

非越流型水制群を有する開水路流れの水面振動と 大規模渦の相互作用

Interaction between Water Surface Oscillations and Large Eddies in an Open Channel Flow with Spur Dikes

大本照憲*・平川隆一**

Terunori OHMOTO, Ryuichi HIRAKAWA

*正会員 工博 熊本大学大学院助教授 環境共生科学専攻 (〒860-8555 熊本市黒髪)

**学生員 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪)

Spur dikes have been used to realign a channel or redirect main flow away from a streambank to protect it from erosive tractive forces. They are also used to increase channel roughness at locations that lack roughness elements. In certain cases, spur dikes can be used to narrow the channel in low-gradient, aggrading reaches causing flow velocities and sediment transport rates to increase. Water surface oscillation was produced in dikes fields when non-submerged spur dikes were set up in a case of their arrangements. The water surface oscillation was attributed to the interaction of large scale eddies formed in the spur dike fields along both banks, and was probably triggered by the separation eddies behind the first spur dike. This study focused on the interaction between water surface oscillation and large eddies in both cases of spur dike set up along both banks and one bank. The result showed that when a remarkable water surface oscillation was observed, the interaction of the large eddies in both banks was strong.

Key Words : spur dike, water surface oscillation, PIV, large eddy

1. はじめに

水制は、明治時期の低水工事において低水路の固定、水深の確保、河岸近傍の流速低減を目的として多く施工された。しかしながら、終戦直後、毎年全国で千人を超す死者を出していた状況で、水害に強い河川をつくることが望まれ、強固に見えるコンクリート護岸が用いられた。それに伴い水制の設置もほとんど行われなくなった。水害の脅威が和らぎ、人々の生活も豊かになってくると、川に対する人々のニーズにも変化が生じてきた。そこで多自然型工法の一つである水制も見直され、設置が試みられている。

ところで、水制に関する研究は、水制周辺の流れ場、主流部から水制域内への物質輸送などを解明するためにこれまでも多数行われてきた。松岡¹⁾は実河川に設置された片岸水制群を現地観測し、水制群内における水制先端部の渦と大規模水平渦の挙動を検討している。室内実験においては、大本²⁾は電磁流速計を用いて越流型水制群周辺の流れ場を計測し、水制群の向きが流れの3次元構造および河床変動に与える影響を明らかにした。富永³⁾は片岸に2基の越流型水制を設置し、水制の向きの変化が水制周辺の流れ構造に与

える影響について可視化PIV法を用いて検討している。川口⁴⁾は片岸に設置した越流型水制群の角度および間隔を変化させ、水制に作用する流体力を計測している。石垣・馬場⁵⁾は台座付平板を開水路に設置して流れと移動床現象を計測し、台座先端付近から形成される2次流が水制剥離渦などの流れ構造や洗掘現象に与える影響について検討している。池田⁶⁾は非越流型不透水水制群を水路片岸に設置し、水制間隔と水制長の比を変化させ、水制・主流域間での質量・運動量の交換に関して検討を行っている。

しかしこれらの研究では水面振動を取り扱ったものは少なく、水制域に発生した水面振動が流れ場に与える影響については不明な点が多い。今本池本⁷⁾は水路兩岸に多数個設置された不透水水制を対象とし、越流時および非越流時における抵抗特性について実験的に検討している。また水表面の可視化を行い、流れの蛇行を捉えているが、水面振動の周期および特性については検討されていない。

筆者ら⁸⁾は非越流型直角水制群を水路兩岸に対称に設置し、水制群先端部の1~2基間のみの間隔を系統的に変化させた。その結果、水制群の中央部にあたる、上流から11~12基目の水面振動は、1基目と2基目の水制設置間隔が水制長の偶数倍で水面振動は大きな

り、1 倍を除いた奇数倍で小さくなる傾向があることを指摘した。また水制群中央部を PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて流れ場を計測し、水制域内の滞留時間と水制域境界における運動量輸送について検討を行い、顕著な水面振動がある場合には滞留時間は短く、水制域内に運び込まれる運動量が多くなることを指摘した。水制域全体に生じる水面振動の要因は、水制 1 基目背後に発生した渦が引き金となって、それより下流側における左右両岸の水制域内での大規模渦の相互干渉にあることが推測される。そこで、本研究では固定床上に非越流型不透水制を両岸と片岸に設置することによって大規模渦の相互干渉がある場合と無い場合の流れの特性について検討を行った。

2. 実験装置および方法

本実験に使用した水路は、長さ 10m、幅 40cm、高さ 30cm の可変勾配型の循環式直線水路である。計測部は、側壁からレーザ光が照射可能なように全面がアクリル製となっている。水路勾配は $i=1/1000$ に設定した。座標系は図-1 に示すように、水制群の右岸根付け部を原点に取り、流下方向を x 軸、横断方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とし、それぞれに対応した流速成分を u 、 v および w とする。水制は直方体のステンレス片を使用し、大きさは長さ $L=10\text{cm}$ 、高さ $H=7.5\text{cm}$ 、幅 $B=2\text{cm}$ である。それを、水路壁の両岸および片岸に直角に 21 基ずつ設置している。表-1 に実験条件を示す。2 基目以降の水制設置間隔は、水制長の 2 倍である $D=20\text{cm}$ としている。流量は $Q=2.0\text{ l/s}$ に設定し、水路両岸に水制群を設置したケース R-20 において、11 基目の水制設置断面水路中央の水深が $h_m=4\text{cm}$ となるように下流端の堰を調整し、全ケースにおいて堰の位置はそこに固定した。代表流速には、水路幅と水深 h_m から得られる断面平均流速を用いている。

流速の計測には、非接触型の代表的な画像処理法である PIV 法を用いた。光源に空冷式ダブルパルス YAG レーザ (出力 25 mJ/Pulse 、 Q スイッチ周波数 15 Hz) を用いた。シート光の厚さを 1mm 、パルス間隔を $5000\text{ }\mu\text{s}$ に設定し、水路側方から壁面に垂直に水路全幅に亘って照射した。照射位置は、半水深の水平断面 ($x-y$ 平面) を設定した。レーザ光と CCD カメラ (ピクセル分解能 1008×1018) を同期させて読み込まれた可視化画像は、 30fps (frame per second)、 $960\times1018\text{ pixel}$ のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録され、相互相関法によって処理された。ここに、画像の 1pixel サイズは、 0.403mm である。相関法では検査エリアを $64\times64\text{ pixel}$ 、オーバーラップは 75% とした。1 計測面での画像データは 1000 枚、計測時間は、 33.3sec であった。なお、トレーサとして粒径 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン粒子を使用した。計測位置は、水制群上流から 1 基~2 基目の水

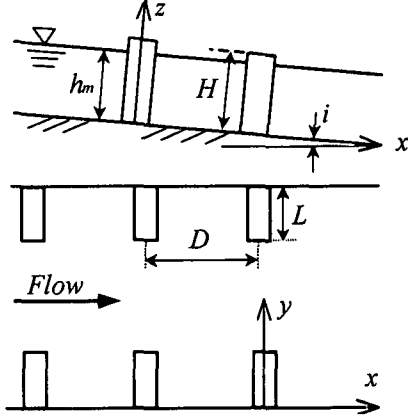


図-1 水制配置図

表-1 実験条件

項 目		R-20	R-30	R ₀ -20
水 路 勾 配	i	1/1000	1/1000	1/1000
流 量	Q l/s	2.0	2.0	2.0
水 路 幅	W cm	40	40	40
水 深	h_m cm	4	4	3
水 制 長	L cm	10	10	10
水 制 高	H cm	7.5	7.5	7.5
水制設置間隔	1~2 基間	20	30	20
	2 基目以降	20	20	20
代 表 流 速	U_0 cm	12.5	12.5	12.5

制間である。

水面変動の計測には、超音波変位計 (KEYENCE 社製 UD-500) を使用した。その際、変位計をそのまま使用すると超音波の照射範囲の直径は約 2cm であったため、センサの先端にアルミ製の円筒に装着し、照射範囲を直径約 8mm にまで向上させている。計測は、サンプリング周波数を 20 Hz 、1 測点のデータ個数は 512 に設定した。

3. 実験結果および考察

3.1 水面振動特性

大本ら⁸⁾は、水制群を水路両岸に直角に設置した場合、水制域全体に亘って、水路中央部に 1 つの節を持ち水路両岸で逆位相であり、主流に対して直角方向の顕著な水面振動の発生を指摘した。

本研究では、水制群を両岸に設置した場合と片岸に設置した場合の水面振動の特性を明らかにするために、水面振動の計測を行った。

図-2 には、水制 1 基目背後の側岸部 ($x/D=0.1$ 、 $y/L=0.2$) における、水面振動の系時変化を示す。この図より、全てのケースに於いて水面振動は周期的であるが、振幅が異なっていることが分かる。ケース R-20 における振幅は水深の約 12% である。これに対し

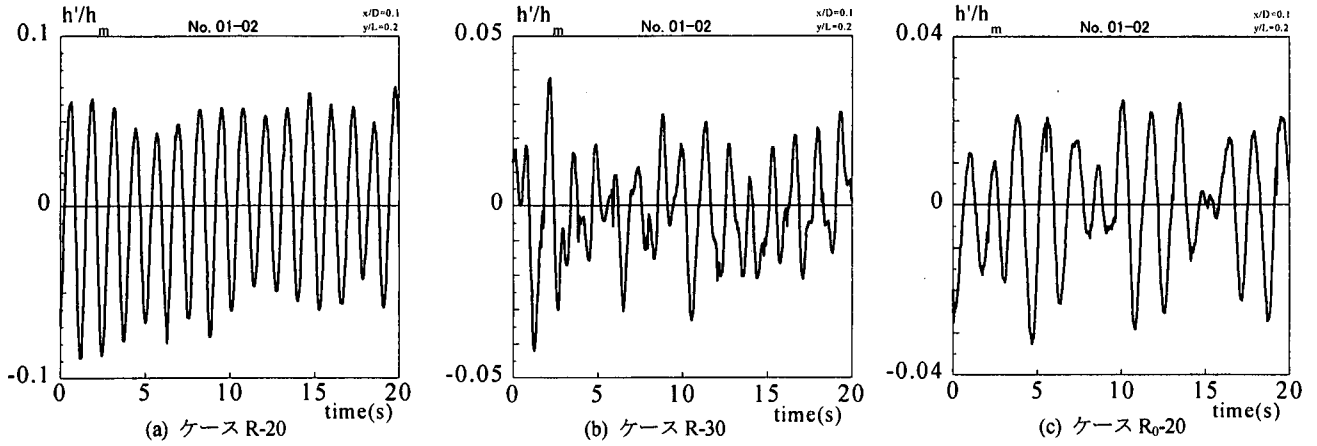


図-2 水面振動の系時変化

て、上流の水制設置間隔を水制長の3倍としたケースR-30においては、振幅は水深の約4%であり、水制群を片岸のみに設置したケースR₀-20では約4%である。また、これらのケースにおいて水面振動の周期を調べるためにスペクトル解析を行った。その結果を図-3に示す。各ケースとも明瞭な卓越周波数が現れており、水面振動が大きいケースR-20では約1.3秒である。水面振動が小さかったケースR-30での周期は約1.3秒であり、ケースR₀-20においては約1.6秒である。

以上より、水面振動の振幅はケースR-30とR₀-20が同程度であり、周期は水制群を水路両岸に設置したケースR-20とケースR-30が同程度となることが言える。

矩形容器内の、主流に対して平行方向の n 次モードスロッシングの固有振動数は次式⁹⁾のように表される。

$$f^n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n\pi g}{W} \tanh\left(\frac{n\pi H}{W}\right)} \quad (1)$$

ここで、 W ：容器幅、 g ：重力の加速度、 H ：水深である。本実験装置の幾何学形状と実験条件をあてはめると1次モードの振動数から得られる周期は1.298秒となり、超音波変位計により得られた主流に対して直角方向の水面振動とほぼ近い値となっている。

3.2 時間平均流速分布

PIV計測では、約33秒間の1000回の瞬時速度分布の計測結果から時間平均速度分布を算出した。本PIVシステムでは、7.5 Hz間隔で瞬時速度分布が計測される。図-4に時間平均速度分布を、図-5に渦度分布を示す。時間平均速度 $U_{i,j}$ は次式のように定義している。

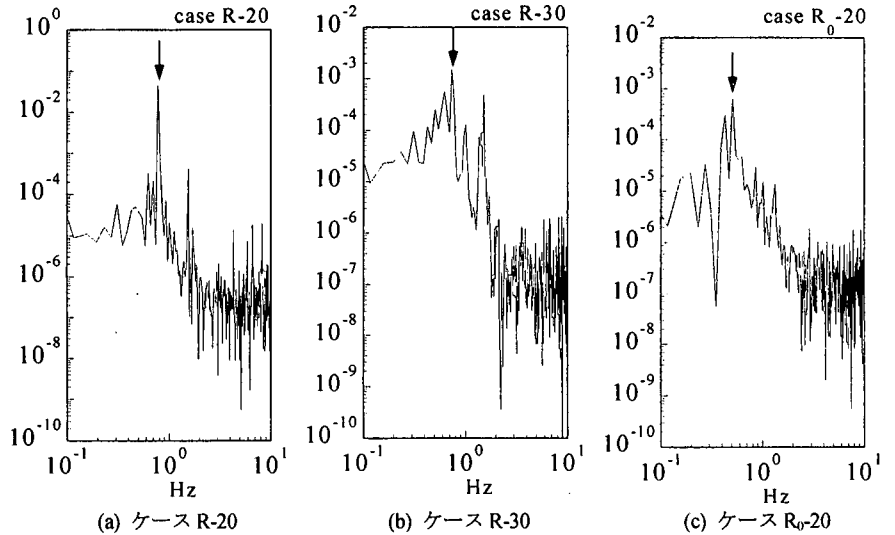


図-3 水面振動のスペクトル

$$U_{i,j} = \sum_{i=1}^N \frac{u_{i,j,t}}{N} \quad V_{i,j} = \sum_{i=1}^N \frac{v_{i,j,t}}{N} \quad (2)$$

ここに、 $u_{i,j}$ と $v_{i,j}$ は x 方向と y 方向の瞬時速度で、 $N=1000$ である。

渦度は次式より算出した。

$$\Omega = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \quad (3)$$

なお、 $\Omega > 0$ の領域を破線で表し、 $\Omega < 0$ の領域を実線で表している。

時間平均速度分布には、水制により水路の右岸側の水制域内に反時計回りの、水路左岸側の水制域内には時計回りの大きな循環流がそれぞれ形成されていることが示されている。水制間隔が水制長の3倍のケースR-30には、右岸側岸部の水制背後において時計回りの渦も形成されている。循環流の中心は、水路片岸に水制群の設置したケースR₀-20に比べて、水路両岸に水制群を設置したケースR-20とR-30の方が流下方向に引き伸ばされている。上流側の水制先端では、水はねによる剥離流が確認される。水制群を水路両岸に設置

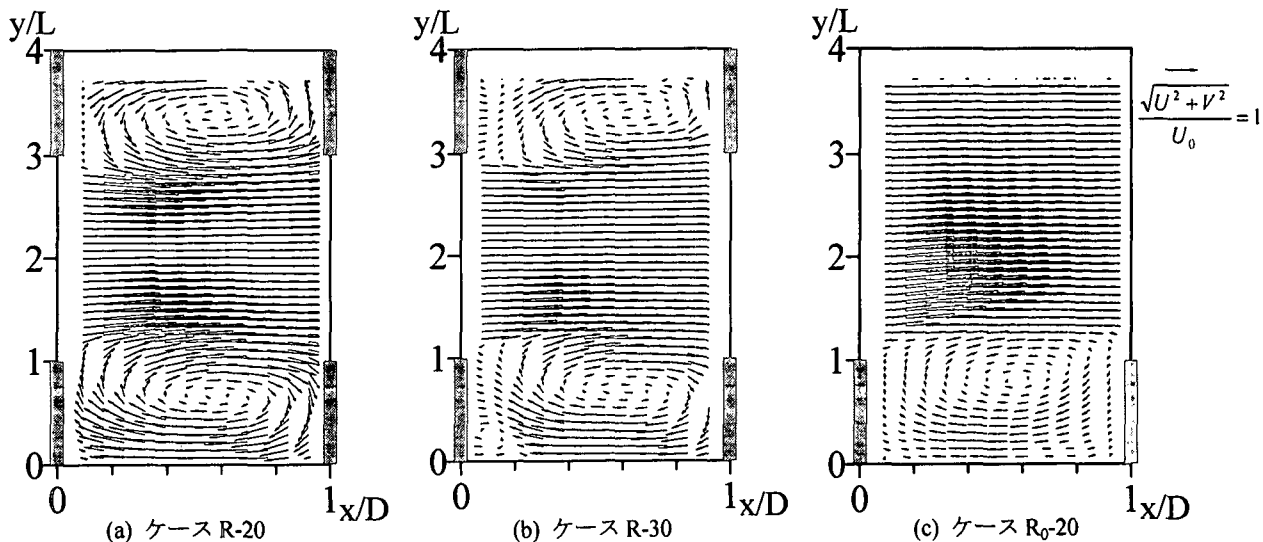


図4 時間平均流速ベクトル

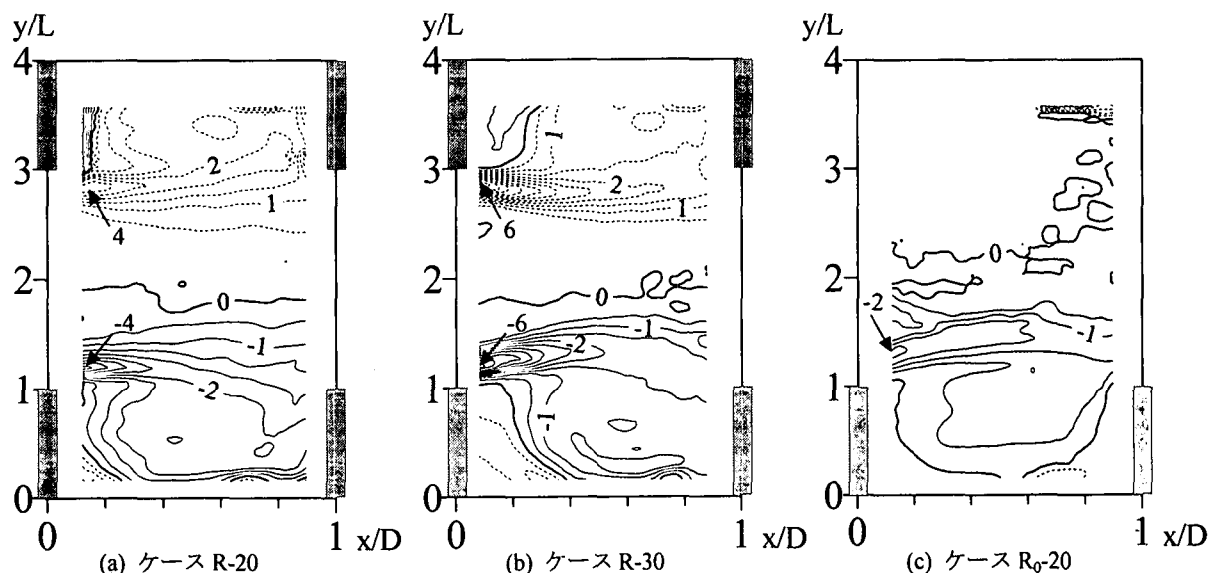


図5 時間平均渦度分布

したケース R-20 と R-30 においては $y/L = 2.0$ の水路中央付近で左右両岸の水はねの影響は打ち消しあっているように見える。これに対して、水制群が右岸のみに設置されたケース R_0-20 では水路中央を超えて左側の領域にまで水はねの影響が及んでいる。

渦度分布より、極値は水制先端部より若干主流部側に現れていることが分かる。各ケースとも渦度の大きい領域は流下方向へと伸びているが、水面振動が大きかったケース R-20 では下流側の水制前面に沿って水制域内へと浸入していくのに対して、水面振動が小さいケース R-30 とケース R_0-20 では主流部へと向かうことが分かる。なお、筆者らは既存の研究において¹⁰⁾、ケース R-20 では瞬間の渦度の極値が左右交互に現れるのに対して、ケース R-30 では常に渦度の大きい領域が水制先端部に存在していることを指摘している。

3.3 瞬間速度分布

本 PIV システムでは、7.5 Hz 間隔で瞬時速度分布が

計測される。図-6～8 に各ケースにおける瞬時の速度分布を示す。ケース R-20 の速度分布からは、水制域内で比較的大きなスケールの渦が発生していること、および渦の形状が周期的に変化し、水制域内の水は主流部と入れ替わっていることが分かる。すなわち、水制域の下流側から流体は水制域内に浸入し、水制域の上流側から主流部へと流出するが、水制域内に流れ込むときには渦の中心は水制域の上流側へと移動し、流出しているときには渦の中心部は水制域の下流側へと移動している。水制域上流部における流体の流出と水はねの影響は、平均速度分布と異なり、瞬間的に主流部を押しつけて対岸の水制域へと及んでおり、水制域の下流側から水制域内に浸入している。主流部の流れは蛇行しているように考えられる。水路両岸の水制域上流部から流出するのは左右交互であり、それに伴い渦の中心部も水制域内を上下流方向に左右逆位相で移動する。水制域から主流部へと向かう流出速度の周期は水面振動の周期とほぼ一致した。

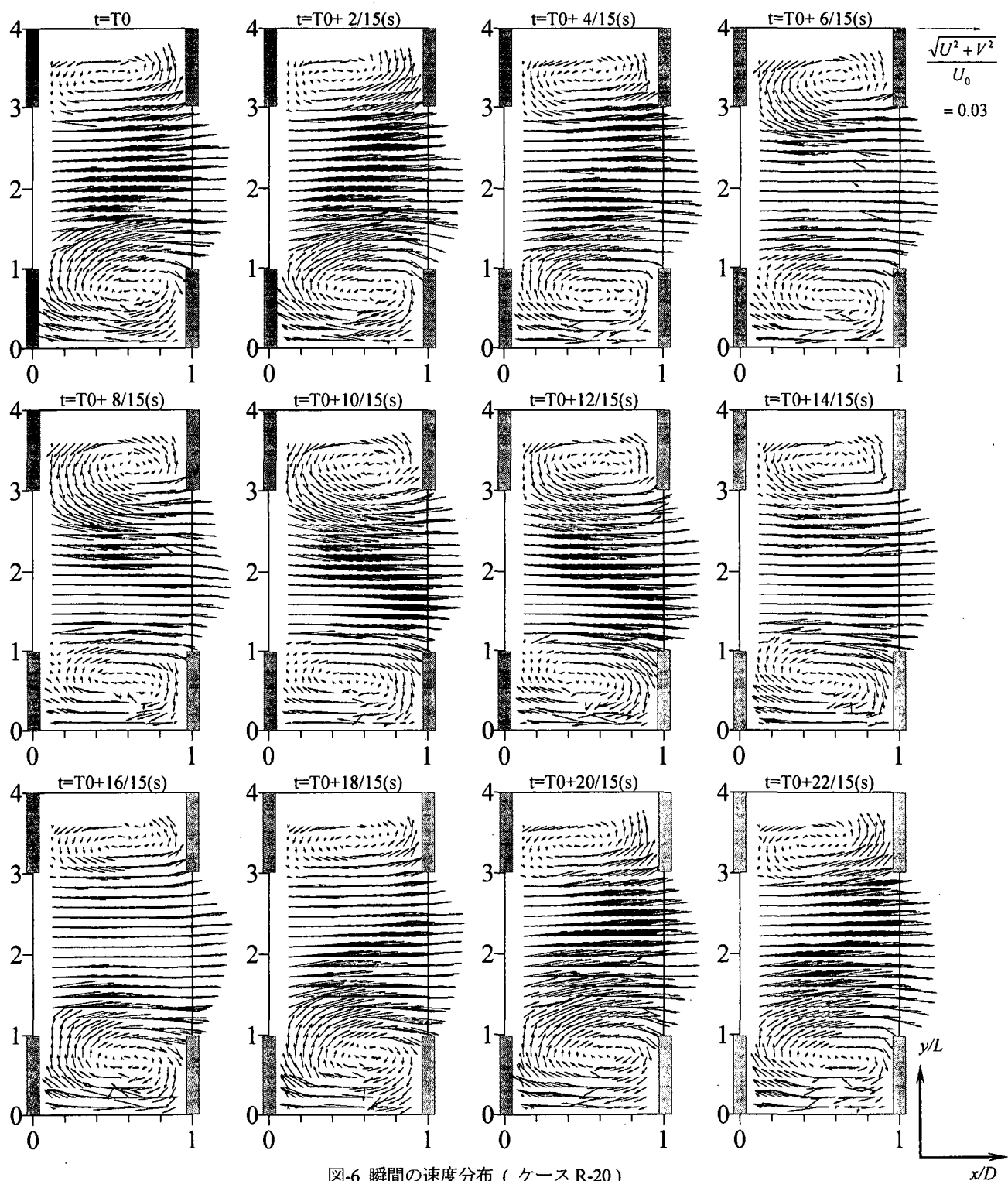


図-6 瞬間の速度分布 (ケース R-20)

水面振動の小さいケース R-30 の瞬間の速度分布からは、水制域内ではケース R-20 と同様に大きなスケールの渦が形成されていることがわかる。水制背後の根付け部には逆流域が常に形成されている。水制域内の渦の中心は、流下方向には水面振動が大きいケース R-20 と異なりほぼ $x/D=0.6$ の位置で安定している。水制域境界付近から主流部の流れに着目すると、水制先端部から主流部に流出した流体は対岸に届くことは無く、主流部の流れはほぼ直線的に流れ、蛇行はほと

んど見られない。また、水制先端背後においてはケース R-20 と異なり、水制域内の流体が周期的に主流部へと流出しているかどうかは確認できない。

水制群を水路片岸に等間隔に設置したケース R₀-20 の瞬間の速度分布からは、水制域内の大きなスケールの渦の中心は、水面振動が大きいケース R-20 と同様に上下流方向に移動しているのが確認される。主流部においては、上流側の水制先端の剥離流と水制背後からの流体の流出の影響が認められるが、ケース R-20 と異

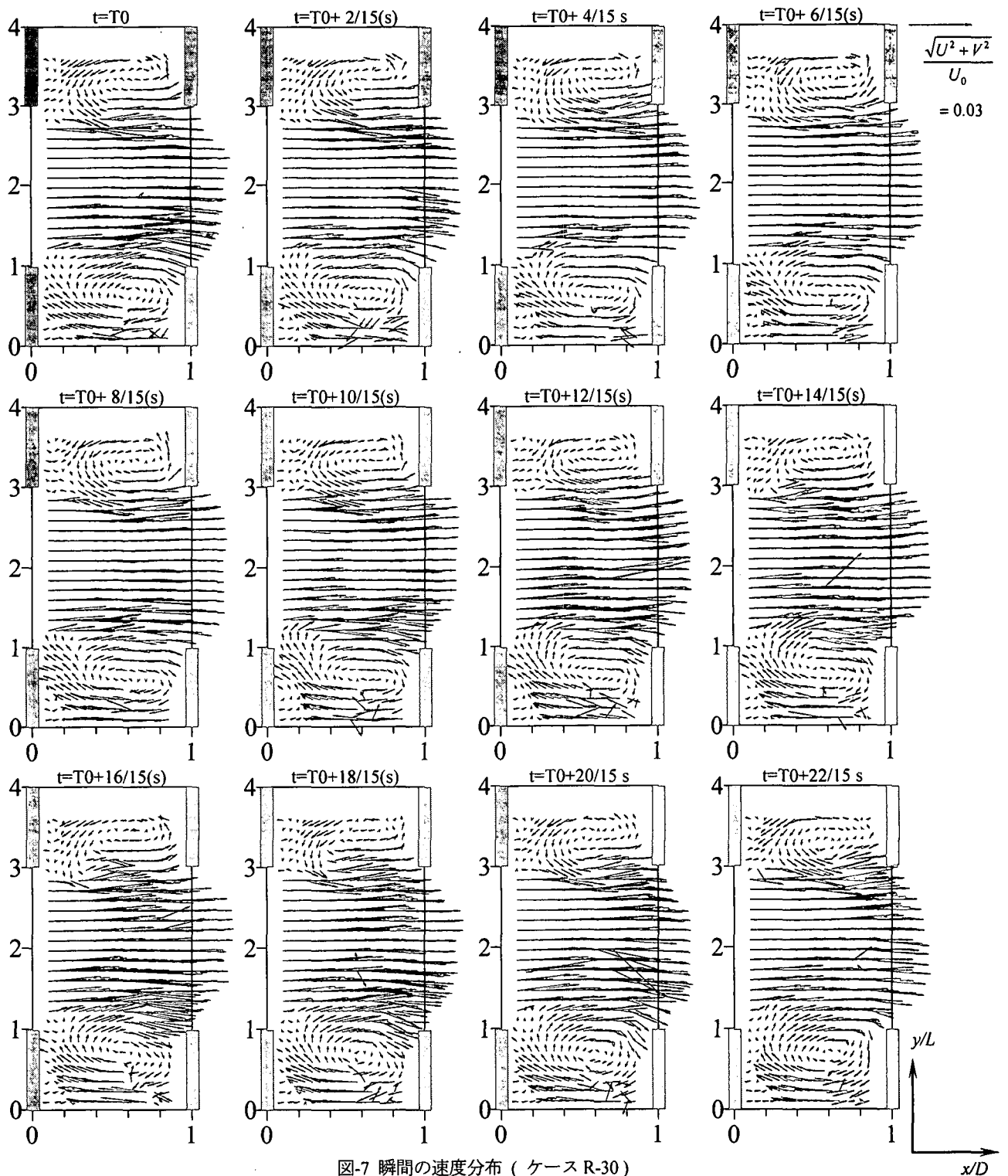


図-7 瞬間の速度分布 (ケース R-30)

なり対岸までは影響を及ぼしていない。また、ケース R-30 と同様に水制域内からの周期的な流体の流出も確認できない。

以上の瞬間速度場の分布より非越流型水制群の水制間隔・対称性・水面振動の特性について検討すると、水制間隔を等間隔にしたケース R-20 とケース R₀-20 においては、いずれも水制域内の渦の中心が上下流方向に移動することが認められ、顕著な水面振動が現れたケース R-20 においては、周期的に水制域から主流部へ

と左右岸逆位相で流体が流出し、対岸へ届いて主流部の流れに蛇行の発生が認められる。水面振動が小さいケース R-30 およびケース R₀-20 では、水制域からの左右交互の流体の流出および対岸への影響は認められず、非越流時における不透水水制群の水面振動の発生は水制域からの周期的な流体の流出に伴う蛇行と、流出した流体が対岸の下流の水制前面まで届くかどうかに関係することが確かめられる。

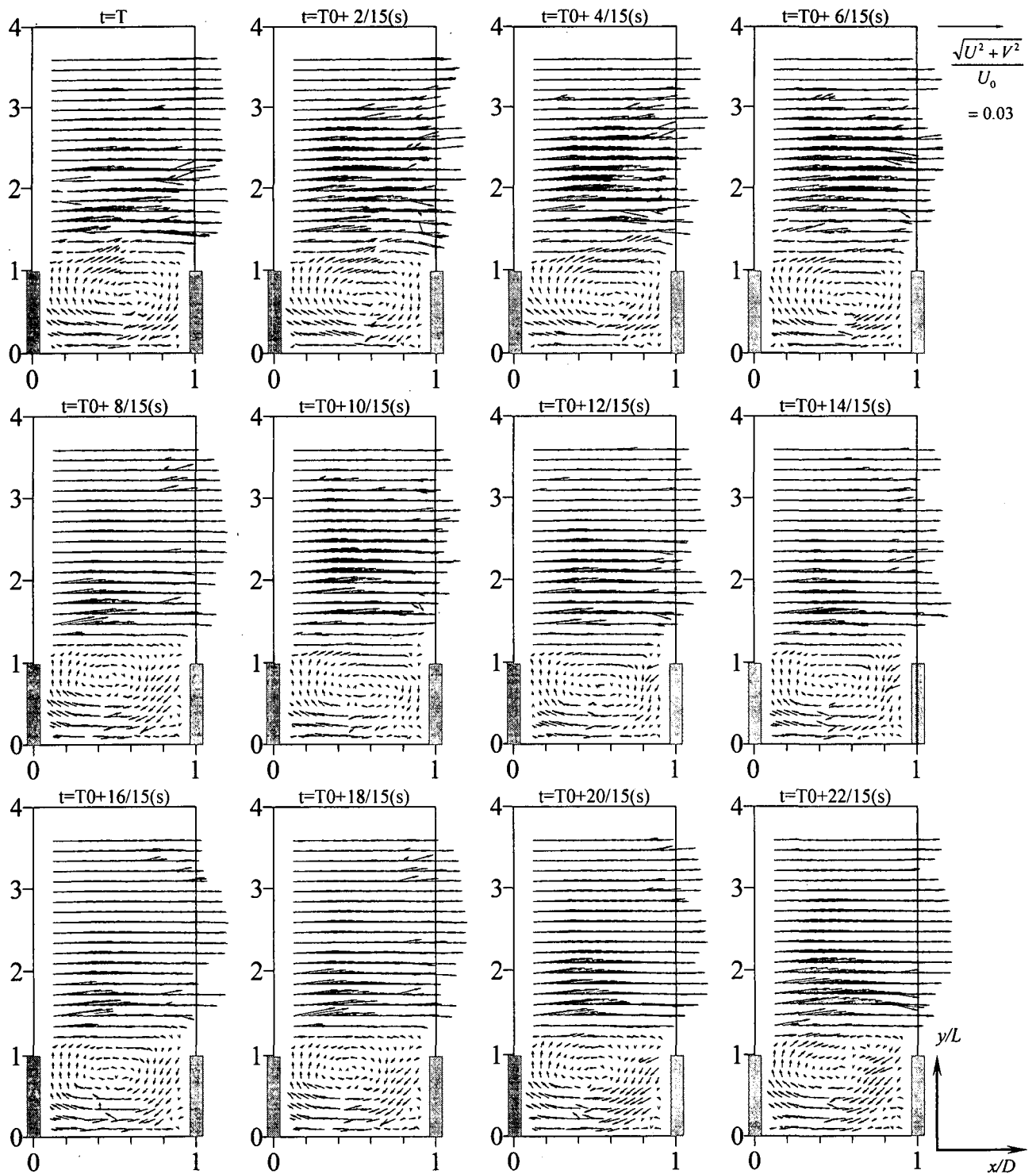


図-8 瞬間の速度分布 (ケース R₀-20)

3.4 流速変動特性

PIV による瞬間の速度分布で確かめられた水路両岸の渦の相互干渉について、流速の速度変動より検討するとつぎのようである。PIV を用い、計測点として鉛直方向には水路床からの高さを水深の 1/2、横方向には水路中央部 ($y/L=2.0$) と水制域境界 ($y/L=1.0, 3.0$) とし、流下方向には上流から 1~2 基の水制間の中点 ($x/D=0.5$) を選び、それぞれの点における速度の系時変化を求めた。

横断方向流速 v の計測結果を図-9 に示す。これよりつぎのことが知れる。すなわち、水面振動が顕著なケース R-20 の場合、各点での変動はきわめて周期的であることがわかる。また主流部中央および水制域境界ともに流速変動はほぼ同位相となっており、流速の振幅は同程度である。一方、水面振動が小さいケース R-30 の場合、水路中央部での流速変動はほとんど無くほぼゼロであるのに対して、右岸境界ではほぼ正の流速を、左岸境界ではほぼ負の流速が占めていることがわかる。

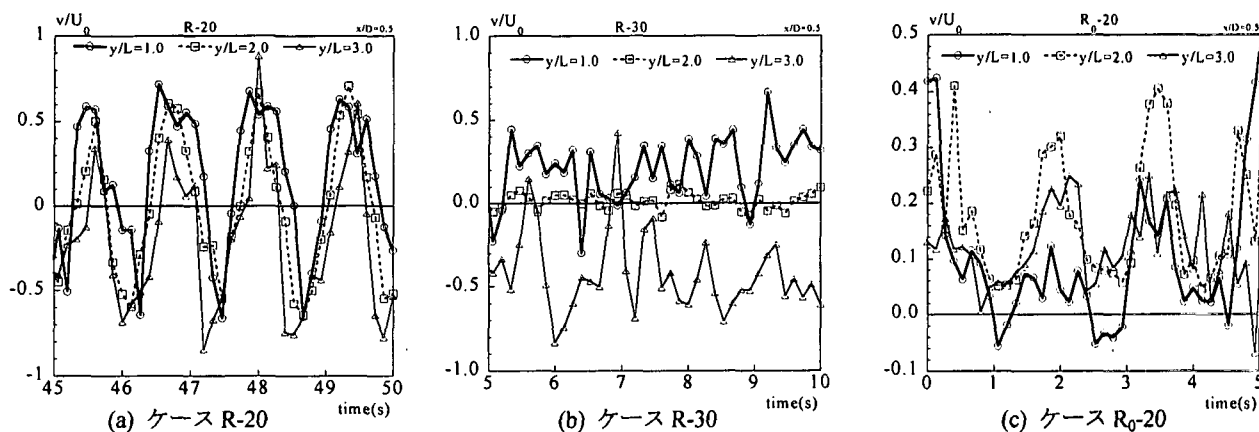


図-9 横断方向流速の系時変化

また各点での速度変動に明瞭な周期変動や位相差は確認されない。さらに、水制群を片岸に等間隔に設置したケース R_0-20 の場合には、各計測点ともほとんど水制域から主流部へ向かう正の流速を示すようになり、流速変動の周期は水面振動の周期とほぼ等しい。

以上の特性を瞬間の速度分布との関連で説明するとつぎの通りである。すなわち、水面振動の大きいケース $R-20$ では水路全幅にわたって流体が周期的に横断方向に移動しているのに対して、ケース $R-30$ では水路中央を越える流体塊の移動は小さい。さらにケース R_0-20 では、水制間中央部 ($x/d=0.5$) において、周期的に右岸から左岸へと向かう流れが生じるが、主流部から水制域へ向かう流れは小さいと考えられる。

4. おわりに

本研究は水面振動が顕著な場合とほとんど無い場合における水制域と主流域との相互干渉について、実験的に検討したものであって、本研究より得られた知見についてまとめると以下のようである。

- 1) 水面振動は、水制を水制長の2倍の等間隔に設置した場合、両岸に対称に設置すると顕著な水面振動が現れ、片岸のみの場合水面振動はほとんど生じない。水制群を水路両岸に設置した場合の水面振動の周期は、矩形容器内のスロッシングの固有周期とほぼ等しい。
- 2) 鉛直方向に軸を持つ時間平均化された渦度の空間分布から、水面振動が顕著な場合のケース $R-20$ には、水制先端部の渦度の等値線は流下するに従い下流側の水制前面から水制域内浸入する傾向を有する。一方、水面振動が小さい場合は主流部へと向かう傾向を有する。
- 3) 水制を対称に設置した場合、水辺面内における瞬間の速度ベクトルから、水面振動が大きいケースでは水制域内から流出した流れは水路中央を越えて対岸まで影響を及ぼしているのに対して、水面

振動が小さいケースでは対岸への影響は小さいことが観察された。

- 4) 顕著な水面振動が生じたケースの横断方向流速の変動は、水制を水制長の2倍で等間隔に設置した場合には水面振動と等しい周期が観察された。

今後は速度場と水面の同時計測を行い、周期的な渦の発生と水面の位相による渦の輸送状況、および水面振動の発生条件についても研究を進めたい。

参考文献

- 1) 松岡安正：大規模水制群内の水平渦，水工学論文集，第39巻，pp.773-778，1995。
- 2) 大本照憲・平川隆一・井手賢正：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。
- 3) 富永晃宏・井嶋康二・中野義郎：斜め越流型水制周辺の流れ構造のPIV解析，水工学論文集，第45巻，pp.379-384，2001。
- 4) 川口広司・岡信昌利・福岡捷二：越流型水制群に作用する流体力の特性，水工学論文集，第44巻，pp.1065-1070，2000。
- 5) 石垣泰輔・馬場康之：開水路流れに設置した台座付平板周りの流れと局所洗掘について，応用力学論文集，Vol.2，pp.657-664，1999。
- 6) 池田駿介・杉本高・吉池智明：不透水水制群を有する流れの水理特性に関する研究，土木学会論文集，No.656，pp.145-155，2000。
- 7) 今本博健・池野秀嗣：水制の水理機能に関する研究(1)，京大防災研究所年報，第17号B，pp.681-699，1974。
- 8) 大本照憲・平川隆一：非越流型水制群を伴う開水路流れの水面振動と乱れ特性，応用力学論文集，Vol.4，pp.533-540，2001。
- 9) 岡本孝司・斑目春樹・萩原剛：流れによる容器内の自励振動(第1報，実験結果)，日本機械学会論文集(C編)，57巻，pp.647-653，1991。
- 10) 大本照憲・平川隆一：非越流型水制群を有する開水路流れの乱流特性と水面振動，水工学論文集，第46巻，pp.469-474，2002。

(2002年4月19日 受付)