

なぜ海王星以遠では惑星がないのか？

小林 浩¹, 井田 茂¹

1. 惑星形成領域の大きさ

我々の太陽系は9つの惑星がある。この惑星の外側にはカイパーベルトと呼ばれる小天体の集団がある。そこには半径数十Km程度の大きさ(微惑星程度の大きさ)の小天体が多数存在する。惑星の中で一番太陽から離れた位置には冥王星があるが、冥王星は惑星というよりカイパーベルト天体と考えるのが妥当である。冥王星は歴史的な背景から惑星とされているだけであるので、実質的には太陽系で一番外側に位置する惑星は海王星である。太陽系は中心星に近い内側にのみ惑星が存在し、外側に惑星はない。そして、その内側と外側の境界は海王星のある30AU(天文単位)程度である。カイパーベルト領域では微惑星が惑星になれなかったため惑星がないと考えられている。なぜカイパーベルトの小惑星達は惑星へと成長できなかったのだろうか？我々は原始太陽系が他の恒星との遭遇を考慮する事がこの問いに対する答えとなりうると考えた。原始太陽系の付近を他の恒星が通過し微惑星の軌道を乱すと、カイパーベルト天体は成長を阻害され惑星へと成長ができないからである。我々は原始惑星系の他の恒星から受ける影響について数値実験を行なった。その結果は、太陽系の惑星形成領域の大きさが説明できる事を示唆する。

これまで、海王星以遠に惑星系がない理由は太陽系の外側では惑星形成の時間がかかり過ぎるためと考えられていた。惑星形成の時間について説明するために、原始惑星系星雲から惑星系が形成される様子を簡単に説明する。原始惑星系星雲は水素やヘ

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

リウムからなるガスと固体微粒子の大きくわけて2成分から成る。この中で固体微粒子が集まり微惑星が造られる。そして、その微惑星が衝突・合体する事により成長し、地球型惑星や木星型惑星の固体核が完成する。木星型惑星の固体核は数地球質量に達するとガスを捕獲し巨大ガス惑星ができる。太陽系はこのように段階を踏んで形成されたと考えられている。海王星以遠で惑星が形成されていないのは、微惑星の合体・成長という過程において微惑星が十分大きくなるための時間が足りなかったと考えられている。つまり、カイパーベルト天体の現在の姿は惑星へと成長途中の微惑星の姿という事になる。しかし、カイパーベルト天体の軌道について奇妙な事が観測結果から確認されている。カイパーベルト天体同士の相互作用では説明できない程、その軌道は乱されている事である。このような軌道では速度分散が大きくなり微惑星は惑星へと成長できない(本文2節を参照)。つまり、時間的困難を乗り越えられたとしてもカイパーベルト天体は惑星へと成長できなかった事になる。

太陽系外縁部での微惑星の集積を困難にする要因として、我々が考えているのが「恒星遭遇」である。我々が考えている「恒星遭遇」とは他の恒星が太陽系の近傍を通過する現象である。現在の太陽系では周囲の星の数密度が小さいため他の恒星がそれほど近くを通る事はない。しかし、恒星は集団で生まれる事が知られている。牡牛座の「すばる」やオリオン座の「トラペジウム」では、多数の星が生まれている。そのように集団で生まれた星が重力的に相互作用をする事によって10⁸年以上の時間をかけて拡散していき、現

在の太陽のように孤独な単一星になると考えられている。この重力的な相互作用の過程において星同士の近接遭遇が起こる。比較的濃い「星生成領域」であるオリオン座の「トラペジウム」で、こうした星団の拡散に伴う他の恒星の最接近距離 (D) を見積ると150-200AUとなる[1]。そして、このような星生成領域にある若い星の半分以上がその星の周りに原始惑星系星雲を持っていて、その原始惑星系星雲の中で惑星系はできる。つまり、惑星の成長期に恒星の近接遭遇を経験する可能性は高い。この惑星形成時の150-200AUに及ぶ恒星遭遇が惑星形成領域の大きさにどのような影響を与えるのであろうか。

2. 微惑星集積

今回の研究では、微惑星の合体・成長の可否の条件が重要である。そのため、微惑星の集積について先に詳しく述べる。微惑星の集積過程において重要なのは微惑星の自己重力による微惑星同士の相互作用である。この微惑星の自己重力は微惑星同士を衝突させる力にもなるし、それらの軌道を乱す力にもなる。さらに合体・成長に重要になってくるのは微惑星同士が衝突した時に合体できるかどうかであるが、微惑星のように大きな天体では自己重力が固着力になる。微惑星同士の重力相互作用により微惑星の軌道がどの程度乱れるかを調べるため、先ず微惑星の重力相互作用によって微惑星同士が衝突するか軌道が乱れていくかについて議論する。これは微惑星の衝突断面積 (A) と 90° 散乱の断面積 (B) を比較する事で評価する事ができる。散乱断面積が衝突断面積より大きい時 ($A < B$) は、微惑星の軌道は乱され速度分散は大きくなる。しかし、逆の場合 ($A > B$)、微惑星は軌道が乱されるよりも衝突しやすい。微惑星同士が衝突するとエネルギー散逸により速度分散は小さくなる。微惑星の衝突断面積と散乱断面積が同程度の時 ($A \sim B$)、微惑星の速度分散は微惑星の表面脱出速度程度となる。つまり、微惑星の速度分散は微惑星同士の相互作用に

よって表面脱出速度に律速される[2]。

次に、微惑星同士が衝突した際の微惑星の合体の可否の条件について考えよう。すべての衝突した微惑星同士が合体できるわけではない。合体を助ける「のり」の役割をするのが微惑星の自己重力である。微惑星の自己重力の「のり」の効果よりそれを振り切って離れようとする効果の方が強ければ微惑星は合体できない。微惑星同士の衝突後の跳ね返りの速度、壊れて飛び散る速度が大きければ大きい程、微惑星の自己重力を振り切って脱出してしまう。微惑星が合体可能な条件を微惑星の軌道の乱れを表す速度分散を使い見積もってみる。図1aのように2つの微惑星を考えて微惑星間での無限遠での相対速度を $v_{\text{相対}}$ とすると、エネルギー保存則から微惑星の衝突速度は $v_{\text{衝突}} = \sqrt{v_{\text{相対}}^2 + v_{\text{脱出}}^2}$ となる。 $v_{\text{脱出}}$ は微惑星の表面での脱出速度 (重力を振り切って逃げ出すのに必要な速度) である。衝突直後の微惑星の相対速度 (反発速度) はエネルギー散逸によって $\epsilon v_{\text{衝突}}$ ($\epsilon < 1$; 反発係数) となる (図1b参照)。反発速度が脱出速度より小さければ ($\epsilon v_{\text{衝突}} < v_{\text{脱出}}$)、跳ね返った微惑星は重力によって捕獲され合体する。 $0 < \epsilon < 1$ であれば、微惑星の合体の条件はおおむね $v_{\text{相対}} < v_{\text{脱出}}$ となる。今まで微惑星が跳ね返ったとして考えてきたが、衝突により微惑星が破壊された時にもこれと同じように考える事ができる。微惑星が衝突により破壊されると破壊によるエネルギー散逸のため微惑星の破片の反発速度の平均値が $\epsilon' v_{\text{衝突}}$ となるだろう。先ほどと同様に、これが脱出速度よりも小さければ破片はまた合体する。この条件にあっても (特に小さい) 破片の

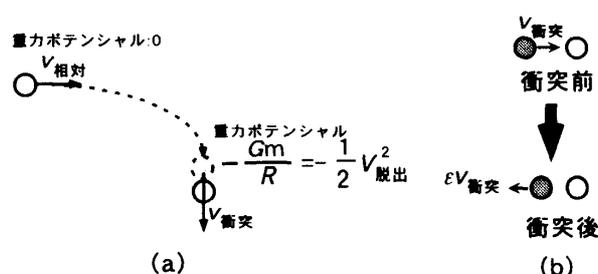


図1: (a) 半径 R , 質量 m の2体の微惑星が無遠慮から近付いて衝突するのを表した図。
 (b) 衝突直前と衝突直後を表した図

なかには合体せずに飛び去ってしまうものもあるだろう。しかし、微惑星の成長を考える上でそのような破片は重要ではないので(ほとんどの質量は合体するため)、この場合も $0 < \epsilon' < 1$ であれば、破壊を考えても微惑星合体の条件は $v_{\text{相対}} < v_{\text{脱出}}$ となる。

微惑星は中心星の周りを公転しているので無限遠での相対速度を決める事はできない。このような場合、無限遠での相対速度の代わりに微惑星の速度分散($v_{\text{分散}}$:円軌道での速度からのズレの速度)を使えば良い[2]。ケプラー速度(v_{kep} :微惑星が円軌道で公転している時の速度)で規格化して考えると、質量 m 、密度 ρ の微惑星が合体できない条件は

$$\frac{v_{\text{分散}}}{v_{\text{kep}}} > \frac{v_{\text{脱出}}}{v_{\text{kep}}} \sim 0.02 \left(\frac{m}{10^{22}\text{g}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho}{1\text{g/cm}^3} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{a}{40\text{AU}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで a は微惑星の太陽からの距離を表している。この式からわかるように円軌道の速度より2%程度以上の速度のズレが衝突による微惑星の合体成長をさまたげる。先に述べたように微惑星同士の相互作用によって速度分散が微惑星の表面脱出速度を超える事はない。つまり、微惑星だけの系で微惑星の成長を考える時、この条件を満たす事はない。しかし、恒星遭遇を考慮すると微惑星の軌道は大きく乱され、微惑星の速度分散は大きな値をとるだろう。その効果を示すため、我々は数値実験を行ない恒星遭遇による微惑星の速度分散の変化を調べた。

3. 恒星遭遇をうけた微惑星円盤

他の恒星と惑星系の遭遇についての研究は、古くからよく研究されてきた。例えば、オールト雲起源の彗星についての研究が有名である。太陽から数万AU以遠にはオールト雲と呼ばれる彗星の巣があると考えられている。ここから彗星のものを太陽にむけて落としているのは他の恒星が近くを通過した際の摂動だと言われている[4]。他にも恒星遭遇により様々な観測事実が説明されている。しかし、我々の研究は今まで行

なわれてきた研究とは着目点が異なる。恒星遭遇の際に他の恒星に近い太陽系の外縁部ほど大きな摂動を受ける。そのため過去の研究では惑星系外縁部に着目していた。我々は微惑星から惑星への成長を妨げる程度の摂動を受ける部分に注目している。式(1)の条件は通過する恒星から離れている原始太陽系はかなり内側でも満たされている。惑星の成長は惑星系の内側で効果的に起こるため、内側における恒星遭遇の影響について詳しく調べる事が重要である。そのため、我々は、この重要な惑星系の内側領域において、数値実験を行なうだけでなく、天体力学的手法を用いた速度分散の上昇の解析的な解をも導出した。

原始惑星系星雲を持つ若い星の近傍を他の星が通過した時、微惑星が惑星へと成長する過程にどのような影響があるかを最初に数値実験によって調べた。中心星の周りに微惑星を円盤状に配置し、その近傍を他の恒星が通過する。微惑星は自己重力を持たないテスト粒子とし、恒星と遭遇する前は速度分散がゼロであるとした。通過する恒星は中心星程度の質量を持ち、星生成領域である散開星団中での恒星の運動が放物線軌道に近い軌道で通過する事を仮定した。恒星が入射してくる方向については2つのパラメーターを設定した。

図2は恒星が微惑星円盤の付近を通過している時のスナップショットである。円盤の外側では微惑星の軌道は大きく乱されている。過去の研究ではこのような円盤に腕(のような形状)ができる事について注目されていた。この後、円盤の外側では系外に飛ばされる微惑星や系内に留まるが大きく軌道の乱される微惑星、そして、接近した恒星に捕獲される微惑星がある。この外側の領域での微惑星円盤の振る舞いは恒星の入射角度や速度により振る舞いが大きく変わる。しかし、内側のあまり影響が小さい円盤領域の広さ($< 50\text{AU}$)はパラメーターにほとんどよらない。

次に、他の恒星が去った後、微惑星の速度分散の変化について示す。図3は微惑星の円盤内の位置と速度分散の関係を表したグラフである。速度分散はケプ

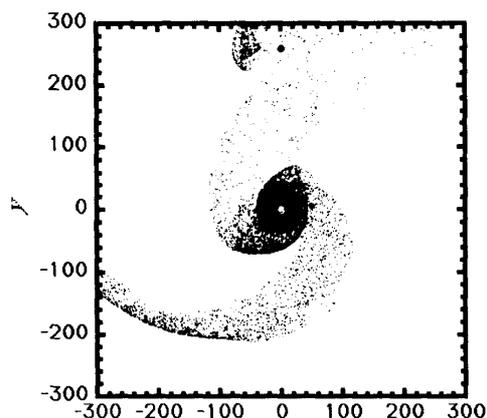


図2：恒星が近点を通った後90°進んだ時のスナップショット。円盤面に対し垂直に上から見た図。小さな点は微惑星、大きな黒丸は遭遇した恒星を表している。恒星は円盤に対して30°の傾きで入射している。

ラー速度で規格化してある。グラフは縦軸と横軸共に対数表示になっているので円盤の外側で急激に微惑星の速度分散が上昇している事がわかる。特に30-40AU以遠では内側より急勾配で速度分散が上昇している。このように急激に速度分散が上がる事は、円盤の外側に向かうと急激に惑星の合体・成長が困難になる事を示している。速度分散の変化においても外側ではパラメーター依存性は大きい。しかし、0.02以下

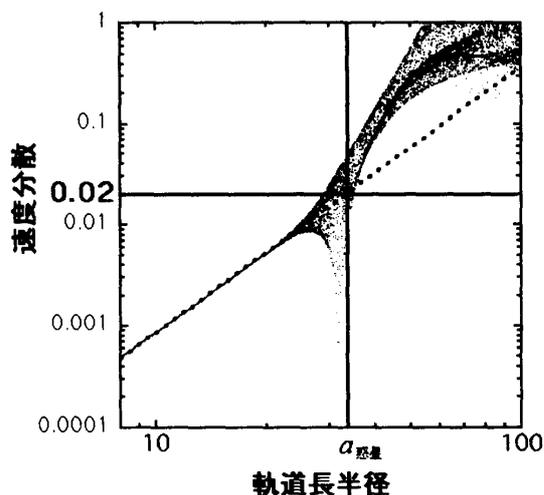


図3：点は恒星遭遇によって跳ね上げられた微惑星の速度分散。横軸は初期の軌道長半径（中心星からの距離）。恒星が円盤に対して5°の傾きで入射した時の結果。点線は解析解を表している。内側では数値実験によって求められた微惑星の速度分散の点と重なっている。解析解の速度分散が0.02となる位置が惑星形成領域境界 $a_{\text{惑星}}$ となるので、このパラメーターでは $a_{\text{惑星}} \sim 30\text{-}40\text{AU}$ となっている。

での速度分散の軌道長半径依存性は、恒星遭遇のパラメーターを変えてもほとんど変化しない（速度分散の大きさはパラメーターによって多少変わる）。重要な事は0.01を超えると急激に速度分散が上昇しているので、惑星形成できうる領域とできない領域の間に明確な境界線がひけると言う事である。

円盤の内側の部分(<30-50AU)では水平方向も垂直方向も速度分散が中心星からの距離のべき乗で表されている。このべき乗則はすべてのパラメーターで成り立っている。我々はこの内側部分での速度分散を天体力学的手法を使って解析的に求めた。この解析解と解析解の導出方法は[4]を見てほしい。この解析解は恒星遭遇のパラメーターを全て含んだ式になっているので、すべての恒星遭遇での速度分散の変化（内側領域）がわかる式になっている。この解析解を入射角に対しパラメーターについて平均をとると次式を得る。

$$\frac{v_{\text{分散}}}{v_{\text{kep}}} \approx \frac{15\pi}{32\sqrt{7}} \frac{M_*}{\sqrt{M_*+1}} \left(\frac{a}{D}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (2)$$

ここで、 D は恒星の最接近距離、 M_* は遭遇する恒星と中心星の質量比である。この解析的に求められた微惑星の速度分散の式は、0.01程度まで成り立っている。速度分散が0.01をこえ0.02程度になった場合もばらつきは大きくなるが数値計算結果と十分一致しており、式(2)は微惑星の集積の可否を見積もる上で利用できる。この式が0.02程度になる中心からの距離 a が、恒星遭遇を経験した惑星系の惑星形成領域とカイパーベルト領域の境目になる。この事を次の節で議論する。

4. 恒星形成が可能な領域の大きさ

2節で微惑星から惑星へと成長するためには微惑星の速度分散が大きくなり過ぎてはいけない事を示し、その条件を見積もった。そして、3節では恒星遭遇を受けると中心星から遠くなるほど恒星遭遇の影響は強く、円盤の外側にいくにつれて急激に微惑星の速度分散が大きくなっていく事を数値実験により示した。微惑星が惑星へと成長不可能な条件(式1)と恒星遭遇後の円盤の内側での微惑星の速度分散(式2)を用い惑星が形成される領域の大きさを見積もる。すると、惑星形成可能な領域の半径($a_{\text{惑星}}$)は[4],

$$a_{\text{惑星}} \sim 40 \left(\frac{D}{150\text{AU}} \right)^{\frac{5}{4}} \text{AU}, \quad (3)$$

となる。 D は恒星の最接近距離である。最初に述べたように太陽系では海王星が30AUであるので非常によく一致している。惑星形成可能な領域の半径は他の恒星の最接近距離 D にのみ強く依存している。前に述べたようにオリオン座の「トラペジウム」のように濃い星生成領域では $D \sim 150\text{-}200\text{AU}$ と見積もられる[1]。この結果は、太陽系がオリオン座の星生成領域のような濃い星生成領域で生まれたとすると惑星形成領域の大きさは恒星遭遇により決まった可能性がある事を示唆している。恒星遭遇を経験した惑星系の惑星形成領域とその外側の領域の境界線は、このように明確な境界線をひくことができる。なぜならば、恒星遭遇により微惑星の速度分散は外側にむかうにつれ急上昇する、そのため非常に狭い領域で式(1)の条件をまたぐためである。また、このように恒星遭遇によって速度分散が上昇しても、その後、時間をかけて速度分散が小さくなれば微惑星は合体・成長可能になる。速度分散を小さくする効果としてガス抵抗が考えられるが、ガス抵抗が速度分散を落とすタイムスケールは 10^9 年となる。ガスの存在する時間は 10^7 年程度と言われているので、ガス抵抗は効かず式(3)の条件が成り立つ。

式(3)の条件を太陽系以外の惑星系にも適用してみる。太陽系以外の惑星形成領域の大きさを観測で直接調べる事はできない。そのため、太陽系外の惑星系の惑星が存在する大きさはベガ型星の観測から二次的に予想されている。ベガ型星という星を御存じだろうか、星の周りに固体微粒子の円盤が観測されているものである[5]。そのベガ型星のなかで、ドーナツ状になっており中心星に近い内側の部分に穴が開いている形状の円盤を持つ星がいくつか観測されている。その円盤の形状について様々な説があるが、穴の部分に惑星が存在し周りの固体微粒子の円盤は太陽系のカイパーベルトに相当しているという説もある。ベガ型星の円盤内側に開く穴の半径は40-60AUである。この円盤の中の穴に惑星が存在するという説が正しいとすれば、系外の惑星系の惑星形成領域の半径は40-60AUということになる。それらのベガ型星が濃い星生成領域で生まれたとして式(3)に $D \sim 150\text{-}200\text{AU}$ を代入すると $a_{\text{惑星}} \sim 40\text{-}60\text{AU}$ となる。つまり、系外惑星系の惑星形成領域の大きさも恒星遭遇によって決まっている可能性がある。

5. 恒星遭遇の証拠

このように惑星のできる大きさは太陽系や系外のベガ型星とよく一致する。「内側の領域」では微惑星から惑星へと成長し、現在の太陽系のような惑星を形成するだろう。では、「外側の領域」はどうなるのであろうか?この領域では微惑星の数が少ない(数密度が小さい)のでともとも微惑星同士の衝突が起こりにくい。運良く衝突しても、もちろん合体はできない。高速で衝突するため壊れるものが多いだろう。つまり、衝突して壊れて破片をまきちらかすものや、衝突しないでそのままの大きさで生き永らえるものが存在する事になるだろう。太陽系ならばこの領域はカイパーベルトにあたる。カイパーベルトにある小天体は地球などの内側にある惑星に比べ軌道離心率や軌道傾斜角が大きい事が観測からよく知られている。我々の恒星遭遇の数値

実験の結果では、このような外側の領域では恒星遭遇の影響を強くうけ軌道離心率と軌道傾斜角が跳ね上げられる。つまり、恒星遭遇を考慮する事でカイパーベルト天体の軌道をうまく説明できる[6]。衝突を免れた天体がこのようなカイパーベルト天体として残ったのだろう。系外のベガ型星においては、この「外側の領域」が観測されている固体微粒子からなる円盤と一致すると考えられる。この円盤で観測されている固体微粒子は初期の原始惑星系星雲に存在した固体微粒子の生き残りではなく、微惑星が一度形成され、その後その微惑星が破壊されてできた固体微粒子だと言われている[5]。つまり、一度できた微惑星が恒星遭遇によって乱されたため、衝突により破壊され固体微粒子がこの領域にばらまかれたと考えれば、観測されているベガ型星の起源と形態をうまく説明できる可能性がある。

恒星遭遇による微惑星の速度分散の変化は、地球型惑星が存在している領域では小さい。しかし、この領域では微惑星の軌道は恒星遭遇により揃えられる事が今回の数値実験でわかった。このように微惑星の軌道が揃うと速度分散が大きくても微惑星間の相対速度が小さくなる事が知られている。この結果が微惑星の集積時間や出来上がる惑星の軌道にどのような影響を与えるかを調べるため、今後は恒星遭遇をうけた後の微惑星の原始惑星系星雲内での集積についてもっと詳しく調べていくつもりである。惑星系の外縁部では恒星遭遇の証拠が現在まで残っている可能性がある。しかし、恒星遭遇を考慮してもカイパーベルト天体のすべてを説明できたわけではない。恒星遭遇の後、「内側の領域」では時間をかけて惑星を形成するように、「外側の領域」では原始惑星系円盤のガスの中で微惑星の軌道が変化していくわけである。その効果を考える事でカイパーベルト天体の説明できなかった部分を説明できる可能性がある。そのため大きく軌道が乱された微惑星のガス円盤中での軌道変化についても調べていく予定である。

参考文献

- [1] Adams F. and G. Laughlin 2001: *Icarus*, 150, 151-162
- [2] Otsuki K. et al. 1993: *Protostars & Planets III*, 1089-1107
- [3] Yabushita S. et al. 1982: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 200, 661-671
- [4] Kobayashi H. & S. Ida 2001: *Icarus* 153, 416-429
- [5] Backman D. and P. Artymowicz 2000: *Protostars & Planets IV*, 639-672
- [6] Ida S. et al. 2000: *Astrophys. J.* 528, 351-356