

抵抗低減効果を目的とした周期的拡大縮小管内乱流における渦の移流

Vortex Advection in Periodically Converging-Diverging Turbulent Pipe Flow for Drag-Reduction Effect

- 柳澤 英希, 農工大, 〒 184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16, E-mail : 50014643069@st.tuat.ac.jp
 守 裕也, 東理大, 〒 162-0825 東京都葛飾区新宿 6-3-1, E-mail : mamori@rs.tus.ac.jp
 岩本 薫, 農工大, 〒 184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16 E-mail : iwamotok@cc.tuat.ac.jp
 村田 章, 農工大, 〒 184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16 E-mail : murata@cc.tuat.ac.jp

Hanaki YANAGISAWA, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Koganei City Nakacho Tokyo
 Hiroya MAMORI, Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku Katsushika Tokyo
 Kaoru IWAMOTO, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Koganei City Nakacho Tokyo
 Akira MURATA, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Koganei City Nakacho Tokyo

Drag-reduction effect of turbulent flows in periodically converging-diverging pipes has been examined by using direct numerical simulations. The friction Reynolds number is set to be 110. The total length of the pipe is $160R$ and the converging section length is $45R$, where R is the averaged pipe radius. The drag-reduction rate varies periodically in time and its average is 17 %. The flow visualization shows turbulent puffs traveling in the streamwise direction and we discuss relation among puffs, streamwise vortical structures, and the drag reduction rate.

1. 緒言

日常生活や工業分野において、円管での流体輸送は広く利用されている。円管内では摩擦抵抗が支配的であり、特に乱流時は層流時に比べて著しく増加する。したがって、流体輸送の省エネルギー化には乱流から層流へ再層流化させることが有効である。

相馬ら⁽¹⁾は円管内乱流において圧力勾配を時間的に変化させ、周期的に加減速を繰り返す脈動制御の再層流化現象を用いた実験を行い、高い摩擦低減効果 (63%) を確認した。一方、著者ら⁽²⁾は流路断面積を流れ方向に変化させ断面平均流速を増減させる事により、空間的に加減速を繰り返す周期的拡大縮小管について複数の管形状の流れ場の直接数値計算 (DNS) を行った。周期的拡大縮小管は脈動流と比較し、ポンプの動力を必要とせず設置を行うだけで抵抗低減効果を得ることができる利点がある。これまでに断面積比を変化させた複数の管形状の流れ場の DNS を行い、最大約 23% の抵抗低減効果を確認した。ただし、抵抗低減効果と管形状を表すパラメータとの関係性については十分調査されていない。

本研究は周期的拡大縮小管内乱流の DNS による流れ場のより詳細な解析を行い、更なる高い抵抗低減率を有する管形状を調査する。本報では周期的拡大縮小管内における渦の移流と抵抗低減効果の関係についての報告をする。

2. 計算方法および計算条件

図 1 に拡大縮小管の形状の一例を示す。ここに、 r は半径方向、 z は主流方向を表す。拡大縮小管の 1 周期分の管長さを L_z^* 、原点から最小断面積部までの長さ、縮小区間長さを L_{acc}^* 、最小断面積部から最大断面積部までの長さを拡大区間長さ、管断面積の最大と最小の比を CR とする。本研究では代表長さを平均管半径 R [m] および速度を摩擦速度 u_τ [m/s] によって無次元化された量を上付きアスタリスクで表記する。

流れ方向には周期境界条件、壁面にすべりなし境界条件を適用し、流れ方向に対する平均圧力勾配を一定とする。支配方程式は管形状に沿って格子が変形する境界適合座標系を用いた円筒座標系での連続の式、Navier-Stokes 方程式とする。

計算条件は摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 110$ とし、ここに Re_τ は摩擦速度 u_τ [m/s]、平均半径 R [m]、動粘度 ν [m²/s] によって定義される。本報では壁面形状を流れ方向に対し 3 次関数、 $L_z^* = 160$ 、 $CR = 1.5$ 及び $L_{acc}^* = 45$ の形状における流れ場の計算結果を示す。

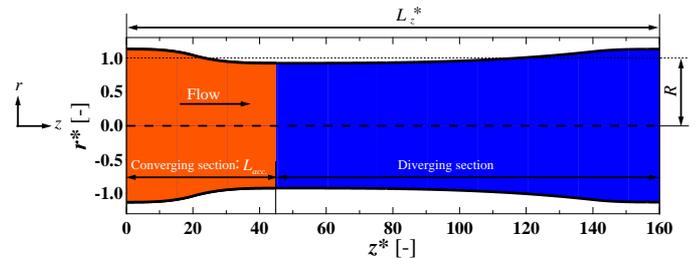


Fig. 1: Schematic of pipe shape.

3. 結果

拡大縮小管における抵抗低減の評価には式 (1)、式 (2) で定義される全抵抗係数 C_T 及び抵抗低減率 R_D を用いた。

$$C_T = D_f + D_p \quad (1)$$

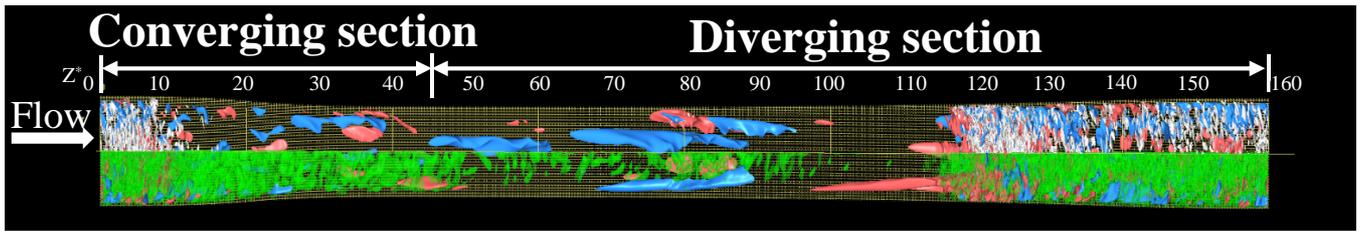
$$R_D = \frac{C_{f,Blasius} - C_T}{C_{f,Blasius}} \times 100 \quad (2)$$

ここで D_f は壁面摩擦抵抗係数、 D_p は壁面圧力抵抗係数、 $C_{f,Blasius}$ は Blasius の式⁽³⁾から求めた直円管の壁面摩擦係数である。本報における管形状では抵抗低減率約 17% を得た。

図 2 に拡大縮小管内の渦の二値化結果を示す。横軸が流れ方向座標 z^* 、縦軸が時刻 t^* である。渦の識別に用いる Q^+ 値の断面平均を二値化の閾値 ($Q = -0.03$) とし、この図においては黒色が渦の存在を表している。縮小区間入り口 ($z^* = 0, t^* \approx 13$) から右上へ伸びる線は、乱流パフの下流への移流に対応しており概して流れ方向に周期的になっている。この流れ方向への乱流パフの移流時間は、後述の抵抗低減効果の時間変化と強い相関がある。また拡大期間においては細かい線が多くみられ、これらは乱流パフの分裂や合体、流れ方向に軸を持つ乱流渦の生成に対応していると考えられる。

図 3 に全抵抗係数 C_T 及び管内における渦の体積割合の時間変化を示す。横軸が時刻、左の縦軸が C_T 、右の縦軸が管内における渦の体積割合を表す。赤い実線は C_T 、黒い実線/波線は渦の閾値をそれぞれ $Q^+ = -0.03, -0.0005$ とした時の管内において渦が占める体積割合を表している。抵抗係数 C_T は時間的に周期的な変化を示し、これ

(a) $T^* = 47.8$



(b) $T^* = 48.8$

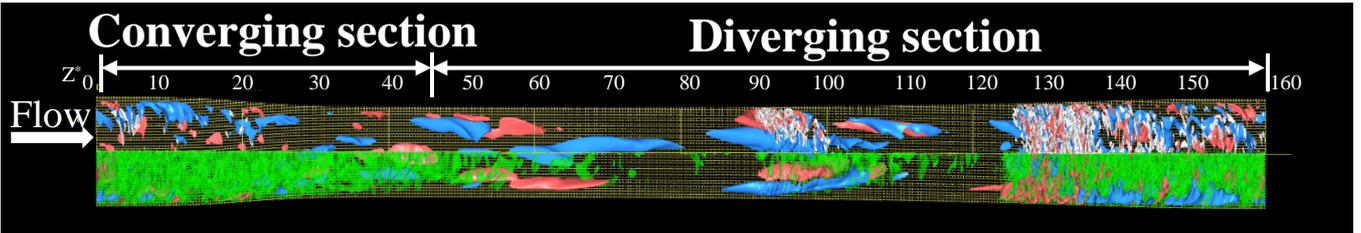


Fig. 4: Instantaneous flow fields: red iso-surface, high-speed region ($u_z^+ > 3$); blue iso-surface, low-speed region ($u_z^+ < -3$); white and green iso-surface, vortical structure ($II^+ \leq -0.03$ and $II^+ \leq -0.0005$).

と渦の体積割合の相関は通常の閾値 ($Q^+ \leq -0.03$) よりも小さい閾値 ($Q^+ \leq -0.0005$) で抽出した場合が高くなった。これは拡大縮小管の抵抗低減効果は、通常の閾値 ($Q^+ \leq -0.03$) によって検出される渦ではなく、小さい閾値で検出される渦と関係性が強いことを示す。

図 4 に瞬時の流れ場の可視化を示す。ここに赤は主流方向の速度の高速領域 ($u_z^+ \geq 3$), 青は低速領域 ($u_z^+ \leq -3$), 白及び緑は変形速度テンソルの第二不変量の等値面 (白: $Q^+ \leq -0.03$, 緑: $Q^+ \leq -0.0005$) で可視化された渦構造でありそれぞれ管の上半分及び下半分のみ可視化を行い、各瞬時場は図 3 の (a), (b) の時刻に対応する。上付きプラスは壁指標であり、粘性長さ l_τ [m] と摩擦速度 u_τ [m/s] によって無次元化されている。渦構造の集合である乱流パフ (4) は時刻の経過とともにが下流へ移流するが、流れが最も加速される拡大区間の前半で抑制されていることがわかる。時刻 $T^* = 47.8$ において $z^* \approx 80$ に存在する周方向に広がる特徴をもつ乱流パフは、時刻 $T^* = 48.8$ においては下流方向へ移動し、 $z^* \approx 90$ において通常の閾値 ($Q^+ \leq -0.03$) で検出出来る渦構造を発生させている。

4. 結言

平均圧力勾配一定条件のもと流れ方向に周期的に拡大縮小する円管内乱流場の DNS を行った。管形状は断面積比 $CR = 1.5$, 管長さ $L_z^* = 160$ 及び縮小区間長さ $L_{acc}^* = 45$ の管形状で計算を行い、約 17% に抵抗低減効果を得た。拡大縮小管内における渦の二値化結果より、乱流パフの移流、拡大区間における分裂や合体を確認した。周期的拡大縮小管による抵抗低減効果は、小さい閾値 ($Q^+ \leq -0.0005$) で検出された周方向に広がる渦と関係性が強い。拡大区間において周方向に広がる特徴を持つ乱流パフが発生する事によって通常の閾値 ($Q^+ \leq -0.03$) で検出出来る渦構造が発生する。

参考文献

- (1) 相馬, 岩本, 村田, "円管内脈動乱流の摩擦抵抗低減効果に与える圧力勾配波形の実験的解析," 日本機械学会論文集 B, 78 (2012), pp. 521-530.
- (2) 柳澤, 守, 岩本, 村田, "周期的拡大縮小管内乱流の抵抗低減効果の時間変化," 第 28 回数値流体力学シンポジウム講演論文, (2014), Paper No. B04-2, 2 pp.

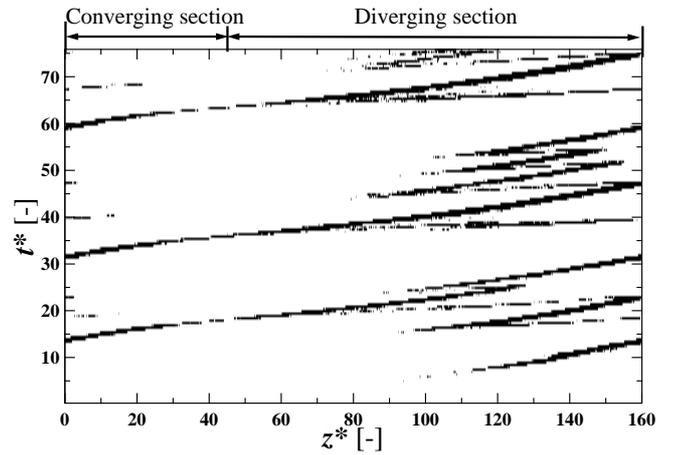


Fig. 2: Binarization of vortical structure.

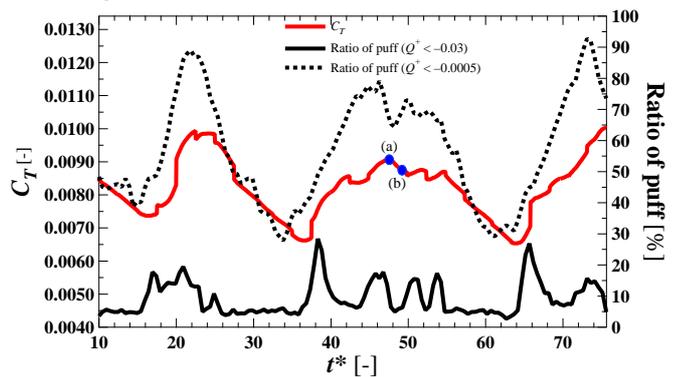


Fig. 3: Time trace of total drag coefficient C_T and ratio of the puff.

- (3) White, M. F., "Viscous Fluid Flow," McGraw-Hill Mechanical Engineering, (2006), pp. 425-426.
- (4) Wygnanski, I. J. and Champagne, F. H., "On transition in a Pipe. Part. 1. The Origin of Puffs and Slugs, and the Flow in a Turbulent Slug," J. Fluid Mech., 59 (1973), pp. 281-335.