

出水の水理特性が魚類行動に与える影響 —テレメトリと行動予測モデルを用いた人工出 水時の魚類行動予測—

EFFECTS OF HYDRAULIC CHARACTERISTICS IN FLOODS ON FISH
BEHAVIOR : ANALYSIS OF FISH BEHAVIORS DURING FLOOD USING
RADIO TELEMETRY AND BEHAVIORAL PREDICTION MODEL

傳田正利¹・天野邦彦²・萱場祐一³

Masatoshi DENDA , Kunihiro Amano and Yuichi Kayaba

¹正会員 (独)土木研究所水循環研究グループ河川生態チーム研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

²正会員 工博 (独)土木研究所水循環研究グループ河川生態チーム上席研究員 (同上)

³正会員 工修 (独)土木研究所水循環研究グループ河川生態チーム自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県羽島郡川島町笠田町官有地無番地)

We tracked fish behavior using radio telemetry in experimental streams, and analyzed it with a behavior prediction model to understand the relation between fish behavior and flood flow.

The results are summarized as follows. 1. Upward migration began with flood discharge, however, there was a threshold in flow rate for the start of the migration. 2. Experimental results were simulated successfully by a model that is driven by hydraulic characteristics such as velocity and acceleration. 3. Thus, hydraulic characteristics which can influence fish behavior seemed to be current velocity and acceleration.

Upward migration of fishes during flood seems able to be explained by combining our fish behavioral prediction model and hydraulic model.

Key Words : Telemetry, fish behavior, behavioral model, experimental river, artificial flood

1. はじめに

河川は常に流量を変動させ、時には極端な増水によって生物に大きな影響を与える。特に水中に生息する魚類は河川の流量変動に大きく影響を受けながら河川内を移動し生息していると考えられる。

魚類の移動は、産卵や摂餌のために意図的に河川内を遡上、降下するものの他に、増水によって下流に流されることもある。このような個体には、その後元の生息場まで戻ろうとする「復帰回帰」と、おおよそ流された場所で日常ルーティンを再開するものがあると考えられている。しかし、いずれの場合においても出水が魚類の生息に与える影響は大きい¹⁾。

河川に生息する魚類にとって良好な生息環境を保全・創出するためには、出水時の魚類移動の特性、特に水理特性との関連の理解は重要である。出水の水理特性から魚類の行動を予測することができれば、ワンドや氾濫源等に代表される魚類の避難場を効果的に整備し河川改修による魚類への影響を軽減することが可能になると考え

られる^{2) 3)}。

このような背景から、本研究では以下の項目について検討を行った。①実大規模の実験河川において、複数パターンの人工出水を発生させ、出水に対応して魚類がどのような行動をとるかを電波テレメトリ手法（魚類に電波発信機を装着して行動を追跡する手法）で追跡する実験。②上記実験を再現する水理計算による出水時の水理特性（流量、流速、加速度）が魚類行動に与える因果関係の把握。③上記因果関係を行動予測アルゴリズムとして実装した行動予測モデルの作成と上記因果関係の妥当性についての検証。本稿では、以上の3点について検討し、出水の水理特性が魚類に与える影響についての情報を提供することで今後の河川環境保全に有益な情報提供を行うことを目的とする。

2. 研究の方法

(1) 実験地の概要

実験は2002年9月、11月、2003年6月にかけて、木曽川支川新境川沿いに位置する自然共生研究センター（35°

22°N, 136°48'E)の蛇行河川水路で行った。実験河川の縦断形状は、河床勾配は上流と下流区間が1/300、中流区間が1/800で、標準的な川幅は底幅で2.5mとなり、河道周辺にワンドや模擬氾濫源(冠水頻度研究ゾーン)が設置されている。実験河川には、実験河川下流端を0mとした測量用横断面が10mおきに設置されている。河床材料は砂、中礫が主要構成材料である(図-1)。実験河川への魚類の移動は上流端もしくは下流端から自然に行われ、放流等の人為的な制御は行っていない。

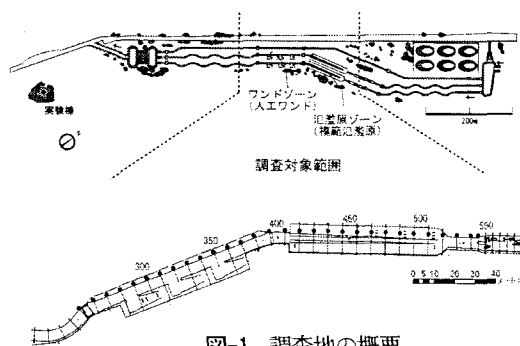


図-1 調査地の概要

(2) 実験方法

a) 実験河川における人工出水時の魚類行動データの収集

実験条件として実験河川への放流量が異なる6ケースを設定した(表-1)。各ケースで用いた魚類(以下、供試魚)は、実験河川での確認個体数が多く、テレメトリ装着の負荷への耐性が強いコイ及びギンブナを対象とした(表-2)。

表-1 出水調査の概要

No	出水日時	出水時刻	ピーク流量 (m ³ /s)	立ち上がり 時間 (min)	ピーク継続 時間 (min)
1	2002/9/11	10:00~12:30	1.93	40	5
2	2002/11/7	14:00~16:00	0.39	50	5
3	2002/11/8	10:00~12:00	0.39	55	20
4	2002/11/8	15:15~17:00	0.39	35	25
5	2003/6/4	9:30~12:30	1	30	90
6	2003/6/4	13:30~16:30	1	60	60

表-2 供試魚の概要と発信機データ

供試魚データ			発信機データ		
No	魚種	体長(mm)	湿重量(g)	周波数(MHz)	発信機重量(g)
1	コイ	185	151.7	143.5	1.8
2	ギンブナ	138	91.6	143.6	1.8
3	ギンブナ	142	87	143.4	1.8
4	ギンブナ	152	97.1	143.3	1.8
5	ギンブナ	143	84.3	143.4	2.3
6	ギンブナ	151	115.3	143.1	1.4

実験河川及び新境川において、供試魚を定置網(袖網長5m、袋網直径60cm、袋網長6m、目合約12mm)、投網(目合は18mm)及びエレクトロフィッシャー(スミスルート社、Model LR-24)を用いて採集した。

濃度約5%に調整した麻酔薬(田辺製薬株式会社製魚類・甲殻類用麻酔薬FA-100)で満たしたバケツ内に供試魚を入れて麻酔をかけた。その後、十分な麻酔状態になるまで観察し麻酔状態を確認後、供試魚の腹腔内をメスで開き、発信機(LOTEK社 MBFシリーズ143MHz帯)を埋

め込み外科手術系で縫合した。

縫合後、供試魚は麻酔薬が混合していないバケツ内で養生し麻酔から覚醒するまで、安静化をはかった。

供試魚を実験河川終末池内に設置した生簀に実験日前日16:00に入れ実験日午前7:30まで蓄養した。実験約60分前には放流地点周辺に移動し、小型生簀内で実験河川の水への適応をはかった。供試魚の放流地点は、出水実験時魚類が上流へ移動する可能性が高いことから実験河川上流端から600m下流のワンド研究ゾーン下流側とした。供試魚は出水実験が始まる概ね30分前に実験河川に放流し行動追跡した。

供試魚の移動追跡は、テレメトリ調査手法を用いて調査員2名(A,B)で行った。調査員A,Bはテレメトリ機材(電波受信機:ALINCO DJ-X3,ハンディアンテナ:北辰産業株式会社製八木アンテナMY-144E2F)及びDGPS受信機を持ち、供試魚に取り付けられた電波発信機の発信信号を聞き取り供試魚がいた河川横断面を特定した。調査員Bはテレメトリ機材を携帯し調査員Aの追跡が困難になった場合の追跡補助を行った。

b) 水理計算(1次元不等流計算)

魚類の行動と出水時の水理条件を関連付ける目的で、魚類が定位した断面の流速、加速度を算出した。水理計算断面は、実験河川に10mおきに設置された横断面とした。算定は、1次元不等流計算⁹⁾により以下の手順で行った。①不等流計算により対象地点の流量(以下、Q)、断面平均流速(以下、V)を算出しQ-V曲線を作成した。②対象地点の時刻(以下、t)におけるQを求めて、流量観測結果と計算結果から補正したt-Qを作成した。③①、②で用いた関係式を用いてt-V、t-加速度(以下、α)の関係式を算出した。

(3) 魚類行動データと水理計算結果の関連性の把握

a) 出水時魚類行動追跡調査データの定量化

出水時の魚類行動と水理特性とを結びつけるため、出水時の供試魚の正確な位置特定、水理計算断面への関連付けをDGPD, GIS (ESRI社 ArcGIS Ver.8.2)を用いて行った。DGPSにより収集したデータをソフトウェア(Trimble社 Pathfinder Office ver. 2.9)及び国土地理院が公開するDGPS基準局用補正データを用いて補正した。DGPSの位置精度検証した結果、概ね既知座標点±1m程度の精度があった。その後、DGPSデータをGIS上に投影した。GISの空間解析ツールを用いて、各GPSポイントデータに最も近傍に位置する横断面を特定し、供試魚の位置とした。DGPSの時刻データを用いて供試魚追跡結果と水理特性量との関連付けを行った。

b) 魚類行動データと水理計算結果の関連性の把握

魚類行動と水理計算結果の関連性を以下の方法で解析した。(1)魚類位置(横断面番号で記述、以下、P.NO)と魚類が存在したP.NOの水理計算結果(流量、流速、加速度)を時系列上で比較する。(2)P.NOと魚類が存在し

たP.NOの水利計算結果（流量，流速，加速度）の関係を分析し，水利計算結果が魚類行動に与える因果関係を設定する．③設定した因果関係をもとに水利計算結果から魚類が移動すると考えられるP.NOを予測する行動予測アルゴリズム（以下，アルゴリズム）を作成する．

（4）魚類行動予測ソフトの開発によるアルゴリズムの妥当性の検証

作成したアルゴリズムを実装するソフトウェアを開発した．開発環境は，開発環境（DELL DIMENSION 8250，CPU：Pentium4 2.4GHz，メモリー：768MHz），オペレーティングシステムとソース記述言語（OS：Microsoft Windows Xp Professional，言語：Borland 社 Delphi Version 7.0）で行った．以降，シミュレーションソフト上を遊泳する魚類個体を仮想魚と呼ぶ．

開発は，石川らの研究⁵⁾を参考にアルゴリズムを実装した（3.（2）.aに記述）．作成した行動アルゴリズムの検証は，開発したソフトウェア上で供試魚と仮想魚の行動予測データの比較を行うことで，行動アルゴリズムの妥当性を検証した．

3. 結果

（1）実験河川における人工出水時の魚類行動の追跡結果と水利計算結果の関連性の把握

特徴的な行動を示した実験ケース（ケース1, 2, 5）について行動追跡結果と水利計算結果の時系列比較を図—2～6に示す．全ケースの魚類の移動特性の整理結果を表—3に示す．なお，ここでのQ, V, α は各時刻における供試魚が存在した位置の値を示す．

表-3 実験全ケースの移動特性

ケースNo	魚種	放流地点	移動した最小P. NO	移動した最大P. NO	備考
1	コイ	280	270	390	ワンド付近を利用
2	ギンブナ	270	390	390	-
3	ギンブナ	290	280	300	-
4	ギンブナ	290	290	310	-
5	ギンブナ	290	290	510	模擬氾濫源を利用
6	ギンブナ	290	290	510	模擬氾濫源を利用

地点を表す数字は，下流基準点からの距離(m)

出水のQにより，供試魚は異なる行動をとった．Qが大きい出水時（ケース1，5，6）では，供試魚が上流側へ移動した．一方，Qが少ない出水時（ケース2，3，4）では，供試魚は上流への移動をしなかった（表-3）．

ケース1では，出水時，供試魚はハイドロのピーク付近から上流へ移動を開始し，途中，実験河川沿いのワンド入り口付近で一時的に滞留しながら上流へ移動した．供試魚は，Qがピークを過ぎ減少開始時に上流へ移動する．Vとの関係で見ると，10:43分頃，Qピーク時に一旦増加したVが約0.6(m/s)以下になった時点で上流へ移動を始めている（図-2）． α とは明瞭な関連性を示し， α が0.0001(m/s²)以下となり減少している10:43分頃に上流へ移動している（図-3）．

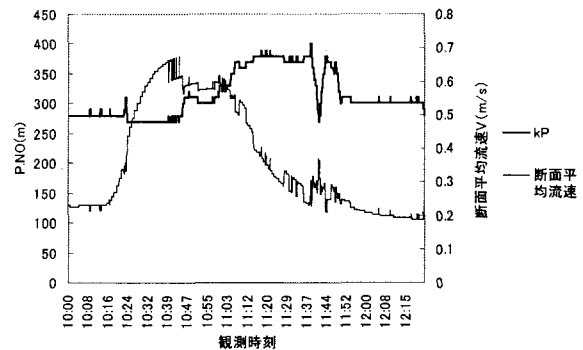


図-2 ケース1における断面平均流速と行動の関係

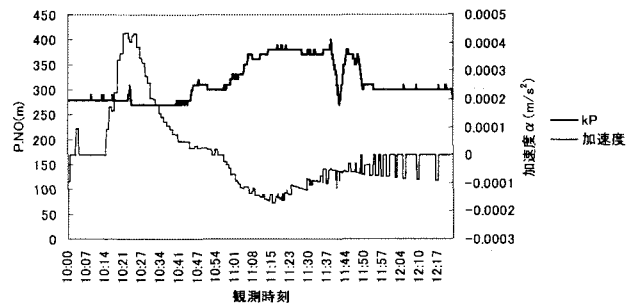


図-3 ケース1における加速度と行動の関係

ケース5では，供試魚は，出水前から緩やかに上流へ移動を始め，出水によるQの増加時にも上流側へ移動し，供試魚は実験河川沿いにある490mの距離ポスト付近の模擬氾濫源で滞留した．その後，Qの減少に伴い模擬氾濫源の水位が低下し水位が約0.3m以下になった状態で実験河川の本流へ移動していく様子が把握できた．供試魚は，Qがピークを迎える10：00頃まで断続的に上流へ移動した．また，Vが0.43(m/s)に達した9：42分頃に一時的に上流への移動を停止するが，V=0.43(m/s)を切る9：50分頃から10：00頃まで上流へ移動する（図-4）．V=0.43(m/s)は概ね魚類の巡航速度の限界値とされる3BL（BL：標準体長）に概ね一致している． α との関係は， α が激しく上昇する9：35頃でも上流へ移動を続け，9：42分頃一時的に移動を止めるが， α の減少と共に上流側へ移動をはじめ， α が0になった時点で停止している（図-5）．

Qが少ない場合の移動ケース（ケース2，3，4）では，供試魚は大きな移動をせずほぼ同一箇所に滞留した．また，Qが多いケースと異なり α が減少傾向にある場合でも上流側へ移動しないことが特徴的である（図-6）．

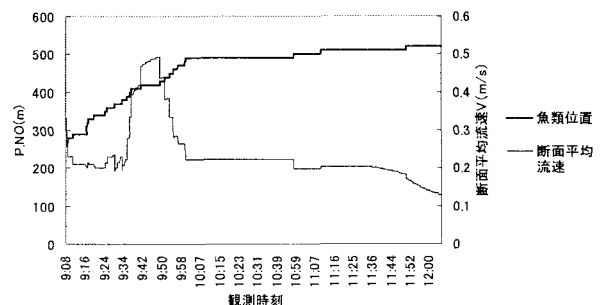


図-4 ケース5における断面平均流速と行動の関係

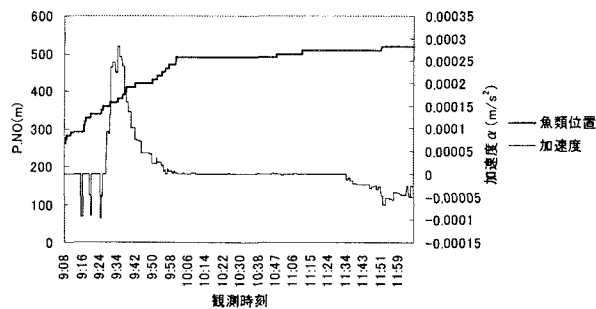


図-5 ケース5における加速度と行動の関係

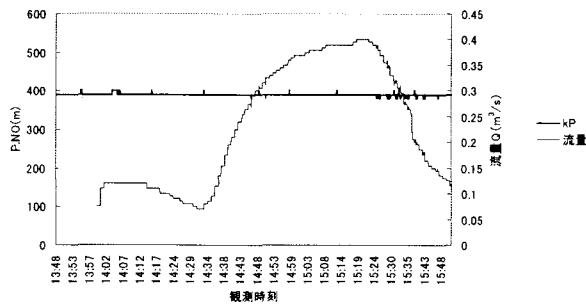


図-6 ケース2における流量と行動の関係

(2) 魚類の行動特性を考慮した行動アルゴリズムの開発とその妥当性の検証

a) アルゴリズムの作成

ルール1 (以下, R1) : (出水の判断及び遡上の動機付け)

出水の規模を魚類は存在する α , V の組み合わせで判断し一定の閾値以上で上流へ移動する. 本研究では α は $0.0001 (\text{m/s}^2)$, V は反応速度とした. 反応速度は本研究において定義したパラメータで後述する. R1 に応じて魚が出水対応モードに移った後, ルール2及び3に従い行動を開始する. ルール2及び3では速度及び加速度の種々の閾値を複数設定し魚類行動解析を行った.

ルール2 加速度の閾値に関するルール (以下, R2)

R2-1: 魚類は $\alpha=0$ の場合上流へ移動しない.

R2-2: 加速度が減少傾向の時には上流へ移動が可能.

加速度の減少傾向は以下の様に判断する. 魚類は加速度の増減を直前時間の状態と現在の状態を比較して判断すると仮定して加速度の差分を判断材料とした.

$$\Delta \alpha = \alpha_t - \alpha_{t-1} \quad (1)$$

α_t : 供試魚の存在する位置における現時刻の加速度

α_{t-1} : 直前の時刻においての加速度

$\Delta \alpha < 0$ の時, 供試魚が加速度が減少傾向にあると判断し上流へ移動する.

R2-3: 加速度が減少傾向が微増の場合には上流へ移動する ($\Delta \alpha \leq 0.000025$).

R2-4: 加速度が減少傾向で $\Delta \alpha$ の絶対値が大きい場合には上流への移動距離も大きい. 予測計算では, $\Delta \alpha \leq -0.00003 (\text{m/s}^2)$ では上流へ10m, $-0.00003 (\text{m/s}^2) < \Delta \alpha < 0$ では上流へ5m移動す

る. R2-4を適用しない場合は常に10m移動するとした.

R2-5: 魚類は加速度の微妙な変化は感知できない. $-0.00001 (\text{m/s}^2) < \Delta \alpha < 0.00001 (\text{m/s}^2)$ では移動しない.

ルール3 速度に関するルール (以下, R3)

R3-1: 移動限界速度 (定義: 速度が魚類の行動能力以上の速度) 以上である場合には魚類は上流に移動できない. この速度は供試魚の個体差を考え各ケースに設定した.

R3-2: 反応速度 (定義: 魚類は流失の危険性を感じない速度) 以下になった時は上流へ移動を終え出水対応モードから出る. この速度は供試魚の個体差を考え各ケースに設定した.

上記のルールを組み合わせ, 行動予測アルゴリズムを6構成想定した. 想定した6構成の概要及びパラメータの設定を示す (表-4, 5). なお下流へ移動する行動はケース1のみに限定されたためアルゴリズムには組み込まなかった.

表-4 実験全ケースの移動特性

	R1		R2					R3	
	α	V	R2-1	R2-2	R2-3	R2-4	R2-5	R3-1	R3-2
A1	○		○	○					
A2	○		○	○	○	○			
A3	○	○	○	○	○	○	○	○	
A4	○	○	○	○		○		○	○
A5	○	○	○	○	○	○	○	○	
A6	○	○	○	○	○	○	○	○	○

A: アルゴリズム

表-5 巡航速度とパラメータ (反応速度, 移動限界速度) の比較

No	2BL (m/s)	3BL (m/s)	反応速度 (m/s)	移動限界速度 (m/s)
1	0.37	0.56	0.56	0.62
2	0.28	0.41	0.3	0.45
3	0.28	0.42	0.3	0.45
4	0.26	0.47	0.33	0.4
5	0.29	0.43	0.18	0.51
6	0.3	0.45	0.33	0.45

b) シミュレーションソフトによる行動アルゴリズムの妥当性の検証

ケース1, 2, 5の供試魚と仮想魚の行動を比較した結果を示す.

ケース1における比較では, アルゴリズム1 (以下, A1) は仮想魚が供試魚よりも上流へ移動し続ける結果となる. アルゴリズム2, 3 (以下, A2, A3) は互いに類似の結果を示し供試魚が上流へ移動する状況が再現されているが, 移動のタイミング, 移動距離等が供試魚と仮想魚で大きく異なっている. アルゴリズム4, 5, 6 (以下, A4, A5, A6) は同様の結果を示している. 上流への移動のタイミングが若干異なっているが上流への移動する傾向, 上流への移動距離も概ね供試魚の動きと類似している結果となっている (図-7).

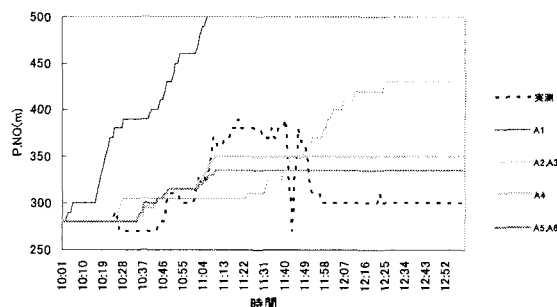


図-7 ケース1の供試魚と仮想魚の行動比較の関係

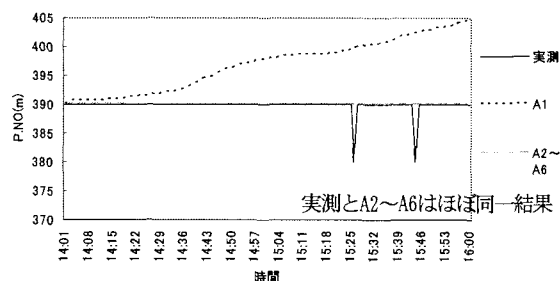


図-8 ケース2の供試魚と仮想魚の行動比較の関係

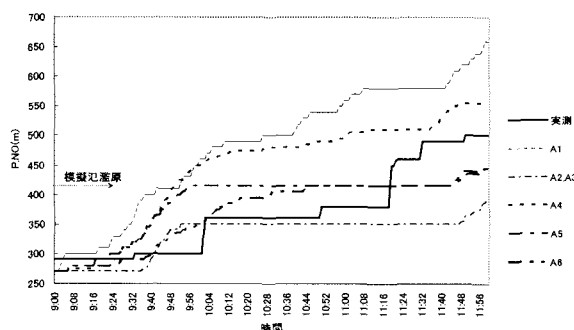


図-9 ケース5の供試魚と仮想魚の行動比較の関係

ケース2における比較では、A1は、仮想魚が上流へ移動し続け供試魚が同じ場所に定位する状態が再現されていない。A2～A6は、仮想魚が同じ場所に定位する状態が再現され供試魚の動きとほぼ合致している(図-8)。

ケース5における比較では、A1では仮想魚は上流へ移動を続け供試魚の行動と一致していない。A2、A3は、供試魚が上流へ移動しすぎる状況が軽減され移動のタイミングもあっているが移動距離が供試魚の移動と異なっている。A4、A5は同様の結果を示し、上流への移動する特性、移動距離は概ね合致しているが移動のタイミングがあっていない。A6は、上流への移動特性、移動距離、上流への移動のタイミングが供試魚の動きと概ね合致し供試魚の動きをほぼ再現しているといえる。また、ケース5に関しては、全アルゴリズムとも11:16分頃の移動のタイミングを再現できていない点、魚類が模擬氾濫源に移動し流速、加速度変化がない箇所に入った場合、行動を再現できていないのが特徴である(図-9)。

4. 考察

(1) 出水の水利特性が魚類の行動に与える影響の可能性

魚類行動追跡実験の結果、実験ケースにより行動が異なったことが特徴的である。ケース1、5、6で流量の増加と共に上流へ移動している様子は、河川に生息する魚類が下流への流失を恐れ上流側へ移動するとされる既往研究の報告と一致する⁶⁾(図-2, 4)。一方、ケース2、3、4では流量が増加しても大きな移動はしていない。ケース2、3、4の流量では、魚類は流失する可能性が少なかったため上流側へ移動せず同じ場所に滞留したと考えられる(表-3)。魚種の違い、季節的な違いも上流への移動意欲に影響を与える要因として考えられるが、魚種、季節が異なるケース1、5、6共に上流へ移動していることから魚類が上流への移動する要因として出水の流量規模が影響を与えている一つの要因と考えられる。また、ケース5、6では魚類の移動範囲がほぼ一致している(表-2)。魚種、水利条件、時期を均一にした場合には魚類の行動が概ね一致する可能性が高いことを示している。これらの実験結果は、①出水の流量規模、水利特性に魚類が敏感に対応しながら行動すること、②出水流量が大きく魚類が下流側へ流失する規模の出水である場合、魚類は上流側へ移動を行う可能性があることを示している。

(2) 出水時の魚類の行動に与える新たな水利指標としての加速度の重要性

流速は魚類個体にかかる流体力を増減させ、常に水流の影響を受ける魚類にとって重要なパラメータである。このため、魚類行動に影響を与える水利特性として流速、特に巡航速度(疲れをしらない血筋だけを使って泳ぐ早さ)がよく評価に用いられる⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

しかし、魚類行動に影響を与えるパラメータは流速だけでなく加速度も重要であると考えられる(図-3)。水流にいる魚類にとって、加速度の増加は大きな圧力変化として感じられ下流への流失の可能を感じると考えられる。このため、加速度の増加に対応し流失回避の行動をとる可能性は高いと思われる。

また、魚類の行動生態学的に考えれば、下流へ流失することを回避し上流へ移動するには、個体に作用する流体力に抗し上流へ移動できるだけの運動を行う必要がある。運動を行うには限られたエネルギーを戦略的に使用する必要がある。最も合理的なのは加速度が増加傾向で流体力が増大している時には、魚類は定位に必要な運動だけで上流へ移動しないのが適切である。また、加速度変化が流下方向に対してマイナスの時、すなわち魚類が相対的に上流へ押し上げられる力を感じていると考えられる時を積極的に選択して上流へ移動すれば移動に消費するエネルギーの軽減の可能性が高く有利であると考えられる。このことは、ケース1、5、6の実験結果が示唆している。

このようなことから出水時の魚類行動に影響を与える指標として加速度が重要な指標と考えられる。

(3)流速と加速度の複合条件から魚類行動を評価する重要性

魚類行動に影響を与える水理特性は流速 (V) , 加速度 (α)が単独で作用するのではなく二つの要素が複合的に作用していると考えられる。

α だけが、魚類行動 (上流への移動) に影響を与える要因だと仮定したA1のシミュレーション結果では、仮想魚の上流への移動タイミングは供試魚と異なり、仮想魚は上流側へ移動し続ける (図-7, 8, 9) 。しかし、実際の魚類は一定の範囲で行動を止める。このことからA1には実際の魚類行動と何らかの矛盾がある。アルゴリズムの構成から判断するとA1では V が魚類に与える影響を考慮していない点に問題があると考えられる。

一方、 α に加え V を考慮したA2~A6では改善がみられる。特に上流側への移動限界速度、反応速度を組み込んだA4~A6は、移動開始のタイミング、移動距離共に供試魚と仮想魚の動きが類似していることがわかる。この結果は、例えば α がマイナスであっても、ある V の範囲でしか魚類は上流へ移動していないことを示している (図-7, 8, 9) 。その範囲は、ギンブナの場合では巡航速度の範囲、 $2BL < V < 3BL$ (BL : Body Length 標準体長) 程度で表された (表-5) 。

この結果に基づくと出水のように長時間泳ぎ続けながら流失を回避する場合には、魚類は以下のような動きで運動コスト最適化していると考えられる。① $V < 2BL$ では激しい遊泳行動を行わなくても流失を回避するため定位を続ける。② $V \geq 2BL$ では遊泳行動を行ないと流失する可能性が高いため遊泳し上流へ移動する。③ $V > 3BL$ では、遊泳行動の限界になり上流への移動が停止する (図-4, 図-7) 。④ $V > 3BL$ を経験した後は、 α が減少傾向でかつ $3BL > V \geq 2BL$ の時、再び移動をする。供試魚は、この動きを繰り返し長時間続く流失の可能性を低くしていると考えられる。実際の魚類行動は、流速、加速度により複合的な影響を受けながら流失を避けるために上流へ運動コストを最適化しながら行動していると考えられる。

5. 今後の課題

本研究では、出水時の魚類行動の把握、魚類の行動と水理特性の関係について概括できた。しかし実験ケースは6ケースと少ない。特に、調査時期、魚種、個体差を考慮した実験ケースを実施していない。今後は追加のデータを加えより詳細に評価する必要がある。また、魚類の移動に関する情報の不足があげられる。特に今回の魚類移動追跡手法では、1次元的な魚類移動しか把握できず横断面上での議論に限定された。今後は、魚類移動と水理特性の関係を平面的に展開する必要がある。また、出水時水理特性だけが魚類の行動を支配するわけではない。このため、水温、濁度等の水質データとの関連等、行動に影響を与える可能性があるパラメータを追加し行動予測をする必要がある。

6. 結論

- (1) 実験河川での人工出水時の魚類行動を追跡した結果、魚類は、出水の流量により異なる行動をとった。出水流量が小さい出水 {0.4 (m³/s)} では、同じ箇所定位し続けたのに対し、出水流量 {約1 (m³/s) , 約2 (m³/s)} が大きい出水では上流へ向かって移動をした。
- (2) このことから魚類が上流した出水ケースでは、魚類の移動に影響を与える水理特性としては、魚類が存在する位置の流速と加速度が影響を与えたと考えられる。
- (3) そしてシミュレーションとの比較を行い、出水時の水理特性から魚類の行動分析を行った結果、ある程度の流量増加後の加速度の減少傾向、巡航速度の下限値が上流への移動要因、巡航速度の上限値が移動の制限要因とするアルゴリズムで概ねの説明が可能になった。

謝辞：

弘前大学農学生命科学部東信行助教授、木更津工業高等専門学校環境都市工学科石川雅朗助教授には研究を進めるにあたり有益なご助言をいただいた。また、独立行政法人土木研究所自然共生研究センターの職員の方々には、調査期間中、様々な面で便宜を図っていただいた。(株)建設環境研究所自然環境一部山下慎吾氏、三井共同建設コンサルタント(株)河川計画一部豊島靖氏には現地データの収集に協力していただいた。(株)アイナスの池田勝彦氏、児玉保氏には、行動予測ソフトの実装作業に協力していただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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、Vol.27 pp793-798,1999
- 2) 大橋弘道、清水康行：数値計算による魚道における魚の挙動の解析、水工学論文集、Vol.48, pp.1597-1602, 2001.
- 3) 天野邦彦、傳田正利、時岡利和、対馬孝治：河川環境評価における流域特性の河川地形からの視点と新技術の適用、土木技術資料、Vol46, No. 5, pp.26 - pp.31, 2004
- 4) 土木学会水理委員会編：水理公式集、河川編、丸善、1999
- 5) 石川雅朗、足立恒・平野弘晃：個体ベースモデルによる魚類生息環境評価手法の構築、河川技術論文集、Vol.7, pp.315-320, 2001.
- 6) 森下郁子、森下雅子、森下依理子：川のHの条件 陸水生態学からの提言、山海堂、pp.3-8,2000
- 7) 中村俊六著 (財) リバーフロント整備センター編：魚道のはなし 魚道設計のためのガイドライン、山海堂、pp84- pp93, 1997
- 8) 廣瀬利雄・中村中六編著、(財) ダム水源環境整備センター編：魚道の設計、山海堂、pp202- pp215, 1991
- 9) 玉井信行・水野信彦・中村俊六：河川生態環境工学 魚類生態と河川計画、東京大学出版会、pp190-192, 1993

(2004.9.30 受付)