



低強度粗粒レゴリスで覆われた小惑星表面の衝突クレーターと衝突励起振動に関する実験的研究

山本，裕也

(Degree)

博士（理学）

(Date of Degree)

2023-03-25

(Date of Publication)

2024-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8590号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482338>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式3)

論文内容の要旨

氏 名 山本 裕也

専 攻 惑星学

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

低強度粗粒レゴリスで覆われた小惑星表面の衝突クレーターと衝突励起振動に関する実験的研究

指導教員

荒川 政彦 教授

要旨

衝突クレーターは固体天体表面に普遍的に存在する地形である。天体同士の衝突は速度数 km s^{-1} から数 10 km s^{-1} にまでおよぶ高速度衝突から、数 m s^{-1} を下回る低速度衝突も存在する。衝突クレーターのサイズは直径 100 km 以上の巨大なものから、数 cm サイズの小さなクレーターまで存在する。大気が非常に薄く、地質活動が極めて少ない天体では表面地形の更新が起りにくく、比較的長期にわたって表面状態が保存される。そのため、固体天体表面の衝突クレーターからは衝突体のサイズや衝突速度、天体表層の強度などの多くの情報を得ることができると期待される。一般的な条件下での衝突現象を理解するためには、スケーリング則を確立する必要がある。広く用いられているクレーターサイズスケーリング則として、次元解析を用いた π スケーリング則と呼ばれるスケーリング則が構築され、衝突実験の結果を基に確立されてきた。

小惑星などの小天体表面は一般にレゴリスと呼ばれる粒子層やボルダーと呼ばれる大きな岩塊に覆われている。近年の惑星探査により、小天体表面の詳細な状態が観測されるようになった。小惑星表面のボルダーは数 100 m から 1 m 以下まで大小様々なサイズを持ち、力学的強度が小さく高い空隙率を持つボルダーも存在することがわかってきた。また、これまで観測された小惑星の表面は多くの衝突クレーターに覆われていて表面画像から各天体のクレーターサイズ頻度分布が得られており、比較的最近衝突クレーターが形成された若い地域を除いてクレーター数は飽和している。クレーターサイズ頻度分布を基にこれらの小惑星の表面年代が推定されている。しかしながら、小惑星 Itokawa ではクレーター数がこれまでの小天体に比べて少なく、クレーターが不明瞭な形状をしていた。クレーターサイズ頻度分布から、Itokawa では直径 10 m 以下のクレーター数が少ないことがわかった。同様の傾向が小惑星 Eros でも確認された。Itokawa や Eros での小サイズのクレーター数の欠乏の要因として以下が挙げられる。(1)ボルダーの衝突破壊による衝突エネルギーの散逸(アーマリング効果)、(2)衝突励起振動による小さなクレーターの消失、(3)小さいサイズの衝突天体のフラックス不足である。

アーマリング効果は、衝突点近傍に大きなボルダーが存在する時に衝突によってボルダーが破壊されることによって、衝突エネルギーが散逸される現象で、砂地に形成されるクレーターサイズよりも小さくなるか、クレーターが形成されなくなる。室内実験により、ボルダーのサイズが衝突体のサイズに比べて同程度以上の大きさである時、またはボルダーの力学的強度が十分に小さい時にアーマリング効果によってクレーター形成効率が低下しうることが確認されている。一方で、小惑星探査機はやぶさ2で実施した宇宙衝突実験では、小惑星 Ryugu 表面が様々なサイズかつ低強度のボルダーに覆われていたにもかかわらず、形成されたクレーターは、砂地に形成されるクレーターと変わらないサイズのクレーターが形成された。ボルダーのサイズや強度がクレーター形

成効率に及ぼす影響(アーマリング効果)を系統的に調べる必要がある。小惑星 Eros 上のクレーターや Ryugu の SCI クレーター周辺の観測から、レゴリスやボルダーの移動が確認されており、衝突励起振動により引き起こされた可能性が考えられる。特に小天体では比較的小規模の衝突であっても、全球的に衝突励起振動の影響を受ける。小クレーターの緩和や消失過程を理解するために、衝突励起振動の物理的特性を明らかにする必要がある。そこで本研究の目的は、(1)ボルダーのサイズや強度がクレーター形成効率に及ぼす影響を調べ、アーマリング効果を定量化すること、(2)クレーター形成時に起こる衝突励起振動の物理的特性を明らかにすること、である。

サイズと強度の異なる粒子で構成された2種類の模擬小惑星表面試料を用いてクレーター形成実験を実施した。同時に、試料内部に加速度計を設置することで、衝突励起振動を計測した。模擬試料には直径 1-4 mm(細粒, 平均直径 3 mm)と 1-4 cm(大玉, 平均直径 1.3 cm)の2種類の風化凝灰岩粒子を用いた。これらの凝灰岩粒子の圧壊強度を計測し、それぞれ約 60 kPa と 13 kPa で、平均空隙率は 77 %と 85 %とわかった。衝突実験は一段式、二段式の縦型軽ガス銃を用いて行った。一段式ガス銃を用いた場合は直径 3 mm の密度の異なる5種類の弾丸を、衝突速度 50-220 m s⁻¹ の範囲まで加速した。二段式ガス銃を用いた場合は直径 2 mm の密度の異なる8種類の弾丸を、衝突速度 1-4.5 km s⁻¹ まで加速した。

第3章では、形成されたクレーターの形状やサイズについて報告する。実験により形成されたクレーター形状を調べたところ、細粒標的では、お椀型クレーターが形成されて弾丸密度が大きくなるほど深さ直径比が増加していたが、大玉標的では、歪な形状のクレーターが形成され、クレーター深さが構成粒子サイズと同程度であったため、深さ直径比のばらつきが大きく、クレーターリムが不明瞭だった。高速度カメラで衝突前後の衝突点付近の様子を観察すると、衝突後すぐに細かい砂煙が発生し放出されたのち、標的粒子が放出されていることが確認でき、衝突点近傍で弾丸が標的粒子を破壊していることがわかった。形成されたクレーターのサイズを運動エネルギー(E_k)で整理すると、細粒標的と大玉標的ともに、全体の傾向として運動エネルギーに対して右肩上がりだったが、 $0.1 \text{ J} < E_k < 0.6 \text{ J}$ の範囲でクレーター半径が増加しないオフセット領域が存在した。また、標的粒子のサイズの違いによるクレーターサイズの違いも見られ、大玉標的に形成されるクレーターは細粒標的に形成されるクレーターに比べて0.8倍程度の大きさだった。クレーターサイズを π スケール則で整理すると、細粒標的に関して、オフセットを挟んで二つのトレンドがあり、大玉標的に関して、同じ π_2 での細粒標的の π_R と比較して、 π_R が小さくなることがわかった。このことから従来の重力支配域のクレーターサイズスケール則では、空隙が大きく、強度が小さい粒状標的に形成されるクレーターサイズをスケーリングできないことがわかった。

加速度計によって計測された衝突励起振動の加速度や伝播速度、持続時間について

て報告する。衝突地点から距離の異なる位置に加速度計を設置することで衝突励起振動の伝播速度を計測した。伝播速度は標的粒子のサイズによって異なるが、衝突速度や弾丸の密度に依存しないことがわかり、細粒標的で $49.7 \pm 12.3 \text{ m s}^{-1}$ 、大玉標的で $67.0 \pm 23.7 \text{ m s}^{-1}$ とわかった。これは、先行研究である Matsue et al.(2020)の石英砂での衝突励起振動の伝播速度と同じような速度を持つ。また、標的の受けた最大加速度($g_{\max}$)とクレーターリム半径で規格化した衝突点距離(x)の関係を調べた結果、標的粒子のサイズや弾丸の種類、衝突速度に依らず最大加速度は規格化距離が増加すると指数関数的に減少することがわかり、最大加速度の距離減衰に関する経験式

$g_{\max} = 10^{1.6} \times (x/R_{\text{rim}})^{-1.9}$ を得た。得られた経験式から、クレーターリムにおける $g_{\max}$ を 35.9 m/s^2 と推定でき、また、 $g_{\max} = 1 \text{ G}$ となるのは $x/R_{\text{rim}} = 6.6$ となる地点であることから、衝突点からこの範囲以内の標的粒子は衝突励起振動によって振動し移動している可能性があることが示唆された。先行研究の Yasui et al.(2015)や Matsue et al.(2020)のガラスビーズ標的や石英砂標的での衝突励起振動と比較すると、距離減衰率がガラスビーズと同程度で、クレーターリムにおける $g_{\max}$ は約 0.2 倍の大きさしかないことがわかった。

第4章では、クレーターサイズスケリング則を改良し、ボルダーのサイズや強度によるアーミング効果の定量化を行った。Mizutani et al (1983)で提案されたスケリング則を改良して、終段階有効エネルギー I が衝突点付近での標的粒子の破壊とクレーター孔を形成するため粒子の放出の両方に使われていると仮定し、アーミング効果を含んだクレーターサイズスケール則を構築した。衝突の際に破壊された標的粒子の数 α を考慮することで、標的粒子の破壊に使われるエネルギーとし、クレーター

直径 D と I 、標的粒子の半径 d に関して以下の関係が得られた。 $I = k_3 \left\{ \rho \left(\frac{d}{D_2^*} \right)^4 + \right.$

$\left. \alpha \delta_t \left(\frac{d}{D_2^*} \right)^3 \right\}$. ρ は標的バルク密度、 δ_t は標的粒子密度、 D_2^* は典型的なクレーター直径、

k_3 は定数。本研究のオフセットは α を変化させることで表現でき、実験結果から I と α の関係を求めたところ、 $\alpha = A \cdot I^n$, A は定数, $n \approx 0.98$, だった。これらの関係から、アーミング効果によるクレーターサイズ減少係数 f を含んだ π スケリング則が以下の

ように表現できた。 $\pi_R^* = k_5 f \pi_2^{-0.21} \pi_4^{0.20}$, $f = \left\{ 1 - k_3 A I^{n-1} \delta_t \left(\frac{d}{D_2^*} \right)^3 \right\}^{1/4} \dots (*)$. 本研究

で求めた n の値がほぼ 1 であったことから、衝突速度が大きくなるほど (π_2 が小さくなるほど), α が大きくなるが、壊れた標的粒子の数によらず一定の割合でクレーター形成効率が低下することがわかった。

氏名	山本 裕也		
論文 題目	低強度粗粒レゴリスで覆われた小惑星表面の衝突クレーターと衝突励起振動に関する実験的研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	荒川 政彦
	副 査	教授	金子 克哉
	副 査	准教授	中村 昭子
	副 査	講師	保井 みなみ
	副 査		
印			
要 旨			
本論文は、小惑星表面を模擬した標的への高速度衝突実験を実施し、クレーター形成効率と衝突励起振動に対する標的構成粒子の強度と空隙率及び粒子径の影響について新しい実験的知見を得たものである。 本論文は、5章からなる。第1章は本論文の背景や目的がまとめられている。衝突クレーターは固体天体表面に普遍的に存在する地形であり、この固体天体表面の衝突クレーターを調べることで、衝突体のサイズもしくは天体表層の構造や強度の情報を得ることができる。特にクレーターのサイズ頻度分布から再現した衝突体のサイズ頻度分布は、天体の表面年代を決めるクレーター年代学に利用される。クレーターサイズから衝突体のサイズを推定するためには、クレーター形成効率の情報が必要であり、クレーターサイズスケール則（この後スケール則と呼ぶ）から推定できる。代表的なスケール則としてはπスケール則がある。しかしながら、対象とする天体表層の強度や空隙率、そして、構成粒子の粒径に適したスケール則を用いないと年代推定には1桁以上の差異が生ずる。小惑星はレゴリス（岩石粒子）やボルダー（岩塊）で覆われているが、そのボルダーは最大で100 mを越えるものもあり、ベキ乗のサイズ頻度分布を持つことが知られる。小惑星イトカワやエロスではクレーターサイズ頻度分布から、直径10 m以下のクレーターの数が少ないことがわかっており、クレーター数の欠乏の原因として次の2つが重要である。(1) 衝突体が比較的大きなボルダーに衝突して破壊するとエネルギーを散逸し、クレーターができなかったり、サイズが小さくなったりする（これを装甲効果という）、(2) 衝突時に発生した振動（衝突励起振動）が全球を揺らすことでレゴリスが移動し、小さなクレーターが消失する。一方、小惑星リュウグウでは衝突励起振動に起因する全球的なレゴリス移動は確認されておらず、はやぶさ2が実施した宇宙衝突実験では、装甲効果がほとんど確認されなかった。リュウグウのボルダーは$< 300\text{kPa}$と低強度で50 %以上の高い空隙率を持つことが分かっており、このようなボルダーの特徴がイトカワ・エロスとリュウグウの間で装甲効果や衝突励起振動の効率に影響を及ぼした可能性がある。そこで本研究は、ボルダーの強度や空隙率、そして衝突体とボルダーのサイズ比がクレーター形成効率に及ぼす影響を調べて、低強度・高空隙率ボルダーの装甲効果を定量化することを研究目的とした。更に、クレーター形成時に起こる衝突励起振動の伝播・減衰過程に対する低強度・高空隙率ボルダーの影響を明らかにし、リュウグウ上で起こる衝突励起振動による再表面化を検討することも研究目的としている。 第2章では、実験に利用した標的の準備方法と標的構成粒子の物性及び高速度衝突実験の手法を述べている。実験には、粒径、強度、空隙率の異なる粒子からなる2種類の標的を準備した。この標的を直径$>27\text{cm}$のタライに入れて、表面を平らにならし、その表面に対して垂直に弾丸を衝突させてクレーター形成実験を実施した。また、衝突点からの距離が異なる標的表面に一軸加速度計を複数個設置することで、衝突励起振動の伝播・減衰過程も調べた。構成粒子には直径1–4 mm（細粒と呼ぶ、平均直径3 mm）と1–4 cm（大玉と呼ぶ、平均直径1.3 cm）の2種類の風化凝灰岩粒子を用いた。これら粒子の圧壊強度を計測したところ、それぞれ60 kPaと13 kPaとなり、平均空隙率は77 %と85 %であった。高速度衝突実験は、一段式縦型ガス銃と二段式縦型軽ガス銃を用いて行った。一段式縦型ガス銃を用いた実験では、直径3 mm、密度$1.1\text{--}7.9\text{ g cm}^{-3}$の異なる5種類の弾丸を衝突速度$39\text{--}220\text{ m s}^{-1}$まで加速して衝突させた。二段式縦型軽ガス銃を用いた実験では、直径2 mm、密度$1.1\text{--}15.6\text{ g cm}^{-3}$の異なる8種類の弾丸を衝突速度$1.2\text{--}4.3\text{ km s}^{-1}$まで加速して衝突させた。クレーター形成過程は高速カメラで$10^3\text{--}10^6$コマ毎秒で撮影し、実験後の標的は回収してクレーターの形状を2次元レーザー変位計やノギスで計測した。			

氏名	山本 裕也
----	-------

第3章では衝突クレーターの形状やそのリム直径、そして加速度計で測定した衝突励起振動とその距離減衰の特徴について述べている。細粒標的に形成されたクレーターの形状はお椀型であり、衝突速度の増加と共にリム直径は大きくなる。しかしながら、弾丸が同じ場合はリム直径で規格化した形状は相似形である。弾丸密度が大きくなると深さ直径比が増加して相似形から外れる。大玉標的のクレーター形状は、リムが不明瞭なすり鉢形状であり歪な形状をしていた。クレーター深さが構成粒子サイズと同程度から数倍であったため深さ直径比のばらつきが大きかった。高速カメラで衝突前後の衝突点付近の様子を観察すると、衝突後すぐに細かい砂煙があがった後、無傷の構成粒子が放出されることが確認できた。これは衝突点近傍で弾丸が構成粒子を破壊し、その後、クレーターが成長している証拠である。リム直径と弾丸運動エネルギー(E_k)の関係を調べると、細粒、大玉標的ともに概ね運動エネルギーのべき乗でリム直径は増加する。しかしながら、今回の研究では $0.1\text{ J} < E_k < 0.6\text{ J}$ の範囲でリム直径が増加しない範囲が発見された。また、大玉標的ではクレーター形成効率の減少が見られ、その直径は細粒標的に形成されるクレーターの約 0.8 倍となった。リム直径を π スケール則で整理すると、細粒標的ではオフセットを挟んではっきりと二つの関係に分かれることが分かった。構成粒子の破碎の有無により、それぞれ別の関係となる。大玉標的では細粒標的と比較して、クレーター形成効率が系統的に下がることが分かった。細粒標的の結果から π スケール則は、低強度・高空隙率粒子の標的に対して適用できない場合があることが分かった。一軸加速度計で標的表面に垂直な方向の加速度を計測した結果、衝突励起振動の伝播速度は細粒標的で $49.7 \pm 12.3\text{ m s}^{-1}$ 、大玉標的で $67.0 \pm 23.7\text{ m s}^{-1}$ となった。また、標的表面が受けた最大加速度($g_{\max}$)とリム半径で規格化した衝突点距離(x)の関係を調べたところ、標的粒子のサイズや弾丸の種類、衝突速度に依らず最大加速度は規格化距離の-2.0 乗で減衰することが分かった。加速度波形を整理すると、 $g_{\max}$ が 1G 以上ではパルス波形が観測され、1G 以下では弾性振動波形が確認された。なおクレーターリムにおける $g_{\max}$ は 30.2 m s^{-2} と求めたが、これは先行研究の砂標的の約 1/5 である。 $g_{\max}=1\text{ G}$ となるのは $x/R_{\text{rim}}=1.8$ となる地点であることから、表面の粒子が流動化する領域はクレーター孔の極近傍であることが確認できた。更に、今回の結果とはやぶさ2の宇宙衝突実験で起きたリュウグウ上の衝突励起振動の領域を比較したところ、衝突励起振動の加速度がリュウグウ表面重力を越える領域はクレーター半径の約 7 倍となり、観測結果と矛盾しないことが分かった。

第4章では、既存のクレーターサイズスケール則を改良し、構成粒子の粒径、強度、空隙による装甲効果の定量化を行っている。まず、終段階有効エネルギー(I)を用いたスケール則を改良した。 I が衝突点付近の構成粒子の破壊と構成粒子の移動によるクレーター孔の拡大に使われていると仮定し、クレーターサイズと I の関係を求めた。装甲効果を考慮するため、衝突の際に破壊された標的粒子の数 α を導入し、標的粒子の破壊に使われるエネルギーを考慮した。実験結果のクレーターサイズと I の関係は、 α を変化させることで再現可能であり、細粒標的のオフセット領域は $\alpha=1\sim 10$ で再現できた。実験結果から I と α の関係を求めたところ、 $\alpha \approx A \cdot I$ となり、細粒標的では $A=19$ 、大玉標的では $A=0.5$ であった。なお、 $1/A$ は一粒子を破壊するために必要なエネルギーである。この結果から、低強度・高空隙率粒子の標的では、衝突条件に関わらず、粒子破壊に消費されるエネルギーとクレーター掘削に消費されるエネルギーの比率は常に一定であることが分かった。次に、この装甲効果によるクレーター形成効率の減少係数を π スケール則に導入したところ、その減少係数は、 I に関係なく A と粒子密度により決まる定数となり、細粒・大玉標的共に 0.7 程度の値となった。すなわち粒子破壊の効果により約 30%クレーターサイズが小さくなることが分かった。

第5章は論文のまとめである。

本研究は、小惑星表面を覆うボルダーの強度、空隙率、粒径がクレーター形成効率と衝突励起振動の伝播・減衰に及ぼす影響を次のように明らかにした。(1) 低強度・高空隙率粒子からなる標的のクレーター形成効率は、粒子破壊が起こるかどうかで異なる関係で表される。(2) 粒子破壊によるクレーター形成効率の減少は、終段階有効エネルギー(I)を用いた理論に破碎した粒子数を導入することで記述できる。破碎粒子数は I に比例し、破碎によるクレーター形成効率の減少は常に 30%程度となった。(3) 衝突励起振動による加速度の最大値 $g_{\max}$ は砂標的よりも距離減衰率が小さく -2.0 乗となった。一方、リムでの $g_{\max}$ は砂標的の 1/5 となった。これらの結果は、小惑星イトカワ、エロス、リュウグウのようなボルダーで覆われた小惑星表面に形成されるクレーターやそれに伴う衝突励起振動について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の山本裕也は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。