

II-177 開水路流れにおける乱れの移流過程について

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

乱流状態における変動速度は、乱れエネルギーのカスケード過程としてよく知られているように、平均流によって運ばれつつ発生・変形・逸散を繰り返している。本報告はこのような乱れの移流過程を Euler 的観点より実験的に検討しようとしたものであって、実験水路としては長さ 13m、幅 40cm、深さ 20cm、路床こう配 1/500 の直線水路が、また、速度計測にはホットフィルム流速計が用いられている。なお、データ処理におけるサンプリング周波数は 20Hz、データ数は 400 であって、5~90 回の繰り返し解析を行なうことにより計測値の信頼性を高める工夫がなされている。

1. 時間相関係数および空間相関係数

流体内の 2 点における乱れ速度間の相関係数すなわち時空間相関係数のうち、同一点が対象とされる場合のものは時間相関係数といわれ、計測点における乱れの通過過程の解析に用いられるのに対し、相異なる 2 点において同一時刻、すなわち、ずらし時間が 0 のものは空間相関係数といわれ、乱れの空間的広がり の解析に用いられる。Taylor による凍結乱流の仮定が成立する場合、時間相関係数 $R(t)$ と空間相関係数 $R(x)$ とは、平均速度を U とすると、 $x=Ut$ という変換関係によって結びつけられるが、実際の流れにこの仮定が つねに適用されるとは限らない。たとえば、図-1 は水深 $H=4.12\text{cm}$ 、Reynolds 数 $Re=2.23 \times 10^4$ の流れにつ いて相対高さ $z/H=0.1$ における $R(t)$ および $R(x)$ の計測結果を示したものであるが、 $t=x/U$ における $R(t)$ は $R(x)$ に比し若干大きくなる傾向が認められる。このような相関係数の特性をそれぞれの平均スケール T_E および L_x によって表わし、両者間の比と相対水深との関係を示すと図-2 のようになる。図-2 に見られるよう に、 L_x は UT_E より若干小さく、その差異は自由表面に近づくにしたがって大きくなる傾向があるが、この傾 向についてはすべての実験ケースに共通するとはいえず、より詳細な検討が必要である。ただし、 L_x と UT_E との比は図-3 にみられるように、 $z/H=0.5$ については Re 数に関係なくつねに 1 よりやや小さく、厳密には 凍結乱流の仮定は成立せず、その適用は近似的であることが知れる。

なお、図-1 に示された $R(t)$ には $t \approx 0.26\text{sec}$ においてゆるやかなピークの発生が認められるが、このピークは乱れの発生機構に関する burst 現象の平均発生周期 $\bar{T}_b$ に対応するものと考えられる。¹⁾ 本実験で行な った 3 ケースの流れについて時間相関係数より $\bar{T}_b$ を求めると、 $\bar{T}_b / (H/U_F) \approx 0.15$ となり、Reynolds 数相似 則に基づいて導かれた T_E に関する普遍表示²⁾ $T_E / (H/U_F) = 0.15$ ときわめてよく類似している。Euler 的平 均スケールは、本来、乱れの発生に関するスケールの大きな成分の特性によって支配されるこのでもこと を考慮すると、 T_E は $\bar{T}_b$ と密接に関係するのは確かであるが、両者間の定量関係については今後の課題と したい。

2. 乱れの移流過程

図-1 に示したと同じケースについての時空間相関係数 $R(x, t)$ を示すと図-4 のようであり、 $R(x, t)$ は距離 x によって定まるある遅れ時間、すなわち最適遅れ時間 τ_x において最大値を示すが、この最大値は x の増 加とともに減少している。いま、 x と τ_x との比によって定義される移流速度 U_0 と局所平均流速 U との比

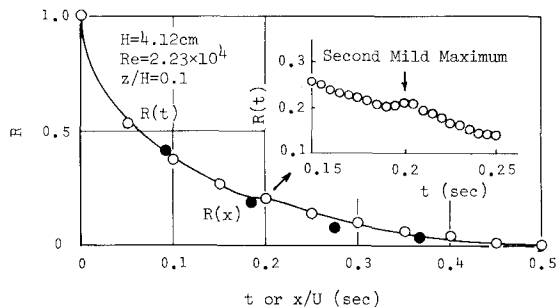


図-1

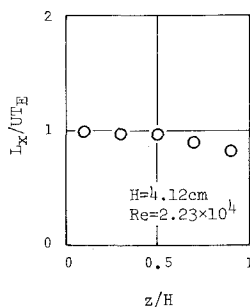


図-2

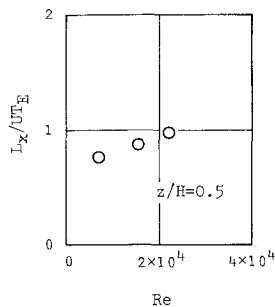


図-3

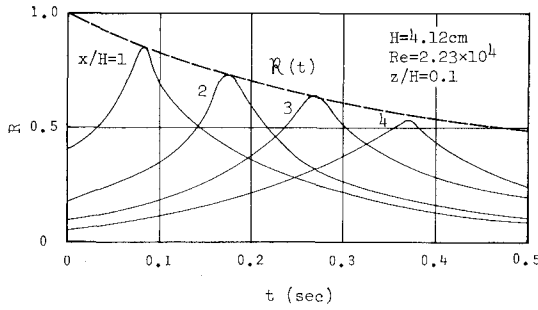


図-4

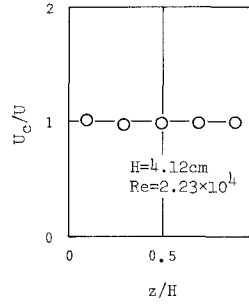


図-5

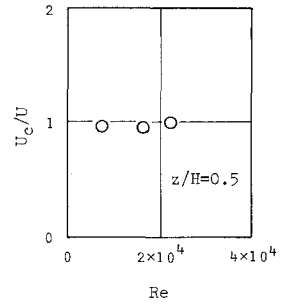


図-6

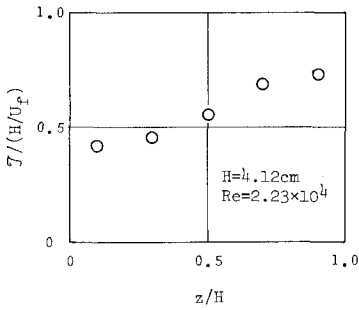


図-7

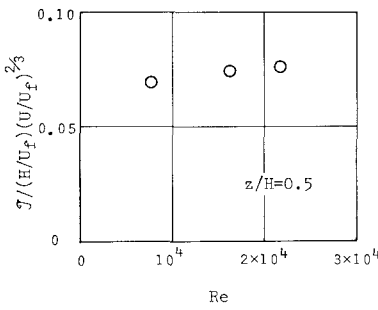


図-8

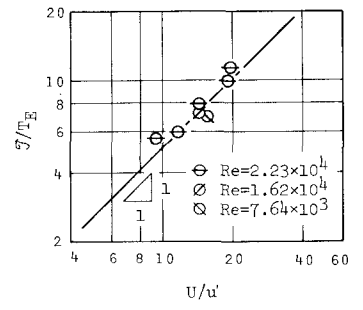


図-9

について示すと図-5のようになり、路床面からの高さにかかわらず、 $U_c/U \approx 1$ の関係の成立することが知れる。この関係は、図-6にみられるように、 Re 数にもかかわりなく成立することが確かめられ、風洞中の乱流境界層で得られた Favre³⁾ の実験結果、すなわち、路床面近傍では $U_c > U$ となり、路床面から離れると逆に $U_c < U$ という結果とは異なっている。

図-4に示された種々の流下距離における時空間相関係数 $R(x, t)$ の包絡線より定義される一種の相関係数 $\bar{R}(t)$ は流下に伴う乱れの変形過程を示すものであって、平均速度に比し乱れ速度が十分小さい場合、Lagrange 的相関係数に相当するものと考えられる。いま、 $\bar{R}(t)$ に関する特性量としてその平均スケール J を採用し、路床面からの高さ z と J との関係を示すと図-7のようであり、路床面近傍ほど流下に伴う乱れの変形は著しいことが知れる。また、Reynolds 数相似則より導れる普遍表示の手法を用いて J を無次元化し、 Re 数との関係を示すと図-8のようになる。これより、 Re 数が十分大きいとき、 $J/(H/U_f)(U/U_f)^{2/3}$ は z/H のみの関数となることが確かめられる。

一方、Euler 的特性と Lagrange 的特性との関係について検討するため、それぞれの平均スケールの比 J/T_E と乱れの相対強さの逆数 U/u' との関係を示すと図-9のようになり、Euler-Lagrange 特性間の関係としてよく用いられる Hay-Pasquill の変換関係⁴⁾ $J/T_E = \alpha (U/u')$ の適用性が認められる。また、図-9より α の値を決定すると $\alpha \approx 0.5$ となり、従来より用いられている $\alpha = 0.4$ ときわめてよく一致している。このことは本報告での $\bar{R}(t)$ は Lagrange 的相関係数にほぼ一致することを示すものと考えられ、比較的計測の容易な Euler 的計測により Lagrange 的特性の解明が可能となる。

参考文献

- 1) Kim, H. T., Kline, S. J. and Reynolds, W. C. : The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., 50 1, pp.133-160, 1971.
- 2) 今本博健：開水路流れにおける乱れの基本的特性について，土木学会論文報告集，197，pp.83-91，1972.
- 3) Favre, A. J., Gaviglio, J. J. and Dumas, R. J. : Structure of velocity time space correlations in a boundary layer, Phys. of Fluid, Suppl., 10, pp.S138-S145, 1967.
- 4) Hay, J. S. and Pasquill, F. : Diffusion from a continuous source in relation to the spectrum and scale of turbulence, Advances of Geophysics, 6, Academic Press, 1959.