

断面形状変化を伴うだ円断面管路内の乱流計測*

杉山 均^{*1}, 秋山 光庸^{*1}, 渡辺 岳男^{*2}Experimental Analysis of Developing Turbulent Flow
in a Distorted Elliptical Duct by Laser-Doppler Velocimeter

Hitoshi SUGIYAMA, Mitsunobu AKIYAMA and Takeo WATANABE

An experimental study of developing turbulent flow in a distorted elliptical duct was carried out at Reynolds number 0.988×10^5 by using laser-Doppler velocimeter. In a distorted elliptical duct, the configuration of cross section varies from elliptical to circular and from circular to elliptical along streamwise direction with a constant cross sectional area constant. Three components of velocity and the five of the five stress components were measured at seven different locations to clarify the development of turbulent structure. As a result of this experimental study, it was found that the distributions of streamwise velocity were influenced by the secondary flow and the averaged intensity of the secondary flow over cross section showed the maximum value at midway between inlet and outlet of a distorted duct. Adding to these points, experimental results displayed that the secondary flow of the second kind at inlet section transformed into that of the first kind induced by pressure gradient at a little distance from the inlet and that of the first kind again transformed that of the second kind at the outlet section. The location of the maximum intensity of streamwise normal stress moves gradually from near upper wall to near side wall as the flow develops. The two kinds of shear stress between streamwise fluctuating velocity and cross sectional fluctuating velocity shows distributions different from each other.

Key Words: Turbulent Flow, Secondary Flow, Reynolds Stress, Laser-Doppler Velocimeter, Distorted Elliptical Duct

1. 緒 言

非円形断面を有する直線管路では乱れの非等方性に起因する第2種二次流れが生成され、その乱流構造は複雑である。この第2種二次流れは断面のコーナ部に向かう流れを形成することよりコーナ流れとも呼ばれている。だ円断面管路はこのコーナ部を特定できない管路であり、第2種二次流れの生成は興味あるところである。またこうしただ円断面管路は、各種熱交換器用配管、あるいは輸送用配管等において広範に利用されており工学的にも重要な機械要素である。

だ円断面管路を対象とした実験解析としては、Cain-Roberts-Barrow⁽¹⁾, Barrow-Roberts⁽²⁾の報告が挙げられる。彼らはだ円断面管路が熱交換機器に利用されていることを考慮し、だ円長短軸比の異なるだ円断面管路を取り上げ、完全発達領域における壁面に沿う局所ヌッセルト数を実験的に示している。Cain-Roberts-Barrow⁽¹⁾は長短軸比が大きくなりレイノルズ数が小さくなると、層流と乱流が共存する領域が存在し熱伝達を低下させることも同時に報告している。また流

動現象に関して Cain-Duffy⁽³⁾, Duffy-Cain⁽⁴⁾は長短軸比1.5, 2のだ円断面管路に対しレイノルズ数 $2 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^5$ の範囲で摩擦係数値、長短軸上主流方向速度分布を報告している。彼らは第2種二次流れについて言及しているものの、その流速については測定していない。だ円断面管路にもこの第2種二次流れは存在するものと思われるが実験により測定提示された報告例はない。そこで著者ら⁽⁵⁾は、長短軸比2のだ円断面管路を対象にレーザ流速計より乱流計測を行いレイノルズ応力を含め、だ円断面管路の第2種二次流れ分布を明らかにした。さらに、等者ら⁽⁶⁾は助走管路における第2種二次流れの発達挙動について計測を行い、第2種二次流れはその発達途中にて最大速度を示しその後減衰し完全発達することを明らかにした。

以上の実験解析に対し理論解析もいくつか報告されている。Cain-Roberts-Barrow⁽⁷⁾は、乱流渦動粘性係数の概念に Van-Driest の混合長さモデル⁽⁸⁾を導入し、完全発達領域にて数値解を得ている。しかし、この種のモデルでは乱れの非等方性を表現できず、その流動特性を正確に再現しているとは言い難い。この点 Gosman-Rapley⁽⁹⁾は Launder-Ying⁽¹⁰⁾の非等方性乱流モデルを用いて完全発達領域での第2種二次流れを予測しているがレイノルズ応力分布等についての解析

* 原稿受付 1997年4月7日。

^{*1} 正員, 宇都宮大学工学部(☎ 321-8585 宇都宮市石井町 2753)。^{*2} (株)日立製作所(☎ 101-8010 東京都千代田区神田駿河台 4-6)。

結果は提示されていない。そこで著者ら⁽⁶⁾は乱れの非等方性を考慮できる代数応力モデルを用いてだ円断面管路内の乱流構造解析を行った。解析結果は実験結果と比較して助走区間も含め比較的良好に流れ場、レイノルズ応力場を再現できることを示した。

以上に示した研究成果よりだ円断面直線管路に生成される第2種二次流れは、断面内主流方向平均速度のただか2~3%程度と微弱でありその分布、強度は乱流構造に影響されることが明らかにされている。また、熱交換器の伝熱促進はその流れ場に大きく依存することを考え合えると、乱流構造を変化させ第2種二次流れ分布、強度を変化させることより伝熱促進を図ることが期待できる。この意味から粗面壁を設けることは乱流構造を容易に変化させ伝熱促進を図るうえで最も一般的な手法と考えられる。その際、圧力損失を極力抑えるように工夫することが望まれる。粗面壁を設ける以外に、圧力損失を抑え乱流構造を変化させる手法として、断面積一定のもとにその断面形状を流れ方向に変化させる手法が考えられる。同時にこうした断面形状が変化する管路にて第2種二次流れがどのように変化するかも興味あるところである。

そこで、本研究ではだ円断面形状が流れ方向に沿って断面積一定の条件のもとに、断面形状が変化する管路を対象にその三次元乱流構造をレーザドップラー流速計により計測し、第2種二次流れの変動挙動、乱流構造の変化を明らかにすることを目的とする。

2. 記 号

C_p : 圧力係数 $= 2(P - P_{\text{ref}}) / \rho U_b^2$

D_h : だ円断面管路での水力直径

I_s : 断面内の平均二次流れ強度

k : 乱流エネルギー

P : 時間平均圧力

Re : レイノルズ数 $= U_b D_h / \nu$

u_i : i 方向時間変動速度成分

$u_i u_j$: レイノルズ応力

U_i : i 方向時間平均速度分布

U_b : 断面内主流方向平均速度

X_i : 物理平面上の i 方向座標軸

ρ : 密度

ν : 粘性係数

3. 実験方法

3.1 実験装置 図1に実験装置の構成図を示す。作動流体には水を用い、循環流路を形成している。ポンプより吐出された水はポンプ吐出し側の弁により流

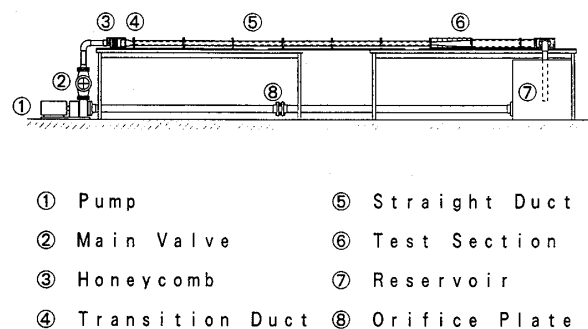


Fig. 1 Experimental apparatus

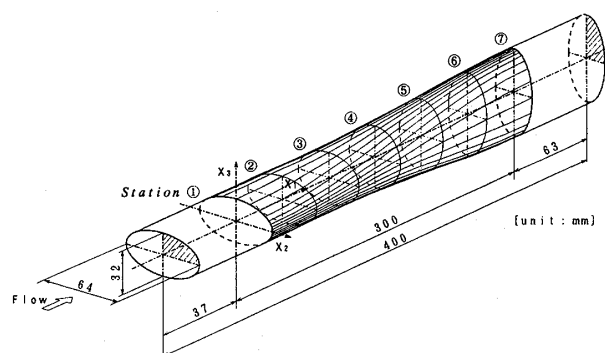


Fig. 2 Distorted elliptical duct

量調節され、装置下部の直管パイプに設けられたオリフィスにより流量管理がなされる。その後、流格子板、縮流部を経てだ円断面管路に流入する。流路はだ円断面形状をしておりその長軸は64 mm、短軸は32 mm、長短軸比は2である。本解析にて対象とした湾曲だ円断面管路は、⑥に示す Test Section 部に設置されている。Test Section 上流部には完全発達乱流を得るため $72.5 D_h$ ($D_h = 41.5$ mm) の長さに対応するだ円断面直管部が設置されている。ここで D_h は形状変化しない入口だ円断面にて算出した水力直径である。さらに Test Section 下流部には $15 D_h$ のだ円断面直管部を設けた。

図2に Test Section 部に設置された湾曲だ円断面管路の概略図、ならびに座標系を示す。湾曲だ円断面管路は図2に示すようにだ円形状から真円形状へ、そして入口断面を 90° 回転させただ円形状に再度変化する。上、下流に設けられただ円断面直管路との接続に支障がないよう上流に37 mm、下流に63 mmの直管部を設けてある。また湾曲だ円断面管路では、流れ方向への圧力変化を抑える意味から断面積一定のもとに断面形状を変化させた。主流方向を X_1 、長軸、短軸方向をおのおの X_2 , X_3 と定義し図2に示す湾曲だ円断面管路の入口を原点にすると任意の位置 X_1 における断面形状は次式により示される。

$$\frac{X_2^2}{Q^2} + \frac{X_3^2}{R^2} = 1 \dots\dots\dots (1)$$

$$R = \sqrt{\frac{H^2}{1 \pm \sqrt{1 - \frac{H^4}{512^2}}}} \quad Q = \frac{512}{R} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、上式中 $\pm$ は X_1 の値により以下の符号を取り、また H は式(3)のように定義される。

$$\begin{aligned} 0 \leq X_1 < 150 & \quad - \\ 150 < X_1 \leq 300 & \quad + \\ X_1 = 150 & \quad R = Q = \sqrt{512} \\ H = 8\sqrt{2} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{5}}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{300}X_1 - \frac{\pi}{2}\right) \\ & + 8\sqrt{2} \left(1 + \frac{2}{\sqrt{5}}\right) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

湾曲だ円断面形状変化を理解するため、上式を用い算出した X_1 - X_2 軸平面、 X_1 - X_3 軸平面ならびに X_2 - X_3 軸平面にて描いた輪郭形状を図3に示す。図3に示す X_1 - X_2 軸平面、 X_1 - X_3 軸平面の形状より明らかなように、流れに沿って滑らかに輪郭形状が変化するように設計した。

測定領域は系の対称性を考慮して図2の斜線部にあたる1/4断面とした。また乱流計測位置は図2に示すStation①から⑦の7断面として50 mm間隔に配置されている。湾曲だ円断面管路は透明塩化ビニールを素材にブロー加工により製作した。このとき板厚は 0.5 ± 0.2 mmの精度にて加工され、湾曲だ円断面管路

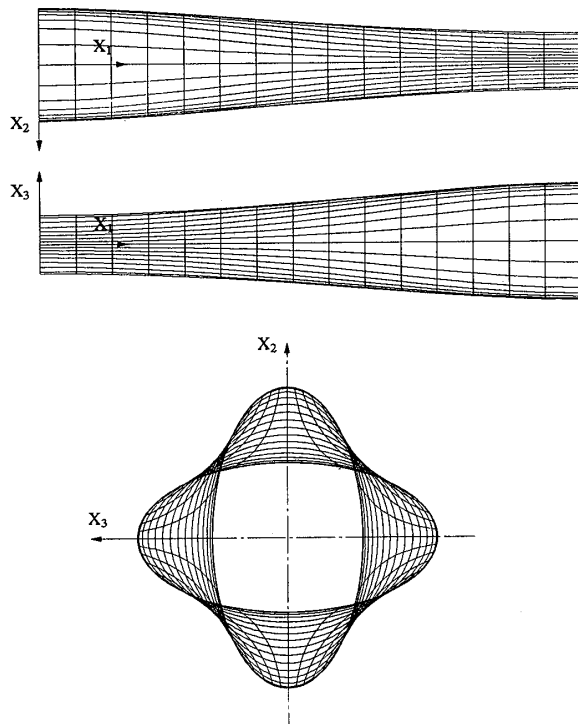


Fig. 3 Configuration of distorted elliptical duct

はシームレス管路となっている。また、板圧が薄いため水圧による変形が懸念されるがこの点を抑える意味から、湾曲だ円管路を上下より厚さ2 mmの板にて挟み込んだ。さらにこの湾曲だ円断面管路は、その全体が直方体形状の水槽に没する構造とし、測定管路の壁面近傍における入射レーザー光の屈折を極力抑え正確な位置決めを確保した。

3・2 計測システム 計測装置は、2Wのアルゴンイオンレーザー光源、カウンタタイプ信号処理器、測定時間ステップを決めるタイマユニット、プローブ、パーソナルコンピュータより構成されている。レーザー光源より発振されたレーザービームは分光光学系で515.5 nm (Green)と488 nm (Blue)の2本のビームに分光、ブラックセル(80 MHz)で周波数シフトされたのち伝送用光ファイバによりプローブに送られる。プローブは500 mm×200 mm×200 mmの可動範囲をもつ三次元トラバース装置に装着されており、トラバース装置の最小可動範囲は0.1 mmである。レーザー流速計に関する諸特性量に関しては別報⁽⁵⁾にて詳述した。

3・3 実験条件 実験に際しては、実験装置が循環回路構造で水温上昇を伴うため温度が一定となるまで循環させ、温度一定(水温40°C)となってから測定を開始した。測定の際のレイノルズ数は断面内主流方向平均速度($U_b = 1.59$ m/s)、だ円断面における水力直径 D_h 、動粘性係数 ν により定義される値で 0.988×10^5 である。また測定ポイントは、1/4断面あたり78点とし乱流特性量の変化が顕著な壁面近傍にて密になるよう設定した。

また、第2種二次流れ測定時にはGreenとBlueのレーザー光を、流れ方向に対して $\pm 45^\circ$ の角度をもつようセットしおのおののレーザービームより測定される流速 U_G , U_B より主流方向速度 U_1 、断面方向速度 U_i ($i=2, 3$)を次式より算出した。ただし、二色に分光されたレーザー光は直交している。

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_G \cos \theta + U_B \sin \theta \\ U_i &= U_G \cos \theta - U_B \sin \theta \quad (\theta = 45^\circ, i=2, 3) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

流れ方向に対するレーザービームの 45° の設定は測定体積を管路中心にセットした状態で U_G , U_B の流速が同一値を示す位置とした。

計測の不確かさ(二乗和平方根モデル)⁽¹¹⁾は、時間平均速度については $\pm 1.3\%$ (約95%包括度)、主流方向変動速度 $\overline{u_1^2}/U_b^2$ については $\pm 5.45\%$ 、断面方向変動速度 $\overline{u_2^2}/U_b^2$, $\overline{u_3^2}/U_b^2$ については $\pm 3.76\%$ (約95%包括度)である。

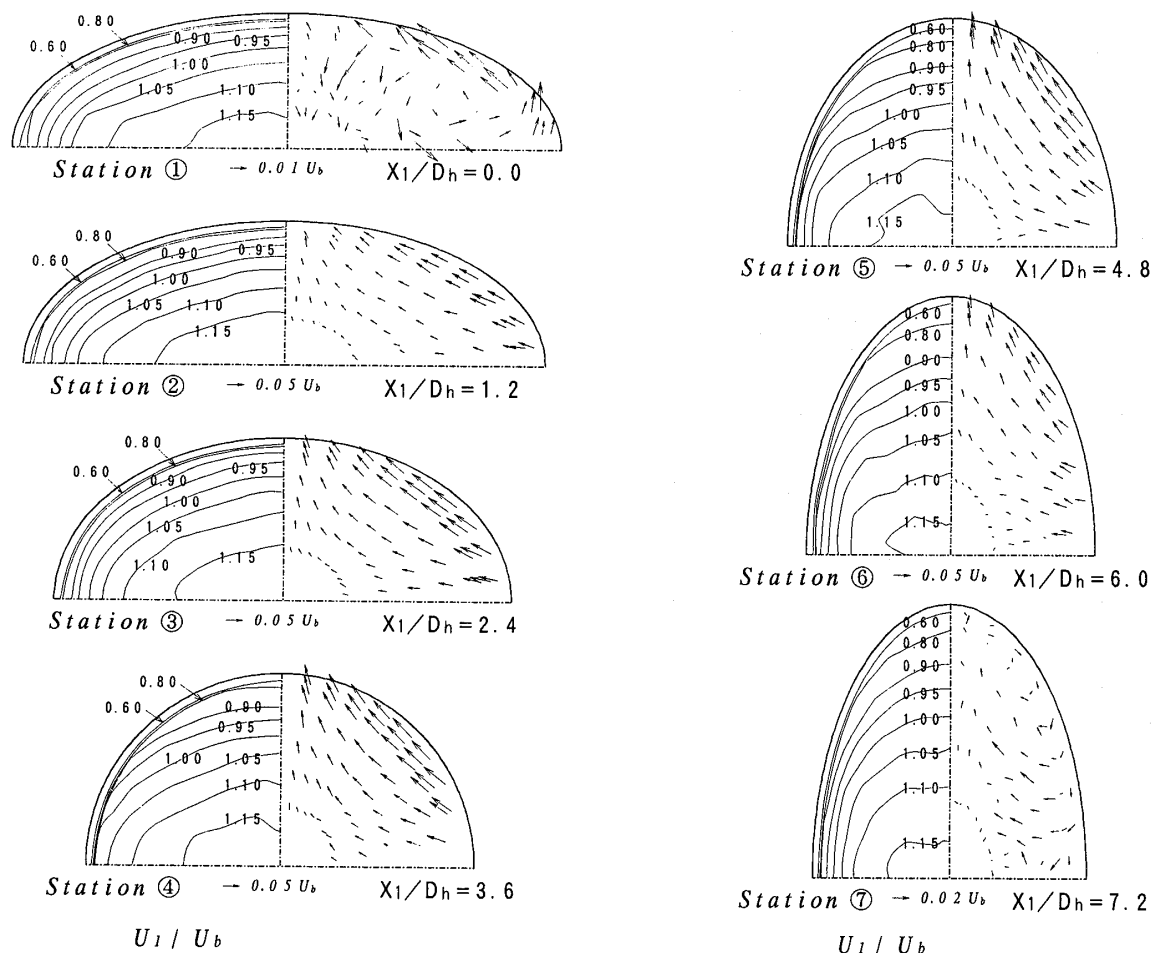


Fig. 4 Distributions of streamwise velocity and secondary flow vectors

4. 結果と考察

湾曲だ円断面管路における測定は $X_1/D_h = 0.0, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 7.2$ の 7 断面にて行った。以下にその結果を示す。

4.1 平均速度場の比較 図 4 に各測定断面における主流方向速度等値線および二次流れベクトル図を示す。湾曲だ円断面管路の入口に相当する $X_1/D_h = 0.0$ では、断面平均速度の 2% 程度の二次流れが形成され第 2 種二次流れが形成されていることがわかる。第 2 種二次流れは管中心部から長軸に沿って管壁に向かい流れ、管壁に到達後だ円壁に沿って流れ大きな循環流を形成する。この結果主流方向速度等値線は長軸に沿っていくぶん突き出た等値線分布を示している。こうした二次流れ分布は $X_1/D_h = 1.2$ 以降、大きく変化し $X_1/D_h = 1.2 \sim 6.0$ 断面では側壁から上壁に向かう一方方向の二次流れ分布となる。これは断面形状が変化することより断面内の圧力分布が変化し、上壁近傍に比較し側壁近傍に高い圧力が形成された結果と推察される。したがって、こうした側壁から上壁に向かう二次

流れは先の第 2 種二次流れとは異なり、第 1 種二次流れと理解される。Station ①から②への形状変化はわずかではあるが、二次流れは大きく変化し第 2 種から第 1 種二次流れへの変化は急激に行われることを実験結果は示唆している。また二次流れは壁面近傍にて大きな値を示し、壁面近傍の低速流体を上壁側に移流することになる。その結果、主流方向速度等値線は上壁側で低速流体が大きな領域を占める分布となる。この傾向は断面形状変化が完了する $X_1/D_h = 7.2$ でも認められる。またこの位置では第 2 種二次流れによる時計回りの循環流が形成されている。 $X_1/D_h = 7.2$ の断面形状は、 $X_1/D_h = 0.0$ における断面形状を 90° 回転させた断面形状ではあるが主流方向速度分布、二次流れ分布は断面形状変化の影響を受け両者で異なる。

次に二次流れの分布強度が流れ方向にどのように変化するかを明らかにするため、以下に示す二次流れの断面内平均強度を定義し、各断面における二次流れの平均強度を算出した。結果を図 5 に示す。

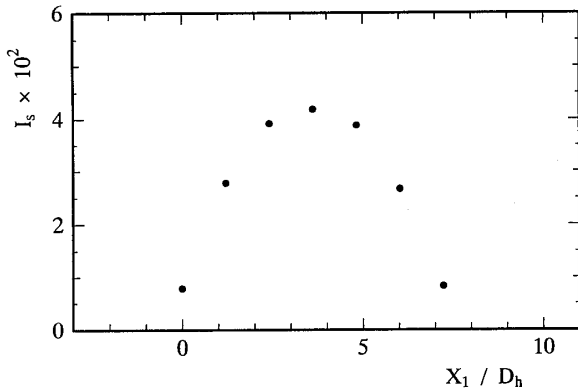


Fig. 5 Development of averaged intensity of secondary flow

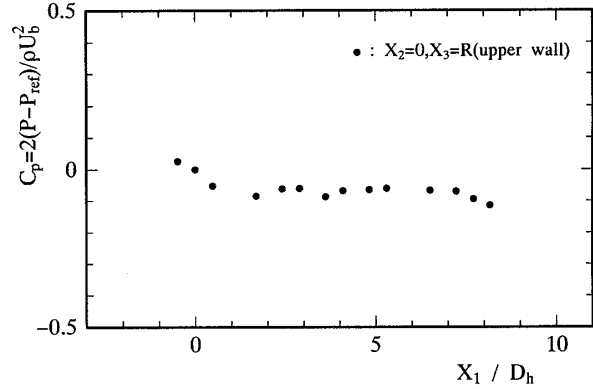


Fig. 6 Development of pressure coefficient along streamwise direction

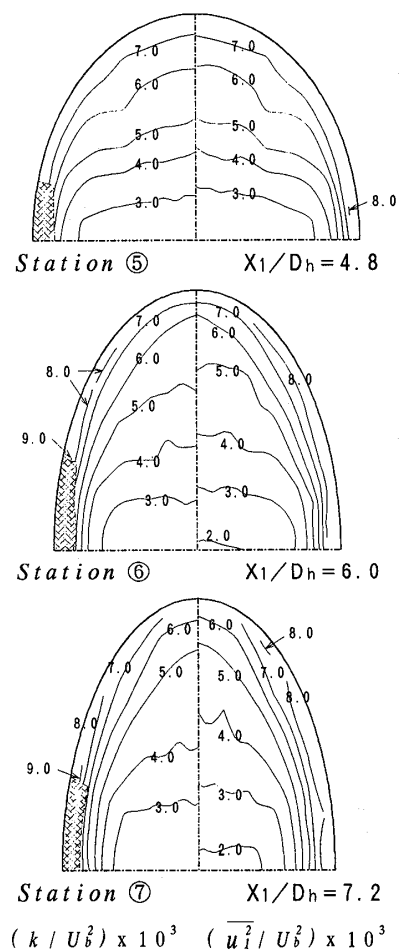
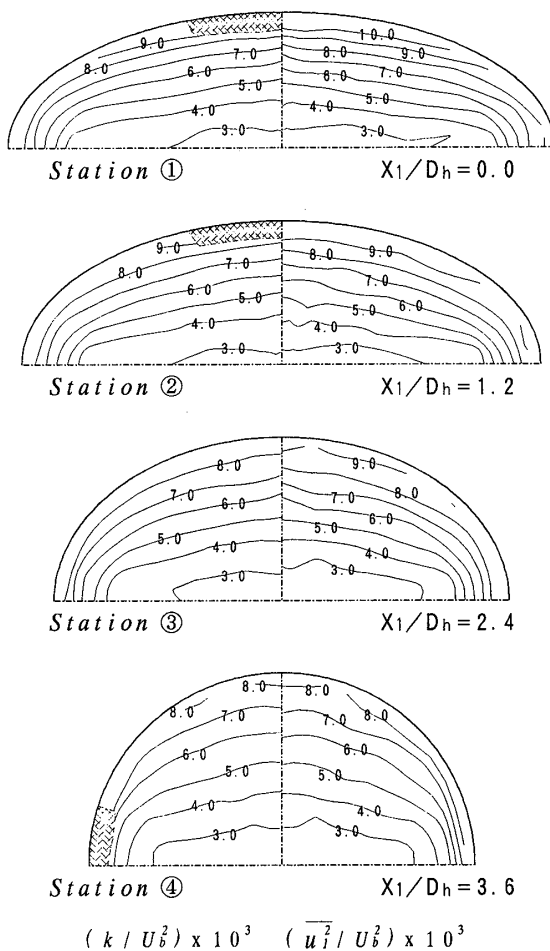


Fig. 7 Distributions of turbulent energy and streamwise normal stress

$$I_s = \frac{\int \sqrt{U_2^2 + U_3^2} dA}{\int dA} \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式中 dA は微小分割面積を示している。図5の結果より二次流れの平均強度は流れ方向に単調増加し最大値を取った後減少することがわかる。その最大値は湾曲円断面管路の中央部に相当する $X_1/D_h=3.6$ で断

面内の主流平均速度の4.28%の値をもつ。 $X_1/D_h=3.6$ を境にして二次流れ強度が減少するのは、この断面より下流では上壁近傍の圧力が側壁近傍の圧力より高くなり二次流れ生成を抑制する方向に作用するためと予測される。

図6は管路上壁の $X_2=0.0$ にあたる位置に沿った静圧分布を測定した結果である。図6中の P_{ref} は

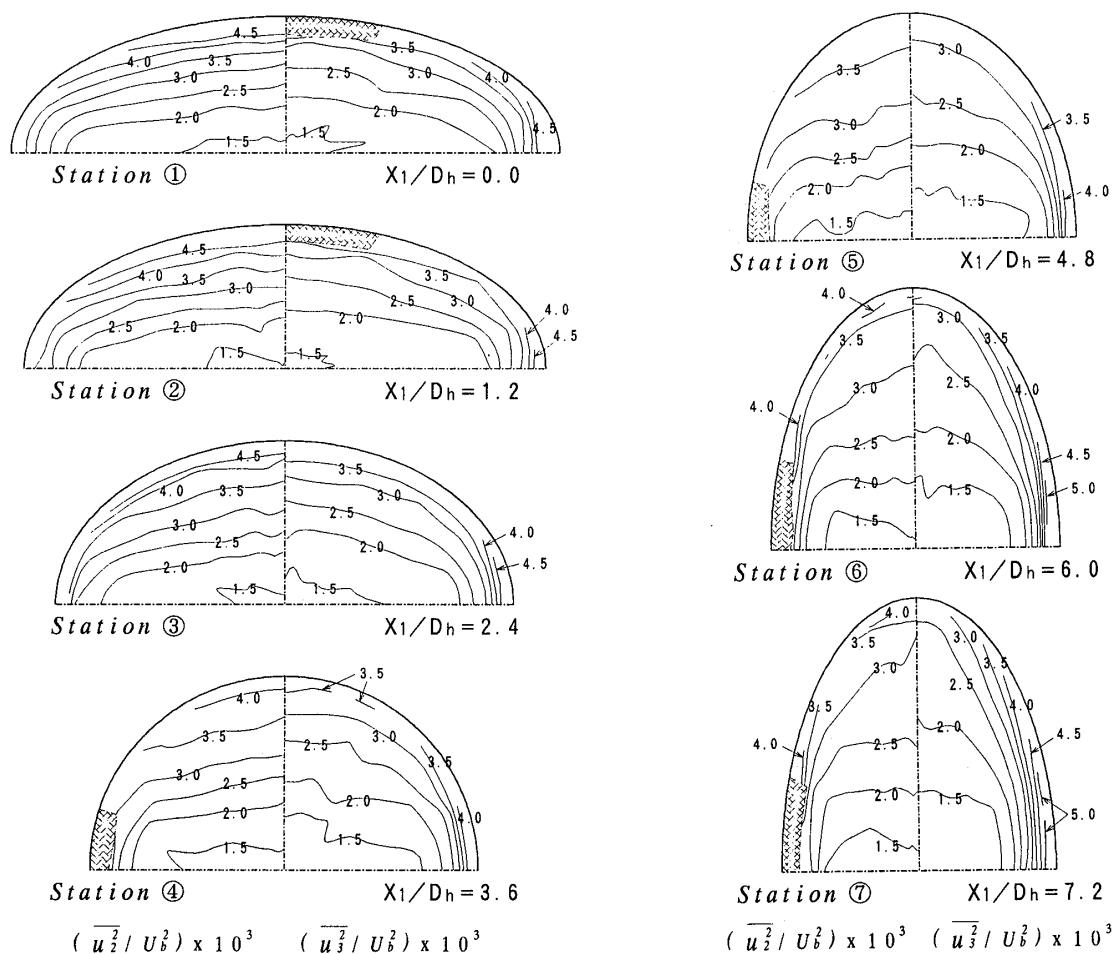


Fig. 8 Distributions of horizontal and vertical normal stresses

$X_1/D_h=0.0$ における静圧を示している。測定点の最初 ($X_1/D_h=-0.5$) と最後 ($X_1/D_h=8.2$) の点とを結んだ直線と各測定値分布を比較すると、各測定値は直線を挟んで散在し、 $X_1/D_h=4$ 程度までは直線下方にそれ以降では直線上方に分布し、静圧は直線的に単調減少するのではないことが理解できる。また、 $X_1/D_h=4$ 以降では直線上方に測定値が存在することから、 $X_1/D_h=4$ 以降では側壁近傍に比べ上壁側に高い圧力が生成されるものと思われる。この上壁の高い圧力と側壁の低い圧力より上壁から側壁への順圧力こう配により二次流れ強度は弱められ減少傾向を示すものと解釈される。

4.2 レイノルズ応力場の比較 図7は乱流エネルギー、主流方向垂直応力の発達挙動を等値線分布にて示した結果である。各値は断面内平均速度にて無次元化している。図7中のハッチングで示した領域は、レーザ光の屈折などにより十分な計測が行われずデータが欠落した領域を示している。両等値線分布は類似の分布を示すことがわかる。また、各断面における最

大値に注目すると $X_1/D_h=3.6$ の位置を境にして上流部では上壁近傍に、下流では側壁近傍に最大値は存在することがわかる。主流方向垂直応力の生成が主流方向速度こう配に支配されることを考慮すると、先に示した主流方向速度分布より明らかのように $X_1/D_h=3.6$ より上流部では上壁近傍にてその等値線分布は密に、下流部においては逆に側壁近傍にて密になることより最大値の生成位置は変化するものと解釈される。また $X_1/D_h=3.6$ での主流方向垂直応力は、ほぼ円周壁に沿って最大値が生成されている。

図8は断面方向の垂直応力の測定結果を示したものである。水平方向垂直応力 $\overline{u_2^2}$ は $X_1/D_h=3.6$ までは上壁近傍にその最大値が存在し、比較的大きな領域を占めることが認められるが、 $X_1/D_h=3.6$ の下流では上壁に認められた最大値の占める領域は減少傾向を示すことが認められる。一方、垂直方向の応力 $\overline{u_3^2}$ は側壁近傍に最大値が存在し下流に発達するにつれ、比較的大きな値を占めるようになる。垂直応力 $\overline{u_3^2}$ の場合上壁は、その生成を抑制する方向に働き、側壁はその

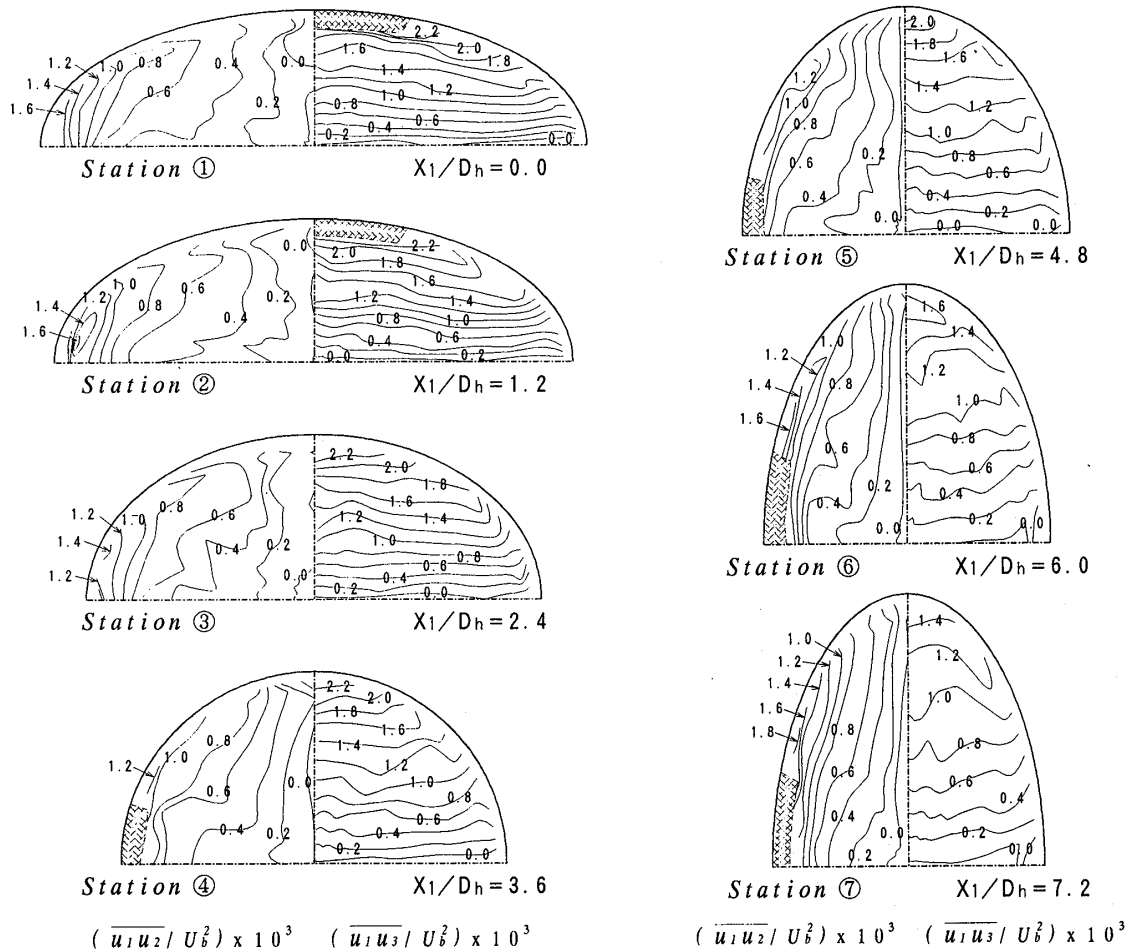


Fig. 9 Distributions of shear stresses

生成を促進する方向に作用することになる。

図9はせん断応力 $\overline{u_1 u_2}$, $\overline{u_1 u_3}$ の測定結果を示す。図9より明らかなように両者の等値線分布は大きく異なりせん断応力 $\overline{u_1 u_2}$ は X_3 軸とほぼ平行に等値線が壁面から管中央部へ発達するのに対して、せん断応力 $\overline{u_1 u_3}$ は X_2 軸に平行な等値線分布を形成する。またその最大値はせん断応力 $\overline{u_1 u_2}$ の場合には側壁近傍に、 $\overline{u_1 u_3}$ の場合には上壁近傍に生成される。このことはせん断応力 $\overline{u_1 u_2}$ は主流方向速度の X_2 軸方向の速度こう配、せん断応力 $\overline{u_1 u_3}$ は主流方向速度の X_3 軸方向の速度こう配に支配されることから理解できる。両せん断応力の最大値を比較すると $X_1/D_h=3.6$ まではせん断応力 $\overline{u_1 u_3}$ のほうが大きな値を示すが、 $X_1/D_h=3.6$ の下流領域では逆にせん断応力 $\overline{u_1 u_2}$ のほうが大きな値を示す。

5. 結 論

だ円断面管路におけるだ円断面形状が面積一定の条件のもとに、流れ方向に変化する湾曲だ円断面管路を

対象にその乱流構造の変化、ならびに二次流れの変化をレーザドップラー流速計により測定し、以下の結論を得た。

(1) 湾曲だ円断面管路入口の側壁近傍の長軸に沿う主流方向速度こう配と入口断面を 90° 回転させた出口断面の上壁近傍の長軸に沿う速度こう配とを比較すると出口部のほうが小さい。これは二次流れによる低速流体の移流効果と解釈される。

(2) 湾曲だ円断面管路入口の $1/4$ 断面においては第2種二次流れによる1個の渦が形成される。この第2種二次流れはわずかな形状変化によって第1種二次流れへと変化し、側壁から上壁に向かう一方の流れを形成し、湾曲だ円断面管路出口において再度第2種二次流れを形成する。

(3) 断面内の平均二次流れ強度は流れ方向に沿って増加し流れ方向管路中央の位置にて最大値を取ったのち減少する。その最大値は断面内の主流方向速度の4.28%程度に相当する。

(4) 主流方向垂直応力の最大値は管路入口におい

ては上壁に形成され流れの発達に伴って側壁側に移動する。

(5) 水平方向垂直応力は管路上壁近傍で、鉛直方向垂直応力は管路側壁近傍にて最大値を示す。

(6) せん断応力分布 $\overline{u_1 u_2}$ は鉛直軸に平行に $\overline{u_1 u_3}$ は水平方向軸に平行な等値線分布を形成する。またその絶対値の最大はせん断応力 $\overline{u_1 u_2}$ は側壁近傍にせん断応力 $\overline{u_1 u_3}$ は上壁近傍に生成される。

最後に本実験を進めるに際し、実験装置については本田技術研究所 筒井壽博氏、アイソタイプ社 茂木辰雄氏、測定に関しては日本カノマックス株式会社 山下雅雄氏のご助言をいただいた。また、当時宇都宮大学工学部4年生 加藤洋幸氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

- (1) Cain, D., Roberts, A. and Barrow, H., *Wärme*

- Stoffübertrag.* 2 (1973), 101-107.
 (2) Barrow, H. and Roberts, A., *Proc. 4th Int. Heat Transf. Conf.*, (1970), Paper No. FC4.1.
 (3) Cain, D. and Duffy, J., *Int. J. Mech. Sci.*, 13 (1971), 451-459.
 (4) Duffy, J. and Cain, D., *Aeronaut. J.*, (1972), 371-373.
 (5) 杉山 均・秋山光庸・八畝喜規・若山英樹, 機論, 60-571, B(1994), 842-848.
 (6) 杉山 均・秋山光庸・若山英樹・渡辺岳男, 機論, 62-595, B(1996), 1006-1012.
 (7) Cain, D., Roberts, A. and Barrow, H., *Proc. I. Mech. E. Conf. Compact High Duty Heat Exchang.*, (1972), 39-46.
 (8) Van Drist, E. R., *J. Aeronaut. Sci.* 23 (1956), 1007-1011.
 (9) Gasman, A. D. and Rapley, C. W., *Recent Advances in Numerical Methods in Fluids*, (1980), 335-399, Pineridge Press.
 (10) Launder, B. E. and Ying, W. H., *Heat Fluid Flow*, 3-2 (1973), 115-121.
 (11) 日本機械学会誌, 計測の不確かさ, (1987), 3-16, 丸善.