

曲がりを伴う矩形管内の乱流に関する実験的研究

宇都宮 浩司*・中西 助次**

(平成25年10月31日受付)

A Study on the Turbulent Duct flow in a Three-Dimensional Duct with Curvature

Koji UTSUNOMIYA and Suketsugu NAKANISHI

(Received Oct. 31, 2013)

Abstract

The turbulent flow in a duct with curvature was investigated by measuring the three dimensional flow fields. Because of the secondary flow influenced by centrifugal force in a curved duct, the effect of duct contraction and expansion were examined. The cross sectional size of the rectangular duct was 120mm by 240mm, with a curvature of 200°. The experiments were conducted for three duct geometries: a constant duct width (the standard case), a contraction in duct width, and a duct expansion. The changes in duct width took place from the latter half of the duct curvature as it transitioned to the straight duct section. The results indicated that for the case of an expanding duct, the velocity defect flow was larger, turbulent intensity increased, and the turbulent boundary layer thickened and expanded in three dimensions, as compared with the standard straight duct case. When the flow was contracted, the turbulent intensity and the turbulent boundary layer thickness both decreased, with greater uniformity of the velocity profiles, as compared with the standard case.

Key Words: Turbulent Flow, Curved Duct, Internal Flow, Three Dimensional Boundary Layer, Secondary Flow

1. 緒言

本研究は矩形管内の乱流に関して、曲がり部後方の直線流路での二次流れ⁽¹⁾⁽²⁾の影響とそれに伴う流れの3次元性を調査することを目的とする。管路輸送や流体機械内部の流れでは流路に曲がりを伴う事が多く、遠心力の作用のため流れに3次元性を生じる。更には、この遠心力に伴う乱流混合の影響により発生する運動エネルギー損失の正確な評価や、その低減に関して、いわゆる粗過程での基礎的な研究が要求されている。関連する研究を見ると、長方形ダクト曲面上の境界層について、曲率⁽³⁾や圧力勾配⁽⁴⁾の影響の報告があるものの、流れの3次元性と壁面近傍の流れの複雑さ⁽⁵⁾を伴うため、詳細に実験を行った研究は皆無である。

これに関して、妹尾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾は平衡三次元境界層のエネルギー損失について研究を行い、エネルギー損失の機構が境界層の発達や加速度の変化と関係することを説明しているが、実際の流れ場では乱流境界層の発達と境界層と縦渦の干渉が伴うため、系統的な実験的研究が必要である。従って曲がりを伴う矩形管内流れの二次流れとその制御に関して、エネルギー損失の機構を解明したり、3次元乱流境界層の特徴を調べ、縦渦の発達と曲面上の乱流境界層の干渉の影響について調査したりすることは意義があると考えられる。

そこで本研究⁽¹⁰⁾では、曲がり部後半から直線流路部にかけて流路幅を滑らかに変化させた場合の、流れの加速度と曲がりの効果について、曲がりに伴う矩形管流の3次元性に関して実験的に明らかにした。

* 広島工業大学工学部知能機械工学科

** 広島工業大学工学部機械システム工学科

2. 実験装置 及び 方法

2.1 実験装置及び方法

図1に供試流路の概略を示す。空気はプレナムタンクから流入し、入口ノズルを通った後に供試流路へ導かれる。供試流路の寸法は幅 $W \times$ 高さ $H=120\text{mm} \times 240\text{mm}$ の長方形断面で、曲がり角度は $\phi=200^\circ$ である。座標系は曲がり終端位置の内壁側を原点に流れ方向に x_0 、高さ方向に y 、半径方向に z とした。なお、参考のために図2に実験装置の写真を掲げておく。

測定には主として Pitot 管と熱線流速計を使用した。Pitot 管は3孔式（センサ部は孔径がおよそ 0.5mm ）のものと単孔式（壁面極近傍用、センサ部は $0.1\text{mm} \times 0.7\text{mm}$ の矩形）のものを使用した。熱線流速計による測定には、センサ部が直径 $\phi 3.1\mu\text{m}$ のタングステン線の I 形及び X 形の自作プローブを用いた。受感部の長さは線直径の約 200 倍（粘性長さの約 27 倍で空間分解能は良好⁽¹⁾）である。得られた熱線信号は線形化処理後、サンプリング周波数 10kHz で PC 内部に設置した AD 変換ボードを用いてデジタル変換し、32 秒間（下流位置は 16 秒間）のデータを収録した。信号は MO ディスクに一旦記録後、PC で解析した。

2.2 実験条件

実験は $x_0/W=-2.44$ 位置での流路中心流速 $U_{\text{ref}}=10\text{m/s}$ の条件で行った。測定は曲がり部終端部から直線部にかけて外壁側を緩やかに縮小した場合（Case I：流路全体に渡り概ね順圧力勾配となる条件、 $\Delta W/W = -0.13$ ）、流路幅が一定である場合（Case II：基準となる条件、 $\Delta W/W$

$= 0$ ）、緩やかに拡大した場合（Case III：流路全体に渡り概ね逆圧力勾配となる条件、 $\Delta W/W = 0.15$ ）の3条件で行った。ここで W は流路幅を、 ΔW は流路幅の変

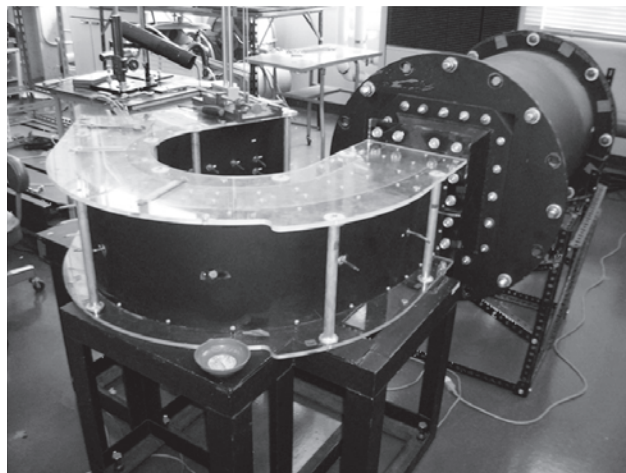


Fig. 2 Experimental apparatus and coordinate system

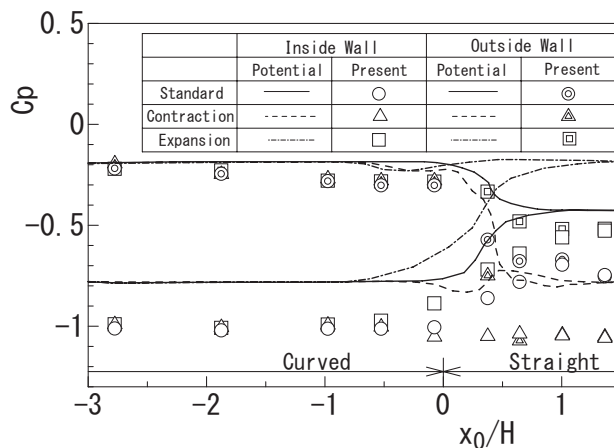


Fig. 3 Streamwise variation of wall static pressure

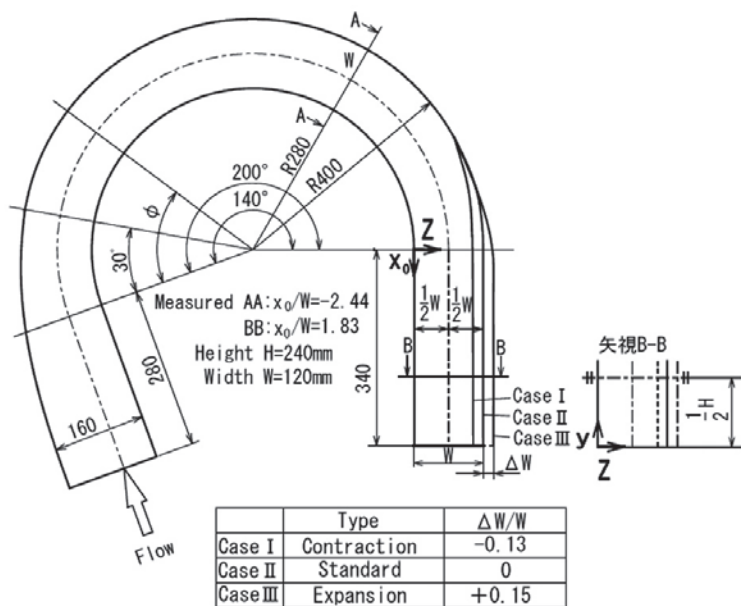


Fig.1 Experimental apparatus and coordinate system

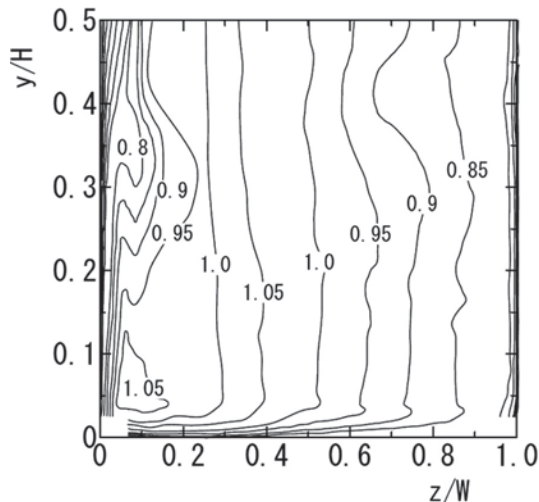


Fig. 4 Contour lines of U/U_c (Standard, $x_0/W = -2.44$)

化量を表す。主な速度や乱れ強さの測定位置は曲がり部内 ($x_0/W = -2.44$) と曲がり部後方 ($x_0/W = 1.83$) である。

3. 実験結果 及び 考察

3.1 圧力分布及び曲がり部の平均速度

図3に流路の内壁側と外壁側の壁面中央部での無次元壁面圧力係数 $C_p = 2\Delta p / \rho U_c^2$ (Δp は基準からの圧力差, U_c は流路中心速度) の値の流れ方向変化を示す。図中の曲線は2次元ポテンシャル流の場合の結果を表している。曲がり部では遠心力の作用による二次流れの為、内壁と外壁間で圧力差が生じる。曲がり部下流では、流路幅一定の場合は外壁側の順圧力勾配と内壁側の逆圧力勾配は同程度の値をとっている。流路幅を縮小させた場合は、外壁面側の順圧力勾配は大きくなり、内壁側では圧力分布は概ね変化しない。流路幅を拡大した場合は、内壁側の逆圧力勾配が大きくなり、一方外壁側の順圧力勾配が小さくなる。

図4に曲がり部の $x_0/W = -2.44$ 位置での平均速度の等値線図を示す。本図中には $x_0/W = -2.44$ 位置での U_c の値で無次元化した値を示している。なお3条件で同様の結果であることを確認しており、ここでは流路幅一定の結果のみ示している。遠心力に伴うプラントルの第一種の二次流れ⁽¹²⁾により、外壁面側から底壁面を通過して内壁面へ向かう運動量の小さい流体塊の輸送が生じ、内壁面に沿って上方への巻き上がりがあると考えられる。このために縦渦が内壁側流路中心付近に形成され、壁面に発達する境界層は3次元の挙動を示している。

3.2 平均速度と乱れ強さの等値線図

図5に曲がり部下流の $x_0/W = 1.83$ 位置での流れ方向の時間平均速度 U/U_c 及び流れ方向乱れ強さ u_{rms}/U_c の等値線図 ($x_0/W = 1.83$ 位置での U_c の値で無次元化) をそれぞれ示す。図5上段の U/U_c の値の分布を見ると、流路幅が一定 (Case II : Standard) の場合は、内壁側の減速領域は上流側と比較して外壁方向へ広がっており、二次流れにより内壁側へ輸送された低速流体塊が縦渦により流路中央部へ輸送されると考えられる。流路幅縮小 (Case I : Contraction) の場合、流れの加速 (増速) により断面平均速度が増加し、内壁面側の減速領域は縮小する。このため壁面上の境界層は薄くなっている。また外壁側の領域では、流路幅が一定の場合と同様の一様な速度の分布を示す。流路幅拡大 (Case III : Expansion) の場合、断面全体に減速領域が広がり大きな運動量欠損を生じる。内壁では高さ方向に境界層が厚くなり、境界層の3次元性が增大すると共に内壁面と底壁面では境界層が厚くなる。このように流路幅を縮小させた場合より、流路幅を拡大させた場合の方が、著しく流れが変化することが判る。

次いで、図5下段に示した流れ方向乱れ強さ u_{rms}/U_c の値の分布を見ると、流路幅が一定の場合、乱れ強さの値が大きい領域は平均速度の減速領域に見られ、 $y/H \approx 0.3$, $z/W \approx 0.1$ 付近で最大値を示す。流路幅縮小の場合は、断面全体に渡り3条件中で最も低い値を示し、流れの加速の効果により乱れ損失が小さくなるために等値線の間隔が広がる。一方、流路幅拡大の場合は、断面全体にわたり3条件中で最も低い値を示し、流れの減速の効果のために乱れ損失が小さくなり、これに伴い等値線の間隔が広がる。そして、流路幅一定の場合と比較して値の大きな領域が全体的に広がり、特に内壁側の値が増大する。更には乱れエネルギーの増加に伴い、等値線の間隔が狭くなるとともに、最大値を示す位置が底面側に移動する。

このように、流路の曲がりに伴う遠心力の作用のため、流れ場は複雑な3次元的事象となること、そして流れが加速されているか、減速されているかにより、その効果が大きく変化することが判る。

3.3 壁面近傍の流れ

次いで、流路壁面近傍の流れ現象 (特に境界層の挙動) を調べることにする。図6 (a) に $x_0/W = 1.83$ 位置での流路の底壁面近傍の速度分布について、 U/U_{ref} の値で無次元化して示す。流路幅が一定の Case II の場合、縦渦による影響のため外壁側から内壁側に向かって速度欠損量が増加しており、特に $y/H = 0.005 \sim y/H = 0.03$ の範囲で速度欠損量が多い。また壁面極近傍の速度勾配も内壁側に行くに従い減少する。流路幅縮小の Case I の場合は、増速に伴う速度の一様化のためこの領域の速度欠損割合が小さくなり、排除厚さや運動量厚さが薄くなっていると考えられる。このように、流れの増速に伴い、遠心力に伴う縦渦の影響の減少と二次流れが抑制された結果、分布形状や壁面極近傍の速度勾配の横方向の変化は小さくなる。流路幅拡大の Case III の場合は、流路幅一定の場合と比較して速度欠損量が増大する。さらに周方向の分布の差も増大している。これは内壁面側での大きな減速により流れの3次元性が強くなり、また壁面摩擦応力の横方向の差も増大するためである。従って分布形状の曲率半径方向の差は、流路幅を拡大した場合が最も大きくなる。

次いで、図6 (b) に $x_0/W = 1.83$ 位置での流路の内壁面近傍の速度分布を、図6 (a) の場合と同様に U_{ref} で無次元化して示す。流路幅一定の Case II の場合は、流路の中央部に近づくに従い U/U_{ref} の値は減少していき分布が一様化しており、このために壁面極近傍の速度勾配が減少する。これに対し、流路幅縮小の Case I の場合は、 $y/H \leq 0.2$ の領域で U/U_{ref} の値が1.0を越え、また流路全般にわたり速度の欠損量が減少している。反対に流路幅拡大の Case

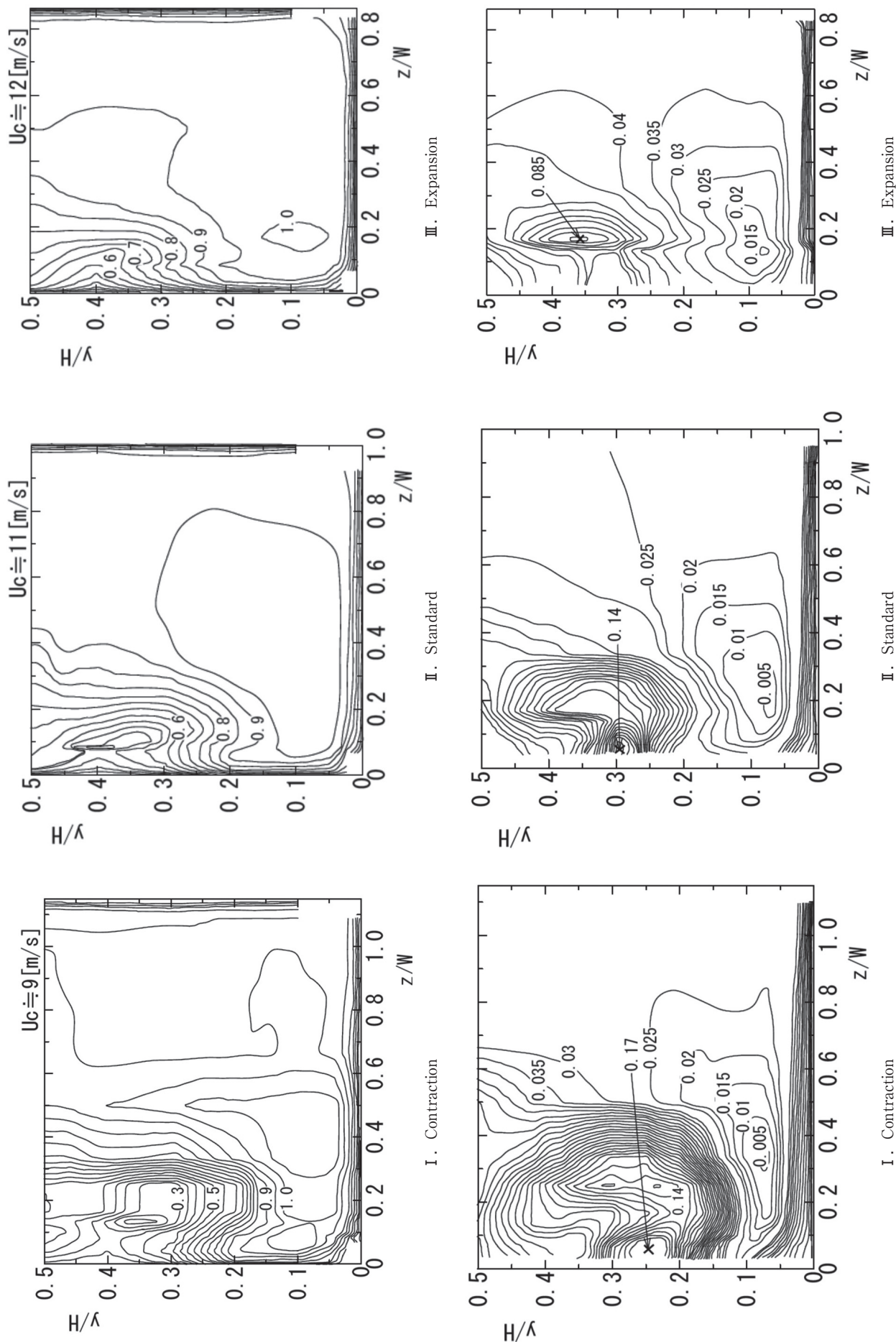


Fig. 5 Contour lines of U/U_c and u_{rms}/U_c ($x_p/W=1.83$)

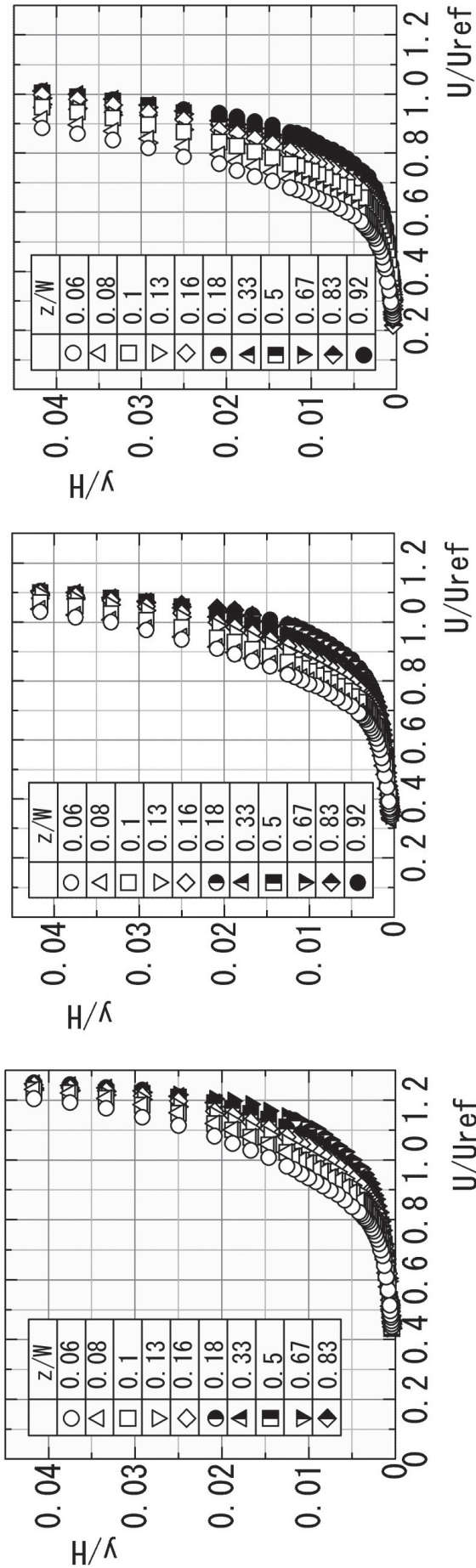


Fig.6 (a) Profiles of U/U_{ref} at the bottom wall

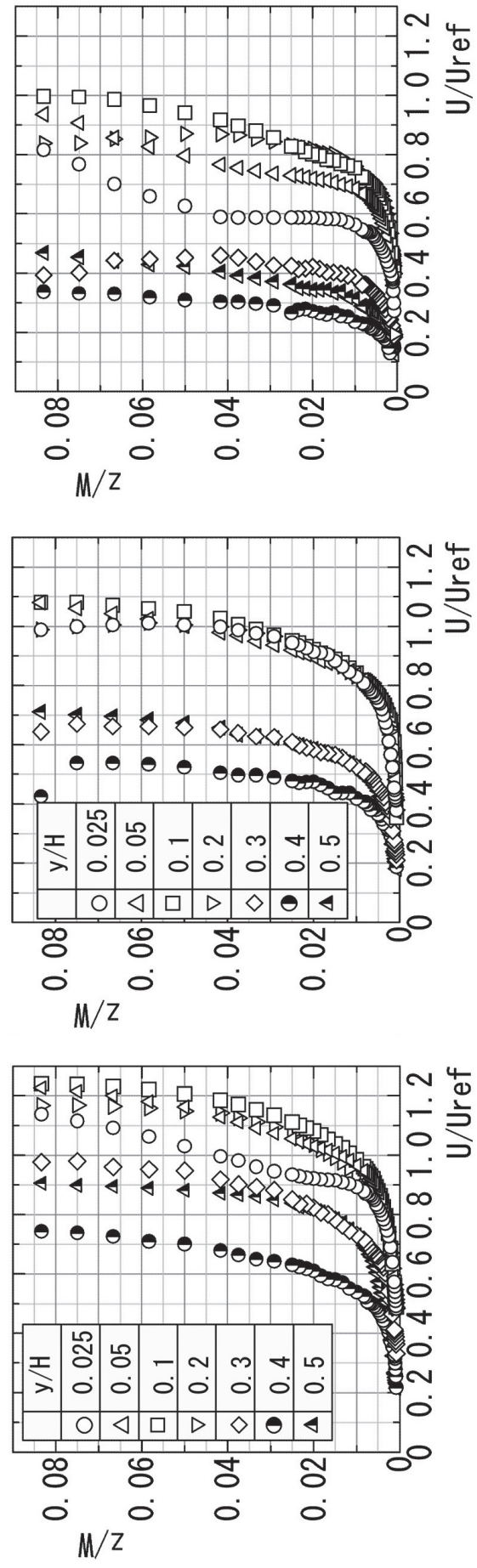


Fig.6 (b) Profiles of U/U_{ref} at the inner-side wall

Ⅲの場合は、流路高さの中央方向に行くに従い U/U_{ref} の値が大きく減少しており、境界層厚さが増大している。

3.4 境界層の3次元性

本流れは内部流れのため、境界層を定義する事は困難であるが、縦渦や二次流れの影響を評価するため、ここでは任意の速度の位置で境界層厚さを定義し、その分布の濡れ縁に沿う変化から流れの3次元性を評価することにする。平均速度が $U/U_{ref} = 0.8$ となる高さ位置を擬似的な境界層厚さ δ と定義して、その値の底壁面上の分布を図7に示す。 $x_0/W = -2.44$ の位置では、増速領域が内壁側に偏在しているので、 $z/W \leq 0.3$ でほぼ一定の値となる。その外側では縦渦と二次流れの影響のため δ の値が単調に増加する。 $x_0/W = 1.83$ 位置の結果を見ると、流路幅が一定の Case II の場合は $z/W < 0.18$ では内壁上の流れと上流での二次流れの影響のため、この値は増加する。 $z/W = 0.18 \sim 0.6$ で $\delta \approx 2.5\text{mm}$ の一定値をとり、 $z/W < 0.6$ では外壁の影響により緩やかに増加する。流路幅を縮小させた Case I の場合は、流れの加速に伴い全般的に δ の値が小さくなり、また曲率半径方向の変化も無くなる。従って縦渦による影響が少なくなり、低速流体塊の二次流れによる内壁側での蓄積が抑制されると推定される。反対に、流路幅を拡大させた Case III の場合は流れの減速に伴い全般的に値が増大し、特に $z/W < 0.18$ で著しく増大しており、この領域で3次元性が強まる。 $z/W \geq 0.18$ で一定の値をとっているが、 δ の値の流路幅一定の場合からの変化割合は、流路幅を縮小させた場合より大きい。

この $x_0/W=1.83$ 位置での各流路幅での底壁面上の境界層 δ と $x_0/W=-2.44$ 位置でのそれとの比、即ち境界層の変化率(変化割合) η を計算し、その値の z/W に対する変化を図9に示す。流路幅が一定の場合、内壁側の $z/W \geq 0.35$ では $\eta=2.0 \sim 3.0$ の値を示し、 $z/W \geq 0.45$ の範囲では $\eta \leq 1.0$ の値を示す。流路幅を縮小させた Case I の場合、ほぼ全領域に渡り $\eta \leq 1.0$ の値を示し、また流路幅が一定の場合よりも値が小さい。従って、この場合は境界層の発達を制御されている。流路幅拡大の Case III の場合は、全領域で流路幅一定の場合の値を上回り、 $z/W = 0.06$ で最大値 $\eta_{max}=7.3$ の値を取る。また、内壁に近づくほど変化割合が増加し、横方向の変化も著しく大きい。この場合は、内壁側の境界層の発達の影響が大きく、また外壁側から内壁側への低速流体塊の輸送量も増して、乱流混合も促進される事になるものと考えられる。

3.5 運動量欠損に関する量の評価

最後に、上流位置 ($x_0/W=-2.44$) からの流路全体に渡る運動量の欠損量を

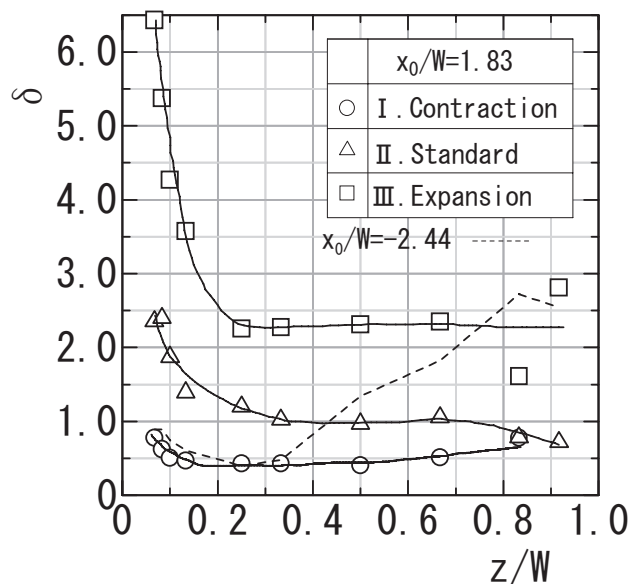


Fig.7 Variation of δ at the bottom wall

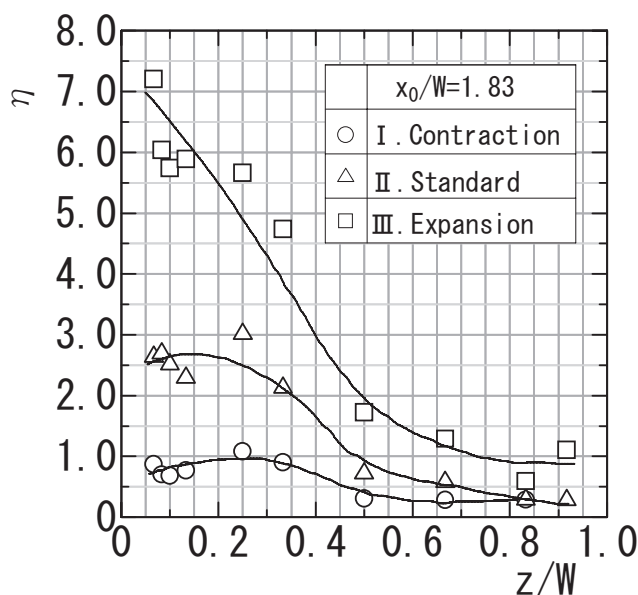


Fig. 8 Comparison of the boundary Layer

Table. 1 Comparison of each results

	Contraction	Standard	Expansion
$(u_{rms}/U_c)_{max}$	0.085	0.14	0.17
ζ	0.511	0.582	0.987

$$\xi = (\int \int U_i^2 dy dz - \int \int U_{as}^2 dy dz) / \int \int U_{as}^2 dy dz$$

と定義して計算した。ここで添字の as は $x_0/W=-2.44$ 位置での流路幅一定の場合、i は各々の場合の $x_0/W=1.83$ 位置での結果を表している。この値について、表1に各々の場合の $x_0/W=1.83$ 位置での流れ方向乱れ強さの断面最大

値 $(u_{rms}/Uc)_{max}$ と一緒に示す。流路幅が一定の場合と比べると、 ξ の値は流路幅を拡大させた場合にはその変化が大きくなり、反対に流路幅を縮小させた場合は、その変化割合が小さくなる。従って、運動量損失の変化割合は、流路幅を縮小させた場合よりも加速度が負である（即ち流れが減速している）流路幅を拡大させた場合の方が著しく大きい。一方、 $(u_{rms}/Uc)_{max}$ の値はむしろ流路幅拡大の方が変化は小さい。従って、管路全体に渡る乱れ強さの全体の量（総乱流エネルギー量）は流路幅を拡大させた場合は増大するものの、最大値の変化そのものは小さいと考えられる。

4. 結言

曲がりに伴う矩形管内の乱流の3次元性について、曲がり部後半から直線流路部にかけて流路幅を変化させた場合の効果について調査し、以下のような結論を得た。

- (1) 流路幅を拡大させた場合は、二次流れの影響により断面全体の境界層が流路幅一定の場合より厚くなり、3次元性が大きくなる。乱れも増加し、縦渦の影響のため乱れ強さの大きい領域は広範囲に存在する。
- (2) 流路幅を縮小させた場合は、速度分布が一様化すると共に、減速領域が減少して混合損失は減少する。このために、流路幅一定の場合より二次流れが弱体化し、乱れ強さも緩やかな分布となる。
- (3) 断面全体での上流からの運動量欠損割合を定義した。流路幅が縮小の場合は一定の場合よりやや減少する程度であるのに対し、流路幅が拡大の場合は著しく増加している。従って流路幅を拡大し、流れを減速させた

方が影響が大きい。

本研究の遂行に当たり、当時の大学院生、合原真路、古木賢一、田辺大輔、松山哲也、森下正樹、河村知広の各氏、および当時の卒業研究生各氏に感謝する。また、山口大学 望月信介教授、近畿大学 亀田考嗣准教授、元広島工業大学 大坂英雄教授、元九州大学 速水洋教授、および九州大学 高曽徹准教授のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Smits, A. J. et al., *J. Fluid Mech.*, 94-2, (1979), 209-242.
- (2) Schwarz, A.C. et al., *Phys. Fluid*, 8-11, (1996), 3163-3171.
- (3) 喜多義範, 他 2 名, 機論, 52-481, B (1986), 3194-3201.
- (4) 伊藤英覚, 機論, 50-458, B (1984), 2267-2274.
- (5) 杉山均, 日本流体力学会誌, 22-1, (2003), 41-50.
- (6) 妹尾泰利, 機論 B, 47-420, (1981), 1459-1466.
- (7) 妹尾泰利, 内部流れ学 I, (1995), 151, 養賢堂.
- (8) 妹尾泰利, 内部流れ学 II, (1994), 78, 養賢堂.
- (9) 妹尾泰利, 内部流れ学と流体機械, (1982), 71, 養賢堂.
- (10) 宇都宮浩司, 他 2 名, 機講論, (2008), 46, 143-144.
- (11) 宇都宮浩司, 他 3 名, 機論, 74-742, B (2008), 1360-1367.
- (12) 中村育雄・大坂英雄, 工科系 流体力学, (1985), 192, 共立出版.

