

「2010年度最優秀研究者賞受賞記念論文」

破壊が決める原始惑星の最終質量

小林 浩^{1,2}

2011年9月28日受領, 2011年10月12日受理.

(要旨) 太陽系の惑星, また近年多数発見されている系外惑星は, どのようにして形成されたのであろうか. これらの惑星達は, 微惑星と呼ばれる惑星のもととなる小天体が衝突・合体により原始惑星を形成し, 原始惑星同士の衝突をへて地球型惑星が形成される. 一方, 非常に大きくなった原始惑星が固体核となり膨大な量の気を集積し, 木星型惑星が完成する. 大きな原始惑星ができる過程では, 天体の衝突は合体・成長をもたらすだけでなく, 破壊もおこす. 破壊により生成される小さな破片はガス抵抗により原始惑星との相対速度が小さくなるため, 原始惑星と衝突しやすくなり, 成長を促す. その一方でガス抵抗によりこの破片は角運動量が奪われ, 中心星に落下し消失してしまう. この諸刃の剣を両方矛盾無く取り入れると, 原始惑星が成長できる大きさには上限が存在し, 衝突・破壊が原始惑星の最終質量をきめる. 太陽系のような木星や土星をつくる固体核を生成するには, 成長時間が十分短く, 壊れにくい微惑星が必要となる. 現在の太陽系の固体成分よりも10倍重い原始惑星円盤の中で比較的大きい100 km大の微惑星ならば, 木星や土星は形成可能である.

1. 木星型惑星の形成

惑星形成は大きく分けて, 微惑星形成, 原始惑星形成, ガス降着による木星型惑星形成の3つの形成過程がある. 微惑星から原始惑星の形成はガスが大部分の木星型惑星になるのか, 固体が主な地球型惑星になるのかを決める重要な過程で, 非常に良く調べられている. 本研究までに明らかになっていた描像を以下にまとめる ([1] 等も参照). 微惑星は衝突・合体を繰り返し成長する. 大きい天体の方が力学的摩擦により相対速度が下げられている, また, 重力が大きいことから, 重力による引きつけにより衝突断面積は大きくなる. その結果, 大きい天体がどんどん大きくなり (暴走成長), 円盤の各場所に1つの大きな天体 (原始惑星) ができる. その時, 原始惑星の周りにはほとんどどの大きさのまま成長しない微惑星がとりまき, これらの微惑

星の総質量の方が原始惑星の質量よりもずっと大きい. その後, 原始惑星は広い軌道間隔をとるため, お互いに衝突しなくなり, 残った微惑星と衝突しながら, 成長する. そのため, 暴走成長に比べゆっくり原始惑星は大きくなる (寡占的成長). 寡占的成長の時の原始惑星の間隔はヒル半径の10倍程度となり, 原始惑星の周りの微惑星をすべての食べ尽くしたときの質量が原始惑星がなりえる最大質量 (M_{iso}) となる. 原始惑星の質量が木星型惑星形成の臨界質量を超えると, 固体核となり膨大なガスを集積し木星型惑星を形成する. この臨界質量は10倍の地球質量程度である. 原始惑星はガス円盤の寿命 (一千万年程度) 以内にこの臨界質量に到達しなければ, 木星型惑星になれない.

2. 惑星成長にともなう微惑星の衝突・破壊

原始惑星や微惑星などの天体の衝突頻度は天体の数密度, 断面積, 相対速度の積によって与えられる. これらの天体は恒星の周りを公転しているため, 円軌道

1. フリードリヒ・シラー (イエナ) 大学天体物理研究所
2. 名古屋大学大学院理学研究科
hkobayas@nagoya-u.jp

からのズレでランダム速度が表され、その自乗和が天体間の相対速度を決める。寡占的成長時には原始惑星は大きくなっているため、原始惑星の重力散乱により微惑星のランダム速度は非常に大きくなる。原始惑星が大きくなるにつれて重力散乱が強くなり、微惑星間の相対速度は大きくなるため原始惑星が火星程度の大きさになると微惑星間の衝突により微惑星は破壊される。破片は数が多いので破片同士で衝突して、どんどん小さくなっていく。このような連鎖的な衝突・破壊により非常に小さくなった天体はガス抵抗を強く受け、中心星に落下する。そのため、原始惑星の周りの微惑星が減少して、原始惑星の成長が阻害される。通常の原始惑星系円盤において破壊がない場合の原始惑星の最終質量(M_{iso})は木星型惑星の形成の臨界質量よりも大きいため、臨界質量までの到達時間がガス散逸時間より短ければよく、形成時間だけが問題だとこれまで考えられてきた。しかし、破壊を考慮すると原始惑星の最終質量は M_{iso} に比べてずっと小さく、この場合の最終質量が臨界質量を超えられるかということも新たに問題になってくる。

3. 天体の破壊を考える上で重要なパラメータ

このように原始惑星の成長において破壊は非常に重要である。これまで多くの原始惑星の形成と成長の研究において破壊が考慮されてきた。しかし、破壊の結果は、衝突する天体の物質や構造、質量などによるため不定性が残る。また、過去の研究ではそれぞれが独自の破壊モデルを使っており、どの破壊モデルが正しい結果を導びけているのか判断が難しい[2, 3]。そのため、本研究では最初に破壊モデルにおいて最も押さえるべき破壊に関係するパラメータを明らかにする。

原始惑星形成において重要なのは1回の衝突による破壊ではなく、くりかえし起こる衝突・破壊である。このような衝突・破壊により天体は小さくなるが、これを言いかえると、天体の質量を座標とした系での質量座標の負方向への輸送問題である。大雑把に言うと、輸送の質量フラックスは1回の衝突・破壊による「質量の減少」、「破片の総質量」、そして「衝突頻度」の積によって決まる。「質量の減少」はもともとの衝突天体の質量と破壊の結果放出される破片の質量の差で決まるが、一般に1回の衝突でも多数の破片が放出され

るので質量フラックスに最も寄与する典型的な破片質量について少し考えてみる必要がある。小さい天体と低速度で衝突するような非常に弱い衝突のとき、衝突したターゲット天体の質量はほとんど変わらず、少量で小さな破片が放出される。この場合、典型的な破片のサイズは少量の破片のサイズで、元のターゲット天体よりも非常に小さい。また、強い衝突の場合は粉々になるので、破片は元の衝突した天体に比べずっと小さくなる。中間的なエネルギーの衝突でも質量フラックスを決める典型的な破片はもとの天体よりもずっと小さい。そのため、1回の衝突・破壊による「質量の減少」は衝突天体の質量で決まり、破壊の結果によらない。そして、「衝突頻度」はもちろん破壊の結果によらないので、「破片の総質量」だけが質量フラックスを決める重要な物理量となる。また、驚くべきことに1回の衝突により放出される破片のサイズ分布はほとんど影響を及ぼさない。

「破片の総質量」は衝突天体から放出した破片の総質量なので衝突が激しくバラバラになってしまうときはほとんど衝突天体の全質量、また弱い衝突で少しだけ破片が放出される場合は衝突天体の質量よりずっと小さくなる。典型的には、衝突後にできる一番大きい天体を除くすべての質量がこれに当たる。これまでの研究では衝突天体がバラバラになってしまう強い衝突に注目して、少量の破片が生成される弱い衝突は無視されたり、過小評価されることが多かった。これは「破片の総質量」がある典型的な衝突エネルギーより上ではほぼ衝突天体の全質量で与えられ、それ以下では非常に小さい値で与えられていることに当たる。しかし、実際の室内実験や衝突シミュレーションにより得られた「破片の総質量」は衝突エネルギーが減少するにつれ滑らかに減少する。そして、現実的なモデルで計算を行うと、破壊が支配的な場合の天体の質量分布が決まる。その結果、これまで無視されることが多かった「破片の総質量」が衝突天体の質量に比べずっと小さいような弱い衝突は「衝突頻度」が高いため、実は強い衝突よりも重要で、原始惑星の成長過程で微惑星の破壊が起こったときの微惑星の減少時間は弱い衝突が決めていることが分かった[4]。これらの結果をもとに、次の節以降で示す解析やシミュレーションでは、衝突を扱う実験やシミュレーション結果と整合性のとれた「破片の総質量」を与え、弱い衝突もきちんと考慮し

て行う。

4. タイムスケールを使った解析による予測

詳しい計算の前に簡単なタイムスケールの見積りから、破壊を考慮した原始惑星形成の物理的な描像を説明する。原始惑星が寡占的成長をしているとき、大雑把に原始惑星と微惑星の2種類に分類される。微惑星はほとんど初期の質量から成長していないが原始惑星の質量はどんどん大きくなる。その一方で、微惑星は数が多く系の総質量は微惑星により決まる。上述のように原始惑星が大きくなると、微惑星間の衝突が激しくなり微惑星の破壊が起こる。生成された破片はくりかえし衝突し十分小さくなるとガス抵抗により中心星に落下して消失する。そのため、原始惑星の周りの天体の消失時間は衝突・破壊により微惑星が小さくなる時間と小さい破片が中心星に落下する時間のうち長い方で決まる。

図1は、現在の太陽系を再現できる程度の質量の円盤(林モデル[5])で5.2 AU における、原始惑星の成長のタイムスケールと原始惑星の周りの天体の消失のタイムスケールを示している。100 km という大きな微惑星から原始惑星ができると考えると(図1上)、微惑星が破壊され小さくなる時間の方が小さくなった天体がガス抵抗より中心星に落下して消失時間よりも長い。そのため、原始惑星の周りの天体の消失のタイムスケールは微惑星の破壊が決める。原始惑星は周りの天体を集積し成長しているので、周りの天体が消失してしまうとそれ以上成長できなくなってしまふ。つまり、成長と消失のタイムスケールが同程度になるときに原始惑星の最終質量は決まり、原始惑星は0.03倍の地球質量程度までにしかたれないことがわかる。

微惑星がもっと小さかったとして1 km 程度の場合(図1下)は、地球質量以下のとき微惑星の破壊の時間に比べて小さい破片が落下する時間の方が長いため、原始惑星の周りの天体の消失のタイムスケールは破片の落下によって決まる。さらに、この場合、微惑星はすみやかに小さくなるので原始惑星の周りの天体は元の微惑星よりもずっと小さくなる。非常に小さい天体は強いガス抵抗によりランダム速度が下がり、衝突・破壊が起こらなくなる。破壊が止まるサイズが10 m 程度のため、その程度の大きさの天体が原始惑星の周

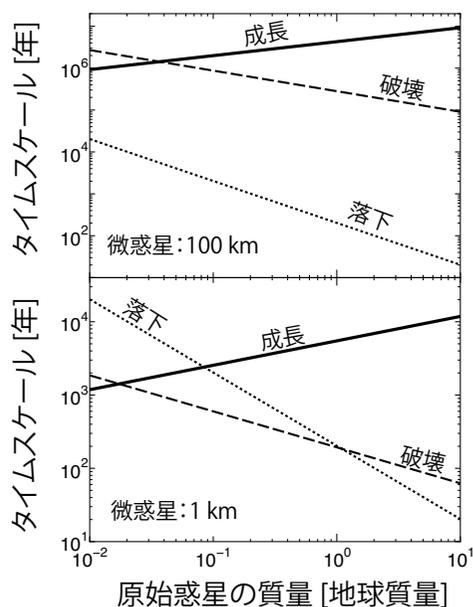


図1：原始惑星の成長のタイムスケール(実線)と原始惑星の周りの天体の消失のタイムスケール(破線：破壊による消失、点線：ガス抵抗による落下による消失)の比較。上は100 kmの微惑星、下は1 kmの微惑星でタイムスケールを見積もっている。0.01-0.1倍の地球質量程度に原始惑星が大きくなると成長時間よりも消失時間の方が短くなり、原始惑星の成長は止まってしまふ。

りに残る。このような天体は非常にランダム速度が小さいため原始惑星への衝突断面積は大きくなる。その結果、原始惑星の成長のタイムスケールは非常に短くなる。それでも、小さな天体は中心星に落下して消失する時間も短いので火星質量程度(0.1地球質量)までしか原始惑星は大きくなれないことが分かる。

このように原始惑星の最終質量は微惑星の破壊により決められ、そのため微惑星の大きさにも依存している。多くの研究者が微惑星の形成について精力的に調べているが未だ解決していない。様々な形成モデルが考えられているが、それぞれのモデルで作られる微惑星のサイズが違うため、原始惑星形成から微惑星のサイズに制約を与えることは微惑星形成を論ずる助けになるだろう。本研究では木星型惑星の固体核を作るために必要な条件として、微惑星のサイズにも制約を与えることを目指す。

5. 破壊を入れた原始惑星の成長

微惑星から原始惑星の形成と進化は、 N 体シミュレーションか統計的シミュレーションの2つの方法で主に調べられている。 N 体シミュレーションは、微惑星が衝突すると合体するという仮定のもとに、原始惑星の成長を正確に計算することができる。しかし、衝突とともに多数の破片が生成されるため、このような多数の破片を取り扱うことは現在のコンピュータでは不可能である。一方で、統計的シミュレーションでは、天体の質量分布が衝突により時間変化して行く様を計算する。そのため、破片の数が増えても取り扱うことができる。このように利点があるが、難しい面ももちろん持ち合わせている。統計的方法では微惑星の正しい衝突頻度を与えなければ原始惑星の成長を正確に解くことができないことである。しかし、統計的シミュレーションでも、微惑星のランダム速度の進化と衝突によるサイズ分布の進化を同時に解き、多くの過去の研究により正確に与えられた衝突断面積とランダム速度の変化率を用いれば、 N 体シミュレーションにより計算された微惑星の分布やランダム速度の進化を完璧

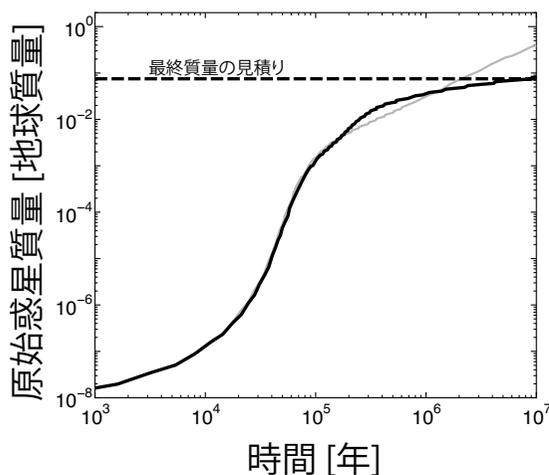


図2：林モデル、3.2AUにおける、10kmの微惑星から始めた場合の原始惑星の進化。破壊を考慮しない場合（灰色線）に比べて破壊を考慮すると（黒線）、最終的な原始惑星の質量は小さくなる。破線は解析的に導出した原始惑星の最終質量。破壊を考慮しない場合の原始惑星の最終質量 M_{iso} は2倍の地球質量程度。

に再現できる[6, 7].

図2に示すのが原始惑星の進化である。破壊を無視した場合は、原始惑星は最大質量 M_{iso} に向かって大きくなる。しかし、破壊を考慮した場合は、原始惑星の成長は途中で鈍くなり止まってしまう。原始惑星の最終質量は M_{iso} に比べてずっと小さい。これは、タイムスケールを使った解析で予想した通りであるが、実際は微惑星が破壊によって減ると破壊による消失時間が長くなっていくので、特に大きな微惑星の場合は予想

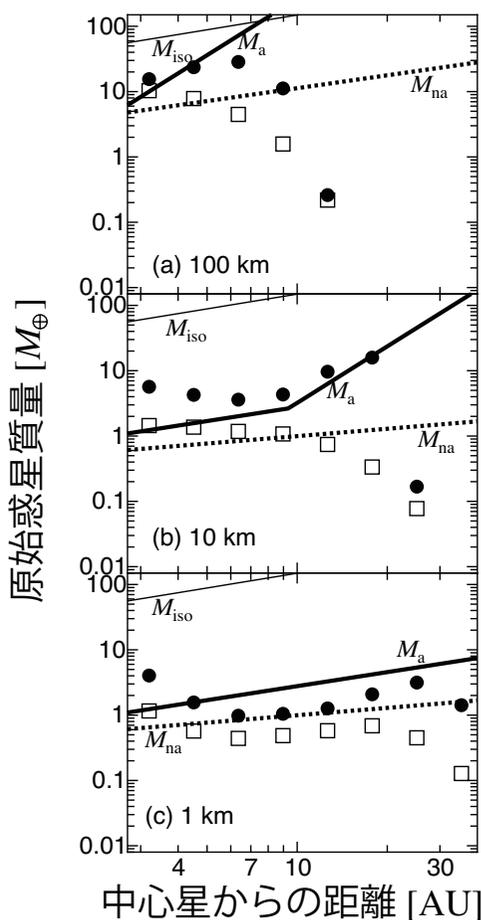


図3：破壊を考慮した場合（黒丸）とさらに大気の効果も考慮した結果（白四角）の、10倍の林モデル円盤において、(a)100 km、(b)10 km、(c)1 kmの微惑星からシミュレーションして求めた一千万年後の原始惑星の質量。解析的に求められた原始惑星の最終質量も破壊を考慮した場合（点線、 M_{na} ）、さらに大気を考慮した場合（実線、 M_a ）、破壊がない場合の最終質量（ M_{iso} 、細線）について示した。成長時間が早い円盤の内側では原始惑星は最終質量に到達するが、遠方では到達できない。

したよりも原始惑星は幾分大きくなる。図2の破線は、4節で行ったタイムスケールを使った解析を詳しくし、この効果も取り入れて導出した原始惑星の最終質量の解析解である（導出は[7]参照）。この解はシミュレーション結果とよく一致しており、林モデル程度の円盤では原始惑星は火星質量程度までしか成長できないことが分かった。

そのため、もっと重い原始惑星系円盤を考える必要がある。林モデルの10倍重い円盤の場合で円盤の寿命の1千万年間で原始惑星の最終質量を図3に示した。重い円盤の場合でも同様に原始惑星はその質量に上限を持つ。円盤が大きくなると原始惑星の成長のタイムスケールが短くなるため、原始惑星の質量の成長上限も大きくなるが、10 km以下の微惑星から始めた場合は地球質量程度までしか成長できない。また、大きい微惑星の場合は1千万年経ってもまだ成長の途中で現在の木星がいる5 AU程度の位置では上限まで到達できていないようである。

しかし、4節で述べたように、小さな微惑星から始めた場合、破壊により出た破片を集積しても原始惑星は成長できる。破片は衝突を繰り返し小さくなるが、この破壊の連鎖が続いている限り、破片の総質量が微惑星の総質量より大きくなることはない。だが、とても小さい天体にはガス抵抗が強くなるため、ランダム速度が減少し、破壊が起こらなくなる。その結果、このサイズの天体の総質量が非常に大きくなる。以後、これを典型的な破片と呼ぶ。この典型的な破片のサイズは原始惑星が大きくなる程小さくなり、火星程度の原始惑星の周りでは10 m程度である。この典型的な破片はガス抵抗により中心星に落下するために消失する。原始惑星が大きくなるにつれて消失時間は短くなるので、この場合には別の原始惑星の最終質量に決まる。

どちらの過程が原始惑星の最終質量を決めるかは最初の微惑星のサイズに依存している。大きい微惑星は重力が強くなり破片を再集積してしまうため、実質的に壊れにくくなる。その結果、破壊にかかる時間は長く、原始惑星は微惑星を集積して大きくなり、最終質量もそれにより決まる。一方、小さな微惑星は簡単に壊れてしまうため、すぐに破片になり、原始惑星は主に破片と合体成長する。そのため、最終質量は破片の消失とのバランスで与えられる。シミュレーションの結果、

微惑星が大体10 km以上の場合には前者となり、それ以下では後者により最終質量が決まることが分かった。

破片を主に集積する場合、典型的な破片のサイズは初期微惑星によらないため、原始惑星の質量も初期微惑星のサイズによらない。しかし、微惑星を集積する場合、微惑星が大きくなる程、破壊が起こりにくくなるため、微惑星消失時間が短くなり、最終質量は大きくなる。原始惑星が核となりガス集積し木星型惑星を形成するためには、原始惑星は10倍の地球質量程度にまで成長しなくてはならない。つまり、少なくとも解析解により与えられる原始惑星の最終質量は10倍の地球質量より大きい必要がある。この条件を満たすには微惑星は100 kmより大きくななければならない。しかし、100 kmの微惑星からできる原始惑星は成長が遅い。そのため、よく用いられる林モデルの原始惑星からでは火星程度までしか成長できない。円盤の質量には不定性があり10倍程度重い可能性がある。10倍重くした林モデルの円盤では、原始惑星の成長が早くなるため、原始惑星は10倍の地球質量に達することができる。それでも、3-4 AU程度の位置だけで、太陽系のような5 AU以遠にそのように大きな原始惑星を作ることは難しい[7]。

6. 原始惑星の大気

原始惑星が月質量程度になるとその周りに大気を持つ。原始惑星の近くを通る天体は大気によるガス抵抗により運動エネルギーを奪われ、原始惑星に捕獲される。そのため、原始惑星の断面積が実効的に大きくなる。この結果、原始惑星の成長は促進される[8, 3]。前節で説明したシミュレーションに大気による断面積拡大の効果を加味してシミュレーションを行った結果が、図4である。原始惑星が十分に大きくなると大気をまとうため、それによって原始惑星の成長を早める。しかし、大気が入った場合でも原始惑星の質量には上限があり、その最終質量は大気がない場合と同様な解析により解が得られ、図3に示してある（解の導出は[9]参照）。

この大気の効果は成長を促すが、破壊により決められる原始惑星の最終質量自体はそれほど大きくなりません。そのため大気を考慮しない場合と同様に、100 km以下の微惑星から始めた場合、最終質量が小さい

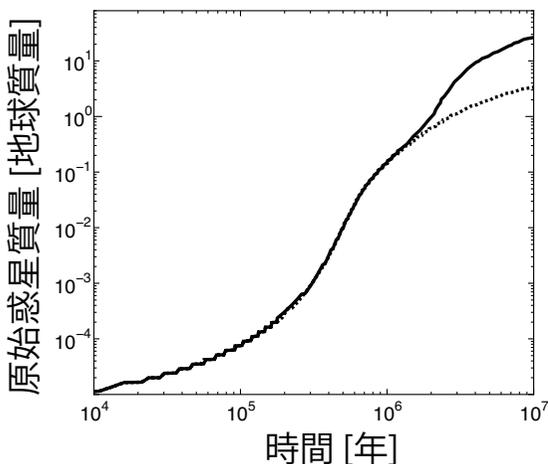


図4：原始惑星の大気を考慮した場合(実線)の原始惑星質量の進化(10倍の林モデル, 100 kmの微惑星で6.4 AUにおける)。大気を考慮しない場合(点線)に比べ、地球質量以上で原始惑星の成長が著しく早くなっていることが分かる。

ため、10倍の地球質量に原始惑星はなれない¹。しかし、大気により成長時間が短くなるため、大きな微惑星から始めた場合でも最終質量まで到達できるようになる。その結果、10倍重い林モデル円盤ならば100 km程度の微惑星から始めると臨界質量に到達することができる。微惑星がさらに大きく1,000 kmサイズの場合は、やはり成長時間がかかりすぎるため臨界質量には到達できない。簡単に見積もると10倍重い林モデル円盤では、5 AUに木星型惑星を作るには50-200 km程度の微惑星が必要になる。シミュレーションの結果はこの見積りと矛盾がない[9]。また、このように大きな微惑星の破壊強度は自己重力で主に決まっているため不定性が小さいため、原始惑星の成長への破壊モデルの不定性の影響も非常に小さいこともつけ加えておく。

7. 議論

今回の研究で微惑星のサイズに制限をつけた。微惑星形成は非常に難しい問題で未だ明確な答えが出てい

1. 5AUよりも内側では原始惑星は解析的に見積もられた最終質量を超えることができる。これは、外側で原始惑星が成長し、破片が生成され、その破片がガス抵抗により移動し内側の原始惑星に更なる成長を促す効果によるものである。残念ながらこの更なる成長は木星型惑星形成領域(5-10 AU)ではほとんど起こらない。また、小さい微惑星の方がこの効果は大きいですが、小さい微惑星ではそれを考慮しても10倍の地球質量の原始惑星を作ることは難しい。

ないが、これまでの研究での微惑星の形成過程を紹介するとともに、本研究で得た制約を満たす形成過程について議論したい。原始惑星系円盤の塵は最初0.1 μm 程度大から衝突・合体を繰り返し大きくなる。小さい天体はガスに引きずられて運動しているが、大きくなるにつれてガスの影響が小さくなる。天体はガスからの抵抗により角運動量を失い、中心星に落下するが、1 m程度の天体が最も速く落下する。合体成長によりこのサイズになった天体は落下してしまうため、微惑星になることは非常に難しい[10]。近年、この困難を超えるモデルが提唱されている。このモデルでは、小さい天体が原始惑星円盤の乱流構造の中に溜まり自己重力によって固まって微惑星を形成する[11]。この場合、微惑星のサイズは100km程度で、木星型惑星を作る条件とよく合っている。

もう一つの木星型惑星を作る条件は重い円盤だ。このような重い円盤は観測から類推される原始惑星円盤質量の上限である。しかし、もう少し軽い円盤でも木星型惑星は作れるかもしれない。円盤中の固体物質は本研究で用いた円盤に比べ遠方で量が多いことが観測で示唆されている。微惑星が形成される前は、原始惑星円盤中で塵は合体成長により成長し、それに伴い中心星方向に落下していく[10]。その結果、中心星に近い領域では固体物質が濃集する。そのため、本研究で示唆したより比較的軽い円盤でも木星型惑星は形成できるかもしれない。

また、原始惑星の形成と微惑星の破壊の開始は観測されている円盤の進化と関係があるのかもしれない。数百万年から千万年以上歳をとった星の周りで、残骸円盤と呼ばれる淡い円盤が見つまっている。このような円盤ではガス成分が非常に少ない、または全くないために、円盤として観測されている1-100 m程度の塵は中心星からの輻射圧で短時間で飛ばされてしまう。このような円盤は微惑星が壊れて破片を提供し続けることによって作られていると考えられている。原始惑星が形成されて、微惑星のランダム速度が十分に上げられると、微惑星の破壊により円盤が形成できるため、残骸円盤は原始惑星の形成を示唆しているかもしれない。しかし、原始惑星はガス成分が残っているうちも形成される。この場合、上で述べたようにガス抵抗により衝突速度が落とされるため10 m程度までしか小さくならない。円盤のガス成分が散逸するにつれ、破

片のランダム速度が下がらなくなってくるので、破片はもっと小さくなれるようになる。そして、ガスが十分に晴れると観測されるような μm サイズの塵を生成できるようになる。結果として、ガス散逸により円盤は明るくなり、その後破壊によって微惑星が減っていくのでだんだん暗くなることが予想される。実際、観測される残骸円盤は数千万年から1億年程度のとき明るさがピークになり[12]、ガス散逸により説明できるかもしれない。

さらに原始惑星はそのまま火星や水星のような地球型惑星になっている可能性が高いため、原始惑星の形成時間は火星形成時間とも直接関係している。近年の研究で火星のハフニウムとタングステンの比が得られ、それをもとに火星は24百万年程度の時間で非常に急成長し形成されたことが分かった[13]。このような急成長で原始惑星が作られ、その最終質量が火星程度になるためには、原始惑星系円盤は重く、微惑星は小さい方がいいだろう。この場合、木星型惑星の固体核を作る条件とは異なることになる。一方で、火星は現在の位置でつくられたのではないかもしれない。原始火星が地球付近で作られて現在の軌道まで飛ばされるならば[14]、100 kmの微惑星でも火星を急速に作ることは可能かもしれない。そして、これならば木星形成条件とも整合的である。

8. まとめ

微惑星は衝突・合体をくりかえし大きくなっていく。衝突が起これば自然に破壊も起これり、その規模は衝突エネルギーに依存する。原始惑星がある程度大きくなると微惑星は激しい衝突・破壊を引き起こし消失するため、それによって自律的に最終質量が決まっていることが分かった。この破壊の効果により、10倍の地球質量程度の木星型惑星の固体核を作るには100 kmサイズと大きな微惑星と10倍の林モデルと重い円盤が必要条件となる。本研究は木星型惑星の形成だけではなく、その他のイベントとも関係しているだろう。たとえば、太陽系には地球型惑星の形成中でも破壊は重要であるし、このような過程で生成される破片は残骸円盤として観測可能だ。今後、これらと比べることが惑星系の形成条件に更なる制約をつけて行くことが可能になるだろう。また、観測されている円盤にはど

のような惑星系が存在しているか、そしてその進化を予測可能にすることを目指して行きたい。

謝辞

本研究のために有益な議論をさせて頂いた田中秀和准教授、本研究を奨励してくれたAlexander Krivov教授、自身の計算コードを見せてくれた稲葉知士准教授に感謝の意を表したい。また、査読者による丁寧な査読が本稿の完成の助けになったことを合わせてお礼申し上げたい。

参考文献

- [1] 渡邊誠一郎, 井田茂, 1997, 岩波講座地球惑星科学12 比較惑星学第3章, 131.
- [2] Wetherill, G. W. and Stewart, G. R., 1993, *Icarus* 106, 190.
- [3] Inaba, S. et al., 2003, *Icarus* 166, 46.
- [4] Kobayashi, H. and Tanaka, H., 2010, *Icarus* 206, 735.
- [5] Hayashi, C., 1981, *Suppl. Prog. Theor. Phys.* 70, 35.
- [6] Inaba, S. et al., 2001, *Icarus* 149, 235.
- [7] Kobayashi, H. et al., 2010, *Icarus* 209, 836.
- [8] Inaba, S. and Ikoma, M., 2003, *A&A* 410, 711.
- [9] Kobayashi, H. et al., 2010, *ApJ* 738, 35.
- [10] Brauer, C. et al., 2008, *A&A* 480, 859.
- [11] Johansen, A. et al., 2007, *Nature* 448, 1022.
- [12] Currie, T. et al., 2008, *ApJ* 672, 558.
- [13] Dauphas, N. and Pourmand, A., 2011, *Nature* 473, 489.
- [14] Hansen, B. M. S., 2009, *ApJ* 703, 1131.