

脳動脈瘤モデル内部に作用する壁面せん断応力の測定

伊藤 康介[○] (横浜国立大学), 崔 璋雲 ((株) フローテック・リサーチ)
磯田 治夫 (浜松医科大学), 西野 耕一 (横浜国立大学)

Measurement of wall shear stress in cerebral aneurysm model

Kousuke Ito, Jang-Woon Choi, Haruo Isoda, and Koichi Nishino

ABSTRACT

Blood flow dynamics play an important role in the initiated and developed cerebral aneurysm. In particular, the wall shear stress (WSS) acting on an aneurysm surface is believed to be responsible for the cytological effect leading to the long-term growth of the aneurysm. The present paper describes in vitro measurement of WSS inside an aneurysm model that is generated from MRI and rapid prototyping. The WSS is evaluated from an in-plane distribution of three-component mean velocities measured with the stereoscopic PIV. A WSS evaluation technique applicable to complex three-dimensional geometry like aneurysm is proposed here and its accuracy and validity is discussed.

Keywords: Flow measurements, Stereoscopic PIV, Wall shear stress, Cerebral aneurysm

1. 結 論

脳動脈瘤の形態学および組織学的特長について多くの研究がなされているが、動脈瘤内の血流動態（流速分布や壁面せん断応力）に関する研究は形状の複雑さ等のため、十分に行われていない。本研究はくも膜下出血の原因とされる脳動脈瘤形成および成長に関与する血流動態の特性を明らかにすることを目標とする。

脳動脈瘤は比較的太い血管に生じる風船状の瘤である。破裂していない状態（未破裂動脈瘤）では多くの場合ほぼ無症状であるが、破裂する（破裂動脈瘤）とくも膜下出血を引き起こす。これまでの研究から、動脈瘤などの血管病変は脳血管の分岐部などに局所的に発生することが知られている⁽¹⁾。血管形状の変化に起因する血流動態の変化が動脈瘤形成および成長に影響していると考えられている。従って、動脈瘤の発生と成長の要因を明らかにするには、血流動態解析によって瘤内部の流れを詳細に把握することが重要となる。

本研究は脳動脈瘤に作用する壁面せん断応力の評価を目的とする。そのために、まず脳動脈瘤シリコンモデル内の定常流を屈折率マッチングにより可視化撮影した後、ステレオ PIV を用いて動脈瘤内部の速度 3 成分を測定した。次に、取得した速度 3 成分及び脳動脈瘤形状データを用いて、動脈瘤内壁に作用するせん断応力の評価を試みた。このように評価した壁面せん断応力分布は特定の動脈瘤に対する基礎データとなるとともに、数値流体解析の比較検証データとして利用される。

2. 脳動脈瘤モデル内部流動のステレオ PIV 計測

2.1 脳動脈瘤シリコンモデル

人体頭部の MRI によって取得した大脳動脈データをもとに、3 次元 CG/CAD による形状モデリングと 3 次元プリンタ方式の粉体積層型高速造形により透明シリコンゴムモデルが作成された(Fig.1)。本研究で使用したモデルは実物を 3 倍に拡大した破裂動脈瘤(TypeA)ならびに未破裂動脈瘤(TypeB)である。



Fig. 1 Cerebral aneurysm silicon model (TypeB).

2.2 屈折率マッチング

シリコンモデル内部の流れを可視化するために、屈折率マッチングを適用した⁽²⁾。モデルを屈折率が一致する溶液中に設置するとともに、作動流体も同様の溶液を使用する。これにより光の屈折の影響を受けずに、流れ場の可視化が可能となる(Fig.2)。マッチング流体および作動流体は液温 40℃の 57%質量濃度グリセリン溶液を選

定した。グリセリン溶液は温度変化に伴い屈折率が変化するため、恒温装置を用いて 40°C に保持した。作動流体の物性値は密度 1130kg/m^3 、粘性係数 $5.31 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、屈折率 1.41 である。

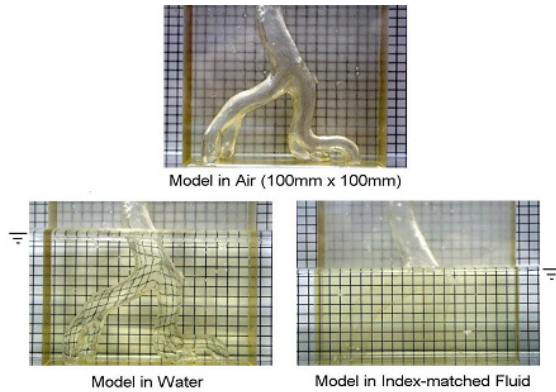


Fig. 2 Effect of index matching.

2.3 実験装置構成

装置の概略図を Fig.3 に示す。恒温水槽内の作動流体を遠心ポンプにより循環させる。モデルへの流入流量は電磁流量計を用いて測定する。モデルは XYZ 軸電動トラバーサに搭載されている。

PIV システムは高速度デジタル CCD カメラ(1280×1024 画素)、ダブルパルス Nd:YAG レーザ(波長 532nm、出力 30mJ/pulse)、同期装置から構成される。光学レンズにより形成されたシート光(厚さ 2.5mm)を撮影領域(73×59mm²)に照射し、CCD カメラを用いて PIV 画像を取得した。トレーサ粒子は平均粒径 8.5μm、比重 1.1 のアクリルコポリマー着色ビーズを選定した。

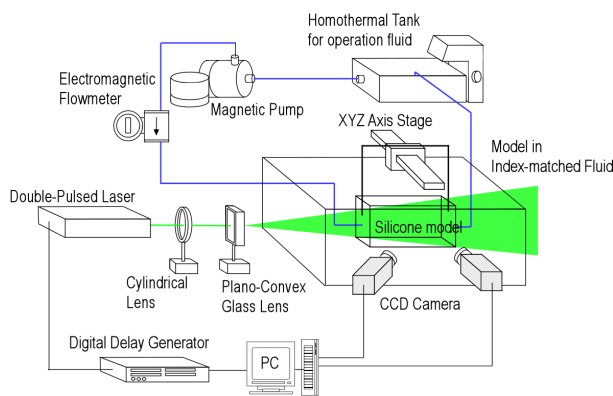


Fig. 3 Experimental apparatus.

2.4 計測条件

可視化画像を取得するために、XYZ 軸トラバーサを Z 軸方向に 2.5mm 間隔で移動させる。Z 軸の原点は動脈瘤に接する位置に設定している。Type A では合計 16 断面、TypeB では合計 14 断面の画像を取得する。Fig.4 に TypeA 及び TypeB の脳動脈瘤形状を示す。作動流体は

左端の太い動脈から流入し、動脈瘤を通過した後、右端の 3 本に分岐した細い動脈から流出する。流入条件は入口動脈部で 381ml/min, 953ml/min, 2290ml/min に設定し、レイノルズ数は 128,300,717 に相当する。流出条件は 3 本からなる出口動脈部の血管断面積に応じて流量配分を行う。

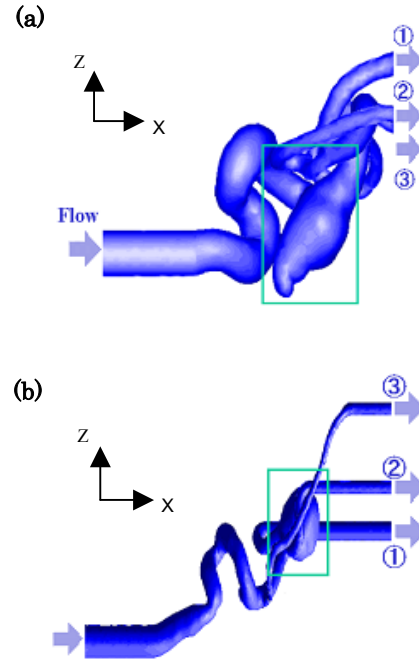


Fig. 4 Configuration of models ((a) ruptured aneurysm and (b) unruptured aneurysm).

2.5 計測結果

Fig.5 は TypeA の Z=15mm の断面における PIV 解析である。同様に PIV 解析を Type A 及び Type B のすべての計測断面で行い、動脈瘤内部の流れの速度 3 成分を取得した。PIV 解析は検査窓サイズを 41×41 画素(流れ場では 1.4×1.4mm² に相当)、隣接検査窓間隔 16×16 画素(61%オーバーラップ)の直接相互相関法を用いた。

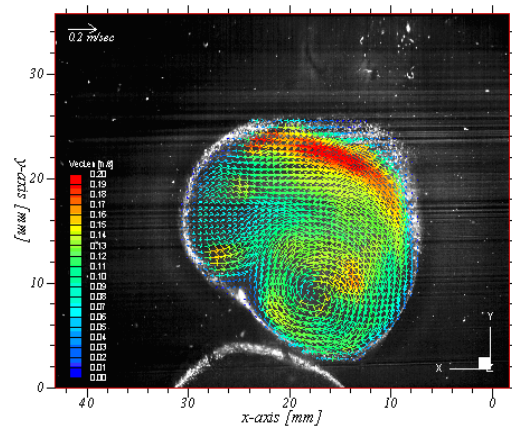


Fig. 5 PIV analysis result (Type A : Z=17.5mm).

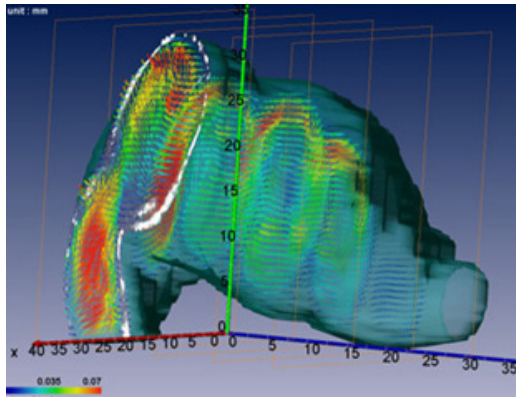


Fig. 6 3D plot of stereo PIV result .

3. モデル壁面に作用するせん断応力の測定

3.1 壁面せん断応力の実験的評価手法

モデル内部を流れる流体が壁面に与えるせん断応力 τ_w は次式で表される。

$$\tau_w = \mu \frac{du}{dh} \quad (1)$$

ここで、 μ は粘性係数、 du はモデル壁面に対する接線方向の速度、 dh はモデル壁面からの垂直方向の距離である。本研究では便宜上、壁面から垂直方向に dh の距離を有する位置を壁面せん断応力の算出点と呼ぶことにする。

脳動脈瘤モデルは分岐や曲面など複雑な形状を有しているため、算出点の特定は容易ではない。また PIV の解析結果は格子状の速度分布を形成するため、算出点の速度を直接求めることも難しい。そこで、本研究では PIV 解析で得られる格子状の流速データから複雑形状モデルに作用する壁面せん断応力を評価する手法を構築した。

算出点の特定ではモデル作成時の 3 次元形状データを利用して、本来曲線であるモデルの断面形状を微小な直線の集合体と近似する。これによりモデル壁面に対する垂直方向が決定され、応力算出点の特定が可能となる。

また算出点における速度は取得した PIV データに対してガウシアンフィルタによる補間を適用する⁽³⁾。算出点の速度 U は PIV 解析結果である格子状の流速分布から次式のように補間される。

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n w(r_i) u_i}{\sum_{i=1}^n w(r_i)} \quad (2)$$

ここで、 n は補間のために考慮する PIV データ数、 r_i は各格子点と算出点の距離、 $w(r)$ は距離 r を変数とする重み関数、 u_i は PIV データである。

(2)式に含まれる重み関数を次のガウス分布とするこ

とで、ガウシアンフィルタによる空間平均化で補間される。

$$w(r) = \exp \left\{ - \left(\frac{r}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

標準偏差 σ には次式で表される推奨値⁽³⁾を適用する。

$$\sigma = 1.24 \sqrt{\frac{A_0}{N_0}} \quad (4)$$

ここで、 A_0 は解析領域全体の面積、 N_0 は PIV データの個数である。

上述で補間される算出点の速度から壁面の接線方向速度を抽出する。壁面と接線方向速度から直線近似で速度勾配を求め、壁面せん断応力が算出される。

3.2 壁面せん断応力評価方法の妥当性の評価

本評価方法の妥当性を吟味するため、有限体積法を用いた市販流体解析コードで得られた脳動脈瘤内部の平均速度分布に本手法を適用して、壁面せん断応力を求め、数値解析で別途得られている応力と比較した。

Fig.7 は CFD 解析の計算格子である。形状と滑らかに一致するようにテトラメッシュを生成した。また、壁面からプリズムを 0.05mm の厚さで 10 層生成した。CFD では壁面と 1 層目のプリズムの間隔 0.05mm から、速度勾配を算出している。CFD 解析結果との整合性を確認することが本章の目的であるため、実験的手法を適用する際、応力算出点は壁面から 0.05mm に設定した。

Fig.8 は TypeB の Z=15mm の断面における壁面せん断応力分布の比較である。縦軸は壁面せん断応力値、横軸は Fig.8(a)の算出点の番号に相当する。分布の形状、大きさは概ね一致が確認でき、本手法が妥当であると考えられる。しかしながら、比較に用いた CFD 解析結果は壁面近傍において緻密な速度勾配が得られるように計算格子を生成しているため、壁面近傍に速度データが多く存在する速度分布が形成される。PIV の格子状の流速分布においても本手法が適用可能であるかについては未だ議論の余地が残されている。今後は壁面近傍にある速度データの間隔を意図的に間引き、PIV の解析条件に即した速度分布で再度比較を行うことが必要と考える。また本手法では奥行き方向 (Z 軸方向) に対する断面の傾きの影響を排除している。断面の奥行き方向の傾斜を考慮した実験的手法を新たに構築し、計算精度の更なる向上に努める予定である。

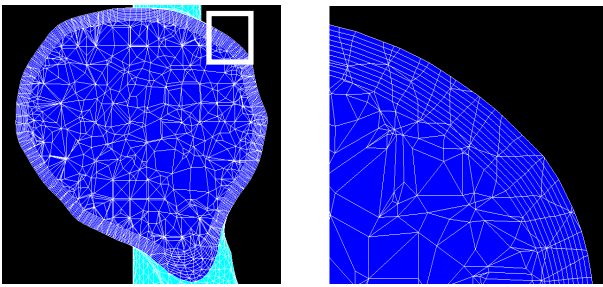


Fig. 7 Configuration of the calculation grid (TypeB : Z=15mm).

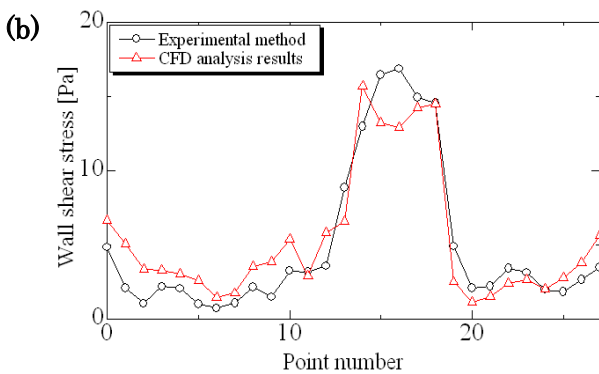
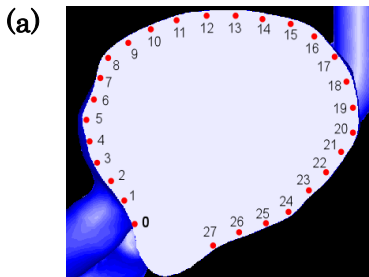


Fig. 8 Distribution of the wall shear stress at number from 0 to 27 (TypeB: Z=15mm).

3.3 壁面せん断応力の測定

壁面せん断応力評価方法をステレオ PIV 計測の結果に適用し、壁面せん断応力を算出した。Fig.9(b)は TypeB の Z=18mm の断面における壁面せん断応力分布である。縦軸は壁面せん断応力値、横軸は Fig.9(a)の算出点の番号に相当する。応力算出点は壁面から 0.15mm に設定した。取得画像の全面積は $48 \times 38.6 \text{ mm}^2$ 、PIV データ数は 5121 個であり、 σ は 0.74 となる。

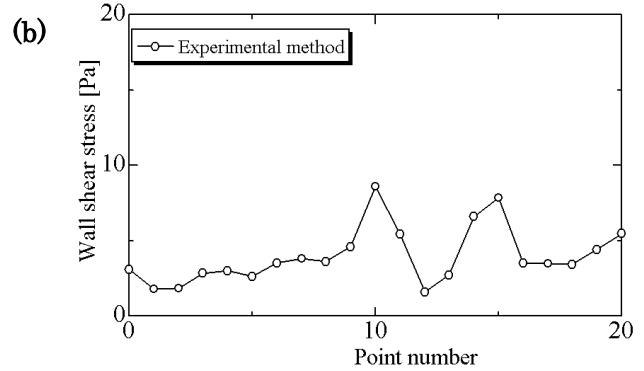
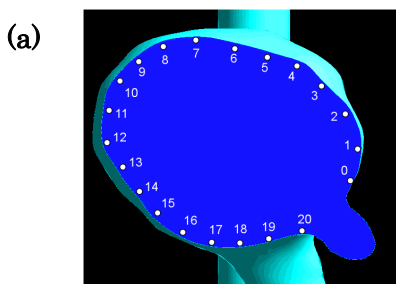


Fig. 9 Distribution of the wall shear stress at number from 0 to 20 (TypeB: Z=18mm).

4. 結論

本研究ではステレオ PIV 計測により脳動脈瘤モデル内の流れの速度 3 成分を測定した。また PIV 解析結果から壁面せん断応力を実験的に評価する手法を提案した。本報ではその手法の妥当性を検証するとともに、計測結果に実験的手法を適用し、壁面せん断応力を実験的に算出した。

謝 辞

本研究の遂行にあたり(株)アールテックの小杉隆司氏ならびに(株)フローテック・リサーチの水賀美健氏のご協力を得た。本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B) (No.17360077)の補助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 狩野猛, 竹内繁和, 小林延光, 本宮峯生, 馬淵正二: 脳血管障害の流体力学, Neurosurgeons, Vol.12, pp.15-24,1993
- 2) Nishino, K.: Highly efficient PIV measurement of complex flows using refractive index matching technique, Proc. 2004 Korea-Japan Joint Seminar, on Particle Image Velocimetry, POSTECH, Korea, Dec.9-10, Paper7.
- 3) Agui, J.C. and Jimenez, J.: On the performance of particle tracking, J.Fluid Mech., Vol.185, pp.447-468, 1987