

## 複断面直線水路における浮遊砂の流送・堆積機構

芦田 和男・藤田 正治  
劉 炳義・田中 孝昌

### TRANSPORT OF SUSPENDED SEDIMENT IN CHANNEL WITH FLOOD PLAIN

By Kazuo ASHIDA, Masaharu FUJITA, B. Y. Liu and Takamasa TANAKA

#### Synopsis

This paper presents the results of experimental and theoretical investigations on the processes of transport and deposition of suspended sediments in the channel with a flood plain. In the interaction region between the flow in a main channel and the flow in a flood plain, suspended sediments are mixed laterally as well as longitudinal momentum of flow. Almost of the sediments transported to the flood plain are deposited and are transported as bed load because the turbulence on the flood plain is small. In this paper the concentration distribution of suspended sediments and transverse distribution of deposition-rate and bed load on a flood plain are measured, and the processes that suspended sediments are diffused to the flood plain and deposited there as suspended sediments are transported downstream are investigated. Then, the numerical method to calculate the distributions is proposed under the condition of steady and uniform flow. This method is verified by comparing the theoretical results with experimental ones.

#### 1. 緒 言

複断面形状の実河川では洪水時に高水敷にも水が流れ、低水路と高水敷上の流れが相互に作用し合い、横断方向への流水の運動量や浮遊砂の輸送が顕著になる。そのため、低水路と高水敷の境界付近で、低水路上の流速やせん断応力が減少し高水敷上のそれらが増加することや<sup>1),2),3),4)</sup>、高水敷に浮遊砂が堆積する<sup>5)</sup>ことなどが従来の実験的・理論的研究で明らかにされている。しかし、まだ境界付近の流れの構造は明確でなく、流速分布やせん断応力分布についての実用的な計算式は得られていない。また、浮遊砂の流送機構についてはほとんど研究されておらず、低水路と高水敷の間で浮遊砂がどのように混合するかについては明らかでない。

複断面河道では、高水敷側の低速流と低水路側の高速流の混合により、横断方向の強い拡散現象が生じる。そのため低水路の高濃度の浮遊砂が高水敷に多く輸送される。高水敷では乱れ強度が比較的小さいため輸送された土砂は河床に沈降・堆積し、その一部は掃流砂として流送される。この堆積量の算定法を求めることは高水敷の管理上非常に重要であるだけでなく、洪水時の流水の挙動を推測する上で必要である。また、高水敷の先端付近に二次流が形成されることは従来の研究<sup>3)</sup>で明らかにされているが、この流れは流速分布だけでなく、浮遊砂の横断方向の拡散現象にもかなり影響を与えるものと思われる。したがって、複断面河道の浮遊砂の流送機構を検討するにあたって、とくに低水路と高水敷の境界付近に着目することが肝要であり、そこでの横断方向の拡散係数や浮遊砂の横断方向の輸送現象に対する二次流の効果などを明らかにすることが重要である。

本研究では以上の点に鑑み、複断面直線水路に対して次の事について検討する。まず、流下方向の時間平均流速の鉛直分布および横断分布について検討し、とくに砂粒子の横断方向の拡散係数と関連のある横断方向の渦動粘性係数について検討する。ついで、浮遊砂濃度分布を詳細に測定し、濃度分布形、濃度分布の発達過程および高水敷と低水路との境界付近に生じる二次流と濃度分布との関係について検討するとともに、高水敷上に沈降する浮遊砂量や掃流砂量の横断分布について検討する。さらに、浮遊砂濃度や高水敷上の浮遊砂の沈降量を平衡状態の二次元拡散方程式により計算し、その計算法の妥当性を実験との比較により検証する。

## 2. 流れの特性

### 2.1 実験の概要

Fig. 1 に示すような低水路幅 20 cm、高水敷幅 20 cm、高水敷高さ 2 cm および 5 cm の片側に高水敷を設置した複断面直線水路で、直径 3 mm のプロペラ流速計を用いて流速分布を測定した。水路長は 8 m、水路勾配は 1/673 である。実験条件は Table 1 に示すとおりである。Case 1~3 は高水敷高さ 2 cm の実験であり、Case 1, 2, 3 と高水敷上の水深が増加する。Case 4 は高水敷の高さが 5 cm の場合の実験である。ここに、 $B, B_f$ : 低水路および高水敷の幅、 $\Delta$ : 高水敷の高さ、 $Q$ : 全幅流量、 $h, H$ : 低水路および高水敷上の水深、 $I_e$ : エネルギー勾配である。

実験はほぼ等流の条件で行い、上流端から 6.3 m の位置で流速分布が平衡に達していることを確認した上で、そこで流下方向の平均流速を詳細に測定し、流速の鉛直および横断分布を調べた。座標系は Fig. 2 に示すとおりで、流下方向に  $x$  軸、低水路と高水敷の境界より低水路側に  $y$  軸、鉛直上方向に  $z$  軸をとる。

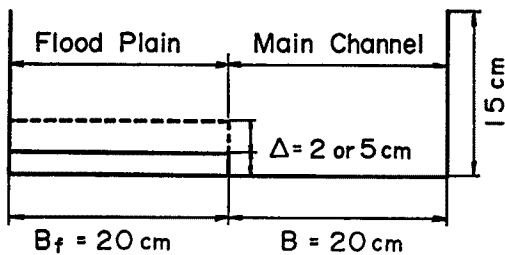


Fig. 1 Sectional view of experimental flume.

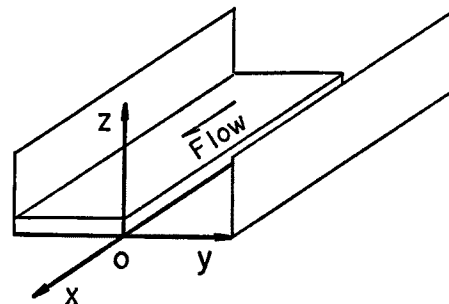


Fig. 2 Coordinate system.

Table 1 Experimental conditions

Case	$\Delta$ (cm)	$B$ (cm)	$B_f$ (cm)	$Q$ (l/s)	$h$ (cm)	$H$ (cm)	$I_e$
1	2	20	20	1.9	2.9	0.9	1/609
2	2	20	20	4.9	4.5	2.5	1/592
3	2	20	20	7.1	5.2	3.2	1/574
4	5	20	20	7.1	7.2	2.2	1/559

### 2.2 流速分布特性

Fig. 3 (a), (b), (c) および (d) は、Case 1, 2, 3 および 4 の図中に示す測定高さにおける横断流速分布を示したものである。従来の研究と同様に、低水路と高水敷の境界の流速が極小になり、 $H/\Delta$  がある程度大きくなると境界から高水敷側に少し入ったところに流速の極大値がみられる。この極大点は今本・石垣

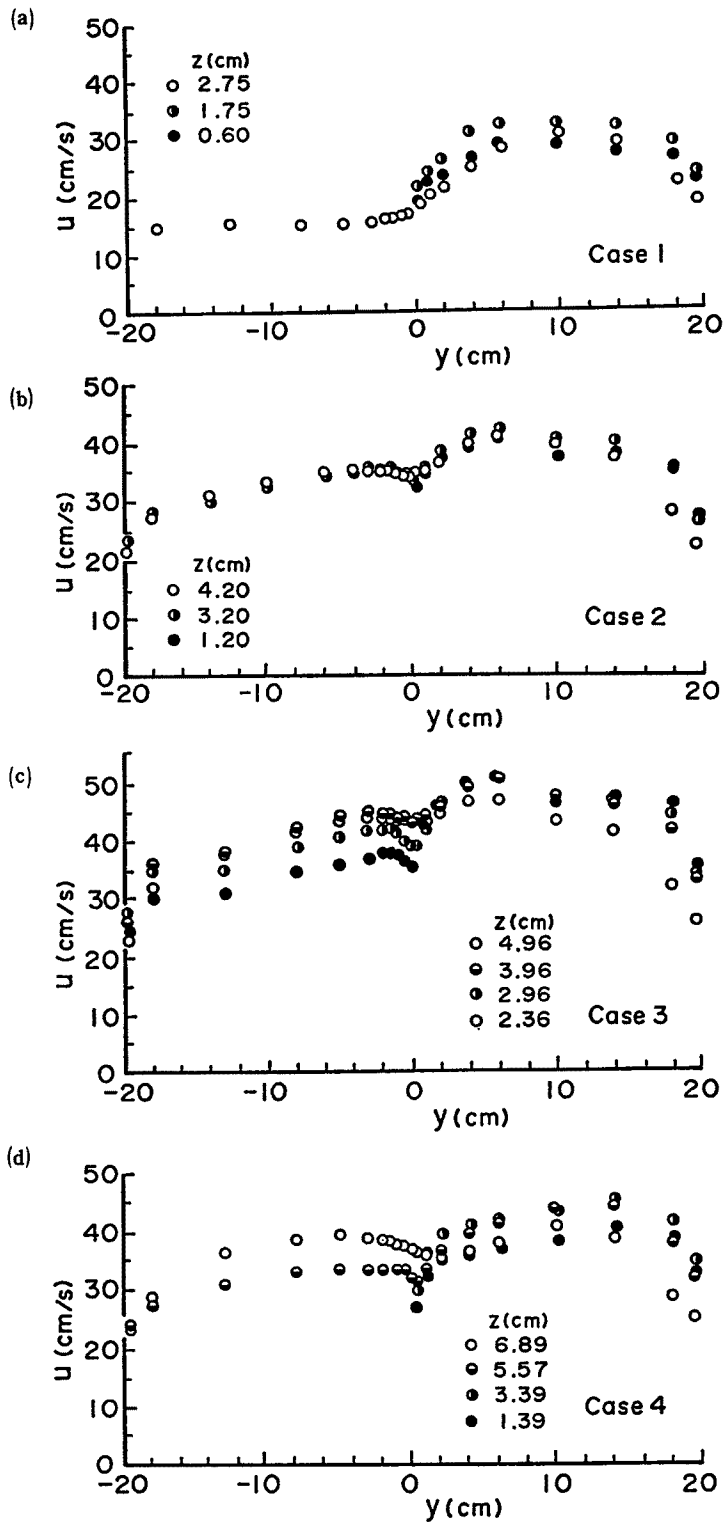


Fig. 3 (a)~(d) Typical profiles of longitudinal flow velocity in lateral direction.

らが指摘しているように、Fig. 4 に示すような高水敷の先端付近に生じる二次流の影響によるものであり、この位置は二次流の下降流の生じる位置に対応するものと推察される。Case 1 では強い二次流が生じていないため、この傾向が顕著でないものと考えられる。また、水深の増加につれて壁面の影響が顕著になっており、Case 1 を除いて流速分布に高水敷と壁面の影響のない部分が明確に現れていない。したがって、流速分布の一般的な諸特性を明らかにするためには、もっと幅の広い水路で実験を行う必要がある。

従来、流下方向の流速の横断分布式について、Rajaratnam・Ahmadi<sup>1)</sup> は次式を提案している。

低水路 ( $0 \leq y \leq B$ ) :

$$\frac{u-u_m}{u_m-u'_m} = 1 - 0.75 \left( \frac{y-b_1}{b_m} \right)^2 \dots\dots\dots (1a)$$

高水敷 ( $-B_f \leq y < 0$ ) :

$$\frac{u-u_\infty}{u'_m-u_\infty} = \exp \left\{ -0.693 \left( \frac{y}{b_f} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (1b)$$

ここに、 $u$  : 任意の  $y$  および  $z$  における流下方向の流速、 $u_m$ 、 $u'_m$  および  $u_\infty$  : Fig. 5 に示す流速で、それぞれ低水路における高水敷や壁面の影響外の部分の流速、低水路と高水敷の境界における流速および高水敷における低水路や壁面の影響外の部分の流速、 $b_1$  : 低水路の流速が  $u'_m$  から増加し、 $u_m$  になるまでの距離、 $b_m$ 、 $b_f$  : 低水路と高水敷の流れの相互作用領域の長さを表すスケールであり、Fig. 5 に示すように、 $b_m$  は  $u$  が  $u_m$  から減少し  $(u-u'_m)/(u_m-u'_m)$

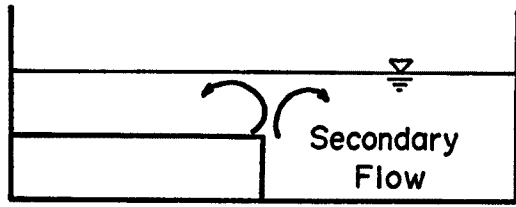


Fig. 4 Secondary flow in interaction zone.

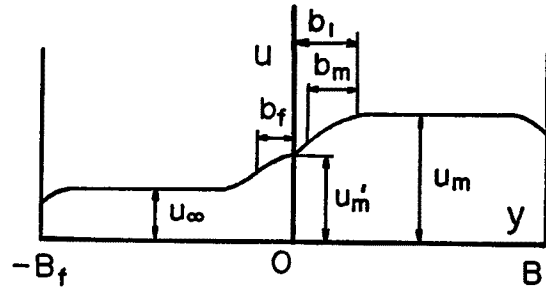


Fig. 5 Definition sketch.

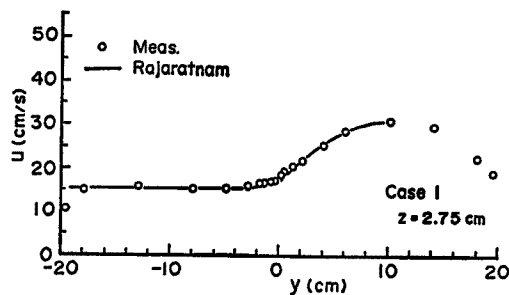
=0.25 となるまでの横断方向の距離であり、 $b_f$  は  $u$  が  $u'_m$  から減少して  $(u-u_\infty)/(u'_m-u_\infty)=0.5$  となるまでの横断方向の距離である。 $b_m, b_f$  は実験結果から次式で近似している。

$$\frac{b_m}{H} = 3.78 \frac{h}{H} - 3.78 \dots\dots\dots (2a)$$

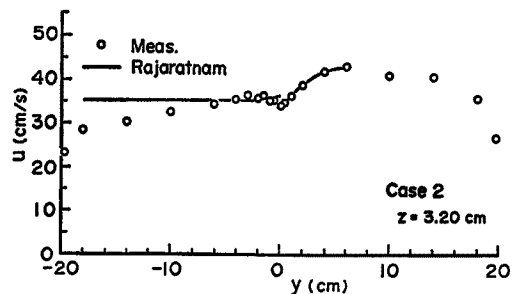
$$\frac{b_f}{H} = 0.64 \frac{h}{H} - 0.64 \dots\dots\dots (ab)$$

この式は、相互作用領域が高水敷の高さに比例するというを意味し、その一般性はさらに検討を要する。

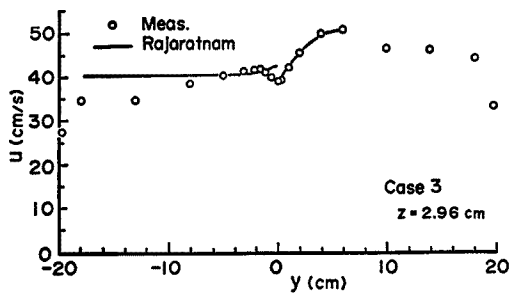
さて、上述の流速分布と実験値を比較して、その適合性を検討する。Fig.6 (a), (b), (c) および (d) は、Case 1, 2, 3 および 4 の計算値と実測値を比較したものである。ただし、 $u'_m$  は低水路と高水敷で別々に適当に与えている。また、 $b_m, b_f$  は計算値が実験値とよく適合するような値を選んだ。低水路ではよく一致し



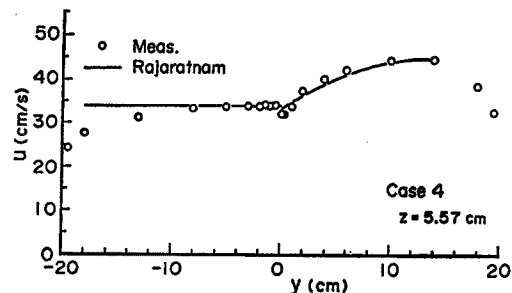
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 (a)~(d) Comparison between theoretical results and experimental ones on flow velocity profiles in lateral direction.

ており、用いた  $b_m$  の値も Fig. 7 に示すように従来のものとよく一致している。しかし、高水敷では壁面の影響が無視し得ないことを考慮しても、高水敷の先端付近の分布形の傾向はあまり適合しているとは言えない。これは、式 (1b) には二次流の効果が考えられていないためであり、流速の横断分布に極大点が生じると言う特性はこの式では説明できない。また、式 (1a) および (1b) を用いて流速分布を計算する場合、 $u_m$  や  $u_\infty$  は単断面の場合の対数則より算定されるが、 $u'_m$  の計算法がないために、流速分布を一般的に求めるにはまだ多くの問題がある。

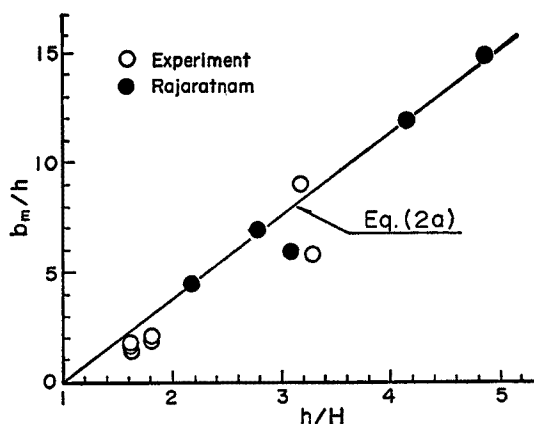


Fig. 7 Length scale  $b_m$  of interaction zone.

### 2.3 横断方向の渦動粘性係数

Fig. 3 に示すようなせん断流では、横断方向の渦動粘性係数も横断方向や鉛直方向に変化するものと考えられる。後述の浮遊砂濃度の理論解析では、横断方向の砂粒子の拡散係数を必要とし、鉛直方向の拡散と同様にこれを横断方向の渦動粘性係数から求める。以下では横断方向の渦動粘性係数について検討するが、平均流速分布からその横断分布や鉛直分布を求めるのは困難であるので、せん断流内の平均的な値について議論する。

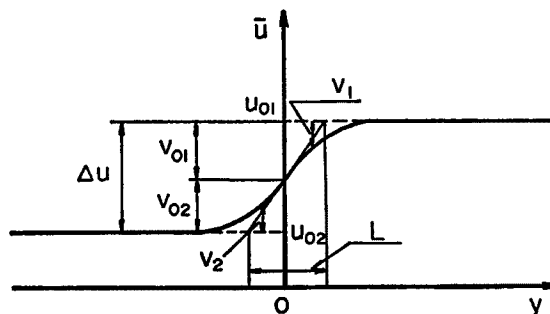


Fig. 8 Definition sketch.

さて、Fig. 8 を参照して、低水路と高水敷の間の相互作用領域の平均的な横断方向の渦動粘性係数  $\epsilon$  について検討する。高水敷の高さより上方向に平均した低水路と高水敷上の一様流速  $u_{01}$  と  $u_{02}$  によるせん断流を考えると、この問題は、横断方向に粗度が急変する流れの流速分布を扱った山崎・石川ら<sup>6)</sup>の研究と同様に考えられる。すなわち、水平方向の渦動粘性係数が両流速の相互作用領域内で一定であるとして、力の釣合から流速分布を求めると次式のようになる。

$$\frac{v_1}{u_{01}} = \frac{v_{01}}{u_{01}} \exp\left(-\beta_1 \frac{y}{H}\right) \dots\dots\dots (3a)$$

$$\frac{v_2}{u_{02}} = \frac{v_{02}}{u_{02}} \exp\left(-\beta_2 \frac{y}{H}\right) \dots\dots\dots (3b)$$

ここに、 $v_1 = \bar{u} - u_{01}$  (低水路)、 $v_2 = \bar{u} - u_{02}$  (高水敷)、 $\beta_1 = \sqrt{2/\alpha_1}$ 、 $\beta_2 = \sqrt{2/\alpha_2}$ 、 $\alpha_1 = \epsilon / (f_1 u_{01} H)$ 、 $\alpha_2 = \epsilon / (f_2 u_{02} H)$  である。ただし、

$$\beta_1 / \beta_2 = v_{02} / v_{01} \dots\dots\dots (4)$$

$$v_{01} / v_{02} = \sqrt{u_{02} / u_{01}} \dots\dots\dots (5)$$

である。ここに、 $\bar{u}$ : 鉛直方向に平均した流下方向の流速、 $f_1, f_2: (u_{*f} / u_{01})^2, (u_{*f} / u_{02})^2$  で定義される抵抗係数である。ただし、 $u_{*f} = \sqrt{gHI}$  である。

また、山崎・石川らは Fig. 8 に示すように、混合領域における代表長さ  $L$  を  $v_{01} / (dv_1/dy) + v_{02} / (dv_2/dy)$ 、代表流速  $U$  を  $v_{01} + v_{02}$  で表し、 $\epsilon = \gamma \cdot L \cdot U$  で渦動粘性係数を求めた。それと同様に考えると

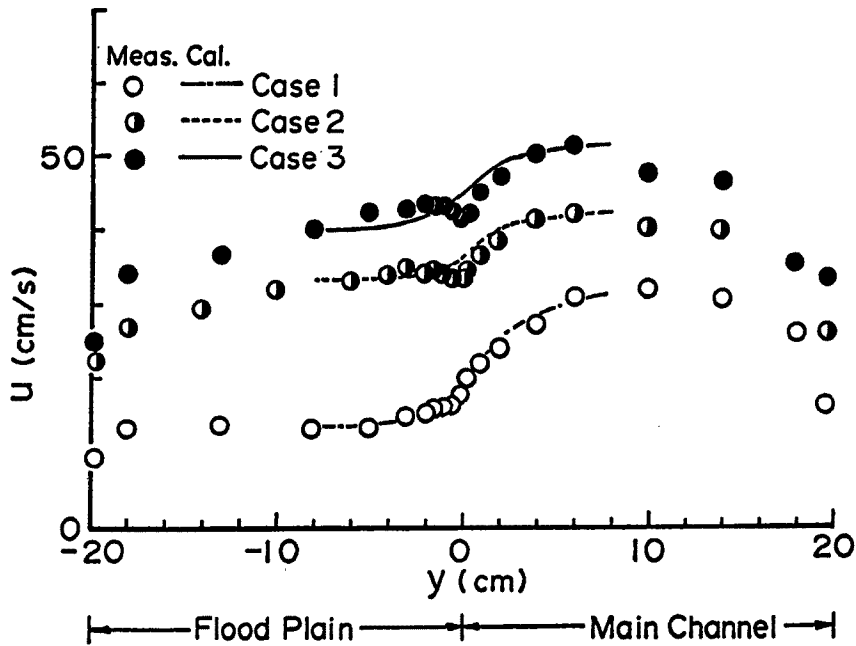


Fig. 9 Comparison between theoretical results and experimental ones on flow velocity profiles in lateral direction.

$$\epsilon = \frac{\gamma^2 H}{2} \Delta u^2 \left( \frac{\sqrt{u_{01}} + \sqrt{u_{02}}}{u_{*f}} \right)^2 \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここに、 $\Delta u: u_{01} - u_{02} (=v_{01} + v_{02})$ ,  $\gamma: u_{02}/u_{01}$  に関する係数である。

実験より  $H, \Delta u, u_{01}, u_{02}, u_{*f}$  を求め、 $\gamma$  は文献(6)より0.03として  $\epsilon$  を求め、Case 1, 2, 3 について  $u$  の横断分布の実験値と理論値を比較すると Fig. 9 のようになる。平均的な  $\epsilon$  を用いているので、高水敷の先端から少し高水敷側で流速が極大となる傾向は説明できないが、大体の傾向はよく表現されている。このように、式(6)より  $\epsilon$  を求めると、鉛直平均した流速の横断分布はおおよそ式(5)で計算できる。さらに、詳細に  $\epsilon$  の分布を明らかにすれば、もっと正確に流速の横断分布や鉛直分布を再現できるものと考えられる。

$\epsilon$  を支配していると思われる因子として、低水路と高水敷の流速の差  $\Delta u$  のほかに、横断方向の平均水深  $H_m$  が考えられる。ここに、 $H_m$  は乱れの空間スケールを決めるものであり、 $\Delta/H$  は二次流の規模と関係したパラメータである。そこで、式(6)をこれらのパラメータで無次元化すると、

$$\frac{\epsilon}{\Delta u H_m} = f_n \left( \frac{\Delta}{H}, \gamma, f_1, f_2 \right) \dots\dots\dots (7)$$

と表示できる。ここに、 $f_n$ : 括弧内のパラメータの関数である。したがって、 $\epsilon/(\Delta u \cdot H_m)$  は無次元高水敷高さ  $\Delta/H$ ,  $\gamma$  および抵抗係数  $f_1, f_2$  に影響されるものと考えられる。文献(6)によると本実験条件では  $\gamma$  は一定であり、抵抗係数もほぼ等しいので、 $\epsilon/(H_m \cdot \Delta u)$  を  $\Delta/H$  をパラメータとして整理すると Fig. 10 のようになる。同図で  $\epsilon/(H_m \cdot \Delta u)$  が減少して0になる点は、流速分布に高水敷の影響がなくなると思われる点であり、それより両側壁側では便宜上  $\epsilon/(H_m \cdot \Delta u)$  は0としている。 $\epsilon/(H_m \cdot \Delta u)$  は本実験の範囲では0.12~0.22であり、 $\Delta/H$  とともに増加する傾向があるが、本実験では壁面の影響も無視できないので、これの一般性についてはさらに検討を要する。

以上のように、本実験に対する  $\epsilon$  は Fig. 10 のように求められたが、一般的な算定式については、壁面の影響のない条件で、境界付近の二次流の構造などを明らかにして導く必要がある。

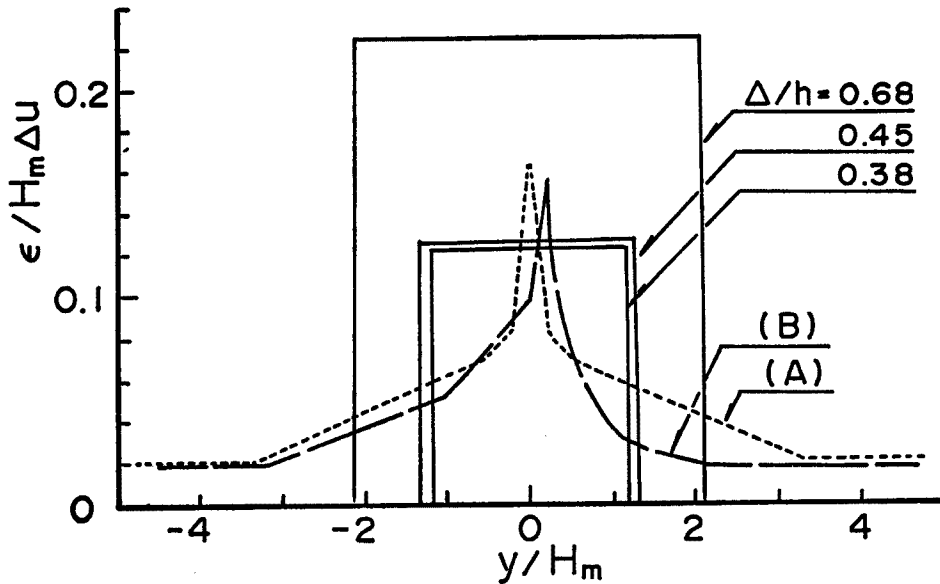


Fig. 10 Kinematic eddy viscosity in lateral direction.

### 3. 浮遊砂濃度分布および高水敷上の浮遊砂の堆積

#### 3.1 実験の概要

実験水路および高水敷の形状は2.と同一である。水路上流端から平均粒径0.1 mm、平均沈降速度1 cm/sの砂を Fig. 11 に示すような方法で低水路のみに給砂し、浮遊砂が流下方向および横断方向に拡散し、高水敷に堆積する過程をサイフォンと採砂箱で調べた。Fig. 11 に示すように採砂箱は横断方向幅1 cm および 2 cm、流下方向幅 2.6 cm の2種類で高水敷に2列設置されている。下流側で河床に沈降する浮遊砂を、上流側で掃流砂と河床に沈降する浮遊砂を採取する。実験条件は Table 2 に示すとおりで Case S-1 および Case S-2 は2.の Case 3 および Case 4 の水理条件とはほぼ同じである。

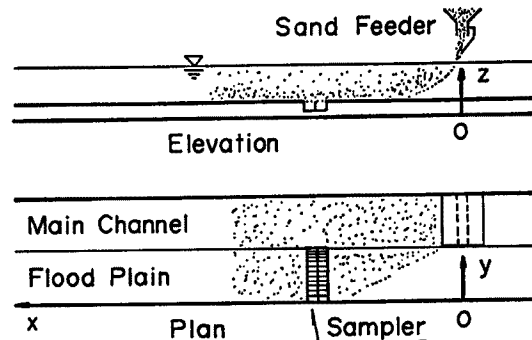


Fig. 11 Method of sand feeding.

給砂量は 2.3 gr/sec であり、低水路には Case S-1 および Case S-2 でそれぞれ 0.3 cm、0.4 cm の砂漣が形成されたが、その波高がほとんど変化しない状態で実験を行った。浮遊砂や高水敷上の流砂の採取は、給砂点から0.5, 1, 2, 3 および 4 m の地点で行った。実験は濃度の測定、5つの地点の高水敷の流砂の採取を別々に行い、一つの Case で6回通水して行った。各 Case の各実験で河床条件を含め、実験条件は

Table 2 Experimental conditions

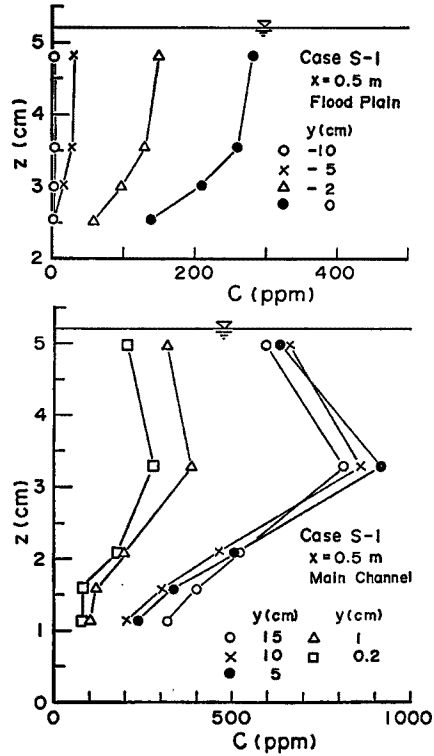
Case	$A$ (cm)	$B$ (cm)	$B_f$ (cm)	$Q$ (l/s)	$h$ (cm)	$I_s$	$Q_s$ (gr/s)
S-1	2	20	20	7.1	5.1	1/648	2.3
S-2	5	20	20	7.1	7.1	1/697	2.3

ほとんど一致していた。なお、以下では給砂地点を  $x$  軸の原点とする。

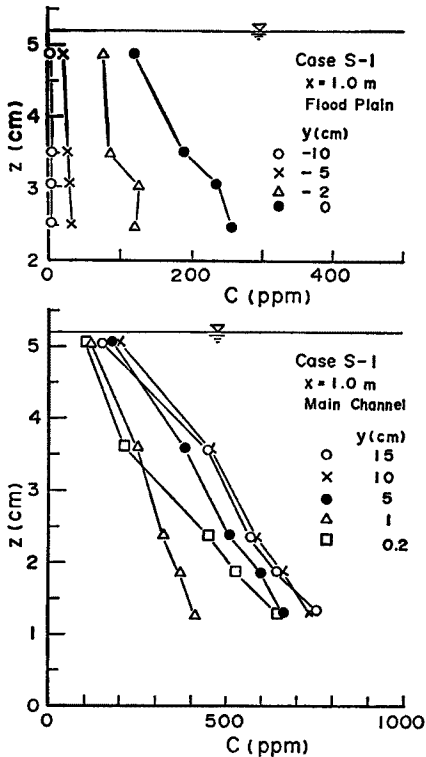
3.2 浮遊砂濃度分布

Fig. 12 (a)~(e) は、Case S-1 の場合の  $x = 0.5, 1, 2, 3, 4$  m における浮遊砂濃度分布の流下方向の変化を示したものである。水面から給砂しているため上流では濃度が底面付近より水面付近の方が高くなっている。流下とともに濃度分布は変化し、給砂地点から 3m 下流ではほぼ平衡状態に達している。同図にはラウス分布も示しているが、平衡状態の濃度分布は低水路と高水敷の境界近傍および高水敷を除いてほぼラウス分布と一致していることがわかる。しかし、境界付近では高水敷でも低水路でも、底面より上方で濃度が最大となっている。

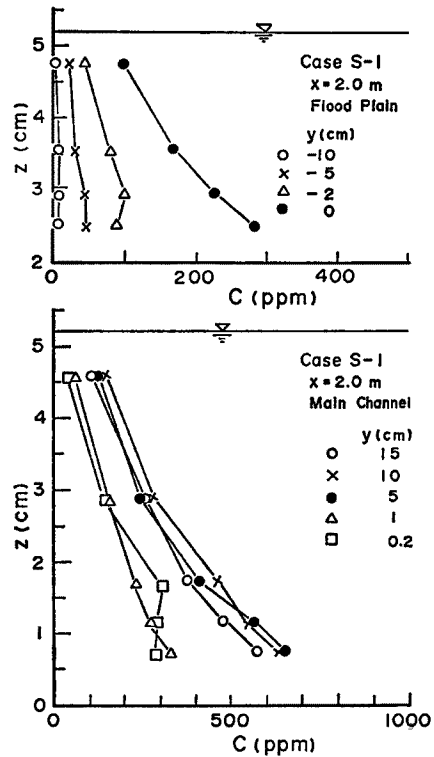
高水敷側には給砂地点から 50 cm 下流 ( $x = 0.5$  m) で、すでにかかなりの量の浮遊砂が輸送されている。観察によると、浮遊砂はスケールの大きい渦によって間欠的に高水敷側に輸送されているようで、このため、給砂地点のす



(a)



(b)



(c)



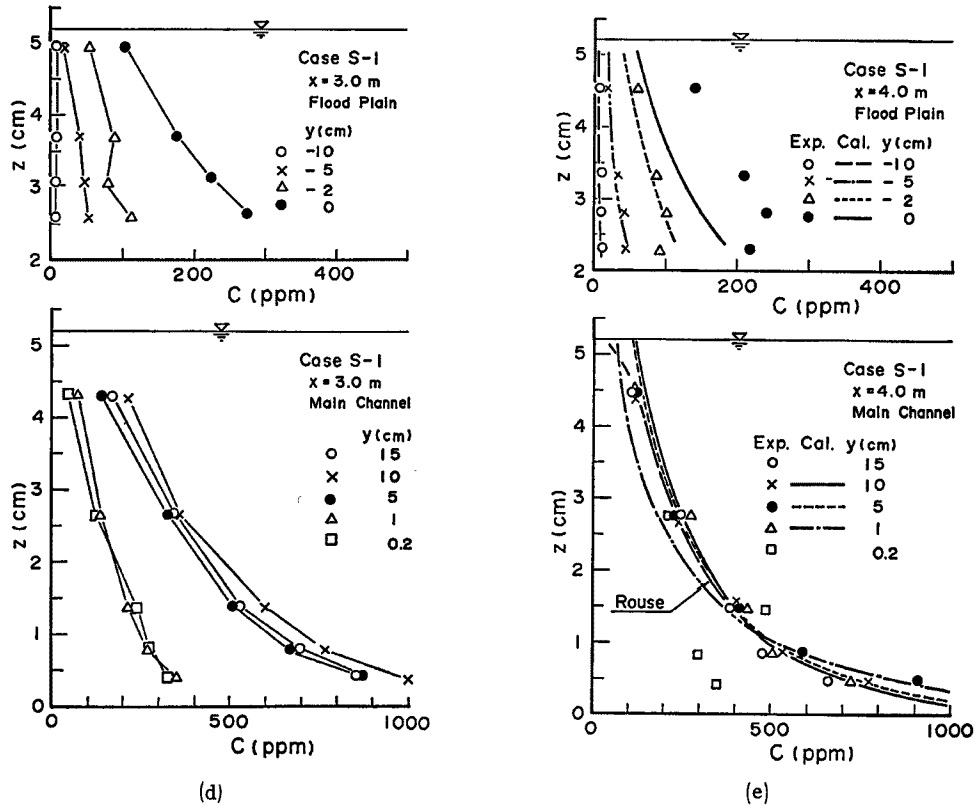


Fig. 12 Concentration distribution of suspended load.

ぐ下流でも浮遊砂が高水敷にかなり輸送されている。

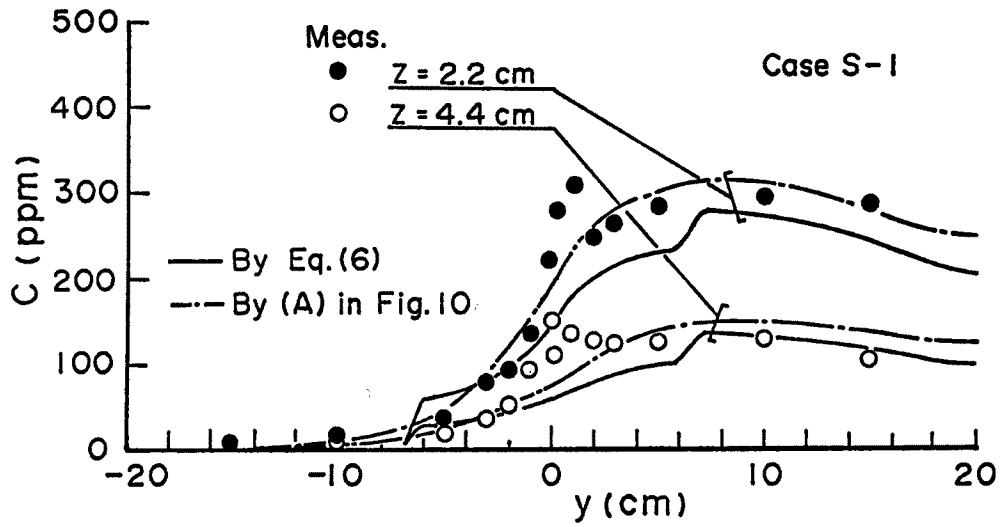
Fig. 13 (a) および (b) は Case S-1 および Case S-2 の場合の濃度の横断分布を示したものである。高水敷の先端付近で濃度が極大になっている。このことや Fig. 12 の境界付近の分布形は、二次流の上昇流によって底面付近の高濃度の浮遊砂が巻き上げられることを示唆するものである。

### 3.3 高水敷における浮遊砂の沈降量と掃流砂量

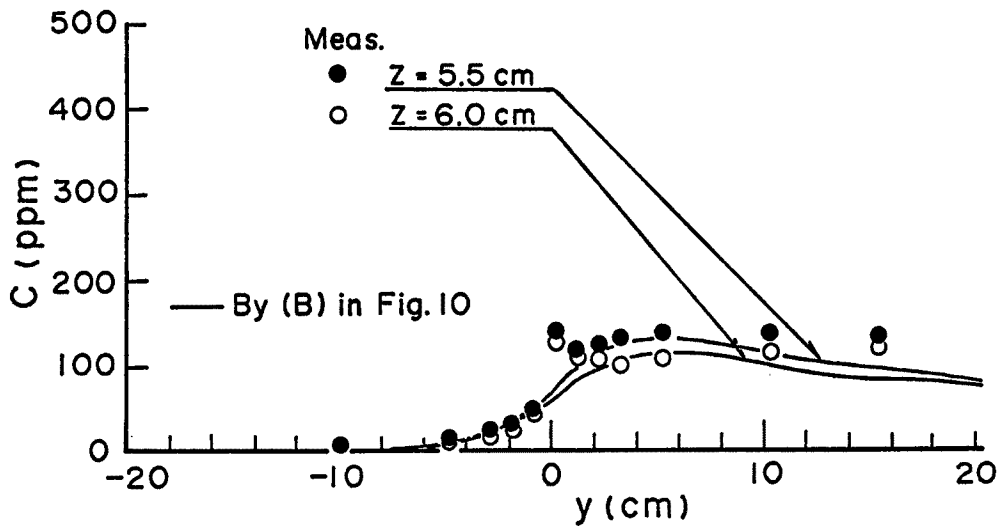
Fig. 14 (a) および (b) は、高水敷上の浮遊砂の沈降量の横断分布を示したものである。この量は浮遊砂が単位時間、単位面積当たり沈降する量であり、沈降量と再浮上量との差として求められる堆積量とは異なる。流下方向に河床付近の濃度が増加するため、沈降量も流下方向に増加している。また、浮遊砂が高水敷側に輸送されるため、横断方向の沈降範囲も増加している。

Fig. 15 (a) および (b) は、高水敷上の掃流砂量の横断分布を示したものである。高水敷は固定床であり、掃流砂は堆積した浮遊砂が流送されたものである。浮遊砂の堆積量が流下方向に増加するに従って、掃流砂量も増加し、また、沈降範囲が横断方向に広がるにつれて、掃流砂の横断方向の存在領域も広がっている。

Fig. 13 および Fig. 14 からわかるように、高水敷の先端から少し高水敷側に沈降量や掃流砂量の極大点がある。これは先端付近に生じる二次流の影響と考えられる。本実験で得られた結果だけから明確なことは言えないが、この位置は二次流の下降流の位置にほぼ対応するので、砂粒子の底面方向の平均速度が沈降速度より大きくなり、沈降量が他の個所より多くなるため、先端近傍より掃流力は小さいにもかかわらず掃流砂量も多くなるものと推察される。今後、さらに、二次流の構造と浮遊砂の挙動との関係を詳細に調べる必要がある。



(a)



(b)

Fig. 13 Transverse distribution of concentration of suspended load.

#### 4. 浮遊砂の流送・堆積過程に関する理論的解析

##### 4.1 基礎式

非平衡状態の浮遊砂濃度分布は次式より計算される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_0) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $t$ : 時間、 $u, v, w$ :  $x, y, z$  方向の平均流速、 $w_0$ : 砂粒子の沈降速度、 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ :  $x, y, z$  方向の拡散係数である。本実験のように時間的に水力条件や河床条件が変化しないとき上式の  $\partial C / \partial t = 0$  である。また、 $u \gg v, w$  であり、流下方向の拡散は移流の項に比べて非常に小さいと考えると、上式は次のようになる。

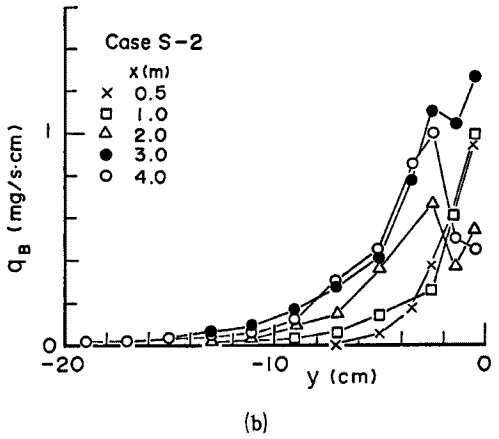
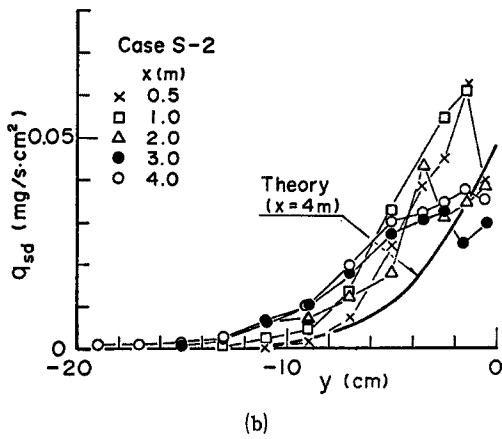
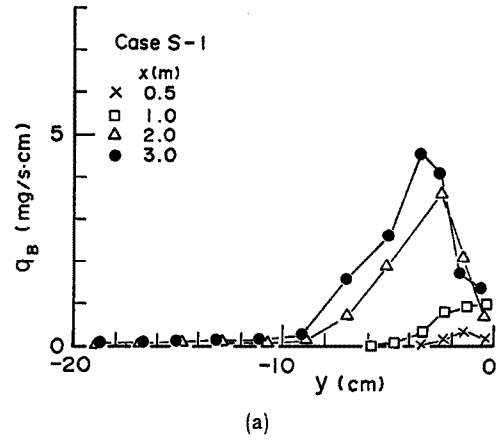
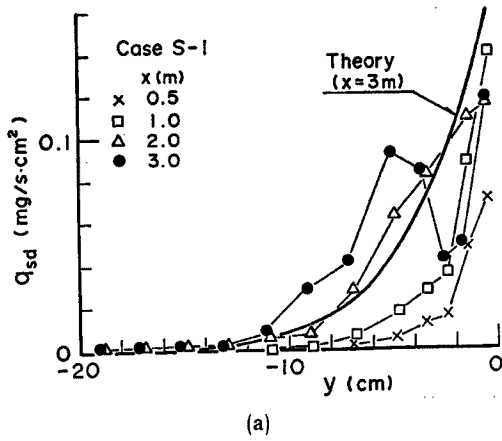


Fig. 14 Deposition rate of suspended load on flood plain.

Fig. 15 Bed load on flood plain.

$$u \frac{\partial C}{\partial x} - w_0 \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (9)$$

上式を適当な境界条件のもとに解けば浮遊砂濃度が給砂地点から発達し平衡になるまでの過程が計算できる。

さらに、平衡状態 ( $\partial C/\partial x=0$ ) を対象にすると式(9)は次式ようになる。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

以下では、上式を用いて平衡状態の濃度分布を解析する。さて、水面や側壁を通して浮遊砂が輸送されない条件と高水敷上での濃度を規定する条件は次のようである。

水面 ( $z=h$ ) :

$$\epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (11)$$

側壁面 ( $y=B, -B_f$ ) :

$$\epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

低水路底面 ( $z=0.05h$ ) :

$$C = C_s \dots\dots\dots (13)$$

高水敷底面 ( $z=0.05H+D$ ) :

$$\partial/\partial z(\epsilon_s \partial C/\partial z) + \partial/\partial y(\epsilon_y \partial C/\partial y) + w_0 \partial C/\partial z = 0 \dots\dots\dots(14)$$

以上より、浮遊砂の平衡濃度分布が計算され、高水敷上への浮遊砂の沈降量は、底面付近の濃度と砂粒子の沈降速度との積として

$$q_{sd}(x) = C(x, 0.05H + \Delta) \cdot w_0 \dots\dots\dots(15)$$

のように計算される。

#### 4.2 理論値と実験値との比較

計算に際して、鉛直方向の拡散係数は鉛直方向の渦動粘性係数に比例するとして、ラウスの式より次式のような放物線で与えた。

$$\text{低水路: } \epsilon_s = \beta u_* \kappa z (1 - z/h) \dots\dots\dots(16a)$$

$$\text{高水敷: } \epsilon_s = \beta u_* \kappa (z - \Delta) \{1 - (z - \Delta)/h\} \dots\dots\dots(16b)$$

ここに、 $\beta$ : 比例係数、 $\kappa$ : カルマン定数である。

低水路における基準点濃度には実験値を用い、上式の  $\beta$  は2、 $\kappa$  は0.4とした。また、本実験では高水敷上で砂粒子の再浮上はほとんどないものと思われるので、式(14)の左辺第一項は0とおいた。

さて、本解析では横断方向の拡散係数  $\epsilon_y$  が重要であり、その決定法が問題となる。Fig. 13 (a) には  $\epsilon_y$  がその方向の平均的な渦動粘性係数と等しいものとし、Fig. 10 からそれを求め、濃度分布を計算した結果を示している。大体の傾向は計算されているが、低水路と高水敷の境界付近や高水敷においては、あまり適合していない。そこで、 $\epsilon$  を横断方向に適当に変化させて、Fig. 10 の点線(A)のような分布を用い、 $\epsilon_y = \epsilon$  として濃度分布を計算すると Fig. 12 (e) または Fig. 13 (a) に示すように、計算値は実験値を良好に説明する。Fig. 13 (b) にも  $\epsilon$  の横断分布を Fig. 10 の破線(B)のようにしたときの濃度分布の実験値と理論値の比較を行っている。このように、 $\epsilon_y$  を式(6)の  $\epsilon$  と等しいものとして一定値を与えても、第一近似的には濃度分布は計算されるが、境界付近の浮遊砂濃度や高水敷への浮遊砂の拡がりや再現するためには、Fig. 10 の点線や破線のような  $\epsilon_y$  の横断分布を考慮しなければならない。

ついで、Fig. 14 (a) および (b) に、浮遊砂の高水敷における沈降量の分布の計算値を示す。詳細な分布形状は再現されていないが、おおよその傾向は計算されている。本解析では、清水中における砂粒子の沈降速度で浮遊砂を沈降させており、二次流の効果は全く考慮していないため、高水敷先端付近の沈降量の極大値は計算されていない。

以上のように、複断面直線水路における浮遊砂濃度や高水敷における浮遊砂の沈降量の分布について、本解析方法はほぼ有効であるが、境界付近の二次流の効果などを今後取り入れて発展させる必要がある。

## 5. 結 語

複断面直線水路で流下方向流速の横断分布、浮遊砂濃度分布、高水敷上の浮遊砂沈降量および掃流砂量の横断分布について実験的・理論的検討を行い、浮遊砂が低水路から高水敷へ輸送され堆積する過程について考察した。主要な結果を要約して結語とする。

(1) 低水路と高水敷の境界より高水敷側で、流速および浮遊砂濃度の極大点が生じる。流速の極大点は二次流の下降流の地点に、また濃度の極大点は上昇流の位置に対応するものと考えられる。

(2) 低水路の濃度分布は境界付近を除いてほぼラウス分布に従っているが、境界では二次流による巻き上げによって、底面より上方向の位置に濃度の最大点が生じる。

(3) 低水路に供給された浮遊砂は流下するとともに間欠的な大規模な渦によって高水敷に輸送され、それとともに、高水敷上で浮遊砂が沈降し、掃流砂が生じる横断方向の領域は高水敷側に広がる。また、浮遊砂

の沈降量や掃流砂量は高水敷の先端から少し高水敷側の所で極大値をとる傾向がある。これも二次流の影響であると考えられる。

(4) 平衡状態の拡散方程式を用いて、浮遊砂濃度や高水敷上の浮遊砂の沈降量を計算し、その計算法の妥当性を実験値との比較から検証した。しかし、濃度分布や沈降量の詳細な分布を再現するためには、低水路と高水敷の境界における流れの特性を考慮した拡散係数を求める必要がある。

実河川では河道が蛇行している場合が多く、その場合横断方向への移流の効果が無視し得なくなる。今後この点についても検討して行きたい。

#### 参 考 文 献

- 1) Rajaratnam, N. and R.M.Ahmadi, : Hydraulics of Channel with Flood Plains, Journal of Hydraulic Research, Vol. 19, 1981, pp. 43-60.
- 2) Myers, W.R.C. and E.M. Elsayy : Boundary Shear in Channel with Flood Plain, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 101, July 1975, pp. 933-946.
- 3) 今本博健・石田泰輔：複断面開水路流れの水理特性に関する実験的研究，第27回水理講演会論文集，1983，pp. 61-66.
- 4) Krishnappan, B.G. and Y. L. Lau : Turbulence Modeling of Flood Plain Flow, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, 1986, pp. 251-266.
- 5) James, C.S. : Sediment Transfer to Overbank Sections, Journal of Hydraulic Research, Vol. 23, 1985, pp. 435-452.
- 6) 山崎真一・石川忠晴・金丸督司：開水路平面せん断流に関する実験的研究，第39回年次学術講演会講演概要集，1984，pp. 473-474.