

THE VELOCITY-SIZE RELATIONSHIP FOR MEMBERS OF ASTEROID FAMILIES AND IMPLICATIONS FOR THE PHYSICS OF CATASTROPHIC COLLISIONS

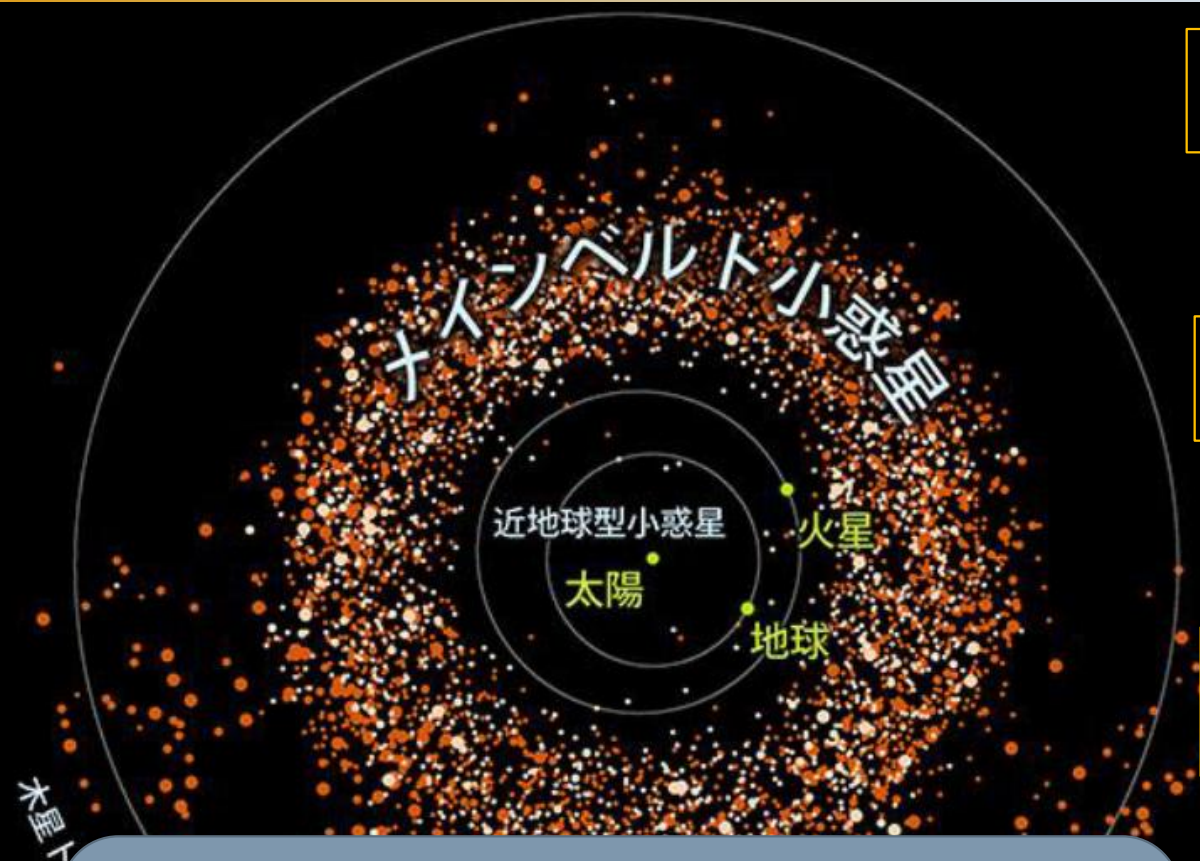
A. CELLINO, P. MICHEL, P. TANGA, V. ZAPPALA, P. PAOLICCHI AND A. DELL'ORO

ICARUS, 141, 79-95, 1999.

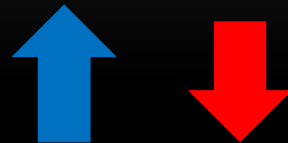
第3回衝突研究会TVセミナー

2012/7/05

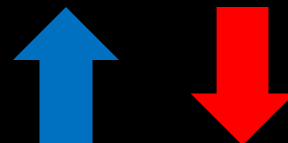
担当：三嶋慎平（東大柏）



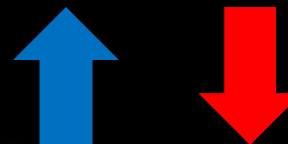
メインベルトにおける小惑星の形成と軌道進化



共鳴領域への小惑星の投入



メインベルトからの小惑星の放出と近地球領域への輸送



近地球型小惑星(NEA)の形成

NEAの形成過程を明らかにするにはメインベルトにおいて小惑星が形成したときの状況(=小惑星のサイズと放出速度の関係)を知ることが必要

- メインベルトにおける小惑星は母天体の**破壊的衝突(catastrophic collisions)**により形成
⇒この衝突イベントの物理を知ることが重要

※**破壊的衝突**...カタストロフィック破壊が起こる衝突現象。カタストロフィック破壊とは、天体衝突時の衝撃波が物体表面で反射してできる希薄波と干渉し、自由表面で現れた張力が引っ張り強度を超えた時にターゲット天体全体が破壊されること。

➤ いくつかのアプローチ

- ①半経験的モデル(e.g., Paolicchi *et al.* 1996)
- ②ハイドロコード(e.g., Ryan *et al.* 1990)
- ③室内衝突実験(e.g., Fujiwara *et al.* 1989)

} 衝突実験の結果の再現を目的

- 衝突実験と実際の小惑星形成過程ではターゲットとプロジェクタイトの大きさが著しく異なる
 - ⇒ スケーリングの問題
 - 実験データからスケーリング則により予想される速度よりも実際の小惑星の速度が著しく大きい
 - サイズが大きいと重力効果が効いてくる

小惑星形成時のサイズ - 速度関係を議論するには実際の観測データに基づく必要あり

手法と目的

- ①メインベルト小惑星の重要な族におけるサイズと放出速度分布をプロットし，エネルギー分配の仮定から導いた解析的な解と比較
 - Zappala *et al.* (1995)による統計的に信頼できる族のデータを使用
- ②先行研究の衝突実験結果を①の解析解と比較
 - Nakamura and Fujiwara (1991)とGiblin *et al.* (1994)のデータを使用
- ③半経験的モデルによる計算結果を①の解析解と比較
 - Paolicchi *et al.* (1996)と同じパラメータセットを使用して計算



実際の観測データからメインベルトの族内小惑星におけるサイズ - 速度関係を調べ，これまでの実験とモデルの妥当性と問題点を検証する

this research

小惑星の共鳴軌道への投入率を見積もり，NEAの形成と軌道進化に対するメインベルト小惑星の寄与を明らかにする

future works
and goal

天体サイズ

- 小惑星のサイズ

- 絶対等級 H とアルベドから求める

$$\log D \text{ (km)} = 3.13 - 0.5 \log A - 0.2H$$

- アルベドの値はIRAS Minor Planet Survey(IMPS)のデータ

- 母天体のサイズ

- 母天体の直径 \approx 族内の最大の小惑星と三番目に大きな小惑星の直径の和

(Tanga *et al.* 1999)

放出速度

- 公転する天体が突然速度変化を被った時の軌道要素の変化を表す式(ガウスの式)

$$\begin{cases} \delta a/a = \frac{2}{na} V_T \\ \delta e = \frac{1}{na} [2(\cos f)V_T + (\sin f)V_R] \\ \delta I = \frac{1}{na} \cos(\omega + f)V_W. \end{cases}$$

$$V_T = \frac{na}{2} \frac{\delta a}{a}$$

- a(軌道長半径)のみに依存
⇒より不安定なe(離心率)や
i(軌道傾斜角)に依存しないため
正確

$$\Delta V = (V_T, V_R, V_W)$$



放出速度

$$V_T = (na/2)(\delta a/a)$$

平均運動

半径方向に垂直な速度成分

母天体の軌道長半径

• 速度は等方的と仮定

$$\langle V_T^2 \rangle = \langle V_R^2 \rangle = \langle V_W^2 \rangle = \frac{\langle V^2 \rangle}{3}$$

$$V_\infty = \sqrt{3} V_T$$

$$V_{ej} = \sqrt{V_\infty^2 + V_{esc}^2}$$

衝突時における破片(=小惑星)の母天体に対する相対的な速度

$$V_{esc} = V_{esc0} \left(1 - \frac{d}{R} \right)$$

$$V_{esc0} = \sqrt{8/3\pi G\rho R}$$

サイズ - 速度関係の仮定

- カタストロフィック破壊により，衝突エネルギーの一部が散逸し，さらに各破片にAの割合で分配されて運動エネルギーとなる

$$\frac{1}{2} m_i V_i^2 = A_i f_{KE} E$$

小惑星の質量

全衝突エネルギー

小惑星の放出速度

非弾性パラメータ



エネルギー等分配 (A=一定)を仮定し，母天体質量Mで割る

$$\frac{1}{2} \frac{m}{M} V^2 = A f_{KE} \frac{E}{M}$$

サイズ - 速度関係の仮定

$$\frac{m}{M} = 2Af_{KE} \frac{E}{M} V^{-2}$$

母天体の質量

specific impact energy

$$m \propto d^3$$

$$\left(\frac{d}{D}\right)^3 = 2Af_{KE} \frac{E}{M} V^{-2}$$

$$K = 2Af_{KE} \frac{E}{M}$$

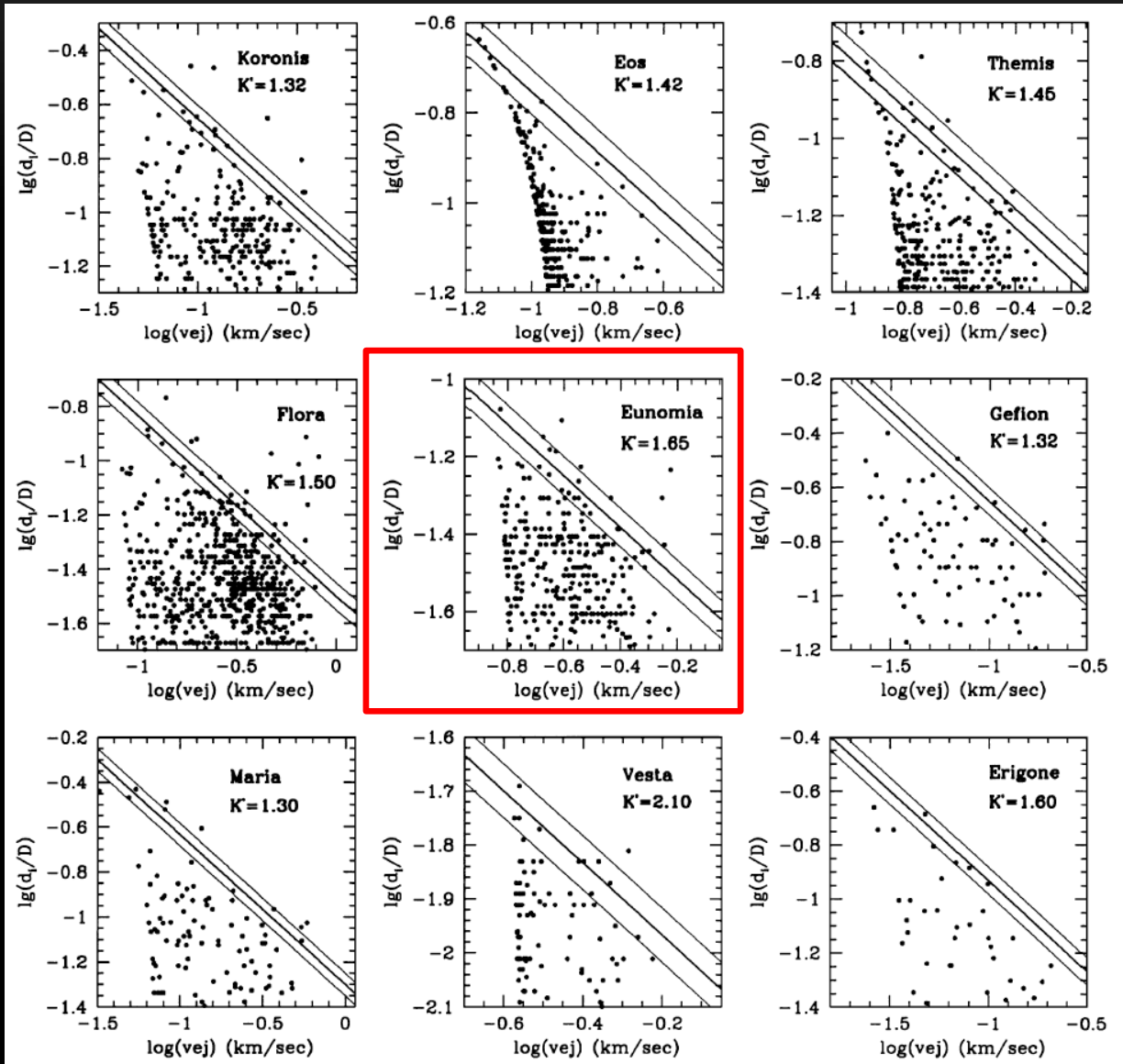
$$K' = -\frac{1}{3} \log K$$

$$\log\left(\frac{d}{D}\right) = -\frac{2}{3} \log V - K'$$

エネルギー等分配が成り立つと仮定したときのサイズ - 速度関係から衝突を記述する特徴的なパラメータを制約する

分析結果

$$\log\left(\frac{d}{D}\right) = -\frac{2}{3}\log V - K'$$



データ点は三角形の領域内にほぼ収まる

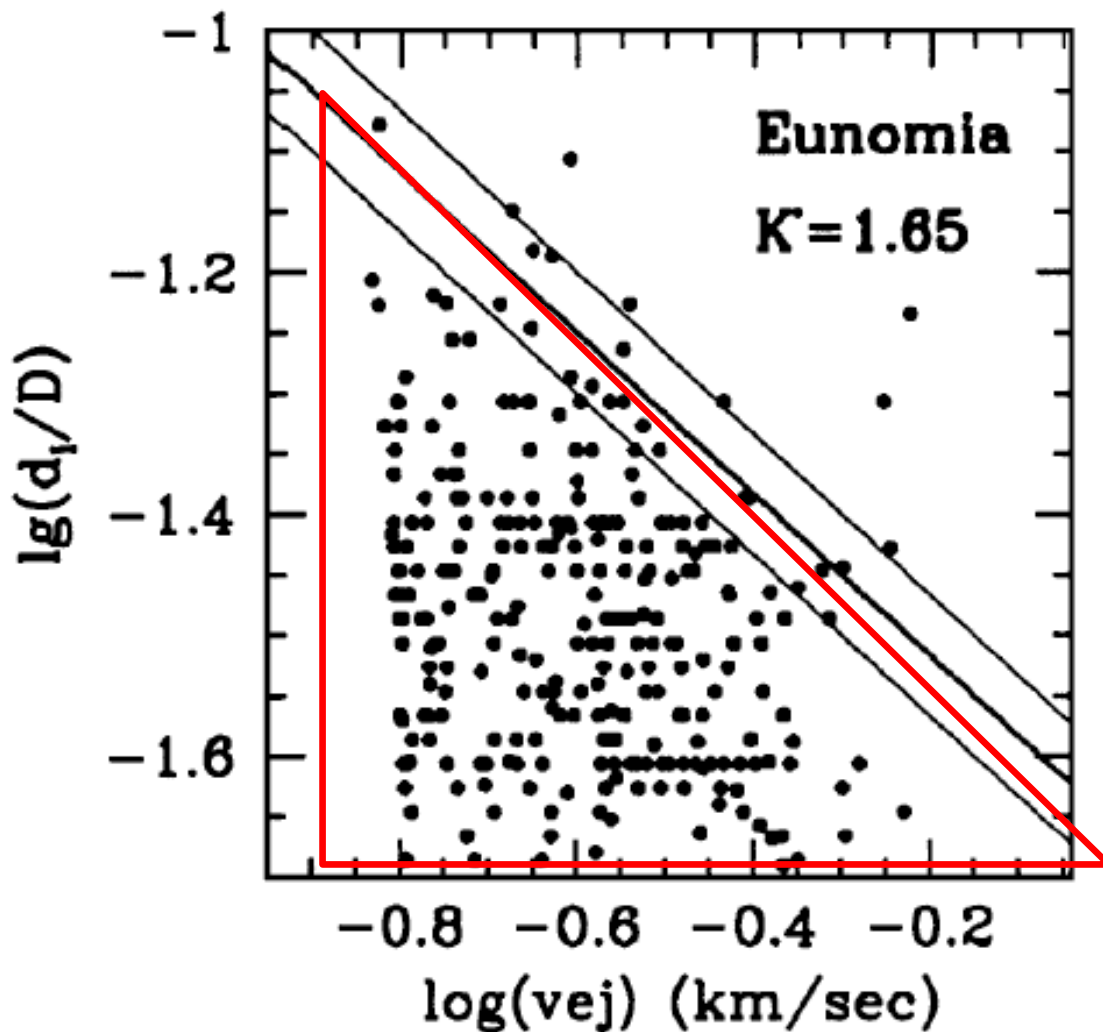
外側領域は傾き-2/3の直線でフィットできる

なぜデータ点がばらつく？

- 速度の射影の問題(V_T のみ用いたため)
- エネルギー等分配が成り立っていないため

分析結果

$$\log\left(\frac{d}{D}\right) = -\frac{2}{3}\log V - K'$$



データ点は三角形の領域内にほぼ収まる

外側領域は傾き-2/3の直線でフィットできる

なぜデータ点がばらつく？

- 速度の射影の問題(V_T のみ用いたため)
- エネルギー等分配が成り立っていないため

分析結果

① 三角形の領域に入りきらない異常に大きな放出速度を持つ小惑星の存在

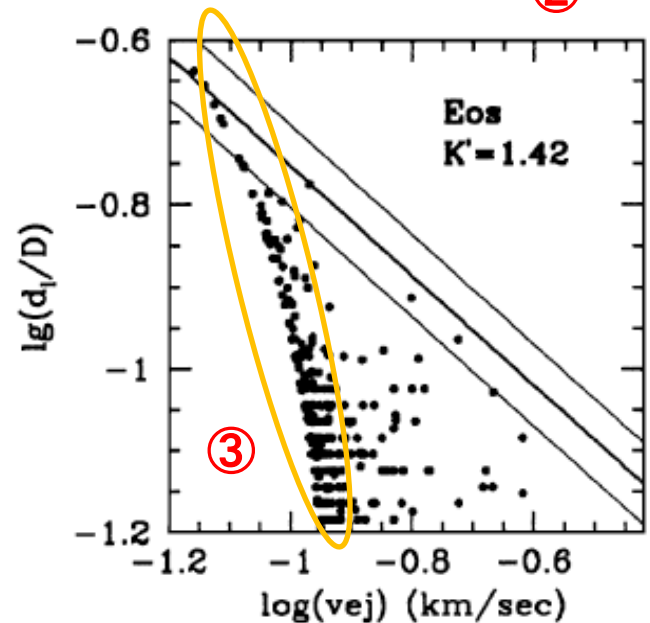
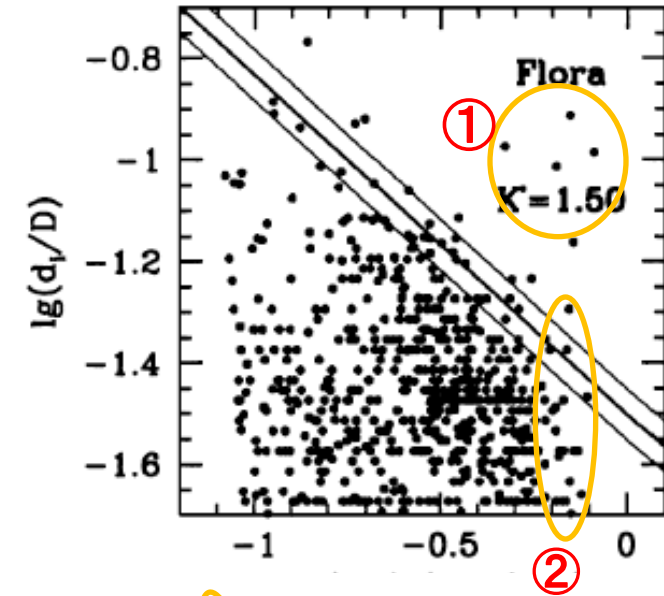
- 正規の族構成小惑星ではない(偶然侵入した)
- 再集積した可能性も

② 三角形領域の右側頭端が切れている

- 小さな小惑星データの不足

③ 三角形領域の左側が内側にカーブ

- 脱出速度の粗い見積もりのため



衝突レジーム変化の推定

- K' と、largest remnantと母天体の質量比($f_1 \equiv m_{\text{LR}}/M$)の関係を調べる

$$f_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{SM}{\rho E/2} \right)^b$$

変形



$$\frac{E}{M} = \frac{2^{1-1/b} S}{\rho} \frac{1}{f_1^{1/b}}$$

- 室内実験から
- S は衝突強度

$$K = 2A f_{\text{KE}} \frac{E}{M}$$

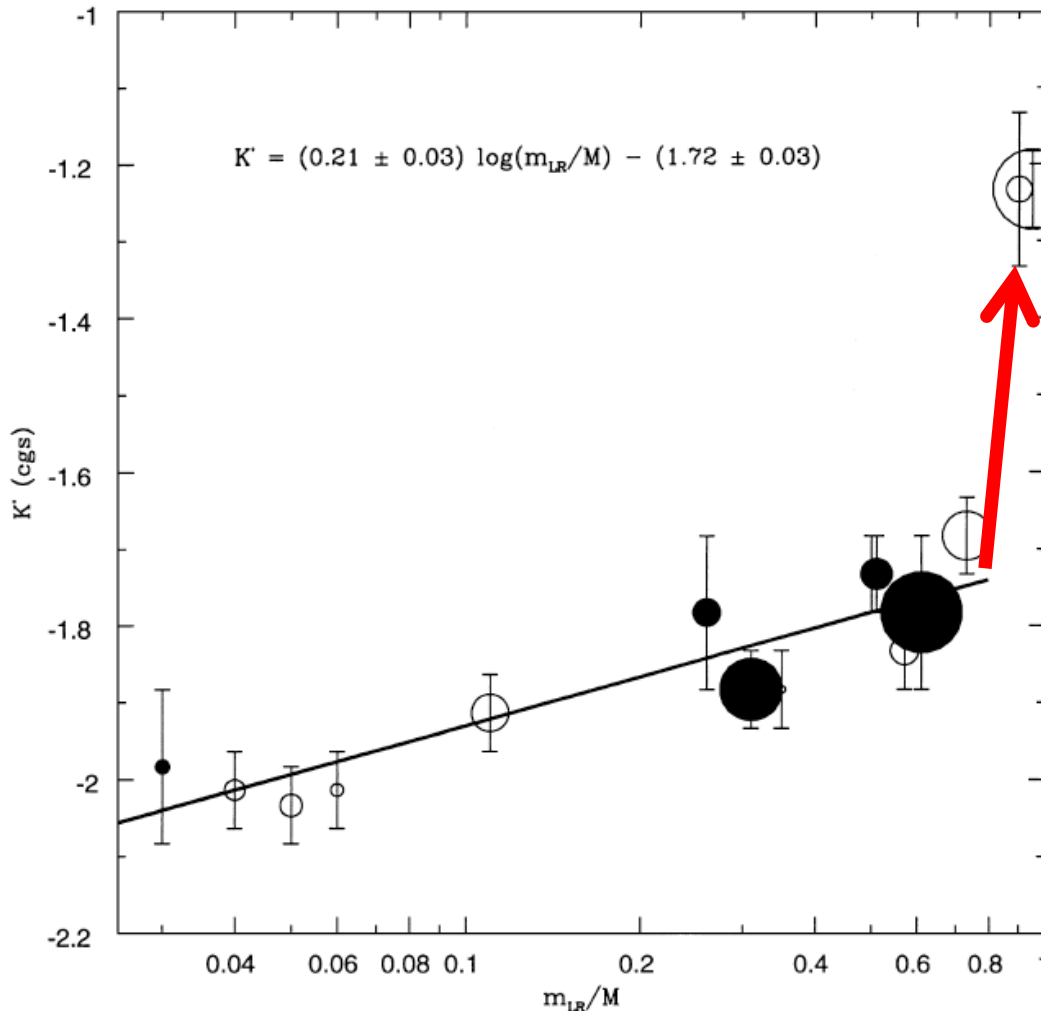
に代入

$$K' = -\frac{1}{3} \log C + \frac{1}{3b} \log \left(\frac{m_{\text{LR}}}{M} \right)$$

$$C = \frac{2^{2-1/b}}{\rho} S A f_{\text{KE}}$$

分析結果

$$K' = (0.21 \pm 0.03) \log(m_{LR}/M) - (1.72 \pm 0.03)$$



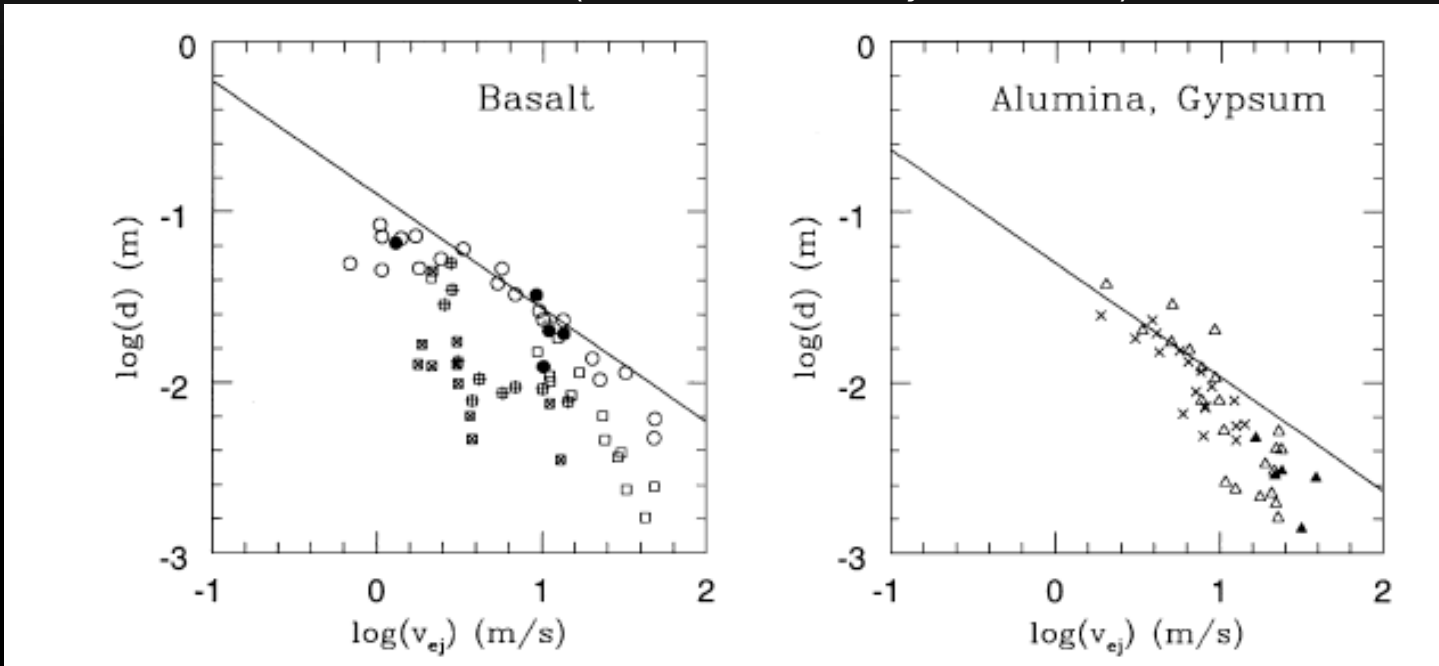
$1/3 \log C$

$$C = \frac{2^{2-1/b}}{\rho} S A f_{KE}$$

Aが 10^{-2} のオーダー(準等分配)ならばSは 10^8 程度
 \Rightarrow 非合理的でない

m_{LR}/M がクリティカルなパラメータ
 \Rightarrow 衝突レジームが $m_{LR}/M=0.8$ 付近で変化?

- よく引用されるデータ(Nakamura and Fujiwara 1991)



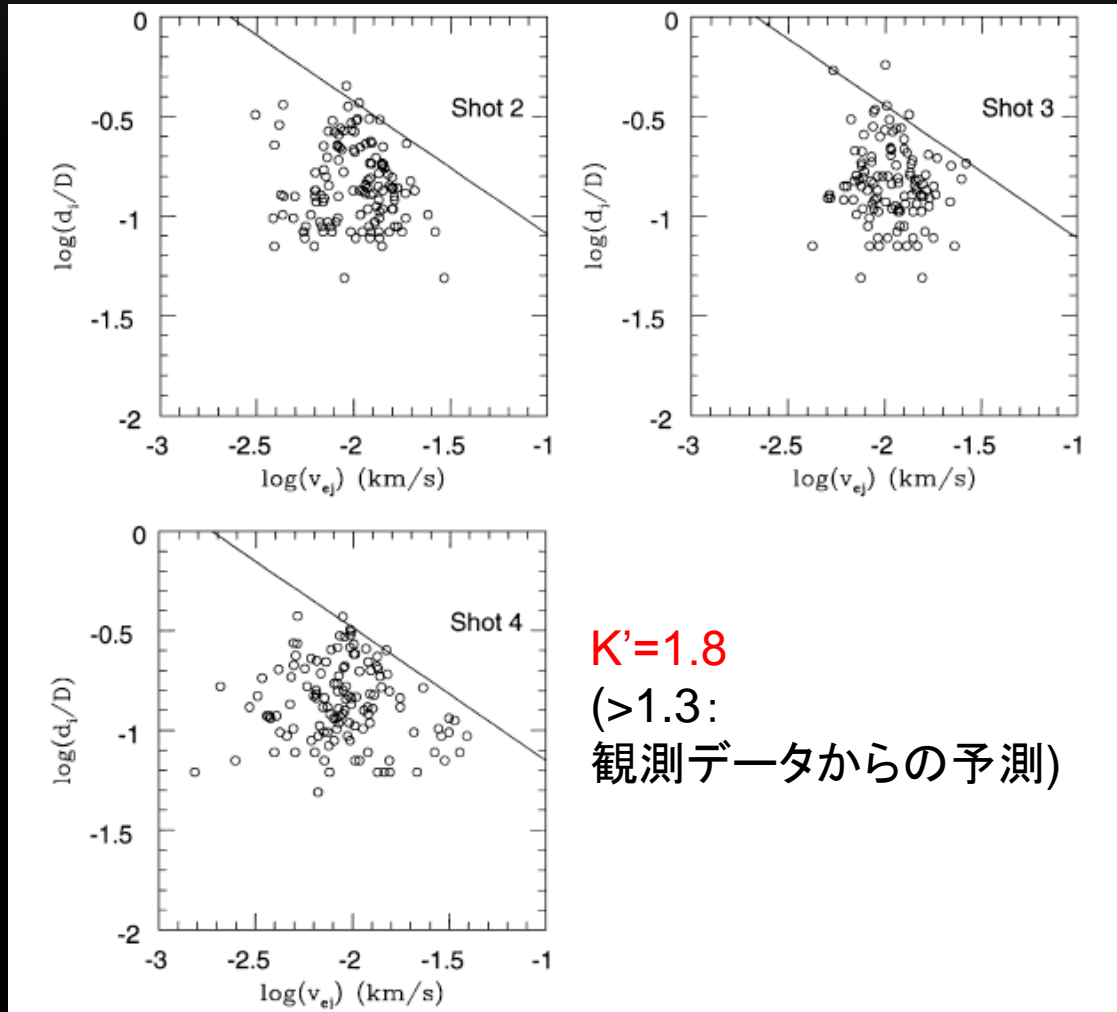
直線の傾きは-2/3
⇒観測データの分析結果と同じ

K 値は得られない
⇒母天体質量で規格化していないから

衝突実験

実験データの評価

- 母天体質量で規格化されたデータ (Giblin *et al.* 1994)



$K'=1.8$
(>1.3 :
観測データからの予測)

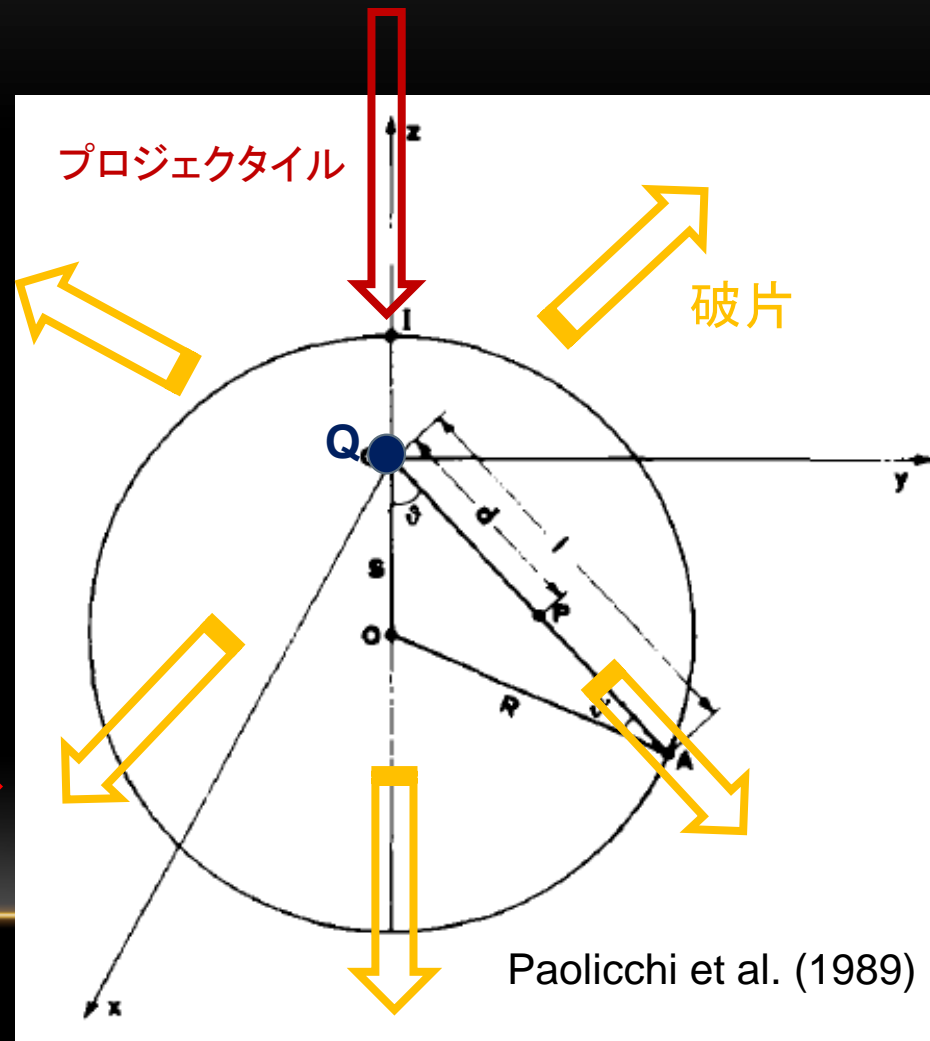
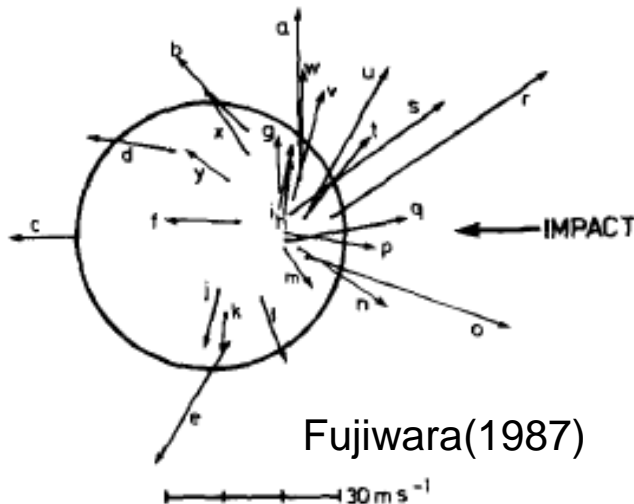
直線の傾きは観測データの分析と同じ $-2/3$

観測データから予測される m_{LR}/M に対する K' 値と比べてかなり大きい

半経験的モデル

モデルの概要

- 実験より衝突点とターゲットの中心点を結んだ直線状のある点Qから放射状に破片が飛び散るとする
- ターゲットの重心に対する相対速度 $V(r)$ はターゲットの自転速度による項と衝突による破片の放射的な速度項の和



半経験的モデル

モデルの概要

$$\mathbf{V}(r) = \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_B$$

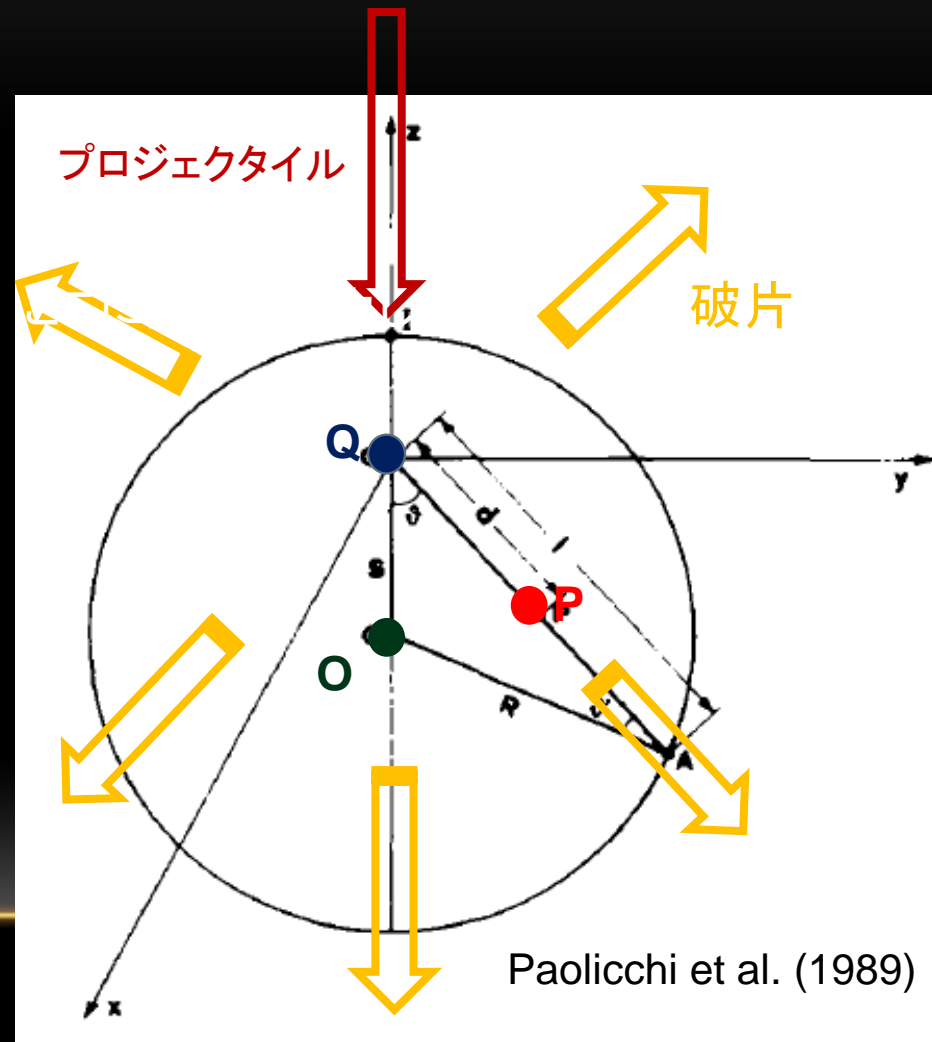
QP方向の単位ベクトル

$$= \omega_0 \times \mathbf{OP} + \alpha l^{-\gamma} (d/l)^\delta \mathbf{QP}$$

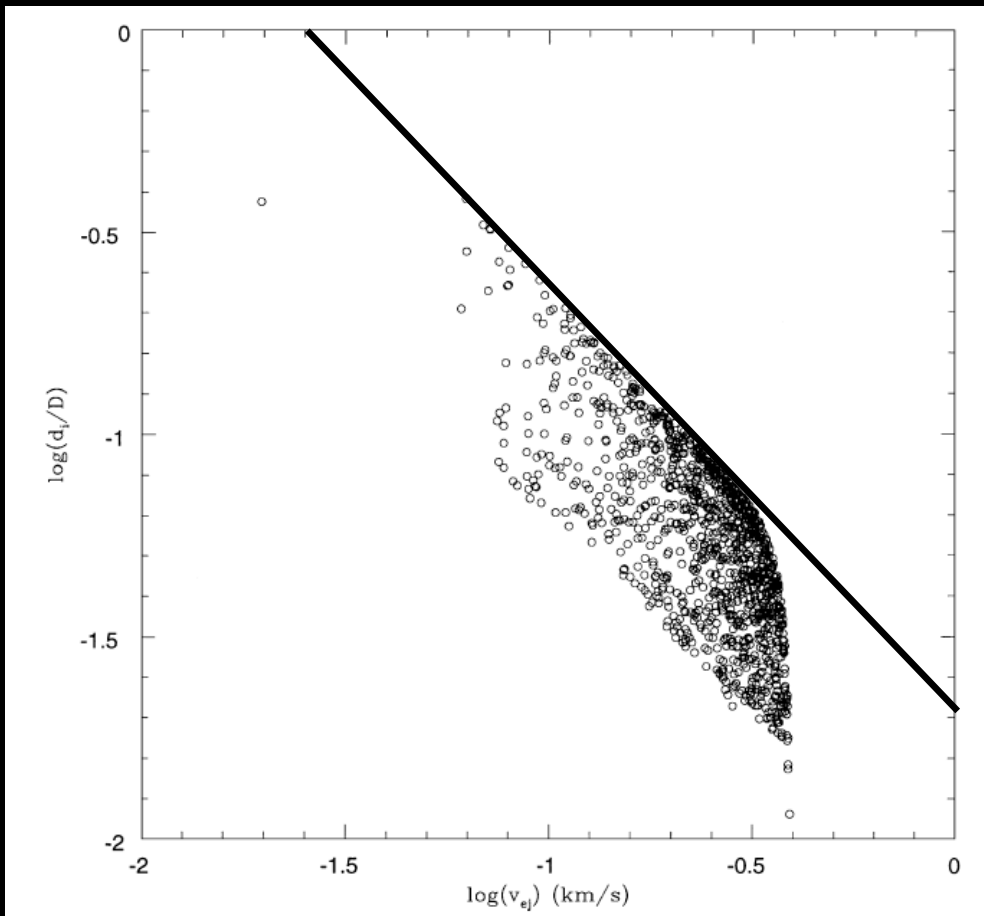
QA間の距離

QP間の距離

ターゲットの衝突前の回転速度ベクトル



- 半経験的モデル(SEM)によるシミュレーション
- Paolicchi et al. (1996) で使われたパラメータを使用



直線の傾きは-2/3
より-1に近い

結論と問題点

結論

- メインベルト小惑星の族内の小惑星のサイズ - 速度関係に物理的解釈を与えた。その結果、Wiesel(1978)の主張したような単純なエネルギー等分配原理では説明できないことが分かった。
 - ⇒ 準等分配である可能性が高い
- 本研究で用いた放出速度ベクトルの見積もり手法を小惑星の衝突進化の数値モデルに組み込めば、メインベルトにおける衝突イベントがNEAの形成にどれだけ寄与したかを定量的に評価できる。

問題点

- 衝突現象の物理的理解が不十分
 - C値が多く族間でほぼ一定であることなど
 - 本研究で示したサイズ - 速度関係がどのサイズまで成り立つか不明
 - 小さな小惑星の速度分布が不明なため
 - 小直径へ外挿すると速度が不自然に大きくなってしまう
 - 1km以下の小惑星は衝突進化により族間で混合している可能性