

開水路に設置した遮蔽板の横断方向間隔の 変化がアユの遊泳特性に及ぼす影響

鬼束 幸樹¹・秋山 壽一郎²・白岡 敏³・鏝 敬介⁴・桃谷 和也⁴

¹九州工業大学大学院准教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

³奥村組 (〒545-0053 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

⁴九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

河川には魚がすめる条件の一つとして避難場所の確保が要求される。魚は血合筋と普通筋の二種類の筋肉をもち、平時は疲労が蓄積しない血合筋を使用する。遊泳速度が維持速度を超え、普通筋を使用すると疲労が蓄積されるため、避難場所での休憩が必要になる。

本研究は、横断方向幅を任意に変化させた遮蔽板を開水路に設置し、流速を系統的に変化させてアユの挙動について検討したものである。その結果、流速の増加に伴いアユの遊泳速度が増加することが判明した。これは、アユが下流に流されないように遊泳するためと考えられる。また、流速の増加に伴いアユの休憩エリアの利用回数および休憩時間が増加することが判明した。これは、アユが高速流を避けるためや休憩を目的として休憩可能エリアを使用したためと考えられる。

Key Words : rest area, ordinary and dark muscle, flow velocity, migration speed

1. はじめに

中村¹⁾は川に魚がすめる条件の一つとして避難場所の確保を挙げている。魚は平時には疲労が蓄積しない血合筋を使用し、疲労が蓄積する普通筋は使いたがらない²⁾。遊泳速度が維持速度を越え、普通筋を使用すると疲労が蓄積されるため³⁾、避難場所での休憩が必要となる。一方、捕食の危険や洪水時の突進速度を超える流速に遭遇した時も避難する必要がある。この場合は筋肉疲労の蓄積とは無関係に避難する。本論文では前者を「休憩」、後者を「避難」と区別する。

魚の避難場所の利用形態については多くの研究が存在する。綾ら⁴⁾は淀川において水位の上昇により、フナ(*Carassius*)などの18魚種がワンドに避難することを解明した。佐川ら⁵⁾は仔魚等がワンドに避難することを解明した。傳田ら⁶⁾は信濃川水系千曲川の一次水域および本川における魚類調査を行い、洪水時にアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)、ウグイ(*Tribolodon hakonensis*)、オイカワ(*Opsariichthys platypus*)、ギンブナ(*Carassius auratus langsdorfi*)が一次水域に避難することを示した。東ら⁷⁾は平川において出水で流下したウグイがワンドや植生帯に避難することを解明した。傳田ら⁸⁾は流速だけでなく加速度が避難行動に影響を及ぼすことを解明した。

また、傳田ら⁹⁾は過去の地形データに基づいて、魚の

避難可能エリアの経年変化を予測した。これらの研究では河川において、特に洪水時に低速領域に魚類が忌避することを示しており、河道計画を策定する上で、低流速域を設置する重要性を示している。ただし、河道設計上は断面積確保の観点からワンドや植生などの遮蔽物の流下方向の投影面積は小さい方が望ましい。したがって、同じ投影面積を有する遮蔽物において、魚の休憩場所が効率的に確保できる横断位置を明らかにすることが必要となる。

一方、魚の休憩場所の利用形態の研究も開始された。石川¹⁰⁾は水路片側に2つの水制を設置してウグイを10尾放流し、静水状態では水制間に滞在しないが流水状態では頻繁に滞在することを示した。福井ら¹¹⁾はヘチマロン(ポリプロピレンをヘチマの乾燥繊維の様な立体網目形状に成型した製品)を水路両壁に交互配置して稚アユを放流し、遡ヘチマロン下流側に発生する低速域で休憩することを示した。和田ら¹²⁾は水路片側に設置した連続水制の長さおよび間隔を変化させ、オイカワ5尾の遊泳を観察した。その結果、旋回が困難な凹部は利用しないが、それ以外の場合は頻繁に休憩することを示した。高水ら¹³⁾は水路側壁付近で円柱密度を系統的に変化させてウグイを放流し、円柱群内に侵入する尾数が円柱密度の増加に伴い低下することを解明した。鬼束ら¹⁴⁾は水路の側壁に遮蔽板を千鳥状に設置し、遮蔽板間隔および流速を系統

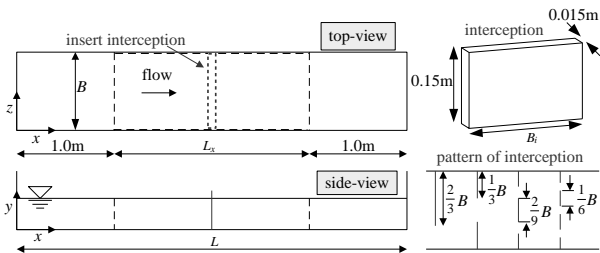


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Number of interception	B_i	$U_m/\bar{B}_L(1/s), Q(l/s)$			
		2, 4.8	4, 9.6	7, 16.8	10, 24
1	$(2/3)B$	C1-02	C1-04	C1-07	C1-10
2	$(1/3)B$	C2-02	C2-04	C2-07	C2-10
3	$(2/9)B$	C3-02	C3-04	C3-07	C3-10
4	$(1/6)B$	C4-02	C4-04	C4-07	C4-10

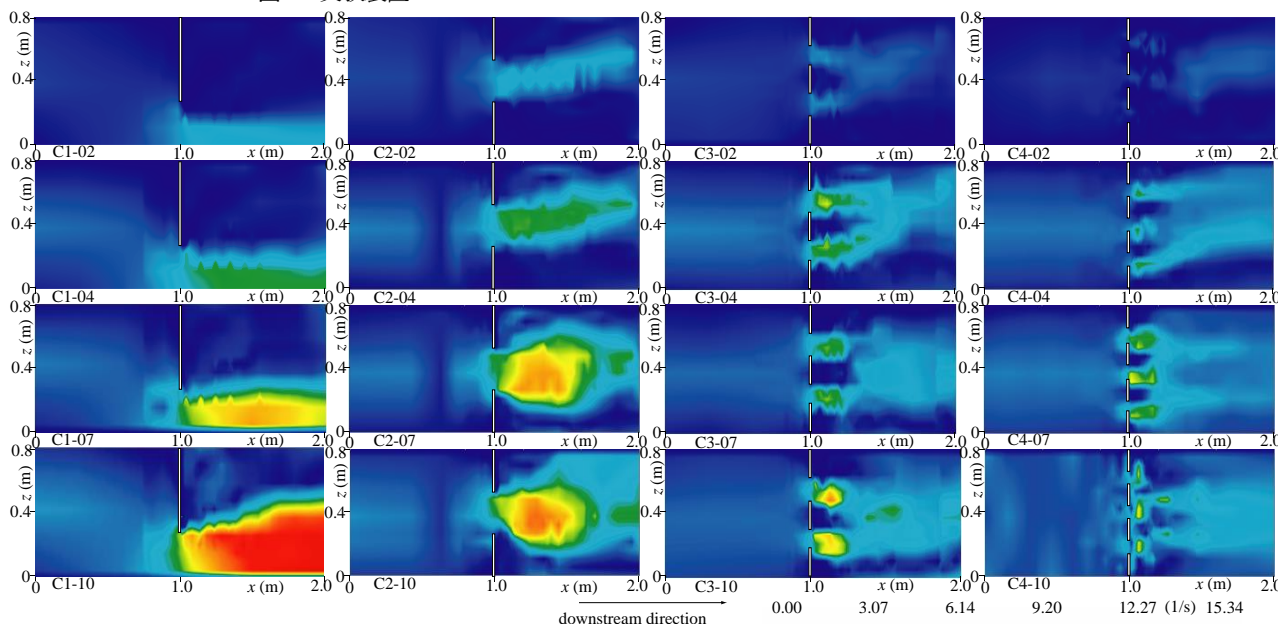


図-2 各ケースにおける流速コンター

的に変化させ、遮蔽板下流側に発生する低速域でカワムツが休憩することを解明した。以上のように、維持速度を越える速度で遊泳をした場合、休憩することが指摘されているものの、休憩場所や休憩時間およびそれらに及ぼす流速の影響についてはほとんど解明されていない。こうした不明点を解明するには、遮蔽板の横断位置および流速を系統的に変化させ、各魚種の行動特性を把握する必要がある。しかし、魚の行動特性は尾数による影響も受けるため、上記のパラメータに加え、尾数も系統的に変化させる必要がある¹⁴⁾。ただし、こうした実験には膨大な時間と労力を必要とするため、本研究では、まず、単独で魚が遊泳する状態に着目する。

本研究は、横断方向幅を任意に変化させた遮蔽板を開水路に設置し、流速を系統的に変化させて単独で遊泳するアユの挙動について検討したものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示す水路長 $L=4.0\text{m}$ 、横断方向幅 $B=0.8\text{m}$ 、高さ 0.25m の循環式開水路を実験に用いた。流下方向に x 軸、 x 軸に直角上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとる。厚さ 0.015m 、高さ 0.15m 、横断方向幅 B_i の遮蔽板を

水路始端から 2.0m の位置に横断方向に等間隔で設置した。表-1に実験条件を示す。遮蔽板の横断方向幅 B_i の合計が同一となるように、遮蔽板数を1~4枚の4種類に変化させた。それぞれの遮蔽板数において、水深を 0.05m に固定した状態で体長倍流速 $U_m/\bar{B}_L(1/s)$ を2, 4, 7, 10の4種類に変化させ、合計16ケースの実験を行った。ここに、 Q は流量、 U_m は断面平均流速、 $\bar{B}_L=60.0 \pm 2\text{mm}$ (平均±標準誤差)はアユの平均体長である。用いたアユは山口県樫野川漁業協同組合から購入した養殖魚である。なお、魚の最大遊泳速度、すなわち突進速度は体長倍流速 $U_m/\bar{B}_L(1/s)$ が10が最大のため、上記のような流速設定とした。対象魚をアユにした理由は、河川における漁獲量のトップクラスに位置していたため、最も保全すべき魚の一種と考えたからである。なお、表-1のように遮蔽板数と流速に基づきケース名を決定した。水路の下流端から 0.25m の位置の水路中央に直径 0.25m の円形金網を設置し、1尾のアユを挿入する。するとアユは金網内で暴れるように遊泳するが、3s程度で緩やかな定常遊泳となる。そのため、挿入後5~10s間馴致した後に金網を取り上げ、水路上部に設置した画素数 1440×1080 、撮影速度 30fps のビデオカメラで1分間撮影する。撮影時間を1分とした理由は、次のようである。撮影時間を変

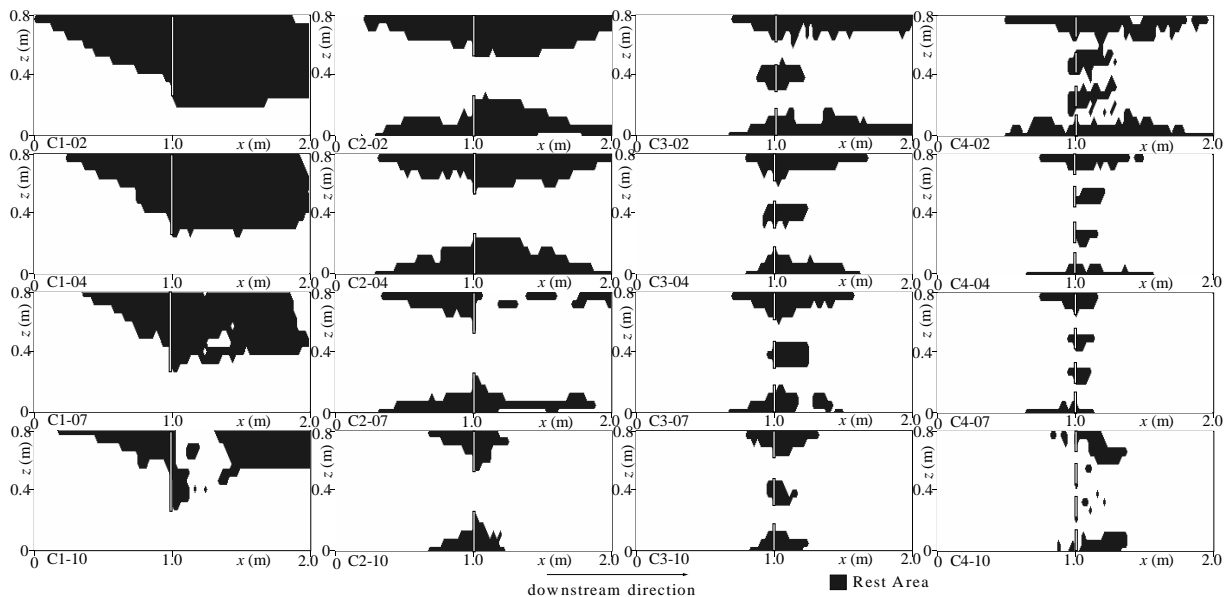


図-3 各ケースにおける休憩可能エリア

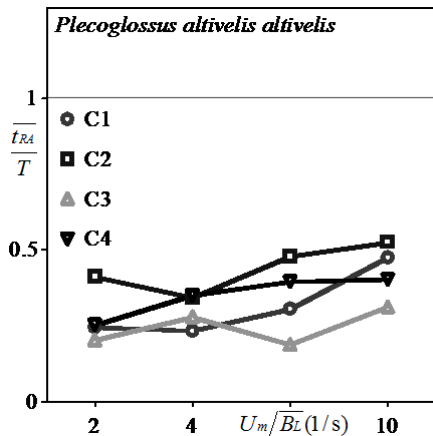


図-4 休憩可能エリアの平均滞在時間の割合

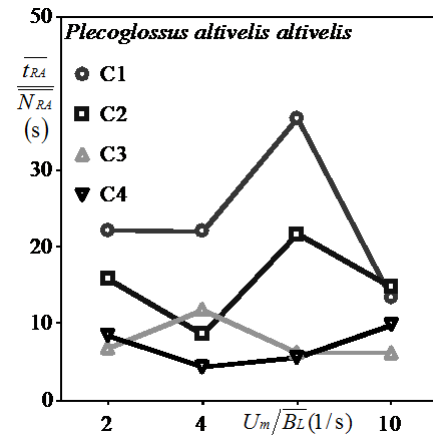


図-5 1回の休憩可能エリアでの滞在時間と流速との関係

化させると実験結果に差異が生じる。特に、30s以下の範囲では実験結果が大きく異なる。撮影時間の増加に伴い実験結果に及ぼす影響は徐々に減少する。1分以上撮影時間を増加させても結果に及ぼす影響は小さかったため、一つの目安として1分を採用した。上記の実験を各ケースで $n=50$ 回、合計800回行った。アユ300尾を順番に実験に使用した。そのため、一度実験に使用したアユが再度実験に用いられるまでに2、3日の間隔があるため、疲労の蓄積は考えにくく、同じアユを再使用することによる実験結果への影響はないと考えられる。また、水路に流す水はカルキ抜きした水道水で、実験中に循環する水を変えなかったが、貯水槽の容量が約4.0m³であるため、実験中の水温(約20℃)や水質はほぼ一定である。撮影後、0.2sごとの魚の遊泳位置を解析した。本実験では、図-1に示す $L_x=2.0$ m の範囲において撮影および解析を行った。

x 軸方向に2.5cm、 z 軸方向に5.0cm間隔でメッシュをとり、80×15点の格子で構成される計1200点において、3次元電磁流速計を用いて水路床から1.0cmの高さにお

ける流速3成分を0.05s間隔で25.6s計測した。流速計測位置を水路床から1.0cmの高さにした理由は、多くの魚が底面付近を遊泳するため、魚が体感する代表流速と見なせるからである。計測後、 x 軸、 z 軸方向の時間平均流速 U 、 W を算出した。また、流量 Q より、断面平均流速 U_m を算出した。なお、流速測定時には水路にアユを放流していない。

3. 実験結果および考察

(1) 休憩可能エリアと休憩の定義

図-2 に各ケースにおける流速コンターを示す。全てのケースにおいて遮蔽板間の狭窄部から下流側に比較的高速な流れが発生し、遮蔽板下流側に低速な流れが発生している。また、遮蔽板数の増加に伴い、高速な流れと低速な流れの流速差が減少している。

魚の遊泳速度には、疲労が蓄積する突進速度と、疲労の蓄積のない維持速度 V_{fc} に大別される。維持速度 V_{fc} は次式で与えられる¹⁾。

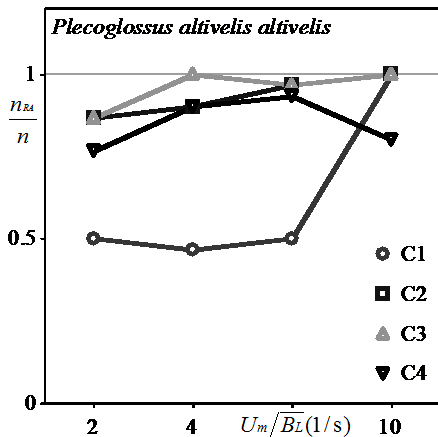


図-6 各ケースにおける休憩可能エリアの利用頻度と流速との関係

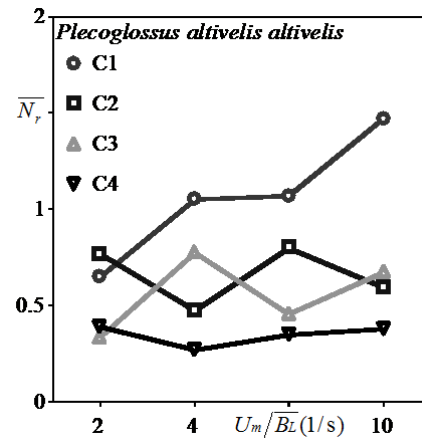
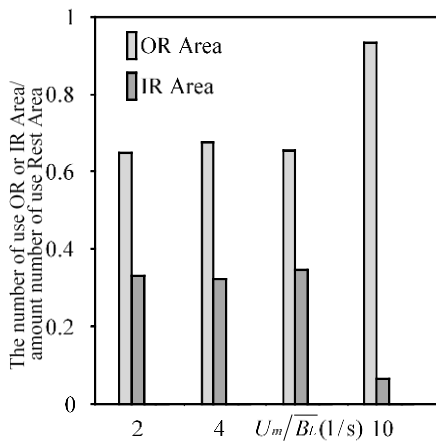
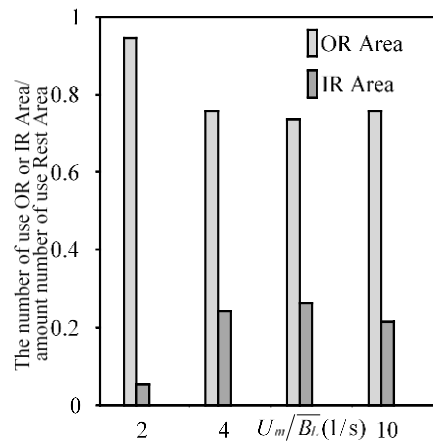


図-7 1回の休憩可能エリア滞在における平均休憩回数と流速との関係



(a) C3



(b) C4

図-8 各遮蔽板における休憩可能エリアの進入回数割合

$$V_{jc}/\overline{BL} = 2 \sim 4 \text{ (1/s)} \quad (1)$$

魚は休憩する際に維持速度以下で遊泳すると考えられる。そこで、流速が体長倍流速で2以下の領域を「休憩可能エリア」と定義し、図-3に各ケースにおける休憩可能エリアを示す。全ケースにおいて遮蔽板下流側と上流側が休憩可能エリアとなっている。ただし、流速の増加に伴い休憩可能エリアが減少している。

ところで、アユが休憩可能エリア内を遊泳していても、突進速度で遊泳している場合は休憩しているとは認定できない。そのため、アユが休憩可能エリアに進入し、かつ、維持速度以下に相当する体長倍流速2以下の状態を「休憩」と判断する条件とする。

(2) 休憩可能エリアの利用特性

アユは休憩可能エリアに進入しても、短時間に休憩可能エリアから離脱する個体も、比較的長期間滞在する個体も存在した。そこで、実験回数50回における平均的な特性を明らかにする。図-4に実験時間 T に対する休憩可

能エリアの平均滞在時間 $\overline{t_{RA}}$ の割合を示す。流速の増加に伴い若干の増加傾向はあるが、ケース間で顕著な差はみられない。このように、流速の増加に伴う休憩する傾向が増加する結果は福井ら¹⁰⁾の結果と一致する。

図-5に休憩可能エリアの滞在時間 $\overline{t_{RA}}$ を休憩可能エリアへの平均進入回数 $\overline{N_{RA}}$ で除した値と体長倍流速 U_m/\overline{BL} (1/s)との関係を示す。遮蔽板数の増加に伴い一回の休憩可能エリアの滞在時間が減少する。ただし、C1とC2において、体長倍流速が7から10にかけて減少しているが、これが明確な傾向なのかばらつきから生じたものか現在不明である。図-4、5より、遮蔽板数の増加に伴い休憩可能エリアへの進入回数が増加していることが理解される。これは、遮蔽板数の増加に伴い高速域の範囲が増加するため、休憩可能エリアから高速域に進入したものの再度休憩可能エリアに避難する回数が増加したためである。

休憩可能エリアの利用頻度を表すものとして、アユが休憩可能エリアに進入した実験数 n_{RA} を実験回数 n ($n=50$) で除した値を算出した。図-6に各ケースの休憩可能エリアの利用頻度と体長倍流速 U_m/\overline{BL} (1/s)との関係を示す。C1に

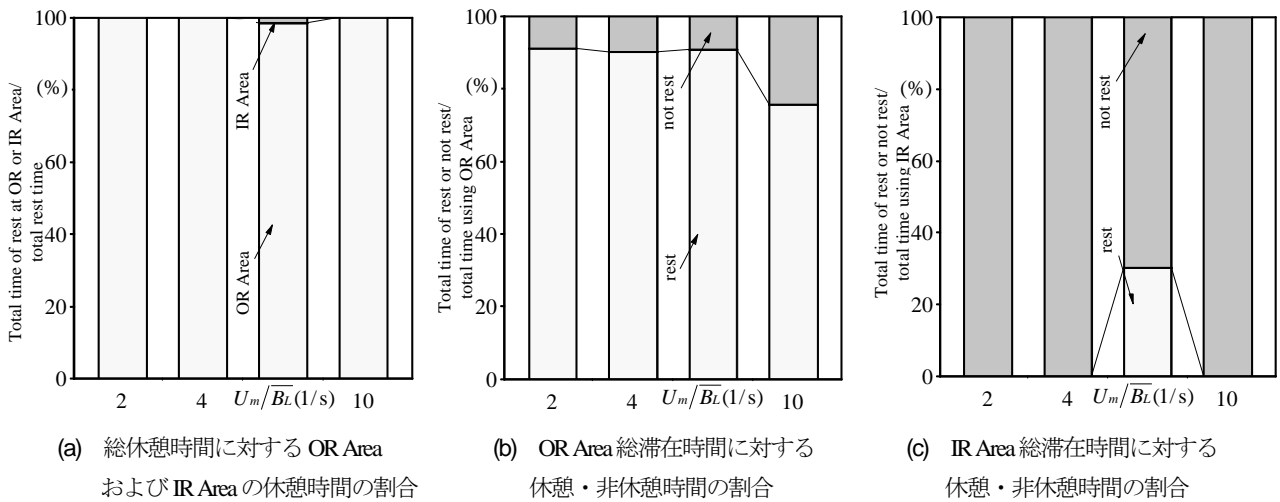


図-9 C3における休憩場所と休憩時間との関係

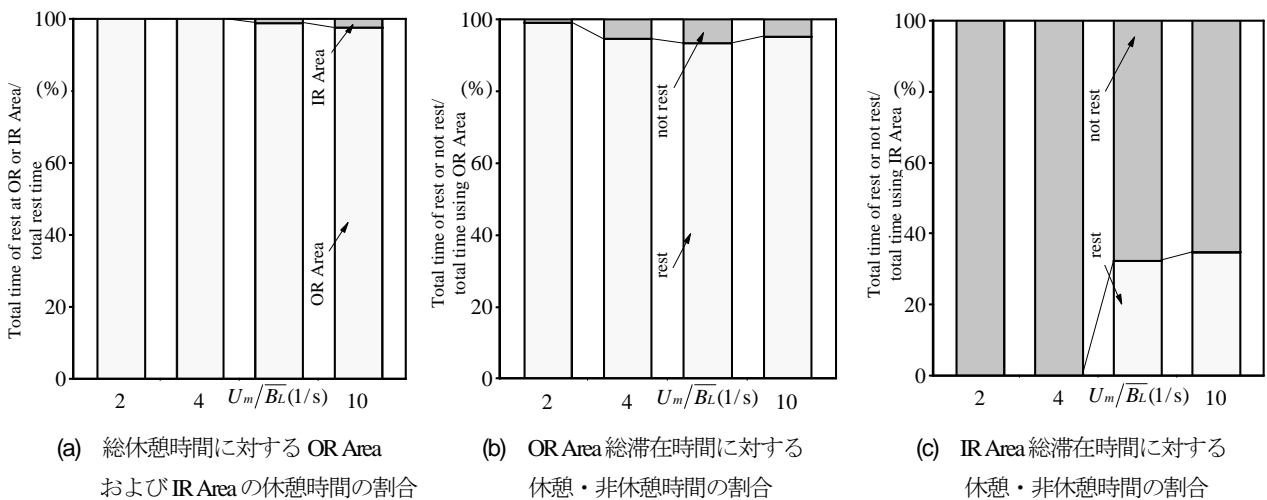


図-10 C4における休憩場所と休憩時間との関係

において、体長倍流速が2~7のケースについては、利用頻度が5割程度である。C1は唯一遮蔽板の狭窄部の片側が側壁に接しているケースである。魚には壁面選好性があり、壁面付近で遊泳したがる傾向がある¹⁵⁾。そのため、側壁に沿って遊泳するアユが多く、休憩可能エリアに進入することなく上流側に遊泳したことが原因と考える。ところが、C1において体長倍流速10のケースでは利用頻度が高くなっている。これは、壁面付近を上流側に遊泳しようとしても、体長倍流速が10以上で遊泳する必要があり、疲労の蓄積を避け、上流側への遊泳を忌避したものと考えられる。その他については、実験回数の7割以上が休憩可能エリアを利用する結果になった。

図-7に各休憩可能エリア滞在における平均休憩回数 \bar{N}_r と体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}$ (1/s) との関係を示す。図-6から伺えるように、C1の体長倍流速2~7のケースを除く各ケースの休憩可能エリアの利用頻度に差異はないが、休憩する回数は遮蔽板数の増加に伴い減少する。

(3) 休憩可能エリアの位置による利用比較

C3, C4 については、側壁に接している休憩可能エリアと側壁に接していない休憩可能エリアに分類できる。側壁に接している遮蔽板により発生した休憩可能エリアを Outside Rest Area (以下 OR Area)，中央部分に存在するものを Inside Rest Area (以下 IR Area) と定義した。

図-8(a), (b)に C3, C4 における休憩可能エリアへの総進入回数に対する OR Area および IR Area への進入回数の割合を示す。C3, C4 ともに流速の変化に関わらず、OR Area への進入回数の割合が高くなる。

図-9(a)に C3 における総休憩時間に対する OR Area および IR Area の休憩時間の割合、図-9(b)に C3 の OR Area、図-9(c)に C3 の IR Area 総滞在時間に対する休憩と非休憩時間の割合を示す。図-9(a)から伺えるように、総休憩時間に対する OR Area での休憩時間が9割以上を占め、IR Area での休憩時間は非常に短い。また図-9(b), (c)から伺えるように、OR Area 滞在中はほぼ休憩しているが、IR Area 滞在中はほとんど休憩していない。

図-10(a)にC4における総休憩時間に対するOR AreaおよびIR Area総休憩時間の割合、図-10(b)にC4のOR Area、図

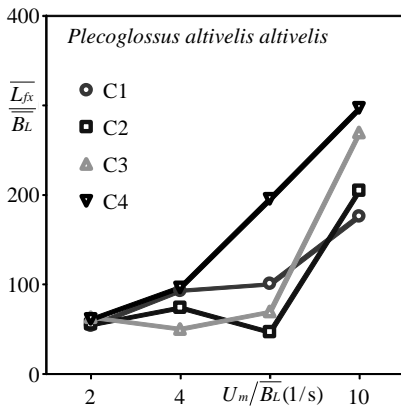


図-11 x軸方向の平均遊泳距離と流速との関係

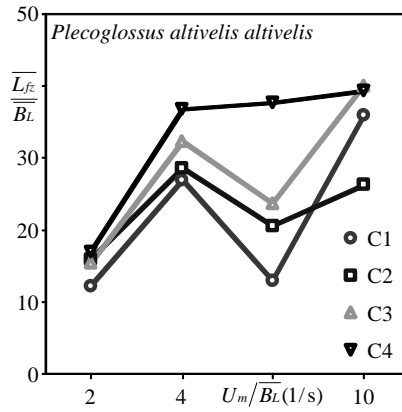


図-12 z軸方向の平均遊泳距離と流速との関係

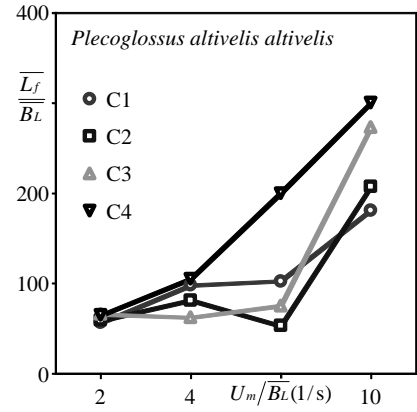


図-13 平均遊泳距離と流速との関係

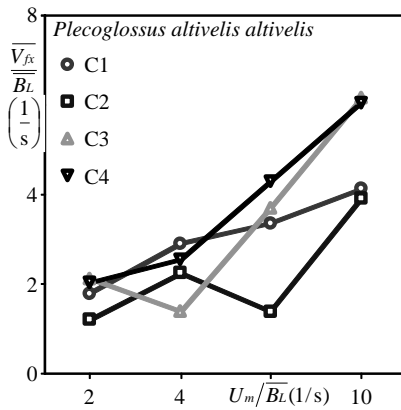


図-14 x軸方向の平均遊泳速度と流速との関係

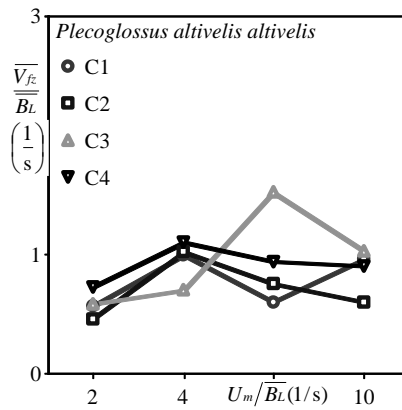


図-15 z軸方向の平均遊泳速度と流速との関係

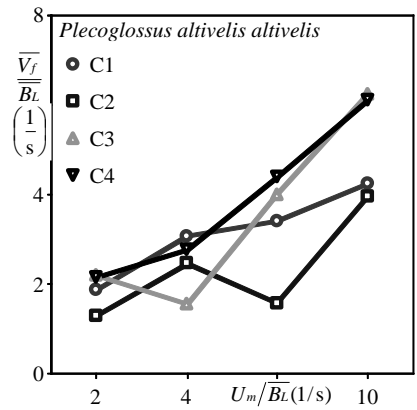


図-16 平均遊泳速度と流速との関係

-10(c)にC4のIR Area総滞在時間に対する休憩と非休憩時間の割合を示す。図-9と同様に、総休憩時間に対するOR Areaでの休憩時間が9割以上を占める。またOR Area滞在中はほぼ休憩しているが、IR Area滞在中はほとんど休憩していない。C3、C4どちらもOR Areaは休憩目的で利用され、IR Areaは横断方向への移動、もしくは高速域を回避する目的で利用されていると考えられる。

(4) アユの平均遊泳距離および平均遊泳速度の特性

平均遊泳速度は、動画から得られるアユの対地速度に、3次元電磁流速計で得られた局所流速を加減して求められる。平均遊泳距離は平均遊泳速度を時間積分することで求められる。図-11にx軸方向の平均遊泳距離 $\overline{L_{fx}}$ 、図-12にz軸方向の平均遊泳距離 $\overline{L_{fz}}$ 、図-13に平均遊泳距離 $\overline{L_f}$ をそれぞれアユの平均体長 $\overline{B_L}$ で除したものと体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}$ (1/s)との関係を示す。x軸方向の平均遊泳距離 $\overline{L_{fx}}$ は、流速の増加に伴い増加する。z軸方向の平均遊泳距離 $\overline{L_{fz}}$ については、全体的に流速の増加に伴い増加傾向にあるが、C4を除くと体長倍流速が7において、遊泳距離の減少が見られる。この結果が明確な傾向を示したのか、ばらつきのある範囲内かは現在明確でない。

また、遮蔽板数の増加に伴い遊泳距離は増加する。遮蔽板数の増加に伴い休憩可能エリアへの進入回数も増加するため、xおよびz軸方向について平均遊泳距離が増加する結果となった。

図-14にx軸方向の平均遊泳速度 $\overline{V_{fx}}$ 、図-15にz軸方向の平均遊泳速度 $\overline{V_{fz}}$ 、図-16に平均遊泳速度 $\overline{V_f}$ をそれぞれアユの平均体長 $\overline{B_L}$ で除したものと体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}$ (1/s)との関係を示す。x軸方向の遊泳速度については、流速の増加に伴い増加する。これは、休憩可能エリア外で遊泳する際に流されないように遊泳することが原因である。z軸方向の遊泳速度は、x軸方向と比べ、遮蔽板数の増加および流速の増加に伴う顕著な特徴はみられない。

4. おわりに

本研究は、横断方向を任意に変化させた遮蔽板を開水路に設置し、流速を系統的に変化させてアユの挙動を解析した。体長倍流速が2-10(1/s)の範囲の流速で、単独で遊泳するアユに関して得られた知見は以下の通りである。

(1) 遮蔽板数が増加すると休憩可能エリアへの進入回

数は増加する。これは、遮蔽板の増加に伴い高速域の範囲が増加するため、高速域と休憩可能エリアを往来する回数が増加するためである。

- (2) 水路中央部分に設置した遮蔽板によって発生する休憩可能エリアに比べ、側壁に接した遮蔽板によって発生する休憩可能エリアの利用回数および休憩時間が増加する。これは、側壁に接した遮蔽板の休憩可能エリアは主として休憩目的で利用し、水路中央付近の遮蔽板の休憩可能エリアは横断方向への主として移動もしくは高速域を回避する目的で利用するためである。
- (3) 流速および遮蔽板数の増加に伴い、平均遊泳距離は増加する。これは、遮蔽板数の増加に伴い休憩可能エリアへの進入回数が増加するためである。
- (4) 流速の増加に伴い、流下方向の遊泳速度は増加する。これは、休憩可能エリア外で遊泳する際に下流へ流されないよう遊泳するためである。

本研究で得られた結果は極めて限定した条件の中で得られたものであり、速やかな工学的利用は極めて困難な段階である。今後は、魚の尾数や魚種を変更させて、より一般的な知見を得たいと考えている。本研究がさらに発展することにより、洪水時の河川に魚の避難エリアを設けるための遮蔽物の設置方法が明らかになると考えている。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金基盤研究(C)26420500(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，p3441，p87，1995。
- 2) Webb, P.W.: Hydrodynamics and energetics of fish propulsion, *Bull. Fish. Res. Bd Can.*, Vol.190, pp.1-159, 1975.
- 3) 綾史郎，河合典彦，小川力也，紀平肇，中西史尚，竜門俊次：淀川における水位の変化と魚類の産卵行動，河川技術論文集，第10巻，pp.333-338, 2004。
- 4) 佐川志朗，萱場祐一，荒井浩昭，天野邦彦：コイ科稚仔魚の生息場所選択，応用生態工学，第7巻，pp.129-138, 2005.
- 5) 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, No.73, pp.340-358, 2006.
- 6) 東信行，鴨下真吾，佐原雄二，関泰夫，渡辺勝栄：増水時における河川魚類の挙動と河川構造，環境システム研究論文集，Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 7) 傳田正利，天野邦彦，萱場祐一：出水の水理特性が魚類行動に与える影響，水工学論文集，第49巻，pp.1465-1470, 2005.
- 8) 傳田正利，天野邦彦，原田守啓：過去の河川氾濫状況の定量的復元と氾濫原が有していた魚類避難場の機能検証，水工学論文集，第53巻，pp.1195-1200, 2009.
- 9) 石川雅昭：ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.101-106, 2000.
- 10) 福井吉孝，関谷明，下村充，打田剛：アユの迷入防止装置の計画・設計について，河川技術論文集，第9巻，pp.439-444, 2003.
- 11) 和田清，桑原真吾，稲川啓太，寺町茂：在来魚類の遊泳能力算定と農業用水路網の避難場所における個体群行動，河川技術に関する論文集，第12巻，pp.371-376, 2006.
- 12) 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.
- 13) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，白岡敏，三原和也：側壁に千鳥状に配置した遮蔽物がカワムツの休憩特性に及ぼす影響，環境システム研究論文集，Vol.40, pp.II9-III4, 2012.
- 14) Patridge, B.L.: The structure and function of fish schools, *Scientific American*, Vol.246, pp.90-99, 1982.
- 15) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，松田孝一郎，野口翔平，竹内光：単独で遊泳するアユの挙動に及ぼす側壁の影響，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68, No.4, pp.I_661-I_666, 2012.

(2016. 5. 26 受付)

EFFECTS OF TRANSVERSE WIDTH PATTERN OF INTERCEPTION CONSTRUCTED IN OPEN-CHANNEL ON SWIMMING CHARACTERISTIC OF AYU, *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Bin SHIRAOKA, Keisuke KASUGAI
and Kazuya MOMOTANI

It is important to secure the rest area for fish. Fish has the ordinary and dark muscle. When fish uses ordinary muscle, fish got tired. In such a situation, fish needs a rest. In this study, rest characteristic of ayu (*Plecoglossus altivelis altivelis*) with changing the width and the number of interception was researched. The migration rates of ayu were obtained with the aid of a digital video camera. It was found that the migration speed increased with an increase of flow velocity, because ayu swim in keeping with flow velocity for prevent to be drift towards downstream. The total time of the rest increases with an increase of flow velocity.