

様々な厚さを持つ標的に対するクレーター形成実験

～月、火星の縦穴への応用

○道上達広（近畿大学）、アクセル・ハガーマン（オープン大学）、宮本英昭（東京大学）、三浦靖一郎（徳山高専）、パトリック・ソフィア・リカフィカ（近畿大学）、春山純一（ISAS/JAXA）

はじめに

ピットクレーター、ピットチェイン、トラフのような陥没地形は、火星、月、地球、金星、フォボス、小惑星など多くの太陽系天体で見られる。ピットクレーターなどの陥没地形は、クレーターと幾分似ているものの、断面が絶壁で、かなり深く陥没したものも多い（図1D）。またそれらが直線上に並び、リニアトラフと呼ばれる地形を形成しているものもある（図1A）。このようなピットクレーターなどの陥没地形は、地下にある空洞に、崩落などで表面物質が流入することによってできたと考えられている。それらは、溶岩チューブ（溶岩が流れた跡にできるチューブ状の空洞）、dike injection、extensional fracturing、dilatational normal faulting などによって形成されたであろう。

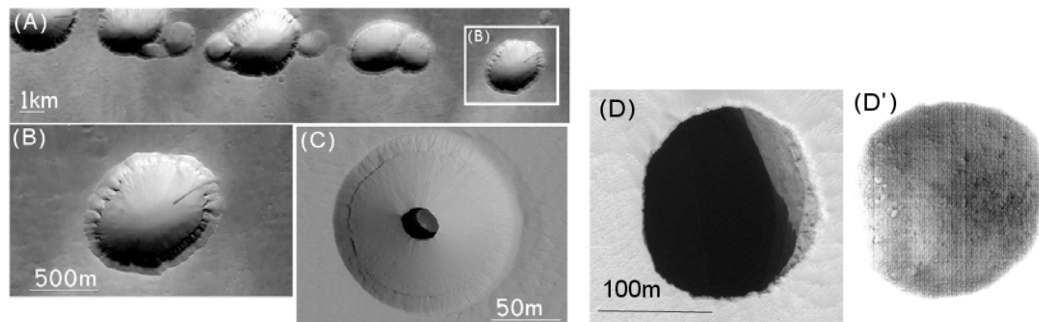


図1 火星のピットクレーター(A)Alba Paterの南側にあるピットクレーターチェイン。(B)(A)のピットクレーターの1つの拡大写真。(C) Pavonis Monsのピットクレーター。崩壊途中と予想される。(D)Arsia Mons 近くのピットクレーター。断面は絶壁。(D')別の日に撮像した(D)の床部分。いくつかの岩塊が見られる。

Haruyama et al. (2009)、Martellato et al. (2013)は月の深いピットクレーターは、溶岩チューブの天井に隕石が衝突し、崩落することによって形成されたことを、地形的特徴、数値計算により示唆した。月と同じく火星のピットクレーターの一部も、溶岩チューブのような空洞がある天井に、隕石が衝突してできた可能性は高い。Cushing(2012)は、中央に深い穴が空いたピットクレーター（図1C）は、天井が崩落する途中の段階であると指摘している。もしそうなら、ピットクレーターやピットチェイン、トラフの一部さえも、隕石衝突が引き金になって崩落が起き、形成された可能性がある。本研究では隕石衝突が引き金と

なって、ピットクレーターが形成された可能性を探るために、空洞を模擬した標的に対して衝突実験を行った。特にクレーター形成における天井厚さの影響を調べ、クレーター形成から天井に穴ができるまでの実験条件を調べた。なお、本稿は Michikami et al. (2014)の概要である。

実験概要

今回行った実験の概要について述べる。実験は JAXA 宇宙科学研究所の旧 2 段式軽ガス銃（藤原銃）を使用した。標的として平均粒径 0.2mm の豊浦標準砂を少量のセメントと水で固めたモルタルを作製した。作製した標的の物性評価を行い、音速 2280 ± 60 m/s、圧縮強度 3.2MPa、引張強度 0.8MPa であった。この強度は予想される天体表層の強度である。標的の大きさは、直径約 15cm 高さが 6cm の円柱形で、空洞を模擬するために標的の衝突反対面を長方形の形にくりぬいた。空洞の横幅 (T_C) は 4cm と 8cm、空洞の天井の厚さ (T_R) は 1-4cm の範囲で作成した。弾丸には物性のよく分かっている直径 7.14mm のナイロン球を用い、衝突速度約 1.2km/s で正面衝突実験を行った。高速度カメラは標的の側面と上面に設置し共に 1 秒当たり数千コマの割合で破片の飛び出す様子を撮影した。

実験結果

天井の厚さ (T_R) を変えると、様々な形のクレーターが観測された。図 2 は空洞の横幅が $T_C = 8\text{cm}$ のときの形成されたクレーター（図 2 a）とそのスケッチ（図 2 b）であり、クレーターの形状が天井の厚さ T_R が変わるにつれてどう変化するかを示している。図 2 の左端が $T_R = 1\text{cm}$ とき、右端が $T_R = 4\text{cm}$ のときになる。今回の実験では、 $T_R = 3\text{cm}$ 以下のとき衝突反対面にクレーターが形成され、 $T_R = 4\text{cm}$ 以上ではそのようなクレーターは形成されなかった。穴は $T_R = 2\text{cm}$ 以下で形成された。

定量的にみるために、今回のすべてのショットのデータをグラフにしたのが図 3 になる。横軸にショットナンバーを示してあるが、横軸を右にいくほど T_R が大きいことを示している。図 3 から分かることは大きく分けて 3 つある。1 つめは、衝突面にできるクレーターの大きさは空洞の大きさ（すなわち、 T_R 、 T_C ）には関係なく一定であること。2 つめは衝突反対面にできるクレーターの大きさは衝突面にできるクレーターよりも大きく、 T_R が大きくなるにつれて、大きくなる傾向にあること。これに関係して、衝突反対面から飛び出す破片は、衝突面から飛び出す破片よりも多かった。3 つめは穴の大きさは T_R が大きくなると小さくなる傾向にあることである。衝突反対面に形成されたクレーターと衝突面に形成されたクレーターが繋がったときに、穴が形成される。衝突反対面にクレーターができる条件は、衝突反対面から飛び出す破片の速度から見積もることができる。詳しくは述べないがその条件を見積もったところ、今回の実験では、衝突反対面での圧力が標的の圧縮強度を超えたときに衝突反対面にクレーターができることがわかった。

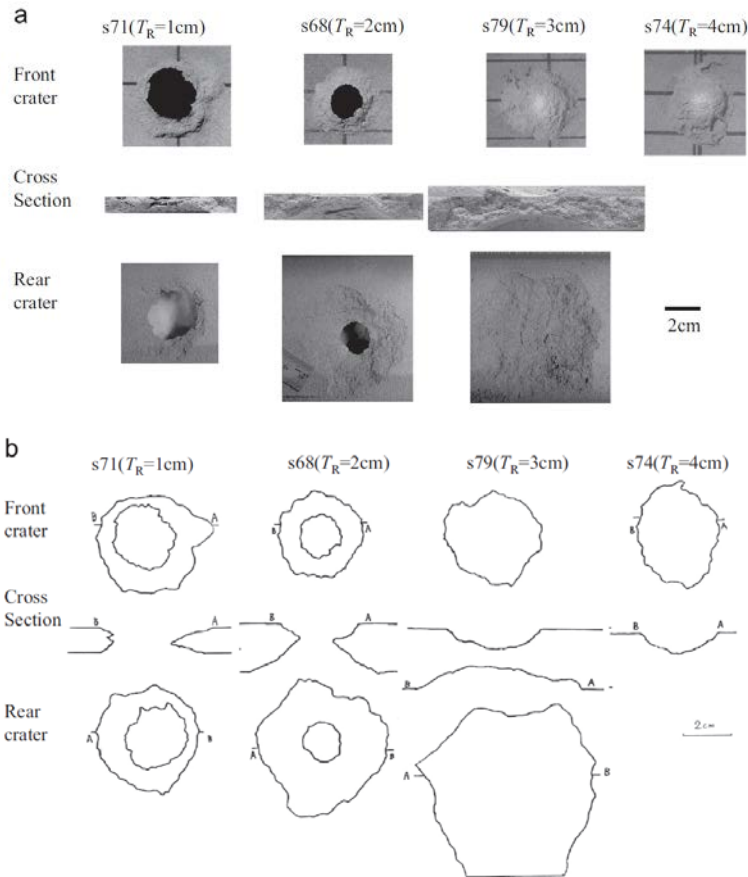


図2 クレーターの形状の写真(a)とスケッチ(b)。それぞれにおいて、上段が衝突面にできたクレーター、中段がクレーター断面、下段が衝突反対面にできたクレーターを示す。

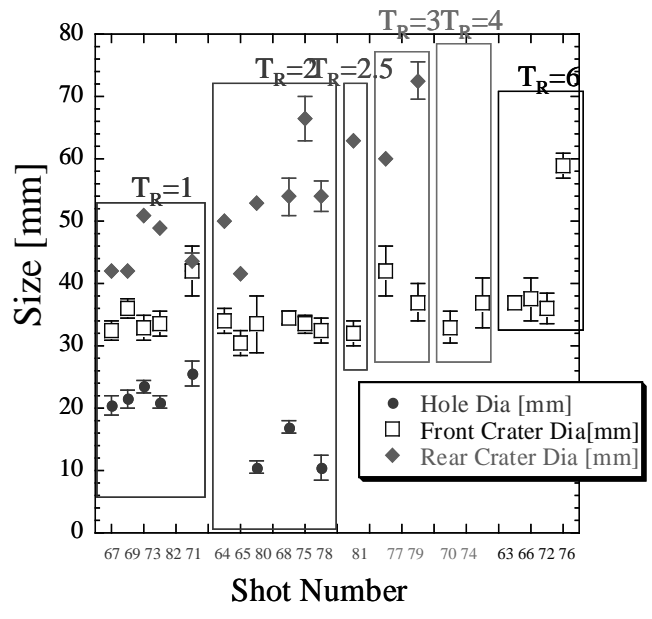


図3 クレーターのサイズ。クレーターの大きさ(直径)は、衝突面にできたものを□、衝突反対面にできたものを◆とした。穴の大きさは●で示した。

考察

室内実験の結果を、実際の天体衝突に直接応用することは難しいかもしれないが、今回の示されたデータは月、火星の縦穴の存在に関して新たな解釈を与えることができる。Robinson et al., (2012)、Cushing (2012)の研究では、縦穴は隕石衝突によって形成されないと考えている。観測事実として、縦穴の底には破片が多く存在するものの、縦穴の周りに通常の隕石衝突によって見られる盛り上がったリムや破片がないからである。しかしながら、今回の実験結果からリムのないことや破片の少ないことを説明することができる。前述したように我々の実験では、衝突反対面から飛び出す破片の方が、衝突面から飛び出す破片よりも多い。この実験結果に基づいて、隕石衝突起源の縦穴形成の2つのシナリオを考えた。1つめのシナリオは、隕石衝突によって、クレーターができ、その後、それが引き金となって天井が崩落するというもの。これは、縦穴の周りにリムがないことと表面の破片が少ないことを説明することができる。また、実験では衝突反対面のクレーターの方が大きいので、衝突反対面のクレーターの大きさになるまで崩壊する可能性がある。2つめのシナリオは隕石衝突が1回おき、その後、崩壊は起きないというもの。この場合でも、実験では衝突面よりも衝突反対面のクレーターから出る破片の方が多いので、床に破片が多数存在し、表面側に破片が少ないことを説明することができる。また、リムがない理由として、リムは通常、飛び出した破片と、表面地形の盛り上がりで形成されるが、天井が薄く、表面に飛び出した破片が少ないと、リムが小さくなる可能性が挙げられる。以上のように、どちらのシナリオでも観測された月と火星の縦穴の特徴を説明することができ、隕石衝突によって縦穴が形成される可能性を示すことができた。

参考文献

Cushing, G.E., 2012. Candidate cave entrances on Mars. *J. Cave Karst Stud.* 74, 33-47.

Haruyama, J., et al. 2009. Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras. *Geophys. Res. Lett.* 36, L21206, <http://dx.doi.org/10.1029/2009GL040635>.

Martellato, E., Foing, B.H., Benkhoff, J., 2013. Numerical modeling of impact crater formation associated with isolated lunar skylight candidates on lava tubes. *Planet Space Sci.* 86, 33-44.

Michikami, T., Hagermann, A., Miyamoto, H., Miura, S., Haruyama, J., Lykawka, P. S., 2014. Impact cratering experiments in brittle targets with variable thickness: Implications for deep pit craters on Mars. *Planet Space Sci.* 96, 71-80.

Robinson, M.S., et al. 2012. Confirmation of sublunarean voids and thin layer in mare deposits. *Planet Space Sci.* 69, 18-27.