

論文内容の要旨

論文題目 Evolution of Asteroid Regolith Layers by Cratering

(クレーター形成による小惑星のレゴリス層進化)

氏名 道上達広

小惑星は、太陽系の他の惑星に比べて、熱変成、再溶融、浸食などの再変成作用の影響が少なく、太陽系のより古い時代の衝突進化の情報をより多く残していると考えられる。小惑星レゴリスは小惑星同士の衝突の結果生じたものであり、それは小惑星のクレーター分布とともに、小惑星の衝突進化、広くは太陽系の衝突進化を知る上で重要な手がかりとなる。

小惑星のレゴリス層は、小惑星に衝突した隕石様天体がつくるクレーターからの放出物が堆積することによって形成され、その小惑星の寿命（より大きな隕石様天体の衝突によってその小惑星が破壊されるまでの時間）までレゴリスの成長は続く。そのため、隕石様天体の衝突頻度、それによって作られるクレーターの大きさ（クレーターから放出される物質質量）、クレーターから放出される物質のうち小惑星に重力的に捕らえられるものの割合、小惑星の寿命によってレゴリス層の進化は決定される。それらは小惑星の現在の年齢、構造と密接に関わっており、レゴリス層の厚さが時間と共にどう進化するか明らかになれば、現在の小惑星から遡って、過去の衝突の履歴、小惑星の力学的構造が明らかになる。

過去に行われた数少ない理論的研究 (Housen et al. 1979) によると、直径が数 10km よりも小さい小惑星にはレゴリスはほとんどない。しかし最近の小惑星探査から、そのような小さな小惑星にもレゴリスが存在する証拠が見つかっている (Veverka et al. 2000)。この理論と観測の違いは以下のように考えられる。過去の理論的研究では、小惑星の物質強度を玄武岩程度（圧縮強度で数 100MPa）と大きく見積もっていた。物質強度が大きいと、クレーター形成過程によってできる破片の速度は十分大きい。そのため、重力の小さい小惑星においては、ほとんどの破片は脱出速度を越えてしまい、小惑星表面に堆積することができない。一方、最近の観測結果（例えば、C型小惑星 253Mathilde, 45Eugenia）からは小惑星の強度は以前考えられてきたよりも弱いことが見積もられる。物質強度が小さいと破片の速度も小さくなることが予想され、母天体に堆積しやすくなるだろう。

過去において、クレーター形成における破片の速度分布を調べた衝突実験は2例しかなく、統計的に扱うには不十分である。そこで、小惑星のレゴリス進化を考える上で、これまでもっとも不確定であった、クレーターから低速度で放出される破片の速度分布について実験的研究を行った。この実験では、直径 $50\mu\text{m}$ のガラスビーズと中空ガラスビーズを温度を変えて焼結させることで、様々な物質強度（圧縮強度 $0.5\text{--}250\text{MPa}$ ）を持つ標的物質を作成し、それに対してクレーター形成の衝突実験を行った。その結果、標的の物質強度が小さくなるにつれて平均的な破片の速度が減少することが発見された。例えば、圧縮強度約 0.5MPa の標的物質において、秒速 1m よりも遅い速度を持つ破片の質量は、破片の総質量の約 40% を占める。

実験室スケールの衝突現象を小惑星スケールに応用するにはスケーリング則が必要である。過去のスケーリング則は、速度の速い破片しか扱えない。そこで、我々の実験結果を小惑星スケールの現象に適用するために、次元解析的手法を用いて経験的な破片速度分布に関するスケーリング関数を導いた。このスケーリング関数を用いて、考えられる小惑星の強度範囲で弱い物質強度を仮定すると、小さな小惑星にもレゴリス層が存在できることが分かった。例えば、直径 1km 、引張強度 1MPa の小惑星のレゴリスの平均的な厚さは約 1m である。

小惑星表面にクレーターが形成されるとともに、レゴリス層は進化していく。しかしそのレゴリス層進化は、クレーター形成がレゴリス層の上や、その下の岩盤まで及ぶので、より定量的な見積もりが必要になる。そこで、レゴリス層の時間的変遷、空間的分布を推定するために、モンテカルロ法を用いた数値モデルを構築した。モデルは以下の通りである。小惑星表面を2次元平面に置き換えて、格子点を考える。最初にレゴリス層のない状態から計算を始める。隕石様小天体の衝突と共にクレーターがその表面に生成される。このときのクレーターができる時期や大きさ、また位置は、ランダムに与える。隕石様小天体の平均的な衝突頻度は、現在の小惑星帯での平均衝突頻度から計算する。またクレーターの大きさについては、Holsapple(1993)のスケーリング則を用いる。クレーターから放出された破片の速度分布は、物質強度が支配的な領域については、本研究で得たスケーリング則を、重力が支配的な領域では Housen et al. (1983)のスケーリング則を用いた。それらを用い、さらに母天体の脱出速度よりも遅い破片はすべて降り積もると仮定することで、クレーター形成によって堆積する破片の総量を求めた。破片の堆積する位置は、小さな小惑星では表面全体に一様に、大きな小惑星では ejecta blanket を考えて決める。レゴリス層の厚さ、地形の起伏の情報は、各格子点に与えられ、クレーター形成によって時間とともに変化する。

数値シミュレーションの結果から、レゴリス層の厚さは十分時間を与えるとある種の定常状態になることがわかった。これはレゴリス層がある程度厚くなると、クレーター形成

がレゴリス層の中だけで頻繁に起こるようになり、レゴリス層の一部が宇宙空間に失われ、レゴリス層の浸食が起こるためである。すなわち、この浸食作用と新たに岩盤を掘り起こすことによってできる放出物の堆積が拮抗するため、レゴリス層の厚さは定常状態に達する。ただし小惑星レゴリスの厚さが定常になるまでの時間は小惑星の寿命に比べてかなり長いことがわかった。例えば直径 50 km の小惑星の定常状態になる時間は 1000 億年であるが、このような小惑星が破壊されないで存在しえる時間（寿命）は 20 億年程度である。一方、大きな小惑星(直径 500km)では、ejecta blanket の効果により、レゴリス厚さの空間的なばらつきが見られた。それは平均と標準偏差が同じで空間的な確率分布は指数関数になる。

天体の衝突頻度、クレーターの大きさ、破片の降り積もる割合、小惑星の寿命をパラメーターとして考え、どのパラメーターがレゴリス形成に、一番寄与しているのかを解析解と数値計算のいずれかで見積もった。より具体的には、それぞれパラメーターの値を変えることでレゴリスの厚さがどう変わるのかを調べた。パラメーターの上限値、下限値は現在の小惑星の統計的振る舞いから決めた（例えば、衝突は速度秒速 1 - 10 km の間で確率的に起こる）。それによると、直径 20km 以下の小惑星では、レゴリスの厚さは現実的な物質強度の範囲で 1 桁程度変わり、その他のパラメーターは数倍しか変わらないことが分かった。例えば、直径 20km の小惑星は、伸張破壊強度 100MPa から 0.001MPa の範囲で、レゴリスの厚さは約 25m から 250m になる。このことから、小さな小惑星では、物質強度がレゴリス形成に大きく寄与していることがわかった。

以上のことから直径 20km 以下の小さな小惑星では、物質強度とレゴリスの厚さに大きな相関があることがわかった。さらにこれらの結果を用いて、最近の米国の探査機による小惑星 Eros、Gaspra の画像を解析し、典型的な S タイプ小惑星の伸張破壊強度を約 10MPa 以下と見積もることができた。将来、探査機によって他のタイプの小惑星のレゴリスの厚さがわかれば、その小惑星の物質強度を決めることができる。物質強度を推定することは、小惑星の起源、進化を理解する上で、もっとも重要なひとつの手がかりとなるであろう。