

粗面管からなる管群の熱伝達

土田 一・相場 真也

Heat Transfer of Tube Banks Consisted of Tubes with Pyramidal Rough Surface

Hajime TSUCHIDA, Sinya AIBA
(昭和57年10月30日受理)

Heat transfer of tube banks consisted of tubes with pyramidal surface was investigated to obtain a possibility promoting the capability of the tube bank in cross flow of air. Heat transfer rates were measured oncoming the second row of banks schematically varying the roughness height, tube arrangement, tube spacing and Reynolds number Re (based on minimum flow area velocity and tube diameter) ranged from 1.2×10^4 to 8.0×10^4 .

It was found that the heat transfer character changed drastically neighborhood $Re = 4.5 \times 10^4$, independent of roughness height, arrangement style and tube spacing. It was also made clear that heat transfer rate in the separated region was affected little by roughness height.

1. 緒 言

近時、エネルギー問題と関連して熱交換器の性能向上や把握が重要な課題の一つとなってきた。管形熱交換器は構造が簡単なことや保持が容易であることなどから古くから最も多く用いられ、熱交換器の90%を占めている。管形熱交換器にも多くの種類があるが、最近ではフィン付管で構成される場合がきわめて多い。これは、伝熱面積の増加を目的としていることは明らかであるが、圧力損失が裸管からなる場合に比較して増大する。

一方、気流に直交しておかれた粗さを有する単独円管では、粗さを付けない場合よりも熱伝達率が向上し、抵抗も減少する場合があることはよく知られている¹⁾。しかしながら、円管群が粗面管で構成されている場合に関する研究はあまり見受けない。

著者らは、管群の伝熱特性においてレイノルズ数が 10^4 のオーダーの範囲では上流側から第1列めの円管の熱伝達が第2列め以降のそれよりもきわめて悪い^{2) 3)}ことを明らかにした。以上の背景から、管群の性能向上を計るため第1段階として粗面管を基盤目

形管群の第1列めに配し、この円管まわりの熱伝達を改善させ大幅に向上することを示した。⁴⁾本報は、第2列めにも粗面管を配しこれらの円管まわりの熱伝達の挙動を調べ、管群全体の性能を向上させることを目的として行った実験の報告である。

主要記号

c_x, c_y : 流れ方向、流れと直角方向の円管中心距離

d : 円管直径

$h = k/d \times 10^3$: 相対粗度

k : 粗さ高さ

Nu : ヌセルト数

Q : 供給熱量

$Re = U_f d / \nu$: レイノルズ数

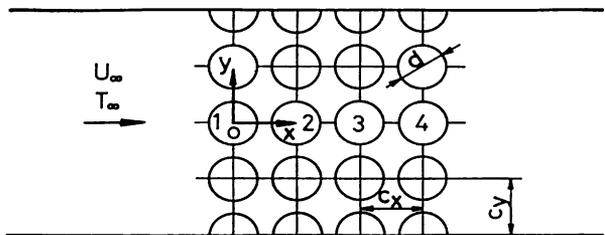
S : みかけの伝熱面積

T : 温度

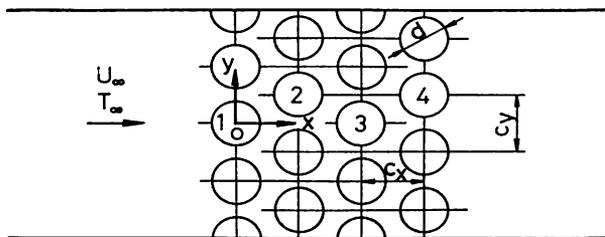
U_∞ : 管群上流速度

$Ut = U_\infty c_y / (c_y - d)$: 最小隙間速度

α : 熱伝達率



(a) 碁盤目形配列



(b) 千鳥形配列

図1 円管配列と座標系

θ : 角度

λ, ν, ρ : 主流温度における空気の熱伝導率, 動粘性係数, 密度

添 字

c : 限界

m : 平均

w : 壁

∞ : 主流

2. 実験装置および方法

幅×高さが225mm×160mm, 225mm×140mm, 225mm×120mmの3種類の矩形断面を測定部とする吹出し風筒により, 図1に示すような5行4列からなる碁盤目形配列および千鳥形配列管群において第1列め,

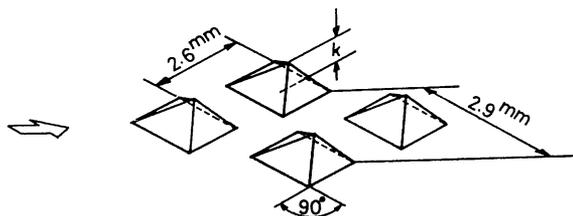


図2 管表面粗さの形状および寸法

第2列めに図2に示すようなピラミッド形の粗さを有する円管を配し, 第2列めの円管(図1の2の円管)に関して熱伝達を測定した。取扱った円管間隔 $c_y/d, c_x/d$ (以下 $c_y/d \times c_x/d$ のように示す) は碁盤目形配列では1.6×1.6, 1.4×1.4, 1.2×1.2の3種類, 千鳥形配列では1.4×1.4の1種類である。管群上流での乱れ強さは, 円管を設置した状態で1~2多程度であった。なお, 第3列め以降の円管には粗さは付していない。熱伝達の測定方法は既報告²⁾⁴⁾と同一で, 内部をウレタンフォームで充填したアクリル樹脂管に幅10mm, 長さ1.02~1.44m, 厚さ0.13mmのステンレス箔をら線状に巻き付け, 外径25mmになるようにし, これを通電加熱して行った。図2に示した粗面は, 粗さ間のピッチは変えずに高さ k について0.5, 0.37, 0.27mmの3種類を取扱った。なお, k が小さいほど粗さの形状はやや円錐形に近づいた。また, 粗さによる実質的な伝熱面積の増加は k の大きい順に11, 5, 3多程度となっている。レイノルズ数 Re は最小隙間速度で定義し, その範囲は $1.2 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4$ である。熱伝達率およびヌセルト数は $\alpha_\theta = Q/S(T_w - T_\infty)$, $Nu_\theta = \alpha_\theta d / \lambda$ により定義した。

3. 実験結果と検討

図3は, 碁盤目形配列における第1列めの円管に

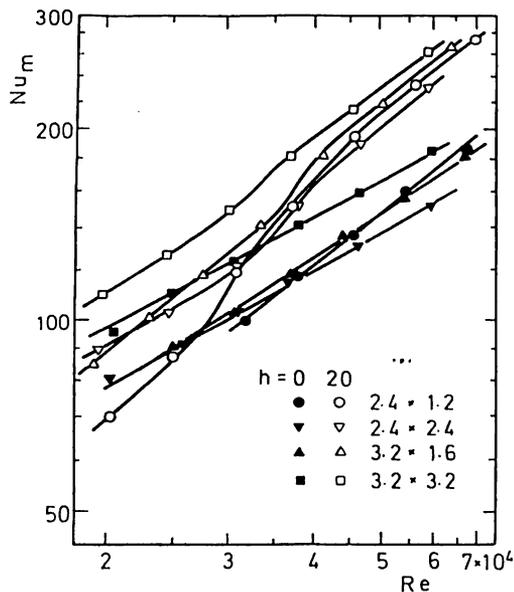


図3 平均ヌセルト数

粗面管からなる管群の熱伝達

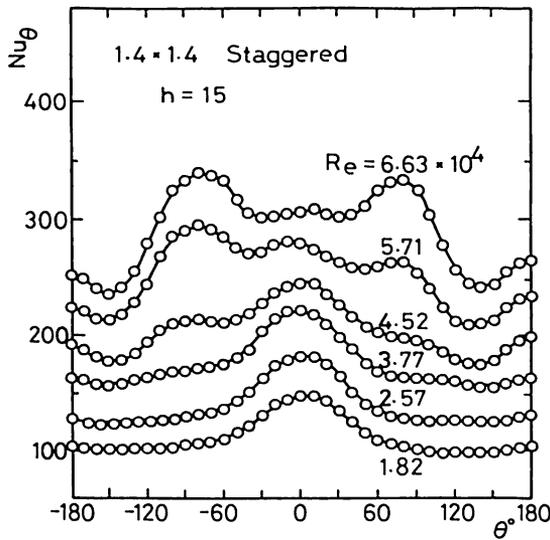


図4 局所ヌセルト数

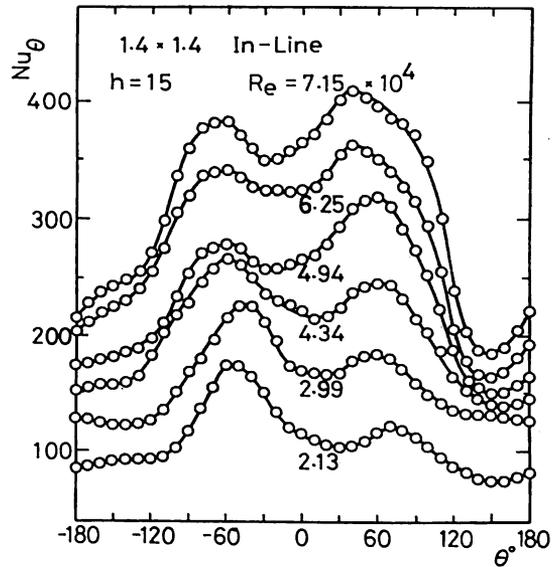


図5 局所ヌセルト数

関する $h=20$ の場合の円管間隔が比較的広い円管配列に関して得られた結果である。レイノルズ数 $Re = 3.0 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^4$ 近傍から熱伝達率の向上が顕著になり、いずれの円管間隔でも最大50%程度 $h = 0$ の場合より熱伝達率は大きくなっていることがわかる。これは、円管前方岐点からはく離点近傍までの層流境界層が粗さにより乱流の状態になるためである。また、 $Re > 4.0 \times 10^4$ においては円管間隔の影響が少なくなる傾向を示している。

次に、第2列めの結果を 1.4×1.4 の場合を中心に述べる。図4は、千鳥形配列における $h=15$ の場合の局所ヌセルト数の測定結果を示したもので、円管上下ではほぼ対称な分布となっている。図から明らかのように、レイノルズ数によってその分布形状が異なっていることがわかる。すなわち、 $Re \leq 3.77 \times 10^4$ ではレイノルズ数に依存せずに前方岐点で最大値を示しているが、 $Re = 4.52 \times 10^4$ 近傍で熱伝達の挙動が変化しはじめ $\theta = \pm 80^\circ$ 付近に第2極大値をもつようになり、レイノルズ数が大きくなるにつれそれが顕在化し、 $Re = 6.63 \times 10^4$ では前方岐点よりも高い値を示すようになる。これは、 $Re \leq 3.77 \times 10^4$ の場合とは異なり粗さが境界層に対して影響をおよぼしていることを示している。すなわち、比較的円管間隔が狭いため $\theta = \pm 60^\circ$ 近傍の増速効果と粗さによる相乗効果によるものと考えられる。なお、 $h=11$ の場合は $Re = 6.96 \times 10^4$ においても $\theta = 0$ で Nu_θ は最大となっている。一方、粗さの最も大きい $h=20$ の場合は、 $Re \geq 5.38 \times 10^4$ において前方岐点の極

大値は極小値となり、 $h=15$ の場合の第2極大値に相当する部分の熱伝達率がきわめて大きくなる傾向を示している。また、 h が近いほど第2極大値を示す位置は前方岐点に近づき $h=20$ の場合は $\pm 65^\circ$ となっている。

図5は、 $h=15$ の場合の基盤目形配列とは異なり円管上下で非対称となっており、管群をよぎる流れが偏っていることを示している。この流れの偏りのため $Re \leq 4.34 \times 10^4$ では流れが上向きとなり円管下側 $\theta = -50^\circ \sim -60^\circ$ 近傍に熱伝達率の最大値が存在している。また、 $Re \geq 4.94 \times 10^4$ においては流れは下向きとなり円管上側 $\theta = 40^\circ \sim 60^\circ$ 近傍に最大値が存在するようになる。図4に示した千鳥形配列の場合とは異なり最大値と最小値はいずれのレイノルズ数においても約2倍程度の差となっていることがわかる。これは、円管前面では第1列めの円管背面の速度の違いはく離域に接しているにもかかわらず、第1列めの円管からはく離せん断層の付着の影響により千鳥形配列とはほぼ同一の熱伝達率となっている。また、レイノルズ数の増加に伴いはく離せん断層が付着する部分の分布は丸みを持った形状となっているが、これは千鳥形配列の場合と同様粗さの影響により境界層が乱流に近づくことを示している。一方、円管後方においては千鳥形配列よりはく離域が広がっていることから熱伝達率が低下しているものと考えられる。 1.4×1.4 における他の h の局所熱伝達率の傾向は図5の場合とほぼ同一であるが、 $h=20$ で $Re \geq 6.49 \times 10^4$ では円管上下の非対

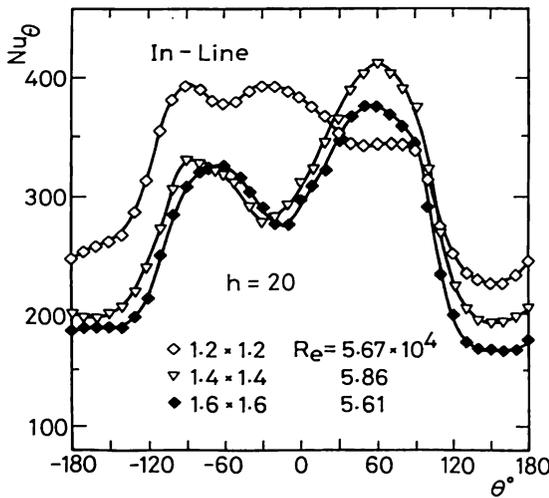


図6 局所ヌセルト数

称性が顕著になり、粗さ高さが偏流現象にある程度の影響を持っていることをあらわしている。

次に、碁盤目形配列における局所ヌセルト数の円管間隔による変化をほぼ同一のレイノルズ数について図6に示す。1.4×1.4、1.6×1.6の場合はその分布形状が類似しているが、1.2×1.2の場合は図4に示した千鳥形配列に似た分布形状となっていることがわかる。これは、流れと直角方向の円管間隔がきわめて狭いため第1円管のはく離せん断層が偏りいわば千鳥形配列の場合における流動状況になっていることを示唆している。

次に、平均ヌセルト数の結果について述べる。

図7は、千鳥形配列(1.4×1.4)においてhを変化させた場合の平均ヌセルト数のレイノルズ数による変化を示したものである。平滑管h=0の場合に比較していずれもNumは増加しているが、Numが急増するレイノルズ数(このレイノルズ数を限界レイノルズ数Recと呼称する)4.5×10⁴近傍までは実質的な伝熱面積の増加を考慮すれば、粗さを付したことによる効果はさほどみられない。しかしながら、Re > Recではレイノルズ数の増加に伴いNumの場合に比較して25~33%程度熱伝達がよくなっていることがわかる。これは、4.5×10⁴近傍で前述のように境界層が乱流に遷移していることを示すものである。

図8は、碁盤目形配列(1.4×1.4)の場合について示したものである。Re = 4.5×10⁴近傍から千鳥形配列の場合と同様熱伝率はレイノルズ数の増加に伴って増加割合が大きくなっていることがわかる。

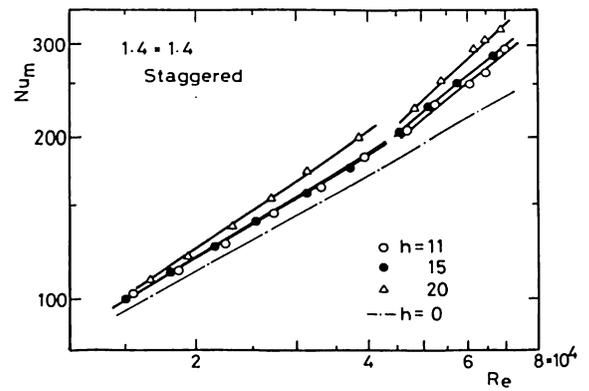


図7 平均ヌセルト数

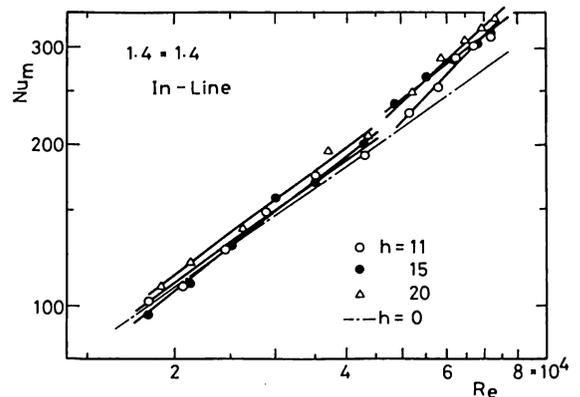


図8 平均ヌセルト数

以上、平均ヌセルト数とレイノルズ数の関係を

$$Num = c Re^n \quad (1)$$

で表わすと、係数Cおよびレイノルズ数のべき指数nは、表1のようにまとめられる。表から明らかのように、配列様式によらず $Re > Rec$ ではレイノルズ数のべき指数は0.8より大きくなっている。これは単独円管に本実験と同様、ピラミット形の粗さを付けたAchenbach¹⁾の結果と同一である。

表1 係数cとn

	Staggered(1.4×1.4)		In-Line(1.4×1.4)		
	c	n	c	n	
h=11	2.17×10 ⁻¹	0.64	6.21×10 ⁻²	0.76	Re < Rec
15	1.93×10 ⁻¹	0.65	2.87×10 ⁻²	0.83	
20	1.00×10 ⁻²	0.72	4.52×10 ⁻²	0.79	
h=11	1.49×10 ⁻²	0.89	1.48×10 ⁻³	1.10	Re > Rec
15	1.62×10 ⁻³	0.88	4.10×10 ⁻²	0.80	
20	4.17×10 ⁻³	1.01	5.30×10 ⁻³	0.99	

粗面管からなる管群の熱伝達

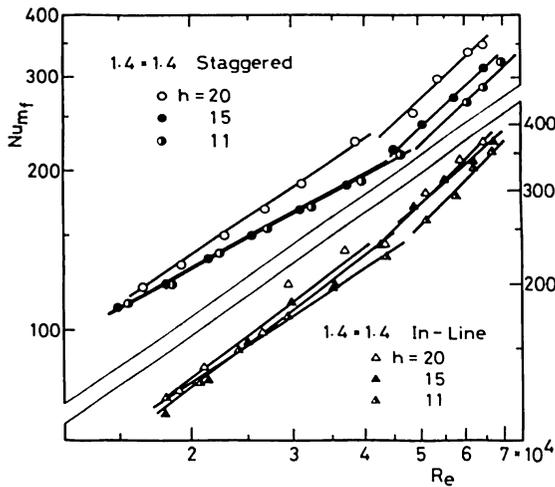


図9 円管前面の平均ヌセルト数

次に、粗さの効果を更に明瞭にするために、1.4 × 1.4における千鳥形および碁盤目形配列の場合の円管前面すなわち $\theta = +90^\circ \sim -90^\circ$ までの局所ヌセルト数を平均した結果 (Nu_{mf}) のレイノルズ数による変化を図9に示した。配列様式による差異はほとんどみられないが、千鳥形配列において熱伝達が急激に増加するレイノルズ数すなわち限界レイノルズ数 Rec が粗さによりいくぶんではあるが異っている。すなわち、 $h=20, 15, 11$ に対して $Rec = 4.2 \times 10^4, 4.5 \times 10^4, 4.8 \times 10^4$ となり、粗さ高さが大きいほど Rec は小さい。また、碁盤目形配列においてはその

限界レイノルズ数はさほど明確とはなっていないが、千鳥形配列の場合と同様の傾向が認められる。

図10は、1.4 × 1.4の千鳥形および碁盤目形配列の場合の円管後方岐点における熱伝達率のレイノルズ数による依存性を示したものである。千鳥形配列の場合、粗さ高さによらず Nur は次式で整理される。

$$Nur = 0.121 Re^{0.69} \quad (2)$$

前述の平均ヌセルト数および円管前面における限界レイノルズ数はみられず、 $h=0$ の場合とほぼ同一となっている。また、碁盤目形配列も式(3)のように結果は整理される。

$$Nur = 0.038 Re^{0.78} \quad (3)$$

レイノルズ数の比較的小さい領域で平滑管 $h=0$ よりもいくぶん低い値を示しているのは、粗さの存在のためレイノルズ数によってはむしろはく離点が前方岐点側に移動し、⁵⁾ 後流幅が広くなり円管背面に接するうず流れの強さが弱まっているものと考察される。⁶⁾

千鳥形配列の場合と比較すると20%程度後方岐点の熱伝達率が小さくなっている。これは、前述のようにはく離域が千鳥形配列の場合よりも広がっているためと考えられる。また、ここで注目すべき点は碁盤目形配列の円管間隔が狭い1.2 × 1.2における $h=15$ の場合の結果 (◆印) も示してあるが、この場合はむしろ千鳥形配列とほぼ一致した結果となって

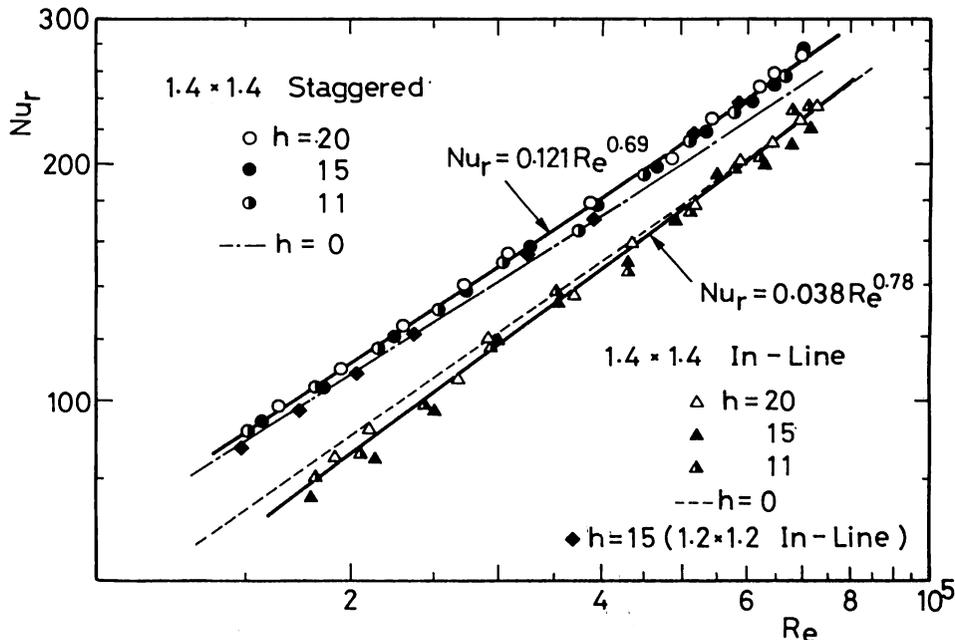


図10 円管後方岐点のヌセルト数のレイノルズ数による変化

いることがわかる。このことは前述のごとく、偏流により流れが千鳥形配列の流動状況になっていることを示す証左である。

図11は、碁盤目形配列の場合の $h=20$ における各円管間隔による平均ヌセルト数のレイノルズ数による変化を示したものであるが、円管間隔による熱伝達率の差異はあまり見られない。このような特性は管群を密にし熱交換器をコンパクトにしようとする場合には重要な特性となる。なお、図には粗さを付けない管群における第2列めの円管の結果および第1列めの円管のみに粗さがある場合 (1.6×1.6) の結果 (◎印) を示した。

4. 結 言

管群の性能向上を計るため碁盤目形および千鳥形管群について、ピラミッド形の粗さを有する円管を第1列、第2列めに配し、主に第2列めの熱伝達率の測定を行った。実験範囲で得られた主なる結果は次のようである。

- (1) 配列様式、粗さ高さ、円管間隔に依存せずに $Re = 4.5 \times 10^4$ 近傍で伝熱特性が異なり、この Re 数以上で熱伝達率の増加割合が大きくなる。
- (2) 平滑管よりなる管群に比較して第2列めの場合における粗さによる熱伝達率の向上割合は第1列めの場合に比較して少ないが、本実験のレイノルズ数の範囲では最大25~33%程度熱伝達が向上する。
- (3) 円管背面すなわち離域では粗さ高さの影響はみられない。

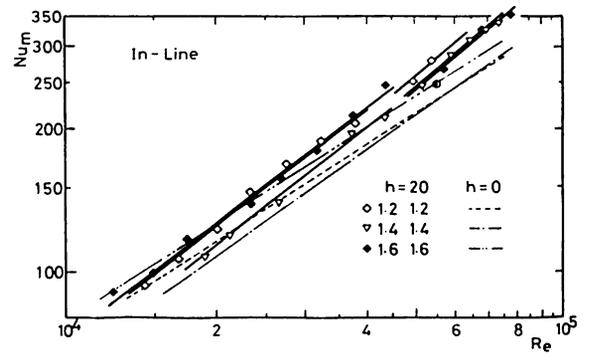


図11 平均ヌセルト数

終りに、本実験を行うにあたり種々のご協力いただいた本校機械工場実習係の諸氏ならびに当時学生小田切勝実、笹村 聡両君に感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) Achenbach, E., Int. J. Heat & Mass Transf., 18 (1975), 1387.
- 2) 相場ほか2名, 機械学会論文集, 47-422 (昭56-10), 2004.
- 3) Aiba, S., et al. Bull. JSME, 25-204(昭82-6), 927.
- 4) 相場ほか2名, 機械学会論文集, 48-432 (昭57-8), 1633.
- 5) Achenbach, E., J. Fluid Mech., 46 (1971), 321-335.
- 6) Aiba, S., et al. Wärme-und Stoffübertragung 12 (1979), 221-231.