

炭素質コンドライトを模擬したガラスビーズ焼結体へのクレータ形成実験

○岡本千里¹, 池崎克俊², 今栄直也³, 矢野創⁴, 橋省吾⁵, 土山明⁶, 澤田弘崇⁴,
長谷川直⁴, 中村昭子¹, 富山隆将⁷

1 神戸大学, 2 大阪大学, 3 国立極地研究所, 4 宇宙航空研究開発機構, 5 北海道大学,
6 京都大学, 7 海洋研究開発機構

はじめに

C型小惑星は、主に炭素質コンドライト類似物質から構成される始原的な天体である。有機物など生命の起源についての情報が得られる事が期待されるため、「はやぶさ2」計画などの小惑星探査機によるC型小惑星からの表面物質のサンプリングが考案されている。「はやぶさ2」では、サンプリング手法として、C型小惑星1999JU3に弾丸を撃ち込み、クレータ放出物をサンプリングする弾丸射出法が採用された。サンプリングには、小惑星構成物質の物性を知ることが非常に重要となる。C型小惑星の構成物質は、炭素質コンドライトの強度から予測される。それは、イトカワのようなS型小惑星など熱進化した岩石質天体由来の石質隕石と比較して、その強度は脆弱であり、さらに内部にコンドリュールが豊富に含まれるなど、内部組成も異なる。このことにより、C型小惑星表面への衝突を考える上で、従来よりも複雑な現象を考慮する必要がある。先行研究として、Love et al. (1993)では、天体の空隙率を考慮したクレータ形成現象を調べるため、強度、密度を変化させたガラスビーズ焼結体への衝突実験を行った[1]。結果として、空隙率・強度がクレータリング結果に及ぼすことを明らかにした。また、Yasui and Arakawa (2011)では、普通コンドライト母天体の破壊現象を調べるため、石膏-ガラスビーズ混合体の衝突破壊実験を行った[2]。彼らはコンドリュールを模擬したガラスビーズを含有した石膏試料を用いた衝突実験を行い、ガラスビーズが衝突破壊強度や破片速度に与える影響を明らかにした。このように強度、コンドリュールを考慮した天体の衝突破壊に関する研究はそれぞれあるものの、C型小惑星のように、脆弱かつコンドリュールを豊富に含む天体へのクレータ形成過程の解明はまだ十分なされていない。C型小惑星のクレータ形成過程の解明は、炭素質コンドライトの放出過程や太陽系形成初期における天体同士の衝突進化を明らかにするためにも重要となる。そこで、本研究では、C型小惑星のクレータ形成過程を明らかにするため、C型由来と考えられる炭素質コンドライト隕石と同等の強度、コンドリュール比を持つ模擬試料へのクレータ形成実験を実施した。

実験手法

炭素質コンドライト隕石は、主にコンドリュールとマトリクスと呼ばれる組織から成る。そこで実験では、隕石中のコンドリュールとマトリクスを模擬するため、2種類の異なるサイズのガラスビーズからなる焼結体を作成した。炭素質コンドライト隕石中で一般的に観察される平均的なコンドリュールのサイズ・含有量を模擬するために、粒径 $\phi 300\mu\text{m}$ のガラスビーズをコンドリュール模擬物として使用した。はやぶさ2探査機が向かう1999JU3は、CMコンドライトなどに類似した組成を持つことが分かっている。そこで、模擬試料は、このコンドリュール含有量と近い20wt%~50wt%のコンドリュール模擬物含有量を持つよう調整した。また、マトリクス部分には $\phi 20\mu\text{m}$ のガラスビーズを使用した。この $\phi 300\mu\text{m}$ および $\phi 20\mu\text{m}$ のガラスビーズ混合物を直径 $\phi 10\text{cm}$ 、高さ6cmの容器に入れ、均一に混合したのち、電気炉で焼結させた。ここで、炭素質コンドライト(例 マーチソン隕石)の強度は $\sim 0.3\text{--}3\text{MPa}$ 程度である[3]。試料強度を炭素質コンドライト隕石と同等にするため、焼結温度・時間を調整し、試料の引張強度が $0.2\pm 0.1\text{MPa}$ および $2\pm 0.5\text{MPa}$ となるように2種類の強度を持つ試料を作製した。作製した模擬物質はCTスキャンにより試料内部のコンドリュール模擬物とマトリクス部の均質性を調べ、試料中に均質に分散していることを確認した。本研究試料におけるコントロールパラメータは試料強度、コンドリュール比となる。これらの模擬試料を用い、宇宙研に設置された火薬銃を用いてクレータ形成実験を実施した。実験で使用した弾丸は、直径8mm、質量5gのSUS製のものを用い、衝突速度は100~250m/sで実施した。実験は真空下($\sim 10\text{Pa}$)で行われた。実験後、形成したクレータ形状・体積、破片放出速度を計測し、炭素質コンドライト模擬物質のクレータ形成過程を明

らかにした。クレータ形状は、レーザー変位計 (LK-H150) により距離 0.2mm 間隔で計測を実施した。また、破片速度は 2 台の高速度カメラ (E2, IDT) により 4000-10000fps で撮像を行った。

実験結果および考察

実験後、C 型小惑星模擬試料に形成されたクレータ形状を調べた。クレータサイズは、一定の運動エネルギーにおいてコントロールパラメータである強度に依存した。試料強度により、クレータサイズ・体積は大きく依存し、引張強度が 1.5MPa の試料では、0.2MPa の試料に比べ、クレータ体積が 2 倍程度大きくなるという結果が得られた。

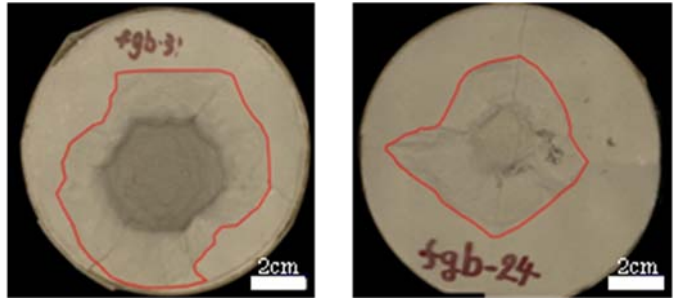


Fig.1 C 型模擬試料の形成クレータ
クレータ外側を赤線で示す。

左：引張強度 0.2MPa 右：引張強度 1.5MPa

本研究条件では、コンドリュール比によるクレータ体積の明確な違いは見られていない。ターゲットの破壊度合いは、ガラスビーズ間の焼結によるネックの数、太さに依存すると考えられるため、コンドリュール含有量を増加させた場合、影響が見られる可能性もある。また、本研究の模擬試料のクレータ体積について、Poelchau et al. (2013) で調べられた Sand stone のクレータ体積について、運動エネルギーを外挿し比較したところ、本研究の C 型小惑星模擬試料の方が 10 倍以上大きな体積が形成されることが分かった[4]。C 型小惑星模擬試料の圧縮強度は Sand stone の 1/10 倍、引張強度も数倍小さいためであると考えられる。また、C 型小惑星模擬試料と比較するため、本研究では耐火レンガでも同条件にて実験を実施したが、耐火レンガのクレータ体積は Sand stone の結果とよい一致を示した。以上より、C 型小惑星模擬試料においても、試料強度がクレータ形成に影響を与えることが分かった。そこで、本研究では強度とクレータ形成効率の関係を調べた。クレータ形成効率として無次元量 π_v , π_3 を考える [5]。 π_v , π_3 はそれぞれ $\pi_v = \rho_t V / m_p$ (V : クレータ体積, ρ_t : 標的密度, m_p : 弾丸質量), $\pi_3 = Y / (\rho_p v_i^2)$ (Y : ターゲット強度, ρ_p : 弾丸密度, v_i は衝突速度) と表される。C 型小惑星模擬試料において、形成されたクレータ形状には、ピット部分とスポール部分が明確に現れた (Fig.1)。C 型小惑星模擬試料では、形成クレータ全量の中でピット部分の占める割合が高かった。 π_v の V としてクレータ全体積、また Y を引張強度とした場合、C 型小惑星模擬試料の低強度 (0.2MPa)、高強度 (1.5MPa) 試料で上手くスケーリングすることができなかった。クレータ形成におけるピット部分とスポール部分は、破壊のメカニズムとして、それぞれ圧縮、引っ張りが支配的と考えられる。そこで、本研究ではクレータのピット部分、スポール部分の体積をそれぞれ調べ、 π_v の V としてクレータ全体積、また Y を圧縮強度として、本結果と Love et al. (1993) による粒径 50 μ m の均質なガラスビーズ焼結体のクレータ全体に対する形成効率を比較したところ、Love らの試料の内、低強度焼結体試料は本研究スケーリング結果と良い一致を示した。一方、Sand stone の結果とは、一桁以内では一致するが、Love らの焼結体試料ほど一致しないという結果になった。これは、空隙率など、他の要因が影響している可能性もあるが、スポールとピット体積比が C 型模擬試料と異なることも影響していると考えられる。本研究結果より、C 型小惑星のような低強度のターゲットでは、表面付近のスポール部分の体積に対して、形成クレータの内、ピット部分の占める割合が増加することが考えられ、このような低強度ターゲットのクレータ形成効率のスケーリング則では、ピット部分とスポール部分体積を考える必要がある。今後、C 型小惑星のような低強度小惑星上へのクレータ形成におけるピット・スポール部分形成効率および破片放出過程を明らかにする。

参考文献

- [1] Love et al. (1993) *Icarus* 105, 216-224; [2] Yasui and Arakawa (2011) *Icarus* 214, 754-765; [3] Tsuchiyama et al. (2009) *MAPS*, 5189; [4] Poelchau et al. (2013) *MAPS* 48, 8-22; [5] Holsapple (1993) *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 21, 333-373