論 文 の 内 容 の 要 旨

論文題目　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
（Study on Vibration Analysis of Rubble Pile Asteroids and Its Application to Fracture Dynamics）

氏　　名　中条　俊大

ラブルパイル小惑星とは，岩塊や砂利が万有引力により集積してできた小天体のことである．その探査ミッションにおいて，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ことが考えられる．このとき事前に衝突への応答を予測する必要があるが，一枚岩として成り立っている小天体とは大きく異なる，集積した粉体としての挙動を考慮して解析しなければならない．

ラブルパイル小惑星の挙動を調べるのに適したシミュレーション手法の一つとして，Discrete Element Method (DEM) が挙げられる．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，運動を模擬するものである．一方，従来の関連研究では，ラブルパイル小惑星の挙動解析はDEM を用いたパラメトリックスタディに終始しがちであり，ダイナミクスの本質について議論したものはない．本論文ではラブルパイル小惑星のダイナミクスの体系化を目指し，固有振動モード解析手法と，それを応用した，指定された振動励起や破壊を実現するための衝突条件の解析手法を提案する．

ラブルパイル小惑星をDEM にしたがって万有引力で結合した粒子群としてモデル化する．まず全体として内力がつり合い，全体の形状を保っている状態を基準に内力の線形化を行うと，粒子群の剛性マトリクスを定義することができる．これと粒子の質量や

慣性モーメントから求まる質量マトリクスにより，粒子群の固有振動モードが求められる．それらに必要な定式化を行い，計算例とともに示す．また，粒子群全体の大まかな形状が与えられれば，その固有振動モードは大局的には構成する粒子のサイズに依存しないことを示す．これにより，粒子群の大局的挙動解析に際し，必要に応じてモデル化に必要な計算コストを低減させることができる．さらに，粒子群全体のサイズに対する固有振動モード，固有振動数のスケーリング則を解析的に示す．

次に，本論文で示した手法から得られる，ラブルパイル小惑星を想定した粒子群の固有振動モードと，従来の研究で明らかになっている，一枚岩として成り立っている小天体を想定した弾性体（連続体）の固有振動モードの比較を行い，それらの共通点や差異について考察を行う．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る．

こうした固有振動モードによる粒子群の運動表現は，線形振動だけでなく破壊のし始めの表現にも応用可能である．本論文では，粒子群へのインパクターの衝突による破壊のし始めを固有振動モードにより表現する方法について述べる．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，計算例とともに定量的に示す．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ということである．

振動や破壊のし始めを固有振動モードで表現するとき，逆に指定された振動や破壊のし始めを実現するための適切な衝突条件を体系的に求めることができる．まず，指定さ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す．次に，粒子群の指定さ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述べ，計算例によってその妥当性を示す．ひずみエネルギーの極大値はその領域の破壊のし始めの様子を表す評価関数の一つであるが，他の評価関数を定義した場合も同様に解くことができる．つまり，破壊のし始めの効率を目的にしたがったある評価関数により表現すると，粒子群の指定された領域（または全体）を効率良く破壊するための衝突条件が体系的に求められるということである．

以上のように本論文では，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への応用を見据え，ダイナミクスの基本原理について論じる．