

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：37104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610133

研究課題名(和文) 蒸発を伴う微惑星の軌道進化

研究課題名(英文) Possibility of the evaporation of planetesimals in the protoplanetary disk

研究代表者

長澤 真樹子 (Nagasawa, Makiko)

久留米大学・医学部・准教授

研究者番号：00419847

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：ガス円盤中で運動する微惑星は、円盤との相対速度が音速を超えたときに生じる衝撃波で加熱される。木星型惑星が形成される段階では、平均運動共鳴と永年共鳴の影響で、周囲の微惑星のガス円盤に対する相対速度は、小惑星帯において10km/sを超え、数百キロメートルサイズの氷微惑星の蒸発が起きる速度となっていることが判明した。この速度は、隕石中のコンドリュール形成に必要と考えられる速度にも達していることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：When the relative velocity between a planetesimal and the gas disk exceeds the speed of sound of the gas, a bow shock is produced. We find that the velocities relative to the gas disk of planetesimals a few hundred kilometers in size exceed 10 km/s in the asteroid region due to the mean-motion resonance and the secular resonance of a Jovian planet. The shock is enough strong to cause the evaporation of icy planetesimal. Our results also suggest that chondrules were produced effectively by the bow shocks.

研究分野：惑星形成

キーワード：惑星起源・進化

### 1. 研究開始当初の背景

惑星は、原始惑星系円盤の中で形成される微惑星と呼ばれる 10km から 100km 程度の大きさの天体が衝突合体する過程を経て形成される。微惑星が原始惑星や木星型惑星と同居する時代には、微惑星は惑星の摂動によって原始惑星系円盤の回転速度と比べて速い速度を持つため、衝撃波を形成してとけることが考えられる (Tanaka et al. 2013)。これまで、微惑星の蒸発の効果を含めた多体計算はなされておらず、どのような領域で、どの程度の蒸発が生じるかはわかっていない。

また、この微惑星衝撃波は、隕石中に含まれる、コンドリュールと呼ばれる 1mm 程度の球形の粒の起源の一つとして有力視されている。その一方で、これまでの研究では、微惑星が十分なコンドリュール形成に十分な速度 (8km/s 程度以上) に達していないことが問題点として挙げられる。

### 2. 研究の目的

惑星が形成される過程では、ガス円盤内で多数の微惑星と原始惑星や惑星が混在する状況が生じる。こうした状況では、大きな惑星による重力摂動によって微惑星の速度が上昇する。微惑星と原始惑星系円盤との相対速度が音速を超えると衝撃波が生じ、その加熱で微惑星が蒸発することが考えられる。

そこで、原始惑星系円盤内で多数の微惑星の速度を多体計算から求める計算コードを構築し、微惑星の運動を数値計算し、原始惑星系円盤内のどの領域でどの程度の量の物質が蒸発するかを調べることが目的とする。

### 3. 研究の方法

原始惑星系円盤中に 10km から 1000km 程度のサイズの微惑星が多数存在する状況を考える。これらの微惑星は小惑星帯となる火星と木星の軌道の間 (3AU ~ 5AU) に存在しており、5AU には、木星型惑星が形成されつつあるとする。木星摂動によって微惑星がガス円盤に対して獲得する相対速度を、円盤の重力を含めた重力多体計算を実行して追う。微惑星には、ガスとの相対速度に依存するガス抵抗が働くものとする。

まず、微惑星の大きさや初期位置を変化させ、全体としてどのような運動となるかを調べる。微惑星半径として 10km, 100km, 300km, 1000km を考え、1つの初期位置に対して 5~30 個程度の微惑星を異なる角度に配置する。太陽系が作られたと考えられている最小質量円盤中で、今の軌道要素や質量を持つ木星を考慮し、この微惑星の運動を解く。

次に、木星の質量や軌道要素を変化させ、太陽系形成のいつの段階で微惑星が蒸発するほどの相対速度を得るのか、その時間幅はどの程度なのかを求める。最小質量円盤以外の原始惑星系円盤の密度を変化させて同様の計算を行い、十分な相対速度となるのはどのような条件なのかを調べる。

### 4. 研究成果

#### (1) 微惑星の運動の概要

木星は、3AU から 4AU の間に、無数の平均運動共鳴を生じる。このため、初期に、3AU から 4AU に存在している微惑星は、軌道運動をしているうちに、次第に離心率が上昇する。ガス円盤中では、ガス抵抗が働くため、微惑星は太陽方向に移動するが、共鳴にはまっている間は、大きな移動をすることなく、離心率だけが上昇する。しかし、ある程度離心率が大きくなると、微惑星は共鳴から外れて、太陽系の内側の方へと移動を開始する。この運動によって、3AU から 4AU にある微惑星の多くが失われる。

3AU 付近には、2:1 の平均運動共鳴と呼ばれる強い共鳴が存在している。内側に移動する微惑星がこの共鳴に入る際に、ある程度離心率を持っていると、微惑星の離心率は非常に高くなる現象がみられる (図 1)。これが、微惑星がガス円盤との高い相対速度を持つ鍵となる点である。

微惑星のサイズが小さい場合、ガス円盤から受けるガス抵抗が強いため、一般的には 2:1 の共鳴に入る前に、離心率がゼロ近くに下がってしまう。このため、10km よりも小さな微惑星はガスに対して高い相対速度を持つことができない。ガス円盤の自己重力を考慮しない場合、1000km 程度の微惑星であっても、10km/s の相対速度を持つのは 20 例中 1、2 例にとどまる。しかし、ガス円盤の自己重力を考慮すると、3AU 付近に、永年共鳴が生じる。永年共鳴は、木星の近点の移動速度が微惑星の近点の移動速度と近くなるため、微惑星が偏った力を受けて軌道がゆがむ効果で、これによって微惑星は高い離心率を持つて 2:1 共鳴に入ることになる。

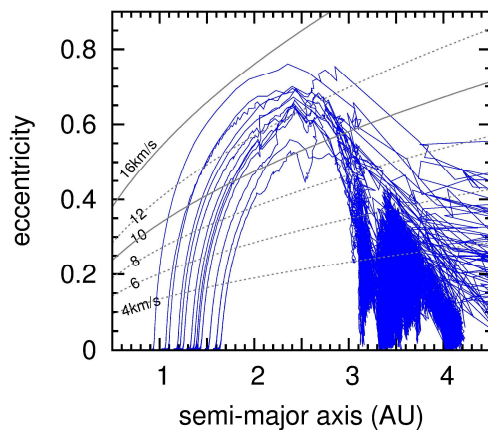


図 1: 円盤の自己重力を考慮した場合の 300km の半径を持つ微惑星の運動。初期に 4.1AU にある微惑星 20 個の軌跡を記してある。横軸が微惑星の太陽からの距離、縦軸が離心率。ガス円盤との相対速度の目安を点線で示してある。4km/s 程度以上の相対速度の場合、微惑星は 1 千万年で半分程度に蒸発する。小惑星帯でコンドリュール形成に必要な相対速度は 8km/s 程度以上である。

原始惑星系円盤の自己重力による永年共鳴の効果によって、100km 以上の大きさの微惑星は、ほとんどの場合、2:1(約 3AU)と 3:1(約 2.5AU)の平均運動共鳴の間で 10km/s 以上のガス円盤との相対速度を持つことになる。

ガスとの相対速度は、3:1 の共鳴付近で最大となる。これは、大きくは、3:1 の共鳴より内側になると、共鳴間士の距離が離れること、ガス抵抗を及ぼす原始惑星系円盤の密度が濃くなること、木星の重力摂動が弱くなることによる。高い相対速度に達するものは、より強いガス抵抗を受けるため、より太陽系の内側へと落下する傾向を持つ。このため、100km サイズの微惑星は、1.4AU から 1.8AU の範囲程度で移動が停止するのに対し、1000km サイズの微惑星は、1AU の地球軌道付近にまで移動をする(表 1 参照)。

微惑星半径	最終的な位置
10km	2.4AU-2.7AU
100km	1.4AU-1.8AU
300km	1.0AU-1.6AU
1000km	0.9AU-1.3AU

表 1: 初期位置が 4.1AU の微惑星のガス抵抗による移動が最終的に終了する範囲。1AU は地球と太陽の距離。

## (2) 微惑星蒸発の時期

共鳴から外れた微惑星が、ガス抵抗によって太陽系の内側に移動する速さは、微惑星サイズに依存する。10km 程度の微惑星の場合、進化が停止するまでの時間は 100 万年程度であり、1000km サイズの微惑星の場合は 5 千万年程度の時間となる。

一つ一つの微惑星が高い相対速度を持つ時間はそれほど長くなく 1 万年程度である。しかし、共鳴から外れる時期は、微惑星ごとに異なり、微惑星全体では、100 万年間程度の間、速度の高い微惑星が系に存在する時間が続く(図 2 参照)。

サイズが大きい方が、多少、高い相対速度を持つ時間は長い、ガス抵抗が微惑星半径に比例するのに対し、継続時間は比例するほど長くはならない。これは、高い相対速度を得た微惑星は、強いガス抵抗を受けるため、すみやかに相対速度が小さくなる効果によるものである。

共鳴の場所に至るまでの時間は、微惑星半径に比例するため、100km と 300km の微惑星の場合を比べると、サイズが大きいほど、微惑星が高い速度を持つ時期が遅い。また、継続時間もやや長くなっている。コンドリュールの形成は、CAI 形成後数百万年間程度続いたと考えられているため、コンドリュール形成に寄与する衝撃波を形成する微惑星は、300km サイズ程度以上の物が有望である。数百 km サイズの微惑星の作る衝撃波であれば、コンドリュールが凝固する速さも速すぎずに適していると考えられる。

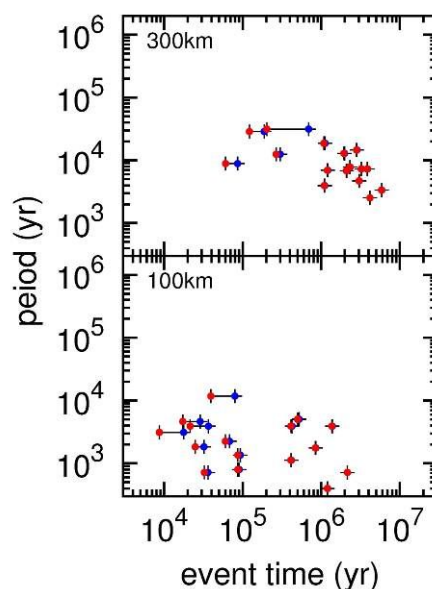


図 2: 微惑星とガス円盤との相対速度が 10km/s 以上となる時期(横軸)とその継続時間(縦軸) 300km サイズの微惑星(上)と 100km サイズの微惑星(下)の場合。最初に 10km/s を超えた時期を赤い点で、最後に 10km/s を切った時期を青い点で示してある。サイズの大きな微惑星ほど、継続時間が長く、イベントの発生する時期も遅いことがわかる。

## (3) 木星型惑星のパラメータへの依存性

微惑星はガス抵抗で移動する過程で、平均運動共鳴と永年共鳴を通過し、ガスに対する高い相対速度を得る。このため、共鳴が強いほど、ガス円盤との相対速度は高くなる。しかし、永年共鳴の強さは、共鳴の原因となる木星型惑星のパラメータに依存する。ごく単純には、木星の質量が大きいほど、木星の離心率が大きいほど、永年共鳴は強いものとなる。ただし、永年共鳴の位置も木星のサイズに依存し、ガス円盤の面密度の異なる場所へ移動するため、簡単には議論ができない。

### 木星の質量

4AU 付近の微惑星の場合、木星が現在の 1/10 程度のサイズになった段階で、微惑星は、蒸発が影響をもつような相対速度に達する。しかし、木星サイズが現在の 1/3 程度以下の場合、永年共鳴は 3.8AU よりも外側で生じるため(表 2 参照)、多くの場合、微惑星は 2:1 の共鳴に入るまでに、離心率が下がってしまい、コンドリュール形成を行えるような速度(>8km/s)を超えることは難しい。反対に、木星が現在の物より大きければ、細かい平均運動共鳴を通過している段階で、散乱が顕著になりほとんどの微惑星が小惑星帯を通過することなく系外へ散乱されてしまう。

3AU 付近の微惑星の場合、ほぼ木星が現在のサイズに成長するまで、木星重力で微惑星の軌道が乱されることはなく、そのため、ガス抵抗による顕著な移動が生じない。また、

3AU 付近では細かい共鳴がオーバーラップすることはないので、木星サイズが大きくなっても激しい散乱が生じることはない。

木星質量	永年共鳴の位置
0.1MJ	4.17AU
0.3MJ	3.78AU
0.5MJ	3.57AU
1.0MJ	3.25AU
2.0MJ	2.89AU

表 2: 木星の質量が異なる場合の、微惑星が高い相対速度を得るために必要とする永年共鳴の位置。1 MJ は現在の木星の質量。

#### 木星の離心率

現在の木星の離心率は、0.05 程度である。初期段階では、木星の離心率は、現在よりも小さかったことが考えられる。表 3 に 100km サイズの微惑星の得るおよその最大相対速度をまとめる。

表 3 に示した通り、木星の離心率が小さい場合、ガス円盤との最大の相対速度は小さく抑えられる傾向を持つ。いずれの場合でも、微惑星は蒸発が影響する速度には達している。しかし、コンドリュール形成に十分な速度となるには、木星の離心率が 0.03 程度以上必要であることがわかる。

木星の離心率	最大相対速度
0.01	7km/s
0.03	11km/s
0.048	12km/s
0.07	14km/s

表 3: 木星の離心率と 100km の微惑星の得るガスとの最大相対速度。最大速度は木星の離心率が 0.01 の時は 3AU 付近で、それ以外では 3:1 共鳴のある 2.5AU 付近で生じている。

#### 木星の軌道長半径

太陽系以外の惑星系では、木星型惑星の位置は様々である。基本的に、共鳴の位置は、木星の軌道長半径に対する比から得られるため、微惑星の運動を縮尺でスケールすることが可能である。一方、大局的なガス円盤の密度分布は、木星型惑星の位置によらないため、円盤の重力とガス抵抗の強さを考慮する場合、木星の位置によって、微惑星の運動は異なり得る。しかし、ガスの面密度が著しく異ならないならば、2:1 の共鳴に入るまでに離心率が上がっていること、3:1 の共鳴に移動する間に離心率が下がること、の 2 つの条件が満たされるため、得られる最高の相対速度に違いは生じない結果となった。

#### (4) ガス円盤密度への依存性

ここでは、面密度の軌道長半径に対するべき指数は、最小質量円盤の持つ 3/2 の値と変わらず、全体の質量が定数倍となるような密

度の変化のみを考えた。

ガス円盤の密度は、ガス抵抗の強さと永年共鳴の強さの両方に関係する。ガス抵抗に関しては、ガス密度が高いと、ガス抵抗が強くなり、微惑星の速度は押さえられる。永年共鳴に関しては、ガス密度が高いと、周囲のガスの重力が強くなり、共鳴の位置はより木星の近く、つまりガス密度の低い方へと移動する効果を持つ。両者の効果は互いにほぼ打ち消しあい、微惑星の得る速度という観点からは、大きな違いをもたらさない。しかしながら、最大速度となる位置、移動を起こす微惑星の初期位置などは、円盤の密度によって異なるものとなる。

ガス円盤の密度が最小質量円盤の 1/10, 1/2, 1, 3/2 倍の場合の、永年共鳴の生じる位置は表 4 のようになっている。密度が 1/10 倍の場合、永年共鳴は 3:1 共鳴よりも太陽に近い側で生じるため、最大の相対速度を得るのは、この共鳴の付近となる。密度が 1/2 倍の場合、3:1 の共鳴の近くで永年共鳴が生じるため、3:1 での離心率の増大が大きくなり、最大の相対速度は 2AU 付近で生じることになる。密度が 3/2 の時は、2:1 共鳴に移動する前に、永年共鳴の効果がガス抵抗で落ちてしまうために、運動は円盤の重力を考えない場合と近いものとなる。

総合すると、影響を受けるのは、2:1 の共鳴よりも外側の微惑星であり、円盤密度が低いほど、太陽の近くで最高速度に達する傾向を持ち、その速度がやや速いものとなる(図 3 参照)。

ガス円盤の密度	永年共鳴の位置
0.1 倍	2.02AU
0.5 倍	2.89AU
1.0 倍	3.25AU
1.5 倍	3.44AU

表 4: ガス円盤の密度と永年共鳴の位置。最小質量円盤モデルの面密度を 1 とする。

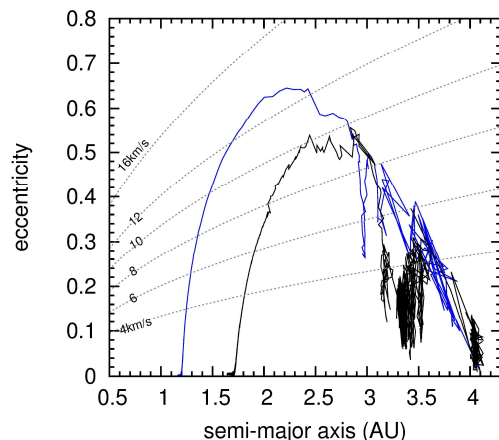


図 3: ガス円盤の密度が最小質量円盤の 1/2 倍(青)と 3/2 倍の時の 300km の微惑星の運動の違い。初期の微惑星位置は 4.1AU。

#### (5) 微惑星の軌道傾斜角

円盤ガスの自己重力を考慮しない過去の研究では、微惑星の軌道傾斜角は共鳴の通過をしても大きくならないことが知られていた(Marzari & Weidenschilling 2002)。

しかし、今回の自己重力を考慮した結果から、微惑星が永年共鳴を通過し、木星に近接するほどの高い離心率を持つことから、微惑星は最大で 15 度程度の軌道の傾きを得ることが新たにわかった(図 4 参照)。このことにより、微惑星の運動が、密度の濃いガス円盤の中心面付近だけではなく、半分程度の時間、ガス密度の低い円盤の上面へ出たものとなることがわかる。ガス密度が低い領域では、微惑星が高速となっても、衝撃波が立たないため、蒸発においてこの効果が影響を持つと考えられるが、円盤から出たとしても、微惑星表面の温度はすぐには下がらないことも考えられるので、今後の研究では、円盤の鉛直方向の構造を考え、微惑星表面の温度の変化を考慮しながら微惑星蒸発を解く必要があると考えられる。

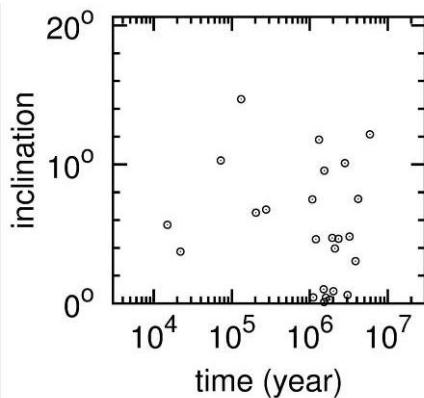


図 4: ガス円盤との相対速度が 10km/s を超えている時間とその時の軌道の傾き。300km の微惑星の場合。

#### (6) 彗星中の結晶質シリケートへの応用

本研究から、木星型惑星がある程度の大きさに形成されているガス円盤中で、小惑星帯に落下してくる微惑星は、ガス円盤に対して 10km/s 程度の相対速度を持つことが明らかとなった。

彗星の中には、結晶質シリケートが含まれていることが知られている。このような彗星中の、高温で形成される物質と、低温を維持した物質の共存の起源ははっきりとしていない。本研究からは、300km サイズを超えるような微惑星の場合、半分程度は蒸発を経験するようなガス円盤との相対速度を得たのちに、木星の散乱を受けて、太陽系の遠方(>1000AU)に飛ばされる現象が見られた。小惑星帯の外側の方の微惑星(3AU ~ 5AU)の氷微惑星の木星摂動による進化が、この結晶質シリケートの起源の一つとなっている可能性が考えられる。

#### < 引用文献 >

Tanaka, K. K., Yamamoto, T., Tanaka, H., et al., Evaporation of icy Planetesimals due to bow Shocks, *The Astrophysical Journal*, 764, 2013, 120(11pp)

Marzari F., & Weidenschilling, S. Mean Motion Resonances, Gas Drag, and Supersonic Planetesimals in the Solar Nebula, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 82, 2002, p.225-242

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

M. Nagasawa, K. K. Tanaka, H. Tanaka, T. Nakamoto, H. Miura, & T. Yamamoto, Revisiting Jovian Resonance Induced Chondrule Formation, *The Astrophysical Journal Letters*, 794, L7, 2014, 5pp, doi:10.1088/2041-8205/794/1/L7, 査読付

〔学会発表〕(計 6 件)

長沢真樹子, 荒川創太, 井田茂, 惑星散乱と潮汐相互作用, 日本惑星科学会, 2015 年 10 月 15 日, 東京工業大学(東京都目黒区)

H. Nomura, D. Ishimoto, M. Nagasawa, K. K. Tanaka, H. Miura, T. Nakamoto, H. Tanaka, T. Yamamoto, Diagnosing Evaporation of Icy Planetesimals in Protoplanetary Disks, *International Astronomical Union*, 2015 年 8 月 10 日, Honolulu (USA)

野村英子, 石本大貴, 長沢真樹子, 田中今日子, 三浦均, 中本泰史, 田中秀和, 山本哲生, 氷微惑星衝撃波加熱の ALMA による観測的検証法, 日本惑星科学連合, 2015 年 5 月 27 日, 幕張メッセ(千葉県幕張市)

長沢真樹子, 田中今日子, 田中秀和, 中本泰史, 三浦均, 山本哲生, 木星の共鳴による微惑星の軌道進化, 日本惑星科学会, 2014 年 9 月 24 日, 東北大学(宮城県仙台市)

長沢真樹子, 原始惑星系円盤内で高速になる微小天体の軌道進化, 日本惑星科学会, 2013 年 11 月 21 日, 石垣島市民会館(沖縄県石垣島市)

田中今日子, 田中秀和, 山本哲生, 三浦均, 中本泰史, 長沢真樹子, 衝撃波による氷微惑星の蒸発とダストの再凝縮過程, 日本天文学会, 2013 年 9 月 12 日, 東北大学(宮城県仙台市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

長澤 真樹子 (NAGASAWA Makiko)

久留米大学・医学部・准教授

研究者番号: 00419847