

不透過水制群を有する 流れの構造に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE STRUCTURE OF OPEN CHANNEL FLOW WITH IMPERMEABLE SPUR DIKES

池田駿介¹・吉池智明²・杉本高²

Syunsuke IKEDA, Tomoaki YOSHIIKE, Takashi SUGIMOTO

¹フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

²学生会員 学士(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1)

It is important for river engineers to know the hydraulic roles of spur dikes. A series of laboratory tests for horizontal structure of open channel flow with spur dikes was performed by varying the interval of spur dikes. The results indicate that the structure of flow is different according to the interval. The reattachment length is found to be a function of the interval of spur dikes. The momentum transport rate between the main flow region and spur dike region in the most upstream spur dike region takes a peak when the interval is 4.0 times of the length of a spur dike. The flow near the tip of the subsequent spur dike plays an important role in the momentum transport rate in the first spur dike region.

Key Words : *spur dikes, horizontal structure of flow, momentum transport, mass transport, interval of spur dikes*

1. はじめに

水制工は流れに対して粗度として働き、流速を減少させ、水はねによって流れの向きを変えするという効果によって川岸を浸食から守る目的で用いられてきた。近年は、水制工の設置によって多様な流れを生み出せることから、河川環境に配慮した工法としても用いられている。

水制群を有する流れは次第に流下方向へ変化しない流れとなる。これを平衡領域、そのような領域に至るまでを遷移領域と呼んでいる。最近の研究としては、固定床直線水路に単一水制を設置し、水制周りの流れの構造を調べたもの¹⁾、移動床における越流型水制周りの洗掘、堆積に関するもの^{2), 3)}などがあるが、水制群を有する流れの研究は、平衡領域を扱ったものが多く、水制群先頭の遷移領域はあまり扱われていない。松岡⁴⁾は、実河川において水制群から放出される渦が、水制域における底泥の堆積状況に大きく寄与していることを指摘しており、水制先端から剥離する渦の特性

を知ることが重要な課題である。また、近年注目されている環境面での効果を考えるとき、水制域・主流域間での物質輸送を考えることは重要になる。

本研究では、流れの構造を支配する因子として水制間隔に注目し、不透過水制群先頭における遷移領域を中心に、流れの基本的な構造、剥離渦の特性、水制域・主流域間での質量・運動量交換に注目し、実験を行った。

2. 実験概要

実験には図-1のような長さ 12m、幅 1.2m の循環式可変勾配直線水路を使用し、不透過水制として長さ 30cm、高さ 30cm、厚さ 1cm のアクリル板を水路左岸に設置した。水制群先頭の左岸側位置を原点として流下方向を x 軸、横断方向を y 軸、河床からの高さを z 軸として、座標を設定している。なお、上流側の水制、水制区間から、それぞれ水制 1、水制区間 1 とし、また、水制区間 1 の水制域を水制域 1 と呼び、流下方向

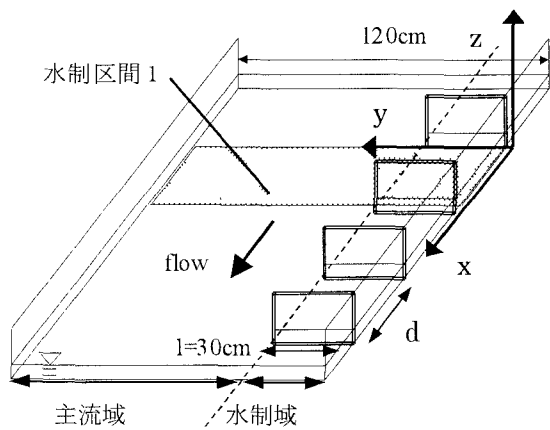


図-1 実験水路概略図

表-1 実験条件

Case		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
水路床勾配	$i_b \cdot 10^{-3}$	0.51						
流量	$Q(l/s)$	10.9						
水制間隔/水制長	d/l	1	2	3	5	7	3	4
水制間隔	$d \text{ (cm)}$	30	60	100	150	200	90	120
水制数	N_{SD}	15	10	7	6	5	7	6

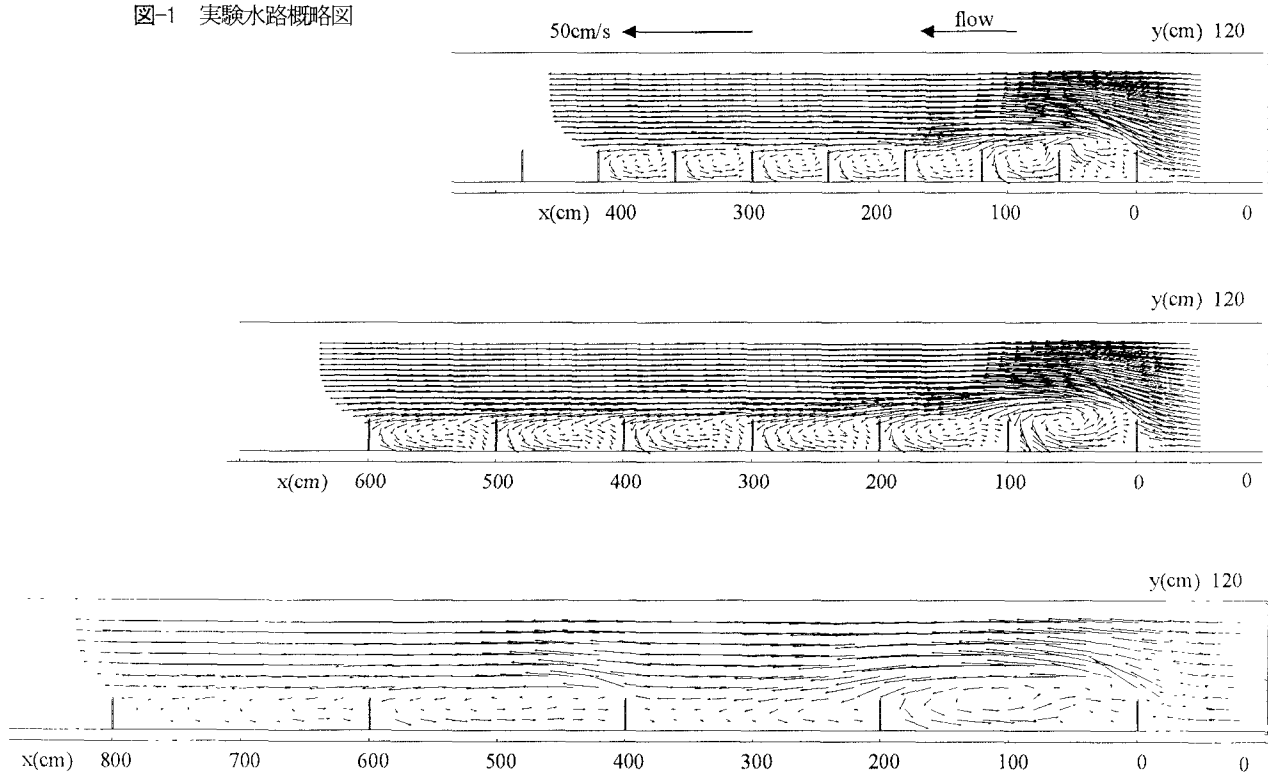


図-2 $z=0.4h$ における時間平均流速ベクトルの例

流速を u 、横断方向流速を v で表す事とする。実験条件は表-1 に示すとおりである。水制間隔による変化を見るため、各ケースともに水制間隔以外の水理条件を固定している。

水路全体の平面的な構造を把握するために、河床から4割の水深での流速を平均流速として、二成分電磁流速計を用いて流下方向、横断方向を同時に測定した⁵⁾。また、容量式波高計を用いて水制から放出される剥離渦の特性や、それによって生じる水制域内での水面変動を測定した。水制・主流域間での物質輸送に関係する指標として質量・運動量の交換について検討する。そのために、水制先端を結ぶ境界面上で、二成分レーザードップラー流速計を用いて流下方向、横断方向の流速を2次流による局所的な3次元性を考慮し

て水深方向に $z=1, 2, 3, 4\text{cm}$ の4点で測定した(平均水深は全ケースともに約5cm程度である)。ここでは、E6($d/l=3.0$)、E7($d/l=4.0$)の2ケースを追加した。

3. 水制群を有する流れの構造

(1) 流速測定結果

流れ場の全体的な構造を把握するため図-2 に時間平均流速ベクトルを示す。水制周りの流れ場は、水制先端からの剥離、それに伴う剥離渦の放出、逆流域などを持つ複雑な流れとなっていることが知られている。また、単一非越流不透水水制を有する流れにおいて、水制先端から剥離した流れは一定距離を流下し再附着

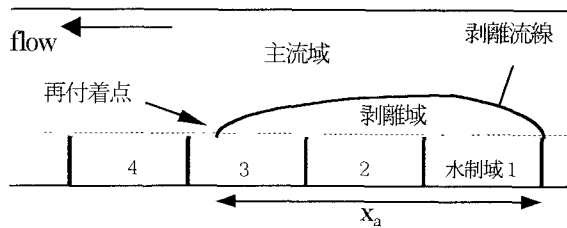


図-3 剥離域, 再付着点

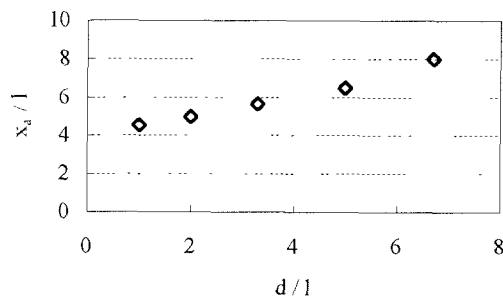


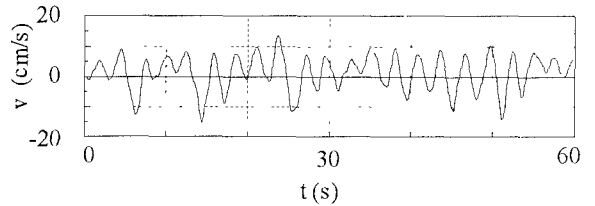
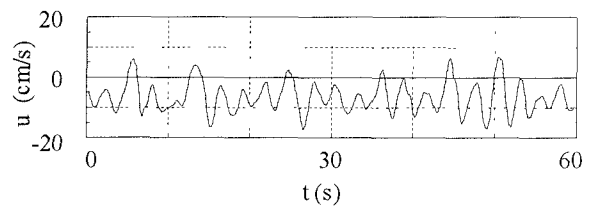
図-4 水制群先端から剥離域の
最下流地点までの距離

する。この再付着の位置は時間的に上・下流へ変化し、また、時間平均再付着点距離は水制長さの 14 倍の距離であることが指摘されている⁹⁾。

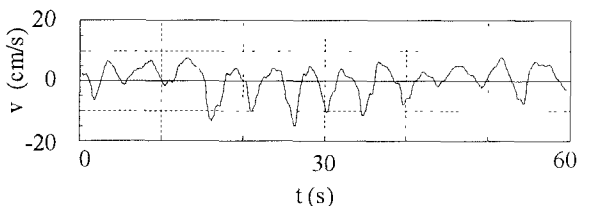
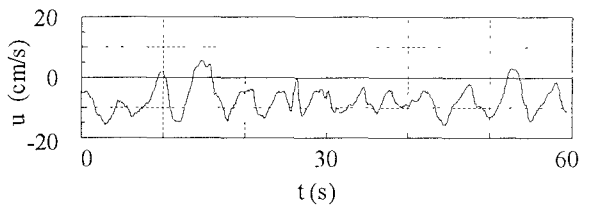
水制群を有する流れにおける再付着点を、剥離した流れが水制群の先端を結んだラインに到達する位置として定義する。また、剥離流線とこのラインとに囲まれる領域を剥離域と呼ぶことにする(図-3)。主流域において流下方向流速の瞬間値が負としないことを剥離域外である条件として、再付着点が最も下流に現れた地点の距離 x_a を求めた結果を図-4 に示す。この結果、水制間隔が狭いほど短い距離で再付着していることがわかる。

水制域内では反時計回りの循環流が生じている。流下方向の平衡域では、この循環流は規則的なパターンを繰り返すようになる。水制間隔の狭いものでは水制域全体を一つの循環流が占めており、水制間隔が広いものになると、反時計回りの循環流に加え、上流側の水制背後に死水域的な時計回りの循環流を伴うようになる。水制間隔が狭い二つのケース(E1, E2)においては、遷移領域である水制群先端の水制域において、時計回りと反時計回りの循環流を併せ持つ流れが見られた。これは、藤田⁹⁾によって実河川水制域において観測された流れと一致している。

水制間隔の狭い 3 ケース (E1, E2, E3) で遷移領域内の水制先端において上流側に向かう逆流が見られる。さらに、水制 2 の先端における流速に注目すると、ケース E1, E2 では横断方向流速が正負に大きく変化し、水制域への流入と、流出を繰り返す周期的な流れとなっている(図-5)。この変動の周期は、ケース E1 で



(a) E1 ($x=30\text{cm}$, $y=32\text{cm}$)



(b) E2 ($x=60\text{cm}$, $y=32\text{cm}$)

図-5 水制 2 先端における流速の時間変動

2.7 秒, E2 で 4.9 秒であった。

(2) 水面変動測定結果

a) 水制域の水面変動

ケース E1, E2 では水制域内の水面が、流下方向に同位相で周期的に変動している様子が観察された。水制間隔が広いケースでは、水面変動が小さく確認できなかった。この水面変動の周期は、ケース E1 で 2.9 秒, E2 で 5.0 秒であり、先に述べた水制先端を回り込む逆流の周期にほぼ一致している。木村ら¹⁰⁾は、フルード数が大きい流れにおいて、開水路中の死水域でセイシュに起因する水面変動の発生を指摘している。本実験では、この水面変動の周期は閉鎖性水域の水面の固有振動数と一致せず、セイシュとは異なるものである。この水面変動は、剥離流線が周期的に再付着点付近の水制にぶつかることによって、その水制域の水位が上昇し、前方の水制域との間に水位差が生じることにより生じると考えられる。

b) 剥離渦の特性

ケース E3, E4, E5 で、剥離渦の移動経路に近いと思われる水制域先端から主流域側へ 10cm 離れたライン上 ($y=40\text{cm}$) における水面変動の周期を調べると、

図-6 のようになり、流下するに従って周期が大きくなっている。それに対して、ケース E1, E2 では $y=40\text{cm}$ のライン上での水面変動の周期がそれぞれ、2.9 秒、5.0 秒で一定であり、水制域内の水面変動の周期に等しい。ケース E1, E2 の $x=22\text{cm}$, $y=40\text{cm}$ の地点における水面変動を FFT 法によってスペクトル解析した結果を図-7 に示す。ケース E2 では周期が 2.5 秒のサブピークが存在している。これは、剥離渦の水面変動によるものと考えられる。ケース E1 では剥離渦の周期が a) で述べたメカニズムによる水制域内の水面変動に

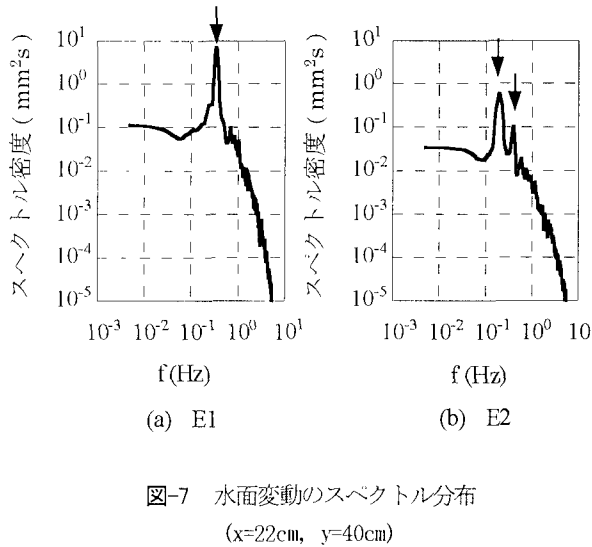
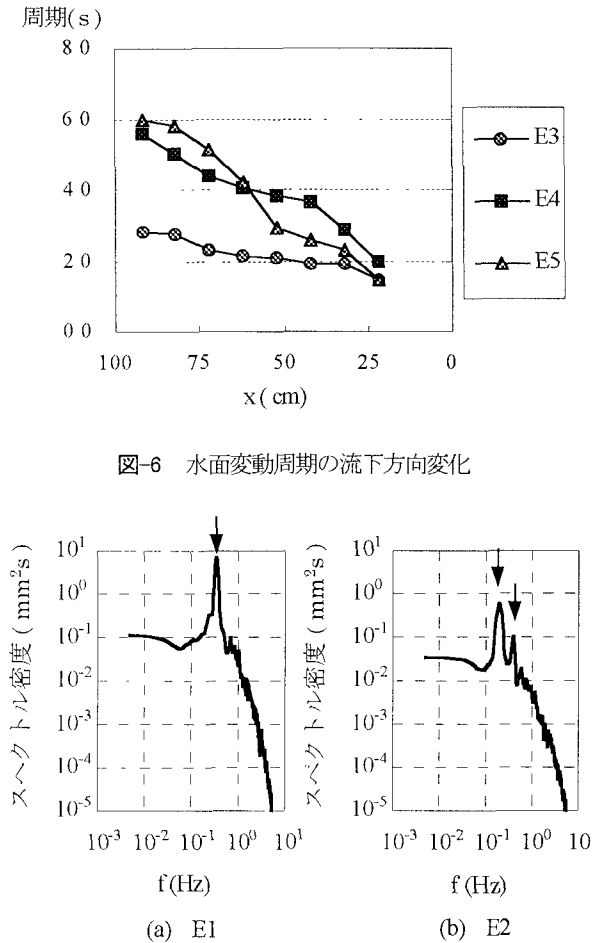


表-2 水制区間 1 におけるレイノルズ応力最大値及びその値を示す位置

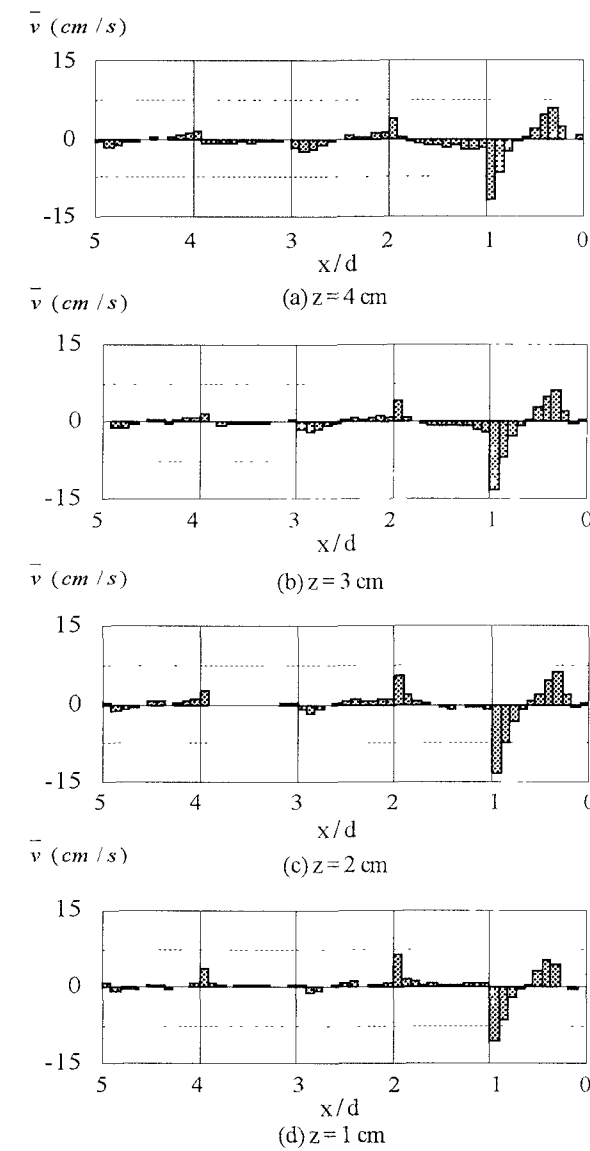
case	x (cm)	x/d	y (cm)	$-\overline{u'v'} (\text{cm}^2/\text{s}^2)$
E1	30	1	40	20.24
E2	60	1	40	11.31
E3	20	0.2	40	8.51
E4	45	0.3	45	14.33
E5	80	0.4	50	11.84

一致しているために変動の周期性が強められている。剥離渦の発達等による乱れの変化を見るために、水制区間 1 におけるレイノルズ応力の最大値を比較する(表-2)。水制間隔の狭いケース E1,E2 では下流側の水制域からの逆流によって下流側の水制先端付近で最大値をもっている。水制間隔の広いケース E3,E4,E5 では剥離渦の発達によって水制区間半ばで最大値をもっているが、ケース E3 ではその値が小さい。このことは、ケース E3 では剥離渦の発達が抑えられていることを示している。

4. 水制・主流域間の質量・運動量交換

(1) 境界面における横断方向流速

流速分布の傾向を見るためにケース E4 の境界面上での横断方向流速の水深変化を図-8 に示す。



水制区間 1 における横断方向流速が著しく大きく、単一不透過水制背後の流れにおいて、剥離した流れが水制背後に回り込むことによる遠心力に起因する二次流によって、水面付近で流出、河床付近で流入が起こる事を指摘している。ケース E4 では、水制区間 2 から水制区間 4 までの区間では水深の浅いところで水制域への流入が、深いところで主流域への流出が起こる傾向にあり、ここでは単一水制周りの流れとは逆になっている。このような 3 次元性は、水制間隔が広くなるほど強くなる傾向が見られた。

(2) 質量・運動量交換率の定義

水制域・主流域間の物質交換を示す指標として、水制群先端を結ぶラインを境界面とし、この面における質量交換率、移流と乱れ双方を含む運動量の交換率に注目した。ある水制区間における境界面での水深平均した質量交換の絶対値及び、境界面での運動量交換率を、木村ら⁷⁾、陳・池田⁸⁾の論文を参考にして、断面平均流速 U 、平均水深 h 及び水制間隔 d で無次元化した値を用いて次のように表す。

$$k' = \frac{1}{\rho U d h} \int_0^d \int_0^h \rho |\bar{v}| dz dx$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U^2 d h} \int_0^d \int_0^h \rho \bar{u} \bar{v} dz dx$$

ここに、 k' ：無次元質量交換率、 θ ：無次元運動量交換率である。なお、運動量交換は水制域から主流域へ向かう輸送を正としている。

(3) 質量交換

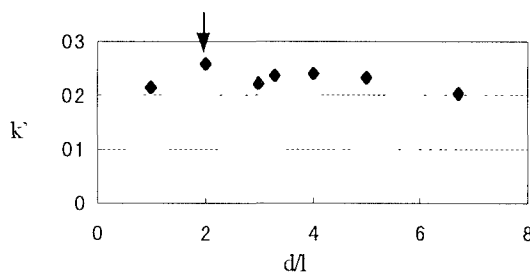


図-9 水制区間 1 の質量交換率

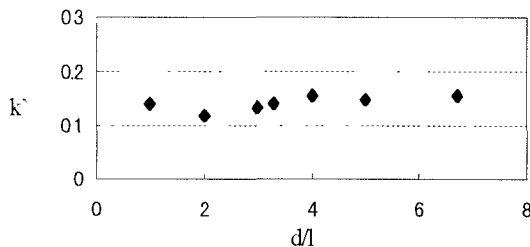


図-10 再付着点より下流側の水制区間における質量交換率平均値

質量交換率の流下方向への変化は、横断方向流速と同じように水制群先端の水制区間で大きく、下流側の水制区間では小さい。剥離域に含まれる水制区間は大きな値をもっており、水制区間 1 での質量交換率で比較すると図-9 のようにケース E2 ($d/l=2.0$) でピークをもつ。これは、3. (2) a) でふれた水制域内の水面変動による質量交換が大きいことによると考えられる。また、再付着点より下流側の水制区間での質量交換率の平均値は、水制間隔の広いケースになるほど大きな値を持つ傾向にある。

(4) 運動量交換

水制区間 1 における運動量交換率は図-11 のようになる。水制間隔が狭いと正、広くなると負の運動量交換率となっており、正の運動量交換率は、ケース E6 ($d/l=3.0$) でピークをもっている。再付着点より下流側の水制区間での交換率の平均値は図-12 の様に全てのケースで負となっており、また、水制間隔が広くなるほど、大きな負の値を持つ傾向にある。

運動量交換率の流下方向への変化を図-13 に示す。水制区間 1 における運動量交換率の流下方向への分布は、水制間隔によって大きく異なっている。ケース E1 ($d/l=1.0$)、E2 ($d/l=2.0$) では水制区間前半で負、後半で正という分布を持つ。ケース E6 ($d/l=3.0$)、E3 ($d/l=3.3$)、E7 ($d/l=4.0$) では水制区間前半で正、後半で負の値を持つ傾向にあり、水制 2 付近で極めて大きな正の運動量交換率を持っている。ケース E4 ($d/l=5.0$)、E5 ($d/l=6.7$) では負の運動量交換が強く、水制 2 付近の正の交換は見られない。また、この 2 ケースでは水制区間 2 後方の水制 3 付近において正の運動量交換率が見られる。水制区間 1 では、後方

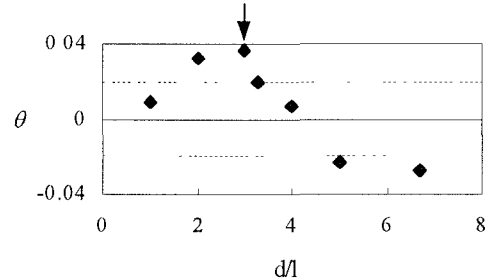


図-11 水制区間 1 における運動量交換率

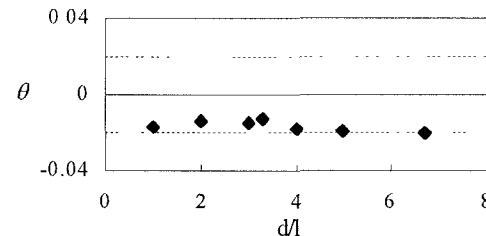


図-12 再付着点より下流側の水制区間における運動量交換率平均値

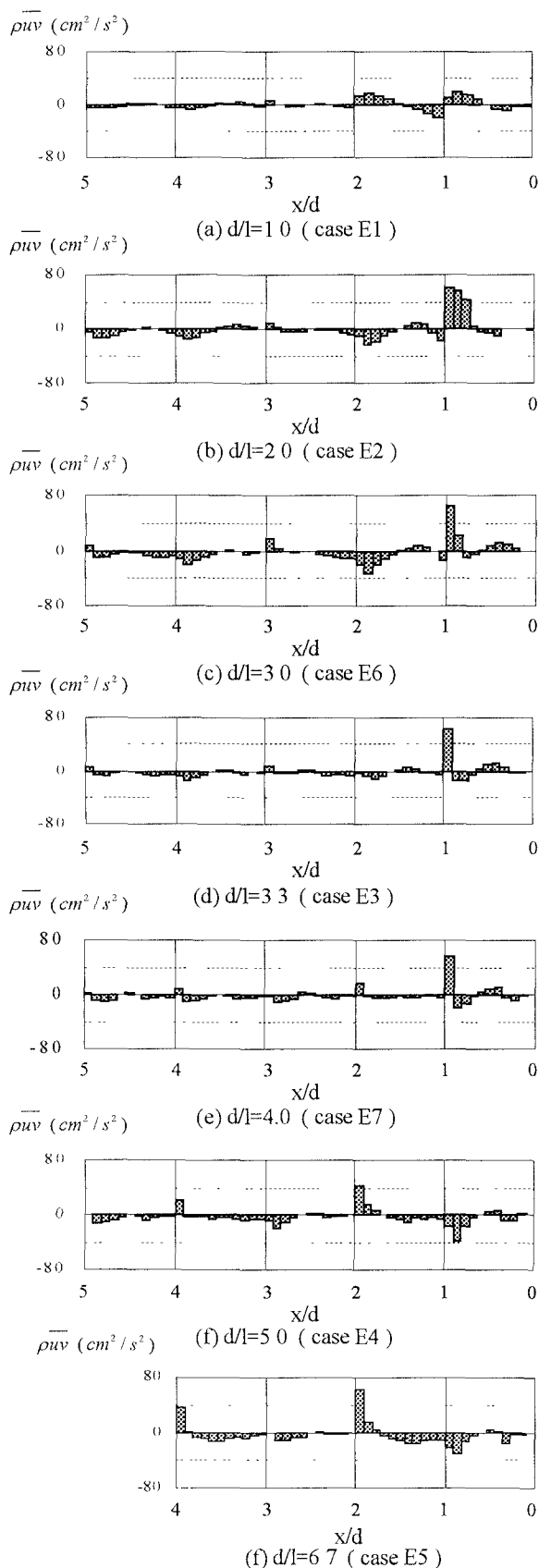


図-13 $z=2\text{cm}$ における境界面上の運動量交換率の流下方向変化

の水制である水制2付近で生じる運動量交換率が大きく、運動量交換の収支はここにおける値に支配されている。

4. まとめ

不透水水制群を有する流れの構造を支配する因子として水制間隔に注目して実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 水制群先頭の水制から剥離した流れは水制間隔が狭いほど、短い流下距離で再付着する。また、水制間隔が狭いケース ($d/l=1.0$, $d/l=2.0$) においては、剥離域内の水制区間において、水制先端を前方水制域へ周り込む逆流と水制域での水面の振動が見られた。
- (2) 水制・主流域間の質量交換率は、水制群の先頭の水制区間では $d/l=2.0$ のケースで最大となる。再付着点よりも下流側の水制区間における平均値は水制間隔の広いものほど大きな値を持つ傾向にある。
- (3) 運動量交換率は、再付着点より下流側の水制区間においては負の交換率を持つ。水制群の先頭の水制区間においては水制間隔の狭いケース ($d/l=4.0$ 以下のケース) では正の、広いケース ($d/l=5.0$, $d/l=6.7$) では負の運動量交換率を持っており、それを支配しているのは2番目の水制先端付近で生じている運動量交換である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費基盤研究(A)(1)(代表研究者：池田駿介、課題番号：07455195)の補助を受けたものである。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 宗田徳彦：Reynolds応力を考慮した水制を含む流れの計算，水工学論文集，第37巻，pp.487-494，1993.
- 2) 福岡捷二・西村達也・岡信昌利・川口広司：越流型水制周辺の流れと河床変動，水工学論文集，第42巻，pp.977-1002，1998.
- 3) 大本照憲・平川隆一：越流型水制群に対する二次流と流砂の応答，水工学論文集，第42巻，pp.1003-1008，1998.
- 4) 松岡保正：大規模水制群内の水平渦，水工学論文集，第39巻，pp.773-778，1995.
- 5) 陳 飛勇・池田駿介：水制周りの水平剥離渦に関する実験的研究，水工学論文集，第40巻，pp.787-792，1994.
- 6) 藤田一郎：トレーサを利用した実河川水制周辺流れのビデオ画像解析，水工学論文集，第42巻，pp.505-510，1998.
- 7) 木村一郎・細田尚ほか：開水路流れにおける死水域内流体振動に及ぼす水理パラメーターの効果，水工学論文集，第39巻，pp.779-784，1995.

(1998. 9. 30 受付)