

# ラブルパイル小惑星の振動解析と破壊ダイナミクスへの応用に関する一考察

その他のタイトル	Study on Vibration Analysis of Rubble Pile Asteroids and Its Application to Fracture Dynamics
著者	中条 俊大
学位授与年月日	2017-03-23
URL	<a href="http://doi.org/10.15083/00075713">http://doi.org/10.15083/00075713</a>

## 審査の結果の要旨

氏名 中条 俊大

修士（工学）中条俊大提出の論文は「ラブルパイル小惑星の振動解析と破壊ダイナミクスへの応用に関する一考察」と題し、本文7章および付録から成っている。

ラブルパイル小惑星は岩塊や砂利が万有引力により集積して成り立っている小天体であり、その構造的な特性は一枚岩である小天体とは異なる。ラブルパイル小惑星の探査ミッションにおいて、その内部構造を調べるため、あるいは惑星保護のため、衝突機（インパクター）を衝突させて振動や破壊を励起する際、事前にその振動や破壊の応答を予測する必要がある。このとき前述の理由から、ラブルパイル小惑星を集積した粉体と考えて解析しなければならない。

粉体の挙動解析には、実験に加え、近年 Discrete Element Method (DEM) と呼ばれる数値シミュレーション手法がよく使われている。これは粉体を多数の粒子でモデル化し、粒子同士の接触時にヘルツの接触理論をはじめとする弾性力学に基づいた反発力を与えることで、粉体の運動を模擬するものである。一方、これまでの研究は種々の実験や DEM によるシミュレーションの結果を議論するパラメトリックスタディに終始しており、粉体のダイナミクスを体系的に解析した例はない。

以上を背景に、本論文は万有引力で集積した粉体としてのラブルパイル小惑星のダイナミクスの体系化を目指し、その一環として振動解析およびそれを応用した破壊ダイナミクスに関する基礎理論の構築を行っている。具体的には、まずラブルパイル小惑星を DEM と同様に粒子群としてモデル化し、その運動方程式を線形化することで、粒子群全体の剛性や固有振動モードを導出している。そもそも、ラブルパイル小惑星が振動するということはこれまで定性的な見解にとどまっており、本研究により初めてヘルツの接触理論等に基づいた定量的な解析ができたといえる。また、固有振動モードを用いて、インパクターにより励起される破壊現象も近似的に表現できることを示している。これにより、ある振動や破壊を励起するために適切な衝突条件を体系的に求められることを示している。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的と意義を述べている。

第2章では、本研究におけるラブルパイル小惑星のモデル化の考え方、および DEM と同様の粒子間相互作用について説明している。また、粒子群の剛性を定義できることを示しており、さらにそれが粒子群を構成する各粒子のサイズによらないことを示している。

第 3 章では、粒子群の固有振動モード解析に必要な定式化を行い、代表的な粒子群について計算例を示している。また、粒子群が自転している場合にも触れている。さらに、スケーリング則として、固有振動数は粒子群全体のスケールの $-2/3$  乗に比例することを解析的に示している。

第 4 章では、第 3 章で示した粒子群の固有振動モードと弾性体（連続体）の固有振動モードの比較を行っている。低次の固有振動モードの形状には両方で共通するものが見られる一方、固有振動数は大きく異なることを示し、その理由について論じている。また、粒子群が固有振動モードに基づいた線形振動をする限界について力学的エネルギーの観点から論じている。

第 5 章では、インパクトの衝突を想定した破壊現象を固有振動モードにより表現する方法について述べている。具体的には、破壊の進行に伴って固有振動モードを逐次再構築して状態量を引き継いでいけば良い。さらに、近似精度は劣るが、初期形状の固有振動モードのみを用いても表現できることを示している。つまり、粒子群の領域や境界条件が動的に変化するにも関わらず、初期形状の固有振動モードが依然として有用であることを示している。

第 6 章では、第 5 章の評価を受け、固有振動モードを用いれば、ある振動や破壊を励起するために適切な衝突条件を体系的に求められると述べている。まず、与えられた次数の固有振動モードへのエネルギー配分を最大化する衝突条件が解析的に求められることを示している。次に、粒子群のある与えられた領域のひずみエネルギーの極大値を最大化するための適切な衝突条件は最適化問題として解けることを示しており、計算例によってその妥当性を示している。ひずみエネルギーの極大値はその領域を効率良く破壊するための指標の一つであるが、他の評価関数を定義した場合も同様に体系的に解くことができる。

第 7 章は結論であり、本研究の成果を要約している。

以上要するに、本論文はラブルパイル小惑星の挙動解析の体系化の一環として、固有振動モード解析の定式化を行い、粒子群の大局的挙動の粒子サイズへの非依存性、破壊のし始めの挙動を固有振動モードにより表現、評価できることを示した。ラブルパイル小惑星の挙動を **Finite Element Method (FEM)** など解析する手法と比べ、本手法ではモデルの構築を容易にしておき、計算コストを大きく低減するという点で優れている。特に、粒子サイズによらずに計算できることから、モデルの格子生成に要する時間を削減できるところが大きい。将来的に、ラブルパイル小惑星の振動励起や破壊を伴うミッション、特に惑星保護に関連するミッションに応用できることから、宇宙工学分野において貢献するところが大きい。さらに、粉体の挙動に関連して地上の土木工学等にも応用できると期待される。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。