画像処理手法を用いた180°曲がり正方形 断面管内の流動解析*

秋山光庸**, 池崎 昭***, 杉山 均**, 浦井 勇**

Flow Analysis in a 180°-Bend Square Duct by Using Image Processing Technique

Mitsunobu AKIYAMA, Akira IKEZAKI, Hitoshi SUGIYAMA
and Isamu URAI

ABSTRACT

A data acquisition technique is adapted to obtain three dimensional velocity distributions of the flow in a 180°-bend square duct by combination of a hydrogen bubble method and an image processing technique. The results show the existence of the flow toward inner wall immediate upstream of the inlet to the curved channel and of the additional secondary flow near the outer wall of the curved section. These characteristic phenomena lead to the three dimensional distortion of mean flow development.

Moreover, the results obtained by this method were compared well with the calculated results of the elliptic N-S equation for this flow field. The present data acquisition system is suitable to this kind of flow.

1. 緒 言

曲がり管路は、機械工学をはじめ原子力工学、宇宙工学、化学工学、生体工学と各分野にて利用される重要な機械要素であり、古くより実験、理論の両面より数多くの研究が報告されている。一方、現象的にも遠心力による第1種2次流れが発生し、等速度線図、等温度線図を大きく歪ませる結果、流動特性、あるいは伝熱特性に少なからぬ影響を与え、その特徴的な流動解析に努力がはらわれている。

このような、曲がり管内流動測定に対して、熱線風測計や、レーザ・ドップラー流速計を用いて^{1)~}測定する試みもなされているが、可視化法によりその流動状態を定量的に把握しようとする試みも報告されている^{2), 4)}。筆者らは、可視化法による曲がり管内流の流動を解析するため、注入流脈法により正方形断面曲がり管内速度助走区間流れの発達段階の流動機構を明らかにし³⁾、また、流跡手法により、曲がり円管内層流助走区間流れについて、その主流には水素気泡法を、2次流れには日本画材の軽石粒子をトレーサとして用いて速度分布、2次流れ分布等を明示した⁴⁾。さらに、水素気泡法と画像処理手法とを組み合わせた可視化手法を提示し、それら画像処理データより速度

*原稿受付 1990年12月 8 日

**正会員 宇都宮大学工学部

***正会員 日産自動車㈱

分布を算出するアルゴリズムを構築した⁷⁾。

本報は、この手法⁷⁾を用いて比較的きつい曲率半径比を持つ正方形断面曲がり管路内層流の流動状態を数値解析結果と対比させながら説明すると同時に、本手法の妥当性についても検討を加えることを目的とする。

2. 主な記号

De : ディーン数

$$= Re(1/Rc)^{1/2}$$

d : 正方形断面の一辺

R : 曲率半径

Re : レイノルズ数

$$= W \cdot d / \nu$$

Rc : 曲率半径比 $= R/d$

U, V : 垂流方向速度

W : 主流方向速度

$\bar{W}$: 主流方向平均速度

Z : 主流方向座標軸

ν : 動粘性係数

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

実験装置の概略図を図1に示す。ヘッドタンク①から送り出された水は主流量調節バルブ③、整流部④、直管部⑤を通り十分に発達させられる。その後供試空間である曲管部⑥を経て、流量調節および流量測定部へと導かれる。ヘッドタンクからのオーバーフローパイプ②は温度補償水槽⑦へとつながっており、水槽のオーバーフローパイプ

① Water tank	⑦ Thermal compensator
② Over flow pipe	⑧ Pulse generator
③ Main valve	⑨ Anode plate
④ Flow rectifier	⑩ Cathode wire
⑤ Leading section	⑪ Temperature recorder
⑥ Test section	⑫ Temperature probe

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Fig. 2 Test section and cathode wire locations

と共に、管路に流れる流量、管路内外の温度を安定させている。⑧は水素気泡法のための直流パルス発生装置であり、⑨、⑩はそれぞれ銅板製の陽極、タングステン製の水素気泡発生陰極である。温度測定は銅・コンスタンタン熱電対⑫を多点温度記録装置⑪に接続し、管路内入口温度、出口温度、温度補償水槽の管路入口付近、中間部、供試空間、の計五か所で測定している。

図2に、供試空間および陰極線の配線を示す。上下側壁は5mm厚さ、左右側壁は1mmの透明アクリルにて製作した。曲率半径 $R=80\text{mm}$ 、曲管内径寸法 $d=40\text{mm}$ 、曲がり角度 $\theta=180^\circ$ 、曲率半径比 $Rc=R/d=2$ の仕様を持つ。陰極線には線径 $50\mu\text{m}$ のタンクズテン線を使用している。測定断面内における陰極線の配置は図中に示すよう

に壁面近傍で2mm間隔で2本、その後4mm間隔で設定してある。実験に際しては、水平に陰極線を配置した管と、垂直に配置した管の2種類を用意して実験を行った。

レイノルズ数は $Re=1,000$ 、ディーン数は、 $De=707.1$ とし、曲がり管入口手前において十分発達した流れとするため、曲がり部入口上流に2,740mmの助走区間を設定した。

3.2 画像処理手法

画像処理システムを図3に示す。可視化画像は、CCDカメラにより撮影され、直接あるいはビデオテープを通して間接的に画像処理装置(PIP-4000ADS社製)に取り込まれる。入力された画像は $512 \times 480 \times 8\text{bit}$ のデジタル画像に変換され、8画面分ある画像メモリーの一つに格納される。その後、取り込み画像に対し、画像強調、2値化等の処理がなされて、ホストコンピュータの主メモリーに画像データが転送されることになる。ここで、得られた画像データより平均流速の絶対値、速度方向等を算出し結果を3次元的に表示させる。

入力画像としては、水素気泡法によるタイムライン画像(気泡列画像)と流脈画像を取り込む。おのおのの画像を得る際には、タングステン線に3mm間隔で2mm幅のマスキングを施したものを

使用した。また水素気泡発生に用いた直流パルス発生器(SCR-PG)の時間ステップは200msに設定した。

画像処理を経てホスト側に転送されたタイムライン画像に対しては、ラベリング処理を経ておのの気泡の重心位置を算出する。ラベリング処理とは、同じ流脈上の連結成分に属するすべての画素に同じラベル(番号)を割り当てる操作である。

つぎに流脈画像上で気泡に重心から一定距離以内にある流脈を順次検索する。図4(a)に、流脈の検索順位と検索範囲を示す。また、図中gcは、注目している気泡の重心位置を示す。流脈が見いだせなかった場合、その気泡は対応なしとして、次の気泡の重心回りを検索する。流脈が見いだされた場合は、その流脈の連結成分を下流方向(図4(b))にたどっていきパルス間隔 ΔT 秒前に発生した別の気泡を見いだす。この操作を気泡の数だけ繰り返し気泡同士の対応付けがなされる。対応付けされた二つの気泡の重心位置とパルス間隔から、速度ベクトルを求め二つの気泡の中点での値と定義する。この操作によって求められる速度ベクトルはランダムな位置に分布しているため、曲がり管を $0.05d$ 幅の格子点に分割し、一定の円形の平均化領域を設定し、ベクトル、格子点間の距離に反比例する重みを付け、平均化して格子点上のベクトルを求める(図4(c))。定義式を以下に示す。

$$W_m = \frac{\sum_{i=1}^n W_i / L_i}{\sum_{i=1}^n 1 / L_i}$$

ここで W_i は得られた速度ベクトル、 W_m はメッシュ上の速度ベクトル、 L_i は両者間の距離を表す。

画像取り込みから以上説明した速度算出までの解析過程を整理したものを図5のFlow-Chartに示す。実画像を使つてのより具体的な解析手法については別報⁷⁾にて詳述した。

なお、流速測定における、水素気泡の浮上速度、陰極線の後流、

Fig. 3 Schematic diagram of image processing system

- (a) Detect the streak line from gravity point of bubble
- (b) Search the next bubble along streak line
- (c) Calculate velocity vector

Fig. 4 Determination of velocity vector

Fig. 5 Flow chart of the present method

および発生した気泡が水流に追従するための応答性等の誤差要因を把握し実験を行った。

4. 実験結果および考察

図6は、曲がり管流入手前（曲がり管入口より80mm上流位置）における、左右対称軸上（upper-lowerを結ぶ対称軸）および上下対称軸上（inner-outerを結ぶ対称軸）、の主流速度分布を示したものである。実線はHagen-Poiseuille流れの理論速度分布、丸印が実験結果であるが、十分に発達した流れが形成されていることが確認できる。

(a) Along the center line in vertical direction
(b) Along the center line in horizontal direction
Fig. 6 Comparison with Hagen-Poiseuille flow

図7～図10は、曲がり部における各断面の測定結果を示したものである。おのおの上段より主流速度分布の3次元鳥瞰図、主流速度分布の半断面等値線図、そして2次流れのベクトル線図を示し、左側の段は数値解析結果を、右側の段は実験結果を示している。主流速度等値線図は、 $0.2\bar{W}$ 間隔にて表示してある。数値解析に際しては、3次元楕円型N-S方程式を解くものとして格子は、半断面で 32×20 で、内外壁にて格子間隔を密にとる不等間格子とした。また、主流方向には、200の分割数で配置されている。レイノルズ数、曲率半径比、曲がり角などの条件は同一である。

一般に曲がり管に流入した流れは遠心力の作用を受け、その流動状態は複雑に変化することが知られており、同時に、曲がり部流入手前においては、曲がり部の影響により、遠心力の作用方向とは逆の内壁側に向く2次流れが発生し、主流方向流れが内壁側に寄せられることが報告されている⁸⁾。図7は曲がり管入口手前 $Z = -0.25d$ における結果であるが、実験、計算とも前述の点を、その2次流れの内壁側への発生より認めることができる。この種の現象は、曲がりのきつい管内流に特徴的な現象と考えられる。

図8は、 $Z = 45.7^\circ$ における流動状態を示す。2次流れベクトルを見てわかるように、この位置においては、曲がりによる遠心力のため、一對の

Fig. 7 Experimental and calculated results at $Z = -0.25d$ Fig. 8 Experimental and calculated results at $Z = 45.7^\circ (1.60d)$

対称渦が形成され、この2次流れにより外壁側に流量が運び込まれる結果、主流方向速度は外壁近

置までくると $Z = 94.3^\circ$ にて認められた付加的2次流れの渦は、非常に小さくなっていることが、

傍において最大値をとる。2次流れの絶対値は実験の方が多少大きな値を示しているが、渦中心が内壁側に寄るなど傾向は両者とも良く一致している。

図9は、 $Z = 94.3^\circ$ における結果を示したものである。この位置における特徴的な現象として、主流速度の鳥瞰図を見て解かるように管中央付近にて速度の遅い領域が存在し、速度分布が摺り鉢状分布となり、極小値を持つ点が挙げられ、計算、実験ともに認められる。主流速度等値線図を見ると、両者共、比較的高い値の等値線が、下壁面に沿って延びていることが解かるが、これは下壁面に沿う2次流れに起因するものと解釈される。また2次流れベクトル図を見ると、上下対称軸の外壁側近傍にて遠心力に抗する方向に新たな2次的な逆流が発生していることがわかる。これは、遠心力と圧力とが不均衡となった結果発生する付加的な2次流れ渦と考えられる⁹⁾。2次流れベクトル図の計算結果を見ると遠心力に抗する方向への2次流れは、この位置では判別が難しいが、下流の $Z = 118^\circ$ の位置においては認められており、両者同様の傾向を示している。

図10に曲がり管出口部近傍に相当する $Z = 170.7^\circ$ における流動状態を示す。この位

Fig. 9 Experimental and calculated results at $Z=94.3^\circ$ ($3.29d$) Fig.10 Experimental and calculated results at $Z=170.7^\circ$ ($5.96d$)

計算, 実験結果より推察することができる。2次流れ速度の値も両者同程度を示しているが, 実験

では上下対称軸線近傍においても比較的高い値を示しており, これは計算結果と多少異なっている。また, $Z=94.3^\circ$ の位置で認められた主流速度分布の極小値は, 計算, 実験とも認められないが, 強調されるほどのものでもなくなる。

図11は, 断面の上下対称軸上, ならびに左右対称軸の主流方向速度分布発達の様子を計算と実験について比較したものである。その絶対値は, 多少異なるものの全体の傾向は両者似た傾向を示している。さらに流れ方向に2次流れ強度が主流方向に沿ってどのように変化するかを知るために, 断面平均2次流れを主流平均速度にて無次元化したものを図12に示す。図より実験において 44° 近傍 ($1.54d$) で2次流れ強度は最大値を持つことが解かるが, これは計算結果とも符合している。また曲がり部入口手前で, 実験, 計算とも2次流れが存在し曲がりの上流への影響が認められる。数値解析において, この種の現象は, 3次元楕円型方程式を解くことによって始めて予測することが可能となる。以上のように, 本解析手法は曲がり管内流に特徴的な現象を詳しく捉えることが可能である。また, 数値解析結果と比較しても, 解析手法の妥当性を示すものと考えられる。

Fig.11 Development of mean velocity distribution

Fig.12 Intensity of the secondary flow along the mean flow direction

5. 結 論

可視化手法として水素気泡法を用い、そのタイムライン画像と流脈画像を CCD カメラにより取り込み、同時に画像処理手法を組み込むことにより、3次元速度測定を可能とするシステムを構築し、比較的曲がりのきつい180°ベンドを持つ正方形断面管内層流に適用し、その3次元流動状態の特徴を明らかにした。同時に、数値解析結果との比較も行い、その実験手法の妥当性についても検討を加えた。

その結果、本解析手法によって曲がり入口手前での内壁側へ向かう2次流れの存在、付加的2次

流れの存在、主流速度の発達過程などの3次元流動挙動を明らかにすることができた。さらに本実験解析結果は数値解析結果とも大きな差異はなく本解析手法が妥当なものであることが査証できた。

なお、計算には、当時卒業研究の学部生であった堤崎高司氏のご助力を得た。

参考文献

- 1) J.A.C. Humphrey, A.M.K Taylor and J.H. Whitelaw: Laminar Flow in a Square Duct of Strong Curvature, J. Fluid Mech., 83-3 (1977) 509
- 2) P.H.M. Bovendeerd, A.A. VAN Steenhoven, F.N. Van De Vosse and G. Vossers: Steady Entry Flow in a Curved Pipe, J. Fluid Mech., 177 (1987) 233
- 3) 谷下・鈴木・大石・成瀬: きつい曲がり管における定常入口流れ, 機論 (B編), 論文 No.90-0490
- 4) 角田・須藤: 曲がり管内二次流れの一可視化法, 可視化情報, Vol.10, No.39 (1990) 47
- 5) 秋山・菊池・中山・鈴木・西脇・Cheng, K.C.: 水力学的不安定流れと境界壁形二次流れの相互干渉とその段階的な遷移発達 (長方形曲りダクト内の層流速度助走区間問題), 機論 (B編), 47-421 (昭56-9) 1705
- 6) 秋山・花岡・Cheng, K.C・浦井・鈴木: 曲り円管内層流助走区間流れに関する研究 (第2報, 速度分布の可視化による測定), 機論 (B編), 50-449 (昭59-1) 286
- 7) M. Akiyama, A. Ikezaki and H. Sugiyama: Flow Visualization in Curved Square Duct Using Image Processing Controlled by Micro Computer, Flow Visualization V, Proceedings of the Fifth Int. Symp. on Flow Visualization, Edited by R. Reznicek, 1989, Prague, Hemisphere Pub. Co. (1990) 203
- 8) 秋山・杉山・齊藤・西脇・村越・Cheng, K.C.: 非定常三次元放物型方程式によるきつい曲り円管内層流強制対流熱伝達の数値解析, 機論 (B編), 54-507 (昭63-11) 3219
- 9) 大場: レーザ誘起蛍光法による流れの可視化, 流れの可視化, 7-25 (1987) 7