オリフィスを有する管内を通過する脈動流に関する研究*
(レーザ流速計を用いた流れ場の観察)田村 恵 万*¹, 岩本 順二郎*²A Study on Pulsating Flow through a Pipe with an Orifice
(An Observation of Flow Field by Laser Doppler Velocimeter)Ema TAMURA*³ and Junjiro IWAMOTO^{*3} Graduate School of Engineering, Tokyo Denki University,
2-2 Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8457 Japan

An orifice flow meter is widely used to measure the flow rate in a pipe, where the accuracy of the measurement is acceptable when the flow is steady. It is desired that in order to develop an accurate method to measure the flow rate in a pipe under pulsating flow conditions a detailed flow pattern of the unsteady flow field should be sought. In the present paper, the velocity distributions and turbulent intensity were measured in the flow field downstream of the orifice in a pipe under pulsating flow conditions. The experimental results showed the following: velocity profiles have almost similarities in the potential core region, velocity profiles on the centerline of the pipe show hysteresis phenomena when opening area ratio of the rotary valve changes with time, and the peak of turbulent intensity near the edge of the orifice moves downstream with time as the rotary valve opens.

Key Words: Pulsating Flow, Orifice, Laser Doppler Velocimeter, Reattachment Length, Jet Boundary

1. 緒 論

絞りの一つであるオリフィスは、その構造が簡単であることから国内外を問わず広く流量測定に関連して利用されている。オリフィスを用いた絞り流量計は、流れが定常であることを前提としているため、非定常流の流量を正確に測定することは困難である。工業上の流れは非定常の場合が多く、したがって正確な流量計測が困難であるのが現状である。特に、脈動流の流量を正確に測定する有効な流量計測技術の確立が望まれており、そのためにも、脈動流における流れ場について詳細な検討が必要である。

Motttram⁽¹⁾は、ピストン駆動によって管内に脈動流を発生させた。そして、脈動流のために生じる平方根誤差以外の流量誤差はレイノルズ数とストローハル数に依存することを示し、その理論的補正誤差関数を導出した。Jungowski ら⁽²⁾は円管内に脈動流を発生させ、管内の軸方向にわたる圧力分布ならびにオリフィス前後の速度分布を測定し、時間平均速度分布は脈

動周波数に依存しないことを明らかにしている。しかし、流れ場の詳細は十分には明らかにされていない。近江ら⁽³⁾は円管内に円筒オリフィスを設置することによって振動流れを発生させたときの速度分布と再付着点距離について調べている。絞りのないときの振動流れが層流、遷移流、乱流の場合について行っているが、I形の熱線プローブによるため逆流循環部については流れを十分にとらえられていない。池田ら⁽⁴⁾はノズルを用い、脈動する噴流の自由せん断層に形成される渦の挙動を可視化法により観察している。以上のように脈動噴流の流動特性を明らかにすることは、脈動の影響の程度とその領域を明らかにし、内部流れについて知見を与え、正確な流量計測方法の提案、各種配管の保守の目安、脈動と噴流の乱流混合による反応促進など工学的に重要である。

このような背景の下、本研究では、まず、脈動がある場合のオリフィス管内での流れの挙動の基礎的な知見を得ることを目的とし、ロータリバルブを用いて管内に脈動流を強制的に発生させた。そして、レーザ流速計(以下LDVと略す)を用い、主としてオリフィス下流部で流速分布の測定を行い、脈動が発生したときの流れ場の挙動の変化や特徴について実験的検討を行った。

* 原稿受付 2004年4月1日。

^{*1} 正員、東京電機大学大学院工学研究科(〒101-8457 東京都千代田区神田錦町2-2)。^{*2} 正員、東京電機大学工学部。

E-mail: ema@kouku-k.ac.jp

2. おもな記号

- A_0 : ロータリバルブ開口面積比
 AR : 速度振幅比
 D : 円管内径
 d : オリフィス孔径
 f : 脈動周波数(ロータリバルブ1周期(180°)で1 Hz)
 l : 再付着点距離
 N_H : ホジソン数 $= (V \bar{\rho} f / \bar{M})(\Delta p_T / \bar{p}_T)$
 $\bar{M}$: 管路の平均質量流量
 $\bar{p}_T$: サージタンク内の平均圧力
 Δp_T : 絞り(オリフィス)入口とサージタンク内部の圧力差の平均値
 V : サージタンクの容積
 $\bar{\rho}$: サージタンク内の流体の平均密度
 p : 圧力
 p_a : 大気圧
 Δp : 差圧
 R : 円管内半径
 r : 円管中心から半径方向への距離
 Re : レイノルズ数
 St : ストローク数
 $U = U_f(r, x)$
 U_f : 脈動周期全体にわたる長時間平均速度

$$U_f(r, x) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} u_f(r, x, t) dt$$

 $T = t_2 - t_1$: 時間 [ロータリバルブの回転周期(1/f)の整数 n 倍 ($n \approx 30$)]
 u_f : 時刻 t における瞬時速度 $= u_f(r, x, t)$
 $U_{f,\theta}$: ロータリバルブの回転角度が θ のときの速度平均(位相平均)

$$U_{f,\theta}(r, x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{f,\theta}^i(r, x)$$

 N : データ数 ($N=30$)
 $u_{f,\theta}^i(r, x)$: $u_{f,\theta}(r, x)$ の i 番めのサンプル
 $u_{f,\theta}$: ロータリバルブの回転角度が θ のときの瞬時速度 $= u_{f,\theta}(r, x)$
 $u'_{f,\theta}$: $u_{f,\theta}$ の乱れ

$$u'_{f,\theta}(r, x) = \sqrt{[u_{f,\theta}(r, x) - \bar{u}_{f,\theta}(r, x)]^2}$$

 $\bar{}$: ロータリバルブの回転2°分の時間における短時間平均
 $U_m = U_f(0, x)$
 $u_{\max}$: 中心軸上での最大速度
 $u_{\min}$: 中心軸上での最小速度
 $U_p = U_{f,\theta}(r, x)$

- $u'_p = u'_{f,\theta}(r, x)$
 $U_0 = U_0(0, -25.4)$
 $U_{60} = U_f(r, 60)$
 x : オリフィス板から軸方向への距離
 β : 絞り比 (d/D)
 θ : ロータリバルブの開口角度
 $(\theta=0^\circ$ で全閉, $\theta=90^\circ$ で全開)
 ν : 動粘度

3. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略図を示す。流体には、空気を用いた。空気は、吸込口より吸い込まれ、パイプ1、サージタンク1、パイプ2、サージタンク2、そして、ルーツ真空ポンプを経て大気中に放出される。脈動流は、パイプ2のオリフィス下流535 mmの位置にあるパタフライ式のロータリバルブを用いて発生させる。パタフライ式ロータリバルブは管内パタフライ弁を定速回転させるタイプのものであり、開口面積変化は正弦波状になる。パイプ1, 2の内径 D はともに 53.0 mm, オリフィスの直径 d は 23.14 mm である(絞り比 $\beta=0.4366$)。パイプ1, 2および、オリフィスの材質は透明の亚克力製である。実験は、パイプ1におけるオリフィス前後の圧力差 Δp を 100 mmAq ($\Delta p/p_a=9.67 \times 10^3$) に固定して行った。脈動の減衰度合いを示すホジソン数 N_H は約 6.3 となり、1.0 以上であることから脈動の影響はほとんどないものと考えられる⁽⁵⁾。また、脈動周波数 $f=0$ Hz でのパイプ1および2におけるオリフィスで測定した流量の差異は、パイプ1における測定値の 0.8% 以内であった。

非定常流をLDVで測定する場合には、トレーサとして使用する粒子の径ならびにその供給法が重要になる。本論文では、トレーサとして平均直径 1.1 μm の水蒸気を用い、サージタンク1から供給した。測定は、

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Fig. 2 Data rate of the LDV

出力 10 mV の一次元 He-Ne レーザを用いて行った。図 2 は、データレートを示している。図 2 より、管壁付近 ($r/R=0.6$ 以上) では、レーザ光の散乱等の原因によって、データレートが数 kHz となっているが、計測システムとしては十分な値が得られていると考えられる。

本実験では、流速分布ならびに乱れ値分布の測定を行うが、流速の測定値は、LDV による測定値を線形補間によって一定時間間隔 (0.1 ms) のデータに変換し、30 回程度の同期加算 (ロータリバルブ 1 周期ごと) を施した後、31 点の移動平均を行い算出する。

本研究の脈動周波数に関しては、Mottram は脈動周波数 50 Hz まで、Jungowski らは 24, 39 Hz の 2 種類の周波数を扱っていることを踏まえ、10 Hz と 30 Hz を採用した。これらの周波数に関連し、オリフィス噴流の初期不安定変動の、噴出直径 d に基づくストローハル数 $St = fd/U'$ (U' : 噴出速度) $= 0.63 \sim 0.80^{(6)}$ と比較すると、本実験では $St = 0.0038$ (10 Hz), 0.011 (30 Hz) となり、かなり小さい。なお、本実験での、管内径 D に基づくレイノルズ数 Re は $U_0 D/\nu = 3.29 \times 10^4$, ストローハル数 St は $fd/U_0 = 0.057$ (10 Hz), 0.17 (30 Hz) である。

4. 実験結果および考察

4.1 時間平均速度分布 図 3 に脈動周波数 $f = 10$ Hz でオリフィス板から軸方向への距離 $x/D = 1.13 \sim 3.77$ のときの時間平均速度分布を示す。ここで、横軸は円管内半径 R で規格化した半径方向の距離 r/R を示し、円管上面は (up), そして下面は (down) としている。また、縦軸は $x/D = -0.48$ ($x = -25.4$ mm), $r/R = 0$ (フランジタップ方式でのオリフィス上流における圧力取出し口に相当) における、 $f = 0$ Hz での時間平均速度 U_0 で規格化している。また、図 3 中左側の

Fig. 3 Averaged velocity profiles at the frequency of 10 Hz

括弧内の数値はオリフィス板から軸方向への規格化した距離 x/D を表している。図 3 中の点線は、オリフィスエッジの位置を示している。

図 3 において、 $x/D = 1.13 \sim 1.89$ における速度分布にはポテンシャル流れとなる領域が見られる。そのコア領域を破線で示す。また、 $x/D = 1.13 \sim 3.02$ における速度分布においては、管壁近くで逆流が観察できる。図 3 中の太実線は順流と逆流の境界を示す。また、脈動していない場合、また脈動周波数を変化させた場合においても時間平均速度分布は図 3 と同様な傾向を示した。この平均速度分布によりオリフィス下流の流れ場におけるポテンシャルコア領域は $x/D \approx 1.89$ で消失していることがわかる。また、再付着点距離 $l/D \approx 3.24$ となるという結果を得た。

Jungowski らは $Re \approx 10^5$ でほぼ同じ絞り比 ($\beta = 0.4347$) のオリフィスを用い、脈動周波数 f を 0, 24, 39 Hz と変化させて、オリフィス前後における半径方向の時間平均速度分布を熱線流速計により測定し、時間平均速度分布は脈動周波数にほとんど依存しないという結果を得ている。この傾向に関しては、本実験と同様であるが、Jungowski らのオリフィス上流での速度分布は管中心から管壁まで直線的な配をもっているのに対し、本実験では境界層部分を除いた主流部分におけるその速度はほぼ一様に近い分布であったた

め、オリフィス下流における速度こう配は若干異なる結果となった。また、Jungowski らは I 形の熱線を使用したため逆流を感知できていないが、本実験では逆流が明確に観察でき、オリフィスのような絞りを有する管内の流れに関して有効な物理量である再付着点距離も明らかとなった。

大庭ら⁷⁾は、オイルフロー法を用いて本実験とほぼ同じレイノルズ数におけるオリフィス下流での定常流の再付着点距離を求めており、その結果は $l/D \approx 3.25 \sim 3.37$ と本実験結果とほぼ一致している。再付着点距離は、その上流の速度分布に依存するが、大庭らは上流での速度分布を明らかにしていないため直接的な比較はできない。しかし、オリフィス上流の速度分布形状およびレイノルズ数が再付着点を決めるうえでの重要なパラメータであることは容易に推測できる。

4.2 脈動時の速度分布と乱れ値分布

4.2.1 噴流中心軸上での速度と乱れ値の変化

脈動周波数が $f=30\text{Hz}$ の場合の、円管中心軸上 ($r/R=0$) のロータリバルブ 1 周期にわたる速度変化を図 4 に示す。図 4(a)、(b) は U_0 、図 4(c) は U_m で規格化した速度である。ロータリバルブは、1 回転につき開閉を 2 回繰返すため、速度分布における 1 周期は 180° に相当する。ここでは、ロータリバルブにより円管が閉じられている状態を 0° としている。

図 4(a) においてロータリバルブの開口面積変化は正弦波状であるが、この波形は大きくひずんでいる。図 3 でポテンシャルコア領域内にある $x/D=1.13$ 、 1.51 では波形はほぼ同じであるが、それ以外では振幅が x/D の増加に伴い減少していることがわかる。また、位相については x/D の増加に伴い約 5.4° ずつ進んでいる。これを速度に換算すると約 40m/s となり、ポテンシャルコア領域での平均速度とほぼ一致する。

図 4(b) は、図 4(a) の横軸をロータリバルブの開口面積比 A_0 (ロータリバルブ開口面積/パイプ断面積) として表したものである。ロータリバルブと円管とのすきま (約 1mm) は無視して考えている。 $\theta=0^\circ$ および 180° のときの開口面積比は $A_0=0$ 、 $\theta=90^\circ$ のときは $A_0=1$ に対応する。図 4(b) 中の $A_0 \text{ inc.}$ はロータリバルブが開いていく場合、 $A_0 \text{ dec.}$ は閉じていく場合を示す。

図 4(b) では、開口面積比が増加していくときの流速は、開口面積比が減少していくときのものと比較して低くなるというヒステリシス現象が現れている。また、図 4(a) において速度分布に谷 (20°) および山 (40°) が現れ、速度はロータリバルブの開口面積比に対応した単調な増加を示していないことがわかる。オ

(a) Velocity normalized by U_0

(b) Velocity normalized by U_0

(c) Velocity normalized by U_m

Fig. 4 Normalized velocity profiles on the center axis of the pipe over 1 period

Fig. 5 Normalized velocity profiles vs. opening area ratio

リフィスからの主流とロータリバルブから脈動流れおよび慣性の影響などが複雑に重なり合うことにより、管内では流体の加速・減速が生じることによるためであると思われる。

図4(c)は、速度分布の相似性について確認するために、速度を時間平均速度 U_m で規格化したものである。横軸はロータリバルブの開口面積比 A_0 で表している。ポテンシャルコア領域が存在している $x/D = 1.13$ と 1.51 の波形においては、位相のずれを除けば、よく重なり合い、分布形状は相似となっている。しかしポテンシャルコアが消滅している $x/D = 2.26$ と 3.02 での波形は、ポテンシャルコア内の波形とは若干のずれが生じている。

図5に脈動周波数を変化させた場合における開口面積比 A_0 と $x/D = 0.48$ における円管中心軸上 ($r/R = 0$) での速度の関係を示している。 $f = 5\text{Hz}$ の A_0 inc. の場合は、 $f = 10\text{Hz}$, A_0 dec. の場合と線が重なっている。 $f = 5\text{Hz}$ の場合にはヒステリシス現象はかなり小さく、この傾向は x/D が変化しても同じである。ロータリバルブが閉じている場合は、ロータリバルブにおける流量は零である。ロータリバルブが開き始めると、慣性の影響のために少し遅れて流量がロータリバルブの開度に応じて増加していくこととなる。この慣性の影響は脈動周波数に依存する。続いて、ロータリバルブの開度が最大となった状態、すなわちここで流量は最大となっているが、その後に開度が減少していく場合にも慣性の影響により、遅れて流量が減少することになる。しかし、流量が多い状態からロータリバルブにより開度を小さくしていくときには流体の慣性をより受けるために、その遅れは前者より大きくな

Fig. 6 Normalized velocity profiles U_p/U_0

るものと考えられる。そのため、流速は、開口面積比が増加していく場合のほうが減少していく場合と比較して、小さくなると思われる。

次に、ロータリバルブの回転角度に応じた速度分布について考える。図6に中心軸上での速度分布を示す。ここで、各速度は、比較を容易にするため、距離 $x/D = 1.13$ ($x = 60\text{mm}$) での速度 U_{60} によって規格化している。各角度における速度分布と、脈動を発生していない定常流(図6中 Steady と表記)の速度分布を比較すると、図4(a)において速度がほぼ最大となる角度 (120°) ではオリフィスからの距離に対する速度振幅の減衰が定常流より遅く、速度が最小となる角度 (30°) では早くなっている。 90° の速度分布は、定常流の場合とよく一致しているが、これはロータリバルブが開いた状態 (90°) での流れが定常流に近いとみなせることを示している。

次に乱れ値について、脈動周波数 $f = 30\text{Hz}$ の場合の、円管中心 ($r/R = 0$) のロータリバルブの開口面積比 A_0 における変化を図7に示す。ポテンシャルコアの存在領域である $x/D = 1.13$ と 1.51 においては、他と比較し乱れ値は小さな値となっていて、開口面積比とともにその値は減少しているが、ヒステリシスな現象はほとんど見られない。ポテンシャルコアが消滅する領域である $x/D = 2.26$ と 3.02 では全体的に大きな値を示し、ヒステリシスな傾向をもっている。特に、再付着点の近くである $x/D = 3.02$ では、脈動の影響により再付着点位置も変動していることから、乱れ値もこれに伴って他の位置よりも大きな変動が起きている。

4・2・2 オリフィス下流部での速度および乱れ値の変化 図8に脈動周波数 $f = 30\text{Hz}$ の場合の、円管

Fig. 7 Normalized RMS profiles

断面での位相平均速度分布 U_p/U_0 を白丸で、乱れ値分布 u'_p/U_0 を黒丸で示す。速度の乱れ u'_p はロータリバルブの角度が 2° 間における短時間平均から求めたものであり、例えば $\theta=60^\circ$ は 60° から 62° における平均の値である。 U_p および u'_p はともに U_0 によって規格化されている。図 8 中の点線は、オリフィスエッジの位置を示している。図 8 中左側の括弧内の数値はオリフィス板から軸方向への距離 x/D を表している。さらに、図 8 中の太実線は順流と逆流の境界を示し、ポテンシャルコア領域を破線で示す。図 8(a), (b) はそれぞれロータリバルブの回転角度が 60° および 180° の場合の分布を示している。

本実験では LDV の測定方向とロータリバルブの回転軸方向が直交していたため、ロータリバルブの回転方向から誘起される大きな流れが測定対象である速度分布の対称性に影響を与えることが懸念されたがその影響は小さく、ほぼ軸対称の分布が得られた。図 8(a) と図 8(b) とともに、 $x/D=1.13$ での一様な速度分布をもつ部分の幅は脈動がない場合と比べて短くなっている。ポテンシャルコア領域は図 8(a) では $x/D \approx 2.05$ まで存在しているのに対し、図 8(b) では $x/D \approx 2.45$ まで存在している。また、再付着点については、図 8(a) では $x/D \approx 2.82$ 、図 8(b) では $x/D \approx 3.65$ と予測され、ロータリバルブの回転とともに $x/D \approx 0.83$ の範囲をもって変動している。これは、オリフィス下流から発生した脈動が、オリフィス孔からの噴流に影響を与えていることが原因であると考えられる。ポテンシャルコア領域が大きいくほど再付着点距離も長くなる傾向がわかる。

(a) $\theta=60^\circ$ deg. (b) $\theta=180^\circ$ deg.

Fig. 8 Velocity and RMS profiles at the frequency of 30 Hz

乱れ値については、オリフィス付近($x/D=1.13 \sim 1.89$)では M 字形をしており、乱れ値の大きな値をもつ山部と小さな値の谷部に分かれている。山部はオ

Fig. 9 Normalized RMS Profiles at $f=30$ Hz

リフィスエッジ近傍に見られる。ポテンシャルコアがある領域では主流の影響が大きいので、乱れ値は小さな値を取っていることがわかる。また、ポテンシャルコアが消滅する噴流境界付近から管壁($r/R=1$)にかけての広い範囲で乱れ値がロータリバルブの回転とともに変動しているようすがわかる。

次に、乱れ値の挙動をさらに詳細に観察するため、図9にロータリバルブの回転角度 18° , 72° および 108° における等乱れ値分布 u'_p/U_0 を示す。前に述べたように、オリフィス下流における速度分布および乱れ値

Fig. 10 Velocity amplitude ratio AR

分布はほぼ軸対称であることが明らかとなったので図9は、管半分の値について描いてある。縦軸は半径 r/R を、横軸は距離 x/D である。図9の右側のバーは乱れ値の大きさを表している。

図9(a) $\theta=18^\circ$ では $r/R \approx 0.48$, $x/D \approx 0.72$ と $r/R \approx 0.60$, $x/D \approx 0.80$ に強い乱れ、そして $r/R \approx 0.60$, $x/D \approx 1.50$ を中心にしてその周辺において強い乱れが生じている。次に、図9(b) $\theta=72^\circ$ にロータリバルブの回転角度が増加して時間が経過していくと、 $r/R \approx 0.60$, $x/D \approx 1.20$, $r/R \approx 0.62$, $x/D \approx 1.60$, そして $r/R \approx 0.42$, $x/D \approx 2.42$ に強い乱れが見られるようになる。さらに図9(c) $\theta=108^\circ$ では、 $r/R \approx 0.62$, $x/D \approx 1.60$ と $r/R \approx 0.60$, $x/D \approx 2.25$, $r/R \approx 0.35$, $x/D \approx 2.50$ へと強い乱れは、管中心に向かいながら下流へ移動している。Miau ら⁽⁸⁾ は水を用いて脈動を起こした場合のオリフィス下流での流れ場の可視化ならびに LDV による速度計測を行っている。そのときのレイノルズ数は 2000、脈動周波数は 1.93 Hz と本実験とは条件に相違はあるが、Miau らが可視化でとらえられた渦の位置は、無次元化した速度変動の値が大きい位置と一致しており、図9で示される乱れ値のピークの値も渦の発生に関係しているものと思われる。

次に、円管中心軸上での速度振幅比 AR の変化について考える。次式で定義される円管中心軸上での速度振幅比 AR

$$AR = (u_{\max} - u_{\min}) / U_m \quad \dots\dots\dots (1)$$

とオリフィスからの距離 x の関係を図10に示す。図10より、 AR は x/D とともに増加していき、 $x/D=3$ 付近でピークを示した後に減少している。このピークの現れる位置は再付着点位置($f=10$ Hz では $l/d \approx 3.24$)にほぼ対応していると考えられる。井口ら⁽⁹⁾ は、レイノルズ数 31900 の急拡大管内乱流脈動拘束噴流の、熱線を用いた測定実験より、速度振幅比の挙動は、乱れの発生とその半径方向への伝播に関係していると

述べている。本実験においても、オリフィス下流部では噴流を形成することとなる。この噴流部では流れが加速されていくが、それに伴い乱れが現れることとなる。それに加えて、脈動が発生することにより噴流境界は激しい変動を生じ、その変動によって半径方向へ向かって乱れが伝ばしていき、これらの乱れは時間の経過とともに下流方向に伝わっていくものと思われる。そして、乱れは流れの減速に伴い再付着点付近で急な減衰を示すものと推測される。そのようなことから、 AR の挙動と再付着点位置が関連づけられると考えられる。

5. 結 論

本論文では、ロータリバルブによって発生させた脈動による管内での流れ場の挙動を把握することを目的とし、LDV を用いた流速分布および乱れ値分布の測定を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) 円管中心軸上での流速に着目したとき、ポテンシャルコアが存在する領域では位相は異なるが、速度波形は相似となる。

(2) 円管中心軸上における流速は、ロータリバルブの開口面積比が増加していく場合と減少していく場合とではヒステリシス現象を示す。これは流体の慣性による影響に依存しているものと考えられるが、本実験の範囲では脈動周波数が 5 Hz ではヒステリシス現象はかなり小さいといえる。

(3) 円管中心軸上の速度振幅比 AR はオリフィス板から軸方向への無次元距離 x/D とともに増加するが、脈動周波数が 30 Hz では 3 付近でピークをもつ

た後に減少する。このピーク値は再付着点の位置とほぼ対応している。

(4) ロータリバルブの回転とともに噴流境界が激しく振動し、乱れ値のピークはオリフィスエッジ付近から円管中心へ時間的とともに移動していく。

文 献

- (1) Mottram, R. C., The measurement of Pulsating Flow Using Orifice Plate Meters, Flow Its Measurement and Control in Science and Industry, *Instrum. Soc. Am.*, 1, Part 2 (1974), 197-208.
- (2) Jungowski, W. M., Stuzinski and Szabo, J. L., Orifice Meter Performance under Pulsating Flow Conditions, *Proc. 2nd Int. Symp. Fluid Flow Meas.*, Calgary, Alberta, (1990), 255-269.
- (3) 近江宗一・井口学・川端弘俊・高野誠, オリフィスを設けた円管内の振動流れにおける速度分布と再付着点距離, *機論*, **50**-453, B (1984), 1231-1239.
- (4) 池田敏彦・森豊・土屋良明・長澤忠延・堀越長次, 脈動噴流に関する研究(可視化による渦の挙動の観察), *可視化情報*, **17**-67 (1997), 56-61.
- (5) Hodgson, J. L., The Orifice as a Basis of Flow Measurement, *Inst. Civil Eng. Selected Eng. Papers*, 31 (1925).
- (6) 豊田国昭・白浜芳朗・小谷幸慈, 渦構造の操作による非円形噴流の制御に関する研究, *機論*, **58**-545, B (1992), 7-13.
- (7) 大庭拓也・李家賢一・砂田保人, オリフィス急拡大付着流れに関する渦構造に関する実験的研究, *日本航空宇宙学会論文集*, **48** (2000), 82-88.
- (8) Miao, J. J. and Yang, R. Z., Unsteady Pipe Flow through an Orifice Plate, *Chinese J. Mech.*, (1995), 153-160.
- (9) 井口学・山崎英治・山田栄二・森田善一郎, 急拡大管内乱流脈動拘束噴流の速度と乱れ強さ, *機論*, **56**-526, B (1990), 89-94.