

縦断方向に粗度が繰り返し変化する開水路流れの特性

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

1. まえがき

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、粗度急変流れに対する適用性を実験的に検討している²⁾。本報は、粗面、滑面が繰り返される条件での乱流構造を実験的に調べ、緩和モデルの適用性の検討を行ったものである。このような粗度変化の繰り返しはいわゆるgravel sheet(縦断交互分級)で見られるし、原則的には河床波の第一近似でもある。また、粗滑遷移実験で疑似等流の調整が実際には難しいのに対し、粗滑を何度も繰り返す流路では疑似等流を得易いといった利点がある。さらに、粗滑繰り返し波長とReynolds応力の緩和距離との比によってどの程度流れの空間的均質性が確保されるかも興味ある課題である。

2. 緩和モデルの概要とその粗・滑繰り返し流路への適用

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⁾。

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

ここで対象としているように, 摩擦速度が流下方向長さ L (水深 h で無次元化したもの)ごとに急変する場合, 任意の1つの粗度急変点から下流 ξ の断面でのReynolds応力分布は次のようになる。

$$\tau(\eta|\xi) = (1-\eta) \cdot \Omega'(\eta|\xi) \quad ; \quad \Omega'(\eta|\xi) \equiv (\beta^2-1)\psi'(\eta|\xi)+1 \quad ; \quad \psi'(\eta|\xi) = 1 - \exp(-\xi/\eta) / \{1 + \exp(-L/\Lambda)\} \quad (3)$$

ここに, $\beta \equiv u_{*2}/u_{*1}$, u_{*1}

: 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。

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_{*1}}{\kappa y} \sqrt{\Omega'(\eta|\xi)}$$

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

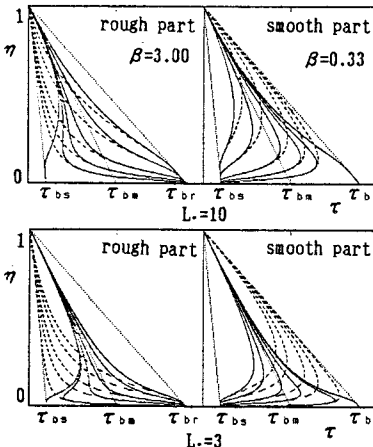


図1 Reynolds応力分布

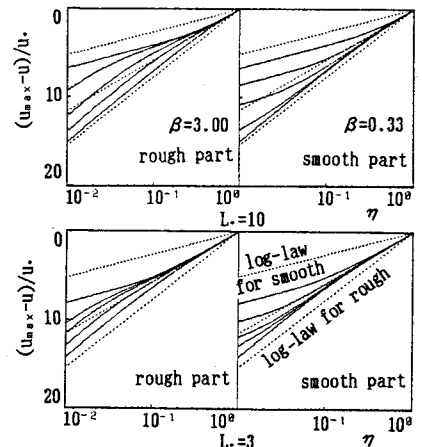


図2 流速分布

図1, 2は, 粗・滑繰り返し流路でのReynolds応力分布, 流速分布の計算例で, 単一の急変流れでの計算結果と比較されている。なお流速分布図には 平均底面せん断応力に対する対数則も併示した。式(4)の積分では, 表面流速を境界条件とした。Lが小さくなるにつれて乱流構造に占める平均底面せん断応力に支配される領域が増えることがわかる。

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)。水路中に長さL (15, 30, 45cmとした, $L=L/h$)の粗面部・滑面部を繰り返し設置し, この上に疑似等流を調整し 充分下流の2組の粗面・滑面部を測定区間とした。流速測定は直径3mmのプロペラ流速計を用いて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。

これまでの研究により粗度変化に対し底面せん断応力はほぼ瞬時に応答することから, 底面近傍の流速勾配から粗面部・滑面部の摩擦速度を評価すればよいが, 滑面に比べ粗面は粗度が邪魔して底面付近の流速データが得られていない。そこで, 先の計算結果に基づき, むしろ表面付近での流速勾配に対数則を当てはめて1波長平均された摩擦速度(u_{*m})を評価し, これと滑面での底面近傍流速データから評価された滑面の摩擦速度(u_{*s})から, 次式より逆算で粗面の摩擦速度(u_{*r})を推定, 粗度変化指標 β を決定, これに対して緩和モデルを適用した。

$$u_{*m}^2 = (u_{*s}^2 + u_{*r}^2) / 2 \quad (\text{添字 } m, r, s \text{ は 1 波長平均, 粗面, 滑面での値を示す}) \quad (6)$$

なお式(5)の積分の際には, 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3に実験結果と比して示した。また乱れ強度分布については図4に示す。緩和モデルは流速分布は的確に予測しているが, 乱れ強度の実験結果は緩和モデルで期待するほどには底面での応答がすばやくなく, 乱れの相関構造についての相似性が底面近傍で保証されていない可能性がある。

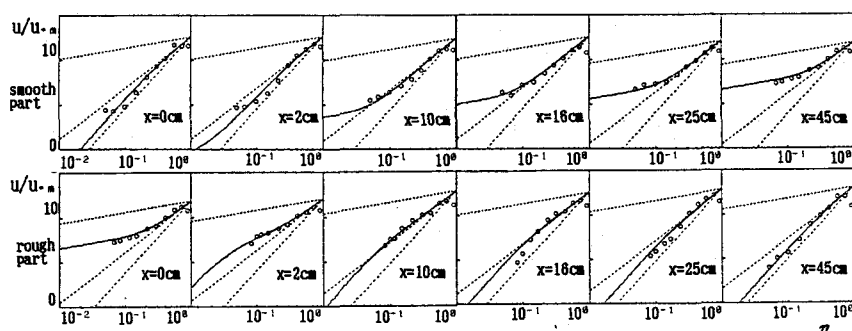


図3 流速分布の実験結果($L=45\text{cm}$, $h=6.08\text{cm}$)

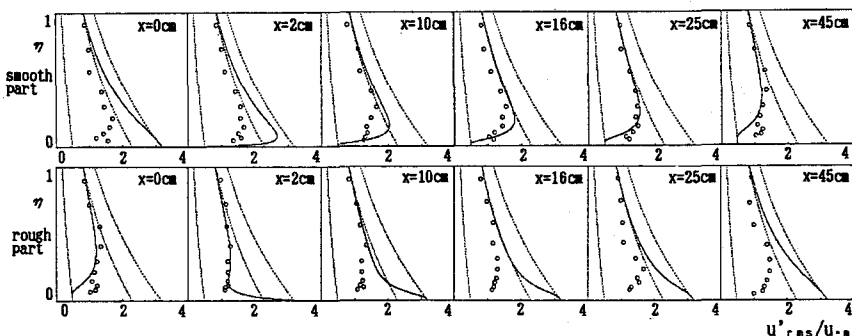


図4 乱れ強度分布の実験結果($L=45\text{cm}$, $h=6.08\text{cm}$)

4. あとがき

粗度変化に対するReynolds応力分布の応答に対する緩和モデルの適用性を, 粗・滑が繰り返される路床上の流れについての実験によって検討した。流速分布については緩和モデルは実験結果を的確に記述するが, 乱れ強度分布の変化では相関構造の相似性に基づくモデルが必ずしも適当でない可能性が示された。

参考文献 1)辻本・Cardoso・斎藤(1990)水講34, 2)辻本・宮垣・漆崎(1991)中部支部年次研究発表会。