

# ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON EVALUATION OF FISH SCHOOLING BEHAVIOR PROPERTIES

石川雅朗<sup>1</sup>  
Masaaki ISHIKAWA

<sup>1</sup>正会員 工修 木更津高専・助教授 環境都市工学科 (〒292-0041 木更津市清見台東2-11-1)

In this paper we describe an experimental study on dynamics of fish schooling behaviors. There are very few paper about quantitative and practical information of fish school behavior properties. In order to obtain information of dynamical fish school behaviors, experiments with Japanese dace *Tribolodon hakonensis* were carried out. The behaviors of Japanese dace in both of static and dynamic water area were recorded using a video camera, which was fixed on a ceiling board and covered the whole water area. At intervals one second, images were captured from video tape. Coordinates data of each fish head position was digitized from image data. This confirms that a minimum distance between individual fish is equal to about 0.03m.

**Key Words :** *Fish schooling behavior, Japanese dace, fish school radius, evaluation index  
Individual based model*

### 1. はじめに

魚類生息環境の保全に配慮した河川計画を適正に進めるためには、その計画で盛り込む工夫がどのような効果をもたらすかをあらかじめ予測する必要がある。そのような評価を行うためのひとつのツールとして欧米では正常流量漸増法(IFIM)が広く用いられている<sup>1)</sup>。我国においても正常流量漸増法を適用するための基礎研究が行われ<sup>2~3)</sup>、いくつかの河川計画では事業レベルで魚類生息環境の事前評価が試みられている。

正常流量漸増法の主要モジュールのひとつである物理的生息場シミュレーションPHABSIMでは、魚類生息場となりうるポテンシャルWUAが算定されるが魚類の現存量とは無関係である。①淵の創出、②魚巣ブロック設置、③洪水時における避難場の設置など、魚類の動きが大きく関与する超マイクロ生息場における評価では予測精度が低下することが考えられる。

このようなPHABSIMの欠点を補う方法として、個体ベースモデル(Individual Based Model, IBM)といった魚群行動モデルの生息環境評価手法としての適用が考え

られる<sup>4~8)</sup>。魚1尾1尾に着目して、設置した避難場等に魚群がどのようなアプローチで進入し、そこにどのくらい滞在するのか予測計算を行うのである。

魚類の個体ベースモデルを構築するためには、個体(魚)の基本行動規則として、個体が相互に引きあう距離や反発する間隔などの各種パラメータを設定する必要がある。モデルの同定を行うためには動的な魚群行動特性を定量的に把握する必要がある。

本研究はウグイ *Tribolodon hakonensis* を供試魚とした室内魚群行動観察実験を行い、①魚群半径、②個体間隔、③魚群重心移動速度の3つの評価指標を定め、それらの時間的な変動に対しスペクトル解析を適用し、魚群行動特性を定量的に把握することを目的として実施したものである。

### 2. 魚群行動観察実験

#### (1) 実験装置

図-1に観察実験水路の概要を示す。静水状態の実験は勾配が水平な実験用開水路の一部を魚止めネットで仕切

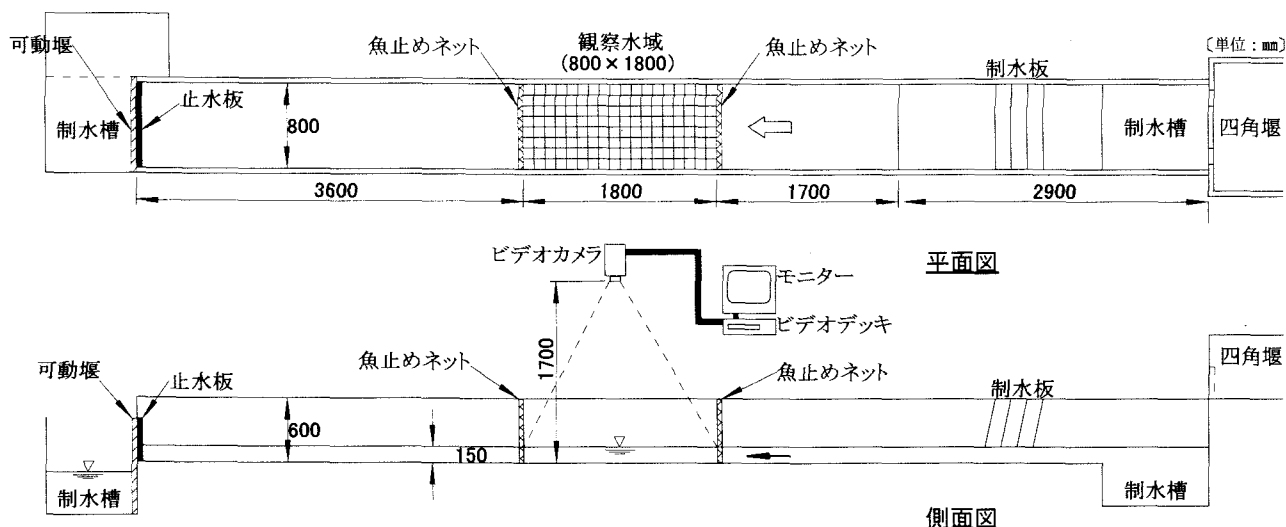


図-1 魚群行動観察実験水路

水路（延長10m）の中央付近の1.8mの区間の上下流に魚止めネット設け観察水域とした。流れのない静水場の観察では下流端に止水板を設けた。天井部に固定したビデオカメラを用いて魚群行動を記録した。

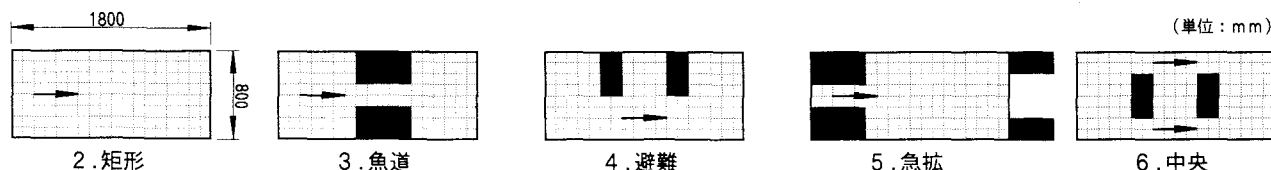


図-2 観察水域の形状

遮水ユニットの配置をかえて観察水域の形状は5ケースとした。「3. 魚道」は観察水域にネック部を設けたもので狭窄部に流速を減じるプレート等は設置していない。「5. 急拡」は下流部領域外にもユニットを配置して流れが逆流する部分が生じさせ、複雑な流速分布となるようにした。

り、その0.8m×1.8mの矩形水域を観察水域として、ここに供試魚を放流し魚群行動を観察した。水路の側壁はアクリル板で透明なため、外側から黒色に着色したベニヤ板を張りつけて人が水路に近づく影響を軽減させた。下流端の可動堰の部分には止水板を設け、観察水域の水深を一定に保つようにした。動水状態の実験では、止水板を取り外し一定の流量を流し、下流端に設けた可動堰の調整により観察水域の水深が所定の値になるようにした。

魚群行動観察は観察領域全体をカバーするように天井に固定したビデオカメラ（ハンディカムビデオ8 TR205、ワイドコンバージョンレンズ VCL-0637, SONY）を用いて、ビデオテープに画像を記録した。撮影中の実験室は無人の状態にした。観察時間帯は午前9時から午前11時までの2時間の一定の時間帯とした。照明は室内照明と窓からの自然光で水面における照度の測定を行った。

## (2) 供試魚

供試魚は千葉県内水面水産試験場において1998年4月28日に孵化し、育成された生後1年3ヶ月のウグイを用いた。実験期間中は供試魚を実験室内の1.20m×2.40m、水深0.30mのスチール製の水槽で飼育した。

静水状態における実験では、水路下流端に止水板を設置し実験実施期間中、供試魚を水路内に留めおいた。水

表-1 実験ケースと条件

| 実験<br>ケース | 水域<br>形状 | 供試魚の平均<br>体長±σ(cm) | 水深 H<br>(cm) | 流況 | 流量 Q<br>(m³/s) |
|-----------|----------|--------------------|--------------|----|----------------|
| F11       | 矩形       | 9.80±0.64          | 4.94         | 静水 | 0.000          |
| F13       |          | 9.80±0.64          | 25.10        |    | 0.000          |
| F20       |          | 9.80±0.64          | 14.85        |    | 0.000          |
| F22       | 魚道       | 9.65±0.67          | 15.00        | 動水 | 0.012          |
| F30       |          | 9.80±0.64          | 15.10        |    | 0.000          |
| F32       |          | 9.65±0.78          | 15.00        |    | 0.012          |
| F40       | 避難       | 9.80±0.64          | 15.02        | 静水 | 0.000          |
| F42       |          | 8.80±0.95          | 15.00        | 動水 | 0.012          |
| F50       | 急拡       | 9.80±0.64          | 14.87        | 静水 | 0.000          |
| F52       |          | 9.15±0.87          | 15.00        | 動水 | 0.012          |
| F60       | 中央       | 9.80±0.64          | 14.95        | 静水 | 0.000          |
| F62       |          | 9.50±0.97          | 15.00        | 動水 | 0.012          |

位の変更およびユニットの移動による水域形状の変更は前日の12時頃に行った。翌日の実験開始時刻9時までの約21時間馴致させた。動水状態における実験では、観察水域の流況に馴致させるために撮影開始30分前に供試魚を水路に放流した。撮影開始後30分を経過した時点からの映像を解析データとしているので、実質的な馴致時間は1時間程度になる。

供試魚を飼育水槽から観察水路に移すことによる環境変化が魚群行動に与える影響をなくすために、馴致時間は、同様な過去の観察実験<sup>7)9)</sup>を参考に、可能な限り長い時間を確保した。

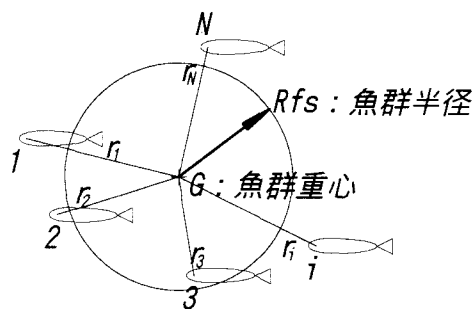


図-3 魚群半径の定義

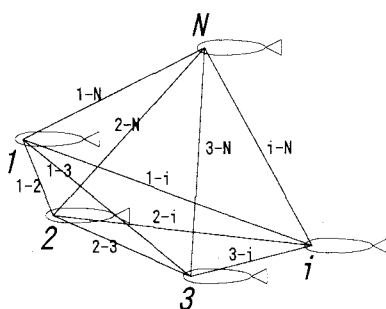


図-4 個体間隔の定義

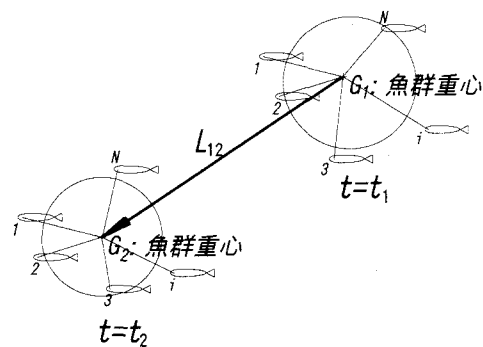


図-5 魚群重心移動速度の定義

静水・動水の全てのケースにおいて、給餌は実験日前日の17時頃に行い、翌日は給餌をせずに観察を行った。供試魚は概ね体長10cm程度のもを選び、放流時に体長の測定を行った。何れのケースも放流尾数は10尾とした。

### (3) 実験ケース

図-2に示した5つの観察水域形状に対して、水深を15cm程度に固定し、それぞれケースについて、流況が静水と動水の場合について魚群行動観察実験を行った。動水の場合は流量 $Q=0.012\text{m}^3/\text{s}$ とした。矩形水域については、水深を5cm, 25cmとした場合の観察実験も行った。実験ケースと条件を表-1に示す。

### (4) 画像解析とデータサンプリング

録画テープからの解析データの抽出は、実験者の存在が供試魚に与える影響を取り除くために、撮影開始30分後から38分間における記録画像をもとにサンプリング間隔1秒で行った。

静止画像を効率的にキャプチャーするためにアナログテープに記録された映像データをデジタルデータに変換した。パソコンにIEEE-1394規格で接続されたビデオ(TRV-900, SONY)と静止画像キャプチャーソフト(Pixe-DV, ピクセラ)を用いてデジタルビデオテープから1秒間隔で38分間(2280秒)にわたるJPEG形式の静止画像を抽出した。

次に、座標読み取りソフト(Digitizer for Bitmap, シェアウェアソフト)を用いて、静止画像から供試魚の頭部の位置をXY座標値として抽出した。供試魚尾数を10尾とし、1ケースにつき2280データをサンプリングした。

### (5) 流速測定

流速測定は3成分電磁流速計(ACM300-A, アレック電子社製)を用いて原則的に10cm間隔メッシュの交点において測定可能な点の流速を計測した。センサーの鉛直方向の位置は、予備観察により遊泳する供試魚の吻端流速に相当すると思われる水深12cmの位置に固定した。

## 3. 評価指標

### (1) 評価指標の定義

魚群行動特性を定量的に表現するために、次に示す3つの評価指標の時系列データを、観察実験により得られた各試験魚頭部の位置座標データから算定した。

#### a) 魚群半径 $Rfs$

魚群を構成する各魚の位置座標から魚群の重心を算定し、魚群重心と各供試魚との距離 $r$ を求め、(1)式で定義した魚群半径 $Rfs$ を各時刻ごとに算定した。この指標は魚群の広がり具合を集約している(図-3)。

$$Rfs = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N r_i^2}{N}} \quad (1)$$

ここに、 $Rfs$ : 魚群半径,  $N$ : 供試魚総個体数,  $r_i$ : 魚群重心と各供試魚との距離。

#### b) 個体間隔 $Dmin, Dmax, Dave$

各時刻ごとに供試魚相互間の距離を算定し、その最小値, 最大値, および平均値の時系列データを抽出した。総個体数が10尾の場合、1時刻の個体間隔データ数は45となり、それから各指標値の時系列データを求めた(図-4)。

#### c) 魚群重心移動速度 $Vfs$

各時刻における魚群重心の位置座標値から(2)式で定義した魚群重心移動速度 $Vfs$ (以下、「重心移動」と呼称する)の時系列データを算定した。

$$Vfs = \frac{L_{12}}{|t_2 - t_1|} \quad (2)$$

ここに、 $Vfs$ : 魚群重心移動速度,  $L_{12}$ : 重心移動距離,  $t_1, t_2$ : 時刻。

表-2 評価指標値算定結果

| ケース  | 水域<br>形状 | 流況 | 魚群半径<br>Rfs(m) | 個 体 間 隔 (m)  |              |              | 魚群重心<br>移動速度<br>Vfs(m/s) | 平均流速<br>V<br>(m/s) |
|------|----------|----|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------------|
|      |          |    |                | 最小値<br>Dmin  | 最大値<br>Dmax  | 平均値<br>Dave  |                          |                    |
| F11  | 矩形       | 静水 | 0.186 ±0.002   | 0.038 ±0.001 | 0.534 ±0.005 | 0.238 ±0.003 | 0.106 ±0.001             |                    |
| F13  |          |    | 0.252 ±0.003   | 0.034 ±0.001 | 0.732 ±0.009 | 0.313 ±0.004 | 0.077 ±0.001             |                    |
| F20  | 矩形       | 静水 | 0.172 ±0.002   | 0.027 ±0.001 | 0.518 ±0.007 | 0.213 ±0.002 | 0.114 ±0.001             | 0.12               |
| F22  |          | 動水 | 0.423 ±0.005   | 0.032 ±0.001 | 1.210 ±0.012 | 0.483 ±0.005 | 0.087 ±0.001             |                    |
| F30  | 魚道       | 静水 | 0.156 ±0.003   | 0.030 ±0.001 | 0.420 ±0.006 | 0.202 ±0.003 | 0.043 ±0.001             | 0.20               |
| F32  |          | 動水 | 0.665 ±0.002   | 0.027 ±0.001 | 1.706 ±0.004 | 0.791 ±0.003 | 0.039 ±0.001             |                    |
| F40  | 避難       | 静水 | 0.103 ±0.001   | 0.028 ±0.001 | 0.291 ±0.001 | 0.138 ±0.001 | 0.036 ±0.001             | 0.17               |
| F42  |          | 動水 | 0.278 ±0.004   | 0.031 ±0.001 | 0.820 ±0.011 | 0.330 ±0.004 | 0.059 ±0.001             |                    |
| F50  | 急拡       | 静水 | 0.102 ±0.001   | 0.027 ±0.001 | 0.289 ±0.002 | 0.137 ±0.001 | 0.053 ±0.001             | 0.22               |
| F52  |          | 動水 | 0.246 ±0.003   | 0.034 ±0.001 | 0.717 ±0.008 | 0.306 ±0.003 | 0.069 ±0.001             |                    |
| F60  | 中央       | 静水 | 0.109 ±0.001   | 0.027 ±0.001 | 0.310 ±0.002 | 0.145 ±0.001 | 0.047 ±0.002             | 0.12               |
| F62  |          | 動水 | 0.513 ±0.005   | 0.026 ±0.001 | 1.347 ±0.011 | 0.594 ±0.006 | 0.064 ±0.001             |                    |
| 最大値  |          |    | 0.665          | 0.038        | 1.706        | 0.791        | 0.114                    |                    |
| 最小値  |          |    | 0.102          | 0.026        | 0.289        | 0.137        | 0.036                    |                    |
| 平均値  |          |    | 0.267          | 0.030        | 0.741        | 0.324        | 0.066                    |                    |
| 標準誤差 |          |    | 0.052          | 0.001        | 0.132        | 0.059        | 0.007                    |                    |
| 標準偏差 |          |    | 0.179          | 0.004        | 0.459        | 0.203        | 0.026                    |                    |

各評価指標値は平均値±標準誤差(s.e)

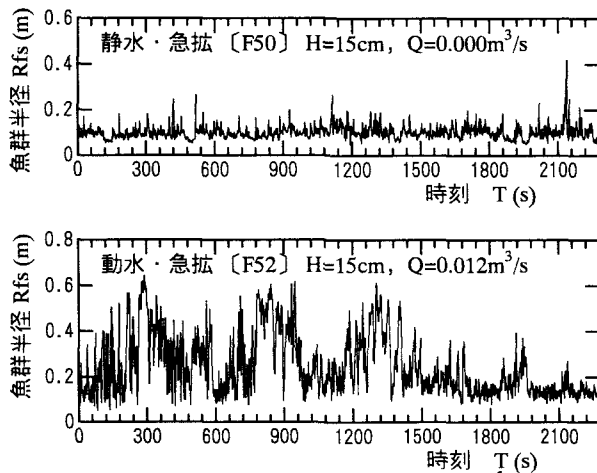


図-6 魚群半径の時系列変化

魚群半径の時間的変化について静水では変動が小さく相対的に安定している。動水では変動が大きい、その最小値は一定の値となる傾向が確認された。

#### 4. 実験結果

算定結果を概観し各々の評価指標値の変動を把握するために、主要な各評価指標の代表値を表-2に示す。

流況（静水・動水）別の魚群半径Rfsの時間的変動について吟味するために、観察水域の平面流速分布の変化が大きい水域形状が「急拡」のケースについて、魚群半径の時系列変化を図-6に示す。魚群半径の時間的変動は、相対的に静水では変動が小さく動水では大きい。

避難場領域における流速分布状況を把握するために、流速ベクトル図を図-7に示す。水路部の流速は概ね0.2～0.3m/sであった。避難領域部の流速は0.06m/s前後と緩やかで、逆流が生じ大きく渦巻いていた。

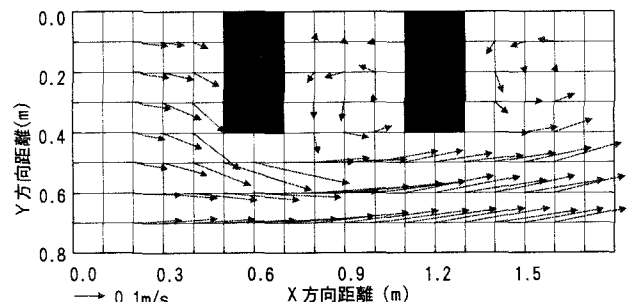


図-7 流速ベクトル図〔避難〕

水路部の流速は0.2～0.3m/s程度。避難領域では0.06m/s程度の流速で渦巻いている。

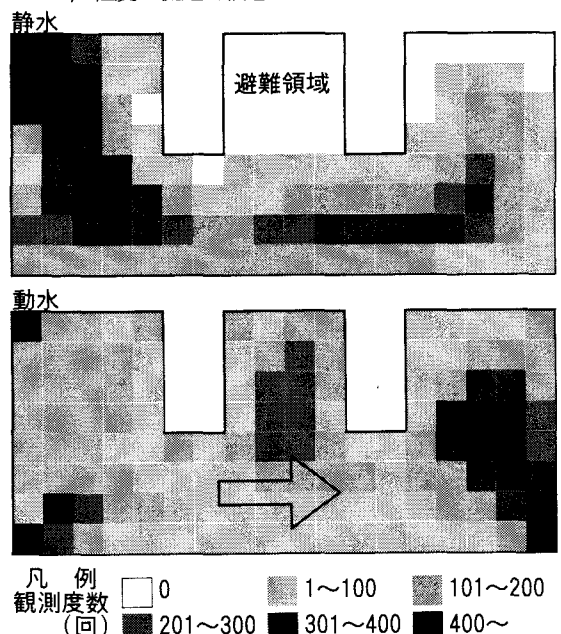


図-8 観察度数の分布〔避難：静水と動水〕

供試魚位置座標データ(各22800データ)から、10cmメッシュごとに観察度数を集計し分布図にしたもの。避難領域の観察度数は静水は全てゼロ、動水は100～300回程度。

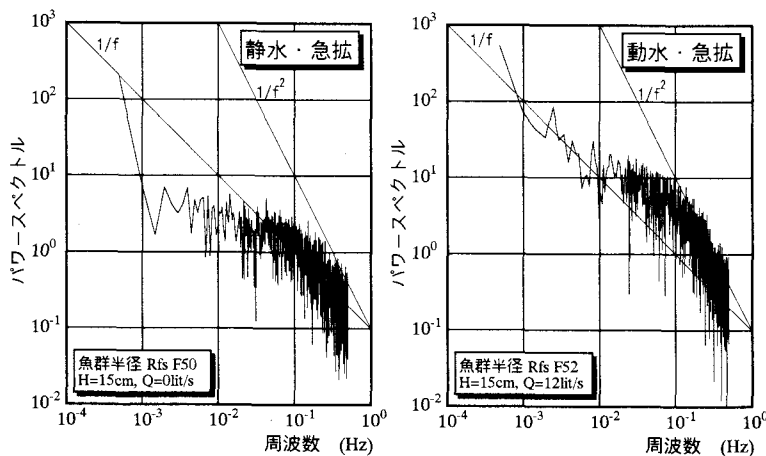


図-9 魚群半径のパワースペクトル (急拡)

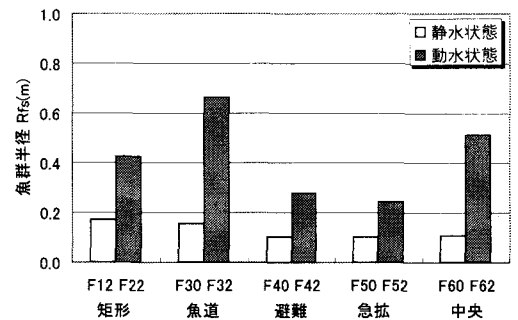


図-11 流況別 魚群半径の比較

水域形状に係わらず動水における魚群半径は静水よりも常に大きい値となっている。

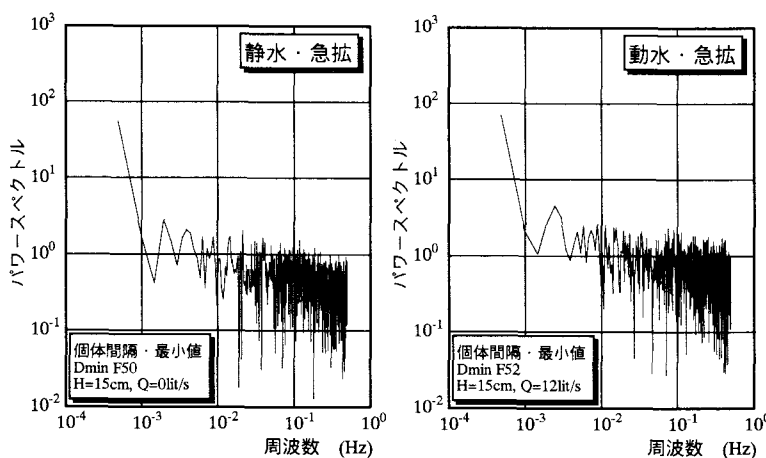


図-10 個体間隔・最小値のパワースペクトル (急拡)

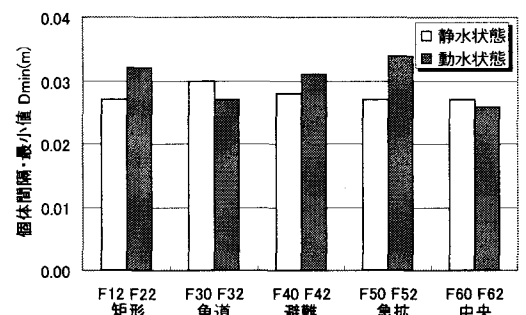


図-12 流況別・個体間隔最小値の比較

個体間隔の最小値は水域形状や流況による変動が小さく、どのケースにおいても概ね0.03m前後の値となっている。

流速に対する供試魚の選好性を確認するために、避難の静水と動水について、画像データから抽出した供試魚の位置座標データをもとに10cmメッシュごとの観測度数を集計し分布図にして図-8に示す。避難領域についての観測度数は静水の場合は全メッシュについてゼロであった。動水では100～300回程度と隣接する水路部よりも高い度数であった。

魚群半径 $Rfs$ と個体間隔・最小値 $Dmin$ について時系列変動を定量的に把握するために、「急拡」のケースについて高速フーリエ解析を適用してパワースペクトルを求め、それぞれ図-9と図-10に示す。

流況別の魚群半径の平均値を比較するために算定値を棒グラフにして図-11に示す。全ケースについて魚群半径の平均値は静水よりも動水の方が高い。特に「魚道」は静水に対して動水では4倍程度の値となっている。

さらに流況別の個体間隔・最小値の平均値を比較するために算定値を棒グラフにして図-12に示す。個体間隔・最小値については多少のバラツキはあるものの流況別の差は小さく概ね同じ値の0.03m程度となっている。

## 5. 考 察

観察水域は水域形状ケースにより異なるが基本的な大きさは1.8m×0.8mである。供試魚の平均的な体長10cmに対し、観察水域は流下方向18倍、横断方向8倍の大きさとなる。魚の巡航速度(体長の2～4倍程度)と突進速度(体長の10倍程度)<sup>10)</sup>に対し、遊泳し始める位置にもよるが、観察領域の大きさは供試魚の自由な遊泳を制限しないと考えられる最低限の大きさと考えられる。横断方向については突進速度による遊泳移動に対し不足しているが、動水において魚の流れに抗するように定位する性質から最小限に十分な大きさと判断した。

観察水域の形状と静水・動水の各ケースについて、平面的な供試魚相互の影響作用を把握するために、供試魚が交差することを許し、水深上下方向の遊泳を最小限に抑えるために基本的な水深を15cm程度とした(表-1)。魚群行動を観察した条件は、実河川における河岸付近の水深の浅い場所、あるいは、低水時の小川における魚群行動といった限定された状況を想定している。

動水における魚群半径の時系列変化（図-6）を見ると大きく変動しているものの全体的な傾向からその最小値は0.1m程度となり静水の場合とほぼ同じになることが確認された。これは個体間隔・最小値が一定であることに関係すると考えられる。流れや形状による行動の制限が小さい場合、各個体は隣接する個体との間に一定の間隔を保つことで魚群を形成する。魚群の広がり具合を示す魚群半径の下限値は個体間隔の最小値に依存すると考えられる。

「避難」のケースについての観察度数の分布（図-8）を見ると、静水の場合に避難領域の度数がゼロとなっている。これは、避難領域が三方を囲まれた閉鎖的な領域となっているため流れによる制限がなく自由に遊泳できる静水では供試魚が危険な領域として進入を避けたものと推測される。流れの制限が大きく作用する動水の場合には避難領域の中央付近では200～300度数となっており、移動中の休憩場としての役割が確認された。全データ数は22800データであり、メッシュ数128から均一に分布した場合の度数は178となり、200～300度数は平均以上となる。

## 6. 結論と今後の課題

人工的に育成された養殖魚を供試魚とした、実験室内水路の限定された水域における魚群行動の観察結果から、各評価指標の時間的変動について分析し、以下のような結果を得た。

- ①水域形状により多少変動するものの、静水における魚群半径 $R_{fs}$ は動水に比べ安定しており、概ね0.1～0.2m程度であった（表-2、図-11）。
- ②流況に係わらず動水における魚群半径 $R_{fs}$ は、静水よりも常に大きい値となった（表-2、図-11）。
- ③動水における避難領域は魚の移動に有効に作用していることが確認された（図-8）
- ④動水における魚群半径 $R_{fs}$ の時間的変動のパワースペクトルは、 $10^{-1}\text{Hz}$ を境に高周波域においては $1/f^2$ で減衰することが確認された（図-9）。
- ⑤静水場における魚群半径 $R_{fs}$ の時間的変動のパワースペクトルは、 $6 \times 10^{-2}\text{Hz}$ を境に高周波域では $1/f$ で減衰し、低周波域では白色ノイズであった（図-9）。
- ⑥個体間隔・最小値 $D_{min}$ は流況や水域形状の条件にかかわらずほぼ一定値となり、その値は概ね0.03mであることが確認された（表-2、図-12）。また、その時間的変動はランダム現象に近いことが確認された（図-10）。

さらに、今後の課題として次のようなことが考えられる。

- ①室内実験により養殖魚を供試魚として検討を行った。パラメータ設定など実用に供するためには実河川に生息する天然魚についての各評価指標値について吟味し精度を向上させる必要がある。
- ②流況が静水と動水の場合について検討したが、動水については、流量の変動に対する各評価指標値の変化については未解明である。
- ③体長10cm程度にそろえた供試魚を用いたが、体長が異なる供試魚についても検討し、成長段階ごとの行動特性を吟味する必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたって、千葉県内水面水産試験場から貴重な供試魚を提供していただいた。豊橋技術科学大学の小出水規行先生には有益な助言をいただき、さらに本論文を点検していただき改良の指示をいただいた。実験の遂行と膨大なデータ分析にあたっては、当時、木更津高専・環境都市工学科の正岡潤君（春本鐵工株式会社）、ならびに渡邊茂雄君（豊橋技術科学大学）にしばしば手伝っていただいた。ここで深い感謝の念を表しておきたい。

## 参考文献

- 1) Reiser, D.W., et al. :Status of Instream Legislation and Practices in North America, Fisheries, Vol.14, pp.22-29, 1989.
- 2) 中村俊六, 石川雅朗, 築坂正美, 東 信行, 中村緩徳：河川における魚類生息環境評価（IFIM適用）のための基礎調査, 河道の水理と河川環境シンポジウム, JSCE, pp.127-134, 1995.
- 3) 金 亨烈, 玉井信行：乙川におけるIFIMを用いた魚類の生息域評価に関する研究, 環境システム研究, Vol.24, pp.77-82, 1996.
- 4) Winkle, W., et al. :Uncertainty and Instream Flow Standard, Perspective Based on Hydropower Research and Assessment, Fisheries, Vol.22, pp.21-22, 1997
- 5) Jager, H. I., et al. :Would Hydrologic Climate Change in Sierra Nevada Stream Influence Trout Persistence, Trans. Am. Fish. Soc. Vol. 128, pp.222-240, 1999
- 6) 三宮信夫, 中峯 浩, 松田 皎：魚群行動モデルの感度解析, 日本水産学会誌56(12), pp.1973-1977, 1990
- 7) 梁 振林, 松田 皎, 三宮信夫：ウグイの水槽実験による魚群行動モデルの考察, 日本水産学会誌58(5), pp.853-860, 1992.
- 8) 青木一郎：魚の群れ行動のシミュレーション, 海洋科学 Vol.15, No.4, pp.207-210, 1983.
- 9) 梁 振林, 松田 皎, 東海 正：定置網構造に対する魚群行動モデリング, 日本水産学会誌60(2), pp.185-191, 1994.
- 10) 中村俊六：魚道のはなし, pp.169-170, 財団法人リバーフロント整備センター, 1995

(2000.4.17受付)