

湿った砂におけるクレーター形態：衝突実験と数値シミュレーションの相互比較

○豊嶋遙名¹, S. Raducan², 荒川 政彦¹, 長谷川 直³, M. Jutzi²

¹神戸大学, ² University of Bern, ³宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

背景：太陽系には湿った表層を保持している、もしくは保持していた天体が幾つか存在する：現在地球は液体の水、タイタンは液体炭化水素を表層に含んでおり、過去には火星、小惑星も液体の水を含んでいたと考えられている。それらの表面に普遍的に存在する衝突クレーターは、これまでそのサイズ頻度分布から、天体表面年代の推定や天体へ飛来する衝突体のサイズ頻度分布の推定に利用してきた。この際、クレーターサイズを衝突体サイズに変換するために必要なのがクレーターサイズスケール則であり、標的物質ごとに経験的に構築される。Toyoshima et al. (submitted) は湿った砂標的を用いた衝突クレーター形成実験を行い、含水率に伴い変化する標的の付着力および摩擦係数の影響を組み込んだ、湿った表面に利用可能なスケール則を構築した。この実験では特徴的なクレーター形状が観察されており、含水率の増加に伴ってエジェクタ粒子が互いに付着し合い塊を形成する為、湿った標的におけるエジェクタ堆積構造はランパート状の非一様な形態を示すことが明らかになった。湿った表面におけるクレーターの形状的特徴を確立できれば、クレーター形状から形成当時に表面が湿っていた可能性や、侵食の激しい湿った表面において侵食前のクレーター形状を推定することが将来的には可能になるかもしれない。実際にタイタンや火星上で、実験結果と類似したランパート構造を持つ衝突クレーターは観測されているものの、今回の室内実験で形成されたクレーターは強度支配域である為、重力支配域である実際の衝突クレーターへの直接的な応用は不適切である。そこで本研究では、実際のクレーターと比較可能な、重力支配域における湿った表面でのクレーター形成を数値計算により再現することにした。

手法：本研究では Toyoshima et al. (submitted) の実験結果を再現・拡張するため、Bern の parallel smoothed particle hydrodynamics コード (Bern SPH) (Benz & Asphaug, 1995; Jutzi et al., 2008; Jutzi, 2015) を用いた。このコードは、弾塑性応答や破壊・損傷といった地質材料のシミュレーションに適した材料モデル、空隙圧密モデル ($P-\alpha$)、および様々な材料の状態方程式で構成される三次元衝撃物理コードであり、重力支配域クレーターを室内実験で再現する際に広く利用されてきた石英砂標的を用いた室内実験に対してすでに検証されている (Luther et al., 2021)。我々は Toyoshima et al. (submitted) の直径 4.7 mm ポリカーボネイト球弾丸を用いた衝突速度 4 km s^{-1} における、乾燥砂標的および湿った砂標的（含水率 12 wt. %）に対するショットをそれぞれ再現した。ただし粒子数

は 70,000 粒子である。実験で使用された標的は含水率 0 wt. %, もしくは 12 wt. %に調合した石英砂(粒径 500 μm)と液体水の混合試料であり、空隙率、摩擦係数、付着力はそれぞれ 51 %, 0.67, 0.54 kPa (含水率 0 wt. %), および 31 %, 0.53, 6.1 kPa (含水率 12 wt. %) である。本研究では、材料モデルに実測した摩擦係数を使用し、付着力については含水率 0 wt. % 標的の場合は 0 kPa, 含水率 12 wt. % の場合は 0.1 - 6.1 kPa を使用してパラメタチューニングを行った。空隙圧密モデルには、Housen et al. (2018) で計測された石英砂の Crush curve と実測された空隙率を使用した。状態方程式には、石英と水の Tillotson EOS を様々な方法で混合して使用することを試みたが、状態方程式の違いがクレーター形状へ与える影響がほとんどなかったことから、含水率 0 wt. % 標的、12 wt. % 標的どちらの場合にも石英の Tillotson EOS (Melosh, 1989) を使用した。さらに本研究では室内実験の拡張として、同じ標的パラメタを用いた地球重力およびタイタン重力下における直径 10 cm, 1 m, 100 m クレーターの再現を行い、Toyoshima et al. (submitted) のクレーターサイズスケール則の評価も行った。

結果：本計算結果は、含水率 0 wt. % 標的、12 wt. % 標的どちらの場合も室内実験で取得されたクレータープロファイルと良く一致した（図 1）。特に含水率 12 wt. % では、エジェクタ粒子のクランプリングも極めて良く再現されており、エジェクタ堆積構造の歪化が観察された。また、数値計算により形成された湿った砂のクレーターサイズは、Toyoshima et al. (submitted) のクレーターサイズスケール則と整合的であることが確認された（図 2）。そして、含水率 0 wt. % 標的、12 wt. % 標的どちらにおいても重力支配域である、再現された直径 100 m のクレーターは、含水率 12 wt. % 標的の方が深さが浅くなっている、湿った表層のクレーターの方が侵食で消去されやすい可能性が示唆された。また、今回の計算粒子数（解像度）ではクランプリングは観察されず、今後解像度を上げて評価を試みる必要がある。

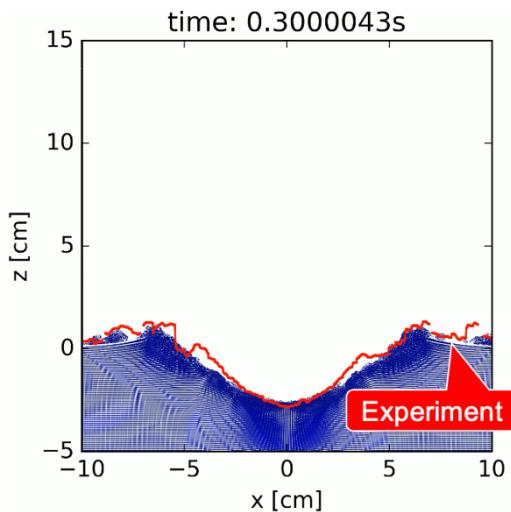


図 1 含水率 12 wt. % 標的において形成されたクレーターの室内実験と数値計算の比較。

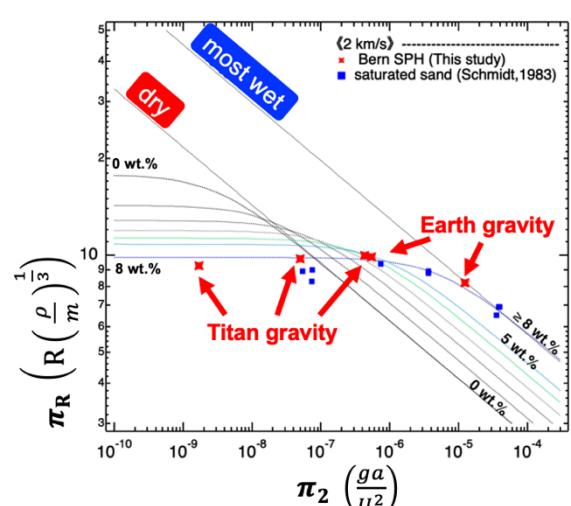


図 2 標的含水率ごとの湿った砂クレーターサイズスケール則（色付き曲線）と含水率 12 wt. % 標的の数値計算結果（赤星）の比較。