

2014年度後期 第1回衝突勉強会

テーマ：観測に基づく推定

# Craters on asteroids

Reconciling diverse impact records with a  
common impacting population

David P.O'Brien , Richard Greenberg , James E.Richardson  
Icarus 183 (2006) 79-92

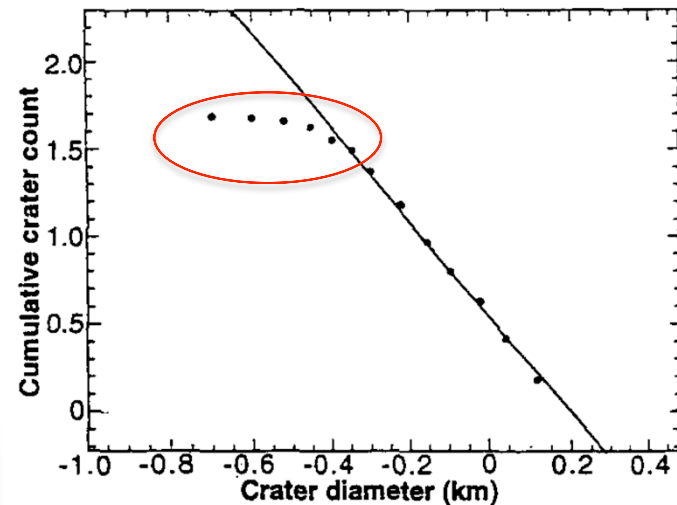
神戸大学 理学研究科

M1 松榮 一真

# Introduction

- ◇ 小惑星帯での衝突速度は $\sim 5\text{km/s}$  (Opik 1951, Piotrowski 1952)
  - カタストロフィック破壊(エネルギー大)・クレーター形成(エネルギー小)
  - クレーター形成の方が多く、小惑星上のクレーターの記録は小惑星のサイズ分布を推測するのに用いられる
  - **クレーター消失過程**を考慮する必要がある
- ◇ ガリレオ探査機によって小惑星GaspraとIda上のクレーター分布を調べた(Greenberg 1994,1996)
  - クレーターサイズ分布と衝突体のサイズ分布が類似
  - 衝突体サイズ分布  $\rightarrow$   $\sim 100\text{m}$ のべき:  $-2.95$ ,  $100\text{--}6\text{m}$ のべき:  $-4$  (Van Houten et al.1970)
  - Gaspra,Idaの小さなクレーターの数が少ない

100m以下の衝突体のサイズ分布の傾きが大きいこと、Gaspra,Ida上の小さなクレーターが少ないこととの関係を説明する必要がある



Gaspraのクレーターサイズ分布 (Belton et al.1992)

# Introduction

- ◇ 詳細なクレーター記録がわかっている小惑星 : Gaspra, Ida, Mathilde, Eros
  - 小惑星サイズ・形状とNEA・小惑星帯のサイズ分布への理解が広がった
  - 小惑星のサイズ分布は、**collisional**と**dynamical effect**により変化

collisional : クレーター形成orカタストロフィック破壊により小さな破片が形成  
dynamical : Yarkovsky効果と軌道共鳴によりNEAへ移動しNEA天体上にクレーター形成

- ◇ 小惑星帯とNEA分布のcollisional,dynamicalによる変化を数値計算 (O'Brien and Greenberg 2005)
  1. 小惑星帯の観測可能な天体のサイズ分布
  2. NEAの観測可能な天体のサイズ分布
  3. 隕石の宇宙線照射年代によるm-サイズの天体の寿命
  4. 200km以上の母天体から形成された小惑星群の数
  5. Vesta上の玄武岩質地殻と巨大衝突盆地

## <目的>

Gaspra, Ida, Mathilde, Erosの観測されたクレーター記録とモデルの結果を比較すること

→モデルを**クレーター形成**・**消去過程**を考慮し再構築

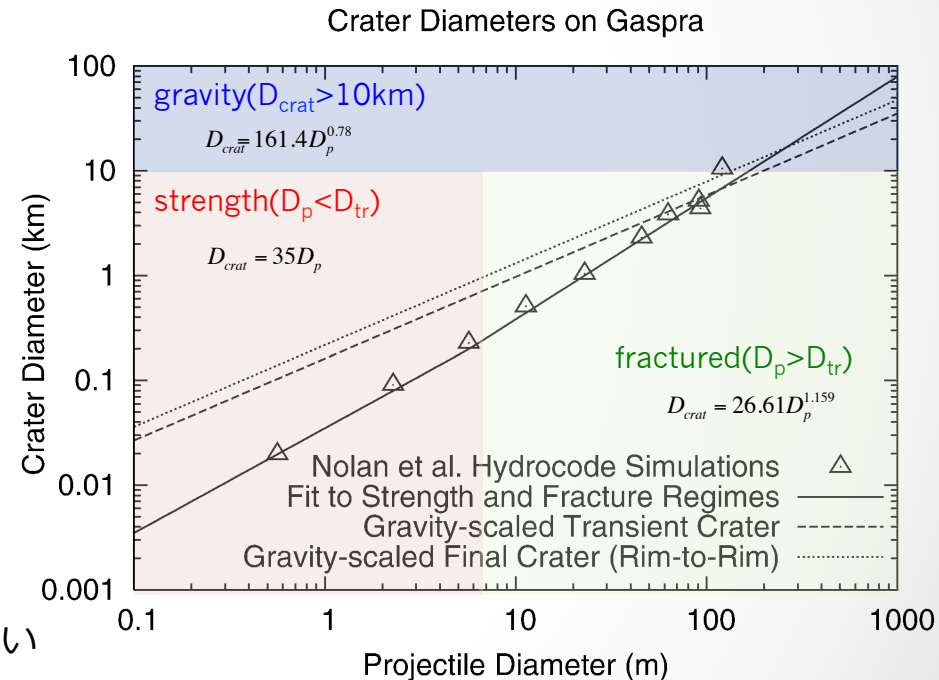
# Crater production~simulations~

- ◇ Gaspraサイズの球天体に対し、衝突体とクレーターサイズの関係进行計算(Nolan et al.1996)
  - 衝撃波・掘削流によって強度が0になる領域がトランジェントクレーター直径 $D_{tr}$ に等しい
  - strength, fractured regimeでは重力崩壊がないため $D_{tr}$ は最終クレーター直径と同じ
  - gravity regimeではリム直径は $D_{tr}$ より25%大きい(Melosh 1989)

- ◇ Asphaug et al.1996
  - Idaで同様のシミュレーション
  - Weibull flaw distributionを一定

- ◇ Greenberg et al.1996
  - Idaでの計算結果をNolan et alに適応
  - strength, fractured regimeで正しくないかもしれない

- ◇ Asphaug et al.2000
  - Mathilde,Erosで数值計算
  - クレーターと弾丸サイズの関係进行推定していない



Gaspraへの計算結果(Nolan et al.1996)の結果を、他のS-type小惑星 (Ida,Eros)・クレーター分布がわかっているC-type小惑星(Mathilde)に適応する

# Crater production~scaling~

◇ Holsapple and Schmidt(1982)に基づいた $\pi$ -scalingをIda,Erosに適応

規格化直径

$$\pi_D = D_{at} \left( \frac{\rho_t}{m_p} \right)^{1/3}$$

重力支配域

$$\pi_D = C_D \pi_2^{-\beta}$$

強度支配域

$$\pi_D = C'_D \pi_3^{-\sigma}$$

規格化重力

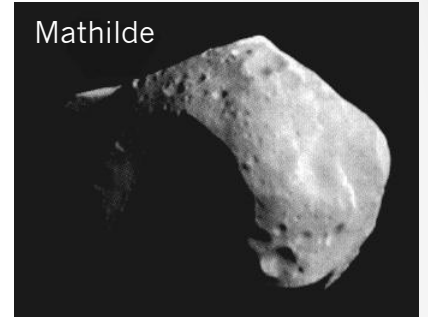
$$\pi_2 = \frac{1.61gD_p}{v_i^2}$$

規格化強度

$$\pi_3 = \frac{Y}{\rho_p v_i^2}$$

$D_{at}$ : トランジェントクレーター直径  
 $\rho_p, \rho_t$ : 弾丸・標的密度  
 $m_p$ : 弾丸質量  $g$ : 重力加速度  
 $Y$ : 標的物質強度  $v_i$ : 衝突速度  
 $D_p$ : 弾丸直径

Mathilde



◇ C-type小惑星Mathilde

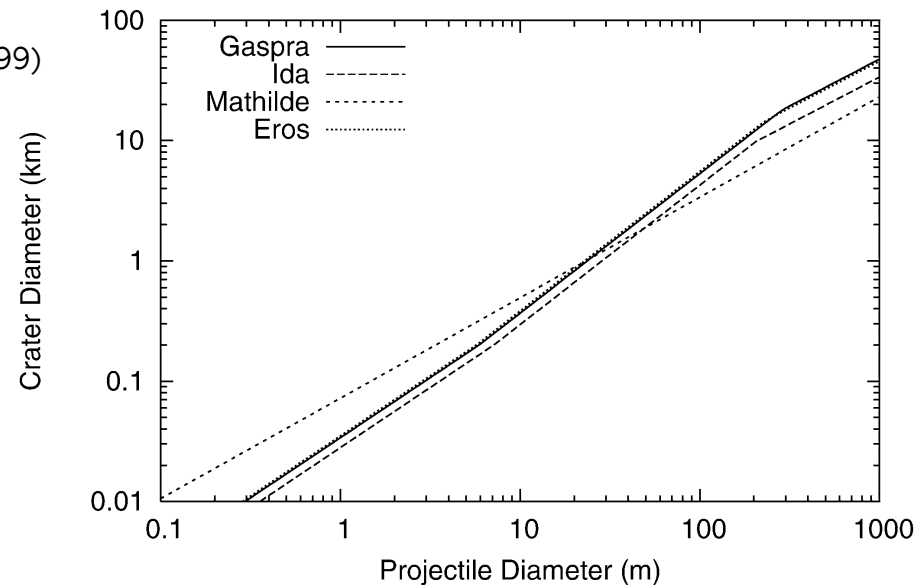
- 密度がS-typeの半分程度→内部空隙の存在
- Mathildeの半径程度を直径とする巨大クレーターの存在
- 衝撃波が減衰し破壊された領域が小さい

(Chapman et al.1999)

◇ シミュレーション結果(右図)

- GaspraとErosはほぼ同じ関係
- Idaはクレーターが少し小さい
- Mathildeのみ傾向が異なる

Crater Diameters on Different Asteroids



# Crater production~Impacting population~

◇ 全ての小惑星について共通の衝突体のサイズ分布を仮定

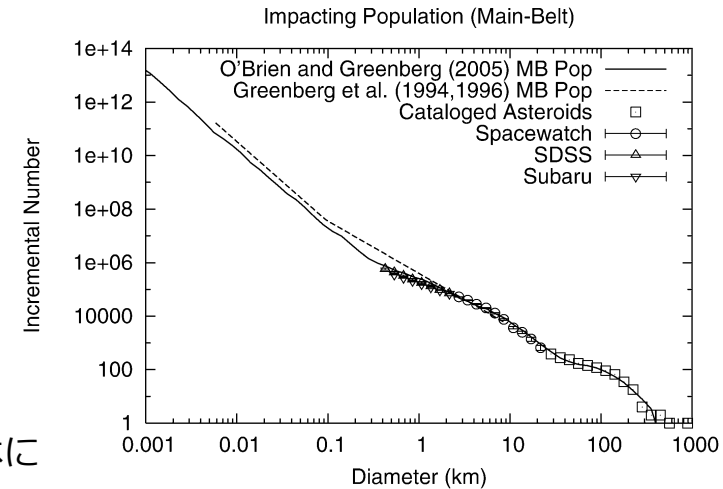
- O'Brien and Greenberg 2005を用いる

◇ NEA, MBAの衝突現象

例) Eros (NEA)

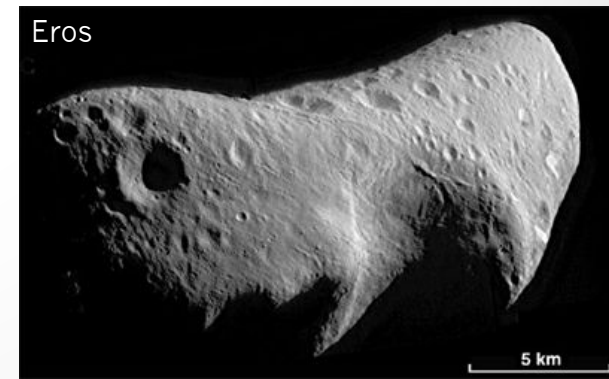
- クレーター分布がMBAsの衝突分布を反映
- NEAへは小惑星帯から離れた天体が衝突し、小惑星帯の天体に

比べ~1000倍も衝突する可能性が小さい (Rabinowitz et al. 2000, Jedicke and Metcalfe, 1998)



◇ 小惑星帯からやってきたNEAsの平均寿命を計算 (Bottke et al. 2000, 2002)

- 地球型惑星や太陽に衝突・太陽系から放出されるまで6.5 Myr
- Eros軌道周りの天体の数から、Erosは安定軌道であることがわかり50 Myr
- NEAに50 Myr存在することは小惑星帯に1 Myr存在することと同等
- NEAに多数のクレーターが存在することはMBAによる衝突で形成



# Crater erasure mechanisms

◇ クレーターを消す過程 (Greenberg,1994,1996, Richardson et al.2004)

## 1. Global seismic jolting

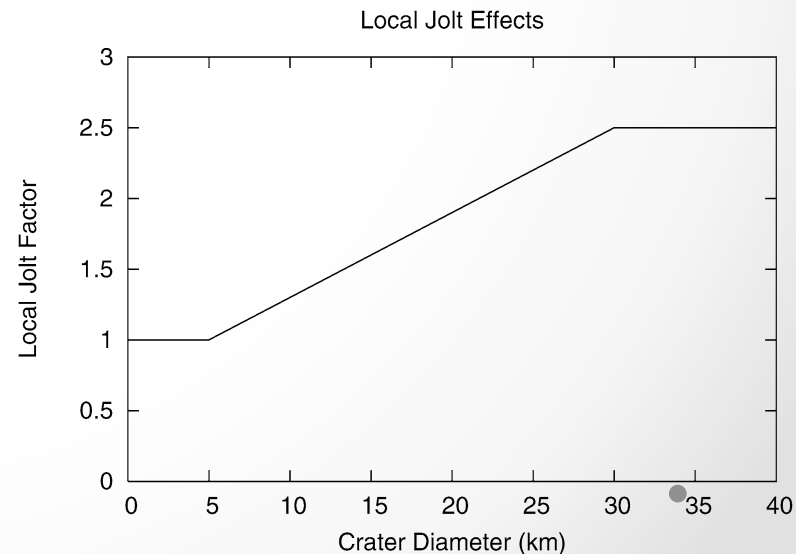
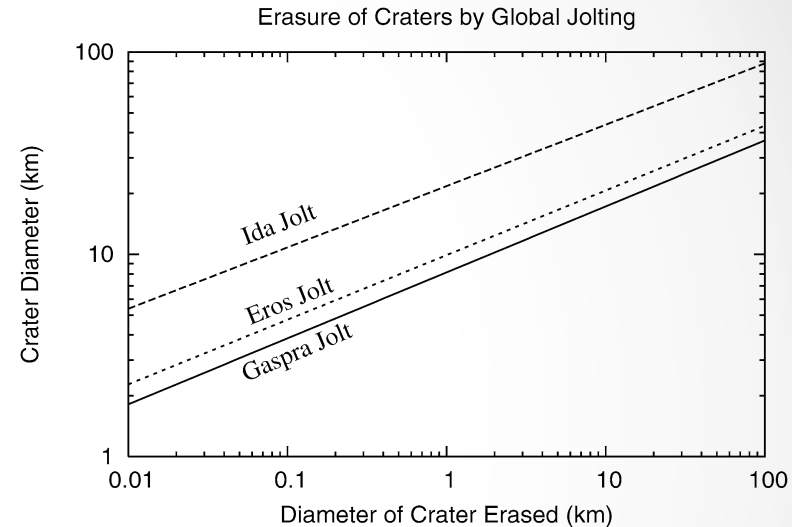
巨大衝突が生じたとき、衝撃波が伝播し全球を振動させあるサイズより小さなクレーターを全て消す過程

- Gaspra, Ida (Greenberg 1994, 1996)
- ErosはGaspraよりサイズが40%大きいこと以外は同じとして計算
- Mathildeでは生じない現象

## 2. Local seismic jolting

大きな衝突が生じたとき、衝撃波が伝播し局所的にjoltが生じてある範囲内に存在するクレーターがサイズに関係なく消える過程

- Gaspra, Ida, Eros同様の傾向
- Mathildeでは生じない現象



# Crater erasure mechanisms

◇ クレーターを消す過程 (Greenberg,1994,1996, Richardson et al.2004)

## 3. Cumulative effects of seismic shaking (Richardson et al.2004)

比較的小さな衝突によるjoltが複数回生じることでレゴリス層が崩れクレーターを消す

➤ Erosでのseismic shakingをモデル化した

## 4. Superposition of craters

クレーターが平衡状態となり、形成と消失の割合が一定となりサイズ分布が一定(Melosh 1989)

◇ Greenberg 1994,1996によって平衡状態を2つに分類

1) Sandblasting : 大きいクレーターを小さいクレーターで消失

2) Cookie-cutter : 小さなクレーターを大きなクレーターで消失



# Combining production and erasure

- ◇ 全ての小惑星の地表面が、クレーターの平衡状態に達するほど十分に古いわけではない
  - 巨大衝突によるjoltが生じ小さなクレーターが消されるため

- ◇ クレーター形成と消失過程の関係

## クレーター形成

衝突頻度  $f(D_p)$

$$f(D_p) = P_i r_t^2 N_p(D_p)$$

$D_p$ : 弾丸サイズ  $P_i$ : 衝突確率  
 $N_p$ : 天体数  
 $r_t$ : 標的天体の平均半径

時間  $t_{exp}$

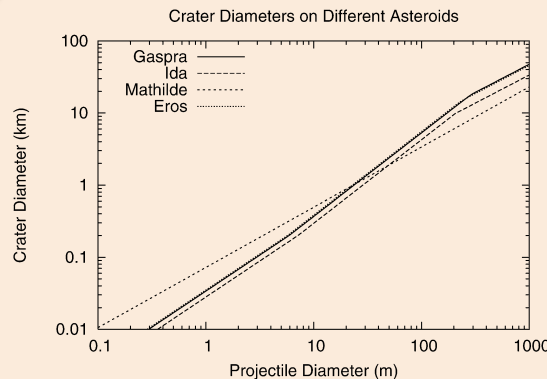
衝突数

$$f(D_p) t_{exp}$$

※

$D_{crat}$  のクレーターを形成した衝突数

$$N_{crat}(D_{crat})$$



※衝突体 ( $D_p$ ) で形成されるクレーター ( $D_{crat}$ ) の関係を適応

## クレーター消失

Global jolt

Cumulative seismic shaking

※Erosのみ適応

superposition local jolt

※巨大クレーターのみ適応

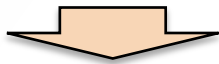


クレーター形成とクレーター消失過程を考慮して、クレーターのサイズ分布を数値計算

# Result~Gaspra~



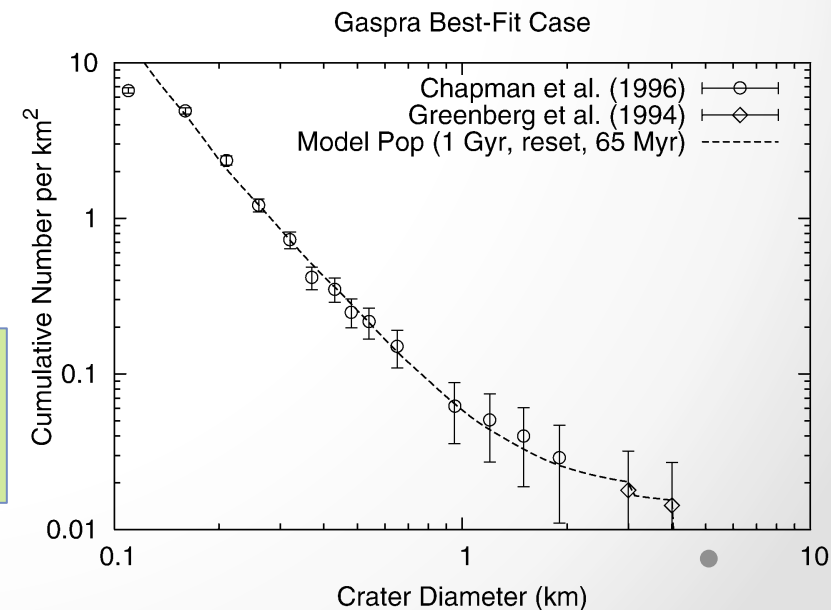
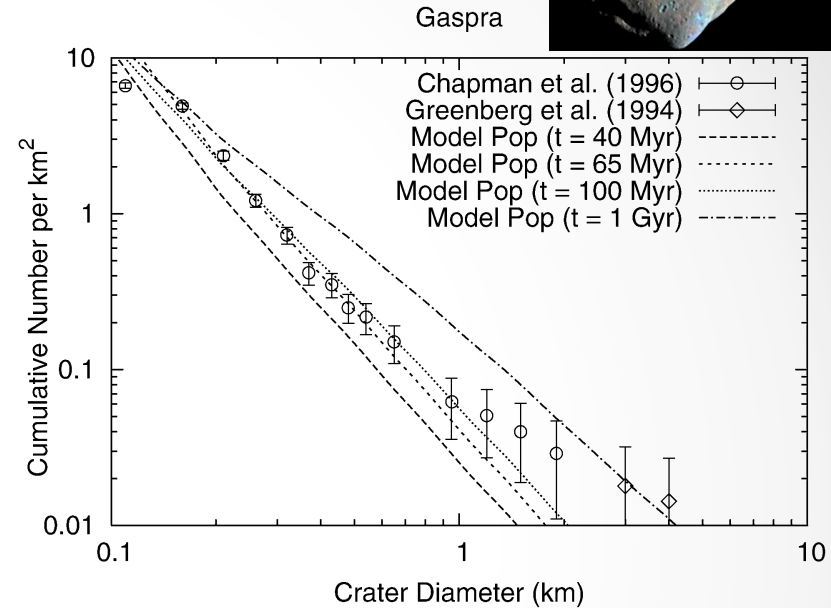
- ◇ exposure time=65Myrでの大きなクレーター  
1Gyrでの小さなクレーターで観測結果と合わない



65Myrより後でクレーター消失過程が重要

- ◇ Gaspraが経験したシナリオ
  1. 巨大クレーター( $\geq 3\text{km}$ )の数を増やすくらい十分長い時間exposeされた
    - Global joltで3kmより小さいクレーターは消去
    - Global joltは弾丸が200mの衝突
  2. 観測された数だけ小さなクレーターが1)の後に形成

Gaspraは1億年exposeされていて、65Myrに約200mの天体の衝突が生じ3kmより小さなクレーターがGlobal joltによって消失した



# Result~Ida~



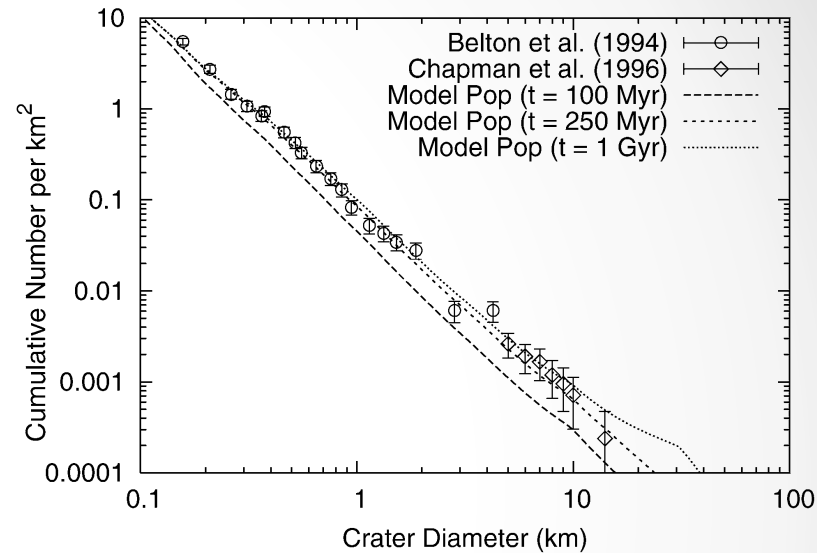
## ◇ 250Myrより長い時間でのモデル

- クレーター分布は10kmより小さいと飽和して  
いて良く合っている
- Idaの地表はこれくらい古いとされているが、  
10kmより大きなクレーター分布の変動でばら  
つきが生じる

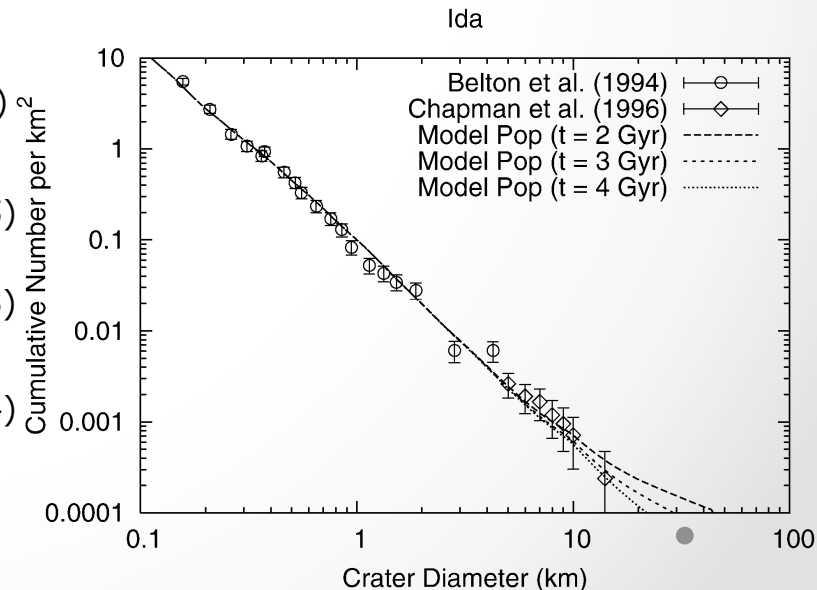
## ◇ Idaの年代で注目すべき点

- 直径が~1.5kmの衛星のDactyl
- サイズよりcollisional lifetime~100Myr  
(Greenberg et al.1996)
- モデルよりcollisional lifetime~800Myr  
(O'Brien and Greenberg 2005)
- Idaを含むKoronis族<1.5Gyr  
(Durda et al.1993)
- クレーターが多いことから地表年代は古い  
(Belton et al.1994)

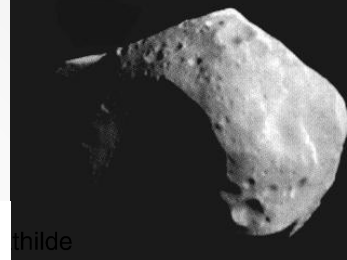
Idaの年代は、~500Myr-1Gyrと推測される



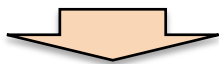
(a)



# Result~Mathilde~



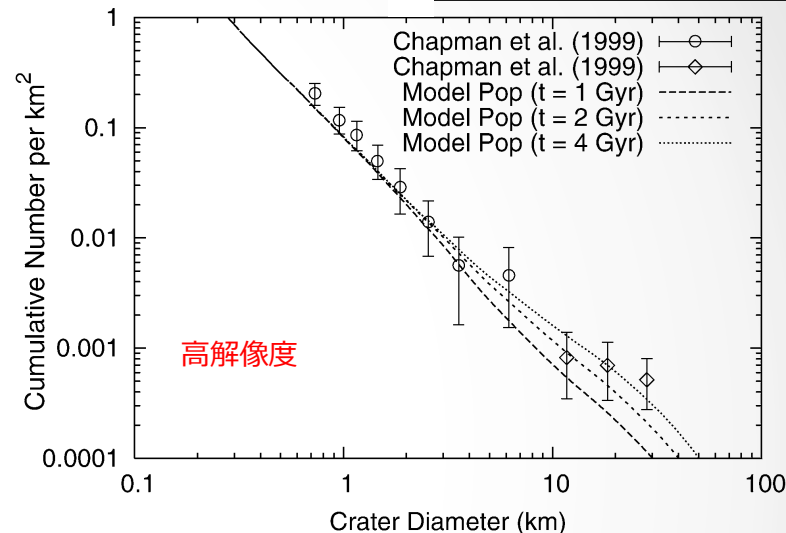
- ◇ S-type小惑星より低密度であるため、内部に空隙がありラブルパイル構造かもしれない
  - 大きなクレーターがあることからjoltは生じているはず
- ◇ NEAR探査によりMathildeでは地震エネルギーは伝播していないことを示唆



Joltの影響は除外している

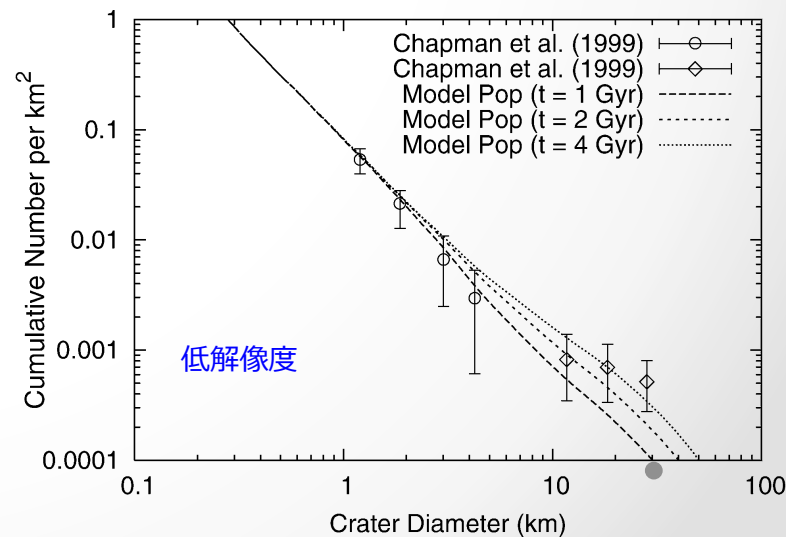
- ◇ km-scaleと小さなクレーターでは一定に飽和
- ◇ exposureが長くなると大きなクレーターが増加
  - 大きなクレーターで結果があるのは4Gyr

内部空隙があるためJoltは生じておらず数kmより小さなクレーターでは飽和に達しており、大きなクレーターから地表年代は~4Gyrと推定



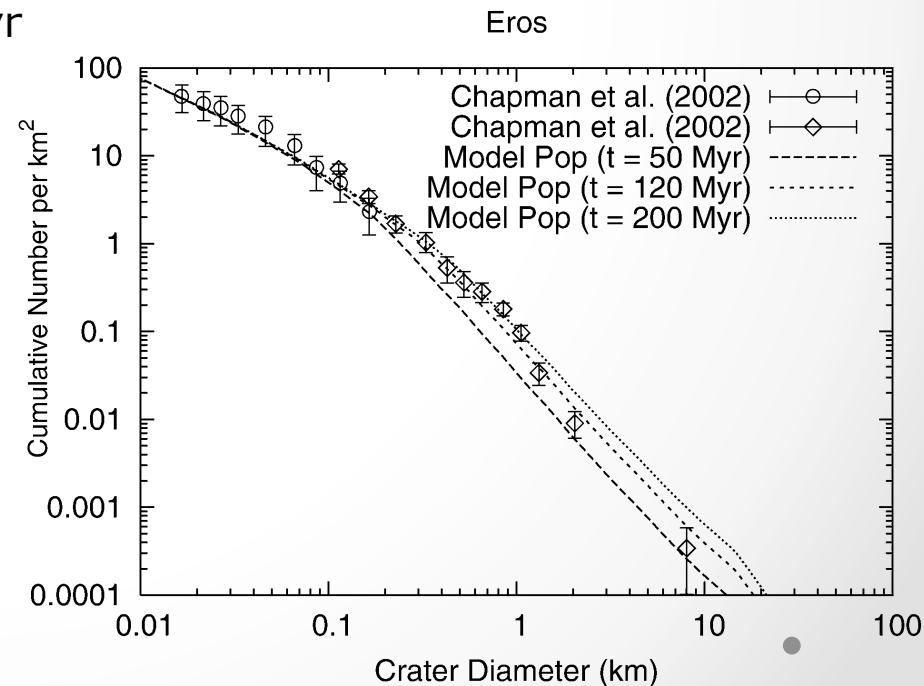
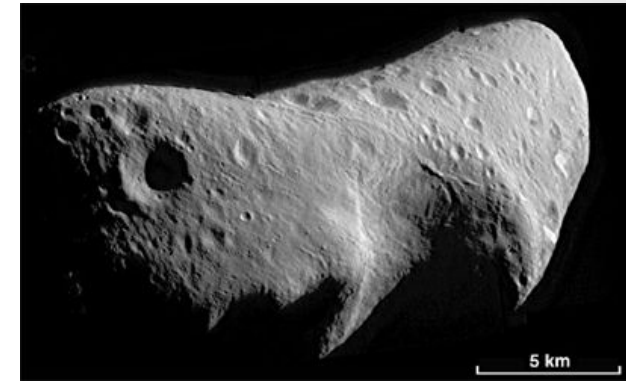
(a)

Mathilde



# Result~Eros~

- ◇ Erosは、モデルが作られている唯一の小惑星(Richardson 2004,2005)
- ◇ 高解像度の画像がある
- ◇ 200mより小さなクレーターではどの年代でもモデルが一致
  - Cumulative seismic effectを考慮しているため
- ◇ 観測結果と最も整合性が良いのは、 $t=120\text{Myr}$ 
  - Richardsonのモデルでは、 $400\pm 200\text{Myr}$
  - 計算に用いた衝突体のサイズとクレーターサイズの関係が異なるため
  - 正しい関係を用いた数値シミュレーションが必要となる



小さなクレーターは、Cumulative seismic effectより消失していて、地表年代は~120Myrと最も整合性が良い

# Summary

☆ Gaspra, Ida, Eros, Mathildeのクレーター分布は、共通の衝突分布で表せることがわかった

☆ クレーター形成と消失過程を考慮したモデルと観測結果を比較

## 1. Gaspra

- 1億年exposeされていて、65Myrに約200mの天体の衝突が生じ3kmより小さなクレーターが Grobal joltによって消失した

## 2. Ida

- 10kmより小さなクレーターは飽和状態に近いため、クレーター消失過程が大きく影響している
- 年代は、~500Myr-1Gyrと推測

## 3. Mathilde

- 内部空隙があることからgrobal, local joltは生じていない
- NEARによる探査結果と調和的
- 大きいクレーター(D>10km)より~4Gyrと推定

## 4. Eros

- 直径が200mより小さなクレーターの分布を説明するためには、cumulative seismic shakingが必要
- 若い地表年代は~120Myr

