

開水路粗度急変流の乱れと浮遊砂濃度の遷移過程

京都大学防災研究所 正員 村本 嘉雄 京都大学防災研究所 正員 藤田 裕一郎
 明石工業高等専門学校 正員 神田 佳一 大阪府 正員 〇矢田 哲郎

1. はじめに：本研究では護床工等水利構造物周辺の水利特性を明らかにすることを目的として、底面粗度が滑面から粗面、あるいは粗面から滑面へと急変する非平衡乱流場において、乱れ特性と浮遊砂の流送特性を詳細に測定し、その結果を $k \sim \varepsilon$ 乱流モデルと浮遊砂の拡散方程式を用いた数値解析結果と比較した。

2. 実験の概要：実験水路は全長15m、幅40cm、深さ30

cmの木製矩形断面水路であり、底面は直径 $D=2.45$ cmのガラス玉を最密に敷並べその下半分を石膏で充填した半球粗度（マンギンの粗度係数 $n_R=0.02$ ）、及び表面ペイント仕上げの合板（ $n_S=0.01$ ）からなり、水路中央部で粗度は急変する。実験は、表-1の6ケースを行い、水面形を測った後、粗度急変部周辺の乱れ特性

や浮遊砂濃度を計測した。流速の測定には2方向用熱膜流速計、浮遊砂濃度の測定には光学濃度計を用い、読み取り時間1/108sec、読み取り個数4096個で統計処理を行った。なお座標系は、粗度変化点から流下方向に x 軸、底面から鉛直上方に z 軸をとり、水路中心線上で測定した。

3. 遷移形態と水面形：図-1は、粗度急変部の流れの遷移を流量 $Q \sim$ 勾配 i の平面上で示したもので、滑面及び粗面におけるそれぞれの限界勾配 i_S, i_R によって遷移形態Ⅰ（粗面は常流、滑面は射流）及びⅢ（ともに射流）に分類される。図-2(a)、(b)は、粗度急変部周辺における水面形の測定結果をRun SR-1C及びRS-1Cについて

示したものであり、白丸は本実験値、黒丸は同じ流量条件での大坪¹⁾の実験値である。(a)では水面は滑らかに遷移しているのに対して、(b)の大坪の実験では水面波がみられる。これは粗度変化点での滑面河床隅角部による局所的な段上がり効果によるものと思われる。今回の実験では、その隅角部をカットし

たので、水面は滑らかに低下している。また、図には示していないが、遷移形態ⅡのRun SR-2Cでは跳水が発生しており、その発生位置とRun RS-2Cの支配断面は粗度変化点から下流側にシフトしている。遷移形態Ⅲでは、Run SR-3C及びRS-3とも水面形の遷移は短区間で完了しており、その区間の水面の勾配は急である。

4. 乱れ特性：図-3(a)、(b)は乱れエネルギー k の鉛直分布の流下方向変化をRun SR-1CとRS-1Cについて示したもので、実験値と $k \sim \varepsilon$ 乱流モデル²⁾を用いた計算値とを比較している。(a)では底面付近で k が急激に増加して下流部のはば直線の分布に遷移しており、(b)では底面付近で k が急激に減少して下流部の分布に近づいている。実験結果

表-1 実験条件

実験番号	河床勾配 i	粗度条件	流量 Q (l/s)	*等流水深 h_{a2} (cm)	*摩擦速度 U_*2 (cm/s)	浮遊砂濃度 c (ppm)
SR-1C	1/500	滑→粗	4.10	3.94	2.54	340
SR-2C	1/100	"	4.58	2.60	4.75	680
SR-3C	1/50	"	5.57	2.42	6.50	1020
RS-1C	1/500	粗→滑	3.72	2.64	2.14	380
RS-2C	1/100	"	5.10	1.95	4.22	580
**RS-3	1/50	"	6.21	1.85	4.22	—

注) *下流部等流区間の値 **水面形のみ測定

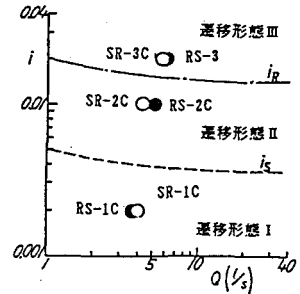


図-1 流れの遷移形態

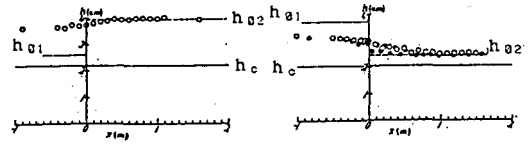


図-2 水面形の測定結果

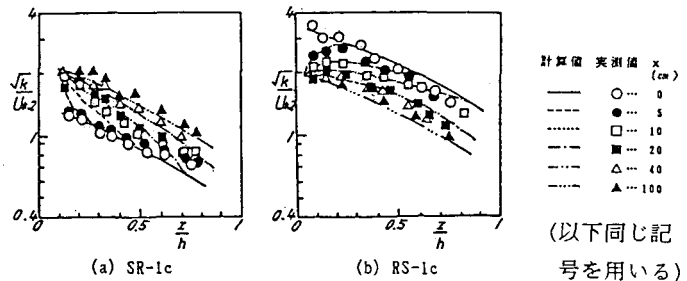


図-3 乱れエネルギー k

計算値 実験値 x (cm)
 — ○ — 0
 - - - ● - - 5
 - - - □ - - 10
 - - - ■ - - 20
 - - - △ - - 40
 - - - ▲ - - 100
 (以下同じ記号を用いる)

Yoshio MURAMOTO, Yuichiro FUJITA, Keiichi KANDA, Tetsuro YADA

と計算値は必ずしも一致しないが、底面から変化していく様子はよく一致している。図-4はRun SR-1Cについて渦動粘性係数 ν_t の実験結果と計算結果を比較したもので、計算結果によれば $x=0$ 及び $x=100\text{cm}$ では z/h

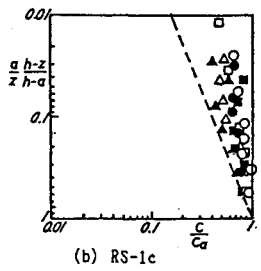
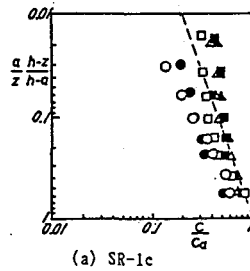
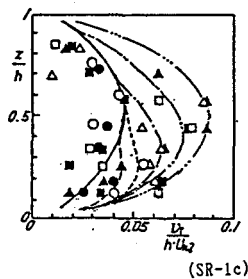


図-5 浮遊砂濃度の流下方向変化①

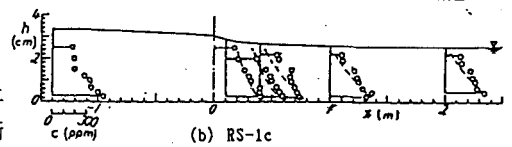
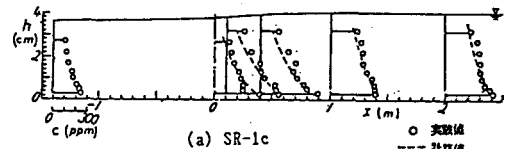


図-6 浮遊砂濃度の流下方向変化②

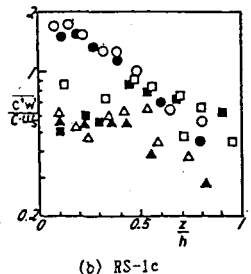
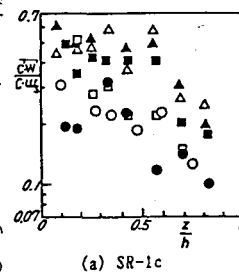
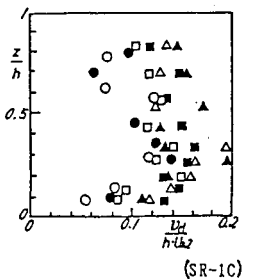


図-7 $c \cdot w'$ の流下方向変化



(SR-1C)

図-8 渦動拡散係数

図-4 渦動粘性係数物線分布であるが、その間の遷移過程は様ではなく、 $0 < z/h < 0.5$ で早く遷移し、実験結果の値とはやや異なるが定性的にはほぼ一致している。

5. 浮遊砂の濃度分布特性: 図-5 (a)、(b)及び図-6 (a)、(b)は、Run SR-1C及びRS-1Cについて浮遊砂濃度の鉛直分布の遷移特性を示したものである。両図とも、(a)では乱れ強度が増加することにより浮遊砂が上方に巻き上げられて、次第に鉛直方向に比較的均一な下流部の平衡分布へと遷移し、逆に(b)では乱れ強度が減少するので巻き上げられる浮遊砂量は減少し、底面付近でやや濃度が増加しているのが分かる。図-5の各測点における濃度は、それぞれ $z=0.3\text{cm}$ での基準濃度 C_0 で無次元化しており、図中の点線のように $x=100\text{cm}$ の分布にラウス式を適用すると $\beta=2$ となった。図-6は渦動拡散係数 $\nu_d = 2 \cdot \nu_t$ とした計算結果と実験値の比較であり、ほとんどの断面の水面付近で計算値の方が大きくなっているものの実験値と計算値はほぼ一致しており、浮遊砂の非平衡特性をある程度予測できることが分かる。図-7

(a)、(b)は $c \cdot w'$ の流下方向変化である。(a)では乱れの増加に従って鉛直方向に運ばれる浮遊砂が増加することを示しているが、その増加の様子は乱れエネルギーに比べるとかなり複雑である。一方(b)では $x=5\text{cm}$ まではほとんど変化がないが、それより下流では、特に $z/h < 0.5$ で乱れの減少に伴って鉛直方向に運ばれる浮遊砂が大きく減少しており、乱れエネルギーの減少開始よりもやや遅れている。図-8はRun SR-1Cについて渦動拡散係数 ν_d の流下方向変化を示したものである。渦動拡散係数の変化は渦動粘性係数のそれとよく似ており、渦動粘性係数との比 $\beta (= \nu_d / \nu_t)$ の平均値は約2であった。これは下流粗度上の平衡浮遊砂分布からラウス式を適用して得られた値と一致しており、非平衡場においても比例関係が成り立つものと思われる。

6. おわりに: 本文では、粗度急変流の乱れと流砂の遷移機構について述べたが、浮遊砂濃度の遷移特性は、粗度急変部の乱れ特性と密接に関係していることが分かった。今後は、三次元の流れ場における考察や、より実河川に即した移動床における洗掘、堆砂現象の評価などに適用していくことが必要であろう。

【参考文献】 1) 大坪 高: 京都大学卒業論文、1988、pp.12-13.

2) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎: 第33回水理講演会論文集、1989、pp.499-504.