

同サイズ微惑星の低速度衝突に関する実験的研究：衝突破壊強度と破片速度の角度依存性

Low-velocity impact experiments on equal-sized planetesimal collisions

河本 泰成^{1*}, 保井 みなみ², 篤生 有理³, 荒川 政彦¹

KOMOTO, Yasunari^{1*}, YASUI, Minami², SHIMAKI, Yuri³, ARAKAWA, Masahiko¹

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, 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

太陽系の惑星は多孔質の微惑星同士が衝突破壊、再集積を繰り返すことで成長した。特に衝突成長の初期においては、同サイズの微惑星同士が脱出速度（数 10m/s）程度で衝突し、正面衝突に限らず様々な角度で衝突したと考えられている。先行研究 Arakawa (1999) では、弾丸・標的質量比 0.13、衝突速度 150-700m/s、衝突角度 0°-50° の氷球の斜め衝突実験を行い、破片の最小飛翔速度 (v_{min}) と衝突角度 (θ) との間に $v_{min}=A(\cos\theta)^{3.2}$ の関係があることを見つけた。本研究では、岩石微惑星と氷微惑星を模擬した試料を用いて、100m/s 以下の低速度における斜め衝突実験を行い、先行研究との比較から、斜め衝突破壊に対する弾丸・標的質量比の影響を調べた。実験では、衝突破壊強度と破片の飛翔速度を測定し、構成物質・衝突角度の依存性を調べた。

実験は一段式軽ガス銃を用いて行った。試料は氷と空隙率 55% の石膏を用い、岩石微惑星と氷微惑星をそれぞれ模擬した。試料は全て直径 30mm の球であり、これを弾丸と標的に用いた。石膏試料を用いた実験は神戸大学で行い、氷試料を用いた実験は北海道大学・低温科学研究所の大型低温室 (-10 °C) で行った。衝突速度 (v_i) は正面衝突では 12.5-83.3m/s と変化させた。一方、斜め衝突では 65-75m/s で一定とした。斜め衝突の衝突角度は 0-75 ° で、15 ° 刻みとした。衝突破片は回収箱を用いて回収し、個々の破片の質量を計測した。衝突の様子は高速度ビデオカメラを用いて毎秒 3000-8000 コマの速度で撮影した。

破片速度を解析した結果、正面衝突では反対点速度 (v_a : 試料の中心に対して衝突点と対称な点での速度) と重心速度とほぼ一致し、完全非弾性衝突として説明できるとわかった。しかし氷の場合、カタストロフィック破壊が起こると、氷球同士がつぶれ、重心速度より 10~15m/s ほど遅くなった。同時に、衝突方向と垂直に細粒破片の飛び出しが観測され、その速度は最高で衝突速度と同程度になった。斜め衝突では、衝突角度が大きくなると反対点速度は小さくなった。一方、衝突点から氷球の接面上に広がるエジェクタの速度は、下流方向ではジェッティングにより衝突速度からその 1.5 倍程度まで加速されることがわかった。氷の場合、衝突角度が 0-45 ° では $v_a=20(\cos\theta)^{3.6}$ 、45-75 ° では $v_a=7.7(\cos\theta)^{0.95}$ が得られた。一方、石膏の場合、 $v_a=31(\cos\theta)^{1.3}$ が得られた。45-75 ° 衝突での氷試料や石膏試料の場合は、規格化最大破片質量が 0.5-1 の結果が多い。

衝突破壊強度 Q^* は、規格化最大破片質量が 0.5 になる時のエネルギー密度 Q で定義される。なお、 Q は弾丸の運動エネルギーを弾丸と標的の質量を合わせたもので割った値である。正面衝突の場合、氷試料では、Arakawa et al. (1995b) と Arakawa (1999) より、弾丸・標的質量比 0.003-0.13 で $Q^*=89\text{J/kg}$ が得られている。石膏の場合、Yasui and Arakawa (2011) より、弾丸・標的質量比 0.027-0.56 で $Q^*=446\text{J/kg}$ が得られている。今回の実験の結果、同サイズ球の衝突でも、氷・石膏共にこれらの先行研究と同じような衝突破壊強度を示した。斜め衝突の場合、氷・石膏共に衝突角度に比例して最大破片も大きくなり、氷の場合 $m_f/M=0.044(\cos\theta)^{-1.4}$ 、石膏の場合 $m_f/M=0.44(\cos\theta)^{-0.62}$ が実験結果から得られた。また、斜め衝突の場合、弾丸速度の、衝突点の接面に垂直な成分が標的破壊に重要であると考え、 $Q_{ob} = Q(\cos\theta)^2$ をパラメータとして斜め衝突のデータを整理した。その結果、正面衝突と斜め衝突でデータの差異はほとんど見られなくなった。斜め衝突での破壊では、衝突速度の衝突点の接面に垂直な成分 $v_i \cos\theta$ が支配的であるということがわかった。

キーワード: 斜め衝突, 微惑星, 多孔質天体, 氷天体

Keywords: Oblique impact, Planetesimals, Porous body, Icy body