

北海道開発局開発土木研究所 正員 崇田 徳彦  
正員 清水 康行

### 1. はじめに

水制等の河川構造物周辺の流れや土砂輸送およびこれに伴う河床の変化を的確に予測することは河川計画上重要な課題である。一般に、構造物背後の土砂堆積は乱流拡散や2次流の効果に伴い土砂が運搬されることにより生ずる。著者等は水制背後の土砂堆積に及ぼす2次流や乱流拡散を実験により明らかにし、このうち2次元モデルの計算に乱流拡散の効果を組み入れたモデルの開発を行った<sup>1),2)</sup>。これによると、Reynolds数の横断方向の差が非常に大きい条件下では、乱れによる運動量の拡散効果が平均流速の決定に対して重要な役割を果たすという結論が得られている。さらに、構造物周辺の2次流を予測する手法について準3次元モデル<sup>3),4)</sup>の提案を行った。この方法は水制により強制的に曲げられた流れに生じる加速度と彎曲部に生じる遠心力が類似のものと考え2次流の運動方程式を導入し、これを積分することによりせん断力を求めさらに積分することで流速を求めるものである。

本研究では準3次元モデルを水制周辺の流れが急変し河床が極端に変化している条件下で計算を行い、準3次元モデルの有効性について検討を行う。また、水制を含む移動床実験を行い砂州との関係について検討を行う。

### 2. 研究目的

水制周辺に発生する流れ、特に水制上流部付近に発生する流れは上昇流や下降流が卓越しており静水圧の仮定が許されない箇所と考えられる。しかしながら上昇流や下降流が河床変動計算に重要となる河床せん断力にどの程度影響を与えているかは明らかでない。そこで、水制先端部の動的平衡状態における水制周辺の上昇流や下降流を含む3次元電磁流速計を用いて計測を行い、河床付近の流速がどの程度であるか検証する。さらに、この結果と準3次元モデルの計算結果を比較することにより、モデルの有効性を確認する。このような条件下で準3次元モデルによる再現性が良好であれば水制を含む実河川への適用は充分可能と考えられる。

札内川を例に挙げるように北海道の水制設置計画は急流河川の河道維持に用いられる場合が多く、このような急流河川の河床形態の多くは砂州発生を伴う中規模河床形態<sup>5)</sup>である。このため水制設置の検討を行う際、砂州の影響を考慮することは水制の安定維持や水制の配置のために非常に重要であるが、砂州移動と水制周辺に発生する土砂堆積の関係は非常に現象が複雑であり、未解明であると言っても過言ではない。これらの理由により、砂州発生条件下における水制の実験を行った報告は非常に少なく板倉・黒木・森<sup>6)</sup>による研究があるだけである。水制工の配置についての研究には加治・竹本・北條・福田<sup>7)</sup>や飛山・黒木・板倉<sup>8)</sup>の研究がある。加治らは(水制長/水制間隔)について4以下が良好であるという研究報告があるが、飛山らによると砂州が発達した河道において(水制長/水制間隔)は3倍程度では不十分であり2以下を必要とするという研究報告がある。このような研究成果を踏まえ、実験は砂州発生条件下及び非砂州条件下で行うこととする。また、本研究では様々なタイプの水制のうち非越流型不透過の単一水制を対象とする。これは、(1)実河川に設置されている水制は透過型が多いが、設置後の水制には土砂が堆積し草木等が引っ掛かるため、その透過率は非常に低くほぼ不透過と見なしても支障ないものが多い、(2)河川計画上、土砂堆積を目的とした水制設置の場合、水制設置箇所は最終的に高水敷化される部分であるために、水制高は高水敷高程度が最も経済的で効果があるとされている、このため水制を越流する流れは大規模な洪水時を除いてあまりない、などの理由によるものである。さらに、水制設置箇所は蛇行部や合流部が殆どであるが、直線水路は砂州の移動と水制によって発生する土砂堆積の関係や水制本来の機能により発生する土砂堆積現象を知るうえにおいて最も重要な形状であると考えられる。以上の理由に基づき実験条件は、非越流型不透過水制を用いた直線水路実験で行う。

### 3. 準3次元モデルの概略

本論文で検討を行っている準3次元モデルの基本概念を以下に示す。なお、計算方法詳細については[3],[4]に掲載している。Engelund<sup>9)</sup>は一樣彎曲部の2次流に関する先駆的な研究を行っており、これによると一樣彎曲部に発生する2次流の運動方程式は次式で表される。

$$-\frac{u^2}{r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \cdot \frac{\partial v_n}{\partial z} \right) \quad (1)$$

<sup>1</sup>Flow Mainting Dynamic balance and Change of Riverbed around Spur-Dike  
by Naruhiko MUNETA ,Yasuyuki SHIMIZU

ここで、 $s_0, n, z$  はそれぞれ流下方向、横断方向および鉛直方向の座標軸、 $u_s, v_n$  は  $s_0, n$  方向の流速成分、 $\rho$  は流体の密度、 $p$  は  $\rho gh$  (ただし、 $g$  は重力加速度、 $h$  は水深)、 $K_s$  は  $\kappa u_* h/6$  (ただし、 $\kappa$  はカルマン定数、 $u_*$  は摩擦速度)、 $r$  は流路の曲率半径である。

(1) 式より求まる  $v_n$  が一様弯曲部の 2 次流であるが、この算出法の概略を以下に示す。はじめに、左辺に流速分布の 1 次近似として放物線分布を与える。次に、水面でのせん断力 (=0) の境界条件を用いて (1) 式を  $z$  で積分し、水深方向のせん断力  $\partial v_n / \partial z$  を求める。さらに河床での流速 (=slip velocity) の境界条件を用いて  $\partial v_n / \partial z$  を  $z$  で積分し、 $v_n$  を求める。しかしながら  $v_n$  には未知数  $p$  が含まれているため、さらに  $v_n$  を  $z$  で積分し、その結果が 0 となることを用いて  $p$  を求める。(なお、以下の説明では、上記の方法を Engelund の方法とする)。

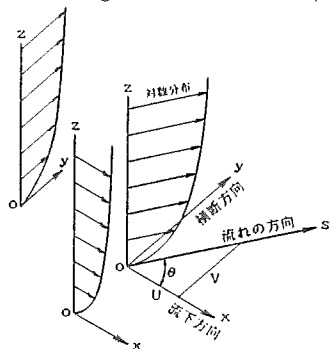


図-1 1次近似の仮定

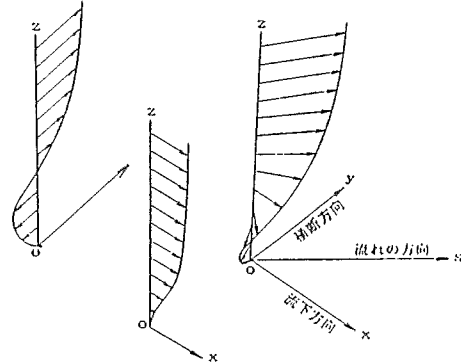


図-2 2次流

準 3 次元モデルは、上記の考え方を流向が場所ごとに变化しても適用可能なように 2 次元的に拡張を行う。流れの水平方向運動方程式はベクトル表示すると以下の式で与えられる。

$$\vec{v}(\nabla V) + \frac{1}{\rho} \nabla p - T_V(\vec{v}) = T_H(z) \quad (2)$$

ただし、

$$\vec{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}' \quad (3)$$

$$= u\vec{i} + v\vec{j} \quad (4)$$

$$= U\vec{i} + V\vec{j} + u'\vec{i} + v'\vec{j} \quad (5)$$

ここで、 $\vec{v}$  はベクトル表示であり、 $T_V(\vec{v})$  は水平方向の拡散項、 $T_H(z)$  は水深方向の拡散項である。

また、 $\mathbf{V}$  は水深平均流速、 $\mathbf{v}'$  は残差である。さらに  $x, y$  軸に関して、 $u, v$  は流速成分、 $\vec{i}, \vec{j}$  は単位ベクトル、 $U, V$  は水深平均流速、 $u', v'$  は残差である。 $\mathbf{V}$  と流向方向に後述の (7) 式を用いて算出される 1 次元等流の無次元流速分布  $\Phi(\xi_0, \xi)$  を与えると、流速分布は以下の式になる。

$$\vec{v} = \underbrace{\mathbf{V} \Phi(\xi_0, \xi)}_{1 \text{ 次近似}} + \mathbf{v}' \quad (6)$$

ただし、 $\xi$  は  $z$  を水深  $h$  で無次元化した値 ( $= z/h$ )、 $\xi_0$  は流速が 0 となる河床からの距離であり、以下の説明では便宜上河床を  $z = 0$  とする。(5) 式の 1 次近似 (図-1 参照) を Engelund の方法と同様に (2) 式左辺に代入し、右辺に含まれる  $\vec{v}$  (図-2 参照) を算出する。

以上の考え方にに基づき、直交直線座標系における 3 次元の水平方向運動方程式 (2) 式を展開すると準 3 次元の運動方程式は以下の式で表される。

$$\vec{v} = - \left[ a \int_{\xi_0}^{\xi''} \frac{1}{k(\xi')} \int_{\xi'}^1 \Phi(\xi_0, \xi)^2 d\xi d\xi' + b \int_{\xi_0}^{\xi''} \frac{1}{k(\xi')} \int_{\xi'}^1 k(\xi) \Phi(\xi_0, \xi) d\xi d\xi' + c \int_{\xi_0}^{\xi''} \frac{1-\xi'}{k(\xi')} d\xi' \right] \quad (7)$$

$$a = \frac{h^2}{K_0} \vec{v}(\nabla V) \quad (8)$$

$$b = -\frac{h^2}{K_0} T_V(\vec{v}) \quad (9)$$

$$c = \frac{-V + a \int_{\xi_0}^1 \int_{\xi_0}^{\xi''} \frac{1}{k(\xi')} \int_{\xi'}^1 \Phi(\xi_0, \xi)^2 d\xi d\xi' d\xi'' + b \int_{\xi_0}^1 \int_{\xi_0}^{\xi''} \frac{1}{k(\xi')} \int_{\xi'}^1 k(\xi) \Phi(\xi_0, \xi) d\xi d\xi' d\xi''}{\int_{\xi_0}^1 \int_{\xi_0}^{\xi''} \frac{1-\xi'}{k(\xi')} d\xi' d\xi''} \quad (10)$$

ここで、 $K_0$ は水深平均成分の渦動粘性係数であり、 $k(\xi)$ は渦動粘性係数の鉛直分布成分である。

#### 4. 移動床実験

実験は黒木・岸による中規模河床形態の領域区分<sup>6)</sup>によると実験1が非砂州、実験4,6が単列砂州領域に位置する。実験条件を表-1に示し、実験水理条件を表-2に示す。

	実験1	実験4	実験6
水路延長	30m	30m	30m
水路幅	1m	1m	1m
下流端水位	0.20m	0.03m	0.03m
河床勾配	1/2020	1/300	1/300
水制長	0.3m	無水制	0.1m
水制幅	0.2m	無水制	0.2m
実験流量	$0.109m^3/s$	$0.012m^3/s$	$0.012m^3/s$
通水時間	4時間	14時間	14時間

表-2 実験条件

	実験1	実験4	実験6
無次元掃流力 ( $\tau_*$ )	0.06	0.06	0.06
無次元限界掃流力 ( $\tau_{*c}$ )	0.034	0.034	0.034
摩擦速度 ( $u_*$ )	3.1	3.1	3.1
粒子 Reynolds 数 ( $Re_s$ )	31	31	31
フルード数 (Fr)	0.4	0.7	0.7
流速係数 ( $u/u_*$ )	17.5	12.8	12.8
川幅水深比 (B/h)	5.0	33	33
$BI^{0.2}/h$	1.1	10.6	10.6

表-3 実験水理条件

今回の実験の中で最もせん断力が大きい実験1の条件により予備実験(無水制)をおこなった。これによると、下流端からの流砂量は  $6(l/2hr)$  であったために通水時の給砂は行わなかった。尚、使用した砂は珪砂 1mm を使用しており粒度分布の広がりには殆どないものと考えられる。

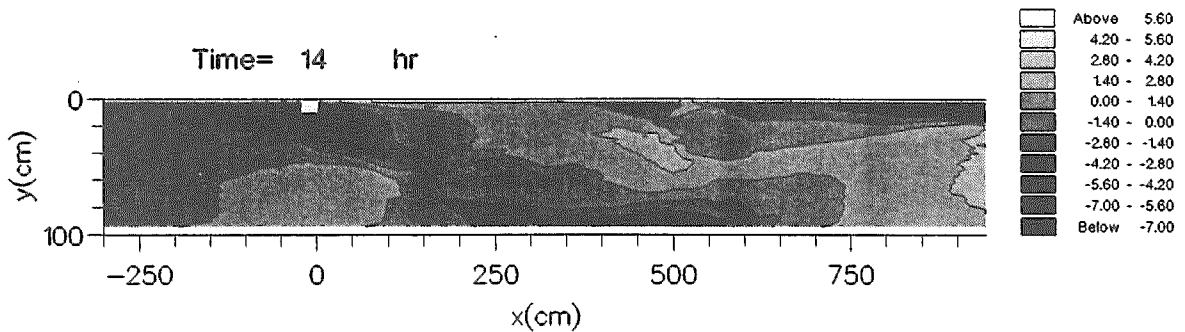


図-3 河床コンター図 (実験6)

#### 4-1 砂州発生下による移動床実験

砂州発生下による移動床実験は実験4と実験6である。通水時間は実験4を平坦河床から通水を行い砂州が充分発達したと考えられる14時間後に通水を停止した。これと同様に実験6も14時間通水を行った。図-3は実験6の河床コンター図であり、ちょうど水制の対岸側に砂州の発達が確認される。

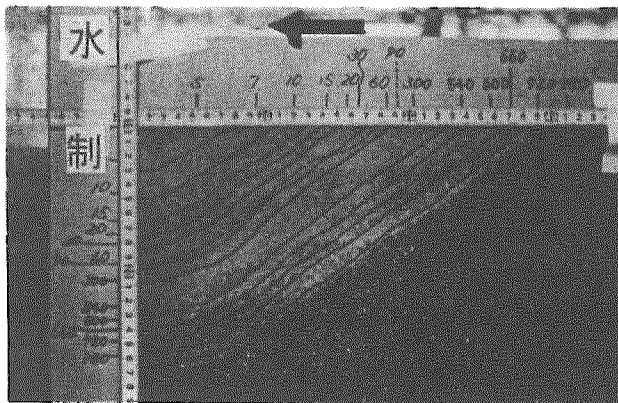


写真-1 局所洗掘深 (水制上流部)

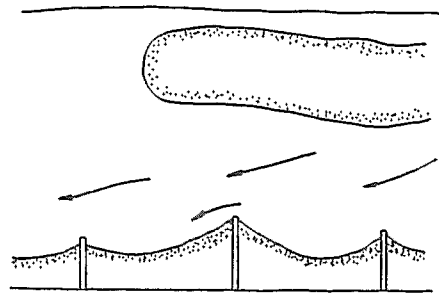


図-4 板倉らによる調査概念図

写真-1は実験6の水制上流部の時間変化に伴う局所洗掘深を表している。これによると通水300分後、局所洗掘深(初期洗掘深)は21cmとなり、その後500分まで洗掘の進行は見られず、ほぼ動的平衡状態に達していると考えられる。しかしながら、水制対岸側の砂州の発達に伴い流向が水制側に向ったために、500分後からさらに洗掘が始まり最終洗掘深は初期洗掘深

より約 1.7 倍にも達した。300 分までの初期洗掘深を水制によって生じたものであると仮定した場合、それ以降の洗掘深は砂州との関係により生じたものと考えられる。板倉ら<sup>9)</sup>は現地調査の結果から砂州河道におけるいくつかの水制工の例について実体の把握を行っている。その一つに対岸に砂州の存在が認められる水制において水流が水制側に集中したために一度堆積した土砂が再び洗掘されている水制(図-4)を確認しており、この現象と全く同様の動きによるものと考えられる。このため水制を設置する際、砂州との関係を充分考慮しなければ、設置した水制に中折れや沈下が生じたり、土砂堆積の起こらない水制を設置してしまう可能性がある。

## 5. 動的平衡状態の流れ

### 5-1 実験内容

4 節でおこなった実験 1 を通水完了後モルタル (5mm 厚) で固定し、再度通水を行い、3 次元電磁流速計を用い詳細に流速を測定した。計測は 1 点当たりの時間を 0.1 秒間隔で行い 30 秒間行った。

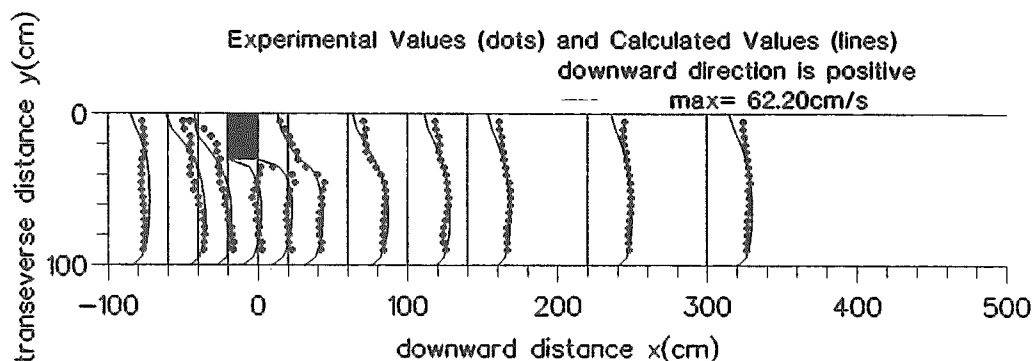


図 5 平均流速の実験結果と計算結果の比較 (流下方向流速)

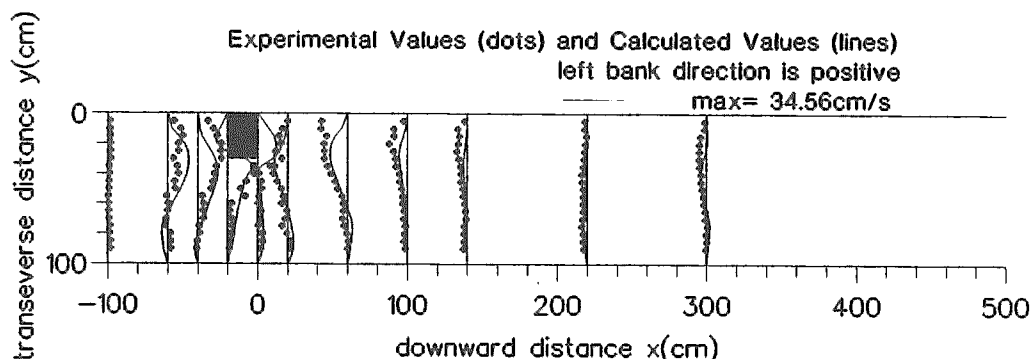


図-6 平均流速の実験結果と計算結果の比較 (横断方向流速)

### 5-2 計算結果と測定結果の比較

本論文で用いている準 3 次元モデルは 2 次元モデル<sup>10)</sup>により算出した平均流速の計算精度が大きく解の精度を決定する。そのため、流速成分を水深平均した実験結果と 2 次元モデルによる流速の計算結果の比較を行う。図-5 は流下方向流速の実験結果と計算結果の比較を示し、図-6 は横断方向流速の実験結果と計算結果の比較を示す。なお、図-5.6 は左側が上流であり、黒丸が実験結果、実線が計算結果である。図-5 は流下方向が正、図-6 は左岸から右岸の方向が正である。図-5 の流下方向流速によると計算結果は全域で良好であり、図-6 の横断方向流速によると計算結果は水制先端部及び水制前域で多少精度が落ちるものの、ほぼ実験結果を再現していると考えられる。

図-7 は水深方向の流下方向流速を表しており、図-8 は水深方向の横断方向流速を表している。図 7.8 は黒丸が実験結果 (大丸が水位、小丸が流速) であり実線が計算結果である。最初に流下方向流速について検討を行う。図-7 は水深方向の流下方向流速を表しており、図の左側が上流であり、図の手前が右岸側である。(1),(2) 及び (3) は左岸側から 25.45 及び 60cm の測線の縦断面図を表している。(1) の計算結果によると-50cm 付近で精度は劣るものの、その他は良好に再現されていると考えられる。(2) についても (1) と同様である。

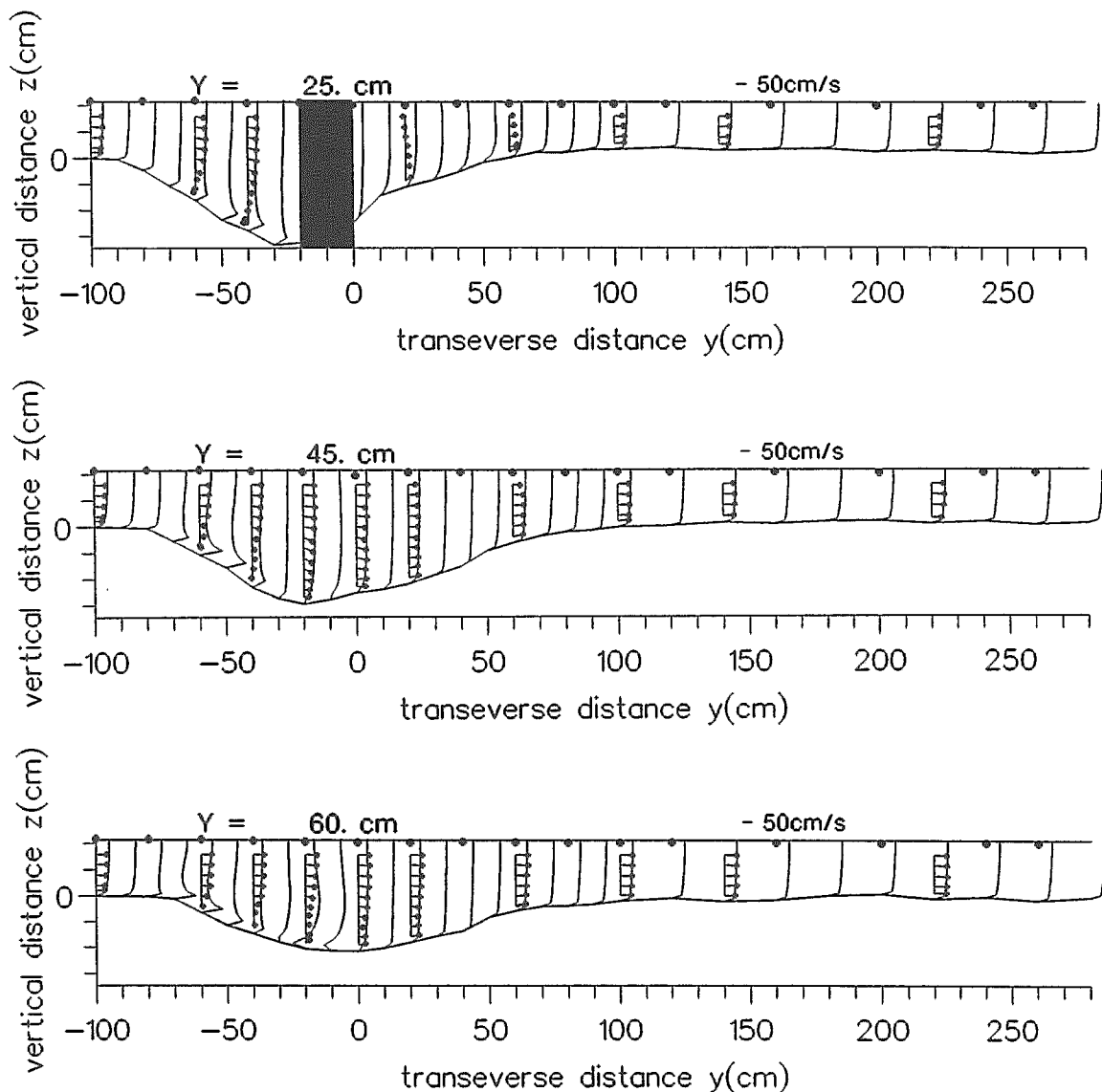


図-7 流下方向流速

(3)の実験結果によると、水制上流部で河床付近の流速が逆向きになっている様子や水制下流部で河床付近で膨らんでいる様子が良く現れているものの水制上流部の河床付近の流速の精度は悪い。

続いて横断方向流速について検討を行う。図-8は図の左側が左岸であり、図の手前が上流である。(1)、(2)及び(3)は水制下流端より-100,-60,-40cm上流部の地点を示す。(1)によると、実験結果及び計算結果とも横断方向流速は殆ど0であり、2次流はまだ発生していない。(2)、(3)の実験値によると左岸側付近では下降流が発生し、河床付近では左岸から右岸へ向かう流れが表面付近よりも卓越しており、(2)から(3)に向かうに従い、この傾向は大きくなっている。(2)の計算結果によると河床付近の流速は良好に再現されている。(3)の計算結果によると、断面中央から右岸側に向けては精度良い計算結果が得られているものの左岸側付近では河床付近の再現性は良くない。このことは、鉛直流が河床せん断力に与える影響を無視できない。つまり水制直近傍の流れに関しては $w=0$ ( $w$ は水深方向流速)の仮定では再現することが困難である。以上の検討により水制の直近傍では精度の落ちる箇所がある。しかしながら、水制長(30cm)とほぼ同程度(36cm)の局所洗掘が発生する条件下であり、しかも計算精度の落ちる部分は水制直近傍(水制上流側から20cm)であり、実河川の水制を含む流れ及び河床の変化を予測するモデルとしては十分な精度をもつものと考えられる。

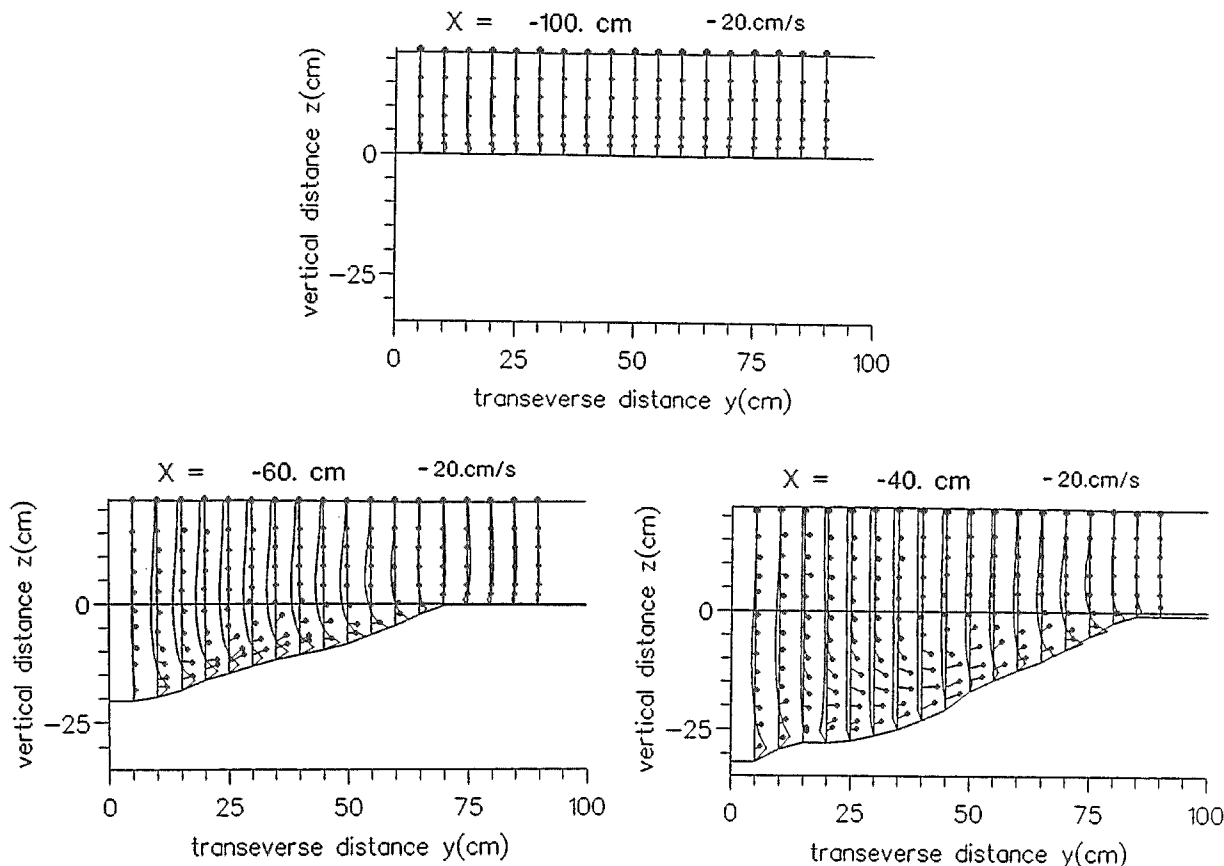


図-8 横断方向流速

## 6. おわりに

本研究により、著者等が提案を行っている準3次元数値計算モデルを用いることで、水制を含む河床付近の流速をほぼ再現可能であることが確認された。このため、準3次元モデルを河床変動可能なように拡張を行い、現地河道の施工計画に役立つモデルにする予定である。また、砂州と水制の関係について興味深い現象が基礎実験により明らかにされたが、今後これらの関係をさらに検討していく必要がある。今後の課題として、今までは構造物背後の流れや土砂輸送の原因と考えられる乱流拡散現象<sup>3),4),5)</sup>による水平混合と本研究で扱ったような2次流による鉛直混合現象を別々に評価し数値解析に適用してきたが、実際はこれらの現象が相互にどのような関係を持ち流れの構造を決定しているかを明らかにする必要がある。

## 謝辞

本モデルで行っている2次流の計算方法に関して、北海道大学森明巨先生から御指導を受けた。記して謝辞にかえる次第である。

## 参考文献

- 1) 崇田徳彦, 清水康行: 水制を含む流れに関する研究, 北海道開発局開発土木研究所月報, 第471号, pp.2 ~ 15, 1992
- 2) 崇田徳彦, 清水康行: Reynolds 応力を考慮した水制を含む流れの計算, 土木学会水理講演会, 第37回, pp.487 ~ 494, 1993
- 3) 崇田徳彦, 清水康行: 水深方向流速分布を算出する2.5次元数値計算モデルの開発, 北海道開発局技術研究発表会講演概要集(3)pp.191 ~ 196, 平成4年度
- 4) 崇田徳彦, 清水康行: 鉛直流速分布を考慮した水制を含む数値計算モデルの開発, 土木学会北海道支部論文集, 第49号, pp.479 ~ 484, 1993
- 5) 黒木幹男, 岸 力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告, 第342号, pp.87 ~ 96, 1984
- 6) 板倉忠興, 黒木幹男, 森 明巨: 水制の機能と効果に関する研究, 北海道大学委託研究報告, 平成2年度 水域経営に関する基礎的研究(研究代表者:板倉忠興, 藤田睦博), pp.101 ~ 121, 1991
- 7) 加治昌秀, 竹本成行, 北條絃次, 福田義昭: 効果的な水制工の配置に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告, 第48号, pp.369 ~ 374, 1991
- 8) 飛山裕之, 黒木幹男, 板倉忠興: 移動床河道に於ける水制の効果に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告, 第48号, pp.379 ~ 384, 1991
- 9) Englund, F.; "Flow and bed topography in channel bends", j.Hyd.Div., ASCE, 100, HY11, 1974
- 10) 清水康行: 沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究, 北海道大学審査学位論文, pp.1 ~ 197, 1991