

粒子間力が小天体表面層の振動圧密特性に及ぼす影響に関する実験的研究

大村知美, 中村昭子
神戸大学大学院理学研究科

背景

小天体上における振動でレゴリス層の対流や圧密が生じ、表面地形の変化や物質混合、また表面の物理特性の変化が起きる。振動によるこれらの現象は主に振動の特性にコントロールされると考えられている。よく考えられるのは Γ (=振動加速度/重力加速度)というパラメータであり、 Γ が現象をコントロールしているとすると微小重力下では小さな衝突による振動でもレゴリス層を変化させられると言われていた。ただし例えば圧密特性に関する研究からは、振動を特徴づけるパラメータ、すなわち、振動加速度と振動数だけが現象をコントロールしているのは固着性をほぼ無視できる mm サイズ粒子の場合であることが示唆されている。一方、小天体上のレゴリス粒子は固着力の影響を比較的大きく受けていると考えられる。それは、微小重力下で相対的に固着力の影響が大きくなることによる。また、短い自転周期を持つラブルパイル天体(1950DA)が自身の回転による遠心力で崩壊しないためには、構成粒子層が 75-85 Pa の固着力を持っていないなければならないという数値シミュレーション結果が報告されている (Hirabayashi and Scheeres, 2015)。

本研究

粉体層の圧密特性に固着力が及ぼす影響について調べるため、固着性が中～大程度の粒子を用いてタッピング圧密実験を行った。平衡に達したときの充填率と充填タイムスケールに着目し、本研究で用いた試料の場合の圧密特性が固着性をほぼ無視できる粒子の場合とどのように異なるか比較した。またレゴリス粒子の固着性が小天体表面進化のタイムスケールにどのように影響するかを推測した。

実験方法

試料粉体には直径 19 μm (GB19), 55 μm (GB55), 93 μm (GB93)の球形ガラスビーズを用いた。試料は 200°Cのオーブンで一晩以上加熱してから用いた。せん断試験によって測定した各試料の固着力はそれぞれ 111 ± 29 Pa, 38 ± 20 Pa, 62 ± 52 Pa で、GB19 の固着力は 1950DA のそれと同程度である。試料粉体をふるいを通して $\Phi 50$ mm, 深さ 30 mm の試料容器にすり切り充填したものを実験試料とした。試料の充填率は試料粉体の体積と質量から決定した。タッピングの衝撃加速度が 112 ± 9 m/s² ($\Gamma=11 \pm 1$), 272 ± 22 m/s² ($\Gamma=28 \pm 2$), 685 ± 60 m/s² ($\Gamma=70 \pm 6$)の条件で実験を行った。各条件において試料を任意の回数($3 \leq n \leq 2 \times 10^4$)タッピングし、タッピング前後での試料の充填率を調べた。実験は基本的に大気中で行った。GB93 のみ、宇宙科学研究所の縦型チャンバー内で 0.15-0.17 Pa 下での実験も行った。

実験結果

①平衡充填率：GB19 のそれは他の試料よりも小さく、これは固着力が粒子層の充填を妨げたためと考えられる。GB55 と GB93 の平衡充填率は先行研究で 1 mm 粒子を用いた実験で得られたのと同程度となり、本研究での加速度範囲であれば、GB55 と GB93 の固着力は平衡充填率に影響を及ぼさないことがわかった。一方で平衡充填率が最大となる Γ に着目すると、GB93 の平衡充填率は $28 \leq \Gamma < 70$ で最大

となり、GB55 の場合平衡充填率は $70 < \Gamma$ で最大になると考えられる。1 mm 粒子の場合、平衡充填率は $\Gamma \approx 1.2$ で最大になることがわかっている(Phillipe and Bideau, 2003)。平衡充填率が最大になる Γ は粒子径が小さくなる(=固着性が増す)と増加し、また固着性の影響によりオーダーで変化することがわかった。

②充填時間の Γ 依存性：平衡充填率に粒子間力が影響する GB19 は比較対象から除いた。充填時間の定量化には先行研究で用いられているのと同じ KWW law (Phillipe and Bideau, 2003)を用いた。KWW law は次式のように与えられる： $\Phi(n) = \Phi_{ss} - (\Phi_{ss} - \Phi_0) \exp[-(n/\tau)^\beta]$ (Φ ：充填率， n ：タッピング回数， Φ_{ss} ：平衡充填率， Φ_0 ：初期充填率， τ ：緩和時間， β ：定数)。各実験条件での初期充填率と平衡充填率から圧密タイムスケールにあたる緩和時間(タッピング回数)を得た。同じ緩和時間を得るのに必要な Γ の値は粒子径が小さくなると大きくなり、1 mm 粒子と本実験で用いた粒子の場合オーダーで異なった。

以上のことは 1 mm 粒子を用いて得られた圧密曲線と本研究で GB55 を用いて得られた圧密曲線は類似しているが、同じ曲線を得るのに必要だった加速度はオーダーで異なることから読み取れる。また対流の特性を反映する、タッピング後の粒子層表面形状からある対流特性を得るために必要な Γ の値も固着力の影響によりオーダーで変化することが示唆された。

圧密特性の Γ 依存性が粒子径により変化することを説明するには、 Γ に代わる振動による力、重力に加え固着力を含んだパラメータが必要になると思われる。

また、真空度の充填率への影響は、大気中で実験を行った場合のばらつき程度であった。

小天体上への応用

現象を特徴付ける Γ の値が固着性の影響がみられない粒子の 10 倍であるような固着性を持つレゴリス層を仮定した場合に、衝突励起振動による表面進化タイムスケールがどの位変化するかを考えた。衝突励起振動加速度 a の大きさは、衝突速度が一定の場合 $a = AD_i^\beta$ で表されることが理論的、実験的に示されている(Miyamoto et al., 2007; Yasui et al., 2015)。ある衝突励起振動加速度が引き起こされる頻度は衝突体サイズ分布から計算できる。衝突体サイズ頻度分布を O'Brien and Greenberg 2005 による小さな衝突体のサイズ分布で与えると、現象を引き起こすのに必要な加速度が 10 倍ならば、その現象が起こる頻度は $\sim 1/160$ 倍になるという結果が得られた。よって振動現象が Γ に支配されているとしたら、固着力が現象を特徴付ける Γ を 10 倍変化させるようなレゴリス層の表面進化タイムスケールは、固着力を考慮しない場合と比べ 2 桁変化することが示された。

まとめ

粉体層の圧密特性に粒子間力が及ぼす影響について調べた。固着力が平衡充填率に影響しない粒子層であっても、粒子の固着性は同じ圧密特性を得るのに必要な Γ の値をオーダーで変化させる。小天体上のレゴリス層の固着性も表面進化タイムスケールをオーダーで長くする可能性がある。