

天体・日常・微小スケールをつなぐクレーターの物理

桂木 洋光 〈名古屋大学大学院環境学研究所〉

1. はじめに

満月の夜に見る月の美しさは古くから人々を魅了し続けてきました。望遠鏡でその表面を観察するとクレーターと呼ばれる大小様々な円形の窪み地形を見ることができます。一般に月のような固体天体表面に見られるクレーターのほとんどは隕石の衝突により作られたと考えられています。火山噴火のような現象でもクレーター形状は作られることがあり、特に衝突により作られたクレーターのことを指す場合は衝突クレーターという言葉が用いられることもあります。夜空を見上げて天体のクレーター形状を肉眼で直接見ることは難しいですが、今日では、様々な固体天体の表面が数多のクレーターで覆われているということが探査の結果から明らかにされています。クレーターの形状としては図1(a)に示したような単純クレーターと呼ばれるお椀型の窪みが最も有名です。しかし、色々なクレーターの詳しい形状を見てみると複雑クレーターと呼ばれる個性的なものもあることに気づきます。例えばサイズの大きな複雑クレーターはその中央に突起構造を持っていたり、周囲に崖崩れのような構造が見られることもあります(図1(b))。

クレーターの形状は天体表面に刻まれた過去の隕石衝突の記録となりますが、衝突によるクレーター形成の物理過程をきちんと解明しないと、その記録を正しく読み解くことはできません。残念ながら私達は未だ完全にはクレーター形成の物理を理解できていませんが、研究は着実に進んできています。

クレーター形成と言えば、宇宙で起こる大規模衝突の結果というイメージが強いかもしれませんが、実は身近なところでも類似の現象が起こっています。例えばゴルフボールがバンカーに落ちると、ゴルフボールを中心としたクレーターがバンカー内に作られます。一方で多くの固体天体表面もバンカーのように粉体(砂礫)層で覆われていることが知られています。衝突エネルギーの規模は両者でも

ちろん大きく異なりますが、衝突により粉体層に窪地が作られるという意味でそれらは似ています。本稿では、天体規模の現象と我々の身近なスケールの現象をつなぐ結節点とも言えるこの衝突クレーター現象にまつわるいくつかの話題を提供したいと思います。

2. クレーターから分かること

天体表面に見られるクレーターの形状や分布は対象天体の性質や歴史を体現しています。まず、天体の表面が形成された初期状態では、表面にクレーターは存在しないと仮定しましょう。その後、対象天体は宇宙空間を旅する道すがら大小様々な隕石との衝突を経験し、都度クレーターを形成するとします。この仮定によると、天体表面は年齢を重ねるにつれて、度重なる衝突のためにクレーターの個数密度を大きくしていきます。つまり、クレーターが多数ある表面は衝突の経験が豊富な老獪表面であり、逆にクレーターがほとんど見られない表面は比較的若いということになります。惑星科学の分野ではこの考えに基づいてクレーターによる表面年代の定量的推定手法が確立されているようです。表面の年代推定は他の様々な情報と組み合わせてその天体の歴史の解明に用いられ、それは究極的には太陽系の歴史の解明へとつながることになります。¹⁾

しかし、この手法も万能というわけではありません。我々が目にすることができる表面地形は、天体誕生から現在までを全て積分した結果だけです。その歴史の過程で、天体表面では衝突以外の様々なイベントも起きている可能性があります。もっと言うと、そもそもクレーター形成過程が衝突条件にどのように依存するのかについて我々の知識はまだ限られています。

3. クレーター形成物理のスケーリング

衝突によるクレーター形成は紛れもなく物理現象ですが、その物理的理解は上述したように未だ確立されていません。その大きな要因の一つに、クレーター形成の規模の問題があります。大きなクレーターを残す衝突は当然その衝突の規模も大きく、例えば直径数100~1,000 kmにもおよぶ巨大クレーターも月面には多数見つかっていますが、そのような規模の衝突を地球上で直接実験的に再現することは(技術的にも人道的にも)不可能です。このような大規模現象の研究では、一般には理論や数値計算が大きな威力を発揮します。

しかし、本稿では敢えて実験的研究によるクレーター形

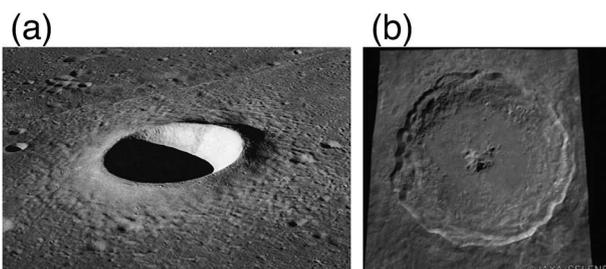


図1 月の(a)単純クレーター形状(Moltke, 直径約7 km)(NASA)と(b)複雑クレーター形状(Tycho, 直径約85 km)(©JAXA/SELENE)。

成の物理へのアプローチについて触れたいと思います。これは筆者が実験家であるからでもあります。実験室スケールと天体スケールをクレーター形成の物理によってつなげることが本稿の目的であるからです。地上実験と天体現象を結びつけるにはスケーリングという手法が鍵となります。スケーリングという概念は、多くの物理研究の中で意識されているかいないかに関わらず普遍的に使われています。例えば支配方程式が分かっている物理系では通常その係数は無次元化され、実験や観測との整合性をチェックする段階で単位のついた具体的諸量が用いられます。この手法は支配方程式そのものの適用可能なスケールがあらかじめ限定されているわけではないというスケーリングの概念に立脚しています。また、衝突クレーター形成については、支配方程式は未だ明らかにされていませんが、別のスケーリング手法を用いてエネルギーの釣り合い等を考えることにより現象の本質をあぶり出すことができます。

具体例として、衝突によって作られるクレーターのサイズ(直径 D_c)を衝突隕石の運動エネルギー E_{kei} から見積もることを考えてみましょう。ここで衝突ターゲット天体の表面を構成する物質の強度を Y_t とします。この強度という量は単位体積当たりの物体を破壊するのに必要なエネルギーとみなせます。そのため、クレーターの体積が D_c^3 に比例すると考えると、 $E_{\text{kei}} \sim Y_t D_c^3$ より

$$D_c \sim \left(\frac{E_{\text{kei}}}{Y_t} \right)^{1/3} \quad (1)$$

という関係を得ることができます。ここで \sim は数係数を省略して両辺が比例し次元が等しいことを意味します。一方でクレーターのサイズ D_c が大きくなると、ターゲットを破壊することよりも破砕片を重力に逆らって運ぶために必要なエネルギーがクレーター形成の力学を支配するようになります。このような場合では、 D_c^3 に比例する体積の破砕片を D_c に比例する高さまで引き上げるのに必要なポテンシャルエネルギー $\rho_t g D_c^4$ と E_{kei} が釣り合うこととなります(ここで ρ_t と g はそれぞれターゲット天体表面構成物質の密度とターゲット天体表面での重力加速度)。つまり D_c は

$$D_c \sim \left(\frac{E_{\text{kei}}}{\rho_t g} \right)^{1/4} \quad (2)$$

と表されることとなります。このように物理量の依存関係を主にベキの形で表すことがスケーリングにあたります。²⁾ここで、式(1)と(2)で右辺のベキ指数の値が異なることに注意してください。どちらのスケーリングが支配的になるかは強度と重力の効果の比にあたる無次元パラメーター $N_t = Y_t / \rho_t g D_c$ に依存します。 $N_t \gg 1$ の領域では式(1)が、 $N_t \ll 1$ では式(2)が支配的となり、それぞれの関係式を強度支配スケーリング、重力支配スケーリングと呼びます。また、 Y_t や D_c などの個別パラメータがどのような値であっても N_t の値が同じであれば物理的に相似なクレーター形成現象が起こることをこのスケーリングは意味します。このような相似則のおかげで実験室スケールと天

体スケールのクレーター形成をつなぐことができるのです。

これらのスケーリング関係は衝突体の形状や構造、衝突角度等の詳細を考慮していませんので粗い近似となりますが、一方でそれらの詳細に関わらず多数の(幅広いスケールにわたる)衝突クレーターについて統計をとると普遍的に成り立つ関係になり得る可能性を秘めています。実際に大規模な爆発実験によるクレーター形成では、式(1)と(2)の中間の関係が得られています。¹⁾また、粉体の層に固体弾を低速(およそ1 m/sの衝突速度)で自由落下衝突させる簡単な実験では、形成されるクレーターの直径が式(2)の形に近く、固体弾が陥入する深さが式(1)に近いことが明らかにされています。³⁾

つまり、これらの関係はシンプルなエネルギーのバランスから得られているので逆に普遍性が高く、現象の規模を問わず成り立つ関係になっていると言えます。もちろん、このようなシンプルなエネルギー・バランスのみのスケーリングで全てが分かる訳ではありません。実際の現象ではエネルギーの他に運動量に関するバランスも考慮に入れる必要があるかもしれません。また、衝突体やターゲットの状態(固い岩塊か、氷か、砂層か、大気があるか)等の境界条件依存性も気になります。しかしいずれにしても、一般にスケーリング関係は現象の規模には依存しないので、実験で求めた関係式を天体現象に適用することが原理的には可能となります。つまり、我々の日常のスケールからは遠く離れた天体で起こる衝突クレーター形成現象を考えるヒントを、日常(実験室)スケールのクレーター形成に見つけることができるのです。

スケーリングの方法とその解釈には注意点もあります。上述のクレーターのスケーリングの例では二つの関係式があり、どちらを適用すべきかは N_t に依存していました。これは現象を支配する物理過程が複数ありその有効となる領域が異なるために生じる結果です。また、ここでは触れられませんが、高速衝突の場合は、衝撃波の効果なども重要となってきます。現象のスケール等に合わせて支配的となる物理過程を正しく考慮しないとスケーリングの方法では正しい答えを導き出せません。上述の例では重力と強度の効果を検討してきましたが、天体スケールとは逆に小さなスケールの極限では表面エネルギー γ の効果が顕著になることもあります。表面エネルギーは文字通り単位表面積が作られることにより生じるエネルギーで定義されます。通常天体クレーターのスケールで表面エネルギーが支配的となるようなことはありませんが、純粋な粉体物理の興味から小さなスケールでのクレーター形成に関する実験的研究が最近行われ、クレーター形成における表面エネルギーの影響も考慮されるようになってきました。

4. 様々なクレーター形状

表面エネルギーの効果に注目するためには液体を取り扱うのが良い作戦となります。表面エネルギーが関連するク

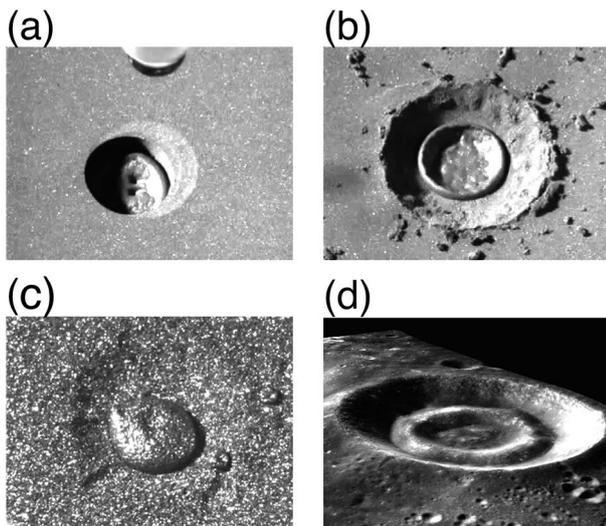


図2 (a)-(c) 水滴と粉体層の衝突によるクレーター形状⁴⁾と、(d)月のクレーター (Hesiodus A, 直径約 15 km) (諸田智克氏提供)。

クレーター形成現象の物理を研究するために、例えば液滴の粉体層への衝突実験が行われました。⁴⁾ 実験は非常にシンプルで、直径数 mm の液滴が様々な高さ (概ね 1 m 未満; 衝突速度で 4 m/s 以下) から粉体層ターゲットへ自由落下衝突されました。この実験により、これまでのクレーター形成実験ではあまり観測されたことのない様々なクレーター形状が新たに発見されました (図2(a)-(c))。例えば、液滴が静かに粉体層上に滴下された場合、それはゆっくりと粉体層へ浸透し、円筒形の縦穴クレーターを残します (図2(a))。衝突速度を上げると、衝突の瞬間に起こるクレーター形成とその後のゆっくりとした液滴の浸透という二段階の過程が見られるようになります。この場合、浸透によって縦穴ではなく二重リング構造が形成されます (図2(b))。更に液滴の衝突速度を上げ、同時に粉体層を構成する粒子のサイズも少し大きくすると、今度は液滴の衝突により「たんこぶ」のような盛り上がり地形が形成されるようになります (図2(c))。これらのクレーター形状は全て液滴の表面エネルギーが様々な形で影響して形成された日常スケールのクレーターです。

表面エネルギーは前述の通り規模の小さな現象でのみ重要となりますので、天体における衝突クレーター形成では通常無視される効果となります。そのため、図2に見られるような液滴衝突によるクレーター形成は天体衝突クレーターとは無関係と考えられています。しかし、実は月面の大規模クレーターにも図2(b)にそっくりなクレーター形状があります。図2(d)に月探査衛星「かぐや」により撮影された月面でのクレーターが示されています。図2(d)に示されているクレーターの直径はおおよそ 15 km で、図2(b)の実験により作られたクレーターは直径約 10 mm です。その比は実に 10^6 にも及び両者は全く異なるスケールの現象であると言えます。もちろん、直径 15 km もする大きなクレーター形成で表面エネルギーが何らかの役割を果たし

ているとはにはわかには考えられません。すなわち、両者の形状の一致は残念ながら偶然であり、現状では物理機構の相似性を意味していません。しかし、このような形状の一致は、実在する特殊な天体クレーター形状の成因について何かを考え始めるきっかけくらいにはなり得るのではないかと考えています。図2(d)のようなクレーター形状は二層構造を持つターゲットへの衝突実験でも作ることができ、今後も様々な角度からの研究が必要でしょう。一方、基礎物理実験では過度に応用を意識せず自由な発想で現象の理解を積み重ねることも重要でしょう。その積み重ねの結果、いつか本当に天体現象に対応するものが見つかり、基礎物理と天体現象の深い理解が同時に得られることを今後期待したいと思います。

最近では、液滴の衝突の他にも、いくつかのセットアップで衝突クレーター形成の物理過程に関する基礎の実験が行われてきています。例えば泥団子の弾丸を粉体層に衝突させると、その衝突速度等に依存していくつかの特徴的クレーター形状が作られることが分かりました。⁵⁾ ある程度高速の衝突では、泥団子は衝突により砕けますが、そのうちいくつかは破片としてクレーター表面に点在し、岩塊がばらまかれたクレーターのような独特の地形を形成します。この泥団子衝突実験で作られたクレーター形状についても、やはり実際の天体表面に類似の地形を探し出すことが可能で、現在も両者の成因の類似性等に関する議論は研究が進められている状態です。泥団子を砂場で落として壊してみようような体験は、誰も子供の頃にやったことがあるかと思えます。その時に何が起きるかについて、驚くべきことに我々は未だその物理過程を正確に理解できていなかったのです。また、そのような身近な現象の物理をしっかりと解明することは、遠い宇宙空間で起こる衝突現象に何らかのヒントを与えるかもしれないのです。

5. 微小クレーター

これまで本稿では宇宙空間で起こる天体衝突クレーター形成は大規模であると暗黙の内に仮定しているような印象を持たれたかもしれませんが、しかし、その仮定は必ずしも正しくありません。宇宙空間では小さなスケールでの衝突クレーター形成も起こっています。通常の惑星探査では天体の表面観察の空間分解能が限られているために小さなクレーターを判別するのは難しいですが、我々が未だ見ていない空間スケールにも想像を絶するクレーター形状の世界が広がっているかもしれません。実際、例えば近年日本の探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワから持ち帰った微小粒子の中に奇妙な微小クレーターが見つかりました⁶⁾ (図3)。この特異な微小クレーターは直径がおおよそ 100-200 nm 程度と我々の日常スケールと比べると極めて小さく、その理解のためには再びスケリングの手法で、今度は極微の世界と日常スケールを結びつけないといけません。

図3のクレーター形状を良く見ると、そのリム (緑) に

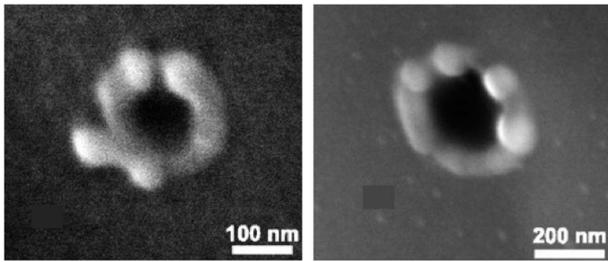


図3 イトカワ微粒子上に発見された微小クレーター。⁶⁾

いくつかの突起構造があることに気づきます。この構造の起源については未解明ではありますが、例えば流体衝突で見られるミルク・クラウン構造が想起されます。他にも圧縮波と希薄波の相互作用によるスポーリング現象などがその成因の候補として考えられますが、ここでは特にミルク・クラウン構造について簡単に考えてみましょう。ミルク・クラウン構造の発生には表面エネルギーが関連した流体力学的不安定性が必要となります。再びここで表面エネルギーの効果が出てきたわけですが、今度は直径100 nmの微小クレーターに関する議論ですので、表面エネルギーが確かに重要となる可能性が十分にあると言えるでしょう。実際に表面エネルギーの効果を含めたスケーリングを用いて微小クレーターが作られた際の衝突速度を見積もることも試みられています。⁷⁾

しかし、ことはそんなに簡単ではありません。流体現象であるミルク・クラウン構造により、イトカワ微粒子上で起きた微小クレーター形成を直接説明することには未だ大きなギャップがあります。まず単なる流体現象であればクレーター形状は(地上でのミルク・クラウンがそうであるように)あつと言う間に緩和されて消えてしまいます。また、真空、低温、微少重力といった極限環境下でどのような不安定性が実際に起きるのかについても定かではありません。このような事情から、イトカワ微粒子上の微小クレーターのリム構造を直接ミルク・クラウンと同列に扱うことは現状では難しく、未だその定量的検証は十分にはなされていません。今後の研究の進展に期待したいところです。

6. おわりに

本稿では、クレーター形成の物理とその形状について、身近なものと同規模のものを対比させながら簡単に紹介してきました(更なる詳細について興味を持たれた方は拙著³⁾をご参照ください)。衝突の規模が異なる場合は、それに応じて支配的となる物理法則も異なると考えられます。そのことを意識した上でスケーリングの概念を用いれば、天体規模で起こっている衝突クレーター形成の基礎物理過程についての知見を実験室規模の実験等に基づいて導き出すことが原理的には可能です。

クレーター形状については、簡単な室内実験で作られる構造と、実際に天体表面や小惑星で採取された微小サンプル上に見つかったクレーターの形状との定性的比較を通じて様々な可能性を議論してきました。これらの形状の類似性に関する研究にも多くの限界があり、その理解は未だ不十分です。しかし、簡単な実験のセットアップを用いて作られる身近なスケールのクレーターと、天体表面で起こる大規模衝突クレーターがどこかで結びつくかもしれないと考えることは楽しいことです(少なくとも筆者にとっては)。ひょっとすると、実験室で簡単に起こすことのできるクレーター形成は天体規模のクレーター形成とはほとんど関係がないのかもしれませんが、しかし、特に粉体の衝突クレーター形成は、「粉体物理」のモデル実験としての位置付けもあり、特異なソフトマターの一種である粉体物理そのものの理解に貢献してきていることは間違いありません。基礎物理としても価値があり、惑星科学的応用上でも重要となるクレーター形成の物理実験を行うことはこの分野の研究における今後の大きな課題と言えます。

参考文献

- 1) H. J. Melosh: *Impact Cratering* (Oxford Univ. Press, 1989).
- 2) 奥村 剛: 日本物理学会誌 **69** (2014) 678.
- 3) H. Katsuragi: *Physics of Soft Impact and Cratering* (Springer, 2016).
- 4) H. Katsuragi: Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 218001.
- 5) F. Pacheco-Vázquez and J. C. Ruiz-Suárez: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 218001.
- 6) E. Nakamura, et al.: Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **109** (2012) E624.
- 7) H. Katsuragi: EPJ Web Conf. **92** (2015) 02032.

(2015年2月21日原稿受付)