

1. はじめに

近年、河道の多様性が河川生態環境に果たす役割の大きさが再認識され、山地河川や都市河川において瀬-淵構造の保全または創出に関する検討が行われている。このような瀬-淵構造の保全・創出にあたっては、瀬や淵の流れ構造と維持機構との関係についての確に把握することが必要である。本研究では瀬-淵構造における特に淵の流れ特性に着目し、淵の保全や人工的な淵の創出の際に必要な基礎的知見を得るため、実験水路に淵を造成し流速計測を行い、実験的に淵の流れの3次元流れ構造と淵の維持機構について検討するとともに、複雑な河床変化により生じる3次元性の強い流れ構造を理解するため3次元数値計算により理論的に淵を有する河道の流れ構造について検討した。

2. 実験方法

実験水路は、全長 13m、幅 B=59.3cm、高さ 30cm の勾配可変型長方形断面開水路を用いた。実験水路に造成した実験淵の概形と座標系を図-1に示す。淵は砂河床を掘り下げて造形しセメントで固めることによって作成した。実験淵は幅 59.3cm、全長 160cm で、水路左岸側を淵底面の平面部とし、右岸側に全長 40cm、斜面勾配 1/10 の斜面を設けた。過去の研究で淵の出入り口において角度がない場合、流心が淵平面部上を通らず土砂の堆積が生じる可能性が示唆されたため、淵底面への流れ込みを促すよう淵上流部、下流部ともに流下方向と 45° の角度を保たせつつ斜面を設け、淵最深部の深さは 4cm とした。水路勾配は 1/900 とした。本実験では固定床条件において平水時・中小出水時・大規模出水時を想定した3ケースの流量において3次元流速計測を行い、異なる流量における淵を有する河道の流れ構造を比較し、淵の維持機構について検討した。水理条件を表-1に示す。流量 Q については各断面で流速分布を積分したものを平均することにより求め、流量 Q 以外の条件は淵上流端から 30cm 上流の断面平均値である。流速計測には I 型および L 型の 2 成分電磁流速計を用い、同一点で 2 回計測することにより、主流速成分(u)、横断流速成分(v)、および鉛直流速成分(w)を計測した。淵上流端を x=0cm とし、座標系は水路中央線に沿う方向を x 軸、これに直角な水平方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とした。

表-1 水理条件

Case	流量 Q(lit/s)	水深 Hr(cm)	平均流速 Um(cm/s)	レイノルズ数 Re	フルード数 Fr
TL	1.59	1.5	18.2	2727	0.474
TM	3.57	2.4	25.2	6048	0.520
TH	7.17	3.8	31.8	12084	0.521

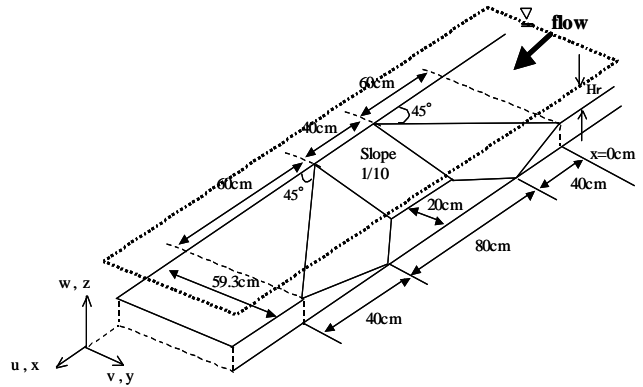


図-1 淵の概形と座標系

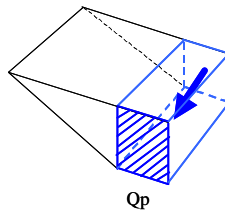


図-2 流入流量イメージ図

表-2 淵平面部内への流入流量の比

Case	Qp(lit/s)	Qp/Q	Vp/V
TL	0.978	0.615	1.219
TM	2.033	0.570	1.133
TH	3.608	0.504	0.999

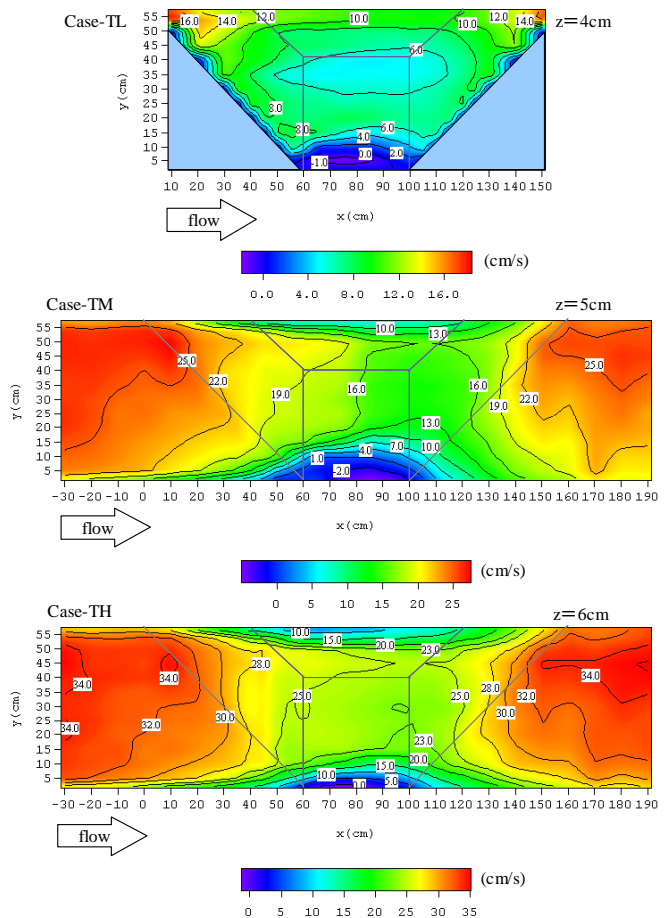


図-3 主流速平面コンター

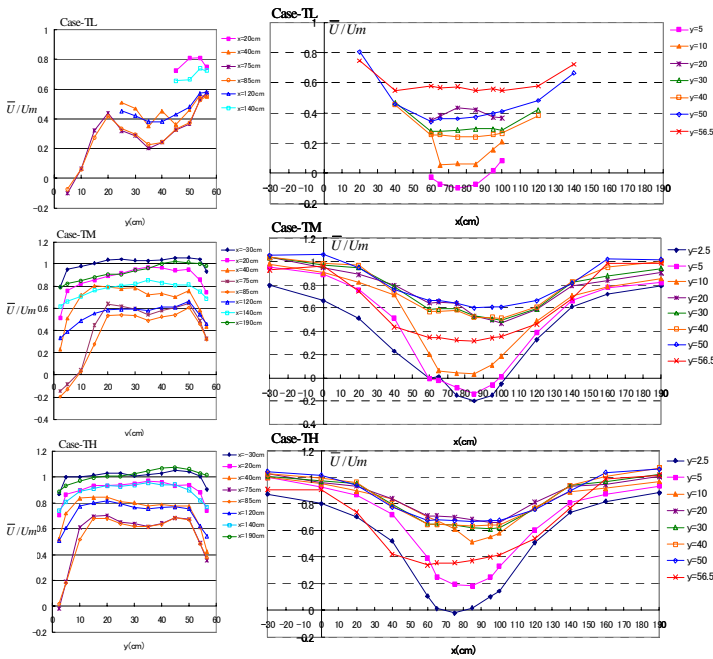


図-4 水深平均流速  $\bar{u}/Um$   
(左：横断面分布，右：縦断面分布)

### 3. 実験結果と考察

図-2に示すように、淵内  $y=40\text{cm}\sim 59.3\text{cm}$  の淵平面部に流入する流量を  $Q_p$  とし、淵平面部への流入流量の比較を行なった。その結果を表-2に示す。淵平面部への流入流量割合  $Q_p/Q$  を比較すると、淵平面部への流入流量割合は Case-TL が最も大きく、流量の大きいケースになるほどその割合は小さくなっている。このことから、流量が少ない平水時の場合は淵内部へ偏って流れが集まるが、流量が多くなるほど断面を広がって流れる特徴があるといえる。図-3は Case-TL, TM, TH のそれぞれ  $z=4\text{cm}, 5\text{cm}, 6\text{cm}$  における主流速平面コンターである。すべてのケースにおいて主流速は淵に入ることによって減速され、淵から出るとまた加速される一般的特徴を示す。また淵の上流側と下流側に  $45^\circ$  の角度を設けたことにより流れが淵内平面部へと偏向している様子がわかる。Case-TL では左岸側壁近傍まで高速流が入り込んでいるが Case-TM, TH については淵内の両岸壁付近が減速されており、全ケースで右岸壁付近は水裏部となり緩流域がみられる。次に図-4は各ケースの淵上流  $x=-30\text{cm}$  における断面平均流速  $Um$  によって無次元化された水深平均流速分布であり、それぞれの横断面分布と縦断面分布を示した。横断面分布では全ケースの淵内部  $x=75, 85\text{cm}$  で2つの流心が発達している。Case-TL は左岸側壁付近で淵内でも値が上昇し、この2流心構造が顕著である。他のケースでは淵内左岸の減速効果は大きい。右岸傾斜面の減速効果は全ケース同様にみられるが Case-TH では Case-TM よりも流量が増大した分、淵の右岸側に高速域が広がる。縦断面分布では Case-TL の  $y=56.5\text{cm}$  以外の淵内両岸で大きな減速がみられ、

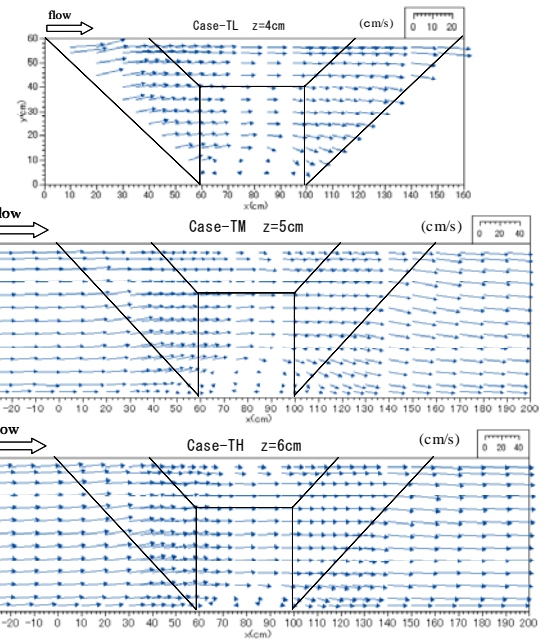


図-5 流速ベクトル  $(u, v)$

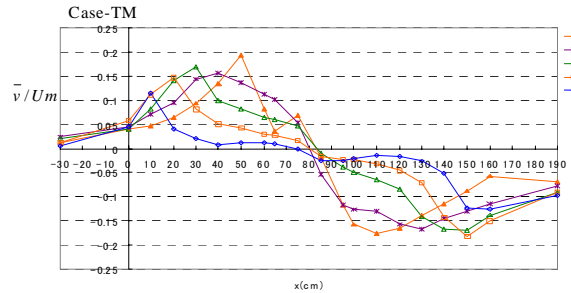


図-6 水深平均横断方向流速  $\bar{v}/Um$

Case-TM, TH では  $y=20\sim 40\text{cm}$  でよく似た分布傾向を示し、淵内後方  $x=100\text{cm}$  に向かい徐々に減速する傾向がみられる。水深平均流速分布より淵では流量が増加しても6割程度の減速効果を確認でき、特に両岸においては魚類等の出水時の避難場としての機能を果たすことが可能であると考えられる。図-5に Case-TL, TM, TH のそれぞれ  $z=4\text{cm}, 5\text{cm}, 6\text{cm}$  における流速ベクトル  $(u, v)$  を示す。上流側の斜面部では淵内平面部寄りに傾いた流れが生じ、また下流側の斜面部ではそれに対をなすように、流下方向から右に傾いた流れとなっている。特に Case-TL, TM の  $x=60\text{cm}\sim 90\text{cm}$  の右岸側では、右岸壁近くに逆流が生じ、小規模の渦が形成されていることがわかる。図-6に代表的に Case-TM の水深平均横断方向流速  $\bar{v}/Um$  の縦断面分布を示す。  $\bar{v}/Um$  の正の値は左岸向きを示し、負の値は右岸向きを示す。淵中央の  $x=80\text{cm}$  付近で左岸向きの流れから右岸向きへと変わることがわかる。上流側ではそれぞれの断面で淵の入口まで左岸向きの流れが発達し、淵に入ると徐々に減衰する。淵中央を境に右岸向きの流れが発達し、淵の出口より下流では減衰していく。図-7に各ケース  $x=85\text{cm}$  における2次流ベクトル

ル( $v/U_m, w/U_m$ )を示す. Case-TL では左岸壁付近まで時計回りの 2 次流が入り込み, Case-TM, TH については左岸壁付近にもうひとつ反時計回りの 2 次流が形成される. これらの 2 次流の影響により Case-TL では左岸付近の減速が生じ, Case-TM, TH については左岸壁付近の減速が生じるものと考えられる. 図-8 に代表的に Case-TM の主流速鉛直分布  $u/U_m$  を示す. 淵平面部上を通る  $y=40, 50, 56.5\text{cm}$  におけるそれぞれ  $x=45\text{cm}$  から  $115\text{cm}$  まで  $5\text{cm}$  毎の主流速鉛直分布の縦断変化である. 主流速は  $x=30\text{cm}$  の断面平均流速で無次元化されている. 淵前方の  $x=45\sim 75\text{cm}$  までと淵後方  $x=85\sim 115\text{cm}$  とで淵中央付近を変化点として前方では右上がりの傾きが大きく, 流下に従い水面付近の流速が減速し, 逆に底面付近が加速される. これは他ケースにおいても同様にみられ, 段落ち流れのような逆流は生じないものの, 剥離を伴う流れ特性が現れているといえる. 左岸壁近傍の  $y=56.5\text{cm}$  では大きく減速され, また淵前方で水面付近が特に大きく減速されている.

#### 4. 淵の流れの 3 次元数値計算

##### 4. 1 基礎方程式

本研究では複雑な河床変化により生じる 3 次元性の強い流れ構造を予測するため, 3 次元数値計算を試みた. 基礎式として以下のレイノルズ方程式を用いる.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここに,  $U$  は平均流速,  $P$  は圧力,  $\rho$  は水の密度である. また, 乱流エネルギー, 乱流散逸に関しては以下のモデル化された式を用いた.

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \varepsilon \quad (3)$$

$$U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} [C_1 \{P_k - \varepsilon\} - C_2 \varepsilon] \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

各定数はそれぞれ  $C_\mu=0.09$ ,  $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $C_k=1.0$ ,  $C_\varepsilon=1.3$  と与えた. 壁面の境界条件としては, 対数則が成立するものとし乱流エネルギー  $k$  を用いて与える. 入口での境界条件は, 流量  $Q$  を与え,  $U$  を流量が一致するように対数則分布で与え  $V=0$ ,  $W=0$  とした. これを有限体積法で離散化し, 圧力解法には SIMPLE 法を用い, 移流拡散の解析にはハイブリッド

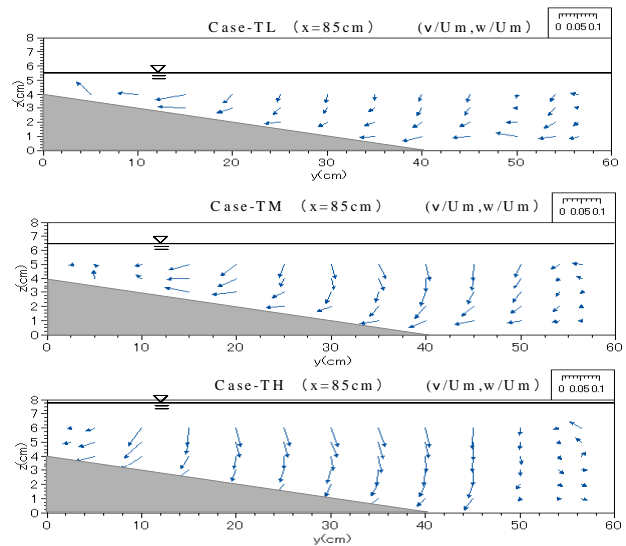


図-7 2 次流ベクトル( $x=85\text{cm}$ )

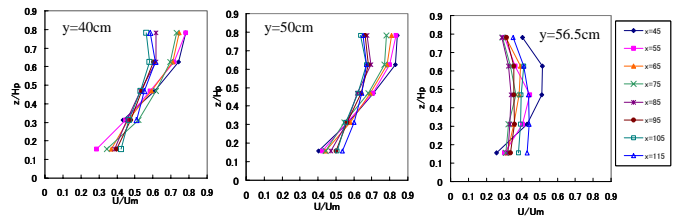


図-8 主流速鉛直分布  $u/U_m$  (Case-TM)

法を用いた. 計算メッシュは  $x$  方向 123,  $y$  方向 31,  $z$  方向は Case-TL, TM, TH それぞれ 36, 40, 49 とした. 河床形状については流れのない遮蔽ブロックを積み上げることで淵を形成した.

##### 4. 2 数値計算結果

図-9 に各ケース淵中央  $x=75\text{cm}$  の水深平均流速  $\bar{u}$  (実験値(exp.), 計算値(cal.)) を示す. Case-TL では実験値と計算値に大きな差があり, 横断中央の減速と左岸部の高速域が再現されていない. また Case-TH では全断面を通して計算値の値が大きく, 特に Case-TM と同様に右岸側の斜面部での流速差が大きい, 実験では実際の流量がもう少し小さかった可能性がある. 実験値と計算値において差が見られた理由としては実験で見られたような 2 次流の形成が計算では過小評価されており, この 2 次流の再現に課題が残ったといえるが, 分布形状としては良好に再現されており, 淵の流れ計算として再現性が高いといえる. 図-10 に各ケース淵平面部を通る  $y=50\text{cm}$  の断面における主流速鉛直分布 (実験値(exp.), 計算値(cal.)) を示す. Case-TL では水深平均流速  $\bar{u}$  の分布で中央付近において実験値と計算値で大きなずれが生じていたため, この位置における鉛直分布のみの結果では判断はできないが淵内の縦断面において鉛直分布は全ケース良好に再現されている. Case-TM, TH については水路壁付近の水面近くの減速効果は計算で再現されず, 壁面近くの流れの再現性に関しては課題が残った. 図-11 に各ケ

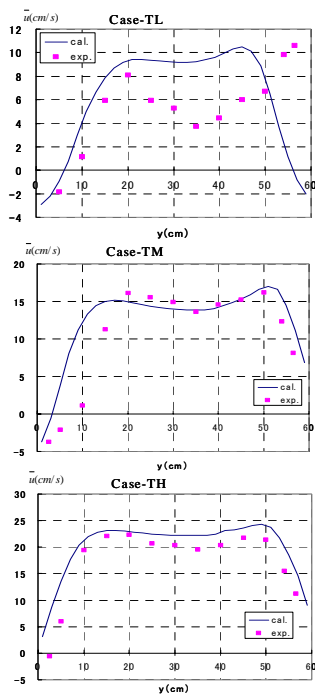


図-9 水深平均流速  $u(\text{cm/s})$

一ス淵平面部中央を通る  $y=50\text{cm}$  の底面流速(河床上  $1\text{cm}$  上)の縦断分布を示す。Case-TM, TH とともに淵頭で計算値の減速が大きく、実験値と  $5\text{cm/s}$  ほどの差が生じているが、全ケースで淵平面部・淵尻斜面部では良好に一致しており、淵平面部から淵尻にかけての流速の増加傾向が一致してみられる。図-12に各ケース  $y=50\text{cm}$  における乱流エネルギー  $k$  の縦断コンターの数値計算結果を示す。全ケースで淵頭斜面から淵前方で乱流エネルギーは大きく、流下に従い徐々に弱まるが、淵尻でまた増加する傾向がみられる。さらに流量の増加に従い、乱れエネルギーも増大し、Case-TH では淵後方まで乱れの大きな領域が広がる。出水時において移動し始める土砂は淵前方の乱れの増大により巻き上げられ、淵後方の底面流速の増加が土砂の運搬作用となり土砂が下流へと運ばれていくと考えられ、淵が土砂堆積により埋没せず維持されるメカニズムのひとつに乱流エネルギーの増大と底面流速の増加があると考えられる。

### 5. おわりに

本研究では淵の流れ特性に着目し実験と数値計算により淵の流れ特性と淵の維持機構について検討した。淵の出入り口の角度をつけた斜面の設置により、淵平面部上に流心を導くことができた。淵の特に両岸で減速域が確保され、出水時の魚類等の避難場としての機能が示された。数値計算では淵内部の流れが良好に再現された。より厳密な再現には高次の乱流モデルや非定常モデルを用いることが必要であると考えられる。出水時における乱流エネルギーの増大と底面流速の増加により土砂が下流に輸送されることが淵の維持機構のひとつとなることが示唆された。

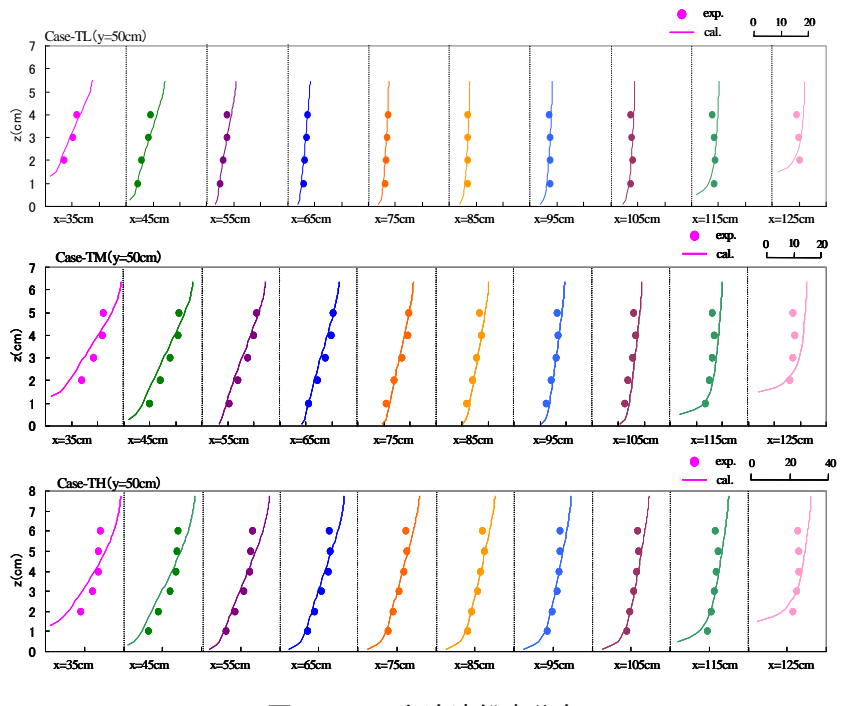


図-10 主流速鉛直分布

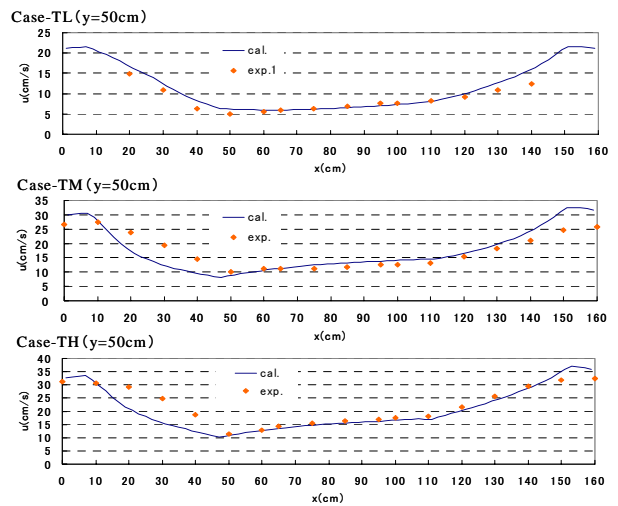


図-11 底面流速 ( $y=50\text{cm}$ , 河床  $1\text{cm}$  上)

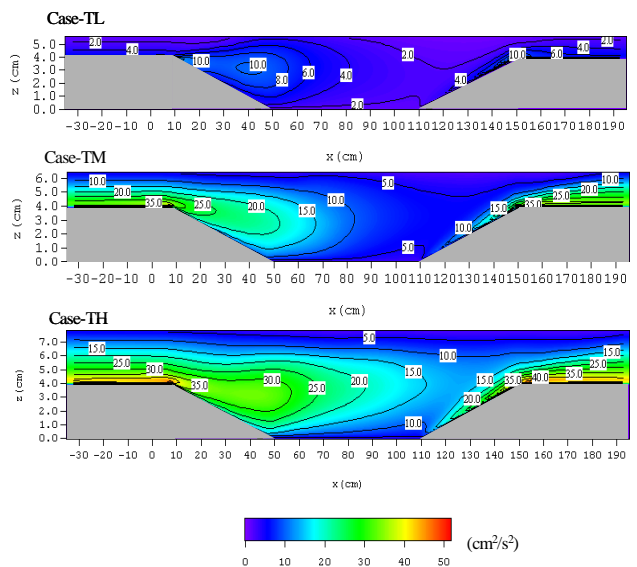


図-12 乱流エネルギー  $k$  縦断コンター ( $y=50\text{cm}$ )

