

# 密集形管群からなる管胴形熱交換器における 胴側(单相流)の伝熱特性

相 場 眞 也    小 野 茂 樹\*  
永 井 静 一\*    阿 部 節 夫\*  
宮 腰            慎\*

## Shell-side Heat Transfer Coefficients of Air in Tubular Heat Exchanger Composed of a Closely Spaced Tube Bank

Heat transfer of the shell-side has been experimentally examined for air in a shell-and-tube type heat exchanger composed of a closely spaced tube bank (tube arrangement is triangular style). It is found that average heat transfer behavior around each tube in the heat exchanger can be explained by the heat transfer in the vicinity of the front stagnation point of tubes in the cross flow region and total heat transfer rate of baffle compartment for the narrow tube spacing is not lower compared with the previous data of the general tube spacing.

### 1. はじめに

コンパクト式熱交換器の性能向上は近年著しいものがあるが、管胴形熱交換器は最も広く使用されているにもかかわらず、顕著な進展はみられない。熱交換器の性能評価は種々の視点からなされるべきものであるが、伝熱工学的には熱交換器の単位体積当りの伝熱量が大きいこと、流体輸送のための動力が少ないことである。管胴式熱交換器の場合は、特に、胴側流体の熱伝達と流体輸送動力の大小が問題となる。

一般に管の配列様式は大別して基盤め形と千鳥形があり、管外の汚れの除去という問題を除外して考えれば後者が有利な特徴を持っている。たとえば、同一ピッチであれば千鳥形配列のほうが単位体積あたりの伝熱面積を大きくとれる<sup>1)</sup>。また、管表面からの熱伝達率においても同一レイノルズ数で数%上まわる<sup>2)</sup>。著者らの一人はこれまで管群の熱伝達を

取り上げ、千鳥形配列の場合は同一レイノルズ数であれば円管間隔が密になるほど流体輸送動力は流量との関係で減少する場合があることを示すとともに、円管間隔がきわめて狭くなっても管群全体の熱伝達率は広い場合とほとんど変わらないことを明らかにした<sup>2)3)</sup>。

ところで、管胴形熱交換器の胴側の熱伝達に関する研究は古くから行われている<sup>4)~9)</sup>。また、松島らは最近高温の排熱回収に伴うこの種熱交換器の伝熱特性を明らかにしている<sup>10)11)</sup>。しかし、管配列ピッチ比は比較的広い場合を対象としていて、熱交換器のコンパクト化という観点からは充分とはいえない。また、胴側流体が高温となってくると胴内各部の熱伝達特性もさることながら、各管まわりの局所の伝熱特性を把握しておくことは極めて重要となってくる。しかし、いまのところ各管の局所熱伝達特性を詳細に検討を加えたものは見当たらない。

以上のような背景から円管間隔がきわめて狭い千鳥配列管胴形熱交換器の伝熱特性に関し、円管まわ

\* 当時本校学生

りの局所の伝熱特性に関する知見を得ることを含め、管群の熱伝達特性と比較しつつ実験的に検討を加えたものである。

記 号

- D : 胴内径
- d : 円管直径
- H : バッフルプレート切欠き高さ
- h : 熱伝達率
- N : 管番号
- Nu : ヌセルト数
- Nu<sub>mt</sub> : 熱交換器コンパートメントのヌセルト数
- p : 円管間隔
- q : 熱流束
- Re : レイノルズ数 =  $Ud / \nu$
- T : 温度
- U : 胴中心部の管列での最小断面積に対する流速
- $\theta$  : 角度
- $\lambda, \nu$  : 空気の熱伝導率, 動粘性係数

添 字

- f : 前方岐点
- m : 平均
- w : 管壁
- $\infty$  : 熱交換器入口

2. 実験装置と方法

図1に実験装置の概要を示してある。管胴形熱交換器では胴側流体が最初に流入してコンパートメントを除けばそれ以降のコンパートメントの熱伝達率はそれほど変わらないことが知られている。そこで、装置は流体入口部と出口部で構成されるようにし、吹出し形風胴先端部に208×118mmの矩形ダクトを取り付け、第一段めのコンパートメント(以後、ISと略称する)に空気が流入し、バッフル切欠部を通じて第2段めのコンパートメント(以後、OSと略称する)の出口から空気が実験室に流出する。アクリル樹脂製の内径D=242mm、長さ650mmの胴はバッフルプレートによって仕切られている。プレートは直径5mmの丸棒4本で固定されている。また、直径d=25mmのアクリル樹脂製の円管は正三角形に配列されている。円管間隔pは30mm(p/d=1.2)と27.5mm(p/d=1.1)の2種類とし、バッフルプ

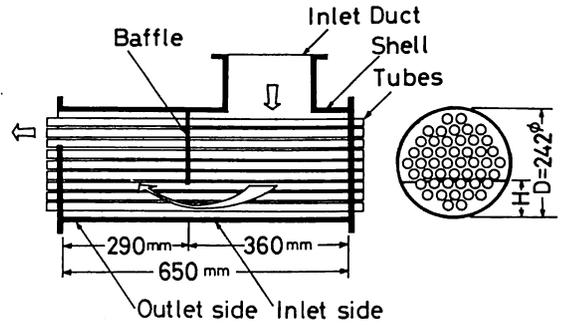


図1 実験装置

レート切欠き高さHは36~102mmの範囲に変えている(H/D=0.15~0.42)。なお、円管とバッフルプレートとの隙間はないようにしてある。入口ダクトの流速は1.4~3.4m/sの範囲で変化させているが、p/d=1.2に対しては2.9m/s、p/d=1.1の場合には1.75m/sの流速の場合に関して主に実験を行

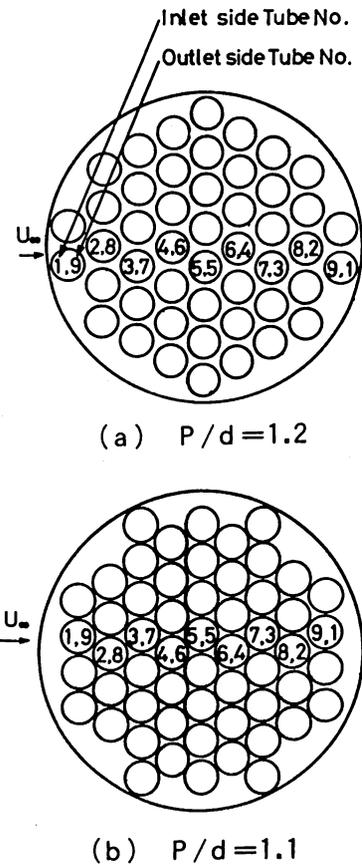


図2 円管配列と管番号

密集形管群からなる管形熱交換器における胴側（単相流）の伝熱特性

った。従って、胴中心付近の最小断面積を通る流速に基づくレイノルズ数  $Re$  は  $p/d=1.2$  の場合は I S 部で8050, O S 部で10000,  $p/d=1.1$  の場合は I S 部で7700, O S 部で9500である。

胴内の円管は図2のように配置され、 $p/d=1.2$  の場合の円管は48本、 $p/d=1.1$  の場合は56本である。なお、円管内に示されている数字は円管番号をあらわし、前者は I S 部、後者は O S 部のそれぞれである。

熱伝達測定用円管に対しては幅30mm、厚さ50 $\mu$ m のステンレス箔を内部をウレタンフォームで充填したアクリル樹脂管に7回巻きつけ通電加熱した<sup>(12)(13)</sup>。円管表面温度は円管の中央部のステンレス箔裏側に固定してある直径0.065mmの Cu-Co熱電対にて10度ごとに測定し、次式により熱伝達率、ヌセルト数を定義した。

$$h_{\theta} = q / (T_w - T_{\infty}), \quad Nu_{\theta} = h_{\theta} d / \lambda$$

なお、管軸方向の温度変化を検討する目的で上記熱電対固定位置より軸方向に左右70mm 離れた位置で中央付近の温度分布とほぼ同一であることを確認した。

StachiewiczとShort は胴の断面が矩形の系を取り上げ、円管軸方向の熱伝達率の変化を報告している<sup>(7)</sup>。彼らの結果によれば流れがバッフルプレートを過ぎるとき、プレートの裏側では流れがよどみ、その近傍の円管まわりの熱伝達率は著しく低下する。しかし、プレート間の距離が増加すると、円管軸方向の熱伝達率は円管の中央付近でそれほど変化なく、バッフルプレートに近い部分ではやや熱伝達率の低い部分が認められる。また、対向するバッフルプレート近傍では熱伝達率がやや大きく、従って、中央付近の熱伝達率はほぼ円管全体の平均値とみなしてよいと考えられる。

### 3. 実験結果及び検討

3.1 局所ヌセルト数 松島らの実験結果からも明らかなように第一段めのコンパートメント(I S)の伝熱特性とそれ以降の特性は異なる。したがって、I S部とO S部と区別して記述する。

3.1.1 I Sの局所ヌセルト数分布 図3(a), (b)は各々  $p/d=1.2, 1.1$  の場合における局所ヌセルト数  $Nu_{\theta}$  の変化を図2に示した円管番号  $N$  に沿って示したものである。 $N=1, 8$ を除けば、

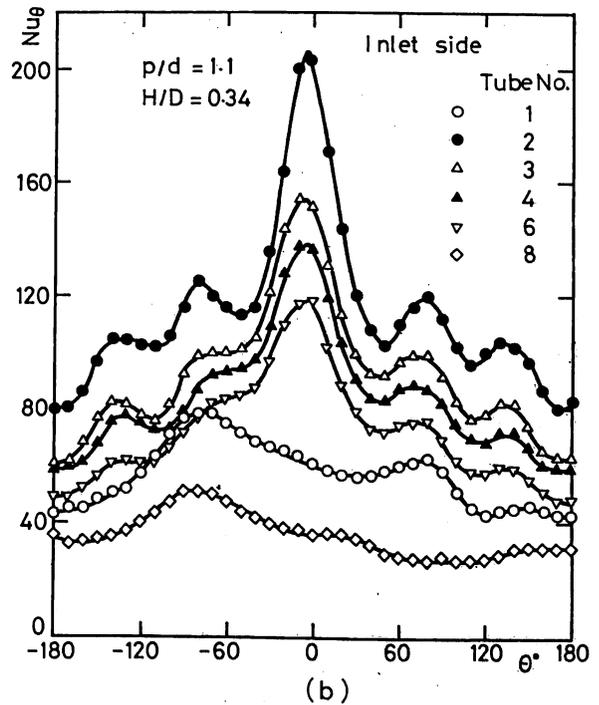
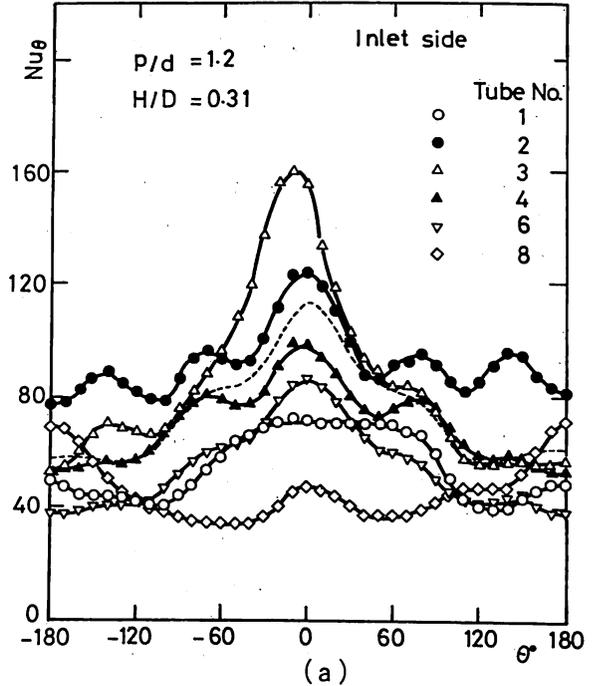


図3  $Nu_{\theta}$  の分布

$\theta \approx 0^{\circ}$  に最大値を持ち、円管上下 ( $\theta = 0 \sim +180^{\circ}, \theta = 0 \sim -180^{\circ}$ ) の分布は比較的良好な対称性を示していることがわかる。この対称性は胴壁面に近い円管の場合ほど崩れる傾向が特に  $p/d=1.2$  の配置の場合に顕著に認められた。 $p/d=1.2$  の場合、

H/Dの減少とともに胴中央部へ流入する流量は減少し、ノズル入口から放射状に広がる。そのため、流れが放射状に広がった部分では千鳥形配列であるにもかかわらず、流れに対しては基盤め形配列の状況を呈する。従って、図に示した $Nu_{\theta}$ 分布と異なり、顕著なピークを2つ有する基盤め形管群の分布<sup>14</sup>と類似のものとなる。p/d=1.2の配列は胴と管群との間に隙間があり(ただし、N=5の列は除外)、いわゆるバイパスフローとなっていて上述の傾向をもたらしているものと考えられる。一方、p/d=1.1の場合は胴内壁と管との間の隙間が1/2(p-d)より狭いためバイパスフローは生じていない<sup>15</sup>。そのため、胴内壁にかなり隣接している円管であっても、p/d=1.2の場合に比較して $Nu_{\theta}$ 分布は千鳥形管群のそれに類似した傾向を示す。

ところで、図3(a)(b)で明らかのように、円管まわりの $Nu_{\theta}$ は $\theta$ によって大幅に変化していること、円管の位置Nによる $Nu_{\theta}$ の分布形状、 $Nu_{\theta}$ の大きさも著しく相違することがわかる。図3(a)には千鳥形管群の結果を破線で示してある(レイノルズ数 $Re=8600$ で、流れ方向から第4列めの結果)。流れと直角方向の円管間隔は本実験結果と同一であるが、流れ方向のそれは約15%ほど大きい。この流れ方向の円管間隔の相違のため多少 $Nu_{\theta}$ の分布は異なっている。しかし、N=4の傾向とほぼ一致していることがわかる。

千鳥形管群で上流側から第3列めの熱伝達率が最大となることはよく知られているが、p/d=1.1の場合は明らかにN=2の結果が円周全般にわたって $Nu_{\theta}$ が大きいことがわかる。このような現象は円管に対して噴流を衝突させた場合に類似している。その後、噴流の最大速度は減衰し、Nとともに $Nu_{\theta}$ は低下する。N=8の結果は並行流領域(パフプレート切欠部を円管軸と平行に流れる)にあるため、円管まわりの大きな $Nu_{\theta}$ の変化はみられず、かつ $Nu_{\theta}$ も小さい。なお、 $\theta = \pm 50^{\circ}$ 及び $\pm 100^{\circ}$ 付近にみられる極小値は隣接する管の影響を受け流れが管壁表面付近で一時停滞して生じたもので、 $\theta = \pm 80^{\circ}$ 及び $\pm 130^{\circ}$ 近傍の極大値は停滞した部分(仮りにはいく離泡と考える)の外側の流れの再付着によるものであろう。

3. 1. 2 OSの局所ヌセルト数分布 OSの $Nu_{\theta}$ の分布を図3(c)(d)に示す。p/d=1.2の場合はNの増加、すなわち、流れ方向に進むにしたがって全般的に $Nu_{\theta}$ は減少の傾向にあることがわか

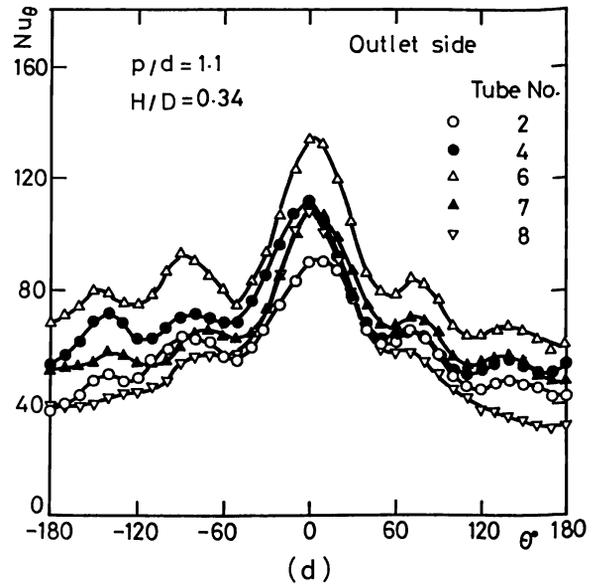
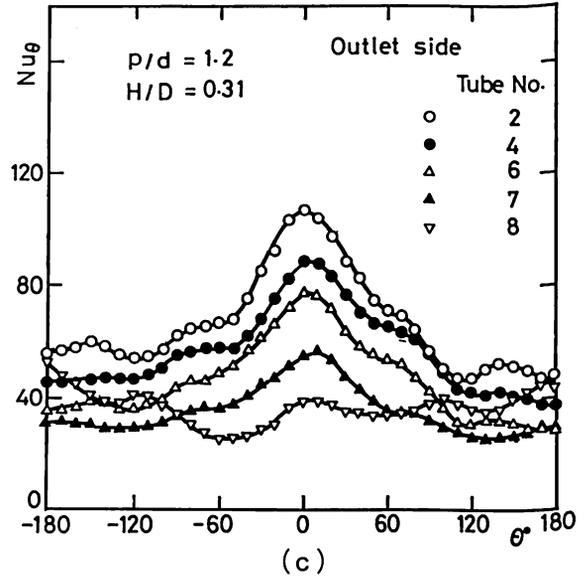


図3  $Nu_{\theta}$ の分布

る。直交流部における $Nu_{\theta}$ の分布形状はISのN=4, 6の場合に極めて類似しているが、レイノルズ数がISの場合より大きいにもかかわらず $Nu_{\theta}$ そのものはむしろ低めの結果となっていることは、バイパスフローがISの場合より顕著となっているためと解される。一方、p/d=1.1の場合はNによって $Nu_{\theta}$ 及びその分布形状はそれほど変わらずp/d=1.2の場合より全般的に熱伝達が良好であることがわかる。

3. 1. 3 前方岐点及び後方岐点のヌセルト数の挙動 著者の一人は円管間隔の狭い千鳥形管群

密集管群からなる管形熱交換器における胴側（単相流）の伝熱特性

における伝熱特性は円管前方岐点の伝熱特性と密接に関連があることを明らかにしている<sup>10)</sup>。図4 (a) ~ (d)は前方岐点 ( $\theta = 0^\circ$ ) の  $Nu_\theta$  すなわち  $Nu_f$  の  $N$  による変化を、バフフルプレートと開口比  $H/D$  をパラメーターとして示したものである。なお、図4 (a) (b) に示してある  $H/D$  の記号は以後 (図8は除く) この図で用いた  $H/D$  をあらわすことにする。IS では  $H/D$  による  $Nu_f$  の変化 (特に  $p/d = 1.2$  の場合) は少ない。  $p/d = 1.2$  の場合で  $N = 3$  で  $Nu_f$  は最大値をとっている。これは、千鳥形管群の場合と同一の結果で、円管に到達する最大流速もあまり減少せずかつ流れの持つ乱れ強さと相乗している結果と考えられる。  $p/d = 1.1$  の場合は  $N = 2$  で最大値となっているが、一列めの円管間隔が狭いため、測定円管に到達する流れ (衝突噴流と考えるとよい) は  $p/d = 1.2$  の場合より早く減速し、しかも乱れ強さも大きいと考えられる。

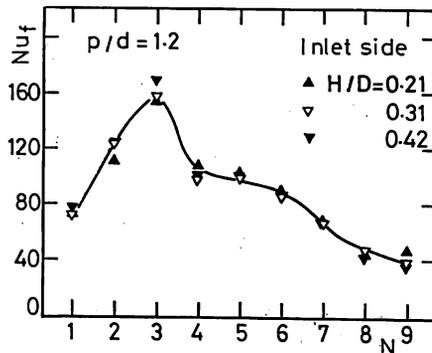
一方、図4 (c) (d) に示すようにOSでは  $H/D$  による  $Nu_f$  の変化は大きいことがわかる。  $p/d$  によらず、  $H/D \leq 0.21$  ではコンパートメントの中央部の  $Nu_f$  が小さい結果となっている。特に、  $p/d = 1.2$  の場合は顕著で、その部分の流れがよどんでいることを示している。これに反し  $p/d = 1.2$  の場合は  $H/D = 0.42$ 、  $p/d = 1.1$  では  $H/D \geq 0.24$  で上に述べた傾向と逆となっている。  $p/d = 1.2$ 、  $H/D = 0.42$  の場合は直交流領域が減少する結果で、  $p/d = 1.1$  の場合も上述の理由による他、もともとバイパスフローが存在しないため、むしろコンパートメントの中央部の  $Nu_f$  が大きくなっているものと考えられる。

後方岐点 ( $\theta = 180^\circ$ ) の  $Nu_\theta$  の変化はOSの  $p/d = 1.2$  の場合を除けばいずれの場合も  $H/D$  の影響はほとんどみられずかつ図4に示した  $Nu_f$  の場合と比較して流れ方向の変化も少ない。

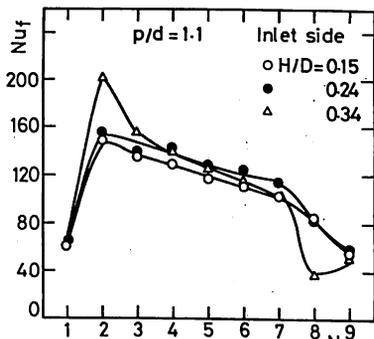
図5は  $p/d = 1.1$ 、  $H/D = 0.34$  の場合におけるOSの中央部の円管まわりの局所ヌセルト数のレイノルズ数  $Re_i$  による変化を示したものである。縦軸は  $Nu_\theta / Re_i^{0.8}$  をとって整理してある。  $Re = 8100 - 18500$  では結果は極めてよくまとまっていて、少なくともこのレイノルズ数の範囲ではフローパターンの大きな変化はないことがよみとれる。

3. 2 平均ヌセルト数

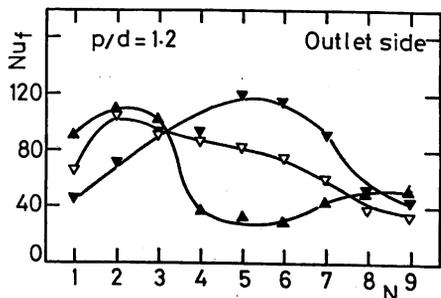
3. 2. 1 ISの平均ヌセルト数の挙動 図6 (a) (b)には各々  $p/d = 1.2$ 、  $1.1$  の場合における平均ヌセルト数  $Nu_m$  の変化を示してある。図4



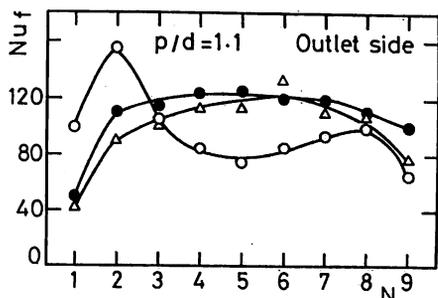
(a)



(b)



(c)



(d)

図4  $Nu_f$  の挙動

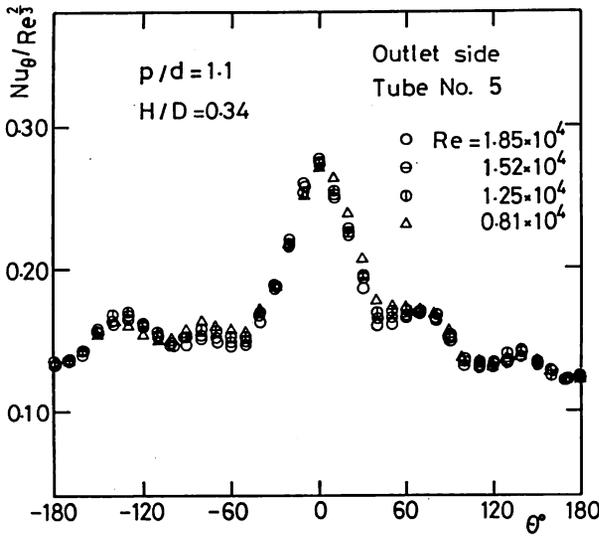


図5  $Nu_{\theta} / Re^{0.5} - \theta$  の関係

に示した  $Nu_{\theta}$  の挙動に極めてよく対応していることがわかる。H/D の  $Nu_m$  に対する影響 (特に  $p/d = 1.2$  の場合は比較的少なく  $p/d = 1.2$  の場合  $N = 2 \sim 3$  付近で  $Nu_m$  が最大となっている。  $N > 3$  では  $N$  の増加とともに  $Nu_m$  は減少してゆくが前述のようにバイパスフローの存在によりコンパートメントの中央部の流れが停滞することによるものである。ただし、  $N > 7$  では H/D によっては並行流となり、  $Nu_m$  は小さい。この傾向は図7 (a) でより明確に示されていることがわかる。また、流れと直角方向の列ごとの平均ヌセルト数を求めても図6 (a) の傾向とそれほど異なる。なお、図7の結果は管番号1の平均ヌセルト数を基準にして示してある。

$p/d = 1.1$  の場合 (図6 (b)) は  $N = 2$  で最大値を示し、  $N > 2$  では減少の傾向を示すが、  $p/d = 1.2$  ほど急激には減少しない。図7 (b) で明らかなように、直交流領域ではむしろコンパートメント中央部の  $Nu_m$  が周囲のそれより高い結果となる。

### 3. 2. 2 OSの平均ヌセルト数の挙動

ISの場合と同様  $Nu_{\theta}$  の挙動との対応はよい。又 H/D によって  $Nu_m - N$  の傾向が逆になる場合があり、設計上注意を要することと思われる。図6 (c) の  $H/D = 0.21$  と  $0.42$  の場合がその典型的な例である。すなわち、H/Dの減少とともにバイパスフローによる影響が顕著になりコンパートメント中央部の  $Nu_m$  は低下する。逆にH/Dの増加とともに平行流領域が広がるため、円管による抵抗が減少し、  $N = 5$  付近の  $Nu_m$  は大きくなる。しかし、コンパートメ

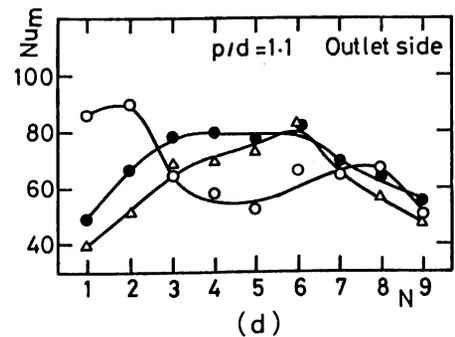
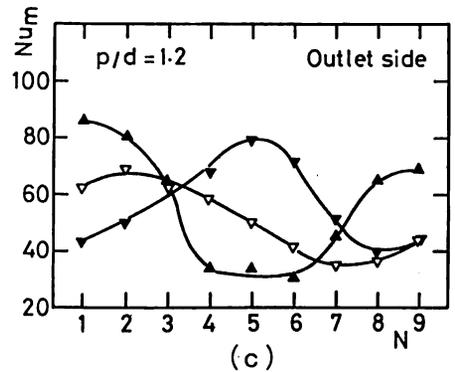
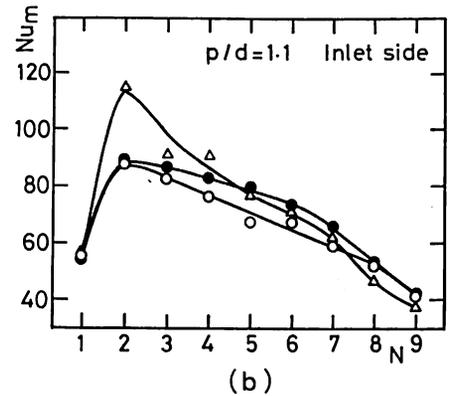
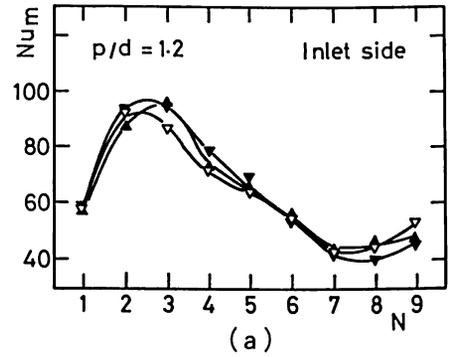


図6  $Nu_m$  の挙動

密集形管群からなる管胴形熱交換器における胴側（単相流）の伝熱特性

ント入口、出口側に近い円管の $Nu_m$ は平行流領域にあるため小さい結果となっている。 $H/D=0.34$ の場合には出口付近を除けばほぼ $H/D=0.21$ と $0.42$ の結果のほぼ中間を示すような挙動を呈している。

$p/d=1.1$ の場合、直交流領域での $Nu_m$ は $H/D$ によってあまり変化せず、かつ $N=3\sim7$ 付近までは $N$ によっても変わらないことがわかる。ただ、 $H/D=0.15$ の場合には $p/d=1.2$ の場合における $H/D=0.21$ に類似の傾向がいくぶんみられる。図7(b)に示してあるように流れと直角方向の円管すなわち各列の円管まわりの平均ヌセルト数はそれほど変化なく、従って各列の平均ヌセルト数の傾向は図6(d)における結果と同一となる。

3. 3 コンパートメント全体の平均ヌセルト数  $Nu_{mt}$

以上述べたように、平行流領域での熱伝達は直交流領域のそれに比較して悪い。そのため、ISの場合は平行流領域が出口側だけであるためOSの $Nu_{mt}$ より大きい結果を示す<sup>(9)</sup>。図8には $p/d=1.1$ 、 $H/D=0.34$ と $p/d=1.2$ 、 $H/D=0.31$ の結果を示してある。円管間隔が本実験のように極めて狭い場合であっても上に述べたことと同一の結果が得られていることがわかる。レイノルズ数が異なるため $p/d=1.2$ と $1.1$ で直接 $Nu_{mt}$ の大小は述べられないものの、従来の研究結果を延長して考えれば、IS、OSとも $p/d=1.1$ の場合の $Nu_{mt}$ が同一のレイノルズ数であれば大きいことがわかる。また、 $H/D=0.15$ の場合を除けば $H/D$ による $Nu_{mt}$ に対する影響はそれほど顕著でないことも測定結果から明らかとなった。図8には、本実験結果と比較するためBell<sup>(6)</sup>、松島ら<sup>(10)</sup>の結果も示してある。Bellの結果は充分発達したコンパートメントの $Nu_{mt}$ で次式で与えられている。

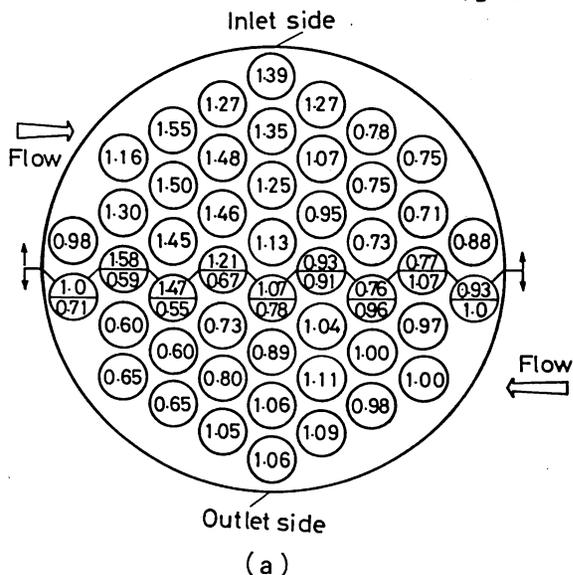
$$h = F_{th} \cdot J_h \cdot (c \cdot G_c) \cdot Pr^{-1/4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \cdot \left(\frac{\phi \cdot \xi_h}{X}\right) \cdot F_g \quad (1)$$

ここで、 $F_{th}$ は円管の種類による係数（平滑管の場合は1.0）、 $G_c$ は胴の中心線に最も近い管列での直交流の最大値量速度、 $J_h$ は伝熱因子で $Re=600\sim 10,000$ に対しては

$$J_h = 0.35 \cdot Re^{-0.39} \quad (2)$$

$c$ 、 $Pr$ は流体の定圧比熱、プラントル数をそれぞれあらわす。また、 $\phi$ はバッフルプレートの切欠部を通る流れによる補正係数で、 $\xi_h$ 、 $X$ 、 $F_g$ はそれぞれ、胴と管群との間の隙間を通る流れによる、管列数、バ

$P/d = 1.2$   
 $H/D = 0.31$



$P/d = 1.1$   
 $H/D = 0.34$

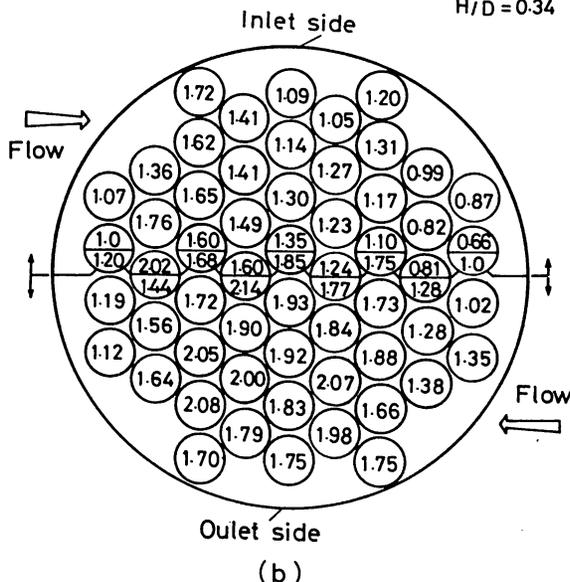


図7  $Nu_m$ の分布

ッフルプレートと円管や胴とバッフルプレート間の隙間を通る流れによる補正係数である。図に示したBellの結果はOSに対応する $p/d=1.2$ の場合のものである。破線 $p/d=2.0$ の松島らの結果でこれもOSに対すのものである。太実線は同様に松島ら

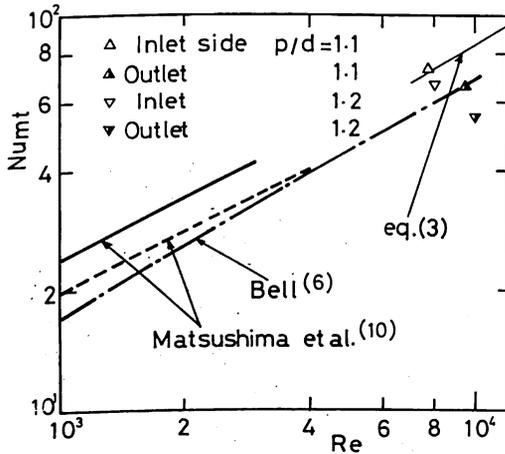


図8  $Nu_{mt} - Re$  の関係

のISの結果で、 $p/d$ が本実験とではかなり異なるにもかかわらず、結果は彼らの延長上に存在している。OSの場合は  $p/d = 1.2$  では彼らの結果より低め、 $p/d = 1.1$  の場合はいくぶん高めの値を示している。なお、実細線は著者らの一人が求めた千鳥形管群の平均ヌセルト数を示すもので次式のように表わされる。

$$Nu_{mt} = 0.24 Re^{0.64} \quad (3)$$

ISの  $p/d = 1.1$  の結果は上式と良く一致していることがわかる。

以上のことから極めて円管間隔が狭い場合であってもコンパートメント全体の平均ヌセルト数を円管間隔が広い場合と同一程度にできることが明らかとなった。また、 $p/d = 1.2$  の結果から、バイパスフローとならないような設計を行うことが熱交換器の性能向上には重要であることも示唆している。

#### 4. 結 言

管胴形熱交換器のコンパクト化を目的とし、千鳥形配列で構成されたきわめて狭い円管間隔からなる管胴形熱交換器の伝熱モデル実験を行った。得られた主な結果は次のように要約される。

- (1) 各円管まわりの局所ヌセルト数分布はコンパートメントの中央部では円管上下についてほぼ対称で  $\theta = 0^\circ$  近傍に最大値を持つ。バイパスフローが生ずるような場合の分布は非対称となり、場合によっては基盤形配列管群で見られるような分布となる。
- (2) コンパートメントの流れ方向に沿う各円管の前方岐点 ( $\theta = 0^\circ$ ) の局所ヌセルト数  $Nu_f$  は入口部

では  $H/D$  にそれほど依存しない。一方、出口部では  $H/D$  によって大きく影響される。また、前方岐点のヌセルト数  $Nu_f$  は円管番号  $N = 2$  ないし 3 の円管で最大値をとる。また、平均ヌセルト数  $Nu_m$  の  $N$  の変化は  $Nu_f$  と  $N$  の関係にきわめて良く対応している。

(3) バイパスフローが存在する場合はコンパートメント中央部の円管まわりの  $Nu_m$  は直交流領域にありながら、普行流領域のそれより低い結果となる場合がある。この傾向は  $H/D$  が小さいほど顕著になる。

(4) コンパートメント全体の平均ヌセルト数  $Nu_{mt}$  は、円管間隔が狭い  $p/d = 1.1$  の場合であっても、比較的広い円管間隔に関する従来の実験結果とほぼ同一であることを明白にした。ついで、バイパスフローが存在すると  $Nu_{mt}$  が低下することを  $p/d = 1.2$  の結果で明らかにした。

#### 文 献

- (1) たとえば, McAdams, W. H. Heat Transmission, 3rd ed., p, 282, McGraw-Hill.
- (2) 相場・土田, 機論B, 48-436, 2655, (1982-12).
- (3) Aiba S. ほか 2名, Bull. of the JSME, 52-204, 927, (1982-6).
- (4) Ambrose T. W. and Knudsen J. G., AIChE J. 4, 332 (1958).
- (5) Gurushankariah M. S. and Knudsen J. G., Chem Eng. Progress Sympo. Series, 55-29, 29 (1959).
- (6) Bell K. J., Petro/Chem. Eng., 32. 26 (1960).
- (7) Stachiewicz J. W. and Short B., Int Developements in Heat Transfer, ASME, New York, 959 (1961).
- (8) Gay B., ほか 2名, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 19, 995 (1976).
- (9) Sparrow E. M. and Perez J. A., J. of Heat Transfer, 107, 345 (1985).
- (10) 松島・ほか 3名, 機論B, 50-450, 550 (1984-2).
- (11) 松島・ほか 3名, 機論B, 51-466, 2000 (1985-6).
- (12) Aiba S. and Yamazaki Y., J. of Heat Transfer Trans. ASME C, 98, 503 (1976).
- (13) Aiba S. ほか 2名, Int. J. Heat Mass Transfer, 23, 311 (1980).
- (14) 相場・ほか 2名, 機論B, 47-422, 2004 (1981-10).
- (15) Bell K. J., University of Delaware Engineering Experiment Station, Bulletin No.5, Newark, Del., 1963.
- (16) 相場・ほか 2名, 機論B, 48-434, 1976 (1982-10).