

コヒーレント構造モデルを用いた準周期境界による流入変動風の生成

清水建設 正会員 ○酒井 佑樹
清水建設 非会員 野津 剛

1. はじめに

構造物周りの剥離を伴う非定常な流れ場を精度良く予測するためには LES 等の非定常計算が必要となる。近年では、WALE モデルやコヒーレント構造モデルなど¹⁾、様々な渦粘性モデルが提案されてきているが、その検証事例は不十分である。そこで本研究では、SGS 渦粘性の大きさを乱流構造に基づいて決めるコヒーレント構造モデルを用いて準周期境界型流入変動風を生成し、流入変動風性状の再現性を確認する。

2. 流入変動風の生成方法

Lund ら²⁾は、流入変動風を生成するドライバ部として、本来の乱流境界層の計算で用いる領域とは別の計算領域を設けることで流入変動風の生成を行なった。Lund らによる方法の特徴は、抽出断面の風速を平均値と変動値に分解したうえで、変動値のみを流入境界に代入する点である。したがって、流入境界で規定された平均風速の鉛直プロファイルを崩すことなく風速変動成分を発達させることができる。ただし、Lund らの方法ではドライバ部での主流方向の境界層発達を考慮しているため、上面境界において境界層の発達に応じた鉛直方向の速度成分を与える必要がある。また、抽出断面での速度変動を求めるために、抽出断面での壁面摩擦速度および境界層厚さを推定する必要がある。さらに、抽出断面での風速の変動成分を流入境界に代入する際に格子点間で補間を行なう必要があるなど、煩雑な操作が要求される。

一方で片岡ら³⁾は、壁面摩擦速度および境界層厚さがドライバ部内で変化しないものとみなして Lund らの方法に簡略化を施した。これによる流入境界における風速分布は次式で求められる。

$$u_{inlt}(y, z, t) = \langle u \rangle_{inlt}(z) + \phi(\theta) \times (u_{recy}(y, z, t) - [u](z, t)) \quad (1)$$

$$v_{inlt}(y, z, t) = \phi(\theta) \times v_{recy}(y, z, t) \quad (2)$$

$$w_{inlt}(y, z, t) = \phi(\theta) \times (w_{recy}(y, z, t) - [w](z, t)) \quad (3)$$

ここで $[u]$ 、 $[v]$ および $[w]$ はドライバ部の各時刻での x-y 断面平均値。下付き添字 *inlt* と *recy* はドライバ部の流入断面と速度変動を抽出する抽出断面を意味する。仮定により、壁面摩擦速度および境界層厚さに変化が無いとしても、実際にはドライバ部内で平均速度分布の変化が生じることは避けられない。これにより風速変動が境界層の外側にまで伝わるのを防ぐために、抽出境界の変動成分に **damping** 関数 $\phi(\theta)$ を掛けている。本計算においても、片岡らの方法にならって流入変動風を生成する。

3. 計算手法

3. 1 LES の基礎方程式

LES の基礎方程式としては、フィルターをかけた非圧縮流れの連続の式と Navier-Stokes 方程式である。これらの式は以下のように表せる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4) \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\nu \bar{D}_{ij}) \quad (5)$$

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6) \quad \tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (7)$$

u_i は $i(i=1\sim 3)$ の風速、 t は時間、 p は圧力、 ρ は空気密度であり、 ν は動粘性係数を表す。本研究では SGS モデルにコヒーレント構造モデル(CSM)を用いるため、SGS 応力 τ_{ij} は以下のようにモデル化される。

$$\tau_{ij} = -2C\Delta^2 |\bar{D}| \bar{D}_{ij} \quad (8)$$

ただし、

$$\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} \quad (9) \quad |\bar{D}| = \sqrt{2\bar{D}_{ij}\bar{D}_{ij}} \quad (10)$$

キーワード LES, 流入変動風, コヒーレント構造モデル, 準周期境界

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設 tel.03-3820-8672

$$C = \frac{1}{22} |F_{CS}|^{3/2} F_{\Omega} \quad (11)$$

$$F_{CS} = \frac{\bar{Q}}{\bar{E}} \quad (13)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{2} (\bar{W}_{ij} \bar{W}_{ij} + \bar{D}_{ij} \bar{D}_{ij}) \quad (15)$$

$$F_{\Omega} = 1 - F_{CS} \quad (12)$$

$$\bar{Q} = \frac{1}{2} (\bar{W}_{ij} \bar{W}_{ij} - \bar{D}_{ij} \bar{D}_{ij}) \quad (14)$$

$$\bar{W}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (16)$$

3. 2 計算条件

方程式は有限差分法により離散化する．各変数はスタッガード格子で配置される．速度と圧力のカップリングには Fractional Step 法を用いる．時間発展は Adams-Bashforse 法を用いる．空間離散化は，拡散項は 2 次精度中心差分，移流項は 2 次精度中心差分と 1 次精度風上差分のブレンド式を用いる．ブレンドファクター α は 0.9 とする．

$$\phi_{\alpha} = \alpha \phi_{c2d} + (1 - \alpha) \phi_{1st} \quad (17)$$

ϕ_{c2d} : 2 次精度中心差分による離散化

ϕ_{1st} : 1 次精度風上差分による離散化

3. 3 対象物体のモデル化

対象物体は D:B:H=1:1:1 の角柱とする．また，境界層厚さ $\delta = 0.8\text{m}$ とすると $H/\delta = 0.3125$ である．対象物体は IBM(Immersed Boundary Method)⁴⁾を用い，表面で指定する速度となるように外力を加える．すなわち，Navier-Stokes 方程式において，対象物体の位置に外力項 f_i を加え，速度を 0 とする．

$$f_i(x_s, t) = \alpha \int_0^t u_i(x_{j,s}, t') dt' + \beta u_i(x_{j,s}, t) \quad (18)$$

ここで， x_s は物体表面位置， t は無次元時間， u_i は外力を与える格子点の風速である． α ， β は収束性調整のパラメータで $\alpha = -2000$ ， $\beta = -30$ とした．

4. 計算領域と境界条件

図 1 に計算領域と境界条件を示す．計算格子は Vinokur の手法⁵⁾により上面境界から床面境界に向けて寄せている．上面境界は Free-slip，床面境界は No-slip としている．流入境界は式(1)～(3)で与えられる．その際の平均風速プロファイルは，地表面粗度区分 III 相当の実験結果(図 2)の分布を与えた．

5. 計算結果

図 2 および図 3 に，準周期境界により生成した流入変動風のプロファイルを示す．平均風速は地表面付近でやや過大だが，概ね実験結果に一致している．乱れ強さは全体的に過小になっているが，これは計算安定性を確保するために移流項の離散化において 1 次精度風上差分を 10%ブレンドしたことによると考えられる．図 4 には本計算領域の対象物体まわりの流れの瞬間場を示す．瞬間場ではあるが，屋上面の小さい逆流と後方の循環流は十分に再現されていることが確認できる．

6. まとめ

本研究では，SGS モデルにコヒーレント構造モデルを用いた準周期境界型流入変動風を生成し，流入変動風性状の再現性を確認するとともに，生成された流入変動風により物体周りの流れ場が妥当であるか検証を行った．今後は，移流項のブレンドファクターをより大きな値にして数値粘性の影響が小さな計算を実施予定．

7. 参考文献

- 1) 日本建築学会：都市の風環境予測のための CFD ガイドブック，(2020)
- 2) Lund, T.S, Wu, X. and Squires, K.D : Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations, J. Comp. Phys., No.140, pp.233-258 (1998)
- 3) 片岡浩人，水野稔：流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析，日本建築学会計画系論文集，第 523 号，pp.71-77，(1999)
- 4) Goldstein, D., Handler, R. and Sirovich, L. : Modeling a no-slip flow boundary with an external force field, J. Comp. Phys., Vol. 105, pp.354-366 (1993)
- 5) Vinokur, M : On One-Dimensional Stretching Functions for Finite-Difference Calculations, J. Comp. Phys., Vol. 50, No.2, pp.215-234(1983)

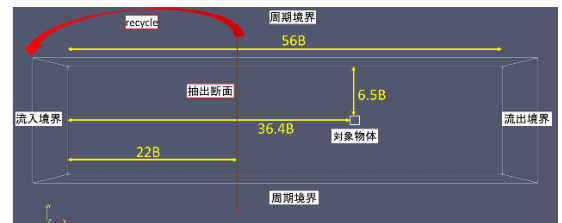


図 1 計算領域と境界条件

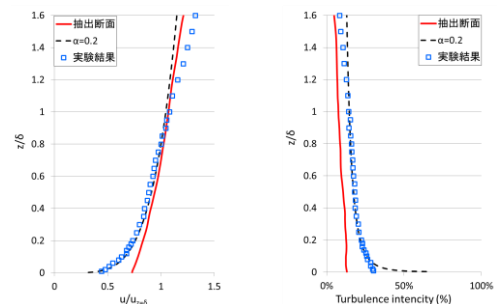


図 2 平均風速分布

図 3 乱れ強さ

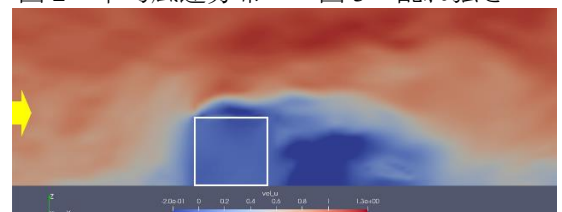


図 4 主流方向 u 成分の瞬間場