

平成22年 6月10日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740247

研究課題名 (和文) 衝突数値シミュレーションによる太陽系小天体の構造進化モデルの構築

研究課題名 (英文) Construction of a structure evolution model of small solar system bodies by numerical simulations of aggregate collisions

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)：彗星や小惑星といった太陽系小天体は、原始惑星系円盤中でミクロン以下のサイズの塵(ダスト)が合体成長して形成された微惑星の名残であると考えられている。本研究ではダスト同士の衝突過程の数値シミュレーションを行うことで、微惑星および小天体の構造進化モデルを構築することを試みた。結果としてダスト同士の衝突合体によって超低密度の微惑星が形成され、それが現在見られる小天体の低密度構造の一因であることが明らかとなった。

研究成果の概要 (英文)：Small solar system bodies, such as comets and asteroids, are considered to be remnants of planetesimals formed through collisional growth of dust aggregates consisting of submicron grains in a protoplanetary disk. We carried out numerical simulations of collisions of dust aggregates to construct a structure evolution model of planetesimals and small solar system bodies. We reveal that very low density planetesimals are inevitably formed as a result of collisional growth of dust aggregates and such process leads small solar system bodies to have low density structures we observe at present.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
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

(1) 惑星形成論に則れば、現在の太陽系に存在する彗星などの小天体は惑星に集積し

なかった微惑星の名残であり、小天体の構造には原始惑星系円盤中の微惑星の形成過程の情報が直接反映されていると考えられる。さらに、微惑星はダスト(μm 以下のサイズ

のダスト粒子が多数合体してアグリゲイトをなす)の合体成長によって形成されたものであり、その構造には形成当時のダストの構造が反映されていると考えられる。しかしながら、ダストの成長過程における密度構造の詳細は不明であり、これが微惑星形成過程に大きな不定性を生んでいる。

(2) 近年の惑星探査や観測によって彗星や小惑星の表面の様相が明らかになりつつあり、さらにそれら小天体の空隙率は非常に大きいという結果が得られている(例えば Wild 2 彗星の密度は 0.36 g/cm^3 程度しかない)。特に空隙率の大きな密度構造は、従来の枠組み(ダストを成長段階にかかわらず密な球と考える)では取り扱えない。また、そのような高空隙・低重力天体上に形成される衝突クレーターは通常見られる御椀型ではない奇妙な形状であった。このような観測結果を小天体すなわち微惑星の形成過程から説明する理論モデルを構築することが必要とされてきた。

2. 研究の目的

本研究では、ダストアグリゲイトの衝突シミュレーションを行うことで、惑星形成論において未解決かつ重要な問題であるダストから微惑星への成長・形成過程を明らかにし、その密度構造進化過程をもとに微惑星や小天体の形成進化について議論することを目的とする。こういった観点から太陽系小天体の密度構造を論じる研究は類を見ないものである。

3. 研究の方法

本研究課題の主な研究方法は、ダストアグリゲイトの衝突数値シミュレーションを行うことである。申請者らが開発してきたN体コードは、粒子の弾性および分子間力を考慮した粒子間相互作用を適切にモデル化しており、 0.1 ミクロン の粒子多数からなるダストアグリゲイトの運動を高精度に追えるものである。具体的には以下のような状況のシミュレーションを行った：

(1) 様々なサイズ・密度のダストアグリゲイトを模して Ballistic Cluster-Cluster Aggregation (BCCA) 構造および Ballistic Particle-Cluster Aggregation (BPCA) 構造

のアグリゲイトを準備しそれらを衝突させる。BCCA 構造は原始惑星系円盤内で形成される低密度ダストを模擬したものであり、BPCA 構造はコンパクトなダストを模擬したものである。

(2) 粒子の配位数をパラメータとして振ることによっても異なる密度のアグリゲイトを準備し、それらの衝突シミュレーションを行った。

(3) 主として BPCA 構造のアグリゲイトにより異なるサイズの衝突シミュレーションを行った。サイズ比の異なる衝突はダストが成長し微惑星形成に至るまでに必然的に生じる過程であると考えられる。

4. 研究成果

主な成果は以下のとおりである：

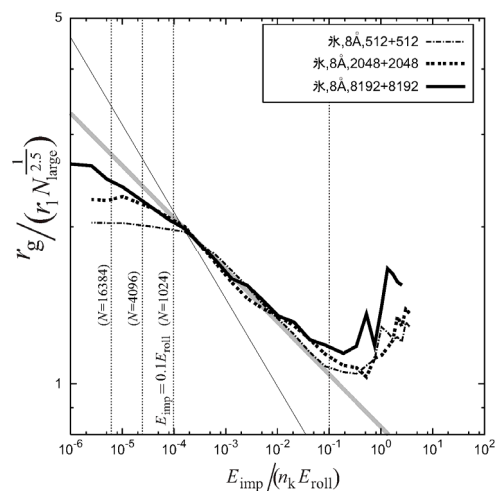


図1：BCCA アグリゲイトの衝突圧縮。縦軸・横軸はそれぞれ規格化した回転半径・衝突エネルギーを表す。灰色太線がフラクタル次元 2.5 に圧縮される場合の理論線を示す。

(1) もともとフラクタル次元が2以下のふわふわなダストアグリゲイトは衝突によって圧縮されるが、そのフラクタル次元は 2.5 程度にとどまることが明らかとなった(図1)。すなわち衝突による圧縮には限界があり、結果として低密度のままダストは成長し、他の圧密過程を考えなければ 10^{-4} g/cm^3 という超低密度(空気より軽い!)な微惑星が形成されることが示唆された(図2)。

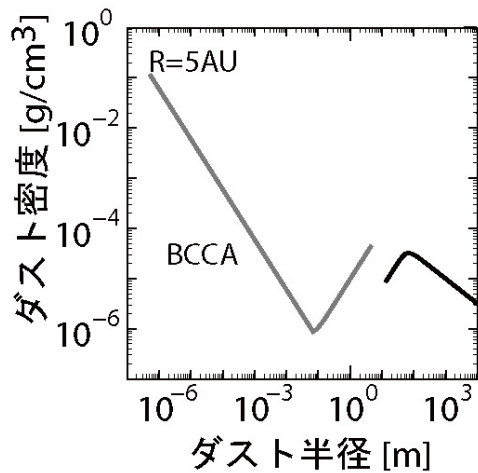


図 2：原始惑星系円盤内（中心星から 5AU の距離）におけるダストの成長（横軸）と密度変化（縦軸）。

(2) ある程度圧縮されたダスタグリゲイトは、成長途上で高速衝突を経験すると予想される。そのようなアグリゲイトに対し、破壊が卓越し成長が阻害される衝突速度すなわち臨界速度を調べた結果、氷アグリゲイトの場合サイズによらずおよそ 50m/s であった（図 3）。これは原始惑星系円盤中で達成される最大衝突速度と同程度かそれ以上である。したがって少なくとも氷ダストは衝突合体成長が可能であり、微惑星形成に至ることが示唆される。

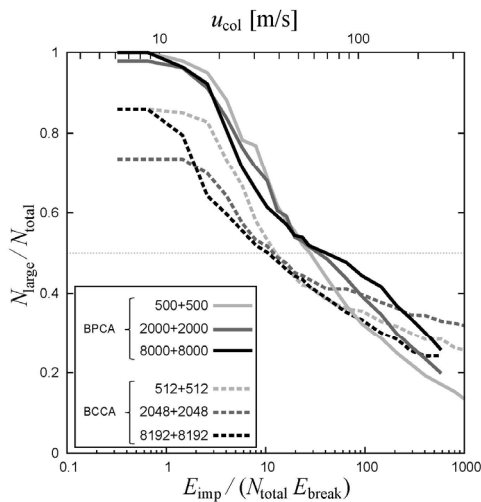


図 3：衝突エネルギー（横下軸）または衝突速度（横上軸）に対する氷アグリゲイトの破壊効率（縦軸）。破壊効率が 0.5 以上であれば衝突により成長できることを意味する。

(3) ダストは衝突しても跳ね返ってしまい合体成長が妨げられるかもしれないが、シミュレーションの結果から粒子の配位数が 6

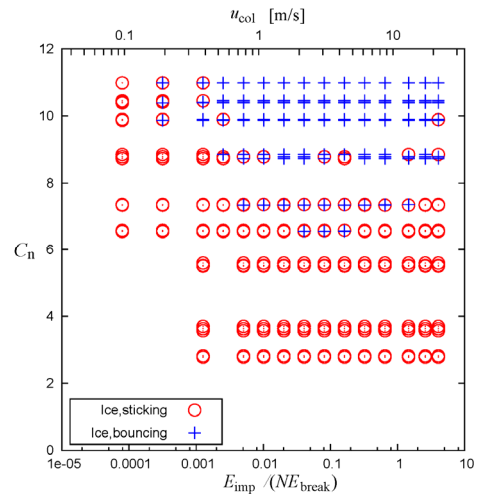


図 4：衝突エネルギー（横軸）とアグリゲイトの平均配位数（縦軸）の組み合わせに対する衝突結果。赤丸は付着、青十字は跳ね返ったことを示す。

以下であれば跳ね返らずに付着することが示された（図 4）。これは従来の室内実験の結果に対して重要な示唆を与えるものである。本研究のシミュレーション結果によれば衝突によって成長するダストは配位数が 4 以下であることが示されている。したがってダストは跳ね返ることなく合体成長できることが示唆される。

(4) サイズ比が大きくなればなるほど、圧密される領域は局所的になるがその圧密合いは大きいものではなく衝突での圧密は難しいことが示され、そのような過程で形成されるクレーターから放出されるイジェクタは少量であることが明らかになった。またサイズ比によって成長限界速度自体はほとんど変わらない（氷アグリゲイトで ~50m/s）が、成長限界速度より小さい衝突速度ではサイズ比が増すほどより成長しやすくなること、が明らかとなった（図 5）。

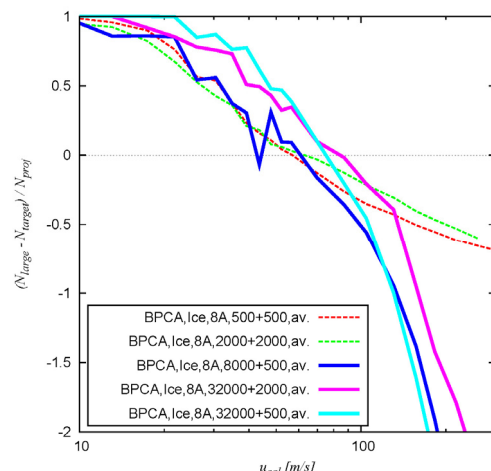


図 5：衝突速度（横軸）に対する成長効率（縦軸）。点線は同サイズの衝突、実線がサイズ比を付けた衝突の結果。

総じて、本研究によってダストの衝突成長過程を通じて形成される微惑星および小天体は極端に低密度としか成り得ないことが結論された。現在観測される小天体の密度は低密度とはいえ空気より軽いというような超低密度ではない。したがって、現在の密度になるためには円盤ガス圧による圧縮や熱的変性など衝突以外の過程も重要であることが考えられる。今後の展開としてはそれら衝突以外の過程による寄与を定量的に評価することで小天体の進化過程の理解がより進んだものとなり、小天体=始原天体探査計画へも貢献することが期待される。

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 11 件)

- ① 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. 41th*, #1717 (CD-ROM), 査読無.
- ② 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 ices by impacts of asteroidal objects and its collisional history, *Earth Planet. Space*, 62, 5-11, 査読有.
- ③ 和田浩二, つぶらな衝突, 2009, 日本惑星科学会誌 (遊・星・人), Vol. 18, No. 4, 216-225, 査読有.
- ④ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2009, Collisional Growth Conditions for Dust Aggregates. *Astrophys. J.*, 702, 1490-1501, 査読有.
- ⑤ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2009, Numerical Simulation of Dust Aggregate Collisions: Growth and Disruption of Dust Aggregates, *Proceedings of the International Conference on Exoplanets and Disks*, pp. 103-106, 査読無.
- ⑥ 山本哲生, 和田浩二, 小林浩, 木村宏, 田中今日子, 田中秀和, 2009, 惑星系円盤ダストの物理過程, *天文月報* Vol. 102, No. 2, 118-126, 査読無.
- ⑦ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2009, Growth and disruption of dust aggregates by Collisions, *Proceedings*

of Cosmic Dust . Near & Far 2008 in Astoronomical Society of the Pacific, in press, 査読無.

- ⑧ 陶山徹, 和田浩二, 田中秀和, 2008, 合体成長過程におけるダスト圧縮過程の数値計算とその定式化, 日本惑星科学会誌 (遊・星・人), Vol. 17, No. 3, 177-184, 査読有.
- ⑨ Suyama, T., Wada, K., and Tanaka, H., 2008, Numerical simulation of density evolution of dust aggregates in protoplanetary disks. I. Head-on collisions, *Astrophys. J.*, 684, 1310-1322, 査読有.
- ⑩ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2008, Numerical Simulation of Dust Aggregate Collisions. II. Compression and Disruption of Three-Dimensional Aggregates in Head-on Collisions. *Astrophys. J.*, 667, 1296-1308, 査読有.
- ⑪ Yamamoto, S., Kimura, H., Zubko, E., Kobayashi, H., Wada, K., Ishiguro, M., and Matsui, T., 2008, Comet 9P/Tempel 1: Interpretation with the Deep Impact Results. *Astrophys. J.*, 673, L199-L202, 査読有.

[学会発表] (計 12 件)

- ① Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., Collisional Growth Possibility of Dust Aggregates: A Bouncing Problem, *Lunar Planet. Sci. Conf. 41th*, Woodlands, TX, USA (2 March 2010).
- ② 和田浩二, 田中秀和, 陶山徹, 木村宏, 山本哲生, Bouncing Conditions and Collisional Growth Possibility of Dust Aggregates, 第 6 回太陽系外惑星大研究会, 国立天文台 (2010 年 1 月 18 日).
- ③ 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跳ね返り条件, 「天体の衝突物理の解明」研究会 (V), 北海道大学低温科学研究所 (2009 年 11 月 13 日).
- ④ 和田浩二, ダストアグリゲイト衝突シミュレーション, 第 25 回 Grain Formation Workshop/平成 21 年度銀河のダスト研究会, 大阪産業大学梅田サテライト教室 (2009 年 10 月 9 日).
- ⑤ 和田浩二, つぶらな衝突, 日本惑星科学会秋季年会, 東京大学 (2009 年 9 月 29 日).
- ⑥ 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

による付着・反発・破壊，日本地球惑星科学連合大会，幕張（2009年5月19日）。

- ⑦ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2009, Numerical Simulation of Dust Aggregate Collisions: Growth and Disruption of Dust Aggregates. Exoplanets and Disks: Their formation and Diversity, The 2nd Subaru International Conference, Keauhou, Hawaii, USA (11 March 2009).
- ⑧ 和田浩二，田中秀和，陶山徹，木村宏，山本哲生，衝突によるダストの破壊と成長，日本惑星科学会秋季年会，九州大学（2008年11月3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による破壊過程と成長効率，「天体の衝突物理の解明」研究会(IV)，北海道大学低温科学研究所（2008年9月29日）。
- ⑩ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2008, Growth and disruption of dust aggregates by collisions, Cosmic Dust - Near & Far, Heidelberg, Germany (11 September 2008).
- ⑪ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2008, Numerical Simulation of Dust Aggregate Collisions: Compression and Disruption of 3D Aggregates, Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting, Busan, Korea (18 June 2008).
- ⑫ 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による付着と破壊，日本地球惑星科学連合大会，幕張（2008年5月30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