

石膏塊と硅砂の境界へのナイロン球衝突：予備実験

鈴木絢子^a、長谷川直^b、佐藤雅彦^b、山本裕也^b

A preliminary experiment on impacting a nylon sphere at the boundary between a gypsum block and silica sand

Ayako I SUZUKI^a, Sunao HASEGAWA^b, Masahiko SATO^b, Yuya YAMAMOTO^b

Abstract

In order to understand impact cratering near the boundary between different geological units, we conducted an impact cratering experiment near the boundary between a gypsum block and dry silica sand. In this experiment, a target with a solid/granular boundary was prepared by burying a semi-cylindrical gypsum block in a container of dry silica sand. The nylon projectile impacted on the gypsum side (approximately 3 mm from the boundary) at an impact velocity of 3.64 km/s. An impact crater was formed on both the gypsum block and silica sand. Some of the phenomena were similar to those observed in impacts on the gypsum target and the silica sand target, respectively, and some were different.

Keywords : Impact craters, Experiments, Gypsum, Silica sand

1. 背景

近年の惑星探査技術の目覚ましい発展によって、天体表層の小さなスケールの地形までも観察できるようになった。van der Bogert, C.H. (2017) に掲載されている直径100m程度の月のいくつかの小さなクレーターは、より大きな衝突クレーターのエジェクタ堆積物（クレーターの孔からの放出物が降り積もった領域）と溶岩池（衝突溶融物が溜まって冷

^{a)} 東洋大学自然科学研究室 〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20
Natural Science Laboratory, Toyo University, 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8606, Japan

^{b)} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1
Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, 252-5210, Japan

え固まった領域)の境界にできている。地質ユニットにもよるが、月面上の直径100m程度の衝突クレーターは、強度支配域クレーターである可能性も高い (Melosh, H.J. 1989)。そのため定性的には、このような地質ユニット境界にできた強度支配域クレーターは、地質ユニットの強度や空隙率などの性質の違いを、直径や形状などに反映していると考えられる。

垂直方向に物質が異なる標的 (異なる物質が層状になった標的) に対する衝突実験は、これまでも実施されてきた (例えば, Dohi, K. 2012)。一方で、水平方向に物質が異なる標的でのクレーター形成にはこれまであまり関心が払われていなかったが、我々は固体中に強度境界をもつ標的に対するクレーター形成実験を実施してきた (鈴木絢子, 2022a)。

今回我々は、固体と粒状体の境界付近への衝突クレーター形成を試みた。本稿では、標的の準備方法を説明するとともに、2023年10月に実施したある1ショットの予備的な結果を報告する。

2. 実験手法

石膏塊を乾燥珪砂に埋めたものを標的とした。吉野石膏販売 (株) より購入したハイストーンN型の焼石膏と水温約25℃の水道水とを、質量比1 : 0.42で混合してスラリーを作成した。内径15cm、高さ10cmの紙管の中央部を、高さ・幅それぞれ約150mm、厚さ2mmの亚克力板で仕切ること、半円柱形の型枠を都合2つ準備した。亚克力板の両側にスラリーを静かに流し入れ、室温で約3週間乾燥させたのち、紙管と亚克力板を取り外した。この石膏塊の引張強度、バルク密度、空隙率は、同じ焼石膏を用いて同様の方法で作成した小試験片を測定した結果 (鈴木絢子, 2022b) を用いることにした。引張強度、バルク密度、空隙率はそれぞれ 4.01 ± 0.42 MPa、 1.52 ± 0.02 g/cm³、34%である。

できた半円柱形の石膏塊の1つを乾燥珪砂と共に直径45cm、深さ16cmの金たらいに入れた。乾燥珪砂の平均粒径、バルク密度、安息角、空隙率はそれぞれ約510μm、 1.56 ± 0.07 g/cm³、約35°、38%である (山本聡, 2018)。乾燥珪砂の表面はステンレス直尺を用いて水平にならし、珪砂層の表面と石膏塊の表面とが一致するようにした。

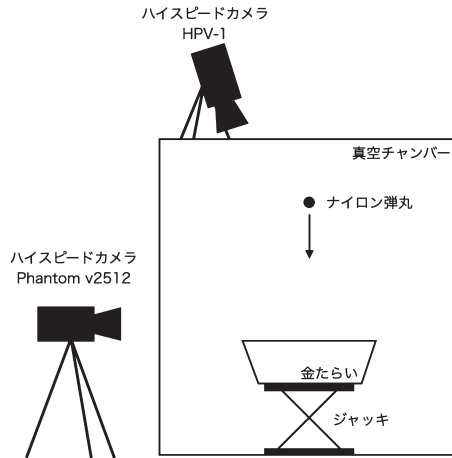


図1. 真空チャンバー内の標的とハイスピードカメラの設置位置関係。

実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の超高速衝突実験施設にある縦型二段式軽ガス銃を用いて実施した。上記のとおり準備した標的の金たらいを真空チャンバーの中央部に設置し、実験に先立って真空チャンバー内を真空ポンプで8Paまで減圧した。弾丸は直径4.8mmのナイロン球で、真空チャンバーの上部から鉛直下向きに発射される。オシロスコープを用いて、銃身直下に設置された2本のレーザー光を弾丸が横切る時刻を計測し、その時間差から衝突速度を求める。本実験では3.64km/sであった。チャンバー内の真空度は十分高いため、空気抵抗による弾丸の減速は無視できるものとする。衝突地点の様子は、真空チャンバーの上側窓からハイスピードカメラ HPV-1を用いて50万fpsで撮影、横側窓からハイスピードカメラPhantom v2512を用いて99000fpsで撮影した。真空チャンバー内の標的と弾丸の軌道、ハイスピードカメラの位置関係を図1に示した。

3. 結果と考察

ハイスピードカメラHPV-1の映像を用い、ナイロン弾丸が衝突したのは、硅砂と石膏の境界から石膏側に約3mmの地点と判断した。ハイスピードカメラPhantom v2512の映像によると、衝突後、石膏側からは不規則形状の様々な大きさの破片が飛散し、硅砂側では放出された硅砂が作る逆円錐型のエジェクタカーテンが観察された。それぞれ、石膏標的や硅砂標的への衝突で観察されるものと良く似ていた。

試験後の標的にできた衝突クレーターの写真を図2に掲載した。石膏側と硅砂側の両方に衝突クレーターが観察された。

石膏側のクレーターは、周縁部は不規則な形状で、衝突点付近が深くなっていた。これは石膏標的への衝突で観察されるクレーターの特徴と共通している。衝突点付近の深い部分は、衝突による圧縮破壊を主として形成された領域で、周囲の浅い部分は、引張破壊によって形成された領域（スポール領域）であると考えられる。硅砂との境界に近づくにつ

れてクレーター領域は拡大した。珪砂との境界におけるクレーター領域の長さは60mmであった。衝突地点を通り、珪砂との境界に垂直な直線上において、衝突地点とクレーターの縁との距離は23mmであった。石膏側の衝突クレーターの平面形状は、円の半分というよりも、“横長”の楕円の半分に近いことがわかった。大気との境界面(水平面)だけでなく、珪砂との境界面(垂直面)でも引張破壊が起きたため、境界に近いところでスポール領域が拡大し、“横長”の形状になったと考えられる。

珪砂側のクレーターの平面形状は円の一部に近い形状で、周辺より盛り上がったクレーターリムを持っていた。これも珪砂標的への衝突で観察されるクレーターの特徴と一致している。本実験ではナイロン弾丸は珪砂へは衝突していないが、石膏に衝突して発生した衝撃波が、石膏と珪砂の境界を越えて珪砂側へも伝播し、衝突クレーターを作ったと考えられる。珪砂側の衝突クレーターは、石膏との境界におけるへこみの長さは130mmであった。衝突地点を通り、石膏との境界に垂直な直線上において、衝突地点とクレーターリムとの距離は96mmであった。また、石膏との境界に平行な向きにクレーターのリム間距離を計測すると、一番長い場所は石膏との境界から34mmの地点で、長さは138mmであった。珪砂側の衝突クレーターの平面形状は、円の半分というよりも、“縦長”の楕円の一部に近いことがわかった。石膏との境界があることで、衝撃波か掘削流の伝播、または、クレーター形成の修正過程(modification stage)に影響があったためと推察される。

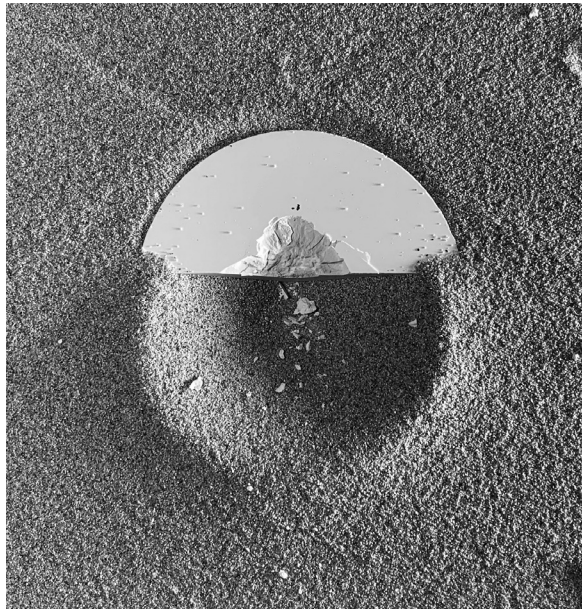


図2. 乾燥珪砂と石膏の境界付近にナイロン弾丸を衝突させてできたクレーターの平面写真。図中央やや上部に見られる白い半円形の部分が石膏塊で、乾燥珪砂に埋まっている。ナイロン弾丸は、境界から石膏側に約3mmの地点に衝突した。図の横幅は約25cm。

4. おわりに

異なる地質ユニットの境界付近にできる衝突クレーターへの応用を念頭に、固体と粒状体の境界付近への衝突クレーター形成を試みた。本実験では、半円柱形の石膏塊を乾燥硅砂のたらいに埋めることで、固体と粒状体の境界を持つ標的を準備した。ナイロン弾丸は衝突速度3.64km/sで、石膏側（境界から約3mm）に衝突し、石膏側と硅砂側の両方に衝突クレーターが形成された。それぞれ、石膏標的、硅砂標的への衝突で観察されるものと類似の現象・地形が観察された。一方で最終的な地形には、境界の存在を示唆する点もあった。今後は衝突速度を変えた実験を複数回実施し、ハイスピードカメラでの観察等を通じて、境界付近への衝突でできる衝突クレーターの形成メカニズムを考察する。

謝辞

本実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の超高速衝突実験共同利用施設を利用して実施した。

参考文献

- van der Bogert, C. H. et al. (2017) Origin of discrepancies between crater size-frequency distributions of coeval lunar geologic units via target property contrasts. *Icarus*, 298 : 49-63.
- Dohi, K. et al. (2012) The effect of a thin weak layer covering a basalt block on the impact cratering process. *Icarus*, 218 : 751-759.
- Melosh, H. J. (1989) *Impact Cratering: A Geologic Process*. Oxford University Press, New York.
- Suzuki, A. I. et al. (2018) Increase in Cratering Efficiency with Target Curvature in Strength-Controlled Craters. *Icarus*, 301 : 1-8.
- 鈴木絢子ほか (2022a) 強度境界での衝突クレーター形成に関する予備実験の報告. 東洋大学紀要 自然科学篇 第66号 : 1-4
- 鈴木絢子ほか (2022b) 強度境界での衝突クレーター形成を想定した予備実験 ～石膏標的のクレータースケリング則～. 令和3年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム講演集 SA6000178025.
- 山本聡ほか (2018) その場計測研究による衝突クレーター形成のスケリング則に対する最新の理解. 日本惑星科学会誌「遊・星・人」第27巻1号 : 17-27.