

開水路流れにおける乱れの移流過程について (2)

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
 兵庫県 正員 佐々木健
 京都大学工学部 正員 ○阪本幸則

従来の乱流現象の取り扱いにおいては主として固定点における速度の時間的変動特性の解明に重点がおかれ、Taylorの凍結乱流の概念あるいはHayおよびPasquillの変換関係を用いて乱れの時間的な特性から空間的特性および移流特性を推定しようとするのが大半である。しかしながら、乱流状態での流体速度は時間的にばかりでなく空間的にも不規則かつ偶然的な変動をしており、乱流場の時空間構造の解明には速度の多点同時計測が不可欠である。著者らは従来より2次元開水路流れを対象として実験的検討を行ってきたが、本報告ではとくに乱れの移流過程をとりあげ、相関解析およびスペクトル解析により乱れの移流速度ならびに寿命時間について検討を行なっている。

1. 実験装置および方法

実験水路は長さ13m、幅40cm、深さ20cmの亚克力樹脂製直線水路であって、粗面についての実験は砂粒を添付した鋼板を水路床に敷設することによって行なわれている。速度計測には2台のホットフィルム流速計が用いられ、磁気テープに記録された速度変動はA-D変換器により数値化され電子計算機によって統計処理されている。なお、相関解析における平均値評価時間は水深Hの10倍程度のスケールの乱れが10個通過する時間 $10 \cdot 10H / U_m$ (U_m :断面平均速度)程度にとられており、スペクトル解析においてはサンプリング周波数 $f_s = 20,160$ Hzに対してデータ数は500個とされ、いずれの解析においても計測値の信頼性を向上させるため最低5回以上の繰り返し計算が行なわれている。

本実験のように流れ方向に離れた多点同時計測においては、上流側に設置されたプローブにより流れが攪乱され、下流側における速度計測の有効性についての検討が必要となる。このため本研究においては上・下流側に離れた2点において計測された平均速度、乱れ強さおよびパワースペクトルについて比較検討を行ない、下流側計測点における高周波数の速度変動を除いた計測値は十分有効であることが確認されている。

2. 移流速度

移流速度 U_c は乱れが平均流によって下流側へと運ばれる速度であって流れ方向にxだけ離れた2点に関する時空間相関係数 $R(x; t)$ が最大値を示す遅れ時間を t_p とすると、 $U_c = x / t_p$ と表わされる。図-1は種々の水理条件において計測された U_c と相対水深 z/H との関係を示したものであって、 U_c は局所的平均速度 U で無次元化されている。図より、 U_c は U よりも若干小さな値をとっているもののほぼ U に一致するとみなしうるということが知れる。なお、路床面近傍における計測値のバラツキは上流側プローブによって発

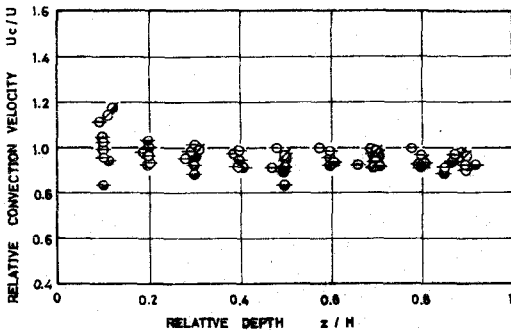


図-1 (記号は図-3に同じ)

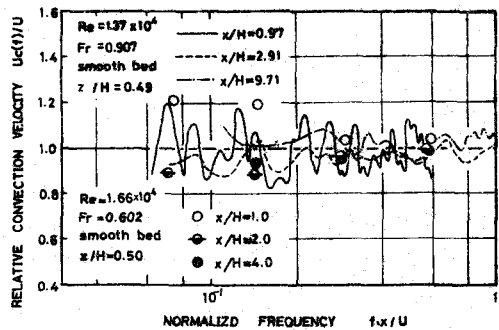


図-2

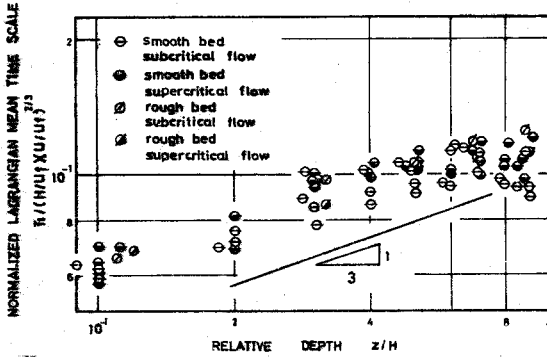


図-3

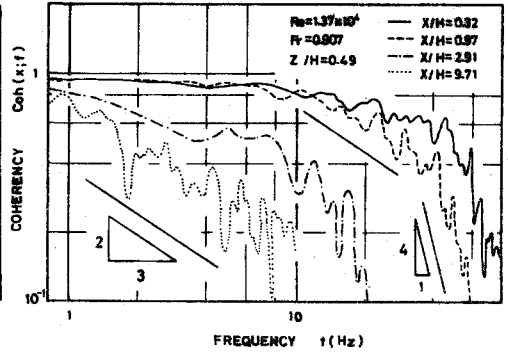


図-4

生された攪乱の影響によるものと考えられる。

移流速度を乱れの周波数成分ごとにみると図-2 のようであって、スペクトル解析によるもの以外にフィルター化乱れ速度についての相関解析による結果も併示されている。図にみられるような傾向は他の相対水深あるいは水理条件においても同様であって、 $U_0(f)$ は周波数 f あるいは距離 x に関係なく U に一致するとよいことが知れる。

3. 寿命時間

乱れの変形速度を表わす寿命時間 T_L はラグランジュ的時間相関係数 $R_L(t)$ の積分スケールとして定義されるが、乱れ速度が平均速度に比し十分小さい場合、 $R_L(t)$ は近似的にオイラーの時空間相関係数 $R(x;t)$ の包絡線あるいは $R(x;t_p)$ に一致すると考えられ、多点同時計測より T_L を評価することが可能となる。図-3 は T_L をレイノルズ数相似則より導かれる普遍関数表示法に従って示したものであり、 U_p は摩擦速度を表わしている。図において、無次元化寿命時間 $T_L / ((H/U_p)(U/U_p)^{2/3})$ は z/H の $1/3$ 乗に比例して増加する傾向が認められ、 T_L の普遍関数表示式としてすでに提案した

$$T_L / ((H/U_p)(U/U_p)^{2/3}) = C_{T_L} (z/H)^{1/3} \quad (1)$$

の成立性が確認されるとともに、比例定数も既報¹⁾の $C_{T_L} \approx 0.19$ に近いようである。なお、著者らはすでに自由表面近傍における $T_L / ((H/U_p)(U/U_p)^{2/3})$ は z/H の $2/3$ 乗に比例するという提案をしているが²⁾、本実験においてそのような傾向は顕著ではなく、さらに詳細な検討が必要と考えられる。

一方、乱れの周波数成分ごとの寿命時間 $T_L(f)$ はコヒーレンシ $\text{Coh}(x; f)$ の x に関する積分スケールを U_0 で割ったものとして定義されるが、 $\text{Coh}(x; f)$ の関数形については不明の点が多く、従来よりつぎのような指数関数によって近似されることが多い。

$$\text{coh}(x; f) = \exp(-fx/\lambda U_0) \quad (2)$$

ここに、 λ は寿命距離と波長との比に関係する係数であって、通常、 f に関係しない定数として取り扱われるが、乱れのカスケード過程から類推すると、 λ は f によって変化するとした方がより妥当のようである。そこで、Taylorによって提案された乱れの強さ、エネルギー逸散率および寿命時間の間の関係式が周波数成分ごとの乱れにも適用されると仮定すると、つぎのような $\text{Coh}(x; f)$ についての相似則が得られる³⁾。すなわち、

$$\text{慣性領域} : \text{Coh}(x; f) \sim f^{-2/3} \quad (3)$$

$$\text{第1粘性領域} : \text{Coh}(x; f) \sim f^{-4} \quad (4)$$

$$\text{第2粘性領域} : \text{Coh}(x; f) \sim f^{-8} \quad (5)$$

図-4 は $\text{Coh}(x; f)$ の計測値の一例であって、いずれにおいても f の $-2/3$ 乗に比例する慣性領域が認められるとともに一部のものについては f の -4 乗に比例する第1粘性領域も存在し、 f に対する上記の相似則の妥当性がうかがわれるが、詳細については今後の研究課題としたい。

参考文献 1) 今本ら：土木学会年講，1975。 2) Imamoto：IAHR，1975。 3) 今本：未発表