

性能の異なる計算ノードを組み合わせたコンピュータークラスターによる 粒子法の並列化手法に関する基礎的研究

A Fundamental Study on Parallelization Methods for Particle Method by Computer Clusters Combining Computational Nodes with Different Performance

○舟塚誠樹¹, 相田康洋²
Masaki Funaduka¹, Yasuhiro Aida²

The particle method is a technique that reproduces incompressible fluids through particle-particle interactions. In large-scale computations, increased computational cost and memory bandwidth constraints pose significant challenges. In contrast, domain partitioning parallelization using clusters is effective for load balancing. This study targets heterogeneous clusters built by reusing discarded PCs. It implements domain partitioning considering performance differences and the exchange of boundary particle information via MPI communication. This enables low-cost, flexibly scalable parallel particle method simulations.

1. 緒言

非線形解法の一つに、非圧縮性流体の運動を複数の粒子により再現する粒子法がある^[1]。粒子法は各粒子と影響半径内における近傍粒子との相互作用から物理量の計算をするため計算量が粒子数の増加に伴って増加する。特に高解像度や大規模なシミュレーションでは、計算コストが大幅に増加しメモリ帯域が飽和する可能性が発生する。そこで、コンピュータークラスターを活用し並列化を行うことでメモリ帯域の限界を拡張する。単一ノードで計算を行う場合、すべての粒子データを単一ノード内で処理するため、メモリ帯域の制約により計算処理の速度が低下する。しかし、コンピュータークラスターを利用し計算領域を複数のノードに分割することにより各ノードが独立したメモリ帯を持つため、メモリ帯域使用量をノードごとに分散することが出来る。これにより、メモリ帯域の制約を緩和しメモリ帯域が飽和することを防ぐ。

一方で、近年のコンピューターの性能向上は凄まじく、これに伴い多くのコンピューターが現状で廃棄されている。実際に、一般社団法人パソコン 3R 推進協会によると 2023 年度に国内のみで家庭から回収された PC の台数は 209,296 台、同様に国内のみで法人から回収された使用済み PC の台数は 18,851 台となっている^[2]。そこで、本研究では不要となったコンピューターを利用することにより低コストでコンピュータークラスターを構築することが出来る考えた。

本研究のように不要となったコンピューターを活用して構築されたコンピュータークラスターでは、異なる性能のコンピューターが混在しているため、それぞれのノードの性能に応じた負荷分散が求められる。こ

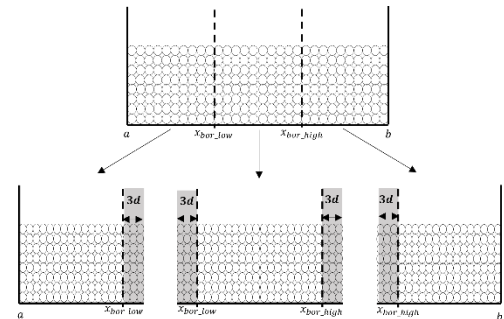


Figure 1. Parallelization using three nodes

れは、各ノードの性能が異なるため、一律に負荷を分散した場合、処理能力の低いノードが原因となり全体の計算効率が低下するためである。

したがって、本研究では廃棄されたコンピューターを再利用することを想定した性能の異なる計算ノードを用いたコンピュータークラスターによる粒子法シミュレーションの並列計算の仕組みの開発を目的とする。

2. 研究手法

本研究では、分散メモリ型環境に適したメッセージパッシングライブラリである MPI を用いて粒子法の並列化を実装した。3 ノード間で通信を行い、計算領域を分割して各ノードに割り当てることで並列計算を実現する。性能の異なるノードに対応するため、あらかじめ分割済みのデータファイルを準備し、各ノードが担当領域の粒子情報に直接アクセスできるようにした。粒子法では近傍粒子との相互作用計算が必要となるため、領域境界付近では隣接するノードとのデータ交換が不可欠となる。本研究では送信領域を導入し、その領域内の粒子物理量を隣接するノード間で交換をすることで、境界付近における計算の整合性を保つ(Figure 1)。ここで分割前の計算領域が

1: 日大理工・院(前)・海建, Grad Student. Ocean Architecture and Engineering, CST., Nihon-U.

2: 日大理工・教員・海建, Associate Prof. Ocean Architecture and Engineering, Dr.Eng, CST., Nihon-U.

$$N = \{x|a < x < b\} \quad (1)$$

である。ここで N_i :ノード番号とし、3つのノード N_0, N_1, N_2 が計算する領域を

$$N_0 = \{x|a < x < x_{bor_low}\} \quad (2)$$

$$N_1 = \{x|x_{bor_low} \leq x < x_{bor_high}\} \quad (3)$$

$$N_2 = \{x|x_{bor_high} \leq x < b\} \quad (4)$$

とする。ここで $x_{bor} = (a + b)/3$ であり N_0 と N_1 と N_2 の境界値となる x 座標から垂直に境界を伸ばす。各ノードの送信領域を

$$N_0 = \{x|x_{bor_low} \leq x < x_{bor_low} + 3d\} \quad (4)$$

$$N_1 = \{x|x_{bor_low} - 3d \leq x < x_{bor_low}\} \quad (5)$$

$$N_1 = \{x|x_{bor_high} \leq x < x_{bor_high} + 3d\} \quad (5)$$

$$N_2 = \{x|x_{bor_high} - 3d \leq x < x_{bor_high}\} \quad (6)$$

とする。ここで、 d :粒子径とし、影響半径よりも十分に広い送信領域を確保することで境界を跨ぐ近傍粒子との相互作用の範囲をカバーする。このようにして各ノードは、この送信領域内に存在する粒子の物理量を隣接するノードに送信し、逆に隣接するノードから送信領域内の粒子データを受信することで、境界付近において十分な近傍粒子を確保する(Figure 2)。

本研究で用いた半陰解法の並列計算では、タイムステップごとに粒子データの交換を2回実施する。1回目は粒子数密度の計算が終了した後、粒子の自由表面判定を行う前に実施する。これは、隣接ノードから取得した境界付近の情報を反映させ、正確な自由表面判定を行うためである。2回目は一連の計算および出力処理が終了した後、次のタイムステップに進む直前に実施する。この交換により、全ノードが整合のとれた粒子情報を保持した状態で次ステップの計算を開始でき、計算の安定性が確保される。加えて、本手法では境界位置を変更することで、各ノードの性能差や計算負荷に応じた適応的な負荷分散を実現している。これにより、性能の異なる計算ノードを組み合わせた場合においても、計算効率を最大化しつつ大規模なシミュレーションを低コストで実行可能とする。

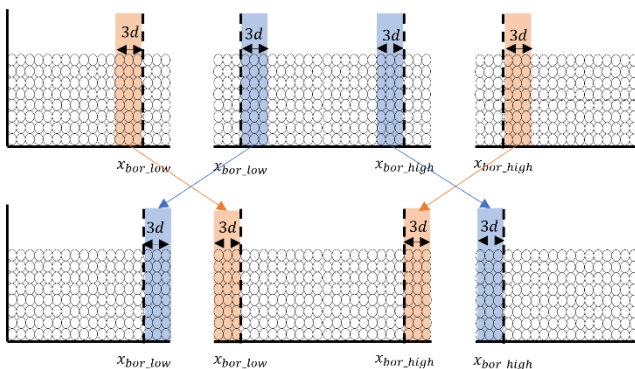


Figure 2. Exchange of particle data via three nodes

3. 結果

本研究では廃棄されたコンピューターを利用することを想定し、性能の異なる計算ノードを組み合わせた粒子法シミュレーションの並列化の実装を行った。境界付近に存在する各粒子と影響半径内の近傍粒子との相互作用から物理量を適切に計算するために、各ノードに導入した送信領域内の粒子データの物理量を MPI を用いて交換した。Figure 3 に本研究で開発した粒子法シミュレーションを3ノードによって実行した計算結果を可視化したものを示す。各ノードの計算結果から、送信領域内の粒子データの物理量が適切に交換され、計算領域全体として一貫性のあるシミュレーションが実現されていることが確認できる。今後の課題としては、さらに大規模なシミュレーションを可能とするために、Nノードによる並列化の実装が必須になる。

4. 結言

本研究によって以下の結論を得た。

本研究では廃棄されたコンピューターを再利用することを想定した、メッセージパッシングライブラリ(MPI)を用いたコンピュータークラスターによる粒子法シミュレーションの並列計算の仕組みの開発を行い、3ノードで検証しその仕組みの有効性を示した。

5. 参考文献

- [1] 越塚誠一,「粒子法,丸善出版」,pp.1,平成17年2月25日
- [2] 一般社団法人パソコン3R推進協会:使用済みパソコンの回収および再資源化
https://www.pc3r.jp/association/recycle_result.html (閲覧日:2025年9月29日)

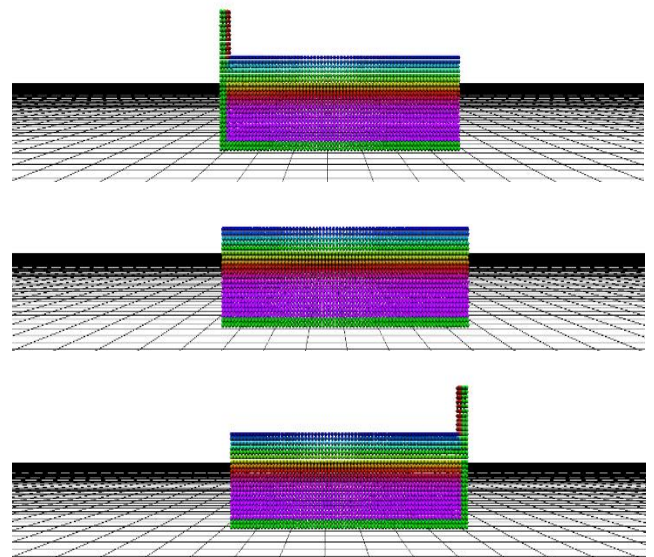


Figure 3. Calculation results using three nodes