合流分岐部を通る流動形態と壁せん断応力*

山口隆平^{*1}, 岡部 洋^{*2}, 野川 順一^{*3}
氏 家 弘^{*4}, 高倉 公朋^{*4}Flow Structure and Wall Shear Stress through Confluent
and Bifurcating ChannelRyuhei YAMAGUCHI, Hiroshi OKABE, Jun-ichi NOGAWA,
Hiroshi UJIIE and Kintomo TAKAKURA

Cerebral artery aneurysms often form in the circle of Willis, most frequently in the anterior communicating artery. This artery forms a junction between two confluent arteries and two bifurcating arteries. In the present study, the flow field around the anterior communicating artery is simulated by two confluent tubes, two bifurcating tubes, and junctional region connecting to four tubes. The wall shear stress and the velocity profile around the anterior communicating artery in laminar steady flow were experimentally studied using an electrochemical method and a laser Doppler velocimeter, respectively. The flow around the junction is found to be very unstable and the wall shear stress to vary greatly around the apex.

Key Words: Bifurcation, Confluence, Velocity Profile, Wall Shear Stress, Cerebral Artery, Aneurysm, Biomechanics

1. 緒 言

生体内の血管は各種の分岐および合流部で構成されている。血管の病理学的異変がこれらの部位に多発することが知られ、血管の幾何学的形状に起因する血行力学的因子が関与するとされている。血管の幾何学的形状に起因する病理学的異変は、主として動脈硬化性病変と血管破裂に至る動脈りゅうの二つに大別され、その血行力学的発生には相反する因子が関与するとされている^{(1)~(5)}。病理学的には、動脈硬化性病変は流れが主管から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)~(9)}、壁せん断応力の小さな部位ではせん断速度に依存する物質伝達の低下と動脈硬化症との関連が指摘されている。他方、人体の脳内ウイリス輪(図1)は、クモ膜下出血を生じる脳底部に位置する^{(10)~(13)}。このウイリス輪の一部を構成する前交通動脈は、左右

の前大脳動脈を連結する動脈で、どちらか一方の血流供給が低下した場合に側副血行路として働く。幾何学的には、左右の対向する二つの合流流れが合流(連結)直後に合流管にほぼ直角な同一2方向の流れに分岐するという特異な部位であり、ウイリス輪のうちでも動脈りゅうの最多発部位である。動脈りゅうはこの合流流れが分岐する流れ分割点(Apex)近傍に発生しやすく、動脈硬化症に対する血行力学的要因とは反対に流れが衝突し垂直およびせん断応力の大きな部位との関連が指摘されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

前交通動脈では合流流れが合流直後にほぼ直角な同一2方向の流れに分岐するという幾何学的特徴のため、流体力学的には前交通動脈回りの流れは極めて不安定であり、流れの急変が予測される。病理学的には、前交通動脈の上流の両前大脳動脈の幾何学的非対称性や両動脈圧の不均衡と動脈りゅう発生頻度が、森竹・大槻⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、Andrews-Spiegel⁽¹²⁾やKayembeら⁽¹³⁾により検討されている。血行力学的には、Roachら⁽²⁾、森竹・大槻⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾やUjiieら⁽¹⁴⁾が流れの可視化などにより流動形態から流れが衝突する部位と動脈りゅう発生との関連を指摘している。しかしながら、前述のように前交通動脈の幾何学的形状の特異性や流れの不安定などのため、合流直後に分岐する前交通動脈回りの流

* 原稿受付 1995年5月9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, オリンパス光学工業(株) (〒192 八王子市小石川町2951)。^{*3} 学生員, 芝浦工業大学大学院。^{*4} 東京女子医科大学脳神経センター (〒162 東京都新宿区河田町8-1)。

れ構造や血管壁に直に作用する壁せん断応力は調査されていない。

本研究では、脳内の動脈りゅう発生の30%以上の最多発部位⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾である前交通動脈回りの流れ構造および血管壁に直に作用する壁せん断応力を実験的に検討する。実験では前交通動脈回りの基本的流れを検討するため、対向する二つの合流流れが合流後に直角な同一2方向の流れに分岐する合流・分岐流路でモデル化する。速度分布をレーザドップラー流速計(以後LVDと呼ぶ)により計測し、壁せん断応力を酸化還元系の電解液を用いた電気化学的手法⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾により測定する。その結果、合流分岐点近傍の流れ構造と動脈りゅう発生部位との関係を検討する。

おもな記号

- D_0 : 合流管内径
 D_1 : 枝管内径
 Q_L, Q_R : 左・右合流管内の流量
 Q_s : 分岐後の両枝管内の流量
 R_c : 流れ分割点曲率半径
 Re : レイノルズ数 $= UD_0/\nu$
 R_s : 枝管への側壁曲率半径
 U : 左・右合流管内の平均流量に基づく平均速度
 u : x 方向速度成分
 v : y 方向の速度成分
 x : 合流管軸
 y : 枝管軸
 z : 主・枝管で中間面に垂直軸
 δ : 前交通動脈内径
 ν : 作動流体の動粘度
 ρ : 作動流体の密度
 $\tau_w, \tau_{wL}, \tau_{wR}$: 左・右合流管上流, 枝管下流でのポアズイユ流れの壁せん断応力
 τ_{wL}^* : 左・右合流管内の平均流量に基づく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 $= \tau_{wL}^* D_0 / (4\rho\nu U)$
 τ_{wL}^* : 有次元壁せん断応力

2. 供試流路モデル, 測定断面および実験方法

2・1 合流・分岐流路(前交通動脈)モデル 前交通動脈の幾何学的特徴は(図1), 合流管である上流側の二つの前大脳動脈が合流すると同時に, 合流管軸にほぼ直角な同一方向の二つの下流側前大脳動脈に分岐し, 合流部を前交通動脈が連絡するという基本形状で示される。前交通動脈回りの合流から分岐に至る流れ

Fig. 1 Sketch of circle of Willis

Fig. 2 X-ray with aneurysm, sketch of communicating part and modeling

分割点近傍に動脈りゅうを持つX線写真の症例と、前交通動脈の合流・分岐流路のモデル化を図2に示す。実際の上流側の二つの前大脳動脈は180°で対向する合流管というよりも、より小さな角度(例えば, 120°程度)で合流している。しかしながら, 180°で対向する合流管をもつ本モデルは、前交通動脈の基本的な幾何学的特徴を示している。

モデル化した前交通動脈近傍の供試流路形状を図3に示す。合流管直径 $D_0=24$ mm, 枝管直径 $D_1=18$ mm, 前交通動脈径 $\delta=D_0/4=6$ mm, 流れ分割点曲率半径 $R_c=D_1/2=9$ mm, 側壁曲率半径 $R_s=D_1/2=9$ mm とする。供試流路は厚さ 30 mm の2枚の亚克力板を重ね合わせ、両亚克力板に合流管、枝管および前交通動脈をそれぞれ対応する直径のボールエンドミルで機械加工し、それぞれの接続面が滑らかな曲面壁で接続されるように研磨してある。座標は合流管外壁の中央部 A_{20} に原点 O をおき、流れ分割点を B_0 , 合流管、枝管軸をそれぞれ x, y 軸とする。速度成分は、

Fig. 3 Sketch of flow field, measurement location in confluent and bifurcating channel

Fig. 4 Cast of confluent and bifurcating channel

x , y 方向の速度をそれぞれ u , v とする。供試流路モデルに石膏を注入して得られた供試流路外形を図 4 に示す。

対称面にある管壁のうち、合流管に沿う外壁 (A_i)、合流管から枝管に至る側壁 (E_i , F_i) および中間壁 (B_i , B_{-i}) とする。これらの位置 (A_i , B_i , B_{-i} , E_i および F_i) は壁せん断応力測定用の電極位置を示し、流れ分割点近傍では 4 mm、流れ分割点から離れた位置では 5 mm ごとに埋め込んである。

速度分布の測定断面を図 3 に破線で示す。測定断面は流れ分割点 B_0 から十分離れた右合流管上流 A_{36} - E_1 、合流管から曲面壁への移行部 A_{28} - E_{12} , A_{12} - F_{12} 、曲面壁から枝管への移行部 B_{-7} - E_{16} , B_{-7} - F_{16} および流れの変化が大きいことが期待される流れ分割点回りなどである。

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 LDV により測定する。レーザ光は流路対称面に垂直に入射する。速度分布の測定は流路対称面上で 1 mm ごとに、壁上の壁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。このうち管壁と管壁から 0.6 mm までの 3 点の接線方向速度から速度こう配を求め、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、密度 $\rho=1.44 \text{ g/cm}^3$ 、動粘度 $\nu=2.18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ および屈折率 $n=1.490$ である。これら物性の測定は、密度を比重計、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。

2・3 壁せん断応力の測定 壁せん断応力の測定方法は前報同様であり、等モル濃度 10^{-2} M の黄血塩、赤血塩および支持電解質として 1 M の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⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。このとき使用した作動流体の動粘度 ν および密度 ρ は純水より若干大きい程度で、液温 30°C の場合それぞれ $\nu=0.836 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho=1.04 \text{ g/cm}^3$ である。

2・4 流れの可視化 両管軸を含む対称面に外壁 (A) 側よりレーザシート光を入射することにより、対称面の流れを可視化した。密度 1.04 g/cm^3 、直径 100 μm のポリスチレン粒子を散乱粒子とし、作動流体は散乱粒子と同程度の密度をもつチオシアン酸カリウムの水溶液(質量比 水:KSCN=1:0.16)を用いた。

3. 実験結果および考察

一般に血管は弾性管であり、血液は体積の 40% を有形成分が占める非ニュートン流体であるが、本研究では剛体管を通るニュートン流体により検討する。

他方、実験では合流流量比として正常な状態と考えられる等流量比 ($Q_R/Q_L=1.0$) と一方の流量 Q_L が何らかの理由で減少した不均衡流量比 ($Q_R/Q_L=1.5$) を対象とする。分岐後の左側と右側の枝管を等しい流量 Q_S が流れるように設定する。一般に、血管は末梢の組織が必要とする流量を供給する。したがって、何らかの障害で上流側の合流流量比が変化したとしても、分岐後の枝管を通る流量 Q_S は末梢の組織を維持するうえでつねに等しく保たれると考えることができる⁽¹⁰⁾。両合流管の平均流量 $(Q_R+Q_L)/2$ に基づく合流管での平均レイノルズ数を 400 とする。

3・1 流れの可視化と管軸方向速度分布 レイノルズ数 $Re=400$ 、2 種類の流量比 $Q_R/Q_L=1.0$ および 1.5 の場合、対称面上の流れの可視化を図 5(a) および図 5(b) に示す。これら可視化からスケッチした流れと対称面上の管軸方向速度分布を、それぞれ図

(a) Even flow ratio ($Re=400$, $Q_R/Q_L=1.0$) (b) Imbalance flow ratio ($Re=390$, $Q_R/Q_L=1.5$)

Fig. 5 Flow visualization at symmetrical plane

6(a)および図6(b)に示す。図6の代表速度のスケールは、左右合流管の平均流量に基づく平均速度 U を示し、 S はよどみ点を表す。

なお、レーザシート光は1.5 mm ないし2 mm 程度の厚みをもつため、図5には対称面上の流れに加え、対称面の上下に発生する二次の旋回流による対称面を横切り交差する流線が含まれる。図6では、これら交差する流線を削除してある。

等流量比 $Q_R/Q_L=1.0$ の場合 [図6(a)]、速度分布はほぼ左右対称となっている。流れ分割点に近づくとき右外壁上 $A_{26}-A_{22}$ でははく離流が発生し、左右の外壁に沿って一対の対称な渦が発生する。中間壁では、左右の合流管からの流れが衝突する B_3-B_4 、および $B_{-3}-B_{-4}$ 付近によどみ点が発生し、よどみ点を境に前交通動脈と枝管への流れに分かれる。合流管から枝管に至る側壁のほうに主流が偏向し、速度こう配が大きくなり、他方外壁では速度こう配が減少し A_{26} 付近で逆流が発生している。

実験では、供試流路の真上に設置したヘッドタンクから左右対称な配管を通して隔たり、エルボを介して対称な助走部(直管長さ2.3 m)を通して供試流路モデ

(a) Even flow ratio ($Re=400$, $Q_R/Q_L=1.0$) (b) Imbalance flow ratio ($Re=390$, $Q_R/Q_L=1.5$)

Fig. 6 Axial velocity profile at symmetrical plane

ルに合流する。断面 $A_{20}-B_0$ の前交通動脈部を通して、右側の合流管から全流量の1%程度の左側に通過する流れがあるため、厳密な流量比は $Q_R/Q_L=1.02$ である。

不均衡流量比 $Q_R/Q_L=1.5$ の場合 [図6(b)]、右側の外壁上では速度こう配は、前交通動脈部に近づくとき急激に増加する。右合流管から全流量の10%程度の流体が前交通動脈を通り左合流管に噴流状に流入するため、左側外壁上に大きな逆流が発生し、流れは不安定となる。中間壁では、左右の合流管からの流れが衝突するよどみ点 S の位置は等流量比の場合と大きな違いはない。

流量比 $Q_R/Q_L=1.0$ および1.5ともに、流れ分割部である中間壁によどみ点が発生し、よどみ点から前交通動脈への中間壁上で速度こう配は大きくなる。特に不均衡流量比 $Q_R/Q_L=1.5$ の場合、流量の多い右側の B_{CR} および B_0 で極めて大きな速度こう配となる。

3・2 壁せん断応力分布 2種類の流量比 $Q_R/Q_L=1.0$ および1.5の場合、対称面にある管壁上のせん断応力分布を図7および図8に示す。各図の(a)および(b)は、それぞれ合流管および枝管の壁せん断応力分布である。各横軸は合流管半径 $R_0=D_0/2$ で無次元化してある。縦軸である壁せん断応力 τ_w は、左右の合

Fig. 7 Distribution of dimensionless wall shear stress in confluent and bifurcating channel at even flow ratio ($Re=400$, $Q_R/Q_L=1.0$)

流管の平均流量に基づく合流管上流ポアズユ流れで 2.0 として無次元化する。図 7, 8 中の Closed Symbol は LVD で測定した速度から算出した壁せん断応力であり, Open Symbol は電気化学的方法による結果, 実線は電気化学的方法の結果を結んだものである。なお, 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, 逆流が発生している場合のように壁せん断応力が主流に対して逆向きで, 負の値となっていると予想される場合でも正の絶対値で示す。同様に, LDV で測定した速度から算出した壁せん断応力を示す場合にも, 十分上流の両合流管では主流の向きが反対であり, かつ合流点回りではその流れの変化が大きいことから, 絶対値で示す。したがって, 壁せん断応力の作用方向を見るためには速度分布と対応させる必要がある。なお, 図 8 の記号を通る垂直線は, 流れの不安定(乱れ)により発生した壁せん断応力の変動を示す。図 7, 8 中の τ_L , τ_R はそれぞれ左右の合流管で十分上流, τ_S は枝管の十分下流でのポアズユ流れの壁せん断応力を示す。

等流量比 $Q_R/Q_L=1.0$ の場合(図 7), 主管外壁(A: Δ)に沿う壁せん断応力は合流点に近づくとき左右対称

Fig. 8 Distribution of dimensionless wall shear stress in confluent and bifurcating channel at imbalance flow ratio ($Re=390$, $Q_R/Q_L=1.5$)

に急激に増加し, A17, A23 で極大値を, A19 で小さくなりその作用方向が反転する。合流点の両側 A17, A23 の極大値は, 外壁に発生する左右対称な渦による。流れの方向を考慮すると, A13 から A19 までの領域と A27 から上流の右合流管外壁では, 壁せん断応力の作用方向は x 軸の負の方向に作用する。したがって, 方向を考慮すると合流点近傍で壁せん断応力は A17 で $\tau_w = -11$ から, A23 で $\tau_w = 13$ まで急激に変化する。枝管に続く側壁(E: $\diamond$, F: $\square$)では主流が枝管側に偏向するため, 曲面中央部(E13, F13)で $\tau_w = 30$ の極大値に達する。側壁上の壁せん断応力は枝管に入るといったん減少するが, その下流で増加に転じ τ_S に漸近する。左右の側壁上ではほぼ対称に分布している。流れを分割している中間壁(B: $\circ$)上では, 流れ分割点である B0 で, よどみ点である B3-B4 および B-3-B-4 付近で小さな値をとる。このよどみ点近傍でその値は大きく変動する。このように, 流れ分割点近傍の中間壁および外壁で壁せん断応力は大きく変化し, かつ壁せん断応力のこう配は非常に大きくなる。

不均等流量比 $Q_R/Q_L=1.5$ の場合(図 8), 外壁(A: Δ)に沿う壁せん断応力は合流点に近づくとき急激に増

加し, A_{21} で $\tau_w = 60$ 以上の大きな極大値, A_{13} 付近で第2の極大値をとる。外壁のせん断応力は, A_{13} から右合流管全域にわたって負の値となる。側壁(E:◇, F:□)ではほぼ対称に分布しているが, 合流部を通して流体が流入してくる流量の少ない左側の曲面壁中央 F_{14} の壁せん断応力のほうが E_{14} よりも大きくなる。これは, 前交通動脈部を通った流体が左合流管の主流を側壁のほうに偏向させているためである。中間壁(B:○)では, 左右の合流管から流れが衝突するよどみ点 S は B_2 - B_3 , および B_3 付近に発生し等流量比の場合と大きな相違はない。流量の多い右側の B_{-1} で大きな値 $\tau_w = 50$, および合流点 A_{21} 近傍の極大値 $\tau_w = 60$ の発生要因は, 右合流管から全流量の10%の流体が縮流しながら前交通動脈部を通過する際速度こう配の増加による。さらに A_{13} の第2の極大値は, この縮流が噴流となり左合流管外壁上に形成する旋回流の最も速度こう配の大きい位置である。合流管および枝管ともに, 前交通動脈部を通して流体が流入してくる左側で流れはより不安定となる。

電気化学的方法と速度分布から算出された壁せん断応力は, 壁せん断応力の絶対値が大きな位置で両者の

差が大きくなる。電気化学的方法では, 合流管上流で $Re = 400$ に相当する直管ポアズユ流れの壁せん断応力を2.0として無次元化した。図7, 8に示すように, 流れ分割点回りの壁せん断応力は30(合流管上流値の15倍)以上の値に到達し, ポアズユ流れで換算すれば対応する Re 数は6000(15倍)以上となる。この値は層流域での結果から外挿して算出したものであり, LDVによる速度分布から評価した結果が正しいとすれば, 層流域以上の高 Re 数の流れで壁せん断応力は過大に評価されることになる。しかしながら, 電気化学的方法は流れ場全体にわたって連続して測定でき, 領域全体を把握する場合に極めて有効な方法である。

3.3 壁せん断応力変動の生理学的意義 不均衡流量比 $Q_R/Q_L = 1.5$ の場合, 実際の血管に対応させて相似則により換算した有次元壁せん断応力 τ_w^* を, 図9(a), (b)に示す。ただし, 前交通動脈部上流の合流管である前大脳動脈の内径は3mm⁽¹⁸⁾, 血液粘度は純水の4倍程度⁽³⁾とした。一般に, 曲がり部や分岐, 合流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1ないし2Paとされている⁽¹⁹⁾, 合流管の十分上流の壁せん断応力の値は3ないし5Paであり, 約2倍の大きさである。森竹⁽¹⁰⁾ らによれば前交通動脈の動脈りゅうは, 合流管外壁よりも流れを分割する中間壁上の流れが衝突するよどみ点近傍, かつ流量の多いほうの壁上に発生するとされている。さらに, 血管により病理学的異変の発生様式に差異はあるものの, 血管内皮細胞は壁せん断応力が39Pa以上になると力学的に損傷を受けるとされている⁽⁵⁾。そこで, 中間壁で流量の多いほうのよどみ点近傍に着目すれば B_{-1} で $\tau_w^* = 100$ Pa となり, 血管内皮細胞が損傷を受けるとされる臨界値の2倍以上に達する。また, 動脈内の平均的な壁せん断応力が2Paであることを考慮して図9の値の1/2に換算したとしても, よどみ点近傍の B_{-1} で50Paとなり臨界値に匹敵する。壁せん断応力の大きさは流路形状や合流流量比に依存すると考えられるが, 流量の多い中間壁上に発生するという従来の病理学的知見⁽¹⁰⁾ と一致している。このように, 前交通動脈の流れ分割点近傍に発生する動脈りゅうの発生要因として, 流れが衝突する部位の回りで壁に作用する垂直応力とともに接線方向に作用する壁せん断応力の大きさ, およびそのこう配が大きな影響をもつものと考えられる。

4. 結 論

本研究では, 対向する二つの合流流れが合流後に直角な同一方向の二つの流れに分岐する合流・分岐流路

Fig. 9 Dimensional wall shear stress corresponding to Fig. 8 transformed by similarity ($Re = 390$, $Q_R/Q_L = 1.5$)

でモデル化した前交通動脈回りの基本的流れを実験的に検討した。その結果、動脈りゅうの好発部位である前交通動脈回りで流れの変化が大きいことが示された。

(1) 動脈りゅうの好発部位である前交通動脈回りでは、壁せん断応力の変化が大きい。特に、不均衡流量比では、合流管外壁および流れを分割する中間壁上で壁せん断応力は大きく変化する。

(2) 動脈りゅうの好発部位とされている流量の多いほうの中間壁上では、流れが衝突するよどみ点と前交通動脈部の間で壁せん断応力は急激に大きくなる。この領域の壁せん断応力の増加はよどみ点から前交通動脈に流入する縮流により生じる。

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。本研究の実験では元本学院生 津田昌宏、元本学学生 中鶴保久、本学院生 岡部昭典の各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) Roach, M. R., ほか2名, *Stroke*, **3**(1972), 255-267.
- (3) McDonald, D. A., *Blood Flow in Arteries*, 2nd ed., (1974), 92-95, Edward Arnolds.
- (4) Caro, C. G., ほか2名, *Proc. R. Soc. London, Ser. B*, **177** (1971), 109-159.
- (5) Fry, D. L., *Circ. Res.*, **22**(1968), 93-108.
- (6) Cornhill, J. F., ほか2名, *Atherosclerosis*, **35**(1980), 103-110.
- (7) Friedman, M. H., ほか4名, *Atherosclerosis*, **39**(1981), 425-436.
- (8) 山口隆美・ほか4名, 循環器病の進歩, **7** 1(1986), 97-108.
- (9) Yamamoto, T., ほか10名, *Arterios. Thromb.*, **12**(1992), 626-632.
- (10) 森竹浩三・ほか5名, *Neurologia Medico Chirurgical*, **16** 5(1976), 427-435.
- (11) 大槻宏和・ほか4名, 日本バイオレオロジー学会論文集, **9** (1986), 335-338.
- (12) Andrews, R. J. and Spiegel, P. K., *Surg. Neurol.*, **16** 2(1981), 122-126.
- (13) Kayembe, K. N. T., ほか3名, *Stroke*, **15** 5(1984), 846-850.
- (14) Ujiie, H., ほか6名, *Stroke*, **24** 12(1993), 1850-1856.
- (15) Hennerici, M., ほか3名, *Surg. Neurol.*, **27**(1987), 439-448.
- (16) Mizushima, T., *Adv. Heat Transf.*, **7**(1971), 87-161.
- (17) Yamaguchi, R., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **111** (1989), 47-54.
- (18) Reutern, G. M. and Budingen, H. J., *Ultrasound Diagnosis of Cerebrovascular Disease*, (1993), 38-46, Thieme Medical Publishers.
- (19) Giddens, D. P., ほか2名, *Appl. Mech. Rev.*, **43** 5, Part. 2(1990), 98-102.