血管狭窄部及び動脈瘤内血液拍動流における血液モデルの検討

Investigation of Constitutive Models for Blood Flows in Blood Vessels with Stenosis and Aneurysm

○正 撰 隆文 (高知工科大院) 正 辻 知宏 (高知工科大), 正 蝶野 成臣 (高知工科大)

Takahumi ERAMI, Graduate School of Kochi University of Technology, Tosayamada-cho, Kochi, 782-8502, Japan
Tomohiro TSUJI, Kochi University of Technology, Tosayamada-cho, Kochi, 782-8502, Japan
Shigeomi CHONO, Kochi University of Technology, Tosayamada-cho, Kochi, 782-8502, Japan

Key Words: Shear-Thinning, 3D-Blood Flow Analysis, Pulsatile Flow, Wall Shear Stress

1. 緒 言

血管内で起こる様々な疾患は複雑な形状を有した箇所に多発する。そのため疾患の発生と血液流動に関連性があることが示唆されているが、実際には未だ明らかにされていないのが現状である。血液の大きな特徴として非ニュートン性があり、その特徴を現す代表的な血液モデルとして Casson モデル, Carreau-Yasuda モデル, Bi-Viscosity⁽¹⁾⁽²⁾がある。

本研究は、上記モデルを用いて狭窄部及び動脈瘤を有する血管内血液拍動流の有限要素解析を行う。得られた結果より、各々のモデルについての特性の吟味及びモデルについての比較検討を行う。解析領域は、狭窄部及び動脈瘤を有した管とする。

2. 基礎方程式

連続の式、及び運動方程式は以下のように表される。

・連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

・運動方程式

$$\rho D\mathbf{v}/Dt = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

ここで $\mathbf{v}$ は速度ベクトル、 ρ は密度、 $D\mathbf{v}/Dt$ は速度ベクトルの実質微分、 p は圧力、 $\boldsymbol{\tau}$ は偏差応力テンソルである。本研究で用いた血液モデルは Casson モデル, Bi-Viscosity モデルに修正を加えたモデル, Carreau-Yasuda モデル, ニュートン流体の4種類であり、それぞれ以下のように表される。

・修正 Casson モデル

$$\boldsymbol{\tau} = \left(S_y / \sqrt{2II} + \delta + 2\sqrt{S_y \mu} / \sqrt[4]{2II + \delta + \mu} \right) \mathbf{A} \quad (3)$$

・修正 Bi-Viscosity モデル

$$\boldsymbol{\tau} = \left(S_y / \sqrt{2II + \delta + \mu} \right) \mathbf{A} \quad (4)$$

・Carreau-Yasuda モデル

$$\boldsymbol{\tau} = \left(\mu + (\mu_0 - \mu) / \left(1 + (\lambda II)^b \right)^a \right) \mathbf{A} \quad (5)$$

ここで S_y は降伏応力、 μ は無限せん断粘度、 μ_0 はゼロせん断粘度、 δ は解析不可能点を解消する修正パラメータ、 λ は緩和時間、 a , b は任意の指数である。 $\mathbf{A}$ は変形速度テンソル、 II は変形速度テンソルの第二不変量である

3. 数値解析

解析領域は直径 D 、長さ $15D$ の円管であり、主流方向に x 軸を取る。直径 D の球形の狭窄部及び動脈瘤は、その中心が $x=5D$ の円管壁面上に位置しているものとする。血液モデルのパラメータ、血管径は実際の人間に近い値を用いた。拍動流の周期は $1s$ とし、初期条件は流量波形中 $t=0s$ における流量時の定常解とした。計算は初期条件による周期性の問題を考慮し拍動5周期に渡って行っ

た(解析結果は十分な周期性が得られた $t=3.0s$ からのものである.)。

4. 解析結果

$x/D=5$ すなわち狭窄部頂点、動脈瘤頂点における壁面せん断応力の時間変化を図1, 2に示す。領域自体が高せん断応力領域である狭窄部頂点では、各々のモデル間の違いはあまり顕著ではない。しかし全体的に Casson モデルと Carreau-Yasuda モデルのせん断応力値はニュートン流体と比べて高い値を示している。瘤頂点は、流れの淀みにのため低せん断応力領域であるため血液モデル間の違いが拍動流全体に渡って顕著に表れている。

引用文献

- (1) Leuprecht, A. and Perktold, K., Computer Method in Biomechanics and Biomedical Engineering, 4(2001), 149-163.
- (2) 石川拓司・Luis.F.R.GUIMARAES・大島修造・山根隆一郎, 機論 B, 62-600(1996-8), 2957-2964.

Fig.1 Time dependence of wall shear stress at $x/D = 5$ Fig.2 Time dependence of wall shear stress at $x/D = 5$