

平成21年6月15日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560507

研究課題名（和文） 魚群行動モデルによる魚道形式評価手法の開発

研究課題名（英文） Development of fishpass type evaluation method
applied fish schooling model

研究代表者

石川 雅朗（ISHIKAWA MASAOKI）

木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：30232268

研究成果の概要：室内実験水路にウグイを放流して観察実験を行った。時々刻々と変化するウグイの位置座標値を抽出して、魚群行動、遡上行動について定量的に評価した。魚群行動の群れの大きさの時間的変動が $1/f$ ゆらぎであることを確認した。ウグイの遡上行動については、流れ場において、相対的に流速が小さく、かつ緩やかな流れが連続した経路を選択して遡上することを確認した。個体（ウグイ）相互の基本的な行動規則と向流性を組み合わせた個体ベース魚群行動モデルを開発して、計算シミュレーションにより魚群行動、遡上行動を再現した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,000,000	0	2,000,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	480,000	4,080,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：河川，魚道，ウグイ，遡上行動，向流性，降河行動，魚群行動，

個体ベース魚群行動モデル

1. 研究開始当初の背景

魚の動きのモデル化は複雑適応系の応用研究のひとつである。魚道における魚の挙動といった生物の動きに流れが大きく関与する現象の解明は、水産学と水工学の両面からのアプローチが必要となる学際的な問題である。魚群行動に個体ベースモデルを適用した研究はいくつかあるが、流れ場における魚群の行動に適用した研究はほとんどなく、この点が本研究の特色である。この研究成果によって現状では経験的知見による定性的な魚道機能評価を定量的に行うことができるよ

うになり、理論的な魚道設計方法を構築することが可能となる。

個体ベースモデルは個体相互の局所的な相互作用規則から大局的な行動パターンを再現するモデルとしてクレッグ・レイノルズによって提案された。北米ではサケ科魚類の移動や回遊状況の概観を把握するモデルとして適用された。本研究は、既往の知見や実験結果からこのモデルを局所的な魚道内の魚の動きに対応させ魚道評価方法の構築を試みる。

我国においては青木による静水場におけ

る魚の基本行動規則の検討や三宮，松田らによる魚群行動モデルの感度解析など，魚群行動モデルの基本理論に関する研究がある。

2. 研究の目的

ダムや堰など河川構造物の建設により回遊魚の遡上・降下が阻害され魚資源が減少する。こうした資源量の減少を防ぐためにダムや堰などに魚道を設け回遊魚の遡上・降下の経路を確保している。現状の魚道設計は研究者や技術者の経験的な知見に基づいて行われており，理論的に裏付けされた設計方法は未だ確立されていない。本研究は，魚群行動モデルを適用した客観的な魚道の評価・設計方法を構築することを目的として実施する。

3. 研究の方法

(1) 二次元魚群行動特性

二次元魚群行動観察実験により求めた実際の魚（個体）の動きを分析して二次元魚群行動モデルの設定パラメータの根拠を明確にする。観察実験結果は動画としてビデオテープに記録されている。この動画から各個体の位置座標時系列データを抽出する。個体の動きに着目して，他の個体との相互作用による影響や，流速分布状況がその個体の動きに与える影響を，統計的手法とパワースペクトル分析手法を適用して検討する。その分析結果から魚群行動モデルの設定パラメータの最適値と適用範囲について吟味する。なお，ビデオカメラにより撮影された動画は視差を含んで歪んでいる。個体位置座標のデータ化においてアフィン変換を適用した視差の除去方法について検討する。

(2) 個体ベース魚群行動モデル

レイノルズ(1987)が考案した鳥の動きを再現する個体ベースモデルの個体相互作用パラメータを吟味して魚の動きの再現に適用する。さらに，流れ場における魚群行動に適用するために向流性モデルを組み込んだ個体ベース魚群行動モデルを構築する。向流性モデルの基本的な考え方は次の通りである。

- ① 魚の遊泳速度がその場の流速より大きい場合には流れに定位して遡る行動をとる
- ② 魚の遊泳速度がその場の流速より小さい場合には，隣接する流れの中から最も流速の小さいメッシュを検索し，定められた遊泳速度の範囲内からランダムに遊泳速度を決め，魚はそのメッシュに向かって遊泳する

図1に基本行動規則，図2に向流性モデルの概念図を示す。ソフトウェアの開発環境と

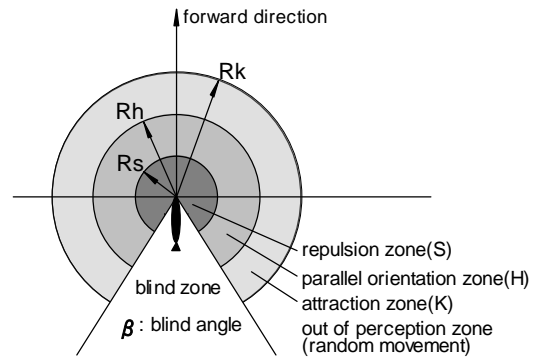


図1 個体の基本行動規則

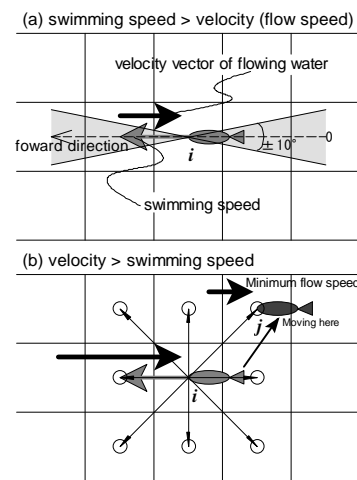


図2 向流性モデル

してボーランド社の Delphi6 を用いた。

(3) ウグイ魚群の遡上行動特性

室内実験水路 (L10m×W0.8m×H0.6m) に，供試魚の体長約 10cm のウグイ 10 尾を放流して魚群行動観察実験を実施する。水路にはアクリル製ユニット (L0.1m×W0.4m×H0.2m) 6 個を 0.4m 間隔で水路中流部右岸側に配置した避難場スペースを有した魚道を模した平面形状とする。水理条件は，水深 0.15m，流量 0.024m³/s とする。魚群行動の観察は天井部に設置した 4 台のカメラを用いて無人の状態で行う。観察時間は 20 分間とする。流速は水深 0.09m(6 割水深)において，縦横 0.05m 間隔で測定する。連続した遡上行動が明らかな期間を特定し，1 秒毎に静止面を抽出して魚の位置座標を供試魚別に読み取る。魚の向流性を定量的に把握するために，現時刻の位置から次時刻の位置へのベクトルを進行ベクトルとする。進行ベクトルと供試魚の位置する場所の流速ベクトルがなす進行角 θ を定義する。

(4) 魚群遡上行動シミュレーション

個体ベース魚群行動モデルを用いて，いく

つかの阻流ブロックを配置した水路における魚群遡上行動の数値シミュレーションを行いシステム的な魚道設計を評価した。魚群遡上行動の数値シミュレーションの流速分布データは、室内実験水路において0.1mメッシュ間隔で実測した2次元の流速データを用いた。

延長10.8m、幅0.8mの仮想水路で、阻流ブロックを配置しないケースAと右岸側に阻流ブロックを配置したケースBの2水路ケースについて魚の最大遊泳速度を変化させ、区間延長7.2mにおける魚群遡上行動シミュレーションを行い、阻流ブロックが遡上時間および魚のエネルギー消費に及ぼす影響を検討する。

(5) 三次元魚群行動特性

魚道を想定した室内水路において、三次元の流速分布測定と魚群行動観察実験を行い、構造物と流れ場に対する魚群の行動を評価した。水路の上下流に魚止めネットを配置して、長さ1.0m、幅0.4m、水深0.3mの観察水域を設け、流量0.012m³/sを流下させた。この観察水域の上流端にアクリル製ユニット(L0.4×W0.4×H0.1m)を配置して、水深差0.1mの瀬と淵を模した形状とした。このユニットのある場合とない場合において、観察域における流速分布の測定、および年齢3年のウグイ(体長約10cm)5個体の魚群行動撮影を行った。水深および流下方向に0.05cm間隔で三成分電磁流速計により流速を測定した。上方および側方に設置した2台のCCDカメラで同時に撮影して、三次元の魚群行動を記録した。20分間の映像から1秒間隔で静止画像を抽出し、その歪みを補正したのち、各個体頭部の三次元位置座標を求めた。

4. 研究成果

(1) 二次元魚群行動特性

魚群行動を定量的に把握するために、魚群の広がり具合を示す魚群半径 Rfs を(4.1)式のように定義した。まず、魚の位置座標データから魚群の重心を求め、重心からの各魚の距離の二乗を求め、その相乗平均を魚群半径 Rfs と定義した。

$$Rfs = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N r_i^2}{N}} \quad \dots(4.1)$$

ここで、 Rfs : 魚群半径、 N : 個体数、 r_i : 魚群重心と各個体との距離。

図3は魚群半径のパワースペクトル図である。低周波域、すなわち大局的な部分は計算シミュレーションの方が実験よりも、やや単

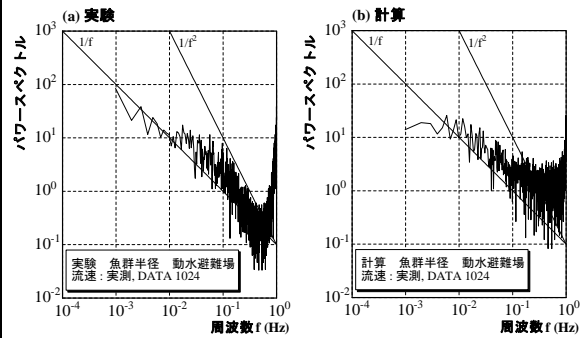


図3 魚群半径のパワースペクトル図

調な傾向にあるものの、高周波域においては実験と計算のパワースペクトルの分布が概ね合致している。このように魚群半径の周期的な変化は実験と計算結果がほぼ等しく、個体ベース魚群行動モデルによって、流れ場における魚群の群れ形成を再現できることが確認された。

(2) ウグイ魚群の遡上行動特性

図4はユニットを配置した水路中央部付近における流速ベクトル図と代表的な個体の遡上経路を示したものである。下図の細線は等流速線を示している。

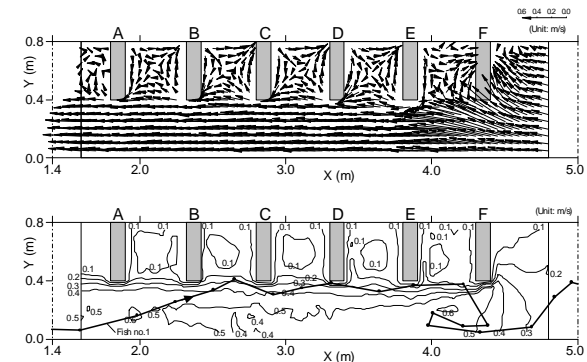


図4 ユニット部の流速ベクトル図と遡上経路

① 流速分布

ユニットを配置した区間では、6個のユニットにより5つのプール部が形成され、流れの状態はユニットに挟まれたプール部とスロット部で大きく異なる。スロット部では狭窄により流れが加速され、0.6m/sを超える最大流速が観測された。プール部とスロット部の境界付近では、流れ方向に平行に分布した等流速線が確認された。この部分はスロット部左岸に比べ相対的に緩やかな流れとなっている。

① 魚群の遡上経路

スロット部とプール部の境界付近では流速0.2~0.4m/sの等流速線が流れ方向に連続した水域が形成され、魚群はこの境界付近の等流速線に沿うように遡上した。魚の遊泳速度は位置する場の流速に応じて、持続速度、

中間速度、突進速度の3段階の遊泳速度を選択していることを確認した。

(3)魚群遡上行動シミュレーション

100回のシミュレーションで得られた平均遡上時間はケースAで215秒、一方ケースBはその2.4倍程度であった。遡上時間の最小値と最大値の差はケースAが110秒、ケースBでは465秒と4倍程度であった。今回のシミュレーションでは、阻流ブロックがないほうが魚は短時間で水路を遡上した。

ケースAとBともに、最大遊泳速度が大きくなると遡上時間が短くなり、単位時間当たりの遊泳速度が増加してエネルギー消費率も大きくなった。

最大遊泳速度0.15, 0.20 m/sのときにはケースAとケースBの間にエネルギー消費率の明確な差は認められなかった。最大遊泳速度0.80 m/sのときのエネルギー消費率は、ケースAよりケースBの方が20%程度高い値となった。

(4)三次元魚群行動特性

ユニットの背後では、河床から高さ0.05mの平均流速がユニットのない場合(0.11m/s)の半分にも満たない0.04m/sであり、渦流が発生していることを確認した。ユニットのない場合の個体出現は、水域中央付近に頻度のピークを持つ山形の形状を呈した。ユニットがある場合では、その存在により個体出現頻度の中心は下流側に移動した。鉛直方向の出現頻度が密であったところは、ユニットのない場合では河床から0.1m程度までであったのに対して、ユニットがある場合ではそれによって緩やかな流れ場が創出されたことで河床から0.2m程度までに範囲が広がった。特にユニット上部まで個体の出現がみられた。これは魚の向流性によるものと考えられる。

(5)実河川へのモデルの適用

個体ベース魚群行動モデルを適用して実河川の計画河道における魚群の降河状況のシミュレーションを試みた。水制背後の淀み域が魚群降河に影響することを確認した。

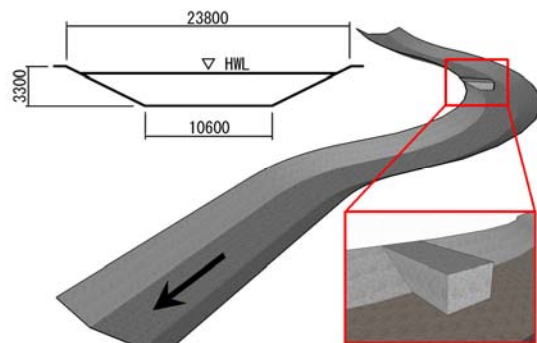


図5 計画河道3次元図

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

- ① 石川雅朗, 白井淳治, 胡夫祥, 東海正, バーチカルスロット型実験魚道におけるウグイ魚群の遡上経路と行動, 水産工学, 第43巻, 9-20, 2006, 査読有り

[学会発表] (計 5件)

- ① 石川雅朗, 小木曾淳弥, ウグイの魚群行動と1/fゆらぎ, 土木学会関東支部・第35回技術研究発表会, 2008年3月11日, 芝浦工業大学
- ② 上野真誉, 石川雅朗, 室内観察実験によるウグイの2次元魚群行動特性, 土木学会関東支部・第35回技術研究発表会, 2008年3月11日, 芝浦工業大学
- ③ 藤本健太, 石川雅朗, 室内観察実験によるウグイの3次元魚群行動特性, 土木学会関東支部・第35回技術研究発表会, 2008年3月11日, 芝浦工業大学
- ④ 布施龍一, 石川雅朗, 個体ベース魚群行動モデルによるウグイの遡上降河行動, 土木学会関東支部・第35回技術研究発表会, 2008年3月11日, 芝浦工業大学
- ⑤ 花田大輝, 岡崎宏軌, 石川雅朗, 生態環境を考慮した河道計画の評価方法構築の試み, 土木学会関東支部・第36回技術研究発表会, 2009年3月13日, 千葉工業大学

[その他]

ホームページ等

<http://chaos2.kisarazu.ac.jp/~ishikawa/VHS-Fish/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

石川 雅朗 (ISHIKAWA MASAOKI)

木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号: 30232268

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

大木 正喜 (OHKI MASAKI)

木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号: 40042650

東海 正 (TOKAI TADASHI)

東京海洋大学・海洋科学部・教授

研究者番号: 30237044