A210 傾斜内壁をもつシャープターン流路内の流動と熱伝達特性

中山浩[○], 廣田真史, 藤田秀臣 (名古屋大学), 倉本博幸 (名古屋大学・院)

Heat transfer characteristics and flow structure in serpentine channels with a inclined partition wall

Hiroshi NAKAYAMA, Masafumi HIROTA, Hideomi FUJITA, Hiroyuki KURAMOTO

ABSTRACT

Flow structure and heat/mass transfer characteristics for turbulent flow in serpentine channels with a inclined partition wall have been examined experimentally. Detailed distributions of velocity data have been measured using PIV for three kinds of angle $\alpha = +4^\circ, 0^\circ, -4^\circ$ at Reynolds number of 3.5×10^4 . Next, by comparing the published local mass transfer results for their three cases, the mechanism of the heat (mass) transfer from the channel wall in and after turn section were discussed.

Keywords: Forced Convection, Heat/Mass Transfer, Heat Exchanger, PIV

1. 緒言

熱交換器には、物理的制約によりシャープターンを持つ矩形断面の往復流路が多く利用されている⁽¹⁾. このように流路が急激に折り返す場合には、遠心力に起因する2次流れと大規模な流れのはく離、再付着が共存するため、流路内の流動は極めて複雑となる. この結果、流路内の熱伝達特性は複雑に変化し、壁面温度分布の不均一性により機器の寿命に悪影響を与えることも予想される. このため、流路内の局所熱伝達特性や伝熱を支配する内部流動を明らかにすることは機器の設計上において重要である.

これまで、著者らは高空間分解能が得られるナフタレン昇華法を用いて、シャープターンをもつ矩形流路内の全壁面にわたる局所熱伝達特性を実験的に明らかにしてきた⁽²⁻⁴⁾. 特に流路内壁(隔壁)を外壁に対して傾斜させた場合には、局所熱伝達特性に大きな影響を及ぼすことを示し、また傾斜角度の最適化により、平均熱伝達率の増大、流動抵抗の低減、熱伝達率分布の一様性向上など、熱交換器により適した伝熱特性が得られる可能性を指摘してきた⁽⁵⁾. しかし、その伝熱特性に多大な影響を及ぼす内部流動については、十分な研究は行われていない. このような流路の流動特性を明らかにすることは、工学的に興味深いだけでなく、より高効率な伝熱機器の設計にも有用な知見を与えることになる.

そこで本研究では、傾斜内壁を有する長方形断面のシャープターン流路(図2)において、3種類の傾斜角度に対して、非接触で多点同時計測が可能なPIV法を用いて流路内の速度分布を計測した. この速度分布をナフタレン昇華法により測定した流路壁の局所物質伝達率分布⁽³⁾

と比較することにより、流路内に形成される流れ場の構造と伝熱との関係を明らかにする.

2. 実験装置および実験方法

図1にPIVによる実験装置の概要を示す. 作動流体には室温空気を用い、流路系は吸い込み式とした. 室温空気は整流室を経てシャープターンを持つ測定流路に流入し、フィルターおよび流量計を通過後、送風機により実験室外に排出される. 測定流路入口はバッフル板を取り付けて、流入空気を強制的にはく離、急縮小させた⁽²⁾.

図2に測定領域の詳細と各壁面の名称を示す. なお、後述のように、局所シャドウ数分布は以下の4面における結果を示す. (i) 上下壁(長辺壁), (ii) ターン部外壁(端面), (iii) ターン下流隔壁, (v) ターン下流外壁. 流路は入口断面 $40\text{mm}(=2A) \times 20\text{mm}(=2B)$ (水力直径 $d_h=26.6\text{mm}$) をもつ矩形流路であり、流路隔壁を厚さ $T_d=8\text{mm}$, ターン部

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Details of the test section
($\alpha=-4^\circ$, convergent channel)

の間隙寸法 C を $40\text{mm}(=2A)$ に保ち、流路隔壁の傾斜角度 α を $+4^\circ$ (拡大流路), 0° (平行流路), -4° (縮小流路) の3通りに変化させた。流路入口で定義したレイノルズ数 $Re = U_b d_h / \nu = 3.5 \times 10^4$ (U_b : バルク速度, ν : 動粘性係数) の条件下で実験を行った。

座標系の原点は $\alpha=0^\circ$ の場合の隔壁先端中央とし、上流側の主流方向を X 軸、長辺壁スパン方向、短辺壁スパン方向をそれぞれ Y 軸、 Z 軸と定めた。流路の無次元化にはそれぞれ水力直径、流路幅 ($2A$), 流路高さ ($2B$) を用いて、 $X^* = X/d_h$, $Y^* = Y(2A+T)/2$, $Z^* = Z/B$ と定義した。 X , Y , Z 方向の平均速度成分はそれぞれ U , V , W と表す。

速度計測に用いたPIVシステムは、撮影用光源としてダブルパルスYAGレーザシート光 (出力: 15mJ , 波長: 532nm , 発光半値幅: 5ns , シート光厚さ: 0.5mm), 相関カメラ ($640 \times 480\text{pixel}$, 8bit), レーザとカメラを同期させるシンクロナイザおよびコンピュータから構成されている。本計測ではトレーサとしてプロピレングリコールの煙を使用し、発光時間間隔 Δt を $10 \sim 30\mu\text{s}$ に設定して測定断面を可視化した。PIVの解析には濃度相関法⁽⁵⁾を適用し、速度ベクトルの算出にはサブピクセル補間を用いた。また設定した検査窓のサイズは $31 \times 31\text{pixel}$, 探查領域は $40 \times 40\text{pixel}$ とした。1000枚の瞬時画像 (500ペア) を用いて時間平均速度分布を算出し、流れ場の挙動を調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 PIVとLDVの比較

まず最初に、平行流路においてLDVにより求めた速度と、PIVを用いて測定した速度分布の比較を行うことで、PIVの信頼性を検証した。LDVの測定を行った流路はPIVで用いた流路の1.25倍の大きさを持ち、レイノルズ数を 3.5×10^4 に一致させたため、 U_b は両測定で異なる。図3(a), (b)にPIVとLDVで得られた流路対称面内 ($Z^*=0$) における X 方向 (流路軸方向) および Y 方向 (流路スパン方向) の平均速度分布 U/U_b と V/U_b を示す。PIVとLDVによる平均速度分布は、流れの3次元性が高いと思われるターン部、ターン下流部においても、定性的・定量的によく一致していることがわかる。端面近傍の V/U_b やターン後の隔

壁近傍の U/U_b では、両者にわずかな差が見られるが、これは U_b が異なるためトレーサ粒子にかかる遠心力の違いから生じる誤差、また速度勾配の大きな場所で生じるPIV特有のバイアス誤差⁽⁶⁾等により起因すると考えられる。

3.2 流路の流動・伝熱特性

図4(a), 4(b), 4(c)にナフタレン昇華法で求めた $\alpha=0^\circ$, $+4^\circ$, -4° の各流路の (i) 長辺壁, (ii) 端面, (iii) ターン下流隔壁, (iv) 外壁上における局所シャドウ数 Sh 分布を示す⁽³⁾。図ではシャドウ数が高い領域ほど白く表示されている。また、図5(a), 5(b), 5(c)にそれぞれ $\alpha=0^\circ$, $+4^\circ$, -4° の場合の流路対称面内 ($Z^*=0$) における速度ベクトル分布およびバルク速度で無次元化された平均速度分布 $(U^2+V^2)^{1/2}/U_b$ を示す。以下では流路を (1) ターン上流部, (2) ターン部, (3) ターン下流部の3領域に分けて考察する。

3.2.1 ターン上流部

まず長辺壁上における流路前半部分に注目すると、いずれの場合も流路入口で Sh の高い領域が観察される。これは、流路入口のバッフル板における流れのはく離・再附着による乱れと境界層の前縁効果の相乗効果であると考えられる。 $\alpha=0^\circ$, $+4^\circ$ では、その後下流に進むにつれ濃度境界層の発達とともに Sh は低下していく。しかし、 $\alpha=-4^\circ$ では、他の流路と比較して比較的高い Sh が維持されている。これは、図5(c)から明らかなように、流路断面積の縮小により流れが加速されているためと考えられる。

(a) Streamwise velocity distribution ($Z^*=0$)

(b) Spanwise velocity distribution ($Z^*=0$)

Fig.3 Mean velocity distribution in the sharp turn channel obtained by PIV and LDV system

傾斜内壁をもつシャープターン流路内の流動と熱伝達特性

Fig.4 Distribution maps of local Sherwood numbers

Fig.5 Mean velocity vector maps and distribution maps

3. 2. 2 ターン部

ターンの前半部では, 図4に示すように, いずれの流路でも端面前半部分 ($Y^* < 0$) と長辺壁上の端面近傍部分に高 Sh 領域が見られる. まず端面に注目すると, 特に $\alpha = -4^\circ$ の Sh は, 他の流路に比較してより上流側 ($Y^* = -0.8$) で, 極大値を示している. これは図5(c)に示すように, 加速されてターン部に流入した流体が端面の前半部分に衝突するためと考えられる. 一方, $\alpha = +4^\circ$ の場合 (図5(b)) には, ターン部に流入した流体の速度は遅く, $Y^* = 0.0$ 付近を中心として端面に衝突するため, Sh の極大値をとる場所は $\alpha = -4^\circ$ の場合より下流方向に移動し, その値も低くなる. いずれの流路の長辺壁にも見られる端面との接合部付近における高 Sh は, 端面に衝突した流れが長辺壁に吹き下ろすためと考えられる. また, ターン前半コーナー部には低 Sh 領域が観察される. これは, 図5に見られるようにこのコーナー部に循環領域が形成され, 流速の遅い流体が淀んでいるためと考えられる. この循環領域は $\alpha = -4^\circ$, 0° , $+4^\circ$ の順に大きくなり, 低 Sh 領域と対応していることがわかる.

ターンの後半部では, ターン下流外壁上と長辺壁の外壁近傍で高 Sh 領域が見られる. これも, ターン前半部と同様に外壁への流れの衝突による効果と, その後長辺壁に吹き下ろす流れの効果と考えられる. 図5(c)に示すように, 特に $\alpha = -4^\circ$ の場合では, 他の流路に比較して, ターン下流外壁に衝突する流体の速度が早いいため, ターン下流外壁に見られる Sh の極大値 ($X^* = 1.0$) も, 他の流路に比べて高い値を示している. なおターン後半コーナー部には, いずれの場合も明確な循環領域は観察されない.

3. 2. 3 ターン下流部

ターン下流部でも, 流れ場に及ぼす α の影響は顕著に認められる. $\alpha = 0^\circ$ の場合では, 隔壁先端近傍にはく離泡と, それに対応する低 Sh 領域が明確に観察される. 隔壁上の Sh は $X^* = -2.6$ 付近で極大値を示しており, 時間平均的な隔壁上の再付着点も $X^* = -2.6$ 付近に観察される. したがって, 流路隔壁先端ではく離した流れがこの地点に再付着することにより, 隔壁上の物質伝達を促進すると考えられる.

$\alpha = +4^\circ$ では, はく離泡は $\alpha = 0^\circ$ の場合に比べて小さくなり, その結果, 低 Sh 領域は極めて狭い領域に限定され, はく離泡下流の Sh は, いずれの壁面においても3種類の隔壁角度の中で局所的に最も大きくなっている. 外壁側における高 Sh は, 主に隔壁の傾斜と流れのはく離により実質的な流路断面積が小さくなり, この領域を通過する流体の速度が速くなることに起因している. しかし, 隔壁上および長辺壁の隔壁近傍の高 Sh 領域は, 今回の速度計測結果からは伝熱促進をもたらすような流れは見られず, 今後の更なる調査が必要と考えられる.

$\alpha = -4^\circ$ の場合には, はく離泡が大きく発達しているため, はく離泡に対応する低 Sh 領域の面積も他の流路に比較して非常に広がっている. 隔壁上の再付着点 ($X^* =$

-3.5) 付近で Sh は高くなるが, 再付着する速度自体が小さいため, 他の流路に比較してこの領域における Sh は全般的に低い値を示している. 逆にターン下流外壁上の Sh は全体的に高い値を示しており, 他の流路に比較して特異な分布を取っている. これは, 図5(c)に示すように, 隔壁先端ではく離した流れがターンによる強い遠心力を受け, ターン下流外壁側に高速領域をもつ Y 方向に偏った速度分布を有するためと考えられる.

4. 結言

本研究では, PIVを用いて3種類の隔壁角度 ($\alpha = +4^\circ$, 0° , -4°) をもつシャープターン流路内の流動構造を示し, 隔壁傾斜角度が流れ場に与える影響を明らかにした. また過去に測定した局所 Sh 分布と流れ場を比較することで, 伝熱特性に与える流動特性の影響について定性的な検討を行った. 以下に得られた結果を示す.

- (1) 流路対称面内 ($Z^* = 0$) におけるLDVの速度計測結果とPIVの結果との比較から, シャープターン流路に生じる3次元的な構造をもつ複雑な流れ場においても, PIVによる速度計測が十分な信頼性を有していることを確認した.
- (2) ターン部およびターン下流部の伝熱特性は, 隔壁の傾斜角度によって大きく変化するが, 流れの各壁面への衝突などの流動特性により, その変化を定性的に説明できる. 特に端面の前半部分およびターン下流外壁では, 主流が壁面に衝突することによる伝熱促進の効果が見られた. また, ターン下流部では, 流路隔壁先端ではく離した流れが下流側内壁に沿ってはいく離泡を形成し, それが低 Sh 領域と対応することを確認した.

今回は流路対称面内 ($Z^* = 0$) の平均速度分布のみを示したが, 流れ場は3次元的であるため, この面のみでは内部流動の全体像を把握することは難しい. 特に長辺壁上の伝熱特性は, 2次流れの影響を強く受けるため, 今後は2次流れの計測も必要と考えられる.

参考文献

- (1) Metzger, D.E., Plevich, C.W., and Fan, C.S., J. Eng. Gas Turbines and Power, 106(1984), 677-681.
- (2) 廣田真史, 藤田秀臣, Syuhada, A., 吉田尚史, 荒木慎二, 柳田真, 田中雅, 日本機械学会論文集 (B), 65-635 (1999), 2439-2466.
- (3) 廣田真史, 藤田秀臣, 中山浩, 加藤達人, 梶田明男, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (神戸), 2 (2000), 573-574.
- (4) 中山浩, 廣田真史, 藤田秀臣, 倉本博幸, 梶田明男, 可視化情報, Vol.19, Suppl. No.2 (1999) pp.71-74.
- (5) PIVの要点, 可視化情報学会講習会テキスト, VSJ-PIV-S1, (1998) 6.
- (6) Keane, R.D., Adrian, R.J., Meas. Sci. Technol. 1 (1990), pp.1202-1215.