

# 寒冷地急流河川における構造物端部の環境特性と修復手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 25

担当チーム：水環境保全チーム

研究担当者：矢部浩規、渡邊和好、矢野雅昭

## 【要旨】

融雪出水時の護岸工周辺の流況を把握するため、中流部の護岸工がなされた現地河川において、超音波流速計による断面流速分布を計測した結果、護岸工近傍に 2m/s 以上の高流速域が生じていることが確認された。河岸の粗度の低下による護岸工下流端部の洗掘を確認するため、河床変動計算による検討を行った結果、粗度の低下に伴い、わずかだが護岸工下流端部の洗掘が大きくなることが確認された。また、移動床水理模型実験により、砂州発生条件下で対策工（ワンド工および水制工）の河岸部の流速低減効果を検証したが、その効果は確認されなかった。しかし、ワンドを設置したケースではワンド内が魚類にとっての出水時の待避場となることが想定された。対策工により生じた河床地形により、低水流量時の越夏環境を流況計算により検討したが、対策工の設置による大きな越夏可能場の増加は確認されなかった。対策工の設置による砂州地形の変化について検討した結果、対策工の上流側の砂州の波長、波高の減少と砂州移動速度の増加が確認された。

キーワード：護岸、粗度、洗掘、魚類生息環境、ワンド、水制工

## 1. はじめに

急流河川では、出水時に河岸浸食など発生しやすく、護岸工がなされることが多い。しかし、護岸工の設置により河岸の粗度が低下する場合、護岸工周辺の流速が増すことが考えられる。また、湾曲河道などで外岸の粗度が低下すると、2次流が増加し、外岸側の深掘れが増大することが知られている<sup>1)</sup>。護岸の力学設計法<sup>2)</sup>では、護岸を行う場合は、粗度の低下に配慮することとされているが、施工時期が古い護岸にはこのような配慮がなされず、流況に影響が及んでいる可能性がある。また、護岸の上下流の端部においては、すりつけ護岸として、未施工区間との法線形や粗度のなじみをよくするため、屈撓性があり、かつ表面形状に凹凸のある接続型ブロックや籠工が用いられることが多いとされている<sup>2)</sup>。そのため、護岸工区間で粗度の低下により流速が増大しても、すりつけ工区間で減勢されることも考えられるが、これが十分でない場合は、その下流端で河岸浸食されることが考えられる。また、サクラマス幼魚の生息環境として、河川改修により、河道が単調となった区間よりも、瀬淵地形を持つ自然河川の方が多く利用されていることが指摘されている<sup>3)</sup>。そのため、護岸工がなされた単調な河道断面が、長い延長で連続する場合、魚類の生息環境にも影響が

及ぶことが考えられる。

護岸周辺の流速の増加、単調な河道断面の魚類生息環境への影響など、護岸工に伴う負の影響があったとしても、現状で河岸浸食防止に寄与している護岸を張り替えることは現実的ではない。そのため、より部分的な改修により、護岸工による負の影響を低減できれば、経済的に優位であると考えられる。

本研究は、護岸工に伴う河岸の粗度の低下が、河岸周辺や護岸工下流端部の流況に及ぼす影響を明らかにし、河岸流速の低減と魚類の生息環境の改善につながる部分的な改善手法を検討するものである。

## 2. 出水時における護岸工の流況特性の把握

### 2. 1 はじめに

本章では、既往研究による検討、現地調査および数値計算により、出水時の護岸工下流端部の流況および洗掘について把握する。

### 2. 2 既往研究による護岸工の影響

#### 2. 2. 1 砂州を伴う直線河道の河岸流況把握

著者らにより砂州の発生条件での河岸の粗度を変数とした移動床水理模型実験が行われた<sup>4)</sup>。この実験水路断面と実験ケースをそれぞれ図-1 と表-1 に示す。なお、この実験ケースの条件を 1/100 スケールのものだとすると、川幅 70m の河道に 600m<sup>3</sup>/s の

表-1 実験ケース

ケース	断面	流量 (m <sup>3</sup> /s)	勾配	移動床部 マンニング粗度 ※粒径から算出	河岸部(護岸) マンニング粗度 ※目標値	粒径 (mm)	移動床時 通水時間
1	A	0.0060	1/200	0.014	<b>0.0085</b>	0.77	9時間44分
2	A	0.0060	1/200	0.014	<b>0.0116</b>	0.77	9時間6分
3	B	0.0060	1/200	0.014	<b>0.0085</b>	0.77	7時間30分
4	B	0.0060	1/200	0.014	<b>0.0116</b>	0.77	8時間10分
5	B	0.0060	1/200	0.014	<b>0.0138</b>	0.77	9時間30分
6	B	0.0060	1/200	0.014	<b>0.0185</b>	0.77	9時間30分

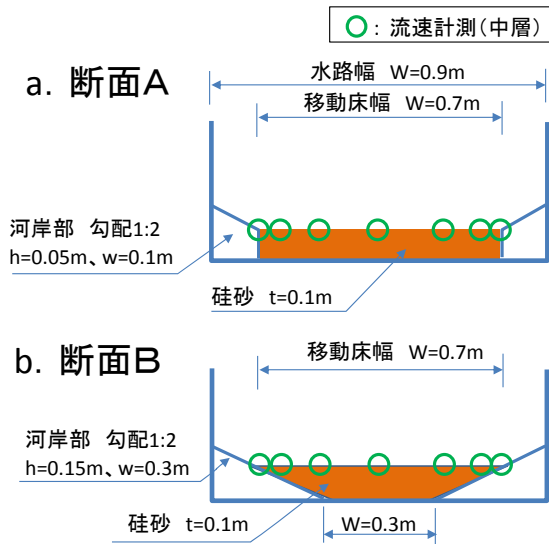


図-1 河岸断面と流速計測位置

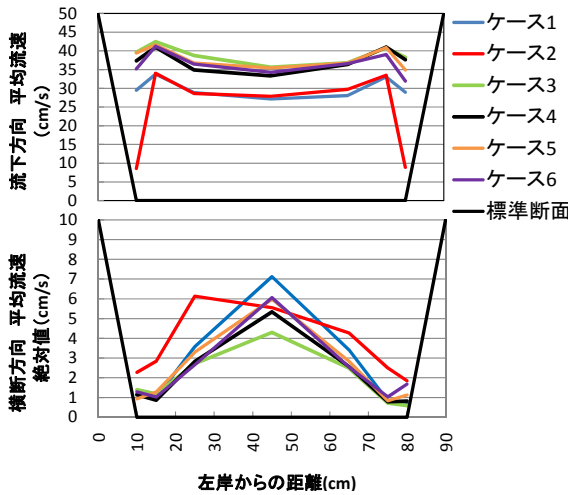


図-2 水理模型実験による河岸横断流速 (平均値)

流量が流れていることになる。この河道条件に近い豊平川における平成 15~24 年の 10 年間の年最大流量の平均値は 405m<sup>3</sup>/s<sup>5)</sup>であり、この実験の流量条件は、豊平川に当てはめると、平均年最大流量以上の出水となる。また、表-1 の 4 種類の河岸のマンニング粗度は、同様に実スケールにすると、小さい方から、0.019 (こて仕上げコンクリート、粗石練り込み)、0.026 (突起高さが 5cm 程度の護岸)、0.030 (河床材



写真-1 超音波流速計の曳航船による河道内流況観測 (A 川 KP11.76 付近)

料粒径が 8cm 程度の河床)、0.041 (植生被覆) 程度となる。実験結果として、図-1 に示す流速観測点の各横断位置における流下方向流速および横断方向流速の平均値を図-2 に示す。これより、河岸部の粗度が小さいケースほど、河岸部の流下方向の流速が速いことが確認される<sup>4)</sup>。そのため、護岸工により河岸粗度が低下した場合、同様に河岸付近の流速が増すことが考えられる。

## 2. 2. 2 融雪出水時の護岸工河道断面の流況計測

融雪出水期において護岸工がなされている現地河道において流況観測を行った。調査は平成 24 年 5 月 8 日に A 川の KP11.76 において、水面から鉛直下方の流向流速を計測できる超音波流速計 (TRDI 社製ワークホース ADCP 2400kHz) を曳航船 (ハイドロシステム開発 セーフティサーベイヤ) により横断方向に曳航することにより、河道断面の流速分布を計測した (写真-1)。

その結果を図-3 に示すが、河道中心部では 3m/s を超える流速が発生しており、護岸工がなされている左岸の河岸部では、流速 2m/s を超える流れが生じていることが確認できる。一般的には安全側をみて、堤防法尻部の水深平均流速が 2.0m/s 程度より大きくなる個所に護岸工の設置が検討される<sup>2)</sup>。そのため、この現地の状況は、護岸工が河岸浸食を防いでいる状況とも考えられる。その一方で、写真-1 に示すとおり、現地の護岸が比較的平滑なものであり、河岸の粗度が自然河岸の粗度よりも小さいと考えられるため、自然河岸よりも、高流速域が法面近傍まで生じている可能性がある。

## 2. 2. 3 砂州を伴う直線河道の護岸工下流端部の洗掘

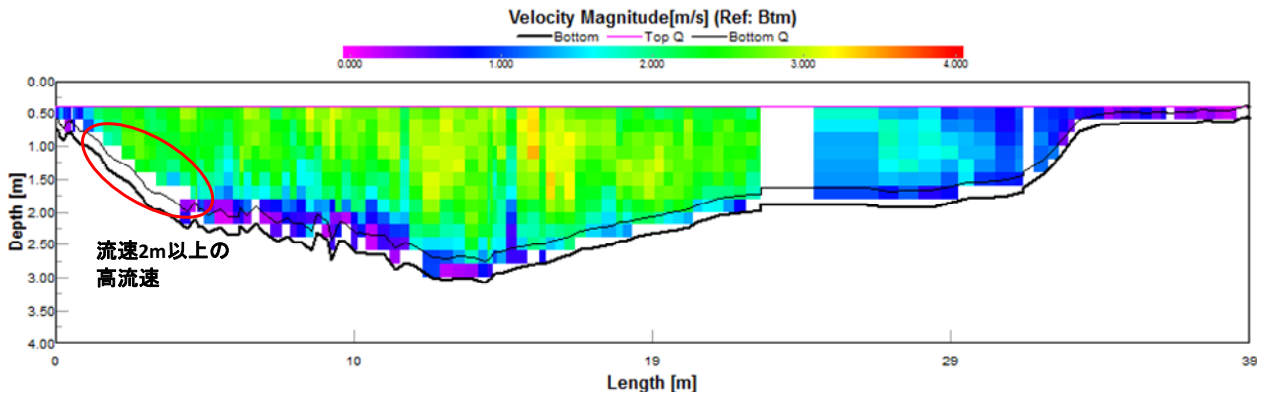


図-3 河道内流況の超音波流速計の曳航観測結果

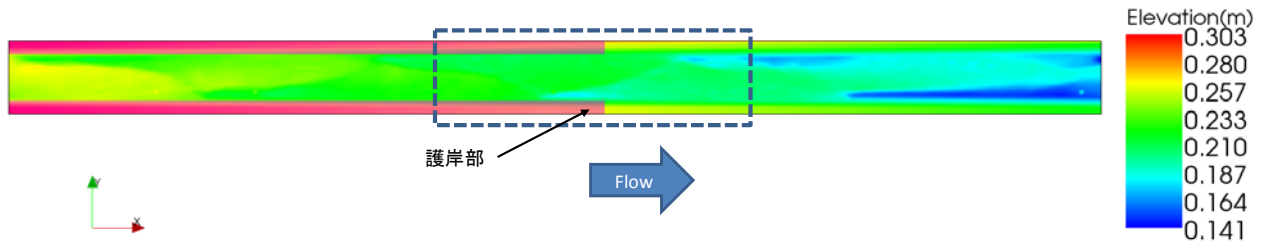


図-4 砂州を伴う直線河道の護岸工下流端部の河床変動計算に用いた初期河床

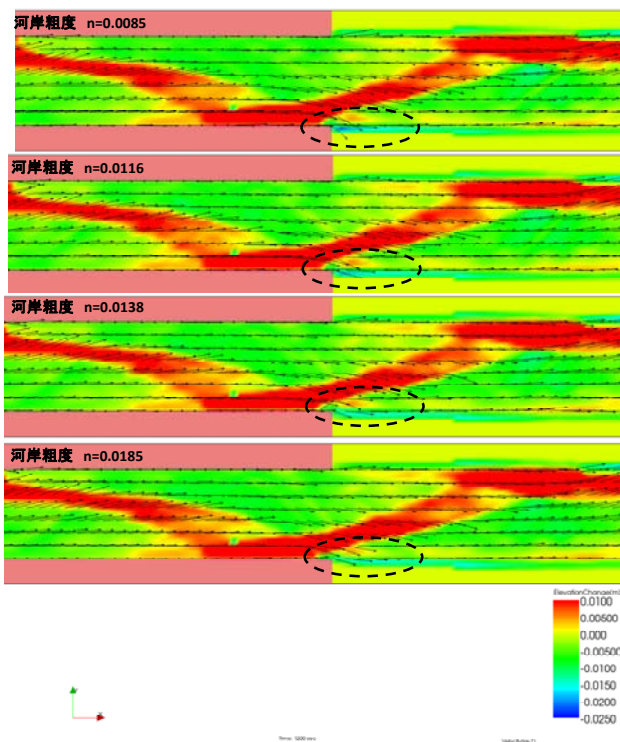


図-5 河床変動計算による砂州移動に伴う護岸端部の洗掘(河床変動量) ※図-4の破線四角内

砂州流下に伴い水衝部が護岸工下流端部となった場合の、この箇所洗掘状況を検討するため、前述した既往研究の移動床水理模型実験で得られた最終河床形状(表-1 ケース3)を初期河床条件として、

表-2 iRICによる河床変動計算条件  
(粗度の違いによる護岸工下流端部の洗掘)

項目	計算条件
ソルバー	Nays2D
格子サイズ	直線河道砂州移動条件(実験後河床): 0.025×0.025m 弯曲河道条件: 0.05×0.05m弯曲河道
マンニングの粗度係数	移動床部: 0.0138 固定床部: 0.0085, 0.0116, 0.0138, 0.0185
乱流モデル	ゼロ方程式
移流項の差分法	CIP法
下流端水位	等流水深

河床変動計算により検討した。流況計算の設定条件を表-2に、計算格子に用いた初期河床形状を図-4に示す。流況計算で検討したケースは、移動床部のマンニング粗度を0.0138とし、左右岸の河岸固定床部のマンニング粗度を0.0085、0.0116、0.0138、0.0185の4ケースとしたものである。流況計算にはiRICのNAYS2Dソルバー<sup>6)</sup>を用いた。この結果として、計算開始から砂州の移動により、最初に水衝部が護岸工下流端部に移動した際の、河床変動量と流速ベクトル分布を図-5に示す。砂州の移動に伴い、護岸工下流端部に流れがぶつかり、わずかだが、粗度が小さいケースほど、護岸端部が洗掘された。

#### 2. 2. 4 湾曲河道の護岸工下流端部の洗掘

護岸工は河道弯曲部の外側側になされることが多いため、河道が弯曲した条件においても、護岸工下流端部の洗掘状況を河床変動計算により検討した。

河床変動計算の設定条件を表-2に、計算格子に用いた河床形状を図-6に示す。この河道は移動床幅0.7m、河床勾配1/200、河岸高さは5cm、法面勾配は1:2であり、前述した移動床水理模型実験や河床変動計算と同様の河道条件であり、流路延長30m、蛇行角度は30度となっている。通水時間が長くなると、砂州の発達と流路の蛇行が発生し、護岸工下流端部の洗掘に対する、純粋な河岸の粗度による流速変化の影響を把握できない。そのため、砂州形成、蛇行が発生する前までの計算結果で検討を行った。

計算結果として河床変動量の図-7に示す。これより、前述した直線河道の砂州流下の河床変動計算と同様に、わずかながら、河岸の粗度が小さいほど護岸工下流端部の洗掘が大きい傾向が確認された。

### 3. 平水時における護岸工下流端部の最適な魚類生息環境の検討

本研究では、魚類の生息環境の指標として主にサクラマス(*oncorhynchus masou*)を用いた。これは、サクラマスが寒冷地域に生息する冷水性魚類であり、さらにその生態が河川環境と関わり深いことによる。サクラマスの河川内で過す期間は、産卵床の砂礫中で卵期および仔魚期として6-8ヶ月間、浮上からスマルトとして降海するまでの遊泳生活期間が約12ヶ月、そして親魚回帰時の河川遡上から産卵までが3-5ヶ月間と、通常3年間の生涯のうちの約2年を淡水域で過す<sup>7)</sup>。また、サクラマスの親魚は、生まれた稚魚がなるべく広く降下・分散し、河川の生産力を効率よく利用できるように、主に河川の源流域で産卵する<sup>7)</sup>。このため、サクラマスは河川が連続性を有し、良好な環境であることを必要とし、サクラマスが健全に生息できる河川であることは、良好な河川環境を有している一つの指標であると考えられる。

本章では既往研究から、サクラマスの越夏環境と

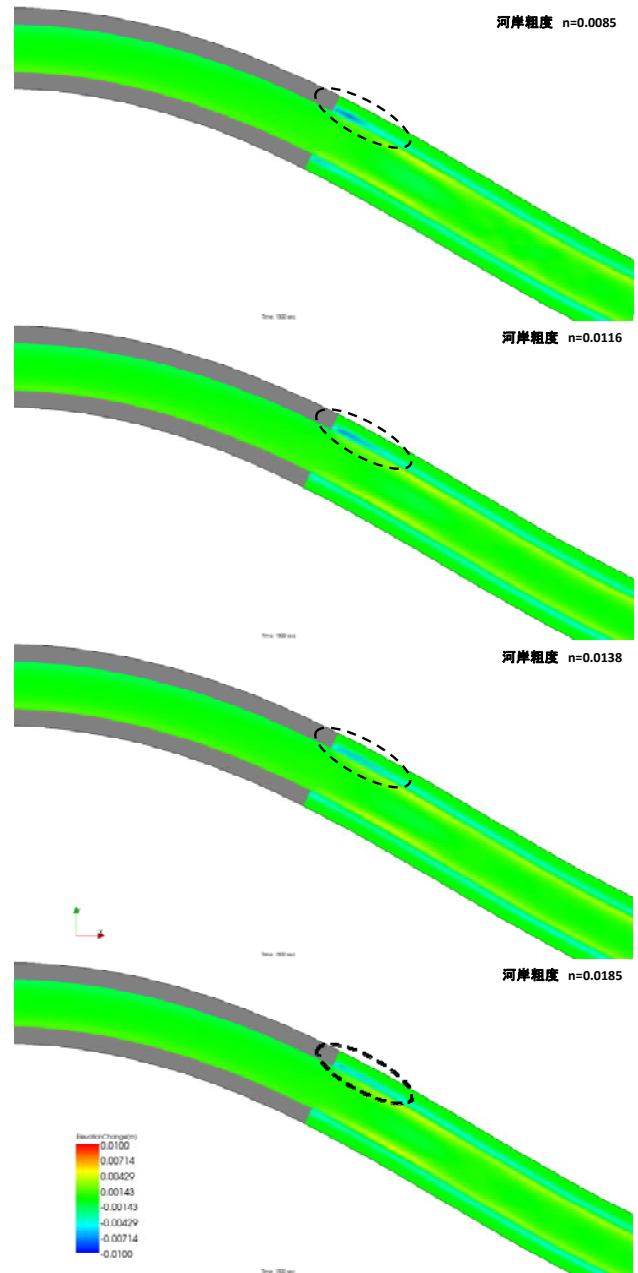


図-7 流況計算による弯曲部護岸端部の洗掘(河床変動量) ※図-6の破線四角内

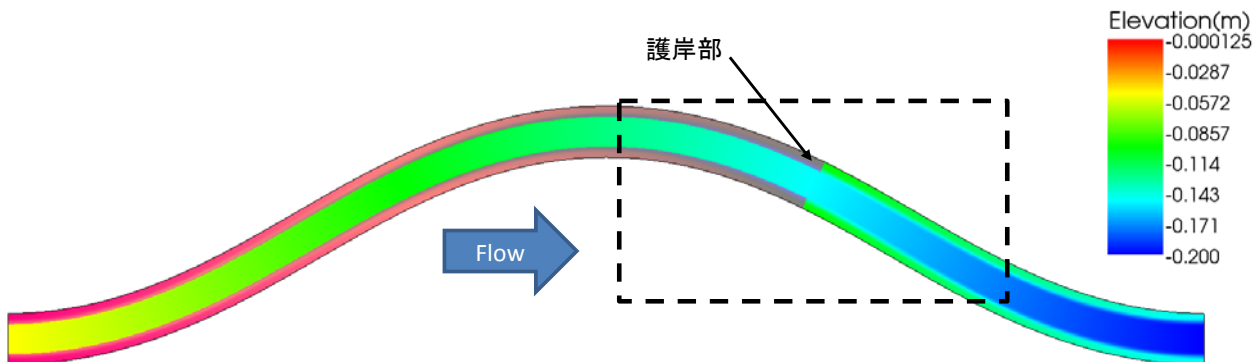


図-6 湾曲河道の護岸端部の流況計算に用いた初期河床

越冬環境に着目し、環境必要条件について考察する。また、既往研究により出水時における魚類の待避場所の必要性についても考察する。

### 3. 1 既往文献による検討

#### 3. 1. 1 サクラマス越夏環境

産卵のために遡上するサクラマスの越夏環境として、深い淵が利用されることが指摘されている<sup>8)</sup>。また、サクラマスの越夏環境となる淵の環境として、Edo & Suzuki<sup>9)</sup>は、平均水深、最大カバーサイズ、平均流速、淵の容積の重要性を指摘し、サクラマスが確認された淵の水深の平均値と標準偏差は54.8±13.6cm、範囲は32.7-70.2cm、流速の平均値と標準偏差は4.3±4.0cm/s、範囲は0-11.5cm/sとされている。また、個体サイズが大きいサクラマス親魚には、総カバー面積よりも個々の最大カバーサイズが重要であることが述べられている<sup>9)</sup>。また、カバーが無くとも水深が2m以上あれば、その深さがカバーになるとの指摘もある<sup>10)</sup>。

このような越夏環境は、サクラマス親魚が産卵のため遡上し、遡上後約半年を摂餌せずに体力を保持しながら河川で過ごさなければならぬ生態を考えると、不可欠であるとされている<sup>8)</sup>。また、サクラマスは一つの越夏場所にとどまらず、出水毎に上流に移動して行くため、越夏場所となる場所はある程度間隔をおいて分布して存在する必要があるとされる<sup>10)</sup>。

#### 3. 1. 2 越冬環境

越冬期間のサクラマス幼魚の生存率は、既往研究によると52%<sup>7)</sup>、9~17%<sup>11)</sup>と推定されており、越冬期間を生き延びることの困難さが示唆され、越冬環境の重要性が伺える。しかし一方で、この越冬環境は減少しつつあるとの指摘もあり<sup>12)</sup>、この保全・創出は、サクラマスの個体群を健全に保つために重要である。

鈴木ら<sup>13)</sup>の調査結果では、サクラマス幼魚のエネルギー消費が少なく、安静に生息できる空間が重要であることを指摘し、サクラマス幼魚の越冬環境として、流速が1.3cm/s±1.5(平均±標準偏差)と遅く、水深が81.5cm±17.4と大きく、被覆度の中央値が0.6と高い個所であるとされている。

#### 3. 1. 2 出水時の避難場所

遊泳魚類は、出水時には本流の高流速域から低流速域である高水敷きやワンド、タマリなどの一時的水域に避難することが知られている<sup>14)</sup>。護岸工が長い延長で行われ、単調な断面となった河道では、こ

のような場所が少なく、出水時に下流へ流される可能性がある。サクラマスが長時間遊泳可能な巡航速度は2~3BL(m/s)<sup>15)</sup>とされ、サクラマスの体長を概ね35cm<sup>9)</sup>とした場合の巡航速度が1m/s程度となり、出水時の河道内にこれを下回る領域があることが望ましいと考えられる。

## 4. 急流河川における「治水」と「環境」が両立した護岸工下流部修復手法の検討

### 4. 1 目的

河川の流況を局所的に変化させる方法として水制工があるが、水制工は土砂堆積により河道断面の縮小に繋がることもある<sup>16)</sup>。そのため、河道幅が十分な箇所以外で水制工を行うことは、近年の川幅を拡幅する方向性の河道改修と異なる<sup>17)</sup>。一方、部分的に川幅を拡幅するワンド工は、剥離渦を発生させ<sup>18)</sup>、流れのエネルギーを減少させる効果があることが考えられる。また、環境面においても、魚類が一時的に出水時に避難する箇所として、有効である可能性がある。ところで、実河川の多くは、砂州などの中規模河床形態を伴っていると考えられ、より現地河川に適合した条件とした場合、砂州地形の影響を考慮する必要がある。しかし、ワンドに関する既往研究では、ワンド内の水理構造<sup>19)</sup>、土砂堆積<sup>20)</sup>に関するものなどが行われているが、砂州発生条件下での検討については行われていない。なお、水制工が川幅減少に繋がることを前述したが、水深に対し、高さが低い冠水する越流型水制工の砂州発生条件下での河床変動については、知見が不足しており、本研究が目的とする対策工としての有効性を否定できない。

本章では、部分的な処置により、護岸工による高流速対策および環境改善対策を検討する。砂州発生条件下でワンド及び越流型水制工(以降、対策工)を設置した際の、河岸部への流速低減効果と河床地形への影響を、移動床水理模型実験により検証したものである。

### 4. 2 方法

#### 4. 2. 1 移動床水理模型実験

##### a) 実験水路

実験に用いた水路は、移動床部の延長が43.25m、河床勾配1/200の河川上流部の条件とし、地上部の河岸法勾配が1:2で、河岸高が5cmである河岸形状とし(図-8a~d)、河床には厚さ10cmで粒径0.77mmの珪砂を敷き均した。河岸形状は2パターンとし、図-8a

に示す移動床部が十分な厚さを有し、砂州が十分発達できる断面Aと、**図-9b**に示す法面が河床内にも連続する断面Bとした。

河岸の粗度は、棧粗度により調整することとし、式(1)に示す足立の式<sup>21)</sup>により、相当粗度を算出し、高さ2mmの棧粗度の設置間隔を変更することで設定した。なお、相当粗度は、式(2)、(3)<sup>22)</sup>によりマニング粗度に変換した。

$$\frac{k}{h_g} = 30m \left( \frac{R}{h_g} \right)^{-\theta} \quad (1)$$

ここに、 $h_g$ は棧の高さ、 $m$ は $0.79(h/h_g)^{-0.29}$ 、 $\theta$ は $0.02 \times (h/h_g)^{0.8}$ 、 $h$ は棧間隔、 $R$ は径深、 $k$ :相当砂粒粗度である。

$$\varphi = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{k} \quad (2)$$

$$n = \frac{R^{1/6}}{\sqrt{g}\varphi} \quad (3)$$

ここに、 $R$ は径深、 $\varphi$ は流速計数、 $g$ は重力加速度、 $n$ はマニング粗度である。

ケース2, 3, 5のワンド形状は、**図-8a~d**に示すとおり、法肩の位置を変えずに、地上部の法勾配を標準断面の1:2から1:0.5と急にすることにより、河床面で0.075m川幅が広がるようにした。また、ワンドの延長は拡幅された川幅の10倍の延長とし、0.75mとした。ワンドの上下流は、**図-8d**に示すとおり、断面の急激な変化を避け、45度で上下流と擦り付けた。水制は、**図-8c, d**に示すとおり、長さ0.1m、河床面からの高さが1cmであり、等流水深が2cmとなることから、越流型の水制となる。また、水制は河床内にまで固定構造物として連続した構造物とした。ワンドおよび水制の設置位置は、砂州が十分発達する水路下流部とし、中心が水路下流端から8.05m上流の位置となるようにした。

## b) 実験条件

流量は、本実験の水路条件で、中規模河床形態の

表-2 実験ケース

ケース	断面	流量 (m <sup>3</sup> /s)	勾配	移動床部 マニング粗度 (粒径から算出)	河岸部(護岸) マニング粗度	粒径 (mm)	移動床時 通水時間	対策工
1	A	0.0060	1/200	0.0138	0.0116	0.77	9時間6分	-
2	A	0.0060	1/200	0.0138	0.0116	0.77	10時間9分	ワンド有り 砂州前縁線側
3	A	0.0060	1/200	0.0138	0.0116	0.77	8時間8分	ワンド有り 砂州頂部側
4	B	0.0060	1/200	0.0138	0.0116	0.77	8時間10分	-
5	B	0.0060	1/200	0.0138	0.0116	0.77	11時間30分	ワンド有り 砂州前縁線側
6	B	0.0060	1/200	0.0138	0.0116	0.77	8時間	水制有り 砂州前縁線側

発生区分により交互砂州が発生する条件とした<sup>23)</sup>。実験ケースを**表-2**に示すが、対策工の有無により比較するため、断面Aでは対策工がないケース1と、**図-8d**のようなワンドを設置し、砂州前縁線がワンド側に向いた状態で通水を終えたケース2、頂部がワンド側に向いた状態で通水を終えたケース3を行った。断面Bでは、対策工がないケース4、ワンドを設置し、砂州前縁線がワンド側に向いた状態で通水を終えたケース5、水制を設置し、砂州前縁線が水制側に向いた状態で通水を終えたケース6について行った。通水時間は10時間を目安に、水路下流部に砂州が十分発達するまでの時間とし、砂州が計測に適した位置となったときに通水を終了し、最終的に**表-2**に示す時間となった。

## c) 計測

対策工による流況や河床形状への影響を把握するため、レーザー砂面計による河床高の計測、2次元電磁流速計による平面流速分布の計測を行った。なお、レーザー砂面計と2次元電磁流速計による計測区間は、下流端から砂州半波長5個分の範囲とした。

レーザー砂面計の計測は、通水終了後に、砂州形状が極力維持されるよう排水した河床にて、縦断間隔15cmの横断測線を設定し、レーザー砂面計により横断方向5mm間隔で計測した。

2次元電磁流速計による計測は、通水終了後に河床をセメント固化し、**表-2**に示す流量を通水して行った。また、対策工のないケースでは、**図-8a, b**に示す横断地点において縦断間隔30cmで計測し、対策工のあるケースでは、対策工周辺の流況を詳細に把握するため、上・下流のワンド擦り付け端部から2.1m上流もしくは下流の範囲を、縦断間隔15cmで計測した。流速計測は10秒間の計測を3回実施し、それらの平均値を用いた。なお、水深が浅く、電磁流速計のセンサーの一部が水上に出てしまう箇所では、計測を行っていない。

これらの結果から算出した河床変動量と、中層の平面流速分布は、QGIS<sup>23)</sup>を用いて可視化した。

時系列的な砂州の半波長、移動速度の変化を把握するため、30分間隔で、水路下流端からの砂州の先端位置を計測した。そして、隣り合う砂州の先端位置の差から各砂州の半波長を算出し、各砂州の先端位置の移動距離より砂州の移動速度を算出した。波高については、先端位置から5cm下流の深掘れ部と5cm上流の頂部の標高差から算出した。なお、これらの計測は下流端から17.1m上流までの範囲で行っ

た。また、これらの計測では、ケース2, 3で若干の欠測が生じた。

また、対策工による流速低減効果を検討するため、**図-9**に示す砂州の向きを基準とした横断位置の流速の比較を行った。砂州の向きによる横断位置は、前縁線側および頂部側の河岸法尻から0, 5cmの地点（それぞれF1~2, C1~2）とした。そして、各ケース内で全体平均値、対策工設置位置の砂州内での平均値、その上・下流の砂州内での平均値を算出し、比較を行った。

#### 4. 3 結果

##### 4. 3. 1 河床変動量と流速ベクトル分布

通水終了後の初期河床からの河床変動量と、中層の流速ベクトルの平面分布について、**図-10a~f**に示す。これより、砂州の形成が確認され、頂部で土砂が堆積し、前縁線から河岸にかけて深掘れしていることが分かる。通水時においては、砂州は発達しながら流下し、対策工位置においても同様に通過していった。流下した砂州の前縁線が対策工側を向いているときは、**図-10b, e, f**のケース2,5,6のような状態になり、頂部がワンド側を向いているときは、**図-10c**のケース3のような状態となっている。

対策工周辺の初期河床からの河床変動量と、中層の流速ベクトルの平面分布を拡大したものを**図-11a~d**に示す。**図-11a, c**に示すとおり、ケース2, 5の砂州前縁線の深掘れがワンド側に向けた結果では、砂州による深掘れ以外にも、ワンド下流端で大きく深掘れしている。また、ケース5では、ワンドの下流端で流向が対岸に向かって大きく変化し、水はねしていることが確認できる。水制を設置したケース6については、水制の先端で深掘れしていることが確認できる。**図-11b**に示すとおり、ケース3の頂部がワンド側に向けた結果では、土砂堆積がワンド内にも及び、頂部と同等の河床高となっている。

**図-12, 13**に断面A,Bの各ケースの最深河床高の縦断分布を示すが、対策工のないケース1,4に比べ、対策工を設置したケースでは、対策工の上流側で深掘れが減少していることが確認できる。

##### 4. 3. 2 砂州の向きによる横断位置の河岸部の流速分布

**図-9**に示す砂州の向きによる横断位置での河岸部の流速について、各ケースで全体の平均値を算出した。また、対策工設置位置とその上・下流の砂州毎の平均値を算出し、比較した。その結果を**図-14~17**に示すが、対策工設置の有無、対策工を設置したケ

ース内でのワンド設置位置の砂州、対策工上・下流

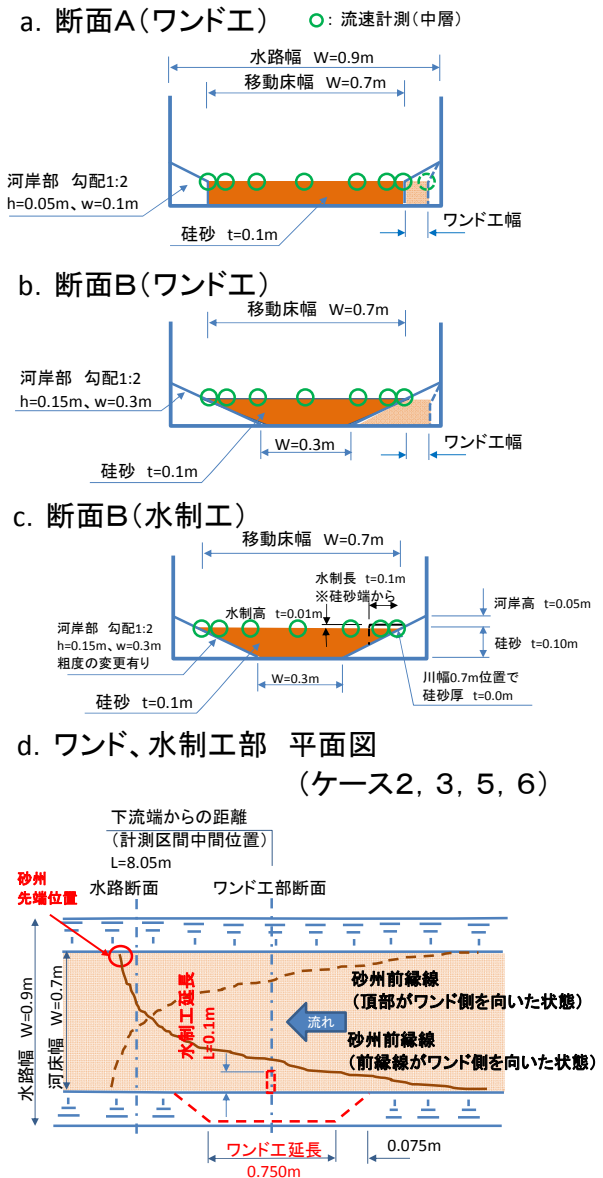


図-8 水路平面・断面 概略図  
※a, bの点線部はワンド工断面

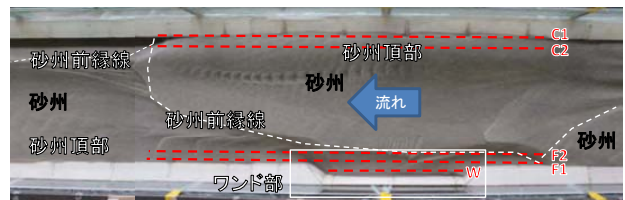


図-9 通水後河床と砂州地形内の横断位置

F1, 2 : 砂州前縁線側の河岸からのそれぞれ 0, 5cm 離れた地点

C1, 2 : 砂州頂部側の河岸からのそれぞれ 0, 5cm離れた地点

W : ワンド内

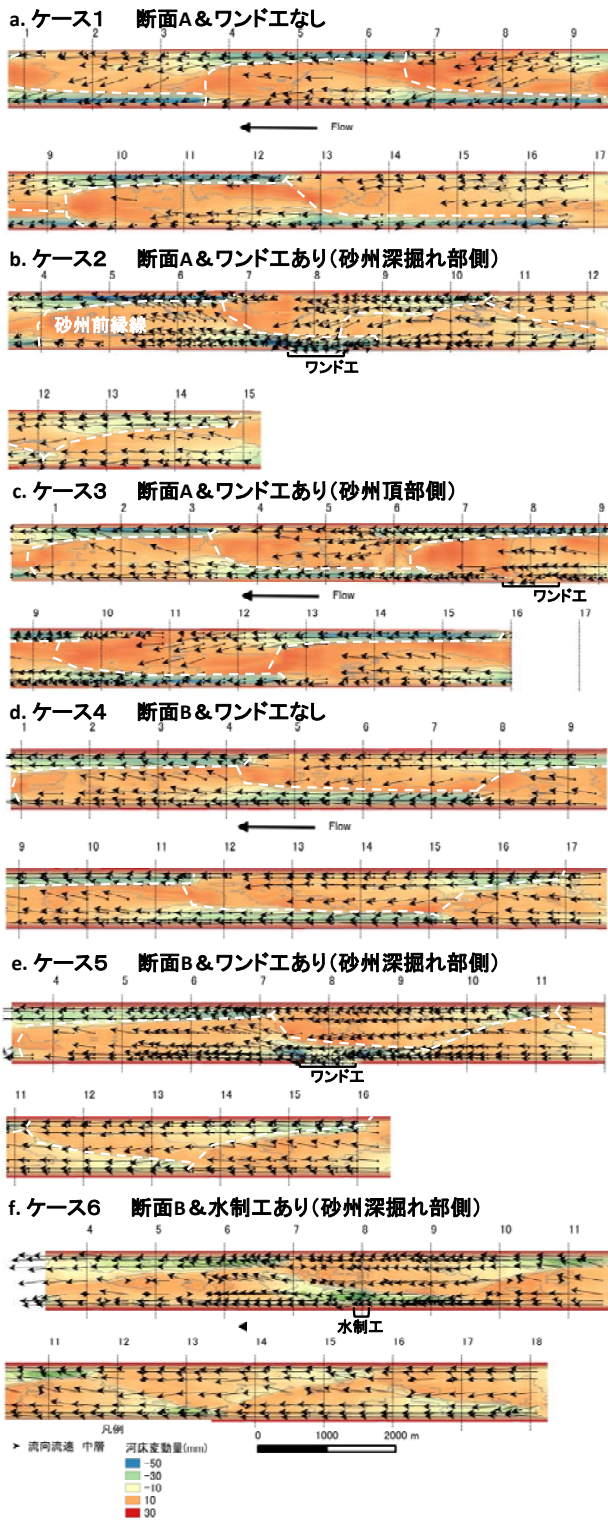


図-10 河床変動量と流向流速の平面分布  
 ※図上部の数字は水路下流端からの距離 (m)

の砂州に関わらず、河岸部(F1,2, C1,2)の流速分布に大きな差はみられなかった。一方、ワンド内(W)の流速については、全てのケースで河岸部(F1,2, C1,2)よりも小さかった。また、断面形状が異なるケース1

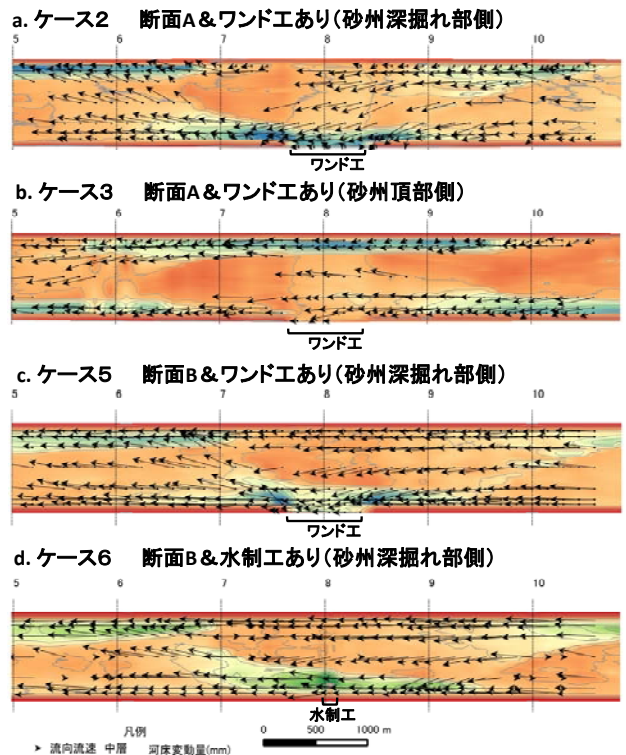


図-11 河床変動量と流向流速の平面分布  
 (ケース2, 3, 5, 6 対策工周辺拡大)

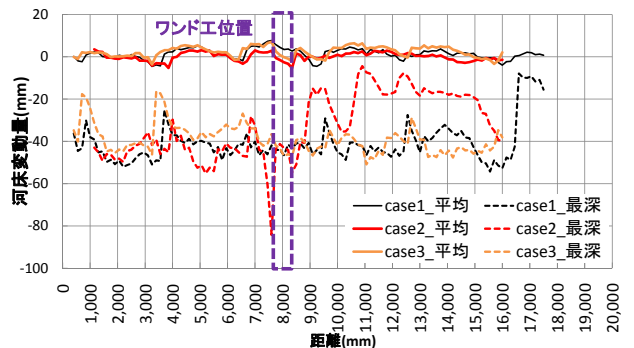


図-12 平均河床高と最深河床高の縦断分布(ケース1~3)

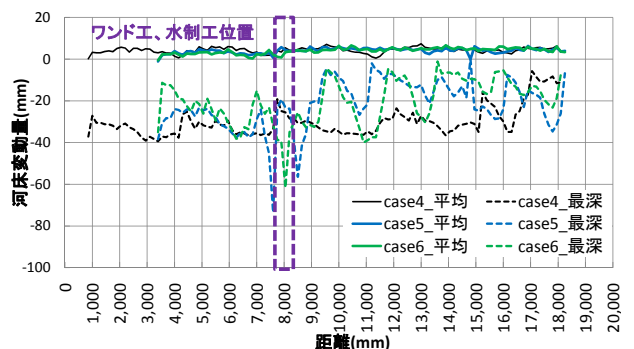


図-13 平均河床高と最深河床高の縦断分布(ケース4~6)



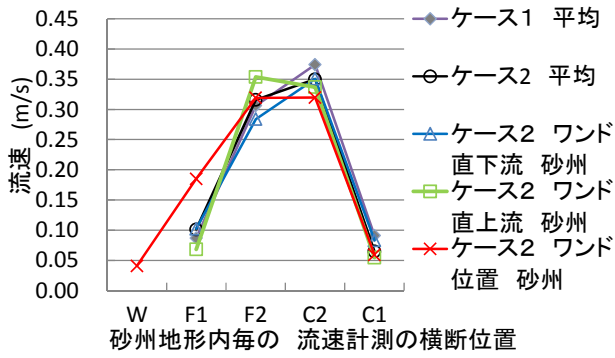


図-14 砂州地形内横断位置による2次元電磁流速計  
中層流速分布 (ケース1, 2)

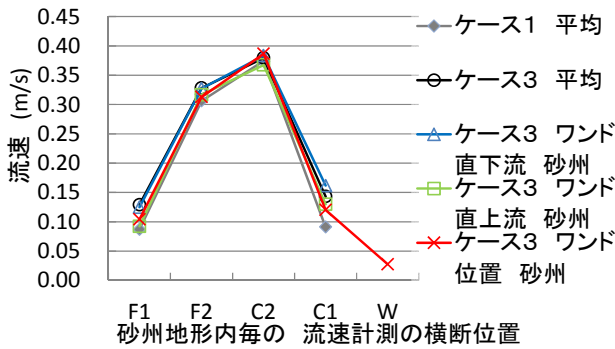


図-15 砂州地形内横断位置による2次元電磁流速計  
中層流速分布 (ケース1, 3)

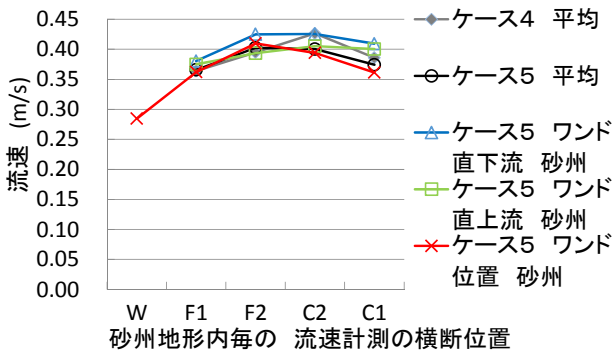


図-16 砂州地形内横断位置による2次元電磁流速計  
中層流速分布 (ケース4, 5)

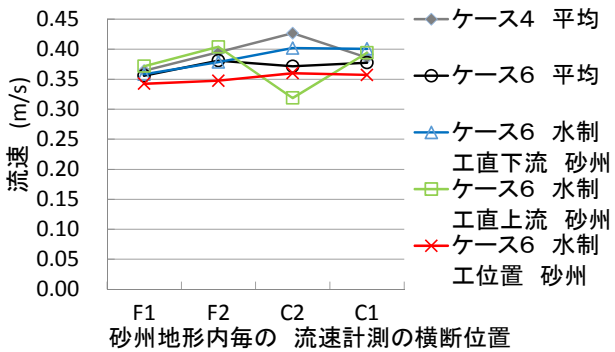


図-17 砂州地形内横断位置による2次元電磁流速計  
中層流速分布 (ケース4, 6)

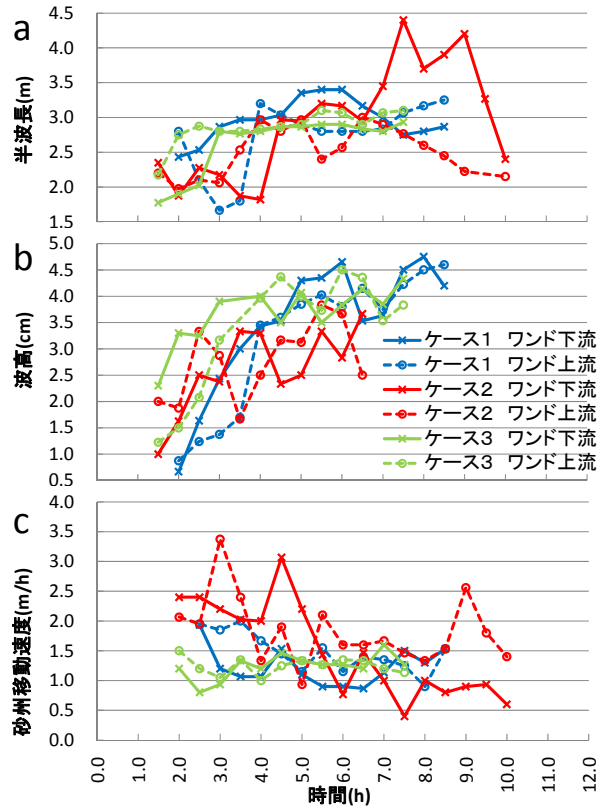


図-18 ワンド設置位置の上・下流側の違いによる  
砂州半波長、波高、移動速度の時間変化 (ケース1~3)

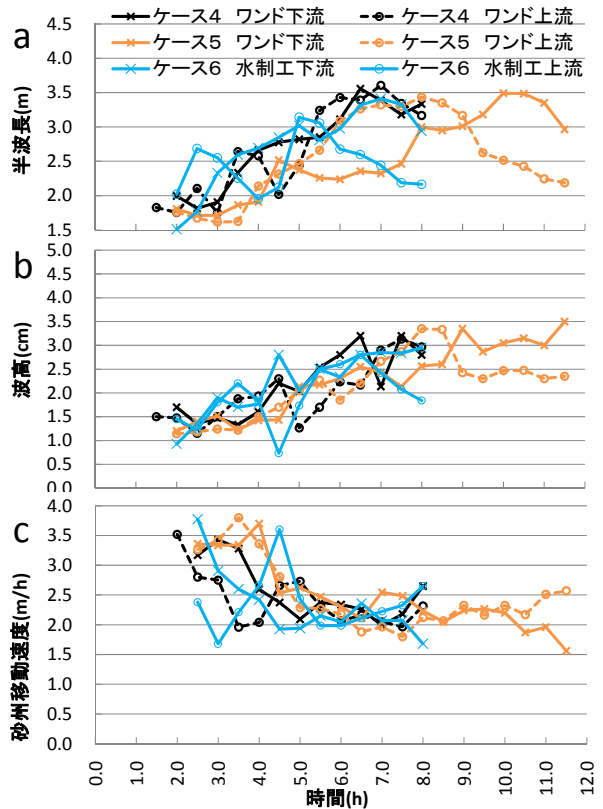


図-19 ワンド設置位置の上・下流側の違いによる  
砂州半波長、波高、移動速度の時間変化 (ケース4~6)

～3とケース4～6では最外岸部(F1, C1)の流速の平均値が大きく異なり、断面Aであるケース1～3では、0.05～0.19m/sであるのに対して、ケース4～6では0.34～0.41m/sと速かった。

実験によるワンド内の流速は断面Aの場合は0.03～0.04m/s、断面Bの場合は0.27m/sである。

#### 4. 3. 3 対策工の上下流での砂州の半波長、波高、移動速度の違い

対策工設置位置の上・下流側で、砂州の半波長、波高、移動速度の違いを把握するため、水路下流端から8m上流の位置で、これらの結果を上・下流側で分割して平均値を算出し、比較した。断面A、Bのケースによる半波長、波高、移動速度の時間変化を、それぞれ図-18a～cと図-19a～cに示す。この図より、断面A、Bの対策工のないケース1、4では、通水に伴い対策工位置の上・下流側の半波長、波高、移動速度の差が小さくなり、通水終了時には大きな差はない。しかし、対策工のあるケース2、5、6では、通水終了時に対策工上流側の方が下流側よりも、半波長と波高が小さく、移動速度は速かった。ただし、同じ対策工のあるケース3では対策工設置位置の上・下流で明確な違いは確認されなかった。

#### 4. 3. 4 平水時の対策工周辺の流況の検討

サクラマスの越夏環境の視点から対策工実施条件での河床形状を評価するため、低水流量時の流速、水深を流況計算により把握した。流況計算にはiRICのNAYS2Dソルバー<sup>9)</sup>を用いた。計算を行ったのは対策工を行っていないケース4とワンド工を行ったケース5、水制工を行ったケース6である。計算条件を表-3に示す。設定流量は0.00015m<sup>3</sup>/sを用いた。この流量は計算条件が1/100スケールとすると、実スケールで15m<sup>3</sup>/sにあたり、河川の規模が近い豊平川の雁来地点における平水流量14.44m<sup>3</sup>/s<sup>25)</sup>と近い値である。計算に用いた対策工周辺の河床地形を図-20に示す。流況計算の結果として、水深分布を表示したものを図-21に、流速分布を表示したものを図-22に示す。本流況計算結果を1/100スケールのもとのみならず、越夏環境として水深の最小値が0.327m、流速の最大値が0.115m/sとの調査事例<sup>9)</sup>の値を、フルード相似則<sup>18)</sup>により実験水路スケールに変換すると、この水深、流速は、それぞれ0.00327m以下(1/100倍)、0.0115m/s以上(1/10倍)となる。図-21、22の流況計算結果では、この条件から逸脱する範囲を越夏不可エリアとして白抜きしてある。そして、概ね水深、流速がこれらを満たす範囲を赤丸で記した。越夏可能エリア

表-3 iRICによる流況計算条件  
(平水時対策工周辺流況)

項目	計算条件
ソルバー	Nays2D
格子サイズ	0.025×0.025m
マンニングの粗度係数	河床部:0.0138, 河岸部:0.0116
乱流モデル	ゼロ方程式
移流項の差分法	CIP法
下流端水位	等流水深

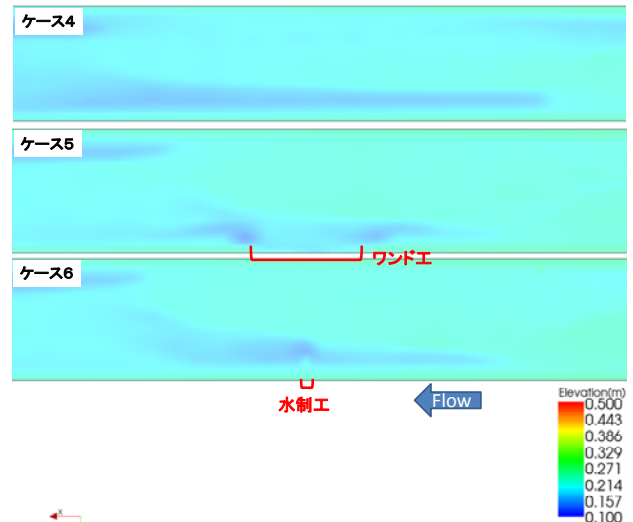


図-20 流況計算 (0.00015m<sup>3</sup>/s) による河床形状

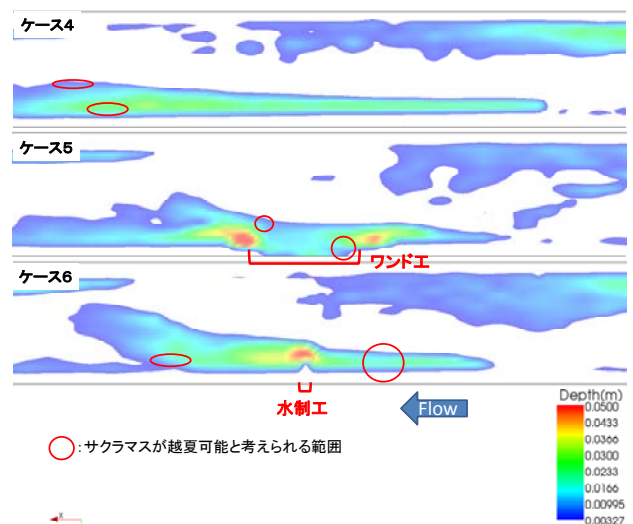


図-21 流況計算 (0.00015m<sup>3</sup>/s) による水深分布  
※水深0.00327m以下の箇所を白抜き

は、対策工の実施の有無で広さに大きな変化はなかった。

#### 4. 4. 考察

##### 4. 4. 1 対策工周辺の河床変動

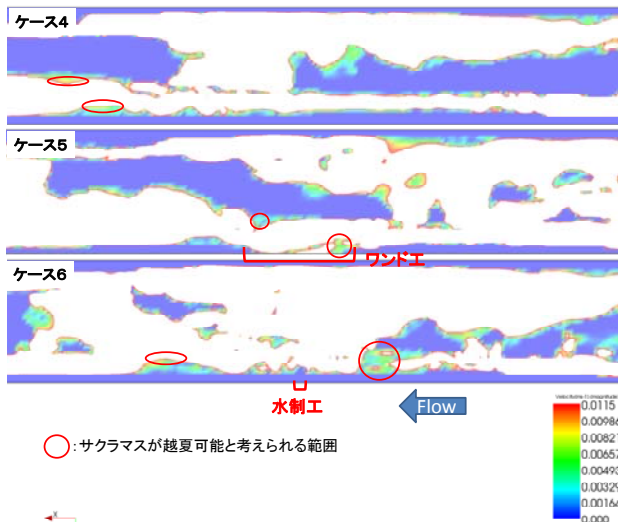


図-22 流況計算 (0.00015m<sup>3</sup>/s) による流速分布  
 ※流速0.0115m/s以上の個所を白抜き

図-11に示すとおり、ケース2, 5, 6の砂州前縁線が対策工側に向けた状態では、ワンド下流端と水制工の先端に大きな深掘れが確認され、ケース5では図-11cに示すとおり、ワンドの下流端に水はねが確認された。既往研究においてもワンドの下流端においては、水はねが生じることが知られている<sup>19)</sup>。本実験において確認された、ワンド下流端の深掘れは、砂州前縁線からワンドに向かう流れが、ワンド下流端に集中し、水はねしている流況が影響したことが考えられる。この深掘れは本実験のケース2では最大8cmであり、例えば本実験が1/100スケールものとする、実スケールでは最大8mの深掘れとなる。このように、ワンド下流端で深掘れが発生することは、現地に施工を検討する際には考慮する必要がある。

#### 4. 4. 2 対策工による流速低減効果

図-14~17に示すとおり、対策工設置の有無や、対策工の設置位置の砂州内とその上下流の砂州内では、河岸部の流速に大きな差がなく、流速低減効果は確認されなかった。これは、流速分布が砂州地形の影響を強く受けているためと考えられる。

実験によるワンド内の流速は断面Aの場合は0.03~0.04m/s、断面Bの場合は0.27m/sであり、本実験を1/100スケールものとする、フルード相似側より実スケールでの値は、それぞれ0.3~0.4m/s、2.7m/sとなる。断面Aの場合は、ワンド内流速がサクラマスの体長を概ね35cm<sup>9)</sup>とした場合の巡航速度1m/sを下回るため、魚類の待避場所として機能することが考えられる。

#### 4. 4. 3 対策工が砂州形状、移動へ及ぼす影響

図-18, 19に示すとおり、対策工を設置したケースでは、対策工の上流側の方が下流側よりも、砂州の半波長と波高が小さく、移動速度は大きかった。砂州の波長、波高は池田<sup>25)</sup>によれば、式(4)~(6)のように表される。

$$L = 5 \sqrt{\frac{Bh}{C_f}} \quad : Fr < 0.8 \quad \dots (4)$$

$$\frac{L}{B} = 5.3 \left(\frac{B}{d_s}\right)^{-0.45} \frac{B}{h} \quad : Fr \geq 0.8 \quad \dots (5)$$

$$\frac{Z_b}{h} = 9.34 \left(\frac{B}{d_s}\right)^{-0.45} \exp \left[ \frac{2.53 \operatorname{erf} \left\{ \frac{\log_{10} \left( \frac{B}{h} \right) - 1.22}{0.594} \right\}}{0.594} \right]$$

… (6)

ここに、 $L$  は波長、 $B$  は川幅、 $h$  は水深、 $C_f$  は河床の摩擦係数、 $Z_b$  は波高、 $d_s$  は粒径、 $Fr$  はフルード数である。これらの式を用いて、本実験の水力条件として、 $Fr$  数を等流水深とマンニングの式から算出した流速から算出して0.87、川幅 $B$  を0.7m、水深 $h$  を等流水深の0.02m、粒径を0.00077mとし、半波長、波高を算出すると、それぞれ3.03m (波長6.05m÷2)、3.6cmとなる。これを図-18, 19a, bに示す実験結果と比較すると、ケース5,6の対策工下流側で、実験値と算出値がほぼ一致するが、上流側では実験値が小さくなっている。また、ケース2については、実験値の対策工下流側の半波長の方が、算出値よりも小さいが、波高はほぼ一致し、上流側では半波長、波高ともに実験値が小さくなっている。対策工下流側は、概ね水力条件から算出される半波長、波高と一致していると考え、対策工上流側では算出値から逸脱し、半波長、波高が、対策工の設置により小さくなったことが考えられる。

砂州の移動速度と水量との関係を、簡易に砂州の前縁で粒子がトラップされることにより生じるとすると、式(7)により表現可能とされ、流砂量に比例し、砂州波高に反比例する<sup>26)</sup>。

$$V_b = (1 - \lambda) \frac{q_b B}{Z_b l_{bf}} \quad \dots (7)$$

ここに、 $V_b$  は砂州の移動速度、 $\lambda$  は河床を構成する材料の空隙率、 $q_b$  は流砂量、 $B$  は川幅、 $Z_b$  は波高、 $l_{bf}$  は砂州前縁の長さである。本実験で、ワンド上流側の砂州の移動速度が下流側よりも速かった原因として、前述したとおり、ワンドの設置により、その上流側の砂州の波長 (前縁の長さ)、波高が小さくなり、それに伴い、式(7)の関係から、移動速度が大きくなったと考えられる。

対策工の設置によりその上流側に波長、波高、砂

州の移動速度に変化が生じた原因として、図-12, 13をみると砂州の深掘れ部が浅くなっており、対策工の上流で流砂が堆積傾向になったことが考えられるが、詳細な機構の解明は今後の課題としたい。

## 5. おわりに

### 5. 1 出水時における護岸工の流況

出水時の護岸工周辺の流速を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

①既往研究により、砂州発生条件下での移動床水理模型実験の結果、河岸部の粗度が低下するほど、河岸部の流速が速くなる傾向が確認された。

②融雪出水期に護岸工が実施されている現地河川において、超音波流速計による断面流速分布の曳航観測を行った結果、護岸工近傍まで高流速域が接近していることを確認した。

③砂州の移動条件での護岸工下流端部の洗掘を河床変動計算により検討した結果、わずかだが、河岸粗度が小さいほど、護岸工下流端部が洗掘される傾向にあった。また、弯曲部河道における護岸工下流端部の洗掘を河床変動計算により検討した結果も同様であった。

本研究で対象とした河床勾配1/200程度の河道条件においては、護岸工による粗度の低下により、その近傍の流速が増す傾向が確認されたが、護岸工下流端部の洗掘は大きくなかった。現地河川においては、護岸工の上下流端に、粗度が自然河岸とすりつくような凹凸の大きい素材のすりつけ工が行われることや、自然河岸部に植生による被覆効果もあるため、粗度の低下の影響による護岸工下流端部の浸食は少ないと考えられる。ただし、自然状態の川幅を護岸などの構造物で狭窄して、水深が大きくなるような改修を行っている場合や、砂州や蛇行部の移動により、水衝部が変化する場合は、護岸下流端部が洗掘される可能性があり得る。

### 5. 2 平水時における護岸工下流の最適な魚類生息環境

冷水性魚類のサクラマスを対象とし、既往文献により、越夏環境、越冬環境、出水時の待避場の観点で最適な生息環境について以下のとおり、取りまとめを行った。

①越夏環境としては、流速が遅く、水深が深く、大きなカバーがある個所が望ましく<sup>8,9)</sup>、水深が2m以上あればこれがカバーの代わりにもなる<sup>10)</sup>。なお、既往調査結果<sup>9)</sup>ではサクラマスが確認された淵の水深

の平均値と標準偏差は54.8 ± 13.6cm、範囲は32.7-70.2cm、流速の平均値と標準偏差は4.3 ± 4.0cm/s、範囲は0-11.5cm/sとされている。

②越冬環境として、流速が遅く、水深が深い個所が利用されており<sup>13)</sup>、既往調査結果<sup>13)</sup>では、この流速が1.3cm/s ± 1.5 (平均 ± 標準偏差) と遅く、水深が81.5cm ± 17.4との調査結果が述べられている。

③出水時の待避場としては、サクラマスの巡航速度<sup>15)</sup>程度の流速となる個所が望ましいと考えられ、親魚を対象とすると、1.0m/s程度以下となる個所が望ましいと考えられる。

### 5. 3 対策工による河岸流速の低減効果と砂州地形への影響

本研究は、護岸工による粗度低下に伴う河岸部周辺の高流速対策として、対策工（ワンド工もしくは水制工）の効果を移動床水理模型実験により検証した。その結果、以下のことが明らかとなった。

①砂州前縁線が対策工側に向けた状態では、ワンドの下流端もしくは水制工の先端で水はねが生じ、大きな深掘れが生じた。

②対策工設置による河岸部での顕著な流速低減効果は確認されなかった。しかし、本実験を1/100スケールとした場合、ケースによっては、実スケールでも出水時にワンド内の流速が体長35cm程度のサクラマスの巡航速度以下となると考えられた。

③対策工の設置により発生した河床地形の低水流量時の流況をサクラマスの越夏環境の観点から検討した結果、対策工の有無により大きな差はなかった。

④対策工を設置したケースでは、その上流側で、下流側よりも、半波長および波高が小さく、移動速度が大きかった。これは対策の設置により、その上流が堆積傾向になったことによると推察される。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二ら：緩傾斜河岸を設置した河道弯曲部の流れと河床形状，土木学会論文集，No.509(II-30)，pp155-167，1995,2.
- 2) 護岸の力学設計法．(財)国土技術研究センター，2007.
- 3) 中野繁，井上幹生：河道の直線化改修がサクラマス幼魚の微生物場所に与える影響，魚と卵 Tech. Rep. Hokkaido Salmon Hatchery(164):23-32,1995.
- 4) 矢野雅昭ら：平成25年度プロジェクト研究報告書；8.3 冷水性魚類の産卵床を考慮した自律的河道整備に関する研究，(独)土木研究所，<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/project.html>.

- 5) 国土交通省, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>
- 6) iRIC Project, <http://i-ric.org/ja/>
- 7) 真山 紘: サクラマス淡水域の生活および資源培養に関する研究, 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 46, pp.1-156, 1992
- 8) 田子泰彦: 神通川と庄川におけるサクラマス親魚の遡上生態, 日本水産学会, No.66(1), pp44-49, 2000.
- 9) Edo. Kaneaki. & Suzuki. Kenichi. :Preferable summering habitat of returning adult masu salmon in the natal stream. Ecological Research, No.18, pp783-791, 2003.
- 10) 魚のすみやすい川づくりガイドーサクラマスを代表種としてー, 財団法人 北海道建設技術センター, 2010,9.
- 11) 宮腰靖之: 北海道におけるサクラマスの放流効果および資源評価に関する研究, 北海道立水産孵化場研究報告第 60 号,pp.1-64,2006
- 12) 真山 紘: 越冬時のサクラマス幼魚の生活と河川環境, 北海道さけ・ますふ化場 魚と卵, 164, pp.33-40, 1995
- 13) 鈴木研一ら: 北海道北部河川におけるサクラマス幼魚の越冬時の微生息場所とその物理環境, 北海道立水産孵化場研究報告第 54 号,pp.7-14,2000,3.
- 14) 傳田正利・天野邦彦・辻本哲郎: 一時的水域の魚類群集多様性向上への寄与とそれを支える物理環境に関する研究, 土木学会論文集G, Vol.62(3), pp340-358, 2006.
- 15) 魚からみた落差工への配慮事項, (財) リバーフロント整備センター, 1998,3.
- 16) 山本晃一: 構造沖積河川学; その構造特性と動態, 山海堂, 2004.
- 17) 多自然川づくりポイントブックⅢ. (財) リバーフロントセンター, 2013.
- 18) 例えば、禰津家久・富永晃宏: 水理学, 朝倉書店, 2008,10.
- 19) 禰津家久ら: わんど形状が河川に及ぼす影響に関する水理学的研究, 応用力学論文集, Vol.3, pp813-820, 2000.
- 20) 富永晃宏・鄭載勲・阪巻実佳: 複断面開水路高水敷に設けられた凹部の流れ構造, 応用力学論文集, Vol.8, 2005,8.
- 21) 水理公式集, 社団法人 土木学会, 1985.
- 22) 水理公式集, 社団法人 土木学会, 1999.
- 23) 黒木幹男・岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第 342 号, pp87~96, 1984.
- 24) QGIS, <http://www.qgis.org/>
- 25) 石狩川水系豊平川河川整備計画, 国土交通省北海道開発局, <http://www.sp.hkd.mlit.go.jp/>, 2008,9.
- 26) 池田駿介: 単列交互砂州の波長と波高, 水工学論文集, 第 27 回, 1983,2.
- 27) 渡邊康玄: 中規模河床形態の形状特性と河川地形, 2008 年度 (第 44 回) 水工学に関する夏期研修会講義集 A コース, 土木学会 水工学委員会・海岸工学委員会, 2008,8.

## **A study on environmental characteristic understanding and repairing method for structure edge on a steep river in cold region**

**Budgeted :** Grants for operating expenses  
General account

**Research Period :** FY2011-2013

**Research Team :** Watershed Environmental  
Engineering Research Team

**Author :** YABE Hiroki  
WATANABE Kazuyosi  
YANO Masaaki

**Abstract:** To understand river flow velocity of adjacent bank protection, cross sectional velocity distribution was surveyed by ultrasonic velocity meter on mid reach, where bank protection is installed, on a river. The result showed that high velocity occurred to adjacent bank protection. To understand erosion tendency difference by manning roughness on bank protection, numerical calculation was carried out. The result showed that the lower was the manning roughness on the bank protection, the greater were the erosion extent slightly. Countermeasures (Wand and dike structure) effects on decreasing manning roughness on adjacent bank protection, was confirmed by flume experiment. The result showed that the countermeasures were ineffective for decreasing flow velocity of adjacent bank protection. But the area inside the wand, assumed useful for fish shelter under high velocity caused by flood. And the results also showed that length and height of bars, those were located on upstream of the countermeasures, were shorter and smaller than those of sand bars in the cases which no countermeasures were set.

**Key words:** Bank protection, Manning roughness, Fishes habitat, Wand, Dike