

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

TURBULENT FLOW AND FREE-SURFACE OSCILLATION IN AN OPEN CHANNEL WITH SPUR DIKES

大本照憲¹・平川隆一²

Terunori OHMOTO and Ryuichi HIRAKAWA

¹正会員 工博 熊本大学大学院助教授 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

²学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (同上)

Spur dikes are known to perform two functions. One is retardation of flow along a riverbank owing to their roughness. The other is the control of flow direction by splashing the water. Focus on the above two functions led to the use of dikes mainly for preventing bank erosion and destruction of revetments, modifying the alignment of low water channels, controlling flood for navigation and utilizing water. Interaction between cavity flow and main flow in an open channel with a series of non-submerged dikes has yet to be fully discussed. In this study, experiments were executed to clarify momentum exchanges between main flow and cavity flow. In the experiment, two-dimensional flow field in a horizontal cross-section was measured by PIV (particle image velocimetry). The results showed that prominent water surface oscillation happened in an arrangement of spur-dikes and have strong influence on turbulent flow characteristics and momentum exchange between spur dikes region and main flow one.

Key Words : *turbulent flow, non-submerged spur dikes, PIV, free surface oscillation*

1. はじめに

水制は、基本的には河岸近傍の流れに対する粗度としての流速低減効果および水はね作用としての流向制御効果の2つの働きがあることが知られている。その発展過程は、河川に対する認識や技術水準を鋭敏に反映することが指摘されており¹⁾、従来、両者の機能に着目し、河岸侵食や護岸破損の防御、低水路法線の修正、航路確保等の治水・利水を主目的に利用されてきた。さらに、近年では水制周辺の流れが変化に富むために河岸植生や水生生物にとって良好な環境が創造されることから、河道直線区間においても生態系の保全・修復を目的にした水制の設置が試みられている。

連続越流型水制群に関しては、越流型水制群の向きが水制域および主流域の河床変動や流れの三次元構造に与える影響について検討された研究^{2), 3), 4)}がある。非越流型水制群に関しては、固定床直線水路に単一水制を設置して水制周りの流れを調べたものや水路片岸に複数の水制を設置したもの⁵⁾、水制群の設置間隔を変化させたもの⁶⁾などがある。しかしながら、水制を設置することによって水制域に水面振動が発生した場合には不明な点が多く、水面振動の流れ場に与える影響について検討した

研究は少ない。

筆者等⁷⁾は、非越流型直角水制群を水路両岸に対称に設置した流れ場に於いて実験を行い、水制群先頭部の1基目と2基目の水制間隔を系統的に変化させた場合、水制設置間における水面変動が大きく異なり、水制群中央部の11基目~12基目における水面振動は、1基目と2基目の水制間隔が水制長の偶数倍で大きく、奇数倍で小さくなる傾向があることを明らかにした。また、上流より11基目~12基目の水制間における流れ場をPIV (Particle Image Velocimetry) を用いて計測を行い、水面振動の強い場合と弱い場合における流れの特性について検討した。水制域全体に生じる水面振動は、両岸の水制域に発生した大規模渦の相互干渉によるものであり、水制1基目の背後に発生した剥離渦が引き金になったと考えられる。

本研究では水制群先端部の1基目と2基目の水制間隔を変化させることによって水面振動が大きく異なることに着目し、PIV法を用いて流れ場の詳細な計測を行い、水制群先端部に発生した水面振動が平均流特性や乱れ特性、水路両岸の渦の相互干渉、ならびに水制域と主流域の境界における運動量交換に与える影響について検討を行った。

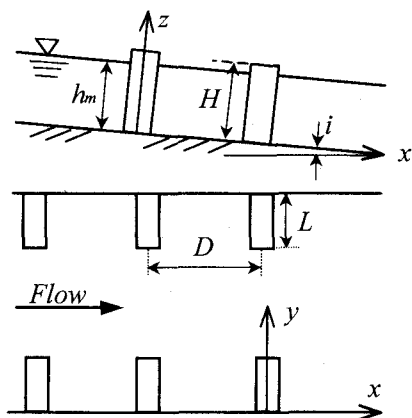


図-1 水制配置図

2. 実験装置および実験方法

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、側壁からレーザー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 軸とし、それぞれに対応した流速成分を u および v 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、水路両岸に対して直角に其々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倍にあたる $D=20\text{cm}$ としている。流量は $Q=2.0\text{ l/s}$ に設定し、下流端の堰を調整することによって、11基目の水制設置断面水路中央の水深を $h_m=4\text{cm}$ とした。

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レーザー（出力25mJ）を用いた。シート光の厚さを1mm、パルス間隔を $5000\mu\text{s}$ 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。レーザー光と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), 960×1018 (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、PIV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。流速のサンプリング周波数は15Hz、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 $30\mu\text{m}$ 、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基目の水制間および11期目と12期目の水制間である。

水面変動の計測には、超音波変位計（KEYENCE製UD-500）を使用した。その際、超音波変位計をそのまま使用すると空間分解能は2cm程度だったため、センサをアルミ製の円筒に装着し、空間分解能を8mmまで向上させている。計測結果は、サンプリング周波数20Hz、1

表-1 実験条件

項目	R-20	R-30
水路勾配 i	1/1000	1/1000
流量 $Q(\text{l/s})$	2.0	2.0
水路幅 $W(\text{cm})$	40	40
水深 $h_m(\text{cm})$	4	4
水制長 $L(\text{cm})$	10	10
水制高 $H(\text{cm})$	7.5	7.5
水制設置間隔 $D(\text{cm})$	1~2基間	20
	2基目以降	20
代表流速 $U_1(\text{cm/s})$	25	25
フルード数 Fr	0.4	0.4

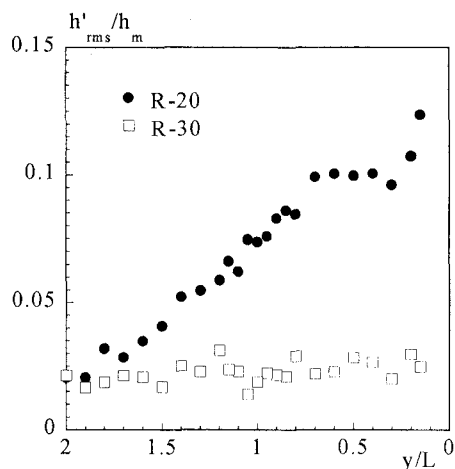


図-2 水面振動の標準偏差の横断分布
(11~12基間)

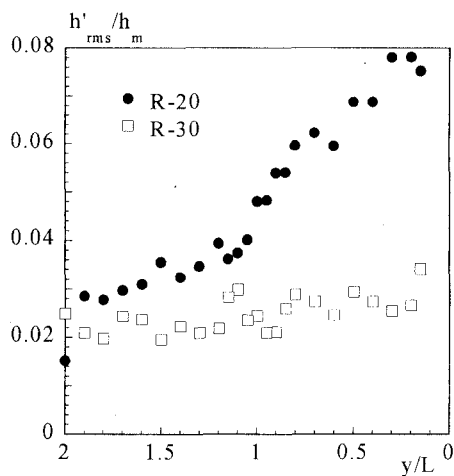


図-3 水面振動の標準偏差の横断分布
(1~2基間)

測点のデータ個数は512に設定した。

3. 水面振動特性

総数42基の水制を水路両岸に直角に設置した。但し、水制群先頭部の1基目と2基目の水制間隔 D のみを変え、

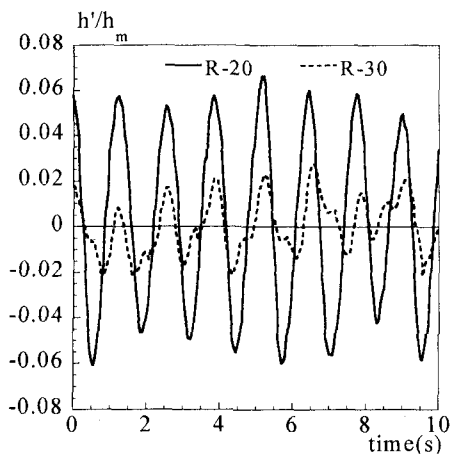


図4 水面振動の経時変化

$D=20\text{cm}$ と 30cm の2種類について比較する。まず、水制域全体の水面振動の特徴を見るために、水制群中央部にあたる11基目~12基目において水面振動を計測した⁷⁾。そのときの水面振動の標準偏差の横断分布を図-2に示す。これより、上流側の水制設置間隔を水制長の2倍にした方が、水制長の3倍で設置したときよりも水制域内に生じる水面振動が大きくなることが分かる。

水制群中央部におけるこのような現象は、水制群設置領域の上流にあたる水制1基目において水面振動を引き起こす原因のあることが予想される。

1基目と2基目の水制間中央部における水面振動の標準偏差の横断分布を図-3に示す。11基目~12基目の水面振動に比べるとケースR-20の水制域内における水面振動は約3/4程度に抑えられてはいるが、それでもケースR-30より水面振動は大きくなる。このときの水面振動の経時変化を図-4に示す。計測位置は水制群1基目根付け部($x/D=0.1$, $y/L=0.2$)である。両ケースとも振動は周期的であるが、振幅が異なる。水制群先頭部の間隔を 30cm にしたケースR-30の場合には、水面振動の振幅は高々水深の約4%であるのに対し、水制間隔を 20cm に設置したケースR-20の場合には、振幅は水深の12%まで達している。

水面振動の周期特性を調べるために、スペクトル解析を行った。一例として、図-5に水制1基目における水面振動のスペクトルを示す。水面振動が大きいケースR-20では明瞭な卓越周波数が現れており、その周期 T は約1.3秒である。水面振動が小さいケースR-30においても周期は約1.3秒のピークが現れて、さらに約1.7秒のサブピークも存在していることが認められる。

4. 平均流特性

ケースR-20とR-30における主流速 U の等値線を図-6に示す。図より、両ケースとも水路中央部で流速はもっとも大きく、水制域内に於いては強い逆流が存在している

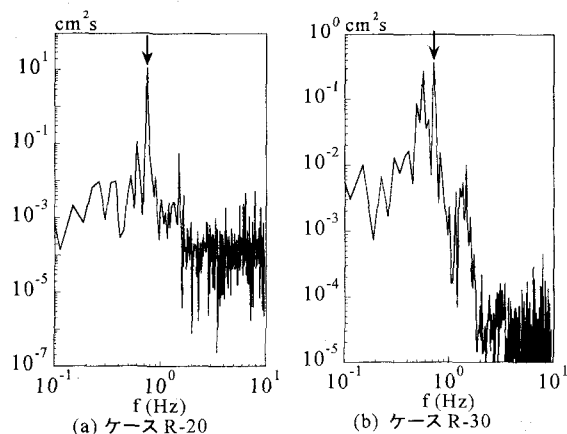


図5 水面振動のスペクトル分布

ことが分かる。ケースR-30の水制域内では、水制背後の根付け部において正の領域も存在している。

図-7には、水制群中央部($x/D=0.5$)での主流速の横断分布を示す。水面振動が強い場合R-20と弱い場合R-30において水制域内の主流速に顕著な差は無いが、主流域では、R-20に較べてR-30で大きくなることが認められる。

横断方向の流速成分 V の等値線を図-8に示す。図より横断方向流速成分は、顕著な水面振動が生じたケースR-20では、ほぼ水制間中央部($x/D=0.5$)を境にして、それより下流側では水制域内へ流入する形態を取り、上流側では逆に水制域から主流部へと流出する形態を取っていることが分かる。水面振動が弱いR-30では、水制間中央部より若干下流側の $x/D=0.6$ 付近を境にして、それより下流側で水制域内へ、上流側で水制域から主流部へ流れの向きを取る。また、水路右岸側に於ける極大値の発生位置は、ケースR-20では $x/D=0.15$ であるのに対して、ケースR-30ではケースR-20よりも下流側の $x/D=0.27$ に位置する。

図-9には、横断方向流速の極大値発生位置における横断分布を示す。極値の発生位置は両ケースとも水制先端から水制長の約40%水制域内に入ったところに現れている。極大値の大きさは、水面振動が顕著に現れたR-20では水面振動が弱いR-30の約1.5倍である。また、主流部の $y/L=1.5\sim 2.5$ においては横断方向流速はR-30では微弱であるのに対してR-20では横断方向に中央でゼロとなる直線分布で無視できないことが分かる。

レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の等値線を図-10に示す。水制域と主流部の境界近傍に発生した極大値は流下方向に減少傾向を示しており、その位置は水面振動が顕著に現れたケースR-20では、下流側の水制前面で水制域内に入り込み、R-30では逆に流下とともに主流部に向かっていることが認められる。

図-11には、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断分布を示す。 x 座標は極大値が現れた位置である。この図より、極大値の発生位置は両ケースとも水制先端より水制長の約30%主流部側に在り、その大きさは水面振動が生じたケ

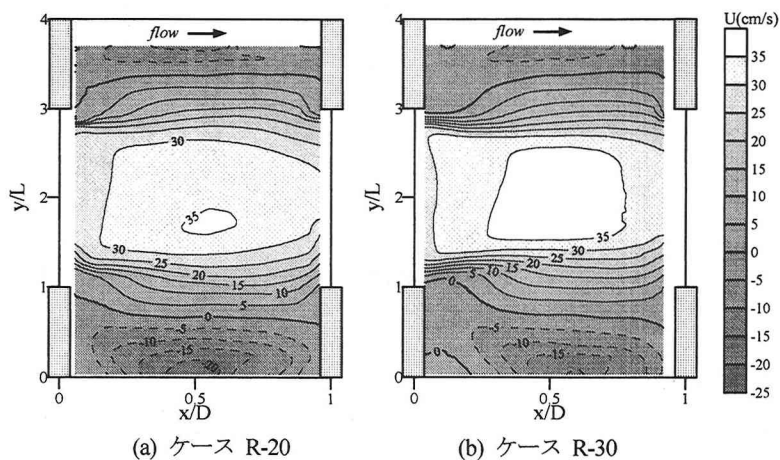


図-6 主流速の等値線

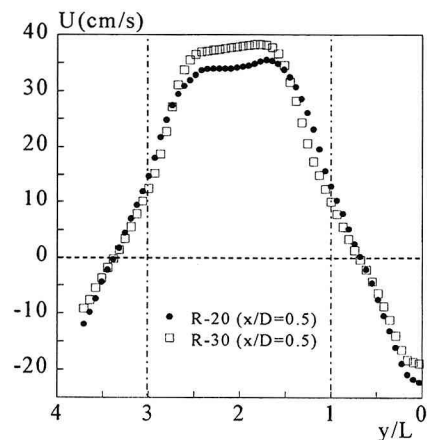


図-7 主流速の横断分布

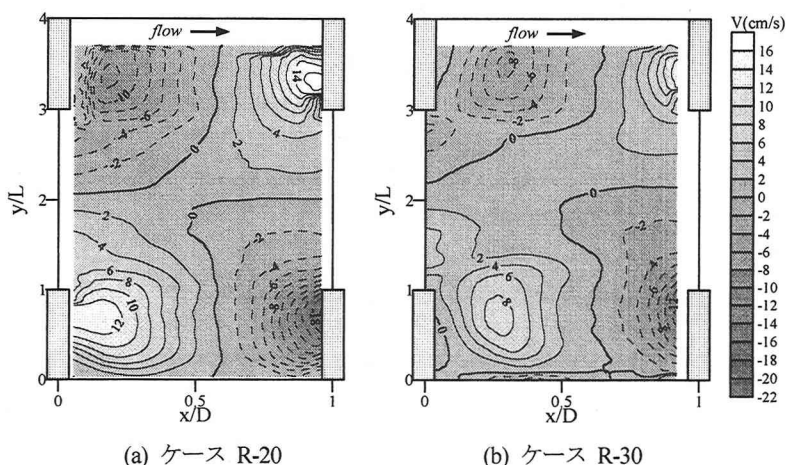


図-8 横断方向流速の等値線

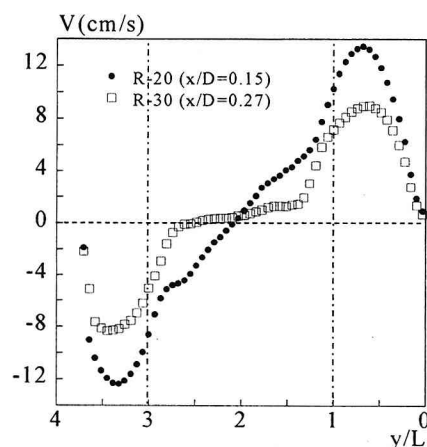


図-9 横断方向流速の横断分布

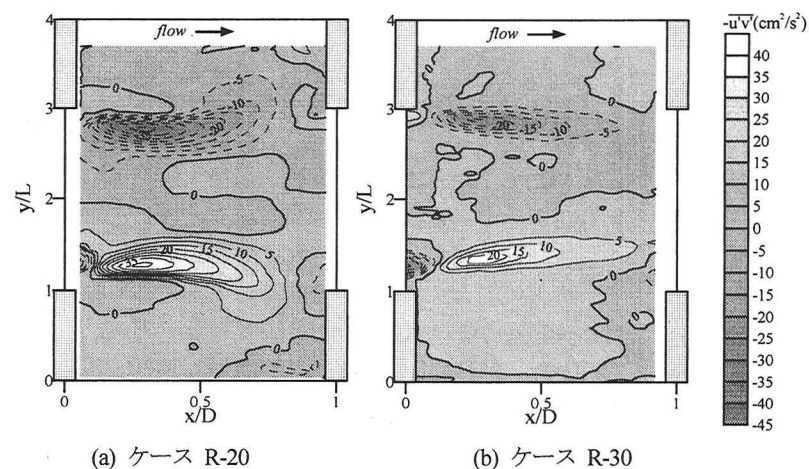


図-10 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の等値線

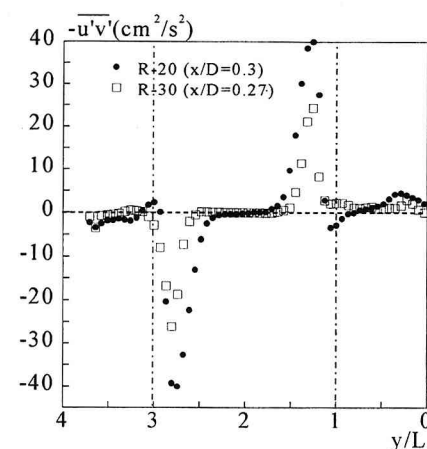


図-11 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断分布

ースR-20は水面振動が弱いR-30の1.6倍にも達する。

水制先端部を結んだ主流域と水制域の境界における水制一区間の運動量輸送は、池田・陳⁵⁾と同様に、次式で検討する。

$$\theta = \frac{1}{\rho U_m^2 D} \int_0^D \rho \overline{uv} dx$$

$$= \frac{1}{\rho U_m^2 D} \int_0^D \rho (UV + \overline{u'v'}) dx \quad (1)$$

図-12,13には、式(1)より求められた運動量輸送 θ を示す。ここでは、移流による運動量輸送 UV と乱れによる運動量輸送 $\overline{u'v'}$ および両者を併せた全運動量輸送 $(UV + \overline{u'v'})$ に分けて表示しており、水制域内から主流部への輸送を正としている。図-12より、水制群中央部にお

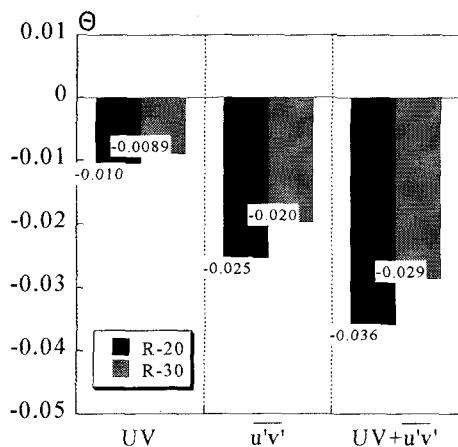


図-12 水制域境界における運動量輸送
(11~12基間)

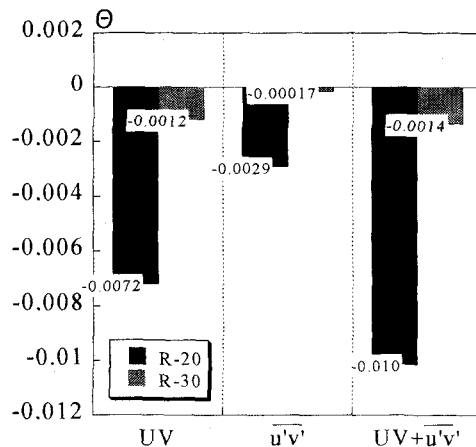


図-13 水制域境界における運動量輸送
(1~2基間)

ける運動量輸送は、乱れによる運動量輸送 $\overline{u'v'}$ が卓越している⁷⁾。また、水制域内へ運び込まれる運動量は、水面振動が弱いR-30に比べて水面振動が強いR-20の方が大きい。図-13の水制群先端部における運動量輸送は、移流による運動量輸送 UV に関しては水面振動が大きいケースR-20は水面振動が小さいケースR-30の6倍大きく、乱れによる運動量輸送 $\overline{u'v'}$ に関してはR-20はR-30の18倍にも達する。 UV と $\overline{u'v'}$ による運動量輸送を比較すれば、水面振動が強弱を問わず、移流による運動量輸送 UV が卓越していることが分かる。これは、水制群中央部における運動量輸送の形態とは異なる。移流による運動量輸送と乱れによる運動量輸送を合わせた $(UV + \overline{u'v'})$ では、水制域境界面を通して水制域内に運び込まれる運動量は水面振動が弱いR-30に比べて水面振動が強いR-20で大きくなることが分かる。

5. 瞬間渦度分布

水面振動の発生は、水路兩岸の渦の相互干渉によることが予想される。図-14に水面振動が発生したケースR-20のPIV解析によって得られた鉛直方向に軸を持つ渦度の瞬間分布を示す。図より、水制先端部で剥離した渦は、時間の経過と共に下流側の水制先端部へ向かって拡大しながら移流していくのが分かる。水制域内に於いては、水制根付け部では逆回転の補償渦が生じている。また、兩岸の水制先端部背後に注目すると、渦度の大きくなるのは左右交互であり、その周期は約0.6秒であることから、水面振動の周期の約半分である。

図-15には、水面振動が弱いR-30の瞬間渦度分布を示す。図より、水制先端部より若干主流側で渦度は大きくなり、その分布は側岸に平行に流下方向へと漸減している。水制域内に於いては $x/D < 0.3$ においてはその下流側とは渦度が逆符号を示し、逆回転の補償渦の空間スケ-

ルがR-20に比べて大きい。また兩岸の水制先端部では、R-20と異なり、時間変動は小さく常に渦度の大きい領域が存在している。

6. 結論

本研究では、水制群先端部に発生した水面振動が平均流や乱れの特長、水路兩岸の渦の相互干渉、ならびに水制域と主流域の境界における運動量交換に与える影響について検討を行った。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 非越流型直角水制群を水路兩岸に対称に設置し、兩岸の渦の相互干渉が強い場合には規則的な水面振動が発生し、水制設置区間の上流域では水制間隔の水制長の対する比 D/L が2の場合には、 $D/L=3$ に比べて振幅は3倍の値を示した。
- (2) 1基目と2基目の水制間において、水面振動の主流速 U への影響は小さい。しかし、水面振動の横断方向の時間平均流速成分 V への影響は強く、 V の極大値は水面振動が弱い場合R-30に比べて、水面振動が強い場合R-20では1.5倍の大きさを示した。
- (3) 水制域と主流部の境界における運動量の交換は、水面振動が弱いR-30に比べて水面振動が強いR-20で大きい。乱れによる運動量輸送 $\overline{u'v'}$ の極大値は、R-20ではR-30の1.6倍であった。また、移流による運動量輸送 UV については、R-20はR-30の6倍に達する。
- (4) 瞬間渦度の時系列分布から、水面振動が強いR-20では鉛直方向に軸を持つ渦が兩岸から左右交互に規則的に発生し水面振動と強い相関を示すのに対して、水面振動が弱いR-30では定常的に水制域と主流部の境界において強い渦が発生することが認められた。

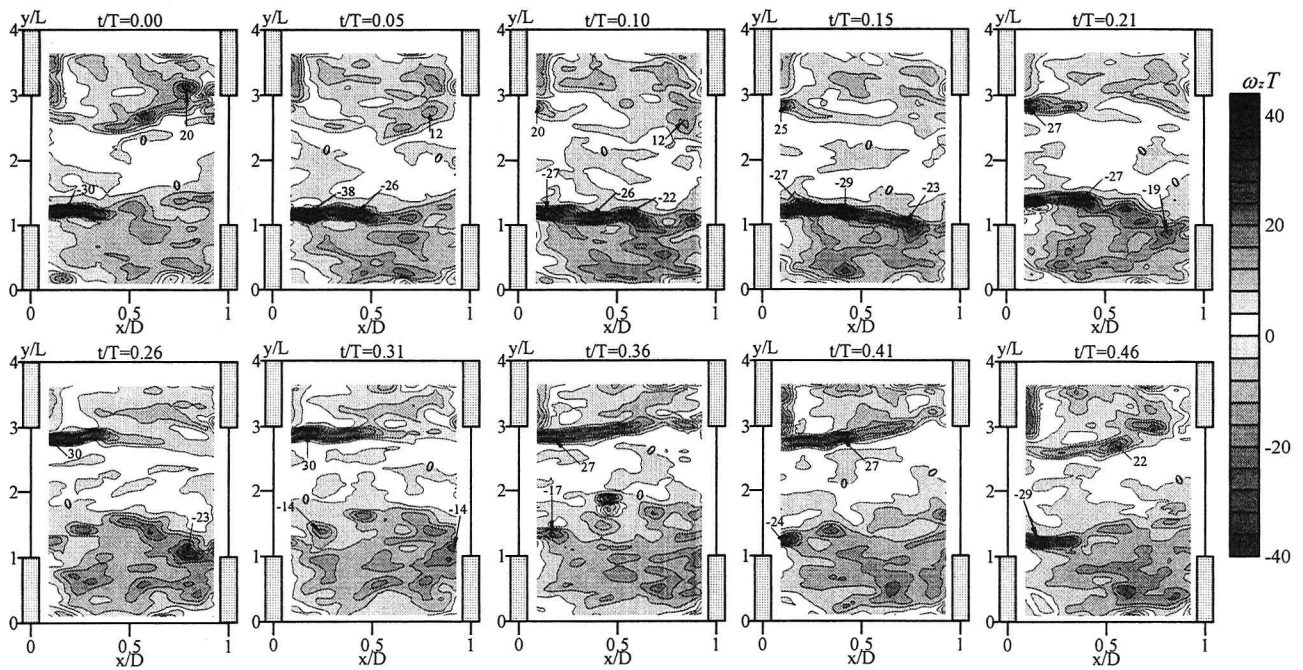


図-14 瞬間渦度分布 (ケースR-20)

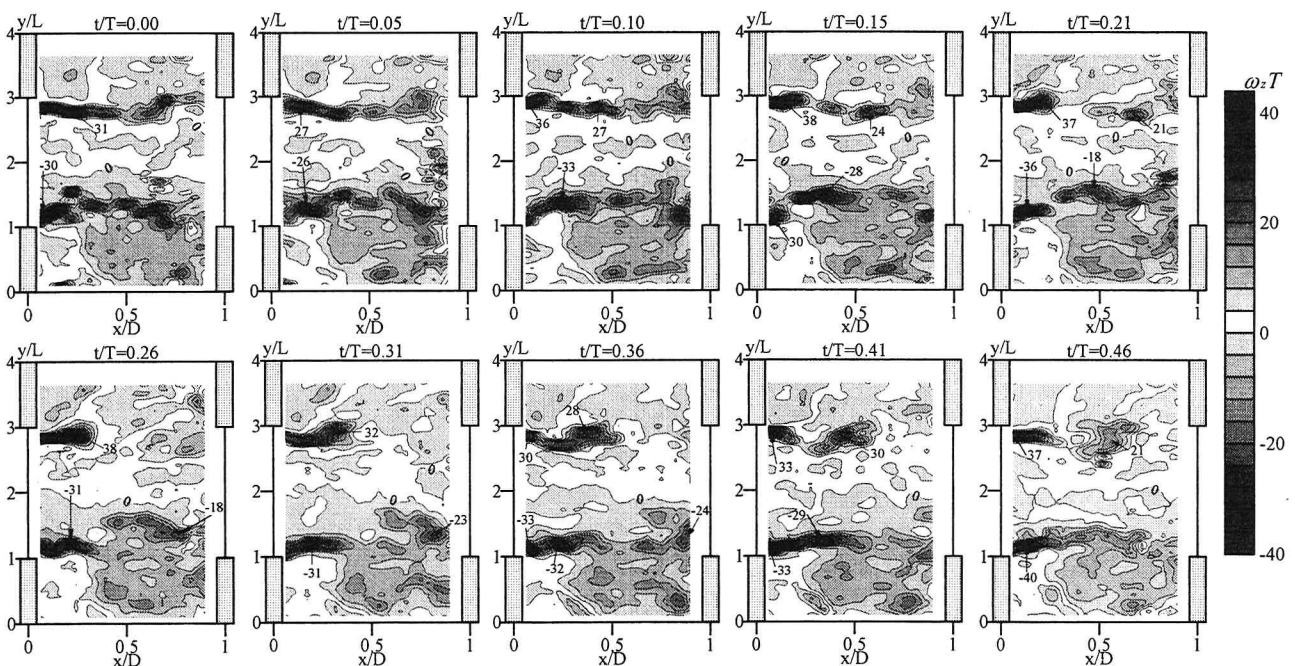


図-15 瞬間渦度分布 (ケースR-30)

参考文献

- 1) 山本晃一：日本の水制，山海堂，1996.
- 2) 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.
- 3) 大本照憲，平川隆一：越流型水制群を有する開水路流れの三次元構造，応用力学論文集，Vol.2，pp.665-672，1999.
- 4) 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.
- 5) 陳飛勇，池田駿介：水制周りの水平剥離渦の構造に関する実験的研究，水工学論文集，第40巻，pp.787-792，1996.
- 6) 池田駿介，杉本高，吉池智明：不透過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) 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.

(2001. 10. 1受付)