星は密接に関わっている。これからもカイパーベルトの観測は進んで行くだろう。新しいカイパーベルトの観測からさらなるヒントを得れば、恒星遭遇の効果を検討した外縁部での惑星形成をそれぞれが調和した理論により解明することが可能になるだろう。そして、このような太陽系の外縁部での出来事は太陽系にとどまらず一般的な惑星系でも起こることだろう。これらのイベントの痕跡が系外惑星系の外縁部でも可能かどうかを検証していきたい。

謝 辞

査読者の田中秀和氏には大変有益なコメントをいただきました。本論文の改訂を助けていただいたことに感謝いたします。

参考文献

- [1] Brown, M. E., 2001, *Astron. J.* 121, 2804.
- [2] Trujillo, C. et al., 2001, *Astron. J.* 122, 457.
- [3] Malhotra, R., 1995, *Astron. J.* 110, 420.
- [4] Levison, H. and A. Morbidelli, 2003, *Nature* 426, 419.
- [5] Duncan, M. J. et al., 1995, *Astron. J.* 110, 3073.
- [6] Ida, S. et al., 2000, *Astrophys. J.* 528, 351.
- [7] Gomes, R.S. et al., 2004, *Icarus* 170, 492.
- [8] 井田茂, 渡邊誠一郎 1997, 地球惑星科学 12巻「比較惑星学」, 131.