

## 垂直ダクト内における縦一列水平円管群の 自然対流熱伝達予測に関する実験的研究\*

齊藤 図\*\*, 岸 浪 紘 機\*\*  
戸 倉 郁 夫\*\*, 長 沢 聡 也\*\*\*

### An Experimental Study on Free Convection Heat Transfer from Horizontal Cylinders in a Vertical Duct

Hakaru SAITO, Koki KISHINAMI, Ikuo TOKURA, and Toshiya NAGASAWA

This experimental study has been conducted on the free convection from horizontal cylinders, vertically lined in array, set in a vertical duct or in free space. It has been found that the Nusselt numbers for each cylinder in an array are proportional to the 1/4 th power of Rayleigh number in both cases, and the experimental data concerning the average Nusselt number for the whole array can be well represented by a practical formula, Eq. (2.a), which covers the cylinder arrays set either in free space or in a vertical duct.

**Key Words:** Convective Heat Transfer, Cylinder Array, Free Convection in Vertical Duct, Heat Exchanger

#### 1. 緒 言

本研究は、暖房用放熱器のごとく比較的少数の水平加熱円管が垂直平行平板間に縦一列に配置された場合の自然対流熱伝達に関する実用的な実験式を提案することを目的に行ったものである。

自由空間内における水平円管群（垂直配列）自然対流熱伝達に関する現在までの研究は、理論的研究としては、勝田ら<sup>(1)</sup>が比較的接近した2本の等温円管群に対してLevyの積分法を用いた解析を行った報告、および、Faroukら<sup>(2)</sup>が上下2段の水平並列円管群の熱伝達を数値的に解析した報告があるのみであり、その他のほとんどが実験的な研究である。Eckertら<sup>(3)</sup>は直径22.3 mmの等温円管（3本、垂直および千鳥配列）を用いて、また、等熱流束の条件ではLiebermanら<sup>(4)</sup>が直径0.127 mmの細線（10本、垂直および傾斜配列）、Marsters<sup>(5)</sup>が直径6.35 mmの円管（3、5および9本、垂直配列）を用いて実験を行い、主として管の本数および管間隔の相違による各管の熱伝達率の変化について報告している。また、一對の水平円管におい

て上流管と下流管の表面温度が異なる場合の熱伝達がSparrowら<sup>(6)</sup>およびRazelos<sup>(7)</sup>によって研究され、管表面温度の相違が、管間隔の小さな場合に、下流管の熱伝達に著しい影響を与えることが報告されている。しかしながら、上流管から熱的な干渉を受けている状態で下流管のヌセルト数がレーレー数によってどのように変化するかを明らかにした報告は見当たらず、また、管群全体の平均ヌセルト数に対する定式化に関しては現在までほとんど行われていない状況にある。

円管を垂直平行平板間に設置した場合の熱伝達促進効果に関する研究は極めて少なく、わずかにMarsters<sup>(8)</sup>およびSparrowら<sup>(9)</sup>による単一水平円管に関する実験結果、橘<sup>(10)</sup>によるフィン付き管群（2本）に関する熱伝達実験、ならびに著者ら<sup>(11)(12)</sup>による単列あるいは複数列円管群の伝熱特性に関する研究を見るのみである。

本研究は、このように円管群の熱伝達特性が現在まで系統的には十分な解明がなされていない現状を考え、1、2、3および5本の等温加熱水平円管を垂直平板間に縦一列に配置した場合の管群の自然対流熱伝達が管本数、管間隔、平板間隔や平板の高さによってどのように変化するかを系統的实验によって明らかにするとともに、これらの影響をすべて考慮した管群熱伝達

\* 昭和61年9月28日 北海道支部第28回講演会において講演、原稿受付 昭和61年4月28日。

\*\* 正員、室蘭工業大学（〒050 室蘭市水元町27-1）。

\*\*\* 学生員、室蘭工業大学大学院。

に対する予測式を提案するものである。

記号

- $b$ : 管間隔 m
- $d$ : 管直径 m
- $g$ : 重力加速度  $m/s^2$
- $Gr_d$ : グラスホフ数  $= g\beta d^3(T_w - T_\infty)/\nu^2$
- $h$ : 平均熱伝達率  $= q/(T_w - T_\infty) \text{ W/m}^2\text{K}$
- $L$ : ダクト高さ m
- $N$ : 管本数
- $N_u$ : 円管の平均ヌセルト数  $= hd/\lambda$
- $N_{uv}$ : ダクト内, 自由空間内管群の平均ヌセルト数  
 $= (\sum_{i=1}^N N_{ui})/N$
- $P$ : ピッチ  $= b/d$
- $P_r$ : プラントル数
- $q$ : 円管の熱流束  $W/m^2$
- $R_a$ : レーレー数
- $S$ : 平行平板間距離 m
- $T_w, T_\infty$ : 管表面温度周囲温度 (ダクト外) K
- $\beta$ : 体膨張係数  $K^{-1}$
- $\lambda$ : 空気の熱伝導率  $W/mK$
- $\nu$ : 動粘度  $m^2/s$

2. 実験

実験は水平加熱円管を、垂直平行平板と管軸方向からの空気の流入を防ぐために取付けた2枚の側板から構成されるダクト内に設置して行った。使用した加熱円管およびダクトの構造は、既報<sup>(11)(12)</sup>のものと同一である。主に使用した加熱円管は直径28.5 mm、長さ600 mm、厚さ1.5 mmの銅管であり、その内部には3分割されたヒータが挿入されていて、それぞれ独立に電気加熱され管表面温度を一様に保つ構造となっている。実験は管表面温度一定の条件で行い、中央部の

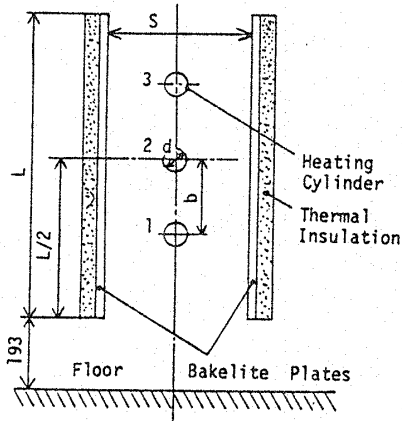


図1 円管の配置

ヒータに供給した電力より平均熱伝達率を算出した。この加熱円管は、移動および取り外しが可能な2枚の平行平板(高さ3種類、幅650 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の調節を行った。なお、平行平板と側板には厚さ50 mmの発泡ポリスチレン板と、厚さ5 mmのベークライト板外面を厚さ50 mmの発泡ポリスチレンで断熱したものの2種類を使用した。したがって、平行平板は断熱条件にある。ふく射伝熱量の算定は、銅管表面のふく射率を0.072と仮定してMarsters<sup>(9)</sup>と同様な方法で行った。本実験におけるふく射伝熱量は全伝熱量の10%以下である。図1は、円管の配置の一例(3本管群の場合)を示したものである。加熱円管はいずれの場合にも、管群の中心が平行平板の空間の中央と一致するように設置するものとする。また、円管は最下端から上方へ1, 2, 3番管と表すことにする。本実験におけるグラスホフ数の範囲は $4 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5$ であり、実験範囲は表1に示してある。なお、物性値は管表面と室温との平均温度で評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 単一水平円管の熱伝達 単一水平円管の熱伝達は、本伝熱現象の最も単純な例であり、垂直平行平板が管群の熱伝達に及ぼす影響を調べる基礎となるものである。図2は、単一水平円管を平行平板間に設

表1 実験範囲

N	d (mm)	L	S	P
1	22, 2, 28, 5, 38	—	$\infty$	—
	28.5	10d, 20d, 35d	1.35d ~ 29d	—
2	28.5	—	$\infty$	1.1 ~ 20
	28.5	10d, 20d, 35d	2d, 3d, 5d	2, 3, 5
3, 5	22, 2, 28, 5	—	$\infty$	2 ~ 10
	28.5	10d, 20d, 35d	1.35d ~ 29d	2, 3, 7

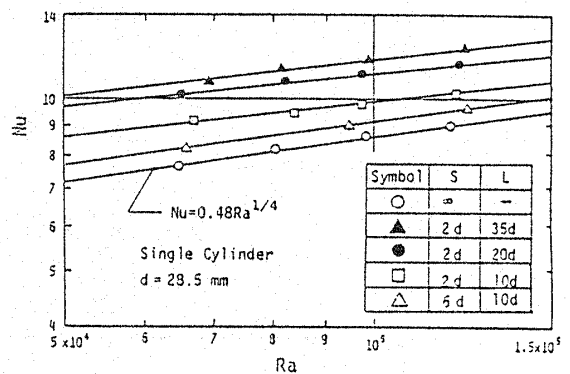


図2 単一水平円管の熱伝達

置した場合の平均ヌセルト数とレーレー数の関係を示したものである。ここで、平行平板間の円管の平均熱伝達率は、自由空間における場合と同様に、管表面温度と室温との温度差を用いて定義することにする。図2中の実線は実験値の傾向を示したものであるが、平行平板間隔が小さくなるほど、また、平行平板高さが高くなるほど、ヌセルト数は大きな値となっており、煙突効果による熱伝達促進を示している。また、ヌセルト数のレーレー数依存を調べると、平行平板間隔が小さくなるほどレーレー数の指数がわずかに小さくなっている。しかし、その値は0.24~0.25であり、ほぼ1/4とみなしてよい。なお、この図より、平行平板高さが変化してもレーレー数の指数の値はほとんど変わらないことがわかる。

**3.2 自由空間における管群の熱伝達** 平行平板間に設置された管群の熱伝達の基準となる自由空間内の管群の熱伝達について以下に述べる。最下端に位置する1番管の熱伝達については、管群の中では最も他の管による干渉を受けにくい管であるので、ピッチがかなり小さい場合を除いてほぼ単一水平円管の熱伝達と等しい値が得られている。しかし、下流管の熱伝達は、上流管からの浮力流れの影響のためピッチによって大きく変化する。図3は、上流管から熱的な干渉を受ける下流管の最も単純な例として、2本管群中の2番管の熱伝達を示したものである。ピッチが2の場合には単管の熱伝達よりも小さな値を示しているが、ピッチが大きくなるほどヌセルト数の値も大となり、単管の値を上回るようになる。図には、参考のために Sparrow ら<sup>(6)</sup>の実験値も記入してあり、実線は実測値の傾向を示したものである。この結果より、上流管から熱的な干渉を受ける下流管のヌセルト数もほぼレーレー数の1/4乗に比例して変化することがわかる。

図4は、2, 3および5本管群全体の平均熱伝達、 $N_{un}/Ra^{1/4}$ と $[(P-1)/1.3]^{(N-1)}$ の関係を示したもので

あり、実験値はS字状に分布している。図中の実線は実験値を最小二乗近似して得られた次の結果を示したものである。

$$N_{un}/Ra^{1/4} = F_1(N, P) = -2.12 \times 10^{-4} Z^3 - 5.28 \times 10^{-4} Z^2 + 0.0339 \times Z + 0.436 \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $-7 < Z < 7$

ここで  $Z = \log_e [(P-1)/1.3]^{(N-1)}$  である。

式(1)は、自由空間における1~5本管群の平均ヌセルト数を±10%以内の誤差で近似している。

**3.3 平行平板間に設置された管群の熱伝達** 本論文においては、のちに示す実験式を用いて任意管群の熱伝達を予測する際の便利を考慮し、熱伝達はいずれの管に対しても管表面と自由空間における温度差をもって定義してあるから、ここで述べる各管の熱伝達の挙動はこのような定義に基づく熱伝達率によるものであることに注意しなければならない。以下では、平行平板間に設置された管群の熱伝達が、自由空間における熱伝達〔すなわち式(1)で表される熱伝達の値〕と比較して、どの程度変化するかを考察する。

平行平板間の管群のヌセルト数とレーレー数の関係を、2本管群について調べた例を図5および図6に示してある。これらは、本実験において平行平板高さが最大で平板間隔が小さく、煙突効果が顕著であると考えられる条件下での実験値である。自由空間における熱伝達(図3)と比較すると平行平板が熱伝達に及ぼす影響が明確に示される。すなわち、1番管の熱伝達が著しく増大しており、ピッチが大きい場合でも自由空間における2番管の熱伝達を上回っていることがわかる。これは、1番管は常に煙突効果によって誘起されて平行平板内を流れる室温の空気に熱伝達を行うためである。これに対して2番管は、1番管によって暖められた上昇流と熱伝達を行うため、伝熱量が1番管ほ

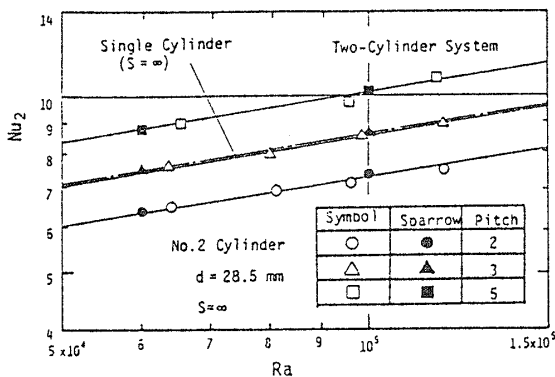


図3 2番管の熱伝達 (自由空間)

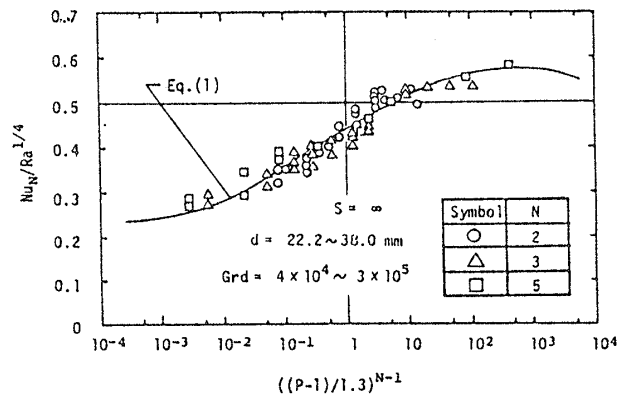


図4 管群の平均熱伝達 (自由空間)

どには増大しないものと考えられる。さらに、これらの図より、本実験範囲内では平行平板間の管群のヌセルト数もレーレー数の約1/4乗に比例していることがわかる。なお、図6中の実線は自由空間における値を示したものである。

図7は、 $Nu_w / (Ra^{1/4} F_1(N, P))$  の値が  $L/S$  (平行平板高さと平板間隔の比) によってどのように変化するかを示したものである。ここで  $Nu_w$  は管群全体の平均ヌセルト数であり、各管の熱伝達率の算術平均値を用いて定義したヌセルト数である。 $S \rightarrow \infty$  の極限では縦軸の値は1に漸近し、管群の熱伝達は式(1)で与えられる自由空間における値に一致する。また、 $L/S$  の値が大きくなるに従って縦軸の値は、最大値に達し、やがて減少する傾向を示している。このことは、平行平板間隔が小さくなるほど煙突効果によって管群の熱伝達は大きくなるが、平板間隔があまり小さすぎても管自身が空気の流れを阻害するために熱伝達が低下することを示していると考えられる。さらに図7より、自由空間の場合と比較した管群の熱伝達は、管本数が多いほどその増加割合が小さくなっており、特に  $S$  が小さい範囲でその傾向が顕著であることがわかる。これは、前述したように、平行平板間の管群では1番管の

みが室温の空気と熱伝達を行い、他の下流管は上流管で加熱された空気流と熱交換を行うため、管本数が多くなるほど管1本当たりの伝熱量が小さくなるからである。また、 $S$  が一定の条件で平行平板高さ  $L$  を変えると、本実験範囲内では、 $L$  の増加につれてヌセルト数が増加する。

図7の実験値を近似し、さらに  $d/S$  (管直径と平板間隔との比) による実験値の変化をよく表す関数を導入すると、平行平板間の管群の熱伝達は最終的に次の式によって表される。

$$Nu_w = Ra^{1/4} \cdot F_1(N, P) \cdot F_2(d/S, L/S, N) \quad (2 \cdot a)$$

$$F_2(d/S, L/S, N) = \exp[0.056(L/S - 0.032(L/S)^2) / N^{0.8} + 0.3d/S - 0.45(d/S)^2] \dots \dots \dots (2 \cdot b)$$

ただし、 $(N-1)Pd/L < 1, d/S < 0.7, L/S < 35$

図8は平行平板間の管群の平均ヌセルト数  $Nu_w$  と  $Ra \cdot [F_1(N, P) \cdot F_2(d/S, L/S, N)]^4$  の関係を示したものである。本実験値は式(2・a)によって±10%以内の誤差で近似されることがわかる。なお、図8中には、参考のために Sparrow ら<sup>(6)</sup>による単一水平円管の実験結果を斜線で示した領域で記入してある。彼らは  $Nu = A \cdot Ra^B$  とおいて、いくつかの実験条件に対する定数  $A$  および  $B$  の値を示している。彼らの実験値は、

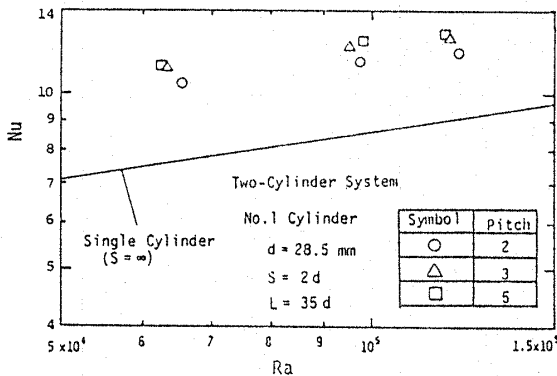


図5 1番管の熱伝達 (ダクト内)

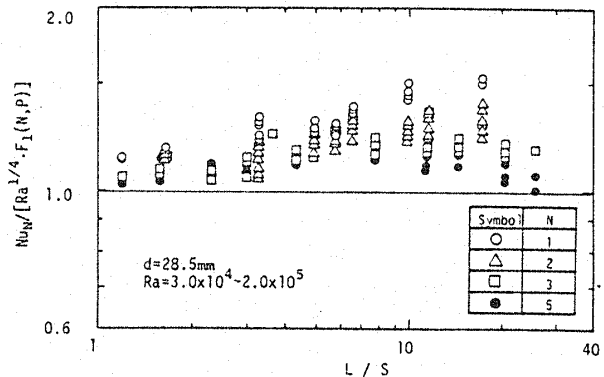


図7 ダクト内の管群の熱伝達 (L/Sの影響)

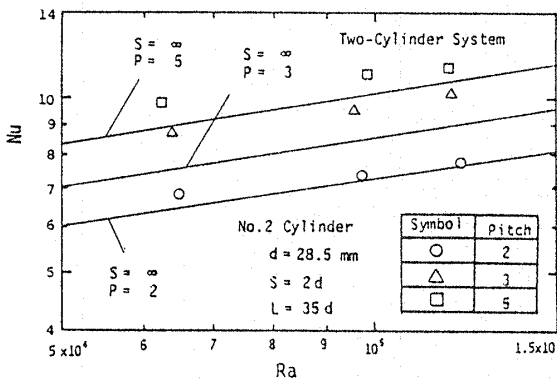


図6 2番管の熱伝達 (ダクト内)

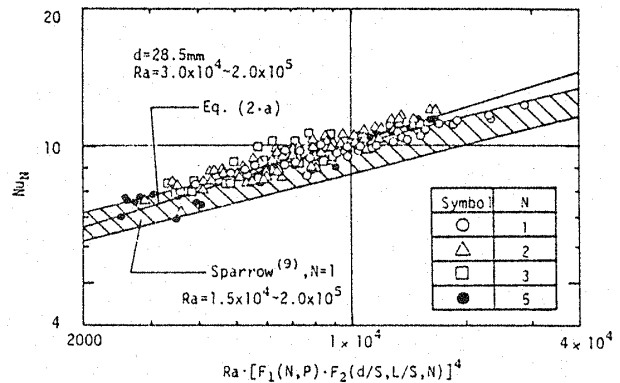


図8 ダクト内の管群の平均熱伝達

ヌセルト数がレーレー数の約1/5乗に比例する結果となっているために、レーレー数が大きな範囲で本実験値よりも若干低い値となっている。これは実験条件や管群からの放射の見積もりなどに起因するものであろうが、その差は本実験範囲内で約10%以内で、実用上は支障無いものと考えられる。管群の平均ヌセルト数を表す式(2・a)は、 $S \rightarrow \infty$ の極限で自由空間における値、すなわち式(1)と一致する。したがって式(2・a)は、管群を自由空間に設置した場合、および平行平板間に配置した場合のいずれにおいても使用可能であり、通常の使用範囲における便利な熱伝達の実験式であると考えられる。

#### 4. 結 言

比較的少数の水平加熱円管を縦一列に配置した場合の自然対流熱伝達の実験を行い、自由空間の場合と垂直平行平板間に設置した場合の熱伝達を調べた。その結果、本実験の範囲内で各円管の平均ヌセルト数は、いずれの場合においても、レーレー数の約1/4乗に比例することを示した。さらに、管群の平均ヌセルト数を表す実験式として式(2・a)を得た。この式は自由空

間の管群、および垂直平行平板間の管群のいずれの場合にも適用できる熱伝達の予測式であり、実用的に便利な式であると考えられる。

#### 文 献

- (1) 勝田・石原, 第15回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭53-5), 208.
- (2) Farouk, B. and Guceri, S. I., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 26-2(1983), 231.
- (3) Eckert, E. R. G. and Soehngen, E. E., *AF Technical Report 5747*, U. S. Air Force, Ohio, (1948).
- (4) Lieberman, J., and Gebhart, B., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 12-11(1969), 1385.
- (5) Marsters, G. F., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15-5(1972), 921.
- (6) Sparrow, E. M. and Neithammer, J. E., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 103-4(1981), 638.
- (7) Razelos, P., *Wärme und Stoffübertragung*, 19-4(1985), 255.
- (8) Marsters, G. F., *Thermal and Fluid Sci. Group Rep.*, No. 2/73, Dept. Mech. Engng., Queen's Univ., (1973), 1.
- (9) Sparrow, E. M., and Pfeil, D. R., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 106-1(1984), 124.
- (10) 橘, 機誌, 57-421 (昭29), 125.
- (11) Tokura, I., ほか3名, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 105-1(1983), 102.
- (12) 齊藤・ほか2名, 機論, 51-462, B(昭60), 670.