

同一面への事前衝突を受けた氷試料の衝突破壊強度

○羽山遼¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²神戸大学自然科学系先端融合研究環

はじめに

氷天体同士の衝突合体と再集積は、氷惑星・氷衛星、カイパーベルト天体の形成・進化に重要な役割を果たしたと考えられ、これまでに氷試料を用いた衝突実験が数多く行われてきた。実際の氷天体は、カタストロフィック破壊以前に、複数回の事前衝突を経験し、その際のクレーター形成に伴って内部にクラックが生じ、衝突破壊強度 Q^* が無傷の状態から変化している可能性がある。そのため複数回の事前衝突を経験した標的の Q^* を研究することは重要である。複数回衝突の先行研究では、事前衝突により発生したクラックにより衝突破壊強度が下がることが報告されている (Gault et al., 1969; Housen, 2008)。さらに、衝突エネルギーの合計が等しく衝突回数を変化させた実験を行った場合、衝突により発生する最大破片と積算エネルギー密度の関係は、単一衝突によって得られたものとはほぼ一致することが報告されている。一方、Nakamura et al. (1994)は、衝突破壊で得られたコア破片を2回目の衝突試料として実験を行い、その結果、1回目の衝突が破壊にはほとんど影響しないことを報告している。このような不一致が起こる理由は、衝突により発生するクラックが非均質だからであり、複数回衝突の研究では試料に入ったクラック分布を定量化した上で実験することが必須である。そこで、我々は同一氷試料を用いた複数回衝突実験を行い、事前衝突が Q^* に与える影響を定量的に明らかにすることを試みてきた。その結果、標的の異なる面に衝突を行った実験の場合、複数回の事前衝突を受けたターゲットの規格化最大破片質量 (m_l/M) と事前衝突のエネルギー密度の積算値 (ΣQ) の関係は、事前の衝突回数によらず無傷の氷の結果 (Kato et al., 1995; Arakawa et al., 2002) によく一致することがわかった。今回の研究では同一面への複数回衝突実験を行うことで衝突面の選択の違いによる Q^* の変化について調べた。また、以前の研究では同一サイズの標的を用いた実験が多かったので、本研究では、標的のサイズを変化させることで、弾丸と標的のサイズ比が Q^* に及ぼす影響も考慮した上で m_l/M と ΣQ の関係式を求めた。

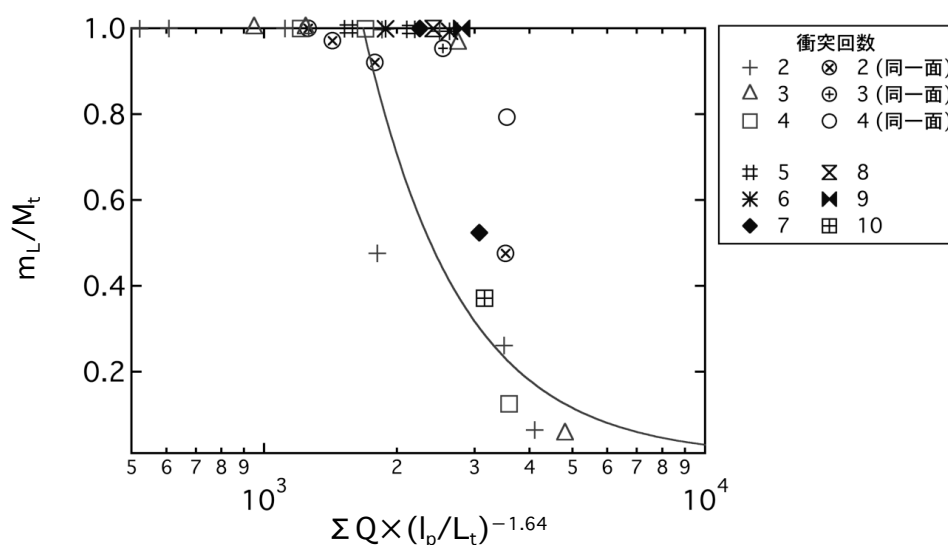
実験方法

事前クラックが氷ターゲットの衝突破壊強度に与える影響を調べるために、北海道大学低温科学研究所の低温室と神戸大学の低温室で一段式軽ガス銃を用いた複数回 (最大10回) 衝突実験を行った。なお、衝突面の違いによる Q^* への影響を考察するために氷弾丸を氷ターゲットの異なる面に衝突させる場合と同一面に衝突させる実験を行った。実験温度は約 -15 , -10°C で、衝突速度は $140\sim 480\text{m/s}$ の範囲で変化させた。氷弾丸は円柱

形で、質量は0.6gと1.6gの2種類を使用した。氷ターゲットは立方体多結晶氷で、その質量は240～2500gである。実験後、回収した衝突破片の質量を計測した。また、カタストロフィックに破壊されなかったターゲットは、クラック分布を定量化するために衝突点からの距離が異なる3点で弾性波速度の測定を行い、クラック密度を算出した後、次の衝突実験の標的とした。

実験結果と考察

下図は横軸に積算エネルギー密度と縦軸に元の標的質量 M_t で規格化した最大破片質量 m_L をプロットしたグラフである。図の曲線は、一回衝突も含めた異なる面に複数回衝突を行った場合の実験データのフィッティングを示し、氷ターゲットの衝突破壊に関して $m_L/M = 2.34 \times 10^6 \{Q \times (l_p/L_t)^{-1.64}\}^{-1.98}$ という経験式が得られた。 l_p と L_t はそれぞれ弾丸とターゲットのサイズであり、 $(l_p/L_t)^{-1.64}$ は弾丸サイズ比の破壊強度への効果をスケーリングした項である。同一面に衝突を行った実験では、異なる面に衝突を行った場合に比べ Q^* が上昇し、4回衝突の場合、同程度の積算エネルギーで異なる面に衝突したターゲットと比較すると最大破片が4倍近く大きくなった。これは衝突点近傍の領域では事前衝突により形成したクラックの存在により衝撃圧力が急速に減衰し、ターゲット内で効率的に破壊が進行しなかったためと考えられる。一方、クラック密度の増加に伴い物質中の音速は減少することが知られており、O'Connell and Budiansky (1974) によってクラック密度と弾性率の関係が定式化されている。このクラック密度を標的内部のクラックの定量化の指標として用い、実験試料に適用した結果、クラック密度は衝突点からの距離が増加するに従って減少し、 ΣQ の増加に伴い線形に増加することが分かった。また、同一面衝突では異なる面衝突に比べクラック密度が小さい値となることが分かった。



図：規格化最大破片質量と積算エネルギー密度の関係