

縦列水平円管群熱交換器の自然対流熱伝達 に関する実験的研究*

斉藤 図**, 戸倉郁夫**, 岡田広一***

An Experimental Study on Free Convection Heat Transfer from Vertically Lined Horizontal Cylinders Set between Parallel Walls

by Hakaru SAITO, Ikuo TOKURA, and Koichi OKADA

Experiments have been carried out on the free convection heat transfer from horizontal cylinders in array of staggered arrangements. Average heat transfer coefficients of individual cylinders and whole cylinder arrays were measured in order to clarify dependabilities of those coefficients upon the geometric figures including spacing and off-set distance between two cylinder lines. Visualization of flow fields around the array has also been tried to explain the heat transfer behavior of cylinders in array. The experiments showed that there exist some optimum values of cylinder spacings and the off-set distances to increase the heat transfer coefficients and that the promoting effect in heat transfer can be expected especially when the array is set between parallel walls.

Key Words: Convective Heat Transfer, Heat Exchanger, Free Convection, Horizontal Cylinder Array, Staggered Arrangement, Parallel Walls

1. 緒 言

水平円管列の自然対流熱伝達は暖房用の熱交換器などに利用されており、強制対流と異なって、通風用の動力が不用であるなどの利点をもつものである。この現象に関する現在までの研究は、解析的な取扱いが困難なために、そのほとんどが実験的なものである⁽¹⁾。特に、実際の暖房熱交換器における場合のように、水平円管列が限定空間内に設置された場合の自然対流熱伝達に関する研究は、きわめて少ないのが現状である。

著者らは前報⁽²⁾において、水平円管を垂直一列に配置した場合の自然対流熱伝達の実験を行い、管すきまが小さくなると下流各管の熱伝達はかなり低下することを示した。本研究は、そのように管すきまが小さくなった場合の円管列の熱伝達低下を改善する一方法として、交互の管の軸を横方向へ移動させ、二列千鳥配置とした場合の管群の熱伝達を実験的に調べたものである。また、限定空間の一例として、平行平板間に設置した場合の熱伝達促進効果についても検討を行っ

た。本研究は、温水あるいは蒸気加熱の暖房器を想定して行ったため、実用的な外径として $\phi 28.5$ mmの円管を用い、管表面温度は約 80°C 一定として実験を行っている。

2. 実験装置および方法

実験は6本の水平加熱円管を、管軸方向からの空気の流入を防ぐために、2枚のベークライト側板(1000 mm \times 1000 mm \times 5 mm)間に支持して行った(図1)。この加熱円管は、移動および取りはずしが可能な2枚の平行平板(ベークライト製、1000 mm \times 650 mm \times 5 mm)間に設置されており、この平板の移動により平行平板間隔を調節した。装置の内面には放射の影響を少なくするためにアルミニウムはくをはり、外面は厚さ50 mmの発泡ポリスチレンで断熱している。加熱円管は、図2に示されるように外径28.5 mm、長さ600 mm、厚さ1.5 mmの銅管であり、内部にピッチ7 mmで螺旋状に被覆ニクロム線を巻いたアルミニウム管を挿入したものである。銅管内部の3分割されたヒータ(中央部の主ヒータおよびその両端のガードヒータ)は、それぞれ独立に電気加熱され、管表面温度を一樣に保つことができるようになっている。管表面温度は、銅管表面の4箇所(管の中央部から100 mmと両端部

* 昭和59年11月21日 第928回講演会において講演、原稿受付 昭和59年5月28日。

** 正員、室蘭工業大学(〒050 室蘭市水元町27-1)。

*** 正員、セイコー電子工業(株)(〒136 東京都江東区亀戸6-31-1)。

から 100 mm の距離) に取付けた直径 0.1 mm の銅・コ
ンスタンタン熱電対によって測定した。実験は円管表
面温度一定の条件下で行い、主ヒータに供給した電力
より平均熱伝達率を算出した。本実験での管直径を代
表長さとしたグラスホフ数は、約 1.5×10^5 である。

図 3 には、縦一列に配置された水平円管の交互の管
軸を横方向へ移動させ、二列千鳥配列とした場合の円
管の配置を示してある。水平加熱円管はいずれの場合
にも、管群の中心が平行平板内空間の中央と一致する
ように設置される。各管列中の円管は、第 1 管列の最
下端より上方へ 1, 2, 3 番管, 第 2 管列の最下端より上
方へ 1', 2', 3' 番管と表すことにする。

円管群を限定空間内に設置した場合の熱伝達は、自
由空間内における場合とは異なった挙動を示す。特に、
管列を平行平板間に配置した場合には、いわゆる煙突
効果による熱伝達の促進が期待できる。そこで、本研
究では、高さ 1 m の平行平板間に管群を設置した場合
の熱伝達促進効果についても併せて検討を行った。

3. 実験結果

3-1 管列間距離による熱伝達の変化 各管の平
均ヌセルト数 N_{ui} を以下の式で定義する。

$$N_{ui} = q_i d / \lambda (T_w - T_\infty) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 d : 管直径, q_i : 各管の熱流束, T_w : 円管の

表面温度, T_∞ : 室温, λ : 空気の熱伝導率である。

本研究では、管群を平行平板間に設置した場合にも、
平行平板外部の温度 T_∞ を使用して N_{ui} を定義して
いる。したがって、この場合の N_{ui} の値は見掛けの値
である。図 4 は、自由空間における円管の平均ヌセル
ト数(単一水平円管の値との比 $N_{ui}/N_{u\infty}$) が、管列間
距離 ($W/d, d$: は円管直径) によって変化する様子
を、4 種類の管配列ピッチ [$P=(b+d)/d, b$: 管すきま]
について示したものである。図 4 中の実線は、各管のヌ
セルト数の平均値を示している。管すきまが小さな場
合 ($P=2$) には、 $W/d < 2$ で各管の熱伝達は急激に低
下する傾向がみられる。これは、管相互の間隔が狭く
なるために管列内部の自然対流流れが阻害されるため
である。また、上流管である 1 および 1' 番管の熱伝達
が下流管の熱伝達よりも大きな値を示している。 $P=2$
の場合には、 W/d の値を大きくしても、管群の平均熱
伝達(実線で示される)は単管の熱伝達 ($N_{u\infty}$) とほ
ぼ等しい値になる程度であるので、管列相互の干渉に
よる熱伝達の促進は期待できない。しかしながら、 $P=3$
では、管群の熱伝達は管列間距離 (W) の増加ととも
に増大してゆき、 $W/d=1$ で一つのピーク値に達し、
 $W/d \cong 1.5$ でいったん低下し、 $W/d=2$ で再び増加す
るという変化を示している。この傾向は、 $P=5$ および
7 の場合も同様である。また、どの管配列ピッチにおい
ても W/d の値が約 3 以上では、管列の熱伝達に大き
な変化がみられないことから、第 1 管列と第 2 管列の
相互干渉は $W/d < 3$ の範囲で顕著であるといえる。

管群中の円管の熱伝達は、上流管からの浮力流れに
大きく影響される。図 5 は、ステアリン酸亜鉛を用いた
微粒子追跡法による管群まわりの流れ場の可視化写
真の一例を示したものである。 $W/d=1$ (図 5(a)) で
は、浮力流れが管列のすきまを、各円管を縫うように

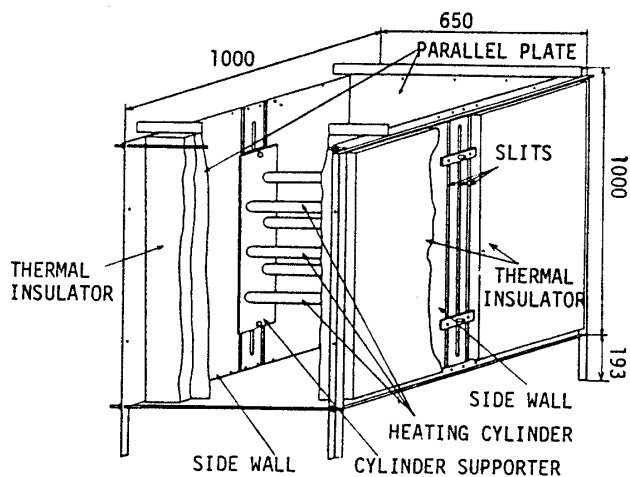


図 1 実験装置概略図

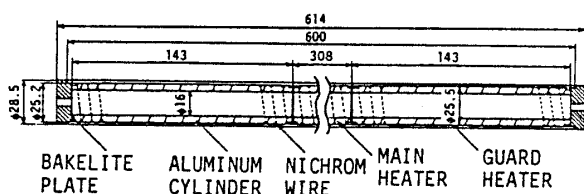


図 2 加熱管の構造

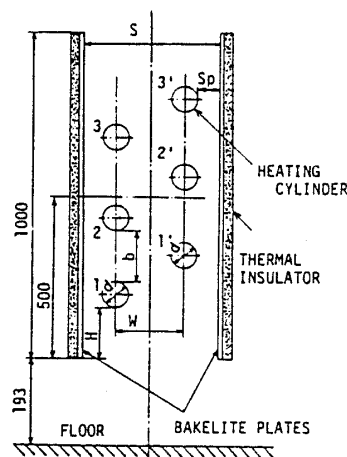


図 3 円管の配置

流れており、2列の円管が一つの伝熱系を構成していることがわかる。それに対して $W/d=5$ [図5(b)] では、各管列は独立して自然対流系を構成しているのが示されている。また、浮力流れは管列間のすきまに流れ込む傾向があることから、縦2列の円管列の熱伝達の変化は、図6に示す浮力流れの概略図と関連づけて説明できる。すなわち、 $W/d=1$ [図6(a)] では浮力流れが管列中の各下流管に強制対流として有効に作用するのに対して、 $W/d \cong 1.5$ [図6(b)] では浮力流れが管列間のすきまに流れ込んで吹抜けてしまうために管列の熱伝達は低下することになる。さらに W/d が大きくなると、浮力流れが各管列のみに作用するようになり、各管列は単一管列の熱伝達と同様の挙動を示すようになる [図6(c)]。

3.2 管すきまによる熱伝達の変化 図7は、各円管の平均ヌセルト数(単管の値との比)と管配列ピッチの関係を示したものである。 $W/d=3, 5, 11$ の場合には、管群の平均熱伝達

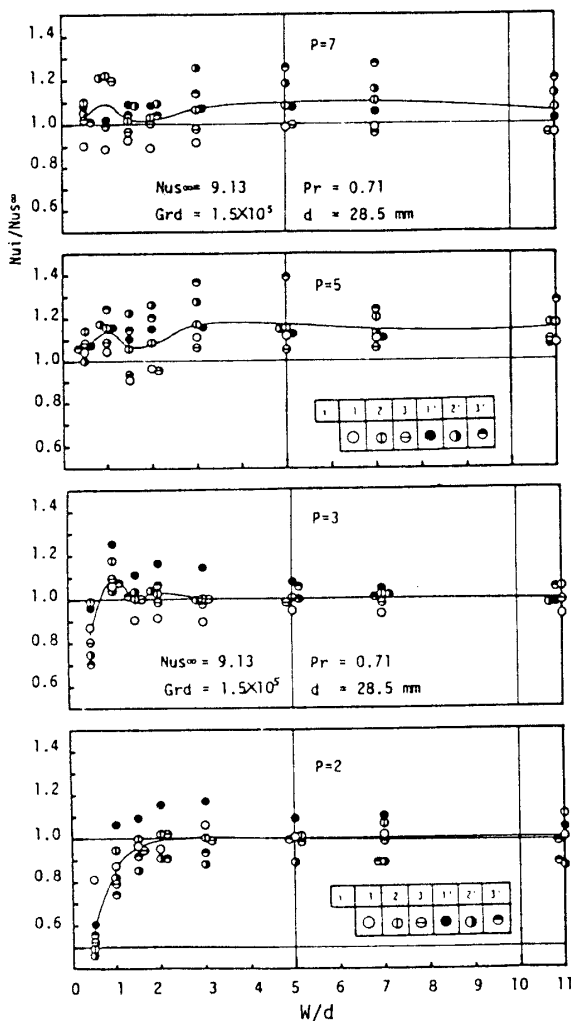
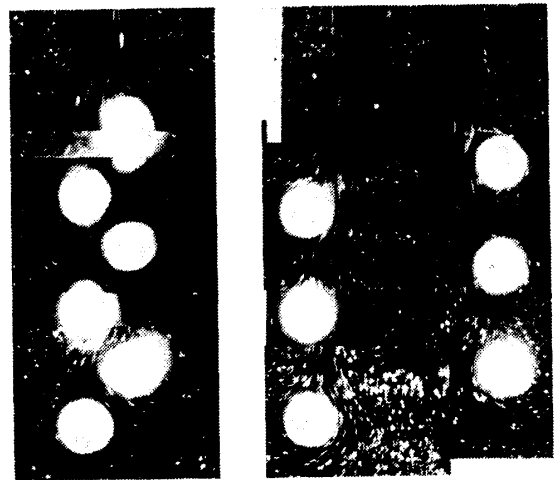


図4 管列間距離による熱伝達の変化

はいずれの場合にも $P < 3$ ではほぼ単一円管の値に等しく、 $P=5$ では増加し、 $P=7$ でやや減少するという、同様な傾向を示している。つまり、 $W/d > 3$ では、円管の熱伝達は管列間相互の干渉の影響はほとんどなく、管配列ピッチによって決定されることがわかる。本実験条件では、 $P=5$ の場合に、単管の場合の約15%増の熱伝達の値が得られる。 $W/d=0.5$ では、 $P \leq 3$ で熱伝達の低下が著しいが、 $W/d=1$ では $P=3$ での熱伝達が、他のピッチにおける場合よりも大きな値となっており、管列間の相互干渉が、管すきまが小さな範囲でも熱伝達の増加に寄与していることを示している。

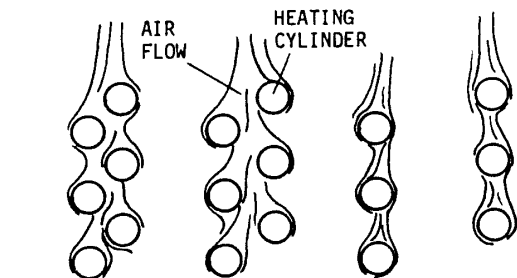
3.3 平行平板間に設置された円管群の熱伝達

図8は、管群を平行平板間に設置した場合の管群全体の平均ヌセルト数(単管の値との比)と、平行平板間距離 S の関係を示したものである。いずれの管配列ピッチにおいても、 $S/d < 10$ の範囲で熱伝達は増大しており、この範囲で煙突効果による管群の熱伝達促進が有効であることがわかる。その最大値は、 $S/d=4, P=5$ かつ $W/d=1$ の場合であり、単管の約50%増の値と



(a) $W/d=1$ (b) $W/d=5$

図5 自然対流流れ場の可視化写真 ($P=3, d=12$ mm, 管表面温度と室温との温度差 50°C , $1/30$ s 露光)



(a) $W/d=1$ (b) $W/d=1.5$ (c) $W/d=5$

図6 円管まわりの自然対流流れの概略図

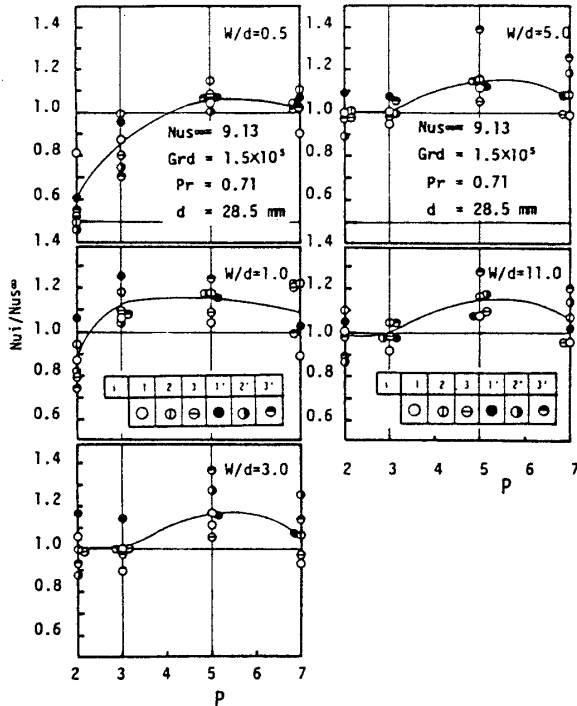


図7 管配列のピッチによる熱伝達の変化

なっている。 $S/d < 4$ では、管群の熱伝達が低下しているが、これは、平行平板と円管表面の距離が狭くなり、円管自身が平行平板間の空気の流れを阻害するためである。また、図8には示していないが $S/d < 10$ の範囲では、管すきまが小さな場合に1番管および1'番管の熱伝達が高くなる。これは、下流各管は煙突効果による浮力流れの影響を受けながら熱伝達を行っているにもかかわらず、空気との温度差が小さい条件下で伝熱しなければならないのに対して、1番管および1'番管は室温の空気と熱交換を行っているからである。管すきまが大きな場合には、上流管からの浮力流れによる強制対流的な作用も加わるため、下流各管の熱伝達も増加する傾向にある。

平行平板間に設置された管群の熱伝達におよぼす管列間距離の影響を調べると以下のことがわかる。管すきまが大きな $P=7$ の場合には、管相互の距離が大きいため管列間距離の熱伝達への影響はほとんどなく、 $S/d < 10$ で煙突効果による熱伝達の増加がみられる。管すきまが小さくなるにしたがって、管群の熱伝達はすべての平行平板間距離に対して低下する傾向にあるが、 $S/d=4$ かつ $W/d=1$ の条件の場合にはかなり大きな値 ($P=2$ の場合でも単管の約30%増)を示している。このことから、管群の熱伝達を大きな値に維持するためには、管すきまが小さな場合ほど、管列間距離と平行平板間距離の選択には十分注意しなければ

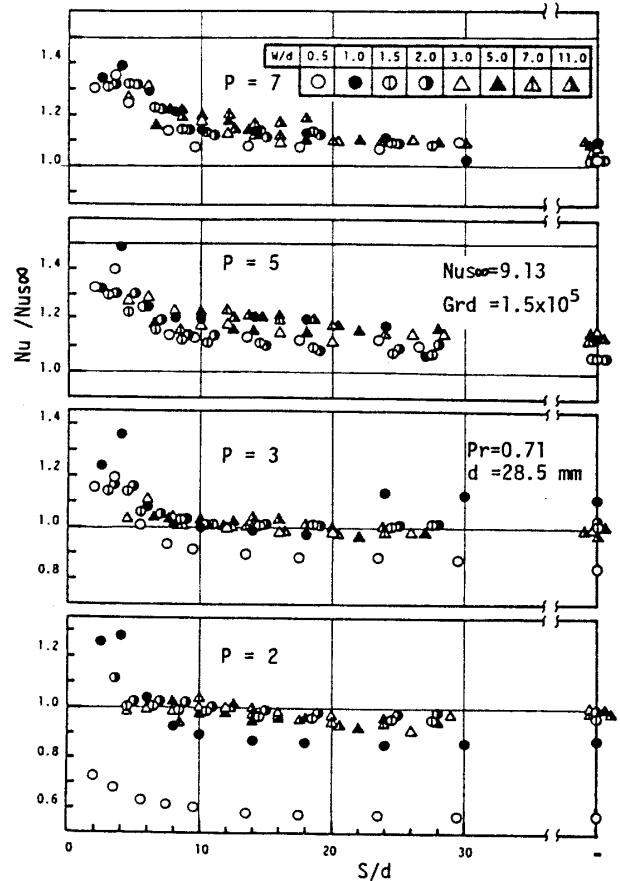


図8 平行平板間距離による熱伝達の変化

ならないといえる。

14. 結 言

自由空間に設置された縦2列の水平管群の自然対流熱伝達は、直径28.5 mm程度の円管を使用した場合には、管列間距離が管直径の約3倍以内になると管列相互の干渉の影響を受ける。特に管すきまが小さな場合ほどその影響の程度が大きい。管列間距離が管直径の約3倍以上では、管すきまが管列の熱伝達を支配する主要な因子である。円管群を平行平板間に設置した場合には、ある平行平板間距離(本実験条件では $10d$)以内で煙突効果による熱伝達の増加が期待でき、適切な管列間距離と組み合わせることにより、管すきまが小さな場合の管群の熱伝達を促進させることが可能である。

文 献

- (1) 例えば, Marsters, G.F., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 15-5 (1972), 921.
- (2) Tokura, I., ほか3名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 105-1 (1983), 102.