

魚 道 の 設 計

Fishway Design Guidelines for Japanese Fishes

中 村 俊 六

Shunroku NAKAMURA

1. 設計手順

魚道の一般的な設計手順は以下のようである。

【設計計画資料の準備】

- 1) 魚道の設置を計画している水理構造物（堰やダムなど）の概要（取水量、放流量、取・放水時期、取水口位置、放流場所等も含む）を記したものを用意し、魚道の設置の目的が（a）遡上魚用、（b）降下魚用、（c）採捕用、あるいは（d）それらの兼用、のいずれであるかを明確にする。また、魚道流量（呼び水を含む）として可能な範囲も明確にしておく。
- 2) （a）対象地点を記した流域の地形図、（b）水理構造物（ダム等）周辺の平面図（地形図）、側面図などを用意する。

【対象魚の生態把握】

- 3) 魚道の対象魚（できたら想定される利用尾数も）をリストアップし、主要魚種について（a）遡上あるいは降下の目的（例えば産卵）を明確にし、（b）持続時間に対応した遊泳力のデータを準備する。
- 4) 想定される主要な利用魚種について、遡上（あるいは降下）の時期（およびその最盛期）をできるだけ詳細に把握しておく。その際水温との関係も明らかにしておくことが望ましい。
- 5) 想定される主要な利用魚種について、産卵場所、生育場所、および摂餌場所などをでき得る限り明らかにしておく。

【水文諸量の把握】

- 6) 対象地点の流況曲線を用意し、豊水量、平水量、低水量、渇水量などを明確にするとともに、設計対象流況を明確にしておく。また、浮流砂量や下流部の河床変動についてもでき得る限りの予測を行う。
- 7) 魚道の上流端および下流端での水位－流量曲線を用意し、上記の設計対象流況における上、下流の水理条件を明確にしておく。

【魚道の水理計算】

- 8) 魚道の設置位置を選定する。設置位置としては、特に魚道の入口及び出口の位置が適切であるように選定するが、この段階では設置可能な位置はすべて検討対象として抽出しておく。
- 9) 設置位置の条件から、設置可能な魚道形式を選定する。
- 10) 設置位置（魚道の上、下流端位置）から魚道勾配が与えられ、上記の6）および7）によって水位条件が与えられているので、これらを用いて各形式ごとに適当な寸法を想定した水理計算を行う。この結果、各形式ごとに可能な概略の規模が決定される。

【建設計画または概略設計】

- 11) 上記の2）（b）で用意された図面上に魚道を書き込み、呼び水が必要、あるいはその供給が

与えられた魚道流量の範囲で可能であればその供給水路（パイプラインも含む）も含めた概略設計を行う。

12) いくつかの概略設計を比較検討する。この比較においては、上記の3)～7)で与えられたすべての条件を勘案することになる。また、魚道周辺の流況（流速分布等）についての概略計算から集魚効果、迷入の可能性なども併せて検討する。また、場合によっては、模型実験や現地での（仮設）試行実験も行った方が良いこともある。

13) 最良と思われるものを選定する。

【効果の検証計画及び細部設計】

14) 魚道の効果を確認するための、遡上尾数の計数用プールや計数設備を設計に組み込み、モニタリングあるいは検証のための計画もできるだけ具体的に立案する。

15) 管理及びメンテナンスのための諸設備も設計に組み込み、管理及びメンテナンス計画を立案する。

16) 最後に、万一の場合を想定し、その対策を講じる。例えば、随所に角落しを設けることはこうした対策として有効である。

2. 我国における主要回遊魚の遊泳力

2・1 我国の主要回遊魚

我国の主要な回遊魚とその主要な分布域は表－1のようである。

表－1 我国の主要な回遊魚とその分布域（石田力三、中村中六 1991）

学名			主要分布域
(1) 遡河型：淡水で孵化、暫時淡水域、その後降海して成長、産卵のために遡上			
ヤツメウナギ科	カワヤツメ	<i>Entosphenus japonicus</i>	太平洋側：利根川以北 日本海側：島根県以東
カタクチイワシ科	(マ) エツ	<i>Coilia mystus</i>	九州西部有明海沿岸
キュウリウオ科	キュウリウオ	<i>Osmerus dentex</i>	北海道の太平洋岸
	シシャモ	<i>Spirinchus lanceolatus</i>	北海道の太平洋岸
	ワカサギ	<i>Hypomesus olidus</i>	太平洋側：千葉県以北 日本海側：島根県
シラウオ科	シラウオ	<i>Salangichthys microdon</i>	ほぼ全域
サケ科	カラフトマス	<i>Oncorhynchus gorboscha</i>	北海道
	サケ	<i>Oncorhynchus keta</i>	太平洋側：利根川以北 日本海側：島根県以東
	サクラマス	<i>Oncorhynchus masou</i>	太平洋側：神奈川県以北 日本海側：熊本県以北
	サツキマス	<i>Oncorhynchus rhodurus</i>	西日本の太平洋側
	アメマス	<i>Salvelinus leucomaenis</i>	太平洋側：北上川以北

トゲウオ科	イトヨ	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	日本海側：追良瀬川以北 ほぼ全域（主として北緯35度以北）
ハゼ科	シロウオ	<i>Leucopsarion petersi</i>	ほぼ全域

（２）降河型：海水で孵化、淡水域で成長、産卵のために降海

ウナギ科	ウナギ	<i>Anguilla japonica</i>	全域、特に太平洋側：松島湾以南 日本海側：能登半島以西
	オオウナギ	<i>Anguilla marmorata</i>	鹿児島県～房総半島

（３）両側回遊型：淡水で孵化、ただちに降海、川に遡上して成長、産卵

アユ科	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	ほぼ全域
ハゼ科	ヨシノボリ	<i>Rhinogobius brunneus</i>	ほぼ全域
	チチブ	<i>Tridentiger obscurus</i>	北海道網走湖以南の日本全土
カジカ科	ヤマノカミ	<i>Trachidermus faciatus</i>	有明海湾奥流入河川
	アユカケ	<i>Cottus kazika</i>	太平洋側：相模川以南 日本海側：雄物川以西

また、それらの産卵時期と産卵場所は表－２のようである。

表－２ 我国の主要な回遊魚の産卵時期と産卵場所（石田力三、中村中六 1991）

	成魚の体長	産卵期	産卵場所
（１）遡河型			
カワヤツメ	40～50cm	4月～6月	緩やかな流れの砂礫質河床
（マ）エツ	40～60cm	6月～8月	下流域
キュウリウオ	15～20cm	4月～5月	下流の砂礫底
シシャモ	13～16cm	10月	河口から数km上流の淡水域砂礫床
ワカサギ	6～15cm	1月～4月	水深の浅い砂礫底、水草
シラウオ	8～10cm	3月～5月	2～3m以浅の砂礫底、水草
カラフトマス	40～70cm	10月	上・中流の砂礫底
サケ	55～100cm	9月～12月	流れが緩やかな砂礫底、湧水場所
サクラマス	40～60cm	9月～10月	上・中流の淵から瀬への移行点
サツキマス	30～35cm	9月～11月	水深10～30cmの砂礫床
アメマス	30～60cm	10月～11月	上・中流の石礫底
イトヨ	8cm程度	4月～6月	流れの緩やかな水草近くの砂泥底
シロウオ	4～6cm	1月～5月	浅い流れの緩い礫河床の石の下面

(2) 降河型

ウナギ 40～90cm

南西太平洋の中層と推定される

オオウナギ 160cm程度

(3) 両側回遊型

アユ	15～30cm	10月～12月	中流域の砂礫底
ヨシノボリ	6～8cm	4月～9月	平瀬の石の下面
チチブ	3～6cm	5月～8月	石の下面
ヤマノカミ	10～16cm	1月～3月	汽水域の2枚貝の空き殻
アユカケ	15～20cm	12月～3月	汽水域と推定される

魚道の設計において最も関係が深いのはこれらの魚が遡上あるいは降下するときの体長であって、それらは表-3のようである。

表-3 我国の主要な回遊魚の遡上期と降下期およびその時の体長(石田力三、中村中六 1991)

	遡上期	遡上期の体長	降下時期	降下時の体長
カワヤツメ	3月上旬～	40～50cm	4月～5月	14～18cm
(マ) エツ	4月上旬～	～60cm		
キュウリウオ		15～20cm	夜明け	
シシャモ		13～16cm		10mm程度
ワカサギ		6～15cm		
シラウオ		8～10cm		
カラフトマス	6月～9月	40～70cm		34～36mm
サケ	9月～12月	55～100cm	2月～5月	60mm程度
サクラマス	5月～7月	40～60cm	3月～6月	
サツキマス	4月～6月	30～35cm	12～2月	15～20cm
アメマス	8月中・下旬	30～60cm	4月～6月	17cm程度
イトヨ	2月～3月	8cm程度	夏～秋	2～3cm
シロウオ	1月～5月	4～6cm		4～5mm
ウナギ	12月～5月	5cm程度	8～10月	35～70cm
オオウナギ				
アユ	2月～5月	数cm程度	秋	産卵場まで成魚、孵化後数mm
ヨシノボリ		2～数cm程度		産卵場まで成魚、孵化後数mm
チチブ	秋	1cm程度		産卵場まで成魚、孵化後数mm
ヤマノカミ	5月～6月	3cm程度	11月頃	産卵場まで成魚、孵化後数mm
アユカケ	4月～5月	3～5cm		産卵場まで成魚、孵化後数mm

2・2 遊泳力

魚が流れに逆らって遊泳するときの進行速度は流れの速さ（流速）によって異なるが、流速を徐々にあげていくと、なおも流れに逆らって泳ぎ続ける魚の見かけ上の進行速度がゼロになり、停止しているように見える状態になる。この時の流速を「遊泳速度」と呼び、長時間（通常30～60分間）その状態を継続できる遊泳速度のうち最大のものを「巡航速度 cruising speed」あるいは「耐久速度 endurance speed」といい、ごく短時間（1～数秒）だけ継続できる遊泳速度を「突進速度 burst speed」あるいは「瞬間最大速度」という（例えば 塚本勝巳 1973）。

同じ魚についてもその測定方法によって遊泳速度が異なるので、種々の魚の遊泳速度を一概に論ずるのは難しいが、多くの（体型が紡錘形の）魚では、体長をBL（cm）とすれば、

$$\text{巡航速度} = 2 \sim 3 \text{ BL} \quad (\text{cm/s}), \quad \text{突進速度} = 10 \text{ BL} \quad (\text{cm/s}) \dots\dots (1)$$

の程度である。ただし、サケ科の魚では、巡航速度 = 3～4 BL程度であり、

$$\text{アユにおいては：巡航速度} = 5 \sim 7 \text{ BL}, \quad \text{突進速度} = 12 \sim 18 \text{ BL} \quad \dots\dots (2)$$

の程度であって、いずれも普通以上の遊泳速度を示す（塚本勝巳 1973など）。

カトポディス（Katopodis 1990）によれば、多くの淡水魚の遊泳速度をその持続時間との関係においてとらえれば図-1のようであるという。

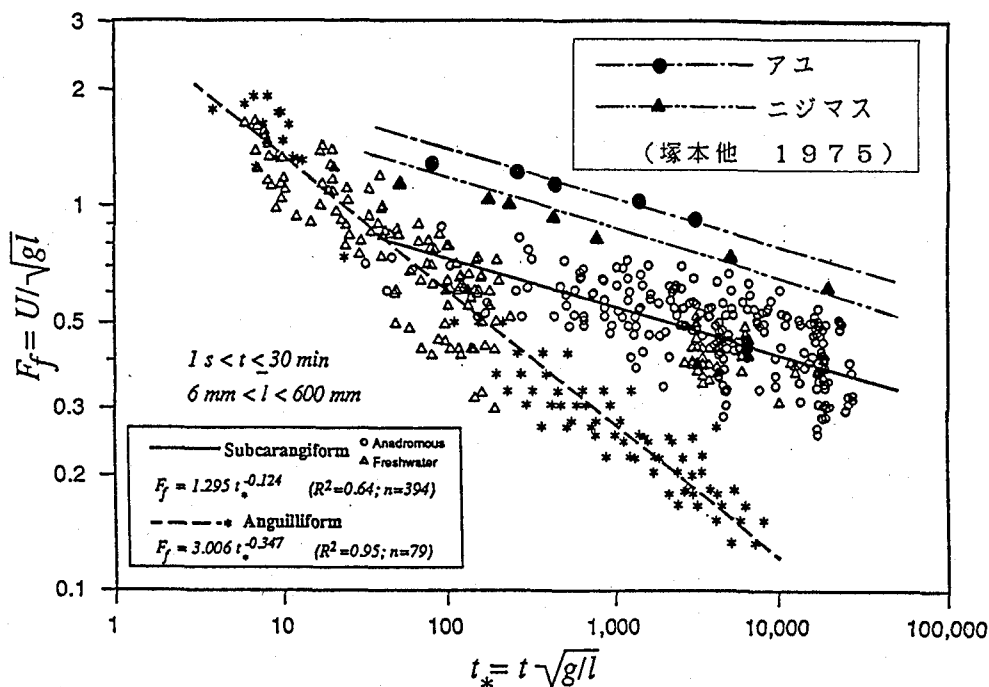


図-1 淡水魚の遊泳速度-持続時間関係（Katopodis 1990、塚本他 1975）

（ F_f ：無次元遊泳速度、 U ：遊泳速度、 g ：重力の加速度、 l ：体長、 t_* ：無次元持続時間、 t ：持続時間）

図中の anguiliiform と subcarangiform とは遊泳型を示し、ウナギのように全身をくねらせて泳ぐものを anguiliiform、マグロのように尾柄部と尾鰭だけで泳ぐものを thunniform としたとき、その中間に、かなりの部分を動かして泳ぐ subcarangiform と尾鰭に近い部分を動かして泳ぐ carangiform が入る。淡水魚は anguiliiform か subcarangiform のいずれかの遊泳型を示す。なお、同図には、塚本ら（１９７５）によるアユとニジマスについての測定結果も併記した。これを見ると、測定法の違いを考慮してもなおアユの遊泳力は平均以上と見ることができ、カトボディスによる平均的な曲線を魚道設計に用いれば安全側の設計ができることが解る。

3. 設計対象（河川）流量

対象とする魚種（「魚道設計対象魚種」）が決まれば、その魚種が遡上あるいは降下する期間は限定されるので、魚道を設計する上で考慮すべき河川の流況はその期間（「設計対象期間」）のものに限定されるが、我国ではそのように期間を限定しても、河川の流況は降雨などによってかなり大きく変化するのが一般的である。どのような流況に対しても魚道が機能するように設計することは不経済なので、例えば流量や水位について上限と下限を想定し、その範囲内で機能するような魚道を設計することになる。このような、魚道を設計する上で対象とするある一定範囲の河川流況を、ここでは「設計対象流況」と呼ぶことにしよう。

設計対象流況として最小限必要となるのは、魚道の上流側（出口側）と下流側（入口側）の水位とその変動幅であるが、流送土砂量や下流域での流速分布なども併せて考える必要がある場合が多い。これらを知るための資料が無い場合にはなんらかの方法で推定し、設計条件として確定しなければ設計にはいれない。流量の資料から水位などを推測することは比較的容易なので、まず流量について「設計対象（河川）流量」を決める場合が多い。魚道をつけるべき河川構造物自体がこれから新たに設置されるものである場合には、その構造物の設計のための資料がそのまま魚道の設計にも利用できる。いずれにしろ、資料としては例えば水位や流量の月報など、いわゆる時系列データのかたちをとっている場合が多いので、そうした資料から設計条件を決めることになる。

その決め方としては、①時系列データから直接的におおよその条件値を決める方法と、②確率論的に求める方法とが考えられる。第１の方法は、例えば、出水時の流量は除外して、他の期間の平均値を設計条件としての基準値にする、といった方法である。第２の方法としては、(a) 頻度分布から設計条件を決める方法、(b) 河川計画などに用いられている方法をそのまま適用して得られる超過確率（あるいは非超過確率）から判断する方法、および、(c) 対象魚の特性を考慮して、遡上魚に待機を強いることになる期間を限定した上で確率的な計算を行なう方法とが考えられる。

あるダムにおける１０年間の日流量データを用いて一例を示そう。設計対象期間として３月から８月を想定して頻度分布を示せば図－２のようであり、トーマス法による非超過確率分布を示せば図－３のようである。図－２から、例えば、最多頻度の流量である $100\text{ m}^3/\text{s}$ を設計対象流量の基準値とし、上限値を $200\text{ m}^3/\text{s}$ に決めるのが上記の (a) の方法である。また、図－３から、 $200\text{ m}^3/\text{s}$ を設計対象流量の上限値とすれば、その上限値を越える流量になる確率は１５％程度であることになる。

こうした方法は一見科学的であるが問題点も少なくない。例えば上記の方法で確率５０％の条件を設定したとしても、遡上する魚にとっては（設計された魚道が、その条件下であれば確実にのぼれるものであったとしても）魚道を遡上できる確率は５０％ではない。魚道の近くまで遡上して来たときに出水が始まり、その出水によって貯水位や流量が設計条件をはずれて高くなり続けたとすれば、そ

の期間中はのぼれぬ魚道であり続け、その期間は一般に1日や2日では終わらないからである。この場合、確率50%、すなわち2日に1日は遡上可能、とはならないのである。

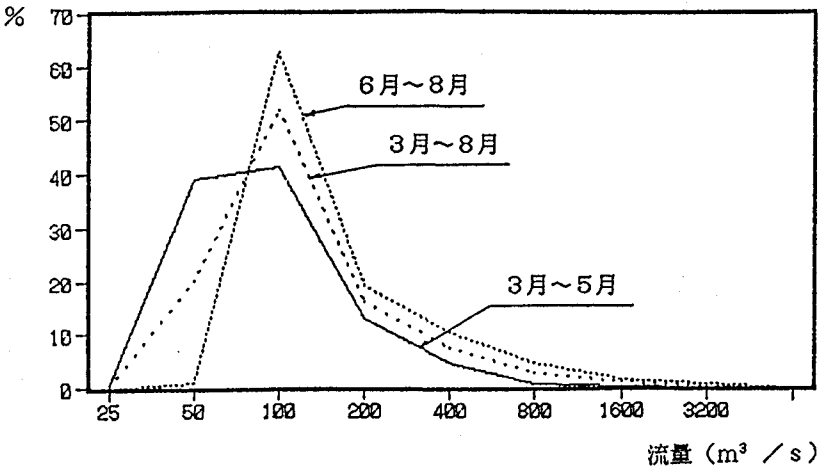


図-2 日流量の頻度分布図の一例

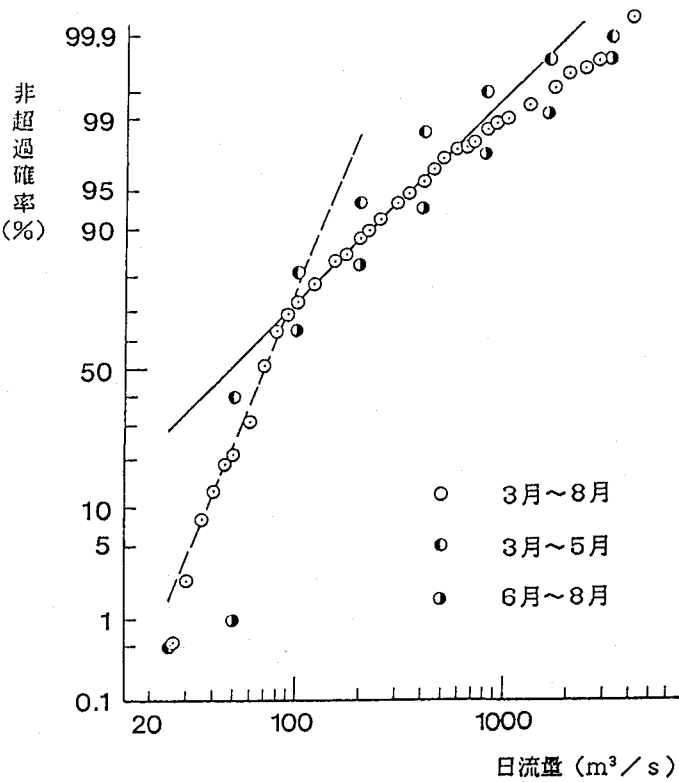


図-3 日流量の非超過確率分布の一例

サケのように、決まった産卵時期に決まった産卵場所まで行き着かなくてはならない場合には、こうした遅れ（待ち時間）が決定的なダメージを与える場合がある。設計条件の設定にあたっては、こうした遅れ時間を最大限どの程度まで許容するかが重要なポイントになるのである。サケのようにごく限られた期間内に遡上しなければならないほどの緊急性が無いアユやマスの場合でも、魚道の目的をできるだけ速やかに遡上させることに置く以上、設計条件をはずれて遡上魚に待機を強いる期間を「猶予期間」として設定し、その猶予期間を考慮した上で確率論的に決める方が合理的と考えられる。こうした「猶予期間」の限定条件下で確率を求めるのが上記の(c)であり、具体的には以下のようにすればよい。

いま仮に、河川流量がある流量を越すと魚道の流量も増えて遡上不可

能になるが、それ以下の流量であれば遡上が可能で、猶予期間としては3日を見込んでよいでしょう。遡上の遅れを3日以内にとどめるためには、対象期間中のいかなる時点においても、3日以内に

その「限界設計対象流量」以下にならなくてはならない。そのような限界流量を Q_{3d} とすれば、例えば図-4のようなデータに対して、 Q_{3d} の求め方は以下のようなものである（Katopodis 1988）。

- ①まず最初に、最初の3日間の流量の最小値をとりあえずの Q_{3d} とする。
- ②つぎに、1日ずらした3日間、すなわち2日～4日の流量の最小値とその Q_{3d} とを比べて大きい方を Q_{3d} としなおす。
- ③同様に、次々と1日ずらしながら、3日間の最小値のうちの最も大きいものを求めながら対象期間の最後まで探し終えれば、求める Q_{3d} が得られる。

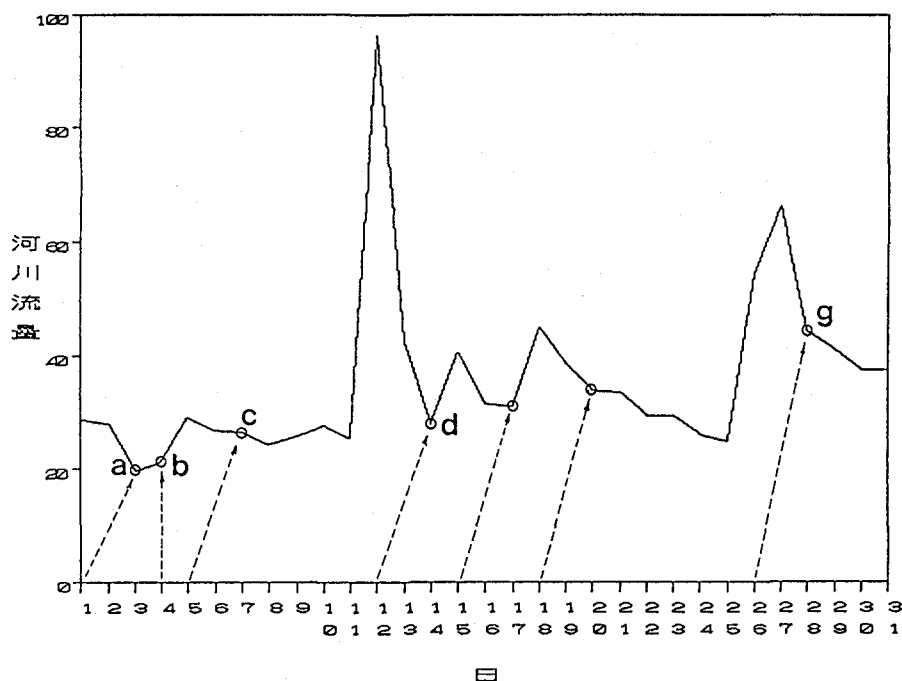


図-4 「3日猶予流量」 Q_{3d} の算出例

例として用いた図-4のデータの場合には、まず最初に図中のaが Q_{3d} となり、次に4日～6日の各流量の最小値bがとって代わり、すぐ次にcが、12日の出水後にdが、それぞれ新たな Q_{3d} となって、結局最後にはgがこの期間の Q_{3d} として求まることになる。

こうして得られた Q_{3d} は、これだけではこの期間だけのものなので、次に確率的な意味を持つ Q_{3d} に拡張しよう。

- ④対象期間を3月から8月とし、先に用いた10年分のデータのすべてについて、各年ごとの Q_{3d} を求める。

- ⑤得られた10個の Q_{3d} について、先に行なったのと同様な非超過確率の計算をすれば、例えば5年に一度は設計条件を越える可能性のある設計対象流量のようなものが得られる。

このような方法は、流量のみでなく水位についても、上限値についてでなく下限値についても、また、猶予期間として何日間を設定しても、導入が可能である。先に用いた10年間のデータについて、猶予期間を3日に設定した場合（ Q_{3d} ）と7日に設定した場合（ Q_{7d} ）の計算を行なえば図-5を得る。同図から、いまの場合、先述のように上限値として $200 \text{ m}^3/\text{s}$ を設計条件に用いても、この場

合の非超過確率はかなり低いものになることが理解されよう。

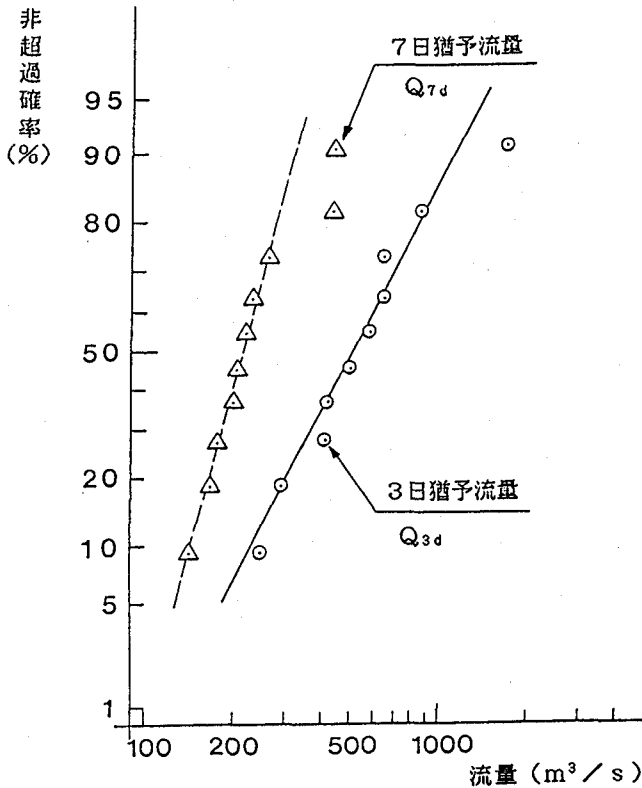


図-5 猶予期間付き流量の非超過確率分布の一例

そのような場所を容易に見つけることができる。したがって、堰などの構造物を作る段階では、魚道についてはその構造物の構造に深く関わる部分だけを作っておいて、入口を含む区間は、あとで魚の集まり具合を見てから設置するというのもひとつの方法である。特に砂防ダムなどのように、構造物ができてからの流況の変化が著しい場合には有効性が高いと思われるが、我国では実際上とりにくい方策であり、目下のところ例はない。

事前に魚の集まる場所（したがって入口の最適場所）がわかりにくい場合の他の抜本的対策としては、①堰などの幅全域を魚道の入口にしてしまうことと、②魚の遡上期には魚道だけから水を流すようにすること、のふたつが考えられる。

①は、我国では「全面魚道」と言われるものであり、滋賀県に9例（中 賢治他 1990）の他、段差工を魚道状にした北海道の止別（やんべつ）川での実施例（岩城勝義他 1990）などがある。②においては、もちろん魚が遡上してくるのに十分な流量が流されることを前提としている。アメリカの、発電放水路に集魚設備を備えた発電用ダムにおいて、遡上期に限ったゲート操作が行われているケースはこの方策の例と言えよう（Clay 1961）。可動堰において、遡上の最盛期には堰の一部を開けて、そこから遡上できるようにするケースもこの方策の変形と言うことができる。我国では、発電放水口がダムから離れた下流にあり、ダムからその地点までは魚道から流される水が河川流量の

4. 魚道の位置

4・1 入口の位置

魚道を設置する場所の選定は、①魚道の規模、したがって建設経費、②魚道の集魚効果、あるいは集魚設備の必要性、③洪水流下の障害物となる可能性、すなわち「河川管理施設等構造令」などによる制約、④排砂などのメンテナンスの頻度、⑤景観、⑥部外者の立ち入り頻度、等々の種々様々なファクターに関係するきわめて重要な決定事項である（中村 1990）。これらのうち、特に遡上魚を対象とする魚道の場合、魚道そのものの機能を重視する立場からは②が最も重要であり、それゆえ魚道の入口の位置の選定がポイントになる。

遡上してくる魚がまず入口に集まってきてこそ魚道が機能するのであるから、入口を設置する最適な場所は遡上魚が集まってくる場所ということになるが、これを堰などができる前に正確に予測することは必ずしも容易ではない。

対象とする遡上障害構造物が既設のものである場合には、観察などの調査によって

大勢を占めているために効果をあげている一例として、五ヶ瀬川の星山ダム（宮崎県）魚道を挙げることができる。

しかし、このような例は特殊であり、通常は、後で魚道をつくるというわけにはいかず、全面魚道とするのは無理で、魚道だけから水を流すわけにはいかないような場合がほとんどである。その場合には、とにかく遡上魚が集まると予測される場所を選定しなければならない。そのような場所の予測には、地元の漁業協同組合員などへの聴取や事例調査が有効であるが、ここではそうした経験的な知識の集積としての一般論を整理すれば以下のようなものである。

遡上してきた魚が堰などの直下で一般的にとる行動は、①強すぎる流れなどの遡上障害を回避して、緩い流れとの境界に沿って移動する行動、②穏やかで一般的な緩い流れの中にある比較的速い流れに向かう行動、③周囲の複雑で乱れた流れの中にある比較的整った太い流れに向かう行動、④比較的強い流れに引きずられるように発生する循環流での遊泳滞留、のいずれかである。したがって、①のような遡上障害があるときには、その境界に沿って行き着く先が、②および③ではそれぞれの流れの源の近くが、また、④ではその循環流領域が、それぞれ魚がよく集まる場所となる。一般的には、このような場所は堰直下の側岸寄りの部分や発電などの放流口の横の部分である。

以上、経験的な知識の集積としての一般論を整理したが、実際上はこれだけの知識ではうまくいかない場合が少なくない。別の経験的知識は、堰や魚道ができてから河床形態や流況が変化することが多いことを教えているからである。したがって、魚道に長期的な効果を期待するのであれば、こうした変化も予測した上で位置を決めなければならない。急流河川の多い我国では、むしろこの点にこそ、魚道位置選定の難しさの理由があると言っても過言ではないのである。堰堤そのものの築造による変化などのマクロな変化についてはここでは語りきれないので「河川地形学」あるいは「土砂水理学」関係の専門書に譲るとして、魚道そのものによる局所的な河床変動については、建設省土木研究所において先駆的な研究が行われているので、その結果の一部を紹介しておこう。

実験は、魚道が堰よりも下流に伸びている場合（突出型）、上流に伸びていて入口は堰堤の法尻（のりじり：スロープの下端）に近い場合（引き込み型）、魚道が屈曲していて入口は堰の直下に、出口は直上流にある場合（屈曲型）などについて、いずれも左岸側に設置されたケースについて行われたが、その結果によれば、突出型や屈曲型が魚道直下の堰に近い位置に局所洗掘を起こすのに対し、引き込み型では護床工下流の、堰から比較的遠い位置に洗掘を生じるようである（神庭治司他 1990）。現時点までの報告ではこれ以上のことには触れていないが、そうした局所変動が長期的には魚道入口の流況をどの様に変化させていくのかなどについての検討も含め、今後の進展に期待したい。

なお、このように設置後の変化を予測することが難しいのであれば、将来において入口を別に設ける可能性をも頭に入れておくのもひとつの手である。実際、突出型の魚道に、屈曲型の枝別れを付けて改善をはかった例や、最初からそうした枝別れを作っておいて成功した例は少なくない。改善をはかった例としては利根大堰の魚道（Moriguchi 1990）を、最初から枝別れにしている例としては、日高川（和歌山県）のいくつかの魚道を、それぞれ代表例としてあげることができる。

4・2 出口の位置

出口の位置を選定する上で特に注意すべき点は、①遡上した魚が取水口へ迷入する可能性や、堰からの越流水に取り込まれての落下と逆戻り（fallback）、②流送土砂の流入しやすさ、③堆砂による閉塞の可能性、④流量調節装置や計数設備の設置位置との兼ね合い、などである。

入口として良い場所を選べば出口に①の問題が生じることが多い。安定した主流が流れている側が入口の好条件だが、それは同時に取水口の好条件でもあるからである。しかし、迷入の可能性につい

ては、取水口から離すべき距離をそれほど大きくする必要がない場合も少なくない。取水口の周辺は深くて広く開口していて、取水口から少し離れただけで、取水による流れの流速は著しく小さくなる場合が多いからである。遡上魚が流れの速い魚道を抜けて、急に全く流れの無いところに出れば、その後に向かうべき方向を見失う恐れもあるわけであるが、ある程度の流れがあれば容易に正しい方向を見つけ得ると思われる。こうした理由からは、迷入の恐れがない程度に出口を離すことができれば、魚道を取水口と同じ側に設けるのはむしろ有利な場合が少なくないのである。

このことは、②や③について考えればより鮮明になる。取水口にとっても、②や③を避けたいからである。実際上は、むしろ④によってかなりの制約を受けることがあろう。流量調節装置などの付帯設備は、動力部などの隠れた部分にスペースを必要とするからである。

しかし、いずれにしろ入口の位置の選定のほうが出口の位置の選定よりも優先するので、もし出口の位置になんらかの問題があるのであれば、別途のなんらかの工夫によって解決した方がよい場合が多い。

5. 迷入対策と降下魚用の魚道

魚道が果たすべき最も重要な役割は、淡水魚に安全・確実で自由な回遊路を提供することであるが、一般的には、魚道がこのような役割を果たすのは主として遡上しようとする魚に対してである。降下する魚についての回遊路の確保においては、取水口への連行あるいは迷入の防止策が重要な役割を担っている。

現在までに考案された種々の迷入防止策は表－４のように整理できる（Task Committee on Fish-Handling Capability of Intake Structures, ASCE 1982）。

表－４ 迷入防止策

考え方	具体的方法例
(1)集魚して移動させる（fish collection and removal）	トラベリング・スクリーン
(2)安全な経路に誘導する（fish diversion）	傾斜スクリーン＋バイパス
(3)忌避させて進入を抑止・妨害する（fish deterrence）	気泡列、電気バリヤ、赤色塗装
(4)フィルターにより排除する（physical exclusion）	フィルター

我国ではほとんどの事例が上記の（3）に分類されるものであり、そのほとんどにおいて顕著な効果はあげていないと言っても過言ではない。効果のあがらぬ理由のひとつは、魚がたとえ忌避行動を起こして取水スクリーンへの進入をストップしても、その後安全な降下経路に入ることが難しい状況の中に放置されることにある。もっと（1）や（2）の考え方を導入すべきであり、その場合の「安全な経路」の一翼を魚道（あるいは、その一種とも言うべきフィッシュ・バイパス）に担わせるべきである。なお、（1）や（2）のように、人為的に安全な経路を通過させる場合には、（母集団がどうであれ、少なくとも）救った魚の数は明確にすることが容易であり、効果の判定も比較的簡単にできるというメリットもある。

6. 魚道の形式と特徴

現在までに考え出された魚道の形式と水理学的特徴などを整理すれば表－5 のようである。

表－5 魚道の形式と留意すべき特徴

名称	特徴、留意事項
(A) プールタイプ（プールが連なる形のもの、別途に休憩用プールを要しない。プール間の隔壁に、ほぼ様な流れの、定まった通過経路を与える方式。）	
① 階段式	流速、流量とも水位変化による影響を強く受ける
② 潜孔式	流速、流量とも水位変化の影響を受けにくい
③ バーチカル・スロット式	流速は影響を受け難く、流量は水位に比例
(B) 水路タイプ（長いものには途中で休憩用プールが必要。溪流のように流況が複雑で適当な経路を魚に選ばせる方式。ある程度の水位変化には順応可能。）	
④ 緩勾配バイパス水路	人工河川であり、長い距離を必要とする
⑤ 粗石付き斜路	特に下流部の流況予測と上流端の工夫が成否の鍵を握る
⑥ 導流壁式	流況予測が困難
⑦ デニール式	
⑦ a：標準型	底部で流速が遅く、表層で速い。小型で急勾配のものが適用可能
⑦ b：スティープパス型	底部で流速が速く、表層で遅い。小型急勾配の適用可
⑦ c：舟通し型	中央部を舟通しとして使用可能。比較的緩勾配の必要有り
⑧ カルバート式	種々の工夫が可能な簡易魚道。緩勾配の必要有り
(C) 閘門タイプ（水位差のある場所で舟を通すために作られる閘門と同じ原理のもの）	
⑨ a：閘門型	集魚や通過促進のための工夫が成否の鍵を握る
⑨ b：ボーランド型	ダム用。同上
(D) その他	
⑩ リフトあるいはエレベータ式	
⑪ フィッシュポンプ式	

なお、階段式以外の形式についての我国の事例としては、

- ③ バーチカル・スロット式については、鳴瀬川水系迫（はさま）川（宮城県）三方（さんぼう）島堰、北上川（宮城県）北上大堰、阿武隈川（宮城県）阿武隈大堰、
- ⑤ 粗石付き斜路については、仁淀川（高知県）八田（はた）堰、
- ⑦ デニール式のうちの⑦ a：標準型については、（簡易型ではあるが）鳴瀬川水系吉田川（宮城県）粕川堰、
- ⑨ a：閘門型については、筑後川（佐賀県）筑後大堰、信濃川（新潟県）蒲原大堰、

などを代表例としてあげることができる。また、我国には事例の無いデニール式のスティーブパス型や舟通し型およびカルバート式については、カトポディス (Katopodis 1990) やラリーニア (Larinier 1990) の文献に詳しい。フィッシュポンプ式についても小長谷 (小長谷 1990) の文献を参照されたい。

7. 呼び水

形式の選定および内部構造の設計のまえに、あらかじめ特に留意しておく必要があるのは呼び水についてであり、その基本的な考え方の要点は以下のようである。

- ①もし呼び水として一定流量以上のものが配分可能ならば、できるだけそのすべてを魚道そのものに流す流量として使用する方法をまず検討すべきである。
- ②もしその結果、魚道の入口近傍の流況に問題が生じるようであれば、その緩和のための入口プールを付加すればよい。
- ③もし配分可能な流量が大きくて魚道だけに流すには多すぎるのであれば、別途に呼び水放流設備を設けることになるが、その場合には、
 - ③ a: 呼び水の流れが、魚道入口に向かわない別の経路への誘導を生じないようにしなくてはならない
 - ③ b: 呼び水の流れが、遡上魚の入り込み易い循環流を形成しないようにしなくてはならない
 - ③ c: 呼び水の流れが、魚道入口への (魚の) 進入の妨害をしてはならない
 - ③ d: 魚道入口近くまで来て、魚がなおも呼び水に向かうようであってはならない
- ④一般に、呼び水の放出口で強い (流速の大きな) 流れを与えて上記の条件を満足させることは困難である。したがって、
 - ④ a: できるだけ穏やかに落下させる
 - ④ b: 拡散装置 (ディフューザー) で減速、拡散させるなどの方法で放出する方が無難であるが、
 - ④ c: 強い流れの呼び水水路の両側に魚道設ける (「呼び水水路式魚道」と呼ばれることもある) ようにするのも、上記の③ d の恐れが無い限り効果的である。

8. 流量公式と流況

8・1 階段式

階段式魚道においては、

越流流速 $V_c = \sqrt{g h_c} = \sqrt{2 g h} / 3 \dots \dots (3)$

(ここに、 g : 重力の加速度、 h_c : 限界水深、 h : 越流水深)

が対象魚の突進速度を越えないように設計し、流量については以下の式を用いて計算するのが一般的である (図-6 参照)。

越流流量 $Q_v = 0.61 b h^{3/2} \sqrt{g}$ (落下流状態・完全越流の場合) $\dots \dots (4)$

$Q_v' = b h_2 \sqrt{2 g (h_1 - h_2)}$ (潜り越流の場合) $\dots \dots (5)$

潜孔流量 $Q_o = C a \sqrt{2 g \Delta H}$ (潜りオリフィスになっている場合) $\dots \dots (6)$

(ここに、 b : 越流幅、 h_1-h_2 : 上・下流の水位差 ($=\Delta H$)、 C : 縮流係数 ($=0.65\sim 0.8$; 潜孔形状や接近流速で異なる、 a : 潜孔の断面積)

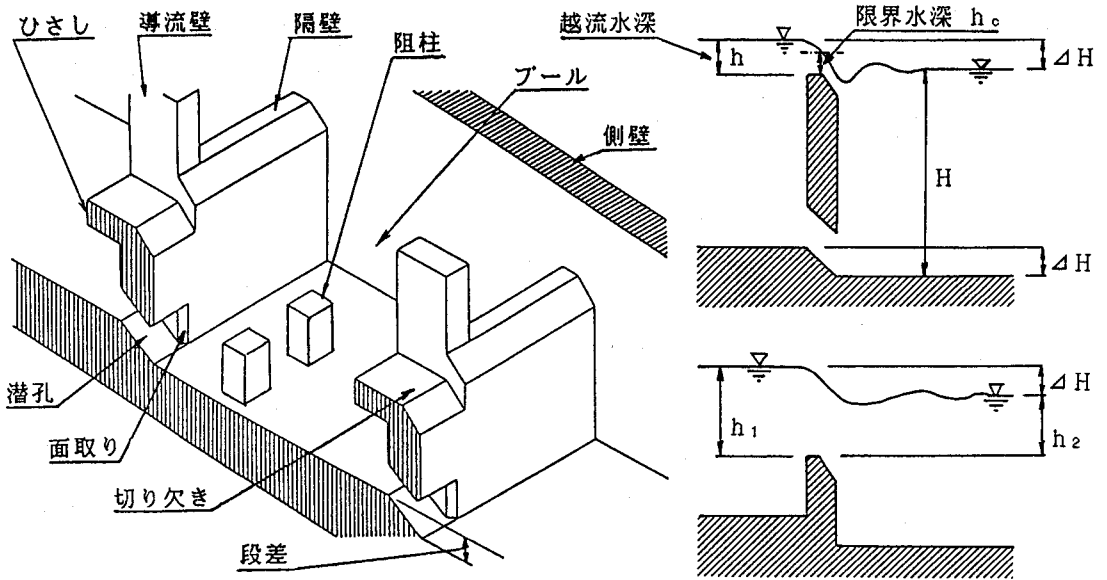


図-6 階段式魚道内各部の名称(左)と記号

ただし、以下の点に留意する必要がある。

(1) 落下流状態(plunging flow)と表面流状態(streaming flow)

流量が大きくなったり、プール長や段差を小さく設計するとプール内の流れが表面流状態になる(図-7)。表面流状態での流量は、

$$Q_p = 1.5 b d \sqrt{g S L} \quad \dots \dots (7)$$

(ここに、 d : 隔壁上の水深、 S : 勾配 ($=\Delta H/L$)、 L : プール長)

の程度であり、両者の遷移状態での流量は、

$$Q_t = 0.25 b S L^{3/2} \sqrt{g} \quad \dots \dots (8)$$

の程度である(Rajaratnam & Katopodis et al. 1988)。ただし上記の Q_t は隔壁としてシャープ・クレスト(越流水深/隔壁天端厚が2以上のもの)を用いた実験から得られたものであり、隔壁天端に丸みをもたせれば Q_t は上記の値よりも若干大きくなる。

設計時におけるチェックとしては、設計対象水位(の範囲)に対して、 Q_p 、 Q_t 、 Q_s のすべてを計算し、

- 1) $Q_t > Q_p$ で、しかも $Q_t > Q_s$ のとき: 安定した落下流状態
- 2) $Q_t > Q_p$ であるが同時に $Q_s > Q_t$ でもあるとき: 遷移状態
- 3) $Q_s > Q_t$ で、しかも $Q_t < Q_p$ のとき: 安定した表面流状態

を目安に考えればよい。試みに上記の考えで計算すると、

a) 段差30 cmのとき：プール長2 mでも越流水深10 cmに対して安定した落下流状態、プール長4 mなら越流水深10～15 cmに対して安定した落下流状態、であるのに

b) 段差10 cmでは：プール長2 mでは越流水深10 cmで遷移状態になる可能性があり、プール長4 mでも越流水深が15 cmになれば遷移状態になる可能性がある、

ことがわかる。遷移状態では落下流状態と表面流状態とがある時間間隔で交互に現われるので遡上中の魚に混乱を与えることになる。したがって、プール長や段差の小さい階段式魚道を設計する場合には十分な注意が必要である。

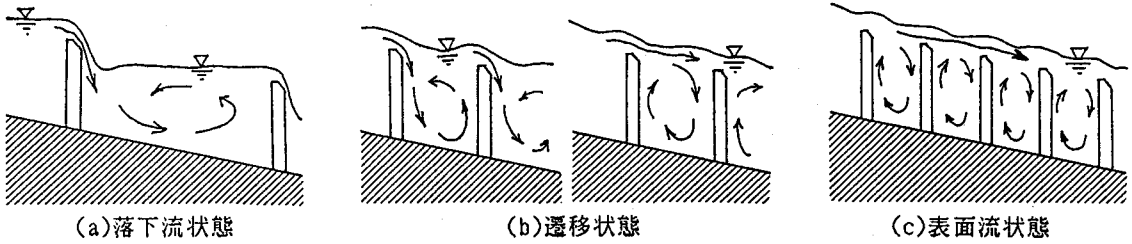


図-7 階段式魚道における「落下流状態」と「表面流状態」

(2) スタンディング・ウェイブ (standing waves)

越流における一般的な水面形は下流の水位に応じて図-8のように変化する (White & Nemenyi 1942、あるいは、Leutheusser & Birk 1990)。図のように、下流側の水位が低ければ跳水あるいは潜り跳水が起きるが、水位が上昇するとスタンディング・ウェイブが発生するのである。

階段式魚道の場合、段差を小さくすると同様な現象が生じるので注意を要する。

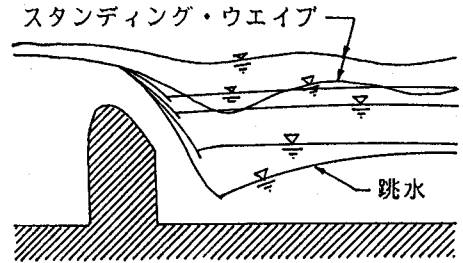


図-8 越流部下流の水面形

(3) 水面揺動と静振 (seiche) 一切り欠きの必要性

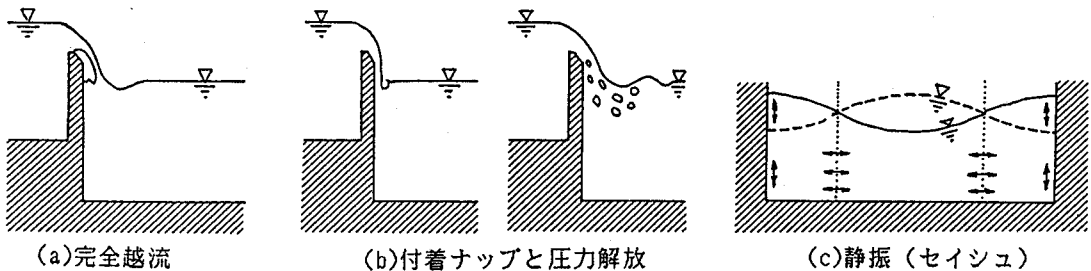


図-9 完全越流、付着ナップと圧力解放 (水面揺動)、および静振

切り欠きのない全面越流型の隔壁の場合、段差が大きければナップが側壁から離れて側方からの空気の出入りが自由になり、完全越流の状態になるが (図-9の (a))、段差が十分でないと側方からの空気の出入りがしにくい状態になり、隔壁背面での圧力が不安定になる (同図の (b))。付着ナッ

プの状態と圧力解放とが繰り返され、プール内に水面揺動が生じるのである。

また、プール内に静振（同図の（c））が生じることがある。横断方向の流れが無いために静振の節の位置で水粒子の横振動が自由にできるためである。特に、魚道がカーブする区間があったり（カーブ区間で横断方向の波動エネルギーが与えられる）、幅が広い魚道の場合に（静振の周期が長くなるので減衰しにくい）生じやすい。下流にいくにしたがってビート現象も加わるのが普通であり、マクナリーダム（アメリカ、コロンビア川）の魚道でこの現象が生じたときには波高が2.4 mにも達したという（Clay 1961、あるいは、Bell 1986）。

こうした現象は切り欠きを設けることによって容易に回避できる。切り欠き部分で空気の出入りが容易になり、切り欠きからの、周辺よりも速い流れがプール内に循環流（したがって横断方向の流れ）を誘起するからである。

なお、特に対象魚の遡上スピードを問題にする場合には、切り欠きは直線的に配置する方がよい。例えば交互に配置した場合には、向流性（流れに逆らって泳ぐ性質）の強い遡上魚はプールごとに循環流に迷い込む可能性が高いからである（図-10の（a））。もし、直線的な配置に対して接近流速の増加を気にするのであれば、切り欠きをひさし付きにすればよい（図-10の（c））。

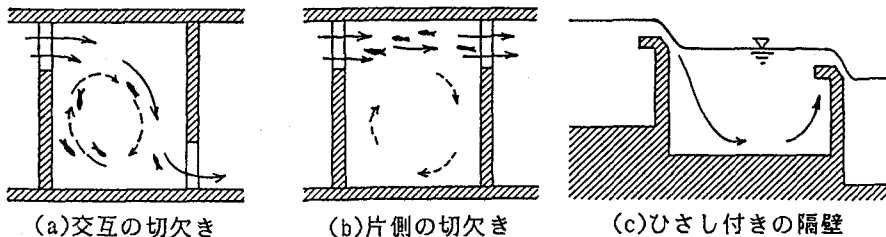


図-10 切り欠きの配置と遡上魚の挙動（(a)と(b)）およびひさし付きの隔壁（(c)）

（4）潜孔

潜孔は、隔壁を越流する流れのみに依存する場合の主要な欠点：①流量や流速が水位変化の影響を強く受け、②越流流速を対象魚の遊泳力以下に押えれば流量が少なすぎ（あるいは、流量を多くするには規模を大きくせざるをえず）、③遡上するには何回も水表面に浮上しなくてはならず（したがって、底層のみを移動する習性のある魚は遡上できず）、④プール内に堆砂しやすい、などを補うために必要である。

潜孔を通過する流量は（6）式に示したようにプール間の水位差に依存するのであって水位そのものには依存しないので、潜孔を設ければ安定した流量を確保でき、上記の①と②の欠点が緩和される。また、潜孔の位置を底層にもってくれば、③と④の欠点もある程度補うことができる。ただし、③に対処するためにはプール間の水位差（段差）を小さくして流速を対象魚の遊泳力以下に抑えなければならず、潜孔を大きくするほど以上の効果は高まる。

したがって、潜孔を付ける以上、できるだけ段差を小さくして、流量の許す限り大きなものを付けた方がよいということになる。

段差を小さくすると、先述したように、表面流状態への移行やスタンディング・ウェイブの問題が生じ易くなるが、底部にある潜孔からの流れはこれらの現象の発生を抑制する方向に働く。大きなものを付けると、潜孔からの強い流れ（噴流）が減勢されないまま、つぎの潜孔への接近流速となり、その結果、流れが次第に加速されるように思われ勝ちである。しかし、実際にはプールの断面積に対

して潜孔の断面積が大きいほど減勢は短距離で行われる。これは、噴流中心軸に沿った高流速の流れがその勢いを維持するために必要な周囲水の連行加入が、魚道のように周囲を固定壁で囲まれた状況下では強く抑制されるためである。

このことを最初に明快に示したのはホワイトとネメニー（White & Nemenyi 1942）であって、彼らの風洞実験の結果の一部を示せば図-11のようなのである。

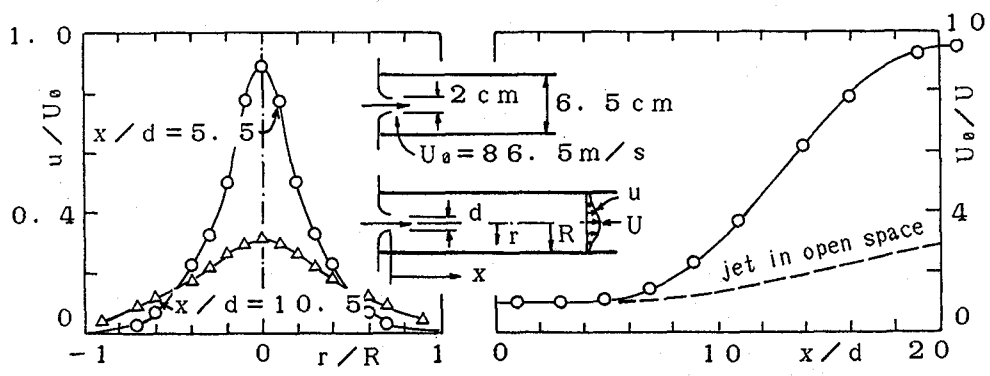
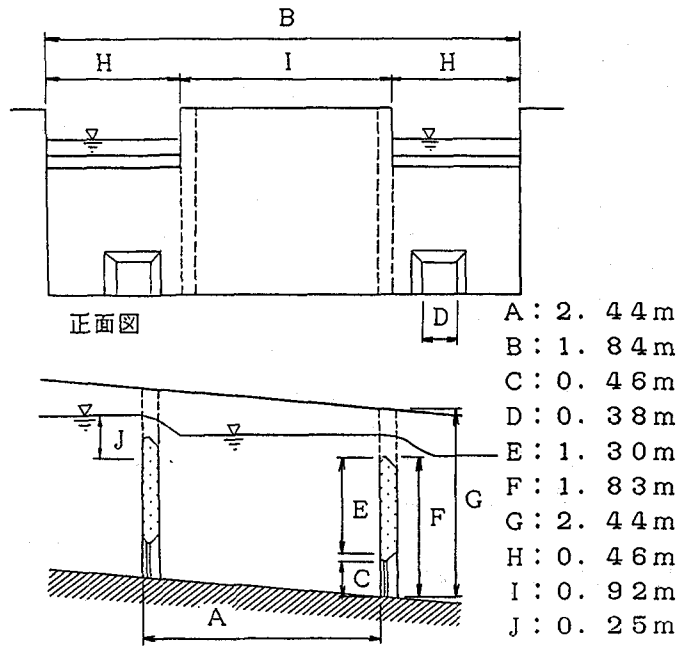


図-11 周囲に固定境界を持つ噴流における流速分布（左）と中心軸流速の低下（右）
（White & Nemenyi 1942 から再構成）



越流部縦断
図-12 アイスハーバー型 (Bell 1986)

これを見ると、流速分布は噴流特有の釣鐘状を示すが短距離で偏平化し（左図）、中心軸上の最大流速（ U ）は、周辺に境界のない噴流の場合（破線）に比べてはるかに早く減速することが解る（右図；同図は縦軸に U_0 （噴出口での流速）/ U をとっているので、この値が急上昇することは急減速することを意味している）。

ただ、実際上どの程度まで大きくできるかはプール長やプール幅も関係し、模型実験でのチェックなしに設計するには勇気が必要である。ここでは、先述したマクナリーダムでの静振発生の失敗の経験から詳細な実験を繰り返して生み出された「アイスハーバー型」を参考として図-12に示すにとどめよう。

8・2 パーチカルスロット式

パーチカルスロット式においては、
スロット部流速 $V_s = \sqrt{2g\Delta H}$

..... (9)

(ここに、 ΔH : プール間水位差 (= 段差))

が対象魚の突進速度を越えないように設計し、流量については以下の式を用いて計算するのが一般的である (図-13に参考設計例を示す)。

$$\text{流量 } Q_v = C b_o H \sqrt{2 g \Delta H} \quad \dots \dots (10)$$

あるいは、

$$Q_v' = (3.77 (H/b_o) - 1.11) \sqrt{g S b_o^5} \quad \dots \dots (11)$$

($L = 10 b_o$ 、 $B = 8 b_o$ 、 $1.9 < H/b_o < 9.02$; Katopodis 1990)

(ここに、 C : 流量係数 (= 0.75程度)、 b_o : スロット幅 (図-13中のD)、 H : スロット部の水深、 S : 勾配、 L : プール長、 B : プール幅)

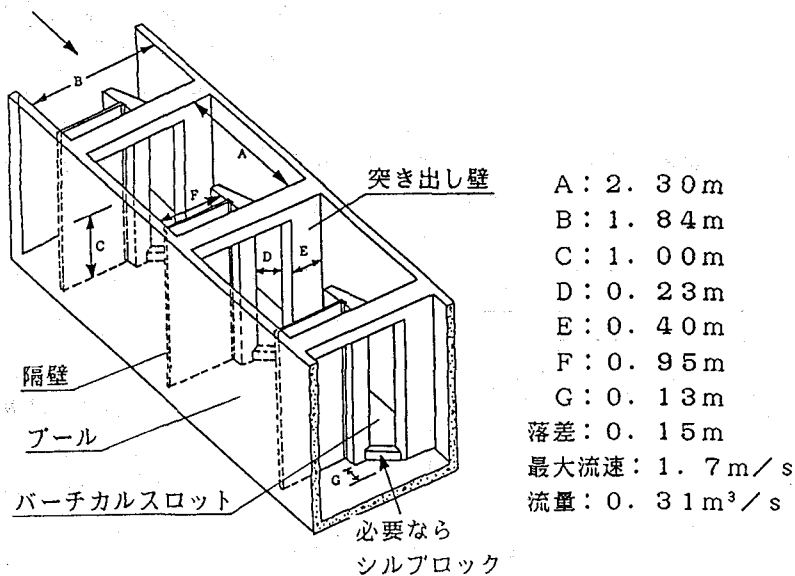


図-13 バーチカルスロット式 (右側は参考寸法)

なお、スロット部での流速は鉛直方向にほぼ一様であり (Rajaratnam et al. 1986、あるいは、中村・和田 1990)、遡上魚は任意の水深位置を遡上できる。

8・3 粗石付き斜路

粗石付き斜路の設計においては、緩勾配バイパス水路や導流壁式と同様に、いわゆる等流公式:

$$\text{平均流速 } V = S^{1/2} R^{2/3} / n \quad \dots \dots (12)$$

(ここに、 S : 勾配、 R : 径深、 n : マニングの粗度係数)

を用いて、 n を適当に見積ったうえで流速や流量を計算している例が多いが、大きな石を埋め込んだ浅い水路での径深の計算方法などが不確かなうえ、 n が水深に応じてかなり変化することを考えるとあくまで概算の域を出ない。

もう少し精度の高い方法としてはハービヒとシュリツ (Herbich & Shulits 1964) による巨

大粗度（水面上に粗度が露出するような大きな粗度）上の流れについての水面形計算手法を利用することが考えられる。ただし、目下の所では限られた勾配についてのみ可能である。

いずれにしろ水位変化によって流況が変わり、遡上不可能な、泡を大量に含んだ激流になりやすいので、八田堰（高知県仁淀川）の魚道（写真－１）のように、横断方向に勾配を徐々に変えて、どこかで遡上可能な部分が生じるようにするなどの工夫が必要である。



写真－１ 八田堰の粗石付き斜路

８・４ デニール式

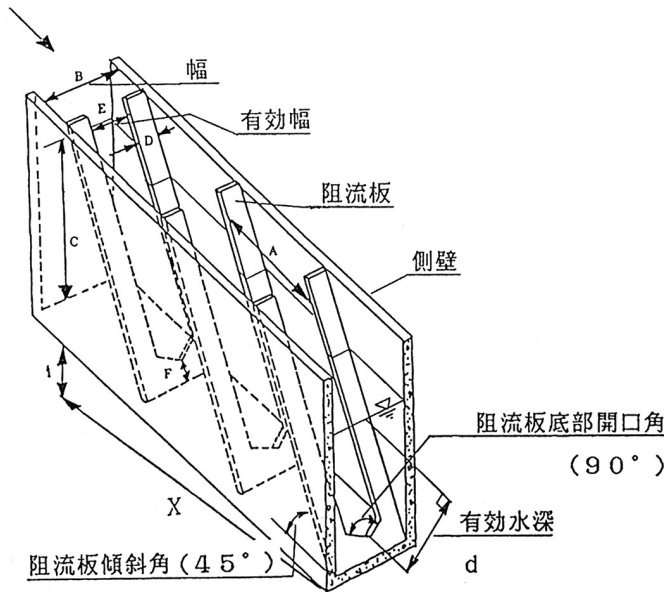
（１）標準型デニール（図－１４） 標準型デニール（ただし、図－１４のＡ、Ｂ、Ｄ、Ｅ、およびＦが図の寸法と相似で、阻流板傾斜角が４５°のもの）においては、

$$\text{流量 } Q_d = 0.94 (d/b)^2 \sqrt{g S b^5} \quad \dots \dots (13)$$

（ここに、 d ：有効水深（図の d ）、 b ：有効幅（図の E ）、 S ：勾配（図の $1/X$ ））

で流量が与えられるが、流速については、次式で与えられる代表流速（水表面から水深の２５％分だけ下の位置の流速）が対象魚の巡航速度を大きく上回らないように設計する（Katopodis １９８８）。

$$\text{代表流速 } V_d = (-0.184 (d/b)^2 + 1.862 (d/b) - 0.955) \sqrt{g b S} \quad \dots \dots (14)$$



- A：０．２６ｍ
- B：０．５８ｍ
- C：０．９７ｍ
- D：０．１１ｍ
- E：０．３６ｍ
- F：０．１３ｍ
- X：１２．５
- 勾配：１／１２．５
- 代表流速：１．４ｍ／ｓ
- 流量：０．４５ｍ³／ｓ

図－１４ 標準型デニールとその参考寸法

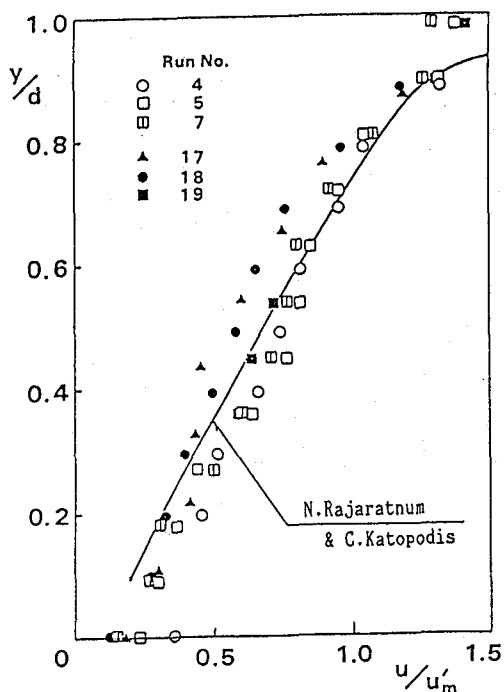


図-15 標準型デニールにおける流速分布 (中村・和田 1990)
(y : 鉛直方向の位置、 d : 有効水深、 u : 流速、 $u'm$: 代表流速 ($=V_d$))

デニール式の特徴のひとつはその特異な流速分布にある。標準型の場合には底部で遅く上層で速い流速分布となり、有効水深 d が有効幅 b よりも大きいときには中央部において図-15のようにほぼ直線的な流速分布を示し、底部の流速は (14) 式で得られる代表流速の半分以下になる。水深が浅いときには底層の流速が一様化し、代表流速の 0.6 倍程度となる (Rajaratnam & Katopodis 1984 あるいは、Katopodis 1988)。なお、水深が大きいと上層の高流速部が遡上に適さなくなり、その分だけ遡上にとっての無効断面が増加することになる (ただし、上層の高流速が呼び水として効果的に作用することが多い)。これを避けるためには浅いデニールを2段がさねにして、「2階建てデニール」 (Rajaratnam, Katopodis, & Flint-Petersen 1987) にすればよい。

有効幅は対象魚の体長の $1/2$ 以上あれば十分である。また、阻流板の、形状、間隔、厚さ、材質などについてはあまり神経質になる必要はない。

ただし、魚道の長さについては制約があり、長い場合には適当な間隔で休憩用のプールが必要である。休憩用プールの設置間隔は、サケなどの大型魚を対象とする場合には、遡上高さ 1.8 m ごとというのが原則的な目安である (Senn, H 他 1984)。勾配が $1/5 \sim 1/6$ のものでは約 10 m ごとに、ということになる。

他の魚については遊泳力-持続時間曲線 (図-1) から計算することになる。ひとつの試算として、体長 (l) = 10 cm 程度のアユを考え、重力の加速度 (g) を近似的に $1,000 \text{ cm/s}^2$ としよう。その場合には、 $\sqrt{gl} = 1 \text{ m/s}$ 、 $\sqrt{g/l} = 10 \text{ s}^{-1}$ であるから、図-1の横軸を 10 分の 1 して「秒」と読み替え、縦軸はそのままにして「m/s」と読み替えればよいことになる。したがって、カトポディスの曲線から、持続時間が 1 秒、5 秒、10 秒、60 秒について、遊泳速度はそれぞれ 1.35、0.8、0.7、および 0.6 m/s 程度と読み取れるから、魚道内の底部流速が 0.5 m/s のものであれば、 $0.1 \times 60 \text{ (秒)} = 6 \text{ m}$ 、0.4 m/s のものであれば、12 m 程度の区間ごとに休憩用プールを設置すればよいことになる。

(2) スティープパス型 スティープパス型 (図-16) においては流速分布は標準型と逆のかたち、すなわち底部で速く、上層で遅いかたちとなる (ただし、水深が深くなり過ぎると中層で遅く、底層と上層で速いかたちになる)。流量公式については例えばカトポディスの文献 (Katopodis 1990) を参照されたい。

(3) 舟通し型 ヨーロッパの舟運が盛んな川では、堰には閘門や舟通しが付属しているのが普通である。このため特にフランスにおいて、舟通しの水路底に特殊形状の阻流板や阻流角材を設置して魚道をも兼ねるものが開発された (一例を図-17に示す)。これも一種のデニール式魚道であり、流量についての実験公式もラリーニア (Larinier 1990) によって与えられている。

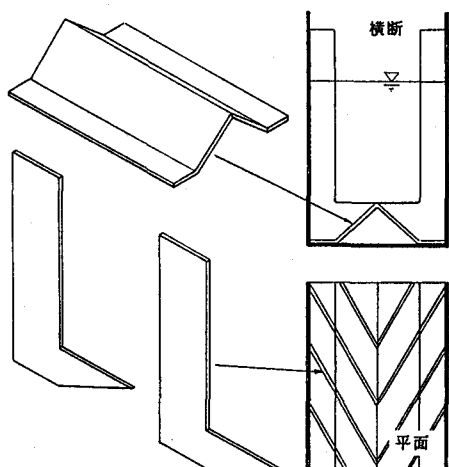


図-16 スティーブパス

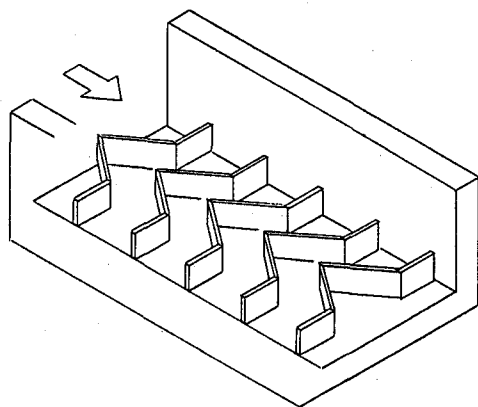


図-17 舟通し型の一例

8・5 カルバート式

カルバートパイプの中に阻流板や粗度（流れを阻害する突起）を適当に配置することによって、内部構造を、原理的には階段式、バーチカルスロット式、あるいはデニール式と同様なものにしたものであって、様々の工夫に対して実験公式が与えられているので、例えばカトポディスの論文（Katopodis 1990）を参照されたい。

9. 付属設備

9・1 流量調節設備

古くは切り欠きや角落しを付けて流量調節を行うことが多かったが、最近では調節用ゲート（竹林・渡辺 1990）が設置されることが多くなり、魚道自体を水位に応じて昇降させる工夫（Watanabe 1990、高橋他 1990）まで登場している。あるいは魚道出口（あるいは出口付近）の側壁から余水をオーバーフローさせて魚道流量の安定化をはかるとともに、オーバーフローした余水を呼び水に利用する工夫も研究、あるいは実施されている（卯月 1990）。

9・2 呼び水付加設備

呼び水水路と称して開水路で比較的急な流れを与えるもの（例えば筑後大堰（佐賀県・筑後川）、パイプラインからディフューザーを通して入口付近の水中に放流しているもの（例えば宮中堰（新潟県・信濃川）、側壁を拘束したかたちで落下流として与えているもの（例えば三方島（さんぼうじま）堰（宮城県・鳴瀬川））などがある。いずれの形態をとるにせよ、で先述した注意が必要である。

9・3 計数装置あるいは観察設備

自動的に通過魚を計数する設備については、①光電管によるもの、②超音波探知器によるもの、③電気伝導度の変化を読みとるもの、などが開発されているが、精度その他に問題点が多い現状である。ただ最近におけるエレクトロニクス技術やコンピュータによる画像処理技術の発展はめざましいので、その応用としての新技術の開発が期待される（寺園他 1990）。

観察設備として魚道の側面の一部を透明ガラスにしたものは、昭和63年に入間川（埼玉県）に（

我国では)初登場して以来、現在では、暑寒公園内の魚道(北海道増毛町)、水産庁養殖研究所日光支所内の魚道(栃木県)などがある。

9・4 その他

魚道の上面には防鳥網をかぶせるべきであるが我国では事例が見あたらない。うなわ(岐阜県)、はめ(和歌山県)などの一種のやな漁法(アユなどを一ヶ所に追い込む漁法)を誘導設備として利用するのも一法であると考えられるが、これも事例は見あたらない。

入口の側壁が高く直立している場合には、自然石を側壁に(水面上の部分にも)埋め込むなどして日光の照り返しを防ぐ必要がある。

随所に角落し用の溝を設けて置くことは万一の場合の手当として必要である。プールタイプの魚道では、角落しの工夫次第で、階段式、潜孔式、およびバーチカルスロット式の3形式が随時変更可能な魚道を設計することができる。

10. 効果の検証

効果の検証のためには、①遡上(あるいは降下)魚の総数(母集団)、②魚道(あるいはフィッシュ・バイパス)の通過数、および、③通過スピードを計測しなくてはならない。

②と③は比較的容易にできるが、①が難しい。ひとつの便法としては標識魚の放流がある。

11. 参考文献

11・1 魚道全般および設計ガイド

- Clay, C.H. (1961): Design of Fishways and Other Facilities, The Department of Fisheries of Canada, Ottawa (近く改訂新版が出版される予定)
- Bell, M.C. (1986): Fisheries Handbook of Engineering Requirements & Biological Criteria, Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland
- Katopodis, C. (1988): A Guide to Fishway Design, Freshwater Institute, Department of Fisheries and Oceans, Canada, Winnipeg
- Publications Committee of the International Symposium on Fishways '90 in Gifu (1990): 魚道会議ぎふ'90論文集、岐阜県
- 中村俊六(1989): 魚道一その設計指針作成の試みと今後の課題、水産土木、V o 1. 25、No. 2(通巻50号)
- 中村俊六(1990): 魚道設計の留意点、ダム技術、No. 39

11・2 淡水魚の生態と遊泳力

- 宮地伝三郎・川那部浩哉・水野信彦(1976): 原色日本淡水魚類図鑑(全改訂新版)、保育社
- Blake, R.W. (1983): Fish locomotion, Cambridge University Press, Cambridge
- SYMPOSIUM魚類の遊泳運動(1983)、月刊海洋科学、1983年4月号(通巻154号)、海洋出版株式会社
- 水野信彦・後藤 晃 編(1987): 日本の淡水魚類、東海大学出版会

11・3 迷入防止対策

- Task Committee on Fish-Handling Capability of Intake Structures, ASCE (1982):

Design of Water Intake Structures for Fish Protection, American Society of Civil Engineers, New York

List, E.J. (editor) (1988) : Design and Operation of Water Intakes, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 6, Special Issue, ASCE, New York

11・4 その他

石田力三・中村中六 (1991) : 我国の主要な回遊魚 (未発表)

塚本勝巳 (1973) : 魚類の遊泳速度と遊泳能力、水産土木、Vol. 10, No. 1

Katopodis, C. (1990) : Advancing the Art of Engineering Fishways for Upstream Migrants, 魚道会議ぎふ'90論文集

Tsukamoto, K., Kajihara, T. and Nishiwaki, M. (1975) : Swimming ability of fish, Nippon Suisan Gakkaishi, 41

中 賢治・杉谷博隆・氏家宋二・藤岡康弘 (1990) : 小河川における全面階段型魚道の設置事例, 魚道会議ぎふ'90論文集

岩城勝義・山本義弘・片山利幸・妹尾優二 (1990) : 河川改修と魚道の考え方ー北海道の農村地域における中小河川の改修を例として、魚道会議ぎふ'90論文集

神庭治司・鈴木研司・清水 裕 (1990) : 魚道設置方法の改善とその水理的検討、魚道会議ぎふ'90論文集

Moriguchi, H. (1990) : Fishway of Tone Diversion Weir and Salmon, Cherry Salmon, and Sweet Fish, 魚道会議ぎふ'90論文集

Larinier, M. (1990) : Experience in Fish Passage in France : Fish Pass Design Criteria and Downstream Migration Problems, 魚道会議ぎふ'90論文集

小長谷庸夫 (1990) : フィッシュポンプを用いた魚道、魚道会議ぎふ'90論文集

Rajaratnam, N., Katopodis, C. and Mainali, A. (1988) : Plunging and streaming flows in pool and weir fishways, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 114(8)

White, C.M. and Nemenyi, P. (1942) : Report on Hydraulic Research on Fish-Passes, in Report of the Committee on Fish-Passes, The Institution Research Committee, London

Leutheusser, H.J. and Birk, W.M. (1990) : Drownproofing of Low Overflow Structure, J. Hydraulic Engineering, 117(2), ASCE

Rajaratnam, N., Vinne, G.V. and Katopodis, C. (1986) : Hydraulics of Vertical Slot Fishways, J. Hydraulic Engineering, 112(10), ASCE

中村俊六・和田 清 (1990) 階段式にバーチカルスロットを組み込んだ魚道 (デニール式付き) の水理特性, 魚道会議ぎふ'90論文集

Herbich, J.B. and Shulits, S. (1964) : Large-Scale Roughness in Open-Channel Flow, Proc. ASCE, 90-HY6, ASCE

Rajaratnam, N., and Katopodis, C. (1984) : Hydraulics of Denil Fishways, J. Hydraulics Engineering, 110(9), ASCE

Rajaratnam, N., Katopodis, C. and Flint-Petersen, L. (1987) : Hydraulics of Two-Level Denil Fishway, J. Hydraulic Engineering, 113(5), ASCE

Swann, H. and Rothfus, L. (1984) : Compendium of low-cost Pacific salmon and steelhead

trout production facilities and practice in the Pacific Northwest, U.S. Department of Energy, Portland

竹林征三・渡辺 昭（１９９０）：魚道ゲート構造についての研究、魚道会議ぎふ'９０論文集

Watanabe, K., Itou, T. and Marumoto, J.（１９９０）：Nibutani Style Fishway Gate (Swing-Shoot Type)、魚道会議ぎふ'９０論文集

高橋龍城・村川壽朗・横田敏幸（１９９０）：フィッシュビレッジ・オブ・Ｇメホローその魚道技術、魚道会議ぎふ'９０論文集

卯月雅裕（１９９０）：階段式魚道の隔壁形状及び水位調節装置に関する実験的研究、魚道会議ぎふ'９０論文集

寺園勝二・中村 稔・角本正明（１９９０）：超音波を利用した魚数計測装置について、魚道会議ぎふ'９０論文集