

曲線流の乱れの特性

京大防災研究所 正員 ○村本嘉雄
 " " " 塩入淑史

曲線流における平均流の流速特性は近年多くの実験により明らかとなり、その理論的裏付けも与えられている。しかし、乱流の特性については、二次元曲線水路においても実験値は少なく、平均流との関連も明確には、わかっていない。壁面の shear の影響を受け、二次流の存在する曲線流においては、乱流の測定結果はほとんどの場合、縦抗散の実験値から若干の推察からとれている程度である。ここでは、同心円状の曲線水路で水路中心水深比の小さい流れにおける主流成分の乱流の測定結果からその特性を検討する。

実験の概要 実験水路は中 50 cm の塩化ビニール製であり、上、下流 11 m の直線水路の間に偏角 180°、中心曲率半径 150 cm の曲線部が挿入されており、路床こう配は 1/200 である。水理条件は流量 18.4 l/sec、流入部の水深 4.5 cm ($Re = 3.72 \times 10^4$, $Fr = 1.19$) であり、内壁 45°付近より流れに剥離が生じており、60°~150°間 2" 平均 2.5 cm の水位上昇部が現われている。乱流の測定には時定数 0.1 sec、直径 1.5 mm の回転式流速計を用いた。測定は半径方向の分布を詳細に検討することを中心として、-2m, 0, 30°, 90°, 180°の 5 断面で横方向 11~13 点、鉛直方向は底面より 1.5~2.0 cm の 1 点とし、曲線部では接線方向に流速計を設置した。この測定範囲では接線方向に対する流向は 5% 以内であり、流速計に対する流向の影響は無視できることを確認した。なお、0, 30°の断面で鉛直方向 3 点の測定を補足的に行なった。記録装置は 25~30 sec、読みとり時間间隔は約 0.1 sec であり、統計解析には 200 点平均法を用いた。

実験結果とその検討 (1) 平均流速と乱流の強さの分布：この水理条件における平均流の流速特性は、主流の最大流速は 60°付近で水路中心より外方へ移行し、二次流の発生域の限界はほぼ 70°である。図-1, 2 に主流の平均流速、乱流の強さの半径方向の分布を示している。曲線部における乱流の強さは剥離の影響を受ける内壁近くを除いて接線方向に急激に減少している。-2m の断面より乱流の強さの減少が早いことは -2m の測定水路床より高いことによる。乱流の強さの半径方向の分布はほぼ一様であり、乱流に対する側壁 shear の影響および $\bar{u}$ の半径方向の分布と速度 u の作用に基因する流れの安定性の影響は顕著に現れていない。したがって、30°の若干外方へ増大しているのは $\bar{u}$ の分布の不安定域の不安定域に及んでいるためと考えられるが、側壁の shear と $\partial \bar{u} / \partial r$ による説明で主である。

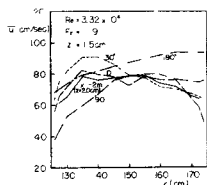


図-1

(2) 同じ相関曲線と乱流のスケール：図-3, 4 は $\alpha = 0, 180^\circ$ における同じ相関曲線を示したものであり、それぞれ $N=200$, $m=20$ として計算した。 $\alpha = 0$ の $R(r)$ は側壁から 0~10 cm の範囲で中央部に比べて $R(r) = 0$ の降下は早く、側壁 shear の影響による乱流のスケールの減少を示している。 $\alpha = 180^\circ$ の $R(r)$ は 174 cm ~ 175 cm では $\tau = 0.1 \text{ sec}$ に対して $R(r) < 0$ となり、 $\alpha = 0$ に比べて乱流のスケールは急激に減少している。126 cm ~ 130 cm では、曲線流としての特性、側壁 shear の影響より上流の剥離の影響が大きくなり、 $R(r)$

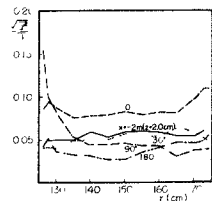


図-2

の変化は $\alpha=0$ の同測定の α より ±1/2 程度になる。なお、 $\alpha=30^\circ$, 90° では全体として両者の中間的な特性を示すが、 $\alpha=30^\circ$ の $R(r)$ は内壁より外壁近くで $\tau=0$ 付近のこの配が緩く遠心力不足の影響が若干みられる。また 90° では $r < 130 \text{ cm}$ の内壁より利権域の特性が強く現われ、 $\tau=2 \text{ sec}$ でも $R(r) > 0$ となる。このように曲線部では $\tau < 0.1 \text{ sec}$ の $R(r)$ を求める必要があるが、これは用いた減速計の測定限界をこえていて、乱水のスケールについて正確な検定は難しい。図-5 は $R(r)$ にみられる傾向の便宜的な表示として、 $R(r)=0.3$ となる点の $\tau_{0.3}$ を用いてセミスケール $L_x = 0.831 \tau_{0.3} \bar{U}$ を求めたものである。 $\alpha=-2m, 0$ では、中央部で $L_x = (2 \sim 3)h$ になり、通常の平均流速の order に近くなる。曲線部では直線部に比べて急激な L_x の減少が、利権の影響域を除いて半径方向には一様で分布を示す。 30° において乱水の強さの場合と同様に外方の若干スケールが増大するが定量的には明らかでない。

(3) スパクトル分布；スパクトル密度の計算は $F(m) = 1 + 2 \sum_{k=1}^m \frac{m-k}{m} R(k) \cos \alpha k$ にとり、 $R(k)$ は上述の計算値を用いた。なお、若干の測定値については Tuckey の方法による計算と比較して有意な差をみる。また一測定のデータで定常性、観測時間、平均化時間、読みとり誤差に関して若干の検討を行う。 $0.5 \leq m \leq 2 \text{ sec}^{-1}$ の範囲では $F(m)$ に対する α の影響が小さいことを確かめた。図-6 は水路中心で縦方向各点の正規化したスパクトル分布を示したものである。 $5 > m > 2 \text{ sec}^{-1}$ では $m > 5 \text{ sec}^{-1}$ 成分の成分が大きいことおよび上述の影響もあって傾向が不明確である。 $0.5 \leq m \leq 2 \text{ sec}^{-1}$ の範囲に注目すると、 $\alpha=-2m, 0$ では通常、直線部の測定値にみられる特性を示しているが、 α のこの配は $-5/3$ よりややゆるい。曲線部では、 $m=5$ の $F(m)$ が小さくなり、 180° では white noise に近い分布を示し、高周波成分の寄与が大きくなるようである。図-7 はこれらのエネルギー密度分布を示すもので、曲線部では特に低周波域の乱水の減衰が著しいことがわかる。

以上、測定結果からみられる特性を要約すると、曲線部では乱水の低周波成分の減衰によって乱水の強さ、スケールが小さくなる。とくに、乱水のスケールの減少が著しく、それによつてエネルギー密度は直線部より増大するものと考へられる。こうした乱水の減衰の機構は、曲線部後半では主流の平均減速分布の変化に起因しており、それによつて流出されるが、流入部付近では平均減速の特性がわからず推察することはできず、二次流成分の寄与が大きいと考へられる。こうした現象は二次流の存在する曲線部において物質の縦拡散が増大することによって生じ、また水路隅角部における乱水の強さの減衰も類似した現象と考へられる。

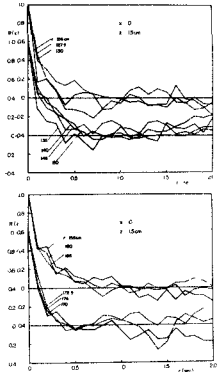


図-3

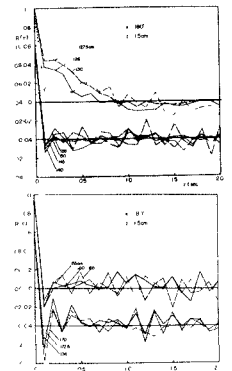


図-4

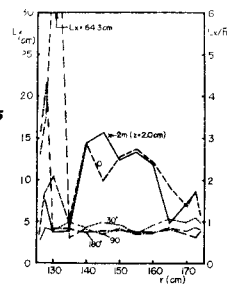


図-5

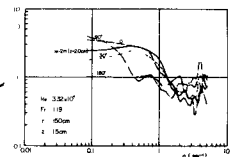


図-6

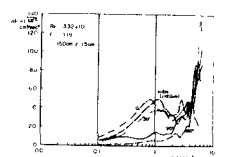


図-7