

## 段落ち・段上がりを伴う開水路流れの特性

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎  
 金沢大学大学院 学生員 宮垣 圭吾  
 金沢大学工学部 ○本田 安宏

### 1. まえがき

開水路流れにおける路床形態の変化は底面せん断応力、その上の流れの構造の大きな変化をもたらす。著者らは摩擦速度が変化する流れの乱流構造をReynolds応力分布の応答に対する緩和モデルで表現し、とくに河床粗度の変化する流れに適用した<sup>1)</sup>。これに対し、河床高さが変化する場合、一般には、剥離・再付着を伴うためそのまま適用することができない。本研究では、図1に示すように水路内に一定長さ間隔(L)で等しい落差高(H)の段落ち・段上がりの存在する流れを考える。この時この水路に疑似等流が可能であり、河床高さの高い部分(摩擦速度が大きい)と河床高さの低い部分(摩擦速度が小さい)が繰り返される。但し、段落ち後、段上がり直上流では剥離が生じ、再付着後ただちに新しい底面せん断応力に応答するとしても、剥離域という有限長さ(L<sub>s1</sub>, L<sub>s2</sub>)の不連続部が出現する。本研究ではこの部分を巧みに扱うことで、緩和モデルの適用を可能とすることを目的とした。

### 2. 実験方法と結果の概要

実験は長さ12m、幅40cmの可変勾配水路で行なった。水路床はアクリル樹脂製で、L=60cm、H=1.0cmとした(予備実験により、単一の段落ちまたは段上がり(落差1cm)後の流速分布の回復にはこの程度の距離が必要であると判断した)。段落ち・段上がりは6組設置し、上流から4組目の部分を計測区間とした。流速測定には直径3mmの小型プロペラ流速計を用い、各測点につき50Hzでデジタルレコーダに約40秒サンプリングした。

実験で得られた流速分布の底面近傍でのデータに、滑面対数則を適用して推定した底面せん断応力の場所的変化を図2に示す(剥離域内は逆流のため測られていない)。

測定された流速分布を段落ちまたは段上がり前の平衡摩擦速度(u<sub>τ1</sub>)で無次元化し、相対水深(y/h, h:水深, y:河床からの高さ)に対してプロットしたのが図3である。但し剥離域では、鉛直方向の距離は剥離自由流線からの高さ(y')を自由流線からの水面の高さ(h')で無次元化したものを相対水深の代わりに用いた(自由流線は便宜的に2L<sub>s1</sub>(または2L<sub>s2</sub>), 2Hを長軸・短軸とする楕円としましたL<sub>s1</sub>=L<sub>s2</sub>=5Hとした)。これによると自由流線に沿う強いせん断応力がこの付近での大きい流速勾配を生みだしていることが予想される(従来のReynolds応力分布の計測結果<sup>2),3)</sup>と矛盾しない)。剥離域が終ると底面近傍から新しい状態での底面せん断応力に応じた速度勾配に徐々に適合して行く様子が認められる。図4には乱れ強度分布の変化例を図3と同様に示す。自由流線に沿って強いReynolds応力の生まれることが予想されたにも拘らず、乱れ強度はそれに応じた顕著な変化を呈していない。

### 3. Reynolds応力分布の緩和モデルの適用

底面せん断応力が場所的に変化しているとき(τ<sub>0</sub>(ξ), ξ:水深hで無次元化した流下方向距離), 位置ξでのReynolds応力分布(τ(η|ξ), η:水深で無次元化した河床からの高さ)は次のように表される<sup>1)</sup>。

$$\tau(\eta|\xi) = (1-\eta) \int_0^{\infty} \tau_0(\eta|\xi-\delta) g_R(\delta) d\delta \quad (1)$$

ここで、g<sub>R</sub>(δ|η)は相対高さηでのReynolds応力の緩和のインパルス応答で、緩和長さスケールΛ(水深で無次元化されている)を用いて、次のように同定されている<sup>1)</sup>。

$$g_R(\delta|\eta) = \frac{1}{\Lambda(\eta)} \exp\left\{-\frac{\delta}{\Lambda(\eta)}\right\}; \Lambda(\eta) = 20\eta(1+1.5\eta^3) \quad (2)$$

本研究で対象としている流れに対しては、先の考察から自由流線に沿う大きなせん断応力を考慮し、図2に実線で示すような摩擦速度の変化を仮定する。このとき式(1)は次のようになる。

$$\tau(\eta|\xi) = \rho u_*^2 (1-\eta) \cdot \Omega(\eta|\xi) \tag{3}$$

$$\Omega(\eta|\xi) = \beta_2^2 + (\beta_s^2 - \beta_2^2) \exp\{-\frac{(\xi-\lambda)}{\Lambda}\} + (1-\beta_s^2) \exp(-\xi/\Lambda) \tag{4}$$

ここに、 $\beta_2 \equiv u_{*2}/u_{*1}$ 、 $\beta_s \equiv u_{*s}/u_{*1}$ 、 $u_*$ ：摩擦速度で、添字 1, 2はそれぞれ段落ちまたは段上がり前後の値、さらに $u_{*s}$ は自由流線上のReynolds応力に対応する摩擦速度、また $\lambda$ は水深で無次元化された剥離域の長さである。これに混合距離モデルを適用して流速分布が、また乱れ速度の相関と乱れエネルギーの配分についての相似性がReynolds応力分布の遷移過程でも保持されると仮定することから乱れ強度分布が、それぞれ次式によって計算される ( $\kappa$  : Karman定数)。

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_*}{\kappa y} \sqrt{\Omega(\eta|\xi)} ; \frac{u'_{rms}}{u_*} = 2.3 \sqrt{\Omega(\eta|\xi)} \cdot \exp(-\eta) \tag{5}$$

図3、4に緩和モデルによる計算結果も併示した。計算は  $\beta_s=5$  として試算したものである。流速分布の再現は良好であるが、乱れ強度については先に述べたように計算結果で現われる自由流線に沿ったReynolds応力に伴う増加が実験では出現せず、その原因については今後の課題となった。

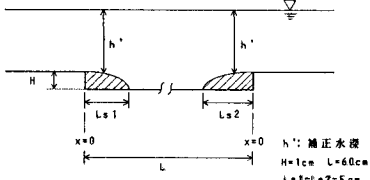


図1 段落ち、段上がり流れ概念図

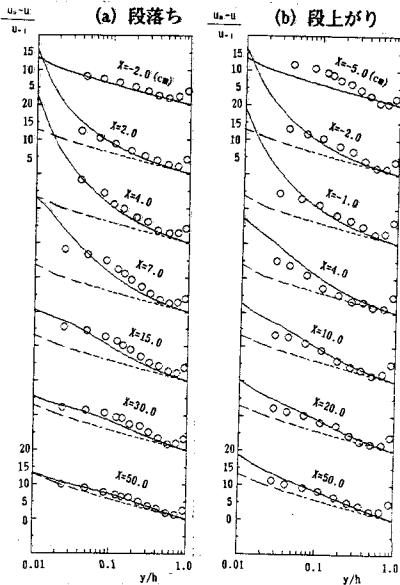


図3 非平衡流速分布の緩和

4. あとがき

河床高変化に伴う剥離域について、自由流線を仮想壁面とし、それに沿って出現する強いReynolds応力に対応する摩擦速度を考えると緩和モデルの適用が有効であることがわかった。今後、剥離域の形状、スケール、自由流線に沿ったReynolds応力の変化などの評価についての検討をおこなう予定である。

参考文献 1) 辻本・Cardoso・斎藤 (1990) 水講, 34, 2) Etheridge & Kemp (1978) J. Fluid Mech., 86, 3) Nakagawa & Nezu (1987) J. Hydraul. Res., 25-1.

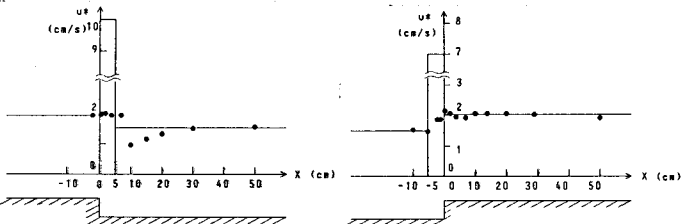


図2 摩擦速度の場所的変化

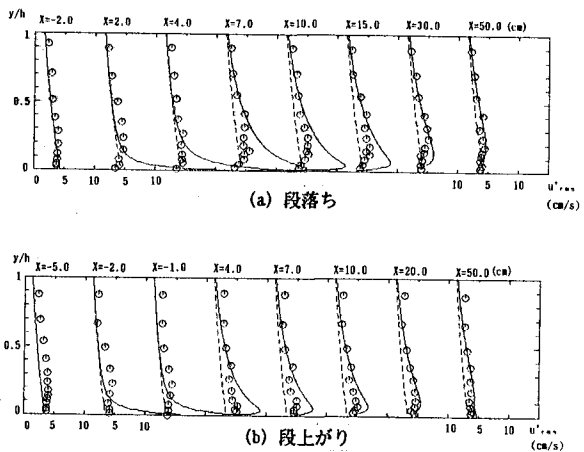


図4 非平衡乱れ強度分布の緩和