

非越流型水制群を伴う開水路流れの水面振動に関する研究

Water Surface Oscillation in an Open Channel with a Series of Spur Dikes

大本照憲*・平川隆一**

Terunori OHMOTO and Ryuichi HIRAKAWA

*正会員 工博 熊本大学助教授 大学院自然科学研究科

**正会員 博(工) 熊本大学 工学部環境システム工学科

Water surface oscillation was produced in dikes fields when non-submerged spur dikes were set up. 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, a growth mechanism of the water surface oscillation caused by the mutual interference of large eddies in both spur dikes fields was examined. The result showed that the frequency was measured to be the same as the first-order eigenvalue of the oscillation.

Key Words : spur dikes, water surface oscillation, wave, interaction

1. はじめに

河川の堤防周辺における流速低減あるいは流行制御などを目的としてこれまでに各種の水制が用いられてきた。これらの機能を効果的に発揮させるために、従来数多くの水制工法が提案・実施されてきている。開水路両岸に不透過水制を設置した場合、水制域内の側岸部において水面の振動現象が生ずる場合があることが指摘されている¹⁾。実河川において水面が振動した場合それに隣接する側岸部の浸食の原因となりうる。

水面振動を有する流れについては、機械工学の分野では水平平面噴流²⁾、自由液面に潜り込む噴流³⁾および上向き平面噴流⁴⁾などが扱われている。土木の分野では、海洋、河川やダム⁵⁾の問題として扱われてきているが、このような現象では水面振動が流下方向に生じた流れである。筆者ら⁶⁾は非越流型不透過構造水制で、比較的長い水制長を持ち、かつ水路両岸に対称に設置した水制群を有する流れにおいて、水路中央に1つの節をもち、水路両岸が節となる水面振動が横断方向に発生することを指摘した。そこでは電磁流速計、PIV (Particle Image Velocimetry) および超音波変位計を用い、上流端の水制設置間隔を系統的に変化させることによって、主流に対して横断方向の水面振動が顕著に生じたケースとそうで

ないケースについて流れ場の計測を行ってきた。しかしながら、水面振動の発生原因については明らかにはされていない。水制域内に発生する水面振動は、水制1基目背後に発生した渦が引き金となり、それよりも下流側における両岸の渦の相互干渉によって引き起こされていることが予想される。

本研究では固定床上に多数個設置された非越流不透過水制を対象とし、水制群全体で両岸の渦の相互干渉がある場合と無い場合、および水制群先端部でのみ両岸の渦の相互干渉があり下流側では干渉がない場合において、水面振動の横断方向ならびに流下方向特性について実験的検討を行った。

2. 実験装置および方法

本研究に用いた実験水路は、幅 40 cm、深さ 20 cm、長さ 10 m の長方形断面アクリル製直線水路であって、水路勾配は水路の下流側に設けられたジャッキにより任意に変えられるが、本実験においては 1/1,000 の一定値に保たれている。下部貯水槽の水をポンプでヘッドタンクにくみ上げ、オーバーフローによりヘッドタンク水位を一定に保つ。ヘッドタンクの水は、流量調整弁、整流板を経て実験水路に導かれる。ヘッドタンクと実験水路のヘッド差は約 2 m である。このヘッド差および流量調整弁により任

意の一定流量を実験水路に供給することができる。流入水流にはポンプ等による圧力脈動の変化は見られない。実験水路下流から流出した水は下流部のバケツに入り、下部の貯水槽に戻る。実験水路の水位は、水路下流端に設けられた堰の高さを調整することにより任意の水位を得ることができる。

実験水路には水制群の上流側に 3 m の助走区間を設け、流れを発達させて水制群設置領域に流入させる。また、水制群下流側にも最低 3 m の助走区間を設けた。実験水路は底面、側面とも可視化のため板厚 20 mm のアクリル板を用いて矩形水路を形成している。

水路に通水した流量は、表-1 に示すように毎秒 2 リットルおよび 3 リットルであった。

非越流不透水制のモデルとして厚さ 20 mm のステンレス片を使用し、今回の実験で用いた水制長は $L = 10$ cm とした。水制の個数は表-1 に示すとおりである。兩岸に位置する水制は左右対称に設置されており、case 21-2 および case 21-1 は左岸上流部の個数がそれぞれ 2 基と 1 基であることを表している。なお、流下方向への水制設置間隔 D は水制長 L の 2 倍に固定している。

水深は、液面形状が完全な水平にならないことから、水制 1 基目の水制設置断面の水路中央における水深をもって設定水深とし、各ケースで一致させた。

計測は、上流より 1 基目～2 基目の水深および水制群全体の側岸部における水深を超音波変位計 (KEYENCE 社製 UD-500) で計測した。超音波変位計の計測範囲は約 200 mm、応答速度は 18 ms 以下で、振動周期の約 1 s に対して十分な応答速度である。その際、超音波変位計をそのまま使用すると空間分解能が 2 cm 程度であったため、外径 2 cm のセンサに内径 8 mm の銅管を装着し、空間分解能を約 8 mm 程度にまで向上させている。また、1 基～2 基間と水制群中央部に当たる 11 基～12 基間の全体の流況を、ツイン Nd:YAG パルスレーザ、および CCD カメラ (MEGAPLUS ES1.0) により、パーソナルコンピュータのハードディスクに記録した。ハードディスクに記録した画像は計算機でデジタル化し、画像処理を施すことによって流速分布を求めた。流速分布は、流れにトレーサとして径 30 μ m のナイロン粒子 (比重 1.02) を流し、PIV 法によって算出した。計測断面は、図-1 に示す座標系において、鉛直方向の中心断面 (x - y 断面) とした。ここに、画像の 1 pixel の最小サイズは、約 0.4 mm である。

表-1 実験条件

case	21-21	21-2	21-1	21-0	2-2
右岸水制個数	21	21	21	21	2
左岸水制個数	21	2	1	0	2
流量 (ℓ/s)	2.0	2.0	2.0	3.0	2.0
設定水深 (cm)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
フルード数	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34

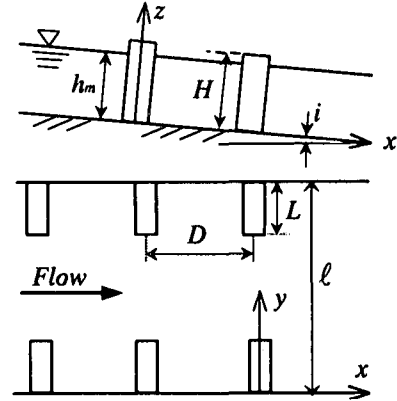


図-1 水制配置概略

3. 実験結果

3.1 水面振動

超音波変位計を 1～2 基間において横断方向に設置し、水面振動の 4 点同時計測を行った。その結果を図-2～6 に示す。計測位置は右岸近傍 ($y=2$ cm)、水制域境界 ($y=10$ cm)、水路中央 ($y=20$ cm)、および左岸近傍 ($y=38$ cm) である。図-2 の水制群を水路兩岸に 21 基ずつ設置した case 21-21 の水面振動は、水路中央に 1 つの節をもつ左右逆位相の振動であることが分かる。水面振動の周波数は 0.78 Hz である。図-3 の左岸の水制を 2 基とし 3 基目以降を片岸とした case 21-2 の水面振動も水路中央に節が 1 つ存在している左右逆位相の振動であり、その周波数は 0.78 Hz である。図-4 の先頭部左岸の水制を 1 基とし右岸の水制数を 21 基とした case 21-1 では、横断方向に節は存在しておらず、左右同位相の振動が生じている。これは、右岸 1 基目背後には水制間隔スケールの渦が存在しているのに対して、左岸 1 基目背後には、2 基目以降の水制が存在し無いため水制先端からの剥離による渦が存在し、兩岸の渦スケールが異なるために兩岸の渦の相互干渉が弱まったと考えられる。水面振動の周波数は 0.73 Hz であり、他のケースに較べて若干小さくなる。図-5 の水制群を片岸のみに設置した case 21-0 では、水路中央に 1 つの節

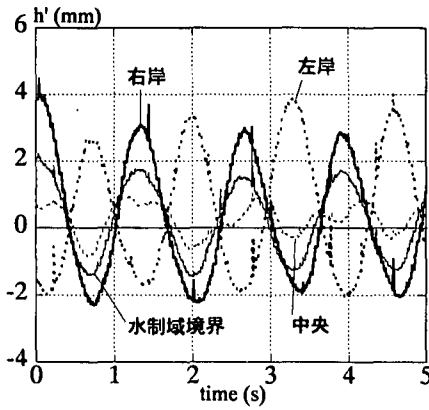


図-2 水面振動時系列 (case 21-21)

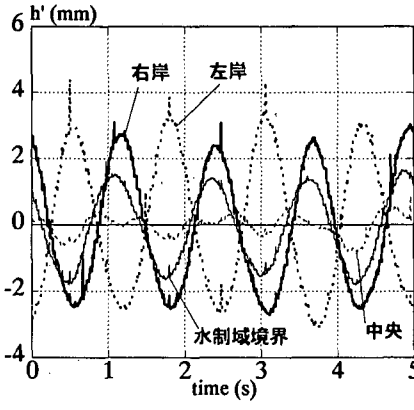


図-3 水面振動時系列 (case 21-2)

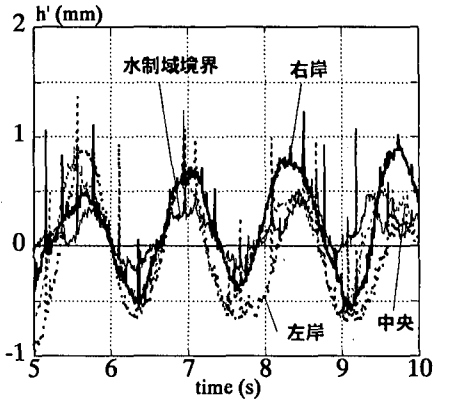


図-4 水面振動時系列 (case 21-1)

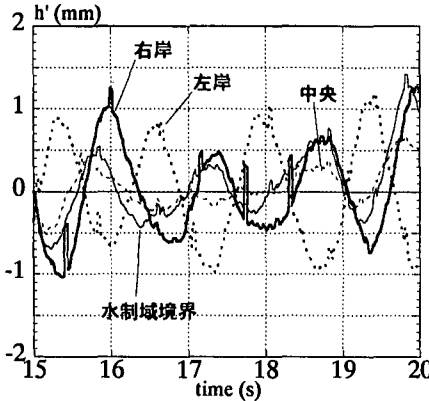


図-5 水面振動時系列 (case 21-0)

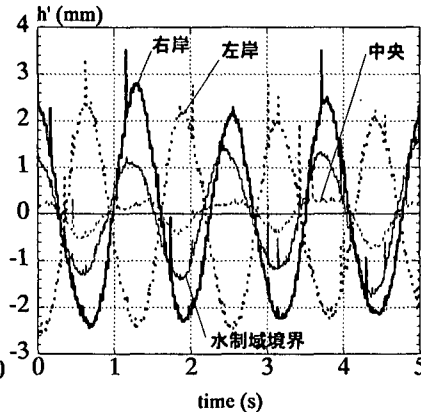


図-6 水面振動時系列 (case 2-2)

—— 右岸 (y = 2 cm)
 —— 水制域境界 (y = 10 cm)
 - - - 中央 (y = 20 cm)
 ····· 左岸 (y = 38 cm)

が存在する水路両岸で逆位相の振動であり、その周波数は0.78 Hzである。図-6の水制を両岸に2基ずつ設置したcase 2-2では、水面振動の周波数は0.78 Hzであり、左右逆位相の振動が生じている。上流端における水面振動の大きさは、case 21-21で最も大きく、続いてcase 21-2とcase 2-2が同程度であり、次にcase 21-1とcase 21-0が同程度であり、それぞれ水制群全体で両岸の渦の相互干渉がある場合、上流部のみで干渉がある場合、および水制群全体で干渉がない場合に対応している。

次に、水面振動の水制群全体における流下方向特性について見るために、流下方向の各水制間中央部に超音波変位計を等間隔で設置した。横断方向の設置位置は、水面振動の振幅が最も大きく生じていた側岸部である。

図-7には、超音波変位計から得られた各水制間中央部における平均水深 H_d の流下方向変化を示す。これより、いずれのケースにおいても、1~2基間より2~3基間で水位が上昇し、3~4基間で下降することが分かる。しかしながら、4~5基間以降では、水面振動が最も顕著に表れたcase 21-21では流下するに従い全体的に水位は下降傾向にある。それに対して、水面振動がほとんど見られなかったそれ以外のケースにおいては、水位は流下方向へ増大する傾

向にあることがわかる。

図-8には、側岸部における水面振動の振幅 A の流下方向変化を示す。ここでの振幅 A は、図-7に示した各水制間での平均水深 H_d を用いて無次元化している。これより、水制群の配置によって水面振動の振幅は全く異なることが分かる。すなわち、水路両岸に21基ずつ設置したcase 21-21では、上流端から中央部にかけて振幅は大きくなり、中央部から下流端にかけては、13基目~14基目間 ($x=250$ cm) で振幅が減少している箇所があるが、全体的に振幅は小さくなっていく。これに対して、上流部のみを両岸に設置したcase 21-2およびcase 2-2は上流端での振幅は平均水深の約10%程度であり、流下するに従い小さくなり、中央部から下流端にかけてはほとんど振動が見られない。これは、上流部のみ両岸の渦の相互干渉を引き起こしているためだと考えられる。case 21-1では、2基目から4基目にかけて振幅が他の水制位置に比べてやや大きくなるが、それでも平均水深の約4%程度であり、水面振動はほとんど生じていない。一方、水路片岸のみに水制群を設置したcase 21-0では、水制設置領域全体に亘って顕著な水面振動は見られない。これは水制群全体に亘って両岸の渦の相互干渉が無いためであると考えられる。

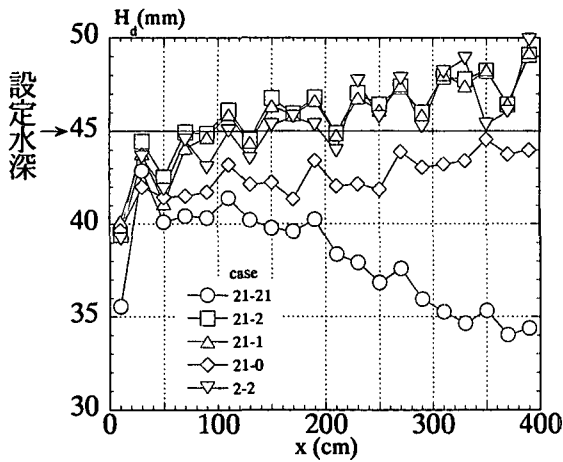


図-7 水深の流下方向変化 (y=2cm)

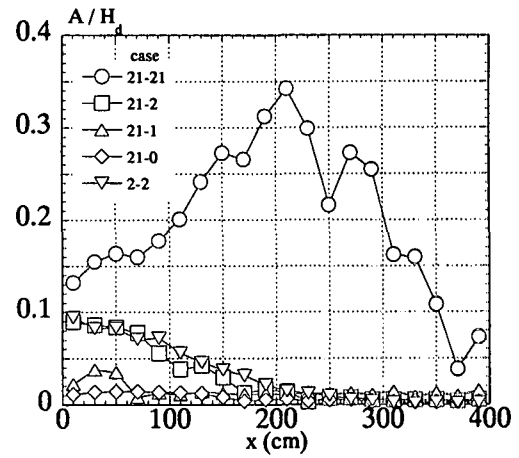


図-8 振幅の流下方向変化 (y=2cm)

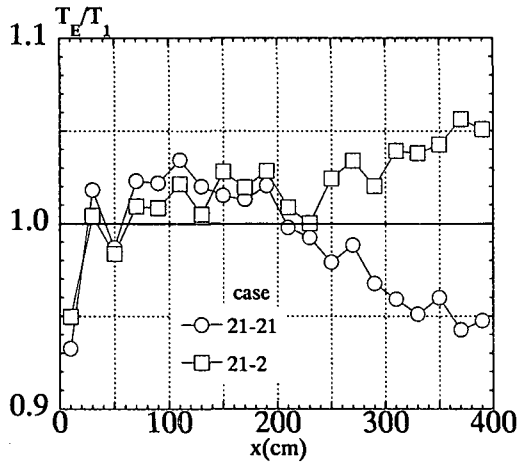


図-9 水面振動周期の流下方向変化 (y=2cm)

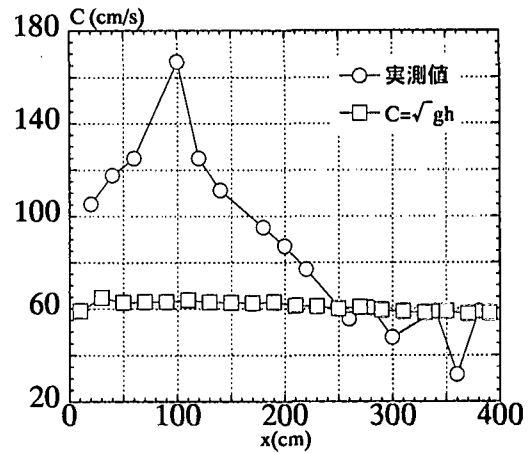


図-10 波速の流下方向変化 (case 21-21, y=2cm)

先頭部において、顕著な水面振動が生じた case 21-21 と case 21-2 において、超音波変位計のデータから各水制域内の水面振動の周期 T_E を求めた。

水路幅 l 、水深 h が与えられた容器内の液面揺動の 1 次の固有振動数 ω_1 は、次式で表される⁷⁾。

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\pi g}{l} \tanh\left(\frac{\pi h}{l}\right)} \quad (1)$$

本実験においては、水深は波長の約 5 % 程度であり、浅水波と見なすことができ、 $\pi h/l \rightarrow 0$ においては $\tanh \pi h/l \rightarrow \pi h/l$ より、この 1 次の固有周期 T_1 は

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2l}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

で与えられることがわかる。この周期は、閉鎖性水域の固有振動であるセイシュの振動周期とよく一致

することが知られている。

図-9 に実験結果 T_E を式 (2) で得られる T_1 を用いて無次元化を行ったものの流下方向変化を示す。各ケースの周期は、水制群先端部を除くと水制群中央部までは固有周期の約 2 % 程度長くなっている。12 基目以降においては、水制群を両岸に設置した case 21-21 の周期は、固有周期に較べて徐々に短くなる傾向を有し、水制群先頭部のみを両岸とした case 21-2 では、固有周期よりも長くなっていく傾向にあることが分かる。しかしながら、各ケースとも T_1 の約 ± 6 % 内にあり、いずれの振動数も流れのない場合の一次の固有周期すなわちセイシュの周期に等しいと考えてよい。

図-10 には、水制群を水路両岸に設置した case 21-21 において、流下方向に等間隔に設置した超音波変位計のラグタイムから求めた波速を示す。上流から 13 基にかけては $\sqrt{gh}$ に近づき、それより下流側では $\sqrt{gh}$ よりも遅くなっていることが分かる。

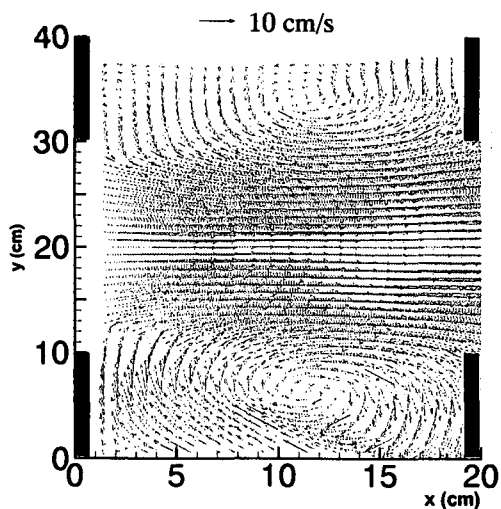


図-11 上流部の速度分布 (case 21-21)

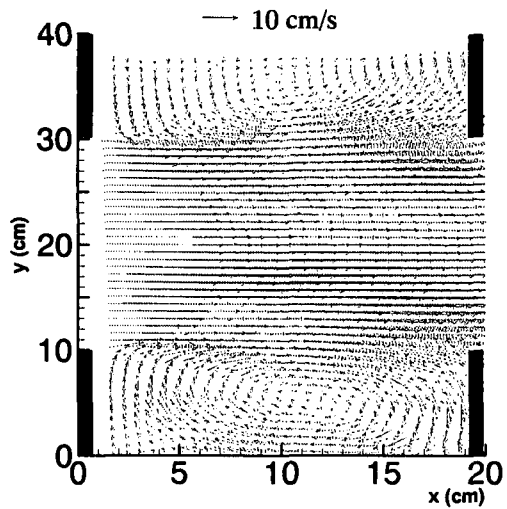


図-12 中央部の速度分布 (case 21-21)

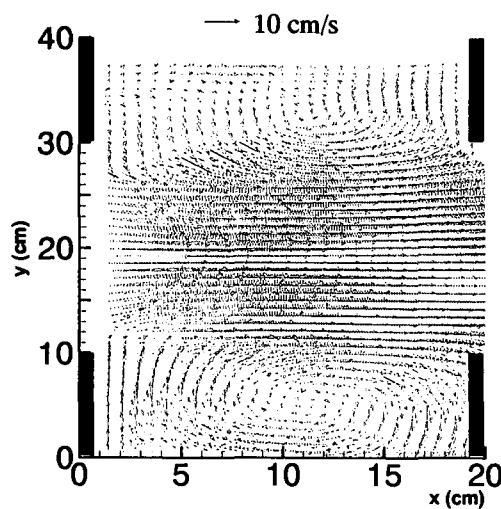


図-13 上流部の速度分布 (case 21-2)

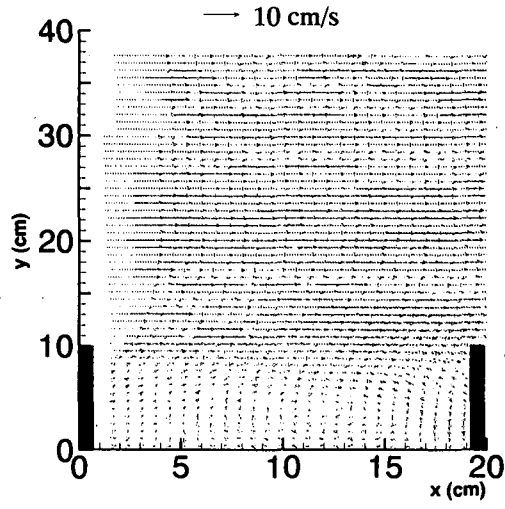


図-14 中央部の速度分布 (case 21-2)

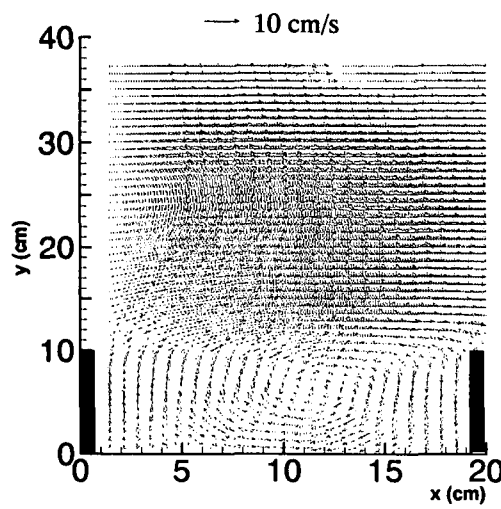


図-15 上流部の速度分布 (case 21-0)

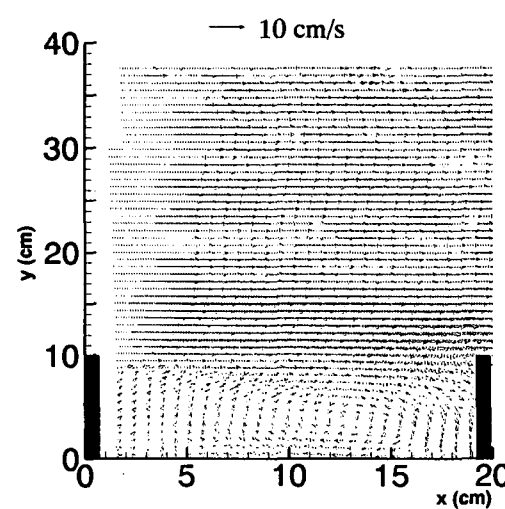


図-16 中央部の速度分布 (case 21-0)

3.2 平均流特性

PIV 計測では、約 33.3 秒間の 1,000 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。図-11～16 に時間平均速度分布を示す。いずれの計測

位置に於いても上流および下流の水制により、右岸水制域内に時計回りの大きな循環流が形成されることが示されている。

水制群上流部の 1 基～2 基間における水制域内の側岸付近に着目すると、両岸に水制を複数設置した

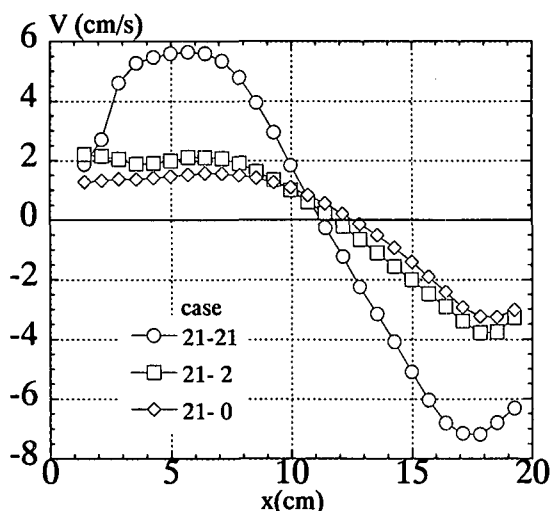


図-17 横断方向流速の流下方向分布
(水制域境界 1 基～2 基間)

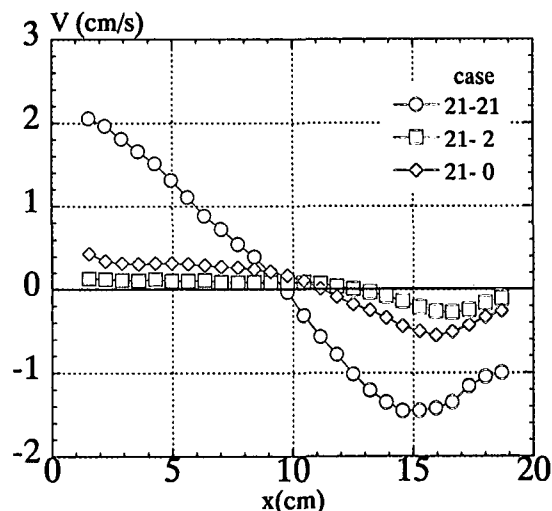


図-18 横断方向流速の流下方向分布
(水制域境界 11 基～12 基間)

case 21-21 では、水制間中央部で上流側 1 基目の水制先端に向きをとる流れが生じているのに対して、3 基目以降が片岸水制群の case 21-2 および水制群全域が片岸水制群の case 21-0 では側岸に沿って上流側へと向かう流れが生じているのが分かる。

水制群中央部の 11 基～12 基間においては、 $x = 5$ cm 付近の水制域内の流れに着目すると、case 21-21 での速度ベクトルは上流側に向きを取っている。これに対して、水制が片岸にしかない case 21-2 および case 21-0 では、順流と逆流の収束域にあたっており、主流部へと向きをとっていることが分かる。これらのことより水制域内に存在する循環流は、両岸に水制群がある場合は下流側でも上流部と同様に水制域スケールの大きさを保っているのに対して、先頭部のみ両岸水制および片岸水制群の場合は循環流のスケールが上流部に比べて下流側で小さくなることがわかる。これも、水制 1 基目背後に生じた両岸の渦の相互干渉は、下流側では水制群が片岸にしか存在しないために弱くなり、水制域内の循環流のスケールが下流側で上流部に比べて小さくなったと考えられる。

速度ベクトルより水制域境界における横断方向流速 V を求め、流下方向にプロットしたものが図-17 および 18 である。上流部の図-17 において、水制域から流出する速度と水制域内に流入する速度の極値は case 21-21 で最も大きく、続いて case 21-2、case 21-0 の順である。流入の極値は、上流側の水制から下流側に向かって水制間隔 D の約 90 % のところで生じている。水制群中央部の図-18 では、水制域内に流入する速度の大きさは上流部と異なり case

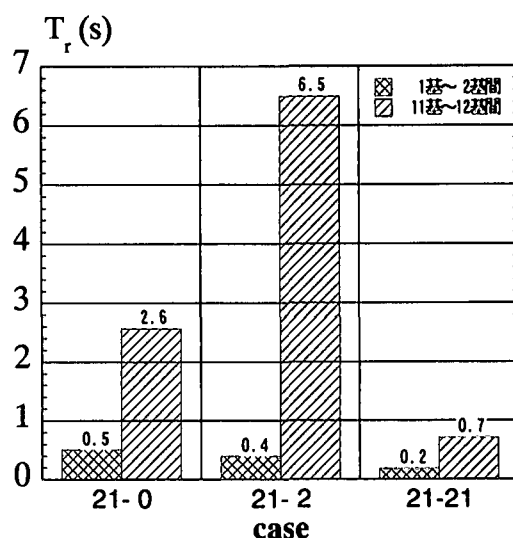


図-19 水制域内の滞留時間

21-21 で最も大きく、続いて片岸水制群の case 21-0、上流部のみ両岸水制の case 21-2 の順である。流入速度が最も大きくなる位置については、上流部の 1 基～2 基間に比べて 3 ケースとも水制間隔 D の約 10 % 程度上流側へとシフトしていることが分かる。

非越流型水制群における水制域内の滞留時間 T_r を次式で定義し、その結果を図-19 に示す。

$$T_r = \frac{A \times h}{Q_{in}} = \frac{D \times L \times h}{D \times h \times \int_0^D |V_{in}| dx} \quad (3)$$

ここに、 Q_{in} ：水制域内に流入する流量、 D ：水制

設置間隔, V_m : 水制域内へと向かう横断方向流速である。

各ケースとも、水制群上流部の1基~2基間の方が、水制群中央部の11基~12基間に比べて滞留時間が短くなっていることが示されている。その1基~2基間について見てみると、滞留時間が最も長いのは片岸水制群であり、最も短くなるのは両岸水制群である。これは、両岸の渦の相互干渉があることによって水制域内の循環流が強くなったためであると考えられる。一方、11基~12基間においても、両岸の渦の相互干渉があるcase 21-21の方が相互干渉のないcase 21-0よりも、滞留時間は短くなっている。しかしながら、case 21-2は上流側でのみ両岸の渦の相互干渉があるにもかかわらず、滞留時間が最も長くなっているが、この理由は現在のところ不明である。

4. 結論

本研究は水制群を水路両岸と片岸、さらに先端部のみ両岸で下流側は片岸に設置し、両岸の水制域内の水面振動および水面振動の流下方向特性について実験的に検討したものである。得られた知見についてまとめると以下のようなものである。

- (1) 水制域内に発生する水面振動の振幅は、水制群を水路両岸に対称に設置したケースでは、上流端から中央部にかけて増加し、中央部で極大となり、中央部から下流端にかけては減少する傾向にあった。上流端のみ水制を両岸に設置しそれよりも下流は片岸としたケースでは、先端部で水面振動は大きく、流下するに従い一様に減少する傾向を有した。このことより、水制域内に発生する水面振動の発生は、両岸の渦の相互干渉以外には考えられないことが明らかとなった。
- (2) 水制1基目背後における水面振動のモードは水制配置によって異なる。両岸水制群と片岸水制群もしくは先頭部の2基のみ両岸でそれ以降片岸水制としたケースでは、水路中央に1つの節を持つ、横断方向に一次モードの水面振動が生じる。先頭部の1基のみを対称とし2基目以降を片岸水制群にしたcase 21-1では、横断方向に節を持たず水路全幅に亘って

同位相の水面振動が生じる。振幅の大きさは両岸水制群で最も大きく、片岸水制群で最も小さく抑えられた。

- (3) 横断方向に一次モードの水面振動の周期は、水制配置によらずほぼ等しい。その周期はセイシュの周期とほぼ等しくなった。
- (4) 水制域内における滞留時間は、本研究で扱ったいずれのケースも、中央部に比べて上流端の方が短い傾向にある。上流端での滞留時間は、上流端における水面振動の大小関係と一致しており、振幅が大きいケースで滞留時間は短く、顕著な水面振動がないケースで滞留時間は長くなることが分かった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 佐伯壮一, 斑目春樹, 岡本孝司: 水平平面噴流による自励スロッシング振動発生機構の解明, 日本機械学会論文集 (B 編), 65 巻 635 号, pp.2270-2277, 1999.
- 3) 馬場昌法, 斑目春樹, 岡本孝司: 自由液面よりもぐり込む噴流による自励スロッシング, 日本機械学会論文集 (B 編), 65 巻 635 号, pp.2278-2285, 1999.
- 4) 飯田将雄, 斑目春樹, 岡本孝司, 深谷征史: 液面に衝突する上向き平面噴流の自励振動, 日本機械学会論文集 (B 編), 61 巻 582 号, pp.517-523, 1995.
- 5) 例えば, 玉井信行: 水理学, 培風館, 1989.
- 6) 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.
- 7) 九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻 編: 地球環境を学ぶための流体力学, 株式会社 成山堂書店, 2001.

(2003年4月18日受付)