

水位落差の大きな魚道の流況改善について

IMPROVEMENT MEASURES OF POOL-AND-WEIR FISHWAY WITH LARGE WATER DIFFERENCE

浦 勝¹・山口秀和²・鬼束幸樹³・秋山壽一郎⁴

Masaru URA, Hidekazu YAMAGUCHI, Kouki ONITSUKA and Juichiro AKIYAMA

¹正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水1-1)

²学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

³正会員 博(工) 九州工業大学助手 工学部建設社会工学科

⁴正会員 Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科

A pool-and-weir fishway has been constructed at one side of the weir which stands across a river for irrigation. Unfortunately, the difference of water elevation between the upper stream and the first pool of this fishway is relatively large in comparison with that between another pools. Therefore, the velocity of the falling flow is higher than the burst speed of the small fishes. As a result, such fishes cannot migrate to the upstream of the river. Several improvements for this fishway are suggested in this study. The flow velocity and the water surface fluctuations in such improved fishways were measured with a 3-D electromagnetic current meter and a water-wave gauge. It was verified that the falling velocity in one of improved fishways is lower than the burst speed of the small fishes.

Key Words : pool-and-weir fishway, burst speed, field measurements, migration

1. はじめに

河川に設けられた取水用の堰が統廃合され大型化されると、水位差が大きくなり魚類の縦断方向の自由な移動が阻害され、かつ河川生態系に影響を与えることが懸念される。そのため、河川によっては特に漁業権が設定されていなくても、堰やダムには魚道を設置し、魚類の縦断方向の移動を助け、河川の環境保全に努めている。

魚道の形式は、水路タイプ、プールタイプ、オペレーションタイプに大別される^{1) 2)}。オペレーションタイプは一般に操作用の動力を必要とし、水資源用として用いられる。水路タイプにはデニール式、スティーブパス式、バーチカルスロット式などもあるが^{3) 4)}、緩勾配バイパス水路、粗石付斜水路は環境保全上より優れた形式といえる。一方、プールタイプとしては古くから隔壁とプールで構成される階段式魚道が用いられてきたが、この魚道は流入流量が変化すると、プール内の循環渦の回転方向が変化するなど、流況の不安定性が指摘されている⁵⁾。とくに全面越流型ではセイシュが発生することがあり⁶⁾、これを改善するものとしてアイスハーバー型が導入されている²⁾。このように、階段式魚道は種々の問題を抱えているが、既に日本の河川に数多く設置されているのが現状である。こうした魚道を作り替えることも不可能で

はないが、それには多くの時間とコストが必要であり、若干の改修でその機能を果たさせる方が現実的である。

著者らは福岡県を流れる一級河川を横断する農業用取水堰に併設された階段式魚道における遡上状況の観察を行った。この堰では利水目的のために貯水位を維持する必要があり、灌漑期には最上流の隔壁に「角落し」がはめ込まれ、上流側から第1番目のプールへの落差がその他のプール間落差よりも極めて大きくなっている。そのため、水脈の落下速度が小型魚の突進速度を上回り、小型魚は水脈中を遡上することができず、空気中を遡上する跳躍遡上を強いられていた。ところが観察の結果、小型魚は跳躍遡上に全て失敗していた。そこで現地で直ちになし得る改善を行ったが、跳躍遡上率はほとんど向上しなかった。現地計測の結果、跳躍遡上の失敗の原因は、落下流がはく離していること、落下流速が突進速度を超えていることおよびその流向にあることを突き止めた。これに基づきいくつかの改善案を提案し、その室内模型を作成し、水面変動と3成分流速を容量式波高計と3次元電磁流速計を用いて計測した。その結果、提案された改善案の一つでは小型魚でも遊泳遡上の可能性があり、跳躍遡上する場合でも遡上率が向上する可能性があることを確認した。

本研究は、ケーススタディーにすぎないが、同様に階

段式魚道の水位落差が大きく、魚が遡上できない状況は国内に少なくないと考えられる。本研究の結果がこうした魚道に利用されることを期待し、ここに報告する。

2. 現地測定

(1) 対象魚道の詳細

河口より33km地点に農業用水と都市上水の取水を目的として設置された落差3.6mの可動堰（鋼製転倒ゲート3門）がある。この堰の右岸側には、幅2.0m、プール長2.0m（隔壁厚さ0.3m、プール有効長1.7m）の交互切欠き付階段式魚道が、プール数18個、全長38mで設置されている。かんがい期（5月20日～10月5日）には、魚道より上流側での貯水位 H_0 が23.0mに保持されており、出水時には $H_0=23.1$ mとなるように転倒ゲートで調節されている。また、非かんがい期では貯水位 H_0 は22.5mに下げられる。

上流側から4個の隔壁部分の平面および縦断面図を図-1および図-2に示す。流下方向を x 、鉛直上向きを y 、横断方向を z とした。第1隔壁(W1)の天端高は23.0mであり、それ以降の隔壁の天端高はそれぞれ0.2mずつ低くなっている。両岸に交互に設置される切欠き部の幅はすべて0.7mである。切欠き深さは第3隔壁以下では0.2mであるが、第1隔壁(W1)と第2隔壁(W2)ではそれぞれ0.6、0.4mであり、両隔壁の切欠き部に角落しを入れることによって、貯水位の変化に対応できる構造となっている。しかし現実には利水目的のため、かんがい期の貯水位を $H_0=23.0$ m以上に保持することが重視され、第1隔壁の切欠き部には角落しが常時約23.0m水位まで入れられる。結果として第1隔壁は天端高が約23.0mの全面越流型魚道となっている。なお、第1隔壁を除く全ての隔壁には切り欠き部の反対側において、天端から0.7m下に 0.2×0.2 mの正方形の潜孔がある。

(2) 現状および緊急改善

かんがい期において、降雨があった翌日に対象魚道を観察すると、貯水位は $H_0=23.10$ mとなっており、第1隔壁の切欠き部に高さ23.02mまで厚さ5cmの角落しが入れているため第1プールとの水位落差は $\Delta H_1=0.51$ mにも達していた。そのため、魚の遡上が全く不可能になっていた。そこで、第2隔壁の切欠き部において、22.6m水位まで角落しを入れ、さらに第2隔壁の潜孔を塞いだ。このため、第1プールと第2プールの水位差 ΔH_2 が若干増加するものの、貯水位 H_0 と第1プールとの水位差 ΔH_1 を低下させることができた。この改良を行った後の各水位をレベルとポイントゲージを用いて計測した結果を図-2中に示した。プール間落差は、

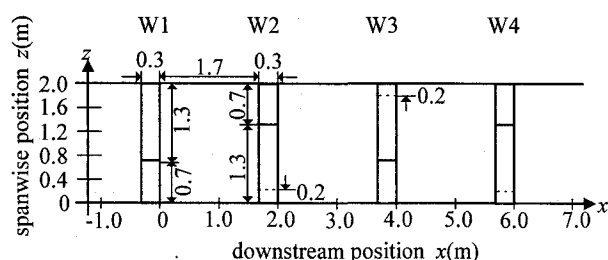


図-1 魚道平面図（第1～第4隔壁間）

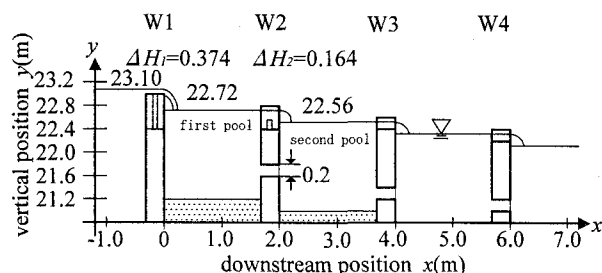


図-2 魚道縦断面図（第1～第4隔壁間）

$\Delta H_1=0.37$ m、 $\Delta H_2=0.16$ mであり、 ΔH_3 以降はほぼ0.2mであった。階段式魚道の落差は $\Delta H=0.15 \sim 0.2$ m以下が多く採用され、最高でも0.3m程度とされており^{7,8)}、 ΔH_1 の落差を魚が遡上できるかどうかが重要となる。なお、このとき第1隔壁では全面越流であり、水脈は隔壁天端から剥離し自由落下していた。第2隔壁では切欠き部のみの越流、第3隔壁以降は切欠き部と潜孔からの流下となっていた。

(3) 遡上状況の観察

先述のような改善を行った後、この魚道の最上流端に位置する第1プールまで遡上してきたオイカワが第1隔壁を遡上する状況を観察した。その結果、第1隔壁から落下する水脈中を泳いで遡上するオイカワが全くみられず、空中を遡上する跳躍遡上を強いられていた。そこで、デジタルビデオカメラを第1プールの側岸付近に設置し、オイカワの跳躍遡上の状況を約110秒間撮影した。

ビデオ撮影された中から抽出した20秒間に跳躍した14尾のオイカワ（体長7～20cmで平均15cm）の跳躍軌跡を図-3に示した。跳躍始点の x 座標に記した○印は上流側に向かって跳躍して遡上に成功したもの、△印は上流側に跳躍したが失敗したもの、×印は下流側に向かって跳躍して失敗したものを表している。跳躍した14尾の内、成功したのは1尾、すなわち遡上率は7%にすぎなかった。また、3尾(21%)は跳躍高さが第1隔壁高の23.0mに達していないこと、6尾(43%)は下流方向に跳躍していることおよび4尾(29%)は跳躍方向が上流側だが水平距離が足りずに第1隔壁まで到達していないことが観察され、遡上失敗の原因として、跳躍高さが足りないことおよび跳躍方向を誤ったことなどが考えられる。

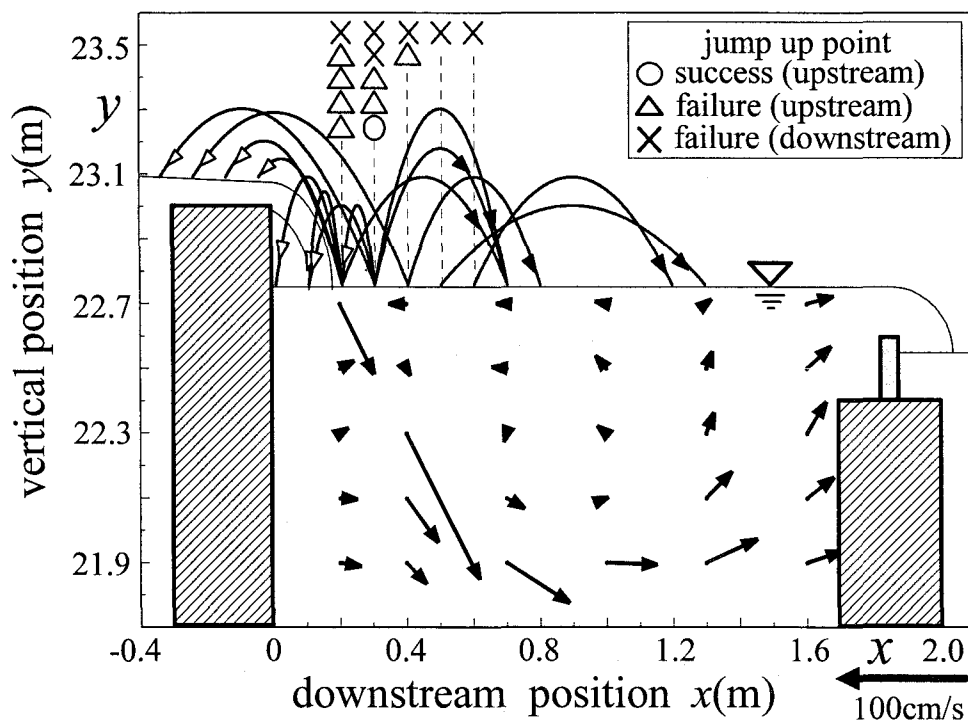


図-3 第1プール内の流速ベクトル(U , V) ($z=1.9\text{m}$ の断面)とオイカワの跳躍軌跡

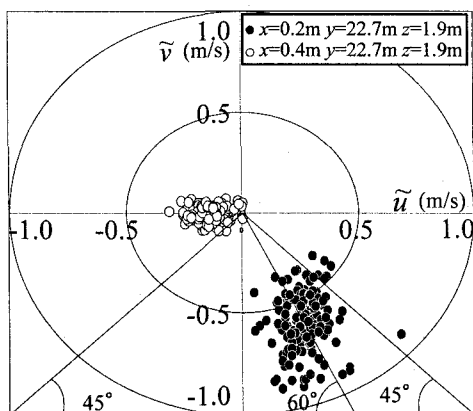


図-4 瞬間流速($\tilde{u}$, $\tilde{v}$)

(4) 電磁流速計を用いた現地の流速計測

魚が遊泳遡上せずに跳躍する原因として、落下流の流速が魚の突進速度 U_{BS} を上回っていることが考えられる。一般に、魚の突進速度 U_{BS} は次式で表される²⁾。

$$U_{BS} = 10BL \quad (1)$$

ここに、 BL は体長であり、今回測定できたオイカワは平均的には 15cm であるため、突進速度 U_{BS} は 1.5m/s 程度と算出される。そこで、落下流の速度と突進速度とを比較するために、3次元電磁流速計を用いて第1プール内の右岸側半分において、流下方向6点、水深方向5点、横断方向4点の計120点でサンプリング間隔 0.33s 、サンプリング時間 169s の流速計測を行った。

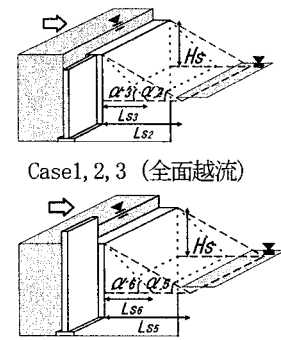
各4つの x - y 断面で得られた流速ベクトルの1例を図-3中に示した。第1プールの $x=0.1\sim 0.2\text{m}$ 付近に落下

する水脈は落下流速が 1.5m/s 以上に達しており、オイカワの突進速度を超えていることが確認される。一方、和田⁹⁾は同じ水理条件において、落下流が隔壁からはく離する場合としない場合の遊泳遡上状況を観察した結果、はく離する場合は遊泳遡上率が低下することを指摘した。すなわち、魚が遊泳遡上ではなく跳躍遡上を強いられた原因として、水脈がはく離していることおよび落下流速が突進速度を超えていたことが考えられる。

さて、図-3より観察された魚のうち43%は誤って下流方向に跳躍し、しかも跳躍開始位置が落下流から遠ざかるほどその傾向が顕著となっていることが観察される。中村²⁾は魚の遊泳に関する第1定理として「魚はその体長分の長さしか流れを認識できない」と述べていることから、跳躍方向を誤る魚が多く存在するのは、それらの魚が空中に跳躍する際の水面付近における瞬間流速の流向と渦のスケールに問題があると考えられる¹⁰⁾。図-4に $z=1.9\text{m}$ 断面の水面付近における $x=0.2\text{m}$ および $x=0.4\text{m}$ の瞬間流速 ($\tilde{u}$, $\tilde{v}$) の分布を示した。ここに、 $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ はそれぞれ x , y 方向の瞬間流速である。落下点付近の $x=0.2\text{m}$ の断面では、瞬間流速はほぼ第4象限に存在し、しかも $\tilde{u} < 80\text{cm/s}$ の低速度ではその角度が水平面から約 60° となっている。これは、魚が水面から約 60° で跳躍することを示唆する。ところが落下点から離れた $x=0.4\text{m}$ の断面では、主として第3象限に位置し、しかもランダムである。そのため、魚は跳躍方向を誤ったものと推測される。

表-1 実験条件

Case.No	1	2	3	4	5	6
越流状態	全面越流			スロープ部のみ		
流量(cc/s)	3820			2480		
スロープ角度 α		30°	45°		30°	45°
スロープ水平方向長さ L_s (cm)		10	17.3		10	17.3
スロープ高さ H_s (cm)		10			10	
越流水深(cm)	2.45					



Case4, 5, 6 (スロープ部のみ越流)

図-5 隔壁形状

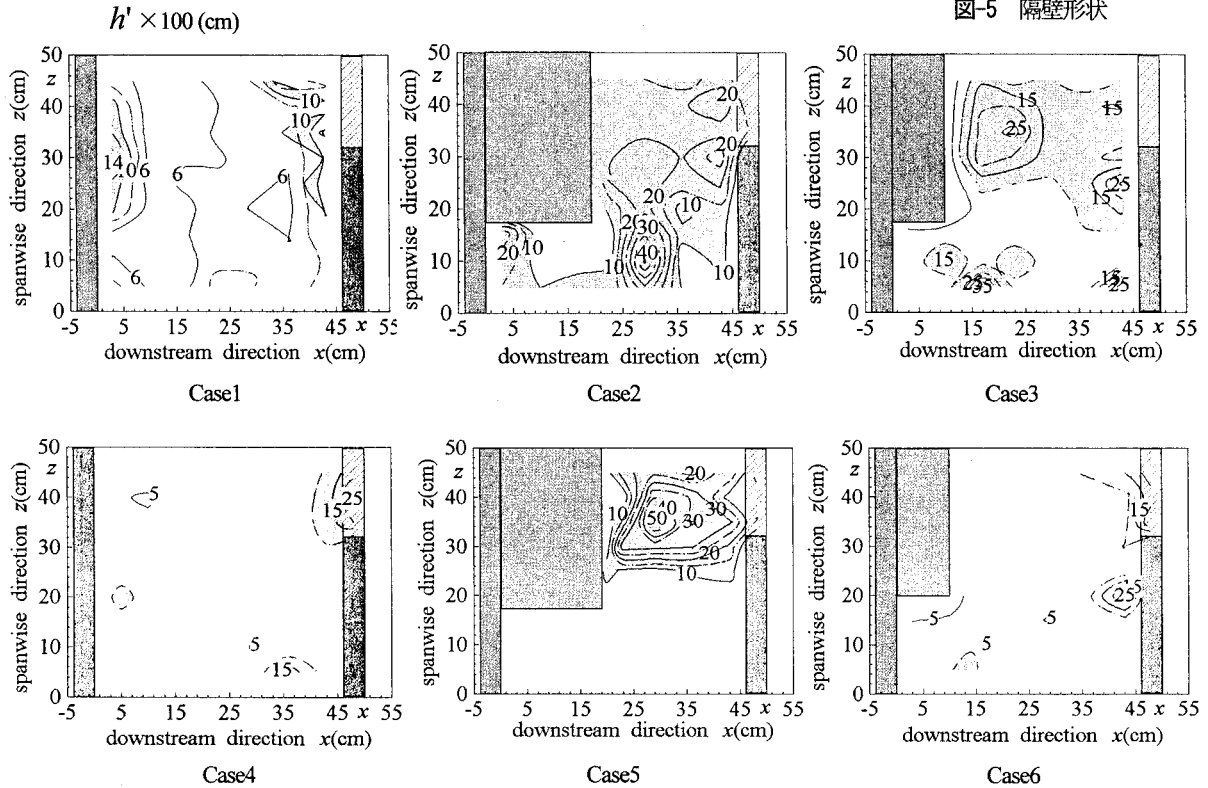


図-6 水面変動強度

3. 改善案の提案

現地計測の結果、対象魚道において魚が遡上できない原因が、①落下流の水脈が隔壁から剥離し、②その進入角度がランダムで適切でないことおよび③落下流速が突進速度を越えているという3点にあると推測された。ところが、対象魚道では貯水位を23.0m以上に保つために第1隔壁の切欠き部に23.02m水位まで角落しを入れる必要があり、落差を小さくすることは難しい。そこで、落差 ΔH_1 を変えずに遊泳遡上を可能とする改善案として、第1隔壁の非切欠き部分にスロープを取り付けることを提案する。これによって、①第1プールに流入する流れがはく離せず、②流入角度を定常的に安定させ、③流速の減速も期待される。しかも気泡の連行を減少させることも予測される。ただし、スロープの最適な角度は予測できず、実験結果に基づいて決める必要がある。

4. 室内模型実験

(1) 実験装置および測定方法

実験に用いた水路は、全長4m、水路幅50cm、勾配1/12.5である。模型縮尺を $s=1/4$ とすると、速度縮尺は $\sqrt{s}=1/2$ となる。現地魚道の第1～第4隔壁の模型を実験水路中に設置することで、現地魚道を再現した。

実験条件を表-1に示し、改善案の模式図を図-5に示した。ここに、 α はスロープの角度、 L_s はスロープの張り出し長さ、 H_s はスロープの落差であり、添字はケース名を表している。Case1は実魚道の現状を再現したものである。Case2およびCase3は第1隔壁の非切欠き部(17.5<z≤50cm)にスロープを設置するもので、スロープ角度をそれぞれ30°および45°としたものである。後述するが、Case1～3では切り欠き部(0<z≤17.5cm)でも越流が生じ、極めて3次元的な流れとなり、なおかつ水面

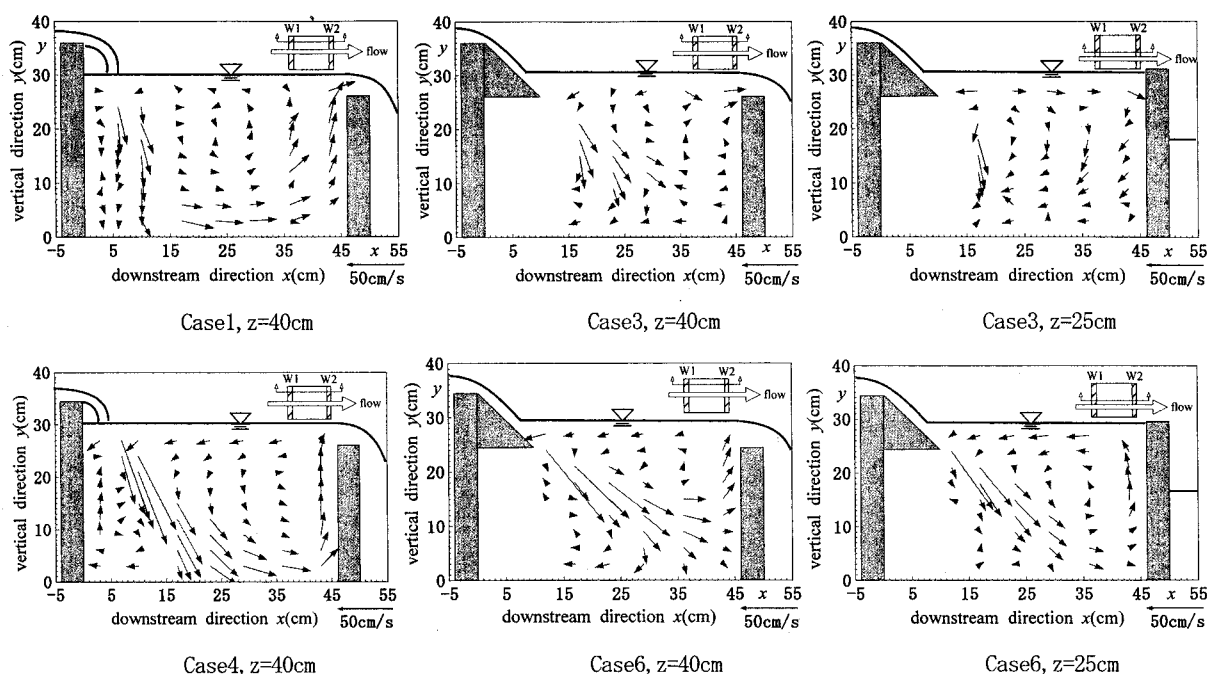


図-7 第1プール縦断面内の流速ベクトル(U, V)

変動が大きく空気混入も顕著であった。そこで、Case1～3の切欠き部における隔壁の高さを高くし、スロープ部のみの越流としたものをCase4～6とした。

3次元電磁流速計を用いた流速測定と、容量式波高計を用いた水面変動測定を行った。流速測定点は、第1プールにおいて流下方向(x)に7点、鉛直方向(y)に9点、横断方向(z)に9点の計567点であり、サンプリング間隔を0.33s、サンプリング時間を84sとした。また、水面変動測定点は x 方向に7点、 z 方向に9点の計63点であり、サンプリング間隔を0.1s、サンプリング時間を60sとした。

(2) 実験結果および考察

a) 水面変動特性

図-6に水面変動のRMS値 h' を示す。なお、図中の数字は h' を100倍した値で、ハッチされた領域は $h' \geq 0.1\text{cm}$ の領域である。目視によると、スロープ角度が 30° のCase2およびCase5ではスロープを下った流れが第1プール内の水面付近を通過し、次の第2隔壁へと流れていく“streaming flow”となっていた。そのため、波状跳水的な流況で水面が大きく変動していた。高須ら¹¹⁾は“streaming flow”は望ましくなく、プール内で反時計回りの循環渦(図-3の図面において)が発生する“plunging flow”が適していると述べている¹²⁾。また、Case2、Case5では多くの空気連行が認められた。中村²⁾、久保田¹³⁾らは空気連行が魚の遡上を阻害することを報告しており、両ケースは望ましくない状態といわざるを得ない。

一方、Case4およびCase6は水面変動がかなり押さえられていることが観察される。

b) 流速分布

スロープ角度が 30° のCase2およびCase5についてはstreaming flowとなり、しかも空気連行が顕著で魚道として適さないことは既に述べた。ここではその他のケースに着目する。図-7にCase1、3、4および6における縦断面内($x-y$)の流速ベクトル(U, V)の例を示す。Case1は現地魚道を再現したものであり、図-3で示された現地計測の結果とほぼ一致する。Case3については、 $z=40\text{cm}$ の断面ではスロープからの流入角度が 50° 程度になっており流入角度の改善が認められるが、 $z=25\text{cm}$ の断面では流入角度は垂直に近かった。これは切欠き部($0 < z \leq 17.5\text{cm}$)からも越流するために、スロープ部($17.5 < z \leq 50\text{cm}$)を越流する流れと切り欠き部を越流する流れがプール内で混合し、流れが複雑化することの一因があると考えられる。

一方、図-7のCase6の流況に着目すると、 $z=25, 40\text{cm}$ の両断面とも、スロープを下った流れが水平からほぼ 45° でプール内に流入していることが分かる。しかも、streaming flowではなくplunging flowとなっていることから、減勢効果が十分にあることも確認でき、第1プールから続いて落下する第2プール内の流況を悪化させることはほとんどないものと考えられる。次に、落下流が突進速度を超えるかどうかを判定する必要があるが、この電磁流速計を用いた計測は極めて粗な計測メッシュしか用いておらず検討が困難である。そのため、以下に示すような計測を追加し、検討を加えた。

c) スロープを下る流れのプールへの流入流速

Case6において、スロープ先端($x=10\text{cm}$)よりスロープ

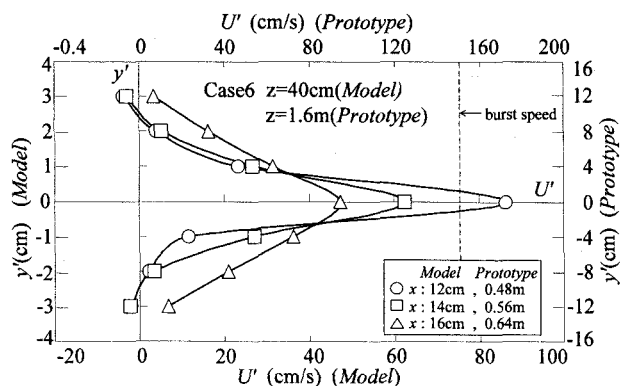
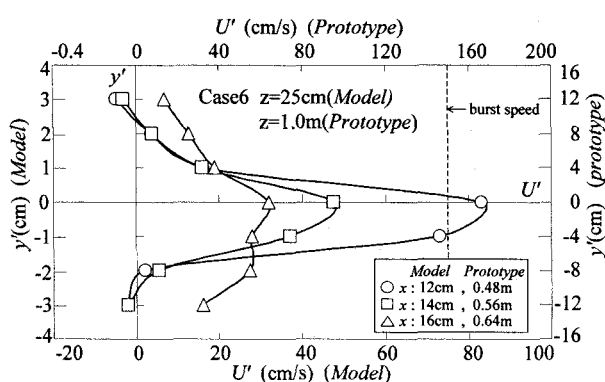


図-8 Case6におけるスロープ延長方向の流速 U'

延長方向およびその軸の直角方向(y')に2cmずつ、プロペラ流速計をトラバースさせて、サンプリング間隔0.05s、サンプリング時間60sで計測を行った。z=25, 40cmの断面における3測線上(x=12, 14, 16cm)の流速結果(Model)とそれを実スケールに換算した結果(Prototype)を図-8に示す。ここでは、実スケールに基づき議論する。両断面ともスロープ先端に近いx=0.48mで流速が160~180cm/sに達している。オイカワの突進速度は150cm/sであり、突進速度を上回る領域は $y'=\pm 2$ cm程度の範囲である。また、流下に伴い急激に流速が減速し、スロープ先端から16cm下流域ではオイカワの突進速度を十分に下回る。こうした領域はオイカワの体長スケールと同様であり、この領域をさけることで遡上が可能と考えられる。また、瞬間的には平均流速よりも低流速が発生するため、遊泳遡上が可能であると期待できる。

5. おわりに

本研究では、落差の大きな(0.51m)現地魚道の観察を行い、魚が全く遡上していない状況を目にした。現場で早急に対応できる改善を施し、落差を縮小(0.37m)したが、遡上率はほとんど向上しなかった。これは、落下流がはく離していること、落下流速が小型魚の突進速度を超えていることおよび落下流の流入角度が適切でないことが原因であると推測された。そこで、0.37mの落差のまま遡上が可能な魚道にするために、実験水路においてスロープを取り付け、その効果を検討した。その結果、スロープの傾斜角が45°の場合では気泡の発生がほとんどなく、スロープからの流入角度が45°であり、しかも流入流速が小型魚の突進速度以下となる領域が生じることが分かり、遊泳遡上の可能性があることが判明した。また、跳躍遡上をする場合でも、水面から跳び出す角度が適切になるため、遡上率の向上が期待される。ただし、本研究で提案した簡易型改善案の有効性は実魚道では証明されていないため、実魚道に適用し遡上率がどれほど改善されるかを検証するつもりである。

謝辞：本研究を行うに当たり、現地計測に協力いただいた当時大学院生の藤井智也(日鉄鉱コンサルタント)、木田宜慶(日本鋼管)、山田弘明(大本組)および当時学部生の河東礼(九工大大学院)の諸氏に謝意を表す。本学学部生、播磨慎也および八木圭一の両氏には解析に協力いただいた。また、現地計測を行うに当たり便宜を図っていただいた国土交通省遠賀川工事事務所に謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村中六：魚道の設計，山海堂，pp.5-26，1991。
- 2) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，pp.42-49，1995。
- 3) 和田清，東信行，中村俊六：デニール式およびスティーブパス式魚道における流れ場の特性と稚アユの遡上行動，水工学論文集，第42巻，pp.499-504，1998。
- 4) Rajaratnam, N. and Katopodis, C.: Hydraulics of Denil fishways, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110, pp.1219-1233, 1984。
- 5) 中村俊六：魚道の設計，水工学に関する夏期講習会，A-6-1~A-6-24，1991。
- 6) 中村俊六，和田清：全幅越流型階段式魚道内における横波の発生とその制御，土木学会論文集，No.521/II-32，pp.207-215，1995。
- 7) 高橋信博，中村俊六：魚道内のアユの挙動に関する実験的研究，第28回水理講演会論文集，pp.353-358，1984。
- 8) ドイツ水資源・農業土木協会(中村俊六訳)：多自然型魚道マニュアル，山海堂，pp.72-811，1998。
- 9) 和田吉弘：アユの遡上と魚道構造の関係，ダム技術，No.39，pp.34-42，1990。
- 10) 房前和朋，島谷幸宏，萱場祐一，傳田正利：礫河床における魚道の遊泳速度に関する基礎的研究，水工学論文集，第41巻，pp.1117-1122，1997。
- 11) 高須修二，箱石憲昭，村岡敬子，田中和浩，尾寄佳史：階段式魚道の水理特性に関する研究，水工学論文集，第38巻，pp.351-356，1994。
- 12) Rajaratnam, N. and Katopodis, C. and Mainali, A.: Plunging and streaming flows in pool and weir fishways, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.114, pp.939-944, 1988。
- 13) 久保田哲也：砂防施設の魚道における溪流魚の行動と魚道の実態，水工学論文集，第42巻，pp.487-492，1998。

(2002. 9. 30受付)