河川技術論文集, 第17巻, 2011年7月

流速の増大がオイカワによる水際の緩流域利用頻度に及ぼす影響

EFFECT OF INCREASE IN THALWEG VELOCITY ON USAGE FREQUENCY OF LOW-VELOCITY ZONE NEAR SHORELINE BY PALE CHUB

小野田 幸生[1]・佐川 志朗[2]・上野 公彦[3]・尾崎 正樹[4]
久米 学[5]・相川 隆生[6]・森 照貴[7]・萱場 祐一[8]
Yukio ONODA, Shiro SAGAWA, Kimihiko UENO, Masaki OZAKI,
Manabu KUME, Takao AIKAWA, Terutaka MORI and Yuichi KAYABA

[1]理博（独）土木研究所自然共生研究センター　専門研究員
（〒501-6021　岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地）
[2]農博　（独）土木研究所自然共生研究センター　任期付研究員
[3]岐阜県河川課（〒500-8570　岐阜県岐阜市薮田2丁目1番1号）
（前（独）土木研究所自然共生研究センター　交流研究員）
[4]（独）土木研究所自然共生研究センター　交流研究員
[5]水産科学博　岐阜経済大学経済学部　奨励研究員（〒503-8550　岐阜県大垣市北方町5-50）
（前　（独）土木研究所自然共生研究センター　非常勤職員）
[6]木曽川下流河川事務所　河川環境課　専門調査員（〒511-0002　三重県桑名市大字福島465）
（前　国土交通省 中部地方整備局 中部技術事務所　環境共生課 環境技術係長
［〒461-0047　名古屋市東区大幸南1-1-15］）
[7]環境科学博　（独）土木研究所自然共生研究センター　専門研究員
[8]正会員　工博　（独）土木研究所自然共生研究センター　センター長

We examined whether the usage frequency of low-velocity zone near shoreline by pale chub is changed with increase in thalweg velocity using an experimental flume. We set iron stripped-frictions on one side of the experimental channel to weaken velocity artificially. We divided cross-section of the channel into three equal parts in each of the height and width (nine in total) then recorded which part is used by large-sized (ca. 10cm) and small-sized (ca. 5cm) pale chub after changing current velocity (0, 10, 26, 42, 71 cm/s in the center part). Under low-velocity conditions (≤10 cm/s), most of the fish in both size-classes used the center part. In contrast, under high-velocity conditions (≥ 26 cm/s), small-sized fish moved to the slowest part above the stripped-frictions and large-sized fish moved to the deeper parts with lower currents. These location shifts may be caused by avoidance of high velocity since the shift was explained by the tolerance for current velocity generally calculated as 2 ~ 3 BL (body length)/s. These results suggest that low-velocity zone near shoreline would function as fish habitat, thereby the function is broadly important in the field. Therefore, the low-velocity zone should be considered in the treatment of river bank of nature-oriented river works.

Key Words : *velocity tolerance, cruising speed, river bank treatment, experimental flume, pale chub, nature-oriented river works, low-velocity zone near shoreline*

1．はじめに

植物を有する水際域は，水面への被陰効果だけでなく，流心部よりも流速が遅い領域（以下，緩流域と呼ぶ）も提供するため，魚類にとって重要な生息場所である[1), 2)]．たとえば，流心部の流速が速い場合には，その領域内には稚仔魚が少なく[3)]，水際の緩流域は遊泳力が小さい稚仔魚によって特に利用されることが知られている[4)]．また，比較的遊泳能力の高い成魚であっても，増水時には水際の緩流域に移動することが報告されている[5)]．これらのことから，魚類による水際の緩流域の利用は，魚類

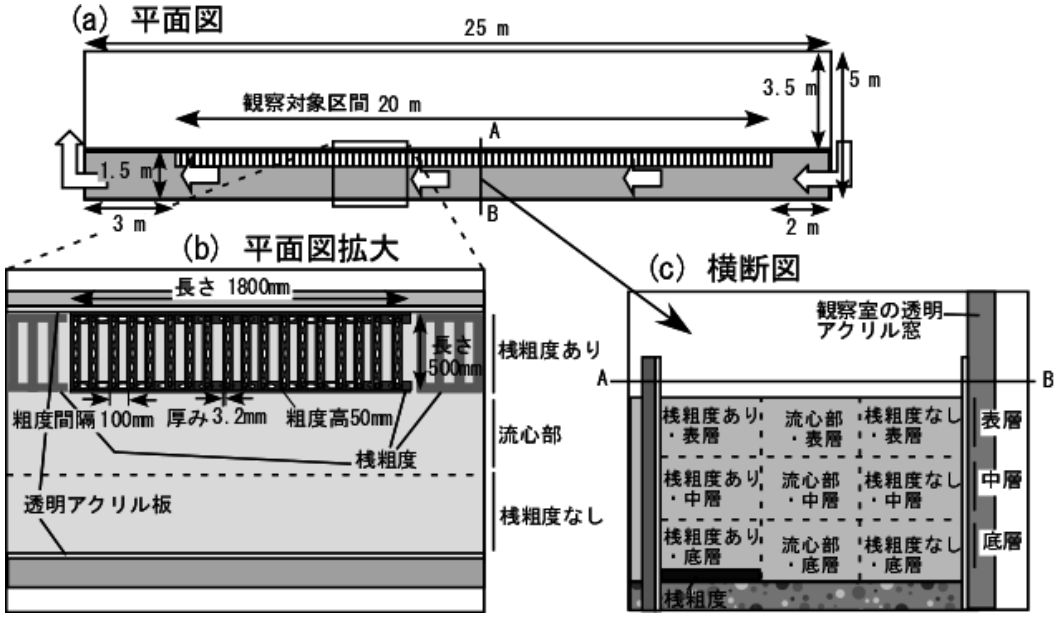

図-1 実験水路の平面図(a)，その拡大図(b)と横断図(c)．

の遊泳能力あるいは流心部の流速，またはこれらの複合要因によって規定されていると考えられる．

これまでの水際の緩流域の重要性に関する研究については， Bb型の河川形態[6]に分類される中流域で行われることが多かった[3]．しかしながら，河川の上流域や下流域に場所が変わると流心部の流速が変化するため，魚類による水際の緩流域の利用パターンも変化することが考えられる．その理解のためには，流心部の流速と関連付けて，水際域の重要性を検討する必要がある．その整理が進めば，①流心部の流速がどの程度速い時に，魚類が水際の緩流域を必要とするのか，②水際の緩流域の流速がどの程度遅い時に，生息場所として機能するのか，を推定できる．それによって，多自然川づくりで重要視されている河岸処理手法に対する評価にも利用できると考えられる[1]．

これまで水際の緩流域の重要性を示した研究は野外観察によるものが多く，流心部の流速との関係については断片的な情報にとどまっている[3), 7)]．すなわち，既往研究の多くは，魚類の定位場所における流速から緩流域の重要性を推察するにとどまり，流心部の流速との関連性については情報不足である[7)]．その一因として，野外観察では流速を制御しにくく，流心部の流速のデータを幅広く集めにくいことも影響していると考えられる．

そこで本研究では，魚類の生息場所としての緩流域の重要性が流心部の流速によって変化するのかを検証することを目的に実験を行った．具体的には，実験水路内に水際の緩流域に見立てた低流速区画を用意し，流速を変化させた時に魚類による区画の利用パターンが変化するかどうかを調べた．

2．方法

写真-1 実験対象魚のオイカワ

(1) 供試魚

本研究では，供試魚にオイカワ（*Zacco platypus*）を用いた（写真-1）．オイカワは，北海道を除く全国に広く分布しているため[8) -10)]，本研究結果を実河川へ適用しやすいという利点がある．さらに，多自然川づくりで河岸処理への工夫が特に必要とされる中小河川でも，オイカワは多く生息している点でも指標となりえる．

まず，自然共生研究センター内の実験河川において，エレクトリックショッカー（LR-24 ELECTROFISHER, Smith-Root, Inc., USA）とタモ網（目合い1-2mm，幅34cm×高さ33cm×奥行44cm）を用いて，オイカワを2010年10月14日に採集した．次に，実験水路に隣接した観察室内の蓄養水槽に移し，２週間以上馴化させた個体を実験に使用した．蓄養中には1日1回乾燥赤虫を適量与えたが，水路での実験中には，楊ほか[11)]を参考に給餌の刺激が魚の行動に影響することを防ぐために無給餌とした．

(2) 大型実験水路と実験装置

実験には，岐阜県各務原市に位置する国土交通省水辺共生体験館の実験水路を利用した（図-1およびhttps://www2.cbr.mlit.go.jp/kisojyo/taikenkan/experi.html参照）．実験水路は，延長25m，幅5mの還流式の水路で，左岸側の側壁が透明アクリル板の観察窓となっており，隣接する地下観察室から水中の目視観察が可能

表-1 実験条件の概要

実験条件	流量※1 (m³/min)	実験水路の水深 (cm)	「流心部・中層」の区画における流速 (cm/s)
1	0	29	0
2	2.9	32	10
3	7.2	34	26
4	12.8	38	42
5	24.9	40	71

※1 流量は，実験水路に備え付けの流量計の値による．

な構造となっている．上流側の2mは上流部の屈曲部からの影響を受け流れが一定ではなく，下流側の3mは流された個体を含めてカウントしてしまう危険性があるため，実験水路の流程25mのうち，上流側の2mと下流側の3mを除いた，残りの20mを観察対象区間とした．

実験に先立ち，実験水路を幅1.5mに狭め，狭めた実験水路の両壁面に厚さ2mmの透明アクリル板を貼り付けた（図-１b,c参照）．これにより，壁面の質感の違いが流速およびオイカワの場所利用に及ぼす影響を排除した．河床には中礫（粒径約50mm）を縦断勾配1/1,000で敷き詰めた．

低流速域を設定するために，黒色塗装した2種類の鉄製L型アングル（長さ500mmと1800mmで，それぞれ厚さ3.2mm，縦50mm，横50mm）を組み合わせて，鉄製の桟粗度（幅500mm，長さ1800mm，粗度間隔100mm，粗度高50mm）を作成した（図-１b参照）．この桟粗度を実験水路の片側底面に複数敷き詰めることによって，水路の片側を水際の緩流域に見立てた（図-１c参照）．これによって，緩流域の有無による2タイプの水際域をそれぞれ左右岸に設定し，流心部の流速に見立てた水路の流心部における流速を変化させた上で，水際の緩流域の利用頻度が変化するかを調べた．なお，桟粗度を設置した場所の効果を排除するために，桟粗度を設置する位置を観察ごとに左右岸で入れ替えた．

水面より上の景色や観察者の動きなどの刺激が魚類の行動に及ぼす影響を排除するために，実験水路の上を市販の黒色の寒冷紗（遮光率50%）で覆うとともに，観察者の前に寒冷紗と黒色プラスチック板でついたてを作成した．

(3) 流速変化と計測方法

実験水路の流量を5段階（0，2.9，7.2，12.8，24.9 m³/min）にコントロールし，実験条件1から5を設定した（表-1）．それぞれの実験条件に対して，下流端堰上げによる調整を行い等流状態にした．その時の水深は，それぞれ29，32，34，38，40cmとなった（表-1）．流速の計測は観察領域の縦断方向の中央にあたる，上端から12mの地点で行った．流速を計測するにあたって，水路の横断面を水平方向に3等分（桟粗度あり，流心部，桟粗度なし），垂直方向にも3等分（表層，中層，底層）し，合計9区画に区切った（図-1c参照）．その各区画の中心で流速を測定し，流速分布を調べた．流速は電磁流速計（VET-200-10P，ケネック社，東京，精度±0.5cm/s）を用い，各区画の中央において3回計測し，その平均値を用いた．実験条件1から5に対する，「流心部・中層」の区画の流速は，0，10，26，42，71cm/sであった（表-1）．

(4) 観察方法

観察は2010年11月11日から12月2日の間に7回行い，それぞれの観察は9時から16時の間に行った．各回，10-20個体程度のオイカワを実験水路に放流し，実験条件1から5まで流量を変化させ，利用区画の変化を観察した．各実験条件の流量に調整した後に約30分間馴化させ，行動が落ち着くのを待った．なお，この馴化時間を経た後には利用区画が定まり，さらに30分後も同様の利用パターンを示すことを予備観察で確認している．その後，隣接する地下観察室から，オイカワによる利用区画を体サイズ（小サイズ群：体長約5cm，大サイズ群：約10cm）に分けて記録した．利用区画の記録の際には流速測定と同じ9区画を用いて，上流から下流側に向かって移動しながら，縦断方向1mごとに記録した．ダブルカウントを避けるため，各実験条件における利用区画の観察は，5分以内に終了させた．

その後，縦断方向の利用区画の観察例数をすべて合計し1つの横断面における利用区画の観察例数として取りまとめた．この理由は，①等流状態での観察であったこと，②オイカワが横断面の区画をまたいで移動することは稀だったこと，の２点による．

３．結果

(1) 流速分布

「桟粗度あり・底層」の区画では，緩流域が形成された（図-2a参照）．実験条件1-5における，上記の区画を除いた8区画の流速のレンジは，それぞれ0，6-10，17-26，23-42，48-71cm/sであったのに対して，「桟粗度あり・底層」の区画の流速は，それぞれ0，2，3，14，15cm/sであった．

各実験条件における水路横断面の流速分布は，実験条件1を除いた2から5の実験条件間で似たようなパターンを示した．すなわち，①「流心部・中層」の区画で，流速が最も速くなり，②「桟粗度なし・底層」の区画や「桟粗度あり・中層」の区画では流速がやや遅く，③「桟粗度あり・底層」の区画では，流速は最も遅かった．

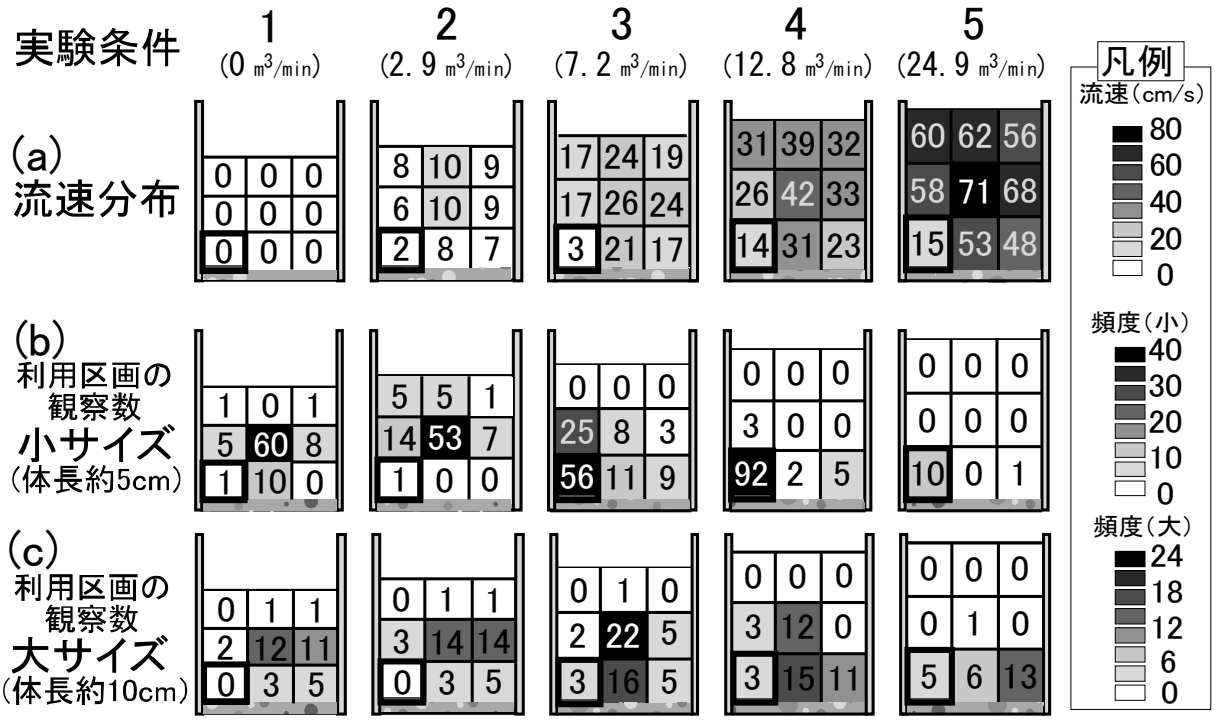

図-2 流速の違いによるオイカワ利用区画の違い
各実験条件における水路横断面の流速分布（a）とオイカワによる利用区画の観察例数（小サイズ，b；大サイズ，c）．
図の示し方は図-1(c)と同様．左下の太枠で囲った区画は「桟粗度あり・底層」を示す．各区画の中の数字は，流速あるいは観察頻度の値を示す．

(2) オイカワによる利用区画の変化

オイカワによる利用区画は，実験条件によって異なり，その反応は体サイズによって異なった（図-2b,c参照）．実験条件1と2では，両サイズ群とも「流心部・中層」の区画を多く利用し（実験条件1：小サイズ群，全86例中60例，大サイズ群，全35例中12例；実験条件2：小サイズ群，全86例中53例，大サイズ群，全41例中14例），「桟粗度あり・底層」の区画をほとんど利用しなかった．一方，実験条件3から5では，サイズ群によって利用する区画が異なった（写真-2参照）．小サイズ群では，「桟粗度あり・底層」の区画を利用するようになり，その傾向は実験条件3から5へと流速が増加するにつれて顕著になった（それぞれ，全112例中56例，全102例中92例，全11例中10例）．一方，大サイズ群については，実験条件3では「流心部・中層」の区画（全54例中22例）を最も多く利用したが，比較的遅い流速を有する「流心部・底層」の区画（同16例）も利用するようになった．さらに実験条件4，5と流速が速い時には，「流心部・中層」の区画の利用数がそれぞれ全44例中12例，全25例中1例に減少し，「流心部・底層」の区画（それぞれ15，6例）や「桟粗度なし・底層」の区画（それぞれ11，13例）の利用数が増加した．ただし，実験条件4と5においても，大サイズ群は最も流速が遅い「桟粗度あり・底層」の区画（それぞれ3，5例）をあまり利用しなかった．むしろ，大サイズ群は「流心部・底層」や「桟粗度なし・底層」の区画において，さらに底層の空間に定位する行動が見られた（写真-2）．

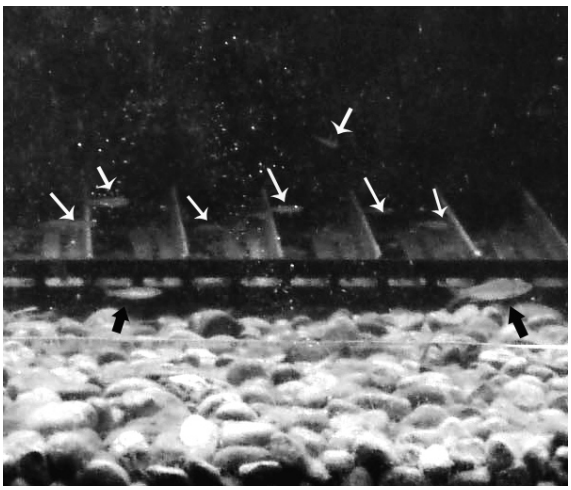

写真-2 流速の変化によるオイカワの利用区画の変化
実験条件4の時に観察室から撮影した写真．手前に見える大サイズのオイカワ（太黒矢印）は「流心部・底層」の区画を，小サイズのオイカワは（細白矢印）は奥に見える「桟粗度あり・底層」の区画を，多く利用した．

なお両サイズ群ともに，実験条件1-4（観察数の合計：小サイズ群，86,86,112,102例；大サイズ群，35,41,54,44例）に比べて実験条件5での観察数の合計が減少した（小サイズ群，11例；大サイズ群，25例）．こ

れは，オイカワが観察できる範囲に定位できなかったためで，オイカワが観察領域から下流に流されたり，河床に敷いた礫の間隙に入り込んだことを確認している．

４．考察

(1) 流速条件による緩流域の利用頻度の変化

本研究において，流心部の流速の変化に対してオイカワが低流速域へと利用区画を変化させたのは（図-2），速い流速からの忌避の結果と考えられる．高流速域からの忌避行動には流速耐性が関係すると考えられる．魚類の流速耐性としては，突進速度と巡航速度という2種類の基準がよく用いられる[12]．突進速度とは魚の発揮しうる速度のうち最大のもので，1秒から数秒持続する速度と定義される．一方，巡航速度とは比較的長時間（30分-数時間）疲労することなく泳ぎ続けられる速度の中で最大のものと定義される．本研究では，平水時の河川における河岸処理への適用を考慮している点，30分の馴化後に観察している点から，巡航速度を基準として用いるのが適当である．一般的に，紡錘型をした魚種の巡航速度は2～3BL（体長）/sであるといわれている[12]．今回用いたオイカワの体サイズに適用すると，巡航速度は小サイズ群では約10-15cm/s，大サイズ群では約20-30cm/sとなる．この巡航速度をあてはめると，今回観察された場所利用の変化が良く説明できる．

実験条件1と2の時には，水路横断面の全区画の流速が両サイズ群の流速耐性よりも低かったため，「桟粗度あり・底層」の区画の低流速域を利用する必要がなかったと考えられる．どの区画でも利用できるにもかかわらず，「流心部・中層」の区画が集中的に利用された理由として，餌となる流下物（流下藻類や流下昆虫など）を摂食しやすい場所として選好された可能性が考えられる．実験条件を変えた直後に水面を流れる小さなゴミを食べるために浮上する行動が見られたことに加え，既往研究では，オイカワが付着藻類だけでなく水面に落ちて流れる昆虫類を捕食することも知られている[8)-10)]．これらのことも，この仮説を支持するだろう．

実験条件3の時には，「桟粗度あり・底層」の区画（3cm/s）以外では流速が17cm/s以上となり，小サイズ群の流速耐性を超えていたと考えられる．その結果，小サイズ群は流速耐性の範囲内であった「桟粗度あり・底層」の区画へと利用場所をシフトさせたと考えられる．一方，大サイズ群は，流速耐性を超える流速ではなかったため，実験条件1や2と同じく「流心部・中層」の区画に多く留まったと考えられる．ただし，流速耐性の閾値に近い流速であったため，相対的に低流速だった水路底層の区画も利用されたものと考えられる．

ここで，大サイズ群が，最も低流速だった「桟粗度あり・底層」の区画を利用しなかったことが疑問として残る．その理由として，体サイズによって乱流が定位行動に及ぼす効果が異なるため[13]，退避する位置が異なった可能性が考えられる．ただし，Nikora et al.[13]では乱流の影響は体サイズが小さい個体において顕著であるとされており，小サイズ群が桟粗度直上で乱流の生じやすい区画を多く利用した本結果とは異なるため，今後検討が必要である．他の理由として，大サイズ群の個体が摂餌に有利なポジションを確保し続けた可能性も考えられる．前述のように「流心部・中層」の区画が摂餌に有利であり，かつ高流速時でも巡航速度から大きく外れていないとすれば，摂餌に有利なポジションに近い「流心部・底層」に退避する理由となるだろう．いずれにしても，今後オイカワの巡航速度を実際に計測し，体サイズとの関連を調べる必要があろう．

実験条件4と5の時には，「流心部・中層」の区画における流速がさらに速くなり，両サイズ群ともその高流速を有する区画をほとんど利用しなかった（図-2，写真-2参照）．これらの結果も，緩流域の利用が流速耐性と関連することを示唆している．

(2) 現場への適用

本研究の結果から，野外における水際緩流域の魚類の生息場所としての重要性も，流心部の流速によって変化すると考えられる．

たとえば，本研究結果から，小サイズ（体長約5cm）のオイカワにとって，流心部の流速が26cm/s程度の時には，水際の緩流域が重要になると推察される．この約26cm/sという流速は，平瀬でも見られる程度の比較的遅い流速である[7)]．このことから，水際の緩流域は多くの場所で必要とされることが考えられる．河岸工事によって水際域の構造が単純化されると，緩流域の広さの減少を通じて，魚類の生息量に影響を及ぼす可能性があると考えられる．したがって，河岸工事の際には人工的に緩流域を創造するなどの配慮が必要になるだろう．

また，本研究では中小河川の代表魚種であるオイカワの観察にとどまっているが，今後は実河川に生息する他魚種についても検討が必要となろう．たとえば，本研究成果を踏まえて，遊泳能力が低い稚仔魚を考慮の対象とする際には，流心部の流速がもっと遅い条件から水際の緩流域への配慮が必要になるだろう．ただし，過剰な緩流域の形成は，オオクチバス（*Micropterus salmoides*）やブルーギル（*Lepomis macrochirus*）のような止水性外来魚の河川への侵入を助長する可能性があるので[7)，14)]，注意が必要である．これまで，魚道改善の視点から多種の突進速度に関する知見の集積がなされてきたように[15)]，今後は水際の緩流域への配慮の観点から，巡航速度に関しても多種にわたる知見の集積が望まれる．

また，本研究の成果を他の魚種に対して利用する場合，体長から推定される巡航速度（2-3BL/s）は，一つの目

安として有効であると考えられる．たとえば，萱場ほか[3]はアブラハヤ（*Phoxinus lagowskii steindachneri*）を中心とした魚類群集において，体長3cmまでの体サイズ群が流心部（平均流速76cm/s）ではほとんど見られず，水際の緩流域（同10cm/s）に集中していたことを観察している．流心部と水際域の流速に大きな差があるものの，この水際の緩流域の利用も2～3BL/sによって推定される巡航速度を目安として利用することで説明でき，その汎用性の広さを示唆するものである．ただし，アユ（*Plecoglossus altivelis altivelis*）のように巡航速度が10BL/sと大きく外れる例もあることから[16]，先述のように実際に巡航速度を計測し，その知見を集積していく必要性が指摘される．

本研究が提示した，水際の緩流域の重要性と流心部の流速との関係性についての知見は，河岸・水際域の設計や評価に役立つと考えられる．これまで河川改修の影響や効果に関して， PHABSIMなどの評価手法があったものの，水際域を評価する手法は組み込まれていなかった．本研究の知見は，造成後の水際域の構造と河道条件による水理計算によって導かれる流速から，その水際域の構造が魚類の生息場所として機能するかどうかを判断する材料として有効である．また，河岸処理の計画段階から，水際の緩流域が機能するかどうかをシミュレーションすることが可能となり，多自然川づくりで重要視されている河岸・水際域の処理に対しても有効な知見であると考えられる．

５．結論

本研究によって以下の3点が示唆された．

① オイカワによる緩流域の利用頻度は，流心部の流速によって変化する．
② 流心部の流速が速いほど緩流域が必要とされる．
③ 水際の緩流域が利用され始める流心部の流速の閾値として，巡航速度が一つの目安となる．

謝辞：本研究を行うにあたり，水辺共生体験館の実験水路の使用を許可して頂いた水辺共生体験館運営会議の皆様，ならびに実験水路の管理などをして頂いた木曽川上流河川事務所の皆様に感謝申し上げます．また，実験に用いた魚類の採集や実験水路での作業などを手伝って頂いた自然共生研究センターの皆様にも感謝申し上げます．

参考文献

1) 萱場祐一：多自然川づくりにおける水際域の保全と修復：水際域の魚類生息場所としての機能を中心として，水環境学会誌，Vol.31，pp.341-345,2008.
2) 河口洋一：水辺の植物が河川性魚類の生態に及ぼす影響（特集「生物相からみた環境の変化」），海洋と生物Vol.25，No.6,pp.452-459,2003
3) 萱場祐一・吉田桂治・田村秀夫・剣持浩高・高木茂知・林尚：水際における生息場所タイプと魚類の生息分布―砂鉄川における現地調査結果から―，河川技術論文集，第11巻，pp.31-34，2005
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-人工増水と生息場所との関係-，応用生態工学，Vol.7,pp.129-138,2005a
5) 佐川志朗・田代喬・松間充：出水時におけるオイカワ稚仔魚の避難場所-災害が魚類の生息に与える影響-，多自然研究，Vol.114，pp.3-7，2005b
6) 可児藤吉：渓流棲昆虫の生態，古川晴男（編）（昆虫：上），pp.117-317,1944
7) 鈴木興道:魚のす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
8) 宮地傳三郎・川那部浩哉・水野信彦：原色日本淡水魚図鑑，保育社，大阪，1976
9) 中村守純：オイカワ，In:日本のコイ科魚類―日本産コイ科魚類の生活史に関する研究，(財)資源科学研究所，東京，pp.224-231,1969
10) 森誠一・名越誠：オイカワ，In：川那部浩哉・水野信彦（編）日本の淡水魚，山と渓谷社，東京，pp.244-249,1989
11) 楊継東・関根雅彦・浮田正夫・今井剛：行動モードを考慮した魚の環境先行性に関する実験的研究，土木学会論文集，pp.35-45，1999.
12) 塚本勝巳:17.遊泳生理,In 板沢靖男・羽生功（編）魚類生理学，恒星社厚生閣，東京，pp.539-584，1991
13) Nikora, V.I., Aberle, J., Biggs, B.J.F., Jowett I.G., and Sykes J.R.E.:Effects of fish size, time-to-fatigue and turbulence on swimming performance: a case study of *Galaxias maculates*, Journal of Fish Biology, Vol.63, pp. 1365-1382, 2003
14) 永吉武志・今西洋平・佐藤照男・端憲二・嶋田浩：オオクチバスの巡航速度に関する実験，農業農村工学会全国大会講演要旨集，pp.856-857，2010
15) 鬼束幸樹・秋山壽一郎・山本晃義・渡邉拓也・脇健樹：河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究～アユ，オイカワ，カワムツ，ギンブナを対象～，土木学会論文集B，Vol.65，No.4，pp.296-307,2009
16) 塚本勝巳・梶原武・益田信之・森由基彦：放流時における人工種苗アユの分散―I，日本水産学会誌，Vol.41，No.7，pp.733-737

(2011.5.19受付)