土木学会論文集 No. 768／II-68, 55-66, 2004. 8

実際の魚体運動を反映した魚周辺の流動シミュレーション

二瓶泰雄[1]・福永健一[2]・小澤喜治[3]

[1]正会員　博（工）　東京理科大学助教授　理工学部土木工学科（〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641）
E-mail: nihei@rs.noda.tus.ac.jp

[2]非会員　修（工）　オリジナル設計㈱　東関東支店（〒336-0011　埼玉県浦和市高砂 4-3-15）

[3]学生員　学（工）　東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻
（〒152-8552　東京都目黒区大岡山 2-12-1）

実際の魚体運動データを反映しつつ，複数尾の魚周辺の流動計算に適用可能な数値モデルを開発することを試みた．まず，室内実験により静水中を遊泳する魚体運動をビデオ撮影し，その画像データを用いて魚体運動抽出のための画像解析手法を構築した．次に，得られた魚体運動データを用いて，矩形座標系に基づく１尾及び２尾の魚周りの流動計算を実施した．この結果，尾鰭の波状運動や魚体全体の大変形，魚の遊泳方向変化に伴い，魚周辺から渦層が剥離して魚後方にカルマン渦と逆の配置をしている渦列が形成された．それらと連動して，魚体周囲の圧力分布が大きく変化して前方推進力や抵抗力が生じていることが示された．また，これらの流動計算結果を用いて，魚個体間における流体力学的な相互作用特性について検討した．

Key Words: *fish behavior, fluid force, numerical simulation, image processing*

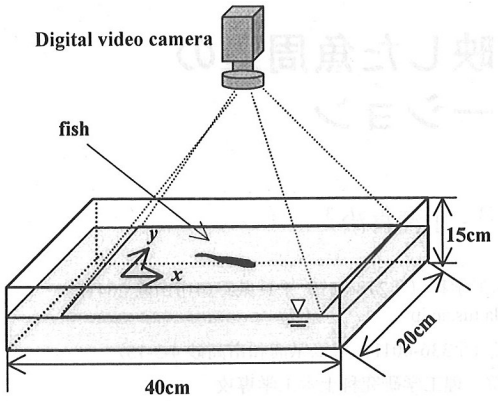
1．緒言

水産資源確保や魚類生息環境の保全に配慮した形で河川管理・整備を推進するためには，河川内における魚類生息環境を定量的に評価・予測し得る研究手法の開発が必要となる．このような河川生態環境評価手法としては，流速や水深等の環境要素を用いて魚類生息環境を算定するモデル（例えば，流量増分式生息域評価法 IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) [2)~5)]）や１尾１尾の魚の運動を解析する魚群行動モデル[6)~9)]が挙げられる．このうち後者に関しては，個々の魚の運動に対して運動方程式を立てて魚の速度や位置を求めるものであり，魚の移動・回遊や魚個体間の相互関係，という IFIM では考慮されていない魚類行動特性を明示的に反映し得る形となっている．しかしながら，魚群行動モデルでは，魚に作用する力として考慮されている前方推進力や魚個体間干渉力等は数多くの経験的なパラメータを含む形で定式化されているので，魚群行動モデルを発展させるためには，魚に作用する力の定式化を高精度化・精緻化することが急務の課題となっている．

このような魚に作用する力のうち前方推進力や抵抗力という周囲流体から受ける力の物理的な発生メカニズムを把握するためには，魚周りの流動シミュレーションを実施することが有効である[10)~13)]．この CFD では，主として，周期的に振動する翼を魚体運動に見立てて，その振動翼周りの流れ場に関する数値計算を行い，魚体周りの渦構造や魚体に働く摩擦力や圧力の分布や総和について検討している．しかしながら，これらの流動シミュレーションでは，１）実際の魚体運動データを反映した数値解析例が極めて少ない，２）魚体形状にフィットする境界適合座標系を採用しているため，流れ場の境界形状が複雑な場合や魚群運動を対象とするケースへの適用は格子生成の問題に起因して困難である，といった問題点が挙げられる．特に，２）の問題に起因して，既存の魚周辺の流動計算では魚１尾を対象としたもののみであり，２尾以上の魚を対象とした計算例は著者の知る限りでは皆無である．

以上のような研究背景に基づいて，本研究では，実際の魚体運動データを反映しつつ，複数尾の魚周辺の流動計算への適用が可能な数値モデルを開発する．また，そのモデルに基づいて，静水中を遊泳する１尾及び２尾の魚周辺の流動シミュレーションを実施することを試みる．以下では，まず，室内実験により，静水中を遊泳する魚体運動に関してデジタルビデオカメラを用いて撮影し，そこで得られた画像に対して，別途構築された画像解析手法を用いて魚体の位置や速度，加速度を抽出する．次に，画像解析により得られた魚体運動データを入力データとして，魚周辺の流動シミュレーションを実施する．本モデルでは，座標系として境界適合座標系を用いずに矩形格子座標系を採用し

注）本論文は，既発表の結果[1)]にその後の研究成果を加え，まとめ直したものである．



図－１　室内実験の概略図

ており，魚群周辺の流動計算への適用が容易なものとなっている．この流動計算結果に基づいて，魚体の運動特性と魚周りの渦構造や流体力分布特性との関係について検討を行う．また，２尾の魚周辺の計算結果を用いて，魚個体間における流体力学的な相互作用特性を調べる．

魚周辺の流れ場は，本来三次元的な現象であり，そのような取り扱いを行う必要があるものの，本論文では，平面二次元場を対象として，魚体運動に関する画像解析や流動シミュレーションの手法や結果を示している．これまでの研究では，実際の魚体運動データを取り込んだ形で複数魚周辺の流動計算を行った研究例が皆無であり，また，二次元的な魚体運動により魚の推進力が生成されることが指摘されている[14), 15)]．これらの理由により，三次元流動計算を行う前段階として，平面二次元計算を実施する意義は十分高いものと考えられる．

２．魚体運動抽出のための画像解析手法の構築

（１）室内実験

後述する流動シミュレーションにおける魚体の位置や速度，加速度の時系列データを取得するために，静水中における魚の遊泳運動を対象とした室内実験を行う．ここでは，**図－１**に示すように，静水中を遊泳する魚体運動の様子を上方からデジタルビデオカメラ（SONY㈱，DCR－TRV900）により撮影する．デジタルビデオカメラの空間解像度は0.05cm，撮影時間間隔は1/30sである．実験条件としては水深5.0cm，静水状態とする．実験魚は，尾鰭や体の下半身部分を波状運動させることにより推進する，というアジ型推進[16)]の特徴を有しているタイリクバラタナゴ（Rhodeus ocellatus ocellatus）である．本実験における魚の数としては，１尾（case1）と２尾（case2）という２ケースを選定している．魚の寸法としては，１尾の場合（case1）では体長6.1cm，体高1.9cmであり，２尾の場合（case2）では一つは体長5.7cm，体高1.7cm，もう一つは体長5.6cm，体高1.7cmである．なお，本論文では**図－１**に示すようなx, y座標を定義し，各方向の魚体速度をu_f，v_f，加速度をα_{fx}，α_{fy}としている．

（２）魚体位置・速度・加速度抽出を目的とした画像解析手法

上記の室内実験により撮影された魚体運動の画像データをPC上に取り込み，最終的に水槽内における魚体の位置及び速度，加速度を抽出する．ここでは，a）濃度勾配を利用した魚体位置の抽出，b）魚体内の特徴的な点の抽出，c)魚体速度・加速度の算定，という手順に基づく魚体運動抽出のための画像解析手法を記述する．なお，以下では，魚１尾の場合（case1）の結果について述べるが，２尾の場合（case2）においても同様な手順を適用している．

a）濃度勾配を利用した魚体位置の抽出

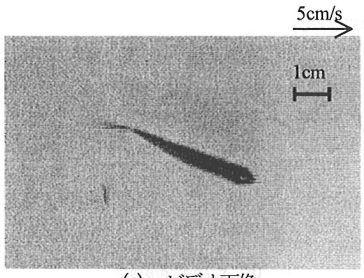
まず，**図－２（a）**に示されている撮影されたビデオ画像から魚体のみを抽出する．この画像には，魚とともに水槽底面等が含まれているので，このビデオ画像から魚体のみを抽出するためには，二値化処理を行う必要がある．そこで，まず，各画素の濃度値に対してある閾値を設けて二値化処理を行ったところ，魚の影や魚の糞などのゴミと，魚体部分，特に尾鰭を分離することが困難であることが判明した．そこで，ここでは，各画素の濃度の空間勾配に着目して，濃度勾配ベクトルの大きさを用いて二値化処理を行ったところ，**同図（b）**に示しているように，尾鰭を含めて魚体位置を概ね良好に抽出し得ることが分かる．

b）魚体内における特徴点の抽出

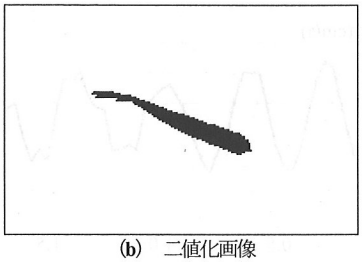
次に，魚体速度を算定するために，まず，魚体内における尾鰭先端部などのような特徴的な点をいくつか抽出し，それらをラグランジュ的に追跡することにより，魚体の速度を求めることとする．そこで，魚体内における特徴点としては，本実験で用いるタイリクバラタナゴの運動パターンが，上半身部分と下半身部分とで異なっているアジ型推進タイプであることを考慮して，**同図（c）**に示しているように，上半身部分にある頭先端と重心，下半身部分の尾鰭の付け根と尾鰭の先端，の計４点を選定している．二値化された魚体画像（**同図（b）**）を用いて，これらの特徴点を抽出する方法をそれぞれ以下に列挙する．なお，上述した特徴点は，本来，鉛直高さが異なる位置に存在しているものの，平面上の速度・加速度データを取得するために，便宜上，同一平面上に位置するものとして取り扱う．

＜尾鰭先端部＞

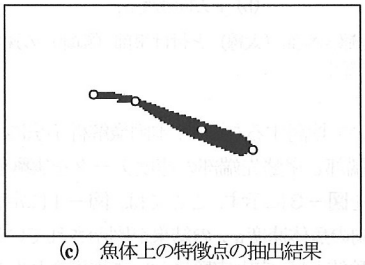
魚を上方より見た場合，水平面内における魚体輪郭線の曲率は，尾鰭先端部で最も大きくなるものと考えられる．このような輪郭線の曲率を利用して，尾鰭先端部を抽出する．実際には，二値化処理を行った画像より魚体の輪郭線



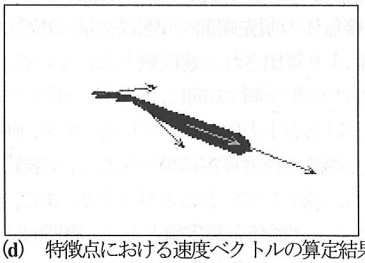
(a) ビデオ画像



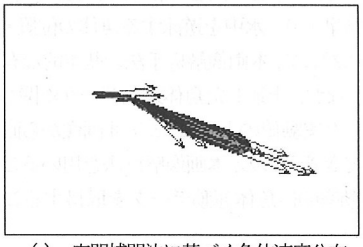
(b) 二値化画像



(c) 魚体上の特徴点の抽出結果



(d) 特徴点における速度ベクトルの算定結果



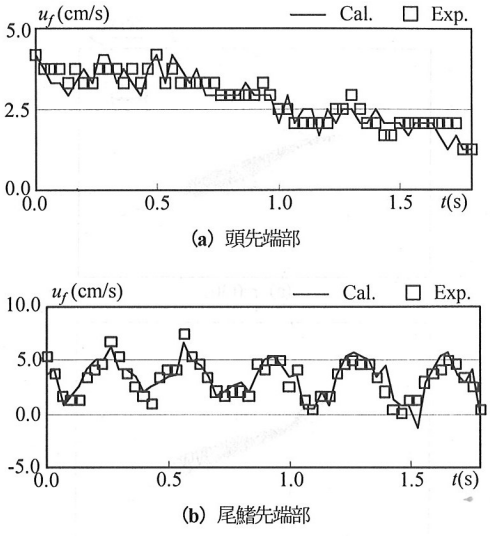
(e) 空間補間法に基づく魚体速度分布

図－2 画像解析による魚体位置・速度の算定結果の一例

を求め，この輪郭線に対する単位接線ベクトルを算出し，この接線ベクトルから輪郭線の曲率を算出する．

＜尾鰭付け根部＞

尾鰭付け根部の形状がくびれている，という特徴を利用して，尾鰭付け根部を抽出する．具体的には，①魚体中心線を二値化画像に対する細線化処理[17]により求め，②魚体中心線上の各画素から輪郭線までの最短距離 L を算出し，③この L の中心線方向に対する空間勾配の絶対値が最大となる点を尾鰭付け根部とする，という手順に従って尾鰭付け根部の位置を算定する．



(a) 頭先端部

(b) 尾鰭先端部

図－3 魚体速度に関する実験値（□印）と画像解析結果（実線）の比較（x 方向速度 u_f）

＜頭先端部＞

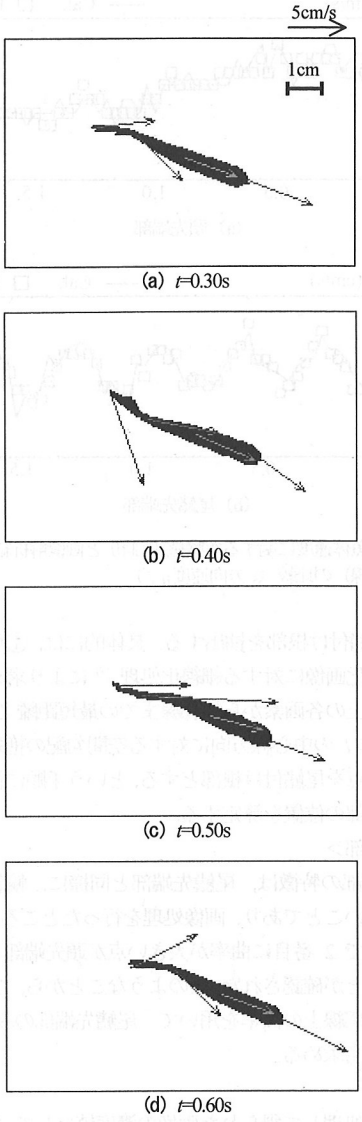
頭先端部の特徴は，尾鰭先端部と同様に，輪郭線の曲率が大きいことであり，画像処理を行ったところ，魚体の輪郭線上で 2 番目に曲率が大きい点が頭先端部と一致していることが確認された．このようなことから，ここでは，魚体の輪郭線上の曲率を用いて，尾鰭先端部のみならず，頭先端部も求める．

＜重心＞

二値化処理して得られた画像の濃度値として，魚体上は 1，それ以外の部分は 0 と定義する．このような濃度値より算出される重心位置を魚体の x-y 平面上の重心とする．

c）魚体速度・加速度の算定

上述した画像解析法により得られる魚体内における 4 つの特徴点をラグランジュ的に追跡して，特徴点上の速度 u_f，v_f を算出する．ここで用いる 2 時点における画像の時間間隔に関しては，より細かい魚体速度変動を捉えるためには，当然ながら，より短い時間間隔を設定することが望まれる．しかしながら，画像上の空間解像度と比べて，速度算定に用いる画像間の時間間隔内における魚体の移動距離が短い場合には，速度の算定精度が著しく低下する．このようなことから，魚の移動速度と撮影したビデオの画素サイズを考慮して，本研究では，速度算出時に使用するビデオ画像の時間間隔を 4/30s とする．その結果を同図(d)



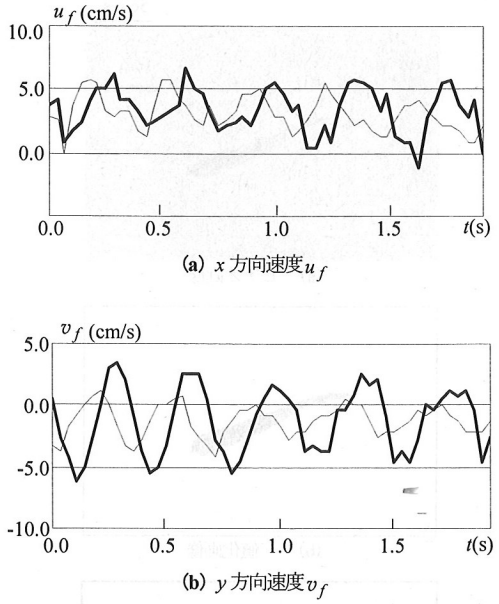
図－4　魚体位置と特徴点速度の時間変動パターンの一例（case1）

に示す．ここで得られた４つの特徴点上の速度を空間補間することにより，魚体速度分布を求めている．ここでの空間補間法として，距離の二乗を用いた重み付け補間法を採用しており，**同図（e）**のような魚体上の速度分布が得られている．

また，魚体上の加速度α_{fx}，α_{fy}は，魚体上における特徴点上の速度の時間変化率より算出し，後述する流動シミュレーションにおいて用いている．

（3）画像解析手法に関する有効性の検証

上述された画像解析手法における魚体位置・速度の算定



図－5　尾鰭先端部（太線）と付け根部（細線）の速度の時系列変化

精度について検討するために，本画像解析手法により得られた頭先端部と尾鰭先端部の速度データを実験値と比較したものを**図－3**に示す．ここでは，**図－1**に定義されているx方向の魚体速度u_fの結果が図示されている．また，図中の実験値とは，室内実験において撮影されたビデオ画像から直接魚体の頭先端部や尾鰭先端部の位置を読み取った結果により算出された速度値となっている．ここで，case1 における魚の進行方向は，x 軸と一致しておらず，**図－2**における右下方向となっている．まず，画像解析法による頭先端部の速度算定結果を見ると，実験値と同様に，時間とともに減少していることが分かる．また，尾鰭先端部に関しては，実験値と算定値ともに，周期的に大きな振幅で変動しており，この両者の結果は良好に一致している．これらの結果より，水中を遊泳する魚体の位置・速度データの抽出に対して，本画像解析手法の基本的な有効性が検証された．なお，上述した魚体運動データに関しては，**図－3**に示した実験値のように，ビデオ画像から直接読み取ることができるものの，本画像解析法を用いることにより，簡便かつ効率的に魚体運動データを取得することが可能となる．

（4）魚体運動の特徴

次に，本画像解析手法により得られた魚体運動の基本的な特徴に関して，魚１尾の場合（case1）を例にして記述する．**図－4**は，本実験中に観察された魚体運動の典型例として，画像解析開始後t=0.30，0.40，0.50，0.60s における魚体位置と４つの特徴点の速度ベクトルを示している．

これらを見ると，頭部を含めた上半身部分は変形せずにほぼ直進しているのに対して，尾鰭や魚体下半身部分は大きく変形した波状運動をしている様子がうかがえる．このような運動の様子は，典型的なアジ型推進の特徴が現れているものと考えられる．この中で，下半身部分における周期運動をより詳細に把握するために，尾鰭先端部と尾鰭付け根部における速度の時系列変化を**図－5**に示す．これらを見ると，上述しているように，尾鰭先端部や付け根部では周期的な速度変動が見られ，その周期がおよそ0.35sである．また，これらの速度変動の位相は，尾鰭先端部と付け根部でずれている．さらに，尾鰭先端部と付け根部の速度変動振幅を比較したところ，x，y 方向ともに，尾鰭先端部の方が尾鰭付け根部よりもやや大きくなっていることが分かる．

3．流動モデルの概要

（1）本流動シミュレーションの特徴

前述した室内実験と画像解析から得られる魚体位置・速度・加速度データを入力条件として，魚周りの流動シミュレーションを行うことを試みる．本研究で行う流動計算の特徴としては，1）数値計算における魚体運動の取り扱いに関しては，振動翼のような理想化された魚体運動ではなく，2．における画像解析手法により得られる実際の魚体運動データを数値計算に採用している，また，2）より応用性の高い数値モデルにするために，座標系として矩形格子座標系を用いる，ということが挙げられる．2）に関しては，矩形格子座標系を境界形状の変化が大きい魚周りにおける流動シミュレーションに適用するので，そこでの計算精度が低くなる可能性がある．そこで，矩形格子座標系を用いて静止物体周りの数値シミュレーションを実施し，物体に作用する抗力に関する評価精度を検討する．

（2）数値解析方法の概要

a）基礎方程式系

流動シミュレーションにおける流体運動の基礎方程式系や魚体運動の取り扱い，数値解法について述べる．まず，流体運動に対する基礎方程式系は，非圧縮性を仮定して，連続式とNavier-Stokes方程式とする．

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \mathbf{0} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \tag{2}$$

ここで，$\mathbf{u}$ は流速ベクトル，p は圧力，ρ は密度，ν は動粘性係数である．なお，ここでは，乱流モデルを採用しておらず，直接数値計算を行っている．

b）魚体運動の取り扱い

本計算における魚体運動の取り扱い方としては，通常の移動境界流れ解析で用いられる密度関数法[18]と類似して，スカラー値c_sを用いて魚体位置を判別する．ここでのスカラー値c_sとしては，魚体が占有する格子では1，流体が占有する格子では0とし，このc_sを導入することにより，効率的に流動計算を行うことが可能となる．

このような魚体位置やそこでの速度・加速度に関しては，前述した画像解析結果を与えており，画像データの撮影時間間隔である1/30sごとに魚体位置・速度・加速度データを更新している．なお，後述する流動計算では，計算時間間隔は1/30sよりも短い値に設定されている．ここで，画像解析結果を時間的に内挿して計算時間ステップ毎に魚体運動データを作成することは，魚体位置が時間的に変化するため容易ではない．そこで本計算では，1/30sごとに魚体データを更新し，その間の計算ステップでは同一データを用いている．本計算では，このように離散的に存在する画像データを1/30s毎に更新すること，また後述するように，計算格子解像度を画像解析上の画素サイズと同じにしているので，数値シミュレーション上，スカラー値c_sは0と1のみ存在することになる．

魚体と流体の境界面上における境界条件に関しては，移動境界流れ解析での取り扱い（例えば，金井・宮田[19]，二瓶・灘岡[20]）を参考にして行う．まず，速度に関しては，魚体内格子や魚体・流体境界面上では，画像解析により得られた魚体速度を与えている．また，圧力に関しては，Akimoto and Miyata[10]やNakaoka and Toda[11]と同様に，境界面に対して垂直方向の圧力勾配と魚体運動の加速度が等しいものとして与えている．

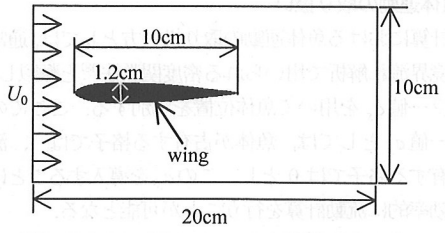
c）数値解法

本計算における数値解法としては，差分法をベースとして，圧力場と速度場を交互に解くMAC法に類似した部分段階法（fractional step method）[21]を用いており，矩形格子のスタッガードメッシュ系を採用している．この部分段階法では，①圧力勾配項を除いた式(2)を用いて仮速度ベクトルを計算し，②圧力のポアソン方程式より圧力を算出し，さらに，③そこで得られた圧力を用いて仮速度を修正して流速ベクトルを求める，という手順となっている．なお，圧力のポアソン方程式を解く際には，移動境界計算に適しているirregular star法[18]を用いており，これにより，流体・魚体間の境界面上における圧力条件の取り扱いも容易となる．

（3）本流動モデルの計算精度に関する検討

a）計算条件

矩形格子座標系に基づく本流動モデルの計算精度を検証するために，静止している物体周りの流動シミュレーションを行う．計算対象とする物体としては，抵抗係数がよ



図－６　静止した翼周りの数値計算に関する諸条件

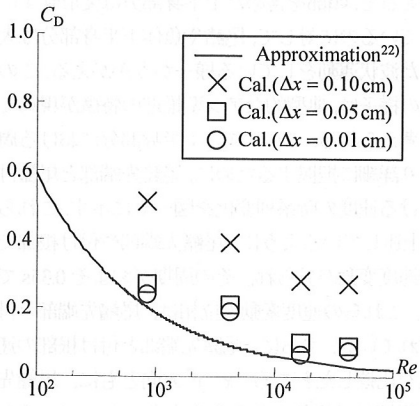
く知られている翼（NACA0012 型[22]）とし，二次元流動場の計算を実施する．矩形格子座標系を採用した場合には，計算精度は格子解像度に大きく依存することから，ここでは格子解像度をいくつか変化させて本流動モデルの計算精度について検証する．

計算領域としては，**図－６**に示しているように，20cm ×10cm とし，翼厚 1.2cm，翼長 10cm の翼を計算領域左側に設置する．ここでは，計算格子幅Δx とレイノルズ数 Re ($=U_0 d/\nu$，U_0：主流速度，d：翼長，ν：動粘性係数) を変化させることとし，３つの計算格子幅Δx (=0.01cm, 0.05cm, 0.10cm) と４種類のレイノルズ数 Re (=800, 4000, 16000, 40000) を設定している．なお，y 方向の格子幅Δy は x 方向の格子幅Δx と同じ値を与えている．

境界条件としては，左側境界に関しては一定速度U_0 を流入させることとし，その他の境界に関しては開放条件（境界に対して垂直方向の空間勾配値を 0）を与えている．初期条件としては静止条件としている．なお，物体表面上における流速や圧力の境界条件は，前節に記述した魚体に関する取り扱いと同一としている．

b）計算結果

静止している翼周りの流動計算結果について述べる．ここでは，物体に作用する抗力の計算精度に着目しているため，翼に関する抗力係数 C_D の計算結果を**図－７**に示す．図中の計算結果は，抗力係数が時間的に変化せずに定常状態となった時の結果である．また，図中には，翼の抵抗係数に関する既存の実験データに対する近似式[22]を合わせて示している．これらの結果を見ると，計算格子解像度が相対的に粗い場合（Δx =0.10cm）には，計算結果と実験式はあまり一致していないものの，相対的に格子解像度を高くすると（Δx =0.01cm，0.05cm），計算結果は実験式に近づいている．特に，計算格子幅 0.01cm の場合には，Re=4000 のケースを除いて，計算結果と実験値は概ね一致している．また，計算格子幅 0.05cm のケースでは，計算格子幅 0.01cm の結果と比較して大差ないことが分かる．このように，矩形格子座標系を用いて物体周りの流動解析を行う場合には，格子解像度を細かくしていくとともに抗力に関する計算精度が向上していることが確認された．



図－７　静止した翼の抗力係数 C_D に関する計算結果

４．１尾の魚周りの流動シミュレーション

（１）計算条件

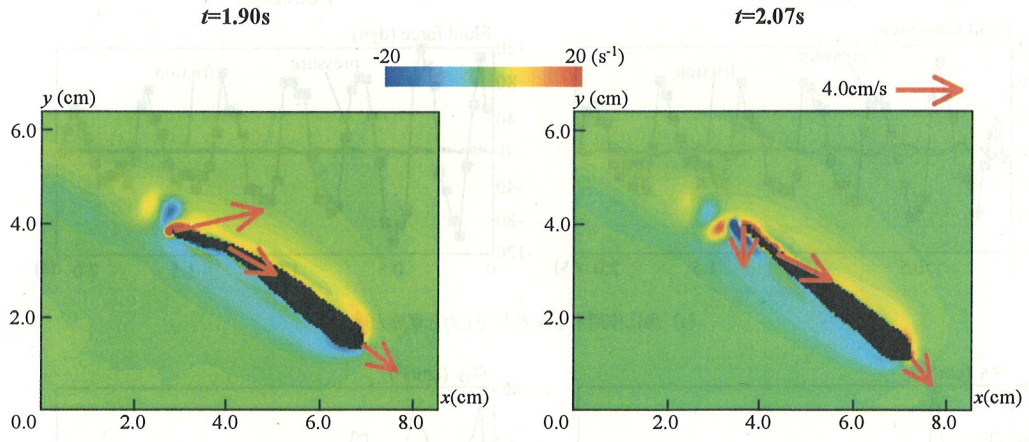
３．で述べた流動モデルを用いて，魚周辺における流動シミュレーションを行うことを試みる．ここでは，まず，１尾の魚（case1）を対象とした計算条件とその結果について示す．入力条件となる魚体運動データとしては，**２．**で示した画像解析結果を採用するので，計算条件としては室内実験における条件と概ね同じとする．具体的には，計算領域サイズを 22.35×11.85cm の水平２次元計算とし，格子数を 447×237，計算格子幅を 0.05cm，計算時間間隔を 1/300s とする．動粘性係数や密度は，常温の水の値を用いている．本計算における境界は全て開境界とし，境界条件としては開放条件を課している．また，初期条件に関しては静止条件を与えている．

（２）計算結果

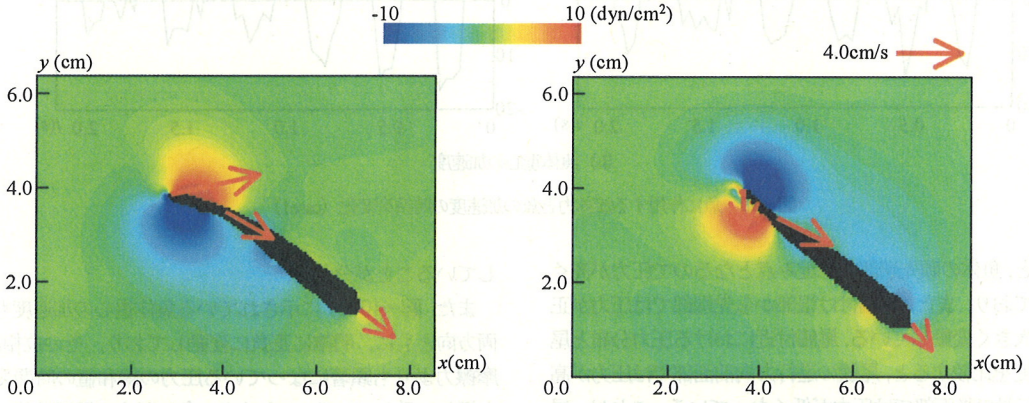
a）魚周辺の流動場の瞬間像

case1 における魚周りの流動場の瞬間像を見るために，渦度と圧力の空間コンターを**図－８**に示す．図中には，計算開始後 1.90s と 2.07s の結果を示しており，これは，周期的な尾鰭の波状運動（**図－５**）における約半周期分に相当している．また，同図中には，魚体上における特徴点上の速度ベクトルも合わせて図示している．

図－８(a)に示されている渦度コンターを見てみると，図中右下方向に進行している魚の運動に伴い，魚の上半身部分周辺の流体は引きずられるために，図中の魚体上側では正の渦度，下側では負の渦度，となる渦層が生じている．このような渦層は，魚の頭先端部より形成されており，魚体に沿うように分布している．また，魚の下半身部分の周辺では，アジ型推進タイプの特徴である尾鰭の波状運動に伴って剥離渦が生成されており，魚の後方では，正負の渦



(a) 渦度コンター

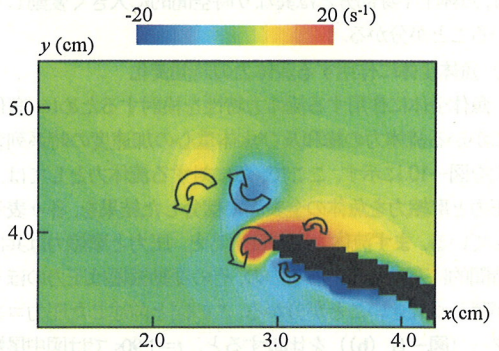


(b) 圧力コンター

図－8　1尾の魚周りの渦度と圧力の空間分布
(case1，図中のベクトルは魚体速度ベクトルを示す)

が千鳥状に配置している．このような剥離渦の形成過程としては，t=1.90s の時には，魚体上面で生成された正の渦層が，図中右上方向に移動している尾鰭先端付近より剥離している．また，t=2.07s の時には，魚体下面で生成された負の渦層が，図中下向きに移動している尾鰭先端付近より剥離していることが分かる．なお，剥離渦の形成位置は，尾鰭先端付近以外の魚体表面からも確認されている．

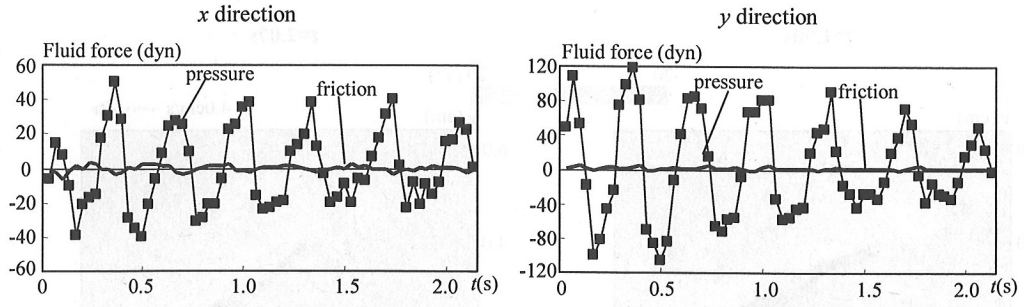
このような魚後方のwake内における剥離渦の様子を詳細に見るために，尾鰭周辺における渦度コンターを**図－9**に示す．ここでは，t=1.93s における結果を図示している．これを見ると，魚体上面で形成された正の渦度は，この時点では，尾鰭先端付近より剥離して魚の下方に移動しつつある．wake 内の渦の配置を見ると，魚体上面で形成された正の渦度は魚体の中心軸よりも下方に，また，魚体下面で形成された負の渦度は魚の上方にそれぞれ位置しており，カルマン渦と逆の配置になっている．これは，魚が推



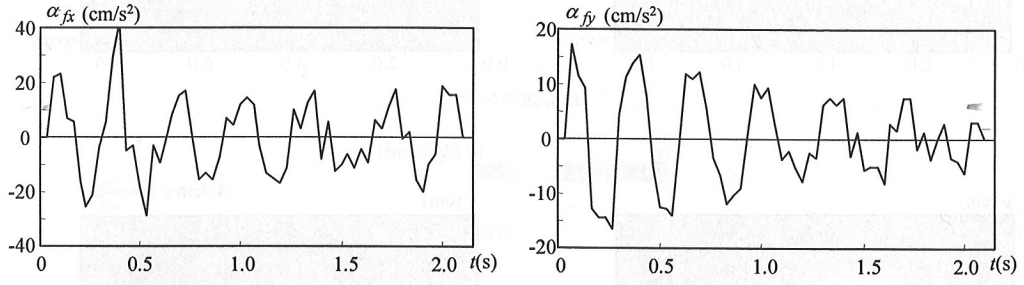
図－9　尾鰭周辺の渦度コンター (case1，t=1.93s)

進力を生み出す時に生じる渦の配置であり（例えば，Wu[15]），本流動モデルは，魚の推進力形成に寄与するカルマン渦と逆の回転をする渦列を再現していることが分かる．

次に，**図－8 (b)** に示されている圧力コンターに注目



(a) 魚に作用する流体力（圧力と摩擦力）



(b) 魚体重心の加速度

図－10 魚に作用する流体力と魚の加速度の時系列変化（case1）

すると，魚体の頭先端部では淀み点となるので圧力が高くなっており，また，尾鰭付け根部から先端部では圧力が正負に大きく変動している．尾鰭付近における圧力分布と尾鰭速度を比較すると，尾鰭の進行方向前面部では圧力が高く，反対の後面部では圧力が低くなっている．これは，尾鰭運動に伴って周囲の流体が加減速運動を受けるため，尾鰭周囲の圧力分布が変化するものと考えられる．このように，尾鰭における波状運動に伴って，尾鰭周囲の圧力分布は，魚体上半身部分とは異なり時空間的に大きく変動していることが分かる．

b）魚体全体に作用する流体力の時間変化

魚体全体に作用する流体力特性を検討するために，魚体にかかる流体力の総和及び魚体重心の加速度の時系列変化を**図－10**に示す．ここで，魚に対する流体力としては，圧力と摩擦力を魚体の全表面で積分した結果を，各々表示している．まず流体力に着目すると．圧力と摩擦力は共に時間的に変動しているものの，その変動振幅は圧力のほうが著しく大きいことが分かる．この図と前述した圧力コンター（**図－8 (b)**）を比較すると，t=1.90s では図中尾鰭上側の圧力が下側よりも高くなっている結果として，魚体全体に作用する圧力値は両方向ともに負となり，t=2.07s ではその逆の結果となっている．このように，魚体に作用する圧力成分は，x, y 方向ともに正負に大きく変動しており，魚体運動に対して前方推進力と抵抗力の役割を果たしていることが分かる．

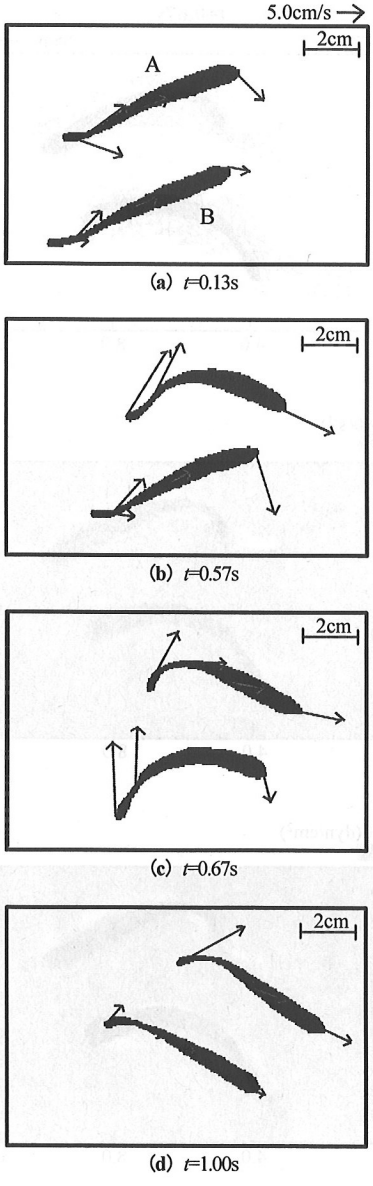
また，**図－10 (b)** に示されている魚体重心の加速度も，両方向ともに，明確に正負に変動しており，その位相は，摩擦力よりも顕著になっている圧力の総和値の時間変化と概ね一致している．これより，魚に対する周囲流体から受ける圧力分布が，魚体の加減速運動に多大な影響を与えていることが分かる．

なお，case1 における魚の平均前進速度 V は約 3.5cm/s，尾鰭の波状運動における波の伝播速度 c は9.6cm/s であり，V/c=0.36 となっている．これは，Lighthill[14] が述べている魚が推進運動を行い得る条件（V/c＜１）を満たしている．V/c が１に近いほど効率性の高い運動と考えられているので[14]，本実験における魚体運動は，あまり効率的な魚の推進運動をしているとは言い難い．

５．２尾の魚周辺の流動シミュレーション

（１）計算条件

本論文で構築した数値モデルを，魚群運動を含む流動場へ応用するために，最も基本的な例として，２尾の魚周辺における２次元流動シミュレーションを行う．ここでの魚体運動としては，**２．**で示した実験水槽中（**図－１**）を遊泳する２尾の魚の水平運動（case2）を対象とする．この実験条件に合わせるために，計算格子幅は x, y 方向とも



図—11 case2 における魚体運動の特徴

に 0.05cm とし，格子数は 377×277 とし，計算時間間隔は 1/300s とする．動粘性係数や密度，境界・初期条件に関しては，１尾の魚に対する流動計算の条件と同一とする．

本流動計算における魚体運動の入力条件の特徴を述べるために，静水中における２尾の魚（case2）に関する魚体位置と特徴点上の速度ベクトルを**図—11** に示す．この結果を数値解析に用いているため，図中の時刻 t は数値計算開始からの時刻に相当している．また，ここでは，図中上側に位置する魚を魚 A，下側のものを魚 B と呼ぶこととする．これを見ると，t=0.13s では 2 尾共に魚体の向きは同じ方向になっている．その後，t=0.57s では魚 A が魚体の向きを下向きに変え，それに追随して，t=0.67s のときに魚 B も向きを変更しており，その際には魚体全体を大きく湾曲させている．さらに t=1.00s の時点では，2 尾の魚ともに魚体の向きを変え終わり，再び同一方向に遊泳している．

このような運動をする 2 尾の魚に作用する流体力特性に対して，魚個体間の流体力学的相互作用の影響を調べるために，次に示す３つの魚体運動条件に関する流動計算を行う．ここでの魚体運動条件としては，**図—11** に示されている魚２尾を遊泳させた時のケース（case2-1）に加えて，魚 B が存在しないものとして魚 A のみの運動を考慮した場合（case2-2）と，逆に魚 B のみの運動を考慮した場合（case2-3）とする．これらの流動計算により得られた魚 A や B に作用する流体力を比較し，魚が 1 尾のみの場合と 2 尾存在する場合における流体力の違いを抽出することにより，魚個体間の流体力学的相互作用を検討する．

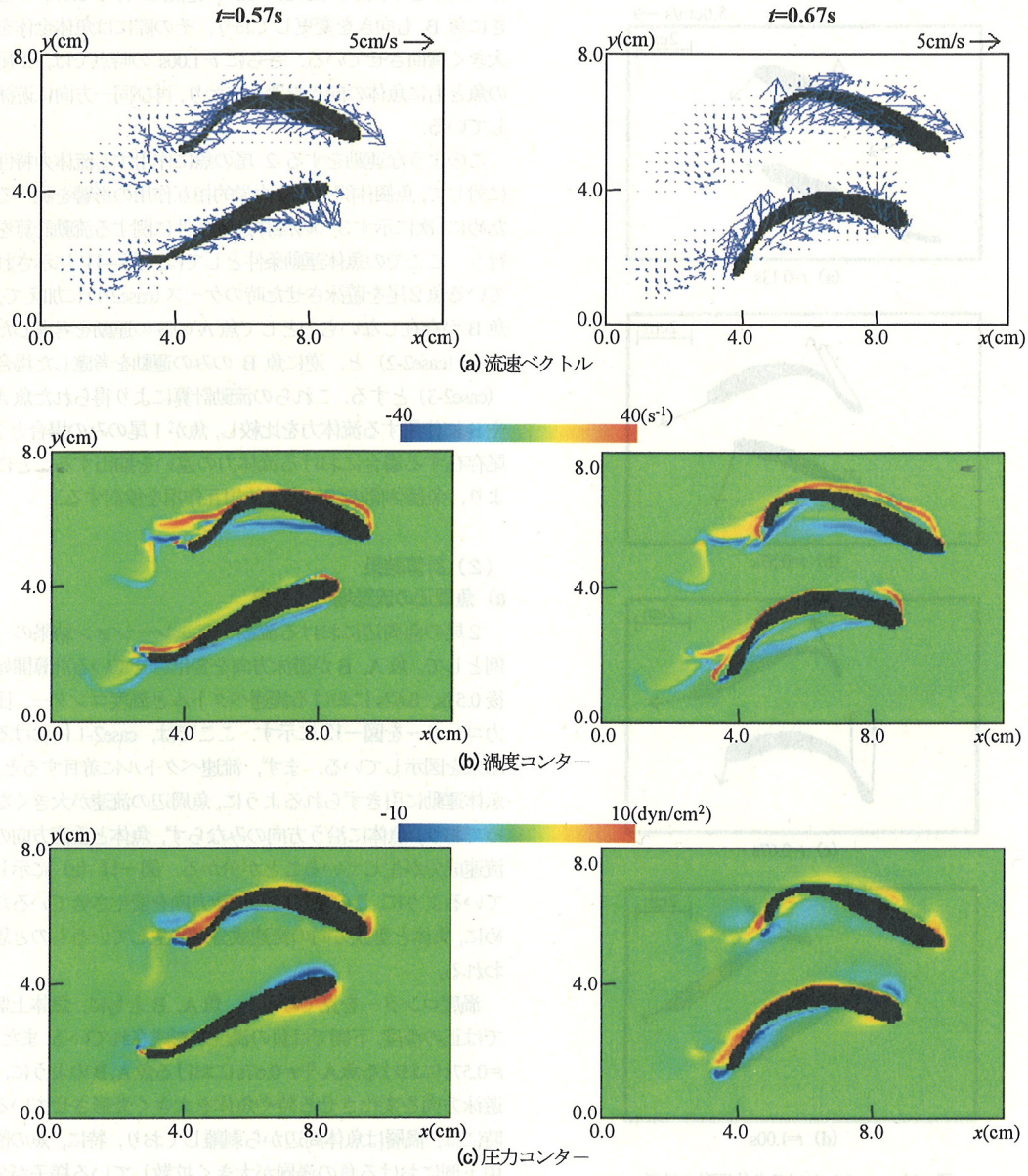
（2）計算結果

a）魚周辺の流動場の瞬間像

２尾の魚周辺における流動シミュレーション結果の一例として，魚 A，B が遊泳方向を変化させている計算開始後 0.57s，0.67s における流速ベクトルと渦度コンター，圧力コンターを**図—12** に示す．ここでは，case2-1 における結果を図示している．まず，流速ベクトルに着目すると，魚体運動に引きずられるように，魚周辺の流速が大きくなっており，魚体に沿う方向のみならず，魚体と垂直方向の流速成分が生じていることが分かる．**図—11 (c)** に示しているように，この時点では遊泳方向を変化させているために，魚体と垂直方向の流速成分が発生しているものと思われる．

渦度コンターを見てみると，魚 A，B ともに，魚体上側では正の渦度，下側では負の渦度が形成されている．また，t=0.57s における魚 A や t=0.67s における魚 A，B のように，遊泳方向を変化させる時や魚体を大きく変形させている時には，渦層は魚体周辺から剥離しており，特に，魚の図中下側における負の渦層が大きく拡散している様子が分かる．このように，魚周辺に形成されている渦層の剥離現象は，**4**．で示したような，尾鰭の波状運動に伴って尾鰭先端付近から発生しているのみならず，魚の遊泳方向転換時や魚体を大きく湾曲させる時においても生じていることが示された．

圧力コンターに注目すると，**図—８**と同様に，頭先端部や尾鰭周辺のように，魚体の進行方向前面部においては圧力値が大きくなっている．また，魚が進行方向を変えるときには，t=0.57s の魚 A や t=0.67s の魚 B のように，体を折り曲げることに起因して，図中魚体下側よりも上側の圧力が大きくなっている．このような魚体周辺の圧力差により，魚の進行方向が変化したものと考えられる．

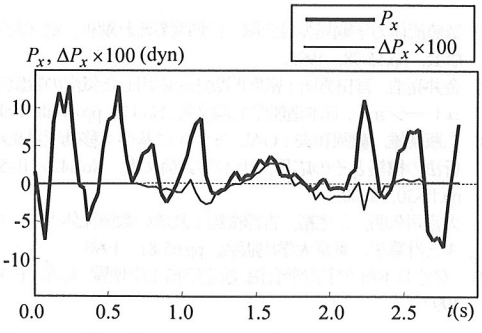


図—12 魚周りの流動パターンと圧力コンター（case2-1）

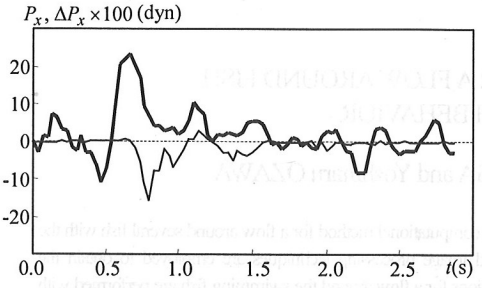
以上の結果をまとめると，本ケースのように，魚体の遊泳方向が変化する場合や魚体形状が大きく湾曲する場合には，魚体の遊泳方向や形状が直線的なときと比べて，魚周辺の渦層の剥離状況や圧力分布パターンが大きく変化していることが示された．

b）魚個体間の流体力学的相互作用

魚への流体力に対して魚個体間の影響を見るために，魚AとBの2尾存在するケース（case2-1）と，どちらか一尾のみ存在する場合（case2-2，2-3）における流体力を比較する．例えば，魚Aに作用する流体力に関して，case2-1とcase2-2の結果の差は，case2-1で魚Bが存在することに起因する流体力と考えられ，その差を魚個体間の流体力学的な影響と見なすことができる．**図—13**は，x方向における圧力の総和値P_xを例にして，case2-1における魚A，BのP_xから，case2-2の魚Aとcase2-3の魚BのP_xを差し引いた結果ΔP_xを示している．図中には，case2-1における圧力の総和値P_xも合わせて示されている．また，図化の関係上，ΔP_xを100倍して図示している．これらを見ると，ΔP_xは，魚A，Bともに，P_xと比べて2オーダー程度小さくなっていることが分かる．類似した傾向は，y



(a) 魚A（ΔP_x ：case2-1 と case2-2 の P_x の差）



(b) 魚B（ΔP_x ：case2-1 と case2-3 の P_x の差）

図−13 魚に作用する圧力の総和値 P_x（case2-1，x 方向）及び各計算ケース間の P_x の差 ΔP_x

方向における圧力に関しても確認されている．このように，本計算条件では，魚個体間における流体力学的な相互作用は，魚に作用する流体力に対して大きな影響を及ぼしていないことが分かる．なお，魚群運動のように，魚が数尾もしくは数十尾存在する場合には，魚個体間における流体力学的な影響は本計算ケースよりは大きくなるものと推察される．今後は，魚群運動に対する流動シミュレーションを通して，魚個体間の流体力学的な影響を詳細に検討する必要がある．

6．結言

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである．

（1）実際の魚体運動データを反映させつつ，魚群周辺の流動場への適用も容易な数値モデルを開発した．この際には，魚体運動データを取得するために，室内実験において水中を遊泳する魚体運動をビデオ撮影し，その画像に対して魚体の位置や速度，加速度を抽出するための画像解析手法を構築した．また，流動モデルにおける座標系として矩形格子座標系を採用することにより，複数尾の魚周辺の流動場への適用が容易な応用性の高い流動モデルを構築した．これらの手法を用いて静水中を遊泳する１尾及び２尾の魚を対象とした流動シミュレーションを実施した．

（2）魚周辺に形成される渦層の剥離現象は，アジ型推進タイプの特徴である尾鰭の波状運動のみならず，魚体全体の大変形や魚の遊泳方向変化に伴って生じていることが明らかとなった．また，魚後方の wake 内では，カルマン渦と逆の配置をしている渦列が形成されていることが示された．

（3）尾鰭の波状運動や魚体の大変形により，魚体周囲，特に尾鰭周辺の圧力分布が大きく変化し，前方推進力や抵抗力が生じていた．

（4）２尾の魚周辺における流動計算結果を用いて，魚個体間における流体力学的な相互作用特性を検討したところ，魚への流体力に対する魚個体間の流体力学的な影響は大きくないことが示された．

なお，ここでは２次元場における魚周辺の流動解析を行っているが，今後は，本研究を発展させて，魚周りの３次元計算や魚群運動に対して本手法を適用する予定である．

謝辞：本論文の３名の査読者から貴重な御意見を頂き，論旨をより向上することができた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1) 二瓶泰雄，福永健一：画像解析と数値シミュレーションを用いた魚行動解析モデルの開発，河川技術論文集，Vol.8，pp.355-358，2002.
2) Stalnaker, C., Lamb, B. L., Henrinken, J., Bovee, K. and Bartholow, J.: The Instream flow Incremental Methodology, A primer for IFIM, National Ecology Research Center National Biological Survey, Colorado, pp.7-40, 1994.
3) 中村俊六，石川雅朗，築坂正美，東信行，中村緩徳：河川における魚類生息環境評価（IFIM 適用）のための基礎調査，河道の水理と河川環境シンポジウム，pp.127-134，1995.
4) 玉井信行，奥田重俊，中村俊六編：河川生態環境評価法 潜在自然概念を軸として，東京大学出版会，pp.174-183，2000.
5) 揚継東，関根雅彦，浮田正夫，今井剛：行動モードを考慮した魚の生息環境評価手法に関する研究，土木学会論文集，No.671／VII-18，pp.13-23，2001.
6) 三宮信夫，島田亮，中峯浩：魚群行動における自律分散機構のモデリング，計測自動制御学会論文集，Vol.29，No.2，pp.211-219，1993.
7) Niwa, H.: Newtonian dynamical approach to fish schooling, *J. Theor. Biol.*, Vol.181, pp.47-63, 1996.
8) 三宮信夫：魚群における協調行動の生成，生物物理，Vol.40，No.4，pp.234-238，2000.
9) 石川雅朗，足立恒，平野弘晃：個体ベースモデルによる魚類生息環境評価手法の構築，河川技術論文集，Vol.7，pp.315-320，2001.
10) Akimoto, H. and Miyata, H.: Finite-volume simulation of a flow about a moving body with deformation, *Proc. 5th Int. Symp. on CFD-Sendai*, Vol.1, pp.13-18, 1993.
11) Nakaoka, T. and Toda, Y.: Laminar flow computation of fish-like motion wing, *Proc. 4th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*,

pp.530-538, 1994.
12) Liu, H.: A numerical study on jet-stream propulsion of oscillating bodies, 日本造船学会論文集, Vol.178, pp.101-112, 1995.
13) Zhu, Q., Wolfgang, M. J., Yue, D. K. P. and Triantafyllou, M. S.: Three-dimensional flow structure and vorticity control in fish-like swimming, *J. Fluid Mech.*, Vol.468, pp.1-28, 2002.
14) Lighthill, M. J.: Note on the swimming of slender fish, *J. Fluid Mech.*, Vol.9, pp.305-317, 1960.
15) Wu, T. Y.: Swimming of a waving plate, *J. Fluid Mech.*, Vol.10, pp.321-344, 1961.
16) 田中一朗, 永井實：抵抗と推進の流体力学　ー水棲動物の高速遊泳能力に学ぶー, 扇興社, pp.9-38, 1996.
17) 高木幹雄, 下田陽久：画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.606-612, 1991.
18) 数値流体力学編集委員会編：移動境界流れ解析, 東京大学出版会, pp.15-78, 1995.
19) 金井亮浩, 宮田秀明：密度関数法を応用した気泡の数値シミュレーション, 日本造船学会論文集, No.179, pp.41-48, 1996.
20) 二瓶泰雄, 瀬岡和夫：GAL モデルに基づく移動境界流れ解析法の構築とその応用, 土木学会論文集, No.642／II-50, pp.19-30, 2000.
21) 大宮司久明, 三宅裕, 吉澤徹編：乱流の数値流体力学　モデルと計算法, 東京大学出版会, pp.65-81, 1998.
22) (社) 日本航空宇宙学会編, 航空宇宙工学便覧, 丸善, pp.76-85, 1992.

(2003. 9. 5 受付)

NUMERICAL SIMULATION FOR A FLOW AROUND FISH WITH ACTUAL FISH BEHAVIOR

Yasuo NIHEI, Kenichi FUKUNAGA and Yoshiharu OZAWA

To clarify the fluid forces on a swimming fish in water, we present a computational method for a flow around several fish with the experimental data of actual fish behavior. Laboratory experiments and image processing techniques are employed to obtain the swimming fish behavior in still water. With these data, numerical simulations for a flow around the swimming fish are performed with Cartesian coordinate system. The results indicate that the separation of the boundary layers around the fish occur due to the wavy motion of a tail fin and the large deformation of fish body, resulting in the appreciable vortex streets in the wake. It is noted from the computational results that these fish behavior cause the propulsion and drag of the swimming fish through the spatial variation of the pressure distribution around fish. We also examine the hydrodynamic influences between two fish on fluid forces with the computational results.