

階層構造粒子塊の圧密挙動に関する実験的研究：モデルとの比較

大村知美¹, 桂木洋光², 豊田優佳里³

¹大阪産業大学, ²大阪大学, ³アストロバイオロジーセンター

はじめに

微惑星の衝突進化を考える際, 微惑星の強度は重要なパラメータである。構成粒子が集積しただけの始原的な状態の微惑星の物性は, その構成粒子がなす構造に依存する。原始惑星系円盤の自己重力不安定によって形成された微惑星は, 初期粒子構造として, 粒子(grain)の凝集体(pebble)が集合した粒子構造(以下, 階層構造粒子塊)を持つと考えられる。また, その粒子構造は集積後も自己重力等による圧密で変化する。よって, 微惑星物性の進化を解明する上では, 階層構造粒子塊の圧密挙動について理解することが重要である。

数値シミュレーションで階層構造粒子層の圧密挙動を再現した結果によると, 階層構造粒子層の圧密には主な圧密メカニズムに対応した3つの段階が存在する。各段階における圧密メカニズムは, それぞれ (1) 凝集体(=pebble)の再配置 (2) 凝集体の塑性変形 (3) 粒子(grain)の弾性変形であり, 各段階の圧密曲線を再現するモデル式も提案されている[1]。

本研究では, 階層構造粒子層の圧密挙動を実験的に調べるとともに, CTスキャンを用いて, 圧密段階の異なる粒子層の内部粒子構造の観察を行った。また, [1]で提案されたモデル式が実験結果を再現できるか調べた結果について報告する。

実験

実験に用いる粒子層の構成粒子(grain)には, 直径4.2 μmのガラスビーズを使用した。粒子中に含まれる「だま」をふるいにかけ, 直径 d が $1 < d < 2$ mmの凝集体(pebble)のみをサンプルに用いた。pebbleを円筒容器に充填したものをサンプルとして, 万能試験機に取り付けたピストンで圧密し, ピストンのストロークと試験力を記録した。比較のため, 同じ粒子を目開き500 μmのふるいでサンプル容器にふるい入れた均質粒子層でも実験を行った。

実験より得られた階層構造粒子層の圧密曲線を均質粒子層のものと比較すると, 圧密の初期段階においては階層構造粒子層の方が圧密に要する圧力は大きいが, 圧密が進むと両者の差は失われていくことが示された。CTスキャン画像からも, 圧密の進行と共に pebble の輪郭が消失していく, 圧密挙動に pebble の有無が影響しない領域においては粒子層内部に pebble の痕跡が見られない様子が観察されている。このことは, 本実験でみられた粒子層の圧密段階は[1]でいうところの(2)の圧密段階(pebbleの塑性変形によって粒子層の圧密が進む段階)に相当することを示している。

モデルとの比較

[1]で提案されたモデル式のうち、(2)の圧密段階の圧密挙動を再現する式に本研究で用いた pebble のパラメータを代入し、実験結果を再現できるか調べた。式中の pebble 物性値のうち、充填率および「かたさ」の指標となる値には、 $d \sim 4 \text{ mm}$ の pebble で測定した結果を適用した。pebble の充填率 ϕ は粒子上半分のプロファイルと粒子質量より推定した。体積と質量の誤差を考慮すると充填率の推定値は 0.3–0.6 程度の幅を持つが、今回は $\phi = 0.39$ とした（各粒子の代表値の平均）。また、「かたさ」の指標となる値は、単一粒子の圧壊試験を行った際のピーク試験力 F_{\max} とその時点における粒子変形量 Δx から、定数 $k = F_{\max}/\Delta x$ として求めた。実験に用いた pebble の「かたさ」は、 $k = 500 \text{ N/m}$ 程度であった。他のパラメータには[1]で用いられている値を適用したが、実験結果は再現されなかった。実験結果を再現するには、pebble 充填率により大きな値（ $\phi = 0.55$ ）を適用するか、pebble 間に粒子間力が働き始める圧縮長 $\delta_{\text{agg},0}$ をモデルの 35 倍程度にする必要があった。前者は測定値の不確かさの範囲には含まれるが、値の妥当性を検討するためには、pebble 体積・質量の測定精度の向上が求められる。後者からは、半径 $0.1 \mu\text{m}$ 粒子より成る数 μm サイズ凝集体より成る粒子層（[1]の計算条件）と、本実験における粒子層で、粒子の変形挙動が異なる可能性が示唆される。

まとめ

本研究では、階層構造粒子塊の圧密挙動を実験的に測定した。実験結果および CT 画像から、本実験でみられた圧密挙動は、pebble 粒子の塑性変形が支配的となる圧密段階に相当することが示された。また、実験の結果は、パラメータの調整を行えば[1]で提案されたモデル式で再現された。パラメータの差異は、pebble の物理量の測定精度や、pebble のサイズスケールによる粒子挙動の違いを反映している可能性がある。以上のことから、[1]のモデル式は、pebble の塑性変形が支配的な圧密段階における実際の粒子層の圧密挙動を記述する上で有用であることが示された。ただし、粒子サイズスケールの効果を考慮し、一部のパラメータ設定については再検討が必要である可能性が示唆される。

謝辞

CT スキャナの利用をご快諾頂いた荒川政彦教授（神戸大学大学院理学研究科）に感謝致します。

参考文献

- [1] Arakawa et al., 2025, Earth, Planets and Space, 77:89