

2014/6/4 衝突勉強会

テーマ:小惑星形成と進化に関するレビュー

GROWTH AND EVOLUTION OF ASTEROIDS

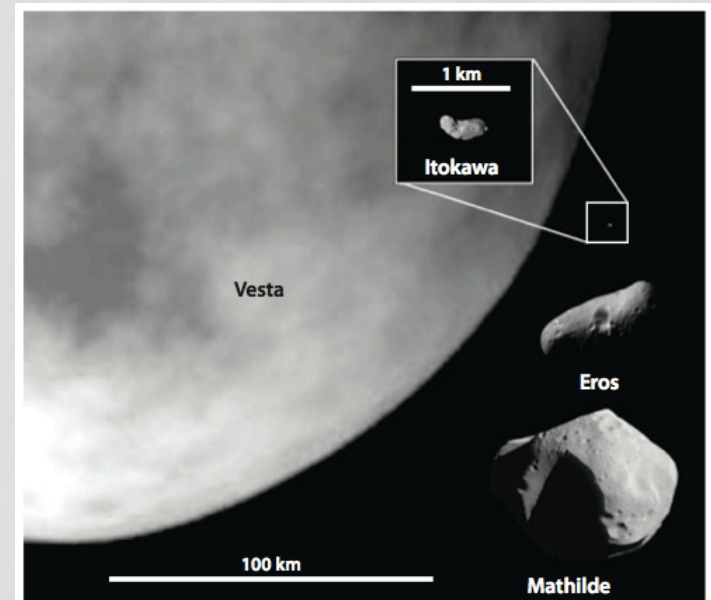
ERIK ASPHAUG

ANNU. REV. EARTH AND PLANET. SCI. 2009

神戸大学 辻堂 さやか
大村 知美

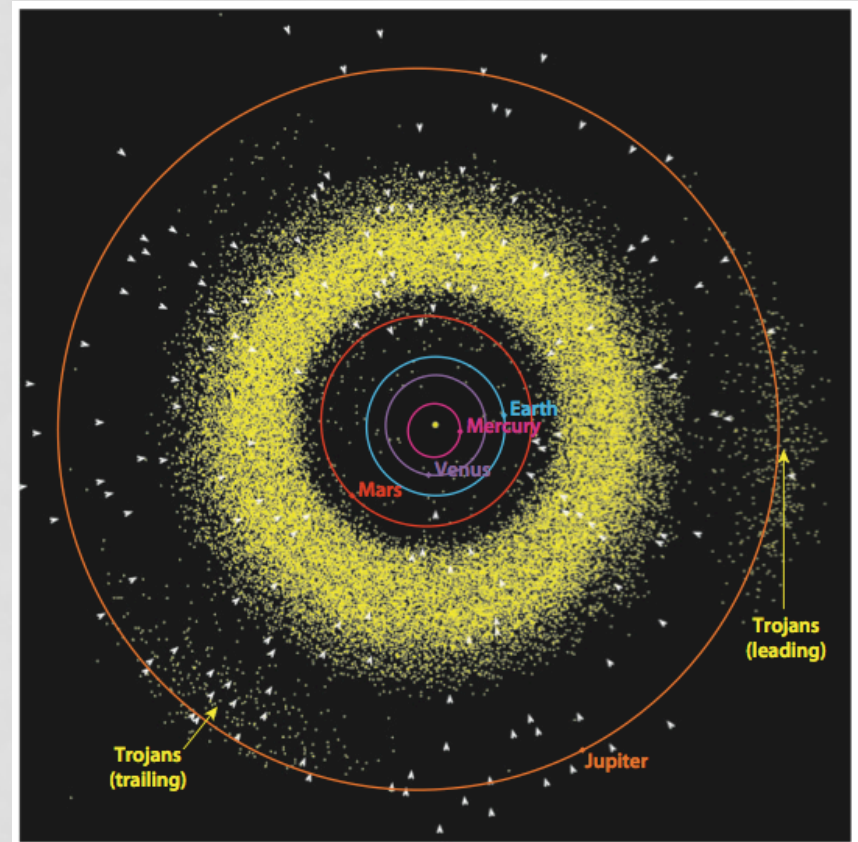
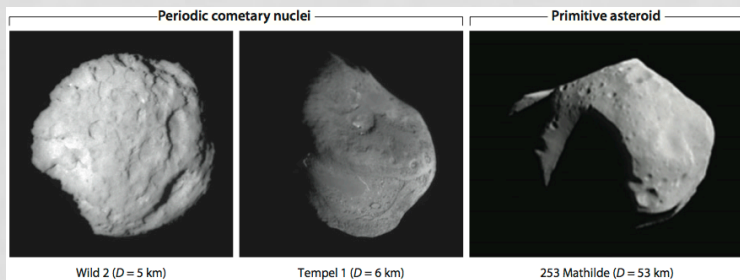
小惑星について

- 破壊と集積の結果、形成されてきた
 - 現在も小惑星サンプリングミッションが進行中、あるいは計画中
 - 太陽系の起源や微惑星、惑星、地球で発見された隕石と関連づける事ができる
 - 惑星進化の歴史を知る上で小惑星について理解する事は重要
- 個数分布は小さいものが支配的
 - 小さいものは大きいものより多い; 一方で大きい小惑星が質量の大部分を占めている
 - ベスタやセレスのようなメインベルトのごく一部の小惑星が質量のほとんどを占める
- メインベルトの小惑星の全質量
~ 3.6×10^{21} kg: 月の~5%, セレスの4倍
- 小惑星は多様⇒ 分類が難しい
 - 重力: ケタで異なる
 - 組成: 氷に富むもの、月のようなもの、分化していないものetc
- 小惑星は2あるいは3連星が多い



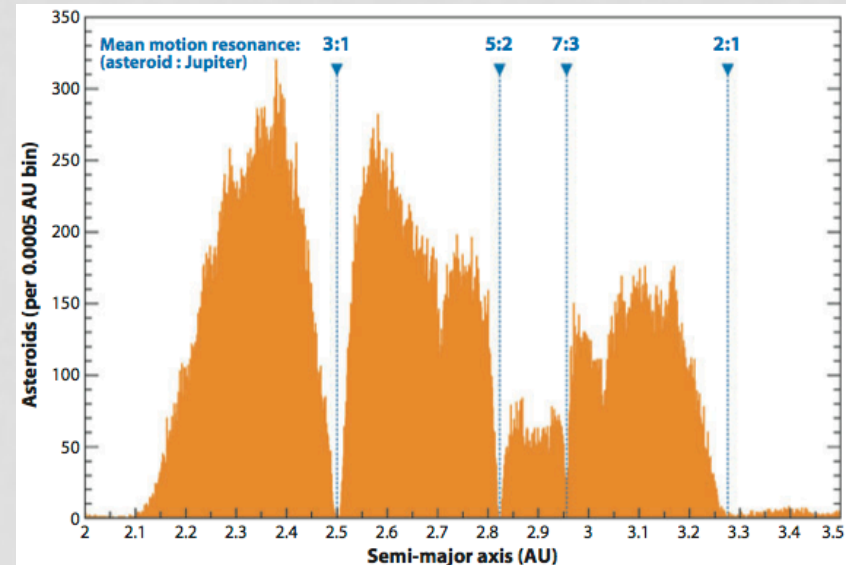
分布

- MBA(メインベルト小惑星)
 - 火星と木星の間
 - 個数が多い
- NEA(地球近傍小惑星)
 - 近日点 $q \leq 1.3\text{AU}$
 - 遠日点 $Q \geq 0.083\text{AU}$
- トロヤ群
 - 小惑星と分類されているが、組成的には彗星に似ている
- 彗星
 - 小惑星と似ている: 分類が難しい
 - 太陽に近づくとコマを噴出



小惑星の個数分布

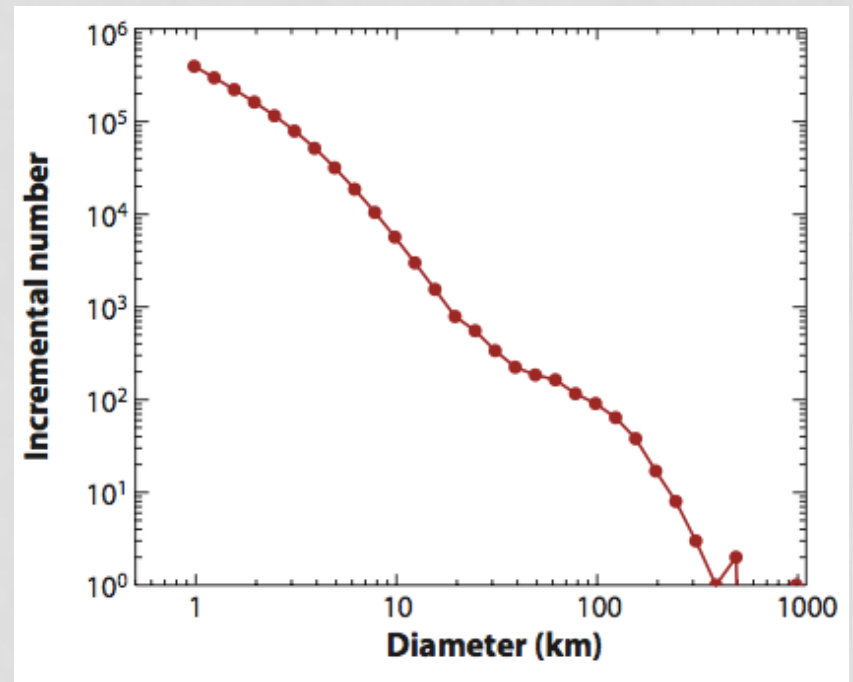
- 小惑星の大部分はメインベルトに存在
 - 木星との平均運動共鳴; 5:1(1.78AU) と 2:1(3.28AU)の間
- NEAは1000万年のタイムスケールでメインベルトから移動
- NEAとMBAはサイズ分布が異なる
 - 小さい小惑星程簡単にメインベルトから移動する
 - 小さい惑星:
ヤルコフスキー効果を受けやすい
 - 1km以下の小惑星を1AU以上移動させるが~10km以上の小惑星には影響しない
 - ヤルコフスキー効果
 - ⇒ 平均運動共鳴と永年共鳴
 - ⇒ 重力的に不安定
 - ⇒ 飛ばされる



サイズ分布

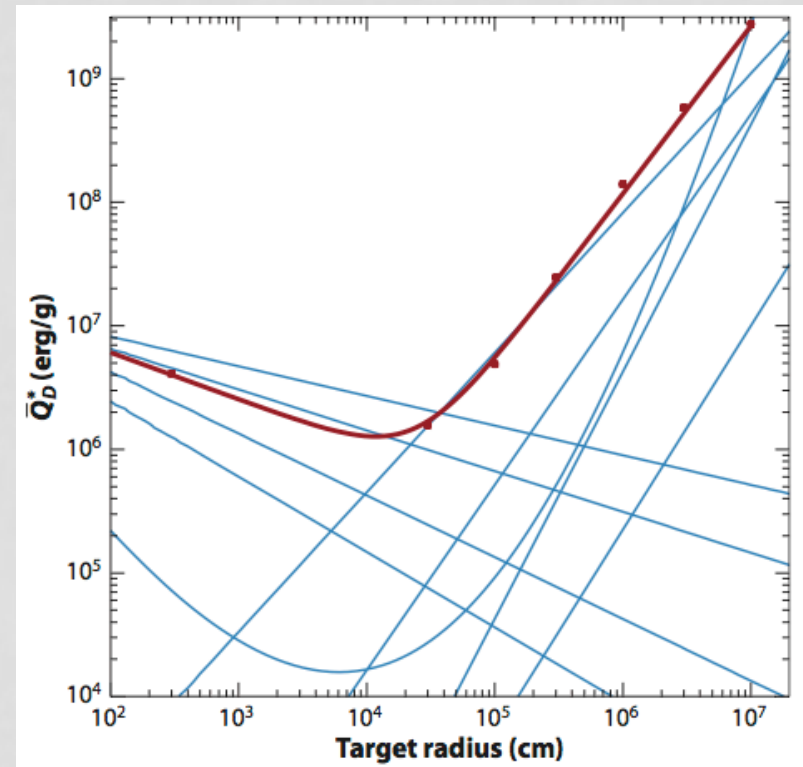
- 1kmより大きい...
 - MBAは100万~200万個
 - NEAは~1000個
- サイズ分布の微分:
 $n = dN/dD = CD^{-\alpha}$
 - N: 累積個数、D: 直径
C, α : 定数
- Ivezić et al.2001
 - $0.4\text{km} < D < 5\text{km}$; $\alpha \sim 2.3$
 - $D > 5\text{km}$; $\alpha \sim 4$
⇒ 天体サイズによって
ベキが異なる

- NEA → α 大
 - 小さいものが多いため
 - $0.1\text{m} < D < 200\text{m}$; $\alpha = 3.7$



破壊

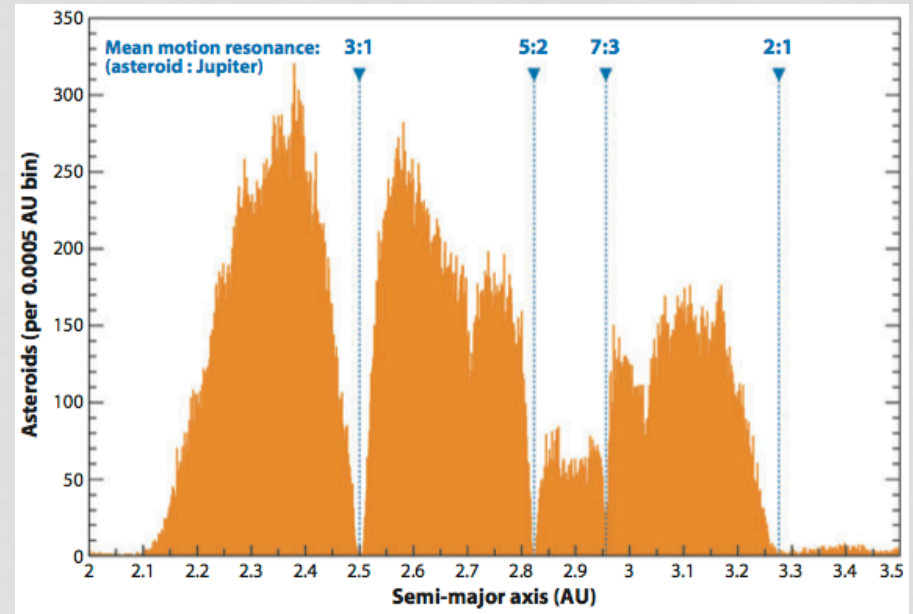
- 小さい天体; 強度支配域
- 大きい天体; 重力支配域
 - 逆のトレンドを持つ
 - Q_D^* :
最大破片がちょうど元の質量の半分になるときのエネルギー密度
- $D=100\text{m}$; 最も壊れやすい
- 分化が進んだ小惑星は壊れにくい
 - 右グラフの約3倍



カークウッドの空隙

- メインベルト
 - 5:1~2:1の木星との平均運動共鳴の間(1.8~3.3AU)
- カークウッドの空隙
 - 木星との平均運動共鳴であり、小惑星が少ない領域

- メインベルトから地球近傍へと天体は移動する
- 太陽光の力による
 - ⇒ ヤルコフスキー効果、YORP効果



ヤルコフスキー効果

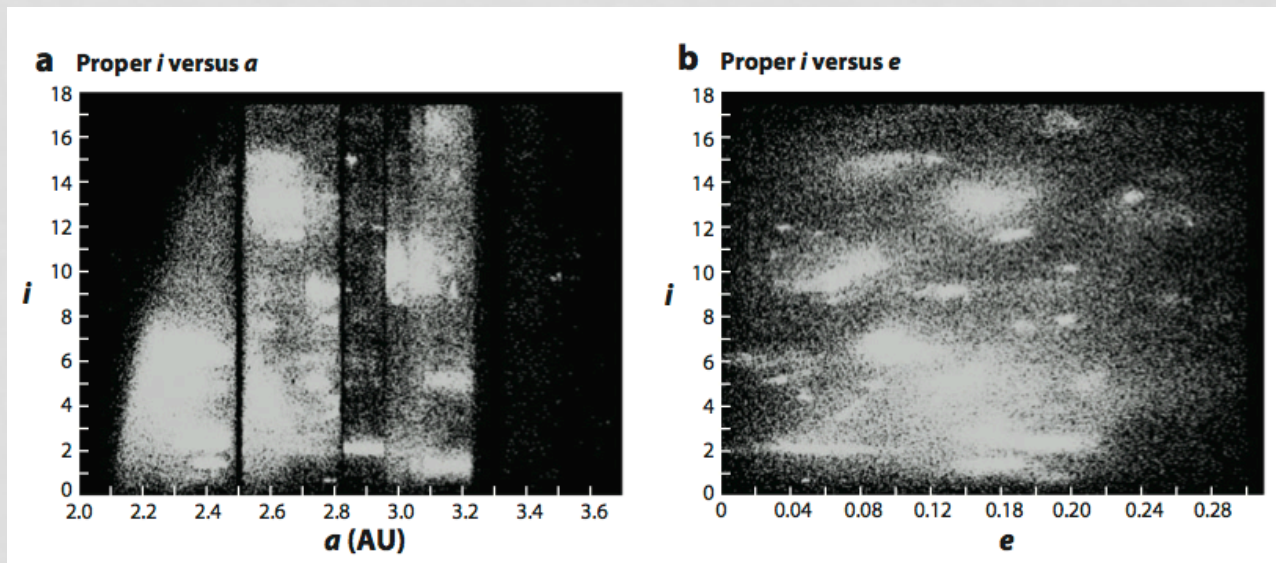
- ヤルコフスキー効果:
小天体の日中/夜間の温度差のために起こる不均等な熱放射による、軌道を変化させる効果
 - 以下のパラメータによる
 - 1日の長さ
 - アルベド
 - 熱慣性 $\Gamma = \sqrt{\rho c \kappa}$
 - ρc : 体積熱容量
 - κ : 熱伝導率
 - 太陽からの距離
 - 形状
 - サイズと自転速度にも関係
- 熱慣性 : 温度変化に対する抵抗の度合いを示す尺度
 - 熱慣性 Γ 小
 - ⇒ 日中/夜間温度差 大
 - ⇒ ヤルコフスキー効果 大
 - 粒子 大 ⇒ Γ 大
 - 粒子 小 ⇒ Γ 小
- サイズ 大
 - ⇒ ヤルコフスキー効果 小
- 数10kmより小さい天体に大きく影響
 - 地球近傍へ移動、あるいは隕石として地球に落下
- ヤルコフスキー効果による力
 - \propto 表面積 D^2
- 加速度 $\propto D^{-1}$

YORP効果

- YORP:
自転運動をする不均一な形状の天体において、
熱放射と輻射圧のバランスが天体上で均一でない時
に起こる、自転速度を変化させる効果
- 10kmの天体は数億年毎に自転速度が2倍(半分)になる
(Rubincam, 2000)
- 再形成や再表面化、衛星の形成、連星の進化のメカニズム
 - 赤道付近に物質が集まり、いずれ破片が表面から分離して衛星、
連星が形成される

族

- 似通った固有軌道要素を持つ小惑星の一群: 族
 - 固有軌道要素: 軌道長半径 a , 軌道傾斜角 i , 離心率 e から規則的な短周期変動と木星などからの摂動の効果を取り除いた量
 - 起源(衝突破壊の母天体)が同じである場合が多い

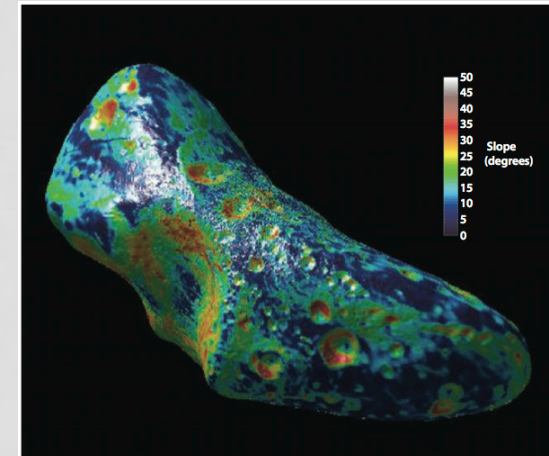
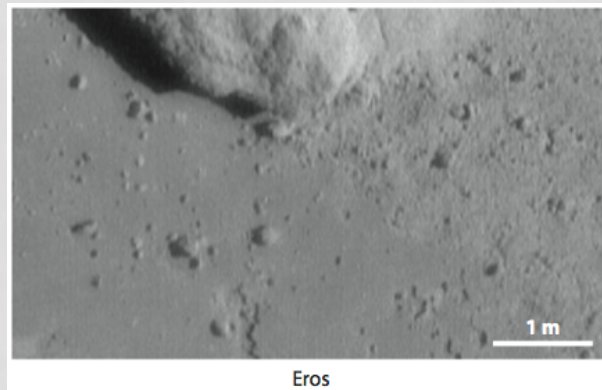
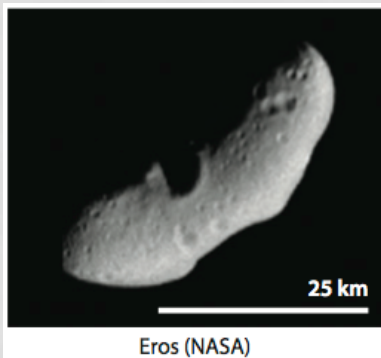


連星

- 約200の連星惑星が見つかっている
 - NEAの約1/6は連星
- 惑星に近づいた天体が潮汐力によって分裂するか、あるいはカタストフィック破壊によって形成される
- 力学的捕獲は初期太陽系外縁部では起こりうるが、小惑星帯では太陽の重力の効果が大きいため起こらない
- NEAの連星はYORP効果にともなう自転加速による分裂による
 - 一度連星が形成されたら、YORP効果は連星をより大きい軌道長半径にする
- 連星の形成と進化を理解することは微惑星の集積や小惑星族の起源、小惑星の形状、表面、構造的進化を理解する上で重要

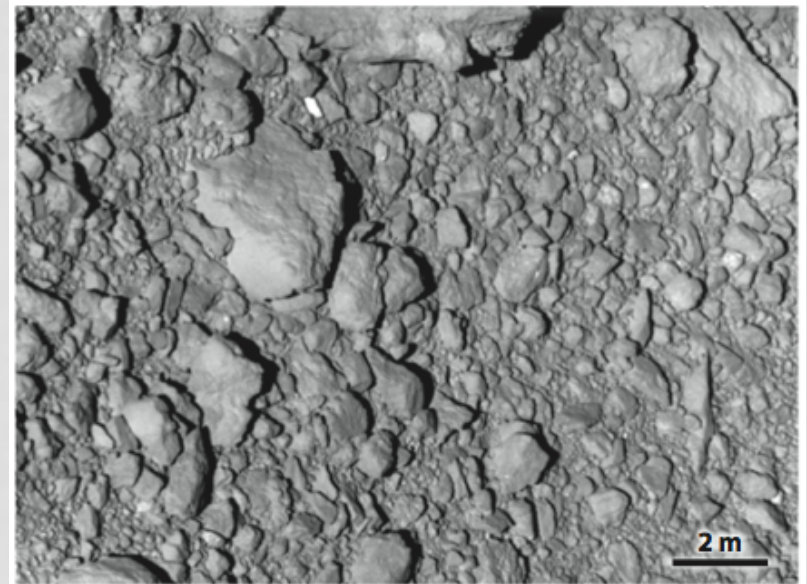
エロス

- 普通コンドライトと似た組成
 - 普通コンドライト: 密度 $\sim 3.4\text{-}3.7\text{g/cm}^3$
 - バルク密度 $\sim 2.7\text{g/cm}^3$
 - ⇒ もしも普通コンドライトと同じ組成なら、空隙率 $\sim 25\%$
- 重力は場所によって異なる
 - ピーナッツのような形状と早い自転のため
- 平らな部分が多い
 - クレーターリム等を除く
- 割れ目のような形状
 - ラブルパイル天体である可能性



イトカワ

- 2005年にははやぶさが到着
- エロスの1/200,000の質量
 - 微小重力
- ラブルパイル天体
(Fujiwara et al. 2006)
- 粗い岩に覆われていて、認識できるクレーターはほとんどない
- 平らな砂利でできている"海"
- 内部に関してはよくわかっていない



Itokawa

小惑星の分類

• S型

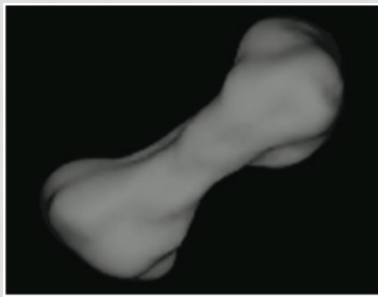
- 知られている小惑星のうち~15-20%
- 地球近傍に多い
- 普通コンドライト隕石の起源
- シリケートのスペクトル吸収
- 中くらいのアルベド($p_v \sim 0.15$)

• C型

- 知られている小惑星のうち~75%
- メインベルトに多い
- 炭素質コンドライト隕石の起源 (始原的)
- 低いアルベド($p_v \sim 0.05$)
 - ex. マチルダ



253 Mathilde



216 Kleopatra

• M型

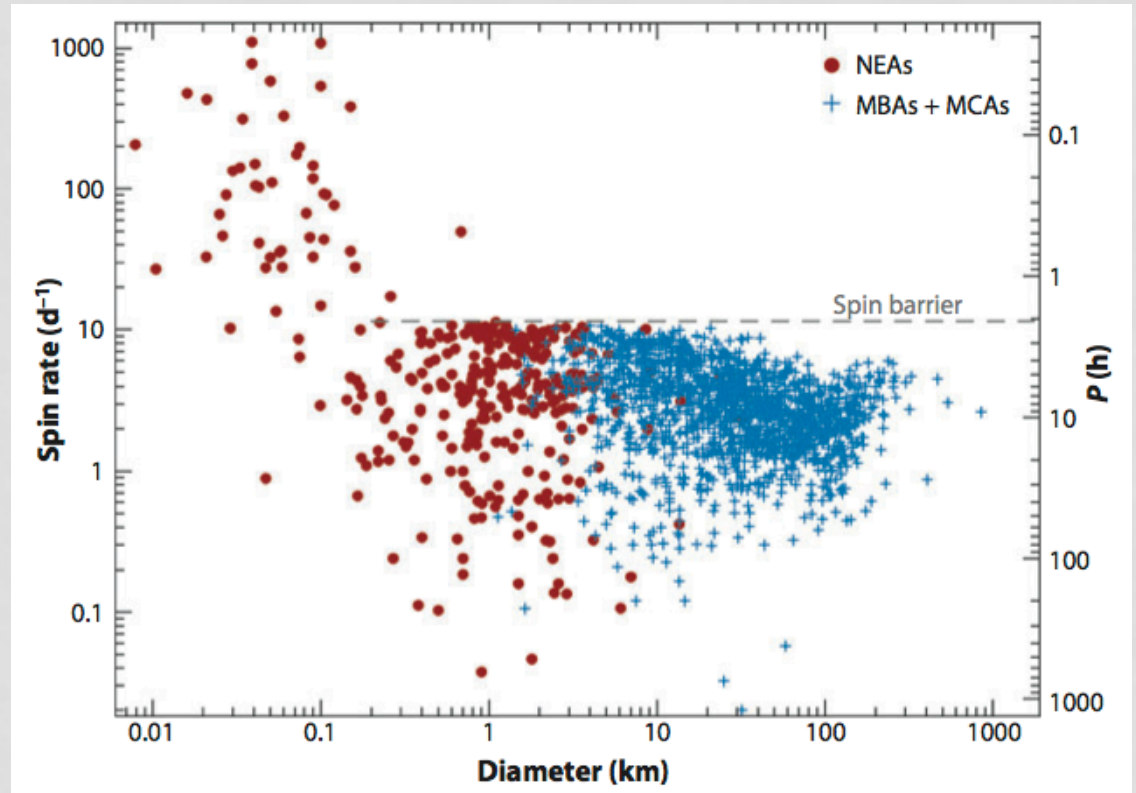
- いくつかは鉄隕石起源であるが、多くはケイ酸塩水和物であり、鉄隕石起源ではない
 - 中くらいのアルベド
 - 分化した惑星のコアの金属破片を含むか、衝突等の大きなイベントによってマントル岩石を失ったと考えられている
 - 金属を含むMタイプ小惑星の探査機による調査は行われていない
- 宇宙風化によって全ての小惑星表面は赤化、暗化し、スペクトルが変化する

測光観測

- 絶対等級Hから直径Dを推定することができる
 - 絶対等級H:
太陽からも地球からも1AUの距離にあり、位相角=0°とした場合の等級
 - $D \sim 1329 \text{ km} \times 10^{-H/5} p_v^{-1/2}$
 - NEAの平均アルベド $p_v \sim 0.14$
 - p_v はSタイプとCタイプで~3倍異なる
⇒ 同じHの場合、Cタイプの方が~50%直径が大きくなる
- 光度曲線
 - 自転軸、主軸の長さ、アルベド、位相関数から自転速度と形状が導かれる
 - 衛星の存在がわかる
 - $D > 0.3 \text{ km}$ のNEAの~15%が連星
 - $P^2 = 4\pi^2 a^3 / GM$ より、
 - 軌道長半径aがわかれば、連星系の質量Mが導かれる
(周期Pは光度曲線によってわかる)

直径と自転速度の関係

- D~200mで境界に達する
($P_{\text{rot}} \sim 2.2\text{h}$)
 - 密度 $\sim 2\text{g/cm}^3$ の球の最大自転速度
 - 多くの連星系の角運動量はこの境界付近である



- 以下のような連星の形成メカニズムが考えられる
 - YORP効果により自転速度がこの境界より速まる
⇒ 遠心力により一部が分離し、衛星になる

様々な観測手法

- 分光観測

- 可視～近赤外分光

- 組成について

- 中間赤外～熱赤外分光

- 熱特性について

- ヤルコフスキー効果、YORP効果による進化を理解する上で重要

- これらを組み合わせることで、小惑星のアルベドとともにサイズ、形状を推定できる

- レーダー

- 円偏光

- 表面の粗さ

- アルベド

- 空隙率、組成

- ただし～数10cm: 波長の数倍



小惑星の起源



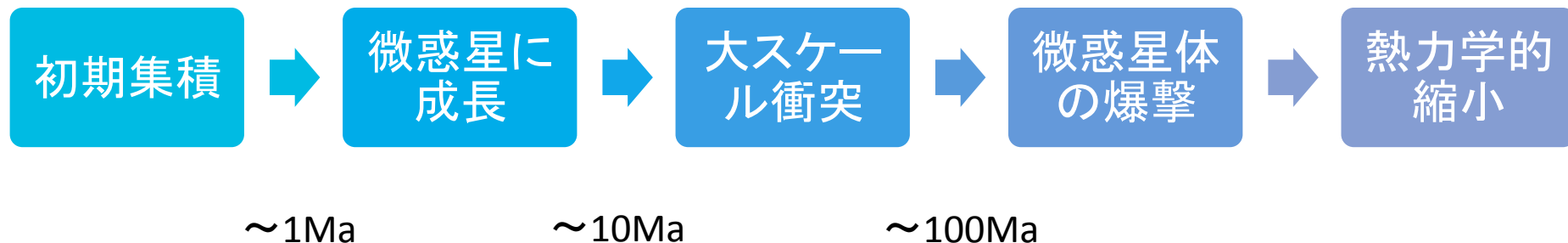
小惑星の起源

- 多くの小惑星はカタストロフィック崩壊過程で生まれ、また準カタストロフィック崩壊やクレーター形成で劇的な変化を遂げる。
- 初期の軌道と今の軌道は違う(摂動による)
 - 小さな小惑星は今も移動している
- 小惑星の進化
組成と集積のタイミング、集積した場所に依存
- 小惑星の起源
 - 力学的
 - 岩石学的

族の年齢

- ほとんどの、直径20-30kmのメインベルト小惑星はカタストロフィック崩壊の残骸
- 相当サイズの破片の放出
 - 衝突、共鳴、ヤルコフスキー効果を受ける
 - 族の形成、散乱
- 族はできてからとても新しい(モデルを使って逆算)
 - 月、地球の衝突履歴とも一致
 - モデルの問題点
 - Karin族の小惑星→ヤルコフスキー効果を考慮すると解決
 - 地球に衝突した隕石(炭素質コンドライト組成)はBaptistina族の形成時のものだと思われているが、BaptistinaはSタイプ小惑星で組成が一致しない→結論は出ていない

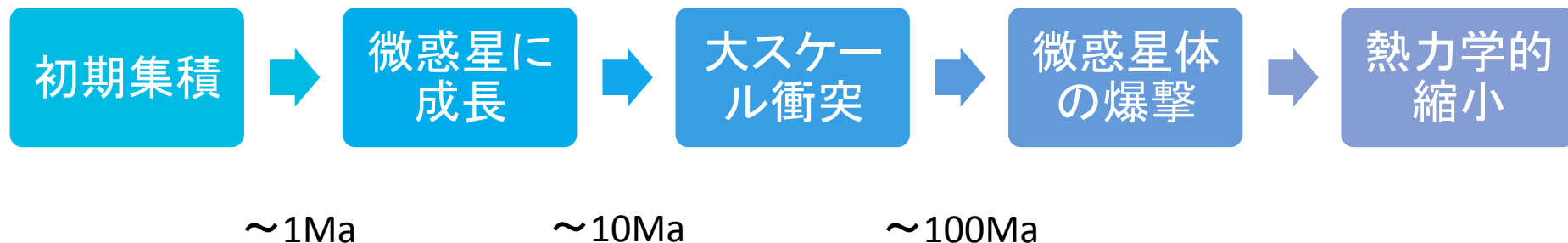
惑星形成の標準モデル



◆ 微惑星への成長

- 中央平面外にある小さな物質は太陽風に吹き飛ばされる
- ガスの抵抗による惑星形成領域からの落ち込み
- ブラウン運動、化学的、電気的なメカニズムで付着→砂-ボルダーサイズの塊の成長
- 集積は1AU内で最も速く、遠くなると遅い
- 何十AUの間で物質のやりとりがある
 - NASA's Stardust sample return
- 初期の重力不安定によって大きな微惑星は小さなものより速く成長
 - →同サイズ、同間隔に落ち着く
- m-kmサイズの微惑星群

惑星形成の標準モデル

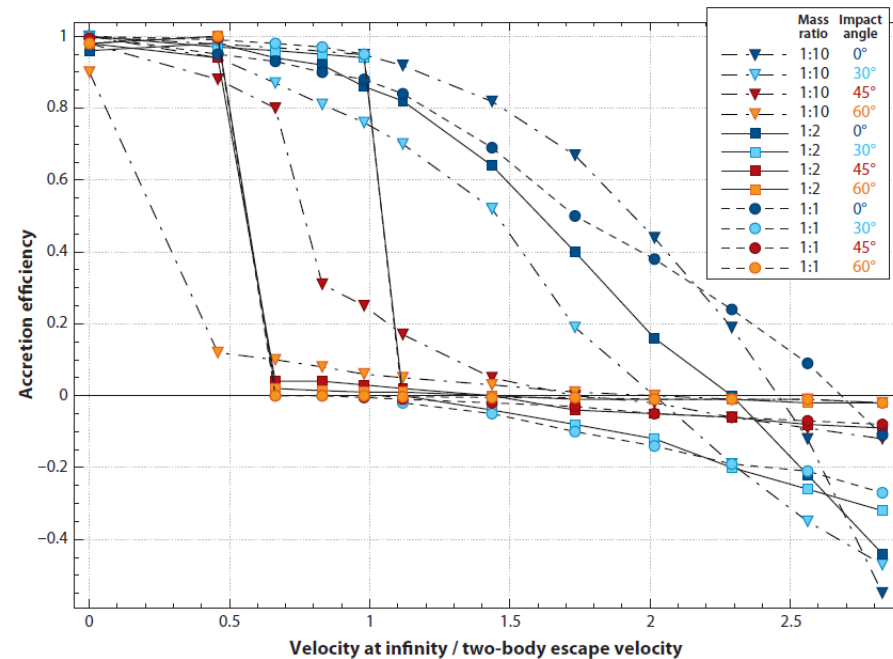
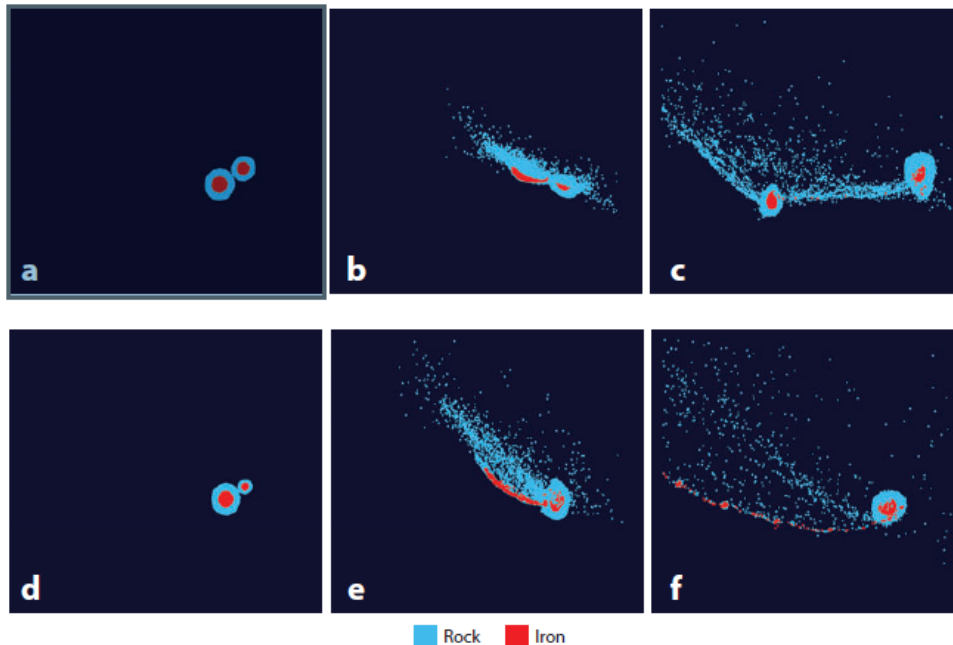


◆ 分化とコンドリュールの年代学

- 微惑星が十分に大きく、十分に速く育てば全体溶融が可能
 - 隕石の変成、火成度合いの多様性ができる→鉄隕石、エコンドライトの組成
- 発見されている隕石はコンドライト隕石(変成度合い小)が多い
 - 集積はAIの減少後にも起こっている
- コンドリュールからの正確な年代、集積場所の決定
- コンドリュール(コンドライト隕石に含まれる球状粒子)
 - 溶融したケイ酸塩が冷却されてできた
 - 初期→二次集積への移行と同時代に形成
 - コンドライト隕石のバルク質量の半分以上

◆ 巨大衝突のシミュレーション

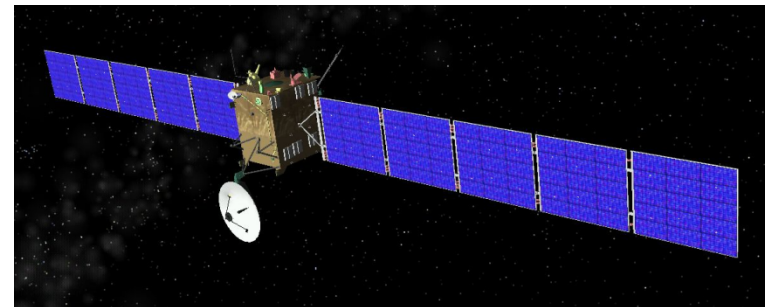
- 衝突は低速度→高速度に
- 多くのものは集積しない→小惑星、隕石の起源として重要
- 全ての地球型惑星は巨大衝突のあとの状態
 - 組成の多様性



- 完成した惑星がパンなら小惑星はパン屋の床のパンくずのようなもの

最後に

- 現在の小惑星に対する理解は、限られた情報によるものである
- 小惑星の研究はまだ始まったばかりであり、様々な探査計画がある(2009年時点)
 - Lutetia－探査機Rosetta
 - Vesta－探査機Dawn



探査機Rosetta