

雪の動的圧密実験：氷微惑星の低速度衝突圧密への応用

Dynamic compaction experiments of snow: Implications for low-velocity impact compaction of icy pre-planetesimals

保井 みなみ^{1*}, 坂本花菜², 荒川 政彦³Minami Yasui^{1*}, Kana Sakamoto², Masahiko Arakawa³¹ 神戸大学自然科学系先端融合研究環, ² 神戸大学理学部, ³ 神戸大学大学院理学研究科¹Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ²Faculty of Science, Kobe University, ³Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：太陽系形成標準モデルでは、cmサイズのダストボールから重力不安定によって微惑星が形成されると考えられている。しかし、この形成過程では円盤ガスの乱流の影響によりダストの沈殿が困難であることが問題点として挙げられる。そこで着目されたのが、cmから数100mサイズの天体を意味する pre-planetesimal (微惑星前駆天体) である。近年、この pre-planetesimal が衝突合体によって微惑星へと成長するという仮説が提案された。しかし、pre-planetesimal の成長過程にも問題点がある。それは衝突破壊が起こりやすいこと、短時間で太陽に落ちてしまうこと、そして衝突の圧密により天体同士が反発して合体成長しないことである。pre-planetesimal の成長過程についての理論的研究は幾つか行われている。Geretschauser et al. (2011) は多孔質シリケートダスト集合体の衝突モデルを提案し、SPH法を用いた数値計算を行った。その結果、衝突速度、弾丸・標的サイズ比によって異なる7つの衝突モード(圧密、破壊、付着)を発見し、モードによって圧密の程度が異なることが分かった。しかし、この研究ではモデルに実測した圧密曲線(圧力と空隙率の関係)を組み込んでいないため、実際の衝突現象を実現しているかは疑問が残る。そこで本研究では、氷 pre-planetesimal の衝突圧密条件を明らかにするため、高空隙雪を用いた低速度衝突実験を行った。そして、衝突後の時間変化に伴う密度の深さ分布、圧密領域のサイズ、標的に与えられる応力を調べ、衝突圧密時の密度分布および圧密領域に関する経験式を決めた。

実験方法：衝突実験は、北海道大学低温科学研究所にある-10℃の低温室で行った。弾丸は直径25mm、高さ40mm、質量149gのステンレス円柱を用いた。弾丸下部にはエジェクタの影響を抑えるため、直径26mmの塩化ビニル円盤を取り付けた。弾丸の加速方法は自由落下で、落下距離は50~900mmの間で9種類変化させた。衝突速度範囲は0.7~3.5m/sである。標的は空隙率の異なる円筒形の雪を用いた。直径26mmのアクリル筒に氷粒子を詰め、空隙率が70、80、90%となるよう氷粒子の質量を調整した。氷粒子は噴霧器を用いて液体窒素の中に水を散布し、その後液体窒素から氷粒子を取り出し、250ミクロンのふるいにかけて大きい粒子を取り除いた。粒径は50~500ミクロンである。雪標的は高さ100mmで、20mmごとに青い雪で境界を作り、深さに伴う密度変化を観察できるようにした。青い雪は市販のスプレーで液体窒素の中に青く染色した水を散布した。衝突の様子は高速度ビデオカメラで撮影した。シャッタースピードは20、50マイクロ秒、撮影速度は毎秒3000、5000コマである。衝突の際の応力を実測するため、弾丸上部に加速度センサーを設置した。加速度計が測定した電圧はオシロスコープ、またはデータロガーで記録した。データロガーの記録点は25万~100万点、サンプリング間隔は20マイクロ秒である。

実験結果：衝突の際に標的に与えられる応力は、加速度計データ、高速度ビデオカメラ画像の両方を用いた。その結果、応力曲線(応力の時間変化)上の最大応力 s_{max} は空隙率70%雪で 20 ± 100 Pa、空隙率80%雪で 15 ± 50 Paとなり、70%雪の方が1.3~2倍大きくなった。また、最大応力は各試料共に衝突速度と伴に大きくなった。加速度計から得た最大応力と高速度ビデオカメラの映像から得た最大応力を比較すると概ね一致し、さらに木下式雪硬度から求めた降伏強度 Y と各解析法から求めた応力も、概ね一致した。次に密度分布について調べるため、標的の最上層の衝突後の最終密度 r_1 と最大応力 s_{max} を比較した。その結果、最大応力 s_{max} と伴に最上層の密度 r_1 は大きくなった。そして、最大応力と最上層の密度の関係は空隙率70%雪で $r_1 = 1.7 \times 10^2 s_{max}^{0.2}$ 、空隙率80%雪で $r_1 = 1.2 \times 10^2 s_{max}^{0.3}$ となり、絶対値は70%雪の方が1.5倍大きくなるが、増加率を示すべきは0.2-0.3とほぼ一致した。最後に、木下式雪硬度 Y と標的全体の平均圧縮密度 r_{ave} の関係から、標的の見かけの体積弾性率 K を求めた。その結果、空隙率70%雪では1.8MPa、空隙率80%雪では0.2MPaとなり、70%雪は80%雪より約8倍大きくなった。氷の K は約10MPaであり、それと比べて約10-50倍小さくなった。

キーワード：氷微惑星前駆天体、衝突圧密、低速度衝突実験、密度分布、圧密領域、体積弾性率

Keywords: icy pre-planetesimal, impact compaction, low-velocity impact experiment, density profile, compaction area, bulk modulus