

弱基本境界条件を適用した振動する複数円柱まわりの流れの解析

日本大学大学院 学生会員 ○徳田 翔也

日本大学 正会員 長谷部 寛

日本大学大学院 学生会員 (研究当時) 王 聰

1. 背景

現在、再生可能エネルギーに高い注目が集まっており、風力発電では様々な手法が提案されている。本研究では複数円柱振動子を用いたウエイクギャロッピング発電法について検討している¹⁾。ウエイクギャロッピングとは、斜張橋や吊り橋のケーブルに生じる振動現象で、上流側のケーブルからはく離れた複雑な流れの影響で下流側のケーブルが激しく振動する現象である²⁾。ウエイクギャロッピング発電法の構築には、円柱の配置条件を知る必要があり、風洞実験では流れ特性の把握が難しいため数値流体解析を用いた場合の検討も行っている³⁾。

数値流体解析は通常、円柱表面に流速 0 を与える基本境界条件を使用する。また、壁面境界付近に形成される境界層を精度よく計算するために、壁面付近のメッシュ分割を十分に細かく切る必要がある。しかし、メッシュを細かく分解することで解析にかかる時間やコストが増大する。この解消法として、基本境界条件を弱く与える weak boundary condition (以下 Weak B.C.) が Bazilevs and Hughes らにより提案された⁴⁾。Weak B.C. は古典的なペナルティ法に不連続ガラキンの考えを組み込んだもの、または Nitsche の方法とされており、ペナルティ法で導入される境界積分項に、応力の積分項、安定化項が追加される。しかし、複雑な流れが生じる解析に対して各項が果たす効果は明確ではない。本研究では、振動する複数本の円柱を配置した精度の良い解析を効率よく行うために、基礎的な検討として Weak B.C. を適用した低レイノルズ域での振動する複数円柱の検討を行った

2. 解析手法

本研究では、書籍⁵⁾に付属されている非圧縮粘性流体解析プログラムを改良して用いた。支配方程式には以下の無次元化した連続式と、ALE 表記に基づく Navier-Stokes 方程式を用いた。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + (u_j - \hat{u}_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \bar{\nu} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} = b_i$$

ここで、 u_i は i 方向の流速、 \hat{u}_j はメッシュ速度、 p は圧力、 $\bar{\nu}$ は $\bar{\nu}=1/Re$ 、 Re はレイノルズ数、 b_i は物体力である。

上記の支配方程式を SUPG/PSPG 法により離散化し右辺に weak B.C. の各項を追加した式を以下に示す。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \left(-p \delta_{ij} + \bar{\nu} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) d\Omega \\ & + \sum_e \int_{\Omega_e} \tau_m^e \left(u_j \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial q}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega \\ & = \int_{\Gamma_h} w_i \left(-p \delta_{ij} + \bar{\nu} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) n_j d\Gamma \\ & + \sum_e \int_{\Gamma_b} w_i \left(-p \delta_{ij} + \bar{\nu} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) n_j d\Gamma \\ & + \sum_e \int_{\Gamma_b} \left(-q \delta_{ij} + \bar{\nu} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \right) n_j u_i d\Gamma \\ & - \sum_e \int_{\Gamma_b} \tau_p w_i (u_i - \bar{u}_{pi}) d\Gamma \quad (2) \end{aligned}$$

$$\tau_p = \frac{C_b}{h_b} \frac{L}{Re} \quad (3)$$

キーワード Weak boundary condition ウエイクギャロッピング 複数円柱 数値流体解析

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学大学院理工学研究科 土木工学専攻

ここで、 τ_m^e は安定化パラメータ、 Γ_h は自然境界条件を与える境界、 Γ_b は weak B.C.を適用する境界。 τ_p はペナルティパラメータ、 n_j は境界外向き単位法線ベクトル、 \bar{u}_{pi} は弱く課す基本境界条件、 \bar{h}_b は無次元要素代表長さ、 L は代表長であり、 C_b' は 4.0 が推奨されている。要素は三角形一次要素を用い、時間方向には Crank-Nicolson 法、連立一次方程式の解法には GPBi-CG 法が用いられている。振動方程式の解法には Newmark- β 法を用いた。

3. 解析条件

解析領域及び境界条件を図-1 に示す。振動する単独円柱と円柱 2 本の 2 種類を対象とした。流入部にはレイノルズ数 200 に相当する一様流を与えた。円柱後流には十分な領域を与え、上下壁面には slip 条件、円柱表面は初期検討として、U 方向に weak B.C.を用い、V 方向に 0 を与えた。円柱直径は D である。時間増分量は 0.01 とし、ペナルティパラメータは 0.8, 8, 80, 800 の 4 種類で検討した。

4. 解析結果

ペナルティパラメータを変更した単独円柱の解析結果から、流速ベクトルを可視化した図を図-2 に示す。単独円柱では、図-2 のように円柱表面の流速ベクトルがペナルティパラメータを大きくすることで、徐々に小さくなり 0 に近づくことが確認できた。

次に、円柱を 2 本配置した場合の、流速ベクトルを可視化した図を図-3 に示す。こちらも単独円柱と同じく、ペナルティパラメータを大きくする事で、円柱表面の流速ベクトルが小さくなる事を確認した。

振動する複数円柱の結果については、講演時に示す。

5. まとめ

本研究室では、複数円柱振動子を用いたウエイクギャロッピング発電法に関する検討を行っている。基本境界条件を使用している既存の解析では、メッシュ分割を細かくする必要があり、解析に時間がかかる事から、円柱本数を増やした場合でもメッシュ分割を緩和させ効率よく解析を行う事を目標に、基本境界条件を弱く与える弱基本境界条件を適用し、円柱周りの流れを検討した。振動する単独円柱と円柱 2 本を対象とし、どちらもペナルティパラメータを上げることで、円柱表面付近の流速が 0 に近づく事を確認できた。今後は高レイノルズ数域で weak B.C.を適用した 3 次元の流体構造連成解析を行う事が課題である。

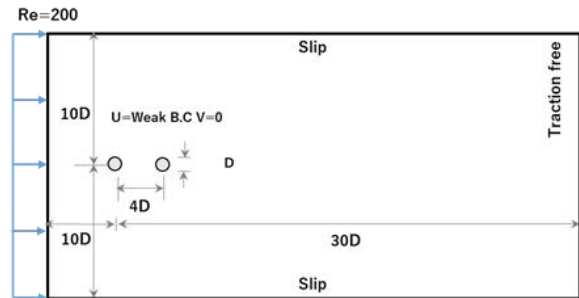


図-1 解析領域及び境界条件(円柱 2 本配置)

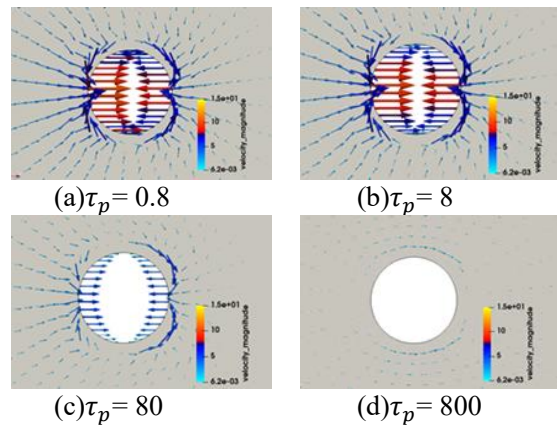


図-2 円柱近傍の流速ベクトル

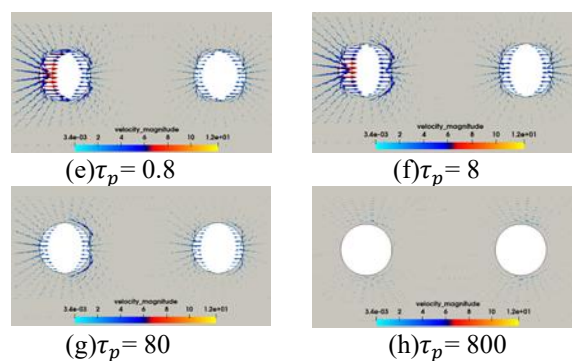


図-3 円柱近傍の流速ベクトル (円柱 2 本配置)

参考文献

- 1) 野村卓史, 三枝成彰, 長谷部寛: 固定円柱の後流に配置された複数円柱の振動に関する基礎実験, 風工学シンポジウム論文集, Vol.22, pp245-250, 2012
- 2) 社団法人日本鋼構造協会(編): 構造物の耐風設計 東京電機大学出版, 1997
- 3) 徳田翔也, 長谷部寛: 複数円柱の空気力に対する円柱配置間隔の影響, 計算工学会論文集, vol26, A-02-04, 2021
- 4) Y.Bazilevics and T.J.R.Hughes: Weak imposition of Dirichlet boundary conditions in fluid mechanics, Compt. Fluids, Vol.36, pp.12-26, 2007
- 5) 日本計算工学編: 第3版有限要素法による流れのシミュレーション, 丸善出版, 2017