

ウェイクギャロッピングにおける流れ場と空気力に関する数値解析的検討

名古屋大学 正会員 ○北川徹哉
 野村総合研究所 非会員 溝口卓弥
 オタワ大学 正会員 Dragomirescu Elena

1. はじめに

主流方向に直列に近接配置された二つの円柱状物体においてはウェイクギャロッピングが発生し、主として風洞実験を用いた多くの研究が行われてきた。しかしながら、その発生メカニズムは明らかにされていない。本研究においては、ウェイクギャロッピングを数値流体解析によりシミュレートし、流れ場と空気力の特性を調べる。

2. 解析方法

解析対象の2円柱の概要を図1に示す。上流側円柱は固定とし、下流側円柱は主流方向に対して鉛直方向に1自由度を有する。円柱中心間距離 L は円柱直径 D の2倍とし、下流側円柱の固有振動数および減衰定数は文献1)の風洞実験にあわせて、それぞれ 1.16Hz, 0.00148 としている。この2円柱周りの流れ場を LES 記述された非圧縮性流体のナビエ・ストークスの式（以下、NS 式）、ならびに連続の式を解くことによって求める。流れ場とその揚力による下流側円柱の応答変位 y とを時々刻々と交互に解き、下流側円柱の運動にともなう流れ場への影響は ALE 法により考慮している。なお、LES には Smagorinsky モデル (Smagorinsky 定数 = 0.1) を使用し、NS 式の対流項には 3 次精度上流差分法を用いた。これらの流体方程式の離散化はコロケート格子を用いた差分法により行い、一般座標系において SMAC 法により解いた。NS 式の粘性項には 2 次精度クラーク・ニコルソン法を、対流項には 2 次精度アダムス・バッシュフォース法を適用している。解析空間は図2に示す、主流方向に $60D$ 、鉛直方向に $30D$ 、円柱スパン方向に $1D$ を有する楕円柱の内部である。円柱表面の格子点数は円周方向に 200 点、スパン方向に 26 点であり、円柱表面から放射方向に 150 点の格子を設けている。なお、本手法の静止直列2円柱における解析の精度については文献2)を参照されたい。また、図3に示すように格子系は円柱の運動にともなう変形し、各格子の移動速度が ALE 法に用いられる。境界条件については、流入境界に一樣流速、流出境界には対流粘性条件を、円柱表面にはすべりなし条件を適用した。風洞実験結果¹⁾がリミットサイクルを示した

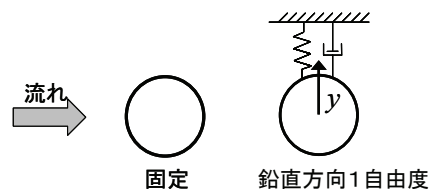


図1 解析対象の2円柱

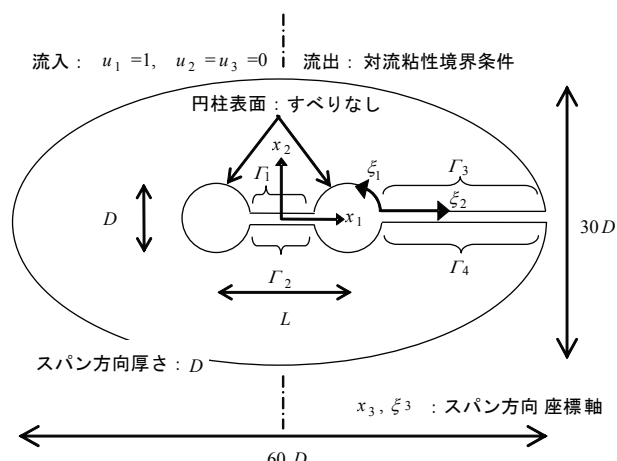


図2 格子系の円柱スパン方向断面の概要

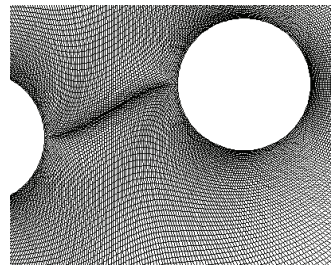
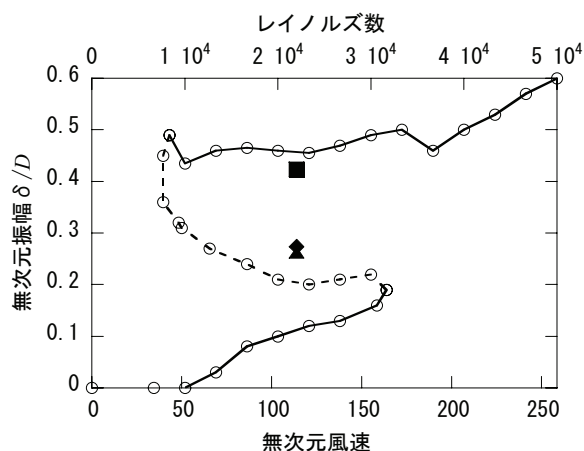
図3 格子系の変形の例 ($y = 0.4D$)

図4 応答振幅の実験値との比較

○林ら¹⁾ 実験値
 ▲本研究 解析値 $y_s=0.2D$,
 ◆本研究 解析値 $y_s=0.25D$, ■本研究 解析値 $y_s=0.5D$

ウェイクギャロッピング, 数値流体解析, 直列2円柱, 揚力

〒464-8603 名古屋市千種区不老町 電話: 052-789-5918 FAX: 052-789-3734

無次元風速 114 (レイノルズ数は 2.2×10^4 .) での応答を本研究の検討対象とし, 下流側円柱に初期変位 y_s を与えて解析を開始した. y_s は $0.2D$, $0.25D$, $0.5D$ の3通りとした.

3. 解析結果および考察

図4は下流側円柱の応答振動が定常化したと思われる時点以降の応答変位振幅の平均値を無次元風速に対してプロットしたものである.

本解析の応答振幅は既往の風洞実験結果¹⁾と概ね整合している. 以下では $y_s = 0.5D$ のケースに着目する.

図5は $y_s = 0.5D$ のケースの下流側円柱の揚力係数 C_L と無次元変位 y/D の時刻歴について, y/D を基準としておよそ1波分の区間を抜き出したものである. 無次元時間 $t=820$ 付近から850付近に着目すると y/D が大きくなるにつれて C_L が小さくなっていくことが分かる. 図6(a)は図5の $t=827$ における, スパン中央断面での渦度 ω_3 の分布である. 下流側円柱が上流側円柱のウェイク中に位置している. 図7(a)は図6(a)と同時刻における下流側円柱表面の圧力係数 C_p の分布を示しており, 点線より外側の場合は負圧を, 内側の場合は正圧を表す. また, θ は上流方向からの角度である. 円柱表面全体が負圧に覆われており, C_L はゼロに近い値(図5: $t=827$) となっている. 次に $t=835$ における流れ場(図6(b))では, 上流側円柱の剥離せん断層が下流側円柱の上面前部に再付着している. このタイミングの C_p

(図7(b))を見ると, $\theta=70^\circ$ 付近に再付着による C_p の正圧方向のピークがある. また, 円柱の上面と下面とで圧力分布に非対称性が見られる. 特に, 下面側の負圧が強く, これにより C_L は負の値(図5: $t=835$) となっている. なお, 下流側円柱の後方には明確な渦が発生しており, この影響により C_L の変動が大きくなっている. さらに $t=850$ においては, 図6(c)に示すように上流側円柱の剥離せん断層が下流側円柱の下面側にまわり込むギャップフローが発生している. このときの C_p (図7(c))は, 剥離せん断層の再付着点が円柱前面部($\theta=10^\circ$ 付近)に位置することを示している. 図7(b)と比べて再付着点に作用している正圧は大きくなっている一方, 表面圧力の上下非対称性は弱くなり, C_L の振幅は減少に向かう(図5: $t=850$ 近傍). また, このギャップフローが発生している間は, 下流側円柱の後方には明確な渦の形成は見られず, 後流域の乱れが著しいことが図6(c)よりわかる.

参考文献 1) 林健一, 赤瀬雅之, 井上浩男: 並列ケーブル振動時における振幅依存性について, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp.245-250, 1994. 2) 北川徹哉, 太田裕希: 数値流体解析による静止タンデム2円柱まわりの流れ場の考察, 土木学会論文集A, Vol.63, No.1, pp.153-166, 2007.

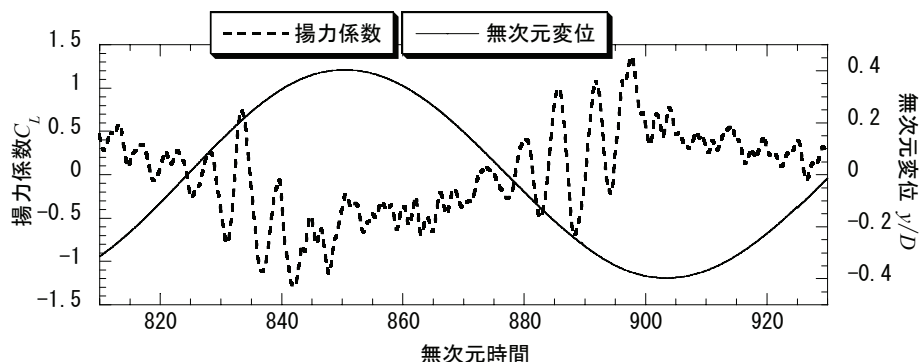


図5 $y_s = 0.5D$ のケースにおける下流側円柱の揚力係数と無次元変位の時刻歴

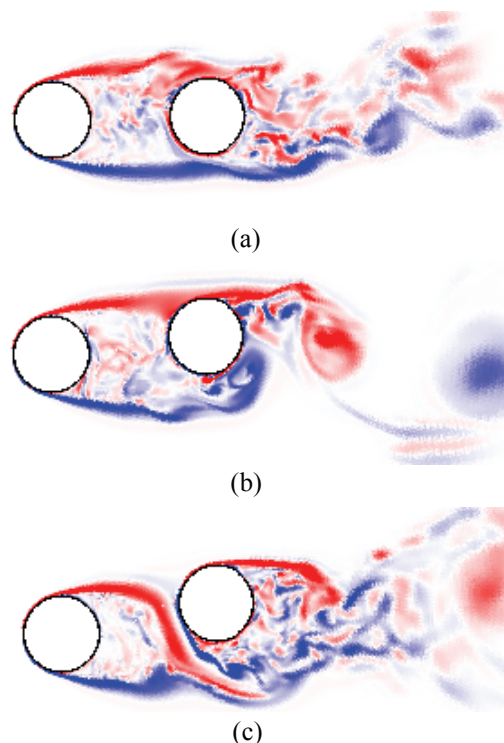


図6 $y_s = 0.5D$ のケースにおけるスパン中央断面の瞬間渦度分布

- (a) 上流側円柱のウェイクに下流側円柱が埋没している様子 ($t=827$)
- (b) 上流側円柱の剥離せん断層が下流側円柱に再付着する様子 ($t=835$)
- (c) 上流側円柱の剥離せん断層が下流側円柱の下部にまわりこむギャップフローが発生している様子 ($t=850$)

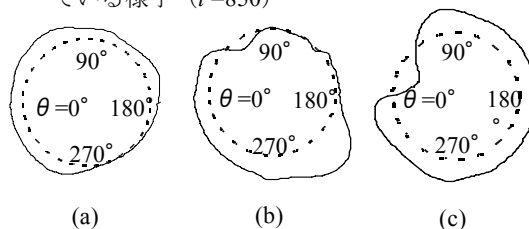


図7 下流側円柱の表面に作用する圧力の挙動

- (a) 図6(a)と同時刻における C_p の分布
- (b) 図6(b)と同時刻における C_p の分布
- (c) 図6(c)と同時刻における C_p の分布