

*Itokawa's cratering record
as observed by Hayabusa :
Implications for its age*

Icarus 200 (2009) 503–513

P.Michel , D.P.O'Brien , S.Abe , N.Hirata

全体の流れ

第1章: イントロダクション

第2章: イトカワの表面上のクレーター密度について

第3章: O'Brien et al.(2006)のモデルのイトカワへの適用

第5章: 地震動について

第4章: イトカワ及びエロスのクレーター分布に基づく年代の計算

第6章: イトカワの小さいクレーターが少ないことについて

第7章: 結果と結論の要約

1. Introduction

イトカワとは？ I

○サイズ: 535 m × 294 m × 209 m

○S型小惑星に属し、地球近傍小天体 (NEO) の1つ

- ・力学的進化: 地球に近接遭遇する
- ・起源: メインベルトの内側

○“ラブルパイル”天体と考えられる
(約 2 g/cm³、空隙率は約40%)



25143イトカワ

イトカワとは？ II

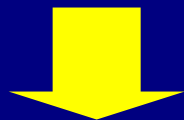
○ラッコみたいな形

○表面：起伏が多く、大きな岩(boulder)に富む

- ・表面の~80%："rough terrains"
- ・表面の20~%："smooth terrains"

○メインベルト中の他の小惑星との衝突
によってバラバラに破壊されたより大きな
小惑星の破片(と考えられている)

イトカワの年齢を見積もること



母天体が破壊されてから
これまでの時間を決めること



25143イトカワ



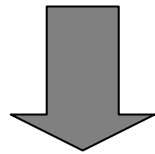
ラッコ

どのようにしてイトカワの年齢を見積もるのか？

○はやぶさ探査機によって撮影されたイトカワ表面のクレーターの情報を使う。

⇒ O'Brien et al.(2006) のモデルを使って、イトカワの表面上のクレーターを累積するのに必要な時間を計算

このやり方はイトカワには上手く適用できた。
しかし、イトカワ上の小さなクレーターは驚くほど数が少ない。



その他のクレーター消去メカニズム
最近の確率的消去イベント } の証拠になるかもしれない。

2. *Distribution of craters on Itokawa observed by the Hayabusa mission*

イトカワのクレーター密度

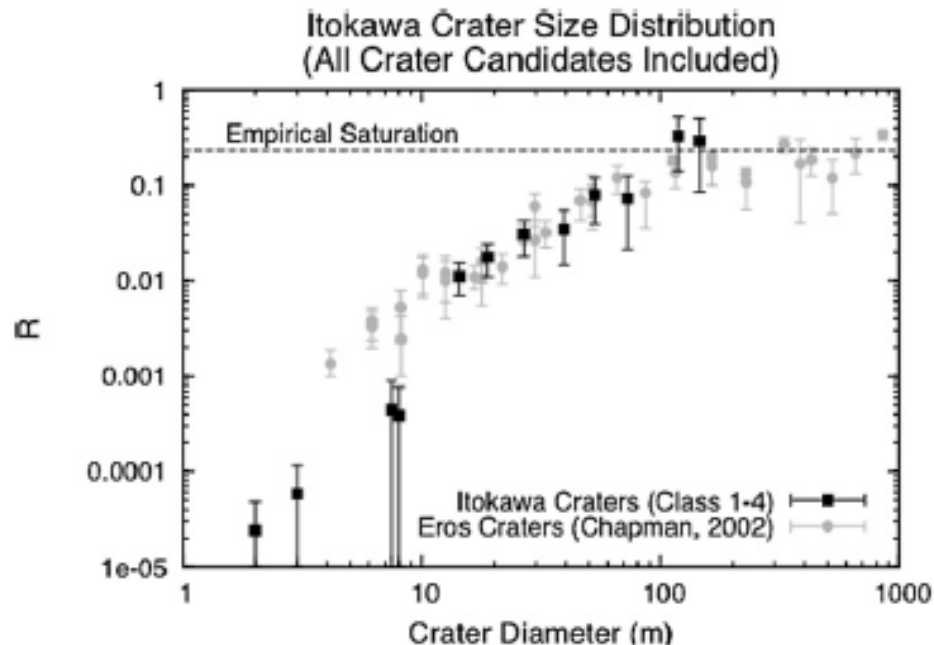


Fig. 1. R-plot of the size-frequency distributions of craters and boulders on Itokawa overlain on the crater counts for Eros from Chapman et al. (2002). The diameters are the mean diameters of the craters, based on the major/minor axes given in Hirata et al. (2009).

Fig.1: イトカワとエロスのクレーター密度をR-plotに示したもの

※エラーバー: $N^{1/2}$

○直径100 m 以上:
—クレーター生成と消去が
平衡な“飽和”状態

○直径10-100 m :
—飽和以下

○直径~10 m 以下:
—顕著に少なくなっている

※小さいクレーターのほとんどは
イトカワの“smooth terrains”に
見つかっている(Hirata et al., 2009)。

3. Model of crater accumulation on Itokawa's surface

3.1. Scaling laws for crater formation

2種類のスケーリング則を使用

- Strength-A : (shear flow を考慮外)
 - O'Brien et al.(2006): ガスプラのクレーター形成シミュレーション (Nolan et al., 1996)にて未知数を決めた π スケーリング
- Strength-B : (shear flow を考慮済)
 - Holsapple(1993): 陸上の爆発クレーターに基づくスケーリング則

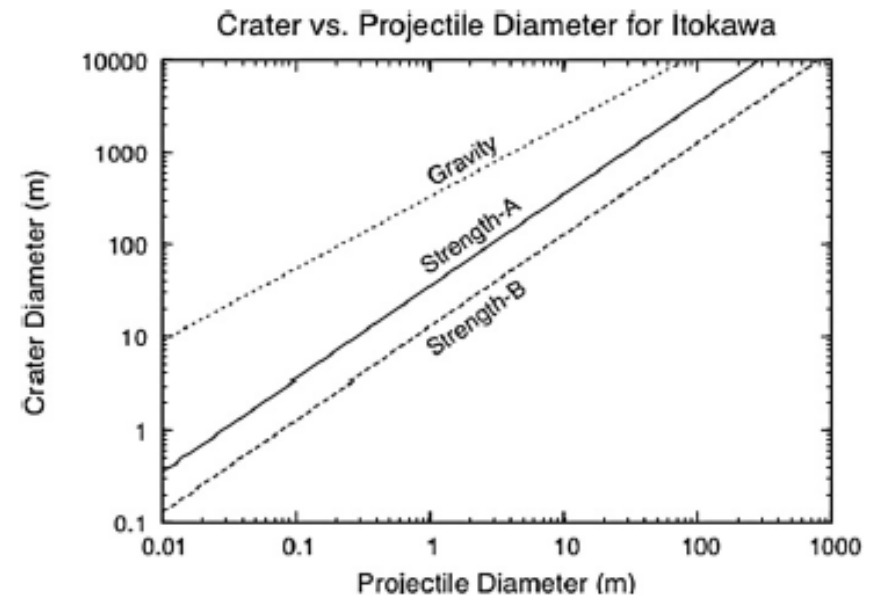


Fig. 2. Comparison of the scaling laws used in this modeling for converting impactor diameter into crater diameter on Itokawa. The crater diameters given here are the final rim-to-rim diameters. The "Strength-A" line is based on hydrocode simulations by Nolan et al. (1996) and the "Strength-B" line is based on impact experiments and explosions in hard rock, from Holsapple (1993). The "Gravity" line is the maximum size of a crater that can be formed in the gravity regime in competent rock, from Holsapple (1993). As the strength-scaled limit is always lower than the gravity-scaled limit for the impactor size range shown here, the strength-scaled limit will determine the final crater size.

3.2. Model projectile population

2種類の衝突天体分布モデルを使用

(※ NEAのクレーターのはほとんどはメインベルトで作られたものと仮定)

- OBG分布:
 - O'Brien et al.(2006) で衝突分布として使われたメインベルト分布
- BAL分布:
 - Bottke et al.(2005)のモデルを使うことにより作られた衝突分布

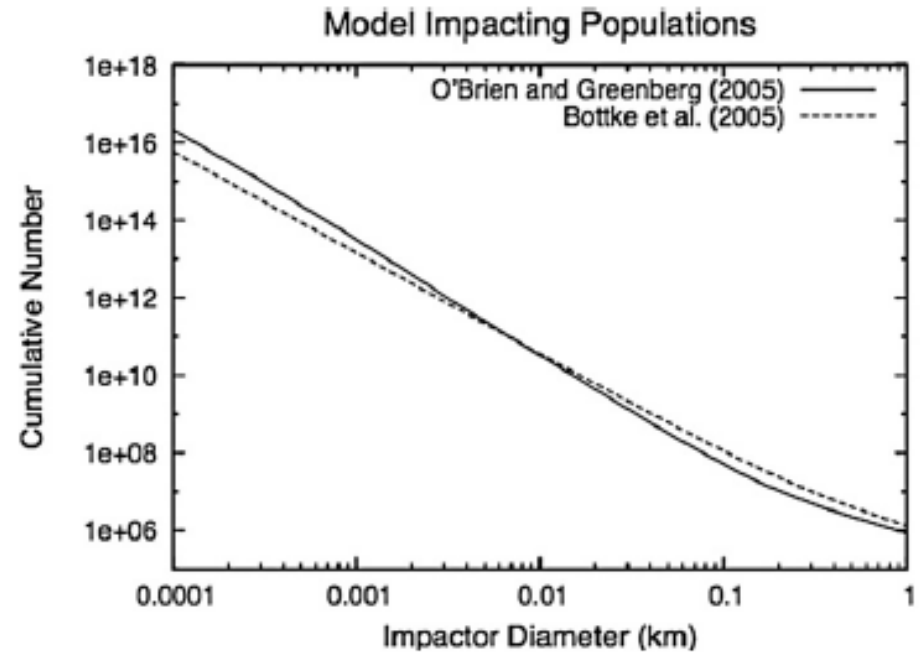


Fig. 3. Comparison of the Bottke et al. (2005) and O'Brien and Greenberg (2005) main-belt impacting populations. The Bottke et al. population is somewhat shallower than the O'Brien and Greenberg population, which may be important for how well they can match the small craters on Itokawa and Eros.

これら2つの分布のどちらが、
イトカワ(及びエロス)のクレーター分布に
最も良い一致を示すか調べた。

3.3. *Crater erasure processes*

クレーターを消してしまう過程とは？

○重なり合わせ(クレーターが飽和状態に近いとき)

- ・小さなクレーター:
 - 大きなクレーターを浸食し、ゆっくりと覆う
- ・大きなクレーター:
 - それが形成される場所ですべてのクレーターを消す

○地震動

- ・局所的な地震動:
 - 大きいクレーターのすぐ近くのところにあるクレーターを消し得る。
- ・小惑星の全体の地震動:
 - 打ち上げられたレゴリスで、小惑星全体の表面のクレーターを消し得る。
- ・多くの小さな衝突の累積の効果による地震動:
 - 小さなクレーターを消し得る。

3.4. Seismic shaking erasure

地震動による消去について

Richardson et al.(2004, 2005)はエロスについて衝突毎の地震の伝播定数 K_i を見積もった。(Fig.4)

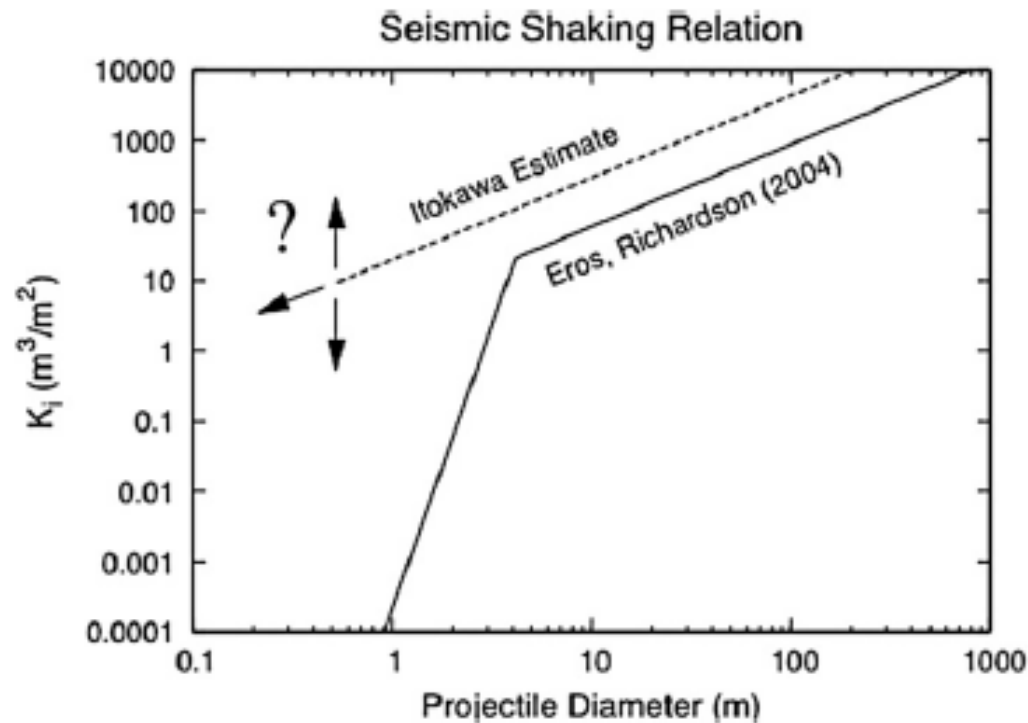


Fig. 4. Plot of the seismic diffusion constant per impact (K_i) for Eros, determined by Richardson et al. (2004), and the estimated form of the relation for Itokawa (see text for details).

- 4 m で傾きに変化がある：
—斜面でのレゴリスの動きが
“stick-slip” から “hop-slip” へ
移行した

イトカワの移行
はどこか？

直径 D_a の小惑星の表面に自分の重力加速度に匹敵する加速度を引き起こし得るプロジェクティル直径 D_p (Richardson et al.(2005) Eq.7)

$$D_p \propto D_a^{5/3}$$

- **イトカワ: $D_p = \text{約 } 5 \text{ mm}$**

5. Discussion about seismic shaking

地震の伝播定数 K_i の見積もり

イトカワにおいての K_i の傾きは決まっても、
ラインを決定できない。

(∵ 地震動を起こさない小規模なプロジェクティルが
5 mm 以上であるかもしれないため)

今回、イトカワに関しての各々のプロット中
で、最低の K_i のラインを用いて実際のク
レーター分布にフィットさせた。

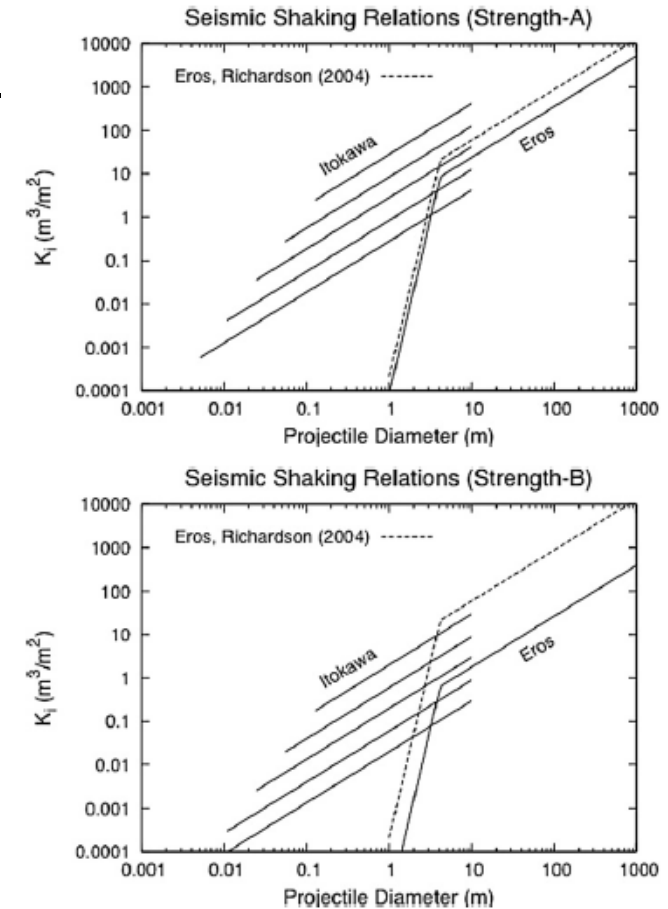
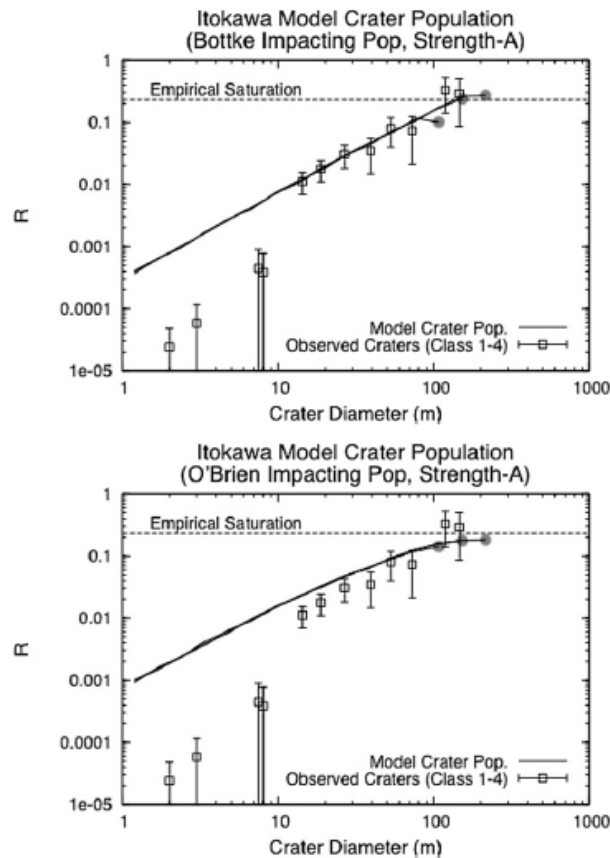


Fig. 9. Seismic shaking parameter K_i used for the Itokawa and Eros simulations, with the curve calculated for Eros by Richardson et al. (2004) shown for comparison. Here, the curves for Itokawa are those that match craters of Classes 1-4 of Hirata et al. (2009). If only the Classes 1-3 were considered, as in Fig. 7, the K_i curves should be raised by a factor of 2. A mobile regolith thickness h of 0.1 m is assumed for all simulations. Doubling h for a given asteroid would result in the respective K_i curves being shifted down by a factor of 2, in order to give the same degree of seismic shaking erasure. For Itokawa, a "family" of curves with different small-size cutoff diameters is given, all of which give the same amount of seismic shaking erasure and hence the same final crater population. The Itokawa curves only extend to ~ 10 m because that is roughly the largest size impactor that hits Itokawa over its history in our simulations. The lowermost K_i curves for Itokawa in each plot are the one that were actually used to generate the model crater populations in Figs. 5 and 6.

4. Modeling the crater history on Itokawa and comparison with Eros

(BAL分布, OBG分布) + Strength-Aでフィット(Fig.5)



～イトカワ～

- BAL分布(上図):
—直径10 m以上のクレーターでよくフィットする。
- OBG分布(下図):
—BAL分布にはいくらか劣るがよくフィットしている。

直径10 m以上のクレーター分布を再現するのに必要な時間

=約 75 Myr

Fig. 5. Comparison of our model fits to the Itokawa crater population using the BAL (top) and OBG (bottom) impacting populations, and the Strength-A scaling law. Solid lines are the model results. In the plot on the top, the exposure times represented are 25, 75 and 150 Myr (the gray dots are placed to help discriminate between the different curves). The best fit occurs after ~75 Myr. However, given the small number statistics for the few largest craters, any exposure time in the range 25–150 Myr is actually plausible. In the plot on the bottom, the exposure times are 20, 60 and 120 Myr. In both cases, the model predicts significantly more craters smaller than 10 m in diameter than are actually observed.

BAL分布 + Strength-Bスケーリング則でフィット(Fig.6)

～イトカワ～

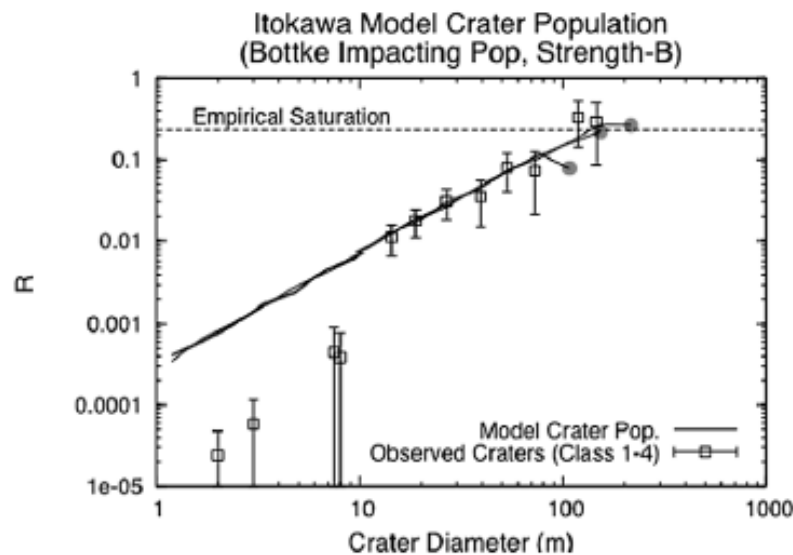
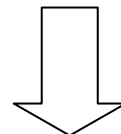


Fig. 6. Comparison of our model fits to the Itokawa crater population using the BAL impacting population and the Strength-B scaling law. Solid lines are the model results (the gray dots are placed to help discriminate between the different curves), and the times represented by the different lines are 300, 900 (best fit), and 1800 Myr. This implies a minimum surface age of ~ 900 Myr for this scaling law, about a factor of 10 larger than the estimate using the Strength-A scaling law.

直径10 m 以上のクレーター分布を
再現するのに必要な時間

= 約 900 Myr

※ Strength-Aよりも約 3 倍小さな直径を予測している
+ サイズ分布の傾きが約 2.7

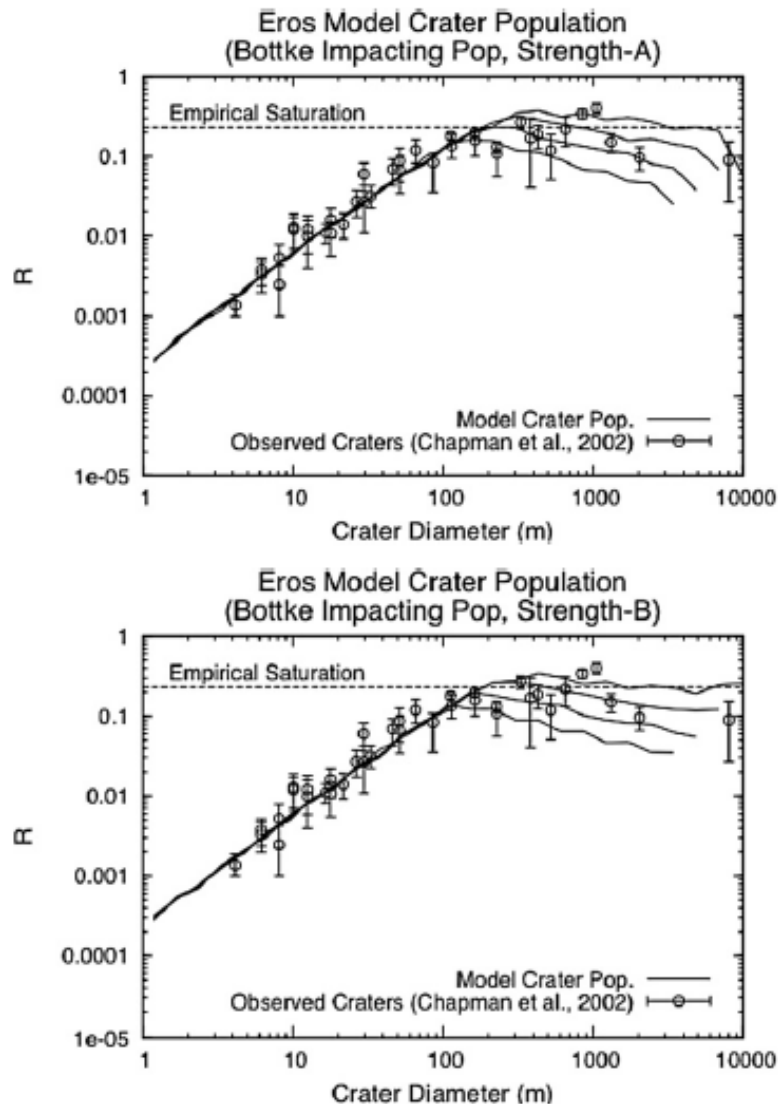


これはStrength-Aのときのクレーター年齢の見積もりと
ざっくり10のファクターの違いになる。

※ $3^{2.7} \doteq 19$

BAL分布 + (Strength-A, -B) でフィット(Fig.8)

～エロス～



- Strength-A (上図):

クレーター分布を
再現するのに必要な時間

≒ ~100-200 Myr

- Strength-B (下図):

クレーター分布を
再現するのに必要な時間

≒ ~1000-2000 Myr

Fig. 8. Comparison of model fits to the Eros crater population using the BAL impacting population and the Strength-A and Strength-B scaling laws. Solid lines are the model results, and the times represented by the different lines, from bottom to top, are 50, 100, 200 and 400 Myr in the top plot, and 500, 1000, 2000 and 4000 Myr in the bottom plot. After ~100-200 Myr with the Strength-A scaling law, the model population is a good match to the observed population, while it takes ~1000-2000 Myr with the Strength-B scaling law.

6. The origin of the deficiency of the smallest craters on Itokawa

イトカワの直径10 m 以下のクレーターは異様に少ない
～その理由を推測 I～

○ NEAは、メインベルト小惑星と比べて遥かに少ないこと

イトカワは元はメインベルト中にあり、そこで多数のクレーターを形成していた。

直径10 m 以下のクレーターを消去できる大きな衝突があったとすると—、

—その衝突は、イトカワをメインベルトの外へ出し得る。

⇒ それ以後のインパクトは数が少ない他のNEAのみである。

イトカワの直径10 m 以下のクレーターは異様に少ない
～その理由を推測Ⅱ～

○ イトカワ表面のほとんどは大きい岩でぎっしり覆われており、それが"鎧"のように振る舞っていること

小さいクレーターを形成するはずの小さいインパクトターが、岩を砕くのに使われてしまっている。

(この見解はイトカワの"smooth terrains"上で小さなクレーターのほとんどがみつけているという観測に矛盾しない)

イトカワの直径10 m 以下のクレーターは異様に少ない
～その理由を推測Ⅲ～

○ 比較的最近に初期化イベントがあったかもしれないこと

~100 Myr (Strength-A)あるいは~1000 Myr (Strength-B)インパクトの爆撃に晒された後、
直径~10 m 以下の全てのクレーターを消すが、直径数~10 m の大きなクレーターは維持するある程度最近の初期化イベントがあった、というもの。

現在の小さいクレーター分布は、その初期化イベント以後出来たものではないか。

(1000 yr 前後 (Strength-A) 、10000 yr 前後 (Strength-B))。

先の推測Ⅲ(初期化イベント)の正当性と具体的な事象

○ Scheeres et al.(2007)

・構成要素再配置:

- イトカワはここ10万年以昔に最も速く回転していたようであり、YORP効果により、現在の回転率まで減速した。回転速度の変化に伴う変形で、現在の主要な構成要素へ再配置した。(10-100 kyr 要する)

○ Fujiwara et al.(2006)

・大きな衝突:

- イトカワの体(body)の部分がもともと単体物として存在しており、大きな衝突が現在首の部分で見られるくびれた部分を形成した。

7. *Conclusions*

- ・イトカワ表面のクレーター史を計算するためO'Brien et al.(2006)のモデルを使うことによって、クレーターサイズ分布を再現した。
- ・イトカワのクレーター累積に必要な時間が~75 Myr から1 Gyr である。
- ・イトカワの小さいクレーター($< 10\text{ m}$)の欠乏は、今回使った地震動の平衡モデルによって綺麗に説明することはできない。
- ・しかし、特定のイベント—例えば、Scheeres et al.(2007)によって提案された、頭と体がかっ付いたという低速度衝突—は、小さなクレーターの消去につながるかもしれない。
- ・そしてそれはイトカワ上のクレーター分布と今回のモデルの予測との食い違い(小さなクレーターが少ないこと)を説明するかもしれない。