

アイスハーバ型らせん魚道の流況に関する数値シミュレーション

諏訪 好英 細野 成一
林 秀郎 (本社エンジニアリング本部)

Numerical Simulation of the Water Flow in Ice-Harbor Type Spiral Fishways

Yoshihide Suwa Seiichi Hosono
Hidero Hayashi

Abstract

In the construction of river facilities such as dams, several ecological problems should be considered. Construction of the fishway is one of the ways to enable fish passage in rivers. We have developed “Spiral Fishways”, which has the advantages of area savings and easy construction. “Spiral Fishways” for salmon and trout passage have been constructed at several rivers. In this research work, a new type of “Spiral Fishway” was improved to enable smaller fish passage. This paper describes the numerical simulation system which was developed to analyze water flow and bubble distribution in the pool of the fishway. Using this system, a fishway configuration was investigated to obtain a more desirable water flow for fish passage.

概要

ダムや堰などの河川構造物の建設に関しては、生態系など河川環境への配慮が必要である。このため遡河性魚類の回遊を可能とする魚道の設置が行われている。当社では設置敷地面積が小さく、施工が容易な「らせん魚道」を考案し、サケ、マスなどを対象とした魚道の設置を進めてきた。現在、「らせん魚道」をさらに小型の魚種に適用するため、その魚道形状やプール内の流況に関する検討を進めている。本研究では気流分布を含めた流況特性の予測、評価を可能とするシミュレーション手法を開発し、より魚が遡上しやすい流況が得られる構造を検討した。本論文ではその概要を報告する。

1. はじめに

ダムや堰に代表される各種河川構造物は用水の安定供給や洪水など自然災害の防止に重要な役割をはたす一方、魚の回遊を阻害したり、瀬、淵形状を改変するなど様々な面で生態系に影響を及ぼす。サケ、マス、アユ、ウナギなどの遡河性魚類は川を産卵、索餌のための重要な生活域としており、河川構造物の建設に際しては魚道（魚の回遊を可能とするための水路または装置）の設置など環境保全のための対策が必要である。これまで各種形態の魚道が考案されている¹⁾²⁾が、対象魚種に合わせてその形状を最適化するためには、設置域周辺流況との整合性や魚道内での流況特性に関して定量的な把握を行うことが重要となる。

当社では施工性、経済性に優れた「らせん魚道 (Spiral Fishway)」を考案し、昭和57年より北海道のサケ、マス通路整備事業を中心として各地の魚道設置事業に参画してきた。曲線水路により構成されるらせん魚道では、設置敷地面積を大幅に削減できる上、プレキャスト方式によるRC造の共通ブロック化が可能のため、現場打ちで構築される通常の直線魚道に比べて大幅な工期短縮が可能である。先述したように、当社のらせん魚道はサケ、マスなどの大型魚種に対して既に実績を上げているが、さらにアユ科、キュウリウオ科など比較的小型の魚種への対応を可能とするため現在検討を進めている。

本報では水路内の流況特性を検討するため開発した数値シミュレーションの概要と、これを用いて行ったらせん魚道の水路隔壁形状に関する検討結果を報告する。

2. らせん魚道の構造と隔壁形状

らせん魚道の構造を図-1に示す。らせん魚道は流量調整用の余水吐きを備えた取水水路、魚が遡上するための段差が設けられたらせん水路、魚道内への魚の入り口となる排水路から構成されている。らせん水路は円周を6分割した扇型共通ブロックを積み上げ、中央支柱、外支柱を現場打ちして構築する。本方式の場合、直径7mの基礎面積で高さ15m程度までの魚道構造が可能である。今回対象とした、らせん水路は、幅1,500mm、1段あたりの段差350mmのもの、幅2,000mm、段差320mmのもの2種類である。いずれも水路中央での勾配は約1/8である。段差部分に設けられた隔壁には越流部およびウナギ類の遡上や土砂吐きを目的とした潜孔が設けられている。魚道内を遡上する魚はいったん水路内底部に潜り込んでから加速して段差を乗り越えることが多く、水路内の各段には水深450mm程度以上のプールが形成されるよう設計されている。

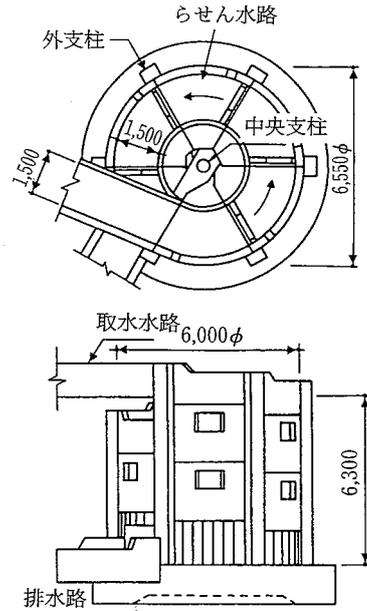


図-1 らせん魚道の構造

らせん水路の段差を形成する隔壁の形状は越流の特性に対して支配的な要素となるとともに、後流側プール内の流況に大きな影響を与える。従来からのらせん魚道で採用してきた隔壁形状と今回検討の対象とした隔壁形状を図-2に示す。従来からのらせん魚道に用いていた図-2(a)の構造は、その外周より部分に曲線的な切り欠きを設けて越流部とし、内周より隔壁部分に潜孔を設けたもので、「切り欠き方式」と呼んでいる。今回対象とした図-2(b)の方式は、直線魚道で採用されている「アイスハーバ方式³⁾」をらせん魚道に応用したもので、隔壁中央に小型の堰を設け、堰の両側と側壁との間に2本の越流部を形成する方式である。

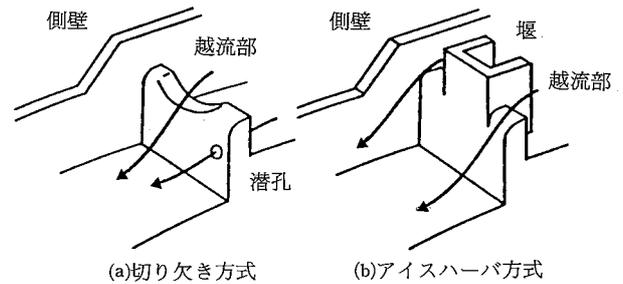


図-2 隔壁の形状

筆者らは木製のモックアップを用いた現地実験や流況シミュレーションを実施し、アイスハーバ方式の隔壁形状により小型の魚種にも対応可能な流況を得られる見通しを得た⁴⁾。アイスハーバ方式の隔壁形状を用いた魚道の流況についてはこれまで様々な検討が行われているが、いずれも直線魚道の場合であり、らせん魚道のような曲線水路に適用した場合について検討した例はない。曲線水路の場合、プール内の流況は形状効果や遠心力の影響を受けるため、直線水路の場合とは大きく異なる特性を示すことが考えられる。

3. 魚道の形態と魚の遡上しやすさ

魚道内での魚の遊泳、遡上能力にはプール内での流況が大きく関与するものと考えられる。一般に魚が遡上しやすいプール内流況の条件としては、次のようなことが必要と考えられる。

- ① 対象魚種の巡航速度を越えるような流速の速い領域が魚の遡上経路に形成されないこと。
- ② 迷走の原因となるような反流域が遡上経路に形成されないこと。
- ③ 乱流的な流速変動や表面波動の乱れが小さいこと。

④ 遡上中の魚が休息できるような、適当なよどみ領域が確保されること。

⑤ 極端に気泡密度の大きな領域が形成されないこと。なお気泡がまったくない場合には、水面から補食されることを嫌い魚が警戒するとも言われている。

一般に魚類の遊泳能力はその体長にほぼ比例することが知られている¹⁾。体長の小さな小型魚種の場合には巡航速度が小さく、また比較的小さな反流域にも敏感に反応するため、大型魚種の場合に比べプール内流況による影響を受けやすくなる。また大型魚種の場合には跳躍して段差を乗り越える場合が多いが、遊泳能力の小さな小型魚種の多くは越流内部を遊泳して遡上する。このため小型魚種を対象とした魚道では、十分な越流水深を得られるような隔壁形状の選定が必要となる。

4. 流況シミュレーション手法の開発

魚道の設計では、3章に示したように流速変動、表面波動、気泡密度など様々な側面からの流況評価が必要となる。このため魚道のプール内流況に関して総合的な評価を行えるシミュレーション手法を開発した。

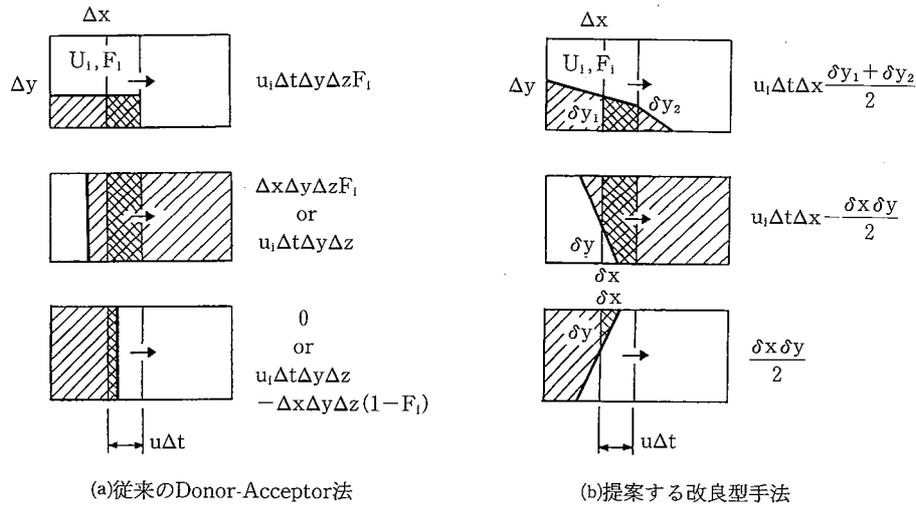


図-3 Donor-Acceptor 法のアルゴリズムの比較

4.1 自由表面流体の解析手法

水路内流況などを数値シミュレーションする場合には、刻々変化する水面状態を考慮して解析を進めて行く必要がある。このような流れを呈するものは自由表面流体と呼ばれている。自由表面流体の解析手法には様々な方法が提案されているが、ここでは固定された計算格子系の中で流体占有率 (VOF 関数) の輸送方程式を解析していく VOF (Volume of Fluid Fraction) 法⁵⁾を採用することとした。VOF 法による解析で用いる基礎方程式を以下に示す。

$$\text{div} \mathbf{v} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad} \mathbf{v} = -\text{grad} P + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\hat{\mathbf{g}}}{\text{Fr}^2} \quad \dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{v}F) = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$F=0.0$: 非流体セル

$0.0 \leq F \leq 1.0$: 自由表面を有する流体セル

$F=1.0$: 流体内部のセル

x : 座標

t : 時間

\mathbf{v} : 流速

P : 圧力

Re : レイノルズ数

Fr : フルード数

$\hat{\mathbf{g}}$: 重力加速度

F : VOF関数

4.2 VOF 関数の輸送に関する Donor-Acceptor 法の改良

VOF 法のアルゴリズムは水面形状のトポロジー変化に対する適用性が高く、原理的には自由表面流体の解析手法として最も汎用性の高い方法である。しかし水面変形が急峻な場合や、水面が分離、合体を伴うような大きな変形を生じる場合には数値的な安定性を確保できないため、実用的には限界があった。

従来の VOF 法計算における数値的な不安定性の原因は、VOF 関数の輸送方程式を解くアルゴリズムにあると考えられる。(3)式に示した VOF 関数の輸送方程式は非線形項のみで構成されており、そのままの形でこれを離散化すると数値的な安定性を確保できない。(3)式の離散化には、従来から Donor-Acceptor 法と呼ばれる特殊な風上差分法⁵⁾が用いられてきた。VOF 関数の輸送方程式を解く際の数値的な不安定性はこの Donor-Acceptor 法の適用限界に起因するものと考えられる。

コントロールボリューム法を採用した場合、VOF 関数は計算セルの中心点で定義され、各セルの流体占有率はセル内での VOF 関数の体積平均として評価される。水面が着目するセルにある場合、その水面方向は隣接セルの流体占有率との関係から決定される。従来の方法では、図-3(a)に示すようにセル界面に平行な水面を仮定して VOF 関数の輸送を評価する方法がとられていた。しかし実際の流れでは水面方向は任意であり、従来の方法では時間積分の都度少なからぬ誤差が累積してしまう問題があった。

ここでは表面方向の任意性を考慮し、図-3(b)に示すような方法で Donor-Acceptor 法のアルゴリズムを再構築した⁶⁾。水面方向の決定には図-4(a)に示すような4箇所のセル中心点およびこれらの中点により構成される3角形を用い、各辺での VOF 関数の線形補間値から任意方向の自由表面を決定していく。この方法によれば Donor-Acceptor 法のアルゴリズムは2次精度に拡張される。3次元計算では8箇所のセル中心で構成される検査領域を図-4(b)に示すような24個の4面体に分割し、それぞれの4面体について3角形を基準として自由表面を決定する。検査領域の分割には複数の方法が考えられるが、図-4(b)の方法で分割した場合には、すべての4面体頂点における VOF 値が計算値と線形補間値とをそれぞれ2つずつ有することとなり、精度的なバランスを確保できる。

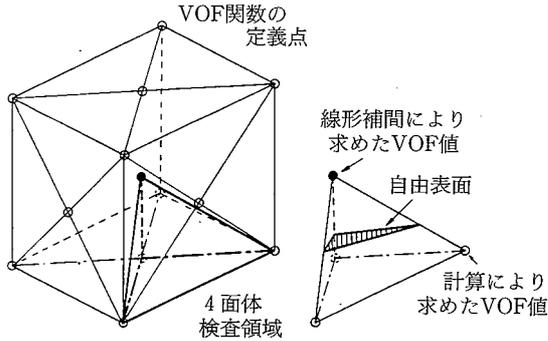
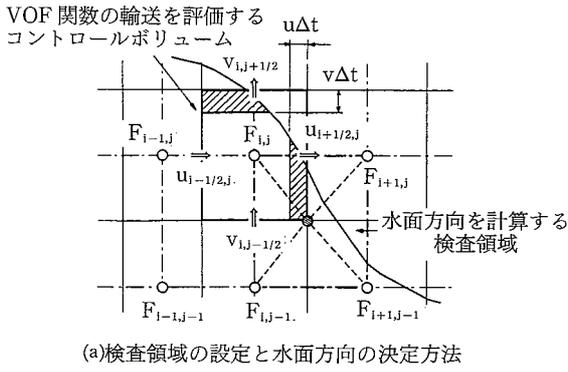


図-4 改良型手法における水面方向の決定

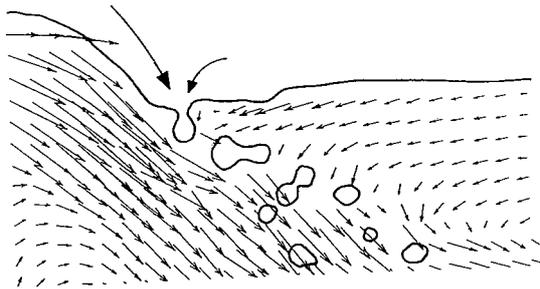


図-5 改良型手法によるシミュレーション結果

4.3 気泡の生成、輸送過程に関する試算

Donor-Acceptor法の改良により、急峻な水面形状の変形に対応した自由表面流体の解析が可能となった。図-5は2次元解析アルゴリズムにこの方法を組み込んで実施した落水部での流れのシミュレーション結果である。落水に伴う水面の巻き込みにより気泡を発生する様子が再現されている。

5. らせん魚道に対応したアイスハーバ型隔壁構造の検討

5.1 検討内容および魚道のモデル化

開発した流況シミュレーション手法を用いて、アイスハーバ型らせん魚道の隔壁形状に関する検討を行った。2章でも示したように、アイスハーバ型の隔壁形状を用いると、より小型の魚種に対応したプール内流況の実現が可能と考えられる。アイスハーバ型の直線魚道では堰の設置位置を隔壁の中央とすることが多いが、曲線水路

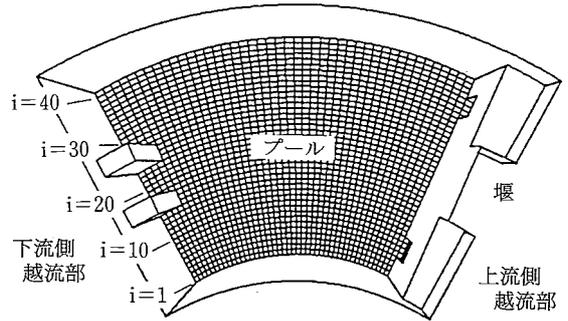
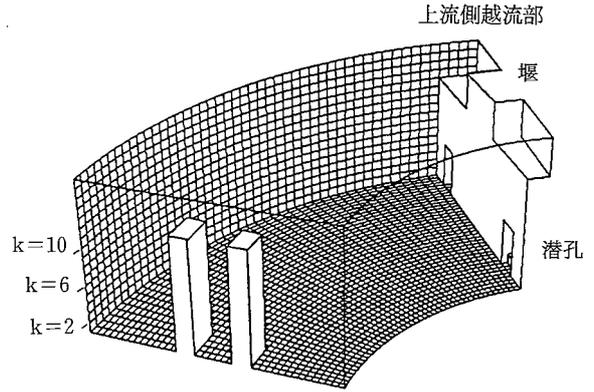


図-6 計算対象領域

にこれを応用した場合には、内周側、外周側での越流特性が異なるため堰の設置位置についての検討が必要と考えられる。

ここでは図-6に示すような段差1段分のプールを計算対象領域とし、上流側、下流側の越流部には周期境界条件を適用した。ただし圧力の周期境界条件については段差分に相当する静水圧を除いた形で上流側境界にこれを付加する方法を用いた。

先述した現地実験の結果では、潜孔からの流れがプール内の流況に大きく影響することがわかった。このため解析モデルでは上流側、下流側プールをつなぐ潜孔を傾斜させ、潜孔からの流れがプールの底面に沿って流れるよう工夫した。ここでは内周側および外周側越流部の底層部に2箇所の潜孔を設けている。

5.2 解析結果および測定値との比較

堰を隔壁中央に設けた場合について流況シミュレーションを行った。3次元電磁流速計による測定結果との比較を図-7に示す。水平断面内のプール中央には横断的な流れが認められ、また垂直断面内ではプール底面に沿って流速の大きな流れが形成されることなど、プール内流況の解析結果は実験結果とよく一致している。気泡分布についても先に示した現地実験での観測結果と定性的に一致した。これらの結果から、流況シミュレーションによるプール内流況特性の検討が可能であると判断した。

5.3 堰の設置位置による流況と気泡密度分布の違い

隔壁への堰の設置位置を隔壁中央、内周より、外周よりとしたときのプール内流況を比較した。それぞれの場合についてのシミュレーション結果を図-8に示す。垂

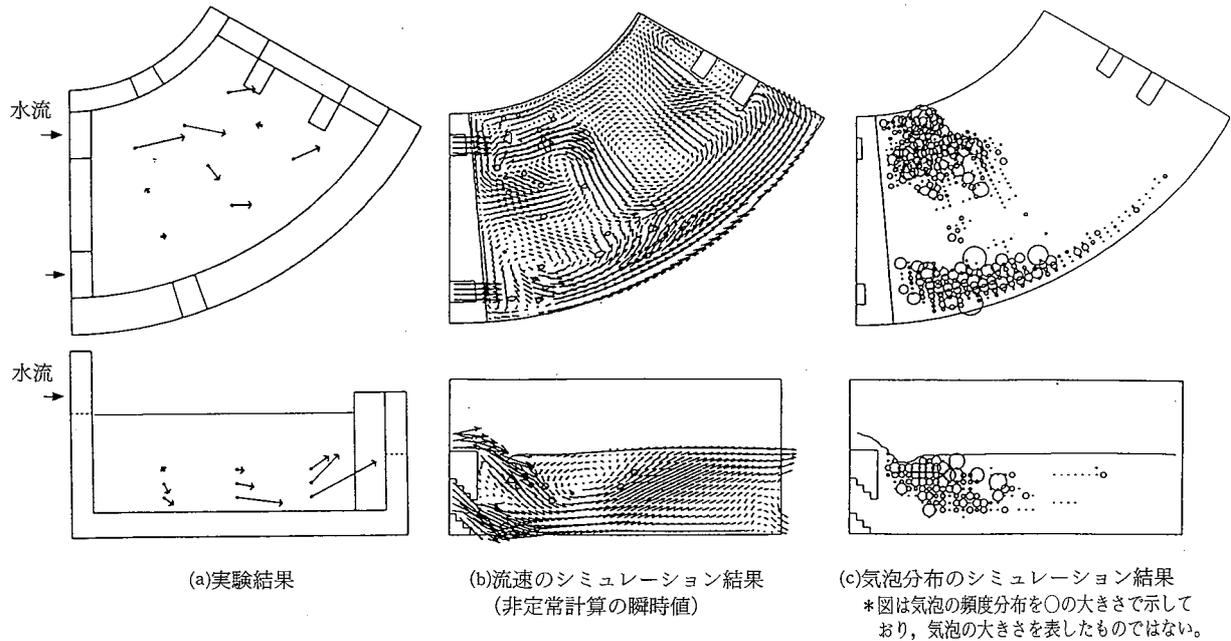


図-7 流況シミュレーションと実験結果との比較
(上：表層水平断面，下：越流部後流)

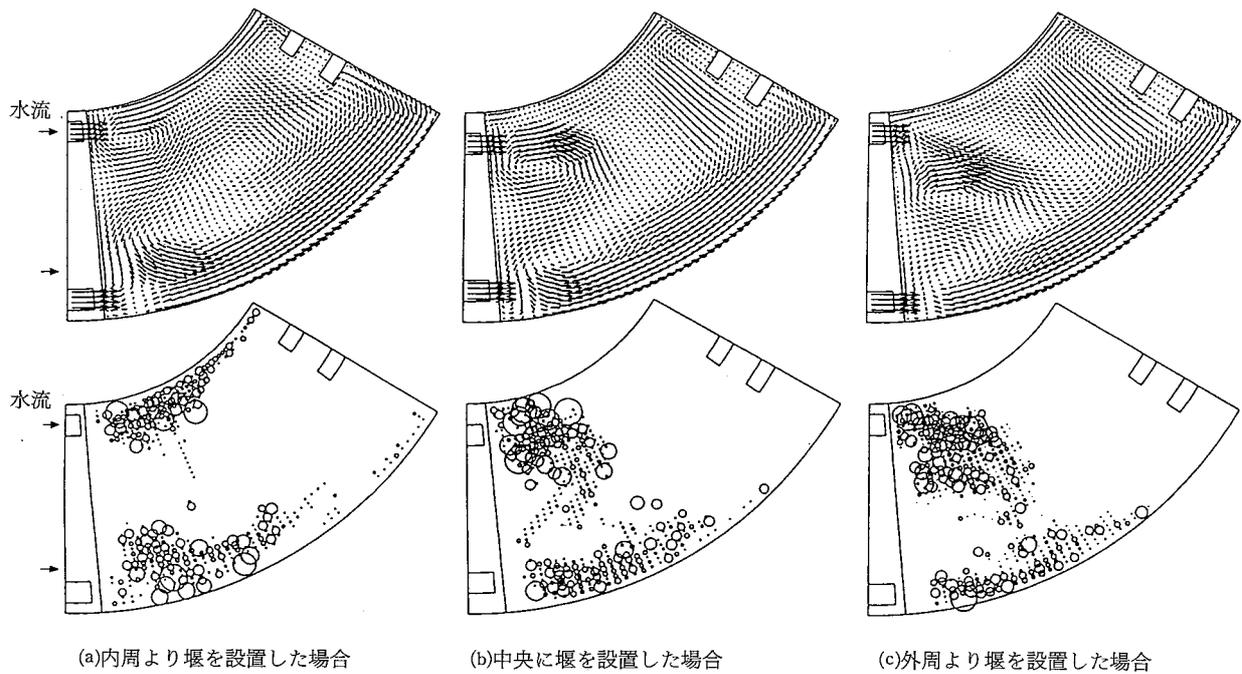


図-8 堰の設置位置による流況の違い

(上：中層水平断面における流速分布 (時間平均)，下：気泡分布)

直断面内ではいずれも似たような流況が得られたが、水平断面内の流況には堰の設置位置による違いが認められた。堰を隔壁中央または外周よりとした場合には、いずれも流れが外周側に誘引される傾向が認められる。このためプールの中央にはこれを横断する流れが認められ、気泡の分布状態もこれに追従している。堰を内周よりとした場合には、それぞれの越流部からの流れがプール側壁に沿って形成されており、主流域とよどみ領域とが明瞭に分離されている。

本来、らせん魚道のような曲線水路では遠心力と形状効果とにより外周側での流量が大きくなる傾向がある。外周よりに堰を設けた場合には、流量の大きな外周側の越流幅が狭くなり大きな流路抵抗となる。一方、内周よりに堰を設けた場合には、流量の大きな外周側越流幅が大きくなるため全体的な流れが阻害されにくい。シミュレーション結果から求めた乱流強度、表面波動の乱れについても、内周よりに堰を設けた場合に最も安定した流れの状態となることがわかった。

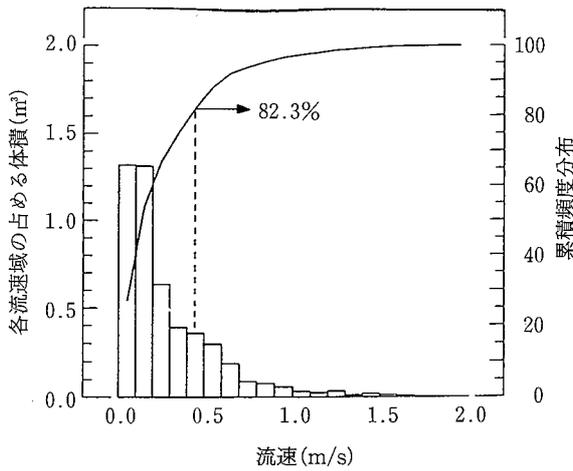


図-9 プール内流速の頻度分布

5.4 魚の遡上しやすさから見た流況の評価

先述したように、魚が遡上しやすいプール内流況の条件として対象魚種の巡航速度を越える領域や反流域が形成されないことが要求される。5.3節での解析結果をもとに、これらの条件がどの程度満足されるのかを考察した。

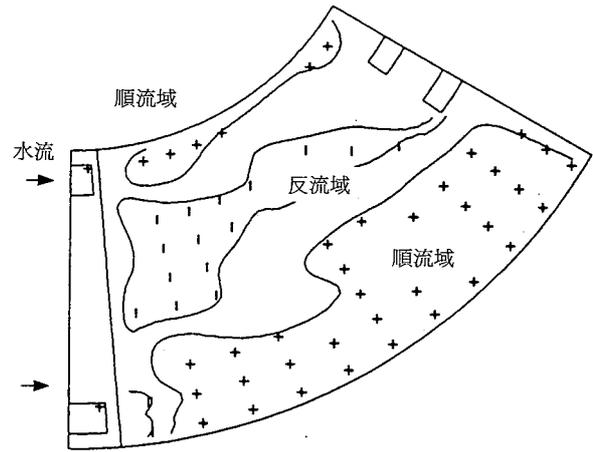
図-9は解析結果から求めたプール内流速の頻度分布を体積比率として表わしたものである。ここでは体長10cmのアユを対象とした場合について巡航速度以下の領域が占める割合を算出した。図に併記した累積頻度分布に当てはめると、堰を内周よりとした場合にはプール内の80%以上の領域が巡航速度以下となることがわかる。

プール内での順流域、反流域の分布を図-10に示す。反流域は堰後流側のよどみ領域にまとまって形成されており、反流方向の流速頻度は0.2 m/s近傍に集中することがわかった。プール内で魚の主な遡上経路は越流部後流側の底層、中層にあると言われている。越流部の後流側ではほぼ全域が順流域となっており、魚が迷走する可能性は小さいと判断できる。

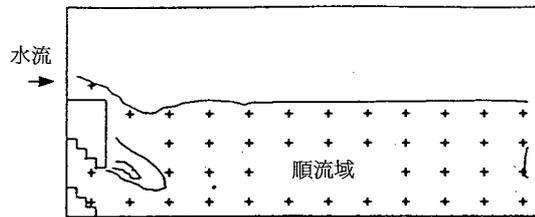
6. まとめ

自由表面流体の解析手法を用いて水路内流況予測を行う数値シミュレーション手法を開発した。試行計算の結果は、魚道のプール内流況や気泡分布など実験結果とよい一致を示しており、本手法によりらせん魚道内の流況の検討が可能であることを確認した。また本手法をアイスハーバ型らせん魚道のプール内流況の検討に適用し、流況改善のためのいくつかの知見を得た。今回の検討結果をもとに改善した魚道形状は、比較的小型の魚種の遡上にも適用可能と考えられる。

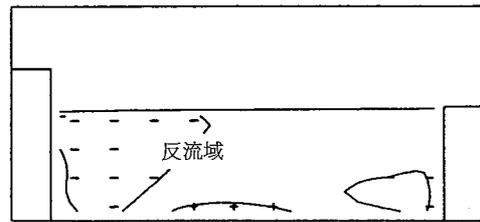
なお今回の検討ではプール内流況の改善に着目したが、魚の遡上には魚道の設置方法や周辺の河川流況との整合性なども大きく影響する。今後は開発したシミュレーション手法を用いてこれら周辺河川環境についても検討を進めていきたいと考えている。



(a)中層水平断面



(b)越流部後流



(c)堰の後流

図-10 プール内での順流域、反流域の分布

参考文献

- 1) 廣瀬, 中村: 魚道の設計, 山海堂, (1994)
- 2) Clay, C.H.: Design of Fishways and Other Fish Facilities, CRC Press Inc., (1995)
- 3) Clay, C.H.: Design of Fishways and Other Fish Facilities, The Department of Fisheries of Canada, (1961)
- 4) Suwa, Y., Hosono, S., et al: Three-Dimensional Water Flow Analysis of Spiral Fishway, Proc. of TECHNO-OCEAN'94, Vol. II, p.661~666, (1994)
- 5) Nichols, D.B., Hirt, C.W., et al: SOLA-VOF; A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-8355, (1980)
- 6) 諏訪: VOF法を用いた大変形砕波現象の数値解析, 日本建築学会学術講演梗概集, p.1491~1492, (1993)