

(論文内容の要旨)

本論文は、自由表面流の数値シミュレーションの高精度化を主たる課題として、粒子法の計算手法の根幹に関わる微分演算子モデルの改良や圧力場の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り、9章からなっている。

第1章は、序論であり、Navier-Stokes 式の格子法・粒子法のソルバーに関して概観し、本論文で取り扱う問題の背景と本論文の動機付けを明らかにするとともに、本論文の主たる成果の概要を紹介し、論文の構成の概略を説明している。

第2章は、粒子法の詳細なレビューであり、粒子法の代表的手法である SPH 法と MPS 法に関して、研究開発の現況をレビューしている。

第3章では、粒子法の計算原理に関して、これまでの研究を詳細にレビューしている。特に積分補間子の導出過程に関しては、SPH 法に関して詳細に記述した後、SPH 法と比較しつつ、MPS 法について論じている。また、計算の効率化の面で鍵となる近傍粒子検索のアルゴリズムに関しても、SPH 法と MPS 法で適用されている考え方を整理している。

第4章では、SPH 法と MPS 法による自由表面流の計算プロセスについて具体的に整理している。具体的には、MPS 法で用いられる半陰解法のプロセスを説明し、圧縮性流体を対象とした SPH 法の原型やその改良型である WCSPH 法(弱圧縮性 SPH 法)で用いられる陽解法のアルゴリズム、さらには、MPS 法のアルゴリズムを SPH 法に適用した ISPH 法に言及している。粒子法では、ベクトル微分演算を近傍粒子との相互作用としてモデル化するが、この際に用いられる微分演算子モデルについても、この章で詳述している。特に勾配モデル、発散モデル、Laplacian モデルに関して、SPH 法、MPS 法の双方に関して、その導出過程を具体的かつ詳細に記述している。この部分の記述は、本論文の後半で展開される微分演算子モデルの改良についての前提条件の整理ともなっている。

第5章では、既往の SPH 法や MPS 法の計算結果の適否に関して判断するため、試行計算を実施し、克服すべき問題点を具体的に示している。計算対象は、単一水滴の変形過程、ダム崩壊流れと衝撃圧、巻き波形砕波とスプラッシュアップであり、水理実験の再現性等の議論を通じて、既存の方法の問題点を指摘している。さらに、これらの問題点の改善のために行われてきた既往の研究のレビューを行って、本論文で目指す技術開発の方向性を明らかにしている。

第6章では、運動量および角運動量の保存性の改善に関して論じ、SPH 法、MPS 法の双方に関して、改良型の手法を提案している。初めに、局所(2粒子間)の保存性を保証すれば系全体での保存性を実現されるという前提に基づき、運動量および角運動量保存型の微分演算子モデルの基本的考え方について述べている。ISPH 法(非圧縮型の SPH 法)に関して、この考え方を適用した CISP 法(修正 ISPH 法)を提案している。CISP 法では、カーネル関数の補正が行われ、運動量および角運動量の保存を可能とする修正が行われる。巻き波形砕波とスプラッシュアップの水理実験の流況再現を行ったところ、CISP 法の有効性が明瞭に示された。一方、標準 MPS 法では、粒子間力を常に斥力化する勾配モデルが導入されているので、2粒子間の圧力勾配力が逆向き等大とならず、運動量保存性が保証されない。そこで、対称型の圧力勾配モデルを新たに導出し、局所的運動量保存性を保証する CMPS 法(修正 MPS 法)を提案している。巻き波形砕波とスプラッシュアップの水理実験の流況再現について、CMPS 法と標準 MPS 法を比較したところ、CMPS 法の優位性が明瞭に確認された。さらに、歪み速度テンソルを用いて粘性項を評価する改良を行った CMPS-SBV 法では、スプラッシュアップの際のジェットの高飛距離や形状の再現性がいっそう改善された。また、標準 MPS 法と CMPS 法に関して計算時間の比較を行ったところ、精度の高い CMPS 法の計算負荷は標準 MPS 法より僅かに低くなっており、現象の再現性の面だけでなく計算効率の面でも CMPS 法が優れた特性を有することが明らかとなった。

第7章では、圧力場の解の改善に関して論じている。半陰解法型の粒子法では、粒子数密度の修正（質量保存則の充足）に、圧力場の解が利用されるので、粒子数密度の偏在化が圧力擾乱を発生させる。本論文では、3種の圧力擾乱の低減法について効果を論じている。初めに、3種の圧力擾乱の低減法について、個々の原理を順に説明している。第1の方法は、前章で述べた運動量保存性の改善である。非圧縮性流体を対象とする粒子法では、粒子数密度を一定値に保持することにより質量保存を満足するので、個々の粒子の座標が時々刻々と修正される。この修正過程では本来なら局所的な運動量保存が満足されなければならないが、計算の安定性を優先して粒子間力を斥力化する相互作用力項が導入され、局所的な運動量保存が不完全である。これにより局所的な粒子座標の計算誤差が増大し、局所的な変動が増大する。ゆえに、局所的な運動量保存性を改善すると、粒子の座標の更新計算の際の計算誤差が減少し、個々の粒子への過剰な斥力の作用も抑制され、結果として圧力擾乱も低減する。第2の方法は、圧力場の陰的解法の支配方程式である Poisson 方程式の生成項の改良である。標準 MPS 法では、Poisson 方程式の生成項は、基準粒子数密度と局所粒子数密度の偏差と関連付けて評価されるが、生成項は元来は粒子数密度の時間微分として記述される。粒子数密度自体は、重み関数の和として定義されることから、重み関数自体を時間微分することにより、当該粒子の周囲粒子の移動速度と関連付けた評価が可能となる。この改善により、粒子数密度の偏差という現在時刻の数密度情報にのみ依存した修正ではなく、周囲粒子の移動速度、すなわち当該粒子周囲の粒子数密度の時間的な変化率による修正が可能となり、生成項の評価精度が向上すると期待される。第3の方法は、僅かな圧縮性の付与である。圧力擾乱の発生は、粒子間斥力による粒子の過剰反発と関連しているので、過剰反発を抑制する数値粘性が付与できれば低減できる。そこで粒子に僅かな圧縮性を許容して、粒子数密度の標準値を固定値とするのではなく、幅を有する値として制御する。これにより、非圧縮性の条件は僅かながら不完全となり、時刻の経過と共に僅かながら体積減少が生じはするが、圧力擾乱は確実に低減される。以上3種の方法を静水状態に適用した結果、何れの方法によっても標準 MPS 法の圧力擾乱が顕著に低減されることが明らかとなった。さらに直立壁に衝突する波による変動圧に対しても、これらの手法を用いて圧力の時系列の特性を検討し、3種の方法の組み合わせにより、圧力ピーク値の鈍りを生じることなく、効果的に圧力擾乱が制御できることが示された。

第8章では、エネルギー保存性の改善に関して検討している。まず、粒子系の内部エネルギーと運動エネルギーの和の時間変化をゼロとする条件を課して、エネルギー保存型の圧力勾配項を誘導している。さらに仮想仕事の原理に基づくエネルギー保存型の圧力勾配項を誘導して、既存の粒子法や、運動量保存型の粒子法と解を比較し、エネルギー保存性の顕著な改善を確認した。しかし、非粘性流体を対象とした非砕波状態の液面振動の解析では、物理的には生じないはずの顕著な振動の減衰が発生し、解析解とも不一致が見られた。粒子法では、この種の場合を対象とした厳密な検討がこれまでほとんど行われてこなかったことから、今回のエネルギー保存性のフレームワークの提示には十分な学術的意義が認められはするが、離散化に伴う数値的な誤差に関してもより詳細に検討が必要なのは言うまでもない。

第9章は結論であり、本論文で得られた成果について要約し、今後の研究の発展を展望している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、自由表面流の数値シミュレーションの高精度化を主たる課題として、粒子法の計算手法の根幹に関わる微分演算子モデルの改良や圧力場の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り、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 一般的な粒子法では、激流解析での解の収束性（計算の安定性）を重視したモデル化が行われており、離散化における運動量保存性は不完全である。粒子法では Navier-Stokes 式の各項を粒子間相互作用としてモデル化するが、近接 2 粒子を包含する検査領域で見れば、圧力は内力と見なせるので、2 粒子間では逆向き等大の圧力が相互に作用する必要がある。しかし、一般の粒子法では圧力勾配力を斥力化して、粒子の重なりを防ぐことにより計算を安定化させるので、2 粒子間では逆向き等大の圧力とはならず、検査領域に付加的な運動量が発生してしまう。本論文では、逆向き等大の圧力の作用を保証する改良型の圧力勾配モデルを考案し、修正粒子法としての CISP 法および CMPS 法を提案している。従来の粒子法では再現が不完全であった巻き波形状碎波における薄層大曲率の plunging jet の存在は、本論文で提案された CISP 法および CMPS 法によって良好に再現された。

2. 粒子法が抱える弱点の一つは、圧力擾乱の問題である。計算効率の高さゆえに頻用される半陰解法型の粒子法では、粒子数密度の修正（質量保存則の充足）に、圧力場の解が利用されるので、粒子数密度の偏在化が圧力擾乱を発生させる。本論文では、この問題の改善のため圧力の Poisson 方程式の生成項のモデル化が改良されて、粒子数密度の標準値からの偏差のみを考慮する標準的なアルゴリズムに代わって、重み関数（または kernel 関数）の分布形を考慮して個々の周囲粒子の移動速度偏差を積分して評価するアルゴリズムを提案している。これにより、圧力場のノイズは既存の粒子法の 10%以下に低減された。

3. 粒子法は激しい水面変化の再現性に重点を置いて開発された手法であることから、厳密なエネルギー保存性に関する議論はあまり行われてこなかった。本論文では、まず、粒子系の内部エネルギーと運動エネルギーの和の時間変化をゼロとする条件を課して、エネルギー保存型の圧力勾配項を誘導している。さらに仮想仕事の原理に基づくエネルギー保存型の圧力勾配項を誘導して、既存の粒子法や、運動量保存型の粒子法と解を比較し、エネルギー保存性の顕著な改善を確認した。

以上のように、本論文は、粒子法の高精度化に貢献が著しい基本的なモデルの改良に成功しており、個々の改良法は粒子法一般に共通して適用できるもので、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 20 年 7 月 23 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認められた。