

# 粗面血管内流れの流れ構造

中西助次\*・大坂英雄\*\*

## Structure of the Blood Flow in the Vascular with Rough Wall

Suketsugu NAKANISHI and Hideo OSAKA

### Abstract

In order to search for the influence of roughness on the vascular lesion from hydrodynamical point of view, the flow in a two-dimensional channel with several roughness elements was investigated numerically as a model of the blood flow in an artery with rough surface. Under the condition that the wall of vascular was rigid and the blood was assumed to be Newtonian fluid, the Navier-stokes equation was solved by the finite difference method for the range of Reynolds number of  $50 \leq Re \leq 2000$ .

From the calculation results, the influence of roughness on the vascular lesion was discussed about the acting shear stress and pressure on the rough wall which were considered as being a source of vascular lesion. A part of the present investigation has already been reported in the Journal of JSME (1986). In this paper, a reconsideration was made synthetically with the some additional data of the flow structure. In addition, an example of experimental result utilizing the flow-visualization technique by authors was also presented in this paper. Good agreement was obtained between the experimental and numerical results for the flow pattern over the rough wall.

### 1. まえがき

血流状態が何らかの形で血管内障害に関係するというのが最近の1つの解釈であり<sup>(1)~(4)</sup>, 流体力学的観点からの究明が要求されるようになった。これに関する最近の研究によると, 血管内壁に働くせん断応力, 圧力および血流のよどみなどの流体力学的因子が種々の血管形状モデルで取り上げられており<sup>(5)~(9)</sup>, しかも局所的流れの構造が要因になると報告されている<sup>(10),(11)</sup>。ところで, これらの研究の多くは, 病変の発生が多発する血管分岐部, 屈曲部あるいは狭窄部の領域を対象としたものが多い<sup>(4)</sup>。一方, 血管病に関する血流の影響は, 血管全体の流れ構造よりはむしろ内壁近傍の流れ構造

が問題である。その点から考えると, 血管内壁の粗さによる流れの変化は血管病変に何らかの影響をおよぼすであろうと思われるがこれに関する研究は少ない<sup>(12),(13)</sup>。また, これに関連する医用工学の分野においても, 人工血管の表面粗さ, あるいは人工血管と生体血管の接合(縫合による)によってできる内壁粗さなどが問題にされている<sup>(14)</sup>。

そこで既報<sup>(15)</sup>では, 粗面血管のモデルとして二次元粗面流路を考え, 血液をニュートン流体として, ナビエ・ストークスの方程式を数値的に解いて粗さ近傍の流れを調べ, 粗さの血管病におよぼす影響について考察した。それによると, i) 粗さ山部では比較的高いせん断応力を示し, 粗さ溝部では定在渦および血流のよどみ領域が存在する, ii) 粗さ要素で流れの剥離・再付着が起り, 局所的高圧力あるいは低圧力を示す領域が存在することが推測できる, などのことが明らかとなった。したがって, 血管病発生の原因を流体力

\*広島工業大学

\*\*機械工学科

学的因子から考えると、粗さの血管病変におよぼす影響は重要であるとの推論を得た。ただし、紙面の都合上示した結果は計算したすべてについてではなく、特に圧力については粗さ近傍の流れパターンから定性的に解釈して局所的高圧力領域が存在することを推論したにとどまっていた。

そこで本論文では、既報<sup>(15)</sup>で示した結果に適宜データを充足し、総合的な解釈を試みるため、再度粗さ近傍の流速分布、等圧力分布などを示して統一的な見解を与えることを目的としている。加えて、計算結果の検証のため粗さ溝部に注目した可視化実験の一例も示した。なお、血管流は拍動的であるが、準定常的流れの領域もあり、また基礎的なデータを蓄積する目的から、第一段階として定常流について調べた。

2. 基礎方程式と計算モデル

血液のレオロジー的性質はプラズマ（血漿）と赤血球の2成分によって決定されると考えてよい。プラズマはニュートン流体であるが、血液全体としては非ニュートン流動を示し、せん断応力の小さい領域で降状値をもつ Casson の式<sup>(16)</sup>にしたがうことはよく知られている。一方、動脈流における血流はせん断応力が大きくニュートン流体のレオロジーをよく近似する。したがって、血液をニュートン流体として取り扱った研究は多く<sup>(1)~(4)</sup>、本研究においても血液をニュートン流体と仮定する。すると、流れを記述する方程式は、連続の式とナビエ・ストークスの方程式で、流れ関数  $\Psi$  と渦度  $\omega$  を用いて

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \omega \quad (1)$$

$$\omega = -\nabla^2 \Psi \quad (2)$$

で与えられる。ここで、方程式(1)、(2)は既報<sup>(15)</sup>と同様に平均流速  $U_m$ 、流路幅  $H$  を代表速度および代表寸法に選んで無次元化している。また  $Re$  はレイノルズ数で、 $Re = U_m H / \nu$  ( $\nu$  は動粘性係数) で定義する。これらの方程式を差分法で解いて調べる。

計算モデルは既報<sup>(15)</sup>と同様で、流路内の流れが二次元ポアズイユ流となった領域に粗さ要素を置き、主流方向無次元長さで10の計算領域としたものである(Fig. 1(a)参照)。また血管は柔軟で内圧変動に対して追従するように動くが、動脈硬化病の血管はある程度硬くなっていることを考慮して、壁は剛体と仮定する。粗さモデルは、要素形状を一辺が流路幅の1/10の正方形とし、Fig. 1(b)に示したような壁より上に0.04、壁より下に0.06(以下ケースIと呼ぶ)と Fig. 1(c)に示したよう

な壁より下に0.1(以下ケースIIと呼ぶ)の2つの場合を考えた。また、粗さ要素の個数は3個と5個について計算した。ただし、ケースIは3個の場合についてのみ調べた。

方程式(1)、(2)は境界条件を、i) 上流、下流境界で流れは二次元ポアズイユ流、ii) 壁で流れはすべりなし、iii) 中心軸に対し流れは上下対称流、とし流路幅の1/2の計算領域について非定常法を用いて解いた。ここで、差分格子は  $\Delta x = \Delta y = 1/100$  の正方形格子で、解の収束判定は  $\Psi$  および  $\omega$  について  $|\Psi^{(n+1)} - \Psi^{(n)}| \leq 10^{-5}$  ( $n$  は反復回数)、 $|\omega(t + \Delta t) - \omega(t)| \leq 10^{-5}$  で行なった。また、計算の手順および差分式は著者らの既報<sup>(17),(18)</sup>と同様である。

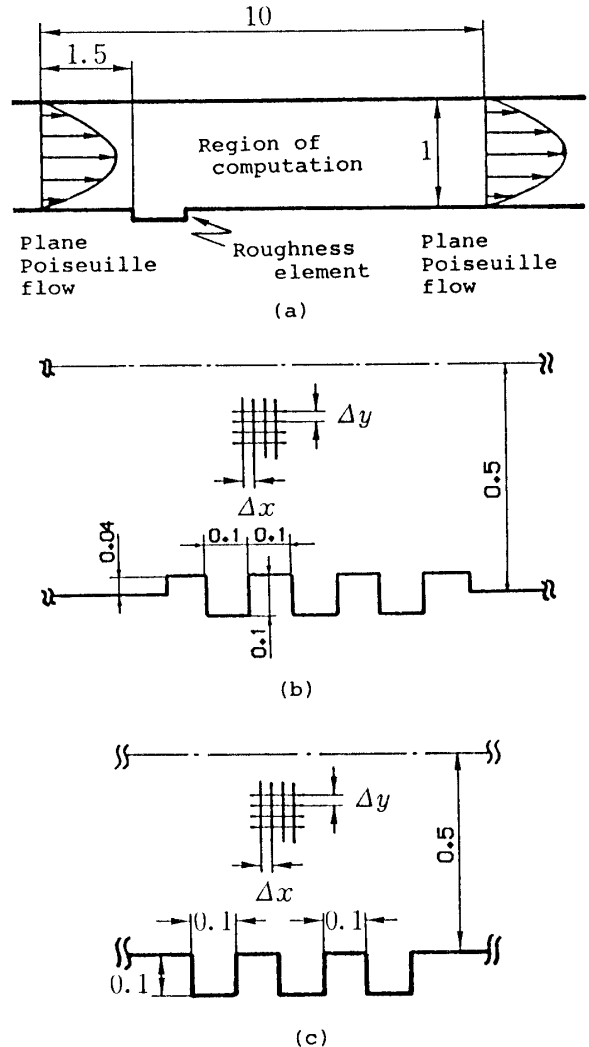


Fig. 1 Calculation model, (a) Two-dimensional channel with roughness elements, (b) Geometry of roughness model Case I, (c) Geometry of roughness model Case II.

3. 結果と考察

血管内壁の粗さはケースIのような壁面より隆起した場合の方が一般的である。Antonia ら<sup>(19)</sup>の乱流粗面境界層の実験結果によると、このような粗面は最初の粗さの影響が極めて大きいことが指摘されている。既報<sup>(15)</sup>で示したように、層流においても最初の粗さに働くせん断応力は大きく (Fig. 14に再掲した)、Antonia らの指摘を裏づける結果であった。また、ケースIIはケースIに比べ粗さの影響は小さいが、粗さは血管病に悪影響をおよぼすという結果が得られている。そうすると、影響の少ないケースIIを調べ粗さが血管病に影響するということになれば、ケースIの場合はそれ以上の影響があると考えられることは可能である。したがって、本論文では影響の少ないケースIIを主に調べることにした。

3.1 流れパターン

Fig. 2 (a)~(c)は粗さ近傍の流れパターンを表わす流線を、ケースIIの粗さ要素3個の場合について示したものである。レイノルズ数はヒトの太い動脈から大動脈における血流のレイノルズ数範囲となるよう  $Re = 50 \sim 1000$  を選んで示した。ここで、これらの図は  $x$  軸に対し  $y$  軸を2倍の寸法で画いてある (Fig. 3, 4も同様)。図から、流れは粗さ要素に対応した周期的流れパターンを示す。図には示していないが、この周期的流れパターンは壁からの距離  $y=0.1$  で消え、流線は滑面壁に平行な流れパターンを示す<sup>(20)</sup>。したがって、このような粗さの流れにおよぼす影響はごく壁近傍であるといえる。図からわかるように、粗さ溝部には渦が定在し、その渦は下流にゆくほど発達している。この傾向は図示したレイノルズ数の範囲内では、 $Re = 400$  の場合にははっきりとみることができるが、他のレイノルズ数については顕著でない。また、溝内の渦はレイノルズ数の大きい場合ほど発達したものとなっている。これらのことから、 $Re$ 数の小さい場合は渦の発達が遅いため、また  $Re$ 数の大きい場合はその発達が早いので下流にゆくにしたがい発達する溝内渦の様子を顕著にみることはできないものと考えられる。Fig. 3は粗さ要素5個の場合の1例として  $Re = 1000$  を示したものであるが、粗さ要素3~5番目の溝の渦についてはほとんど差異がなく、渦はすでに3番目でほぼ十分発達しているとみてよい流れパターンを示している。Fig. 4はケースIの流れパターンをケースIIの場合と比較するため示したもので、 $Re = 200$  を代表として示した。ケースIは粗面ケースIIと異なり、最初の粗さ溝部の渦が

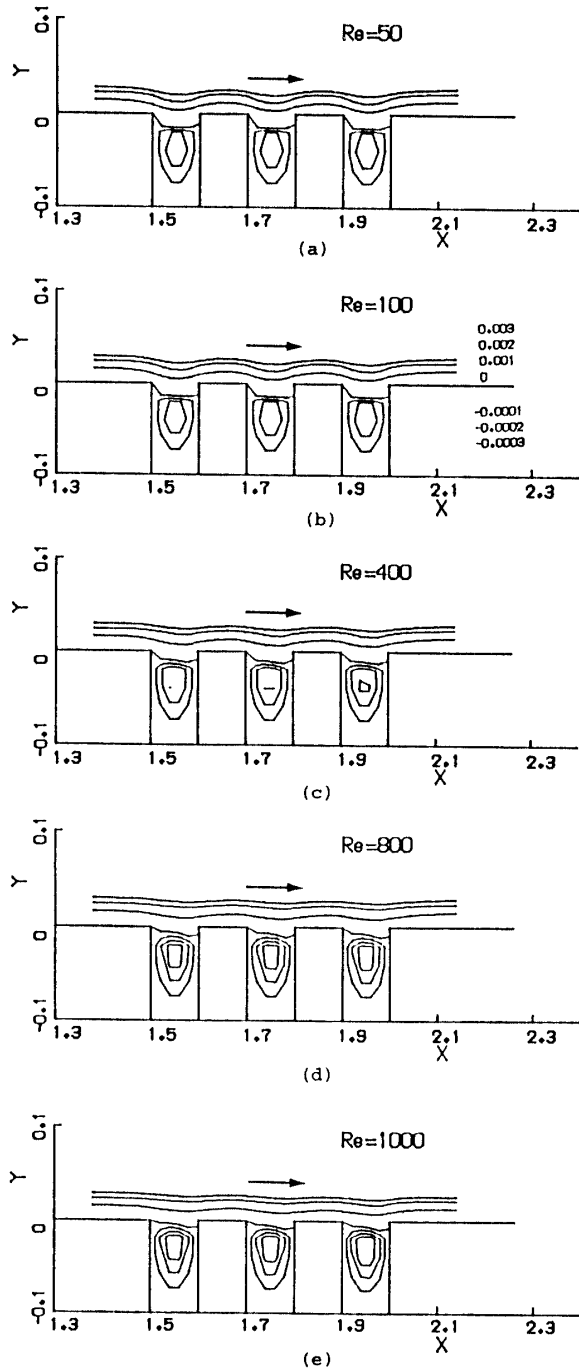


Fig. 2 Stream lines (Case II).

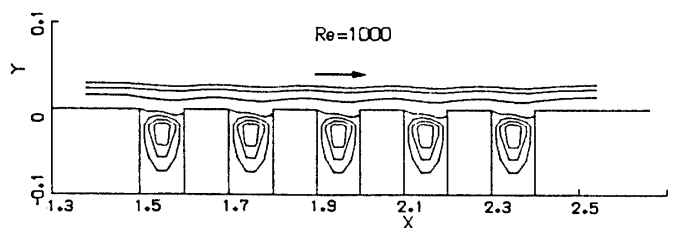


Fig. 3 Stream lines (Case II).

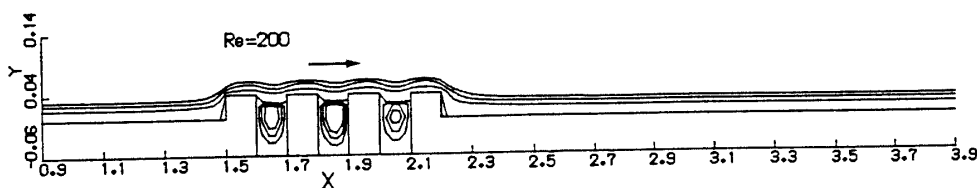
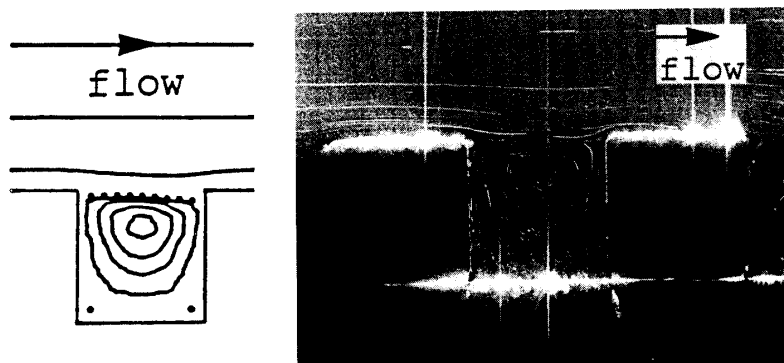


Fig. 4 Stream lines (Case I).

Fig. 5 Flow pattern over the roughness groove by visualization method (Case I,  $Re = 900$ , insertion figure of stream lines is numerical result.)

かなり発達しており、最後の粗さ溝部の渦が最も発達していない。この流れパターンからも隆起状の粗面は最初の粗さの影響が著しいことが推測できる。また最初の粗さの前向きステップおよび最後の粗さの後ろ向きステップで剥離渦がみられ、新見の血栓性動脈硬化に関する微小隆起物上の流れについての実験<sup>(13)</sup>と同様の結果である。既報<sup>(15)</sup>でも述べたが、すべての場合について粗さ溝部で流れの剥離・再付着がみられ、局所的に高圧力および低圧力の領域が存在する(3.3で後述する)ことが推測できる。

Fig. 5は計算結果を検証するために行なった可視化実験の1例を示したものである。実験は回流式水槽<sup>(21)</sup>に長さ350cm、深さ5cm、幅40cmの二次元流路を設置して、計算モデルに対応するように断面形状が一辺0.5cmの正方形の二次元粗さ要素を配列した二次元粗面流路で壁近傍の流れパターンに注目して行なった。図の可視化写真はケースII、 $Re = 1000$ の場合についてのもので、参考のため対応する流線図を挿入図で示しておく。実験と計算結果の比較検証は渦現象の比較に加えて渦中心の位置についても調べた。その結果、計算結果と実験結果は良く一致するものであった。

### 3.2 流速分布

流線図から推測できることだが、粗さ溝部の定在渦による流れは非常にゆっくりとしていて、特に溝底の

領域での流れはほとんどよどみ状態である。Fig. 6は、この溝内部の流れの様子を流速ベクトル分布で示したもので、ケースIIの粗さ要素3個の場合について $Re = 50$ と $Re = 2000$ を選んで示した。また、いずれも上流より2番目の溝について示した。図から、溝内の流れは非常にゆっくりして、溝底部ではよどみ流の状態であることがわかる。また $Re = 50$ の場合は主流より溝内へ流れ込む流速ベクトル分布となっているが、 $Re = 2000$ ではこの傾向はわずかにみられるだけである。この速度ベクトル分布からみた流れパターンは先に示した流線図(Fig. 3)と対応する流れパターンとなっている(Fig. 3には $Re = 2000$ についての流線図は示していないが $Re = 1000$ とはほぼ同様であった)。

Fig. 7とFig. 8は粗面近傍でみられた粗さ要素に対応する周期的流れパターンを流速分布で表わしたもので、いずれもケースIIの場合の $Re = 100$ について $y =$ 一定の流速分布で示した。Fig. 7は粗さ要素3個の場合を粗さ近傍に注目して示したものである。図から壁近傍( $y = 0.02$ )の流速分布は壁の拘束条件のない溝部で増速、拘束条件を受ける山部で減速の分布傾向がみられる。この周期的分布曲線は $y$ の増加とともに下流に位相がずれた曲線となり、 $y = 0.06$ では $y = 0.02$ における分布傾向と逆対応の溝部で減速、山部で増速の分布を示す。また、粗面上の流速は下流にゆくにしたがいわずかな増速傾向がみられる。このことは流線図で

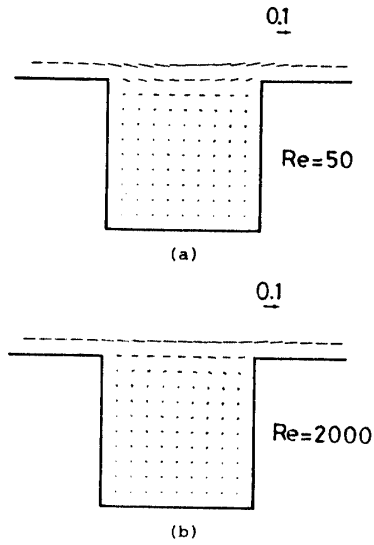


Fig. 6 Distribution of velocity – vectors in the roughness groove (Case II).

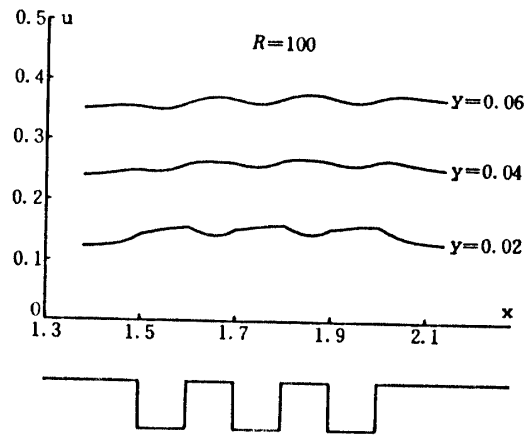


Fig. 7 Velocity distribution at the constant heights (Case II), Flow is left to right.

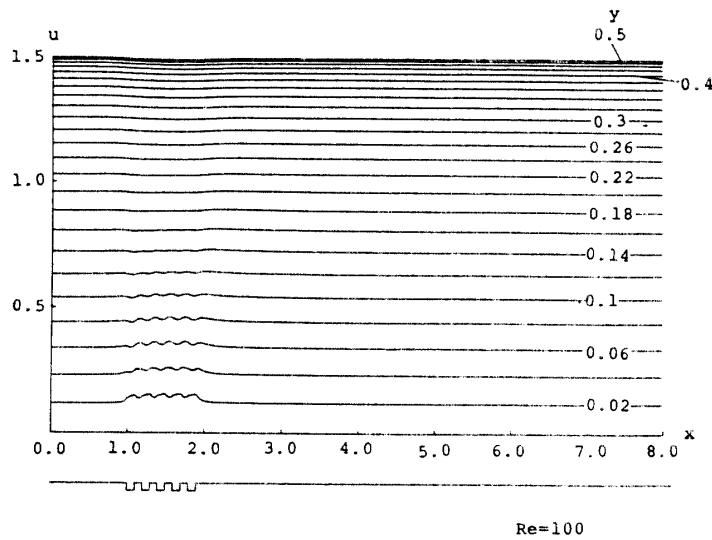


Fig. 8 Velocity distribution at the constant heights (Case II), Flow is left to right.

調べた下流の溝の渦ほど発達する流れパターンと対応している。これらについて、さらに粗さ要素5個の場合の  $(0, 0) \leq (x, y) \leq (8, 0.5)$  の広い領域について示した流速分布から調べる (Fig. 8)。図から、粗面上の周期的流速分布は  $y=0.12$  までみられ流線調べた位置とほぼ対応する。図示していないが、ケースIの場合も最初の粗さを除けばほぼ同じ距離 (山部上端より測った距離) であった。また、下流にゆくにしたがい増速傾向を示す粗面近傍の流速  $u$  についてみると、上流から5番目の粗さにおいても流れは十分発達した平衡状態にはなっていない。流路中央の粗面上

の流速は滑面領域に比べ減速分布であり、粗面壁近傍と逆対応の下流にゆくにしたがいわずかに減速する分布傾向を示す。この流路中央での流速の減速は流路断面の流量が一定であることによる。以上の様子をさらに二次元ポアズイユ流の流速との差  $u - u_p$  分布で調べる (Fig. 9)。図から、粗面壁近傍の周期的流速分布や流路中央での減速分布あるいは粗面領域で下流にゆくにしたがい増速 (壁近傍)、一方減速 (流路中央) 傾向の様子が顕著にみられる。さらに、粗さの影響を受けた流れは滑面領域に入ってもすぐにポアズイユ流分布とはならず、ケースII,  $Re = 100$  では無次元距離で約2.5

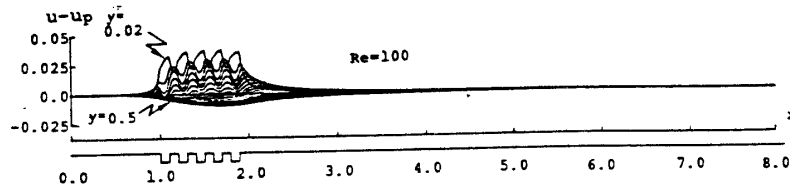


Fig. 9 Distribution of velocity difference ( $u-up$ ) along the channel (Case II).

の緩和距離が必要である。図示していないが、この緩和距離は  $Re$  数の増加とともに大きな値をとり、ケース I とケース II を比べるとケース I の方が約 2 倍長い距離を必要とする。また流路中央と壁近傍とでは壁近傍の方が早くポアズイユ流の流速分布にもどる様子がみられる。

3.3 圧力分布

Fig. 10(b)はケース II の  $Re=100$  の場合について、 $y$  = 一定での主流方向圧力分布を無次元圧力  $P = Re(\bar{p} / \frac{1}{2} \rho U_m^2)$  で示したものである。ここで、 $\bar{p}$  は次元をもった圧力であり、圧力の基準は流路入口とした。図は壁近傍  $y=0.02$  と流路中心軸上  $y=0.5$  での圧力分布を選んで示した。流路断面全域については粗さ要素 1 個当り(上流から 3 番目の粗さ)についての圧力分布を Fig. 10(b)に示した。図から、滑面領域では二次元ポアズイユ流における圧力勾配一定 ( $-Re(dP/dx) = 24$ ) の圧力分布を示す。粗面領域の圧力は壁近傍  $y=0.02$  では粗さ要素に対応した周期的圧力分布を示すが流路中心軸上  $y=0.5$  では周期的分布はみられない。粗面領域の圧力分布を流路断面についてみると、 $y \leq 0.12$  までは周期的圧力分布がみられるが、 $y > 0.12$  では圧力勾配一定(ただしポアズイユ流に比べ若干圧力回復がみられ  $-Re \times (dP/dx) \leq 24$  の圧力分布となる (Fig. 10(b))。これらの傾向は前述した流速分布傾向と対応している。

既報<sup>(15)</sup>で流れパターンから推測した粗さでの流れの剥離あるいは粗さへの再付着による局所的な低圧力および高圧力領域について定量的に調べてみる。Fig. 11 は粗さ要素 5 個の場合について、上流から 3 番目の溝に注目して示した等力圧分布図である。ここで無次元圧力  $P$  は溝部中央の流路中心軸上の点( $x=1.45, y=0.5$ )を圧力の基準  $P=0$  として計算し、図の等圧力線には  $P/2$  の値で示している。図から、壁近傍の圧力分布は複雑であるが  $y \geq 0.12$  では  $dP/dy = 0$  の分布となっている。また、 $y \geq 0.12$  の領域の圧力勾配は  $-Re \times (dP/dx) = 24$  である。当然のことであるが、等圧分布も壁近傍の周期的流れパターンや  $y \geq 0.12$  で平行流とな

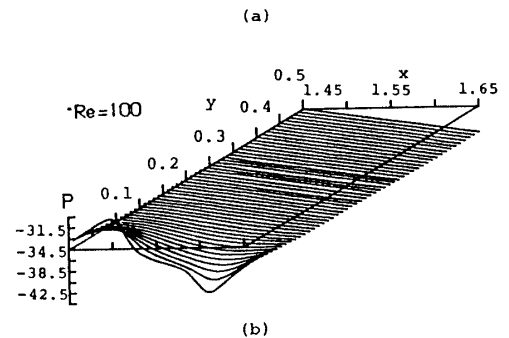
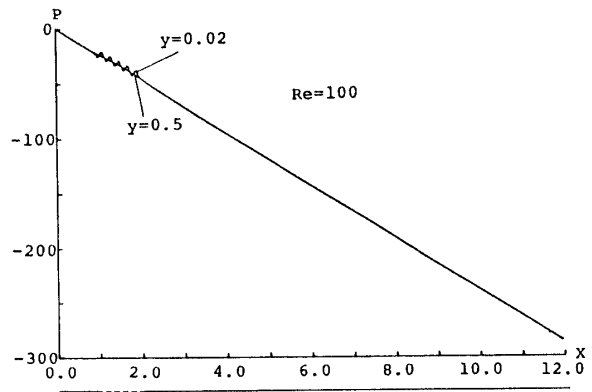


Fig. 10 Pressure distribution along the channel (Case II), at the  $y=0.02$  and  $y=0.5$ , (b) on the region of  $(1.45, 0.01) \leq (x, y) \leq (1.65, 0.5)$ .

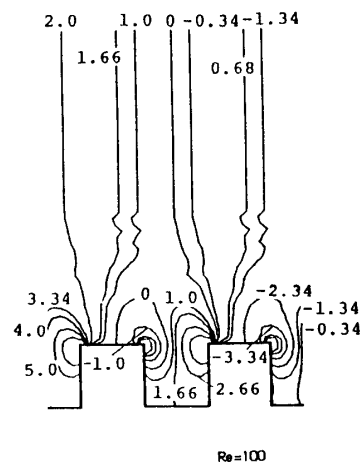


Fig. 11 Pressure contours on the region of rough wall (Case II).

る流れパターンと対応している。粗さ要素に注目すると、流れの剥離・再付着の起こる角近傍に局部的に高圧力あるいは低圧力を示す等圧線の閉じた領域がみられる。高圧力を示す粗さ前向き壁での無次元圧力の値はその断面における流路中心軸上での値と比べ圧力差  $\Delta P \approx 6$  の高圧力を示す。また、図示していないが  $R_e$  数の増加とともに  $\Delta P$  の値は増加する。

### 3.4 壁面せん断応力分布

Fig. 12にケースII, 粗さ要素3個の場合の, Fig. 13にケースII, 粗さ要素5個の場合の壁面せん断応力分布を示す。各レイノルズ数ともほぼ同様な傾向 (図示していない)であったが、比較のため  $R_e=400, 1000$  を選んで示した。また Fig. 14にケースIとケースIIとの分布傾向の違いをみるため、既報<sup>(15)</sup>で示したケースI,  $R_e=200$ の場合の壁面せん断応力分布を再掲しておく。壁面せん断応力は  $C_f = \tilde{\tau}_w / (\rho U_m^2 / 2)$  で定義される壁面摩擦係数で評価し、溝部については  $y=0$  (ケースIの場合は  $y=0.04$ ) での  $\tilde{\tau}_{xy}$  を用いて  $C_f = \tilde{\tau}_{xy} / (\rho U_m^2 / 2)$  で表わした。ここで、添字 $\sim$ は有次元を示し、 $\tilde{\tau}_w = \mu (\partial \tilde{u} / \partial y)_{at\ wall}$ ,  $\tilde{\tau}_{xy} = \mu (\partial \tilde{u} / \partial x + \partial \tilde{v} / \partial y)_{y=0}$ ,  $\mu$  は粘性係数,  $u, v$  は流速の  $x$  および  $y$  方向成分である。

まず、全体的な様子を理解するため、すべての条件について計算した (すべてを図示していない) 壁面せん断応力分布の概要を述べる。せん断応力は粗さ山部で高い値を示し、溝部では壁の拘束がとれて低い値を

示す。局部的に高い値を示す粗さ山部のせん断応力の値は滑面領域における値と比べて約40%ほど高い値をとる。またせん断応力分布も粗さ要素に対応した周期的分布がみられ、この粗面領域における平均値は滑面領域における値とほぼ一致する (Fig. 12~14の図中の点線は平均値を示す)。

次に、ケースIとケースIIの場合について比較検討する。ケースIの粗面は最初の粗さに働くせん断応力の値が最も大きく (Fig. 14), それに対しケースIIの場合には下流の粗さほど高い値を示す (Fig. 12, 13)。また溝部でのせん断応力に注目すると、ケースIの場合には下流にゆくほど減少し、ケースIIの場合にはわずかながら増加傾向がみられる (Fig. 12~14)。この現象は先に流線や流速分布から調べた壁近傍の流れパターンや溝内の渦の発達傾向と一致している。

既報<sup>(15)</sup>で  $C_f \times R_e$  分布から粗面に働くせん断応力のレイノルズ数に対する依存度を調べ、その依存度は極めて弱いことを述べた。本報では詳細には調べないが、再度レイノルズ数の変化について調べてみると、粗さ要素3個の  $R_e=1000$  を除いて (最後の粗さの溝部から滑面領域入口における分布が他の場合と異なる) ほぼ同様な分布傾向がみられる (Fig. 12, 13参照)。

## 4. まとめ

粗面血管のモデルとして二次元粗面流路内の流れを

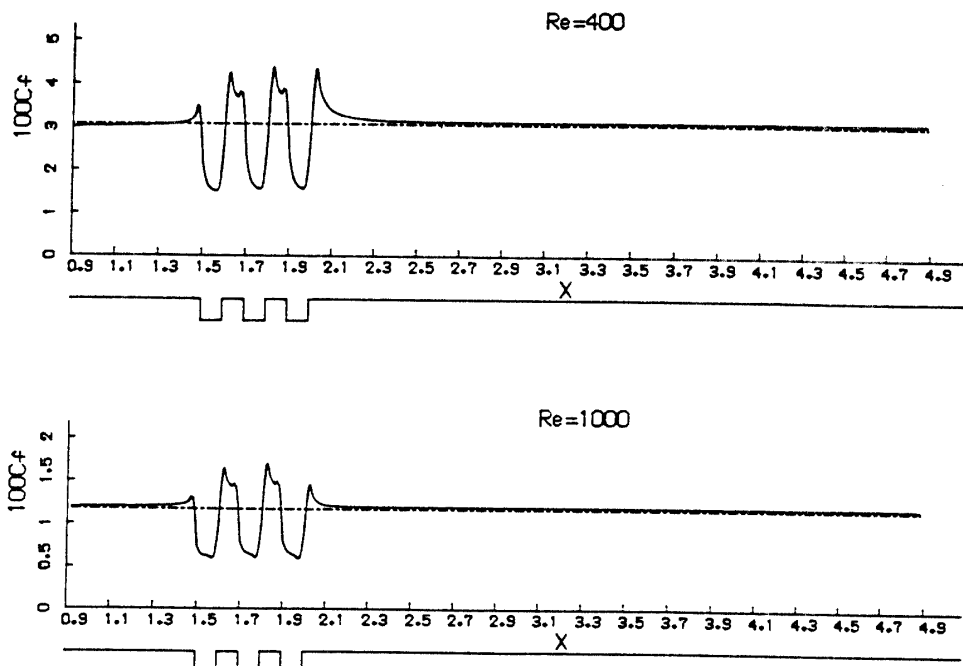


Fig. 12 Distribution of wall shear stress (Case II).

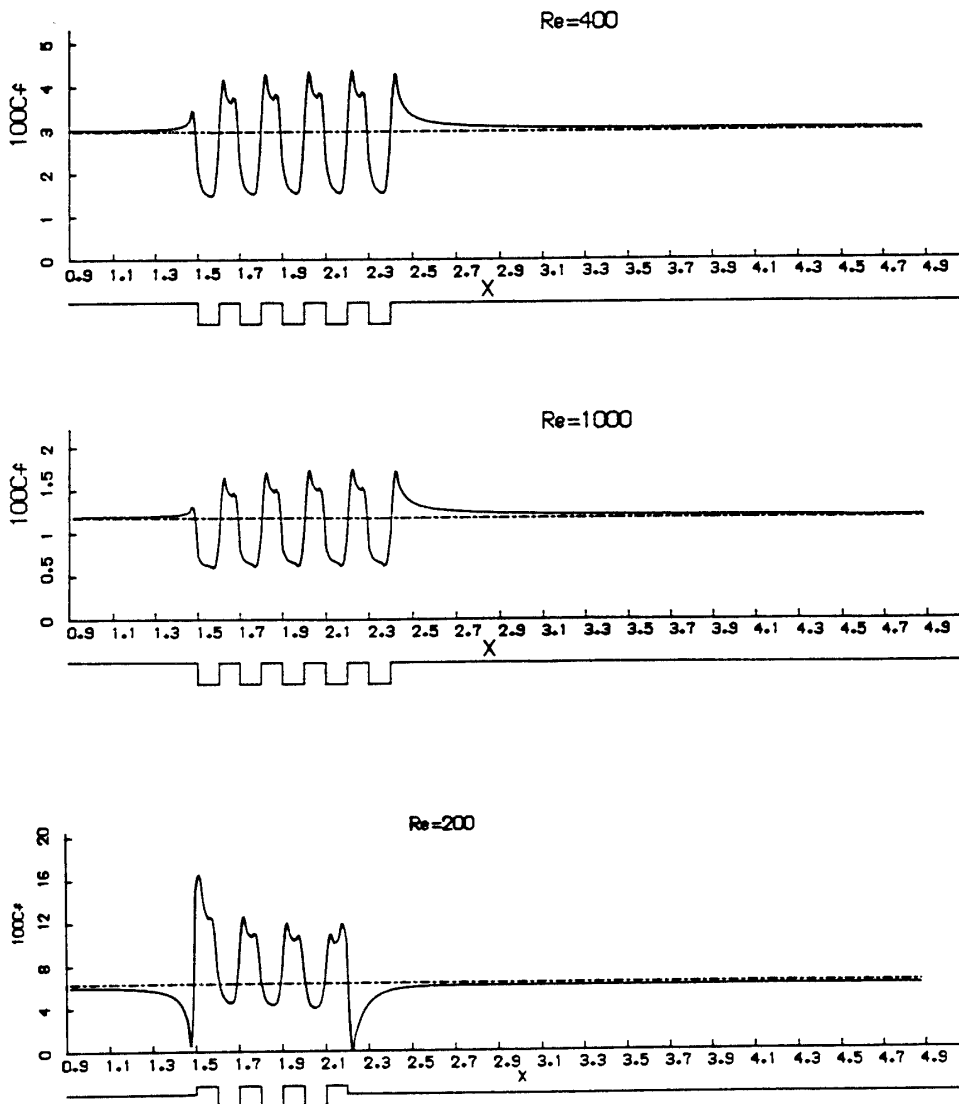


Fig. 14 Distribution of wall shear stress (Case I).

数値的に解いて調べた。以下にその結果を要約する。また、これらの結果を総合して、粗さの血管病におよぼす影響についての一つの見解を述べる。

(1) 流線、流速分布、圧力分布およびせん断応力分布から調べた粗さ近傍の流れは粗さ要素に対応した周期的流れパターンを示す。この周期的流れパターンを示す領域は粗さ上端壁からの距離  $y \approx 0.12$  でありモデルの違いおよび  $R_e$  数に対する依存度は弱い。

(2) 粗さ溝部の定在渦は  $R_e$  数の増加とともに、また下流粗さ溝部の渦ほど発達している。ただしケース I の場合は逆に最初の粗さ溝部の渦が最も発達しており、下流にゆくにしたがい減衰する。

(3) 粗さ溝内の定在渦による流れは非常にゆっくりとしていて、溝底部ではよどみ流の状態である。

(4) 粗面領域の流速は滑面領域に比べ壁近傍で増速、流路中央で減速の分布を示す。この粗さの影響を受けた流れが滑面領域でポアズイユ流にもどる緩和距離はレイノルズ数が大きいほど、またケース II に比べケース I の場合の方が長い距離を必要とする。

(5) 粗さ前向き壁で流れの壁への再付着による高圧力領域が存在する。この高圧力領域はその断面における流路中央の圧力と比べ無次元圧力で圧力差  $\Delta P \approx 6$  の高圧力を示す。また、 $R_e$  数の増加とともに  $\Delta P$  は増加する。

(6) せん断応力分布は、ケース I の場合は最初の粗さでの値が最も大きく下流にゆくにしたがい減少する。それに対しケース II の場合は下流にゆくにしたがい増加する。また、ケース I の場合の最初の粗さにおける



せん断応力の値はケースIIの場合と比べて極めて大きな値を示す。

(7) ケースIの最初の粗さの前向きステップおよび最後の粗さの後ろ向きステップにおいても流れの剝離・再付着がみられる。

以上に、本研究で得られた知見をまとめた。それによると粗面上の流れは、血管障害の原因を流体力学的因子によると考えらるならば、変化に富む興味ある流れ場となっている。ところで、現在までに、動脈硬化またはそれともなう血栓症、心筋梗塞および脳梗塞などの血管病発生進展に関し、病変好発部位と血流の流れパターンを関係づけた血行力学説<sup>(2)</sup>が種々提案されているがいずれも決定的なものではない。これらの主なものは、圧力、せん断応力あるいは血流のよどみなどによる脂質タンパクの血管壁への透過、血管内皮の力学的損傷あるいは血栓形成や物質交換への影響によるものとしたものである。ところが血管壁の病理学的変化は血管の種類や部位により異なっており、その原因も複雑で多因子病 (multifactor disease) と呼ばれている。これらの観点に立って以上に述べた結果をみると、粗さ近傍の流れは病変発生の原因となる流体力学的因子が複雑に影響しあうであろう流れ場となっており、粗さは血管病に何らかの形で悪影響をおよぼすと考えられる。また、ケースIのような隆起状の粗さはケースIIのような溝状の粗さに比べてその影響は大きく、特に上流端粗さが最も影響するであろう。このことは人工血管と生体血管の縫合接続に対しても一つの知見を与えるものであると考える。

本論文では定常流について調べたが血管内の流れは拍動流を調べるのが適切である。このことについては、すでに結果の一部を既報<sup>(18)</sup>で報告しているが、今後さらにデータを充足して調べる予定である。

最後に、本研究の遂行に際し、名古屋大学工学部、中村育雄教授に有益なご教示を賜わった。ここに記し

謝意を表す。

#### 文 献

- 1) Gessner, F. B., Brief reviews : Hemodynamics theories of atherogenesis, *Circ. Res.*, 33 (1973), 259.
- 2) 岡, バイオレオロジー, (昭59), 裳華房, 251.
- 3) 福嶋, 機誌, 88-796 (昭60), 71.
- 4) Kawaguti, M. and Hamano, A., *Proc. Indian Acad. Sci. (Egg. Sci.)* 5-2 (1982), 85.
- 5) Holman, E., *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 28 (1954), 109.
- 6) Roach, M. R., *Circ. Res.* 13 (1963) 537.
- 7) Fry, D. L., *Circulation* 39 suppl. 4 (1969), 38.
- 8) Caro, C. G., *INSERM*, 78 (1978), 33.
- 9) Fox, J. A. and Hugh, A. E., *Brit. Heart J.*, 28 (1966), 388.
- 10) 例えば文献(2)の253ページ.
- 11) 三島, 血管の話, (昭48), 出光書店, 182.
- 12) Niimi, H and Yamakawa, T., *Proc. 2nd ICMMB*, (1980), 130.
- 13) 新見, 日本バイオレオロジー学会論文集, (昭55), 29.
- 14) 井街, 機誌, 90-818 (昭62), 103.
- 15) 中西・大坂, 機論, 52-484 (昭61), 3930.
- 16) 例えば文献(2)の57ページ.
- 17) Nakanishi, S. and Kawaguti, M., *J. Phys. Soc. Jpn.*, 52 (1983), 848.
- 18) 中西・大坂, 機論, 52-484 (昭61), 3935.
- 19) Antonia, R. A. and Luxton, R. E., *Trans. ASME, Ser. D*, 98-1 (1971), 22.
- 20) 中西, 広工大研究紀要, 19-23 (昭60), 101.
- 21) 中西・広工大研究紀要, 22-26 (昭63), 123.

(昭和63年4月9日受理)