

開水路流れにおける Reynolds 応力について

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 浅野 富 夫
 京都大学大学院 学生員 石垣 泰 輔
 東亜建設工業(株) 正員 ○杉 浦 秀 之

本報告は開水路流れにおける Reynolds 応力の特性をホットフィルム流速計を用いた Euler 的計測により実験的に検討しようとしたものであって、流れ方向および鉛直方向速度の同時計測にはファイバー型プローブ2本を組み合わせたX型プローブが用いられている。また、実験には長さ13m、幅40cm、深さ20cmの可動勾配滑面直線水路が使用され、2次元定常等流状態において Froude 数を広範囲に変化させた水理条件が選定されている。

1. Reynolds 応力の鉛直分布

2次元開水路流れにおいて路床面からの高さzでのせん断応力τは粘性応力および Reynolds 応力により

$$\tau = \rho\nu \left(\frac{dU}{dz} \right) - \rho \overline{uw} \tag{1}$$

と表わされる。ここに、ρは流体の単位体積質量、νは動粘性係数、Uは局所的平均速度、uおよびwはそれぞれ流れ方向および鉛直方向の乱れ速度であって、—は時間的平均操作を表わしている。一般に2次元開水路流れでは路床面から離れた外部領域で粘性応力が無視されるとともに自由表面上(z=H)でτ=0、路床面上(z=0)でτ=τ_bとなるような直線分布となり、次式が成立する。

$$\tau/\rho = -\overline{uw} = (1-z/H) \tau_b/\rho = (1-z/H) U_{f1}^2 \tag{2}$$

図-1は水路中央部において計測された Reynolds 応力の鉛直分布を示したものであって、外部領域についての(2)式の妥当性が確認され、本実験で対象とした流れが2次元的であることが知れる。なお、図において - \overline{uw} の無次元化に用いられた摩擦速度 U_{f1} は実測値に(2)式を適用して定められたものであって、他の評価法によるものと比較すると図-2のようである。ここに、 U_{f2} は力学的な釣り合い条件に基づく摩擦速度、 U_{f3} は外部領域における平均速度分布に対数則を適用することにより得られるものであって、それぞれ次式によって表わされる。

$$U_{f2} = \sqrt{gRI} \tag{3}$$

$$U_{f3} = \kappa (U - U_h) / \ln(z/H) \tag{4}$$

ここに、gは重力加速度、Rは径深、Iはエネルギー勾配、 U_h は自由表面上の平均速度を表わし、Kármán 定数κは0.4とされる。図において、 U_{f1} は常流では U_{f2} と U_{f3} との間の値をとるのに対し、Froude 数が増加すると U_{f2} および U_{f3} のいずれよりも大きくなる傾向がみられる。本来これら3量は一致するはずのもの

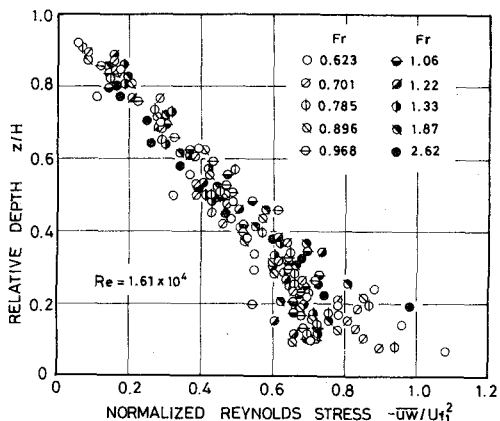


図-1

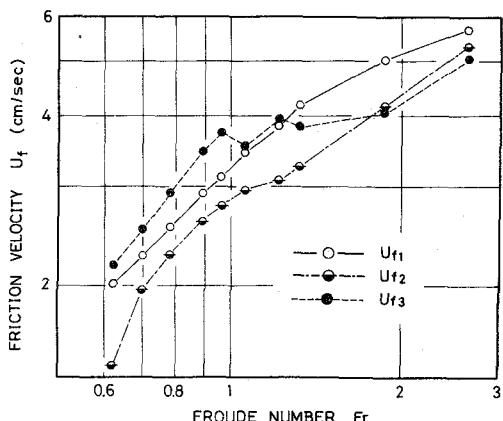


図-2

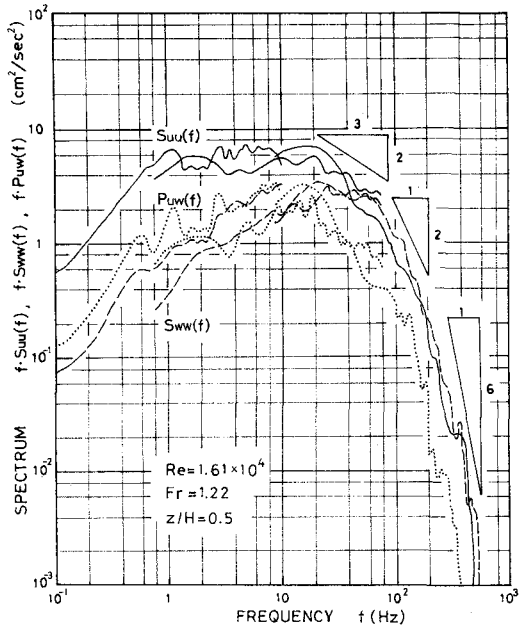


図-3

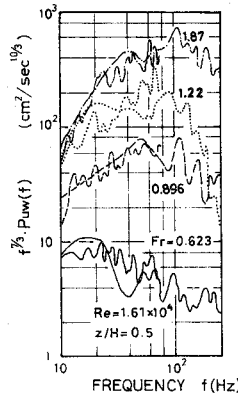


図-4

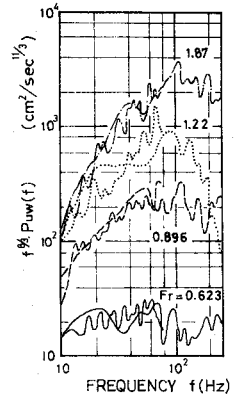


図-5

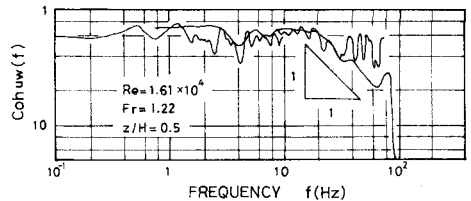


図-6

であるのに、このような結果となった原因としてはつぎのことが挙げられよう。まず、 U_{f_1} に対しては2本のファイバプローブが 0.5mm 程度離れていることおよびA-D変換器の性質上それぞれのプローブからの出力電圧が同一時刻において数値化されていないこと、 U_{f_2} に対しては勾配Iおよび水深Hの計測誤差あるいは流速における低下帯水の影響、 U_{f_3} に対しては平均速度分布に対数則を適用するときを生ずる誤差などが考えられる。

2. Reynolds 応力のスペクトル特性

本実験において計測された周波数スペクトルの一例を示すと図-3のようになる。なお、図に示されたスペクトルはいずれも3種の数値化(サンプリング周波数 $f_s=20, 160, 1600\text{Hz}$, データ数 $N=500$)によるものを重ね合わせたものであって、最低5回の繰り返し計算が行なわれている。図において、 u および w のパワースペクトル $S_{uu}(f)$ および $S_{ww}(f)$ には従来より提案されている $-5/3$ 乗則および -3 乗則あるいは -7 乗則が成立する慣性領域および粘性領域がかなり明確に認められ、計測の有効性がうかがわれる。

一方、Reynolds 応力のパワースペクトル $P_{uw}(f)$ の相似則としては、慣性領域に対する Wyngaard ら¹⁾ の $-7/3$ 乗則および Lumley ら²⁾ の $-8/3$ 乗則が提案されている。 $-7/3$ 乗則は $P_{uw}(f)$ が速度勾配 $\partial U/\partial z$ に比例するという仮定のもとで次元解析的に得られるものであり、 $-8/3$ 乗則は $P_{uw}(f)$ が $(1/f)(\partial U/\partial z)$ および $S_{ww}(f)$ に比例するとしたもので、それぞれつぎのように表わされる。

$$P_{uw}(f) \sim \varepsilon^{1/3} (\partial U/\partial z) f^{-7/3} \quad (5)$$

$$P_{uw}(f) \sim \varepsilon^{2/3} (\partial U/\partial z) f^{-8/3} \quad (6)$$

ここに、 ε はエネルギー逸散率である。図-3に示された $P_{uw}(f)$ に $f^{7/3}$ あるいは $f^{8/3}$ を乗じて相似則の検討を行なうと図-4および5のようになる。なお、図には他の実験ケースのものについても併示されているが、本結果のみからはいずれの相似則がより妥当であるかは断定できない。

さらに、 u と w との間の相関度を周波数成分ごとにみたコヒーレンシ $\text{Coh}_{uw}(f)$ を示すと図-6のようになり、慣性領域に対して著者ら³⁾ によってすでに提案されている -1 乗則がほぼ満足されている。

参考文献

- 1) Wyngaard, J. C. and O. R. Coté: Cospectral similarity in the atmospheric surface layer, Quart. J. Roy. Met. Soc., 98, PP. 590, 1972.
- 2) Lumley, J. L. and H. A. Panofsky: The Structure of Atmospheric Turbulence, John Wiley & Sons, New York, 1964.
- 3) 今本博雄, 久下俊夫: 複断面流れの乱れ特性について, 土木学会第29回年次講演会講演概要集第2部, PP. 394~395, 1974.