水制周辺の流れおよび河床形状と 魚の遊泳行動について

青木 宗之¹・菊池 裕太²・坂間 睦美³

¹正会員 博(工) 東洋大学准教授 理工学部 都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)
E-mail: aoki037@toyo.jp

²正会員 修(工) 埼玉県 県土整備部 河川砂防課 (〒330-9301 埼玉県さいたま市浦和区高砂3-15-1)

³学生員 東洋大学大学院 理工学研究科 都市環境デザイン専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

本研究は、水制周辺の流れおよび河床形状が魚類の遊泳行動に及ぼす影響を、流速 $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ および渦度 ω_z に着目し、検討を行った。そのために、水理実験および実魚 (平均体長 $(BL) = 5.9(\text{cm})$ のウグイ) を用いた挙動実験を行った。

その結果、流量の異なる2ケースともに、河床洗掘箇所には大きな差異はなかった。また、水制による治水 (流速低減, 水刳ね) 機能が確認された。水制により流速低減した水制下流側で、魚が滞留する傾向にあった。魚の滞留箇所の流速 V は、 $25(\text{cm/s})$ (巡航速度 $4BL(\text{cm/s})$) 以下であり、渦度 ω_z の大きさが $2(\text{rad/s})$ 以上であった。河床材料が粗礫の場合、魚の水制下流側での滞留時間は、粗砂の場合に比べて1.7倍増加した。

以上より、水制周辺の流れや河床形態が、魚の生息場になり得ることが示唆された。

Key Words : groin, flow characteristics, vorticity, fish behavior, bed material

1. はじめに

1992年 (平成4年) に、生物多様性の保全等を目的とした生物多様性条約が採択され、1993年 (平成5年) に日本は当該条約を締結した¹⁾。その後、「環境」がキーワードとなり、様々な分野で取り上げられるようになってきた。河川においては、日本国内では、自然環境調査等が数多く行われるようになった。河川においては、1997年 (平成9年) に従来の治水, 利水に環境面をも考慮した現行河川法へ改正された。また、2005年 (平成17年) に「魚がのびやすい川づくりの手引き」²⁾の発行、2006年 (平成18年) に「多自然川づくり基本方針」³⁾が通達された。その他、河川環境に関連する指針やマニュアル、ガイドライン等⁴⁾は多数あり (表-1)、河川環境の保全や保護を考慮した河川整備が求められるようになっていく。このような時勢もあり、古くから用いられてきている「水制」が再度注目されている。

水制は、流速低減および水刳ねという2つの機能を持つ水理構造物であり⁵⁾、古くから河岸の浸食等を防ぐ護岸構造物として多用されてきている。これらの機能は、河岸付近の洗掘軽減、水制周辺部の河床変動を促すとい

った効果をもたらす。これら水制に関する研究は、秋草ら⁶⁾の基礎的研究を発端に、模型実験や数値実験等によって、主として水制の治水機能 (水理特性および河床変動特性) についての解明への努力が多くなされてきている (表-2 a)。近年では、水制がもたらす水理機能の効果から、水制周辺部が水生生物の生息場として利用されることが期待されているほか、河川景観の向上等にも期待されている (表-2 b)。事実、高水¹⁴⁾および青木ら^{15, 16)}は、杭水制が魚類の生息場になり得ることを実験および数値解析で示した。福留ら¹⁷⁾は、山地河川の直線化された河道に二つの異なる形状の水制を設置し、自然に近い淵の構造が復元させ、天然の淵と同様の成果を得たことを示した。林ら^{18, 19)}は、間伐材水制の導入により、土砂の分級や水制周辺の多様なハビタットの創出、魚類の生息環境再生等の手法として一定の効果を有することを明らかにした。菊池ら²⁰⁾は、非越流型水制を交互に配置し、水制設置角度が魚の遊泳行動 (遡上および滞留) に影響を及ぼすことを示した。

以上のように、水制は治水機能だけでなく、豊かな河川環境を創出するという面でも注目が集まっている。一方、生物多様性を視野に入れた河川整備を行っていくう

表-1 河川環境に関連する指針やマニュアル等^{a)}の一例

年	河川環境に関連する指針やマニュアル、ガイドライン等
2004	汽水域の河川環境の捉え方に関する手引書
2004	身近な水域における魚類等の生息環境改善のための事業連携方策の手引き
2005	自然再生～計画から実施までの考え方(案)～
2005	魚がのぼりやすい川づくりの手引
2006	多自然川づくり基本方針
2006	河川の景観形成に資する石積み構造物の整備に関する資料
2006	河川景観の形成と保全の考え方

表-2 各々の研究者による水制に関する研究一覧

a) 治水機能(水理特性および河床変動特性)に着目した研究

研究者	着目点	l/B	l/D	文献No.
秋草ら	水理・河床変動特性	-	-	5)
福岡ら	水理・河床変動特性	0.25	0.6	6)
大本ら	河床変動特性	0.25	0.5	7)
池田ら	水理特性	0.25	-	8)
富永ら	水理特性	0.16	0.5	9)
鬼束ら	河床変動特性	0.25	-	10)
大本ら	水理・変動特性	0.25	0.5	11)
松本ら	河床変動特性	0.25	0.2	12)
原田ら	河床変動特性	0.33	-	13)

b) 環境機能に着目した研究

研究者	着目点	l/B	l/D	文献No.
高水ら	魚類行動	0.23	-	14)
青木ら	魚類行動	0.2	-	15), 16)
福留ら	瀬・淵構造の創出	0.6	0.25	17)
林ら	景観・生息場の創出	0.33	-	18), 19)
菊池ら	魚類行動	0.27	0.2	20)

えでは、水制周辺の流れ特性や、土砂の洗掘・堆積といった河床変動特性をも把握することは、非常に重要であるといえる。そこで本研究では、水制周辺の流れおよび河床形状が、魚類の遊泳行動にどのような影響を及ぼすかを明確にすることを目的とした。そのために、流量および河床材料を変化させ、水理実験および移動床実験、実魚を用いた挙動実験を行った。

2. 実験概要

表-3に、実験ケース一覧を示す。実験には、高さ $l=10(\text{cm})$ 、長さ $b=8(\text{cm})$ 、幅 $b=3(\text{cm})$ のコンクリートブロックを疑似水制(以下、水制とする)とし、1基または4基を用いて非越流状態で実験を行った。Run1およびRun2の河床材料には、代表粒径 $d_{50}=2(\text{mm})$ の様な粗砂を用いた。実験流量 Q は、それぞれ $2.0(\text{l/s})$ および $6.0(\text{l/s})$ とした。そのため、砂の移動量を考慮し、初期敷厚をそれぞれ $3.0(\text{cm})$ および $5.0(\text{cm})$ とした。Run3は、Run2と同様に実験流量 Q を $6.0(\text{l/s})$ とした。また、河床材料には $d_{50}=20(\text{mm})$ の

表-3 実験ケース一覧

	流量 $Q(\text{l/s})$	水制設置箇所 位置・基	河床 材料	初期敷厚 (cm)
Run1-1	2.0	左岸 1	一様な粗砂 $d_{50}=2(\text{mm})$	3.0
Run1-2		左岸 4		
Run1-3		左岸 2, 右岸 2		
Run2-1	6.0	左岸 1	一様な粗砂 $d_{50}=2(\text{mm})$	5.0
Run2-2		左岸 4		
Run2-3		左岸 2, 右岸 2		
Run3-1	6.0	左岸 1	一様な粗礫 $d_{50}=20(\text{mm})$	Run2 を 再現
Run3-2		左岸 4		
Run3-3		左岸 2, 右岸 2

図-1 実験水路概略図 (単位: cm)

a) Run1 (魚の挙動観測区間拡大図)

b) Run2 (魚の挙動観測区間拡大図)

c) Run3 (魚の挙動観測区間拡大図)

図-2 水制設置位置と魚の挙動観測区間概略図 (単位: cm)

様な粗礫を用いてRun2の河床高さを再現し、河床形状を変化させた。なお、実験には実魚が無理なく遊泳することができるよう、実験条件を設定した。魚の行動は、主として流速の大きさに依存しているため^{14)~16), 20)~22)}、実河川で平水時に生じている流速を考慮した。図-1に、実験水路図を示す。全長 $L=1,050(\text{cm})$ 、水路幅 $B=30(\text{cm})$ 、水路勾配 $1/500$ の矩形断面開水路であり、水路中央部に水制を設置し魚の挙動観測区間とした(図-2)。また、水制は流下方向に対して 90° となるように設置し、1基目の水制設置箇所は $x=50(\text{cm})$ の左岸側とした。なお、表

-2のとおり、既往研究における水制長さ l および水路幅 B の比 l/B は0.25程度であるため、本実験では l/B を0.27とした。また、既往研究における水制長さ l および水制設置間隔 D の比 l/D は0.2~0.6と差が生じた。一方で、 l/D の違いによる水制周辺の河床変動特性に大きな差異が見られていない。そこで、本実験では魚の遊泳行動を考慮し、水制設置間隔 $D=25(\text{cm})$ とし、 l/D を0.32とした。

なお、水制周辺における基本的な魚の遊泳特性を把握するため、Run1-1, Run2-1, Run3-1は単独水制とした。一方で、Run1-2, Run2-2, Run3-2は、複数基の水制周辺における魚の遊泳特性を把握するためである。また、実験水路内で蛇行した流れを形成することで、実小河川における魚の挙動が再現可能であるため²¹⁾、Run1-3, Run2-3, Run3-3は水制を左右岸交互に設置した。なお、各ケースにおいて水路最下流部の堰を調節し、実験開始時における $x=0(\text{cm})$ での実験水深を魚が遊泳可能な5.0(cm)とした²⁾。

本実験条件は、既往研究の l/B や l/D の値と同様のため、汎用性のある設定といえる。また、魚はその体長相当分の長さしか流れを認識できない²³⁾。そのため、水制周辺の局所的な流れに対する魚の遊泳行動は、実験水路においても十分に把握できる^{14)~16), 20)~22)}。よって、本実験結果は河川計画に有用な情報を与えるものといえる。

(1) 水理実験および移動床実験

a) 水理実験

水理実験では、 $x = -50 \sim 200(\text{cm})$ の区間において、縦断方向は10(cm)間隔、横断方向は右岸側より $y = 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 27.5(\text{cm})$ の箇所(水制によって計測が不可能な点を除く)で流速および水深の計測を行った。流速は、二次元電磁流速計(KENEK製, VMT2-200-04P)を用い、 x, y 方向の流速(u, v)を計測した。サンプリング周波数を100(Hz)として512個のデータを計測し、単純平均した。実魚の遊泳深度を目視によって確認した結果、青木ら²²⁾と同様に路床および礫上から2.0(cm)であったため、路床および礫上から2.0(cm)の点で流速を計測した。なお、水深はポイントゲージ(KENEK製, PH-102)を用いて計測した。

b) 移動床実験

Run1, Run2では、代表粒径 $d_{50}=2(\text{mm})$ の様な粗砂をそれぞれ敷厚3.0(cm), 5.0(cm)とし、 $x=-200 \sim 300(\text{cm})$ の計500(cm)の区間に敷き詰め、粗砂が移動しないよう水路下流部の堰高および流量を調節しながら冠水状態にした。また、水面勾配が変化しないよう30秒間かけて堰高および流量を設定条件に戻した。その後、10分間の通水を行い、河床高が変化しないよう減水させ、河床高をポイントゲージで計測した。なお、Run1, Run2の予備実験において、10分間の通水の後に十分な時間が経過しても河床の変動に大きな差異がなかったことから、10分間の通水

時間で平衡状態とみなした。また、特に $Q=6.0(\text{l/s})$ のRun2では、実魚を用いた挙動実験時に河床形態が変化しないよう、河床高の計測後にウレタン樹脂で河床を固定した。

また、菊池ら²⁰⁾は代表粒径 $d_{50}=15(\text{mm})$ の様な粗礫を用いて移動床実験を行い、水制周辺の河床洗掘および堆積の傾向を示した。その結果は、中央粒径 $d_{50}=0.94(\text{mm})$ の様な珪砂を用いた大本ら¹¹⁾と同様の傾向であることも示した。そこで本実験では、河床材料の違い(粗砂および粗礫)による水制周辺の流れおよび魚の遊泳行動特性を検討するため、Run2で形成された河床形態を代表粒径 $d_{50}=20(\text{mm})$ の様な粗礫を用いて再現したケースをRun3とした。なお、Run3においても平衡状態であり、河床材料は移動していない。

(2) 実魚を用いた挙動実験

a) 魚類について

実験には、ほぼ全国的に分布するウグイ(*Tribolodon hakonensis*)を用いた。ウグイは、強い遊泳力および走流性を有している^{14)~16), 20)~22)}。本実験に用いたウグイの体長は5.3~6.6(cm)であり、平均体長 $\overline{BL}$ は5.9(cm)である。ウグイは体長が4.0(cm)以上であれば、成魚と同様の流速を好んで遊泳するため²⁴⁾、 $\overline{BL}=5.9(\text{cm})$ のウグイを用いることで、魚の遊泳特性は十分に把握できる。また、本実験に用いたウグイは、高さ60(cm)、幅150(cm)、奥行き90(cm)の水槽内に噴流機を1台設置し、常に流水状態(水槽内の流速:10~40(cm/s)程度)で飼育している²⁰⁾。なお、魚の遊泳速度には長時間の遊泳が可能な巡航速度($2\overline{BL} \sim 4\overline{BL}(\text{cm/s})$ 程度)^{23), 25)}、1~5秒程度の遊泳のみ可能な突進速度($10\overline{BL}$ 程度)²³⁾の2種類が定義されている。そのため、本実験に用いたウグイの巡航速度は11.8~23.6(cm/s)程度、突進速度は59.0(cm/s)程度である。

b) 実験方法

ウグイの持つ群遊性を考慮し²⁶⁾、河床が平衡状態となった図-2中の魚放流区間に5尾のウグイを実験毎に放流し、流速および水温に30分間馴致させた。その後、放流区間上方よりビデオカメラ(SONY製, HDR-CX630V)でウグイの遊泳行動を30分間撮影した。実魚(ウグイ)を用いた挙動実験は、各ケースにおいて5回ずつ行った。また、ウグイの疲労や環境への適応性を考慮し、実験には毎回異なる個体を用いた。そのため、本実験では225尾のウグイを用いている。なお、一度実験に用いたウグイは回収し別の水槽に移しており、再度実験には用いていない。撮影したウグイの遊泳行動は、二次元動画解析ソフト(ライブラリー製, Move-Tr2D)を用いて動画解析した。実験時の水温は $20 \pm 2(^{\circ}\text{C})$ 、水面の照度は200~250(lx)であり、ウグイは比較的行動的であった。なお、ウグイは水温が $11 \pm 1(^{\circ}\text{C})$ 以下になってしまうと、遊泳能力が極端に低下するといわれている²⁷⁾。

図-3 Run1 ($Q=2.0(l/s)$:粗砂)での移動床実験結果

図-4 Run2 ($Q=6.0(l/s)$:粗砂)での移動床実験結果

3. 実験結果

流量および河床材料の違いによる、水制周辺での流れと魚の遊泳行動の関係を明確にするために、流速および渦度に着目した。なお、流速は、 x 方向および y 方向の時間平均流速 $u(cm/s)$ および $v(cm/s)$ の合成流速 $V(cm/s)$ を用いて整理した。また、渦度は以下のとおり定義される。

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

ここで、 ω_z : z 軸まわり (x - y 平面) の渦度(rad/s)であり、流れの回転運動の強さを示す。魚の遊泳行動は、流れの乱れにも影響することが分かっている^{15), 16), 20)}。また、魚は平面的な循環流(回転した流れ)があることにより、その場に滞留し続けてしまうことが指摘されている²⁸⁾。そこで、本研究では渦度を一つの指標として、水制周辺での流れと魚の遊泳行動との関係を示すこととした。これらの関係性を明確にすることで、水制の環境機能評価に役立つ知見になると考えられる。なお、渦度が負(-)の値であれば時計回り、正(+)の値であれば反時計回りの回転を示す。

(1) 移動床実験について

図-3および図-4に、Run1およびRun2における移動床実験結果を示す。ともに、代表粒径 $d_{50}=2(mm)$ の一般的な粗

砂である。それぞれ、初期河床高からの河床洗掘および堆積割合を示している。流量の異なる2ケースとともに、水制天端部を中心に河床洗掘が生じ、流速が低減している水制下流側で堆積が生じた。これは、大本原¹¹⁾および菊池ら²⁸⁾の実験結果と同様の傾向であった。なお、既述のとおりRun3は、河床形状を代表粒径 $d_{50}=20(mm)$ の一般的な粗礫を用い、Run2の河床形態を再現した。

(2) 流れ特性について

a) 平面流況

図-5、図-6、図-7に、各ケースにおける uv ベクトルおよび流速 V コンターを示す。流量および河床材料の大きさに関わらず、各ケースにおいて水制によって水刎ねされ、水制下流側で流速が低減していることが分かる。なお、Run1-3、Run2-3、Run3-3において、水制周辺で蛇行した流れが発生している。これは、水制を交互に配置したことにより、水刎ねが左右岸に向いた結果である。また、代表粒径 $d_{50}=2(mm)$ の一般的な粗砂を河床材料としているRun1およびRun2を比較すると、Run1-2、Run1-3およびRun2-2、Run2-3での水制下流側の流速は、 $V=25(cm/s)$ 以下であり、その形成範囲に大きな差異が見られなかった。一方で、Run1-1およびRun2-1を見ると、水制下流側の $V=25(cm/s)$ 以下の領域は、Run1-1に比べてRun2-1は50(%)程度減少している。

次に、実験流量が $Q=6.0(l/s)$ と同一である一方で、河床

a) Run1-1 (左岸1基)

b) Run1-2 (左岸4基)

c) Run1-3 (交互4基)

図-5 Run1 ($Q=2.0(l/s)$: 粗砂) での uv ベクトル, 流速コンター

a) Run3-1 (左岸1基)

b) Run3-2 (左岸4基)

c) Run3-3 (交互4基)

図-7 Run3 ($Q=6.0(l/s)$: 粗礫) での uv ベクトル, 流速コンター

a) Run2-1 (左岸1基)

b) Run2-2 (左岸4基)

c) Run2-3 (交互4基)

図-6 Run2 ($Q=6.0(l/s)$: 粗砂) での uv ベクトル, 流速コンター

a) 主流部 ($y=15(\text{cm})$)

b) 左岸側 ($y=25(\text{cm})$)

図-8 $Q=6.0(l/s)$: Run2, Run3における流速 V の縦断面図

材料の大きさが異なるRun2およびRun3 (河床材料: 代表粒径 $d_{60}=20(\text{mm})$ の様な粗礫) を見てみると, Run2およびRun3における流速の形成状況は同様の傾向を示していることが分かる. 一方で, Run2 ($d_{60}=2(\text{mm})$ の様な粗砂) に比べてRun3 ($d_{60}=20(\text{mm})$ の様な粗礫) は粗

図-9 Run1 ($Q=2.0(l/s)$: 粗砂) での uv ベクトル, 渦度コンター

図-10 Run2 ($Q=6.0(l/s)$: 粗砂) での uv ベクトル, 渦度コンター

図-11 Run3 ($Q=6.0(l/s)$: 粗礫) での uv ベクトル, 渦度コンター

度が大きいと、流速 V が5～45(%)程度減少している(図-8)。なお、各ケースにおいて水制下流側に形成された流速 V ($\approx 25(\text{cm/s})$ 以下)は、本実験に用いたウグイの巡航速度($4BL(\text{cm/s})$)以下の流速である。

b) 渦度

水制によって流速が低減された水制下流側において、 x - y 平面を回転している流れが確認できた。そのため、渦度に注目した。図-9、図-10、図-11に、各ケースにおける uv ベクトルおよび渦度 ω_z コンターを示す。流量および河床材料の大きさに関わらず、各ケースにおいて水制周辺で反時計回り(正(+))の値および時計回り(負(-))の値の回転運動を示していることが分かる。また、水制を交互に配置された結果、蛇行した流れが形成されているRun1-3, Run2-3, Run3-3は、他ケースに比べて回転運動が卓越していることが分かる。これは、交互に設置した水制によって水刎ねされた速い流れと、流速低減された遅い流れの流速差が大きく、流れの変化が生じやすいためだと考えられる。一方で、Run1-1およびRun1-2は、水制の治水(流速低減および水刎ね)機能を有しているものの、実験流量 $Q=2.0(l/s)$ であり水制周辺の流速差が小さかったため、その機能は十分に発揮されていないものと推察できる。また、代表粒径の大きさが異なるRun2($d_{60}=2(\text{mm})$ の様な粗砂)およびRun3($d_{60}=20(\text{mm})$ の一

様な粗礫)における渦度の形成状況に大きな差異は見られず、それらの渦度への影響は少ないことが示唆された。一方で、本研究では時間平均流速を用いて渦度を評価している。河床材料の大きさによっては、流速の乱れが大きく生じることもある。このことにより、時間平均流速を用いた渦度では魚の瞬時的な遊泳行動を説明することは困難であることが示唆される。そのため、瞬間的な渦度の変化に着目することが課題として挙げられる。

(3) 魚の遊泳行動について

各ケースにおいて、魚は側壁部を遡上した後に、水制下流側に形成された流速 V が $25(\text{cm/s})$ ($4\overline{BL}(\text{cm/s})$) 以下の箇所では滞留する傾向にあった。なお、本研究では魚が10秒間以上遊泳しなかった状態を「滞留」と定義した。流速 $V=25(\text{cm/s})$ ($4\overline{BL}(\text{cm/s})$) は、既述のとおり本実験に用いたウグイの巡航速度以下の流速である。水制下流側に、 $25(\text{cm/s})$ ($4\overline{BL}(\text{cm/s})$) 以下の流速 V が広範囲に形成されたRun1-1(単独水制)では、魚がゆらゆらと漂うように広範囲で滞留した。これに対し、その流速範囲が減少しているRun2-1(単独水制)およびRun3-1(単独水制)では、魚がある一点で滞留する傾向にあった。左岸側に4基の水制を設置したRun1-2, Run2-2, Run3-2では、魚が水制間でも滞留し、その後に遡上するという行動を繰り返した。交互に4基の水制を設置したRun1-3, Run2-3, Run3-3では、側壁部を遡上せずに、水制によって水刳ねされ蛇行した流れに対して遡上した。一方で、Run2-3およびRun3-3は主流部の流速 V が $55\sim 65(\text{cm/s})$ ($9\overline{BL}\sim 11\overline{BL}(\text{cm/s})$) 程度であり(図-8 a), 魚の突進速度程度であった。そのため、魚は水制下流側で滞留し、その後に遡上するという行動を繰り返した。

a) 魚の遡上・滞留と流速および渦度について

ここでは、魚の遡上および滞留といった行動に着目し、流速 V および渦度 ω_z との関係をさらに詳細に検討した。図-12に、魚が遡上・滞留した箇所の流速 V および渦度 ω_z を示す。魚が遡上した箇所の流速 V は、 $25(\text{cm/s})$ ($4\overline{BL}(\text{cm/s})$) 以上である傾向を示した。これは、既往の研究と同様の結果であった¹⁵⁾。また、8割以上の魚が砂床(Run2)および礫床(Run3)の違いに関わらず、渦度 ω_z の大きさが $2(\text{rad/s})$ 以下の箇所では遡上する傾向にあった(図-13)。一方で、魚は砂床(Run2)では直線的な遊泳であったのに対し、礫床(Run3)では屈折的な遊泳であり、その遊泳行動特性が異なった(図-14)。これは、砂床(Run2)と礫床(Run3)の違いによる流れの乱れが影響したものと考えられる。既述のとおり、魚の遊泳行動は流れの乱れにも影響することが分かっている^{15), 16), 21)}。そこで、流れの乱れにも着目した。図-15に、魚の遊泳箇所の流速 v の乱れ(v')を示す。その結果、砂床(Run2)では流速 v の時間変化に大きな変動はない

図-12 魚が遡上・滞留した場所における流速 V と渦度 ω_z

図-13 魚が遡上・滞留した場所における渦度の大きさの分布

図-14 砂床および礫床における魚の遊泳行動特性簡略図

図-15 魚の遊泳箇所の流速 v の乱れ(v') ($x=140(\text{cm})$, $y=25(\text{cm})$)

ことが分かる。一方で、礫床(Run3)での流速 v は著しい時間変化が生じていることが分かる。また、礫床(Run3)での流速 v の乱れ(v')は、砂床(Run2)に比べて10倍程度であった。そのため、砂床(Run2)に比べて礫床(Run3)では流れの変化が生じやすく、魚が流速 v の微小な変化をも感知し、屈折しながら遊泳したものと考えられる。このことにより、流れの乱れに着目することで、魚の瞬時的な遊泳行動を説明できることが示唆できた。

また、魚が滞留した箇所の流速 V は、 $10(\text{cm/s})$ ($2\overline{BL}(\text{cm/s})$) 以下の傾向を示し、渦度 ω_z の大きさが $2(\text{rad/s})$ 以下の箇所での魚の割合は6割程度と低下した(図-13)。これは、遡上する魚に比べて渦度 ω_z が大きい箇所に魚が滞留する傾向にあることを示している。このことにより、魚は巡航速度以下の流速 V ($2\overline{BL}(\text{cm/s})$) であり流れの変化が生じやすい箇所では滞留することが示

図-16 各ケースにおける魚の平均滞留時間および標準偏差σ

唆された。なお、魚は河床洗掘されている箇所においても滞留する傾向にあった。

以上より、時間平均流速を用いた過度 ω_2 は瞬時的な魚の遊泳行動を説明することは困難であることが示された。しかしながら、魚の遡上および滞留し得る領域を評価することは可能であるといえる。

b) 魚の滞留時間について

魚の滞留行動は、休息といったような生息場になり得ることから、魚が水制下流側に滞留した時間に着目した。図-16に、各ケースにおける魚の平均滞留時間を示す。Run1での魚の平均滞留時間は、25秒程度の滞留時間であった。これは、実験流量 $Q=2.0(l/s)$ であり魚の挙動観測区間全体で、流速 $V=25(cm/s)$ ($4\overline{BL}(cm/s)$) 以下の領域が形成されているため(図-5)、魚は水制下流側を利用せずに滞留可能な領域が多いためだと考えられる。次に、実験流量 $Q=6.0(l/s)$ のRun2およびRun3では、河床材料が粗砂($d_{60}=2(mm)$)であるRun2での魚の平均滞留時間は75秒程度であるのに対し、粗礫($d_{60}=20(mm)$)であるRun3での魚の平均滞留時間は125秒程度であり、Run2の1.7倍程度となった。これは、河床材料が粗礫であり、流れの変化が生じやすくなったためだと考えられる。

4. おわりに

本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 流量の異なる2ケースとともに、水制天端部を中心に河床洗掘が生じ、水制下流側の流速低減箇所での堆積が生じた。
- 2) 水制周辺で反時計回り(正(+))の値)および時計回り(負(-)の値)の回転運動を示した。さらに、水制を交互に配置した場合、回転運動が卓越した。
- 3) 河床材料が、代表粒径 $d_{60}=2(mm)$ の様な粗砂または $d_{60}=20(mm)$ の様な粗礫であっても、過度への影響は少ないことが示唆された。一方で、河床材料の大きさによっては、流速の乱れが大きく生じることもあることから、瞬間的な過度の変化に着目することが課題として挙げられた。
- 4) 魚は、流速が低減された水制下流側に滞留する傾向があり、河床材料の大きい場合には、滞留時間が増加し

た。なお、その場の流速 V は魚の巡航速度($4\overline{BL}(cm/s)$)程度以下であった。また、遡上($4\overline{BL}(cm/s)$)程度以上の流速 V 、過度 ω_2 の大きさが $2(rad/s)$ 以下の箇所)する魚に比べて、流れの変化が生じやすい、過度 ω_2 が大きい箇所に魚が滞留する傾向にあった。

- 5) 時間平均流速を用いた過度 ω_2 は瞬時的な魚の遊泳行動を説明することは困難であるが、魚の遡上および滞留し得る領域を評価することは可能である。
- 6) 水制周辺で形成される流れや河床の形態が、魚の生息場になり得ることが示唆された。

謝辞：本研究は、東洋大学井上円了記念研究助成の一部を受けて行った。また、本実験を行うにあたり、当時本学学部生の村上真央氏(現：三井共同建設コンサルタント株式会社)および塩谷国峰氏(現：戸田建設株式会社)にご協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 外務省HP：地球環境 生物多様性条約(生物の多様性に関する条約：Convention on Biological Diversity (CBD))、<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/jyoyaku/bio.html>
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局 HP：魚がのぼりやすい川づくりの手引き、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/kankyou/sakana_tebiki/pdf/print.pdf
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局 HP：多自然型川づくりの基本指針、<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/05/051013/02.pdf>
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局 HP：河川環境に関連する指針・マニュアル・ガイドライン等、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/
- 5) 秋草 勲、吉川秀夫、坂上義二郎、芦田和男、土屋昭彦：水制に関する研究、土木研究所報告第170号、p.2, 1960
- 6) 福岡捷二、西村達也、岡昌利、川口広司：越流型水制周辺の流れと河床変動、水工学論文集、第42巻、pp.997-1002, 1998
- 7) 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
- 8) 池田駿介、吉池智明、杉本 高：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/II-52、pp.145-155, 2000
- 9) 富永晃宏、田本典秀：越流型連続水制群周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果、水工学論文集、第48巻、pp.805-810, 2004
- 10) 鬼束幸樹、秋山壽一郎、鈴木鉄兵：越流型連続水制のアスペクト比の変化が河床形状および水理特性に及ぼす影響、水工学論文集、第49巻、pp.769-774, 2005
- 11) 大本照憲、平川隆一、渡邊訓甫：非越流型水制群の向きが河床変動と流れ構造に及ぼす影響、応用力学論文集、Vol.8、pp.875-882, 2005
- 12) 松本大三、富永晃宏：越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす水制設置角度の影響、水工学論文集、第50巻、pp.1009-1014, 2006
- 13) 原田守啓、高岡広樹、大石哲也、萱場祐一、藤田裕一郎：設置角度の異なる越流型上向き水制の河床変動特性に関する実験的研究、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.69、No.4、pp.I_1189-I_1194, 2013

- 14) 高水克哉, 栗原朋之, 青木宗之, 内山文哉, 福井吉孝: 杭水制内外の流れと魚の挙動, 水工学論文集, 第51巻, pp.1273-1278, 2007
- 15) 青木宗之, 染井香栄, 小原 誠, 吉野 隆, 福井吉孝: 間伐材を用いた杭水制の水理機能と魚の生息について, 環境システム研究論文集, 第37巻, pp.19-28, 2009
- 16) 青木宗之, 瀬崎薫貴, 福井吉孝: 複断面開水路における流量変化と魚の行動に関する実験的研究, 土木学会論文集G (環境), Vol.69, No.4, pp.166-182, 2013
- 17) 福留脩文, 藤田真二, 福岡捷二: 淵環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価, 水工学論文集, 第54巻, pp.1267-1272, 2010
- 18) 林 博徳, 服部実佳子, 新 希一, 岩瀬広継, 島谷幸宏: 上西郷川における間伐材を用いた河道内自然再生工法の導入と評価, 河川技術論文集, 第20巻, pp.121-126, 2014
- 19) 林 博徳, 服部実佳子, 富山雄太, 池松伸也, 来仙義久, 松尾耕太郎, 島谷幸宏: 市民普請による間伐材水制導入と川づくりへの意識向上効果, 河川技術論文集, 第21巻, pp.211-216, 2015
- 20) 菊池裕太, 青木宗之, 福井吉孝: 水制を有する開水路の流れと魚の遊泳行動について, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.71, No. 2, pp.I_747-I_756, 2015.
- 21) 菊池裕太, 青木宗之, 福井吉孝, 村野昭人: 実小河川における魚の挙動を模型実験水路で再現する試み, 土木学会論文集G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_183-II_190, 2015
- 22) 青木宗之, 向井健朗, 菊池裕太, 松木 越: 階段式魚道のプール内における礫の堆積が魚類の行動に及ぼす影響について, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71, pp.I_1099-I_1104, 2015
- 23) 鈴木興道: 魚の住みやすい川づくりに資する魚類の生息分布とその場の流速, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.21-29, 1998
- 24) 泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明: 河川流下水を用いたスタミナトンネルによるウグイの突進速度について, 農業土木学会論文集, No.244(74-4), pp.573-580, 2006
- 25) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, pp.84-89, 1995
- 26) 石川雅明: ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第6巻, pp.101-106, 2000
- 27) 鈴木興道: 魚道の設計に資する淡水魚類の耐久遊泳速度, 土木学会論文集, No.622/VII-11, pp.107-115, 1995
- 28) 青木宗之, 吉野 隆, 福井吉孝: 呼び水式魚道下流における流れとそれに対する魚の挙動, ながれ, 第28巻6号, pp.485-494, 2009

(2016. 3. 22 受付)

ON THE FLOW AND BED CONFIGURATION AROUND THE GROIN AND FISH SWIMMING BEHAVIOR TO IT

Muneyuki AOKI, Yuta KIKUCHI and Mutsumi SAKAMA

The purposes of this study are to examine clearly the flow, bed configuration characteristics and the characteristic of fish swimming behavior around the groin. To complete them, the hydraulics experiments and to observed the movement of real fish were done.

As the results, low velocity areas were formed the downstream of the groin and deviation flow was formed by the groin. Moreover, fish stayed at the high vorticity areas (more 2(rad/s)) and low velocity areas (25(cm/s) or less). On another front, fish run up at the small vorticity areas (2(rad/s) or less) and high velocity areas (25(cm/s)). Therefore, fish behavior has the possibility that vorticity contributes coupled with velocity.