

粉粒体天体内部の密度構造に関する実験的研究

○大村知美¹, Guettler Carsten², 中村昭子¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² Max-Planck-Institute for Solar System Research

ダストの集合体である微惑星や、衝突破片の再集積より形成された天体は惑星形成過程において普遍的であるといえる。粉粒体天体内部の密度構造(空隙率)は強度や熱的性質、衝突進化に影響するため、粉粒体天体の進化を左右する。これらの空隙率は自己重力や岩塊の存在、衝突、振動、熱進化等によって変化する。本研究では自己重力によって、中心からの距離で土圧が異なることによって生まれる密度構造に注目する。

天体を構成する粒子塊を模擬した粉体層の圧縮実験を行い、圧力と空隙率変化の関係を、粉粒体の特性(粒子径、粒子径分布幅、組成)に注目して調べた。また、実験より得た圧力と密度の関係式から粉粒体天体内部の密度構造を推定した。

実験には粒子形状、組成、粒子径分布の異なる粉粒体を用いた。粒子径分布を図1に示す。ふるいを用いて粉粒体を容器にふるい入れて粉体層(サンプル)を作成した。サンプルに遠心加速装置と遠心機、圧縮試験機を用いて荷重をかけ、圧力と空隙率の関係を得た。使う装置によってサンプルの圧縮方法が異なり、遠心加速装置、遠心機では模擬重力(遠心力)による圧縮、圧縮試験機ではピストン圧縮を行っている。サンプルにかかる圧力は遠心加速装置、遠心機の場合はサンプル内部の密度が均一だと仮定した際のサンプル高さ半分の点での土圧、圧縮試験機の場合は土圧に加え圧縮試験機の試験力をサンプル断面積で割った圧力がかかっているとして求めた。サンプルの空隙率はその体積と質量、構成粒子の真密度より決定したサンプル全体の平均空隙率とした。

実験結果を図1に示す。fused alumina 4.5 μm の実験結果より、特に高圧力範囲で模擬重力による圧縮よりもピストン圧縮でサンプルの空隙率が小さくなる傾向が見られた。これは模擬重力による圧縮でサンプルにかかっている圧力を大きく見積もっていることが原因の一つとして考えられる。サンプル内部の模擬重力は軸からの距離に応じて線形的に変化するため、密度が均一であれば、高さ半分での土圧を平均圧力と考えることができる。しかしながら模擬重力による圧縮ではサンプル内部に空隙率分布が生まれ、サンプル容器上方の空隙率が下方の空隙率に対し大幅に大きくなる(Suzuki et al., 2004)。よって実際のサンプル高さ半分における土圧は見積もりよりも小さくなっていると考えられる。

圧縮されやすさは粉粒体によって異なった。これは粒子の特性(組成、形状、粒子径分布)が影響していると考えられる。実験前後の粒子を電子顕微鏡で観察したところ、圧縮による粒子の破壊は見られなかった。よってサンプルの空隙率は構成粒子の破壊によってではなく、粒子の再配置によって減少したと考えられる。粒子の再配置メカニズムは配位数によって異なる。粒子の配位数が6以下の場合、粒子は主に転がりによって再配置される。しかし、粒子の配位数が6を超えると粒子はすべりを伴って再配置されるようになる。配位数は空隙率の減少と共に増加し、配位数が6に達するのは空隙率が ~ 0.7 のときである(Wada et al., 2011)。空隙率が0.7以下の範囲で

はすべりによる再配置が起こっていると考え、圧縮試験機での実験結果より得られた圧縮曲線の傾きと、すべりによる再配置に必要なすべり摩擦力の関係を調べた。すべり摩擦力は粉粒体の剛性率、接触半径に依存する値であり、接触半径は粉粒体の組成、粒子径、外力に依存する値であるが、ここでは粒子のメジアン径での、外力を受けていない場合の接触半径を仮定したすべり摩擦力を用いた。すべり摩擦力の大きい粒子ほど圧縮されにくい（圧縮曲線の傾きが小さい）傾向が見られた。また、粒子径分布幅の大きいサンプルは圧縮されやすい傾向が見られた。

天体構成粒子の圧縮特性が明らかであるとして、レーン=エムデン方程式を用いて粉粒体天体内部の密度構造の推測を行った。天体内部は連続で、土圧は平衡状態にあると仮定する。また、天体内部での圧力と密度の関係をべきで表せると仮定する。構成粒子の圧縮特性より圧力と密度の関係式の係数と指数を決めることで、レーン=エムデン方程式を解くことができる。ここでは fused alumina 4.5 μm の実験結果を用いて、これと同様のふるまいをする粉粒体より構成された粉粒体天体の内部構造を計算した。結果を図 2 に示す。中心から外側へ向かうほど空隙率が大きくなっていくこと、また大きい天体ほど空隙率が小さいことを示せた。

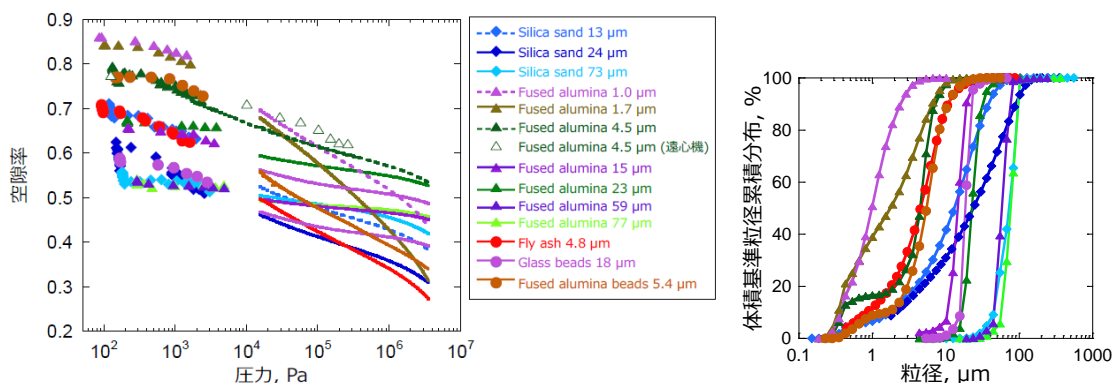


図 1: 左図は実験結果である。印でプロットされているのが遠心加速装置での実験結果で、白抜き印が遠心機での実験結果、線のように見えるのが圧縮試験機による実験結果である。右図は実験に用いたサンプルの粒子径分布である。各サンプルを表す記号は左図と同じである。サンプル名の後の数字は粒子のメジアン径を示す。

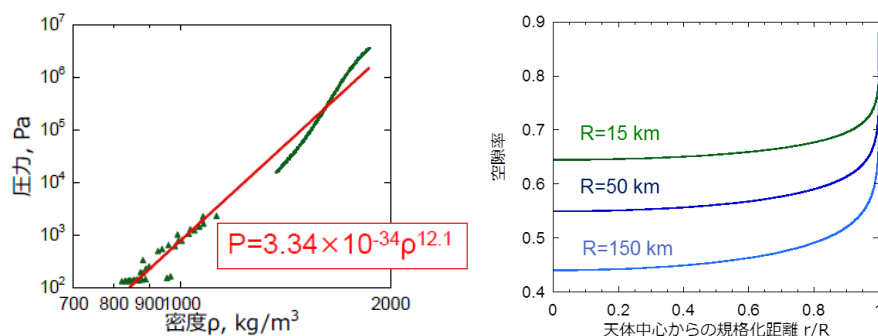


図 2: 左図は実験結果より得られた fused alumina 4.5 μm の密度と圧力の関係である。横軸はサンプルの密度、縦軸はそのときの圧力を示す。右図は実験結果より決めた値を用いて計算した、半径が 15 km, 50 km, 150 km の天体の内部空隙率構造。横軸は天体半径で規格化した天体中心からの距離、縦軸は空隙率を表す。