

低空隙多孔質氷標的を用いた高速度衝突実験：運動量輸送

およびクレーター形成過程に関する実験的研究

¹江口裕樹 ²荒川政彦 ²保井みなみ ²笹井遥

¹神戸大学理学部 ²神戸大学大学院理学研究科

背景・目的

氷衛星の内部は多くの空隙を保持しているものもあると考えられており、そのバルク空隙率を調べるためには構成物である氷、ケイ酸塩鉱物、有機物の質量比が重要である。この比によって、氷衛星の空隙率は 10%程度の低空隙率から 50%以上の高空隙率まで広範囲に及ぶと予想される。太陽系の天体は微惑星同士の衝突と再集積の繰り返しによって形成、成長したと考えられている。それゆえに、衝突の結果で起こる衝突クレーターや天体間での運動量輸送は、表面進化や天体の軌道進化など、天体の進化過程を考える重要な手掛かりになる。衝突時における天体間の運動量輸送については、DART ミッションにより行われる小惑星への人工衝突実験と小惑星の軌道偏向が注目されており、その軌道偏向を予測するために天体同士の衝突による運動量輸送の研究が進んでいる。その際に用いられるのが、衝突前後の母天体の運動量と衝突体の運動量の比 (β) であり、室内実験においても衝突条件と運動量輸送効率 β^{-1} の関係を調べる必要がある。

これまでに、強度支配域のクレーター形成や運動量輸送を調べた衝突実験は様々行われてきたが、そのほとんどが岩石や空隙率 0%の氷の標的を用いたものであった。また、雪標的を用いた実験は空隙率が 40%以上の比較的高空隙の場合がほとんどであり、30%以下の低空隙率の雪標的を用いた実験はこれまで行われていない。そこで本研究では、空隙率 30%以下の雪標的に対して高速度衝突実験を行い、クレーター形状やサイズに対する空隙率依存性を調べた。さらに、運動量輸送効率 β^{-1} に対する強度依存性を調べた。

実験方法

標的には、粒径が $710\mu\text{m}$ 以下の雪を圧縮して作成した高さ 7cm、直径 7cm の円柱試料を用いた。空隙率は 10、20、30%とした。作成した試料は 2~6 日間、 -20°C の冷凍庫で応力緩和させた。衝突実験は、神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用いて行った。この装置は低温室内にあるチャンバーと連結しており、実験を行う際はチャンバー内の温度を -15°C 、真空度を 51~170Pa にした。衝突速度は 1~5km/s とした。弾丸は直径 1mm と 2mm のアルミ球を用いた。

結果・考察

まず、クレーター形成条件と衝突破壊条件の境界条件を調べた。その結果、空隙率が小さいほど破壊に必要なエネルギー密度は小さく、衝突破壊とクレーター形成の境界となるエネルギー密度は空隙率 10%では 30J/kg、20%では 130J/kg、30%で 260J/kg となった。

本研究で得られたクレーター形態は、中心にピットをもち、標的表面は不規則に剥がれたスポール領域を持つ、ピット型クレーターが見られた。これは強度支配域で観察されるクレーター形態と一致する。スポールおよびピットそれぞれの直径 (D_s と D_p) とクレーター深さ (H)を計測した結果、運動エネルギーが一定の場合、 D_s は空隙率が小さいほど大きくなった。例えば、衝突速度が 1km/s 付近では空隙率 10%で約 34mm、空隙率 30%で約 14mm となった。しかし、空隙率 10%の D_s は、空隙率 0%の氷 (Shrine et al., 2001) よりも約 1.4 倍大きくなった。一方、 D_p や H は空隙率による変化は小さく、衝突速度 1km/s 付近では空隙率 10%、20%、30%でそれぞれ $d=2.2$ 、1.6、3.0mm、 $H=4.3$ 、3.9、5.3mm となった。また、 D_p は強度支配域のクレータースケーリング則を用いて、空隙率依存性を考慮した雪の圧縮強度で説明できた。

運動量輸送効率 $\beta-1$ を調べた結果、空隙率が小さいほど、全エネルギー密度の範囲で $\beta-1$ は大きくなった。エネルギー密度依存性を調べた結果、全空隙率でエネルギー密度が大きくなるほど $\beta-1$ は小さくなった。さらに、強度依存性を考慮したパラメータを用いても空隙率が小さいほど $\beta-1$ は大きくなるため、 $\beta-1$ の空隙率依存性の説明には、強度以外のパラメータを考慮する必要があることがわかった。