

開水路粗度急変部における浮遊砂の流送過程

神田 佳一・大坪 高・村本 嘉雄・藤田裕一郎

TRANSPORT PROCESS OF SUSPENDED SEDIMENT IN AN OPEN CHANNEL WITH A STEP CHANGE IN BOTTOM ROUGHNESS

By *Keiichi KANDA, Takashi OTSUBO,*
Yoshio MURAMOTO and Yuichiro FUJITA

Synopsis

The purpose of this study is to elucidate the three-dimensional characteristics of the sediment laden flow in an open channel with a step change in bottom roughness. Under the fully suspended sediment conditions, the detailed measurements of flow velocity and sediment concentration have been carried out over the bed roughness abruptly changed from smooth to rough and rough to smooth.

In the case of the smooth-to-rough change, it is shown that secondary flows, whose length scales are as large as the depth, are developed on the rough bed at the downstream reach, transporting suspended sediment toward the side walls. In the other case with the rough-to-smooth change, suspended particles gradually settle as turbulent intensity decreases near the side walls, and ripple covers the smooth bed. Suspended load diminishes at the downstream reach because of this settlement.

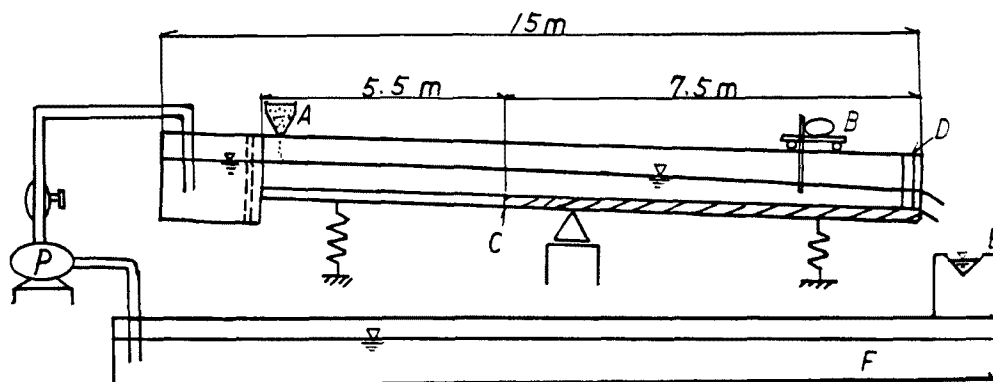
1. 緒 言

開水路における底面粗度の急変に伴う流れの遷移現象に関して、筆者らはこれまで、系統的な基礎実験に基づいて粗度急変による水面形の変化と水路中央部における流速分布、乱れ特性および浮遊砂濃度の遷移特性について検討してきた¹⁾⁻³⁾。しかしながら、河道を横断して設けられる護床工周辺部の流れおよび流砂機構を解明し、その合理的な設計法を確立するためには、粗度急変に伴う二次流構造の変化および側壁の影響をも考慮した三次元的な取扱いが必要であろう。

本研究は前報²⁾に引続き、浮遊砂を含む底面粗度急変流れの水力特性を解明することを目的として、半球粗度および滑面からなる底面粗度急変場における流速と乱れ特性の横断分布および流下方向変化について実験的に考察するとともに、浮遊限界に近い状態における浮遊砂濃度の三次元分布を詳細に測定することにより、その流送過程について検討を加えたものである。

2. 実験の概要

実験は、底面粗度が、滑面から粗面および粗面から滑面へと変化するの二つの場合を対象とし、粗度急変部における流れおよび浮遊砂濃度の三次元特性を検討するものであって、実験には Fig. 1 に示すよう



A: sand feeder, B: carriage for measurement, C: changing point in surface roughness
D: weir for water surface control, E: triangular weir, F: returning flume

Fig. 1. Experimental flume and equipment.

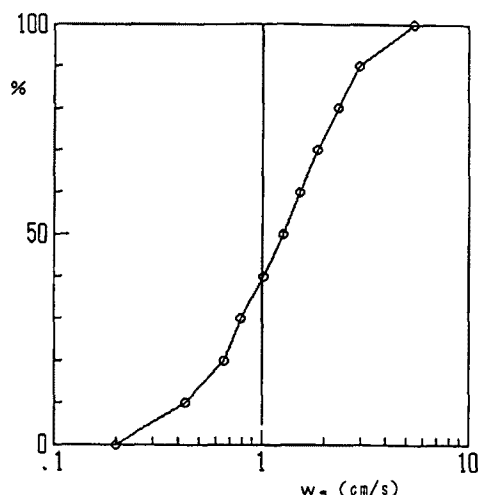


Fig. 2. Settling velocity distribution curve of the sand used.

な循環式の木製長方形断面水路（幅 40 cm，高さ 30 cm，長さ 15 m）を使用した。水路底面は，前報²⁾と同様に，木製ペイント塗装の滑面路床と直径 $D = 2.45$ cm のガラス球の下半分を石膏で充填した半球粗度で構成され，水路始端から 5.5 m の位置で粗度を変化させている。滑面および粗面の粗度係数は，それぞれ $n_s = 0.01$ および $n_R = 0.02$ であって，粗面の粗度高さ k_s は 1.23 cm である。また，半球粗度の基面は半球の頂面にとり，その高さを滑面路床の表面と一致させた。供給した浮遊砂は，Fig. 2 に沈降分析の結果を示したような平均粒径 $d_m = 0.1$ mm，平均沈降速度 $w_s = 1.05$ cm/sec の 8 号硅砂（比重 2.74）である。水路上流端に設置したロータリーフィーダ型の装置で横断方向に一樣に給砂された砂は，水路を流下した後下流端の三角堰および帰還水路上で回収された。

流速および浮遊砂濃度の計測には，それぞれ超小型プロペラ流速計（篠塚製作所製，MODEL SV-33 W）および光学濃度計（東京計測製，MODEL PC-106）を用い，それらのセンサー部を水路に平行に約 5 mm の間隔で測定台に取り付け，水路断面各測点の流速と浮遊砂濃度の同時計測を行った。各測点における計測時間は 40 sec，データ数は 4096 個である。濃度計の検定曲線は，実験と同じ条件下で同一測点の採水による直接濃度測定を行い，その結果から求めている。

水路の座標は，水路中心線上の粗度変化点を原点とし，流下方向に x 軸，右側壁方向に y 軸および粗度基面から鉛直上方に z 軸をとっている。流速と浮遊砂濃度の測定断面は $x = -100, -10, 0, 5, 10, 20, 40, 70, 100, 200$ (cm) の 10 断面であって，各断面内の $y = 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12, 14, 16$ (cm)， $z = 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.2, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5$ (cm) の 96 点で測定を行った。

実験条件は，Table 1 に示す通りであって，滑面から粗面および粗面から滑面の流れにおいて，河床勾配 i を $1/500$ ，流量 Q を約 10 (l/sec) に設定した 2 ケースの実験を行った。浮遊砂の給砂量は，底面上に河床波が形成されず，ほぼ完全浮遊状態となるように留意して設定した。また，給砂量を流量 Q で除した平均浮遊砂濃度 C_0 の値から判断して，浮遊砂の存在が流れの乱れ構造に及ぼす影響および浮遊粒子間の相互作用は無視できるものと考えられる。なお，Table 1 の等流水深 h_{02} および摩擦速度 U_{*2} は，下

Table 1. Experimental conditions

Run No.	(1)	(2)	i	$Q(l/s)$	$h_{02}(cm)$	$U_{*2}(cm/s)$	$C_0(ppm)$
SR-8	smooth→rough	sub→sub	1/500	10.4	7.89	3.33	265
RS-8	rough→smooth	sub→sub	1/500	10.3	4.96	2.79	353

i : channel bed slope, Q : discharge, h_{02} : uniform flow depth in the downstream reach,

U_{*2} : friction velocity for the downstream reach, C_0 : sediment concentration supplied,

(1): changes in channel bed roughness,

(2): transition types of flow (sub; sub critical flow)

流部の等流状態と思われる区間のものである。

3. 水面形に関する検討

Fig. 3 は, Run SR-8 (滑面→粗面) および RS-8 (粗面→滑面) における水面形を示したものである。図中の破線および一点鎖線は, それぞれ粗度係数から算出した上流部および下流部の等流水深 h_{01} お

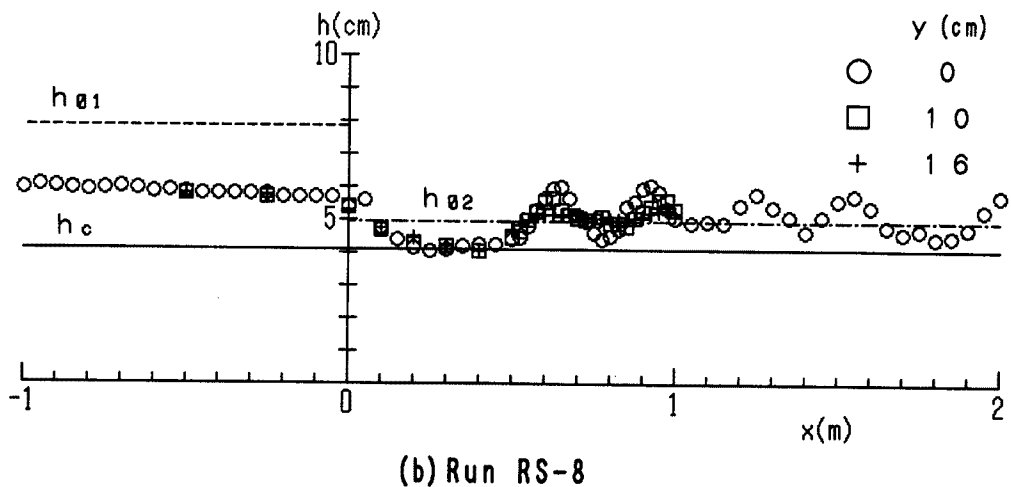
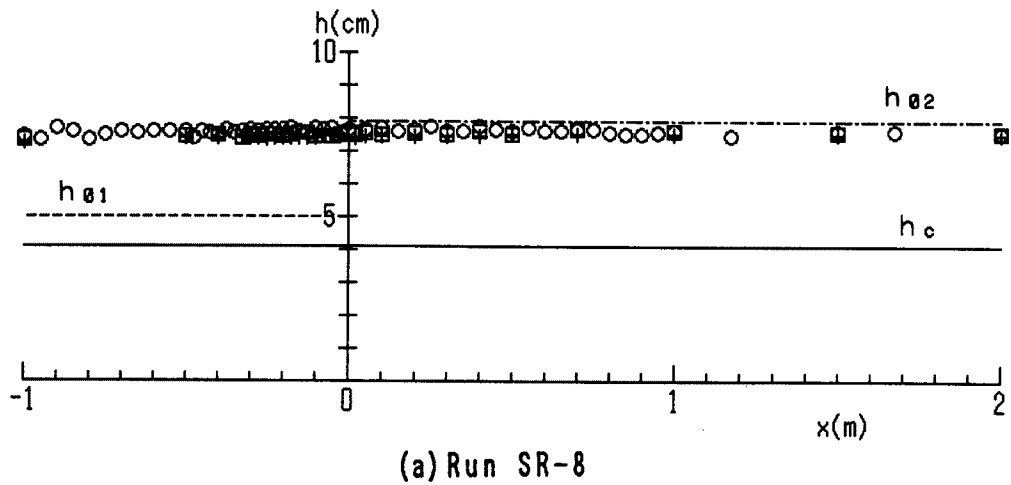


Fig. 3. Changes in water surface profiles in the downstream reach.

よび h_{02} であり、実線は限界水深 h_c である。

粗度変化点上・下流部での流れの状態に基づいた筆者らの分類¹⁾によれば、Run SR-8, RS-8ともに流れは常流であって遷移形態 I に分類されるが、それらの遷移水面形は両者の間でかなり異なっている。Run SR-8では、粗度変化点上流部においても下流部粗面の影響を受けており、上流部での堰上げ背水から下流部の等流水深へと非常に滑らかに遷移している。また、横断方向にも水深はほとんど変化していない。

一方、Run RS-8の場合には、粗面上での遅い流れが滑面上で加速され、限界水深に近づくことによって流れが不安定となり、側壁から発達する衝撃波の影響によって特徴的な水面形状を呈している。すなわち、水路中心線上 ($y=0$ cm) では粗度変化点から約 20 cm の区間で水深が急激に減少して限界流に近い状態となり、その下流では波長約 30 cm、波高約 1.6 cm の定常な水面波が発生していて、側壁近傍では波の振幅は若干小さくなっている。これは、粗度変化点において滑面板の隅角部を円形にカットした場合の結果²⁾とは大きく異なっているが、同様なことが 6 脚ブロックから滑面へと移行する粗度急変部でもみられ⁴⁾、底面が粗面から滑面に変化する流れにおいては、粗度の接続部の形状および基面位置のわずかなずれが水面形に大きく影響することがわかる。

4. 流速と乱れ強度に関する検討

4.1 平均流速の三次元分布

Fig. 4 は、 $y=0$, 10 および 16 cm の各測線について、時間平均流速 U の鉛直分布の流下方向変化を示したものであって、断面平均流速 U_0 および粗度高さ k_s を用いて無次元表示されている。また、 $z=0.3$, 1.0, 2.0 および 3.5 cm の高さにおける U の横断分布を示せば、Fig. 5 のようである。両図より、流速の三次元分布の特徴を述べると以下のようなものである。

a) 滑面→粗面の場合 (Run SR-8)

粗度の急変に伴う流速の流下方向変化は、底面に近いほど応答が早く、従来から指摘されているように¹⁾、新たな粗度に対応した内部境界層が底面近傍より徐々に発達していく様子が明確に現れている。横断方向の分布についてみると、滑面部、粗面部ともに $y=0 \sim 10$ cm の範囲では、流速は幅方向にほぼ一様であって二次流はあまり顕著ではない。しかし、 y が 10 cm を越えて側壁に近づくとき、とくに水面近傍の流速が急激に低下し、流速の鉛直勾配も減少するために流速分布が一様化される傾向にある。

b) 粗面→滑面の場合 (Run RS-8)

流速の鉛直分布とその流下方向の変化は、水面変動の影響を受けて複雑な三次元的特性を示すために、滑→粗の場合ほど流下方向への内部境界層の発達には明確ではないが、粗面上の大きな流速勾配を持つ流れが滑面上で徐々に一様化されていく様子が窺える。また、横断方向の分布については、水路中央から側壁近傍にかけて約 5 cm の間隔で高速域と低速域が交互に現れており、横断方向に波状の分布を呈している。これは、今本らの実験結果⁵⁾にもみられるように、高速域で下降流、低速域で上昇流となるほぼ水深程度のスケールをもつ縦渦が発生していることを示唆するものであるが、水路中央付近以外は顕著でない。

4.2 乱れ強度分布の三次元特性

Fig. 6 は、流れ方向の乱れ強度 u' の鉛直分布を流下方向に示したものである。 u' および z は、それぞれ下流部の摩擦速度 U_{*2} と各点での水深 h で無次元化されており、禰津による普遍関数表示⁶⁾の次式も破線で示されている。

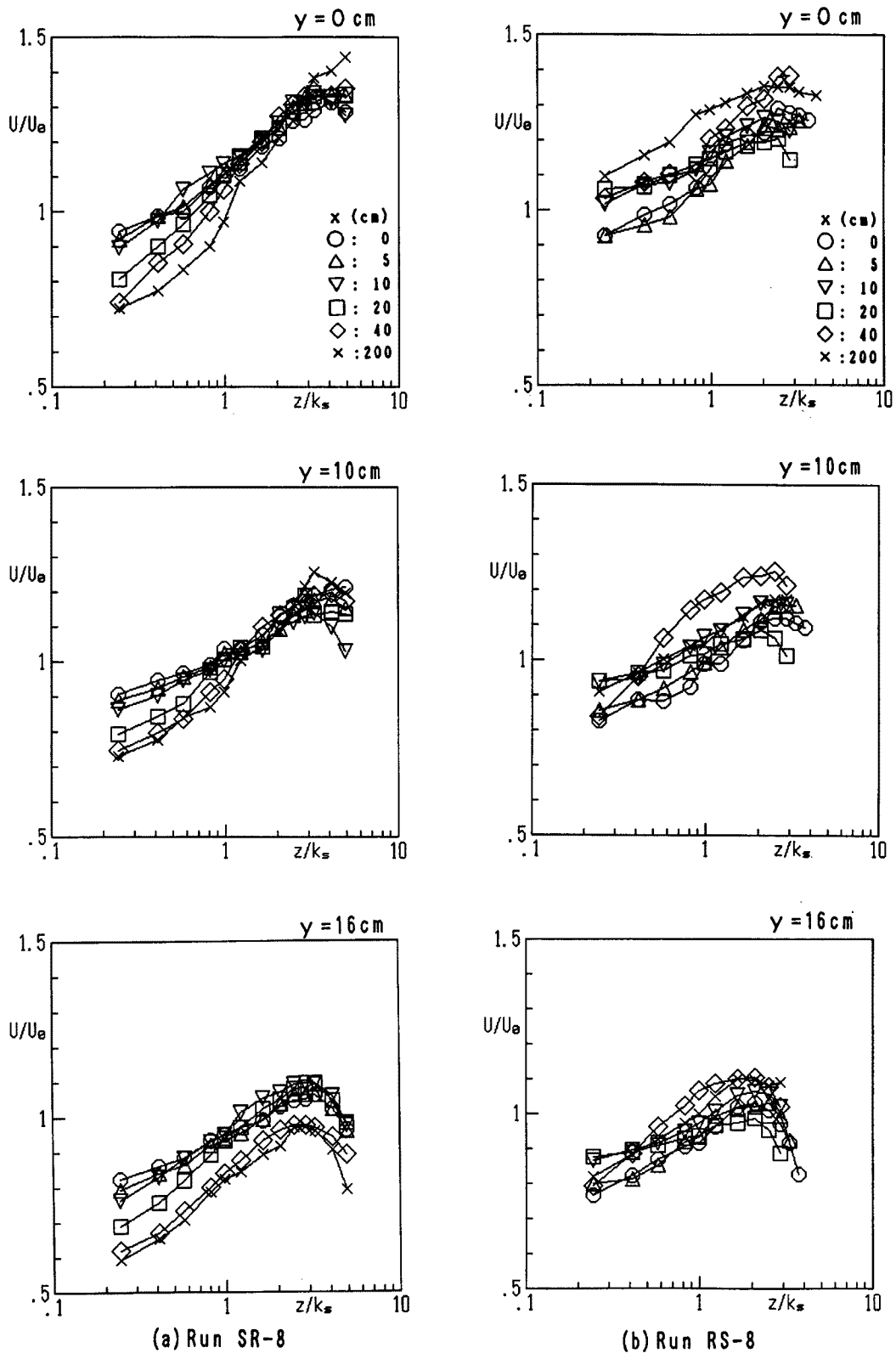


Fig. 4. Changes in vertical distribution of mean velocity in the downstream reach.

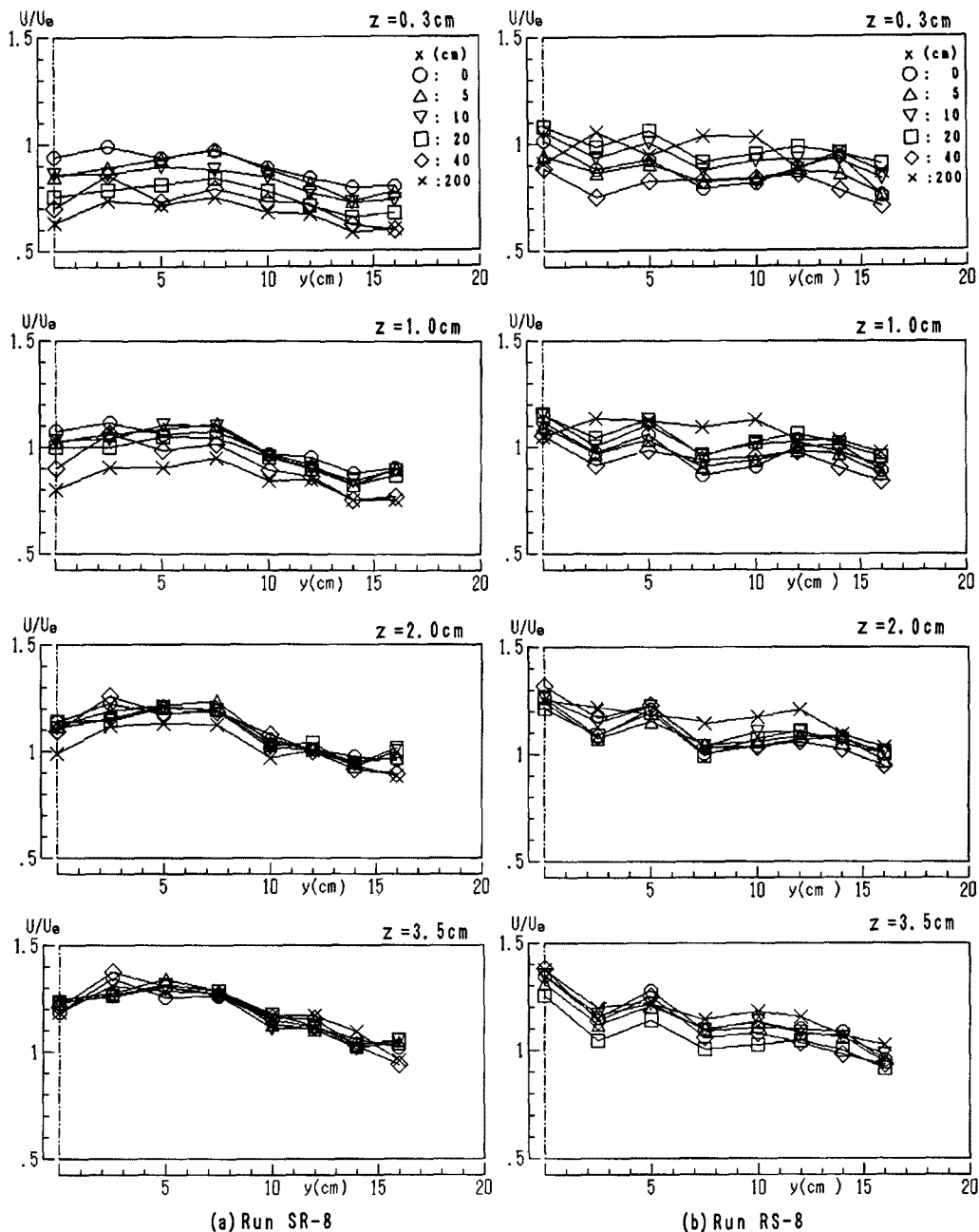


Fig. 5. Changes in lateral distribution of mean velocity in the downstream reach.

$$\frac{u'}{U_*} = 2.30 \cdot \exp\left(-\frac{z}{h}\right) \dots\dots\dots (1)$$

図より、乱れ強度については以下のことが指摘できる。

a) 滑面→粗面の場合 (Run SR-8)

水路中央では、前報²⁾の場合と同様に滑面上の鉛直分布が粗度変化後、内部境界層の発達とともに底面近傍から次第に増加し、 u'/U_{*2} の分布は (1)式に漸近している。 $y = 10$ cmにおいても同じ分布特性を示

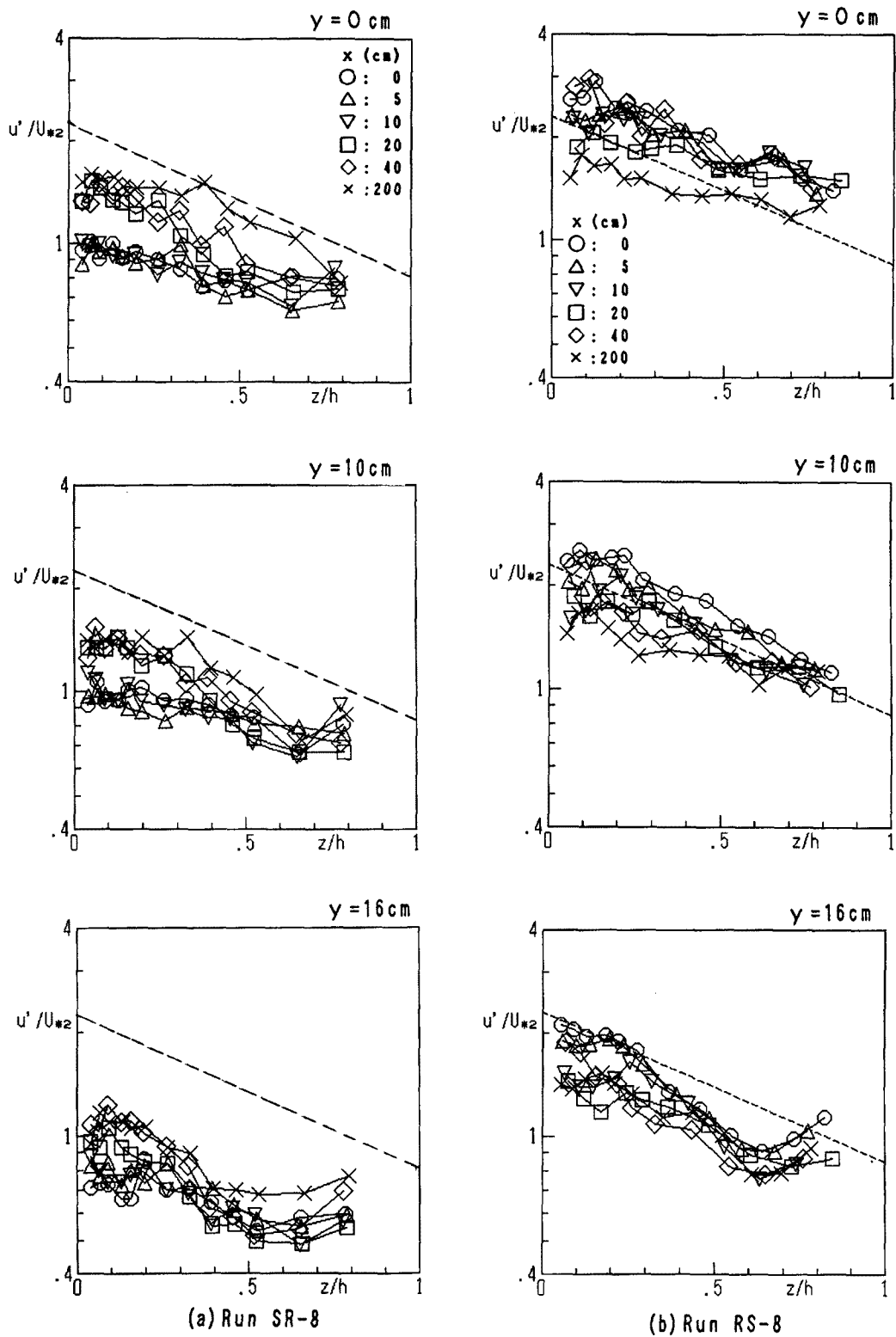


Fig. 6. Changes in vertical distribution of turbulence intensity of longitudinal velocity at the downstream reach.

しているが、側壁に近づくとも乱れ強度は全体的に減少し、(1)式から大きくはずれている。また、側壁から4 cm ($y = 16$ cm) の位置での乱れ強度は、底面から $z/h = 0.5$ までは (1) 式と平行に減少するが水面近傍では逆に増加するような S 字形の分布となっている。これは側壁の効果によって鉛直方向の流速勾配が減少すること、Fig. 4 にみるように水面近傍の流速が低下し、最大流速が水面下に現れることによっている。

b) 粗面→滑面の場合 (Run RS-8)

流速分布の場合ほど定常波（衝撃波）の影響は受けておらず、乱れ強度は x の増加とともに底面近傍から徐々に減少している。このことは、衝撃波の存在によって流速分布の遷移過程からは内部境界層を議論することが困難な本実験ケースのような場合でも、乱れ強度分布から実際の内部境界層の発達状況にある程度推定できることを示している。また、a) の場合と同様に、側壁の影響を受けない $y = 0 \sim 10$ cm の領域では乱れ強度が底面から水面にかけて滑らかに減少しているのに対して、側壁の影響が及ぶ領域 ($y = 16$ cm) では、乱れ強度の値がほぼ一定な底面近傍領域、瀬川の普遍関数と同じ勾配を持つ領域および水面付近の減速部で逆に乱れ強度が徐々に大きくなる領域に分けられる。

5. 浮遊砂濃度の分布特性に関する検討

5.1 河床波の特性

本実験では、全ての断面で完全浮遊状態に近い状態が得られるように、水路の上流端での給砂量を調節したが、河床には若干量の砂が堆積し、粗面で縦筋が、一方滑面では砂れんが観察された。それらの状況を概述すれば以下のようなものである。

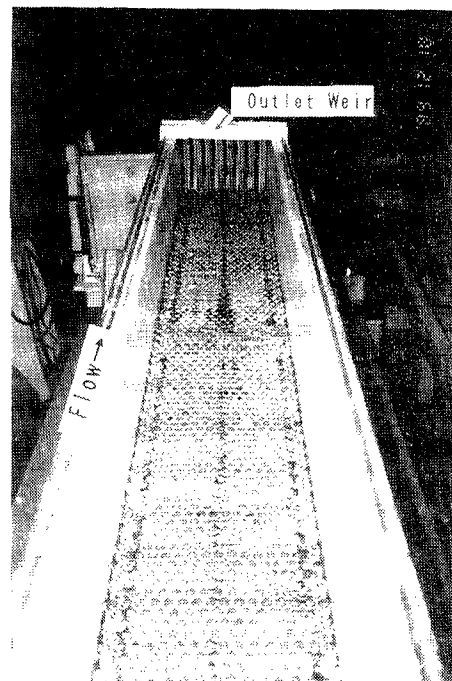
a) 滑面→粗面の場合 (Run SR-8)

給砂位置の直下で側壁近傍に発生した砂れんが徐々に水路中央部まで広がっていき、粗度変化点では Photo 1 (a) のようにほぼ水路全面が波高約 1 mm、波長数 cm の河床波で覆われた。粗度変化点から $x = 20$ cm の範囲は、上流部で形成された砂れんがそのまま移動したような状態であって、半球のかなりの部分が砂によって覆われている。その下流では、水路中央部 ($y = 0$ cm) と側壁近傍において水深の約 2 倍の間隔で 3 本の明瞭な縦筋が現れ (Photo 1 (b))、この縦筋上で砂は掃流状態で移動している。

b) 粗面→滑面の場合 (Run RS-8)



(a) $x = 5 \sim 1$ (m)



(b) $x = 2 \sim 7$ (m)

Photo 1. Configuration of sand wave (smooth to rough)

(Photo 1 (b)), この縦筋上で砂は掃流状態で移動している。

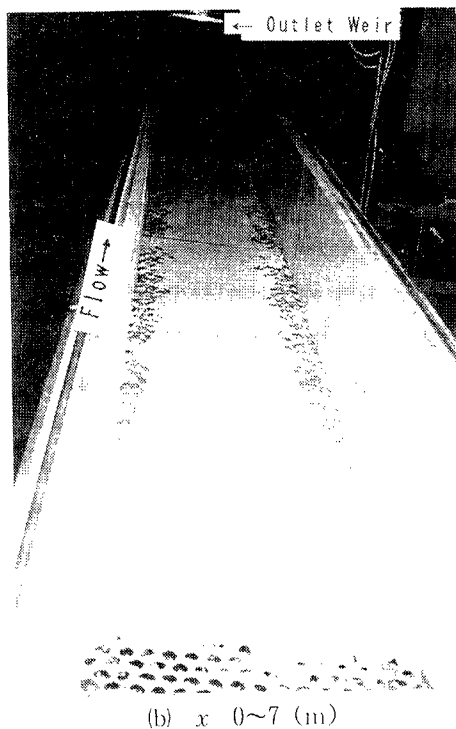


Photo 2. Configuration of sand wave (rough to smooth)

上流部粗面上では **Photo 2 (a)** に見られるように、両側壁から約 10 cm 内側 ($y = \pm 10$ cm) を中心に幅 4 ~ 5 cm の縦筋が 2 本発生しており、これらは給砂位置の直下から粗度変化点まで続いている。粗度変化点直下の水深が急激に減少する区間では、早い流れによって砂が巻き上げられて縦筋は消滅するが、 $x = 40$ cm を越えると両側壁から 5 ~ 7 cm の範囲で再び砂が堆積し、砂れんが形成された (**Photo 2 (b)**)。上流部粗面上の縦筋は、4.1 で述べたように、側壁の影響を受けない縦渦の湧昇位置に発生しており、また、下流部滑面における砂れんは側壁近傍の二次流の影響を受けて形成されたものと考えられる。

5.2 浮遊砂濃度の三次元分布

浮遊砂濃度の三次元性状について、**Fig. 7** は鉛直分布、**Fig. 8** は横断分布の流下方向変化を示したものであり、両図より粗度の急変に伴う濃度分布の遷移特性は以下のようにまとめられる。

a) 滑面→粗面の場合 (Run SR-8)

まず、**Fig. 7** の水路中央部 ($y = 0$ cm) における浮遊砂濃度の遷移過程に注目すれば、浮遊砂濃度は粗面上を流下するに従い、僅かではあるが底面近傍では減少し、水面近傍では逆に増加する傾向にあって、粗面上で生じる強い乱れによって浮遊粒子が上方へ拡散されているものと思われる。側壁近く ($y = 16$ cm) では乱れが小さくなるため (**Fig. 6 (a)** 参照)、砂粒子が沈降して縦筋を形成し、底面濃度および濃度勾配が $y = 0$ cm のそれらに対してが著しく減少する。また、水面近傍では濃度の流下方向への変化はほとんど見られない。底面近傍の横断分布を見ると、滑面上 (粗度変化点) では水路中央から側壁に向かって濃度がかなり減少しているのに対して、粗面上では横断方向にほぼ一様に分布していることがわかる。

b) 粗面→滑面の場合 (Run RS-8)

a) の場合とは異なり、横断方向の分布に大きな特徴が見られる。すなわち、粗度変化点付近では、底面近傍 ($z = 0.3$ cm) において水路中央から側壁に向うほど濃度が高くなっている。このような横断分布は粗度変化点上流の粗面上にも見られ、上述したように縦筋の形成と関係しているものと思われる。滑面上において、乱れの減少によって粒子が沈降し、側壁近くで砂れんが形成されるようになると底面付近の濃度は次第に減少する。

一方、水路中央部の鉛直濃度勾配は側壁近くのそれに比較して小さく、流下方向には x の増加とともに鉛直方向に一様に濃度が減少している。また、流速の場合と同様、浮遊砂の横断分布にも波状の分布が現れ

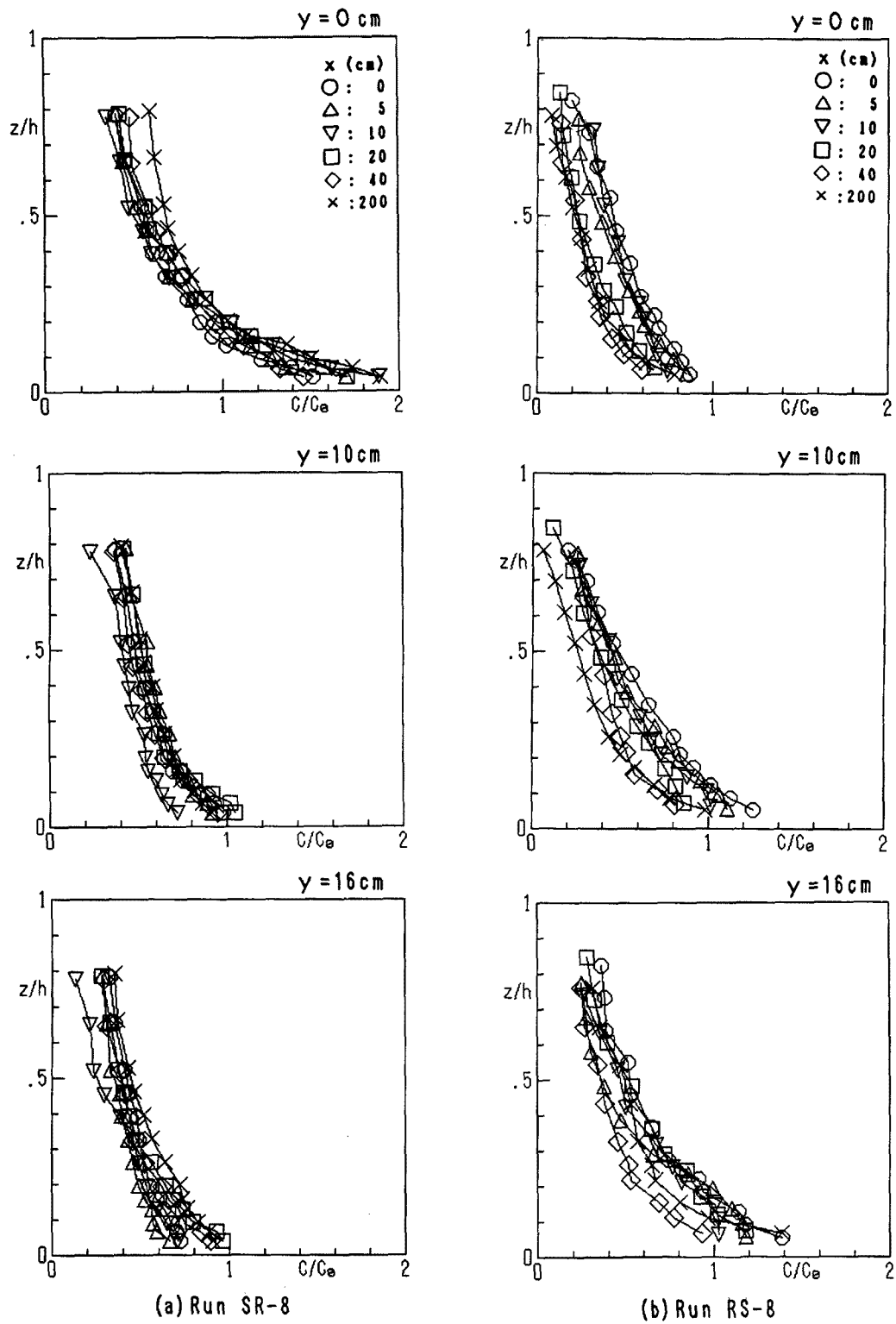


Fig. 7. Changes in vertical profiles of suspended sediment concentration in the downstream reach.

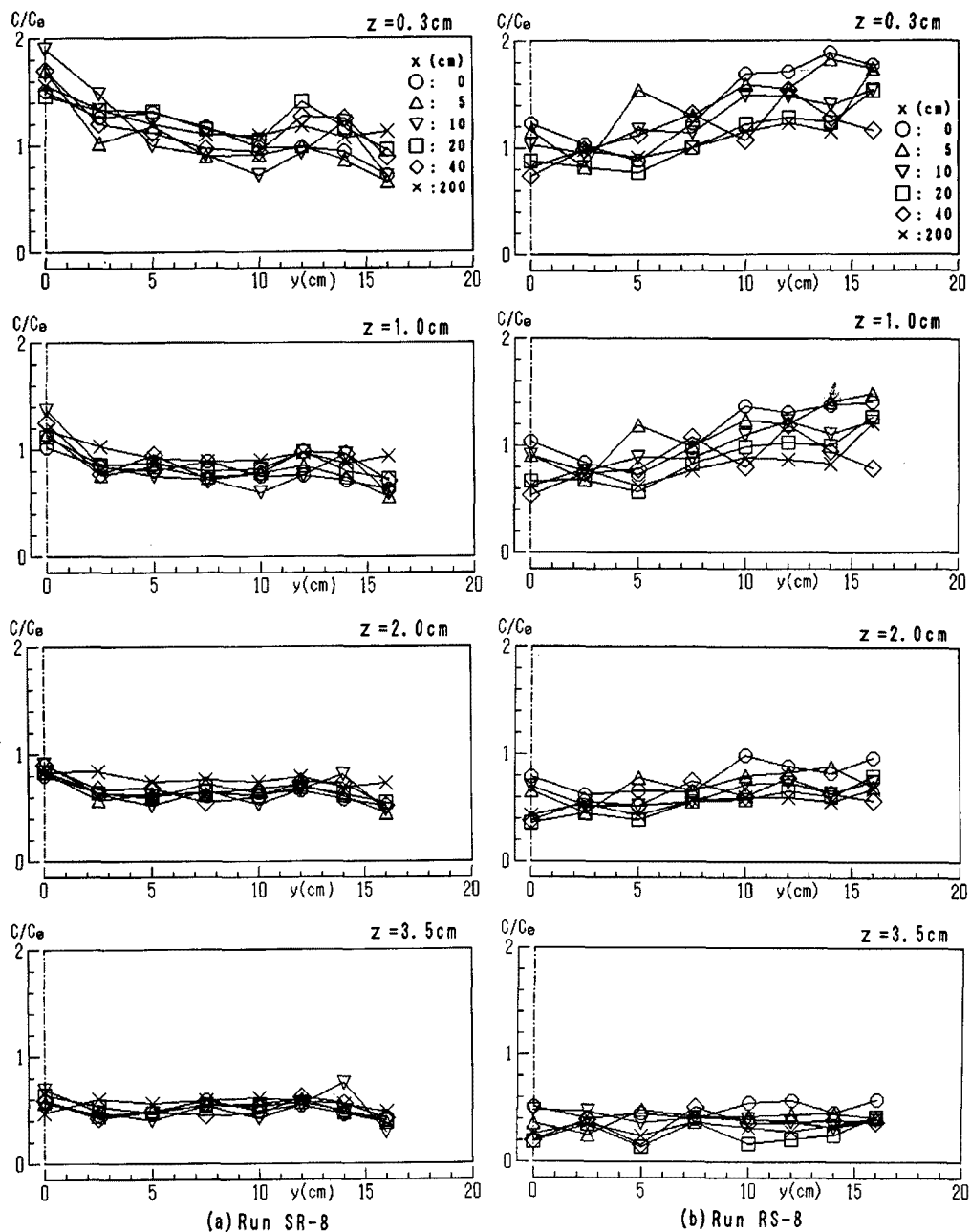


Fig.8. Changes in lateral profiles of suspended sediment concentration in the downstream reach.

ており、粗面上の縦渦よりも小さなスケールの二次流が卓越するものと思われる。しかし、その配列は流下方向に不規則であって、今本ら⁵⁾が指摘したような高流速部と低濃度部、低流速部と高濃度部が一致するような明確な対応関係は得られなかった。

5.3 浮遊砂濃度の変動特性

浮遊砂濃度の乱れ強さ c' の鉛直分布を、平均浮遊砂濃度 C_0 と水深 h を用いて無次元表示すれば、Fig. 9 のようである。図より、浮遊砂濃度の変動特性については、以下のことが言えよう。

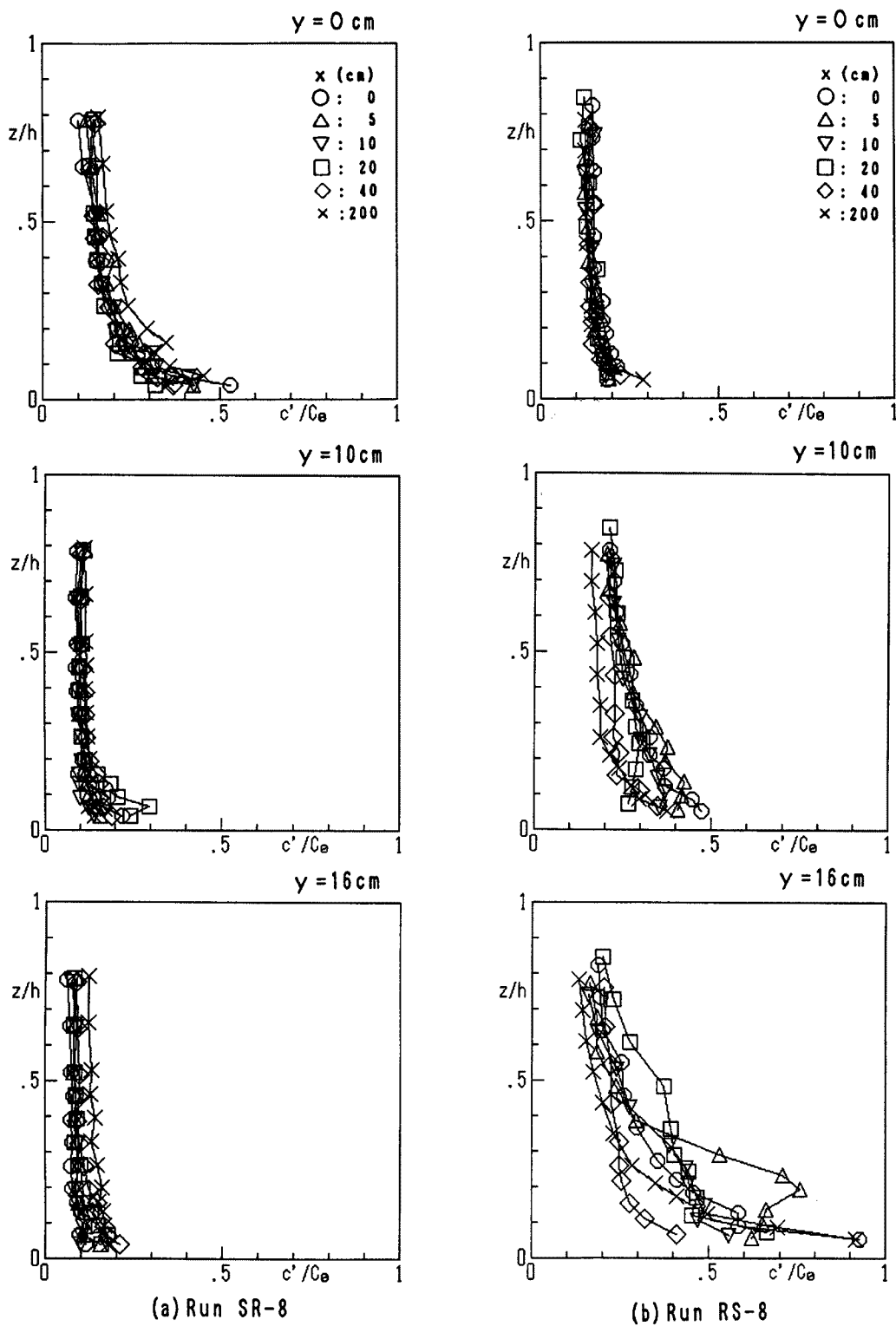


Fig. 9. Changes in vertical distribution of turbulence intensity of suspended sediment concentration in the downstream reach.

a) 滑面→粗面の場合 (Run SR-8)

c' の鉛直分布は、濃度分布とよく似た特性を示している。水路中央では、底面近傍において濃度勾配が大で、流速の乱れも強いために c' の値は非常に大きい、水面に近づくにつれて急激に減少している。側壁近くの c' は、底面の近傍を除いて鉛直方向にほぼ一様に分布している。これは、側壁に近いほど濃度が鉛直方向に一様化されるとともに、 u' が水面付近で増加することによって考えられる。粗度変化に伴う c' の流下方向への変化は、側壁に近いほど大きい、粗面上では浮遊砂が上方へ拡散され、鉛直濃度勾配が小さくなるため、 u' の場合ほど大きな増加傾向は見られない。

b) 粗面→滑面の場合 (Run RS-8)

粗度変化点直下流では、濃度分布と同様に側壁から離れるほど c' の値は小さく、鉛直方向に一様化さ

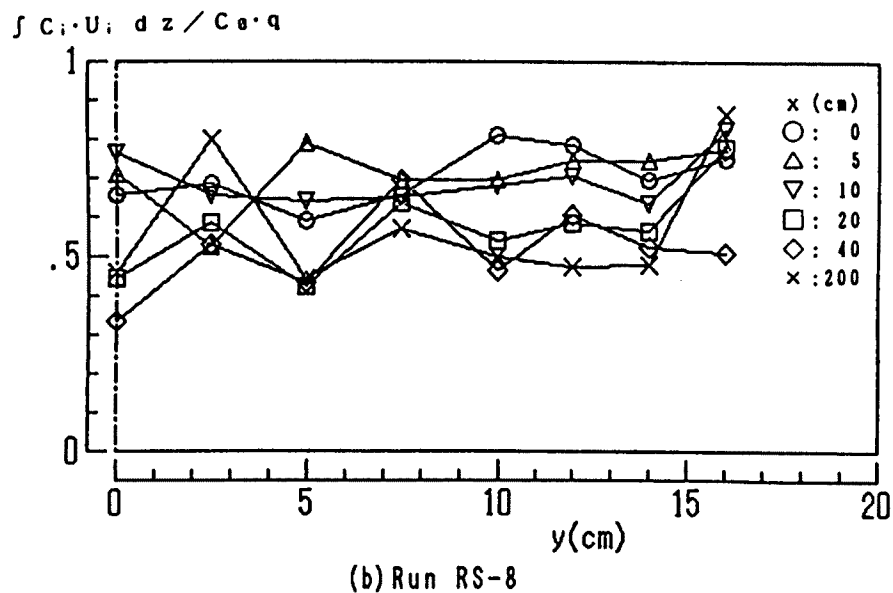
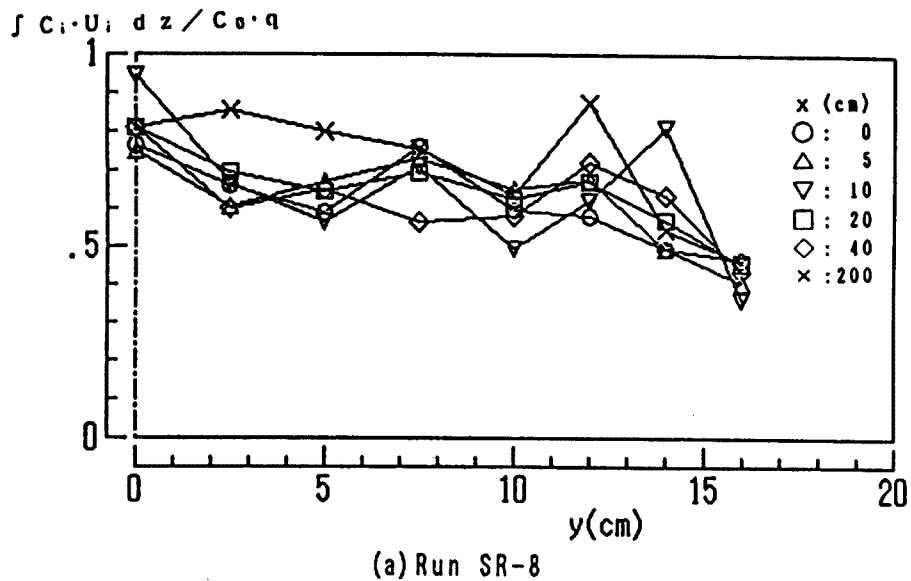


Fig. 10. Changes in lateral profiles of suspension load in the downstream reach.

れており、 u' とは異なった特性を示している。滑面上での d' の減少量は側壁近傍で大きく、内部境界層の発達とともに底面から徐々に変化する様子が明確に現れているが、水路中央部では、流下方向へはほとんど変化していない。

6. 浮遊砂量に関する検討

6.1 浮遊砂量の幅方向変化

Fig. 10 は、単位幅当りの浮遊砂量 $\int C_i U_i dz$ の幅方向変化を各断面について示したものである。

Run SR-8 (滑→粗) では、浮遊砂量は縦筋上で局所的に大きくなっているものの、側壁に近づくほど減少する通常の分布を示している。

Run RS-8 (粗→滑) では、前述したように流速は側壁に近いほど小さくなるが、逆に浮遊砂濃度は縦筋が発生する側壁近傍で大きくなるため、浮遊砂量としては、幅方向にほぼ一様な分布となっている。流下方向へは、 x の増加とともに浮遊砂量は減少する傾向にある。

6.2 全断面の浮遊砂量

Fig. 11 は、全断面の浮遊砂量の流下方向変化を示したものである。Run SR-8 (滑→粗) では、粗度変化点の上・下流部で全浮遊砂量はほとんど変化していないのに対して、Run RS-8 (粗→滑) は、粗度の急変後、全浮遊砂量が急激に減少している。これは、粗から滑への遷移では、乱れが底面から急激に減少していくことによって上流部からの浮遊砂の一部が、主に側壁近くの砂れんが形成される領域に沈降し、掃流状態になる結果であり、また、滑から粗の遷移では、乱れが逆に増加することによって上流部から流送されてきた粒子をほとんど沈降させることなく浮遊させていることによるものと考えられる。

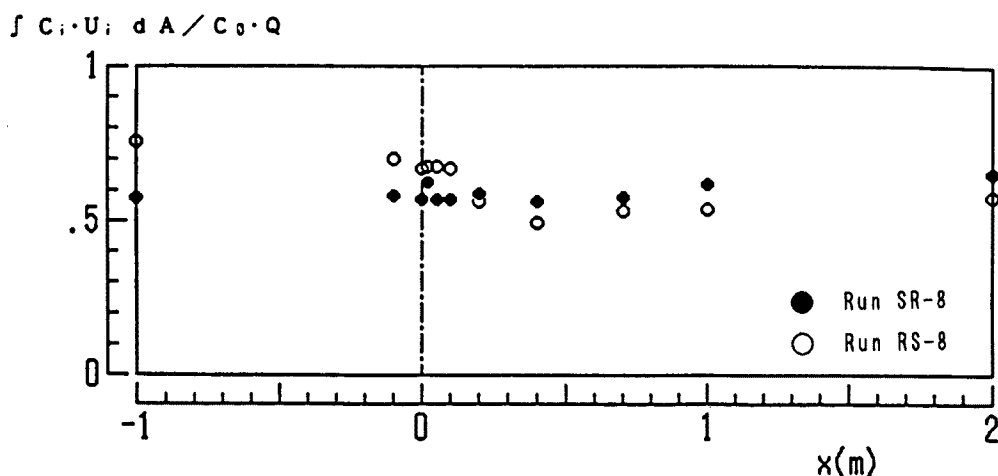


Fig. 11. Changes in total suspension load in the downstream reach.

7. 結 言

本研究では、底面粗度が滑面から半球粗面、半球粗面から滑面へと急変する場での流れの内部構造および浮遊砂濃度の三次元分布に関して検討を行った。ここで得られた成果を要約すれば次のようである。

(1) 滑面→粗面の場合

a) 水面形は滑らかに遷移し、横断方向にも一様である。流速および乱れ強度は、粗度変化点から流

下するに従って底面から変化し、新たな粗度に対応した内部境界層の発達する様子が明確である。また、側壁に近づくほど流速は減少し、水面近傍では流速の鉛直勾配は負となる。このため、水面近くの乱れ強度は逆に大きくなり、その鉛直分布はS字形の曲線となる。

- b) 浮遊砂濃度の遷移特性は乱れの挙動と密接に関係しており、下流粗面上では、乱れの増加により浮遊粒子は河床近傍から上方へ拡散され、濃度勾配は小さくなる。水路中央と側壁近傍には水深の約2倍の間隔で3本の安定した縦筋がみられ、粗面上で左右対称な水深規模の縦渦が発達するものと推察される。この縦渦によって浮遊砂濃度は横断分布に一樣化される。また、浮遊砂濃度の乱れ強さは、濃度勾配と乱れ強度によって支配されるが、流下方向への変化は流速の乱れ強度の場合ほど顕著ではない。
- c) 浮遊砂量の横断分布は、側壁に近いほど小さくなる通常の分布を示しており、浮遊砂量を全断面で積分したものは、流下方向には変化せず浮遊砂量の連続性が保たれている。

(2) 粗面→滑面の場合

- a) 粗度変化点直下流で水面の波打ちがみられ、流速分布もそれに対応して流下方向に変動しており、内部境界層の発達は明確ではない。乱れ強度については水面変動の影響をあまり受けておらず、粗度変化後底面より徐々に変化し、滑面上の乱れ分布へと遷移する。粗面上での流速の横断分布は、ほぼ水深間隔で波状分布を成しており、縦渦の存在が認められる。側壁に近いところでは、流速・乱れ強度はともに減少する。
- b) 粗面上の浮遊砂濃度は、流速とは逆に側壁に近いほど高く、とくに底面近傍では濃度勾配も大きい。滑面では乱れの減衰とともに浮遊粒子が沈降し、小さなスケールの二次流によって横断方向に一樣化されるため濃度は減少する。水路中央では、流下方向にはあまり変化しない。濃度の乱れ強さについても同様であって、滑→粗の流れとは異なった特性を示している。
- c) 浮遊砂量は、横断方向に一樣に分布している。また、流下方向について見れば、粗度変化後滑面上で減少しており、側壁近傍において沈降した砂が砂れんを形成し、掃流状態で流送されるものと思われる。

以上、実験結果から流速と浮遊砂濃度の三次元性状について考察したが、今後は、粗度急変部における流砂機構に関連して、底面せん断力および拡散係数の評価、乱れ挙動と浮遊機構の関連性、さらに河床波の形成過程と掃流機構についても検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎：開水路底面粗度急変部の乱流構造，第33回水理講演会論文集，1989，pp. 499-504.
- 2) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎・矢田哲朗：開水路底面粗度急変部における乱れ特性と浮遊砂濃度の遷移過程，京都大学防災研究所年報第32号B-2，1989，pp. 619-639.
- 3) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎・大坪高：粗度急変流の水面形と遷移長について，水工学論文集第34巻，1990，pp. 511-516.
- 4) 神田佳一：開水路における粗度急変による流れの遷移機構，豊橋技術科学大学修士論文，1987，pp. 30-31.
- 5) 今本博健・大年邦雄：固液混相開水路流れの水理特性に関する研究(1)，京都大学防災研究所年報第22号B-2，1979，pp. 453-468.
- 6) 瀬津家久：開水路の乱流構造に関する基礎研究，京都大学学位論文，1977，pp. 6-24.