

令和元年5月30日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04041

研究課題名(和文)フラッシュX線を用いた衝突破壊の観測と小惑星サイズ頻度分布の衝突進化への応用

研究課題名(英文) In-situ observation of catastrophic disruption of asteroid analogues using flash X-ray photography and its implication for the collisional evolution of size frequency distribution of asteroids

研究代表者

荒川 政彦 (Arakawa, Masahiko)

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号：10222738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：重力支配域における小惑星の衝突破壊強度を調べるために高速度衝突実験を行った。この研究では、異なる引っ張り強度や空隙率を持つ小惑星模擬試料に対してカタストロフィック破壊実験を行い、その時の様子をフラッシュX線により観測して、破片質量と速度の関係を調べた。その結果、初期標的質量の半分の質量を持つ速度の上限值である中間速度を求めた。この中間速度はエネルギー密度と共に単純増加するが、引っ張り強度には依存しない。一方、中間速度は空隙率には強い依存性を持ち、50%の空隙率を持つ試料では約1/3となる。この中間速度を用いて、C型やS型などの様々な小惑星の重力支配域での衝突破壊強度を推定することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数値計算と室内実験を比較・検討することで理論モデルの妥当性を評価することが可能となり、今回求めた「重力支配域の衝突破壊強度」は、従来得られていた原始惑星形成時間や惑星への衝突天体サイズ、小天体の衝突破壊進化過程に影響を与え、これらの見直しを迫る結果である。さらに、重力支配域の天体衝突において衝突破壊強度の構成物質依存性が明らかになったので、微惑星(数km)から準惑星(1000km)への衝突集積モデルの再検討が可能となった。また、小惑星帯には構成物質が異なる複数タイプの小惑星が存在することが知られているが、今回の結果からタイプ毎の小惑星のサイズ頻度分布について新しい仮説の提案が可能となった。

研究成果の概要(英文)：High-velocity impact experiments were conducted for asteroid analogues to study the impact strength in a gravity regime. The catastrophic disruption of asteroid analogues with different tensile strength and porosities were observed by using flash X-ray photography, and the relationship between the impact fragment mass and the ejection velocity was obtained. The median velocity,  $V^*$ , which is an upper limit of ejection velocities of fragments with a half of the original target mass was derived from this relationship and it was found to increase linearly with the energy density but it was independent of the tensile strength. While the  $V^*$  was drastically affected by the porosity, the  $V^*$  of the non-porous target was more than 3 time larger than that of the porous targets. These  $V^*$  of various targets allowed us to estimate the impact strength of asteroid analogues in the gravity regime.

研究分野：惑星科学

キーワード：衝突破壊強度 小惑星 フラッシュX線 脱出速度 重力支配域 再集積天体 多孔質天体 空隙率

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 天体の衝突破壊強度は、微惑星の衝突集積や小惑星の衝突進化に重要な影響を与えており、室内実験や理論により研究が進んでいる。衝突破壊強度は、標的天体の質量が衝突後に半分になる時のエネルギー密度 ( $Q$ : 系の運動エネルギーをその質量で割った値) で定義される量である。

km サイズ以上の天体では自己重力 (脱出速度  $>10\text{m/s}$ ) により破片が再集積するため、衝突破壊強度は再集積する破片の量で決まる。このように自己重力が効く重力支配域の天体衝突においては、数値計算による衝突破壊強度の研究が行われてきたが、得られた衝突破壊強度は、モデルにより結果が大きく異なっている。一方、最近の研究でカタストロフィック破壊時の天体変形に圧密や内部摩擦が大きく影響することがわかってきた [1]。例えば、Jutzi [1] によれば、圧密や内部摩擦により破片速度が大きく減少して再集積が起きやすくなることが示されている。しかしながら、これまでカタストロフィック破壊を起こした時の破片速度に関する実験的研究は少なく、破片速度に影響を及ぼす物理過程の研究は進んでいない。

(2) 重力支配域の衝突破壊強度は、小惑星のサイズ頻度分布の再現にも利用されている。小惑星帯では太陽系形成期から現在まで、小惑星同士の衝突が頻繁に起きており、その結果、小惑星のサイズ頻度分布は変化してきている。このサイズ頻度分布を再現する数値計算は数多く行われており、数値計算に用いる衝突破壊強度によってその分布は大きく変化することがわかっている。重力支配域の衝突破壊強度は、数値モデル毎に大きく異なっており、微惑星の衝突集積や小惑星の衝突進化を研究する上で大きな障壁となっている。一方、最新の数値計算から、重力支配域において圧密や内部摩擦等の重力以外の物理過程が衝突破壊強度に大きく影響していることが明らかになり、このような物理過程を考慮した新しい数値モデルへの見直しが求められている。従って、重力支配域の衝突破壊強度の研究には、室内実験により、衝突破片速度に対する圧密や内部摩擦等の影響を調べるのが重要である。

(3) 重力支配域において圧密や内部摩擦等の物理過程が及ぼす衝突破壊強度への影響は、衝突天体の構成物質により大きく異なると考えられる。例えば、小惑星帯には C 型と S 型という二種類の小惑星が支配的に存在しており、構成物質に差があるため異なる衝突破壊強度を持つ可能性が高い。そしてこの二種類の天体は系統的に C 型が多いというサイズ頻度分布を持っている。この分布の特徴を説明するには、小惑星のサイズ頻度分布に対する衝突破壊強度の影響を明らかにする必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、重力支配域での衝突破壊強度に対する構成物質の影響を明らかにすることである。特に C 型小惑星と S 型小惑星の力学的性質を代表する模擬物質の研究から、二つの代表的な小惑星タイプにおける重力支配域の衝突破壊強度を推定する。

(1) フラッシュ X 線観測：フラッシュ X 線を用いた観測により、衝突により変形した標的内部の速度分布を計測する手法を確立する。

(2) 衝突実験：上記の実験手法を用いて、標的内部を含む全体の速度分布に対する物質強度と圧密の依存性を調べる。

(3) 天体衝突シミュレーションとの比較：SPH 法による衝突破壊の計算結果と室内実験の結果を比較する。さらに自己重力を考慮した数値計算により、天体サイズ  $1\text{km}\sim 1000\text{km}$  における衝突破壊強度の物性依存性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 衝突破壊実験

衝突破壊実験は宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用いて行なった。弾丸は直径 7 mm のポリカーボネート球を用いた。衝突速度は  $1.5 - 6.5 \text{ km s}^{-1}$  ( $Q: 10^3 - 2 \times 10^4 \text{ J kg}^{-1}$ ) で変化させた。その結果、ほとんどの実験で標的はカタストロフィックに破壊し、最大破片は元の標的質量の 10% 程度となった。標的試料には含水率が異なる直径 6 cm の凍結粘土球、多孔質石膏球、乾燥粘土球を用いた。凍結粘土試料はベントナイトと水を 3 通りの質量比(100:35, 100:50, 100:80)で混合して作成した。それぞれの含水率は、25 wt%、35 wt%、45 wt% である。凍結粘土試料は  $-20^\circ\text{C}$  に冷却して、試料内の水は凍結させて用いた。含水率を変化させることで、凍結粘土の静的引張強度は 1.10 MPa から 2.24 MPa まで変化させた。多孔質石膏球の密度は  $1.1 \text{ g/cm}^3$  で、空隙率は約 50% であり、その引張強度は約 2.5 MPa であった。乾燥粘土球の密度は  $1.6 \text{ g/cm}^3$  であり、空隙率は多孔質石膏とほぼ同じ約 50% であったが、引張強度はずっと小さく約 0.3 MPa であった。

この 2 種類の標的では、空隙率はほぼ同じであるが引張強度は 10 倍ほど異なる。

## (2) 計測方法

試料内部の速度分布を測定するため、標的内部には直径 3 mm の鉄球をトレーサー粒子として単一平面上に配置した。このトレーサー粒子の運動を撮影するために 3 方向からフラッシュ X 線を照射して、その透過像をイメージングプレート (IP1,2,3) に記録した (図 1(a), (b))。なお、撮影のタイミングは、衝突後の  $50 \mu\text{s} - 20 \text{ ms}$  で変化させた。内部粒子速度分布は、トレーサー粒子の変位とその時の撮影時間から決定した。また、衝突の様子は 20 万コマ毎秒の速度で高速カメラを用いて撮影し、衝突点の反対点から放出される破片の速度を決定した。なお、実験用のチャンパー内は、衝突実験中は 100 Pa 以下まで真空引きしている。

## 4. 研究成果

### (1) フラッシュ X 線撮影

フラッシュ X 線によって撮影された画像の例を図 2 に示す。この実験は、多孔質石膏の試料に  $9,000 \text{ J/kg}$  のエネルギー密度を与えたものである。CH3 で撮影された衝突後  $500 \mu\text{s}$  の画像から、衝突点を中心に試料が細粒化しており、さらに放射状に太いクラックが試料全体に渡って数本発生していることがわかる。マーカーである鉄球も初期位置から大きく移動していることが確認できる。 $1,000 \mu\text{s}$  後の写真から、衝突半球で試料は完全に破碎し、衝突点中心に放射状に高速度で微小破片が飛散していることがわかる。また、衝突点から遠方の半球は、縦割れクラックが試料内部を分断しているが、かなり大きな破

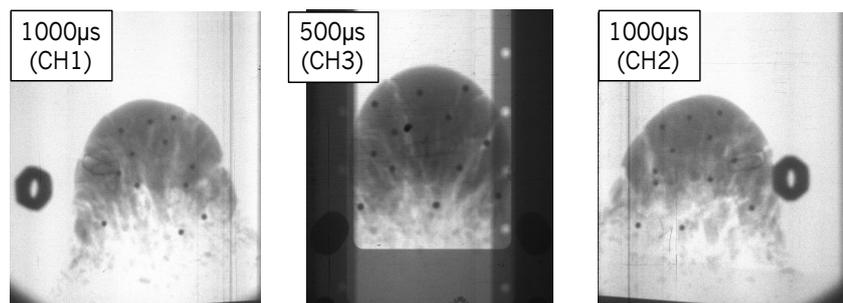


図 2 : フラッシュ X 線写真. 3km/s で多孔質石膏に衝突.

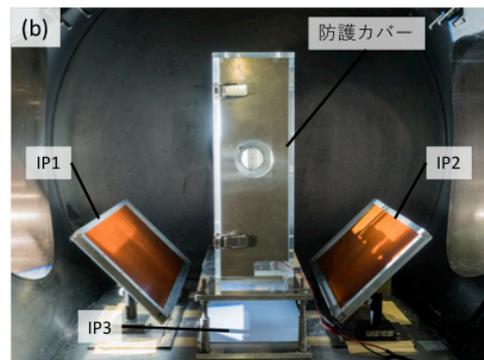
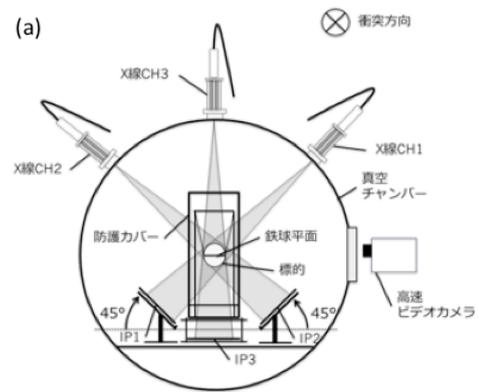


図 1 : (a)実験構成, (b)写真

片も残っており、その破片中にあるマーカーは初期位置からあまり移動していないように見える。一方、衝突点近傍では、マーカーが周囲の破片と分離しているが、それ以外ではマーカーは周囲の破片に取り囲まれたまま移動している。従って、衝突点近傍以外では、マーカーの観測から試料破片の速度を求めることには大きな問題はないと思われる。多孔質石膏は、凍結粘土と比べて衝突点近傍でのクレーターの成長が抑制されており、さらに、衝突点遠方での縦割れの程度も比較的緩やかであった。一方、乾燥粘土は、破碎の程度は多孔質石膏と大差ないが、多孔質石膏や凍結粘土で見られた衝突点から放射状に伸びる縦割れの発達は見られなかった。乾燥粘土の破碎は、ランダムに発生・成長するクラックに起因するようである。

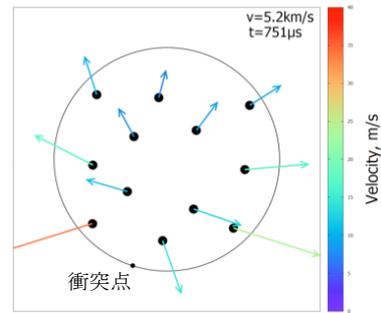


図 3：多孔質石膏の内部粒子速度分布。衝突速度 5.2km/s.

### (2) 内部粒子速度分布

実験結果の解析から、トレーサー粒子の速度ベクトルは、衝突点近傍では弾丸の進行方向と逆向きになることがわかった (図 3)。一方、衝突点から標的半径程度離れると弾丸の進行方向と同じ向きとなった。速度ベクトルは衝突点近傍で最大となり、最小となるのは衝突点から一番遠い反対点ではなく中心付近であった。そのため、標的内部の速度分布は衝突点からの距離だけではなく、標的表面からの距離も関係すると考えられる。なお、鉄球速度は衝突速度の増加に伴って全体的に高速となる。反対点近傍のトレーサー粒子の速度ベクトルは、最大破片が小さい場合には、それぞれが方向と大きさの異なる速度ベクトルをもっていた。しかしながら、最大破片が大きな場合は、それぞれの速度ベクトルの向きと大きさが同じであった。これは、最大破片が小さい場合、反対点の破片が独立に動くことを示している。一方、最大破片が大きな場合、最大破片が幾つかのトレーサーを内包するため、それらが一緒に動いているように見える。

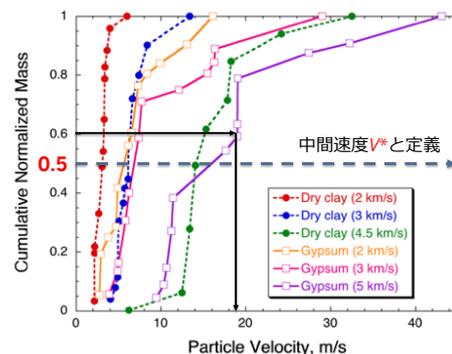


図 4：多孔質石膏の積算質量と内部粒子速度の関係。衝突速度 5.2km/s.

### (3) 中間速度

図 4 は、多孔質石膏及び乾燥粘土に関して、重心系での破片速度とその速度以下の速度を持つ破片質量の総和を表す図である。なお、破片質量と粒子速度の関係は、領域毎に最近傍の鉄球速度を割り振ることで決めており、破片質量は標的の初期質量で規格化している。例えば、多孔質石膏 5km/s の実験では、総破片質量の 60% が約 20 m/s 以下であることがわかる。この結果から、鉄球トレーサーに代表される内部粒子速度は、衝突速度の増加に伴い高速になることがわかった。また、乾燥粘土試料でも、同じエネルギー密度 ( $Q$ ) では、ほぼ同じ内部粒子速度を持つことが分かった。一方、両試料とも空隙率は 50% 程度であるが、凍結試料 (空隙率 < 数%) と比べてかなり内部粒子速度が小さく、空隙率の影響が大きいことがわかる。本研究では、このようにして求まる規格化積算質量と粒子速度の関

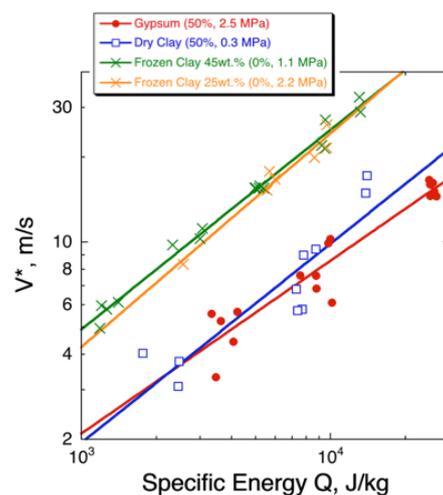


図 5：中間速度  $V^*$  とエネルギー密度  $Q$  の関係。

係において、規格化積算質量が 0.5 となる時の粒子速度を中間速度  $V^*$  と定義している。従って、衝突破片は  $V^*$  以下の速度で半分の質量が運動し、もう半分は  $V^*$  以上で運動する。図 5 にこれまで行った凍結粘土、乾燥粘土、多孔質石膏におけるエネルギー密度と  $V^*$  の関係を示す。この図から  $V^*$  は空隙率が小さい凍結粘土の場合、引っ張り強度に依存しないことがわかる。また、空隙率が大きい場合は空隙率を持たない試料と比べて  $V^*$  が半分以下になる。さらに、多孔質石膏と乾燥粘土のような多孔質試料でも、 $V^*$  は引っ張り強度に依存せず、ほぼ一致することがわかった。

#### (4) 重力支配域の衝突破壊強度

この  $V^*$  と天体の脱出速度  $V_e$  を比較することで、重力支配域における衝突破壊強度  $Q_D^*$  を得ることができる。 $V^*$  から求まる  $Q_D^*$  は、 $V^*$  の物性依存性と同様で、強度によって変化せず、空隙率によって変化する。空隙をもつ石膏や乾燥粘土の  $Q_D^*$  は空隙をもたない凍結粘土の 3 倍となった。この結果は、Jutzi [1] における SPH による数値計算の結果と整合的である (図 6)。一方、C 型小惑星は多孔質であることが知られており、S 型小惑星はラブルパイルでない天体では空隙率は比較的低いことが知られている。従って、C 型小惑星は S 型小惑星 (ラブルパイル天体以外) と比較して、重力支配域においても大きな衝突破壊強度を持つと思われる。この衝突破壊強度の差が C 型小惑星と S 型小惑星のサイズ頻度分布の差の原因かもしれない。

[1] Jutzi, M., 2015. SPH calculations of asteroid disruptions: The role of pressure dependent failure models. Planetary and Space Science 107, 3–9.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Arakawa, M., Wada, K., Saiki, T., Kadono, (他 18 名), Scientific objectives of Small Carry-on Impactor (SCI) and Deployable Camera 3 Digital (DCAM3-D): Observation of an ejecta curtain and a crater formed on the surface of Ryugu by an artificial high-velocity impact, Space Sci. Rev. 208, 187-212, 2017. DOI:10.1007/s11214-016-0290-z (査読有)
2. Ishibashi, K., Shirai, K., Ogawa, K., Wada, K., Honda, R., Sakatani, N., Arakawa, M., Ikeda, Y., Performance of Hayabusa2 DCAM3-D camera for short-range imaging of SCI and ejecta curtain generated from the artificial impact crater formed on asteroid 162137 Ryugu (1999 JU3), Space Sci. Rev. 208, 213-238, 2017. DOI:10.1007/s11214-016-0298-4 (査読有)
3. Ogawa, K., Shirai, K., Sawada, H., Arakawa, M., Honda, R., Wada, K., Ishibashi, K., Iijima, Y., Sakatani, N., Nakazawa, S., Hayakawa, H. System configuration and operation plan of Hayabusa2 DCAM3-D for scientific observation in SCI impact experiment, Space Sci. Rev. 208, 125-142, 2017. DOI:10.1007/s11214-017-0347-7 (査読有)

[学会発表] (計 36 件)

1. Arakawa, M., Experimental study on scaling laws for high-velocity impact phenomena on water ice targets, 9th Workshop on Catastrophic Disruption in the Solar System (CD9), Kobe Japan, May 14-17, 2018.
2. Yasui, M., Impact experiments on porous gypsum and glass simulating rocky planetesimals and proto planets: Collisional properties in oblique impacts, 9th Workshop on Catastrophic Disruption in the Solar System (CD9), Kobe Japan, May 14-17, 2018.
3. 荒川政彦, 小型搭載型衝突装置と分離カメラを用いたリュウグウ上での宇宙衝突実験, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ, 2018 年 5 月 20 日-24 日
4. 保井みなみ, High-velocity impact experiments on porous gypsum simulating C-type asteroids: In-situ measurements of post shock temperature around impact crater, 日本地球惑星科学連合 2018

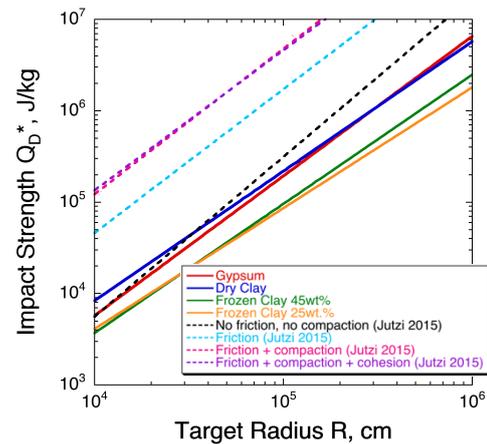


図 6 : 天体半径と重力支配域の衝突破壊強度 ( $Q_D^*$ ) の関係。

- 年大会, 幕張メッセ, 2018年5月20日-24日
- 岡崎昌志, フラッシュ X 線を用いた凍結粘土の衝突破壊過程のその場観察, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ, 2018 年 5 月 20 日-24 日
  - 岡崎昌志, フラッシュ X 線を用いた衝突破壊現象の観測, 日本惑星科学会 2017 年度秋季講演会, 大阪大学, 2017 年 9 月 27 日-9 月 29 日
  - Yasui, M., Effect of oblique impact on impact strength of planetesimals, DPS 48/EPSC 11 Meeting, Pasadena, CA, USA, October 16-21, 2016.

[その他]

ホームページ等

<http://eps1.sakura.ne.jp/EP1-Kobe/Welcome.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 大槻 圭史

ローマ字氏名: OHTSUKI, keiji

所属研究機関名: 神戸大学

部局名: 理学研究科

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 00250910

研究分担者氏名: 長澤 真樹子

ローマ字氏名: NAGASAWA, makiko

所属研究機関名: 久留米大学

部局名: 医学部

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 00419847

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: Martin Jutzi

ローマ字氏名: Martin Jutzi

研究協力者氏名: 保井 みなみ

ローマ字氏名: YASUI, minami

研究協力者氏名: 岡崎 昌志

ローマ字氏名: OKAZAKI, masashi

研究協力者氏名: 中村 誠人

ローマ字氏名: NAKAMURA, masato

研究協力者氏名: 長野 巧

ローマ字氏名: NAGANO, takumi

研究協力者氏名: 末次 竜

ローマ字氏名: SUETSUGU, ryo

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。