農研機構
NARO 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

魚道内の流況に着目した階段式魚道の設計に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): pool-and-weir type fishway, flow structure, Leuciscus hakonensis, swimming behavior, computational fluid dynamics 作成者: 浪平, 篤 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00002190

〔農工研報 49
1 ～48, 2009〕

魚道内の流況に着目した
階段式魚道の設計に関する研究

浪平　篤*

目　次

Ⅰ　緒　言…… 1
1　研究の背景…… 1
2　本研究の目的…… 4
3　本研究の方法と論文の構成…… 5
Ⅱ　階段式魚道の設計に関する既往の研究成果…… 6
1　概説…… 6
2　遊泳特性に基づく魚類の分類…… 6
3　魚類の遊泳速度…… 6
4　構造諸元と遡上率の関係…… 6
5　階段式魚道内の流況形態…… 7
6　階段式魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係…… 8
Ⅲ　階段式魚道における異なる流量条件に対するプール毎の流況とウグイの遊泳行動…… 8
1　概説…… 8
2　模型および流量条件…… 9
3　魚道内流況の計測方法…… 9
4　ウグイの遊泳行動の観測方法…… 9
5　実験結果…… 11
6　結語…… 15
Ⅳ　円弧型隔壁の階段式魚道における流況予測のための数値解析手法の開発…… 16
1　概説…… 16
2　数値解析手法…… 17
3　異なる流量条件に対するプール毎の流況の再現精度の検証…… 20
4　異なる構造諸元に対する流況の再現精度の検証…… 26
5　流況形態の予測…… 27
6　結語…… 32
Ⅴ　傾斜型隔壁の階段式魚道における流況予測のための数値解析手法の開発…… 32
1　概説…… 32
2　数値解析手法…… 32
3　異なる構造諸元に対する流況の再現精度の検証…… 34
4　流況形態の予測…… 38
5　結語…… 39
Ⅵ　階段式魚道の設計に対する提言…… 40
1　概説…… 40
2　階段式魚道の流況形態とその予測方法…… 40
3　円弧型隔壁の階段式魚道内の詳細な流況の予測方法…… 40
4　傾斜型隔壁の階段式魚道内の詳細な流況の予測方法…… 41
5　浮遊魚の遡上に適した階段式魚道内の流況形態…… 42
6　プール毎の流況の違いとそれに基づく遡上率向上方法…… 42
Ⅶ　結　言…… 44
参考文献…… 45
Summary…… 48

Ⅰ　緒　言

1　研究の背景

a　環境との調和への配慮に関する近年の動向

近年，地球温暖化や生物多様性の減少等，地球環境に対して人間活動が及ぼす影響についての認識が高まっている。そして，環境と調和し，自然と共生する持続可能な発展を実現することが国内外で急務となっている。これらを受けて，1997（平成 9）年に河川法が改正がされ，その第 1 条では，河川の総合的管理の内容として従来からの「災害の発生の防止」，「河川の適正な管理」，「流水の正常な機能の維持」に加えて「河川環境の整備と保全」が明記された。1999（平成 11）年には旧農業基本法に代わる農政全般に関する法として食料・農業・農村基本法が制定され，その第 24 条では，「環境との調和に配慮」しつつ農業生産の基盤の整備を実施することが新たに義務づけられた。2001（平成 13）年には土地改良法が改正され，その第 1 条では，土地改良事業の実施の原則に「環境との調和に配慮」することが加えられた。

さて，旧農業基本法，食料・農業・農村基本法，改正

＊施設資源部水源施設水理研究室
平成 21 年 11 月 5 日受理
キーワード：階段式魚道，流況，ウグイ，遊泳行動，数値流体力学

前を含む土地改良法等の施策をもとに展開される農業農村整備事業の中で，農業用水を安定して供給するため，河川に頭首工が建設されてきた。頭首工は我が国の農業生産において今や不可欠な存在となっているが，頭首工が設置されると，その上下流で大きな水位差が生じ，河川生物，特に海と河川とを回遊する魚類の移動に対して支障となる場合も少なくない。そのため，従来より頭首工には魚道が付設されることが多い。環境との調和への配慮が強く求められる近年においては，魚道の重要性は非常に高くなっており，適切な設計方法の確立が待望されている。

b　我が国の魚道

我が国における魚道の歴史は古く，小山(1986)の調査によると，明治時代に建設された記録が残っている。しかし，農業の生産性の向上を目的とした第二次世界戦以降の水利システムの再編成により，それまでの頭首工の大半は鋼製のゲートを有する近代的なものに改修もしくは統廃合された。それに伴い，現存する魚道もその際に建設されたものがほとんどである(農業土木学会，1990)。

さて，一言で魚道といっても，これまでに非常に多くの型式が開発されている。その分類方法もいくつかあるが，水理学的メカニズムの違いによると，**Table 1** のように大きく分類される(ダム水源地環境整備センター編，1998)。

Table 1 の各型式のうち，現存する我が国の頭首工の魚道で最も事例の多いのは，プールタイプの階段式(**Fig. 1** ～ **3**，**Table 2**)である。本型式は農業土木学会(1990)によると全国で調査した魚道のうち約 85%，農林水産省構造改善局(1997)によると約 70% を占めており，我が国の代表的な魚道といっても過言ではない。

しかしながら，既設の階段式の中には，適切な設計が行われなかったことにより，短所(**Table 1**)が発現して十分に機能していないものも散見される。このため，階段式そのものに対して否定的な評価がなされることもあり，欧米で効果を発揮しているといわれるアイスハーバー式，バーチカルスロット式，デニール式，スティープパス式等が，階段式よりも我が国の魚道としても適するとの意見もある(中村，1995)。既設の階段式を改修する際，これらの型式に変更される事例もみられる(久原ら，1998；船田ら，2002；竹下，2004)。

それに対し，我が国と欧米では自然条件，特に河道条件とそこに住む魚類の特性が異なることは少なくないため，欧米で実績のある魚道が必ずしも我が国でも高い効果を上げるわけではないとの意見もある(ダム水源地環境整備センター編，1998)。また，一般に魚類は流れの中で上流側に向かう性質があるため，適切な設計がなされれば減勢効果が高く，比較的単純な流況が形成される階段式(**Table 1**)は，魚類の遡上にとって適していると考えられている。このような考えから，近年では，階段式の長所がより発揮されることを目的とした研究が増加している(和田，1990；和田，1993；高須ら，1994；原ら，1995；林田ら，2000a；林田ら，2000b)。それらの成果の一部は既に整理されており(ダム水源地環境整備セン

Table 1　水理メカニズムの違いによる魚道の分類

Classification of fishway by the difference of its hydraulic mechanism

分　類	例	特　徴	長　所	短　所
プールタイプ	階段式 アイスハーバー式 潜孔式	プール部分で流れを減勢させる。	適切な設計がなされれば減勢効果が高い。魚道内で形成される流況が単純である。	構造緒元や水理条件の違いに伴って流況が変化しやすく，条件によっては魚類の遡上に適さないと考えられる流況になり得る。
水路タイプ	緩勾配水路式 粗石付き斜路式	水路の緩勾配化や，水路底面に設置した粗石により流れを減勢させる。	適切な設計がなされれば，他の形式よりも魚類が遊泳しやすい流況となる。	他の型式よりも勾配をかなり緩やかにしなければならず，それに応じて魚道の敷地も広くなる。
阻流板式	バーチカルスロット式 デニール式 スティープパス式 舟通し式	水路内に設けた板(阻流板)により流れを減勢させる。	魚道内に低流速部が生じる。	魚道内の流れは乱れが大きい。魚道が長距離となる場合は，途中に休憩のためのプールが必要となる。
水位追随型		魚道を構成する水路の一部を可動として河川の水位変動に対応する。	適切に操作されれば効果が非常に高い。	建設時だけでなく維持管理にも多大な費用を要する。
ロック式		水位差が大きな運河等で船舶を上流に移動させるための閘門と同様のゲート操作で魚類を移動させる。		
エレベータ式		魚類を移動可能な水槽によって機械的に運搬する。		

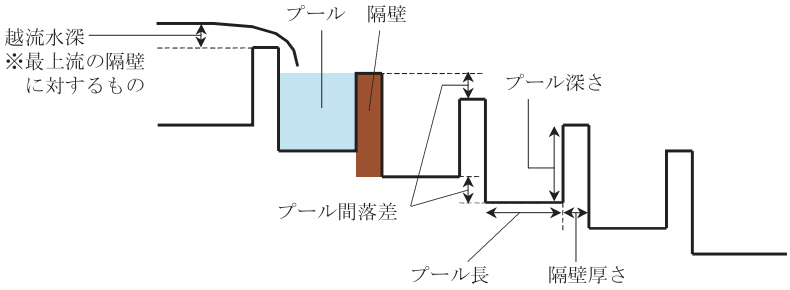


Fig. 1　階段式魚道全体の縦断面図（左が上流）
Overall view of pool-and-weir type fishway (from the right side)

Fig. 2　階段式魚道の隔壁天端の縦断面図（左が上流）
Side view of the crown of the weir wall in pool-and-weir type fishway (from the right side)

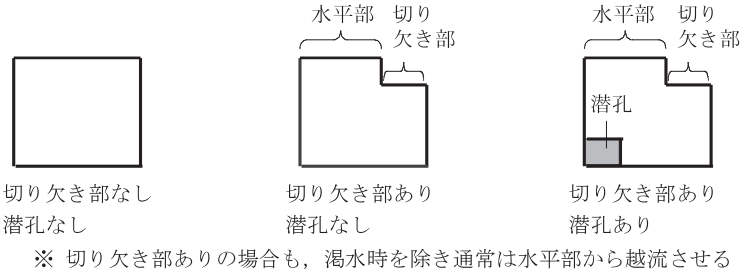


Fig. 3　階段式魚道の隔壁の正面図
Front view of the weir wall in pool-and-weir type fishway

Table 2　階段式魚道における諸元に対する記号
Nomenclature indicating the specifications of pool-and-weir type fishway

プール深さ	H
プール間落差	Δy
プール長	L
隔壁厚さ	D
越流水深	Δh
魚道勾配	$\Delta y/(L+D)$

ター編，1998；和田，2003），現状として本型式の設計方法は他の型式よりもよくまとめられている。

なお，魚道の対象魚は，従来より，北海道および東北ではサケやマス，その他の地域ではアユであることが多い（高嶋・中村，1984）。これらの魚種は，有用な水産資源として考えられている回遊魚である。一方，Ⅰ１ａで述べたように，近年では環境との調和への配慮が強く求められるようになっており，これらの魚種に限らず，回遊しない淡水魚等も含めた多様な魚類を魚道の対象とするべきの考え（板垣，2002）が広まりつつある。さらに，エビやカニ等の甲殻類が魚道の対象とされる場合もある（ダム水源地環境整備センター編，1998；鬼束ら，2004；和田ら，2004）。

ｃ　魚道の設計における視点

さて，設計方法が最もよくまとめられている階段式を例に挙げると，魚道の設計における視点は複数ある。その一つは，魚道の構造諸元と魚類の遡上率の関係である。この場合，魚類の遡上実験において高い遡上率が得られた構造諸元を採用することとなる。これまでに実物規模の模型を用いた実験が系統的に行われており（和田，1990；和田，1993；原ら，1995），その結果の整理も進んでいる（ダム水源地環境整備センター編，1998；和田，2003）。しかしながら，推奨値が明確に定められていない諸元もある。遡上実験の結果からは，魚道の各構造諸元が魚類に対してどのような影響を及ぼすために遡上率が変化するのかは明らかにならないため，推奨値が定められていない諸元を現場固有の地形条件等に応じて設定するのは容易ではない。

二つ目に，魚道内の流況形態が挙げられる。階段式で

は，プール内での減勢効果が期待されているため，上流側の隔壁からの越流水がプール内に潜り込まず水面付近を流下する表面流と呼ばれる流況形態(Clay，1961)の発生は望ましくない(高須ら，1994)。従って，表面流が発生しない構造諸元を採用するのである。表面流の発生を予測する方法は Rajaratnam et al.(1988)，鬼束ら(2005)によって提案されている。しかしながら，これらの方法は矩形型の隔壁天端(**Fig. 2**；以下，矩形型隔壁という)を対象としているのに対し，この形状では，円弧型の隔壁天端(**Fig. 2**；以下，円弧型隔壁という)よりも表面流が発生しやすいこと(高須ら，1994；林田ら，2000b)，さらに，円弧型隔壁および傾斜型の隔壁天端(**Fig. 2**；以下，傾斜型隔壁という)よりもアユの遡上率が格段に低いこと(和田，1990；和田，2003)が確認されている。このため，現状の表面流発生の予測方法のみでは，適切な設計が行えない。

これらの視点に加え，近年では，魚類は魚道内の流況の違いに対応して遊泳するという考え(林田ら，2000a)が広まっている。魚類の遊泳速度についてはこれまでにその目安が明らかにされているのに対し(塚本・梶原，1973；Tsukamoto et al.，1975；鈴木，1999)，魚道内流況と魚類の遊泳行動の関係は未解明な部分が多いため，この関係を調査する実験事例が増えつつある(高嶋・中村，1984；中村ら，1987；林田ら，2000a；林田ら，2000b；鬼束ら，2006)。これらの実験により，上流側の隔壁からの越流水がプール底まで潜り込む流れである落下流と呼ばれる流況形態(Clay，1961)におけるアユ，ウグイ，オイカワの遊泳行動が明らかにされている。

しかしながらこれらの実験では，Ⅰ)観測は一つのプールが対象とされている，Ⅱ)同一の構造諸元で異なる複数の水理条件を対象とした観測があまり行われていない，Ⅲ)遡上率が観測されていないといった問題があり，魚道内流況と魚類の遊泳行動の関係については十分に解明されたとはいえないのが現状である。ここで，上記Ⅰ)については，Kumar et al.(1995)の実験によると，同一形状のプールが連続した魚道に一定の流量が供給されている場合であっても，上流から 3 つ目以降のプールではほぼ同じ水理特性となるのに対し，上流から 1 つ目と 2 つ目は 3 つ目以降と若干異なることが確認されており，上流から 3 つ目までのプールを対象として観測を行う必要があると考えられる。Ⅱ)については，頭首工では魚道への流量を調整する方策がとられていない場合がほとんどであり，河川水位の変動に応じて魚道への流量も変化し，それに応じて魚道内の流況形態も変化すると考えられることから，流量の違いによる影響の評価も必要と考えられる。Ⅲ)については，観測された遡上が魚類にとって容易なものであったか否か評価する上で，遡上率を同時に観測しておくことも必要と考えられる。

上記Ⅰ)～Ⅲ)が克服され，魚道内流況と魚類の遊泳行動の関係が十分に解明されたとしても，魚道内流況を精度良く予測する方法が確立されていない。階段式魚道内の詳細な流速分布の予測のため，数値流体力学の手法を用いて数値解析を行う研究も実施されているが(諏訪ら，1995；後藤ら，1999；前野ら，2001；前野・小川，2002)，それらの事例では適切な手法が用いられていないため，十分な再現精度および汎用性が得られていない。このため，現状では魚道内流況と魚類の遊泳行動の関係を十分に設計へ反映できない。

2 本研究の目的

Ⅰ１ｂで述べたように，階段式の設計方法を向上させるための研究が近年増加しており，それらの成果の一部は既に整理されている。本型式は主にアユを対象として適切な構造の検討が進められているが，実物規模の模型を用いた実験ではサツキマス，コイ，ヌマチチブ，カジカ，アユカケの遡上も確認されている(和田，1993)。また，魚道内にロープを張れば，エビやカニ等の甲殻類がそれを伝わって移動することも確認されている(ダム水源地環境整備センター編，1998)。このため，階段式に関する研究が今後も更に進み，現状よりも短所(**Table 1**)の発現が抑えられ，長所(**Table 1**)が活かされる設計が可能となれば，その適用範囲は他の型式よりも一層広がると考えられる。特に，本型式は我が国の頭首工の魚道の中で建設数が最も多いため，得られた研究成果は，魚道を新設する場合だけでなく，既設の魚道に対して機能を評価し，魚類の遡上により適したものへと改修する際にも，大きく貢献すると考えられる。

そこで，本研究では階段式魚道に着目し，まず，①その設計のために必要な研究が十分に行われているとはいえない，魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係の解明を進めることを目的とする。同時に，②魚道内の流況を精度良く予測できる汎用性の高い数値解析手法の確立も目的とする。さらに，③上記の数値解析を実施するのが困難な場合や，より簡便な流況形態の推定のみが必要な場合もあると考えられることから，この数値解析の結果を利用して構造諸元および水理条件と流況形態の関係の解明を目指す。

これらの目的①～③では，隔壁天端の形状としては，他の形状と比べて表面流が発生しにくく(高須ら，1994；林田ら，2000b)，アユの遡上率が高い(和田，1990；和田，2003)という実験結果が得られている円弧型隔壁(**Fig. 2**)を対象とする。また，傾斜型隔壁(**Fig. 2**)の場合，遡上実験で得られたアユの遡上率は円弧型より若干落ちるが(和田，1990；和田，2003)，施工性は円弧型より高いため現場でも導入されやすいと考えられることから，目的②および③では傾斜型も対象とする。ここでは，傾斜型における目的①については，円弧型における成果が準用できるものと考える。

これら一連の研究が遂行されれば，現状よりも魚類の遡上に適した階段式魚道の設計が可能となる。

3　本研究の方法と論文の構成

a　本研究の方法

本研究の目的はⅠ２で①～③のように設定したが，階段式魚道には隔壁天端形状の違いの他にも，隔壁における切り欠き部および潜孔の有無や位置による違いがある(**Fig. 3**)。従って，これらの目的については，切り欠き部や潜孔の諸元や位置の違いの影響を含めて取り組む必要がある。

しかしながら，切り欠き部や潜孔を含めると，構造諸元および水理条件の組み合わせが多岐にわたり，必要な実験のケース数および各ケースにおける計測点数が膨大になるため，魚道内流量を固定する等，限定された条件下で実験を実施せざるを得なくなる(高嶋・中村，1984；中村ら，1987)。さらに，構造諸元や水理条件によってはプール内に気泡が多く発生し，魚道内における魚類の3次元的な位置を把握すること自体が非常に困難となる場合も想定される。このように，切り欠き部や潜孔を含めた場合は，魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係について設計で利用可能な情報を得ることが容易ではない。

一方，隔壁に切り欠き部と潜孔を設けないタイプについても，これまでに魚類の遊泳行動が観測されているものの(林田ら，2000a；林田ら，2000b)，それらの観測にはⅠ１ｃで述べた問題があり，魚道内の流況との関係については十分に解明されたとはいえないのが現状である。このため，切り欠き部と潜孔を含めた三次元的な現象に取り組む前に，まずは切り欠き部と潜孔を設けないタイプにおける鉛直2次元断面を対象として，魚道内の流況と魚類の遊泳行動の基本的な関係を十分に把握すること(目的①)が必要と考えられる。

また，魚類の遊泳行動に大きな影響を及ぼしていると考えられる魚道内の流況に関する研究として，表面流の発生を予測する方法(Rajaratnam et al.，1988；鬼束ら，2005)や，構造諸元と流況特性の関係(高須ら，1994；林田ら，2000b)についても，これまでは隔壁に切り欠き部と潜孔を設けないタイプを対象として行われてきた。しかし，これらの研究の成果だけでは現場の条件に応じて適切な設計を行うのに十分でないことは，Ⅰ１ｃで述べた通りである。さらに，数値流体力学の手法を用いた魚道内の詳細な流速分布の予測手法についても，主に切り欠き部と潜孔を設けないタイプを対象に研究が行われてきたが(後藤ら，1999；前野ら，2001；前野・小川，2002)，Ⅰ１ｃで述べたように，十分な再現精度および汎用性を有する手法が開発されていないのが現状である。このため，魚道内の流況を精度良く予測できる汎用性の高い数値解析手法の開発(目的②)，および，構造諸元および水理条件と流況形態の関係の解明(目的③)についても，同様に，まずは切り欠き部と潜孔を設けないタイプにおける鉛直2次元的な現象を対象とした基本的な研究の成果を充実させるべきと考えられる。

そこで本研究では，隔壁に切り欠き部と潜孔を設けないタイプの階段式魚道を対象として，Ⅰ２の目的①～③に取り組むことにする。なお，切り欠き部については左右交互ではなく片側配置が推奨されており，潜孔については不要との提案もあり(ダム水源地環境整備センター編，1998；和田，2003)，このようなタイプが近年では階段式の主流となりつつある。このようなタイプでは縦断面における流れが卓越すると考えられるため，切り欠き部と潜孔を設けないタイプを対象とする本研究の成果を活用できる可能性が高い。

目的①のための研究としては，魚類を用いた実物規模の模型実験を行う。魚道の対象魚は一般にⅠ１ｂで述べたようにアユ，サケ，マスであることが多く，魚道の実験でもアユが用いられることが大半である(高嶋・中村，1984；中村ら，1987；和田，1990；和田，1993；原ら，1995)。一方，最近ではウグイ(泉ら，2000;林田ら，2000a；林田ら，2000b)やオイカワ(鬼束ら，2006)を用いた実験もみられる。特にウグイについては，回遊魚ではないが全国の河川で上流から下流まで比較的広範囲に生息しており(ダム水源地環境整備センター編，1998)，魚道を利用する可能性が高い魚種であると考えられる。回遊しない淡水魚等も含めた多様な魚類を魚道の対象とするべきの考え(板垣, 2002)が広まりつつあることから，ウグイを対象とした魚道の評価も意味をもつものと考えられる。また，ウグイはアユと同様の紡錘形しており，かつ，アユの遊泳速度はウグイを含めた他の魚類と比較して著しく大きい(塚本・梶原，1973；Tsukamoto et al.，1975)。そのため，ウグイを用いた実験結果は，アユを対象とした魚道に対しては安全を見込んだ評価として利用できる可能性があると考えられる。そこで本研究では，屋内での飼育が特に容易なウグイを対象とする。なお，ウナギ，カジカ，ヨシノボリ，ナマズ等のように川底をはうように生息する魚種については，その一般的な遊泳特性(和田，1993)から，魚道内における遊泳行動がアユ，ウグイ，オイカワとは異なる可能性がある。

目的②のための研究としては，これまでに数値流体力学の分野で様々な解析手法が開発されているので，まず，それらの長所と短所を整理する。そして，既存の解析手法を適切に改良し，組み合わせることにより，階段式魚道の設計のための利用に適した手法を構築する。

目的③のための研究としては，これまでに矩形型隔壁を対象として提案されている方法を，円弧型と傾斜型に対して適用することによって行う。

b　論文の構成

本研究では，Ⅰ２で設定した目的に対して，Ⅰ３ａで示した方法に基づいて，以下の章構成で取り組む。そして，階段式魚道の設計に対する提言を行うことを目標とする。

Ⅱでは，まず，遊泳特性に基づく魚類の分類と，魚類の遊泳速度について説明する。さらに，本章でも若干触れたが，階段式魚道の設計に関する既往の研究成果と，

それに基づく現状の設計の考え方について概要を説明する。但し，本研究で扱う魚道本体に関する設計項目のみを対象とする。

Ⅲでは，円弧型隔壁の階段式魚道の実物規模模型を用いて，異なる流量条件に対するプール毎の流況とウグイの遊泳行動を観測し，それらの関係を明らかにする。

Ⅳでは，円弧型隔壁の階段式魚道内の流況を精度良く予測できる汎用性の高い数値解析手法を開発する。さらに，開発した手法を用いて様々な構造諸元と水理条件に対する流況の数値解析を行い，その結果から，構造諸元および水理条件と流況形態の関係を整理する。

Ⅴでは，傾斜型隔壁の階段式魚道内の流況を精度良く予測できる汎用性の高い数値解析手法を開発する。ここでの開発は，Ⅳで開発した手法を傾斜型に適したものへ改良することによって行うものとする。さらに，Ⅳと同様，開発した手法を用いて多くの条件について数値解析を行い，構造諸元および水理条件と流況形態の関係を整理する。

Ⅵでは，Ⅲ～Ⅴで得られる魚道内の流況と魚類の遊泳行動に着目した研究成果を整理して，階段式魚道の設計に対する提言を行う。

Ⅶでは，以上の内容を要約して，本研究の結論とする。

Ⅱ　階段式魚道の設計に関する既往の研究成果

1　概説

本章では，まず，遊泳特性に基づく魚類の分類と，魚類の遊泳速度について紹介する。次に，階段式魚道の設計に関する既往の研究成果と，それに基づく現状の設計の考え方のうち，本研究で扱う魚道本体に関する項目について概要を説明する。具体的には，構造諸元と遡上率の関係に着目した遡上実験の結果等から適切と考えられる魚道勾配，隔壁天端形状，隔壁天端が傾斜型の場合の傾斜角度，プール間落差，隔壁厚さ，プール幅とプール長の関係，プール深さ，切り欠き部，潜孔を対象とする。さらに，階段式魚道内で形成されうる流況形態のうち避けるべきタイプと，その発生の予測方法，魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係について説明を行う。

2　遊泳特性に基づく魚類の分類

河川に生息する，あるいは河川を移動する魚類のうち，アユ，サケ，マス，ウグイ，オイカワ，イワナ，ヤマメ，コイ，フナは浮遊魚と呼ばれる。それに対し，ウナギ，ヌマチチブ，カジカ，アユカケ，ヨシノボリ，ナマズ等は底生魚と呼ばれる。

階段式魚道では従来よりアユが対象されることが多いが，実物規模の模型を用いた実験ではサツキマス，コイ，ヌマチチブ，カジカ，アユカケの遡上も確認されている（和田，1993）。

3　魚類の遊泳速度

魚類の遊泳速度には，かなり長時間維持できる速度と，ごく短時間だけ維持できる速度があり，それぞれ巡航速度，突進速度と呼ばれている。我が国の淡水魚に対するこれらの遊泳速度は，塚本・梶原（1973），Tsukamoto et al.（1975），鈴木（1999）によって魚種毎に計測されている。これらの遊泳速度の目安としては，浮遊魚のうちマスのように紡錘形をした魚類では，一般に体長を $B.L.$m とするとそれぞれ 3$B.L.$m/s，10$B.L.$m/s 程度と考えられている（ダム水源地環境整備センター編，1991）。近年では，魚類が瞬間的に出し得る遊泳速度の最大値についての計測も行われている（泉ら，2006）。

魚道の設計では，魚道内の流速が魚類の遊泳速度を越えないことの確認は重要である。階段式魚道では，落下流状態のときは隔壁天端において限界流が発生するため，限界流速を予測し，これを魚類の遊泳速度と比較することがある（ダム水源地環境整備センター編，1991）。一方，限界流発生地点より下流側の射流部分では限界流速より大きな流速が発生するため，本来はこの部分の流速を比較に用いるべきであるものの（中村，1995），その推定方法は確立されていない。

4　構造諸元と遡上率の関係

階段式魚道の構造諸元と遡上率の関係については，実物規模の模型を用いた実験（和田，1990；和田，1993；原ら，1995；ダム水源地環境整備センター編，1998；和田，2003）によってその解明が進んでいる。本節ではその実験結果と，それに基づく設計の考え方の概要を示す。なお，各構造諸元の名称および記号については **Fig. 1** ～ **3** および **Table 2** に従う。この表記法は，以下，共通とする。

a　魚道勾配

勾配 $\Delta y/(L+D)$ が 1/3，1/5，1/8，1/10 の階段式魚道それぞれに対し，越流水深 Δh を 0.05m から 0.20m まで変化させてアユの遡上率を比較した結果，全ての勾配の魚道において Δh の増加に伴って遡上率が低下する一方，勾配 1/10 の魚道では他と比較して低下する割合は少なく，また，全ての Δh で他と比較して高い遡上率が得られている。また，勾配 1/20 の魚道における遡上実験の結果は，勾配 1/10 の結果と同程度となっている。

以上より，階段式魚道の勾配としては，1/10 から 1/20 が適切と提案されている。

b　隔壁天端形状

矩形型と傾斜型に対するアユの遡上率の比較，および，傾斜型と円弧型の比較から，矩形型の場合の遡上率は傾斜型より格段に低く，円弧型は傾斜型より若干高いという結果が得られている。円弧型および傾斜型の場合の遡上率が矩形型より高い理由として，前者 2 つは隔壁天端で越流水の剥離が生じにくいためと考えられている。

c　傾斜型隔壁の場合の傾斜角度，プール間落差，隔壁厚さ

隔壁天端の水平部分と斜面部分の下端との高低差を0.25mに固定し，水平面に対する斜面部分の角度（以下，傾斜角度という）を15度から60度まで変化させてアユの遡上率を比較したところ，傾斜角度が大きいほど遡上率が高いという結果が得られている。

斜面部分の距離（以下，斜面距離という）を0.4mに固定し，傾斜角度を6度から44度まで変化させてアユの遡上率を比較したところ，傾斜角度が大きいほど遡上率が高いという結果が得られている。

傾斜角度を45度に固定し，斜面距離を0.3mから0.9mまで変化させてアユの遡上率を比較したところ，斜面距離が短いほど遡上率が高いという結果が得られている。

以上の一連の実験結果から，①傾斜型隔壁とした場合の斜面角度は45度から60度とする，②プール間落差Δyは0.1mから0.2mとする，③隔壁厚さDは0.2mから0.3mとするのがよいと提案されている。

d　プール幅とプール長の関係

Δyは0.15m，プール深さHは0.6m，流量0.1m^3/sを共通条件として，①プール幅Bが2.0m，プール長Lが3.0mの階段式魚道と，②Bが2.0m，Lが1.0mの階段式魚道を設け，アユの遡上率を比較した結果，①の場合は遡上率が8割であったのに対し，②の場合は4割という結果が得られている。

以上より，階段式魚道のプールの形状としては，BよりLが長いことが望ましいと提案されている。

e　プール深さ

Bが2.0m，Lが3.0mの階段式魚道に流量0.1m^3/sを供給する場合に，Hを0.4m，0.8m，1.2mの3種類を設けて魚類の遡上率を比較した結果，浮遊魚であるアユについてはHが大きいほど低下する傾向が確認され，底性魚については明確な違いがみられていない。

f　切り欠き部

Bが2.0m，Lが3.0m，Hが0.8mのアユを対象とした階段式魚道において，アユより体長の大きなコイを遡上させるため，Bの片側1/5を0.1m低くした切り欠き部（水平部の長さ：切り欠き部の長さ＝4：1）を設けて隔壁天端の一部で水深を高くした結果，切り欠き部なしの場合と比較してコイが容易に遡上したことが確認されている。

また，上記の階段式魚道において，Hが0.4mと0.8mの場合のアユの遡上率を比較した結果，遡上した全個体のうち切り欠き部を利用した割合はそれぞれ25%，15%という結果が得られている。

一方，切り欠き部と水平部の長さの比が3：1の現地に既設の魚道を調査した結果，隔壁からの越流は切り欠き部に集中してプール内に横断方向の揺れが生じていたことが確認されている。

以上より，切り欠き部を設ける場合は，水平部と切り欠き部の長さの比を4：1から5：1とし，切り欠き部を片側に配置するのがよいと提案されている。

g　潜孔

潜孔は，従来より底生魚の遡上に有効といわれており，アユやウグイのような遊泳魚も遡上の際に利用することが確認されている（泉ら，2002）。一方，潜孔からの流れがプール内の流況を複雑にする，洪水時に流下する土砂等により一部の潜孔が閉塞して魚道内の流れが不連続となる等，潜孔の存在に否定的な意見もある（ダム水源地環境整備センター編，1998；和田，2003）。

5　階段式魚道内の流況形態

階段式魚道では，魚道勾配や流量等の条件の違いにより，上流側の隔壁からの越流水がプール底まで潜り込む流れである落下流（Plunging Flow）と，上流側の隔壁からの越流水がプール内に潜り込まず水面付近を流下する表面流（Streaming Flow）が形成されることが知られている（Clay，1961）。落下流については，さらに，上流側の隔壁からの越流水がこの隔壁に沿ってプールに潜り込む落下流と，上流側の隔壁からの越流水がプールに対して斜めに潜り込む斜め流に分類されることもある（林田ら，2000b）。3つに分類した場合の各流況形態の概念図を**Fig. 4**に示す。本研究では，**Fig. 4**の方法により階段式魚道内の流況形態を分類する。

これらのうち表面流は，階段式魚道ではプール内での減勢効果が期待されていること等を考えると避けるべき流況形態であることから（高須ら，1994），表面流の発生を予測する方法がこれまでに提案されている。その代表

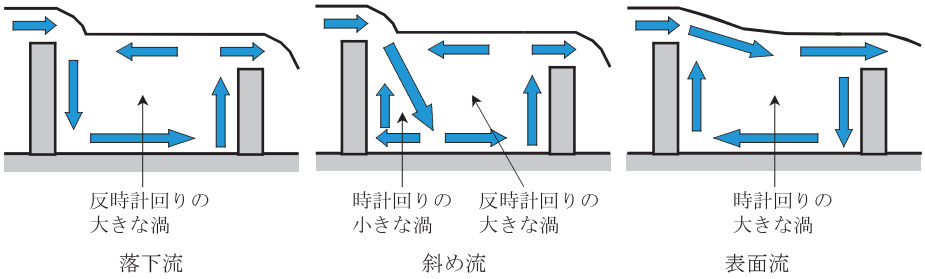


Fig. 4　階段式魚道内の流況形態の概念図（左が上流）
Conceptual diagram of the flow type in pool-and-weir type fishway (from the right side)

的なものが Rajaratnam et al.(1988)の方法である。この方法では，下記の式(1)により係数 Cd を求め，0.22 ～ 031 より大きければ表面流になることが確認されている。

$$Cd = q/\left(S \cdot L^{3/2} \cdot \sqrt{g}\right) \qquad (1)$$

ここで，q は魚道内の単位幅流量(m^2/s)，S は魚道の勾配，g は重力加速度($9.8m/s^2$)である。但し，この方法は矩形型隔壁を対象としたものであり，他の形状には適用できないことが確認されている(高須ら，1994；林田ら，2000b)。

その他に，比較的新しい方法として鬼束ら(2005)によるものがある。この方法も矩形型隔壁を対象としたものであるが，下記の式(2)が表面流と他の流況形態との境界であり，本式に関して(左辺)＞(右辺)のとき表面流になることが確認されている(**Fig. 5**)。

$$\Delta h/\Delta y = 0.42\{L/(H+\Delta h)\}^{0.85} \qquad (2)$$

ここで，左辺 $\Delta h/\Delta y$ はプール間落差に対する越流水深の比であり，右辺に含まれる $L/(H+\Delta h)$ はプールに貯められた水のアスペクト比である(**Fig. 1**, **Table 2**)。$L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ がプール内の流況形態を支配するパラメータとなることは，理論的に導かれている(鬼束ら，2005)。$L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ は，設計や既設魚道に対する現地調査の際に容易に得られる諸元のみで求めることができる。

6　階段式魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係

階段式魚道では，流況形態が落下流(**Fig. 4**)の場合，主流を遡るようにプール底付近，上流側隔壁に沿って遡上する個体が多いこと，落下流であってもプール内における減勢効果が不十分であれば，定位や遡上に失敗する個体が多くなること等が明らかとなっている(高嶋・中村，1984；中村ら，1987；林田ら，2000a；林田ら，2000b)。このことは，従来から確認されている魚類が走流性を有することと整合している。

ここで定位とは，林田ら(2000a)に倣い，魚類の行動のうち上流方向に頭部を向けてある特性の場所にとどまることを指す。走流性とは，流れの中で上流側に向かう性質をいい，向流性とも呼ばれる(ダム水源地環境整備センター編，1998)。これらの用語は，以下，共通とする。

しかしながら，これまでに行われた観測事例には，Ⅰ)観測は一つのプールが対象とされている，Ⅱ)同一の構造諸元で異なる複数の水理条件を対象とした観測があまり行われていない，Ⅲ)遡上率が観測されていないといった問題がある。

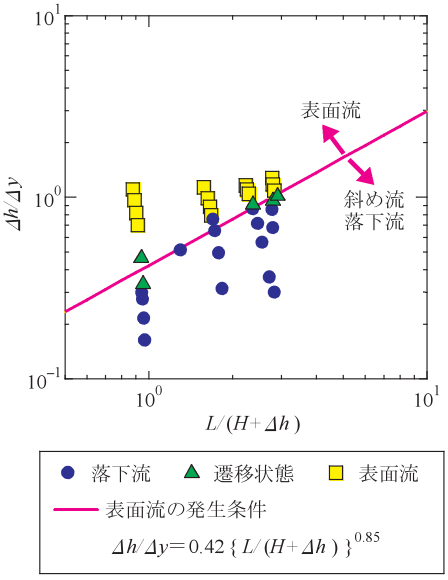


Fig. 5　矩形型隔壁の場合の構造諸元および越流水深と流況形態の関係
(鬼束ら(2005)による図のうち実験計測結果のみを抽出)
Influence that structural specifications and overflow depth exert on flow type when rectangular type weir wall is used
(Only the experimental results of the figure by Onitsuka et al. (2005) is extracted)

Ⅲ　階段式魚道における異なる流量条件に対するプール毎の流況とウグイの遊泳行動

1　概説

魚類は魚道内の微妙な流況の違いに対応して遊泳すると考えられることから(林田ら，2000a)，近年では，魚道の設計において魚道内流況と魚類の遊泳行動の関係が着目されている。この関係を解明するための実験や現地調査がこれまでに数多く実施されており，階段式をはじめ(高嶋・中村，1984；中村ら，1987；林田ら，2000a；林田ら，2000b；鬼束ら，2006)，アイスハーバー式(泉ら，2002)，プールタイプと水路タイプを混合させたハイブリッド式(泉ら，2000)，バーチカルスロット式(泉ら，2004)，デニール式(和田ら，1998)，スティープパス式(和田ら，1998)，修正ラリーニア型舟通し式(和田ら，1999)等で事例がある。

このうち階段式を対象とした事例では，流況形態が落下流(**Fig. 4**)の場合，主流を遡るようにプール底付近，上流側隔壁に沿って遡上する個体が多いこと，落下流であってもプール内における減勢効果が不十分であれば，定位や遡上に失敗する個体が多くなること等が明らかとなっている。

しかしながらこれらの事例には，Ⅰ１c で述べたように，Ⅰ)観測は一つのプールが対象とされている，Ⅱ)同一の構造諸元で異なる複数の水理条件を対象とした観測があまり行われていない，Ⅲ)遡上率が観測されていないといった問題がある。Ⅰ)については，Kumar et al.(1995)の実験によると，同一形状のプールが連続した魚道に一定の流量が供給されている場合であっても，上流から 3 つ目以降のプールではほぼ同じ水理特性となるのに対し，上流から 1 つ目と 2 つ目は 3 つ目以降と若干異なることが確認されており，上流から 3 つ目までの

プールを対象として観測を行う必要があると考えられる。Ⅱ）については，頭首工では魚道への流量を調整する方策がとられていない場合がほとんどであり，河川水位の変動に応じて魚道への流量も変化し，それに応じて魚道内の流況形態も変化すると考えられることから，流量の違いによる影響の評価も必要と考えられる。Ⅲ）については，観測した遡上が魚類にとって容易なものであったか否か評価する上で，遡上率を同時に観測しておくことも必要と考えられる。

そこで本章では，階段式魚道における異なる流量条件に対するプール毎の流況とウグイの遊泳行動の観測を行う（浪平ら，2007）。

2　模型および流量条件

a　模型の概要

Fig. 6 に示す階段式魚道の実物規模模型を屋内に設置した。本模型の構造諸元として，勾配 $\Delta y/(L+D)$，プール深さ H，プール間落差 Δy，隔壁厚さ D（**Fig. 1**，**Table 2**）については，Ⅱ 4 で述べた構造諸元と遡上率の関係に関する既往の実験結果（和田，1990；和田，1993；原ら，1995；ダム水源地環境整備センター編，1998；和田，2003）から定め，プール長 L は $\Delta y/(L+D)$ から逆算して設定した（**Table 3**）。隔壁は，他の形状と比べて表面流が発生しにくく（高須ら，1994；林田ら，2000b），アユの遡上率が高い（和田，1990；和田，2003）という実験結果が得られている円弧型隔壁（**Fig. 2**）とした。詳細な形状については，柏井ら（1994）の提案（**Fig. 7**）を採用した。プールの数は，Ⅲ 1 で述べたⅠ）に対応するため，3 とした。本模型では，最も上流にあるプールより上流側を上流水路部，最も下流にあるプールより下流側を下流水路部，各プールについては上流から順に上流プール，中央プール，下流プールと呼ぶこととする（**Fig. 6**）。

なお，本模型では魚道全体における距離および落差が小さいため（**Fig. 6**），これを使用して観測される遡上率は，現場に実際に設置される魚道での値より大きくなる可能性が高く，普遍的な値とはいえない。しかしながら，本章において後述のように実験条件として流量を変えた場合のウグイの遡上の容易性を比較するための利用については問題ないと考えられる。

b　流量条件

流量条件として，最上流の隔壁に対する越流水深 Δh を **Table 4** のように 4 ケース設定した。この条件は，階段式魚道を対象とした実験における水理条件として比較的多く使用される値の範囲にある（高須ら，1994；原ら，1995；林田ら，2000a；林田ら，2000b）。

3　魚道内流況の計測方法

流速分布および水面形状を中央縦断面で計測し，これを魚道の縦断面における流況の代表値とみなすこととした。このことは，本研究と同様に隔壁に切り欠き部および潜孔のない階段式魚道を用いて流況を計測した鬼束ら（2005）の実験では，縦断面の流速は横断方向にほとんど差違がみられなかったことによる。

Table 3　階段式魚道の実物規模模型の構造諸元（単位：m）
Structural specifications of the full-size hydraulic model of pool-and-weir type fishway (unit : m)

勾配	H	Δy	D	L
1/10	0.4	0.1	0.2	0.8

プール内の水平方向および鉛直方向の流速成分は，各方向に 0.1m ピッチで，東京計測社製三次元電磁流速計 SF-5113（本体部），SPT-200-10Z（検出部）を用いて計測した。但し，水面近傍および構造物近傍については 0.05m ピッチとした。隔壁の上側における水平方向の流速成分は，水平方向に 0.05m ピッチ，鉛直方向に 0.02m ピッチで，東京計測社製プロペラ流速計 SA-1101PR-S（本体部），SAT-350-20S（検出部）を用いて計測した。流速データは 60 秒間の平均値を記録した。

なお，水面近傍では，電磁流速計の計測対応範囲外の条件となり，データを得られない箇所も生じた。隔壁の上側のみプロペラ式流速計を用いたのも，同様の理由により電磁流速計では計測できなかったためである。

水面形状は，水平方向に 0.05m ピッチで，0.1mm 読みポイントゲージを用いて計測した。水面形状の変化が激しい場合は，0.02 ～ 0.03m ピッチとした。水面高さの変動が大きい箇所では，60 秒間の中間値を計測した。

4　ウグイの遊泳行動の観測方法

a　実験に使用したウグイ

実験に使用したウグイ（*Leuciscus hakonensis*，**Fig. 8**）の体長および体重の関係を **Fig. 9** に示す。体長と体重の測定は，実験期間（8 月下旬～ 9 月下旬）に週 1 回程度，任意に選んだ個体を対象に行ったが，同期間中，測定値の傾向に大きな変化は見られなかった。これらのウグイの突進速度は，Ⅱ 3 で述べたように体長の 10 倍程度を目安と考えると，0.9 ～ 1.2m/s 程度になる。

なお，これらのウグイは栃木県鹿沼市の養魚場より購入したもので，購入後は階段式魚道の模型を設置した屋内の水槽にて飼育した。飼育中，エサとしては市販の川魚用のものを週に 1 ～ 2 回与えた。

b　実験時のタイムスケジュール

ウグイの遡上活動は 17:00 ～ 19:00 にかけて活発であるという報告（ダム水源地環境整備センター編，1998）にもとづき，本研究では 16:00 ～ 19:00 を対象として，模型（**Fig. 6**）の左岸側のアクリル窓より魚道内のウグイの動きをデジタルビデオカメラにより撮影した。この時間帯における屋内の照度は，予備実験を行った 8 月中旬の晴天時の屋外での観測結果を目標値として，**Fig. 10** のように調整した。そして，遡上率の測定は翌日の朝に行った。実験におけるタイムスケジュールの詳細および遡上

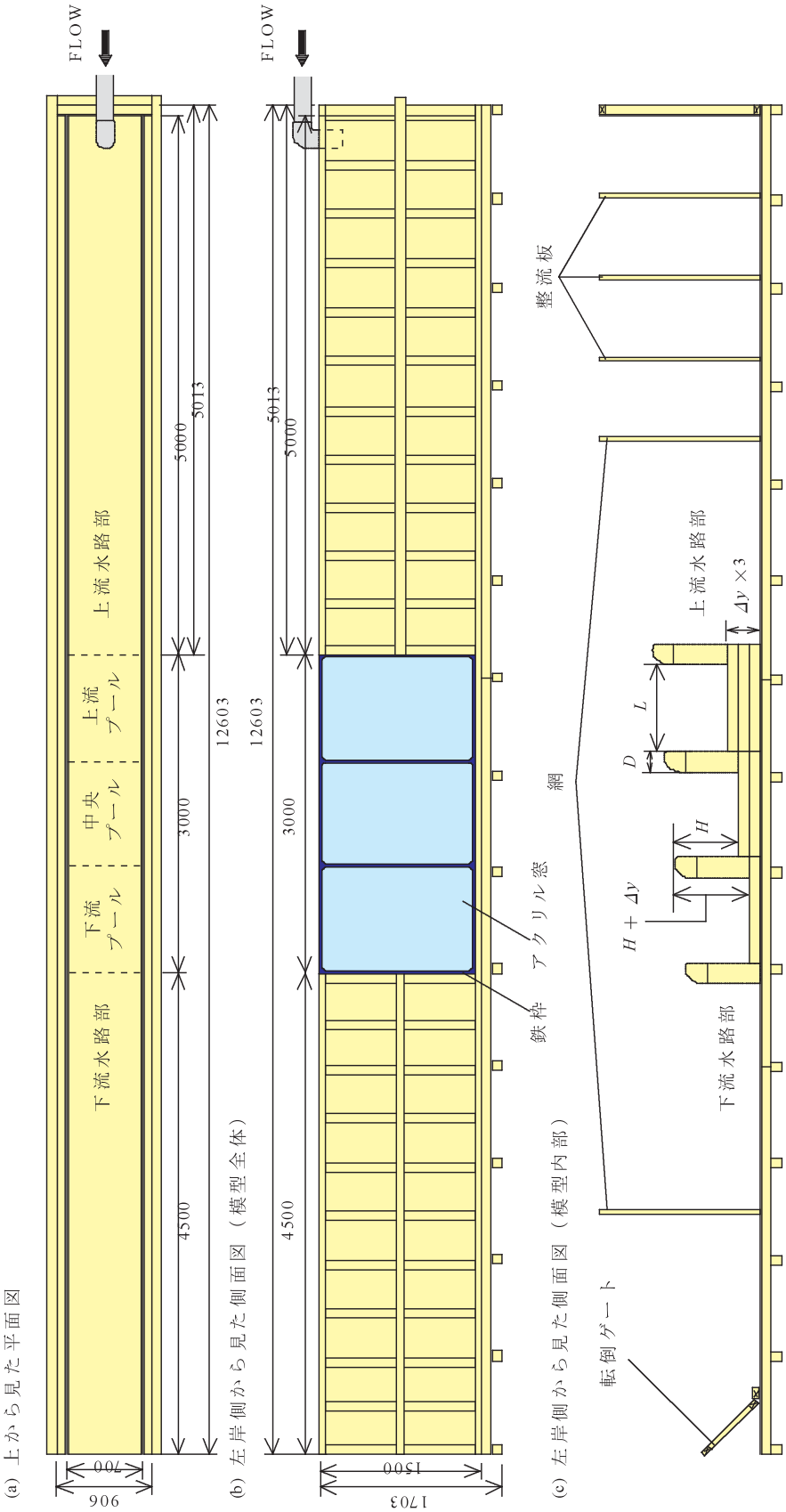


Fig. 6　階段式魚道の実物規模模型の概要（単位：mm）
Schematic diagram of the full-size hydraulic model of pool-and-weir type fishway (unit : mm)

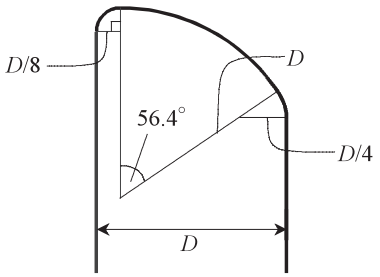


Fig. 7　階段式魚道の実物規模模型における隔壁天端形状（左が上流）
Shape of the crown of the weir wall in the hydraulic model (from the right side)

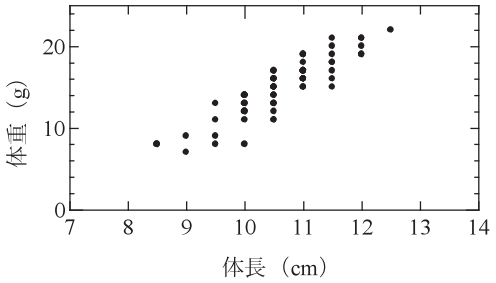


Fig. 9　実験に使用したウグイの体長と体重の関係
Relationship between the length and the weight of *Leuciscus hakonensis* used at experiments

Table 4　流量条件
Discharge conditions

ケース名	越流水深 Δh（m）	単位幅流量（m^2/s）
CASE1	0.05	0.021
CASE2	0.10	0.064
CASE3	0.15	0.127
CASE4	0.20	0.190

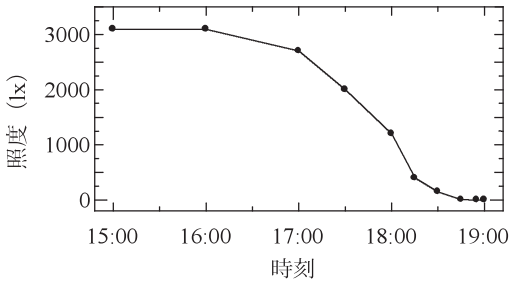


Fig. 10　実験時の屋内の照度変化
Time series of the illuminance in the experimental facility during observation

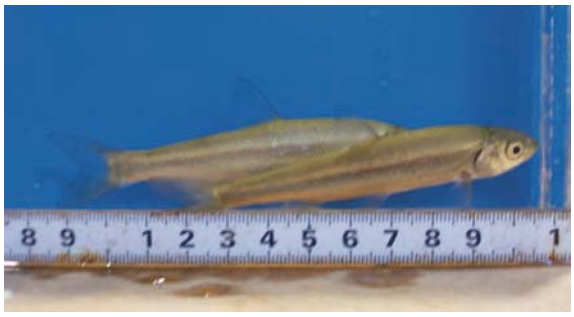


Fig. 8　実験に使用したウグイ
Leuciscus hakonensis used at experiments

Table 5　実験時のタイムスケジュール
Procedure of experiment

時刻	内　　容
14:00	模型へ所定の越流水深（**Table 4**）で通水開始。このとき，下流水路部と下流プールとの水位差が，プール間落差（0.1m）と比べて十分に大きくなるよう下流端の転倒ゲートの高さを調整。
15:00	下流水路部の網より上流側に 30 ～ 50 尾程度のウグイを放流。
16:00	下流水路部と下流プールとの水位差が，プール間落差と等しくなるように下流端の転倒ゲートを調整し，遊泳行動の観測を開始。
19:00	遊泳行動の観測を終了。
翌 8:00	通水終了。水理模型内の全ての箇所にいるウグイの数を数え，総数（A）に対する上流水路部にいた数（B）の割合（= B/A × 100）を遡上率とする。

率の測定方法を **Table 5** に示す。

なお，**Fig. 10** に関して，屋外での 16:00 以前の照度は 7000lx を越えていたが，屋内の照明設備では 3000lx 程度より明るくすることは不可能であったので，この値を最大とした。このため，遊泳行動の観測を開始していない 16:00 以前については，屋外よりかなり暗い条件である。また，19:00 以降については，屋内にある火災報知器等の消せない灯りのために 1lx 未満まで照度を低下させているが，0lx ではない。

Table 5 における 15:00 ～ 16:00 の状態については，静水中にて飼育されたウグイを流水に慣らすため設けた。予備実験により，慣らすための時間を 3 時間とした場合と 1 時間とした場合で，ウグイの遊泳行動および遡上率にほとんど違いが見られなかったことは確認している。また，遡上率を翌 8:00 に測定したのは，観測終了後の 19:00 以降の屋内の照度はほぼゼロであるが，予備実験の際にこの時間帯にウグイが遡上するのを目視により確認できたことから，夜間の遡上もあわせて評価するためである。一方，19:00 以降はビデオカメラによる撮影は不可能であった。

c　環境条件の計測方法

実験時は，14:00 ～ 19:00 の間は 1 時間毎に，そして翌 8:00 に，計測範囲 0 ～ 50℃の水温計を用いて水温を観測した。また，**Fig. 10** のように屋内の照度を調整する際には，ミノルタ社製デジタル照度計 T-1 を用いた。

5　実験結果

実験は 2004 年の 8 月下旬から 9 月下旬にかけて

行った。1 回の実験では 30 ～ 50 尾のウグイを使用し，CASE 1 ～ 4(**Table 4**)のそれぞれで実験に使用した総尾数が 100 を越えるまで繰り返した。その結果，CASE 1 ～ 4 それぞれの実験回数は 3，3，3，4 となり，使用したウグイの総尾数は 127，131，130，142 となった。実験期間中の実験水の温度は 23.0 ～ 28.5℃であった。なお，1 回の実験で使用するウグイの尾数は，1 尾毎の遊泳行動を捉えられないほどプール内に同時に多数が存在するのを防ぐこと，および，複数尾が連続して遡上する場合についても観測することの両方を目的として，予備実験の結果から判断した。

CASE 1 ～ 4 における魚道内流況とウグイの遡上経路の観測結果を **Fig. 11**，遡上率(**Table 5**)の観測結果を **Fig. 12** に示す。**Fig. 11** の矢印は各測定位置の流速ベクトルであるが，Ⅲ 3 で述べたように，隔壁の上側では水平方向成分のみの表示である。各遡上経路の始点および終点付近には，丸数字により各経路の番号を記載している。これらの遡上経路は，各プールから上流側のプールまたは上流水路部への移動が明確な映像として捉えられた場合のものである。但し，気泡の影響によりウグイの遡上が明確には捉えられなかった場合もほぼ同様の経路であったこと，および，複数尾が連続して遡上する場合もほぼ同様の経路であったことを確認している。

a　CASE 1 における魚道内の流況とウグイの遊泳行動

魚道内流況(**Fig. 11(a)**)としては，全てのプールで落下流(**Fig. 4**)となった。上流プールの主流は 0.2 ～ 0.6m/s であるのに対し，下流プールで 0.2 ～ 0.5m/s，中央プールで 0.2 ～ 0.4m/s となった。中央プール以降で上流プールより主流が遅くなったのは，プールによる減勢効果の影響と考えられる。しかし，中央プールより下流プールの方が減勢されておらず，このメカニズムの解明は今後の課題である。なお，**Fig. 11(a)** の流速ベクトルの形状から，上流プールに突入する主流の水脈は薄く，隔壁に最も近い計測点よりも隔壁に近いところを通過した可能性が高く，その付近の主流はより速いと考えられる。

ウグイの遊泳行動(**Fig. 11(a)**)としては，下流および中央プールでは，流速の比較的小さいプールの中央付近で定位していた個体が，一度プール底付近まで潜り，プール底，上流側隔壁に沿って主流を遡った(①，②)。上流プールでは，プール底付近で定位していた個体が，プール底，上流側隔壁に沿って主流を遡った(③)。なお，主流が最も早い上流プールにおける定位は，他のプールとは異なり，休憩しているのではなく，押し流されないように抵抗している様子であった。また，上流プールでは，遡上に失敗することが他のプールより多かった。

遡上率(**Fig. 12**)は平均値で 80% 程度に達しており，実験毎の差も小さかった。これは，各プール内の主流は本研究で使用したウグイの突進速度の目安である 0.9 ～ 1.2m/s(Ⅲ 4 a)の半分以下であり，ウグイにとって主流を遡ることが容易であったためと考えられる。

なお，上流水路部に到達した個体とそうでない個体の間で身体的特徴に明確な違いは見られなかった。このことは，以降の CASE 2 ～ 4 においても同様であった。

b　CASE 2 における魚道内の流況とウグイの遊泳行動

魚道内流況(**Fig. 11(b)**)としては，CASE 1 とほぼ同様であり，全てのプールで落下流となった。各プール内の主流の速さの順も，CASE 1 と同様であった。しかし，主流は CASE 1 より全体的に速くなり，上流プールで 0.6 ～ 1.1m/s，下流プールで 0.4 ～ 1.1m/s，中央プールで 0.2 ～ 0.9m/s となった。

ウグイの遊泳行動(**Fig. 11(b)**)としては，CASE 1 とは若干変化した。下流および中央プールでは，流速の比較的小さいプールの中央付近で定位していた個体が，上流側隔壁の天端付近に進み，そこから上流側隔壁に沿って主流を遡った(①，②)。上流プールでは，流速の比較的小さいプールの中央付近で定位していた個体が，押し流されつつも上流側隔壁付近までほぼ直進し，そこから上流側隔壁に沿って主流を遡った(③)。なお，上流プールでは，CASE 1 と同様に，定位の様子が他のプールと異なり，遡上に失敗することが他のプールより多かった。

このように CASE 2 では，CASE 1 とほぼ同様の流況ではあるが，プール内の主流は CASE 1 より速くなり，突進速度の目安程度となる箇所が生じたため，遡上経路を変えることにより主流を遡る距離を短くしたと考えられる。しかし，遡上率(**Fig. 12**)は平均値で 70% 程度と CASE 1 より若干低下しており，実験毎の差もより開いた。

c　CASE 3 における魚道内の流況とウグイの遊泳行動

魚道内流況(**Fig. 11(c)**)としては，全てのプールで斜め流(**Fig. 4**)となった。主流は CASE 2 よりさらに速くなったが，各プール内の主流の速さの順は変わらず，上流プールで 0.8 ～ 1.7m/s，下流プールで 0.6 ～ 1.5m/s，中央プールで 0.4 ～ 1.4m/s となった。

ウグイの遊泳行動(**Fig. 11(c)**)としては，下流プールでは，プール底付近で定位していた個体が，上流側隔壁付近までほぼ直進し，そこから隔壁に沿って上昇して主流を遡った(①)。同様の経路で遡上する個体は，中央プールでも観測された。中央プールでは，主流の下側の小さな渦が形成される付近で，走流性のため下向きまたは下流向きに定位していた個体が，そこから向きを変えて主流と渦との境界付近を通り，上流側隔壁を越えた(②)。同様の経路で遡上する個体は下流および上流プールでも観測された。しかしながら，この経路では，向きを変えるときに押し流されてしまう場合も少なくなかった。一方，一気に 2 つのプールを遡上する個体も観測された。具体的には，下流水路部から遡上した勢いを維持して上流側隔壁付近に進み，定位することなく一気に隔壁を越

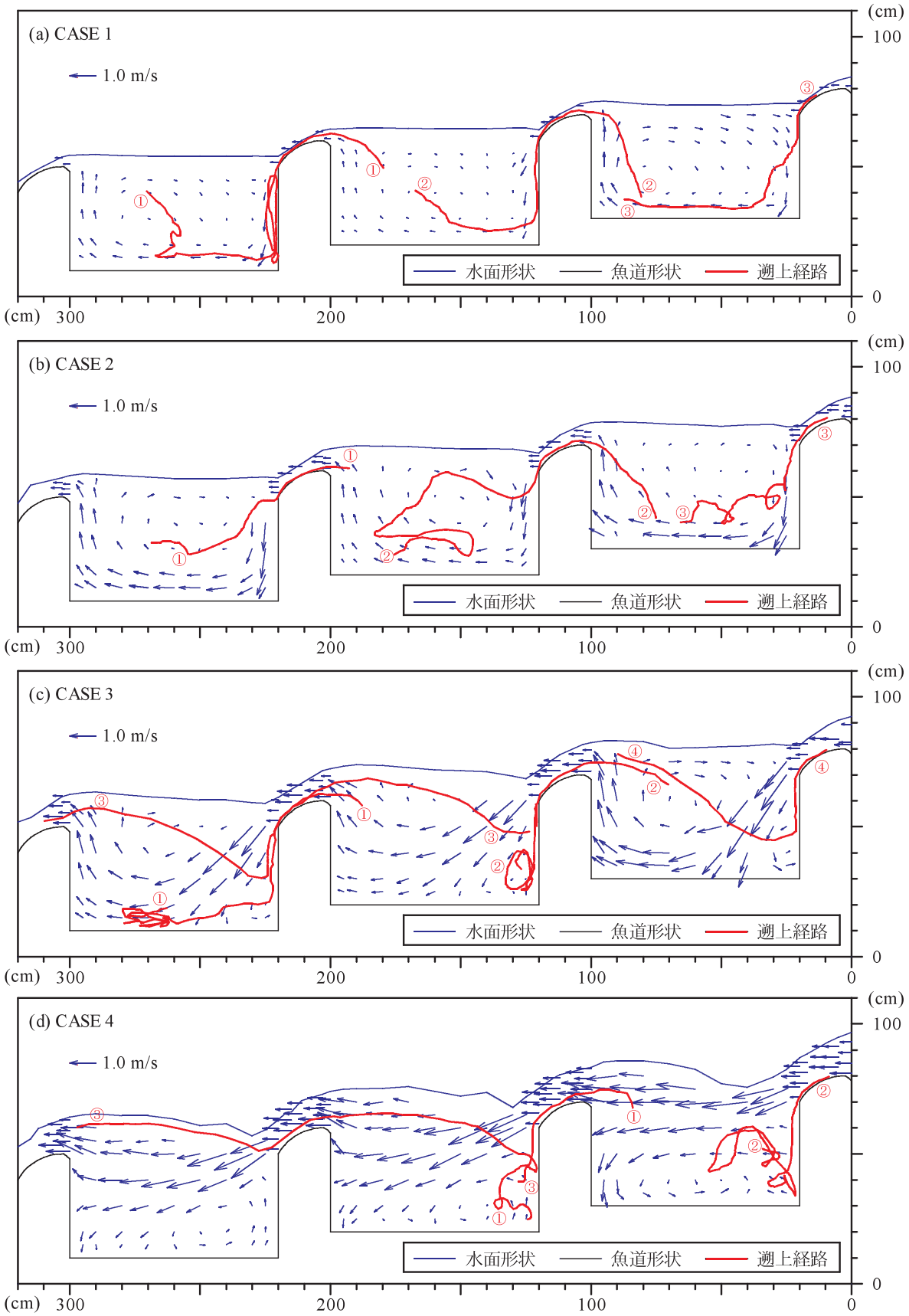


Fig. 11　魚道内の流況とウグイの遡上経路の観測結果
Experimental results of flow structure and ascending route of *Leuciscus hakonensis* in the fishway

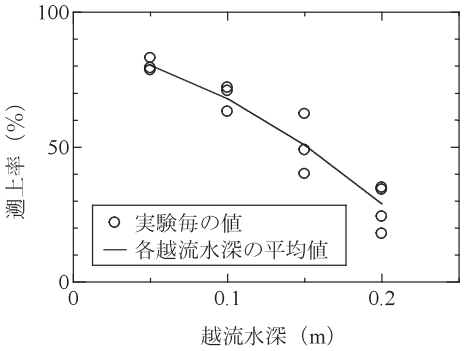


Fig. 12　ウグイの遡上率の観測結果
Experimental results of ascending rate of *Leuciscus hakonensis*

えて中央プールに入り，さらに，その勢いを維持して同様に上流プールに入ろうとした(③)。

なお，全てのプールにおいて，定位は休憩しているのではなく，押し流されないように抵抗している様子であった。特に上流プールでは，押し流されてしまう個体も観測された。押し流されそうになった後に，プールの中央を通って上流側隔壁付近に進んで隔壁を越える個体も，僅かではあるが観測された(④)。

このように，CASE 3 では，各プール内の主流が突進速度の目安を大幅に超えたこと，下向きまたは下流向きに定位しなければならない流況となったこと等から，遡上が困難となり，遡上率(**Fig. 12**)は CASE 2 よりさらに低下するとともに，実験毎の差がより開いたと考えられる。

d　CASE 4 における魚道内の流況とウグイの遊泳行動

魚道内流況(**Fig. 11(d)**)としては，CASE 1 ～ 3 とは異なり，全てのプールで表面流(**Fig. 4**)となった。各プールの中央では，半時計回りの大きな渦が形成された。主流は CASE 3 より速くなったが，プール間の差は小さくなり，上流プールで 0.8 ～ 1.8m/s，下流および中央プールで 0.8 ～ 1.6m/s となった。

ウグイの遊泳行動(**Fig. 11(d)**)としては，中央および上流プールでは, 上流側隔壁付近における主流の下側で, 走流性のため下向きまたは下流向きに定位していた個体が, そこから向きを変えて主流と渦との境界付近を通り, 上流側隔壁を越えた(①，②)。同様の経路で遡上する個体は，下流プールでも観測された。しかしながら，この経路では，向きを変えるときに押し流されてしまう場合も少なくなかった。一方，一気に 2 つのプールを遡上する個体も観測された。具体的には，下流水路部から遡上した勢いを維持して上流側隔壁付近に進み，定位することなく隔壁を越えて中央プールに入り，さらに，その勢いを維持して同様に上流プールに入ろうとした(③)。

なお，全てのプールにおいて，定位は休憩しているのではなく，押し流されないように抵抗している様子であり，押し流されてしまう個体も観測された。

このように，CASE 4 では CASE 3 と比較して流況が大きく変化したが, 遡上経路はほぼ同様であった。一方, 遡上率(**Fig. 12**)は全体的に CASE 3 より大きく低下した。従って，流れの形態に関する遡上の困難さは CASE 3 と大きく変わらないが，主流がより速くなったため，遡上できない個体が CASE 3 より増加したと考えられる。

e　流量条件の違いとウグイの遊泳行動

階段式魚道では，Ⅰ 1 c および Ⅱ 5 で述べたように，表面流は避けるべき流況であるといわれている。一方，本章で観測したウグイの遡上経路および遡上率から，CASE 3 のような斜め流も表面流状態と同様に避けるのがよいと考えられる。このことは，ウグイに限らず走流性をもつ浮遊魚全般に対して当てはまる可能性が高い。ここで，CASE 2 と 3 の越流水深の差は 0.05m である。河川ではこの程度の水位変動は頻繁に生じる。

従って，遡上魚を主な対象とする場合には，設計の際にこの程度の越流水深の変動を考慮し，それによる魚道内流況の変化を予測することの重要性が改めて確認された。場合によっては，想定される越流水深の変動範囲内では斜め流や表面流が生じにくくなるように，プール深さやプール長等の構造諸元を選定する設計方法も必要になると考えられる。このような検討には，Ⅳ以降で開発を目指す魚道内流況の予測のための数値解析手法が有効な手段になる。

また，越流水深の変動への対応方法として，最上流のプールに横溢流式の余水吐を設けること(和田，2003)も有効となると考えられる。このような余水吐の諸元を検討する際にも，前述の数値解析手法は重要なツールになると考えられる。

なお，本章で使用した模型では，CASE 3 の条件では斜め流になるとともに，プール内の主流の速度が実験に使用したウグイの突進速度の目安(Ⅲ 4 a)を大幅に超えた。このため，CASE 3 では CASE 1 および 2 よりも遡上に失敗するウグイが多く観察された原因として，斜め流となったことだけではなく，プール内の主流の速度の影響も受けているはずである。従って，今後の課題として，本章における CASE 3 と同じ越流水深で落下流となる構造諸元の模型を用いた観測を行い，落下流か斜め流かの違いと主流の速度のうち，どちらがウグイの遊泳行動により大きな影響を及ぼしているか，より詳細な調査を行う必要がある。

また，隔壁の上側では計測器の対応範囲外の条件となり，水平方向の流速成分しか計測できなかった(Ⅲ 3)。このため，Ⅳ以降で開発を目指す数値解析手法により，この部分における鉛直方向の流速についても把握するとともに，隔壁の上側の流れとウグイの遊泳行動の関係を調べる必要がある。

f　プール毎の流況の違いとウグイの遊泳行動

落下流および斜め流のときは，最上流のプールでは他のプールと比べて主流が速く，ウグイの定位も困難であ

り，遡上に失敗する場合も他のプールより多かった。

このことから，階段式やアイスハーバー式等のプールタイプの魚道における魚類の遊泳行動を観測する必要がある場合は，複数あるプールのうち中央付近の1段（高嶋・中村，1984；中村ら，1987；鬼束ら，2006）ではなく，複数あるプールのうち最上流のプール，もしくは，プールが1段しかない模型（林田ら，2000a；林田ら，2000b）を対象とし，最も遊泳が困難となる状況について評価する必要があると考えられる。また，一般に階段式等のプールタイプの魚道では全てのプールの構造諸元を同一とするが，最上流のプールのみ他より勾配を緩和させることが，魚類の遡上率を向上させる上で有効な手段になる可能性があると考えられる。

そこで，最上流のプールのみ勾配を緩和させることの効果の確認を目的として，以下の補足的な実験を行った（浪平，2006）。方法はⅢ 2およびⅢ 4とほぼ同じであるが，模型（**Fig. 6**）についてはプール部分の諸元を **Table 6** のように3タイプ設定し，ウグイについては **Fig. 13** の2グループを用いた。ここで，**Table 6** の TYPE A および **Fig. 13** の GROUP 1 はⅢ 2およびⅢ 4の実験で使用したものと同一である。そして，各タイプにおけるウグイの遡上率を観測した。その結果を **Fig. 14** に示す。ここで，**Fig. 14(a)** は **Fig. 12** の再掲載である。

TYPE A と TYPE B における GROUP 1 の遡上率を比較すると（**Fig. 14(a), (b)**），既往の実験結果（原ら，1995）と同じく，勾配が急である TYPE B の方が遡上率が低い。一方，TYPE B のうち最上流の隔壁のみ 0.1m 低くして上流プールのみ勾配を 1/10 に緩和させた TYPE C における GROUP 2 の遡上率を，TYPE B における同じグループによる結果と比較すると（**Fig. 14(b), (c)**），前者の方が高いことが明らかとなった。この結果とⅢ 5 a～Ⅲ 5 d の結果から，最上流のプールのみ勾配を緩和させれば魚類の遡上率が向上する可能性の高いことが示された。

ここで，**Fig. 14(a)** と **Fig. 14(c)** との単純な比較からは，最上流のプールのみ勾配を緩和させたことの効果は小さくみえる。しかしながら，TYPE A と TYPE B の比較に用いた GROUP 1 と，TYPE B と TYPE C の比較に用いた GROUP 2 とで，体長の違い（**Fig. 13**）による遊泳力の差（**Fig. 14(b)**）を考慮すると，**Fig. 14(a)** と **Fig. 14(c)** からみられるよりも，最上流のプールのみ勾配を緩和させたことの効果は大きいと考えられる。

但し，本章における遡上率はプール数が3しかない模型（Ⅲ 2 a）を用いた実験結果である。このため，プール数の少ない水路における落差工として設置される魚道（例えば，**Fig. 15**）に対しては，同程度の効果を期待できると考えられる。しかし，プール数がより多い頭首工の魚道においても同程度の効果を期待できるか否かは不明である。今後，よりプール数の多い魚道における遡上実験を行い，検証する必要がある。その際には，本章における模型実験とは異なり，全ての異なるタイプで同一のグループの魚類を用いる必要がある。

Table 6　階段式魚道の実物規模模型の構造諸元（単位：m）
Structural specifications of the full-size hydraulic model of pool-and-weir type fishway (unit : m)

タイプ名	勾配	*H*	*Δy*	*D*	*L*
TYPE A	1/10	0.4	0.1	0.2	0.8
TYPE B	1/5	0.4	0.2	0.2	0.8
TYPE C ※	上流プール：1/10 他のプール：1/5	0.4	0.2	0.2	0.8

※ TYPE C は TYPE B に対して最上流の隔壁のみ 0.1m 低くしたものである

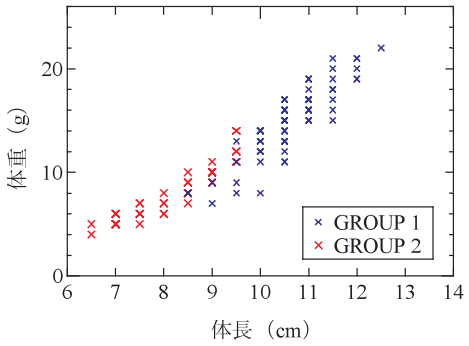


Fig. 13　実験に使用したウグイの体長と体重の関係
Relationship between the length and the weight of *Leuciscus hakonensis* used at experiments

6　結語

本章では，円弧型隔壁の階段式魚道に対するプール数3の実物規模模型を用いて，異なる流量条件に対するプール毎の流況とウグイの遊泳行動の観測を行った。得られた結果を整理すると，以下のようである。

1）流量条件が異なる場合の魚道内流況およびウグイの遊泳行動を観測した結果，越流水深の変化に伴うプール内の流況形態や主流の速度の違いがウグイの遡上率だけでなく遡上経路にも大きな影響を及ぼすことが確認された。特に，越流水深が比較的大きく流況形態が斜め流になるときは，プール内の主流の下側に生じる小さな渦付近ではウグイは走流性のため下向きまたは下流向きに定位しなければならず，このような場合は遡上に失敗しやすくなることが明らかとなった。このことから，階段式魚道における流況形態としては，従来からいわれている表面流だけでなく，斜め流も避けるのがよいと考えられる。

2）上記1）から，設計段階において，想定される越流水深の変動に対する魚道内流況の変化を予測することや，その変動範囲内では斜め流や表面流が生じにくくなるようにプール水深やプール長等の構造諸元を選定することの重要性が改めて確認された。これらのためには，魚道内流況の予測のための数値解析手法が有効な手段になると考えられる。

3）プール毎の流況およびウグイの遊泳行動を観測した

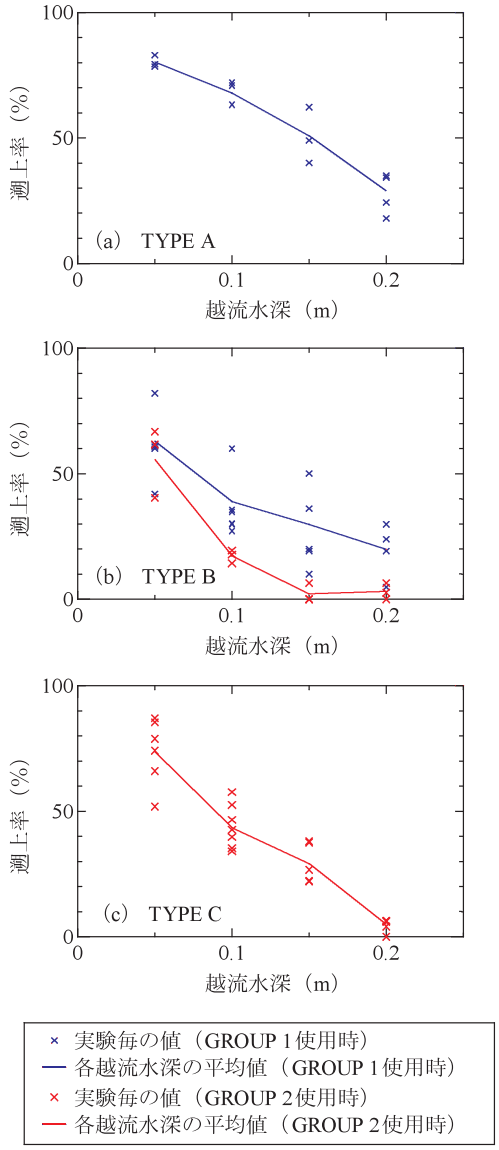


Fig. 14　ウグイの遡上率の観測結果
Experimental results of ascending rate of *Leuciscus hakonensis*

結果，落下流および斜め流のときは，最上流のプールでは他のプールと比べて主流の速度が大きくなり，ウグイの定位も困難となり，遡上に失敗する場合も他のプールより多くなることが明らかとなった。このことから，階段式等のプールタイプの魚道内の魚類の遊泳行動を観測する必要がある場合は，複数あるプールのうち最上流のプール，もしくは，プールが 1 段しかない模型を対象とするのがよいと考えられる。

4）勾配を 1/5 とした模型と，この構造において最上流の隔壁のみ他よりも低くして最上流のプールのみ勾配を 1/10 に緩和させた模型を用いて，ウグイの遡上実験を行った結果，後者における遡上率が高くなることが確認された。

5）上記 3)および 4)から，階段式等のプールタイプの魚道では，最上流のプールのみ他より勾配を緩和させれば，魚類の遡上率が向上する可能性が高いと考えられる。

6）上記 1)において斜め流となるときは，プール内の主流の速度が実験に使用したウグイの突進速度の目安を大幅に越えていた。従って，今後の課題として，落下流か斜め流かの違いと主流の速度のうち，どちらがウグイの遊泳行動により大きな影響を及ぼしているかについて，本章とは異なる構造諸元の模型を用いた観測を行い，より詳細な調査を行う必要がある。

(a)　埼玉県の事例その 1

(b)　埼玉県の事例その 2

Fig. 15　水路の落差工として設置される階段式魚道
Pool-and-weir type fishway set up as drop works in canal

Ⅳ　円弧型隔壁の階段式魚道における流況予測のための数値解析手法の開発

1　概説

魚道を設計する際には，魚道内の流速が魚類の遊泳可能な速度を越えないことが必要である。また，階段式魚道ではプール内での減勢効果が期待されていることから，上流側の隔壁からの越流水がプール内に潜り込まず水面付近を流下する表面流(**Fig. 4**)が発生しない設計を

行う必要がある。

Ⅲでは，プール数3の円弧型隔壁の階段式魚道の実物規模模型を用いて，異なる流量条件に対するプール毎の流況とウグイの遊泳行動の観測を行った。その結果，設計段階において，想定される越流水深の変動に対する魚道内の流況形態や主流の速度の変化を予測することや，その変動範囲内では斜め流や表面流（**Fig. 4**）が生じにくくなるようにプール深さやプール長等の構造諸元を選定することの重要性が改めて確認された。

このような検討を行うためには，設計段階で魚道内流況を精度良く予測できる汎用的な方法を確立することが必要である。それに対して，近年の計算機能力の向上に伴い，流体の数値解析の技術が非常に進歩している。数値解析には，模型実験とは異なって条件の変更に多大な時間および費用を必要としない，模型実験では測定が困難な情報を得られる等の長所がある。このため，水利構造物についても，数値流体力学の手法を用いた数値解析が設計手法の一つとして着目されつつある。階段式魚道内の流況についても数値解析により高い精度で予測できれば，設計において非常に有効である。

なお，これまでに階段式魚道内の流況を数値解析により再現させる研究が実施されているが（諏訪ら，1995；後藤ら，1999；前野ら，2001；前野・小川，2002），それらの事例では適切な手法が用いられていないため，十分な再現精度および汎用性が得られておらず，汎用性の検証もなされていない。

そこで本章では，魚道内流況を精度良く予測できる汎用性の高い数値解析手法を開発する（浪平ら，2006a）。ここでは，Ⅲにおいても対象とした，他の形状と比べて表面流が発生しにくく（高須ら，1994；林田ら，2000b），アユの遡上率が高い（和田，1990；和田，2003）という実験結果が得られている円弧型隔壁（**Fig. 2**）の階段式魚道を対象とする。さらに，設計においてこのような数値解析の実施が困難な場合や，より簡便な流況形態の推定のみが必要な場合もあると考えられることから，解析結果をもとに，円弧型隔壁の階段式魚道における構造諸元および水理条件と流況形態の関係を整理し，各流況形態の発生領域を明らかにする（浪平ら，2006b）。

2　数値解析手法

a　開発する手法に必要な条件

流れの数値解析とは，解析対象の空間を多数の格子に分割し，各格子で流れの運動方程式（運動量保存則）と連続式（質量保存則）を数値的に解くことにより，詳細な流れの数値情報を得るものである。運動方程式には，ニュートン力学における運動の第2法則を厳密に表現したNavier-Stokes方程式（以下，N-S方程式），河川流等のような平面2次元的とみなせる流れを扱うためN-S方程式を静水圧近似して鉛直方向に積分した浅水流方程式，水路における1次元的な情報の伝達のみを扱うため全水頭の変化式から導かれたSaint-Venant方程式がある。階段式魚道内の流れに対しては，N-S方程式を用いなければならない。

階段式魚道内の流れの特徴として，①乱流であること，②水面変動が大きいことが挙げられる。従って，本研究で開発する数値解析手法は，これらに対応可能な方法でN-S方程式と連続式を解くものでなければならない。さらに本研究では，円弧型隔壁の階段式魚道を対象としているため，③円弧形状を正確に表現できることが必要である。

b　既往の手法に基づく検討

上記①に関しては，N-S方程式と連続式を数値的に解く際，最も小さな渦を表現できる程度まで解析対象の空間を細かく格子分割する必要がある。しかし，このように分割すると格子数が多大となり，現在の計算機の能力でも数値解析を実施できなくなる。このため，レイノルズ応力が流れに及ぼす影響をモデル化し，レイノルズ平均（≒時間平均）流れを計算するRANS（Reynolds-averaged numerical simulation），もしくは，どのような流れにおいても共通性をもつ小さな渦をモデル化して計算し，それより大きく，流れによって特性が異なる大きな渦のみ各格子で直接計算するLES（Large Eddy Simulation）のいずれかの手法によって数値解析が行われるのが現状である（例えば，梶島，1999）。なお，LESは非定常性や3次元性が強い場合に実施され，RANSはそれより比較的単純な流れに適用される。但し，LESは非定常3次元計算を行う必要があるため，定常解が得られ，かつ，鉛直2次元断面における計算も可能であるRANSに比べて，計算時間は非常に長くなり，また，求められる計算機の能力も高くなる。本研究では設計での使用を想定していることから，RANSが効率的であると考えられる。このため，流れの基礎式としてレイノルズ平均されたN-S方程式と連続式，さらにレイノルズ平均乱流モデルを使用する。

上記②に対応可能な既往の数値解析手法として，VOF法（Hirt and Nichols，1981），C-CUP 法（Yabe and Wang，1991），MARS法（功刀，1996），MPS法（Koshizuka et al.，1995）等がある。VOF法とは，**Fig. 16**のように，各格子において流体が占める割合を示すVOF関数F（$F = 0$：気体，$0 < F < 1$：水面，$F = 1$：流体）の移流方程式を解くことにより，自由水面の位置を追跡するEuler的な手法である。気体部分は流体のない部分と考え，流体部分のみ解析対象とする単相流計算手法である。C-CUP法とMARS法とは，基本的な考え方はVOF法とほぼ同様であるが，気体部分についても解析を行う気液二相流計算手法である。一方MPS法とは，解析対象の空間を格子に分割するのではなく，空間に流体を表現するための粒子を多数配置し，粒子間作用力を計算して流体粒子を追跡することにより流れを評価するLagrange的な手法である。

これらの手法のうち VOF 法については，諏訪ら(1995)，前野ら(2001)，前野・小川(2002)により階段式魚道内の流況に対する数値解析が行われた事例がある。しかしながら，VOF 法はデカルト座標系(**Fig. 17**)における数値解析を前提として開発された手法であるため，円弧形状の構造物に対しては階段状で表現せざるを得ず，これらの事例は上記③に対応できない。なお，デカルト座標系で傾斜面を有する構造物を表現するため，格子の空隙率および格子界面の開口率を 0 ～ 1 の範囲で任意に与える手法も提案されている(Viecelli，1971；藤間ら，1984；榊山ら，1991；Hirt，1993；米山・松山，1997)。これらの手法には，流体が構造物の傾斜面から受ける摩擦抵抗が考慮されていない，円弧形状を表現した場合には流速に関するコントロールボリュームにおける上記の空隙率等の扱いが複雑になる等の短所がある。

MPS 法には後藤ら(1999)による事例がある。MPS 法では，構造物についてもこれを表現するための粒子を任意に配置するため，円弧形状も容易に表現でき，③への対応が可能である。しかしながら，計算格子を用いる手法と比較して，各粒子に関する位置等，計算機に記憶させる情報量が非常に多く，計算時間も大幅に増加する。このため，本手法は設計での使用には適さないと考えられる。

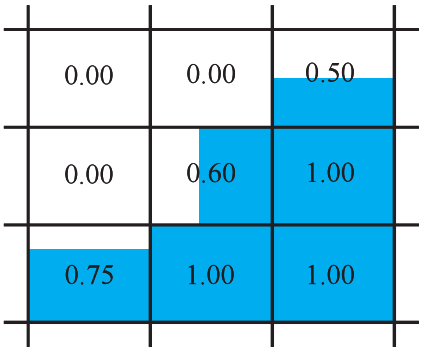


Fig. 16　VOF 法による水面形状の評価の概念図
Conceptual diagram of water surface shape represented by the VOF method

C-CUP 法と MARS 法には事例がないが，気液二相流計算を行うため水面形状の再現精度は VOF 法等の単相流計算方法より高くなる。一方で，気体部分についても数値解析を行うため，計算時間が MPS 法ほどではないが単相流計算方法より増加する，気体に関する境界条件も扱わなければならない，単一の基礎方程式で気液二相を扱うため複雑な条件設定が必要となる等の短所がある。本手法も，設計での使用には適さないと考えられる。

以上より，上記②に対応可能であることと，比較的シンプルな手法であることから，本研究では VOF 法に着目し，③に対応できるように本手法を一般座標系(**Fig. 17**)に展開することとした。なお，一般座標系で VOF 法を適用した事例はほとんどみられず，このような手法による再現精度は十分に確認されていない。この視点からも，一般座標系で VOF 法による数値解析を行う意義は大きいと考えられる。

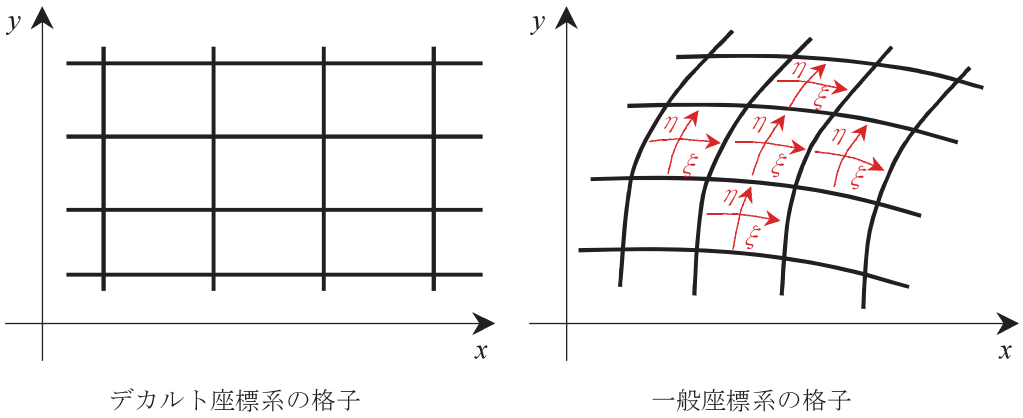
c　基礎方程式

一般座標系におけるレイノルズ平均された N-S 方程式と連続式は，それぞれ次のように表記される。

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(\overline{JU^k}\,\overline{u_i}\right)}{\partial \xi^k}=-\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial \xi^k}\left\{J\frac{\partial \xi^k}{\partial x_i}\left(\frac{\overline{p}}{\rho}\right)\right\}+\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial \xi^k}\left\{J\frac{\partial \xi^k}{\partial x_j}\left(2\nu\overline{D_{ij}}-\overline{u'_i u'_j}\right)\right\}+G_i \tag{3}$$

$$\frac{1}{J}\frac{\partial\left(\overline{JU^i}\right)}{\partial \xi^i}=0 \tag{4}$$

ここで，x_i はデカルト座標で鉛直 2 次元断面を対象とするときには，$i = 1$ のとき水平方向，$i = 2$ のとき鉛直方向を示す。ξ^i は一般座標，J は座標変換のヤコビアンである。$\overline{}$ はレイノルズ平均を表し，u_i は x_i 軸方向の流速成分，u'_i は x_i 軸方向の流速の変動成分($u'_i = u_i - \overline{u_i}$)，$U^i$ は ξ^i 軸方向の流速の反変成分である。t は時間，p は圧力，ρ は密度，ν は動粘性係数，G_i は x_i 軸方向の外力成分，D_{ij} は歪み速度テンソル，$-\overline{u'_i u'_j}$ はレイノル



デカルト座標系の格子　　一般座標系の格子

Fig. 17　2 次元におけるデカルト座標系と一般座標系の格子の概念図
Conceptual diagram of 2 dimensional Cartesian coordinates and generalized curvilinear coordinates

ズ応力であり，繰返し添字は総和規約に従うものとする。J は次のように定義されている。

$$J=\frac{\partial x_1}{\partial \xi^1}\frac{\partial x_2}{\partial \xi^2}-\frac{\partial x_1}{\partial \xi^2}\frac{\partial x_2}{\partial \xi^1} \tag{5}$$

$\overline{D_{ij}}$ は次のように表記される。

$$\overline{D_{ij}}=\frac{1}{2}\left\{\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial \xi^k}\left(J\frac{\partial \xi^k}{\partial x_j}\overline{u_i}\right)+\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial \xi^k}\left(J\frac{\partial \xi^k}{\partial x_i}\overline{u_j}\right)\right\} \tag{6}$$

$-\overline{u'_iu'_j}$ の評価方法として様々なレイノルズ平均乱流モデルが提案されているが，本研究では水工学の分野で解析事例が多く，実績のある標準型 k-ε モデルを採用する。標準型 k-ε モデルでは $-\overline{u'_iu'_j}$ の評価式は次のように定義されている。

$$-\overline{u'_iu'_j}=\nu_t\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{7}$$

ここで，ν_t は渦動粘性係数，k は乱流エネルギー，δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号である。ν_t の評価式，一般座標系における k および乱流エネルギーの散逸率 ε の輸送方程式はそれぞれ次のように表記される。

$$\nu_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(\overline{JU^k}k\right)}{\partial \xi^k}=\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial \xi^k}\left\{J\frac{\partial \xi^k}{\partial x_i}\left(\nu+\frac{\nu_t}{C_k}\right)\left[\frac{\partial}{\partial \xi^j}\left(\frac{\partial \xi^j}{\partial x_i}k\right)\right]\right\}+P_k-\varepsilon \tag{9}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(\overline{JU^k}\varepsilon\right)}{\partial \xi^k}=\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial \xi^k}\left\{J\frac{\partial \xi^k}{\partial x_i}\left(\nu+\frac{\nu_t}{C_\varepsilon}\right)\left[\frac{\partial}{\partial \xi^j}\left(\frac{\partial \xi^j}{\partial x_i}\varepsilon\right)\right]\right\}+\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P_k-C_{\varepsilon 2}\varepsilon) \tag{10}$$

式(9)～(10)の P_k は k の生産項であり，次のように定義されている。

$$P_k=-\overline{u'_iu'_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}=2\nu_t\overline{D_{ij}}\,\overline{D_{ij}} \tag{11}$$

式(8)～(10)の係数には，標準的な値である C_μ = 0.09，C_k = 1.00，C_ε = 1.30，$C_{\varepsilon 1}$ = 1.44，$C_{\varepsilon 2}$ = 1.92 を与えた。

また，一般座標系における VOF 関数 F(F = 0：気体，0 < F < 1：水面，F = 1：流体)の移流方程式は次のように表記される。

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(\overline{JU^i}F\right)}{\partial \xi^i}=0 \tag{12}$$

ところで，標準型 k-ε モデルでは，衝突領域のように歪み速度テンソルの直交成分が存在する流れ場において，P_k(式(11))が過大評価されるという欠点が指摘されている(例えば，村上ら，1988)。例えば，主流 $\overline{u_1}$ が x_2 軸に平行な平面に垂直に衝突している 2 次元衝突噴流の場合，その中心軸上では，

$$\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_2}\fallingdotseq 0 \tag{13}$$

$$\overline{u'_1u'_2}\fallingdotseq 0 \tag{14}$$

とみなせることから，P_k は次のように変形される。但しここでは，連続式を考慮した。

$$\begin{aligned}P_k&=-\overline{u_1'^2}\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1}-\overline{u'_1u'_2}\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_2}-\overline{u'_2u'_1}\frac{\partial \overline{u_2}}{\partial x_1}-\overline{u_2'^2}\frac{\partial \overline{u_2}}{\partial x_2}\\&=-\overline{u_1'^2}\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1}-0-0-\overline{u_2'^2}\left(0-\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1}\right)\\&=-\left(\overline{u_1'^2}-\overline{u_2'^2}\right)\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1}\end{aligned} \tag{15}$$

また，乱流強度 $\overline{u_i'^2}$ は，レイノルズ応力の評価式(式(7))から，次のように表記される。但し式(17)では，連続式を考慮した。

$$\begin{aligned}\overline{u_1'^2}&=-\nu_t\left(\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1}+\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1}\right)+\frac{2}{3}k\\&=-2\nu_t\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1}+\frac{2}{3}k\\\overline{u_2'^2}&=-\nu_t\left(\frac{\partial \overline{u_2}}{\partial x_2}+\frac{\partial \overline{u_2}}{\partial x_2}\right)+\frac{2}{3}k\\&=-2\nu_t\frac{\partial \overline{u_2}}{\partial x_2}+\frac{2}{3}k\end{aligned} \tag{16}$$

$$=2\nu_t\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1}+\frac{2}{3}k \tag{17}$$

式(15)に式(16)，(17)を代入すると，P_k は次のようになる。

$$P_k=4\nu_t\left(\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1}\right)^2 \tag{18}$$

P_k は，本来の表現では式(15)のように正負の両方をとり得るのに対し，式(18)では常に正値となる。これが，標準型 k-ε モデルでは，歪み速度テンソルの直交成分が存在する流れ場において，P_k が過大評価されるメカニズムである。このような P_k の過大評価は，式(7)のようなレイノルズ応力を分子粘性応力との類推から与える渦粘性モデルと呼ばれる乱流モデルにおける構造的な問題である。本研究で対象とする階段式魚道内の流れにおいても，標準型 k-ε モデルを用いれば歪み速度テンソルの直交成分の存在により P_k が過大評価される可能性は少なくないと考えられる。

一方，このような欠点の改善のため，標準型 k-ε モデルに対して様々な改良モデルが提案されている。それらのモデルのうち比較的簡易なタイプには，① P_k の評価式そのものを改良したもの，② P_k の算出に用いられる

ν_t の評価式を改良したものがある。①の中で改善効果が高いことが知られているものとして，式(19)に示す改良 LK モデル(村上ら，1995)がある。

$$P_k = \begin{cases} 2\nu_t DD \quad , \quad \Omega/D \geqq 1 \\ 2\nu_t D\Omega \quad , \quad \Omega/D < 1 \end{cases} \tag{19}$$

ここで, D および Ω は式(20)のように算出される。なお，単純せん断流れでは $\Omega = D$，前述のような衝突噴流の中心軸上では $\Omega = 0$ となる。

$$D = \sqrt{\overline{D_{ij}}\,\overline{D_{ij}}} \quad , \quad \Omega = \sqrt{\overline{\Omega_{ij}}\,\overline{\Omega_{ij}}} \tag{20}$$

式(20)における $\overline{\Omega_{ij}}$ は渦度テンソルであり，次のように表記される。

$$\overline{\Omega_{ij}} = \frac{1}{2}\left\{\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial \xi^k}\left(J\frac{\partial \xi^k}{\partial x_j}\overline{u_i}\right) - \frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial \xi^k}\left(J\frac{\partial \xi^k}{\partial x_i}\overline{u_j}\right)\right\} \tag{21}$$

改良 LK モデルは，$\Omega/D \geqq 1$ の場合は本来の評価式通り P_k を算定し，$\Omega/D < 1$ の場合のみ P_k を本来の評価式から得られる値よりも小さく抑えることにより，P_k の過大評価を回避するものである。

また，前述の②の中で改善効果が高いことが知られているものとして，式(22)に示す Durbin モデル(Durbin, 1996)がある。

$$\nu_t = C_\mu k \cdot \min\left(\frac{k}{\varepsilon}\,,\ \frac{\sqrt{2}}{3C_\mu\sqrt{\overline{D_{ij}}\,\overline{D_{ij}}}}\right) \tag{22}$$

Durbin モデルは, ν_t の評価式(式(8))における時間スケール k/ε に対してモデル上の制限を設けることにより，間接的に P_k の過大評価を防ぐものである。なお，時間スケールに対する制限を与える式において用いられる諸係数は，経験的に定められたものである。

これらの改良モデルの効果を検証するため，階段式魚道内の流況を対象として，改良モデルを適用しない場合，改良 LK モデルを適用した場合，Durbin モデルを適用した場合のそれぞれについて予備計算を行った。その結果，いずれの場合においても乱れが大きくなる条件では流況が安定せず，解析結果の再現精度も乱れが小さい条件と比較して各段に低くなった。そこで，改良 LK モデルと Durbin モデルを併用したところ，乱れが大きくなる条件でも前述の 3 つ場合よりも安定した解析が可能となり，かつ，解析結果の再現精度も改善された。そのため，本章では，これら両モデルを併用することとした。

なお，Ⅳ２ｂで述べた VOF 法を用いた階段式魚道内の流況の数値解析事例のうち諏訪ら(1995)では，使用した乱流モデルは記載されておらず，解析対象は，実物規模ではあるが越流水深が比較的小さく，穏やかな流況である。このため，越流水深が大きく，より乱れの大きい流況にも事例の手法を適用できるかは不明である。また，前野ら(2001)および前野・小川(2002)では，標準型 k-ε モデルが使用されているが，既往の遡上実験(和田，1990；和田，1993；原ら，1995)，魚類の遊泳行動を観測した実験(高嶋・中村，1984；中村ら，1987；林田ら，2000a；林田ら，2000b)，本研究のⅢにおける実験と比較すると，非常に小さい模型(プール深さ H = 0.20m，プール間落差 Δy = 0.04，隔壁厚さ D = 0.02，プール長 L = 0.38m，越流水深 Δh = 0.04 ～ 0.06m 程度，各諸元は **Fig. 1** および **Table 2** 参照)を対象に再現性を検証している。それに対し，ダム等の越流部の放流特性を調査する場合は，水の粘性や表面張力の影響を生じさせないため，越流水深が 0.08m 程度より大きくなるように模型の縮尺を選定する(須賀，1990)。このため，前野ら(2001)および前野・小川(2002)の事例では，縮小模型として扱えない規模の流況を対象としていると考えられ，事例の手法が実物規模の流況にも適用できるか不明である。

3　異なる流量条件に対するプール毎の流況の再現精度の検証

まず，Ⅳ２で構築した数値解析手法について，ある特定の構造諸元の階段式魚道について異なる流量条件に対するプール毎の流況の再現精度を検証する。

ａ　解析モデル

本節の解析モデルは，Ⅲで行った実験における実物規模模型(**Fig. 6**)とする。この模型は隔壁に切り欠き部と潜孔を設けないタイプであることから，縦断面における流れは横断面より卓越していると考えられる。このため，数値解析は鉛直 2 次元断面で行うこととした。そして，模型のうち最上流の隔壁より上流側に 1.0m の位置から最下流の隔壁までの範囲における縦断面を対象として，**Fig. 18** に示す解析モデルを作成した。本章でも，Ⅲと同様，各プールについては上流から順に上流プール，中央プール，下流プールと呼ぶ。

一般に，格子は形状変化の激しい箇所や，流れの変化の激しい箇所で密に，そうでない箇所は粗になるよう形成する。それに対して本節では，実際の設計のように，流れの変化が激しくなる箇所がわからないという前提で，格子の水平方向幅を 0.0125m，鉛直方向幅を 0.01m で一定として，**Fig. 18** の解析モデルを作成した。このとき，鉛直方向の格子軸は曲げず，水平方向のみ曲げて，さらに，図中の魚道形状を示す線より下部の計算格子を流体が通過できないように設定することで，模型と同じ隔壁およびプールの形状を表現した。なお，このようなモデルは σ 座標(Phillips, 1957)としての表現も可能であるが，汎用性のためには一般座標系として扱うのがよいと考えられる。

ｂ　解析条件

(1) 離散化手法と変数配置

流れの数値解析は，基礎方程式を離散化することによって行われる。この離散化の方法には，有限差分法，有限体積法，有限要素法等がある。有限差分法とは，格子点上に変数を配置し，基礎方程式における速度や圧力

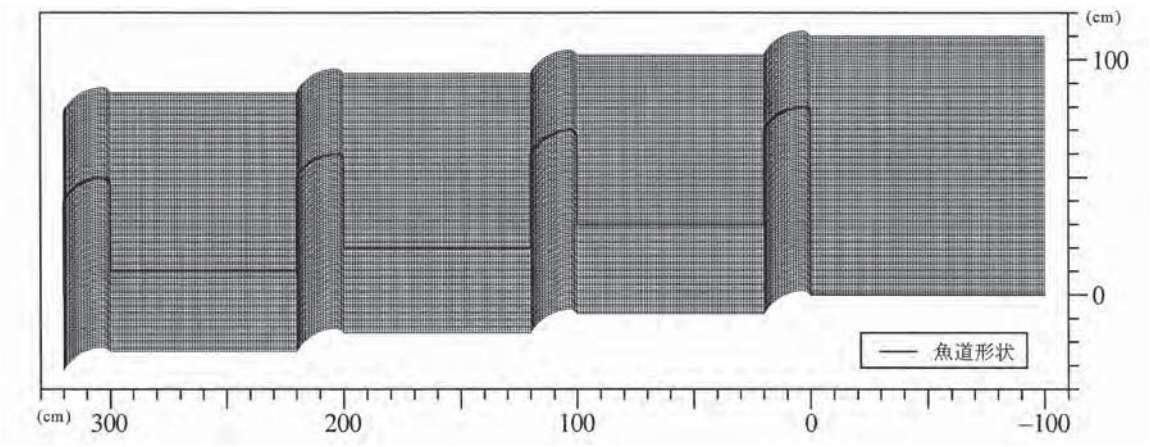


Fig. 18　解析モデル（単位：cm）
Simulation model (unit : cm)

の勾配を差分商によってによって近似するものである。有限体積法とは，格子点上ではなく，格子点によって囲まれたコントロールボリュームの内部およびコントロールボリュームの境界に変数を配置し，保存則をコントロールボリュームの境界における流入流出とその内部での発生消滅によって表現するものである。有限要素法とは，節点に変数を配置し，節点によって囲まれた要素の内部では節点における値から内挿した分布を与えるものである。なお，近年では有限体積法の考え方が取り入れられており（梶島，1999），これら2つの方法の違いは小さくなっている。

本章では，基礎方程式を有限差分法により離散化することとした。その際，基礎方程式の各変数は **Fig. 19** のようにコロケート配置（梶島，1999）した。

一般座標系では，計算量を少なくするためには全ての変数を同一点に配置することが有利である。しかし単純にそのようにすれば，流速の時間進行に作用する圧力勾配は，計算対象の流速が配置された点の両隣の点から，すなわち，一つおきの点から求めることになるため，隣り合う点同士の圧力は互いに影響を及ぼし合わなくなり，圧力場に振動が生じる。このような振動の発生を防止するため，コロケート配置では，N-S 方程式（式(3)）等において対流流束として用いられ，かつ，連続式（式(4)）を構成している $\overline{JU^i}$ を計算格子の界面に配置し，その他の全ての変数を計算格子の中心に配置する。そして，隣り合う格子から求めた圧力勾配をそれらの界面における $\overline{JU^i}$ に作用させる。

(2) 差分スキーム

時間差分スキームは2次精度 Runge-Kutta 法，空間差分スキームは2次精度中心差分とした。但し，N-S 方程式および k，ε の輸送方程式の対流項の離散化には Harten-Yee の風上型 TVD スキーム（Yee, 1986）を適用し，VOF 関数 F の移流方程式（式(12)）の離散化にはドナー・アクセプター法（Hirt and Nichols，1981）を用いた。

ここで TVD スキーム（total variation diminishing scheme）

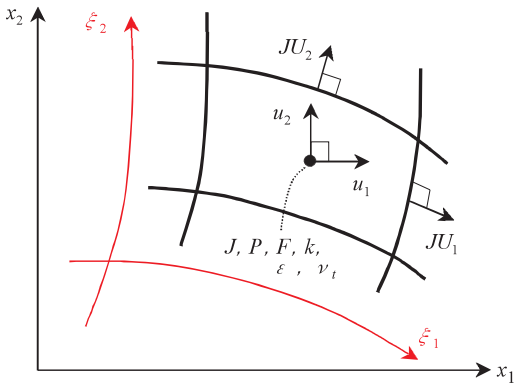


Fig. 19　変数のコロケート配置
Collocated arrangement of variables

とは，空間差分スキームのうち，流速等の解析対象とする物理量の全変動が時間の進行に伴って増加しないという条件を満たすものをいう。具体的には，物理量の分布が不連続な箇所では数値振動を生じさせないために数値粘性が強い，すなわち精度が低いスキームに，その他の箇所では精度が高いスキームになるように，自動的に切り替わるものである。Harten-Yee の風上型 TVD スキームとは，このようなスキームのうち，2次精度と1次精度の切り替えがなされるタイプの一つである。なお，TVD スキームは本来，基礎方程式全体をベクトル型式に書き換え，このベクトル方程式に対して適用されるものである。それに対し本章では，基礎方程式をベクトル型式にせず，一般に行われるように各方程式を個別に離散化し，その際に N-S 方程式および k，ε の輸送方程式における対流項のみに対して本スキームを適用する。このとき，局所的に1次元に分割すること（時間分割法）はせず，全ての方向 x_i（i = 1，2）についての離散化を同時に行う。

また，ドナー・アクセプター法（donor-accepter method）とは，VOF 法における VOF 関数 F の移流方程式の離散化のために開発されたスキームである。特に，水面近傍の F の移流において拡散を生じさせないため，送り

出し側(donor)と受け手(accepter)両方の格子における F 値，および，水面の向きによって，格子間の輸送量が決定されるように工夫されている。

(3) 連続式と圧力場のカップリング手法およびポアソン方程式の解法

連続式(式(4))と N-S 方程式(式(3))における圧力場とのカップリング手法には部分段階法(梶島，1999)を用い，カップリングにより得られる圧力補正値に関するポアソン方程式を，非対称の連立 1 次方程式の解法として収束性および安定性に優れた前処理付 Bi-CGStab 法(小国，1991)によって解いた。

ここで上記のカップリングとは，連続式は速度場に対する発散なしを規定しているのみで圧力の時間変化を与えておらず，N-S 方程式は速度場の時間変化を与えているが速度場には連続式も同時に課せられており，これらを同時に満足するためには N-S 方程式において圧力 p も未知数として扱う必要があることから，行われるものである。

部分段階法(fractional step method)では，まず圧力勾配項を除いた N-S 方程式を陽的に解く。次に，仮に得られた流速に対して圧力勾配を加えて時間進行させたものが連続式を満たすように，圧力に関するポアソン方程式を構成し，未知の圧力を陰的に求める。そして，仮の流速に対して得られた圧力の勾配を加えて時間進行させ，未知の流速を求める。但し，一般座標系において変数をコロケート配置する場合は，仮の流速を得た後の計算手順が若干異なる。まず，仮の流速の座標変換によって格子の中心における反変成分を求め，これを補間して得た格子の界面における反変成分に対して，既知の圧力の勾配を加えて時間進行させる。次に，既知の圧力の勾配が作用した格子界面の反変成分に対して圧力補正値の勾配を加えて時間進行させたものが連続式を満たすように，圧力補正値に関するポアソン方程式を構成し，圧力補正値を陰的に求める。そして，既知の圧力に圧力補正値を加えて，未知の圧力を求めるとともに，仮の流速に対して得られた圧力の勾配を加えて時間進行させ，未知の流速を求める。また，格子界面の反変成分に対して圧力補正値の勾配を加えて時間進行させ，これを更新する。他のカップリング手法として SMAC 法(Amsden and Harlow，1970)が有名であるが，一般座標系では部分段階法の適用事例が多いことから(例えば，小垣ら，1999)，これを採用した。

ポアソン方程式を解く際の収束判定条件には，ポアソン方程式において，係数ベクトルのユークリッドノルムに対する残差ベクトルのユークリッドノルムの比が 10^{-6} 以下となることを課した。また，収束状況に応じて，式(23)，(24)のように，各計算格子において CFL 条件および粘性項の安定条件が満たされる範囲で，計算時間刻み Δt を変化させた(Hirt and Nichols，1981)。

$$\Delta t = \min\left(\alpha\frac{\Delta x_1}{|u_1|},\ \alpha\frac{\Delta x_2}{|u_2|},\ \beta\frac{1}{2\nu\left(1/\Delta x_1^{\,2}+1/\Delta x_2^{\,2}\right)},\ \gamma\cdot\Delta t^*\right) \quad (23)$$

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_1 \ , & ITER < ITER_{\min}\ \ and\ \ ITER^* < ITER_{\min} \\ \gamma_2 \ , & ITER > ITER_{\max}\ \ and\ \ ITER^* > ITER_{\max} \\ \gamma_3 \ , & else \end{cases} \quad (24)$$

ここで，Δx_i は各計算格子における x_i 軸方向の幅，Δt^* は直前の計算ステップにおける計算時間刻み，$ITER$ および $ITER^*$ はそれぞれ現時点および直前の計算ステップにおいて収束に要した反復回数である。a，β，γ_1, γ_2, γ_3, $ITER_{\min}$, $ITER_{\max}$ は係数であり，それぞれ 0.3, 0.667, 1.002, 0.990，1.001，5，150 とした。

(4) 初期条件および境界条件

初期条件として，3 つのプールを満水状態とした。最上流の隔壁より上流側についても同様とした。その際，圧力は静水圧分布とし，流速は全ての位置でゼロとした。

上流端の境界条件として，最上流の隔壁に対する越流水深 Δh が CASE 1 ～ 4 で所定の値(**Table 4**)を満足するように，一定の水深および流速を与えた。この水深は，VOF 関数 F の配置により表現した。但し，計算開始時点では初期条件と同じく，水深は最上流の隔壁天端と同じ高さ，流速はゼロであるため，計算開始後 5 秒間でそれらを前述の一定値まで直線的に増加させた。なお，この過程では，水面上に現れていた隔壁天端に越流が生じるが，VOF 法ではこのような現象も解析できる。

下流端の境界条件は自由流出とした。

壁面の境界条件には対数則(式(25))を適用した。

$$\frac{u_p}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa}\ln\frac{y_p\cdot u_\tau}{\nu} + B \quad (25)$$

ここで，y_p は壁面から第 1 番目の流速定義点までの距離，u_p はその点における壁面に沿った流速成分，u_τ は摩擦速度である。κ および B はパラメータであり，本研究では平滑面における一般値である $\kappa = 0.4$ および $B = 5.5$(梶島，1999)を採用した。

自由水面における境界条件として，水面の接線方向の $\overline{JU^i}$ についてはすべりなし境界とし，水面の法線方向の $\overline{JU^i}$ については連続式(式(4))を満足するように決定した。$\overline{u_i}$ については，格子の各界面における $\overline{JU^i}$ から格子の中心における流速の反変成分を補間し，それをデカルト座標系の物理成分に座標変換することにより求めた。k および ε については対象境界とした。

構造物内部や気体部分($F = 0$)における値が必要な場合は，壁面もしくは自由水面における境界条件による勾配を用いて外挿した。

解析は，CASE 1 ～ 3 では流況が定常とみなせるようになった後に終了させた。それには計算開始後 30 ～ 60 秒程度要した。CASE 4 では定常とみなせる状態にはならず，後述(Ⅳ 3 c)のように若干の変動が継続的に生じていたが，その変動幅がほぼ一定とみなせるようになっ

た後に終了させた。それには120秒程度要した。以降では，流速ベクトルおよび水面形状の解析結果として，計算終了時の値を用いる。

c　異なる流量条件に対するプール毎の流況の解析結果

Ⅲの実験結果と本節の解析結果のケース毎(**Table 4**)の比較を，**Fig. 20** ～ **23** に示す。図中の矢印は各位置における流速ベクトルを表す。但し，実験結果は **Fig. 11** の再掲載であり，Ⅲ 3 で述べたように，計測上の問題から，隔壁天端より上部においては水平方向成分のみを表示している。

CASE 1 の実験結果(**Fig. 20(a)**)では，全てのプールで落下流(**Fig. 4**)となり，プールの中央付近では時計回りの大きな渦が形成されている。但し，上流プールの主流は他のプールより速くなっている。また，中央プールでは，上流および下流プールと比較して主流がより拡散されており，プールの中央付近の渦が若干上流側にある。水面形状は，水平もしくは若干の逆勾配となっている。なお，計測中の流況はこのような状態で安定していた。

CASE 1 の解析結果(**Fig. 20(b)**)では，中央プールの流況に実験結果のような他のプールとの違いは現れなかった。しかし，実験結果同様，全てのプールで落下流となり，プール内の主流は上流プールのものが最も速くなった。全体的な流況は良好に再現されている。

CASE 2 の実験結果(**Fig. 21(a)**)では，CASE 1 と比較して，主流の流速が大きくなっており，水面形状の逆勾配が若干強くなっているが, 全体的にほぼ同様の流況で, 全てのプールで落下流となった。また，CASE 1 と同様, 上流プールの主流は他のプールより速くなっており，中央プールでは上流および下流プールと比較して主流がより拡散されている。なお，計測中の流況はこのような状態で安定していた。

CASE 2 の解析結果(**Fig. 21(b)**)では，CASE 1 と同様, 中央プールの流況に実験結果のような他のプールとの違いは現れなかった。また，全てのプールにおいて渦の中心位置が実験結果より若干下流側にある。しかし，実験結果同様，全てのプールで落下流となり，プール内の主流は上流プールのものが最も速く，CASE 1 の流況との違いも現れている。全体的な流況は良好に再現されている。

CASE 3 の実験結果(**Fig. 22(a)**)では，全てのプールで斜め流(**Fig. 4**)となり，プール内の主流の下側では反時計回りの小さな渦が，上側では時計回りの大きな渦が形成されている。プール内の主流は，上流プールのものが最も速く，中央および下流プールでは比較的拡散されている。水面形状は, 逆勾配がより強くなっている。なお, 計測中の流況はこのような状態で安定していた。

CASE 3 の解析結果(**Fig. 22(b)**)では，中央および下流プールにおいて実験結果ほど主流が拡散されておらず, プール内の渦が若干大きくなっている。しかし，プール内の主流は上流プールのものが最も速いこと，主流のプールへの突入角度等が実験結果と合致しており，全体的な流況は良好に再現されている。

CASE 4 の実験では，CASE 1 ～ 3 とは異なり，計測中の流況は安定しておらず，主流がプールに若干突入する場合と，プールには全く突入せずに水面付近を流下する場合とが繰り返された。平均値としては，**Fig. 23(a)** のように，全てのプールにおいて主流はプールに若干突入するが，プール底には到達せずに下流側の隔壁を流下する表面流(**Fig. 4**)となっている。プールの中央では半時計回りの大きな渦が形成されており，水面形状は強い逆勾配となっている。

CASE 4 の解析においても，CASE 1 ～ 3 とは異なり，流況には実験と同様の変動が継続的に生じていた。**Fig. 23(b)** には，その平均的な状態となったときの流況を記載している。**Fig. 23(b)** では，全てのプールにおいて **Fig. 23(a)** ほど主流が拡散されておらず，渦の位置が実験結果より下流側にあるが，全体的な流況は良好に再現されている。なお，**Fig. 23(b)** では主流より上側の水面付近に現れている時計回りの小さな渦が，**Fig. 23(a)** ではみられない。しかしながら，解析結果ほど明確なものではないが，実験でも同様の渦が発生していることが目視により確認されている。**Fig. 23(a)** に現れていないのは，実験ではⅢ 3 で述べた計測上の問題により水面近傍における流速データが得られなかったためである。目視された渦は，前述の流況変動に伴い，完全に消滅する場合や，**Fig. 23(a)** の水面付近における流速の欠測範囲より大きくなる場合もあった。

以上の CASE 1 ～ 4 の実験結果および解析結果(**Fig. 20** ～ **23**)をあわせて比較すると，解析結果では，越流水深が変化したときに生じる落下流から表面流への流況形態の変化だけでなく，プール毎の詳細な流速分布および水面形状の違いについても精度よく再現されているといえる。これらのことは，VOF 法を一般座標系に適用したことにより，隔壁天端の円弧形状(**Fig. 7**)をかなり正確に表現できたことと，標準型 k-ε モデルに改良 LK モデルと Durbin モデルを適用したことにより，CASE 4 のような乱れの大きい流況でも比較的安定して解析できたことによると考えられる。前述(Ⅳ 2 c)のように，改良 LK モデルと Durbin モデルのいずれかのみを適用した場合や，ともに適用しない場合には，計算は安定せず，結果の再現性もより低いものであった。

一方，CASE 1 ～ 4 で共通して，解析結果ではプール内の主流が実験結果ほど拡散されない傾向が確認された。また，これに起因して，プール内の渦の位置や大きさが解析結果と実験結果で若干異なる場合も生じた。これらの原因として，解析対象とする切り欠き部および潜孔のない階段式魚道では，縦断面における流れが横断面より卓越していると考えられたため，2 次流の影響を無視して解析モデルを鉛直 2 次元断面で構築したこと(Ⅳ

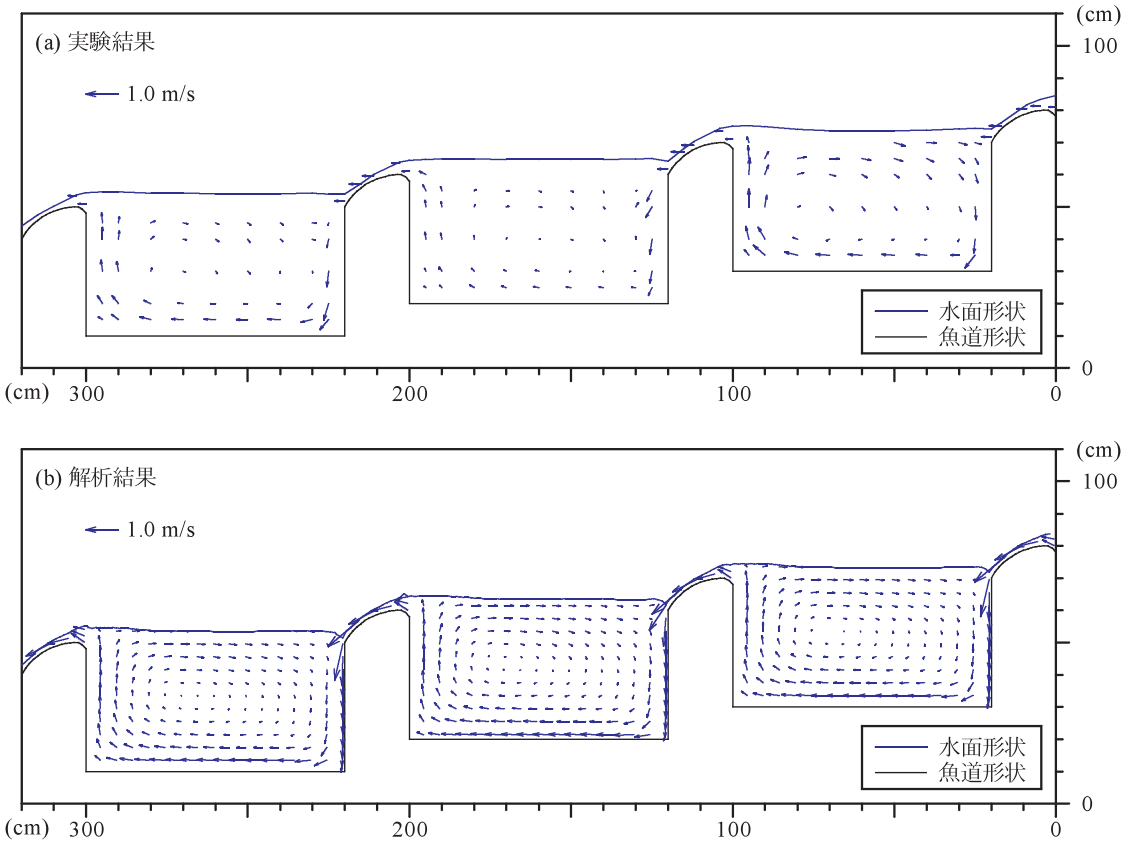


Fig. 20 CASE 1 の実験結果と解析結果の比較
Comparison between experimental results and simulated results of flow structure in CASE 1

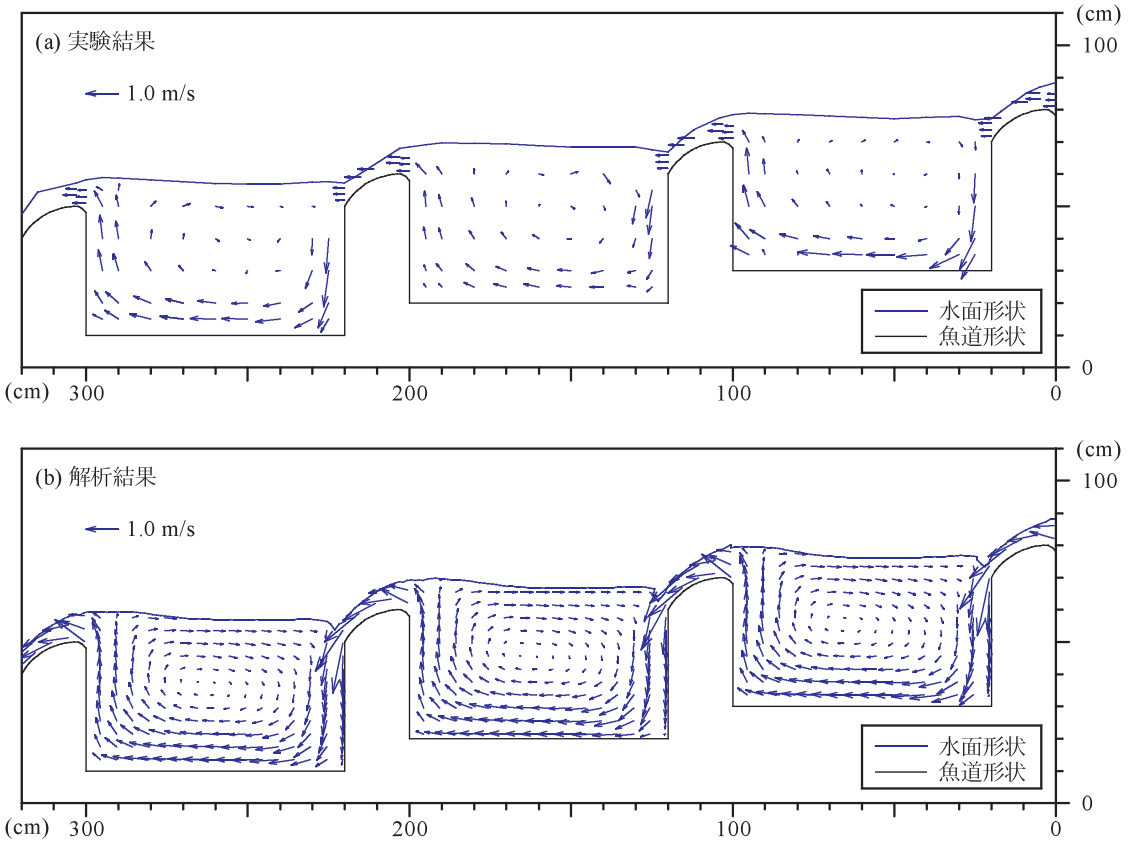


Fig. 21 CASE 2 の実験結果と解析結果の比較
Comparison between experimental results and simulated results of flow structure in CASE 2

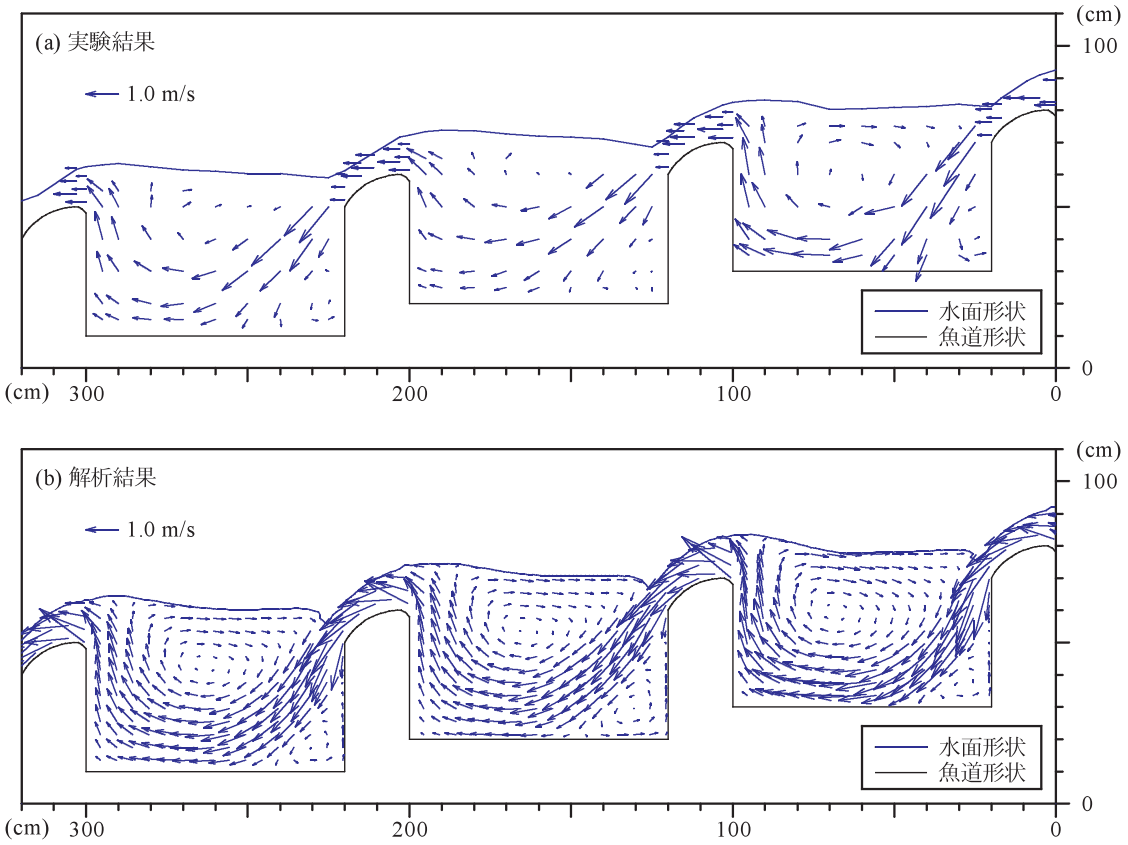


Fig. 22　CASE 3 の実験結果と解析結果の比較
Comparison between experimental results and simulated results of flow structure in CASE 3

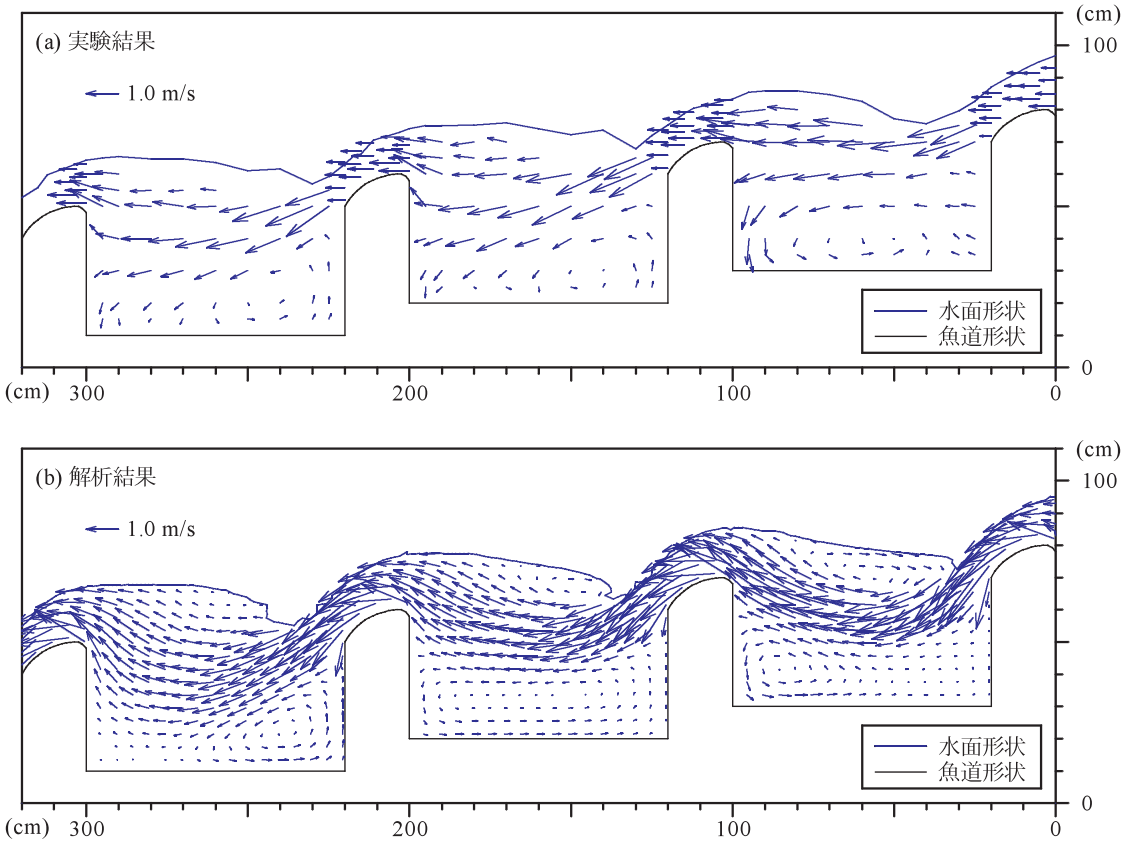


Fig. 23　CASE 4 の実験結果と解析結果の比較
Comparison between experimental results and simulated results of flow structure in CASE 4

3 a)等が考えられる。しかしながら，設計における階段式魚道内の流況の予測としては，この程度の差異は許容できるものと考えられる。

なお，CASE 2 ～ 4 では，越流水脈のプールへの突入部で微小なオーバーハングが生じている。このようなオーバーハングは，プール内の流況がほぼ定常とみなせるようになった後も，繰り返し発生しては，直ちに上流側へ移動して越流水脈に吸収されるように消失した。しかしながら，全体の流況に大きな影響を及ぼすことはなかった。

4　異なる構造諸元に対する流況の再現精度の検証

次に，Ⅳ 2 で構築した数値解析手法について，複数の構造諸元の階段式魚道を対象として流況の再現精度を検証し，本手法が設計で使用可能な汎用性を有するか否かの評価を行う。

a　解析モデル

本節の解析モデルは，比較的詳細な流速分布および水面形状の計測が多くの構造諸元を対象として行われていることから，林田ら(2000a，2000b)の実験における階段式魚道の模型とする。

林田らの実験では，幅 0.6m の 2 次元直線水路に，**Fig. 24** のように厚さ 0.2m の隔壁を 2 基設置することにより，階段式魚道における最上流のプールを再現している。隔壁は, 柏井ら(1994) に提案された円弧型隔壁 (**Fig. 7**)であり，隔壁には切り欠き部および潜孔を設けないタイプである。実験では，プール長 L およびプール深さ H (**Fig. 24**)を **Table 7** のように変化させて，同表の越流水深 Δh 時を対象として，中央縦断面における流速分布および水面形状が計測されている。なお，これらのケースは全て実物規模として想定されている(林田ら，2000a；林田ら，2000b)。Ⅱ 4 a で述べたように，階段式魚道では勾配は 1/10 から 1/20 が適切と考えられており，隔壁厚さ D は 0.2m から 0.3m とするのがよいと考えられているが(ダム水源地環境整備センター編，1998；和田，2003), CASE 1, 4, 7 を除けばこの条件が満たされている。

Fig. 24 の模型は切り欠き部および潜孔を設けないタイプであり，縦断面における流れは横断面より卓越していると考えられるため，Ⅳ 3 と同様，鉛直 2 次元断面で数値解析を行うこととした。解析モデルについても同様に，実際の設計のように流れの変化が激しくなる箇所がわからないという前提で，格子の水平方向幅は 0.0125m で一定，鉛直方向幅は 0.01m で一定として，鉛直方向の格子軸は曲げず，水平方向のみ曲げることにより作成した。その範囲を **Fig. 24** に示す。また，隔壁内部および水路底に該当する格子を流体が通過できないように設定することで，模型と同じ隔壁およびプールの形状を表現した。

なお，前述のように，本節の解析モデルは階段式魚道における最上流のプールのみを対象とするため，上流から二つ目以降のプール内の流況の再現性を検証できない。一方，複数のプールを有する場合については，単一の構造諸元の組合せのみが対象であるが，Ⅳ 3 でプール毎の流況の違いを再現できることが確認されている。このため，本節ではプール毎の流況の違いについては扱わない。

b　解析条件

基礎方程式の各変数の配置方法，基礎方程式の離散化スキーム，圧力場と連続式のカップリング手法については，Ⅳ 3 b(1)～Ⅳ 3 b(3)と同じとした。

上流端の境界条件として，上流隔壁に対する越流水深 Δh が **Table 7** の 0.10m または 0.15m を満足するよう一定の水深および流速を与えた。この水深は，VOF 関数 F の配置により表現した。但し，計算開始時点では初期条件と同じく，水深は上流隔壁の天端と同じ高さ，流速はゼロであるため，計算開始後 20 秒間でそれらを前述の一定値まで直線的に増加させた。

下流端，壁面，自由水面における境界条件，および，構造物内部や気体部分($F = 0$)における値が必要な場合の扱いについては，Ⅳ 3 b(4)と同じとした。

解析は，流況がほぼ定常とみなせるようになった後に終了させた。それには，全てのケースで，上流端における水深と流速が所定値となった後，30 ～ 60 秒程度要した。以降では，流速ベクトルおよび水面形状の解析結果として，計算終了時の値を用いる。

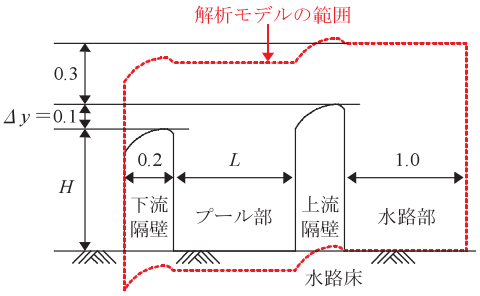


Fig. 24　林田ら(2000a，2000b)による実験模型の縦断図と本研究による解析モデルの範囲(単位：m)
Side view of the hydraulic model by Hayashida et al. (2000a, 2000b) and range of the simulation model by this research

Table 7　林田ら(2000a，2000b)による実験ケース
Experimental cases by Hayashida et al. (2000a, 2000b)

CASE	L	H	勾配	Δh	
1	0.5	0.2	1/7	0.10	0.15
2	1.0	0.2	1/12	0.10	0.15
3	2.0	0.2	1/22	0.10	0.15
4	0.5	0.5	1/7	0.10	0.15
5	1.0	0.5	1/12	0.10	0.15
6	2.0	0.5	1/22	0.10	0.15
7	0.5	0.8	1/7	0.10	0.15
8	1.0	0.8	1/12	0.10	0.15
9	2.0	0.8	1/22	0.10	0.15

c　異なる構造諸元に対する流況の解析結果

まず Δh = 0.10m のときについては，林田ら(2000a, 2000b)の実験による流況形態(**Fig. 4**)は，**Fig. 25(a)** のように，構造諸元に関わらず全て落下流となった。その際の流況は **Fig. 26** のようであった。なお，CASE 6 の流況は掲載された報告がないため，ここでは掲載していない。

本節における流況の解析結果を **Fig. 27** に示す。流況形態は **Fig. 25(a)** と同じく，全て落下流となった。流速ベクトル分布および水面形状には，**Fig. 26** の実験結果と同様の傾向が確認される。個々の流速値についても，実験結果とほぼ同値とみなせる。特に，CASE 1 および CASE 4 では水面形状が強い逆勾配となること，CASE 2 および CASE 3 ではプール内の渦の中心はプール中央付近ではなく，図の水平方向軸で 0 ～ 0.5m の位置にあること等が再現されている。

一方，CASE 7 におけるプール内の渦の中心は，実験結果では図の水平方向軸で 0 ～ 0.2m の位置にあるのに対し，解析結果ではプール中央付近の 0.2 ～ 0.3m にあること，解析結果では全体的に水面形状の逆勾配が実験結果より強くなる傾向がある等の違いも見られる。これらの原因として，Ⅳ 3 と同様，解析対象とする切り欠き部および潜孔のない階段式魚道では，縦断面における流れが横断面より卓越していると考えられたため，2 次流の影響を無視して解析モデルを鉛直 2 次元断面で構築したこと(Ⅳ 4 a)等が考えられるが，設計における階段式魚道内の流況の予測としては，この程度の差異は許容できるものと考えられる。

なお，CASE 3 では，越流水脈のプールへの突入部で微小なオーバーハングが生じている。このようなオーバーハングは，プール内の流況がほぼ定常とみなせるようになった後も，繰り返し発生しては，直ちに上流側へ移動して越流水脈に吸収されるように消失したが，全体の流況に大きな影響を及ぼすことはなかった。計算終了時点(Ⅳ 4 b)で発生していなかったため，**Fig. 27** には現れていないケースもあるが，これらのケースでも同様であった。

次に Δh = 0.15m のときについては，林田ら(2000a, 2000b)の実験による流況形態(**Fig. 4**)は，**Fig. 25(b)** のように，構造諸元の違いにより異なる結果となった。なお，その際の流況は掲載された報告がないため，ここでは掲載していない。

本節における流況の解析結果を **Fig. 28** に示す。これより，落下流は CASE 8 ～ 9，斜め流は CASE 1 ～ 3，5 ～ 6，表面流は CASE 4，7 となり，**Fig. 25(b)** の実験結果と同じ流況形態となった。CASE 8 ～ 9 については，上流隔壁の下部で反時計回りの小さな渦が形成されているが，上流隔壁を越えた水脈は，プールへの突入部では上流隔壁に沿って落下しているため，落下流と判断した。

なお，CASE 2，4，7 ～ 9 でみられるオーバーハングについては，Δh = 0.10m のときと同様である。計算終了時点(Ⅳ 4 b)で発生していなかったため，**Fig. 28** には現れていないケースもあるが，これらのケースでも同様であった。

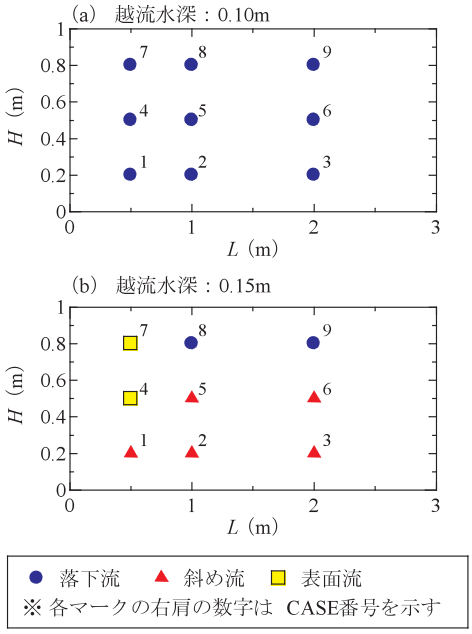


Fig. 25　構造諸元と流況形態の関係の実験結果（林田ら，2000b）
Experimental results of relationship between structural specifications and flow type (Hayashida et al., 2000b)

d　本章で開発した数値解析手法の評価

本節とⅣ 3 の結果より，本章で開発した数値解析手法は，同一の構造諸元の階段式魚道について異なる流量条件に対するプール毎の流況，および，複数の異なる構造諸元の階段式魚道内の流況に対して，十分な再現精度が得られたといえる。さらに，これらのことから汎用性も高いと判断され，本手法は設計で使用可能と考えられる。

なお，本章では隔壁に切り欠き部と潜孔を設けないタイプを対象としたため，鉛直 2 次元断面で数値解析を行った。今後の課題として，切り欠き部や潜孔を設けるタイプについても対象にできるように，本手法を 3 次元化する必要がある。その際，本手法における基礎方程式(Ⅳ 2 c)や解析条件(Ⅳ 3 b，Ⅳ 4 b)等の基本的な考え方はそのまま適用できるため，プログラム上の改良のみで対応できる。

5　流況形態の予測

a　評価方法および使用するデータ

Ⅳ 2 では，円弧形状を正確に表現するため一般座標系において，水面変動に対応するための VOF 法と，乱れの大きい流況でも安定して解析するために改良 LK モデルと Durbin モデルを適用した標準型 k-ε モデルを組み合わせて，新たな数値解析手法を開発した。そして，Ⅳ 3 およびⅣ 4 では，設計において円弧型隔壁の階段式魚道内の流況を予測する手段として，本手法は十分な再現

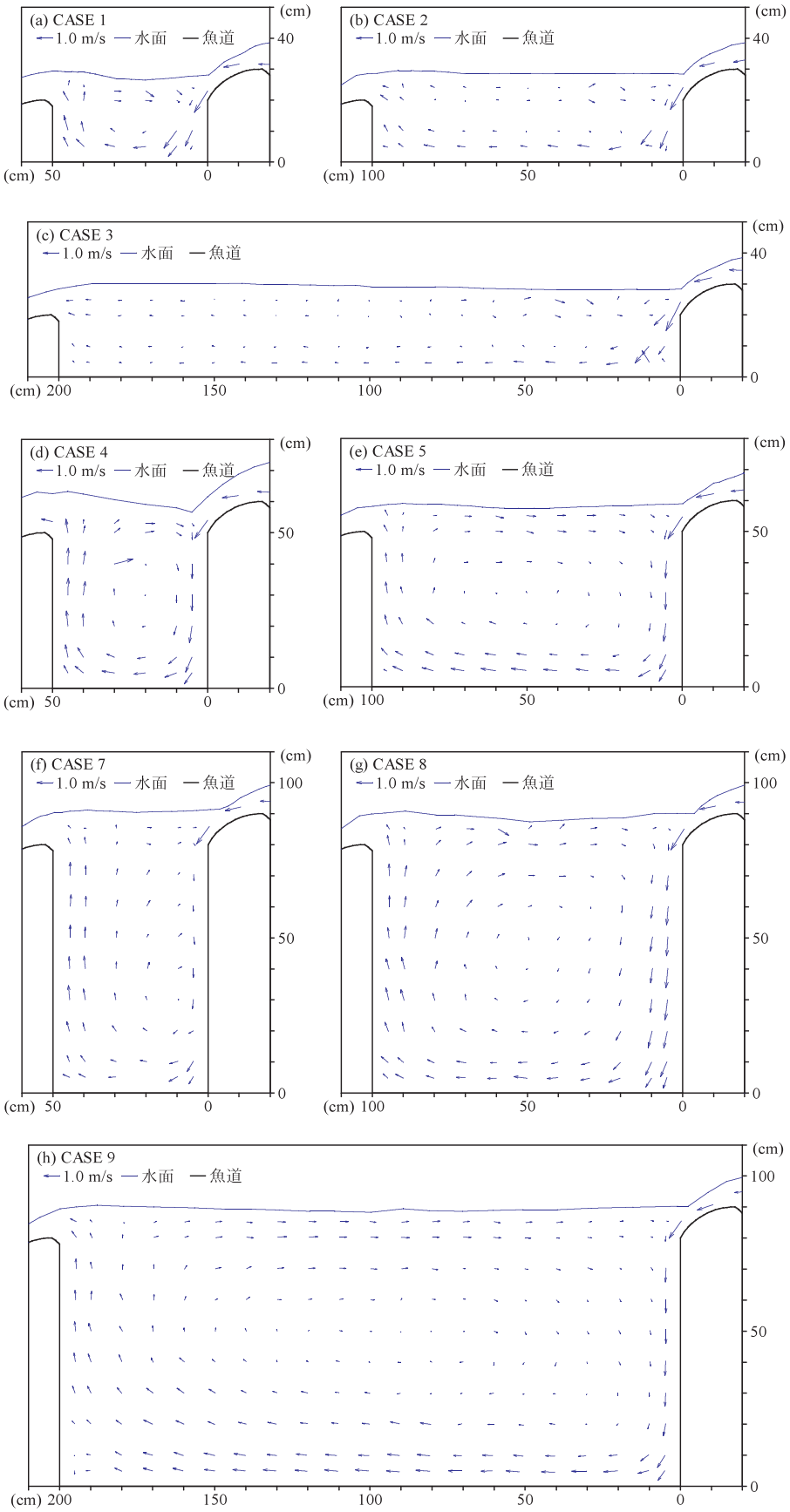


Fig. 26 Δh = 0.10m のときの流況の実験結果（林田ら，2000a）
Observed flow structure when Δh=0.10m (Hayashida et al., 2000a)

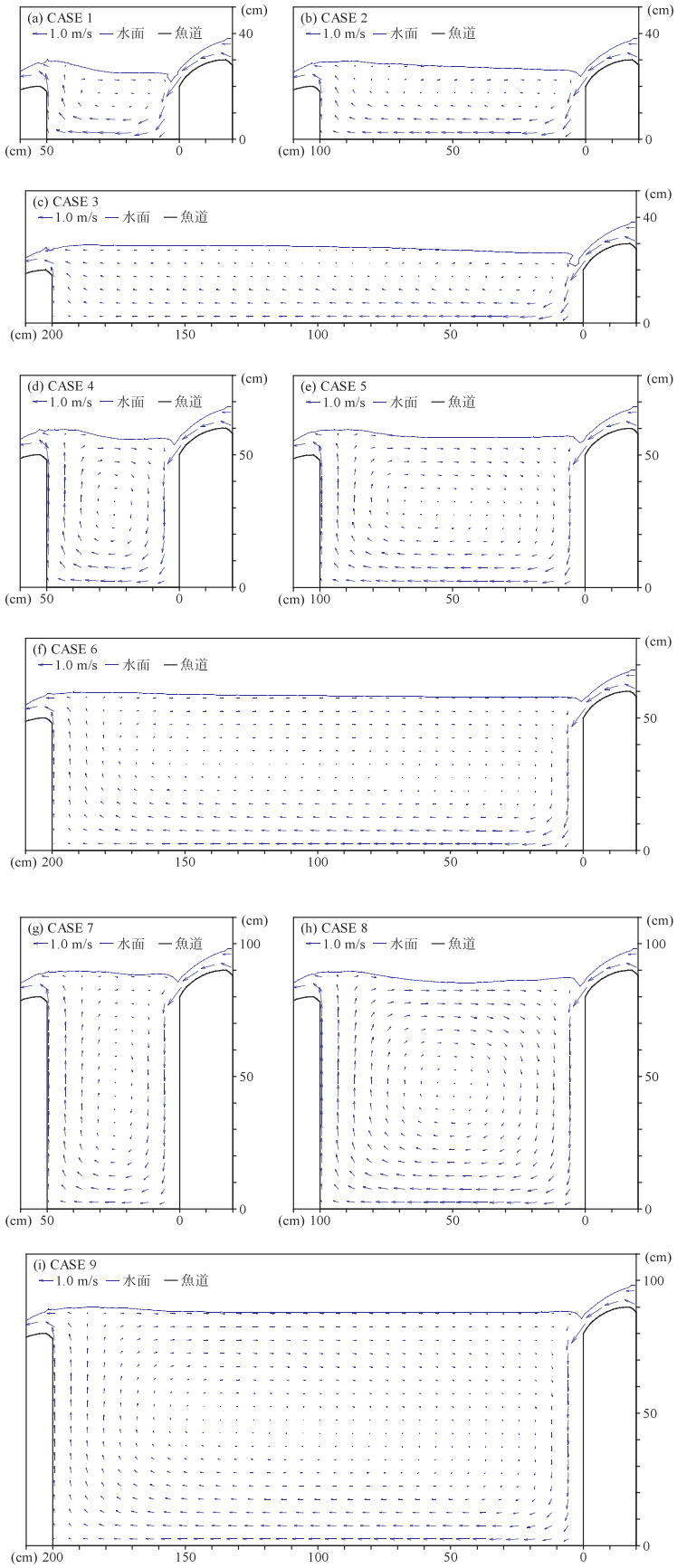


Fig. 27　Δh = 0.10m のときの流況の解析結果
Simulated flow structure when Δh=0.10m

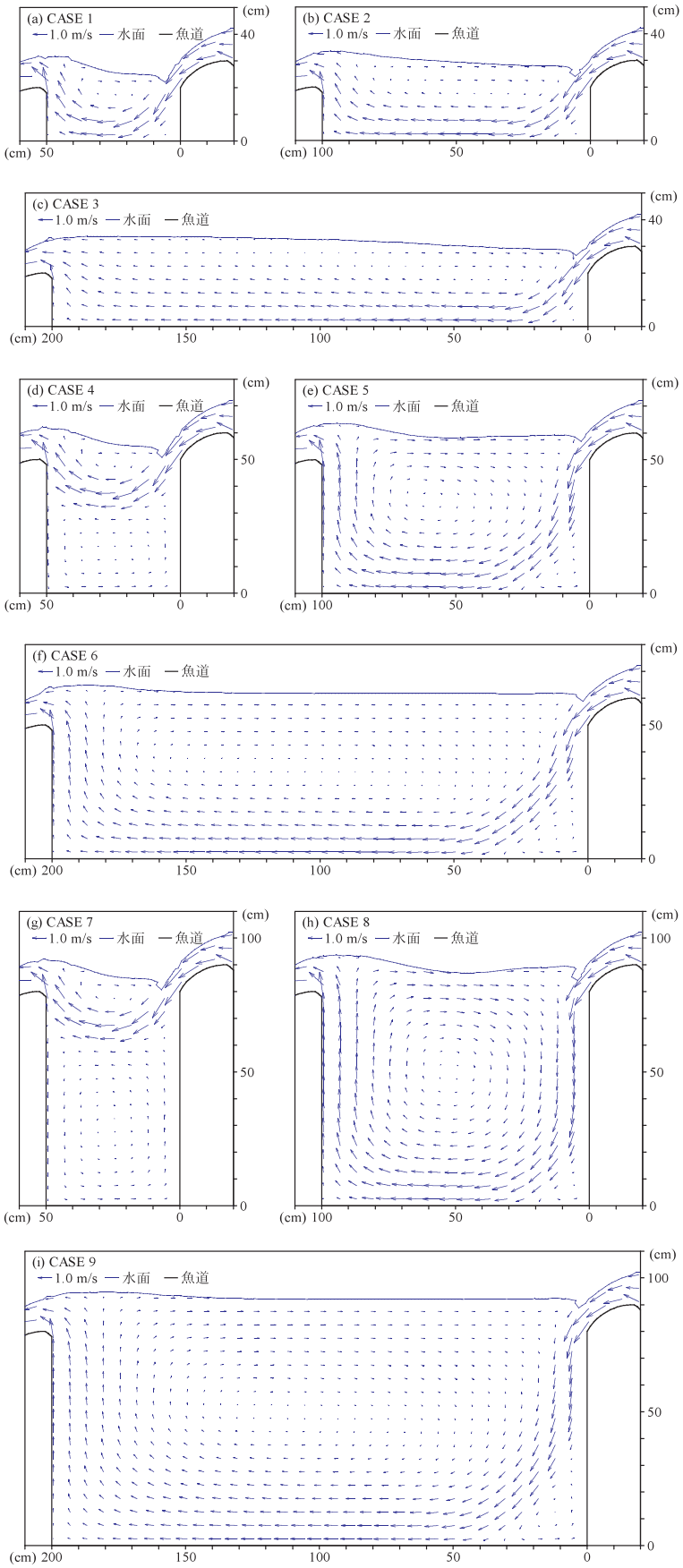


Fig. 28 Δh = 0.15m のときの流況の解析結果
Simulated flow structure at when Δh = 0.15m

精度および汎用性を有することを示した。

しかしながら，設計でこのような数値解析を実施するのが困難な場合もあり得る。あるいは，より簡便に流況形態(**Fig. 4**)のみを推定することが必要な場合もあると考えられる。従って，ここでは，上記の手法を用いた階段式魚道内の流況の数値解析を数多くの条件について行い，円弧型隔壁の階段式魚道における構造諸元および水理条件と流況形態の関係を整理する。

そこで，Ⅳ 4 の解析モデルを用いて，林田ら(2000a, 2000b)の実験では対象とされていない Δh = 0.125m および Δh = 0.20m についても，CASE 1 ～ 9(**Table 7**)の構造諸元における流況の数値解析を行った。そして，Ⅳ 4 の結果も含めた全ての解析結果について，鬼束ら(2005)による矩形型隔壁の階段式魚道における表面流の発生の予測方法(式(2)，**Fig. 5**)に倣い，流況形態毎に $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ の関係をプロットした(**Fig. 29**)。L，H については各ケースで **Table 7** の通りであり，Δy については **Fig. 24** より全てのケースで 0.10m である。

ここで，表面流の発生の予測方法として，Rajaratnam et al.(1988)による提案を利用しなかったのは，本方法では流況形態を規定する係数 Cd(式(1))の算出に H が扱われていないためである。Δh = 0.15m のときの CASE 1 と CASE 4 のように(**Fig. 25(b)**，**Fig. 28**)，H の他の条件は全て同一でも H の違いにより流況形態が異なることが確認されている。

b　表面流の発生領域

円弧型隔壁は矩形型と比較して表面流が発生しにくいことはこれまでにも指摘されていたが(高須ら，1994；林田ら，2000b)，**Fig. 29** より，円弧型および矩形型それぞれの場合における表面流が発生する $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ の範囲の違いが明確となった。

c　落下流と斜め流の発生領域の境界

Fig. 29 より，落下流と斜め流の発生領域の境界は，表面流の発生領域の境界のような単純な形状にはならなかった。そこで，**Fig. 29** において同一のケース(**Table 7**)で互いに Δh が異なる条件のプロット同士をラインで結んだ。このとき，ラインは H の値毎に種類を変えた。その結果が **Fig. 30** である。

Fig. 30 より，ラインの大凡の傾きは H の値毎に異なることがわかる。また，異なる H の値のラインが交差する箇所で落下流と斜め流の発生領域の境界が不連続な形状となっており，同じ H の値のライン同士ではこれらの流況形態の発生領域の境界は単純な形状であることがわかる。従って，落下流と斜め流の発生領域の違いは，H の値毎に評価すれば明確になる可能性があると考えられる。

しかしながら本章では，設計での利用を目的として $L/(H+\Delta h)$ および $\Delta h/\Delta y$ と流況形態の関係を整理しており，それには **Fig. 29** において安全側の評価を行えば十分と考えられる。そのため，H の値が落下流と斜め流の発生領域の境界に及ぼす影響について，ここではこれ以上の調査を行わないが，その解明は今後の課題である。

d　各流況形態の発生領域の境界付近における予測精度

さて，Δh = 0.15m のときの CASE 9 では，実験結果は詳細な流況は不明だが落下流と判定されており(**Fig. 25(b)**)，解析結果は落下流と判定したが斜め流に近い形態であった(**Fig. 28(i)**)。この条件は，**Fig. 29** における落

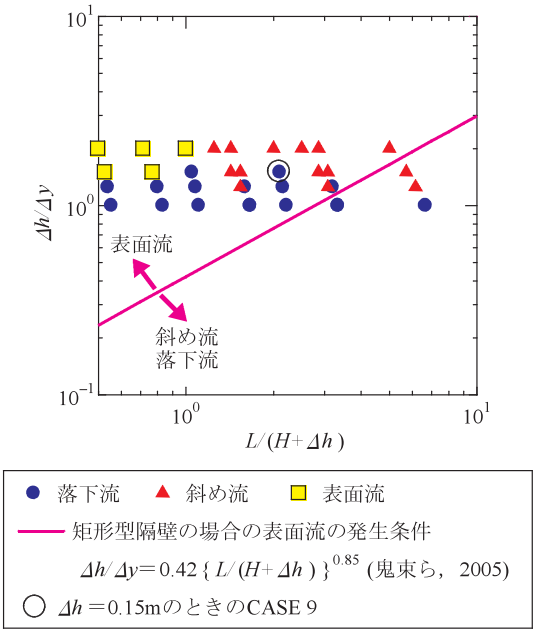


Fig. 29　円弧型隔壁の場合の構造諸元および越流水深と流況形態の関係

The influence that structural specifications and overflow depth exert on flow type when circular arc type weir wall is used

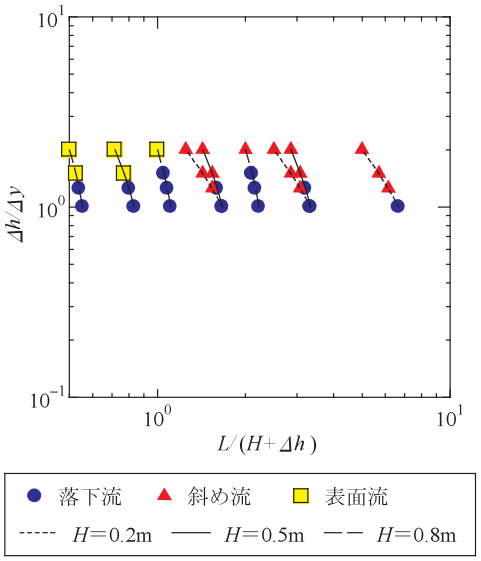


Fig. 30　円弧型隔壁の場合の H の値毎の構造諸元および越流水深と流況形態の関係

The influence of each H that structural specifications and overflow depth exert on flow type when circular arc type weir wall is used

下流と斜め流の発生領域の境界付近に位置している。

このような各流況形態の発生領域の境界付近となる条件では，現場においても，①隔壁の材質が異なった場合や壁面の劣化に伴う粗度の違いによって，あるいは，②流量増加時と流量減少時の違いによって，流況形態が異なる可能性がある。それに対し，数値解析における壁面境界条件の手法には限りがあり，①のような粗度の違いを十分に表現できない。また，本章の数値解析手法ではレイノルズ平均流れの計算を前提としているため(Ⅳ 2 b)，②のような現象を再現できない。そのため，このような条件では，数値解析による再現精度が相対的に低くなる可能性があると考えられる。

以上より，各流況形態の発生領域の境界付近では予測精度が相対的に低くなる可能性があることに十分注意を払い，**Fig. 29** をもとに構造諸元および越流水深を検討すれば，円弧型隔壁の階段式魚道における流況形態を設計段階で把握できると考えられる。さらに詳細な流況を把握する必要があれば，本章で開発した数値解析手法が有効である。

6　結語

本章では，円弧型隔壁の階段式魚道内の流況を精度良く予測できる汎用性の高い数値解析手法を新たに開発した。また，この手法による解析結果を整理して，構造諸元および水理条件と流況形態の関係を明らかにした。得られた結果を整理すると，以下のようである。

1) 円弧形状を正確に表現するため一般座標系において，水面変動に対応するための VOF 法と，乱れの大きい流況でも安定して解析するために改良 LK モデルと Durbin モデルを適用した標準型 k-ε モデルを組み合わせて，新たな数値解析手法を開発した。
2) 上記 1)の手法は，円弧型隔壁の階段式魚道における越流水深の変化やプール長およびプール深さの変化に伴う流況形態の違いだけでなく，プール毎の流速分布および水面形状の違いについても精度よく再現できた。設計において円弧型隔壁の階段式魚道内の流況を予測する手段として，本手法は十分な再現精度および汎用性を有することが示された。
3) 設計において上記 1)の手法を用いた数値解析の実施が困難な場合や，より簡便かつ正確な流況形態の推定のみが必要な場合もあると考えられる。そこで，上記 2)を踏まえ，数多くの条件に対する上記 1)の手法による解析結果について，流況形態毎に $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ の関係を整理し，円弧型隔壁の階段式魚道における各流況形態の発生領域を明らかにした。
4) 各流況形態の発生領域の境界付近では，上記 1)の手法の再現精度が低下する可能性がある。
5) 本章では，鉛直 2 次元断面で数値解析を行っている。そのため，今後の課題として上記 1)の手法を 3 次元化する必要がある。その際，本手法における基礎方程式や解析条件等の基本的な考え方はそのまま適用できるため，プログラム上の改良のみで対応できる。

Ⅴ　傾斜型隔壁の階段式魚道における流況予測のための数値解析手法の開発

1　概説

Ⅲでは，他の形状と比べて表面流が発生しにくく(高須ら，1994；林田ら，2000b)，アユの遡上率が高い(和田，1990；和田，2003)という実験結果が得られている円弧型隔壁(**Fig. 2**)の階段式魚道を対象として，異なる流量条件に対するプール毎の流況とウグイの遊泳行動の関係を明らかにした。Ⅳでは，同じタイプの階段式魚道内の流況を精度良く予測できる汎用的な数値解析手法を開発するとともに，構造諸元および水理条件と流況形態(**Fig. 4**)の関係を整理し，各流況形態の発生領域を明らかにした。

一方，魚類の遡上に対する有効性は円弧型隔壁より若干劣るが(和田，2003)，傾斜型隔壁(**Fig. 2**)は円弧型より施工が容易であるため，現場にも導入されやすいと考えられる。しかしながら，このタイプの階段式魚道が研究対象とされた事例は非常に少なく，その水理特性には不明な部分が多い。

そこで本章では，傾斜型隔壁の階段式魚道内の流況を精度良く予測できる汎用的な数値解析手法を開発する(浪平ら，2006c)。さらに，設計においてこのような数値解析の実施が困難な場合や，より簡便な流況形態の推定のみが必要な場合もあると考えられることから，解析結果をもとに，傾斜型隔壁の階段式魚道における構造諸元および水理条件と流況形態の関係を整理し，各流況形態の発生領域を明らかにする(浪平ら，2006c)。

2　数値解析手法

a　既往の手法に基づく検討

Ⅳで開発した数値解析手法は，一般座標系で解析するためのものであるから，傾斜型隔壁の階段式魚道の解析モデルを一般座標系で作成すれば，この手法をそのまま適用できる。一方，一般座標系ではデカルト座標系と比べて精度が低下する(梶島，1999)。また，格子の空隙率および格子界面の開口率を 0 ～ 1 の範囲で任意に与えることにより，デカルト座標系で傾斜面を有する構造物を表現する手法が提案されている(Viecelli，1971；藤間ら，1984；榊山ら，1991；Hirt，1993；米山・松山，1997)。これらのことから，傾斜型隔壁の階段式魚道内の流況について数値解析を行う場合は，Ⅳで開発した手法より，上述のデカルト座標系で傾斜面を有する構造物を表現する手法が適していると考えられる。

そこで本章では，傾斜面を有する構造物を表現するため格子の空隙率および格子界面の開口率を導入したデカルト座標系において，Ⅳの手法で用いた VOF 法(Hirt

and Nichols，1981），および，改良 LK モデル（村上ら，1995）と Durbin モデル（Durbin，1996）を適用した標準型 k-ε モデルを組み合わせた数値解析手法を構築する。

しかしながら，格子の空隙率および格子界面の開口率を導入する既往の手法（Viecelli，1971；藤間ら，1984；榊山ら，1991；Hirt，1993；米山・松山，1997）では，流体が構造物の傾斜面から受ける摩擦抵抗が考慮されていない。このため，本章では摩擦抵抗を組み込めるように改良を行う。

b　デカルト座標系における傾斜面を有する構造物の表現方法

鉛直 2 次元デカルト座標系において傾斜面を有する構造物を表現するため，**Fig. 31** のように，斜面に該当する格子の空隙率 Fa を 0.5，界面の開口率 A_1，A_2 を 0 または 1 に設定することで表現した。ここで空隙率 Fa とは，格子の面積のうち構造物が存在しておらず流体が流入できる割合であり，開口率 A_1 および A_2 とは，格子の界面のうち流体が通過可能な領域の占める割合である。Fa，A_1，A_2 は上記の値に限らず 0 ～ 1 の範囲で任意に設定できるものとして提案されているが，既往の手法では考慮されていない，流体が構造物の傾斜面から受ける摩擦抵抗の組み込み方法を容易にするため，本章ではこのように設定することとした。全てが隔壁に含まれる格子や水路床部分の格子では，Fa を 0 として格子全体を水が通過不可能に設定した。

c　基礎方程式

格子の空隙率および格子界面の開口率を導入したデカルト座標系におけるレイノルズ平均された Navier-Stokes 方程式（以下，N-S 方程式という）と連続式は，それぞれ次のように表記される。

$$\frac{\partial A_i \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{26}$$

$$\frac{\partial Fa\,\overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial A_j \overline{u_j}\,\overline{u_i}}{\partial x_j} = -Fa\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\overline{p}}{\rho}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\nu A_j \overline{D_{ij}} - A_j \overline{u_i' u_j'}\right) + Fa\,G_i \tag{27}$$

ここで，x_i はデカルト座標で鉛直 2 次元断面を対象とするときには，$i = 1$ のとき水平方向，$i = 2$ のとき鉛直方向を示す。$\overline{}$ はレイノルズ平均を表し，u_i は x_i 軸方向の流速成分，u'_i は x_i 軸方向の流速の変動成分（$u'_i = u_i - \overline{u_i}$），$p$ は圧力，ρ は密度，ν は動粘性係数，G_i は x_i 軸方向の外力成分，D_{ij} は歪み速度テンソル，$-\overline{u'_i u'_j}$ はレイノルズ応力であり，繰返し添字は総和規約に従うものとする。Fa は格子の空隙率，A_i は格子界面の開口率であり，u_i が配置される格子界面を A_i により表現する。$\overline{D_{ij}}$ は次のように表記される。

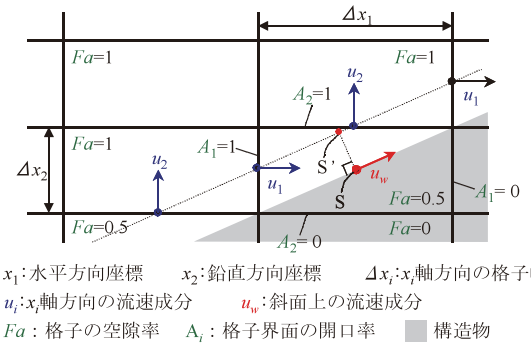


Fig. 31　デカルト座標系において格子の空隙率および格子界面の開口率を用いた構造物の傾斜面の取り扱いの概念図
Conceptual diagram of the representation for the inclined structure using the open volume fraction and the open area fraction of the cell in Cartesian coordinates

$$\overline{D_{ij}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) \tag{28}$$

$-\overline{u'_i u'_j}$ の評価方法には，Ⅳと同様に標準型 k-ε モデルを用いる。標準型 k-ε モデルでは，$-\overline{u'_i u'_j}$ は次のように評価される。

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{29}$$

ここで，ν_t は渦動粘性係数，k は乱流エネルギー，δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号である。ν_t の評価式，格子の空隙率および格子界面の開口率を導入したデカルト座標系における k および乱流エネルギーの散逸率 ε 輸送方程式はそれぞれ次のように表記される。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{30}$$

$$\frac{\partial Fa\,k}{\partial t} + \frac{\partial A_j \overline{u_j} k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{A_j\left(\nu + \frac{\nu_t}{C_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right\} + Fa(P_k - \varepsilon) \tag{31}$$

$$\frac{\partial Fa\,\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial A_j \overline{u_j} \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{A_j\left(\nu + \frac{\nu_t}{C_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right\} + Fa\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P_k - C_{\varepsilon 2}\varepsilon) \tag{32}$$

式（31）～（32）の P_k は k の生産項であり，次のように定義されている。

$$P_k = -\overline{u'_i u'_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = 2\nu_t \overline{D_{ij}}\,\overline{D_{ij}} \tag{33}$$

式（30）～（32）の係数には，標準的な値である $C_\mu = 0.09$，$C_k = 1.00$，$C_\varepsilon = 1.30$，$C_{\varepsilon 1} = 1.44$，$C_{\varepsilon 2} = 1.92$ を与えた。

また，格子の空隙率および格子界面の開口率を導入したデカルト座標系における VOF 法（Hirt and Nichols，1981）では，VOF 関数 F（$F = 0$：気体，$0 < F < 1$：水面，$F = 1$：流体）の移流方程式は次のように表記される。

$$\frac{\partial FaF}{\partial t}+\frac{\partial A_j\overline{u_j}F}{\partial x_j}=0 \tag{34}$$

標準型 k-ε モデルでは，衝突領域のように歪み速度テンソルの直交成分が存在する流れ場において，P_k(式(33))が過大評価されるという欠点が指摘されており(例えば，村上ら，1988)，本研究で対象とする階段式魚道内の流れにおいても，標準型 k-ε モデルを用いれば P_k が過大評価される可能性は少なくないと考えられる。そのため, Ⅳと同様, P_k を式(35)の改良 LK モデル(村上ら，1995)によって評価することとした。

$$P_k=\begin{cases}2\nu_t DD & , \ \Omega/D\geqq 1\\ 2\nu_t D\Omega & , \ \Omega/D<1\end{cases} \tag{35}$$

ここで，D および Ω は次のように算出される。これらの詳細については，Ⅳ２c で述べた通りである。

$$D=\sqrt{\overline{D_{ij}}\,\overline{D_{ij}}} \quad , \quad \Omega=\sqrt{\overline{\Omega_{ij}}\,\overline{\Omega_{ij}}} \tag{36}$$

式(36)における $\overline{\Omega_{ij}}$ は渦度テンソルであり，次のように表記される。

$$\overline{\Omega_{ij}}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j}-\frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i}\right) \tag{37}$$

また，Ⅳと同様，ν_t を式(38)の Durbin モデル(Durbin, 1996)によって評価することとした。

$$\nu_t=C_\mu k\cdot\min\left(\frac{k}{\varepsilon}\ ,\ \frac{\sqrt{2}}{3C_\mu\sqrt{\overline{D_{ij}}\,\overline{D_{ij}}}}\right) \tag{38}$$

3　異なる構造諸元に対する流況の再現精度の検証

Ⅴ２で構築した数値解析手法について，複数の構造諸元の階段式魚道を対象として流況の再現精度を検証し，本手法が設計で使用可能な汎用性を有するか否かの評価を行う。

a　解析モデル

本節の解析モデルは，隔壁天端が傾斜型の階段式魚道におけるプール形状と流況形態の関係が整理された唯一の事例であり，かつ，比較的詳細な流速分布および水面形状の計測が多くの構造諸元を対象として行われていることから，林田ら(2000b)の実験における階段式魚道の模型とする。

林田らの実験では，幅 0.6m の 2 次元直線水路に，**Fig. 32** のように厚さ 0.2m の隔壁を 2 基設置することにより，階段式魚道における最上流のプールを再現している。隔壁は，傾斜型隔壁(**Fig. 2**)であり，隔壁には切り欠き部および潜孔を設けないタイプである。実験では，プール長 L およびプール深さ H(**Fig. 32**)を **Table 8** のように変化させて，同表の越流水深 Δh 時を対象として，中央縦断面における流速分布および水面形状が計測されている。なお，これらのケースは全て実物規模として想定されている(林田ら，2000b)。Ⅱ４a で述べたように，階段式魚道では勾配は 1/10 から 1/20 が適切と考えられており，隔壁厚さ D は 0.2m から 0.3m とするのがよいと考えられているが(ダム水源地環境整備センター編，1998；和田，2003)，CASE 1，4，7 を除けばこの条件が満たされている。

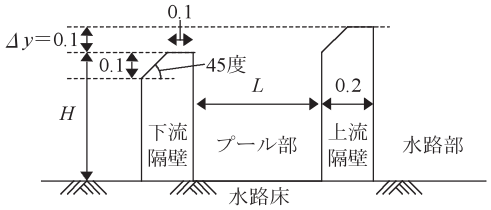


Fig. 32　林田ら(2000b)による実験模型の縦断図(単位：m)
Side view of the hydraulic model by Hayashida et al. (2000b)

Table 8　林田ら(2000b)による実験ケース
Experimental case by Hayashida et al. (2000b)

CASE	L	H	勾配	Δh
1	0.5	0.2	1/7	0.10
2	1.0	0.2	1/12	0.10
3	2.0	0.2	1/22	0.10
4	0.5	0.5	1/7	0.10
5	1.0	0.5	1/12	0.10
6	2.0	0.5	1/22	0.10
7	0.5	0.8	1/7	0.10
8	1.0	0.8	1/12	0.10
9	2.0	0.8	1/22	0.10

Fig. 32 の模型は切り欠き部および潜孔を設けないタイプであり，縦断面における流れは横断面より卓越していると考えられるため，Ⅳと同様，鉛直 2 次元断面で数値解析を行うこととした。そして，**Fig. 32** の模型におけるプール部が 3 段連続する階段式魚道を解析モデルとした。その際のプール間落差 Δy は，上流隔壁と下流隔壁の高さの差である 0.1m(**Fig. 32**)とした。また，水路部の長さは 1m とし，最下流のプールの下流隔壁を解析モデルの下流端とした。

一般に，格子は形状変化の激しい箇所や，流れの変化の激しい箇所で密に，そうでない箇所は粗になるよう形成する。それに対して本節では，実際の設計のように，流れの変化が激しくなる箇所がわからないという前提で, 格子の水平方向幅 Δx_1 および鉛直方向幅 Δx_2 を 0.02m で一定として，解析モデルを作成した。なお，格子幅の妥当性を検討するため，Δx_1 および Δx_2 をともに 0.01m で一定とした解析モデルも作成した。

b　解析条件

基礎方程式の離散化方法としては，Ⅳと同様，有限差分法を用いることとした。その際，基礎方程式の各変数は **Fig. 33** のようにスタガード配置(梶島，1999)した。スタガード配置では，流速のみを計算格子の界面に，その他の全ての変数を計算格子の中心に配置しているの

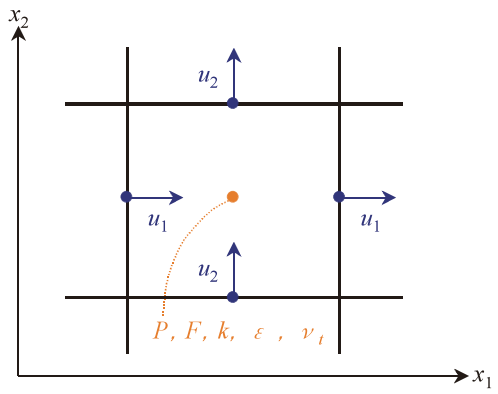


Fig. 33　変数のスタガード配置
Staggered arrangement of variables

で，流速の時間進行に作用する圧力勾配は隣り合う格子から求めることになり，Ⅳ３ｂ(1)で述べた圧力場の振動は生じない。

時間差分スキームは 2 次精度 Runge-Kutta 法，空間差分スキームは 2 次精度中心差分とした。但し，Ⅳと同様，N-S 方程式および k，ε の輸送方程式の対流項の離散化には Harten-Yee の風上型 TVD スキーム（Yee，1986）を適用し，VOF 関数 F の移流方程式の離散化にはドナー・アクセプター法（Hirt and Nichols，1981）を用いた。

圧力場と連続式のカップリング手法には SMAC 法（Amsden and Harlow，1970）を用い，カップリングにより得られる圧力補正値に関するポアソン方程式を前処理付 Bi-CGStab 法（小国，1991）によって解いた。

ここで上記のカップリングとは，Ⅳ３ｂ(3)と同じ考えによって行われるものである。SMAC 法（simplified Marker and Cell method）では，まず N-S 方程式を既知の圧力を用いて陽的に解く。次に，仮に得られた流速に対して圧力補正値の勾配を加えて時間進行させたものが連続式を満たすように，圧力補正値に関するポアソン方程式を構成し，圧力補正値を陰的に求める。そして，既知の圧力に圧力補正値を加えて，未知の圧力を求めるとともに，仮の流速に対して圧力補正値の勾配を加えて時間進行させ，未知の流速を求める。この SMAC 法は，原理的にはⅣで用いた部分段階法と同じであるが，仮の流速を求める際に圧力勾配を用いる SMAC 法ではこの値を流速の予測値とみなせるのに対し，圧力勾配を欠いている部分段階法ではそのようにみなせない点が異なる。

ポアソン方程式を解く際の収束判定条件には，ポアソン方程式において，係数ベクトルのユークリッドノルムに対する残差ベクトルのユークリッドノルムの比が 10^{-6} 以下となることを課した。また，収束状況に応じて，式(39)，(40)のように，各計算格子において CFL 条件および粘性項の安定条件が満たされる範囲で，計算時間刻み Δt を変化させた（Hirt and Nichols，1981）。

$$\Delta t = \min\left(\alpha\frac{\Delta x_1}{|u_1|},\ \alpha\frac{\Delta x_2}{|u_2|},\ \beta\frac{1}{2\nu\left(1/\Delta x_1^{\,2}+1/\Delta x_2^{\,2}\right)},\ \gamma\cdot\Delta t^*\right) \quad (39)$$

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_1\ ,\ ITER < ITER_{\min}\ and\ ITER^* < ITER_{\min} \\ \gamma_2\ ,\ ITER > ITER_{\max}\ and\ ITER^* > ITER_{\max} \\ \gamma_3\ ,\ else \end{cases} \quad (40)$$

ここで，Δx_i は各計算格子における x_i 軸方向の幅，Δt^* は直前の計算ステップにおける計算時間刻み，$ITER$ および $ITER^*$ はそれぞれ現時点および直前の計算ステップにおいて収束に要した反復回数である。a，β，γ_1，γ_2，γ_3，$ITER_{\min}$, $ITER_{\max}$ は係数であり，それぞれ 0.3, 0.667, 1.002, 0.990，1.001，5，150 とした。

初期条件として，3 つのプール部および水路部（Ⅴ３ａ）を満水状態とした。その際，圧力は静水圧分布とし，流速は全ての位置でゼロとした。

上流端の境界条件として，各ケース（**Table 8**）ともに，最上流の隔壁に対する越流水深 Δh が 0.10m を満足するよう，一定の水深および流速を与えた。この水深は，VOF 関数 F の配置により表現した。但し，計算開始時点では初期条件と同じく，水深は最上流の隔壁天端と同じ高さ，流速はゼロであるため，計算開始後 1 秒でそれらを前述の一定値まで直線的に増加させた。

下流端の境界条件は自由流出とした。

壁面の境界条件には，Ⅳと同様，対数則（梶島，1999）を適用した。壁面のうち隔壁天端の斜面部分（**Fig. 31**）では，まず点 S’ における斜面に平行な流速成分を周辺 4 地点の u_1 および u_2 を線形補間して求め，その流速から対数則により点 S における斜面上の流速成分 u_w を求めた。このような手法を用いた数値解析により，台形堰における堰下流側の水深の変化に伴う完全越流から潜り越流への流況変化を再現できることが示されている（浪平ら，2005）。

自由水面における境界条件として，水面の接線方向の $\overline{u_i}$ についてはすべりなし境界とし，水面の法線方向の $\overline{u_i}$ については連続式（式(26)）を満足するように決定した。k および ε については対象境界とした。

構造物内部や気体部分（F = 0）における値が必要な場合は，壁面もしくは自由水面における境界条件による勾配を用いて外挿した。

解析は，流況がほぼ定常とみなせるようになった後に終了させた。それには計算開始後 10 ～ 60 秒程度要した。以降では，流速ベクトルおよび水面形状の解析結果として，計算終了時の値を用いる。

ｃ　解析結果

林田ら（2000b）の実験では，Δh = 0.10m のときの流況形態（**Fig. 4**）は，**Fig. 34** のように，構造諸元の違いにより異なる結果となった。その際の流況が公表されているのは CASE 3（本田ら，2003）および CASE 9（林田ら，2000b）のみである（**Fig. 35**）。

一方，本節において，Δx_1 および Δx_2 をともに 0.02m で一定とした解析モデルを用い，Δh = 0.10m のときを対象とした流況の解析結果を **Fig. 36** に示す。これらの

図では，実験結果(**Fig. 35**)との比較のため，3 つのプール(Ⅴ 3 a)のうち最上流における流況を掲載した。

これより，数値解析による流況形態は CASE 8 を除いて全て実験結果と一致した。CASE 8 の解析結果では，最上流のプールにおいては **Fig. 36(h)** のように落下流と斜め流の中間的な流況形態となったが，上流から 2 段目および最下流のプールにおいては明確な落下流となった。なお，Δx_1 および Δx_2 をともに 0.01m で一定とした解析モデルを用いた場合も，CASE 8 を除き，**Fig. 36** とほぼ同じ解析結果が得られた。この場合の CASE 8 では，全てのプールにおいて明確な落下流となった。CASE 8 のみ解析結果が実験結果と異なった原因として，**Fig. 34** より，CASE 8 は表面流の発生領域の境界付近の条件であった可能性が考えられる。このような境界付近では，数値解析で壁面の境界条件として適用した対数則による粗度と，模型表面の粗度との微妙な違いによって，また，解析モデルの格子の大きさの違いによって，実験結果と解析結果で流況形態が異なる可能性があると考えられる。しかし，解析結果では斜め流ではなく落下流となっており，このような仮説に対しては **Fig. 34** のみでは十分に説明できない。より詳細な検討は次節Ⅴ 4 で行う。

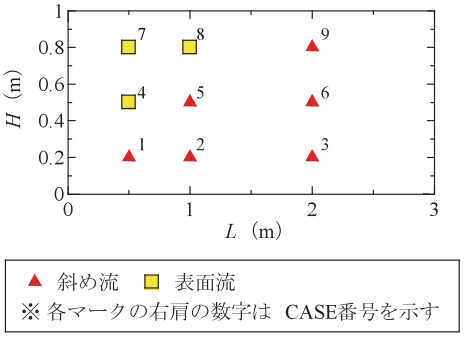


Fig. 34　構造諸元と流況形態の関係の実験結果（林田ら，2000b）
Experimental results of relationship between structural specifications and flow type (Hayashida et al., 2000b)

流速分布については，実験結果が公表されているのは CASE 3 および CASE 9 のみであるため(**Fig. 35**)，十分な比較はできない。しかし，この 2 ケースについては，プールに対して斜めに突入した越流水脈のプール底へ到達する位置や，プール内に生じた渦の大きさや位置等が，解析結果では十分な精度で再現されていると考えられる。

なお，**Fig. 36** の CASE 2，4，8，9 では，越流水脈のプールへの突入部の水面において微小なオーバーハングが生じている。このようなオーバーハングは，Ⅳと同様に，プール内の流況がほぼ定常とみなせるようになった後も，繰り返し発生しては，直ちに上流側へ移動して越流水脈に吸収されるように消失したが，全体の流況に大きな影響を及ぼすことはなかった。計算終了時点(Ⅴ 3 b)で発生していなかったため，**Fig. 36** には現れていないケースもあるが，これらのケースでも同様であった。

また，解析結果では隔壁頂部付近で水面形状の一部が階段状になったが，これは，デカルト座標系で VOF 関数 F の移流方程式(式(34))を離散化したため，計算格子の対角線方向への F 値の輸送が滑らかに行われなかったことによると考えられる。

d　本章で開発した数値解析手法の評価

以上より，本章で開発した数値解析手法は，隔壁天端

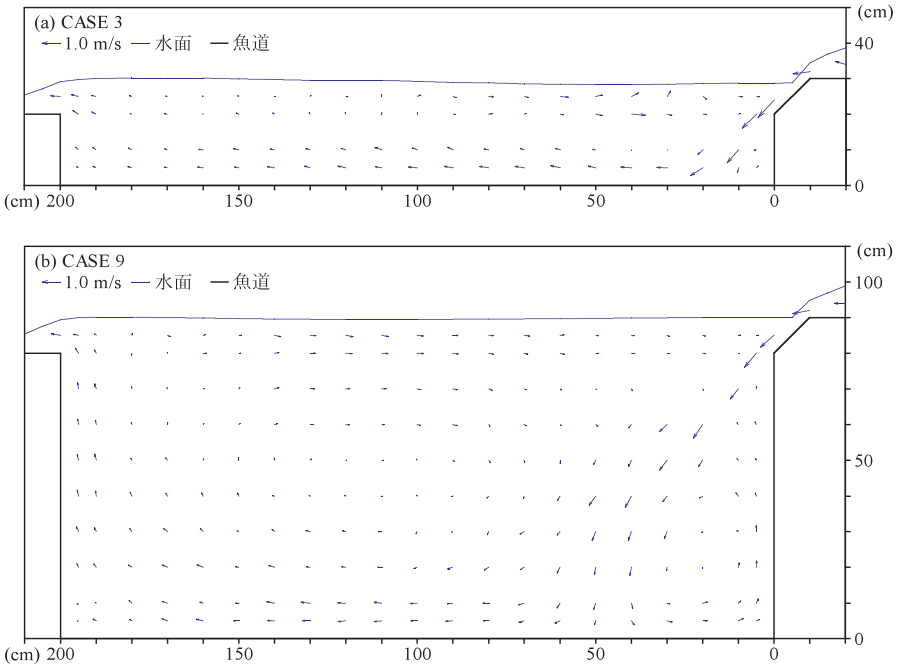


Fig. 35　Δh ＝ 0.10m のときの流況の実験結果(林田ら，2000b；本田ら，2003)
Observed flow structure when Δh ＝ 0.10m (Hayashida et al., 2000b; Honda et al., 2003)

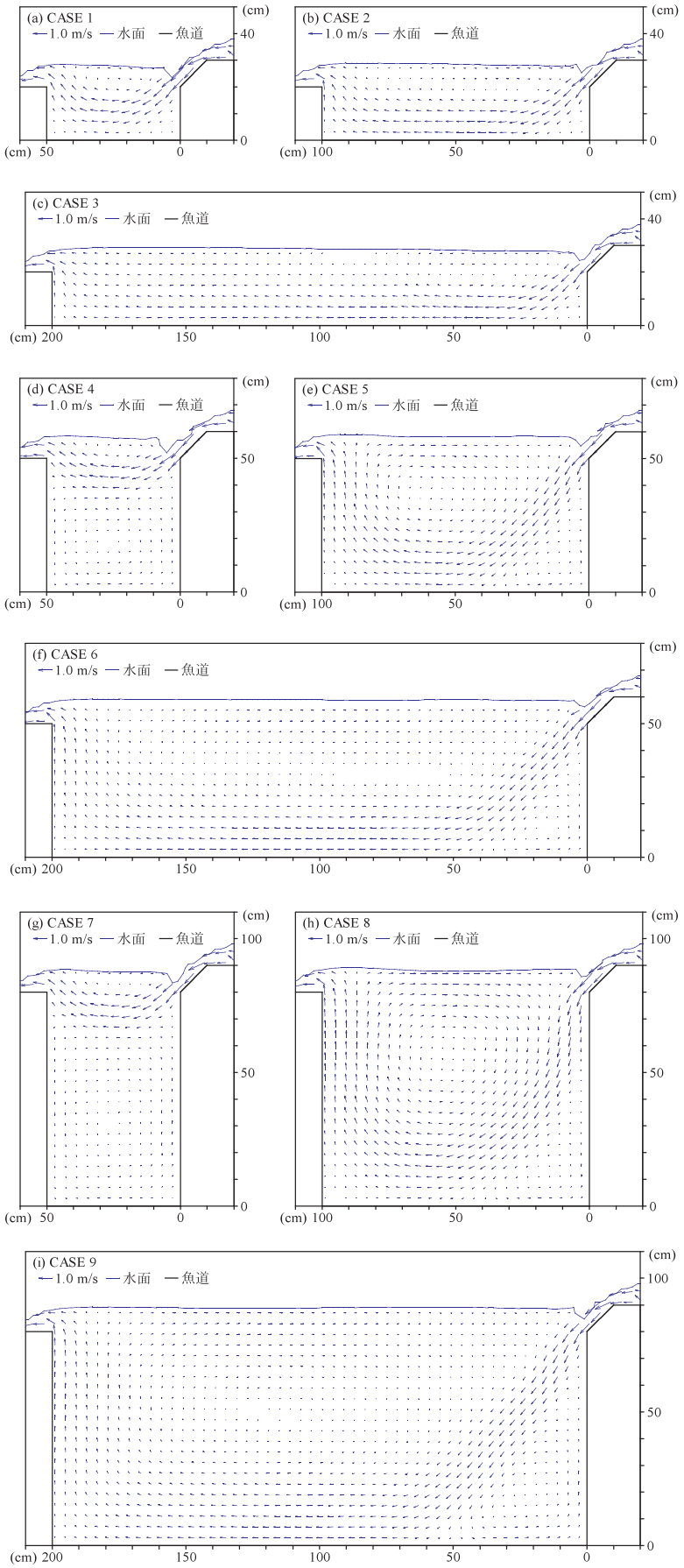


Fig. 36　Δh ＝ 0.10m のときの流況の解析結果
Simulated flow structure when Δh ＝ 0.10m

が傾斜型の階段式魚道内の流況を予測する手法として，十分な精度を期待できると考えられる。しかしながら，上述のように，CASE 8 における実験結果と解析結果の相違の原因が十分に解明されていないため，汎用性については信頼性が若干劣る。この検討は次節Ⅴ 4 で再度行う。

なお，本章では隔壁に切り欠き部と潜孔を設けないタイプを対象としたため，鉛直 2 次元断面で数値解析を行った。今後の課題として，Ⅳで開発した手法と同様，切り欠き部や潜孔を設けるタイプについても対象にできるように，本手法を 3 次元化する必要がある。その際，本手法における基礎方程式(Ⅴ 2 c)や解析条件(Ⅴ 3 b)等の基本的な考え方はそのまま適用できるため，プログラム上の改良のみで対応できる。

4　流況形態の予測

a　評価方法および使用するデータ

Ⅴ 2 では，デカルト座標系において傾斜面を有する構造物を表現するため格子の空隙率および格子界面の開口率を 0 ～ 1 の範囲で設定する手法に対して，流体が壁面から受ける摩擦抵抗を組み込めるように改良した。そして，このような座標系において，水面変動に対応するための VOF 法と，乱れの大きい流況でも安定して解析するため改良 LK モデルと Durbin モデルを適用した標準型 k-ε モデルを組み合わせた数値解析手法を構築した。そして，Ⅴ 3 では，設計において傾斜型隔壁の階段式魚道内の流況を予測する手段として，汎用性については信頼性が若干劣るものの，本手法は十分な再現精度を有することを示した。

しかしながら，設計でこのような数値解析を実施するのが困難な場合もあり得る。あるいは，より簡便に流況形態(**Fig. 4**)のみを推定することが必要な場合もあると考えられる。従って，ここでは，Ⅳと同様，上記の手法を用いた階段式魚道内の流況の数値解析を数多くの条件について行い，傾斜型隔壁の階段式魚道における構造諸元および水理条件と流況形態の関係を整理する。

そこで，Ⅴ 3 の解析モデルを用いて，林田ら(2000b)の実験では対象とされていない Δh = 0.05m, Δh = 0.15m, Δh = 0.20m についても，CASE 1 ～ 9(**Table 8**)の構造諸元における流況の数値解析を行った。このとき，Δh = 0.10m の場合と同様，上流端の境界における水深および流速は，計算開始時点では初期条件と同じであり Δh が所定値を満足しないため，Δh が所定値を満足するような一定値まで, 計算開始後 0.5 秒(Δh = 0.05m), 3.0 秒(Δh = 0.15m)，5.0 秒(Δh = 0.20m)で直線的に増加させた。

そして，Ⅴ 3 の結果も含めた全ての解析結果について，Ⅳと同様，鬼束ら(2005)による矩形型隔壁の階段式魚道における表面流の発生の予測方法(式(2)，**Fig. 5**)に倣い, 流況形態毎に $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ の関係をプロットした(**Fig. 37**)。L，H については各ケースで **Table 8** の通りであり，Δy についてはⅤ 3 a で述べたように全てのケースで 0.10m である。なお，Δh = 0.10m のときの CASE 8 では最上流のプールのみ他の 2 つと流況形態が若干異なったこと(Ⅴ 3 c)から，**Fig. 37** では，解析モデルにおける 3 つのプールのうち最下流のプールに対する解析結果をもとに整理している。

b　表面流の発生領域

傾斜型隔壁の場合に表面流が発生する条件については，これまではほとんど未解明であったが, **Fig. 37** より，どのような $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ の範囲で表面流が発生するかが明らかとなった。また，傾斜型は矩形型よりも表面流が発生しにくく，円弧型(**Fig. 29**)よりも表面流が発生しやすいことも示された。

c　落下流と斜め流の発生領域の境界

Fig. 37 より，傾斜型隔壁の場合における落下流と斜め流の発生領域の境界は，Ⅳの円弧型と同様，表面流の発生領域の境界のような単純な形状にはならなかった。そこで，同様に，**Fig. 37** において同一のケース(**Table 8**)で互いに Δh が異なる条件のプロット同士をラインで結んだ。このとき，ラインは H の値毎に種類を変えた。その結果が **Fig. 38** である。

Fig. 38 において，ラインの大凡の傾きは H の値毎に異なること，および，異なる H の値のラインが交差する箇所で落下流と斜め流の発生領域の境界が不連続な形状となっており，同じ H の値のライン同士ではこれらの流況形態の発生領域の境界は単純な形状であることは，円弧型隔壁の場合(**Fig. 30**)に等しい。従って，落下流と斜め流の発生領域の違いは，H の値毎に評価すれば明確になる可能性があると考えられる。

しかしながら本章では，設計での利用を目的として $L/(H+\Delta h)$ および $\Delta h/\Delta y$ と流況形態の関係を整理しており，それには **Fig. 37** において安全側の評価を行えば十分と考えられる。そのため，H の値が落下流と斜め流の発生領域の境界に及ぼす影響について，ここではこれ以上の調査を行わないが，その解明は今後の課題である。

d　各流況形態の発生領域の境界付近における予測精度

さて，Δh = 0.10m のときの CASE 8 では，実験結果と解析結果で流況形態が異なった。この条件は，**Fig. 37** において表面流，落下流，斜め流それぞれの発生領域の境界付近に位置している。そのため，Ⅴ 3 c の仮説のように，このような各流況形態の発生領域の境界付近となる条件では，数値解析で壁面の境界条件として適用した対数則による粗度と，模型表面の粗度との微妙な違いによって，また，解析モデルの格子の大きさの違いによって，実験結果と解析結果で流況形態が異なる可能性は高いと考えられる。

さらにこのような条件では，現場においても，①隔壁の材質が異なった場合や壁面の劣化に伴う粗度の違いによって，あるいは，②流量増加時と流量減少時の違いに

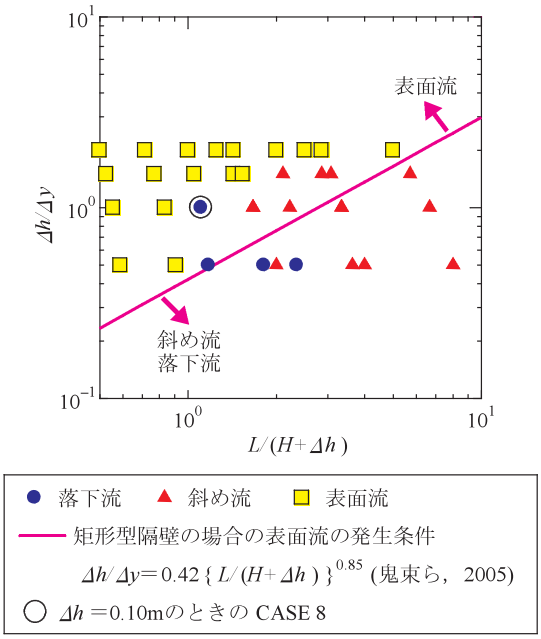


Fig. 37　傾斜型隔壁の場合の構造諸元および越流水深と流況形態の関係
The influence that structural specifications and overflow depth exert on flow type when inclined type weir wall is used

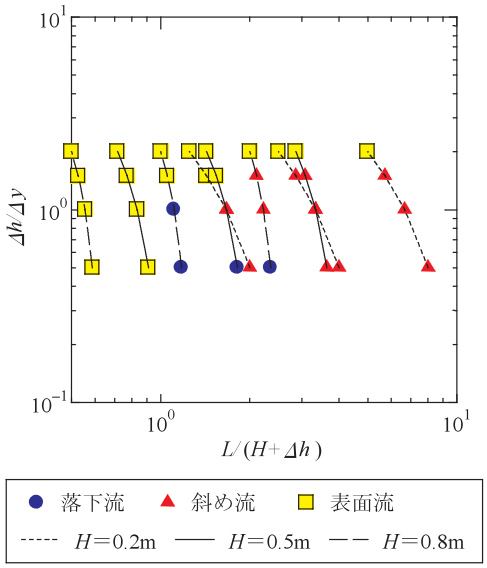


Fig. 38　傾斜型隔壁の場合の H の値毎の構造諸元および越流水深と流況形態の関係
The influence of each H that structural specifications and overflow depth exert on flow type when inclined type weir wall is used

よって，流況形態が異なる可能性がある。それに対し，数値解析における壁面境界条件の手法には限りがあり，①のような粗度の違いを十分に表現できない。また，本章の数値解析手法ではレイノルズ平均流れの計算を前提としているため（Ⅴ 2 a），②のような現象を再現できない。

従って，Δh = 0.10m のときの CASE 8 のような各流況形態の発生領域の境界付近において，数値解析による流況形態に対する再現精度が低下するのは許容せざるを得ず，本章で構築した手法は，設計において傾斜型隔壁の階段式魚道内の流況を予測する手段として十分なものといえる。

以上より，各流況形態の発生領域の境界付近では予測精度が相対的に低くなる可能性があることに十分注意を払い，**Fig. 37** をもとに構造諸元および越流水深を検討すれば，傾斜型隔壁の階段式魚道における流況形態を設計段階で把握できると考えられる。さらに詳細な流況を把握する必要があれば，本章で構築した数値解析手法が有効である。

5　結語

本章では，傾斜型隔壁の階段式魚道内の流況を精度良く予測できる汎用性の高い数値解析手法を構築した。また，この手法による解析結果を整理して，構造諸元および水理条件と流況形態の関係を明らかにした。得られた結果を整理すると，以下のようである。

1）デカルト座標系において傾斜面を有する構造物を表現するため格子の空隙率および格子界面の開口率を 0 ～ 1 の範囲で設定する手法に対して，流体が壁面から受ける摩擦抵抗を組み込めるように改良した。そして，このような座標系において，水面変動に対応するための VOF 法と，乱れの大きい流況でも安定して解析するため改良 LK モデルと Durbin モデルを適用した標準型 k-ε モデルを組み合わせた数値解析手法を構築した。

2）上記 1）の手法は，傾斜型隔壁の階段式魚道における越流水深の変化やプール長およびプール深さの変化に伴う流況形態の違いによる流況形態の違いを精度よく再現できた。設計において傾斜型隔壁の階段式魚道内の流況を予測する手段として，本手法は十分な再現精度および汎用性を有することが示された。

3）設計において上記 1）の手法を用いた数値解析の実施が困難な場合や，より簡便かつ正確な流況形態の推定のみが必要な場合もあると考えられる。そこで，上記 2）を踏まえ，数多くの条件に対する上記 1）の手法による解析結果について，流況形態毎に $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ の関係を整理し，傾斜型隔壁の階段式魚道における各流況形態の発生領域を明らかにした。

4）各流況形態の発生領域の境界付近では，上記 1）の手法の再現精度が低下する可能性がある。

5）本章では，鉛直 2 次元断面で数値解析を行っている。そのため，今後の課題として上記 1）の手法を 3 次元化する必要がある。その際，本手法における基礎方程式や解析条件等の基本的な考え方はそのまま適用できるため，プログラム上の改良のみで対応できる。

Ⅵ　階段式魚道の設計に対する提言

1　概説

本章では，Ⅲ～Ⅴで得られた研究成果を整理し，階段式魚道の設計に対する提言を行う。具体的な内容は，①階段式魚道内の流況形態とその予測方法，②円弧型隔壁の階段式魚道内の詳細な流況の予測方法，③傾斜型隔壁の階段式魚道内の詳細な流況の予測方法，④浮遊魚の遡上に適した階段式魚道内の流況形態，⑤プール毎の流況の違いとそれに基づく遡上率向上方法である。

2　階段式魚道内の流況形態とその予測方法

階段式魚道では，構造諸元，越流水深，隔壁天端形状等(**Fig. 1** ～ **2**，**Table 2**)の違いにより，落下流，斜め流，表面流の 3 つの流況形態(**Fig. 4**)が現れる。この流況形態を主に支配するパラメータは，プールに貯められた水のアスペクト比 $L/(H+\Delta h)$，および，プール間落差に対する越流水深の比 $\Delta h/\Delta y$ であることが理論的に導かれている(鬼束ら，2005)。隔壁に切り欠き部と潜孔のないタイプであれば，隔壁天端形状毎の $L/(H+\Delta h)$ および $\Delta h/\Delta y$ と流況形態の関係は **Fig. 39** のようになる。ここで，**Fig. 39(a)** ～ **(c)** はそれぞれ **Fig. 5**，**Fig. 38**，**Fig. 30** の再掲載である。なお，**Fig. 39(a)** は模型実験の結果を，**Fig. 39(b), (c)** は数値解析の結果を整理したものである。

Fig. 39 より，円弧型隔壁の場合が最も表面流が発生しにくく，矩形型隔壁が最も表面流が発生しやすいことがわかる。この違いは，隔壁を越える水は隔壁天端形状に沿った方向に流れやすいこと，具体的には，矩形型では水平方向に，傾斜型ではその傾斜の向きに，円弧型では鉛直下向きに流れやすいことによると考えられる。その典型的な例を **Fig. 40** に示す。これらの流況図は，隔壁天端形状の他は全て同じ条件における解析結果である。**Fig. 40(b)** は **Fig. 36(e)**，**Fig. 40(c)** は **Fig. 27(e)** の再掲載であり，**Fig. 40(a)** を得るために行った数値解析の手法は **Fig. 40(b)** を得るためのものと同一である。このような特性のため，矩形型，傾斜型，円弧型の順に表面流が発生しやすいと考えられる。

Fig. 39(b), (c) より，円弧型隔壁と矩形型隔壁における落下流と斜め流の発生領域の境界は，表面流の発生領域の境界のような単純な形状にはならないことがわかる。しかし，同一の構造諸元で互いに Δh が異なる条件のプロット同士をラインで結ぶと，ラインの大凡の傾きは H の値毎に異なり，異なる H の値のラインが交差する箇所で落下流と斜め流の発生領域の境界が不連続な形状となるが，同じ H の値のライン同士ではこれらの流況形態の発生領域の境界は単純な形状である。そのため，これら 2 つの流況形態の発生領域の違いは，H の値毎に評価すれば明確になると考えられるが，設計の際には **Fig. 39** において安全側の評価を行えば十分と考えられる。

なお，各流況形態の境界付近となる条件では，数値解析で壁面の境界条件として適用した対数則による粗度と模型表面の粗度との微妙な違いによって，また，解析モデルの格子の大きさの違いによって，**Fig. 39** とは異なる流況形態となる可能性がある。現場においても，隔壁の材質が異なった場合や壁面の劣化に伴う粗度の違いによって，あるいは，流量増加時と流量減少時の違いによって, **Fig. 39** とは異なる流況形態となる可能性がある。そのため，このような条件では，推定精度は相対的に低くなることに注意し，安全側の評価を行うことが必要である。

3　円弧型隔壁の階段式魚道内の詳細な流況の予測方法

円弧型隔壁の階段式魚道における流況形態(**Fig. 4**)の予測には **Fig. 39(c)** が有効である。一方，このタイプにおいて，流速が最大となる隔壁からの越流水がプール部分に突入する箇所等で，詳細な魚道内の流況を把握する必要がある場合には，円弧形状を正確に表現するため一般座標系において，水面変動に対応するための VOF 法(Hirt and Nichols，1981)と，乱れの大きい流況でも安定して解析するために改良 LK モデル(村上ら，1995)と Durbin モデル(Durbin，1996)を適用した標準型 k-ε モデルを組み合わせた数値解析手法が有効である。本手法は，既往の手法では得られなかった再現精度と汎用性を有することが確認されている(**Fig. 20** ～ **23**，**25** ～ **28**)。

本手法で解析を行う場合，基礎方程式の各変数はコロケート配置(**Fig. 19**)し，時間差分スキームは 2 次精度 Runge-Kutta 法，空間差分スキームは 2 次精度中心差分により離散化する。但し，Navier-Stokes 方程式および k, ε の輸送方程式の対流項の離散化には Harten-Yee の風上型 TVD スキーム(Yee，1986)を適用し，VOF 関数 F の移流方程式の離散化にはドナー・アクセプター法(Hirt and Nichols，1981)を用いる。圧力場と連続式のカップリング手法には部分段階法を用い，前処理付 Bi-CGStab 法(小国，1991)によって圧力補正値に関するポアソン方程式を解く。壁面の境界条件には対数則(梶島，1999)を適用する。

但し，各流況形態の境界付近となる条件では，数値解析における壁面境界条件による粗度と実物の隔壁の粗度との微妙な違いや, 流量増加時と減少時の違いによって，異なる流況形態となる可能性があり，予測精度が相対的に低くなるので，十分な注意が必要である。

なお，現時点では本手法の数値解析プログラムは鉛直 2 次元断面における解析を対象として作成されている。そのため，今後の課題として，3 次元解析に対応できるようにプログラムを改良する必要がある。その際，本手法における基礎方程式や解析条件等の基本的な考え方はそのまま適用できる。

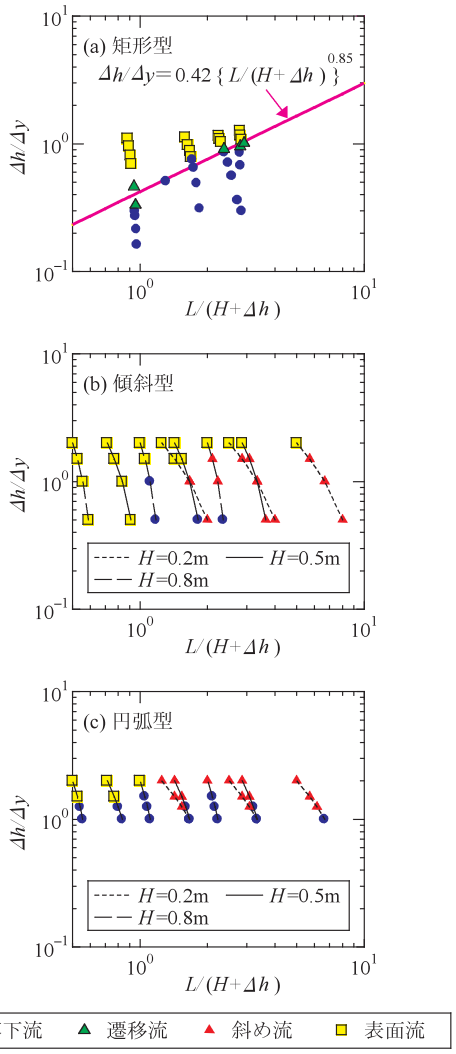


Fig. 39　隔壁天端形状毎の $L/(H+\Delta h)$ および $\Delta h/\Delta y$ と流況形態の関係
（**Fig. 39(a)~(c)** はそれぞれ **Fig. 5**，**Fig. 38**，**Fig. 30** の再掲載）
The influence that $L/(H+\Delta h)$ and $\Delta h/\Delta y$ for each shape of the crown of the weir wall exert on flow type

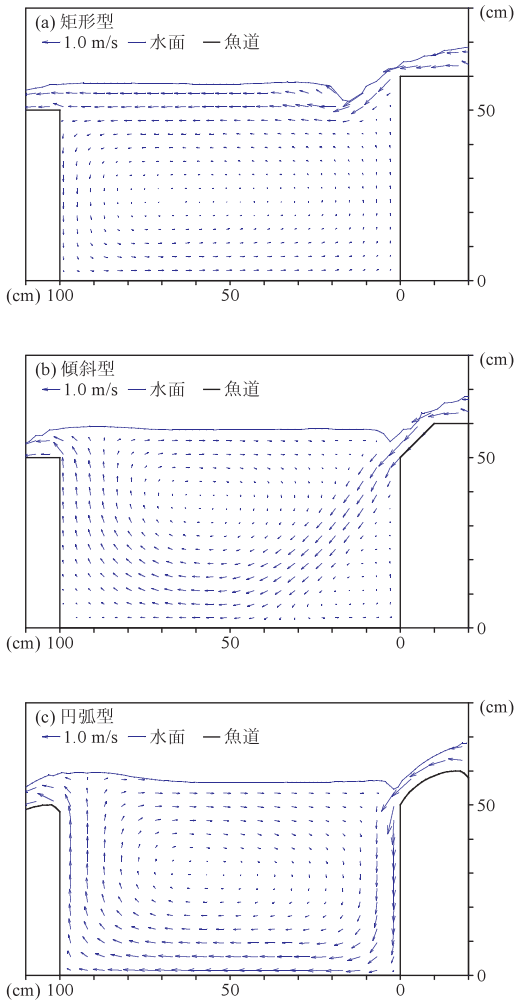


Fig. 40　隔壁天端形状の違いが流況に及ぼす影響の解析結果（Δh = 0.10m）
Simulated results of the influence that difference of shape of crown of weir wall exert on flow structure when Δh = 0.10m

4　傾斜型隔壁の階段式魚道内の詳細な流況の予測方法

傾斜型隔壁の階段式魚道における流況形態（**Fig. 4**）の予測には **Fig. 39(b)** が有効である。一方，このタイプにおいて，流速が最大となる隔壁からの越流水がプール部分に突入する箇所等で，詳細な魚道内の流況を把握する必要がある場合には，傾斜面を有する構造物を表現するため格子の空隙率および格子界面の開口率を 0 ～ 1 の範囲で設定するデカルト座標系において，水面変動に対応するための VOF 法（Hirt and Nichols，1981）と，乱れの大きい流況でも安定して解析するために改良 LK モデル（村上ら，1995）と Durbin モデル（Durbin，1996）を適用した標準型 k-ε モデルを組み合わせた数値解析手法が有効である。但し，流体が壁面から受ける摩擦抵抗を組み込めるような改良（**Fig. 31**）が必要である。本手法は，既往の手法では得られなかった再現精度と汎用性を有することが確認されている（**Fig. 34** ～ **36**）。

本手法で解析を行う場合，基礎方程式の各変数はスタガード配置（**Fig. 33**）し，時間差分スキームは 2 次精度 Runge-Kutta 法，空間差分スキームは 2 次精度中心差分により離散化する。但し，N-S 方程式および k，ε の輸送方程式の対流項の離散化には Harten-Yee の風上型 TVD スキーム（Yee，1986）を適用し，VOF 関数 F の移流方程式の離散化にはドナー・アクセプター法（Hirt and Nichols，1981）を用いる。圧力場と連続式のカップリング手法には SMAC 法（Amsden and Harlow，1970）を用い，前処理付 Bi-CGStab 法（小国，1991）によって圧力補正値に関するポアソン方程式を解く。壁面の境界条件には対数則（梶島，1999）を適用する。壁面のうち隔壁天端の斜面部分（**Fig. 31**）では，まず点 S' における斜面に平行な流速成分を周辺 4 地点の u_1 および u_2 を線形補間して求め，その流速から対数則により点 S における斜面上の流速成分 u_w を求める。

但し，円弧型隔壁の場合に対する手法と同様に，各流

況形態の境界付近となる条件では，数値解析における壁面境界条件による粗度と実物の隔壁の粗度との微妙な違いや，流量増加時と減少時の違いによって，異なる流況形態となる可能性があり，予測精度が相対的に低くなるので，十分な注意が必要である。

なお，現時点では本手法の数値解析プログラムは鉛直 2 次元断面における解析を対象として作成されている。そのため，今後の課題として，3 次元解析に対応できるようにプログラムを改良する必要がある。その際，本手法における基礎方程式や解析条件等の基本的な考え方はそのまま適用できる。

5　浮遊魚の遡上に適した階段式魚道内の流況形態

円弧型隔壁の階段式魚道の実物規模模型において，浮遊魚の一種であるウグイ（体長 9 ～ 12cm 程度）の遡上経路を観測した結果が **Fig. 41** である。このうち，斜め流になるとき（**Fig. 41(c)**）にプール内の主流の下側に生じる小さな渦付近では，ウグイは走流性のため下向きまたは下流向きに定位し，遡上する際にはそこから向きを変えなければならず，向きを変えるときに押し流されてしまう場合が少なくないことが確認されている（Ⅲ 5 c）。遡上率についても，落下流になるとき（**Fig. 41(a), (b)**）には 70 ～ 80% 程度の比較的高い値が得られたのに対し，斜め流になるときには 50% 程度であった（**Fig. 12**）。

ここで **Fig. 41** では，流況として，隔壁の上側や水面近傍では計測器の対応範囲外の条件となり流速を観測できていない観測値ではなく，Ⅵ 3 の手法を用いた解析結果を掲載しているが，解析結果は観測値を十分な精度で再現していることは確認済みである（**Fig. 20** ～ **23**）。そして，**Fig. 41(c)** の CASE 3 における経路②が，先に指摘した遡上に失敗しやすくなる状況において，遡上に成功した場合の一例である。

これまでに，階段式魚道で発生する 3 つの流況形態（**Fig. 4**）のうち表面流は，階段式魚道ではプール内での減勢効果が期待されていること等から，避けるべき流況形態と考えられてきた（高須ら，1994）。それに加え，上記の観測結果から，円弧型隔壁の場合は斜め流も避けるべき流況形態と考えられる。このことは，ウグイに限らず走流性をもつ浮遊魚全般に対して当てはまる可能性が高い。従って，浮遊魚を主な対象として円弧型隔壁の階段式魚道の設計を行う際には，想定される越流水深の変動範囲内では斜め流や表面流が生じにくくなるように H や L 等の構造諸元を選定することが必要である。この場合には **Fig. 39(c)** が有効である。

なお，上記の観測結果および解析結果において落下流になるとき（**Fig. 41(a), (b)**）には，プール内では流速は実験に使用したウグイの突進速度の目安（Ⅲ 4 a）となる 0.9 ～ 1.2m/s を下回っていたが，隔壁の上側では超えていた。それに対し，斜め流になるとき（**Fig. 41(c)**）には，プール内，隔壁の上側ともに流速は実験に使用したウグイの突進速度の目安を超えていた。このため，今後の課題として，上記の観測で斜め流になったのと同じ水理条件下で落下流となる構造諸元の模型を用いて，ウグイの遊泳行動を観測する必要がある。

また，上記の観測は円弧型隔壁の階段式魚道におけるものである。Ⅵ 2 で示したように，円弧型の場合は他の形状よりも落下流の発生領域が広い。このため，今後の課題として，円弧型では落下流となるが傾斜型隔壁では斜め流になる条件では，傾斜型の採用を避けるべきか否かについて，同様の観測を行って確認する必要がある。

上記の 2 つの課題が解決されれば，落下流か斜め流かの違いと主流の速度のうち，どちらが魚類の遊泳行動により大きな影響を及ぼすかが明らかになる。

6　プール毎の流況の違いとそれに基づく遡上率向上方法

一般に，階段式やアイスハーバー式等のプールタイプの魚道では，全てのプールの構造諸元を同一とすることが多い。しかしながら，円弧型隔壁の階段式魚道の実物規模模型において，プール毎の流況および浮遊魚であるウグイの遊泳行動を観測した結果，落下流および斜め流のときは最上流のプールでは他のプールと比べて主流が速く，ウグイの定位も困難であり，遡上に失敗する場合も他のプールより多くなることが確認されている（Ⅲ 5 a ～ Ⅲ 5 d）。また，勾配を 1/5 とした模型と，この構造において最上流の隔壁のみ他より低くして最上流のプールのみ勾配を 1/10 に緩和させた模型では，ウグイの遡上率は後者の方が高くなることが確認されている（Ⅲ 5 f）。これらの結果は，ウグイと同じ浮遊魚だけでなく，底生魚も含めた魚類全般に対して当てはまる可能性が高いと考えられる。また，隔壁天端形状に関わらず，階段式であれば共通することと考えられる。

以上より，階段式魚道における魚類の遊泳行動を観測する必要がある場合は，複数あるプールのうち最上流のプール，もしくは，プールが 1 段しかない模型を対象とし，最も遊泳が困難となる状況について評価する必要があると考えられる。

また，階段式魚道では，最上流のプールのみ他より勾配を緩和させることは，魚類の遡上率を向上させる上で有効になる可能性が高いと考えられる。このことは，十分な遡上率が得られることが既に確認されている魚道勾配が 1/20 ～ 1/10 の場合（原ら，1995；ダム水源地環境整備センター編，1998；和田，2003）よりも，地形条件や建設コスト等の制約のために魚道勾配を 1/20 ～ 1/10 より急にせざるを得ない場合において効果を発揮すると考えられる。この場合は，前述の実験結果に基づき，最上流のプールのみ勾配が 1/10 となるように，最上流の隔壁のみ他より低く設計すればよい。

なお，上記の観測結果については，プール数が 3 しかない模型を用いた実験により確認されたものである（Ⅲ

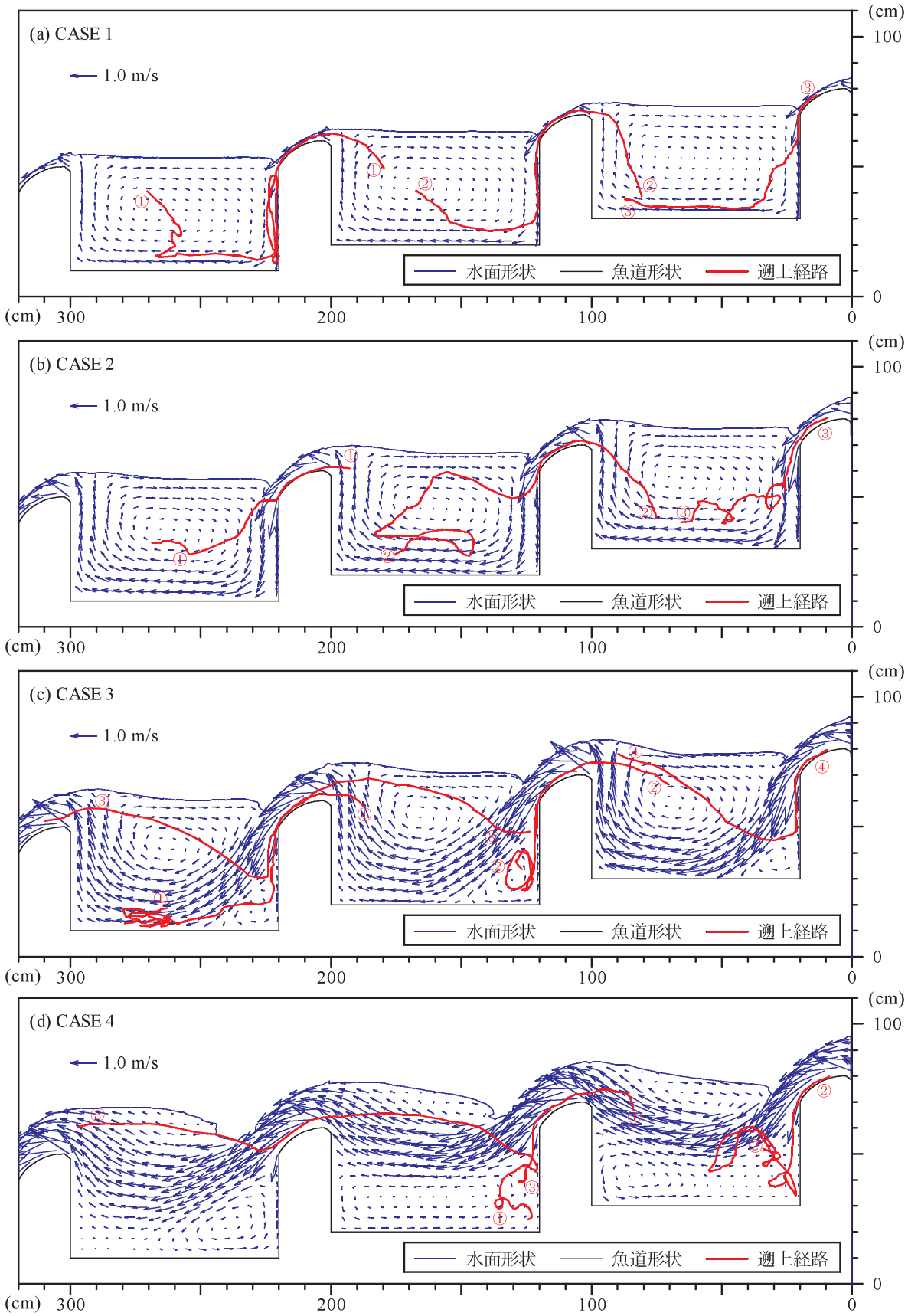


Fig. 41　魚道内の流況の解析結果とウグイの遡上経路の観測結果
Simulated flow structure and observed ascending route of *Leuciscus hakonensis* in the fishway

5 f)。このため，今後の課題として，プール数がより多い魚道においても同程度の効果を期待できるか検証を行う必要がある。

Ⅶ　結　言

本研究は，魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係に着目して，階段式魚道の設計に対する提言を行うものである。各章の内容および得られた成果の概要は，以下の通りである。

Ⅰでは，まず，生態系との調和への配慮が強く求められる近年，我が国の農業生産に不可欠な存在である頭首工において，魚道の重要性が非常に高くなっていることを述べた。次に，魚道の中でも，適切な設計がなされれば減勢効果が高く，比較的単純な流況が形成される階段式に着目し，その設計に関する既往の研究成果と，それに基づく現状の設計方法における問題点を抽出した。そして，本型式の長所がより発揮される設計を確立するためには，魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係の解明を進めるとともに，魚道内の流況を精度良く予測できる汎用性の高い数値解析手法を確立することの必要性を示し，これらを本研究の目的として設定した。さらに，設計において上記の数値解析の実施が困難な場合や，より簡便な流況形態の推定のみが必要な場合もあると考えられることから，構造諸元および水理条件と流況形態の関係を整理することも，目的の一つとした。

Ⅱでは，まず，遊泳特性に基づく魚類の分類と，魚類の遊泳速度について説明した。さらに，Ⅰでも少し触れているが, 階段式魚道の設計に関する既往の研究成果と，それに基づく設計の考え方のうち，本研究で扱う魚道本体に関する項目について概要を説明した。

Ⅲでは，他の隔壁天端形状と比べて表面流が発生しにくく，アユの遡上率が高いという実験結果が得られている円弧型隔壁の階段式魚道に着目した。そして，このタイプに対するプール数 3 の実物規模模型を用いて，異なる流量条件に対するプール毎の流況とウグイの遊泳行動の観測を行った。その結果，流量の変化に伴うプール内の流況形態や主流の速度の違いがウグイの遡上率だけでなく遡上経路にも大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。特に，斜め流のときにプール内の主流の下側に生じる小さな渦付近では，ウグイは走流性のため下向きまたは下流向きに定位し，遡上する際にはそこから向きを変えなければならず，向きを変えるときに押し流されてしまう場合が少なくないことを確認した。また，落下流および斜め流のときは，最上流のプールでは他のプールと比べて主流が速くなり, ウグイの定位も困難であり，遡上に失敗する場合も他のプールより多くなることを確認した。

さらに，勾配を 1/5 とした模型と，この構造において最上流の隔壁のみ他より低くして最上流のプールのみ勾配を 1/10 に緩和させた模型を用いて，ウグイの遡上実験を行った結果，後者における遡上率が高くなることを明らかにした。

Ⅳでは，円弧型隔壁の階段式魚道内の流況予測手法として，一般座標系において，改良 LK モデルと Durbin モデルを適用した標準型 k-ε モデルと，VOF 法を組み合わせて，新たな数値解析手法を開発した。そして，実験結果との比較から，本手法が既往の手法では得られなかった高い再現精度および汎用性を有することを示した。さらに，設計においてこのような数値解析の実施が困難な場合や，より簡便な流況形態の推定のみが必要な場合もあると考えられることから，本手法による解析結果について流況形態毎に $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ の関係を整理し，円弧型隔壁の階段式魚道における各流況形態の発生領域を明らかにした。

Ⅴでは，円弧型隔壁よりも遡上実験から得られたアユの遡上率は若干低いが，施工性は円弧型より高く，現場でも導入されやすいと考えられる傾斜型隔壁の階段式魚道に着目した。そして，このタイプの魚道内の流況予測手法として，傾斜面を有する構造物を表現するため格子の空隙率および格子界面の開口率を 0 ～ 1 の範囲で設定するデカルト座標系において，改良 LK モデルと Durbin モデルを適用した標準型 k-ε モデルと，VOF 法を組み合わせて，新たな数値解析手法を開発した。実験結果との比較から，本手法が既往の手法では得られなかった高い再現精度および汎用性を有することを示した。さらに，設計においてこのような数値解析の実施が困難な場合や，より簡便な流況形態の推定のみが必要な場合もあると考えられることから，Ⅳと同様，本手法による解析結果について流況形態毎に $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ の関係を整理し，傾斜型隔壁の階段式魚道における各流況形態の発生領域を明らかにした。

Ⅵでは，Ⅲ～Ⅴで得られた研究成果を整理し，階段式魚道の設計に対する提言を行った。具体的な内容は，①階段式魚道内の流況形態とその予測方法，②円弧型隔壁の階段式魚道内の詳細な流況の予測方法，③傾斜型隔壁の階段式魚道内の詳細な流況の予測方法，④浮遊魚の遡上に適した階段式魚道内の流況形態，⑤プール毎の流況の違いとそれに基づく遡上率向上方法である。

本研究で階段式魚道を対象としたのは，一般に魚類は流れの中で上流側に向かう性質があるため，適切な設計がなされれば減勢効果が高く，比較的単純な流況が形成される本型式は，魚類の遡上にとって適していると考えられるものの，既設の本型式の中には，適切な設計が行われなかったことにより十分に機能していないものが散見されるためである(Ⅰ)。そこで，設計に必要な研究が十分に行われていない，魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係の解明を進めるとともに(Ⅲ)，魚道内の流況を精度良く予測できる汎用性の高い数値解析手法を確立した(Ⅳ，Ⅴ)。さらに，このような数値解析の実施が困難な

場合や，より簡便な流況形態の推定のみが必要な場合もあると考えられることから，数値解析の結果を利用して，構造諸元および水理条件と流況形態の関係を明らかにした（Ⅳ，Ⅴ）。これら一連の成果を整理した階段式魚道の設計に対する提言（Ⅵ）によって，現状よりも本型式の長所を活かせる設計が可能となり，本型式の適用範囲は一層広がると考えられる。また，本型式は，数多くある魚道の型式の中で，我が国では最も建設数が多い。このため，前述の提言は，魚道を新設する場合だけでなく，既設の魚道に対して機能を評価し，魚類の遡上にとってより適したものに改修する際にも，大きく貢献することが期待される。

但し本研究では，階段式魚道のうち隔壁に切り欠き部と潜孔のないタイプを対象としている（Ⅰ）。これは，本型式における最も基本的なこのタイプであっても設計に必要な研究が十分に行われておらず，まずはこのタイプにおける研究の充実を図ることが必要と考えられたためである。一方，実際に設置される魚道の中には隔壁に切り欠き部や潜孔を設けるものも少なくない。このようなタイプのうち，近年主流になりつつある切り欠き部を片側に配置し，潜孔を設けないタイプに対しては，縦断面における流れが卓越すると考えられるため，本研究で得られた構造諸元および水理条件と流況形態の関係，および，魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係を活用できる可能性が高い。潜孔を設けるタイプや切り欠き部が左右交互に配置されるタイプに対しては，魚道内の流況が大きく異なるため，本研究の成果をどの程度適用できるか不明である。そこで今後の課題として，本研究で直接扱わなかったこれらのタイプに対する本研究の成果の適用性を検証する必要がある。

本研究で開発した魚道内の流況の数値解析手法については，現時点では，隔壁に切り欠き部と潜孔のないタイプを対象とした鉛直 2 次元断面における解析用のプログラムを作成している。これを，切り欠き部や潜孔があるタイプを対象とするために 3 次元化する際には，基礎方程式や解析条件等の基本的な考え方はそのまま適用できるので，プログラム上の改良のみで対応できる。

また，本研究で得られた魚道内の流況と魚類の遊泳行動の関係については，浮遊魚の一種であるウグイを対象とした実験から得られている（Ⅲ）。ウグイを用いた理由としては，まず，ウグイは回遊魚ではないが，全国の河川で上流から下流まで比較的広範囲に生息しており，魚道を利用する可能性も高いと考えられることから，ウグイを対象とした魚道の評価も意味をもつものと考えられたためである。また，ウグイはアユと同様の紡錘形した浮遊魚であること，ウグイもアユも走流性をもつこと，アユの遊泳速度はウグイを含めた他の魚類と比較して著しく大きいこと等から，ウグイを対象とした実験結果は，最も多いアユを対象とした魚道に対して安全を見込んだ評価として利用できる可能性があると考えられたためである。

一方，魚種の中には，ウナギ，カジカ，ヨシノボリ，ナマズ等のように川底をはうように生息する底生魚も存在する。これらの魚種については，その一般的な遊泳特性から，魚道内における遊泳行動がアユやウグイとは異なる可能性がある。一部の底生魚については階段式魚道における遡上が確認されているが，主にアユを対象として適切な構造の検討が進められている本型式の底生魚に対する効果は十分に解明されていない。近年では環境との調和への配慮が強く求められるようになっており，多様な魚類を魚道の対象とするべきの考えが広まっていることから，今後の課題として，魚道内における底生魚の遊泳行動を観測し，本型式の底生魚に対する適用性の検討を行う必要がある。

参考文献

1）Amsden, A. A., Harlow, F. H.（1970）: A simplified MAC Technique for Incompressible Fluid Flow Calculations, *Journal of Computational Physics*, **6**, 322-325

2）Clay, C. H.（1961）: *Design of fishways and other fish facilities*, Dep. of Fisheries of Canada, Ottawa, Ontario, Canada.

3）ダム水源地環境整備センター編（1991）：魚道の設計－魚道と関連施設－，山海堂

4）ダム水源地環境整備センター編（1998）：最新 魚道の設計－魚道と関連施設－，信山社サイテック

5）Durbin, P. A.（1996）: On the *k-ε* stagnation point anomaly, *International Journal of Heat and Fluid flow*, **17**, 89-90

6）藤間攻司・後藤智明・首藤伸夫（1984）：非線形分散波理論の数値的な検討，海岸工学講演会論文集，31，93-97

7）船田一彦・前川勝朗・大久保 博・神谷和英（2002）：頭首工における魚道の改修事例と整備，農業土木学会誌，70（12），21-24

8）後藤仁志・酒井哲郎・芝原知樹（1999）：急激な水面変動を伴う流速場の Lagrange 型数値解析，水工学論文集，43，509-514

9）原 義文・和田吉弘・宮園正敏（1995）：アユを用いた急勾配な階段式魚道に関する実験的検討，*Proceeding of the International Symposium on Fishway '95 in Gifu*, 169-173

10）林田寿文・本田隆秀・萱場祐一・島谷幸宏（2000a）：階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動，水工学論文集，44，1191-1196

11）林田寿文・本田隆秀・萱場祐一・島谷幸宏（2000b）：階段式魚道における落下流と表面流の発生特性とウグイの遡上行動，環境システム研究論文集，28，333-338

12）Hirt, C. W., Nichols, B. D.（1981）: Volume of fluid（VOF）method for the Dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, **39**, 201-225

13）Hirt, C. W.（1993）: Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering, *Journal of Wind Engineering and Industrial*

Aerodynamics, **46&47**, 327-338
14）久原和博・橋場豊勝・小酒井 徹・江崎 聡（1998）：牟呂松原頭首工の改築に伴う魚道機能の向上，水の技術，2，18-24
15）本田隆秀・林田寿文・萱場祐一（2003）：階段式魚道における魚類の遊泳行動実験から見た魚道形状・構造に対する一考察，全国魚道実践会議 2003in 岐阜，143-150
16）板垣 亘（2002）：これからの魚道の水理設計，農業土木学会誌，70（6），57
17）泉 完・工藤 明・東 信行・佐藤正一（2000）：ハイブリッド式魚道のプールタイプの流況におけるウグイの遡上行動実験，河川技術に関する論文集，6，131-136
18）泉 完・高屋大介・工藤 明・東 信行（2002）：アイスハーバー型魚道における魚類の隔壁遡上特性，農業土木学会論文集，217，55-63
19）泉 完・菅原賢治・工藤 明・東 信行（2004）：バーチカルスロット型魚道におけるアメマスの現地放流実験，農業土木学会誌，72（7），45-50
20）泉 完・矢田谷健一・東 信行・工藤 明（2006）：河川流下水を用いたスタミナトンネルによるウグイの突進速度について，農業土木学会論文集，244，171-178
21）梶島岳夫（1999）：乱流の数値シミュレーション，養賢堂
22）柏井条介・村岡敬子・田中和浩（1994）：階段式魚道の水理特性，土木技術資料，36（11），32-37
23）小垣哲也・小林敏雄・谷口伸行（1999）：非圧縮性乱流数値解析に適した一般座標系差分スキーム（第 1 報，座標変換後の基礎方程式の解析的保存特性と適切な差分スキームの一般座標への拡張），日本機械学会論文集（B 編），65（633），55-63
24）功刀資彰（1997）：自由界面を含む多相流の直接数値解析法，日本機械学会論文集（B 集），63（609），88-96
25）Koshizuka, S., Tamako, H., Oka, Y.（1995）: A particle method for imcompressible viscous flow with fluid fragmentation, *Computational Fluid Dynamics JOURNAL*, **4(1)**, 29-46
26）小山長雄（1986）：魚道の診断と設計，信教印刷
27）Kumar, G. S., Nago, H., Maeno, S., Hoshina, T.（1995）: Hydraulics of ice harbor type fishway, *Proceeding of the International Symposium on Fishway '95 in Gifu*, 79-86
28）前野詩朗・尾上博則・宮内洋介（2001）：VOF 法による階段式魚道の流れの数値解析，水工学論文集，45，421-426
29）前野詩朗・小川 信（2002）：プールタイプ魚道の流れの数値解析，水工学論文集，46，421-426
30）村上周三・持田 灯・林吉彦（1988）：*k-ε* モデルにおける建物風上の *k* の過大評価とモデルの改良，第 10 回風工学シンポジウム，199-204
31）村上周三・持田 灯・近藤宏二（1995）：改良 *k-ε* モデルによる 2 次元建物モデル周辺気流の数値計算，生産研究，47（2），107-111
32）中村俊六・高嶋信博・木村 博（1987）：階段式魚道内の流況に関する実験について，農業土木学会誌，55（10），11-16
33）中村俊六（1995）：魚道のはなし，山海堂
34）浪平 篤・後藤眞宏・常住直人（2005）：台形堰上の潜り越流の数値解析，水工学論文集，49，799-804
35）浪平 篤（2006）：階段式魚道の設計技術の向上，平成 17 年度 農業工学研究所 水工研究会，53-69
36）浪平 篤・後藤眞宏・小林宏康（2006a）：一般座標系における VOF 法を用いた階段式魚道内の流況の数値解析，農業土木学会論文集，242，57-65
37）浪平 篤・後藤眞宏（2006b）：階段式魚道における汎用的な流況予測のための数値解析手法，応用力学論文集，9，833-841
38）浪平 篤・後藤眞宏・常住直人（2006c）：隔壁頂部が傾斜型の階段式魚道における流況の数値解析と表面流の発生条件，農業土木学会論文集，246，189-196
39）浪平 篤・後藤眞宏・小林宏康（2007）：階段式魚道における流量変化に伴うプール毎の流況およびウグイの遡上行動，水工学論文集，51，1291-1296
40）農業土木学会（1990）：農業土木工事図譜 第 4 集 頭首工編，農業土木学会
41）農林水産省構造改善局（1997）：基幹水利施設整備状況調査結果 全国編，農林水産省構造改善局
42）鬼束幸樹・秋山壽一郎・浦 勝（2004）：水位差の大きな階段式魚道に設置されたスロープが遡上率に及ぼす効果，水工学論文集，48，1579-1584
43）鬼束幸樹・秋山壽一郎・木内大介・川良典彰（2005）：階段式魚道におけるプランジングフローとストリーミングフローの発生条件に関する研究，水工学論文集，49，817-822
44）鬼束幸樹・秋山壽一郎・飯國洋平・木内大介・高橋康行（2006）：片側切り欠き付き階段式魚道におけるアスペクト比および流量が魚の遡上特性に及ぼす影響，応用力学論文集，9，865-873
45）小国 力編著（1991）：行列計算ソフトウェア，丸善株式会社
46）Phillips, N. A.（1957）: A cordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *Journal of Meteorology*, **14**, 184-185
47）Rajaratnam, N., Katopodis, C., Mainali, A.（1988）:Plunging and streaming flows in pool and weir fishway, *Journal of Hydraulic Engineering*, **114(8)**, ASCE, 939-944
48）榊山 努・鹿島遼一・阿部宣之（1991）：傾斜堤周辺の波動場解析へのポーラスモデルの適用性，海岸工学論文集，38，546-550
49）須賀堯三編著（1990）：水理模型実験，山海堂
50）諏訪好英・細野成一・林 秀郎（1995）：らせん魚道のプール内流況に関する数値シミュレーション，国際魚道会議 '95 ぎふ，87-92
51）鈴木興道（1999）：魚道の設計に資する淡水魚類の耐久遊泳速度，土木学会論文集，622/ Ⅶ -11，107-115
52）高嶋信博・中村俊六（1984）：魚道内のアユの挙動に関する実験的研究，水理講演会論文集，28，353-358
53）高須修二・箱石憲昭・村岡敬子・田中和浩・尾嵜佳史（1994）：階段式魚道の水理特性に関する研究，水工学論文集，38，

351-356

54）竹下祐輔（2004）：紀の川水系における魚道の調査設計について，平成 16 年度近畿地方整備局管内技術研究発表会論文集，
http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/kannai2004/04/11.pdf

55）塚本勝己・梶原 武（1973）：魚類の遊泳速度と遊泳能力，水産土木，10（1），31-36

56）Tsukamoto, K., Kajihara, T., Nishiwaki, M.（1975）: Swimming Ability of Fish, *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, **41(2)**, 167-174

57）Viecelli, J. A.（1971）: A Computing Method for Incompressible Flows Bounded by Moving Walls, *Journal of Computational Physics*, **8**, 119-143

58）和田 清・東 信行・中村俊六（1998）：デニール式およびスティープ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，42，499-504

59）和田 清・小出水規行・石川雅朗・中村俊六（1999）：修正ラリーニア型舟通し魚道の流れ場と稚アユの遡上経路，水工学論文集，43，983-988

60）和田 清・小出水規行・今村和志（2004）：長良川河口堰「せせらぎ魚道」における密度流の特性とモクズガニの着底・生息分布，水工学論文集，48，1585-1590

61）和田吉弘（1990）：アユの遡上と魚道構造の関係，ダム技術，39，34-42

62）和田吉弘（1993）：魚道実物大模型実験による遡上特性，長良川のアユづくり（第二部 研究論文集），治水社，114-138

63）和田吉弘（2003）：言いたい放題 魚道見聞録，山海堂

64）Yabe, T., Wang, P. Y.（1991）: United Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Flow, *Journal of Physical Society of Japan*, **60(7)**, 2105-2108

65）Yee, H. C.（1986）: Linearized form of implicit TVD schemes for the multidimensional Euler and Navier-Stokes equations, *Computers & Mathematics with Applications*, **12A**, **4/5**, 413-432

66）米山 望・松山昌史（1997）：自由液面解析コード（FRESH-FV）を用いた津波遡上解析，海岸工学論文集，44，266-270

Studies on Design of Pool-and-Weir Type Fishway Focusing Flow Structure in the Fishway

NAMIHIRA Atsushi

Summary

Recently, consideration to harmony with the ecosystem is strongly requested. In headworks that are indispensable to the agricultural production of our country, the importance of fishway has increased very much. It is common that pool-and-weir type fishway is more suitable for upstream migration of fishes in a lot of types, because the energy of the flow is dissipated enough and the flow structure become comparatively simple in this type if it is designed adequately. However, there are some cases in which this type does not function fully in the field due to inadequate design. Threfore, the objective of this study was to establish the design of pool-and-weir type fishway which fulfills its merit more, provided that the structure in which the weir walls has no noch and orifice was target, because even this most simple structure has not been studied enough either.

First of all, relationship between the flow structure and the swimming behavior of *Leuciscus hakonensis* in individual pool of pool-and-weir type fishway under a variety of discharge conditions were clarified by observations using a full-size hydraulic model composed of three pools.

Next, new numerical analysis methods based on computational fluid dynamics were established for pool-and-weir type fishway whish has weir walls with circular arc shaped crown and pool-and-weir type fishway whish has weir walls with inclined crown. From a comparison with experimental measurements, it was clarified that these two methods can become accurate, efficient, general prediction procedures of the flow structure in pool-and-weir type fishway for its design and these are more accurate than existing methods.

It is assumed that these a series of study results can improve the possibility to design pool-and-weir type fishway in which its merits function more fully than ever, and make this type more widely applied. In addition, these results are expected to contribute to not only constructing new one but also evaluating the performance of existing one and rehabilitating it, because most of existing fishways is this type in our country.

Keywords: pool-and-weir type fishway, flow structure, *Leuciscus hakonensis*, swimming behavior, computational fluid dynamics