72 レーザライトシート法とレーザ流速計併用による 曲がり管内層流の実験解析

宇都宮大学 秋山 光庸、杉山 均、二宮 尚、浦井 勇
出光興産(株) 古賀 英明*

Flow Visualization and Velocity Measurement in a Bend Tube
using Laser Light Sheet Method and Laser Doppler Velocimeter

Mitsunobu AKIYAMA*, Hitoshi SUGIYAMA*, Nao NINOMIYA*,
Isamu URAI* and Hideaki KOGA**

The flow field in a sharp bend tube was visualized using laser light sheet method and the velocity field was also measured by laser Doppler velocimeter. A 90° bend tube whose radius of curvature is four times its tube radius is connected with 70 diameters long straight tube in order to establish a fully developed laminar pipe flow at the inlet of the bend. The flow field in the plane of symmetry is visualized to show flow reversals at the outer side of the bend near its inlet for $Re > 613$ and at the inner side of the bend around the bend angle $\Omega = 58^\circ$ for $Re > 1320$. The distributions of streamwise and transverse velocities at several bend angles were obtained. The contours of streamwise velocities are found to shift towards the outer side of the bend and form C-shaped distributions. The secondary flow is found to form a pair of vortex and is strongest at the bend angle $\Omega = 30^\circ$.

1. はじめに

曲率を持った管は直管に次いで重要な管路の一つである。プラント内の配管、ボイラーや原子力施設などの熱交換器、化学反応装置など、工業的にもその使用範囲は広く、大動脈弓などの血管内の流れなど生体工学においても重要な流れ場を構成する。その流動状態の詳細を知るとは、流体力学的、伝熱工学的のみならず、生体工学的にも重要と考えられる。従来、曲がり管内の流動状態に関する研究は、数多く行われているが¹⁾²⁾、管径に対する曲率半径の割合が小さい、きつい曲がり管に関する詳細な実験的研究はあまり行われていない。本研究では、十分発達した円管内層流を入口条件とする、きつい曲がり管内層流の流速分布の詳細をレーザ・ドップラ流速計を用いて測定し、併せてレーザライトシート法による可視化を行い、その流動状態の詳細を調べる。

2. 実験方法

Fig. 1に実験装置の概略図を示す。流路は内径 $d=16\text{mm}$ (半径 $a=8\text{mm}$)、曲率半径 $R_c=32\text{mm}$ 、曲率半径比 $R_c/a=4$ 、曲がり角度 90° の曲がり管で、2枚の板厚 20mm の亚克力板に曲がり管半断面の溝を精密加工し、接着したものを用いた。また、曲がり管の上流側及び下流側に、各々長さ $70d$ 及び $14d$ の直管部を設け、曲がり管入口で十分発達した円管内層流(ポアズイユ流れ)を実現した。流体は脱気した水で、流量はオーバーフローと流量調節バルブによって調節し、散乱粒子として、比重 0.983 、平均径 $45\mu\text{m}$ のガラスビーズを界面活性剤と共に加えた。流速測定には、レーザ・ドップラ流速計(LDV)を用いた。光源は 25mW のHe-Neレーザで、逆流の測定が可能な様に周波数シフトを用いた。LDVの測定体積は、

* Dept. of Mech. Systems Engng., Utsunomiya Univ., 2753 Ishii-machi, Utsunomiya 321, Japan

** Idemikousan Co. Ltd., 3-1-1 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japan

幅 $150\mu\text{m}$ 、長さ 1.87mm であった。プローブヘッドのトラバースには、 0.1mm 間隔の移動が可能なトラバース装置を用い、空気、アクリル、水の屈折を考慮して位置決めを行った。測定位置は、曲がり角度 $\Omega = 10^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° の各断面とし、各位置において上半断面内の速度分布を 1mm 間隔の格子点上の各点において測定した。座標系は、主流方向（管軸方向）を Z とし、曲がりの曲率半径方向を X 、これ

らと直交する方向を Y とし、各方向速度を各々 W 、 U 、 V とした。平均主流速度 $\bar{W}$ と管内径 d で定義したレイノルズ数 Re は 600 、 800 、 1300 、 2000 とした。可視化実験の光源には 2W の Ar レーザを用い、シリンドリカルレンズを介してシート状の光とし、曲がり管対称面内の流動を可視化した。散乱粒子には、前述のガラスビーズを用いた。

Fig. 1 Experimental apparatus.

3. 結果及び考察

実験の妥当性を検証するために、曲がり管入口の上流 10mm の位置において主流方向速度分布を測定したところ、 3% 以内の誤差でポアズイユ流れの理論値と一致した。Fig. 2に、 $Re=2000$ における各断面内の主流方向速度分布の等値線及び二次流れベクトル図を示す。他の Re 数における流速分布の詳細は紙面の都合上割愛した。各図において、図の左側が曲がりの内側、図の右側が曲がりの外側に対応し、管上半断面を下流側から見た様子を示してある。曲がり角 $\Omega = 10^\circ$ では、主流方向速度分布はほぼポアズイユ流れと類似の分布となっているが、最大流速点がわずかに外側に寄っており、すでに曲がりの影響が現れている。また、二次流れベクトル図において、対称面近傍で外側に向い、管壁に沿って内側に向かう、曲がり管特有の渦運動が観察される。この渦の中心位置は、上壁に近い $(X, Y) = (-0.2a, 0.675a)$ 付近で、二次流れベクトルの最大値は約 $0.2\bar{W}$ であった。曲がり角 $\Omega = 30^\circ$ では、最大流速点が $X=0.5a$ 付近となり、主流方向速度の速い領域がより外側に寄っており、曲がりの影響が明確に現れている。主流方向速度の最大値は $1.71\bar{W}$ で、この値は Re 数の増加に伴って減少する傾向が見られた。二次流れベクトル図においても、曲がりの影響は顕著に現れており、渦運動の強度が増していることが分かる。二次流れベクトルの最大値は約 $0.8\bar{W}$ で、この値は Re 数の増加に伴って増大することが分かった。渦の中心は、 $(X, Y) = (-0.3a, 0.55a)$ 付近となり、曲がり角 $\Omega = 10^\circ$ に比べて下方に位置していることが分かる。曲がり角 $\Omega = 60^\circ$ においては、主流方向速度分布がかなり異なった様相を呈する。最大流速点は $X=0.625a \sim 0.75a$ と、より外側に移動し、流速の速い領域が曲がり管外側から管壁に沿って内側に向かって広がり、

$\Omega = 10^\circ$

$\Omega = 30^\circ$

$\Omega = 60^\circ$

$\Omega = 90^\circ$

Fig. 2 Velocity distributions at $Re = 2000$; (a) streamwise velocities, contour line interval is $0.2 \bar{W}$, (b) transverse velocities, magnitude of typical velocity vector is $0.3 \bar{W}$.

逆 C 字形の分布となっている。それに伴い、曲りの内側及び管中央付近に低速の領域が見られる。二次流れは弱くなり、複雑な分布となった。渦の中心は、 $(X, Y) = (-0.5a, 0.3a)$ 付近と、内側に移動している。曲がり角 $\Omega = 90^\circ$ では、最大流速点が $X = 0.75a$ 付近とさらに外側に寄り、逆 C 字形の速度分布がより回り込んだ分布となった。また、中心付近の比較的

Fig. 3 Laser sheet illumination photograph near the inlet of the bend at $Re = 950$.

Fig. 4 Laser sheet illumination photograph near the outlet of the bend at $Re = 1600$.

広い範囲にわたって、速度の遅いほぼ流速一定の領域が見られた。二次流れベクトル分布は非常に複雑な分布となり、低速領域内の対称面近くに、 $(X, Y) = (-0.3a, 0.2a)$ 付近に中心を持つ小さな渦が観察された。この位置での流動状態は、 Re 数によってかなり異なったものとなったことを付記する。Fig. 3～Fig. 4に、可視化実験の結果を示す。Fig. 3は、 $Re=950$ における曲がり管入口付近の可視化結果で、直管部からの流れが曲がり部において遠心力を受けて曲がりの外側に片寄っている様子がよく分かる。また、曲がり管外側の曲がり角度 $\Omega = 0^\circ \sim 26^\circ$ の範囲に逆流の存在が見られる。この逆流は、 $Re=613$ 以上で見られ、その位置は Re 数には依存しなかった。Fig. 4は、 $Re=1600$ における曲がり管出口付近の可視化結果で、曲がりの中央部内側に逆流が存在することが分かる。この逆流は、曲がり角 $\Omega = 58^\circ$ 付近を中心としており、 $Re=1320$ 以上で見られた。また、曲がり角 $\Omega = 90^\circ$ 付近では、曲がりの内側の流動状態が非常に複雑になっていることが分かる。

4. 結論

十分発達した円管内層流を入口条件とする、曲率半径比 $Rc/a=4$ のきつい曲がり管内層流に関して、その流速分布の詳細をレーザ・ドップラ流速計を用いて測定し、併せてレーザライトシート法による可視化を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 主流方向速度の速い領域は、曲がりにつれて外側に寄り、逆C字形の分布となった。
- (2) 断面二次流れによる上下一対の渦運動は、曲がり角 $\Omega = 30^\circ$ 付近で最大となり、曲がり角 $\Omega = 90^\circ$ 付近では、曲がりの内側の低速領域内にのみ観察された。
- (3) $Re=613$ 以上で曲がり管外側の曲がり角 $\Omega = 0^\circ \sim 26^\circ$ の範囲に、また、 $Re=1320$ 以上で曲がり管内側の曲がり角 $\Omega = 58^\circ$ 付近に逆流が見られた。

参考文献

- 1) 秋山ら、機論、47-421、B、(昭56)、1705。
- 2) 伊藤、機論、50-458、B、(昭59)、2267。