テーパ曲がり管内の脈動流れ*

角 田 勝^{*1}

Pulsating Flow through a Tapered Curved Tube

Masaru SUMIDA^{*2}^{*2} Graduate School of Engineering, Hiroshima University,
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

An experimental investigation of pulsating flow through a tapered curved tube is presented to study the blood flow in the aorta. The experiments are performed in a U-tube with the curvature radius ratio of 3.5 and including 50 percent reduction in the cross-sectional area between the inlet and the exit of the curved section. Laser Doppler velocity measurements are made for the Womersley number of 10, the mean Dean number of 400 and the flow rate ratio of 1. Flow visualizations are used to investigate qualitatively the nature of the flow, complementing the quantitative LDV measurements. The velocity profiles for the steady and pulsating flows in the tapered U-tube are compared with the corresponding results in a U-tube having a uniform cross-section. The striking effects of the tapering on the flow are exerted on the axial velocity profiles in the section from the latter half of the bend to the neighborhood of the inlet of a downstream tangent. A depression phenomena in the velocity profile appears at the position of smaller bend angle Ω and the degree of the depression against the cross-sectional averaged velocity is reduced. Strong secondary fluid motions occur near the bend exit and that leads a velocity profile to depress weakly in the downstream tangent. The value of β_m which indicates a uniformity in the velocity profiles decreases with an increase of Ω , but it rapidly increases just after the bend exit.

Key Words: Unsteady Flow, Pulsating Flow, Tapered Curved Tube, Velocity Distribution, LDV, Pipe Flow

1. 緒 言

曲がった管路内の非定常流に関する研究は、この種の流れが生理学や医工学の流動現象とかわりがあることから、特に血液流れに関連したものが多く、その方面からの研究が進展している。すなわち、これらの研究の多くは、動脈流れをモデル化して種々の条件のもとで実験を行い、複雑な生体内の現象の解明を試みようとするものである。大動脈は分岐を含む複雑な弾性曲がり流路で、内部の流れは非ニュートン性を示す間欠的な非定常流である。これまでの研究に用いられているモデルを見ると、生理学者の関心は、現在管路については大動脈弓モデル管、流量変化については脈動流または生理学的に変動する流れにあるようである。流体力学者はこのような曲がった管路内の非定常流れを工業的な側面からもとらえ、基本的に断面形状が一定で曲率半径比 R_c が小さい ($R_c \leq 4$) 180° の曲がり部をもつ U 字形管内の脈動流れとしてまず指向している⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

このような研究状況を踏まえ、著者はこれまで $4 \leq R_c \leq 30$ なる曲がり管内の脈動流について種々の条件下で実験を行い、流動機構を詳細に解明してきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。その結果、速度分布の曲がりの転向角 Ω に沿う推移におけるウォマスリイ数 α による違いは、おもに変動成分の分布の違いによっており、その形状は中程度の α 数の流れが最も複雑であるということを見いだした⁽⁶⁾⁽⁷⁾。したがって、曲がり管ならびに U 字形管内の脈動層流の挙動についてはある程度まで明らかにされたといえる。ところで、これらの成果を前述の生理学者が求める大脈動流れとりわけ関心の高い大動脈弓における流れに適用するためには、さらに分岐のあるもしくは曲がり部内の管断面積が Ω に沿って漸次減少する管内の脈動流れについて流動様式を調べておくことが望まれる⁽⁸⁾。しかし、テーパ曲管内の脈動流れを扱った研究は少なく、Yearwood ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ と Chandran ら⁽¹¹⁾ の 3 例にすぎない。前者⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ では、曲がりの入口と出口の管断面積減少率が 46% の大動脈弓モデル管路内に一様な速度分布で流入する生理学的流量変動流れについて、後者⁽¹¹⁾ では管断面積減少率が 23% の弾性管壁の変形状態が調べられている。このように、十分発達した直管内流れが流入するテーパ曲管内の非定常流れの内部挙動についてはまったく

* 原稿受付 2002 年 4 月 17 日。

^{*1} 正員、広島大学大学院工学研究科(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)。

E-mail: sumida@mec.hiroshima-u.ac.jp

扱われておらず、大動脈流れの解明のためにも欠かせない急務な課題の一つとなっている。

そこで、本研究では大動脈内の血液流れのようすを知る基礎資料を得るために、大動脈の湾曲部を $R_c=3.5$ 、入口と出口の管断面積減少率が50%のテーパ曲管とみなしたU字形管路内の脈動流について、その流れ特性を実験的に調べた。すなわち、まずウォマスリイ数 $\alpha=5.5\sim 18$ の流れについて水素気泡法による流速プロフィルの観察を行ってU字管路全体の流れの概況をとらえたうえで、中程度のウォマスリイ数の流れにおける速度分布をレーザドップラー流速計によって測定するとともに、曲がり部については二次流れを可視化し写真撮影した。そして、これらの結果を断面形状が一定でほぼ同じ曲率半径比をもつU字形管内流れの結果と比較しつつ、脈動流れに及ぼすテーパの影響について考察した。

2. おもな記号(図2参照)

- d : 管路の内径 ($=2a$)
- D : ディーン数 $=Re/\sqrt{R_c}$
- Q : 流量
- R : 曲がり管中心軸の曲率半径
- R_c : 曲率半径比 $=R/a_1$
- Re : レイノルズ数 $=d_1 W_1/\nu$ (ν : 動粘度)
- u, v, w : $[x, y, \Omega(z_1, z_2)]$ 方向の速度成分
- W : 瞬時の断面平均流速
- $x, y, \Omega(z_1, z_2)$: 座標系 (Ω : 曲がりの転向角)
- α : ウォマスリイ数 $=a_1\sqrt{\omega/\nu}$
- η : 流量比 $=W_o/W_m$
- θ : 位相角 $=\omega t$ (t : 時間, ω : 角振動数)
- 添 字
- m : 時間平均値
- o : 振幅値
- 1, 2: 上流直管部, 下流直管部

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置および供試管路 実験装置の概略を図1に示す。装置の主要部は流れの駆動装置、供試管路、速度計測・可視化装置部から構成されている^{(6),(7)}。作動流体の水は、ピストンによる振動流量とポンプからの定常流量が調節されて所定の脈動流となり、供試管路内に流入する。すなわち、

$$Q = Q_m + Q_o \sin \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

なる時間的に変動する流量が供試管路内に実現されている。

供試管路の形状ならびに座標系を図2に示す。テーパU字形管路は透明ガラス管製で、入口部で内径 $d_1=23.1$ mm、出口部で $d_2=16.3$ mm、管中心軸の曲率半径 $R=40$ mm である。これらの諸元は、血液循環器系に関する解説⁽¹²⁾⁽¹³⁾ ならびに大動脈(弓)に関する諸家のモデル^{(2)(3)(5)(9)~(11)(14)(15)} に基づいており、曲がり部の入口と出口間の断面積の減少率は50%、曲率半径比 R_c は3.5である。また、比較のために断面形状が変わらずテーパ曲管とほぼ同程度の曲がりをもつ $d=17.6$ mm, $R=32$ mm ($R_c=3.6$) のU字形管路を併せて使用した。なお、これらの曲がり部の上流側には約2000 mm、下流側には約1800 mmの直管が接続されており、十分発達した直管内流れが曲がり部に流入する。

3.2 速度の計測および可視化の方法 速度の計測にはレーザドップラー流速計を用い⁽⁶⁾、曲がり開始点の上流 $z_1=-7d_1$ から曲がりの終了点 ($\Omega=180^\circ$) の

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.2 Configuration of tapered curved tube (upper figure) and coordinate system (lower figure)

Fig. 3 Axial velocity profiles for steady flow through tapered U-tube ($D=400$).
Upper and lower figures show the profiles on the x and the y axes, respectively

下流 $z_2=30d_2$ までの 15 箇所の位置において主流の管軸方向速度 w と二次流れの外壁方向速度 u を求めた。このとき、 w については上半断面内の 72 点、 u については x, y 軸上について測定を行った。なお、上述の速度計測に先立って、U 字管路全体にわたる流れ場の概況を把握するために、水素気泡法⁽⁷⁾によって x, y 軸上の流速プロファイルを直接観察・カメラ撮影した。さらに、曲がり部内については横断面内に誘起される二次流れを固体トレーサ法⁽¹⁶⁾によって可視化した。

4. 結果と考察

4.1 流れの条件 人の大動脈内の流れはウォマスリイ数 α とレイノルズ数 Re で記述され⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾、広範な値 ($\alpha \approx 8 \sim 21$, $Re \approx 1\,000 \sim 8\,000$) が知られている。本研究では、大動脈弓モデル管内流れとして従来行われている諸家の値⁽²⁾⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾を参考に、平均ディーン数 $D_m=400$ (平均レイノルズ数 $Re_m=750$)、 $\alpha=5.5 \sim 18$ 、流量比 $\eta=1$ の下で実験を行った。

以下では、断面形状が一定な曲がり管内入口脈動流において複雑な速度分布が出現した流れ⁽⁶⁾⁽⁷⁾との比較も考慮し、 $\alpha=10$ の結果を取り上げて考察する。

4.2 定常な流れ テーパ U 字形管路内の定常流れに関する問題については、2 例⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾の実験的研究がある。Kang ら⁽¹⁴⁾は曲がりの入口と出口間における圧力降下を求め、Yearwood ら⁽⁹⁾は管中心軸が同一平面内にあるモデル流路について速度分布を測定している。このように、管中心軸が同一平面内にあるテーパ曲管内の速度分布に関する研究例は定常流においてさえも見当たらない。そこで、脈動流れを検討するのに先立って、まずは定常流の場合について調べておく。

図 3 に、脈動流の時間平均流量と同じ流量を有する定常流 ($D=400$) の x, y 軸上の管軸方向速度分布を

(a) Tapered U-tube

(b) U-tube with a uniform cross-section

Fig. 4 Velocity profiles on the x axis visualized by hydrogen bubble method for steady flow ($D=400$)

示す。速度 w は、上流直管部における断面平均流速 W_1 で除して表示してある。図 4 は、これらの軸方向速度の管軸に沿う推移を確認するために、水素気泡法によって流速プロファイルを目視し、あわせて断面形状が一定な U 字形管内の流れと比較したものである。

テーパの影響は、曲がり部後半の区間から出口付近における内側断面で顕著に現れている。テーパ曲管の場合、管断面の狭まりによって流速が増して管軸方向への圧力降下が大きくなるとともに、流体に作用する遠心力は曲がり部の下流ほど強くなる。その結果、内外壁上の圧力差は曲がりの転向角 Ω に比例して大きくなり、 Ω に沿う圧力はテーパのない曲管と比べて入口直後の外壁側で上昇の度合いが弱まり、内壁側で降下が大きくなる。したがって、曲がり入口近傍 ($\Omega \approx$

Fig. 5 Outward velocity profiles on the x axis for steady flow through tapered U-tube ($D=400$)

Fig. 6 Secondary flow motion visualized by tracer method for steady flow through tapered U-tube ($D=400$, $\Omega=90^\circ$)

$0 \sim 15^\circ$)における主流の内壁側への偏りはテーパのない曲管よりも小さく、中央部の高速流体は遠心力の作用を受けてやや早くから外壁側へ移動する($\Omega \approx 20 \sim 50^\circ$, 図5の u の分布参照)。他方、内壁側の流体は大きい圧力降下によって管軸方向に加速され($\Omega \approx 0 \sim 90^\circ$), $\Omega = 50^\circ$ では速度分布にくぼみ現象が現れる。そして、曲がり部後半の区間($\Omega \approx 100 \sim 150^\circ$)では内壁側の極大速度は外壁側のそれと同程度の値を示すようになる。この間横断面内に誘起される二次流れ運動は、図6の可視化写真($\Omega = 90^\circ$)ならびに u の分布(図5)が示すように内側断面に偏り、管路中央部で遠心力の作用が分断された外側断面にはよどみ領域が広がる。また、内側断面における強い二次流れ運動と軸方向への増速の結果、軸方向運動量の大きい流体が断面中央部へ輸送され、局所断面平均流速 W に対する w/W の分布形のくぼみの度合いはテーパのない管路の場合に比べてかなり小さくなる($\Omega = 90 \sim 140^\circ$)。

その後、曲がり部出口に近づくと内壁側の圧力降下が減少して内壁寄りの流体は減速し始め、また流路断面積の減少と相まって中央部から外側断面で増速し、極大速度は外壁側で大きくなる($\Omega \approx 150 \sim 180^\circ$)。この区間での強い外壁方向流れ(図5)は、遠心力の消失

した下流直管部においても外壁に連なる壁側の高速流体を上下壁に沿って内壁側へ輸送する。そのため、 $z_2/d_2=3$ 付近では x 軸上で内壁側にも極大値をもち y 軸上では中央部でくぼむ、 $\Omega \approx 50^\circ$ の w の分布に類似した形状が出現する。以降、速度分布は中央部でふくらんで次第に粘性作用によって軸対称な形状に変わる。なお、直管内流れへの回復⁽⁷⁾は、 z_2/d_2 の値で見た場合流出レイノルズ数 $Re_2 (= W_2 d_2 / \nu)$ が高くなるためテーパのない管路よりも大きくなるが、曲がり終了点からの距離 z_2 の値には大差ないようである。

4.3 脈動する流れ

4.3.1 速度分布の管軸に沿う変化 図7に軸方向速度 w に関する測定結果を示す。速度 w は上流直管部における断面平均流速の最大値($W_{1,m} + W_{1,o}$)で除して表し、図示は1周期中の代表的な位相角 θ について行っている。また、図8には比較のために断面形状が一定の曲管内の流れについて流量が最大あるいは最小となる $\theta = 90, 270^\circ$ における w の分布を示した。さらに、図9は x 軸上の二次流れ速度 u の分布を両U字管路について示したものである。

一般に、曲がり管内の脈動流れ⁽⁶⁾では局所速度の変動の位相のずれが断面内で著しく増大し、内壁側で逆流現象や中程度の α 数では加速中期($\theta \approx 0^\circ$)の速度分布にくぼみ現象が生じる⁽⁶⁾。さらに、曲がり開始点付近では、流入直後の二次流れ強さとその回り込みが内壁側に達する位置 Ω と位相 θ によって、速度分布形状は複雑に変化する。したがって、断面平均流速が Ω に沿って大きくなるテーパU字形管路内では、これらの諸現象や特性が短い区間内において複雑に絡み合った速度分布を呈するようになる。以下では、上述のような流れ特性の概観を踏まえて、断面形状が変わらないU字管内の流れと比較しつつ、脈動流れに及ぼすテーパの影響を抽出することにする。

曲がり開始点付近では、曲がりの影響が強く現れ、テーパの影響は比較的小さい。すなわち、 $z_1/d_1 = -3$ の直管部においては下流の曲がりの影響は見られず、軸方向速度は軸対称な分布形を示す(図略)。しかし、曲がり開始点近傍($\Omega \approx 0 \sim 10^\circ$)では、加速後期に生じた内壁側の大きい圧力降下によって内側断面の流体は加速され、加速終了期からの流量の多い期間($\theta \approx 90 \sim 150^\circ$)速度の大きい領域はテーパのない管路より一時的に内壁側へ偏る。と同時に、この高速流体には遠心力がより強く働くことになるので、わずかに下流の $\Omega = 20^\circ$ での二次流れ速度は減速前期($\theta \approx 90 \sim 180^\circ$)に急増し、テーパのない管路よりも大きい値を示す(図9)。一方、高速領域の外壁側への移動は、内側断

(a) Velocity profiles on the x axis (b) Velocity profiles on the y axisFig. 7 Axial velocity profiles for pulsating flow through tapered U-tube ($\alpha=10$, $D_m=400$, $\eta=1$)

面の軸方向の運動量を減速後期 ($\Theta=180\sim 270^\circ$) にいっそう失わせることにもなる。そのため最小流量時 ($\Theta=270^\circ$) 主流が負方向となる領域は、テーパのない管路に比べて外壁寄りまで広がる ($\Omega=20^\circ$)。しかし、 $\Omega=50\sim 90^\circ$ では流量の多い期間上・下壁寄りの流速の大きい流体を内壁側へ引き込んで増速し、最小流量時 ($\Theta=270^\circ$) における逆流の度合いは弱められて、断面内での正・負方向速度の差は小さくなる。また、この区間 ($\Omega=50\sim 90^\circ$) での減速前期 ($\Theta=90\sim 200^\circ$) の速度分布は、 y 軸上では前述した強い二次流れによって上下壁寄りで突出し、 x 軸上では軸方向加速によって内壁側でふくらんで、中央部内壁寄りにややくぼん

だ形状が作られる。このとき、二次流れ運動は内側断面に偏り、 $\Theta=90^\circ$ での速度はテーパのない管路の場合より4割ほど大きい(図9; $\Omega=90^\circ$, 図10; $\Omega=50^\circ$ 参照)。

ところで、このような速度分布のくぼみ現象は、断面形状が一定の曲がり管内におけるほぼ発達した領域では中程度の α 数の加速中期 ($\Theta\approx 0^\circ$) に見られ⁽⁶⁾、またきつい曲がり管内の入口脈動流れでは曲がり開始点から $\sqrt{aR}$ に対する無次元距離 $\sqrt{Rc}\Omega$ (Ω : rad) の値が2のあたりで減速前期 ($\Theta\approx 90\sim 180^\circ$) に出現する⁽⁷⁾。ともに強い二次流れ運動が作り出す効果として

(a) Velocity profiles on the x axis

(b) Velocity profiles on the y axis

Fig. 8 Axial velocity profiles for pulsating flow through U-tube with a uniform cross-section ($\alpha=10$, $D_m=400$, $\eta=1$)

(a) Tapered U-tube

(b) U-tube with a uniform cross-section

Fig. 9 Outward velocity profiles on the x axis for pulsating flow ($\alpha=10$, $D_m=400$, $\eta=1$).
 $\circ$: $\theta=90^\circ$, $\triangle$: $\theta=180^\circ$

Fig. 10 Secondary flow motion visualized by tracer method for pulsating flow through tapered U-tube ($\alpha=10$, $D_m=400$, $\eta=1$). $\Omega=50^\circ$, $\theta=180^\circ$

興味深い。ただし、テーパ管の場合、上述のように二次流れの回り込みと内壁側の軸方向加速効果が相まって、テーパのない曲管の場合と比べてより上流側で速度分布形にくぼみが形成される。しかしながら、くぼみ形成時に内側断面の流体が軸方向に加速されているため、瞬時の断面平均流速 W に対するくぼみの度合いは断面形状が一定の曲がり管の場合よりも小さくなる。

曲がり部の半ほどを過ぎると、 W の増加によって流体に作用する遠心力が増大し、内外壁間の圧力差は大きくなるとともに、流れの変動に対する非定常慣性

力も強まる。そのため、管軸に沿う圧力降下は流量が増す加速期に内壁側でさらに大きくなり、加速の後期($\theta=0\sim90^\circ$)には軸方向速度の最大値は内壁側で生じるようになる($\Omega=135^\circ$)。そして、速度変動は内壁寄りやや大きくなるが、断面内における速度ならびに位相の差は小さくなる。なお、管路面積の変わらないU字管では、 $\Omega=135^\circ$ の速度分布は発達した曲がり流れ⁽¹⁸⁾に近い形状を示している(図8)。

曲がり部の出口近くになると圧力降下は内壁側で減少し、流量の多い期間内側断面で高速となった流体は外壁側へ押し出され、強い二次流れ速度を有して直管部へ流出する。そのため、下流直管部では遠心力が消失しているものの、この部分の流下に沿って速度が極大となる領域は z_2 および θ につれて断面内を移動する。その様相は、テーパのない管路の場合とはかなり異なっている。すなわち、曲がり出口($\Omega=180^\circ$)の二次流れ速度 u は、内壁側でしかも流出流量に比例して大きい(図9)。その値は $W_{2,m}$ の6割にも達するもので、断面平均流速に対してみると曲がり入口直後と相対的に同程度の強い二次流れ運動が下流直管部の入口付近に生じていることがわかる。この二次流れによって、曲がり流出直後($\Omega=180^\circ\sim z_2/d_2=1$)では1周期にわたって曲がりの外壁側に連なる壁寄りで速度が大きい。しかし、 $z_2/d_2=3$ 付近では減速初期($\theta=90\sim150^\circ$)内側断面でも速度が極大値をとるようになり、中央部には速度の小さいくぼみ現象が再び現れる。また、曲がり出口($\Omega=180^\circ$)では減速終了期($\theta=270^\circ$)、負方向速度となる逆流領域が再び内側断面に広がる。その後、速度分布は粘性作用によって軸対称な直管内分布形に徐々に移行する($z_2/d_2=7\sim15$)。ただし、この下流直管部では強い二次流れを有した高レイノルズ数($Re_{2,m}=1060$)の低ウォマスリイ数($\alpha_2\approx 7$)流れとなるため、 z_2/d_2 に対する直管内流れへの回復⁽⁷⁾は断面形状が一定のU字管の場合よりもやや長くなるようである。

4・3・2 速度分布形状の平坦化 以上のように、テーパU字形管路内の脈動流れでは主流の高速領域は曲がり部内を断面の中央部から外側、内側、外側断面へと移動し、速度分布形状は複雑な時間的変化をする。ところで、管路断面の狭まりは一般に速度の分布形状を平坦化させる効果をもつことが知られている。そこで、断面内の速度分布の一様性の度合いを次式のような指標値で表してみる。

$$\beta = \frac{1}{AW_m} \int_A |w - W| dA \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 A は管路断面面積を表す。上半断面内の測定値

Fig. 11 Variation of β over a cycle.
(— — — : Fully-developed straight-tube flow)

Fig. 12 Longitudinal variation of β_m

から得られた β の結果を図11に、その時間平均値 β_m の管軸に沿う変化を図12に示す。図11、12中には、比較のためにテーパのないU字管路の場合あるいは定常流の結果も示してある。

直管内の発達した領域においては、定常流の β ならびに脈動流れの β_m とも約0.5の値をとる。図11より、ほぼ発達した直管内の速度分布形状をもつ曲がり開始点では、 β は管中心部と振動境界層内における速度変動の位相差に相応した約 40° の位相遅れで正弦状の時間的変化をする。しかし、 Ω が大きくなるにつれて、減速後期から加速初期にかけて β は小さくなって速度分布形状の平坦化が進み、 β が最大値をとる θ は流量の最大時に移ってくる。

つづいて図12について見ると、テーパU字管内脈動流れの β_m は曲がり部内では定常流の場合とあまり大差なく、 Ω が大きくなるにつれて減少し曲がりの終了点で平坦化が最も進む。しかし、出口直後($z_2/d_2=0\sim3$)脈動流れの速度分布形状は急変して β_m は急激に増大し、曲がり部の $\Omega=75^\circ$ と同程度の値をとるようになる。以降、 β_m は軸対称流れの値(0.5)に徐々に漸近する。一方、断面形状が一定のU字管について見ると、脈動流れの場合曲がり部内では高速領域が

ほぼ1周期中外側断面にあるために β_m の軸方向変化は小さい。定常流では、曲がり部内で内壁側でも極大速度をもつ分布形状となるため β_m は減少し、くぼみ現象がほぼ消失する後半の区間($\Omega \approx 135^\circ$)でテーパ管の値に近い値をとる。

5. 結 言

曲がりの入口と出口間の管断面積減少率が50%で $R_c=3.5$ のテーパU字管内を流れる脈動流($\alpha=10$, $D_m \approx 400$, $\eta=1$)の速度をLDVで測定し、速度分布の管軸に沿う変化を断面形状が一定のU字管内流れと比較して調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) テーパの影響は、定常流れおよび脈動流れとも曲がり部の後半の区間から出口付近において顕著に現れ、テーパのないU字管路とは異なる流動特性を示す。

(2) 曲がり管内入口脈動流れ特有の速度分布のくぼみ現象は、テーパのないU字管路の場合よりも小さい Ω の位置で現れるが、くぼみの程度は小さくなる。また、曲がりの出口近傍では二次流れが急激に強まり、その下流直管部の速度分布には弱いくぼみ現象が再び出現する。

(3) 脈動流れの速度分布は Ω が大きくなるにつれて断面内で速度差の小さい形状へと変化し、 β_m はテーパのないU字管路の場合よりも減少するが、曲がり出口直後 β_m の値は急増する。

終わりに、本研究を行うにあたってご指導いただいた広島大学名誉教授 須藤浩三先生、ならびに実験に

協力いただいた当時学部学生の岡田正次君[現：ニッタ(株)]と楠瀬幸司君[現：(株)クボタ]に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 杉山五久夫・川野洋典・新見英幸, 機論, 51-466, B (1985), 1757-1762.
- (2) Walker, J. D., Tiederman, W. G. and Phillips, W. M., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, 111 (1989), 228-232.
- (3) 成瀬岳史・仁科吉広・久下沼祥子・谷下一夫, 機論, 56-532, B (1990), 3625-3632.
- (4) 成瀬岳史・仁科吉広・石原賢一・谷下一夫, 機論, 57-541, B (1991), 3018-3025.
- (5) Black, M. M., Hose, D. R. and Lawford, P. V., *J. Med. Eng. Tech.*, 19-6 (1995), 192-197.
- (6) 角田勝・須藤浩三, 機論, 61-587, B (1995), 2442-2449.
- (7) 角田勝・須藤浩三, 可視化情報学会論文集, 21-1 (2001), 12-18.
- (8) Chandran, K. B., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, 115 (1993), 611-616.
- (9) Yearwood, T. L. and Chandran, K. B., *J. Biomech.*, 13 (1980), 1075-1088.
- (10) Yearwood, T. L. and Chandran, K. B., *J. Biomech.*, 15-9 (1984), 683-704.
- (11) Chandran, K. B. and Ray, G., *Med. Biol. Eng. Comput.*, 20 (1982), 145-150.
- (12) 沖野遙・菅原基晃・松尾裕英, 心臓血管系の力学と基礎計測, (1986), 186, 講談社.
- (13) 大島宣雄, ながれ, 14 (1995), 5-9.
- (14) Kang, S. G. and Tarbell, J. M., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, 105 (1983), 275-282.
- (15) Lim, K. O., Kennedy, J. S. and Rodkiewicz, C. M., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, 106 (1984), 351-356.
- (16) 角田勝・須藤浩三・和田秀之, 機論, 54-505, B (1987), 2375-2382.
- (17) 日本機械学会編, 機械工学便覧(C6 バイオテクノロジー・メディカルエンジニアリング), (1988), 150, 日本機械学会.
- (18) 角田勝・須藤浩三, 機論, 52-474, B (1986), 752-757.