47 レーザ誘起蛍光法による分岐管内層流の流速分布の可視化と定量測定

関西大工 大場 謙吉, 川崎重工(株) 佐藤 誠, 関西大(院) 坂口 総一郎

Visualization and Quantitative Measurement of Velocity Profile of Laminar Flow in a Branch Tube Using a Laser Induced Fluorescence Method

Kenkichi OHBA*, Makoto SATO** and Soichiro SAKAGUCHI*

Visualization and quantitative measurements of the velocity field of a laminar water flow through a branch tube of square cross section was made using a laser induced fluorescence (phosphorescence) method (LIF). Velocity profiles in two directions across the tube were visualized in totally 23 different cross sections located at the upper and lower streams of the branch portion along the flow direction. The wall shearing stress was obtained from these visualized velocity profiles and the map of the wall shearing stress over the whole flow field was obtained.

1. はじめに

分岐管内の流れを把握することは、工業分野のみならず医学分野においても重要である。特に、動脈硬化症の好発する血管分岐部では、そこでの流れ場が動脈硬化症の発症と深く関係していると言われている。そこで、我々は流体の流れを乱すことなく、分岐部などの複雑な流れ場において細部にわたり可視化が可能であるなどの利点を持つ、レーザ誘起蛍光法^{1), 2)}(L.I.F.)を用いて正方形断面を持つ分岐管内の管断面内流速分布の可視化を行った。そして、その可視化写真から各断面内の流速分布と、壁面せん断応力の分布図が得られたので報告する。

2. 実験装置および方法

本研究で用いた測定装置の概略をFig.1に示す。蛍光粒子を瞬間的に励起・発光させるための光源には窒素バルスレーザを使用した。このレーザは波長337.1nm、ピーク・パワー1MW、パルス幅5nsである。このレーザから発するパルス光は、まず紫外線吸収の少ない石英レンズで絞られる。ここで絞られたビームはさらに直径1mmの開孔を通り、測定部に流れに対して垂直方向から照射される。これにより流れ中に分散された蛍光粒子はビーム軸に沿って緑色の発光を示すが、光は微弱である。そのためにI.I.カメラを用いて光を増幅した。そしてその光を毎秒200駒の撮影・再生能力をもつ高速ビデオカメラで記録した。

Fig. 1 Diagram of the apparatus for visualization and measurement of flow velocity distribution.

* Department of Mechanical Engineering, Kansai University, Suita, Osaka, Japan.
** Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kobe, Hyogo, Japan.

また、トレーサとしての蛍光粒子にはZnSを使用し、流体中に約0.1-0.2%wt混入した。この粒子の残光寿命は約1秒で、平均粒径は約 $8\mu\text{m}$ 、密度は 4.1g/cm^3 である。Fig.2に分岐管の座標系を示す。管の断面形状は正方形で一辺が 11.5mm である。分岐角度は 45° でBranch1, Branch2の長さはそれぞれ 30cm , 40cm である。また流れ方向をZ軸とした。可視化はBranch1,2それぞれの管中心軸の交点を0点とし、水力平均直径(D_h)間隔で分岐部上流側3断面、Branch1,2の下流側それぞれ10断面で行った。

3. 結果および考察³⁾

x軸、y軸上の流速分布の可視化写真をFig.3に示す。全ての写真はビーム照射からの経過時間 $T_p=50\text{ms}$ である。流入条件として、流量比 $Q_2/Q_1=0.5$ (Q_1, Q_2 はそれぞれBranch1,2の流量)、レイノルズ数は分岐部上流での値とし、 $Re=870$ である。

Fig. 2 Co-ordinates system for the 45-deg. buranched tube of square cross-section.

Fig. 3 Velocity profiles visualized by L.I.F. in a branch tube.

Fig. 4 Change of velocity profiles with time.

【分岐部上流(-3Dh ~ 0Dh)】 -3Dh~-1Dhのx軸とy軸方向の分布はすべて放物線状の形をしている。このことから直管部で流れは、分岐部の影響を受けずに十分発達した状態で分岐部に流入することがわかる。分岐入口部(0Dh)でのy軸方向の分布で流速のピークがBranch2側に寄っているのは、流れの一部がBranch2に吸い込まれているためである。

【分岐部下流、Branch1】 分岐部の(1Dh)のx軸方向の分布の両側壁近傍と、y軸方向の分布の右側壁近傍に逆流が起きている。x軸方向の3Dhの分布から下流では“鞍型”の分布となっている。そして、鞍の中央部での流速は非常に低い。さらに下流に行くと中央部でのへこみが小さくなっている。y軸方向の分布は分岐直後(2Dh)から左半分の高速部と右半分の速度零の部分に分かれた形になっている。また、この零速度部は管中央部にまで広がっている。ここで、(3Dh)の時間的変化の様子をFig.4に示す。時間の経過と共に僅かであるが零速度部は逆流している。これは、分岐部での管の広がりにより0Dhから1Dhの間で流れの剥離が起こり、それによる大きな渦が管中央部まで広がったためである。そしてこの渦はさらに下流にまで広がっている。Fig.5に、 $Re=870, Q_2/Q_1=1, 5Dh$ でのy軸方向の速度分布を示す。写真の左側の壁に剥離による渦が生じていることがわかる。

【分岐部下流、Branch2】 Branch1と同様に、流れの剥離による渦が存在するはずであるが、2Dhのy軸方向の分布では逆流はみられない。これより、Branch2での渦はBranch1のものとは比べ小さいことがわかる。

次に、これらの写真から壁面でのせん断応力を求めた。Fig.6に結果を示す。横軸は断面の位置、縦軸は壁面せん断応力値を示している。図中の○はy軸方向の紙面左側の壁、●は右側の壁での値を、△はx軸方向の左側の壁、▲は右側の壁での値を示す。また斜線部は分岐部を表している。まず、○を見ると分岐前後で応力は高くなっている。特に2Dhでは非常に高い。その反対側の壁●では分岐部の0Dhから1Dhの間で剥離渦により値は負と

Fig. 6 Distribution of wall shearing stress along z-axis. (Branch 1)

なる。x軸方向の両壁(△,▲)の分岐部上流では、 $\tau_w \approx 0.04\text{Pa}$ となり、○、●ともそれに近い値となっているが、これは直管内で十分発達した層流の値とほぼ等しく、上流では分岐の影響を殆ど受けていないことがわかる。

次に、 $Re=870$ 、 $Q_2/Q_1=0.5$ の壁面せん断応力を求め、そのマップ図をFig.7に示す。これらの図は管の一断面をとり、その断面でA点を起点として反時計回りに各コーナーをB,C,D,E点として、断面を切り開いた図である。-3Dhと-2Dhでは4面すべて中央部での値が高く、コーナー付近での値は低い。ピークの値もあまり違いはない。-1DhではC-D、つまりBranch2側の壁での応力は極端に高くなっている。これは分岐部でBranch1の左側壁に右側壁での流れの剝離によるジェット流が存在する(Fig.4)ためと思われる。分岐部入口の0DhではB点,E点各々のコーナー付近ではほぼ0に近い値になっている。1DhではAF点付近を除きすべて負の値になっている。2Dhでは剝離渦の影響が現れ、A-B、E-Fで応力が低い値になっているが、対照的にC-Dの中央部では0.2Pa以上の高い値になっている。3Dh~5DhではC-Dの応力は高いが下流ほどその値は下がっている。そして断面内2次流れによりB-CとD-Eの一部での値は高い。また、A-B、E-F間では他の面と比べて低い値のまま下流へと進み、徐々に正の値の領域が広がっている。これは剝離渦の領域が狭くなったためである。

4. まとめ

L.I.F.を用いて正方形断面を持つ分岐管の速度場の可視化と定量測定を行うことができ、それに基づいて壁面せん断応力の分布を流れ場全体にわたって求めることができた。

最後に、本研究にご協力いただいた、本学四年次生(1986年度)、西川、道場両君に深く感謝いたします。

《参考文献》

- 1) N. Nakatani et al.; J. Phys. E: Sci. Instrum. 8(1975)1042
- 2) 大場, 佐藤; 流れの可視化, Vol. 6, No. 22(1986)377
- 3) 佐藤, 大場; 日本機械学会講演論文集, No. 874-2(1987 Mar.)39

Fig. 7 Map of wall shearing stress. (Branch 1 -3Dh~5Dh)