

## 多孔質物質の動的圧密実験：微惑星前駆天体の衝突圧密への応用 Dynamic compaction experiments of porous materials: Implications for impact compaction of pre-planetesimals

保井 みなみ<sup>1\*</sup>; 横田 みずき<sup>2</sup>; 坂本 花菜<sup>2</sup>; 荒川 政彦<sup>3</sup>

YASUI, Minami<sup>1\*</sup>; YOKOTA, Mizuki<sup>2</sup>; SAKAMOTO, Kana<sup>2</sup>; ARAKAWA, Masahiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学自然科学系先端融合研究環, <sup>2</sup> 神戸大学理学部地球惑星科学科, <sup>3</sup> 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻  
<sup>1</sup>Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Kobe University, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：微惑星形成過程において、cm サイズから km サイズ（微惑星前駆天体と呼ぶ）への成長メカニズムは、2つの説が提唱されている。1つは、赤道面に沈殿、濃縮したダストアグリゲイトが自己重力によって分裂・収縮し、微惑星を形成すると唱えた重力不安定説、もう1つは、衝突合体を繰り返してダストアグリゲイトから微惑星へと成長すると唱えた直接合体成長説である。本研究では、直接合体成長説に着目する。この説では、微惑星前駆天体同士が衝突を繰り返すことで内部密度が上昇し、その後の衝突で反発や衝突破壊が起こり、合体成長が妨害されるという問題点がある。そこで、衝突によって変化する微惑星前駆天体の最終密度分布を調べたのが坂本（2013、卒論）である。坂本は高空隙の雪にステンレス円柱を自由落下させる衝突圧密実験を行い、衝突時の衝突応力と圧密分布、圧密領域の大きさの関係を明らかにした。しかし、坂本の研究では衝突速度が0.7~3.5m/sと微惑星前駆天体の比較的小さい平均衝突速度範囲で実験を行っている。そこで本研究では、微惑星前駆天体の圧密メカニズム、衝突応力、圧密分布を調べるため、5m/s以上の速度範囲での多孔質物質の衝突圧密実験を行った。

実験方法：標的には、岩石および氷微惑星前駆天体を模擬したパーライトと雪を用いた。雪の初期空隙率は70、80%、パーライトの初期密度は85kg/m<sup>3</sup>である。雪の衝突実験は北大低温研の低温室(-10℃)、パーライトの実験は神戸大で行い、横型一段式軽ガス銃及び縦型一段式軽ガス銃を使用した。雪の実験は縦型銃のみを使用した。アクリル筒内に液体窒素内に噴霧して作成した氷粒子(40~200μm)、または市販のパーライト粒子(2.2~3.4mm)を深さ12cmになるように入れ、2cm間隔で染色した氷粒子またはパーライトで境界を5層作り、深さに伴う密度変化を観察出来るようにした。このアクリル筒内の標的の上にピストンを設置し、弾丸でピストンを加速させて標的を圧密した。弾丸は、横型銃では直径25mmの弾性ボールを用い、縦型銃では直径30mmの円筒サボを取り付けた弾性ボールを用いた。ピストンは、直径30mm、高さ10~30mmのポリカーボネイト、アルミ、ポリアセタール円盤を用いて、ピストンによる圧密の違いを調べた。弾丸の衝突速度は2~118m/sである。衝突の様子は高速度ビデオカメラで撮影し、撮影速度は6000~10000fps、露出時間は20~100μsとした。

実験結果：まず、ピストンの加速度から求める衝突応力 $\sigma_p$ と、エネルギーの保存式から求める木下式高度 $Y$ を比較した。その結果、 $\sigma_p$ と $Y$ はパーライト、雪、共に1対1の関係にあることがわかった。

次に、標的の平均最終密度 $\rho_f$ を決める物理量を求め、 $\rho_f$ を求めるモデル式を決定した。パーライトは粒子の破碎による圧縮によって圧密が進行する。衝突により破壊された破片質量 $\Delta m$ を運動量と運動エネルギー $E_k$ と比較した結果、運動エネルギーと相関があり $\Delta m = 10^{-3} E_k^{0.4}$ という経験式が得られた。また、破碎した破片が未破壊のパーライト粒子間の隙間を埋めると仮定して圧密前後の標的質量保存式を用いると、モデル式 $\rho_f = \rho_i / (1 - \Delta m / m_t)$  ( $\rho_i$ : 標的の平均初期密度、 $m_t$ : 標的質量) が得られた。またこのモデル式は実験値とよく一致した。

一方、雪の場合、氷粒子間の隙間が小さくなることによって圧密が進行する。このことから、パーライト同様圧密前後の標的質量保存式を用いて、モデル式 $\rho_f = m_t / (L_0 - \Delta L) S$  ( $L_0$ : 標的の初期深さ、 $S$ : 標的の底面積、 $\Delta L$ : 標的の圧密前後の長さ変化量) が得られた。ここで、 $\Delta L$ は衝突応力と歪速度の関係から得られた圧縮粘性係数 $\eta$ を用いて $\Delta L = E_k / A \eta v_p S$  ( $v_p$ はピストン速度、 $A$ は定数) となる。このことから、雪の平均最終密度は運動量によって決まり、実験値ともよく一致した。

最後に、標的最上層の最終密度 $\rho_{f1}$ と衝突応力 $\sigma_p$ の関係を調べた。その結果、パーライトでは $\rho_{f1} = 3.0 \sigma_p^{0.8}$  (kPa)、雪では $\rho_{f1} = 127 \sigma_p^{0.3}$  (kPa) という関係が得られた。しかし雪は、 $\sigma_p > 100$  kPaになると $\rho_{f1}$ にばらつきが見られる。これは、圧密メカニズムの違いが原因と考えられる。100kPa以下では雪の初期空隙率で圧密メカニズムは変化しないが、100kPa以上の場合、初期空隙率70%では衝撃波の伝搬による圧密が起こり、初期空隙率80%では衝突直後に上層部が最終密度まで圧密し、その後下層部が時間と共に同時に圧密されることがわかった。一方、パーライトは全ての応力範囲で破碎圧密が起こっているため、データのばらつきはほとんどみられなかった。

キーワード: 微惑星前駆天体, 動的圧密, 衝突実験, 最終密度, 木下式硬度, 圧縮粘性係数

Keywords: pre-planetesimal, dynamic compaction, impact experiment, final density, Kinoshita strength, compression viscosity