

小孔を通過する流れに関する研究*

(第2報, 速度場に関する実験)

福 富 清*¹, 長谷川 富市*²
中 野 裕 二*³, 鳴 海 敬 倫*²

A Study of A Flow through Small Apertures (2nd Report, Experiments on The Velocity Field)

Kiyoshi FUKUTOMI, Tomiichi HASEGAWA,
Yuji NAKANO, and Takatsune NARUMI

The velocity field of an inlet and outlet flow through small orifices was experimentally examined. The velocity along the center line near the orifices was measured with a laser doppler anemometer, stream lines in the whole flow region were photographed, and the following points were clarified : (1) The center line velocities of liquid paraffin agree with the theoretical value of Stokes flow in the region of Reynolds numbers below 10. (2) With distilled water, a diverging angle of the issuing flow from a larger orifice is smaller than that of the issuing flow from a smaller orifice. Furthermore, a characteristic isolated vortex is generated on the downstream side of the orifice at the Reynolds number of from 10 to 30. (3) With ethanol used as a test liquid, the diverging angle of the issuing flow is small even for the Reynolds number of less than 10, and the flow resembles a jet. (4) The magnitude of the diverging angle of the issuing flow have a decisive effect on the value of the excess pressure drop at the same Reynolds number ; the larger the diverging angle is, the smaller the excess pressure drop is. (5) The dimension of the isolated vortex generated with the outlet flow of water is, when non-dimensionalized with the orifice diameter, correlated with a dimensionless number $V(\lambda/\nu)^{1/2}$, where V is the mean orifice velocity, λ is a time proper to water and ν is the kinematic viscosity.

Key Words: Flow through Small Orifices, Low Reynolds Number, Velocity Field, Extensional Flow, Viscoelastic Fluid, Relaxation Time

1. 緒 論

小孔を通過する流れの速度場に関する研究は, 余剰圧力損失の研究に比べて数が少なく, それも実験的には流入側流れについてのものがほとんどである⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾.

本報では, 種々の液体について, 小孔として小オリフィスを用いて, 流入側流出側流れをレーザ流速計と流線写真観察により調べ, 小孔近傍と小孔から離れた領域までの全体像を明らかにしようとするものである.

2. 実験装置と使用液体

2.1 中心速度の測定 小孔中心軸上の流入流出側速度(以後これを中心速度と呼ぶ)はレーザ流速計により測定した. 図1に実験装置の概略図を示す. 流路はアクリル樹脂製で40mm×40mmの正方形断面をしたく形流路で, 長さはオリフィスから流入流出側と

も400mmである. レーザ流速計の測定モードは通常の前散乱形フリンジモードで, オリフィス近傍まで測定を可能にするため分割ビームの1本をオリフィス面と平行にセットした(図1). このとき測定流速 U は次式で与えられる.

$$U = \frac{\Lambda}{\sin \theta} f_d \dots \dots \dots (1)$$

ここで, θ および Λ は装置定数 ($\theta=19.82^\circ$, $\Lambda=0.6328 \mu\text{m}$) であり, 散乱粒子によるドップラー周波数 f_d を求めることにより速度 U を得る. f_d は散乱粒子で発生させた散乱光を光電変換素子により電気信号に

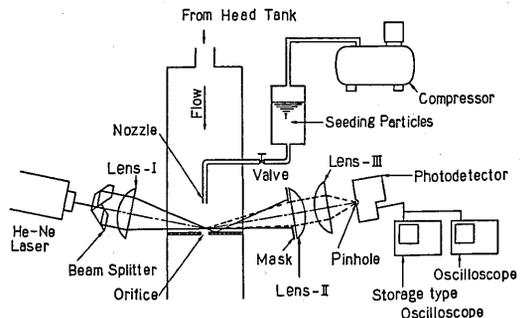


図1 中心速度測定装置概略図

* 昭和62年10月2日 北陸信越支部信越地方新潟講演会において講演, 原稿受付 昭和61年12月23日.
*¹ 准員, 新潟大学大学院 (☎950-21 新潟市五十嵐2の町8050).
*² 正員, 新潟大学工学部.
*³ 正員, 石川島播磨重工業(株) (☎737 呉市昭和町2-1).

換えてストレージオシロスコープで読取った。供試液体は蒸留水と流動パラフィン(粘度は水のほぼ30倍, 比重は80%程度)の2種類を用いた。また, 散乱粒子として, 液体が水の場合はクリームパウダを, 流動パラフィンではアルミナ研磨材(0.3 μm)を用いた。その場合, 水ではクリームパウダを同液に混合しエタノールにより比重調整後図1中に示されたノルズより流出させた。しかし, 同一レイノルズ数, 同一孔径における流動パラフィンの平均流速は水のその30倍程度になるので流動パラフィンでは比重調整は行っていない。

2.2 流線撮影 流線の撮影はアルミニウム粉トレーサ法によった⁽⁶⁾。供試液体にアルミニウム粉を少量混入し十分かくはん後, ヘッドタンクに移してから1日以上, 流路に封入した後1日以上合計2日間以上放置し実験を開始した。使用流路は2.1節で述べたものと同じであり, オリフィスについても2.1節のものと径の若干の違いはあるがほぼ同じである。つまり,

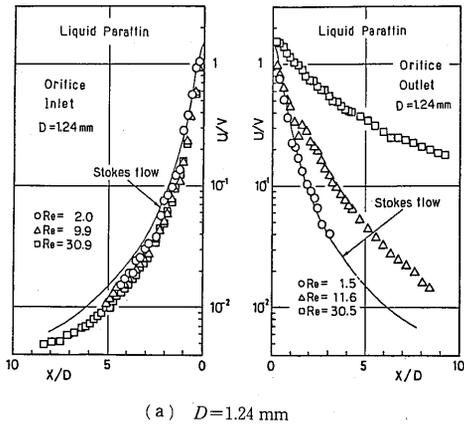
速度測定用オリフィスは $D=0.296, 1.24$ mm, 流線撮影用オリフィスは $D=0.307, 1.097$ mm である。写真撮影は, 後面に黒いゴムパッキンをはり付け, 側面から低温源ストロボ(Xeフラッシュ光源)のスリット光を連続照射しながら一定時間露出し行った。

3. 実験結果

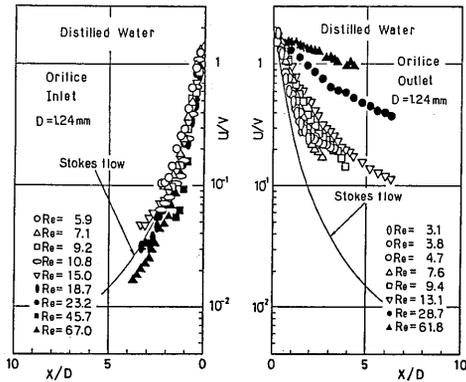
3.1 中心速度 図2(a), (b)に流動パラフィンの流入側流出側中心速度の測定結果を示す。縦軸は測定速度 U のオリフィス平均流速 V による無次元速度, 横軸はオリフィスからの距離 X のオリフィス径 D による無次元距離であり, レイノルズ数をパラメータとしている。また, レーザビームは有限の太さを持つため $X/D=0$ の位置までの測定は困難であるため行っていない。また, 図2中実線はストークス流の理論解⁽⁶⁾

$$\frac{U}{V} = \frac{3}{2} \frac{1}{(1+4(X/D)^2)} \dots\dots\dots (2)$$

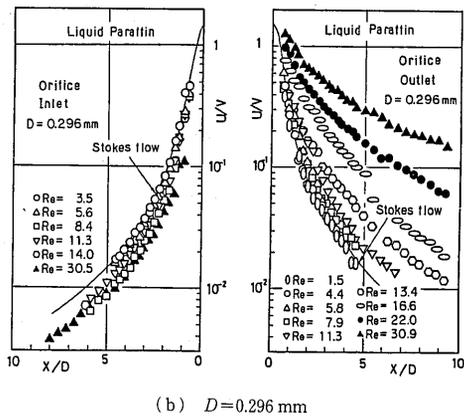
を表す。両オリフィス径とも $Re < 10$ では流入側流出



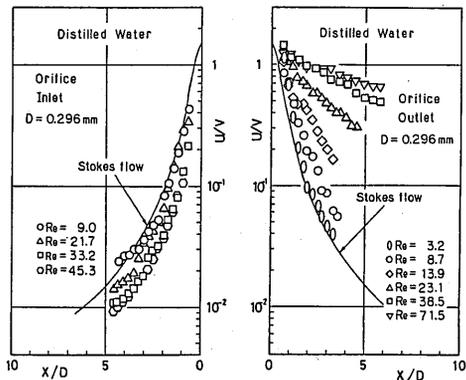
(a) $D=1.24$ mm



(a) $D=1.24$ mm



(b) $D=0.296$ mm



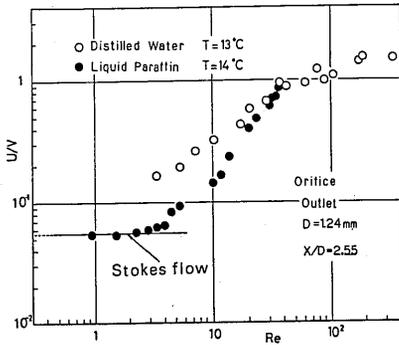
(b) $D=0.296$ mm

図2 流動パラフィンの無次元中心速度 (U/V) 対無次元距離 (X/D)

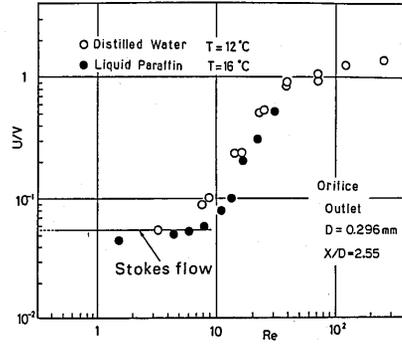
図3 蒸留水の中心速度

側の中心速度のオリフィス面に関する対称性は良く、ストークス流の理論解ともほぼ一致している。また、流入側では、レイノルズ数が高くなるにつれて無次元速度は小さく、流出側では大きくなる傾向を示す。これは、レイノルズ数が高くなるにつれて流入角は広がり、流出側での速度の減衰は小さくなるためと考えら

れる。図3(a),(b)に蒸留水の中心速度を示す。両図とも流入側では、前述の流動パラフィンの結果と同様に、 $Re < 10$ においてストークス流の理論解とほぼ一致し、レイノルズ数が高くなるにつれて無次元速度は小さくなる。しかしながら、流出側ではレイノルズ数が低い場合($Re < 10$)でも、 $D=0.296\text{ mm}$, $Re=3.2$

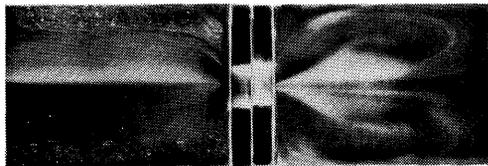


(a) $D=1.24\text{ mm}$

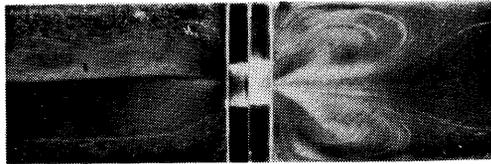


(b) $D=0.296\text{ mm}$

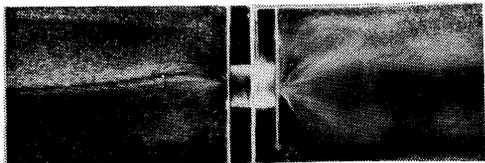
図4 中心速度減衰の割合
無次元中心速度 (U/V) 対レイノルズ数 (Re)



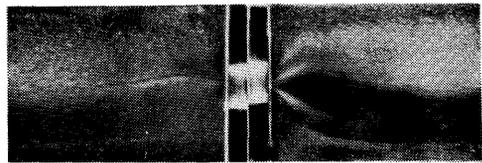
$V=96.8\text{ (cm/s)}$ $Re=35.2$, $V=84.9\text{ (cm/s)}$ $Re=32.0$



$V=47.8\text{ (cm/s)}$ $Re=17.3$, $V=66.9\text{ (cm/s)}$ $Re=24.3$

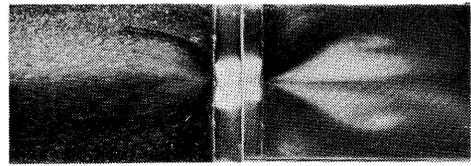


$V=26.1\text{ (cm/s)}$ $Re=9.49$, $V=35.1\text{ (cm/s)}$ $Re=12.5$

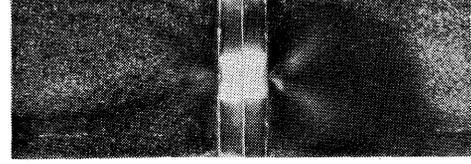


$V=19.4\text{ (cm/s)}$ $Re=7.06$, $V=18.5\text{ (cm/s)}$ $Re=6.62$

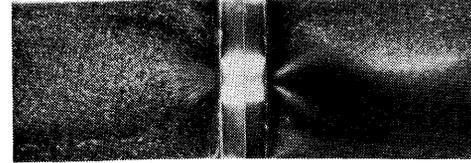
(a) $D=1.097\text{ mm}$



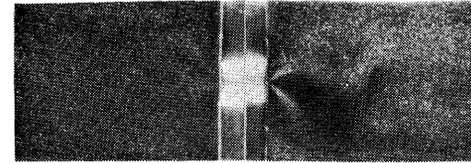
$V=331\text{ (cm/s)}$ $Re=33.7$, $V=386\text{ (cm/s)}$ $Re=40.0$



$V=198\text{ (cm/s)}$ $Re=20.3$, $V=190\text{ (cm/s)}$ $Re=19.4$



$V=132\text{ (cm/s)}$ $Re=13.4$, $V=109\text{ (cm/s)}$ $Re=10.1$



$V=24.5\text{ (cm/s)}$ $Re=2.49$, $V=32.0\text{ (cm/s)}$ $Re=3.24$

(b) $D=0.307\text{ mm}$

図5 流動パラフィンの流線写真

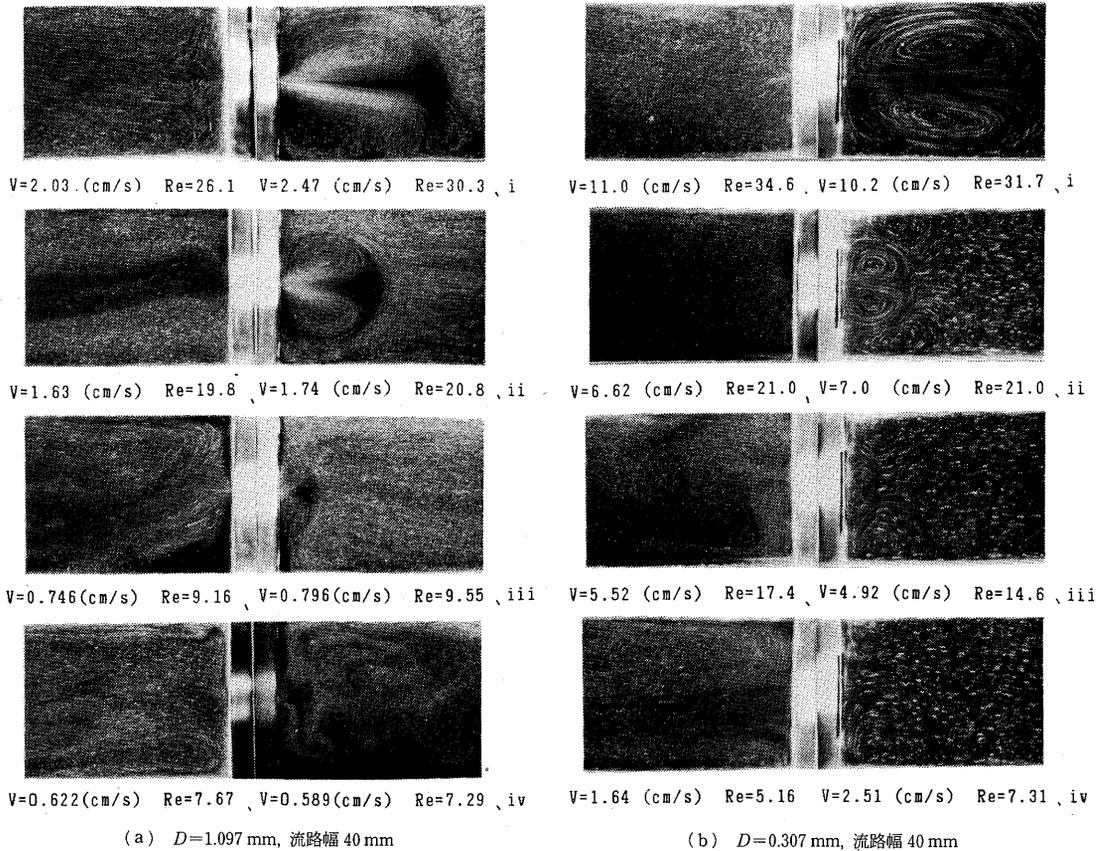
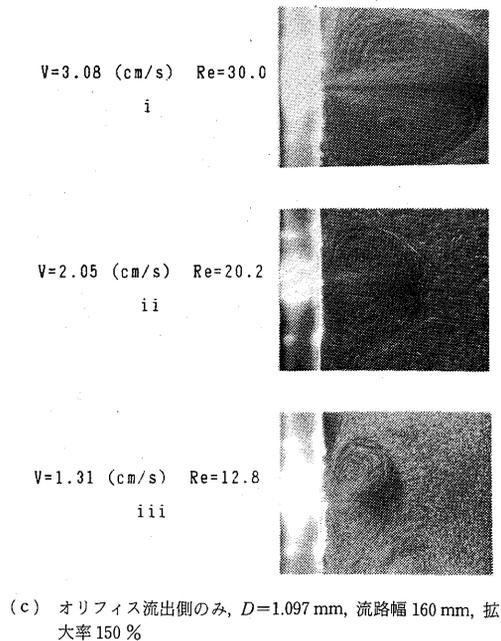


図6 蒸留水の流線写真



の場合を除くと、無次元速度はストークス流の理論解より高い値を示し、中心速度はオリフィスについて非対称性を示している。また、オリフィス流出後の速度の減衰割合を見るために、オリフィスより一定の距離 $X/D=2.55$ における流速をレイノルズ数を変えて測定した。図4に、測定した流速 U を平均速度 V で無次元化して示す。これによれば、 U/V は、 $D=1.24$ mm、蒸留水の場合を除いて、 $Re < 5$ でストークス流の理論解と概略一致しているが、これ以上のレイノルズ数では徐々に増加している。また、 $D=0.296$ mmでは、蒸留水と流動パラフィンの実験値は近いが、 $D=1.24$ mm、 $3 < Re < 10$ では蒸留水の値が流動パラフィンのそれより明らかに高い値を示している。以上のことから、蒸留水では $Re=5$ 程度でもオリフィス径が大きいときは流出後の速度減衰率は小さいことがわかる。

3・2 流線撮影 図5(a)、(b)に流動パラフィンのオリフィス通過時の流れの流線写真を示す写真の縦の長さが流路幅(40 mm)である。流れは紙面で左

から右に向かい、図5(a)が $D=0.307\text{ mm}$ 、(b)が $D=1.097\text{ mm}$ のオリフィスによる結果である。図5(a),(b)において、流入部はオリフィス径、レイノルズ数によらずすべて放射状流れになっていることがわかる。また、 $Re < 10$ において流線は流出側でも放射状流れを作りオリフィスについてほぼ対称形になっている。しかし、 $Re \geq 10$ において流出側では徐々にジェットになっていくことがわかる。このことは両オリフィス径に共通である。図6(a)~(c)に蒸留水の流線写真を示す。流入部の流れは流動パラフィン同様オリフィス径やレイノルズ数によらず放射状流れを作る。しかし、流出側ではレイノルズ数が小さい($Re < 10$)場合でも、流動パラフィンとは異なり、オリフィス出口付近にジェットに似た流れ状態が存在し、その周囲にうずを伴っていることがわかる。さらに、特徴的なことは、比較的高いレイノルズ数域($Re=10\sim 30$)でも流出ジェットは孤立したうず塊を形成し、そのスケール(主流方向)は同程度のレイノルズ数ではオリフィス径が異なってもほぼ同程度になっている。図7(a),

(b)にエタノールの流線写真を示す。流入側の流れは前述の二者と同様放射状であるが、流出側($Re=3\sim 30$)では蒸留水の場合よりさらに細いジェットを作っている。また、蒸留水のようなうず塊ははっきりと区別できるほどには現れず、両オリフィス径で類似の流れを作っている。

4. 考 察

速度場に関して本報で得られた知見を、前報⁽⁷⁾で得られた余剰圧力損失の実験結果と対応させると次のようになる。流動パラフィンについては $Re < 10$ で流入流出側速度はほぼストークス流の理論解と一致するが、このとき、余剰圧力損失もストークス流の理論値に一致する。蒸留水の $Re=10\sim 30$ の流れの流出側では、オリフィス径が大きいと流出速度の減衰率が小さく、オリフィス径が小さいとそれは大きい。これに対応して、オリフィス径が大きい場合は相対的に余剰圧力損失は大きく、オリフィス径が小さい場合には余剰圧力損失は相対的に小さい。エタノールでは、流動パ

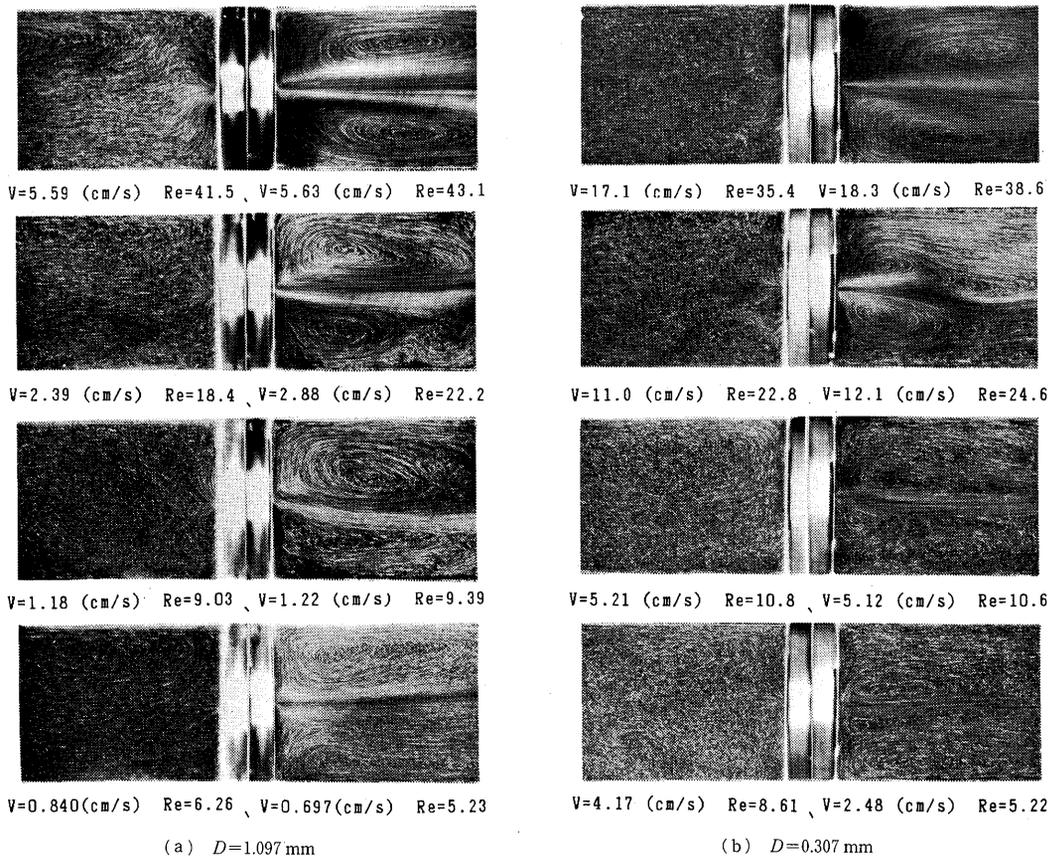


図7 エタノールの流線写真

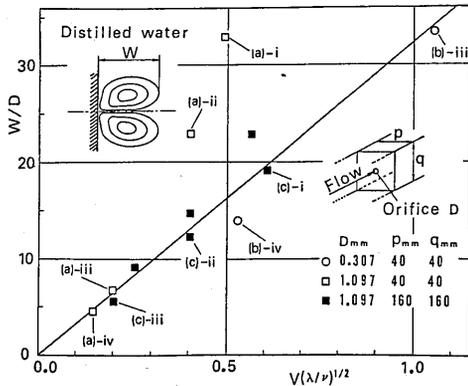


図8 蒸留水のうず塊スケール, 無次元うず塊スケール (W/D) 対無次元数 $[V(\lambda/\nu)^{1/2}]$, (図8中記号((a)-i)などは図6(a)~(c)参照)

ラフィン, 蒸留水のいずれよりも流出角は小さく, Re が10以下でもジェットに似た状態で流出する. この場合, 余剰圧力損失はストークス流の理論値より大きい. 以上のことから, Re が一定の場合, 余剰圧力損失が相対的に小さいか大きいかは流出速度の減衰率の大小, あるいは, 流出側広がり角度の大小に大きく関係していることがわかる.

また, 水の場合に, $Re=10\sim30$ でオリフィス出口に孤立したうず塊が見られたが, このうず塊の大きさ W をオリフィス径 D で無次元化し, $V(\lambda/\nu)^{1/2}$ を横軸にとりプロットしてみた. ここに, λ は前報⁽⁷⁾で述べた「水に固有なある時間」であり, ここでは具体的には著者の一人が以前に測定した⁽⁸⁾弾性力に基づく緩和時間を用いた. その結果を図8に示す. 図8中, 白四角のデータ [図8((a)-i), ((a)-ii)] はうず塊がすでに流路幅の影響を受けていると考えられるためこれを除くと, 無次元うず塊スケール W/D は無次元数 $V(\lambda/\nu)^{1/2}$ で概略整理できることがわかる. したがって, 水の無次元余剰圧力損失 $2\Delta P/\rho V^2$ が同じく $V(\lambda/\nu)^{1/2}$ で整理されたこと⁽⁷⁾とを併せて考えると, 本研究のような伸張性の強い流れにおいて, 無次元数 $V(\lambda/\nu)^{1/2}$ が重要な役割を果たすものと考えられる. なお, 水以外の液体についてもその液体に固有なある時間に基づいて考察を行うべきであるが, 現時点ではこれらは不明であるため, できないと考えられる.

5. 結 論

小オリフィスを通過する流れの流入側流出側中心速度をレーザ流速計により測定し, また, アルミニウム粉により流れの可視化を行い, 次の点を明らかにした.

(1) 流動パラフィンについては, レイノルズ数10以下で流入側流出側中心速度はストークス流の理論解にほぼ一致する.

(2) 蒸留水については, オリフィス径の大きいほうが流出液の広がり角度は小さく, オリフィス径の小さいほうが流出側広がり角度は大きい. また, $Re=10\sim30$ でオリフィス出口付近に特異な孤立したうず塊が生じる.

(3) エタノールについては, レイノルズ数10以下でも流出側広がり角度は小さく, ジェットに似た形態で流出する.

(4) 液体の流出側広がり角度が大きい場合は余剰圧力損失が相対的に小さく, 広がり角度が小さい場合は余剰圧力損失は相対的に大きい.

(5) 蒸留水のオリフィス出口付近で生ずるうず塊の大きさ W をオリフィス径で無次元化した W/D は無次元数 $V(\lambda/\nu)^{1/2}$ によって整理される. ここに, V はオリフィス平均速度, λ は水に固有なある時間, ν は水の動粘度である.

最後に, 本研究の遂行にあたり多大なるご協力をいただいた(株)日本ステンレスの池田敏郎氏, 三井造船(株)の酒井太志氏(当時, 新潟大学学生)らに対し深く感謝いたします.

文 献

- (1) Metzner, A. B., Uebler, E. A. and Chan Man Fong, C. F., *AIChE J.*, **15** (5) (1969), 750.
- (2) Cable, P. J. and Boger, D. V., *AIChE J.* **24** (5) (1978), 869.
- (3) Ramamurthy, A. V. and McAdam, J. C., *J. Rheology*, **24**-2 (1980).
- (4) 長谷川・渋谷・大西, 機論, **48**-427 (昭57), 480.
- (5) 浅沼, 流れの可視化ハンドブック, (昭57), 198, 朝倉書店.
- (6) Happel, J. and Brenner, H., *Low Reynolds Num. Hydrodynamics*, (1965), 153, Prentice Hall.
- (7) 長谷川・福富・鳴海, 機論, **53**-496, B (昭62), 3510.
- (8) 長谷川, 機論, **44**-381 (昭53), 1610.