

湾曲風洞流路における非等方性乱流の実験解析*

杉山 均^{*1}, 秋山 光庸^{*1}, 二宮 尚^{*1}
八 鯨 喜 規^{*1}, 平 田 賢^{*2}Experimental Analysis of Anisotropic Turbulent Flow
in a Distorting Duct by a Laser-Doppler AnemometerHitoshi SUGIYAMA, Mitsunobu AKIYAMA, Nao NINOMIYA,
Yoshinori YAKUWA and Masaru HIRATA

The experimental study of three dimensional turbulent flow in a distorting duct was made using a laser-Doppler anemometer. To make clear the relationship between mean strain and structure of turbulence is of fundamental importance in all turbulent shear flows. The purpose of this work is to analyze the flow in a distorting duct by comparing present experimental data with published data. The obtained experimental data was compared the other data of Tucker-Reynolds measured by hot wire anemometer and the numerical results using Reynolds stress model. The present experimental data of decay for normal stresses along the center line was close to the calculated results. Separated flow was observed in outlet corner region of a distorting duct by laser-Doppler anemometer and flow visualization technique. Numerical method was also able to predict this separated flow. The three dimensional turbulent flow in a distorting duct is analyzed more clearly by the present experimental data.

Key Words: Turbulent Flow, LDV, Separation, Secondary Flow, Internal Flow, Distorting Duct

1. 結 言

非等方性乱流現象を解析するための、一つの流路として湾曲風洞流路が挙げられる。この湾曲風洞を用いて非等方性乱流場を解析した実験として、古くはTownsend⁽¹⁾によるものが挙げられる。その後、Tucker-Reynolds⁽²⁾は、同様な実験を湾曲風洞の断面アスペクト比を大きくとった場合の解析を行い、Townsendの実験と比較、その非等方性乱流構造について言及している。また、形状は多少異なるが湾曲流路内の伝熱特性については、Yoshida - Furuya - Echigo⁽³⁾の報告がある。

また、この種の三次元乱流を数値的に予測するには非等方性乱流モデルが必要となる。Launder-Reece-Rodi⁽⁴⁾は、Tucker-Reynoldsの実験を対象とし、湾曲風洞中心部の垂直応力、乱流エネルギー減衰を解析している。その際、速度分布は既知として解析している。さらに、Fu-Launder-Tselepidakis⁽⁵⁾は、圧力-ひずみ相関項中に現れる四次相関テンソルをより一般化

し、定数系、散逸項に不変量関数を導入し Launder らと同様に一次元問題として解析を行っている。著者らも、レイノルズ応力方程式を用いて、この湾曲風洞内乱流を数値的に解析することを試みている⁽⁶⁾。その際には、計算の簡便性、経済性を考慮して Rodi 近似⁽⁷⁾を用いて対流項、拡散項をモデル化、代数応力モデルとして解析し、モデル化の上で問題となる圧力-ひずみ相関項に関しては、一部改良を加えたモデル⁽⁸⁾を用いている。従来、この流れ場は一次元問題として取扱われてきたが、より実際に即するよう、境界適合座標系⁽⁹⁾を導入し三次元問題として解析を行っている。その結果、特徴的な点として、湾曲風洞部の出口近傍コーナー部において、わずかな領域ではあるが、はく離現象が数値解析では観察された。実験においては、このような報告は、されていない。また、Tucker-Reynoldsの実験結果と比較すると、各方向垂直応力の減衰挙動に差が認められ、数値解析のほうが、彼らの実験値より大きな値を示した。このような差異を、明らかにする意味より、Tucker-Reynoldsの実験装置を対象とし、レーザ・ドップラー流速計を用いて、その湾曲風洞内流路における流動挙動を測定し、数値解析結果との差異分析を行うことを目的とする。

* 平成4年5月27日 第29回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成3年12月10日。

^{*1} 正員、宇都宮大学工学部 (〒321 宇都宮市石井町 2753)。

^{*2} 正員、芝浦工業大学システム工学部 (〒330 大宮市深作 307)。

2. 記 号

- D : 代表長さ
 k : 乱流エネルギー
 K_1 : 非等方性を示すパラメータ
 $\quad = (\overline{u_2^2} - \overline{u_3^2}) / (\overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})$
 k_1 : 波数成分
 L : 積分スケール
 Re : レイノルズ数 $= U_{in} D / \nu$
 S : 一次元パワースペクトル密度関数
 u_i : i 方向時間変動速度成分
 $\overline{u_i u_j}$: レイノルズ応力
 U_i : i 方向時間平均速度分布
 U_c : $x_1/D=0.533$ における主流中心速度
 U_∞ : 主流速度
 U_{in} : 入口部主流中心速度
 x_i : 物理平面上の i 方向座標軸
 λ : レーザ波長
 ν : 動粘性係数
 $\rho(\tau)$: 自己相関関数
 τ : 時間遅れ
 ϕ : レーザ交さ角

3. 実験解析

3.1 実験解析モデル 本実験において対象とした Tucker-Reynolds の実験装置の概略について説明する。図 1 にその装置を示す。

彼らの実験風洞は、図 1 に示すとおり三つの部分より成り立っている。まず第 1 の部分は、長さ 0.610 m (2 ft), 縦横比 6:1 で、 $D=0.191$ m (7.5 in) の入口直管部であり、その入口には、乱流格子が設けられている。第 2 の部分は、2.438 m (8 ft) の長さを持ち、入口部での縦横比 6:1 の割合が下流に行くにしたがい徐々に変化し、その割合は湾曲風洞出口において 1:6 となる。図 1 に示すように主流方向を x_1 , 亜流方向を x_2, x_3 とすると主流方向に沿う各断面の位置は次式で与えられる。

$$x_2 = (x_2)_i e^{-cx_1}, \quad x_3 = (x_3)_i e^{-cx_1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$(x_2)_i, (x_3)_i$ は、湾曲風洞入口部での x_2, x_3 方向の、壁面上での座標値を示し式 (1) 中の定数 c は、0.067 81 m (0.222 51 ft) と設定している。第 3 の部分は、縦横比が入口直管部と逆となる長さ 1.219 m (4 ft) の直管部より形成されている。

入口流入速度は、6.096 m/s (20 ft/s) であり、入口く形断面の短辺を代表長さとして、レイノルズ数は、 $Re=7.7 \times 10^4$ である。実験条件として、特に注意すべ

き点として風洞設計に際して境界層排除厚さを考慮している点が挙げられる。すなわち、主流方向 x_1 の中心速度を、入口直管部より出口直管部まで一定となるようにするため各断面にて境界層排除厚さを算出し、その厚さ分だけ断面に加える操作を行っている。この境界層排除厚さについて Tucker⁽¹⁰⁾ は次のように定義した。

$$\delta^*(x_1) = 0.046 x_1 \left(\frac{U_\infty x_1}{\nu} \right)^{-1/5} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) は、圧力こう配のない平板での、境界層排除厚さを示す式であり、 x_1 は、直管入口からの距離、 U_∞ は、主流速度、 ν は、作動流体の動粘性係数を示す。

実験装置を製作する場合には、この排除厚さ分を考慮して設計することとした。また、系の対称性を考えて実験の測定領域は図 1 の斜線部に示す 1/4 断面として測定を行った。

3.2 実験装置 図 2 に実験装置の構成図を示す。作動流体は水とし、循環流路を形成している。ポンプより吐出された水は弁により流量を調整され、6 枚の整流格子板、二次元ベルマウス形状をした案内板を経て Test Section 部へ導入される。Test Section 部の大きさは、図 1 に示す入口く形断面の短辺 D にて $D=4$ cm である。Test Section を通過した流体は、二次元ベルマウス形状の案内板を通過し、Reservoir に貯水され、再びポンプへと誘導される。

Test Section 部はレーザ・ドップラー流速計にて測定をするためアクリル板にて製作、またレーザ光屈折による影響を抑える意味より、Test Section 部は、その全体が直方体形状の水槽に水没する構造となっている。

循環流路構造とし、水温上昇を伴うため、実験は、温度が一定となるまで循環させ、温度一定となつてから測定を開始した。測定条件は、Test Section 入口部

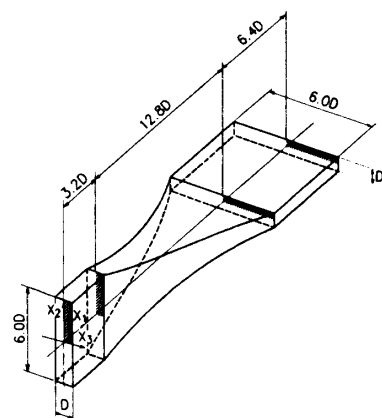


図 1 実験解析モデル

において、混合平均速度 1.066 m/s, 入口中心部速度 1.176 m/s, 水温 50°C, レイノルズ数 7.7×10^4 である。

3.3 計測システム 計測系の概略図を、図 3 に示す。計測装置は、2 W 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、514.5 nm (Green) と 488 nm (Blue) の 2 本のビームに分光され、ブラックセル (80 MHz) で周波数シフトされ、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 の可動範囲を持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。

図 4 は、測定体積の概略を示したものである。本計測システムの場合、プローブに設けられた収束レンズの焦点距離は、 $f=120$ mm で、交さ角 ϕ (Green) = 14.44° , ϕ (Blue) = 14.52° であることにより、短軸 d [mm] = 0.06 mm, 長軸 l [mm] = 0.49 mm の回転だ円の体積を有することになる。測定体積内のレーザー干渉縞の間隔は、 d_f (Green) = 2.046 nm, d_f (Blue) = 1.931 nm で、共にフリンジ数は 32 本、ビーム直径は $d_0 = 1.2$ mm である。測定体積を通過する粒子による散乱光は、プローブ内のフォトマルレンズにより集光し、受光光学系に送られる後方散乱方式である。こうして得られるドップラー周波数 f_d と、粒子速度 v との間には、次の関係式が成り立つ。

$$v = \frac{\lambda(f_d - f_s)}{2 \sin(\phi/2)} = d_f(f_d - f_s) \dots\dots\dots (3)$$

式(3)において、 f_s は、シフト周波数、 d_f は、フリンジ間隔である。測定に際して主流方向、垂流方向のシフト周波数は、主流 0.1 MHz, 垂流 1.0 MHz であり、測定時間ステップは 5 ms, 測定データ数は 4 096, 壁面近傍では、その 2 倍として計測した。また、測定の際に使用した散乱粒子径は、3 μ m 程度のものを用いた。

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 $\overline{u_1^2}/U_c^2$ については $\pm 15.5\%$, 垂流方向変動速度 $\overline{u_2^2}/U_c^2$ については $\pm 23.5\%$, $\overline{u_3^2}/U_c^2$ については、 $\pm 18.8\%$ (いずれも約 95% 包括度) である。

4. 実験結果および考察

4.1 主流中心部速度 図 5 は、主流方向速度 U_1 の断面中心における、本実験結果、Tucker らの実験結果、計算結果を比較した図である。Tucker らの実験結果は、文献(10)より引用した。また、湾曲風洞部は、板厚 3 mm のアクリル製のため動圧により流路が拡大するが、この拡大量をダイヤルゲージにて測定し、流速を補正して表示した。

図 5 よりわかるように、本実験結果は、計算結果に近い値となった。Tucker らの実験結果と比較すると、本計算結果は、湾曲部において高い値を示している。これは、彼らが、湾曲風洞部設計の際に境界層排除厚さ分を高く見積もって、設計したことによるものと思われる。また、この流れに特徴的な湾曲風洞出入口部における主流速度のピーク値も、本実験結果はとらえ

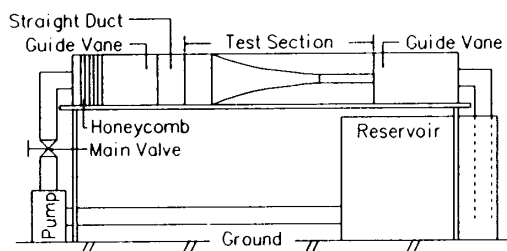


図 2 実験装置概略図

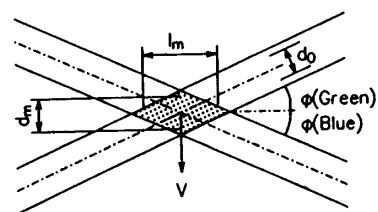


図 4 測定体積概略図

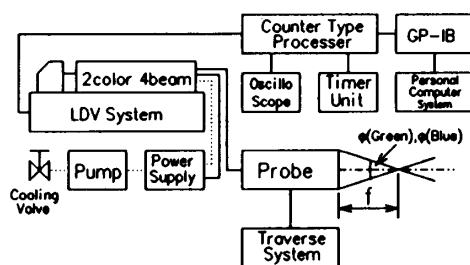


図 3 計測システム

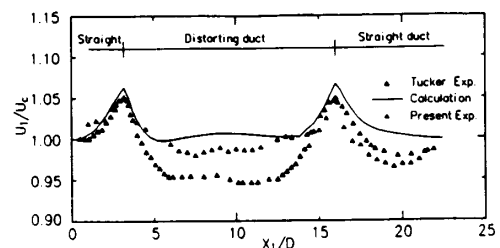


図 5 主流中心速度変化

ている。

4.2 乱流エネルギー、垂直応力分布 図6は、乱流エネルギーの断面中心部における流れ方向への減衰の挙動を、本実験結果、Tuckerらの実験結果、計算結果と比較したものである。本実験結果は計算結果に近い値を示し、Tuckerらの結果とは異なる結果となった。Tuckerらの結果では、湾曲風洞部出口において明りょうなピーク値を持つが、本実験結果では、ピーク値は認められるものの、それほど顕著ではない。

図7は、主流方向垂直応力 $\overline{u_1^2}$ 分布の各結果を比較したものである。計算結果が、湾曲風洞出入口部にて大きな変動を持つのは、レイノルズ応力方程式中の対流項、拡散項のモデル化に際し、Rodi近似を用いた代数応力モデルとしたことに起因している。代数応力モデルとすると、各レイノルズ応力は、乱流特性量と、各方向速度こう配により構成され、このうち速度こう配の値が、直接的に反映された結果と考えられる。この傾向は、亜流方向速度変動についても同様に認められる。

実験結果は、計算値に近い値となったが、 $x_1/D=7$ 近傍より多少増加を示し、計算結果とは異なっている。Tuckerらの実験結果と比較すると、その位置は異なるものの、増加傾向を示し、明りょうなピーク値を形成している。この傾向は、乱流エネルギー減衰挙動についても同様に認められる。

図8は、亜流方向速度変動 $\overline{u_2^2}$ の減衰挙動結果を、

比較したものである。入口直管部にて本実験、Tuckerらの実験とも同程度の乱れ強度を持っているが、湾曲風洞に流入すると両者には差が生じ、本実験結果は、 $x_1/D=7$ 近傍より、増加傾向を示し、湾曲出口部にて計算結果に近い値を示す。その後、出口直管部にて減衰していく。このような傾向は、先に示した、 $\overline{u_1^2}$ の分布と似ている。

図9は、亜流方向速度変動 $\overline{u_3^2}$ の減衰挙動の各結果を比較したものである。Tuckerらの実験結果、計算結果に認められるように、この $\overline{u_3^2}$ 分布において特徴的な点として、湾曲風洞出口近傍において、一度ピーク値をとった後、減衰し最小値をとって、再度増加するという点が挙げられる。本実験結果では、その傾向は明りょうに示しているとは言えないが、最小値を持つ点は同様に認められる。また、本実験結果の $\overline{u_3^2}$ の分布においては、 $\overline{u_1^2}$ 、 $\overline{u_2^2}$ の分布に認められた、湾曲風洞内

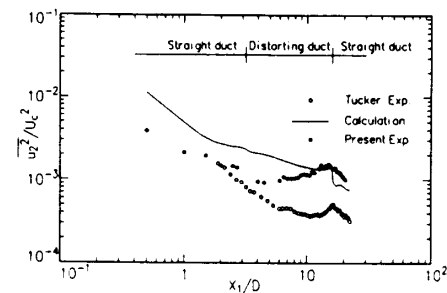


図8 垂直応力 $\overline{u_2^2}$ の減衰

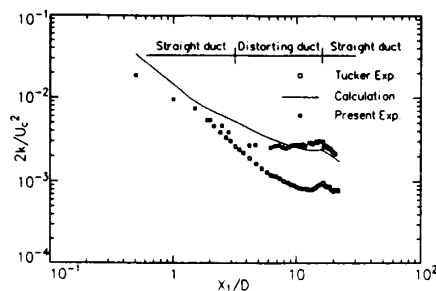


図6 乱流エネルギーの減衰

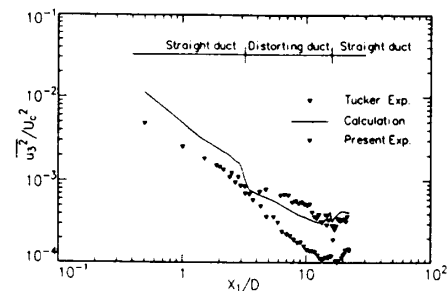


図9 垂直応力 $\overline{u_3^2}$ の減衰

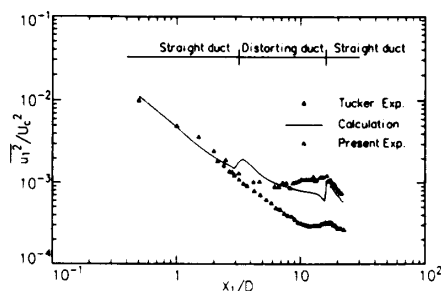


図7 垂直応力 $\overline{u_1^2}$ の減衰

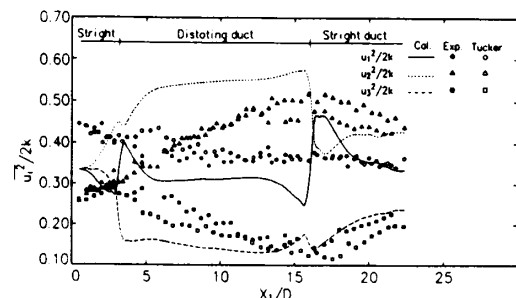


図10 各垂直応力の再配分化

での増加現象は、各結果とも認められない。

図 10 は、各垂直応力値の再配分現象を、各結果で比較したものである。湾曲風洞部に流入すると、各垂直応力は、圧力-ひずみ相関項を通じて、 $\overline{u_2^2}$ の応力が増大、逆に $\overline{u_3^2}$ の応力が減少、 $\overline{u_1^2}$ の値がほぼ一定となる。その後、出口直管部に流入すると、湾曲風洞内の非等方的乱流は、等方的乱流に移行する傾向を示すが、本実験結果においても、同様の結果となっている。

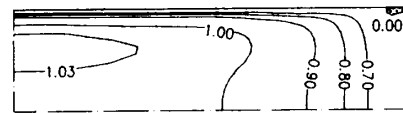
図 11 は、流れの非等方性を示すパラメータ K_1 の変化を、各結果において比較したものである。その定義式より、 K_1 の値は、等方性乱流においては零となり、非等方性乱流においては、その非等方性の大きさに比例して大きな値を持つ。したがって、入口直管部においてほぼ等方的である流れは、湾曲風洞部においてその非等方性を増加し、出口直管部に流入すると等方性乱流へ推移しようとする挙動が、どの結果においても理解できる。ただし、本実験結果は、計算結果より Tucker らの実験結果に近い値を示し、そのピーク値も、彼らの示したピーク値に近い値となっている。この点を考慮し、また、図 7~9 に示すように、本実験の垂直応力値は、計算結果に近い値を示すことを考え合わせると、計算結果の垂直応力の減衰傾向は、実際の流れを捕捉しているとは言い難く、改良が必要であることを示唆しているものと考えられる。すなわち、垂直応力減衰に大きく影響を及ぼすのは、乱流散逸、湾曲風洞出入口部での対流、拡散であり、 ϵ 方程式、レイノルズ応力方程式の対流、拡散項のモデル化などについての検討が必要となろう。

4.3 はく離流の測定 著者らの計算結果によれば、図 12 の主流方向速度等値線図に示すように、 $x_1/D=14.67 \sim x_1/D=16.0$ の範囲のコーナ部において、わずかばかりのはく離領域が予測された。

図 13 は、レーザドップラー流速計にて測定した、主流方向速度 U_1 の測定結果であり、おのおの (A) $x_1/D=14.5$, $x_2/D=-0.63$, $x_3/D=2.46$, (B) $x_1/D=15.0$,

$x_2/D=-0.6$, $x_3/D=2.60$, (C) $x_1/D=15.0$, $x_2/D=-0.6$, $x_3/D=2.35$ の位置に相当する。予測したはく離領域にあたる B の位置で、主流速度は負であり逆流の存在を確認できる。また、図 14 は、はく離領域近傍を、真横から撮影した可視化写真であるが、レイノルズ数は、15 000 と低いのが、はく離流の存在は認められる。以上の結果より、著者らが提示した、レイノルズ応力モ

$x_1/D=14.67$ Calculation



$x_1/D=16.00$

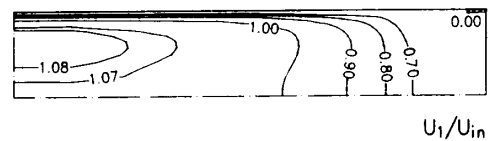


図 12 計算結果によるはく離領域予測

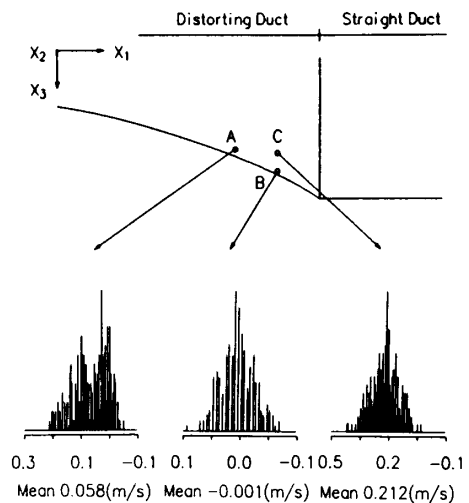


図 13 はく離領域における実験結果

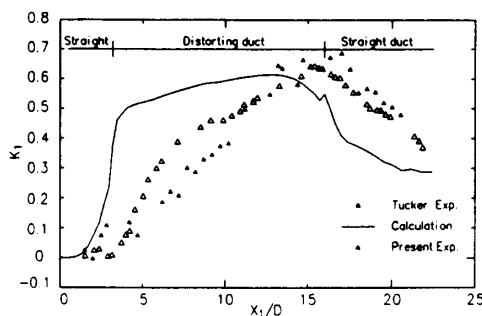


図 11 K_1 の主流方向変化

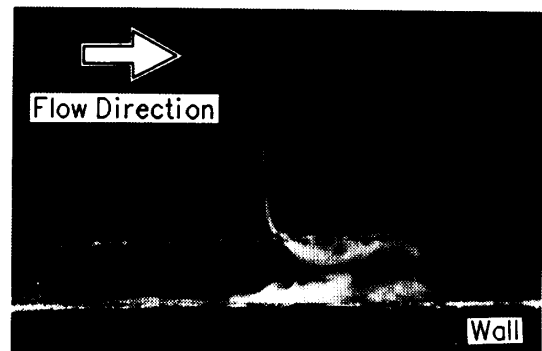


図 14 はく離領域における可視化

デルと境界適合座標系とを用いた計算手法は、比較的妥当なものであることを確認できる。

4・4 二次流れベクトル線図, 主流方向速度等値線
計算結果によると、湾曲風洞手前の入口直管部において、下壁(あるいは上壁)より中心部に向かって二次流れが発生する。この中心部へ向かう二次流れは、湾曲風洞に近づくにつれて、その速さを増し、この結果、図5に示したように、断面中心部の主流方向速度は、湾曲風洞部入口においてピーク値を取るものと解釈される。

図15は、 $x_1/D=2.7$ における、二次流れベクトル線図、主流方向速度等値線図を、本実験結果、計算結果とで比較したものである。両者とも、ほぼ同程度の値を持つことがわかる。主流方向速度等値線図は、実験のほうが、ひずんだ分布となっており、また、大きな値の等値線を示している点が、計算値と異なる。

図16は、湾曲風洞の中心位置にあたる $x_1/D=9.6$ の位置における、二次ベクトル線図、主流方向速度を各結果比較したものである。二次流れは、上壁より側

壁の湾曲風洞面に沿って流れていく様子が、実験、計算結果で認められる。またその値も両者にて大きな差異は認められない。二次流れの大きさは、入口速度の10~20%程度であり、湾曲風洞内で観察される二次流れは、圧力こう配により発生する第1種二次流れである。主流方向速度等値線図を比較すると、計算において、その等値線図は、コーナ部に突き出たような分布となっているが、実験では、この傾向が顕著に認められる。 $x_1/D=2.7$ の結果と同様に、計算結果は、値を小さく予測する傾向にある。

図17は、先に述べたはく離領域にあたる、 $x_1/D=14.67$ の位置における両結果を、比較したものである。計算結果において、この主流方向速度のはく離発生に呼応するように、二次流れベクトルは循環流を形成し、複雑な三次元流れを形成していることを思わせる。しかし実験結果では、明りょうな循環流は捕捉できな

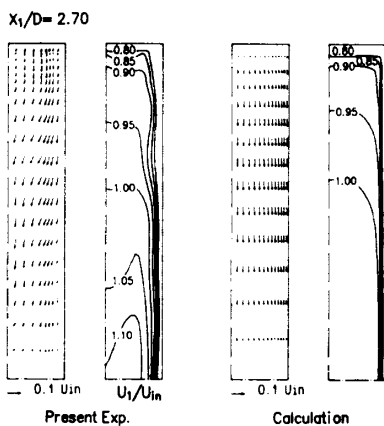


図15 実験結果, 計算結果比較 ($x_1/D=2.7$)

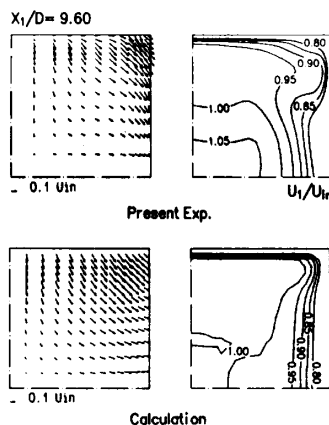


図16 実験結果, 計算結果比較 ($x_1/D=9.6$)

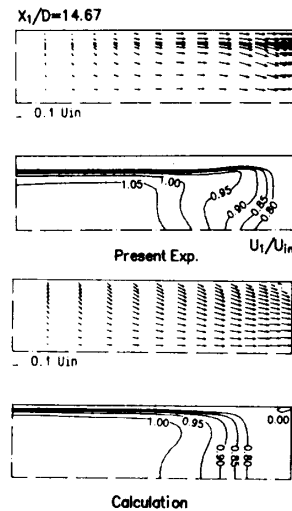


図17 実験結果, 計算結果比較 ($x_1/D=14.67$)

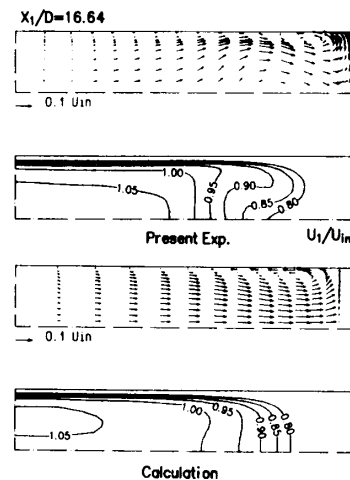


図18 実験結果, 計算結果比較 ($x_1/D=16.64$)

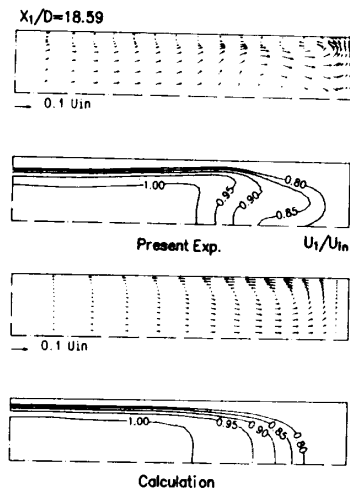
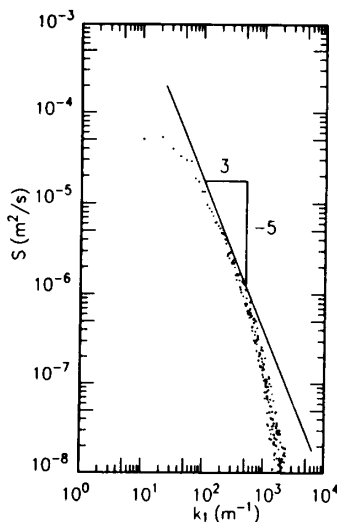
図 19 実験結果, 計算結果比較 ($x_1/D=18.59$)

図 20 一次元パワースペクトル密度関数

った。二次流れの値は、両者ともはく離近傍を除いて、その分布、絶対値とも似たような結果となっている。主流方向速度等値線図を比較すると、実験のほうが、等値線のひずみが大い点が特徴的である。この差異要因の一つとして、 x_3 軸近傍での二次流れ強度が、計算値のほうが大きいことが挙げられる。

湾曲風洞部内のはく離領域で発生した循環流は、出口直管部に流入するとさらに大きな循環流を形成することとなる。図 18 は、湾曲風洞出口部より少し下流の位置にあたる $x_1/D=16.64$ における両結果を比較したものである。計算結果は、上壁面近傍に大きな循環流が認められる。実験結果においても、多少変形しているものの、計算結果とほぼ同じ位置において、循環流が認められる。主流方向速度等値線図を比較すると、実験結果は、 x_3 軸近傍での等値線の側壁面への突出が認められ、計算結果とは多少異なった分布となってい

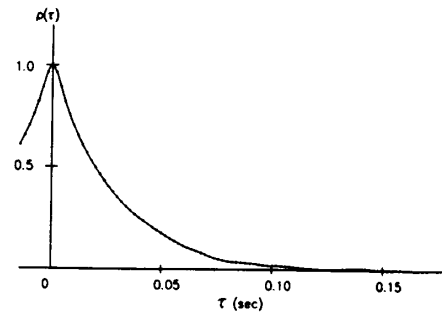


図 21 自己相関関数

る。また、 $x_1/D=9.6, 14.67$ の実験結果に認められた、1.05 の等値ラインが、この位置においては、計算結果でも認められる。

図 19 は、出口直管部における、さらに下流の $x_1/D=18.59$ の位置における両結果の比較図である。二次流れベクトルの強度は、下流に行くにしたがい減衰し、主流方向速度等値線は、側壁に向かって張り出している現象が、実験、計算ともに観察され、両者同一傾向を示している。

4.5 スペクトル解析 図 20 は、 $x_1/D=9.6$ の断面中心部における主流方向変動速度の、一次元パワースペクトル密度関数の結果である。解析にあたっては、114 688 個のデータを処理した。周波数から波数成分への変換は、Taylor の仮説⁽¹²⁾ により変換し表示した。図 20 よりわかるように、Kolmogorov の局所等方性理論による、 $-5/3$ 乗則が成立する慣性領域が、存在することがわかる。図 21 は、スペクトル解析結果を用いて算出した自己相関関数である。これよりランダム変動の時間的スケールの目安である積分スケール (Integral Scale) を求めると 0.028 s 程度となる。

5. 結 論

乱れの非等方性に関する流れ挙動を明らかにする意味より、Tucker-Reynolds の行った湾曲風洞流路流れを対象とし、レーザ・ドップラー流速計を用いてその流れを計測した。その計測結果、および、すでに報告した計算結果、Tucker-Reynolds の実験結果とを比較することにより次の結論を得た。

(1) 主流方向速度の断面中心部における速度分布において、本実験結果は、湾曲風洞部で計算値に近い値となった。このことは、この領域で Tucker らは、湾曲風洞寸法を、大きく設計したことを示唆しているものと考えられる。

(2) 各垂直応力分布の減衰挙動において、本実験結果は全体的に計算値に近い値を示す結果となった。本実験結果では、 $\overline{u_1^2}$, $\overline{u_2^2}$ 分布において Tucker の実験

結果より顕著に、垂直応力値の増加現象が認められることが特徴的である。

(3) 非等方性パラメータを示す K_1 の各結果比較より、計算値は湾曲風洞流路内減衰挙動において、実験結果と異なり、レイノルズ応力方程式の対流項、拡散項、エネルギー散逸方程式などについて改良が必要である。

(4) 三次元乱流として計算した結果によると、湾曲風洞出口近傍のコーナ部において、わずかばかりのはく離領域を予測したが、本実験結果においても、このはく離領域は確認された。

(5) 計算結果によると、二次流れは、湾曲風洞部手前の入口直管部より、すでに発生することを予測したが、本実験結果でも、計算と同程度の二次流れを確認することができた。また、主流方向速度の逆流発生と呼応するように、二次流れは、循環流を形成し、出口直管部にて大きな循環流を形成するが、この循環流も本実験にて確認することができた。

文 献

- (1) Townsend, A. A., *Q. J. Mech. Appl. Math.*, **7**(1945), 104-127.
- (2) Tucker, H. J. and Reynolds, A. J., *J. Fluid Mech.*, **32**(1968), 657-673.
- (3) Yoshida, H., Furuya, T. and Echigo, R., *Turbulent Shear Flows*, **6**(1989), 269, Springer-Verlag.
- (4) Launder, B. E., Reece, G. J. and Rodi, W., *J. Fluid Mech.*, **68**(1975), 537-566.
- (5) Fu, S., Launder, B. E. and Tselepidakis, D. P., *Dep. Mech. Eng.*, UMIST, TFD/87/5(1987).
- (6) 杉山・秋山・平田・上野, 機論, **57-539**, B(1991-7), 2269-2276.
- (7) Rodi, W., *Z. Angew. Math. Mech.*, **56**(1976), 219-221.
- (8) 杉山・秋山・芹沢, 機論, **56-531**, B(1990), 3328-3335.
- (9) Thames, F. C., Thompson, J. F., Mastin, C. W. and Walker, R. L., *J. Comput. Phys.*, **24**, 245-273.
- (10) Tucker, H. J., *McGill Univ. Mech. Eng. Res. Labs.*, Tech. Note 66-4(1966).
- (11) 日本機械学会誌, 計測の不確かさ, (1987), 17-27, 丸善.
- (12) 大路訳, 乱流, (1975), 62, 岩波書店.