複断面開水路における流量変化と 魚の行動に関する実験的研究

青木 宗之¹・瀬崎 薫貴²・福井 吉孝³

¹正会員 東洋大学講師 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: aoki037@toyo.jp

²非会員 五洋建設株式会社 東北支店 (〒980-8605 仙台市青葉区二日町16-20)

E-mail: Shigeki.Sezaki@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: yofukui@toyo.jp

本研究の目的は、流量（流速）の増減に対する魚の行動を明確にすることである。同時に、杭水制が魚の避難場になり得るかについても着目した。そこで、杭水制を設置した複断面開水路を用いて模型実験を行った。流速急増時、43.3(%)の魚が壁際や杭水制内へ退避した。杭水制内に退避した魚はその場に留まることができ、杭水制を避難場として利用した。一方、壁際に退避した魚は流れに押し流された。また、流速急増時に遡上する魚もいるが、減衰時での復帰遡上のほうが多かった。なお、高水敷に杭水制がある場合、乱れ（ $-\rho v'w'$ ）が増大し二次流が発達した。そのため、河岸浸食や河床洗掘が懸念される。さらに、高水敷に乗る魚の総個体数が多くなり、減水後、魚は高水敷に取り残されることが示唆された。

Key Words : flow in compound open channel, change in quantity of flow, fish behavior, pile dike

1. はじめに

1992年（平成4年）に、生物多様性条約が採択された。この条約の目的は、(1)生物の多様性の保全、(2)生物多様性の構成要素の持続可能な利用、(3)遺伝資源の利用から生ずる利益の公正で衡平な配分、であり、日本は1993年（平成5年）に条約を締結した¹⁾。これを受けて、動植物や植生の分布、河川や湖沼、湿地などの自然環境調査や生物の繁殖場のモニタリング調査などが実施されてきている。また、河川では、1997年（平成9年）に河川法が改正され、「河川環境」が注目を受けている。上述のとおり、河川における環境や生態（系）に関する研究の論文数が増加してきていることが指摘されている²⁾。また、国土交通省河川局のWeb上では、河川環境整備に関する指針・マニュアル・ガイドライン等³⁾が非常に多く掲載されており、2006年（平成18年）には、「多自然川づくり基本方針」⁴⁾が発行された。このことも相まって、河川中に生息する「魚類」を対象とした研究事例が増加している⁵⁾⁻¹⁰⁾。

また、近年では地球温暖化による気候変動の影響で、集中豪雨などにより降水量が増加し¹¹⁾、洪水が頻発化している。日本の河川の多くは、低水路と洪水時に水を安

全に流下させるために設けられる高水敷とで構成される複断面開水路である。複断面開水路内での流れは、低水路と高水敷との境界部などに形成される水平渦や二次流などの三次元的な複雑な流れの様相を示すが、流れ構造の解明への努力が多くされてきている¹²⁾⁻¹⁶⁾。しかし、その複断面開水路内での魚の行動に関する研究は多いとはいえず、特に明確にされていない。洪水時、主として流量（流速）が急増、急減したときの魚の行動を明確にすることは、魚の生息実態の把握、生息環境、避難場所や生態系の維持・創生を計るうえで非常に重要であると考えられる。そのため、流量（流速）急増時および急減時における、魚の行動特性を明らかにすることは、生物多様性を考慮した今後の河川計画にとって不可欠であるといえる。

魚は、魚種にもよるが、体長によって通常時での遊泳速度が分かっている。例えば、ウグイ(*Tribolodon hakonensis*)は、体長の4倍程度の値を毎秒あたりにした速度（以下では「値を毎秒あたりにした」は省略する）で遊泳すること、が分かっている¹⁷⁾。魚は、わずかな流れの変化にも反応する能力を持っているとされている¹⁸⁾。もしも洪水になり、急激な流量（流速）増加が生じてしまうと、魚には走流性が働くものの、流れに押し流され

図-1 複断面開水路での流量の増減

てしまい、上流に移動することが出来なくなってしまう。実際の河川では、流速の遅い岸边や水制周辺、植生群中に避難する魚もいる。また、高水敷があるならば、高水敷上が避難場になり¹⁹⁾、その岸边や水制周辺、植生群中に身を潜めていると考えられる。一方で、そのまま押し流され、大きく流下する魚もいれば²⁰⁾、水が引いた後も、元の生息場所周辺に存在し続ける場合もある²⁰⁾。なお、洪水後に高水敷上の水たまりに取り残されている大小の魚をみることが多い。これは、水位の急激な低下が、魚の移動能力を上回った結果の逃げ遅れ²⁰⁾であると推測できる。

そこで本研究では、まず、既往の研究において実魚を用いた模型実験が、どのようなものなのか、その実験条件の設定や用いた対象魚の選定理由等のレビューを目的のひとつとした。つぎに、複断面開水路での流量（流速）の増減に対する魚の行動を明確にすることを目的とした。そのために、小型の模型水路を用い、流量（流速）を変化させ、魚の遊泳行動に着目して実験を行った。著者らは、河川水理構造物が作り出す流れに対する魚類の行動に着目し、現地調査、模型実験および数値解析より研究成果を上げている^{17), 22)~25)}。間伐材有効利用の観点から、杭水制にも着目し、その水理機能を明らかにし、魚の行動特性に対して、杭水制がどのような役割を果たしているのかを実験より検証し^{17), 22)}、明らかにしてきている。本研究においても、杭水制のある水路（図-1 a), b)）で高水敷まで水位が上昇した場合を考え、洪水時に杭水制のある場が魚の避難場としての役割を果たすかどうかについても着目している。なお、本研究は、河道内樹木（図-1 c)）や植生（図-1 d)）が繁茂している場に対しても対応できると考えている。

2. 既往の研究における実魚を用いた模型実験

(1) 各々の研究者による実魚を用いた挙動実験

表-1 に、各々の研究者による実魚を用いた挙動実験一覧表を示す。実魚を用いた挙動実験は、実験水路や実験河川、実河川において行われている。なかでも、実験水路を用いた研究事例が多いことが分かる。

a) 実験水路において行われた実験

表-1 a)は、実験水路で行われた実験である。実験に使用された魚のサイズは比較的小型のものであり、実験水路に関しても小型のものを使用している。しかし、実験水路と魚の縮尺および流れの相似則に関する記述がされていない。このことから、実魚を用いた模型実験では、実験水路と魚との縮尺と流れの相似則とを同時に満たすことが困難であることが分かる。しかしながら、その場の流況や色彩、明るさなどに着目し、それらに対する魚の行動特性を明確にしようとして、実験が試みられている。実験に使用された実魚は、アユやウグイ、オイカワなど、強い走流性を持っている魚である。また、砂や小石混じりの川底で生活しているヨシノボリやカマツカナなどの底生魚が使用されている。

以上より、研究目的に応じて対象魚を選定していることが分かる。

b) 実験河川および実河川において行われた実験

表-1 b)は、実験河川および実河川で行われた実験である。土木研究所自然共生研究センターでは、流量を0.05~0.5(m³/s)の範囲で段階的に増加させた実験河川（流量増加河川）と、流量一定の実験河川（流量増加河川の対照河川）の2つの実験河川において、遡上する魚類の個体数比較を行った。その結果、流量増加に伴い魚の遡

表-1 各々の研究者による実魚を用いた挙動実験一覧表

a) 実験水路における実験

研究者	対象魚	学名	平均体長BL (cm)	実験水路幅B (m)	BL:B	流れの 相似則	着目点	参考文献 No.
石川ら	ウグイ	<i>Tribolodon hakonensis</i>	9.2	0.8	1:8.7	記述なし	A	6)
田代ら	カマツカ	<i>Pseudogobio esocinus</i>	5.0~15.0	0.5	1(中央値):5.0	記述なし	A	8)
鬼束ら	オイカワ	<i>Zacco platypus</i>	6.1	0.4	1:6.6	記述なし	B	10)
	カワムツ	<i>Zacco temminckii</i>	6.6		1:6.1			
高嶋・中村	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	6.0~13.0	10.3	1(中央値):108.4	記述なし	A	26)
中村ら	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	稚魚	10.3	-	記述なし	A	27)
楊ら	オイカワ	<i>Zacco platypus</i>	8.0~10.0	0.23	1(中央値):2.6	記述なし	A	28)
和田ら	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	7.51	0.87	1:11.6	記述なし	E	29)
和田ら	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	7.5	0.3	1:4.0	記述なし	E	30)
桜井ら	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	7.0~11.5	0.5	1(中央値):5.4	記述なし	A	31)
	ヨシノボリ	<i>Rhinogobius</i>	3.8~5.7		1(中央値):10.5			
泉ら	ウグイ	<i>Tribolodon hakonensis</i>	5.8~6.3	0.8	1(中央値):13.2	記述なし	A	32)
林田ら	ウグイ	<i>Tribolodon hakonensis</i>	11.4	0.6	1:5.3	記述なし	A	33)
和田ら	オイカワ	<i>Zacco platypus</i>	8.3	0.03	1:0.4	記述なし	A	34)
鬼束ら	オイカワ	<i>Zacco platypus</i>	6.7	0.4	1:6.0	記述なし	-	35)
浪平ら	ウグイ	<i>Tribolodon hakonensis</i>	8.5~12.5	0.7	1(中央値):6.7	記述なし	A	36)
浪平ら	ウグイ	<i>Tribolodon hakonensis</i>	7.0~13.0	0.7	1(中央値):7.0	記述なし	A	37)
関谷ら	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	8.5~10.5	1.5	1(中央値):15.8	記述なし	-	38)
鬼束ら	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	8.3	0.4	1:4.8	記述なし	A	39, 40)
山本・本田	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	16.4	0.6	1:3.7	記述なし	C	41)

A: 流況と魚の行動特性に着目, B: 色彩と魚の行動特性に着目, C: 周囲の明るさと魚の行動特性に着目

b) 実験河川および実河川における実験

研究者(研究センター)	対象魚	学名	平均体長 (cm)	水路, 河川	水路幅 (m)	着目点	参考文献 No.
東ら	ウグイ	<i>Tribolodon hakonensis</i>	14.4~17.9	岩木川水系平川	実河川	D	20)
	サクラマス	<i>Oncorhynchus masou</i>	42.0~57.0				
土木研究所 自然共生研究センター	シマドジョウ類	<i>Cobitis biwae Jordan et Snyder</i>	記載なし	実験河川	記載なし	D	42)
	タモロコ	<i>Gnathopogon elongatus elongatus</i>	記載なし		記載なし		
	ヨシノボリ類	<i>Rhinogobius</i>	記載なし		記載なし		
土木研究所 自然共生研究センター	コイ	<i>Cyprinus carpio Linnaeus</i>	20.0	実験河川	記載なし	D	43)
	ギンブナ	<i>Carassius auratus subsp</i>	20.0		記載なし		
傳田ら	ニゴイ	<i>Hemibarbus barbus</i>	41.3	信濃川水系千曲川	実河川	D, E	44)

D: 増水時の魚の行動に着目, E: 平水時の魚の行動に着目

上量が増加する傾向を見出し、流量増加と魚の遡上との関連性が示されている(図-2)⁴²⁾。対象魚は遊泳魚のタモロコおよび底生魚のシマドジョウ類、ヨシノボリ類であった。なお、流速に関する記載がないため、遡上を開始する流速は不明ではあるが、遡上可能な流速の範囲であれば底生魚も遊泳魚も遡上することが分かる。一方で、人工出水(流量 0.4~2.0(m³/s))を複数のパターンで発生させた自然共生研究センターの実験結果では、流量減少時の流れの加速度が 0 以下、すなわち、負の値になるタイミングに合わせて、魚が遡上を開始することが示されている(図-3)⁴³⁾。このときの供試魚は、遊泳魚のコイおよびギンブナであり、移動限界流速を体長の 2~3 倍の流速としている。また、流速は一次元不等流計算で算定している。なお、図-2 および図-3は、著作者の承諾を受けて、著者らが加筆している。

実河川での実験では、東ら²⁰⁾は、ラジオテレメトリー法を使用し、岩木川水系平川において、ウグイおよびサクラマスの行動追跡を行った。その結果、平水時にも水があるような、人工構造物周辺のタマリや比較的小さなくぼみ(多自然型工法を含む)などは、大きな増水時の避難場所になり得なかったことを重大な問題と指摘している。一方、多少の増水に対しては、流速の遅い場所に留まることも指摘している。

傳田ら⁴⁴⁾は Multi Telemetry System (MTS)を改良した Advanced Telemetry System (ATS)を開発し、信濃川水系千曲川での魚類(ニゴイ)行動追跡を行い、平水時や大小規模の出水時における魚の行動特性を示した。出水時においても、河道内には流速の遅い箇所が点在する。ニゴイは、流下を最小限に留めるために、流速の遅い空間へ退避行動をとり、平水時の行動状態を著しく変

えないと指摘している。また、実河川での調査結果を楊ら²⁸⁾が実験水路で実施した魚の行動状態に関する結果を参考にし、魚の行動特性を説明している。

これらをまとめると、「魚は各個体の遡上能力を上回った流速になった時点で、その流速よりも遅い箇所へ退避する。」という行動をとるため、魚の行動は流速に依存していることが分かる。なお、この事実は、著者らの行ってきた実験においても明らかにしてきている^{17), 22)-25)}。また、出水時でも、魚にとって遊泳可能な流れ場が形成されていれば、魚はその場に留まることが可能である。しかし、そのような流れ場が形成されず、魚が存在している周辺に退避する場所（避難場所）もない場合には、その個体はもとの場所から大きく流下させられるといえる。

(2) 模型実験の意義

実験水路では、多様な流れを容易に形成することができ、目的に応じた流れをつくり出すことができる。また、その流れに対し、実魚を使用した実験を繰り返す行うことが可能である。これより、模型実験は魚の行動特性のデータを積み重ねることでき、「流れ」に対する魚の行動特性を明確にするために、非常に有利であるといえる。しかし、実河川においては、一定条件のもと繰り返し計測を行うことは困難である。そのため、本研究では模型実験において実河川で生じている流れを再現し、その流れに対する魚の行動特性を明確にすることを目的としている（表-1）。

また、魚は体長相当分の長さしか流れを認識できないことから⁴⁵⁾、流れに対する魚の行動特性を明確にするためには、その場の「流れ」の把握が重要であるといえる。事実、傳田ら⁴⁴⁾は先述のとおり楊ら²⁸⁾によって実験水路で得られた魚の行動特性を参考にし、実河川での魚の行動を説明した。これは、実験水路で示す魚の行動が、実河川で示す魚の行動にも適用できることを示している。よって、魚と実験水路の縮尺については、過度にこだわらなくても良いものと考えられる。

以上より、水理模型実験および実魚を用いた挙動実験を行い、生物多様性を考慮した今後の河川計画に有用な情報を与えようとするものである。

3. 本研究における模型実験

(1) 実験水路および実験ケース

実験水路は、全幅 $B=0.8(\text{m})$ 、全長 $10.8(\text{m})$ であり、高さ $D=9(\text{cm})$ 、幅 $b_f(=0.3(\text{m}))$ の高水敷が水路右岸側に設けられている複断面開水路を用いた。測定対象領域は、図-4 a)に示したとおりであり、長さ $3.6(\text{m}) \times$ 幅 $0.8(\text{m})$ である。なお、水路勾配は $1/500$ である。また、本実験で

図-2 流量増加と魚の遡上の関係（自然共生研究センターの実験結果⁴²⁾より抜粋、加筆）

a) 断面平均流速と遡上距離

b) 断面平均加速度と遡上距離

図-3 流量の増減と魚の遡上の関係（自然共生研究センターの実験結果⁴³⁾より抜粋、加筆）

は疑似杭水制として、直径 $d=0.5(\text{cm})$ 、高さ $8(\text{cm})$ の木製円柱を 122 本使用した。

実験ケースを表-2 に示す。流量 Q は、1) 低水路のみに通水するパターン ($5.0(\text{l/s})$)、2) 高水敷にも通水するパターン ($28.0(\text{l/s})$)、3) 低水路のみの通水から高水敷まで増水、その後減水させ低水路のみに通水するパターン ($5.0(\text{l/s})$ から $28.0(\text{l/s})$ へ増加させ $5.0(\text{l/s})$ へ減少)の計 3 パターンである。なお、先に述べた 2 パターンは定常流であり、最後に述べたパターンは非定常流である。ここで、非定常流時のハイドログラフは図-5 であり、20 秒間で流量を変化（増加、減少）させた。

a) 平面図

b) 断面図

図-4 測定対象領域の概略図

表-2 実験ケース

	疑似杭水制 (円柱群) 設置箇所	流量 Q (l/s)	高水敷高さ D (cm)	低水路水深 H (cm)	高水敷水深 h (cm)	h/H	H/D	通水箇所
Run1-1	なし	5	9	6	-	-	-	単断面のみ
Run1-2	なし	28	9	14	5	0.36	1.56	複断面のみ
Run1-3	なし	5.0→28.0→5.0	9	6→14→6	-→5→-	-→0.36→-	-→1.56→-	単→複→単
Run2-1	低水路	5	9	6	-	-	-	単断面のみ
Run2-2	低水路	28	9	14	5	0.36	1.56	複断面のみ
Run2-3	低水路	5.0→28.0→5.0	9	6→14→6	-→5→-	-→0.36→-	-→1.56→-	単→複→単
Run3-2	高水敷	28	9	14	5	0.36	1.56	複断面のみ
Run3-3	高水敷	5.0→28.0→5.0	9	6→14→6	-→5→-	-→0.36→-	-→1.56→-	単→複→単

また, Run1 は疑似杭水制を設置せず, Run2 では疑似杭水制を低水路右岸側に設置, Run3 では疑似杭水制を高水敷上に設置した (図-4a)。

本実験での円柱群配列は, 整列配列に比べ流速低減効果の高い千鳥配列 (図-6) とした²³⁾。円柱群設置面積は, $b \times L = 8.5 \times 192.5 (\text{cm}^2)$ である。また, 円柱の縦断方向設置間隔 l および横断方向設置間隔 s は, それぞれ 4.0 (cm) である。実際の河川に設置されている杭水制の例は, $d = 15 \sim 20 (\text{cm})$, $l = 50 \sim 100 (\text{cm})$ であるため¹⁷⁾, 本実験では水理模型実験に推奨されている模型縮尺 (1/10~1/30)⁴⁶⁾ に対応させた。これは, 流れの詳細も把握するためである。

なお, 低水路のみに通水している場合, 円柱は非水没である。一方, 高水敷にも通水し, Run2 においての円柱 (低水路設置) は水没であり, Run3 においての円柱 (高水敷設置) は非水没である。また, このときの水位変動は図-4 b) であり, 低水路水深 H と高水敷高さ D の比 H/D は, 1.56 である。

(2) 水理模型実験の概要

流速の測定 (uv および vw) には, 二次元電磁流速計 I 型および L 型 (KENEK 製, VMT2-200-04P および VMT2-200-04PL) を使用した。サンプリング周波数を 100 (Hz) とし, 1 測点毎に 512 個のデータを採取した。なお, 円柱群設置箇所では, 水量の変動が大きいと考えられるため, 横断方向の測定間隔を細かく設定した (図-7)。

(3) 実魚を用いた挙動実験の概要

本実験においても, 実験水路と魚のサイズの縮尺と流

図-5 実験における流量ハイドログラフ

図-6 実験における円柱群配列 (千鳥配列)

図-7 流速測定箇所の簡略図

れの相似則を同時に考慮することが困難であるため, 複断面開水路の流れ特性と, その流れに対する魚の行動特

a) Run1,2 ($y=39(\text{cm}), z=2(\text{cm})$)における時間平均流速 $\bar{u}$ b) Run3 ($y=25(\text{cm}), z=11(\text{cm})$)における平均流速 $\bar{u}$ 図-8 円柱群内における縦断方向の平均流速 $\bar{u}$ の変化図

性に着目して実験を行った。

実魚には、水産価値が高く、河川環境の指標種としてよく用いられるアユと同様に強い走流性を持ち、アユよりも耐久力や水質への耐性があり、ほぼ日本全国に分布しているウグイ^{7), 32), 33), 36), 37)}を使用した。使用したウグイの平均体長 BL は、 $5.0(\text{cm})$ (最大体長 $5.9(\text{cm})$, 最小体長 $4.0(\text{cm})$) である。なお、魚は体長が $4.0(\text{cm})$ 以上であれば、成魚とほぼ同じ流速を好んで遊泳するため⁴⁷⁾、体長 $5.0(\text{cm})$ のウグイを使用することで、十分に遊泳特性を把握することができる。また、中村⁴⁵⁾は、魚の体長の $1/2$ 倍の通路があれば遊泳可能であることを示している。これは、本実験の円柱設置間隔 l_s と魚の体長 BL の関係が BL/l_s または BL/s が 2 以下であれば、魚の遊泳行動に支障はないということである。そのため、今回の実験での円柱の設置間隔と魚のサイズとの関係($BL/l_s = BL/s = 1.25$)において、魚の遊泳行動に支障はないといえる。なお、既往の実験²²⁾では、魚の体長 BL が $10(\text{cm})$ 、円柱設置間隔 l_s が $4(\text{cm})$ であっても($BL/l_s = BL/s = 10/4 = 2.5$)、魚の遊泳行動に大きな支障がなかったということも確認できている。

実験は、魚が魚群行動をする習性があるため⁴⁸⁾、1 回の実験につき 10 尾のウグイを使用した。その魚を測定対象領域の下流に放流し、30 分間を流水に馴れさせた。その後、魚の遊泳行動を上方からビデオカメラ (SONY 製, HDR-SR11) で撮影した。

魚の遊泳時間は、流量 Q を変化させていない Run1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-2 (定常流実験) では 30 分間とした。一方、流量 Q を変化させた Run1-3, 2-3, 3-3 (非定常流実験) では 45 分間とし、それぞれの流量 Q において 15 分間ずつ

図-9 円柱群による流速低減率

の遊泳時間とした。これにより、急激な流量の増減によって変化する流れと魚の行動が把握できる。

著者らは、1 回の実験で魚の行動特性を明確にすることは不可能であると考えている。そのため、実験回数を積み重ねる必要がある。しかし、魚が同じ体長であっても、魚の遊泳能力には個体差がある。一方、魚には学習能力があることが知られている¹⁸⁾。ゆえに、これらを考慮に入れて実験を行う必要がある。本実験では、魚の個体差をなくすために、同一実験条件下において、5 回以上実験を行うことにした。さらに、実験に使用した魚を再度使用することはしていない。楊ら²⁸⁾も、魚の個体差をなくすために、実験毎に異なる個体を用い、同一実験条件下において、最低 3 回の実験を行っている。

なお、本実験での水温 $24.8 \pm 1.6^\circ\text{C}$ であり、水面の照度は $200\sim 250(\text{lx})$ である。これらの条件において、魚は行動的であった。

4. 本研究における実験結果

(1) 水理実験結果

図-8 に、円柱群内における縦断方向の時間平均流速 $\bar{u}$ の変化図を示す。円柱群により流速が低減し、水制の機能を果たしている⁴⁹⁾。図-9 は、円柱群の流速低減率であり、その割合は $50\sim 80(\%)$ であった。流速低減率は、円柱群通過直後 ($x=194(\text{cm})$) の時間平均流速 $\bar{u}$ を円柱群流入前 ($x=-2(\text{cm})$) の時間平均流速 $\bar{u}$ で割った値を 1 から引いた値である。また、水路床から $2(\text{cm})$ (Run3 は、高水敷上から $2(\text{cm})$) での時間平均流速 $\bar{u}$ を用いている。

図-10 に、 $Q=28.0(\text{l/s})$ での vw ベクトル図を示す。円柱が設置されていない Run1-2 (図-10 a)) は、富永ら¹²⁾が示したとおり、高水敷上で渦が形成された。一方、低水路右岸側に円柱が設置されている Run2-2 では、二次流がより大きく形成されていることが分かる (図-10 b))。この現象は、低水路側岸部に円柱を設置した池田ら⁵⁰⁾の実験においても同様の結果を得ている。また、高水敷左岸側に円柱を設置した Run3-2 では、Run2-2 よりも大きな二次流が形成されている (図-10 c))。このことから、

図-10 w ベクトル図 ($y=102\text{ cm}$) 図-11 乱れ $\left(-\rho \overline{v'w'} \right)$ のコンター図 ($y=102\text{ cm}$)

河岸浸食や河床洗掘などが懸念され、河道管理上において好ましくない現象である。なお、この現象は、鄭・富永⁵⁾が高水敷に水制を有した実験においても、同様の結果が得られている。そこで、乱れ $\left(-\rho \overline{v'w'} \right)$ に着目した。図-11に、乱れ $\left(-\rho \overline{v'w'} \right)$ のコンター図を示す。Run1-2では、高水敷上で乱れ $\left(-\rho \overline{v'w'} \right)$ が発達している一方で、Run2-2, 3-2では、円柱周辺で乱れ $\left(-\rho \overline{v'w'} \right)$ が発達していることが分かる。また、Run3-2では高水敷と低水路の境界部においての乱れが、Run2-2に比べて約2倍である。二次流は、境界部での乱れが周りよりも大きくなることで発達すると考えられる。また、瀬津ら¹⁵⁾は H/D が 1.5 よりも大きいとき、低水路内に二次流が形成されることを示した。本実験での H/D は 1.56 であるため、本実験水路においても複断面開水路流れの特徴が示されていることが分かる。

(2) 実魚を用いた挙動実験結果

本実験は、先述のとおり、定常流条件および非定常流条件で実施している。定常流条件における実験結果は、「1. 魚の遊泳行動」、「2. 単断面および複断面開水路流れと魚の遊泳深度」について述べる。

a) 定常流条件での実験結果

「1. 魚の遊泳行動」について、以下に示す。

図-12に、 $Q=5.0\text{ l/s}$ での魚の存在割合を示す。ここで、魚の存在割合は、1分毎に魚の存在箇所をカウントし、算出した。そのため、1ケースでの魚の総個体数は、実験に使用した魚の個体数(=10)とカウント回数との積になる。

$Q=5.0\text{ l/s}$ において、魚はある一定の場所には存在していないことが分かる。時間平均流速 $\bar{u}$ は、Run1-1, 2-1に

図-13 魚の存在割合 ($Q=28.0(l/s)$: 複断面開水路流れ)

図-14 $z=2(cm)$ での時間平均流速 $\bar{u}$ の変化図 ($Q=28.0(l/s)$)

図-15 高水敷へ乗った魚の総個体数 ($Q=28.0(l/s)$)

において、魚の体長の4倍未満であり、通常時の魚の遊泳速度よりも遅い流速である(図-8 a)。このとき、魚は自由に遊泳ができ、ランダムな遊泳行動をすることが分かる。なお、時間平均流速 $\bar{u}$ は、著者らの研究^{17), 22)-25)}では、通常、魚の遊泳深度が水路床からおおよそ2 cm ($z=2(cm)$)の箇所であったことから、 $z=2(cm)$ の箇所の時間平均流速 $\bar{u}$ を示している。

つぎに、 $Q=28.0(l/s)$ での魚の存在割合を図-13に示す。なお、ここでの魚の総個体数も、図-12と同様である。Run1-2では、魚が上流へ行かずに下流の壁際に存在していることが分かる。Run2-2では円柱群内での魚の存在が認められる。一方で、Run3-2では円柱群内に魚の存在が認められない。そこで図-8, 14をみてみると、Run1-2において、魚が存在した場の時間平均流速 $\bar{u}$ は、魚の体長の5倍以下であり、通常時での遊泳ができる流速であっ

図-16 小型実験水路：流れと魚の遊泳深度の関係把握

表-3 小型実験水路を用いた実験ケース

	流量 Q (l/s)	高水敷高さ D' (cm)	低水路水深 H' (cm)	高水敷水深 h' (cm)	h'/H'	H'/D'
Run4	6.3	-	7.8	-	-	-
Run5	6.0	5	7.8	2.8	0.36	1.56

た¹⁷⁾。そのため、魚はその場に留まったものだと考えられる。Run2-2における円柱群内での時間平均流速 $\bar{u}$ が魚の体長の4倍以下であるのに対し、その他の場の時間平均流速 $\bar{u}$ は魚の体長の8倍程度である。そのため、円柱群内へ退避した魚もいたと考えられる。また、Run3-2における円柱群内での時間平均流速 $\bar{u}$ もRun2-2と同程度であるが、円柱群内に魚が存在していない。これは、高水敷右岸側の壁際や低水路河岸を壁際と認識した魚が多く、側壁選好性が優ったものだと考えられる。

左岸側に存在した魚は、上流方向よりやや右岸側に頭を向け、そのままの姿勢で水路を横切り右岸側へ移動し、高水敷に乗ることが多かった。この現象は、二次流の規模が最も大きいRun3-2で、特に多くみられた。高水敷に乗った魚の総個体数は図-15であり、Run3-2はRun2-2に比べ、約8倍の魚が高水敷に乗るという結果を得た。一方で、上方からのみの撮影であるため、平面的な魚の行動のみしか追えておらず、水深方向における魚の遊泳行動は把握できていない。そのため、複断面開水路流れにおいて、魚は高水敷以外の場所でも水路床から高い箇所を遊泳している可能性がある。これは、単断面開水路流れの場合においても同様のことが考えられる。

「2. 単断面および複断面開水路流れと魚の遊泳深度」について、以下に示す。

上述のとおり、通常での魚の遊泳深度は、 $z=2$ (cm)程度であることが分かっている。しかし、この遊泳深度は単断面開水路流れでの実験結果である。そこで本研究では、1)単断面開水路流れでの魚の遊泳深度の再確認、お

a) Run4 (単断面開水路)

b) Run5 (複断面開水路)

図-17 魚の遊泳深度 (小型実験水路)

よび2)複断面開水路流れと魚の遊泳深度との関係を明確にするために、乱れ $(-\rho v'w')$ と魚の行動軌跡に着目した。そこで、魚の行動を上下左右で捉えやすくするために、水路幅20(cm)の小型実験水路(図-16)を用いて基礎的な実験を行った。実験水深 H' は7.8(cm)とし、 $H'/D'=1.56$ を表-2と同一にした。また、単断面開水路流れ(Run4)での壁際における底面付近($y=19$ (cm), $z=2$ (cm))の時間平均流速 $\bar{u}$ を図-14 b)のRun1-2と同程度($\bar{u}=30$ (cm/s)程度)とするため、流量を $Q=6.3$ (l/s)とした。同様に、複断面開水路流れ(Run5)においても、底面付近の時間平均流速 $\bar{u}$ を30(cm/s)程度とするために、流量を $Q=6.0$ (l/s)とした。水路幅20(cm)の小型実験水路を用いたため、水路幅と魚群行動を考慮し、1回の実験に使用したウグイは3尾とした。なお、小型実験水路を用いた実験ケースは表-3である。また、魚の平均体長 BL (≈ 5.0 (cm))や水温($24.8 \pm 1.6^\circ\text{C}$)、水面の照度(200~250 lx)などの実験条件は、既述のとおりである。なお、ここでは魚の遊泳行動を高速・高解像度カメラ(株式会社ライブラリー製、GE60)を用いて、7/100秒毎に上方および側方から撮影した。魚の行動解析には、2次元動画計測ソフト(株式会社ライブラリー製、Move-tr2D)を使用し、魚の遊泳行動を解析した。

Run4(単断面開水路)における実験開始時からの魚の遊泳深度は、概ね水路床付近であり、単純平均した結果、 $z=1.7$ (cm)であった(図-17 a))。これは、著者らの既往の研究^{17), 22)~25)}と一致しており、通常での遊泳深度を

a) Run4 (単断面開水路：平面)

b) Run4 (単断面開水路：横断，上流からみた投影データ)

c) Run5 (複断面開水路：平面)

d) Run5 (複断面開水路：横断，上流からみた投影データ)

図-18 魚の存在箇所 (小型実験水路)

再確認した。また，Run4 での魚の存在箇所は図-18 a), b) であり，約 95(%)の魚が壁際を遡上していた。魚の存在箇所を横断分布で見ると，壁際を遡上していた約 95(%)の魚が，左右岸に二分化していた。図-19 は，時間平均流速 $\bar{u}$ のコンターと魚の遊泳軌跡の一例である。壁際の時間平均流速 $\bar{u}$ は，20~30(cm/s)程度であった。このとき，魚は走流性を発揮して壁際を遡上した（側壁選好性）^{17), 22)-25)}。魚が遡上した箇所の時間平均流速 $\bar{u}$ は，魚の体長の 4~6 倍程度の流速であり，魚の遊泳特性（走流性，側壁選好性）¹⁷⁾が明確に現れたと考えられる。

a) Run4 (単断面開水路：x=80~150(cm))

b) Run5 (複断面開水路：x=80~150(cm))

図-19 時間平均流速 $\bar{u}$ コンターと魚の遊泳軌跡図 (小型実験水路)

a) Run4 (単断面開水路：x=80~150(cm))

b) Run5 (複断面開水路：x=80~150(cm))

図-20 乱れと $-\rho \overline{v'w'}$ 魚の遊泳軌跡図 (小型実験水路)

表-4 Run4 および Run5 での魚の遊泳深度における平均・標準偏差・分散 (小型実験水路)

	Run4 (単断面)	Run5 (複断面)
平均 μ	1.7(cm)	1.4(cm)
標準偏差 σ	0.45	0.82
分散 σ^2	0.21	0.68

図-21 魚の遊泳深度の確率密度 (小型実験水路)

表-5 Run4 および Run5 での魚の横断方向の分布における平均・標準偏差・分散 (小型実験水路)

	Run4 (単断面)	Run5 (複断面)
平均 μ	6.1(cm)	18.3(cm)
標準偏差 σ	6.98	2.75
分散 σ^2	48.7	7.58

図-22 魚が存在した横断方向の確率密度 (小型実験水路)

図-20 は、乱れ $(-\rho\overline{v'w'})$ と魚の行動軌跡図である。Run4の流れ場全体における乱れ $(-\rho\overline{v'w'})$ は小さく、 $|\rho\overline{v'w'}| \leq 0.3(\times 10^4(\text{N/m}^2))$ であった (図-20 a)。このとき、魚は壁際を遡上したことから、 $|\rho\overline{v'w'}| \leq 0.3(\times 10^4(\text{N/m}^2))$ では側壁選好性が優先したと考えられる。

一方、Run5 (複断面開水路) における魚の遊泳深度の単純平均は 1.4(cm) であり (図-17 b)、Run4 と同様に底面付近を遊泳していた。しかし、単断面および複断面開水路流れにおける、遊泳深度の標準偏差 σ および分散 σ^2 に着目すると (表-4)、Run4 よりも Run5 の標準偏差 σ および分散 σ^2 のほうが大きい値であった。このことは、Run5 における遊泳深度が、Run4 の遊泳深度よりもバラ

ついていることを示している。また、Run4 および Run5 における遊泳深度の確率密度を比較しても (図-21)、Run5 での遊泳深度のピーク値は、Run4 に比べて小さい値を示していることが分かる。

つぎに、魚の横断方向の分布を見てみると (図-18 b, d) Run4 および Run5 ともに壁際に存在していることが分かる。そこで、標準偏差および分散 (表-5) を見てみると、Run5 に比べ Run4 の値のほうが大きいことが分かる。これは、Run4 では魚の存在箇所が二分化しているためだといえる。一方、Run5 では左岸側、低水路河岸および右岸側 (高水敷上) と、大きく分けて 3 箇所に魚が存在しているため (図-18 c, d)、Run4 よりも標準偏差および分散が小さい値だと考えられる。ここで、Run5 において、魚が低水路河岸に存在した理由は、その場を側壁として認識したためであると考えられる。そのため、左右岸および低水路河岸において、魚の遊泳特性である側壁選好性が確認されたといえる。

また、Run5 における時間平均流速 $\bar{u}$ は、低水路で 5~65(cm/s)、高水敷で 5~30(cm/s) であり、それぞれ魚の体長の 1~13 倍、1~5 倍と、水深方向および横断方向に多様な流れが形成されている (図-19 b)。このような流れの状況において、魚は低水路河岸から高水敷へ移動した。魚が高水敷へ移動した行動を動画解析した結果、魚は頭を水面方向に向けて遊泳していた。そこで、Run5 における $y=11(\text{cm})$ での流速 v および流速 w の時間変化に着目した (図-23)。図-23 は、 $z=2(\text{cm})$ から $1(\text{cm})$ 毎に $z=6(\text{cm})$ までの流速 v 、流速 w を示しており、流速 w は流速 v の 2 倍程度の大きさである。 $y=11(\text{cm})$ は、魚が高水敷に向かって遊泳した場所であり、流下方向の流速 u に加えて高水敷から落ちる流れが形成された結果、鉛直方向の流向は下向きになっている。 $y=11(\text{cm})$ での時間平均流速 $\bar{u}$ は、20~40(cm/s) 程度であり、流速 w の 4~7 倍程度の大きさである。そのため、魚は流速 u のつぎに流速 w の流れを優先して感知したものと考えられる。高水敷に乗った魚は、その後低水路へ降り、左岸側へ移動した (図-19 b)。乱れ $(-\rho\overline{v'w'})$ に着目すると、魚が壁際以外で遊泳した箇所は、 $|\rho\overline{v'w'}| \geq 0.4(\times 10^4(\text{N/m}^2))$ の値の領域の近傍であることが分かる (図-20 b)。Run5 における乱れ $(-\rho\overline{v'w'})$ の数値は、Run4 の結果より高い値であり、 $|\rho\overline{v'w'}| \geq 0.4(\times 10^4(\text{N/m}^2))$ を選好したと考えられる。

さらに、Run5 において低水路内で魚が遊泳した箇所周辺の乱れ $(-\rho\overline{v'w'})$ について、FFT 解析を行った。その結果、高水敷周辺や水路中央部におけるスペクトルは $1/f$ 勾配⁵⁹⁾であり (図-24)、流れが $1/f$ ゆらぎを持っていることが分かった。 $1/f$ ゆらぎは、全ての生体に対して快適な感覚と与えるものとして知られている⁵⁹⁾。これは、著者らの既往の研究においても実証されている¹⁷⁾。Run1-2 と Run5 での魚の存在箇所は、Run1-2 では左岸側

図-23 Run5における流速 v 、流速 w の時間変化 ($y=11(\text{cm})$)

のみであり (図-13 a), Run5 では左岸側に最も多く存在しているものの (図-22), 大きく分けると 3 箇所が存在している (図-18 c, d). これは, 実験水路幅が影響していると考えられる. 実験水路幅は, Run1-2 では魚の体長の 16 倍に対し, Run5 では魚の体長の 4 倍である. そのため, Run5 においては左岸側に存在した魚が高水敷周辺や水路中央部での $1/f$ ゆらぎを持つ流れを感知しやすい状況にあったといえる. 加えて, 側壁選好性によって, 3 箇所に魚が存在したものだと思われる. なお, 魚の遊泳していた箇所の時間平均流速 $\bar{u}$ は, 魚の体長の約 4~6 倍程度であった.

これら小型実験水路を用いた実験より, 魚は(1)周囲よりも乱れ ($-\rho \overline{v'w'}$) が大きい ($-\rho \overline{v'w'} \geq 0.4(\times 10^1 (\text{N/m}^2))$) の領域の近傍を選好した. その場合は, $1/f$ ゆらぎを持つ流れであった. かつ, (2)体長の 4 倍程度の流速を選好する. さらに, (3)流速 w は流速 v よりも 2 倍程度早いいため, 魚は流下方向の流速 u に加えて流速 w に対しても, 走流性同様の動きを発揮し, 高水敷に向かって遊泳する. (4)低水路へ向かう遊泳は, 魚が $1/f$ ゆらぎの流れを感知したことが示唆された.

以上より, 低水路へ向かう流れが形成されている Run1-2, 2-2, 3-2 において (図-10), 魚が高水敷に乗ったと考えられる. また, Run3-2 は高水敷周辺の流れの乱れ ($-\rho \overline{v'w'}$) が大きくなっているため, 高水敷へ乗った魚の総個体数が多くなったと考えられる.

複断面開水路流れは, 複雑な流れが形成される一方で,

a) 高水敷周辺 ($y=9(\text{cm}), z=5(\text{cm})$)

b) 水路中央付近周辺 ($y=11(\text{cm}), z=4(\text{cm})$)

c) 水路左岸側 ($y=15(\text{cm}), z=2(\text{cm})$)

図-24 Run5における低水路内の乱れ ($-\rho \overline{v'w'}$) のスペクトル

魚にとっては選好できる領域が横断方向および水深方向に拡張される. また, 高水敷周辺に円柱群があることで, さらに多様な流れが形成され, 魚の遊泳分布を大きく変化させる要因となることが示唆された. 一方で, 高水敷に乗る魚の総個体数が多いということは, 減水後, 魚が高水敷に取り残されてしまう可能性も高いことを示唆している.

b) 非定常流条件での実験結果

図-25 に, 流量 Q が $5.0(\text{l/s})$ から $28.0(\text{l/s})$ へ増加, $28.0(\text{l/s})$ から $5.0(\text{l/s})$ へ減少したときの流速 u の時間変化図を示す.

a) 5.0(l/s)から28.0(l/s)へ流量増加

b) 28.0(l/s)から5.0(l/s)へ流量減少

図-25 各ケースにおける流速 u の時間変化図 ($x=102(\text{cm})$, $y=39(\text{cm})$, $z=2(\text{cm})$)

流速 u は、およそ 20 秒間で 2 倍もしくは 1/2 倍の値に変化している。このとき、魚は流れの変化に機敏に反応していた。特に、流量（流速）が急増した図-25 a) のとき、魚はその流れの変化に対応した。図-26 は、流量（流速）急増時における魚の行動模式図である。図-26 中(1)～(5)において、(1), (2)は退避行動、(3)は流量（流速）の変化を利用し、遡上した行動である。また、(1), (4), (5)においては、頭を上流に向けながら遊泳していたが、最終的には流れに押し流されたことを示している。なお、実河川において実験を行った傳田ら⁴⁰⁾も、魚は出水時に魚が(1), (2)のような退避行動をとることを示している。

ここでは、避難場所になり得る円柱群が低水路中に設置されており、Run3 に比べて二次流の規模が小さく、高水敷へ乗った魚の総個体数が少ない Run2 での魚の行動について示す（表-6）。流量（流速）が急増した場合、約 10 秒間で、43.3%の魚が壁際もしくは円柱群内へ移動し退避行動をとった（(1), (2)）。この退避行動が最も多く、そのうち、(1)壁際へ退避行動した 38.3%の魚は、その後に流れに押し流された。このことにより、円柱群内が魚の一時的な避難場所にはなることが示された。

最終的に流れに押し流された魚は、78.3%であった（(1), (4), (5)）。その後、復帰遡上²⁰⁾を試みるものの、流量 Q が 28.0(l/s)の 15 分間においては、全ての魚が復帰遡上を成功させることはできなかった。これは、円柱群内以外での流速 u が、魚の体長の 4 倍から 8 倍へ急増した

図-26 流量（流速）急増時における魚の行動模式図

表-6 流量（流速）急増時における魚の行動割合(Run2-3)

流量（流速）急増時の魚の行動		割合(%)
(1)	壁際へ退避行動、その後後退 (壁際付近に存在していた魚を含む)	38.3
(2)	円柱群内へ退避行動	5.0
(3)	遡上行動	16.7
(4)	定位後、後退	26.7
(5)	すぐに後退	13.3
計		100

ため（図-27 a)）、魚が流れの変化に対応できなかったことを示している。ゆえに、急激な流速の増加は、魚にとって下流へ押し流される大きな脅威であり、15 分間では、その流れに馴れることが困難であるということが分かった。なお、流速の減衰時 20 秒後以降に、魚は復帰遡上を試み成功させた。また、(3)流れの変化を利用して遡上する魚は 16.7%であった。これは、流速 u が増加した瞬間に、魚が走流性を発揮したものと考えられる。自然共生研究センターの実験結果では、流量増加と魚の遡上（図-2）⁴²⁾、流量減少時の流れの加速度と魚の遡上（図-3）⁴³⁾の関係が示されている。

そこで、本研究においても流量が増減したときの流れの加速度に着目した。図-28 に、Run2-3 における流れの加速度 α の時間変化図を示す。図-28 a)は、流量が増加した場合であり、流量増加 10 秒後までの流れの加速度 α は、 $\pm 0.02(\text{cm/s}^2)$ 程度の増減であった。このとき、魚は退避行動や遡上行動をとっている。この行動は、魚は流れの加速度 α の変化を瞬時に読み取り、流れに対応した行動をとったと考えられる。その後、主流部や壁際での流速 u が急増し、魚が押し流され始めた流れの加速度 α は $0.06(\text{cm/s}^2)$ 以上であった。つぎに、流量が減少した場合、流量減少 10 秒後に、流れの加速度 α が $-0.1(\text{cm/s}^2)$ と大きく減少した（図-28 b)）。一方で、流量減少 20 秒後以降に魚が復帰遡上を開始した。これは、流量が減少しても、流速 u が魚の体長の 4 倍程度に減衰するまでに、時間を要したためである。

本実験において、流れの加速度 α が負であっても、流速が魚の遊泳能力を上回っていれば、魚は遡上行動が困難であることが分かった。これは、自然共生研究センタ

図-27 Run2-3における流速 u の1秒毎の時間変化図
($x=102(\text{cm})$, $z=2(\text{cm})$)

図-28 Run2-3における流れの加速度 α の1秒毎の時間変化図
($x=102(\text{cm})$, $z=2(\text{cm})$)

一の実験結果⁴³⁾とは異なった結果ではあるが、流れの加速度 α が魚の行動に変化を与える一つのきっかけとなる

ことが示唆された。

本実験では、遊泳能力の高いウグイを使用しているため、遊泳能力の低いコイやギンブナを使用した自然共生研究センターの実験結果とは異なったものになったと考えられる。しかしながら、本実験と自然共生研究センターとの実験結果^{42,43)}の傾向は概ね一致するといえる。

以上より、東ら²⁰⁾や傳田ら⁴⁴⁾が実河川で行った現地計測や、実験河川を使用して行った自然共生研究センターの実験結果^{42,43)}と概ね同様の結果が得られた。

よって、模型水路においても魚の行動特性を十分に把握できることが証明され、本研究における実験結果は、信憑性のあるものと判断できる。

5. おわりに

本実験より得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) 実験水路で示す魚の行動が、実河川で示す魚の行動にも適用され得る。そのため、一定条件のもとで繰り返し行える、実魚を用いた挙動実験は非常に有利である。また、流れに対する魚の行動特性を明確にするためには、その場の「流れ」、主として流速およびその乱れ ($-\rho \overline{v'w'}$) の把握が重要であるため、魚と実験水路の縮尺については、過度にこだわらなくても良いといえる。
- 2) 低水路または高水敷に水制を設置すると、水刳の影響により二次流の規模が大きくなる。また、高水敷に水制を設置した場合、低水路に水制を設置した場合に比べて、二次流の規模がより大きくなるため、河岸浸食や河床洗掘される恐れがある。
- 3) 魚は、流速が体長の4倍未満であれば、遊泳行動はランダムであり、体長の4倍以上で魚の遊泳特性（走流性の発揮、側壁選好性）が明確に現れることを再確認した。
- 4) 魚は、 $1/f$ ゆらぎを持つ、周囲よりも乱れ ($-\rho \overline{v'w'}$) が大きい $|\rho \overline{v'w'}| \geq 0.4 (\times 10^1 (\text{N/m}^2))$ の領域の近傍を選好し、かつ、体長の4倍程度の流速を選好することが示唆された。
- 5) 複断面開水路流れは、流れが複雑化される一方で、魚にとっては選好できる領域が横断方向および水深方向に拡張される。また、水制や樹木群があることで、魚が選好できる領域が拡張され、魚の遊泳箇所を大きく変化させる要因となる。
- 6) 高水敷に水制がある場合、二次流の規模がより大きくなり、乱れ ($-\rho \overline{v'w'}$) も大きくなるため、魚が高水敷に乗る回数が多くなったと考えられる。さらに、高水敷に乗った魚は、減水後、高水敷に取り残されてしまう可能性がある。また、樹木群が存在する場

合も同様のことが示唆される。

- 7) 20秒間で流速が20(cm/s)から40(cm/s)へと2倍に急増(魚の体長の4倍から8倍に急増)してしまうと、魚はその急激な流速増加に対応しきれず、43.3(%)の魚がまず壁際や杭水制内への移動をする退避行動をとる。
- 8) 壁際へ退避した魚や定位を試みた魚などは、最終的に流れに押し流される。一方で、流速の遅い杭水制内に退避した魚は、その場に留まることができ、杭水制が避難場として利用される。
- 9) 魚は、魚の体長の4倍程度の流速であれば、流速の急増時や減衰時に遡上をする。このとき、流れの加速度 α の正負は影響しない。しかし、流れの加速度 α の変化が、魚の行動に変化を与えるきっかけとなっていると考えられる。
- 10) 実魚を用いた挙動実験(模型実験)においても、実河川や実験河川と同様、出水時には退避行動をとり、減水時には復帰遡上を行うという魚類行動特性を示した。このことにより、魚類の行動特性を把握するうえで模型実験が有効的であるといえる。

謝辞：著者らは、査読者の有意義な意見に感謝する。本研究は、東洋大学校友会奨学金、東洋大学特別研究助成および東洋大学井上円了記念研究助成の一部を受けて行った。また、東洋大学理工学部都市環境デザイン学科環境水工研究室の学生諸君に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省自然環境局自然環境自然環境センターHP：生物多様性条約，<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/treaty/index.html>
- 2) 島谷幸宏：環境生態研究の展望，土木学会論文集，No.804/VII-37，pp.3-9，2005。
- 3) 国土交通省河川局 HP：指針・マニュアル・ガイドライン等，http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/index.html
- 4) 国土交通省河川局 HP：多自然川づくり基本方針，http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/press/200607_12/061013/index.html
- 5) 佐川志朗，萱場祐一，皆川朋子，川口洋一：実験河川におけるエレクトリックショックによる6魚種の捕獲効率，応用生態工学，Vol.8，No.2，pp.193-199，2006。
- 6) 傳田正利，天野邦彦，辻本哲郎：一時的水域の魚類群集多様性向上への寄与とそれを支える物理環境に関する研究，土木学会論文集 G，Vol.62，No.3，pp.340-358，2006。
- 7) 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，Vol.43，No. 1，pp.9-20，2006。
- 8) 泉 完，矢田谷健一，東 信行，工藤 明，加藤幸：自然河川流下水を用いたスタミナトンネルによるオイカワの突進速度に関する現地実験，水工学論文集，第51巻，pp.1285-1290，2007。
- 9) 田代 喬，勝野ちほ，辻本哲郎：砂河川に生息する底生魚カマツカの河床環境劣化抑制機能の評価，河川技術論文集，第14巻，pp.355-360，2008。
- 10) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，渡邊拓也：階段式魚道の壁面色が魚の遡上に及ぼす影響，水工学論文集，第53巻，pp.1243-1248，2009。
- 11) 文部科学省，気象庁，環境省：温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」，2009。
- 12) 富永章宏，江崎一博，小葉竹重樹：複断面開水路流の三次元乱流構造，土木学会論文集，No.417/II-13，pp.129-138，1990。
- 13) 池田駿介，村山宣義，空閑 健：複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造，土木学会論文集，No.509/II-30，pp.131-142，1995。
- 14) 福岡捷二，大串弘哉，加村大輔，平生昭二：複断面蛇行流路における洪水流の水理，土木学会論文集，No.579/II-41，pp.83-92，1997。
- 15) 福津家久，鬼束幸樹，相良幸輝，池谷和哉：かぶり水深の変化が複断面開水路流れの組織渦に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集，No.649/II-51，pp.1-15，2000。
- 16) 渡辺勝利，徳光洋輔，佐賀孝徳：片複断面開水路流れに形成された水平渦の内部構造，水工学論文集，第53巻，pp.931-936，2009。
- 17) 青木宗之，染井香栄，小原 誠，吉野 隆，福井吉孝：間伐材を用いた杭水制の水理機能と魚の生息について，環境システム研究論文集，第37巻，pp.19-28，2009。
- 18) 有元貴文：魚はなぜ群れで泳ぐか，pp.49-127，大修館書店，2007。
- 19) 綾 史郎，河合典彦，小川力也，紀平 肇，中西史尚，竜門俊次：淀川における水位の変化と魚類の産卵行動，河川技術論文集，第10巻，pp.333-338，2004。
- 20) 東 信行，鴨下真吾，佐原雄二，関 泰夫，渡辺勝栄：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，第27巻，pp.793-798，1999。
- 21) 傳田正利，天野邦彦，原田守啓：過去の河川氾濫状況の定量的復元と氾濫原が有していた魚類避難場の機能検証，水工学論文集，第53巻，pp.1195-1200，2009。
- 22) 高水克哉，栗原朋之，青木宗之，内山文哉，福井吉孝：杭水制内外の流れと魚の挙動，水工学論文集，第51巻，pp.1273-1278，2007。
- 23) 青木宗之，福井吉孝，小原 誠，染井香栄：階段式魚道の呼び水がつくり出す流れとそれに対する魚の行動，環境システム研究論文集，第36巻，pp.457-465，2008。
- 24) 青木宗之，吉野 隆，福井吉孝：呼び水式魚道下流における流れとそれに対する魚の挙動，ながれ，第28巻6号，pp.485-494，2009。
- 25) 小坂祐樹，青木宗之，田口裕基，福井吉孝：呼び水式階段魚道における問題点とその対処法について，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68，No.4，pp.L679-L684，2012。
- 26) 高嶋信博，中村俊六：魚道内のアユの挙動に関する実験的研究，水理講演会論文集，第28巻，pp.353-359，1984。
- 27) 中村俊六，高嶋信博，木村 博：実物の魚を用いた河

- 川構造物の模型実験手法について, 水理講演会論文集, 第 31 巻, pp.783-788, 1987.
- 28) 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選好性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.636/VII-13, pp.35-45, 1999.
- 29) 和田 清, 小出水規行, 石川雅朗, 中村俊六: 修正ラニア型舟通し魚道の流れ場と稚アユの遡上経路, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.983-988, 1999.
- 30) 和田 清, 東 信行, 小出水規行, 中村俊六: 稚アユの遡上行動からみた仮設用ストリーム型魚道に関する一考察, 河川技術論文集, 第 5 巻, pp.159-164, 1999.
- 31) 桜井 力, 柏井条介, 佐々木國隆, 岡崎克美, 進藤邦雄, 岡本俊策: コンクリートブロックを用いた粗石式魚道の水理および遡上特性, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.1197-1202, 2000.
- 32) 泉 完, 工藤 明, 東 信行, 佐藤正一: ハイブリット式魚道のプールタイプの流況におけるウグイの遡上行動実験, 河川技術に関する論文集, 第 6 巻, pp.131-136, 2000.
- 33) 林田寿文, 本田隆秀, 萱場祐一, 島谷幸宏: 階段式魚道における落下流と表面流の発生特性とウグイの遊泳行動, 環境システム研究論文集, 第 28 巻, pp.333-338, 2000.
- 34) 和田 清, 桑原真吾, 稲川啓太, 寺町 茂: 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, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.371-376, 2006.
- 35) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 木内大介, 高橋康行, 飯國洋平: 階段式魚道における切り欠き位置が魚の遡上率に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.1279-1284, 2007.
- 36) 浪平 篤, 後藤真宏, 小林宏康: 階段式魚道における流量変化に伴うプール毎の流況およびウグイの遡上行動, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.1291-1296, 2007.
- 37) 浪平 篤, 後藤真宏, 小林宏康: 勾配 1/5 の階段式魚道における流況とウグイの遊泳行動, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.1189-1194, 2008.
- 38) 関谷 明, 宮田 司, 木村成利, 安田陽一: 隔壁に擬岩を用いた急勾配魚道の提案, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp.457-462, 2008.
- 39) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 森 悠輔, 関 強志, 杉本寿郎: 階段式魚道内のアユの挙動と水理量との関係, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1237-1242, 2009.
- 40) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 森 悠輔, 関 強志: アユの休憩場所の水理特性とその挙動との関係, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1225-1230, 2009.
- 41) 山本亮介, 本田晴朗: 無線認識技術を用いたアユの行動特性実験—周囲の明るさ変化に対する反応—, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.I_667-I_672, 2012.
- 42) 土木研究所自然共生研究センターHP: 流量増加と魚類の遡上に関する実験, http://www.pwri.go.jp/team/kyousei/jpn/downloads/arrcnews/vol5/news05_p4.pdf
- 43) 土木研究所自然共生研究センターHP: 出水時, 魚類はどのような行動をとっているのですか?, http://www.pwri.go.jp/team/kyousei/jpn/downloads/katu/h16/h16ar_6.pdf
- 44) 傳田正利, 天野邦彦, 辻本哲郎: 魚類自動追跡システムの現地実証実験と魚類行動特性の把握, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.1, pp.1-14, 2009.
- 45) 中村俊六: 魚道のはなし, pp.84-89, 山海堂, 1995.
- 46) 山本晃一: 護岸・水制の計画・設計—一歩先そして一歩手前—, pp.327-330, 山海堂, 2003.
- 47) 鈴木興道: 魚の住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.
- 48) 石川雅明: ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第 6 巻, pp.101-106, 2000.
- 49) 秋草 勲, 吉川秀夫, 坂上義次郎, 芦田和男, 土屋昭彦: 水制に関する研究, 土木研究所報告, 第 107 号の 6, pp.2-3, 1960.
- 50) 池田駿介, 佐野貴之, 福元正武, 河村一弘: 複断面開水路に生じる大規模組織渦と浮遊砂輸送, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.135-144, 2000.
- 51) 鄭 載勲, 富永晃宏: 高水敷に水制を有する複断面河道の流れ構造, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.913-918, 2009.
- 52) 武者利光編: ゆらぎの科学 6, pp.94-95, 森北出版, 1996.
- 53) アットホーム (株) HP: 教授対談シリーズ こだわりアカデミー 数学・物理 F 分の 1 ゆらぎの謎にせまる, http://www.athome-academy.jp/archive/mathematics_physics/0000000230_all.html

(2012.10.30 受付)

EXPERIMENTAL WORK ON CHANGE IN QUANTITY OF FLOW
IN COMPOUND OPEN CHANNEL AND FISH BEHAVIOR TO IT

Muneyuki AOKI, Shigeki SEZAKI and Yoshitaka FUKUI

In this study, it is a purpose to make clear the characteristics of the fish behavior to the increase and decrease of quantity flow (flow velocity). At the same time, it paid attention whether the pile dike used in the evacuation place of fish. Then, the model experiment carried out by using the compound cross-section open channel where the pile dike had been set up.

When flow velocity increased rapidly, the fish tried the evacuation behavior to the wall side and the pile dike. The fish that tried it in the pile dike that flow velocity is slow was able to stay in the place. Therefore, the fish used in the pile dike as the evacuation place. On the other hand, the fish that tried it to the wall side was swept away to the flow after the evacuation behavior. Moreover, the fish return run-up when flow velocity increased rapidly, too.

Reynolds stress ($-\rho \overline{v'w'}$) increases when there are the pile dike on the flood channel, Reynolds stress ($-\rho \overline{v'w'}$) increases and the secondary flow has developed. Therefore, the bank erosion and the river-bed scour are feared. In addition, it was suggested that the number of total individuals of fish that got on the flood channel increased, and the fish get left on the flood channel.