

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540242

研究課題名（和文） 微惑星形成と惑星集積の連続過程に関する理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical study on an unified process of planetesimal formation and accumulation

研究代表者

田中 秀和 (TANAKA HIDEKAZU)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：00282814

研究成果の概要（和文）：惑星形成領域 1AU 以遠における氷ダストから惑星集積に至る連続的な天体合体成長過程と天体動径方向移動とを内部密度進化を考慮し調べた。天体移動の結果、固体天体は 10AU 以内の領域に濃集して km サイズを超えるいわゆる微惑星へと成長し、この微惑星形成領域で、固体面密度はもとの 10 倍程度に増大することが明らかになった。また、天体は非常に空隙率の高い構造をもち、これが微惑星サイズへの成長に役立つ結果となっている。10AU 以内での微惑星面密度の大幅な増大は木星型惑星の形成には都合がよい。

研究成果の概要（英文）：We investigated the growth process from dust grains to planetesimals and their radial migration, taking into account the evolution of their internal density. Because of their radial migration, solid bodies are concentrated inside of 10AU and grow to km-sized planetesimals. In this planetesimal-forming region, the surface density of the solid component is enhanced by a factor of ~ 10 , compared with the original value. The growing solid bodies have a highly porous structure, which helps their growth to planetesimals. The large enhancement in the solid surface density accelerates growth of cores of Jovian planets.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：理論天文学・惑星形成

1. 研究開始当初の背景

(1) 原始惑星系円盤における惑星形成過程において、その第1段階であるダスト成長期に、ダスト移動によって円盤固体成分の大幅な再配置が起こり、これにより微惑星の初期

分布が決定される。円盤固体成分の大幅な再配置はその後の惑星形成過程の描像を定性的に変える可能性がある。

(2) 氷ダスト衝突の数値計算の研究から、氷ダストはサイズによらず付着合体しやすい

ことが示されている。これにより原始惑星系円盤内において氷ダストの合体成長による氷微惑星形成が可能になっている。

2. 研究の目的

(1) ダスト成長、微惑星形成、微惑星集積初期を連続的な天体合体成長過程として捉え、この合体成長過程と天体の円盤内移動とを同時に解くことで、氷微惑星の円盤内初期配置を明らかにする。

(2) 天体合体成長過程で形成される天体は高い空隙率をもつ。天体の円盤内移動は空隙率(または内部密度)に依存するため、本研究では天体内部構造進化も同時に解き明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 氷ダスト成長、氷微惑星形成、微惑星集積初期の天体合体成長過程を円盤動径方向移動や内部密度進化と連立させ解く。ガス抵抗による円盤動径方向移動は天体サイズと内部密度に依存するため、氷微惑星初期配置を明らかにするためには、上記3つを連立させて解くことが不可欠となっている。また、微惑星集積初期の段階では、ガス抵抗の効果は弱まり動径方向移動はほぼ停止するので、この段階での微惑星分布をもって氷微惑星初期配置と考えることができる。

(2) 天体内部密度進化は、衝突合体時における圧縮によって進行する。これには北大グループによって行われたダスト衝突数値計算結果をモデル化し用いる。さらに、ガス動圧や天体自己重力による準静的な圧縮過程も取り入れることを試みる。その際必要となる天体圧縮強度は高空隙率天体の準静的圧縮過程を数値計算を行うことにより求める。天体圧縮の数値計算は、天体衝突計算の数値コードに収縮する周期境界条件と内部圧力測定を新たに導入し行う。

4. 研究成果

(1) ダスト衝突数値計算に基づいた衝突合体・圧縮モデルを質量比のついた衝突に拡張し、天体合体成長過程で起こる任意の衝突に対する衝突圧縮をモデル化した(Suyama et al. 2012)。これを用いることで、本研究における内部密度進化を考慮した氷天体合体成長過程の数値計算を行うことが可能になった。

(2) 円盤内動径方向移動と内部密度進化を考慮したダストからの氷天体成長過程の数値計算を行い、ダスト直接合体成長による氷微惑星形成が可能であることを示した。数値計算結果によると、衝突圧縮が非効率的であるため、ダストは10万分の $1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度の極低密度の天体へと成長することが示された。このような極低密度のおかげで従来問題で

あった中心星への落下効果が抑制され、ダスト直接合体成長による氷微惑星形成が可能となった(Okuzumi et al. 2012)。このように、ダスト直接合体による氷微惑星の形成が可能であることは本研究により初めて示された結果である。

(3) 上記の天体成長過程の数値計算により、微惑星形成領域も明らかになった。計算結果によると、100mサイズの天体をもっとも移動しやすく、その段階で再配置が決まる。円盤外側領域では成長より内側への動径方向移動が卓越するため100mサイズに成長したほとんど全ての天体は内側領域へ落下し失われる。逆に、数AU以内の内側領域では成長が常に卓越し、合体成長により微惑星が形成される。上記のように高空隙率をもつ天体の効果により微惑星形成領域外側境界が10AUまで広がる。これは木星型惑星の固体コア形成には非常に都合がよい(Okuzumi et al. 2012)。

(4) 高空隙率天体の円盤動径方向移動によって微惑星形成領域における初期面密度は、移動前の値に比べて数倍から数10倍程度増大する。この大幅な増大はその後の惑星成長過程を大幅に加速する(Okuzumi et al. 2012)。

(5) 氷微惑星の衝突破壊によって巨大ガス惑星固体コア形成が阻害されることが指摘されている。固体材料物質再配置による惑星集積過程への影響を、微惑星面密度を変えて衝突破壊を考慮した惑星集積数値計算を行うことで調べた。その結果、再配置によって10倍程度微惑星面密度が増加すれば、氷微惑星衝突破壊を考慮しても現在の太陽系の巨大ガス惑星固体コア形成を説明できることを示した(Kobayashi et al. 2011)。

(6) 上記で調べたダスト成長、微惑星形成、微惑星集積初期の氷天体連続合体成長過程では、天体圧縮として衝突合体時のもののみを考慮していた。その結果、衝突圧縮だけでは氷天体内部密度が密な状態の10万分の1以上にはならないという問題があった。そのため、ガス動圧や天体自己重力による準静的な圧縮過程をさらに取り入れ氷天体の進化を再検討した。まず、高空隙率天体の準静的圧縮過程を数値計算を行うことにより、天体の圧縮強度を調べた。多数の圧縮数値計算を行った結果、圧縮強度は空隙率の3乗に比例するという普遍的な経験式が得られた(Kataoka et al. 2013)。

(7) 得られた高空隙率天体の圧縮強度経験式を用いて、氷天体の成長と移動過程を再計算した。円盤内での移動が主に起こる100mサイズの段階では、ガス動圧による静的圧縮が効果的に進行し、その結果天体内部密度は2桁程度上がる。これにより微惑星形成領域は多少狭まり6AUまでとなる。微惑星形成領域における初期微惑星面密度にはこれまで通

り数 10 倍程度増大がみられた。さらに、天体が km サイズ以上に成長すると自己重力による圧縮が効き始め 10km サイズでは空隙率は 90%程度となり彗星やカイパーベルト天体と同程度まで圧縮される。さらなる圧縮は天体が融解することによって進行するであろう (投稿準備中)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① A. Kataoka, H. Tanaka, S. Okuzumi, and K. Wada, Static compression of porous dust aggregates, *Astron. & Astropys.* (査読あり) 2013, in press
- ② K. K. Tanaka, T. Yamamoto, H. Tanaka, H. Miura, M. Nagasawa, and T. Nakamoto, Evaporation of Icy Planetesimals due to Planetesimal Bow Shocks, *Astrophys. J.* (査読あり) 764, 2013, 120, DOI: 10.1088/0004-637X/764/2/120
- ③ C. W. Ormel, S. Ida, and H. Tanaka, Migration Rates of Planets Due to Scattering of Planetesimals, *Astrophys. J.* (査読あり) 758, 2012, 80, DOI: 10.1088/0004-637X/758/2/80
- ④ H. Tanaka, K. Wada, T. Suyama, and S. Okuzumi, Growth of Cosmic Dust Aggregates and Reexamination of Particle Interaction Models, *Prog. of Theor. Phys. Suppl.* (査読あり) 195, 2012, 101-113, DOI: 10.1143/PTPS.195.101
- ⑤ T. Suyama, K. Wada, H. Tanaka, and S. Okuzumi, Geometric Cross Sections of Dust Aggregates and a Compression Model for Aggregate Collisions, *Astrophys. J.* (査読あり) 753, 2012, 115, DOI: 10.1088/0004-637X/753/2/115
- ⑥ S. Okuzumi, H. Tanaka, H. Kobayashi, and K. Wada, Rapid Coagulation of Porous Dust Aggregates outside the Snow Line: a Pathway to Successful Icy Planetesimal Formation, *Astrophys. J.* (査読あり) 752, 2012, 106, DOI: 10.1088/0004-637X/752/2/106
- ⑦ H. Kobayashi, H. Tanaka, and A. V. Krivov, Planetary Core Formation with Collisional Fragmentation and Atmosphere to Form Gas Giant Planets, *Astrophysical J.* (査読あり) 738, 2011, 35, DOI: 10.1088/0004-637X/738/1/35
- ⑧ K. Wada, H. Tanaka, T. Suyama, H. Kimura, and T. Yamamoto, The Rebound Condition of Dust Aggregates Revealed by Numerical Simulation on Their Collisions,

Astrophysical J. (査読あり) 737, 2011, 36, DOI: 10.1088/0004-637X/737/1/36

⑨ S. Okuzumi, H. Tanaka, T. Takeuchi, and M. Sakagami, Electrostatic Barrier against Dust Growth in Protoplanetary Disks. II. Measuring of the Size of the "Frozen" Zone" *Astrophysical J.* (査読あり) 731, 2011, 96, DOI: 10.1088/0004-637X/731/2/96

⑩ S. Okuzumi, H. Tanaka, T. Takeuchi, and M. Sakagami, Electrostatic Barrier against Dust Growth in Protoplanetary Disks. I. Classifying the Evolution of Size Distribution, *Astrophysical J.* (査読あり) 731, 2011, 95, DOI: 10.1088/0004-637X/731/2/95

[学会発表] (計 17 件)

- ①片岡章雅、田中秀和、奥住聡、和田浩二、原始惑星系円盤におけるダストの静的圧縮過程、日本天文学会春季年会、埼玉大学・埼玉、2013年3月22日
- ②谷川享行、町田正博、小林浩、田中秀和、原始惑星系円盤中における固体原始惑星へのダスト・微惑星降着、日本天文学会春季年会、埼玉大学・埼玉、2013年3月22日
- ③片岡章雅、田中秀和、奥住聡、和田浩二、原始惑星系円盤におけるダストの静的圧縮過程、惑星科学会秋季講演会、神戸大学・兵庫、2012年10月26日
- ④藤田智明、玄田英典、小林浩、田中秀和、阿部豊、天体スケールにおける衝突破壊モデルの再検討、惑星科学会秋季講演会、神戸大学・兵庫、2012年10月25日
- ⑤ H. Tanaka, Growth of Dust Aggregates in Protoplanetary Disks and Reexamination of Particle Interaction Models, Workshop on Interstellar Matter 2012, Hokkaido University, Japan, 2012年10月17日
- ⑥奥住聡、田中秀和、ダストの成長・内部密度進化に伴う原始惑星形円盤のオパシティ進化、天文学会 2012年秋季年会、大分大学・大分、2012年9月21日
- ⑦ H. Tanaka, Growth of Dust Aggregates in Protoplanetary Disks and Reexamination of Particle Interaction Models, Planet Formation and Evolution 2011, Ludwig-Maximilians-Universität, Germany, 2012年9月4日
- ⑧ H. Tanaka, Growth of Dust Aggregates in Protoplanetary Disks and Reexamination of Particle Interaction Models(招待講演), Dust and Grains in Low Gravity and Space Environment, ESA/ESTEC, Netherlands, 2012年4月3日
- ⑨ H. Tanaka, Molecular dynamics

simulation of mechanical interaction between sub-micron spherical particles(招待講演), Nonequilibrium Dynamics in Astrophysics and Material Science, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, 2011年11月2日

⑩ 田中秀和、分子動力学計算によるダスト微粒子相互作用の解明、惑星科学会秋季講演会、相模女子大学・神奈川、2011年10月24日

⑪ H. Tanaka, Collisional Growth of Dust Aggregates in Protoplanetary Disks, Extreme Solar System II, Moran, USA, 2011年9月12日

⑫ 田中秀和、ナノ粒子の衝突と転がり摩擦の分子動力学計算、トライボロジー会議2011、オリンピック記念青少年総合センター・東京、2011年5月25日

⑬ 奥住聡、田中秀和、内部密度進化を考慮したダストの合体成長と中心星落下、天文学会2011年春季年会、筑波大学・茨城、2011年3月18日

⑭ H. Tanaka, Numerical Simulation of Dust Aggregate Collisions and Comparison with Laboratory Experiments(招待講演), 第7回太陽系外惑星大研究会、国立天文台三鷹、2011年3月9日

⑮ H. Tanaka, Dust Growth in Protoplanetary Disks, Workshop "Dust in Planetary Systems", Jena Univ., Germany, 2010年10月1日

⑯ H. Tanaka, Dust Growth in Protoplanetary Disks (招待講演), Workshop "Material Circulation in the Early Solar System", Palace Hotel Hakone, Kanagawa, 2010年5月29日

⑰ H. Tanaka, Dust Growth in Protoplanetary Disks (招待講演), JGU Meeting 2010, 幕張メッセ・千葉、2010年5月28日

[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]

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 秀和 (TANAKA HIDEKAZU)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：00282814

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

小林 浩 (KOBAYASHI HIROSHI)

名古屋大学・理学研究科・特任助教

研究者番号：40422761