

湿った砂におけるクレーター形成に伴う周辺大気の温度変化

豊嶋遥名¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 笹井遥¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

はじめに クレーター形成は天体における温度上昇イベントの一つであり、衝撃に伴い標的内部で発生する摩擦熱が衝突残留熱としてクレーター地下に残存する。Yasui, et al 2021^[1]の多孔質石膏標的を用いたクレーター形成実験からは、クレーター半径が1km 以上の場合、有機固体の生成に十分な期間地下の加熱が持続する可能性が報告されており、一定サイズ以上のクレーター形成は、ハビタビリティに有意な期間、周囲を温める可能性がある。

Gratteri crater は直径 6.9km の火星クレーターで、比較的形成年代が新しく(1-20Ma)、2次クレーターが多数残存していることが知られている。それらの一部は、泥流が飛散したようなエジェクタ堆積構造を持っており、標的が流動的であった痕跡が見られる。しかし Gratteri の2次クレーターサイズの衝突規模では、標的の流動化に十分なほどの量の凍土を融解させることは難しい。したがって、形成当時この地域は凍っておらず、湿っていた可能性がある。

湿った砂の熱伝導率は、飽和度 0~100 で 0.29 から 2.2 まで変化する^[2]ことから分かるように、表層含水量はクレーター地下がどの程度温められるかを決定する重要な変数の一つである。しかしながら、Gratteri の2次クレーター形状は地域によって、流動的なエジェクタ堆積構造を持つものから乾燥粉体に特徴的な明確なリムを持つものまで様々であり、湿った砂では含水量に伴い剪断強度と摩擦係数が変化する^[3]ことから、表層含水量の地域差が標的物性の地域

間での違いを生み出し、クレーター形態を多様化させているのかもしれない。そこで本研究では、Gratteri 地下での加熱期間を推定するため、形成当時の Gratteri 周囲の表層含水量をまずは見積もることにした。我々は、大気存在下において含水率を変化させた湿った砂でクレーター形成実験を行い、クレーター形状・サイズに対する含水量の影響を評価した。また併せて、クレーター地下数カ所にてクレーター形成に伴う温度上昇のその場観測も行った。

手法 衝突装置には神戸大学の横型二段式軽ガス銃、及び宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて、直径 2mm のアルミ球弾丸、もしくは直径 4.7mm のポリカーボネイト球弾丸を、含水率 0-13 wt.%に変化させた湿った砂標的に衝突させた。横型銃の場合は、標的を30°傾斜させた斜め衝突、縦型銃の場合は垂直衝突で実験を行った。チャンバー内の真空度は 0.03-0.3 気圧の大気存在下で、標的中の水は液体状態であることを標的内部に埋め込んだ熱電対により確認した。温度観測は垂直衝突の場合でのみ行い、標的内部5ヶ所にK型熱電対(サンプリング間隔 10ms)を設置してクレーター地下における温度上昇を計測した。実験の様子は可視光高速カメラ(10⁵fps)、および高速赤外線カメラ(350-3000fps)で標的の真上・真横から撮影して解析した。

結果 含水率が増えるにつれて、エジェクタ粒子が互いに付着して、最終クレーターのリムが歪化した。含水率 8 wt.%以上では実験の数時間後、塊となったエジェクタが

[1]Yasui, et al., Commun Earth Environ 2, 95 (2021).

[2]所, 他. 土木学会第 67 回年次学術講演会 (2012).

[3] Richefeu, Physical Review E 73, 051304 (2006)

[4]Toyoshima, et al., ESS Open Archive (2024).

付着力を失って互いに緩和し、ランパートクレーターのようなエジェクタ堆積構造を形成することも確認された。クレーターサイズについて、直径は含水率 5 wt.%まで減少、それ以上の含水率で一定となり、深さ直径比は含水率 5 wt.%まで増大、それ以上で一定となった。本研究では従来の π スケール則に、計測した湿った砂標的の含水率に伴う摩擦係数変化と剪断強度変化を組み込むことで、標的の含水率変化を表現可能なクレーターサイズスケール則を構築した (図 1) :

$$\pi_R = (0.11w_c + 0.23) \cdot$$

$$\left\{ \pi_2' + \left[\left(\frac{0.052}{(0.11w_c + 0.23)} \right)^{-2.71} \pi_3' \right]^{1.68} \right\}^{-0.22}$$

ただし、 π_R は直径に関する無次元量、 π_2' は重力に関する無次元量(衝突角補正あり)、 π_3' は標的強度に関する無次元量(衝突角補正あり)、 w_c は標的含水率である。我々は Gratteri 周囲で 2 次クレーターの形状が互いに異なる 2 地域を比較し、本スケール則を応用することで表層含水量を推定した(詳しくは[4]を参照)。その結果、一方の地域は表層含水率 2 wt.%以下、他方の地域は 6 wt.%以上である可能性が示唆された。これは本実験で観察されたそれぞれの含水

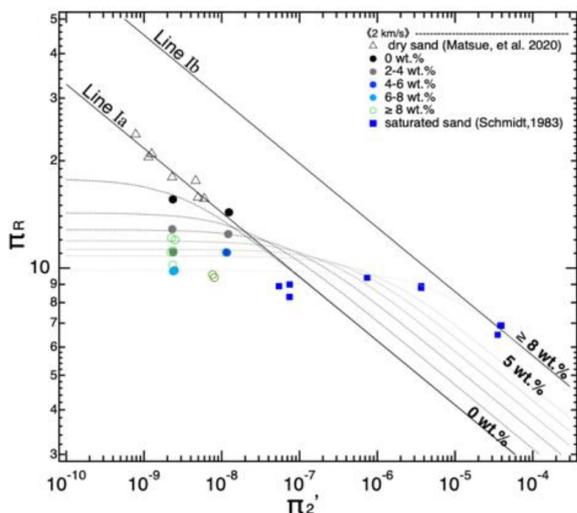


図 1 本研究で構築されたクレーターサイズスケール則 (π スケール則)

左) 無次元重力に対する無次元クレーター直径の関係。Line Ia は乾燥石英砂の重力支配域スケール則で、Line Ib は飽和砂の重力支配域スケール則。右) 無次元標的強度に対する無次元クレーター直径の関係。Line IIa は本研究の湿った砂の強度支配域スケール則。Line IIb は本研究の乾燥砂の強度支配域スケール則で、Raducan, et al(2019)の結果と整合的である。

率におけるクレーター形状とも整合的な結果であった。

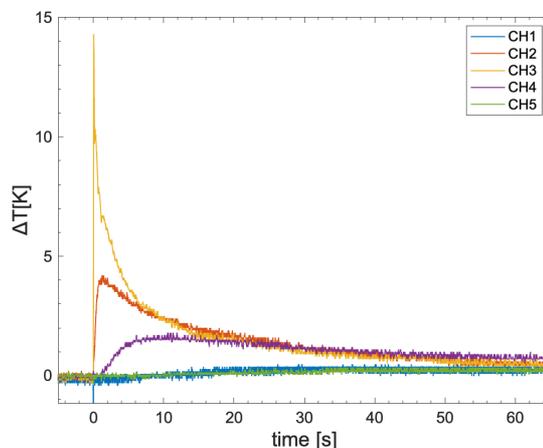


図 2 含水率 12 wt.%標的でのクレーター地下温度上昇各熱電対 (CH1~CH5) のクレーター壁面からの距離は、CH1 から順に 7.53mm、7.14mm、4.06mm、0.617mm、3.504mm。

標的直上から撮影した赤外線カメラからは、クレーター形成時間以降も 100 °C 以上の領域がクレーター壁面に残存することが確認された。クレーター地下における温度上昇は、今回は含水率 9 wt.%以上でのみ確認できた。最大温度上昇は、衝突点の距離よりもクレーター壁面からの距離に依存しており、距離が近いほど温度上昇が大きく、ハンチ幅が狭くなっていたことから(図 2)、含水率が比較的高い場合は、熱伝導によって地下が温められることが確認された。

