主流に対して迎角を有する2円柱の揚力に関する数値流体解析

名古屋大学大学院工学研究科　学生会員　劉　文
名古屋大学エコトピア科学研究所　正会員　北川徹哉
名古屋大学エコトピア科学研究所　正会員　Dragomirescu Elena

１．はじめに

近接した 2 円柱が主流方向に対して迎角を有する場合, 後流側円柱の平均揚力が時間的に変化する現象がみられる. 坂本ら[1)]は円柱中心間距離が直径の 2 倍, 主流方向に対する迎角が 10° の位置に二つの円柱を設置し, 下流側円柱の揚力を計測している．その結果，下流側円柱の平均揚力は一定ではなく，下向きの揚力が大きい“Mode-1”と揚力が小さい“Mode-2”が時間の経過に応じて断続的に交互に発生することが観察された．本研究においては，この平均揚力の挙動と流れ場との対応関係を数値流体解析により調べる．

２．解析方法

LES 記述された非圧縮性ナビア・ストークスの式と連続の式とをコロケート格子を用いた一般座標系において差分法により離散化し，SMAC 法により解いた．LES にはスマゴリンスキーモデルを用い，対流項には 3 次精度上流差分法を適用している．また，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適用し，流速予測子ならびに圧力ポテンシャルの求解には SOR 法を用いた．解析空間は，図 1 に示すような，円柱直径を D として長径 $60D$, 短径 $30D$, スパン方向長さ D の楕円柱であり，主流は左から右に向かって流れる．円柱表面の格子点数は周方向に 200 点，スパン方向に 26 点である. 円柱中心間の距離 L は $2D$ とし, 迎角 α は 5°，10°，15° の 3 通りで解析を行ったが，次章では α = 10° の結果を主に説明する．図 2 は α = 10° における格子系のスパン方向断面の拡大図である．また，境界条件については，流入境界を一様流入，流出境界においては対流粘性条件, 円柱表面はノンスリップとした．なお，レイノルズ数については，北川らがこれまで実施してきたタンデム 2 円柱まわりの流れ場に関する数値流体解析[2)]と整合させて 2.2×10^4 に設定した．

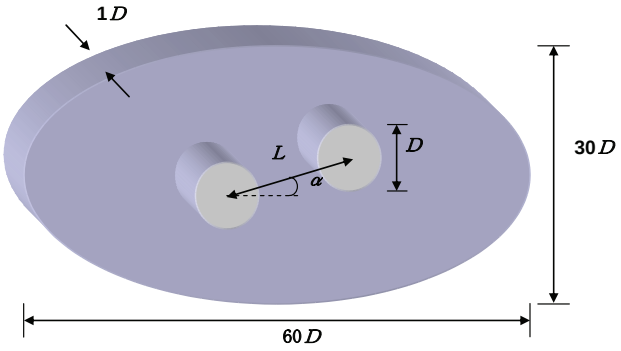


図 1　解析空間の概要

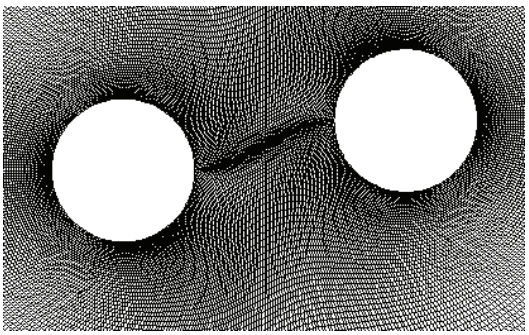


図 2　L/D=2，α=10° における 2 円柱近傍の格子配置

３．解析結果と考察

図 3 に α = 10° における 2 円柱の揚力係数 C_L の時刻歴を示す．t は無次元時間であり，点線および実線はそれぞれ上流側円柱および下流側円柱の C_L を表す. 上流側円柱の C_L は平均がゼロであり, ほとんど変動していない．これに対して，下流側円柱の C_L はほぼ全時間にわたって負の値となっており，これは下向きの揚力が作用していることを意味する．着目すべき点は，下流側円柱の C_L に時間依存性がみられることである. その局所平均 $\overline{C_L}'$ は例えば 80 < t < 140 においては-0.3, 160 < t < 220 においては-0.5 となっている. 第 1 章に記述した坂本ら[1)]の研究においては，$\overline{C_L}'$ が負の方向に大きい場合を Mode-1，小さい場合を Mode-2 としており，本研究においても同様に称することとする．図 3 において，160 < t < 220 および 480< t <510 の $\overline{C_L}'$ が Mode-1 に，それ以外の時間帯の状態が Mode-2 に相当する．

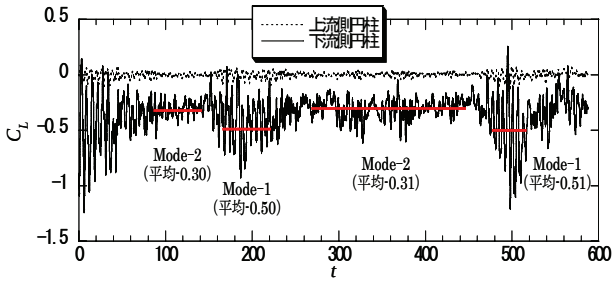
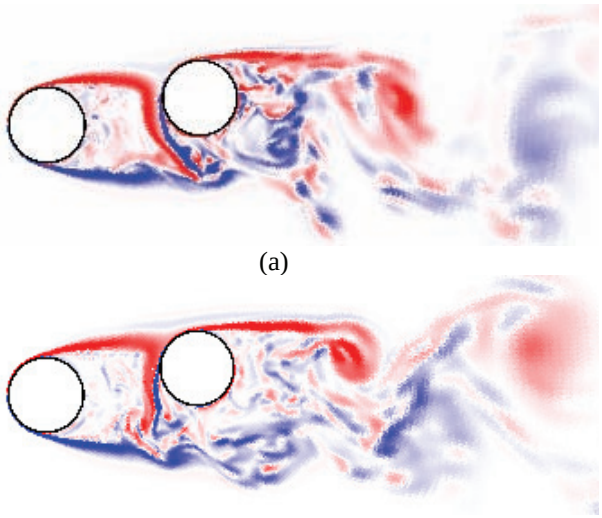


図 3　揚力係数の時刻歴

α = 10° における Mode-1 と Mode-2 の流れ場を考察する．図 4 にスパン中央断面における瞬間渦度のスパン方向成分を示す．図 4(a)は Mode-1 に該当する t = 180（図 3）での渦度分布であり，上流側円柱上部からの剥離せん断層が下流側円柱の正面近傍に付着している．この付着した流れは下流側円柱を下向きに再剥離し，下流側円柱の下部表面付近において弧を描くように向きを変えている．ただし，この再剥離流れは一定の位置に留まっているわけではなく，下流側円柱の下面に近づいたり離れたりしていた．一方，図 4(b)は Mode-2 に該当する t = 268（図 3）における渦度分布である．Mode-1 と同様に上流側円柱上部からの剥離せん断層は下流側円柱に付着するが，その付着位置は Mode-1 のケース（図 4(a)）よりもやや上側である．さらに，再剥離した流れの向きはほぼ鉛直下向きとなっている．以上の再剥離流れの航路の違いが Mode-1 と Mode-2 の $\overline{C_L}'$ に差をもたらしていると推定される．



(a)

(b)

図 4　スパン中央断面における瞬間渦度分布
(a)Mode-1（t = 180）　(b) Mode-2（t = 268）

そこで，円柱表面の圧力特性について検討する．まず，図 5 は上流側円柱と下流側円柱の表面における平均圧力係数 $\overline{C_p}$ の分布である．点線および実線はそれぞれが上流側円柱および下流側円柱の $\overline{C_p}$ を表し，横軸の θ は正面から時計回りの角度である．上流側円柱においては θ = 0° をよどみ点として，$\overline{C_p}$ の分布は円柱表面でほぼ対称となっている．これに対して下流側円柱の $\overline{C_p}$ は非対称な分布となっており，30° < θ < 60° 近傍に上流側円柱からの剥離せん断層の付着による正圧がみられる．これ以外の領域は負圧となっており，緩やかにではあるが円柱の下面側（θ=180～360°）ほど負圧が強くなっている．この $\overline{C_p}$ の非対称性が下流側円柱に下向きの揚力を生じさせている．さらに，下流側円柱の $\overline{C_p}$ について Mode-1 と Mode-2 とで比較する．図 6 に Mode-1 が発生した 160 < t < 220 の時間帯における下流側円柱の $\overline{C_p}$ と，Mode-2 が発生した 80 < t < 140 のそれを示す．$\overline{C_p}$ の正のピークは上流側円柱からの剥離せん断層の付着を表す．この付着位置は Mode-2 の方がやや上側にあり，渦度場(図 4)の観察結果に整合する．また，特に 270° < θ < 360° において，Mode-1 の方が負圧が強く，これが Mode-1 の下向きの揚力を大きくしている理由である．すなわち，Mode-1 における再剥離流れは下流側円柱の下面近傍に位置していた（図 4(a)）ことが，円柱下側表面の負圧を増大させ，下向きの揚力を大きくしたと考えられる．これに対して，Mode-2 では再剥離流れが下流側円柱表面から離れた位置にあった（図 4(b)）ことから，Mode-1 の場合よりも下面の負圧が弱く，下向きの揚力は相対的に小さくなったと解釈される．

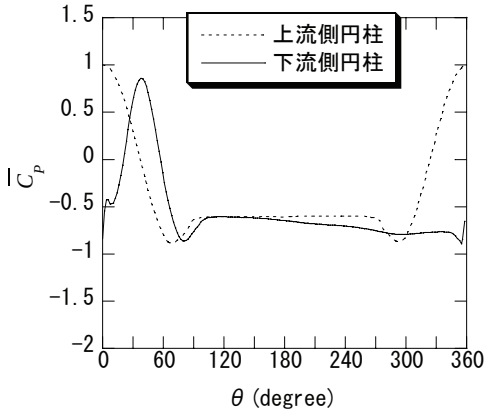


図 5　円柱表面における平均圧力係数の分布

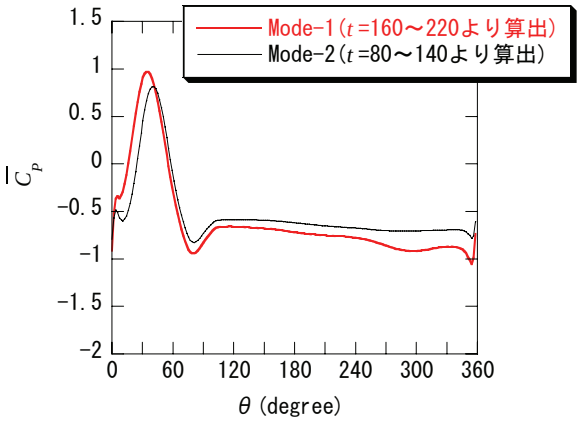


図 6　Mode-1 と Mode-2 の下流側円柱表面の平均圧力分布の比較

参考文献

1) 坂本弘志，Md. Mahbub ALAM，金相一，高井和紀：食違い配列された 2 円柱周辺の流れに関する研究（第 1 報），日本機械学会論文集（B 編），70 巻 696 号，pp. 2034-2042，2004.
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.