論 文 の 内 容 の 要 旨

論文題目　粒子法を用いた複雑問題のための
構造解析手法に関する研究

氏　　名　邵　陽

自然界で起こる現象は，実際には様々な物理の相互作用の結果である場合が多い．また，技術の進歩により，人工物の挙動も益々複雑になっている．従って，気体，液体，固体の運動，物質の拡散と化学反応，電磁気現象などを統合的に考慮しなければならない複雑現象の解明および予測は工学研究として，非常に重要である．この中で，自然現象や工業製品の製造プロセスにおいて広く現れる流体構造連成問題は特に重要である．流体と構造との連成問題はエアバッグの膨張解析，炭素繊維強化プラスチックの圧縮成型解析，能動空力弾性翼の変形解析，スラミング現象の衝撃解析，バーチャル手術のシミュレーション，原子炉の炉心溶融解析など，多岐の分野で様々な現象の中に見られる．また，粉体工学分野に現れる粉粒体と構造との連成問題も，粉粒体を不連続流体として扱うと，マルチスケールの流体構造連成問題になる．これらの複雑現象を解明，予測，制御するためには，物理現象を描画する数学モデルの近似解を求めることを通じ，定量的に自然や人工物の挙動を再現及び予測することができる数値解析が，重要な研究手段として期待されている．

近年，数値解析は解析手法の発展と計算機能力の向上に伴い，単純な固体や流体の解析から，複数の物理現象を同時に解析するマルチフィジクスシミュレーションに発展している．これまでの数値解析手法は計算点の空間位相接続関係の決め方により，有限差分法と有限要素法などを代表とする格子法と，SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法，MPS(Moving Particle Semi-implicit)法，EFG(Element Free Galerkin)法などを代表とする粒子法に分けられる．格子法と粒子法のどちらにおいても，計算対象物を計算点の集まりとして表す．しかしながら，格子法では最初に計算点間の接続情報を作成するのに対して，粒子法では逐次周囲の計算点を探索し，接続関係を作成する．また，粒子法はラグランジュ法に属するため，流体解析において対流項を計算する必要がないという特徴を持つ．さらに，計算格子の作成が必要ないので，構造解析において，大変形に対応しやすいという特徴も挙げられる．粒子法は約 20 年間活発的に研究されてきた．従来の格子法より，不連続面や複雑境界条件の処理がしやすく，新たな物理モデルを加える自由度が高いなどの利点が注目され，大変形問題，破砕問題，複雑形状問題など格子による制約が発生する問

題に適用が試みられている.

そこで，本研究では，様々な複雑問題，特に流体構造連成問題を解くための新しい粒子法の計算手法を開発および検証し，粒子法の適用範囲を広げることを目的にした.
具体的には，不連続流体である粉粒体の内部応力および破砕過程も解析できるように，有限要素法と離散要素法を結合した FEMDEM を具体的な問題に適用し，検証を行った.また，シェル形構造物の数値解析の効率を向上するために，新たなハミルトン系粒子法シェル計算モデルを提案し，検証した．そして，流体と構造が相互作用しながら境界が大きく変化する現象を解析するために，ラグランジュ型解法である粒子法を流体と構造の両方に適用する新たな流体構造連成解析手法を開発し，検証した．最後に，その流体構造連成解析手法を用いて，炭素繊維強化プラスチックの材料物性を予測するために，圧縮成型プロセス中の内部ミクロ構造変化の解析を行い，工業上実用的な解析への適用性を検討した.

粉粒体の解析はこれまで粒子法の一種である離散要素法(DEM)が主に用いられてきたが,構造解析に広く用いられている有限要素法(FEM)と連成させれば，粉粒体の接触による粉粒体内部の変形を扱うことができる．そこで近年，粉粒体と構造物の連成解析において，FEM と DEM の結合である FEMDEM が開発され，粉粒体の接触変形を正確に解析する研究が行われている．FEMDEM の摩擦力に関する基礎検証は既に行われていたが，粉体工学の実用的な応用への検証はまだ不十分と考えられる．そこで，本研究では，FEMDEM の転動ボールミルへの応用を鑑み，回転円筒容器内の粉体挙動に FEMDEM を適用した．計算結果より，FEMDEM の解析結果は従来の離散要素法とほぼ一致していることが分かった．これに加えて FEMDEM では粉体粒子および構造物の内部応力まで示すことが可能であり，FEMDEM は高精度かつ有力な粉体解析手法であることが示された.

シェルとは一方向の長さが他の方向より非常に短い構造体のことである．理論的にはシェルを 3 次元構造物としてシミュレーションすることは可能であるが，厚さが非常に薄いため，通常の 3 次元数値計算手法では計算コストが高くなり，現実的な解像度では適切に近似できない．従って，シェルを解析するためには専用の計算モデルが必要である．シェルは工学的に重要であるため，その計算手法の研究は古くから行われ，幾つかの近似理論が提案されている．これまでの数値解析手法では，これらの近似理論を離散化し，解析モデルの検証(Verification)を行って，合理性を証明してきた．シェルの近似理論の中で，最も有名な理論は Kirchhoff の薄板理論と Reissner-Mindlin の一次せん断理論である．Kirchhoff 理論と比べると，数値解析において，Reissner-Mindlin 理論は偏微分方程式の階数が低いおよび厚肉シェルにもそのまま対応できるなどの利点がある．そこで，本研究では，Reissner-Mindlin 理論に基づいたハミルトン系 MPS 粒子法のシェル解析モデルを開発し，収束精度と近似性能を評価した．まず，従来の MPS 法を用いて，一次せん断理論に

より，シェルの法線方向に自由度を与え，独立変数として計算する方法を開発した．これにより，MPS 法を厚肉シェルにも適用できるようになった．しかし，従来の MPS 法では，収束性を持つためには境界部分の重み関数の調整が必要である．また，振動解析や騒音解析などに重要である長時間解析に対する安定性を持っていないことも重大な問題点である．そこで，本研究では更に，ハミルトン系 MPS 法による Reissner-Mindlin シェルの解析モデルを開発した．1 階微分を最小自乗近似で計算することによって，粒子配置が不均一な境界部分においても，1 次精度を持たせた．また，無限次元の Hamilton 系を有限次元の Hamilton 系に近似し微分方程式を離散化することにより，線形運動量と角運動量，全力学的エネルギーを保存させることに成功した．これによって，従来の MPS 法を用いる場合に生じる上記の 2 つの問題を解決した．片持ち平板の自由振動を計算し，手法の収束性と安定性を示した．

ラグランジュ型解法である粒子法を流体と構造の両方に適用した流体構造連成解析手法では，流体と構造が混在し相互作用しながら境界が頻繁に変化する現象の解析に適していると考えられる．しかしながら，3 次元で効率的な流体と構造の連成解析ができる MPS 粒子法アルゴリズムはまだ確立されていない．そこで本研究では，流体解析のための陽的 MPS 法と構造解析のための Hamiltonian MPS 法を統合し，相互作用力を対称的に計算する流体構造相互作用モデルを加え，効率的な 3 次元流体構造連成解析手法を開発した．そして，その有効性を検証するために 3 種類の検証計算を行った．計算結果は理論解，実験結果および他の解析手法の計算結果と比較し，MPS 粒子法流体構造連成解析手法の特徴と利点を示した．静止流体中の浮体の計算では理論解と良く一致する結果が得られた．弾性障害物を含むダム崩壊の解析結果は他の手法とほぼ一致したが，本手法の結果は変形が少し大きかった．弾性ゲートを有するダム崩壊の解析結果は，実験および他の手法の結果と比べ回復力が少し強い傾向があったが，最大変位は実験値と良く一致した．また，流体と構造間の相互作用力の数値振動が起きなかった．

炭素繊維強化プラスチックは母材であるプラスチック中に強化材にとして炭素繊維を加えている．高い強度と軽さを併せ持つ材料のため，スポーツ用具，航空機，自動車，建築など様々な用途に使用されている．繊維強化複合材料の物性は，強化繊維の含有率や分散状態などがミクロ構造に支配され，そのミクロ構造は成形プロセスに影響される．最終成形品の材料性能を予測するには成形プロセスにおける繊維の分散状態を知る必要がある．近年，複合材料の性能向上の実現に向け，繊維長が長くなってきており，繊維がプラスチックの流動へ与える影響も無視できなくなっている．そのため，繊維とプラスチックの流動を逐一追跡できる解析ツールの開発が必要となる．そこで，本研究では，成形プロセスの基本として，高粘性流体である樹脂の中に複数の炭素繊維を配向させて配置し，上下から圧縮する解析を行った．その結果，樹脂の流動が炭素繊維の配向によって影響され，樹

脂の広がりに方向依存性が現れることが示された．これは実験による観察結果と良く一致する．また，炭素繊維の長さを短くすると，樹脂の広がりの方向依存性は弱くなった．今後，炭素繊維強化プラスチックの様々な成形プロセスにおいて炭素繊維の配向の解析が行えるようになることが望まれる．

本研究では，工学的に重要である様々な複雑問題を解くために新しい粒子法計算モデルの開発および検証を行い，粒子法の適用範囲を広げることができた．