

曲がり下流に円管群が設置された矩形断面流路内 に関する基礎研究

横 田 和 彦

Fundamental Study on Flow Characteristics through the Tube Banks
Arranged Downstream of an Elbow Duct

Kazuhiko YOKOTA

The shell-and-tube type heat exchanger is type of heat exchangers. From the viewpoint of energy-saving and environmental protection, improvements of heat transfer are a necessity. In real flow field, there are many cases when flow comes into tube banks at an angle.

The purpose of the present study is to elucidate the flow field through inclined tube banks. As a first step, an inclined tube is investigated in three boundary conditions, which are periodic, slip and non-slip boundaries. In a wake, there is the flow toward Backward End Boundary (BEB), which is a downstream end boundary of the tube. In both sides of a wake, there is the flow toward Forward End Boundary (FEB), which is an upstream end boundary of the tube. It is found that a low speed area in a wake is carried to BEB by the flow forward BEB. As a second step, the flow fields through inclined tube banks are examined in square duct. The same tendencies based on the same mechanisms are seen. As a conclusion, same tendencies and mechanisms in the inclined tube banks with many rows are obtained.

1. はじめに

現在は、化石燃料に変わり電気を利用したエネルギーシステムがみられ、一部の熱機関は燃料電池や電動機に変わる転換期にある。しかし、多くのエネルギーシステムにおいて熱が関与しており、熱交換器は鍵となる役割を果たしている。熱交換器は工業的に多く用いられており、その一つとして多管式熱交換器が挙げられる。機器には熱伝達の高効率化・省エネルギー化や、機器自体の小型化が求められている。一方、実際に用いられている垂直円管群を有する熱交換器では、流体が円管群に直交して流入するとは限らず、斜めに流入するなどの場合も想定される。矩形断面流路内において曲がり下流に円管群が設置された場合では、円管群に対して斜めに流入する流れ場であり、ストレートダクトにおいて傾斜円管群を設置した場合の流れ場にモデル化することができる。よって、ストレート矩形断面流路内における傾斜円管群を通過する流れ特性を解明することにより、実際に用いられている多管式熱交換器の現実流れ場の一つとして調査する意義は大きい。

過去の垂直円管群に関する研究では、In-line 配列や

千鳥配列など多くの研究^{1,2)}がなされている。そして、単独傾斜円管まわりの流れ場についての報告が多くなされており、 \cos 法則^{3,4)}や二次流れ成分⁵⁾に言及している。しかし、傾斜円管群に関する研究はあまりみられない。

そこで本研究では、傾斜円管群を有する熱交換器を念頭におき、ストレート矩形断面流路内に設置した傾斜円管群を通過する流れについて調べる。まずは単独傾斜円管下流域の特性を、数値シミュレーションにより調査する。ここでは上下境界面を Periodic BC (Boundary condition), Non-slip BC, Slip BC と変化をさせる。次に単独傾斜円管の結果を踏まえ、矩形断面流路における傾斜円管群下流域の特性を、数値シミュレーションと実験により調査する。

2. 数値計算法

本研究では擬似圧縮性法⁶⁾を用いて数値解析を行った。擬似時間項を加えた三次元非定常非圧縮 Navier-Stokes 方程式および連続の式を支配方程式とし、曲面形状を伴う物体まわりの流れ場が計算できるように一般座標変換を施した。

離散化手法には、対流項に Harten-Yee の 2 次精度完全風上型 TVD (Total Variation Diminishing) スキーム

を、粘性項に2次精度中心差分を用いた。また、物理時間項の離散化には2次精度後退差分を、擬似時間項の離散化には前進差分を用いて、時間進行法はLU-SGS (Lower-Upper Symmetric Gauss Seidel) 法を用いた。乱流モデルとしてはLES (Large Eddy Simulation) Smagorinskyモデルを用いた。

3. 実験装置および実験方法

図1に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。円管直径を $D=10$ [mm]とし、ダクトは一辺 $10D$ の正方形断面で、円管はテストセクションに対して図2に示すように傾斜角 30 [deg.]で設置した。ここで、傾斜円管の上流側壁面(図2の上壁面)をForward end boundary (FEB), 下流側壁面を(同図, 下壁面)をBackward end boundary (BEB)と呼ぶこととする。

円管の設置方法は図3に示すように単独(1本)の場合は(1)に設置し、2本(2), 3本(1・3), 4本(2・4), 5本(1・3・5)の位置にそれぞれ設置した。そして多列傾斜円管群の配置は一辺 $2D$ の正三角形千鳥配列となるように設置した。なお、最上流円管列の円管本数は5本であり、偶数列(2, 4, 6列)の場合は最下流円管本数が4本、奇数列(3, 5列)の場合が5本である。

座標系は図2, 3に示すように主流方向を x , 円管高さ方向を z とした。流速分布測定には擬似3孔ピトー管を用いた。

4. 単独傾斜円管

4.1 計算コードの妥当性

本研究に用いた計算コードによる数値計算結果の妥当性を確認する。図4に無限長と仮定できる傾斜円管におけるレイノルズ数 Re_n と周波数パラメータ fD^2/ν の関係を示す。無限長と仮定できるとは上下境界面をPeriodic BCとした時である。ここでレイノルズ数 Re_n は

$$Re_n = \frac{(U \cos 30^\circ)D}{\nu} \quad (1)$$

で定義され、代表長さは円管直径 D , 代表速度は円管軸と垂直となる流速成分 $U \cos 30^\circ$ である。また、周波数パラメータ fD^2/ν はレイノルズ数 Re とストローハル数 St の積の値である。図4より、本研究に用いた計算コードによる計算結果(●)はRoshko⁷⁾やShirakashi⁸⁾の実験結果によく一致している。また本研究では、断面 800×800 [mm], 長さ 3000 [mm]の試験部を有する多目的回流式低速風洞を用いて実験を行った。その結果(▲)にもよく一致していることから、本計算コードには信頼性があると考えられる。以下に、レイノルズ数 $Re_n=6800$ における結果を示す。

4.2 無限長傾斜円管下流の二次流れ成分

図5に単独傾斜円管軸より $1D$ 下流の円管軸と平行な断面

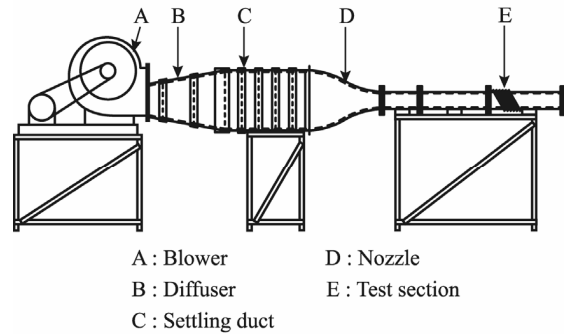


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

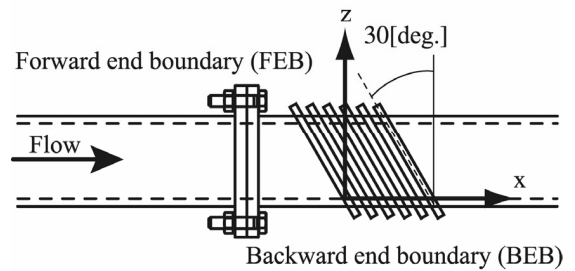


Fig.2 Test section

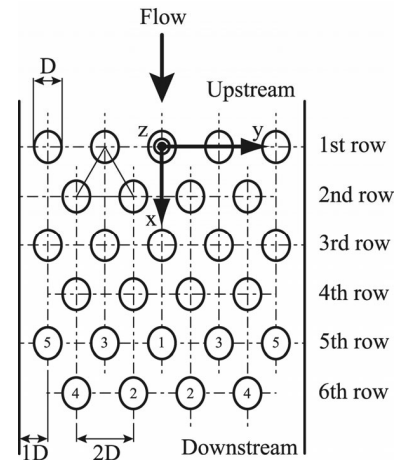


Fig.3 Arrangement of tube banks

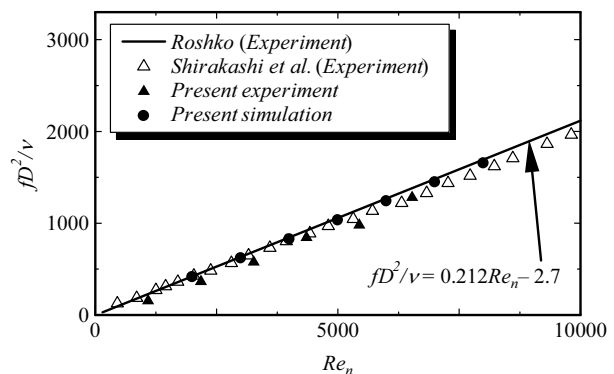


Fig.4 Shedding frequency parameter fD^2/ν

と、 x - y 平面における z 方向の流速分布を示す。図より円管軸より 1D 下流の断面において円管後流では黒色で示した FEB から BEB への下向きの流れとなった。

また、円管後流の両側では白色で示した BEB から FEB への上向きの流れが周期的にみられた。次に x - y 平面に着目すると、円管後流では弱い下向きの流れとなり、円管後流両側では上向きの流れが下流に向かうにつれて弱くなった。以上より、無限長と仮定できる傾斜円管下流では、円管後流で下向きの流れが生成され、円管後流両側では上向きの流れが生成される。

4.3 二次流れの発生機構

次に、傾斜円管下流にみられた上向き・下向き流れの発生機構を調べた。図 6(a) は傾斜円管の境界層により生成された渦管を示している。図 6(a) より、傾斜円管によって円管軸と平行な渦管が生成された。ここで図の (A) の渦管に着目すると、図 6(b) に示す概略図が描ける。つまり、渦度ベクトルが円管軸と平行になるように傾斜しており、流線が渦度ベクトルのまわりに示される。そして図 6(b) の手前の点 (1) では流速ベクトルが流線の接線ベクトルとなり、成分分解すると z 方向成分上向きの流れが生成される。また、図 6(b) の奥側の点 (2) では同様に考えると z 方向成分下向きの流れが生成される。以上より、渦管 (A) の手前側では上向き流れとなり、渦管 (A) の奥側 (円管後流) では下向きの流れとなる。さらに渦管 (B) では渦度ベクトルが渦管 (A) とは逆になることから、同様に考えると渦管 (A) の手前側 (円管後流) で下向き流れとなり、奥側で上向き流れとなる。以上のことから、傾斜円管下流において円管後流で下向きの流れが生成され、円管後流両側で上向き流れが生成されることがいえる。そして、これが傾斜円管下流で生成される二次流れの発生機構となる。

4.4 有限長傾斜円管下流の流速分布

上下境界面を Non-slip BC, Slip BC として数値シミュレーションを行った。この両者を比較することにより、境界層と傾斜円管との干渉について考察を行う。

図 7 に z 方向流速分布を示す。図 7(a), (b) はそれぞれ円管軸上の断面 $x/D=0$, 円管軸より 1D 下流の断面 $x/D=1$ である。また図の左側が Non-slip BC, 右側が Slip BC の結果である。図 7(b) より両境界条件において、円管後流では FEB から BEB への下向き流れとなる。また円管後流両側では BEB から FEB への上向き流れとなる。

次に図 8 に x 方向流速分布を示す。図 8(a), (b) はそれぞれ円管軸より 3D, 9D 下流の断面である。また図の左側が Non-slip BC, 右側が Slip BC の結果である。図 8(a) より両境界条件において円管後流すなわち低速領域が確認できる。そして、図 8(b) の 9D 下流では低速領域が BEB 側に移動している。また上下境界面を Slip BC とした右側の図に着目すると、この結果は上下境界面を Non-slip

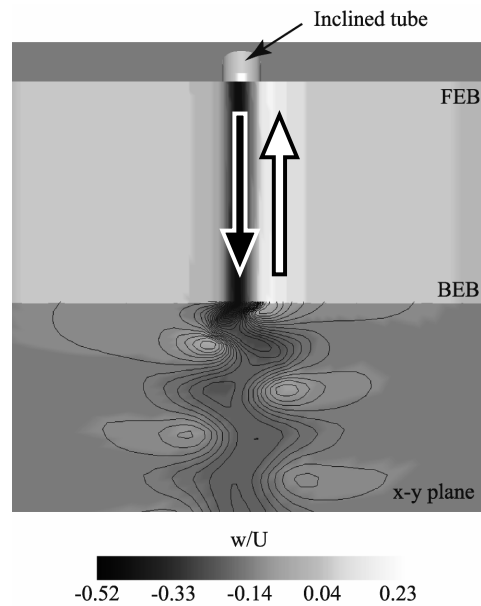
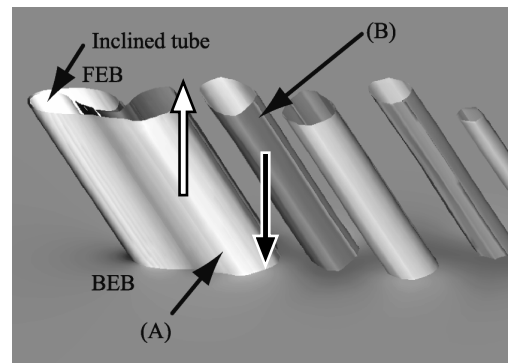
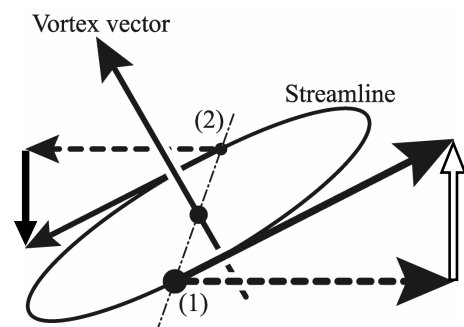


Fig.5 Contour of flow distribution in y - z' and x - y plane



(a) Vortex tube



(b) Diagrammatic illustration

Fig.6 Sketch of streamline around vortex vector

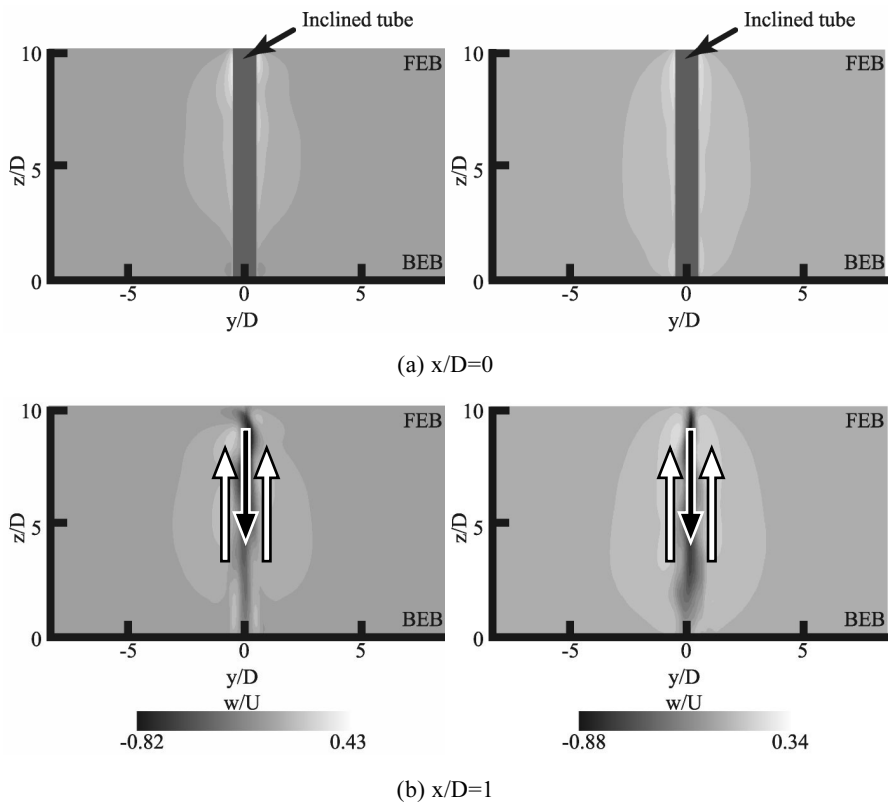


Fig.7 Contour of flow distributions for z-direction
Left: Non-slip BC, Right: Slip BC

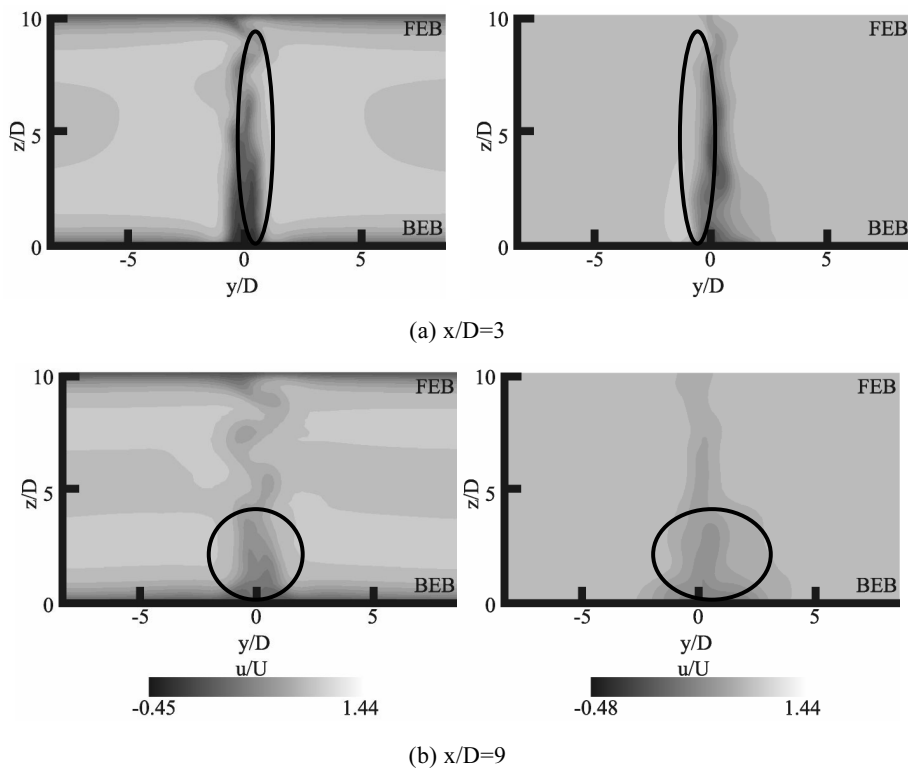


Fig.8 Contour of flow distributions for x-direction
Left: Non-slip BC, Right: Slip BC

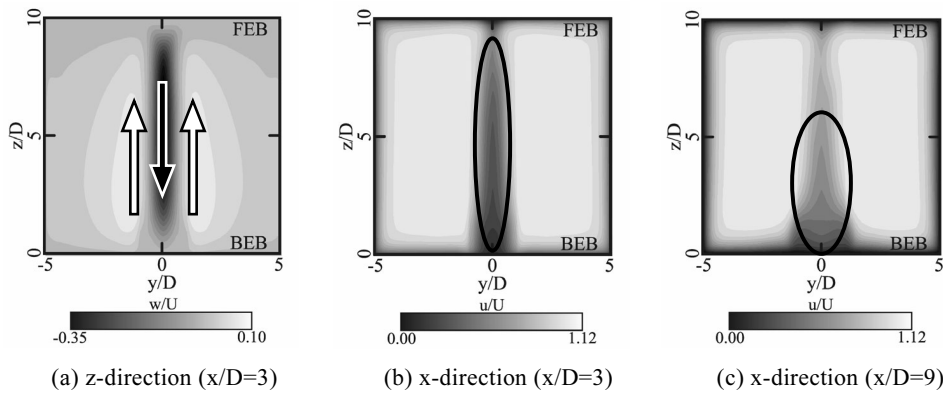


Fig.9 Contours of flow velocity distributions in single tube (Simulation)

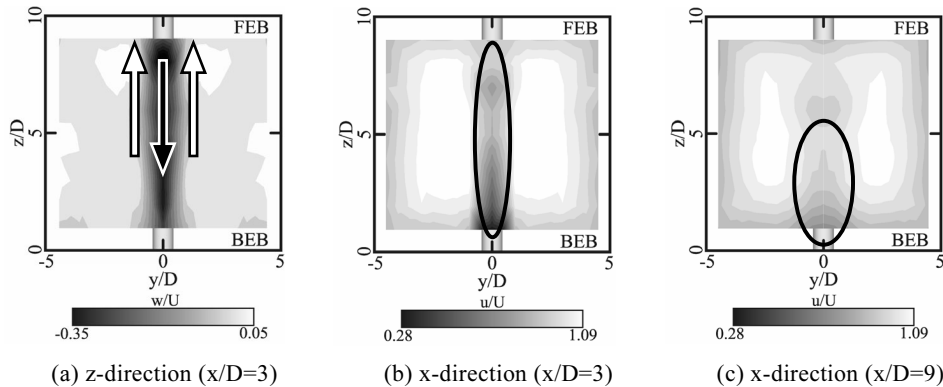


Fig.10 Contours of flow velocity distributions in single tube (Experiment)

BC とした左側の図の上下境界層を除いた部分とよく一致している。つまり、BEB 側に見られる低速領域は境界層によるものではないといえる。

以上より、円管後流すなわち低速領域は図 7 で確認された円管後流の FEB から BEB への下向き流れによって、円管後流すなわち低速領域が BEB 側に移動したものである。

5. 矩形断面流路における傾斜円管群

5.1 1 列傾斜円管群

矩形断面流路における 1 列傾斜円管群のうち円管を 1 本設置した場合の数値シミュレーション結果、実験結果をそれぞれ図 9, 10 に示す。図の (a) は円管軸より 3D 下流の円管軸と平行な断面における z 方向流速分布を示し、(b) (c) はそれぞれ円管軸より 3D, 9D 下流の円管軸と平行な断面における x 方向流速分布を示す。

図 9 (a) より、円管軸より 3D 下流において円管後流では FEB から BEB への下向き流れとなり、円管後流両側では BEB から FEB への上向き流れとなる。また図 9 (b) より、円管軸より 3D 下流において円管後流では低速領域となり、円管後流両側では高速領域となる。そして図 9 (c) より、円管軸より 9D 下流において円管後流すなわち低速領域が BEB へ移動している。

図 10 (a) より、円管後流では FEB から BEB への下向き流れとなり、円管後流両側では BEB から FEB への上向き

流れとなる。また図 10 (b) より、円管後流では低速領域となり、円管後流両側では高速領域となる。そして図 10 (c) より、円管軸より 9D 下流において円管後流すなわち低速領域が BEB へ移動している。

図 9, 10 より矩形断面流路における 1 本傾斜円管の数値シミュレーション結果と実験結果を比較すると、両者は定性的によく一致しているといえる。そして両者の結果より、低速領域が BEB へ移動する機構は円管後流の FEB から BEB への下向き流れによるものである。

本報では 1 列 1 本の結果のみ示したが、1 列において 2~5 本の結果も同様な傾向がみられた。

5.2 多列傾斜円管群

矩形断面流路における多列傾斜円管群のうち 3 列としたときの数値シミュレーション結果、実験結果をそれぞれ図 11, 12 に示す。図の (a) は円管軸より 3D 下流の円管軸と平行な断面における z 方向流速分布を示し、(b) (c) はそれぞれ円管軸より 3D, 9D 下流の円管軸と平行な断面における x 方向流速分布を示す。

図 11 (a) より、円管軸より 3D 下流において円管後流では FEB から BEB への下向き流れとなり、円管と円管の間と、円管と側壁の間では BEB から FEB への上向き流れとなる。また図 11 (b) より、円管軸より 3D 下流において円管後流では低速領域となり、円管と円管の間と、円管と側壁の間では高速領域となる。そして図 11 (c) より、円

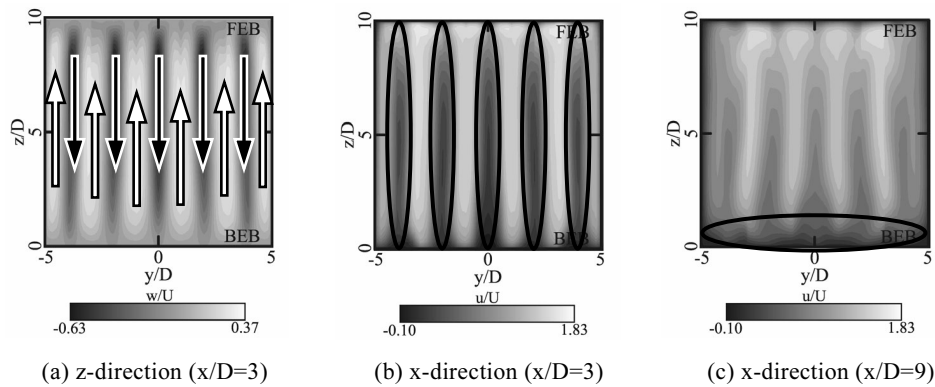


Fig.11 Contours of flow velocity distributions in 3 rows (Simulation)

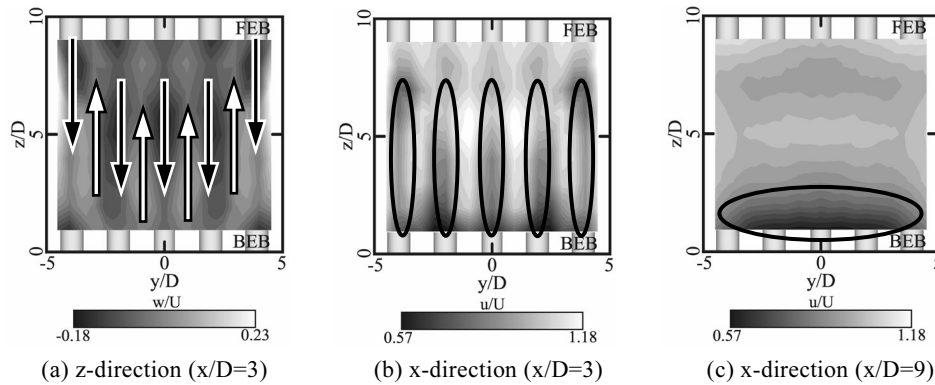


Fig.12 Contours of flow velocity distributions in 3 rows (Experiment)

管軸より 9D 下流において円管後流すなわち低速領域が BEB へ移動して、高速領域が FEB へ移動する。

図 12(a)より、円管後流では FEB から BEB への下向き流れとなり、円管と円管の間では BEB から FEB への上向き流れとなる。また図 12(b)より、円管後流では低速領域となり、円管と円管の間では高速領域となる。そして図 12(c)より、円管軸より 9D 下流において円管後流すなわち低速領域が BEB へ移動し、高速領域が FEB へ移動する。

図 11, 12 より矩形断面流路における 3 列傾斜円管群の数値シミュレーション結果と実験結果を比較すると、両者は定性的によく一致しているといえる。そして両者の結果より、低速領域が BEB へ移動する機構は円管後流の FEB から BEB への下向き流れによるものであり、高速領域が FEB へ移動する機構は円管と円管の間と、円管と側壁の間の BEB から FEB への上向き流れによるものである。

本報では 3 列の結果のみ示したが、複数列 (2 列, 4 ~6 列) の結果も同様な傾向がみられた。

6. まとめ

本研究では、矩形断面流路に設置した傾斜円管群を通過する流れに関して、数値シミュレーションと実験により流れ特性を明らかにすることを目的とした。そして、単独傾斜円管と、矩形断面流路における傾斜円管群を通

過する流れについて検討した。その結果、傾斜円管後流では下向き流れが生成され、円管後流両側では上向き流れが生成される。これは、傾斜円管により生成された傾斜渦管によるものである。また、円管後流すなわち低速領域が下向き流れによって、円管を下流に傾斜させた側に移動する。ただし、この低速領域は上下境界面を Slip BC として数値シミュレーションを行った結果でもみられたことから境界層によるものではない。以上のことは、矩形断面流路における 1 列傾斜円管で円管本数を変化させた場合や、円管列数を変化させた場合も同様な傾向・機構であるという結論を得た。

なお本研究は、(財)豊田理化学研究所の援助を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) G. Xu, Y. Zhou, *Exp. Fluids*, **37**, 2004, 248.
- 2) S. Umeda, W.J. Yang, *Exp. Fluids*, **26**, 1999, 389.
- 3) A. R. Hanson, *AIAA J.* **4-4**, 1966, 738.
- 4) C.W. van Atta, *AIAA J.* **6-5**, 1968, 931.
- 5) T. Kawamura, T. Hayashi, *JSME series B*, **58-548**, 1992, 89.
- 6) A.J. Chorin, *J. Comp. Phys.*, **2**, 1967, 12.
- 7) A. Roshko, *NACA Rept.*, **1191**, 1954, 1
- 8) M. Shirakashi, *JSME series B*, **51-468**, 1985, 2499