137 レーザー誘起蛍光法によるU字テーパ管内の 瞬時流速分布の可視化と測定

関大工 大場謙吉
松下電器産業(株) 浦部丈晴

関大院
関大院

池戸重雄
澤 賢一[○]

Visualization and Measurement of Velocity Field in Pulsatile Flow through a Tapered U-bend Using Laser-Induced Fluorescence Method.

Kenkichi Ohba, Shigeo Ikedo, Takeharu Urabe and Ken-ichi Sawa[○]

A laser-induced fluorescence (LIF) method was used to visualize and measure instantaneous velocity profiles in pulsatile water flow through a tapered U-bend of circular cross-section. Visualization of instantaneous velocity profiles across the tube was made at eight different phases in a period of the pulsatile flowrate waveform. Stereographs of instantaneous velocity profiles and instantaneous contours of equi-velocity in a tapered U-bend was obtained. As a result, it was found that at the outlet of the tapered tube the flow velocity gradient near wall was very steep, and in spite of this fact, some reverse flow appeared near the inner wall of the tapered U-bend at the deceleration phase in the pulsatile flow.

1. はじめに

レーザー誘起蛍光法¹⁾とは、液体中に混入されたトレーサ粒子をパルスレーザー光により励起し、その残光を利用してタイムラインを描かせることで、流速分布を可視化する方法である。この方法は、流れを乱さず非接触測定が可能であり、瞬時流速分布の測定ができる。そこで、動脈硬化症、動脈瘤などの病変の好発部位である大動脈弓での流れ場を調べるために、これを模擬したU字テーパ曲管を、またそのテーパが流速分布に及ぼす影響を調べるために、その傾角にあわせたテーパ直管を用いて定常流及び拍動流の1周期中の各位相について、レーザー誘起蛍光法により可視化を行い、その瞬時流速分布を求めた。^{2),3)}

2. 実験装置および方法

実験装置の概略をFig.1に示す。液体中に混入した蛍光粒子(ZnS)を瞬間的に励起し、発光させる光源として、高出力で空間分解能の高いNd:YAGレーザー(基本波長1064nm)を使用した。レーザーからのパルス光を波長分離器によって、第3高調波355nmの紫外光のみとし、紫外線吸収の少ない石英レンズで絞り、

Fig.1 Experimental apparatus of a laser-induced fluorescence method.

なお、測定部にはレーザーを直進させ、撮影時の光学的歪を取り除くために水槽を設けた。流れ中に充分拡散した蛍光粒子は、レーザーからの紫外パルス光によって瞬間的に励起、発光しルミネセントラインを描く。この光は、非常に微弱であるためイメージンテンシファイアで光増幅し、毎秒200コマの撮影、再生能力のある高速ビデオカメラで記録した。パルスレーザー発振時刻は、Fig.2のようにレーザーからのトリガー信号と電磁流量計からの流量波形とを高速ペンレコーダーで同時記録することで明らかにした。また、座標についてはFig.3のように定め、x軸とy軸は管内半径で無次元化した。

Fig.2 Diagram of trigger system.

Fig.3 Co-ordinates system.

3. 実験結果および考察

Fig.4は本実験で用いた流量波形で、波形上の1～8の各位相において可視化を行なった。また、Fig.5にはテーパ直管断面中央部の、Fig.6にはU字テーパ曲管断面中央部における可視化写真を示す。また、写真中の白い矢印はビームの入射位置を示し、写真右側は曲りの内側を示す。流れの条件は可視化写真の上に示す通りで、 $\bar{Q}$ ：時間平均流量 (ℓ/min)、 ε_q ：流動脈動率、 f ：拍動周波数 (Hz)、 T_p ：ビーム入射からの経過時間 (ms)、 ϕ ：位相である。また、 St は定常流を示す。まず、テーパ直円管断面中央部における流速分布において、定常流ではテーパの流入口での流速分布は放物線状である。以後、流出口に近づくにつれてテーパの影響を受け流体が管中央によせられることにより矩形の流速分布になっている。一方、拍動流では、逆流成分も見られ、位相 $\phi=1,7$ ではさきほどの流出口で矩形になるという流速分布の変化が顕著に見られた。また、管壁での速度勾配也非常に急峻であることが分かる。

Fig.4 Waveform of flowrate.

次にテーパU字曲管断面中央部における流速分布において、定常流では曲り始めにおける放物線状の流速分布が、曲り終りでは遠心力の影響を受け、内壁側より外壁側の方が大

きい流速をもっている。拍動流では、位相 $\phi=1,7$ での流速分布が $\theta=90^\circ$ をこえると管壁付近で急峻な速度勾配をもち、管中央部ではなだらかな流速をもっている。 $\theta=135^\circ$ になると、位相 $\phi=1$ で内壁側が外壁側より大きい流速をもつことが分かる。また、位相 $\phi=3,5$ での逆流成分が曲り終りではテーパと遠心力の影響により内壁側に大きくなり、外壁側との流速の差が大きくあらわれた。

次にテーパU字曲管の9断面における可視化画像を画像処理装置を用いることによって細線化し、流速分布を求め、それを合成することで作成した等流速線図および断面内流速分布立体図である。ここで $\theta=45^\circ$ では、等流速線図より位相 $\phi=3,5$ で内壁側に逆流が生じており位相 $\phi=5$ においてはかなりの広範囲になっていることが分かる。また、立体図を見ると位相 $\phi=7$ で流速分布にくぼみのようなものが見られる。これが $\theta=135^\circ$ では、位相 $\phi=3,5$ における逆流は大きくなった。また、位

$r/R=0$ $\bar{Q}=0.94\text{e/min}$ $\varepsilon_q=1.06$ $f=1.0\text{Hz}$ $Tp=40\text{ms}$

Fig.5 Velocity profiles in a pulsatile flow visualized by the LIF method in a tapered straight tube.

$x/X=0$ $\bar{Q}=1.0\text{e/min}$ $\varepsilon_q=1.0$ $f=1.0\text{Hz}$ $Tp=40\text{ms}$

Fig.6 Velocity profiles in a pulsatile flow visualized by the LIF method in a tapered U-bend.

相 $\phi=7$ では、管周縁部で急峻な速度勾配をもつようになり、管中心に見られたくぼみが小さくなった。ここで、流速分布にくぼみが生じた原因として二次流れの存在が考えられ、急峻な速度勾配をもつ原因としてU字曲管にテーパがついているため管周縁部の流体が管中央に寄せられたためと考えられる。

4. まとめ

L I F法を用いることによりテーパU字曲管内拍動流の流速分布を可視化し、その可視化画像を処理し、等流速分布及び断面内流速分布立体図を作成した。その結果、テーパ管出口で壁近傍の速度勾配が非常に急峻になること、それにもかかわらずU字テーパ管の曲りの内側の壁近傍において拍動流の減速期に逆流が発生することが明らかになった。

<参考文献>

- 1)大場；流れの可視化、Vol.7, No.25(1987)PP.7-13
- 2)池戸、大場；日本機械学会第6回 Λ^* 「イソゾニク」学術講演会講演論文集、No.940-35(1994), 76
- 3)Ohba,K. et al. ; Proc. 4CJUSS Conf. on Biomechanics(1995), 244

Fig.7 Stereographs of instantaneous velocity profiles and instantaneous contours of equi-velocity at the phases 1,3,5,7 at 45° and 135° in a tapered U-bend.