

加速の履歴を持つ減速場における乱流特性

九州工業大学大学院

学生員 ○竹本憲充

九州工業大学工学部

正 員 浦 勝 秋山壽一郎

九州工業大学工学部

学生員 山田弘明

1. はじめに

山田ら¹⁾は、河川中流域の瀬と淵に頻繁に見られる圧力勾配が正から負に急変する流れ場で、レイノルズ応力分布が変化する過程を示したが、せん断乱流の組織的乱流構造が乱れやレイノルズ応力の生成に対して支配的な役割を果たしていることを考慮すると、圧力勾配が急変する流れ場においては、組織的乱流構造も大きく変化していることが予想される。本研究は、圧力勾配が急変する流れ場で得た流速測定値に、Blackwelder ら²⁾が提案した可変区間平均法(VITA)法を用いる解析を行い、Bursting現象の検出基準としての妥当性を検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置を図-1に示す。これは山田ら¹⁾が用いたもののうち、逆勾配部と順勾配部を連続して設置したものと同様である。本研究の用いる記号も彼らの定義に従う。全長20mの流れ場はその形状により入口から1000, 200, 50, 100, 650cmの5区間に分けられ、それぞれ上流部、加速部、接続部、減速部、下流部と名付ける。検討に用いた乱流データは、表-1の水理条件において最も底面に近い点 $y/h=0.045$ で、X型Hot Filmプローブを用いて測定された x 方向および y 方向の変動速度成分 u , v である。サンプリング周波数100Hz, サンプリング時間81.92secとした。

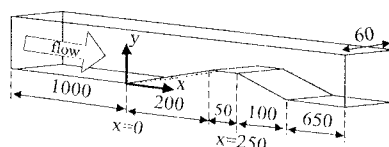


図-1 実験装置

表-1 水理条件 (at $x = -200$)

$h(\text{cm})$	$U_m(\text{cm/s})$	Fr	$Re_x 10^4$
9.49	27.29	0.283	2.73

3. 実験結果および考察

本研究では、乱流の組織的構造を解析するための抽出法として次に示すVITA法を用いた。まず時刻 t における変動速度 $u(t)$ の局所分散 $\text{var}(t, T)$ を式(1)のように計算する。

$$\text{var}(t, T) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u(s)^2 ds - \left[\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u(s) ds \right]^2 \quad (1)$$

$$\text{var}(t, T) \geq k u^2 \quad (2)$$

ここに u' は $u(t)$ のr.m.s.値である。 $\text{var}(t, T)$ が式(2)を満足する場合、バースト検出関数 $D(t)=1$ とする。この連続して $D(t)=1$ となる時間の中間時刻において $du/dt \geq 0$ の条件を満たすものをバースト検出と見なした。VITA法には任意関数として平均時間 T , しきい値 k が含まれる。 T は変動量に対して $1/(2T)$ 以下の周波数を通過する数値的なローパスフィルターに相当することから、 T の選択には注意が必要である。圧力勾配のない乱流境界層の研究では平均時間として、内部時間に基づき $(10 \sim 20) \nu / u^2$ が用いられることが多い。本研究では次式で定義する内部時間スケール、積分時間スケール、Kolmogorovの時間スケールに基づく平均時間 T_0 , T_E , T_K を用いた。

$$T_0 = 20(\nu / u^2) \quad T_E = 0.0447 E(0) / 4u'^2 \quad T_K = 3.412(\nu / \varepsilon)^{1/2} \quad (3)$$

ここに、 ν は動粘性係数、 u' は摩擦速度、 $E(0)$ は周波数 $f=0$ のときの主流速スペクトルの値、 ε は散逸率である。式中の係数は、乱流が十分に発達していると判断される等流状態の測点である $x=-100\text{cm}$ の $y+=43.48$ の位置で得られた T_E , T_K , T_0 が一致するように求めた。これらの係数は圧力勾配の小さい領域でのみ一定値をとり、水深や圧力勾配により変化するが、本研究においては勾配部においてもこの倍数関係が成り立つとする。

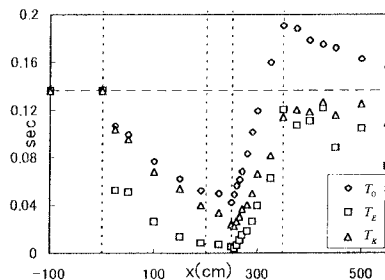


図-1 時間スケールの流下方向変化

$y/h=0.045$ ($y^+=41.1\sim 47.9$) で得られた各時間スケールの流下方向変化を図-1 に示す。積分時間スケールは加速部で比較的大きく減少するが、3 つの時間スケールの分布傾向は類似している。もう一つのパラメーターであるしきい値 k は平衡乱流境界層の研究で用いられている値を採用し、1.0 とした。

図-2 は $y/h=0.045$ におけるバースト平均検出周波数の流下方向変化である。縦軸は周波数、横軸は流下距離である。いずれの時間スケールの結果も、加速部で発生頻度が増加し減速部で減少する傾向がみられる。 $k=1.8$ とした場合検出回数は減少するが、分布の傾向は同様であった。これは順圧力勾配下の境界層流において発生頻度が減少する一宮ら³⁾の結果と異なる。本研究では、検出プローブの位置を $y/h=0.045$ としたため、圧力勾配下では y^+ が一定ではなく、誤差が生じているためと考えられる。また、バーストが最も盛んに発生しているのは $y^+=30$ 付近のバッファー層外縁であるのに対し、検出位置は $y^+=45$ で比較的壁面から遠いため、組織的ではない外層の瞬間的な乱れもバーストとして検出している可能性がある。

図-3 は $y/h=0.045$ でのバースト平均継続時間である。ただ $D(t)=1$ となる時間範囲を各バーストの継続時間とした。加速部では継続時間が減少し、減速部では増加しており、順・逆圧力勾配下でレイノルズ応力が減少・増加する傾向と一致する。レイノルズ応力の発生に対しては発生周期よりも継続時間の方が重要であることがわかる。図-4 は前述した y^+ の位置におけるバースト検出時刻からの遅れ時間 τ (msec) に関する集合平均波形 $\langle u \rangle / u'$ である。 $\tau=0$ はバースト検出時刻を表す。上流部、加速部共に u' で無次元化したエжекション過程のピーク値は変化しないが、スイープ過程のピーク値は減少している。スイープは上方より高速の流体塊が流入することであるから、スイープは測点上方の流体との速度差に比例する。順圧力勾配下では、壁面近くで平均速度が加速するために、外層で速度勾配が緩くなる。 $y^+=45$ 程度の比較的壁から離れた領域でも速度勾配が減少するためスイープのピーク値が減少すると考えられる。

4. おわりに

圧力勾配の急変する開水路乱流の組織的構造を VITA 法を用いて検討した結果、圧力勾配の変化がバースト平均継続時間におよぼす影響については $y/h=0.045$ の位置においても検討できるが、バースト発生周期の検出については疑問点が多いことがわかった。平均時間 T のより合理的な決定法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 山田ら, 土木学会西部支部年講, (2000)
- 2) Blackwelder ら, *J.fluid Mech.*, vol.50, (1974), pp.493
- 3) 一宮ら, 機械学会論文集, 62-594, B (1996) pp.483-490

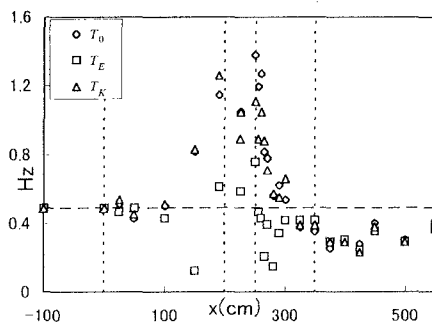


図-2 バースト発生平均周波数

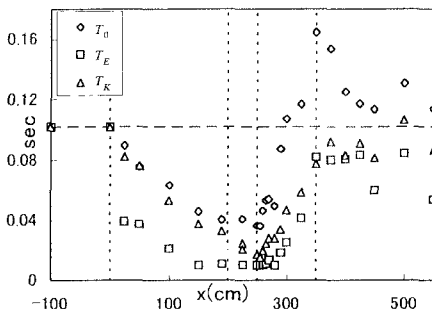


図-3 バースト平均継続時間

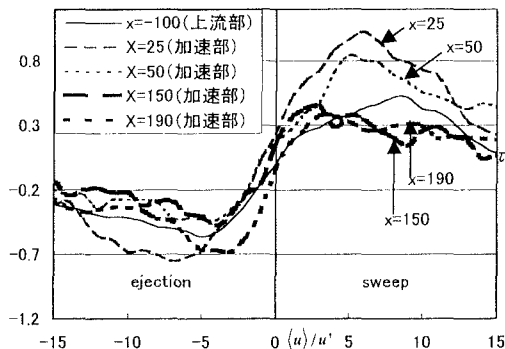


図-4 バーストの集合平均波形