

京都大学防災研究所 正員 今本博健
京都大学大学院 学生員 久下俊夫

複断面流れは、高水敷上の流れと低水路内の流れとの間の速度差に基づく強いせん断力が作用し、高水敷先端近傍に低平均・高乱れ速度の領域が存在するなど、単断面流れとはかなり異なる複雑な挙動を呈する。本研究は複断面流れについて乱れ特性の観点より実験的に検討しようとするものであって、速度成分としては流れ方向、横方向および鉛直方向の3方向のものが対象とされている。

1. 平均速度、乱れ速度および Reynolds 応力の分布特性

実験水路は、幅40cm、深さ20cm、長さ13mの単断面直線水路であって、種々の大きさの合成樹脂板が高水敷として水路両側壁に沿い敷設されるようになっている。いま、高水敷高 $h=3.20\text{m}$ 、高水敷幅 $b=12\text{cm}$ 、路床こう配 $I=1/500$ の複断面水路に、流量 $Q=5.68\text{ l/sec}$ の水を流し低水路床面からの水深 $H=5.6\text{cm}$ の場合の、平均速度、乱れ速度および Reynolds 応力の計測結果を摩擦速度 $U_*=\sqrt{gRI}$ で基準化して示すと図-1のようである。なお、速度計測にはホットフィルム流速計を用い、磁気テープに記録された流速計の出力からサンプリング周波数 $f_s=20\text{Hz}$ で A-D 変換器により数値化された $N=400$ 個のデータを基準に種々の統計量が計算されているが、必要に応じてデータ数を増加させた繰り返し計算が行なわれている。

図-1に見られるように、流れ方向の平均速度 U に関する等平均速度線は高水敷先端近傍における高水敷側から低水路側への低速度領域の広がりおよび自由表面近傍における低水路側から高水敷側への高速度領域の広がりを示し、矢印で示された横方向および鉛直方向の平均速度 V および W の合成速度から破線で示されるような3種の2次流の存在が推測される。また、乱れ速度については高水敷先端近傍から低水路側に高乱れ速度領域の広がりが認められ、高水敷の存在が流況をかなり複雑化する様相が理解される。¹⁾

一方、Reynolds 応力についてみると、流れ方向および横方向の乱れ速度間の相関 $-\overline{uv}$ については、大きな正の値を有する領域が、高水敷上の流れと低水路内の流れとを分離するかのようになり、高水敷先端より低水路側にやや傾きつつ自由表面にまで広がっており低水路内の流れが高水敷上の流れに引きずられて減速されることが知れる。また、流れ方向および鉛直方向の乱れ速度間の相関 $-\overline{uw}$ については、大きな負の値を有する領域が高水敷先端より路床側にふくらみをみせつつ低水路側にほぼ水平に広がっているが、その広がりは低水路中央部にまで及ばず、 $-\overline{uv}$ に比較してかなり狭い領域に限定されている。この領域の存在により低水路内の高水敷高より下方の流れは上方の低流速の流れの影響により減速され、鉛直方向の速度こう配を負にするものと考えられる。このような Reynolds 応力分布の特性は U の分布特性をよく説明し、速度計測の妥当性を示すものといえよう。

なお、高水敷高と自由表面との中間の高さにおいて、高水敷中央部、高水敷先端近傍および低水路中央部の3点における3方向の乱れ速度成分および Reynolds 応力の確率分布に関するひずみ度を、 $f_s=160\text{Hz}$ 、 $N=400$ 、繰り返し数 25 回より得られたものについて示すと表-1 のようである。これより知れるように、ここに示した計測点での u のひずみ度は負、 v のはほぼ 0、 w のは正となる

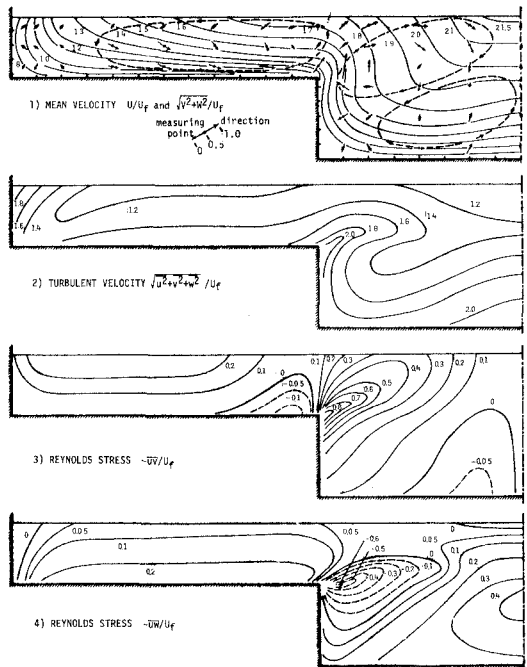


図-1

表-1 Skewness Factor

	y = 6.0cm	y =12.5cm	y =20.0cm
u	-0.38±0.27	-0.19±0.22	-0.69±0.35
v	-0.05±0.23	-0.08±0.17	-0.02±0.30
w	+0.24±0.20	+0.46±0.23	+0.58±0.30
-uv	+0.52±1.45	+1.41±0.76	-0.43±1.60
-uw	+2.08±0.94	+1.10±1.14	+2.61±1.04

傾向がみられ、絶対値の大きな $u < 0$ あるいは $w > 0$ の変動が間欠的に発生し、 $\partial u / \partial z > 0$ である高水敷中央部および低水路中央部の計測点では下方より運ばれる流体塊の混合が支配的となることが知れる。また、 $-uv$ および $-uw$ については計測値のパラツキが大きく適確な判断を下せないが、高水敷先端近傍のひずみ度はいずれについても正の値を示しており、 u が正でかつ v および w が負あるいは u が負でかつ v および w が正の絶対値の大きな間欠的な変動の存在が類推され、既述の高水敷先端近傍の2次流として示された斜昇流は間欠的に助長されたり、方向を変え斜降流となることもありうるということが知れる。

2. スペクトル特性

乱れ速度のパワースペクトル、コースペクトル およびコヒーレンシの計測例として、

高水敷先端よりやや上方の点 ($y=12.5\text{cm}$, $z=4.4\text{cm}$) において、サンプリング周波数 $f_s=20$ および 160Hz の2種とし、データ数はいずれについても $N=400$ 、繰返し数は前者については3回、後者については25回として計算された2種のスペクトルの合成したものを図-2に示す。これよりつぎのことが知れる。

パワースペクトル S_{uu} , S_{vv} , S_{ww} は、高周波数の慣性領域ではいずれも $-5/3$ 乗則にしたがい、低周波数領域では S_{vv} の 1Hz 近傍にかなり顕著なピークが認められる。一方、コースペクトル P_{uv} および P_{uw} は、いずれも慣性領域ではパワースペクトルより急激な減少傾向が認められ、低周波数領域では S_{vv} と同様に 1Hz 近傍でピークを示すとともに、 P_{uv} は P_{uw} に比しかなり大きくなっている。なお、Reynolds応力の慣性領域におけるコースペクトル特性については、相似則より導かれた $-8/3$ 乗則²⁾、あるいは次元解析より得られた $-7/3$ 乗則³⁾ が提案されており、パワースペクトルに関する $-5/3$ 乗則に比較すると不明の点が多いが、本計測結果によると $-8/3$ 乗則にやや近いようである。

また、コヒーレンスの平方根として計算されるコヒーレンシ COH_{uv} および COH_{uw} については、それぞれに対応するコースペクトルとほぼ同じ周波数においてピークの発生が見られるとともに、慣性領域ではほぼ -1 乗則にしたがう傾向がうかがわれる。

以上より明かなように、複断面流れの乱れ構造のうち、高周波数で慣性領域に属するとみなされるものについては、相似則より得られる結果にほぼ一致し局所等方性の概念の適用性が認められるのに対し、低周波数領域のものについては複断面流れ特有の効果が現われ、2次元流れとは異なることが知れる。

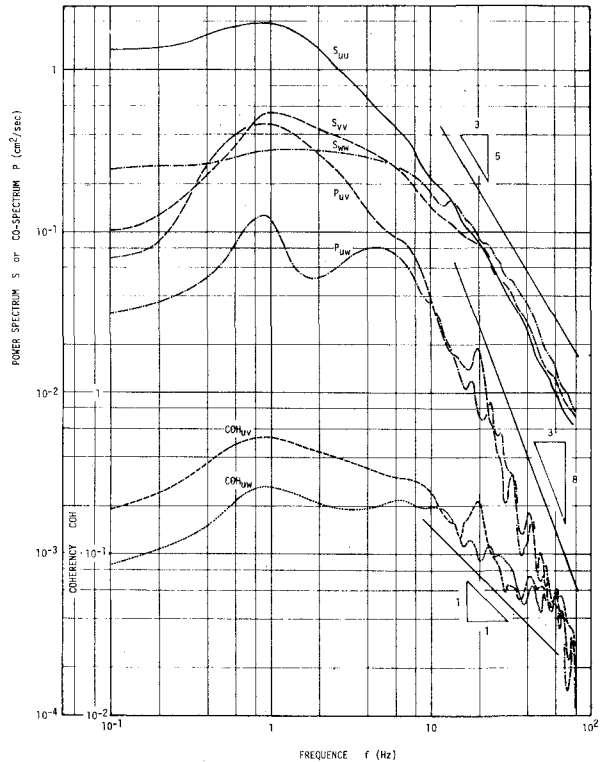


図-2

参考文献

- 1) 今本博健, 久下俊夫: 複断面水路流の水理特性について, 昭49土木学会関西支部年講, 昭49.
- 2) Lumley, J.L. and Panofsky, H.A.: The Structure of Atmospheric Turbulence, John Wiley and Sons, New York, 1964.
- 3) Wyngaard, J.C. and Cote, O.R.: Cospectral similarity in the atmospheric surface layer, Quart. J. Roy. Soc., 98, pp.590~603, 1972.