曲がり管内脈動流に関する研究* (第5報, 入口付近の速度分布)

角 田 勝^{*1}, 須 藤 浩 三^{*2}

Pulsating Flow in Curved Pipes (5th Report, Velocity Distribution in Entrance Region)

Masaru SUMIDA and Kouzou SUDOU

An experimental investigation was made of the pulsating entry flow in curved pipes (curvature ratios of 10 and 30) with fully developed straight profiles. The experiments were conducted on five flow cases under the conditions of the Womersley numbers $\alpha=5.5\sim 18$, the mean Dean numbers $\bar{D}=200, 300$ and the flow rate ratios $\eta=0.5$ and 1. The instantaneous axial velocity distributions were measured by a laser doppler velocimeter at several axial locations from the upper stream tangent to the downstream in the curved pipe. The effects of the nondimensional parameters of $\alpha, \bar{D}, \eta$ and R_c on the flow development are made clear. The velocity distributions change rapidly with the phase at $\Omega=15\sim 30^\circ$ around the curved turn. The flow phenomena occurring in the entrance region of the curved pipes are too complicated for an intermediate Womersley number $\alpha=10$. The flow reversal occurs in the inner half cross-section of the curved pipe, $\Omega\geq 15^\circ$, during the phase of a minimum flow rate for all values of α . The depression in the axial velocity profile appears after the fourth round in the curved pipe for $\alpha=10$. The inlet length of pulsating flow is less than that of steady flow with the same flow rate as the maximum one in pulsating flow.

Key Words: Unsteady Flow, Pulsating Flow, Curved Pipe, Entrance Region, Velocity Distribution, Inlet Length, Secondary Flow, LDV, Pipe Flow

1. 緒 言

曲がった管路内の脈動流れについては、1970年代後半に行われた最初の理論解析的研究⁽¹⁾⁽²⁾以来、数値解析ならびに実験が相次いで行われ、研究は急速な発展をみている。著者らも、これまで曲がり管内の発達した脈動流について数値解析およびLDVによる軸方向速度分布の測定⁽³⁾・圧力測定⁽⁴⁾・二次流れの可視化⁽⁵⁾等の実験的研究を行い、流れを支配する諸パラメータの広い範囲にわたって流れ場の内部機構を調べてきた。その結果、発達した流れの領域における脈動層流の挙動についてはかなりの程度まで明らかにされている。

一方、曲がり管路入口付近の流れについての知識は、熱交換器や流体機器の設計にとって欠かせないものであるとともに、この種の流れが動脈内の血液流れとも関係が深いことから、近年注目を集めている。しかし、この方面の研究は着手されたばかりであり、研究例は少ない^{(6)~(15)}。一般に曲がり管路の助走流れについては、流入速度の条件が(i)十分発達した直管内流れの速度分布をしている場合と、(ii)一様な速度分布

の場合の二とおりが扱われている。脈動層流についてみると、前者については杉山ら⁽⁶⁾、成瀬ら⁽⁷⁾、Rindtら⁽⁸⁾、Thirietら⁽⁹⁾、Swansonら⁽¹⁰⁾の研究が、後者についてはSingh⁽¹¹⁾、Chandranら⁽¹²⁾⁽¹³⁾、Talbotら⁽¹⁴⁾、成瀬ら⁽¹⁵⁾の研究がある。ここでは、本研究に関する流入条件(i)についての研究状況を概観する。研究は有限要素法による数値解析⁽⁸⁾⁽⁹⁾あるいはLDV測定^{(6)~(10)}によって行われており、ともに曲がりの転向角が 90° ⁽⁸⁾⁽⁹⁾または 180° のU字形⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾の曲がり管について、比較的低 α 数⁽⁶⁾⁽⁹⁾で流量比の小さい⁽⁶⁾⁽⁸⁾流れを対象とした、あるいは限られた条件下での流れ⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾について行われたものである。そのため、曲がり管内入口領域の脈動流れの挙動については必ずしも情報が十分とはいえず、未解明な点が多い。また、発達した流れの領域で見いだされている脈動流特有のフローパターン⁽³⁾⁽⁵⁾が管軸に沿って形成されていく様子も明らかにされておらず、これを明らかにするためにはさらに曲がりの転向角の大きい管路での流れの発達過程を調べる必要がある。

そこで、本研究では流入条件(i)での曲がり管内の脈動入口流れを調べるために、 $250d$ の直管部を上流側に接続した曲がり転向角が 540° の曲がり管内(半径比 $R_c=10$ および30)に、ウォマスリイ数 $\alpha=5.5\sim 18$,

* 原稿受付 1994年11月17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 東広島市鏡山 1-4-1)。

平均ディーン数 $\bar{D}=200, 300$, 流量比 $\eta=0.5, 1$ なる正弦状の脈動層流をつくり, 管軸方向速度分布をLDVで測定した。そして, これらの結果から曲がり管内脈動流れの曲がり開始点上流からの管軸に沿う発達過程を明らかにするとともに, 速度分布形状の推移に及ぼす諸パラメータの影響を調べ, 併せて助走長さについて検討した。

2. おもな記号(図2参照)

a : 管半径 $=d/2$

D : ディーン数 $=Re(a/R)^{1/2}$

R : 曲がり管中心軸の曲率半径

R_c : 曲がり管の曲率半径比 $=R/a$

Re : レイノルズ数 $=2aw_m/\nu$ (ν : 流体の動粘度)

u, v, w : x, y, z 方向の速度成分

w_m : 瞬時の断面平均流速

x, y, z : 直交曲線座標系 (z : 曲がり管入口から管中心に沿った管軸方向距離)

α : ウォマスリイ数(無次元振動数) $=a(\omega/\nu)^{1/2}$

η : 流量比 $=\bar{w}_m/\bar{w}_m$

$\Theta=\omega t$ (t : 時間, ω : 角振動数)

ϕ : 位相差

Ω : 曲がりの転向角

添字

—, ~: 時間平均値, 振幅値

3. 実験装置および方法

実験装置の概要を図1に示す。実験装置は前報⁽³⁾と

図1 実験装置概略図

図2 管路と座標系

同様, 脈動流発生装置, 供試管, 流速測定装置から構成されているので, 以下では供試管と流速測定装置についてのみ述べる。作動流体は水である。

供試管には, 内径 $d(=2a)=10.0$ mm, 管中心軸の曲率半径 $R=50.0$ mm [曲率半径比 $R_c(=R/a)=10.0$], ピッチ角約 2.8° のアクリル製管⁽⁴⁾ と $d=10.0$ mm, $R=150$ mm ($R_c=30$), ピッチ角約 0.9° のガラス管を用いた(図2)。これらの曲がりの転向角は 540° で, 管路の上流側には 2500 mm, 下流側には 600 mm のガラス製直管が接続されている。供試管は, レーザビームに及ぼす管路壁の屈折の影響を和らげるために水槽内に入れられている。

速度の計測には, レーザドップラー流速計(日本科学工業製: 後方散乱型)を用いた。LDV データは, パーソナルコンピュータで一周期当たり $300\sim 500$ 個のサンプリング数で $3\sim 5$ 周期採取して重ね合わせた。このときの各周期の同一位相時における速度データのばらつきは, 2% 以下であった。測定部は, 管路の曲がり開始点の上流 $15d$ ($z=-15d$ と記述する) より曲がりの転向角 $\Omega=250^\circ$ までの区間に 11 箇所設け, 各測定位置において管軸と曲率中心を含む水平面 (x - z 軸面) および鉛直面 (y - z 軸面) の管軸方向速度を求めた。

4. 結果と考察

曲がり管の上流で十分発達した直管内脈動層流が生

表1 実験条件

Flow Case	R_c	α	$\bar{D}$	η
I	10	10.0	200	1.0
II	10	5.5	200	1.0
III	10	18.0	200	1.0
IV	10	10.0	200	0.5
V	10	10.0	300	1.0
VI	30	10.0	200	1.0

図3 上流直管部 ($z=-15d$) における速度と位相差の分布 ($\alpha=10$, $\bar{Re}=632$, $\eta=1$)
(—: 直管内流れの厳密解⁽¹⁶⁾)

図4 中 α 数の x 軸上の軸方向速度分布 (Case I : $\alpha=10$, $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)
(---: 発達した流れ)

図5 中 α 数の y 軸上の軸方向速度分布
(Case I : $\alpha=10$, $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)

じているかどうかを調べるために、 $z=-15d$ の位置で速度分布を測定した。その一例を図3に示す。図3は、断面平均流速 w_m

$$w_m = \bar{w}_m + \bar{w}_m \sin \Theta \dots \dots \dots (1)$$

に対して、瞬時の局所速度 w を

$$w = \bar{w} + \sum_{i=1}^n \bar{w}_i \sin(i\Theta + \phi_i) \dots \dots \dots (2)$$

図6 中 α 数の x 軸上の二次流れの速度分布
(Case I : $\alpha=10$, $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)

と表示し⁽³⁾、平均成分 $\bar{w}$ と変動成分 $\bar{w}_1$ および位相差 ϕ_1 について示したものである。実験結果は、図3中の実線で示される直管内脈動流の厳密解⁽¹⁶⁾とよく一致し、直管部で十分発達した脈動流が曲がり管内に流入していることがわかる。

実験は、発達した曲がり管内脈動流が特異な挙動⁽³⁾⁽⁵⁾(逆流現象や管中央部における速度分布のくぼみ現象)を示す流動条件(ウォマスリイ数 $\alpha=10$ 、平均ディーン数 $\bar{D}=200$ 、流量比 $\eta=1$)をもとに、表1に示す範囲(振動数 0.19~2.1 Hz、断面平均流速の時間平均値 $\bar{w}_m \div 6.3 \sim 11.2$ cm/s、振幅値 $\bar{w}_m \div 3.2 \sim 11.2$ cm/s)で行った。なお、同一条件下における無次元パラメータの設定誤差は、 α 数については1%、 $\bar{D}$ 数および η については2.1%以下である。

4・1 瞬時速度の管軸に沿う変化 図4~12に速度に関する測定結果を示す。速度 w は断面平均流速の最大値 $(\bar{w}_m + \bar{w}_m)$ で除した形で表示してある。縦軸は

x 軸上あるいは y 軸上の位置を表し、図の上端は前者の場合外壁に後者では上壁に当たり、直管部においてはそれぞれに連なる壁側を意味する。図示は、一周期中の代表的な四つの位相 ($\theta=0, 90, 180, 270^\circ$) について行った。図4~12中の実線は測定値を結んだものであり、破線は発達した直管内脈動流の厳密解⁽¹⁶⁾ または曲がり管内脈動流の数値解析の結果⁽⁹⁾ である。

ここでは、まず中程度のウォマスリイ数 ($\alpha=10$) の流れ (Case I, 図4~6) について管軸方向の流れの発達過程を考察する。 $\alpha=10$ では局所速度間の位相のずれが著しく、管路中央部での流体速度は圧力変動にあわせて Ω 方向に増減を繰返すが、内壁近傍では位相のずれが大きく速度こう配の変動は大きくなる。流れが加速され始めると ($\theta=270\sim 300^\circ$)、曲がり入口部の内壁側の流体には一周期中で最も強い順圧力こう配が加わるため、内側断面の流体は大きく加速されて、逆流していた流れも加速中期 ($\theta\approx 0^\circ$) には順方向の流れとなる。他方、加速前期 ($\theta=270\sim 0^\circ$)、管路中央部の大きい速度をもった流体は、曲がり部流入後遠心力を受けて外壁側へ移動し始め ($\Omega=0\sim 15^\circ$)、内壁側の流体の加速と相まって $\Omega=35^\circ$ の位置における速度は加速中期 ($\theta=0^\circ$) には x 軸上および y 軸上ではほぼ平坦な分布形となる。このとき入口直後の $\Omega=15^\circ$ における外壁側へ向かう二次流れの速度は、順方向速度の大きい管路中央部から外側断面で大きい (図6, $\theta=270, 0^\circ$)。さらに下流では、遠心力の作用によって中央部の流体が外側に移動する一方、内側断面には前の周期に強い遠心力を受けて外側に輸送された運動量の大きい流体が側壁に沿って外側壁から移動してくることによって、軸方向速度の極大値が外壁側と内壁側に生じるようになる ($\Omega=90\sim 180^\circ$)。このようにして、加速中期 ($\theta\approx 0^\circ$) には管路中央部で速度が小さい冠形状 (凹形) の速度分布が形成され、次第に発達した曲がり管内流れに移行する。加速がさらに進んで最大流量時 ($\Omega=90^\circ$) になると、速度分布は入口直後まで ($\Omega=15^\circ$) は直管部と同様中央部でふくらんだ形状を示す。しかし、この管路中央部の速度の大きい流体には、曲がり部流入直後強い遠心力が働いて主流速度 ($\bar{w}_m + \bar{w}_m$) の約3割にも達する強い二次流れが生じる (図6) ため、下流の $\Omega=35\sim 60^\circ$ の位置では最大軸方向速度の位置が管路中央やや内壁寄りから外壁側へ変わり、 y 軸上の分布は中央部から平坦化する。 $\theta=0^\circ$ の位相時にみられたくぼみ現象は $\Omega=90^\circ$ より下流では内壁側で極大速度をもつ流体が遠心力によって管路中央部へ運ばれることと流量が増加したことによって弱まり、 x 軸上の速度は管路中央から外壁寄りで大き

い分布を、 y 軸上では平坦な形状を示すようになる ($\Omega=90\sim 180^\circ$)。減速中期 ($\theta=180^\circ$) には、曲がり入口近傍の流れは直管内と同様な速度分布形を示す ($\Omega=0\sim 15^\circ$)。しかし、その下流 ($\Omega=35\sim 180^\circ$) では運動量の大きい中央部の流体が遠心力の作用で外壁側へ押しさらされ、かわって上下壁の運動量の小さい流体が内壁側へ移動し始める。そこへ逆圧力こう配が作用するので、内側断面で減速が進み、内壁近傍で逆流が発生する。また y 軸上の分布は中央部でくぼむが、その度合は外壁側へ向か二次流れの速度の著しい $\Omega=35^\circ$ で大きい。さらに減速されて最小流量時 ($\theta=270^\circ$) になると、内壁近傍の負方向に向かう速度はいっそう強まり、逆流領域は曲がり部では管中心部まで広がる。なお、この中程度の α 数におけるほぼ発達した流れでは、二次流れが上あるいは下側の半断面内を周回する周期と主流の変動周期とがほぼ同じになり、加速後期から減速後期にかけて二次流れによって内側断面に運ばれた運動量の大きい流体がちょうど加速期に外壁側へ輸送されることになる。このため、中 α 数の流れでは他の α 数の場合より一周期を通じて強い二次流れが誘引される⁽⁵⁾。

変動流量を小さくすると [$\eta=0.5$ (Case IV, 図7)], 平均流の影響が大きくなって曲がり入口付近の様子は定常流⁽¹⁷⁾ に類似してくる。すなわち、最小流量時 ($\theta=270^\circ$) の曲がり開始部から下流における内側断面の逆流は、内壁の近傍と一區間 ($\Omega=35^\circ$) の管中心部に限られ、 $\Omega=35^\circ$ では凹凸のある速度分布形状を示す。また、加速中期 ($\theta=0^\circ$) $\Omega=35\sim 60^\circ$ の区間で、Case I の $\Omega\approx 90^\circ$ でみられたのと同様に軸方向速度分布にくぼみが形成される。以降の領域では、一周期中同程度の遠心力が作用するので外壁側で速度の大きいDean形の分布となり、発達した曲がり流れへの移行は早い。

次に流れの発達過程に及ぼす α 数の影響を調べる。

図7 低流量比の x 軸上の軸方向速度分布
 (Case IV: $\alpha=10$, $\bar{D}=200$, $\eta=0.5$, $R_c=10$)

図 8 低 α 数の x 軸上の軸方向速度分布 (Case II: $\alpha=5.5$, $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)
(---: 発達した流れ)

図 9 低 α 数の y 軸上の軸方向速度分布
(Case II: $\alpha=5.5$, $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)

α 数が低い場合 (Case II, $\alpha=5.5$, 図 8, 9), 流れの非定常性に基づく慣性力は弱まり粘性力が相対的に大きくなるので, 流れの発達の様子は一部期間を除いて定常流の発達過程に類似している。すなわち, x 軸上での速度の大きい位置は Ω に沿って次第に中央部から外側断面に移り, 速度こう配は内壁側で緩やかに外壁側で大きくなる。 $\alpha=10$ の場合に比べて逆圧力こう配

の値は小さくなりその作用する期間も短くなるため, 減速終了時 ($\Theta=270^\circ$) における曲がり入口下流での逆流の速度は小さくなる。また, 周期が長く流れが準定常的であることから, 加速中期 ($\Theta=0^\circ$) の速度分布に二次流れの輸送効果がほとんどみられず, 各軸上の速度分布は流路全域にわたってほぼ平坦な形状を示し, 顕著なくぼみ現象は発生しない。最大流量時から減速初期にかけては ($\Theta=90^\circ\sim 180^\circ$), 高速流体が定常入口流れと同様外壁側から上下壁に沿って内壁側へ回り込むので, x 軸上の分布は外壁側で大きく, y 軸上の分布は凹形となる ($\Omega=35^\circ\sim 90^\circ$)。それより下流では, 最大速度の位置が外壁側に寄った Dean 形に近い分布形を示して発達する ($\Omega=145^\circ\sim 180^\circ$)。

α 数を高めると (Case III, $\alpha=18$, 図 10, 11), 非定常慣性力が支配的となるので, 速度分布の形状には位置 Ω および位相 Θ による差があまりみられなくなり, 速度分布の変化は低・中 α 数の場合よりなめらかとなる。断面中央部に最大速度をもつ流体が曲がり部に流入すると, $\Omega=15^\circ$ の一部期間 [減速初期 ($\Theta=90^\circ\sim 180^\circ$)] を除いて最大速度の位置は Ω に沿って外壁側に移動し, その位置は一周期中外壁側に保持される ($\Omega=35^\circ\sim 180^\circ$)。 x 軸上での逆流は流入直後の外壁近傍 ($\Omega=15^\circ$) でもみられるが, $\Omega=35^\circ$ の加速後期 ($\Theta=0^\circ\sim 90^\circ$) に y 軸上の速度分布にやや大きいくぼみがみられる程度で, 発達した流れへの移行は低・中 α 数の場合より早い。

図 10 高 α 数の x 軸上の軸方向速度分布 (Case III: $\alpha=18$, $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)
(---: 発達した流れ)

図 11 高 α 数の y 軸上の軸方向速度分布
(Case III: $\alpha=18$, $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)

図 12 大きい半径比における x 軸上の軸方向速度分布
(Case VI: $\alpha=10$, $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=30$)

従前の研究^{(6)~(10)}は曲がりの比較的小さい $R_c \leq 10$ の管路を対象として行われている。そこで、曲がりのゆるやかな $R_c=30$ の結果 (Case VI, 図 12) を図示し、半径比の影響を検討してみる。速度分布の形状は曲率半径の小さい $R_c=10$ の流れとおおむね類似して推移する。ただし、類似した流動パターンは R_c が大きい管路ほど上流側、すなわち小さい Ω の位置で見られる。したがって、 R_c の大きい管路ほど発達した曲がり流れは小さい転向角 Ω で達成されることになるが、管軸長さでみるとレイノルズ数が大きいこともあって距離としては大きくなる。

4.2 速度分布の形状を決める $\bar{w}$, $\bar{w}_i$ と ϕ_i の変化

これまで述べてきたように、速度分布の形状は曲がり部へ流入すると急変し、位相によって異なる複雑な

過程を経て発達した流れの形状に近づいていく。そこで、瞬時速度 w を式 (2) を用いて平均成分 $\bar{w}$ と変動成分 $\bar{w}_i$ に分解し、 $\bar{w}$, $\bar{w}_i$ および位相差 ϕ_i が曲がり入口付近での速度分布形状にどのように寄与しているかを調べることにする⁽³⁾。図 13~15 に平均値 $\bar{w}/\bar{w}_m$ 振幅値 $\bar{w}_i/\bar{w}_m$ および位相差 ϕ_i の基本波成分 ($i=1$) についての結果の代表例を示す (添字 1 は省略)。図 13~15 中の実線は測定値を結んだ線である。

$\bar{w}/\bar{w}_m$ の分布 (図 13) は、 α 数にあまり関係なく x 軸上では最大値の位置が管中心部から Ω に沿って外壁側に移り、 y 軸上では $\Omega=35^\circ \sim 60^\circ$ 付近でくぼむ凹形となる。これらの結果は、断面平均流速が $\bar{w}_m$ の放物形速度分布をもつ定常流れが曲がり管内に流入する場合の発達過程⁽¹⁷⁾と同様な分布形を示しており、 $\bar{w}$ の

発達過程への α 数(および η)の影響は小さい。したがって、曲がり入口付近の速度分布形状の α 数による違いは、主として変動成分によっていることがわかる。

変動成分 $\bar{w}/\bar{w}_m$ の x 軸上の分布(図14)は、曲がり開始点付近の $\Omega=0\sim15^\circ$ では内壁側で大きい値を示しふくらむ。しかし、 $\Omega=35^\circ$ 付近になると、低・中 α 数では最大値をとる位置は中央やや外壁側に移動する。その後は低 α 数では $\bar{w}/\bar{w}_m$ の分布と同様な Dean 形分布へ、中 α 数では徐々に内側断面において大きい分布形に変わる($\Omega=60\sim90^\circ$)。高 α 数では時間変動に基づく慣性効果が大きいので、曲がり部流入後の形状

図13 速度の時間平均値 $\bar{w}$ の管軸に沿う変化
(Case I : $\alpha=10$, $\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)

(a) x 軸上

(b) y 軸上

図14 速度の振幅値 $\bar{w}$ の管軸に沿う変化
($\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)

のくずれは小さく($\Omega=15\sim35^\circ$)、管路中央部で平坦なプラグ流形の分布はすぐ形成し直されるが、内壁近傍で最大値をもつようになる($\Omega=60\sim90^\circ$)。一方、 y 軸上の分布については α 数による差は曲がり部では小さくなる($\Omega=15\sim90^\circ$)。すなわち、直管部で α 数の高いほどアンニュール形であった $\bar{w}$ の分布は、入口近傍ではいったん中央部のふくらんだ $\bar{w}$ に近い形状となるが($\Omega=15^\circ$)、その後は曲がり流れ特有の中央部で平坦な形となる($\Omega=35\sim90^\circ$)。

位相差 ϕ (図15)は、低・中 α 数では曲がり部流入後外側断面で負、内側断面で正の値に変化し($\Omega=15\sim60^\circ$)、 $\Omega=35\sim60^\circ$ において管中心部では位相が進み上下壁側で遅れる分布形となって断面内での速度変動の間の位相差はこの区間で大きい。高 α 数では曲がり開始点下流中央寄りの付近で位相がやや遅れるものの($\Omega=15\sim60^\circ$)、その後は断面内でほぼ一定の負の値を示す。以上のことから、曲がり部での逆流は $\bar{w} \geq \bar{w}$ となる領域で発生し、速度分布が冠形状となるくぼみ現象は速度変動と位相進みが内側断面で著しい中 α 数のほぼ発達した領域で現れることがわかる。

4.3 助走長さ 上述の $\bar{w}$, $\bar{w}$ および ϕ の値を用いて助走長さを評価しよう。すなわち、これらの値が発達した曲がり流れの教値解⁽³⁾と各軸上において平

(a) x 軸上

(b) y 軸上

図15 位相差 ϕ の管軸に沿う変化
($\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$)

図 16 助走長さ

均 5% 以内で一致したとみなせる位置までの距離を助走距離とみなす⁽¹⁸⁾。その結果を図 16 に示す。図 16 中の実線は著者らの結果 ($\bar{D}=200$, $\eta=1$, $R_c=10$) を結んだものである。図 16 中には諸家の結果⁽¹⁰⁾⁽¹⁷⁾ も示しておいた。脈動流の助走長さは、 α 数の中程度の流れが最も長く、高 α 数になるほど短くなるようである。また、助走長さは脈動流における断面平均流速の最大値 ($\bar{w}_m + \bar{w}_m$) と等しい平均流速で流入する定常流のもの (図 16 の $\triangle$) より短く、 α 数が大きくなると $\bar{w}_m$ を有する定常流の助走長さ (図 16 中の $\blacktriangle$) に近い値を示すようになる。したがって、非定常流では振動流の場合⁽¹⁸⁾ も含めて断面平均流速の最大値で見積もった定常流の助走終了点より下流では十分発達しているとみなすことができる⁽³⁾⁽⁴⁾。

5. 結 言

曲率半径比が 10 および 30 の曲がり管内入口脈動流の速度を LDV で測定し、速度分布の管軸に沿う変化を調べた。その結果、以下の結論を得た。

(1) 速度分布は、管路の転向角 $\Omega=15\sim35^\circ$ 付近で大きく変化し、管軸に沿う発達過程は中程度の α 数の流れが最も複雑である。

(2) 最小流量時 ($\Omega=270^\circ$) に直管部では管壁近傍で逆流が発生するが、曲がり部流入後 ($\Omega\geq 15^\circ$) は α 数にかかわらず内側断面で生じる。また加速中期 ($\Omega=0^\circ$) の速度分布のくぼみ現象は、中 α 数の $\Omega=90^\circ$ 下流の曲がり部で出現する。これらの逆流・くぼみ現

象は、流量比 η を小さくすると、あるいは $\bar{D}$ 数を増すと弱まり、流れの発達過程は定常流の場合に類似してくる。さらに、両現象が出現する曲がり部の転向角は、 R_c の大きい管路では小さくなる。

(3) 速度分布形状の Ω に沿う推移は、主として速度の変動成分 $\bar{w}$ と位相差 ϕ の分布の違いによって異なり、流れの推移の違いに及ぼす平均成分 $\bar{w}$ の影響は少ない。

(4) 脈動流の助走長さは、断面平均流速の最大値を有する定常流のそれより短い、中 α 数の流れで最も長く、高 α 数では断面平均流速の時間平均値をもつ定常流の場合に近づく。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費の補助によって行われたものである。また、実験装置の製作には米子工業高等専門学校 六宮光郎氏の助力をいただいた。併せてここに感謝を表す。

文 献

- (1) Smith, F. T., *J. Fluid Mech.*, **71**-1(1975), 15.
- (2) Simon, H. A., Chang, M. H. and Chow, J. C. F., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **99**(1977), 590.
- (3) 角田・須藤, 機論, **52**-474, B(1986), 752.
- (4) 角田・須藤・高見, 機論, **50**-452, B(1984), 935.
- (5) 角田・須藤・和田, 機論, **54**-505, B(1988), 2375.
- (6) 杉山・川野・新見, 機論, **51**-466, B(1985), 1757.
- (7) 成瀬・仁科・石原・谷下, 機論, **57**-541, B(1991), 3018.
- (8) Rindt, C. C. M., Steenhoven, A. A., van, Janssen, J. D. and Vossers, G., *J. Fluid Mech.*, **226**(1991), 445.
- (9) Thiriet, J. M. R., Graham and Issa, R. I., *J. Phys.*, **III**, **2**(1992), 995.
- (10) Swanson, C. J., Stalp, S. R. and Donnelly, R. J., *J. Fluid Mech.*, **256**(1993), 69.
- (11) Singh, M. P., Sinha, P. C. and Aggarwal, M., *J. Fluid Mech.*, **87**-1(1978), 97.
- (12) Chandran, K. B., Yearwood, T. L. and Wieting, D. W., *J. Biomech.*, **12**(1979), 793.
- (13) Chandran, K. B. and Yearwood, T. L., *J. Fluid Mech.*, **111**(1981), 59.
- (14) Talbot, L. and Gong, K. O., *J. Fluid Mech.*, **127**(1983), 1.
- (15) 成瀬・仁科・久下沼・谷下, 機論, **56**-532, B(1990), 3625.
- (16) Uchida, S., *Z. Angew. Math. Phys.*, **7**(1956), 403.
- (17) Austin, L. R. and Seader, J. D., *AIChE J.*, **20**-4(1974), 820.
- (18) 角田・須藤, 機論, **60**-569, B(1994), 63.