

粗平板伝熱面から液体への気泡の液体かくはん時の熱伝達促進に関する研究 (第1報)

玉利賢一・蔵迫兼志*・加治屋厚廣・佐藤伸雄

(受理 昭和57年 5月31日)

STUDIES ON THE INCREASE OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS AS THE STIRRING EFFECT OF BUBBLES TO LIQUID FROM A ROUGHNESS FLAT HEATING SURFACES (1st Report)

Masakazu TAMARI, Kenshi KURASAKO, Atsuhito KAJIYA and Nobuo SATO

The heat transfer from the vertical two different kinds of a roughness flat heating surfaces to pure water (H_2O) above $10^6 \Omega cm$ in specific resistance in which the air bubbles were injected through one nozzle with a single upward hole was studied experimentally.

It was found that all experimental data can be correlated by equation (1) and eq. (2) at the following heating surface condition.

That test heating surfaces was made in use under the surfaces condition of plates that performed the plasma coating (atomized weldment) and so the sintering.

It is found that, the following generally relation formula holds within the range of $q \geq 3489 [w/m^2]$, $\xi \geq 10 [mm]$.

$$\bar{\alpha}_{(1)} / \bar{\alpha}_{0(1)} \propto q^{-1/3.8} \cdot (Zn \cdot Q_0)^{3.3/10} \cdot \exp(-0.94\xi/\xi_a) \dots\dots\dots (1)$$

at the within the range of $5 \leq Zn \cdot Q_0 < 30 \quad [N cm^3/s], \xi_a = 55 [mm]$.

$$\bar{\alpha}_{(1)} / \bar{\alpha}_{0(1)} \propto q^{-1/3.8} \cdot (Zn \cdot Q_0)^{3.3/10} \cdot \exp(-1.18\xi/\xi_b) \dots\dots\dots (2)$$

at the within the range of $1 \leq Zn \cdot Q_0 < 5 \quad [N cm^3/s], \xi_b = 42 [mm]$.

Here ξ_a, ξ_b is the smallest values of ξ that keeps the values of $\bar{\alpha}_{(1)} / \bar{\alpha}_{0(1)}$ constant regardless of the heat flux.

1. は し が き

固体壁面からこれに接する液体への熱伝達において液中に気泡が存在する現象は、沸騰現象や気液接触反応をとともなう対流現象として機械工学および化学工学などの多くの分野においてしばしば経験されるもので、気泡の挙動の研究^{1)~14)}をはじめとして、気液二相流熱伝達問題^{15), 16)}をも含めて、今日社会に直結した身近な機器化しつつあるエネルギープラントなど、各種熱交換機部門においての注目事であり、幾多の熱交換機器に対して即解決のための必須問題提起¹⁷⁾が

矢継ぎ早になされているが、いまなお未解決の点が多く残されている。

筆者の一人はさきに鉛直に支持された長方形平滑平板伝熱面とこれに接する液体との間の熱伝達において、伝熱面前方の液中に上向き単口円形ノズルを用いて、ノズル数 Z_n 1個ならびに数個 ($Z_n = 1 \sim 3$) から気泡を吹き込んで液体かくはんを行なった場合の熱伝達促進の効果について報告した。^{18)~21)}

本報告では鉛直に支持された二種類の粗平板伝熱面と純水、空気吹込口(ノズル)数1個 ($Z_n = 1$) の組合せのもとで、粗平板伝熱面表面粗さが気泡による液体かくはん時においていかに熱伝達促進に寄与するか^{22)~30)}について、溶射伝熱面(Plasma coating面)

* 元鹿児島大学大学院生

と焼結伝熱面 (Sintering 面) を使用し, この各伝達面からの熱伝達において

1. 粗平板伝熱面から液体への自由対流熱伝達
 2. 粗平板伝熱面から液体への熱伝達によぼす気泡による液体かくはん時の熱伝達促進効果
- について実験的に検討したものである。

記 号

a	液体の温度伝導率 [m ² /s]
B	伝熱面幅 [mm]
F	伝熱面積 [m ²]
g	重力の加速度 [m/s ²]
G_{rH}	グラスホフ数 $G_{rH} = g\beta H^3 \Delta t / \nu^2$ [無次元]
G_{rH}^*	修正グラスホフ数 $G_{rH}^* = G_{rH} \cdot \bar{N}_{uOH}$ [無次元]
H	伝熱面高さ [m]
$M = M_{50}$	$H = 200\text{mm}$, $B = 50\text{mm}$ の平滑平板伝熱面 (Middle Type) を示す。
$M_{()}$	$H = 200\text{mm}$, $B = 50\text{mm}$ の粗平板伝熱面 (M. T.) を示す。例. $M_{a, \text{wel.}}$, $M_{\text{sint.}}$
n	slope の指数。例. $n_{\text{smo.}}$, $n_{a, \text{wel.}}$, $n_{\text{sint.}}$
\bar{N}_{uOH}	自由対流熱伝達時の平均ヌセルト数 $\bar{N}_{uOH} = \bar{\alpha}_0 \cdot H / \lambda$ [無次元]
P_r	プラントル数 $P_r = \nu / a$ [無次元]
q	熱流束 [Kcal/m ² h]: [W/m ²]
Q_0	標準状態に換算した吹込空気量 [Ncm ³ /s]
Δt	温度差 $\Delta t = t_p - t_b$ [°C]: [K]
$t_b = \theta$	液体の代表温度 [°C]: [K]
t_e	有効温度 $t_e = t_p - 1/4(t_p - t_b)$ [°C]: [K]
t_p	伝熱面表面温度測定表 [°C]: [K]
t_w	熱伝導による温度降下を考慮した伝

熱面表面温度

[°C]: [K]

W_{loss}

加熱器の熱損失

[Kcal/h]: [W]

W_{real}

加熱器に与えられた正味電力

[Kcal/h]: [W]

W_{total}

加熱器に与えられた全電力 (入力)

[Kcal/h]: [W]

x, X

空間座標, 伝熱面高さ [cm]

y

空間座標

z

空間座標

Z_n

空気吹込口 (ノズル) 数

[個]

$\bar{\alpha}, \bar{\alpha}_{()}$

空気吹込み時の平滑平板伝熱面, 粗平板伝熱面の平均熱伝達係数

[Kcal/m²h°C]: [W/m²K]

$\bar{\alpha}_0 = \bar{\alpha}_{\text{osmo.}}$

平滑平板伝熱面の自由対流平均熱伝達係数。例. $\bar{\alpha}_{\text{osmo.}} = \bar{\alpha}_{0(\text{smo.})}$

[Kcal/m²h°C]: [W/m²K]

$\bar{\alpha}_{0()}$

粗平板伝熱面の自由対流平均熱伝達係数。例. $\bar{\alpha}_{0()} = \bar{\alpha}_{0()50}$

[Kcal/m²h°C]: [W/m²K]

$\bar{\alpha}_{50} = \bar{\alpha}_{\text{smo.}50}$

$B = 50\text{mm}$ の平滑平板伝熱面の場合の平均熱伝達係数

例. $\bar{\alpha}_{50} = \bar{\alpha}_{\text{smo.}50} = \bar{\alpha}_{(\text{smo.})50}$

[Kcal/m²h°C]: [W/m²K]

$\bar{\alpha}_{\text{sint.}50}$

$B = 50\text{mm}$ の焼結平板伝熱面の平均熱伝達係数

例. $\bar{\alpha}_{\text{sint.}50} = \bar{\alpha}_{()50} = \bar{\alpha}_{()}$

[Kcal/m²h°C]: [W/m²K]

$\bar{\alpha}_{a, \text{wel.}50}$

$B = 50\text{mm}$ の溶射平板伝熱面の平均熱伝達係数

例. $\bar{\alpha}_{a, \text{wel.}50} = \bar{\alpha}_{()50} = \bar{\alpha}_{()}$

[Kcal/m²h°C]: [W/m²K]

β

体膨脹係数

[1/°C]: [1/K]

ε

空孔率 [%]

λ

熱伝導率 [Kcal/mh°C]: [W/mK]

ν

動粘性係数

[m²/s]

ξ

伝熱面下端幅方向の中央点から空気吹込口 (ノズル) 中心までの垂直距離

[mm]

ξ_a, ξ_b

$\bar{\alpha}_{()}/\bar{\alpha}_{0()}$ が一定になる ξ の最小値

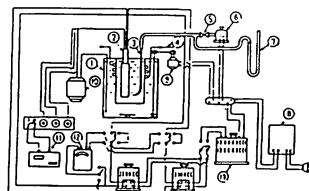
[mm]

添 字

smo.	平滑 (Smooth) 平板伝熱面を示す。 例. $M_{smo.}$, $\alpha_{smo.}$, $\bar{\alpha}(\bar{\alpha}_0)_{smo.}$
a. wel.	溶射 (atmized Weldment) 伝熱面を 示す。例. $\bar{\alpha}_{a. wel.} = \bar{\alpha}_{()} = \bar{\alpha}_{() 50}$
sint.	焼結 (Sintering) 伝熱面を示す。
()	粗面の場合を示す。例. $sint$ OR $a. wel.$
—	平均値
cri	限界値
e	有効値
H	伝熱面高さを代表寸法に選んだ場合 の値
o	空気吹込みなしの値 (自由対流の場合 の値)
real	真の値
SI	SI 単位表示
w	伝熱面表面の値
x	局所値
50	伝熱面幅が $B = 50$ mm である事を示 す。

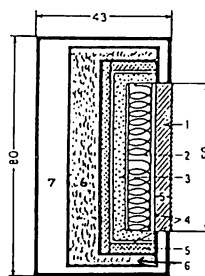
肩 記 号

*	グラスホフ数だけに用いて、修正グ ラスホフ数を示す。
#	表面粗さを表わす。Tyler 法。 [mesh]



1. thermostat vessel
2. test section
3. air injection nozzle
4. cooling device
5. needle regulator
6. mini rotary compressor
7. manometer
8. volt slider
9. agitator
10. cooled junction
11. precision digital meter
12. watt meter
13. slidac

Fig. 1. The arrangement of the whole apparatus.



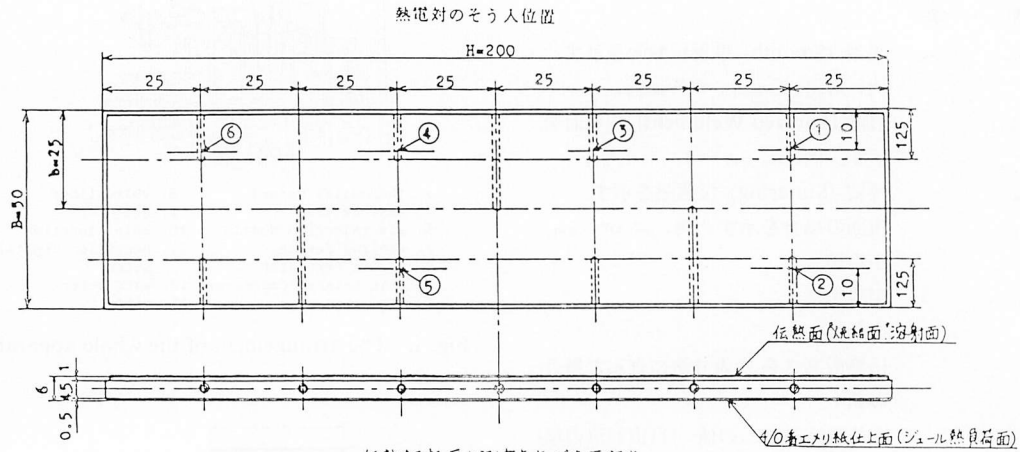
1. test section
(heat transfer surface)
2. nichrome wire
3. grooved plate of fire-clay
4. mica plates
5. asbestos plates
6. glass-cotton
7. air-chamber

Fig. 2. The schematic diagram of the horizontal section of the heater.

2. 実験方法および実験条件

実験装置および実験方法は以下に述べる二種類の粗平板伝熱面を有する加熱器を使用し、試験液体に比抵抗が $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の大気圧の純水と空気吹込口（ノズル：ノズルは上向き単一単口円形 0.9 mm の、さきに報告²⁰⁾した同一同型のものを使用した）数 $Z_n = 1$ に限定した以外はさきの平滑平板伝熱面を使用した報告^{18), 19), 20)}の通りである。実験装置の全体図を Fig 1 (図 1) に示す。この装置を二組準備して、以下に述べる二種類の粗平板伝熱面ごとに、それぞれの加熱器で同一熱流束下で実験研究が行なわれた。伝熱面はさきの平滑平板伝熱面 M 型の Smooth 面（以下、 $M_{smo.}$ と略称）と同型の長方形粗平板伝熱面 $200 \times 50 \times 6$ mm のプラズマコーティング面：溶射伝熱面（以下、 $M_{a. wel.}$ と略称）とシンター面：焼結伝熱面（以下、 $M_{sint.}$ と略称）との二種類を使用し、いずれも液体側伝熱表面

は粗表面になるように配慮して本実験用の加熱器が作られた。加熱器の横断面図を Fig 2 (図 2) に示す。試験伝熱面の寸法とその性状を図 3 に、その表面状態を表 1 に示す。さらに図 4-(a)、に焼結伝熱面粗さの状態顕微鏡⁹⁾写真を、図 4-(b)、に溶射伝熱面粗さの状態顕微鏡⁹⁾写真を例示する。使用粉末成分は溶射伝熱板の場合は電気銅板 (99.8%)、板の厚さ PL 10 mm に純銅粉末 -100 ~ +250 mesh (Tyler 法) を、[Ar, He, H₂, N₂] ガス中でアーク放電させ、電離してプラズマにし 5000 ~ 15000°K のプラズマガスジェット温度中に導入して溶融・高速度 (最大 3000 m/s) でコーティングしたもので、溶射粒子は最大 600 m/s に加速されるといわれている。したがってコーティング面を観察するとかなり粒子はつぶされて表面はあばた状を呈



伝熱銅板厚さ測定点及び表面粗さ

位置	焼結面 (層厚 0.65 mm) 厚さ		溶射面 (層厚 0.5 mm) 厚さ	
	A	B	C	D
1	7.05	7.09	6.68	6.62
2	7.09	7.07	6.64	6.55
3	7.01	7.05	6.64	6.63
4	6.95	7.03	6.64	6.55
5	6.99	7.06	6.60	6.54
6	6.98	7.03	6.63	6.65
片 (mm)	-32~42	-32~42	-100~+250	-100~+250

図3 伝熱面寸法・測温点およびその性状

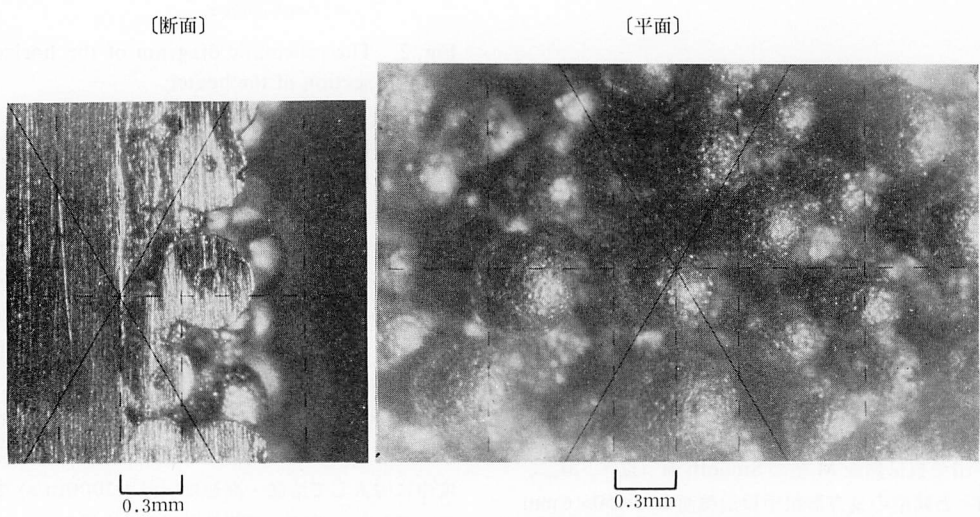


図4-(a) 焼結伝熱面粗さの状態顕微鏡写真 (倍率 30 倍)

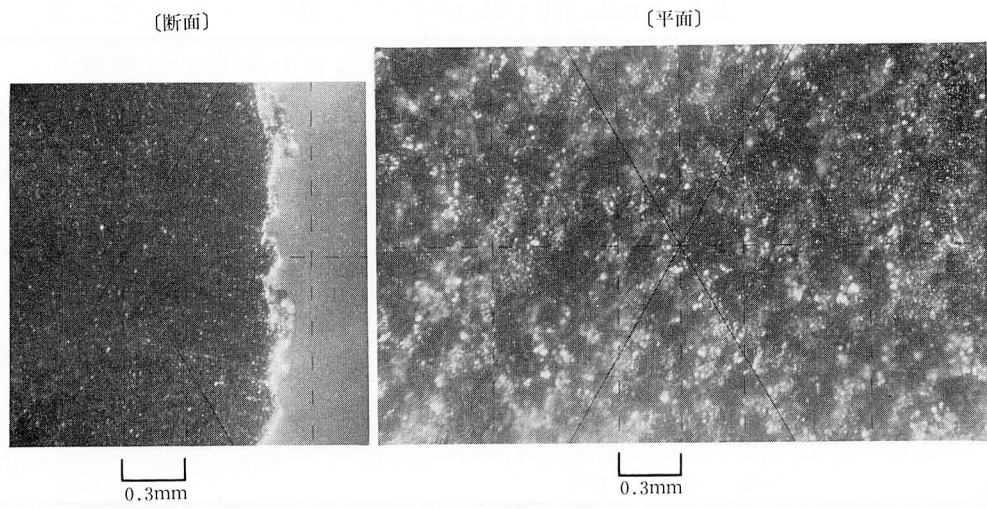


図 4-(b) 溶射伝熱面粗さの状態顕微鏡写真（倍率 30 倍）

表 1. 伝熱面表面状態

諸 値		伝熱面の種類	焼 結 面	溶 射 面
粒 度 (mesh)			-32~+42	-100~+250
平 均 粒 度 (mesh)			37	175
平 均 粒 径 d (μm)			0.398	0.085
面粗さ	Tyler	(mesh)	-32~+42	-100~+250
		(μm)	-495~+351	-147~+61
	JIS	(μm)	-500~+350	-149~+62
層 厚 さ (mm)			0.65	0.5
空 孔 率 ε (%)			22	0.5~10
πd/2 (mm)			0.625	0.134
縦 方 向 粒 子 数 (個)			479.62	2352.9
縦 方 向 長 さ (mm)			314.15	315.3
横 方 向 粒 子 数 (個)			119.90	588.2
横 方 向 長 さ (mm)			78.54	78.8
絶 対 表 面 積 (mm ²)			1.79×10 ⁴	1.79×10 ⁴
実 際 表 面 積 (mm ²)			1.61×10 ⁴	1.75×10 ⁴
平滑面との比較(絶対値)			1.79倍	1.79倍
平滑面との比較(実質値)			1.61倍	1.75倍

る事が図 4-(b) から判かる。一方使用粉末成分が Cu: 89.14%, Sn: 10.6%, P: 0.26% (wt%) で見掛密度は 4.76 gr/cc である。焼結銅板の場合は電気銅板

している (99.8%), PL=10mm にこれらの使用粉末が 800℃で焼結され、焼結厚さ 0.1~0.2mm であるが今回のものは厚めに焼結してある関係から 2~3 層になっている部分も図 4-(a) から判かる。空孔率 ε=22% (Vol. について) であった。本実験に供した二種類の粗伝熱面表面状態を表面粗さ粒度の比較において、溶射伝熱面に比較して焼結伝熱面が 4.73 倍で、伝熱面実表面積については平滑伝熱面と比較すると溶射伝熱面では 1.61 倍、焼結伝熱面においては 1.75 倍であった。Fig 5 (図 5) は伝熱面とノズルの配置および座標軸を示したもので、座標の原点を伝熱面下端で伝熱

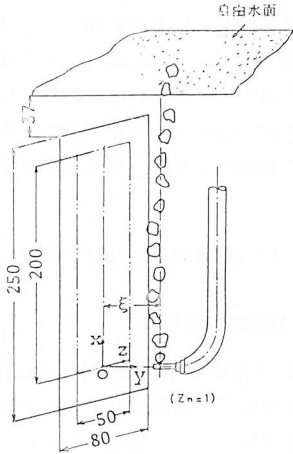


Fig. 5 The arrangement of the air injection glass conduit and nozzle.

表 2. 伝熱面の状態と実験条件およびその範囲

Exp 条件範囲	伝 熱 面 の 状 態						実 験 条 件 お よ び そ の 範 囲							
値と液体・ ガス	高さ H	幅 B	厚さ t	表 面 状 態		表 面 積 m ²	熱流束 q w/m ² ($\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}}$)	ノズル数 Zn 個	ノズル 1 個の吹込 空気量 Q ₀ Ncm ³ /s	全空気吹 込流量 Zn・Q ₀ Ncm ³ /s	伝熱面からノズル 中心までの 垂直距離 ξmm	試 験 液 体 の比抵抗 Ω・cm	液体 の温度 ℃	ガス 体の温度 ℃
				層厚 み	面 粗 さ 符号, - : 通過 + : 止まり									
				伝熱 面の型	mm	mm								
M smo. 平滑面	100	50	5	0	エメリー仕上 4/0番 (酸化面)	1 × 10 ⁴ 1	1047 (900)	1	0.21 0.96 1.87	0.21 0.96 1.87	70 60 50 40 30 20 10 5 2.5			空気
M a.wel. 溶射面	200	50	6	0.5	-100 +250	-149 +62	1.79 × 10 ⁴ 1.75	12677 (10900)	9.44 20.75	9.44 20.75	10 ⁶ 以上	H ₂ O	28	28
M sint. 焼結面				0.65	-32 +42	-500 +62	1.79 × 10 ⁴ 1.61							

面幅方向 (Z 方向) の中央点にとる, 図中の二点鎖線で示した長方形部分が伝熱面に相当することを示す. 本実験は空気吹込口 (ノズル) 数が 1 個 ($Z_n=1$) の場合について実験されたが, ノズルの位置は $x=0, z=0$ の伝熱面下端表面上を原点に, 伝熱面に対して垂直な y 方向の距離 ξ を, $\xi=2.5, 5.0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 \text{ mm}$ と色々変化して, この場合の粗平板固体壁面から純水への対流熱伝達が調べられた. 表 2 に伝熱面の状態と実験条件およびその範囲を示す. 実験範囲として: 熱流束 q は $1047 \leq q \leq 12677 \text{ W/m}^2$ で吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ は $0.21 \leq Z_n \cdot Q_0 \leq 20.75 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の範囲で, また伝熱面からノズル中心までの垂直 (y 方向) 距離 ξ は $2.5 \leq \xi \leq 70 \text{ mm}$ であった. かくして本研究は二種類の粗平板伝熱面: $M_{a.wel.}$, $M_{sint.}$ にわたって熱流束 q , 吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ と空気吹込位置 ξ との組合せにおいて実験が行なわれた. なお自由対流熱伝達の実験は空気吹込口等の関連部分を除いて, 空気吹込なしの状態で上記同一の装置で行なわれた.

3. 実験結果および考察

3.1 自由対流時の熱伝達

粗伝熱面から液体や空気への自由対流熱伝達の研究^{31)~33)}は数少なく, 結果において多少の差異が見られる. 本実験においては液中に鉛直に支持された一様熱流束の条件下で加熱された溶射伝熱面 $M_{a.wel.}$ および焼結伝熱面 $M_{sint.}$ の二種類の粗平板伝熱面か

ら液体への自由対流熱伝達^{付録 1, 付録 2}について述べる. 図 6 に溶射伝熱面, 図 7 に焼結伝熱面の粗伝熱面表面壁温変化を示す. 図において伝熱面表面温度分布は

$$\left. \begin{aligned} (t_{w,a.wel.} - t_b) &\propto X^{1/5} \\ (t_{w,sint.} - t_b) &\propto X^{1/5} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

の関係が成立し, 平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ の場合と同様の傾向が得られた. また図 8 は \bar{N}_{uOH} と $(G_{rh}^* \cdot P_r) \cdot P_r / (0.8 + P_r)$ の関係を, さきに報告^{19), 20)}した平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ との比較において示したものであるが, 本試験粗平板伝熱面から液体への自由対流熱伝達は, 平滑平板伝熱面の次式³⁴⁾ (2) と同様の結果を得た.

$$\bar{N}_{uOH} = 0.74 [G_{rh}^* \cdot P_r \{P_r / (0.8 + P_r)\}]^{1/5} \dots\dots (2)$$

式 (2) において実験点はすべて一様熱流束時の 1/5 乗則に従う事が判った. また図 9 に自由対流熱伝達における $\bar{\alpha}_{o()}$ と q との関係を例示する. $M_{smo.}$; $M_{a.wel.}$; $M_{sint.}$ の各伝熱面から液体への平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}_{o()}$ は熱流束 q との関係において, いずれも

$$\bar{\alpha} \propto q^{1/5} \dots\dots (3)$$

の関係を示すことが明示された. 検討の結果, さきに報告^{19), 20), 21)}した平滑平板伝熱面の結果からその平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}_{o(smo.)}$ は次の式 (4)

$$\bar{\alpha}_{o(smo.)} = 73.40 q^{1/5} \dots\dots (4)$$

で表わされた. また本粗平板伝熱面の実験結果から溶射平板伝熱面に対してその平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}_{o(a.wel.)}$ は次に示す式 (5)

$$\bar{\alpha}_{o(a.wel.)} = 76.05 q^{1/5} \dots\dots (5)$$

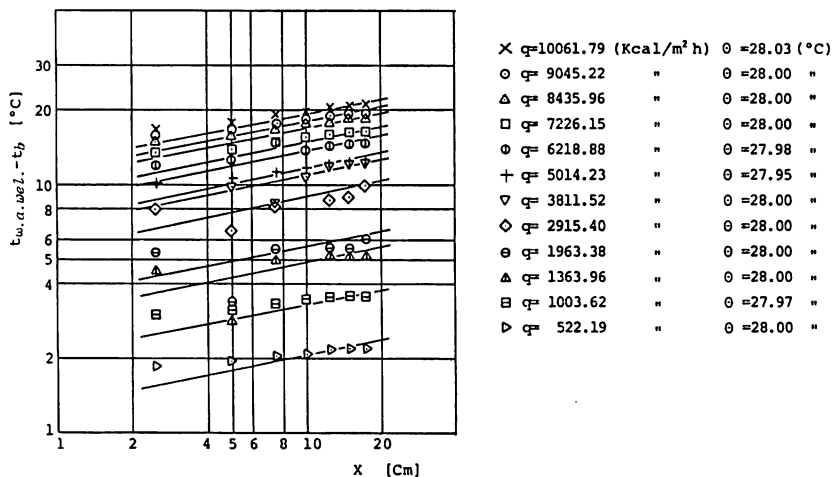


図6 溶射伝熱面の壁温変化

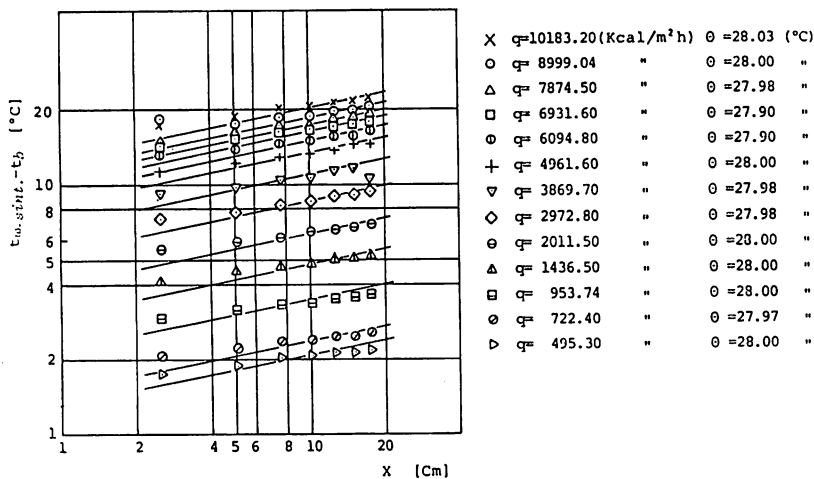


図7 焼結伝熱面の壁温変化

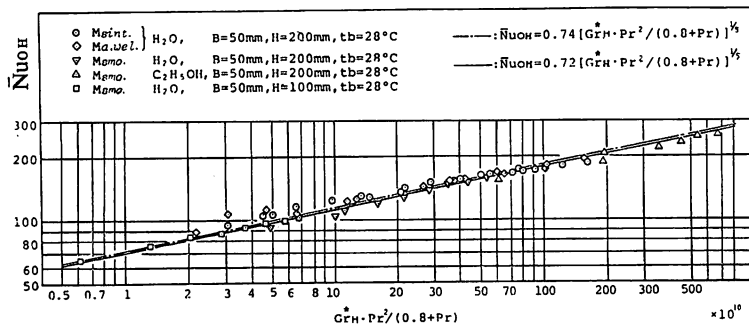


図8 \bar{Nu}_{0H} と $(Gr_H \cdot Pr) \cdot Pr / (0.8 + Pr)$ の関係

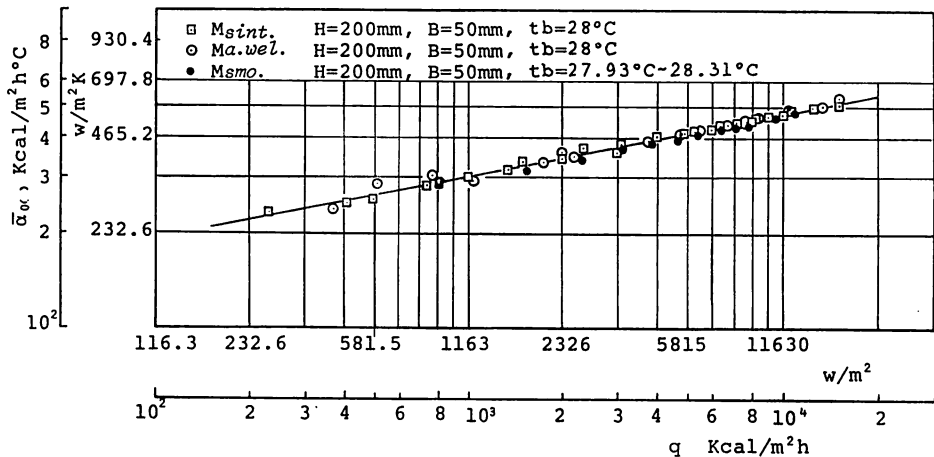


図9 自由対流熱伝達における平均熱伝達係数と熱流束との関係

表3. 自由対流熱伝達における $\bar{\alpha}_0$ と q の関係

項目	$\bar{\alpha}_0$ と q の関係式	単一平板伝熱面との比較
伝熱面種類		
$M_{smo.}$	$\bar{\alpha}_0 = 73.40 q^{1/5}$	——
$M_{a.wel.}$	$\bar{\alpha}_0 = 76.05 q^{1/5}$	+3.5%
$M_{sint.}$	$\bar{\alpha}_0 = 76.12 q^{1/5}$	+3.7%

与えられる。また焼結平板伝熱面からの平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}_{0(sint.)}$ は次式 (6)

$$\bar{\alpha}_{0(sint.)} = 76.12 q^{1/5} \quad \dots\dots (6)$$

で得られる。これらの実験結果を表3に示す。表3からこの程度の伝熱面液体側表面粗さの相違に基づく自由対流熱伝達におよぼす影響は極めて小さい事が判り、さらに平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ からの平均自由対流熱伝達係数と比較して、比較的低熱流束領域: $267 \leq q \leq 5815 \text{ W/m}^2$ において粗平板伝熱面からの平均自由対流熱伝達係数 $\bar{\alpha}_0$ は3~4%増の傾向が得られた。本粗伝熱面, $M_{a.wel.}$ & $M_{sint.}$ の $\bar{\alpha}_0$ と q との精度を表録3に示す。しかるに $M_{smo.}$ 平滑平板伝熱面から液体への (H_2O & $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 自由対流熱伝達は、その無次元整理の結果式 (2) の比例定数 0.74 は実験の結果 0.72~0.74 の範囲でまた Sparrow らの相似解³⁷⁾ にほぼ一致成立するから、 \bar{N}_{uOH} は最大 2.7% の範囲において収まる事が判かる。すなわち液体温度 $t_b = 28^\circ\text{C}$ 一定条件の下で厳密に分析してみると、粗平板伝熱面からの自由対流熱伝達の結果は、二つの粗平板伝熱面: $M_{a.wel.}$, $M_{sint.}$ は共にその無次元整理の

結果、平均ヌセルト数 \bar{N}_{uOH} は平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ に比較して式 (2) により一層よい一致を示す事が明示された。この事はさきの図9からも首肯できる。以上の事から自由対流熱伝達におよぼす表面粗さの影響は極めて小さい事が判明^{31), 32)} した。また今の場合、境界層が層流であるか、乱流であるかを確かめるために藤井らによる、水に対する限界条件:

$$(Gr_{rx}^* \cdot Pr)_c \leq 0.2 \sim 2 \times 10^{13.35})$$

ならびに藤井の限界グラスホフ数 $Gr_{rx, cri}$ に関する実験式³⁶⁾

$$Gr_{rx, cri} = 2.1 \times 10^9 Pr_c^{-3/5}$$

によって検討した。両粗平板伝熱面からの自由対流熱伝達に対して検討の結果 Pr_c 数が、

$$3.77 \leq Pr_c \leq 5.55$$

でこの時、限界グラスホフ数 $Gr_{r0, cri}$ は

$$7.51 \times 10^8 \leq Gr_{r0, cri} \leq 9.47 \times 10^8$$

であった。この時レイリ数 R_{*0} は

$$5.72 \times 10^{10} \leq R_{*0}^* \leq 1.60 \times 10^{12}$$

で充分層流の範囲内^{付録4, 付録5}にあった。なお液中に空気を吹き込み液体かくはんを行なった場合に対しての層流条件について次に述べる。今回の二種類の粗平板伝熱面から液体への空気吹込時における全実験データに対して検討の結果、プラントル数 Pr_c は

$$4.22 \leq Pr_c \leq 5.73$$

にあり、この時、限界グラスホフ数は

$$7.37 \times 10^8 \leq Gr_{Hcri} \leq 8.85 \times 10^8$$

であった。この時レイリ数 R_{*0}^* は

$$7.05 \times 10^{10} \leq R_{*0}^* \leq 1.21 \times 10^{12}$$

であり、層流条件^{付録6, 付録7}を充分満たしている事が明らかとなった。

注)：なお本実験を行なうに当り両粗平板伝熱面を持つ加熱器の熱損失算定のための実験に際して、伝熱面表面が粗表面である関係から伝熱面表面の空孔部分を配慮してこの部分に充填材を流し込む方式をとった。充填材料は検討の結果、流動パラフィン(Liquid Paraffin)^{付録8}使用して外部流体(H₂O)と粗表面部分との縁を断ち切るよう配慮して熱損失の測定を行なった。

3・2 空気吹込時の粗平板伝熱面からの平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}_()$ と熱流束 q との関係

平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ から液体への空気吹き込み

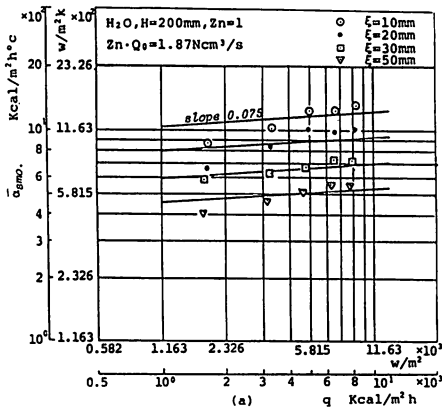


図 10-(a) 気ほう吹き込時の平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}$ と熱流束 q の関係

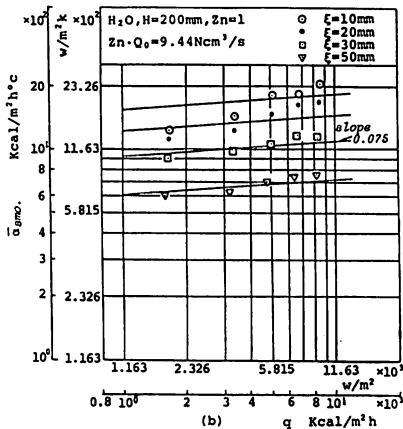


図 10-(b) 気ほう吹き込時の平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}$ と熱流束 q の関係

時の平均熱伝達係数 $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{smo.}$ と熱流束 q との関係をさきの研究^{18), 19), 20)}の結果, $\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_0 - q$ の関係から吹込空気量が次の $Z_n \cdot Q_0 = 1.87 \text{ Ncm}^3/\text{s}$, $Z_n \cdot Q_0 = 20.57 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の場合について図 10-(a), 図 10-(b) に例示する。図から $\bar{\alpha}_{smo.}$ は空気吹込距離 ξ , 吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ のいかんにかかわらず q と共に増加する傾向を示し、次の関係

$$\bar{\alpha}_{smo.} \propto q^{0.075}$$

が得られその Slope の指数 n は 0.075 であった。しかしながら、溶射伝熱面および焼結伝熱面を用いた粗平板伝熱面から液体への熱伝達の結果を $\bar{\alpha}_{a.wel.}$ と q の関係において図 10-1 に、 $\bar{\alpha}_{sint.}$ と q の関係を図 10-2 に例示した。今の場合各伝熱面 $M_{a.wel.}$, $M_{sint.}$ に対して $\xi = 2.5, 10, 30 \text{ mm}$ に限って例示したが $\xi = 5, 20 \text{ mm}$ とともに同様の結果が得られた。粗平

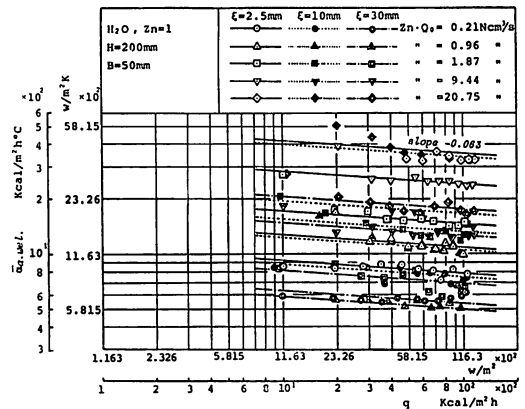


図 10-1 $\bar{\alpha}_{a.wel.}$ と q との関係

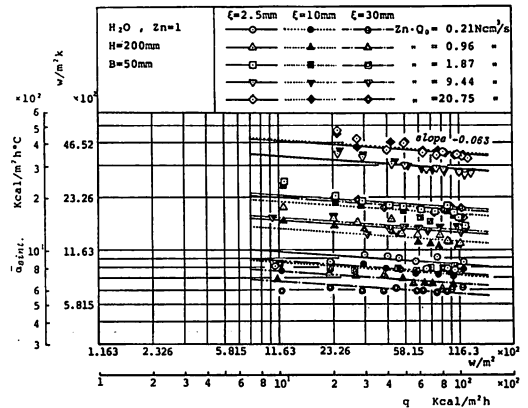


図 10-2 $\bar{\alpha}_{sint.}$ と q との関係

板伝熱面の平均熱伝達係数 $\alpha_{a, \text{wel.}}$, $\bar{\alpha}_{\text{slnt.}}$ は吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ が $Z_n \cdot Q_0 < 9.44 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の範囲では $\xi \leq 30 \text{ mm}$ の場合, q の増加と共に指数関数的に単調に減少する傾向, すなわち次式

$$\bar{\alpha}_{\text{slnt.}} \propto q^{-0.063}$$

の結果が得られた。一方空気吹込位置 ξ が $\xi \geq 40 \text{ mm}$ のごとく比較的大きい場合の $\bar{\alpha}_{\text{slnt.}}$ と q との関係を図 10-3, 図 10-4, の (a)・(b) に示す。図において吹込

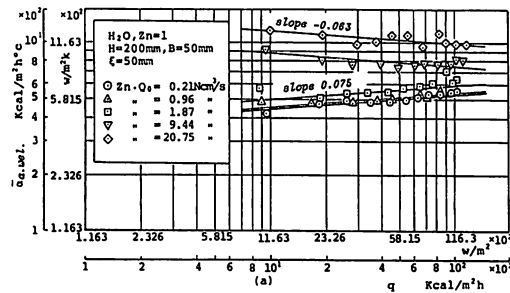


図 10-3 (a) $\bar{\alpha}_{a, \text{wel.}}$ と q との関係

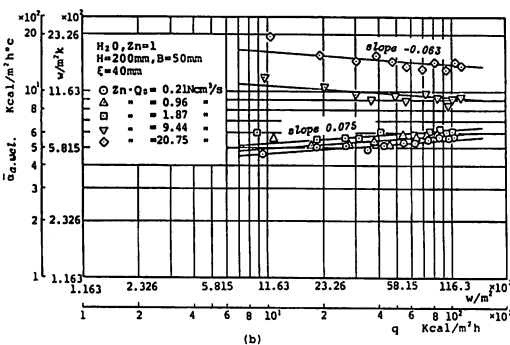


図 10-3 (b) $\bar{\alpha}_{a, \text{wel.}}$ と q との関係

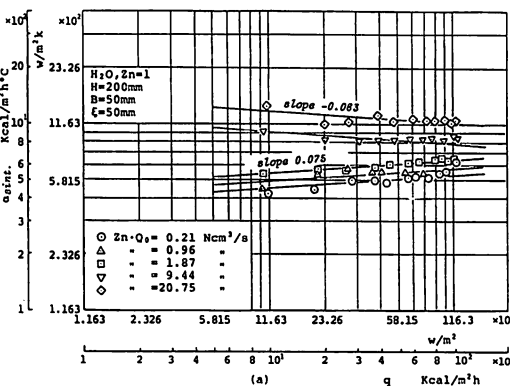


図 10-4 (a) $\bar{\alpha}_{\text{slnt.}}$ と q との関係

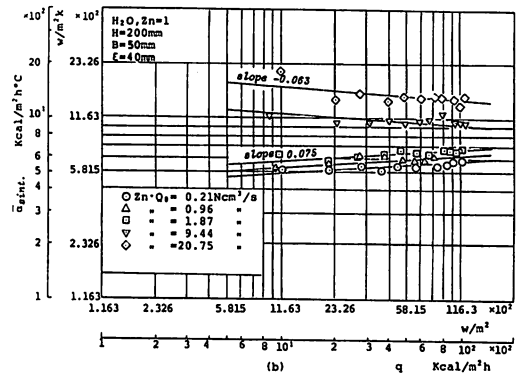


図 10-4 (b) $\bar{\alpha}_{\text{slnt.}}$ と q との関係

空気量が $Z_n \cdot Q_0 < 9.44 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ で空気吹込位置 ξ が $\xi \geq 40 \text{ mm}$ と大きい範囲では, 気泡による液体かく乱の効果はさほど現れられず, 熱流束 q の増加と共に単調に増し, 熱流束の大きい所で各伝熱面ともに平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}_{\text{slnt.}}$ は飽和する傾向を示した。この場合, 粗面平板伝熱面 M_{f} の影響はさほど現れられず, 平滑平板伝熱面 $M_{\text{smo.}}$ と同様な傾向

$$\bar{\alpha}_{\text{slnt.}} \propto q^{0.075}$$

を示すことが判った。また同図において

$$Z_n \cdot Q_0 \geq 9.44 \text{ Ncm}^3/\text{s}$$

の範囲で $\xi = 40 \text{ mm}$ では q の増加と共に平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}_{\text{slnt.}}$ の値は減少し, 吹込空気流量がさらに

$$Z_n \cdot Q_0 = 20.75 \text{ Ncm}^3/\text{s}$$

と増加しても $\xi = 50 \text{ mm}$ と伝熱面から十分離れた吹込位置で ξ の小さい $2.5 \leq \xi < 40 \text{ mm}$ と同様な傾向を示すことが判った。このことから吹込空気流量が多くなればなるほど伝熱面から空気吹込口ノズル中心までの距離 ξ の大きい範囲まで気泡の液体かく乱による影響が及ぶことが判った。すなわち ξ のいかにかわらず, また吹込空気流量にかかわらず図 10-1, 図 10-2 および図 10-3, 図 10-4 の (a), (b) から以下の関係

$$\bar{\alpha}_{\text{slnt.}} \propto q^{-0.063}$$

が成立することが判った。このことを半理論的に求めると次のようになる。ここに自由対流の場合の平均熱伝達係数を $\bar{\alpha}_0$, 空気吹込時の粗面平板伝熱面からの平均熱伝達係数を $\bar{\alpha}_{\text{f}}$ とすると

$$\bar{\alpha}_0 \propto q^{1/5}$$

また 3・3 節に後述のように, 本実験結果から

$$\bar{\alpha}_{\text{f}} / \bar{\alpha}_0 \propto q^{-1/3.8}$$

が得られるので, このことから

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_0 &\propto \bar{\alpha}_{(1)}/q^{1/5} \propto q^{-1/3.8} \\ \therefore \bar{\alpha}_{(1)} &\propto q^{(-1/3.8+1/5)} = q^{-0.063} \end{aligned} \quad \dots\dots(7)$$

を得る。したがって $\bar{\alpha}_{(1)}$ は熱流束 q の増加にともなって一様に減少する傾向を示すことが明らかになった。その勾配は -0.063 で溶射伝熱面、焼結伝熱面ともに同様な結果が得られた。

3.3 平均熱伝達係数比 $\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_0$ と熱流束 q の関係

図 11 に $\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_0$ と熱流束 q との関係を溶射伝熱面 $M_{a, wel.}$ 、焼結伝熱面 $M_{sint.}$ の二種類の伝熱面について例示した。 $\bar{\alpha}_{(1)}$ は気泡による液体かくはん時の粗平板伝熱面における平均熱伝達係数で、図 11 は粗平板伝熱面、 $M_{a, wel.}$ と $M_{sint.}$ を使用して伝熱面前方の空気吹込位置 ξ を変化した場合の熱伝達係数比 $\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_0$ を吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ をパラメーターとして、熱流束 q との関係で例示したものである。図中に平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ の値を破線で並記したが粗平板伝熱面 $M_{(1)}$ との比較において $\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_0$ の傾向は熱流束 q と共に減少し、ある熱流束以上で飽和するのは平滑平板伝熱面、粗平板伝熱面共に同様であるが、その減少の傾向は平滑平板伝熱面の場合と異なる。

(1) 空気吹込位置 ξ が比較的大きい $50 \leq \xi \leq 70$ mm の場合を図 11 の (a), (b), (c), (f) に例示する。図 11 (a) に $M_{sint.}$ と $M_{a, wel.}$ の空気吹込位置 $\xi = 70$ mm の場合を、また図 11 (b) に $\xi = 60$ mm の結果を例示した。図 11 (c) および (f) に $\xi = 50$ mm の位置で空気を吹き込んだ場合の $M_{a, wel.}$ および $M_{sint.}$ の各伝熱面における実験結果を例示した。図 11 (d), (g) は空気吹込位置 ξ が、 $\xi = 30$ mm と比較的に小さくなった場合の $M_{a, wel.}$ と $M_{sint.}$ の両粗平板伝熱面における実験結果の例示であり、図 11 (e), (h) はさらに ξ が、 $\xi = 10$ mm と粗平板伝熱面に接近した場合の実験結果を示した。また図 11 (i), (j) は ξ の極く小さい $2.5 \leq \xi \leq 5$ mm の範囲における実験結果を例示した。以上の結果から空気吹込位置 ξ が大きい $50 \leq \xi \leq 70$ mm の範囲をとれば吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ が $4.44 \leq Z_n \cdot Q_0 \leq 20.75$ Ncm³/s において、熱流束 q のいかににかかわらず、一方比較的小さい範囲である $10 \leq \xi \leq 30$ mm の範囲をとれば、さらに ξ が 5 mm, 2.5 mm と極めて小さくなった $2.5 \leq \xi \leq 5$ mm の範囲においても、熱流束 q が $q \geq 3489$ W/m² ならば、これらの傾向は変わらず、吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ のいかににかかわらず次式

$$\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_0 \propto q^{-1/3.8} \quad \dots\dots(8)$$

の関係が得られることが判かった。

平滑平板伝熱面と粗平板伝熱面との結果をその slope の指数 n の面から考察すると、 $n_{smo.} = -1/8$ であったのに対して、本実験での両粗平板伝熱面の場合においては

$$n_{a, wel.} = n_{sint.} = -1/3.8 > -1/8$$

と平滑伝熱面に比較してその slope n は大きく単調に減少する。この傾向は ξ が比較的大きい範囲 $50 \leq \xi \leq 70$ mm でも変らない。以上のことは伝熱面表面状態の粗滑の差異が吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ 、空気吹込位置 ξ 、熱流束 q との組合せによって総合結果として得られたもので、これは平滑伝熱面の場合に比較して伝熱面近傍（境界層内粘性層におよぶ）の摩擦応力（剪断応力）frection stress or shearing stress の熱伝達におよぼす大きさの度合の差異による結果と考えられる。但し実験結果は $M_{a, wel.}$ 、 $M_{sint.}$ との比較においてはこの程度の表面状態の相違では $q = 1861$ W/m² を除いて大きな差異は認められなかった。

(2) 吹込空気量が $0.21 \leq Z_n \cdot Q_0 \leq 1.87 < 4.44$ Ncm³/s の範囲をとれば図 11 において空気吹込位置 ξ の大きい $40 \leq \xi \leq 70$ mm の範囲で熱流束 q のいかににかかわらず平滑平板伝熱面の場合の slope,

$$n_{smo.} = -1/8 = n_{a, wel.} = n_{sint.}$$

の如く同一傾向

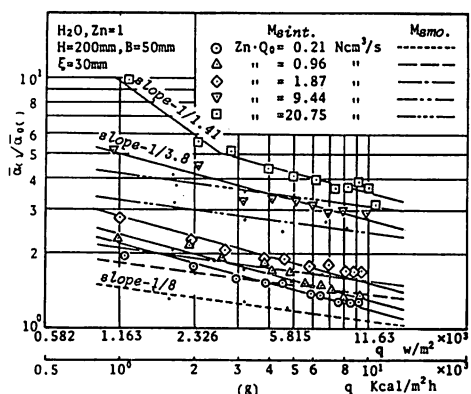
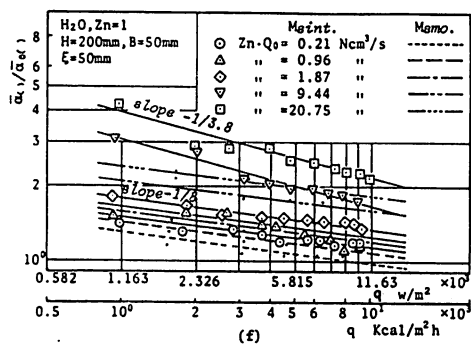
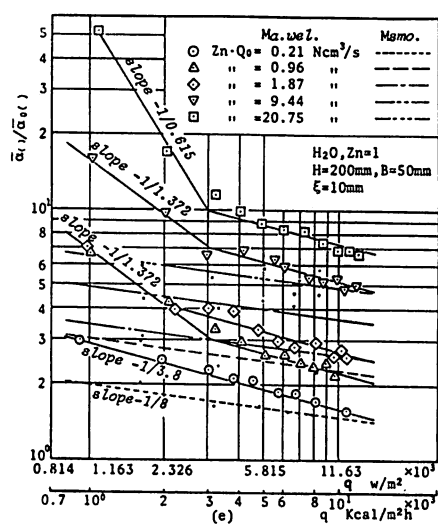
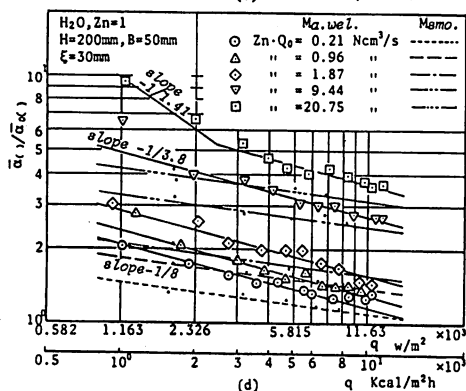
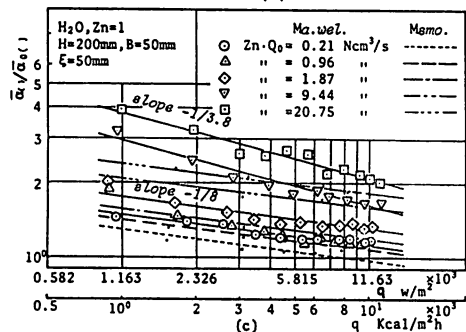
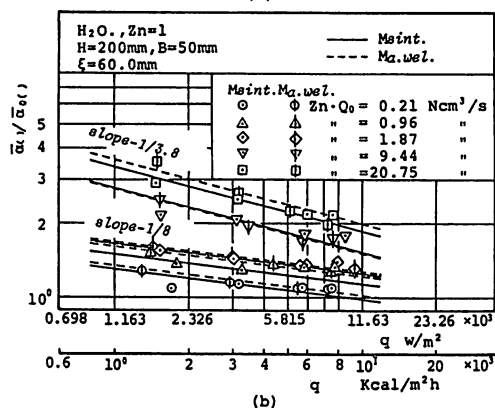
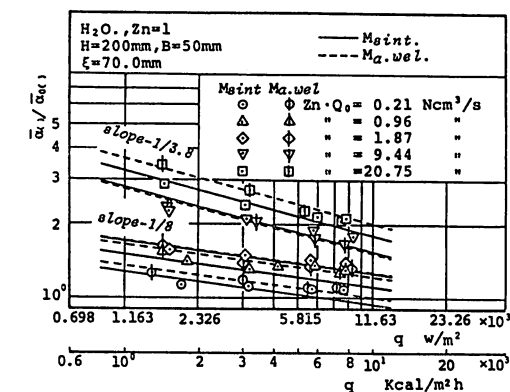
$$\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_0 \propto q^{-1/8}$$

の関係が得られた。これは ξ が伝熱面から $\xi \geq 80$ mm と離れる時、気泡による液体かくはん時の熱伝達におよぼす影響、上記の frection stress or shearing stress の大きさの度合が粗伝熱面では、 q 、 $Z_n \cdot Q_0$ 、 ξ の組合せにおいて丁度平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ から液体への熱伝達時の摩擦力（剪断応力）の影響の大きさの度合に相当するものと考えられる。

(3) 空気吹込位置 ξ が $2.5 \leq \xi \leq 40$ mm の小さい範囲について述べる。空気吹込位置 ξ が 40, 30 mm と伝熱面に接近すれば図 11 (d), (g) のごとく $Z_n \cdot Q_0 = 20.75$ Ncm³/s の場合、その slope は大きくなり $n_{a, wel.} = n_{sint.} = -1/1.4$ の傾向を示す。 ξ のこの範囲では熱流束 q と ξ の減少と共に $\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_0$ の値は急激に増加の傾向を示すことが分かる。さらに $\xi = 20$ mm と伝熱面に空気吹込位置 ξ が接近すれば

$$n_{a, wel.} = n_{sint.} = -1/1.02$$

の如くその slope はさらに大きい値を示し、 $\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_0$ の値も増大する。図 11 (d), (g), (e), (h), (i), (j) に

図11 $\bar{\alpha}_1/\bar{\alpha}_{0(1)}$ と q との関係(a)~(g)

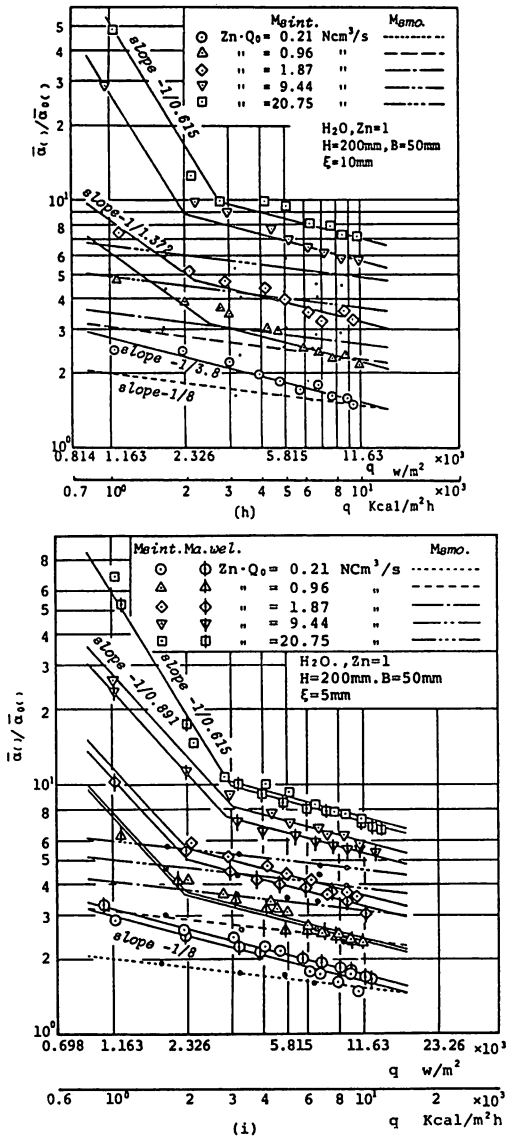


図 11 $\bar{\alpha}_c/\bar{\alpha}_{0c}$ と q との関係 (h), (i)

においてさらに $\xi=10$ mm と伝熱面に接近すれば slope の指数 n は

$$n_{a, wel.} = n_{sint.} = -1/0.015$$

の如くその slope はさらに大きい値をとり $\bar{\alpha}_c/\bar{\alpha}_{0c}$ の値は増大する。結果は空気吹込位置 ξ が $2.5 \leq \xi \leq 10$ mm の小さい範囲で気泡が吹込まれると、

$$Zn \cdot Q_0 = 0.21 \text{ Ncm}^3/\text{s}$$

を除けば $q \leq 3489 \text{ W/m}^2$ ならば粗平板伝熱面 M_c から H_2O への熱伝達は

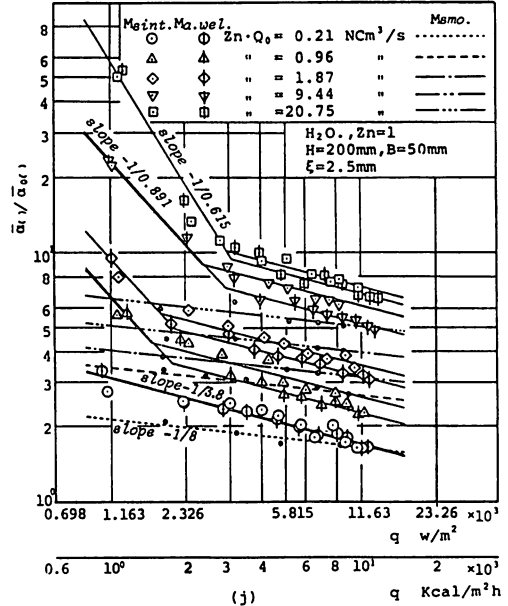


図 11 $\bar{\alpha}_c/\bar{\alpha}_{0c}$ と q との関係 (j)

$$\bar{\alpha}_c/\bar{\alpha}_{0c} \propto q^n$$

の関係においてその slope の指数 n は大きく

$$0.72 \leq n_{a, wel.} \leq n_{sint.} \leq -1.63$$

の傾向図 11(e), (h), (i), (j) を得た。この範囲においては平滑平板伝熱面に比べてある熱流束以下でかなりの大きい $\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_0$ が q , $Zn \cdot Q_0$, ξ の組合せにて得られることが判かった。以上の傾向は溶射伝熱面 $M_{a, wel.}$ 、焼結伝熱面 $M_{sint.}$ とともに同傾向であった。

3・4 平均熱伝達係数比 $\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_0$ と吹込空気量 $Zn \cdot Q_0$ の関係

図 12 (a), (b), (c), (d) は図 11 から同一熱流束 q における $\bar{\alpha}_c/\bar{\alpha}_{0c}$ と $Zn \cdot Q_0$ の関係を整理し、代表的な熱流束 q について示したものである。 q が比較的大きい 3489 W/m^2 以上であれば $Zn \cdot Q_0 \geq 5.0 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の範囲では熱伝達係数比 $\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_0$ は空気吹込位置 ξ の変化に関係なく、また伝熱面のこの程度の表面粗さの相違においては関係なく、この例では図 12 (a), (b), (c), (d) に熱流束 q が $q = 3490 \sim 9300 \text{ W/m}^2$ の範囲を示したが、 q が $q = 11630 \text{ W/m}^2$ と大きくなっても同一の法則に従うと考えるとよい傾向を得た。したがって熱流束 q が $3489 \leq q \leq 11630 \text{ W/m}^2$ の範囲で吹込空気量が $Zn \cdot Q_0 \geq 5.0 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ をとれば $2.5 \leq \xi < 30$ mm の範囲では

$$\bar{\alpha}_1 / \bar{\alpha}_0 \propto (Z_n \cdot Q_0)^{0.33}$$

と考えてよい傾向を得た。

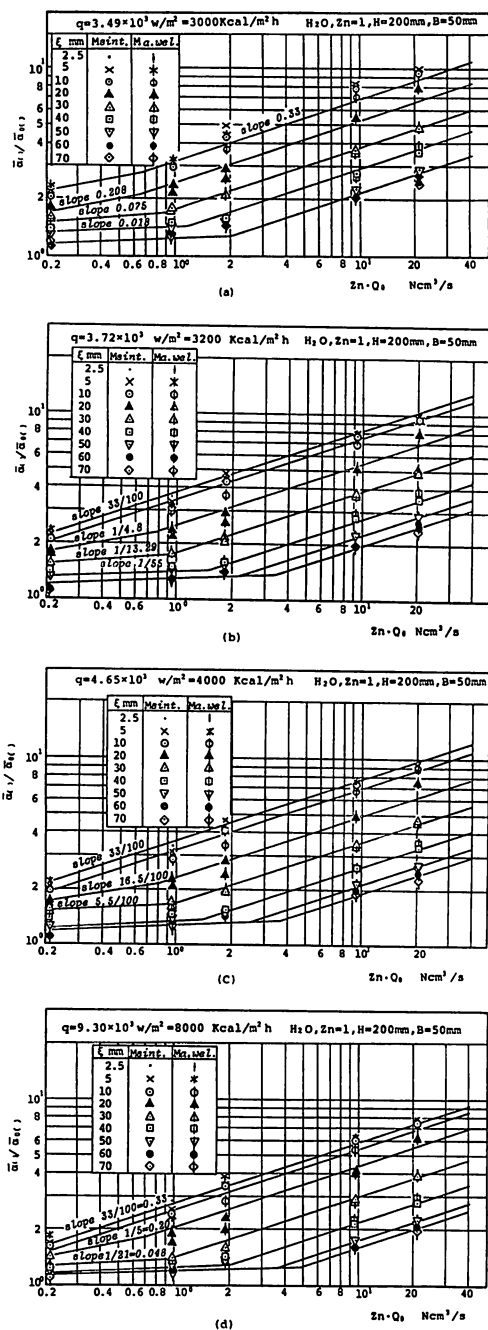


図12 $\bar{\alpha}_1 / \bar{\alpha}_0$ と $Z_n \cdot Q_0$ との関係

3.5 気泡吹込位置 ξ の影響について

図13(a), (b), (c), (d) は溶射伝熱面 $M_{a.wel.}$ と焼結伝熱面 $M_{sint.}$ の各場合と平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ との比較において熱伝達係数比 $\bar{\alpha} / \bar{\alpha}_0$ と空気吹込位置 ξ との関係を示したものである。図13(a) は平均熱伝達係数比 $\bar{\alpha} / \bar{\alpha}_0$ と空気吹込位置 ξ の関係を熱流束 $q = 4650 \text{ W/m}^2$ 一定で、吹込空気量を $Z_n \cdot Q_0 = 1, 5, 10, 20 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ にそろえてパラメーターとして気泡のかくはん効果を $M_{a.wel.}$, $M_{sint.}$ および $M_{smo.}$ の各伝熱面について示したものである。図13(b) は q が 3720 W/m^2 と 3100 W/m^2 の場合を示したものであり (a) の場合と同様に粗平板伝熱面の場合が平滑平

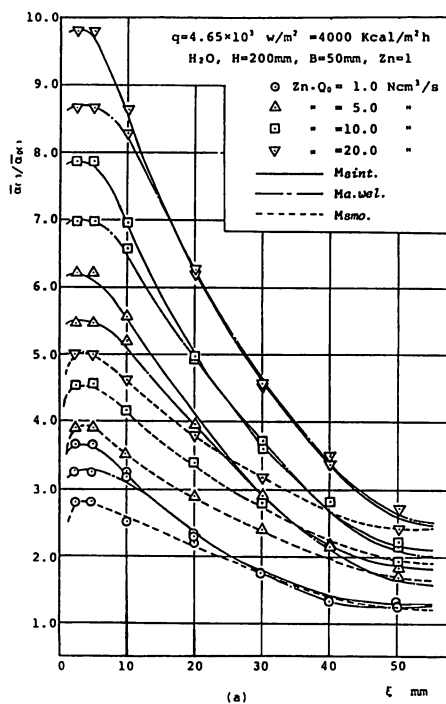


図13(a) $\bar{\alpha}_1 / \bar{\alpha}_0$ と ξ との関係

板伝熱面より熱伝達係数比において倍以上良好な結果が得られている。また図13(c) および (d) において、 $\bar{\alpha}_1 / \bar{\alpha}_0$ と ξ の関係を検討する時、熱流束 q が 1860 W/m^2 と低熱流束で、吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ が比較的多い $Z_n \cdot Q_0 = 20.75 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ においては、空気吹込位置 ξ が小さい範囲では、 $\xi = 10 \text{ mm}$, $\xi = 5 \text{ mm}$ と伝熱面に次第に発泡点が接近すると平均熱伝達係数比 $\bar{\alpha}_1 / \bar{\alpha}_0$ は増加傾向を示すことが判明した。すなわ

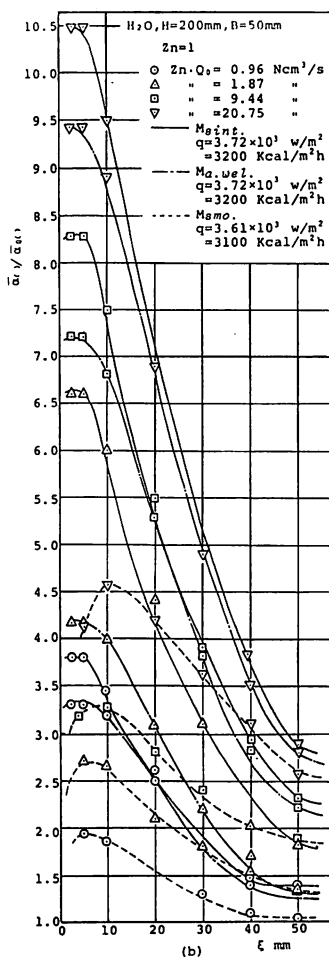


図 13 (b) $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_{0l}$ と ξ との関係

ちこの例では、 $M_{a, wel.}$ において $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_{0l} = 27.70$, $M_{sint.}$ において $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_{0l} = 27.00$ というれも大きな値を示している。このことはもはや通常考えられる剪断応力と熱伝達係数の Reynolds Analogy が成り立たない領域に現象が移行したことを意味するものと考えられる。もし、はく離 flow separation³⁷⁾: break away 側に現象が移行しているものと考えれば、上述の $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_{0l}$ は容易に実現可能となろう。すなわち、境界層に接する主流が圧力差によって加速されたり、減速されたりするのと同様に伝熱面の表面状態すなわち平滑面であるか、或いは粗面であるかの差異によってやはり加速されたり、減速されたりするものと考えられる。すなわち境界層内の流れも又伝熱面表面状態の影響をうけ、前者は平滑平板伝熱面の平滑平板表面

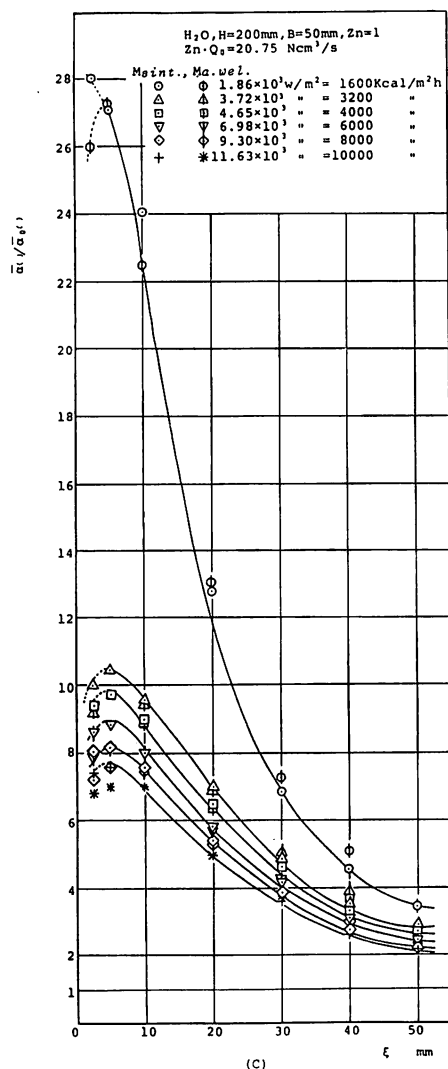
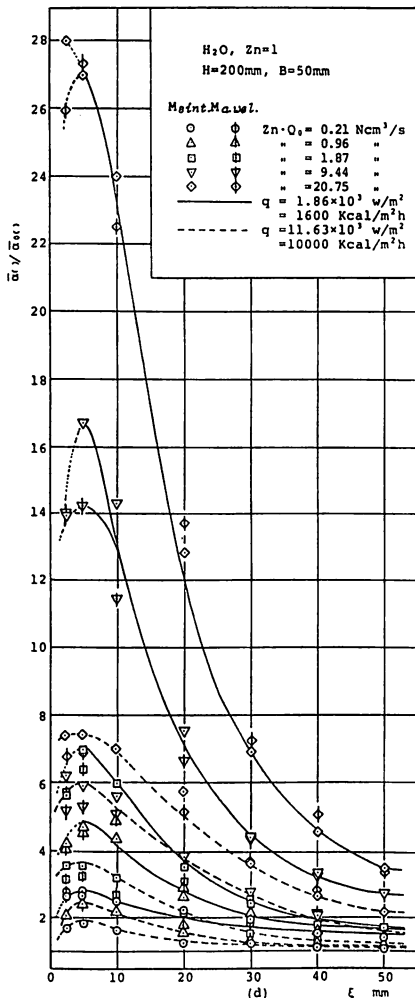


図 13 (c) $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_{0l}$ と ξ との関係

が整流板の作用側に働らき、境界層内のすべての流体粒子は流れ方向に smooth に流動し、伝熱面表面に沿う境界層内のすべての流れは気泡と共に主流と同方向に流れる。後者は粗平板伝熱面の粗粒表面のために気泡吹込時といえども主流は前者のごとくは流れない、主流は粗粒表面のための多少の breaking action によって多少減速されるものと考えられるが、それ以上にこの粗粒表面を含む境界層内の流体粒子の速度はより減速され、ことに 1860 W/m^2 と熱流束が比較的小さい境界層が薄く、充分でない場合においては粗伝熱面表面近傍ではついに流体粒子は粗面にかかえ込まれ、

図 13 (d) $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0$ と ξ の関係

流れが停止するか、流れ方向が逆向きに変えられてしまう。かくして粗平板伝熱面と主流との間に減速された流体が蓄積された状態で、主流（今の場合においては気ほう流）が伝熱面にごく接近する $\xi=10$ mm, 5 mm においては主流と壁面近傍の間で逆流が急速に広がってゆく、反面主流は同時に伝熱面表面から break away し伝熱面の反対方向に押しのけられていくものと考えられる、以上の考察により上述の現象は充分首肯できる。また上記同熱流束、空気吹込位置の時、空気吹込を行なった場合の平滑平板伝熱面との比較を行なってみると、表 4 において $M_{a, wel.}$ で平均熱伝達係数比は $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0 = 4.79$ 、また $M_{sint.}$ において $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0 = 4.77$ 倍と平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ より約

5 倍程度大きいことが判明した。図 13 において ξ が小さくなるほど $Zn \cdot Q_0$ が多ければ多いほど $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0$ は各伝熱面: $M_{a, wel.}, M_{sint.}$ 共に熱伝達促進の傾向で次第に大きな値を示すことは平滑伝熱面 $M_{smo.}$ の場合^{18), 19), 20)}と同様であるが、表 4 における平均熱伝達係数比の比較において、 $Zn \cdot Q_0 = 20.75$ Ncm³/s で $\xi=10$ mm を除けば◎

$$(\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0)_{smo.} < (\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0)_{a, wel.} \leq (\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0)_{sint.}$$

の傾向があることが明らかとなった。上記 (◎印) の理由は $\xi=10$ mm においては焼結伝熱面 $M_{sint.}$ 表面と液体界面の粘性層との親和性が粒度の大きい分だけ、また空孔率が大きい分だけ $M_{a, wel.}$ 面より上まわるものと考えられ、 $(\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0)_{a, wel.} \geq (\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0)_{sint.}$ の様に大小関係が逆になる。この傾向は q が小さければ小さいほど明確となる。ここで注目すべきは伝熱面表面の粗粒子が特別に大きく、かつ散在されぬ限り、すなわち表面粗さが伝熱面全面に一樣分布であれば多少の粗粒表面状態の相違による熱伝達におよぼす影響はさほど判然と現われ難い。表面の粗粒度が小さくとも上記図・表において熱流束が q が $q=1860$ W/m² となる低熱流束域では気泡の液体かく乱の影響は大きく現われることが判かった。この低熱流束域においては伝熱面表面がわずかながら粗でありさえすれば熱伝達におよぼす気泡かく乱の効果は破格的に増大することが上記理由により首肯できる。また図 14 (a), (b), (c), (d) に総吹込空気量が一定の場合の $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0$ と ξ の変化を熱流束 q が 3490, 3720, 6500, 9300 W/m² の各場合について例示した。図において $\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0$ は ξ の変化と共に指数関数的に変化することが判かった。本実験では熱流束 q がある大きさ以上、すなわち $q \geq 3489$ W/m² では総吹込空気量 $Zn \cdot Q_0$ が一定ならば図 14 から吹込空気量が $5 \leq Zn \cdot Q_0 < 30$ の範囲において

$$\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0 \propto e^{-0.017\xi}$$

また $1 \leq Zn \cdot Q_0 < 5$ Ncm³/s の範囲では

$$\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0 \propto e^{-0.028\xi}$$

と考えてよい傾向が得られた。以上の結果により本実験において $q \geq 3489$ W/m² $\xi \geq 10$ mm の範囲をとれば、総吹込空気量 $Zn \cdot Q_0$ が $5 \leq Zn \cdot Q_0 < 30$ の一定範囲において

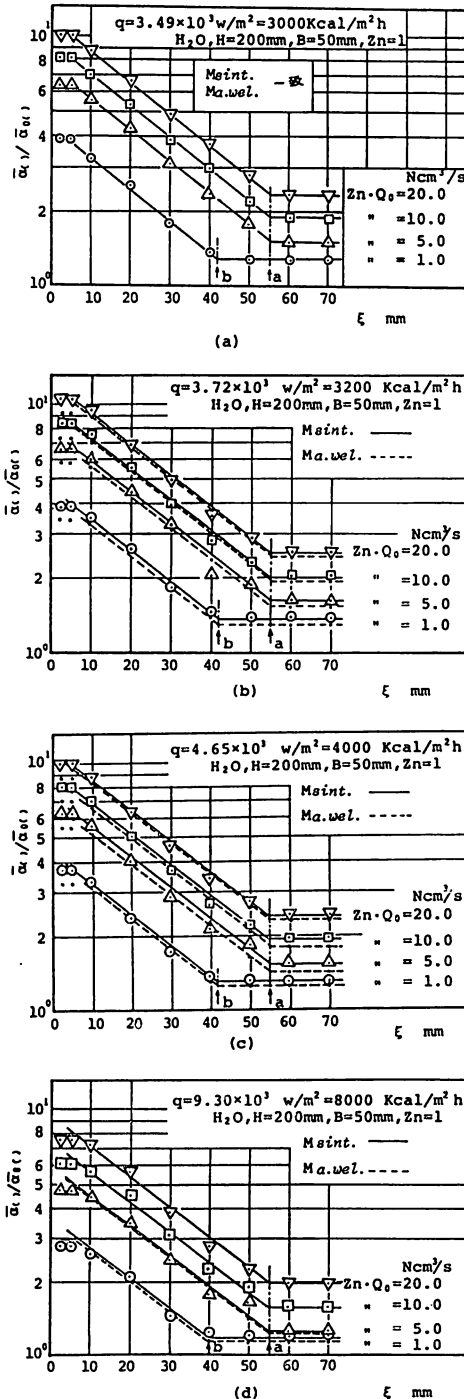
$$\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0 \propto q^{-0.263} \cdot (Zn \cdot Q_0)^{0.33} \cdot \exp(-0.94\xi/\xi_s) \quad \dots\dots (9)$$

$1 \leq Zn \cdot Q_0 < 5$ Ncm³/s の範囲において

$$\bar{\alpha}_l / \bar{\alpha}_0 \propto q^{-0.263} \cdot (Zn \cdot Q_0)^{0.33} \cdot \exp(-1.18\xi/\xi_s) \quad \dots\dots (10)$$

表4. 焼結伝熱面と溶射伝熱面における $\bar{\alpha}_s / \bar{\alpha}_0$ の比較

比較項目 () は粗面の場合		1.87						20.75					
		5.0		10.0		50.0		5.0		10.0		50.0	
熱流束		ξ mm		$\bar{\alpha}$ 比の () 状態									
比較項目 () は粗面の場合		sint.	a.wel	$\frac{\text{sint.}}{\text{a.wel}}$	sint.	a.wel	$\frac{\text{sint.}}{\text{a.wel}}$	sint.	a.wel	$\frac{\text{sint.}}{\text{a.wel}}$	sint.	a.wel	$\frac{\text{sint.}}{\text{a.wel}}$
q=1.86 ×10 ³ w/m ² =1,600 kcal/m ² h	平滑面との比較 (自然対流時)	7.21	6.38	1.13	6.04	4.88	1.24	1.71	1.64	1.04	27.50	27.61	1.00
	平滑面との比較 (気泡吹込時)	1.81	1.60	1.13	1.83	1.48	1.24	1.15	1.10	1.05	4.77	4.79	1.00
	粗面との比較 (自然対流時)	7.08	6.48	1.11	5.93	4.90	1.21	1.68	1.65	1.02	27.00	27.70	0.97
q=4.65 ×10 ³ w/m ² =4,000 kcal/m ² h	平滑面との比較 (自然対流時)	4.72	4.24	1.11	4.21	3.50	1.20	1.54	1.50	1.03	9.64	9.24	1.04
	平滑面との比較 (気泡吹込時)	1.33	1.19	1.12	1.42	1.18	1.20	1.16	1.13	1.03	1.86	1.78	1.04
	粗面との比較 (自然対流時)	4.60	4.18	1.10	4.10	3.45	1.19	1.50	1.48	1.01	9.40	9.10	1.03
q=11.63 ×10 ³ w/m ² =10,000 kcal/m ² h	平滑面との比較 (自然対流時)	3.67	3.27	1.12	3.27	2.69	1.22	1.35	1.32	1.02	7.58	7.08	1.07
	平滑面との比較 (気泡吹込時)	1.15	1.02	1.13	1.24	1.02	1.22	1.14	1.12	1.02	1.65	1.54	1.07
	粗面との比較 (自然対流時)	3.61	3.28	1.10	3.22	2.70	1.19	1.33	1.32	1.01	7.45	7.10	1.05

図14 $\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_{(0)}$ と ξ との関係

の関係が成立することが見出された。但し ξ_a, ξ_b は $\bar{\alpha}_{(1)}/\bar{\alpha}_{(0)}$ が一定になる点 a, b の ξ の最小値で今の場合 $\xi_a = 55\text{mm}, \xi_b = 42\text{mm}$ にとった。この傾向は本実験の $2.5 \leq \xi \leq 70\text{mm}$ であればすべて同一傾向を示した。

4. むすび

鉛直に支持された粗平板伝熱面 $M_{(1)}$ に接する液体への熱伝達、熱流束 $q = 1047 \sim 12677 \text{ W/m}^2$ において、溶射伝熱面と焼結平板伝熱面の二種類の粗平板伝熱面 ($H=200\text{mm}, B=50\text{mm}$) に接する液中に上向き単一口円形の空気吹込口、ノズル数 $Z_n=1$ 個から空気を吹込み、吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0 = 0.21 \sim 20.75 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ ならびに、伝熱面から空気吹込口中心までの垂直距離 ξ を、 $\xi = 2.5 \sim 70\text{mm}$ の範囲で変化させた場合、気泡による液体かくはんが平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ ($H=200, B=50\text{mm}$) との比較において、伝熱面表面粗さが熱流束 q , 吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$, 空気吹込位置 ξ の変化により、いかに自由対流熱伝達を促進するかについて検討の結果次のような結果を得た。

1) 熱伝達係数比と熱流束との関係について

① 溶射・焼結両伝熱面について、空気吹込位置 ξ が (イ) $50 \leq \xi \leq 70\text{mm}$ の範囲では、総吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ が $4.44 \leq Z_n \cdot Q_0 \leq 20.75 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ において、熱流束 q のいかににかかわらず

$$\bar{\alpha}_{(1)50}/\bar{\alpha}_{(0)50} \propto q^{-1/3.8} = -0.263$$

の関係が得られた。

また (ロ) ξ が $2.5 \leq \xi \leq 30\text{mm}$ の範囲では $q \geq 3489 \text{ W/m}^2 (= 3000 \text{ Kcal/m}^2\text{h})$ ならば $Z_n \cdot Q_0$ のいかににかかわらず同一の関係が得られた。平滑伝熱面と溶射・焼結両伝熱面との関係では、その slope の指数 n は

$$n_{smo.50} = -1/8 \text{ に対し,}$$

$$n_{(1)50} = -1/3.8 > -1/8$$

と平滑伝熱面に比して、slope は大きく単調に減少する。この傾向は ξ が大きい $50 \leq \xi \leq 70\text{mm}$ でも変わらない。

② また、吹込空気量が $0.21 \leq Z_n \cdot Q_0 \leq 1.87 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の範囲では ξ の比較的大きい $40 \leq \xi \leq 70\text{mm}$ の範囲で熱流束 q のいかににかかわらず、平滑平板伝熱面 $M_{smo.}$ の場合の slope, $n_{smo.50} = -1/8 = n_{(1)50}$ のごとく同一傾向

$$\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()05} \propto q^{-1/8}$$

の関係が得られた。

③ さらに空気吹込位置 ξ が $2.5 \leq \xi \leq 40 \text{ mm}$ の小さい範囲において、 ξ が 40, 30 mm と伝熱面に接近すれば溶射・焼結両伝熱面の slope の指数

$$n_{()50} = -1/1.41$$

の傾向を示した。 ξ が伝熱面に比較的接近する場合、 $\xi = 20 \text{ mm}$ では

$$n_{()50} = -1/1.02$$

とその slope はさらに大きくなり、 $\bar{\alpha}_{0()50}/\bar{\alpha}_{()50}$ の値は増大する。また ξ が伝熱面に極く接近する $2.5 \leq \xi \leq 10 \text{ mm}$ の範囲では、空気吹込量 $Z_n \cdot Q_0 = 0.21 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ を除けば、熱流束 $q \leq 3489 \text{ W/m}^2$ (3000 Kcal/m²h) ならば、溶射伝熱面、焼結伝熱面から H₂O への熱伝達係数比は

$$\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()50} \propto q^n$$

の関係において、その slope の指数 $n_{()50}$ の値は大きく両粗伝熱面ともに $-0.72 < n_{()50} \leq -1.63$ の傾向を得た。以上の事実は沸騰熱伝達のごとく気泡性が常に伝熱面近傍で実現するような場合において、粗表面がいっそう熱伝達促進に寄与することを物語る実証実験として注目に値するものである。

2) 平均熱伝達係数比と吹込空気量との関係から、熱流束 q が $3489 \leq q \leq 11630 \text{ W/m}^2$ の範囲で吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ が $Z_n \cdot Q_0 \geq 5.0 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ のとき $2.5 \leq \xi \leq 30 \text{ mm}$ の範囲をとれば

$$\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()50} \propto (Z_n \cdot Q_0)^{0.33}$$

の傾向を得た。このことは M_{smo} の場合の指数が 0.2 であったのに比較して本粗平板伝熱面の場合の指数が 0.33 と大きい値を与え吹込空気量の強い関数関係を示すことが明らかになった。

3) 平均熱伝達係数比と気泡吹込位置との関係から空稿吹込位置 ξ が小さくなるほど、 $Z_n \cdot Q_0$ が多ければ多いほど、溶射伝熱面および焼結伝熱面の

$$\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()50}$$

は各々熱伝達促進の傾向で次第に大きな値を示す。これは平滑平板伝熱面の場合と同傾向を示す。しかしその割合は溶射、焼結伝熱面が平滑伝熱面より数倍大きいことが明らかになった。

また、低熱流束域においては、溶射伝熱表面のごとく伝熱面表面がわずかに粗でありさえすれば、熱伝達におよぼす気泡かく乱の影響の効果が破格的に増大することが判明した。このことは、はく離現象として考えれば明解に説明できる。平均熱伝達係数比

$$\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()50}$$

は ξ の変化とともに指数関数的に変化することが判った。その関係は $q \geq 3489 \text{ W/m}^2$ (3000 Kcal/m²h) では、総吹込空気量が、

$$5 \leq Z_n \cdot Q_0 < 30 \text{ Ncm}^3/\text{s}$$

の範囲において

$$\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()50} \propto \exp(-0.017\xi)$$

$1 \leq Z_n \cdot Q_0 < 5 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の範囲において

$$\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()50} \propto \exp(-0.028\xi)$$

の関係が得られた。

4) 試験伝熱面、溶射・焼結の両伝熱面において液中に空気を吹き込んだ場合の熱伝達係数と熱流束との関係は、その slope 指数 $n_{()}$ は $n_{()} = -0.063$ であることが実証された。この値は半理論値とよく一致した。

5) 本実験において $q \geq 3489 \text{ W/m}^2$, $\xi \geq 10 \text{ mm}$ の範囲をとれば、総吹込空気量 $Z_n \cdot Q_0$ が

$5 \leq Z_n \cdot Q_0 < 30$ の範囲において

$$\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()50} \propto q^{-0.263} \cdot (Z_n \cdot Q_0)^{0.33} \cdot \exp(-0.94\xi/\xi_a)$$

$1 \leq Z_n \cdot Q_0 < 5$ の範囲において

$$\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()50} \propto q^{-0.263} \cdot (Z_n \cdot Q_0)^{0.33} \cdot \exp(-1.18/\xi_b)$$

の関係が見出された。 ξ_a, ξ_b は $\bar{\alpha}_{()50}/\bar{\alpha}_{0()50}$ が一定となる a, b の ξ の最小値で今の場合 $\xi_a = 55 \text{ mm}$, $\xi_b = 42 \text{ mm}$ にとった。この傾向は本実験の $2.5 \leq \xi \leq 70 \text{ mm}$ であればすべて同一傾向を示した。

6) 本粗平板伝熱面 $M_{a.wet}$, M_{sint} における熱伝達係数と熱流束との関係は総吹込空気量において $\xi \leq 30 \text{ mm}$ の範囲をとれば

$$\bar{\alpha}_{()50} \propto q^{-0.063}$$

の関係があることが明らかとなった。

本実験において溶射平板伝熱面の他に焼結平板伝熱面について同時に同様の実験を並行して行なった結果、熱流束 q を $q \geq 3489 \text{ W/m}^2$, $\xi \geq 10 \text{ mm}^2$ の範囲をとれば、次の各総吹込空気量 $5 \leq Z_n \cdot Q_0 < 30 \text{ Ncm}^3/\text{s}$, $1 \leq Z_n \cdot Q_0 < 5 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ ごとの範囲において粗平板伝熱面からの熱伝達は各粗平板伝熱面ごとに同一の法則によって支配されることが判かった。以上のことから粗面を持つ液体側伝熱面から液体への熱伝達は太陽熱エネルギーの利用をはじめとして機械工学や化学工学の多くの分野において有効であり、工学への活用の促進要素を持っていることが判かった。

5. あとがき

最後に本研究に際し貴重なご助言をいただいた九州大学工学部の西川兼康教授に深謝致します。また本研究を実行するに当り、粗面材料の提供をいただいた岸園 司オイレス工業株式会社取締役副社長、山下一郎 同社・中央研究所長、ならびに栗本弘嗣同研究所研究員に深謝致します。また粗平板伝熱面を有する加熱器の熱損失検定にあたり、粗面に十分浸透し、なお且つ諸般の目的終了後十分フレッシュな粗面に戻すことが可能な物質の選定にあたり、御繁忙なところを熱心に討論ならびに実験までして、流動パラフィンを選定御教示下さった当学応用化学科教授隈元実忠先生、宮内徳之先生、に御礼を申し上げます。また粗面の写真撮影に協力をいただいた是枝賢一先生に御礼申し上げます。なお昭和55年度10月以降からの機械学会論文集の投稿原稿は全て、SI単位系によることが決定されたので本稿はSI単位をも併記した。本研究に際し、実験に協力を得た是枝隆二、春日嘉辰、久富木良一(昭和55年3月学部卒業生)：ならびに堀之内靖幸、中堂園高明、北原 勉、才田真次(昭和56年3月学部卒業生)の諸君に感謝します。なお本報告は日本機械学会九州支部鹿児島地方講演会(昭和57年5月20日)において、講演を行なったことを付記する。

文 献

- 1) 石神. 玉利., 鹿児島大学工学部研究報告, 5 (昭40), 17.
- 2) 玉利. 塚崎., 鹿児島大学工学部研究報告, 8 (昭42), 47.; 15 (1973), 1.
- 3) 大山., 理研彙報. 21 (昭17), 916.
- 4) Konsetor, v. v., Int. J. Heat. & Mass. Transfer. Vol. 9 (1966), 1103.
- 5) Von. Krevelem, D. W., et al., Chem. Engeg. Progr., 46-1 (1950), 29.
- 6) Von. Siemes, W., Chem. Ing. Techn., 26-8/9 (1954), Teil: 1, 479.; 26-11 (1954), Teil: 2, 614.
- 7) Davidoson, L., et al., J. A. I. Ch. E., 2-3 (1956), 337.
- 8) Haye, W. B., et al., J. A. I. Ch. E., 5-3 (1956), 319.
- 9) Gal-Or, B., Cana., J. C. E., 48 (1970), 526.
- 10) Adler, P. M., J. A. I. Ch. E. 23-2 (1977) 185.
- 11) Barakat, S. A. et al., Int. J. Multi. Flow, 3-4 (1977), 383.
- 12) Tratterson, D. F. et al., J. A. I. Ch. E., 23-1 (1977), 68.
- 13) Schmidt, H., Int. J. Heat & Mass. Transf., 20-6 (1977), 635.
- 14) Schmidt, H., Int. J. Heat & Mass. Transf., 20-6 (1977), 647.
- 15) 伊藤. ほか, 機械学会論文集, 45-389, B (昭54), 118.
- 16) Kubanek, G. R. et al., ASME, HT, 101-3 (1979), 447.
- 17) Lekic, A. et al., Int. J. Heat & Mass. Transf., 23-11 (1980), 1531.
- 18) 玉利. ほか, 機械学会論文集, 33-245 (1967), 87.
- 19) 玉利. 西川., 機械学会論文集, 41-341 (1975), 273.
- 20) 玉利., 鹿児島大学工学部紀要, 17 (1976), 1.
- 21) 玉利. ほか, 第15回伝熱シンポジウム講演論文集, (1978), 5, 6.
- 22) Nunner, W., VDI-Forsch-h., 22-455 (1956).
- 23) Dipprey, D. F., et al., Int. J. Heat & Mass Transf., 6-5 (1963), 329.
- 24) Gomelaury, v., Int. J. Heat & Mass Transf., 7 (1964), 653.
- 25) Obermeier, E., et al., Proc. 6th IHTC, 2 (1978), 613.
- 26) Cunningham, J., et al., 6th IHTC, 2 (1978), 601.
- 27) Han, J. C., et al., Int. J. Heat & Mass Transf., 21 (1978), 1143.
- 28) Wassel, A. T., et al., ASME, HT, 101-3 (1979), 469.
- 29) Momoh, S. K., Letters in Heat & Mass Transf., 6-2 (1979), 125.
- 30) Yamamoto, H., et al., ASME, HT, 101-3 (1979), 475.
- 31) FuJii, T., Int. J. Heat & Mass Transf., 16-3 (1973), 629.
- 32) 藤井. ほか, 機械学会論文集, 44-384 (1978), 2789.
- 33) Prasolov, R. S., Inzh-Fiz. zh., J. (SSSR), IV (1961), 3.
- 34) Sparrow, E. M., et al., Trans. ASME, 78 (1956), 435.
- 35) FuJii, T., Int. J. Heat & Mass Transf., 13 (1970), 753.
- 36) 藤井. ほか, 九州大学生産科学研究所報告, 54 (昭46), 71.
- 37) Prandtl, Ludwig, Essential of Fluid Dynamics, 135~136. Blackie & Son Limited.
- O) 津上製作所: 工具顕微鏡, MODEL T-MCL2, No. 3551. T. 20 C

付録 1. 自由対流 (a. wel.)

番号	W_{total} watt	t_p 伝熱面温度 °C	$t_w(t_{real})$ 伝熱表面温度 °C	t_b バルク温度 °C	$\Delta t = (t_p - t_b)$ 温度差 °C	t_e 有効温度 °C	λ 熱伝導率 kcal/mh°C	a 温度伝導率 m ² /s	ν 動粘性係数 m ² /s	$t_b = (t_p + t_b)/2$ 平均温度 °C	ρ 膨張率 1/°C	$P_r = \nu/a$ プラントル 数
1	5.76	29.54	29.54	28.00	1.54	29.15	$\times 10^{-1}$ 5.299	$\times 10^{-7}$ 1.477	$\times 10^{-7}$ 8.20	28.77	$\times 10^{-4}$ 2.79	5.55
2	15.65	31.59	31.58	28.03	3.56	30.70	5.318	1.486	7.94	29.81	2.88	5.34
3	27.56	33.36	33.34	28.03	5.33	32.03	5.334	1.491	7.76	30.69	2.96	5.20
4	31.31	34.20	34.18	27.95	6.25	32.64	5.342	1.494	7.67	31.07	3.00	5.14
5	53.02	37.60	37.56	28.00	9.60	35.20	5.372	1.504	7.33	32.80	3.15	4.87
6	67.17	39.57	39.52	27.95	11.62	36.66	5.390	1.509	7.13	33.76	3.24	4.72
7	76.26	40.87	40.81	27.95	12.92	37.64	5.402	1.513	7.00	34.41	3.30	4.63
8	94.44	43.50	43.43	28.00	15.50	39.63	5.425	1.521	6.73	35.75	3.42	4.43
9	106.56	45.13	45.05	27.95	17.18	40.83	5.438	1.525	6.59	36.54	3.49	4.32
10	124.23	47.55	47.46	28.03	19.42	42.59	5.453	1.530	6.39	37.74	3.60	4.17
11	146.45	50.53	50.42	28.03	22.40	44.83	5.473	1.537	6.13	39.23	3.73	3.99
12	179.00	54.14	54.00	27.97	26.17	47.60	5.498	1.545	5.82	41.05	3.87	3.77

番号	W_{loss} w	W_{real} w	q 熱流束 kcal/m ² h	q_{SI} 熱流束 w/m ²	$\bar{a}_0(\cdot)$ 平均伝達係数 kcal/m ² h°C	$\bar{a}_{00}(\cdot)$ 平均熱伝達係数 w/m ² k	\bar{N}_{OH} 平均ヌセルト数	G_{RH} グラスホフ 数	G_{RH}^* 修正グラス ホフ数	$G_{RH}^* \left(\frac{P_r}{0.8 + P_r} \right)$	$G_{RH}^* \cdot P_r$
1	1.56	4.20	367.20	427.05	234.55	272.78	88.53	$\times 10^8$ 0.50	$\times 10^{10}$ 0.44	$\times 10^{10}$ 2.15	$\times 10^{10}$ 2.44
2	3.61	12.04	1035.44	1204.22	290.85	338.26	109.38	1.28	1.40	6.49	7.48
3	5.39	20.37	1751.82	2037.37	328.67	382.24	123.23	2.06	2.54	11.43	13.21
4	6.32	24.99	2149.14	2499.45	343.86	399.91	128.75	2.49	3.21	14.27	16.50
5	9.75	43.27	3721.22	4327.78	385.61	448.46	143.55	4.42	6.34	26.55	30.88
6	11.80	55.37	4761.82	5538.00	409.80	476.60	152.06	5.80	8.82	35.65	41.63
7	13.14	63.12	5428.32	6313.14	420.15	488.63	155.56	6.82	10.61	41.83	49.12
8	15.81	78.63	6762.18	7864.42	436.27	507.38	160.82	9.17	14.74	55.26	65.30
9	17.58	88.98	7651.85	8899.10	445.39	517.99	163.82	10.8	17.75	64.68	76.68
10	20.12	104.11	8953.46	10412.87	458.68	533.44	168.22	13.4	22.58	79.10	94.16
11	23.45	123.00	10578.00	12302.21	470.13	546.76	171.78	17.4	29.91	99.44	119.34
12	27.70	151.30	13011.80	15132.72	497.20	578.24	180.85	23.5	42.42	131.80	159.92

付録2. 自由対流 (sint)

番号	W_{total} watt	t_p 伝熱面温度 °C	$t_w(t_{real})$ 伝熱表面温度 °C	t_b バルク温度 °C	$\Delta t = (t_p - t_b)$ 温度差 °C	t_e 有効温度 °C	λ 熱伝導率 kcal/mh°C	a 温度伝導率 m²/s	ν 動粘性係数 m²/s	$t_b = (t_p + t_b)/2$ 平均温度 °C	ρ 膨張率 1/°C	$Pr = \nu/a$ プラントル 数
1	12.63	30.85	30.84	28.00	2.85	30.14	$\times 10^{-1}$ 5.312	$\times 10^{-7}$ 1.484	$\times 10^{-7}$ 8.01	29.43	$\times 10^{-4}$ 2.85	5.40
2	18.18	31.84	31.82	28.00	3.84	30.88	5.321	1.487	7.91	29.92	2.89	5.32
3	32.83	34.42	34.39	28.00	6.42	32.81	5.344	1.494	7.65	31.21	3.01	5.12
4	45.45	36.20	36.16	28.00	8.20	34.15	5.360	1.499	7.47	32.10	3.09	4.98
5	58.08	37.93	37.88	28.00	9.93	35.45	5.375	1.505	7.29	32.96	3.17	4.85
6	75.25	40.48	40.41	28.00	12.48	37.36	5.398	1.512	7.04	34.24	3.28	4.65
7	90.40	42.42	42.33	28.03	14.39	38.82	5.416	1.518	6.84	35.22	3.37	4.51
8	96.46	43.07	42.98	27.98	15.09	39.30	5.422	1.519	6.77	35.52	3.40	4.46
9	117.67	46.03	45.92	27.98	18.05	41.52	5.444	1.527	6.51	37.00	3.53	4.26
10	129.28	47.44	47.32	27.98	19.46	42.57	5.453	1.530	6.39	37.71	3.59	4.18
11	142.41	49.17	49.03	27.98	21.19	43.87	5.465	1.534	6.24	38.57	3.67	4.07
12	177.00	53.17	53.00	28.00	25.17	46.88	5.492	1.543	5.90	40.58	3.84	3.82

番号	W_{loss} w	W_{real} w	q 熱流束 kcal/m²h	Q_{SI} 熱流束 w/m²	$\bar{\alpha}_0(\cdot)$ 平均伝達係数 kcal/m²h°C	$\bar{\alpha}_{01}(\cdot)$ 平均伝達係数 w/m²k	\bar{N}_{NaOH} 平均ヌセルト数	G_{RH} グラスホフ 数	G_{RH}^* 修正グラス ホフ数	$G_{RH}^* \left(\frac{Pr}{0.3 + Pr} \right)$	$G_{RH}^* \cdot Pr$
1	3.21	9.42	810.12	942.17	284.25	330.58	107.03	$\times 10^6$ 0.993	$\times 10^{10}$ 1.06	$\times 10^{10}$ 5.00	$\times 10^{10}$ 5.72
2	4.33	13.85	1191.10	1385.25	310.18	360.74	116.60	1.39	1.62	7.51	8.62
3	7.32	25.51	2193.43	2550.96	341.66	397.35	127.87	2.59	3.31	14.67	16.95
4	9.44	36.01	3096.86	3601.65	377.67	439.23	140.93	3.56	5.02	21.55	25.00
5	11.54	46.54	4002.44	4654.84	403.07	468.77	149.97	4.64	6.96	28.95	33.76
6	14.72	60.53	5205.58	6054.09	417.11	485.10	154.53	6.49	10.03	39.84	46.64
7	17.21	73.19	6294.34	7320.32	437.41	508.71	161.53	8.14	13.14	50.30	59.26
8	18.13	78.33	6736.38	7834.41	446.41	519.17	164.68	8.77	14.44	54.57	64.40
9	22.24	95.43	8206.98	9544.72	454.68	528.79	167.05	11.8	19.72	70.78	84.01
10	24.25	105.03	9032.58	10504.89	464.16	539.82	170.23	13.4	22.89	80.21	95.68
11	26.80	115.61	9942.46	11563.08	469.20	545.68	171.72	15.7	26.91	91.50	109.5
12	32.94	144.06	12389.16	14408.59	492.22	572.45	179.25	21.8	39.03	123.5	149.1

付録 3. 粗伝熱面 $M_{a. \text{wel.}}$ & $M_{sint.}$ の $\bar{\alpha}_0, q$ との精度

熱流束 伝熱 面の型	$q \text{ w/m}^2 \text{ (kcal/m}^2\text{h)}$	2.33×10^2 (2.0×10^2)	5.82×10^2 (5.0×10^2)	1.16×10^3 (1.0×10^3)	5.82×10^3 (5.0×10^3)	1.16×10^4 (1.0×10^4)
$M_{a. \text{wel.}}$	$\bar{\alpha}_{0a. \text{wel.}} = 85.81 \text{ q}^{\frac{1}{2}} \text{ w/m}^2\text{k}$	255.20	306.53	352.11	485.82	558.05
	$(\bar{\alpha}_{0a. \text{wel.}} = 76.05 \text{ q}^{\frac{1}{2}} \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$	(219.43)	(263.57)	(302.76)	(417.73)	(479.84)
	実 験 値 $\bar{\alpha}_{0a. \text{wel.}} \text{ w/m}^2\text{k}$ (kcal/m ² h [°] C)	248.88 (214.0)	300.05 (258.0)	346.57 (298.0)	476.83 (410.0)	548.94 (472.0)
	誤 差 %	-2.47	-2.11	-1.57	-1.85	-1.63
$M_{sint.}$	$\bar{\alpha}_{0sint.} = 85.89 \text{ q}^{\frac{1}{2}} \text{ w/m}^2\text{k}$	255.39	306.80	352.44	486.26	558.57
	$(\bar{\alpha}_{0sint.} = 76.12 \text{ q}^{\frac{1}{2}} \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$	(219.60)	(263.80)	(303.04)	(418.11)	(480.28)
	実 験 値 $\bar{\alpha}_{0sint.} \text{ w/m}^2\text{k}$ (kcal/m ² h [°] C)	252.37 (217.0)	304.71 (262.0)	351.23 (302.0)	482.65 (415.0)	555.91 (478.0)
	誤 差 %	-1.18	-0.68	-0.34	-0.74	-0.47

付録 4. 自由対流 (a. wel.)

番号	Pr	t_b [°C]	$Pr^{\frac{1}{2}}$	$Pr^{\frac{2}{3}}$	$Pr^{-\frac{1}{3}}$	Gr_H	Gr_{Hcr1}	$Gr_H^* Pr$	$Gr_H^* \left(\frac{Pr^2}{0.8 + Pr} \right)$
					$\times 10^{-1}$	$\times 10^8$	$\times 10^8$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{10}$
1	5.55	28.00	1.41	2.80	3.58	0.50	7.52	2.44	2.15
2	5.34	28.03	1.40	2.73	3.66	1.28	7.69	7.48	6.49
3	5.20	28.03	1.39	2.69	3.72	2.06	7.81	13.21	11.43
4	5.14	27.95	1.39	2.67	3.74	2.49	7.85	16.50	14.27
5	4.87	28.00	1.37	2.59	3.87	4.42	8.13	30.88	26.55
6	4.72	27.95	1.36	2.54	3.94	5.80	8.27	41.63	35.65
7	4.63	27.95	1.36	2.51	3.99	6.82	8.38	49.12	41.83
8	4.43	28.00	1.35	2.44	4.09	9.17	8.59	65.30	55.26
9	4.32	27.95	1.34	2.41	4.16	10.8	8.74	76.68	64.68
10	4.17	28.03	1.33	2.36	4.25	13.4	8.93	94.16	79.10
11	3.99	28.03	1.32	2.29	4.36	17.4	9.16	119.34	99.44
12	3.77	27.97	1.30	2.22	4.51	23.5	9.47	159.92	131.80

付録 5. 自由対流 (sint.)

番号	P_r	t_b [°C]	$P_r^{\frac{1}{2}}$	$P_r^{\frac{2}{3}}$	$P_r^{-\frac{1}{3}}$	G_{RH}	G_{RHCrI}	$G_{RH} \cdot P_r$	$G_{RH} \cdot \left(\frac{P_r^2}{0.8 + P_r} \right)$
					$\times 10^{-1}$	$\times 10^8$	$\times 10^8$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{10}$
1	5.40	28.00	1.40	2.75	3.64	0.993	7.64	5.72	5.00
2	5.32	28.00	1.40	2.73	3.67	1.39	7.71	8.72	7.51
3	5.12	28.00	1.39	2.66	3.75	2.59	7.88	16.95	14.67
4	4.98	28.00	1.38	2.62	3.82	3.56	8.02	25.00	21.55
5	4.85	28.00	1.37	2.58	3.88	4.64	8.15	33.76	28.95
6	4.65	28.00	1.36	2.51	3.98	6.49	8.36	46.64	39.84
7	4.51	28.03	1.35	2.47	4.05	8.14	8.51	59.26	50.30
8	4.46	27.98	1.35	2.45	4.08	8.77	8.57	64.40	54.57
9	4.26	27.98	1.34	2.39	4.19	11.8	8.80	84.01	70.78
10	4.18	27.98	1.33	2.36	4.24	13.4	8.90	95.68	80.21
11	4.07	27.98	1.32	2.32	4.31	15.7	9.05	109.5	91.50
12	3.82	28.00	1.31	2.23	4.47	21.8	9.39	149.1	123.5

付録 6. a. wel., $Z_n \cdot Q_0 = 20.75 \text{ Ncm}^3/\text{s}$, $\xi = 2.5 \text{ mm}$

[illegible]

付録 7. $\text{ sint., } Z_n \cdot Q_0 = 20.75. \text{ Ncm}^3/\text{s}, \xi = 2.5 \text{ nm}$

番号	P_r	t_b [°C]	$P_r^{\frac{1}{2}}$	$P_r^{\frac{3}{2}}$	$P_r^{-\frac{1}{2}}$	G_{RH}	G_{RHcl}	$G_{RH}^* \cdot P_r$	$G_{RH}^* \cdot \left(\frac{P_r^2}{0.8 + P_r} \right)$
					$\times 10^{-1}$	$\times 10^8$	$\times 10^8$	$\times 10^{-10}$	$\times 10^{10}$
1	5.73	27.95	1.42	2.85	3.51	0.02	7.37	7.05	6.18
2	5.67	28.05	1.42	2.83	3.53	0.14	7.41	14.12	12.36
3	5.66	28.00	1.41	2.83	3.53	0.19	7.41	16.64	14.60
4	5.60	28.00	1.41	2.81	3.56	0.34	7.48	27.05	23.69
5	5.58	28.00	1.41	2.81	3.56	0.41	7.48	34.15	29.88
6	5.52	28.00	1.41	2.79	3.59	0.59	7.54	43.88	38.32
7	5.47	28.00	1.41	2.77	3.61	0.74	7.58	52.89	46.14
8	5.46	28.00	1.40	2.77	3.61	0.77	7.58	57.22	49.88
9	5.40	28.00	1.40	2.75	3.64	0.98	7.64	69.34	60.40
10	5.38	28.03	1.40	2.75	3.64	1.09	7.64	75.37	65.56
11	5.36	27.96	1.40	2.74	3.65	1.21	7.67	81.04	70.52
12									

付録 8. Liquid Paraffin (流動パラフィン)

Sp. Gr. (比重)	above 0.855 (以上)
Free acid and Free alkali (遊離酸, 遊離塩)	to pass test
Chloride (Cl) (塩化物)	below 0.0015% (以下)
Sulfate (SO ₄) (硫酸塩)	below 0.002%
Sulfide	to pass test
Substances Reducing Permanganate	to pass test
Solid Paraffin	to pass test
Substances Darkened by H ₂ SO ₄	to pass test

NAKARAI CHEMICALS, LTD.
(半井化学薬品株式会社製)

流動パラフィン [Liquid Paraffin. Paraffine Liquid Paraffinol]

常温で流状のパラフィンをいう。
無色，無臭，透明の油状液体。比重は，0.875以上，
水およびアルコールに不溶。エーテル，クロロホルム，石油，ベンゼンなどに可溶。
理科学辞典 第3版 p. 1431

軽質流動パラフィン 0.370 cst/100°F 以下

重質流動パラフィン 0.381 cst/100°F 以下

薬局方の流動パラフィンはスプレーパラフィンともいい，軽質流動パラフィンで Paraffin liquidum は普通の流動パラフィンで比重0.88～0.895

粘度^(R) 260/100°F 以上石油製品事典 p. 48 より