

An Overview of the Asteroids: The Asteroids III Perspective

William F. Bottke Jr., Alberto Cellino, Paolo Paolicchi, and Richard R. Binzel
In: W. F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, and R. R. Binzel (Eds.), Asteroid III. Univ. of Arizona Press, Tuscon, pp. 3-16, 2002

2012/4/20 衝突研究会TVセミナー 保井みなみ (神戸大)

1

1. 我々はなぜ「小惑星」について研究するのか

1. 小惑星の物性、分布、形成、進化は、惑星形成がどのように起こり、最終的に生命がなぜ地球に存在するか、の理解へとつながる。
 - ✦ 小惑星は46億年前の原始的な記録を保持している。
 - ✦ 数々の衝突破壊、力学的・熱的イベントを経験し、今日の形となった。
 - ➡ 理論、室内実験、観測結果を通してこの「記録」を解釈することで、太陽系天体の進化過程についての多くの情報を知り得る。

- ・ 46億年前の小惑星のcomponentは？
- ・ 原始母天体は何？その分布は？
- ・ 惑星形成初期物理条件とは？



2

1. 我々はなぜ「小惑星」について研究するのか

2. 小惑星が地球に衝突し、人類、文明を崩壊させる可能性があるのかどうか、の詳細が知りたい。
 - ✦ 6500万年前の恐竜絶滅は、数kmサイズの小惑星（または彗星）衝突によるもの (Alvarez et al., 1980)
 - ✦ 様々な技術を駆使して、可能性について研究されている (例、リモートセンシング、数値モデル、探査機ミッション)。



3

1. 我々はなぜ「小惑星」について研究するのか

3. 小惑星研究の飛躍的発展の理由は？
 - ✦ CCD技術の発展：小惑星発見率の向上、詳細な軌道要素の測定、探査機によるその場観測
 - ✦ 数値モデル計算の質の向上：安価で速いコンピュータの出現によって、様々な効果 (例、重力擾乱) を入れて軌道計算が可能となった。



4

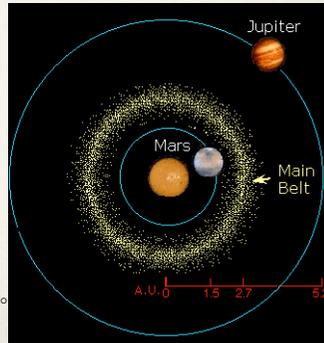
2.小惑星帯の歴史

2.1. メインベルト小惑星の形成

- ✦ メインベルトは、小惑星が最も多く存在する領域である。
- ✦ メインベルト小惑星の進化は、地球型惑星&木星形成と関わりがあるとされている。

例) 惑星形成過程後半に起こる原始惑星と木星との相互擾乱によって起こるメインベルト小惑星の動力学的励起 (軌道変化) (Safronov, 1969など)

- ✦ 形成時期は？
 - ✦ 隕石の短寿命放射性元素の測定により、CAIsが形成した45億7100万年の200万年後、直径10 km以上の小惑星が形成されたと考えられている。



5

2.小惑星帯の歴史

2.2. 初期メインベルト小惑星の動力学的励起

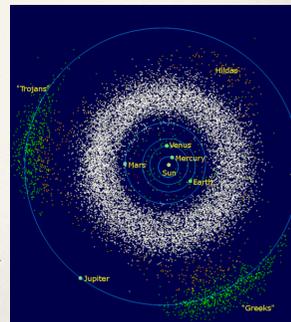
- ✦ 惑星形成のtimingやその過程に関して、メインベルト小惑星が現在の状態にどのようにたどり着いたか、を理解することが重要。
- ✦ 木星の形成は、初期メインベルト小惑星の進化にかなりの影響を与えた。
 1. **大規模な質量減少**: 初期は地球質量の2~10倍あったのが、現在は 5×10^{-4} 倍。
 2. **動力学的励起**: 初期のeとiは、互いに集積可能なほど低かったが、現在はそこ高いため、集積よりむしろ衝突による破壊が起こる。
 3. **動径方向のmixing**: S型小惑星が内側に多く、DやP型は外側に多い。が、境界が明確ではなく、C型やD型は内側でも発見されているし、S型も外側で発見されている。
- 木星が完全成長した後に、短時間で初期のメインベルト天体を散乱させた。→質量減少、動力学的励起
- 小惑星を形成した場所から遠くへ飛ばした。→mixing

6

2.小惑星帯の歴史

2.3. トロヤ群小惑星

- ✦ トロヤ群は小惑星が2番目に多く存在し、木星のLagrangian point L_4 と L_5 に存在。
- ✦ トロヤ群は遠くにいるため、観測が難しい。
 - ✦ スペクトルの特徴がなく、赤い。有機物で覆われている？
 - ✦ 多くはD型小惑星に含まれる。
 - ✦ 木星との関わり
 - ✦ 木星質量の急激な増加時に、 $L_4 \cdot L_5$ 点の振動場が拡張し、微惑星捕獲が進んだ。
 - ✦ 捕獲された微惑星は振動振幅が減少し、大きな振幅を持った微惑星だけ散逸し、残ったものがトロヤ群小惑星となった。
 - ✦ 上のメカニズムは捕獲天体のeやiにはほとんど影響しないため、現在のトロヤ群の軌道分布は原始的？



7

3.現在のメインベルト

- ✦ 初期のメインベルトは、過去に短い時間スケール (1億年オーダー) で数々の衝突、熱過程、動力学的イベントを受けた。
- ✦ この劇的な時代が終わると、残った小天体の進化はゆっくりとなる。
 - メインベルト小惑星の進化を理解するには、このような過程がどのように機能するのかを理解することが必要となる。
 - この「時間と共に何が起こったか」というストーリーを読むためには、小惑星の地形、軌道特性、スペクトル特性を実証することが必要となる。

8

3.現在のメインベルト

3.1. 衝突破壊

- ✦ 衝突イベントは、
 - ✦ 集団のサイズ分布を変化させる
 - ✦ クレーターを形成する
 - ➡ 衝突体の数や特性、標的の特性について重要な情報をもたらす
- ✦ 高速度衝突の物理に関する我々の知識
 - ✦ 1990年以前：観測や室内実験結果から、小惑星は衝突によって生じた一枚岩天体と考えられていた。
 - ✦ 1990年以降：探査機によって、小惑星上に巨大クレーターが発見された。
 - ➡ 更なる数値計算や室内実験によって、“重力スケーリング”と“強度スケーリング”での衝突の違いが分かった。



9

3.現在のメインベルト

3.1. 衝突破壊

- ✦ 小惑星の内部構造と衝突
 - ✦ 小惑星や隕石データの詳細な解析から、小惑星には空隙率の高い重力的に集まったラブルパイルと呼ばれる天体の存在が示唆されるようになった。
 - ✦ 数値計算や室内実験によって、空隙を持った小惑星の衝突に関する多くの事実が分かってきた (Holsapple et al.など)
 - ✦ 空隙は衝突エネルギーを吸収し、破碎しにくくする。
 - ✦ 引っ張り強度の低い小惑星は、過去に破壊を受けた可能性が高い。
 - ✦ 小惑星の内部構造のグループ化と衝突の特徴
 - ✦ 1枚岩天体：衝撃波が伝わりやすく、ダメージやスポールを生じやすい。
 - ✦ 破壊を経験した天体：破壊時に生成したダメージが衝撃波（引張波）の伝播を抑えるため、天体は破壊されにくい。
 - ✦ ラブルパイル天体：クレーターが圧密によって形成する。

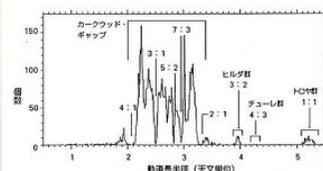


10

3.現在のメインベルト

3.4. 動力学的進化

- ✦ 数値モデルの向上により、メインベルト小惑星がどのように輸送され、他の領域へ飛ばされたか、に関する理解が深まった。
- ✦ 平均運動共鳴・永年共鳴
 - ✦ 木星との平均運動共鳴 (3:1など)：100万年のタイムスケールで、eが地球交差軌道に入ることがわかった (Nesvorny et al.など)
 - ✦ v6永年共鳴：NEOの根源の1つ?
- ✦ ヤルコフスキー効果
 - ✦ 熱放射の不均一によって生じた熱慣性によって軌道が変化
 - ✦ 0.1m~20kmの天体で効く
 - ✦ 軌道長半径の永年変化が起こる。



11

4.地球近傍天体 (NEOs)

4.1. NEOsの発見

- ✦ 近日点距離1.3AU以内、遠日点距離0.983AU以降の天体
 - ✦ Apollo族、Aten族、Amor族など
- ✦ ほとんどのNEOsはメインベルト小惑星の衝突によって生じた破片で、共鳴やヤルコフスキー効果などによって飛ばされてきた。
- ✦ 残りは、KBOsやオールド雲起源と考えられている。
- ✦ 1990年以降、Spacewatchなどの探査によって、数多く発見された。
 - ✦ 絶対等級18以下 (直径1km以上) の天体の50%以上が、a<7.4AUで発見されている。
- ✦ 増加した理由
 - ✦ 性能の高い望遠鏡への資金投入 (政治的問題)
 - ✦ CCDの高性能化



12

4.地球近傍天体 (NEOs)

4.2. NEOsのモデリング

- ✦ NEOsの軌道やサイズ分布のモデリングの発展：以下の2つの進展が飛躍的
 - ✦ 観測的偏り
 - ✦ この偏りが理解され、数値モデル化されたことで、観測によって調べられた群の特性を推定することが可能となりつつある。
 - ✦ 動力学的進路
 - ✦ NEOsの源からの軌道や最終状態までの進化を理解することが重要。
 - ➡ NEOsの源の指標や、軌道、絶対等級分布に関するモデル化が進んだ。
- ✦ 地球型惑星上のクレーターサイズ分布からNEOsの情報を得る
 - ✦ クレータースケーリング則や、月・火星の物理パラメータやクレーター生成率推定値を用いて、惑星軌道を交差する小惑星の集団形状の推定 (Ivanov et al.)

13

4.地球近傍天体 (NEOs)

4.4. 隕石、NEOsと母天体の関係

- ✦ 隕石やNEOsと母天体との関係を探る手法：動力学的モデル、スペクトルなど
- ✦ スペクトル測定：小惑星表面の構成物に関する情報
 - ✦ メインベルト天体は26の型からなる (Bus et al.) →NEOsでもほとんどの型が発見されている。→NEOsはメインベルトの代表的なサンプルとなる。
 - ✦ 既知型をもつNEOsの80%はS型小惑星 (Binzel et al.など)。
 - ✦ 普通コンドライト隕石 (OCs) 母天体の謎 (Asteroids II)
 - ✦ S型小惑星とOCsの間をとったようなスペクトルをNEOsがもつ。
 - ➡ “宇宙風化”の影響 (Clark et al.)
- ✦ 隕石の型と母天体の関係 (Burbine et al.)
 - ✦ 普通コンドライト隕石：S型 (特にS(IV)型)
 - ✦ CMコンドライト隕石：C型
 - ✦ 隕鉄・エンスタタイトコンドライト：M型
 - ✦ HED隕石：V型 (4Vesta)

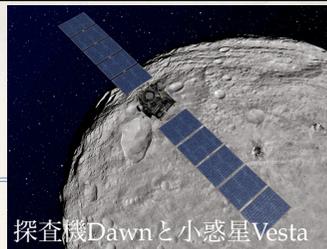
マーチソン隕石



14

5.将来予測

- ✦ メインベルト外側の小惑星やトロヤ群データの増加
 - ➡ 地球型惑星の揮発性物質との関連
- ✦ 数値モデルの発展
 - ✦ コードの進化により、高空隙天体同士の衝突がより正確に再現される。
 - ➡ Mathildeのような天体を模擬可能
 - ✦ 数百万の天体衝突における動力学的進化を追うことが可能
- ✦ レゴリスの熱的および物理的特性の理解向上
 - ✦ 小天体の動力学的進化や光散乱の理解が深まる？
- ✦ スペクトル観測の技術発展：検出器の精度向上・大口径望遠鏡の発展
 - ✦ より小さな小惑星でも観測可能になるか？
- ✦ 探査機
 - ✦ Dawnの最新データ、小惑星サンプルリターンのデータ



15