



# An experimental study on collisional evolution of highly porous small bodies

岡本, 尚也

---

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2015-03-25

(Date of Publication)

2017-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6331号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006331>

※ 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 岡本 尚也

専攻 地球惑星科学専攻

論文題目

An experimental study on collisional evolution of highly porous small bodies.

(空隙の大きな小天体の衝突進化に関する実験的研究)

指導教員 中村 昭子

太陽系には小惑星や彗星といった小天体が存在する。小天体の進化の過程で重要な現象に衝突が挙げられる。小天体は衝突によってその表面にクレーターが形成されることもあるが、破壊されることもある。どのような衝突条件でどういったクレーターが形成されるのか、またどれほど破壊されるのかを解明することは太陽系内の衝突史を理解する手がかりとなる。近年の観測により空隙のある小天体が多数見つかっており、特に彗星においては 86%の空隙率を持つものまで存在することがわかってきた。しかしそのような高空隙天体の衝突物理過程は明らかになっていない。本研究では空隙率 50-94%を持つ標的を用意し、衝突速度 1.6-7.2 km/s の高速衝突実験を行った。第一部では全体のイントロダクションとして天体の衝突過程、小天体の空隙率・密度・強度、クレーターのスケージング則、衝突破壊として用いられる代表的なパラメーター、について記述した。第二部は小天体に捕獲されるダストの潜り込み深さの研究の結果、第三部は空隙の高い標的に形成されるクレーターサイズに関する研究結果、第四部は空隙の高い標的の衝突破壊に関する研究の結果を示した。第五部は全体のまとめとした。本要旨では第二部、第三部、第四部の主要な結果をまとめた。

(第二部)

第二部では高空隙標的に突入する弾丸の貫入過程を調べた。

小天体は形成後に、惑星間に漂うダストを自身の表面に捕獲する可能性が考えられる。特に空隙が高い場合、天体表面から深い位置まで潜り込むことが考えられる。これにより元々の表面の組成とは異なる表面を持つことが考えられ、小天体の進化を考える上でダストの貫入メカニズムは重要であるといえる。我々は空隙率 80%, 87%, 94% を持つガラスビーズ焼結体を作成し、高速衝突実験を行った。弾丸にはさまざまな金属、玄武岩を用いた。ターゲット内部を可視化して貫入過程を調べるためにフラッシュ X 線装置を使用した。また衝突後のターゲットのトラック形状を調べるため、X 線透過画像を取得した。二つの型のトラック形状が観察された。1つは細長い形状であり、これをエンジン型と名付けた。もう1つは太短い孔と尾を持ったトラック形状であり、これをカブ型と名付けた。初期発生動圧が弾丸の引っ張り強度の 20 倍を超えるあたりでエンジン型からカブ型へトラック形状が変わることが分かった。弾丸の減速過程を調べたところ、速度の二乗に比例する慣性抵抗とターゲットの圧縮強度に比例する一定の抵抗の和によって弾丸は減速されることが分かった。衝突時に壊れた弾丸の最大破片が上記の抵抗を受けて進むという仮定を行って貫入深さを計算した。これにより実験結果の弾丸の貫入深さを説明することができた。この結果をダストが氷天体へ貫入する場合へ応用したところ、ダストの貫入深さは天体空隙率が 90% の場合、最大、自身の直径のおよそ 100 倍程度まで潜り込むことが分かった。これは数十ミクロンサイズのダストでは数十センチメートルの貫入深さとなる。小天体の長い歴史の中では表面の昇華によりひとたび捕まえても表面から失ってしまうかもしれない。ただし、より大きな衝突体であれば天体内部に捕獲されている可能性がある。

(第三部)

第三部では高空隙な標的に形成されるクレーターのサイズについて調べた。

クレーターの詳細は天体の空隙率や密度、強度、そして弾丸の直径、密度、強度、衝突速度によって変わることが考えられる。すなわち、これらの条件がクレーターサイズに与える影響を理解できれば、どのようなクレーターが形成されるかが予測できるとともに、クレーターの観測からこれらのパラメーターの一部を制限することが可能だと考えられる。本研究では空隙率 87%,93%, 94%を持つガラスビーズ焼結体と空隙率 50%を持つ石膏、空隙率 74%を持つ軽石を標的として実験に使用した。カブ型の孔の最大径、深さに関して無次元量を用いた解析を行った。本実験で得られた結果と過去の研究結果を用いて、幅広い標的の空隙率にわたって適用できる最大径・深さに関するスケーリング関係を得た。これを用いて彗星 9P/Tempel 1 の表面強度を推定した。得られた値は  $10^{11}$ - $10^8$  Pa 程度であり、過去の研究で推定されていた強度の範囲を狭めた。また、表面の強度が弱い彗星上では深さ/直径比が $<0.1$ となるクレーターが、その後の進化を考慮することなく衝突だけで形成されることも可能である結果が得られた。

(第四部)

第四部では空隙率の高い標的の衝突破壊について調べた。

破壊に必要な標的に与えられる単位質量あたりのエネルギー、すなわちエネルギー密度  $Q$  が過去に様々な標的について調べられている。これらとともに、本研究で用いた標的の  $Q$  についてまとめた。高速衝突実験により空隙率 80%, 87%, 94%を持つガラスビーズ焼結体の  $Q$  を得た。いずれの標的も  $Q$  は  $\text{kJ/kg}$  のオーダーであった。これは純氷や玄武岩標的のそれよりも大きい。過去の様々な  $Q$  と比較したところ、標的の圧縮強度が大きくなるほど、また標的の空隙率が大いほど  $Q$  も大きくなる傾向がみられた。過去に提唱された  $Q$  を無次元化したスケーリングパラメーター  $\Pi_s^*$  を計算した。このスケーリングパラメーター内で使用されるスケーリング定数、 $\mu$  と空隙率に線形の関係があることを仮定したところ、 $\Pi_s^*$  が空隙率によらずほぼ定数を取り、 $Q$  が空隙率の関数で書けるようになった。

|      |   |     |       |
|------|---|-----|-------|
| 氏名   | 岡本 尚也   |     |       |
| 論文題目 | An experimental study on collisional evolution of highly porous small bodies<br>(空隙の大きな小天体の衝突進化に関する実験的研究) |     |       |
| 審査委員 | 区分  | 職名  | 氏名    |
|      | 主査  | 准教授 | 中村 昭子 |
|      | 副査  | 教授  | 巽 好幸  |
|      | 副査  | 教授  | 大槻 圭史 |
|      | 副査  | 教授  | 門野 敏彦 |

要旨

本論文は、太陽系小天体の進化における高速度衝突過程について、特に空隙率が高い天体の場合の塵の衝突捕獲、クレーター形成、破壊についての実験的研究の成果を報告するものである。中空ガラスビーズあるいはミクロンサイズのガラスビーズを焼結させることにより、従来にない高い空隙率 80~94%の標的を作成し、これに弾丸を 7 km/s までの高速度で衝突させた結果を解析し議論を行っている。

本論文は 5 章からなる。

第 1 章は序章であり、研究の背景と目的を記している。

まず、太陽系天体が衝突を経験して進化してきたこと、小天体に見られる痕跡の特徴について紹介している。激しい衝突の場合は小惑星の族のように母天体が破壊し、小規模な衝突の場合は天体表面にクレーターを形成する。ついで、最近の観測により、小天体が空隙を多く含むこと、とりわけ、彗星には空隙率が 80 %を超えると推定されるものがあることを紹介している。衝突過程において空隙の効果は重要と考えられるものの、高い空隙率の標的を用いた実験的研究はほとんど行われていない。そこで、本研究では、高空隙率標的の衝突実験により、衝突体が表面からどれほど深く潜りこむのか、どのような衝突条件でどのような大きさや形のクレーターが形成されるのか、どの程度破壊されるのかという問題に取り組むとしている。さらに、小天体の物質強度の範囲、次元解析に基づくクレーターのスケーリング則、小天体の衝突破壊の程度と衝突条件の間の経験則について説明している。

第 2 章は、衝突貫入過程についてである。

Stardust 計画で持ち帰られた木星族彗星 Wild2 の塵の分析の結果、太陽近傍の高温領域で形成されたと考えられる物質を含むことがわかった。地上望遠鏡によるスペクトル観測によっても、オールド雲彗星と木星族彗星とに、高温で形成されたと考えられる結晶質シリケートの存在が明らかにされ、原始惑星系円盤内での動径方向の物質移動を示す証拠であるとされている。これに対し、本研究では、小天体が形成後に惑星間の塵を自身の表面に捕獲しこれにより表面組成が変化しうる可能性に着目し、衝突貫入過程の理解を目的とした実験を行っている。

ガラスビーズ焼結体標的に、玄武岩および金属の弾丸の高速度衝突貫入実験を行い、弾丸の貫入過程の観察と標的に形成される孔や弾丸の最終形状の測定のために X 線透過画像を取得している。標的には、細長いニンジン型と、太短い孔と尾を持ったカブ型の 2 種類の孔ができる。孔の形状の違いは、初期発生動圧が弾丸の静的引張強度の約 20 倍以上かどうかで決まること、それが弾丸粉碎の条件と対応していることを明らかにしている。さらに、弾丸の貫入深さをエアロジェル中の塵減速のモデルを使って説明している。すなわち、弾丸の最大破片が自身の速度の 2 乗に比例する慣性抵抗と標的の圧縮強度に比例する速度によらない抵抗とを受けて標的中で減速されるとすることで、貫入深さの実験結果を再現している。

氏名 岡本 尚也

このモデルを塵粒子が氷天体へ貫入する場合へ応用したところ、貫入深さは塵直径のせいぜい 100 倍程度にしかならない。これをもとに、彗星で観測されている高温環境由来の塵の起源が、最近の表面への捕獲ではなく、形成途中の捕獲である可能性を指摘している。

第 3 章は、高空隙天体に形成されるクレーターについてである。

クレーターの直径と深さは、天体の空隙率や密度、物質強度、衝突体の直径、密度、強度、衝突速度に依ると考えられる。本研究では、空隙率 90%程度ガラスビーズ焼結体、74%の軽石、50%の石膏を標的とした衝突実験を行い、カップ型の孔の最大径と深さについての無次元量を用いた解析を行った。その結果に、石膏や軽石、空隙率 40%のガラスビーズ焼結体についての過去研究の結果も加えて、広い標的の空隙率範囲にわたる孔の最大径および深さについての経験則を得ている。この経験則を Deep Impact 計画で人工弾丸により作られた Tempel 1 彗星表面のクレーター直径に適用し、表面の物質強度を推定した。強度は  $10 \sim 10^3$  Pa となった。この強度から、彗星表面構成粒子が水氷であると仮定するとそのサイズはおおよそ 100 ミクロンよりも大きいと推定される。この結果は、サブミクロンサイズの塵の付着成長だけで彗星が形成されるとする単純なモデルでは説明されない。また、彗星がこのような小さな物質強度を持つと仮定し本研究の経験則を適用することで、クレーターの深さ/直径比が、衝突直後の段階で、すなわち粘性緩和や昇華といった衝突後の熱進化過程を経る前から 0.1 程度と小さいことを推定している。

第 4 章は、衝突破壊についてである。

衝突後の標的の最大破片質量を整理することにより、本研究のガラスビーズ焼結体の衝突破壊に必要な標的単位質量あたりのエネルギー、すなわちエネルギー密度 (Q) が kJ/kg のオーダーであり、純氷や玄武岩標的のそれよりも大きいことを明らかにしている。ついで、様々な空隙率の標的についての Q とあわせて解析した結果、標的の物質強度が大きくなるほど、あるいは、標的の空隙率が大きいほど Q が大きくなる傾向を確認している。さらに、これまでにない広い空隙率範囲について、Q を空隙率、標的強度、標的密度、衝突速度で記述する経験式を導いている。

第 5 章では全体のまとめと今後の展望を述べている。

本研究は太陽系小天体の塵の衝突捕獲の可能性と、クレーター形成と破壊における標的の空隙率依存性をこれまでにない広い空隙率範囲について研究したものであり、高空隙率天体を模擬した標的を用いた先駆的な実験的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、学位申請者の岡本尚也は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。