

京都大学	博士 (土木工学)	氏名	Hosein Falahaty
論文題目	<p>Enhanced fully-Lagrangian particle methods for non-linear interaction between incompressible fluid and structure (非圧縮性流体—構造非線形連成解析のための粒子法の高度化)</p>		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、流体構造連成 (Fluid-Structure Interactions, FSI) 問題に完全 Lagrange 型の粒子法を適用するための主たる課題として、エネルギー保存性に優れた Hamiltonian 粒子法と弾性体計算の安定性に寄与する stress point を導入し、計算手法の改良等に取り組んだ成果をまとめたものであって、6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、論文内容の概略と論文の構成に関して述べている。また、以降の章で扱う弾性体および超弾性体の解析に関して基礎事項を整理し、応力テンソルやひずみエネルギー関数の表式など、以降の章において共通する数式表記に関してまとめている。</p> <p>第 2 章は、流体構造連成問題に関する既往の研究の詳細なレビューである。はじめに、Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 法や Immersed Boundary (IB) 法など格子法の連成解析について概観し、次に、完全 Lagrange 型の粒子法による連成解析に関して、これまでの研究の進展をレビューしている。ゴム板へのダム崩壊流れの衝突、楔形弾性板の水面突入、弾性板の斜め方向の水面突入など、各種のベンチマーク問題への既往の粒子法連成解析の適用性に関して詳細にレビューし、本論文の位置付けを示している。</p> <p>第 3 章では、本論文の解析の核となる粒子法の計算手法に関して詳述している。まず、流体・弾性体に共通する基礎としての粒子法の kernel 補間および空間微分の定式化、MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法の積分補間子と空間微分演算について述べている。次に、projection 法に基づく MPS 法の 2 段階法計算アルゴリズムに関して述べ、半陰解法である ISPH (Implicit Smoothed Particle Hydrodynamics) 法と MPS 法の微分演算子モデル (勾配モデルおよび Laplacian モデル) に関して述べている。さらに、粒子法の最大の弱点である圧力擾乱 (非物理的な圧力ノイズ) の低減を目的とした高精度粒子法に関して、現状をまとめている。圧力の Poisson 方程式の高精度化に関連する手法として、HL (Higher order Laplacian) 法、HS (Higher order Source) 法に関して述べ、圧力の Poisson 方程式の数値的安定化のための ECS (Error Compensating Source) スキームに関しても言及している。また、離散化後の微分項の Taylor 級数適合性の保証のための GC (Gradient Correction) 法とその数値的安定化に不可欠な人工圧力の最適値を推定するための DS (Dynamic Stabilization) 法に関して記述している。</p> <p>一方、構造解析に関しては、まず、連続式と運動方程式に構成則を用いて応力項を計算して時間発展させるアルゴリズムに関して述べ、ひずみの適正評価に必要な剛体回転の除去の方法にも言及している。次に、超弾性体を対象として、ひずみエネルギー関数の空間微分によって運動方程式の応力項を表記する方法 (Hamiltonian 粒子法と呼ばれる) の定式化について、詳細に述べている。さらに、Mooney-Rivlin 則、Saint Venant-Kirchhoff 則等の構成則に対応するひずみエネルギー関数や陽解法アルゴリズムを用いる構造解析の数値的安定性に重要な役割を果たす計算時間間隔の設定についてもまとめている。</p>			

京都大学	博士（土木工学）	氏名	Hosein Falahaty
------	----------	----	-----------------

第4章では、Hamiltonian 粒子法を構造解析に導入した流体構造連成解析を構築し、各種ベンチマーク問題に適用して、性能を評価している。はじめに、Hamiltonian 粒子法に基づく弾性体ソルバーを構築し、静的圧力を受けるゴム環の応力分布の数値的安定性を検討している。また、2つのゴム環の衝突時の応力分布、周期的変動外力を受ける片持ち梁の応力分布、引張を受ける平板の小孔周囲の応力分布の再現を通して、弾性体ソルバーの再現性を評価している。次に、Hamiltonian 粒子法に基づく弾性体ソルバーを流体解析のための半陰解法型の粒子法とカップリングして完全 Lagrange 型の FSI ソルバーを開発している。流体解析は MPS 法および ISPH 法の2種を用い、各々に対応した微分演算子を用いる HMPS (Hamiltonian MPS) 法と HISPH (Hamiltonian ISPH) 法の2種の弾性体解析とカップリングして、一貫性を確保した FSI ソルバーを構成している。開発した FSI ソルバーを、薄厚アルミニウム底板を有する静水槽の底板変形の解析に適用し、SPH 法と FEM のカップリングで見られた数値的不安定が、SPH 法あるいは MPS 法と Hamiltonian 粒子法とのカップリングにより効果的に抑制されることを示している。次に、開発した FSI ソルバーを、ゴム製の弾性体ゲートを押上げて流出する水中崩壊のベンチマーク問題に適用し、標準粒子法弾性体解析と比べて Hamiltonian 粒子法がゲートの開度の再現性を向上させることを示している。さらに、薄厚アルミニウム楔の水面突入問題、グラスファイバー製の板材のスラミング現象のベンチマーク問題に関しても、板材変形量の時系列に関して、開発した FSI ソルバーの概ね良好な再現性を確認している。

第5章では、弾性体応力計算の精度低下と数値的不安定の改善について検討している。物理量とその微分値に同一計算点を用いることが応力の適切な推定を困難にするとの認識から、応力計算のための補助計算点 (stress point) を導入した DPD (Dual Particle Dynamics) に基づく弾性体ソルバーを MPS 法流体ソルバーとカップリングした DPD-MPS FSI ソルバーを構築している。はじめに、DPD に基づく弾性体ソルバーを構築し、周期的変動外力を受けて大変形する片持ち梁の応力分布の再現を試みている。物理量の同一点定義下での応力分布の高精度計算に有効といわれる MLS (Moving Least Squares) を導入したモデルと比較すると、stress point を導入した DPD は同一解像度の MLS モデルで出現する非物理的応力変動を良好に除去し、安定した応力分布を与えることが示されている。引張を受ける平板の小孔周囲の応力分布に関しても、DPD は同一解像度の MLS モデルと比較してノイズの少ない安定した応力分布を与える。DPD を導入した FSI ソルバーを、薄厚アルミニウム底板を有する静水槽の底板変形の解析、ゴム製の弾性体ゲートを押上げて流出する水中崩壊のベンチマーク問題、ゴム製の弾性体仕切り板を伴うスロッシングの解析、グラスファイバー製の板材のスラミング現象のベンチマーク問題に適用し、DPD を導入した FSI ソルバーの有効性を明らかにしている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の研究の展望について論じている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、流体構造連成 (Fluid-Structure Interactions, FSI) 問題に完全 Lagrange 型の粒子法を適用するための主たる課題として、エネルギー保存性に優れた Hamiltonian 粒子法と弾性体計算の安定性に寄与する stress point を導入し、計算手法の改良等に取り組んだ成果をまとめたものである。得られた主な成果は次の通りである。

1. エネルギー保存性の改善: 本論文では Hamiltonian 粒子法に基づく弾性体ソルバーを構築し、流体解析のための半陰解法型の粒子法とカップリングして完全 Lagrange 型の FSI ソルバーを開発している。流体解析は MPS 法および ISPH 法の 2 種を用い、各々に対応した微分演算子を用いる HMPS (Hamiltonian MPS) 法と HISPH (Hamiltonian ISPH) 法の 2 種の弾性体解析とカップリングして、一貫性を確保した FSI ソルバーを構成している。ゴム製の弾性体ゲートを押し上げて流出する水中崩壊のベンチマーク問題に関して、従来型の粒子法 FSI ソルバーと本論文で提案する MPS-HMPS FSI ソルバーとを適用し、ゴム製ゲートの大変形に関して MPS-HMPS 法の明瞭な有利性を確認している。

2. 弾性体応力計算の精度低下と数値的不安定の改善: 物理量とその微分値に同一計算点を用いることが応力の適切な推定を困難にするとの認識から、応力計算のための補助計算点 (stress point) を導入した DPD (Dual Particle Dynamics) に基づく弾性体ソルバーを MPS 法流体ソルバーとカップリングした DPD-MPS FSI ソルバーを構築している。グラスファイバー製の板材のスラミング現象のベンチマーク問題について、物理量の同一点定義下で空間微分の精度を Moving Least Square (MLS) で改善した MLS-MPS 法による FSI ソルバー比較すると、特に弾性体の応力分布の計算精度において DPD-MPS FSI ソルバーの明瞭な優位性が確認された。

以上のように、本論文は、粒子法の構造流体連成解析に貢献が著しい基本的なモデルの改良に成功しており、既存の弾性体ソルバーは容易ではなかった高精度計算への道を開くものと言える。また、改良案は粒子法一般に共通して適用できるもので、工学的意義も大きく、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 30 年 7 月 30 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。