

開水路底面粗度急変部の乱流構造

Turbulent Structure of Open Channel Flows with Sudden Change in Bottom Roughness

京都大学大学院 神田 佳一 K. Kanda

京都大学防災研究所 村本 嘉雄 Y. Muramoto

京都大学防災研究所 藤田 裕一郎 Y. Fujita

Before and behind the bed protection works in natural rivers, the bed roughness abruptly changes from smooth to rough and rough to smooth. This paper deals with the water surface profile and turbulent structure of open channel flows with sudden change in bottom roughness experimentally and theoretically. Changes in vertical distribution of sediment concentration under the fully suspended condition are also discussed. The transition of flow depth was found to be mainly depend on the bed slope and classified into three types of flow patterns. In the downstream reach after roughness change, the velocity and turbulent property distributions vary with development of the internal boundary layer, in which the transfer of turbulent energy by convection and vertical diffusion is dominant factor in the turbulent energy budget. The calculated results of the $k-\varepsilon$ and sediment transport models agree well with the experimental ones.

Keywords: sudden change in bottom roughness, turbulent flow structure, suspended sediment

1. はじめに

一般に、河川にはダム、堰、床固め等の治水、利水を目的とした多くの河川構造物が設置されており、それらの周辺には、急激な流れの変化による局所洗掘を防止するために護床工が設けられる。しかしながら、護床工の近傍では河床粗度が急変し、それに伴って流れ特性が複雑に変化するために、下流端近傍の洗掘や間隙からの砂の吸い出しによる空洞化が原因となって護床工が破壊されるなど多くの問題を抱えている。こうした護床工周辺の流れは、水理学的には開水路底面粗度急変流として定義され、従来、内部境界層の概念から流速分布及び抵抗特性の遷移が論じられているものの¹⁾、乱れ機構や特に流砂機構についてはほとんど議論されていない。本研究では、系統的な基礎実験から底面粗度急変部における水面形の遷移について分類・検討したのち、流速の測定結果と $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる解析結果との比較から、平均流速及び乱れの遷移特性とエネルギー収支に注目して考察する。また、浮遊砂の流送機構に関連して、完全浮遊状態での濃度分布の変化過程について拡散方程式の適合性を検討する。

2. 実験の概要

実験水路は、幅40cm、長さ15mの長方形断面水路である。底面粗度としては、半球を最密に敷設した粗面路床（粗度高さ $K=1.22\text{cm}$ 、粗度係数 $n=0.02$ ）と木製ペイント塗装の滑面（ $n=0.01$ ）を用い、水路上流端より5.5m下流の位置で粗度を変化させた。粗度基面は流速分布の測定結果から半球の頂点と判断し、滑面の高さをそれと一致させた。実験は、表-1

表-1 実験条件

に示す6ケースでいずれも水路下流端で水位調節を行い、最下流区間でほぼ等流状態が得られている。RS-3を除く5ケースについては、清水で流れ特性を測定した後、平均粒径 $d=0.1\text{mm}$ の珪砂（比重 $\gamma=2.74$ 、沈降速度 $v_s=0.7\text{cm/s}$ ）を水路上流端より

実験 番号	粗度 条件	河床 勾配 1	流量 $Q(\text{l/s})$	下流部 等流水深 $h_2(\text{cm})$	下流等流部 厚底速度 $U_2(\text{cm/s})$	流れの 遷移形態	平均浮遊 砂濃度 $C_s(\text{ppm})$
SR-1	滑→粗	1/500	4.00	3.98	2.55	常流→常流	340
SR-2	"	1/100	4.26	2.52	4.95	射流→常流	680
SR-3	"	1/50	5.44	2.34	6.41	射流→射流	1020
RS-1	粗→滑	1/500	3.75	2.54	2.08	常流→常流	380
RS-2	"	1/100	5.07	1.93	4.15	常流→射流	580
RS-3	"	1/50	6.21	1.85	4.22	射流→射流	---

全幅にわたって連続的に供給し、流速及び浮遊砂濃度の同時計測を行った。流速の測定には2方向熱膜流速計（KANOMAX製、MODEL1246-60W）を用い、浮遊砂濃度は光学濃度計（東京計測製、MODEL PC-106）によって計測した。各データは、サンプリング周波数 $f=108\text{Hz}$ でA/D変換した後、統計処理された。

3. 解析方法

次の仮定、①静水圧近似が可能である、②Boussinesq近似が成立する、③浮遊粒子間の相互作用は無視できる、を用いれば、鉛直二次元の連続式、主流方向の運動方程式、乱れエネルギー k 及び逸散率 ε の輸送方程式、浮遊砂濃度の移流拡散方程式は、それぞれ以下のように書ける。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\nu_t + \nu) \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + g \left(i - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right\} + \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right\} + \frac{k}{\varepsilon} \{ C_1 \cdot \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - C_2 \cdot \varepsilon \} \quad (4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_c} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} (\nu_s \cdot c) \quad (5)$$

ここに、 t は時間、 x 及び z はそれぞれ流れ方向、鉛直方向の空間座標で、座標原点は粗度変化点の粗度基準上に採った。 u 、 w はそれぞれ x 、 z 方向の時間平均流速、 c は浮遊砂濃度、 ν_s は浮遊粒子の沈降速度、 ν は動粘性係数、 ν_t は渦動粘性係数 ($\nu_t = C_\mu \cdot k^2 / \varepsilon$)、 h は水深、 g は重力加速度、 i は河床勾配である。各モデル定数には表-2に示す値を用いた。水面及び底面の境界条件は、Celik・Rodi²⁾の方法に従った(表-3)。ここで、 κ はカルマン定数 ($=0.4$)、 z_0 は粗度パラメータである。また、底面での砂の堆積はないものとし、堆積率 A は0とした。摩擦速度には、粗度変化点上流部及び下流区間で、それぞれ流速勾配及び等流水深と河床勾配から計算した実験値 U_{x1} 、 U_{x2} を用いた。水深は実験結果を内挿して与えた。基礎式は計算領域 ($-1\text{m} < x < 2\text{m}$) 内でドナー・セル法によって離散化され、与えられた初期値から上述の境界条件のもとで定常解が得られるまで繰り返し計算を行った。

表-2 モデル定数

C_μ	σ_k	σ_ε	σ_c	C_1	C_2
0.09	1.0	1.3	0.5	1.44	1.92

表-3 境界条件

	水面条件	底面条件 ($z = z_c$)
u	$\frac{\partial u}{\partial z} = 0$	$\frac{U_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z_c}{z_0} \right)$
k	$\frac{\partial k}{\partial z} = 0$	$\frac{U_*^2}{C_\mu^{1/2}}$
ε	$5.54 \frac{k^{3/2}}{h}$	$\frac{U_*^3}{\kappa z_c}$
c	$\frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial z} + \nu_s c = 0$	$\frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial z} + \nu_s c (1 - A) = 0$

4. 粗度急変流の遷移形態と水面形

図-1は、粗度急変に伴う流れの遷移を流量 Q -勾配 i 平面上で示したもので、滑面及び粗面河床における限界勾配 i_s (破線) 及び i_R (一点鎖線) によって領域Ⅰ (粗面、滑面とも常流)、Ⅱ (粗面は常流、滑面は射流) 及びⅢ (ともに射流) に分類される。各実験の遷移水面形状は図-2のようであって、図中の実線は限界水深、一点鎖線及び破線はそれぞれ上流部及び下流部の等流水深である。各実験の流れの遷移の特徴は次のようである。

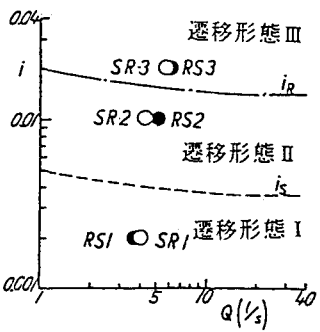


図-1 流量と限界勾配の関係

(1) 遷移形態Ⅰ ($i < i_s$) : 底面粗度が粗面から滑面に変化する場合 (RS-1) において、既報³⁾で筆者らが示した粗度変化点下流の水面の波打ち (●印の水面形) は、粗度変化点での滑面河床の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。今回の実験では隅角部を円形にカットしたため波打ちは見られ

ず、SR-1と同様に水面は滑らかに遷移している。

(2) 遷移形態Ⅱ ($i_s < i < i_R$) ; 滑から粗の場合 (SR-2) は射流から常流へと遷移し跳水が起こる。粗から滑へと変化する場合 (RS-2) には、常流から射流へと遷移するが水深は粗度変化点近傍の上流側で一旦増加し、その下流では急激に減少している。このとき、支配断面の位置は粗度変化点よりも下流にシフトする。

(3) 遷移形態Ⅲ ($i_R < i$) ; 流れは射流から射流へと遷移する。遷移形態Ⅱの場合と同様に、水面

形は粗度変化直後に上流部の等流状態から下流部の等流状態へと遷移し、水面勾配は大きい。

5. 平均流速と乱れ特性

5-1. 平均流速: 図-3は、実験及び計算結果より平均流速分布の流下方向への変化を示したものである。図中、 U_{x2} は下流等流部の摩擦速度、 K は半球の高さである。滑面から粗面への変化では、粗度変化点上での滑面乱流場での流れが粗面上を流下するに従い、底面より粗面对数則に従う新たな内部境界層の発達が見られ、流速分布は内部境界層の上端で交わる2本の直線で表される。逆に、粗面から滑面へ変化する場合には、流速分布は粗面对数則から滑面对数則へと遷移するが、その遷移は同様に内部境界層の発達によって説明される。このことは、計算結果ではより明確であり、両ケースとも x の増加とともに内部境界層が鉛直方向に発達する様子がシミュレートされており、底面近傍を除いて、実験値ともよく一致している。

5-2. 乱れ特性: 図-4、5及び6は、それぞれ乱れ強度 u' 、 w' 、レイノルズ応力 $-u'w'$ 及び渦動粘性係数 ν_t の鉛直分布を下流等流部の摩擦速度 U_{x2} と水深 h で無次元表示したものである。滑面から粗面に流入する流れ (SR-1) においては、底面付近での速度の減少に伴って乱れ強度及びレイノルズ応力は増加し、底面で新たに生成される渦によって、乱れエネルギーは底面から上方へと移動する。このエネルギーの伝播が行われる非平衡領域は、上述の内部境界層を形成し流下

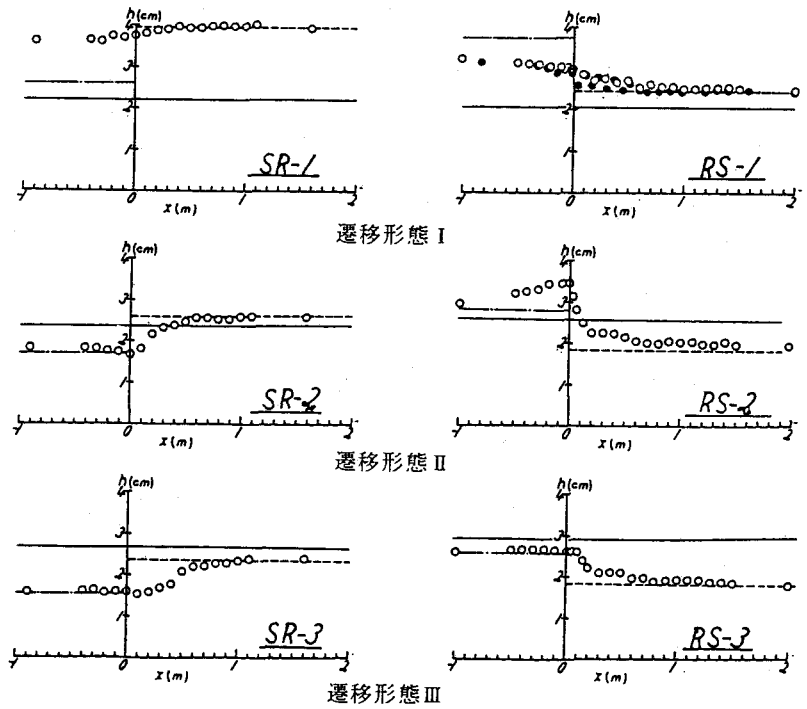


図-2 遷移水面形状

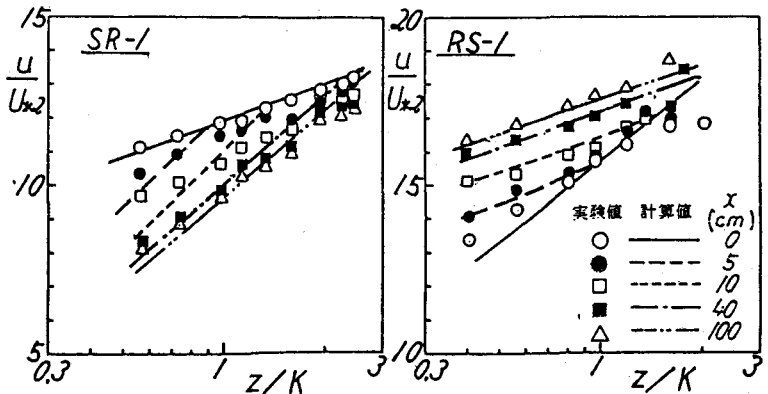


図-3 平均流速分布

するに従って発達している。内部境界層の外側では、滑面上の乱れ特性が保存されているが、 x が 1m を越えると内部境界層は水面まで達し粗面上での平衡状態が得られる。この間、渦動粘性係数は底面近傍でやや複雑な挙動を示すが流心部ではほぼ単調に増加しており、乱流混合が顕著である。粗面から滑面に流入する流れ(RS-1)では滑面上に流れが入ると、底面より発生する乱れエネルギーは減少し、内部境界層内では乱れ強度及びレイノルズ応力は上層から下層に向かって減少、あるいは一様分布となる。渦動粘性係数も一様に減少し、滑面上の放物線分布に遷移する。これらの諸特性は、大きな水位変化を伴う遷移形態Ⅱ及びⅢの場合においても確かめられた。

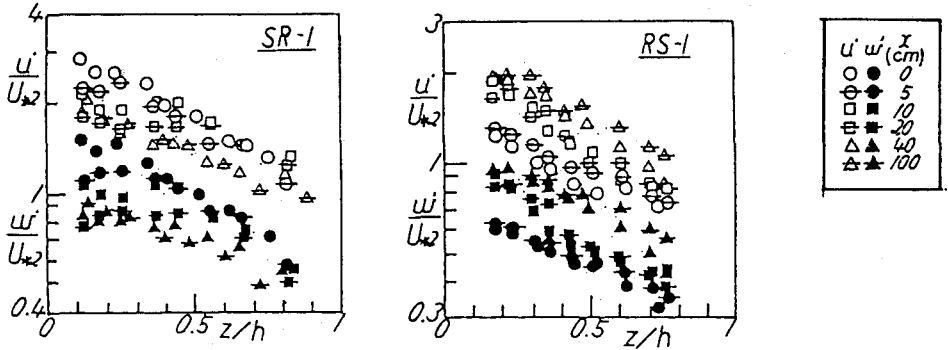


図-4 乱れ強度分布

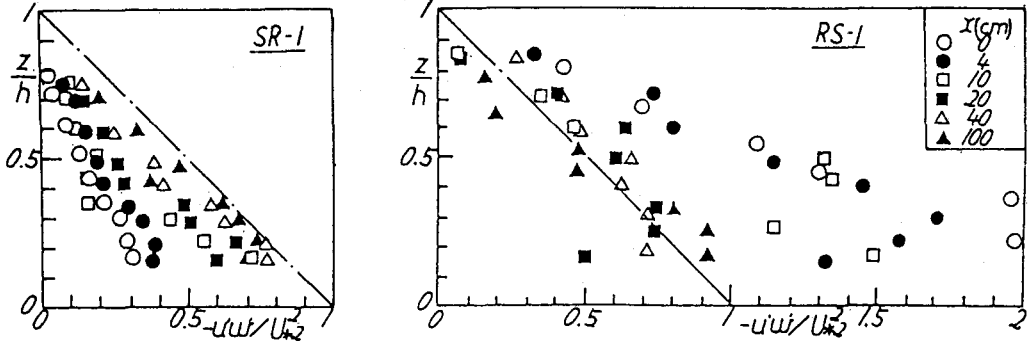


図-5 レイノルズ応力分布

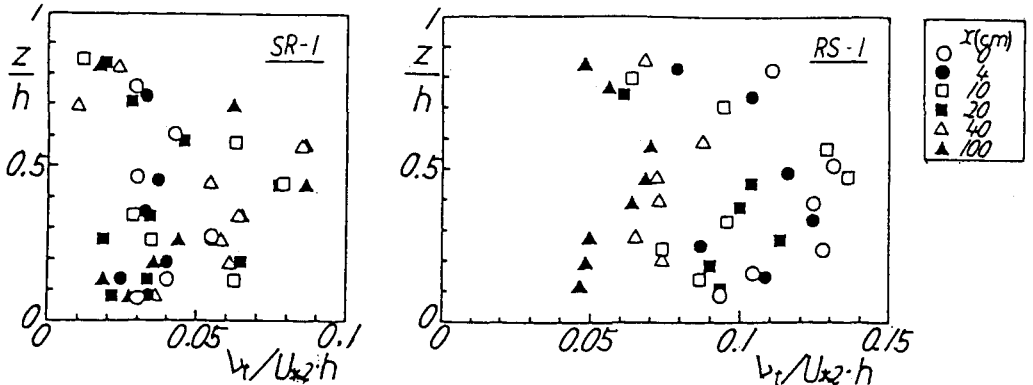


図-6 渦動粘性係数の分布

5-3. 遷移長さ：これまで述べたように、粗度急変部では上流粗度上の特性を有する流れが粗度変化点より遷移区間をへて下流粗度上の平衡分布へと遷移する。流速及び乱れ強度に注目して、この一様領域への遷移長しを下流部等流水深 h_2 で無次元化し、上・下流の粗度係数比 n_1/n_2 で整理すれば図-7のようである。同図には田中⁴⁾による六脚ブロックと滑面を用いた実験及び棧間隔の異なる2種の棧粗度を用いた神田⁵⁾の

実験結果も示されている。図より、いずれの場合も流速の遷移区間は乱れ強度のそれに比べて短く、また、 $n_1 > n_2$ の場合には $n_1 < n_2$ のときよりも長い遷移区間が必要であることがわかる。これは、より乱された乱流場へと変化する滑から粗の流れに比べて粗面乱流場から滑面乱流場への乱れの消散過程の方が、その相対的遷移長が大きくなることを示している。また、 n_1/n_2 が 1 に近づくほど L/h_2 は小さく、粗度の変化が大きいほど遷移長は長くなっているが、 $n_1 < n_2$ の場合には上述の考察とは矛盾しており、今後の検討が必要である。

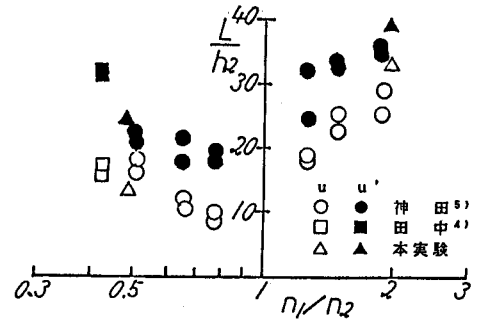


図-7 遷移長さ

6. 乱れのエネルギー収支

図-8 は、 $x=4\text{ cm}$ 、 10 cm 及び 70 cm の各断面において、乱れエネルギーの収支式 (3) 式の各項について、実験値と計算値を比較したものである。ただし、逸散率 ε は他項の総和より求めた。各成分は U_{rms}^2/h で正規化され、負符号はエネルギーの生成を示す。実験結果では、粗度変化点直下流 ($x=4\text{ cm}$) で SR-1、RS-1 とともに、移流項がエネルギー収支の最も大きな割合を占めている。これは、図-4 から明らかなように、乱れエネルギーの変化の大部分が粗度変化点近傍、特に $x=0\sim 10\text{ cm}$ の区間で生じているためであり、主としてこの移流によるエネルギーの移動が粗度急変流の内部機構を特徴づける要因となっていると考えられる。また、拡散によるエネルギーの移動も卓越している。RS-1 では特に粗度変化点直下流において、底面近傍ではエネルギー損失、流心部ではエネルギー生成の大きな部分を拡散項が占めており、鉛直方向に強い混合が生じていることがわかる。一方、SR-1 では $x=10\text{ cm}$ で拡散項が卓越しおり、平均流によるエネルギーの生成量を上回っている。また、移流項が流下するに従い急激に減少するのに対して、拡散項は底面近くで減少しているものの流心部ではむしろ増加傾向にあり、この拡散による鉛直方向への乱れの伝播によって内部境界層が形成されることを示している。平均流場からの乱れエネルギーの生成量は、SR-1 では流下方

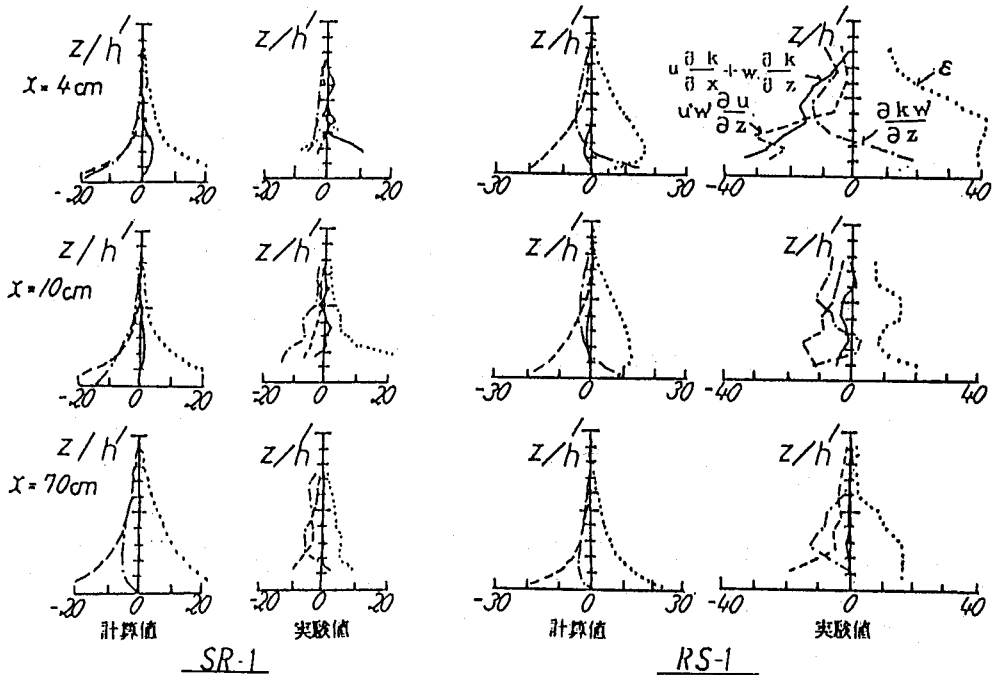


図-8 乱れのエネルギー収支

向に増加し、逆にRS-1では減少しているが、両ケースともに実験値は計算値よりも小さくなっている。また、エネルギー収支を特徴づける移流項は、計算では $x=4\text{ cm}$ で無視できるほど小さくなっている。

これは、底面せん断力の境界条件を粗度変化点で U_{k1} から U_{k2} に不連続に変えたためであって、 $x=1\text{ cm}$ では計算結果でも大きかった。しかしながら、拡散項は定量的にも実験結果とよく一致しており、粗

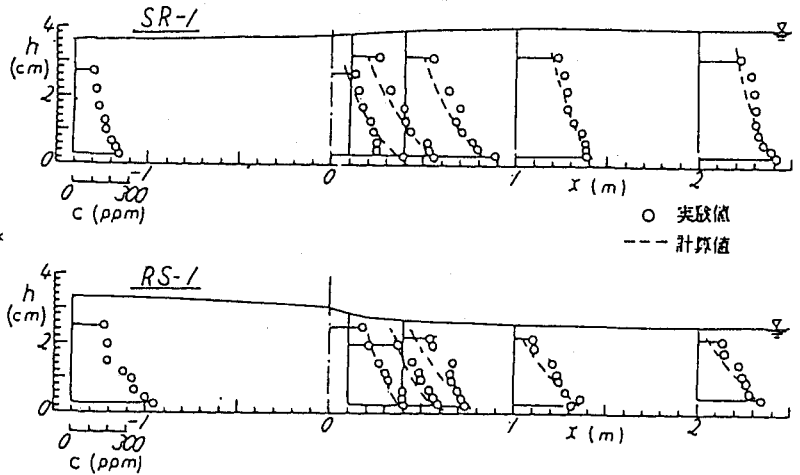


図-9 浮遊砂濃度分布

度変化点及び水面などの取り扱いに課題が残されているものの、本計算法の有用性は評価できよう。

7. 浮遊砂濃度分布

図-9は、浮遊砂濃度分布の流下方向への変化を示したものである。浮遊砂の流送機構は鉛直方向の乱れ挙動と密接に関係しており、浮遊粒子は粗度変化後の乱れエネルギーの移動に伴って、滑から粗の場合では下層から上層へ、粗から滑の場合では上層から底面近傍へと拡散される様子が濃度分布の変化からうかがえる。計算結果は実験結果と一致しており、流れ場と同様に、浮遊砂の非平衡特性を予測できることがわかる。

8. 結論

本研究では、粗度急変部の乱れ構造に関して実験及び数値計算から検討した。その結果を要約すれば以下のようである。

- (1) 水面形の遷移形態を流量・河床勾配と滑面及び粗面における限界勾配との関係から3つに分類し、それぞれの遷移水面形の特徴を明らかにした。
- (2) 流速分布および乱れ特性は、粗度変化の急変に伴って底面より変化し、内部境界層を形成する。その内部では移流及び鉛直拡散によるエネルギーの移動が卓越し、強い非平衡性を示す。浮遊粒子の運動は、この拡散混合によって支配される。
- (3) $k-\varepsilon$ モデルと拡散方程式を用いた数値解析結果は、実験結果とよく対応しており、粗度急変部での複雑な乱れ構造をある程度明らかにすることができる。

最後に、実験と結果の整理に尽力して頂いた京都大学大学院生、大坪高君ならびに同学学生、矢田哲郎君に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 村重・松梨・吉川：粗度急変流内部の底面せん断力算定、土木学会論文報告集、第261号、1977。
- 2) Celik・Rodi: Numerical modelling of sediment transport in open channel flows、Mechanics of Sediment Transport、1982
- 3) 神田・村本・藤田：開水路粗度急変部の乱流構造、第43回年講第2部、1988。
- 4) 田中：開水路底面が滑面から粗面に移行する領域の水理特性に関する実験的研究、豊橋技術科学大学修士論文、1984。
- 5) 神田・四倉：開水路粗度急変部における流れの内部機構、第42回年講第2部、1987。