

解像度の異なる小領域を含んだ粒子法の開発

Development of particle method including subdomains with different resolutions

- 伊澤 精一郎, 東北大・工, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, E-mail: izawa@fluid.mech.tohoku.ac.jp
 - 王 奕惟, 東北大・院, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, E-mail: wang.yiwei.s3@dc.tohoku.ac.jp
 - 西尾 悠, 成蹊大・理工, 武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1, E-mail: nishio@st.seikei.ac.jp
 - 福西 祐, 東北大・工, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, E-mail: fushi@fluid.mech.tohoku.ac.jp
- Seiichiro Izawa, Grad. School of Eng., Tohoku University, 6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai, Japan
Wang YiWei, Grad. School of Eng., Tohoku University, 6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai, Japan
Yu Nishio, Grad. School of Sci. and Tech., Seikei University, 3-3-1 Kichijoji-Kitamachi, Musashino, Japan
Yu Fukunishi, Grad. School of Eng., Tohoku University, 6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai, Japan

Algorithms for particle merging and splitting for incompressible smoothed particle hydrodynamics (SPH) method are proposed aimed at improving the computational efficiency. The size of a particle is set depending on the region the particle is located, which smoothly changes while passing through the buffer area in between the regions. The applicabilities of the particle merging and splitting algorithms are evaluated in a computation simulating the flow around a circular cylinder. The result shows the formation of a Karman vortex street which agrees well with the computation using only small particles. It is also shown that the computational cost can be reduced by approximately 14%.

1. はじめに

粒子法は、連続体を互いに影響を及ぼしあう粒子の集合に置き換え、その運動をラグランジュ的に解く数値解法である。粒子の移動そのものが界面の移動や変形に対応するため、複雑境界や移動境界を含む場を扱いやすく、流体計算や構造計算、あるいは両者の連成計算などに幅広く用いられている^(1, 2, 3, 4)。計算空間の解像度は粒子の大きさによって決まり、粒子径を小さくするほど解像度は高くなるが計算コストが大きくなる。必要な空間解像度を維持しつつ計算コストを下げるためには、オイラー型の数値解法で使用される不等間隔格子や境界適合格子、重合格子などと同じように、場所によって粒子径を変えることが考えられる。これまでも、自由表面や密度の異なる2流体の界面の変形挙動に併せて粒子解像度を動的に変化させる方法が提案されているが、合体や分割によって粒子径が突然変わると圧力場に数値振動が加わってしまう問題があった。そこで、このような数値振動の発生を回避しつつ、安定して計算が行うことができる方法も検討されてきた。例えば、SolenthalerとGross⁽⁵⁾は粒子径が異なる2種類の計算を適当な境界条件のもとで連成させながら行う方法を提案し、Winchenbachら⁽⁶⁾は粒子の合体と分割の個数を場の状況に応じて柔軟に変えることで粒子径を連続的に変化させる方法を提案している。

これに対して本研究では、粒子径の異なる領域を滑らかに接続するために2領域間に緩衝領域を設け、その緩衝領域内で粒子の分裂と合体を滑らかに行う計算手法の開発を試みた。本稿では、非圧縮性に拡張したSPH法に新たに提案したモデルを組み込み、2次元円柱周りの流れ場に適用した結果について報告する。

2. 計算方法及び問題設定

2.1 非圧縮性 SPH 法

非圧縮性流体の運動は、予測子・修正子法にもとづく反復解法によって、各時刻における密度場のぼらつきを緩和しながら速度場を更新することで近似的に実現する。詳細は既報を参照されたい。ここではその概略だけを述べる。

まず、各時刻において現時刻の速度を予測子として全ての流体粒子を仮移動させる。すると、移動後の粒子配置には偏りが生じるため、多くの場合密度場は一様とはならない。そこで、局所的な密度勾配を緩和する方向に速度を修正し、その修正子を用いて粒子を再び元の位置から移動し直す。この操作を繰り返すと移動後の密度場

は一様に近づくが、反復回数を増やしすぎると数値粘性が増加してしまう。そこで、本計算では反復回数を10回で一定とし、修正後の速度に粘性力と必要に応じて外力の効果を加味して時間進行させた。

2.2 緩衝領域内の粒子の扱い

領域によって粒子の大きさを変えるためには、粒子を合体あるいは分裂させる必要がある。本研究では、2領域の境界位置に緩衝領域を設け、この緩衝領域内で粒子直径を連続的に変化させながら粒子の分裂と合体を行う手法を採用した。図1はその模式図である。直径 d_L の大きな粒子が緩衝領域に進入した場合(図1(a))、まず粒子を大きさを保ったまま質量が半分の2つの粒子に分裂させてペアとし、大きな粒子のみの計算領域との境界(流入境界)からの距離 ϵ に応じてペア間の距離を徐々に広げ、同時に粒子径 $d(\epsilon)$ を小さくしていく。緩衝領域内では両者は結合体として回転モーメントも考慮した運動をさせる。そして、緩衝領域を抜けて小さな粒子のみの計

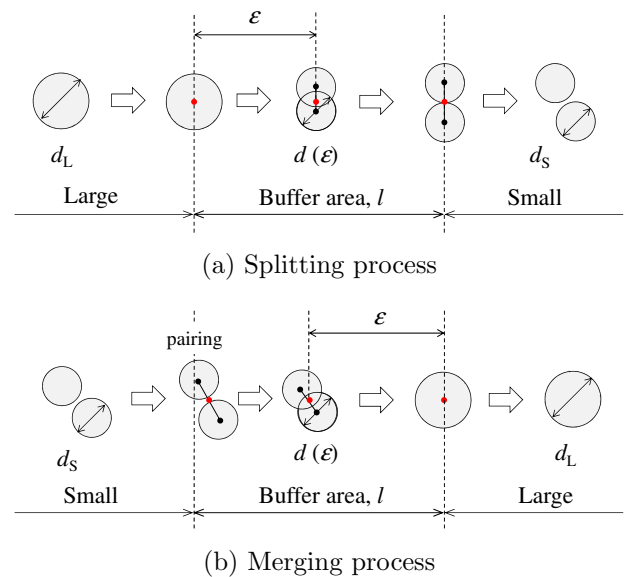


Fig. 1: Treatment of particles in buffer area.

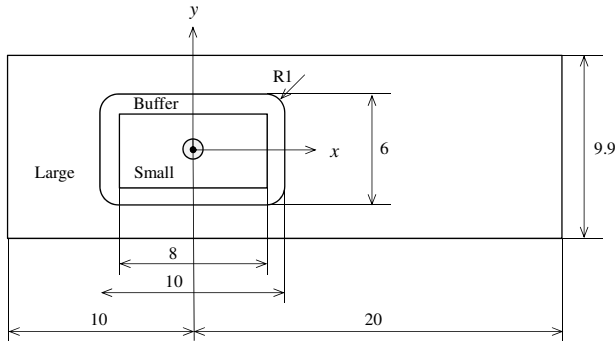


Fig. 2: Computational domain.

算領域との境界に達したところで粒子径 d_s の別々の粒子とみなす。これに対して、小さな粒子が緩衝領域に進入した場合 (図 1 (b)) には、近傍にある粒子同士をペアとする。先ほどとは逆に、大きな粒子のみの計算領域との境界 (流出境界) からの距離 ε に応じてペア間の距離を徐々に縮めると同時に粒子径 $d(\varepsilon)$ を大きくする。そして、緩衝領域を抜けて大きな粒子のみの計算領域との境界に達して両者の距離が零となったところで、質量が 2 倍で粒子径 d_L の 1 つの大きな粒子として扱う。したがって、分裂・合体過程にある粒子の大きさは、

$$d(\varepsilon) = \frac{d_L - d_s}{l} \varepsilon + d_L \quad (1)$$

で与えられる。

2.3 問題設定

計算対象とするのは一様流中に置かれた 2 次元円柱周りの流れであり、以下では、すべての物理量を一様流速を代表流速、円柱直径を代表長さとして無次元化している。計算領域は、図 2 に示すように、円柱近傍の高解像度領域 ($d_s = 0.1$)、その外側の低解像度領域 ($d_L = \sqrt{2}d_s$)、その間の緩衝領域の 3 つの小領域に分かれている。緩衝領域の 4 つの角部は半径 1 で丸められており、これらの角部にある粒子は外側境界からの距離に応じてその大きさを変化させた。座標系は円柱中心に原点をとり、流れ方向を x 軸、それと垂直な方向を y 軸とした。流入境界及び流出境界では一様流入と一様流出条件を与え、 y 軸方向には周期境界条件を与えた。また、無次元時間刻みは小さい粒子に併せて 0.1 と設定し、レイノルズ数は 1,000 とした。なお、小さい粒子のみによる計算も行い、両者の結果を比較した。総粒子数は、大きな粒子と小さな粒子を組み合わせた場合が 17,800 個、小さな粒子のみの場合が 29,700 個である。

3. 結果と考察

図 3 に、時刻 $t = 50$ における瞬時の渦度場の様子を示す。図中の (a) は計算領域全体を小さい粒子のみで計算を行った結果であり、(b) は計算領域を 2 つの小領域に分け、円柱近傍に小さい粒子、その外側に大きい粒子を用いて計算を行った結果である。なお、両者の境界に位置する緩衝領域を点線で表示してある。どちらの流れ場においても、円柱から規則的に渦が放出されカルマン渦列が形成されており、互によく似た分布となっている。特に計算領域を小領域に分割した場合に着目してみると、粒子が緩衝領域を通過する際に分割や合体によってその大きさが変わっても、新たに渦度が作られたり流下してくる渦度が急に減衰してしまったりすることはなく、また円柱近傍のはく離せん断層にも有意な差異は認められない。このとき、円柱後流の $(x, y) = (10, 0)$ における渦度変動から求めたストローハル数は、いずれも 0.16 付近にピークを持ち、カルマン渦列の 0.2 に近い値となった。なお、粒子サイズをさらに小さくして空間解像度を上げると、ストローハル数が 0.2 に漸近することは確認済み

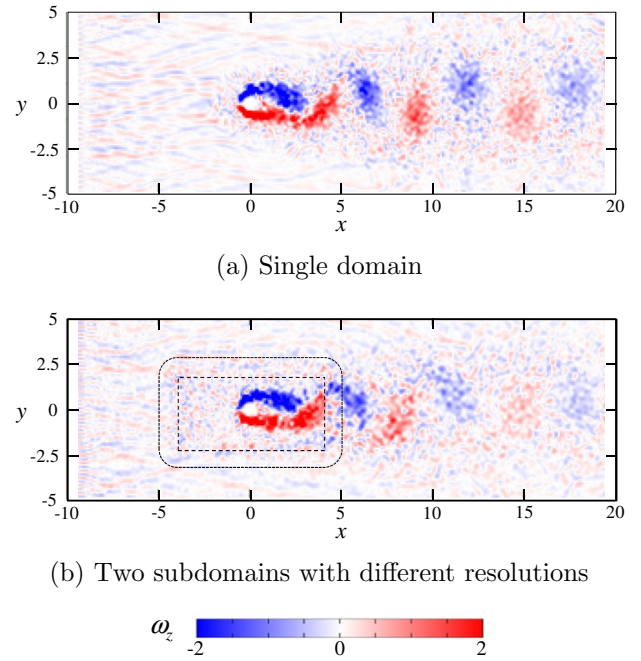


Fig. 3: Instantaneous vorticity fields at $t = 50$.

である。また、計算時間について比較すると、小さい粒子のみの場合は 307 分であったのに対して、領域を分割して粒子数を 40% 削減することで 265 分まで短縮することができた。

4. まとめ

非圧縮性に拡張した SPH 法に新たに提案した粒子の分割・合体モデルを組み込み、計算領域を 2 つの小領域に分割して 2 次元円柱周りの流れ場を計算したところ、全領域を単一の粒子で計算した高解像度の結果とほぼ同じ流れ場が得られた。また、計算時間の短縮も図ることができ、本モデルの有効性が示された。

参考文献

- (1) Liu, M. B. and Liu, G. R., "Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments", Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 17, No. 1 (2010), pp. 25-76.
- (2) 伊澤, 磯, 西尾, 福西, "円板型及びカップ型回転霧化機における液糸形成と液滴分裂", 機械学会論文集, Vol.84(2018), No.862, p. 18-00132.
- (3) Itoh, M., Nishio, Y., Izawa, S., Fukunishi, Y. and Shigeta, M., "Numerical Simulation of Joining Process in a TIG Welding System Using Incompressible SPH Method", Japan Welding Society Journal, Vol. 33, No. 2 (2015), pp. 34s-38s.
- (4) 茂田, 阿川, 本郷, 伊澤, 福西, "界面の大変形を伴う液滴および液膜流の 3 次元 SPH シミュレーション", 数理解析研究所講究録 1724 「複雑流体の数理解析と数値解析」, (2011), pp. 143-147.
- (5) Solenthaler, B. and Gross, M. "Two-Scale Particle Simulation", ACM Trans. Graph., Vol. 30, No. 4 (2011), pp. 81:1-81:8.
- (6) Winchenbach, R., Hochstetter, H. and Kolb, A., "Infinite Continuous Adaptivity for Incompressible SPH", ACM Trans. Graph. Vol. 36, No. 4 (2017), pp. 102:1-102:10.