

フィン付管群の熱伝達

福 井 資 夫*

Heat Transfer on Banks of Finned Tubes

Sukeo FUKUI

This research is conducted in order to obtain a compact and low cost heat exchanger.

The measurement of the heat transfer rate on banks of finned tubes is carried out. The effect of the longitudinal tube spacing and the transverse tube spacing to the heat transfer rate is tested for arrangement of “staggerd” and “in line”.

And a simple correlation method between the rate of heat transfer of tube banks and the transverse tube spacing is confirmed.

1. 緒 言

熱交換器については従来いろいろな研究が行われ実験結果が発表されている。然しその形式、種類等が非常に多く設計を行う場合に利用しにくいことがある。特にフィン付管群の熱伝達については実験も少ない。

本研究は熱交換器の性能向上を目的としてフィン付管群の熱伝達について管群の配列、流れに平行方向の列間ピッチ、流れに直角方向の段間ピッチの影響について実験を行った。併せて段間ピッチの影響について一つの整理方法を示した。

2. 実験装置と方法

実験ははじめに基本形として平滑管の管群について行い、次に管径に比較してフィン高さの低いロウフィン管群を更に管径に比較してフィンの高いハイフィン管群について行った。

2-1 平滑管群

風速の可変な風洞の出口に、模擬熱交換器を取付け、直角に空気を流す。模擬熱交換器は平滑円管の管群で構成し管の配列ピッチおよび風速を種々変化させる。ダクトの構成を図1に示す。管群中5本の測定用円管は直径25mm長さ160mmの銅管の内部にニクロム線ヒーターを挿入し管群の他の銅管も同一寸法のものを使用する。表面温度は銅コンスタンタン熱電対を用いて測定し軸方向の熱損失を防ぎ円管円周方向のみに放熱するように銅管の両端に銅管と同一径のベークライ

* 機械工学科

ト製の円管を取り付ける。その断面を図2に示す。

管と管の間を通る流速は1～40 m/s 管の流れに直角方向のピッチ即ち段間ピッチは32, 37, 50, 75mmに変化する。管の配列は流れの方向に1～5列流れに直角方向に3～7段でごばん目とちどりの2種類である。それぞれについて測定用円管の表面温度、ヒーターを流れる電流電圧を測定し熱伝達率を計算により求める。

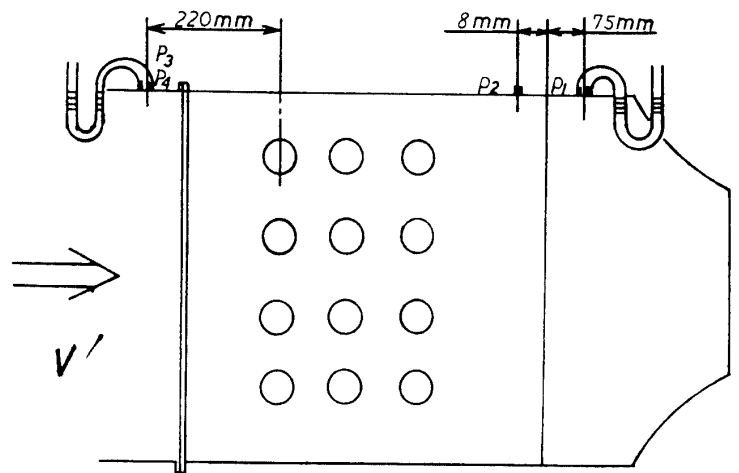
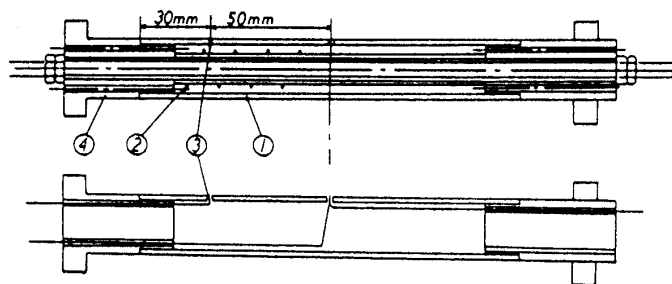


図1 模擬熱交換器のダクト



①銅製円管 ②ヒーター
③熱電対 ④ベークライト

図2 測定用円管

2-2 ロウフィン管群

ロウフィン管群では管群中3本の測定用銅管を用いフィン外径35.92mmフィン底の径は29mmでフィン断面は正三角形でピッチは4mmである。

管と管の間を通る流速は1.3～36m/s 流れに平行な列間ピッチ (P_L) は37, 46, 55, 74mmに変化し流れに直角な段間ピッチ (P_T) も同じ寸法で4種類

とする。管の配列は流れ方向に3列、流れに直角方向に3～6段でごばん目、ちどりの2種類である。

2-3 ハイフィン管群

模擬熱交換器管を構成するハイフィン管は銅製ハイフィン管部分が長さ160mmで半径方向のみ放熱され軸方向は熱的絶縁をするために両端にガラスウールをつめベークライト製のフィン付き保護管を持ち全体では200mmの長さである。放熱管となる銅製のハイフィン管はピッチ4mmで40山としフィンの外径57mm谷径30mm内径24mmでその内部に熱源として直径8mmのガラス管外周にコイル状に巻かれた全長2.0mのニクロム線を挿入して電氣的に加熱出来るようになっている。図3にその断面を示す。管と管の間を流れる流速は3～20m/s 流れに平行な列間ピッチは、58, 67, 77, 116mmに変化し段間ピッチも同じ寸法で4種類である。管の配列は流れの方向に3列、流れに直角方向に2～4段でごばん目とちどりの2種類がある。

3. 実験結果

3-1 平滑管群

平滑管群についてレイノルズ数 $Re = 2 \times 10^3 \sim 7 \times 10^4$ の範囲で熱伝達の実験を行い主として段間ピッチを変化してその影響を調べた。

5列管群の平均熱伝達率は流速の0.6乗に比例して上昇し段間ピッチが大きくなるにつれて熱伝達率も大きくなる。

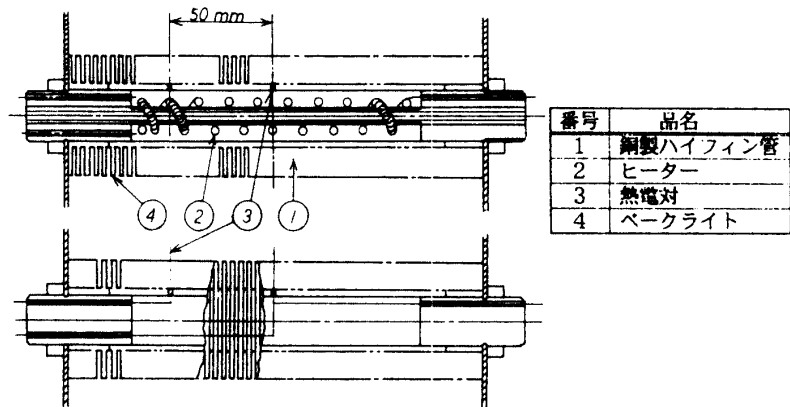


図3 測定用ハイフィン管

3-1-1 5列管群の平均熱伝達率について

平均熱伝達率 α_m を次式で示す。

$$Nu_m = C Re^n Pr^{0.3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで Nu_m は平均ヌセルト数 $= \alpha_m d / \lambda$ 、 α_m は管群の平均熱伝達率 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ 、 Re はレイノルズ数 $= V_{max} d / \nu$ で d は円管の直径 m 、 λ は気体の熱伝導率 $W/m \cdot ^\circ C$ 、 V_{max} は管間の最大速度 m/s 、 ν は気体の動粘性係数 m^2/s である。 C は定数、 n は冪数である。

3-1-2 段間ピッチの影響

段間ピッチを32mmから75mmまで4通りに変えてレイノルズ数が 2×10^4 のときの熱伝達率の変化を図4に示す。段間ピッチが大きくなるにつれて熱伝達率は増大する。この傾向はちどりもご

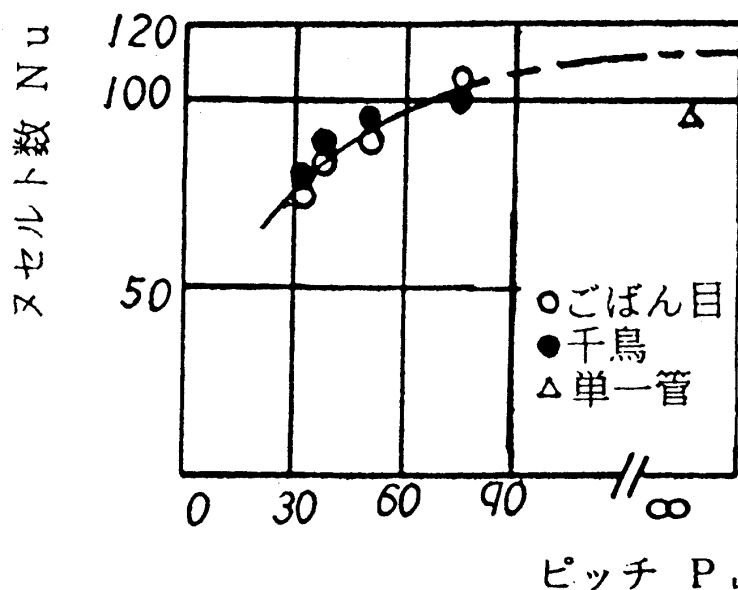


図4 1列目の管の熱伝達率

ばん目も同様である。図の横軸は段間ピッチ (P_i) を示す。

3-2 ロウフィン管群

ロウフィン管3列管群についてレイノルズ数 $Re = 2 \times 10^3 \sim 8.5 \times 10^4$ の範囲で熱伝達の実験を行い列間ピッチと段間ピッチを変化してその影響を調べた。

3-2-1 3列管群の平均熱伝達率について

3列の平均熱伝達率 α_m を次式に示す。

$$Nu_m = C Re^n Pr^{0.3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここでの記号は(1)式と同じである

が、 d はロウフィン管のフィン先端の外径を用いる。図5はごばん目配列で平均ヌセルト数とレイノルズ数の関係を示し $n = 0.45 \sim 0.75$ 、 C はピッチによって異なるが $C = 0.086 \sim 0.14$ である。

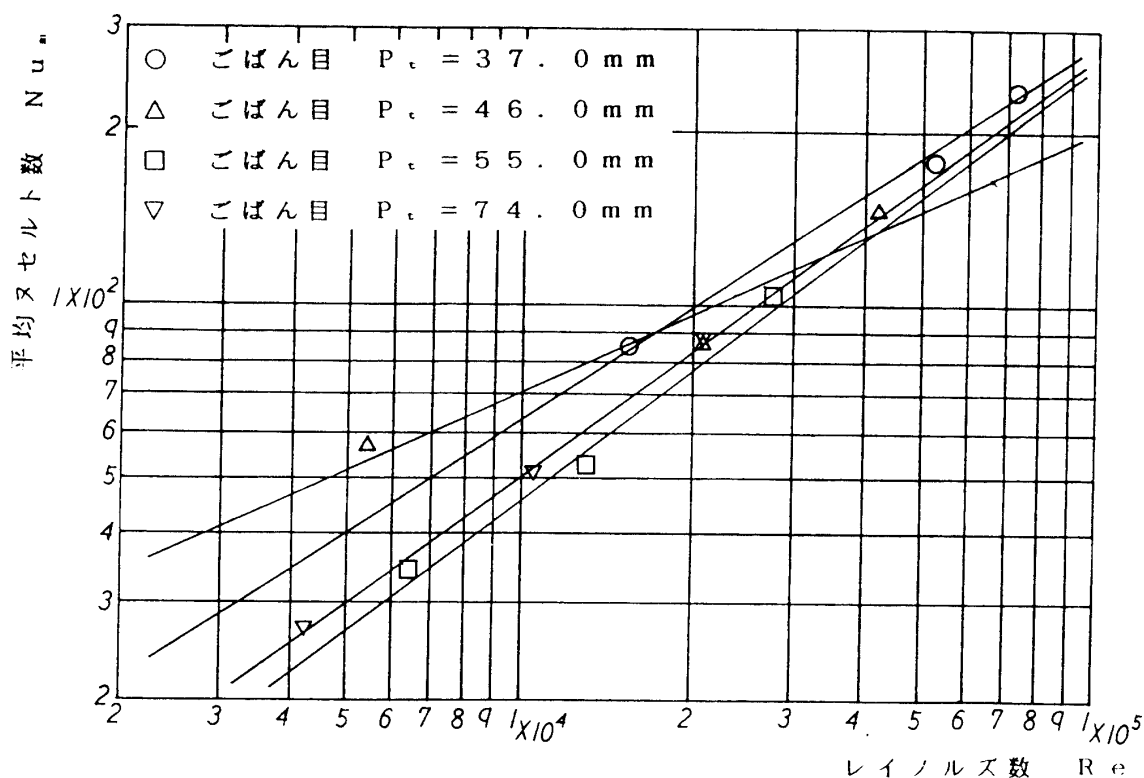


図5 ロウフィン管3列の平均熱伝達率（ごばん目）

3-2-2 列間ピッチの影響

レイノルズ数が 5×10^4 のとき列間ピッチを37mmから74mmまで4通り変えて熱伝達率の変化を図6に示す。列間ピッチが大きくなると熱伝達率は約10%ゆるやかに上昇する。しかしごばん目ではピッチが小さいとき極大値がありピッチ46mmのとき熱伝達率が約15%大きい。

3-2-3 段間ピッチの影響

段間ピッチも列間ピッチと同様37mmから74mmまで変えて熱伝達率の変化を図7に示す。レイノルズ数は 2×10^4 である。段間ピッチが大きくなるとちどりでは熱伝達率が約40%上昇する。しかしごばん目では逆に40%減少する。その理由は明らかではないがフィン底部の流れが段間ピッチによって影響をうけることも考えられる。

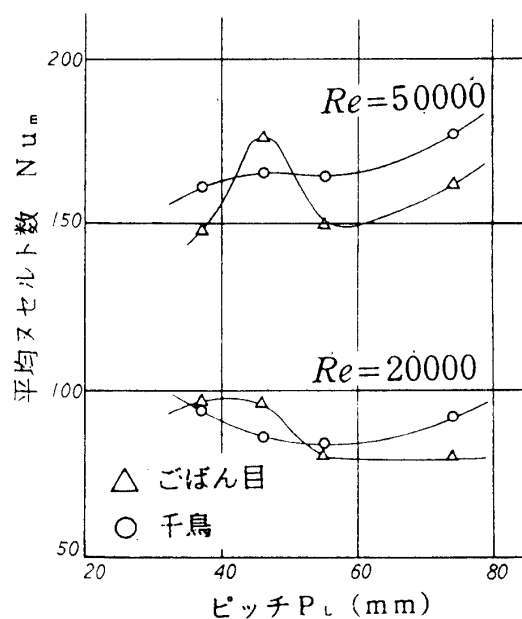


図6 3列平均熱伝達率とピッチ

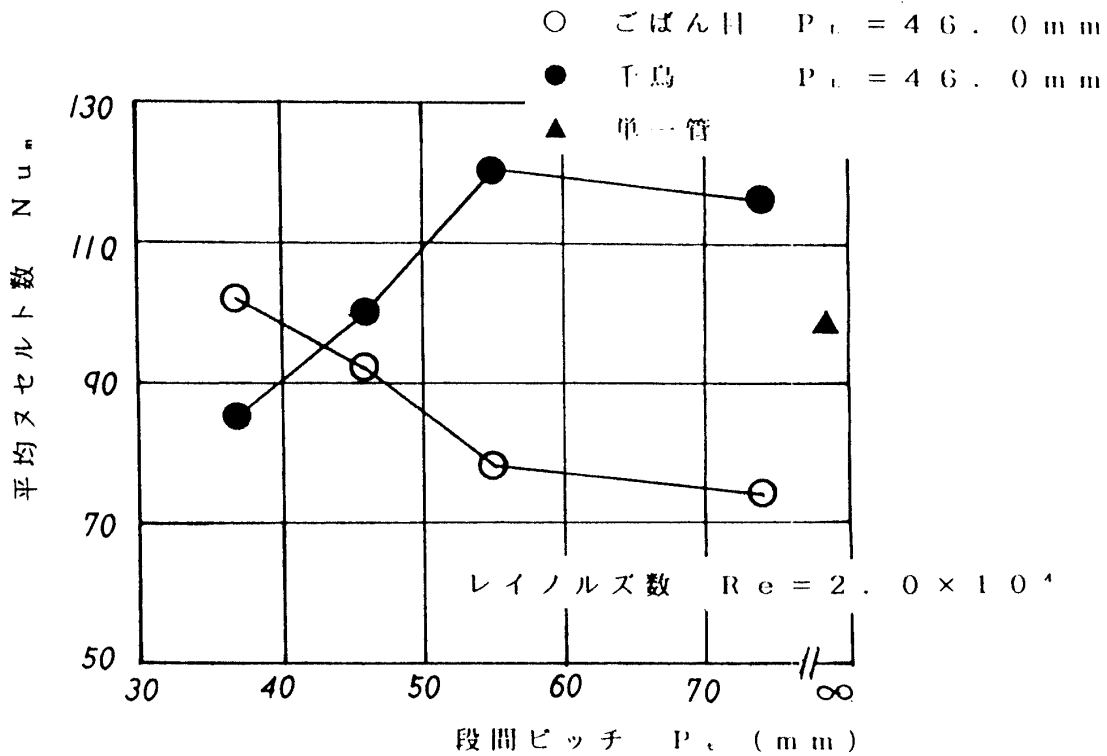


図7 熱伝達率とピッチの関係

3-3 ハイフィン管群

3-3-1 3列管群の平均熱伝達について

管群配列についてごばん目4種類ちどり4種類の計8種類の実験を行った。本実験の結果をま

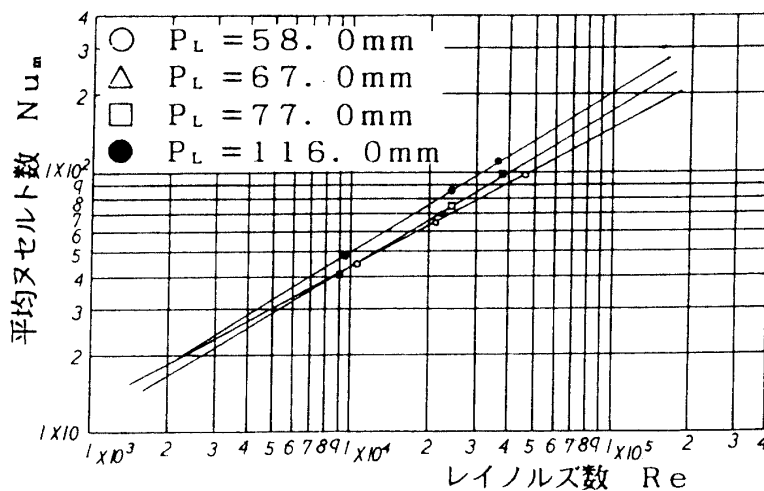


図8 ごばん目配列における3列平均熱伝達率

とめるとごばん目においてヌセルト数 Nu_m とレイノルズ数 Re との関係は $Nu_m \propto Re^{0.5} \sim Re^{0.70}$ でほぼ整理することができる。ちどりにおいては $Nu_m \propto Re^{0.50} \sim Re^{0.75}$ で整理できる。図8はごばん目について示してある。

3-3-2 列間ピッチの影響

ここではレイノルズ数が 1.0×10^4 , 3.0×10^4 のときの3列平均熱伝達率とピッチの関

係をごばん目とちどりについて示す。図9は平均ヌセルト数とピッチの関係を示す。ごばん目配列ではピッチが増すごとに熱伝達率は上昇している。ただ $Re = 1.0 \times 10^4$ のとき上昇割合が小さい。その上昇率は6~15%である。

ちどり配列では隙間の狭い $P_L = 58, 67\text{mm}$ では平均ヌセルト数が高い。ピッチ67mmから77mmにか

けては熱伝達率が下向する。その割合は30～35%程度である。またピッチ77mmから116mmにかけては熱伝達率は上昇しその割合は6～15%程度である。又全体としてごばん目よりちどり配列の方が熱伝達が良い。

3-3-3 段間ピッチの影響

段間ピッチを58, 67, 77, 116mmと変化しその影響を調べた。図10はその結果を示しごばん目ちどり共段間ピッチの増大と共にゆるやかに熱伝達率は上昇している。

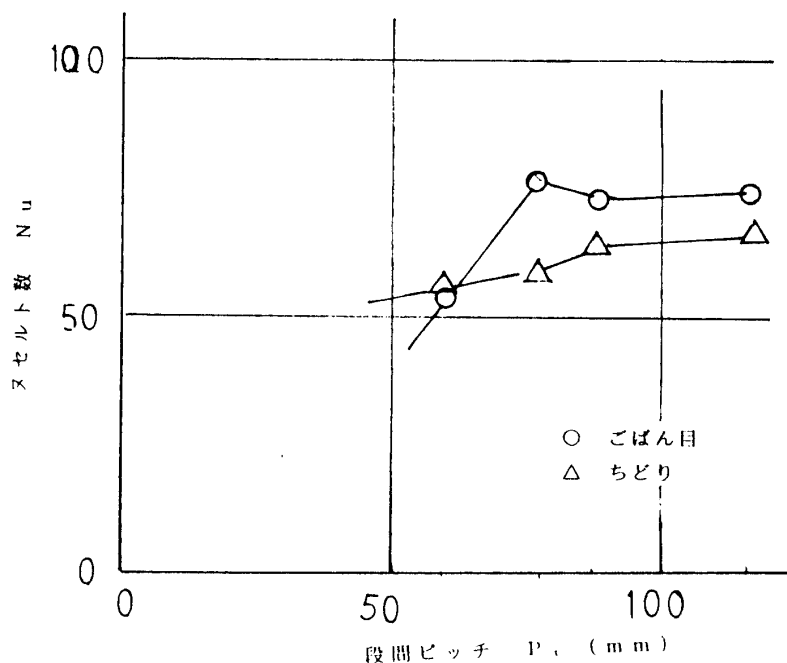


図10 熱伝達率とピッチの関係

4. 段間ピッチの影響について

管群の流れに直角方向のピッチ即ち段間ピッチによって熱伝達率は約40%変化する。従来の研究では個々のケースについて係数をきめて熱伝達率を求めるがここでは解析的に整理する方法について述べる。

4-1 従来の方法

管群の管ピッチの熱伝達率への影響について従来の研究は平滑管のみである。^{1),2)} 平均熱伝達率は次式によって示される。

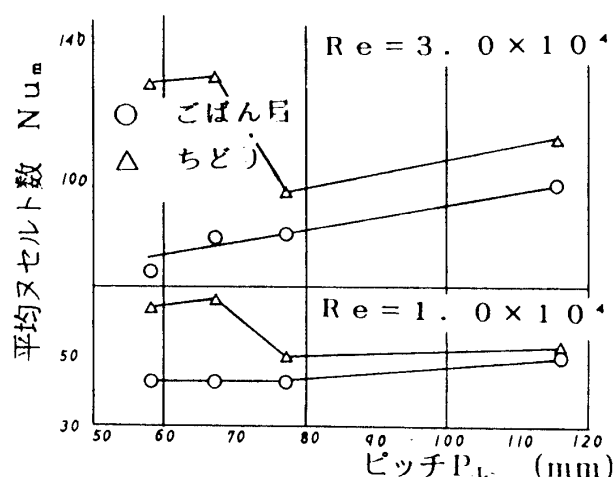


図9 3列平均熱伝達率とピッチの関係

ごばん目の方がその割合が大きい。

3-4 実験値の補正

本実験においてヒーターの発熱量のうち輻射による分は計算により差引いた。その値は小さい。又軸方向熱流によりヒーターの両側の補償用ベークライト製管へ逃げる熱量が実測と計算から求められた。その値は平滑管では約5%で計算により補正を行いフィン付管においてはその値は小さく1～2%で補正を行わない。

$$Nu_m = 0.33C_1 \xi Re^{0.6} Pr^{0.3} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $Nu_m = \alpha_m d / \lambda$, α_m は全管群の平均熱伝達率 d は平滑管の直径 $Re = V_{max} d / \nu$, V_{max} は管間の最大流速, C_1 は管の配列とピッチ直径比 P_t/d , P_L/d (P_t は段間ピッチ, P_L は列間ピッチ) およびレイノルズ数 Re の値によって

図11より求める。

図11はレイノルズ数が8,000, 20,000について C_1 の値を示している。係数 ξ は流れ方向の管列数が10列以上のとき $\xi = 1$ で10列以下のときは0.68～1の間にある。

4-2 一つの整理方法の考え方

図12の如く管群前面の自由空間の流速 V' 管間の最大流速は V_{max} とする。

一本の管の前面では V' が熱伝達を支配し側面の狭いところでは V_{max} が熱伝達を支配する。流速は円管の周囲で V' から V_{max} まで連続的に変化するが簡単のためそれぞれ1/

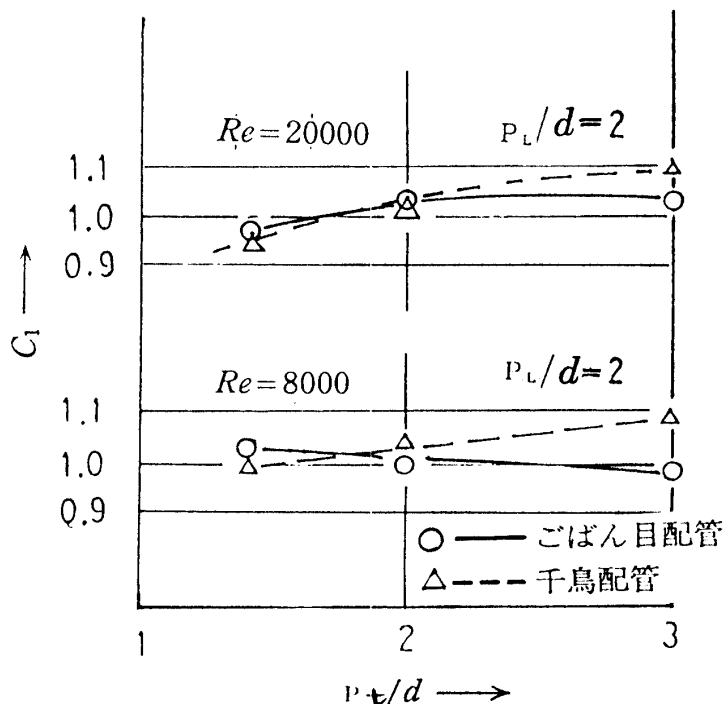


図11 式(3)における係数

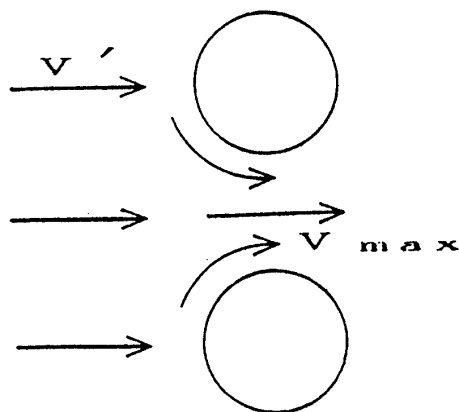


図12 管群の流れ

2づつ支配すると仮定する。従って一本の管について

$$\alpha_e = (\alpha' + \alpha) / 2 \dots\dots\dots (4)$$

になる。ここで α_e は一本の管の平均熱伝達率, α' は管前面の平行流中の管の熱伝達率, α は管間の最大速度をもつ平行流中の管の熱伝達率である。従って一本の管のヌセルト数は

$$Nu_e = \alpha_e d / \lambda = \frac{1}{2} \left\{ C \left(\frac{V'd}{\nu} \right)^n Pr^{0.3} + C \left(\frac{V_{max}d}{\nu} \right)^n Pr^{0.3} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

で表わされ $n = 0.6$ とし管群前面の自由空間の断面積を S' , 管間の狭いところの流路断面積を S_t とすると

$$Nu_e = \frac{1}{2} Nu \left\{ 1 + (S_t/S')^{0.6} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここで Nu は $\alpha d / \lambda$ である。 α は(4)式の定義による。

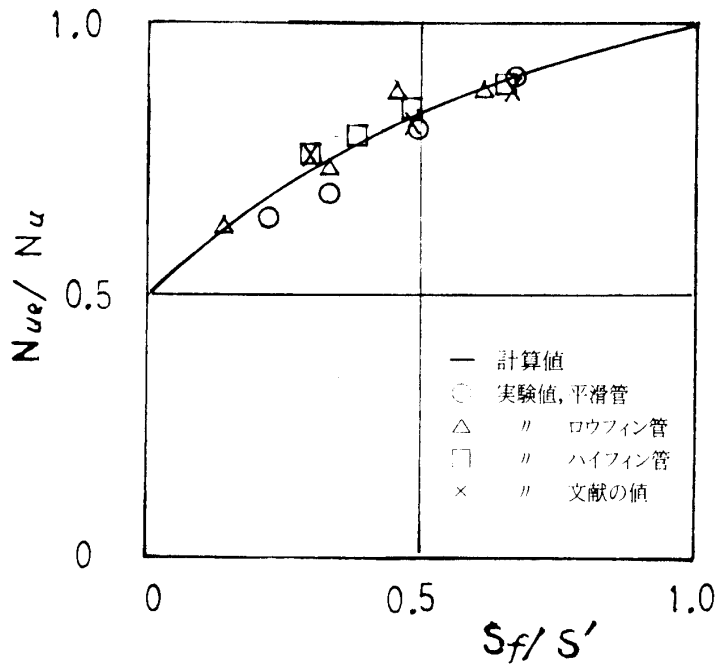


図13 熱伝達率と段間ピッチの関係

図13は横軸に S_f/S' をとり縦軸に Nu_e/Nu をとって段間ピッチの影響を示す。図中の実線は計算値である。

ここで、実測値は S_f/S' が最大のときの Nu_e の値を基準として、それぞれの S_f/S' のときの Nu_e/Nu の値との比を求めてプロットしてある。又従来の文献にある補正係数 C_1 の値を同様の計算により記入してある。いづれも計算値とよい一致を示している。

この整理方法は、かなり広い範囲にわたり段間ピッチの影響を説明出来るが、一部ローフィン管群のごばん目配列等では説明出来ず、なお検討の余地を残している。

5. 結 論

熱交換器の基本形である管群特にフィン付管の管群について空気流中で実験を行い、熱伝達率と流速の関係を示した。又流れに平行方向のピッチと流れに直角方向のピッチの影響について、配列をごばん目とちどりについて実験を行いレイノルズ数の範囲は $2 \times 10^3 \sim 8.5 \times 10^4$ である。

- (1) 流れに平行方向のピッチが増加するとフィン付管群の熱伝達はゆるやかに10～15%増大するがピッチによっては減少することもある。
- (2) 流れに直角方向のピッチが増加するとフィン付管群の熱伝達はちどり配列では40%程度増大する。ごばん目配列では必ずしも増大しない。
- (3) 流れに直角方向のピッチの影響については、管間の狭いところの最大流速と管群前面自由空間の流速による熱伝達率の平均値として表示することで整理出来、裸管フィン付管共レイノルズ数・ピッチの広い範囲にわたり適用出来ることを示した。

参 考 文 献

- 1) Fishenden, M and O.A. Saunders : Introduction to Heat Transfer (1950) 132 Oxford Clarendon Press.
- 2) 谷下市松：伝熱工学 裳華房 (1986)

(平成7年10月26日受理)