

1. 研究背景・目的

礫、石、ブロックなどで構成された多孔質構造物は、水制・波浪減衰機能や水質浄化機能などを有しており、これらの機能の発現には、その間隙部での流動が密接に関係している。しかし、複雑な構造を有する多孔質体間隙部の流動計測は困難であり、また、このようなマイクロな間隙流動を予測することができる計算手法も多くない。このような課題に対し、著者らは複雑な境界を有する物体の境界条件を厳密に満足させて計算を行うことを可能とする Immersed Boundary Method (IB法) を導入した数値モデルを構築してきた¹⁾²⁾。しかし、固体-流体間の相互作用を求める際の強制外力算定手法の制約により、計算領域からある一定距離(セル)だけ物体を離して配置する必要があり、その結果、計算結果は境界条件の影響を含んだものとなっていた。

本研究では、境界条件の影響を含むことなく固体群-流体間相互作用を考慮した流体運動の計算ができるように、周期境界条件の設定方法について検討した。

2. 数値解析手法

本研究で用いる IB法 を導入した数値モデルの基礎方程式は、非圧縮性・粘性流体を対象とした Navier-Stokes 式 (1) と連続の式 (2) である。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u + F + f \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

ここで、 u は流体の速度ベクトル、 P は圧力、 t は時間、 ρ は流体の密度、 μ は粘性係数、 f は外力ベクトルである。 F は、固体境界条件を満足させるために導入された、流体-物体間の相互作用力を表す強制外力であり、本研究では Silva ら³⁾ の提案する Physical Virtual Model (PVM) を使用して算定した。

3. 周期境界条件の設定法

流体計算においては、一般的に、計算対象領域の外側に1メッシュの仮想セルを設け、この仮想セル内の圧力や速度成分などの物理量を適切に設定することによって、slip 条件や no-slip 条件、周期条件などの境界条件を満足させる。しかし、PVM を使用した IB法

を用いて物体表面上における境界条件を満足させるためには、物体表面近傍の物理量を用いて強制外力を算定する必要がある。それ故、物体表面が計算領域の境界に隣接するセル内に存在する場合には、物体表面における境界条件を満足させるに足る十分な仮想セルを設ける必要がある。

図-1には、境界面に球体が接した場合での、強制外力を算定する際に必要な物理量を含むセルを示している。すなわち、球表面の外向き法線方向、および、これに直交する2方向の、図中の黒丸の位置に参照点を設定し、これらの参照点における物理量を用いる。それぞれの参照点における物理量は、流速の場合には参照点を中心に、圧力の場合には参照点から法線方向外側にとった圧力定義点を中心に、 $4\Delta x \times 4\Delta y \times 4\Delta z$ の範囲でラグランジェ多項式を用いて補間され、決定される。そのため図に示すように、圧力の補間範囲は、流速の補間範囲より半セル分法線方向外側にずれることになる。その結果、強制外力を正確に算定するには領域外側に5セル分の仮想領域の確保が必要となる。そこで本数値モデルでは、側方境界の外側に5セルの仮想領域を設け、当該境界の反対側の境界内部5セルの物理量を与えることで周期境界条件を設定した。また、算定された物体表面での強制外力は、物体表面からの距離に応じて分布関数を用いて重み付けされ、直交格子に分配される。このとき、物体が計算領域境界付近に位置する場合は、領域外側の仮想領域にまで物体の影響が及ぶことになる。ここでは、物体が流体に及ぼす影響を周期的に表現するために、仮想領域内に分配される外力項を、対応する内部領域に分配した。

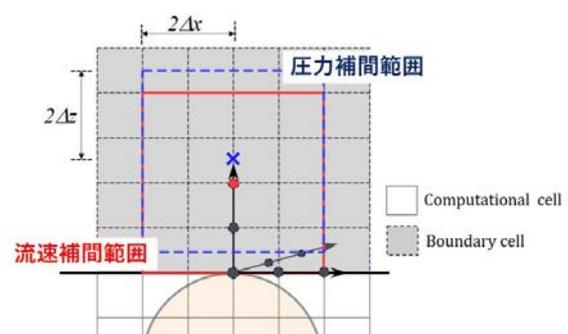


図-1 強制外力補間・分配範囲

4. 妥当性検証

周期境界条件が適切に設定されていれば、単一球を計算領域内のいずれに配置しても、領域内では等しい流況を示すはずである。そこで、球体を計算領域の上端に設置した場合と、領域中心部に設置した場合の計算を行い、流況を比較した。

$Re=300, 600$ として行った計算の結果を図-2、図-3に示す。 $Re=300$ ではいずれの配置でも、球の後流で流軸に対称な渦を形成しているのが見て取れ、これらの形状は一致していた。一方、 $Re=600$ では後流域で渦が発生し、非対称かつ非定常な流れが見られ、いずれの計算結果においても後流域の流れの状況は良好に一致していることが確認された。すなわち、計算境界を跨がって流れの変動が適切に計算されていることが確認できた。さらに、これらの結果を定量的に評価するために、球の中心を原点とする座標系を設定して球周辺の流速成分の差異を算出した結果、 $Re=300$ では最大でも流入流速に対して 1.0×10^{-8} 、 $Re=600$ では 1.0×10^{-4} 程度と、極めてわずかな差異しか認められなかった。

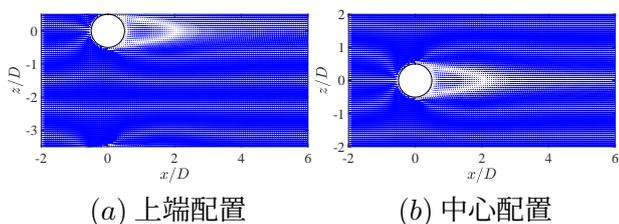


図-2 xz 断面流速ベクトル ($Re=300$)

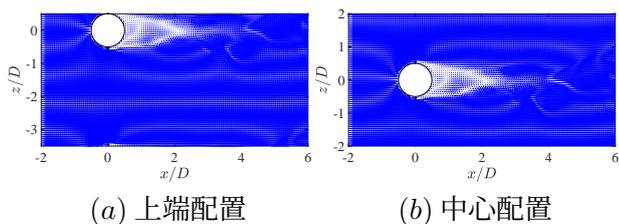


図-3 xz 断面流速ベクトル ($Re=600$)

5. 周期境界条件を適用した多孔質体通過流れの計算

図-4に示すように、計算領域内に粒径 $D=0.0125\text{m}$ の20個の球で構成される多孔質体を設置し、一方向定常流を与えて計算を行った。

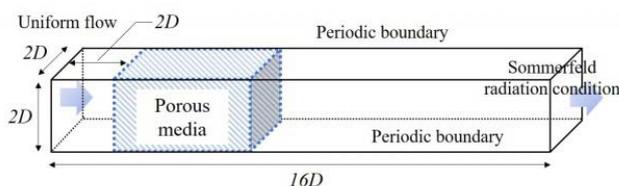


図-4 計算領域と境界条件

図-5は $Re=50, 100, 300$ での断面 $y/D = 0.25$ における流速ベクトルを示したものである。 $Re=50$ では流入後、流軸に対して対称な流れが発生したが、約23秒経過した時点で後流域で乱れが発生した(同図(a))。このとき、間隙部での流れは定常な流れとなっていた。 $Re=100$ でも同様に、一定時間経過後に後流域で乱れが発生した(同図(b))が、その発生するタイミングは $Re=50$ よりも早かった。 $Re=300$ になると、計算開始直後から後流域では複雑な乱れが発生した。また、多孔質体間隙部においても複雑、かつ、非定常な流れが形成されていた(同図(c))。

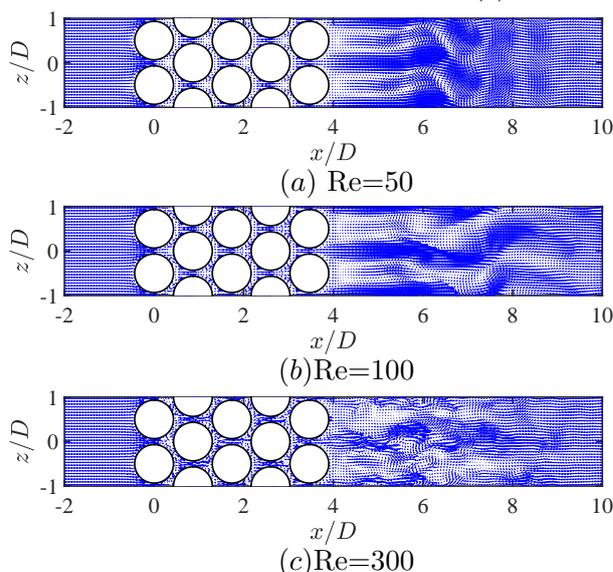


図-5 xz 断面流速ベクトル ($y/D = 0.25$)

6. 結論

1. PVMを使用したIB法を用いて周期境界条件を課す場合には、外力算出の補間範囲を考慮して、5セル分の仮想セルを設ける必要があることを示した。
2. 単一球を通過する流れを計算することにより、本周期境界条件の設定法の妥当性を確認した。
3. 周期境界条件を適用した数値モデルによる多孔質体通過流れの計算において、レイノルズ数が増加するにしたがって、後流域と間隙部での乱れが大きくなることを示した。

参考文献

- 1) 竹岡佑介, 重松孝昌, 中條壯大: 一方向流中に設置された固体群に作用する流体力に関する数値計算, 土木学会論文集 B2, Vol.66, No.1, pp.761-765, 2010.
- 2) 渡辺友哉, 中條壯大, 重松孝昌: 構成部材のアスペクト比が多孔質体通過流れに及ぼす影響, 土木学会論文集 B2, 第75巻, pp.943-948, 2019.
- 3) Lima e Silva, A. L. F., Silveira-Neto, A, and Damasceno, J. J. R.(2003): Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 189, pp. 351-370.