

マルチフィジックスシミュレーションに向けた 粒子法の高精度・高効率化

Accurate and Efficient Particle Method toward Practical Use of Multiphysics Simulations

解像度可変型粒子法に最小二乗粒子法を適用して高精度と 高効率を両立させ、粒子法の複雑現象解析への実用性を向上

近年、シミュレーション技術の向上に伴い、単純な流体だけ、若しくは固体だけのシミュレーションにとどまらず、流体-固体連成解析や相変化を伴う現象など、複雑現象の解析への期待がますます高まっています。東芝は、このような高度な解析を効率的に行うため、マルチフィジックス現象に適していると言われている粒子法の改良に取り組み、解像度可変型粒子法の開発を行っています。更に、この手法に最小二乗粒子法を適用して高精度化し、複雑現象の高精度・高効率化を実現しました。この技術を用いることで、様々な製品製造過程における複雑な現象を解明することが期待されます。

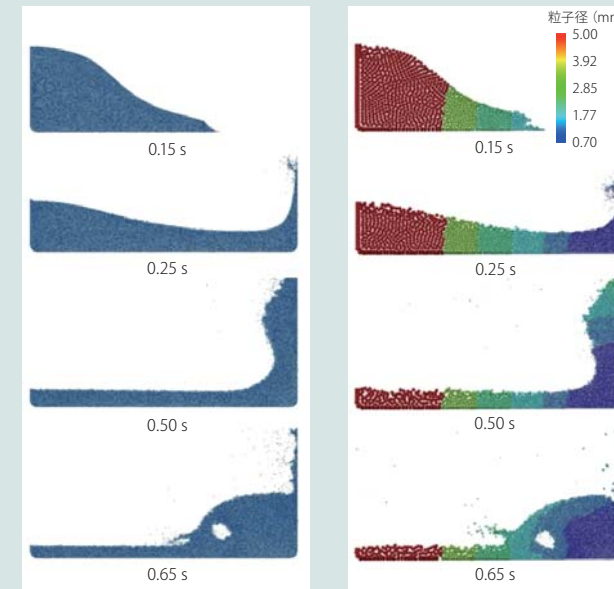


図1. 粒子法(従来)による解析結果の例

個々の計算点が自由に移動できる粒子法は、自由表面流れなどの複雑現象の解析に適しています。

図2. 解像度可変型粒子法を用いたダム崩壊解析の結果

粒子サイズが均一で単一解像度の従来の解析結果と同様の流れを、少ない粒子の解析で再現できました。

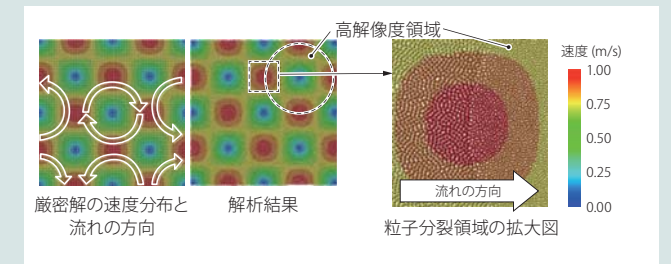


図3. テーラー グリーン渦の厳密解と解析結果

粒子の空間解像度を動的に変更しても、厳密解と同様の速度分布が得られることを確認できました。

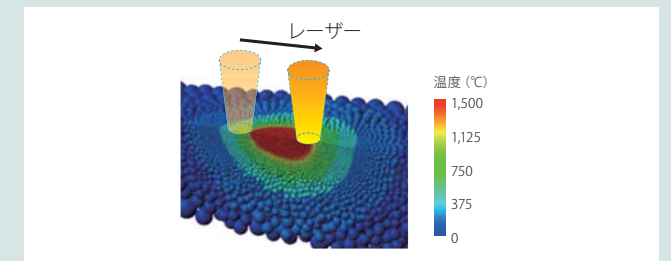


図4. 粒子法によるレーザー溶接の解析イメージ

レーザー照射部だけ解像度を高めることで、効率的な解析が可能になりました。

粒子法の特徴

粒子法は、物質を複数の粒子(計算点)で表現し、ナビエ-ストークス方程式や弾性体構成式などの支配方程式を用いて、個々の粒子に掛かる力を計算することで流体の流れや固体の変形を解析する手法です。一般的なシミュレーション手法である有限要素法などとは異なり、空間を分割するためのメッシュを用いないので、大変形や複数の相の連成解析など、マルチフィジックス解析に適していると言われています(図1)。一方、粒子法には、精度が低い、計算時間が長いなどの問題があり、十分には実用化できていないのが現状です。

東芝は、これまで粒子法の開発と実用化に取り組んできており、実用性の更なる向上のため、高精度かつ高効率な粒子法を開発しました。

解像度可変型粒子法

粒子法の問題として、計算時間が長いことが挙げられます。一般のシミュレーション手法で計算時間を短縮するには、重要な部分だけ空間解像度を高く(メッシュを細かく)し、計算点の総数を低減する方法が用いられます。これに対し、粒子法は、計算点である粒子が流れに沿って動くため、特定部分の空間解像度を高めることは困難でした。そこで、当社は解像度可変型粒子法⁽¹⁾を開発し、粒子法で空

間解像度を変更することを可能にしました(図2)。

具体的には、まずユーザーが各位置の適正粒子径を設定します。その後、解析の中で各粒子の位置から適正粒子径をタイムステップごとに算出し、適正粒子径が現在の粒子径よりもある程度小さい場合、つまり高い解像度が要求される場合には粒子を二つに分裂させ、適正粒子径が現在の粒子径よりもある程度大きい場合、つまり解像度の低下が要求される場合には二つの粒子を結合します。このように、粒子の分裂・結合により解像度を変更すると、必然的に粒子の分布が不均一になり、従来の粒子法では粒子の分布が均一でない場合に解析精度が低下するという問題がありました。このため、不均一な粒子分布でも精度良く計算できる手法が必要です。

最小二乗粒子法

近年、粒子法の高精度化のため、最小二乗粒子法が提案されています⁽²⁾。この手法では、各粒子における物理量の空間微分値などを計算する際に、任意の多項式で物理量を近似し、多項式の係数を最小二乗法で求めます。最小二乗法を適用したことにより、不均一な粒子分布であってもその粒子分布に適した多項式で近似が行われるため、物理量の空間微分値を精度良く計算できるという利点があります。当社は、前述の解像度可変型粒子法に最小二乗粒子法を適用することにより、マルチフィジックスシミュレーション

を高精度かつ高効率に解析できる技術を開発しました⁽³⁾。

精度検証事例

開発した技術の妥当性を検証するために、テーラー グリーン渦(Taylor Green Vortex)と呼ばれる流れについて、解析を実施しました⁽³⁾。この流れには厳密解が存在するため、厳密解と計算結果を比較することで精度を検証できます。従来の粒子法では、このような精度が要求される流れを計算することは困難でしたが、開発した手法を用いることで、正しい計算が可能になりました(図3)。高解像度領域に入った粒子が分裂して小さくなり、また、高解像度領域から出た粒子が結合して大きくなることで、解像度を変更できています。速度及び圧力を解析解と比較した結果、解像度を動的に変更しても精度が高いことが確認できました。

更に、ダム崩壊と呼ばれる自由表面流れにこの手法を適用した結果、解像度を動的に変更しても均一サイズの粒子を用いた高解像度解析の結果(図1)と同様の結果(図2)が得られることが確認できました。またこのとき、単一解像度の解析に比べ、解析に用いた粒子数を61.6%、計算時間を61.8%低減することができました。

このように、空間解像度を適切に設定してこの手法を用いることにより、高い精度を保ったまま計算時間を大幅に削減でき、粒子法の実用性が向上しました。

数値解析事例

開発した解析手法は、金属のレーザー溶接など、相変化を伴う現象への適用が期待されます。レーザー溶接は、金属にレーザーを照射して金属を溶融・凝固させ、複数の部材を結合する手法です。解像度可変型粒子法を用いることで、従来の解析手法では困難だった相変化の解析を効率良く行うことができると考えられます(図4)。

今後の展望

開発した技術は、あらゆる製品製造過程における、様々な複雑現象の解明に活用でき、製造条件の適正化や歩留まりの向上などに寄与することが期待されます。今後、この手法を更に高度化し、早期の実用化を図ります。

文献

- 田中正幸, ほか. 解像度可変型MPS法. 計算工学会論文集. 2009, 2009, Paper No.20090001.
- Tamai, T.; Koshizuka, S. Least squares moving particle semi-implicit method. Computational Particle Mechanics. 2014, 1, 3, p.277-305.
- Tanaka, M. et al. Multi-resolution MPS method. Journal of Computational Physics. 2018, 359, p.106-136.

田中 正幸

研究開発本部 生産技術センター
構造設計技術研究部