

## 審査の結果の要旨

氏名 稲垣 健太

本論文はMPS法を用いた固体解析に関する研究で、5章より構成されている。

第1章は序論で、研究の背景と目的が述べられている。従来、構造解析には主として差分法や有限要素法に代表されるメッシュ法が使われてきた。こうした手法においてはメッシュデータの作成に多大な労力がかかる。またメッシュが大きく変形するような解析が困難であったり、リメッシングを行う必要がある場合に計算負荷が大きくなる。Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法は、連続体を粒子で記述し、構成方程式を粒子間の相互作用モデルに置き換えて解析を行う手法である。MPS法の利点は接触、大変形、破壊を容易に取り扱うことができることである。これを踏まえ、固体解析に対しMPS法を適用することで従来の手法では困難であった接触、大変形、破壊を含む現象を効率的に解析する手法を開発することが研究の目的であるとしている。

第2章ではMPS法を用いた効率的な接触解析手法を開発した。従来の有限要素法のような格子を使用する解析では、構造物同士の接触を効率よく計算することが困難であった。また、一般的な構造物は剛性の異なる材料で構成されることが多く、ヤング率が大きな材料に合わせて時間刻みを小さく設定する必要があるため、動的解析では計算時間が莫大になってしまうという問題があった。そこで、ヤング率が比較的小さな部位を弾性体でモデル化し、ヤング率が大きくなる部位を剛体としてモデル化する弾性体-剛体連成手法を提案した。

本手法をコンクリートキャスクの地震応答解析に適用した。コンクリートキャスクの構成要素であるコンクリート容器、キャニスター、鉛の蓋、使用済み燃料棒を粒子によって2次元でモデル化した。このうち、コンクリート容器のみを弾性体、その他の剛体として扱う。神戸波を入力として用い、キャスクの傾斜角、浮上りおよび水平方向すべりの算定を行った。過去の実験および解析の結果と本解析の結果を比較し、これらの値がよく一致することを確認した。またガタがある場合とない場合では、ガタがある場合において角度、浮上り、すべりが小さく抑えられる結果が得られた。本手法がコンクリートキャスクの地震応答解析を効率的に行えることが示された。

第3章ではMPS法による弾塑性解析手法を開発した。開発した手法では、ひずみと応力の関係を増分形式で記述する。まず弾性状態を仮定し仮の応力を計算し降伏診断を行う。

降伏と判断された場合、Von-Mises の降伏関数を仮定した基礎式を用いる。応力ひずみ曲線が bi-linear であると仮定し、後退型 Euler 積分法を適用して応力を評価する。応力を偏差成分と圧力成分に分割し粒子の加速度を計算する。その際、圧力成分では反発力しか働かなくすることで計算の不安定性を回避する。本手法によって弾塑性体の挙動を常に安定して解析することが可能となった。

本手法の妥当性を検証するために原子力発電所で発生する使用済み核燃料の輸送に用いられる輸送用キャスクのフィンの大変形解析を行った。フィンの一つを切り出したものを計算体系とし、初期形状でのフィンの傾斜が 0 度、10 度、20 度、40 度の 4 ケースで計算を行った。0 度、10 度の場合でダブルヒンジモードの変形が起こり、20 度と 40 度の場合ではシングルヒンジモードの変形を示した。この結果は過去に行われた実験結果と一致した。以上より、本手法の大変形問題への適用性が確認された。

第 4 章では MPS 法を用いた破壊解析とその可視化手法の開発を行った。こうした技術は防災シミュレータや外科手術シミュレータなどへの応用を想定している。本研究ではセパレーションテンソルを導入することにより、任意の向きの破壊面を扱える安定な手法を開発した。本手法を円環の衝撃破壊解析に適用し、実験結果と良い精度で一致していることを確認した。

さらに、粒子法における破壊の解析結果を写實的に可視化する手法の開発を行った。まず、ポリゴンを入力とし、それをレイキャスティング法によって粒子化する。その際粒子とポリゴンノードの相対位置を記憶しておく。次に、粒子法によって解析を行う。その結果を用いて各粒子における変形勾配テンソルを計算し、ポリゴンノードの相対位置を決定する。これによって変形をポリゴンで描画することができる。また破壊が発生した場合には、そこに新たなノードとポリゴンを生成することで破壊を含む現象を可視化する。本手法により剛性の大きい物質および小さい物質の動的な破壊現象を写實的に可視化することが可能となった。

第 5 章は結論であり、本研究のまとめが述べられている。

以上を要するに、本研究では従来手法では困難であった接触、大変形、破壊を含む現象に対して、粒子法による効率的な解析手法を開発した。また、計算例によってその有効性を示した。こうした成果はシステム量子工学の進歩に貢献するところが少なくない。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。