

流体中に置かれた直列2円柱の上流側円柱から放出される渦の挙動

名古屋大学大学院 学生会員 ○溝口卓弥
 名古屋大学エコトピア科学研究所 正会員 北川徹哉
 トヨタ紡織株式会社 非会員 太田祐希

1. はじめに

主流方向に対して直列に配置された2円柱まわりの流れ場および流体力特性の把握は、複数物体まわりの流れ場の理解への基本となることや、ウェークギャロッピングと呼ばれる特異な流体励起振動の発生メカニズムの解明の観点から多くの研究がなされてきた。直列2円柱まわりの流れ場における一つの特徴として、上流側円柱から放出された渦が下流側円柱に衝突し、下流側円柱からの渦と干渉する現象があり、これが流体力に対して与える影響は未解明である。これに対して数値流体解析は流れの動きと流体力などの各種物理量を同時に観察できる手段であり、本研究では3次元数値流体解析を行い、直列2円柱の上流側円柱から放出される渦が流れ場および流体力特性に与える影響について検討を行った。

2. 解析手法

非圧縮性流体のナビヤ・ストークス式および連続の式に Large Eddy Simulation (LES) を適用し、直列2円柱まわりの流れ場をシミュレートした。LES 渦粘性モデルには Smagorinsky モデル (Smagorinsky 定数=0.1) を使用している。離散化にはコロケート格子を用いた差分法を用い、SMAC 法により解いた。ナビヤ・ストークス式の対流項には UTOPIA 法を用いた3次精度上流差分法を適用している。さらに粘性項には2次精度クランク・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用いた。なお、流速の予測子の求解および圧力ポテンシャルに関するポアソン方程式の求解にはSOR法を用いている。また、図

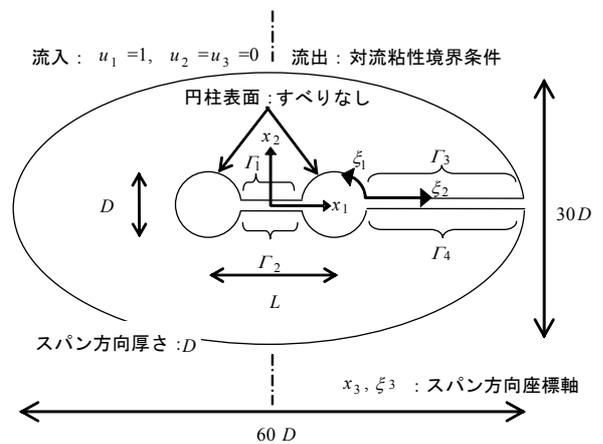


図1 格子系の円柱スパン方向断面の概要

1に示すような、円柱直径を D として縦 $30D$ 、横 $60D$ 、奥行き $1D$ の楕円柱内を解析空間とした。円柱表面の格子点数は円柱周方向に200点、スパン方向に26点である。境界条件については、流入境界において一様流速を与え、流出境界には対流粘性条件を、円柱壁面にはすべりなし境界条件を適用した。レイノルズ数は22000とし、無次元時間 t の刻み幅は 2.0×10^{-3} とした。円柱中心間距離 L については L/D を2, 2.5, 2.75, 3, 3.25, 3.5, 4および5の8ケースとした。

3. 解析結果及び考察

上流側円柱からの渦放出が確認された $L/D = 4$ のケースに着目する。図2(a)はスパン中央断面でのある瞬間の渦度場 ω_3 の分布を可視化したものであり、上流側円柱から放出された渦 (図1(a)中のEu) が下流側円柱に接近している。図3(a)は図2(a)と同じ時間の下流側円柱表面の圧力係数 C_p の分布であり、点線より外側が負圧、内側が正圧であることを表している。Euは下流側円柱に衝突、変形し、その渦構造が乱れるとともに下流側円柱の表面を沿うように流下し (図2(b))、この時、下流側円柱にも小さな渦 (図2(b)中のEd) が形成される。 C_p の分布はEuとEdの影響により、下流側円柱の上面側は負圧となっている (図3(b))。そして、図2(c)では上流側円柱からの渦が下流側円柱からの小渦を包み込みこみ、EuとEdが互いに混合しながら流下し下流側円柱から離れる。このとき、図3(c)のように下流側円柱の上面の圧力は再び正圧となる。EuおよびEdの渦度の強さやEuが下流側円柱に衝突する位置、ならびに下流側円柱表面の C_p の大きさに違いはあったが、以上のプロセスがほぼ周期的に繰り返され、上流側円柱からの渦が下流側円柱を通過するタイ

ミングと下流側円柱からの小渦放出のタイミングとがほぼ同期することが確認された。したがって、上流側円柱と下流側円柱の C_L の支配的な周波数は互いにほぼ同一であると思われる、これを C_L のスペクトルにより確認している。さらに、上述したように E_u による負圧と E_d のそれとが同時に下流側円柱に作用することを考えると、上流側円柱の C_L の変動および下流側円柱のそれとの位相差は円柱間中心距離と相関があると思われる。そこで、上流側円柱の C_L の変動と下流側円柱のそれとの位相差を検討する。図4は上流側円柱および下流側円柱の C_L の支配的な変動周波数 (=ストローハル数 St) における位相差 ϕ (rad) を L/D に関してプロットしたものである。ただし、 $L/D < 3.25$ の ϕ については上流側円柱から渦は放出されなかったため参考値に過ぎないこと、および $L/D = 3$ においては下流側円柱の C_L の支配的な周波数が二つ存在したために記載していない。また、 $L/D \geq 3.25$ においては、 C_L のクロススペクトルより得られる位相差に 2π を加算したものを ϕ としている。これは上流側円柱からの渦が流下して下流側円柱を通過するまでの間に、上流側円柱より次の渦が形成されるためである。阪田・木谷¹⁾は L/D が臨界円柱間距離を超える場合、 $\phi = 1.6L/D + 1.5(\text{rad})$ により近似できることを実験的に導いている。本解析結果もこの近似式に整合しており、 ϕ は L/D に比例する。渦の無次元対流速度を $U_{Eu} = (2\pi/\phi)St(L/D)$ により算出したものが図5である。 $L/D \geq 3.25$ において上流側円柱からの渦の対流速度は主流方向の5~6割程度と見なすことができ、単体円柱のそれが6~8割と言われていることから、本研究対象の L/D では上流側円柱から放出された渦はやや低流速で流下する。また L/D に関して緩やかに比例する傾向が見られ、 L/D をさらに増加させることで単体円柱の場合に近づくとと思われる。

4. まとめ

直列2円柱において、上流側円柱からの放出される渦の下流側円柱への到達と、下流側円柱自身からの渦の放出との同期を明らかにした。さらに、上流側円柱と下流側円柱の位相差が円柱間距離と相関することを、流れ場および円柱表面圧力の挙動より示した。

参考文献

- 1) 阪田一郎, 木谷勝: 直列配列2円柱に作用する変動流体力 (第2報, 変動流体力の位相関係), 日本機械学会論文集 (B編), 49巻447号, pp.2618-2623, 1983. 2) 森谷優, 坂本弘志, 木谷勝, 有江幹男: 直列2円柱に作用する変動圧力および流体力, 日本機械学会論文集 (B編), 49巻443号, pp.1364-1372, 1983.

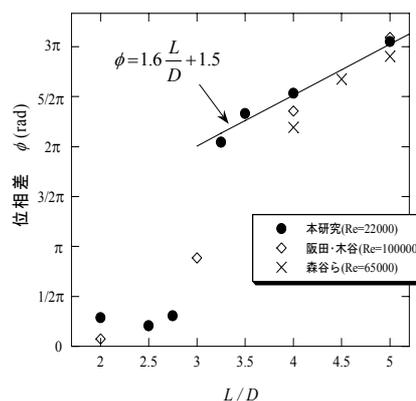


図4 上流側円柱と下流側円柱の変動揚力の位相差

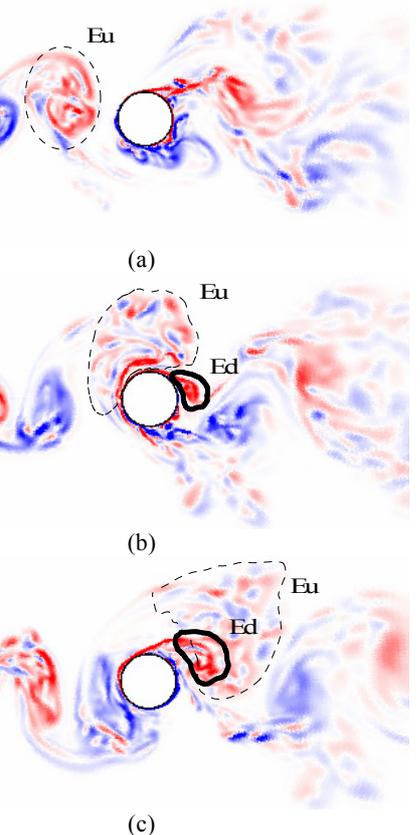


図2 スパン中央断面における渦度分布
(a)上流側円柱から放出された渦が下流側円柱に接近する様子
(b)上流側円柱から放出された渦が下流側円柱に衝突する様子
(c)上流側円柱から放出された渦と下流側円柱にて形成された渦とが混合する様子

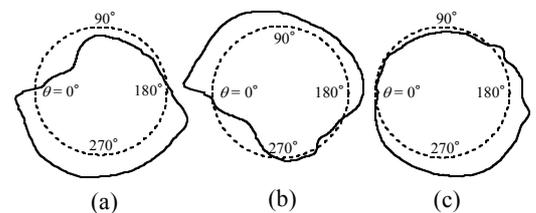


図3 下流側円柱の表面に作用する圧力の挙動
(a) 図2(a)と同時刻における圧力係数の分布
(b) 図2(b)と同時刻における圧力係数の分布
(c) 図2(c)と同時刻における圧力係数の分布

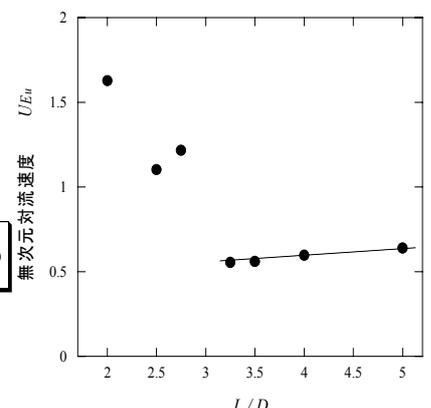


図5 上流側円柱から放出される渦の無次元対流速度