

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：37104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05642

研究課題名(和文)木星形成に伴う始原天体物質の移動と進化

研究課題名(英文)Orbital evolution of high-speed planetesimals generated by the Jovian formation and their effects on surrounding materials

研究代表者

長澤 真樹子 (Nagasawa, Makiko)

久留米大学・医学部・教授

研究者番号：00419847

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：木星が形成されると、その重力の影響で周辺にある微惑星の速度が上昇する。高速度となった微惑星は原始惑星系円盤内に衝撃波を発生させ、周囲の物質を加熱する。この研究では、どのようなときに微惑星が発見されている結晶質シリケートやコンドリュールと呼ばれる隕石内の粒子が作られるための熱源となるかを軌道計算から調べた。そして現在の木星に近い条件であれば、半径が100 km 程度以上の微惑星によって、結晶質シリケートやコンドリュールを形成できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系形成初期に固体微粒子から惑星が形成される過程では、惑星の物理的な成長だけでなく、様々な物質科学的な進化が起きたと考えられている。しかし、天体力学的な惑星進化と物質進化の関係は、これまで統一的には理解されていなかった。本研究では微惑星の天体力学的な運動と、シリケートの結晶化や、コンドリュール形成のダストの物理化学進化の関係の一端を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：When Jupiter is formed, its gravity increases the speed of the surrounding planetesimals. High-speed planetesimals generate shock waves in the protoplanetary disk and heat the material in the disk. From orbital integration, we investigated the conditions under which planetesimals would be the heat source for crystalline silicates and chondrules. We found that planetesimals larger than 100 km can form crystalline silicates and chondrules, provided that Jovian planet has current Jovian parameters.

研究分野：惑星形成論, 天体力学

キーワード：惑星形成・進化

1. 研究開始当初の背景

原始惑星系円盤内で木星型惑星が形成されると、付近の微惑星（小惑星）は、力学的に強い摂動を受けて運動することが知られている(,)。微惑星の軌道進化計算からは、木星の永年共鳴と呼ばれる効果によって、微惑星の速度は、原始惑星系円盤に対して 10 km/s 程度にもなること、微惑星は地球領域にまで至ることがわかっている()。こうした高速微惑星は原始惑星系円盤内に衝撃波をつくり、シリケイト結晶化()、コンドリュール形成()、氷微惑星自体の蒸発()などの様々な物質科学的な進化を起こすと考えられる。しかし、こうした物質科学的な変化の過程は個別に研究はされているが、木星形成に伴って高速化する微惑星の衝撃波加熱によってどの程度説明できるか統一的には明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、微惑星の天体力学的な軌道計算から、木星という巨大惑星の重力摂動を引き金とした、円盤内での物質の移動を計算し、力学的な進化と様々な物質進化の相互関係を統一的に理解することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 原始惑星系円盤内に木星型惑星が 1 つある状況を考え、この木星型惑星の内側にある微惑星の運動を軌道計算する。木星の質量、原始惑星系円盤の質量、微惑星のサイズ、初期の微惑星の位置をパラメータとする。

(2) 得られた微惑星の軌道要素から、微惑星の衝撃波加熱による氷微惑星蒸発、シリケイトの結晶化、コンドリュール形成が、太陽からどのような距離で行われ、どの程度の期間続くのかを調べる。

4. 研究成果

(1) 成果の典型的な描像

図 1 は微惑星が得た最高相対速度(v)とその位置(r)を示したものである。微惑星半径が 10 km, 50 km, 100 km, 300 km, と大きくなるにつれて、得られる最高速度が大きくなっていき、最高速度となる位置が内側になっていくことがわかる。これは、微惑星が大きいほど原始惑星系円盤から受けるガス抵抗が小さく高い軌道離心率を得られること、高い離心率を保つ時間が長いことで微惑星が太陽方向に移動する時間も長く、より内側まで移動できること、そしてより内側ではケプラー速度が速いこと、の 3 つが本質的な原因と考えられる。

図中の左上がりの線は、木星との起動交差を考えたときに限界となる典型的な速度を示しており、黒いひし形で示した点は、木星との平均運動共鳴にあたる点である。図に示されている速度は微惑星のピーク速度であるが、ピーク速度に達するまでは、微惑星の速度はほぼこのラインに沿って変化している。つまり、3 au にあるときは、微惑星はそのサイズに寄らずに典型的な相対速度の最高値として 3 km/s から 5 km/s 程度の値を持っている。

図中の右上がりの線は、下からそれぞれ氷微惑星の蒸発(実線, IceE), シリケイトの結晶化(点線, SiC), コンドリュール溶融(一点破線, ChM), コンドリュール蒸発(点線, ChE)に必要な衝撃波を起こす微惑星の速度である。

物質の状態変化に関係する 4 本の線と、得られた微惑星速度との比較から、微惑星サイズが 10 km 以上であれば、氷が凝縮する位置であるスノーラインよりも温度が低い領域でも衝撃波加熱によって氷微惑星が蒸発できる、

100 km を超える微惑星は周囲のシリケイトダストを結晶化できる、

100 km を超える微惑星は周囲のダストを加熱してコンドリュール溶融ができる、

1000 km を超える微惑星の場合 2 au 以下ではコンドリュールを蒸発させる可能性がある、

氷微惑星蒸発は地球型惑星領域全体で可能だが、コンドリュール溶融は主に 2.5 au より内側で行われる、

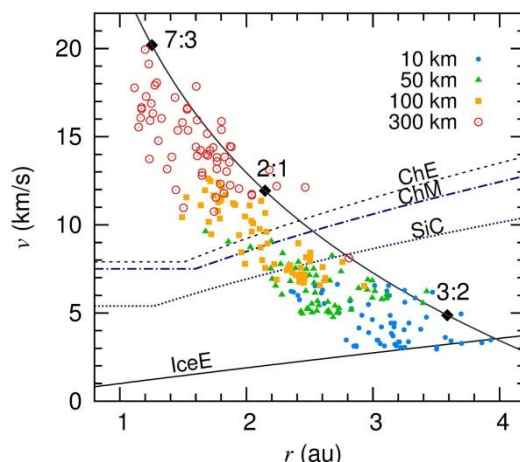


図 1. サイズの異なる微惑星の原始惑星系円盤に対する最高相対速度とその位置。右上がりの線は、氷微惑星の蒸発 (IceE), シリケイトの結晶化 (SiC), コンドリュール溶融 (ChM), コンドリュール蒸発 (ChE) を起こす速度。それぞれ 60 例の結果。

ことがわかる。

これらの結果は各種パラメータに依存し、太陽系の物質進化に対する影響は高い速度の継続時間とも関係している。以下にその詳細を述べる。

(2) 微惑星の初期位置

微惑星は木星型惑星の平均運動共鳴によって離心率が上昇して行く。このため高速度になる微惑星は、木星型惑星の平均運動共鳴が重なり合っている領域にある微惑星である。2:1の共鳴(約3 au)よりも内側にある微惑星は、ガス抵抗で太陽方向に移動する過程で共鳴の位置に来たときにわずかな速度上昇がみられる程度で、その最高速度は4 km/sに満たない。3:1の共鳴(約2.5 au)よりも内側になると、木星摂動による離心率上昇はほとんどなく、ガス抵抗が働かないためほぼ移動もしない。木星に近すぎる微惑星は散乱されてしまうので、周囲に影響を及ぼす微惑星は、2:1共鳴から木星軌道のやや内側までであり、太陽系の場合で3 auから4.2 auである。なお微惑星が木星軌道の外側にある場合は、ガス抵抗によって移動する方向と木星摂動ではじかれる方向が逆となるため、内側にあるときとは描像が異なり、微惑星が広い範囲で周囲に影響を及ぼすようなことはない。

(3) 木星型惑星の質量

微惑星は木星型惑星が成長するまでは周囲に安定に存在していると考えられるが、木星の成長に伴って影響を受けはじめ、円盤との相対速度が上がり移動を開始する。影響を受け始める木星型惑星のサイズ、そして系外における描像を調べるために、木星型惑星の質量を木星の質量の0.1倍、0.3倍、1倍、2倍のときの微惑星最高速度を計算した。

木星質量が大きいほど平均運動共鳴の影響が強く、基本的には木星質量が大きいほど大きい最高速度を得られることになる。ただし、微惑星が長い距離移動できるかどうかは、微惑星が2:1の共鳴に到達できるかどうかで分かれるため、木星型惑星の質量の影響はアナログに変化するものではない。半径100 kmの場合には、2:1の共鳴に到達するには、0.3倍以上の木星質量が必要である。

(4) 木星型惑星の離心率

小さい微惑星が2:1に到達するには永年共鳴の効果が重要であり、永年共鳴の効果は木星の離心率に直接比例する。木星の離心率として0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.3の場合を計算した。木星の離心率が0.03よりも小さいと100 km程度の微惑星の典型的な相対速度は5 km/s程度程度にとどまる。木星離心率が0.1で典型的相対速度は10 km/s程度となる。それ以上になると、木星と微惑星が軌道交差して微惑星は失われやすい。つまり地球から木星の領域で微惑星が周囲に大きな影響を及ぼすのは、木星離心率が0.03から0.1程度のときである。

(5) 木星型惑星の位置

木星型惑星が、1 au, 3 au, 5.2 au, 10 au, 15 au, 20 auの場合に半径100 kmの微惑星の運動を調べた。木星が5.2 auまでは最高速度はほぼ等しく、いずれもシリケートの結晶化やコンドリュール形成に十分な速度となっている。しかし、木星の位置が15 auとなると、半分程度の微惑星は、氷微惑星の蒸発がやっとの速度程度にとどまり、20 auになると、氷微惑星蒸発も厳しい程度の速度しか得られなくなる。これは本質的には、遠方ではケプラー速度が遅いことによる。2:1の共鳴の位置は木星位置の約0.6倍であり、木星が遠方にあると共鳴の位置も遠方になる。遠方ではケプラー速度が距離の2分の1乗に反比例するため、同じ共鳴であっても、その場所における微惑星速度は小さくなる。このために遠方では、木星の位置が遠いほど、最高速度が小さくなる。一方内側の方で木星の位置によって最高速度が変わらないのは、ガス抵抗の強さが関係している。内側はガス面密度が大きいため、ある程度微惑星が高速となると強いガス抵抗で抑えられる効果ははたらくと考えられる。

(6) 原始惑星系円盤の質量

原始惑星系円盤の面密度が最小質量モデルの10分の1, 半分, 1倍, 1.5倍の場合に、100 kmと300 kmの微惑星の運動を調べた。原始惑星系円盤の質量は、ガス抵抗の強さ、永年共鳴の位置、微惑星衝撃波の強さの3点から結果に影響する。複雑に関係していて厳密には表現しにくいのが、ごく大雑把に傾向を述べると、円盤密度が大きいことで全体としてガス抵抗は強くはなるが、永年共鳴の位置が木星に近づくために、共鳴位置でのガス抵抗の大きさはあまり変化せず、微惑星の最高速度の観点ではあまり強い影響は表れない。最高速度となるのは、基本的に木星型惑星の軌道長半径の半分程度の位置であるが、原始惑星系円盤の面密度が最小質量モデルの10分の1になると、永年共鳴の位置がこの位置よりも内側になるために、10 km/sの相対速度となる微惑星はごく限られる。それ以外の場合では、最高速度となる位置における衝撃波の強さは、円盤密度が大きい方が大きい。このことから円盤密度が大きい方が物質進化への影響は大きい。

(7) 継続時間

1つの微惑星が物質進化に影響を及ぼす高速度を出している時間は微惑星半径が大きいほど

大きい。図2に微惑星の半径が50 km, 100 km, 200 km, 300 km, 1000 km の場合に、シリケイトの結晶化(丸印),コンドリュール溶融(三角印)に必要な速度を保っていた継続時間(縦軸)と必要速度が終了した時間(横軸)を示す。微惑星が高速となるタイミングは、平均運動共鳴から外れて移動を開始する時期が微惑星ごとに異なるため、サイズが同じであっても同じではなく幅を持っている。図2では平均値を示している。衝突破壊によって、微惑星は小さいものほど数が多く、大きいものほど数が少なくなることが想像されるが、サイズが小さいものほど、高速度でいる時間は短い。コンドリュール形成は、太陽系形成後(CAI とよばれる隕石ができてから)200 万年程度たってからと考えられている。木星形成の時期は厳密には知られていないが、木星が CAI 形成後 100 万年で形成した場合、200 km を超えるような微惑星(及びその破片)がコンドリュール形成に寄与すると考えられる。

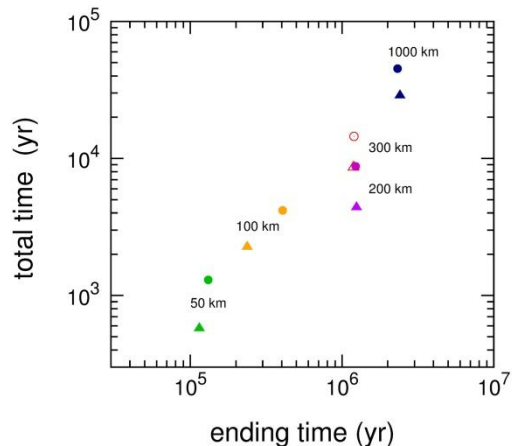


図2.サイズの異なる微惑星がシリケイトの結晶化(印)とコンドリュール溶融(印)に必要な速度となっていた時間。60例の平均値。

(8) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

微惑星による衝撃波加熱が物質学的な進化に対してどの程度の寄与があるかを木星や微惑星の条件に対して系統的に明らかにした。現在のところ本研究に関して出版した論文()の引用は2件にとどまり、インパクトがあったとは認められない。本研究を受けて ALMA 望遠鏡で微惑星蒸発にともなう硫黄系分子を捉える観測も実施されたが、今のところ検出には至っていない。

(9) 今後の展望

木星の影響を受ける微惑星の運動については一通り明らかとなった。今回達成できなかった内容として、衝突を含めた計算が挙げられる。衝突破壊を含めると、衝突でダストなどの周辺物質を生成し、他の高速度微惑星でそのダストを物質学的に進化させる過程、生成されるコンドリュールの総量などが明らかにできると思われる。

< 引用文献 >

Heppenheimer, T. A., Secular Resonances and the Origin of Eccentricities of Mars and the Asteroids, 1980, *Icar*, 41, 76-88

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

Nagasawa, M., Tanaka, K. K., Tanaka, H., Nakamoto, T., Miura, H., & Yamamoto, T., Revisiting Jovian-Resonance Induced Chondrule Formation, 2014, *ApJL*, 794, 7, 5pp

Henning, T., Cosmic Silicates, 2010, *ARA&A*, 48, 21-46

Iida, A., Nakamoto, T., Susa, H., & Nakagawa, Y., A Shock Heating Model for Chondrule Formation in a Protoplanetary Disk, 2001, *Icar*, 153, 430-450

Tanaka, K. K., Yamamoto, T., Tanaka, H., Miura, H., Nagasawa, M., Nakamoto, T., Evaporation of Icy Planetesimals due to Bow Shocks, 2013, *ApJ*, 764, 120, 11pp

Nagasawa, M., Tanaka, K. K., Tanaka, H., Momura, H., Nakamoto, T., Miura, H., Shock-Generating Planetesimals Perturbed by a Giant Planet in a Gas Disk, 2019, *ApJ*, 871, 110, 15pp

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Marzari F., Nagasawa M.	4. 巻 625
2. 論文標題 Influence of general-relativity effects, dynamical tides, and collisions on planet-planet scattering close to the star	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A121 ~ A121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201935065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 野村英子、樋口あや、坂井南美、山本智、長澤真樹子、田中今日子、三浦均、中本泰史、田中秀和、山本哲生、Catherine Walsh、Tom J. Millar	4. 巻 78
2. 論文標題 原始惑星系円盤の有機分子と硫黄系分子：モデルとALMA 観測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 低温科学	6. 最初と最後の頁 165 ~ 172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14943/lowtemsci.78.165	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 田中今日子、長澤真樹子、三浦均、田中秀和、野村英子、中本泰史、山本哲生	4. 巻 78
2. 論文標題 微惑星衝撃波による固体微粒子と微惑星の加熱・蒸発・再凝縮過程	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 低温科学	6. 最初と最後の頁 191 ~ 197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14943/lowtemsci.78.191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagasawa M., Tanaka K. K., Tanaka H., Nomura H., Nakamoto T., Miura H.	4. 巻 871
2. 論文標題 Shock-generating Planetesimals Perturbed by a Giant Planet in a Gas Disk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 110 : 15pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf795	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長澤真樹子
2. 発表標題 中心星近傍での木星型惑星の軌道散乱
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長澤真樹子
2. 発表標題 微粒子の加熱に寄与する高速度微惑星の形成条件
3. 学会等名 日本惑星科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長澤真樹子, 田中今日子, 野村英子
2. 発表標題 系外惑星による系外小惑星の散乱と蒸発
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------