

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540459

研究課題名(和文) 粒子シミュレーションによる小惑星表層の衝突進化過程の解明

研究課題名(英文) Understanding the evolution of asteroidal surfaces caused by impacts using numerical simulation for granular particles.

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・首席研究員

研究者番号：10396856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：小惑星ならびに微惑星の表層は微小重力下の高空隙粉体層である。離散要素法等を用いた衝突数値シミュレーションを行うことで、そこで生じる天体衝突過程を明らかにし、小惑星ならびに微惑星進化に及ぼす天体衝突の影響を評価することが本研究の目的である。研究の結果、衝突天体が潜り込む貫入過程における抵抗則が明らかとなり、また衝突によって生じるイジェクタの総量は衝突天体の運動量に概ね比例することが明らかとなった。これらの結果から、天体衝突による成長と削剥のバランスによって決まる小惑星表層進化過程をより定量的に考察することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：The surfaces of asteroids and planetesimals are highly porous granular layers under small gravity. We conducted numerical simulations of impacts onto such layers using a numerical code, so-called Distinct Element Method in order to evaluate influences of celestial body impacts on the evolution of asteroids and planetesimals. Our results show that a projectile in penetrating granular layer is affected by a drag force consisting of an inertia term and a viscous term and that the total amount of ejecta mass at impact is proportional to the projectile momentum. These results allow us to quantitatively discuss on the evolution of asteroidal surfaces which is determined by the balance between addition and erosion of impact bodies.

研究分野：天体衝突現象をはじめとする惑星科学

キーワード：天体衝突 数値シミュレーション 粉体 小惑星

1. 研究開始当初の背景

惑星をはじめとする太陽系天体の形成史は天体衝突の歴史といっても過言ではない。ミクロンサイズのダストの衝突合体による km サイズの微惑星形成、さらには微惑星の衝突集積過程を経て惑星形成に至るまで、全て衝突が関与する。小惑星の形成進化も例外ではない。近年の「はやぶさ」をはじめとする小惑星探査によっても明らかにされつつあるように、小惑星の多くは集積成長した大きな天体が破壊された時の破片が微小重力下で集積したいわゆるラブルパイルであると考えられている。さらに小惑星表層にはその集積時の衝突の痕跡のみならずその後の進化における天体衝突過程が刻まれている。小惑星は微小重力下にある高空隙粉粒体と考えられるが、そこに刻まれた衝突過程を読み解くことが、小惑星表層進化を理解するうえで必要となってくる。しかしながら、微小重力下高空隙粉体層への室内衝突実験を行うことは困難であり、実験的研究では数例があるのみである。そこで、研究代表者である和田が離散要素法によって微小重力下高空隙粉体層への衝突の数値シミュレーションを行うことで、そのような衝突の物理素過程を明らかにし、微惑星や小惑星の進化過程に迫ろうというものである。

2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえ、申請者は、これまで行ってきた粉体層への衝突シミュレーションを改良・発展させ、微小重力下高空隙粉体層への衝突過程へ適用し、小惑星表層の天体衝突の素過程について明らかにすることが目的である。得られた結果は実験との比較検証を可能とし、より広範囲に適用できるスケージング則の構築を目指すこととする。具体的には天体衝突貫入過程およびイジェクタ放出過程を明らかにする。天体衝突緩急過程は、集積する破片天体が小惑星にどれだけ貫入できるかを明らかにすることにつながり、表層更新・保持過程を解明するうえで必要な素過程である。また、衝突に伴って生じる放出破片（イジェクタ）の総量は、再堆積や再集積するイジェクタ量を見積もるうえで重要であり、小惑星の成長や表層進化に影響を及ぼすものである。

3. 研究の方法

数値的に準備した高空隙粉体層へその構成粒子より一桁以上大きい弾丸を衝突させることにより、天体衝突貫入過程の数値シミュレーションを行った。また、高空隙粉体層に対して、それより一桁以上小さい高空隙粉体を衝突させることにより、より現実的な小惑星表層での衝突や微惑星成長過程での衝突の数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションはいずれもいわゆる離散要素法と呼ばれるコードを用いて行った。この手法は接触する粒子間の相互作用を考慮し

ながら粒子一つ一つの運動を追跡するものであり、粉体層における衝突など、粒子の集合体の振る舞いをシミュレートするのに最適な手法である。

4. 研究成果

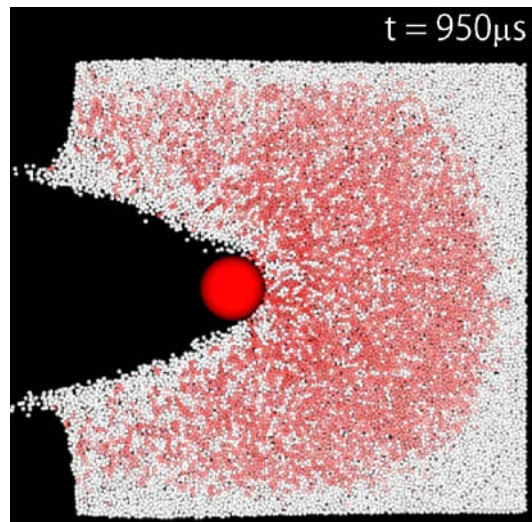


図1 粉体層への貫入のシミュレーション (断面スナップショット)。粒子は蓄積されている弾性エネルギーに応じて赤色に着色されている。

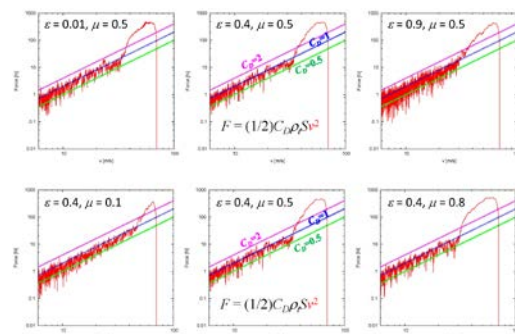


図2 粉体層への貫入抵抗 F (縦軸)を貫入速度(v)に対してプロットしたもの。各パネルは粒子間反発係数および摩擦係数を変えた結果を示す(比較のため真ん中の上下は同じ図である)。また3本の線は慣性抵抗則 $F = \frac{1}{2} C_D \rho_t S v^2$ において抵抗係数 $C_D = 0.5, 1, 2$ のものを示す (ρ_t は標的のバルク密度、 S は弾丸断面積)。

(1) 粉体層衝突貫入抵抗則：このシミュレーションでは室内実験との比較も念頭において計算状況を設定した。すなわち直径 420 μm の石英粒子を 38 万個堆積させた粉体層に直径 6mm のプラスチック球を弾丸として 70m/s の速度で打ち込む。粉体層粒子に比べ弾丸粒子が一桁以上大きいため、弾丸は粉体層を貫入していく(図1)。貫入中の内部の様子を探ることは数値シミュレーションの利点の一つであるが、粉体中の不均一な応力分布や粉体特有の孤立波(detached wave)の進行がみられた。さらに、貫入抵抗を直接算出

してみると、不均一な応力分布にもかかわらず、流体力学的な貫入速度の2乗に比例する抵抗力が発生しその抵抗係数もおよそ1程度であることが示された(図2)。また、粘性散逸力と類似の、速度に比例する項の存在も明らかになった。得られた貫入抵抗力は実験結果と調和的であった。また、貫入抵抗は、粒子間の反発係数および摩擦係数にほとんど依らないことも明らかとなり(図2)、散逸パラメータ非依存性という新たな発見も得られた。

(2) 粉体衝突によるイジェクタ総量：質量の異なる粉体(アグリゲイト)同士の衝突において、小さい方を弾丸、大きい方を標的と定義し、それらの衝突を衝突速度や衝突パラメータ(衝突のオフセット度を示す指標)を様々に振ってシミュレーションを行った(図3)。その結果、衝突によって放出されるイジェクタ総量は弾丸の運動量に比例することが明らかになった。すなわち、イジェクタ量 M_{ej} は弾丸質量 M_{proj} および衝突速度 u_{col} を用いて

$$M_{ej} = M_{proj} u_{col} / u_{col,crit}$$

と表すことができた ($u_{col,crit}$ は衝突成長でき

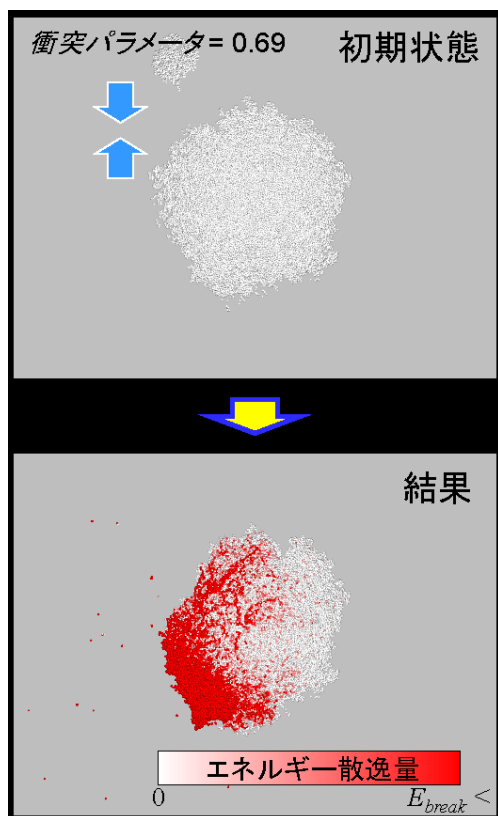


図3: 質量比のついた粉体同士の衝突の一例。ここでは12800個の粒子からなる「標的」に2000個の粒子からなる「弾丸」を衝突パラメータ0.69、衝突速度52m/sで衝突させたときの断面スナップショットを示す。少数だがイジェクタが放出されている。粒子の赤色はエネルギー散逸量の程度を示す。

るかどうかの境界速度)。粉体のような多数の粒子が関わっている系では、多数引き起こされる粒子間相互作用によって初期の運動エネルギーは十分散逸し、結果として放出されるイジェクタ破片は運動量によって駆動される、と解釈される。一方で、弾丸がモノマーの場合にはイジェクタ総量はその運動エネルギーに比例することも明らかになっている。まとめると、十分多数の粒子で構成された弾丸であれば、その内部でエネルギーが十分に散逸することになり、結果としてイジェクタの運動はプロジェクトイルの運動量によって支配されるが、モノマーのようにエネルギーが内部で十分に散逸することができなければ、運動エネルギーがイジェクタへ直接的に受け渡されることにより、イジェクタの運動はプロジェクトイルの運動エネルギーで決まる、ということを示唆しているものと考えられる。このことから、小惑星の進化過程においてエネルギー散逸がどこで生じるかということが重要であることが示されたと言える。

(3) 以上の結果から、微惑星は衝突によって成長が促され、小惑星表層は天体衝突による貫入付着とイジェクタの削剥のバランスで進化することがより定量的に考察できることとなった。

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17件)

- ① Kadono, T., Suzuki, A. I., Wada, K., Mitani, N. K., Yamamoto, S., Arakawa, M., Sugita, S., Haruyama, J., and Nakamura, A. M., 2015, Crater-ray formation by impact-induced ejecta particles, *Icarus*, 250, 215-221, 査読有, doi:10.1016/j.icarus.2014.11.030
- ② Kimura, H., Senshu, H., and Wada, K., 2014, Electrostatic Lofting of Dust Aggregates Near the Terminator of Airless Bodies and its Implication in the Formation of Exozodiacal Disks, *Planet. Space Sci.* 100, 64-72, 査読有, doi:10.1016/j.pss.2014.03.017
- ③ Yamamoto, T., Kadono, T., and Wada, K., 2014, An examination of collisional growth of silicate dust in protoplanetary disks, *Astrophys. J.* 783, L36., 査読有, doi:10.1088/2041-8205/783/2/L36

- ④ Wada, K., Tanaka, H., Okuzumi, S., Kobayashi, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2013, Growth efficiency of dust aggregates through collisions with high mass ratios, *Astron. Astrophys.*, 559, A62 (pp.8), 査読有, doi: 10.1051/0004-6361/201322259
- ⑤ Kataoka, A., Tanaka, H., Okuzumi, S., and Wada, K., 2013, Fluffy dust forms icy planetesimals by static compression, *Astron. Astrophys.*, 557, L4, 査読有, doi:10.1051/0004-6361/201322151
- ⑥ Kataoka, A., Tanaka, H., Okuzumi, S., and Wada, K., 2013, Static compression of porous dust aggregates, *Astron. Astrophys.*, 554, A4 (12pp)., 査読有, doi:10.1051/0004-6361/201321325
- ⑦ Suzuki, A. I., Nakamura, A. M., Kadono, T., Wada, K., Yamamoto, S., and Arakawa, M., 2013, A formation mechanism for concentric ridges in ejecta surrounding impact craters in a layer of fine glass beads. *Icarus*, 225, 298-307, 査読有, doi:10.1016/j.icarus.2013.03.027
- ⑧ Wada, K., and Nakamura, A. M., 2013, Penetration process in granular media revealed by numerical simulation, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 44*, #1466, 査読無, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/pdf/1466.pdf>
- ⑨ Nakamura, A. M., Setoh, M., Wada, K., Yamashita, Y., and Sangen, K., 2012, Impact and intrusion experiments on the deceleration of low-velocity impactors by small-body regolith., *Icarus*, 223, 222-233., 査読有, doi:10.1016/j.icarus.2012.11.038
- ⑩ Suyama, T., Wada, K., Tanaka, H., and Okuzumi, S., 2012, Geometrical cross sections of dust aggregates and a compression model for aggregate collisions. *Astrophys. J.* 753, 115 (10pp)., 査読有, doi:10.1088/0004-637X/753/2/115
- ⑪ 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.* 752, 106 (18pp)., 査読有, doi:10.1088/0004-637X/752/2/106
- [学会発表] (計 19 件)
- ① Kurosawa, K., Senshu, H., Wada, K., and TDSS team, Numerical Simulations of Impacts of a spherical Shell Projectile on Small Asteroids, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 46th*, The Woodlands, TX, USA (17 March 2015).
- ② 和田浩二, 粒子系衝突におけるエネルギー散逸, 「天体の衝突物理の解明」研究会 (X), 北海道大学低温科学研究所(北海道札幌市), 2014 年 10 月 23-25 日.
- ③ Arakawa, M., Saiki, T., Wada, K., Kadono, T., Takagi, Y., Shirai, K., Okamoto, C., Yano, H., Hayakawa, M., Nakazawa, S., Hirata, N., Kobayashi, M., Michel, P., Jutzi, M., Imamura, H., Ogawa, K., Iijima, Y., Honda, R., Ishibashi, K., Sakatani, N., Hayakawa, H., Sawada, H., Small Carry-On Impactor (SCI) and Deployable Camera 3 (DCAM3) in Hayabusa-2 Mission, AID international workshop, JHUAPL, MD, USA (16 October 2014).
- ④ Wada, K., Tanaka, H., Kobayashi, H., and Okuzumi, S., Ejecta Mass at Collisions of Dust Aggregates, *Cosmic Dust*, 大阪産業大学梅田サテライトキャンパス(大阪府大阪市) (4-8 August 2014).
- ⑤ 和田浩二, 田中秀和, 小林浩, 奥住聡, 木村宏, モノマーサイズ分布のあるダストアグリゲイトの衝突とイジェクタ量, 日本惑星科学会 2014 年秋季講演会, 東北大学片平キャンパスさくらホール (宮城県仙台市), 2014 年 9 月 24-26 日.
- ⑥ Wada, K., Arakawa, M., Saiki, T., Imamura, H., Hayakawa, M., Okamoto, C., Shirai, K., Takagi, Y., Kadono, T., Tsuda, Y., Yano, H., Nakazawa, S., Hirata, N., Ogawa, K., Iijima, Y., Michel, P., and Jutzi, M., 2014, Large Scale Impact Experiments Simulating Small Carry-On Impactor (SCI) Equipped on Hayabusa-2, *Lunar Planet. Sci. Conf. 45th*, The Woodlands, TX, USA (18 March 2014).

- ⑦ 和田浩二, 辻堂さやか, 荒川政彦, イジェクタカーテン観測からイジェクタの放出角度と速さを推定する方法, 日本惑星科学会 2013 年秋季講演会, 石垣市民会館(沖縄県石垣市), 2013 年 11 月 22 日.
- ⑧ 辻堂さやか, 荒川政彦, 和田浩二, 鈴木絢子, クレーターエジェクタの速度分布に関する実験的研究: Wada's method の応用, 日本惑星科学会 2013 年秋季講演会, 石垣市民会館 (沖縄県石垣市), 2013 年 11 月 21 日.
- ⑨ 門野敏彦, 鈴木絢子, 和田浩二, 山本聡, 荒川政彦, 杉田精司, 中村昭子, 衝突実験と数値計算におけるクレーターレイの形成, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2013 年 5 月 20 日.
- ⑩ Wada, K., Tanaka, H., H. Kobayashi, and S. Okuzumi, 2013 Amount of ejecta mass at dust aggregate collisions. Exoplanets and Disks: Their formation and Diversity II, The 5th Subaru International Conference, Keauhou Kona, Hawaii, USA (December 8-12, 2013).
- ⑪ 和田浩二, 中村昭子, 粉体層への衝突貫入の数値シミュレーション, 日本惑星科学会秋季講演会, 神戸大学統合研究拠点コンベンションホール(兵庫県神戸市)(2012 年 10 月 25 日).
- ⑫ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., 2012, Collision simulation of dust aggregates with monomer size distributions, Cosmic Dust, CPS(兵庫県神戸市)(8 August 2012).
- ⑬ Wada, K. and Nakamura, A. M., 2012, Penetration Resistance in Porous Granular Bodies: Results from Numerical Simulations. Asteroids, Comets, Meteor 2012, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)(16-20 May 2012).

[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

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