

# 気ほう吹き込み時の液体の伝熱

玉 利 賢 一

(受理 昭和 39 年 5 月 30 日)

## STUDIES ON HEAT TRANSFER OF FLUID WHEN AIR BUBBLES ARE BLOWN INTO IT

Masakazu TAMARI

In the phenomenon of heat transfer from the wall of a solid body to fluid, the existence of two phase boundary layer, that is, the existence of the air phase in the fluid phase is the matter frequently experienced in the fields of mechanical engineering and chemical engineering.

The author performed a few basic experiments on the effects upon the heat transfer by blowing air bubbles into *liquid* (fluid) -distilled water- in order to ascertain the stirring effect in the course of heat transfer between a vertical board heating surface and the fluid contacting with the board. The result obtained is as follows:

1) Blowing air bubbles into the fluid greatly influences upon the heat transfer. Especially the ratio of its increase is considerably far remarkable compared with the experimental result with a horizontal board heating surface.

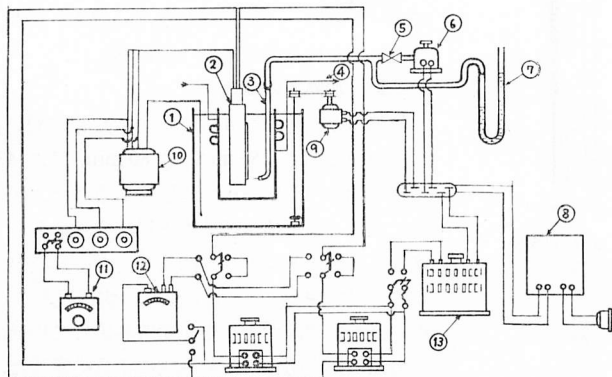
2) The forms of blowing-in of air bubbles are in general likely to be classified into four types of a sphere type, a bell type, a precession type and a tandem type which are approximately similar to produced bubbles at the time of nucleal boiling.

### 1. は し が き

固体壁から液体への伝熱現象で二相境界層，すなわち，液相中に気相が存在する状態は沸騰現象，その他機械工学ならびに化学工学の多くの分野においてしばしば経験する事柄で，いままでに数多くの研究<sup>1)2)3)4)5)</sup>がなされているが，なお多くの未解決点が残されている。例えば，沸騰時の伝熱機構においては発生気ほうの生長，離脱に伴う境界層の機械的かく乱に基づく熱伝達（気ほうのかく乱効果による伝熱）と発生気ほうの周りの液体がその気ほう中に蒸発現象をとまない

潜熱を送り込むことによる熱伝達（潜熱の輸送効果による伝熱）とが考えられるが，これらの問題に対する論議はいまなお各方面で盛んである。

本報告は，垂直平板伝熱面を使用しこれと接する液体の間の熱伝達において，液中に空気ほうを吹き込んでその伝熱現象に関する二三の基礎実験と考察を行ない，これにより相変化をとまなわない液体の熱伝達において気ほうかく乱の効果を明らかにしようと試みたものである。ここに気ほう吹き込みがその熱伝達増進の可能性に大きく影響することを認めたので以下に述べる。



- ① 恒温そう
- ② 加熱器
- ③ 空気吹込用ノズル
- ④ 冷却水
- ⑤ 空気調整用ニードル弁
- ⑥ ベビコンプレッサ
- ⑦ マノメータ
- ⑧ 定電圧調整器
- ⑨ かくはん器用モータ
- ⑩ 冷接点
- ⑪ ミリボルトメータ
- ⑫ 電力計
- ⑬ スライダック

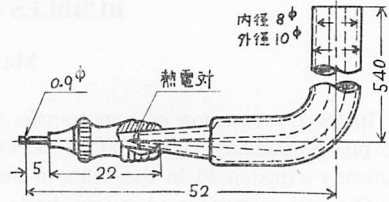
第 1 図 実験装置概略系統図

2. 実験の方法

1) 実験装置

実験に使用した装置全体の概略系統図を第1図に示す。恒温そうならびに実験容器の詳細は第2図に示す。三面に観測用ガラス窓をもち、純水を満した角型の実験容器に加熱器を装備して恒温そうに挿入する。この恒温そう上部には冷却管を設け、さらに、十分かくはんした。加熱器は実験容器内の水中に伝熱面が鉛直になるように保持し、伝熱面正面のそう断面がほぼ一辺140mmの正方形になるようにした。なお、実験にさいしては水面からの放熱を少なくするため実験容器にあらかじめ蓋を設けた。伝熱面熱負荷は、加熱器内の電熱コイルを流れる電力を可変抵抗器で加減調節して電力計で計った。実験中の電圧変動による熱負荷の不安定性をあらかじめ考慮して定電圧調整器を設け

た。温度の測定は、直径0.3mmの銅-コンスタンタン熱電対を使用した。空気の吹き込みは、ベビコンプレッサから空気調整用ニードル弁を経て圧縮空気を空気吹込用ガラス導管(第2図⑦すなわち詳細図第3図)に送り直径0.9mmのノズル(第3図)から水中に吹き込む。この空気吹込用ノズルには、第3図に示

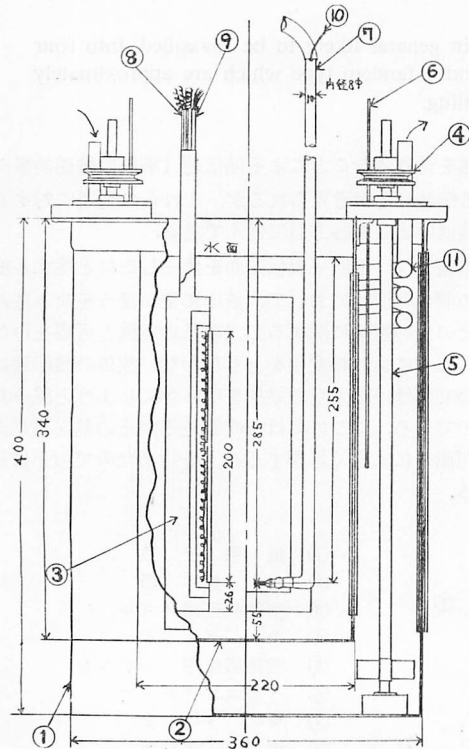


第3図 空気吹込用ガラス導管

すような注射針を使用しその先端部を封じて針の上側面に0.9mmの穴1個を設け、空気ほうが正しく上方に吹き出すように配慮した。空気吹込みの位置は、伝熱面下端、伝熱面の巾方向の中央を通り面に垂直な線上で伝熱面からの距離 $\epsilon$ を5~50mmの範囲に変化させた。熱負荷 $q$ は、1600~7500 Kcal/m<sup>2</sup>h, 吹込空気量 $Q$ は、0.21~20.75 Ncm<sup>3</sup>/secの範囲で、熱負荷 $q$ および吹込空気量 $Q$ 一定のもとに伝熱面からの距離 $\epsilon$ を変えて一連の実験を行なった。整理にあたっては、熱負荷 $q$ として加熱器の電力に熱損失の修正をほどこした値を用いた。また吹込空気量として、吹込導管出口の温度、圧力状態を標準状態に換算した値を採用した。温度境界層の状態は、シュリーレン法による写真撮影および肉視観察でしらべた。また実験容器内の液体全体の流動状況も合わせて調べるためメチレンブルーを流して観察した。吹込空気ほうの形状(気ほう直径、発生頻度、および週期等を含む)は、電磁オシログラフの光学函を改良した暗函を使用してオシロペーパーに記録した。一方ストロボライトを使用して気ほうの挙動を肉視観察した。

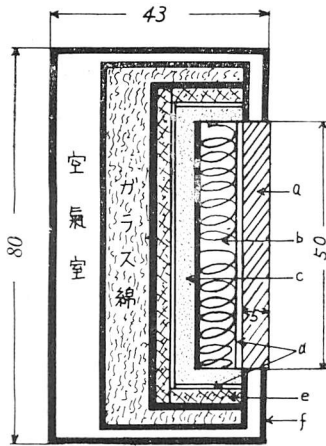
2) 加熱器の構造

加熱器の構造を第4図に示す。加熱器は板厚0.5mmの洋白板で高さ250mm、巾80mm、厚さ43mmに箱状に囲み内部に三重の隔壁をもうけた。伝熱板の裏側にシャモット粘土製熱板と抵抗発熱体としてコイル状のニッケルクロム線を挿入し、この熱板のすぐ裏面から順次第4図に示すように、雲母板、アスベスト板、ガラス綿、および空気室等を設けて伝熱面以外からの熱の損失防止のため熱的に十分絶縁した。伝熱面は、200×50×5mmの矩形銅板を用い、伝熱面表面



- ① 恒温そう
- ② 実験容器
- ③ 加熱器
- ④ プー
- ⑤ かくはん器
- ⑥ 温度計
- ⑦ 空気吹込用ガラス導管
- ⑧ 電力供給用導線
- ⑨ 熱電対
- ⑩ 熱電対管
- ⑪ 冷却管

第2図 実験装置(容器)



a : 伝熱板                      d : 雲母板  
 b : ニッケルクロム線          e : アスベスト板  
 c : シャモット粘土製熱板      f : 断熱箱(洋白板)

第4図 加熱器断面

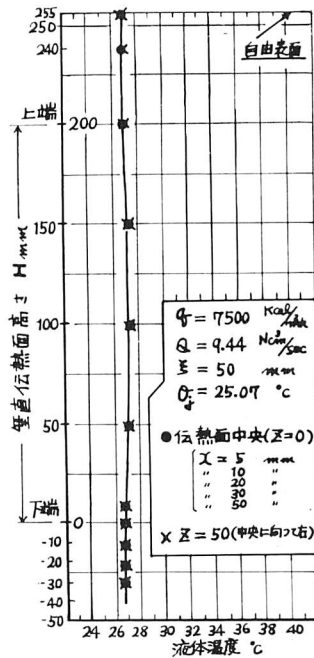
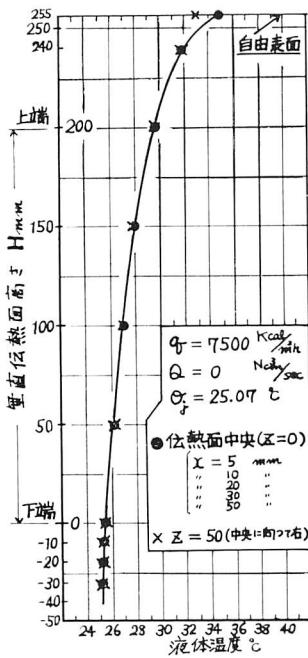
温度測定のために伝熱面の厚さ方向，中央断面上に11個の熱電対が千鳥状に分布するように挿入穴（直径1.5 mm，深さ12.5 mm および25.0 mm）を設け，これら11点の温度の算術平均値をもつて伝熱面表面温

度  $\theta_p$  の代表温度とした．伝熱面は 00 番のエメリ紙で研磨し平滑にして実験に使った．

3. 実験結果ならびに考察

1) 容器内液体の温度分布

容器内液体の温度分布が境界層の外側である温度分布をもち一様性を示さない場合においては，熱伝達係数  $\alpha$  を求めるにあたり液体の温度  $\theta_b$  としてどの点の温度を代表値として選ぶべきかということが問題である<sup>6)7)</sup>．筆者等は，伝熱面に対して上下方向 ( $y$  方向)，垂直方向 ( $x$  方向)，ならびに左右の方向 ( $z$  方向) の実験容器内の液体の温度分布を移動熱電対を用いて測定した．第5図に空気を吹き込まない場合 (a) および空気を吹き込んだ場合 (b) の測定結果の例を示す．各測定方向の温度分布に対して (a) の場合はかなりの温度勾配が見うけられるが，(b) の場合にはほとんど一様な温度分布を示す．このことから，(b) の場合は気ほうのかく乱により液体の温度分布が著しく均一化されたものと判断される．しかし加熱器下部，すなわち伝熱面下端（第5図のO点）から下方の液体の温度分布は (a)，(b) いずれの場合においてもほとんど一様



(a)

(b)

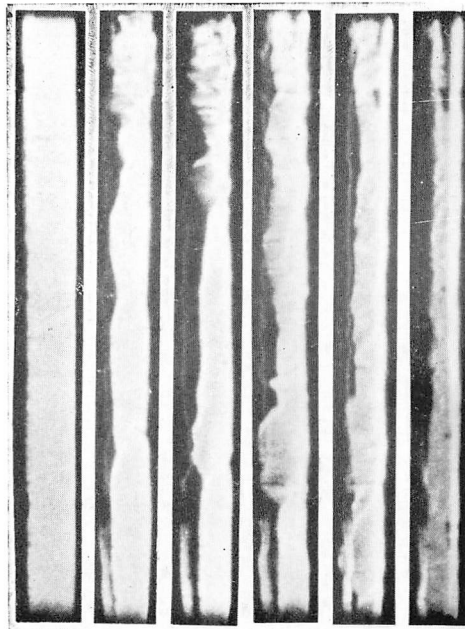
第5図 液体の温度分布

な温度分布を示すため熱伝達係数  $\alpha$  の計算にあつては伝熱面の巾方向に対して中央 ( $z=0$ ), 伝熱面からの距離 (伝熱面に対する垂直距離)  $x=5\text{ mm}$  の位置で, 伝熱面下端から下方に  $30\text{ mm}$  の点 ( $y=-30\text{ mm}$ ) の液体の温度を代表温度  $\theta_b$  として採用した. なお図中の  $\theta_j$  はジャケットの温度を示す.

2) 境界層の流動様相

温度境界層シュリーレン写真の例として熱負荷  $q=7500\text{ Kcal/m}^2\text{h}$  一定, 吹込空気量  $Q=1.87\text{ Ncm}^3/\text{sec}$  一定のもとに, 吹込位置  $\xi$  をいろいろ変化させた場合を第6図に示す. 一般に吹込空気量  $Q$  一定で, 吹込位置  $\xi$  を変化させると, 吹込位置が伝熱面から遠い場合 ( $\xi$  が大きい時) は境界層はその上部

のみ乱れる. また吹込位置が伝熱面に次第に近づくにつれて温度境界層の乱れの範囲は次第に下方に広がりその厚さも薄くなつてくる.  $\xi=10\text{ mm}$  では, ついに全体として温度境界層は乱れを生じ, その層の厚さも極めて薄くなり熱伝達の良好なことがわかる. 一般に同一空気吹込位置 (例えば  $\xi=50\text{ mm}$ ) で熱負荷  $q$  が小さい場合には, 吹込空気量  $Q$  が少ない範囲においては空気を吹き込むと境界層の全域にわたつて乱れを生ずるが, その乱れはあまり大きくない. 熱負荷  $q$  を増すと空気吹込みにより温度境界層の上部は特に乱れを生ずるが, 境界層全体の乱れを観察してみると熱負荷が小さい時に比較してはげしくなつていくことがわかる.

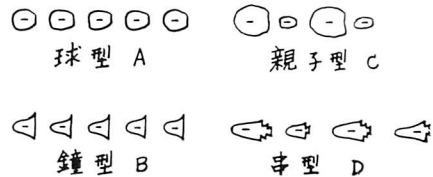


$Q\text{ Ncm}^3/\text{sec}$	0	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87
$\xi\text{ mm}$		50	40	30	20	10

第6図 温度境界層写真 ( $q=7500\text{ Kcal/m}^2\text{h}$ )

3) 吹込空気ほうの形状

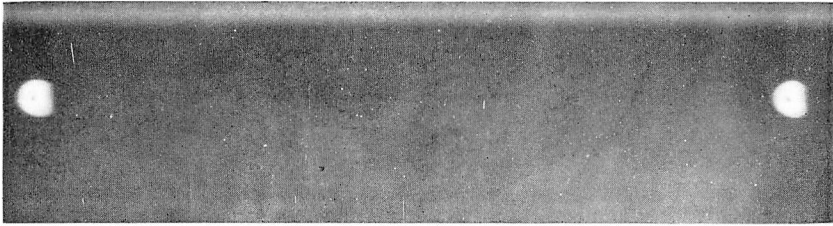
吹込空気ほうをその形状のみから観察すると, ほぼ核沸騰時の発生気ほうと同様の諸型式を示し次の4種類に大別することができるようである. すなわち, 第7図のように球型気ほう(A), 鐘型気ほう(B), 親子型気ほう(C), 串型気ほう(D)に分類される. この各々の気ほうはさらに連続ほうと不連続ほうに分けられる. 熱負荷  $q=4550\text{ Kcal/m}^2\text{h}$ , 吹込位置  $\xi=30\text{ mm}$  で吹込空気量  $Q$  をいろいろに変えて実験を行



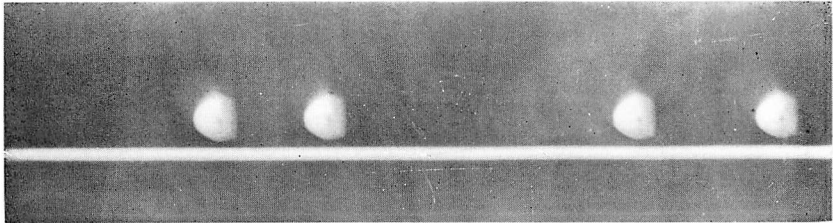
第7図 気ほうの形状

ない得られた写真が第8図 (i), (ii) の吹込空気ほうの写真である. 吹込空気量  $Q$  が比較的になく

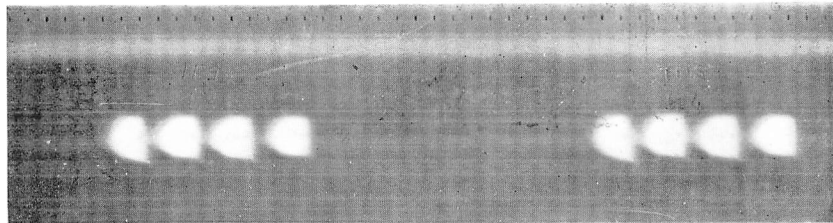
→ 時間



(a)  $Q = 0.21$  (Ncm<sup>3</sup>/sec)



(b)  $Q = 0.94$  (Ncm<sup>3</sup>/sec)



(c)  $Q = 1.87$  (Ncm<sup>3</sup>/sec)

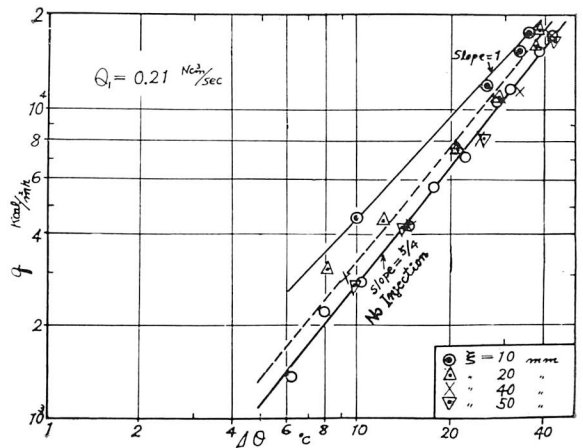
第 8 図 (i) 気ほうの写真 ( $q = 4550$  Kcal/m<sup>2</sup>h  
 $\xi = 30$  mm)

い範囲, 第 8 図 (i) ( $Q=0.21, 0.94, 1.87$  Ncm<sup>3</sup>/sec) では単一気ほう (A・B 型) が得られ, 吹込み空気量が比較的多い範囲, 第 8 図(ii) ( $Q=9.44, 20.00, 20.75$  Ncm<sup>3</sup>/sec) では複合気ほう (C・D) となつて表われていることがわかる。

4) 熱伝達係数

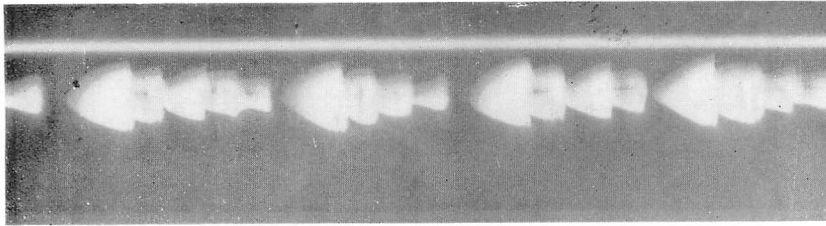
吹込空気量  $Q$  が多い場合と少ない場合について, 熱負荷  $q$  と温度差  $\Delta\theta = (\theta_p - \theta_b)$  との関係を示す。一般に,  $q \propto \Delta\theta^n$  であることから自由対流熱伝達時の層流の場合においては,  $n = 5/4$  であることがわかつてはいるが, 本装置での実験でも同じ傾向 (図の No Injection の線: Slope=5/4 に相当) であつた。この自由対流 (層流) の状態のもとでこれに空気ほうを吹き込んだ場合には, 吹込位置  $\xi=10$  mm で  $n=1$  (図の Slope=1) の値をとる。このことは熱伝達係数  $\alpha$  が熱負荷  $q$

に無関係に一定であることを示している, すなわちかく乱効果がますますつれて  $n$  は  $5/4$  から  $1$  に近づく傾

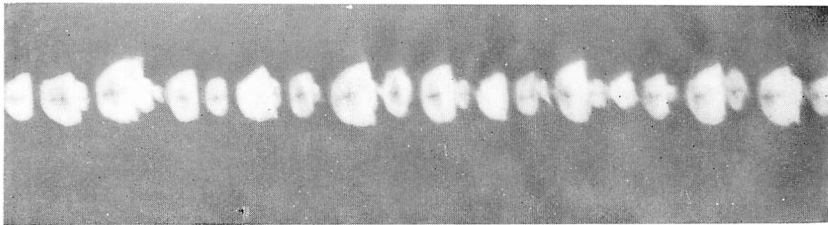


第 9 図  $q$  と  $\Delta\theta$  との関係

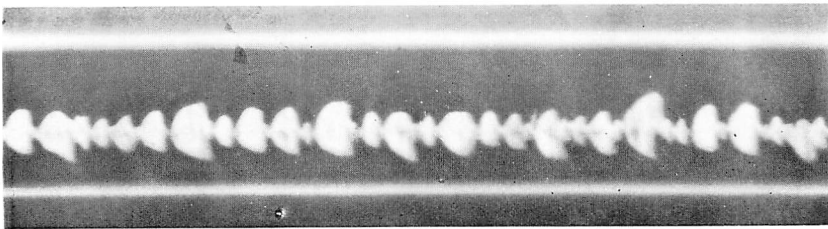
→ 時間



(d)  $Q = 9.44$  (Ncm<sup>3</sup>/sec)



(e)  $Q = 20.00$  (Ncm<sup>3</sup>/sec)



(f)  $Q = 20.75$  (Ncm<sup>3</sup>/sec)

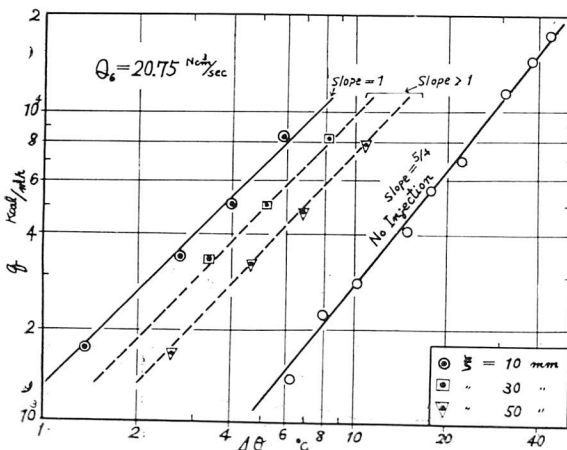
第8図(ii) 気ほうの写真 ( $q = 4550$  Kcal/m<sup>2</sup>h,  $\xi = 30$  mm)

向を示す。吹込空気量  $Q = 0.21$  Ncm<sup>3</sup>/sec, つまり比較的  $Q$  が少ない場合 (例えば, 第9図) には吹込位

置  $\xi$  が增大するにつれて  $n$  の値は1から次第に増加してゆくが, 吹込位置  $\xi > 40$  mm では自由対流熱

伝達時の  $n = 5/4$  の線に一致し, 気ほうかく乱効果のほとんどないことを示している。しかし空気吹込量  $Q$  が大きい場合 (例えば, 第10図) にはそのかく乱の効果は著しく,  $\xi = 50$  mm のところでさえ自由対流 (層流) 熱伝達時の  $n = 5/4$  の線からかなりはなれて勾配も  $5/4$  よりわずかに小さい値を示す。すなわちこの距離でもなお相当量の熱伝達の改善, つまり増進があることがわかる。

液体の対流の起動力として, 温度差による浮力と気ほうかく乱の影響が考えられるが, この点については以前に水平平板伝熱面で気ほう存在の場合<sup>5)</sup>の検討が行なわれ, 次のような考え方で現象が明らかに説明されることが示された。すなわち浮力を  $D_d$ , かくはん力を  $D_a$  と



第10図  $q$  と  $\Delta\theta$  との関係



し空気ほうを吹き込まない場合と吹き込んだ場合の熱伝達係数をそれぞれ  $\alpha_0$  ならびに  $\alpha$  とすれば、

$$\alpha_0 \propto D_d^m \quad \alpha \propto (D_d + D_a)^m \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha/\alpha_0 \propto (1 + D_a/D_d)^m \dots\dots\dots (2)$$

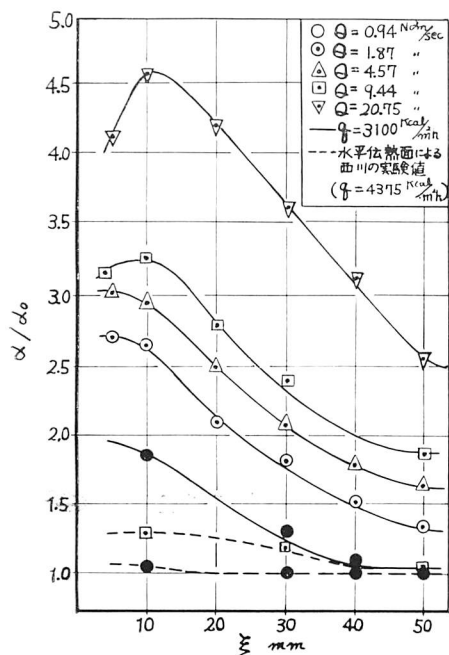
上式の右辺の第2項が  $Q$  に比例すると仮定すれば

$$\alpha/\alpha_0 \propto (1 + cQ)^m$$

となる。ここに  $c$  は比例定数、 $m$  は定数である。

この考え方を、本実験の場合に適合してみると、第9図、第10図において、勾配が  $5/4$  あるいは  $5/4$  に近い状態では  $D_d \gg D_a$ 、すなわち浮力  $D_d$  が圧倒的に大きいとすると、(1)式から  $\alpha \propto D_d^m$  となり  $m=1/4$  つまり  $n=5/4$  となる。この場合  $\alpha \propto \Delta\theta^{1/4}$  であることから自由対流(層流)熱伝達、またはこれにきわめて近い状態として十分理解される。勾配が1の場合は、 $D_d \ll D_a$  すなわちかくはん力  $D_a$  が圧倒的に大きいとすると説明がつく。

熱伝達係数の増加率  $\alpha/\alpha_0$  に対する吹込位置  $\xi$  の関係を熱負荷一定のもとで整理した結果が第11図である。図中に水平平板伝熱面についての結果<sup>9)</sup>を破線で記入した。この図から吹込位置の影響はさらに明らかである。すなわち垂直平板伝熱面を用いて水中に空



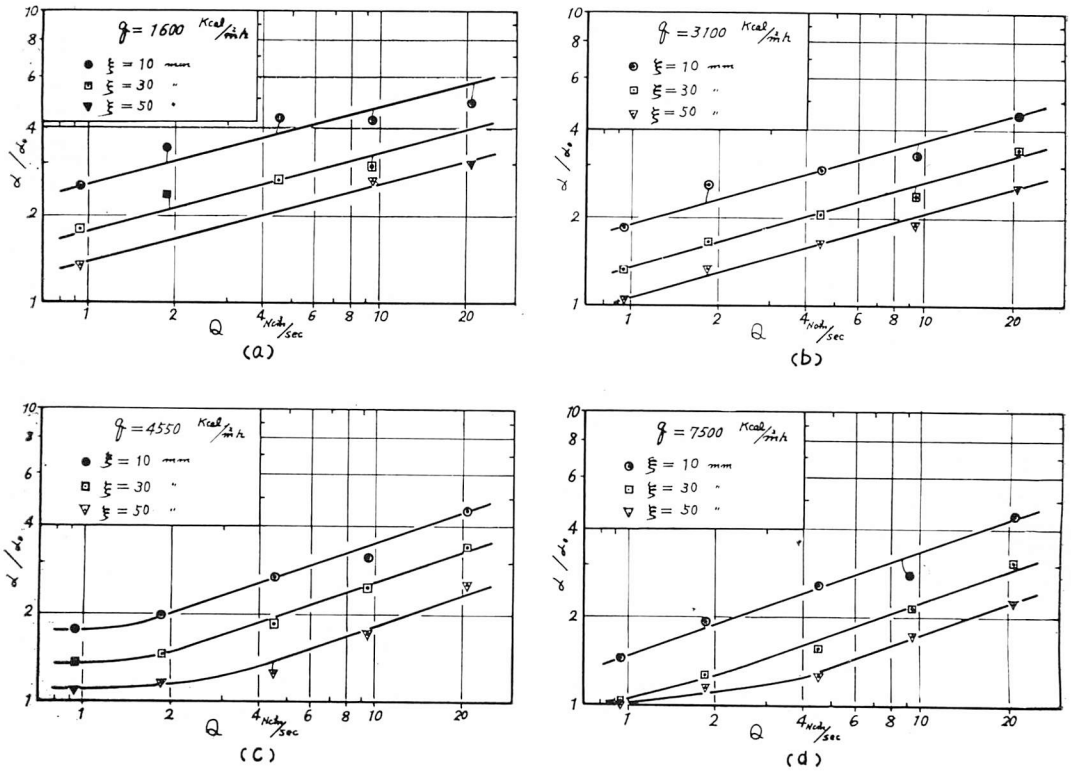
第11図  $\alpha/\alpha_0$  と吹込位置との関係

気ほうを吹き込むと熱伝達係数は水平平板伝熱面での増加よりさらに著しいことが明確にあらわれている。これは水平平板伝熱面では気ほう上昇とともに気ほうは伝熱面より遠ざかりかく乱効果が減少するのに対して、垂直平板伝熱面では気ほうの上昇に対して伝熱面からの距離はあまり変化せず気ほうかく乱効果が減衰しないためと思われる。しかしながら第11図の場合、 $\xi=20$  mm 附近では  $\alpha/\alpha_0$  の上昇は多少鈍くなり  $\xi < 10$  mm になると低下の傾向を示し、特に吹込空気量が多い場合には目立って低下する。これは伝熱面に接近して吹き込み、特に吹込空気量が多くなると伝熱面が空気の層で覆われる結果となり、空気膜による熱しや断の影響が気ほうかく乱の効果を上廻るため熱伝達係数  $\alpha$  が減少するものと思われる。事実、第12図に示すごとく  $Q=20.75$  Ncm<sup>3</sup>/sec,  $\xi=5$  mm では伝熱面は空気膜に覆われていることがわかる。



第12図 空気吹込実験外観写真  
( $q=7500$  Kcal/m<sup>2</sup>h,  $Q=20.75$  Ncm<sup>3</sup>/sec,  $\xi=5$  mm)

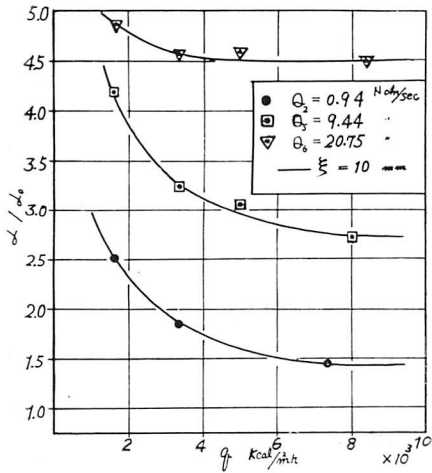
吹込空気量  $Q$  が気ほうかく乱効果にいかん影響するかを調べるため(3)式の  $\alpha/\alpha_0$  と  $Q$  との関係第13図(a)・(b)・(c)・(d)に示す。一般に吹込空気量が増加するとそのかく乱効果が大きくなることを示している。第11図では熱負荷一定の場合を示したが、



第13図  $\alpha/\alpha_0$  と吹込空気量との関係

熱負荷が変化すると  $\alpha/\alpha_0$  の絶対値のみならずその変化の傾向も多少異なってくる。例えば、第13図 (a)・(b)・(c)・(d) においてその勾配は熱負荷  $q$  が大きくなると次第に大きくなる傾向にある。また熱負荷  $q$  が大

きいほど吹込空気量  $Q$  が多くならなければ気ほうかく乱による熱伝達への影響があらわれにくくなる。このことは (c) および (d) 図でわかる。このことは  $\alpha/\alpha_0$  と  $q$  との関係 (第14図) から也十分理解される。



第14図  $\alpha/\alpha_0$  と熱負荷との関係

#### 4. む す び

垂直平板伝熱面を用いて、これに接する液体(純水)中に気ほう(空気ほう)を吹き込んで、これが熱伝達におよぼす影響について研究した結果次の結論をえた。

(1) 垂直平板伝熱面を用いて水中に空気ほうを吹き込んだ場合には、水平平板伝熱面での実験結果と同様、気ほうかく乱の効果により熱伝達係数は増加するがその増加の割合ははるかに著しい。

(2) 空気の吹込位置が伝熱面側に近づくにつれて熱伝達係数は次第に増大する。

(3) 吹込空気量が比較的多い場合、吹込位置が伝熱面に近づくにつれてある距離までは熱伝達係数は増加するが、さらに近づくとも熱伝達係数はかえって低下の傾向を示す。これは吹き込んだ空気ほうが伝熱



面上を膜状に覆い熱しや断の作用をするためとみられる。

(4) 熱負荷が比較的大きい場合においては、吹込空気量が少ない時は、気ほうかく乱効果はあまりあらわれない。吹込空気量が多くなりある量以上になると急にかく乱効果は著しくなる。すなわち熱伝達係数は増大する。

(5) 吹込空気ほうの形状はオッシロ写真の結果から判断して、核沸騰時の発生气ほうとはほぼ同様の四つの型式、すなわち球型、鐘型、親子型、串型に分類できる傾向にある。

最後に本研究に種々御助言と御援助を賜った九州大学工学部西川兼康教授ならびに鹿児島大学工学部石神重男教授に対し厚く御礼申し上げるとともに、熱心に実験に協力された浜崎和則、安井元の両君（昭和39年3月卒業）、研究室の上加世田司郎君に謝意を表する。

文 献

- 1) 昭38.11.28. 日本機械学会第714回講演会(熱力学部門委員会企画)において講演(長崎): 九大工学集報 第37巻, 1号, P. 52.
- 2) F. C. Gunther, F. Kreith. Prog. Rept. No. 4-120 Jet Prop. Lab., Calif. Inst. Tech., March, 1950.
- 3) S. G. Bankoff, J. P. Mason, J. AIChE, 8, 1, 1962. 30.
- 4) F. O. Mixon. W, Y. Chon. K. O. Beatty, CEP. Symp. Series, 56, 30, 1960, 75.
- 5) 山県・平野・西川・外4名: 日本機械学会論文集, 第19巻, 第84号, P. 4.
- 6) Saunders, Proc. Roy. Soc., A. 172, 1939, P. 55.
- 7) Lorenz, Zeitschr. f. tech. Physik, Nr. 9. 1934, S. 62.
- 8) 山県・平野・西川・松岡: 九州大学記要 Vol. XV, No. 1, P. 114.
- 9) 山県・平野・西川・外3名: 九大工学集報, 第26巻, 第1号, P. 21.