

開水路における粗面・滑面遷移部での乱流構造

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 ○漆崎 正人

1. まえがき

河床粗度が変化する流れではReynolds応力分布の応答が底面付近で早く、底面から離れるにしたがって遅くなることに起因して、等流状態について良く知られた乱流構造と異なるため、流速分布や浮遊砂濃度分布も変形する。著者ら¹⁾は、底面せん断応力の変化(粗度変化に対して瞬時に応答すると見なせる)に対するReynolds応力分布の応答をインパルス応答を用いた畳み込み積分モデル(緩和モデルと呼ぶ)で表現することを既に提案し、インパルス応答をJacobsの風洞実験結果²⁾で同定しさらに橋津らの開水路での乱流計測結果³⁾にもそのまま適用できることを示した。本報では、さらに実験室水路での実験を追加し、また野外流路で実施した乱流計測結果とも比較し、緩和モデルの適用性の検討を行った。

2. 緩和モデルの概要

底面せん断応力が場所的に変化しているとき($\tau_b(\xi)$, 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($\tau(\eta|\xi)$, 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¹⁾。

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

ここで、 $g_R(\delta|\eta)$ 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¹⁾。

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

とくに粗度急変部のように底面せん断応力が急変する場合、式(1)は次のようになる。

$$\begin{aligned} \tau(\eta|\xi) &= \tau_{b,1} \Omega(\eta) \cdot (1-\eta) \quad ; \quad \Omega(\eta) = (\beta^2 - 1) \Psi(\eta|\xi) + 1 \quad ; \\ \Psi(\eta|\xi) &= 1 - \exp\{-\xi/\Lambda(\eta)\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $\beta \equiv u_{*2}/u_{*1}$, u_* : 摩擦速度で、添字 1, 2はそれぞれ粗度急変前後での値を示す。さらに、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。

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_{*1}}{\kappa y} \sqrt{\Omega(\eta|\xi)} \quad (4) \quad ; \quad \frac{u'_{rms}}{u_{*1}} = 2.3 \sqrt{\Omega(\eta|\xi)} \cdot \exp(-\eta) \quad (5)$$

3. 実験及び実験結果と緩和モデルの比較

実験は長さ12m, 幅40cmの可変勾配水路で行った。鋼製水路床に厚さ10mmの亚克力板を敷いて滑面部、中央粒径12mmのほぼ均一粒径礫を1層敷いて粗面部を準備した(対数則の理論河床面を一致させてある)。実験は橋津ら³⁾に倣い、粗面、滑面部を通して概ね等流状態が得られるように水路下流端堰を調整して行った。流速測定は直径3mmのプロベラ流速計を用いて50Hzサンプリング(データ個数2048個)でデジタルレコーダに記録し、パーソナルコンピュータで統計処理した。流速分布の縦断方向変化(図1)から、遷移点までに平衡に達した対数則が新しい底面せん断応力に応じた対数則に底面から順次応答変化してゆくことがわかる。遷移前後のそれぞれの平衡に近い流速データに対数則を適合させて粗面部、滑面部での摩擦速度を評価した。これによって遷移のパラメータ β を与え、緩和モデルによる計算を行った。式(4)の積分にあたっては、表面流速(実験データの外挿値)を境界条件とした。流速分布についての計算結果は図1に併示した。また乱れ強度分布については図2に示す。いずれも計算結果との対応は良好である。

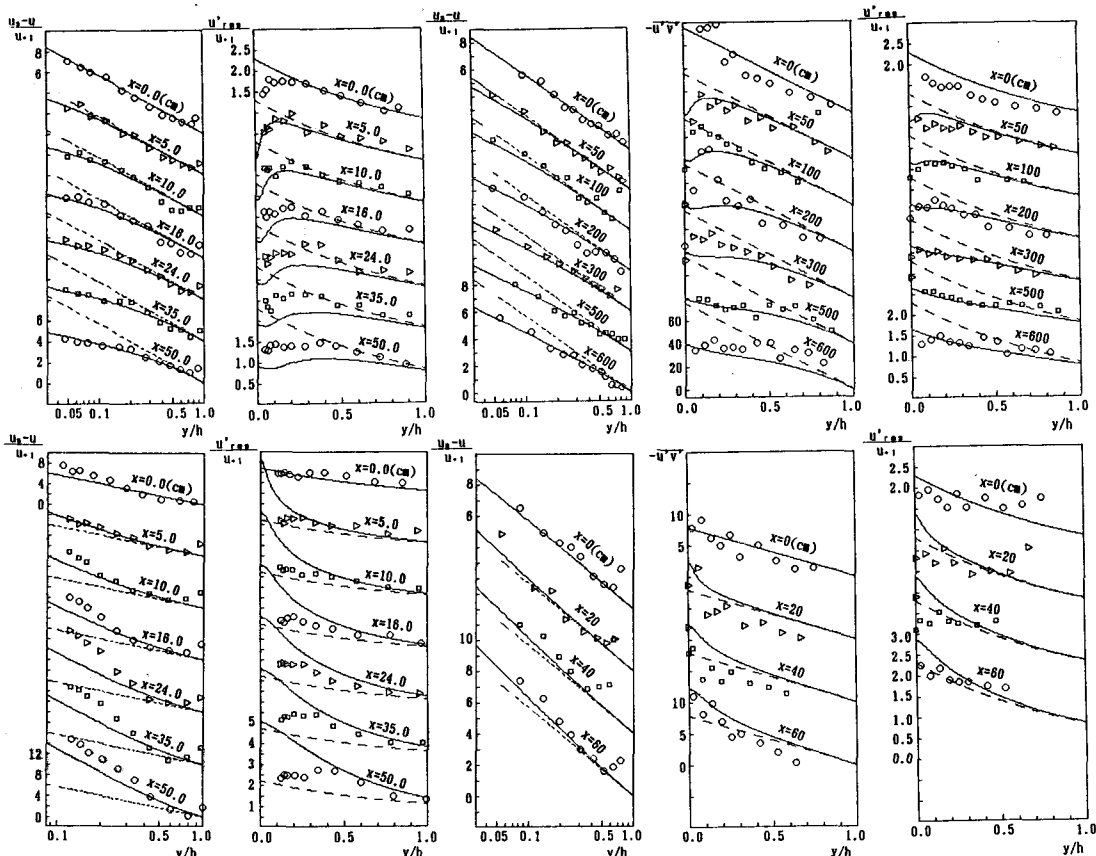


図1. 流速分布(欠速度則表示)

上:粗面→滑面($\beta=0.40$)
下:滑面→粗面($\beta=2.68$)

図2. 乱れ強度分布

上:粗面→滑面, 下:滑面→粗面

図3. 野外流路での流速分布

上:粗面→滑面($\beta=0.72$)
下:滑面→粗面($\beta=1.25$)

図4. Reynolds応力分布(野外流路)

上:粗面→滑面, 下:滑面→粗面

図5. 乱れ強度分布(野外流路)

上:粗面→滑面, 下:滑面→粗面

4. 野外流路での乱流計測結果との比較

実験室データは楠津ら³⁾のも今回のものもいずれもせいぜいReynolds数 ($Re=Uh/\nu$, U : 断面平均流速, ν : 動粘性係数) が25,000程度である。これに対し, 今回金沢市犀川(上菊), 辰巳用水(涌波)において十分に長い一様断面部でしかも底面粗度が急変しているところを選定し ($Re=100,000\sim800,000$), 2成分(流下・鉛直方向)同時計測の行える小型電磁流速計(検出部は長さ3cm, 直径8mmの円筒型)を用いて乱流計測を行った⁴⁾。この計測では乱れ強度の2成分に加えてReynolds応力分布も実測された点が重要である。流速計出力は現地でデジタルレコーダに20Hzで1024個記録し, 後にパーソナルコンピュータで統計処理した。

図3～5に流速分布, Reynolds応力分布, 乱れ強度分布の縦断方向変化を測定値と緩和モデルによる計算値を比較して示した。遷移過程でのReynolds応力分布の変化は著しいが, その底面値は粗度急変後直ちに安定しており, 粗度急変に対する底面せん断応力の変化をほぼ瞬時と見なすことの妥当性がうかがえる。この結果より粗度変化前後の摩擦速度を評価して緩和モデルの計算を行った。乱れ強度分布の変化が緩和モデルより緩慢であることを除いて緩和モデルは遷移過程の乱流構造を的確に記述しているものと判断できる。

5. あとがき

著者らによって提案された粗度急変に対するReynolds応力分布の応答に対する緩和モデルが, 風洞, 実験室内開水路流れ, 用水・実河川規模の流れにそのパラメータを変更することなく適用できることがわかった。参考文献 1)辻本・Cardoso・斎藤(1990)水講34, 2)Jacobs(1939)ZAMM19, 3)楠津・中川・瀬谷・鈴木(1990)水講34, 4)辻本・北村・岡田・王子(1991)水講35。