第Ⅱ部門

気液界面を貫通する固体周りの流動の高速解析手法の提案

大阪市立大学 工学部学生会員三宅亮人大阪市立大学大学院 工学研究科フェロー会員重松孝昌

1. 研究背景・目的

石油プラットフォームや石油掘削リグを始めとする 海洋構造物は,複数の円柱で構成されていることが多 い.これらの海洋構造物に作用する流体力については 古くから多くの研究が行われており,円柱周りに形成 される渦流の特性に依存することが示されている¹⁾. これより,円柱周りに形成される渦流の特性を把握す ることは重要である.しかし,円柱の作用によって変 化する水面変動の影響を詳細に検討した例は極めて少 ない.これは,物性値が大きく異なる気体と液体の界 面を正確に追及することが困難であることに起因して いる.そこで,本研究では気液界面を貫通した円柱を 対象とし,液体と気体の流動を同時に解析でき,高速 かつ高精度で解析可能な数値解析手法を提案する.

一般的に三態(固体・気体・液体)で構成される場における流動計算を行う場合には,時々刻々と変化する気液界面を追跡するとともに,固体表面における境界条件を満足させなければならない.また,密度や粘性係数などの複数の物性値を考慮した流体の運動方程式を解かなければならない.このとき,気体と液体の密度差に起因する圧力の不連続性が,流体運動の解析を複雑化させるとともに,計算の負荷を著しく大きくしている.そこで,本研究では密度で除した圧力を変数として扱うことによって,このような課題を回避し,計算アルゴリズムを簡素化することによって,高速度の計算が可能な解析手法を提案する.

2. 数値計算手法

流体運動の支配方程式は,非圧縮性・粘性流体を 対象とした3次元の連続の式(1)及び Navier-Stokes 方程式(2)を用いる.この方程式の圧力項は一般的に $\frac{1}{\rho}\nabla p$ として表されるが,本研究では $\phi = \frac{p}{\rho}$ として, 式(2)のように ϕ を未知変数として解く.このよう に,密度で除した圧力を変数として扱うことにより, 気液界面における圧力の不連続性に関する課題を回避 するとともに,液相と気相の流動の差は動粘性係数に 依存することになる.各計算セルの動粘性係数は, ϕ の定義座標において $\phi < 0$ の場合に空気, $\phi > 0$ の場合





図-1密度非依存圧力 ϕ の空間分布

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + (\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = -\nabla\phi + \nu\nabla^2 \boldsymbol{u} + \boldsymbol{F} + \boldsymbol{f} \qquad (2)$$

に水の動粘性係数を用いた.式(1)および式(2)の解 法には SMAC 法のアルゴリズムを用い,時間差分に 2次精度の Adams-Bashforth 法,空間差分に 2次精 度の中心差分を用いた.

本研究では,固体表面における境界条件を満足さ せるために,Immersed Boundary Method(IB法)²⁾ を用いた.IB法では,流体-固体間の相互作用力であ る強制外力 F を式(2)に導入することにより境界条 件を満足させる.これにより,流体の運動を解析す るための計算格子が物体形状に依存せず,計算負荷 が軽減される.一般的に気液界面を捕捉する手法と しては,格子間の液体の輸送量を計算する Volume of Fluid Method³⁾や水面位置を関数として表す Level Set Method³⁾等が存在するが,いずれも気体と液体の 判別や輸送量の計算に時間を有したり,人為的経験な 計算テクニックを要する等のデメリットがある.本研 究では,図-1のように気液界面における密度非依存 圧力 $\phi \in 0$ とし,相対的に気相および水相の $\phi \in$ 算 出し, $\phi = 0$ を追跡することで気液界面を捕捉する.

3. 気液界面捕捉手法の妥当性検証

気液界面捕捉手法の妥当性検証を行うため,図-2の ように等加速度 $-\alpha$ で運動する容器中の水面形状の 計算を行った.この時,流体が相対的静止状態となる ことを仮定すると,流体は容器から α の加速度を受 けながら静止している状態である. $\alpha = \frac{h}{B}g$ で表され る時,得られた水面形状は理論解と一致した.



図-2 容器の運動方向と水面形の比較

4. 円柱周りの流動解析の適応例

円柱周りの流動解析の適応例として,静止流体中に おける水平振動円柱周りの流動を解析した.計算は, 長さ 0.12[m],幅 0.12[m],高さ 0.06[m]の水槽を模擬 し,その中央に直径 d = 0.01[m],高さ 6dの円柱を 設置し,水平振動させた.さらに,式(3)で示される Reynolds number(Re 数)をRe = 1500で設定し,式 (4)で示される Keulegan-Carpenter number(KC 数) はKC = 10.0,15.0,20.0,25.0 の4 パターンにおいて 計算を行った.ここで,Tは円柱の振動周期,dは円 柱の直径, V_0 は円柱の速度振幅である.

$$Re = \frac{V_0 d}{\nu} \tag{3}$$

$$KC = \frac{V_0 T}{d} \tag{4}$$

図-3 に, KC = 20.0 の場合の xy 断面 (z = -d)における流速ベクトルおよび無次元渦度 ω^* の空間分 布を示す.これより,半周期毎に1対の渦が振動軸に 対して斜め方向に放出されることが分かる.このよう な流動は, 16 < KC < 24 の範囲 で発生することが Lam *et al.*⁴)によって示されており,他の *KC* 数に おいても Lam *et al.*⁴)と同様の結果が得られた.ま た,図-4 は xz 断面 (y = 0)における流速ベクトルの 空間分布を示す.これより,粘性の影響のみによって 気相と液相の流動に差異が生じることが確認できた.

5. 計算時間の短縮

本数値計算手法を用いた場合,松本ら⁵⁾の手法と比 べて計算時間が短縮された.表-1のように格子数を 設定した場合,計算時間がおよそ26.9%短縮された.

6. 結論

- (1) 本数値計算手法を用いることで,気液界面における圧力の不連続性に関する課題が回避できた.
- (2) $\phi = 0$ を追跡することで気液界面が捕捉できた.
- (3) 本数値計算手法を用いた場合,松本ら⁵⁾の手法と 比べて計算時間がおよそ 26.9 %短縮された.



表-1 総計算時間一覧

grid	(1) present[s]	(2) Matsumoto[s]	(1)/(2)
$80^2 \times 40$	24126	32780	0.736
80 ³	25788	36538	0.706
$160^{2} \times 80$	101653	135483	0.750

参考文献

- 1) C.H.K.Williamson:Sinusoidal flow relative to circular cylinders , J.Fluid Mech. , Vol.155 , pp . 141-174 , 1985 .
- 2) 田邊礼佳:薄板群周辺流況の計算のための IB 法の改良に関する研究 とその適用,大阪市立大学工学部修士論文,pp.4-9,2019.
- 3) 横井研介:界面の大変形を伴う自由界面流れの計算手法, pp. 1-15, 2000.
- 4) K.M. Lam and G. Q. Dai:Formation of vortex street and vortex pair from a circular cylinder oscillating in water , Exp. Therm. FluidSci. , Vol. 26, pp. 901-915 , 2002 .
- 5) 松本弘史:水平振動する鉛直円柱によって誘起される流体運動に関す る基礎的研究,大阪市立大学工学部修士論文,pp.141-149,2017