

空気ほうによる流れの可視化に関する研究
(第2報：空気ほうの拡散と乱れの測定について)

吹 田 年*, 川 又 正 昭*

(1972年9月8日受理)

Visualization of Water Flow by Air Bubbles
(2nd report: On the Diffusion of Air Bubbles and the
Measurement of Intensity of Turbulence)

Minoru SUITA and Masaaki KAWAMATA

Abstract: — For the visualization of water flow, the method of generation of air bubbles, and its applications were discussed in the first report. In this paper, we deal with the detection apparatus of number of air bubbles developed in our study, and the diffusion of air bubbles in water flow, and will further discuss the problem on the measurement of the intensity of turbulence by the air bubbles methods.

1. ま え が き

前報では空気ほう⁽¹⁾による水流の可視化のための特殊プローブならびに空気ほうの発生法について報告し、その応用例として直管内の流れ、円柱まわりの流れ、曲管内の流れの可視化の例をあげた。

本報では水流中での空気ほうの流れに対して著者らにより開発された気ほう数検出装置について述べる。またこれを用いて空気ほうが管内水流中での拡散の研究に使用できることについて述べ、さらにこの方法による乱れの測定理論について説明する。

2. 管内乱流による気ほうの拡散

管内水流の拡散については染料を用いて行なわれたものが報告されている⁽²⁾。これによれば、水流中に染料を流し、拡散した染料を多数の測定点から抽出し、この資料に光をあて通過する光量を測定して濃度が求められている。

著者らは管内水流中に前述したプローブにより直径約 1 mm の空気ほうを噴出し、流れ

* 茨城大学工学部機械工学科

により拡散を生ぜしめ、下流側の管の断面内の多数の測定点を一定時間内に通過する気ほう数を、平行光線と、スリットとフォトランジスタにより電磁オシロに同時に記録し、拡散の状況を調べた。

2.1 気ほう数検出装置

供試管路、測定部、気ほう用空気源、プローブなど前報⁽¹⁾のものを用いた。図1は本研究において考案した気ほう数検出装置の説明図を示す。光源よりの平行光線を反射鏡をへて

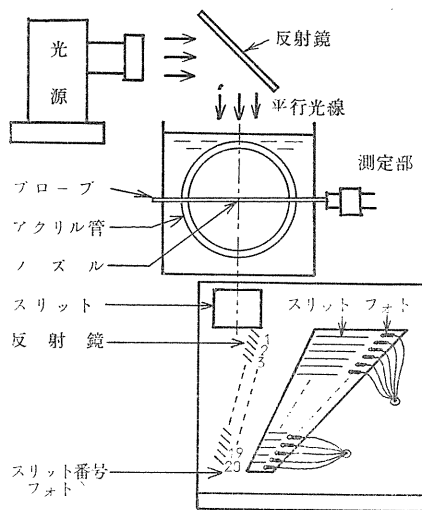


図 1 気ほう数検出説明図

試験管路の透明アクリル樹脂製の測定部へ導びく。気ほうの浮力の影響を除くため、平行光線は測定部の上部より下部に向かって作用させた。測定部を気ほうが通過した際、その点を通過する光は光量の変化を受け、この光の変化信号をフォトランジスタに導き、それによる電流変化を増巾のあと24要素の電磁オシロに記録した。測定部を通過し光量の変化

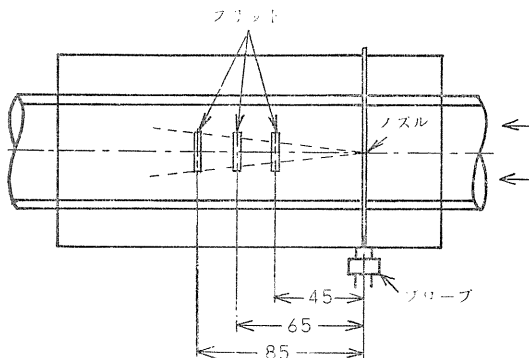


図 2 ノズルとスリット位置の関係

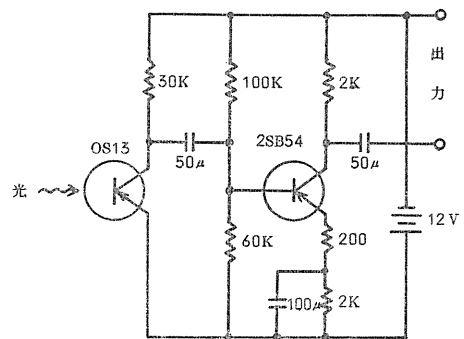


図 3 フォトランジスタ回路

を受けた光線は、巾 20 mm を厚さ 0.1 mm の黄銅板により20に仕切ったスリットを通過し、各スリットを通過した光ごとに、小形の反射鏡を通り方向を合せて配列された20個のフォトランジスタに導びかれる。測定は図2に示すように、プローブの下流 $x=45, 65, 85\text{ mm}$ の位置にスリットを置き行った。図3はフォトランジスタの回路を示す。図4, 5は気ほう数検出装置の外観を示す。図6は同装置を測定部に取付けた状況を示す。図7は気ほうの通過による信号をオシロスコープで見たところを示す。図中するどい立ち上りの波が気ほう1個の通過を示している。

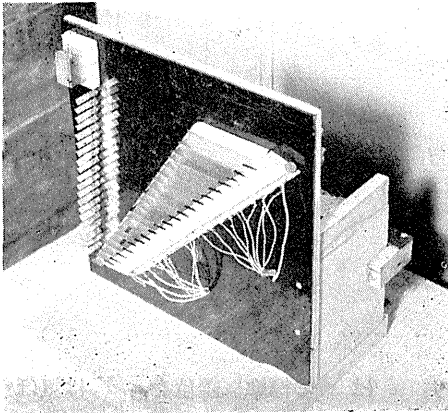


図 4 気ほう数検出装置外観

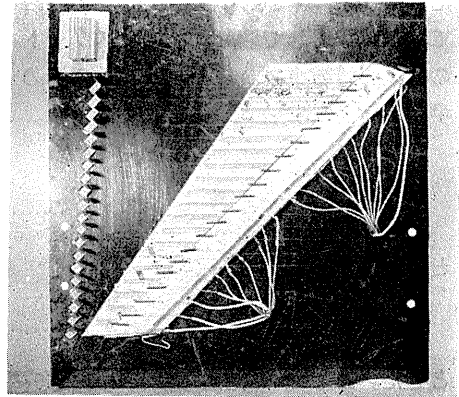


図 5 気ほう数検出装置 (スリットとフォトランジスタの関係)

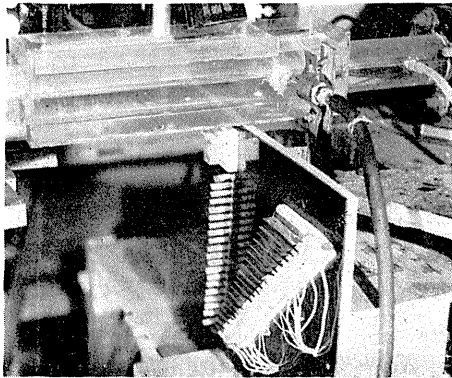


図 6 気ほう数検出装置の取付状況

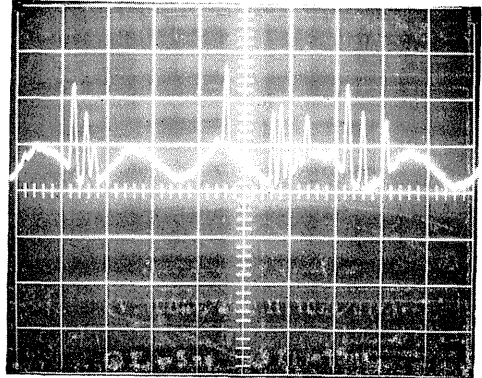


図 7 オシロスコープによる気ほう検出

気ほうは静水中を上昇する場合も横方向のふらつきを示す。よってこの影響を見るため、前報のガラス容器を用い、気ほうの横方向への広がり巾を測定した。広がり巾はプローブの位置より高さ 10 cm 上の位置において約 2 mm 、 20 cm のとき約 3 mm であった。プローブとスリット間の距離は現在の研究においては最小 45 mm であるのでこの影響は無視することとした。

拡散の研究に当ってはノズル1個のプロープを用い、ノズルを管路中心に置いた。流速は0.8~1.4m/sの範囲で変化させた。

2.2 測定値の整理

測定は14~19秒間程度の時間で行ない、この間で記録された気ほう総数は、8000~15000個程度であった。表1は記録例である。

表1. 気ほう数測定例

ノズルから測定断面までの距離 Xcm	平均流速 U ₀ m/s	測定時間 S	個数 N ₀
4.5	0.8	14	9629
	1.1	15	8517
	1.4	15	8768
6.5	0.8	19	11162
	1.1	19	9311
	1.4	19	14841
8.5	0.8	15	7707
	1.1	15	9511
	1.4	15	11501

測定結果は、縦軸にスリットを通過した気ほう数 N を気ほう総数 N₀ で割って、N/N₀として取り、横軸はスリットの位置を管の中心からの距離 Y を管の半径 R で割って、Y/Rとして取った。

つぎに気ほうの分布状況を見るため、正規分布曲線を、

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots(1)$$

とするとき、 $\sigma = \bar{Y}/R$, $y = N/N_0$, $x = Y$ とおき、

$$N = \frac{N_0 R}{\sqrt{2\pi} \bar{Y}} e^{-\frac{Y^2}{2\bar{Y}^2}} \dots\dots\dots(2)$$

とした。ここで y はある量 x の起る確率であり、σ は x の標準偏差値を、Y は気ほう数の測定位置を、 \bar{Y} は Y の標準偏差値を、N₀ は気ほうの総数を、N は Y を通過する気ほう数である。よって式(2)は、Y の標準偏差値が \bar{Y} であるとき、総数 N₀ の気ほうの内、Y を通過する気ほう数 N を与える。式(2)における \bar{Y} はスリットの位置を Y₁, Y₂, …, Y₂₀ とし、おのおの位置で記録した気ほう数を N₁, N₂, …, N₂₀ とするとき、

$$\bar{Y} = \sqrt{\frac{N_1 Y_1^2 + N_2 Y_2^2 + \dots + N_{20} Y_{20}^2}{N_0}} \dots\dots\dots(3)$$

である。

2.3 気ほうの分布曲線

図2に示す測定位置3種類についての実験結果と、式(2)、(3)による計算結果との対比を、流速0.8m/sの場合について図8、9、10により示している。また図11、12、13は流速1.4m/sの場合の結果である。流速の大きい方が、またプロープより下流への距離の大きいほど、拡散の進むことが明りように見られる。

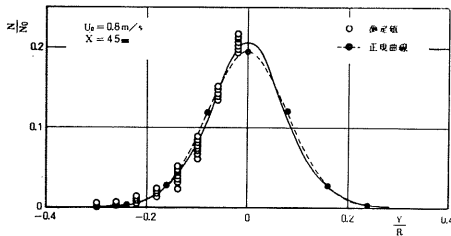


図8 管内流れの気ほう分布 (流速 0.8m/s, x=45mm)

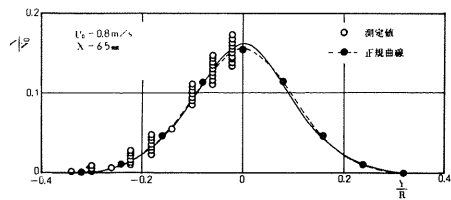


図9 管内流れの気ほう分布 (流速 0.8m/s, x=65mm)

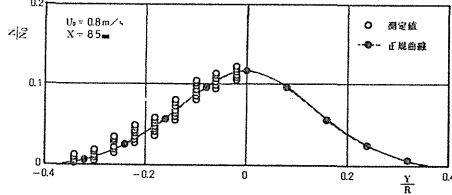


図10 管内流れの気ほう分布
(流速 0.8m/s, x=85mm)

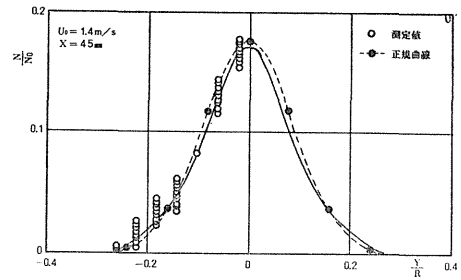


図11 管内流れの気ほう分布
(流速 1.4m/s, x=45mm)

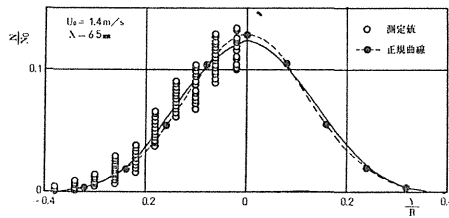


図12 管内流れの気ほう分布
(流速 1.4m/s, x=65mm)

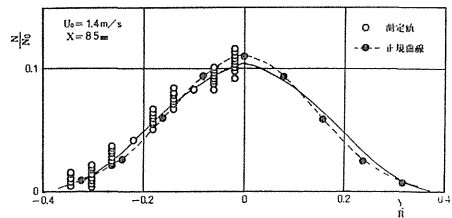


図13 管内流れの気ほう分布
(流速 1.4m/s, x=85mm)

一方水流中における熱拡散は、水流に直角におかれた熱線の x だけ下流における、 x と熱線に直角な Y 方向における温度 θ の分布として、

$$\theta = \frac{A}{\sqrt{x}} e^{-\frac{Y^2}{2x}} \dots\dots\dots(4)$$

で表わされる。ここで A は定数、 \bar{Y} は Y の 2 乗平均を表わす。式 (2) の $N_0/(\sqrt{2\pi} \bar{Y})$ はある条件においては定数であり、式 (4) の A/\sqrt{x} についても同様に考えられる。よって、式 (2) と式 (4) はいずれも定数だけを異にし同一形状の曲線を表わしている。このことから気ほうは有限の寸法をもっているが、流れの中における拡散の状況は、大きさを持たない熱の拡散と同じ傾向で起ることが見られる。よって水流中における拡散の研究は、困難な染料などを用いず、気ほうを使用することによりかなり簡単になるものと考えられる。

3 気ほうによる水流の乱れの測定

3.1 理 論

簡単のため一次元の乱流を考える。 x 軸方向に流速 u で流れるものとする、

$$\left. \begin{matrix} u = \bar{u} + u' \\ v = v' \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

ここで \bar{u} は x 方向の平均流速を、 u' 、 v' はそれぞれ x 、 y 方向の速度変動を表わす。

いま x 、 y 座標の原点を気ほう源と考え、1 個の気ほうが原点に表われ、流速 u で流れ x_1 の位置に到達したものと考える。そのとき y 方向の座標は y を通過したものと考える。図14に以上に説明した状況を示す。いま、

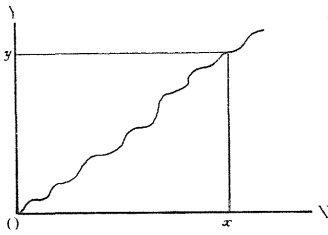


図14. 1個の気ほうの流れ方

$$\frac{x_1}{u} = T \dots \dots \dots (6)$$

とする。ここで T は x_1 を流速 \bar{u} で流れるに要する時間を表わす。1 個の気ほうが x_1 の位置に到達するに要した時間を t_1 とする。ただし t_1 は小さいものとする。

$$\int_0^{t_1} v' dt = VT = y \dots \dots \dots (7)$$

とおくことができる。ここで V は v' の T 秒間の平均速度である。

つぎに気ほう源からつぎつぎ多数の気ほうが流れ、 y_i の点を n_i 個の気ほうが通過したものと考える。これらの気ほうのおのおのについて式 (7) の関係があるが、その2乗平均をとると、

$$\bar{V}T = \bar{y} \dots \dots \dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} V &= \sqrt{\frac{\sum n_i V_i^2}{N_o}} \\ \bar{y} &= \sqrt{\frac{\sum n_i y_i^2}{N_o}} \\ N_o &= \sum n_i \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

ここで N_o は測定時間内に流出した気ほう総数である。

式(6)に式(8)の関係を代入すれば次式を得る。

$$\frac{\bar{V}}{u} = \frac{\bar{y}}{x_1} \dots \dots \dots (10)$$

上式の左辺は y 方向の乱れに相当し、右辺を測定して乱れを知り得ることを示している。上式では y 方向の速度変動 v' の2乗平均 $\sqrt{v'^2}$ の代りに速度変動の平均値 V の平均値 \bar{V} を使っているが、Taylor の拡散の一次元理論の乱れを与える式に近似的に一致する⁽⁴⁾。

なお気ほうはノズルから流出する際に運動量を持って出るのであるが、この影響は空気の質量が水の質量にくらべて 1/700 程度に小さいことから無視できるものと仮定した。

3.2 実験装置

以上の考えにより実験するために二次元回流水そうを使用した。図15に実験装置の概略を示す。測定部は 250mm×200mm の断面をもち、長さは 1500mm である。測定部のあい対する二面は厚さ 10mm の透明なアクリル板を使用し、測定部の上流には縮少管を設け、その上流の図示の位置に 4.5mm 目の整流網二枚を置いた。平均流速の測定は 6mm のピトー管によった。流速は変速電動機の回転数を変化することにより調節した。通過する気ほう数の検出には前報の装置を用い、光学系を図16のように配置した。図17は気ほう発生用プローブと測定位置 x_1 の間の関係を示す。

3.3 実験結果

図18, 19は測定部断面における流速分布を示す。図18は測定部中心におけるもの、図19は中心より 45mm はずれた位置におけるものである。これらによれば側壁より 4mm 以内は境界層を生じていることが見られ、この内側を使用すれば流速は一様である。使用流速

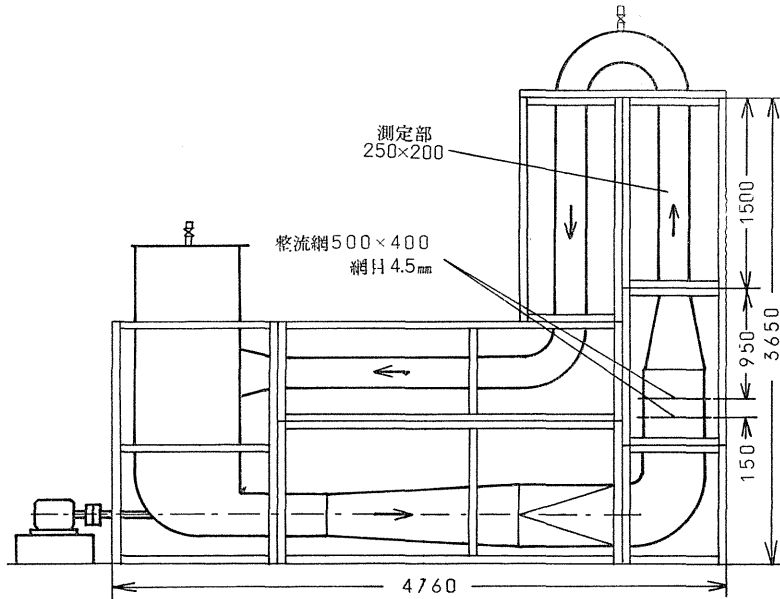


図15 二次元回流水そう

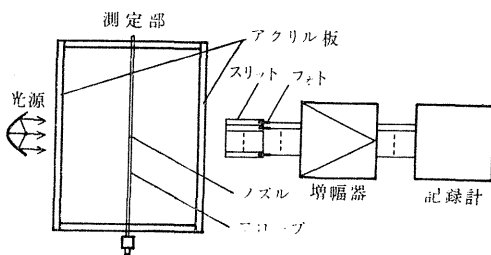


図16 気ほう数検出説明図

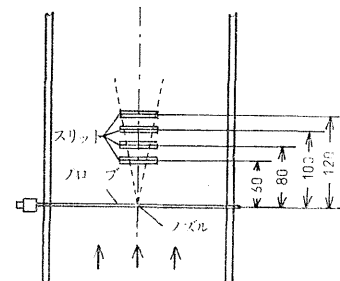


図17 プローブと測定位置の関係

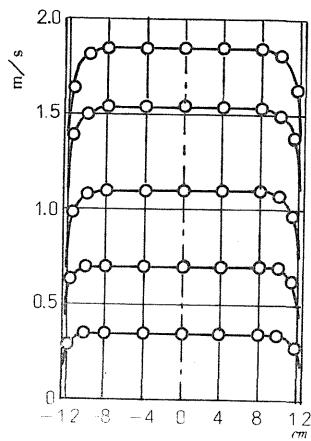


図18 測定部の流速分布(中心断面)

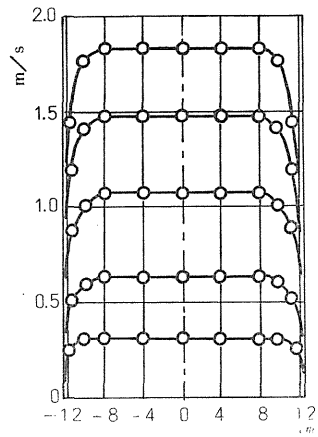


図19 測定部の流速分布(中心より45の位置の断面)

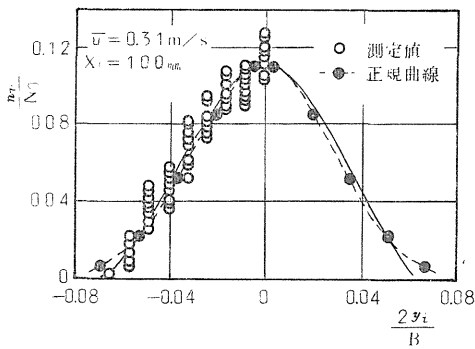


図20 気ほう分布(流速 0.31m/s, $x_1=100\text{mm}$)

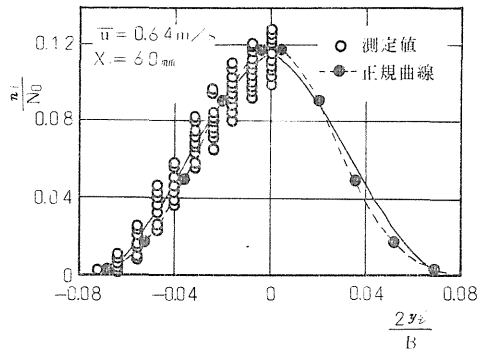


図21 気ほう分布(流速 0.64m/s, $x_1=60\text{mm}$)

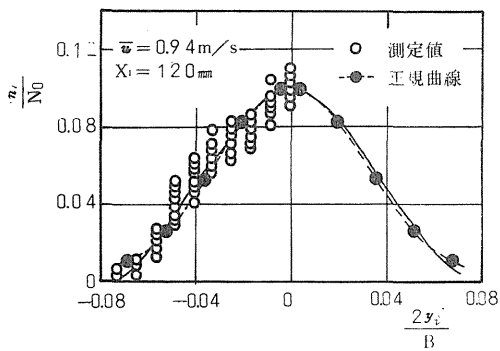


図22 気ほう分布(流速 0.94 m/s, $x_1=120\text{mm}$)

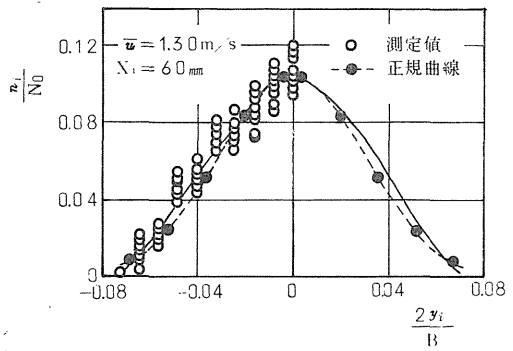


図23 気ほう分布(流速 1.30m/s, $x_1=60\text{mm}$)

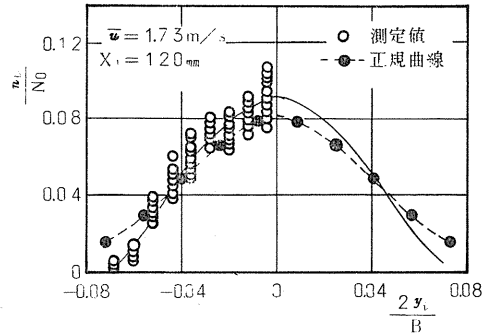
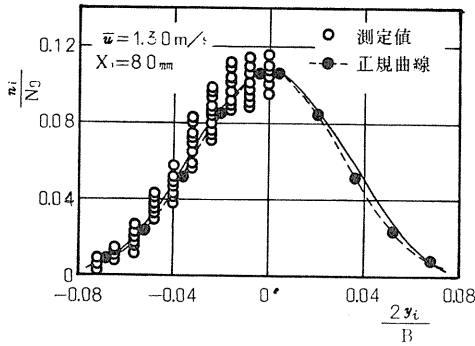


図24 気ほう分布 (流速 1.30m/s, $x_1=80\text{mm}$)

図25 気ほう分布 (流速 1.73m/s, $x_1=120\text{mm}$)

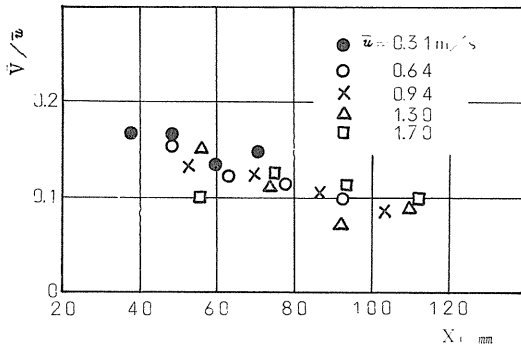


図26 \bar{V}/\bar{u} と x_1 の関係

の範囲は $0.3\sim 1.9\text{m/s}$ であった。測定に用いた気ほう径は $0.7\sim 1.0\text{mm}$ 程度であって、これらの浮力による影響は修正した⁽⁵⁾。図20～25は測定結果を円管内の拡散について述べたところと同じ方法で整理したものである。横軸は測定部の巾 $B=250\text{mm}$ の $\frac{1}{2}$ で割り、無次元化している。これらの図は二次元流れにおける気ほうの拡散を示すものであるが、円管におけるものと似た形状を示している。

図26は本法による乱れ \bar{V}/\bar{u} の測定結果を図示したものであって、横軸には x_1 をとっている。これによれば、実験の範囲では流速の影響は小さく、 x_1 が大きくなるに従い \bar{V}/\bar{u} は徐々に小さくなる。⁽⁶⁾

水流中での熱線による測定法も研究されているが、簡単に使用できるまでにはなっていないようであり、本法によれば近似値ではあるが簡単に測定が出来る。

4 結 論

以上述べたところを要約してあげると、

- (1) 本研究において考案した気ほう数検出装置を用いることにより、本法を水流中の拡散の研究に応用することができる。
- (2) 本法により乱れの近似値を求められることになる。

終りに臨み本研究を進めるに当って実験に当られた当時の卒業研究の学生、坂下明善、山越敏明、一條敏夫、高島俊之の諸君に厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) 吹田, 川又 : 茨城大学工学部研究集報, 20 (1972—12)
- (2) G. V. Evance : *Trans. ASME. Ser. D.* 89—3 (1967—9). 642
- (3) S. Goldstin : *Mod. Dev. in Fluid Dynamics. Vol. 1. Oxford (1952).* 215
- (4) 同上. 219
- (5) 宮城 : 機械学会誌. 32—147 (昭29—7). 305
- (6) 堀江, 山本 : 機械学会講演論文集. No. 153 (昭41—4). 93
- (7) 吹田, 川又 : 機械学会郡山地方講演会前刷 (昭44—5). 143
- (8) 吹田, 川又 : 機械学会諏訪地方講演論文集 (昭46—10). 125