曲り管内脈動流に関する研究* (第4報, 二次流れ)

角田 勝^{*1}, 須藤 浩三^{*2}, 和田 秀之^{*3}

Pulsating Flow in Curved Pipes (4th Report, Secondary Flow)

Masaru SUMIDA, Kouzou SUDOU, and Hideyuki WADA

The secondary flow pattern was clarified experimentally by the visualization method, for a fully-developed pulsating flow through a circular curved pipe with a curvature ratio of 7.6. The experiments were carried out under the conditions of the Womersley numbers $\alpha=5.5\sim18$, the mean Dean numbers $\bar{D}=90$ and 200, and the flow rate ratios $\eta=0.5$ and/or 1. The pictures were taken at selected four phase positions, i. e., $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ and 270° . The instantaneous velocity profiles, the center of vortices and the kinetic energy of the secondary flow were determined with the aid of the photographs and compared with the results obtained by the numerical analysis. On the experimental and analytical results, a discussion is given for the transition of the secondary flow patterns in a period and the effects of the Womersley number on the flow behavior.

Key Words: Fluid Mechanics, Curved Pipe, Pulsating Flow, Flow Visualization, Secondary Flow, Velocity Measurement

1. 結 言

曲り管内流れについては, その工業的応用範囲の広さからこれまでに数多くの研究が行われてきたが, 最近では計測機器の開発に伴い, また熱交換器の改良や血液流れの問題にも関連して定常流のみならず非定常流についても多くの関心が寄せられるようになった。

曲り管内非定常流に関する研究は, Lyne⁽¹⁾の振動流, Smith⁽²⁾の脈動流についての理論的研究に端を発し, その後あいついで理論的研究⁽³⁾が進められるとともに実験的研究⁽⁴⁾も行われるようになった。実験的研究のうち, 断面内に誘起される二次流れを扱ったものとしては, Munson⁽⁵⁾の染料注入法や Bertelsen⁽⁶⁾のAl粉末法による振動流の可視化実験が挙げられるが, いずれの場合も対象とした流れのディーン数は低い。一方, 脈動流における二次流れについては, Talbotら⁽⁷⁾のレーザ・ドップラ流速計による速度測定, および人の大動脈弓モデル管内の流体に血液の流れと同じ流量変動を加えた場合について行った Yearwood

ら⁽⁸⁾の固体トレーサ(ビーズ球)法による定性的観察の二例がみられる程度である。なお, これらの研究はいずれも, 管路の入口付近の流れについて行ったものである。

著者らは先に, 円形断面をした曲り管内の発達した脈動流について数値解析を行い, 管内の一部に逆流の発生する場合があることや軸方向速度分布にくぼみ現象が生じることを明らかにし, 定常流とは異なった二次流れが形成されることを見出した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。そこで本研究では, 従来の研究結果および実用上の問題を考慮して, 大きいディーン数の発達した流れにおける二次流れを可視化し, その特性を実験的に明らかにすることを試みた。すなわち, まずストロボを光源とした固体トレーサ法⁽¹¹⁾を用いて, ウォマスリー数 $\alpha=5.5\sim18$, 平均ディーン数 $\bar{D}=90, 200$, 流量比 $\eta=0.5$ あるいは1の条件下において二次流れを可視化し写真撮影した。ついで, これらの写真から, 瞬時の速度分布, 渦の中心位置および断面平均運動エネルギーを求めて, 既報の数値解析の結果⁽⁹⁾と比較し, 二次流れの挙動について考察した。

2. 主 な 記 号

使用した座標および管路の特性については図1参

* 昭和63年3月31日 第65期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和62年9月28日。

^{*1} 正員, 米子工業高等専門学校 (〒683 米子市彦名町4448)。

^{*2} 正員, 広島大学工学部 (〒724 東広島市西条町下見)。

^{*3} 正員, 日本経済短期大学 (〒180 武蔵野市境5-24-10)。

照.

 D : ディーン数 $= Re\sqrt{a/R}$ Re : レイノルズ数 $= 2aW_m/\nu$ (ν : 動粘度) S : 二次流れの運動エネルギー [式(2)] u, v : x, y 軸方向の無次元速度 $= aU/\nu, aV/\nu$ W_m : 断面平均軸方向速度 [式(1)] α : ウォマスリー数 (振動数パラメータ)

$$= a\sqrt{\omega/\nu}$$

 η : 流量比 $= \bar{W}_m/\bar{W}_m$ $\theta = \omega t$ (t : 時間, ω : 角振動数) $\Delta\theta$: ストロボの発光位相間隔

添 字

-: 時間平均値

~: 振幅値

3. 実験装置および方法

実験装置の概略を図2に示す。実験装置のうち、供試管を除く部分は文献(10)に記述したものとほぼ同じであるので、これらの部分についての説明は省略し、以下に供試管および可視化法について述べる。

供試管は透明ガラス製 (屈折率 1.46) で、その形状は内径 $2a=14.1$ mm, 外径 18.0 mm, 管中心の曲率半径 $R=53.3$ mm (曲率半径比 $R/a=7.6$), ピッチ角約 4° , 巻数 3 である。この曲り管の上流および下流には長さ $160a$ の直管が取付けられている。実験に際して

図1 座標系

図2 実験装置概略図

は、管路外部より撮影を行うために生じる光学的ひずみを軽減するよう、供試管は作動流体である水と同じ水が循環する透明な箱形水槽内に設置した。

可視化は固体トレーサ法で行い⁽¹¹⁾, トレーサ粒子には比重 1.01~1.02, 平均粒子径約 90 μm の球形に近いナイロン粒子を用いた。測定は曲りの転向角が 450° (一巻と 90°) の断面で行い, この断面を中心に管軸に垂直に幅 3~6 mm の平行スリット光線をストロボ発光装置を用いて照射した。カメラは, 断面の外壁側が撮影できるよう, 照射断面に対して約 86° 内壁寄りの方向にセットした。撮影は, 正弦状脈動流

$$W_m = \bar{W}_m + \bar{W}_m \sin \theta = \bar{W}_m (1 + \eta \sin \theta) \cdots (1)$$

の最大加速および減速時 ($\theta=0, 180^\circ$) と最大および最小流速時 ($\theta=90, 270^\circ$) の四つの場合について下記のように行った。すなわち, これらの位相を基準にとり, その近傍でピストンの位置を示すタイムマーカー信号にストロボをある位相間隔 $\Delta\theta$ で同期させて 4 回発光させる ($\Delta\theta=2\sim 20^\circ$, 発光時間間隔 $\Delta t=0.03\sim 0.28$ 秒)。そして, 照らし出されたトレーサ粒子の流跡をバルブ撮影した。

上記の方法によって得られた写真から, トレーサ粒子の軌跡を示す点列間の距離をディジタイザにより読取り, パーソナルコンピュータにストロボの発光時間間隔 Δt を与えて, $3\Delta\theta(3\Delta t)$ 間の短時間平均速度を各位相における二次流れの瞬時速度として求めた⁽¹¹⁾。

なお, 本実験結果が発達した流れに関するものであることは, いくつかの条件下に行った転向角 810° (二巻と 90°) の位置での測定結果と比較し両結果が一致することにより, 前もって確認してある。

実験はウォマスリー数 $\alpha \approx 5.5, 10, 18$ (振動数 $0.09\sim 1$ Hz), 平均ディーン数 $\bar{D} \approx 90, 200$ (平均レイノルズ数 $\bar{Re} \approx 250, 550$, 平均速度の時間平均値 $\bar{W}_m \approx 1.7, 3.9$ cm/s), 流量比 $\eta \approx 1$ ($\bar{D} \approx 90$) および $\eta \approx 0.5, 1$ ($\bar{D} \approx 200$) の条件下に行った。

表1 実験条件

Ex.No.	α	$\bar{D}$	η	R/a
I	5.4	208	1.02	7.6
II	10.2	206	1.03	7.6
III	18.2	194	0.95	7.6
IV	5.5	209	0.47	7.6
V	9.9	214	0.44	7.6
VI	18.1	204	0.50	7.6
VII	5.4	87	0.97	7.6
VIII	10.2	87	1.07	7.6
IX	18.1	89	1.06	7.6

(a) 低 α 数の流れ (Ex. I, $\alpha=5.4$)

(b) 中 α 数の流れ (Ex. II, $\alpha=10.2$)

(c) 高 α 数の流れ (Ex. III, $\alpha=18.2$)

図 3 二次流れの写真 ($\bar{D} \approx 200$, $\eta \approx 1$, $R/a = 7.6$)

4. 結果および考察

4.1 流れのパターン ここでは、代表例として $\bar{D}=200$, $\eta=1$ の結果 (実験条件の詳細については表1参照) を図示し、二次流れのパターンの変化とそれにおよぼすウォマスリー数 α の影響を見ることにする。

図3, 4に二次流れの写真および数値解析により求めた半断面内の流線 [文献(9)の解析法で本実験条件にあわせて改めて計算した] を示す。写真の左は管路の内壁側, 右は外壁側にあたる。これらの写真から, y 軸上の x 軸方向速度および二次流れ (渦) の中心位置を求め, 数値解析の結果と比較したものを図5および6に示す。図5, 6中の実線および黒ぬりの記号は数値解析の結果, 白抜きの記号は測定結果である。

以下に, 二次流れの変化と軸方向流れの変化⁽¹⁰⁾を對比させながら, 一周期における二次流れの挙動について説明を加える。

4.1.1 低 α 数の流れ [Ex. I, $\alpha=5.5$, 図3~6の(a)] 一部の期間を除き定常流の場合と同様なパターンを示す。最小流速時 ($\theta=270^\circ$), 二次流れは弱く (二次流れの強さについては次節参照), 渦の中心は逆流の生じている内壁側の x 軸寄りに位置する。位相が進むにつれて ($\theta=310\sim340^\circ$), 管路内の圧力は順圧力こう配となり, 内側断面の流れも次第に順方向に変化する。一方, 順方向に流れていた外側断面の流体は加速され, 軸方向速度の大きさが最大となる位置は

内壁側から外壁側へ移る。それにつれて, 二次流れの中心は外壁側の上下壁寄りに急速に移動する。流れがさらに加速されると ($\theta=0^\circ$ ($\theta=360^\circ$)), 軸方向速度の分布は管路中央部で平坦な形となり, 二次流れの中心位置が半断面中央やや上下壁寄りに移ると同時にその強さも強まり始める。その後, 外壁側の主流はさらに加速され, 加速終了時 (最大流速時, $\theta=90^\circ$) には, 典型的な Dean 形分布となる。そして, 渦中心は内壁側に移動し, 管路の中央部には粘性作用の弱い領域が生じる。流れが減速し始めるにつれて, 二次流れも減衰し始め渦中心の位置が半断面中央に移動するとともに, 主流が内側断面で逆流するようになる。

4.1.2 中 α 数の流れ [Ex. II, $\alpha=10$, 図3~6の(b)] α 数が10程度になると, 局所速度間の位相のずれが大きくなるため, 軸方向速度分布は加速の初期から後期にかけて ($\theta=320\sim90^\circ$) 管路中央部でくぼんだ形となる。それにともなって二次流れは複雑に変化する。

最小流速時 ($\theta=270^\circ$), 二次流れの中心は内側断面に生じる逆流領域の x 軸寄りに位置し, 外壁側には二次流れのほとんど存在しない領域ができる。位相が進み加速が始まると ($\theta=315\sim340^\circ$), 内壁側の流体は強い順圧力こう配によって加速され, 流れは急速に反転し順方向に変わる。そして, 軸方向速度の最大値は外壁側に生じる。そのため, 二次流れのよどみ領域にあった外壁側の流体は新たな渦運動を始め, 断面内に

図4 二次流れの流線 (数値解; $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R/a=7.6$)

は一時的に ($\theta \approx 340 \sim 25^\circ$), 二対の渦が誘起される。この期間, $r/a=0.68$, $\theta=150^\circ$ 付近に軸方向速度の大きい領域が現れ, 速度分布は管路中央部で速度が小さ

い冠形状 (凹形) を示す。二対の渦のうち内壁側の渦は, 管路中央部の流体が加速されるにつれて消滅し ($\theta \approx 20 \sim 30^\circ$), 二次流れは外壁側に中心を有する一対の渦パターンとなる。その後, この渦は流量の増加とともに急速に発達しながら, 上下壁に沿って内壁側へ大きく移動する。この二次流れは, 減速期に入ってもしばらく発達を続けるが, $\theta=110^\circ$ 付近から減衰し

(a) 低 α 数の流れ (Ex. I)

(b) 中 α 数の流れ (Ex. II)

(c) 高 α 数の流れ (Ex. III)

図 5 二次流れの速度分布 ($\bar{D} \approx 200$, $\eta \approx 1$, $R/a = 7.6$; —: 数値解; ○: 実験値)

(a) $\bar{D} \approx 200$, $\eta \approx 1$ の流れ

(b) $\bar{D} \approx 200$, $\eta \approx 0.5$ の流れ

(c) $\bar{D} \approx 90$, $\eta \approx 1$ の流れ

図 7 二次流れの運動エネルギー (—: 数値解;: 準定常状態 (数値解); ○, △, □: 実験値)

(a) 低 α 数の流れ (Ex. I)

(b) 中 α 数の流れ (Ex. II)

(c) 高 α 数の流れ (Ex. III)

図 6 二次流れの中心位置の変化 ($\bar{D} \approx 200$, $\eta \approx 1$, $R/a = 7.6$; ○: $\theta = 0^\circ$, △: 90° , □: 180° , ▽: 270° ; 白抜き: 測定値; 黒ぬり, —: 数値解)

始める。そして渦の位置は加速前期までは内側断面に位置し、外側断面には二次流れのよどみ領域が生じる。

4・1・3 高 α 数の流れ [Ex. III, $\alpha \approx 18$, 図3~6の(c)] α 数が大きくなると、逆流を生じる小流速期間 ($\theta \approx 210 \sim 320^\circ$) の壁近傍を除いて、軸方向速度分布の形状は位相によってあまり変わらず、断面内の局所速度はほぼ同位相で変動する。そのため、二次流れのパターンも位相による変化は少なく、その中心は加速後期 ($\theta \approx 0 \sim 90^\circ$) に内壁側から中央上下壁寄りに

移動し、減速期から加速初期にかけて ($\theta \approx 120 \sim 300^\circ$) 逆向きに移動する小さな左回り (上半断面) の揺動を行う。

4・2 二次流れの運動エネルギー 前節で見てきたように、二次流れは位相 (時間) の変化に従って複雑な挙動を示す。そこで、ここでは二次流れの断面平均運動エネルギー (二次流れの強さ) E

$$S = \frac{2a^2}{\rho\nu^2} E = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^1 (u^2 + v^2) r^* dr^* d\theta; r^* = \frac{r}{a}$$

..... (2)

図8 二次流れの写真 ($\bar{D} \approx 200$, $\eta \approx 0.5$, $R/a = 7.6$; 写真の左は管路の内壁側, 右は外壁側)

図9 二次流れの写真 ($\bar{D} \approx 90$, $\eta \approx 1$, $R/a = 7.6$; 写真の左は管路の内壁側, 右は外壁側)

を定義して (ρ : 密度), その時間的推移を調べることにする。図7に同位相における写真4~6枚を用いて, あらかじめ定めた解析格子点位置における二次流れの速度ベクトルを求め⁽¹¹⁾, これを式(2)に代入して算出した運動エネルギーを示す。図には $\bar{D} \approx 200$ で $\eta \approx 0.5$ および $\bar{D} \approx 90$ で $\eta \approx 1$ の場合についても示してある。図中の実線は数値解析の結果, 破線は流れを準定常流とみなした場合の結果を表す。また矢印 ($\leftarrow$) は数値解の一周期間平均値を示す。

高 $\bar{D}$ 数, 高 η の流れ [図7(a)] についてみると, 低 α 数 ($\alpha = 5.4$) では S の値は流量変動, 式(1)とほぼ同位相で変動する。 α 数が増加し, 中程度の α 数 ($\alpha \approx 10$) になると流量変動との間に位相差が生じ, S の値は加速終了期 ($\theta \approx 50 \sim 90^\circ$) に急増し, 減速初期 ($\theta \approx 110^\circ$) に最大値を示す。この強い二次流れのため, S の時間平均値 $\bar{S}$ は同じディーン数 $D (= \bar{D})$ の定常流の S の値より約7割大きくなる。また, S の振幅値 $\tilde{S}$ は主流の運動エネルギーの振幅値の約6%にも達する。さらに α 数が大きくなると ($\alpha \approx 18$), 二次流れのパターンは位相によってあまり変わらなくなるため, 流量変動との間の位相の差は大きくなるが S の値の θ による変化は小さくなり, $\bar{S}$ は定常流とほぼ等しい値を示す。

図7(b)に示すように, 流量比 η が小さくなるにつれて, S に及ぼすウォマスリー数 α の影響は小さく, また S の時間的变化も小さくなり, $\bar{S}$ は定常流の値に近づく。一方, $\bar{D}$ 数が低い場合 [図7(c)], S が最大値を示す α 数は低くなる。

5. 結 言

半径比 $R/a = 7.6$ の曲り管路内の発達した脈動流における二次流れを, 固体トレーサ法によって可視化し,

これをフィルムに収めて二次流れの姿を実験的に明らかにした。またこれらの写真から求めた速度分布, 渦の中心位置, 二次流れの運動エネルギーの結果を数値解析の結果と比較して解析結果の妥当なことを検証するとともに, 二次流れの挙動について考察した。なお, 実験はウォマスリー数 $\alpha \approx 5.5 \sim 18$, 平均ディーン数 $\bar{D} \approx 90, 200$, 流量比 $\eta \approx 0.5$ または1の条件のもとで行った。

計算には京都大学大形計算機を使用した。また本研究の遂行にあたって, 米子工業高等専門学校助教授湯原章氏よりご援助をいただいたこと, 討論提出者植村知正・高橋浩爾両先生より図5中の誤記をご指摘いただいたことを付記し, 併せてここに謝意を表する。

付 録

二次流れパターンに及ぼす流量比 η および平均ディーン数 $\bar{D}$ の影響を示すために, 他の条件下で撮影した写真をここに載せておく (図8, 9)。

文 献

- (1) Lyne, W. H., *J. Fluid Mech.*, 45-1 (1970), 13.
- (2) Smith, F. T., *J. Fluid Mech.*, 71-1 (1975), 15.
- (3) 例えば, Mullin, T. and Greated, C. A., *J. Fluid Mech.*, 98-2 (1980), 397.
- (4) 例えば, Bertelsen, A. F. and Thorsen, L. K., *J. Fluid Mech.*, 118 (1982), 269.
- (5) Munson, B. R., *Phys. Fluids*, 18-12 (1975), 1607.
- (6) Bertelsen, A. F., *J. Fluid Mech.*, 70-3 (1975), 519.
- (7) Talbot, L. and Gong, K. O., *J. Fluid Mech.*, 127 (1983), 1.
- (8) Yearwood, T. L. and Chandran, K. B., *J. Biomech.*, 15-9 (1984), 683.
- (9) 高見・須藤・角田, 機論, 50-452, B (昭59), 926.
- (10) 角田・須藤, 機論, 52-474, B (昭61), 752.
- (11) 角田・須藤・湯原, 機論, 54-498, B (昭62), 297.

討 論

〔質問〕 近 江 和 生〔大阪大学言語文化部〕

曲り管路内の発達した脈動流について、二次流れの挙動を詳細に検討されたことに敬意を表す。実験の技術的な面について、一点伺いたい。

貴実験の可視化では、曲管部の管材に起因する光学ひずみや、曲率部を有限幅の平面光で照射することに伴う視差角の影響などが、実験誤差として考えられるが、精度面での検定をされていたらデータをお示し願いたい。私見では、図5の速度分布に示された実験値が、程度の差はあっても全般的にやや正の側にシフトしている点で、これらの誤差要因(とりわけ後者)が関連するのではと考えるが、いかがか。

〔回答〕 可視化を行うに際し、ご指摘の点やカメラを傾けてセットしたために生じる影響などについては、十分注意を払うとともに補正できるものについてはデータ処理の段階で補正した⁽¹⁾。しかし、図5の速度分布についてのご意見にもあるように、補正が適切

に行われたかどうかについては問題があり、測定精度の問題ともあわせて今後の課題にしたいと考える。

〔質問〕 高 橋 浩 爾〔上智大学理工学部〕

二次流れの流速成分 u は概して小さく、またカメラを z 軸から 4° 傾けてセットしていることと関係して、その相対誤差がかなり大きくなるものと思われる。実際、図5を見ると、重要な意味をもつと思われる壁付近の u の測定値はかなりばらついている。

このことから u の測定精度は大体どの程度であるかご教示願いたい。

〔回答〕 近江氏への回答をご参照いただきたい。

〔質問〕 植 村 知 正〔大阪大学基礎工学部〕

主流速度に対する二次流れの速度はどの程度の割合か簡単にお示し願いたい。

〔回答〕 $R/a=7.6$ の場合、二次流れの速度は主流速度の約1割にあたる。