

# 水制の形状が砂州地形の擾乱に及ぼす影響に関する 実験的検討

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECTS OF GROUYNE SIZE ON BED EVOLUTION IN A CURVED OPEN CHANNEL

武藤 裕 則<sup>1</sup>・中 川 一<sup>2</sup>

MUTO Yasunori and NAKAGAWA Hajime

<sup>1</sup>正会員 Ph.D 京都大学助手 防災研究所流域災害研究センター (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター

Following the previous report by the authors (Muto et al., 2005), new experiments were carried out in order to study the effects of design of groynes on bed evolution in a curved open channel. How scouring and depositions on the inner sand bar are produced by the groynes, which are known as *wando* and *tamari*, were of the main interest.

A sand bar which is usually formed along the inner bank is divided into two parts when the groynes are installed. The downstream part of the bar tends to be higher than the case without groynes, since the bed material left from the eroded region is captured by the groynes. The size of scouring area is decided mainly by the height of the groynes among the tested design parameters. By changing the height according to the basic geomorphology of the sand bar, a wider range of the size of scouring hole is produced, which will provide a better environmental background for aquatic natural lives.

**Key Words :** *groyne, curved channel, experiments, movable bed, sand bar, wando and tamari*

### 1. はじめに

河道湾曲部に水制群を設置する場合、通常は外岸沿いに発生する河岸侵食や深掘れを抑えるために、水制は外岸側に設置される例がほとんどである<sup>1)</sup>。これに対して、湾曲部の内岸側に水制を設置した場合、水制による水はね効果が主流の偏流や二次流の発達を助長するため一般に好ましくないと考えられている。一方、舟運のための航路維持を目的とした場合、洪水時には水没する低い水制を河道の両岸に設置する例も多い。例えば、淀川水系に残るわんどやたまりの由来が航路維持を目指したケレップ水制であることは良く知られている<sup>2)</sup>が、本流から離れた高水敷上や湾曲部内岸側のいわゆる水裏と呼ばれる部分にも多数のわんどやたまりがかつては見られたことが何よりの証左である。これらのわんどやたまりは、止水性の淡水魚類や貝類の生息場所としての機能を有しているが、近年の調査の結果、平水時に水裏となる

湾曲部内岸側に良好な環境を維持しているものが多数存在することが報告されている<sup>3)</sup>。水裏部は通常堆積域であり、この部分にわんど・たまりを形成するためには砂州に対して何らかの地形擾乱を与える必要がある。著者ら<sup>4)</sup>は、このような目的に水制工を活用することを考え、移動床湾曲水路における実験を行った。その結果、内岸側水制群により砂州には複雑な洗掘・堆積地形が形成され、それらが水位低下時にはわんどやたまり状の地形となることを示した。しかしながら、水制の形状・配置とわんど・たまり地形の形成の関係や、水制群が水路全体に与える影響などに関しては十分な検討が行われなかった。

本報告では、これらの点に関する検討を進めるために新たな実験を行い、既報<sup>4)</sup>に示した結果とも合わせて考察した。特に、今回追加した実験ケースでは、個々の水制の高さを砂州の比高に追従するように変化させたものも含んでいる。なお、内岸側水制群の形状変更は、流速分布や外岸沿いの深掘れに代

表される大規模河床変形には鋭敏には影響を及ぼさないことが既報で示されており、本報では主として河床形状の計測結果に基づき議論を進める。

## 2. 実験装置および方法

実験水路については既報<sup>4)</sup>に詳細を示しており、ここでは概略を示すのみとする。図-1は水路および付帯施設の平面図を示している。水路は、幅 80cm、深さ 28cm の長方形断面を有し、湾曲部の曲率半径は水路中央で 5.0m である。また水路の流下方向勾配は 1/800 で固定されている。

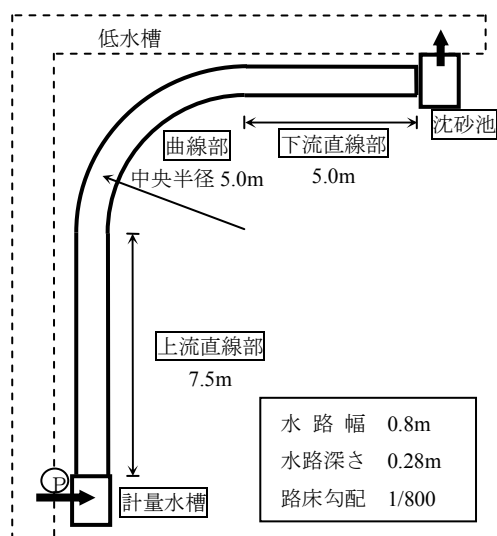


図-1 実験水路の概要（平面図）

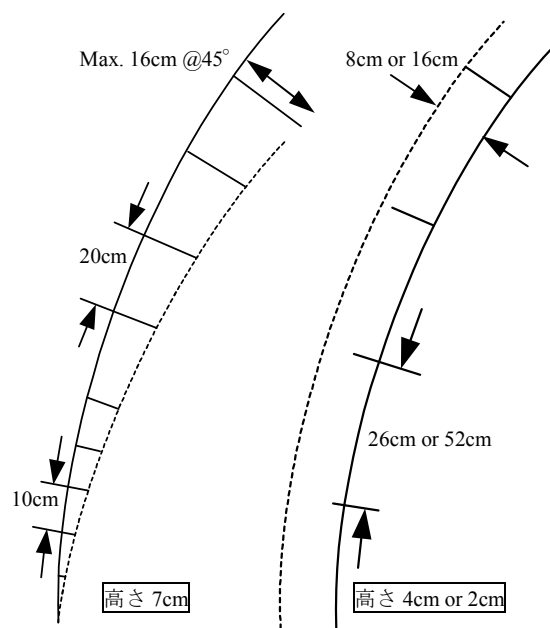
水路底から 10cm の厚さに平均粒径 1.45mm、比重 2.24 のスラジライトを一様に敷き慣らし初期河床とした。実験時の水理条件を表-1 に示す。ここでは、直線部における等流水深から計算される摩擦速度が河床材料の限界摩擦速度以下となるように水理条件を設定している。実験開始後、一定の通水時間（約 50 時間）の後にほぼ平衡河床形状となることを確認し、ポイントゲージによる水面形計測、2 成分電磁流速計による流速計測およびレーザ距離計による河床形状計測を行った。

表-1 水理条件表

| 水理条件                        |        |
|-----------------------------|--------|
| 流量 $Q$ (cm <sup>3</sup> /s) | 13,530 |
| 疑似等流水深 $H$ (cm)             | 5.0    |
| 断面平均流速 $u_m$ (cm/s)         | 33.83  |
| 路床勾配 $I$                    | 1/800  |
| 摩擦速度 $u_*$ (cm/s)           | 2.33   |
| レイノルズ数 $Re$                 | 15,000 |
| フルード数 $Fr$                  | 0.51   |
| 河床材料                        |        |
| 平均粒径 $d_m$ (mm)             | 1.45   |
| 比重                          | 2.24   |
| 限界摩擦速度 $u_{*c}$ (cm/s)      | 2.50   |

なお、後述する各実験ケースは全て表に示した同一の水理条件の下で行っており、上流直線部における流れや流送土砂はほとんど変化していない。

図-2 は水制群の配置条件の基本パターンを示したものである。水制工は水路湾曲部にのみ設置した。外岸側の水制工は高さ 7cm の非越流タイプであり、長さは、湾曲部流入部 ( $\theta=0^\circ$ ) および流出部 ( $\theta=90^\circ$ ) で 0,  $\theta=45^\circ$  で最大値  $0.2B=16\text{cm}$  ( $B$ : 水路幅) とし、水制群の先端部によって描かれる曲線が円弧となるように他の水制の長さを決定した。水制の設置間隔は長さに応じて変化させ、アスペクト比がほぼ 1.25 となるようにした。一方、内岸側の水制工は越流タイプとし、初期河床からの高さを 4cm または 2cm の 2 種とした。長さは、湾曲部流入部 ( $\theta=0^\circ$ ) で 0 とし徐々に増加させ、最大値が  $0.1B=8\text{cm}$  となるものと  $0.2B=16\text{cm}$  となるものの 2 種を考慮した。設置間隔は、パターン A として最大水制長さ (8cm or 16cm) の 3 倍とするものと、パターン B として 1.5 倍とするものの 2 種とした。



(a) 外岸側（非越流型） (b) 内岸側（越流型）

図-2 水制工模型の配置パターン（平面図）

以上の水制群タイプを組み合わせ、表-2 に示す実験条件とした。すなわち、主として内岸側配置の差異によりケース番号が付けられており、Case N-N は水制工なし、Case N-084A, O-084A, O-082A および O-162A は湾曲流入部を除いて水制長さ・高さとも一定のケース、Case O-164+2A および O-164+2B は湾曲の上流部 ( $\theta=45^\circ$  まで) が水制高さが 4cm、下流部（それ以降）が 2cm のケースであり、さらに末尾の A および B は上述の設置間隔の違いである。

表-2 実験条件表

| Case No. | 外岸 | 内岸 ( $L_g$ : 最大長さ, $h_g$ : 高さ)                               |
|----------|----|--------------------------------------------------------------|
| N-N      | なし | なし                                                           |
| N-084A   | なし | $L_g=8\text{cm}$ , $h_g=4\text{cm}$                          |
| O-084A   | あり | $L_g=8\text{cm}$ , $h_g=4\text{cm}$                          |
| O-082A   | 〃  | $L_g=8\text{cm}$ , $h_g=2\text{cm}$                          |
| O-162A   | 〃  | $L_g=16\text{cm}$ , $h_g=2\text{cm}$                         |
| O-164+2A | 〃  | $L_g=16\text{cm}$ , $h_g=4\text{cm}$ (上流), $2\text{cm}$ (下流) |
| O-164+2B | 〃  | $L_g=16\text{cm}$ , $h_g=4\text{cm}$ (上流), $2\text{cm}$ (下流) |

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 内岸沿いの砂州の形成

図-3(a)は、基本となる Case N-N (水制工なし) における平衡河床形状を示したものである。洗掘・堆積域の境界である 0 のコンターについて注目すると、 $\theta = 15^\circ$  の内岸壁より  $\theta = 40^\circ$  付近に向けて堆積域が徐々に拡大し、それ以降の湾曲部では 0 のコンターは水路ほぼ中央に位置する。さらに、+2cm のコンターに注目すると、 $\theta = 30^\circ$  から  $65^\circ$  にかけて+2cm 以上の堆積域が形成されているが、それ以降では湾曲部出口である  $\theta = 90^\circ$  付近を除いてそのような堆積域は見られない。砂州上の最も高い地点は、 $\theta = 60^\circ$  付近で+3.3cm が計測されている。したがって、今回の実験条件では湾曲部の内岸に沿って単一の砂州が形成されるが、その比高は  $\theta = 65^\circ$  付近を境に

して上流側は大きく、下流側は小さい。

図-3(b)は、水制の高さを全区間で同一とした Case O-084A, O-082A および O-162A のうち、Case O-162A について平衡河床形状を示したものである。図より、Case N-N に比べて外岸沿いに形成される洗掘域がやや拡大しているのがわかる。0 のコンターは  $\theta = 15^\circ$  から  $40^\circ$  にかけては Case N-N と同様に内岸壁から水路中央へ向かって描かれるが、 $\theta = 45^\circ$  から  $60^\circ$  にかけて内岸壁寄りに位置し、 $\theta = 60^\circ$  以降  $90^\circ$  にかけて再び水路中央へ向かっている。この結果、Case N-N では単一の砂州であったものが  $\theta = 60^\circ$  付近を境界に 2 つに分断されていることがわかる。一方、砂州の比高についてみると、上流側では+2cm を超える領域が広がっているのに対し、下流側では個々の水制域内に一部+2cm を超える領域があるものの、その比高は総じて上流側より低い。この点に関しては、水制のない Case N-N と同様の特徴を有していると言える。他の 2 ケースもほぼ同様の結果となっている。

砂州の比高に合わせて上流側と下流側とで水制群の高さを変化させた Case O-164+2A および O-164+2B のうち、Case O-164+2A の結果を図-3(c)に示す。水制高さを全区間で同一とした各ケースと同様に砂州の分断が見られるが、+2cm を超える領域の面積が上流側で減少するのに対し、下流側では  $\theta = 75^\circ$  以降で拡大している。このことは、本来形成される砂州の比高に合わせて水制の形状を変化させたことと関

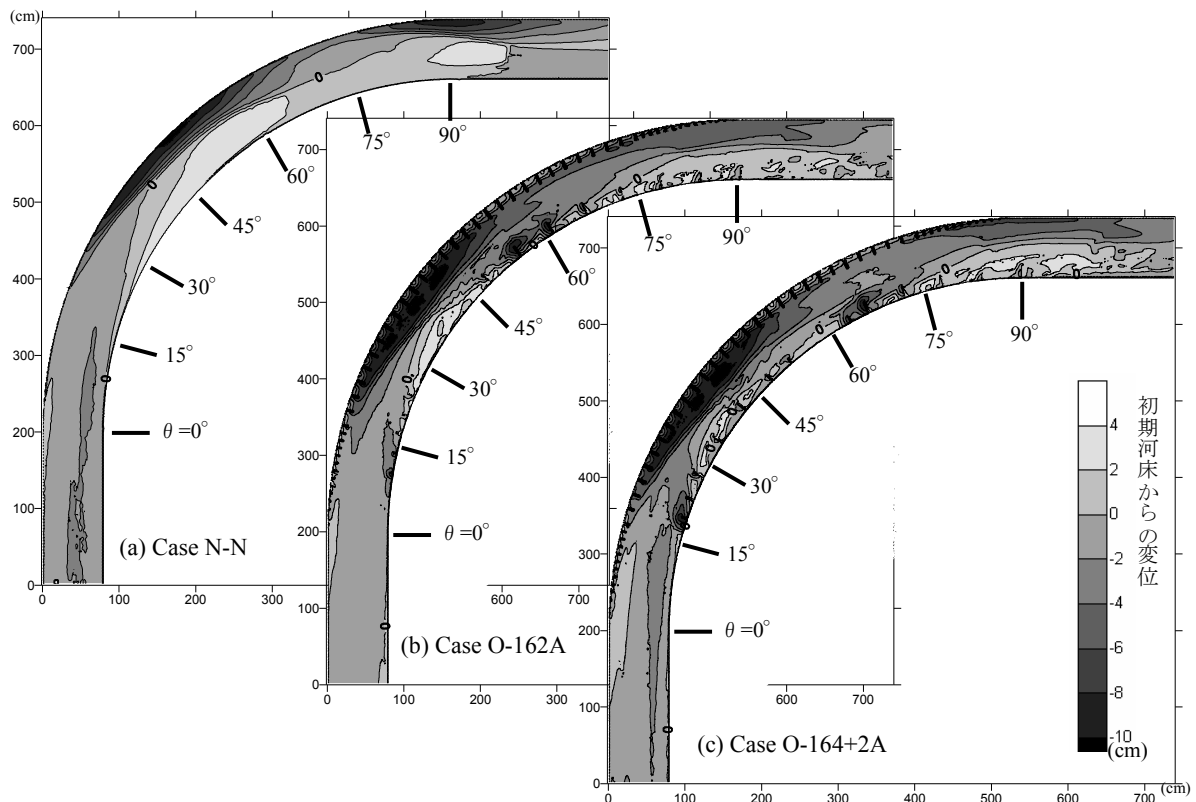


図-3 主要な実験ケースの平衡河床形状

係するものと思われるが、それについては水制工周辺部のわんど・たまり地形の形成と合わせて次節で検討する。

## (2) 水制工による砂州の擾乱

前節で見たように、水路の湾曲形状と水理条件から決まる今回の実験条件では、単一ではあるものの上流部と下流部とで比高が異なる砂州が形成される。さらに、水制群を設置した場合、砂州は二分割されることが示された。本節では、水制工の高さや長さを変化させた場合の砂州地形の応答特性、特に水制工周辺部の洗掘・堆積特性について検討を行う。なお、上述の砂州の比高特性から、湾曲上流部と下流部を分けて扱うこととした。

図-4 は、湾曲上流部である  $\theta = 15^\circ$  から  $50^\circ$  の部分を拡大したものである。なお、砂州の擾乱の様子をより明示するために、-1cm 以下のコンターを省略している。

まず、水制の高さの影響を見るために、(a) Case O-084A と (b) Case O-082A を比較すると、水制工の高さが本来形成される砂州比高より高い Case O-084A の場合、砂州は大きく擾乱され、各水制の前面部に三角形のくぼみ地形が見られる。一方、本来の砂

州比高より水制工が低い Case O-082A の場合、砂州地形に対してある程度の影響は与えているものの、一部では水制の高さを超えて堆積が進んでおり、水制が完全に埋没してしまう部分も見られる。以上のような比較傾向は、水制の長さを倍にした (c) Case O-162A と (d) Case O-164+2A の間にも見られる。

次に、水制の長さの影響を見るために、(a) Case O-084A と (d) Case O-164+2A を比較すると、Case O-164+2A では堆積域 (0 以上の部分の面積) がかなり小さくなっていることがわかる。これは、水制の長さが長いため、その先端部においては砂州の比高に対して高さがかなり大きく、その周辺に局所洗掘を引き起こし砂州 (堆積域) を分断しているものと考えられる。一方、水制前面部の三角形のくぼみ地形は、水制の長さに応じて相似形に拡大している。なお、水制高さの低い (b) Case O-082A と (c) Case O-162A の間には、Case O-0162A の方が堆積高さがやや大きいものの、それ以外の点ではあまり明確な差異は見られない。

最後に、水制域のアスペクト比の影響を見るために、(d) Case O-164+2A と (e) Case O-164+2B を比較すると、Case O-164+2A ではやや深めの三角形であったくぼみ地形が、Case O-164+2B では浅くなり、形状

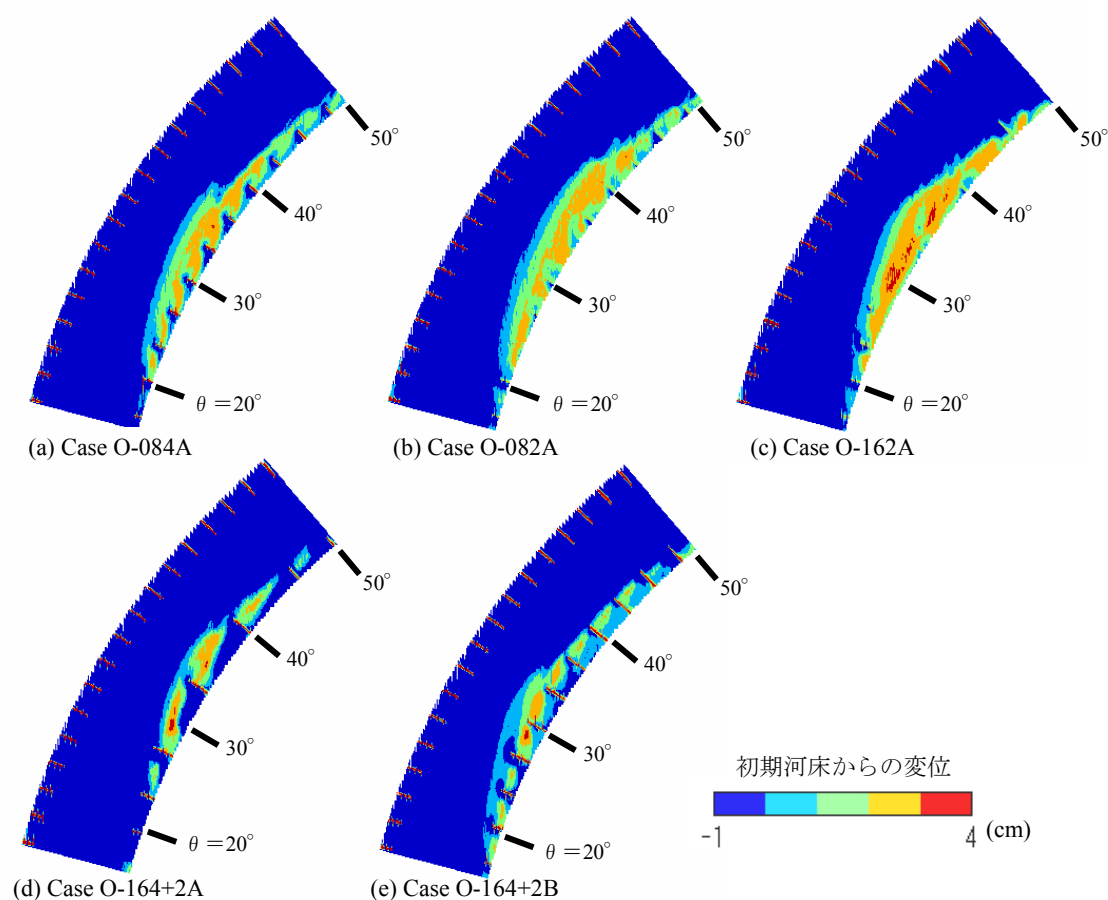


図-4 兩岸に水制群を設置したケースの平衡河床形状 ( $\theta = 15^\circ \sim 50^\circ$ )

も四角形に近い形となっている。これは、水制の設置間隔を小さくしたことで各水制域における堆積域の流下方向への発達を抑えられ、それに伴い横断方向への発達も抑止されたものと考えられる。

一方、湾曲下流部については図-3 に示したように砂州の比高は+2cm 以下であることから、本節の比較では  $h_g=2\text{cm}$  の各実験結果を用い、水制の長さおよび水制域のアスペクト比の影響に関して検討する。

図-5 は、(a) Case O-082A、(b) Case O-162A および (c) Case O-164+2B について  $\theta=60^\circ$  から  $90^\circ$  の部分を拡大したものである。なお、図-4 と同様に、一部のコンター (-4cm 以下および+3cm 以上) を省略している。また、Case O-164+2A については、この部分における水制配置は Case O-162A とほぼ同じであり、河床形状も同様の結果となったため省略した。

(a) Case O-082A と (b) Case O-162A の比較により、既報<sup>4)</sup>にも示したように、水制長さの増大に伴いくぼみ地形が相似形に拡大していることがわかる。しかしながら、図-4 に示した湾曲上流部に形成されたくぼみ地形と比較すると、面積はかなり小さく、下

流寄りに押し込められた形となっている。Case O-082A では水制域の比高は全域でほぼ+2cm 以下であるが、Case O-162A では水制域の中央部分で+2cm を超える箇所も多い。このことは、この箇所においては水制の長さが流送土砂を補足する機能を強化していることを示している。

ところが、アスペクト比を変化させると、この状況は一変する。(c) Case O-164+2B では、 $\theta=75^\circ$  付近で砂州が分断され、それより上流側では洗掘傾向、下流側では堆積傾向となっており、堆積部分においても水制工前面部のくぼみ地形はほとんど見られない。図-3 からわかるように、Case O-164+2A および O-164+2B では、水制の高さを上流部と下流部で変化させると共に、遷移部とでもいうべき  $\theta=45^\circ$  から  $60^\circ$  にかけては水制を配置せず、2つの水制群に分割している。今回洗掘傾向となった  $\theta=60^\circ \sim 75^\circ$  の範囲は、第2水制群の配置が開始される部分にあたり、このことが新たな洗掘領域を発生させたことと関連するものと思われる。

### (3) 河床形状の多様性評価

本研究の目的は、わんど・たまり地形の復元を目指した水制工の活用であり、最終的な技術目標としては、どのような水制形状および配置とすることが最も好ましいわんど・たまり地形を形成するかを示す必要がある。そのためには、好ましいわんど・たまり地形とはどのようなものであるかを評価する必要があるが、生物の生息環境の観点からは、地形の多様性ということが指摘される。すなわち、面積、深さ、その位置する標高、本流からの距離などの指標が個々のわんど・たまりごとに適度なばらつきを有していることが求められる。本節では、地形の多様性を評価する1つの試みとして、砂州地形の縦断形状の空間的な変動について検討する。

図-6 は、内岸側水制先端部付近の河床形状の縦断変化を示したものである。参考として、(a) Case N-N（水制工なし）の結果も示している（横断位置は内岸側壁より8cm）。図より、水制工を配置した各実験ケースの結果は、(a) Case N-N（水制工なし）に示された緩やかな地形変化に、水制群により生み出された細かい変動モードが重ね合わさった形状となっている。(b) Case O-084A について見ると、細かい変動モードの振幅は湾曲部のほぼ全区間に渡ってほぼ4cm と一定値であり、深さの分布の点ではやや単調と言える。(c) Case O-082A についてもほぼ同様の特徴がうかがえるが、湾曲上流部と下流部とで細かい変動モードの振幅がやや変化する様子が見られる。(d) Case O-162A では、上流部では水制工自体が砂州にほぼ埋没してしまうため細かい変動モードが明確

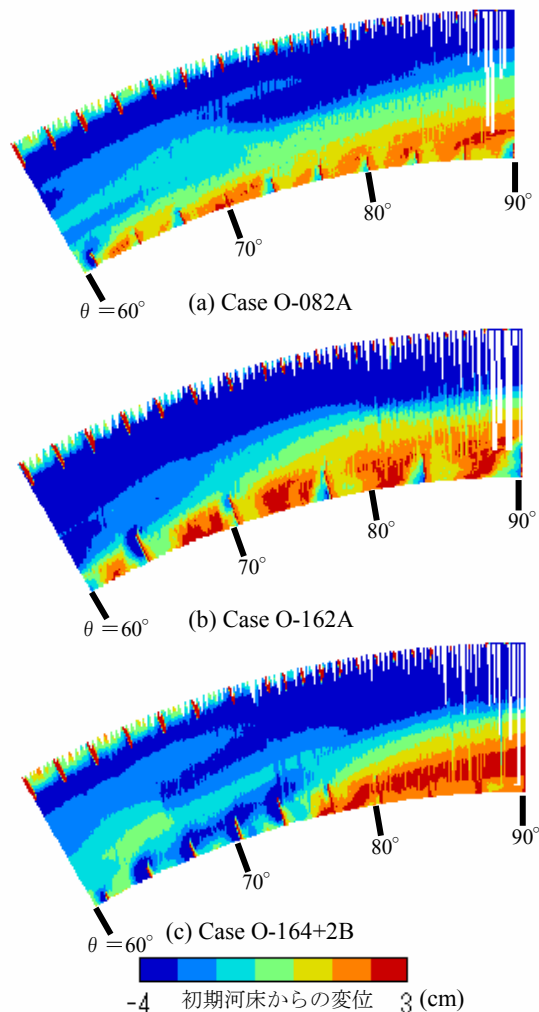


図-5 両岸に水制群を設置したケースの平衡河床形状 ( $\theta=60^\circ \sim 90^\circ$ )

でないが、下流部では水制工の影響が非常に明瞭かつ大幅に表れ、縦断距離 600cm ( $\theta = 50^\circ$  付近) より下流では最大 6cm 程度の振幅が観察された後、下流へ向かい徐々に縮小している。(e) Case O-164+2A では湾曲上流部の水制群の高さを高くしたことにより、(d) Case O-162A の結果に上流部の変動を加えたような結果となっている。(f) Case O-164+2B は、(d) Case O-162A とは逆に、上流部の変動が明瞭であるが、下流部はあまり明確ではなく、砂州の大きな変形に埋もれたような形状となっている。なお、水制群を設置したケースに共通する特徴として、水制工なしの(a) Case N-N より湾曲下流部における比高が大きくなっていることが指摘される。これは、既報<sup>6)</sup>に示したように外岸沿いの洗掘域が拡大していることから、そこから流出した土砂が水制域に補足された結果と考えることができる。

以上の結果から、水制群の高さを砂州の比高より高くすると、地形の変動モードが水制の高さに規定され、変動がやや単調化する傾向にある。さらに、今回の試論によれば、砂州の比高に合わせ水制の高さを調整すると共に、水制の長さをできるだけ長く

した方が地形の変動に多様性をもたらすようである。

#### 4. おわりに

本論文は、湾曲部内岸側に設置された水制群による地形攪乱に関連して、水制の高さ・長さおよび設置間隔を変化させた場合のたまり状地形の形成状況を移動床実験により検討し、地形の多様性評価を試みたものである。実験の結果、たまり状地形の形状やその分布の多様性に対しては、水制の高さの与える影響が大きいことが示された。また、水制の高さを一定とするよりは、砂州の比高に応じて高さを変化させた方が、砂州自身に対する水制の比高としては一定に近い関係になるにもかかわらず、たまり状地形に多様性を与えることが示された。

今回の検討では、水裏部としては実験的に最も扱いやすい湾曲部に形成される固定砂州をベースとした。河道内に形成される水裏部としてはこの他に、低水路の蛇行に伴う交互砂州が考えられる。実際、交互砂州上にわんど・たまり地形が形成されている例も多く、今後はそれらも含めて、水裏部わんど・たまりの形成と維持に対する水制工の活用とその可能性についてさらに幅広く検討を進めていきたい。

**謝辞：**本研究の着想にあたっては、大阪府立西野田工業高等学校・小川力也先生よりわんど・たまりの生物相と生態に関して重要な示唆をいただきました。また、実験の遂行にあたっては、京都大学大学院修士課程・北村耕一君（当時、現石川島播磨重工業）の多大なる協力をいただきました。あわせて深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 富永晃宏, 中居 毅, 内藤 健, 中村尚子: 開水路湾曲部に設置した透過水制の流れと河床変動に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.547-552, 2004.
- 2) 綾 史郎: 淀川のワンドの形成と変遷, わんどの機能と保全・創造～豊かな河川環境を目指して～(財団法人河川環境管理財団大阪研究所編), pp.41-78, 1999.
- 3) 小川力也, 長田芳和: 河川氾濫原のシンボル・フィッシュイタセンパラ, 淡水生物の保全生態学(森 誠一編著), 信山社サイテック, pp.9-18, 1999.
- 4) 武藤裕則, 北村耕一, 中川 一: 水制群による砂州上わんど・たまりの形成に関する実験的検討, 河川技術論文集, 第 11 巻, pp.417-422, 2005.

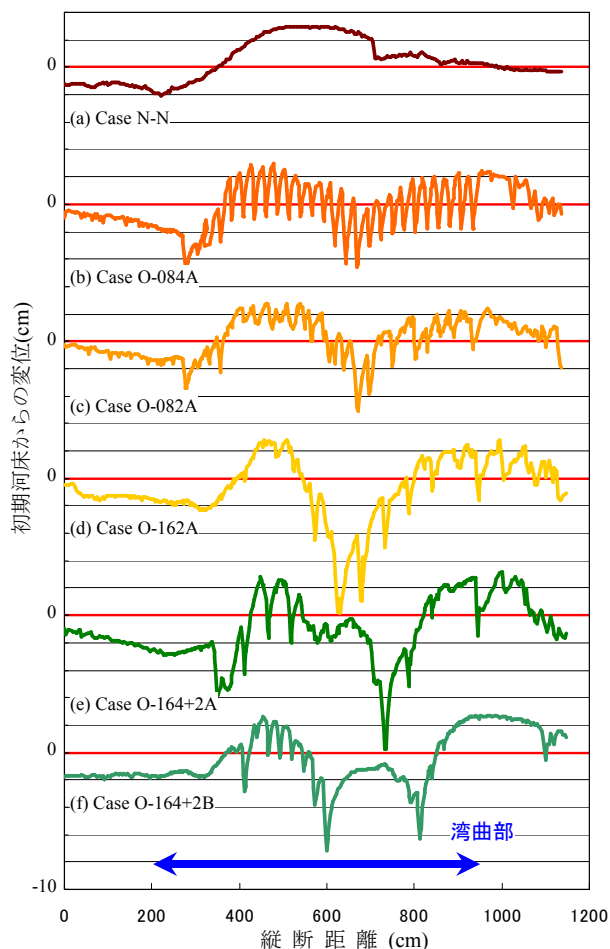


図-6 水制先端部における河床の縦断形状

(2005. 9. 30 受付)