

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

EVALUATION OF MICRO HABITAT BASED ON FISH BEHAVIOR IN
AGRICULTURAL CHANNEL AND ESTIMATION OF FISH SWIMMING CURVES

和田 清¹・桑原 真吾²・稲川 啓太²・寺町 茂³

Kiyoshi WADA, Shingo KUWABARA, Keita INAGAWA and Shigeru TERAMACHI

¹ 正会員 工博 (独)国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 教授 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2)

² 学生会員 (独)国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻 (同上)

³ 水圏域(淡水)環境研究会代表 (〒501-0417 岐阜県本巣市屋井 936-1)

Relation between environmental structures and fish habitat were compared in a small channel for agricultural irrigation system in a branch of the Neo River in Gifu Prefecture. In general, for hydraulic channel design, sustained speed and burst speed have characterized the swimming ability of fish. In this study, it is conducted to evaluate sustained speed in a non-uniform flow channel. Typical swimming curves of twelve species were evaluated in this experiment. Chaos fractal characteristics of fish movement were estimated in small tank. Biological signals have chaos fractal characteristics and chaos fractal analysis is effective to understand that complexity. It is verified the existence of the chaos characteristics in the movement locus of a fish by means of Lyapunov analysis. Furthermore, the complexity of that movement locus was quantified by means of the fractal dimension analyzing methods. This study suggests the necessity of analysis with the long time observation data to understand further real fish movement.

Key Words : ecological continuity, habitat, fish swimming speed,

1. はじめに

落差をもつ河川や農業用水路における横断構造物は、縦断方向の不連続性をもたらすために、魚類などの生息域を区分したり、改修工事に伴う河道断面の画一化は、河川がもつ環境機能の縮小を招き、水生生物の生息密度の減少や個体群の多様性の低下が指摘されている¹⁾。さらに近年、洪水時の避難場所や幼生・稚魚の生育場としての効果を期待して、小河川や農業用水路の岸部において微小ワンドや魚巢ブロックなどの空間を設けることが行われている。しかしながら、これらの構造物空間の蟄集効果や設置間隔の指針などについては未だ十分な検討がされていないのが現状である。

本研究では、河川や農業用水路に生息する一般的な魚類を対象にして、小河川や農業用水路における微小ワンドなどの避難場所の形状、形態が魚類の遊泳行動にどのような影響を与えているかについて、リボntag付け調査および室内水理実験における魚類個体群行動の複雑さをフラクタル次元解析などか

ら定量的に把握したものである。一方、不連続性を緩和する手段である魚道の設計、微小ワンドの配置間隔算定などに必要な魚類の突進速度、巡航速度などの遊泳能力は、従来体長 BL に比例する算定式により求められている²⁾³⁾。ただし、すべての魚種に対して適用できるわけではなく、対象魚種によってはそれらの遊泳速度の値や流れ場に対する基本的な遊泳能力の特性が異なることも予想され、この遊泳能力の評価についても明らかにされていないのが現状である。そこで、本研究では、対象とする農業用水路で採捕された在来魚種について、その基本的な遊泳能力を把握するために簡易二次元水路実験により、個体差や魚種の特性を考慮した基本的な魚類の遊泳能力を推定し、休憩場所(微小ワンドなど)の配置間隔の算定方法など、水路施設設計の基礎資料としてしようとするものである。

2. 避難場所周辺の個体群行動の現地調査

(1) 現地実験の概要

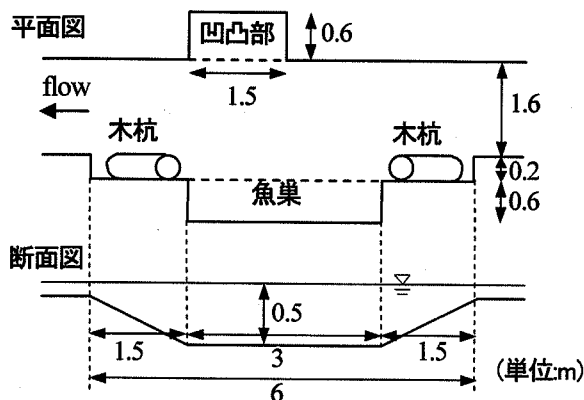
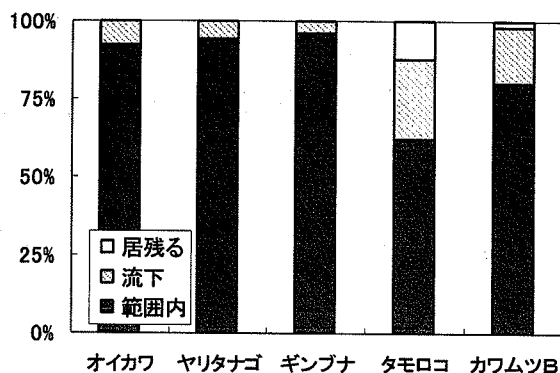


図-1 避難場所(微小ワンド・魚巣ブロック)の幾何形状

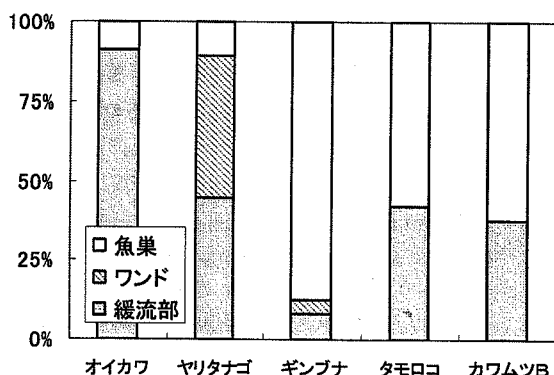
根尾川水系の真桑用水における改修後の農業用水路網(水路幅1.6mの直線水路)には、図-1に示すような微小ワンドや魚巣ブロックが間隔30m程度で設置されている(本巢市屋井地区)。なお、魚巣ブロックの前後には、間伐材による斜め杭が施工されている。これは渦流による緩流域、両生類などの登坂経路の利用などを意図したものである。これらの農業用水路内に設置された人工的な避難場所の機能(短時間の利用率など)を評価するために、下流部に魚類(計12種類、364個体)をリボンタグ標識放流し、個体群の分散状況、避難場所の利用状況をビデオ撮影および目視観察した(2005年8月~11月の計5回)。なお、水位・水温計測には圧力式水位計(メモリー式)と水温データロガーを設置し、流速計測には現場用2次元電磁流速計を使用した。

(2) リボンタグ付け調査による個体群行動

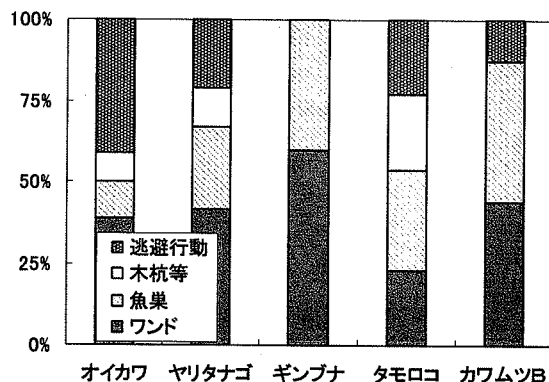
農業用水路直線部の流速は34~50 cm/s程度(水深15~20cm)であり、カワムツB・オイカワ・ヤリタナゴ・アブラハヤなどの魚種が確認されている。同水路において同年11月21日にリボンタグ付け調査(オイカワ・ヤリタナゴなど5種類、各50尾)を実施し、水路下流に放流してその後の定位する位置を目視観測により把握した。その結果を図-2に示す。同図(a)は、放流直後における避難場所の利用率である。オイカワのうち微小ワンドの内部に定位したものは全体のわずか9%(46尾中4尾)であり、残りの91%は木杭の後流部や河床勾配が変化する上流端下部などに定位したことを示している。遊泳力の弱いタモロコは20%程度が対象範囲内から流下している。さらに、放流から2~3分経過後の同図(b)では、ヤリタナゴの45%(47尾中21尾)が微小ワンドの内部に定位、ギンブナは魚巣ブロック内部に定位したことなどがわかる。放流から10分経過後にタモ網などで威嚇・攪乱して再度避難場所の定位状況を示したものが同図(c)である。避難場所である微小ワンド・魚巣ブロックの内部、木杭の下流部な



(a)放流直後の避難場所の利用率



(b) 2~3分後の避難場所の利用率



(c) 威嚇後の避難場所の利用率(10分後)

図-2 避難場所(小ワンド・魚巣ブロック)の利用状況の推移

ど、魚種によって利用状況が異なることがわかる。威嚇・攪乱により、ヤリタナゴは遊泳している個体数の約40%が微小ワンドに逃げ込んだことなどが観察されている。これらのことから、避難場所の利用状況は魚種によって大きく異なり、特にタナゴ類のような遊泳能力の低い魚種の農業用水路における保全を考慮する場合には、避難場所の適切な配置(形状、間隔など)が重要であると示唆される。

3. 魚類の遊泳能力に関する室内実験

(1) 簡易的な遊泳能力の推定

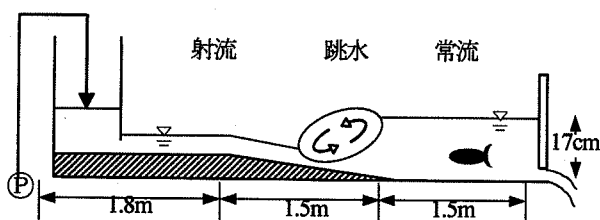


図-3 二次元水路による魚類の遊泳力実験(簡便法)

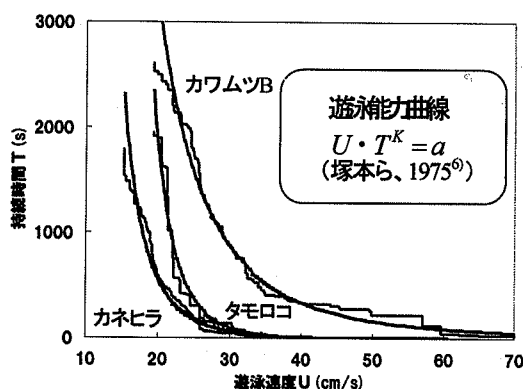
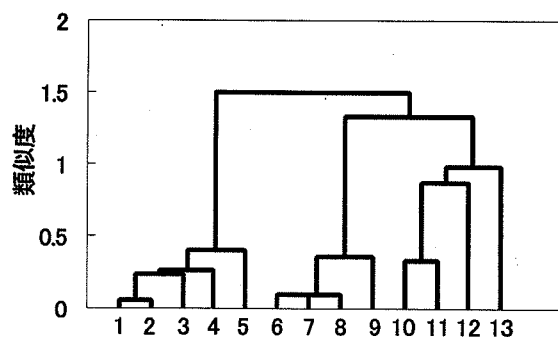


図-4 魚類の遊泳曲線(簡便法)

避難場所が魚類の生息場として機能するためには、そこに生息する魚類が平水時に下流側から上流側へと遊泳できるような適切な配置間隔となっていることが重要である。そこで、まず、対象とする魚類の遊泳能力を求めることが必要である。従来、遊泳能力算定を行う際には、流速分布が一般的なパーソナルタンクを使用した強制的に遊泳させる方法が用いられている⁴⁾。この方法は、魚類に一定の流速を与えてほぼ一定場所に定位して流速と等しい速度で泳ぎ続け、遊泳速度と遊泳持続時間の関係を求めるものであり、突進速度や巡航速度などの基本的な遊泳能力を評価することができる。ただし、流速を数段階変化させる際に、どの程度魚体を休めて次の実験を開始するかなど、魚類の生理学的な知見も必要になる。一方、本簡易手法は、跳水を伴う不等流の流れの状態で行うために、魚類は遊泳能力に応じて場所を選択できるものとなっている。この点がパーソナルタンクを用いた方法と異なり、実際の遊泳行動を反映させたものとなっている。ただし、同一魚種でも個体差による影響が大きくなる可能性がある。

簡易手法は以下のような方法で求めるものである。図-3の落差工直下のように、射流から常流へと変化し、場所ごとに流速が異なるアクリル製二次元水路(幅3cm×高さ25cm×長さ4.8m)内において、一定の流量(1.13~1.15 L/s)を流し、対象魚類(12種類、25個体)を30分間遊泳させた。実験水温は18~23℃である。魚類の遊泳行動をビデオカメラによ



(途中落下) フナ類 タナゴ類 オイカワ科

図-5 遊泳曲線のクラスター分析(最短距離法)

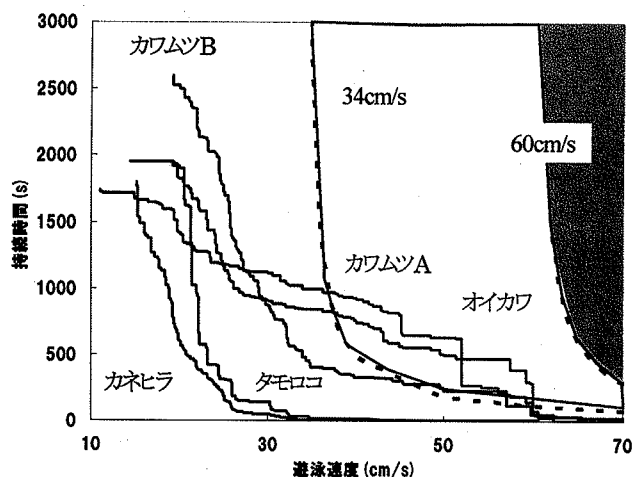


図-6 遊泳曲線を用いた避難場所の配置間隔の算定

り撮影し、動画計測ソフトウェア(Move-Tr/2D)により魚類の位置座標の時系列データを求めた。また、水路の詳細な流速分布は、トレーサー粒子を流してビデオカメラで撮影し、同ソフトウェアによって単位時間当たりの変位量として流速値に換算することにより算定した。この解析データをもとに、位置座標と流速を補間法により対応させ、遊泳速度の時系列データが得られることになる。この時系列データを基にして遊泳速度の大きい順に並び替えて経過時間を持続時間に置き換えることによって、魚類の遊泳能力を簡便に評価することができる。ただし、今回は、巡航速度からやや高い遊泳速度を対象としているために、魚類行動の追跡を0.5~1s間隔で行っている⁵⁾。

得られた遊泳曲線の一例を示したものが図-4である。同図から、従来から提案されている遊泳能力曲線式が測定範囲内ではほぼ適用できることが確認できる。ただし、パーソナルタンクのように何段階かの遊泳速度における持続時間を直接測定していないために、ごく短時間しか維持できない突進速度(1~数秒の最大遊泳速度)の算定には精度が悪いこと

に留意する必要がある。さらに、図-5 は、これらのデータ（遊泳曲線の積分値など）や各個体情報（魚種・体長・体重など）をもとに最短距離法によるクラスター分析の結果を示したものである。同図から、オイカワ属、タナゴ亜科、止水域に生息するフナ類などや、実験途中に力尽きて落下したものを含めて、魚種による遊泳能力の差異が明確に分類されることがわかる。

(2) 避難場所の配置間隔の算定

上述の魚種の遊泳能力測定実験で算定した遊泳曲線と現地で計測した水路の流速を用いて、水路の流速と遊泳速度との相対速度を算出し、現況の避難場所（微小ワンドや魚巣ブロック）の配置間隔（30m）における移動に要する時間と到達できる魚種を把握した。図-6 は遊泳曲線を用いた避難場所の配置間隔の算定結果を示したものである。図中の破線は、水路流速を実測の下限值から 34cm/s と設定し、上流側の避難場所へ 30m 遡上する場合の各遊泳速度における所要時間を連ねた線である。この曲線を超える、すなわち遡上可能なものは 11 種 18 尾のうち 3 尾（カワムツ A・B、オイカワ）のみであった。特にタナゴ類は大きな流速での遊泳持続時間が短いために、平水時には遡上できずにその場所にとどまるか流下、出水時にはさらに流下することになる。さらに、水路内の流速が 60cm/s（出水時を想定）になるとオイカワなどの遊泳魚さえも遡上困難になる可能性がうかがえる。このような考え方を用いて、コスト面だけでなく、対象魚種の選定やその遊泳能力を考慮した避難場所の配置間隔を検討する際の目安が得られることになる。

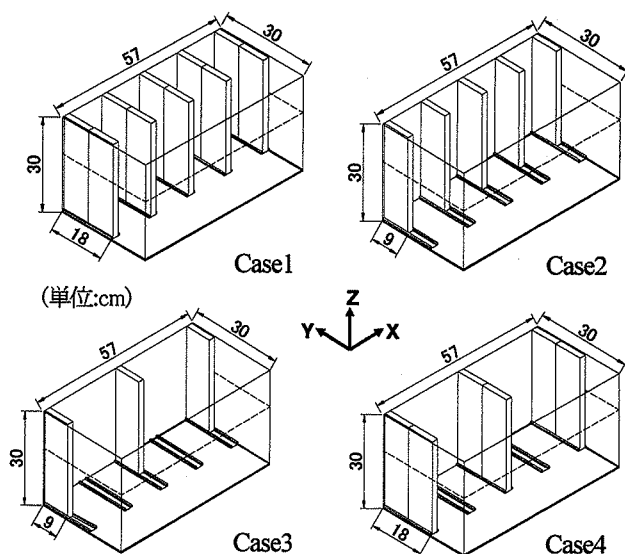


図-7 休憩場所のアスペクト比による実験ケース(4種類)

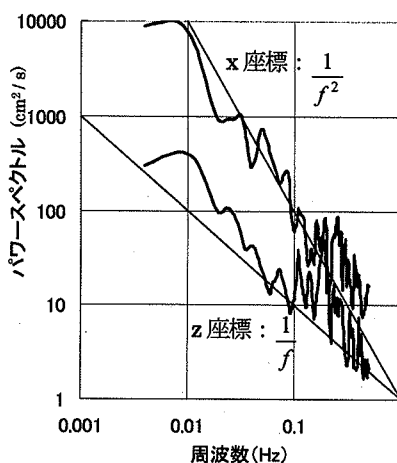


図-8 遊泳軌跡(x,z座標)のパワースペクトル

4. 微小な空間スケールにおける個体群行動

(1) 水理実験および解析方法

一時的な避難場所や幼生・稚魚の生育場として農業水路網を考える場合、上述の微小ワンドや魚巣ブロックだけでなく、農業用水路の側岸にスリット部や木杭などを連続的に導入し、緩流域を創出することによって魚種の移動がより円滑になる工夫を検討する余地がある。そこで、魚種の体長サイズの微小な空間スケール（凹凸形状の単純形状）を考えて、そのアスペクト比が個体群行動に及ぼす影響について、複雑性を表すフラクタル次元解析⁷⁾により定量的に評価した。

個体群行動実験は小型回流水槽（パーソナルタンク）を用い、図-7のように、観察部（60cm×20cm×30cm）に休憩場所（凹凸形状）のアスペクト比（体長BLを基準）が異なる4パターンを設置した。水

深は20cm、最大流速は60cm/s（一定）としてインバーターで制御した。この流速の値は、前述した魚種の遊泳能力測定実験の結果より、数分程度の遊泳が可能であり凹凸部を避難場所として使用する頻度を多く期待できる値とした。観察部の直下には鏡を設置し、3次元的な個体群の移動を測定できるように工夫した。対象個体群は、オイカワ（体長8.3±0.9cm）5尾を1組とし、実験装置に対象魚を放流後1時間程度馴致して行動を観察した。解析手順は以下のものである。デジタルビデオカメラにより約30分間撮影し、その映像をパソコンにavi形式（解像度720×480、DV-Type2）で取り込んだ。その動画を静止画に変換し、2次元動画計測ソフトウェア（Move-Tr/2D）を用いて魚種の3次元位置座標の時系列データを求めた。これらの遊泳軌跡の解析については、ラグについてアトラクタや各種手法を参考に決定し、リアプノフ解析によりカオス性を判断し

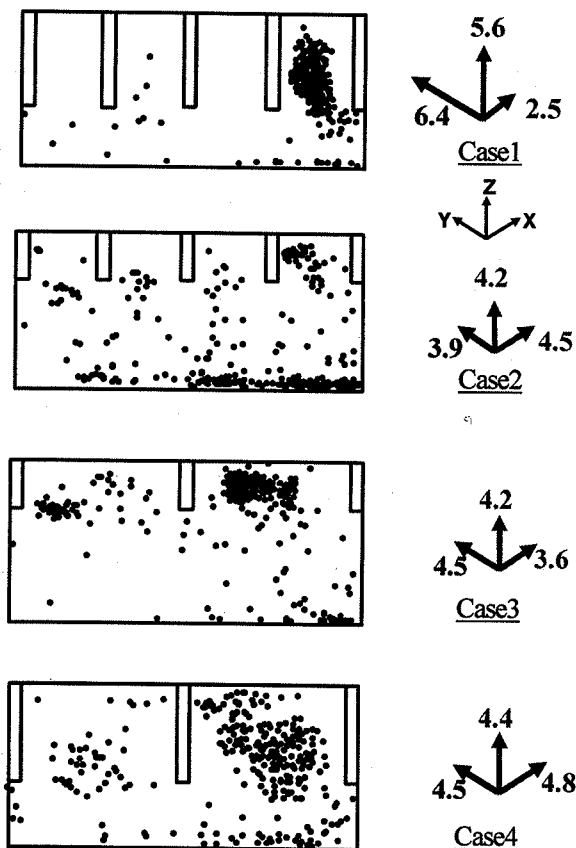


図-9 魚類の遊泳位置(x-y平面)とフラクタル次元

た後、相関積分法によりフラクタル次元を推定した。なお、カオス時系列解析ソフトとして、Sunday Chaos Times を使用した。

(2) 実験結果

図-8 は Case4 における魚類の遊泳軌跡の時系列データをスペクトル解析した一例である。同図から、遊泳軌跡のパワースペクトルは周波数の逆数に比例しゆらぎが生じていること、座標によってその周波数依存性が異なることなどが確認される。また、実験は、最大流速を巡航速度の1.5~2倍程度に設定しているので、個体群は下流部の休憩場所にとどまる傾向にある。さらに、個体群による反発力よりも誘引力の方が大きく、個体群を離れても再び最下流部に戻ることが多いことなどが観察されている。

図-9 は各 Case における魚類の代表的な遊泳位置とフラクタル次元を示したものである。このフラクタル次元が大きい場合変動は乱雑になり、小さくなると規則性が見い出せるとの解釈で適用されている。同図 xy 平面二次元の位置座標の分布からは以下のことがわかる。Case1 (アスペクト比 2:1) では最下流の休憩場所とその周辺、Case2 (1:1) では下流部の休憩場所とは反対側の主流側面付近、Case3 (1:2) および Case4 (2:2) において休憩場所を中心に

ほぼ全域において個体群を形成していることがわかる。Case2 では休憩場所内のサイズが最も狭く、また、Case1 の休憩場所は横長のアスペクト比で、魚類は頭を側壁に向けて遊泳している場合が多く、個体群全体 (5 尾) が収まるスペースは確保されているものの巡回行動がしにくい状況である。さらに、Case3 は、Case1 のアスペクト比を縦長にしたものであり、上下流の休憩場所の利用頻度も増加している。これは、隔壁から剥離した渦流を巧みに利用して遊泳エネルギーを節約していると推定されること、主流と平行に定位し側線感覚によって隣接個体群の遊泳速度と進路を把握しやすい体勢などが寄与しているものと考えられる。また、休憩スペースが大きい Case4 は Case3 の行動範囲をより拡大したものとなっている。一方、同図のフラクタル次元からは、Case1 において x 成分が小さく、y,z 成分が大きいことがわかる。最下流部に留まることが多いことにより個体群密度は高くなり、時折、水面からの飛び跳ね行動が観察されている。これらの要因により、フラクタル次元が高くなったものと考えられる。なお、得られた 3 次元位置座標の時系列データについてリアプノフ解析を適用すると、最大リアプノフ指数は正の値となった。したがって、個体群の実験で得られた遊泳行動はランダム行動ではなく、カオス性を有していることが確認されている。これらのことから、農業用水路の側岸にスリット部や木杭などを連続的に導入する場合、対象魚類の体長サイズの 2 倍以上の縦長スペースを確保すると有効に働くことが示唆される。

5. おわりに

以上、河川や農業用水路に生息する一般的な魚類を対象にして、遊泳能力の基本的な特性、現地における微小ワンドなどの避難場所における遊泳行動、体長スケールの室内実験から、魚類の遊泳行動の複雑さをフラクタル次元解析などから定量的に把握した。本研究により得られた主要な結論は以下のようである。

- 1) リボンタグ付け調査により、農業用水路に設置された避難場所 (微小ワンドや魚巢など) の利用状況は魚種によって大きく異なる。
- 2) 簡易的な遊泳能力算定法が提案され、魚種 (オイカワ属、タナゴ亜科など) による遊泳曲線の差異が明確にグルーピングされた。
- 3) 提案した遊泳曲線を用いて、対象魚種やその遊泳能力を考慮した農業用水路における避難場所の配置間隔の目安を算定する方法を提案した。
- 4) スリットなどの微小な休憩部のアスペクト比と

個体群行動の関係について定量的に評価し、遊泳行動が単なるランダム行動ではなく、ある秩序を伴ったカオス的な性質を伴った一面が示された。これらの解析によって、魚類の運動軌跡の複雑性の変化から、避難場所の評価を行うことができることが指摘された。

一般に、魚類は、眼からの視覚情報に加えて、側線により水流や水圧などの機械的刺激を受容し、周囲の状況を認識するものと考えられている。対象魚種の行動観察から、群れの構造や個体間における関連性などの分析を経て、魚類の行動モデルを構築する必要がある。今後は、対象水域の空間スケールを拡大し、個体識別が可能なテレメトリなどを用いて、構造物の形状と流れ場、魚類の個体群行動の関係について、複雑な群れ行動を評価していく予定である。

謝辞：本研究を遂行するに際し、生物調査にご協力いただいた水圏域（淡水）環境研究会会員の方々および本校水工学研究室学生諸氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 辻本哲郎：河川の生態系保全機能の評価に関わる水工学，第 36 回水工学に関する夏期研修会講義集 A, pp.A-6-1～20, 2000.
- 2) 廣瀬利雄・中村中六：魚道の設計, 山海堂, pp.203-207, 1991.
- 3) 玉井信行・水野信彦・中村俊六：河川生態環境工学, 1993.
- 4) 塚本勝巳：魚からみた魚道設計, 砂防学会論文集 No.2, pp.5～22, 1991.
- 5) 和田 清・桑原真吾・稲川啓太・寺町茂：河川魚類の遊泳能力の算定と凹凸部における個体群行動, 土木学会中部支部研究発表講演概要集, pp.183～184, 2006.
- 6) Tsukamoto, K., T. Kajihara and M. Nishiwaki : Swimming ability of fish, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol.41, pp.167～174, 1975.
- 7) 野口和博：魚の運動軌跡のカオス・フラクタル解析, 生体機能・情報処理シンポジウム pp.5～22, 2005.

(2006. 4. 6 受付)