8 実用プレート式熱交換器内三次元流れの可視化

姫路工大 村井一弘² 川島陽介 中西重康
日本アルミ 藪 芳典 堤 信義

Visualization Study of Flow Pattern in Practical Plate Type Compact Heat Exchangers

Kazuhiro MURAI*, Yosuke KAWASHIMA*, Shigeyasu NAKANISHI*
Yoshinori YABU** and Nobuyoshi TSUTSUMI**

In order to interpret heat transfer data of practical plate compact heat exchangers with corrugate plates the three dimensional flow patterns in them were investigated by visualization using the smoke wire method.

Three types of test section were investigated ; flat plate, "Ellipse" type and "Mount." type. The latter two were of corrugate type, and their plates had projections of ellipse and top-cut pyramid forms regularly arranged, respectively.

It was observed that the "Mount." type projection disturbs flow in the highest degree among three.

This fact well corresponded to our previous heat transfer data where the highest performance was attained with the "Mount." type plate.

1. 緒 言

最近熱交換器における单相流の強制対流の流れ場での伝熱促進法が盛んに研究開発されている。

従来の伝熱促進方法のうち各種内面リブ管について Ravigururajan および Bergles¹⁾により、小型熱交換器については Shah²⁾により概説に紹介されている通り、種々の方法について比較検討がなされている。特に最近では伝熱促進体としてダクト内に波形をつけた方法³⁾、翼を用いる方法⁴⁾についても検討されている。また、層流における流路壁面にキャビティを設け、水力学的発振現象を利用して伝熱促進をする試み⁵⁾もなされている。特殊なものにはオイルクーラなどに用いられる Canted Rib型⁶⁾熱交換器もある。

しかし、単に壁面を波形にした流路でも構造が簡単であるので経済的に比較的有利な伝熱促進効果を達成できる可能性が残されているのではないと思われる。

本研究は実際の三次元的凹凸の曲面のプレート式波形熱交換器の熱伝達特性をフローパターンによって裏づけることを目的としたものである。

そのために排ガス廃熱回収用として用いられているプレート式山形波形熱交換器とその他の波形の異なるものに対して十字向流の場合の実験を行ないその伝熱性能を比較した。また同時に流れの可視化実験により各波形流路間のフローパターンを調べ、それらの伝熱特性を明らかにした。

2. 実験装置および方法

図1に本伝熱実験のための十字型ダクトにおける向流流れの熱交換器要部を示す。図中 AA' のように高温側ガスが放熱用ダクト内寸法 (320 x 320 mm) の中を流れている。これと同時にこのダクトに直角な受熱用ダクト (高温側と同一寸法) の中を BB' のように低温側ガスが流れている。この十字部の熱交換器の中には後述の3種類のプレート

* Himaji Institute of Technology, 2167, Shosha, Himaji.

** The Nippon Aluminium Mfg. Co., Mikuni-honcho, Yodogawa-ku, Osaka.

が所定の間隔で積層される。図のように放熱用および受熱用ダクト断面12点にそれぞれシース熱電対を張って温度測定をした。その温度範囲は放熱側および受熱側の出入口でそれぞれ100～60℃および40～80℃である。また、それぞれのダクト内流量に関しては予備実験により、各ダクト毎にこれより(ダクト径×4倍)の距離だけ下流の断面内16点の流速を熱線流速計によって測定した。断面内の流速分布と平均値とのこの結果に基づき、本実験において断面中央部固定点の流速を基準にして流量を決定した。以上の温度および流量の測定結果によって後述の伝熱特性を調べた。

図2(a), (b), (c)に本伝熱実験に供試の熱交換器の各プレートの形状・寸法を示す。図(a)は形が最も単純な場合の単なる平板である。図(b)は楕円形の谷および山が交互に配置された波形プレートである。すなわち70mm×36mmの格子の隅の楕円形4個(山部)の中に1個の割合で楕円(谷部)が並んでいる。本実験でこれを楕円形プレートと呼ぶ。図(c)は長方形の山および谷が成形されて格子状に凹凸のある波形プレートである。すなわち横向きの長方形(縦38×横48)の凸面4個が千鳥状に配置されていて、その中央にこれと同じ形で90°向きの(／印)の凹面が並んでいる。山の頂面あるいは谷の底面は何れも図の紙面と斜めになっている。ここでこれを山形プレートと呼ぶ。

まず、山形プレートの伝熱特性として総括伝熱係数 U に対するプレート(SUS 304)積層間隔(以下ピッチと呼ぶ)の影響を調べた。このための実験条件を表1に示す。ピッチは5, 7.5, 10mmの3種類で流量 Q_v は500, 1000, 1500Nm³/hの3種類で計9組み合わせである。

また、一定ピッチ($p=7.5$ mm)の下における3種類の波形プレートの伝熱特性 U に対する形状の影響が調べられた。この場合のプレートの材質はポリカーボネートである。平板、楕円形、山形の3種類に対して流量 Q_v はそれぞれ500, 1000, 1500Nm³/hの3種類である。これはダクト開口部の水力相当直径の代表長さによるレイノルズ数 R に換算すると $R_0=2140\sim 7130$ である。

図3に可視化実験の装置を示す。プロア⑧によって吸入された常温(7～11℃)の空気はテストセクション④、

Fig.1 Experimental apparatus for heat transfer

(a) Flat plate (b) Ellipse (c) Mount.

Fig.2 Shapes of corrugate plates

Table 1 Experimental conditions for heat transfer on the effects of pitch(Mount. type)

Pitch mm	5	7.5	10
Flow-rate of air	500	0	0
	1000	0	0
Nm ³ /h	1500	0	0

整流格子⑤、ディフューザ⑥を通して流れる。流量調節はバルブ⑦で行い、流量はテストセクション部断面に設置された熱線風速計の測定値から算出した。可視化の方法はスモークワイヤ法である。すなわちスタンド②によって水平なニクロム線①に流動パラフィンを塗り、交流電圧(30ボルト)を加えると白煙を生ずる。テストセクション真上に設置したカメラでこれを撮影する。

この可視化実験の波形プレート(平板も同じ)の材質は内部の流動パターンが観察できるようにするため全て透明ポリカーボネートである。楕円形および山形プレートの形状・寸法は図2(b), (c)に示すものとそれぞれ同一である。これらの平板、楕円形および山形プレートをそれぞれ2枚一組みとして用いた。図3の上から見てプレートの凸部および凹部がおたがいにはめこみの位置にくるように、しかも所定のピッチで平行に設置された。ニクロム線①はプレート前縁部でしかも2枚のプレートの中央面内にダクト軸に直角に張られている。このように楕円形および山形プレートは立体的な曲面であるため、内部の流れは三次元流であり、流れの個々の流線を忠実に追跡し、平面的に可視化し、撮影することはこの場合困難である。したがってここでは全体的に流動パターンの特徴を把握することを目的とした。そのためにカメラに偏光フィルタをつけて反射光を取り除くとともにテストセクションの左右の2組の照明の微妙な調節をした。また室温に対するニクロム線の太さと電圧の関係などの最適条件を予備的。試行的に調べた。

このようにして実用器の三次元的曲面を有する波形プレート内部の流れのフローパターンを可視化実験により撮影することに成功した(写真1、2、3参照)。可視化実験ではまず山形プレートに対してピッチ p を7.5mmで一定として、流速 u を0.5から1, 1.5, 2m/sと変化させた。この条件を表2に示す。また、同表に示すように u を1m/sの一定として p を $p=5, 7.5, 10$ mmと三種類に変化させた。

またプレート曲面の形状によるフローパターンの変化について調べるために $p=7.5$ mmで $u=1$ m/s(ともに一定)で三種類(平板、楕円、山形)についても実験した。

3. 実験結果

3.1 伝熱実験 図4に表1の山形プレートについて p は3通り、 u は3通りの実験結果を示す。

図のように流量 Q_v が500から1500に3倍になると U は2.2～2.3倍に増加する。またピッチが2倍に増加すると最大で10%増加する。

図5に各種プレートが一定ピッチ($p=7.5$)の場合の流量増加に

- ① Ni-Crom Wire ⑤ Calming Section
- ② Stand for wire ⑥ Diffuser
- ③ Camera ⑦ Valve
- ④ Test section ⑧ Blower

Fig.3 Experimental apparatus for visualization

Table 2 Experimental conditions for visualization (Mount. type)

$\frac{u}{\text{mm/s}}$ pitch	0.5	1.0	1.5	2.0
5	○	○	○	○
7.5	○	○	○	○
10		○		

対する U の変化を示す。何れの U の値も Q_v が 500 から 1500 に増加すると増加する。この場合山形プレートでは U は平板の 2.1 ~ 2.2 倍に向上する。また同一流量の場合伝熱係数の大きい方から順に山形、楕円、平板の順である。

以上、山形プレートではこの範囲では最大の $p = 10$ が最も伝熱特性が良く、三種類の波形では山形が優れており、この値は平板の 2.1 ~ 2.2 倍（また楕円に対して 6% 増）である。山形の場合の伝熱特性についてつぎの可視化実験結果において考察する。

3.2 可視化実験 まず、山形プレートの $p =$ 一定の下においてフローパターンにおよぼす流速の影響についてのべる。Photo 1 (a) (b), (c), (d) は $p = 7.5$ における u の影響を示す写真である。プレートの山あるいは谷の行および列の番号を図 6 のようにつける。例えば横 2 列、縦 3 列の位置を (2, 3) とする。

Photo (a) $u = 0.5$: 煙は前縁（図で上端）から 5 列まで達しており、流線はほぼ上流から下流まで

乱れずに通っている。わずかに (2, 2) の山の部分で乱れている程度であり、乱れの促進効果は小さい Photo (b)

$u = 1.0$: 煙は前縁から 5 列目

Fig.6 Coordinates of tops and bottoms

(a) $u = 0.5 \text{ m/s}$

Photo 1 Visualization on the effects of velocities ($p = 7.5 \text{ mm:const.}$)

Fig.4 Coefficient of overall heat transmission (Mount. type)

Fig.5 Coefficient of overall heat transmission (various types)

(b) $u = 1.0 \text{ m/s}$

(c) $u = 1.5 \text{ m/s}$

(d) $u = 2.0 \text{ m/s}$

まで達しているが3列目から完全に乱されていて乱れの効果が良く表れている。特に上流部(2, 2)、(1, 3)(3, 3)および(2, 4)の山の部分で顕著である。

Photo (c) $u =$

1.5 : 1列目の(3, 1)の山の部分ですでに乱れが進行しており、

2列目までわずかに流線の形跡が部分的に残っているが下流は乱れが著しい。

Fig.7 Sketches of Photo 3

Photo (d) $u = 2.0$: (1, 1)、(3, 1)の山の部分から乱れが始まっており、3列目では煙の筋はほとんど消失している。

以上のようにフローパターンの観察の結果、速度が $u = 0.5$ から 2.0 m/s まで4倍に増加すると乱れ始める距離は $1/3$ 倍かそれ以下に減少する。また乱れは図で左右対称な谷の部分(2, 1)、(1, 1)、(2, 3)および(2, 2)を通過してつぎの下流の山にさしかかる際に著しく促進される。流速が大になるにつれて乱れが大になる事実は図4において同一ピッチで流量増加の際の伝熱特性の結果と定性的に対応している。

つぎに同一流速の下におけるピッチの影響について説明する。

Photo 2 (b₀)、(b)、(b₁)は流速 $u = 1 \text{ m/s}$ の下における $p = 5, 7.5, 10.0 \text{ mm}$ のフローパターンの結果を示す。

Photo (b) $p = 5$: (2, 2)、(1, 3)、(3, 3)、(2, 4)の山の部分でわずかに乱れがあるが煙の筋は依然として下流の5列目まで続いており乱れの促進効果は小である。

Photo (b) $p = 7.5$: すでに示したPhoto 1 (b)と同一である。すなわち3列目から乱れが促進されていて山の部分に著しい変化がみられる。

Photo (b) $p = 10$: 一列目の山の部分からすでに流線がゆらぎ始めて2列目から下流の部分で乱れが促進されている。すでに山と山との平面の部分で3列目まで煙の筋が認められるだけである。 $p = 10$ の場合が三者のうち最も乱れが促進されている。

Photo 2 Visualization on the effects of p for Mount.type($u=1\text{m/s}$)

Photo 3 Visualization on the effects of corrugate shapes($p=7.5, u=1$)

以上のように流速一定の場合においてピッチ p を 5 から 10 に 2 倍に増加させた場合プレート全面に乱れが促進されるようになる。これが写真観察によって明らかになった。また、この結果は図 4 において同一流量の各点が示すように p が 5, 7.5, 10.0 mm と増加するにしたがって U が大になっている事実と定性的に一致している。

プレート形状による影響に関して $p = 7.5$, $u = 1$ (何れも一定) の場合について楕円と山形のフローパターンを比較する。

Photo 3 (i), (ii) に $p = 7.5$, $u = 1$ の場合の楕円および山形の写真をそれぞれ示す。図 7 (ia), (iia) にそれぞれの写真に対するスケッチを示す。

平板の場合この条件では流線は下流まで通っており、いうまでもなく乱れは少ない。

Photo 3 (i) (楕円) と (ii) (山形) のフローパターンを比較すると楕円では各凹凸に沿うように縦方向に流線が一束になっている (図 7 参照)。

これに対して Photo (ii) あるいは図 7 (iia) のように山形では 2、3、および 4 列目のように山の部分で流れが乱れている。それにもかかわらず谷の部分でも著しく淀んでいるような死水域も認められない。

このように同一ピッチの下の形状による乱れの促進効果は山形プレートが最も優れており、楕円がつぎで平板は著しく不良である。この事実は図 5 の U の曲線中で同一流量に対して山形の U の値 (□) が最も大きく、つぎが楕円 (△)、平板 (○) の順番になっていることと対応している。ここに三次元の流れ場において形状の変化に基づく乱れと伝熱特性との関係が明らかにされた。また山形および楕円、平板の場合の伝熱特性が一連の可視化実験によって裏づけられた。

4. 結 論

実用プレート式熱交換器の伝熱用プレートの三次元流に対する可視化実験を行い、伝熱特性との関係によってつぎの結論をえた。

(1) 山と谷の部分に傾斜を持たせ、直角方向に交互に変化させた波形の山形プレートが熱交換器の伝熱特性を有利にすることが明らかにされ、そのフローパターンを求めることができた。

(2) 山形プレートの伝熱特性が楕円形よりも有利であることが上記のパターンによって裏付けられた。

文 献

- 1) Ravigururajan T.S. and Bergles A.E., Augmentation of Heat Transfer in Energy Systems, ASME, HTD-Vol.52, p.9, 1985.
- 2) Shah.R.K., Proc. of the Sixth Int. Heat Trans. Conf., Vol.4, Tronto, p.193, 1978.
- 3) Molki.M., 3)と同じ文献 p.2879.
- 4) Turk.A.Y. and Junkhan.G.H., Trans. Conf., Vol.6, p.2903, 1986.
- 5) Greiner.M., Ghadder.N.K., Mikic.B.B. and Patera.A.T., 4)と同じ文献 p.2867.
- 6) Lee.Y.N., 4)と同じ文献 p.2817.
- 7) 流れの可視化学会編、新版流れの可視化ハンドブック、(昭61)、273、朝倉書店。