弾性血管壁モデルにおける壁の変形と内部流れのPIV計測

坂東 佳憲* (東京大学・院), 大石 正道 (東京大学・生研), 大島 まり (東京大学)

PIV Measurement of Deformation of the Wall and Internal Flow Structure of the Elastic Vascular Model

Yoshinori BANDO, Masamichi OISHI and Marie OSHIMA

ABSTRACT

The shape of blood vessel is deformed by the blood pressure, which the blood flow affects. Therefore, it is necessary not only to measure an internal flow structure but also to measure the deformation of the vascular wall. In this paper, we propose a new method to measure the movement of the wall as well as internal flow in the same section using PIV such that the present method has been applied to an elastic model with particles inside in order to capture the movement of vessel wall. In addition, we investigate the change in the internal flow structure due to the elasticity of the wall. The result shows that the profile of flow rate is different to that of the inlet profile in the cylindrical elastic tube when the deformation rate of the wall is about 3% to the radius.

Keywords: Elastic vascular model, Deformation, Internal flow, PIV

1. 結論

動脈は弾性管であり、血圧の変化や流れ場によって変形するため、動脈を模擬した弾性管モデルを用いて動脈内の流れ⁽¹⁾について計測する必要がある。しかし、計測川の弾性管の作製が容易でないため、実血管形状モデルを使った実験例はほとんど見られない。一方、計算機の性能の向上により、血管の弾性を考慮した実血管形状内流れの数値シミュレーション⁽²⁾が行われている。しかし、計算結果の妥当性を評価するためのベンチマークとなる実験の結果がない。弾性血管壁モデルを用いた精度の良い実験が望まれている。

そのため本研究では、脳の血管形状を再現した弾性壁モデルにおける壁の変形量と内部流れの計測を想定し、単純な円管モデルを用いて壁の移動量と内部流れの計測手法の確立を行う。さらに、壁の変形によって内部の流れ場がどのように変化するかについても調べる。

2. 血管壁の移動量の算出方法の検討

実血管形状の内部流れは3次元であり、壁も3次元的に移動する。このため、本研究では血管モデルにもトレーサ粒子を混ぜることにより、内部流れの速度および壁の移動量をステレオPIVによって求める。

内圧による脳動脈の血管径の変形量は直径の約3%程度⁽³⁾と少ないため、壁の変形量はラグランジュ的に追跡することが可能である。これより、壁の移動量の算出については、手法A)一定の時間間隔毎の壁の移動量を求

め、ある時刻における壁の移動量を移動量の和で求める場合、手法B)基準となる画像を用意し、各時間における壁の移動量を直接求める場合、の2通りが考えられる。このため、単純な円管モデルを用いた2DPIVによって移動量の算出方法について検討を行った。

2.1 単純円管モデル

血管を模擬した単純円管モデルについて説明する。計測モデルはシリコーン(信越シリコーン社製 KE1606)で作製しており、大きさは、内径10mm、外径12mm、実験用水槽内における固定端間の長さは約80mmである。壁の移動量を求めるための粒子(帝國化工社製 TP-690)はモデル作製時に0.01wt%の割合で混ぜ込んでいる。また、計測モデルは0.01wt%のローダミンB水溶液で染色しており、蛍光画像を用いて血管壁部と流動部にある粒子を区別している。

2.2 壁の移動量の算出方法の比較

使用する画像は単純円管モデルを水槽内に固定し、カメラを1 μ mずつ20 μ mまで(0.076pixel~1.51pixel)移動させて撮影した。PIV解析条件は相互相関法のFFT解析で、相関領域は64 $\times$ 64pixelsで、サブピクセル解析はガウス分布で行った。

各手法における真の移動量とPIVの解析結果から求めた移動量との差をFig. 1に示す。計測は3回ずつ行っている。手法Aは1 μ m毎にPIV解析を行っている。結果より、手法Aでは移動量が増えるにつれて、つまり、移動量の和をとるにつれて誤差が増えていくのに対し、手法Bでは移動量が増えても誤差は2 μ m程度とほ

ば一定になった。今回の実験では $1\mu\text{m}$ に相当する移動量がサブピクセル以下であったため、PIV 解析において偏り誤差が生じたと思われる。このため、手法 A ではこの偏り誤差が積算されてしまったと考えられる。したがって、偏り誤差の積算を避けるため、壁の移動量は基準の状態からの移動量を直接求める手法 B を用いる。

Fig.1 Difference between the real and measured movement at each method.

3. 単純円管モデル内の流れと壁の移動量の計測

管壁の変形が流れ場に与える影響について調べるため、単純円管モデルにおいて、壁の変形量が、Case A) 正常な血管に相当する半径の約 3%, Case B) 硬くなった血管を模擬した半径の約 1%, の 2 つ場合について流れ場と壁の変形量を 2 DPIV で計測した。

3.1 実験条件と解析条件

流入波形 (Fig. 3 内) は頸動脈での計測結果から作製した拍動流であり、Reynolds 数は 55~575, Womersley 数は 1.69 である。作動流体には濃度を調整したグリセリン水溶液を用いている。PIV 計測に使用したカメラは TSI 社製 PIVCAM10-30 CCD Video Camera (1000×1016pixels, 20fps) で、光源は New Wave 社製 Mini-YAG double Pulse Nd-YAG Laser (波長 532nm, 10Hz) である。トレーサ粒子は東レ社製 SP-500L (平均粒径 $50\mu\text{m}$, 密度 1080kg/m^3) を用いる。

流れ場の速度および壁の移動量算出とも PIV 解析条件は相互相関法の FFT 解析、相関領域は $64\times 64\text{pixels}$ (50%オーバーラップ) である。また、壁の移動量は内圧が 0.0mmHg の時の画像と各時刻の画像より求める。

3.1 計測結果

計測は管軸方向には中央部付近で、撮影断面は管軸を通る断面で行った。このときの壁の移動量、速度の計測結果から算出した流量、および管の中心における軸方向の速度の時間変化を Fig. 2~4 に示す。

これらの結果を見ると、Case B では、壁の変位量 (Fig. 2)、流量の時間変化 (Fig. 3) とも流入波形 (Fig. 3) と同様の時間変化をしている。また、管の中心における軸方向の速度の時間変化 (Fig. 4) においても、理論値と同様の時間変化を示している。しかし、Case A では、壁の変形量が最大になる時刻は流量が最大になる時刻より

遅くなっている (Fig. 2)。また、流量の時間変化については、1.0s 前後の流入流量が最大になる時には流量は少なく、逆に 3.5s 前後の流入流量が少なくなる時には流量は多くなっており、変形により流入流量の波形が平坦化している。さらに、管の中心における軸方向の速度の時間変化 (Fig. 4) においても、流量の時間変化と同様の変化を示している。

Fig.2 Variation of Displacement.

Fig.3 Variation of Flow rate.

Fig.4 Velocity profiles at the center point.

4. まとめ

血管モデルに粒子を混ぜることにより、壁の変形量と内部流れの速度分布を同時に計測する手法の構築した。拍動流における単純円筒弾性管内の流れ場と壁の移動量について計測を行い、管径の約 3% 変化させた場合、壁の変形量や流量の時間変化において壁の変形による影響が現れることが確認された。

参考文献

- 1) Klancher, M., *et al.* Circ.Res., 66(1990), pp.1624-1635.
- 2) Torii, R., *et al.* Computers & Fluids, 36(2007), pp.160-168.
- 3) 林紘三郎: バイオメカニクス, コロナ社(2000)