

空気ほうによる流れの可視化に関する研究 (第1報：空気ほうの発生法)

吹 田 年*, 川 又 正 昭*

(1972年9月8日受理)

Visualization of Water Flow by Air Bubbles (1st report: On the Method of Generation of Air Bubbles)

Minoru SUITA and Masaaki KAWAMATA

Abstract: — Many studies on visualizations of water flow have been discussed in recent papers. The visualization of water flow by air bubbles has been well known, but there have been few reports about the methods of generation of air bubbles. By using the special probes developed in our study, to some extent, the question about the method of generation of air bubbles was answered. We used the method to the flow past a circular cylinder and the flow in a bend pipe, and obtained the results in some degree.

1. ま え が き

流れを可視化して観察することは、流体の運動が複雑であって、理論的研究に困難をと
もなうだけに、有力な研究手段となる。このため従来からも種々の方法が知られていた。⁽¹⁾
最近水素気ほうによる水流の可視化の方法が発表され、国内でもこれに関して多くの研究
がなされ、^{(2),(3),(4)} また可視化についての解説も行なわれた。^{(5),(6)}

空気ほうによる水流の可視化は、従来から知られていたところであり、例えば文献⁽⁵⁾
の中でも述べられている。他にこの方法を用いた報告としては、主として平均流速を求め
るという立場からの研究、^{(7),(8)} 水中での投射体の運動を解析する手段として使用された例、⁽⁹⁾
また後退翼のはく離、⁽¹⁰⁾ 軸流圧縮機における旋回失速の発生、⁽¹¹⁾ Vortex Flow などの研究、⁽¹²⁾
物体後方のはく離流れの研究に使用された例などが見られる。⁽¹³⁾

しかしながら空気ほうによる流れの可視化には、欠点もあげられており、^{(3),(6)} 応用範囲には
制限があるとされている。また前記の適用例から見ると、気ほうの発生法には困難があっ
たらしく、その発生法について明りように記述されているものは少ない。本研究において

* 茨城大学工学部機械工学科

は気ほう発生用プローブとして、注射針に電子ビームによる細孔加工をほどこしたものを用いることにより、気ほう寸法の斉一性と、再現性が得られ、可視化用の気ほうとしてある程度のものが得られた。実用性もあるものとする。発生法が簡単であるのは本法の特徴である。

2. 空気ほうの発生法

2.1 供試プローブ

供試プローブには市販の注射針に電子ビームによる細孔加工をほどこしたものを用いた。図1に内径50mmの管に使用する場合のもの構造および主要部の寸法を示す。同図

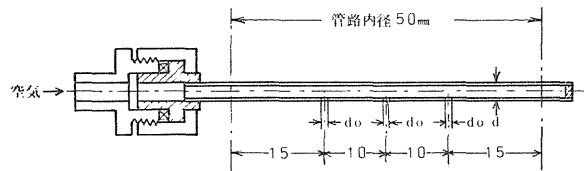


図1 プローブの構造

のものはノズルを3個あけた場合のものであって、図中の d は注射針の外径を、 d_0 はノズルの直径を表わしている。表1に、製作した10本のプローブの d 、 d_0 を示している。表2はプローブの寸法の測定例である。ノズル径の測定は工具顕微鏡によった。図2は $d=0.4\text{ mm}$ のノズルの顕微鏡写真である。

表1 プローブの寸法(呼び寸法)

プローブ番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
プローブ外径 dmm	0.35	0.35	0.35	0.40	0.40	0.40	0.50	1.10	1.10	1.10
ノズル径 $d_0\mu$	50	70	100	50	70	100	100	50	70	100

表2 プローブの寸法測定値

プローブ番号	呼び寸法	ノズル	ノズル径 ヨコ mm	ノズル径 タテ mm	平均 ノズル径 mm	プローブ 平均外径	プローブ 平均内径
No 1	0.35 mm 50 μ	1	0.052	0.049	0.051	0.382	
		2	0.055	0.051	0.053		
		3	0.050	0.042	0.046		
No 2	0.35 mm 100 μ	1	0.109	0.110	0.110	0.367	0.183
		2	0.140	0.112	0.126		
		3	0.110	0.100	0.105		
No 5	0.40 mm 70 μ	1	0.088	0.088	0.088	0.512	
		2	0.085	0.080	0.083		
		3	0.075	0.074	0.075		

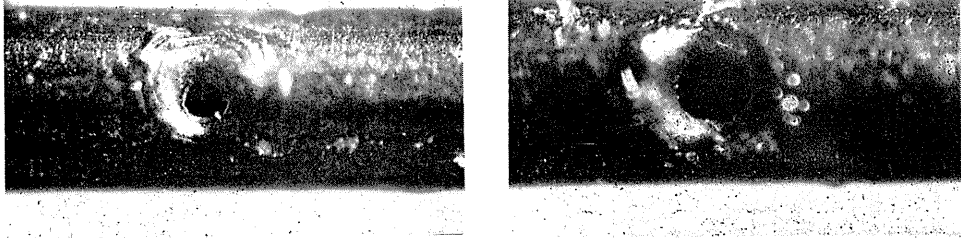


図 2 ノズルの顕微鏡写真 (a) $d_0=67.5\mu$ (b) $d_0=126\mu$

2.2 実験装置

図 3 に実験装置全体の概略を示す。ポンプで揚水された水は、管路中心より水面までの高さが 7.05m であるオーバーフロータンクに導びかれ、同タンクより 2" の水平管路に導

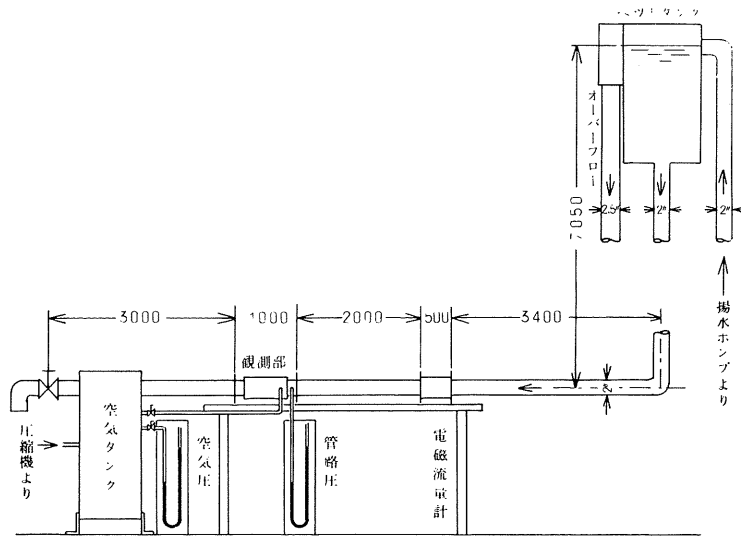


図 3 実験装置概略図

びかれる。曲りより測定部までの長さは曲りの影響を少なくするため管の内径の 110 倍とした。この途中に電磁流量計を置きこれにより流量を測定した。

観測部は内径 50mm, 長さ 1m の透明アクリル管を使用し, 観測に当って管の凸面による歪みをなくするため管の周囲を

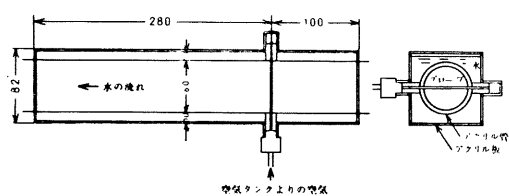


図 4 観測部

透明アクリル板で囲み水を満たした。観測部の静圧の測定は水銀液柱計によった。図4に観測部の詳細を示す。プローブは管路に直角に管の中心に取付け、水漏れを防ぐため管との間にパッキンを用いた。

図5は気ほう発生のための空気系統図である。図中の4で示す空気圧縮機よりの空気を、微調整のきく減圧弁5を経て空気タンク6に導びき圧力変動を小さくし、これよりの空気をプローブのノズルより水流中に噴出させた。

つぎに写真撮影のための光とカメラの方向の関係を図6に示す、光源には100W 500Wのよう素ランプ、またはストロボスコープを使用し、管路への光は巾5mmのスリットにより絞り、光の方向とカメラの軸方向との間の角度は 100° になるよう配置した。これによりほぼ管路の中心断面内の現象の撮影が可能となる。管を取り囲むアクリル板は光の反射を防ぐため、黒い布で覆った。カメラはシャッター速度を検定して使用した。別法による気ほうの流跡撮影を行なうため、ストロボスコープにはプリセットカウンターを併用した。これによればあらかじめ調節した数だけの発光を行なわせることが出来る。使用可能なプリセット数は1, 2, 4, 8, 16, 32であった。

2.3 気ほうの発生に適した空気圧

気ほうの発生状況は、プローブのノズルの向きをいかなる方向に取付けるかにより大きく影響を受ける。取付け方向を大きく分けると、ノズルを(1)上流に向ける、(2)流れの方向に直角に向ける、(3)流れの下流方向に向ける、(4)これらの中間の角度とする、の4方向が考えられるが、実験の結果(3)の方法は図7に示すように、発生した気ほうがプローブの下流側に集まり付着して可視化に適さない。(2)または(4)の方法は(3)に似た気ほう発生傾向を示す。最適の取付け方向は(1)の方向であった。よって本研究においてはノズルの方向は上流向きに取付け観察を行なった。

気ほう発生の際空気圧を低い方から徐々に上げて行くとき、管路の(静圧+動圧)に等しくなるころからわずかな気ほう発生が見られるようになる。このときの空気圧を気ほう発生圧力の下限とした。

さらに徐々に空気圧を上げて行くとき、これにつれて気ほう数が増加して行くのが見ら

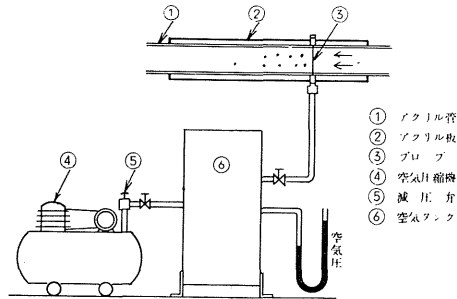


図5 気ほう発生用空気系統図

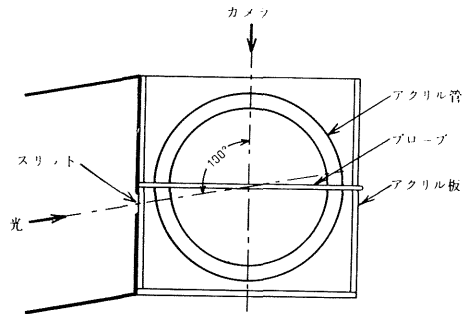


図6 撮影光線とカメラの関係

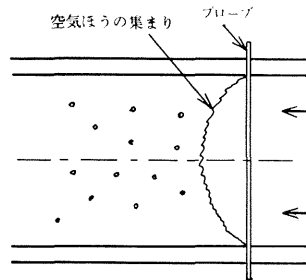


図7 プローブ後部の気ほうの集まり

れ, さらに空気圧を上げて行くときは, さきの図7に示すように気ほうが集ってプローブ直後に付着するようになる。この直前の空気圧を気ほう発生圧力の上限とした。

各プローブについて流速を変化させ, 空気圧の上限と下限を求めた。いま ζ で無次元空気圧力とすると, ζ は次式で示される。

$$\zeta = \frac{P_a}{P_s + \gamma \frac{v^2}{2g}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで P_a は供給空気圧力, P_s は管路の静圧, v は管内の平均流速, γ は水の単位体積重量, g は重力の加速度をそれぞれ表わす。

空気圧を ζ で表わし, 流速との関係を整理した結果が図8~12である。これらの図によ

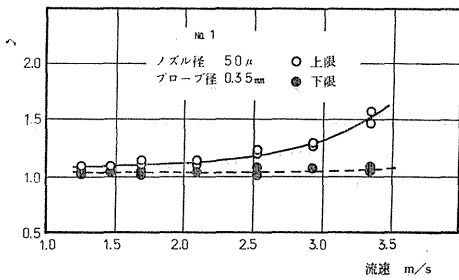


図8 ζ と流速の関係 (プローブ No. 1)

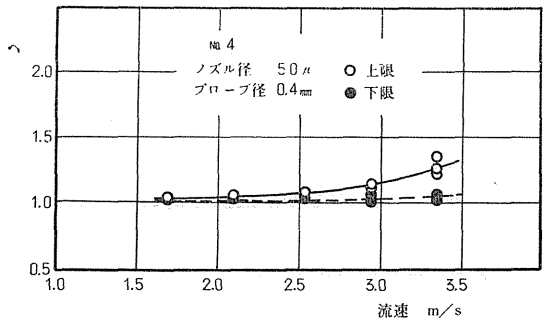


図9 ζ と流速の関係 (プローブ No. 4)

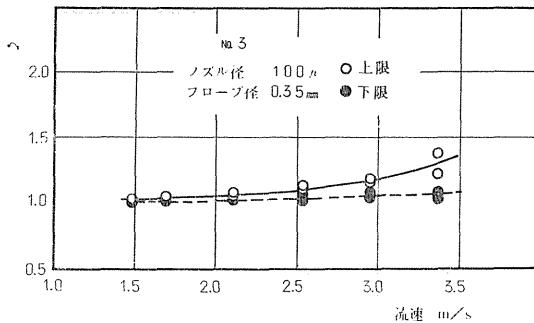


図10 ζ と流速の関係 (プローブ No. 3)

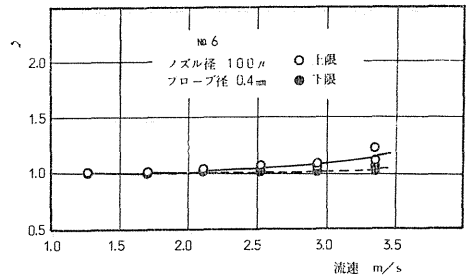


図11 ζ と流速の関係 (プローブ No. 6)

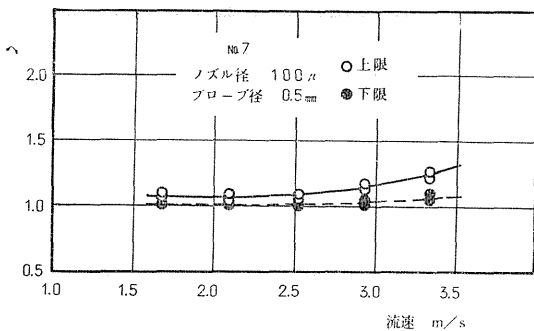


図12 ζ と流速の関係 (プローブ No. 7)

れば, 流速の速い方が可視化に適する空気圧の範囲が大となっていることが見られ, 可視化は空気圧から見て流速の大きい方が容易であることを示している。またノズル径を一定とし, プローブ外径の影響を比較したものを図13に示す。これによれば, ノズル径が同一ならば, プローブ外径の小さいものが好適である。図14はプローブ径を一定とし, ノズル径の

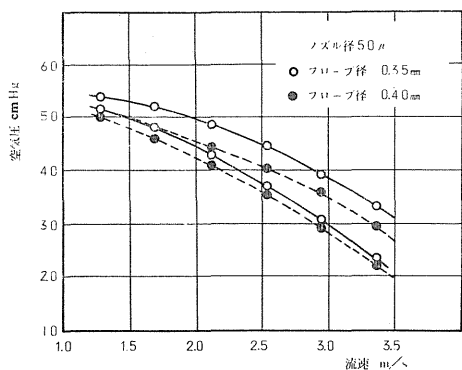


図13 空気圧に対するプローブ外径の影響

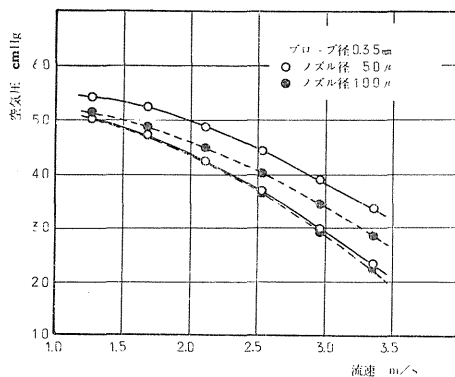


図14 空気圧に対するノズル径の影響

影響を示したものであるが、これによりノズル径の小さいものの方が好適であることが見られる。本研究で準備したプローブについては No. 1 のプローブすなわち外径 0.35mm, ノズル径 50 μ のものが最適であった。よってあとの研究に対しては No. 1 のプローブを使用した。

2.4 空気ほうの寸法

空気ほうの寸法の測定は写真撮影によった、ストロボスコープの周波数を 250Hz とし、プリセットカウンターを1とし撮影した。写真中の任意にえらび出した10個の気ほうの直径をプリネル顕微鏡で読み、その平均を気ほう径とした。測定は上限および下限の空気圧について、流速を変化させて行った。図15~18は測定結果を縦軸に気ほう径、横軸に流速を

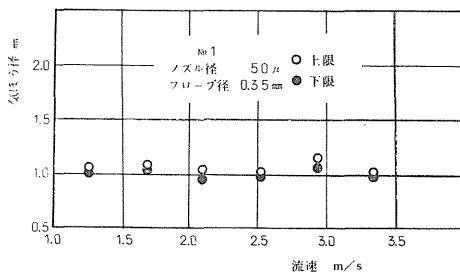


図15 気ほう径と流速の関係(プローブ No. 1)

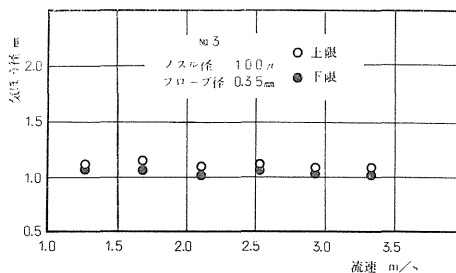


図16 気ほう径と流速の関係(プローブ No. 3)

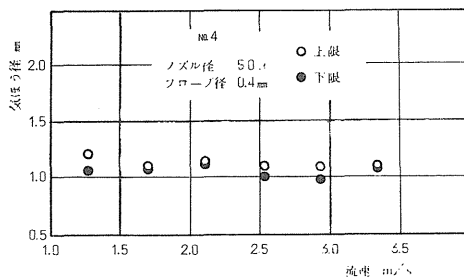


図17 気ほう径と流速の関係(プローブ No. 4)

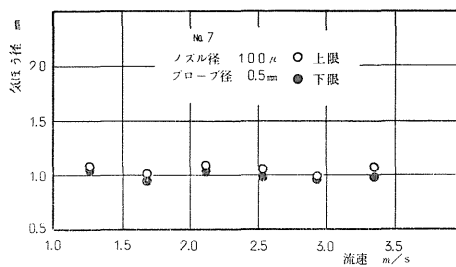


図18 気ほう径と流速の関係(プローブ No. 7)

とり図示したものである。これらの結果によれば、流速の影響は少なく、ほぼ一定の直径の気ほうが得られ、プローブ径、ノズル径の気ほう径に対する影響も、また空気圧の影響も少ない。気ほう径はほぼ 1mm 程度である。しかし細かい点では、ノズル径の小さいとき、空気圧の小さいとき気ほう径はいくぶん小さくなることが見られる。

なお気ほうの追従性の点からは、水素気ほうについて、 200μ 以下が適当であるとの報告があり、この点本法の気ほう径は大きいのであるが、流れの代表寸法が気ほう径にくらべて大きい場合には本法が使用できるものとする。

2.5 空気ほうの静水中における上昇

浮力の影響を調べるため、静水中における気ほうの上昇速度と、気ほう直径との関係を求めた。このため用いた装置は $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times$ 深さ 50cm のガラス製の水そうであって、その底にプローブまたはこれに代るものを取付け、発生した気ほうをストロボスコープの周波数を 20Hz とし、プリセットカウンターを2として撮影した。図19は気ほうの上昇速度と気ほう径の関係を示す。上昇速度はほぼ気ほう径に比例する。本研究で用いた直径 1mm の気ほうの場合、その上昇速度は 14cm/s 程度である。この数字により、可視化への応用に当って、必要に応じて浮力の補正を行なうことが出来る。なお図19に表われている寸法の小さい気ほうの発生に対しては前述のプローブとは別に特殊なプローブを使用した。

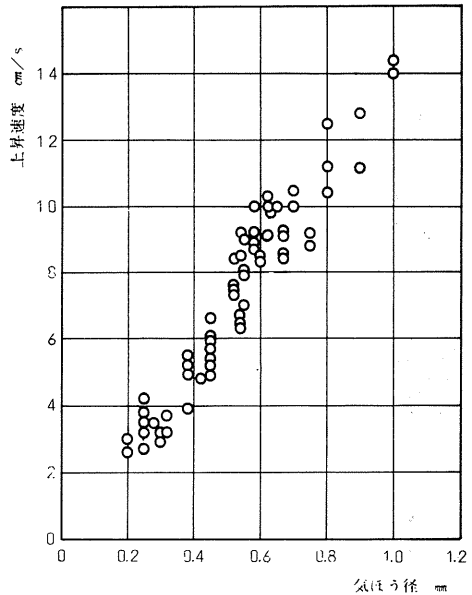


図19 気ほうの上昇速度と気ほう径の関係

図19 気ほうの上昇速度と気ほう径の関係

3. 応用例

3.1 直管内の流れ

前述した装置と方法により管路内に気ほうを流し、流跡 (*pathline*) の撮影を行なった。図20, 21, 22は流速 0.85m/s の場合、シャッター速度に $1/60$, $1/125$, $1/250\text{s}$ を使用し

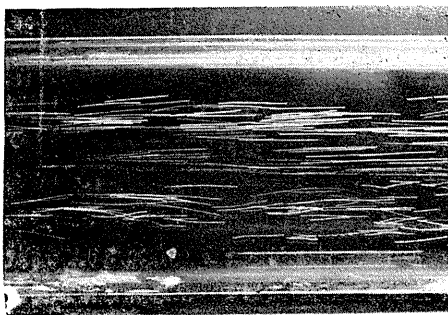


図20 管内流れの流跡撮影例
(流速 0.85m/s , $1/60\text{s}$)

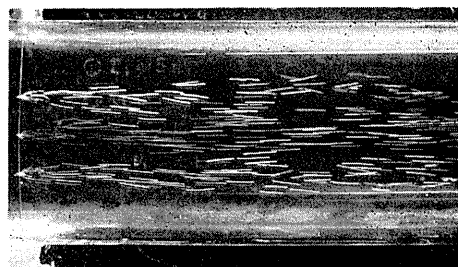


図21 管内流れの流跡撮影例
(流速 0.85m/s , $1/125\text{s}$)

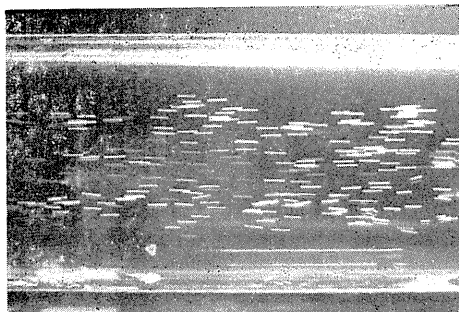


図22 管内流れの流跡撮影例
(流速 0.85m/s, 1/250s)

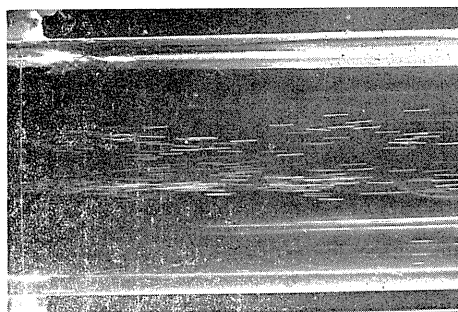


図23 管内流れの流跡撮影例
(流速 1.28m/s)



図24 管内流れの流跡撮影例
(流速 1.69m/s)



図25 管内流れの流跡撮影例
(流速2.12m/s)

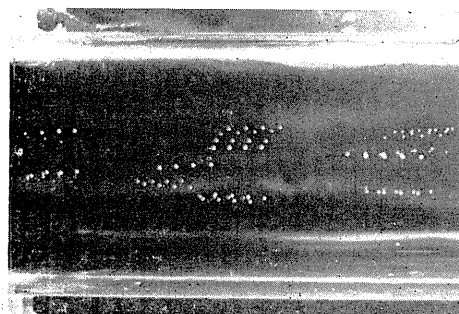


図26 管内流れのストロボによる撮影例

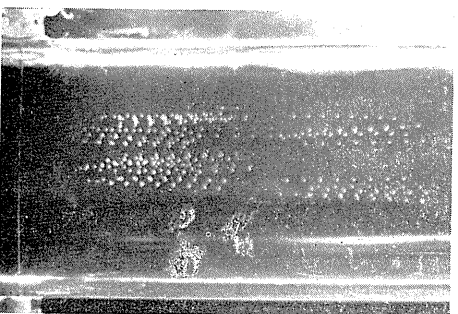


図27 管内流れのストロボによる撮影例

た場合の撮影例である。図23, 24, 25は流速をかえそれぞれ 1.28, 1.69, 2.12 m/s とした
場合の撮影例である。図26, 27は流速 0.85m/s の場合について、ストロボスコープとプリ
セットカウンターを用いての流跡撮影の例である。

これらの流跡写真を同一の流速条件に
おいて、ノズルの位置を管軸に直角方向
に移動して多数撮影し、写真上の流跡寸
法を測定して速度分布曲線を描くことが
出来る。図28は直管における流速分布の
測定例である。ただしこの例ではノズル
の管軸に直角方向の移動は行っていない。
図中実線は1/4乗則による計算結果を
示し、両者はかなりよく一致する、1/4乗
則の指数は Re により、知られている数
字より計算して用いた。

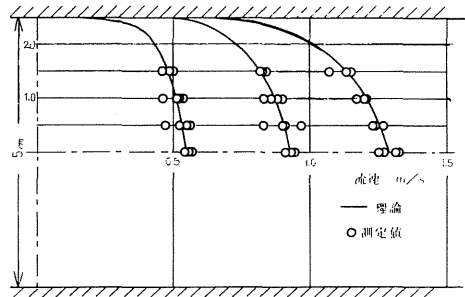


図28 流速分布の測定例

3.2 円柱まわりの流れ

前述した装置の透明アクリル管内の、プローブ取付位置の下流 100mm の位置に、直径
14mm のアクリル樹脂製の円柱を流れに直角に管路中心にねじ止めとした。この円柱のま
わりの流れの流跡撮影を行なった。この結果の例を図29~32に示す。これらは管内流れの

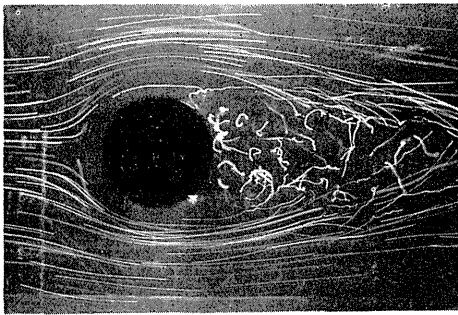


図29 円柱まわりの流れ撮影例
($Re=1.2 \times 10^4$)

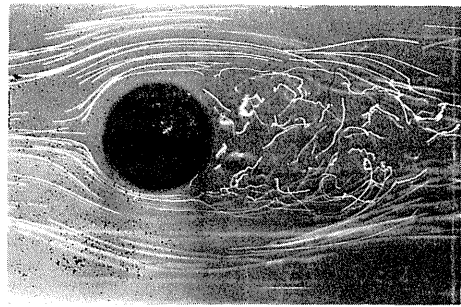


図30 円柱まわりの流れ撮影例
($Re=2.4 \times 10^4$)

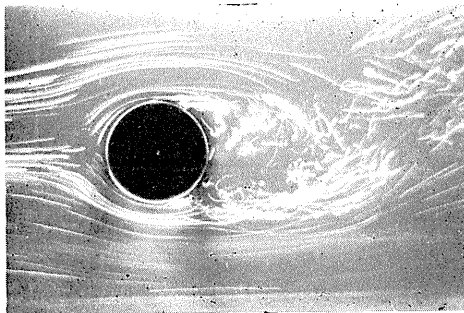


図31 円柱まわりの流れ撮影例
($Re=3.6 \times 10^4$)

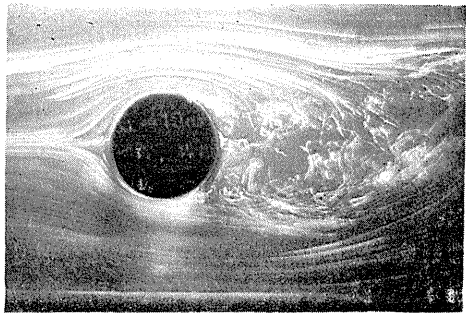


図32 円柱まわりの流れ撮影例
($Re=4.6 \times 10^4$)

管軸を含む水平面内におけるものであって、流速はそれぞれ 0.87, 1.68, 2.55, 3.32m/s におけるものである。これらによれば円柱まわりの流線の他後流の状況がかなり明瞭に見おられ、図31, 32においてははく離点も見られる。なお円柱に対するレイノズル数は上記流速の範囲で $1.2 \times 10^4 \sim 4.6 \times 10^4$ である。

3.3 曲管内の流れ

図3の観測部のすぐ下流の曲りの位置に、内径 50mm、外径 60mm の曲り透明アクリル管を置いた。図33, 34にその寸法を示す。図中にプローブの取付け位置を①のように示し

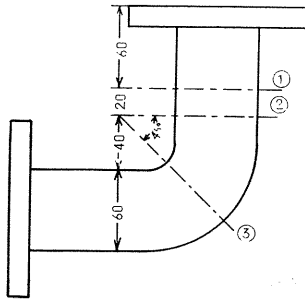


図 33 曲管 A

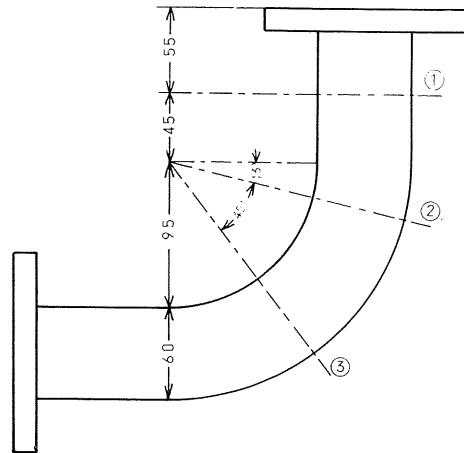


図 34 曲管 B

ている。図35は曲管 B を管路に取付けた状況を示し、プローブが①の位置に取付けられている状況が見られる。図36, 37は曲管 A について、プローブを②の位置に取付け、曲管内の流れの流跡撮影を行った例である。図38は同じく曲管 A についてプローブ位置を③とした例である。これらにより主流は曲りの外側によること、内側にはうずを生ずること、また二次流れ⁽¹⁵⁾などが見られる。

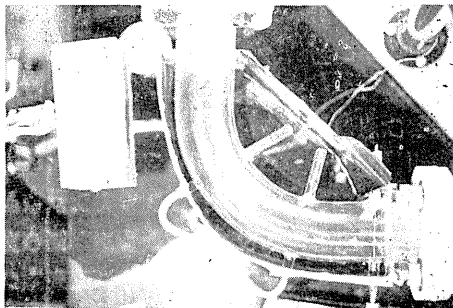


図35 曲管の取付状況

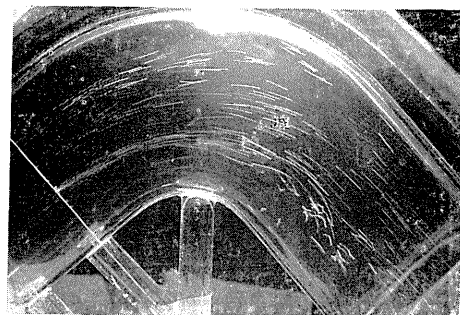


図36 曲管内の流れ撮影例
(曲管A, プローブ位置②)

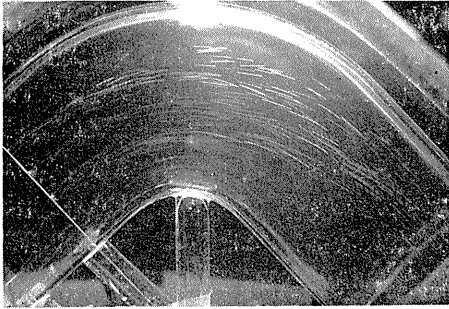


図37 曲管内の流れ撮影例
(曲管A，プローブ位置②)

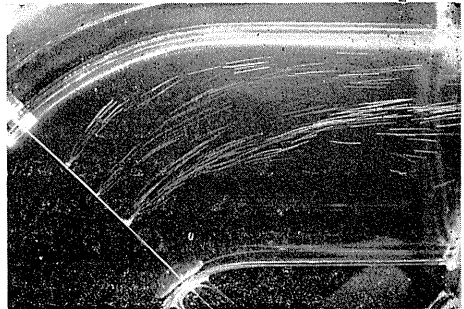


図38 曲管内の流れ撮影例
(曲管A，プローブ位置③)

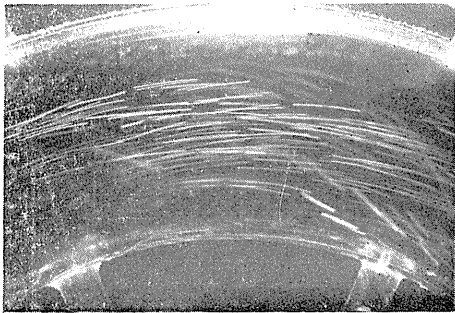


図39 曲管内の流れ撮影例
(曲管B，プローブ位置①)

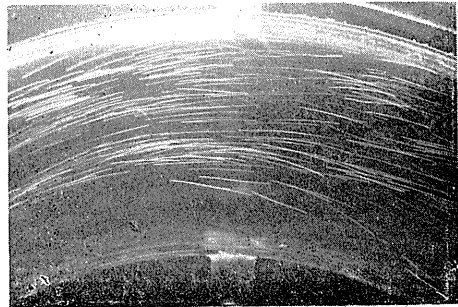


図40 曲管内の流れ撮影例
(曲管B，プローブ位置②)



図41 曲管内の流れ撮影例
(曲管B，プローブ位置③)

図39, 40, 41は曲管 **B** ⁽³⁾ についての流跡撮影の例である。この程度の流速, 曲りにおいては気ほうの内側に集中するような傾向はほとんど見られない。以上はいずれも管軸を含む断面内における流跡を撮影したものである。

4 結 論

以上述べたところを要約してあげると,

- (1) 従来明確に説明されていなかった水流の可視化のための空気ほうの発生法を, 特殊プローブを用い, プローブ径, ノズル径, 使用空気圧力, 気ほう径などの関係として明りように示した。
- (2) 供試プローブを用いて空気ほうによる水流の可視化は容易である。
- (3) 気ほう径は 1mm 程度であってやや大きい, 流れの代表寸法が気ほう径にくらべて大きい場合は, 本法が適用できる。

終りに臨み本研究を進めるに当ってプローブの特殊加工に便宜を与えられた日本電気株式会社電子ビーム機器部技術課長, 根岸保夫氏, また熱心の実験に当たられた当時の卒業研究の学生, 加藤忠夫, 中山武, 八本寿悦の諸君に厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) S. Goldstein: *Mod. Dev. in Fluid Dynamics*. Vol. 1. Oxford (1952). 280
- (2) 浅沼, 武田: 機械学会論文集, 31—222 (昭40—2). 223
- (3) 花輪, 岡本: 機械学会誌, 70—587 (昭42—12). 1793
- (4) 熊谷: 機械学会講演論文集, No. 216 (昭44—10). 45
- (5) B. R. Clayton & B. S. Massey: *J. Sci. Instr.*, 44—1 (1967). 2
- (6) 浅沼: 機械学会誌, 72—609 (昭44—10). 1370
- (7) O. Miyagi: *Tech. Reports*, 5—3 (大13—8). 135
- (8) O. Miyagi: 機械学会誌, 32—147 (昭4—7). 305
- (9) G. Birkhoff & T. E. Caywood. *J. Applied Physics*, 20-July (1949). 646
- (10) N. C. Lambourne & P. S. Pusey. *R & M*, 3106 (1959). 1
- (11) 浅沼ほか2名: 東大宇航研報告, 1—3 (B) (昭40). 240
- (12) P. Poisson-Quinton & H. Werle: *Astro & Aero.*, 5—6 (1967). 64
- (13) A. Acrivos ほか2名: *J. Fluid Mech.*, 34—1 (1968). 25
- (14) 文献(4)に同じ
- (15) 伊藤: 機械学会誌, 66—537 (昭38—10). 1368
- (16) 吹田, 川又: 機械学会 290 回流体工学, 流体機械講演会前刷 (昭43—8). 127