

球面にできる強度支配域クレーターの形成メカニズム

鈴木絢子 (JAXA), 岡本千里 (法政大), 黒澤耕介 (千葉工大), 門野敏彦 (産業医科大),
長谷川直 (JAXA), 平井隆之 (千葉工大)

1. 背景

近年の惑星探査によって、小惑星・小氷衛星等の表面にも衝突クレーターが多数存在することがわかってきた。小惑星など小さな天体上でのクレーター形成は、大きな天体上でのそれと様々な点で異なる。例えば、標的の空隙率や衝突面の形状が不規則なこと、天体の重力加速度や衝突速度が小さいことなどである (e.g., Cintala et al., 1978; Nakamura, 2002)。

曲率のある面にできる強度支配域の衝突クレーターは、Fujiwara et al. (1993, 2014) によって調べられ、曲率が大きくなるほどクレーターの体積、深さ、直径が増加することが指摘されているが、その要因はわかっていなかった。本研究では、直径を変えた石膏球への衝突クレーター形成実験を行った。高精度3次元形状測定を行い、クレーターの体積、半径、深さに曲率が与える影響について調べた。また簡単な半解析モデルを構築し、標的の曲率がクレーター半径に与える影響について考察した。

2. 実験概要

実験は宇宙科学研究所にある超高速衝突実験施設の二段式軽ガス銃を用いて行った。標的は含水石膏で、直径 7.8, 10.9, 17.0, 24.8 cm の球または半球である。参照データ取得のため、一辺が 9, 15 cm の立方体標的も用いた。バルク密度は 1.08 g/cm³、引っ張り強度は 2.4 MPa である。弾丸は直径 3.2 mm のナイロン球で、約 3.4 km/s で標的に衝突させた。本実験の弾丸/標的サイズ比 (=規格化した曲率) α は 0.013-0.041 であった。標的は発泡スチロール製の回収ボックス内に設置し、実験後に回収してできたクレーターを観察した。高精度3次元形状測定システム (COMS MAP-3D) を用いて標的表面を 0.2mm の精度でスキャンし、3次元データを取得した。クレーターがない部分を用いて球面を近似的に求めて衝突前表面とし、それとの差分としてクレーターのプロファイル (深さ) や体積を得た。クレーターの半径は、衝突前表面においてクレーターが占める面積と等しい面積を持つ円の半径と定義した。得られた3次元データの一例を図1に示した。

3. 結果

全てのクレーターは、円形の深い穴（ピット）とその周囲の不規則な浅いへこみ（スポール）で構成されていた。曲率が大きくなると、クレーター全体やスポールの体積、半径は増加するが、ピットの体積はほぼ一定であることがわかった。クレーターの体積が曲率とともに増加する傾向は Fujiwara et al., 2014 とも整合的であることに加え、体積・半径増加にはスポール領域の拡大が寄与していることを新たに示した。クレーター深さについては、少なくとも今回我々が調査した曲率の範囲では、曲率による変化は見られなかった。

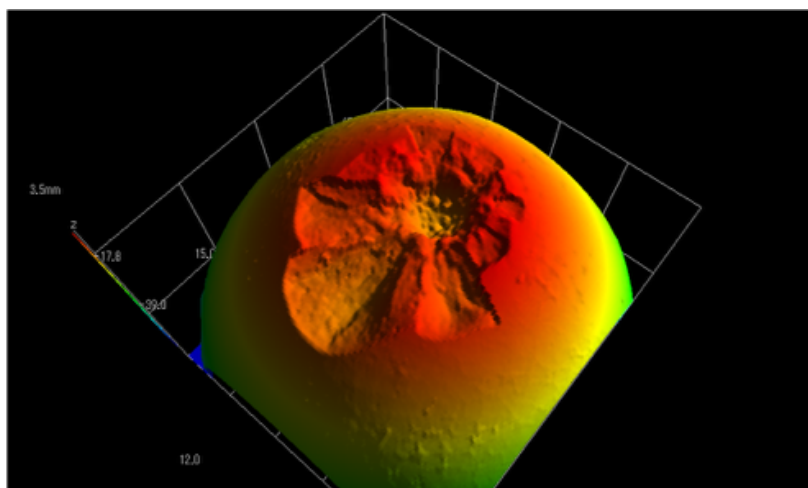


Fig.1 A digital terrain model of the resultant crater formed on a sphere with 7.8 cm in diameter. The rainbow colored pattern displays the height (red is high).

4. 考察

標的に衝突が起こったとき、衝撃波は等圧コア中心からの距離とともに減衰し、ある距離 l における衝撃圧は $P(l)=P_0(l/\alpha R_p)^{-n}$ と表される (Croft, 1982)。ここで R_p は弾丸半径、 P_0 は等圧コア内の衝撃圧力、 α は等圧コア半径が弾丸半径の何倍かを示すパラメータ、 n は減衰率である。等圧コア中心から距離 l の標的表面上におけるローカルな垂直方向への応力 P_n を表すと、平面標的では

$$\frac{P_n}{P_0} = \left\{ 1 + \left(\frac{R_n}{\alpha} \right)^2 \right\}^{-\frac{n+1}{2}},$$

と書ける (図 2a)。ただし、 R_n は平面におけるクレーター半径を弾丸半径で規格化したものであり、本実験では $R_n=6.34$ であった。また球面標的では、

$$\frac{P_n'}{P_0} = \left\{ 1 + \frac{2(1-\alpha\chi)}{(\alpha\chi)^2} (1 - \cos \omega) \right\}^{-\frac{n+1}{2}} \left\{ 1 + \frac{1-\alpha\chi}{\alpha\chi} (1 - \cos \omega) \right\},$$

と表せる (図 2b)。ただし, χ は曲率, ω は球面におけるクレーター半径の中心角である。

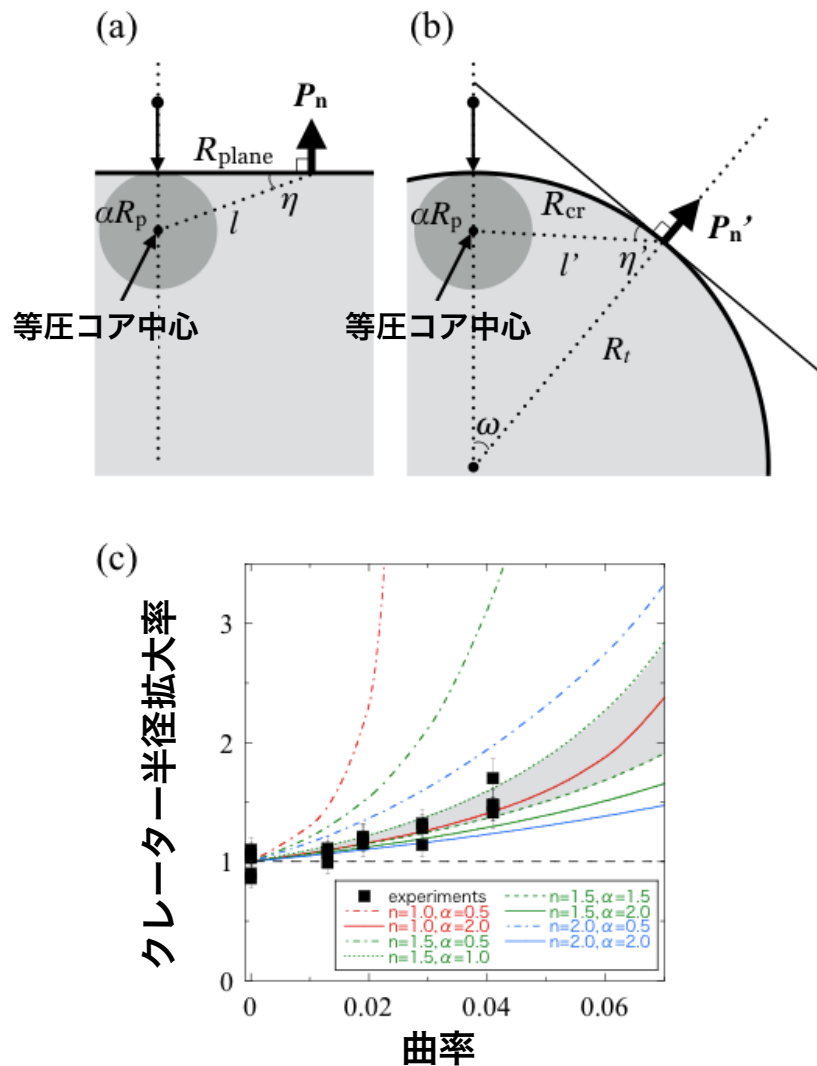


Fig.2 Schematic views of the impacts onto (a) planar and (b) curved ($\chi = R_p/R_t$) surfaces with variables used in our simple model. The projectile comes from the top along the vertical dotted line. The dark-gray circles represent the isobaric core. (c) The model curves of various pairs of n and α are plotted with the experimental results. The gray area indicates the area of $n = 1.5$ and $\alpha = 1.0-1.5$.

いま, 標的は平面も球面も同じ石膏を用いているので, $P_n = P_n'$ とし, 球面におけるクレーター半径を平面におけるクレーター半径で規格化した値 (=クレーター半径の曲率による拡大率) $R_{\text{cr}}/R_{\text{plane}} = R_t \omega / R_{\text{plane}} = \omega / (\chi R_n)$ を図 2c に示した。減衰率 $n=1.0, 1.5, 2.0$, 等圧コアサイズ $\alpha=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の場合を描いてみると, 本実験の結果は $n=1.5$, $\alpha=1.0-1.5$ の範囲と合う。これらの値は先行研究で示され

たものとも整合的である (Gault and Heitowitz, 1963; Senshu et al., 2002)。このことが示唆するのは、標的の形状 (等圧コアから自由表面までの距離) がクレーター半径の拡大に効いているということである。

ここで用いている曲率などのパラメータは、実際の小惑星などでは計測が困難なものが多い。例えば曲面にできたクレーターの直径は、リムからリムまでの直線 (弦) で表すため、小惑星上でも計測可能なクレーター半径拡大率や曲率で実験結果をプロットしたものが図3である。クレーター半径拡大率 (弦計測) とは、弦で計測したクレーター半径 (=直径/2) を平面におけるクレーター半径で規格化したもので、曲率 (弦計測) とは、弦で計測したクレーター直径を標的半径で規格化したものである。弦で計測した場合でも、曲率のある面に出来ているクレーターは、同じ衝突条件で平面にできるクレーターより大きい可能性があることが示された。現在ダクティルやトータティスで見ついている最大クレーターは曲率 (弦計測) が 0.8 程度である (Leliwa-Kopystyński et al., 2008; Hudson et al., 2003; Huang et al., 2013)。彼らはスポールを持つクレーターではないが、将来的にスポールを持つ曲面クレーターが見つかった場合には、それらを作った衝突条件を過大評価しないように気をつけなければいけない。

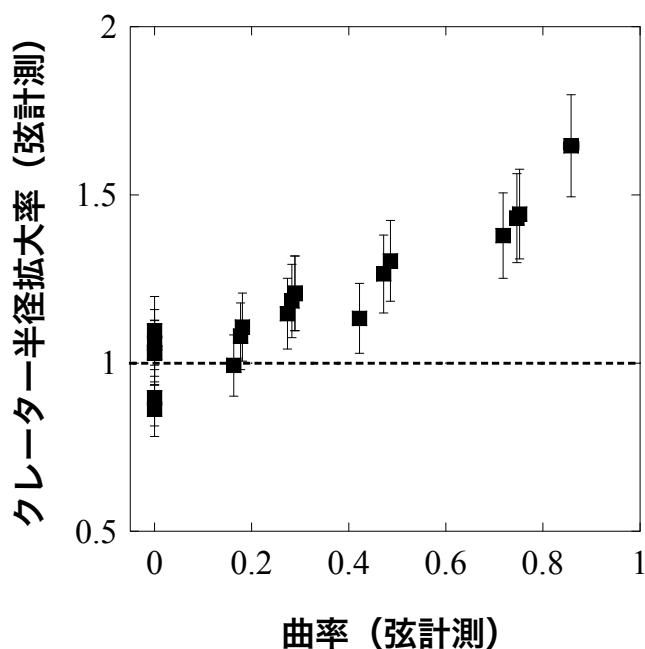


Fig.3 The experimental results are plotted on the diagram with parameters measurable for craters in the field.