

Contamination of the asteroid belt by primordial trans-Neptunian objects

Harold F. Levison et al 2009 Nature, vol.460, 364-366

&

Iron meteorites as remnants of planetesimals formed in the terrestrial planet region

William F. Bottke et al 2006 Nature, vol.439, 821-824

紹介: 神大M1 桂 武邦

メインベルト天体

- メインベルト(2.1~3.3AU)

始原的な氷岩石から火成岩、鉄質まで多様な小惑星が存在

- 標準モデルー原始惑星円盤で形成された小惑星が
メインベルト領域で化学変化を経験

この多様性を

1. Planetary embryos(惑星の種)の軌道進化による微惑星の軌道変化
ー地球型惑星領域で形成された分化した天体 → メインベルト
2. Niceモデルのmigrationが導く原始TNOsの軌道変化
ー原始TNOsで形成された彗星物質 → メインベルト

により説明できないか？

メインベルト天体

- メインベルト(2.1~3.3AU)

始原的な氷岩石から火成岩、鉄質まで多様な小惑星が存在

- 標準モデルー原始惑星円盤で形成された小惑星が
メインベルト領域で化学変化を経験

この多様性を

1. Planetary embryos(惑星の種)の軌道進化による微惑星の軌道変化

ー地球型惑星領域で形成された分化した天体 → メインベルト

2. Niceモデルのmigrationが導く原始TNOsの軌道変化

ー原始TNOsで形成された彗星物質 → メインベルト

により説明できないか？

1. 鉄隕石母天体

● 鉄隕石母天体

ーメインベルトで形成したと考えられている

しかし、

- 観測では分化を示す天体(マントル、殻物質)やその破片がメインベルト内でほとんど見つからない
- 母天体は20km程度と小さい
- 普通コンドライトより1~2Myr早く形成された

といった矛盾が生じる(後述)



地球型惑星領域で形成し、その後メインベルトへ移動したとすればこれらの矛盾を説明できないか？

1. 軌道進化シミュレーション

● 目的

太陽系内側の微惑星やその破片はメインベルトに散乱していくのか調べる

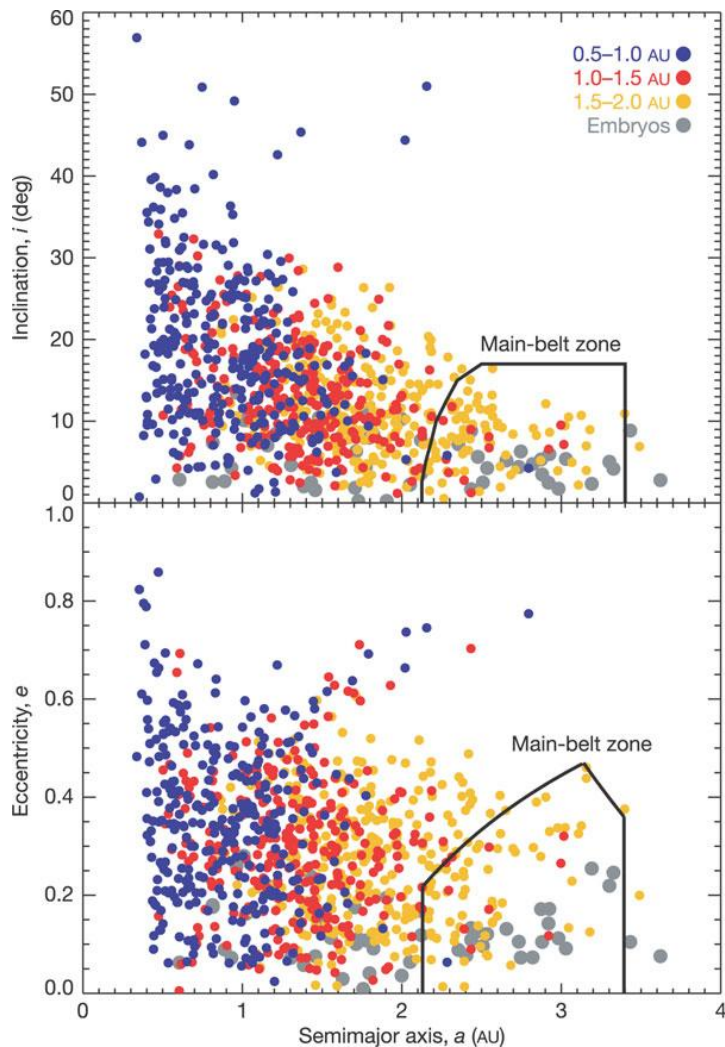
● 内容

0.5~3AUで惑星の種の進化時に何千もの質量0物体の力学進化をたどる

- 10Myr計算
- 初期の軌道長半径0.5-1.0,1.0-1.5,1.5-2.0AUにそれぞれ1000個の微惑星を入れる
- 100個の惑星の種(0.04地球質量)を用意
- 木星型惑星はほとんど影響を及ぼさないと仮定

1. 結果

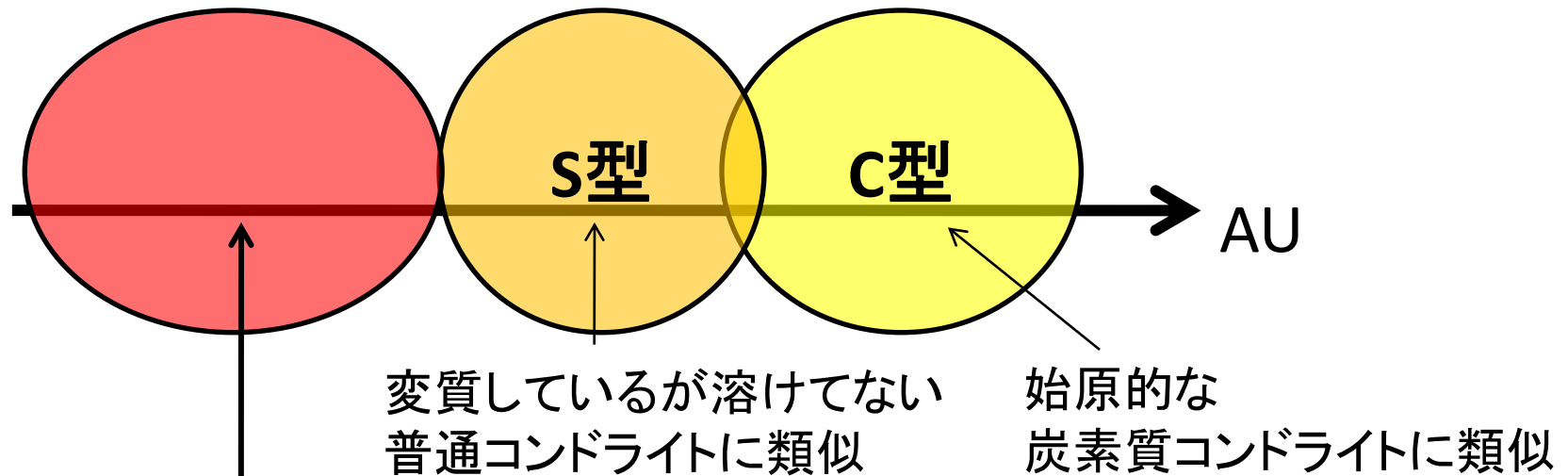
図1 力学進化後の微惑星の軌道要素



- 惑星の種の摂動によりテスト粒子の軌道長半径が時間とともに変化

→ 微惑星は共鳴や惑星の種との接近を通してメインベルト領域(特に内側)に侵入する

● 地球型惑星領域で形成された天体の性質



s型やc型より加熱を受ける

•考えられる微惑星の熱源 → ^{26}Al 、 ^{60}Fe (短寿命)

•地球型惑星領域
—集積が速く内部加熱が可能

高度に変質と分化を受けた
小惑星になるはず

● 鉄隕石との比較

- 鉄の冷却速度と組織データ
 - 分化した小さな小惑星(D20~200km)の核が起源
- 同位体クロノメーター
 - 核の形成は普通コンドライトの母天体形成の1~2Myr前

もし小さい小惑星(鉄隕石母天体)がメインベルト内で分化

→ 大きな天体も当然分化するはず

— しかし観測では分化した天体やその破片がほとんど見つからない

もし鉄隕石母天体が地球型惑星領域で形成

→ 集積時間が短く、小さい天体でも分化可能

→ 分化した天体の不足と調和的

●メインベルト内側の無傷な分化小惑星の不足

矛盾

観測事実(現在)

—ベスタのような既知の分化した小惑星の地殻はひとつ
(Magna 20~30km)

—小惑星族の中で、核やマントル、殻があるという分光での証拠はほとんど示されていない

隕石からの情報(過去)

—隕石から特定された母天体の三分の二以上は鉄隕石由来

—鉄隕石は崩壊的な衝突を通して、D20~200kmの母天体の核から出来た

なぜこのような矛盾が生じるのか？

シミュレーションで調べる

1. 衝突進化シミュレーション

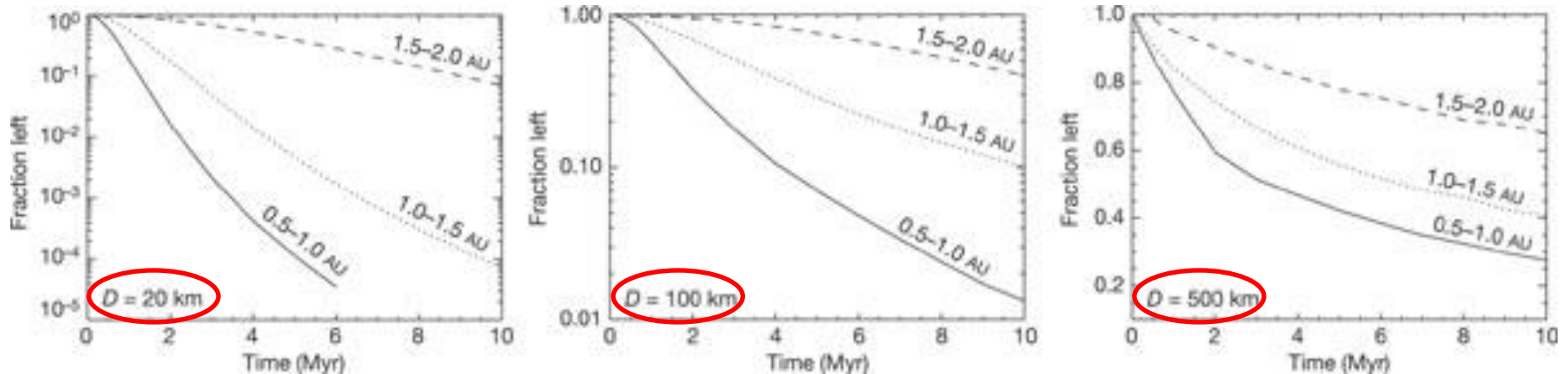
● 太陽系内側の微惑星の衝突歴史モデル

- $D=20,100,500\text{km}$ の微惑星が時間の関数で $0.5 < a < 2.0\text{AU}$ 内で無傷で生き残る割合
- 10Myrの衝突進化を計算
- 衝突頻度・衝突速度

	0.5~1.0AU	1.0~1.5AU	1.5~2.0AU
$P_i(/\text{km}^2\text{y})$	75×10^{-18}	45×10^{-18}	17×10^{-18}
$V_{\text{imp}}(\text{km/s})$	12	10	8

1. 結果

図2 10Myr の衝突進化で太陽系内側に残る微惑星



- $D=20\text{km}$ は0.5～1.5AUで早くに壊れる
- $D=100\text{km}$ 微惑星は0.5～1.5AUでメインベルトに行く可能性が高い
しかし、力学的な現象を考慮→ほとんど残らない
- $D=500\text{km}$ はほぼ残る
ただし、数がもともと少ない→1.5～2.0AUで形成されたものだけが
今日のメインベルトに存在
→ベスタの可能性も

※ 1.5～2.0AUの $D=20\text{km}$ 、 100km の微惑星は分化しないとした

-
- 0.5～1.5AUでは直径20～100kmの微惑星は数Myrで壊れる
 - このとき生じた何百万もの破片のいくつかはメインベルトへ飛ばされるはず
 - これらの微惑星が鉄隕石の起源と仮定
 - **メインベルト内での小さい無傷な分化天体の不足を説明できる**
 - このため残存しているものは無傷ではなく破片が多い

●かんらん岩や玄武岩の隕石の不足

- シミュレーションで40億年の進化中にマントルタイプ物質の仮想的な集団がどれだけ衝突やヤーコフスキー効果で失われるか計算

→かんらん岩質の隕石を補充するA型の小惑星が不足

→A型小惑星は存在するが、多くの隕石を生み出す程の数が無い

- 鉄隕石はこれに対し・・・

→宇宙線照射年代が岩石質より約一桁長い

→高い伝導性→ヤーコフスキー効果の影響が小さい

→ メインベルト内側の鉄隕石のみが40億年の間
存在することが出来た

メインベルト天体

- メインベルト(2.1~3.3AU)

始原的な氷岩石から火成岩、鉄質まで多様な小惑星が存在

- 標準モデルー原始惑星円盤で形成された小惑星が
メインベルト領域で化学変化を経験

この多様性を

1. Planetary embryos(惑星の種)の軌道進化による微惑星の軌道変化

ー地球型惑星領域で形成された分化した天体 → メインベルト

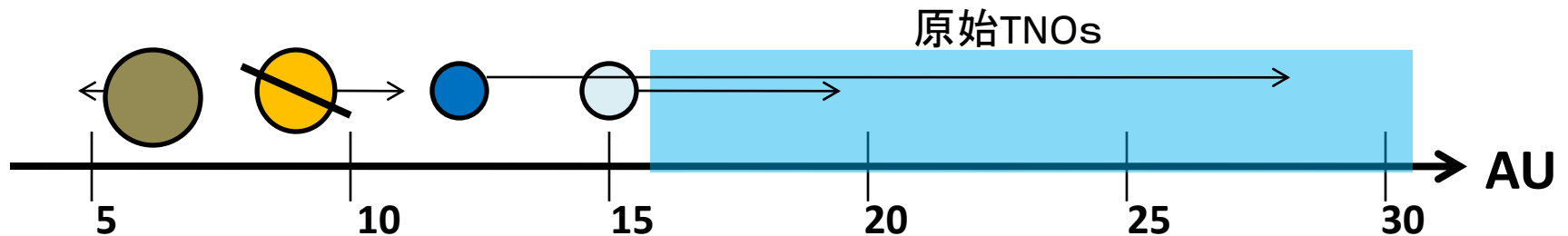
2. Niceモデルのmigrationが導く原始TNOsの軌道変化

ー原始TNOsで形成された彗星物質 → メインベルト

により説明できないか？

2. Niceモデル

惑星集積過程の最終段階での残存微惑星と大惑星との相互作用 → 大惑星の位置が移動



●土星が木と土の1:2平均運動共鳴を通過

—土星の軌道離心率が増加

—土星が海王星と接近し、海王星・天王星が太陽から遠くへ飛ばされる

—円盤を形成している彗星のような微惑星を散乱

このとき、散乱された原始TNOsの一部がメインベルトへ侵入してきた？

2. 軌道力学シミュレーション

● 目的:

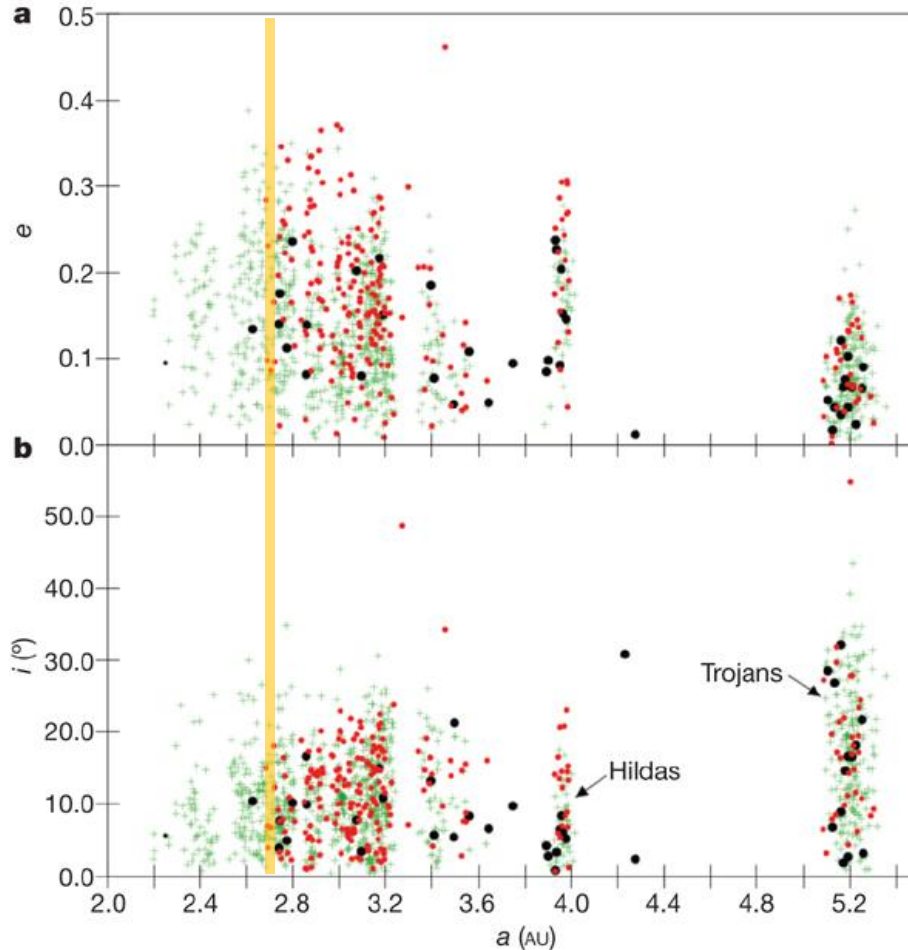
巨大惑星進化時に、彗星円盤で形成された天体が太陽系の内側に入るのかを調べる

● 内容:

- 彗星円盤中の質量0の微惑星総数3千百万個の力学進化
- 木星と土星が及ぼす影響だけを考慮
- 天体が惑星と衝突するか、もしくは日心距離15AU以上、1.5AU以下になればその天体は除外
- 10Myr計算を行った

2. 結果

図3 10Myr後の軌道要素分布



- シミュレーションで捕まえられた天体
- + 直径40km以上の小惑星 ● D型小惑星

- 多くの天体がトロヤ群、ヒルダ群、メインベルト外側(OMB)に捕えられた

- トロヤ(5.2AU) 218個
- ヒルダ(3.9AU) 196個
- OMB(2.82~3.27AU) 395個

↓
40億年間の力学進化を計算



- トロヤ → 32 個
- ヒルダ → 19 個
- OMB → 158 個

- 軌道長半径2.68AUとメインベルト内側にも彗星を捕らえた

● 捕えた天体のスペクトル

- シミュレーションで捕えられた天体と現在のメインベルト天体をスペクトルで比較
- モデルから、メインベルトに捕えられた天体の性質はトロヤ群、ヒルダ群と同じ
- トロヤ群、ヒルダ群の天体はD型やP型に分類される
→観測された暗い彗星のスペクトルと調和的

始原的な小惑星は15AUより遠くで
形成されたというNiceモデルに一致

2. CoDDEM

● 始原的な小惑星の軌道だけでなく、
数やサイズ分布を再現することも重要

— 衝突力学減少進化モデル(CoDDEM)を用いて、

1. 元々メインベルトに存在する天体(I-MB)
2. 元々メインベルト外側に存在する天体(I-OMB)
3. 捕えられたメインベルト外側の天体(C-OMB)
4. ヒルダ群
5. トロヤ群

の40億年間のサイズ頻度分布を計算

2. シミュレーション条件

●それぞれの集団の衝突頻度と衝突速度

衝突頻度(/km²yr)

Population:	1 IMB	2 I-OMB	3 C-OMB	4 Hildas	5 Trojans
1	4.9×10^{-18}	2.3×10^{-18}	2.3×10^{-18}	2.6×10^{-19}	0
2	2.3×10^{-18}	2.8×10^{-18}	2.8×10^{-18}	9.1×10^{-19}	0
3	2.3×10^{-18}	2.8×10^{-18}	2.8×10^{-18}	9.1×10^{-19}	0
4	2.6×10^{-19}	9.1×10^{-19}	9.1×10^{-19}	2.3×10^{-18}	2.4×10^{-19}
5	0	0	0	2.4×10^{-19}	3.0×10^{-18}

衝突速度(km/s)

Population:	1 IMB	2 I-OMB	3 C-OMB	4 Hildas	5 Trojans
1	5.6	5.4	5.4	5.7	—
2	5.4	5.3	5.3	4.7	—
3	5.4	5.3	5.3	4.7	—
4	5.7	4.7	4.7	3.1	4.6
5	—	—	—	4.6	5.2

●バルク密度

集団1. I-MB
2. I-OMB } 2.7g/cm³

3. C-OMB
4. ヒルダ
5. トロヤ } 1.0g/cm³

←現存するトロヤ群やカイパーベルト天体の平均密度

2. シミュレーション条件

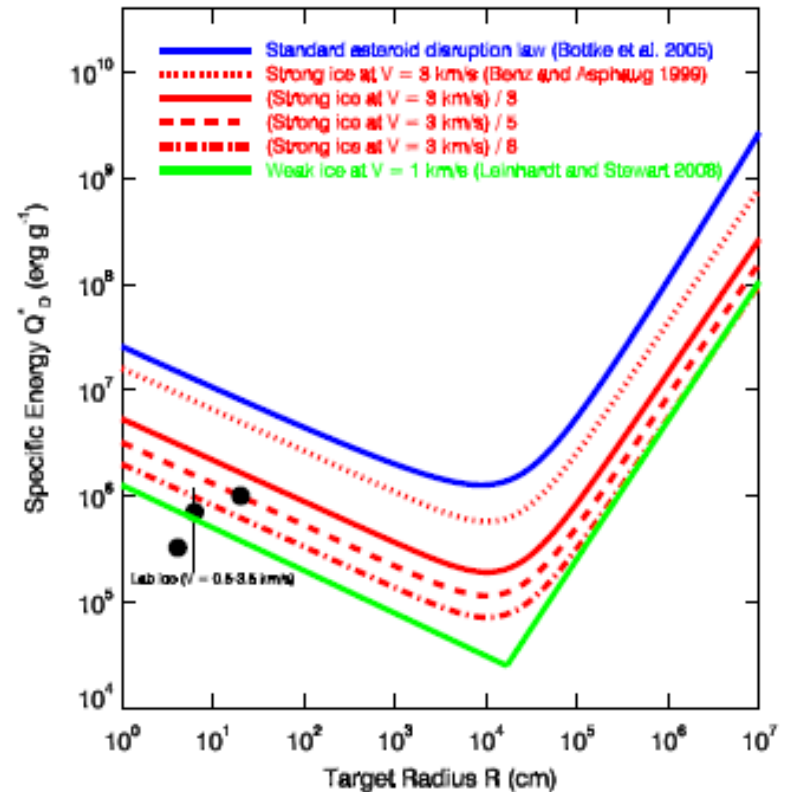
●衝突破壊スケーリング則(Q_D^*)

- 集団1.,2. → 図の青いライン
- 彗星の Q_D^* はまだよくわかっていない
→ 実験で得られた上限と下限の間で
4パターン考える
 - $f_Q=1$: strong iceの Q_D^* (dotted red)
 - $f_Q=3$: strong iceの $Q_D^*/3$ ——— (solid red)
 - $f_Q=5$: strong iceの $Q_D^*/5$ - - - - (dashed red)
 - $f_Q=8$: strong iceの $Q_D^*/8$ - . - . (dash-dot red)

●初期のサイズ頻度分布

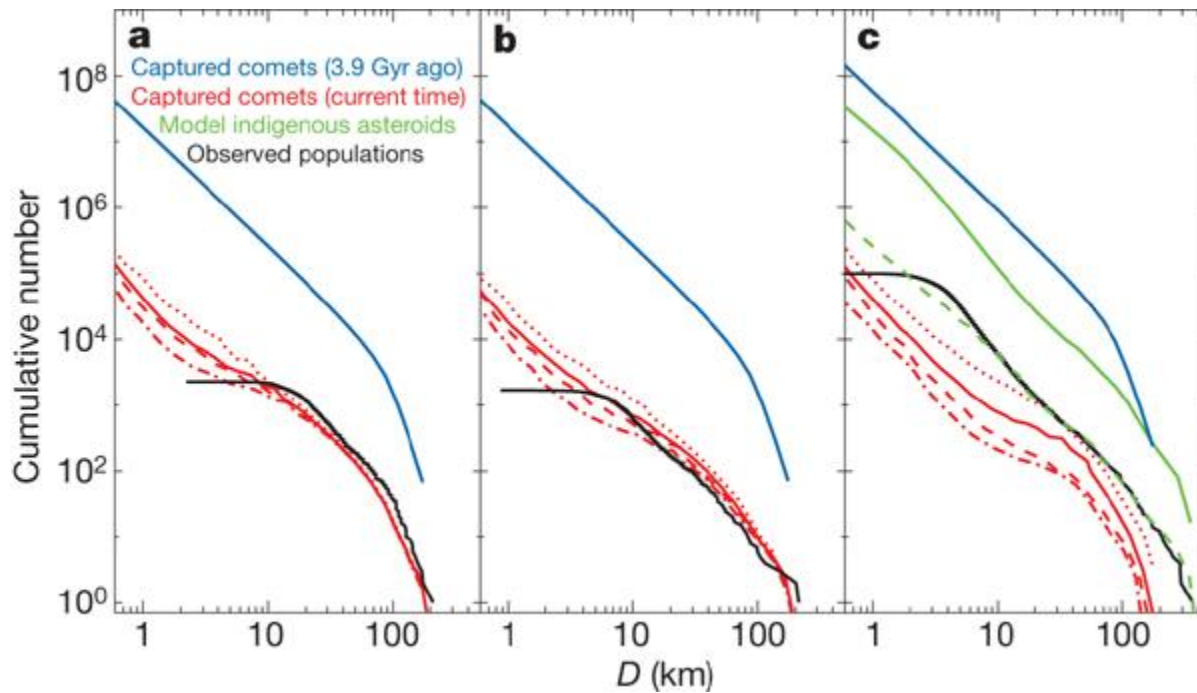
- 集団1.,2. → 現在のメインベルトと同じと仮定
- 集団3.,4.,5. → 現在のトロヤ群と同じ形をしていると仮定
(トロヤ群はあまり衝突での進化を経験していない)

図4 衝突破壊スケーリング



2. 結果

図5 シミュレーション初期と後のサイズ頻度分布
トロヤ群 ヒルダ群 OMB



ヒルダ群とトロヤ群では、モデルと観測
(図の黒線)が非常に良く一致している

-
- メインベルト外側の最終状態は Q^*_D に強く依存する

- $f_Q=1 \rightarrow$ OMBの 100%
- $f_Q=3 \rightarrow$ 48%
- $f_Q=5 \rightarrow$ 20%
- $f_Q=8 \rightarrow$ 16%

観測から求まるOMB内の
 \Leftrightarrow D/P型破片の仮定は $\sim 20\%$
($f_Q > 5$)

が彗星起源

→ 捕えられた彗星は元々存在する小惑星よりも
強度が小さくなる

2. 微小隕石(micro meteorites)

→ **メインベルト小惑星**

普通コンドライト小惑星(S-type)と炭素質コンドライト小惑星(C-type)の割合は大体同じ

→ **地球で採取される微小隕石(直径100~200 μ m)**

= 炭素質コンドライトが豊富

普通コンドライト物質と炭素質コンドライト物質の比(O/C)

$$O/C < 0.16$$

なぜ微小隕石はメインベルト小惑星の比を反映していないのか？

-
- $f_Q > 3$ のモデルでは、捕えられた彗星は小惑星よりも壊れやすく、単位質量あたり15倍ものダストを生み出す
 - 鉱物的に原始C型小惑星によって作られたものと類似

→ モデルから、微小隕石中の
炭素質コンドライトの過剰も説明できる

メインベルトの衝突シミュレーション

— $f_Q > 3$ の場合観測値 $O/C < 0.16$ が得られる

D/P型は弱い微小隕石の起源と仮定

一 捕えられた彗星の大部分はOMBに存在

→放射圧に影響を受けやすい微小天体のみ地球に運ばれる

一 彗星の弱い性質

→地球の大気を通過したり、地球表面に長時間存在すると
破片が生き残りにくい

→衝突過程で隕石程度の大きさを保てない



隕石と微小隕石の組成が違うという
事実も説明可能

まとめ

- メインベルト天体の多様性を外部から侵入した天体によるものと予想し、
軌道進化シミュレーションを行った
 - 鉄隕石母天体は地球型惑星領域起源
 - D/P型小惑星は原始TNOs起源である可能性を示す結果が得られた