Flow characteristics for structure of blood vessel stenosis with pulsating flow

○ 学 吉田 哲雄 (東海大・院) 正 青木 克巳 (東海大)

Tetsuo YOSHIDA, Tokai University under Graduate School, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan
Katsumi AOKI, Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

Key Words: Turbulent kinetic energy, Flow Characteristics, Structural of Angiostenosis, 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、問題視されている。血管狭窄は分岐部・湾曲部等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流体力学的因子を持ち指摘されているものの決定的な解明には至っていない。狭窄には様々な仮説⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾があり現在まで狭窄現象に関して様々な研究報告がされている⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。今日まで狭窄部位での流動特性において、流れの乱れ説に対し故意に剥離を促す形状に着目した研究はほとんど見られない⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁴⁾。本研究においては拍動流を伴う血管狭窄の構造変化での流れ場を明らかにするため PIV による可視化から渦挙動、乱れ度分布を検証し、数値解析により血管内の詳細な流れを明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

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脈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($f=1-2\text{Hz}$)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

2.2 狭窄モデル

本実験で使用した供試モデルは図 2 に示す形状でガラス製である。狭窄管部の上流・下流側の管径は直径 $D=31\text{mm}$ と一定とし、狭窄管の直径・スロープ・狭窄率の主要諸元を表 1 に示す。

Fig.2 Test Model

Table 1 Specification of test model

Model No.	b/d	d/D	Percent Stenosis(%)
M1	0.5	0.432	80
M2		0.529	70
M3		0.613	60
M4	1	0.432	80
M5	2	0.432	80

2.3 PIV

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 $4\mu\text{m}$) 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。また、乱流運動エネルギー (k) の算出式を以下に示す。

$$k = \frac{1}{2} |\mathbf{u}'|^2 \quad \mathbf{u}': \text{変動速度}$$

2.4 数値解析

数値解析には LES 乱流モデルを用い、汎用流体解析ソフト (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 (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。

3. 結果および考察

3.1 PIV による流れの可視化

Fig.3 Measurement region

3.2 スロープ変化に対する流れへの影響

Fig.4 Stream line in stenosed tube with change of a slope at $Re=1000$

図4に狭窄率80%において、スロープ比 b/D を0.5~2.0と変化させた時のModel 1,4,5の流線を示す。どの狭窄管も壁面近傍で逆流領域が存在していることが確認できる。スロープ比 $b/D=0.5\sim 2.0$ の変化に伴い拡張部下流における流動特性は、図5, Model 1では拍動により押し流され渦輪が大きく成長しているが、Model 4では、加速時では渦輪はModel 1に比べ小さく、最大時において渦輪は確認できない。減速時には渦輪が再び発生しているが小さく下流へと移行している。Model 5においては、加速・最大・減速時で決定的な渦輪の確認はできない。つまり狭窄度一定であってもスロープ比が大きくなると渦輪の発生は剥離が狭窄部下流後方に移行すると考えられる。

3.3 乱流運動エネルギーへの影響

Fig.5 Turbulent kinetic energy change of a slope by experiment at $Re=1000$

図5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・減速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噴流から放出される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、乱れが狭窄部下流域で生じている。又、壁面近傍においては k 値が低い事も確認できる。

3.4 数値解析

数値解析より図6に狭窄率80%一定でスロープ比 $b/D=1.0, b/D=2.0, Re=600$ における乱流運動エネルギー(k)分布を示す。拍動流の特徴は流れが時間的に変化する。図6(a),(b)よりスロープ比 $b/D=1.0\sim 2.0$ と変化することで、 $b/D=1.0$ および $b/D=2.0$ では逆流領域は長くなり乱れは下流に影響してくる。又、(a)では検査領域内で乱れが壁面へ衝突し上方へと偏っている事が確認できる。(b)でも同様に乱れが衝突し、下方に偏っている事が確認できる。スロープ比が短ければ速度変動および乱れの差が顕著に見られる。これより $x/D=0, 0.5$ での断面を見てみると(a)においては $x/D=0$ では乱れは管中心に乱れが影響しているが、 $x/D=0.5$ では管中心方向だけでなく、壁面上方にまで乱れが広がり衝突していることが確認できる。又(b)においても、 $x/D=0$ では乱れは管中心に乱れが影響しているが、 $x/D=0.5$ では(a)に比べ管中心方向および壁面全体に乱れが広範囲に衝突していることが確認できる。実際の血管系ではこのように乱れが壁面に衝突する事で血管内皮細胞に障害を与えて更なる血管崩壊の進行に繋がっていくのではないかと考える。又、スロープ変化に伴い、狭窄率一定であってもスロ

ープが長いほど狭窄部下流において乱れが影響し、更なる狭窄発達の要因になるのではないかと考える。

Fig.6 Turbulent kinetic energy change of a slope by numerical analysis at $Re=600$

3.5 結論

実験結果および解析結果から以下のことが明らかとなった

1. 狭窄度変化に対して拍動流において渦挙動が異なる。
2. スロープ比が小さい程、狭窄拡張直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. 拍動を伴うことで時間的な変化に対する乱流運動エネルギーは狭窄度一定では $x/D=0.5$ 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) Fry, D.L., Circ.Res., 22(1968), 165
- (3) Caro, C.G., Fitz-Gerald, J.M. and Schroter, R.C., Proc. Roy., B117(1971), 105
- (4) Donald F. Young, FLOW CHARACTERISTICS IN MODELS OF ARTERIAL STENOSES STEADYFLOW, J. Biomechanics, Vol.6, 1973, pp. 395~410.
- (5) Donald F. Young, FLOW CHARACTERISTICS IN MODELS OF ARTERIAL STENOSES UNSTEADYFLOW, J. Biomechanics, Vol.6, 1973, pp. 547~559.
- (6) 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.
- (7) 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, pp.188-206.
- (8) 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.
- (9) 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
- (10) 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, pp.804
- (11) 吉田哲雄他, 血管狭窄の構造変化に対する流動特性, 日本機械学会関東支部第12期総会講演論文集, No.60-1, 2006, pp.417-418
- (12) 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, pp.77-80.
- (13) 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, pp.163
- (14) ISFV12, Aoki, K., Yoshiuda, T., Okanaga, H., Flow characteristics for structure of stenosis tubes with pulsating flow, Germany