

魚道内のアユの挙動に関する実験的研究

Experimental Study on the Behaviour of Ayu in Fishladder

豊橋技術科学大学大学院 学生員 高 嶋 信 博
豊橋技術科学大学工学部 正 員 中 村 俊 六

1. 緒言 近年、河川の中・下流部に取水ぜきが設置されることが多い。一方、河川の自然環境を保護し水産資源生産の場としての河川の機能を積極的に活性化しようとする動きも活発になっている。このため、魚類の通行水路として堰堤などに併設される魚道についても、河川における開発と自然環境保護との調和をはかるための有効な手段のひとつとして、その重要性がますます高まっている現状と考えられる。

我国では衆知のように、東北・北海道には主としてサケ、マスを対象とした魚道が、それ以外の地域には主としてアユを対象とした魚道が、それぞれ多数設置されているが、我国における魚道の設計が欧米のその模倣から出発したこともあって、前者についてはともかく、後者については必ずしもその機能を発揮していないものが少なくない。このため、アユを対象とした魚道の改善や合理的設計法に関する研究は古くから多数行なわれており、近年再び盛んになろうとしている。従来、の主要な成果を、アユを対象とした階段式魚道（魚梯）についてとりまとめれば本文末の付表に示すようである。

しかしながら、同表からもうかがわれるように、これらの成果を魚道という構造物の設計や改良に活用するためには、(1)諸数値に幅があり過ぎる、(2)設計とは直接的に結びつきにくい表現形式が多い、などの不満を感じざるを得ない。(1)については対象とするアユや河川の特性における地域差や、琵琶湖産アユ、海産稚アユおよび人工生産アユの違いなどが、(2)についてはこれらの研究が主として水産関係者のみによって行なわれてきたことなどが、それぞれの原因として考えられる。また、これらの従来の研究からは最近急増しつつある人工生産アユについてのデータがほとんど得られないということも問題点のひとつとして指摘できよう。

本研究は、こうした現状認識に立脚して、魚道内の水の流れに対して水工学的検討を加えるとともに、魚道内のアユの行動特性を湖産アユのみならず人工生産アユについても観察し、流況特性と行動特性の対応関係から魚道の合理的設計のための具体的指針を得ようとするものである。

2. 実験方法

使用した実験水路の側面図および平面図を示せば図-1のようである。同図からうかがわれるように実験水路全体は、高水槽、魚道水路および浄化設備に大別できる。浄化設備としては散水ろ床を用いた。魚道水路は上流側プールと下流側プールの間に、幅1.08m、長さ1.22m、深さ0.72mの箱5個を階段状に連結した形になっているが、それぞれの箱の連結部には切欠き（幅0.38m、深さ5cm）のついた厚さ14cmのセキがはさみ込まれている。それぞれの箱ごとの段差は15cmであり、連結後の平均勾配は約 $\frac{1}{11}$ である。切欠きは交互にシグザグ状に入っており、その反対側の底部には最大直径12.5cmのうなぎ穴（潜孔）がつけられるようになってい

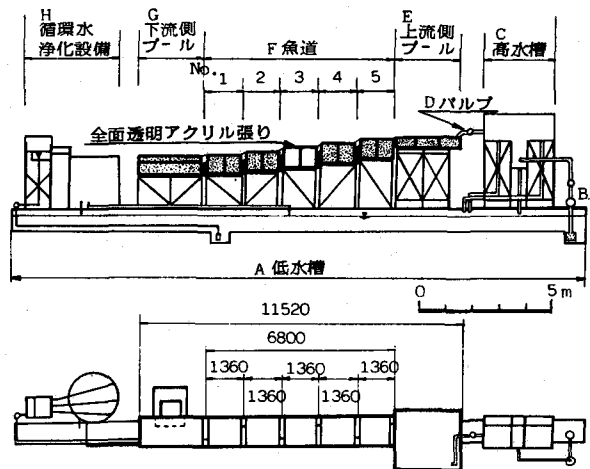


図-1 実験水路（寸法の単位はmm）

る。また、3段目の箱(No.3)は全面透明アクリル製であり、写真1に示すようにその箱の上部には傾斜した鏡が設置されている。実験に際しては、トレーサー(流況測定時)あるいはアユ(アユの行動特性測定時)の挙動を写真1に示すビデオカメラで撮影した。実験に使用したアユは、(1)愛知県栽培漁業センターで生産され、同水産試験場内水面分場で飼育馴致された人工生産アユ約500尾(Run A、B、C)と、(2)琵琶湖産(愛知川のヤナにて捕捉)アユ約300尾(Run D)である。実験は、RunA、B、CおよびD(湖産アユ)のそれぞれについて、流量、うなぎ穴の直径および切欠の越流水深を表-1のように設定した各ケースについて行なった。実験中の水温は約22℃、照度は約250Luxである。アユの行動の観察は、各ケースごとに約20尾のアユをNo.2の箱に放流後、約1~1.5時間行なった。流況の測定にはウォーターブルーを適当な位置に連続注入してまず流れのパターンを把握した後、比重を約1.0に調整した直径約8cmの突起つきの浮標を適当な位置に投入してその移動速度を測定するという方法を用いた。

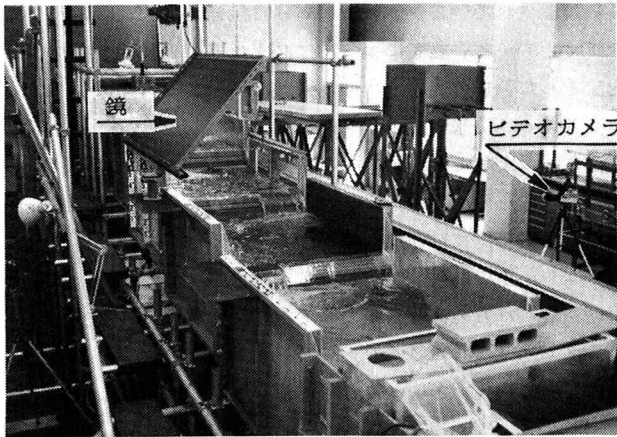


写真1 魚道水路全景

表-1 実験条件

Case No.	切欠の越流水深 (cm)	ウナギ穴の径 (cm)	流量 (l/s)
1	5.3	5.0	14.12
2	5.3	12.5	26.87
3	5.3	0.0	9.06
4	7.3	5.0	26.71
5	2.5	5.0	6.16
6	2.5	12.5	19.96
7	2.5	0.0	5.37
8	8.3	0.0	26.31

Run A	第1回人工生産アユ s58.5.10~15
B	第2回人工生産アユ s58.6. 1~10
C	第3回人工生産アユ s58.6.16~17
D	琵琶湖産アユ s58.5.23~25

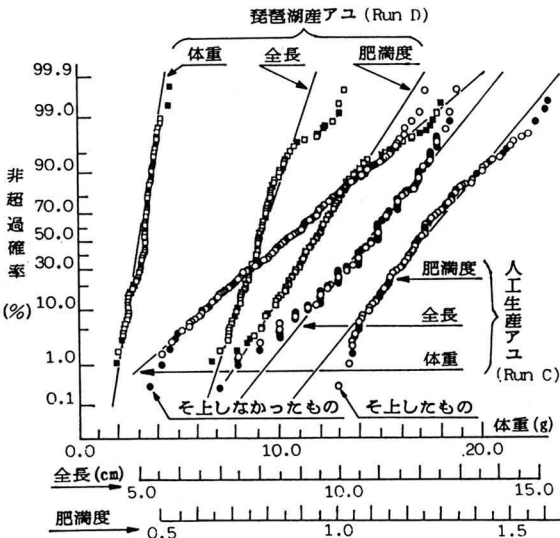


図-2 使用したアユの体型

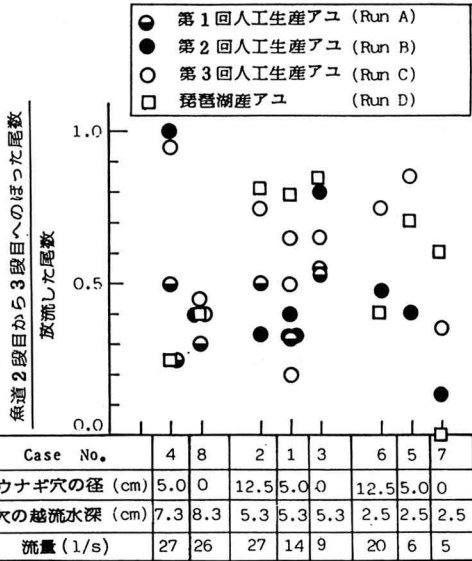


図-3 各実験ごとのそ上率

3. 実験条件によるそ上率の差違 図-2は、実験に使用したアユの体重等の分布例としてRunCおよびDの場合を示したものである。図中○印はRunC（人工生産）、□印はRunD（湖産）の各分布を、また、それぞれ黒く塗りつぶしたものはNo.2の箱から出ることなくそ上しなかったアユを示している。なお、他の人工生産アユ（Run A、B）の分布特性は概略RunCに類似している。同図から、①それぞれの分布はいずれも正規分布している、②使用した湖産アユは人工生産アユよりも細身で小柄である、③そ上するアユとそ上しないアユの間に、体重、全長等に関して有意な違いがあるようには見うけられない、ことなどがわかる。また、すべての実験についてそ上率（そ上した尾数／放流尾数）を見れば図-8のようである。同図から、流量が大ききせき全幅にわたって越流してうなぎ穴が無い場合はそ上率が比較的低い、などの傾向も見うけられるが、全体的には実験条件によるそ上率の違いは、今回の実験に見る限りでははっきりしない、と言ふべきだろう。なお、湖産アユについては、運搬してきたすべてのアユをいったん下流プール内のカゴに移した際に約100尾（全体の約2割）のアユが猛烈ないきおいでカゴを抜け出し約5分程度の間にそれらのほとんどすべてが上流プールまでそ上してしまっている。RunDで使用したアユはその残りのアユであることに留意する必要があるだろう。すなわち、もし、すべてのアユを同時に放流したのであれば（集団行動として）図-8よりもはるかに高いそ上率を示した可能性があり、この点を考慮すれば、湖産アユの方がそ上指向性が強かったと判断される。（そ上率は、実験時刻、運搬後の経過時間などにも影響されると思われるが、今回の実験では特に見るべき傾向は見出せなかったので、ここでは割愛させていただく。）

4. 魚道内のアユの挙動と流況

(4-1) アユのそ上経路 いくつかのアユが切欠きを有するセキを越えてそ上する際の挙動を図化した例を示せば図-4のようである。同図左側はうなぎ穴が無い場合、右側はうなぎ穴（ $\phi 125$ ）がある場合であり、それぞれの上部の図Aはいずれも鏡に写ったものを横から見たもの、下部の図Bはアクリル板を通して横から見たものである。観察によれば、そ上したアユはそのほとんどが同図のように切欠き部分からそ上

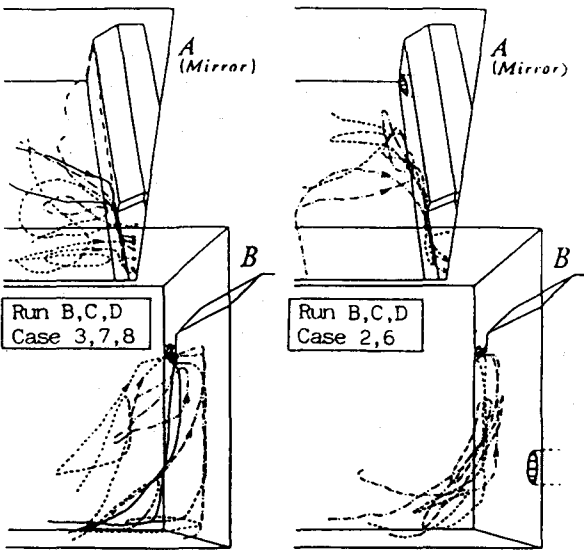


図-4（上図） そ上する直前のアユの挙動

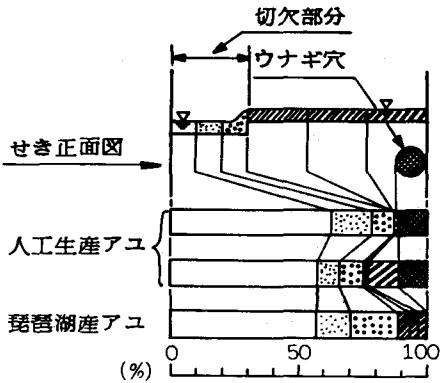
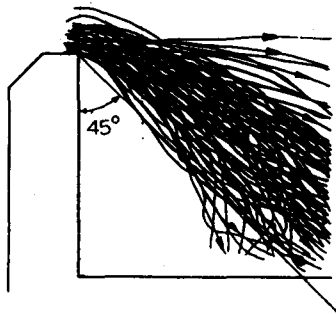


図-5（右上図） そ上時に通過する位置の割合

図-6（右下図） そ上時の進入経路（進入角度）



した。せき断面内のどの部分を通してそ上したかを、通過したものの割合で示せば図-5のようである。図-5に示されているように、人工生産アユの場合、うなぎ穴から潜入する形で上の段(No.3から4へ)にそ上したものもあるが、人工、湖産を問わずほとんどは切欠きからそ上し、さらに、切欠き中でも側壁に最も近い部分からそ上したものがほとんどである。さて、図-4に戻って、切欠き部分からそ上する直前の動きを見れば、(1)うなぎ穴の無い場合(左図)には、正面から切欠きに向うものもあり、比較的自由にそ上経路を選んでいるように見受けられるが、(2)うなぎ穴のある場合には、すべてがほぼ同一の経路を選んでいることが注目されよう。後述する流況の観察結果によれば、前者の一部と後者のすべてが選択しているこの経路は、切欠きからの落下流の直撃を避けてその背面にまわり、落下流の背面と側面に形成された逆流部分を通過する経路である。すなわち、そ上しようとする大部分のアユは、落下流の直撃を避けながら、逆にその背面に形成される上向きの流れを巧みに利用して、その流れに乗って上の段の魚道へとそ上していることが理解されよう。

なお、そ上した直後の経路、すなわち進入経路は、図-6のようであって 45° よりも緩い角度で上段の箱に進入する(平均的には約 55°)。

(4-2) 魚道内のアユの挙動と流況

代表的な1尾のアユがNo.3の箱に進入してからNo.4の箱にそ上して行くまでの経路(実線)と、そのケースでの魚道内の流況の概略(破線)とを併記した例を示せば図-7および8のようである。図-7はうなぎ穴が無い場合、図-8はうなぎ穴のある場合のそれぞれ代表的なパターンと考えて良い。これらの図から、

- (1) まずアユの挙動については、魚道内におけるアユの主要な行動範囲は、うなぎ穴が無い場合もある場合も魚道の底部であり、
- (2) 平面的には、うなぎ穴が無い場合には切欠きの直下流を除く領域で、ある場合にはうなぎ穴と切欠きの中間領域で、いずれも比較的上流部、であり
- (3) つぎに、これらの主要行動範囲の流況については、いずれの場合も、切欠きからの落下流やうなぎ穴からの強い流れの主流部からはずれた領域の底部である、

ことがうかがわれよう。すなわち、アユは強い流れの直撃は避けながら、それによって生じるみだれたながれを頭上(背中)に受けながら、そ上する経路を探り、タイミングをとらえようとしているように見受けられる。

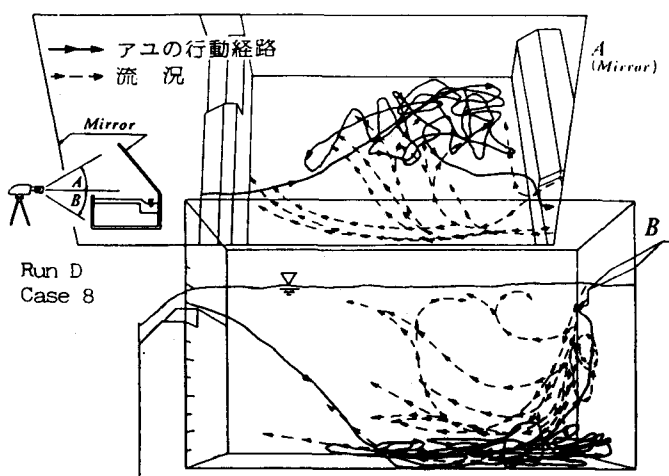


図-7 魚道内のアユの挙動と流況(うなぎ穴の無い時)

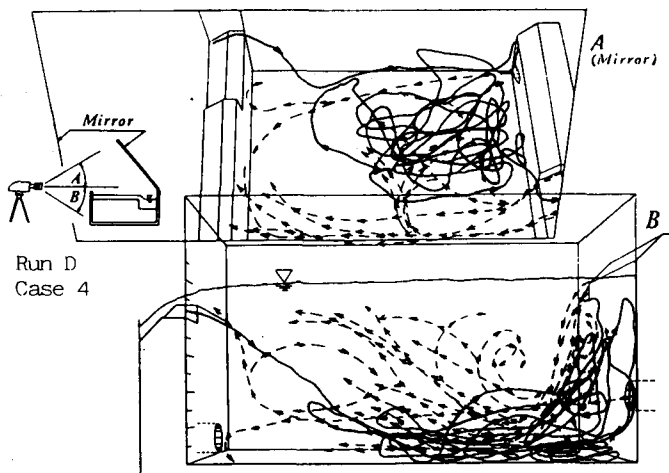


図-8 魚道内のアユの挙動と流況(うなぎ穴径 125 mm)

(4-3) アユの遊泳速度 アユの遊泳速度あるいは遊泳力については、従来の研究⁽¹⁾によって(1)稚アユの体長と遊泳力はほぼ比例する、(2)低流速では遊泳速度は小さく、流速の増加にしたがって泳力を増す、(3)ある流速(30~40 cm/s)のあたりで最高の泳力を発揮し、それより流速が増加するとかえって遊泳速度は低下するが、(4)流速80~100 cm/sで再び遊泳速度を増し第2ピークを示し、(5)そのピークを過ぎると遊泳速度は急激に落ちてついには流れに押し流される、ことが知られている。今回の実験に用いたアユの魚道内での遊泳力(流速+移動速度)と流速の関係を代表的アユについて示せば図-9のようである。同図中に実線と一点鎖線で示した曲線は小山⁽¹⁾による遊泳速度(移動速度)に関する実験結果から、筆者らの用いた人工生産アユ(体長8~9 cm)と湖産アユ(6~7 cm)に対応する体長のものを引用併記したものであり、破線の直線は移動速度がゼロの位置を示したものである。同図から、(1)今回使用したアユの魚道内での遊泳速度は、小山による実測値よりも著しく小さいが、(2)遊泳力と流速との対応関係における上述の傾向は定性的に良く類似しており、(3)人工生産アユと湖産アユ(ただし、猛烈な勢いでのはってしまった約2割のアユを除く普通のアユであることは前述したとおり)の間に優劣はつけがたく、(4)遊泳速度は流速が30~40 cm/sのところで、また、遊泳力は流速が100~120 cm/sのところで、それぞれ最高値を示している、ことなどがうかがわれよう。なお、上記の流速の測定結果の1例を示せば図-10の太い矢印のようであり、上記のアユの遊泳力の測定はこれらの流速の測定された位置におけるアユの移動速度から算出したものである。

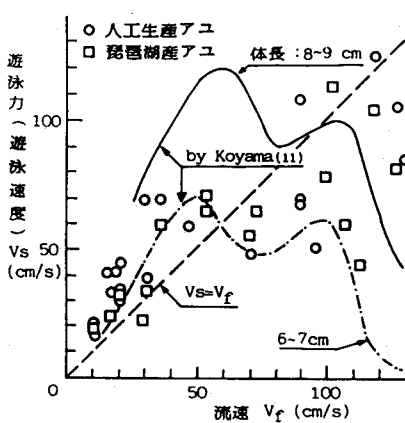


図-9 アユの遊泳力と流速の関係

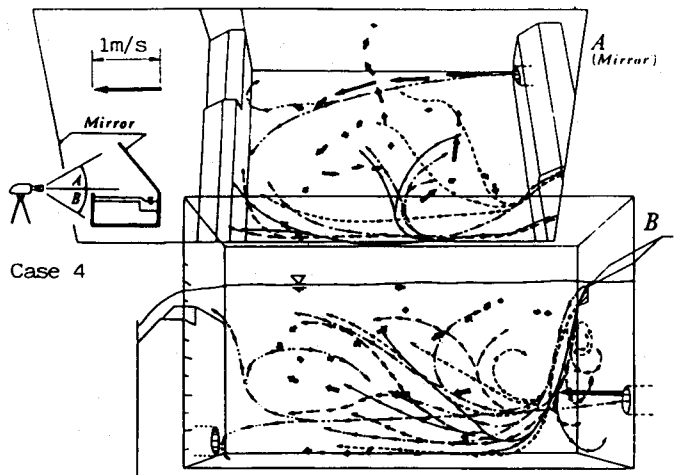


図-10 流況および流速の測定結果例

5. 結論 以上、人工生産アユと琵琶湖産アユを模型魚道内に放流して、魚道内におけるアユの挙動と流況の各特性を実験的に検討した結果を報告した。比較的勾配の緩い魚道を用いたこと、アユの集団行動については把握されていないこと、など問題点も多く、なお多くのケースについてのデーターの蓄積が要求されるが、少くとも以上の結果に見る限り、(1)のぼるアユとのぼらぬアユの間に全長等の違いはない、(2)アユの挙動は魚道内の流況と密接に関連し、とくにそ上時には逆流部を巧みに利用するアユが多い、(3)魚道内の平均流速という表現はあいまいであるのみではなくアユにとってほとんど意味が無く、(4)のぼり得る魚道の条件としては必要な流況が部分的に形成されていれば良いように見うけられる、など今後の研究や魚道の設計にとって有効な示唆が得られたものと評価できよう。

なお、広島大学名誉教授中村中六博士ならびに愛知県水産試験場内水面分場小林隼人氏には、アユの入手に際し多大なる御援助を賜わるとともに、アユの生態、飼育法などについて御教示いただいた。末尾ながら深甚なる謝意を表します。

(付表) アユを対象とした階段式魚道の実態と理想的条件(従来の調査研究成果より抜粋して作表 — 右肩の()は参考文献番号)

対象事項	現状(実態)	理想的条件(あるいは限界条件)
(1) 設置位置	種々のケースあり ⁽¹¹⁾	右岸と左岸のどちらか一方で良い(川幅50m以下の場合) ⁽⁷⁻⁵⁾ , 両岸に設置すべき(川幅100m以上の場合) ⁽⁷⁻⁵⁾
(2) 魚道の登り口位置	ダムの下が多い ⁽⁷⁾	河流の方向と一致させるのが良い, ⁽⁶⁻¹⁾ ダムから2-12m ⁽⁸⁻⁴⁾ ■ 難す必要がある, 魚の良く集結する場所 ⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁻²⁾
(3) 魚道の出口位置	取水口に平行した場所が多い ⁽⁷⁾	渇水区に近い位置が良い ⁽⁷⁾
(4) 魚道の勾配	1/10, 1/3-1/58(1/10が最も多い) ⁽⁷⁾	魚道幅が広いほど緩にする, ⁽⁸⁻⁵⁾ 1/12-1/10以下 ⁽⁷⁻⁴⁾
(5) 魚道の幅員	2m(最小) - 19m(最大), 3-5.5m ⁽⁶⁾	0.9mあれば良い, 少なくとも1.6-2.0m以上, 最小有効幅員は3m以下では効果なし, 広い方が良い, ⁽⁹⁾ 0.6m(小形の魚に対して), 1.2m(大形の魚に対して) ⁽⁸⁻⁵⁾
(6) 幅員率(魚道幅/川幅)	1-15%(4%が最も多い) ⁽⁴⁾	4-5%以上 ⁽¹¹⁾
(7) 魚道内の平均流速	1.17m/sの時上最大で1.3m/sが上限速度, 1.2-1.5m/s(最大) ⁽⁸⁻³⁾ 3.0m/s以上を生じさせない ⁽⁸⁻⁵⁾	0.4-0.6m/s ⁽⁴⁾ , 1.0-2.0m/s ⁽¹¹⁻²⁾ , 1.2-1.8m/s ⁽⁷⁻¹⁾
(8) 魚道内通水量	1-3.0m ³ /sが最も多い ⁽⁷⁻¹⁾	通水量が少ないものも多いものも不可 ⁽⁸⁻³⁾
(9) 魚道落差	51mが最大 ⁽⁶⁾	9-10m以上のダムには価値が少ない, ⁽⁸⁻³⁾ 40m程度の堰堤では有効 ⁽⁵⁾
(10) 各プールごと落差	30cm以下が多い ⁽⁴⁾⁽⁸⁻⁷⁾	30cmを目安, 30cmを限度, 30-40cm(小さな魚の場合) ⁽⁷⁻³⁾⁽⁸⁻²⁾⁽⁷⁻²⁾
(11) ノッチ(切欠)の位置	ジグザグ配列が多い ⁽⁶⁾	ジグザグに配列するのが良い ⁽¹¹⁾
(12) ノッチ(切欠)の形状	深さ15-20cm, 幅1mのものが大部分 ⁽⁶⁾	幅は少なくとも0.3-0.4m以上, 狭く深いものは良くない ⁽⁸⁻⁴⁾
(13) 藩孔の大きさ	0.2-0.3m ² のものが大部分 ⁽⁹⁾	

参考文献

((8-3))のように一を付したものは、文献8中に引用された文献であることを示す)

(1) 小山長雄、滝沢達夫：関屋分水路可動堰の魚道設置に関する調査(1968年度受託研究報告)、信州大学繊維学部生物工学教室、1969、P26、(2) 小山長雄：魚ののぼらぬ魚道、内水面漁業技術研修会(資料)、1980、P20 (3) 白石芳一：北上大堰魚道水理模型におけるアユのそ上行動、水産増殖、21(2)、1968、(3-1) 白石芳一：階段式魚梯におけるそ上の生態について、水産増殖、1955 (4) 小山長雄、滝沢達夫：魚道と堰の放水管理及び予測される魚道効果、木曾三川河口資源調査報告、No.4、1967 PP145-148 (5) 高堰堤における魚道調査概要、高岡ダム・星山ダム、1979 (6) 小山治行：魚道とその効果について、内水面漁業資料第42集、1954(6-1) 田内森三郎、安田秀明：本流をそ上した魚が魚道へ転入する率、水物談会報、(19)、1930 (7) 稲葉伝三郎、竹内直政：魚道の設計について、内水面漁業資料第44集、1954、PP6-12 (7-1) 橘英三郎：魚梯そ上試験、水研誌、12(1)、1917 (7-2) Frischholz: Anlage und Betrieb von Fischpassen, Handbucn der Binnenfisc - herei Mitteleuropas, 1928 (7-3) 日暮忠：魚梯の話、水産界、1916 (7-4) 山田陽清：河川及運河、総合工学全集、1931 (7-5)(6-1)と同じ (8) 小山長雄：魚道をめぐる諸問題、文献篇、KST報告、1965 (8-1) 日暮忠：魚梯の話、水産界報、1915 (8-2)(7-3)と同じ (8-3) 日暮忠：魚梯に就て、土木学会誌、4(1)、1918 (8-4) 青戸信賢：魚道に就て、帝水、1928 (8-5) 関口四郎：魚道の構造に就て、水産会報、1912 (8-6)(7-1)と同じ (8-7)：白石芳一：階段式魚梯におけるそ上アユの生態について、水産増殖、1955 (9) 加藤精一：魚道及び魚梯、日本水産資源保護協会、水産増殖叢書、(17)、1968、PP49-51 (10) 木曾三川河口資源調査団報告、第4節魚道、1965、(11) 小山長雄：魚道の診断と設計(1)~(4)、にほんのかわ、No.24~27、1983 (11-1) 建設省、1966 (11-2)(8-7)と同じ (11-3) 田内森三郎：魚梯に関する二三の実験並びに其解説、電気協会会報、第87号、1929 (11-4) 小山長雄：アユの生態、中公新書、1978