

水制のある開水路中の横断運動量拡散係数の測定

Measurements of Lateral Momentum Diffusion Coefficient
in Open Channel Flows with Groins

柿崎恒美* 長谷川 和義**

By Tsunemi KAKIZAKI and Kazuyoshi HASEGAWA

Coefficients of lateral momentum diffusion in open channel flows influenced by a series of groins were obtained from the detailed velocity profiles which were measured by LDV. The coefficients are not constant in lateral direction rather distribute with a peak in diffusion area of a groin. Magnitude of the coefficients are comparable or more less to compare with that of vertical momentum diffusion. It was found that the coefficients calculated from log-velocity distribution along the oblique line stretching from the shear layer of a groin correspond to the directly measured data.

Key word: Momentum diffusion coefficient, Lateral shear stress, Isovel and Ray

1. はじめに

水制などの構造物を開水路の1部分に配置した場合、構造物が配置された側の流速は配置されていない側の流速よりも小さくなる。この速度差のために両者の境界面では横断方向に運動量輸送が起こり、横せん断力が発生する。筆者らは(1991.)この境界面を2次元の浅水流方程式の特異点と考え、特異摂動法により流速分布の横断方向分布を理論的に解析してきた。しかし、解析の結果、横断方向の運動量拡散係数 ϵ_y の値は粗面における横断方向の拡散係数として知られている値 $\epsilon_y = \alpha h u_*$ ($\alpha = 0.12$) より小さな値を用いなければ解析解は実験結果を満足することができなかった。

水制などの構造物を配置した場合、横断方向の運動量拡散係数は重要なパラメーターであるが、現在までのところ、開水路中に置かれた構造物背後の横断方向拡散係数を計測した例はない。本論文は、河道の1部分に水制の模型ブロックを配置し横断面の流速分布を詳細に計測することによって横断方向の拡散係数を測定し、その性質について考察したものである。

* 学生員 北海道大学大学院 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 工博 北海道大学 助手 工学部土木工学科
(同 上)

2. 模型組ブロックによる実験

実験は、幅 $B = 40$ (cm)、長さ $L = 4.7$ (m) の鋼製アクリル壁可傾斜水路で行った。水路床には塩化ビニール板を隙間なく敷き詰め、その上に直径4mm程度の砕砂を粗度として一様に張り付け、固定床として実験をおこなった。この水路の上流端から下流端まで全長に渡って高さ2.5 (cm)、幅5 (cm) の透過水制の1/50のブロック模型を組み合わせ、水路の左岸側壁に沿って図-1に示すように16基の連続水制モデルとして設置し、左岸側壁から突き出した水制の先端までの区間に水制域をつくった。水制ブロックの設置に当たっては文献 (秋草・吉川 (1960.)) を参考にして、水制角度 $= 0^\circ$ 、水制高さ $k = 2.5$ (cm)、透過度 $= 0.64$ 、水制長 $B_2 = 11$ (cm)、水制間隔 $\ell = 25$ (cm) と決めた。この様に透過水制を設置し、ブロックの形状抵抗による速度欠損と、次のブロックまでの速度回復が平衡状態に達していると思われる上流側から10基目と11基目の透過水制ブロックの区間の流速を測定した。

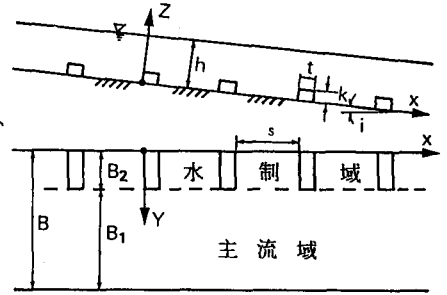


図-1 水制を配置した河道の概略と座標軸の定義図

各実験の実験条件は表-1に示されている通りである。このような実験条件に対して、流れを疑似等流状態に保ち、主流方向の流速の測定をおこなった。流速の測線は流れ方向 (縦断方向) と流れに直角な方向 (横断方向) との2方向選び、横断方向については1水制区間に数断面選び、1基の水制 (構造物) による流れの変化の様子を詳細に測定した。また、縦断方向は水制域 ($Y = 5$ (cm)) とそれ以外の領域 (主流域) ($Y = 25$ (cm))、及び両者の境界領域の3断面について流速を測定した。なお、測定にはパソコン制御・自動トラバース付きレーザー・ドップラー流速計を用いた。

表-1 実験の主要水理量

実験 No.	Q (ℓ/s)	h (cm)	I	u_m (cm/s)	u_x (cm/s)	Fr	$Re^{(1)}$	$Re^{(2)}$
Run (1)	11.67	7.00	1/333	41.67	4.54	0.50	29169	37503
Run (2)	5.63	4.52	1/247	31.14	4.23	0.47	7785	34254
Run (3)	3.07	5.06	1/790	15.17	2.50	0.22	3793	16687
Run (4)	8.19	4.70	1/153	43.56	5.49	0.64	10890	47916
Run (5)	8.19	4.54	1/153	45.10	5.39	0.68	11275	49610
Run (6)	2.40	4.56	1/1035	13.16	2.08	0.20	3290	14476

※ Q = 平均流量、 h = 平均水深、 u_m = 平均流速、 Fr = フルード数、また、 $Re^{(1)}$ 、 $Re^{(2)}$ はレイノルズ数でそれぞれ次のように定義する。

$$Re^{(1)} = \frac{u_m h}{\nu} \quad Re^{(2)} = \frac{u_m B_2}{\nu} \quad \text{ここで、} B_2 = \text{水制長、} \nu = \text{粘性係数}$$

3. 実験結果及び考察

図-2～図-4はRun1における水路の横断面の流速分布の鳥瞰図である。座標軸 U は流速値、 Z は水深方向、 y は横断方向を示していて、それぞれ摩擦速度 ($u_* = \sqrt{gh_i}$)、水深 (h)、水路幅 (B) で無次元化されている。ここで、水制の模型ブロックは $B = 0.0 \sim 0.3$ の領域に位置している。

また、測定断面は10基目の水制の上流側の端を座標原点 ($x = 0.0$) に選び、それぞれ $x = 7.4$ (cm)、 $x = 18.5$ (cm)、 $x = 23.9$ (cm) と流下方向に3断面示している。3つの図を比較すると次の事が言える。

(a) 3つの断面とも水制域と主流域での水深方向 (z 方向) の流速分布が、明瞭に異なっている。水制域では、ブロックの形状抵抗のために、その流速は主流域のそれに比して約50%減速している。また、ブロックの背後から流下方向に進むにつれて、流速が徐々に回復している様子がうかがえ、wake分布的な性質を呈している。一方、主流域側では流下方向に関する変化はあまり見受けられず、上流から下流に至るまで対数分布状を保っている。

(b) 流速の横断方向分布は減速域である水制域側から主流域に向かって増加しているが、特に両者の境界

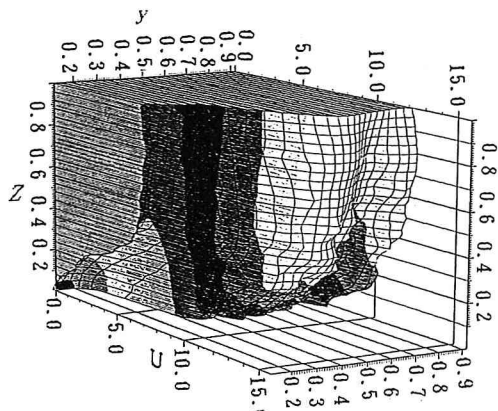


図-2 横断面の流速分布の鳥瞰図
(Run-1, $X=7.4\text{cm}$)

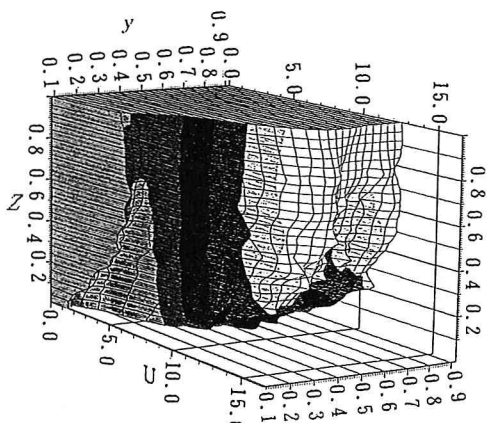


図-3 横断面の流速分布の鳥瞰図
(Run-1, $X=16.9\text{cm}$)

の領域で著しく増大している。つまり座標軸を図-1のように選べば、この境界域付近で du/dy が極値となり、乱れによる横断方向運動量輸送による横せん断力が発生していることが予想される。

(c) 実験で用いた模型ブロックでおこなった2次元実験(長谷川・柿崎(1990.))で確認された水制直後の逆流域は確認できず、流れの3次元的周り込みが水制下流の圧力低下を回復させ、剥離を抑えていると思われる。

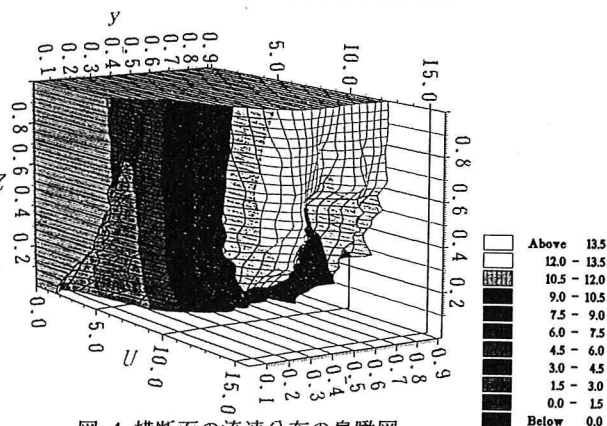


図-4 横断面の流速分布の鳥瞰図
(Run-1, $X=23.9\text{cm}$)

4. 河床せん断力の算定

図-2～図-4で確認できるように水深方向の流速分布は主流域では対数則に従うと思われる。そこで粗面に関する対数則を仮定し、摩擦速度 (u_*) と粗度 (k_s) を未知数として最小2乗法により u_* を求めてみた。図-5～図-10中の●でプロットされた値はこの様にしてもとめた u_* から河床せん断力 τ_o を逆算したものの横断方向の分布を見たものである。水制域の流速分布は対数則には従わないのでこの方法は適応できなが、一応水制域も同様の計算をしている(ただし、あまりにも誤差の大きい点は除いている)。図-5～図-10全てに共通して、水制域と主流域の境界付近に河床せん断力の極小値があらわれている。このことは、流体に働く重力の斜面方向成分のかなりの部分が、この境界付近では運動量の横断拡散による横せん断力によってバランスされており、河床せん断力の受け持ち分が減少していることを意味していると思われる。

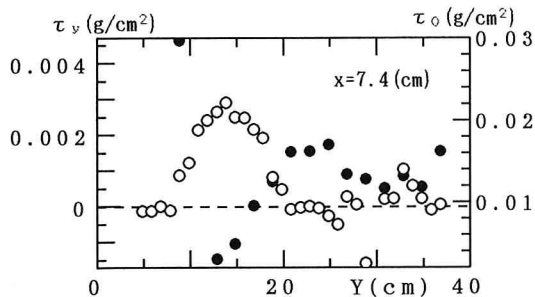


図-5 河床せん断力と横せん断力の横断分布 (Run-1)

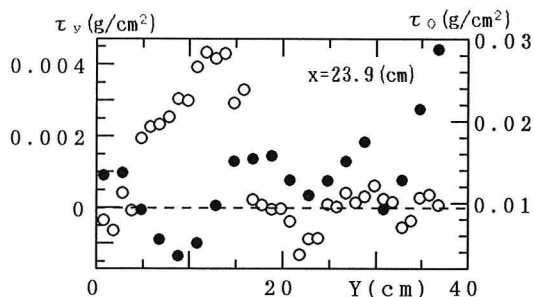


図-6 河床せん断力と横せん断力の横断分布 (Run-1)

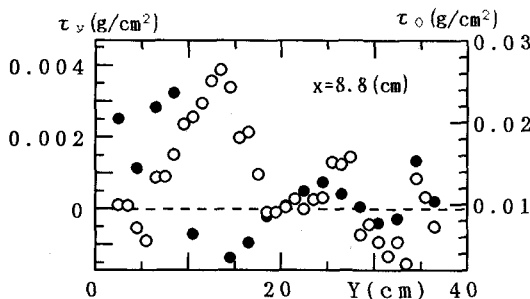


図-7 河床せん断力と横せん断力の横断分布 (Run-2)

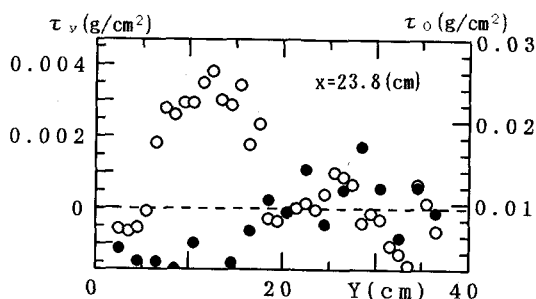


図-8 河床せん断力と横せん断力の横断分布 (Run-2)

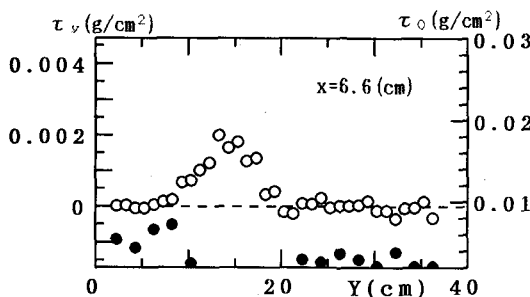


図-9 河床せん断力と横せん断力の横断分布 (Run-3)

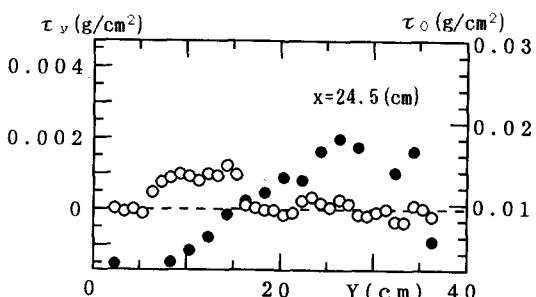


図-10 河床せん断力と横せん断力の横断分布 (Run-3)

5. 横断方向の運動量拡散による横せん断力 (τ_y) の評価

次に面積法 (Area Method) (江頭・黒木・澤井・山坂 (1988.)) を用いて横断方向の運動量拡散による横せん断力を求めてみた。図-11は面積法概念図である。断面内の主流の等流速線を描き、それに直交する法線を求める。この場合せん断力は等流速線に沿ってのみ流下方向に作用し法線に沿っては作用しない。従って、図-11のBCEFの要素の低面BCに作用するせん断力は(1)式のようになり、 τ_y はその $\sin \theta$ 成分になる。

$$\tau = \rho g \left(\frac{dA}{dl} \right) I \quad \dots (1)$$

図-12・図-13は測定したデータより等流速線を描いたものである。これらの図から明らかなように、等流速線は水制域と主流域の境界付近で急激に水面に向かって立ち上がっており、横せん断力の卓越し始める様子がうかがえる。図-5～図-10の○印は、面積法で求めた各点の τ_y を一度水深方向に平均し、横断方向にプロットしてその変化を見たものである。なお、 τ_y は面積法では離散的な形で得られるが、次式により格子上に内そうした。

$$\tau = \sum_i \frac{\tau_i}{R_i^2} / \sum_i \frac{1}{R_i^2} \quad \dots (2) \quad \tau_i = \text{面積法で求められた値, } R_i = \tau_i \text{ から格子点までの距離}$$

面積法を用いる場合、横断方向の流速成分 (2次流) が無視できることが前提条件である。本実験の場合、水深の横断方向の変化は $dh/dy=0$ とは言い難く、精度上の問題はあるものの、 τ_x の分布と比べてみると τ_x の値が極小になる付近で τ_y が極大値をとっている。つまり両者は互いに関係しあい平衡しているものと考えられる。

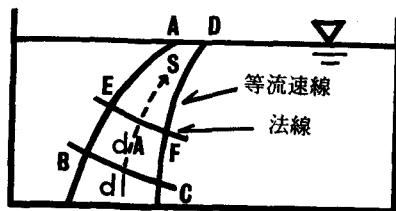
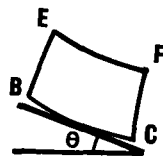


図-11 面積法概念図



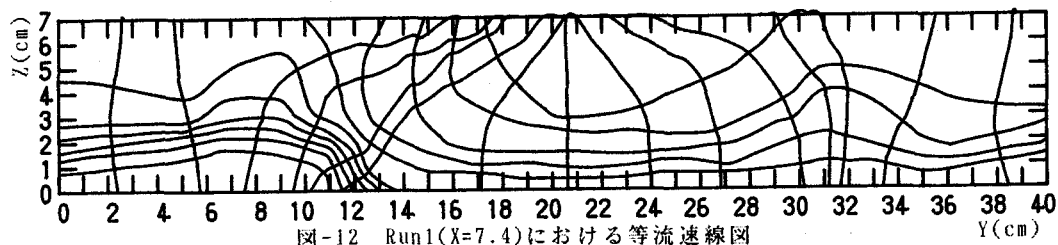


図-12 Run1(X=7.4)における等流速線図

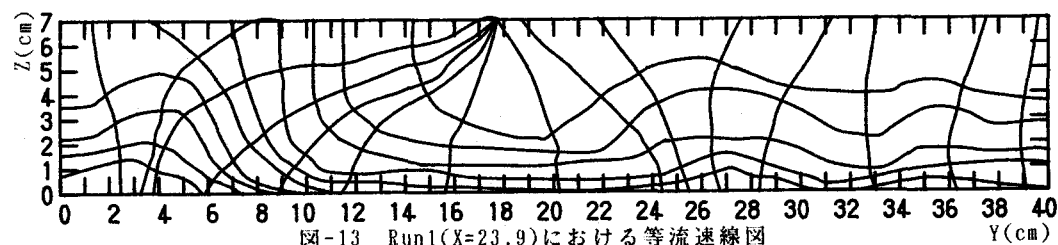


図-13 Run1(X=23.9)における等流速線図

6. 拡散係数の評価

6・1 実験値からの算定

横断方向の運動量拡散係数 ε_y の定義式は $\tau_y = \rho \varepsilon_y \partial u_m / \partial y$ (3) である。実測の流速値 u_m (水深方向平均流速) と面積法により求められた τ_y を式 (3) に代入し差分により ε_y を求めてみた。図-14～図-15は ε_y の横断方向の変化を見たものである。これらの値は粗面の横拡散係数 $\varepsilon = \alpha h u_x$ ($\alpha = 0.12$) よりも小さな値であり、対数則からの縦拡散 $\varepsilon = (1/6) \kappa h u_x$ に近い値となった。

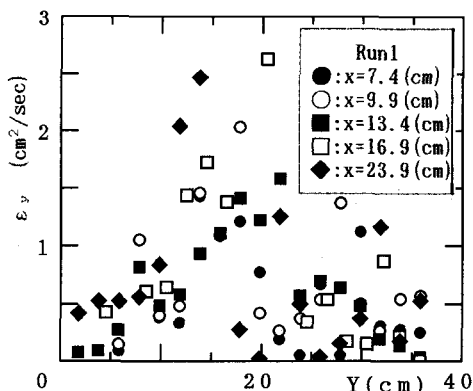


図-14 ε_y の横断方向変化 (Run1)

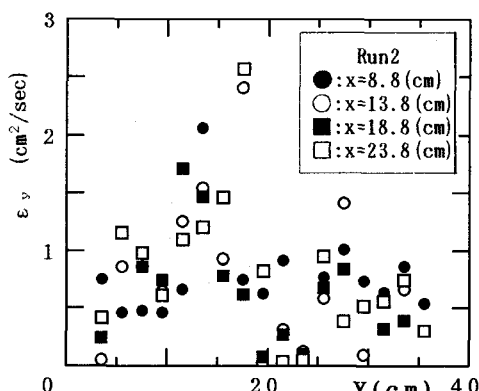


図-15 ε_y の横断方向変化 (Run2)

6・2 理論的考察

清水らは (北条・清水・板倉 (1990.)) 面積法を応用して河床・河岸のせん断力を算定することに成功している。流れの混合作用を法線が底面と交わる点の底面せん断力と底面からの面積荷重距離のみの関数としてとらえ、図-11中の s 軸に沿って対数則が成立するものと仮定し、渦動粘性係数 K を次のように仮定している。

$$K = \kappa u_* s \gamma \quad \dots (4) \quad s \text{ は底面からの距離}$$

ここで、 γ は底面から等流速線までの面積荷重距離であり次式で表される。

$$\gamma = \left(\int_s^{s_m} dA / l_1 \right) / \left(\int_0^{s_m} dA / l_b \right) \quad \dots (5)$$

s_m は法線の長さ

l_1 は等流速線に沿った法線間の距離

l_b は河床 (潤辺) の法線間の距離

水制のような構造物を河道の1部分に配置した場合の横断拡散作用は流速のコンター図から明らかなように構造物背後に生じるwakeに起因していると思われる。つまり、wake

e部分から伸びる法線は拡散作用が起こっている領域を通り水面に達している。この様な考えに立ち(4)式を用いて理論的にKを求める。ただし、wakeの場合河床ではせん断力が発生せず、wake分布の変曲点(仮想底面)で最大値をとる。wake分布(6)式から仮想底面を求める

$$\frac{u_1}{U_\infty} = \frac{\sqrt{10}}{18\beta} \left(\frac{x}{C_D d} \right)^{-\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(\frac{z}{b} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}^2 \quad \dots (6)$$

$$z_0 = b \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{4}{3}} \quad \dots (7) \quad b = \sqrt{10} \beta (x C_D d)^{\frac{1}{2}}$$

この仮想底面に作用するせん断力は水製の抗力((8)式)から(9)式のように仮定する。

$$D = \left(\frac{1}{2} C_D k \rho u_\infty^2 \right) B_2 = u_*^2 B_2 s \rho \quad \dots (8)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{C_D k}{2s}} U_\infty \quad \dots (9)$$

(8)式、(9)式と(4)式からKを求め実測値と比較してみるものが図-16である。両者はよく一致している。このことを利用すれば、 ε_v はモデル化が可能であり、従来の浅水流モデルと組み合わせて水制流れの解析を前進させたいと考えている。

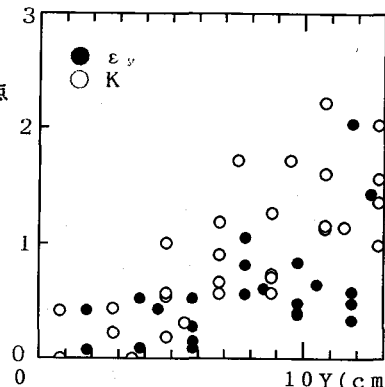


図-16 ε_v とKの比較(Run1)

7. まとめ

(1)河道の一部分に構造物を配置した開水路における水深方向の流速分布は水制域ではwake分布に、主流域では対数則にしたがう。その速度差のために両者の境界領域では運動量の横断方向輸送がおこり横せん断力が発生している。河床せん断力は水制域と主流域の境界付近で最小値となり、横せん断力はその領域で最大値となる。つまり、流下重力はせん断力は河床せん断力と横せん断力の両者によってバランスされている。

(2)横断方向の運動量拡散係数 ε_v はこれまでに粗面開水路で計測された値よりは小さくなった。このことは、筆者らの浅水流方程式における横断流速分布の理理解が、小さめの ε_v を要することと一致する。

(3) ε_v は構造物背後で発生するwakeに起因して発生している。構造物背後から伸びる等流速線の法線にそって軸(s軸)を選べば、流速分布はs軸に沿って対数分布となり、このことから ε_v が推定できる。

【謝辞】本研究をすすめるにあたり、北海道開発局開発土木研究所における実験装置を全面的に使用させて頂いた。また、本研究の1部は、鹿島財団研究助成「治水安全度向上及び水辺環境改善工法としての水製の機能に関する研究」による援助を受けている。記して関係機関・関係者の方々に感謝の意を表す次第である。

【参考文献】(1)長谷川和義・柿崎恒美(1991.): 三次元的に配置した透過水制まわりの流れのモデル化、土木学会北海道支部論文報告集(2)柿崎恒美(1991.): Characteristics of velocity fields of flows over and around permeable groins, xxiv IAHR CONGRESS STUDENT PAPER COMPETITION (S-41-S-48) (3)秋草勲・吉川秀夫(1960.): 水制に関する研究、土木研究所報告107号の6(4)長谷川和義・柿崎恒美・三井和久(1990.): 透過水制における透過流量と抵抗特性、水工学会論文集(5)柿崎恒美・長谷川和義・石井千万太郎(1990.): 2次元に配置した透過構造物の抵抗特性、第45回年次学術講演会概要集(6)江頭進治・黒木幹男・澤井健二・山坂昌成(1988.): 開水路における河床せん断力の推定法、第32回水理講演会論文集(7)北条紘次・清水康之・板倉忠興(1990.): 開水路における河床、河岸のせん断力の推定法、第34回水工学論文集