

内部クラックを持つ炭素質隕石の衝突破壊強度

○道上達広（近大）、ハガーマン・アクセル（ルレオ工科大）、岡庭洸太（近大）、長谷川直（宇宙研）

はじめに

小惑星探査機はやぶさ 2 が持ち帰った炭素質小惑星リュウグウのサンプル粒子内部には、多くのクラックが存在することが分かっている。天体衝突を模擬した室内衝突実験において、内部クラックが存在する標的に対する実験は少ない。そのため、内部クラックが衝突の破壊にどのように影響するのか、よく分かっていない。衝突破壊の程度は衝突エネルギー Q （弾丸の運動エネルギーを標的の質量で割った単位質量当たりのエネルギー）に依ることが知られている。特に衝突によって標的の質量が半分になるときのエネルギーは、衝突破壊強度 Q^* と呼ばれる。この Q^* は、多くの数値シミュレーションや室内衝突実験によって求められている。しかしながら、小惑星リュウグウのような炭素質小惑星と同じ（内部クラックを持つ）炭素質隕石に対する室内衝突実験は少なく、衝突破壊強度はよく分かっていない。そこで本研究では、内部クラックを持つ炭素質隕石に対して衝突破壊実験を行い、その衝突破壊強度 Q^* を求めることにした。具体的には、衝突前の標的と衝突後の最大破片を X 線 CT 撮像し、内部クラックの分布を可視化する。衝突前後の隕石を 3 次元の重ね合わせ（レジストレーション）を行い、クラックを抽出することで、クラックの成長と破断面の関係を明らかにし、衝突破壊強度を求める。

標的に用いた炭素質隕石

標的にはアエンデ隕石（CV）、マーチソン隕石（CM）、アグアス・ザルカス隕石（CM）を用いた。室内衝突実験を実施する際、標的を立方体もしくは球体に成形することが多い。しかしながら、炭素質隕石は高価であり、加工する際、隕石内部に新たなクラックが発生する。そこで本研究では入手した CM コンドライト隕石については成形せずにそのまま用いることにした。一方、CV コンドライト隕石であるアエンデ隕石は、内部にクラックはほとんど存在しない。隕石を X 線 CT 撮像するには、1-2cm の大きさが上限となる。そこで、4cm 以上のアエンデ隕石を 1-2cm にカットした。その際、人工的に内部にクラックが生じた。それらのアエンデ隕石を本研究では用いた。

X 線 CT 撮像実験

衝突破壊強度を求める際、標的内部のクラック分布は重要と考えた。そこで衝突実験前の標的と衝突実験後の最大破片を東北大学博物館にて、X 線 CT 撮像を行い（解像度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{voxel}$ ）、標的内部の 3 次元構造を調べた。衝突前、CM コンドライト隕石であるマーチソン隕石、アグアス・ザルカス隕石において、隕石内部にいくつかのクラックが存在していることを確認した。一方、同じ炭素質隕石で CV コンドライト隕石であるアエンデ隕石は、カットしていない隕石は、今回の解像度で大きなクラックはほとんど無いこと、カットした隕石ではクラックがあることを確認した。衝突実験後、壊れた標的の最大破片に対して、X 線 CT 撮像を行い、その内部のクラック分布について調査した。

衝突実験

衝突実験は JAXA 宇宙科学研究所で行った。標的の大きさは 1-2cm で、弾丸は直径 0.8mm のガラス球（質量 0.0007g）もしくは直径 1.0mm のアルミナ球（質量 0.0027g）を使用した。衝突速度は 2-4km/s である。実験の概要や結果については Michikami et al. (2023, Icarus, 392, 115371) に詳細に記述している。Michikami et al. (2023) では、衝突による隕石内部のコンドリュール付近のクラック進展に注目したが、本研究では、炭素質隕石の衝突破壊強度 Q^* に注目している。

また、 Q^* を求めるには、標的中心に弾丸を衝突させることが望ましいが、標的が小さいため中心に当てることは難しい。つまり弾丸の軌道は若干ずれ、標的に衝突する位置がショットごとに異なり、標的の表層の一部が壊れるものからカタストロフィック破壊まで、様々な壊れ方をした。

実験結果

衝突前の標的と衝突後の最大破片を調査したところ、ほとんどの標的において、衝突前に存在していたクラックに沿って、最大破片の破断面が形成されていることがわかった。

次に、衝突破壊強度 Q^* を見積もるために、衝突エネルギーと最大破片質量/標的質量の関係を調べた。その結果、アエンデ隕石（CV コンドライト隕石）の衝突破壊強度 Q^* は、クラック無しの標的で 1150 J/kg、クラック有りの標的で 1190 J/kg である。クラック有りと無しで Q^* はほぼ同じ値をとることが分かった。一方、データ数としては少ないが、CM コンドライト隕石（マーチソン隕石、アグアス・ザルカス隕石）における衝突破壊強度 Q^* は、1 回目の衝突で 1270 J/kg、2 回目の衝突で 1450 J/kg であった。1 回目と2 回目とで若干、値は異なるがこれはデータ数が少ないためであると考えられる。衝突破壊強度 Q^* の平均は 1300 J/kg 程度になる。

考察

CM コンドライト隕石の Q^* の値が ~1300 J/kg であることは、当初予想していた値よりも大きい。ここで近年報告されている Flynn の隕石の Q^* の値と比較してみる。普通隕石である NWA869(L3-6) は ~1800 J/kg (Flynn et al., 2018, PSS, 164, 91-105)、Saratov(L4) は ~1000 J/kg (Flynn et al., 2023, 54th LPSC, 1250.pdf) であり、玄武岩と同程度である。一方、炭素質隕石のデータは少ないが、Allende(CV3) は ~1970 J/kg (Flynn et al., 2024, 55th LPSC, 1234.pdf)、NWA4502(CV3) は ~224 J/kg (Flynn et al., 2020, PSS, 187, 104916) とかなり値にばらつきがあることが分かる。

今回求めた CM コンドライト隕石の Q^* の値が大きい理由として、次のことが考えられる。まず今回用いた標的は不規則な形でかつ衝突点は標的中心から若干ずれている。また CM コンドライトの標的は衝突前から ~10 $\mu\text{m}/\text{voxel}$ の解像度でクラックが存在していることを確認している。これらが複雑に影響して Q^* の値を大きくする方向に働いたと考えた。CM コンドライト隕石（CI コンドライト隕石も）は他の隕石と比べて大きなクラックが存在することが多いので、今後、小惑星リュウグウなどの炭素質小惑星の岩塊の Q^* を室内実験から見積もる際には、標的の形状、衝突点の位置、クラックの存在の有無が重要になると考えられる。