

魚道の流れ特性と魚の遡上特性との関係

*九州工業大学大学院 工学研究院建設社会工学研究系

鬼 東 幸 樹†

Relationship between Flow Characteristics in Fishways and Migration Characteristics of Fish

Kouki ONITSUKA, Department of Civil and Architectural Engineering, Kyushu Institute of Technology

1 はじめに

今回、「魚道」について特集記事を執筆するようにながれ編集委員から打診があった。私は魚道の研究をしているが、私よりも優れた魚道の研究者が大勢いる中で、私が特集記事を書くのはいかなものか？と初めは難色を示した。しかし、私自身がかつてながれ編集委員であったので、記事集めが大変なことを知っており、私が断ると編集委員が困るだろうと思った。また、私の知っている一流の魚道研究者は私よりも遙かに多忙であったり、あるいは高齢だったり、私がもし編集委員なら頼みにくいと感ずる方ばかりである。こうした背景から、中年で暇人の私が引き受けるのも悪くないと思った。また、魚道や魚の挙動の論文が土木、農学、水産、電気と多くの分野に分散しており、情報を容易に収集することが困難な状況なため、これを集約することが必要と感じていたことや、今まで私は「うまくいったこと」を論文に掲載してきたが、「うまくいかなかったこと」を公表しようと思ったことも執筆への後押しとなった。本報告がこれから魚道や魚を用いた実験を行おうと模索している若手研究者の方に役に立てば幸いである。

河川に生息する魚類は主として、一生を淡水域で生息する「純淡水魚」、海と淡水域との間を定期的に回遊している「通し回遊魚」、および本来は海水魚であるが、汽水域で生活したり一時的に淡水域に進入する「周縁性淡水魚」に大別される¹⁾。このうち、アユやサケに代表される通し回遊魚は、海洋から河川に遡上し、河川内で産卵を行う。そのため、ダム

や堰といった河川横断構造物が設置された場合、河川縦断方向の移動が阻害され、産卵が不可能あるいは困難になるために種の存続が危ぶまれる。そのため、堰やダムの上下流に発生する水位落差を分割、あるいは滑らかに接続することによって魚の遡上および降下を可能にする魚道の設置が必要となる。

魚が魚道を遡上および降下するためには、主として魚道への集魚対策と魚道内での遊泳対策の両者が必要となる²⁾。本報告では紙面の関係で魚道内での遊泳対策のみに着目する。

2章では魚道の歴史を紹介する。3章では魚道の種類を紹介すると共に、現在知られている設計マニュアルを紹介する。4章では著者が魚を採取、飼育する上で失敗した例を紹介する。5章では魚の遊泳能力を紹介する。6章では単純な流れにおける魚の挙動の研究を紹介する。7章では3章で紹介した魚道の設計マニュアルに掲載されていない近年の魚道研究の紹介を行う。なお、引用文献において入手が容易な文献については略記している。

2 魚道の歴史

2.1 世界の魚道史

Clay³⁾によると最古の魚道設置は、17世紀のフランスらしい。1861年にイギリスで鮭漁業保護法(Salmon Fishery Act)が制定され、1872年に斜面式特殊魚道の特許がアメリカで申請された⁴⁾。ただし、20世紀まではあまり科学的な視点で魚道を設計することはなかったようだ。魚道を科学的な視点で捉えた初めての書物を1909年にDenil⁵⁾が出版した。1938年にはMcLeod & Nemenyi⁶⁾による実験結果に基づき、科学的根拠に基づく魚道がコロンビア川に初めて完成した。1941年にはNemenyi⁷⁾によって19

*〒804-8550 北九州市仙水町1-1

† E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

表1 魚道の種類

魚道タイプ	我が国における代表的な魚道形式
プールタイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・階段式魚道 ・バーチカルスロット式魚道 ・アイスハーバー式魚道 ・ハーフコーン式魚道 ・棚田式魚道 ・潜孔式魚道
水路タイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・デニール式魚道 (標準型, 舟通し型) ・粗石付き斜路式魚道 ・粗石付き斜曲面式魚道 ・緩勾配バイパス式魚道
閘門タイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・ロック式魚道

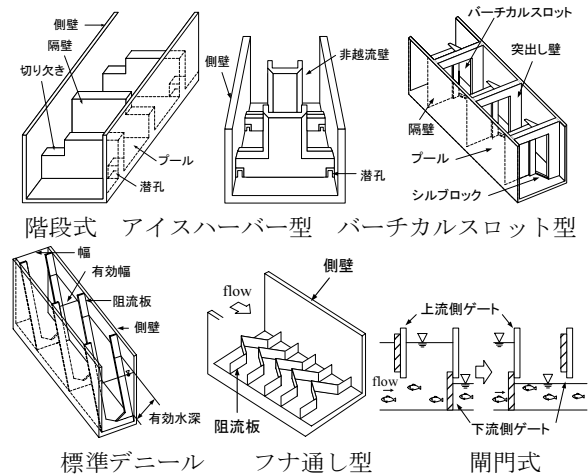


図1 魚道の種類

世紀から 20 世紀前半に設置された魚道のリストが公表された。戦後、1948 年の U.S. Fish and Wildlife Service の報告書⁸⁾、1956 年の Schoning & Johnson の報告書⁹⁾などを皮切りに数多くの報告書や論文が公表されるようになった。詳細な魚道の世界史は Clay³⁾の著書、「Design of Fishways and Other Fish Facilities」を参照されたい。

2.2 日本の魚道史

堰を設置した際に、恐らく意図的ではなく偶発的に魚が遡上可能な水路が設置された例は 1600 年に球磨川に設置された旧遥拝堰や、1700 年に吉井川に設置された旧田原井堰などが挙げられる¹⁰⁾。

小山¹¹⁾によれば 1870 年頃に十和田湖から流出する滝に我が国初の魚道が設置されたい。ただし、構造上の欠陥があり、遡上率は低いと日暮¹²⁾は述べている。本格的に設置された我が国初の魚道は 1888 年に鬼怒川に設置されたものであろう¹²⁾。1894 年には奥入瀬川に、1905 年には櫛田川に、1907 年には淀川に魚道が設置された¹³⁻¹⁴⁾。また、1912 年には瀬田川にウナギ専用の魚道が設置された¹⁵⁾。1919 年には矢作川の旧明治頭首工にアユの遡上を目的とした魚道が設置された¹⁶⁾。魚道に関する我が国の最古の論文は恐らく 1912 年の日暮¹²⁾のものであり、その後 1915 年に魚道に関する情報が日暮¹⁷⁻²⁰⁾によってまとめられた。1928 年には天竜川に²¹⁾、1929 年には阿賀野川に本格的な魚道が設置されるようになった²²⁾。戦争によってしばらく魚道の研究は下火になるが、1951 年に Van Cleve 博士が我が国の魚道を観察し、当時の占領軍総司令部に報告を送ってからは再び魚道に注目が集まるようになった²³⁻²⁴⁾。詳細な我が国の魚道史については、中村の著書²⁵⁻²⁶⁾や「最新魚道

の設計」²⁷⁾を参照されたい。なお、Clay³⁾の「Design of Fishways and Other Fish Facilities」において、我が国の魚道史についての記述はたったの 9 行しかない。

3 魚道の種類と設計基準

3.1 魚道の種類

魚道の分類方法は研究者によって若干異なるが、2005 年に国土交通省河川局が発表した分類方法²⁸⁾によると、表 1 のようになる。また、これらの魚道のいくつかの模式図を図 1 に示す。様々な形式の魚道が開発されているが、我が国の既設魚道の 9 割以上は階段式魚道である²⁶⁾。

3.2 魚道の設計基準

魚道の設計基準を示したものとして、2005 年の「魚ののぼりやすい川づくりの手引き」²⁸⁾、2002 年の「よりよい設計のために「頭首工の魚道」設計指針」²⁹⁾、1998 年の「最新魚道の設計」²⁷⁾、1994 年の「農業水利施設の魚道整備の手引き」³⁰⁾などが挙げられる。また、事例集を集めた「技術者のための魚道ガイドライン」³¹⁾が 2011 年に刊行された。

上記のマニュアルはマクロな視点であるが、魚の挙動等に着目したミクロな視点で問題提起しているものとして、2003 年の「魚道見聞録」³²⁾、1995 年の「魚道のはなし」²⁶⁾などが挙げられる。

最新の魚道設計指針は 2005 年の「魚ののぼりやすい川づくりの手引き」²⁸⁾であるが、定量的に不明な点が多い。例えば、魚道の幅員については「さほど大きな幅員は必要としない」とあり、さらに、「階段式魚道では、(中略)幅員に対して概ね 1.5~2.0 倍程度のプール長が適切」としており、不明な幅員からプール長を決定しなければならない。また、水深に

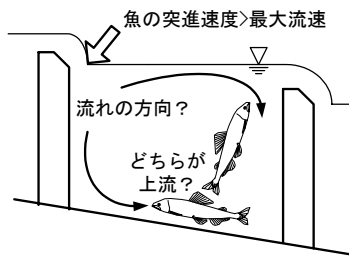


図2 階段式魚道での魚の遡上に必要な条件

については「最浅部の水深は魚の体高の2倍以上」と記しているものの推奨値が示されていない。また、推奨値が示されている場合でも根拠が示されていないものもある。以上のように魚道の設計指針は現時点では未完である。

3.3 階段式魚道における遡上に必要な条件

我が国の既設魚道の9割以上を占める階段式魚道に着目する²⁶⁾。階段式魚道の模式図を図2に示す。さて、遡上に必要な条件を考えてみよう。階段式魚道を魚が遡上する状況を人間に当てはめると、降りてくるエスカレーターを逆走するようなものである。ただし、登り始める前にエスカレーターの長さはわからない。エスカレーターの降下速度が人の最高駆け上がり速度よりも速い場合は逆走する気にならない。降下速度が最高駆け上がり速度よりも遅くても、距離が長いと疲労が蓄積して途中でギブアップしてしまう。また、エスカレーターの挙動は単純であるが、実際の魚道内の流れは複雑である。こうした思考実験を行うと、階段式魚道において遡上に必要な条件を極めて大雑把に述べれば、①魚が上流方向を認識できること、②魚道内最大流速よりも魚の遊泳速度が大きいこと、③魚道内に魚が休憩できる領域が存在することである。①は魚道内における水理量の把握の必要性を意味し、②は魚の遊泳特性の把握の必要性を意味する。②に関しては5章および6章で、①、③に関しては7章で解説する。

4 魚を用いた実験の失敗談

著者は学生時代から2002年までは乱流の研究を行っていた³³⁻³⁵⁾。魚道や魚の挙動の研究を始めたのは2003年からである。これまでの失敗談を交えて、魚の捕り方、魚の飼育方法のノウハウを記載する。

4.1 魚の捕り方

今までアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)、ギンブナ(*Carassius langsdorfi*)、オイカワ(*Zacco platypus*)、

カワムツ(*Nipponocypris temminckii*)、ムギツク(*Pungtungia herzi*)などを実験対象としてきた。養殖魚であるアユやコイは漁協や養殖業者に頼むと比較的安価に購入できる。一方、オイカワ、カワムツ、ムギツクなどは、ペットショップで販売されているが、大量には販売されていない。基本的に養殖されていないので、仮にペットショップに大量発注を掛けると、その都度、専門の業者に捕獲を委託するため、安価な購入は困難である。そのため、当方で手配せざるを得ない。

河川で魚を捕獲する方法として、電気ショッカー³⁶⁾、投網³⁷⁾、タモ³⁷⁾、セルビン³⁸⁾、などが挙げられる。電気ショッカーは非常に高価なため、貧乏研究者の著者には購入能力が無いこと、および学生が使用することを想定すると若干の危険性を感じるので初めから検討しなかった。

4.1.1 投網

投網を購入し、早速投げ方を練習した。初めは投網が広がらず苦勞をした。しばらく練習するとある程度開くようになった。早速、大学の近くの川に魚を採りに行った。魚が多く生息する下流域は直径数ミリから数十センチの混合砂礫河床となっている。そのため、投網が底面に達しても巨石間に隙間ができ、多くの魚が逃げてしまう。歩留まりが悪いながらも何度も投網をして何とか魚を持ち帰った。しかし、数日でほとんどが死亡した。死んだ魚をよく見るとあちこちの鱗が脱落していた。どうやら、投網を引き上げる際に魚が暴れるため、鱗が脱落したようだった。砂礫河川では投網は向かないし、砂河川でも鱗が脱落するために、適していないと思う。なお、漁業権のある河川では漁協の許可が必要である。

4.1.2 タモ

タモで魚を捕る場合、流水中を人が歩くので水が濁る。そのため、下流から上流に移動する。また、主として水際に草があるところを選ぶ。なぜなら、水中の草の茎の間に魚が休憩しているからである。タモを底面に擦りながら静かに下流側から水中内の草に近づける。ある程度近づいたところで、少し上流側から勢いよく片足で何度も踏みながらタモの方へ足を移動させる。すると驚いた魚は下流側へ逃げていき、タモの中に入る。この時にタモを上げるタイミングが重要となる。早すぎると魚が入らないし、遅すぎると一度タモに入った魚が再び逃げてしまう。これには経験が必要である。ただし、この方法では大型のオイカワやカワムツの捕獲は難しい。

表2 既往の突進速度の研究

魚種	B_L (cm)	B_S/B_L	流速(cm/s)	文献番号
アユ	14.4	12.4	-	45)
	10	20	-	46)
	10	17	-	29)
	8.5	11.5	-	30)
	8	16.3	-	29)
	7.5	10.4	-	30)
	7	15.7	-	47)
	6.6	18.2	-	45)
	6.5	9.5	-	30)
	6	18.3	-	29)
	5.5	4.4	-	30)
	4.5	13.3	-	47)
	-	15	-	48)
オイカワ	-	15.3	-	49)
	9	11.1	-	46)
ウグイ	8.1	27	91~195	50)
	-	10	-	48)
カワムツ	10.7	19.5	91~227	51)
	8.5	11.8	-	46)
	-	10	-	48)
ギンブナ	9	2.2	-	46)
	0.8	20.6	-	28)
	-	10	-	48)
ドジョウ	17.5	5.1	-	46)
	12.5	6	-	46)
	7.1	18.5	-	28)

大型のオイカワやカワムツを捕獲するには上流と下流からタモを持った人で挟み撃ちにする方法がある。高速で接近してくる魚を観察し、タモを通過する時の横断位置を瞬時に予測し、それに合わせてタモを移動させる必要がある。この移動速度が遅いと魚は簡単にタモを避けて通過する。そのため、魚がタモに接近するぎりぎりのタイミングで素早く横断方向にタモを移動させる必要がある。また、魚が入った瞬間に素早くタモを上げなければ、魚はタモから脱出する。これらの技術にも経験が必要で、ちなみに、学生と魚を捕りに行くと学生の捕獲量は私の1/10~1/3程度にしかならない。

タモは確実に魚を捕獲できる方法であるものの、投網ほどではないが、捕獲時に鱗が脱落することがある。フナやコイのような少々鱗が脱落しても死亡しにくい魚には適しているが、オイカワやカワムツには若干適していないと考えている。

4.1.3セルビン

セルビンとは透明な円筒形の形状で、一部に出入口がある漁具である。一度魚が進入すると「返し」があるため魚が出にくい。中に入れた餌の臭いで集魚させるために、淵の比較的上流側に設置すると良

い。この時、セルビン内に空気が入っているとあまり集魚しない。また、セルビンの両側から下流方向へ「ハ」の字になるように巨石を配置すると集魚効果が高まる。5分で15尾程度なら容易に確保可能である。また、鱗が脱落することもほとんど無く、オイカワやカワムツの捕獲には最適と考えている。

4.2 魚の飼育方法

魚は綺麗な水が適していると早合点し、カルキ抜きした水道水を新品の水槽に入れて飼育を始めた。すると、毎日数尾ずつ死んでいった。黄金のザリガニを開発したことで有名なペットショップに相談に行くと、花田一社長が丁寧に魚の飼育方法を教えて下さった。結論から言えば、「魚を飼う=バクテリアを飼う」であった。バクテリアは糞や食べ残しから発生するアンモニア毒素を、毒性の低い亜硝酸や硝酸に分解する。そのため、100%水道水は禁物で、砂利やフィルターにバクテリアが生息していることが必要となる。水替えやフィルターを洗浄する際にも適度にバクテリアを残すことに留意が必要である。

5 魚の遊泳特性

5.1 魚の突進速度

5.1.1背景

「魚がのぼりやすい川づくりの手引き」²⁸⁾には、「魚道内の最大流速は、対象とする魚種のうち最も遊泳力の小さい魚の突進速度以下になるように設定することを基本とする」と記されている。突進速度とは1秒~数秒間しか維持できない魚の最大遊泳速度であり、長時間遊泳可能な速度は維持速度と呼ばれる³⁹⁾。維持速度は水温の影響を受けるが、突進速度はその影響を受けない⁴⁰⁻⁴²⁾。Lindsey⁴³⁾は遊泳の際に用いる尾ひれおよび躯幹の大きさに基づき魚の遊泳型を16種類に分類した。Katopodis⁴⁴⁾は遊泳型および体長が同一であれば、魚種が異なっても遊泳能力が等しいと述べた。しかし、塚本ら⁴⁵⁾が得たアユおよびニジマスのデータを観察すると、遊泳型および体長が同一でも魚種によって遊泳能力が異なることが示唆される。

表2に我が国の河川に生息する魚(外来種を除く)において、突進速度が求められている魚の体長 B_L (cm)、突進速度 B_S (cm/s)を体長 B_L (cm)で除した値 B_S/B_L (魚体長倍速度)およびデータが得られた際の流速(cm/s)を示す。同一魚種で同一体長であっても文献によって値が異なる。小山⁴⁸⁾は流速を変化さ

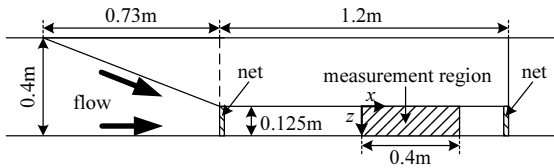


図3 魚の突進速度を求める実験装置の平面図

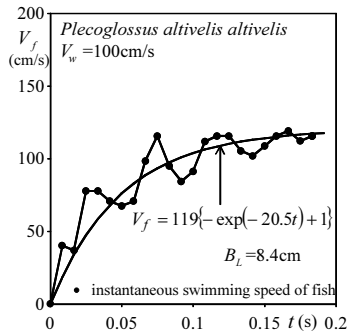


図4 アユの対地速度の時間変化

せてアユの遊泳速度を測定した結果、遊泳速度は流速 40cm/s および 80~100cm/s 付近でピークを示し、それ以外の流速では減少することを示した。また、泉ら⁵¹⁻⁵⁵⁾や藤原ら⁵⁶⁾のデータからも、魚の突進速度が流速に依存すると判断される。したがって、魚の突進速度を解明するには、魚種、体長、流速を系統的に変化させる必要がある。

5.1.2 実験装置および条件

図3に示すように、全長 4.2m、幅 0.4m、高さ 0.3m の水路の上流側から 1.5m 流下した断面より、長さ 0.73m の縮流部を設置し、水路幅を 0.4m から 0.125m に直線的に減少させた。縮流部の下流域に長さ 1.2m、幅 0.125m の矩形断面区間を設けた。縮流部を設置した理由は、流速および乱れ強度を断面内で一様にして、断面内のどの領域を遊泳しても統一の条件にするためである⁵⁷⁻⁵⁹⁾。

水深 h が 0.087m の状態で断面平均流速 V_w を 4~5 通り変化させた。魚が全力で遊泳しても下流に流され始める流速を最大流速とした。

5.1.3 実験結果および考察

図4にアユの対地速度 V_f の時間変化の例を示す。巨視的に見ると速度が急激に上昇し、その後、次第に速度変化が緩慢になり、ついには定常状態に達している。Blaxter³⁹⁾は 1 秒~数秒間維持できる最大遊泳速度を突進速度と定義したが、本実験結果には定常状態を 1 秒以上持続している尾数が少なかった。しかし、定常状態を 1 秒以上持続している魚と 1 秒未満しか持続していない同流速同体長の魚の最大遊泳速度はほぼ同値であったため、両者を突進速度と

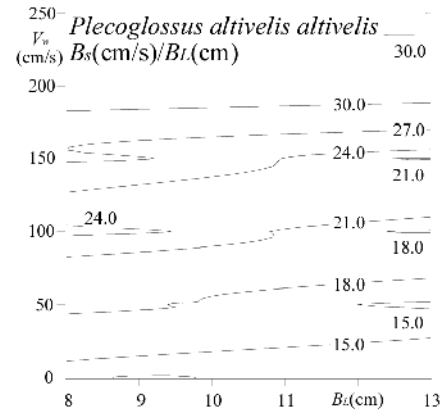


図5 アユの突進速度 B_s/B_L の等値線図

して扱った。

全ての魚種で体長が増加すると対地速度は増加し、流速が増加すると対地速度は減少する傾向が見られた。そこで、対地速度 V_f の変化を次式で表現する。

$$V_f = \beta \{- \exp(-\alpha t) + 1\} \tag{1}$$

ここに、対地速度 V_f の単位は cm/s とし、 t は遊泳開始からの時間で単位は s とし、 α 、 β は係数である。実測された対地速度 V_f に式(1)が最もフィットするように係数 α 、 β を算出した。式(1)において時間 t を無限大にすれば最大対地速度 $V_{f\infty}$ に漸近する。これは、突進速度 B_s から断面平均流速 U_m を減じた値に等しい。つまり突進速度 B_s は最大対地速度 $V_{f\infty}$ と断面平均流速 V_w から求められる。

$$B_s = V_{f\infty} + V_w \tag{2}$$

図5にアユに関する体長 B_L と B_s/B_L との関係を示す。体長 B_L の増加に伴い B_s/B_L 値が若干低下する。また、同一の体長 B_L においては流速の増加に伴い B_s/B_L の値が増加しており、興味深い発見である。オイカワ、カワムツおよびギンブナに関するグラフは文献⁶⁰⁻⁶²⁾を参照されたい。以上より、上記の4魚種については、体長および流速に応じた、突進速度が算出可能となった。

6 単純な流れにおける魚の挙動の研究

魚の行動把握の研究は主として水産の分野で開始された。そのため、静止流体あるいは比較的単純な流れにおける挙動が対象となっている。研究は主に、(1)魚群としての挙動、(2)魚群内における相対的な魚の位置および(3)魚群に属していない魚の挙動の3つに大別される。

井上⁶³⁾はスキヤニングソナーを用いて、サケ、マ

イワシ、ゴマサバ、ウマズラハギ、トビウオの魚群速度が 0.3m/s 程度であることを解明した。金ら⁶⁴は魚群の直進時間の最頻値がマアジは 1 分、ゴマサバおよびカタクチイワシは 2 分であることを解明した。佐々木ら⁶⁵はフナ、カワムツおよびカマツカの河川内の挙動をテレメトリー発信器を用いて解明した。傳田ら⁶⁶はテレメトリー法を拡張した ATS を開発し、ゲンゴロウブナの挙動追跡を行った。Klimley *et al.*⁶⁷は 1995 年から 1997 年のカリフォルニア湾におけるサメの位置を 2~38 時間ごとに記録した。

魚群内における相対的な魚の位置を示す研究として長谷川・添田⁶⁸の研究が挙げられる。彼らは魚群中における各個体の位置関係を示すパラメータとして、個体間距離、頭位交角、分布角および密度の 4 つを挙げ、パラメータの定量評価を行った。その結果、平行性の高い個体同士は平行性を維持することを解明した。これは、Partridge & Pitcher⁶⁹の結果と一致する。Sakamoto *et al.*⁷⁰は水槽内を遊泳する 2 尾のタモロコが接近あるいは離縁する最大周期が約 100s であることを解明した。一方、三宮グループ⁷¹⁻⁷⁴は、前進推進力、個体間引力、成群力、壁からの反発力、方向場の力および外乱の 6 つによって魚群が形成されるという物理モデルを提案した。

魚群に属していない魚の挙動の研究は少ない。そもそも魚群の定義が近年まで確定していなかった。兼廣ら⁷⁵はタイリクバラタナゴの尾数を 1, 2, 3, 5 と変化させて静止流体中の遊泳挙動を観察した結果、1 および 2 尾の場合は各個体の遊泳軌跡および個体間距離が不規則に変化するのに対し、3 および 5 尾ではそれらが安定することを示した。Partridge⁷⁶はミノウが 2 尾で遊泳する場合は特定の 1 尾が主としてリーダーとなって遊泳するのにに対し、3 尾以上では互いの距離を保つことで群れが自然に形成され、リーダーが存在しないことを発見した。そのため、「各個体が遊泳速度と遊泳方向を群れの他の個体全と一致させようと絶えず調整している 3 尾以上のグループ」が魚群という定義が定着している^{67,73,76}。

2 尾以下の魚の行動を検討した研究は、実験よりむしろ数値計算の分野が活発である。関谷ら⁷⁷および高水ら⁷⁸は走流性、壁面選好性および忌避性を組み込んだランダムウォークモデルを提案した。大橋・清水⁷⁹は魚の抗力、推進力および加速度で構成される運動方程式を用いて単一で行動する魚のシミュレーションを行った。二瓶ら⁸⁰は 1 あるいは 2 尾で遊泳するタイリクバラタナゴを撮影し、そのデータに基づき魚周囲の流体計算を行った。橋本ら⁸¹は Boid モデル⁸²を用いて魚群の挙動を計算した。藤井ら⁸³は血合筋と普通筋の特性を組み込んだ魚の遊泳シミュレーションに成功した。

鬼束ら⁸⁴⁻⁸⁹は体長倍流速がゼロから 8 までの流れで、アユの尾数を 1, 2, 3 尾と変化させて遊泳挙動を観察した。その結果、アユの挙動は直線と屈折で構成されることを発見し、直線部の長さや屈折角度を解析し、側壁の影響がない状態におけるアユの挙動が解明されつつある。

7 階段式魚道の研究動向

7.1 背景

図 1 に示した階段式魚道は、隔壁、切り欠き、潜孔などで構成されている。これらの形状や配置などの最適値の把握が必要であるが、3.2 で示したとおり必ずしも把握されていない、あるいは根拠が不明である。これまで既往の研究および著者の研究を交えて以下では解説を行う。

7.2 プランジングフローとストリーミングフロー

階段式魚道では図 2 のように、流れの回転が時計回りのストリーミングフローと反時計回りのプランジングフローに大別される⁹⁰⁻⁹²。Rajaratnam *et al.*⁹³は両者の発生条件式を提案しているが、越流水深をプール長で代用するという仮定には疑問が生じる。鬼束ら⁹⁴⁻⁹⁶はベルヌーイの定理と自由落下理論を用いて、流れの形態を決定するパラメータが、フルード数 Fr 、相対水深 $h/\Delta y$ 、アスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta y)$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ の 4 つであることを解明した。ここに、 h は水深、 Δy はプール間落差、 L_x はプール長、 L_y はプール高、 Δh は越流水深である。流れの形態に及ぼす各パラメータの強度を調べた結果、相対水深 $h/\Delta y$ の影響が小さいことが判明した。その結果次式が提案された⁹⁶。

・プランジングフローの発生条件

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} \leq (0.87Fr + 0.19) \frac{L_x}{L_y + \Delta h} - 1.0Fr + 0.37 \quad (3.a)$$

・ストリーミングフローの発生条件

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} \geq (0.87Fr + 0.19) \frac{L_x}{L_y + \Delta h} - 1.0Fr + 0.37 \quad (3.b)$$

近年、階段式魚道内の流れの数値予測が可能となった⁹⁷⁻¹⁰⁰。式(3)は 3 つのパラメータを含むが、2 つのパラメータで流れの形態を予測する古い式⁹⁴でもある程度の予測精度を有する¹⁰⁰⁻¹⁰¹。

高嶋・中村¹⁰²はプランジングフローにおけるアユ

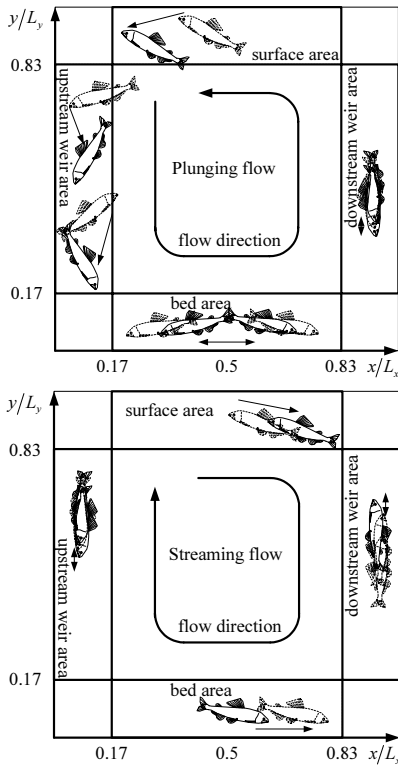


図6 プランジングフローおよびストリーミングフローにおけるアユの遊泳挙動

の遡上軌跡を図示した。林田ら¹⁰³⁻¹⁰⁴⁾はプランジングフローとストリーミングフローにおけるウグイの遡上経路を分類した。浪平ら¹⁰⁵⁻¹⁰⁶⁾はプランジングフローの場合はウグイが底面付近で上流向きに遊泳することが多いが、ストリーミングフローの場合は上流向きだけでなく、下流向きに遊泳する個体がいることを指摘した。鬼束ら¹⁰⁷⁻¹⁰⁸⁾は両者におけるアユの挙動を観察し、図6のように分類した。既往の研究では、アユは流れに向かって泳ぐ「正の向流性」によって遡上すると言われていたが、利用する空間によって「正の向流性」と「負の向流性」を使い分けていることが判明した。

7.3 魚道の色

階段式魚道はコンクリートで施工されることが多く、表面に塗装が施されることはほとんどない。一般に魚は透過光と反射光に対する反応が異なる¹⁰⁹⁾。魚道内を塗装して反射光を変更することで、魚の遡上および降下欲が沸くのであれば、既設魚道の改良を極めて安価に行うことができる。

小山¹¹⁰⁾は、稚アユが赤色には高い反応を示し、黄緑色にはほとんど反応しないことを示した。篠邊¹¹¹⁾は波長が600~620nmの色がアユの忌避色と述べ、これに基づき、落ちアユの迷入防止のために取水口を赤色で塗装することがあるが¹¹¹⁻¹¹²⁾、効果には疑

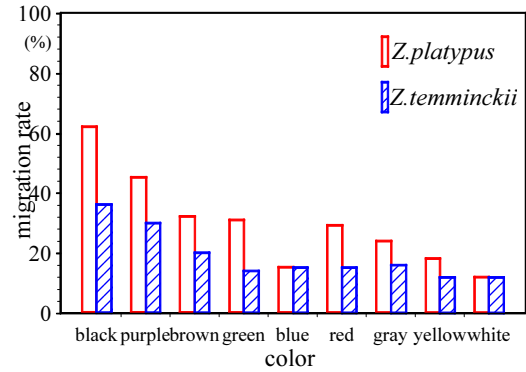


図7 魚道壁面色を変化させた時の遡上率

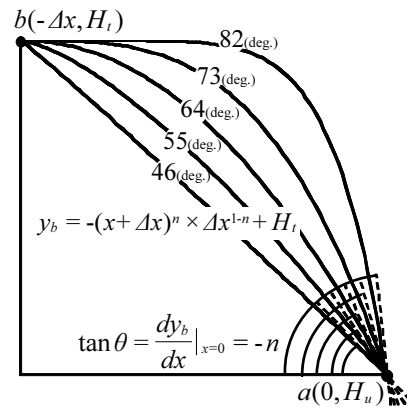


図8 R型隔壁形状の定式化

間がある¹¹²⁾。近年、下村ら¹¹³⁾および関谷ら⁷⁷⁾は、白色、赤色およびレンズ模様のテープを水路中に設置すると、90%以上のアユがこれらのテープを忌避することを解明した。また、関谷ら⁷⁷⁾は白色と黒色が隣接した底面をもつ水路では、アユは白色の領域を忌避することを解明した。鬼束ら¹¹⁴⁾は魚道の壁面を9色に変化させてオイカワおよびカワムツの遡上率を調査した。結果を図7に示す。マンセル表色系では色は色相、明度および彩度で表現される¹¹⁵⁾。図7において横軸の左から右に向かって明度が高くなっている。オイカワおよびカワムツ共に、明度の低下に伴い遡上率が増加している。したがって、魚道の壁面は明度が低い色が適している。

7.4 隔壁形状

Wada¹¹⁶⁾は階段式魚道の切欠き形状を、直角型、傾斜型、突出型、丸型に変化させてアユの遡上実験を行った結果、傾斜型および丸型形状の遡上率が高いことを示した。そのため、各種魚道マニュアル²⁷⁻²⁸⁾には、傾斜型および丸型形状(R型)の隔壁形状が推奨されている。ところが具体的に形状を再現できる数値や式が示されていない。そこで、鬼束ら¹¹⁷⁾は図8に示すように、R型の切り欠き下端の点 $a(0, H_u)$ と天端の点 $b(-\Delta x, H_t)$ との間の切り欠き高さ y_b を表記可能な次式を提案した。

$$y_b = -(x + \Delta x)^n \times \Delta x^{1-n} + H, \quad (4.a)$$

$$\tan \theta = \left. \frac{dy_b}{dx} \right|_{x=0} = -n \quad (4.b)$$

ここに、 Δx は隔壁厚、 θ はa点における切り欠き角度である。流量を6通り、切り欠き角度を46~82°の間で5通り変化させてアユの遡上実験を行い、流量に関わらず約55~62°がアユの遡上に最適な角度であることを解明した。

7.5 潜孔の位置

図1に示すように階段式魚道の潜孔は、慣例的に上流側プールの底面に接するように交互に配置される。潜孔の有効性がないとの和田¹¹⁸⁾の指摘があったが、高嶋・中村¹⁰²⁾、高崎ら¹¹⁹⁾によってその有効性が証明された。一方、階段式ではないが、アイスハーバー型魚道においてウグイが潜孔内を遡上することを泉ら¹²⁰⁻¹²³⁾は指摘した。そこで、最適な潜孔の位置を求めるため、潜孔を底面に接する状態で交互および片側に設置してアユの遡上実験を行った¹²⁴⁾。その結果、片側切り欠きの方が遡上率が高いことが判明した。続いて、潜孔の設置位置を横断および鉛直方向に変化させてオイカワの遡上実験を行い、水路中央の底面が適切な配置であることを解明した¹²⁵⁾。また、近年連続遡上率に関する検討も始めた¹²⁶⁾。

7.6 その他の研究例

魚道の解説といってもどうしても著者中心の情報ばかりになってしまう。ここでは、7.5までに触れられなかった話題を提示しよう。

魚道を総説あるいは評価した研究は多数存在する¹²⁷⁻¹³⁷⁾。篠邊^{13-14,138-139)}は既設魚道の幾何学形状等を綿密に調査し、統計的な傾向を示している。我が国で最も注目されている魚道は恐らく長良川河口堰に設置された魚道である。これらの魚道の効果を研究した例も多数存在する^{47,110,140-144)}。

安田ら¹⁴⁵⁻¹⁴⁶⁾は水際の傾斜を緩やかにすることで、魚だけでなくエビやカニの遡上率が向上することを解明した。底面に粗石を設置することによる遡上率への影響を検討した例もある¹⁴⁷⁻¹⁴⁹⁾。また、魚の体長と乱流スケールとを比較して、遡上率との関係を検討した例もある¹⁵⁰⁾。

当然、階段式だけでなく、バーチカルスロット型¹⁵¹⁻¹⁵³⁾、デニール型、ステープパス型¹⁵⁴⁻¹⁵⁵⁾、フィッシュポンプ¹⁵⁶⁻¹⁵⁷⁾などの研究も存在する。近年では、表1および図1に紹介したタイプだけでなく、

土嚢を使った魚道の作製なども試みられている¹⁵⁸⁻¹⁵⁹⁾。

8 おわりに

本報告では魚の挙動や遡上に必要な魚道の条件について述べた。紙面の関係で薄く広い記述となった。詳細については、引用文献を参照されたい。また、著者の失敗談も恥ずかしながら本報告に記載した。これから魚を用いた実験を試みる若手研究者の方の役に立てば幸いである。

謝辞：本報告を作製する上で協力頂いた本学学生の松田孝一郎、山尾匡人、臼杵幸平、藏本更織、白岡敏、野口翔平、福田拓也、三原和也の諸氏に謝意を表す。

引用文献

- 1) 水野信彦・後藤晃：日本の淡水魚類，(東海大学出版会，1999) 4.
- 2) 阿部彦七ら，新砂防，45(4) (1992) 33-35.
- 3) Clay, C. H.: *Design of Fishways and Other Fish Facilities*, (LEWIS PUB., 1995), 4.
- 4) Pryce-Tannat, T. E.: *Fish passes*, (Edward Arnold & Co., 1938).
- 5) Denil, G.: *Les échelles a poissons et leur application aux barrages de Meuse et d'Ourthe*, (Annales des Travaux Publics de Belgique, 1909).
- 6) Mcleod, A. M. and Nemenyi, P.: *An investigation of fishways*, Univ. Iowa, Stud. Eng. Bull 24 (1939-1940), 63.
- 7) Nemenyi, P.: *An Annotated Bibliography of Fishways*, Univ. Iowa, Stud. Eng. Bull., 23 (1941) 66.
- 8) U.S. Fish and Wildlife Service: *Review Report on the Columbia River and Tributaries*, App. P, Fish & Wildlife U.S. Army Corps of Engineers (1948).
- 9) Schoning, R. N. and Johnson, D. R., *Fish Comm. Oregon, Contrib.* 23 (1956) 16.
- 10) 岩村勉，農業土木学会誌，61(5) (1993) 423-428.
- 11) 小山治行：魚道とその降下について，内水面漁業資料，水産庁漁政部，42 (1954) 1-38.
- 12) 日暮忠，土木学会誌，4(1) (1918) 201-224.
- 13) 篠邊三郎，農業土木学会誌，57(12) (1989) 1183-1187.
- 14) 篠邊三郎，ダム技術，39 (1990) 43-56.
- 15) 小山長雄：魚道の診断と設計，にほんのかわ，28 (1984) 34-37.
- 16) 岩村勉，国際魚道会議ぎふ'90 (1990) 301-303.

- 17) 日暮忠：魚梯の話，水産会報 396 (1915) 26-27.
- 18) 日暮忠：魚梯の話，水産会報 397 (1915) 30-32.
- 19) 日暮忠：魚梯の話，水産会報 398 (1915) 43-44.
- 20) 日暮忠：魚梯の話，水産会報 399 (1915) 55-56.
- 21) 農業土木学会：本邦灌漑排水工事図譜 (1933).
- 22) 加藤清一：魚道及び魚梯子，水産増養殖叢，17 (日本水産資源保護協会，1968).
- 23) 大島泰雄：つくる漁業，(水産庁資源協会農林統計協会，1988).
- 24) Van Cleve, R.: 日本の内水面水産と利水計画，(水産庁，1951) 1-20
- 25) 中村俊六，国際魚道会議ぎふ'90 (1990) 295-300.
- 26) 中村俊六：魚道のはなし，(山海堂，1995).
- 27) ダム水源地環境整備センター：最新魚道の設計，(信山社サイテック，1998).
- 28) 国土交通省河川局：魚ののぼりやすい川づくりの手引き(2005).
- 29) 農林水産省農村振興局整備部設計課：よりより設計のために「頭首工の魚道」設計指針，(農業土木学会，2002).
- 30) 農業水利施設魚道整備検討委員会：農業水利施設の魚道整備の手引き，(水産庁振興部振興課，1994).
- 31) 安田陽一：技術者のための魚道ガイドライン，(北海道魚道研究会，2011).
- 32) 和田吉弘：魚道見聞録，(山海堂，2003).
- 33) Nezu, I. and Onitsuka, K., *J. Hydr. Res.*, IAHR, 39(6) (2001) 629-642.
- 34) Nezu, I. and Onitsuka, K., *J. Visualization*, The Visualization Soc. of Japan, 5(1) (2002) 77-84.
- 35) Onitsuka, K., Akiyama, J. and Matsuoka, S., *J. Hydr. Res.*, IAHR, 47(1) (2009) 58-65.
- 36) 小出水規行ら，河川技術に関する論文集，10 (2004) 339-344.
- 37) 庄司崇ら，河川技術に関する論文集，10 (2004) 345-350.
- 38) 竹村武士ら，河川技術に関する論文集，10 (2004) 351-356.
- 39) Blaxter, J.H.S.: Swimming speeds of fish, *FAO Conf. Fish Behv. in Relation to Fishing Tech. and Tactics*, (1967) 1-32.
- 40) Brett, J.R., *Trans. R. Soc. Can.*, 4(1) (1963) 441-457.
- 41) Brett, J.R., *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 24 (1967) 1731-1741.
- 42) Blaxter, J.H.S. and Dickson, W., *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 24 (1959) 472-479.
- 43) Lindsey, C.C., *Fish Physiology*, 7 (1978) 1-100.
- 44) Katopodis, C., *Proc. of the Int. Symp. on Fishways '90 in Gifu*, (1990) 19-28.
- 45) 塚本勝巳ら，日本水産学会誌，41(7) (1975) 733-738.
- 46) 石田力三：アユその生態と釣り—アユのすべてがわかる本，(つり人社，1988).
- 47) 小山長雄：木曾三川河口資源調査団 (1965).
- 48) 小山長雄：アユの生態，(中公新書，1978).
- 49) 九州地方建設局河川部：魚道設計参考資料(案)(魚道設計の考え方) (1997).
- 50) 関谷明ら，水工学論文集，46 (2002) 1133-1138.
- 51) 泉完ら，水工学論文集，51 (2007) 1285-1290.
- 52) 泉完ら，農業土木学会論文集，244 (2006) 171-178.
- 53) 泉完ら，農業農村工学会論文集，76(4) (2008) 407-408.
- 54) 泉完ら，農業農村工学会論文集，77(3) (2009) 305-314.
- 55) 泉完ら，農業農村工学会論文集，77(4) (2009) 431-437.
- 56) 藤原公一ら，日本水産学会誌，76(6) (2010) 1025-1034.
- 57) Lupandin, A.I., *Biol. Bulletin*, 32(5) (2005) 461-166.
- 58) 今本博健ら，京大防災研年報，20(B-2) (1977) 309-329.
- 59) 鬼束幸樹ら，水工学論文集，40 (1996) 767-772.
- 60) 鬼束幸樹ら，水工学論文集，51 (2007) 1267-1272.
- 61) 鬼束幸樹ら，水工学論文集，52 (2008) 1183-1188.
- 62) 鬼束幸樹ら，土木学会論文集 B, 65(4) (2009) 296-307.
- 63) 井上喜洋，日本水産学会誌，53(8) (1987) 1307-1312.
- 64) 金文官ら，日本水産学会誌，59(3) (1993) 473-179.
- 65) 佐々木丞ら，環境工学研究論文集，38 (2001) 13-19.
- 66) 傳田正利ら，河川技術論文集，11 (2005) 459-464.
- 67) Klimley, A.P. et al., *Envir. Biol. Fishes*, 63 (2002) 117-135.
- 68) 長谷川英一ら，51(12) (1985) 1921-1926.
- 69) Partridge, B.L. and Pitcher, T.J., *J. Comparative Physiology*, 35 (1980) 315-325.
- 70) Sakamoto, W., Aoki, I. and Kuroki, T., *Bul. Jap. Soc. Scientific Fisheries*, 41(9) (1975) 945-952.
- 71) 三宮信夫ら，計測と制御，19(7) (1980) 704-707.
- 72) Sannomiya, N. and Matsuda, K., *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 14 (1984) 157-162.
- 73) 三宮信夫ら，システム制御情報学会論文集，2(1) (1989) 23-31.
- 74) 三宮信夫ら，計測自動制御学会論文集，35(11) (1999) 1370-1376.
- 75) 兼廣春之ら，日本水産学会誌，51(2) (1985) 1977-1982.
- 76) Partridge, B.L., *Scientific American*, 246 (1982) 90-99.
- 77) 関谷明ら，土木学会論文集，782(70) (2005) 81-91.
- 78) 高木克哉ら，水工学論文集，51 (2007) 1273-1278.
- 79) 大橋弘道，清水康行，水工学論文集，48 (2004) 1597-1602.
- 80) 二瓶泰雄ら，土木学会論文集，768(68) (2004) 55-66.
- 81) 橋本麻未ら，水工学論文集，49 (2005) 1477-1482.
- 82) Reynolds, C. W., *Comp. Graphics*, 21(4) (1987) 25-34.
- 83) 藤井真一ら，水工学論文集，53 (2009) 1249-1254.
- 84) 鬼束幸樹ら，水工学論文集，52 (2008) 1195-1200.
- 85) 鬼束幸樹ら，水工学論文集，53 (2009) 1219-1224.
- 86) 鬼束幸樹ら，土木学会論文集 B, 65(45) (2009) 308-319.

- 87) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 54 (2010) 1309-1314.
- 88) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 55 (2011) S1441-S1446.
- 89) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 56 (2012) (掲載決定).
- 90) 高須修二ら, 水工学論文集, 38 (1994) 351-356.
- 91) 浪平篤ら, 水工学論文集, 51(2007) 1291-1296.
- 92) 浪平篤ら, 水工学論文集, 52 (2008) 1189-1194.
- 93) Rajaratnam, N. et al., *J. Hydr. Eng.*, 114 (1988) 939-944.
- 94) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 49 (2005) 817-822.
- 95) 鬼束幸樹ら, 応用力学論文集, 10 (2007) 639-704.
- 96) 鬼束幸樹ら, 環境工学研究論文集, 44 (2007) 49-58.
- 97) 前野詩朗ら, 水工学論文集, 45 (2001) 421-426.
- 98) 前野詩朗ら, 応用力学論文集, 12 (2009) 701-709.
- 99) 浪平篤ら, 応用力学論文集, 9 (2006) 833-841.
- 100) 浪平篤ら, 農業土木学会論文集, 74(6) (2006) 997-1004.
- 101) 浪平篤, 農村工学研究所報告 49 (2009) 1-48.
- 102) 高嶋信博ら, 第 28 回水理講演会論文集, (1984) 353-358.
- 103) 林田寿文ら, 環境システム研究論文集, 28 (2000) 333-338.
- 104) 林田寿文ら, 水工学論文集, 44 (2000) 1191-1196.
- 105) 浪平篤ら, 水工学論文集, 51 (2007) 1291-1296.
- 106) 浪平篤ら, 水工学論文集, 52 (2008) 1189-1194.
- 107) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 53 (2009) 1237-1242.
- 108) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 54 (2010) 1291-1296.
- 109) 玉井信行, 水野信彦, 中村俊六, 河川生態環境工学, (東京大学出版会, 1993).
- 110) 小山長雄: 魚道をめぐる諸問題 II, 解説篇, (木曾三川河口資源調査団, 1967).
- 111) 篠邊三郎: 魚道の水理と魚類の遡上に関する研究, 昭和 56~58 年度科学研究費補助金研究成果報告書, (弘前大学農学部, 1984).
- 112) 全国内水面漁業協同組合連合会: 魚の迷入の実態とその対策へのアプローチ, (1996).
- 113) 下村充ら, 河川技術論文集, 8 (2002) 337-342.
- 114) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 53 (2009) 1225-1230.
- 115) Munsell, A. H.: *A Color Notation*, (GEO. H. ELLIS Co., 1905).
- 116) Wada, Y., *Proc. of the Int. Symp. on Fishways '90 in Gifu*, (1990) 445-450.
- 117) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 54 (2010) 1297-1302.
- 118) 和田吉弘, 応用生態工学, 3(2) (2000) 225-230.
- 119) 高崎忠勝ら, 河川技術に関する論文集, 5 (1999) 165-170.
- 120) 泉完ら, 河川技術に関する論文集, 6 (2000) 131-136.
- 121) 泉完ら, 農業土木学会論文集, 215 (2001) 75-84.
- 122) 泉完ら, 農業土木学会論文集, 217 (2002) 55-63.
- 123) 泉完ら, 水工学論文集, 47 (2003) 763-768.
- 124) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 55 (2011) S1429-S1434.
- 125) 鬼束幸樹ら, 環境工学研究論文集, 47 (2010) 31-38.
- 126) 鬼束幸樹ら, 土木学会論文集 G, 67(7) (2011) III_147-III_153.
- 127) 森誠一, 応用生態工学, 3(2) (2000) 151-152.
- 128) 森川一郎, 応用生態工学, 3(2) (2000) 193-198.
- 129) 高橋剛一郎, 応用生態工学, 3(2) (2000) 199-208.
- 130) 水野信彦, 応用生態工学, 3(2) (2000) 209-218.
- 131) 中村俊六, 応用生態工学, 3(2) (2000) 219-224.
- 132) 森誠一, 応用生態工学, 3(2) (2000) 235-241.
- 133) 中村俊六, 砂防学会誌, 50(3) (1997) 52-57
- 134) 中村俊六, 水工学に関する夏季講習会, (1991) A-6-1-A6-24.
- 135) 阿部彦七ら, 新砂防, 45(4) (1992) 33-35.
- 136) 安田陽一, 日本水産学会誌, 73(1) (2007) 116-119.
- 137) 泉完, 農業土木学会誌, 68(4) (2000) 368-370.
- 138) 篠邊三郎, 農業土木学会誌 58(2) (1990) 153-158.
- 139) 篠邊三郎, 農業土木学会誌 61(5) (1993) 435-440.
- 140) 新村安雄ら, 応用生態工学, 3 (2000) 169-178.
- 141) 竹門康ら, 応用生態工学, 3 (2000) 158-168.
- 142) 住谷昌宏ら, 応用生態工学, 5(1) (2002) 23-40.
- 143) 笹浩司ら, 河川技術論文集, 11 (2005) 453-458.
- 144) 永矢貴之ら, 河川技術論文集, 15 (2009) 91-96.
- 145) 安田陽一ら, 河川技術に関する論文集, 6 (2000) 149-154.
- 146) 安田陽一ら, 河川技術論文集, 7 (2001) 221-226.
- 147) 八田哲郎ら, 河川技術に関する論文集, 5 (1999) 147-152.
- 148) 桜井力ら, 水工学論文集, 44 (2000) 1197-1202.
- 149) 宮園正敏ら, 砂防学会誌, 57(5) (2005) 15-24.
- 150) 鬼束幸樹ら, 水工学論文集, 48 (2004) 1579-1584.
- 151) Rajaratnam, M. et al., *J. Hydr. Eng.*, 112 (1986) 909-924.
- 152) Stuart, I. G. & Berghuis, A. P., *Fisheries Manag. and Ecol.*, 9 (2002) 111-122.
- 153) Alvarez-Vazquez L. J. et al., *J. Comput. And Applied Mech.*, 218 (2008) 395-403.
- 154) 辻本哲郎ら, 水工学論文集, 40 (1996) 731-736.
- 155) 和田清ら, 水工学論文集, 42 (1998) 499-504.
- 156) 小長谷庸夫, 日本水産学会誌 35(5) (1969) 430-433.
- 157) 川崎秀明ら, ダム工学 11(3) (2001) 219-229.
- 158) 武藤裕則ら, 河川技術論文集, 12 (2006) 377-380.
- 159) 竹村武士ら, 農業農村工学論文集, 264 (2009) 79-80.