

小惑星起伏地形に起因するクレーター形状の 多様性に関する実験的研究

○横田優作¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 白井慶¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙科学研究所

【背景】近年の小惑星探査機はやぶさ2やOSIRIS-RExによる調査で、小惑星リュウグウやベヌスは赤道域に巨大な起伏地形（赤道リッジ）を持つことがわかっており、リッジ上のクレーター形状は表面起伏の影響を受けて非円形になっていることが知られている。さらに、両小惑星の表面の固着力は非常に小さく、例えば、ベヌスの高緯度に形成されたクレーター周囲には赤道方向に伸びる滑らかな領域が観測されており、これはエジェクタ粒子が表面に衝突したことによって起きた雪崩を示す証拠と言われている。一方、小惑星探査機Dawnが調査した小惑星ベスタは、その表面が一面クレーターで覆われているが、リッジやトラフを持ち非常に起伏に富んでいることが知られている。このベスタでは、表面起伏や雪崩の影響を受けて形成されたと思われる非円形クレーターが多く発見されている。このように、表面起伏と雪崩の影響でクレーターの形状は多様性を持つことになるが、その研究は斜面上のクレーターを除いてほとんど進んでいない。ところが、斜面に対するクレーター形成実験では再現できない形状のクレーターが天体の起伏上に存在する。そこで本研究では、小惑星表面の起伏地形を模擬した粉粒体標的に対してクレーター形成実験を行い、最終クレーターの形状と遷移クレーターの崩壊様式を調べることで、クレーター形成過程に対する起伏地形の影響を明らかにする。また、非円形クレーターの形成メカニズムの解明とそのモデル化を目指す。

【実験方法】クレーター形成実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸にはアルミナ球（直径3mm）とアルミ球（直径1, 2mm）、標的には石英砂（直径100 μ m、安息角31°）とガラスビーズ（直径100 μ m、安息角23°）を使用した。標的は、小惑星表面の起伏地形を模擬するために山脈型に作成し、その山頂付近に弾丸を衝突させた。標的の傾斜角 θ （水平面と斜面の成す角度）は、石英砂では20°と30°、ガラスビーズでは20°に設定した。また、平面標的（ $\theta=0^\circ$ ）も用意した。また、衝突点から山頂までの水平距離 d を0.7mmから56.8mmの範囲で変化させた。衝突速度 v_i は、低速度衝突実験では3~202m/s、高速度衝突実験では1.9~2.2 km/sの範囲とした。クレーター形状を解析するためにMetashapeを利用してクレーターを撮影した写真から3次元形状モデルを作成した。この形状モデルを用いて、クレーターの稜線方向の長さ D_{ma} 、斜面方向の長さ D_{mi} を測定した。また、高速カメラを用いてクレーターの成長と崩壊の観測を行った。

【実験結果】最終クレーターの形状は d に依存していた。山頂付近に形成された場合はレモン型、山頂から離れた位置で一部が山脈にかかって形成された場合は貝殻型、完全に斜面上に形成された場合は舌状のクレーターとなった。また、重力支配域の π スケール則を用いて実験結果を整理したところ、石英砂（ $\theta=30^\circ$ ）の遷移クレーターは $\theta=0^\circ$ の最終クレーターよりも大きくなることがわかった。遷移クレーターが山頂を超えて成長した場合、稜線方向のクレーター壁が底に向かって崩壊し、稜線方向のクレーター径が増加した。遷移クレーターが山頂を超えなかった場合、斜面方向のクレーター壁はクレーターの外側に崩壊し、斜面上側、下側のクレーター径が共に減少した。最終クレーターのアスペクト比 D_{ma}/D_{mi} と衝突位置 d/D_{ma} の関係を調べたところ、アスペクト比は粒子の種類と傾斜角毎に d/D_{ma} に依存しており、石英砂（ $\theta=30^\circ$ ）ではレモン型クレーターと貝殻型クレーターは $d/D_{ma}\sim 0.25$ で遷移し、遷移クレーターが山頂を超えるかどうかの境界になっていることがわかった。また、貝殻型クレーターと舌状クレーターは $d/D_{ma}\sim 0.62$ で遷移していた。それぞれの粒子におけるアスペクト比と衝突位置の関係は次の通りである。石英砂（ $\theta=30^\circ$ ）

では $D_{ma}/D_{mi}=1.6\exp(-1.03d/D_{ma})$ 、石英砂 ($\theta=20^\circ$) では $D_{ma}/D_{mi}=1.2\exp(-0.56d/D_{ma})$ 、ガラスビーズ ($\theta=20^\circ$) では $D_{ma}/D_{mi}=1.5\exp(-0.87d/D_{ma})$ 。このことから、標的の傾斜角が安息角付近であれば同じ衝突位置でほぼ同じアスペクト比を示し、安息角に対して傾斜角が小さくなるにつれてアスペクト比が小さくなることがわかった。また、石英砂 ($\theta=30^\circ$) では遷移クレーターの半径と最終クレーターの斜面上側の長さの比 R_{up} は d/D_{ma} の増加に伴って増加することがわかった。石英砂 ($\theta=30^\circ$) について得られた R_{up} と d/D_{ma} の関係は $R_{up}=2.09 d/D_{ma}+0.65$ である。一方、遷移クレーターの半径と最終クレーターの斜面下側の長さの比 R_{down} は衝突速度の増加に伴って減少することがわかった。さらに、遷移クレーターの直径と最終クレーターの稜線方向の長さの比 R_{rd} は d/D_{ma} と衝突速度に依存せず、その値は $0.9\sim 1.3$ であることがわかった。山脈型標的の最終クレーターの形状を説明するために、クレーター形状の幾何学モデルを構築した。このモデルでは遷移クレーターが半球であると仮定し、その後の地滑りによる形状変化を3つの崩壊パラメータ (α : 稜線方向、 β : 斜面上側、 γ : 斜面下側) で表すことで、クレーター形状を幾何学的に計算することができる。このモデルを用いて実験結果を解析した結果、稜線方向のクレーターの崩壊は標的の傾斜角と粒子の安息角によって決まっており、傾斜角が安息角に近い方がより、クレーター壁の地滑りが進み稜線方向のクレーター径が大きくなることが分かった。一方、斜面下側のクレーター壁の崩壊は衝突速度と良い相関があり、衝突速度の増加に伴って衝突面側の地滑りが進み斜面下側のクレーター径が小さくなることが分かった。また、斜面上側のクレーターの崩壊は、粒子の種類毎に衝突位置に依存する。すなわち、衝突点が山頂から遠ざかるにつれて、衝突反対側のクレーター孔への地滑りが進み、斜面上側のクレーター径が大きくなることが分かった。本実験の結果、山脈型地形に形成される様々な形状のクレーターは、主に衝突速度と衝突位置に依存する斜面方向の崩壊によって作られることが分かった。本実験で形成された $d/D_{ma} = 0.28$ のクレーターとベスタの起伏上に形成されたクレーターを比較した結果、クレーター形状とアスペクト比がほぼ一致していた。そのため、小惑星の起伏地形上で観測される非円形クレーターは、上述のような崩壊プロセスによって形成された可能性が高い。