

不規則形状弾丸による高空隙率小惑星掘削の数値衝突計算

黒澤耕介, 千秋博紀, 和田浩二, TDSS チーム
千葉工業大学 惑星探査研究センター

まとめ: iSALE shock physics code を用いて銅製半球殻衝突体が空隙率 90% の小天体に衝突する状況を数値的に計算した。標的の固着強度を 3 桁にわたって変化させて、形成される掘削流について調べた。その結果、標的の固着強度が掘削流の様相を決める重要なパラメータであることがわかった。

はじめに: 近年の小惑星探査では衝突体を用いて小惑星表面を掘削する能動的探査が多く実施されている。例えば SMART-1[1], Deep Impact[2], はやぶさ[3], LCROSS[4]などがあげられる。これは宇宙風化や太陽光による熱変性の影響が少ない深部の物質を掘削することが目的である。

衝突能動探査の科学的成果を最大化するためには、衝突によって何が起こるか、例えば放出物の量及びその速度/角度分布、最終クレータのサイズなど、を小惑星到着前に予測し、最適な探査計画を建てる必要がある。ところがその事前予測には 2 つの困難がある。一つ目は小惑星近傍に行ってみるまで、その表面状態が不明であることである。特に空隙率や降伏応力は衝突掘削過程を予測する上で重要なパラメータである。小惑星は多様な空隙率を持つことが知られており、ラブルパイル構造を持つ小惑星では空隙率が 80% 近くに及ぶこともある[5]。降伏応力は、衝突地点の岩石の形態によって大きく異なるはずである。例えば砂や一枚岩の典型的な降伏応力はそれぞれ 0.01 MPa, 10 MPa 程度である。つまり、衝突地点の岩石の産状によって降伏応力が 3 桁に渡って変化してしまうことになる。

二つ目の困難は、惑星探査に持っていきける衝突体の形状は大きく制限されることである。例えば SMART-1, Deep Impact, LCROSS で用いられた衝突体は中空円筒であるし、現在航行中のはやぶさ 2 の衝突体(SCI)は半球殻形状である[6]。衝突掘削過程に関する我々の知見は真球衝突体の衝突実験や数値計算をもとにしている。近年行われた中空弾丸を用いた衝突実験によれば、中空弾丸衝突の場合、放出物カーテンの形状が真球衝突の場合とは異なる[7]。このことは中空弾丸衝突で形成される掘削流が真球弾丸衝突のそれとは異なることを意味し、放出物カーテンの速度・角度の諸量だけでなく、生成されるクレータサイズなども予測できない可能性を示唆

するものである。

以上の問題意識を踏まえ、我々は SCI 衝突の数値解析に取り組んでいる。本稿ではその結果の一部を紹介する。

数値解析の利点: 数値計算には iSALE shock physics code を用いた[8-10]。iSALE には様々な物質に対する状態方程式、構成方程式モデル[9]に加え微小空隙の圧密を扱う ϵ - α 圧密モデル[10]が実装されており、計算の自由度が高いのが特徴である。SCI 衝突のような特殊事例を扱うには最適と言える。数値計算では様々な理想化が行われる半面、計算に含めた物理過程のみを反映した結果が得られること、実験では観測困難な標的内部の掘削流を可視化できることなど、実験とは相補的で有用な情報を引き出すことが可能である。

計算条件: 以下に計算条件をまとめる。衝突体は直径 13 cm, 厚み 7 mm の半球殻、標的は一様な岩石層を設定し、状態方程式にはそれぞれ銅の Tillotson EOS[11]と花崗岩の ANEOS[12]を用いた。このとき衝突体の質量は 2 kg となる。衝突体には金属の弾塑性応答を表現した Johnson-Cook モデル[13]を用い、標的には最も単純な強度モデルである Drucker-Prager モデル(DRPR モデル)[14]を用いた。標的の固着強度は 0.02-10 MPa で変化させ、内部摩擦係数は 0.35 に固定した。DRPR モデルにおける固着強度は圧力がかかっていない場合の降伏応力として定義される。高空隙率小天体を表現するため、標的には ϵ - α 圧密モデルを用い、バルク空隙率を 90% に設定した。この場合の衝突体-標的間の密度比は 33 に及ぶ(バルク密度で比較すると 13)。衝突速度は下向き 2 km/s とした。なお、重力は計算に入れていない。

計算結果: 今回は衝突点近辺で駆動される掘削流に注目して解析を行った。最終的に形成されるクレータサイズは頭言に言及しない。計算のスナップショットに標的中の圧力分布を重ねてみると、衝突体の前方に弓状衝撃波が形成され、いわゆる貫入の様相を呈していることがわかる。衝突体-標的間の密度比が 3 を超えると、衝突掘削でなく衝突体の貫入が卓越するという先行研究[15]の結果と調和的である。同時に粒子速度の鉛直成分も重ねてみると、自由表面からの希薄波によって、表面付近の粒子が上向きに加速されてい

ることがわかる。これは従来の掘削流形成の描像が、そのままあてはまることを意味している。標的の固着強度が十分に小さく、粘弾性力による減速が効かなければ、図中で赤色に示された領域はその後上空に放出されると期待される。この場合は衝突体直径の数倍のサイズのクレータが形成される可能性が高い。標的の固着力を 0.02-10 MPa まで変化させた場合の同時刻のスナップショットを比較すると、上記の予測が尤もらしいことを確認できる。固着強度が~1MPa を超えてくると、表面付近の粒子が上向きに加速される様子が見られず、むしろ深部へ貫入していく衝突体に引きずられ下向きの加速を受けていることがわかる。この場合は物質の放出が起こらず、衝突体直径と同程度の貫入孔が形成されることになるだろう。

ある深さにおける圧力の動径分布をみると、上記の掘削/貫入の境目である固着強度~1MPa は表面付近を伝播する衝撃波の強度に大体対応している。つまり固着強度を上回る圧力変化を受けた場合にのみ、物質が流動化し、表面の掘削が達成されると予想される。空隙率が大きく(標的密度が小さく)なると発生する衝撃圧力が小さくなるため、貫入モードになりやすい。これまでは標的密度を幅広く変化させた実験結果をもとに、密度比を基準にして掘削/貫入モードが分けられてきたが、伝播する衝撃波の強さと標的の降伏応力の比較によって物理的解釈を与えることが可能になると期待できる。

今後の予定: 今回は iSALE shock physics code を用いて SCI 衝突のような特殊事例が数値的に解析可能である可能性を示した。今後は降伏応力-内部摩擦係数-空隙率のパラメータ空間を埋める計算を実施し、SCI 衝突で何が起こるかの事前予測を進めていく予定である。

謝辞: iSALE の開発者である G. Collins, K. Wünnemann, B. Ivanov, J. Melosh, and D. Elbeshausen の各氏に感謝致します。

参考文献:

References: [1] Foing, B. H., et al. (2001), *Earth Moon Planets*, **85-86**, 523. [2] A'Hearn, M. F., et al. (2005), *Science*, **310**, 258. [3] Yano, H. et al. (2006), *Science*, **312**, 1350. [4] Heldmann et al. (2011), *SSR*, **167**, 93. [5]

Consolmagno, G. J. et al. (2008), *Chem. Erde (Geochem.)* **68**, 1. [6] Wada, K. et al. (2014), *LPS XXXXV*, 1768. [7] Schultz, P. H. et al. (2010), *Science*, **330**, 468. [8] Amsden A. A., et al. (1980) *LANL Report LA-8095*. 101 p. [9] Ivanov B. A., et al. (1997), *IJIE*, **20**, 411. [10] Wünnemann, K., et al. (2006), *Icarus*, **180**, 514. [11] Tillotson, J. H. (1962), *Technical Report GA-3216*, General Atomic Report. [12] Thompson, S. L., and Lauson, H. S. (1972), Rep. SC-RR-71-0714, Sandia Natl. Lab., Albuquerque, N. M. [13] Johnson G. R. and Cook W. H. (1983), *Proc. 7th International Symposium on Ballistics*. Hague, The Netherlands. [14] Drucker, D. C. and Prager, W. (1952), *Quarterly of Appl. Math.*, **10**, 157. [15] Kadono, T. (1999), *PSS*, **47**, 305.

※図はスライドを参照して頂きたい。