

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 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740299

研究課題名（和文）粒子シミュレーションによるダストから微惑星への成長進化モデルの構築

研究課題名（英文）Construction of a growth model of dust to planetesimals by numerical N-body simulation

研究代表者

和田 浩二（WADA KOJI）

千葉工業大学・惑星探査研究センター・上席研究員

研究者番号：10396856

研究成果の概要（和文）：サブミクロン粒子からなるダストアグリゲイトから微惑星への成長進化モデルを構築するために、精緻なダストアグリゲイトの衝突数値シミュレーションを行った。とくに、跳ね返り・アグリゲイトの質量比の効果・粒子のサイズ分布の効果が成長過程に及ぼす影響を調べた結果、氷ダストアグリゲイトは原始惑星系円盤内で成長可能であるが、岩石ダストの成長は依然困難であることが示された。ダストから微惑星への成長過程を探る上ではより広いパラメータスタディや他の要素を考慮する必要がある。

研究成果の概要（英文）：I carried out numerical simulations of collisions between dust aggregates consisting of submicron grains to construct a growth model of dust to planetesimals in protoplanetary disks. In particular, I focus on the effects of bouncing process, the mass ratio of colliding aggregates, and the monomer size distributions in aggregates. As a result, I found that icy dust aggregates are able to grow in protoplanetary disks, but silicate dust aggregates are still difficult to grow. We need study more in wider ranges of parameters and the effects of other factors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：惑星科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星形成・進化，衝突，ダスト，微惑星

1. 研究開始当初の背景

現在の惑星形成論の筋書きは、原始惑星系円盤においてダスト（ μm 以下の固体微粒子の集合体即ちアグリゲイトになっている）が衝突合体しながらやがて km 以上の微惑星に成長し、その微惑星が集積することで惑星が形成される、というものである。しかしな

がらダストから微惑星への進化過程は不明な点が多く、その解明は惑星形成論において重要課題と位置づけられている。

ダストの直接合体成長による微惑星形成過程が抱える問題としては、必然的に経験する高速衝突（数十 m/s ）において成長できるのか？成長に時間が掛かり過ぎて中心星へ落下してしまうのではないかなどがある。

また、ドイツのグループによるアグリゲイト衝突の室内実験において、低速($\sim 1\text{m/s}$ 以下)衝突では跳ね返りそれ以上成長できないという結果が報告されている [Blum & Wurm 2008, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 46, 21]. このことはダスト成長に対する深刻な障壁を意味するが、跳ね返る原因・機構については不明である。

このようなダスト成長問題に対して、研究代表者はこれまでサブミクロン粒子からなるダストアグリゲイト同士の衝突数値シミュレーションを行い、ダストの構造 (密度やフラクタル次元) 進化過程や合体成長の可能性について検討してきた。研究代表者が開発してきた数値計算コードは、アグリゲイトを構成する個々の粒子の運動を計算する N 体計算であり、アグリゲイトの力学構造と衝突時における振る舞いの精緻なシミュレーションが可能である。これまで、衝突圧縮過程ではフラクタル次元が 2.5 に留まり低密度のダストひいては微惑星が形成されることや、氷ダストアグリゲイトならば成長の臨界衝突速度は 50m/s 程度であり氷微惑星の形成は可能であることが示唆されつつあったが、さらに岩石ダストの成長問題や跳ね返り問題など多くの課題が残されていた。

2. 研究の目的

本研究課題においては、ダストアグリゲイトの成長問題に対してこれまで考慮されてこなかった様々な要素の影響を評価し、ダストから微惑星への形成過程のモデルを構築することを目的とした。とくに、(1) 低速度衝突において跳ね返りが生じる条件を明らかにすること、(2) 質量比の異なるアグリゲイト同士の衝突の影響を評価すること、(3) アグリゲイトを構成する粒子がサイズ分布を持つことによる影響を評価すること、に焦点を絞ってダストアグリゲイトの衝突シミュレーションを行った。

3. 研究の方法

これまでの研究に用いた数値計算コードを用いて、ダストアグリゲイトの衝突シミュレーションを行う。

(1) の跳ね返り問題においては、配位数が異なる様々な氷・岩石アグリゲイトを初期条件として衝突させ、衝突速度と配位数 (空隙率) をパラメータとして跳ね返る条件を明らかにする。(2) の質量比の異なるアグリゲイト同士の衝突においては、数百から数十万個の氷粒子からなる BPCA 構造のアグリゲイトを用意し、その質量比を 1 : 1 から 1 : 64 まで振って衝突シミュレーションを行うことで質量比の効果を調べる。(3) の構成粒子

のサイズ分布の影響を調べるために、観測されている星間ダストの冪分布 (冪の値が -3.5 の冪分布) に従って粒子サイズ分布を与えたアグリゲイトを用意し、粒子数も振ってそれらの衝突シミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) アグリゲイトが跳ね返るためにはエネルギー散逸を抑える仕組みが必要となる。アグリゲイトの衝突においては、粒子間の転が

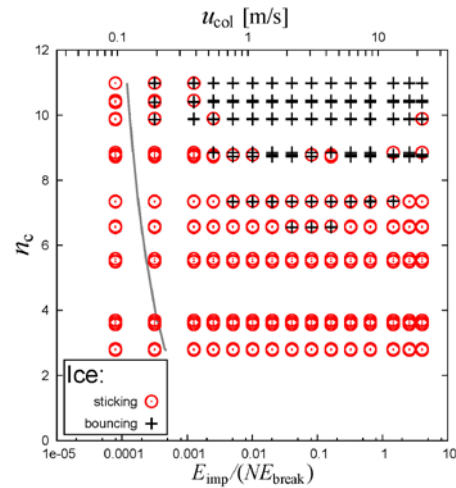


図 1: 氷ダストアグリゲイト同士の衝突の付着・跳ね返り結果のまとめ。初期アグリゲイトの配位数 n_c (縦軸) と衝突エネルギー E_{imp} (横下軸) あるいは衝突速度 u_{col} (横上軸) に対して、付着した場合を赤丸、跳ね返った場合を黒十字で示す。衝突エネルギーは粒子数 N と付着粒子ペアを引きはがすのに必要なエネルギー E_{break} を用いて規格化した。灰色の線は $E_{\text{imp}} = E_{\text{break}}$ となる境界を示す。この結果から $n_c > 6$ の場合には衝突速度に依らず跳ね返ることが分かる。

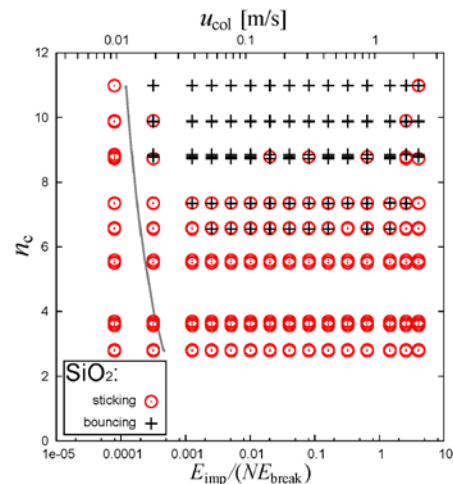


図 2: 岩石ダストアグリゲイト同士の衝突の付着・跳ね返り結果のまとめ。見方は図 1 と同様。やはり $n_c > 6$ の場合には衝突速度に依らず跳ね返ることが分かる。

りやスライドなど粒子がある程度自由に動くことによってエネルギーが散逸される。仮説としては、「配位数」が十分多い、つまり一つの粒子に多くの粒子が付着していれば粒子が自由に動けずエネルギー散逸が不十分となり、アグリゲイトが跳ね返るのではないかと考えられる。数値シミュレーションの結果、物質・構造・衝突速度によらず、配位数が6以上であればアグリゲイトは跳ね返ることが明らかにされた(図1, 2)。さらに衝突の結果ダストアグリゲイトは配位数が4以下にしかなりえないことが明らかになり、得られた跳ね返り条件からダストは原始惑星系円盤内では跳ね返ることなく合体成長可能であることが示唆された。

(2) これまでは等質量のダストアグリゲイト同士の衝突を考慮してきたが、実際の原始惑星系円盤では、質量比の異なるダストアグリゲイト同士の衝突が頻繁に生じると考えられる。質量比が異なることのメリットは、オフセット衝突がある程度まで正面衝突的となることであり、正面衝突ではアグリゲイ

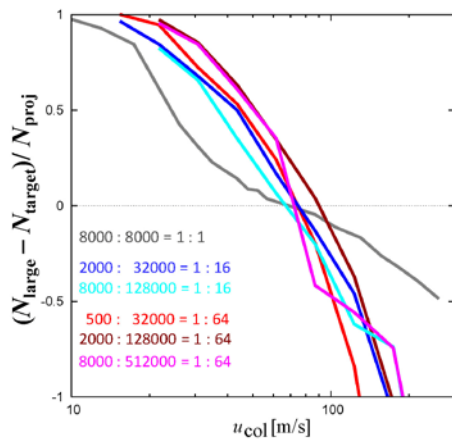


図3: 様々な質量比 (1:1, 1:16, 1:32) の氷ダストアグリゲイト同士の衝突における、成長効率 $(N_{\text{large}} - N_{\text{target}}) / N_{\text{proj}}$ を衝突速度に対して表示したもの。ここで N_{large} は最大衝突破片の粒子数、 N_{target} は大きいほうの初期アグリゲイト(標的)の粒子数、 N_{proj} は小さいほうの初期アグリゲイト(弾丸)の粒子数。成長効率とは即ち標的アグリゲイトが成長するかどうかを示すもので、正なら成長を負なら削剥されたことを意味する。質量比が大きくなるほど、標的アグリゲイトを破壊することが困難な傾向になることが分かる一方、成長効率が0となる速度即ち成長臨界速度は質量比に殆ど依らず、100m/s以下に留まることが示されている。この結果をスケージング則に当てはめると、岩石ダストアグリゲイトの成長臨界速度は高々10m/sに過ぎないことになり、質量比を大きくとることは岩石ダストの成長にはあまり寄与しないことが示唆される。

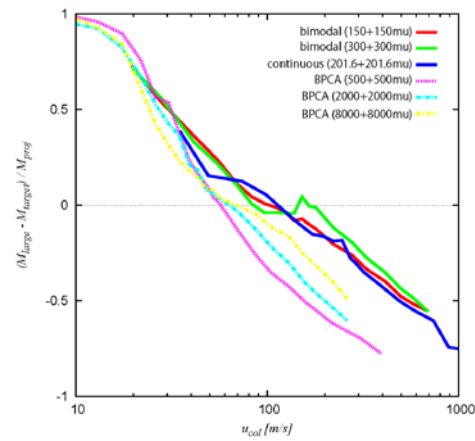


図4: 粒子サイズ分布を持った氷アグリゲイト同士の衝突(実線)と、等サイズ粒子からなる氷アグリゲイト同士の衝突(破線)における成長効率を衝突速度に対して表示したもの。粒子サイズ分布としては、冪の値が-3.5の冪分布を仮定し、大小2種類(二極分布)の粒子で構成したもの(赤線、緑線)と連続分布で構成したもの(青線)を表示してある。結果として、粒子数依存性や二極分布・連続分布の違いによる顕著な差は見られなかったが、サイズ分布を付けたことによって成長臨界速度が増加する傾向が示唆された。

トは成長が比較的容易になることが知られている。したがって、質量比がつくことで成長が容易になることが予想される。そこで、数百から数十万個の氷粒子からなるBPCA構造のアグリゲイトを用意し、その質量比を1:1から1:64まで振って衝突シミュレーションを行うことで質量比の効果を調べた。最近の研究によれば、円盤中では質量比が1:10程度の衝突が支配的であることが示されており、本研究で与える質量比は妥当な範囲である。結果として、質量比がつくことでアグリゲイトは効率よく付着・成長することが可能であるが、成長臨界衝突速度については等質量衝突に比べて明瞭に大きくはならないことが分かった(図3)。また、密度構造も衝突地点付近が局所的に圧縮されるが全体としては圧縮されないことが分かった。

(3) 観測されている星間ダストの冪分布(冪の値が-3.5の冪分布)に従って粒子サイズ分布を与えたアグリゲイトを用意し、粒子数も振ってそれらの衝突シミュレーションを行い、粒子サイズ分布の影響を調べた。結果として、サイズ分布を付けたことでよりアグリゲイトは付着成長しやすくなり臨界成長速度も上昇するという傾向が見られた(図4)。これは小さな粒子が多数存在することでアグリゲイトの強度が増したことが原因と考えられる。さらに、衝突によって生じる多数の破片について調べたところ、破片を構成す

る粒子はもとのアグリゲイトに比べて大きなものの割合が大きいことが分かり、ダストの構造進化過程と観測への示唆が得られるに至った。

以上の結果を総合すると、ダストアグリゲイトは跳ね返ることなく衝突付着で成長し、とくに氷ダストであれば、高速衝突であっても原始惑星系円盤内で成長可能であることが分かった。さらに、このような成長過程におけるダストは圧縮が困難であり非常に大きな空隙率を保ったまま成長する。このような高空隙率構造は、中心星へ落下する前にダストが成長することを可能とし、無事微惑星が形成されることが判明した。しかしながら現時点では依然岩石ダストアグリゲイトでは成長が困難であることが示唆されており、その解決に向けてさらなる研究が必要である。その一つとして粒子のサイズ分布は大きな役割を果たすであろうことから、さらに様々なサイズ分布について検討を進めることが肝要であると考えられる。また粒子間焼結の効果など他の要素を考慮した研究も必要であろう。

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 8 件)

- ① Suyama, T., Wada, K., Tanaka, H., and Okuzumi, S., 2012, Geometrical cross sections of dust aggregates and a compression model at aggregate collisions. *Astrophys. J.*, in press, 査読有.
- ② Okuzumi, S., Tanaka, H., Kobayashi, H., and Wada, K., 2012, Rapid coagulation of porous dust aggregates outside the snow line: A pathway to successful icy planetesimal formation. *Astrophys. J.*, in press, 査読有.
- ③ Tanaka, H., Wada, K., Suyama, T., and Okuzumi, S., 2012, Growth of cosmic dust aggregates and reexamination of particle interaction models. *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, in press, 査読有.
- ④ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2011, Numerical simulations of collisions of dust aggregates with size distributions. 第 29 回 Grain Formation Workshop/平成 23 年度銀河のダスト研究会集録, 印刷中, 査読無.
- ⑤ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2011, The Rebound Condition of Dust Aggregates Revealed by Numerical Simulation on their Collisions. *Astrophys. J.* 737, 36 (12pp), 査読有.
- ⑥ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2011, Growth Efficiency of Dust Aggregates Through Collisions with a Great Difference in Their Sizes. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 42nd, #1730. 査読無.
- ⑦ Yamamoto, S., Wada, K., Kobayashi, H., Kimura, H., Ishiguro, M., and Matsui, T., 2010, Collisional process on Comet 9/P Tempel 1: mass loss of its dust and ice by impacts of asteroidal objects and its collisional history. *Earth Planet. Space* 62, 5-11. 査読有.
- ⑧ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2010, Collisional Growth Possibility of Dust Aggregates: A Bouncing Problem. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 41st, #1717. 査読無.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 和田浩二, 田中秀和, 陶山徹, 木村宏, 山本哲生, Numerical simulation of collisions of dust aggregates with monomer size distributions, 第 8 回太陽系外惑星大研究会, 熱海, 2012 年 4 月 19 日.
- ② Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., Numerical Simulation of Collisions of Dust Aggregates Composed of Particles with Size Distributions, Dust and Grains in Low Gravity and Space Environment, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands (4 April 2012).
- ③ 和田浩二, 田中秀和, 陶山徹, 木村宏, 山本哲生, サイズ分布のある粒子からなるダストアグリゲイトの衝突シミュレーション, 第 29 回 Grain Formation Workshop/平成 23 年度銀河のダスト研究会, CPS, 神戸, 2011 年 11 月 10 日.
- ④ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2011, Numerical Simulation of Dust Aggregate Collisions: Current Understandings and Future Perspectives, Asia Oceania Geosciences Society 8th Annual Meeting, Taipei International Convention

- Center, Taipei, invited talk (9 August 2011).
- ⑤ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2011, Growth Efficiency of Dust Aggregates Through Collisions with a Great Difference in Their Sizes, Lunar Planet. Sci. Conf. 42th, Woodlands, TX, USA (8 March 2011).
 - ⑥ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2010, To Bounce, or Not to Bounce: That is the Question of Dust Aggregates, Recent Progress in Physics of Dissipative Particles. - From fine powders to macroscopic behaviors of granular particles -, November 25, 2010, Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto University.
 - ⑦ 和田浩二, 田中秀和, 陶山徹, 木村宏, 山本哲生, ダストアグリゲイト同士のDEM衝突シミュレーション, 「粉体物理学を惑星科学の接点」ワークショップ, 惑星科学研究センターセミナー, 神戸大学 (2010年11月23日).
 - ⑧ 和田浩二, 田中秀和, 陶山徹, 木村宏, 山本哲生, サイズ比のついたダストアグリゲイトの衝突, 「天体の衝突物理の解明」研究会(VI), 北海道大学低温科学研究所, (2010年11月5日).
 - ⑨ 和田浩二, 田中秀和, 陶山徹, 木村宏, 山本哲生, ダストアグリゲイトの衝突シミュレーション: サイズ比の効果, 日本惑星科学会秋季年会, 名古屋大学 (2010年10月6日).
 - ⑩ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2010, To Be Planetesimals, or Not to Be: That is the Question of Dust Aggregates?. Numerical Simulations of Dust Aggregate Collisions, in Japanese-German Workshop "Dust IN Planetary Systems", September 29 2010, Jena, Germany.
 - ⑪ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2010, A dust aggregate model based on numerical simulations of aggregate collisions, 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, solicited talk (23 July 2010).
 - ⑫ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2010, Numerical Simulations of Collisions between Different-sized Dust Aggregates, Asia Oceania Geosciences Society 7th Annual Meeting, Hyderabad,

India (9 July 2010).

- ⑬ 和田浩二, 田中秀和, 陶山徹, 木村宏, 山本哲生, To be or not to be: That is the question of dust aggregates, 2010年度第1回CPSセミナー, CPS/神戸大学(2010年6月16日).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 浩二 (WADA KOJI)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・上席研究員

研究者番号: 10396856

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし