

論文の内容の要旨

Impact-induced resurfacing process on asteroid Itokawa inferred from impact experiments and reflectance spectroscopy analyses

(衝突実験と反射スペクトル解析による
小惑星イトカワの衝突表面更新過程の解明)

複雑理工学専攻 杉田研 巽 瑛理

1. 序論

小惑星の物質的な理解は太陽系始原物質の理解、小惑星の力学的な進化は地球を含む太陽系内部への衝突フラックスの制約につながる。小惑星帯内での衝突破壊により小惑星はより小さく進化していくため、小さな小惑星の進化の歴史を知ることは小惑星帯や地球型惑星進化の理解に必要不可欠である。

はやぶさによるイトカワの探査によって小惑星の詳細な画像、スペクトル情報などが得られ、その進化過程が明らかになりつつある (e.g., Saito et al., 2006; Miyamoto et al., 2007). また、はやぶさミッションでは初の小惑星からのサンプル回収が行われており、放射性核種を分析することによって様々な年代が得られている (e.g., Nagao et al., 2011). しかし、それぞれの年代がイトカワの進化史においてどのような意味を持つのかは明らかではない。本研究では、表面進化に着目し、クレーター分布とスペクトル観測を基にその表面年代の制約を試み、物質科学的な証拠と合わせ統合的にイトカワの進化史を明らかにすることを目的とした。

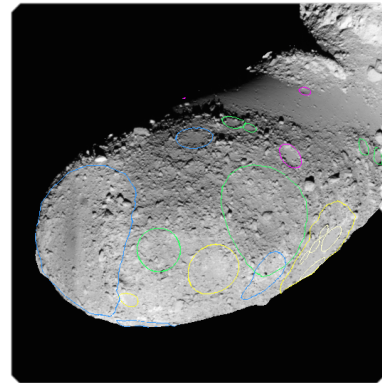


Fig. 1 イトカワの衝突由来と考えられる円形窪地. ©JAXA/ISAS

ラブルパイル小惑星であるイトカワにはクレーターのような円形の窪地 (Fig. 1) が複数発見されている (Hirata et al., 2009). これらが隕石衝突クレーターであるとすると、クレーター個数分布から天体の表面年代を制約することができる (クレーター年代学). イトカワの様に表面に岩塊が多数存在する場合には表面の岩塊が鎧のような効果を示し、クレーター形成効率を下げる (アーミング効果) 可能性が示唆されている。しかし、粗粒な天体表面でのクレーター形成効率はこれまで定量的に明らかになっていない。そのため、小惑星イトカワでのクレーターサイズの見積もりは不確実性が高く、用いるクレーターのスケーリング則によっては年代が 10 倍以上も変化する。クレーターの形成効率を実験から定量的に見積もりスケーリング則を明らかにすることにより、より正確なイトカワのクレーター年代推定を試みた。

一方で、局所的な表面年代を評価する方法として宇宙風化という指標がある。宇宙風化とは微小隕石衝突や宇宙風の影響を受けて、徐々に普通隕石のスペクトルから赤化・暗化する作用であり、AMICA (Asteroid Multiband Imaging Camera) の画像解析からイトカワにおいても不均一に宇宙風化が起こっていることが報告された (Ishiguro et al., 2007). つまり、イトカワのローカルな相対年代は宇宙風化度から評価できる。この指標を用いて、各クレーターの相対的な年代を調べ、全球のクレーター積算年代が示す物理的な意味を解釈し、イトカワの力学的

進化の制約を試みた。

2. 衝突実験によるアーマリリングの定量的評価

イトカワの表面には cm-m サイズの岩塊が豊富に存在しており、隕石衝突頻度から隕石がそれ自身と同程度もしくはそれよりも大きい岩塊にぶつかることが頻繁にあることが分かった。これまで、低速度で粒子径と弾丸径の比を変えた実験 (Güttler et al., 2012) と高速度で大きい粒子への衝突実験 (Holsapple and Housen, 2014) が行われたが、これらは一見矛盾した結果を出している。本研究ではアーマリリングのメカニズムおよび衝突条件と形成されるクレーターサイズの関係、つまりクレータースケーリング則を明らかにするため、クレーター形成実験を行った。衝突実験は ISAS の二段式軽ガス銃 (1 – 6 km/s) および東大の一段式軽ガス銃 (0.1 – 0.2 km/s) を用いて行った。ターゲットにはパミスと玄武岩を用い、異なる粒径のターゲットに対して衝突速度を変化させ、クレーター直径を計測した。また、Quarter-space 実験によりクレーター形成中の断面を観察した。クレーター形成はごく初期の粒子の破壊過程から後期の破壊を伴わない掘削過程に分けられることが分か

った。さらに、クレーター形成効率は $\xi = E_{imp}/Q_D^* m$ そのメカニズムによって3つの領域に分けることができ、衝突エネルギーが非常に高い ($\xi > 10^4$) ときにはクレーターサイズは粒子径の影響を受けず、砂ターゲットにできるクレーターサイズと同等になるが、衝突エネルギーが小さくなると粒子径の影響を受け砂にできるクレーターよりも小さくなりイジェクタ速度も遅くなることが分かった。さらに衝突エネルギーが小さな条件 ($\xi < 1$) ではターゲット粒子にピットができるだけであったり、一つの粒子が破壊されるだけに留まり、明らかなクレーターは形成されなかった。瞬間的な弾丸と標的構成粒子の運動量交換モデルを考え、従来のクレータースケーリング則を拡張した新しいクレーター則を提案した (Fig.2)。

3. モンテカルロ法によるクレーター年代推定

実験で求めたアーマリリングの条件に従い、モンテカルロ法的にイトカワのクレーター年代を推定する。O'Brein et al. (2005)のメインベルト小惑星分布に従うように隕石サイズを決め、さ

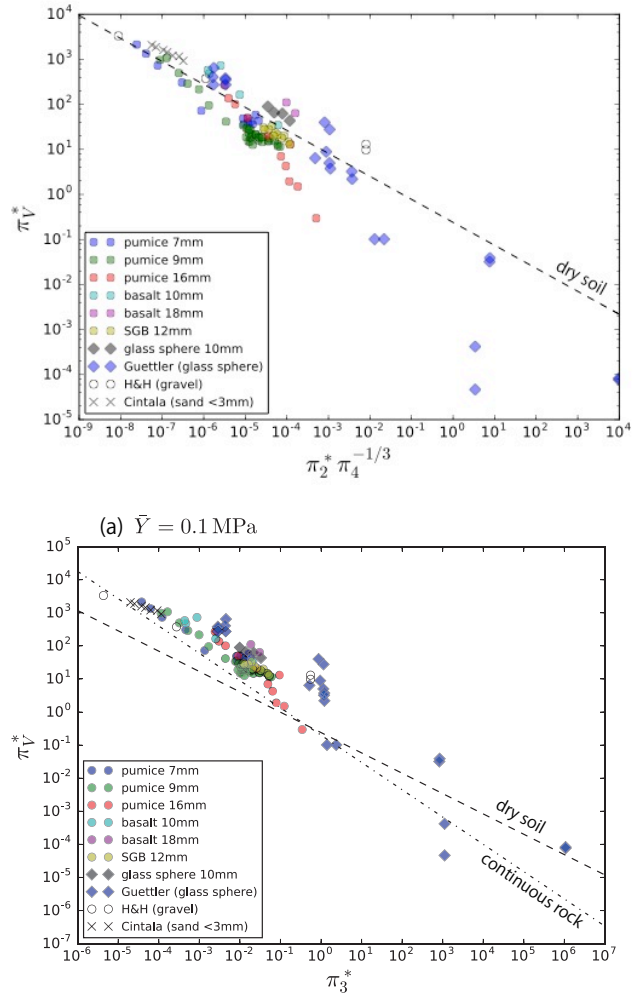


Fig. 2 新しいスケリングによる実験結果の整理. 新しいスケリングで実験結果がうまく表せる. 新しい重力則 (上) と新しい強度則 (下).

らに小惑星上の粒径分布から確率的にどのサイズの岩塊に衝突するのか求めた。次の通り、アーミング条件に応じてクレーター直径を決定した：Armoring range I ($\phi < 1$ かつ $1 < \xi < 10^4$), Armoring range II ($\phi < 1$ かつ $\xi < 1$)。形成されるクレーター分布はアーミングの効果がないときに比べ、大きいクレーターの分布には大きく影響を与えないが、小さいクレーターがオーダーで少なくなる傾向が示された (Fig. 3)。これは衝突励起地震によるクレーター消去過程だけでは説明できず、アーミングを考慮することでイトカワのクレーター分布 ($D > 10$ m) が良く説明されることから、イトカワでアーミングが起きていたことが支持される。また、クレーター年代は、先行研究で一枚岩にできるクレーターのサイズ則を用いて求められた 75 Myr – 1 Gyr (Michel et al., 2009) より非常に短く、1 – 10 Myr 程度と見積もられた。

4. スペクトル解析による宇宙風化年代とクレーターの関係

イトカワの全球について主成分分析を行った結果、第一主成分 (PC1) は宇宙風化を表していることが示唆された (Koga et al., 2014)。宇宙風化度はその場所が最表面に晒されてからの年代と考えられているため、衝突によるクレーター掘削と深く関係している。また、 $\sim 2\text{m/pixel}$ という高解像度の画像が得られていることから、局所的な宇宙風化度を知ることができる (Fig. 4)。重力場に沿った PC1 の勾配は、時間をかけた重力場に沿ったレゴリスの崖崩れの様子示しており、イトカワでの衝突励起地震の存在を示唆する結果となった。これは Miyamoto et al. (2007) の解析と調和的である。Hirata et al. (2009) で示された、衝突由来と考えられる円形窪地それぞれの底面の PC1 値を調べ、分類を行った (Fig. 5)。重力場に沿ったレゴリスの移動から、レゴリスの底面の PC1 値がクレーターの古さを表す指標と考えることができる。その結果、PC1 が大きい、つまり比較的古いと考えられるものは底面よりもリムが新しいものが支配的になっているこ

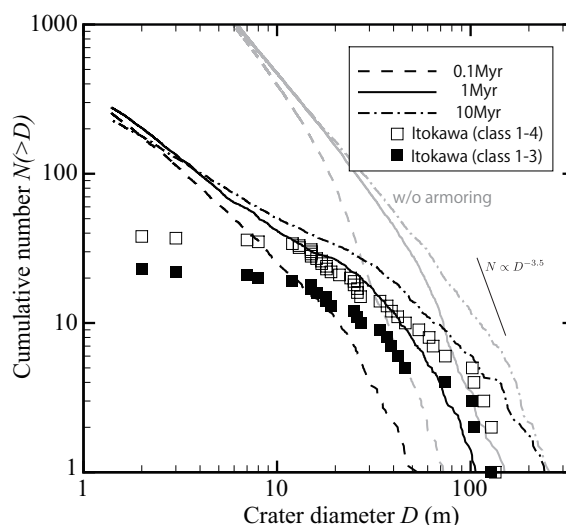


Fig. 3 モンテカルロシミュレーションによるイトカワのクレーター分布と観測結果の比較。アーミングがあるときとないときでは小さなクレーターの分布が大きく変わる。

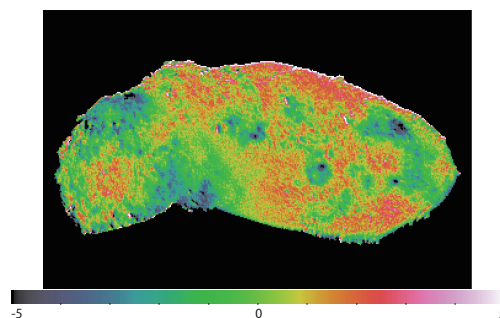


Fig. 4 イトカワの PC1 マップ。宇宙風化度が不均質であることを示している。クレーター配置と関係している。(ST_2385540425, ST_2385559680, ST_2385578902, ST_2385598109, ST_2385617364, ST_2385655809)

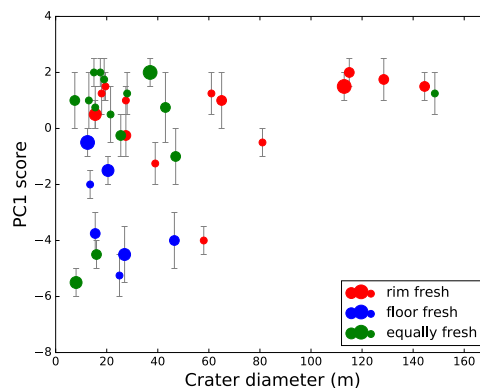


Fig. 5 クレーター直径とクレーター内部の PC1 値の関係。Rim fresh: リムが底面よりも新しい, Floor fresh: 底面がリムよりも新しい, Equally fresh: 同程度。

とがわかった。特に大きな円形窪地 ($D > 60 \text{ m}$) は底面がリムよりも古いものがほとんどであり、クレーターが時間をかけて変形していくという仮説と調和的である。

5. イトカワのクレーター年代とスペクトル相対年代から導かれる力学的進化

各クレーターの PC1 値から、各クレーターの相対的な年代が分かった。その結果、クレーターは時間的に一様に形成されたのではなく、クレーター形成頻度、つまり隕石の衝突頻度の低下があったことが示唆された。小惑星の分布よりメインベルト内での衝突頻度は現在の地球近傍軌道よりも低く、同程度のクレーターを形成するために 50 倍上の時間が必要となることから、イトカワの表面のクレーター分布はメインベルトから地球近傍への移動を示している可能性がある。これは、小惑星がメインベルトから地球近傍へと移動してきたことを示す初めての実証的な証拠かもしれない。

イトカワの移動を仮定すると、それぞれの領域でのクレーター年代は地球近傍で $>2 \text{ Myr}$ とメインベルトで $1 - 10 \text{ Myr}$ と推定できる。この年代は宇宙船照射年代 (e.g., Nagao et al. 2011) やスペクトル年代 (e.g., Koga et al. 2014) と整合的である。この結果は、イトカワの全球的な更新が $1 - 10 \text{ Myr}$ 前に起こったことを示し、イトカワが母天体の破壊 ($\sim 1.3 \text{ Gyr}$; Park et al., 2015) から何度かの全球的な表面更新を経験したことを示唆している。

さらには、大きなクレーター群が同じような比較的古い年代を示していることは、メインベルト内で大きなクレーターが形成されたのちに地球近傍軌道に移動し、宇宙風化の影響をより受けたと解釈できる。つまり、イトカワは少なくとも数 Myr は大きなクレーターを消滅させるような大規模な変形例えば衝突破壊や潮汐力による変形がなかったことを示唆している。

参考文献

Saito et al., *Science* 312, pp. 1341-1344 (2006); Miyamoto et al., *Science* 316, pp. 1011-1014 (2007); Hirata et al., *Icarus*, 200 pp. 486-502 (2014); Michel et al., *Icarus* 200, 504-513 (2009); Ishiguro et al., *MAPS* 10, pp.1791-1800 (2007); Güttler et al., *Icarus* 220, pp. 1040-1049; Holsapple and Housen, 45th LPSC, #2538 (2014); O'Brien et al., *Icarus* 178, pp. 179-212 (2005); Park et al., *MAPS* 50, pp. 1-12 (2015); Nagao et al., *Science* 333, pp. 1128-1131 (2011); Koga et al., 45th LPSC (2014)

