

小惑星帯での衝突史

小林 浩

〈名古屋大学大学院理学系研究科素粒子宇宙物理学専攻 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: hkobayas@nagoya-u.jp



火星と木星の軌道に挟まれる小惑星帯には、様々な大きさの多数の小惑星の軌道が集中している。これらの小惑星どうしの平均的な衝突速度は5 km/sと大きく、衝突により小惑星は破壊される。衝突破壊の時間スケールの見積もりから、太陽系の歴史の中で直径100 km以下の小惑星は大規模破壊を経験しており、それより大きな小惑星の多くは大規模な衝突破壊を経験していないことが予測される。これは、平山族に含まれる小惑星の割合の小惑星大きさ依存性を見ても整合的である。このことは、直径100 km以上の小惑星は遙か太古の惑星形成期にできたことを示唆する。一方、小さな小惑星は現在まで衝突破壊をくりかえしていることを示唆しており、その質量分布は衝突のくりかえしが作るものと整合的である。このように小惑星帯における衝突を軸に小惑星の歴史が理解できる。

1. 平山族と小惑星帯における衝突頻度

太陽系の火星と木星の軌道長半径はそれぞれ1.5天文単位と5.2天文単位であり、この火星軌道と木星軌道に挟まれる2.1-3.3天文単位に数多くの小惑星が軌道長半径を持つ。この帯状領域は小惑星帯と呼ばれている。

小惑星帯には小惑星が密集するため、小惑星同士の衝突が起こる。小惑星体では小惑星間の平均的な相対速度は5 km/sと非常に速く、衝突が起こると天体が破壊される。衝突により小惑星が壊れる時間スケール^{*1}は理論研究により見積もられており、その時間スケールは小惑星の大きさに依存する。小惑星は大きいほど数が少なく、また自己重力に守られているので破壊されにくい。こういった条件を考慮すると、衝突・破壊の時間ス

ケールは大きい小惑星の方が長い。そして、だいたい100 km以下の大きさの小惑星の衝突・破壊の時間スケールは太陽系年齢よりも短い、それ以上の小惑星は衝突・破壊の時間スケールが太陽系年齢を超える¹⁾。小惑星が破壊されるのに必要な衝突エネルギー等の条件にはまだまだ不定性がある。そのため時間スケールの見積もりにも大きな不定性がある。そこで、平山族に注目する。平山族に属する小惑星は、それぞれの族で似た軌道を持ち、過去に破壊的衝突によって生成された可能性が高い。平山族に含まれる小惑星の割合²⁾は、小惑星の直径が1-10と10-100 kmの場合はそれぞれ 31.5 ± 1.1 と $31.8 \pm 1.1\%$ と3割程度だが、直径100 km以上の小惑星では $7.5 \pm 5.1\%$ と優位に小さい（誤差は標準誤差で与えた）。これは、衝突・破壊の時間スケールの見積もりと矛盾がな

^{*1} この時間スケールの見積もりには、当然、1度の大規模破壊衝突により破壊される効果も、多数の衝突により少しずつ破壊される効果も考慮されるべきである。長年、大規模破壊が重要と考えられていたが、定量的に調べると小さい小惑星が多数衝突することで少しずつ壊される方が実効的であることが示された⁶⁾。

く、直径 100 km 以上の大きな小惑星が破壊的衝突をあまり経験していないことを示唆している。

本稿では、直径 100 km 以上の小惑星とそれ以下の小惑星のそれぞれの質量分布から、それぞれの小惑星の起源に迫っていきたい。

2. 大きい小惑星の分布

図1は小惑星の個数頻度分布である。どの大きさの小惑星が小惑星帯の総質量を担っているのかは、小惑星帯の起源に迫るために大事な情報である。そこで、図1の頻度分布に質量をかけて、質量分布をプロットしたのが図2である。直径が 500 km 以上の小惑星は3つしかないため、統計的に判断するのが難しい。そのため、500 km より小さい小惑星に注目すると、小惑星の質量は 100–200 km 程度の直径を持つ小惑星が担っていることがわかる。

第1節で説明したように、直径が 100 km より大きい小惑星の衝突・破壊の時間スケールは太陽系年齢より長く、多くの小惑星は衝突・破壊を経験していない可能性が高い。そのため、直径 100–200 km の小惑星が質量を担うようなサイズ

分布は現在の衝突過程によって決まったのではなく、惑星形成期の記録を保存している可能性がある。

小星帯より太陽に近い軌道の惑星や遠い軌道の惑星は形成されているが、小惑星帯では惑星は形成されなかった。そして、現在の小惑星帯の総質量は惑星質量に比べてずっと小さいため、将来的にも小惑星帯で惑星を形成することはできない。そのため、小惑星帯は昔は惑星を形成できるほど豊富な材料物質があったが、現在の量まで激減したことが推測されている。実際、小惑星帯は木星に近いので、木星のように重い惑星が形成されると、その強い重力で小惑星の数はだいぶ減らされる⁴⁾。そのような重力摂動で数が減らされる場合は、取り除かれる小惑星と生き残る小惑星の数の比は小惑星の大きさに依存しない。そのため、図2に見られるような小惑星の質量分布にある直径 100–200 km のピークは木星形成以前の惑星形成環境で作られたものだろう。

惑星形成時に小惑星は衝突・合体をくりかえし、大きな小惑星を形成していっただろう。このような時代は、原始惑星系円盤内の乱流によって小惑星は軌道が乱されている。小惑星が小さい時は、衝突断面積は幾何断面積で決まる。一方、小

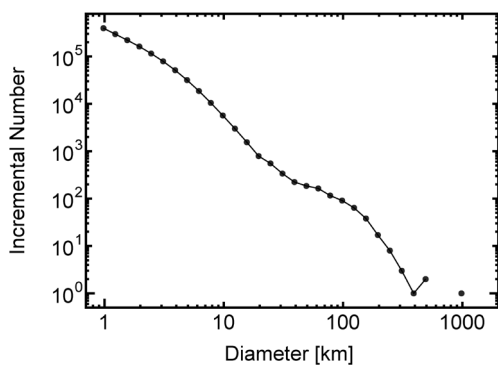


図1 小惑星の直径に対する頻度分布。横軸直径 D で、縦軸は直径が $\Delta D (=1.22 - 0.89D)$ の範囲の小惑星の数 (ΔN) をプロットしている。直径の見積もりは $D > 200$ km は絶対光度からアルベド 0.092 として導出し、 $D > 200$ km では IRAS の赤外線観測データを用いて補正している³⁾。また、 $D \approx 620, 780$ km を中心とする ΔD の範囲では $\Delta N = 0$ のためプロットされていない。

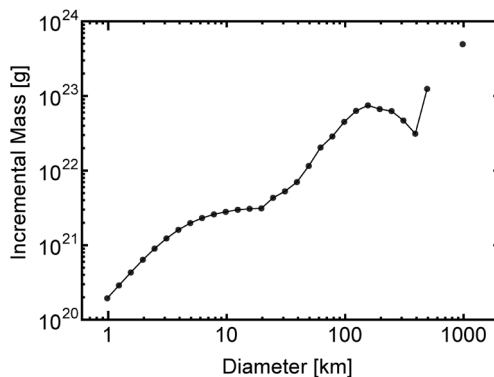


図2 小惑星の直径に対する質量分布。縦軸は図1で用いた小惑星の数と質量 $m = \rho \pi D^3 / 6$ の積をプロットしている。ここで、 ρ は小惑星の密度で、簡単のため $\rho = 3 \text{ g/cm}^3$ を使っている。

惑星が十分に大きくなると、自己重力が大きいため、乱流による軌道の乱れは重要でなくなる。その場合、小惑星の自己重力により衝突断面積は幾何断面積に比べ大きくなる。このような衝突断面積の変化がサイズ分布にも変化をもたらす。

小惑星が小さく、衝突断面積が幾何断面積で決まっている場合は、比較的ゆっくり成長するため、衝突によって多くの小惑星が合体しながら成長する。その結果、総質量は大きな小惑星が担うような質量分布になる。一方、小惑星が大きくなるにつれ、衝突断面積は自己重力の効果により大きくなる。つまり、自己重力の強い大きな小惑星ほど早く成長するようになる。早く成長する場合は多くの小さい小惑星を取り込む前に成長してしまうので、成長して形成された大きな小惑星ほど総質量に対する寄与が小さくなる。その結果、自己重力が効き出すサイズくらいに図2のような質量分布はピークを持つ。原始惑星系円盤の中の乱流を考えると、このピークの小惑星のサイズは説明できる⁵⁾。サイズ分布のベキ指数なども、理論的に導出でき小惑星のサイズ分布とも整合的である。詳しい導出などは Kobayashi et al.⁵⁾ を参照してもらいたい。

3. 小さい小惑星の分布

直径 100 km 以下の小さい小惑星は衝突が十分に短い時間で起こる。衝突・破壊によりさらに小さい小惑星が多数形成される。これらの小さい小惑星はさらに衝突・破壊をくりかえし、さらに小さくなっていく。この現象は、衝突カスケードと呼ばれる。

衝突カスケードが起こっている時、衝突・破壊によりあるサイズの小惑星が減少する量と増加する量がつりあう。そして、単位時間あたりに減少する（もしくは増加する）質量がどのサイズでも同じになると平衡のサイズ分布が達成される。詳しい導出は Kobayashi & Tanaka⁶⁾ を参照して欲しいが、本項では以下で簡単なサイズ分布の導出

を行う。

直径 D の小惑星が $N(D)$ 個、体積 V の空間に一樣に広がるとき、これらの小惑星との衝突頻度は、

$$N(D)\sigma v/V \quad (1)$$

である。ここで、 σ は衝突断面積、小惑星間の v は相対速度である。ここで、衝突する小惑星の直径を D' とする。直径 D と D' の小惑星が単位時間あたりに衝突するイベントの数は

$$N(D')N(D)\sigma v/V \quad (2)$$

となる。このような衝突で小惑星が壊れる時、失われる質量は

$$(\pi\rho/6)D^3 N(D')N(D)\sigma v/V \quad (3)$$

となる。ここで ρ は小惑星の内部密度である。この失われる質量がサイズによらない時に平衡解になる。 $\sigma \propto D^2$, v は D に依存しないため、

$$D^5 N(D)N(D') \propto D^0 \quad (4)$$

この式(4)を満たすサイズ分布が平衡解となる。

まず、簡単なため $D'=D$ の場合を考えてみよう。 $N(D) \propto D^{-5/2}$ の場合が平衡解になる。よくサイズ分布を議論される時に用いられる量は $N(D)$ を D で微分したもので、 -3.5 乗になり様々な分野でよく見かけるサイズ分布になっていることが分かる。100 km 以下の小惑星のサイズ分布を見てみよう。 $N(D) \propto D^{-2.5}$ というよりは、 $N(D) \propto D^{-2}$ となっている。この違いは $D'=D$ と単純化したことに起因する。

小惑星の平均相対速度は 5 km/s と非常に大きく、小さい小惑星でも大きな小惑星を壊す衝突エネルギーを持っている。それでも、 D'/D が D に依存しないならば、上の見積もりと同じになる。しかし、小惑星は十分に大きく、自己重力により守られているので、大きな小惑星ほど壊れにくい。 $D'/D \propto D^p$ とすると平衡のサイズ分布は、

$$N(D) \propto D^{-5/(2+p)} \quad (5)$$

となる。 $p \approx 1/2$ だと直径 1-100 km の小惑星サイズ分布は説明できる。重力が完全に衝突強度を決めていると仮定すると、破壊が起こる時の衝突エネルギーは自己重力のエネルギーに比例する。 $D' \ll D$ とすると、衝突エネルギーは $\pi \rho D'^3 v^2 / 12$ である。一方、小惑星表面での重力エネルギーは $G \pi \rho D^5 / 6$ である。ここで G は重力定数である。衝突エネルギーと重力エネルギーを比べると、 $D' / D \propto D^{2/3}$ となる。つまり、 $p = 2/3$ である。小惑星のサイズ分布を説明するには少し p は大きい。

直径 1-100 km 程度の小惑星を模擬した衝突シミュレーションの結果は、上の見積もりがシンプルすぎることを示している。実際は、摩擦などのエネルギー散逸も重要である。衝突シミュレーションの結果は $p \approx 1/2$ 程度と整合的である^{7,8)}。

4. 小惑星のサイズ分布から紐解く 小惑星史

以上のように小惑星のサイズ分布から小惑星の衝突史の一部が明かされる。その結果をまとめると以下ようになる。

- 直径 100 km 以上の小惑星は惑星形成時期の情報を残している。そのサイズ分布は衝突成長の記録で説明できる。
- 直径 100 km 以下の小惑星は現在の衝突・破壊のくりかえしで作られた。小惑星の衝突に対する強度をサイズ分布から見積もることができる。自己重力の効果で大きな小惑星の方が壊れにくい（衝突強度が大きい）ことが示唆される。

謝 辞

本稿は、平山族発見 100 年を記念した研究会の議論が発端となり、執筆したものである。このような機会を与えてくれた研究会の SOC メンバーに感謝したい。

参考文献

- 1) O'Brien, D. P., et al., 2005, *Icarus*, 183, 79
- 2) <https://newton.spacedys.com/astdys/>
- 3) Bottke, W. F., et al., 2005, *Icarus*, 175, 111
- 4) Bottke, W. F., et al., 2005, *Icarus*, 179, 63
- 5) Kobayashi, H., et al., 2016, *ApJ* 817, 105
- 6) Kobayashi, H., & Tanaka, H., 2010, *Icarus*, 206, 735
- 7) Benz, W., & Asphaug, E., 1999, *Icarus*, 142, 5
- 8) Suetsugu, R., et al., 2018, *Icarus*, 314, 121

Collisional History in Main Belt

Hiroshi KOBAYASHI

Graduate school of Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Abstract: A lot of asteroids have orbits in the Main Belt. Mean collisional velocity between them is estimated to be 5 km/s so that collisions lead to destruction. The collisional timescale for 100 km-sized or larger asteroids is estimated to be much longer than the age of the Solar System, while smaller asteroids are expected to have experience of catastrophic disruption. This estimate is consistent with the fraction of asteroids in collisional families (Hirayama families). The mass distribution may be explained by the onset of runaway growth, while that for smaller asteroids is possible to be constructed by collisional cascade. Therefore, the asteroid history in the Main Belt may be understood according to collisional theory.