

熱線風速計による矩形管内旋回乱流の測定

Turbulence Measurement in Swirling Flow by a Hot-wire

西原 義寛*・小林 敏雄*・森 西洋平*

Yoshihiro NISHIHARA, Toshio KOBAYASHI and Yohei MORINISHI

1. は し が き

熱線風速計を用いて矩形管内旋回乱流の測定を行った。計測は単一傾斜熱線をサポート軸まわりに回転して行い、三次元の平均速度分布およびレイノルズ応力分布を得た。本報告では、まず初めに計測の方法について詳述し、次に測定結果を示し検討を加える。

2. 計 測 方 法

熱線風速計による三次元測定には、複数の熱線を組み合わせて測定する方法と、単一傾斜熱線を回転させて測定する方法がある。前者の方法は、瞬間的な値を求めることができるが、複数の熱線を較正するのはかなりの手間がかかり、また個々の熱線の特性変化の影響を受けやすい。したがって本報告では後者の方法を用いて、時間平均速度およびレイノルズ応力を求めた。以下に本報告で用いた方法について詳述する。

熱線が感じる有効流速 u_{eff} は以下の式で表される。

$$u_{eff}^2 = (\sin^2\alpha + k\cos^2\alpha + h\cos^2\beta) u^2 \quad (1)$$

ここで α は流れの方向と熱線とがなす角度、 β は熱線と熱線支持針とがつくる面の法線と流れの方向とがなす角度である。また k と h は熱線の較正実験の結果得られる定数である。

いま、熱線と座標軸、速度ベクトルの関係を図1のように定める。熱線をサポート軸まわりに θ だけ回転すると(1)式は以下になる。

$$\begin{aligned} u_{eff}^2 = & (\sin^2\gamma + k\cos^2\gamma) u^2 \\ & + (\sin^2\theta\cos^2\gamma + k\sin^2\theta\sin^2\gamma + h\cos^2\theta) v^2 \\ & + (\cos^2\theta\cos^2\gamma + k\cos^2\theta\sin^2\gamma + h\sin^2\theta) w^2 \\ & + \{(1-k)\sin 2\gamma\sin\theta\} uv \\ & + \{(1-k)\sin 2\gamma\cos\theta\} uw \\ & + \{(\cos^2\gamma + k\sin^2\gamma - h)\sin 2\theta\} vw \end{aligned} \quad (2)$$

流れが乱れを含んでいると、流速は時間平均成分と変動成分の和で表される。

$$u = U + u' \quad (3)$$

$$v = V + v' \quad (4)$$

$$w = W + w' \quad (5)$$

また、熱線風速計の出力をリニアライザに入力することにより、有効流速と出力電圧 e との関係は以下になる。

$$u_{eff} = Se \quad (6)$$

ここで S はリニアライザのゲインである。(6)式も時間平均成分と変動成分の和で表すことができる。

$$u_{eff} = S(E + e') \quad (7)$$

(3)~(5)式、(7)式を(2)式に代入し、時間平均をとる、時間平均成分と変動成分に分けて表すと

$$\begin{aligned} S^2 E^2 = & (\sin^2\gamma + k\cos^2\gamma) U^2 \\ & + (\sin^2\theta\cos^2\gamma + k\sin^2\theta\sin^2\gamma + h\cos^2\theta) V^2 \\ & + (\cos^2\theta\cos^2\gamma + k\cos^2\theta\sin^2\gamma + h\sin^2\theta) W^2 \\ & + \{(1-k)\sin 2\gamma\sin\theta\} UV \\ & + \{(1-k)\sin 2\gamma\cos\theta\} UW \\ & + \{(\cos^2\gamma + k\sin^2\gamma - h)\sin 2\theta\} VW \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S^2 e'^2 = & (\sin^2\gamma + k\cos^2\gamma) u'^2 \\ & + (\sin^2\theta\cos^2\gamma + k\sin^2\theta\sin^2\gamma + h\cos^2\theta) v'^2 \\ & + (\cos^2\theta\cos^2\gamma + k\cos^2\theta\sin^2\gamma + h\sin^2\theta) w'^2 \\ & + \{(1-k)\sin 2\gamma\sin\theta\} u'v' \\ & + \{(1-k)\sin 2\gamma\cos\theta\} u'w' \\ & + \{(\cos^2\gamma + k\sin^2\gamma - h)\sin 2\theta\} v'w' \end{aligned} \quad (9)$$

θ をいろいろに変えてリニアライザ出力の平均電圧と変動電圧の実効値を測定すれば、(8)、(9)式の連立方程式を解いて平均速度とレイノルズ応力が求められる。

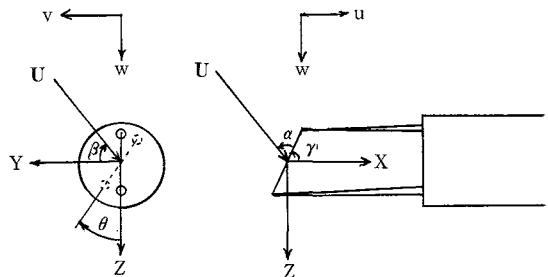


図1 導入座標

*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

しかし(9)式は θ を変えただけでは方程式を閉じることができない, よって熱線の傾き角 γ を変えて測定を行う必要がある. 本報告においては, 45°傾斜型熱線による測定を6点, I型熱線による測定を1点行い, (8), (9)式から平均速度とレイノルズ応力を求めた.

(8)式を解くには, 逐次近似法の1つであるNewton-Raphson法を用いる¹⁾. $U=U_1, V=U_2, W=U_3$ とおき, (8)式の左辺を F_i とおく. また U_j ($j=1, 2, 3$)の初期値を U_{j0} ($j=1, 2, 3$)とし, (8)式に代入して得られた結果を F_{i0} とする. (8)式の右辺をTaylor展開し, 第1項のみを取って F_i の近似値とすると(10)式が得られる.

$$F_i - F_{i0} \approx \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial F_i}{\partial U_j} \right) \Delta U_j \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

ただし N は測定点数

(10)式に i に関して最小自乗法を適用して, 以下の行列式を得る.

$$[T] [\Delta U] = [S] \quad (11)$$

ただし

$$\begin{cases} T_{mn} = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial F_i}{\partial U_m} \right)_0 \left(\frac{\partial F_i}{\partial U_n} \right)_0 \right] \\ S_m = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial F_i}{\partial U_m} \right) (F_i - F_{i0}) \right] \\ \Delta U_m = (\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3) \end{cases} \quad (12)$$

計算の手順は最初に(11)式を解いて ΔU_j ($j=1, 2, 3$)を求める. 次に新たな初期値 $U_{j0} = U_{j0} + \Delta U_j$ を再び(11)式に代入し ΔU_j ($j=1, 2, 3$)を求める. 以上の計算を ΔU_j ($j=1, 2, 3$)が十分小さくなるまでくり返して, 平均速度 U_j ($j=1, 2, 3$)を得る.

レイノルズ応力を求めるために(9)式の係数を整理して(13)式で表す.

$$D_{11}\overline{u'^2} + D_{12}\overline{v'^2} + D_{13}\overline{w'^2} + D_{14}\overline{u'v'} + D_{15}\overline{v'w'} + D_{16}\overline{u'w'} = D_{17} \quad (13)$$

(13)式に i に関して最小自乗法を適用すると(14)式を得る.

$$[T] [Z] = [S] \quad (14)$$

ただし

$$\begin{cases} T_{mn} = \sum_{i=1}^N [D_{im} \cdot D_{in}] \\ S_m = \sum_{i=1}^N [D_{i7} \cdot D_{im}] \\ Z = (\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}, \overline{u'v'}, \overline{v'w'}, \overline{u'w'}) \end{cases} \quad (15)$$

(14)式を解いてレイノルズ応力を得る.

3. 矩形管内旋回流の実測

図2に対象とする矩形管路を示す. 流体は空気を用いている. 送風機からの空気は一辺 d ($=100\text{mm}$)の正方形

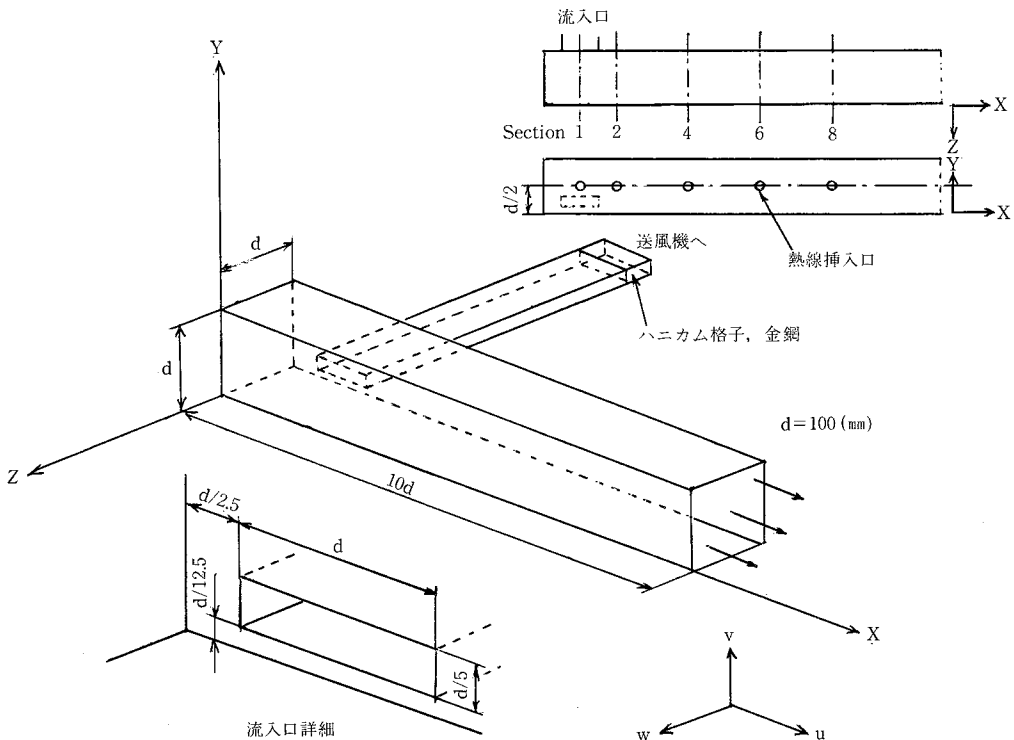


図2 対象矩形管路

4. 測定結果および考察

図 3 に Section 2, 6 における断面中央の平均流速分布を 図 4, 図 5 に Section 2, 6 におけるレイノルズ応力分布を示す。また図 6 には、以下の式で定義した乱流エネルギー k の分布を示す。

$$k = (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) / 2 \tag{16}$$

なお、それぞれの値は流入口の流速 W_0 で無次元化して示してある。

4-1 平均速度分布

図 3 の平均流速分布でわかるように、軸方向平均速度 U に逆流域がみられる。この逆流は旋回の遠心力の作用で発生したと思われる。この逆流域の中心は、旋回中心とほぼ一致している。

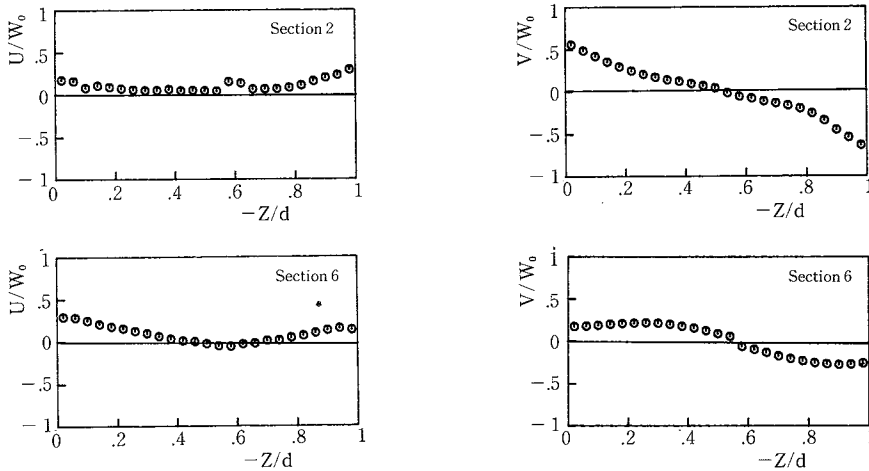


図 3 断面中央における平均流速分布 (Y/d=0.5)

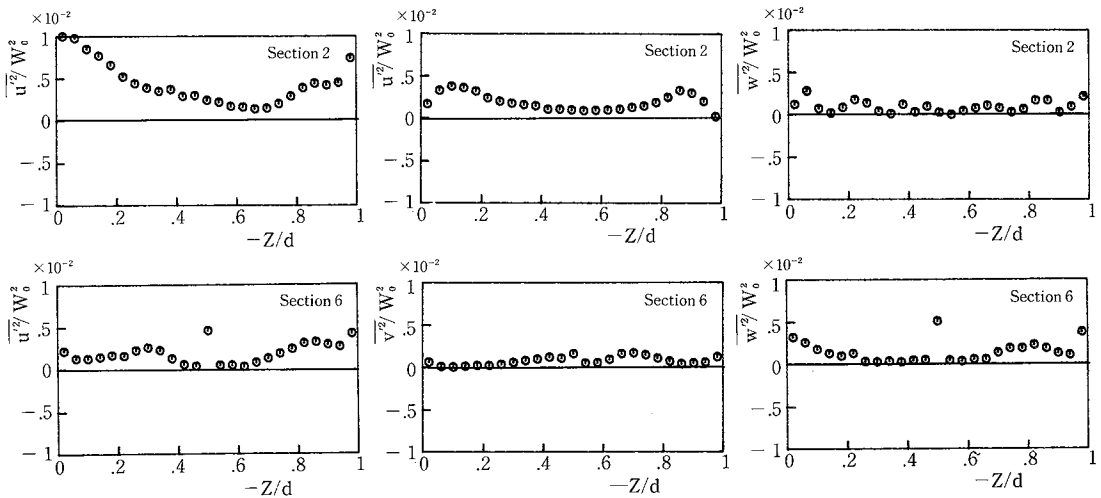


図 4 レイノルズ応力分布(1) (Y/d=0.5)

研 究 速 報

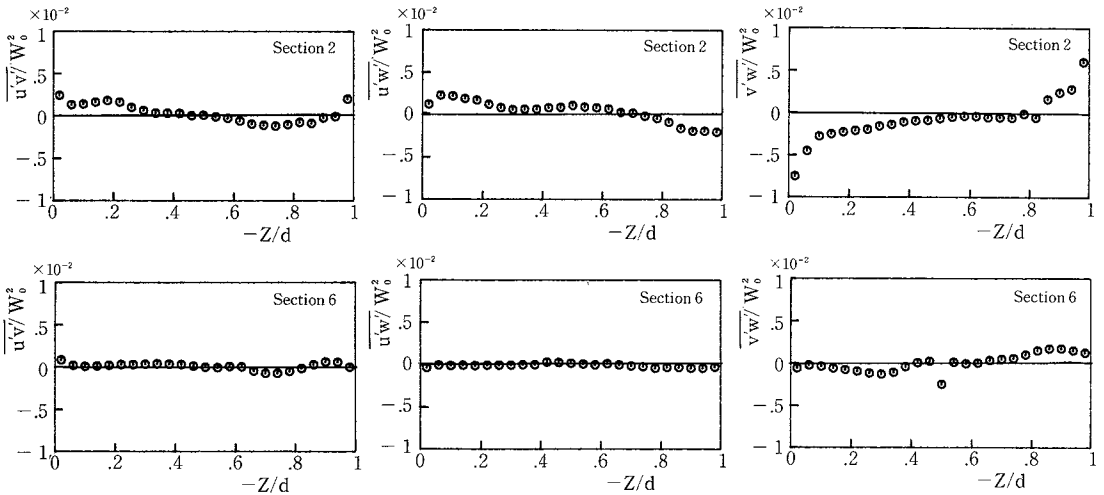


図5 レイノルズ応力分布(2) (Y/d=0.5)

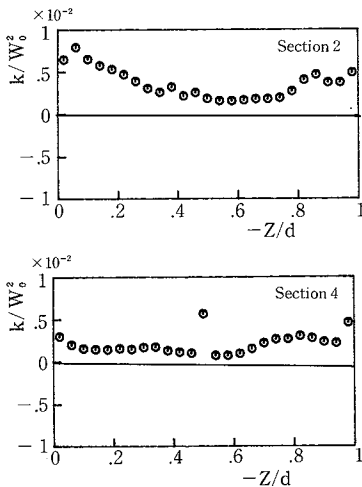


図6 乱流エネルギー分布 (Y/d=0.5)

旋回速度Vは、流入口に近いSection 2では管中心からの距離に比例する剛体渦に近い分布をしているが下流 (Section 6)では壁面近傍で急速に減衰し、管中心からの距離に対し一様な分布になる。Y/d=0.5の軸上においてVが0となる旋回中心の位置はx軸上の位置によって異なり、その差は最大でZ/d~0.2程度である。この変動が定常的なものなのか、非定常なふれ回りであるのか判断するにはさらに詳細な計測を行う必要がある。

4-2 レイノルズ応力および乱流エネルギー分布

上流 (Section 2)においては、 $\overline{u^2}$ 、 $\overline{v^2}$ 、 $\overline{v'w'}$ が他の三成分に比べ大きな値を示し、特に $\overline{u^2}$ が支配的であることがわかる。またこれらのレイノルズ応力はいずれも壁面近傍で極大値を持っている。

これに対し下流 (Section 6)においては、上流 (Section 2)で支配的であった、 $\overline{u^2}$ が大幅に減衰している。しかし $\overline{v^2}$ には大きな減衰は見られない。またこれらの極大値は上流 (Section 2)に比べ、管中心方向に移動した位置にある。

乱流エネルギー分布も同様の分布で、上流 (Section 2)では壁近傍に極大値を持ち、下流 (Section 6)では減衰し、管中心よりに極大値を持った分布となる。

平均速度分布と対比すると、平均速度の勾配 $\partial U/\partial Z$ 、 $\partial V/\partial Z$ が急変する点が、上流 (Section 2)では壁面近傍に、下流 (Section 6)では、管中心よりにある。したがって乱れのほとんどは平均速度の勾配 $\partial U/\partial Z$ 、 $\partial V/\partial Z$ が急変する部分で生成されていると考えられる。また、下流 (Section 6)における $\overline{u^2}$ の大幅な減衰は、管軸方向の平均速度の勾配 $\partial U/\partial Z$ が一様になったためと考えられる。

5. あとがき

熱線風速計を用いて矩形管内旋回流の平均速度分布およびレイノルズ応力分布の測定を行い、結果の検討を行った。旋回流の定性的な解析を行うにはさらに詳細な計測を行う必要がある。今後は円管内旋回流について詳細な計測を行う予定である。(1987年11月4日受理)

参 考 文 献

- 1) 福田ほか1名：日本造船論文集, 150号 (1983), 85
- 2) 鶴崎ほか1名：機械学会論文集, 489号 (1987), 1553
- 3) 九郎丸ほか4名：機械学会論文集, 427号 (1982), 408
- 4) 林ほか1名：航空宇宙研報告, 242号 (1971), 1