

## セレーテッドフィンのフィン効率

橋 詰 健 一\* ・ 森 川 亮\*\*  
小 山 哲 也\*\*\* ・ 松 江 孝 博\*\*\*\*

(平成12年8月31日受理)

### Fin Efficiency of Serrated Fins

Kenichi HASHIZUME, Ryo MORIKAWA,  
Tetsuya KOYAMA and Takahiro MATSUE

(Received Aug. 31, 2000)

#### Abstract

Fin efficiency of serrated fins was analyzed, and an analytical solution, theoretical fin efficiency, was derived as a function of modified Bessel functions. Furthermore, an approximate equation was given for the theoretical fin efficiency, which enables the calculation with a pocket calculator with an accuracy of  $\pm 1.5\%$ . In the analysis of the theoretical fin efficiency, however, two assumptions were employed, i.e., uniform heat transfer coefficient over the fin surface and thermal insulation at the end surface of segmented sections. To compensate these assumptions, a correction factor was introduced and determined experimentally. Using this correction factor together with the theoretical fin efficiency, the actual fin efficiency can be estimated for serrated fins of various fin geometries, including plain fins.

**Key words:** Heat Conduction, Heat Exchanger, Heat Transfer Enhancement, Fin Efficiency, Analysis, Experiment

#### 1. 緒 言

ハイフィンの先端部に切込みを入れたセレーテッドフィンは延性の低い鉄系の材料でもフィン高さの高いフィンを形成できることから近年になって高温ガスとの熱交換用を中心に使用が拡大してきた。しかしながらセレーテッドフィンは切込み部を持たない通常のプレインフィンに比べて歴史が浅いために種々の形状寸法に対する伝熱性能が把握されているとはいえず、熱交換器への採用検討や設計のための熱伝達率予測式の登場が望まれている。

一般性のある熱伝達率予測式を作成するにはまずは多くの実験データを蓄積しなければならない。しかし実験から直接に得られるデータはフィン効率を含んだ有効熱伝達率であって、これらデータから予測式作成のために必要な実

際の平均熱伝達率を求めるには精度の良いフィン効率の計算法が不可欠である。ところが現状ではセレーテッドフィンのフィン効率計算法が確立されていないので、平均熱伝達率を求めることは難しい。また、たとえ何らかの方法で導かれた熱伝達率予測式が登場したとしても、高温ガス用を選定される鉄系のフィン材では熱伝導率が低いので空冷熱交換器に比べてフィン効率の低い領域で使用することになり、熱交換器の設計においてはフィン効率の見積もりが非常に重要になってくる。

このような背景のもとに筆者らはセレーテッドフィンのフィン効率に関して一連の解析的および実験的な研究を行ない、実用的な寸法形状に適用できるフィン効率計算法を確立した<sup>1)</sup>ので以下に報告する。

\* 広島工業大学工学部知能機械工学科

\*\* 広島工業大学大学院工学研究科機械システム工学専攻(現・株式会社日本製鋼所)

\*\*\* 広島工業大学工学部電気・デジタルシステム工学科

\*\*\*\* 広島工業大学工学部機械システム工学科

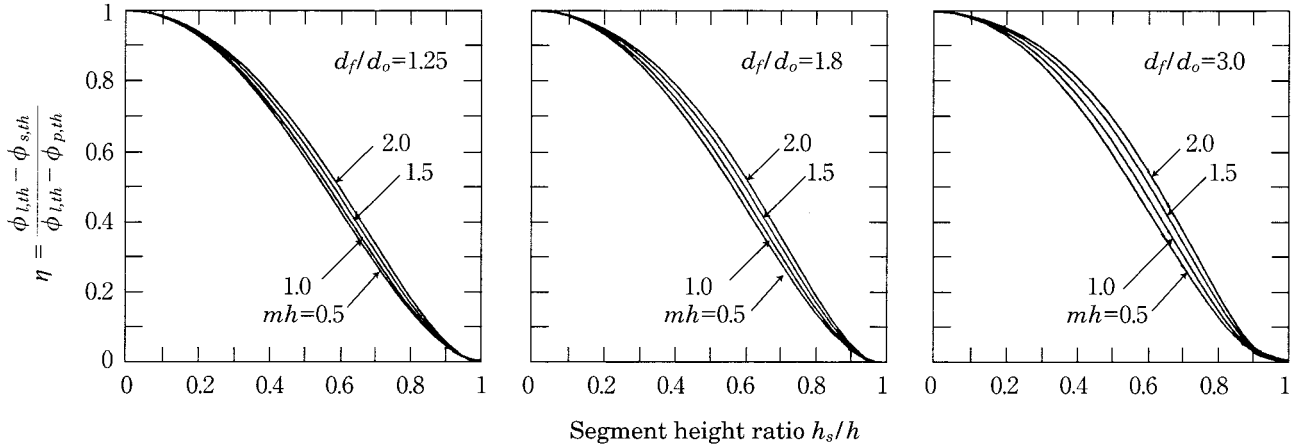


Fig. 3 Theoretical fin efficiency of serrated fin

4. 実際のフィン効率

4.1 理論フィン効率の補正係数

セレーテッドフィンの理論フィン効率は式(8)により求めることができるし、簡単には近似式(17)によることもできるが、この理論フィン効率はフィン表面では熱伝達率が一樣でフィンの端面で断熱、という仮定にもとづいているので、実際のフィン効率  $\phi$  はこの理論フィン効率に補正を加えなければならない。そこでこの補正を次の形

$$\phi = \phi_{s,th} \psi \cong \phi_{s,a} \psi \tag{18}$$

で表わして、補正係数  $\psi$  を実験から求めることにする。

4.2 実験

室内空気を吸込む開放型風洞の実験装置を図4に示す。この風洞の試験ダクト部には図5に示す2列5段のフィンチューブが千鳥配列されている。供試フィンチューブは4段目の1本のみで、他はこれと同一寸法にアクリルで製作したブレインフィンチューブモデルである。供試フィンチューブの形状寸法を表1にまとめて示す。各形状寸法のフィンチューブは銅、鉄、ステンレス鋼の3種類の材料で製作した。この供試フィンチューブの中心部にアルミ鑄込みヒータを挿入し、電気加熱する。フィンの根元部には45°おき8か所に線径0.2mmのT型熱電対が埋め込まれ、フィン根元温度が測定される。この供試フィンチューブを図6のように試験ダクト内に設置し、試験ダクト内の空気平均温度とフィン根元温度からフィン側全表面積を基準とする有効平均熱伝達率  $a_e$  を求めた。図7は有効ヌセルト数  $Nu_e$  の形にした実験結果の一例を示す。

4.3 補正係数の導出

有効平均熱伝達率の実験結果からフィン効率を求めるにはフィンの材質に依存しない実際の平均熱伝達率  $a_e$  を知

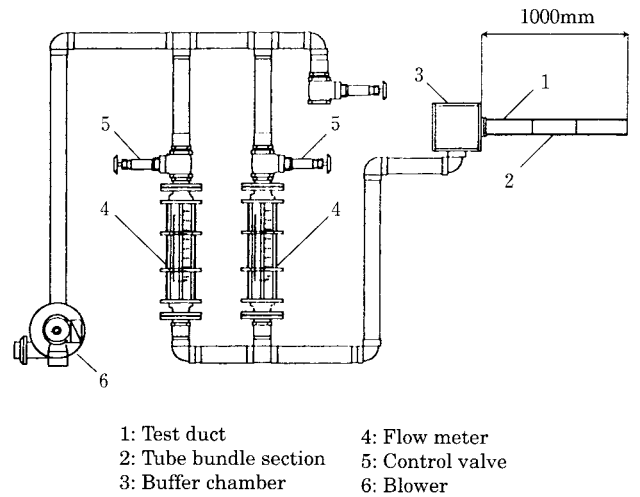


Fig. 4 Experimental apparatus

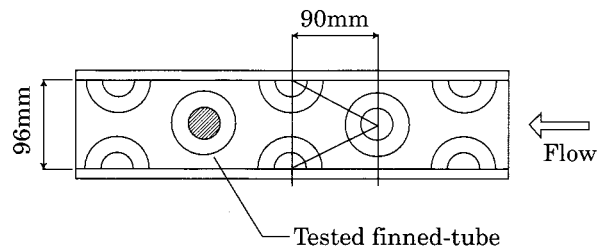


Fig. 5 Tube bundle section

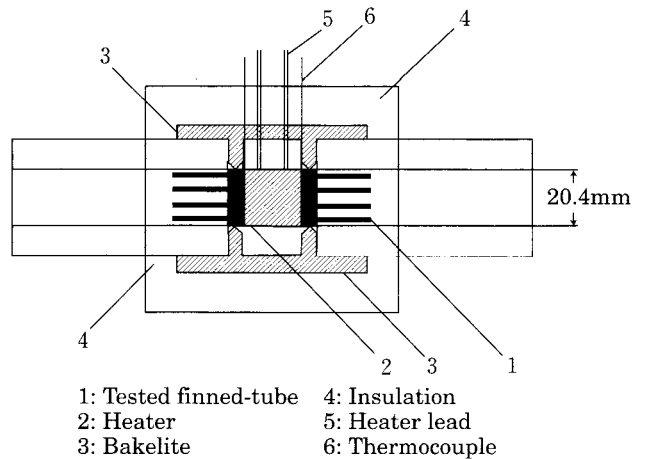
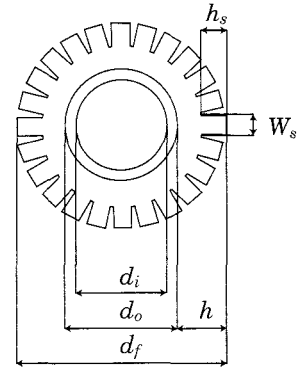


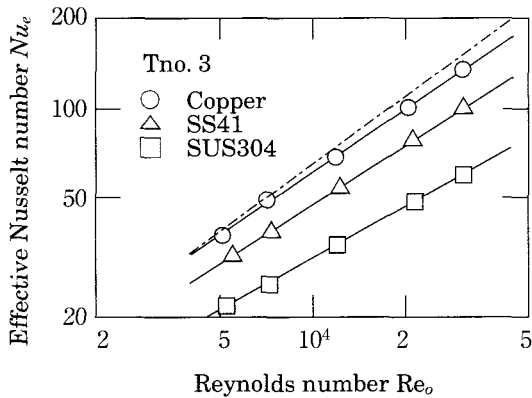
Fig. 6 Tested tube in test duct

**Table 1** Tested finned-tube

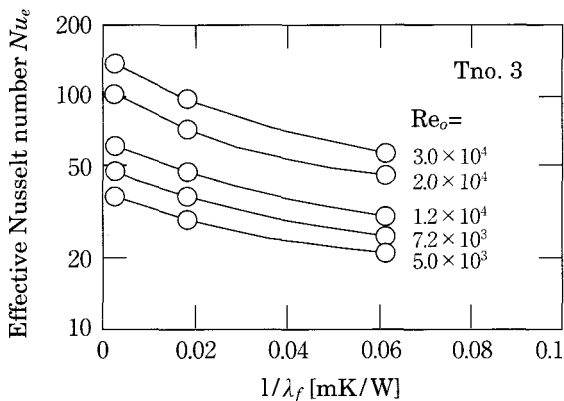
Test tube no.		$h_s$	$W_s$	$d_f$	$d_o$	$d_i$	$t$	$p$
Plain	Tno. 1	0	0	68.5	31.8	20.0	1.0	5.1
Serrated	Tno. 2	8.0	12.0					
	Tno. 3	8.0	6.0					
	Tno. 4	13.0	5.0					
Plain	Tno. 5	0	0		38.1	30.0		
Serrated	Tno. 6	8.0	12.0					
	Tno. 7	8.0	6.0					



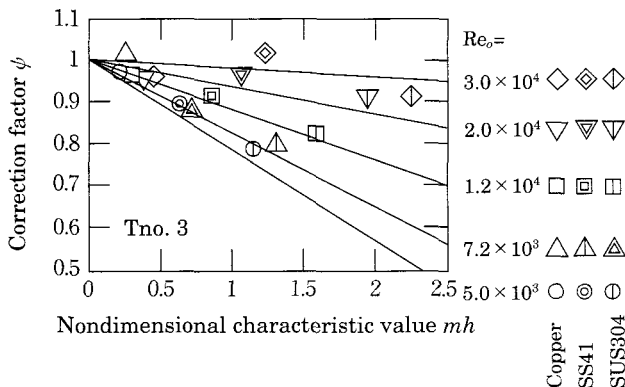
Unit: [mm]



**Fig. 7** Result of effective heat transfer coefficient



**Fig. 8** Extrapolation of average heat transfer coefficient



**Fig. 9** Result of correction factor

らねばならないので、まず図7から適当なレイノルズ数に対する有効ヌセルト数の値を読み取ってこの値を縦軸に、フィン材の熱伝導率  $\lambda_f$  の逆数を横軸にとった片対数グラフ上に図8のように表示した。そして各レイノルズ数に対する有効ヌセルト数の値を結ぶ線を横軸の値がゼロになるまで外挿して、即ち  $\lambda_f \rightarrow \infty$  に対する値として実際の平均熱伝達率を求めた。この値がフィン効率100%の時の実際の平均熱伝達率に対応する平均ヌセルト数  $Nu_o$  になる。図7中にはこのようにして求めた平均ヌセルト数の値を一点鎖線で示してある。

平均ヌセルト数がわかれば有効ヌセルト数の各実験点についての実際のフィン効率は次式により計算できる。

$$\phi = 1 - (A_f/A_s)(1 - Nu_o/Nu_e) \quad (19)$$

ここで  $A_f$  はフィン側の全表面積、 $A_s$  は素管部を除いたフィンだけの表面積である。そして求めた実際のフィン効率  $\phi$  と式(8)による理論フィン効率  $\phi_{s,th}$  とから式(18)による補正係数  $\psi$  を算出した結果の一例が図9である。すべての供試フィンチューブについて同様の計算を行なった結果、最終的に次の整理式を得た。

$$\psi = 1 - [0.016(h_s/W_s) + 0.14(d_f/d_o)^{2.7}(1 - 0.097 \ln Re_o)]mh \quad (20)$$

理論フィン効率の式(8)とこの補正係数を用いたフィン効率の計算値はプレーンフィンを含む全供試フィンチューブの実験値と  $\pm 5\%$  の精度で一致した。

### 5. 結 言

セレーテッドフィンをモデル化してフィン効率の解析を行ない解析解(理論フィン効率)として式(8)を導いた。この解析解は Bessel 関数の関数で計算が煩雑なので、電卓だけで理論フィン効率を  $\pm 1.5\%$  の精度で計算できる近似式(17)も作成した。これらの式で求まる理論フィン効率はフィン表面で熱伝達率が一樣、フィン端面で断熱、というふたつの仮定にもとづいているので、これら仮定を補正

する補正係数を実験により求め、補正係数の整理式(20)を決定した。ここで述べた方法によればプレインフィンを含むセレーテッドフィンの実際のフィン効率を容易に計算することができる。

以上をまとめると、プレインフィンを含むセレーテッドフィンのフィン効率は次の手順で求めることができる(プレインフィンに対しては以下の式で  $h_s=0$  とおく)。

$$m = \sqrt{\frac{2a_o}{\lambda_f t}}$$

$$\phi_{l,th} = \frac{\tanh(mh)}{mh}$$

$$h_e = h[1 + 0.35 \ln(d_f/d_o)]$$

$$\phi_{p,Sch} = \frac{\tanh(mh_e)}{mh_e}$$

$$n = 1.6 - 0.094[(mh)(d_f/d_o)]$$

$$\eta = |\cos[(\pi/2)(h_s/h)]|^n$$

$$\phi_{s,a} = \phi_{l,th} - \eta(\phi_{l,th} - \phi_{p,Sch})$$

$$\psi = 1 - [0.016(h_s/W_s) + 0.14(d_f/d_o)^{2.7}(1 - 0.097 \ln Re_o)]mh$$

$$\phi = \phi_{s,a}\psi$$

本方法の適用範囲は次のとおりである。

- チューブ配列 : 千鳥配列
- フィン外径比 :  $1.80 \leq (d_f/d_o) \leq 2.15$
- セグメント高さ比 :  $0 \leq (h_s/h) \leq 0.86$
- セグメント部のアスペクト比 :  $0 \leq (h_s/W_s) \leq 2.60$
- レイノルズ数 :  $5 \times 10^3 \leq Re_o \leq 5 \times 10^4$
- 無次元特性数 :  $0 \leq (mh) \leq 2.5$
- 補正係数  $\psi \leq 1$  ( $\psi \geq 1$  の時は  $\psi = 1$  とする)

記 号

- $A_f$  : フィンの表面積
- $A_c$  : 素管部を含むフィン側全表面積
- $d_f$  : フィン外径 =  $2r_2$
- $d_o$  : フィン根元直径 =  $2r_0$
- $h$  : フィン高さ =  $r_2 - r_0$
- $h_s$  : セグメント高さ =  $r_2 - r_1$
- $I_n(z)$  : 第1種変形 Bessel 関数
- $K_n(z)$  : 第2種変形 Bessel 関数
- $m$  : 特性数 =  $\sqrt{2a_o/(\lambda_f t)}$

- $Nu_e$  : 有効ヌセルト数 =  $a_c d_o / \lambda_a$
- $Nu_o$  : 平均ヌセルト数 =  $a_o d_o / \lambda_a$
- $p$  : フィンピッチ
- $Re_o$  : レイノルズ数 =  $u_m d_o / \nu_a$
- $r_0$  : フィン根元半径
- $r_1$  : セグメント部根元半径
- $r_2$  : フィン外半径
- $t$  : フィン厚さ
- $u_m$  : 最小流路断面における流速
- $W_s$  : セグメント幅
- $a_c$  : フィン側全表面積基準の有効平均熱伝達率
- $a_o$  : フィン側全表面積基準の実際の平均熱伝達率
- $\theta$  : フィンと周囲流体(空気)との温度差
- $\lambda_a$  : 周囲流体(空気)の熱伝導率
- $\lambda_f$  : フィン材の熱伝導率
- $\nu_a$  : 周囲流体(空気)の動粘性係数
- $\phi$  : 実際のフィン効率
- $\phi_{l,th}$  : 直線フィンの理論フィン効率
- $\phi_{p,Sch}$  : Schmidt の近似によるプレインフィンの理論フィン効率
- $\phi_{p,th}$  : プレインフィンの理論フィン効率
- $\phi_{s,a}$  : 近似式によるセレーテッドフィンの理論フィン効率
- $\phi_{s,th}$  : 解析解によるセレーテッドフィンの理論フィン効率
- $\psi$  : 理論フィン効率に対する補正係数

文 献

- 1) 橋詰健一・松江孝博・小山哲也, セレーテッドフィンのフィン効率(第1報), 日本機械学会論文集(B編), 63-616 (1997), 4029-4035
- 2) 橋詰健一・森川 亮・松江孝博・小山哲也, セレーテッドフィンのフィン効率(第2報), 日本機械学会論文集(B編), 65-632 (1999), 1498-1501
- 3) 橋詰健一・森川 亮・松江孝博・小山哲也, セレーテッドフィンのフィン効率(第3報), 日本機械学会論文集(B編), 66-648 (2000), 2125-2132
- 4) Gardner, K.A., Efficiency of Extended Surface, Trans. ASME, (1945), 621-631
- 5) Schmidt, Th.E., Verbesserte Methoden zur Bestimmung des Wärmeaustausches an berippten Flächen, Kältetech.-Klimatis., 18-4 (1966), 135-138