

# 水中の気ほうの様相

石神重男・玉利賢一

(受理 昭和40年5月31日)

## MOVEMENTS OF AIR-BUBBLES IN THE WATER

Shigeo ISHIGAMI, Masakazu TAMARI

The shapes, the deviations and the local velocities of air-bubbles when air was blown into the water minutely examined in the cases where no walls were around them and where 1 vertical wall, 2 and 4 vertical walls were near them respectively in order to observe their movements in each case distinctively.

The results which were thus obtained will give become the basic data for studies on the phenomenon of heat transfer between two phase flow and the wall surface.

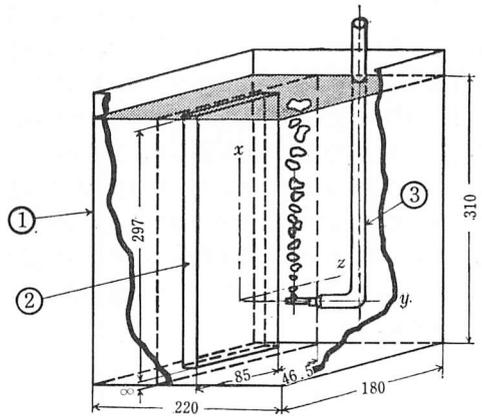
### 1. ま え が き

液中に気ほうの混在する状態時の熱伝達は沸騰その他諸種の化学装置の中の現象として、しばしば見られることである。筆者の一人<sup>1)2)3)</sup>はさきに水の沸騰のさいの熱伝達研究の基礎として、垂直平板伝熱面前方の水中に空気を吹き込んだ場合について、伝熱面負荷とともに空気吹き込みの位置、ならびに吹込空気量を変化し、熱伝達係数におよぼすこれらの影響について実験的に研究し、その結果を報告した。

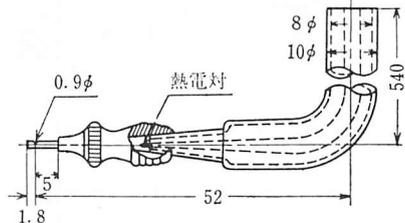
本報告は上記の影響を生ずる原因としての水中における気ほうのかく乱の様相に着目して、その様相の詳細を実験的に検討したものである。本実験では熱負荷は与えず、また空気吹き込み孔は一つとした。

### 2. 実験装置および方法

実験装置全体を第1図に示す。これは前報<sup>1)</sup>の実験に使用した内槽と同じものである。図中の①が試験槽、②が伝熱壁面（本実験では熱負荷は与えなかつたので単なる壁面と考えてよい）、③が空気吹き込み管である。水の深さは静止時 310mm で、水面から 262mm 下方の壁面中央を原点にとり（この点が伝熱面として使用するときの伝熱面下点中央にあたる）、原点を通り壁面に垂直な線を  $x$  軸、壁面にそつて鉛直な線を  $y$  軸、壁面にそつて水平な線を  $z$  軸とする。空気吹き込み管を第2図にしめす。内径 8mm のガラス管の先を絞り、ここに図のごとく外径 1.32mm の注射針をとりつけ、その尖端は封じ、尖端から 1.8mm の側面に直径 0.9mm の孔をあけ、これを空気吹き込み孔とした。



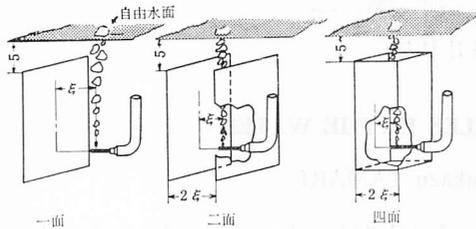
第1図 実験装置



第2図 空気吹込管の先端附近の図

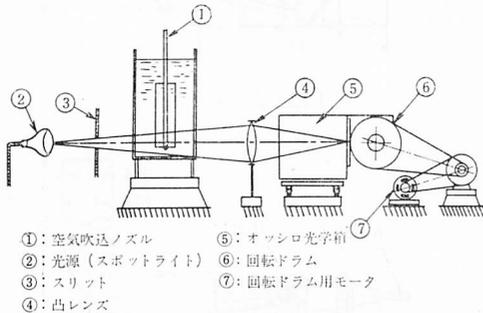
本実験中空気吹き込み孔の水中の深さはすべて 262 mm とし、 $x$  軸上のみで位置を変えた。壁面から孔の中心までの垂直距離を  $\xi$  とし、 $\xi$  の値は  $\infty$ , 50, 40, 30, 20, 10, 5, 2.5 mm に変えて実験した。ただし  $\xi = \infty$  とは壁面をとりさり空気吹き込み孔を試験槽の中央においた場合をしめす。壁面は吹き込み孔に対し一

面のほか二面および四面の場合も実験した。その配置のしかたを第3図にしめす。



第3図 壁面の配置図

空気吹き込み量は  $0.21 \text{ Ncm}^3/\text{s}$  から  $20.75 \text{ Ncm}^3/\text{s}$  の範囲に変えて実験した。吹き出し孔を出る気ほうの大きさおよび気ほう発生頻度は第4図の装置により吹き出し孔より上方  $4.5\text{mm}$  のところを気ほうの上昇方向に垂直なスリットを通る光束で切り、その影絵を回転ドラム上のフィルムにうつして調べた。気ほうの上昇速度は気ほう上昇の全過程を  $x$  方向、 $z$  方向からそれぞれ一つの視野で8ミリシネにうつし、その写真から時間と移動距離を求めて算出した。上昇気ほうは  $y$  軸からある程度それて、 $x, z$  方向に動揺しながら上昇するが、この浮動領域の限界は気ほう上昇の全体を  $x$  方向、 $z$  方向から平行光線で照らし、気ほうの影を紙上に投影し、これを目視しておよそ2分間の包絡線として求めた。



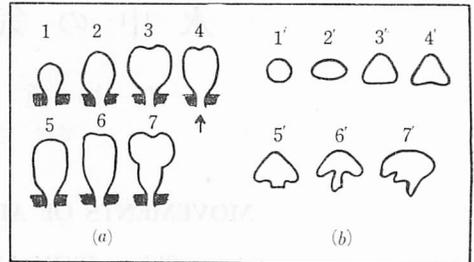
- ①: 空気吹込ノズル
- ②: 光源 (スポットライト)
- ③: スリット
- ④: 凸レンズ
- ⑤: オシロス光字箱
- ⑥: 回転ドラム
- ⑦: 回転ドラム用モータ

第4図 気ほう発生様相の撮影装置

### 3. 実験結果とその検討

#### (1) 吹き出し孔を離れるときの気ほうの形状

観察した代表的な形を第5図に示す。図中の (a) 群は吹き出し孔を離れる直前の形で、(b) 群は離れて直後の形である。すなわち離れる前は空気流量が少ないときは、球形または長楕円体に近い形であるが、流量が多くなると頂部が平か、又はやや中凹みの紡錘体状

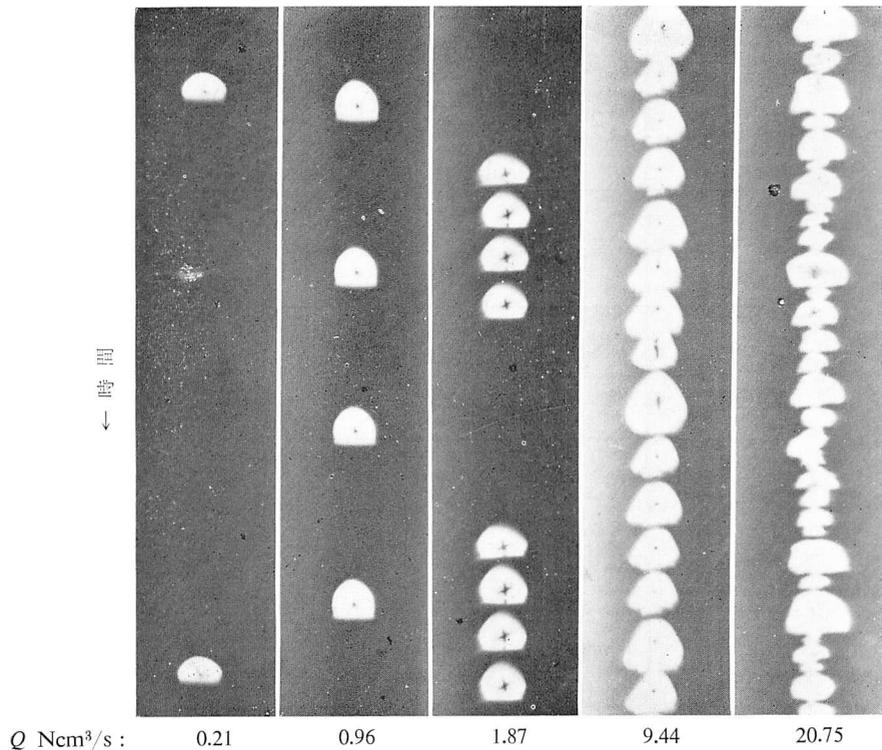


第5図 吹き出し孔離脱時の気ほうの形状

になる。流量の多いとき頂部が上記のごとくなるのは気ほうが急速に上向きに成長しようとするのに対する水抵抗のためと見られる。吹き出し孔を離れたあとは偏平な楕円回転体か、大部分は頂部が上に凸になった三角形の角を丸めた形の回転体、あるいは茸状笠形や不定形の気ほうとなる。かように頂部が突出し、底面が偏平に近くなるのは気ほうが切れるとき、気ほう下面の総圧力が急に高まり中央部を押し上げるためと考えられる。

#### (2) 吹き出すときの気ほう径と頻度

第4図の方法によつて写した写真の一部を第6図に示す。図は壁面を除いて ( $\xi = \infty$ ) 空気吹き込み量を変えて撮つた結果である。図によつてスリットを通る光束部を通過するときの気ほうの水平断面の直径と気ほうの発生頻度を知ることが出来る。このような写真多数をうつし、その直径と頻度をとつた資料が第7図、第8図である。前者は壁面のない場合、後者は一壁面で  $\xi = 5\text{mm}$  の場合である。図のごとく気ほう直径は必ずしもある一つの中心値を有する分布傾向とは限らない。場合によつては、二つの群あるいは三つの群の分布をすることが見られる。しかし現象を簡単に表示するためには、これがそれぞれの吹き出し条件のもとである一つの代表直径で表現されれば、その取扱いは非常に便利であろう。一般にこのようなばらつきのある粒群を整理するのに代表直径のとりかたとして、i) 中央値 (Median) による、ii) 分布面積平均をとり代表直径とする、iii) 空気流量と気ほう発生頻度とから気ほうを同一直径の完全球体としてその直径を算出し、代表直径とする方法などが考えられる。壁面のない場合について吹き込み空気量  $Q \text{ Ncm}^3/\text{s}$  と発生頻度  $f$  個/s との実測値が第9図、 $Q$  に対する i)~iii) によつて求めた気ほう直径が第10図である。第4図の装置による写真から測定した直径値は光束の切断する面が固定しているため、空気流量の多いところでは、気

第 6 図 吹き出し孔近傍の気ほうの写真 ( $\xi = \infty$ )

ほうの最大直径を完全にはとらえていない。すなわち、気ほうがこの切断面より上方で大きくふくらむこともありうるからである。よつて  $Q$  と  $f$  から算出した直径が最も合理的な代表値として採用することができる。第 9 図において、 $f$  は  $Q$  の増加とともに増大することがわかる。特に  $Q=5 \text{ Ncm}^3/\text{s}$  以上では  $f$  は  $Q$  とともにほぼ直線的に増大している、いまこの部分を直線とみなすと

$$f \propto Q$$

$$Q \propto f \cdot d^3$$

$$\therefore d = \text{一定}$$

となることがわかる。

図中に Siemes<sup>43)</sup> の測定結果を参考に記入したが、これでは  $5 \text{ Ncm}^3/\text{sec}$  以上で  $f$  がほぼ一定となっている。したがつて、

$$f = \text{一定}$$

$$\therefore Q \propto d^3$$

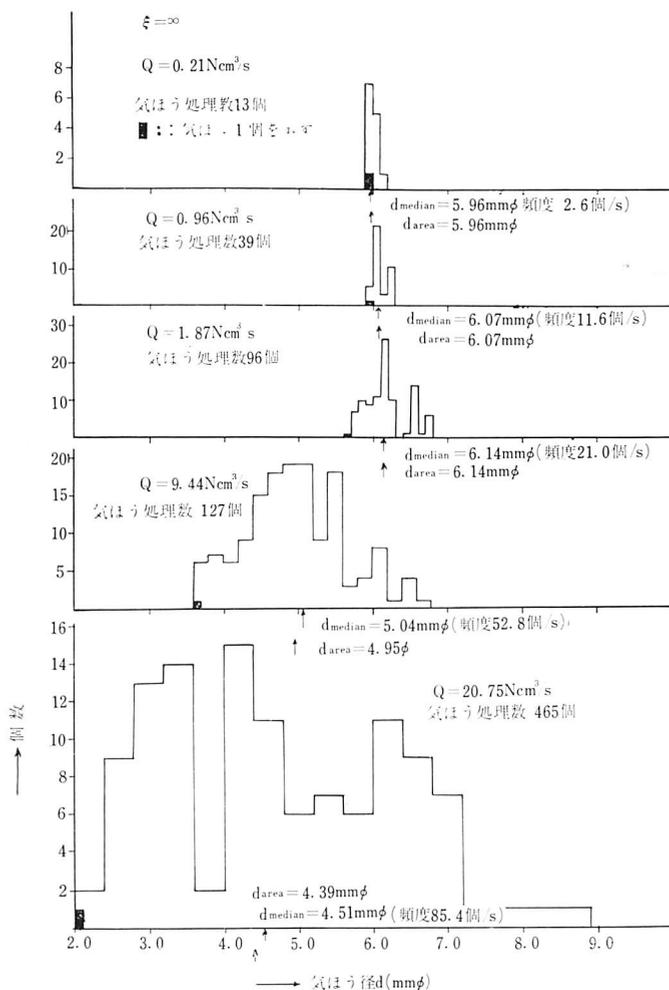
$$\text{または、} \quad d \propto \sqrt[3]{Q}$$

となり、 $d$  は  $Q$  とともに次第に増大することとなる。しかし実際に気ほうの発生を観察していても、 $Q$  が増

加すると、 $f$  が増大し、 $d$  はさほど大きくならないことが明らかである。よつて Siemes の結果は本実験における観測位置に関しては成立しない。ただし気ほうが吹き出し孔より相当上昇すると、いくつか互に合体して大きな気ほうとなることがある。よつてこのような点で観測すれば Siemes の結果により近づくであろう。(Siemes は電極板法とストロボスコープで観測している)

壁面に関連する空気吹き込み位置  $\xi$  を変えた場合の気ほうの直径(代表値)を第 11 図に、 $\xi$  の変化に対する頻度の変化を第 12 図に示す。 $\xi$  の大きい範囲では吹き込み空気量が一定ならば壁面の配置を変えても  $d$  も  $f$  もほとんど一定であつて、 $\xi$  が小さくなると  $d$  は減少し、 $f$  は増大する。図は  $Q=0.96 \text{ Ncm}^3/\text{s}$  で比較的吹き込み空気量の少くない場合であるが、この程度では、 $\xi \leq 5 \text{ mm}$  で上記の  $d, f$  の変化が起つている。これは吹き出し孔が壁面に近づくとき壁面の干渉が気ほうの分裂を助長するほうに作用することを現している。

### (3) 上昇途中の気ほう



第7図 気ほうの分布状態図 (壁面なしの場合)

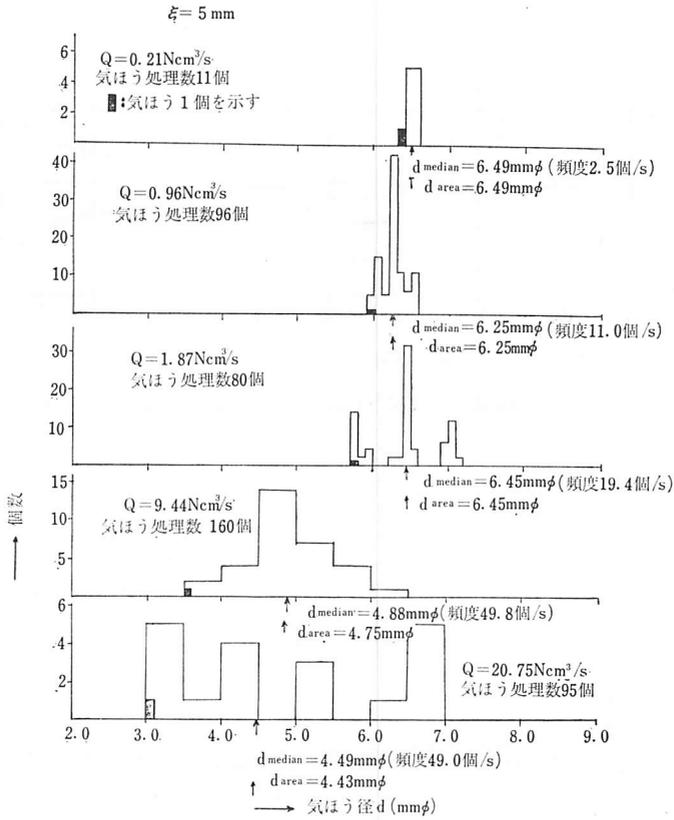
空気吹き出し孔を離れてのち、気ほうは不規則な運動をするが、その間に変形、分裂あるいは合体しながら上昇する。この際、水平方向にも、ある領域の中を浮動する。以下ある水平面内の浮動の中を“ふれ”と称する。以上のような気ほうの運動により液の対流は促進され、もし熱伝達を伴う場合には液体中の温度境界層、速度境界層などにも変化を与え、熱伝達現象に影響するわけである。

気ほう上昇の状況を写真に撮つた一例が第13図で、吹き込み空気量は一定とし、露出時間を1/8, 1/125, 1/1000秒に変えてとつたものである。この写真からも気ほうのふれ域、上昇速度、形状などを知ることができるが、さらに正確に上昇状況を知るため、8ミリシ

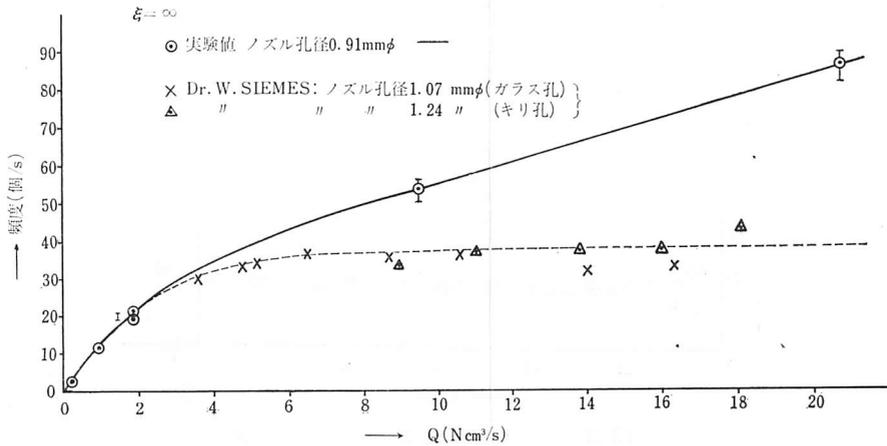
ネに撮影した。これからある気ほうの動きを追跡したのが第14図から第16図である。図の横軸はフィルムのコマ数、したがって時間、縦軸は気ほうの位置をとつてある。この図から時間と気ほう位置の関係がわかり、これらの微分として気ほうの各位置における速度を知ることができる。

#### a. ふれについて

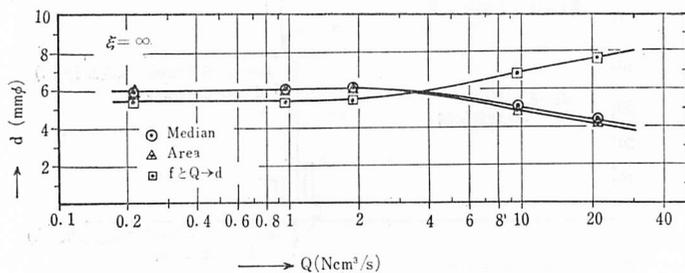
第17図は壁面のない場合の吹き出し孔からの高さ、その点のふれの関係を示す。ふれはx方向、z方向とも同じで、したがってふれ領域の水平断面はふれ量の半分を半径とする円形になる。ふれははじめ急に大きくなるが、さらに上昇するとその増加は次第にゆるやかになり、各空気量ごとにそれぞれ一定のふれに



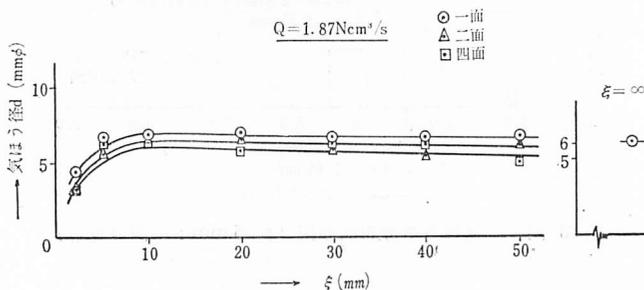
第 8 図 気ほうの分布状態図 ( $\xi = 5 \text{ mm}$  : 一面の場合)



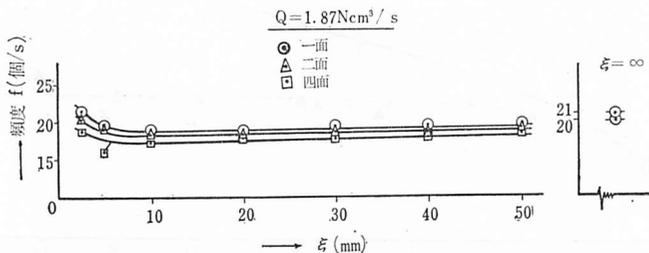
第 9 図 気ほうの頻度と吹込空気量との関係



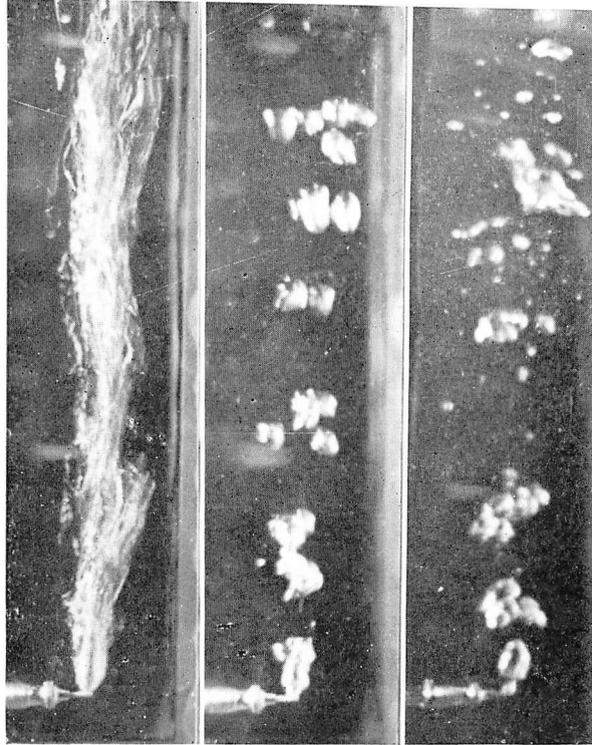
第 10 図 気ほう径と吹込空気量との関係



第 11 図 気ほう径と吹込位置との関係



第 12 図 気ほうの頻度と吹込位置との関係



$Q$ Ncm <sup>3</sup> /s	9.44	9.44	9.44
露出時間 s	1/8	1/125	1/1000
絞り f	2.8	1.2	1.2

第13図 気ほうの上昇時の様相

近づいて行く傾向を示す、空気量が微量の場合から  $1.87 \text{ Ncm}^3/\text{s}$  付近までは空気量とともにふれは急が増大するが、それ以上の空気量になるとふれはさほど増大しない。これは上昇速度が早くなることを意味するものである。第18図は空気量の違いによるふれの変化図で  $Q=5 \text{ Ncm}^3/\text{s}$  以上ではふれ巾は各高さで僅かに増加するのみである。

第19図は一面の壁があるとき、 $Q=9.44 \text{ Ncm}^3/\text{s}$  一定で $\xi$ の変化による $x$ 方向、 $z$ 方向のふれを示した。 $\xi \geq 20\text{mm}$ では壁の影響は見られないが、 $\xi < 20\text{mm}$ になると $x$ 、 $z$ 方向でふれが違ってくる。 $x$ 方向については $\xi=10\text{mm}$ 付近に最小点がおこり、 $\xi$ がさらに小になるとまた増大する。これは $\xi=100\text{mm}$ 付近のとき壁によつて $x$ 方向のふれが適当に整流されて減少する最適状態となるためで、これよりさらに接近すると、壁により反撥されて、かえつて $x$ 方向に大きくふれることを示す。

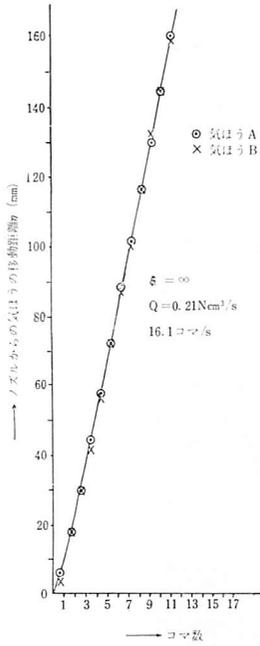
第20図は二面の場合で、ここでも $\xi=20\text{mm}$ 付近

までは $x$ 方向、 $z$ 方向ともふれは同じで、 $\xi < 20\text{mm}$ で壁面の影響が現われてくる。この際 $x$ 方向ふれは最低点がおこる付近では、すでに両壁面によりふれは限定され、 $z$ 方向のふれのみ増大してゆく。

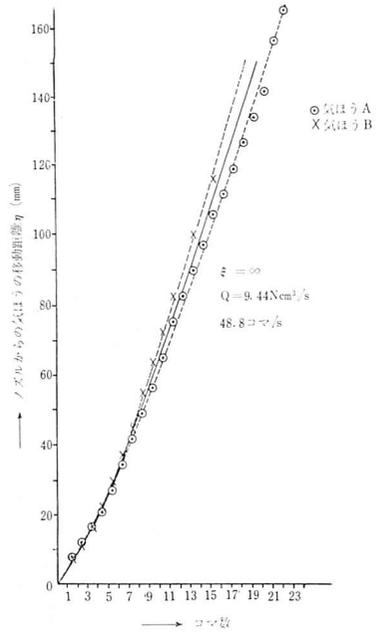
#### b. 気ほうの上昇速度

第21図は壁のない場合の気ほうの上昇時間と位置の関係、第22図は位置と上昇速度の関係を示す。 $\eta=0\text{mm}$ においては速度が0でないのは孔を出るときすである速度を持つていることを示している。上昇速度は高さとともに直線的に増大する。 $Q < 1.87 \text{ Ncm}^3/\text{s}$  付近までは速度線の傾きは急で、すなわち上下の速度差があまりないが、この範囲では $Q$ の増加は前項に述べるように、ふれの増加として現れてくる。 $Q > 1.87 \text{ Ncm}^3/\text{s}$  になるとふれの増加は少なくなり、そのかわり上昇速度の増加が著しいことがわかる。

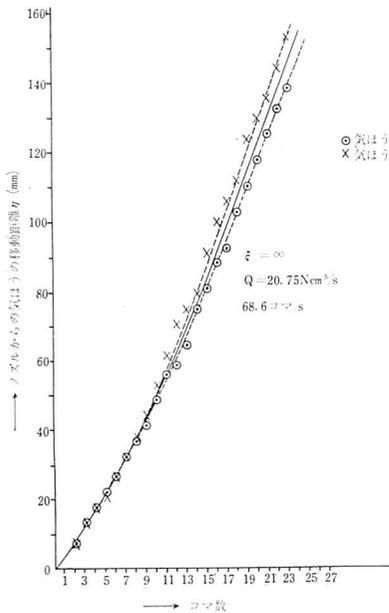
第23図は $Q=0.96 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ 一定とし、一面、二面、四面の壁を配置したとき吹込位置 $\xi$ と、速度 $U$ の関係を高さをパラメータとして示したものである。一面お



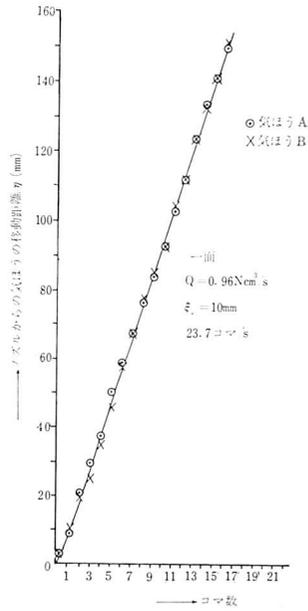
第 14-a 図 気ほうの移動距離とコマ数との関係



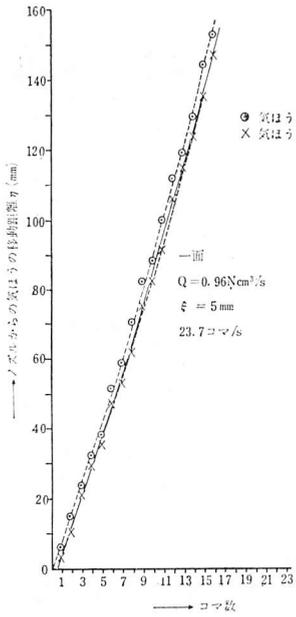
第 14-b 図 気ほうの移動距離とコマ数との関係



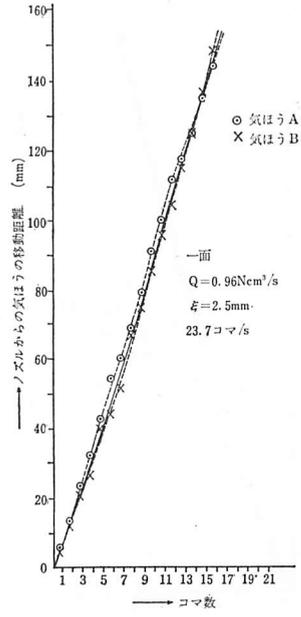
第 14-c 図 気ほうの移動距離とコマ数との関係



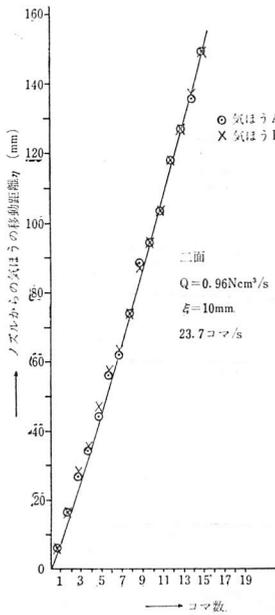
第 15-a 図 気ほうの移動距離とコマ数との関係



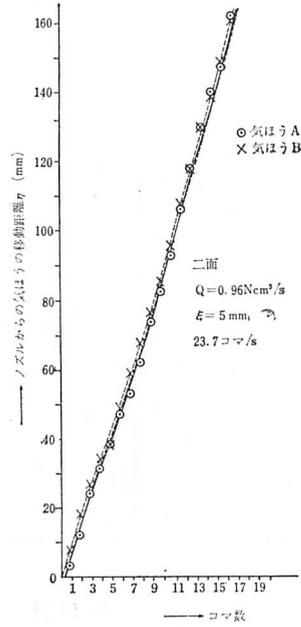
第 15-b 図 気ほうの移動距離とコマ数との関係



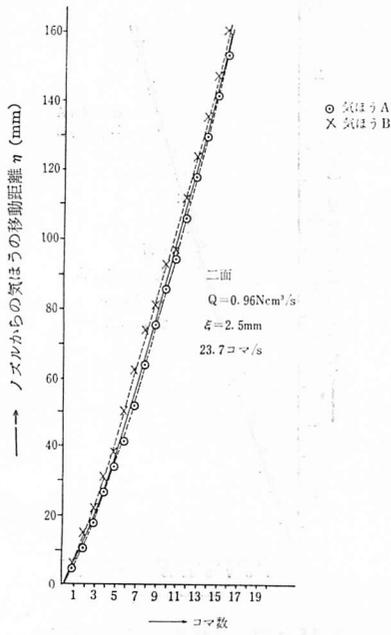
第 15-c 図 気ほうの移動距離とコマ数との関係



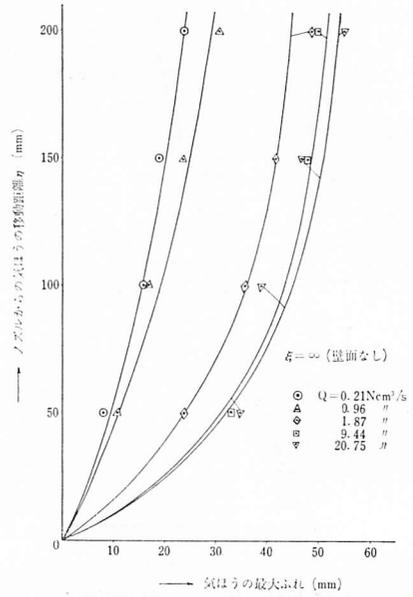
第 16-a 図 気ほうの移動距離とコマ数との関係



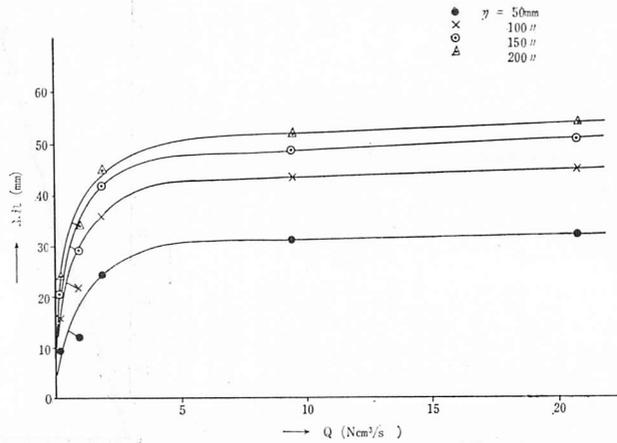
第 16-b 図 気ほうの移動距離とコマ数との関係



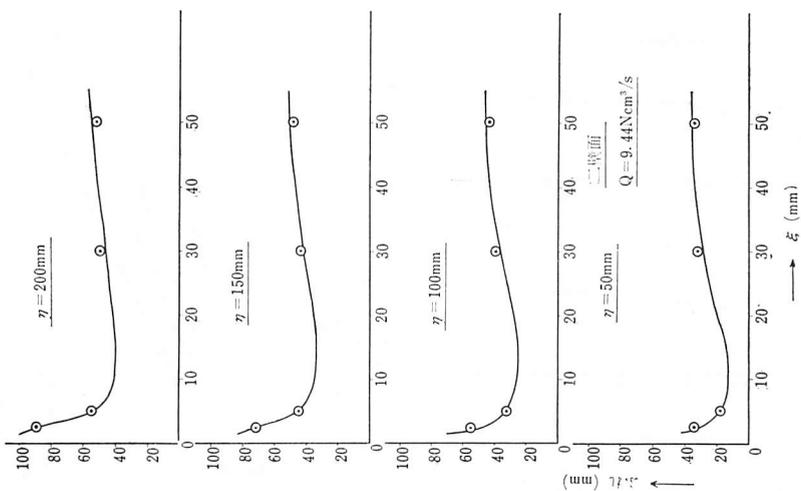
第 16-c 図 気ほうの移動距離とコマ数との関係



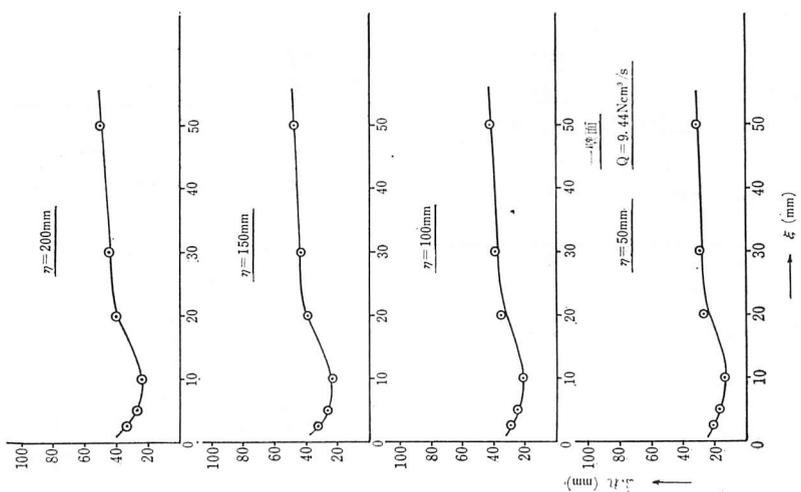
第 17 図 気ほうの移動距離と最大ふれとの関係



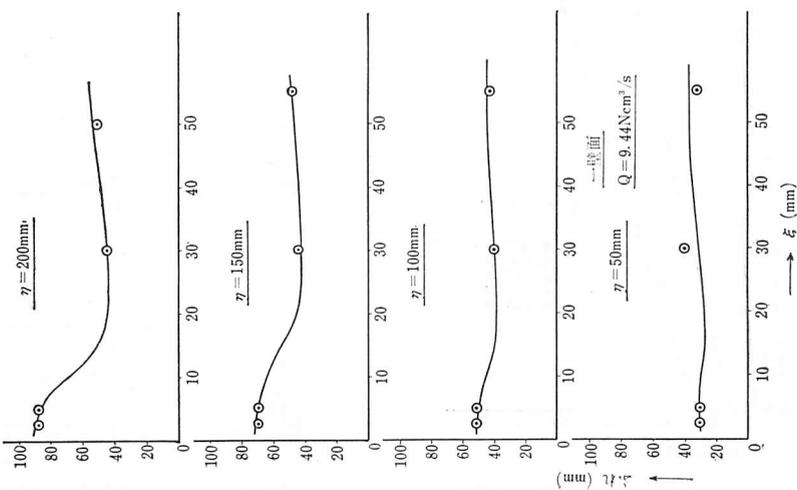
第 18 図 x 方向のふれと吹込空気量との関係



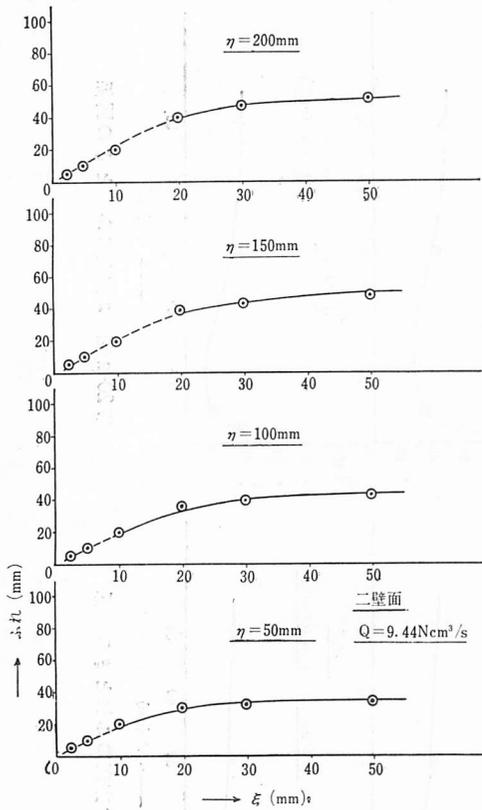
第20-a図 z方向のふれと $\xi$ の関係



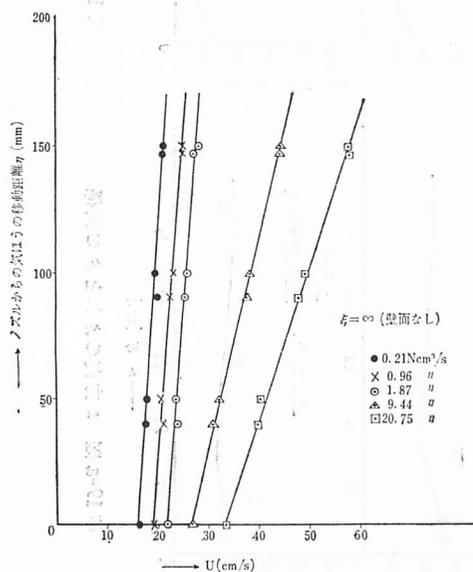
第19-b図 x方向のふれと $\xi$ の関係



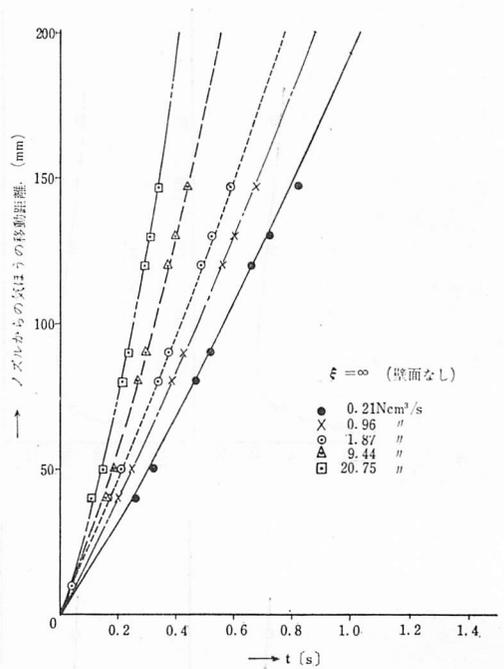
第19-a図 z方向のふれと $\xi$ の関係



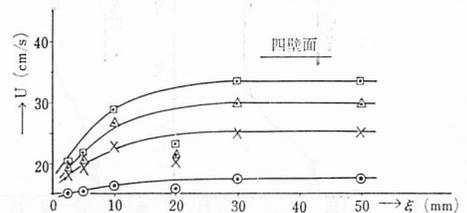
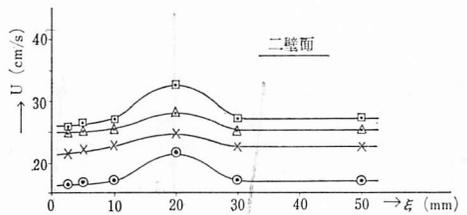
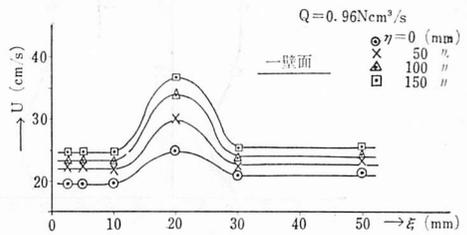
第20-b図 x方向のふれと $\xi$ の関係



第22図 気ほうの上昇時の位置と速度との関係



第21図 気ほうの移動距離と時間との関係



第23図 気ほうの上昇速度と $\xi$ との関係

よび二面の壁を配置したとき  $\xi=20\text{mm}$  付近に著しく上昇速度の高い状態が生ずる。この点はちょうど  $x$  方向のふれと、 $z$  方向のふれとが異なりはじめる点に相当するが、この現象は気ほうの上昇によつて、試験水槽内全体の対流が現実最適の状態となることを示すものであろう。その証拠に四面の壁を配置したときは対流が水槽の局部に制限されるため、このような傾向はあらわれない。 $\xi$  の減少とともに壁による抵抗のため上昇速度は単に除々に減少するのみである。一面、

二面の場合、 $\xi < 20\text{mm}$  では  $x$  方向のふれは減少するが、 $z$  方向のふれは増加するため  $\xi=20\text{mm}$  付近より速度は下つてくる。

#### 4. む す び

水中に空気ほうを吹き込んだ場合の気ほうの形状、気ほうの上昇時のふれ、上昇の速度などについて壁のない場合の他、特に一面、二面、四面の壁のある場合について実験的にその詳細な現象を明らかにした。こ

れによつて、気ほうの混在する水と壁との間の熱伝達を研究する上の有力な手がかりを得ることができた。

#### 5. あとがき

本研究をおこなうにあたり、終始熱心に努力された学生西郷久生、米倉真一の両君ならびに研究室の上加世田司郎君、さらに種々御支援をうけた田中義弘、松村博久氏に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 玉利：日本機械学会第 714 回講演会(熱・熱力学部門委員会企画)，前刷集(昭 38. 11. 28)，137.
- 2) 玉利・西川：九大工学集報，37-1 (昭 39. 3)，52.
- 3) 玉利：鹿大工学部研究報告，4 (昭 39. 11. 20)，7.
- 4) Von Dr. W. Siemes, Chemie-Ing.-Techn., 26, Jahrg, 1954/Nr. 8/9, Teil : 1, 479.
- 5) Von Dr. W. Siemes, Chemie-Ing.-Techn., 26, Jahrg, 1954/Nr. 11, Teil : 11, 614.