

管および環状流路内の乱流構造(I)

—— 乱れおよびレイノルズ応力 ——

宮下 尚, 柴田 良弘, 西村 龍夫

1. 緒 言

輸送現象論は流体力学の一部を形成している運動量移動を含むエネルギー(熱), 運動量, 物質移動に関する一貫した理論体系であり, ある物理量の移動 transfer と, これに関する速度 rate を考察する現象論である。

本研究は, 輸送現象論の中の運動量移動を中心として, 流体の力学を考慮するという観点に立ち, 化学工学的アプローチを試みる。流路としては, 内部流れを考える上でシェルアンドチューブ, 或は二重管型熱交換器の環状部を想定したモデルを用いる。非円形流路の代表的な例の一つである二重管環状流路内での伝熱の媒体となっている流体の挙動, 乱流の構造を, 単一円管流路内でのそれと比較し考察を加えながら解明を試みようとする実験的研究である。

環状部の流れを解明する上で同心二重管に対しては, 層流域, 乱流域それぞれに関して速度分布など流れの解析や実験が行われ, 統一的な結論が得られている。

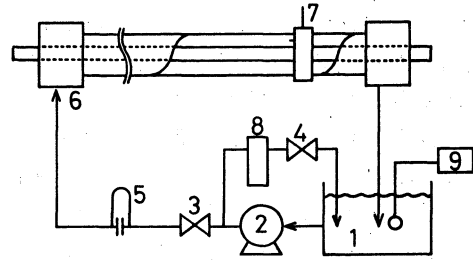
偏心二重管環状部内の熱伝達特性を研究する上で重要な役割を果たすのは, 周方向の局所熱伝達率の分布であるという認識のもとに, 伝熱と物質移動のアナロジーにより中村¹⁾は, 電気化学的方法により環状部内管壁面の平均及び局所の物質移動係数, 剪断応力, 乱れ強度, また, 外管壁面の物質移動係数, 剪断応力を測定し, 偏心二重管環状部における輸送現象の解明を試みた。また荻下³⁾は, 中村の環状部両壁面での輸送現象についての研究の延長として, 環状部内流れに着目し乱流輸送現象を解明するために速度分布, 乱流強度分布, レイノルズ応力分布の測定を行った。しかし, 荻下の測定結果には内管の偏心していない場合, つまり, 同心二重管環状部内流れについての研究は行われていない。偏心二重管環状部内流れは, 主流方向, 半径方向, 円周方向にそれぞれ速度変動を有するため三次元流れであるが, 同心二重管環状流路の場合には, 流れは二次元流れとして考えられ, また流体摩擦を用いて結果を整理することが可能である。

そこで, 本研究は, 非円形流路の代表例として同心二重管環状流路について, 乱流構造の解明を試みる。測定は全て単一円管流路, 同心二重管環状流路について行われ, 二種のレイノルズ数と二種の流路において比較されている。また, 同心二重管環状流路で得られた結果については, 偏心二重管環状流路最広部における実験結果と比較され, 内管の偏心が内部流れに及ぼす影響を観察する。なお, 本研究は, 全て熱線流速計使用による流動実験によってなされ, 結果が整理されている。

2. 装置および実験方法

2.1 装 置

実験装置の概略図を図1に示す。恒温槽①で30℃に保たれた純水は、ポンプ②によって、オリフィス流量計⑤を経てミキシングボックス⑥に送られ、テストセクション⑦を通った後、再び恒温槽①に戻り循環使用される。流量は、バルブ③及びバイパスバルブ④で調整され、オリフィス流量計⑤により測定される。測定センサーであるプローブの熱線素子は、水中の微粒子などの衝撃に対して弱いため、バイパス流路に10μmのフィルターをもったストレーナー⑧が設けられている。流路の全長は4.7mであり、二重管環状流路としての外管には内径50mmのアクリル樹脂製パイプを用い、内管には外径21.8mmのパイプを使用する。単一円管流路の場合には、内管を抜き取りアクリル樹脂製パイプのみの流路で測定を行った。テストセクションは流路入口から3.9mの位置にあり、この距離は単一円管の直径の約80倍、そして環状流路の相当直径の約130倍の助走距離であり、完全発達乱流が得られる長さとなっている。テストセクションにはプローブが流れに対して並行に取り付けられており、流路内の任意の位置へトラバースできるように設計されている。熱線流速計システム(KANOMAX社・CTA System MODEL 7223)は、X型2センサープローブからの信号が二組の熱線流速計に入り、各種演算ユニットの組み合わせにより、流速を始め、乱流強度、レイノルズ応力、相関係数などの、各種の測定ができる。熱線流速計は相関係測システムであるため、あらかじめ流速の決まった検定装置内で検定されて、使用される。



- | | |
|-----------------|--------------------------|
| 1 reservoir | 6 mixing box |
| 2 pump | 7 test-section |
| 3 flow valve | 8 strainer |
| 4 by-pass valve | 9 temperature controller |
| 5 manometer | |

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

2.2 実験方法

実験は、単一円管流路、及び管径比2.29の同心二重管環状流路について、 $Re = 1.6 \times 10^4$ と 3.0×10^4 の条件で行った。また偏心二重管環状流路では、 $E_q(1)$ の定義によって定まる偏心率 $e = 0.25, 0.50, 0.75, 0.99$ の4種について行った。

$$e = 2S / (D_o - D_i) \quad (1)$$

3. 実験結果

3.1 速度分布

本研究の基礎的実験として、各流路内の速度分布を測定した。

単一円管流路での速度分布を図2に示す。参考のために、図に von Karman, Prandtl-Nikuradse の対数速度式を示してある。分布は $y^+ > 30$ の完全乱流

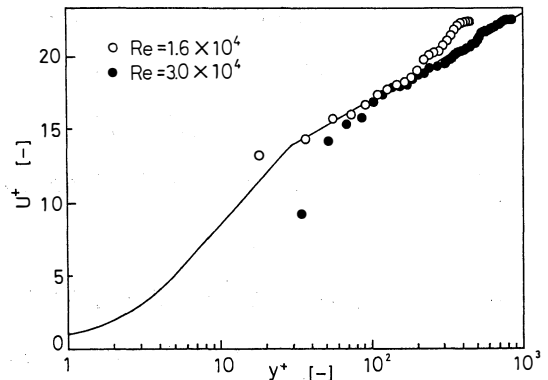


Fig.2 Universal velocity profile in circular tube.

域では、対数速度式とはほぼ一致しているが、 $u^+ > 20$ では対数速度式から外れており、この領域は外層領域に当たるものと思われる。 $y^+ < 30$ の範囲では、対数速度式よりも小さな値となっている。この範囲は本実験装置で、管壁より 1 mm 程度の範囲であり、このことは、現象ではなく、測定位置が壁極近傍であるために、プローブ自体が流れに対して攪乱を起こし、流体中に抵抗を設置したのと同様な効果が現れ、流速が低下したものである。

同心二重管環状流路内の速度分布を図 3 に示す。分布形状にはほとんどレイノルズ数による違いは現れておらず、十分な発達乱流となっていることが予想される。最大流速位置は、流路中間点(外管内壁面と内管外壁面への距離が等しい地点)よりも、やや内管側へ偏った位置であることがわかる。この位置は、レイノルズ数には依存せず横軸が $y_0/R_{EQ} = 0.575$ の位置に存在している。

そこで、同心二重管環状部内流れの速度分布を von Karman, Prandtl-Mikuradse の対数速度式と比較することを試みる。同心二重管環状流路の場合には、流れに対する両壁面からの影響は複雑なものとなっているので、壁面剪断応力、及び摩擦速度は、単一円管流路の場合と異なった算出方法となる。 $u^+ [-]$, $y^+ [-]$ を求めるに当たって、壁面剪断応力 τ_w を導出する必要がある。以下に同心二重管環状流路の外管壁面、及び内管壁面の剪断応力 τ_{w0} , τ_{wi} の導出方法を示す。

今、単一円管流路において管壁面が十分に滑らかで、Eq.(2)の Karman の 1/7 乗速度分布則が成立しているものと仮定する。

$$u^+ = 8.74 (y^+)^{1/7} \quad (2)$$

Eq.(2)は摩擦速度を用いて表現すると、

$$(u/u^*) = 8.74 (y \cdot u^*/\nu)^{1/7} \quad (3)$$

となる。Eq.(3)を変形すると

$$u^{*8/7} = u \cdot (\nu/y)^{1/7} \cdot (1/8.74)$$

これは次式とも表わされる。

$$u^{*2} = u^{7/4} \cdot (\nu/y)^{1/4} \cdot (1/8.74)^{7/4} \quad (4)$$

ここで、 $u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ と表されることを考慮すると u^{*2} は、

$$u^{*2} = \tau_w/\rho \quad (5)$$

と表される。Eq.(4)と Eq.(5)より次式が成立する。

$$u^{7/4} \cdot (\nu/y)^{1/4} \cdot (1/8.74)^{7/4} = \tau_w/\rho \quad (6)$$

Eq.(6)を τ_w について変形すると、

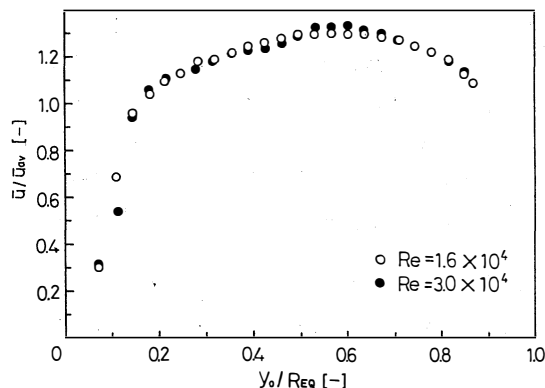


Fig.3 Velocity profile in coaxial double tube.

$$\tau = 0.025 \cdot \rho \cdot \nu^{1/4} \cdot (1/8.74)^{7/4} \quad (7)$$

よって壁面剪断応力は Eq.(7) で表現することができる。

Eq.(7) を同心二重管環状流路に適用するに当たって、最大流速位置を境として外管側と内管側の流体を独立したものと考える。すると、外管壁面の剪断応力 τ_{wo} は、

$$\tau_{wo} = 0.025 \cdot \rho \cdot \nu^{1/4} \cdot y_o^{-1/4} \cdot u^{7/4} \quad (7)$$

と表される。ここで、 y_o は外管壁面からの距離である。よって、最大流速位置より外管側の任意の位置 y_o における時間平均流速を代入すると、外管壁面剪断応力を求めることができる。内管壁面剪断応力 τ_{wi} も同様に、

$$\tau_{wi} = 0.025 \cdot \rho \cdot \nu^{1/4} \cdot y_i^{-1/4} \cdot u^{7/4} \quad (9)$$

と表される。ここで、 y_i は内管壁面からの距離である。

Eq.(8), Eq.(9) より求めた同心二重管環状流路外管内壁面、内管外壁面の剪断応力、及び摩擦速度を Table 1 に示す。

Table 1

	Re = 1.6×10^4 [—]		Re = 3.0×10^4 [—]	
	Outer tube	Inner tube	Outer tube	Inner tube
τ_w [Pa]	0.8910	0.9852	2.6672	3.0431
$u^* \times 10^{-2}$ [m/s]	2.9909	3.1451	5.1748	5.5275

これらの値より両レイノルズ数とも、外管内壁面よりも内管外壁面の方が壁面剪断応力は大きな値であり、摩擦速度 u^* に関しても最大流速位置よりも内管側の流体の摩擦速度の方が大きな値となっていることがわかる。

そこで、同心二重管環状流路内の速度分布を最大流速をとる位置で外管側と内管側に分けた二つの速度分布を、縦軸に無次元速度 u^+ [—]、横軸に無次元距離 y^+ [—] で表現した図をそれぞれ図 4、

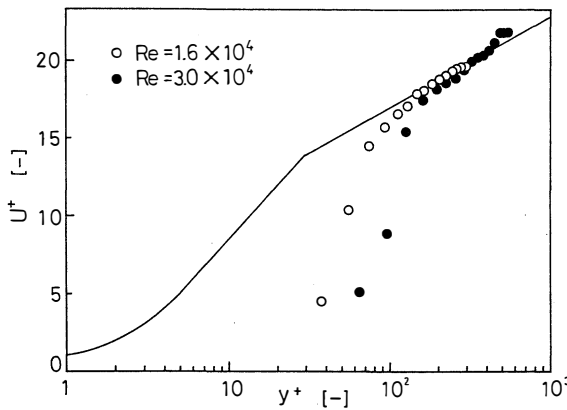


Fig.4 Universal velocity profile in the region of outside for coaxial double tube.

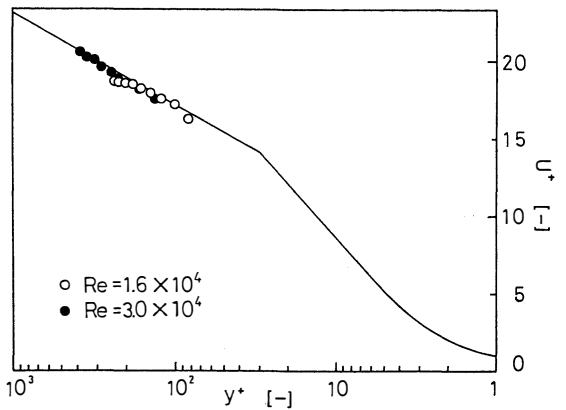


Fig.5 Universal velocity profile in the region of inside for coaxial double tube.

図5に示す。なお内管側の図4については、図の右端を壁面として表現した。参考のために von Karman, Prandtl-Nikuradse の対数速度式を示しておく。両図より、 $y^+ < 150$ の範囲では、両レイノルズ数とも対数速度式よりも小さな値となっている。この範囲は本実験装置では管壁極近傍であり、測定上不正確である。これは、現象ではなく測定位置が壁極近傍であるために、今回使用したX型プローブ自体が、流れに対して攪乱を起し流体中に抵抗を設置した状態と同様な効果が現れ、流速が減少したものである。プローブの攪乱による影響を受けない領域の分布については、対数速度式とはほぼ一致しているものと見なすことができる。よって、同心二重管環状部内流れについて行った外管内壁、内管外壁の両壁面剪断応力 τ_w 、及び外管側、内管側での摩擦速度 u^* の導出方法と、求めた値については信頼性があるものと思われる。

次に、内管の偏心した場合、つまり偏心二重管環状流路における速度分布と比較をしてみる。偏心二重管環状流路内の速度分布は、半径方向に速度勾配を有することは、これまでの同心二重管環状流路内の結果からも容易に予想はつくが、内管が偏心した場合には、環状流路の円周方向の各位置では、外管と内管の距離が異なるため、流路の幅が違い、流路幅が最も狭い部分では流れが遷移化し層流となる場合が起こり得る。この現象から、環状流路の最広部と最狭部では明らかに速度差があり、円周方向についても十分に速度勾配を有することが予想される。

半径方向と円周方向に速度勾配をもつ流れは三次元流れとなり、これらを同時に測定することは、実験装置、測定方法において多くの問題を引き起こすために複雑なものとなる。そこで、同心二重管環状流路における速度分布を、偏心二重管環状流路における速度分布と比較するために、円周方向に流れを有しないと考えられる、偏心二重管環状流路最広部での速度分布との比較を試みる。

$Re = 1.6 \times 10^4$ での、同心の場合と、偏心率 $e = 0.25, 0.50, 0.75, 0.99$ の場合の流路最広部における分布を図6に示す。ここで Re_Q は水力相当径 D_{EQ} の1/2の大きさの値であり、同心二重管の場合の環状流路幅である。また S は偏心率によって定まる内、外管中心間距離である。この表現でも、横軸のゼロは外管壁面を表し、横軸の1.0は内管壁面を表している。分布形状には偏心率により差異が見られる。特に、偏心率 $e = 0.99$ の高偏心率の場合には、分布は他の偏心率のものとは全く異なった形状となっている。まず、最大流速位置に着目してみる。同心二重管(偏心率 $e = 0.00$)の場合には、最大流速位置は横軸0.575と、流路中間点よりも内管側に偏った位置であるのに対して、その位置は偏心率の増大に伴い外管側へ移動しており、偏心率 $e = 0.99$ になると最大流速位置は横軸が0.45の位置となり、流路中間点よりも外管側の位置となっている。次に、最大流速の大きさに着目すると、これも先と同様に偏心率による影響がよく現れている。偏心率 $e = 0.00, 0.25, 0.50, 0.75$ の場合

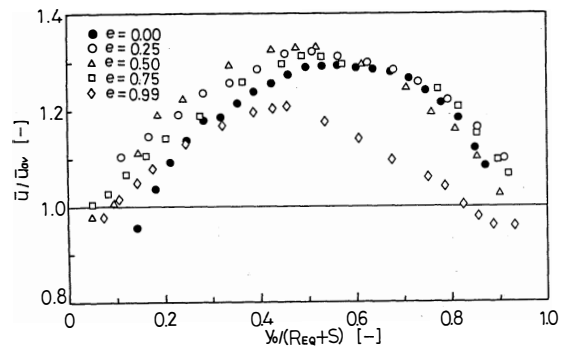


Fig.6 Velocity profile in eccentric annulus.

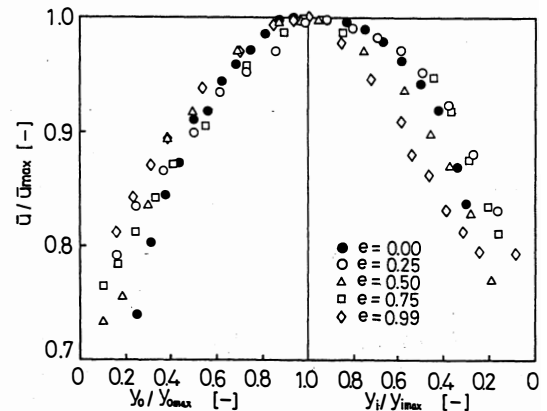


Fig.7 Velocity profile in the region of outside and inside for eccentric annulus.

には、最大流速は断面平均流速の約1.3倍付近の値であるのに対し、偏心率 $e = 0.99$ の場合には、その値は約1.2倍程度となり小さな値となっている。これは、偏心率 $e = 0.99$ であるため流路最広部の幅が広いことを考慮すると、十分に予測されることである。しかし、他の偏心率と比較した場合の分布形状の極端な変形は、偏心率 $e = 0.99$ の場合の環状流路全域に渡って、他の偏心率の場合とは異なった乱流構造となっているものと予測される。

次に、図6の結果を各偏心率における最大流速位置を基準に二分し、外管側と内管側との速度分布形状の比較を行う。縦軸を各偏心率における最大流速で無次元化した $u/u_{\max}[-]$ とし、横軸を外管側については $y_o/y_{\max}[-]$ と表し、内管側については $y_i/y_{\max}[-]$ と表した図を図7に示す。図の左端は外管内壁を表し、右端は内管外壁を表し、横軸の1.0は最大流速位置を表している。最大流速位置から外管側での分布は偏心率には依存しておらず、ほぼ一本の曲線に近似されることがわかる。そこで、外管側での分布の値は最小二乗法を用いて相関式を求めると、

$$u/u_{\max} = 1 - 0.33(1 - y_o/y_{\max})^2 \quad (10)$$

となる。参考までに、荻野ら²⁾が求めた相関式では係数が0.36となっていることから、この違いは実験条件(使用流体、管径比 etc.)によって変わってくるものと思われるが、結果的にはよく似た二次曲線の相関式が得られたものと考えられる。

しかし、内管側での分布は偏心率の違いによる分布の差がはっきりと表れており、一本の曲線に近似することは不可能であることがわかる。よって荻野らが表した、偏心二重管環状流路最広部においては、外管側の分布と内管側の分布は同じ形状を示すという報告には無理があるように思われ、このことは同心二重管環状流路の場合についてだけ成立するのではないと思われる。

3.2 乱流強度分布

単一円管流路内の乱流強度分布を主流方向については図8(a)に、半径方向については図8(b)に示す。二方向の速度変動成分の実効値を時間平均流速 u で無次元化した量、 $100\sqrt{u'^2}/u$ [%], $100\sqrt{v'^2}/u$ [%] で表す。乱流強度は流路中心軸上では最小値をとり、壁面に近づくにつれて値は増大する。また、主流方向の乱流強度の値は流路内の全ての位置で、半径方向についての値よりも大きくなっている。流路中心軸では、主流方向の乱流強度は両レイノルズ数とも約4%，半径方向については両レイノルズ数とも約3%の値をとっている。なお、乱流強度は壁面の極近傍では、ゼロの値をとることは予想されるが、プローブの厚みのために測定を行うことが不可能であるために、結果は得られていない。壁

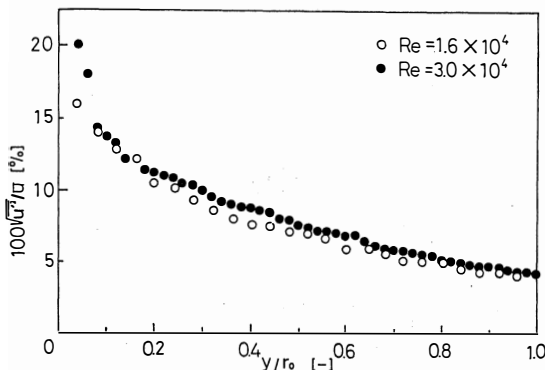


Fig.8(a) Turbulent intensity profile in circular tube (Z-direction).

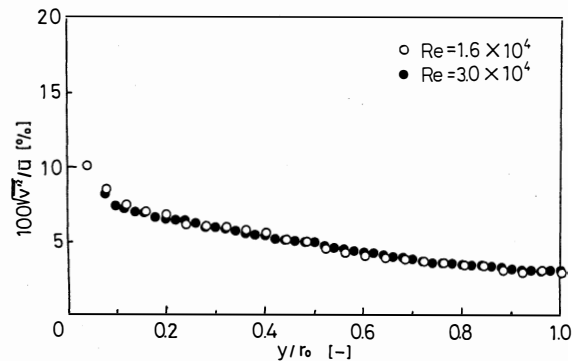


Fig.8(b) Turbulent intensity profile in circular tube (r-direction).

近傍においては、一般に約8%程度の値をとるものとされているが、本実験では半径方向についての値は、 $Re = 1.6 \times 10^4$ では約10%、 $Re = 3.0 \times 10^4$ では約8%と似た値を表しているものの、主流方向についての値は $Re = 1.6 \times 10^4$ で約16%、 $Re = 3.0 \times 10^4$ で約20%とかなり大きな値が表れている。これは、先の章でも述べたように測定に用いたX型プローブ自体が流体中の抵抗となり、流速を低下させたために乱流強度の値が大きくなったものである。主流方向について $Re = 3.0 \times 10^4$ の場合には、 $Re = 1.6 \times 10^4$ の場合に比べて、 $y/r_o > 0.2$ の範囲でわずかながら高い値を示しているが、全体的に両図を比較すると、分布形状、及び値はレイノルズ数には依存していないように思われる。

速度変動成分の実効値を摩擦速度 u^* で無次元化した量 $\sqrt{u'^2}/u^*[-]$ 、 $\sqrt{v'^2}/u^*[-]$ を、先の乱流強度の表現方法と区別するために、ここでは『無次元乱れ強さ』とする。

図8(a)、(b)の縦軸を、無次元乱れ強さの表現に改めると、図9(a)、(b)になる。図9(a)では、主流方向の速度変動成分の実効値の分布は、多少ばらつきの見られる部分もあるが、 $y/r_o > 0.5$ の範囲ではよくまとまっており、管壁から管中心に向かって、ほぼ直線的に減少していることがわかる。その値は管壁近傍では摩擦速度の約2倍となっている。また管中心では摩擦速度とほぼ等しい値となっている。また図9(b)より、半径方向の速度変動成分の実効値の分布は、レイノルズ数の違いにより多少差異が見られるが、壁近傍では、摩擦速度の約1.1倍の値を取り、管中心へ向かうにつれ徐々に減少し、管中心では約0.6倍の値となる。全体的に観察すると、主流方向の値は、半径方向の約2倍程度の値

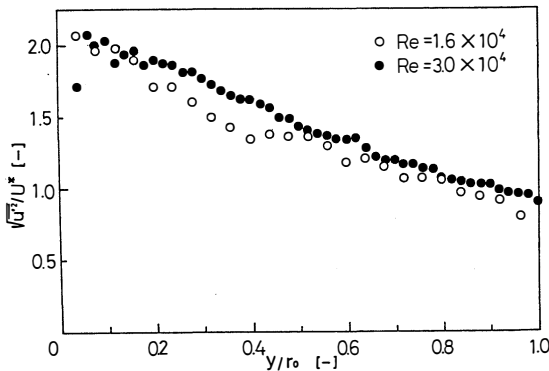


Fig.9(a) Dimensionless turbulent intensity profile in circular tube (Z-direction).

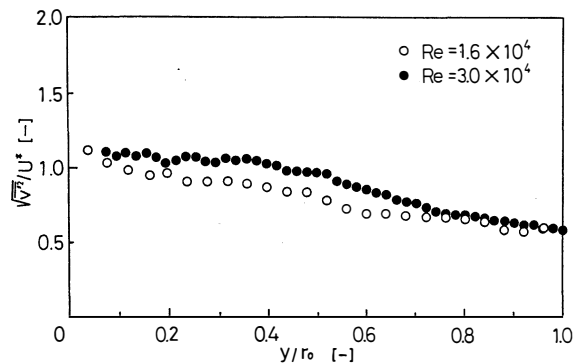


Fig.9(b) Dimensionless turbulent intensity profile in circular tube (r-direction).

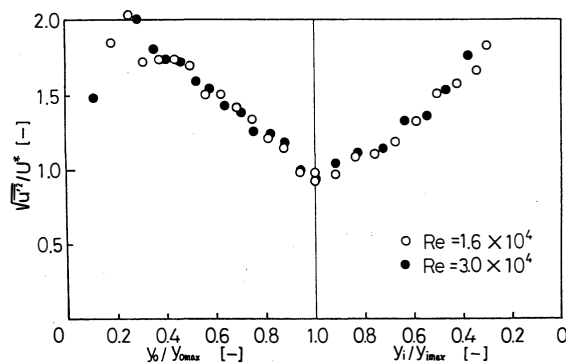


Fig.10(a) Dimensionless turbulent intensity profile in the region of outside and inside for coaxial double tube (Z-direction).

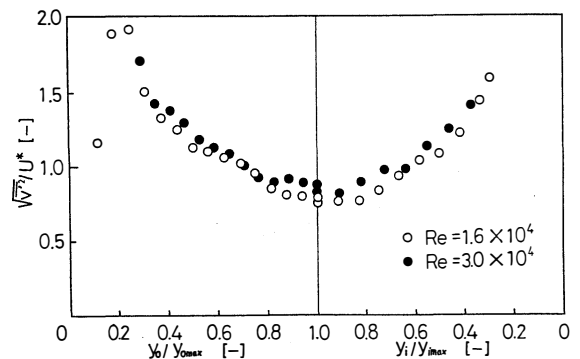


Fig.10(b) Dimensionless turbulent intensity profile in the region of outside and inside for coaxial double tube (r-direction).

をとり、その傾向は流路の全ての位置について言えることである。

同心二重管環状流路内の乱流強度分布を主流方向については図10(a)に、半径方向については図10(b)にそれぞれ示す。分布は両管壁面付近で極大値、環状流路中間点付近で最小値をとる。分布もレイノルズ数による違いは見られず、ほぼ同じ形状である。流路中間点付近の最小値の値は、主流方向の値は約5%，半径方向の値は約4%となっている。最小乱流強度位置は、 $y_o/R_{EQ} = 0.575$ の位置であり、この位置は両レイノルズ数に関して言え、また主流方向、及び半径方向についても言うことができる。この位置は最大流速位置と一致していることから、同心二重管環状流路内流れでは、最大流速位置と最小乱流強度位置は、レイノルズ数には依存せず、同一位置に存在することがわかる。

次に乱流強度を、摩擦速度 u^* で基準化した無次元乱れ強さで表す。最小乱流強度位置で二分し、外管側を $y_o/y_{o\max} [-]$ で表し、内管側を $y_i/y_{i\max} [-]$ で表す。主流方向、及び半径方向の無次元乱れ強さの値は、両管壁付近から最小乱流強度位置へ向かって単調な減少をし、外管側と内管側の値は、変化の勾配もほぼ対称である。主流方向の無次元乱れ強さは、最小値をとる位置で約1.0，半径方向の最小値は約0.75となっている。環状流路内各位置での主流方向の値は、半径方向の値の約1.3倍程度の値をとることがわかる。

偏心二重管環状流路における最広部での乱流強度分布を、主流方向については図11(a)に、半径方向については図11(b)にそれぞれ示す。主流方向、半径方向とも、偏心率の違いによって分布形状に差異が見られる。最小乱流強度位置は、主流方向、半径方向とも偏心率によって異なっている。偏心率 $e = 0.00$ (同心二重管) の場合には、その位置は横軸0.575の位置であるのに対して、内管が偏心すると最小乱流強度位置は最大流速位置と同様に、外管側へ向かって移動する。先の節で、最大流速位置は、同心の場合の横軸0.575の位置から、偏心率の増大に伴い外管側へ向かって移動し、偏心率 $e = 0.99$ では横軸0.45の位置となる結果を得ているが、各偏心率における最小乱流強度位置は、最大流速位置とは必ずしも同一地点とはならないことがわかる。主流方向と半径方向についての各偏心率における最小乱流強度位置を比較すると、低偏心率 ($e = 0.00, 0.25, 0.50$) では、ほぼ一致しているが、高偏心率の場合、特に偏心率 $e = 0.99$ では、その位置は大きく異なっている。半径方向の最小乱流強度位置は横軸0.425の位置である。よって、この偏心率の場合に主流方向と半径方向の速度変動にはアンバランスが生じており、乱れ挙動が他の偏心率とは異なっていることが予想される。このことから、内管の偏心による二重管環状部流れに及ぼす影響が観察される。

全体的に観察すると乱流強度の値は、両壁面近傍で最大値を表すが、各偏心率におけるその値は内管壁での値よりも、外管壁での値の方が大きな値を表している。このことは、主流方向と半径方向に

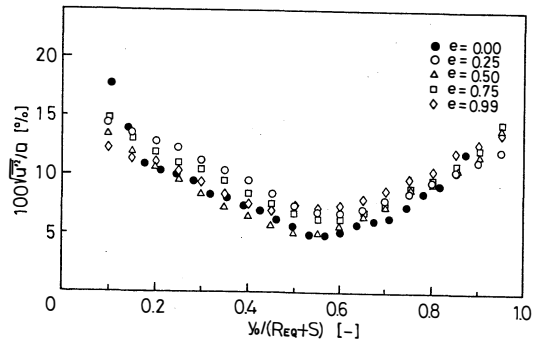


Fig.11(a) Turbulent intensity profile in eccentric annulus (Z-direction).

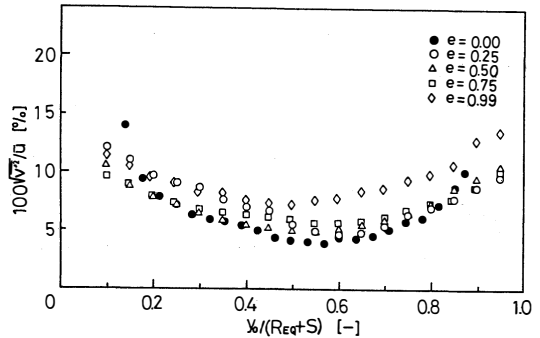


Fig.11(b) Turbulent intensity profile in eccentric annulus (r-direction).

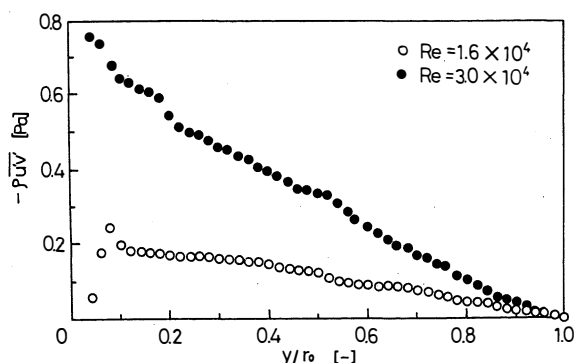


Fig.12 Reynolds stress profile in circular tube.

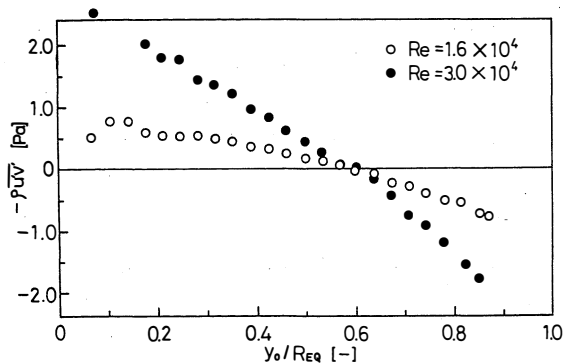


Fig.13 Reynolds stress profile in coaxial double tube.

ついて比較しても、また、各偏心率について比較しても言えることである。しかし、偏心率 $e = 0.99$ の場合の分布だけは、特殊な形状をしている。つまり、主流方向、半径方向とも外管壁での極大値と比べ、内管壁での極大値の方が大きな値となっている。特に、半径方向についてのこのことは顕著に表れている。これは、外管側の極大値が他の偏心率の場合に比べ小さくなったと見るよりも、内管側の極大値が他の偏心率の場合に比べ大きくなっているものと見るべきである。偏心率 $e = 0.99$ は高偏心率であるため、流路最広部は他の偏心率よりもかなり広がっており、内管壁近傍ではその幾何学的流路の複雑さから、乱れの増大が特に著しくなったものと思われる。よって、偏心率の影響は高偏心率においての内管側で著しく観察されるものと思われる。

3.3 レイノルズ応力分布

単一円管流路内のレイノルズ応力分布を図12に示す。レイノルズ応力は、管中心ではゼロの値をとり、管壁へ向かうにつれて直線的に増加している。 $Re = 3.0 \times 10^4$ の値は、 1.6×10^4 の値より大きく、約3倍の値となっている。

同心二重管環状流路でのレイノルズ応力分布を図13に示す。レイノルズ応力は、外管側では正の値をとり、内管側では負の値をとる。これは、速度変動成分の方向についての、基準のとり方によるものであり、本実験では、主流方向の速度変動成分 u' については、主流方向と同じ方向を正とし、また半径方向の速度変動成分 v' については、単一円管流路の場合は、管壁から管中心へ向かう方向を

Table 2
circular tube

τ_w [Pa]	$Re = 1.6 \times 10^4$ [-]	$Re = 3.0 \times 10^4$ [-]
experimental	0.22	0.70
calculation	0.231	0.695

coaxial double tube

τ_w [Pa]	$Re = 1.6 \times 10^4$ [-]		$Re = 3.0 \times 10^4$ [-]	
	Outer tube	Inner tube	Outer tube	Inner tube
experimental	0.9	1.0	2.64	3.0
calculation	0.8910	0.9852	2.6672	3.0431

正とし、二重管環状流路の場合は、外管壁から内管壁へ向かう方向を正の方向と定めている。

レイノルズ応力がゼロとなる位置は、環状流路中間点より内管側に存在し、レイノルズ数には依存せずに、最大流速位置と一致している。

レイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ となる位置から、壁面へ向けて直線的に増加するものと考え、壁面剪断応力 τ_w を推定してみる。分布図から壁面剪断応力を推定した値と、また速度分布の節で算出した、壁面剪断応力 τ_w を Table 2 に示す。計算値は、実験結果からの推定値とほぼ一致している。よって、レイノルズ応力分布から壁面剪断応力を推定することは可能であると思われる。

偏心二重管環状流路最広部でのレイノルズ応力分布を図14に示す。偏心率の増大に伴い、レイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ となる位置は徐々に外管側へ移動する。偏心率0.99の場合には急激に外管側へ移動し、その位置は横軸が0.45の位置となる。各偏心率における最大流速位置と、レイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ の位置は、必ずしも同一地点とはならないことがわかる。レイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ の位置は、内管が偏心した場合には、最大流速位置よりも内管側に存在している。一般には、最大流速位置でレイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ になるものと考えられるが、この結果から偏心二重管の場合、内管の偏心による影響を受け、分布には変形が生じ、レイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ の位置が、最大流速位置よりも内管側に偏っているものと考えられる。

レイノルズ応力は、乱流中の速度変動成分によって生じ、流体中の速度の異なる二層間に作用する単位面積当りの運動量移動速度である。このことから、運動量移動を生み出す速度変動成分と、流れの速度勾配との間には、何らかの関連性があると考えるのは妥当である。任意の位置における速度変動成分と、速度勾配との関連性を表現する方法として、この Eq.(11) で表される Prandtl の混合距離 ℓ と、Eq.(12) で表される ブシネの渦動粘性係数 ϵ を採用し、本実験結果より算出した。

$$-\rho u'v' = \rho \cdot \ell^2 \cdot du/dy \cdot |du/dy| \quad (11)$$

$$-\rho u'v'/\rho = \epsilon \cdot du/dy \quad (12)$$

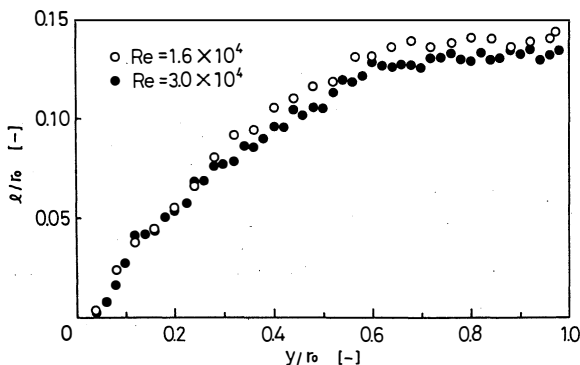


Fig.15 Mixing length in circular tube.

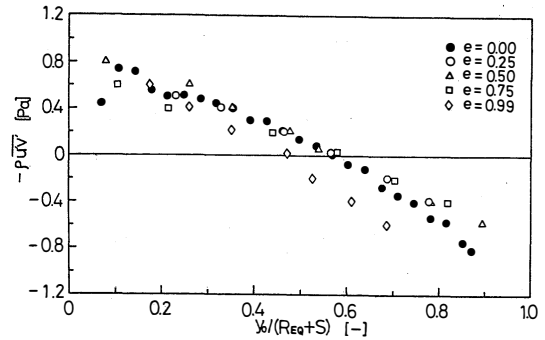


Fig.14 Reynolds stress profile in eccentric annulus.

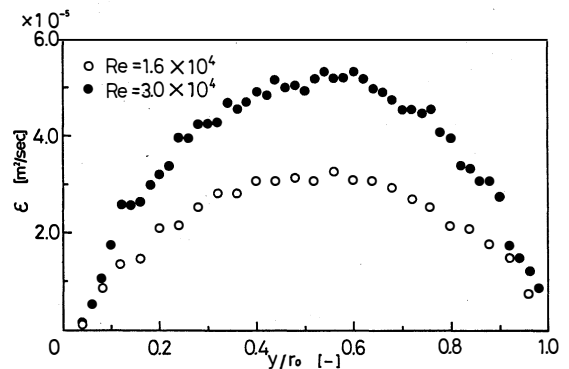


Fig.16 Eddy diffusivity in circular tube.

これらの二つの理論を参考にして Prandtl の混合距離 l 、及び Boussinesq によって表された渦動粘性係数 (乱流拡散係数) ϵ を、本実験で得られた、速度分布の結果から図微分によって求めた各位置での速度勾配と、レイノルズ応力の結果より、単一円管流路内での値を算出し、またレイノルズ数の違いによる影響を調べる。

まず、単一円管流路内流れでの Prandtl の混合距離 l の算出結果を図15に示す。

図から明かなように、分布は壁面ではゼロの値を取り、管中心へ向かうにつれて値は増大する。 $y/r_0 < 0.25$ の範囲ではレイノルズ数には依存しておらず同じ値となっている。しかし、 $y/r_0 > 0.6$ の管中心に至っては、値の増加はほとんどなく一定値を取り、流体中の回転する渦粒子の寸法は、ほぼ同じスケールであることがわかる。一定値の大きさは、 $Re = 1.6 \times 10^4$ では $l/r_0 = 0.144$ 、また $Re = 3.0 \times 10^4$ では $l/r_0 = 0.134$ の値をとることから、レイノルズ数が小さい方が l の値は大きくなり、渦の平均的回転スケールが多少大きいということが言える。

次に、Boussinesq の渦動粘性係数 ϵ の算出結果を図16に示す。図より渦動粘性係数分布は壁面と管中心でゼロの値を取り、壁面と管中心との中間点で最大値をとる値となっている。その値は、レイノルズ数が大きいほど大きな値となっている。壁面でゼロの値をとるのは、Eq.(12)からも理解されるようにレイノルズ応力がゼロであるためであり、管中心では速度勾配がゼロとなるため Eq.(12)は不定形となり成立しなくなる。

同心二重管環状流路での混合距離 l の算出結果を図17に示す。 l は、両壁面から流路中間点へ向かって増加し続けている。単一円管での混合距離は管中心で一定値をとることから、この増加は二重管環状流路特有の傾向であると思われ、単一円管のような広いコアをもつ流路と比較し、環状部のクリアランスが狭くなるため、単一円管流路のように大きな渦が得られず、自ずから異なった渦スケールが生じているものと思われる。

ϵ の算出結果を図18に示す。流路全域にわたりレイノルズ数の高い方が、 ϵ は大きな値となっているが、レイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ 、即ち横軸0.575での、 ϵ の値はゼロとなることを考えると、流路中間

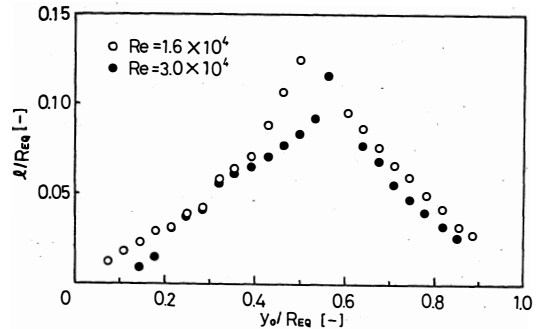


Fig.17 Mixing length in coaxial double tube.

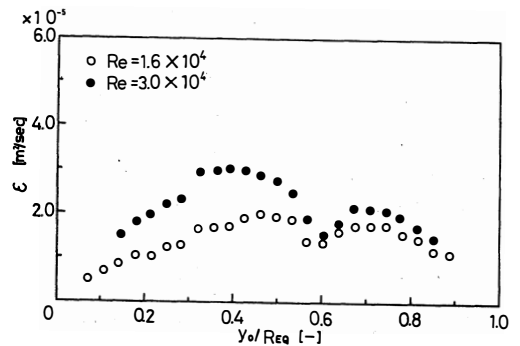


Fig.18 Eddy diffusivity in coaxial tube.

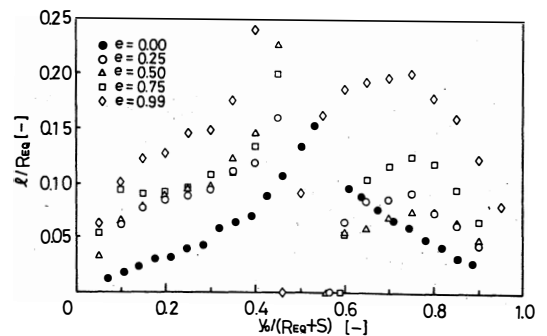


Fig.19 Mixing length in eccentric annulus.

点では急激に減少するものと思われる。この急激な減少も、環状流路特有の傾向と思われる。 ϵ の値の極大値については、内管側での極大値よりも、外管側での極大値の方が大きな値であることがわかる。

偏心二重管環状流路最広部での、混合距離 ℓ の算出結果を図19に示す。偏心率の違いによってかなりの変化が見られる。これは、内管が偏心した場合には、最大流速位置とレイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ の位置が、異なっていることに起因している。最大流速位置で Eq.(11) は不定形となるために、最大流速位置より外管側については増加し続ける。最大流速位置より内管側については、途中で極大値をもつ二次曲線の形となっている。しかし、レイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ の位置で、 ℓ はゼロとなることを考慮すると、最大流速位置とレイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ の位置の間では、 ℓ は負の値(虚数)をとることになる。このような値は、Eq.(11)の数学的モデルを、

偏心二重管流れへ応用したことについての問題点が現れた結果である。混合距離 ℓ/R_{EQ} は高偏心率になるにつれて大きな値となるが、これは、偏心率の増大に伴い流路幅が広がるために、同心二重管環状流路の場合の流路幅である、 R_{EQ} の一定値で無次元化した ℓ/R_{EQ} の値が大きくなったものである。同心二重管環状流路の場合の ℓ と比較すると、偏心率0.99の場合の ℓ は他の偏心率に比べかなり大きな値となっている。このことは内管側についてよく現れており、この領域での平均的渦スケールがかなり大きいことがわかる。

ϵ の算出結果を図20に示す。外管側での極大値は、内管側での極大値に比べ、大きな値をとるという傾向は同心二重管の場合と同じであるが、偏心率0.99の場合だけは、このことは該当せずに、内管側では、偏心率 $e = 0.75$ の場合の2倍以上の値と、かなり大きな値となり、やはりこの領域では他の偏心率とは異なった乱流構造となっていることがうかがえる。

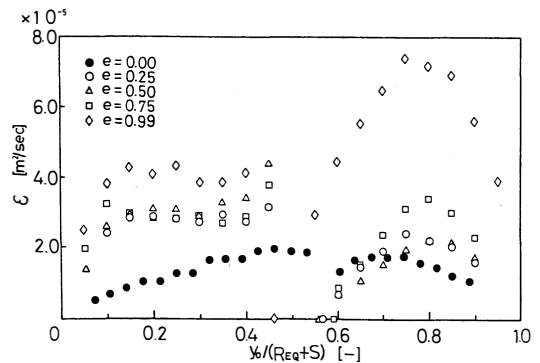


Fig.20 Eddy diffusivity in eccentric annulus.

4. 結 論

単一円管流路、同心二重管環状流路、偏心二重管環状流路最広部における乱流強度分布の測定から以下の結果を得た。

- 1) 単一円管流路の壁近傍での主流方向の速度変動成分の実効値の大きさは、摩擦速度の約2倍程度である。
- 2) 同心二重管環状流路での乱流強度の分布は、最小乱流強度位置を境とした場合、外管側と内管側の分布形状は、ほぼ対称で同じ形状に分布している。
- 3) 単一円管流路での速度変動の実効値は、管中心から壁近傍までの広範囲の領域において、主流方向の値は半径方向の値と比べ約2倍の大きさをもっている。しかし、同心二重管環状流路での場合、その値の比は約1.3倍となり、二方向の速度変動の大きさの差が縮小しバランスがとれ、渦が発生し易い流れとなっていると考えられる。
- 4) 同心二重管環状流路の最小乱流強度位置での、主流方向の速度変動成分の実効値の大きさは、摩擦速度とほぼ等しい。
- 5) 偏心二重管環状流路最広部での最小乱流強度位置は、主流方向、半径方向とも、ほぼ流路中間点の同一地点に位置するが、極端な高偏心率 ($e = 0.99$) の場合にはその位置は一致しておらず、速度

変動にアンバランスが起こり、変位流れが生じているものと予想される。

単一円管流路，同心二重管環状流路，偏心二重管環状流路最広部におけるレイノルズ応力分布の測定から以下の結果を得た。

- 1) 単一円管流路，及び同心二重管環状流路においては，レイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ の位置は，レイノルズ数には依存せず最大流速位置と一致している。
- 2) 二重管環状流路においても単一円管流路と同様に，レイノルズ応力分布は $-\rho u'v' = 0$ の位置から両管壁面へ向かって，レイノルズ応力の絶対値 $|-\rho u'v'|$ は直線的に増加するように分布する。
- 3) 流路内のレイノルズ応力の分布形状から，管壁での壁面剪断応力を推測することは可能である。
- 4) 偏心二重管環状流路最広部での，レイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ の位置は，最大流速位置よりも内管側に存在するが，極端な高偏心率 $e = 0.99$ の場合には，同心二重管環状流路の場合と同様にその位置は一致する。
- 5) Prandtl の混合距離 ℓ によって予測される平均的渦スケールは，レイノルズ数の違いによって変化するが，単一円管流路では，管中心付近で一定値をとる分布を有する。しかし，同心二重管環状流路では流路中間点付近でもその値は増加し続ける傾向にある。
- 6) Boussinesq の渦動粘性係数 ϵ は，レイノルズ数に依存して変化をする。単一円管流路では，壁面と中心軸の中間点で極大値をとる分布を有し，また同心二重管環状流路では，最大流速位置を境として外管側と内管側ではほぼ対称な形で分布するが，内管側の極大値に比べ外管側の極大値の方が大きな値を示す。
- 7) Prandtl の混合距離理論，及び Boussinesq の渦動粘性係数の概念を，偏心二重管環状流路のような，最大流速位置とレイノルズ応力 $-\rho u'v' = 0$ となる位置が異なる流れに応用すると，最大流速位置と $-\rho u'v' = 0$ の位置の間の領域においては，その数学的モデルの不完全さから，物理的事実とは考えられない値を示す。

Nomenclature

D_{EQ}	: hydraulic equivalent diameter	[m]
D_i	: outside diameter of inner tube	[m]
D_o	: inside diameter of outer tube	[m]
e	: eccentricity	[-]
ℓ	: mixing length defined by Prandtl	[m]
Re	: Reynolds number	[-]
R_{EQ}	: Width between inner and outer tube for coaxial double tube	[m]
R	: radius of tube	[m]
r_o	: radius of a circular tube	[m]
S	: distance between the center of inner and outer tube	[m]
u	: velocity (in z-direction)	[m/s]
u^*	: friction velocity	[m/s]
u_{av}	: cross-sectional average velocity	[m/s]
u_{max}	: maximum velocity	[m/s]
v	: velocity (in r-direction)	[m/s]
y	: distance from wall	[m]

y_{\max}	: distance from wall to the location of the maximum velocity	[m]
ϵ	: eddy diffusivity defined by Boussinesq	[m ² /s]
τ_w	: wall shear stress	[Pa]

Superscripts

'	: fluctuating
-	: time-smoothed

Subscripts

o	: outer tube wall
i	: inner tube wall

Literature cited

- 1) NaKamura,A.: Master thesis of Toyama University (1983)
- 2) Ogino,F., M.Funatu, M.Yoshida and T.Mizushina: Proc. 3rd PACHEC, Seoul, 1, 57(1983)
- 3) Ogishita,M.: Master thesis of Toyama University (1986)

化学工学協会鹿児島大会 (鹿児島大学工学部) にて一部発表 (昭和62年11月26・27日)

Turbulence structure in Circular and Annulus Ducts (I)

—— Turbulence and Reynolds Stress ——

Hisashi Miyashita, Yoshihiro Shibata, Tatsuo Nishimura

An experimental investigation was performed to study the turbulence structure in circular and annulus duct in region of the turbulent flow.

The Velocity distribution, the turbulence intensity distribution and the Reynolds stress were measured by two channels hot wire anemometer in order to examine the turbulent transport phenomena in two ducts.

Those distributions were compared in the case of two kind of ducts and two Reynolds numbers.

The results obtained in an annulus ducts was also compared with ones obtained for a part of most wide in eccentric annulus duct and effects to eccentricity in inner flow was observed.

[英文和訳]

管及び環状流路内の乱流構造(I)

—— 乱れおよびレイノルズ応力 ——

宮下 尚, 柴田 良弘, 西村 龍夫

乱流領域での管および二重管環状部流路内の乱流構造を検討すべく実験的研究が行われた。

上記二重の流路における乱流輸送現象を調べるため、流路内の速度分布、乱流強度分布およびレイノルズ応力分布が2チャンネル熱線流速計を用いて測定された。

これらの分布は2種の流路および2つのレイノルズ数の場合において比較検討されている。

環状流路において得られた結果は偏心二重管の最広部で得られた結果とも比較され、内部流れの偏心率による影響が観察された。

(1988年10月31日受理)