曲り円管内の層流速度助走区間の可視化

宇都宮大・工 秋山光庸[○], 花岡嘉明, 浦井 勇
鈴木道義, K.C.Cheng

VISUAL STUDY OF LAMINAR FLOW IN THE ENTRANCE REGION OF A CURVED PIPE

Mitsunobu AKIYAMA*, Yoshiaki HANAOKA*, Isamu URAI*
Michiyoshi SUZUKI* and K. C. CHENG**

Three-dimensional laminar-flow development in a curved pipe has been investigated by using flow visualization technics. The hydrogen bubble and the powder of pumice used in Japanese painting were applied to trace the main and secondary flows, respectively. The thermal and refraction compensators were found to be needed for improved results. The results are obtained for the locations at 0° , 22.5° , 45° , 90° and 180° from the beginning of the curved pipe led by a long leading straight pipe under the flow conditions of Reynolds number 1000, Dean number 333 and the curvature ratio to be of $1/9$.

As a result, the overshooting phenomenon of the main flow distortion towards the outer wall due to the centrifugal force in the midst of the development is clearly identified and an overall comparison is made with the available theoretical results in good agreement.

1 はじめに

直円管内で十分に発達した層流を同一径の曲り管に導入して、曲りからくる遠心力によって生じる流速分布の発達の様子を可視化法により調べた。水流の可視化には水素気泡法と日本画材用の軽石粒子とを、それぞれ主流と横断面上の二次流れに用いて観察・撮影した。これらの写真により、流水が曲管へ流入してから発達するまでの各段階における速度分布の特徴をとらえることが出来たので、その概要を報告する。理論計算も現在進行中であり、それらとの比較についても述べる。

2 本実験の概要と特徴

本実験装置の直管導入部は内径 $2a = 48 \text{ mm}$, 長さ 400 cm であり, 試験部は同一内径で管中心曲率半径 $R_c = 21.6 \text{ cm}$ の曲管である。また撮影位置は曲管入口部より 0° , 22.5° , 45° , 90° および 180° とした。使用した条件はレイノルズ数

* Dept. of Mech. Engg., Fac. of Engg., Utsunomiya Univ., Ishii cho, Utsunomiya 321, Japan

** Dept. of Mech. Engg., Fac. of Engg., Alberta Univ., Edmonton, Alberta, Canada. T6G 2G8

$Re=1000$, こゝで $Re = W 2a/\nu$,
 W : 平均流速, $2a$: 管直径, ν :
 動粘性係数, デーン数 $De =$
 333 , こゝで $De = Re(a/R_c)^{1/2}$
 および曲率半径比 $a/R_c = 1/9$ を
 用いた。(図1と図2を参照)

本実験は次の事柄に特徴がある。

(1) 主流の可視化には一般的な水素気泡法を用いたが、電極の白金線を管中心曲率線上で測定位置より上流20mmのところに設定して測定位置の誤差をできる限り少なくした。

(2) 二次流れについては固体粒子トレーサのうち適当なものとして軽石粉末を用いた。これは嵩比重0.83と軽い水に入れると水中によく浮遊しており、その粒径は $20\mu m$ から $40\mu m$ が主で可視できる。

(3) 内管内の水流を外部から撮影するには管壁による屈折率による歪みを補正することが重要であり、これには箱型水槽を用いることで解決している。

(4) 撮影を容易にするため供試管径は大きいが、この上に室温と水温とに大きな差がでれば浮力の影響が管内流に現われ自然対流が発生する。その結果、歪んだタイムラインが観測された。これを改良するために、供試水を用管外側に設けた水槽にバイパスして室温による加熱を防ぎ、管の出入口の水温差を $0.02^\circ C$ 以内におさめた。

Fig.1 Test Apparatus (Main Flow)

Fig.2 Test Apparatus (Secondary Flow)

3 主流速度分布の結果と考察

主流方向速度分布を入口からの角度により分けて順次図3, 4および5に示す。図中(a)が水平方向速度分布にあたり、この写真の左側が曲管の内廻り側で、右側が外廻り側を示してある。(b)は垂直方向速度分布を示し、左側が下部、右側が上部を示す。図では示さぬが、直内管内で十分に発達した点での水平方向と垂直方向の速度分布も求め放物形分布を確認した。この放物形速度分布が曲内管に流入すると、流体は遠心力の作用を受け、図3に示した $\theta = 22.5^\circ$ では水平方向速度分布中の最大流速の位置が外側に寄り始める。垂直方向速度分布は、

流れの対称性も失なわれることもなく、また最大速度点も管中央にある。

図4は曲管入口より 45° の位置のものである。ここに至ると、水平方向速度分布は最大速度部が極度に管外廻り側に寄り、内廻り側の低速部は管中心部にまで及んでくる。垂直方向速度分布は今までと異なり上下両端に最大流速を持つようになり、中央部の速度は $\Omega = 22.5^\circ$ の場合に比べ低下している。曲管内で遠心力は主流速度の強さの二乗に比例して作用する。放物形速度分布で曲管に流体が流入すれば、断面の中心部分で遠心力は最大となり、これが流体の粘性摩擦力と圧力との均衡を保つように写真に見られる主流速度を形成する。ここでは管の内廻り部の流体を置き去りにして、主流中心部の流体は流体自身が持つその慣性力で管の外廻り部へ寄せられて行き、最後には管中心部の主流速度自身が極小値を持つような“行き過ぎ現象”を起こしていることが確認される。これが $\Omega = 90^\circ$ の図5になると、この“行き過ぎ”は徐々に回復して全体的になめらかな安定した速度分布へ向う。この様にして速度分布が安定して一定形状を示すまでの速度助走区間長さが定まる。なお、垂直方向速度分布測定では、二次流れの影響を受け易く中心部ではタイムラインが渦をまくように巻き込まれる現象がみられた。これらの写真から求められた速度分布を当研究室での計算結果と比較して良好一致を見た。

(主流用実験条件)

水素気泡用直流パルス発生器; パルス周期 $T = 400 \text{ ms}$, パルス幅 $a = 10 \text{ msec}$, 光源; 120 V , 42.3 W , 露光; $1/60 \text{ sec}$, $F8.0$, フィルム; ネオパン400

Fig. 3 $\Omega = 22.5^\circ$, $De = 333$ (Main Flow)

Fig.4 $\Omega = 45^\circ$, $De = 333$ (Main Flow)

Fig.5 $\Omega = 90^\circ$, $De = 333$ (Main Flow)

4 二次流れ速度分布の結果と考察

3節の主流方向速度分布を示した位置に対応して二次流れの可視化写真を図6, 7および8に示す。

図6は、 $\Omega = 22.5^\circ$ の結果で、中央部の流体が激しい遠心力を受けて急激に外側の管壁に移動し始めていることがわかる。外廻り壁にきた流体は外廻り中央に旋点を作る。その点には遠心力に対峙して圧力が形成され、粘性力のため遠心力の弱い管壁に沿って上下二分した流れが発生し内廻り壁側に廻り込む。これによって管内には一対の二次流れ渦が生じる。

図7は、 $\Omega = 45^\circ$ の場合で、 22.5° に見られるような速い速度部分が減少して、ややゆるい速度の渦を形成している。また $\Omega = 22.5^\circ$ から 45° にかけて二次流れ渦の中心位置が中央部からわずかに内廻り側に入ることが知れる。この二次流れは 90° にくるとより一層弱まり、今までの一対の渦の他に、新たに別の非常に弱い一対の渦が現われてくる。次にこの流れが曲円管を一層進み $\Omega = 180^\circ$ になると図8に示すように流れは安定してくる。

ここで二次流れ速度分布の最大速度は放物形速度をもつ層流の最大値に比較すると $\Omega = 22.5^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ および 180° において、それぞれ20%、15.5%、8.5%および8.3%である。

これらから曲円管内二次流れ速度ベクトルを求め計算と比較した結果、それらは良く一致している。

(二次流れ用実験条件)

トレーサ; 軽石, 嵩比重 0.83, 重量割合 0.8%, 光源; ハロゲンランプ 150 W 1台, プロジェクター 300 W 2台, 露光; $\frac{1}{2}$ sec, F 5.6, フィルム; ネオパン 400

Fig. 6 $\Omega = 22.5^\circ$, $De = 333$
 (Secondary Flow)

Fig. 7 $\Omega = 45^\circ$, $De = 333$
 (Secondary Flow)

5 まとめ

直管につづく曲内管内で発達する層流について、速度分布発展の挙動を二つの可視化法で観察した。実験条件は $Re=1000$, $De=333$, $a/R_c=1/9$ である。同一条件での数値解とも直接比較を行なった。その結果;

(1) 主流方向速度分布を得るため、入口から 0° , 22.5° , 45° , 90° および 180° の位置で水平方向と垂直方向について、水素気泡法を用いタイムラインを可視化し写真に示した。 45° 位置では主流速度が管中央で極小値をもつ「行き過ぎ」が見られた。

(2) 上記の写真より主流方向速度分布を定量化し数値解と良好な一致をみた。

(3) 二次流れ速度ベクトルや周方向および半径方向速度を求めるため曲管入口より 22.5° , 45° , 90° および 180° において、トレーサとして新しく軽石粉末を用い流跡線を可視化し、その写真を示した。 90° では弱い二対目の渦の可能性を示した。

(4) 二次流れ速度ベクトルを写真より定量化し、かつ数値解と比較してほぼ良い一致を示した。

宇都宮大学教授西脇一郎先生の御鞭撻を記して感謝致します。また理論計算と本実験装置設計はトヨタ自工高村伸一氏(元修工学生)に負うところが大きい。

(参考文献)

- 1) Austin, L.R. ; The Development of Viscous Flow within Helical Coils, Ph.D. thesis, University of Utah, 1971
- 2) 三坂喜晴 ; 水素気泡法による曲管内層流の可視化と速度分布測定, 流れの可視化シンポジウム(第2回), 1974, pp. 139-142
- 3) Patankar, S.V. et al. ; Prediction of Laminar Flow and Heat Transfer in Helically Coiled Pipes, J. Fluid Mech., Vol. 62, Part 3, 1974, pp. 539-551
- 4) 秋山光庸ほか ; 曲り内管内の速度・温度助走区間における強制・自然複合熱伝達, 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 1980, pp. 16-18
- 5) Akiyama, M. and Takamura, S. et al. ; Flow Visualization of the Entrance Region for Steady Viscous Flow in Coiled Circular Pipes, Int. Symp. on Flow Visualization, Bochum, Sept., 1980, pp. 147-151

Fig. 8 $\Omega = 180^\circ$, $De = 333$
(Secondary Flow)