

狭窄管内拍動流の構造変化に対する流動特性

吉田哲雄^{*1} 岡永博夫^{*2} 青木克巳^{*3}

Flow Characteristics for Structure of Stenosis Tubes with Pulsating Flow

by

Tetsuo YOSHIDA^{*1}, Hiroo OKANAGA^{*2} and Katsumi AOKI^{*3}

(Received on September 30, 2006 & accepted on January 24, 2007)

Abstract

In this paper, we describe the flow characteristics for the structure of stenosis tubes under pulsating flow. Stenosis in blood vessels causes the separation and the stagnation of the flow, and occurs in the normal bloodstream. Furthermore, stenosis in blood vessels is determined by a fluid mechanics factor, since it is closely related to the flow via the generation of shapes, such as the divergence points and the curved parts. In the present study, we investigated disorders in the flow by examining the flow characteristics of strictures, which have hardly been examined to date. In this study, the flow was made visible by particle image velocimetry to clarify the formation mechanism of blood vessel stenosis, and a detailed numerical analysis of the relationship between the flow characteristics and the shape changes was carried out.

Keywords: Turbulent kinetic energy, Flow characteristics, Structural stenosis, Percent stenosis, PIV, LES

1. 緒論

血管狭窄は血栓症・心筋梗塞・脳卒中といった循環器病疾患の原因となっており⁽¹⁾、日本人の死因の上位を占めており死亡率が高く問題視されている。一般に血管狭窄部において血小板・白血球等の血液成分の活性化・傷害物質、低酸素症を引き起こすことで循環器病の直接的な原因となる事が知られている。又、血管狭窄は分岐部・湾曲部等の血管形状が急激に変化する部位において発生頻度が高い事も知られている。狭窄の発生メカニズムは血液の流れと密接に関係しており血流といった血行力学的因子を持ち指摘されてはいるものの決定的な解明には至っていない。血管狭窄の発生メカニズムを解明することが出来れば、多くの循環器病疾患において基礎医学の構築となり、医学的・工学的観点から問題解決が期待される事となる。

血管狭窄には様々な仮説があり、Fry らの壁せん断応力の高い部位の血管内皮細胞に脂質等の高分子物質が沈着することで狭窄が形成されるという高せん断応力説、Caro らの微小なせん断応力領域では血液速度の停滞により、血管内皮細胞に脂質が沈着しやすく高濃度の物質の境界層が存在するという低せん断応力説があり、この他にも圧力説、乱流説、剥離説がある。現在まで狭窄現象に関して様々な研究報告がされており、Young や石川らによる圧力測定・流れの再付着点、狭窄後の下流に及ぼす渦の共振現象、拍動流における狭窄管内の水素気泡可視化⁽²⁾⁽⁵⁾、山口らによる脈動により形成される渦輪の挙動⁽⁶⁾、姫野

による狭窄部における数値解析⁽⁷⁾等多くの報告がされている。しかしながら今日まで狭窄部位での流動特性において、流れの剥離や乱れに着目し血管狭窄構造を系統的に変化させた際の流れ場を究明した報告は殆ど見られない⁽⁸⁾⁽¹²⁾。

本研究は血管狭窄による血流の挙動を明らかにする為の基礎的研究である。基礎研究の第1段階とし、ガラス製のモデルより、狭窄管の狭窄率並びにスロープ変化した際の構造変化に対する流れ場を明らかにする為、拍動流の加速時、最大時、減少時での流れ場をPIVによる可視化と数値解析から渦挙動、乱れ度分布を検証し、狭窄部の構造変化に対する流動特性を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を図1に示す。作動流体には清水を用い、拍動ポンプにより狭窄管に拍動流を流して循環させる機構である。一般に成人の血流周波数範囲は $f=1\sim 2\text{Hz}$ であり、本実験における拍動ポンプの周波数は $f=1.67\text{Hz}$ である。又、流量は重量法により測定した。

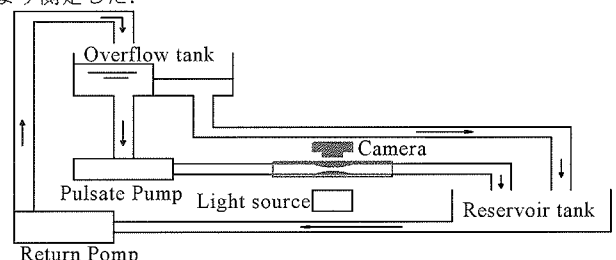


Fig.1 Outline of the experimental setup

* 1 工学研究科機械工学専攻院生
* 2 工学部機械工学科助教授
* 3 工学部機械工学科教授

本実験では図 2 に示す剛体管(ガラス管)を使用し, 狭窄管部以外の非狭窄部の直径 $D = 31\text{mm}$ と一定とし, 狭窄管の直径・スロープ比・狭窄率の主要諸元を表 1 に示す. 狭窄率においては面積比より算出しており次式を以下に示す.

$$1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad \begin{array}{l} D: \text{非狭窄部の直径} \\ d: \text{最小狭窄部の直径} \end{array} \quad (1)$$

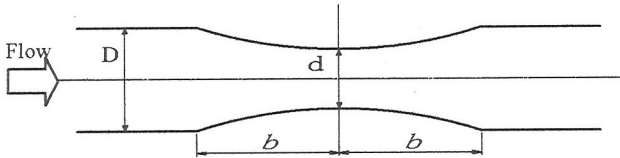


Fig.2 Test Model

Table 1 Size of test model

Model No.	b/D	d/D	Percent Stenosis(%)
M1	0.5	0.432	81
M2		0.529	72
M3		0.613	62
M4	1.0	0.432	81
M5		0.529	72
M6	2.0	0.432	81
M7		0.529	72

流れの可視化には, 作動流体である清水にナイロンミクロンパウダー(平均粒径 $4\ \mu\text{m}$, 1.02g/cc)を混合し, スリット幅 2mm のヤグレーザー(50mW)を狭窄管に対し垂直に中心断面部に照射させ, 流れの可視化を行った. 動画撮影にはフレーム速度 200fps の高速度カメラを用い, 1 秒間測定を行い得られた動画より PIV 解析を行う. Re 数の測定には代表直径を非狭窄部の直径 $D = 31\text{mm}$ とし, 乱流運動エネルギー: (k) の算出式を以下に示す.

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{2} u'^2 \quad (3)$$

U : 非狭窄部断面平均速度 u' : 変動速度

3 数値解析

数値解析には LES 乱流モデルを用い, 汎用熱流体解析ソフト (FLUENT) にて計算を行った. 解析領域内に 6 面体の構造格子を基本とした 6 面体 (Hex/wedge) 格子を作成し解析領域全体で約 50 万の格子を作成した. 流入条件として C 言語を用いて正弦波の拍動を速度の値で流入させる. 解析は 3 次元非定常乱流計算を行い, 計算時間は 0.001s で 1000 回計算させた. 計算領域としては流入部から最小狭窄部までを 150mm , 最小狭窄部から流出部までを 500mm とし, 計算領域全体で 650mm の領域である. 格子構造を図 3, 境界条件を表 2 に示す.

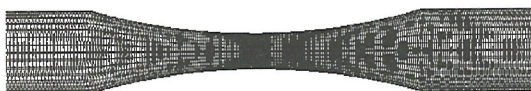


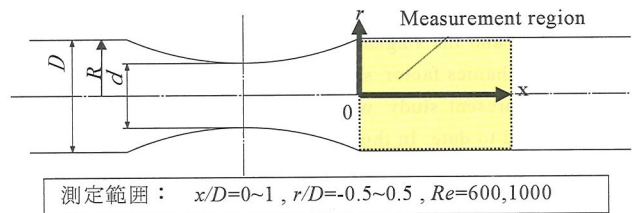
Fig.3 Whole meshes (Grid number = 5×10^5)

Table 2 Analysis condition

Software	FLUENT 6.1.22	
Model	LES	
Grid system	Hex/wedg	
Cells	About 500,000	
Calculation condition	Unsteady	
	Time step	0.001s
	Iteration time step	1000
Input condition	Inflow	Velocity inlet
	Outflow	outflow

4. 結果および考察

4.1 拍動流の加速・最大・減速時における狭窄部下流域での流動特性



測定範囲: $x/D=0\sim 1, r/D=-0.5\sim 0.5, Re=600,1000$

Fig.4 Measurement region

図 4 に狭窄部下流 $x/D=0\sim 1$ の範囲での半周期拍動 $T=0.15\text{s}$ の加速, 最大, 減速時における渦輪発生過程を時間変化順に示す. 又, 測定範囲は狭窄部下流 $x/D=0\sim 1$ の範囲である. ここで半周期拍動時間 $T_s=0.15\text{s}$ とし加速, 最大, 減速時を半周期拍動時間で無次元化する. 無次元化した加速, 最大, 減速時を T_a, T_{max}, T_d と示す. 無次元時間の範囲は $0\sim 1$ である.

$$\frac{T_a, T_{\text{max}}, T_d}{T_s} \quad (4)$$

$T_{a,\text{max},d}$: 加速, 最大減少時 T_s : 半周期拍動時間

4.1.1 狭窄率変化に対する流動特性

一定なスロープ比 $b/D=0.5$ の狭窄モデルに対し, 図 5 は狭窄モデルの狭窄率を $80\%, 70\%, 60\%$ と変化させた場合の拍動流の半周期における加速時, 最大, 減速時の流線を示している. これらの結果から逆流領域がいずれの狭窄モデルにおいて狭窄管の下流側の壁面近傍に生成されていることが確認できる. そして, その逆流の直後にドーナツ状の渦が発生していることが分かる. 狭窄モデル内の流れは拍動流の半周期の間に渦の発生と消滅が繰り返されている.

又, 狭窄率の変化に伴い狭窄部下流に発生する渦の大きさは異なる. 図 5 のモデル 1 では, 加速・最大・減速と時間経過することにより渦輪が大きく発達している. それに対し, モデル 2 の加速時では, 主流速度と壁面近傍速度との速度差により大きな渦輪が狭窄管の拡張部から発生している. そして, その渦輪は主流にまで影響を及ぼしていることが分かる. しかしながら, 拍動周期のピークでの主流速と渦速度との相対速度が小さいために渦輪形成を確認することができない. モデル 1 とモデ

ル2の流線を減速領域で比較するとモデル1の流れは複数の小さな渦を発生していることが分かる。加速時におけるモデル3の下流に生成される渦輪はモデル1,2の下流に生成される渦輪より小さく、モデル3の渦輪は拍動周期の最大領域から減速領域へ移行する際に消失している。このように狭窄管内の流れは狭窄管の構造と拍動流の周期により種々の流動特性を示すことが確認できた。即ち、狭窄率が大きいほど狭窄管の最小径から検査面に噴出される際に周期噴流の境界層並びに剥離せん断層は不規則に変化する。これにより速度勾配は変化し不連続な大

きさの渦輪形成に繋がる。よって、このような流れにより逆流領域が生成される。そして、このような流れは壁面の近くの剥離とせん断層に不規則に変化するので壁面に影響を与える。狭窄率が低い程発生する渦の大きさは小さくなる傾向を示し、減速時での渦は消失する。又、狭窄率が高いほど逆流領域は増大する傾向を示す。従ってこのような壁面近傍の流体の挙動が実際の血管壁に影響を与えると考えられる。

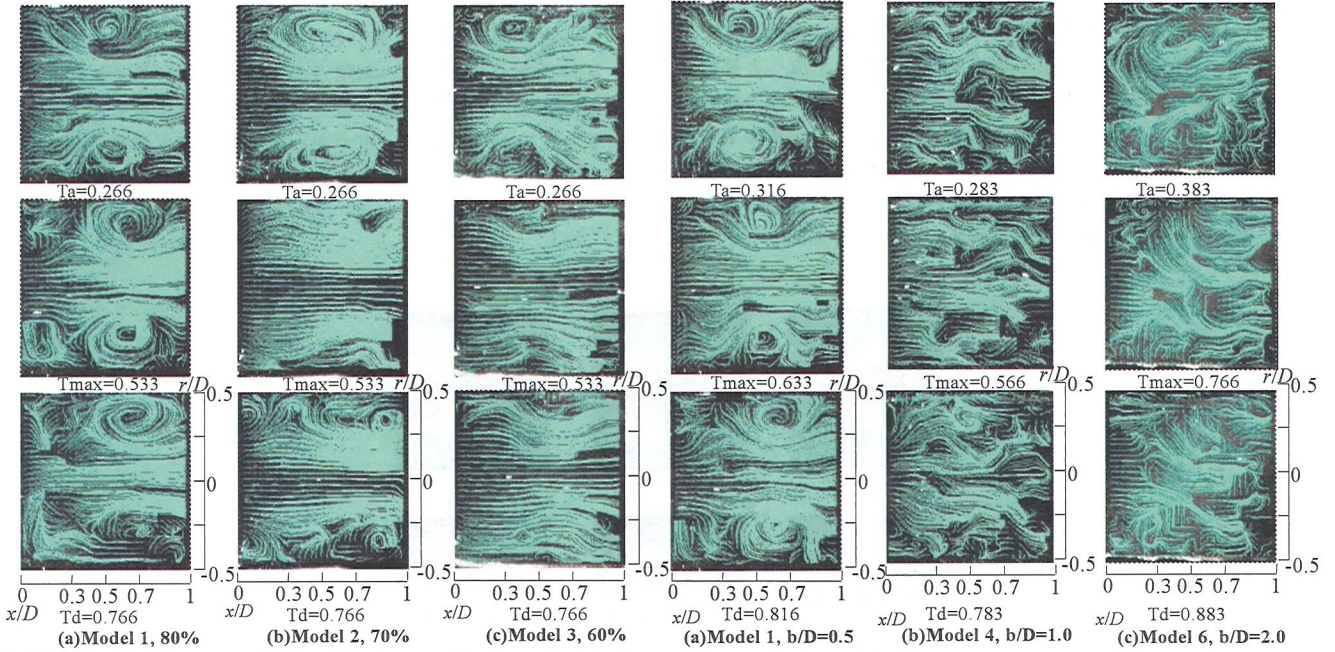


Fig.6 Stream line in stenosed tube with change of a slope at Re=1000

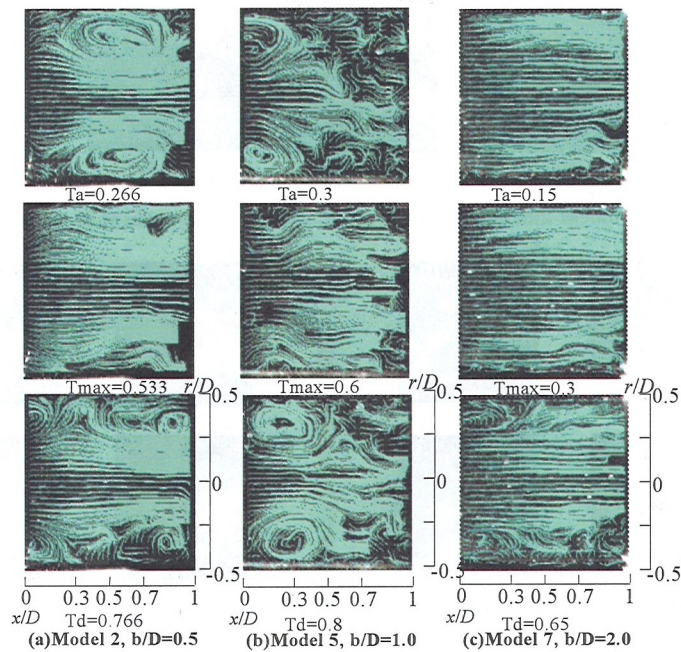


Fig.7 Stream line in stenosed tube with change of a slope at Re=1000

4.1.2 拍動流のスロープ変化に対する流れ場への影響

図6のモデル1, 4, 5は狭窄率80%の狭窄モデルに対しスロープ比を $b/D=0.5\sim 2.0$ まで変化させた際の $Re=1000$ での流線分布を示している。これらの結果から、どの狭窄管モデルにおいても壁面近傍で逆流領域を形成していることがわかる。図6のModel 1はスロープ比 b/D が0.5から2.0と大きくなるに従って拍動周期が(加速・最大・減速)変化するに従って渦輪が大きく成長していることがわかる。加速時の渦輪はモデル4の方がモデル1より小さく、また最大時において渦輪は確認できない。しかしながら減速時には小さい渦が再び発生し下流へと移行している。モデル5においては、半周期の流れでの渦輪の確認はできなかった。これらより、拍動流においては、狭窄率が一定であってもスロープ比が大きくなるに従って剥離点は下流へと移行する。そして、剥離点が下流に移行するに従って渦輪の発生位置も下流側へと移行する傾向がある。図7のモデル2, 5, 7は

狭窄率70パーセントの狭窄モデルに対しスロープ比 b/D を0.5から2.0まで変化させた際の $Re=1000$ での流線を示している。これらの結果より、どのモデルにおいても壁面近傍で逆流領域を確認できる。スロープ比 $b/D=0.5\sim 2.0$ の変化に対し、モデル2の加速時には渦輪が発生するにも関わらず最大時での渦輪は確認できない。しかしながら、減速時に複数の小さな渦輪が発生していることが確認できるモデル5の渦輪の大きさは加速・最大時にはモデル2より小さく、減速時にはモデル2より大きい。モデル7では、加速・減速において渦輪は確認できないが減速時は確認できる。しかしながらモデル5に比べ大きさは小さい。図6, 7の結果から、狭窄率が一定であってもスロープ比が大きくなるに従って剥離点が下流側へ移行しそれに伴って逆流領域並びに渦輪の発生位置も下流へと移行すると考えられる。また、スロープ比が一定であっても狭窄率が異なる場合は渦輪の形態および大きさが異なることが明らかとなった。

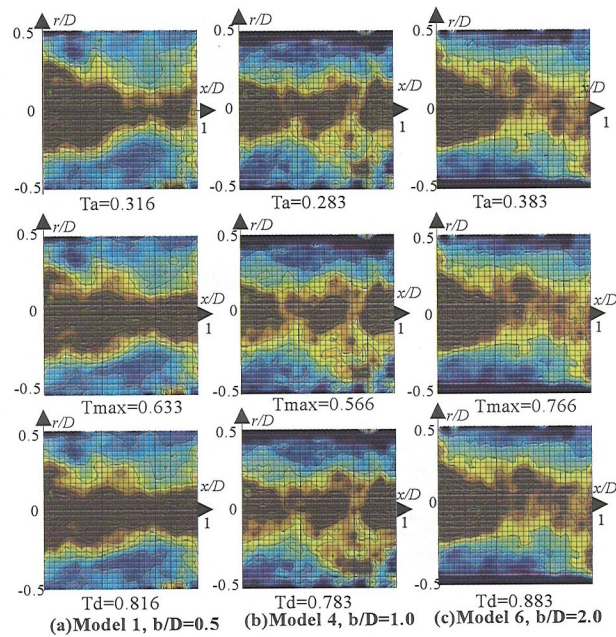


Fig.8 Turbulent kinetic energy change of a slope by experiment at $Re=1000$

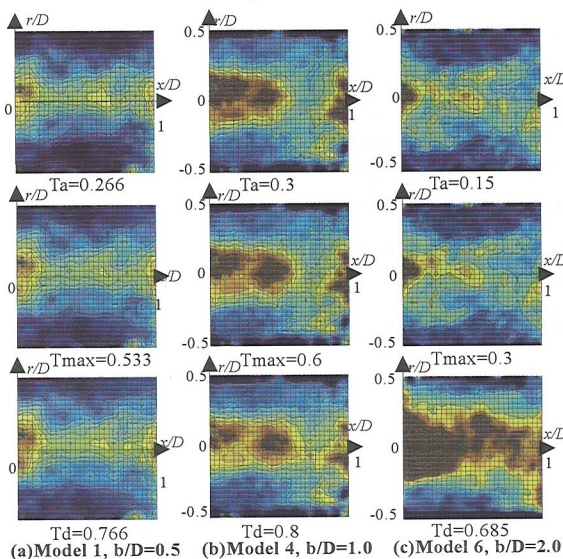


Fig.9 Turbulent kinetic energy change of a slope by experiment at $Re=600$

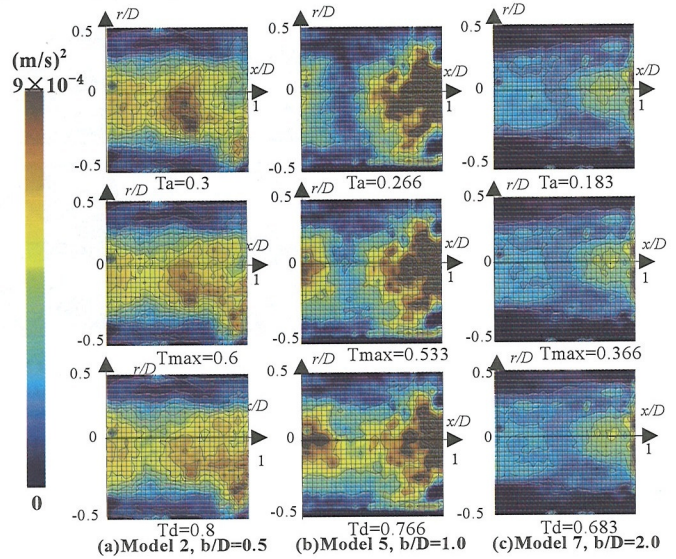


Fig.10 Turbulent kinetic energy change of a slope by experiment at $Re=1000$

4.2 乱流運動エネルギーへの影響

図 8 は、 $Re=1000$ で狭窄率 80%一定としスロープ比 $b/D=0.5, b/D=1.0$ および $b/D=2.0$ における半周期拍動($T=0.15s$)での加速・最大・減少時での乱流運動エネルギー(k)分布を示す。どのスロープ変化に対しても狭窄管中心部において k 値が高くなっていることが確認できる。又、乱れが狭窄部下流に渡り生じている。壁面近傍においては k 値が低い事も確認できる。狭窄率一定であってもスロープ比が短い程主流せん断速度が速いことで乱流運動エネルギーが高まると考えられる。壁面近傍において k 値が低い原因は、次のようなものが考えられる。スロープ変化により渦輪が狭窄直後で発生するためと考える。又、流れが低 Re 数移行により渦輪が発生し停滞するためであると考える。層流から乱流に遷移し主流が不安定かつ局所的に乱れることにより壁面近傍での k 値が低いのではないかと考える。これより図 11,12 に $x/D=0.5$ および 0.7 での断面の乱流運動エネルギーを見てみると、 $x/D=0.5$ および $x/D=0.7$ において増加・最大・減少でどの狭窄管に対しても狭窄管中心で乱流運動エネルギーは高いことが確認でき、壁面近傍においてエネルギーは低いことが確認できる。これより狭窄度一定であってもスロープ比が短いほど主流せん断速度が速いことで乱流運動エネルギーが高まると考えられる。壁面近傍において k 値が低い原因として考えられる要因としては、スロープ比 b/D が $0.5\sim 2.0$ と変化するに従い渦輪発生が $x/D=0$ で低 Re 数移行に伴い渦輪発生が発生し停滞することでこのようになるかと考える。層流から乱流に遷移し主流が不安定かつ局所的に乱れることにより壁面近傍での k 値が低いのではないかと考える。図 9 は $Re=1000$ で狭窄率 70%一定としスロープ比 $b/D=0.5, b/D=1.0$ および $b/D=2.0$ における前述同様の乱流運動エネルギー(k)分布を示す。どのスロープ変化に対しても狭窄管中心部において k 値が高くなっていることが確認できる。更に乱れが狭窄部下流域に渡り乱れが生じている。加速・最大・減速時で乱れの変化はほとんど確認できない。しかしながら、図 8 と比べると壁面近傍および狭窄管中心において k 値は低いことが確認できる。狭窄率一定であってもスロープ比が短い程主流せん断速度が速いことで乱流運動エネルギーが高まると考えられる。実験結果において、狭窄率一定でスロープが短くなれば流れの剥離が早まる。主流せん断速度が速いことで乱流運動エネルギーが高まるものと考えられる。

4.3 Re 数変化

図 10 は、狭窄率 80%一定とし、 $Re=600$ における加速、最大、減少時での乱流運動エネルギー(k)分布を示す。図 10(a),(b),(c)は図 8 の $Re=1000$ に比べ主流部の k 値は全体的に低いことが確認できる。又、 $b/D=0.5\sim 1.0$ とスロープが長くなるにつれ主流部の k 値の幅は徐々に広範囲となっており、 $b/D=2.0$ では k 値が更に高くなっている。これより低 Re 数以降に伴い主流部の流速が減速する事で乱流運動エネルギーはスロープの長さ按比例して高くなっている。これより図 13,14 に $x/D=0.5$ および 0.7 での断面の乱流運動エネルギーを見てみると、 $x/D=0.5$ では狭窄中心部においてスロープ比の大きさではなく $1.0, 2.0, 0.5$ の順に乱流運動エネルギーは高くなっており、乱れに非対称性が見られる。又、壁面近傍において乱流運動エネルギーは低いことが確認できる。これより低 Re 数移行に伴い渦輪の発生・停滞・消滅が繰り返

されることにより狭窄管中心での乱流運動エネルギーはスロープ比順ではないと考える。

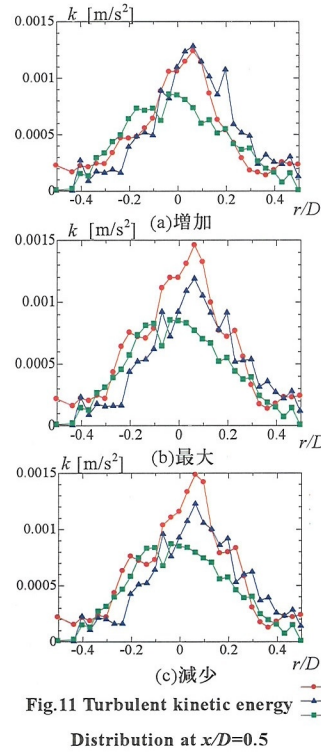


Fig.11 Turbulent kinetic energy Distribution at $x/D=0.5$

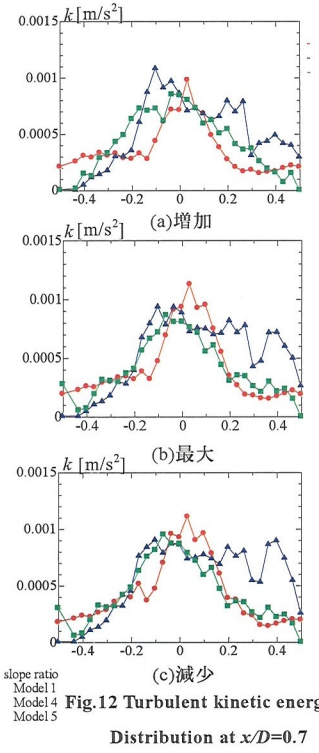


Fig.12 Turbulent kinetic energy Distribution at $x/D=0.7$

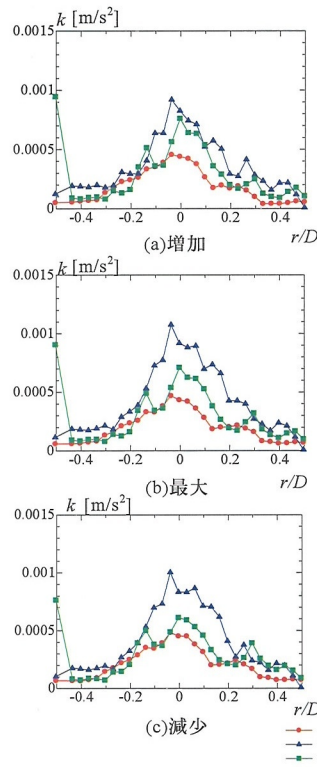


Fig.13 Turbulent kinetic energy Distribution at $x/D=0.5$

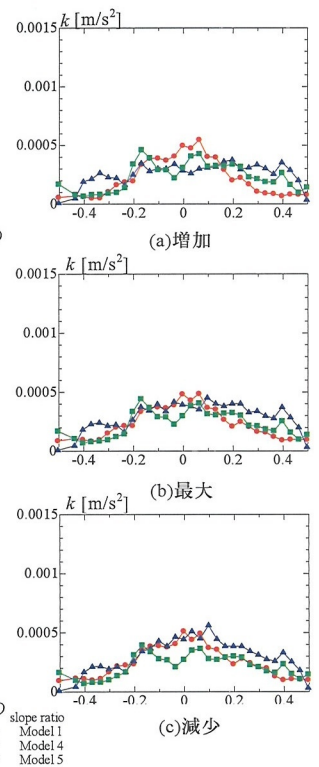
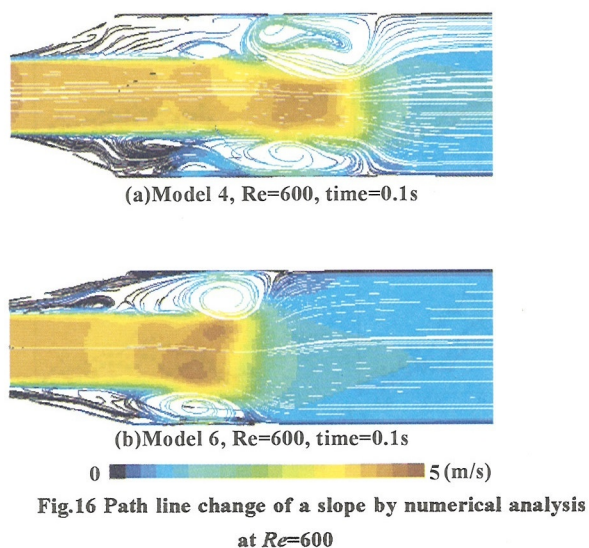
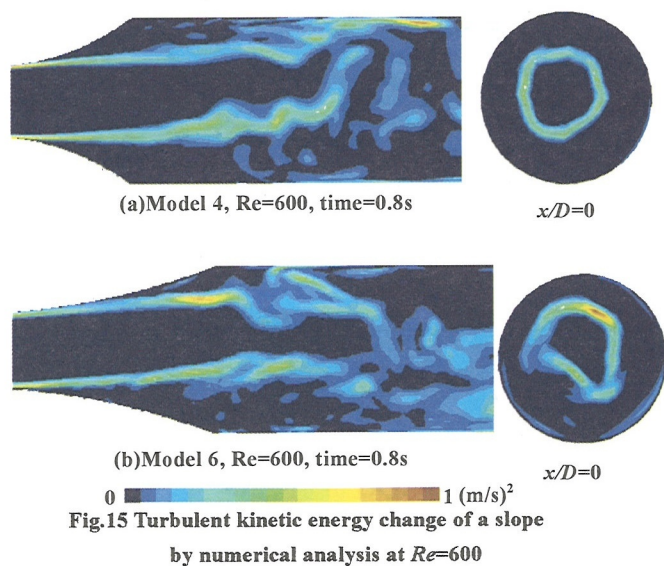


Fig.14 Turbulent kinetic energy Distribution at $x/D=0.7$

4.4 数値解析

数値解析より図 15 に狭窄率 80%一定でスロープ比 $b/D=1.0$, $b/D=2.0$, $Re=600$ における流速減少時での乱流運動エネルギー(k)分布を示す。図 15(a),(b)より狭窄管拡張部下流において乱れは下流に影響し逆流領域は長くなっていることが確認できる。スロープ長さ $b/D=1.0$ では狭窄部拡張部下流の壁面において強い乱れが壁面に衝突している事が確認できる。又, $b/D=2.0$ でも, 狭窄部拡張部下流の壁面において強い乱れが壁面に衝突しているが, 乱れの壁面への衝突はより下流において衝突する事が明らかとなった。これより乱れの壁面への衝突から, 実際の血管系で考えると血管細胞を傷つける事で血管崩壊の要因を作り, 又, 血栓, 脂質が崩壊場所に沈着する事で, 更なる狭窄現象に起因するのではないかと考える。これより流れの特性をより詳細に見る為に, 図 16(a),(b)流跡を示す。実験での流線と解析結果と流れの傾向がほぼ一致しており, 流速増加時において渦輪が形成され狭窄部下流へと移行していることが確認できる。



5 結論

今回の実験結果および数値解析結果から以下のような事が明らかになった

1. 拍動流において狭窄率変化により渦挙動が異なる。
2. スロープ比が小さい程, 狭窄管拡張後の早い段階で流れが剥離し, 渦輪が形成され狭窄管中心付近での乱流運動エネルギーは高くなる。
3. スロープ比が高い程, 狭窄管拡張部下流において渦輪が形成され, その壁面には大きな乱流運動エネルギーを与え, 下流に移動する傾向がある。
4. 拍動流を伴う事で時間的变化に対する乱流運動エネルギーは狭窄率一定では $x/D=0.5$ においてスロープ比順に狭窄管中心において高い値を示す。

参考文献

- (1)大島研三, 動脈硬化症-基礎と臨床-, 朝倉書店
- (2) Donald F. Young, FLOW CHARACTERISTICS IN MODELS OF ARTERIAL STENOSES STEADYFLOW, J. Biomechanics, Vol6, 1973, pp. 395~410.
- (3) Donald F. Young, FLOW CHARACTERISTICS IN MODELS OF ARTERIAL STENOSES UNSTEADYFLOW, J. Biomechanics, Vol6, 1973, pp 547~559.
- (4) 石川拓司他, 狭窄部を通る血流における渦の共振現象, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.63, No.606, 1997, pp.387-395.
- (5) 石川拓司他, 狭窄管内脈動流の可視化とシミュレーション, 可視化情報, Vol.18, No.70, 1998, pp188-206.
- (6) 山口住夫他, 狭窄のある管内の脈動噴流により形成される渦輪の挙動, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.67, No.653, 2001, pp.44-51.
- (7) 姫野龍太郎 血流のシミュレーションと医療への応用 精密工学会誌, Vol.71, No.4, 2005, pp.427-430
- (8)青木克巳他, 狭窄の構造変化に対する流動特性, 日本機械学会流体工学部門講演論文集, Vol.82, 2004, pp804
- (9)吉田哲雄他, 血管狭窄の構造変化に対する流動特性, 日本機械学会関東支部第 12 期総会講演論文集, No.60-1, 2006, pp417-418
- (10)吉田哲雄他, 狭窄管内拍動流の構造変化に対する流動特性, 第 34 回可視化情報シンポジウム講演論文集, Vol.26, No.1, 2006, pp77-80.
- (11)吉田哲雄他, 血管狭窄の構造変化に対する流動特性, 日本機械学会流体工学部門講演論文集, Vol.6-21, 2006, pp163
- (12)T.Yoshida, K.Aoki, H.Okanaga, Flow characteristics for structure of stenosis tubes with pulsating flow, ISFV12, Germany