

# 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

鈴木絢子<sup>a</sup>・長谷川直<sup>b</sup>・寫生有理<sup>b</sup>・木内真人<sup>b</sup>

Results of preliminary experiments on impact crater formation at strength boundaries

Ayako I SUZUKI<sup>a</sup>・Sunao HASEGAWA<sup>b</sup>・Yuri SHIMAKI<sup>b</sup>・Masato KIUCHI<sup>b</sup>

## Abstract

Impact craters are one of the probes that constrain the properties of impact sites. A small impact crater at the boundary between the melt pool and the ejecta blanket around Jackson crater on the Moon exhibits irregular shape and is thought to reflect the difference in strength between the melt pool and the ejecta blanket. In this paper, we report the results of preliminary experiments assuming the formation of impact craters at the strength boundary.

**Keywords** : impact craters, experiments, light-gas gun

## 1. 背景

衝突クレーターは、様々な個体天体に普遍的に存在する顕著な表層地形である。一方で、「典型的な形状からのずれ」を調べることで、クレーター形成時の表層環境や後の進化過程を制約する重要なツールとも考えることができる。

月のジャクソンクレーター (22.4° N 163.1° W) のエジェクタ堆積物と溶岩池の境界に小さな衝突クレーターがある (van der Bogert, C. H. 2010)。エジェクタ堆積物とは衝突クレーター内部からの放出物が降り積もったもので、溶岩池は衝突溶融物が溜まって冷え固まったものである。一般的には、エジェクタ堆積物の方が空隙があつて標的強度が小さく、溶岩池の方が空隙が (比較的) なく標的強度が大きいと解釈できる。境界にできたそのク

<sup>a)</sup> 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

<sup>b)</sup> 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

レーターは、エジェクタ堆積物側の半径が、溶岩池側より約20%大きかった。この境界上のクレーターのサイズは200 m程度であり、月面上での相によっては強度支配域であると推測される。そのため、定性的には、溶岩池とエジェクタ堆積物の強度の違いが、直径の違いに反映されていると考えることができる。しかし、これまで水平方向に強度境界のある標的に対する衝突クレーター形成実験は行われていない。

強度境界のある標的に対する衝突クレーター形成実験の主な難しさは、1) 強度境界のある標的の入手方法または作成方法と、2) 境界に弾丸を当てる方法または当たったと確かめる方法であると考えられる。本報では、この2点の困難さを克服する手段について特に焦点をあて、我々が実施した予備的な実験の結果を報告する。

## 2. 実験手法

### 2.1. 標的の作成と計測

天然の岩石には強度分布があると考えられるが、非破壊でそれを計測することは容易ではない。我々は、焼石膏を用いて標的を自作することにした。一般的な“粉末の石膏”は、焼石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) であり、水と混合することによって水和反応を起こして二水石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) の結晶を作って「石膏像」などでイメージされる“かたまり”となる。つまり、求める形状で様な強度の標的を作成することが容易である。強度の異なる2種類の焼石膏を用いることで、強度境界のある標的を作成することが可能となる。

吉野石膏販売(株)より購入したハイストーンHLP型 (以下HLP型) とハイストーンC-2型 G (以下C-2型) の2種類の焼石膏を用いた。まず直径10cm、高さ7cmの紙管を寝かせ、開口部の下半分を半円形のダンボールで覆った型を作成した。HLP型と水温25°Cの水道水を質量比1:0.3で混合したスラリーを型に流し入れ、室温で約1週間乾燥させた。次に、HLP型の半円柱が入ったままの型を縦に起き、C-2型と水温25°Cの水道水を質量比1:0.45で混合したスラリーを、型の残り半分に流し入れた。その後室温で3週間以上乾燥させて、実験直前に紙管を取り除いた。実験前は、2種類の石膏同士はしっかり接着していた。

標的のバルク密度と引張強度は、円板形試験片を用いて計測した。前段落と同様に作ったHLP型とC-2型のスラリーを、直径30mm、高さ10mmの紙管にそれぞれ流し入れた。室温で約2時間乾燥させてから紙管を取り外し、室温で3週間以上乾燥させた。各5片ずつの質量、直径、高さを計測し、質量を体積で割った値の平均をバルク密度とした。それぞれ  $1.66 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.36 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$  であった。二水石膏結晶の真密度を  $2.304 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$  (Suzuki et al. 2018) とすると、空隙率はそれぞれ28%、41%である。引張強度は、円板形試験片を直径方向に一軸圧縮試験機 (株エー・アンド・デイ, テンシロンUCT-2.5) で圧縮し、破断したときの試験力を用いて計算した。これはブラジリアンテストという手法 (e.g., Wong and Jong. 2014) で、破断点の試験力を  $F$ 、試験片の直径を  $d$ 、厚みを  $h$  とすると、引張強度は  $\sigma_t = 2F/(\pi dh)$  となる。それぞれ8片、9片の試験片での結果を平均し、引張強度は  $4.90 \pm 0.61 \text{ MPa}$ 、 $1.38 \pm 0.05 \text{ MPa}$  であった。

## 2.2. 超高速衝突実験装置

実験は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の宇宙科学研究所に設置されている縦型二段式軽ガス銃を用いて実施した。直径4.6mmのナイロン製またはポリカーボネイト製の球（弾丸）を、水素ガスまたは窒素ガスを用いて約1～7 km/sに加速できる装置である。約1 mの銃身の内部には螺旋状の溝が施されており、弾丸が回転しながら飛翔することで直進性がよくなり（ジャイロ効果）、着弾点のばらつきを抑える効果がある。標的の強度境界に弾丸を確実に当てたい本実験にとって適した実験装置といえる。

衝突速度は、銃身直下の速度計測システムで得た値を用いる。レーザー光とそれを受けけるフォトダイオードが2組設置してあり、弾丸がこれらを横切った時刻をオシロスコープで計測することで、時刻差から弾丸の飛翔速度を計測する仕組みである。その後弾丸は、直径150cm、高さ200cmの実験チェンバー内に設置した標的に向かって約2.7m飛翔する。実験チェンバー内はロータリーポンプで約10Paに真空引きしており、大気が弾丸減速や実験結果に与える影響は非常に軽微であると考えられる。

本実験ではナイロン球を用いた。衝突速度は2516 m/sであった。

## 2.3. 着弾点の観察

本研究の結果を解釈する上では、弾丸が標的のどこに着弾したのかを知る必要がある。そこで、高速度ビデオカメラ（株島津製作所, Hyper Vision HPV-X）を用いて、標的表面を撮影した。撮影フレームレートを8  $\mu$ s/frameとしたところ、弾丸が標的に半分ほどめり込んだ様子を捉えることができた。この画像より、弾丸は強度境界面からHLP型側に2 mm外れたところに着弾したと結論づけた。

## 3. できた衝突クレーター

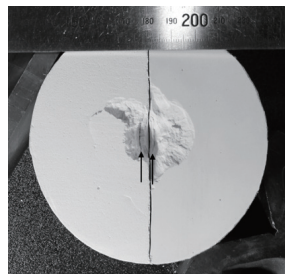


図1. できた衝突クレーター

ショット後、標的を実験用チェンバーから回収した。標的は石膏の境界面で2つに分かれていたが、衝突点周辺にクレーターができていた。分かれた2つのパーツを元のように組み合わせ、衝突クレーターを観察した（図1）。上から見たクレーターの概形は円で、

周が不規則な形状をしていること、中心付近が一段と深くなっていることは、脆性破壊を示す標的にできる典型的な衝突クレーターの特徴と共通している。一方で、衝突点下に、強度境界面に平行なクラック(黒矢印)が両サイド共に観察された。クレーターサイズは、HLP型(写真向かって右側)の方がC-2型より大きい。着弾点が強度境界からHLP型側にずれたためかもしれない。また、強度はHLP型の方が大きい、空隙率はC-2型の方が大きい。空隙により衝撃波の伝播が阻害され、クレーターが大きくなれなかったのかもしれない。

#### 4. まとめと今後の展望

本報では、強度境界での衝突クレーター形成実験の予備的な実験の結果を報告した。強度境界に弾丸を当てるため、螺旋状の溝のある銃身を持つ縦型二段式軽ガス銃を用いて実験を実施した。また、境界面を高速ビデオカメラで観察することで、どこに当たったかを突き止めることができた。強度境界のある標的は、焼石膏を用いて自作した。しかしショットによって強度境界面で割れてしまった。今後、まずショットによって強度境界面で割れないような標的の作成方法を考案する必要がある。その後衝突速度を変えてできるクレーターの変化を調べる。各石膏のよう標的にできるクレーターとの定量的な比較も行う。

#### 謝辞

本実験は、JAXA宇宙科学研究所の共同利用として、超高速衝突実験施設を利用して行った。

#### 参考文献

- Suzuki A. I. et al. (2018) Increase in Cratering Efficiency with Target Curvature in Strength-Controlled Craters. *Icarus*, 301 : 1-8.
- van der Bogert, C. H. et al. (2010), Discrepancies Between Crater Size-Frequency Distributions on Ejecta and Impact Melt Pools at Lunar Craters : An Effect of Differing Target Properties? *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 41 : #2165.
- Wong, L. N. Y. and M. C. Jong (2014), Water Saturation Effects on the Brazilian Tensile Strength of Gypsum and Assessment of Cracking Processes using High-Speed Video. *Rock Mech. Rock Eng.*, 47 (4) : 1103-1115.