

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 レゴリス対流による小惑星表面更新過程の実験とモデルによる研究

氏 名 山田 智哉

論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、実験、モデル計算に基づき、天体衝突起源のレゴリス対流による小惑星表面更新のタイムスケールを推定することにより、レゴリス対流による小惑星表面更新の可能性の評価を試みた研究である。

小惑星は太陽系初期の情報を保存する重要な天体であり、多くの探査機によって、小惑星表層の詳細が明らかにされてきた。特に、探査機『はやぶさ』によって、小惑星イトカワの表面を覆う大きな岩塊と細粒の砂礫であるレゴリスがサイズ分離している様子が明らかにされた。このサイズ分離した表面地形を説明するためのメカニズムの一つとして、“天体衝突起源の振動によって小惑星レゴリス層に対流運動が生じ、対流運動の過程でサイズ分離が生じた”というレゴリス対流仮説 (*Miyamoto et al., Science 316, 1011-1014, 2007*) が提案された。

一方、室内実験では、レゴリスのような粉体に鉛直振動を加えると、粒子の対流運動である粉体対流を容易に観察することができる。また、粉体対流がサイズ分散を持つ粉体層で発生すると、粒子のサイズ分離現象である BNE: Brazil Nut Effect が発生する。ただし、小惑星は極端な微小重力環境（重力加速度は地球の数千から数万分の一）であるため、粉体対流速度と重力加速度の関係が調べられ、それらの間に正の相関関係があることが示された。これは、微小重力環境でもレゴリス対流が発生することを示唆するが、レゴリス対流による粒子運動の定量的評価はこれまで行われていない。一方、小惑星を破壊する隕石衝突の頻度から様々なサイズの小惑星の衝突寿命が推定されている。さらに、イトカワサンプル粒子の宇宙線照射年代は 1.5 ~ 8 Myr と、普通コンドライト隕石の宇宙線照射年代に比べ若いことも明らかにされており、レゴリス対流による表面更新と調和的である。しかし、レゴリス対流仮説の可能性を考察するためには、上記の様々なタイムスケールとレゴリス対流による表面更新のタイムスケールを定量的に比較し、その整合性を検討する必要がある。そこで、本研究では、レゴリス対流による様々なサイズの小惑星表面更新のタイムスケールを推定することを目的とした。

レゴリス対流のタイムスケールを推定するための要素の一つとして、レゴリス対流速度の振動・重力依存性を同時に評価できる定量的な関係則（粉体対流速度のスケーリング則）が必要となる。しかし、そのような粉体対流速度のスケーリング則はこれまでに確立されてこなかった。そこで、本研究では、上記の研究目的を達成するために、(I)粉体対流実験を行い、粉体対流速度のスケーリング則を構築する、(II)実験で得られた粉体対流速度のスケーリング則を利用してレゴリス対流による表面更新モデルを開発する、という二つの段階を経た。開発したモデルを用いて、レゴリス対流による小惑星表面更新のタイムスケールを見積もった。

(I)では、ガラスビーズを円筒形アクリル容器に積層させ、電磁式の振動装置で容器全体に鉛直振動を加えて粉体対流を発生させた。発生した粉体対流の容器壁面の流れ場を高速度カメラにより 1000 fps で撮影した。その動画像より PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いて容器壁面の代表対流速度 v_{zmax} を算出した。実験条件の振動振幅、振動周波数、重力加速度、粉体層厚、容器半径、粒子径をまとめることにより、スケーリング則を構成する変数として、最大振動速度と重力加速度の比である Γ 、振動と重力のエネルギーの比である S 、粉体層断面と粒子断面の長さの比である L の三つの無次元数を得た。これら三つ無次元数と、重力が作る特徴速度で規格化した代表対流速度 v_{zmax}^* の間のスケーリング関係を調べた。結果として、 v_{zmax}^* は無次元のコントロールパラメーター S 、 L のべき乗の積の形で適切にスケールできることが分かった。また、この結果から v_{zmax} は重力加速度にほぼ比例することが明らかになった。

(II)のレゴリス対流による小惑星表面更新モデルは、(i) 隕石が小惑星へ衝突する衝突段階、(ii) 衝突による振動が発生する振動段階、(iii) 振動によって対流が発生する対流段階、の三つの段階で構成される。このモデルでは、間欠的隕石衝突イベントにより (i) - (iii) の一連の段階が繰り返され、小惑星表面が更新されると考えた。(i)、(ii)では、先行研究で開発された衝突頻度モデル、衝突励起振動モデルを利用する。(iii)では、(I)の実験で得られた粉体対流速度のスケーリング則を利用してレゴリス対流速度を推定する。(i) - (iii)を統合することで、レゴリス粒子が発生した対流ロールをおよそ一周するために必要なタイムスケール T の表式を小惑星直径 D_a の関数として得た。得られた T の表式に先行研究で標準として用いられているパラメーター値（衝突励起振動におけるエネルギー変換効率： $\eta=10^{-4}$ 、衝突励起振動の減衰の指標： $Q=2000$ 等）を代入し、 $T(D_a)$ を推定した。結果として、推定された T は、 $D_a < 5.0$ km の小惑星において、その衝突寿命と比べて十分に短いことが分かった。例えば、イトカワサイズの小惑星の場合、 $T(D_a=400 \text{ m})=1800 \text{ yr}$ であった。これはその衝突寿命の値およそ 170 Myr より十分に短い。一方で、この値は、イトカワサンプルの宇宙線照射年代よりも極めて短い。そのため、イトカワ粒子の宇宙線照射年代はレゴリス対流以外の表面更新過程、例えば、隕石衝突によるレゴリス層の散

逸など、別の現象のタイムスケールを反映していると考えられる。ただし、 $T(D_a)$ の推定のために用いられたパラメーター値は、小惑星の内部構造や表面状態に依存し、大きく変化する。例えば、 η の推定値は、先行研究によって5桁の広がりを持つ。そのため、本研究では、不定性を持つパラメーターと $T(D_a)$ の関係を評価した。その結果、最もレゴリス対流が生じにくいパラメーター値の組み合わせであっても、小惑星寿命の内に表面更新が達成可能であることが分かった。すなわち、本研究によって、レゴリス対流は小惑星表層進化を理解する際に考慮すべき現象の一つであることが明らかになったと言える。