ハイフィンチューブ千鳥配列の熱伝達率整理式について*

橋 詰 健 —*1

Heat Transfer Correlations for High-Finned Tubes
in Staggered Arrangement

Kenichi HASHIZUME

Existing correlations are reviewed for heat transfer of high-finned tubes in staggered arrangement, and compared with published experimental data. These data include those using tubes for air-coolers (AC) and for heat recovery heat exchangers in the high-temperature region (HRHX). Comparisons showed that none of the correlations can predict experimental data for both AC and for HRHX. Therefore, a new correlation is proposed which can predict almost all data within 10%.

Key Words: Heat Transfer, Forced Convection, Heat Exchanger, Finned Tubes, Correlations

1. 緒 言

ハイフィンチューブは熱交換器の伝熱管として古くから使用されており、その伝熱特性に関する実験的な研究が多くなされてきた。これらの研究は主として空冷熱交換器を対象としたもので、フィン材としてはアルミニウムが多いためにフィン厚さは薄くてフィン高さが高いものが中心であった。ところが近年のコンバインドサイクル発電プラントなど高温ガスからの熱回収を目的とした熱交換器に使用されるハイフィンチューブでは素管、フィン材ともに鉄系の材料となるので、空冷熱交換器に使用されるものに比べてフィン厚さが厚く、フィン高さが低く、フィンピッチも大きくなって、さらに、正三角形配列以外の配列も採用されるようになってきた。このような高温ガスを対象としたハイフィンチューブ(以下、高温ガス用と略す)の特性に関する研究はいまだ少なく、その特性が空冷熱交換器を対象としたもの(以下、空冷熱交用と略す)と比較検討した研究は見当たらない。近年になって河村ら⁽¹⁾は高温ガス用のハイフィンチューブを用いた実験を行

い、フィン形状や配列が伝熱特性に及ぼす影響を系統的に調べて熱伝達整理式を作成したが、この整理式が空冷熱交用のハイフィンチューブにも適用できるかについての検討はなされていない。本報ではいくつかの代表的な熱伝達整理式を高温ガス用、ならびに空冷熱交用の実験データと比較し、さらに、この双方に適用できる新しい整理式を作成する。

記 号

d_e : 等価直径 $= \sqrt{t(d_f^2 - d_o^2)/p + d_o^2}$

d_f : フィン外径 $= d_o + 2h$

d_o : 素管外径

G_m : 最小流路断面における質量流速

h : フィン高さ

Nu : ヌセルト数 $= ad_o/\lambda$

Pr : プラントル数

P_d : 対角方向の管配列ピッチ

P_l : 流れ方向の管配列ピッチ

P_t : 流れ直角方向の管配列ピッチ

p : フィンピッチ

Re : レイノルズ数 $= G_md_o/\mu$

s : フィン間距離 $= p - t$

* 原稿受付 1994 年 12 月 15 日。

*1 正員、広島工業大学工学部 (〒731-51 広島市佐伯区三宅 2-1-1)。

表 1 熱伝達率の整理式

C	K_G	K_A	m	n
Kawamura et al. [1]				
0.105	$(d_e/d_o)^{-0.285} (h/s)^{-0.3}$	$\{P_d/(P_d-d_e)\}^{0.85}$	0.715	1/3
Briggs and Young [3]				
0.1378	$(h/s)^{-0.296}$	-	0.718	1/3
Gianolio and Cuti [4]				
0.287	$(t/s)^{0.25} (h/s)^{-0.37}$	-	0.7	0.33
Heat Exchanger Design Handbook [5]				
a: 0.19	$(p/d_o)^{0.18} (h/d_o)^{-0.14}$	$(P_t/P_1)^{0.2}$	0.65	0.33
b: 0.05			0.80	0.36
c: 0.008			0.95	0.36
a: $Re < 2 \times 10^4$, b: $2 \times 10^4 < Re < 2 \times 10^5$, c: $2 \times 10^5 < Re$				

t: フィン厚さ

α: 熱伝達率

μ: 粘性係数

λ: 熱伝導率

2. 従来の熱伝達率整理式と実験データ

ハイフィンチューブ管群(千鳥配列)の熱伝達については多くの整理式が作成されている⁽²⁾が、それらは一般に次の形にまとめられている。

$$Nu = CK_G K_A Re^m Pr^n \dots\dots\dots (1)$$

ここで、C は定数、 K_G はチューブの形状の影響を表す項、 K_A はチューブの配列の影響を表す項で、代表的な整理式におけるこれらの項の内容と値を表1に示す。

これら整理式と比較する実験データとしては高温ガス用については河村ら⁽¹⁾、空冷熱交用についてはBriggs-Young⁽³⁾と Gianolio-Cuti⁽⁴⁾がある。これらの実験条件を表2にまとめて示すが、いずれも生データが表の形では与えられていないので以下の比較においてはそれぞれの条件におけるレイノルズ数の範囲を原著論文の図から読み取り、表1に示したそれぞれの整理式からヌセルト数を算出した。なお、ここで比較に用いる実験データは段数の影響をほとんど受けないとされている五段以上の管群を用いたものに限定した。

3. 実験データとの比較と新しい整理式

図1は河村らの整理式と空冷熱交用の実験データとの比較で、実験値と計算値との比は図1の横軸と明白な相関がみられる。実験データの大部分はこの整理式の適用範囲を超えているが、適用範囲内の2点の実験データでも計算値より17~36%も低い値となってお

表 2 実験条件

Bank No.	d _o [mm]	h [mm]	t [mm]	p [mm]	P _t [mm]	P ₁ [mm]	
Kawamura et al. [1]							
1	45.0	19.0	1.4	6.35	105	115	
2				12.7			
3				6.35			
4	38.1	16.0	1.2		96	90	
5							
6				13.3			5.08
7	13.5	1.0	4.06	90	100		
8	31.8	13.0	5.08				
9		13.3	1.2			4.06	
10		13.0	1.0	5.08			
11	16.0	1.2	5.08	100	100		
12	45.0	12.7	0.8			3.39	100
13	31.8	9.7				90	80
14		10.0		6.35	64	49	
15		45.0	15.0		74	65	
16	90				70		
Briggs and Young [3]							
21	29.1	14.7	0.43	3.18	62.3	Et	
22	23.6	13.2	0.52	2.59	57.2		
23	24.1	16.6	0.55	2.63	62.3		
24	40.9	14.5	0.46	3.22	71.5		
25	27.8	11.8	0.43	2.82	55.7		
26	26.2	12.3	0.33	2.52			
Gianolio and Cuti [4]							
31	25.4	15.9	0.45	2.82	60.3	Et	
32		16.3	0.41	2.31	76.2		
33		16.3	0.41	2.31	60.3		
34	38.1	15.2	0.52	2.82	76.2		

Et: Equilateral-triangular

り、この整理式には河村らによって与えられた適用範囲のほかにも条件がありそうである。

図2(a)はBriggs-Youngの整理式と他の実験データとの比較で、空冷熱交用の実験データとはよく一致しているが高温ガス用については実験データが最大

Symbols for Figs.1 through 3

- : Kawamura et al. [1]
 △ : Briggs and Young [3]
 □ : Gianolio and Cuti [4]
 ←→ : Applicable range

図1 河村らの整理式との比較

- (a) Comparison with Briggs and Young [3]
 (b) Comparison with Gianolio and Cuti [4]
 (c) Comparison with HEDH [5]

図2 諸整理式との比較

で56%も高い値となっている。

図2 (b)は Gianolio-Cuti の整理式と他の実験データとの比較で、上記 Briggs-Young と類似の傾向を示している。

図2 (c)は Heat Exchanger Design Handbook (HEDH)の整理式と実験データとの比較で、高温ガス用については実験データが計算値よりもかなり高い値となっているものの、まともには他の整理式よりも良好である。

ところで、表1の K_G をみると HEDH を除く整理式では (h/s) の影響が

$$K_G \propto (h/s)^{-0.296 \sim -0.37} \quad (2)$$

表3 実験範囲(適用範囲)

	Experimental range	HEDH *
Re	$1.9 \times 10^3 - 4.8 \times 10^4$	-
p/d_o	0.074 - 0.28	0.125 - 0.28
h/d_o	0.282 - 0.69	0.125 - 0.59
h/s	1.68 - 8.58	-
P_t/d_o	1.75 - 3.00	2.17 - 4.13
P_1/d_o	1.51 - 3.15	1.27 - 2.14
P_t/P_1	0.90 - 1.16 **	-

* : Recommendation in HEDH

** : Except Bank No.14 and 16

図3 係数 C

図4 河村らの実験データとの比較

の形で含まれており、図2 (c)ではこの傾向が明らかに認められる。そこで、試みとして HEDH の K_G に式 (2)を追加してみる。そして、ヌセルト数のレイノル

図 5 Griggs-Young の実験データとの比較

図 6 Gianolio-Cuti の実験データとの比較

ズ数に対する依存性(指数 m)については河村らおよび Briggs-Young で実質的に一致している指数 $m = 0.715$ が高温ガス用にも空冷熱交用にも成り立つとして

$$C = Nu_{\text{exp}} / \{ (p/d_0)^{0.18} (h/d_0)^{-0.14} (h/s)^{-0.3} \times (P_t/P_l)^{0.2} Re^{0.715} Pr^{1/3} \} \quad (3)$$

として係数 C を求めてみた。その結果が図 3 で、 $C = 0.20$ とすると高温ガス用と空冷熱交用のほとんどすべての実験データが $\pm 10\%$ の範囲内で整理できる。この整理式の適用範囲は表 3 に示す比較に用いた実験データの範囲と思われるが、すべての項で HEDH の推奨適用範囲を超えている。ただし、図 3 において $h/s =$

1.8 と 2.7 の 2 点のデータ(表 2 で Bank No. 14 と 16)は図 2 よりはまだよくなったとはいえ、実験値は計算値よりも 25% ほど大きい。この理由は No. 14 と No. 16 は流れ方向の配列ピッチが正三角形配列よりもさらに小さい($P_t/P_l = 1.29 \sim 1.31 > 1.16$: 正三角形配列)ためと思われ、このような配列についてはさらに検討が必要である。

図 4 は新しい整理式と河村ら、図 5 は Briggs-Young、図 6 は Gianolio-Cuti の実験データとの比較を示す。ただし、表 1 の Bank No. 14 と No. 16 のデータは上記理由から除外している。

4. 結 言

ハイフィンチューブ千鳥配列の代表的な熱伝達整理式として河村ら⁽¹⁾、Briggs-Young⁽³⁾、Gianolio-Cuti⁽⁴⁾、Heat Exchanger Design Handbook⁽⁵⁾ と高温ガス用ならびに空冷熱交用の実験データとを比較していずれの整理式もこれら双方の実験データを精度よく再現することはできないことを示した。さらに、この比較の考察から新しい整理式として

$$\begin{aligned}
 Nu &= 0.20 K_G K_A Re^{0.715} Pr^{1/3}, \\
 K_G &= (p/d_0)^{0.18} (h/d_0)^{-0.14} (h/s)^{-0.3}, \\
 K_A &= (P_t/P_l)^{0.2} \quad \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

を作成し、この整理式が高温ガス用と空冷熱交用の双方のほとんどすべての実験データを $\pm 10\%$ の精度で再現できることを示した。適用範囲は少なくとも比較に用いた実験データの範囲である表 3 の条件と思われるが、さらに広範囲の実験データを収集して適用範囲と再現精度を検証してゆきたい。

文 献

- (1) 河村・ほか 3 名, 機論, 57-537, B(1991), 1752.
- (2) Hashizume, K., *Handbook of Heat and Mass Transfer*, (1986), 747, Gulf Publ., Houston.
- (3) Briggs, D. E. and Young, E. H., *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 41-59(1963), 1.
- (4) Gianolio, E. and Cuti, F., *Heat Transf. Eng.*, 3-1(1981), 38.
- (5) *Heat Exchanger Design Handbook*, (1987), 2.5.3-13, Hemisphere Publ., Washington.