

# 論文審査の結果の要旨

氏名 巽 瑛理

本論文は6章から成り、第1章は序論、第2章はラブルパイル天体を模した粗粒標的へのクレーター形成実験、第3章は第2章により求められたクレーターのサイズスケール則を用いたイトカワのクレーター年代推定、第4章はイトカワのスペクトル解析によりクレーター年代の解釈を与えている。第5章はイトカワの表面に関する先行研究および他手法による年代推定レビューを行い、イトカワの総合的な力学進化史を提案している。第6章は全体のまとめとなっている。

本論文は、探査機はやぶサの観測で発見された小惑星イトカワ上のクレーターを詳細解析したものである。画像解析、室内実験、分光解析を連携させた総合的な研究である。

イトカワなどの小さな小惑星は、岩塊や砂が非常に弱い重力や固着力で結びついた天体（ラブルパイル天体）であると考えられている。ラブルパイル天体では岩塊一つ一つは強度を持つが、全体としては粉体的に振舞うため非常に複雑で、このような天体でのクレーターの形成機構やスケール則は明らかにならなかった。そのため、クレーターの数密度からラブルパイル天体の表面年代を正確に得ることができないという問題があった。

第2章では、ラブルパイル天体のように粗粒な天体表面を模擬した標的に対して幅広い速度域（ $\sim 70\text{m/s} - 6\text{km/s}$ ）についてクレーター形成実験を行い、これまで得られていなかった粒子の破壊が支配的なエネルギー領域からクレーター掘削の支配的なエネルギー領域までの実験データを得た。得られたデータは、従来のスケール則に乗らない傾向を示した。そこで、高速度カメラによる断面観察を行い、現象が標的粒子の破壊過程と掘削過程の2つからなることを明らかにした。この観察事実に基づいて従来のスケール則を拡張し、アーミング効果がある場合の新たなスケール則を提案し、本研究で得た粗粒媒質上のクレーターサイズのデータを説明することに成功した。

第3章では第2章で提案したクレーターのサイズスケール則を用いて、モンテカルロ法的にイトカワのクレーター分布シミュレーションを行った。イトカワのクレーター分布は  $D > 100\text{ m}$  では飽和状態なのに対して、先行研究から  $D < 100\text{ m}$  ではクレーターが非常に少ないことが報告されており、このような特徴的な分布を再現できるか検討した。小惑星上のクレーター大きさ分布は、アーミング効果だけでなく、レゴリス移動によるクレーター緩和からも影響を受けるため、先行研究のレゴリス移動モデルと本論文で求めたアーミング効果の両方を考慮してクレーター大きさ分布の推定を行った。シミュレーションの結果、アーミング効果とレゴリス移動過程の両方が効けばイトカワのクレーター分布 ( $D > 10\text{ m}$ ) が再現できることが明らかとなった。シミュレーション結果

は 10 m 以下のクレーターが観測結果に比べ過剰に生成されていたが、これはイトカワの 2 つの特徴的な地形（粗粒な地域と細粒な地域）によってクレーターの消去過程が異なることや小さなクレーターの消去イベントの結果であるとも解釈できる。シミュレーション結果からイトカワのクレーター年代は 1 – 10 Myr と示唆された。これは一枚岩にできるクレーターサイズを仮定した先行研究の結果 (75 Myr – 1 Gyr) よりも 10 倍以上若い年代であり、イトカワが母天体の破壊から複数回の全球的な表面更新をしたことを強く示唆する結果である。

第 4 章では、はやぶさに搭載された AMICA の分光画像データを用いてイトカワのスペクトル解析を行った。スペクトルの主成分分析結果から、イトカワの第一主成分 (PC1) として宇宙風化度を抽出できており、PC 1 値が大きいものほど宇宙暴露年代が古いことが示されている。個々のクレーターの PC1 値を計測することで、クレーターの年代分布を得た。クレーターの年代分布からクレーター形成率（つまり天体衝突率）が近年に大きく減少したことが示唆された。これはイトカワが小惑星帯（天体衝突頻度が高い）から地球近傍（天体衝突頻度が低い）への移動を反映している可能性が高い。イトカワの軌道変化に関する初めての実証的根拠である。

第 5 章ではイトカワの力学進化を総合的に議論している。イトカワのクレーター形成率の減少が軌道進化に由来するならば、メインベルトと地球近傍での滞在時間は、それぞれ 1 – 10 Myr と >2 Myr となることを明らかにした。また、メインベルトで形成されたクレーターが現在まで残っていることは、イトカワが地球近傍に移動して以来、地球近傍で全球が大変形するイベント（例えば、惑星接近による激しい潮汐変形）はなかったことを示唆することを指摘している。また、本論文で得られた年代は、先行研究でのクレーター年代とイトカワ試料から得られた表面年代の矛盾を解消することも指摘している。

本論文はラブルパイル天体上でのクレーター形成素過程を明らかにし、それに基づいた小惑星の力学進化史の解明を行っている。ラブルパイル天体は普遍的に存在するため、本論文で求めたスケール則や解析手法はイトカワだけでなく他の多くの小惑星、特に今後探査が予定されるリュウグウや Bennu にも適用できる。

以上のことから、本論文に博士の学位を授与できるものと判断する。

以上 2156 字