

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

鬼束 幸樹¹・秋山 壽一郎²・白岡 敏³・三原 和也³

¹正会員 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)

E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

²正会員 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)

E-mail: juichiro@tobata.isc.kyutech.ac.jp

³学生会員 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)

E-mail: jojo_dio_standmost@yahoo.co.jp

中村は川に魚がすめる条件として、流量の確保、水質の確保、餌の確保、天敵からの保護、産卵場の確保、回遊路の確保、避難場所の確保を挙げている。天敵からの捕食を避けるため、あるいは洪水時の高速流を避けるために魚がワンド等の一次水域に避難する際の特性については、幾分研究がなされている。しかし、遡上中に疲労が蓄積することで魚が休憩する際の特性については幾分研究がなされているものの、休憩場所の幾何学形状および流速の変化による影響についてはほとんど解明されていない。本研究では室内水路において側壁に千鳥状に遮蔽物を設置し、遮蔽物設置間隔および流速を系統的に変化させて魚の休憩特性に及ぼす影響について検討した。その結果、遮蔽物設置間隔および流速を増加させると、休憩時間が増加することや休憩回数が増加することなどを明らかにした。

Key Words : rest, ordinary and dark muscle, open-channel flow, swimming behavior

1. はじめに

中村¹⁾は川に魚がすめる条件として、流量の確保、水質の確保、餌の確保、天敵からの保護、産卵場の確保、回遊路の確保、避難場所の確保を挙げている。この内、避難場所の確保は、筋肉疲労および時間スケールの観点から2つに分類されると考えられる。魚の筋肉には血合筋と普通筋があり、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⁾。遊泳速度が体長倍流速で2~4の維持速度を越えると疲労が蓄積されるため²⁾、しばしば休憩が必要となる。この場合、休憩時間は数秒~数十分以内と推定される。一方、捕食の危険性のある時や洪水時に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。また、避難場所から離脱する条件として、天敵が去ることあるいは洪水が去ることが必要なので、比較的長時間の滞在となる。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例が

存在する。綾ら³⁾は淀川において水位が上昇すると、フナをはじめとする18魚種が城北ワンド(No.28実験ワンド)に避難することを解明した。佐川ら⁴⁾は自然共生研究センターの実験河川で人工洪水を発生させ、洪水時に仔魚等がワンドに避難することを解明した。傳田ら⁵⁾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平水時と洪水時に行い、洪水時にアユ、ウグイ、オイカワ、ギンブナが一次水域に避難することを示した。東ら⁶⁾は青森県を貫流する岩木川支流の平川においてテレメトリー法を用いてウグイを追跡し、出水で流下したウグイはワンドや植生帯に避難することを明らかにした。傳田ら⁷⁾は自然共生研究センターの実験河川におけるコイおよびギンブナの挙動をテレメトリー法を用いて追跡し、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⁸⁾は過去の地形データに基づいて、洪水時の流況を再現し、魚の避難可能エリアの経年変化を予測した。

一方、魚の休憩場所の利用形態の研究も開始された。石川⁹⁾は水路片側に2つの水制を設置してウグイを10尾放流したところ、ウグイは静水状態では水制間を滞在しな

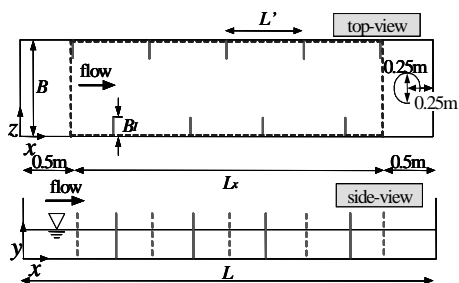


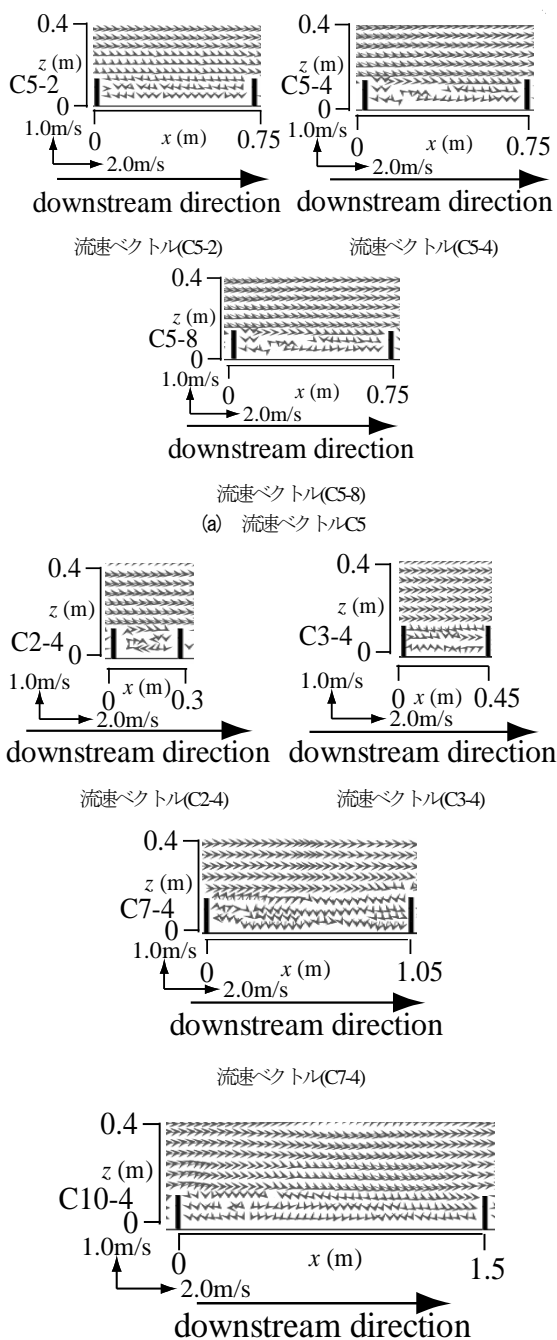
図-1 実験水路の模式図

表-1 実験条件

Case name	Aspect ratio	$U_m / \overline{B_L}$
C2-2	2	2
C2-4		4
C2-8		8
C3-2	3	2
C3-4		4
C3-8		8
C5-2	5	2
C5-4		4
C5-8		8
C7-2	7	2
C7-4		4
C7-8		8
C10-2	10	2
C10-4		4
C10-8		8

いが流水状態では頻繁に滞在することを解明した。福井ら¹⁰⁾はヘチマロンを水路両壁に千鳥状に配置して体長倍流速が約3の開水路流に稚アユを放流したところ、遡上中に時折ヘチマロン下流側に発生する低速域で休憩することを明らかにした。和田ら¹¹⁾は水路片側に設置された連続水制の長さおよび間隔を変化させ、最大流速を維持速度の約1.5～2倍にした状態でオイカワ5尾の遊泳を観察した。その結果、水制長さおよび間隔が体長程度以下の場合には凹部内での旋回が困難なのでオイカワは凹部を利用しないが、それ以上の場合には頻繁に休憩することを示した。高水ら¹²⁾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たところ、円柱群内に侵入するウグイの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¹³⁾は段落ち下流部で遊泳しているアユの挙動を撮影すると共に流速測定を行い、休憩時におけるアユの挙動を分析し、水量と休憩場所との関係を解明した。以上のように、魚が維持速度を越える速度で遊泳をした場合にしばしば休憩することが指摘されている。また、水量と休憩場所との関係が明らかにされている。しかしながら、休憩間隔や休憩時間およびそれらに及ぼす流速の影響等についてはほとんど解明されていない。

本研究は、室内水路の側壁における遮蔽物の間隔および流速を系統的に変化させ、魚の休憩特性に及ぼす影響について検討したものである。



(b) 流速ベクトルC2-4, C3-4, C7-4, C10-4

図-2 流速ベクトル図

2. 実験装置および実験条件

図-1に示す長さ4.0 m、幅 $B = 0.8$ m、高さ0.25 mの水

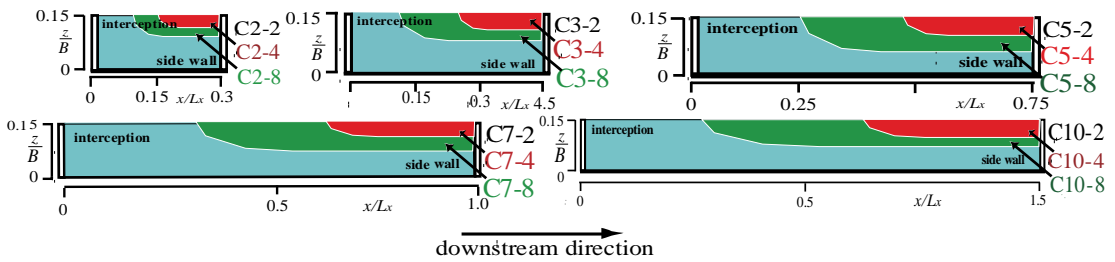


図-3 休憩可能エリア

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。表-1に実験条件を示す。水路の兩岸に、高さ0.15 m，横断方向幅 $B_I=0.15$ m，厚さ0.015 mの遮蔽物を千鳥状に設置した。設置条件として、遮蔽物間隔 L_x を遮蔽物幅 B_I で除したアスペクト比 L_x/B_I を2, 3, 5, 7, 10倍の5種類とし、水深を0.05 mに固定した状態で体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}$ を2, 4, 8倍の3種類に変化させた合計15ケースの実験を行った。ここに、 U_m は断面平均流速， $\overline{B_L}$ はカワムツ (*Nipponocypris temminckii*) の平均体長で $\overline{B_L}=60$ mm ある。実験には150尾のカワムツを用意し、偏りが無いよう順番に使用した。また、本研究で用いたカワムツの標準偏差 $SD=1.48$ mm であった。水路の上流端から流下方向に0.25 mの位置に整流板を、水路下流端には堰を設置した。水路床勾配を変化させて流れを等流に設定した。

水路の下流端から0.25 mの位置に直径0.25 mの円形金網を設置し、1尾のカワムツを挿入する。挿入後5～10秒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分間の撮影を行った。上記の実験を各ケースで50回，合計750回行った。撮影後，0.02 sごとの魚の遊泳位置および魚向 θ を解析した。魚向 θ は上流向きを 0° として絶対値を取り範囲を $0^\circ \leq |\theta| < 180^\circ$ とした。時間ごとの魚の遊泳位置より対地速度が算出され，これに流速を加減することで遊泳速度が算出される。

x 軸方向に3.75 cm， z 軸方向に5 cm ごとにメッシュをとり，80×15点の格子で構成される計1200点において，東京計測株式会社製の3次元の電磁流速計「SF-301a型」を用いて流速3成分を0.05 s 間隔で25.6 s 計測した。計測後， x 軸， z 軸方向の時間平均流速 U ， W および断面平均流速 U_m を算出した。なお，流速測定時には水路にカワムツを放流していない。

3. 実験結果および考察

(1) 休憩の定義

図-2(a) にアスペクト比が5で体長倍流速が2, 4, 8の流速ベクトルを，図-2(b) に体長倍流速が4でアスペクト比が2, 3, 7, 10の流速ベクトルを示す。いずれの流

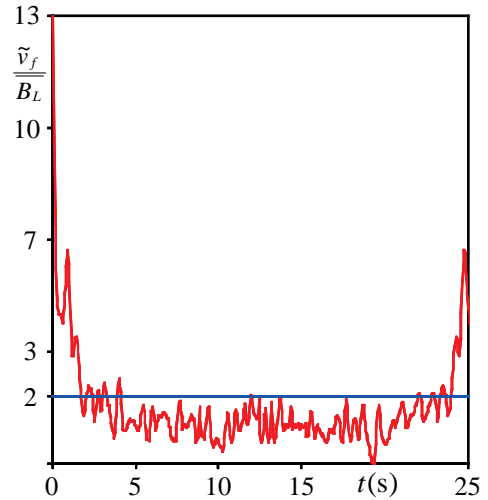


図-4 遊泳速度の時間変化

速においても主流に比べて遮蔽物間の流速が小さいことが理解される。

Katopdis¹⁴⁾ は遊泳型および体長が同一であれば，魚種が異なっても遊泳能力が等しいと述べており，血合筋のみを使用して疲労が蓄積しない維持速度 V_{jc} は一般に次式で与えられる¹⁾。

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

カワムツは流速があると上流方向へ遊泳する正の向流性を有しているため，放流後のカワムツの過半数は上流へと遊泳を開始する。ただし，遊泳速度が維持速度 V_{jc} を越えた場合は普通筋を使用するため，疲労が蓄積される。すると，疲労を回復させるために維持速度以下の遊泳状態に変更して休憩すると考えられる。図-2で観察されたように，遮蔽物間は低流速領域が多いため，カワムツはこの領域に進入して休憩を行う。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に全ケースの休憩可能エリアと不可能エリアとの境界線を示す。体長倍流速が2の時は遮蔽物間はすべて休憩エリアであるが，図中のケース名と同様な色の部分は休憩エリアではなくなった部分を示している。アスペクト比が小さいと遮蔽物間のほとんどのエリアが休憩可能エリアとなる。一方，アスペクト比が大きい場合は，流速

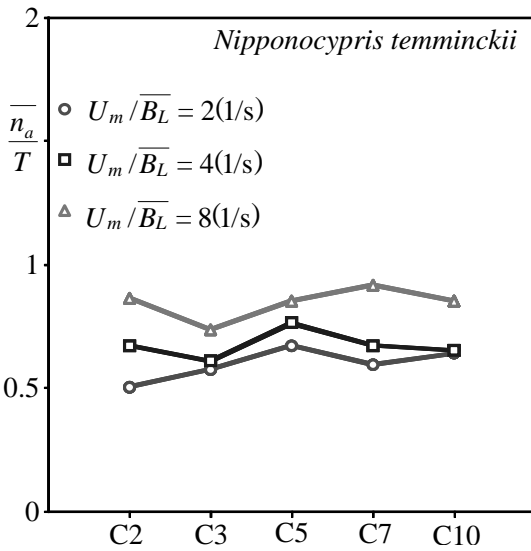


図-5 平均休憩可能エリア進入回数
とアスペクト比との関係

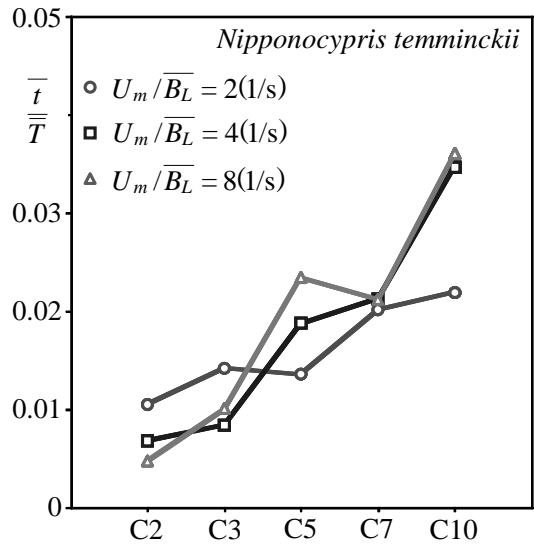


図-6 単位時間あたりの休憩時間
とアスペクト比との関係

が増加すると遮蔽物間の比較的下流域の主流側で休憩不可能エリアが発生する。しかし、流速が体長倍流速で2以下の領域を遊泳していても、遊泳速度が高速な場合は休憩しているとは認定できない。

図-4にカワムツが休憩可能エリアに進入して休憩可能エリアを離脱するまでの体長倍遊泳速度 \bar{v}_f / B_L の時系列の一例を示す。カワムツの遊泳速度は休憩可能エリアに進入した後に著しく低下し、しばらく低速で遊泳した後、遊泳速度を急激に増加している。そこで、カワムツが休憩可能エリアに進入し、かつ、遊泳速度が体長倍流速で2以下の状態が休憩していると考えられる。ところが、図-4を詳細に観察すると、休憩を開始した後も瞬間的に遊泳速度が体長倍流速2を越えている場合がある。これはカワムツが魚向を変化させていることが原因であり、実際にはカワムツは休憩していると推定される。したがって、カワムツが休憩可能エリアに進入し、かつ、遊泳速度が体長倍流速2以下になった時を休憩開始とし、カワムツが休憩可能エリアから離脱あるいは遊泳速度が体長倍流速2以上を1s以上継続し始める瞬間を休憩終了と定義した。また、今回体長倍流速2倍のケースにおいて、休憩エリアに進入せず遊泳速度が2倍以下となる場合が稀に起きた。しかしこれは進行方向を変えるために一時的に遊泳速度が低下したために起きた現象であり、1s以上継続して起きていないため本研究では休憩とはみなしていない。

(2) カワムツの休憩中の特性

図-5にアスペクト比と休憩可能エリアに侵入した回数の平均値 \bar{n}_a を実験時間 T で除した値との関係を流速別に示す。単位時間当たりの休憩可能エリア進入回数はアスペクト比に大きな影響を受けず、流速の増加に

伴い増加する。これは、流速が増加すると遊泳中に疲労が蓄積されるため、低流速域の休憩可能エリアに進入して休憩していることを意味する。また、各ケースにおいて標準誤差は0.03～0.1 (1/s) であった。図-6にアスペクト比と総休憩時間の平均値 \bar{t} を実験時間 T で除した値との関係を流速別に示す。アスペクト比が2および3の場合に例外があるものの、流速の増加に伴い総休憩時間が増加する傾向にある。一方、各流速においてアスペクト比が増加すると、総休憩時間が長くなる。図-5よりアスペクト比が増加しても休憩可能エリア進入回数はほとんど変化しないことから、アスペクト比の増加に伴い休憩時間が増加することが理解される。ここで、アスペクト比が2および3の各ケースの標準誤差は0.009～0.015であるが、アスペクト比が5から10の各ケースの標準誤差は0.001～0.008であった。このことから、アスペクト比が2および3場合に例外が発生した理由として、休憩エリアが小さいため休憩エリア内での遊泳が困難となり各ケースでの偏りが大きくなったためだと考えられる。

(3) カワムツの主流遊泳時の特性

カワムツは主流中での遊泳と休憩可能エリアでの休憩を繰り返しながら遡上する。そこで、遊泳開始地点から遊泳終了となる水路始端までの距離を総遊泳時間で除した平均遡上速度の平均値 \bar{V}_{fu} を算出し、流速との関係をアスペクト比ごとに図-7に示した。アスペクト比および流速の増加に伴い平均遡上速度が低下している。これは、図-6に示されたように、アスペクト比および流速の増加に伴い総休憩時間が増加するため、平均遡上速度が低下したものと考えられる。また、各ケースにおける標準誤差は0.5～1 (1/s) であった。

カワムツはある休憩可能エリアで休憩した後主流を

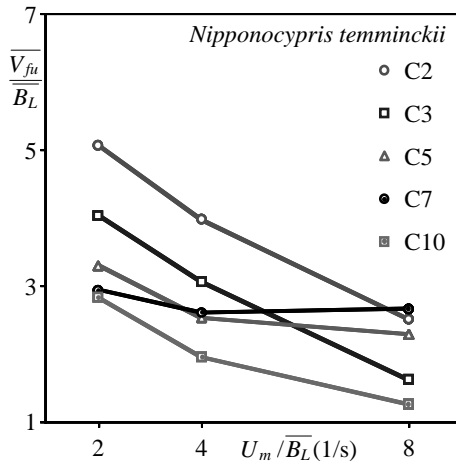


図-7 平均遡上速度と流速の関係

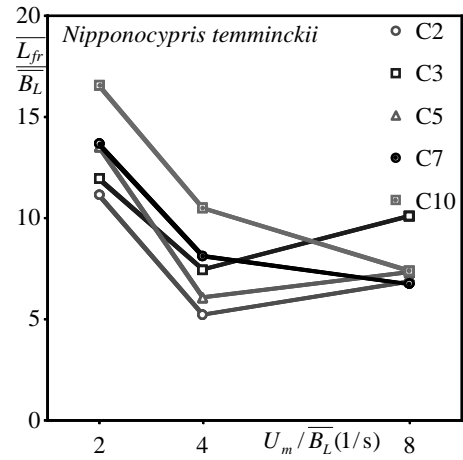


図-8 休憩間の平均遊泳距離と流速の関係

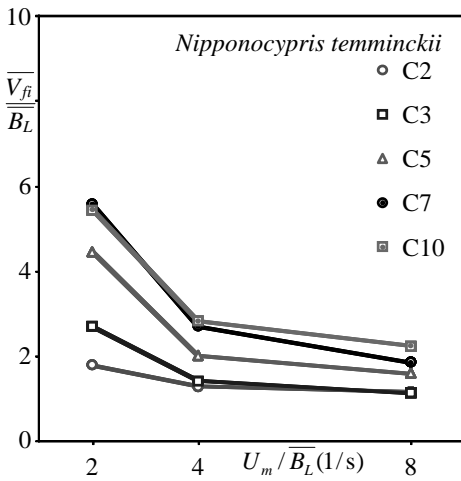


図-9 休憩エリアから主流に遊泳を開始する時の初期遊泳速度との関係

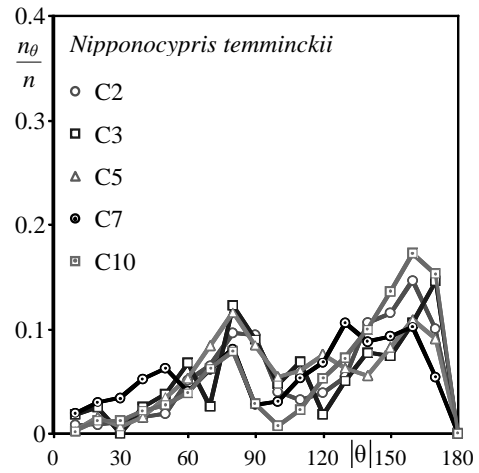


図-10 休憩エリアから主流に遊泳を開始する時の魚向とアスペクト比の関係

遊泳し、再び別の休憩可能エリアに進入して休憩をする。そこで、休憩間の遊泳軌跡をトレースして求めた遊泳距離の平均値 $\overline{L_{fr}}$ を算出し、図-8に流速との関係をアスペクト比ごとに示した。アスペクト比の増加に伴い休憩間遊泳距離は増加する。これは、図-6に示されたように、アスペクト比の増加に伴い総休憩時間が増加するので、休憩中に十分に疲労が回復するため、休憩後の遊泳距離が増加したこと、およびアスペクト比が増加すると休憩場所の間隔が増加するために生じたものと考えられる。一方、体長倍流速が2～4の範囲では流速の増加に伴い休憩間遊泳距離は低下しているのに対し、4～8の範囲では増加している場合がある。これは、体長倍流速が8の場合、流れによって下流方向に流されて、再び遡上するために生じたものである。また、各ケースにおける標準誤差は1～2であり、上記に示しているこれまでの傾向と一致しているため、偏りによる誤差は起きていないと考えられる。

(4) カワムツが休憩終了から遊泳を開始する時の特性

図-9に流速と休憩可能エリアから主流に遊泳を開始する時の初期遊泳速度の平均値 $\overline{V_{fi}}$ を平均体長 B_L で除した値との関係をアスペクト比ごとに示す。全ての流速においてアスペクト比の増加に伴い初期遊泳速度が増加する。これは、アスペクト比の増加に伴い総休憩時間が増加するのでより疲労が回復し、遡上欲が湧くためと考えられる。また、各ケースにおける標準誤差は0.5～1 (1/s) であり、上記に示しているこれまでの傾向と一致しているため、偏りによる誤差は起きていないと考えられる。

図-10に休憩可能エリアから主流に遊泳を開始する時の初期魚向の絶対値 $|\theta|$ の頻度分布を示す。ここに、 n は休憩可能エリアから主流に遊泳を開始した総回数、 n_θ は 10° ごとの頻度である。同図より、全てのアスペクト比において 80° および 160° 付近にピークが観察される。前者は休憩可能エリアの比較的上流域から主流に直角あるい

は若干上流向きに遊泳を開始する場合を示している。こうしたカワムツは上流への遡上意欲がある。一方、後者はほぼ下流方向を向いているため、降下していることを意味する。今回、1ケースごとに休憩可能エリアから主流に遊泳を開始する回数が0~15とばらつきがあること、また1ケースでの休憩可能エリアから主流に遊泳を開始する回数が少ないことにより、各ケースごとの魚向の標準誤差等は示すことができないため、50ケース全ての初期魚向の絶対値 $|\theta|$ の頻度分布を示した。

4. おわりに

本研究では、アスペクト比を変化させた遮蔽物を両岸に設置し、遮蔽物間距離と流速を系統的に変化させてカワムツの挙動を解析したものである。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 既往の研究からウグイ、アユ、オイカワは水制間に流水状態で頻繁に滞在することが明らかになっており、この傾向は本研究でも確認できた。また、新たに流速の増加に伴いカワムツの休憩時間は増加することが明らかとなった。
- (2) 既往の研究から水制長および間隔が体長程度以下の場合には凹部内での旋回が困難なのでオイカワは凹部を利用しないということが明らかとなっている。本研究ではアスペクト比の増加に伴いカワムツの休憩時間が増加する。そのため新たに休憩エリア内の遊泳が容易になることで休憩時間が増加することが明らかとなった。
- (3) アスペクト比および流速の増加に伴い平均遡上速度が低下する。これは、アスペクト比および流速の増加に伴い総休憩時間が増加するため遊泳時間が短くなることが原因である。
- (4) カワムツはアスペクト比の増加に伴い休憩間遊泳距離および初期遊泳速度は増加する。これは、アスペクト比の増加に伴い総休憩時間が増加するので、より疲労が回復し、遡上欲が湧くためである。

(5) カワムツは休憩可能エリアから主流に遊泳を開始する時の魚は、上流への遡上意欲がある魚と下流に流される魚に大別される。

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)23560610(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，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，渡辺勝榮：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，森悠輔，関強志：アユの休憩場所の水理特性とその挙動との関係，水工学論文集，第53巻，pp.1225-1230，2009.
- 14) Katopodis, C., *Proc. Of the Int. Symp. On Fishways '90 in Gifu*, pp.19-28, 1990.

(2012. 8. 22受付)

EFFECTS OF ALTERNATE SPUR DYKES CONSTRUCTED IN OPEN-CHANNEL FLOW ON RESTING CHARACTERISTICS OF *NIPPONOCYPRIS TEMMINCKII*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Bin SHIROOKA and Kazuya MIHARA

Fish has the ordinary and dark muscle. When fish uses ordinary muscle, fish gets tired. In such a situation, fish needs a rest. In this study, some spur dykes were established at both banks in open-channel flows and flow velocity was changed. The trajectories of *Nipponocypris temminckii*'s were observed. It was found that the total time of the rest increases with an increase of aspect ratio and also velocity. The migration speed decrease with an increase of velocity, because the total time of the rest increase with an increase of velocity. After the rest, some fishes start to swim to the upstream and the other start to swim to the downstream.