直角分岐流れの壁せん断応力に対する枝管形状 および流動形態の影響*

山口隆平^{*1}, 西田正浩^{*2}, 中矢伸久^{*3}

Effect of Geometrical Shape of Side Branch and Flow Condition on Wall Shear Stress in Right Angle Branch

Ryuhei YAMAGUCHI, Masahiro NISHIDA and Nobuhisa NAKAYA

Using the branch model in which the side branch bifurcates at a right angle from the trunk, the effect of the shape of the side branch and the flow conditions have been experimentally studied on the variation of wall shear stress in laminar steady flow. The experiment has been carried out on three branch models which have different curvatures at the upstream corner and the same sharp square edge at the downstream corner. The wall shear stress along the proximal wall of the side branch sinusoidally varies downstream, and the gradient of wall shear stress along the proximal wall becomes markedly large. The high wall shear stress which arises around the upstream corner of the side branch is strongly related to the secondary helical flow from the trunk into the side branch. This variation strongly depends on the curvature at the upstream corner and the flow distribution ratio of the side branch to the trunk.

Key Words: Pipe Flow, Right Angle Branch, Secondary Helical Flow, Corner Shape, Flow Distribution, Wall Shear Stress, Biomechanics

1. 緒 論

管継手の一つである分岐管は各種流体輸送網の主要な構成要素である。特に、T字形の直角分岐管はその幾何学的形状の簡素さゆえに、最も普遍的に用いられている。これまで直角分岐管内流れに関しては、分岐によるエネルギー損失について種々の報告がなされ、レイノルズ数が 10^5 程度の乱流域の損失係数が枝管への流量比および主管と枝管の面積比に関して詳細に確立されている⁽¹⁾⁽²⁾。他方、層流域の分岐流れでは臨界レイノルズ数付近で損失が急変することなどが示されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

生体内の血管は各種形状の分岐部から構成されている。血管の病理学的異変が分岐部に多発することから、血管形状に起因する流れ構造が血管病変と密接に関与することが指摘されている^{(5)~(7)}。腸間膜動脈や腎動脈などが非対称に分岐していく腹大動脈は、血管病変の好発部位の一つである。病理学的には、大形動物の血管病変は流れが枝管へ分岐していく中枢壁(二次元流

れであれば、流れ分割点に相対するはく離流が発生する枝管壁)上に観察されている^{(8)~(12)}。したがって、壁せん断応力の小さな部位と動脈硬化などの血管病変との関連が指摘されている。

血行力学的観点から、直角分岐モデルや腎動脈鋳形モデルを用いた流れの可視化^{(13)~(16)}、LDVや電気化学的方法による流速および壁せん断応力分布の測定^{(17)~(21)}、二次元⁽²²⁾⁽²³⁾および最近では三次元⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾有限要素法や有限体積法による数値解析が行われている。これらの研究では、分岐直後の枝管内における二次流れの発生、枝管壁における流れの停滞、壁せん断応力の低下、および流れ分割点近傍の壁せん断応力の上昇などが報告されている。しかしながら、定性的な可視化実験やLDV流速計による速度分布から間接的に求めた壁せん断応力の測定では測定点が限定されているため、血管にじかに作用する流れ因子である壁せん断応力の挙動は十分に解明されていない。また、腎動脈を模した直角分岐流の壁せん断応力の計測では⁽²⁰⁾⁽²¹⁾、枝管中枢壁に沿う測定点が少ないことや同一断面の周方向分布を測定しているため、流れ方向の変動を明示するには至らない。三次元数値解析では枝管入口上流コーナで壁せん断応力の若干の増加が示されているが⁽²⁵⁾、流れ場の計算分割数や演算速度に対す

* 原稿受付 平成5年5月18日。

^{*1} 正員, 芝浦工業大学工学部 (〒108 東京都港区芝浦 3-9-14)。

^{*2} 正員, 慶應義塾大学大学院 (〒223 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

^{*3} 芝浦工業大学大学院。

る制約などにより壁せん断応力の変化は未解明である。さらに、最近では振動せん断率 $OSI \neq 0$ なる領域と血管病変発生部位との相関が指摘されている⁽²⁶⁾。

著者らは前報において⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾、腹大動脈から下腸間膜動脈への分岐流のような主管から枝管が非対称 45° で分岐する枝管壁上のせん断応力を電気化学的方法⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾により測定した。その結果、定常流では枝管中樞壁に沿ったせん断応力は、単に小さいというよりも下流方向に大きな振幅で正弦的に変動する。かつ、主管と枝管への流量比によっては壁せん断応力の流れ方向こう配が極めて大きくなることを示した。さらに、この正弦的変動は主管から枝管に流入する二次の旋回流により発生することを示した。

これらの結果から、分岐点回りの壁せん断応力の変化は、主管下流および枝管への流量比、分岐角および枝管中樞壁のコーナ曲率により著しい影響を受けることが予想される。本報では、主管である腹大動脈から枝管である腎動脈へ直角に分岐する流路モデルを取り上げ、定常流の枝管壁上のせん断応力に対する枝管幾何学的形状、および流量比やレイノルズ数などの流動形態の影響を検討する。本報の分岐モデルは、流体輸送継手として知られる直角 T 字形分岐管である。

おもな記号

- A_n : 主管外壁上の測定電極
- B_n : 中樞壁上の測定電極
- D_0 : 主管内径
- D_1 : 枝管内径
- E_n : 末梢壁上の測定電極
- F_n : 主管内壁上の測定電極
- Q_T, Q_M, Q_S : 主管上流, 下流および枝管下流の流量
- R_0 : 主管半径 $= D_0/2$
- R_1 : 枝管半径 $= D_1/2$
- Re : レイノルズ数 $= UD_0/\nu$
- R_s : 中樞壁曲率半径
- U : 主管上流の平均速度
- ν : 作動流体の動粘度
- ρ : 作動流体の密度
- τ_T, τ_M, τ_S : 主管上流, 下流および枝管下流でのポアズイユ流れの壁せん断応力
- τ_w : 主管上流のポアズイユ流れの壁せん断応力を 2 として無次元化した壁せん断応力 $= \tau_w^* D_0 / (4\rho\nu U)$
- τ_w^* : 有次元壁せん断応力

2. 実験装置および方法

2.1 分岐モデル 実験で用いた直角分岐モデルと測定電極配置を図 1 に示す。分岐形状は主管 ($D_0 = 24.5 \text{ mm}$) から枝管 ($D_1 = 14 \text{ mm}$) が 90° で分岐し、枝管と主管の面積比 $[D_1^2 / (D_0^2 + D_1^2) = 0.25]$ は前報⁽²⁸⁾と同じものを用いた。枝管入口の上流コーナ曲率半径を $R_s = D_0/2, D_0/4$ および零の 3 種類とし、それぞれモデル A, B および C と呼ぶ。下流コーナは流れを乱さない形状をとるものとして、丸みのない直角を流れ分割点とする。モデル A, B の主管と枝管は滑らかに接続してあるが、モデル C ではシャープな接続面となっている。

分岐モデル A に石膏を注入して作製した鑄型を図 2 に示す。この分岐鑄型で示すように、枝管の上流コーナは曲率半径 $R_s = D_0/2$ の丸みをもっており、下流はシャープな直角コーナとなっている。したがって、これら上・下流コーナ間の主管と枝管の接続面は、丸み ($R_s = D_0/2$) をもった上流から、下流コーナのシャープな流れ分割点まで連続して丸みが小さくなるよう滑らかに接続されている。壁せん断応力測定のための電極として、直径 0.5 mm の白金線を主管および枝管軸を含む中間面にある管壁にアクリルセメントを用いて埋め込み、電極面が分岐面と滑らかになるよう研磨した。主管軸を x 、枝管軸を y とし、その交点を分岐点 (原点) とする。測定電極は $x/R_0 = -10$ から 16 、 $y/R_1 = 0$ から 16 の範囲に 4 mm ないし 10 mm の間隔で 4 列

図 1 直角分岐形状と電極配置

図 2 分岐モデル A の鑄型 ($R_s = D_0/2$)

(A_n, B_n, E_n, F_n) 埋め込まれている。最も大きな曲率半径 ($R_s = D_0/2$) をもつモデル A では、中枢壁に沿って主管直管部から曲面壁への移行位置 B_{12} 、曲面壁から枝管直管部への移行位置 B_{17} とする。上流コーナ曲面上に 22.5° 間隔で 3 本の電極を埋め込み、上流からそれぞれ B_{c-}, B_c および B_{c+} とする。モデル B の場合には曲面上の電極は中央に埋め込んだ B_c だけであり、モデル C には曲面壁はない。

これらの電極は、主管および枝管の中間面からそれぞれ約 3 および 6° 離れている⁽²⁸⁾。以下に述べる壁せん断応力の結果では、埋め込み不十分な B_{26} (モデル A) と B_7 (モデル B) の値を除く。

2.2 実験方法 実験方法は前報⁽²⁸⁾ 同様であり、黄血塩、赤血塩および支持電解質として水酸化カリウムからなる混合電解液を用い、試験電極と対極との間に流れる電流 i の三乗が壁せん断応力 τ_w^* に比例するところの電気化学的方法により測定する⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾。実験はおもにレイノルズ数 $Re \cong 800$ 、主管から枝管への流量の分配は面積に比例し、かつ生理的に適合する形状流量比 ($Q_s/Q_T = 0.25$)、および等流量比 ($Q_s/Q_T = 0.5$) の 2 種類とする。

2.3 流れの可視化 分岐部回りの流れを染料およびアルゴンレーザを使ったレーザシートにより可視化する。染料は、黒インキとメチレンブルーの混合液 (混合比 9:1) を用いた。レーザシート法では、散乱粒子として直径 $100 \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子 (比重 1.05) を用いた。

3. 壁せん断応力分布

以下に示す図 3~6 の結果では、主管、枝管上の壁せん断応力分布をそれぞれ図の左および右半部に示す。各横軸は、主管半径 R_0 、枝管半径 R_1 で無次元化してある。縦軸である壁せん断応力 τ_w は、主管上流ポアズイユ流れで 2.0 として無次元化した絶対値を示す。 τ_T , τ_M および τ_S は、それぞれ対応する主管上流、下流および枝管内直管ポアズイユ流れの漸近値である。

3.1 レイノルズ数および流量分配の影響 病理学的観察によれば、腹大動脈から腎動脈への入口の形状は上流コーナでは大きな丸みを取り、下流コーナは流れを乱さないようシャープな形状となっている⁽¹⁵⁾。本節では、最も大きな曲率半径 $R_s = D_0/2$ をもつモデル A の結果について検討する。

形状流量比の結果を図 3 (a)~(c) に示す。 $Re = 760$ 、図 3 (b) の場合、主管外壁 A_n に沿うせん断応力は分岐点付近まで減少し、 A_{16} の回りで最小となり変曲点をもつ。後述の流れの可視化によれば、分岐点下

流で流れがはく離することから、分岐点下流の $x/R_0 = 0$ から 4 の範囲で壁せん断応力は負の値となる。主管内壁 F_n では、流れ分割点近くで最大値を示したあと減少する。中枢壁に続く主管外壁 B_n では分岐点に近づくと壁せん断応力は急激に増加し、曲面壁に入った直後の B_{c-} で上流の 4 倍以上の第 1 の極大値 ($\tau_w = 8$) となった後、急激に減少し中枢壁曲面から直管部へ入った直後 B_{17} , B_{18} 付近で極小値 ($\tau_w = 0.7$) を示す。その後いったん増加し、 B_{22} で第 2 の極大値 ($\tau_w = 3.5$) を示す。中枢壁に相対する末梢壁 E_n では、流れ分割点

(a) $Re=510$

(b) $Re=760$

(c) $Re=1000$

図 3 形状流量比の分岐部回り壁せん断応力分布 (モデル A: $R_s = D_0/2$)

付近で最大で下流に急速に減少していく。これらの傾向は、レイノルズ数の増加とともに顕著となる。図 3 (c) に示す $Re=1000$ の場合、中枢壁上の B_{c-} で上流ポアズイユ流れの 5 倍の第 1 の極大値 ($\tau_w=10$)、曲面壁を回った直後の B_{17} で極小値 ($\tau_w=0.7$)、 B_{22} で第 2 の極大値 ($\tau_w=5.5$) をとる。

等流量比, $Re=790$, $Q_s/Q_r=0.49$ の結果を図 4 に示す。主管外壁上の壁せん断応力は分岐点付近で変曲点を取り、 $x/R_0=-1$ から 5 の範囲で明らかなく離流の発生が示される。中枢壁上では、 B_{c-} から一つ下流の電極であるコーナ中央 B_c で上流の 10 倍以上の極めて大きな第 1 の極大値 ($\tau_w=26.4$) となり、 B_{18} で極小値 ($\tau_w=1.5$)、 B_{23} で上流の 5 倍の第 2 の極大値 ($\tau_w=11$) を示す。このように枝管への流量の増加とともに、中枢壁上の壁せん断応力は顕著な変化を示す。さらに特筆すべきことは、いずれの流量比においても中枢壁曲面上の極大値は相対する流れ分割点に沿う末梢壁上の最大値と同程度の大きさとなる。このことは、壁せん断応力は中枢壁上で小さく、相対する末梢壁上で大きいとされてきた従来の結果に対し、新しい知見を提供している。

3.2 分岐角の影響 前報⁽²⁸⁾ で示した分岐角 45° の場合、枝管中枢壁上には少なくとも二つの極大値が示された。言い換えると $Re \cong 800$ の場合、形状流量比では枝管中枢壁 $y/R_1=4$ に第 1 の極大値 ($\tau_w=4$)、より下流 $y/R_1=7$ で第 2 の極大値 ($\tau_w=3$)、等流量比では中枢壁 $y/R_1=4$ に第 1 の極大値 ($\tau_w=12$)、 $y/R_1=8$ で第 2 の極大値 ($\tau_w=10$) が示された。同じ形状流量比 0.23、レイノルズ数 760 である図 3 (b) の結果と比べると、その発生位置の違いはあるが、中枢壁曲面上 B_{c-} で第 1 の極大値 ($\tau_w=8$)、枝管流入後 $B_{22}(y/R_1=$

6) で第 2 の極大値 ($\tau_w=3.5$) となる。ここで取り上げた直角分岐モデル A の中枢壁曲率半径 $R_s=D_0/2$ は、前報の曲率半径 $3.5D_0$ より小さいため一概に比較できないが、一般に分岐角度の大きいほうが流れの変化が大きいと考えられる。

3.3 上流コーナ曲率の影響 曲率半径 $R_s=D_0/4$ および零(モデル B, C)の結果を図 5, 6 に示す。

モデル B ($R_s=D_0/4$) の中枢壁のせん断応力は、曲面壁直前 B_{13} で上流の 3.5 倍の第 1 の極大値 ($\tau_w=7$)、 B_c でほぼ同じ大きさの値となる。モデル B の曲率半径はモデル A よりも小さいため、 B_{13} と B_c との間に電極を埋め込むことは難しいが、より大きな値となることが予想される。枝管内では壁せん断応力の変化はモデル A より大きい。

枝管入口に丸みをもたないモデル C では中枢壁上の変化はより大きくなり、入口直前 B_{14} で上流値の 5

図 5 形状流量比の分岐部回り壁せん断応力分布 (モデル B: $R_s=D_0/4$)

図 4 等流量比の分岐部回り壁せん断応力分布 (モデル A: $R_s=D_0/2$)

図 6 形状流量比の分岐部回り壁せん断応力分布 (モデル C: $R_s=0$)

倍の第1の極大値 ($\tau_w=9.5$), 枝管流入後 $B_{16}(y/R_1=2.5)$ で小さな極大値 ($\tau_w=3$), $B_{21}(y/R_1=8)$ で上流値の5倍の極大値 ($\tau_w=9.5$) をとる。入口直前の電極 B_{14} は枝管入口から4 mm 上流に埋め込まれている。シャープなコーナをもつ枝管入口を回る流れは急変する。したがって、枝管入口により近い位置で測定できれば、壁せん断応力は非常に大きな値となると予想される。このモデルを使った可視化によれば、分岐直後の中枢壁上にはく離流が観察されることから、 B_{16} では負の極小値となる。

このように、3モデルとも中枢壁上では少なくとも壁せん断応力は二つの極大値を示し、その変化は曲率半径 R_s が小さいほど顕著である。

4. 流れ模様と壁せん断応力の変化

4・1 染料による可視化 前述のように、枝管中枢壁上における壁せん断応力の変化は、三次元分岐流に固有の二次の旋回流と密接に関連すると考えられる。これらの変化と二次流れとの関連を、染料による流れの可視化により検討する。以下に示す図7(a)～(c)は、前述の図3(b)の流れに対応している。

図7 染料による流れの可視化 ($Re=760$, $Q_s/Q_T=0.24$, モデル A: $R_s=D_0/2$)

図7(a)に示すように、主管上流の外壁からの染料は分岐点若干上流からはく離する。その下流で、一方の染料は主管下流へ、他の染料は主管外周部の壁面に沿って枝管入口の上流コーナの B_C に衝突するよう流入する。したがって、 B_C 上の極大値は上流のコア流れが枝管側に偏向するというよりも、主管外壁上のはく離域から主管外周部の壁面に沿った二次流れが枝管内に衝突流入する位置に発生する。

図7(b)に示すように中枢壁に続く主管外壁からの染料は、上流コーナを回り終わるまで中枢壁に沿って流れ、枝管直管部に入ると中枢壁からはく離する。したがって、 B_{18} の極小値は枝管へ流入した流れが中枢壁から離れるために生じる。二次元分岐であれば分岐直後の中枢壁上にはく離流が発生するが、三次元分岐ではこのはく離域に流れ分割点に衝突した後の二次旋回流が流入するため、はく離流の発生が抑制されると考えられる。しかしながら、同時に撮影した他の結果では微妙にはく離位置の変化が見られる。さらに、 B_{17} , B_{18} の壁せん断応力測定中に得られる電流値の挙動から、大きな曲率半径 R_s をもつ三次元分岐流であってもこの領域の流れは大変微妙である。

図8 レーザシート法による分岐中間面上の流れ ($Re=780$, モデル A: $R_s=D_0/2$)

図 9 はく離点および中枢壁上の流れの相似性

一方、図 7 (c) に示すように上流のコア流れ中間面の若干上方からの染料は、流れ分割点の直前で枝管に巡回しながら流入し、中枢壁に近づいていく。したがって、 B_{22} の第 2 の極大値は上流のコア流れが流れ分割点に衝突した後、らせん状の流れとなって中枢壁に近づく位置に発生すると考えられる。

このように、中枢壁上の壁せん断応力の変化は主管外周部の壁面からの二次流れと、上流コア流れから流れ分割点に衝突後発生する二次の旋回流により生ずる。

4.2 分岐中間面の流れ模様 分岐中間面上の流れ模様を検討するため、レーザシートを光源として粒径約 $100 \mu\text{m}$ の散乱粒子の軌跡を図 8 に示す。

図 8 (a) に示す主管外壁上では、染料を使った図 7 (a) ほど明白なはく離流の発生は示されない。また、枝管に続く中枢壁上では枝管に流入直後、粒子は中枢壁から離れその軌跡の間隔は広がるがはく離流は示されない。

図 8 (b) に示す等流量比の場合、枝管へ流入する流量が多いため、中枢壁上にははく離流の発生はないと考えられる。しかしながら、主管外壁上では主管下流への流量の減少により明らかなはく離流が示される。図 8 (a), (b) とも枝管直管部に流入直後、中枢壁から枝管本流に向かう流れを示すが、はく離流は発生しないと考えられる。

5. 壁せん断応力変化の意義

上述のように、直角分岐管内流れは主管から枝管へ続く中枢壁上の流れに特徴づけられる。ここで、上流コーナに大きな丸みをもつモデル A について検討す

る。

一般に、大きい動物の血管病変は流れ分割点に相対する中枢壁に発生する^{(9)~(12)}。二次元流れであれば、この領域の壁せん断応力は小さく、せん断速度に依存する物質伝達の低下との関連が指摘されている⁽⁹⁾。本報の結果によれば、確かに曲面壁から直管に移行した部位の壁せん断応力は小さいが、この部位の上・下流域では上流ポアズイユ流れの数倍の大きな値となる。したがって、中枢壁曲面に沿う流れ方向の壁せん断応力のこう配は極めて大きい。

Ku らによれば⁽²⁶⁾、血管病変は $\text{OSI} \neq 0$ なる部位に発生することが明らかにされている。 $\text{OSI} \neq 0$ なる部位は、定常流のはく離点付近に発生する。この流れ状況を図 9 (a) に示す。定常流のはく離点回りでは壁せん断応力の流れ方向こう配は負の値をとる部位に相当する。一方、本報で得られた中枢壁曲面上の第 1 の極大値から枝管直管部の極小値までの流れ状態を、図 9 (b) に示す。ここで、極大値と極小値との間の点 B_i の壁せん断応力 τ_{Bi} を差引けば、定常流のはく離点回りの流れと相似となる。

このように、脈動流であれば $\text{OSI} \neq 0$ と予想される定常流のはく離点回りの流れ状態は、本報の中枢壁曲面回りの壁せん断応力の変化と生理学的に相似な意義を有すると考えられる。さらに、血流に直に接する血管内皮細胞レベルで考えれば、この壁せん断応力は隣接する内皮細胞同士が互いに圧迫するよう作用すると考えられるが、その影響については生物学的検証に委ねたい。

6. 結 論

本報では、定常流中で主管から枝管が 90° で分岐する直角分岐流れの壁せん断応力分布に対する枝管幾何形状および流動形態の影響を実験的に検討した。

(1) 枝管中枢壁で壁せん断応力は少なくとも二つの極大値をとる。第 1 の極大値は、主管外壁上のはく離域から主管外周部を通り中枢壁に衝突する枝管入口に、第 2 の極大値は流れ分割点に衝突後中枢壁に巡回しながら接近する位置に発生する。

(2) 中枢壁曲面上では、相対する末梢壁上の壁せん断応力と同程度の位置が発生する。この傾向は枝管への流量の増加とともにより顕著となり、等流量比では上流の 10 倍以上にまで増加する。

(3) 従来壁せん断応力が小さいとされてきた枝管中枢壁上で、分岐直後の壁せん断応力は確かに小さいが、その上・下流域では大きく変動する。変動の度合いは、中枢壁曲率半径が小なるほど顕著となる。した

がって、枝管入口の中枢壁に沿う流れ方向の壁せん断応力のこう配は極めて大きい。

本研究費は平成4年度日本私学振興財団学術研究振興資金、ならびに平成4年度文部省科学研究費補助金総合研究A(#04305008)の補助の下に行われた。関係各位に謝意を表す。本研究の実験をお手伝いいただいた本学院生 小川晶久、岡部洋、鈴木宏知の各氏に謝意を表す。

文 献

- (1) 日本機械学会編, 管路ダクトの抵抗, (1980), 86-95.
- (2) 佐藤, 機論, **28-192** (1962), 881-889.
- (3) 東野・ほか3名, 機論, **47-423, B** (1981), 2139-2148.
- (4) 嵩, ターボ機械, **2-5** (1974), 437-443.
- (5) Lighthill, M. J., *J. Fluid Mech.*, **52** (1972), 475-497.
- (6) McDonald, D. A., *Blood Flow in Arteries*, 2nd ed., (1974), 92-95, Edward Arnolds.
- (7) Stehbens, W. E., *Q. J. Exp. Physiol.*, **44** (1959), 110-117.
- (8) Caro, C. G., ほか2名, *Proc. Soc. London, Ser. B*, **177** (1971), 109-159.
- (9) Cohnhill, J. F., ほか2名, *Atherosclerosis*, **35** (1980), 103-110.
- (10) Friedman, M. H., ほか2名, *Atherosclerosis*, **39** (1981), 425-436.
- (11) 山口・ほか4名, 循環器病の進歩, **7-1** (1986), 97-108.
- (12) Yamamoto, T., ほか10名, *Arterios. Thromb.*, **12** (1992), 626-632.
- (13) Karino, T., ほか2名, *Biorheology*, **16** (1979), 231-248.
- (14) Rodkiewicz, C. M. and Roussel, C. L., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **95** (1973), 108-112.
- (15) Houle, S. and Roach, M. R., *Atherosclerosis*, **40** (1981), 231-244.
- (16) Sabbah, H. N., ほか2名, *Arteriosclerosis*, **4** (1984), 28-33.
- (17) Rieu, R., ほか2名, *J. Biomech.*, **18-9** (1985), 703-715.
- (18) Liepsch, D., ほか4名, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **111** (1989), 222-227.
- (19) Lutz, R. J., ほか5名, *Cir. Res.*, **41** (1977), 391-399.
- (20) El Masry, O. A. and Feuerstein, I. A., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **104** (1982), 290-295.
- (21) 広瀬・ほか2名, バイオメカニズム, **11** (1991), 99-109.
- (22) Kawaguti, M. and Hamano, A., *J. Phy. Soc. Jpn.*, **46-4** (1979), 1360-1365.
- (23) O'Brien, V. and Ehrlich, L. W., *J. Biomech.*, **10** (1977), 623-631.
- (24) Yung, C. N., ほか2名, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **112** (1990), 189-197.
- (25) Perktold, K. and Peter, R., *J. Biomed. Eng.*, **12** (1990), 2-12.
- (26) Ku, D. N., ほか3名, *Arteriosclerosis*, **5** (1985), 293-302.
- (27) 山口・ほか2名, 機論, **57-539, B** (1991), 2203-2208.
- (28) 山口・矢野, 機論, **58-551, A** (1992), 1122-1127.
- (29) Mizushima, T., *Ad. Heat Transf.*, **7** (1971), 87-161.
- (30) Yamaguchi, R., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **111** (1989), 47-54.