

特集「小惑星レゴリスの起源と進化」

小惑星レゴリス衝突進化

道上達広¹，山本聡²，長沢真樹子³，中澤暁⁴

1. 小惑星における衝突現象

小惑星のレゴリス層は、主に小惑星同士の衝突現象によって形成され、進化してきたと考えられる。本稿では、衝突現象とレゴリス層の生成と進化について明らかにする。

最初に小惑星の初期状態として、裸の状態、つまりレゴリス層がない状態を考えよう。この表面上に天体が衝突すると、クレーターリングによって表面上に破片が降り積もる。これがレゴリス層の起源である（ここでは、天体が完全に壊れてしまうような衝突は考えない。そのような衝突が起こるまでをあつかうことにする）。衝突が繰り返されるにつれレゴリス層はだんだん厚くなる。レゴリス層がある程度の厚さに達すると、小さな天体の衝突はレゴリス層の中で起きるようになり、レゴリス層の構成粒子の粉碎や変成を起こすようになる。このような小さな天体の衝突によって、レゴリス層では粒子のサイズ分布や物性変成の進化が進む。しかし、長いタイムスケールでは、全レゴリス層を貫く程の大きな天体の衝突が起き、レゴリス層下の岩盤を掘り起こし、さらなるレゴリス層を形成する。このようにして小惑星表面上では、レゴリス形成と厚さの進化→レゴリス構成粒子の進化→新たなレゴリス形成といったことを繰り返して衝突進化してきたと思われる。これらの現象の本質を理解するために、次の二点を分けて考えていくことにする。

・大きな天体衝突によるレゴリス層の厚さの進化

(2章)

・小さな天体衝突によるレゴリス構成粒子の進化

(3章)

また、衝突頻度や衝突速度において母天体小惑星の軌道進化はこれらのレゴリス進化と密接に関わっている。今回は前提として、衝突頻度や衝突速度は現在の小惑星帯での平均的な値を用いることにした。太陽系が形成されてまもない初期においては小惑星の衝突頻度、衝突速度が現在のそれよりも大きく異なることが予想される。そこで最後に過去における小惑星の軌道進化とレゴリスの進化についても検討を行った(4章)。

2. レゴリス形成と厚さの進化

2.1 過去のレゴリス進化モデル

クレーターの形成による理論的レゴリス進化モデルは、Housen et al.(1979)[1]の研究が有名である。彼らは小惑星レゴリスの厚さと小惑星の大きさの関係をはじめで見積もった。その後の研究では、Namiki and Binzel(1991)[2]が951ガスプラのレゴリスの厚さを、Nakamura[3][4]が直径1.4kmと直径14kmの小惑星のレゴリスを扱っている。いずれのモデルも基本的な計算方法は同じであり、小惑星母天体上にレゴリスがない状態から計算を始めている。レゴリス生成モデルにおける重要なパラメーターとして、衝突天体の頻度、生成クレーターの大きさ、母天体への破片の降り積もる割合、小惑星の衝

1 宇宙科学研究所・惑星研究系
2 北海道大学・低温科学研究所

3 東京工業大学・理工学研究科
4 宇宙開発事業団 SELENEプロジェクト

突寿命が挙げられる。それらのパラメーターの与え方は、次のとおりである。

・小惑星母天体における衝突頻度と衝突速度

小惑星の衝突断面積と、メインベルトでの小惑星のサイズ分布、空間分布から、衝突頻度、衝突速度を見積もることができる。一般には小惑星帯における衝突頻度は平均衝突確率 $3 \times 10^{-18}/\text{km}^2 \cdot \text{year}$ に小惑星のサイズ分布(衝突天体の個数)を掛けたもの、衝突速度は平均衝突速度である 5km/sec で与えられることが多い。

・生成されるクレーターの大きさ

クレーターの大きさを決める上で、母天体の重力と物質強度が重要である。これは室内実験の結果にスケーリング則を用いて求めることができる[5]。過去の研究では玄武岩程度の強度を持った物質を考え、クレーターの直径は衝突天体の直径の10倍程度と見積もられている。

・破片の降り積もる割合(破片の速度分布)

これも母天体の重力と物質強度が重要になる。母天体の脱出速度を超える速度で飛び出す破片は、母天体表面には降り積もらない。過去の研究においては、この降り積もる割合の見積もりが不十分である。これは、1) クレータリングにおける個々の破片の速度分布を直接測定した室内実験は2例しかなく[5]、それらは破片速度の速いものを中心に測定しており、遅い速度をもった破片に対しては十分に測定されていないこと、2) 小惑星を玄武岩程度の強度を持った天体だと仮定しているため、遅い速度をもった破片が少なくなる(詳しくは次節)ことが理由として挙げられる。特に小さな小惑星では、遅い速度の破片の量がレゴリ

ス厚さ見積もりにおいて大きく効いてくる。しかし、破片の速度分布の低速度領域に対するスケーリング則は十分には確立されておらず、レゴリス形成を見積もるうえでの不確定要素の要因となる。Housen et al.(1979)は、室内実験の結果をそのまま用いているため、小さな小惑星に対して降り積もる割合を過小評価している。Namiki and Binzel(1991)は降り積もる割合をパラメーターとして与えている。Nakamura(1994)では、すべて降り積もるとしてレゴリスの厚さの上限値を示して、レゴリスの存在を議論している。

・小惑星の寿命

レゴリス生成は小惑星が破壊されるまで続くと考えられる。いずれのモデルでも、大きな衝突破壊によって母天体が半分の質量になったときにその小惑星は壊れると仮定し、それまでの平均的な時間を小惑星の寿命としている。この小惑星の寿命は、衝突破壊強度、衝突頻度、衝突速度を用いて求めることができる。衝突破壊強度(Q^*)は小惑星を壊すのに必要な単位質量当たりのエネルギーと定義されている。

過去の研究でのパラメーターの与え方と、計算結果を表1にまとめた。いずれのモデルでも、パラメーターの与え方によってレゴリスの厚さが大きく変わることがわかる。このようにレゴリスの厚さを見積もるときには、パラメーターの与え方が重要になる。そのため、レゴリス形成に大きく寄与するキーパラメーターは何かを知る必要がある。あとで述べるようにレゴリスの厚さを決定するキーパラメーターは、物質の強度と考えられる。

表1 各モデル[1, 4, 2]のパラメーターとレゴリスの厚さの計算結果。(gravity)は重力が破壊強度よりも重要な場合で、(strength)は破壊強度が重要な場合。

	Housen et al. (1979)	Nakamura (1994)	Namiki and Binzel (1991)
衝突天体のサイズ分布のべき指数 $N(>D)=CD^{-b}$	$b=2.5$	$b=2, 2.5$	$b=2, 2.5$
衝突確率 m : 衝突天体質量	$4.74 \times 10^{-17} m^{-0.833} / \text{cm}^2 \text{ sec}$	$3 \times 10^{-18} / \text{km}^2 \text{ year}$	$5.4 \times 10^{-18} / \text{km}^2 \text{ year}$
衝突速度	5km/s	5km/s	5km/s
クレーターの体積 V (m^3) D_p : 衝突物体直径(m) D : クレーター直径(m) E : 衝突エネルギー G : 重力加速度	$V=229D_p^3 = 0.08D^3$ $D \propto E^{1/3}$ (strength) $D \propto E^{0.29} G^{1/6}$ (gravity)	$V=90D_p^3$	$=0.25D^3$ / $D_p=10$ (strength) / $D_p=78 \times D_p^{0.17}$ (gravity)
母天体を脱出する放出物の割合	300km 10% 100km 50% 10km 99.9% 1km 99.9%	0%	90% 99% (strength) 99.9% $1.36 \times 10^{-3} D^{-0.61}$ (gravity)
1) 衝突破壊強度 Q^* または 2) 最大衝突天体 D_p^*	1) 10^6-10^7 erg/g	2) 直径 1.4km $D_p^*=28\text{m}$, 56m 直径 14km $D_p^*=280\text{m}$, 560m	1) 0.8×10^5 erg/g (最小) 1.5×10^7 erg/g (最大)
結果 レゴリス厚さ	直径(km) レゴリス厚さ 10 < 1mm 100 200mm 300 3.5km 500 1.2km 1000 1.2km	(上限値: 全て降り積もる場合) 直径 1.4km の天体 $D_p^*=28\text{m}$ $D_p^*=56\text{m}$ $b=2$ 0.6m 4.8m $b=2.5$ 1.5m 12m 直径 14km の天体 $D_p^*=280\text{m}$ $D_p^*=560\text{m}$ $b=2$ 6m 48m $b=2.5$ 15m 120m	直径 16km (最大) $b=2$ 90% 7.8m 99% 0.78m $b=2.5$ 90% 49m 99.9% 0.52m (最小) $b=2.5$ 90% 48m

2.2 最近の観測結果と理論モデルの問題点

前節で述べた理論モデルによると、数10km以下の小さな小惑星にはレゴリスはあまりないと予想されている(表1のNakamura 1994の結果は、破片が全て表面に降り積もると仮定した場合の値で、実際にはこの値に降り積もる割合を掛けたものがレゴリス厚さである。Nakamuraは、この降り積もる割合が非常に小さいと考え、結論としてレゴリスはほとんどないとしている)。しかし、最近の探査の結果からはこれらの小さな小惑星にもレゴリス層がある証拠が見ついている。1991年に951ガスプラ、

1993年に243アイダ、1997年に253マチルダ、2000年に433エロスの画像データが探査機から地球に送られてきた。特に433エロスにおいては、NEARシューメーカー探査機によって、今までにない高解像度(4m/pixel)の画像データが得られた。それによると明らかにレゴリスの存在を示すと思われる証拠が見つかってきている。いくつか紹介すると、
・大きさが約60mにも及ぶ岩石の塊(boulder)が、母天体の至るところで見ついている。これはおそらくクレーターリングによって岩盤から掘り起こされた大きな破片であろう。

- ・クレーターが覆い隠されたような領域がある。これは小惑星表面がレゴリスのような、粉体物質で覆われていることを示唆している。
- ・クレーターの内壁に他の領域よりも反射率が高い領域がある。宇宙空間に曝されている表面物質は時間が経つと、宇宙風化作用を受け暗くなる傾向にある。逆に最近暴露されたばかりの表面は十分な宇宙風化作用を受けていないため、周りと比べて明るい。この内壁に見られる明るい領域は、斜面勾配があるために崩れて暴露されたばかりのレゴリス表層だと考えられている。

前節で述べた理論モデルによる予測と実際の観測結果の違いの一番の原因は、過去のモデルでは小惑星の物質強度を玄武岩程度（圧縮強度で約100MPa）と評価したことにありと考えられる。物質強度が大きい場合、クレーターリングで生じる放出破片の速度が速くなるのが実験から確認されている[4]。小さな小惑星は脱出速度が小さいため、物質強度が大きいとほとんどの放出物が母天体の脱出速度を越えてしまい、表面に降り積もることができない。

一方、253マチルダは非常に密度が低く（ $1300 \pm 200 \text{ kg/m}^3$ ）、観測されたスペクトルと密度から、空隙率50%のCMコンドライト天体であると言われている。このような天体は弱い物質強度をもつと考えられる。物質強度が小さいと破片の放出速度も遅くなり、多くの破片が母天体に降り積もると予想される。そこで、この物質強度の重要性に着目し、次の節では物質強度と降り積もる割合（破片の速度分布）の関係を考えたモデルを紹介する。

2.3 物質強度を考慮したレゴリス進化モデル

ここでは、衝突実験の結果から破片の降り積もる割合を見積もることとする。図1は破片の速度分布で、過去の衝突実験の結果[6]にあらたな実験データを加えたものを示してある。横軸に破片の速度、縦

軸にその速度よりも大きい破片の質量を全質量で規格して、両対数分布で示してある。この図から物質強度が小さくなるにつれて、破片の速度が遅くなっていることがわかる。横軸をHousen[6]の次元解析から得られた無次元量 $v\sqrt{\rho/Y_t}$ （ v は放出速度、 ρ はターゲット密度、 Y_t はターゲットの引っ張り強度である）で規格化した量に変換すると、データ点が1つの線上にのることがわかる（図2）。図2の点線はデータ点がある2つの関数形（総質量のある割合までは多項式、それ以外はべき乗分布）でフィットしたものである。

この v に小惑星の脱出速度、 ρ に小惑星の密度、 Y_t に小惑星の引張強度を代入すれば、実際的小惑星上で破片が降り積もる割合を求めることができる。

衝突天体のサイズ分布は、 $N(>D)=CD^{-b}$ で $b=2$ で与える。またクレーターの大きさはHolsapple (1993) [5]に基づいたスケーリング則を用いた。計算の詳細については[7][8]を参照していただきたい。ここでは結果のみ述べる。小惑星の物質強度が弱いと仮定して求めたレゴリス形成モデルでは、小さな小惑星でも十分にレゴリスを保持することができる（図3）。例えば大きさを243アイダ程度（直径30km強）とし、圧縮強度を0.1MPaと仮定すると、レゴリスの厚さは300m以上になり、このサイズの小惑星でも十分レゴリスは存在できる。

図3のレゴリスの厚さは、平均的なレゴリス層の厚みを示している。実際的小惑星のレゴリスの厚さは、この平均的な厚さから2倍程度のバラツキがあると考えられている[9]。これは、レゴリスの量が比較的大きな衝突天体によってほとんど決まることによる。例えば、大きなクレーターでも小さなクレーターでも破片の降り積もる割合が同じであるとするならば、小惑星が破壊されるまでに形成されるレゴリス層の約70%が大きな衝突天体の衝突によって生成される。大きな天体の衝突頻度は不確実性が大きいので、レゴリスの厚さは2倍程度変わる。また、

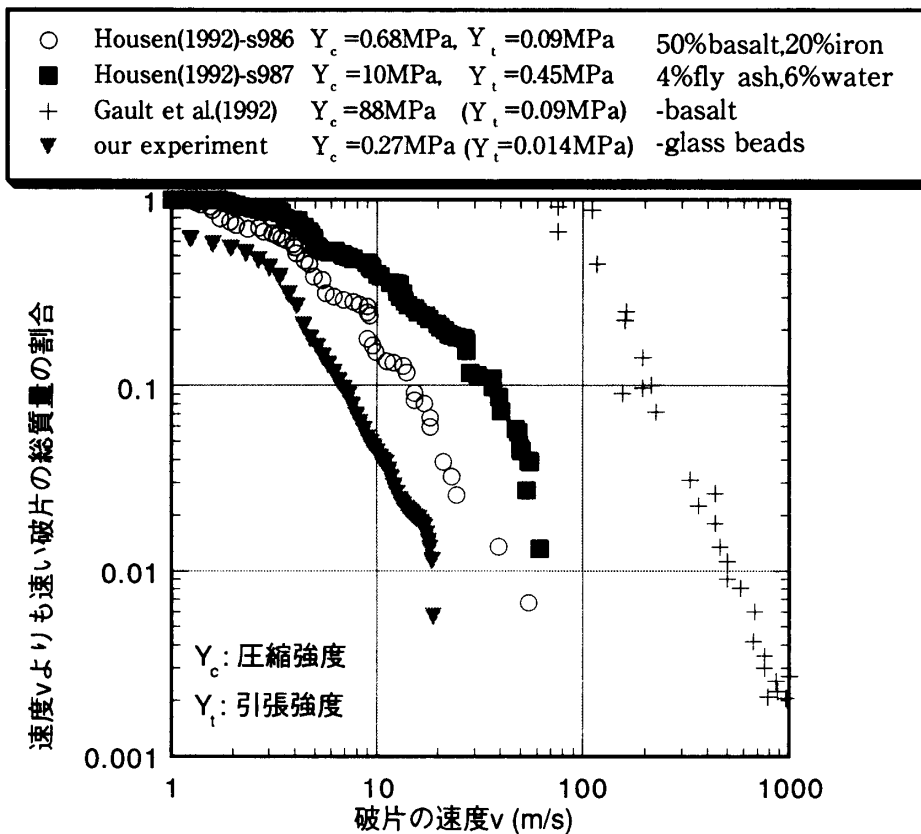


図1 破片の速度分布

fit function1 ($f \geq 0.2$): $1.1267 - 1.3412v_r + 0.66784v_r^2 - 0.11795v_r^3$
 fit function2 ($f < 0.2$): $0.62805v_r^{-2.1178}$

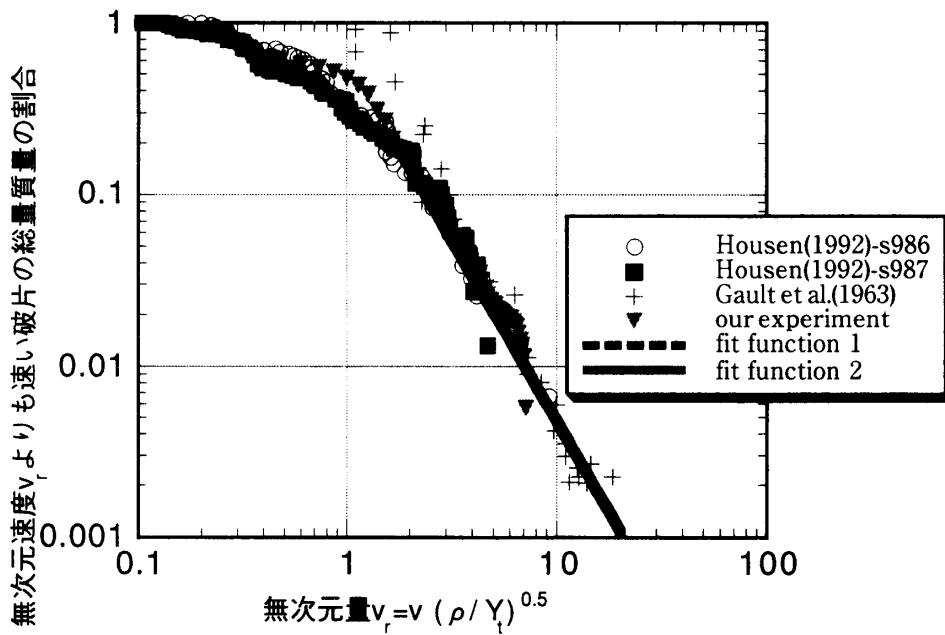


図2 規格化した破片の速度分布

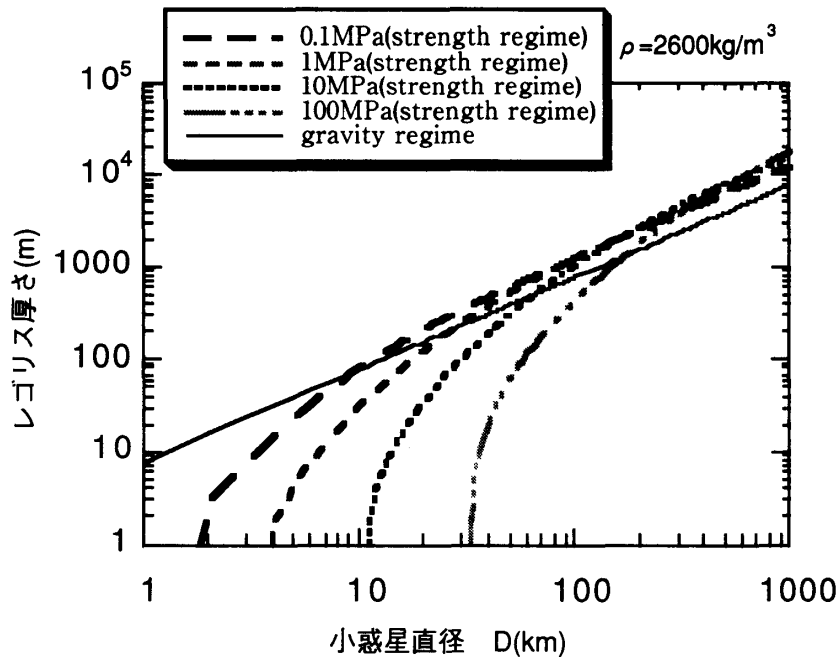


図3 小惑星の直径とレゴリスの厚さ。4つの点線は、クレーター形成において物質強度が支配的になる strength regime で計算したものの、実線はクレーター形成において重力が支配的になる gravity regime で計算した結果を示してある。

一つの小惑星の表面においても、大きなクレーターの近傍と、そこから離れた場所ではレゴリスの厚さにバラツキが生じることになる。

小惑星が寿命を迎えたとき、レゴリス層の厚みは平衡状態になっているのであろうか？ Housen (1981b) [10]は、小惑星が寿命を迎えても、レゴリス層の厚さは平衡に達しておらず、平衡状態になるための時間は太陽系年齢をはるか超えると述べている。これは上で述べたレゴリス形成の厚さが大きな衝突天体によって決まることに関係している。

3. 衝突によるレゴリス粒子の変化

3.1 レゴリス粒子の衝突進化

マイクロメテオロイドなどの小さな天体の衝突によるクレーターリングはレゴリス層だけでおこる。これらの衝突では新たなレゴリスを生成することは出来ないが、衝突直下のレゴリス構成粒子に力学的、物性的な変化をおこす。ここでは、これらのレゴリ

ス進化について見ていく。レゴリス粒子の衝突進化として、(a)ガーデニング(b)レゴリス粒子の母天体脱出(c)構成粒子の粉碎や圧密、また熔融や気化 (d)物性的特性の変成等が起こる。最後の(d)は(c)とも深く関わっているが、本特集「実験的手段による小惑星レゴリスの研究」で詳しく説明がされているので、ここでは(a)から(c)について述べる。

(a) ガーデニング

一回の衝突によるクレーターリングにより地層は掘り起こされ、層が「逆転する」ように再分配される。そして衝突が繰り返されることでいろいろなレゴリス層が混ざり合う。これをガーデニングと呼ぶ。天体表面のいろいろな場所のレゴリス粒子を再分配するので、レゴリス層の特性の平均化の役割を果たす。例えば宇宙線等がレゴリス粒子に衝突し変成をおこす場合を考えよう。宇宙線などの高エネルギー粒子の衝突では表層付近のレゴリス粒子しか変性を及ぼさない。つまり、内側のレゴリスは外側に守られているために変成をうけない。しかし、ガー

デニングにより、変成を受けた領域と変性を受けていない領域が混ざり合う。また変成を受けていない新鮮な粒子が新たに宇宙線にさらされることにもなる。これ以外にも小天体表面全体で、粒子のサイズ分布特性の均一化といった役割も果たす。

(b) 母天体脱出

衝突クレータリング過程で低速度で放出された粒子は母天体重力によって天体表面に戻される。一方高速度のものは母天体重力圏を脱出してしまふ。天体の重力が小さい場合、衝突によって放出されたレゴリス粒子の多くが母天体を脱出する。あとで見るように、母天体が10kmよりも小さい場合、この放出脱出がレゴリス層の損失のおおきな原因になると予想される。一方、これらの放出粒子は惑星間塵の起源の一つとなる。地球外起源の塵 (IDP) の中に小惑星起源のものがあると考えられている。放出レゴリス粒子とIDPの関連について研究が進めば、これらのIDPの分析から小惑星表面の物性情報が得られるであろう。

(c) サイズ分布の変化

メテオロイドが高速でレゴリス層に衝突すると、衝突直下のレゴリス粒子の粉碎や圧密がおこる。また衝突による加熱で高温になると溶融や気化する部分も出てくる。これらのプロセスはレゴリスのサイズ分布進化に大きく関連している。粉碎は構成粒子を小さくする役割を果たすが、逆に溶融や圧密によって粒子が凝集化して大きなレゴリス粒子を形成する。レゴリス粒子のサイズ分布進化はこの二つの兼ね合いで決定される。

3.2 レゴリス層全体への影響

それでは、一体どの過程が小惑星のレゴリス層進化において一番効果的に影響を及ぼしているのであろうか？ 残念ながら過去のレゴリス、小惑星

研究においては、レゴリス構成粒子の衝突進化を扱った研究はない。ここでは、これまでの室内衝突実験を基にしたスケーリング等を使って、それぞれの量比を基に検討を行う。

まず小惑星に衝突するメテオロイドの衝突頻度について決める。ここでは絶対値そのものについて議論するわけでないので、メテオロイドのサイズ分布、衝突速度は2章で使った衝突天体のものと同じと仮定する。次に1回の衝突で生成、変成、放出されるそれぞれの体積量 V を見積もる必要がある。

- ・レゴリス層で生成されるクレーターの体積をガーデニングの量とする。粉体に対するスケーリング則を基にした、Schmidt and Holsapple(1982)[11]の結果を用いる。
- ・脱出する量の見積もりについてはレゴリス粒子からの放出速度分布 (Housen et. al.(1983)[12], Yamamoto and Nakamura(1997)[13])の結果を用いる。
- ・粉碎量についてはCintala and Hörz(1990)[14]の粉碎量のスケーリング式を使った。圧密についてはここでは考えない。
- ・レゴリス層での衝突における溶融量、蒸発量の見積もりにつかえる有用なデータが得られていない。ここでは、一つの目安として、岩石における溶融量のスケーリング式[15]を使う。

これらの一回の衝突での生成量 V を使って、深さ h まで影響が及ぼされるタイムスケールを見積もる。タイムスケール T は次式で表せる。

$$T = h / \int V(m, R) f(m) dm$$

ここで、 $V(m, R)$ は質量 m のメテオロイドが半径 R の小惑星に衝突したときの、クレータ体積 (ガーデニング量に相当) や脱出、粉碎や溶融される体積量等である。メテオロイドの単位面積当たりの衝突

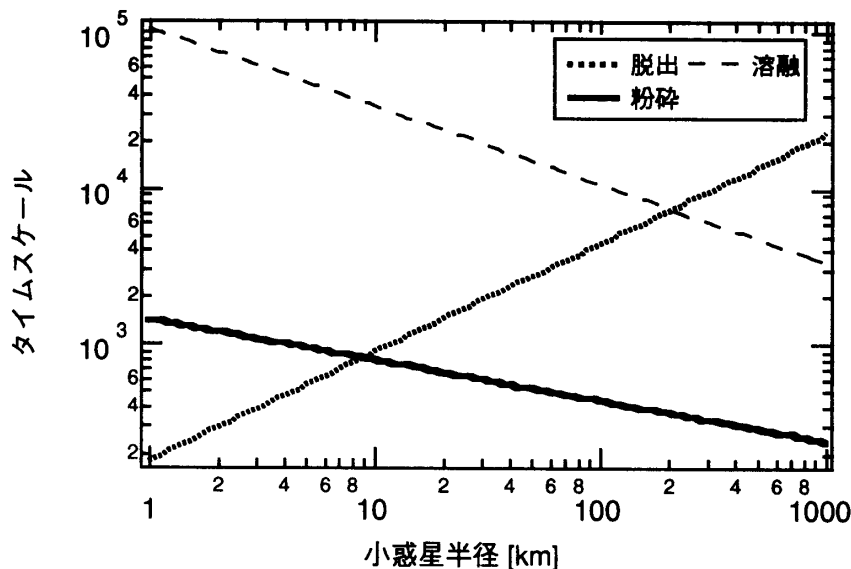


図4 レゴリス粒子の脱出、溶融、粉碎のタイムスケール

頻度 $f(m)$ については、2章と同じモデルを使う。ここではメテオロイドの最大サイズはレゴリス層の厚さ程度とし、積分の上限値は大きさ h に相当する質量とした。また下限値は $10\mu\text{m}$ のダスト質量とした。

図4に結果を示す。横軸に天体の大きさをとり、縦軸にそれぞれのタイムスケールを示した。縦軸はガーデニングのタイムスケール（1kmサイズの天体では約1万年、100km天体で約10万年）で規格化した。図4によると10kmより小さな天体では溶融や粉碎量よりも母天体を脱出するタイムスケールの方が短い。つまり小さな天体では重力が小さいため、粉碎や溶融が起こっても、短い時間で衝突放出によって母天体を脱出してしまう。一方、100kmより大きな天体では粉碎、溶融されるタイムスケールの方が脱出のタイムスケールよりも短い。重力の影響が大きいので、変性やサイズ変化を受けた粒子のほとんどは衝突放出されても再び表面に戻るからである。

また、2章のレゴリスモデルによると、10km以上の天体でレゴリス層が新たに1m程度生成されるのにかかる時間は数千万年から数億年である。この値は（小惑星の大きさや物質強度による不定性がある

が）図4でのタイムスケールでは $10^2 \sim 10^3$ に相当する。そのため、10km以下の天体ではレゴリス生成と脱出放出が同じタイムスケールで起こると予想される。一方10kmより大きな天体ではレゴリス生成と同じタイムスケールで粉碎が起こると予想される。結局これらの結果から予想されることは、

- ・10kmよりも小さな小惑星のレゴリス層は変成を受けていないフレッシュなものが多い。またレゴリス層が生成されても、その厚さは時間とともに減少していく。
- ・逆に数10kmよりも大きな天体のレゴリス粒子は衝突変性の影響を受けているものが多い。

ここでは、大雑把なタイムスケールだけで話を進めてきた。レゴリス進化について厳密な定量的評価をするには、衝突モデルの検討だけでなく、それぞれの衝突素過程についてさらなる実験および理論的研究が必要である。

4. 軌道進化とレゴリス進化 について

小惑星の軌道進化に伴う、小惑星の総質量、ランダム速度（相対速度）の変化は、レゴリス形成に大きく関わっていると考えられる。しかし、小惑星の軌道がどのような進化を経て現在に至ったかについては研究者によって考えが異なっており、いまだにはっきりと解明されていないのが現状である。この節では、まず、軌道進化について Nagasawa et al.[16]の研究を中心に紹介し、ついで小惑星の軌道進化に伴う小惑星の総質量とランダム速度の変化が、レゴリス形成にどのような寄与を与えるかを検討する。

4.1 小惑星のランダム速度の起源

小惑星帯には、大きく分けて二つの解かれていない謎がある。ひとつは太陽系の他の領域に比べて、小惑星帯の総質量が著しく欠損していることであり、もうひとつは、他の惑星に比べて小惑星が非常に大きいランダム速度（ $\sim 5\text{km/s}$ ）をもっていることである。

一般的な原始惑星系円盤モデルからは、太陽系の形成時の小惑星帯の総質量は現在の1000倍以上あったと見積もられている。一方、Davis et al. (1994) [17]の計算によると現在のランダム速度になる頃までには、総質量は少なくとも現在の数倍程度まで減っていたと考えられる。このことから、もともと小惑星帯には総質量で1000倍以上もの天体があったが、ランダム速度が現在の値になる頃までに、数倍に減少したと予想される。

小惑星の大きなランダム速度を説明している研究はいくつかある。これには、大きく分けて二つのタイプがある。ひとつは、地球サイズの微惑星が小惑星帯に入りランダム速度を跳ね上げた、とする散乱タイプのもの、もう1つは、何らかの類の共鳴が小

惑星帯を移動してランダム速度を跳ね上げた、と考える共鳴タイプのもの[18]である。どちらのメカニズムでも、ランダム速度の上昇に伴い、かなりの数の小惑星が、惑星や原始惑星系円盤との相互作用によって、系外に散乱されたり、太陽に落下したりして失われる。今回は、共鳴タイプのもののうち、原始太陽系星雲の散逸による永年共鳴の移動を考え、小惑星の軌道進化がどのようなものになるかを説明する。

・永年共鳴の移動とその研究

永年共鳴は天体同士の近日点や昇交点の移動周期と関係した共鳴であり、天体の公転周期と関係する平均運動共鳴と比べ、はるかに長い周期を持つ。永年共鳴軌道に入った小惑星の離心率、あるいは軌道傾斜角は大きく変化する。小惑星帯にある有名な永年共鳴は、2AU近辺の ν_6 と ν_{16} の共鳴であり、これらは小惑星帯の内端を定めている。この共鳴の位置は系の軌道平均したポテンシャル分布によって決まっています、現在は動くことはない。これに対し、Ward et al.は、原始惑星系円盤の散逸によりこのポテンシャルが変化し、永年共鳴が移動することで小惑星の離心率が跳ね上げられることを示唆した[18]。この考えを受けたその後の研究から、星雲散逸に伴う永年共鳴の通過で、小惑星のランダム速度が上昇することが確かめられている。

・永年共鳴による小惑星の軌道進化

原始惑星系円盤は、木星の10倍以上の質量を持っていたと考えられていて、T-Tauri星の観測からは、その典型的な存在時間は 10^6 - 10^7 年といわれている。円盤の散逸メカニズムには、粘性による拡散、原始太陽の強い紫外線による光蒸発、惑星と星雲の潮汐相互作用によるギャップ形成などが挙げられている。Nagasawa et al.[16]では、太陽に近いところから円盤が順々に散逸するモデルを用いた。こ

これは、木星がその形成時に近くのガスを捕獲し、軌道に沿って原始惑星系円盤にギャップを開けていき、内端が太陽に達した後の状態を考慮したものである。この数値軌道計算では、太陽、木星、土星、3次元の原始太陽系星雲、テスト粒子（小惑星）を考え、円盤の散逸にともなう、永年共鳴がどのように移動し、どの程度小惑星の離心率、軌道傾斜角を上昇させるかを軌道計算、解析計算の両方から調べている。詳しくは[16]を見てもらいたいが、その結果だけをまとめると、(1) 小惑星軌道は、永年共鳴によって跳ね上げられること、小惑星の多くが木星の重力摂動で系外に散乱されることがわかった。また、(2) 散逸時間が数十万年以上の場合に、観測される小惑星の大きな離心率、軌道傾斜角がうまく説明されることが明らかになった。さらに、(3) 小惑星のまわりで円盤ガスが散逸した後に永年共鳴の通過が起き、小惑星の軌道の跳ね上げが星雲のない状況で起きると計算された。これは小惑星の衝突進化が、原始惑星系円盤散逸開始以降数十万年後に、星雲フリーの環境で活発化したことを意味している。そして、このランダム速度は、上昇開始以後ごく短時間（数千年）に跳ね上がり、数十万年で小惑星帯全体のランダム速度が現在のものになったと考えられる。

4.2 レゴリス進化との関連

このように現在の小惑星のランダム速度は、数十万年という比較的短いタイムスケールで得られ、同時に総質量も著しく減少したと考えられる。したがって前に述べたような仮定、つまりランダム速度が現在の値になる頃までに、総質量が著しく減少していたと考えるのは妥当であろう。

さて、この場合2章でみたレゴリス厚さの進化にどのように影響するのであろうか？衝突進化の初期分布の違いは直接的には小惑星のサイズ分布に関わってくる。そこで、2章で行った計算で、ランダム

速度は大きいままで、サイズ分布 $N(>D)=CD^{-b}$ の C と b だけを変化させ、レゴリス進化がどうなるかを検討してみた。その結果、初期質量を2章で与えた値の数倍増大した場合について計算したが、レゴリスの厚さはほとんど変わらなかった。これは次のような理由による。初期質量分布が増えると衝突天体の衝突頻度が増える。しかし、その一方で母天体自身の寿命が短くなるため、レゴリス層がある程度厚さを持つまでに、母天体そのものが破壊されてしまう。そのため、レゴリス層の平均的な厚さについては小惑星全体として変わらない。極端な例としては初期質量を1桁増やした計算も行ったが、この理由により結果はほとんど変わらないという結論が得られた。

5. まとめ

- ・従来の衝突モデルでは小さい小惑星（直径が10-20km程度）ではレゴリス層を保持することが難しいと考えられてきた。しかし、実際の観測では小さな小惑星にもレゴリス層があることがわかっている。これはモデルで与えるパラメーターの値に問題があったためであると考えられる。小惑星表面でのレゴリス層の厚さを決める重要なパラメーターは母天体の破壊強度である。小惑星の表層が比較的弱い破壊強度を持つ場合、衝突放出の速度が遅くなるため、多くの放出物が表面に堆積出来る。そのため小さな小惑星でも十分な厚さのレゴリス層が存在出来るであろう。
- ・レゴリス構成粒子の衝突進化には、ガーデニング、レゴリス粒子の母天体脱出、構成粒子の粉碎や圧密、また熔融や気化や物性的特性の変成などが考えられる。10kmサイズより小さな小惑星のレゴリス層は、重力が小さいため、変成を受けてもガーデニング過程でほとんどが母天体から放出され失われていく。そのため、その表面は変性を

受けていないフレッシュな粒子が多いと予想される。一方数10kmよりも大きな天体では衝突の影響を受けたレゴリス粒子は母天体を脱出することなく保持されるため、大きな天体の表面では衝突進化（宇宙風化など）したレゴリス粒子が多く存在すると予想される。

- ・原始太陽系円盤の散逸に伴う小惑星の軌道進化の計算からは、現在の小惑星の大きなランダム速度は、数十万年という比較的短いタイムスケールで得られ、同時に総質量も著しく減少したと考えられる。また小惑星の軌道進化がレゴリス形成に及ぼす影響を考えると、レゴリスの厚さは、小惑星の衝突頻度を現在のそれより大きくしても、現在のランダム速度で計算する限り初期質量には依らないことがわかった。これは母天体自身の寿命が影響しているためである。

参考文献

- [1] Housen, K.R. et al., 1979 : Asteroid, Univ. of Arizona Press, 601-627,
- [2] Namiki, S., and Binzel. R. P., 1991 : Geophys. Res. Lett. 18, 1155-1158,
- [3] Nakamura, A., et al., 1993 : 第15回太陽系科学シンポジウム集録, 68-71.
- [4] Nakamura, A., 1994 : 第16回太陽系科学シンポジウム集録, 69-72.
- [5] Holsapple, K. A, 1993 : Annu. Rev. Earth Planet. Sci.21, 333-373.
- [6] Housen, K.R, 1992 : LPSC XXIII] abst.555-556.
- [7] Michikami, T, et al., 1999 : 第21回太陽系科学シンポジウム集録, 52-55.
- [8] Michikami, T, et al., 2000 : 33 rd Lunar & Planet. Sympo., in press.
- [9] Housen, K.R., 1981a: Proc. Lunar Planet. Sci.12B, 1717-1724.
- [10] Housen, K. R., 1981b : Ph.D. Dissertation, Univ. of Arizona, Tucson.203pp
- [11] Schmidt, R.M. and Holsapple, K.A., 1982, Geol. Soc. Amer. Spec. Pap, 190, 93-102.
- [12] Housen, K. R, et al., 1983 : J.Geophys.Res., 88, 2485-2499.
- [13] Yamamoto, S., Nakamura, A.M., 1997 : Icarus, 128, 160-170.
- [14] Cintala, M.J. and Hörz, F., 1990 : Meteoritics, 25, 27-40.
- [15] Melosh, H.J., 1989 : Impact Cratering, Oxford Univ. Press.
- [16] Nagasawa, M. et al., 2000 : AJ, 119,1480-1497.
- [17] Davis, D.R., et al., 1994 : Planet.Space.Sci, 42, 599-610
- [18] Ward, et al., 1976 : Icarus, 28, 441-452.