密度関数法を用いた階段式魚道における魚の挙動の3次元シミュレーション

3D-NUMERICAL SIMULATION OF FISH MOVEMENT IN A POOL AND WEIR TYPE FISHWAY USING DENSITY FUNCTION METHOD

藤井真一[1]・木村一郎[2]・清水康行[3]・清治真人[4]
Shinichi FUJII, Ichiro KIMURA, Yasuyuki SHIMIZU and Masato SEIJI

[1]学生員　北海道大学大学院工学研究科（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）
[2]正会員　工博　北海道大学大学院工学研究科　准教授（同上）
[3]正会員　工博　北海道大学大学院工学研究科　教授（同上）
[4]正会員　財団法人北海道科学技術総合振興センター（〒100-0005 東京都千代田区丸の内3-2-2）

This paper presents a numerical model, which has been developed to compute fish movement in three-dimensional free surface flow induced by habitat structures. From the engineering and biological view point, it is important to understand flow behavior induced by habitat structures and their effect on the fish movement. Three-dimensional flow field with free surface flow condition has been computed herein using a density function method. This method is shown to be more flexible and efficient than other methods for treating complicated free boundary configurations. It is found that motion of the fishes somewhat possesses some specific characteristics. We set characteristics of fish movement and its interaction with flow in our computation based on some previous investigations. The model proposed herein reproduces successfully the free surface flow and the fish movement concurrently in a pool-and-weir-type fishway in Tokachi River, Japan.

Key Words : *density function method, 3D CFD model, pool-and-weir-type fishway, fish movement*

1．はじめに

これまでわが国では洪水や水需要といった問題から，ダムや堰といった河川横断施設が作られてきた．しかしながら，このような施設ができると，河川の上下流方向への連続性が断たれる．魚道は，そのような障害物においても魚の遡上が可能となる特別な水路や装置を設けた魚の通り道である．現在，魚道は水理実験やモニタリング調査などの結果を踏まえて設計がされているが，工学的・生物学的観点から，より効果的な魚道設計法の確立が求められる．水理実験では，一つ一つの魚道の流れを再現するには高額な費用を要し，また魚の動きを実験的に追求することは難しい．よって，本研究では現在高精度化が成され，様々な分野で用いられている数値流体力学的手法によって，これらの再現計算を試みる．

大橋・清水[1]は平面二次元流れのもと，魚道内における魚の挙動を数値計算により解析した．また，Fujiiら[2]は鉛直二次元のもと、VOF(Volume of fluid)法を用いて，

図-1　千代田新水路における階段式魚道の流況

階段式魚道の自由水面流れと魚の挙動の数値解析を行った．これらの研究では，魚道内遡上過程のシミュレーションモデルが提案されているが，魚道内の流れは隔壁や穿孔などの影響により，三次元性が強く，二次元での

流れの計算では再現が難しい．そこで本研究では，これらの研究を更に拡張し，三次元流れのもとで，自由水面流れを計算し，その流れの中での魚の挙動を魚の遊泳特性に基づき，数値計算によって求める試みを行った．

本研究ではまず，魚道や津波のような自由水面の大変形を精度良く再現可能であるとされている密度関数法と呼ばれる手法を用いて，**図-1**の十勝川にある千代田新水路の階段式魚道において，流れの再現計算を行った．密度関数法は，複雑で大規模な自由水表面問題に対して有力な手法の一つであるが，数値拡散により気液界面のぼやけが生じ，その結果として体積保存性に問題が発生する．そこで，朝位・坪郷[3]によって提案されている体積補正法を用い，安定に長時間の自由水表面流れの計算を可能とした．用いる乱流モデルとしては，標準型線形k-εモデルと，二次非線形k-εモデルとする．実験結果をもとに，各モデルの妥当性を検証する．

また，流れの計算を行った後に，魚の遊泳特性に基づき，魚の挙動の計算を行った．魚の動きは，魚の遊泳特性の中でも特に重要な，流れに平行に泳ぐという性質から主に予測がなされる．しかしながら，刻一刻と変化するような流れの中で，魚は向きや遊泳速度を変えるため，魚の挙動を理解することは困難である．そこで本研究では，各地点での流れの計算結果を基に，魚の位置での流速を導き，流れの向きに平行に魚の遊泳方向を決定し，流速と遊泳速度の関係式から遊泳速度を求めた．

２．流れの数値解析

(1) 数値解析法

a) 基礎式

三次元解析の基礎式として，以下の非圧縮性流体に対する連続式，運動方程式，k-ε方程式を用いた．

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+\frac{\partial U_j U_i}{\partial x_j}=g_i-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial\left(-\overline{u_i u_j}\right)}{\partial x_j}+\nu\frac{\partial^2 U_i}{\partial {x_j}^2} \tag{2}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial k U_j}{\partial x_j}=-\overline{u_i u_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\varepsilon+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\frac{D_t}{\sigma_k}+\nu\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right\} \tag{3}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial \varepsilon U_j}{\partial x_j}=-C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\overline{u_i u_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\frac{D_t}{\sigma_\varepsilon}+\nu\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right\} \tag{4}$$

ここに，x_i：空間座標，t：時間，U_i：流速，p：圧力，u_i: 乱れ速度，ν: 動粘性係数，ρ: 流体の密度，k: 乱れエネルギー，ε：乱れエネルギー散逸率，D_t：渦動粘性係数を表わす．添え字i, jは1,2,3の値をとり，それぞれ1はx方向，2はy方向，3はz方向を表わす．また，添え字i, jに関しては総和の規則を用いている．式(3), (4)中のモデル定数については，一般にσ_k=1.0,σ_ε=1.3,$C_{\varepsilon 1}$=1.44, $C_{\varepsilon 2}$=1.92が用いられる．

b) 密度関数法

密度関数法では，以下に示す密度関数（$0\le\Phi\le 1$）の保存則を解く．

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}+\nabla\cdot(u\Phi)=0 \tag{5}$$

ここで，Φは密度関数である．この関数は液相で1を，気相で0を，気液界面で0.5の値をとる．

密度関数Φと密度ρおよび粘性係数μの関係は次式を用いる．

$$\rho=\Phi\rho_{Liq}+(1-\Phi)\rho_{Gas} \tag{6}$$

$$\mu=\Phi\mu_{Liq}+(1-\Phi)\mu_{Gas} \tag{7}$$

ここに，ρ_{Liq}は液相の密度，ρ_{Gas}は気相の密度，μ_{Liq}は液相の粘性係数，μ_{Gas}は気相の粘性係数である．

c) 乱流モデル

標準型線形k-εモデルと，二次非線形k-εモデルを用いる．

・ <u>標準型線形$k-\varepsilon$モデル</u>

レイノルズ応力を次のように与える．

$$-\overline{u_i u_j}=\nu_t S_{ij}-\frac{2}{3}k\delta,\ S_{ij}=\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i},\nu_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

・ <u>二次非線形k-εモデル</u>

レイノルズ応力を次のように与える[4]．

$$-\overline{u_i u_j}=\nu_t S_{ij}-\frac{2}{3}k\delta_{ij}-\frac{k}{\varepsilon}\nu_t\sum_{\beta=1}^{3}C_\beta\left(S_{\beta ij}-\frac{1}{3}S_{\beta\alpha\alpha}\delta_{ij}\right),\quad i,j=1,2,3 \tag{9}$$

$$S_{ij}=\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i},\ \nu_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon},\ S_{1ij}=\frac{\partial U_i}{\partial x_r}\frac{\partial U_j}{\partial x_r},$$

$$S_{2ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_r}{\partial x_i}\frac{\partial U_j}{\partial x_r}+\frac{\partial U_r}{\partial x_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_r}\right),\ S_{3ij}=\frac{\partial U_r}{\partial x_i}\frac{\partial U_r}{\partial x_j}$$

上式は，より一般的なPope[5]の表現と等価である．式(9)中のモデル係数C_1, C_2, C_3, C_μについては，ストレイン・パラメータSとローテイション・パラメータΩの関数として次のように与える．

$$C_1=0.4f_M(M),\quad C_2=0,\quad C_3=-0.13f_M(M) \tag{10a}$$

$$f_M(M)=(1+0.01M^2)^{-1},\ \mathrm{M=max[S,\Omega]} \tag{10b}$$

$$C(M)_\mu=\min\left(0.09,\ 0.3/(1+0.09M^2)\right) \tag{11}$$

$$S=\frac{k}{\varepsilon}\sqrt{\frac{1}{2}S_{ij}S_{ij}}\ ,\Omega=\frac{k}{\varepsilon}\sqrt{\frac{1}{2}\Omega_{ij}\Omega_{ij}}\ ,\ \Omega_{ij}=\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\frac{\partial U_j}{\partial x_i} \tag{12a,b}$$

d) 計算方法の概要

計算法は直交格子系の有限体積法とし，完全スタガード格子系を用いる．運動方程式の移流項にはQUICKを，kおよびε方程式の移流項にはHybrid法を用いる．時間積分は完全陽解法とし，二次のAdams Bashforth法を用いる．圧力については，SOLA法に従い各時間ステップごとに連続式を満たすよう収束計算により求めた．

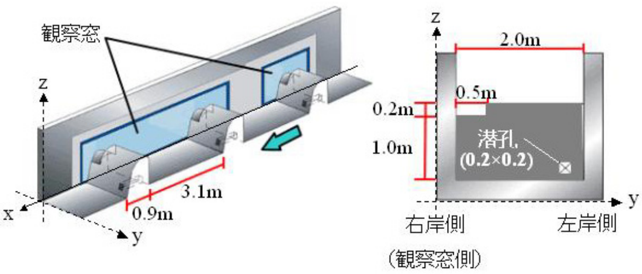
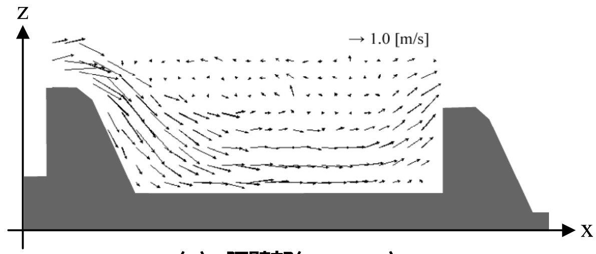
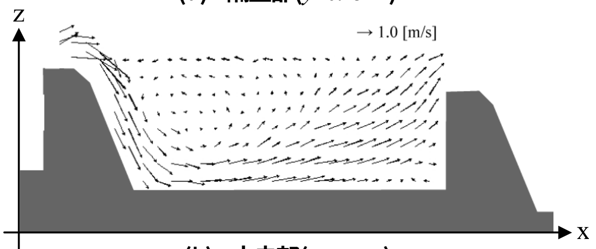


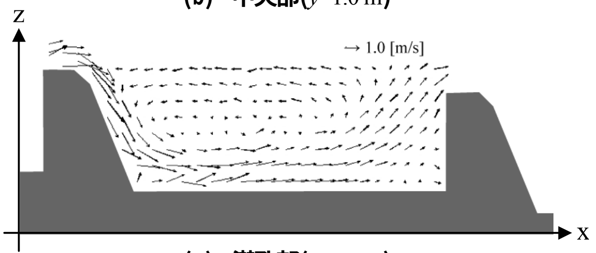
図-2　魚道の形状



(a)　隔壁部(y=0.25 m)



(b)　中央部(y=1.0 m)



(c)　潜孔部(y=1.7 m)

図-3　実験による流速分布

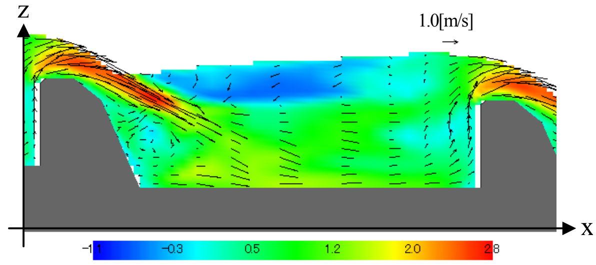
(2) 計算水路

計算水路は，十勝川の千代田新水路にある階段式魚道を用いる．**図-2**に計算に用いる魚道の形状を示す．

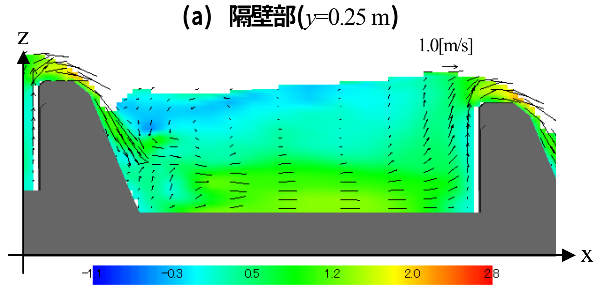
水路幅は2.0m，プール長は3.1m，隔壁長は0.9m，および勾配は1/20である．

(3) 計算条件

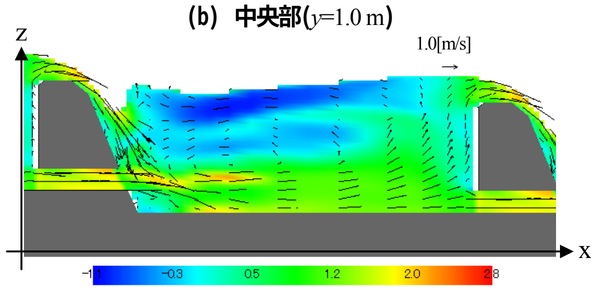
千代田新水路の魚道では，流量は0.09~0.98m^3/sと想定されているが，本研究では，最大流量である0.98m^3/sの場合の計算を行った．魚道延長は約100mであり，同じ形状の魚道が連続的に続くことを考慮して，プール１個分の領域4m（プール長3.1m＋隔壁長0.9m）を計算対象とし，上流端及び下流端の境界条件には，周期境界条件を与え，底面および壁面の抵抗は対数則で評価した．計算グリッドはx方向に80個，y方向に30個及びz方向に50個とし，格子間隔が0.05m~0.2mの可変グリッドで区切った．



(a)　隔壁部(y=0.25 m)

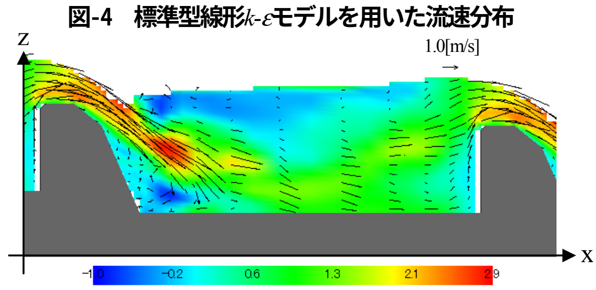


(b)　中央部(y=1.0 m)

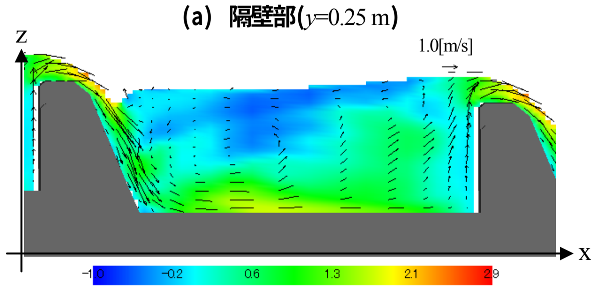


(c)　潜孔部(y=1.7 m)

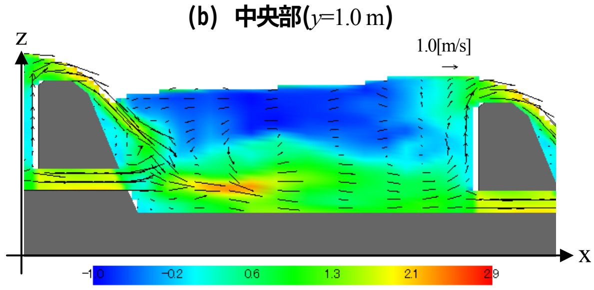
図-4　標準型線形k-εモデルを用いた流速分布



(a)　隔壁部(y=0.25 m)



(b)　中央部(y=1.0 m)



(c)　潜孔部(y=1.7 m)

図-5　二次非線形k-εモデルを用いた流速分布

(4) 流速の計算結果

図-3に，3分の1スケールで行った実験を，現地スケールに修正した後の流速を示した．流速は，電磁流速計により計測がされた．また，**図-4**に線形モデル，**図-5**に非線形モデルを用いた際の流速の計算結果を示した．計算結果を実験結果と比較すると，実験結果は隔壁からの越流水がプール底まで潜り込む落下流状態になっており，線形モデルと非線形モデルの計算結果も同様に落下流状態を再現することができた．この結果から，線形モデルと非線形モデルの計算結果を比較すると，非線形モデルを用いた計算結果の方が，線形モデルを用いた場合よりも，隔壁からの越流水がプール底に向かってより深く潜り込んでおり，再現性が若干向上することが確認された．

3．魚の遊泳計算

魚の遊泳にはいくつかの特徴がある．中村[7]，廣瀬ら[8]，板沢ら[9]，および竹内ら[10] によって紹介されている魚の遊泳特性を考慮し，以下のようにして計算を行った．

(1) 遊泳計算法

a)遊泳方法

魚は体の側面方向への流れに弱いので，常に体を流れと平行に保ちながら遡上しようとする．また，流れの急な場所を遡上しようとする時，堰の直下や直上といった自然にあらざる特殊な状況下では，魚は自らの体長の流さ分しか，流れを認識できなくなるのではないかと想定されている．そこで，本研究では魚は流線に平行に遡上するよう計算をした．

b) 魚の持つ筋肉

魚は普通筋と血合筋という二種類の筋肉を持っている．血合筋は，酸素が供給され続ける限り働き続ける筋肉である．それに対して，普通筋は数秒程度しか使えない筋肉であり，危険からの逃避や，急流遡上などの緊急時に血合筋と併用して使われる．

普通筋は数秒間使用可能とされているが，詳しい時間は不明である．今回は計算ツールの確立を目指しているため，正確なデータ収集は後に行うが，本研究では普通筋の使用可能時間は最大5秒間として計算をした．

c) 遊泳速度

魚の遊泳速度は，現在では持続速度，中間速度および突進速度の3つに分類する考え方が定着している．持続速度は血合筋の活動により理論的には疲労することなく泳ぎ続けられる低速遊泳で，中間速度は血合筋を主体として普通筋が徐々に使用され始める段階で，突進速度は普通筋による瞬間的な高速遊泳と定義される．魚の遊泳速度は魚の体長に比例すると言われており，紡錘形の魚種では，最大持続速度は魚の体長をL(m)とすると，3×L(m/sec)，突進速度は10×L(m/sec)と定義される．

魚は流速に合わせて，血合筋と普通筋とを使い分け，

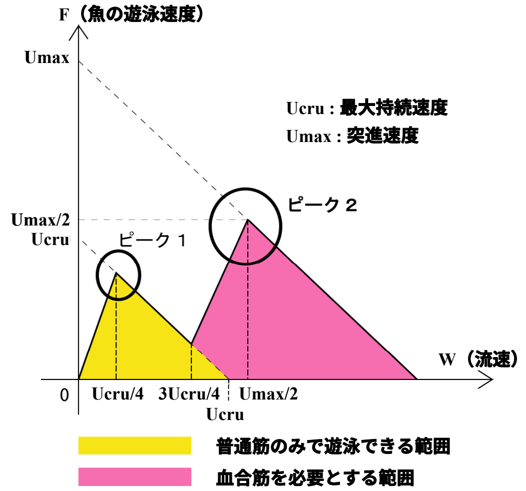


図-6　魚の遊泳速度と流速の関係

遊泳速度を変える．魚の遊泳速度と流速の関係は大橋・清水ら[1)]によるものと同様の方法で求めたが，魚の遊泳速度と流速の関係をより正確に再現するために，**図-6**のようにデータを一部改正した．それにより，魚の遊泳速度と流速の関係は以下の式で表される．

$$W \le \frac{U_{cru}}{4} \Rightarrow F = 3W \tag{13}$$

$$\frac{U_{cru}}{2} < W < \frac{3}{4}U_{cru} \Rightarrow F = U_{cru} - W \tag{14}$$

$$\frac{3}{4}U_{cru} < W \le \frac{1}{2}U_{\max} \Rightarrow \frac{1}{4}U_{cru} + \left(\frac{2U_{\max} - U_{cru}}{2U_{\max} - 3U_{cru}}\right)\left(W - \frac{3}{4}U_{cru}\right) \tag{15}$$

$$W \le \frac{U_{\max}}{2} \Rightarrow F = U_{\max} - W \tag{16}$$

ここでF, Wはそれぞれ，魚の速度の大きさおよび流れの速度の大きさであり，以下の式で表される．U_f, V_f, W_f, U_w, V_w, W_wをそれぞれ魚のx方向の速度，y方向の速度，z方向の速度，流れのx方向の速度，y方向の速度，およびz方向の速度とする．

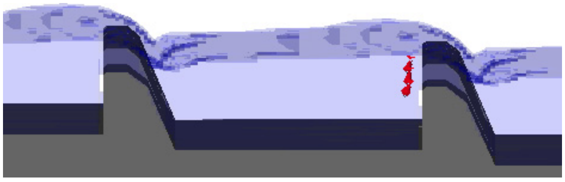
$$F = \sqrt{U_f^2 + V_f^2 + W_f^2} \tag{17}$$

$$W = \sqrt{U_w^2 + V_w^2 + W_w^2} \tag{18}$$

d) 魚の初期条件

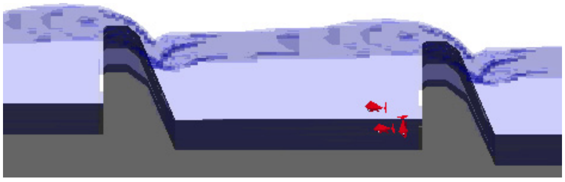
本研究では，十勝川で比較的広範囲に生息しているウグイを想定して計算を行い，その体長を25cmに設定した．よって**c)**の定義から，最大持続速度U_{cru}は，3×L(m/sec)すなわち0.75(m/sec)，突進速度U_{max}は10×L(m/sec)すなわち2.5(m/sec)とした．

計算する魚の数は3匹とし，現地計測結果と比較するため，プールの下流側に等間隔(y=0.3, y=1.0, y=1.7)に並べて計算を開始した．魚の遊泳計算に用いる流速は，二次非線形k-εモデルを用いた流速結果を用いた．

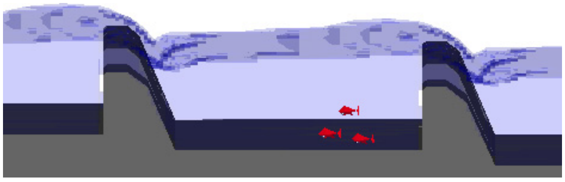


(a)t=0.0sec

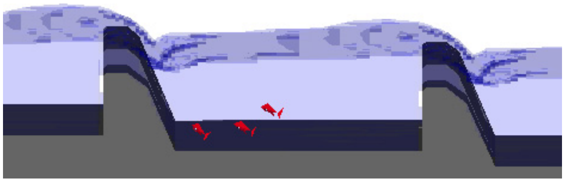
(b)t=0.4sec



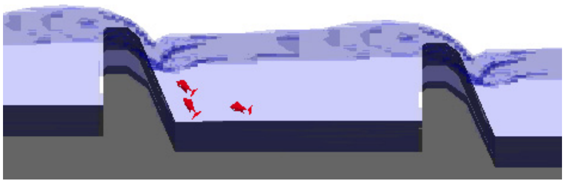
(c)t=2.0sec



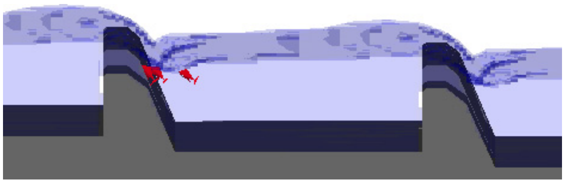
(d)t=3.0sec



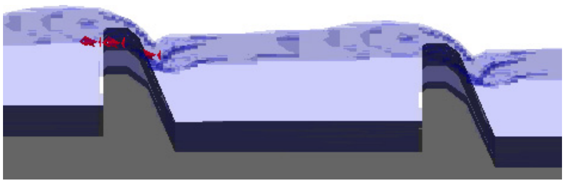
(e)t=5.0sec



(f)t=6.0sec

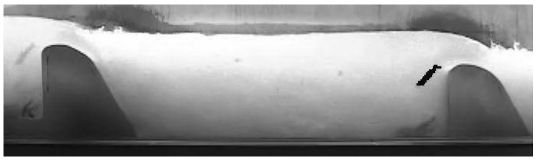


(g)t=7.0sec

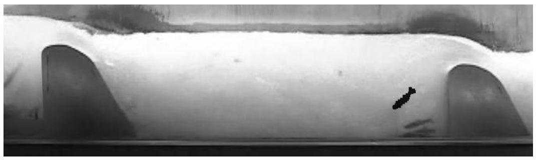


(h)t=8.0sec

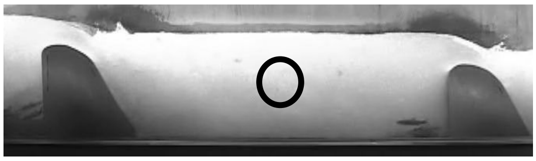
図-7　計算による魚の挙動



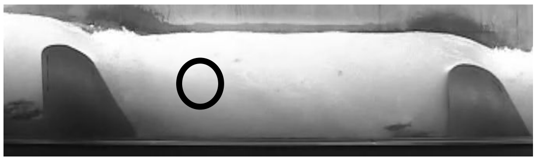
(a)t=0.0sec



(b)t=0.4sec



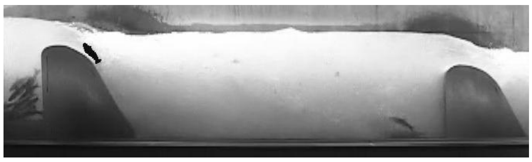
(c)t=2.0sec（魚は見えない）



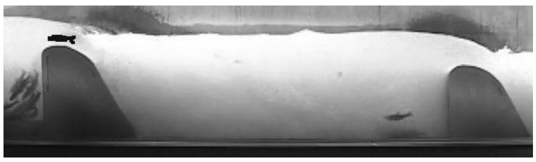
(d)t=3.0sec（魚は見えない）

(e)t=5.0sec

(f)t=5.2sec



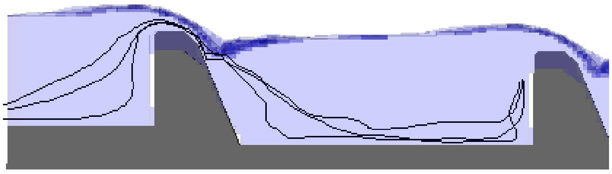
(g)t=5.4sec



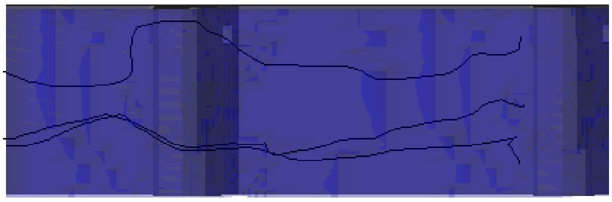
(h)t=5.6sec

(i)t=5.8sec

図-8　実際の魚の挙動



(a)横から見た図



(b)上から見た図

図-9　計算による魚の軌跡（魚は右端が初期位置）

(2) 魚の挙動の計算結果

以上に述べた方法により自由水面流れと，魚の遊泳についての数値計算を行い，**図-7**，**図-8**および**図-9**にその結果を示した．

図-7には，**a)t=0.0sec，b)t=0.4sec，c)t=2.0sec，d)t=3.0sec，e)t=5.0sec，f)t=8.0sec，g)t=12.0sec，h)t=16.0sec**における横（斜め上方）から見た魚の挙動の計算結果を示した．可視化をする際，見やすさのため，魚の色は赤色に設定している．**図-8**は，**a)t=0.0sec，b)t=0.4sec，c)t=2.0sec，d)t=3.0sec，e)t=5.0sec，f)t=5.2sec，g)t=5.4sec，h)t=5.6sec，i)t=5.8sec**における現地観測結果であり，横から見た天然の魚の挙動を示した．**図-9**では，数値計算による魚の挙動の軌跡を**(a)上から見た図**および**(b)下から見た図**で示している．

図-5の流れの計算結果と**図-9**に示した魚の挙動を比較すると，魚は流れと並行に遊泳していることがわかる．また，**図-8**における天然の魚の挙動も，**図-3**の実験結果と比較して，流れと並行に遡上していることが確認できた．これらにより，魚は流れと平行に泳ぐという定義を計算に組み込むことで，魚の挙動をある程度再現できることがわかる．

今回の計算では流れの流速結果がよく再現されており，魚の挙動の数値計算においても，実際の魚の挙動と比較して，似かよった挙動を再現することができた．今後魚の遊泳計算モデルの改良を進めていくことにより，流れと魚の挙動を同時に捉えられる本手法は，魚道の最適な設計において有効なツールになりうると考えられる．

4．まとめ

本研究では，魚の挙動を考慮した三次元自由水面解析モデルの構築を目的に，千代田新水路の階段式魚道における自由水面流れと魚の挙動の計算を行い，実験結果との比較を行った．本研究で得られた結果を以下に列挙する．

(1) 計算によって得られた流速結果を実験結果と比較すると，非線形乱流モデルを用いた計算結果は，実験結果と同様落下流状態になっており，流速の大きさや向きも比較的近い値を示すことがわかった．しかしながら，線形乱流モデルの計算結果は，表面流状態に近い流況となった．線形乱流モデルより，非線形乱流モデルを用いた計算結果の方が，より実験結果と近い計算結果を示すことが確認できた．

(2)魚の挙動は，実験および数値計算結果の双方において，流れと平行に泳いでいることが，流速結果と比較して確認することができた．数値計算による魚の挙動は，実験結果と比較すると，十分な精度で再現されているとは言い難いが，三次元的に流れに平行に遡上する魚の挙動をシミュレーションするモデルの構築には成功した．

今後，実魚道での魚の挙動をさらに収集し，計算結果との比較を行い，計算に必要となる魚の遊泳特性を明らかにしたい．また，今回対象魚としたウグイには魚群行動が知られており，そういったモデルを今後計算に組み込むことで，より現実的な魚の挙動を再現するモデルを構築したいと考える．これらの点の検討・改善を進めていくことにより，効果的，経済的な魚道を設計するための計算ツールの確立を目指したい．

参考文献

1) 大橋弘道，清水康行：数値計算による魚道内における魚の挙動の解析，水工学論文集，第48巻，2004.
2) Fujii, S., Shimizu, Y. and Giri, S: Numerical simulation of free surface flow and fish movement in a fishway, Proceedings of the international conference on fluvial hydraulics, river flow 2008, Cesme, Izmir, Turkey, Vol.3, pp.1945-1951, 2008.
3) 朝位孝二，坪郷浩一：密度関数法による自由水表面流れ解析のための体積補正法に関する研究，水工学論文集，第49巻，pp.697-702, 2005.
4) Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear k-ε model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, Int. J. for Numerical Methods in Fluids, Vol.42, pp.813-837, 2003.
5) Pope, S.B. : A more general effective viscosity hypothesis, J. Fluid Mech., Vol.72, pp.331-340, 1975.
6) 木村一郎，細田尚，音田慎一郎：橋脚による堰き上げ効果の再現性に着目した数値解析モデルの比較，水工学論文集，Vol.49，pp.559-564, 2005.
7) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.
8) 廣瀬利雄，中村中六：魚道の設計，山海堂，1994.
9) 板沢靖男，羽生功：魚類生態学，恒星社厚生閣，1991.
10) 竹内俊郎，中田英昭ら：水産海洋ハンドブック，生物研究社，2004.

(2008.9.30受付)