

Efficiency of cratering on the coarse surface above the regolith substrate

(小石とレゴリスの層構造を持つ天体表層でのクレーター形成効率)

Eri Tatsumi¹ and Seiji Sugita²

¹Graduate School of Frontier Science, Univ. of Tokyo
5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8561 Japan

²Graduate School of Science, Univ. of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

ABSTRACT

Recent geochemical analyses of returned Itokawa samples have yielded important age estimations. For example, the cosmic ray exposure ages are less than 10 Myr (Nagao et al, 2011, Meier et al, 2014), and $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{39}$ age is ~ 1 Gyr (Park et al, 2014). The geologic meaning of these radioisotope ages, however, is not fully understood. One of the obstacles against such geologic interpretation of these radiometric ages is the great ambiguity in the resurfacing processes; resurfacing processes on Itokawa is still highly unknown. Hayabusa imaging observations revealed a number of unfamiliar circular features on Itokawa surface, which is possibly impact craters (Hirata et al, 2009). If those features are impact craters, the crater retention age would be 75Myr - 1Gyr assuming strength scaling (Michel et al, 2009). This large uncertainty in retention age estimates comes from that in crater size scaling. Two kinds of crater size scaling are commonly used: the gravity scaling and the strength scaling (e.g., Holsapple, 1993). Previously a few cratering experiments on coarse-grained targets have been conducted (Güttler et al., 2012, Holsapple and Housen, 2014), however there is no unified explanation yet.

Moreover, crater size is controlled by the mechanical properties of both surface and near-surface layer. Itokawa possibly has a boulder-rich layer on a finer regolith-rich substrate. Observationally some of the circular depressions show their floors are filled with fine regolith. Such structure may also be formed via so-called Brazilian-nuts effect (e.g., Rosato, 1987).

Additionally, impact experiments on asteroid 1999JU3 will be carried out in the upcoming Hayabusa-2 mission. The spacecraft are designed to acquire the samples of the asteroid by launching impactors to the surface. While 1999JU3 may have coarse-grained surface, our experimental data are also important for estimating the penetration depth of the impact samplers.

In this study, we experimentally investigate the crater scaling on layered structures with boulder-rich layer and regolith substrate. We used the sintered-glass beads blocks as boulder simulants and 200 μm glass beads as regolith simulant. We employed three types of targets: (1) a 20-mm-thick block layer on a regolith substrate, (2) a 40-mm-thick block layer on a regolith substrate, and (3) a uniform regolith layer. Polycarbonate projectiles 10 mm in diameter (0.76g) were launched at $\sim 70 - 190$ m/s.

When impact energy is low, the sizes of craters on the layered structures turned out to be smaller by $\sim 20 - 40\%$ than gravity scaling. However as impact energy increases, crater sizes on such surface goes to gravity scaling rapidly. When the projectiles pass completely through the pebble layer, crater size coincides with the gravity scaling.

Our experimental results, however, indicate that the crater scaling on layered targets is rather close to the gravity scaling than the strength scaling. This result is consistent with a prediction on impact experiments with much large impact energy on uniformly coarse-grained targets (Holsapple and Housen, 2014). Then, the crater retention age of Itokawa would be estimated to be $< 10\text{Myr}$. This age is comparable to CRE age and much shorter than the $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{39}$ age.

小石とレゴリスの層構造を持つ天体表層 でのクレーター形成効率



巽 瑛理, 杉田 精司 (東大新領域)

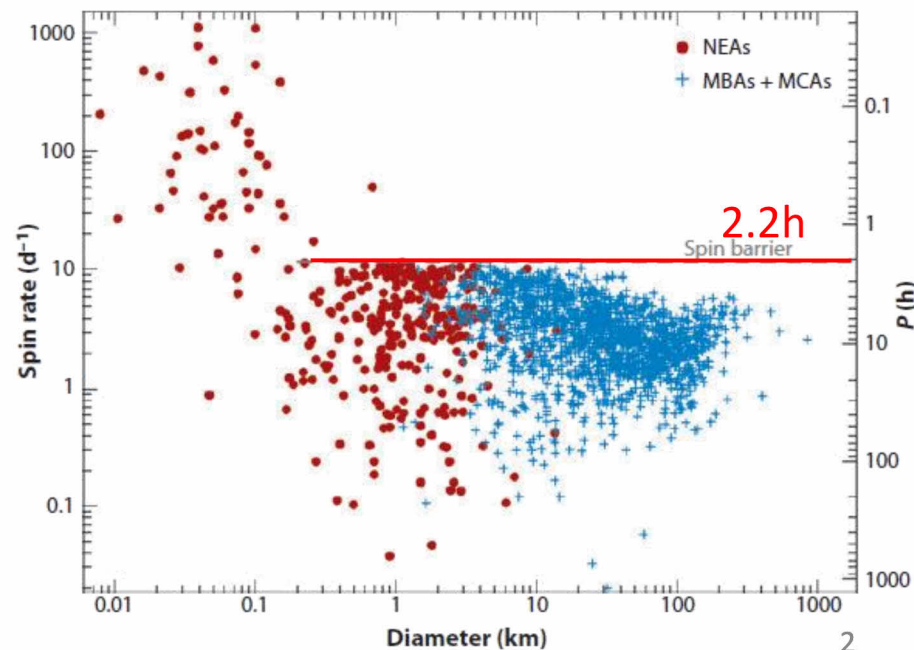
2014-08-05 月惑星シンポジウム

ラブルパイル小惑星

- ラブルパイル小惑星とは、衝突破片等の岩塊が自己重力で集積した天体.
- ラブルパイル小惑星の存在
 - これまで探査が行われてきた、ItokawaやErosもラブルパイル天体である可能性.
 - 小惑星帯には普遍的にラブルパイル天体が存在.

観測的事実

- 300km以下の小惑星の空隙率は50~70%程度. *Baer et al. (2011)*
- 自転周期が2.2h以下のものが極めて少ない. *Pravec et al. (2007)*



Pravec et al. (2007)

小惑星イトカワの内部構造

- イトカワは低密度 ($\sim 1.9\text{g/cm}^3$) であり, 内部に40%程度の空隙を持つラブルパイル小惑星であると考えられている.

Fujiwara et al. (2006), Saito et al. (2006)

ラブルパイル小惑星でのクレーター形成過程は明らかでない.

- クレーターサイズ
 - クレーターサイズ分布から小惑星の表面年代を求める.
 - スケーリング則の不確定性が表面年代推定の不確定性に.
- イジェクタ質量分布
 - 重力の小さな小惑星では, 重力圏脱出速度が小さく, クレーター形成時のイジェクタによる質量損失が大きい.
 - クレーターによる質量損失は小惑星サイズ分布の進化に大きく影響する. *Kobayashi&Tanaka(2010)*

ラブルパイル小惑星でのクレーター則

- クレータースケーリング則 (*e.g. Holsapple(1993)*)
 - ラブルパイル小惑星の構成粒子は材料強度をもつ
→ **材料強度支配?**
 - 粒子同士は自己重力で集積しており, 実質的には強度をもたない → **重力支配?**

小惑星イトカワの場合

- 材料強度支配 → 75Myr-1Gyr

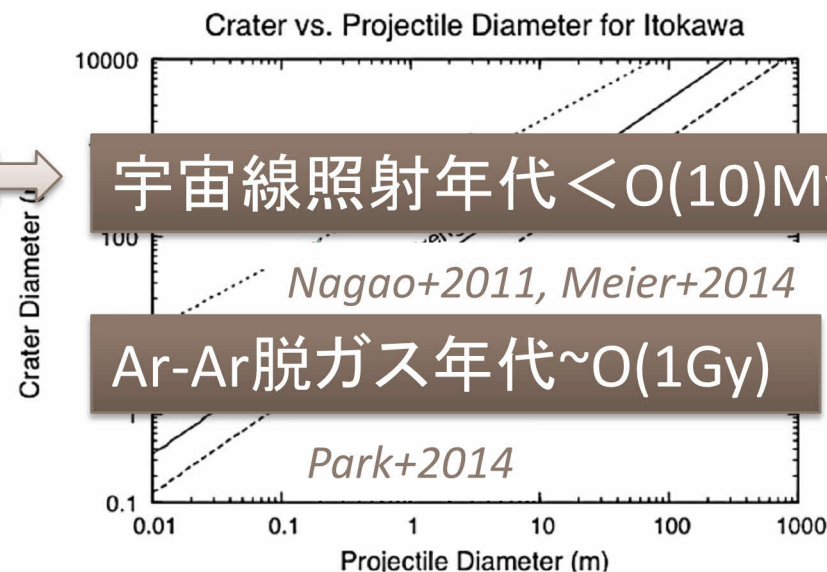
Michel et al. (2009)

- 重力支配

→ 上記年代の1/100以下

※ インパクターのサイズ分布

$$N(> D) \propto D^{-2.7}$$



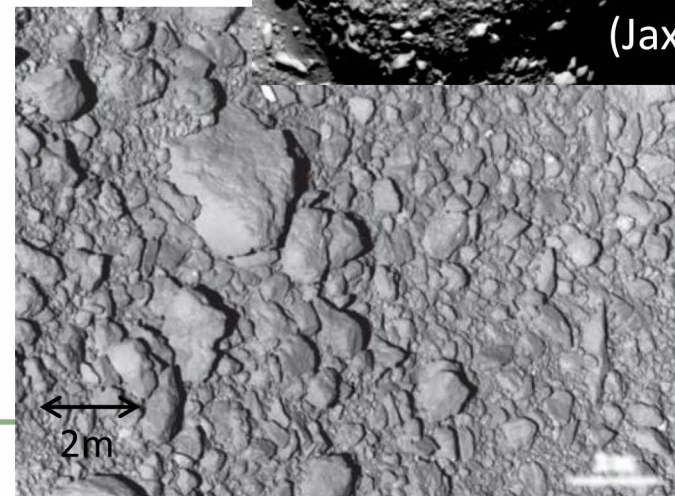
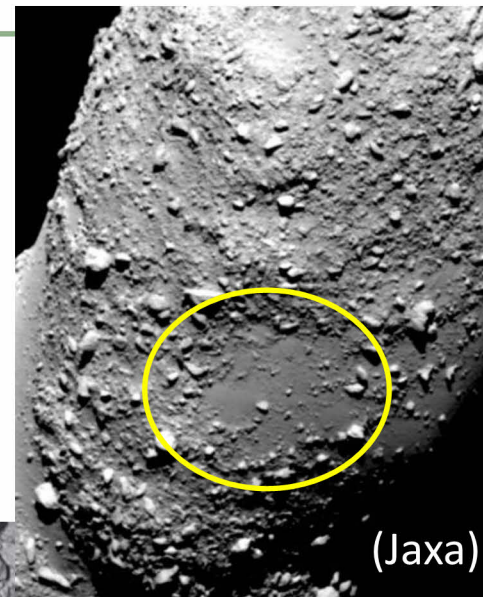
小惑星イトカワの探査から

- イトカワが岩塊とレゴリスの層構造を持っている可能性.

1. 衝突由来と考えられる円形の窪地. *Hirata+2009*
→窪地の底面がレゴリスで満たされている.
岩塊層の下にレゴリス層が存在する？

2. ポテンシャルの低い所に粒径が小さいもの
が集まっている. *Miyamoto+2007*
→衝突による地震が起こり, レゴリス
が移動.

**衝突励起振動によって鉛直方向の
粒度偏析が起こった？**



Itokawa observed by Hayabusa

This document is provided by JAXA.

研究目的

レゴリス層上に小石層がある時のクレーター スケーリング則の理解

- 理学的

ラブルパイル小惑星のクレータースケーリング則

応用: イトカワのクレーター表面年代推定

1999JU3への応用も

- 工学的

小石層によるSMP弾丸の減速率

応用: はやぶさ2でのサンプル回収効率の見積もり,
タッチダウンサイトの検討

小石とレゴリスが層構造を持つ表層での クレーター形成実験

実験コンセプト

• 条件: レゴリス層 + 小石層

- 小石の破壊エネルギー < 衝突エネルギー
- 破壊と掘削が同時に起きる. クレーターを掘削するための実効的エネルギー E_{eff} と小石の破壊や摩擦により散逸されるエネルギー E_{dis}

$$E_{\text{impact}} = E_{\text{eff}} + E_{\text{dis}}$$

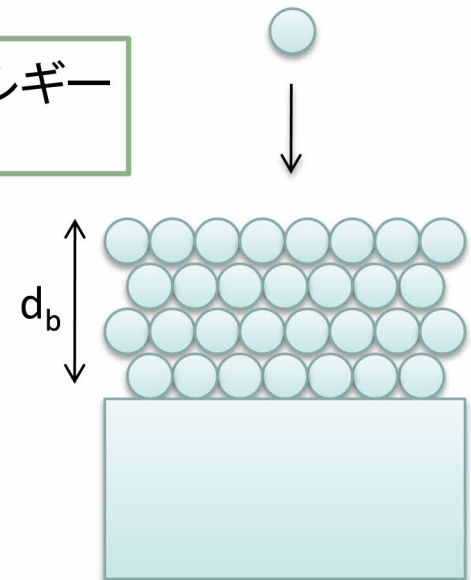
• パラメータ: 小石層厚さ d_b

- インパクターが破壊貫入時に散逸されるエネルギー

$$E_{\text{dis}}(d_b, Q_D^*)$$

- 小石層の厚みを変えることで, E_{dis} を変化させる.

小石の破壊エネルギー密度



• 評価する物理量

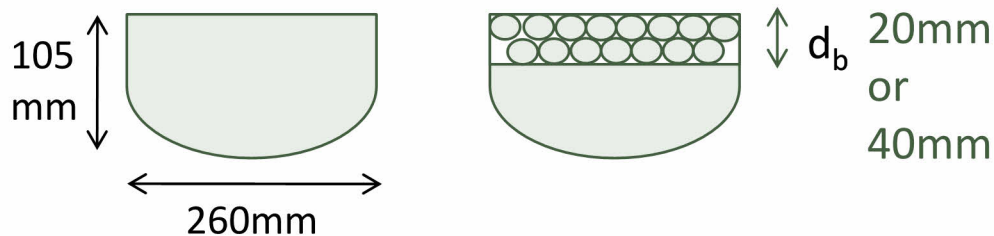
クレーターサイズ → 天体の表面年代

実験セッティング

ターゲット

(作成法はSetoh et al.(2007)に準拠)

- ① 模擬小石層 ($d_b=20\text{mm}$)
+ ガラスビーズ層
- ② 模擬小石層 ($d_b=40\text{mm}$)
+ ガラスビーズ層
- ③ ガラスビーズ ($\phi=200\mu\text{m}$)

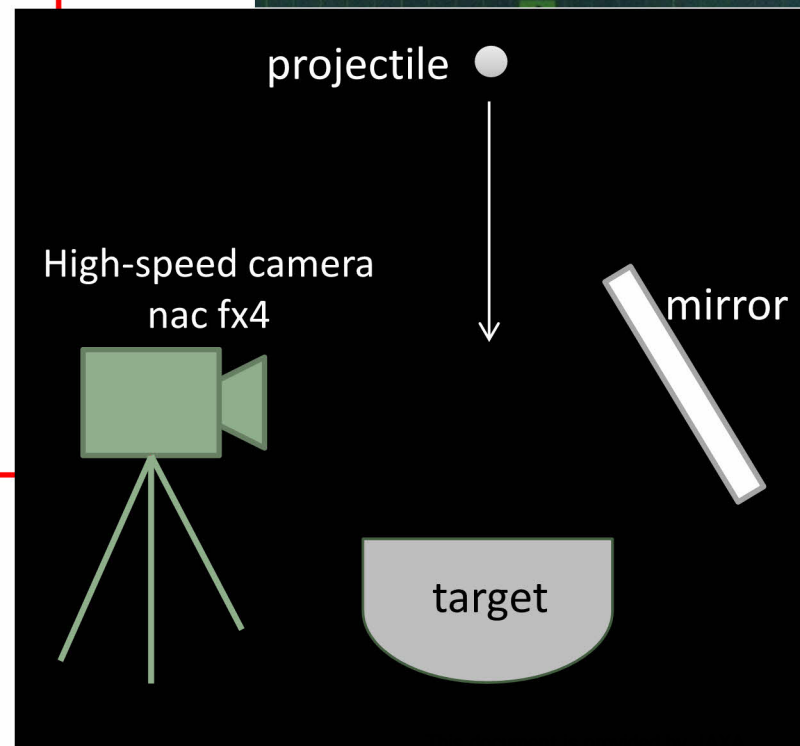
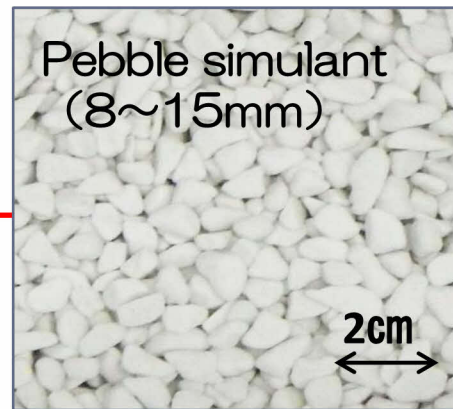


インパクター: ポリカ弾丸 $\phi 10\text{mm}$ (0.79g)

大気圧下

Impact velocity : 70~185m/s

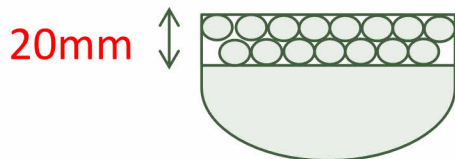
撮影速度 : 5000fps, 露光時間 : 1/20000sec



観察：基層の構成とクレーター形成

衝突速度：~185m/s
衝突~0.2sec

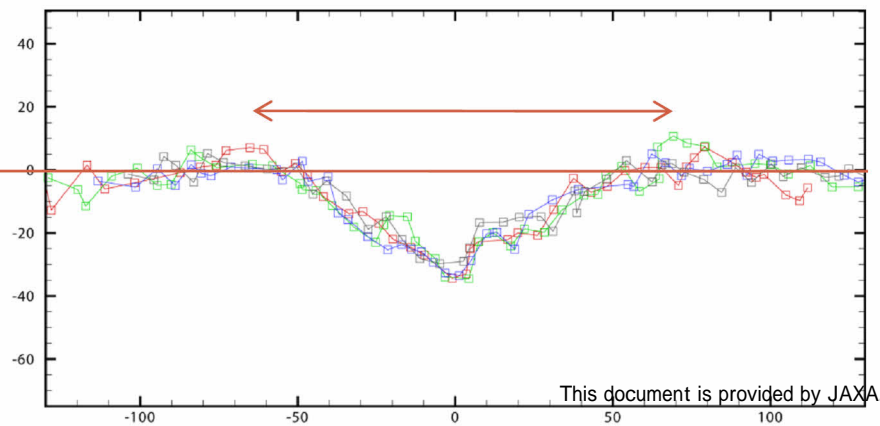
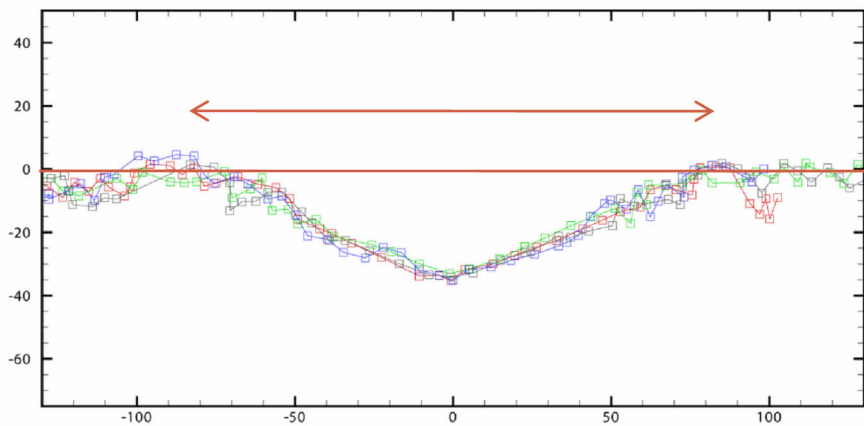
Frame rate: 5000fps
Exposure time: 50 μ sec



← pebble layer →
← glass beads →

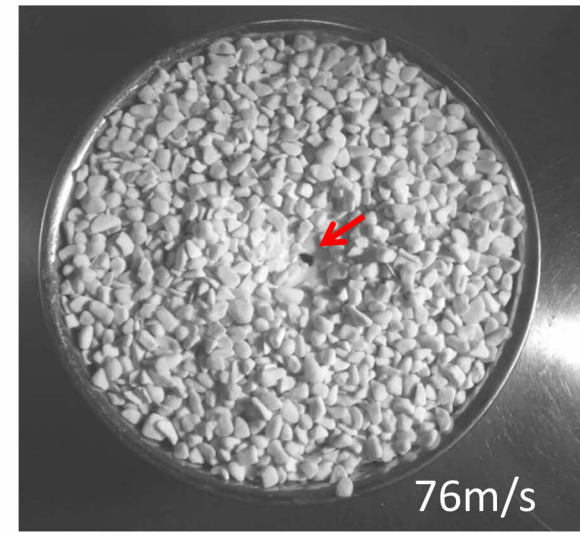
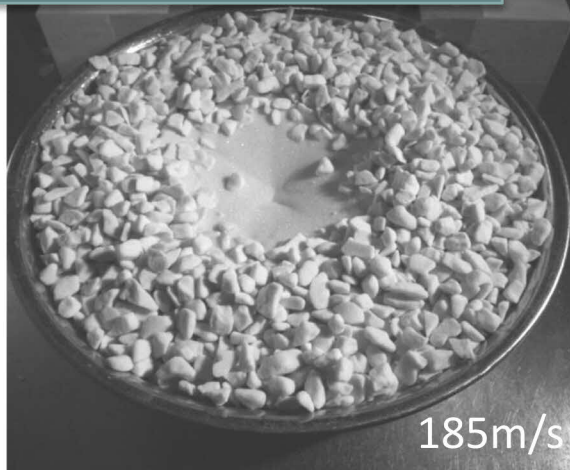


クレーター直径計測



衝突速度とクレーター形態

小石層厚み20mm



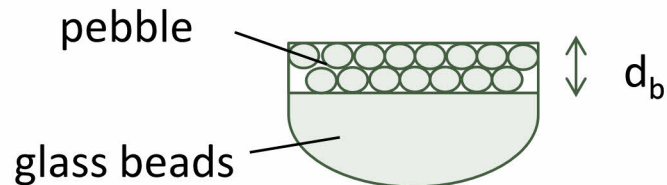
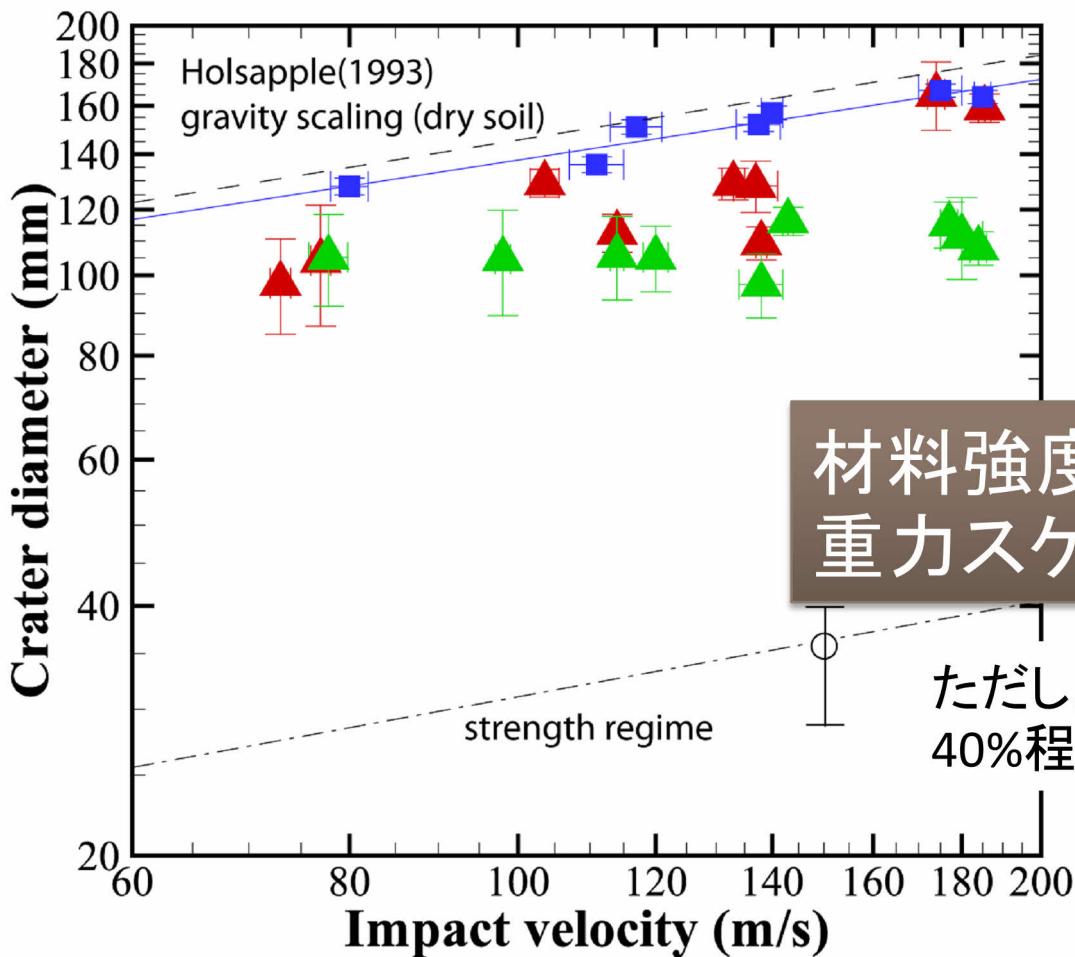
← Impact Velocity

小石層厚み40mm



Result : クレーターサイズ

Impact velocity vs. Crater diameter

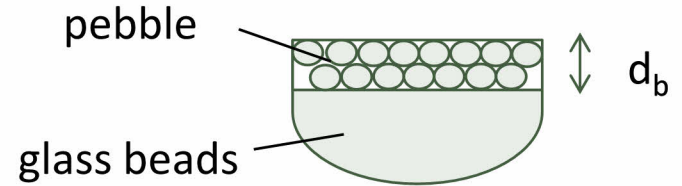
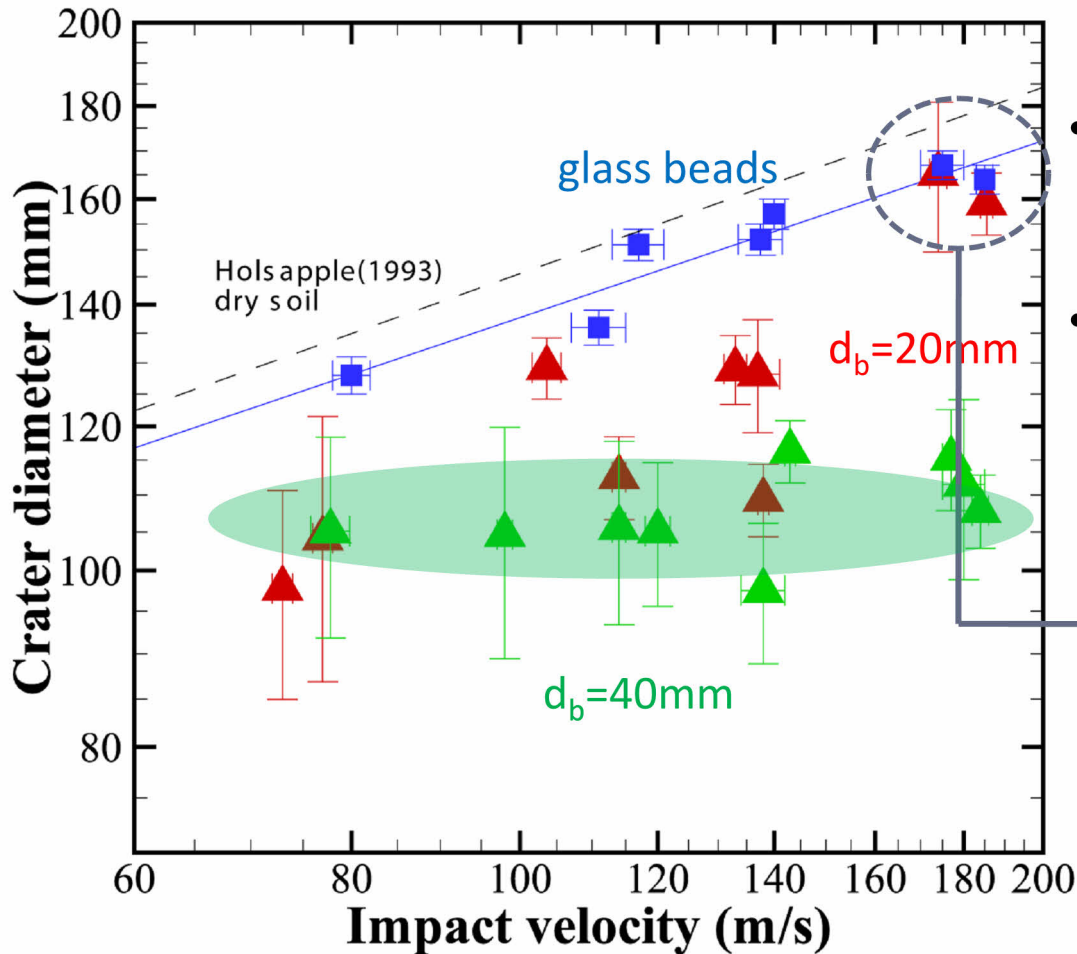


材料強度スケーリング則よりも
重カスケーリング則に近い

ただし、重カスケーリングから最大で
40%程度のずれがある。

Result : クレーターサイズ

Impact velocity vs. Crater diameter

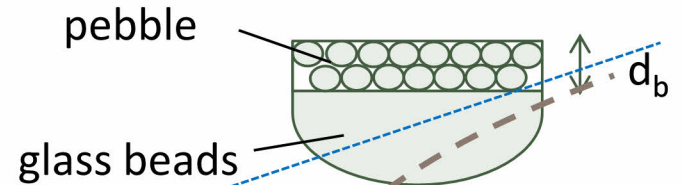
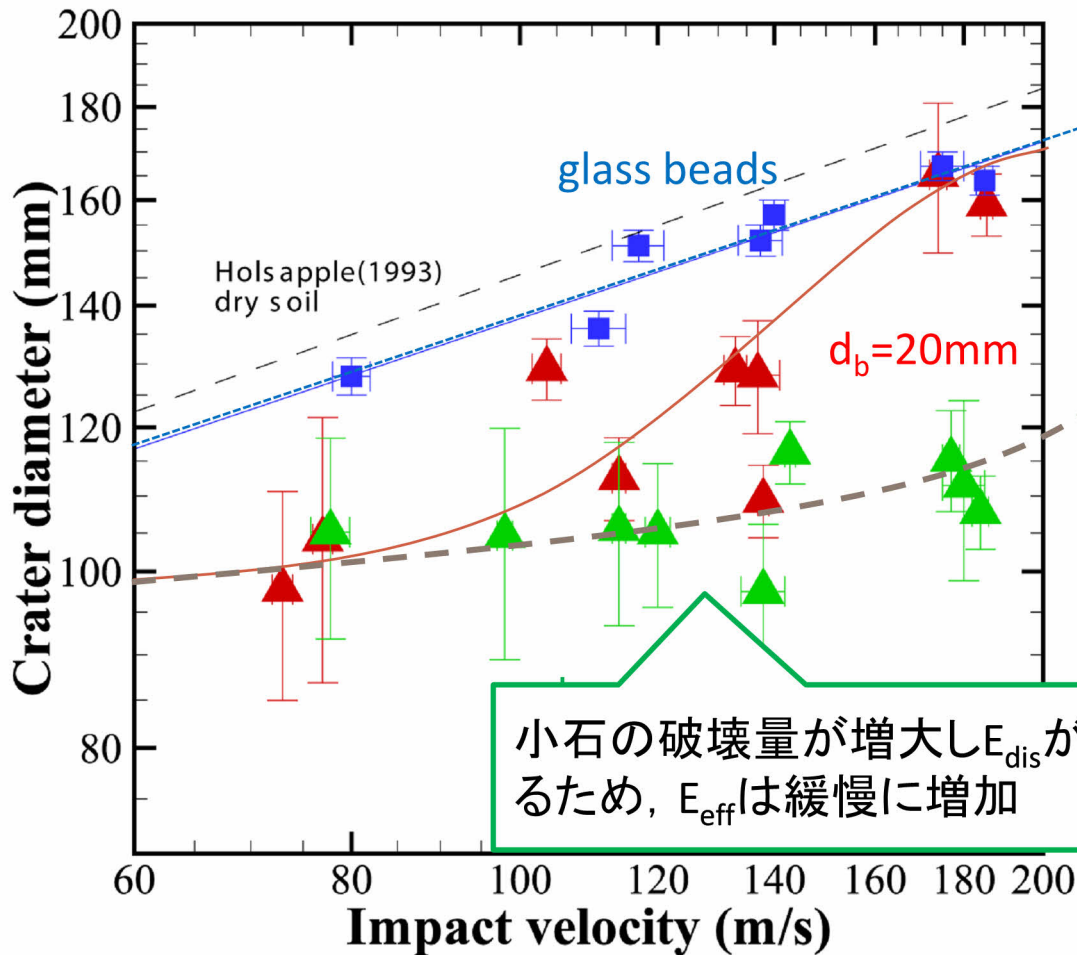


- 弾丸が小石層を貫通する場合：
クレーターは重力則とほぼ同じ。
- 弾丸が小石層を貫通しない場合：
クレーターの大きさは横ばい。



Result : クレーターサイズ

Impact velocity vs. Crater diameter



推論: 衝突速度(エネルギー)が十分に大きければ, 重力則に漸近するのではないか.

小石の破壊量が増大し E_{dis} が増加するため, E_{eff} は緩慢に増加

クレーター形成メカニズム

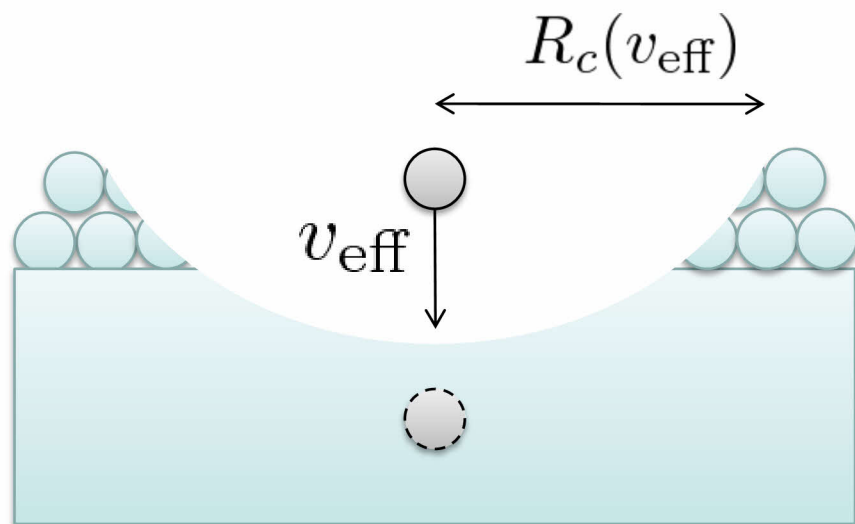
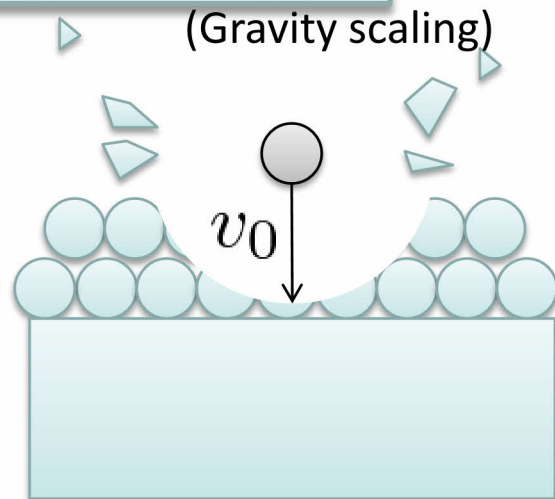
$$E_{\text{impact}} = E_{\text{eff}} + E_{\text{dis}}$$

$$R_c \propto v_{\text{eff}}^{\alpha/3} \propto E_{\text{eff}}^{\alpha/6}$$

(Gravity scaling)

$$\begin{cases} E_{\text{impact}} = \frac{1}{2} m_p v_0^2 \\ E_{\text{eff}} = \frac{1}{2} m_p v_{\text{eff}}^2 \end{cases}$$

- 小石層の破壊と摩擦によって、エネルギーを散逸し、インパクトは減速.
- クレーターサイズは小石層によって減速された実効的な速度 v_{eff} (エネルギー E_{eff}) に依存する.
- インパクトの衝突エネルギーが十分に大きければ、小石層を貫通し、ほとんどのエネルギーが掘削に使われる. ($E_{\text{dis}} \ll E_{\text{eff}}$)
→重カスケーリング則との一致



小石層でのインパクター減速率

- 小石層を通過するとき、速度の2乗に比例した抵抗を受けるとすると、深さ z 通過後の弾丸速度は、

$$F = -Av^2 \longrightarrow v = v_0 \exp(-Az)$$

- インパクターが停止する条件、

$$\underbrace{\frac{1}{2}m_p v^2}_{\text{インパクター運動エネルギー}} = \underbrace{K Q_D^* m_t}_{\text{ターゲット構成粒子破壊エネルギー}}$$

m_p : インパクター質量
 m_t : ターゲット構成粒子質量
 Q_D^* : ターゲット構成粒子破壊エネルギー密度
 a_t : ターゲット構成粒子径
 K : パラメータ $\sim 0(1)$

- K が1~5程度の不確定性を持つとすると、

$A = 1.1/a_t \sim 1.5/a_t$ 程度の減速率と求められる。

クレーター形成の実効的エネルギー E_{eff}

- ① ターゲット構成粒子が破壊されない場合 *Güttler et al. (2012)*

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{2} m_p v_0^2 \left(1 + \frac{m_t}{m_p} \right)^{-2}$$

- ② ターゲット構成粒子が破壊されるが、小石層を貫通しない場合

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{2} m_p v_0^2 \exp(-2Az)$$

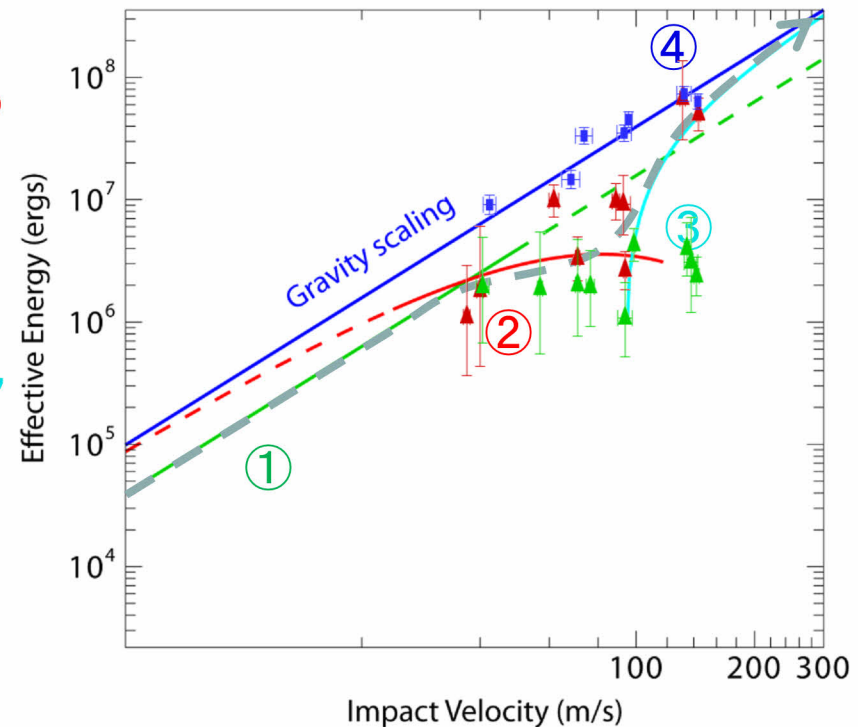
- ③ ターゲット粒子が破壊され、かつ、小石層を貫通する場合

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{2} m_p v_0^2 - \frac{CQ_D^* m_t}{\text{Constant.}}$$

- ④ 衝突エネルギーが十分に大きい場合

$$E_{\text{eff}} \sim \frac{1}{2} m_p v_0^2$$

衝突速度と実効的エネルギーの関係



イトカワのクレーター表面年代への応用

イトカワでのクレーター則は重カスケーリングに近い可能性が高い。
→ **クレーター表面年代 < 10Myr** である可能性が高い。

- イトカワの窪地の内部は宇宙風化度が低い。

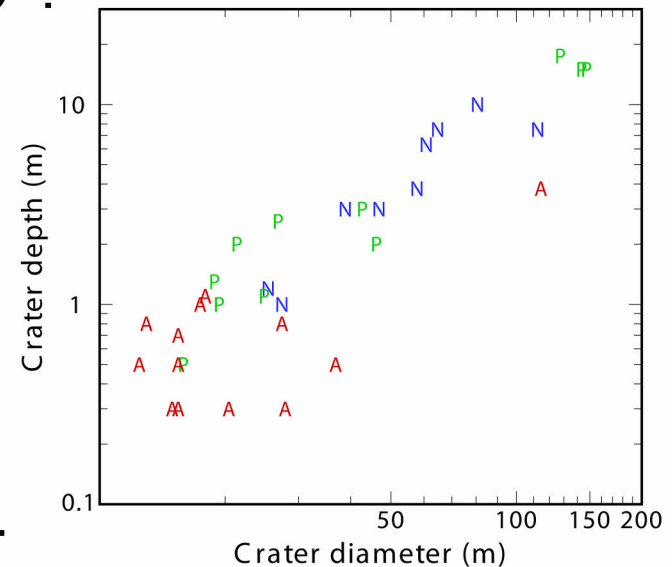
Ishiguro et al. (2007)

- イトカワ上の円形の窪地は底面によって、次のように分類できる。 *Hirata et al. (2009)*

- レゴリスで満たされているもの (A)
- レゴリスで部分的に満たされているもの (P)
- 岩塊質なもの (N)

- 底面にレゴリスが露出しているクレーター
重カスケーリング則 (①) が適用できると考えられる。

- 底面も岩塊質なクレーター:
衝突エネルギー < 破壊エネルギー: ①
衝突エネルギー > 破壊エネルギー: ②



はやぶさ2サンプラーへの応用

- はやぶさ2の目標天体である1999JU3表面もcm～mサイズの粒子で構成されている可能性が高い。 *Müller et al.(2011)*
- 搭載カメラ解像度の制限から、全球観測位置からmm～cmサイズの粒子の識別ができない。
- 実験から得られた減速率 ($A = 1.1/a_t \sim 1.5/a_t$) を用いると、

はやぶさ2サンプラー条件

ターゲット構成材料: basalt ($Q_D^* = 1000\text{J/kg}$)

衝突スピード: 300m/s

インパクト質量: 5g

$$d_{\max} = \frac{\log(E_{\text{impact}}/KQ_D^*m_t)}{2A} \blacktriangleright d_{\max} = 2 \sim 3\text{cm}$$

→小石層が2～3cm以下であれば、その下層のレゴリスをサンプリングできるかもしれない。

まとめ

- 小石とレゴリスが層構造を持つとき、クレーターサイズの変化を実験により評価した。
 - 重カスケーリングにより近い可能性が高い。
 - 構成粒子が破壊されるか否か、小石層を貫通するか否かによって4つの領域に分けられるかもしれない。
- 理学的意義
 - ラブルパイル小惑星のスケーリング則が重力則に近いとすると、イトカワの年齢は回収試料の宇宙線照射年代 (<10Myr) (Nagao+2011, Meier+2014)と同程度になる可能性がある。
- 工学的意義
 - 1999JU3表面の多くはcmサイズの小石(弾丸径に匹敵)に覆われている可能性があるが、小石層が2~3cm以下ならばSMP弾丸が貫通し、内部のレゴリスをサンプリングできる。

謝辞：本研究を進めるにあたって、神戸大学の荒川先生、中村先生に議論の機会をいただき、有益なコメント・アドバイスをいただきました。ここに感謝の意を表します。



ご清聴ありがとうございました。