巨大惑星の衛星系形成における微惑星の寄与

木次 电 2017年7月17日受領, 査読を経て2017年8月7日受理,

(要旨) 巨大惑星の周りには衛星と不規則衛星がある.前者は巨大惑星の成長過程において惑星まわりにあったとされる周惑星ガス円盤内で形成され,後者は捕獲された微惑星が起源だと考えられているが,これらの形成過程には不明な点も多く残っている.本稿では,不明な点の一つであり,理解されているようで実は詳細な研究がされてこなかった周惑星ガス円盤からのガス抵抗による微惑星の捕獲過程について,これまでに得た結果をもとに紹介し,捕獲された微惑星が巨大惑星の衛星系形成にどのように寄与するのかについて述べる.

1. はじめに

近年,巨大惑星の衛星¹の詳細が探査機の観測,理 論的研究によって明らかにされ,非常に注目されてい る.その一方で巨大惑星の周りには不規則衛星と呼ば れる小天体群も存在している.これら二つは衛星とい う名前こそ共通しているが,軌道や質量が大きく異な る.こうした違いは起源の違いを反映しており,衛星 は過去に惑星周りにあったガス円盤の中で誕生し,不 規則衛星は捕獲された微惑星が起源と考えられている. そのため,衛星と不規則衛星は従来分けて議論されて きた.

しかしながら、最近の研究から一部の不規則衛星は 衛星の形成とほぼ同時期に捕獲された可能性が指摘さ れている.詳細は2.2節に譲るが、現在、有力とされ ている天体の重力相互作用で不規則衛星を捕獲するモ デルでは、一部の大きな不規則衛星(約100 kmサイ ズ)の捕獲が困難なため、それらの大きな不規則衛星 は惑星周りにあったガス円盤からのガス抵抗で捕獲さ れたのではないかとされている.この時、ガス円盤内 ではガリレオ衛星などの衛星の集積が進行している. そのため多少強引に考えると、微惑星の捕獲がしばし ば起こる状況下で衛星が集積したことになる.しかし, 従来の衛星のガス円盤内での集積モデルでは捕獲され た微惑星の衛星形成への寄与は考慮されていない.

このように、ガス抵抗による微惑星の捕獲という観 点からだと、衛星と不規則衛星に関連があるように見 えてくる.その一方で、微惑星の円盤からのガス抵抗 による捕獲過程自体は詳しく研究されておらず不明な 点が多いため、結局、衛星と不規則衛星の起源に、捕 獲された微惑星がどのように寄与するのかよくわから ないというのが現状である.そこで本稿では、曖昧に されてきたガス抵抗による微惑星捕獲をこれまで調べ てきたので、それらの結果をもとに巨大惑星の衛星系 形成において微惑星がどのように寄与するのかを述べ たいと思う.

2. 巨大惑星の衛星系

研究結果について述べる前に,現在提案されている いくつかの衛星の形成モデルと不規則衛星の捕獲モデ ルについて簡単に紹介しておく.

2.1 衛星の形成

巨大惑星の周りには数多くの衛星がある.衛星のサ イズは100-1000 km,構成物質もほぼ氷でできている ものもあれば,岩石が混じるものや木星衛星のイオの ように氷を含まず岩石のみでできているものもあり, 非常に多様である.衛星は巨大惑星の近傍を公転して おり,軌道長半径は惑星半径の30倍程度の範囲に大 半のものが収まる.またそれらの軌道はほぼ円軌道で, 軌道面は惑星の赤道面とほぼ一致している.こうした 軌道の特徴から,巨大惑星の成長時に原始惑星系円盤 のガスが惑星へ降着する際に惑星周りに形成されたガ ス円盤(以後,周惑星円盤と呼ぶ)において,これらの 衛星は誕生したと考えられている [1,2]. つまり,惑 星が太陽周りにあった原始惑星系円盤内で固体が集積 し形成されたように,衛星も惑星周りにできた周惑星 円盤内で固体が集積し形成されるのである².

では惑星形成における太陽系最小質量モデルと同様 に、衛星系における最小質量モデルを作れば衛星の形 成を大まかに説明できるかというとそうではない. 単 純に当てはめると周惑星円盤の面密度が高くなり、水 氷が気化してしまう[1]. これは多くの衛星が水氷を 保持していることと矛盾する、そのため現在、円盤内 の温度の問題を回避するために大まかに二つの周惑星 円盤モデルが提案されている. 一つが solid enhanced minimum mass diskモデルで周惑星円盤のガス面密 度が惑星の近傍では高いが、惑星から離れると急激に 減少するというものである[2]. このモデルだとガリ レオ衛星の氷の含有率が衛星によって異なることを説 明できる. もう一つはgas-starved diskモデルである [1]. このモデルでは、惑星形成の間、周惑星円盤に原 始惑星系円盤からガス供給が続いていることに注目し, 一度に衛星の材料を用意するのではなく原始惑星系円 盤から継続的にガスとともに供給される固体物質の集 積で衛星が形成されるというものである、この円盤モ

デルの場合,外から供給される材料物質によって形成 されるため,周惑星円盤自体のガス面密度が低下して も問題ない.さらに,このモデルだと,従来の高い面 密度による水氷の気化を回避できるだけではなく,巨 大惑星の質量と衛星系の総質量の比が約10⁻⁴となる観 測事実も説明できる[5].そのため,これまでの衛星 形成に関する先行研究では,この円盤モデルをそのま ま使用,もしくは一部改良するなどして,幅広く使用 されている.そこで本稿でもgas-starved diskモデル を使って以後,話を進めていく³.

さて、この円盤モデルでの微惑星の捕獲の取り扱い について見てみる.上述のように、このモデルでは衛 星の材料となる固体物質は周惑星円盤へ流入してくる ガスとともに供給されると考えている.これは、固体 物質のサイズはガスの流れと一緒に動けるようなサイ ズでなくてはならないことを意味しており、論文中の 見積もりによると1 mより小さいサイズ(ダストサイ ズ)を想定している[1].そのため、gas-starved diskモ デルにおいて、微惑星の捕獲の効果は考慮されていな いのである.

2.2 不規則衛星の捕獲

巨大惑星には惑星近傍を公転する衛星以外にも,不 規則衛星と呼ばれる小天体群が存在する.大半の不規 則衛星のサイズは1-10 km程度で最大でも100 km程 度である.また,それらの軌道長半径は惑星半径の 100-600倍程度あり,惑星から非常に離れた場所に分 布している.それらの軌道の離心率,軌道傾斜角は大 きいものが多く,逆行軌道のものも多数存在する.こ うした軌道の特徴から,起源は捕獲された微惑星と考 えられている⁴.不規則衛星の捕獲について様々なモ デルが提案されているが,おおまかにいうと周惑星円 盤からのガス抵抗による捕獲モデルと三天体の重力相 互作用による捕獲モデルとに分類できる.さらに後者 は,三天体の構成が,二つの惑星と一つの微惑星の場

^{2.} 惑星近傍の中型の衛星(約100 kmサイズ)は周惑星円盤からではなく、地球の衛星である月が地球への天体衝突で地球周りに形成された粒子円盤から誕生したように、過去に巨大惑星周りにあった粒子円盤から形成されたというモデルが提案されている[3.4]. このモデルの場合でも周惑星円盤に起源を求めるモデルが棄却されるわけではなく、衛星の半径が1000 km以上ある大型の衛星(木星のガリレオ衛星,土星のタイタンなど)は、この粒子円盤モデルから起源を説明するのは難しいため、周惑星円盤起源と考えられている.

^{3.} しかし最近の研究から従来のダストの集積だけでは衛星サイズまで集積するのが困難であることが示されている[6].また 周惑星円盤内での電離度を考慮した計算では、gas-starved diskモデルで想定されているよりも角運動量の輸送効率が低く、周惑星円盤の面密度が高くなるという問題点も指摘されている[7].

^{4.} 海王星のトリトンは代表的な不規則衛星の一つであるが、半径は1000 km以上あり、さらに惑星のごく近傍を逆行方向に 円軌道で公転しており、かなり特異な天体である。

合と一つの惑星と二つの微惑星の場合とに分類できる. 簡単にそれぞれのモデルを説明しておく.

(a) ガス抵抗による捕獲[8,9]:周惑星円盤を通過し た微惑星がガス抵抗によってエネルギーを失い捕獲さ れたという古くから提案されているモデルである.こ のモデルのジレンマは,微惑星を捕獲できるほどのガ ス抵抗の場合,捕獲後も微惑星に強いガス抵抗が作用 することで急激な軌道進化を引き起こし惑星へ落下し てしまうが,その一方で,落下を防ぐためにガス抵抗 を弱くすると微惑星の捕獲が困難になることである. また周惑星円盤のガスの散逸が進行し,ガス抵抗が弱 くなったとしても,特定の軌道の微惑星であれば捕獲 されうることがあるが[9],計算例が少なく,その詳 細は不明である(詳しくは35節).

(b)バイナリー微惑星と惑星の三体相互作用による 捕獲[10,11]:連星系の小天体が発見されていることか ら,惑星に接近したバイナリー微惑星のうち一体がエ ネルギーを持ち去り、もう一体が捕獲されるというも のである.ただ捕獲確率が低いことや、捕獲後の離心 率が大きく、現在の軌道にするには結局、ガス抵抗が 必要となるなどの問題がある[11].

(c)一つの微惑星と二つの惑星の三体相互作用によ る捕獲[12.13]:近年、太陽系の惑星は誕生してから数 億年後に動径方向に移動した可能性が指摘されている. 移動中に巨大惑星同士でしばしば近接遭遇するため、 この遭遇時に周囲にあった微惑星と三体相互作用し、 捕獲するというモデルである. このモデルだと順行も 逆行も捕獲でき、さらに捕獲後の軌道も観測とある程 度一致することが知られている.しかし惑星の大移動 を起こすために誕生直後の太陽系が現在よりもずっと コンパクトでなければならないことや、木星が不規則 衛星を捕獲するために天王星サイズの惑星がもう一天 体必要になるといった問題がある[13]. また, このモ デルでは微惑星のサイズが大きくなるにつれて捕獲確 率が減少するため、直径が100 km以上ある不規則衛 星(木星のHimaliaなど)は捕獲が困難とされている. そのため、これらの大きな不規則衛星は惑星移動時に 捕獲されたのではなく、惑星が移動する前にガス抵抗 などで惑星形成の時期に捕獲されていた不規則衛星の 生き残りとされている.

2.3 ガス抵抗による微惑星捕獲過程の扱い

巨大惑星の衛星形成及び不規則衛星の捕獲について 簡単に説明した.見比べると両者の間で微惑星の捕獲 について整合性がとれていないことがわかる。 衛星形 成のgas-starved diskモデルでは微惑星の効果は考慮 されていない、その一方で、三体相互作用による不規 則衛星の捕獲モデルではサイズの大きなものの捕獲が 困難なため、ガス抵抗による捕獲を必要としている。 仮に、周惑星円盤からのガス抵抗によって大きな不規 則衛星が捕獲できた場合、衛星形成に寄与するか否は 別にしても、100 km サイズの微惑星が捕獲できるの であれば、より小さな微惑星の捕獲が起こったと考え ても不自然ではないだろう.おそらく,こうした不一 致が生まれた原因の一つとして、モデルが提案された 2000年代はじめには、周惑星円盤の構造について不 明な点が多かったことが挙げられる、しかし最近では 高解像度の流体計算によって惑星近傍まで見ることが 可能となり、ガスが周惑星円盤に降着する様子や、円 盤の三次元構造の詳細が精力的に調べられている。こ のような計算により、周惑星円盤がほぼ軸対称構造で あることや、ガスの密度分布等が明らかにされた [14.15]. そこで、周惑星円盤を軸対称の円盤と仮定し た太陽,惑星,微惑星の三体問題軌道計算を用い,以 下では周惑星円盤によって微惑星は捕獲されるのか、 また捕獲された場合どのような軌道進化をするのか (3.2節),捕獲された微惑星は円盤のどこに分布する のか(3.3節)、それらが衛星の形成に寄与するのか(3.4 節)、ガスの散逸が進行しガス面密度が減少した周惑 星円盤に微惑星の捕獲は可能なのか、また捕獲された 微惑星の軌道は実際の不規則衛星の軌道と一致するの か(3.5節)について述べることにする[16-19].

3. 捕獲された微惑星の衛星系形成への寄与

3.1 微惑星の捕獲

これまでにも「捕獲」という言葉が出てきたが、今 後も頻出するのでガス抵抗に限らず衝突や重力相互作 用によるものも含めた一般的な捕獲現象についてはじ めに説明する.話を簡単にするために中心星の周りを



図1: (a) 惑星を原点においた回転座標系における惑星周りのポテンシャルエネルギーの様子. ポテンシャルエネ ルギーが0の等値線上のレモン型の領域(太線)は惑星のヒル圏である. 長さはヒル圏の半径R_Hで規格化され ている. L₁, L₂はラグランジュ点である. (b) y=0における図1aの断面図.

惑星と微惑星が公転している三体で成り立つ系につい て考える。ただし、惑星と微惑星の質量は中心星の質 量よりもずっと小さいとする.この時、系は中心星の 重力によって支配されるが、惑星のごく近傍では中心 星の重力よりも惑星の重力が卓越する領域が存在する。 この領域のことを惑星のヒル圏とよぶ、図1aは惑星 を原点とした回転座標系における惑星周りのポテンシ ャルエネルギーの様子を示しており、レモン型の領域 がヒル圏である.惑星と中心星を結んだ直線状に存在 するヒル圏の出入り口をラグランジュ点(L, L)と呼 ぶ. 微惑星が捕獲されるには、 兎にも角にもまず微惑 星は惑星のヒル圏に入らなければならない。そのため には微惑星のもつエネルギーが最低でもラグランジュ 点のポテンシャルエネルギーよりも高いことが要求さ れる. 高いエネルギーをもつ微惑星だとあらゆる場所 からヒル圏内に侵入でき、ラグランジュ点でのポテン シャルエネルギー程度のエネルギーしか持たない微惑 星だとL₁もしくはL₂の近傍から入ることになる.次 にヒル圏に入った微惑星を捕獲するためには、 今度は 微惑星のエネルギーをラグランジュ点のポテンシャル エネルギーより何らかのエネルギー散逸(本稿ではガ ス抵抗)によって減少させなくてはならない. 十分な エネルギーの散逸が起こり、微惑星のエネルギーがラ グランジュ点のポテンシャルエネルギーよりも小さく なるとその微惑星は捕獲されたという(図1b).一方で、 エネルギー散逸が無い、もしくは散逸が十分ではなく

微惑星のエネルギーが高いままの場合, 微惑星はヒル 圏から脱出し, 再び太陽周りを公転するようになる.

3.2 周惑星円盤による微惑星の捕獲及び軌道 進化

では具体的に、周惑星円盤からのガス抵抗による微 惑星の捕獲現象について見ていく、周惑星円盤からの ガス抵抗による捕獲はヒル圏に入った微惑星が惑星近 傍のガス密度の高い領域を通過した時に、周惑星円盤 から撃力的にガス抵抗をうけ、エネルギーを急速に失 うことで起こる. こうした捕獲はgas-starved diskモ デルの場合でも十分起こり、サイズが大きくなるにつ れて捕獲頻度は減少するが、約10kmの微惑星でも捕 獲可能である. また捕獲頻度は微惑星の捕獲前の軌道 (太陽中心の軌道)にも依存する、微惑星が初期に大き な軌道傾斜角を持っている場合、微惑星は周惑星円盤 の上空からほぼ垂直に侵入するようになる。こうした 軌道で周惑星円盤を通過する場合。円盤と相互作用す る時間が非常に短くなるため十分なエネルギー散逸が 起こらず、捕獲が困難になる、そのため初期の軌道の 離心率. 軌道傾斜角が高くなるにつれて周惑星円盤に よる捕獲頻度は減少する.

また周惑星円盤は、円盤を構成するガス自体が惑星 周りをほぼケプラー速度で公転している.このことが 捕獲過程及び、その軌道進化を多様なものにする(図 2).周惑星円盤の公転方向と逆方向から微惑星が惑星



図2:周惑星円盤からのガス抵抗によって捕獲された微惑星の軌道の例.原点に惑星があり、周惑星円盤は惑星の 周りを反時計周りに公転している.座標は惑星のヒル半径R_Hで規格化されている.(a)順行捕獲,(b)逆行捕 獲.[16]より引用・改変.



図3: (a) 周惑星円盤内の捕獲された微惑星の面密度. 微惑星のサイズは300 m.微惑星が初期に太陽周りを公転し てた時の離心率と軌道傾斜角はレイリー分布に従うと仮定(ただし<e_H²>^{1/2}=2<i_H²>^{1/2}, e_H, i_H(離心率, 軌道 傾斜角をR_H/a(a:惑星の軌道長半径)で規格化したもの). 黒の実線と黒の破線はそれぞれガスとダストの面 密度(∝r⁻¹⁵(rは惑星からの距離)). (b)捕獲された微惑星同士が衝突するタイムスケール. 黒の実線はガス抵 抗によって惑星に落下するタイムスケール(T_{gab}). 垂直の点線に囲まれた領域は現在のガリレオ衛星のある 領域. [18]より引用・改変.

に接近した場合(以後,逆行捕獲ということにする), 微惑星とガスとの相対速度は大きくなり, 微惑星のエ ネルギー散逸も大きくなる. そのため周惑星円盤の公 転方向と同じ方向から接近したもの(以後,順行捕獲) に比べ捕獲されやすい[16,17]. 捕獲後の軌道進化も順 行捕獲と逆行捕獲で異なる. 捕獲直後は順行でも逆行 でも惑星を中心とした軌道の離心率と軌道傾斜角は大 きい.しかし逆行で捕獲された微惑星は捕獲後も常に 向かい風をうけることになる.そのためエネルギーが 急速に失われ,軌道長半径が減衰し,らせん状に惑星 へ落下してしまう.一方,順行方向から捕獲されたも のは近点通過時にエネルギーを失い円軌道化し,その 後はガスとの相対速度が小さくなるため軌道進化は逆 行にくらべ長くなる.

3.3 周惑星円盤内での捕獲された微惑星の分布

前節では個々の微惑星の捕獲と軌道進化を述べたの で、この節では周惑星円盤をもつ惑星の軌道近傍に一 様分布している微惑星が捕獲された後、周惑星円盤の どこに分布するのかを述べる、軌道計算の結果から、 周惑星円盤内にある微惑星は、惑星周りを順行方向に 公転するもの、逆行方向に公転するもの、そして捕獲 されず円盤を通過していくものの三種類に分類できる ことが明らかとなった[18] 上述のように順行の微惑 星は軌道進化が進むと円軌道化し軌道進化が緩やかに なる一方、逆行捕獲の微惑星は急激な軌道進化で惑星 に落下する. また捕獲されていない微惑星は惑星に接 近しすぎると円盤内側の高いガス密度からのガス抵抗 で捕獲されてしまうため、周惑星円盤の内側には存在 しない、そのため、周惑星円盤の外縁には三種類の異 なる運動状態の微惑星が存在しているが.惑星の近傍. つまり現在の衛星があるような領域では基本的には順 行方向に運動しているものが多く存在する.また捕獲 された微惑星の周惑星円盤内での面密度は、捕獲頻度 と軌道減衰に依存する。 捕獲前の微惑星の離心率や軌 道傾斜角が大きい場合は、前節で述べたように捕獲頻 度が小さくなり、その結果、周惑星円盤における捕獲 された微惑星の面密度も小さくなる傾向にある. さら に,惑星軌道付近の微惑星の分布は実際には一様では なく、惑星による重力散乱により惑星軌道近傍の微惑 星が取り除かれたような非一様分布になると考えられ ている、この散乱による微惑星の除去は、微惑星の供 給源が減少することを意味するため、捕獲された微惑 星の面密度にも大きな影響を与える。特に捕獲後、周 惑星円盤内を逆行方向に公転する微惑星は、もともと は惑星の軌道のごく近くで太陽周りを公転していたも のが多いため、非一様分布になると急激に減少してし まう.このため、非一様性が強く効く場合には、周惑 星円盤に捕獲された微惑星の大半は順行方向に公転す ることになる.

3.4 捕獲された微惑星の衛星形成への寄与

ここまでで、捕獲された微惑星の周惑星円盤内での 振る舞いが大まかに理解できた.そこで、従来、gasstarved diskモデルで衛星形成の材料物質として想定 されているガスと共に流入してきたダストと捕獲され た微惑星の面密度を比較し、どちらが材料物質になり うるのかを調べる。周惑星円盤内のダストの動径方向 依存性はガスと同じと仮定し、ガスに対するダストの 比は0.01とする⁵.一方、微惑星は、ガスと微惑星の 比が0.01の原始惑星系円盤から捕獲されたとする。そ の結果を示したのが図3aである。捕獲前の微惑星の 運動状態に関係なく、外縁部分ではダストが卓越して いる。一方、微惑星の捕獲される前の軌道が円軌道に 近い場合、現在のガリレオ衛星領域では、捕獲された 微惑星の面密度がダストの面密度を上回る。しかし、 捕獲前の微惑星の軌道の離心率が大きくなるにつれて 面密度が減少し、衛星のある領域においてもダストの 面密度が卓越するようになる[18].

次に捕獲された微惑星が集積できうるのかを調べる. 図3bはガス抵抗による軌道減衰のタイムスケールと 捕獲された微惑星同士の衝突のタイムスケールを比較 したものである。 周惑星円盤の外縁では衝突のタイム スケールよりも軌道減衰のタイムケールが短いため. 衝突する前に微惑星は落下してしまう。一方、ガリレ オ衛星領域において捕獲された微惑星の面密度は増加 するので衝突のタイムスケールが軌道減衰のタイムス ケールより短くなる、そのため惑星近傍領域では、捕 獲された微惑星は落下するより前に衝突できると考え られる。ただ、この領域での衝突速度を見積もると脱 出速度の1.2-1.4倍程度あるため実際に集積できるか という問題は残る.しかし最近の空隙率,物質強度, 粉体摩擦の効果を入れた衝突シミュレーションによる と数キロメールサイズの小天体が、脱出速度よりも幾 分高い速度で衝突した場合でも衝突合体できることが 示されており[21]、集積できた可能性が高い、

さて、この節の最後に微惑星のサイズを変えた場合 についても述べておく、実は微惑星のサイズを変えた としても、周惑星円盤内にある捕獲された微惑星の数 は捕獲頻度と捕獲後の軌道減衰率のつりあいで決まる ため、ほとんど変化しない、つまり微惑星のサイズが 小さいとガス抵抗の効果が大きくなるので捕獲頻度と 軌道減衰率の両方が高くなり、サイズが大きいとガス 抵抗の効果は弱くなり捕獲頻度と減衰率が低くなって しまうため、結果的に微惑星のサイズへの依存性は小

^{5.} ダストとガスの比は一定ではなく動径方向に依存することも 指摘されているが, 簡単のため本稿では0.01で一定としている [20].

2 2 а h 捕獲前 捕獲後 1 1 y/R_H y//R_H 0 0 -1 -1 -2 -2 -1 0 1 2 -2 -1 0 1 2 -2 x/R_H x/R_H

図4: ガス抵抗が弱い時の微惑星の捕獲軌道の例(逆行捕獲). (a)捕獲される前の様子 (b)捕獲後の様子.レモン型 の領域は惑星のヒル圏である. [19]より引用・改変.

さくなるのである⁶. 捕獲された微惑星の面密度の傾 向も微惑星サイズが変化してもほぼ同様である.ただ し、捕獲された微惑星の面密度の増加する位置(図3a における惑星ヒル半径の0.004-0.02倍の位置での増 加)は、微惑星が捕獲される位置の推移に依存する。 微惑星サイズが大きくなると、捕獲に必要なガス抵抗 も大きくなるため、より惑星近傍で捕獲されることに なり、面密度の増加する位置も内側に推移する、一方、 サイズが小さい場合はその逆で周惑星円盤の外側で捕 獲されることになるため、 面密度の増加位置は外側に 推移する、推移した面密度の増加位置では微惑星サイ ズが300mの時と同様に、捕獲前の軌道が円軌道に近 いとダストの面密度よりも卓越するため、捕獲された 微惑星が衛星形成に寄与できた可能性がある.ただし, 捕獲前の軌道が円軌道に近いものになるためには、原 始惑星系円盤のガス抵抗が十分効く必要がある. 解析 的な見積もりによると[22],捕獲前の軌道が円軌道に 近かったと予想される微惑星のサイズは100 m以下で あり、それ以上のサイズは比較的大きい離心率と軌道 傾斜角をもっていたと考えられる. そのため衛星の材 料物質として主に寄与できるのは数十メートルサイズ 以下のものであった可能性がある.

3.5 散逸している周惑星円盤による微惑星捕獲

これまで衛星形成期における周惑星円盤による微惑 星の捕獲について見てきた. しかし巨大惑星の成長の 最終段階になると、 周惑星円盤のガスの源である原始 惑星系円盤の散逸によるガス供給の減少もしくは、成 長した巨大惑星の重力によって原始惑星系円盤に形成 されたギャップによるガスの供給の減少が起こるため. 周惑星円盤のガス面密度はさらに減少し、いずれ散逸 する[20]. ガスの供給が減少することでガス密度が低 下した周惑星円盤では微惑星捕獲が困難になる. その ため、これまでの接近した微惑星がたえず捕獲され、 それらが周惑星円盤内に分布するという3.2節-3.4節 のような描像ではなくなると考えられる. では捕獲が 起こらないかといえばそうではなく、円盤通過時の撃 力的なガス抵抗による捕獲(3.2節)とは異なる捕獲過 程で微惑星は断続的に捕獲されるようになる。図4は gas-starved disk モデルのガス面密度の0.01倍まで散 逸した周惑星円盤による10 km サイズの微惑星捕獲 の様子である.惑星に接近した微惑星はしばしばカオ ス的な運動を示し、 微惑星のエネルギーはラグランジ ュ点でのポテンシャルエネルギー以上で捕獲されてい ないにもかかわらず、惑星の周りを公転することがあ る.図4aを見ると、ヒル圏の外に軌道がはみ出して おりエネルギー的には捕獲されていないが、惑星の周 りを公転している様子がわかる、このようなカオス的

^{6.} 微惑星サイズが10 kmを超えると、捕獲に非常に強いガス抵抗 が必要となるため、惑星の物理半径付近を通過しなくてはな らない、そのため捕獲前に衝突するものが増加するため、周 惑星円盤内の微惑星の総数は10 kmサイズ以下の場合に比べ減 少する。

な軌道で微惑星が惑星周りをしばらく公転すると,ガ ス散逸によってガス密度が低下し弱まったガス抵抗で も、公転中に小さいエネルギー散逸の蓄積で微惑星 は捕獲される[9,19].この捕獲軌道の特徴として,惑 星中心軌道の近点が惑星から離れているということが 挙げられる.そのため順行,逆行問わず,微惑星の軌 道進化は遅く,長いもので惑星公転周期の10⁴-10⁵倍 の間,周惑星円盤内で生き残ることができる[19].こ れは従来の捕獲軌道が惑星の公転周期程度かそれ以下 で落下していたことを考えると,いかに長いかがよく わかる.

では最後に、捕獲された微惑星が軌道減衰している 最中に周惑星円盤が完全に散逸した場合を考え、散逸 直後の微惑星の軌道長半径と、実際の不規則衛星のも のとを比較する.離心率や軌道傾斜角分布は円盤散逸 のタイムスケールや散逸開始時のガス面密度によって 影響されてしまうが、パラメータ依存性がほぼ無い一 つの興味深い結果は、ガス抵抗によって捕獲された微 惑星の惑星中心軌道の軌道長半径には上限があり、惑 星のヒル半径の約0.3倍以上の軌道長半径をもつもの はほぼ存在しないということである[19]. この結果は、 ガス密度が高い場合に起こる撃力的な捕獲においても 同様にみられた[17]. 実際の不規則衛星の軌道長半径 分布を見てみると順行の不規則衛星はヒル半径の0.1-0.3倍の軌道長半径をもつものが大半であるが、逆行 の不規則衛星は軌道長半径が大きいものが多くヒル半 径の0.2-0.6倍の範囲に分布している[23]. そのため 0.3倍以上の軌道長半径を持つ逆行の不規則衛星をガ ス抵抗の捕獲のみで説明するのは困難であり、捕獲後 に摂動によって外側に移動する、もしくは別の捕獲モ デルの寄与など、なんらかの解決策が必要である、そ の一方で,惑星移動による捕獲モデルでは捕獲困難と されるHimaliaの軌道長半径はヒル半径の0.2倍程度 なので、軌道長半径に関してはガス抵抗による捕獲で 説明可能である.

4. まとめと今後の課題

本稿の内容をまとめると以下のようになる.(1)巨 大惑星形成時に惑星周りにあったとされる周惑星円盤 からのガス抵抗によって,惑星軌道近傍にあった微惑 (3) 周惑星円盤へのガス供給が減少し,ガス抵抗が弱 くなったとしても微惑星の捕獲は起こり,そうしたも のの一部は軌道長半径が幾分小さい不規則衛星になっ た可能性がある.

最後に、これらの結果の不定性についても述べてお く.これらの研究は三体軌道計算によって得たもので あり、微惑星同士の重力は考慮していない.そのため、 本稿で紹介した微惑星の分布は重力を考慮した場合、 変化する可能性は高い.またダストの分布についても 単純にガス面数密度と同じ動径方向依存性と仮定して いるが、実際にダストの流入過程を計算し周惑星円盤 内での分布を調べると捕獲された微惑星とダストのど ちらが寄与するのか、より明確になると考えられる.

謝 辞

本稿で紹介した研究に携わっていただいた共同研究 者の大槻圭史氏,谷川享行氏,藤田哲也氏に感謝いた します.本稿の査読者である田中秀和氏には有益なコ メントをいただきました.感謝いたします.

参考文献

- Canup, R. M. and Ward, W. R., 2002, Astron. J. 124, 3404.
- [2] Estrada, P. R. et al., 2009, Europa (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press).
- [3] Crida, A. and Charnoz, S., 2012, Science 338, 1196.
- [4] Hyodo, R. et al., 2015, Astrophys. J. 799, 40.
- [5] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2006, Nature 441, 834.
- [6] Shibaike, Y. et al., 2017, Astrophys. J. 846, 81.
- [7] Fujii, Y. I. et al., 2011, Astrophys. J. 743, 53.
- [8] Pollack, J. B. et al., 1979, Icarus 37, 587.
- [9] Cuk, M. and Burns, J. A., 2004, Icarus 167, 369.
- [10] Agnor, C. B. and Hamilton, D. P., 2006, Nature 441, 192.
- [11] Philpott, C. M. et al., 2010, Icarus 208, 824.
- [12] Nesvorný, D. et al., 2007, Astron. J. 133, 1962.

- [13] Nesvorný, D. et al., 2014, Astrophys. J. 784, 22.
- [14] Tanigawa, T. et al., 2012, Astrophys. J. 747, 47.
- [15] 谷川享行ほか, 2011, 遊星人 20, 262.
- [16] Fujita, T. et al., 2013, Astron. J. 146, 140.
- [17] Suetsugu, R. et al., 2016, Astron. J. 151, 140.
- [18] Suetsugu, R. and Ohtsuki, K., 2017, Astrophys. J. 839, 66.
- [19] Suetsugu, R. and Ohtsuki, K., 2016, Astrophys. J. 820, 128.
- [20] Sasaki, T. et al., 2010, Astrophys. J. 714, 1052.
- [21] Jutzi, M. and Asphaug, E., 2015, Science 348, 1355.
- [22] Tanigawa, T. et al., 2014, Astrophys. J. 784, 109.
- [23] Jewitt, D. and Haghighipour, N., 2007, Annu. Rev. Astron. Astr. 45, 261.