水平円管群の熱伝達率(第1報) : ナフタリン昇華法による測定

水平円管群の熱伝達率 (第1報)

——ナフタリン昇華法による測定——

岸 浪 紘 機

Heat Transfer for the Tube Bundles with the Flow Normal to the Tube Axis (1st Report)

— Measurement of Naphthalene's Diffusion —

Kōki Kishinami

Abstract

As mass and heat transfer are based on diffusion and heat conduction both by the gradient of mass concentration and by the temperature, the relation between mass and heat transfer is analogous.

It is very important to know the heat transfer on the complicated surface of machine, but it is not easy to investigate theoretically and experimentally.

The investigations of heat transfer from mass transfer datum which is obtained by mass transfer model are developed. Among these for example, there are ammonia's diffusion in the 1920's and Naphthalene's diffusion in the 1940's.

In this report, the heat convection for the tube bundles which are widely utilized in heat exchangers of many heat cyclemachines, such as the evaporator and the condenser of boiler-turbine Units, are investigated by Naphtalene's diffusion's model.

The experiment is performed within Reynold's number from 500 to 10000 by the naphthalen's cylinder (in 15 mm diameter, 150 mm length), of which the arrangement is alined or staggered in flow direction.

The ratio of Picht (S) for diameter (d) is $S/d=3.09$, $S/d=2.33$, $S/d=1.87$.

I. まえがき

物質伝達と熱伝達とは濃度勾配および温度勾配による拡散と熱伝導に基づいた物質輸送および熱輸送である。物質伝達と熱伝達とはそれぞれ濃度および温度の一階の微分に伴う拡散および熱伝導に基づくことから適当な媒介変数を与えるならば相似則が成立する。伝熱面が複雑な配列下におかれた熱交換器で，その表面からの熱伝達率を知るのは重要なことであるが，これを理論的に，実験的に調べることは困難なことが多い。それゆえ複雑な熱実験を物質伝達実験に置換し，得られた実験結果から間接的に熱伝達率を測定する方法が発達し，1920～1930 年にかけて W. Lohrish[1]，H. Thoma[2] らによりモデル表面に濃リン酸を浸した吸取り紙をつけて，それに NH_3 ガスを吸収させる方法で物質伝達実験を行ない円管群等の間接的な熱伝達

率を測定している。ナフタリンのような昇華する拡散性物質でモデルを作り気流にさらす昇華法による熱伝達率を求める実験は1940年以降 C. C. Winding[3] などにより始められ，理論および緒実験例が福井[4] らにより述べられている。この方法により気流にさらす実験前後のモデルの重量差ないしモデル表面形状の変形量からモデルの平均的な熱伝達率ないし局所的熱伝達率を知ることができる。

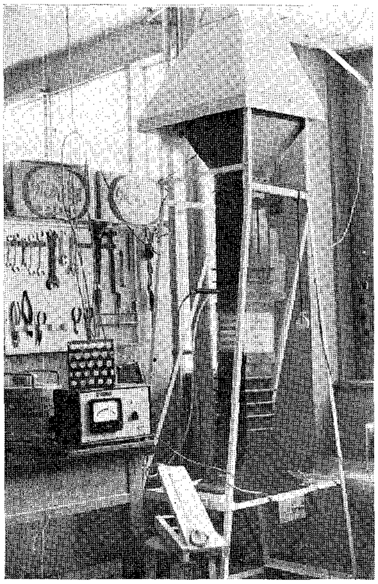
本報においては，ボイラーの中の蒸発管あるいはコンデンサー中の冷却管等に広く適用されている円管群の熱伝達率をナフタリン昇華実験によって間接的に測定したものである。

従来この種円管群の種々の配列に対する実験は，各段を一括し総括的に表わすことが多いので，本報では流れ方向に対する各段あたりの熱伝達率を求め図表化した。

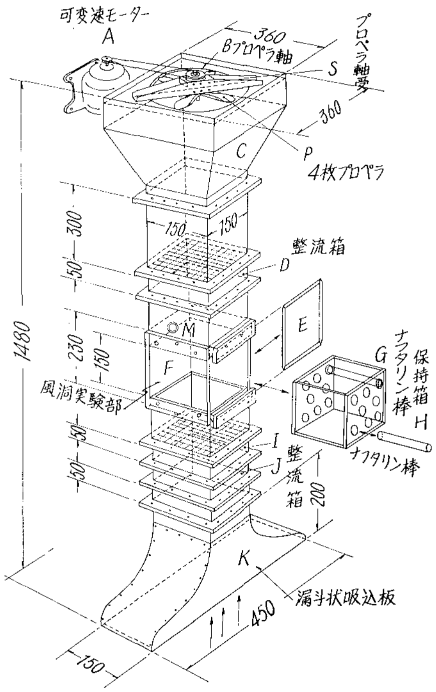
II. 実験装置および方法

写真-1は本実験装置を示す。上部より排気筒，風洞，サーミスタ風速計，傾斜式マノメータ等が置かれている。

図-1は本実験装置概略であり，本装置は開放型吸込み式小型風洞と実験部に置くナフタリン棒保持箱 G および上述の計測装置とナフタリン製丸棒 (15 mmϕ×150 mm) よりなっている。



写真—1 実 験 装 置



図—1 実 験 装 置

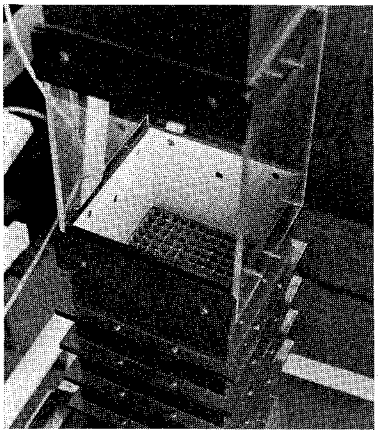
風 洞 概 要

本風洞は解放型吸込み式である。空気はまず漏斗吸込板 K で一様な加速で吸込まれ，I, J

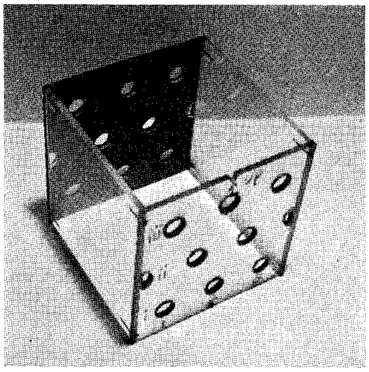
なるブリキ製蜂の巣式整流板 (10 mm×10 mm) を内装した整流箱を通過し，整流されて断面 (150 mm×150 mm) の透明アクリル製風洞実験部 F に入る。

そこで，前板 E を開いてナフタリン製丸棒 H を保持したナフタリン棒保持箱 G を実験部 F に置いて前板 E を閉じ，実験を行なう。その上部にサーミスタ風速計，温度計挿入口 M がありここで実験中の風速，温度を計測する。そして空気は整流箱 D に入り，プロペラ巻き込み流を防止されてベンチュリー部 C に入り動圧降下を起しプロペラの役目を増加させる。プロペラ P は径 (308 mm) の4枚羽根で，出力 40 watt の可変速モーター A (600～3000 rpm) により駆動されて 0.3～6 m/s の流速が得られる。

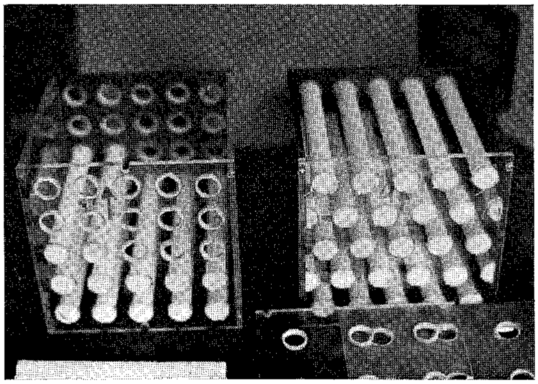
風洞実験部 F は透明アクリル板製で外部から見え，その詳細を写真-2に示す。この実験部に挿入する保持箱（3列千鳥配列）の一例を写真-3に示す。また千鳥，碁盤目型5列配列の保持箱とナフタリン棒装着状態を写真-4に示す。



写真—2 風洞実験部



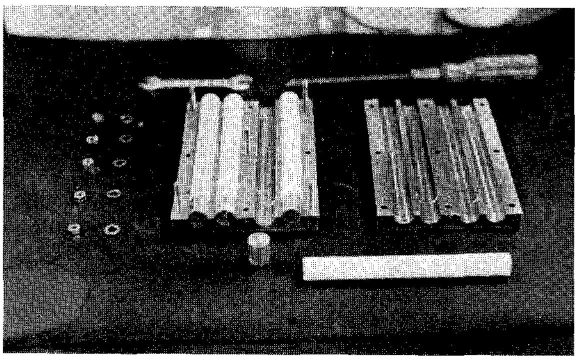
写真—3 保持箱



写真—4 ナフタリン棒の装着

ナフタリン棒の鋳造

使用ナフタリン棒の寸法は直径 15 mm, 長さ 150 mm である。鋳型は黄銅製として 写真-5 に示すように一度に 4 本のモデルを製作できるようにし，割れ型構造とした。ナフタリンの融点は 80.7°C で，ナフタリン粉末をビーカに入れ，それを沸騰した湯の中で加熱して溶融した。溶融したナフタリン液をあらかじめ 50°C 前後にあたためた鋳型にそそいで鋳造した。ナフタリンの緒性質を 表-1 に示す。



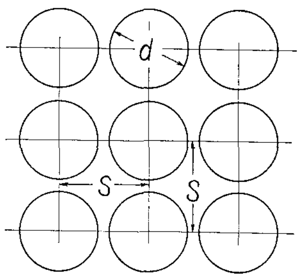
写真—5　ナフタリン棒鋳型

表—1　ナフタリン諸性質

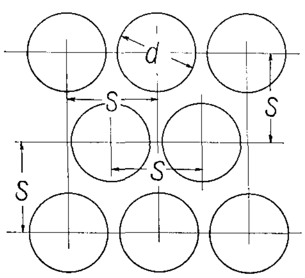
化学式	C_8H_{10}
溶融点	80.7°C
沸点	217.9°C
分子量	128.16 kg·m/kmol
ガス定数	6.615 kg·m/kg·°K
昇華の潜熱	133 kcal/kg
比重量	1.145 gr/cm³

ナフタリン棒の配列

ナフタリン棒保持実験箱は 5 mm 厚アクリル板製で，箱前後のアクリル板に棒配列に相当する直径 17.5 mm の穴をあけ，この板と側板をネジ止めして取りはずしを可能として他の異なる配列板と取り換え可能とした。穴の周囲は重量測定の際，ナフタリン棒出し入れにより損傷しないようにネルの布を貼った。熱伝達率は千鳥配列か碁盤目配列かにより異なるが，さらには棒径 d に対する円管群のピッチ間隔 S の比 S/d を一要因とした。円管群の横ピッチと縦ピッチを変えることは実験研究上必要なことであるが，本報においては実験値の整理上両ピッチを等しくした。本実験においては 3, 4, 5 列の 3 段階に分けて碁盤目，千鳥各配列の実験箱を作製した。3, 4, 5 各配列のピッチは各々 46.4 mm, 35 mm, 28 mm となり d は 15 mm であるから S/d 値は各々 3.09, 2.33, 1.87 となる。



図—2　碁盤目配列



図—3　千鳥配列

III.　ナフタリン昇華法による測定理論

使用記号の説明

m:	物質移動量	$kg/m^2{\cdot}h$	D:	拡 散 係 数	m^2/h
a:	温度伝導率 $a=\lambda/\rho{\cdot}C_P$	m^2/h	ρ:	密　　度	$kg{\cdot}s^2/m$
λ:	熱 伝 導 率	$kcal/m^2h°C$	C:	ナフタリン濃度	kg/m^3
ν:	動粘性係数	m^2/s	u, v:	x, y 方向速度	m/s
θ:	温　　度	°C	h:	熱 伝 達 率	$kcal/m^2h°C$
h_D:	物質伝達率	m/h	d:	ナフタリン棒径	m

Suffix　1　ナフタリン状態

W および ∞ を壁面および流体側遠方状態とする。

$S_c=\nu/D$: Schmidt 数　$P_r=C_P{\cdot}\mu/\lambda$: Prandtl 数　$R_e=u{\cdot}d/\nu$: Reynolds 数

$N_u=h{\cdot}d/\lambda$: Nusselt 数　$Sh=h_D{\cdot}d/\lambda$: Sherwood 数

拡散現象 (Fick の法則)

濃度が場所によって異なる二成分系ないし多成分系流体において均一な濃度になるように拡散現象が起る。物体表面からの蒸発，昇華等の拡散現象はすべて Fick の法則に支配され移動質量 m は流体中の一成分濃度 $C\,kg/m^3$ とするとき次式で示される。

$$m=-D{\cdot}dC/dx \tag{1}$$

完全気体の濃度はその成分系ガスの分圧であるから，次式に変換される。

$$m=-D/(R_1{\cdot}T_1){\cdot}dP_1/dx \tag{2}$$

ここで P_1 はナフタリン蒸気分圧である。

基礎微分方程式

物質伝達または熱伝達においては次の境界層内基礎微分方程式が成立する。

連続方程式　$$\partial u/\partial x+\partial v/\partial y=0 \tag{3}$$

運動量方程式　$$u{\cdot}\partial u/\partial x+v{\cdot}\partial u/\partial y=\nu{\cdot}\partial u^2/\partial^2 y \tag{4}$$

物質移動方程式　$$u{\cdot}\partial P_1/\partial x+v{\cdot}\partial P_1/\partial y=D{\cdot}\partial P_1^2/\partial^2 y \tag{5}$$

エネルギー方程式　$$u{\cdot}\partial\theta/\partial x+v{\cdot}\partial\theta/\partial y=a{\cdot}\partial\theta^2/\partial^2 y \tag{6}$$

境界条件　$$\left.\begin{array}{llll} y=0; & u=0, \quad v=v_W, & P=P_W, & \theta=\theta_W \\ y=\infty; & u=u_\infty, & P=P_\infty, & \theta=\theta_\infty \end{array}\right\} \tag{7}$$

相似変数 η を次式の如く定め，Blasius 変数変換を行なう。

相似変数　η　$$\eta=y/2{\cdot}\sqrt{u_\infty{\cdot}/\nu{\cdot}x} \tag{8}$$

流れ関数　$\psi(\eta)$　$$\psi=\sqrt{\nu{\cdot}u_\infty{\cdot}x}\int f(\eta){\cdot}d\eta \quad 但し\quad f(\eta)=u/u_\infty \tag{9}$$

温度関数　$F(\eta)$　$$F=(\theta-\theta_W)/(\theta_\infty-\theta_W) \tag{10}$$

濃度関数　$\phi(\eta)$　$$\phi=(P_1-P_{1W})/(P_{1\infty}-P_{1W}) \tag{11}$$

関数 $f(\eta)$, $F(\eta)$, $\phi(\eta)$ は無次元化された境界層内速度，温度，濃度である。上述の変数変換により式(4), (5), (6)を常微分化すれば

$$f'''(\eta)+f(\eta)\cdot f''(\eta)=0 \qquad \text{運動量方程式} \tag{12}$$

$$F''(\eta)+P_r\cdot f(\eta)\cdot F'(\eta)=0 \qquad \text{エネルギー方程式} \tag{13}$$

$$\phi''(\eta)+S_c\cdot f(\eta)\cdot \phi'(\eta)=0 \qquad \text{物質移動方程式} \tag{14}$$

ここで，無次元数 $S_c=\nu/D$, $P_r=\nu/a$ は各々シュミット数，プラントル数とよばれる。

無次元境界条件

$$\eta=0\ ;\ f'(\eta)_{\eta=0}=0,\quad F_{(0)}=0,\quad \phi_{(0)}=0,\quad f_{(0)}=2\cdot v_W/u_\infty\cdot\sqrt{R_{ex}}$$

$$\eta=\infty\ ;\ f'_{(\infty)}=2,\qquad F_{(\infty)}=1,\quad \phi_{(\infty)}=1 \tag{15}$$

境界条件のもとにこの方程式を解けば各々速度，温度，濃度場が得られ，境界条件の相似性より $\nu=a=D$ の場合，すなわち $P_r=S_c=1$ の場合にこれら三つの場は相似であると言われる。R_e 数が余り高くなくかつ物質移動量の少ない場合は $v_W\fallingdotseq 0$ となり，式(12)のみによって速度場が決定され，それにより始めて式(13), (14)が解ける。式(13), (14)中の P_r 数と S_c 数が等しければ，$f(\eta)$ は同一であるから $F(\eta)$ および $\phi(\eta)$ は完全に同一となる。

すなわち，空気中へのナフタリン昇華は S_c 数2.6前後であることから本実験により得られた実験値は，P_r 数2.6前後の流体の強性対流熱伝達率に直接相当する。

強制対流熱伝達率と物質伝達率の次元解析による関係

強性対流熱伝達率：	h	u_∞	d	μ	ρ	C_P	λ	[要因物理量]
次元	$[H/L^2\cdot t\cdot\Theta]$	$[L/t]$	$[L]$	$[M/L\cdot t]$	$[M/L^3]$	$[H/M\cdot\Theta]$	$[H/L\cdot t\cdot\Theta]$	
強制対流物質伝達率：	h_D	u_∞	d	μ	ρ	D		[要因物理量]
次元	$[L/t]$	$[L/t]$	$[L]$	$[M/L\cdot t]$	$[M/L^3]$	$[L^2/t]$		

基本単位数 H/Θ, M, L, t および M, L, t で各々を次元解析すれば，次式の関係が得られる。

$$N_u=\frac{h\cdot d}{\lambda}=C\cdot R_e^m\cdot P_r^n,\qquad Sh=\frac{h_D\cdot d}{D}=C\cdot R_e^m\cdot S_c^n \tag{16), (17}$$

ここで，h_D は次式によって定義される物質伝達率である。

$$m=h_D\cdot(C_{1W}-C_{1\infty})=h_D/(R_1\cdot T_1)\cdot(P_{1W}-P_{1\infty}) \tag{18}$$

式(16), (17)において流体流れの状態と面の形が同じであれば R_e 数は等しくなり両式を割れば

$$h\cdot d/\lambda=h_D\cdot d/D\cdot(P_r/S_c)^n \tag{19}$$

となりナフタン実験より得られる物質伝達率から，指数 n を適当に選ぶ事によりあらゆる P_r

数の場合の熱伝達率を間接的に知ることができる。

実験値の整理

管群配列における最大流速をもって丸棒の R_e 数を決定する。

$$V_{\max}=F/F_{\min}\cdot V \text{ m/s} \qquad \text{但し} \quad F=b\cdot I \text{ m}^2 \tag{20}$$

F: 風洞断面積　V: 風洞断面におけるサーミスタ風速

$$F_{\min}=(b-n\cdot d)\cdot I \tag{21}$$

b: 風洞の幅　d: 丸棒径　I: 棒の長さ　n: 丸棒横列数

よって R_e 数は

$$R_e=V_{\max}\cdot d/\nu \tag{22}$$

単位時間あたりこの風洞を流れる空気流量 Q_a m^3/h

$$Q_a=V\cdot F \text{ m}^3\text{/h} \tag{23}$$

ナフタリン棒の表面濃度は表面温度で飽和していると考える。

$$C_{1W}=P_{1W}/R_1\cdot T_1 \tag{24}$$

ただし，P_{1W} は $\log P_{1W}=11.7797-3812.34/T-0.02593\log T$ にて与えられるナフタリン表面蒸気圧である。

m 段目にさしかかった時の空気中に含まれるナフタリン濃度は $(m-1)$ 段目までの全減少量を $\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=0}^{n}M(i,j)$ とすれば，ナフタリン濃度 $C_{1\infty}(m-1)$

$$C_{1\infty}(m-1)=\sum_{i=0}^{m-1}\cdot\sum_{j=0}^{n}M(i,j)/Q_a\times\frac{3600}{t} \tag{25}$$

m 段目をすぎた直後の濃度 $C_{1\infty}(m)$

$$C_{1\infty}(m)=\sum_{i=0}^{m}\cdot\sum_{j=0}^{n}M(i,j)/Q_a\times\frac{3600}{t} \tag{26}$$

$S_1=C_{1W}-C_{1\infty}(m-1)$, $S_2=C_{1W}-C_{1\infty}(m)$ と置けば平均対数平均濃度差 S_S は次式となる。

$$S_S=(S_1-S_2)/\ln(S_1/S_2) \tag{27}$$

従って，i 段目，j 列目のナフタリン丸棒の実験後の減少量 mij とするとき物質伝達率 h_Dij は

$$h_Dij=mij/(A\cdot S_S). \tag{28}$$

ただし，A は丸棒の表面積にして $\pi d\cdot L$ であらわされ，t は実験時間である。

IV.　実験結果と考察

表-2 に代表的な実験測定値表を示す。温度 θ°C，速度 V m/s，圧力 P mm を測定し実験

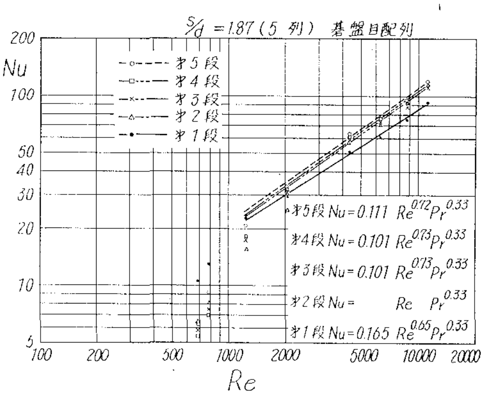
表—2 三列碁盤目配列実験ダーターの一例

S/d	θ ℃	V m/s	P mm	ν m²/s	T sec	R_e	D m²/s	S_c	C_w	$\varDelta P$
3.09	19.2	6.1	767.0	0.1551×10^{-4}	3600	8693	2.098×10^{-2}	2.66	3.313×10^{-4}	0.30

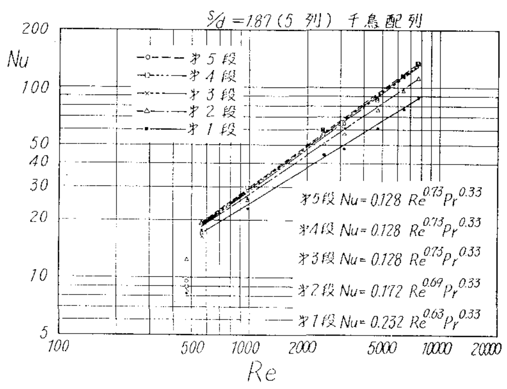
段	列	実験前重量	実験後重量	重 量 減	濃 度 差	物質伝達率	Sh
m	n	I gr	II gr	(I-II) gr	S_S	h_D	
	1	45.8327	45.5099	0.3228		148.1	105.8
1	2	46.1592	45.8380	0.3212	3.302×10^{-4}	147.4	105.3
	3	46.0164	45.6915	0.3249		149.1	106.5
	1	46.1485	45.7890	0.3595		166.1	118.7
2	2	45.9298	45.5577	0.3721	3.278×10^{-4}	172.0	122.9
	3	46.2430	45.8737	0.3693		170.7	122.0
	1	45.9373	45.5802	0.3571		166.3	118.9
3	2	46.0109	45.6402	0.3707	3.253×10^{-4}	172.7	123.4
	3	46.2532	45.8939	0.3593		167.4	119.6

時間 Tsec，空気の動粘性係数 ν 等より R_e 数，拡散係数 D，S_c 数および蒸発濃度 C_W を計算し，各段 m の各列 n のナフタリン棒の実験時と実験後の重量を測定した。各段の各列の重量減少量の差は列間においてほとんどないことより流速状態は均一にして良好なることがわかる。

蒸発濃度 C_W と各段あたりの空気中のナフタリン濃度から対数平均濃度差 S_S を計算し，物質伝達率 h_D を計算し，熱伝達の N_u 数に対応する物質伝達の Sh 数を計算した。以下この Sh 数と N_u 数を対応させるために $(P_r/S_c)^n$ の指数 n は，従来 Colburn の提唱している $n=1/3$ をもってまとめた。以下5列，4列，3列配列の千鳥，碁盤目配列の場合の N_u 数と R_e 数を対数グラフに図示する。以下図-4から図-9まではナフタリンの空気中に対する S_c 数が2.6

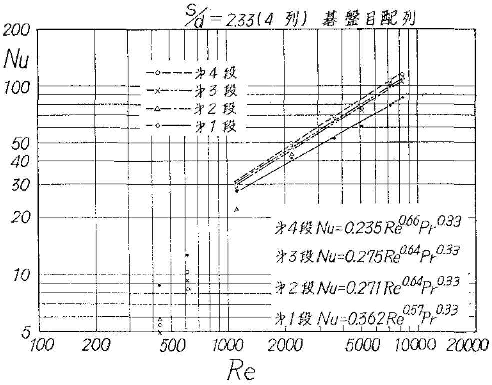


図—4 五列碁盤目配列 N_u-R_e 線図

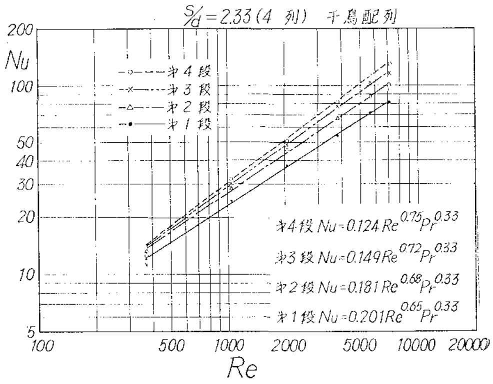


図—5 五列千鳥配列 N_u-R_e 線図

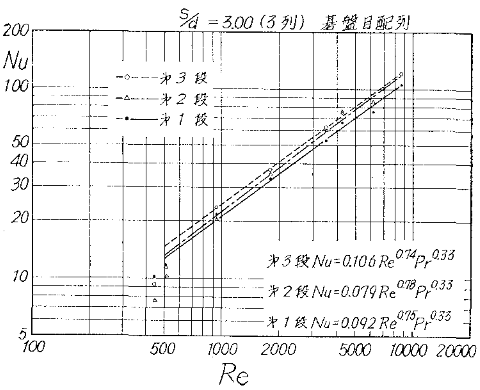
前後より P_r 数 2.6 前後に対する N_u 数分布に相当するものである。対数方眼紙により横軸に R_e 数，縦軸に N_u 数をとれば，勾配は R_e^m の指数 m を表わし，縦軸との切片は定数 C を表わす。各実験結果は大略 R_e 数 1000 以上においては法則性を示し，各図中に各段あたりの実験公式を与えた。定数 C はナフタリンの場合 $S_c^{1/3}=1.38$ 倍がかかっているために $P_r^{1/3}$ を考慮しない実験公式に比し C の値がこの倍数だけ小さくて，この実験式は従来行なわれた空気 ($P_r=0.72$) 中の Grimson[5] の熱実験式あるいは Lohrish[1], Thoma[2] 等が行なったアンモニア吸収法 ($S_c=1.04$) による実験式と比較出来て便利である。図-4, 図-5 は $S/d=1.87$ における碁盤目，千鳥配列の N_u 数分布である。図-6, 図-7 は $S/d=2.33$ における碁盤目，千鳥配列の N_u 数分布である。図-8, 図-9 は $S/d=3.09$ における碁盤目，千鳥配列の N_u 数分布である。各実験結果は大略千鳥配列においては R_e 数 600 ぐらいから，碁盤目配列においては R_e 数 2000 ぐらいから法則性を示している。そして常に千鳥配列のほうが碁盤目配列に比し，N_u 数 20～30% 高いことを示している。各段あたりの熱伝達率は碁盤目よりも千鳥配列のほうが段あたりの差が大きいが，全体的にみて千鳥配列は S/d が大きくなるにつれて各段あたりの N_u 数の差が小さ



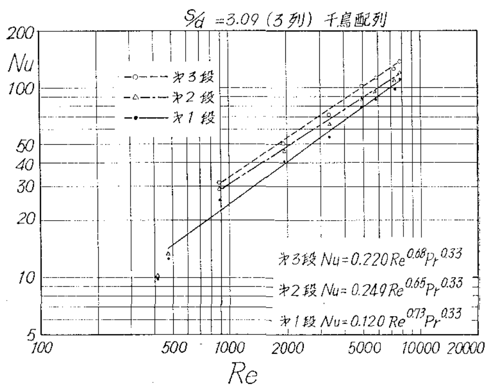
図—6　四列碁盤目配列 N_u-R_e 線図



図—7　四列千鳥配列 N_u-R_e 線図



図—8　三列碁盤目配列 N_u-R_e 線図



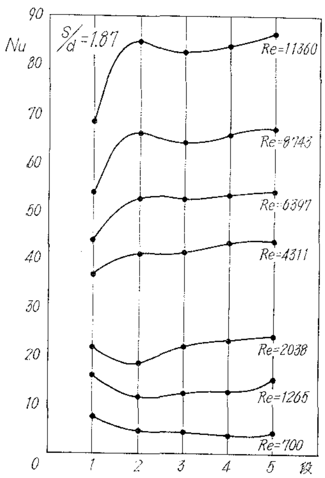
図—9　三列千鳥配列 N_u-R_e 線図

くなり碁盤目配列は S/d が大きくなるにつれて各段あたりの N_u 数の差が大きくなる傾向があるが S/d と各段の N_u 数間には極大値があるようである。表-2 には図-4 より図-9 までに得られた各種配列に対する各段の暫定的な熱伝達率実験式の未知定数 C および m を一括してまとめたものである。図-10, 11, 12 は，前実験により得られた実験値を $S_c^{1/3}$ 分の一だけ小さくして一般化し，R_e 数をパラメーターにした各段あたりの碁盤目配列の場合の N_u 数分布である。碁盤目配列においては R_e 数が 2000 ぐらいまでは各段あたりの熱負荷率はあまり変わらないことがわかる。R_e 数が 5000 ぐらいになれば S/d が大きなうちは各段の N_u 数の差はあまり

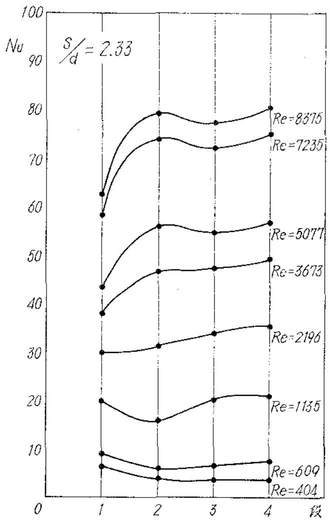
表—3 ナフタリン実験による $N_u=C\cdot R_e^m\cdot P_r^{0.33}$ 式の定数 C, m の決定

S/d	3.09				2.33				1.87			
配列	千鳥		碁盤目		千鳥		碁盤目		千鳥		碁盤目	
S_c	2.649		2.650		2.650		2.674		2.668		2.640	
段＼定数	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m
5									0.128	0.73	0.111	0.72
4					0.124	0.75	0.235	0.66	0.128	0.73	0.101	0.73
3	0.220	0.68	0.106	0.74	0.149	0.72	0.275	0.64	0.128	0.73	0.101	0.73
2	0.249	0.65	0.079	0.78	0.181	0.68	0.271	0.64	0.172	0.69		
1	0.120	0.73	0.092	0.75	0.201	0.65	0.362	0.57	0.232	0.63	0.165	0.65
平均熱伝達率	0.196	0.687	0.092	0.757	0.1637	0.70	0.285	0.627	0.157	0.702	0.119	0.707

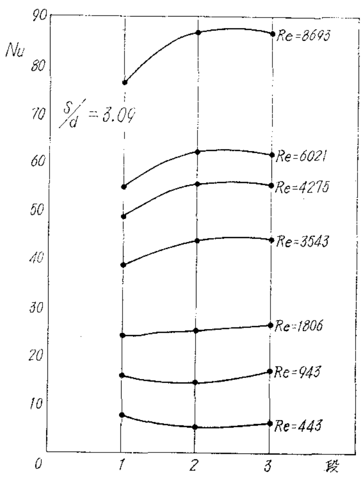
碁盤目各配列に対する各段別の R_e 数をパラメータとした場合の熱伝達分布



図—10 五列碁盤目配列

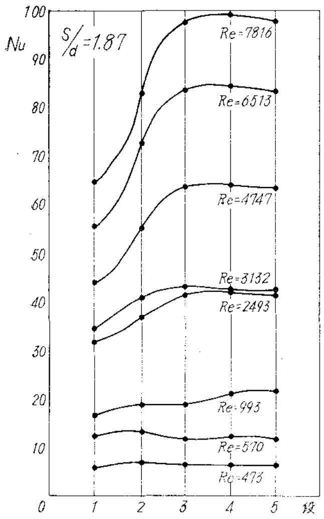


図—11 四列碁盤目配列

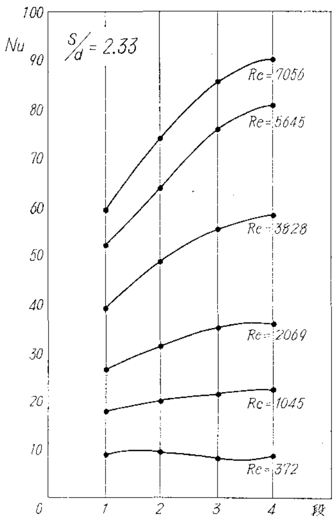


図—12 三列碁盤目配列

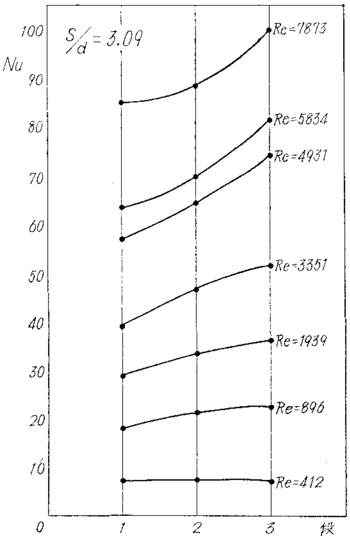
千鳥各配列に対する各段別の R_e 数をパラメーターとした場合の熱伝達率分布



図—13　五列千鳥配列



図—14　四列千鳥配列

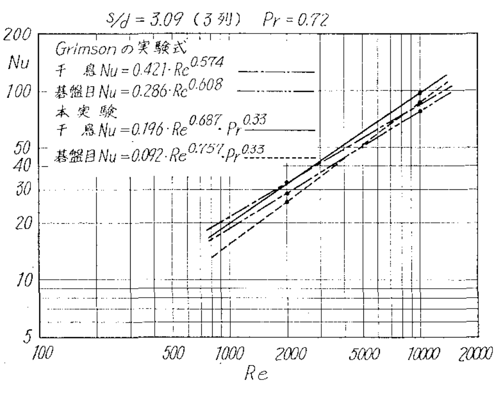


図—15　三列千鳥配列

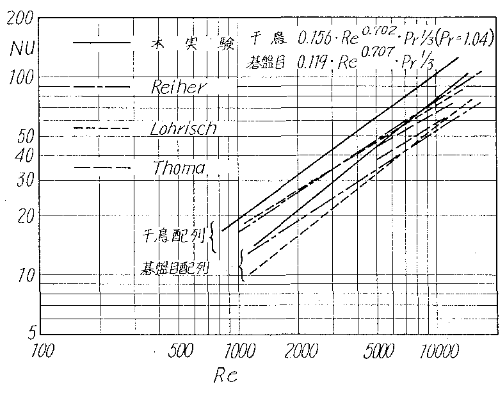
ないが，S/d が小さくなると1段目より2段目にかけての N_u 数の変化が激しくそれ以降の段の N_u 数変化はほとんどなくなる。13, 14, 15図は前同様にし，R_e 数をパラメーターとした千鳥配列下の各段の N_u 数分布である。R_e 数が1000以下においては，各段あたりの N_u 数はほとんど差がないが，R_e 数4000をすぎると1段目，2段目，3段目間の N_u 数変化が激しく S/d が小さくなるに従いこの傾向が増大し，3段目以降はあまり変化がなくなる。全体的に千鳥配列のほうが碁盤目配列に比し各段あたりの伝達率差が非常に大きいことが解る。

本実験結果と従来の実験結果との比較

本実験より得られた実験値はナフタリンの昇華実験によるものであるが，機械工学便覧に掲げられているGrimson の[5] 水平円管群の空気流中熱実験の結果の $S/d=3$ の場合の実験式中



図—16　Grimson の実験との比較



図—17　Lohrish 等の実験との比較

千鳥配列 ($N_u=0.421\cdot R_e^{0.574}$)，碁盤目配列 ($N_u=0.286\cdot R_e^{0.608}$) 各式と本実験における同一条件下三列配列 ($S/d=3.09$) の実験結果得られた平均的実験式 (表-3 参照) より $P_r=0.72$ の場合に適用した N_u 数分布の比較を 図-16 に示す。本実験値と Grimson[5] の値は大略一致しているが，R_e^m の指数 m が本実験においては大きくその分だけ千鳥配列においては R_e 数 5000 以上，碁盤目配列においては R_e 数 2000 以下において偏差が見られる。図-17 はアンモニアを混入した空気流中に濃リン酸を浸したすい取り紙を巻いたモデル間の物質伝達により得た 5 列配列に対する Lohrish[1], Reiher[6], Thoma[2] の実験値と本実験結果の 5 列配列の実験式に $P_r=1.04$ を適用した値を比較したものである。 Lohrish[1] の実験値は $S_1/d=1.78$ (横ピッチ比)，$S_2/d=1.25$ (縦ピッチ比) の場合で，本実験では両ピッチ比 1.87 であり同一条件ではないが比較してみた。W. Lohrisch[1]，H. Reiher[6] の各値はさほどの誤差はないけれども本実験値とは相当な誤差が生じていてその原因は明確でない。$(P_r/S_c)^n$ において指数 $n=1/3$ としてデータ整理したことにも関係がありそうである。

V. 結　　言

本実験研究はまだ中間的なものであるが，ボイラーの蒸発管，コンデンサーの冷却管あるいは各種熱サイクル装置の熱交換器等に広く利用されている円管群の管軸に垂直流れに対する熱伝達率を物質伝達率との相似性からナフタリン昇華法により調べたものである。

実験は径 15 mm，長さ 150 mm のナフタリン棒を 3 列 ($S/d=3.09$)，4 列 ($S/d=2.33$)，5 列 ($S/d=1.87$) 各配列の千鳥および碁盤目に配列し，R_e 数 500 から 10000 までの範囲で実験研究したものであり，実験整理は Colburn の提唱した $(P_r/S_c)^n$ の指数 n を 1/3 として暫定的にまとめたが Sherwood 数と R_e 数間には R_e 数 1000 以上において法則性を持つ事が確認された。これらをとりまとめるとつぎのようになる。

1) 千鳥配列の場合は，実験範囲内において碁盤目配列の場合よりも N_u 数が大きい。

2) 千鳥配列は碁盤目配列に比し各段の N_u 数の変化が大きい。

3) 各段の N_u 数は実験範囲において 1 段目，2 段目，3 段目となるに従い高くなり，この傾向は R_e 数が高くなるほど激しくなるが，4 段目以降は余り変化がなくなる。

4) R_e 数 1000 以下では，各段の N_u 数の変化は実験範囲内でほとんどなくなる。

本研究を行なうにあたり，北海道大学工学部斎藤武教授の御指導を頂き，前室蘭工業大学千谷茂教授ならびに当学機械工学科林重信助教授の御批判，御協力を頂いた。ここに附記して深甚なる謝意を表わす。さらには本学機械工学科学生 (当時) 木村昌之君ならびに小島邦義君の御協力を得た。またデーターの計算処理には当学電子計算機を使用し，電算機室各位の御協力を得た。ここに附記して謝意を表わす。

(昭和 44 年 4 月 30 日受理)

文　献

1) W. Lohrish: VDI Forsch-*h*., 322 (1929), 46.
2) H. Thoma: Hochleistungs Kessel (1921).
3) C. C. Winding & A. J. Cheney: Indst. Engng. Chem., 40-6 (1948), 1087.
4) 福資井夫・森下輝夫: 日本機械学会誌 65 (昭 37), 1480.
5) 日本機械学会編: 機械工学便覧 (改正第4版), 11-29 (1960).
6) H. Reiher: Mitteilung über Forscharbeiten des VDI., Heft 269, 1925.