The additional pressure loss was proportional to the 1.3th power of the retained dust loading, which was similar to the result for the fixed bed. It was, however, experimentally found that the additional pressure loss was not dependent on filtration velocity. Pressure loss buildup was predicted by assuming uniform deposition of dust around the filter media.

三角形・正方形配列密充填円柱群間隙の軸方向流体流れ内の層流熱伝達に関する実験的研究[†]

宮武 修・岩下寛之*・山本修史*

九州大学工学部 化学機械工学科^{††}

はじめに

基本的な伝熱系の一つである一様壁面温度の円柱群と、その間隙を軸方向に流れる流体との間の層流熱伝達（グレッツ・ヌセルト問題）に関しては、従来、理論的にも実験的にも明らかにされていなかった。そこで著者らは前報^{2,3)}において、種々の間隔をもって配置された三角形配列および正方形配列の円柱群に対して数値解析し、その層流熱伝達の特性を理論的に明らかにするとともに、数値解析結果から局所ヌセルト数および対数平均ヌセルト数などを表す近似式を導出した。

本研究は、Fig. 1 に示したように、直径 d_o の一様壁面温度の三角形配列および正方形配列の円柱群が接触した場合を模擬した流路形状における層流熱伝達の実験を行い、円柱群が密に充填された場合について、前報の数値解析結果の妥当性を検証するために行ったものである。

実験装置および実験方法

作動液が上昇流の場合の実験装置主要部の概要を Fig. 2 に示した。作動液として用いたエチレングリコールを、0.2 m³ の恒温槽内で約 73°C の一様温度に加熱後、ポンプによって混合室と助走部を経て伝熱部に送り、0.387～0.396 kg/s の流量でジャケット内を流れる約 20°C の冷却水で冷却し、再び混合室を経て系外に流出させる。なお、作動液が下降流の場合には、Fig. 2 に示した実験装置主要部の上下を反対にして助走部を上方に設け、作動液は上方から下方へ流すが、冷却水は下方から上方へ流した。

助走部および伝熱部の肉厚 $\delta = 0.292$ mm の銅製ダクトは、Fig. 3 に示したように、外径 $d_o \approx 22$ mm（三角形配

列）、 $d_o \approx 11$ mm（正方形配列）の円柱群が接触した際に生ずる間隙と同じ流路形状をもっており、伝熱部のダクトは内径 $D = 16.7$ mm のジャケット内に納められている。十分に発達した層流速度分布をもって伝熱部に作動液を流入させるため、助走部の長さは 0.30 m にとり、端効果の影響をみるため、伝熱部の長さは $l \approx 0.3, 0.6$ m の 2 通りに変えた（ d_o, l の正確な値は Figs. 4, 5 中の表を参照）。また、管内を層流の状態に維持するため、水力学的相当直径基準のレイノルズ数が 1350 以下になるように液流量を調整した。

混合室は端を封じたダクトの壁面に穿った孔群からの流出噴流を合流させる構造になっており、両混合室内にそれぞれ 3 本挿入した熱電対によって、伝熱部に流入、流出する液の混合平均温度を測定した。伝熱部ジャケット上・下部に冷却水の流出・入管を 3 個ずつ取付け、それぞれ 3 本の熱電対によってジャケットに流入、流出する冷却水の混合平均温度を測定した。作動液、冷却水の質量流量は容器に受けた液を計量して求めた。

実験結果の整理法

一様壁面温度 t_w をもつ長さ l 、直径 d_o の円柱 1 本当たり、液から円柱への伝熱速度 Q は次式で与えられる。

$$Q = h_{lm} \pi d_o l \Delta t_{lm} = w c_p (t_0 - t_l) \\ \Delta t_{lm} = (t_0 - t_l) / \ln \{ (t_0 - t_w) / (t_l - t_w) \} \quad (1)$$

ここで、 w は円柱 1 本当たりの液の質量流量 (Fig. 1 参照) であり、ダクトを用いる本実験系において、三角形配列の場合にダクト内の 2 倍の質量流量、正方形配列の場合にダクト内の質量流量に対応している。

Eq.(1) から、対数平均ヌセルト数 Nu_{lm} は、

$$Nu_{lm} = \frac{h_{lm} d_o}{k} = \frac{Gz}{\pi} \ln \frac{t_0 - t_w}{t_l - t_w} \quad (2)$$

ここで、 Gz は次式で定義したグレッツ数である。

[†] 1988年7月28日受理

^{††} 〒 812 福岡市東区箱崎 6-10-1

* 九州大学大学院 熱エネルギーシステム工学専攻

Fig. 1 Schematic of flow configuration
(a): triangular array (b): square array

$$Gz = wc_p / (kl) \quad (3)$$

c_p, k は平均的なバルク温度 $t_b = (t_0 + t_l)/2$ で算定した。温度依存性の大きい μ の変化 (速度分布の変形) が熱伝達に及ぼす影響については、 t_w と t_b で算定した粘度比 (μ_w / μ_b) を用い、ヌセルト数に補正を施すことにした。なお、作動液であるエチレングリコールに対するこれらの物性値 $c_p, k, \mu (= \rho \nu, \nu$ は動粘度) と温度 t' [$^{\circ}\text{C}$], t [K] の関係は、最小自乗法を適用して文献値 ($c_p^{1,5,9}$) $k^{6,8,10}$, $\rho^{1,4}$, ν^{11}) から導いた次式を用いて算出した。

$$c_p [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] = 2292 + 4.74 t' \quad (4)$$

$$k [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] = 0.255 + 0.00011 t' \quad (5)$$

$$\rho [\text{kg}/\text{m}^3] = 1128 - 0.697 t' + 0.0002 t'^2 \quad (6)$$

$$\nu [\text{m}^2/\text{s}] = \exp(-10.10 - 4.411 \times 10^3 t'^{-1} + 1.229 \times 10^6 t'^{-2}) \quad (7)$$

本実験範囲で、ジャケット内での冷却水の温度上昇が 0.54K 以下になる程度に冷却水流量は大きく、冷却水側の熱伝達係数 h_c は作動液側のそれに比べて大きいので、壁面温度 t_w は冷却水のバルク温度 $t_{c,b}$ に近いが、若干の相違を考慮するため、次式から t_w を近似的に算出した。

$$t_w = t_{c,b} + \frac{Q}{\pi(d_o - 2\delta)l} \left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta}{k_d} \cdot \frac{d_o - 2\delta}{d_o - \delta} \right) \quad (8)$$

ここで、 δ はダクトの肉厚、 k_d はダクトの熱伝導度で、 h_c は円管内乱流熱伝達に対する Sieder-Tate⁷⁾ の式にジャケット内の伝熱学的相当直径を用いて算出した。ちなみに、本実験範囲内で、Eq.(8) による温度補正 ($t_w - t_{c,b}$) と作動液側の伝熱推進対数平均温度差 Δt_{lm} の比は、

$$(t_w - t_{c,b}) / \Delta t_{lm} < 0.094 \quad (9)$$

で表されるように十分小さく、冷却水側の伝熱抵抗は実験の整理結果に大きく影響を与えるものではない。

実験結果

Figs. 4, 5 の上方の図に、それぞれ三角形配列 [TA], 正方形配列 [SA] の場合の対数平均ヌセルト数 Nu_{lm} とグレッツ数 Gz の関係に対する実験結果を記号で、前報^{2,3)} で得た数値解析結果を実線で、その結果から導いた円柱間隔が狭い場合に適用できる次の近似式を破線で示した。

$$Nu_{lm} = 9.26(1 + 0.0179 Gz^{1.46})^{1/4} [\text{TA}] \quad (10)$$

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 3 Cross-sectional view of heat transfer region
(a): triangular array (b): square array

$$Nu_{lm} = 4.08(1 + 0.0349 Gz^{1.46})^{1/4} [\text{SA}] \quad (11)$$

Eqs. (10), (11) は、それぞれ円柱間隔と円柱直径の比で定義した円柱間隔比 $\sigma = 1 \sim 1.1$, $1 \sim 1.2$ の範囲における Nu_{lm} と Gz の平均的な関係を表す。本実験系である $\sigma = 1$ のみについて、前報^{2,3)} の数値解析結果から近似式を新たに導くと、図中に $\times$ 印でその数点を示した次式が得られる。

$$Nu_{lm} = 8.92(1 + 0.0143 Gz^{1.46})^{1/4} [\text{TA}] \quad (12)$$

$$Nu_{lm} = 4.02(1 + 0.0347 Gz^{1.46})^{1/4} [\text{SA}] \quad (13)$$

これらの図から実験結果が数値解析結果より小さくなることがわかる。これは、冷却されるダクト壁近傍において、液の粘度の増大に伴って速度が低下することに起因するものと考えられる。そこで、前述の粘度の比の補正 (μ_w / μ_b)ⁿ を Nu_{lm} に施すと、Figs. 4, 5 の下方の図に示したように、Sieder-Tate が円管の場合に導いた補正⁷⁾ と

Fig. 4 Comparison of experimental data with numerical solution and approximate expressions for triangular array

Fig. 5 Comparison of experimental data with numerical solution and approximate expressions for square array

同一の指数 $n=0.14$ において実験結果が数値解析結果と良好に一致している。

短い管と長い管の場合および作動液が上昇流と下降流の場合において、実験結果に識別できる系統的な相違が見られないのは、本実験装置および実験範囲で、端効果および自然対流の影響が殆どないことを表している。

おわりに

円柱群が接触した状態を模擬し、三角形配列 [TA] および正方形配列 [SA] の一様壁面温度の円柱群と、その間隙を軸方向に流れる流体との間の層流熱伝達について実験的研究を行った結果、一様壁面温度の円管内熱伝達に対して Sieder-Tate が導いた流体の粘度変化の補正を適用すれば、対数平均ヌセルト数 Nu_{lm} とグレッツ数 Gz の関係に対する前報で得た数値解析結果は実験結果と良好に一致することがわかった。この実験結果は、数値解析結果から導いた円柱間隔が狭い場合の近似式とも妥当に一致するが、円柱群が接触した状態の本実験系に限れば、新たに導いた次の近似式とより良好に一致する。

$$Nu_{lm} = 8.92(1 + 0.0143 Gz^{1.46})^{1/4} (\mu_b / \mu_w)^{0.14} \text{ [TA]}$$

$$Nu_{lm} = 4.02(1 + 0.0347 Gz^{1.46})^{1/4} (\mu_b / \mu_w)^{0.14} \text{ [SA]}$$

Nomenclature

c_p = specific heat of fluid [J/(kg·K)]

d_o = diameter of cylinder [m]

Gz = Graetz number defined by Eq.(3) [-]

h_{lm} = logarithmic mean heat transfer coefficient [W/(m²·K)]

k = thermal conductivity of fluid [W/(m·K)]

k_d = thermal conductivity of duct [W/(m·K)]

l = length of cylinder (heat transfer region) [m]

Nu_{lm} = logarithmic mean Nusselt number defined by Eq.(2) [-]

Q = heat transfer rate per cylinder [W]

t = temperature [K]

t_0 = inlet bulk temperature of fluid [K]

t_l = outlet bulk temperature of fluid [K]

w = mass flow rate of fluid per cylinder [kg/s]

δ = thickness of duct [m]

μ = viscosity of fluid ($= \rho \nu$) [Pa·s]

σ = ratio of spacing between cylinders to diameter of cylinder [-]

<Subscripts>

b = fluid bulk mean

c = cooling water

w = cylinder wall

<Abbreviations>

[SA] = square array

[TA] = triangular array

Literature cited

- 1) Eckert, E.R.G. and R.M. Drake, Jr.: "Heat and Mass Transfer", p. 502, McGraw-Hill, New York (1959)
- 2) Miyatake, O. and H. Iwashita: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **12**, 654 (1986)
- 3) Miyatake, O., H. Iwashita and N. Miura: *ibid.*, **14**, 622 (1988)
- 4) Nath, A. and E. Bender: *J. Chem. Eng. Data*, **28**, 370 (1983)
- 5) Nikolaev, P.N. and I.B. Rabinovich: *Russian J. Phys. Chem.*, **41**, 1179 (1967)
- 6) Riedel, L.: *Chem. Ing. Tech.*, **23**, 465 (1951)
- 7) Sieder, E.N. and G.E. Tate: *Ind. Eng. Chem.*, **28**, 1429 (1936)
- 8) Slawewski, T.K. and M.C. Molstad: *ibid.*, **48**, 1100 (1956)
- 9) Stephens, M.A. and W.S. Tamplin: *J. Chem. Eng. Data*, **24**, 81 (1979)
- 10) Vanderkool, W.N., D.L. Hildenbrand and D.R. Stull: *ibid.*, **12**, 377 (1967)

Experimental Study of Laminar Heat Transfer in Axial Fluid Flow through Closely-Packed Triangular and Square Arrays of Cylinders

Osamu Miyatake, Hiroyuki Iwashita* and Shuji Yamamoto*

Dept. of Chem. Eng., Kyushu Univ., Fukuoka 812

Key Words : Heat Transfer, Experimental Data, Graetz-Nusselt Problem, Nusselt Number, Cylinder, Rod Bundle, Square Array, Triangular Array, Forced Convection, Axial Laminar Flow

Rates of laminar heat transfer in axial fluid flow through triangular and square arrays of cylinders were investigated experimentally for the case of cylinders in contact with one another.

The experiments were conducted by using ducts of the same cross sections formed by both arrays of contacting cylinders, and the boundary condition of uniform temperature at the cylinder wall was substantially achieved.

Reasonable agreement was found between the logarithmic mean Nusselt numbers obtained from the experiments and those predicted by the authors' previous numerical solutions when a Sieder-Tate type of viscosity ratio correction was applied to account for the effect of variation in fluid viscosity.

* Thermal Energy System, Graduate School, Kyushu Univ.