梅田眞三郎[○](福山大学・工), Wen-Jei Yang(ミシガン大), 塩野正顕, 谷口輝(福山大学大学院)

Characteristics of Vortices in Louver Fins

Shinzaburo UMEDA, Wen-Jei YANG, Masaaki SHIONO and Akira TANIGUCHI

ABSTRACT

Research results pertinent to heat exchangers are available in existing literature and heat transfer text books. However, it was short of sufficient flow visualizations in louver fins because of the difficulty in its flow visualization. Flow visualization by means of the dye injection method and the laser Doppler velocimetry (LDV) was performed to disclose flow characteristics in louver fins. Fin pitches P_f and louver angles θ in louver fins were varied. Flow patterns in each louver fins are visualized using the fluorescein dye illuminated a laser light sheet. The LDV data were used to calculate Reynolds stress distributions and power spectrum distributions. It is disclosed that vortices in cases of $\theta=15^\circ$ and 20° for $P_f=100\text{mm}$ exhibit a distinctive periodic characteristics, and the Strouhal number is uniquely related to the Reynolds number.

Key words Louver fins, Dye injection method, LDV, Vortices

1 まえがき

コンパクト形熱交換器では、小型・軽量化と同時に伝熱性能の向上が求められ、高性能な伝熱面としてルーバーフィンをはしめとしたフィン型式が用いられている。それらのルーバーフィン内の流れには強い三次元特性があらわれているが、これまでの研究では、ルーバーフィンまわりの流れの可視化が不十分で、特に乱流への遷移領域付近の Re 数の大きい場合の流れの十分な解明には至っていないと思われる。これには、ルーバーフィンなどの配列形状の複雑な物体まわりの流れの可視化の困難さも関係していると思われる。

昨年¹⁾に続き、ルーバーフィンまわりの流れについて注入トレーサ法及び二次元レーザ流速計(LDV)を用い、フィンピッチやルーバー角度を変化させた場合の可視化実験を行った。特に、ルーバーフィンまわりに発生する渦の構造及びその振動特性の解明を試みた。

2 実験方法

実験装置の概要を図-1(a)と(b)に示す。上流側水槽に800mmの管路長の助走区間、縦・横3列のルーバーフィンを配置した750mmの管路長の試験区間及び流量調節用の下流側区間のそれぞれの管路を接続した。管路幅Bは600mmとなっている。いずれの管路も透過性のアクリル樹脂板で製作した。上流側水槽ヘッドHuと下流端管路の底にあけた穴の開閉の数を調節することによって管路内の流量を変化させた。またルーバー角度 θ を 10° 、 15° 及び 20° の3種類、フィンピッチ P_f を50

と100mmの2種類を選び、それらの違いによる流れの変化を調べた。今回の実験のTypeの分類を表-1にまとめて示す。なお、ルーバーフィン長Lは、1列目が300mmで、2列目と3列目は200mmとなっている。ルーバー長 P_l 及びフィンの厚さ t は、それぞれ100及び5mmとなっている。

このようなルーバーフィンに関する大きな実験装置を製作し、蛍光染料を用いた注入トレーサ法によりルーバーフィンまわりの流脈の可視化を行った。この場合、試験区間にアルゴンレーザによるシート光を管路側面から水平に照射し、管路上方に設置したカメラで水平断面における流れの可視化撮影を行った。その他に、2列目のルーバーフィンの中央断面(以下では2-Cの記号を用いる)や3列目の入口断面(3-E)と図-1(c)に示す3列目の計測領域の最下流側断面(3-6)のそれぞれの鉛直断面に上方からシート光を照射し、下方に設置したカメラからのそれらの流れの可視化も行った。

その他に、LDVを用いてルーバーフィンまわりの流速及びその変動の計測を行った。図-1(c)に示す2列目の左側(流下方向に向かっての左側)領域及び3列目入口付近の管路中央水深での水平断面に計測格子を設けた。それらの水平断面の計測以外に、I及びIIIでの鉛直断面の計測格子上でも流速測定を行った。さらに、同図の◎印を示す3列目入口付近の点においても流速変動を計測し、得られた時系列データからその変動の振動解析も行った。

なお、1列目のフィン区間での流入流速分布も調べ、それらから得られた平均流速 U_0 を Re 数の代表流速に選

んだ。代表長さには P_f を選んだ。今回の P_f には 50 と 100mm の 2 種類の間隔のものを選んだので、 Re 数を同じにした場合には U_0 が大きく異なっている。そのため流れの比較にあたっては、 U_0 がほぼ同じ程度になるものを選んだ。

3. 実験結果

3. 1 注入トレーサ法による流脈の可視化

蛍光染料をルーバーフィンまわりに注入し、アルゴンレーザシート光を照射して流脈の可視化を行った。管路上方及び下方から撮影した結果の二例を図-2.1 と 2.2 に示す。

まず、図を省略しているフィンピッチが 50mm でルーバー角度が 10° の Type A-1 の場合には、ルーバーフィンの並びの変化が小さく、幅も狭いために流れの変化も小さくなっていた。図-2.1 に示すルーバー角度を 15° に広げた Type A-2 では、フィン入口や曲がりの部分の

影響を受け、渦の形成がみられるようになっている。(a) の上方からの写真には、1 列目中央及び 2 列目の中央と左側のそれぞれのルーバーフィンの位置を一点鎖線で示している。また (b) と (c) の管路の下方からの写真には、3 列目の中央と左側の位置を一点鎖線で示した。図-2.1 (a) では、1 列目のフィンの入口の影響を受けて流脈の変化があらわれ、フィンの曲がり部分では渦の形成を想像することができるような流脈の変化が大きくあらわれている。2 列目のフィン区間では流脈がさらに変化し、(b) に示すように 2 列目のルーバーフィン中央位置に相当するフィンの曲がり部分では縦渦の形成がみられる。その流脈の変化は、2 列目のルーバー区間でも促進され、(c) に示すように細長い縦渦の形成がみられ、しかもその広がりには管路水深方向の中央部付近の範囲となっている。

次に、フィンピッチを 100mm に広げた Type B でのルーバー角度が 10° のものは、Type A の場合と同様に流

Fig.1 A schematic of experimental setup and measuring grids

Table 1 Kinds of ducts with louver fins

Type	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
Angle of louver	10°	15°	20°	10°	15°	20°
Fin pitch : P _f	50mm			100mm		
Length of louver fin : P _l	100mm					
Thickness of fin : t	5mm					
Depth of duct : d	200mm					
Width of duct : B	600mm

Fig.2.1 Flow patterns for Type A-2 and $Re=1,200$

Fig.2.2 Flow patterns for Type B-2 $Re=1,600$

脈の変化が小さかった。図-2.2 に示すルーバー角度が 15° で Re 数が 1,600 の場合では、(a) 図に示されるように 2 列目のフィン入口付近ではっきりと流脈の変化があらわれ、渦の形成を想像することができる。(b) 図で示す 2 列目ルーバーフィン中央位置付近では、流脈が上下方向に広がり、さらに(c)や(d)に示す 3 列目のフィンに入った部分では左右にも広がり、はっきりとした縦渦の形成がみられる。図を省略したルーバー角度を 20° に広げた Type B-3 では、Type B-2 と同様に流脈の変化が大きくあらわれ、数個所にわたって旋回する縦渦がはっきりとみられる。

3. 2 平均レイノルズ応力分布

2 列目及び 3 列目入口付近の流速及びその変動を LDV によって計測した。紙面の都合で流速変動による平均レイノルズ応力分布についての結果のみを示す。

2 列目の I - III 区間及び 3 列目のそれぞれの計測領域での平均レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}/U_0^2$ の結果の一例を図-3 に示す。(a) に示す 2 列目の結果では、上流側から下流側に向かう右側のルーバーフィン中央部前後の屈曲部付近にレイノルズ応力の変化がはっきりとあらわれている。次の (b) に示す 3 列目入口付近の計測領域でのレイノルズ応力の変化については、2 列目のレイノルズ応力の値のスケールとは異なり、ルーバー背後とフィン側でのそれぞれの応力の変化が大きくあらわれている。

最後に、3 列目入口付近の計測領域の鉛直断面での等レイノルズ応力分布図の結果の一例を図-4 に示す。流下方向に向かって並べられたいずれの断面においてもそれぞれの断面の中央部付近に負のレイノルズ応力の値があらわれ、それらのまわりは逆にほとんどが正のレイノルズ応力の値となっている。また (b) と (d) での負のピーク値については、(b) では上方に、(d) では下方に、それぞれ上下の異なった位置にあらわれている。

以上のような 2 列目及び 3 列目の入口付近の流速及びその変動結果から、2 列目の屈曲部であらわれた流れの変化が 3 列目入口付近では上下及び左右方向に大きく変化し、三次元的な流れへと発達していると思われる。

3. 3 流速変動のスペクトル解析

ルーバー角度や Re 数の違いによってルーバーフィンまわりの流れが異なることから、LDV を用いて流速の変動の時系列データを測定した。図-1 (c) に示す◎印で示す 3 列目のルーバーフィン入口付近で流速変動を調べた。得られた時系列データよりパワースペクトルを求めた。

3 列目のルーバーフィン入口付近での測定点の結果については、フィンピッチの狭い場合の Type A でのパワースペクトルは、ルーバー角度や Re 数によってその形が異なっている。ルーバー角度が 10° や 20° の場合には、いずれも卓越周波数があらわれるようなスペクトルはほとんど見られなかった。それぞれの場合にはルー

Fig.3 Reynolds stress distributions on horizontal section at louver fins for Type B-3 and $Re=1,600$

Fig.4 Iso-Reynolds stress distributions on vertical section of third row at louver fins for Type B-3 and $Re=1,600$

バーの位置と次の列のフィン位置が関係し、流れの変化が小さいためによるものと考えられる。ルーバー角度が 15° の場合には、Re 数によってスペクトルが異なり、ある周波数に対して大きなスペクトルの値を示す場合や種々の周波数に対するスペクトルの値が大きくなったノイズを多く含んだ形のパワースペクトルも見られた。

一方、フィンピッチが大きくなった Type B の場合の結果については、ルーバー角度が 10° の場合には、顕著な周期性のある振動が見られない流れになっていると思われる。しかしながら、 15° 及び 20° のルーバー角度では、比較的鮮明な卓越周波数があらわれるパワースペクトルが得られた。いずれのスペクトルにおいても 0.1Hz 前後付近に卓越周波数が現れ、周期の長い振動を示す流れとなっていることが想像できる。

次に、ルーバー角度が 15° の Type A-2 及び 15° と 20° の Type B-2 と B-3 に対して、Re 数を変化させた場合の v 方向成分に関するパワースペクトルにおける卓

越周波数 f_v を求めた。それぞれの結果を図-5(a)と(b)に示す。

図-5(a)に示す Type A-2 の結果では、確かに Re 数の増加に対して f_v は増大傾向にあるが、Re 数が 1,000 前後及び 1,500 前後では f_v の値が大きく変化している。前述のように、この場合鮮明な卓越周波数は得られていないので、最大のパワースペクトルの値に対する f_v をプロットしているためによるものと思われる。それに対して、(b)に示す Type B については、ルーバー角度が 15° 及び 20° の場合はともに、Re 数の増加に対して 1,000 前後までは f_v の変化は小さいが、それより大きくなると急激に増大している。 15° と 20° のルーバー角度の違いで比較すると、 15° の場合の方が f_v の値も大きく、増加率も高くなっている。

以上のようなルーバーフィンまわりの流速変動の振動特性と前述の乱れや流脈の可視化結果を含めて考察をまとめると、今回のようなルーバー角度の変化に対しては、 15° 以上のルーバー角度での流れにはルーバーフィン入口付近で発生した縦渦がルーバー区間で増大し、下流側に進むにつれて大きな振動を伴った流動に発展しているものと思われる。特に、 20° のルーバー角度の Re 数が低いときには、全体的に乱れが広がっているが、Re 数が大きくなると乱れは局部的に大きくなり、それらの周辺での流れの回転流動が顕著に現れていると思われる。

4. 結論

フィンピッチ及びルーバー角度を変化させてルーバーフィンまわりの流れの可視化を行った結果、次のような結果を得ることができた。

(1) フィンピッチが狭い場合には、ルーバーフィンまわりの流脈の変化が小さく、ルーバー角度による流れの変化も小さい。しかしながらフィンピッチが大きく、ルーバー角度も大きくなると、ルーバーフィンまわりの流脈の変化がはっきりとあらわれ、縦渦を可視化することができた。

(2) LDVによってもルーバーフィンまわりに発生する渦の位置を明らかにするとともに、フィン入口による流れの剥離、ルーバーフィンの屈曲部及びルーバーとフィンの配置がそれらの渦の発生と発達に関係していることを明らかにすることができた。

(3) フィンピッチが大きく、ルーバー角度も大きい場合には、流速変動にはっきりとした振動が現れることが明らかとなった。またその振動周期は長く、大きな縦渦を伴う流動であることが明らかになった。

<参考文献>

- 1) 梅田眞三郎, 他 3 名 : ルーバーフィンまわりの流れの可視化, 可視化情報, Vol. 20, Suppl. No. 2, pp. 81-84, 2000

Fig.5 Relationship between f_v and Re in louver fins