

PIVによる血液質量流量計内の二次流れの計測

Measurement of Secondary Flow by PIV in a Blood Mass Flow Meter

○ 福田恭平 (東理大院) 小阪亮 (産総研)
 丸山修 (産総研) 西田正浩 (産総研)
 川口靖夫 (東理大) 山根隆志 (産総研)

Kyohei FUKUDA and Yasuo KAWAGUCHI, Tokyo University of Science

Ryo KOSAKA, Osamu MARUYAMA, Masahiro NISHIDA and Takashi YAMANE,
 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-2-1, Namiki, Tsukuba, Ibaraki

Abstract: We have developed a miniaturized mass blood flow meter especially for axial flow blood pumps. The purpose of this study is to analyze secondary flow patterns in the mass flow meter by Particle Image Velocimetry (PIV). As a result, it was found that the secondary flow patterns were different between at low flow rate condition and high flow rate condition. This result explained the fact that calibration coefficients, which translated the strain gauges into the flow rate in the flow meter, were quite different between at low and high flow rate condition.

Key Words: Mass Flow Meter, Axial Flow Blood Pump, PIV

1. 諸言

人工心臓の在宅治療患者の血液ポンプ自体の駆動状態や、人工心臓を適用された患者の生理状況を管理するために、血液ポンプを通過する血流量の計測は重要である。

血流量を計測する方法として、ポンプの消費電力から流量を推定する流量推定法や、市販の血流計を利用する方法が提案されている。しかし、図1に示すように、流量推定法は、軸流型のポンプに対して流量と消費電力の間にリニアな相関がなく、適用が困難である上、遠心型のポンプに対しても、血液の粘度による影響を受けてしまい、流量計測に誤差が生じてしまう欠点がある⁽¹⁾。また、市販血流計として、トランジットタイム式超音波血流量計や電磁流量計があるが、これらは小型化に限界があり、退院後に在宅で使用することは容易ではない。そのため、退院後にも在宅で携帯して使用可能な血流量計は、遠心型・軸流型といったポンプ特性の違いによる影響を受けず、血栓形成や感染症を生じない無侵襲計測を小型、軽量で実現できることが望ましい。

そこで、産総研では上記の条件を満たした、人工心臓のための小型曲がり管式小型質量流量計を開発している。ただし、前報により、本流量計は、1.0 L/min 近傍を境に、流量に対する校正式が異なることを示した⁽²⁾。

本研究では、この校正式の違いの根拠を明らかにするため、小型質量流量計の原寸大可視化模型を製作し、PIV法により、流量計内の流れを解析することを目的とした。

2. 小型質量流量計と計測原理

2-1 質量流量計について

本研究で対象とする小型質量流量計は、人工心臓のポンプに接続された曲がり管をセンサプローブとして使用して流量を計測する。図3に示す小型質量流量計は、内径 12 mm、外径 14 mm の曲がり管であり、R 30 mm、角度 120° の曲がり部を有する。遠心力が強く生じる曲がり部として流入口から 30° の点 (A 点)、遠心力の影響が少ない直管部として流入口から 120° の点 (B 点)、計 2 点にそれぞれ長さ 0.2 mm のひずみゲージ (特注品、日章電機(株)) を貼付してある。ひずみゲージを貼付した部分には、内圧による局所的なひずみが生じやすい構造にするため、直径 6 mm、肉厚は 150 μm まで薄肉加工してある⁽²⁾。

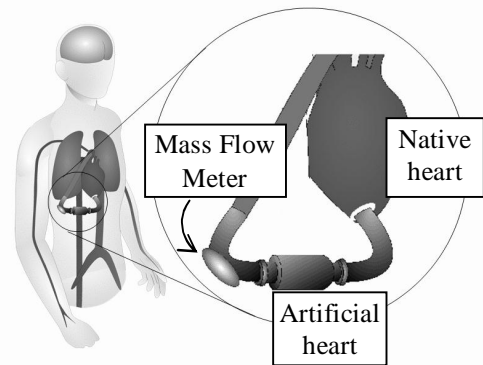


Fig. 2 Blood mass flow meter for discharged patients with an implantable artificial heart

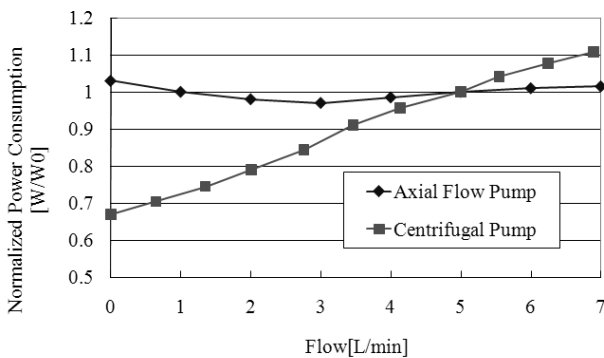


Fig. 1 An example of the correlation between flow rate and power consumption under constant rotational speed

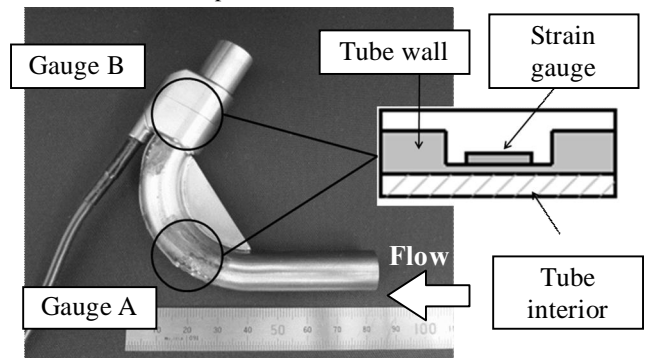


Fig. 3 Blood mass flow meter with two strain gauges

2-2 計測原理

本質量流量計の計測原理について述べる。本質量流量計は、A点とB点における遠心力による差圧を利用して流量を計測する。圧力とひずみは、一般的に一次式で結ばれる関係であるから、A点とB点のひずみの値を求めることは、2点間における遠心力による差圧を求めることに等しい。

次に、遠心力により生じた差圧と流量の関係を求める。曲がり管路中の微小領域では、次の4つの力が生じている。(a) 流体による遠心力、(b) 微小領域の外側から静圧によって加わる力、(c) 微小領域の内側から静圧によって加わる力、(d) 微小領域の両側から静圧によって加わる力、この4つの力をまとめると、

$$\frac{dP}{dr} = \rho r \omega^2 \quad (1)$$

となる。ここで、 ρ は密度、 r は管半径、 ω は角速度を示す。また、 dr と dP はそれぞれ微小領域における微小管半径、微小圧力を示す。

流量と差圧の関係を求めるため、 ω が r に依存せず一定であると仮定し、式(1)の両辺を積分する。このとき、静圧 P_0 と遠心力により増加した静圧 P_1 の関係を、差圧 ΔP と、曲がり管内周半径 r_0 と外周半径 r_1 を用いて表すと、

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \frac{\rho \omega^2}{2} (r_1^2 - r_0^2) \quad (2)$$

となる。式(2)から、遠心力による差圧は流量の2乗に比例する関係があることが示された。

したがって、遠心力による差圧とひずみの関係と、遠心力による差圧と流量の関係から、A点とB点の2点のひずみの値を計測することにより、流量の計測が可能であることがわかる。

2-3 質量流量の算出方法

ひずみゲージを用いて管路内圧を計測する場合、薄肉加工を施した部分の肉厚の差や、ひずみゲージの貼り付け方などによって、圧力とひずみの校正係数が異なることが考えられる。そのため、A点とB点の圧力とひずみの校正式をそれぞれ求めると、

$$P_{A0} = P_S = \alpha_A \varepsilon_A + \beta_A \quad (3)$$

$$P_{B0} = P_S = \alpha_B \varepsilon_B + \beta_B$$

が成り立つ。ここで、 P_{A0} 、 P_{B0} はA点とB点の圧力を、 ε_A 、 ε_B はA点とB点のひずみを示す。また、 α_A 、 β_A 、 α_B 、 β_B は、それぞれ、A点とB点の校正係数を示す。

遠心力による差圧は、流量が生じたときに、遠心力の影響が大きいA点により得られたひずみの値から、影響が少ないB点により得られたひずみの値を引くことで求められる。そのため、差圧とひずみの校正式を求めると、

$$\Delta P = C_1 \varepsilon_A - C_2 \varepsilon_B + C_3 \quad (4)$$

となる。ここで、 C_1 、 C_2 、 C_3 は校正式の校正係数を示す。したがって、式(2)(4)より、ひずみゲージの校正係数がそれぞれ異なっても、2点のひずみを計測することで流量を求めることができる。

3. 実験方法

3-1 流量の校正試験

小型質量流量計の流量と2点のひずみゲージのひずみ差の校正式を得るため、流量の校正試験を実施した。

流量の校正試験では、本質量流量計を、産総研製の血液ポンプ、塩化ビニル製のチューブ (MERA Exceline-H, 泉工医科工業(株)), 血液リザーバ(特注品, 泉工医科工業(株)), から成る体循環系を模擬した閉回路に接続し、回路内に純水を満たした。流路抵抗は、流量 5.0 L/min, 圧力 100 mmHg となるよう設置する。校正式を得るための市販計測機器として、圧力計 (AP641-G, 日本光電(株)) と流量計 (T402, Transonic System inc.) を用いた。試験では、まず、流量が生じないように回路をクランプすることにより、流量 0 L/min を維持した状態でポンプを回転させ、回路内の静水圧を上昇させた。そして、2点のひずみゲージのひずみ差と差圧の校正式(4)を求めた。次に、クランプを取り外し、流量を生じさせ、校正式を用いて、ひずみゲージより得られた遠心力により増加した差圧と市販流量計で計測された流量の校正式を求めた。

3-2 流量計内流れの可視化実験

質量流量計内の流れを可視化するため、質量流量計で使用する曲がり管の原寸大の可視化模型を製作し、流れの可視化実験を行った。

試験回路の概略図を図4に示す。曲がり管の模型は、材質として透明なアクリルを使用した。作動流体として 64 wt% ヨウ化ナトリウム水溶液を、トレーサ粒子として直径 10 μ m の銀めっきガラス粒子 (S-HGS, Dantec Dynamics) を使用した。照明にはアルゴンイオンレーザー (CW532-5W, カノマックス)、撮影には高速ビデオカメラ (Phantom V7.1, Vision Research) を使用した。曲がり管模型の計測地点に対し、アルゴンイオンレーザーライトシート (厚さ 1.6mm) を照射する。このレーザーライトシートに対し垂直に設置した高速ビデオカメラを使用し、シート上のトレーサ粒子の動きを撮影する。設定流量は、校正式が異なる 1.0 L/min 前後の 0.5 L/min, 5.0 L/min の2条件とした。画像解析法として4時刻粒子追跡法を用いた。4時刻粒子追跡法とは、図5に示すように、高速ビデオカメラで撮影された4枚の画像を重ね合わせ、同一の粒子の動きと思われる粒子群を1つの速度ベクトルとして捉える方法である。図6に管路の座標系を示す。流量計入口を $\theta=0^\circ$ 。出口を $\theta=120^\circ$ とした。可視化解析を行う断面として、管軸を通過する断面、および流入口に対して $\theta=30^\circ$ 、 60° 、 90° における流路断面について、それぞれ速度分布を求めた。さらに、管軸を通過する断面内の速度分布に関しては、座標変換によりそれぞれの角度位置における管軸方向の速度成分を抽出した。

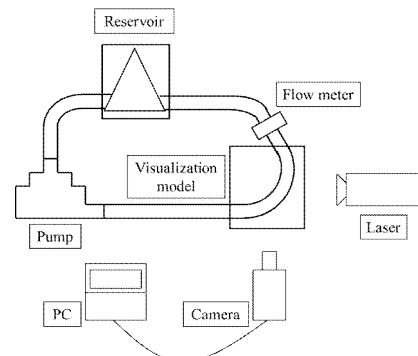
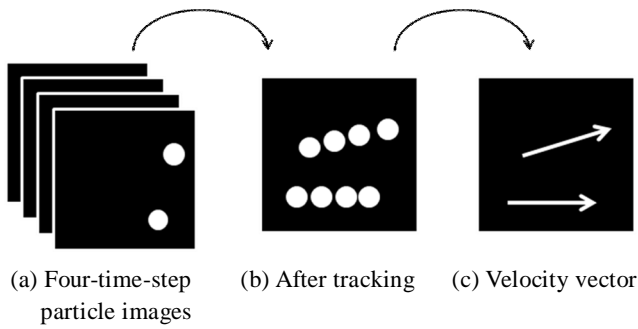


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus for mass flow meter visualization



(a) Four-time-step particle images (b) After tracking (c) Velocity vector velocimetry
 Fig. 5 Schematic diagram of Four-time-step particle tracking velocimetry

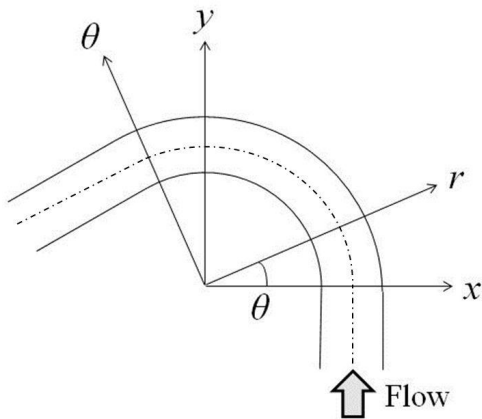


Fig. 6 Coordinate system of parallel section

4. 結果

4-1 流量の校正試験

本流量計から得られた差圧と流量との関係を図7に示す。図7より、本流量計の校正式は、流量約1.0 L/min前後で変化していることがわかった。この原因として、低流量域と高流量域における曲がり管内の流れが変化していることによる影響が考えられた。

4-2 流量計内流れの可視化実験

まず、管を通過する断面の速度分布について示す。これは、主方向流れを表している。各流量における、異なる角度位置 θ における θ 方向速度分布を図8(a), (b)に示す。速度は断面平均速度で無次元化しており、図の縦軸の1目盛は、断面平均速度を示している。グラフの横軸は、管軸を0 mm、管の内壁を-6 mm、外壁を6 mmとした。管径は12mmである。図8より、 $\theta=0^\circ$ における速度分布において、0.5 L/minの低流量域では、層流の特性であるハーゲン・ポアズイユ流れの傾向が見られた。一方、5.0 L/minの高流量域では、乱流の特性である台形型の速度分布の傾向が見られた。そして、いずれの場合も速度分布は軸に対称であった。また、遠心力の影響が少ない地点と予想していた流出口地点の $\theta=120^\circ$ にも、流入地点の $\theta=0^\circ$ の流速分布に比べて、5 mmの場所において、0.5 L/min時では約3倍の流速が、5.0 L/min時では約2倍の流速が生じていることがわかった。いずれにせよ、 120° の直管部でも、遠心力による速度分布の変化の影響が大きく残っていることがわかった。

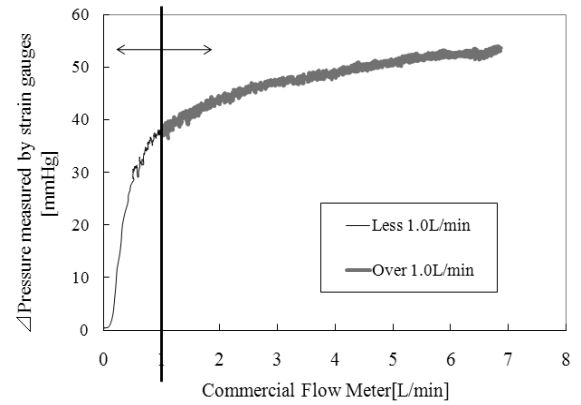
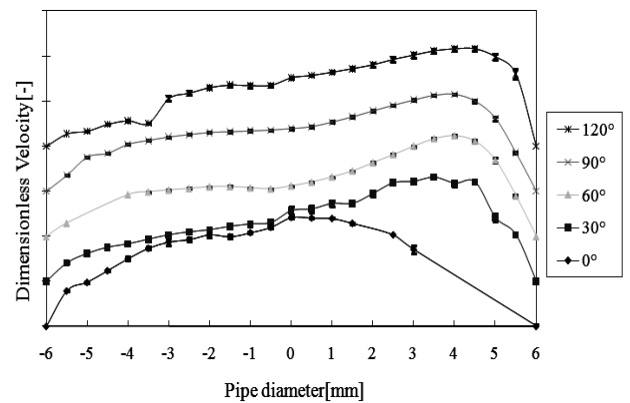
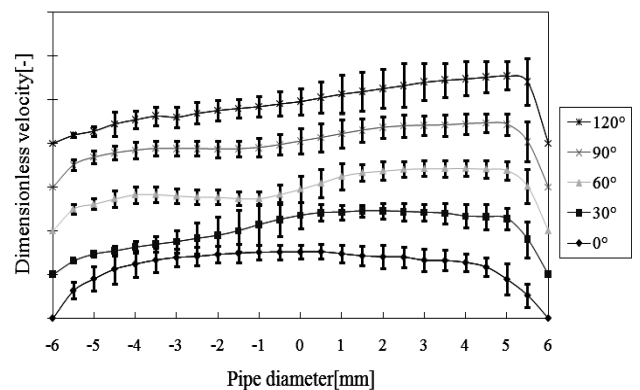


Fig. 7 Relationship between flow rate and differential pressure measured by two strain gauges



(a) Flow rate of 0.5 L/min



(b) Flow rate of 5.0 L/min

Fig. 8 Velocity distributions on the symmetry plane at some angle positions inside the mass flow meter

次に、流路断面の解析結果について示す。これは、二次流れを表している。流路断面の速度分布を図9に示した。5.0 L/minの高流量域では、0.5 L/minの低流量域と比べて渦の中心部の直径がより大きくなっていることがわかった。これは、高流量域では、より剛体運動に近い流れが曲がり管内形成されたためであると考えられる。また、 $\theta=60^\circ$ や 90° における速度分布は、5.0 L/minの高流量域では、二次流れが小さく、流れが発達しづらいと言える。一方、0.5 L/minの低流量時では、二次流れが大きく、管軸進行方向に流れが発達するのが容易である結果と言える。

5. 考察

管並行断面流れの解析結果から、低流量域と高流量域では速度分布が異なることがわかった。特に $\theta=30^\circ$ における流速分布の違いは顕著であり、低流量域には $\theta=30^\circ$ から $\theta=120^\circ$ に至るまで、その歪み方がそれほど変わらず、その流速のピークが $r=4$ mm付近に存在した。一方、高流量域では、 $\theta=30^\circ$ 、 60° 、 90° では速度分布の歪み方が徐々に変化しており、流速のピークは、 $\theta=30^\circ$ では $r=2.5$ mm、 $\theta=60^\circ$ では $r=3.5$ mm、 $\theta=90^\circ$ では $r=5$ mmとなり、速度分布の歪み方が徐々に管路外側に向かって移動した。したがって、 $\theta=30^\circ$ における流れの状態は、低流量時には、既に発達した曲がり管流れであるのに対し、高流量時には、曲がり管内入口流れと見なすことができる結果といえる。約1.0 L/min付近にてひずみゲージより導いた差圧と市販流量計による流量との校正式が異なる理由として、これら流れの状態による速度分布の変化から生じるものである可能性がある。

一方、管軸に垂直な断面内の二次流れの解析結果から、低流量域と高流量域とでは二次流れの渦の大きさが異なることがわかった。低流量時では、断面二次流れがディーン型の渦を形成し、発達した曲がり管内流れとなっているのに対し、高流量では、二次流れの渦が弱く形成しており、未発達である曲がり管内流れを呈していると予測できた。そのため、二次流れの計測においても、流量の高低に依存して流れのパターンが異なっていると言える。

本可視化結果から、ひずみゲージより導いた差圧と市販流量計による流量との校正式が1.0 L/min前後で変化する原因として、低流量時における曲がり管内流れの発達と、高流量時における曲がり管内流れの未発達の違いが影響している可能性が示唆された。

6. 結言

曲がり管式小型質量流量計において、流量計測の際に生じる、流量に対する校正式の変化の原因を、PIV法により調べた。その結果、校正式が1.0 L/min前後で変化している原因として、流量によって曲がり管内流れのパターンが異なっていることが影響している可能性が示唆された。

今後、非定常流への計測を考慮し、流量に対する校正式が変化しない質量流量計の開発を行うため、数値解析と実験的な検討から、流量により流れのパターンが変化しないモデル形状へと改良を行う予定である。

謝辞：本研究の一部は平成21年度NEDO産業技術研究助成（No. 09A07015a）の援助を受け行なった。

7. 参考文献

- (1) Akira, T, Makoto, Y, Ken-ichi, A, Hiroshi, T, Tomoyuki, Y, Shin-ichi, N, In Vivo Test of Pressure Head and Flow Rate Estimation in a Continuous-Flow Artificial Heart, *Artificial Organs*, 27(1), pp.99-103, 2003.
- (2) 小阪亮, 西田正浩, 丸山修, 日高達哉, 大久保剛, 山根隆志, 軸流型人工心臓のための質量流量計の開発, *ライフサポート*, Vol.20 No.3, 2008.

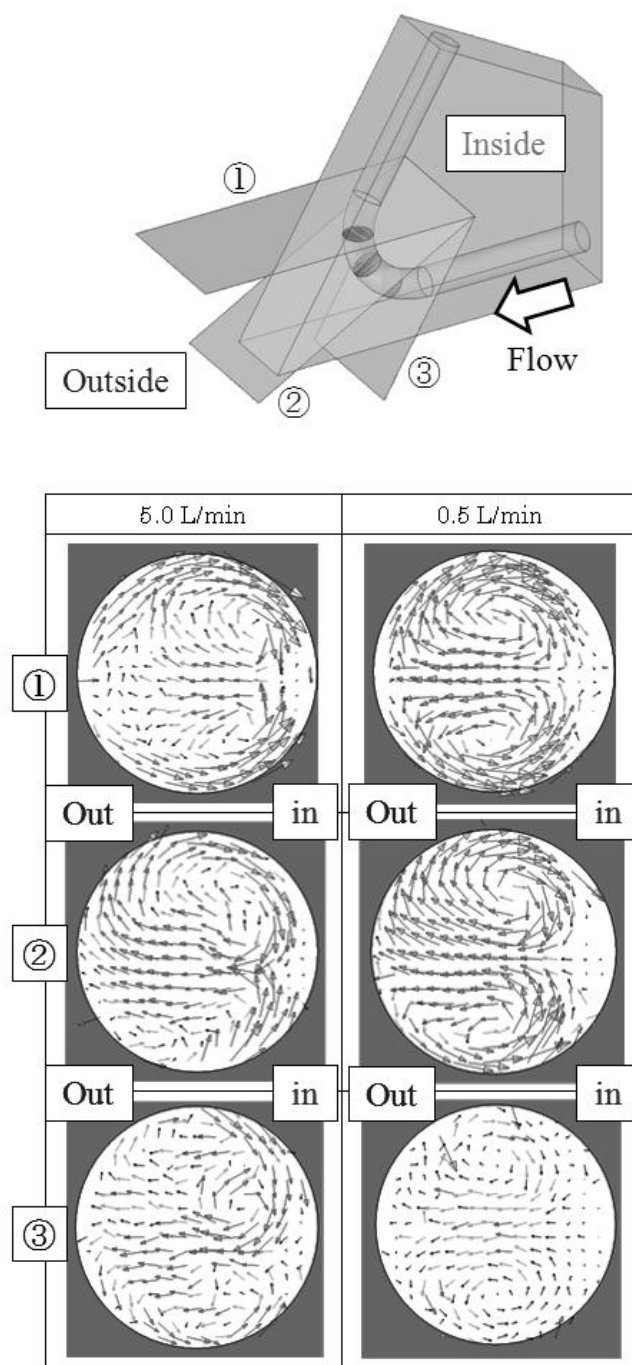


Fig. 9 Vertical section of the secondary flow
① $\theta=90^\circ$, ② $\theta=60^\circ$, ③ $\theta=30^\circ$