

モルタル標的に対する斜め衝突実験～月の楕円クレーターと縦孔への応用

○道上達広（近畿大学工学部），アクセル・ハーマン（オープン大学），
諸田智克（名古屋大学），春山純一（ISAS/JAXA），長谷川直（ISAS/JAXA）

研究会で発表した内容は、その後、Planetary and Space Science に受理された (<http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2016.11.004>)。以下はその要旨となる。

太陽系の固体天体表面において、衝突クレーターは非常によく見られる地形である。固体天体にあるほとんどの衝突クレーターは斜め衝突で形成され、45度をもっとも起こりうる。しかしながら、過去の斜め衝突実験において、固体天体の強度を模擬した衝突実験の数はとても少ない。特に、氷に対する実験を除いて、物質強度が1MPaオーダーの脆性標的に対する斜め衝突実験は行われていない。強度支配領域で形成されると考えられる直径100m以下の月面クレーターは、表面強度が1MPaオーダーと考えられている（例えば、Melosh, 1989; Collins et al., 2011; Daubar et al., 2014 など）。

非常に浅い角度で隕石が天体表面に衝突したとき、楕円クレーターが形成される。すなわち、隕石が、ある臨界角よりも浅い角度で衝突したとき、形成されるクレーターの形は円からずれて衝突方向に長細くなる。臨界角は、過去の研究（例えば、Bottke et al., 2000; Collins et al., 2011; Elbeshausen et al., 2013 など）によれば、物質の強度に強く依存することが分かっている。それゆえ、月面の100m以下のクレーター形成を調査するために、1MPaオーダーの標的に対して斜め衝突実験を行うことにした。

本研究の目的は2つある。1つは月面の強度を模擬したモルタル標的（圧縮強度3.2MPa、引張強度0.8MPa、密度1550kg/m³）を作成し、その表面に斜め衝突させることで、衝突角度と楕円クレーターの関係を調べる。もう1つは以下になる。近年発見された月の縦孔は、地下空洞

の天井にできたクレーターと考えられている（例えば、Haruyama et al., 2009; Martellato et al., 2013; Michikami et al., 2014 など）。縦孔の形は楕円形をしていることから、それらの形成メカニズムを調査するために、空洞を模擬した同様のモルタル標的を作成し、その天井に斜め衝突させることで、どのような形の縦孔が形成されるか調べる。

実験はJAXA宇宙科学研究所にある2段式軽ガス銃を使用し、弾丸に直径7.14mm、質量0.217gのナイロン球を用いた。モルタル標的は、空洞なし標的では縦20cm、横20cm、高さ6cmの直方体、空洞あり標的では、縦25cm、横35cm、高さ4cmの直方体で、下面の半分ほどをくり抜き、空洞面の天井の厚さを1cmにした。空洞なしの標的に対しては、衝突角度 $\alpha=5^\circ-90^\circ$ の間で7ショット、空洞ありの標的に対しては、衝突角度 $\alpha=2^\circ-90^\circ$ の間で7ショット、実験を行った。ここで、衝突角度は標的表面からの角度で $\alpha=90^\circ$ が正面衝突になる。衝突速度は2.3km/s程度で一定とした。衝突の際の真空度は200Pa以下で、高速度カメラで撮影することによって、放出された破片の様子を確認した。

図1は、標的の表面および裏面にできたクレーターで、衝突角度別に示してある。上段が空洞なし標的、下段が空洞あり標的で、弾丸は左から衝突した。空洞あり標的では、衝突面に形成されたクレーターに加えて、衝突反対面にもクレーターが形成された。本研究では、衝突面に形成されたクレーターを表面クレーター、衝突反対面にできたクレーターを裏面クレーターと呼ぶことにする。表面クレーターと裏面クレーターが繋がったときに、縦孔は形成された。

例外として、衝突角度 $\alpha=2^\circ$ では、2つのクレーターが繋がらず縦孔は形成されなかった。図1において、空洞なし標的、空洞あり標的共に、衝突角度 $\alpha=15^\circ\text{-}20^\circ$ 程度で楕円クレーターになった(楕円クレーターになる衝突角度を臨界角 α_{cri} とする)。さらに、衝突角度が小さくなるほど、衝突面に形成されたクレーターはさらに細長くなるのが分かる。また、空洞なしと空洞ありを比べた時、空洞なしのクレーターと空洞ありの表面クレーターの大きさ、形が類似している。一方、空洞あり標的において形成された裏面クレーターは衝突角度の依らず円形になっている。

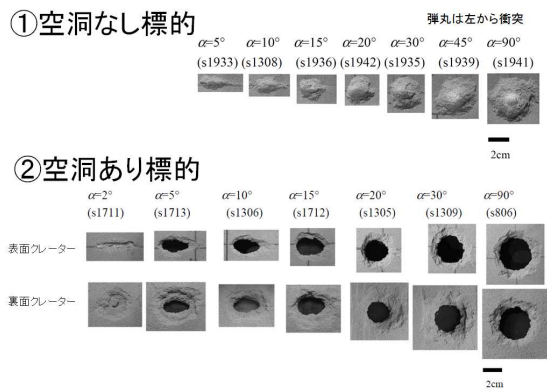


図1 今回の斜め衝突実験によって形成されたクレーター。衝突角度 α は、標的表面からの角度で、正面衝突が $\alpha=90^\circ$ となる。

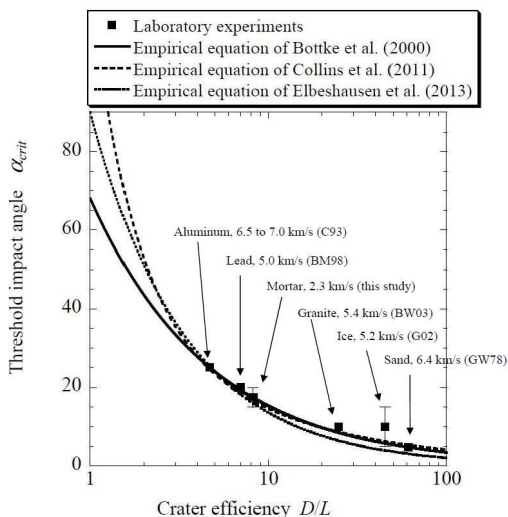


図2 円形クレーターから楕円クレーターになる衝突臨界角 α_{cri} とクレーター効率(クレーター直径 D /弾丸直径 L の比)の関係。

図2は、衝突実験における楕円クレーターになる臨界角とクレーター効率(クレーター直径 D /弾丸直径 L の比)の関係を示してある。黒点が、衝突実験で得られた様々な物質に対する実験データ、点線、実線が提案されている経験式になる。今回のモルタル標的の実験結果は、過去の経験式とともに良く一致していることが分かった。また、過去の研究で得られた経験式では、クレーター効率が小さくなるほど、臨界角は大きくなるのが図2のように分かっている。

今回のモルタル標的に対する実験では、月面強度 1MPa に対応する臨界角とクレーター効率を求めることができた。しかし、今回の実験では、衝突速度 2.3km/s であったので、実験結果を月面に応用するには月面での隕石の衝突速度を考慮しなければならない。図2において、今回求めたモルタル標的のデータ点は、衝突速度が大きくなると、経験式に沿って右下へ、衝突速度が小さくなると、経験式に沿って左上へ移動する。

ここで 100m サイズの月面クレーターの形成(強度支配域で形成されるクレーター)を考えてみる。月面クレーターの隕石の平均衝突速度は 20km/s 程度であるので、この場合、楕円クレーターが形成される臨界角 α_{cri} は 5° 程度で、形成されにくい。一方、2次クレーターが形成される衝突速度は数 100m/s で、臨界角 α_{cri} は数 10° なので、楕円クレーターが形成されやすい。したがって、月面に観測される 100m サイズの楕円クレーター(縦孔も含む)のほとんどは、2次クレーターだと考えられる。

参考文献

Bottke et al., 2000. Icarus 145, 108-121. Collins et al., 2011. Earth Planet Sci. Lett. 310, 1-8. Daubar et al., 2014. JGR. 119, 2620-2639. Elbeshhausen et al., 2013. JGR 118, 2295-2309. Haruyama et al., 2009. GRL. 36, L21206. Martellato et al., 2013. Planet Space Sci. 86, 33-44. Melosh, 1989. Impact Cratering: A Geologic Process. Oxford Uni. Michikami et al., 2014. Planet Space Sci. 96, 71-80.