

京都大学工学部 正 員 楠津家久
 阪 急 電 鉄 正 員 石田吉宏
 京都大学大学院 学生員 門田章宏

1. はじめに

非定常開水路流の乱流構造に関する研究は、実験装置や計測機器の制約などから、これまでほとんど行われておらず、また、準定常モデルでは説明できない現象がいくつか存在するために、開水路流の乱流構造に及ぼす非定常効果に関しては不明な点が多く存在する。そこで、筆者らは、非定常性が及ぼす乱流構造の変化に着目し、乱れ特性量を非接触で高精度に計測できるレーザー流速計と任意に洪水波形を変化させることのできる流量自動制御装置を駆使し、非定常開水路流の乱流計測を行った。本報告は、乱流構造の基礎の一つである平均流速分布に及ぼす非定常性の影響について考察を行うものである。

2. 実験および解析方法

実験は、長さ 10m、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配型循環水路で行われた。水路床は滑面とし、流量変化は三角波とした。また、非定常流を発生させる直前のベースフローの流量 $Q_b = 2.5(\ell/s)$ 、水深 $h_b = 4.0(cm)$ 、水路勾配 $i = 1/10^4$ とした。表-1 に示すように、増水時間 (= 減水時間) T_d は、4 通りに変化させた。表中、添え字 p は、ピークフロー時における値を示す。平均流速の決定には、データのばらつきが小さくなるフーリエ成分法を用いた¹⁾。

非定常性による乱流構造の変化を示す指標として、楠津らにより提唱される以下の非定常パラメータ α を用いることにする²⁾。

$$\alpha \equiv \frac{(h_p - h_b)/T_d}{U_c}, \quad U_c \approx \frac{U_{mp} + U_{mb}}{2} \quad (1)$$

ここで、 U_{mb} および U_{mp} は、それぞれベース時、ピーク時の断面平均流速である。

3. 実験結果および考察

図-1 は、最も非定常性の強いケースの平均流速分布を示したものである。図中の、 $T \equiv t/T_d$ は、正規化された時間で、 $0 \sim 1$ が増水期、 $1 \sim 2$ が減水期に相当する。この図から、平均流速は、粘性底層を除く内層 ($\xi \equiv y/h \leq 0.2$) において、位相に関係なくほぼ直線分布しており、底面近傍では Prandtl-Karman の壁法則が成立し、対数則に従うものと考えられる。また、Karman 定数 κ は主流の条件によらず 0.41 の普遍定数であることが認められているので、対数則の成立する範囲での直線の勾配から、摩擦速度 U_* が評価できる³⁾。

一方、外層 ($0.2 < \xi < 1$) では、増水が進行していくにつれて、対数則からのずれ (wake 成分) が顕著に現れてくる。Wake 成分は、次の wake 関数 $W(\xi)$ を用いて表される³⁾。

$$\frac{U(y)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y U_*}{\nu} \right) + A + W(\xi), \quad W(\xi) = \frac{2\pi}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \xi \right) \quad (2)$$

表-1 水理条件

RUN	S-1	S-2	S-3	S-4
$T_d(sec)$	30	60	90	120
$Q_p(\ell/s)$	7.5	7.5	7.5	7.5
$h_p(cm)$	5.65	5.85	5.95	5.95
F_{rp}	0.446	0.423	0.413	0.413
$\alpha(\times 10^{-3})$	2.25	1.29	0.92	0.69

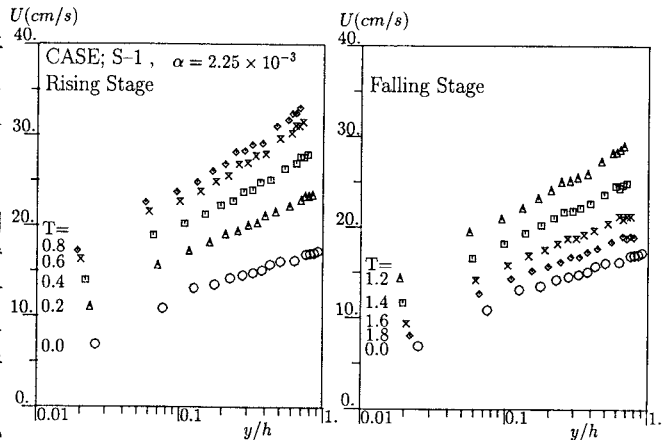


図-1 平均流速分布 ($\alpha = 2.25 \times 10^{-3}$)

ここで、 Π は、wake 強度で、対数則からのずれの大きさを表す指標である。そこで、非定常開水路流でも同様に、内層で対数則が成立し、かつ外層で wake が見られたので、式 (2) を用いて各位相における $\Pi(t)$ を評価した。図-2は、図-1の平均流データから摩擦速度 U_* と $\Pi(t)$ を評価した後、log-wake 則を内部変数表示したものである。図中、各位相における平均流速分布は、それぞれ縦軸の原点を10ずつずらして表示されてある。この図から、増水が進行していくにつれて、 $\Pi(t)$ の値が増加し、水深のピーク時 ($T = 1$) 前に、 $\Pi(t)$ がピークに達し、その後は減少し、定常に落ち着く以前に、 $\Pi(t)$ の値はゼロとなる。また、式 (2) における積分定数 A は、全位相にわたり、5.3 ~ 6.0 程度の値で、ほぼ一定の値を示した。

図-3 は、増水期および減水期における $\Pi(t)$ の時間変化を非定常パラメータ α を変化させて示したものである。非定常性が大きくなる (α の値が大きくなる) につれて、 $\Pi(t)$ のピークと水深のピーク ($T = 1$) との位相差が顕著となり、また、 $\Pi(t)$ は増水期において大きく、減水期で小さくなる傾向が見られ、最小値をとる時間が早くなることがわかる。

4. おわりに

以上より、定常流と同様、非定常開水路流に関しても、内層では Prandtl-Karman の壁法則、すなわち対数分布則

が成立する。したがって、摩擦速度 U_* が対数則分布の勾配から評価できる。一方、外層では、対数則からのずれが存在し、wake 関数を用いて流速分布を決定することができる。wake 強度 Π の値は、非定常性が大きいほど、減水期に比べて増水期の方が大きくなる傾向が見られた。 Π 値が増水期の方が大きいという現象は、境界層流の特性と同様である。すなわち、順圧力勾配 (加速流) のとき、 Π 値は無視できるほど小さいが、逆圧力勾配 (減速流) では、 Π 値は増大する。非定常開水路流と対応させると、増水期で逆圧力勾配、減水期で順圧力勾配となるので、この傾向は境界層流と一致する⁴⁾。

最後に、本研究を遂行するにあたり、住友財団から助成を得たことを記し、これに感謝する。

参考文献

- 1) Nezu, I. & Nakagawa, H. (1991); 流砂に関する国際シンポジウム, フィレンツェ, pp.165-190.
- 2) Nezu, I. et al. (1993); *Hydraulic Conference*, ASCE, サンフランシスコ
- 3) Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993); *J. Hydraulic Eng.*, IAHR-Monograph, Balkema 出版社
- 4) 中川・橋津・石田・門田・藤本 (1993); 水工論文集, 第 37 巻, pp.593-598.

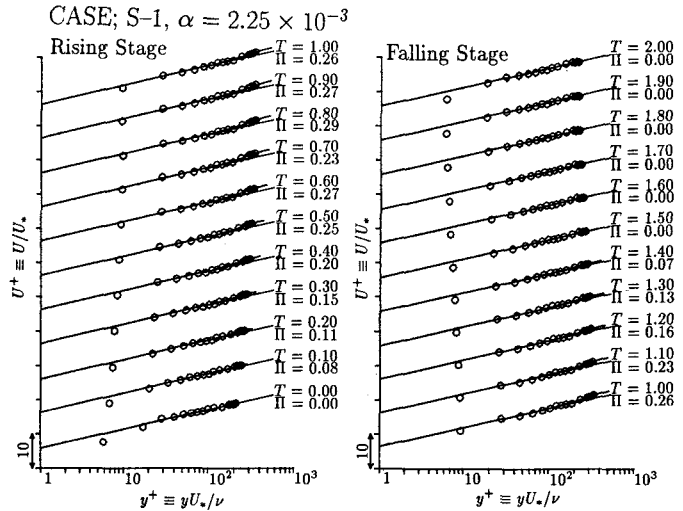


図-2 対数則, Log-Wake 則および平均流速分布

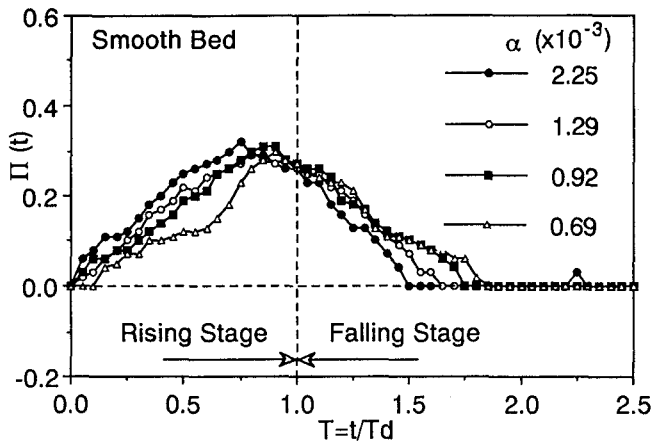


図-3 Wake 強度 $\Pi(t)$ の時間変化