

片側に淵を有する直線河道の 3 次元流れ構造

Three-dimensional flow structures in a straight river channel with a pool on one side

富永 晃宏¹・橋本 直彦²・松本 大三³・島田 譲治⁴

Akihiro TOMINAGA, Naohiko HASHIMOTO, Joji DHIMADA and Daizo MATSUMOTO

¹正会員 工博 名古屋工業大学大学院教授 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 建設技術研究所 (〒330-0071 さいたま市浦和区上木崎 1-14-6)

³学生会員 名古屋工業大学大学院博士後期課程 都市循環システム工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

⁴学生会員 名古屋工業大学大学院博士前期課程 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Pool-riffle sequences are important for improvement of habitats and restoration of channelized urban streams. However, their hydrodynamic behavior has not yet fully understood to date. In this study, we pay attention to the flow characteristic of pool in pool-riffle sequence. The pool was made at fixed bed condition imitating actual river channel of mountain section in a straight channel. 3-D flow structures in this open channel with a pool were analyzed by measuring three-dimensional velocities with electromagnetic velocimeters. A cylindrical separation vortex was generated in the case of rectangular pool. Flow is deflected toward the side pool in the case of trapezoidal pool. 3-D flow structures are changed with an increase of discharge and flow depth.

Key Words : open-channel flow, pool-riffle, 3-D flow structure, 3-D numerical calculation

1. 序論

自然河川に存在する瀬と淵は、河川生態系の生息環境において重要な構造である。しかし、近年ダムや堰等の人工構造物や巨石の採取等、様々な人為的インパクトにより河床形態が変化し、特に河川上流部に多く存在していた淵が失われてしまっている。こうした淵の環境の悪化は、魚類をはじめとする多種多様な生物の生息を脅かしており、その対策が求められている。また、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、多くの都市河川においても瀬・淵構造の創出に関しての検討が行われている。特に魚類にとって淵の重要性が指摘されており、流量の変化に応じた淵の流れ構造の変化や、淵が埋没することなく維持される機構との関係についての的確に把握することが必要である。

これまで瀬・淵構造に関しては、急流河川を対象に中規模河床形態との関連性から瀬と淵の地形区分の定量化に関する研究^{1) 2)}、また現地観測や水路実験によって瀬や淵の底面流速や底面せん断応力の平水時・出水時変化から土砂輸送メカニズムについて検討した研究等^{3) 4)}があり、様々な方向から研究が進められてきた。魚類の生息環境改善のためには、淵の保全・再生を試

みる場合、河道の改変は流況を変化させ、土砂堆積や生息環境に影響を与えることが予想される。淵を有する河道の流れに類似した流れの詳細な研究として、宮本らは底面に凹部を設けた開水路の流れ構造に関する研究を行っている⁵⁾。この研究では凹部の境界では非定常性が強い周期的な流れ構造を示すことや凹部深さの増大に伴い流況が変化すること、半幅凹部流れでは側方から凹部への流出入が確認されている。また、凹部流れの組織構造について詳細な検討を行っている⁶⁾。ただしこれらの研究は直方体の凹みを対象としており自然河川の淵形状とはかなり異なっている。

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、まず射流の発生しない穏やかな条件において片側に深みを有する開水路の流れ構造を検討した。研究対象として瀬と淵が連続する河川上流部の河道も視野に入れているが、現段階では中流域の直線河道における淵の造成を対象として、あえて直線水路での実験を行った、モデル的な形状の淵を実験水路に設置し、このような淵の流れ構造の流量変化に対する応答と維持機構を検討することとした。また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

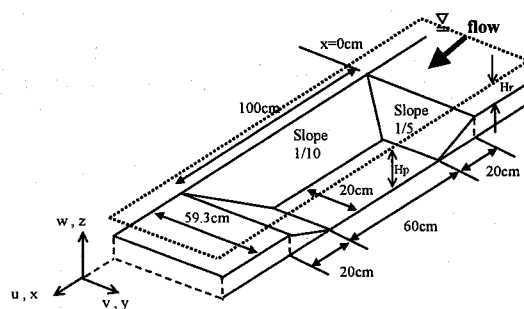
実験水路は、全長13m、幅 $B=59.3\text{cm}$ 、高さ30cm の勾配可変型開水路を用いた。実験水路に造成した2種類の実験淵の概形と座標系を図-1に示す。この形状は現地河川の淵をモデルとしているが、基礎実験として単純化したものである。淵は砂河床を掘り下げて水路左岸側を淵底面の平面部とし右岸側に斜面を設けるように造形しセメントで固めることによって作成した。長方形の実験淵は(ケース R)、左岸の淵最深部が幅20cm、長さ60cm の長方形で深さを4cm とし、淵上流部と下流部にそれぞれ勾配1/5の斜面を設けるとともに、右岸斜面部は幅39.3cm で斜面勾配を1/10とし、最深部の長さ60cm、最頂部の長さ100cm となる。台形の実験淵(ケース T)は左岸の淵最深部が幅20cm、左岸長さ80cm、中央側長さ40cm の台形で、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勾配1/7.1の斜面を設け、淵最深部の深さは4cm とした。また右岸側に全長40cm、斜面勾配1/10の斜面を設けた。水路勾配はケース R で1/800、ケース T で1/900とした。ケース R では流量は $0.0027\text{m}^3/\text{s}$ とし、水深は淵下流端から1m 下流で水深 $H_r=2.4\text{cm}$ となるように堰上げを調整した。ケース T では流量を平水時・中小出水時・大規模出水時を想定して 0.0016 、 0.0036 、 $0.0072\text{m}^3/\text{s}$ と3通りに変化させ、それぞれのケース名を TL, TM, TH とした。これらの実験条件を表-1に示す。平均流速 U_m は $x=-30\text{cm}$ の断面平均流速である。

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 $x=0\text{cm}$ 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。

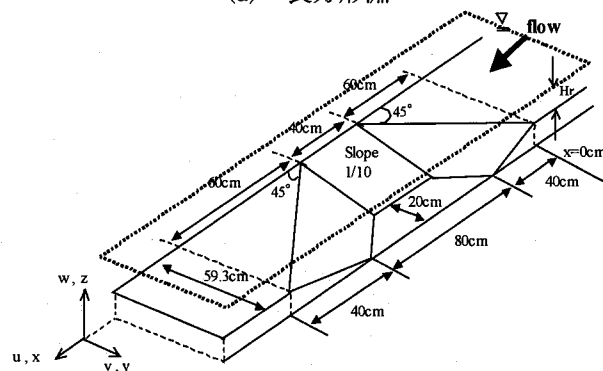
3. 実験結果および考察

3. 1 長方形淵の3次元流れ構造

図-2はケース R の $z=5, 3, 1\text{cm}$ の水平断面における平面流速ベクトルを示す。左岸において顕著な離渦がみられる。これは離渦は淵内の平面部中央を中心として、淵平面部である $y>40\text{cm}$ において発生しており、水路底から水面にまでほぼ同じ大きさと強さを示す円筒状の渦構造を示している。淵頭の斜面部 $x=10\text{cm}$ から流れが偏向され、 $y=40\text{cm}$ 付近に集中し速い流れをつくっている。そして、淵尻の斜面部 $x=80\sim 100\text{cm}$ においては大きく流れが左岸側に曲げられ渦を形成している。この流れ形状では特には離を促す構



(a) 長方形淵



(b) 台形淵

図-1 実験淵の概形と座標系

表-1 水理条件

CASE	Discharge Q (lit/s)	Flow depth $H_f(\text{cm})$	Pool depth $H_p(\text{cm})$	Mean velocity $U_m(\text{cm/s})$	Froude Number $Fr = U_m / \sqrt{gH_f}$
R	2.92	2.4	6.4	21.9	0.452
TL	1.59	1.5	5.5	18.2	0.475
TM	3.57	2.4	6.4	25.2	0.520
TH	7.17	3.8	7.8	31.8	0.521

造は存在しないが、このような離渦が形成されたことは興味深い。これは流下方向に非対称に水深が増大することによって引き起こされた圧力勾配が要因と考えられる。流れが左岸の淵へ入ることで減速され、圧力が増大したことにより外向きの流れを誘発し、これが右岸斜面の存在により集中した流れを形成する。その補償流として側岸に沿う逆流を発生させたものと推測される。しかし、詳細なメカニズムは未だ不明である。 $z=5\text{cm}$ では右岸側にも $x=-10\text{cm}$ から $x=110\text{cm}$ の $y<10\text{cm}$ において凸型に湾曲した流れがみられる。

図-3は無次元された主流速の横断面コンターである。また、計測された2次流ベクトルを重ねて示している。 $x=35, 65, 85\text{cm}$ の淵平面部において流速の低下が顕著であり、 $U/U_m=0.5$ 以下の流速が鉛直方向に2次的に分布している。この部分は円筒形のはく離渦の外縁を示すもので、2次的な横断方向せん断層が形成されているといえる。また全断面において流心が2つみられ、底面近くまで高速域の張り出しがみられる。流心のみられる場所は両岸で生じた湾曲流れや渦により

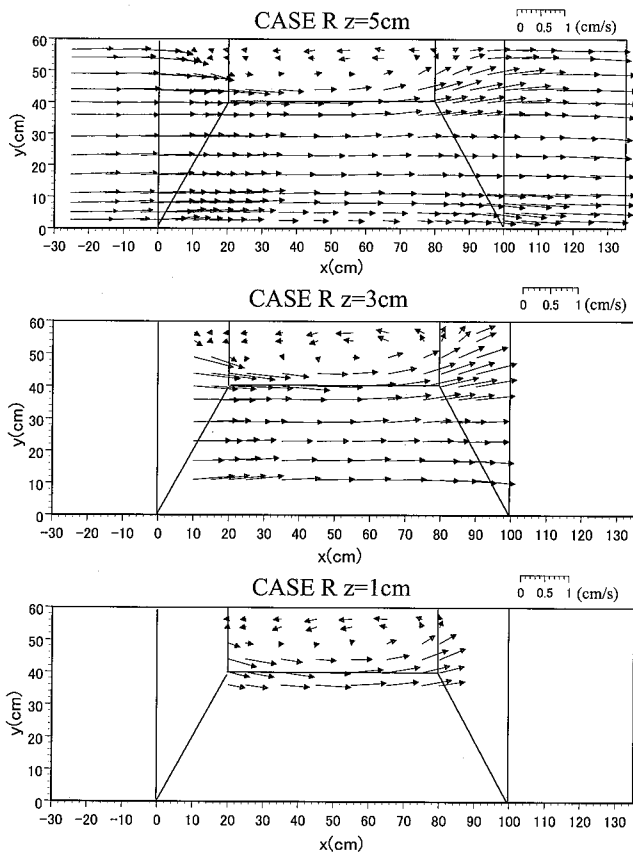


図-2 平面流速ベクトル (ケース R)

流れが集中する場所であり、ここに加速領域が形成されるとともに、その2つの流心間では相対的に流速が低下したものと考えられる。2次流についてみると、 $x=10\text{cm}$ においては全体に下降流が現れ、左岸から中央へ向かう下降流が顕著である。 $x=35\text{cm}$ 、 55cm では2つの流心位置で下降流が認められる。これらの流心領域では2次流の下降流による運動量輸送の結果、底面近傍の流速勾配が大きくなり、底面せん断応力の増大が推測される。 $x=75\text{cm}$ 以降では中央から左岸に向かう流れが顕著となり、 $x=90\text{cm}$ では底面付近で上昇流が認められる。

3. 2 台形淵の3次元流れ構造

直線水路に設置された長方形の淵では淵部分を流心が通らず、はく離渦の発生により逆流が引き起こされる結果となり、この流れ構造では土砂堆積によって淵が維持できない可能性が高い。したがって、流下方向に対して斜めの落ち込みにより流心を淵側へ誘導するように台形の淵を設置し、このケースについては、平水時、中出水時、大出水時を想定した流量の異なる3ケースについて実験を行った。

図-4に各ケースの水位の縦断変化を示す。水位は淵部で上に凸となる分布を示し、流量の増大とともに水位の上昇量が增大することがわかる。頂部での水位上

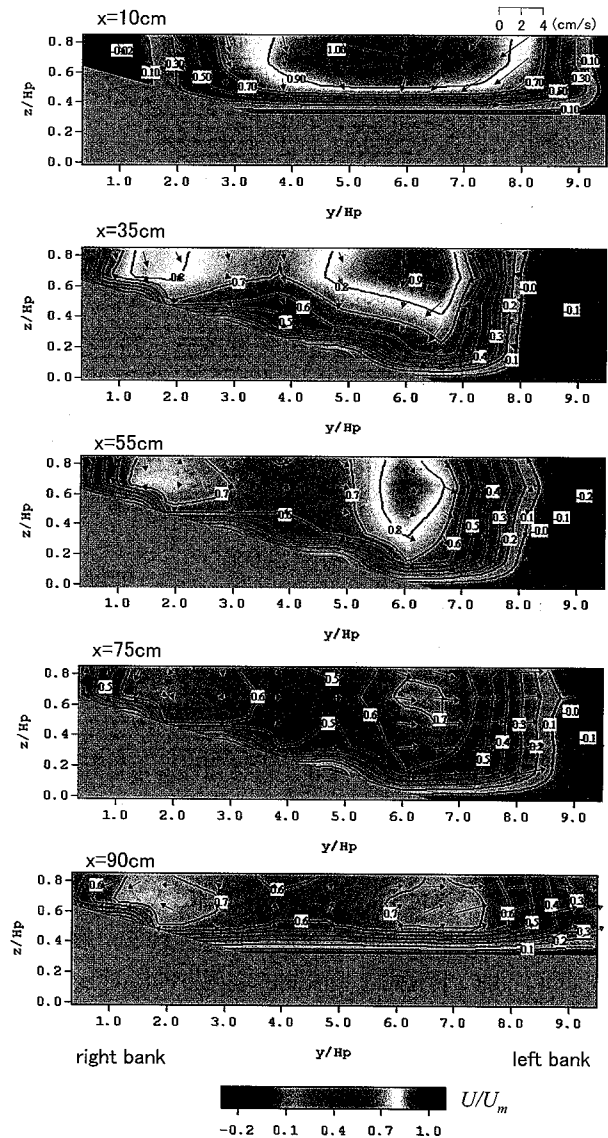


図-3 横断面主流速コンター (ケース R)

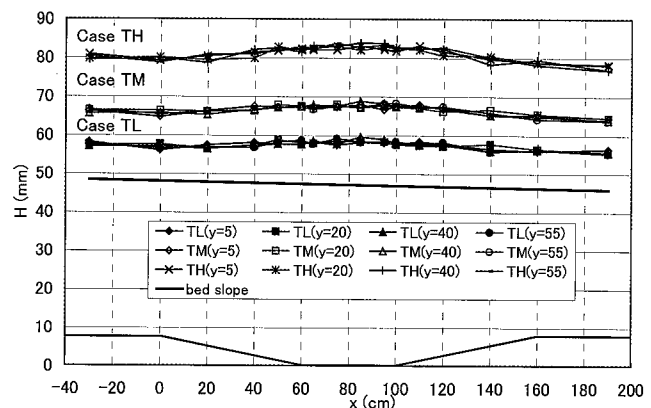


図-4 水位縦断変化

昇量はケース TH では約 4mm 、TL では約 2mm である。非対称な河床形態であるが、横断方向にはほとんど変化が見られない。

図-5はケース TL、TM、THのそれぞれ水面付近の $z=4\text{cm}$ 、 5cm 、 6cm における平面流速ベクトルである。

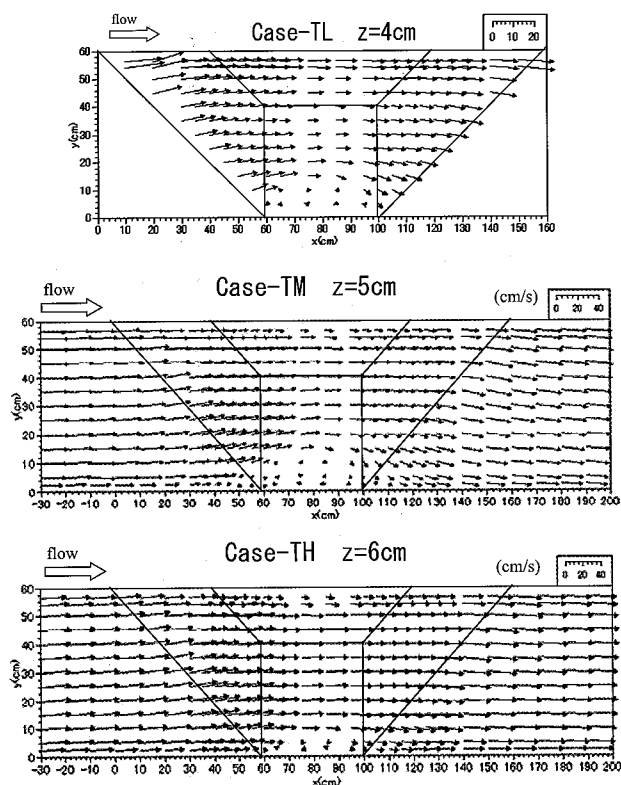


図-5 平面流速ベクトル (ケース T)

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。淵の上流側と下流側に主流方向に対して 45° の角度を有する斜面を設けたことにより、流れは淵上流端で淵最深部へと偏向し、下流端で右岸側へ向かう流れとなっている。最も水深が小さいケース TL では左岸側壁近傍まで高速流が入り込んでいるが、ケース TM, TH では左岸近傍が減速されている。このような流向の変化により横断斜面上部の右岸側では全ケースで減速が顕著となり、平面渦の形成が見られ逆流も発生する。この右岸の平面渦は水深の増大とともに縮小している。

図-6 にケース TM と TH の水深平均した横断方向流速 $\bar{V}$ を平均流速 U_m で無次元化した値の縦断変化を示す。 $\bar{V}/U_m$ の正の値は左岸向きを示し、負の値は右岸向きを示す。淵の上流部で左岸向きに方向を変え、ちょうど斜め段落ち開始点付近で最大値を取る。最大偏角は $\bar{V}/U_m = 0.15$ 程度である。淵下流では淵中央点を中心にほぼ対称な変化を示し右岸向きになっている。ケース TH では TM に比べて下流の偏角が小さく、全体的に横断方向の偏流の程度は小さくなっている。

次に図-7, 8, 9 は各ケースの主流速横断面コンターを示す。図中には2次流ベクトルを重ねて示している。ケース TL では $x=30\text{cm}$ の淵頭斜面において左岸近くに流心がみられるが、 $x=45\sim 115\text{cm}$ までの主に淵内平

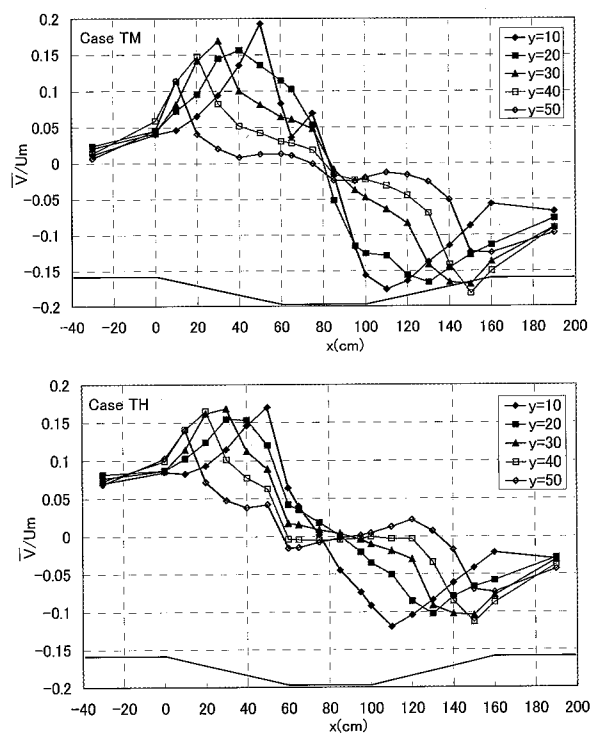


図-6 横断方向平均流速縦断分布

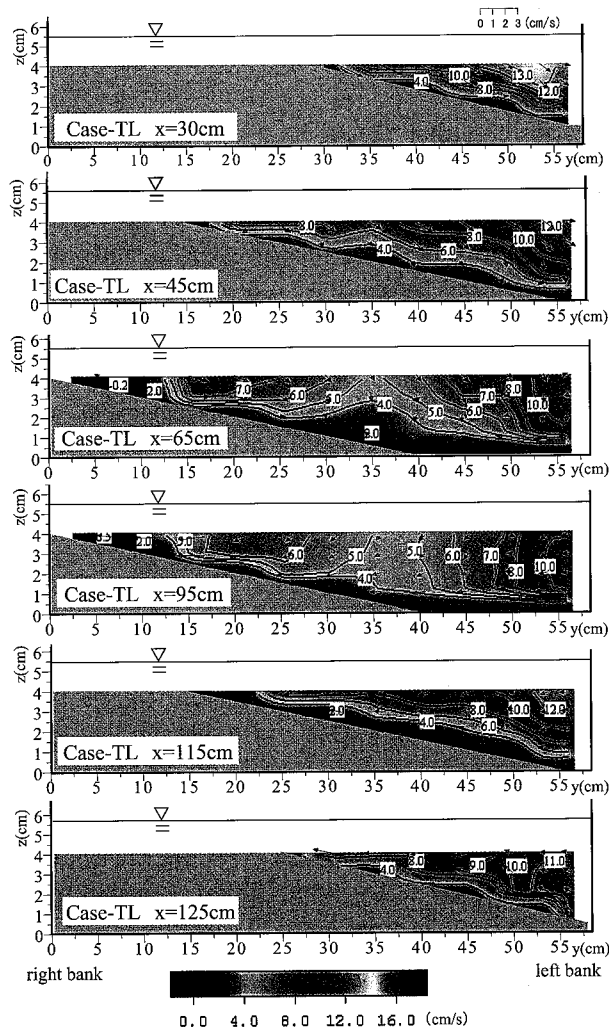


図-7 横断面主流速コンター (ケース TL)

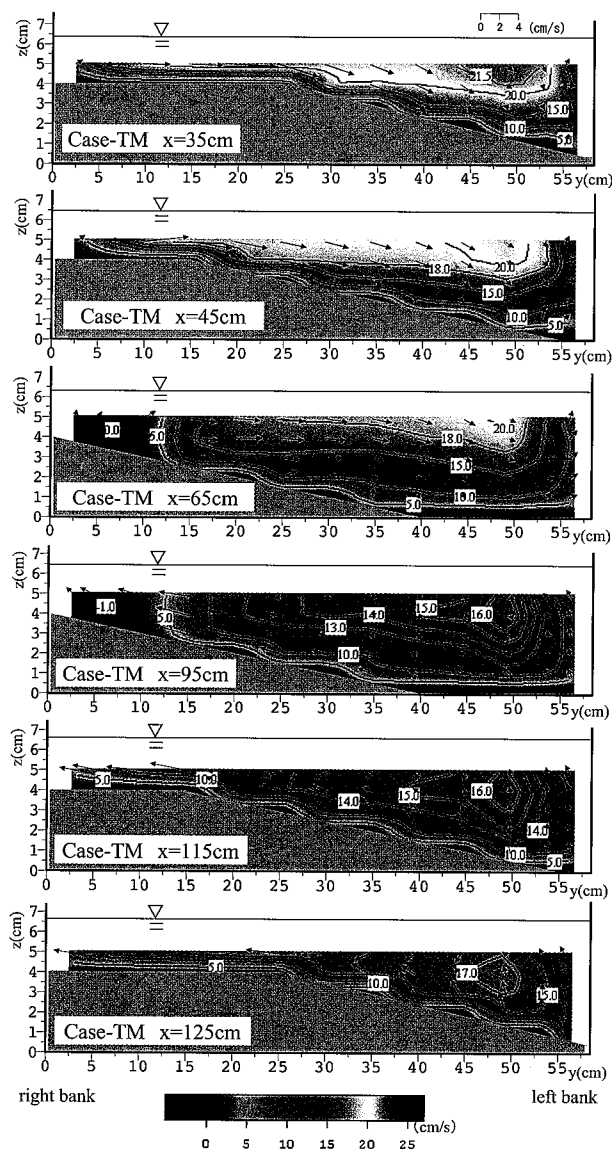


図-8 横断面主流速コンター (ケース TM)

面を有する区間では淵内右岸の斜面上と淵内平面部左岸壁近傍に2つ流心が分かれて存在している。淵内の前方から後方にかけて徐々に流心が2つに明確に分かれていき、相対的に淵内右岸側斜面下方の $y=30\sim 45\text{cm}$ 付近に流速の低下が生じている。また、 $x=95\text{cm}$ では特に左岸側の淵平面部において、鉛直方向にほとんど一定の流速コンターとなっていることがわかる。 $x=115\text{cm}$ では $x=45\text{cm}$ とほぼ同様の分布である。2次流は $x=45\text{cm}$ より上流で全体に左岸へ向かう下降流が見られる。 $x=115\text{cm}$ より下流では若干上昇しながら右岸へ向かう流れが見られる。

次に、ケース TM では $x=35\sim 125\text{cm}$ の全範囲で左岸側 $y=50\text{cm}$ 上に流心が存在している。ケース TL と異なり左岸ごく近傍は減速されている。淵内を流下するにしたい、底面近傍から淵平面部下流端付近まで減速が進み、同時にピークが水面下に現れるようになる。底面近傍の流速勾配は最大流速が現れる $y=50\text{cm}$ 付近

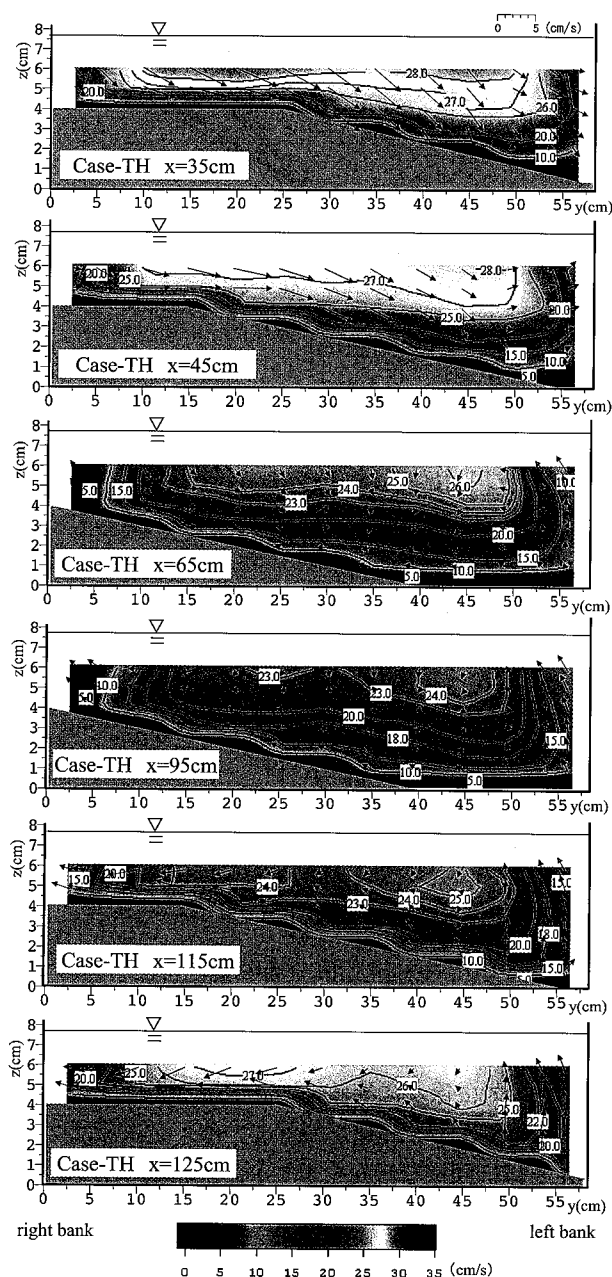


図-9 横断面主流速コンター (ケース TH)

で大きく、水路中央付近が小さくなり、斜面上の $y=15\sim 20\text{cm}$ 付近で再び大きくなる。また、淵最深部領域の右岸近傍は大きく減速されている。2次流は淵中心位置より上流では側岸斜面を下降する流れ、下流では斜面を上昇する流れが認められる。淵下流の右岸水平面においても右岸向きの横断方向流れが観測される。

ケース TH では淵上流で主流速の偏りは少なく右岸付近まで高速域が存在する。流下にしたいが徐々に高速域は淵平面部寄りに移動していき、 $x=45\sim 115\text{cm}$ では $y=45\text{cm}$ 上に流心が現れ、ケース TM よりも左岸近傍の減速がさらに進んでいる。流心から左岸側の壁下方に向かって等値線の強い張り出しがみられる。また、淵内右岸側の斜面上にも等値線の張り出しは大きく、

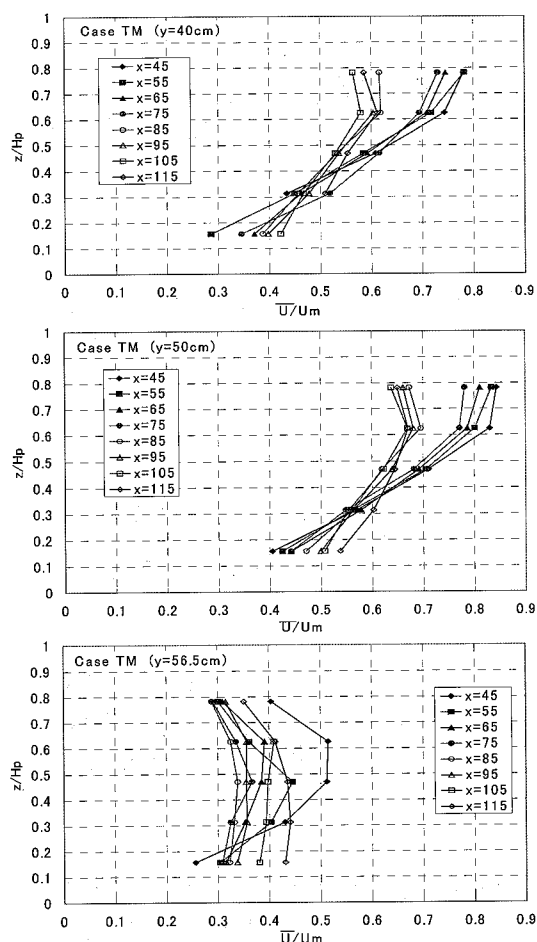


図-10 主流速鉛直分布の変化特性

断面を広がって流れている様子がわかる。淵下流では、上流側と反対に徐々に等値線の高速域が全体に広がり、むしろ右岸側に最大流速が現れている。2次流はケース TM とほぼ同様な傾向を示すが、上流域の左岸向き下降流が強くなっている。

図-10 に代表的なケース TM についての淵平面部上を通る $y=40, 50, 56.5\text{cm}$ における無次元主流速鉛直分布 U/U_m の縦断変化を示す。淵前方の $x=45\sim75\text{cm}$ までと淵後方 $x=85\sim115\text{cm}$ とで淵中央付近を境として上流側では流速勾配が大きくなり、下流側では水面付近の流速が減速し、逆に底面付近が加速され、結果として流速勾配が減少している。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、剥離を伴う流れの特性が現れているといえる⁷⁾。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 velocity dip 現象が顕著に表れている。

図-11 は各ケースの平均流速 U_m によって無次元化された水深平均流速の横断分布である。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。ケース TL は左岸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

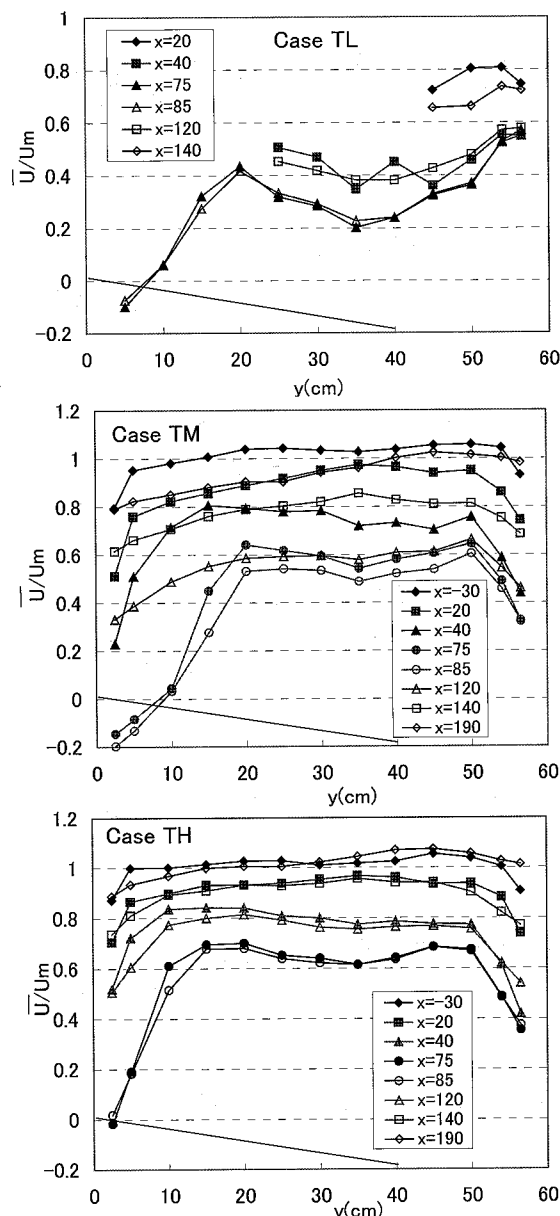


図-11 水深平均主流速の横断分布

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ケース TH では 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。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。

4. 淵流れの3次元数値計算

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。

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

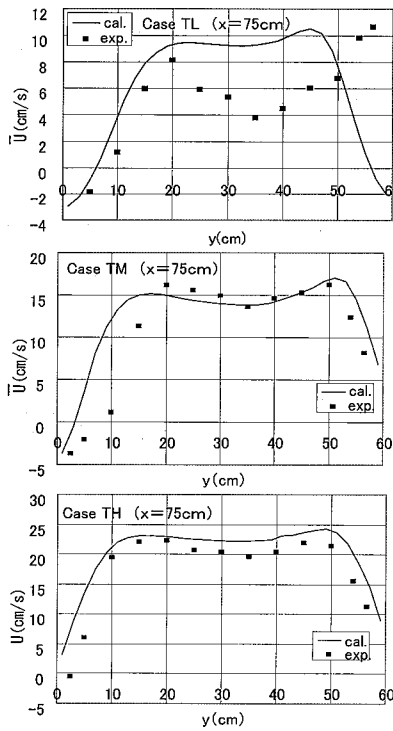


図-12 水深平均流速の横断分布の実験値と計算値の比較

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

$$\frac{u_i u_j}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

ここに、 U は平均流速、 p は圧力、 ρ は水の密度である。乱流モデルには標準型 k - ε モデルを用い、渦動粘性係数 ν_t 、乱れエネルギー k 、散逸率 ε に関しては以下のモデル化された式を用いた。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \varepsilon \quad (5)$$

$$U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} [C_1 \{P_k - \varepsilon\} - C_2 \varepsilon] \quad (6)$$

$$P_k = -u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

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法を用いた。計算メッシュは x 方向 123, y 方向 31, z 方向はケース 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

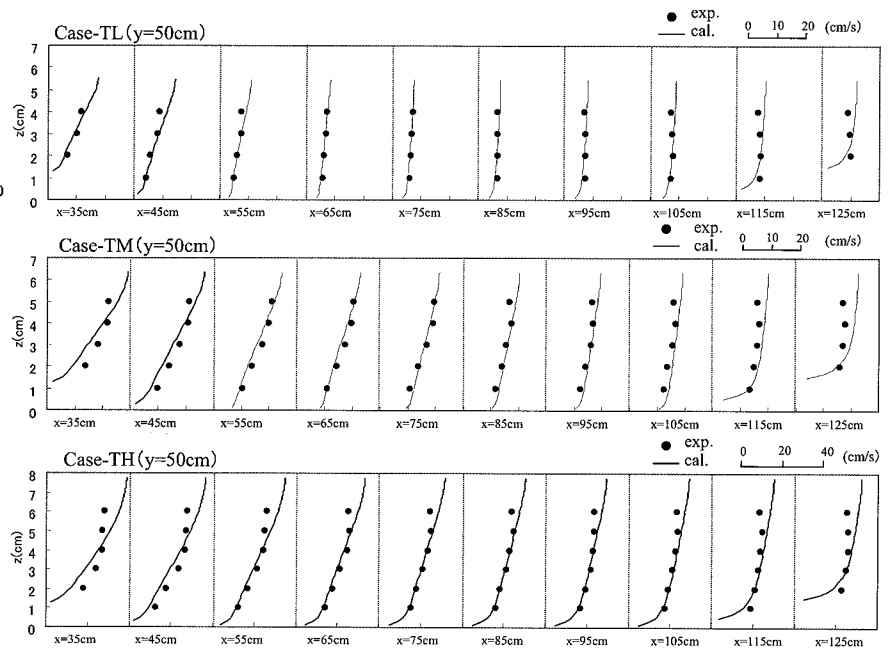


図-13 主流速鉛直分布の実験値と計算値の比較

で淵を形成した。水面は固定で淵部の水面形のふくらみは考慮されていない。

図-12 に淵中央 $x=75\text{cm}$ の水深平均流速 $\bar{U}$ の実験値と計算値の比較を示す。水深の最も小さいケース TL では分布形状において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。特に左岸近傍の高速域が計算では全く再現されず、むしろ他のケースよりも大きな減速が表れている。その他のケースでは2つのピークを持つ特徴的な分布形状が再現されている。ケース TM では右岸側の斜面部で計算値が大きくなっている。ケース TH では全体的に計算値が大きい分布形状は良く一致している。ケース TL で実験値と計算値において差が見られた理由としては2次流構造が他のケースと異なる点があげられる。また、ケース R の計算においては淵部のはく離循環渦が再現されなかった。今後は水面の変化も考慮したより高精度の計算モデルで検討する必要がある。

図-13 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の鉛直分布の比較を示す。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といえる。ただし、ケース TL では水深平均流速に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。ケース 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-14 に各ケース淵平面部中央を通る $y=50\text{cm}$ の底面流速（河床上 1cm）の縦断分布を示す。ケース TM, TH とともに淵頭で計算値の減速が大きく、実験値と

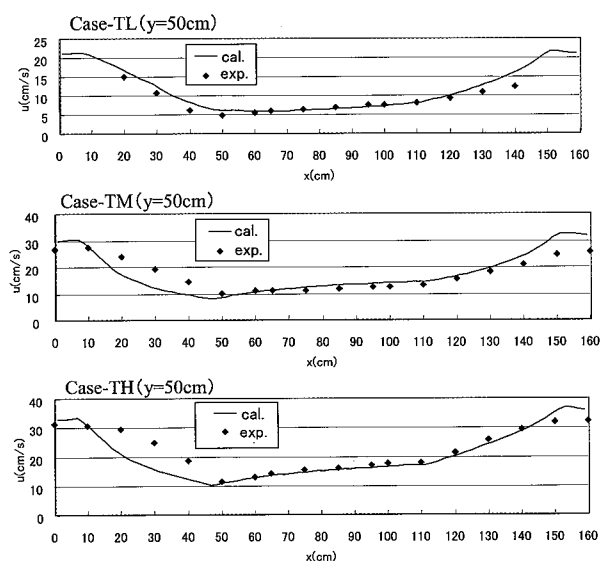


図-14 底面流速 ($y=50\text{cm}$, 河床 1cm 上)

5cm/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。また、流量の増大とともに淵の底面流速が増大していることがわかる。

図-15 に各ケース $y=50\text{cm}$ における計算された乱れエネルギー k の縦断コンターの数値計算結果を示す。実験では乱れエネルギーは過小評価されるので示していないが、相対的には同様の傾向を示した。全ケースで淵頭斜面から淵前方で乱れ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、ケース 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れ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. 結論

本研究では直線水路の片側に淵を有する開水路流の流れ構造を実験と数値計算により検討した。長方形の淵では、中小出水程度では淵部分にはく離渦が生じ、直線水路にこのような淵を造成しても土砂堆積によって維持できない可能性が高い。淵の出入り口の角度をつけた斜面の設置により、淵平面部に流心を導くことができた。水深が大きい場合には淵の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。数値計算では水深が大きい場合は淵内部の

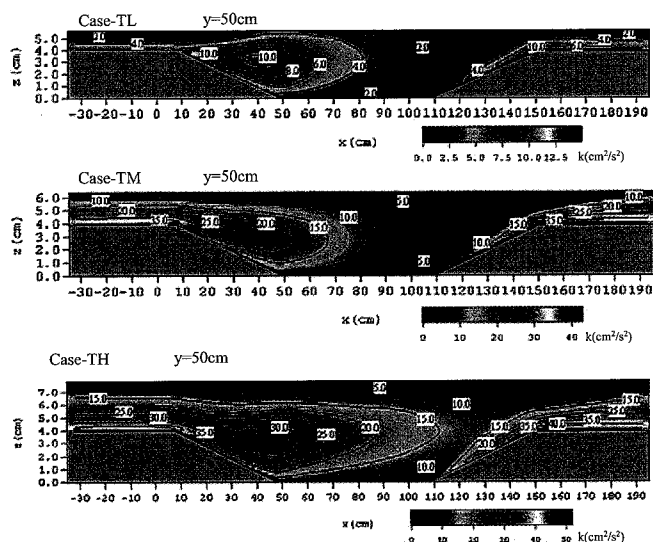


図-15 乱れエネルギー k の縦断コンター ($y=50\text{cm}$)

流れが良好に再現されたが水深が小さい場合は大きく相違した。より厳密な再現には高次の乱流モデルや水面変化を取り入れることが必要であると考えられる。また、出水時における乱れ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。

参考文献

- 1) 野上毅・渡邊康玄・中津川誠：急流河川における河床地形の定量的区分，水工学論文集，47 巻，pp239-244，2003。
- 2) 野上毅・渡邊康玄・長谷川和義：急流河川における生息場としての河床地形区分，水工学論文集，46 巻，pp1127-1137，2002。
- 3) D.J.Booker, D.A.Sear, and A.J.Payne: Modelling Three-Dimensional Flow Structures and Patterns of Boundary Shear Stress in a Natural Pool-Riffle Sequence, Earth Surf. Process Landforms 26, pp553-576, 2002
- 4) J.F.Rodriguez, M.H.Garcia, F.M. Lopez and C.M.Garcia: Three dimensional hydrodynamics of pool-riffle sequences for urban stream restoration, River Flow 2004, pp1297-1304, 2004
- 5) 宮本仁志・神田徹・藤田一郎・池上迅：PIVによる開水路凹部流れの計測および数値解析，水工学論文集，41 巻，pp.1049-1054，1997。
- 6) 宮本仁志・神田徹：開水路凹部における流れの組織運動の二次元ウェーブレット解析，水工学論文集，45 巻，pp.499-504，2001。
- 7) 藤田一郎，熊城秀輔：斜め段落ち部を有する開水路流れの構造，応用力学論文集 Vol.8, pp765-772，2005。

(2007.4.12 受付)