直角分岐管内の速度分布と壁せん断応力 に対する二次流れの影響*

山口 隆平^{*1}, 鈴木 宏知^{*2}, 藤井 亀^{*3}

Effect of Secondary Flow on Wall Shear Stress and Velocity Profile in Right-Angle Branch

Ryuhei YAMAGUCHI, Hirotomo SUZUKI and Hisashi FUJII

The axial and transverse velocity components in a right-angle branch have been measured using a two-dimensional laser Doppler velocimeter. The radius R_s of curvature along the upstream corner of the side branch is one half of trunk diameter D_0 . The experiment has been carried out for two flow division ratios at the Reynolds number of 800. Consequently, it is clarified that the sinusoidal variation of wall shear stress along the proximal wall of the side branch is induced by the secondary helical flow transferred from the trunk. The wall shear stress estimated from the axial velocity profile near the tube wall at the common median plane agrees fairly well with the result measured by the electrochemical method, employed in the previous study. Therefore, the electrochemical method is one of the most suitable methods for the measurement of wall shear stress in the range of liquid laminar flow.

Key Words: Pipe Flow, Right-Angle Branch, Secondary Helical Flow, Laser Doppler Velocimeter, Wall Shear Stress, Biomechanics

1. 結 論

血管の病理学的異変が分岐部に多発することから、血管の幾何学的形状に起因する流れ構造が血管病変発生と密接に関与することが指摘されている^{(1)~(4)}。各臓器へ動脈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、動脈硬化性病変は流れが枝管へ分岐していく中枢壁(流れ分割点に相対するはく離流の発生が予測される枝管壁)上に観察され^{(5)~(8)}、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、分岐モデルを用いた流れの可視化^{(9)~(13)}、LDV や電気化学的方法による流速および壁せん断応力の測定^{(14)~(17)}、有限要素法や有限体積法による三次元数値解析が行われている⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。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、枝管壁上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増加や、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⁽²⁰⁾。

従来、枝管上流コーナを回った位置では壁せん断応力が小さく、このせん断速度に依存する物質伝達の低下が血管病変を発生・促進させるとされている。著者らは前報⁽²¹⁾で、枝管が主管から直角に分岐するとき、分岐対称面である中間面にある壁上のせん断応力を電気化学的方法⁽²²⁾⁽²³⁾により測定した。その結果、確かに枝管上流コーナ下流には壁せん断応力の小さな部位は発生するが、その回りで大きな値となり、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指摘した。この変動は、主管から枝管に流入する二次流れにより発生することを定性的に示した。

しかしながら、枝管中枢壁回りで壁せん断応力が大きな振幅で変動することは、前報で初めて明らかにされた知見である。したがって、この変動の定量的な発生要因と前報の電気化学的方法で得られた結果を他の方法で検証し、その妥当性を示すことも必要である。

本報では、前報⁽²¹⁾で取り上げた枝管上流コーナに曲率をもち、主管から直角に分岐する直角分岐管内の軸方向および二次流れの速度分布をレーザドップラー流速計により測定する。その結果、管軸方向の流れから直角分岐管内流れの基本特性を示すと同時に、分岐点回りの二次流れの速度分布から枝管中枢壁回りの壁

* 原稿受付 1994 年 12 月 27 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} 学生員、芝浦工業大学大学院。

^{*3} 芝浦工業大学工学部。

せん断応力変動の発生要因を明らかにする。さらに、管壁近くの速度分布から算出した壁せん断応力と前報の結果とを比較し、電気化学的方法の妥当性を検討する。

おもな記号

- D_0 : 主管内径
 D_1 : 枝管内径
 Q_T, Q_S : 主管上流および枝管内の流量
 Re : レイノルズ数 $= UD_0/\nu$
 R_s : 中枢壁上流コーナ曲率半径 $= D_0/2$
 U : 主管上流の平均速度
 u : x 方向速度成分
 v : y 方向の速度成分
 x : 主管軸
 y : 枝管軸
 z : 主・枝管で中間面に垂直軸
 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 として無次元化された壁せん断応力 $= \tau_W^* D_0 / (4\rho\nu U)$
 τ_W^* : 有次元壁せん断応力

略記

- D. W.: 枝管末梢壁 (Distal Wall)
 I. W.: 主管内壁 (Inner Wall)
 O. W.: 主管外壁 (Outer Wall)
 P. W.: 中枢壁 (Proximal Wall)

2. 供試分岐モデル, 測定断面 および実験方法

2.1 分岐モデル 分岐モデルの概略と速度分布の測定断面を図 1 に示す。本報では前報⁽²¹⁾ で用いたモデルのうち、滑らかに枝管に流入すると考えられる上流コーナ曲率半径 $R_s = D_0/2$ で枝管が直角に分岐する流路モデルを取り上げる。各管内径は、主管 $D_0 = 24.5$ mm, 枝管 $D_1 = 14$ mm, 枝管と主管の直径比 D_1/D_0 および面積比はそれぞれ $D_1/D_0 = 0.58$, $D_1^2/(D_0^2 + D_1^2) = 0.25$ である。下流コーナは流れを乱さない形状をとるものとして、丸みのない鋭い直角な流れ分割点とする。本研究で取り上げる流路モデルは、生体の腹大動脈から腎動脈へほぼ直角に分岐する部位を対象とする。腹大動脈径は 6 mm ないし 8 mm, 腎動脈径は 2

mm ないし 4 mm であり、直径比 $D_1/D_0 = 0.3$ から 0.5, 分岐角は 60° から 90° ⁽⁷⁾⁽⁸⁾, 腎動脈入口の形状は上流コーナは丸みをもち、下流側は流れを乱さないシャープなコーナとされている⁽¹¹⁾。本流路モデルの直径比は若干大きい、主管から枝管への基本的な流れは十分に近似できると考える。

図 1 に示すように、座標は主管軸を x , 枝管軸を y とする。一方、中間面に垂直に z 軸をとる。速度成分は、 x, y 方向の速度をそれぞれ u, v とする。供試分岐モデル形状の三次元表示を図 2 に示す。三次元形状はミットヨ製ジオタイザにより計測した。

測定断面は、分岐点から離れた主管上流で T_1, T_2, T_3 , 上流直管から曲面壁への移行部で T_4 , 主管下流では流れ分割点直後の M_1 (流れ分割点下流 0.5 mm), M_2 (流れ分割点下流 2.0 mm), M_3 , 枝管で S_1 (流れ分割点から 0.5 mm 下流), S_2 (流れ分割点下流 2.0 mm), $\dots S_7$ である。主管から枝管に至る中枢壁曲面上では、曲面壁に接線方向の速度 q を法線方向 n に測定する。なお、図 1 中に前報⁽²¹⁾ の壁せん断応力測定位置 (A_i, B_i, E_i, F_i) を併記する。

2.2 速度分布測定と壁せん断応力の算出 速度分布を 4 W アルゴンレーザを光源とした後方散乱形の二次元レーザドップラー流速計 (以後 LDV と呼ぶ)

図 1 直角分岐形状と測定断面 ($R_s = D_0/2$)

図 2 分岐モデル形状

図 3 分岐モデルとレーザ流速計の配置

により測定する。使用した集光レンズの焦点距離 122 mm であり、測定部となる焦点の大きさは大気中で直径 0.04 mm、長さ 0.2 mm である。信号処理は TSI 社製 IFA-750 A によった。

速度分布測定用の LDV と分岐モデルの配置を図 3 に示す。レーザ光は分岐中間面に垂直に入射する。速度分布の測定は、分岐対称面である中間面の直径上および中間面に垂直な z 軸上で 1 mm ごとに、また中間面にある壁上のせん断応力を算出するために管壁から 1 mm までの範囲を 0.2 mm 間隔で測定する。したがって、中間面上と中間面に垂直な方向の空間分解能はそれぞれ 0.04 mm および 0.2 mm と推定される。そこで、中間面上で管壁から 0.2 mm と 0.4 mm の管軸方向速度から算出したこう配を壁上の速度こう配とし、壁せん断応力を算出する。

作動流体として、チオシアン酸カリウム KSCN の飽和水溶液を用いる。一般に、流路材であるアクリルの屈折率 $n=1.490$ と使用流体の屈折率は異なる。KSCN の飽和水溶液(質量混合比 水:KSCN=1:2.27)の屈折率はアクリルの屈折率にほぼ等しく、この飽和水溶液を用いることにより流路材と流体との間の屈折の影響を除去できる。液温 22°C の場合、屈折率 $n=1.490$ 、密度 $\rho=1.44 \text{ g/cm}^3$ 、および動粘度 $\nu=2.18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ である。これら物性の測定は、動粘度をオストワルド粘度計、屈折率をアタゴ社製の屈折率計(R-5000)で測定した。

3. 実験結果および考察

実験は中枢壁曲率半径 $R_s=D_0/2$ 、レイノルズ数 Re は 800 程度、主管から枝管への流量配分は面積にほぼ比例しかつ生理的に適合する形状流量比 $Q_s/Q_T=0.23$ および等流量比 $Q_s/Q_T=0.49$ の 2 種類とする。血管内

(a) 分岐中間面上の軸方向速度分布

(b) 分岐中間面に垂直軸上の軸方向速度分布

 図 4 形状流量比の軸方向速度分布
($Re=760$, $Q_s/Q_T=0.23$)

流れは脈動流であり、腹大動脈では無次元振動数(ウオマースリ数)は 3 から 6⁽²⁾、最大・最小レイノルズ数はそれぞれ千数百および 200~300 程度で変動している⁽⁸⁾。一般に、無次元振動数が 10 以下の流れは準定常流であることから、腹大動脈内の基本流れをレイノルズ数 800 の定常流で検討する。また、血管分岐部では末梢部が必要とする血液を配分すると考えられることから、分岐面積比に比例し生理的に適合する形状流量比、および腎臓などの臓器の機能が活発となり、面積比以上の血液が枝管へ流れる他の条件として等流量比を取り上げる。

3.1 管軸方向速度分布 2 種類の流量比 $Q_s/Q_T=0.23$ および 0.49 に対する中間面上および中間面に垂直な z 軸上の管軸方向速度分布を、それぞれ図 4 および図 5 に示す。

中間面上の流れは、主管上流断面 T_1 でほぼ発達したポアズイユ流れから、分岐点に近づくとき次第に枝管側へ偏り、上流直管からコーナ曲面壁への移行部の断面 T_4 では主管外壁の速度こう配は小さく中枢壁側で

(a) 分岐中間面上の軸方向速度分布

(b) 分岐中間面に垂直軸上の軸方向速度分布

図 5 形状流量比の軸方向速度分布
($Re=790$, $Q_s/Q_T=0.49$)

大きくなる。この傾向は枝管への流量の増加とともに顕著となり、流量比 $Q_s/Q_T=0.49$ の場合には明らかに主流の枝管側への偏向が現れ、中枢壁側の速度こう配は急速に増加する。主管下流では流れ分割点から内壁上に急速に境界層が発達し、断面 M_1 では内壁上の境界層外縁で変曲点に近い速度分布の変化が示される。逆に主管外壁上では逆流が発生する。一方、枝管上流コーナー回りでは速度こう配は急速に増加、その後減少し枝管直管部に入った断面 S_3 および S_4 で中枢壁上の速度は小さくなるが、二次元分岐であれば離流が発生すると予想される中枢壁上に逆流は発生しない。枝管末梢壁では流れ分割点下流で急速に境界層が発達し、下流へと減速する。

中間面に垂直な z 軸上では、流量比 $Q_s/Q_T=0.23$ および $Q_s/Q_T=0.49$ とともに中間面に関して対称な速度分布を形成する。主管上流断面 T_1 ではほぼ発達したポアズイユ流れとなる。流量比 $Q_s/Q_T=0.23$ の場合、主管下流断面 M_3 では正規形（円形）の速度分布となる。主管下流への流量の少ない流量比 $Q_s/Q_T=0.49$ では、断面 M_1

図 6 形状流量比における速度分布から算出した壁せん断応力分布と電気化学的方法による結果⁽²¹⁾との比較 ($Re=760$, $Q_s/Q_T=0.23$) 図 7 等流量比における速度分布から算出した壁せん断応力と電気化学的方法による結果⁽²¹⁾との比較 ($Re=790$, $Q_s/Q_T=0.49$)

では正規形（円形）の速度分布となるが中間面から離れた両管壁近くで逆流が発生する。さらに下流の断面 M_3 では軸心の速度は減少し両管壁近くの速度は増加し、その結果軸心と両管壁近くに三つの速度の極大値をもつ流れとなる。一方、枝管内では典型的な M 形の速度分布となり、その度合いは枝管内流量の多い流量比 $Q_s/Q_T=0.49$ のほうが著しい。

3.2 壁せん断応力の比較 2種類の流量比 $Q_s/Q_T=0.23, 0.49$ に対する中間面にある壁上のせん断応力分布を、それぞれ図 6 および図 7 に示す。図の左および右半部はそれぞれ主管、枝管上の壁せん断応力分布である。各横軸は、主管半径 $R_0=D_0/2$ 、枝管半径 $R_1=D_1/2$ 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 として無次元化する。図 6, 7 中の Open Symbol は前報の電気化学的方法による結果⁽²¹⁾、Closed Symbol は LDV で測定した壁近傍の速度分布から算出した壁せん断応力であ

り、実線は電気化学的方法による結果を結んだものである。なお、逆流が発生し負の値となっていると予想される場合でも電気化学的な測定法ではその作用方向を検知できないため、正の絶対値で示す。

主管外壁(A:△)に沿う壁せん断応力は減少し、分岐点付近で最小となり変曲点をもつ。分岐点近傍では速度分布から算出した結果(▲)は負の値となり、逆流の発生と一致している。中枢壁に続く主管壁(B:○)では分岐点に近づくとき壁せん断応力は急激に増加し、流量比 $Q_s/Q_T=0.23$ の場合上流コーナ曲面壁に入った直後の B_{c-} で上流の4倍、流量比 $Q_s/Q_T=0.49$ では曲面壁の中央 B_c で13倍の大きな第1の極大値を示す。その後急激に減少し、中枢壁曲面から枝管直管部へ入った直後 $B_{17,18}$ 付近で極小値をとる。その後いったん増加し、 B_{22} 付近で第2の極大値を示す。一方、電気化学的方法では流れ分割点すぐ下流の主管内壁(◇) F_1, F_2 , および枝管末梢壁(□) E_1, E_2 で大きな壁せん断応力から下流へ急激に減少するのみであった。したがって、流れ分割点に続く末梢壁上ではよどみ点である流れ分割点での小さな値から急激に増加し8mm程度下流で最大値をとり、その後 τ_s へと漸近する。

前報⁽²¹⁾では枝管上流コーナ回りの中枢壁上では上流の直管ポアズイユ流れの壁せん断応力の4倍ないし10倍以上の振幅で正弦減衰的に変動することを示した。これらの結果は、前報で初めて明らかにされた知見であり、他の方法で検証することが必要である。言い換えると、 $Re=800$ のとき上流ポアズイユ流れの無次元壁せん断応力 τ_w は2.0であり、中枢壁曲面上や流れ分割点回りでは容易に10(5倍)以上の値に到達する。この値に相当する直管ポアズイユ流れのレイノルズ数は4000(5倍)以上となり、少なくとも直管ポアズイユ流れでは検証できない。しかしながら、今回速度分布から算出した分岐点回りの壁せん断応力と前報の値はよく一致することから、壁せん断応力の直接測定法である電気化学的方法の有効性が示された。

3.3 壁せん断応力変化に対する二次流れの影響

前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。従来、枝管上流コーナ下流の中枢壁でせん断応力は小さく、相対する末梢壁上で大きいとされてきた。確かに、枝管上流コーナ下流の中枢壁上でせん断応力は小さいが、その上・下流域では極めて大きな値となり、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ことを指摘した。著者らは、前報でその原因として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流れの可視化により定性的に示した。

流量比 $Q_s/Q_T=0.23, 0.49$ の場合、分岐点回りの代表的な断面の二次流れの速度分布をそれぞれ図8(a), (b)に示す。図8中の記号○および●は各管軸に垂直な二次流れの速度成分であり、それぞれ中間面上および中間面に垂直な z 軸上の二次流れである。例えば、図8(a)の断面 T_4 では、●の正の値は z 軸上で主管外壁から中枢壁に向かう速度成分であり、同様に○の正の値は中間面上で主管外壁から中枢壁に向かう速度成分である。したがって、記号○だけは時計回りに90°回転させればその方向と一致する。

十分上流の断面 T_1 では二次流れは発生していないかあるいは極めて小さいが、分岐点に近づくとき二次流れが発生し、枝管入口の曲面壁への移行断面 T_4 では断面全体にわたって主管外壁から中枢壁に向かう流れが生じている。その大きさは、流量比にもよるが管軸付近において主管上流の平均速度の $v/U=0.15$ (15%程度)である。特に、 $Q_s/Q_T=0.49$ の場合には中間面を挟む両管壁近くで二次流れは管軸心より大きく $v/U=0.21$ となり、主管外壁から両管壁に沿い中枢壁(上流コーナ)へ回り込むことが顕著となる。枝管内では中間面を挟んで対称な1対の渦が発生する。この対称な渦は、主管から流れ分割点へ衝突後枝管外周壁に沿って中枢壁に旋回しながら流入する二次流れによって生じる。前報に示した流れの可視化および本結果をもとにスケッチした基本流れ模様を図9(a)に示す。図下半分は分岐点回りの基本流れ模様、上半分は主管A-A'断面で見た枝管および主管下流への流れ区分図である。図9中の粗いハッチング部は主管下流、密なハッチング部は枝管へ流入する流体を示している。枝管内の二次流れ強さは主管上流に比べて極めが大きくなり、断面 S_3 の管軸では流量比 $Q_s/Q_T=0.23, 0.49$ の場合それぞれ $u/U=0.50, 1.45$ (50, 150%)である。この二次流れにより中枢壁の壁せん断応力は周期的に変化し、枝管内の中枢壁上に発生するせん断応力の第2の極大値はこの二次流れにより発生する。他方、流れ分割点下流の主管内では中間面を挟んで対称な1対の渦が発生する。流量比 $Q_s/Q_T=0.23, 0.49$ の場合、断面 M_1 の管軸付近の二次流れの強さはそれぞれ $v/U=0.26, 0.50$ (25, 50%)程度である。

二次流れ模様のスケッチを図9(b)に示す。主管上流断面では、中間面を挟んで主管外壁から中枢壁に向かう対称な二次流れが生じているが、旋回流とはならない。分岐点下流の主・枝管では基本的に対称な1対の旋回流が発生するが、流量比 $Q_s/Q_T=0.49$ の場合には断面 S_7 の中枢壁側に新たにもう一対の小さな旋回流が発生する。分岐点下流に発生する対称な旋回流の

図 8 二次流れの速度分布 (図中の Open および Closed Circle は、それぞれ中間面上と中間面に垂直な軸上の二次流れ速度分布)

個数は、流量比や幾何学的な条件により変化すると考えられるが、主管下流および枝管内の流れは少なくとも対称な一対の旋回流の発生により支配されると考えられる。

3・4 壁せん断応力変動の生理学的意義 前報で、

中枢壁に沿う壁せん断応力の負のこう配は、Ku ら⁽²⁰⁾の提案した血管病変発生との相関が示される $OSI \neq 0$ と生理学的に相似な流れとなることを示した。本報では、上記の無次元壁せん断応力を生体の血管径や血液粘度を考慮し流体力学的相似則を用いて有次元化する

図 9

ことにより、他の生理学的意義を検証する。

腹大動脈径は 6 mm 程度⁽⁷⁾⁽⁸⁾、血液粘度は純水の 4 倍程度⁽²⁾である。この関係を用いて、図 6, 7 に対応する有次元壁せん断応力 τ_w を、それぞれ図 10(a), (b) に示す。一般に、曲がり部や分岐などの影響を受けない動脈内の平均的な壁せん断応力は 15 dyn/cm² とされているが⁽²⁴⁾、図 10(a), (b) の十分上流の壁せん断応力の値は 20 dyn/cm² であり、ほぼ匹敵する値である。Fry⁽⁴⁾ によれば血管内皮細胞は 390 dyn/cm² 以上になると力学的に損傷を受けるとされている。血管病変が発生しやすいとされる中枢壁上に注目すれば、流量比 $Q_s/Q_T=0.23$, 0.49 の場合最大値はそれぞれ 80, 250 dyn/cm² となり、流量比 $Q_s/Q_T=0.49$ の場合この臨界値の 60% 程度に達する。さらに前報では病変発生が指摘される中枢壁回りで壁せん断応力こう配の犬なることを指摘した。参考のためにそのこう配を求めると、流量比 $Q_s/Q_T=0.23$, 0.49 の場合中枢壁回りの壁せん断応力のこう配の絶対値は $d\tau_w/ds=100$,

図 10 有次元壁せん断応力分布

200 dyn/cm² 程度である。ただし、 s は上流コーナ曲面壁に沿う流れ方向である。

4. 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管内の軸方向および二次流れの速度分布をレーザドップラー流速計で測定し、前報で示した中枢壁(枝管上流コーナ)回り壁せん断応力変動の発生要因、および液体流の壁せん断応力の直接測定法である電気化学的方法の有効性を検討した。

(1) 枝管中枢壁(枝管上流コーナ回り)で壁せん断応力は大きな振幅で変動し、少なくとも二つの極大値をとる。第 1 の極大値は、主管外壁から二次流れが流入する中枢壁上に、第 2 の極大値は主管上流のコア流れが流れ分割点に衝突後主管外周壁を通り旋回しながら中枢壁に流入する二次の旋回流により発生する。

(2) 中枢壁回りの変動の要因となる二次流れの大きさは、管軸心において主管上流での平均速度の 15%、形状および等流量比の場合主管下流ではそれぞれ 25, 50%、枝管内ではそれぞれ 50, 150% 程度と見積もられる。

(3) 前報で示した壁せん断応力は、壁近傍の速度分布から算出した結果と一致することから、液体流の壁せん断応力の直接測定法である電気化学的方法が有効であることが示された。

本研究費は平成6年度日本私学振興財団学術研究振興資金によった。分岐形状の三次元計測をしていただいた(株)ミットヨの石川啓治、水谷隆の両氏のご助力によった。本研究の実験では本学院生 増井秀行、池田智彦の両氏にお手伝いいただいた。関係各位に謝意を表す。

文 献

- (1) Lighthill, M. J., *J. Fluid Mech.*, **52**(1972), 475-497.
- (2) McDonald, D. A., *Blood Flow in Arteries*, 2nd Ed., (1974), 92-95, Edward Arnolds.
- (3) Caro, C. G., ほか2名, *Proc. R. Soc., London*, Ser. B, **177**(1971), 109-159.
- (4) Fry, D. L., *Circ. Res.*, **22**(1968), 93-108.
- (5) Cohnhill, J. F., ほか2名, *Atherosclerosis*, **35**(1980), 103-110.
- (6) Friedman, M. H., ほか4名, *Atherosclerosis*, **39**(1981), 425-436.
- (7) 山口・ほか4名, 循環器病の進歩, **7-1**(1986), 97-108.
- (8) Yamamoto, T., ほか10名, *Arterios. Thromb.*, **12**(1992), 626-632.
- (9) Rodkiewicz, C. M. and Roussel, C. L., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **95**(1973), 108-112.
- (10) Karino, T., ほか2名, *Biorheology*, **16**(1979), 231-248.
- (11) Houle, S. and Roach, M. R., *Atherosclerosis*, **40**(1981), 231-244.
- (12) Sabbah, H. N., ほか2名, *Arteriosclerosis*, **4**(1984), 28-33.
- (13) Liepsch, D., ほか4名, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **111**(1989), 222-227.
- (14) Rieu, R., ほか2名, *J. Biomech.*, **18-9**(1985), 703-715.
- (15) Lutz, R. J., ほか5名, *Circ. Res.*, **41**(1977), 391-399.
- (16) El Masry, O. A. and Feuerstein, I. A., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **104**(1982), 290-295.
- (17) 広瀬・ほか2名, バイオメカニズム, **11**(1991), 99-109.
- (18) Yung, C. N., ほか2名, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **112**(1990), 189-197.
- (19) Perktold, K. and Peter, R., *J. Biomed. Eng.*, **12**(1990), 2-12.
- (20) Ku, D., ほか3名, *Arteriosclerosis*, **5**(1985), 293-302.
- (21) 山口・ほか2名, 機論, **60-569**, B(1994), 56-62.
- (22) Mizushima, T., *Adv. Heat Transf.*, **7**(1971), 87-161.
- (23) Yamaguchi, R., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **111**(1989), 47-54.
- (24) Giddens, D. P., ほか2名, *Appl. Mech. Rev.*, **43-5**, Part. 2(1990), 98-102.