

3DCAD データを用いた 粒子法シミュレーションの検討

○群馬大学理工学部 学生会員 吉田希生一
群馬大学大学院理工学府 正会員 斎藤隆泰
群馬大学大学院理工学府 正会員 清水義彦

1. はじめに

現在の流体解析分野では、差分法や有限要素法による数値シミュレーションが活発に行われている。これらは、汎用性が非常に高いものの、界面の大変形などに対して格子や要素の破綻が生じるなどの脆弱性を持つことが一般に知られている。そのような中、近年、粒子法と呼ばれる格子や要素を必要としない数値シミュレーション手法が注目を集めている。粒子法では、計算点である粒子群が移動することは連続体が実際に移動したことを意味する。そのため、シミュレーション対象の初期形状を作成する場合には、ユーザーが粒子を配置する必要がある。対象となる形状が単純な場合は、プログラムにより容易にその形状を再現できることが可能であろう。しかし、形状が複雑な場合は、初期形状を作成するプリプロセスの段階で、多大な時間を費やす必要がある。そこで、本研究では、3DCAD により作製したモデルをボクセルデータに分割することで、初期形状を作成する方法について検討する。複雑な形状モデルとして、消波ブロックモデルを対象とした場合の数値解析例を示し、本手法の有効性を検討する。

2. 粒子法 (E-MPS 法) による流体解析

粒子法は、連続体の運動を離散的な粒子群の運動によって近似する計算手法の 1 つである。そのため、差分法や有限要素法のようにメッシュ分割の必要がない。また、運動する粒子に関して計算を行う Lagrange 的な手法であるため、移流項を計算する必要がなく、界面の大変形を伴う解析等に特に有効である。本研究では、粒子法の 1 つである MPS 法を圧力に関して陽的に解いた E-MPS 法¹⁾を使用する。流体の支配方程式は、時刻 t に対する連続の式とナビエ・ストークス方程式であり、それぞれ以下のように表される。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

ここで、 ρ , $\mathbf{u}$, P , ν および $\mathbf{g}$ はそれぞれ、密度、流速、圧力、動粘性係数および重力加速度である。E-MPS 法では式 (2) の右辺第一項、第二項に含まれる勾配 ∇ 、ラプラシアン ∇^2 を以下に示すような粒子 i と粒子 j に対する粒子間相互作用

モデルを用いて離散化する。

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n_{\text{grad}}^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(P_j + P_i)(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} w_{\text{grad}}(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (3)$$

$$\langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2d}{\lambda^0 n^0} \sum_{j \neq i} [(\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)] \quad (4)$$

ここで、 d , $\mathbf{r}$, λ^0 は空間次元数、粒子座標、基準状態における粒子間距離の重み付き二乗平均である。また、 $w(|\mathbf{r}|)$ および n^0 はそれぞれ、重み関数および基準粒子数密度であり、これらにより重み付き平均をとる。式 (3), (4) の重み関数の計算について、安定化のためにそれぞれ以下の式を用いる。

$$w_{\text{grad}}(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - \frac{r}{r_e} & (r < r_e) \\ 0 & (r \geq r_e) \end{cases} \quad (5)$$

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} + \frac{r}{r_e} - 2 & (r < r_e) \\ 0 & (r \geq r_e) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 r は粒子間距離、 r_e は影響半径を表しており、影響半径外の粒子からの影響を無視することで、計算負荷を軽減している。また、無限遠まで格子状に流体を非圧縮性流体と仮定した状態の下で粒子を配置すれば、それぞれ式 (5), (6) を用いた場合の重み関数の総和は、基準粒子数密度 n_{grad}^0 , n^0 として、それぞれ以下のように定義される。

$$n_{\text{grad}}^0 = \sum_{j \neq i} w_{\text{grad}}(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (7)$$

$$n^0 = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (8)$$

また、E-MPS 法では、流体に微小な圧縮を許容し、圧力を密度の関数として次式のように表す。

$$P = \begin{cases} c^2(\rho - \rho^0) & (\rho > \rho^0) \\ 0 & (\rho \leq \rho^0) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 c は流体中の音速、 ρ^0 は圧力ゼロの状態における密度である。密度 ρ は重み関数の和に比例すると仮定して、次式のように与える。

$$\rho = \frac{\rho^0}{n^0} \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (10)$$

なお、音速 c に関しては、実際よりも小さな仮想的な音速を与えることで、時間増分を大きくとることができる²⁾。一方で、式(2)における、ナビエ・ストークス方程式では非圧縮性流体を仮定している。そのため、流れ場を非圧縮性流体として近似できる範囲、すなわち、流速の大きさと音速の比で定義するマッハ数 $M_a = |u|/c$ が1よりも十分小さい必要がある。ここでは、マッハ数 M_a を $M_a=0.2$ とした次式により仮想的な音速を与える。

$$c = \frac{u_{\max}}{0.2} \quad (11)$$

ここで、 $u_{\max}$ は最大流速の予測値である。

3. 消波ブロックのMPS粒子化

(1) 3DCADデータの作製

以下、本研究で作製対象とした消波ブロックの寸法を図1に示す。この消波ブロックは後に説明する解析モデル(図2)に設置される。立方体に内接する正四面体を考え、立方体または正四面体の中心と各頂点とを結ぶ線分を消波ブロックの突起とし、上向きの突起を作製する。まず、円柱状の物体を作製し、その先端方向にすばませ、先端の縁を曲面状にする。次に、下側3つの突起を作製する。正四面体と各頂点がなす角の角度を求めると、およそ 109.5° となるので、作製された物体を 109.5° 回転させ、複製する。このようにして、2つ目の突起を作製する。2つ目の突起を上向きの突起を中心に円状に 109.5° ずつ回転させ、2つ複製することで消波ブロックを作製した。

(2) ボクセルデータ化

3DCADで作製したモデルデータ(拡張子は.stl)を図3(a)に示す。1辺10mm、5mmの立方体で図3(a)のモデルを分割すると、それぞれ図3(b)、図3(c)のように、ボクセル形状で近似された消波ブロックを得る。節点にボクセルの辺長と同じ直径の粒子を配置し、解析モデル上に配置することで初期形状を作成する。

4. 数値解析例

以下、数値解析例を示す。解析モデルは、図2のようなダムブレイク問題で、3節で作成した消波ブロックが存在する問題である。解析条件は表1に示すとおりである。なお、解析時間は10秒で、消波ブロック粒子は剛体粒子とする。解析開始から1秒後に、中央にある仕切り板を鉛直上向きに取り去る。図4(a)は粒径10mm、図5(a)は粒径5mmでの解析対象である。計算時間間隔は、粒径10mmでの解析では $\Delta t = 2.7 \times 10^{-4}$ s、粒径5mmでの解析では $\Delta t = 1.3 \times 10^{-4}$ s である。なお、図4,5中の(a)は解析の初期状態($t = 0$ 秒)、(b)は解析時間の最終時刻の状態($t = 10$ 秒)を示している。図4,5より、粒径の違いにより消波ブロックの移動後の位置に若干の差異が見受けられる。この原因は、消波ブロックの体積が、粒径によって

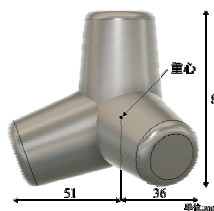


図1 消波ブロックの3DCADモデル

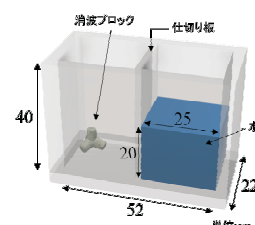


図2 解析モデル

表-1 解析条件

	水粒子		消波ブロック粒子	
粒径 (mm)	10	5	10	5
粒子数 (個)	18000	308736	364	1862
密度 (kg/m ³)	1000	1000	2300	2300
体積 (m ³ × 10 ⁻⁴)	110	110	1.9	1.2

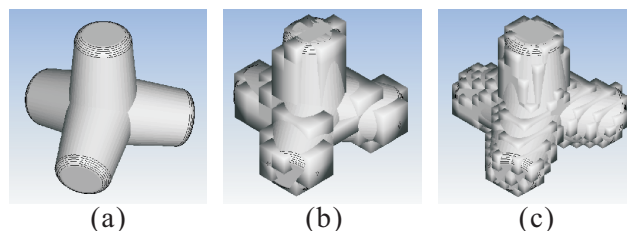


図3 (a)3DCADモデル (b)10mm分割 (c)5mm分割

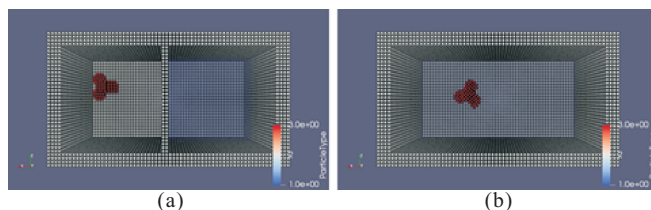


図4 粒径10mm: (a) 解析対象 (b) 解析結果

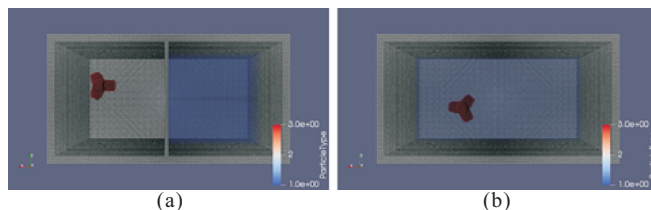


図5 粒径5mm: (a) 解析対象 (b) 解析結果

若干、異なっているためであると考えられる(表1参照)。

5. おわりに

本研究では、3DCADデータを用いて粒子法の初期形状を作成する方法について検討した。数値解析例として、E-MPS法を用いて消波ブロックの挙動解析を行った。今後は、ボクセルデータを用いた場合の詳細な精度検証を行うと共に、粒子法の高速解法についても検討する予定である。

謝辞

本研究の一部は、H30年度高橋産業経済研究財団助成金の支援を得て行われた。

参考文献

- 1) 塚越誠一, 柴田和也, 室谷浩平: 粒子法入門-流体シミュレーションの基礎から並列計算と可視化まで-, 丸善出版, 2013.
- 2) 大地正俊, 越塚誠一, 酒井幹夫: 自由表面流れ解析のためのMPS陽的アルゴリズムの開発, 日本計算工学会論文集, Vol.2010, No. 20100013, 2010.