

複数回衝突を受けた氷天体の衝突破壊強度に関する実験的研究

Experimental study on the impact strength of planetary bodies damaged by multiple collision

羽山 遼¹, 荒川 政彦^{1*}, 保井 みなみ², 鳶生 有理³

Ryo Hayama¹, Masahiko Arakawa^{1*}, Minami Yasui², Yuri Shimaki³

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重点研究部, ³ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ³Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

はじめに：氷小天体同士の高速度衝突破壊は、外惑星領域における微惑星成長やカイパーベルト領域におけるデブリディスク形成に重要な物理過程である。氷天体の衝突破壊に関する実験は、これまで多結晶氷や空隙をもつ雪に関して系統的に行われてきた。その結果、多結晶氷の衝突破壊強度は 90 J/kg であり、雪の衝突破壊強度は空隙率により複雑に変化することが分かっている。一方、現実の天体同士の衝突では、衝突破壊が起きる前に、同じ天体が複数回衝突を経験することは珍しくない。実際、現在観測される氷小天体には必ず衝突クレーターが観察され、その多くは天体サイズの 1/3 にも及ぶ大きなクレーターを持つ。従って、室内実験の結果を天体同士の衝突により破壊が起こる条件に応用する時、全く傷もなく綺麗な結晶氷を用いて得られた衝突破壊強度を適用することは問題がある。すなわち、事前に複数回の衝突を経験して内部に多くの破断面を持つ天体は、内部にダメージを持たない天体よりはずっと破壊し易いと予想される。そこで、本研究では、多結晶氷の衝突破壊強度が、事前衝突によりどのように影響を受けるのかを定量的に調べることにした。その結果、事前衝突の回数やその時の衝突エネルギーが衝突破壊強度に及ぼす影響を定量化した。

実験方法：衝突実験は一辺 3 - 10cm の立方体多結晶氷 ($M_t=100 - 1000\text{g}$) と質量 (m_p)1.5g もしくは 0.2g の円筒氷弾丸を用いて行った。実験はすべて -10 - 15 °C の低温室内に設置したガス銃を用いて行い、衝突速度 (v_i) は 100m/s~480m/s とした。実験では、立方体の異なる面に対して複数回衝突させて標的を破壊する実験と同じ面に複数回衝突させて破壊する実験を行った。複数回衝突させる場合には、一度の衝突エネルギーを何通りか変化させてその影響も調べた。実験後は、試料が破壊していない場合、試料内を伝播する弾性波速度を複数位置で計測した。破壊後は、破片のサイズ分布を計測した。また、事前衝突により生じたクラックが静的破壊強度に及ぼす影響を調べるために、250m/s で一度衝突した 10cm 試料をスライスして板状とし、その中を伝播する弾性波速度とその板状試料の貫入強度を変形試験機により計測した。この計測により、内部クラックによる弾性波速度の低下と静的強度の低下に関する経験式を決めることを試みた。

実験結果：標的の異なる面に衝突させた場合、エネルギー密度 ($Q=0.5m_p v_i^2/M_t$) の積算値 Q と最大破片質量 (m_f) の関係は、衝突回数に関わらず無傷の氷の結果に一致するということが分かった。さらに破片の積算個数分布も最大破片付近では、ほぼ一致することが確認された。しかしながら、細粒破片の積算個数分布は、衝突毎のエネルギー密度が大きい方が大きくなる傾向があった。また、複数回衝突のうち、最後に破砕した時のエネルギー密度が無傷の氷を破砕する程の大きさの場合は、無傷の氷を破砕した場合とほぼ同じ破片サイズ分布を持つことがわかった。一方、同一面に複数回衝突させた場合は、氷標的を破砕させるのに必要な積算エネルギー密度 (Q) の大きさは明らかに上昇した。この衝突面の選択の違いを定量的に議論するに、事前衝突を受けた氷試料の静的破壊強度と弾性波音速の低下の関係を調べた。その結果、次のような実験式を得た。

$$Y/Y_0=1-3.4 \quad V/V_0^{0.78}$$

この関係を Mizutani et al. (1990) により提案された無次元衝突応力 P_f に適用し、最大破片質量との関係を調べると衝突面に関係なく、次のような関係ですべての実験結果を整理することができた。

$$m_f/M_t=0.0413P_f^{-4.82}$$

従って複数回衝突の最大破片に対する影響は、弾性波速度の低下により定量化できることがわかった。現実の小天体は複数回衝突により、内部に多くの破断面を持つものが多いと思われるが、そのような天体の衝突破壊強度を推定する手段として弾性波速度の計測が有効であると言える。

キーワード: 氷微惑星, 衝突破壊, クラック, 弾性波速度, 力学強度, スケール則

Keywords: icy planetesimals, impact disruption, crack, sound velocity, mechanical strength, scaling law