

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

AN APPROACH FOR A FISH-BEHAVIOR ANALYSIS WITH IMAGE PROCESSING AND NUMERICAL SIMULATION

二瓶 泰雄¹・福永 健一²

Yasuo NIHEI and Kenichi FUKUNAGA

¹正会員 博士(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

²非会員 修士(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)

To accurately understand a fundamental fish behavior in fishways, we need to examine not only flow patterns and fish motion in fishways, but also fluid forces on a swimming fish. For this purpose, in the present study, we present an approach for a fish-behavior analysis with numerical simulation and image processing technique. In this analysis, a numerical simulation for flow around a swimming fish with Cartesian coordinate system is performed by using an actual fish behavior obtained by an image processing technique. The results obtained by the analysis for a swimming fish in still water indicate that the wavy motion of tail and fins of a fish has significant influences on flow patterns around a fish and fluid forces on a swimming fish.

Key Words: Fish behavior, numerical simulation, image processing, fluid force

1. はじめに

堰やダムなどの水理構造物を建設する際には、河川における生態系保全や水産資源確保のために、魚類の移動が可能となる魚道が設置されている。河川内における魚道の設置効果を検討し向上させるために、魚道内における水理特性や魚の遡上実態に関して精力的に調べられている^{1)~3)}。このうち、後者の魚行動特性をより詳細に把握するためには、流れ場における魚体運動特性に加えて、魚に作用する流体力特性をも評価・検討することが可能となる魚行動解析モデルの開発が強く望まれている。

魚に作用する流体力や魚周辺の流動特性を把握するために、魚周りの流動シミュレーションがいくつか行なわれている^{4)~6)}。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が数値解析において反映されていない、2)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が困難である、といった問題点が挙げられる。

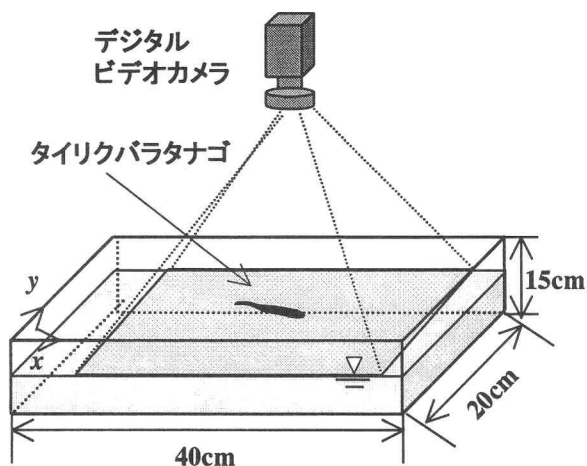
そこで本研究では、実際の魚行動データを反映しつつ、複雑な流れ場へ適用可能となるような、画像解析手法と数値シミュレーションをカップリングした新しい魚行動解

析モデルを開発することを試みる。そこでは、まず、室内実験により、静水中を遊泳する魚行動をビデオ撮影する。次に、その画像データを用いて、新たに構築された画像解析手法に基づいて、魚体位置や速度データを連続的に取得するとともに、魚行動に関する基本的な特徴について検討する。さらに、この画像解析手法により得られた魚体位置・速度データを入力データとして、魚周りの数値解析を行う。ここでは、複雑な流れ場へも適用が容易である矩形格子座標系を適用した。これらの結果に基づいて、魚体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。

2. 室内実験と画像解析手法

(1) 室内実験について

本論文では、魚行動解析モデルを開発するに当たり、最もシンプルな静水中における魚運動を対象とする。そこで、図-1に示すような矩形水槽中における魚運動に関する室内実験を行う。この実験では、静水中を遊泳する魚運動の様子を上からデジタルビデオカメラ (SONY(株), DCR-TRV900) により撮影する。実験条件としては水深5cm、水温25℃、静水状態とし、一匹の魚を水槽内に放してい



図一 室内実験の概略図

る。なお、撮影画像の空間解像度を 0.05cm、時間間隔を 1/30 秒としている。本実験で使用した魚は、タイリクバラタナゴ（体長 6.1cm、体高 1.9cm）であり、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⁷⁾の特徴を有している。

(2) 画像解析手法の概要と解析結果

上記の室内実験において撮影されたビデオ画像（図一 2 (a)）に対して、以下の 3 つの手順に従って、魚体位置及び速度を算出する。

a) 魚体位置の抽出

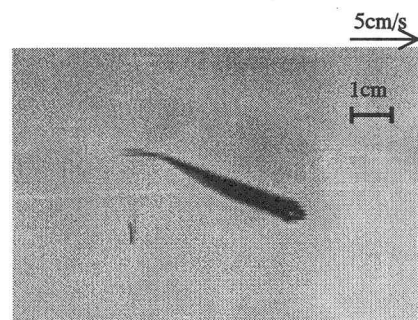
ビデオ画像から魚体のみを抽出するために二値化処理を行う。この処理に際しては、閾値として各画素の濃度値を用いるのではなく、各画素における濃度空間勾配の大きさを用いて二値化処理を実施する。その結果、同図(b)に示すように、尾鰭を含めて魚体位置を概ね良好に抽出することが可能であることが分かる。

b) 魚体内における特徴点の抽出

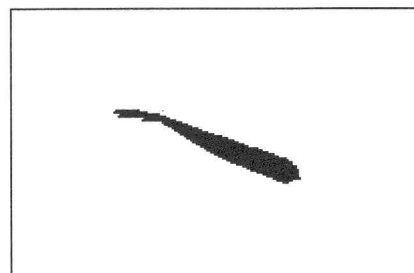
次に、魚体速度を算定するために、魚体内における尾鰭先端部などの特徴的な点をいくつか抽出し、それらをラグランジュ的に追跡することにより、魚体の速度を求める。ここでの魚体内における特徴点としては、同図(c)に示しているように、上半身部分にある頭先端と重心、下半身部分の尾鰭の付け根と尾鰭の先端、の計 4 点とする。特徴点の抽出方法の詳細については二瓶・福永⁸⁾を参照されたい。

c) 魚体速度の算定

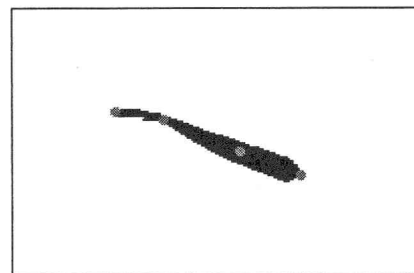
上述した画像解析法により得られる魚体内における 4 つの特徴点をラグランジュ的に追跡して、特徴点上の速度を算出する。速度算出時におけるビデオ画像の時間間隔を



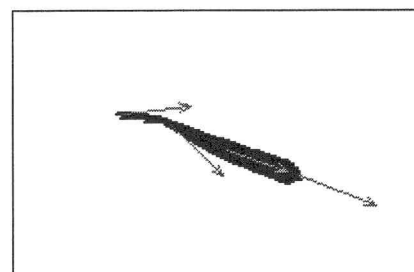
(a) ビデオ画像



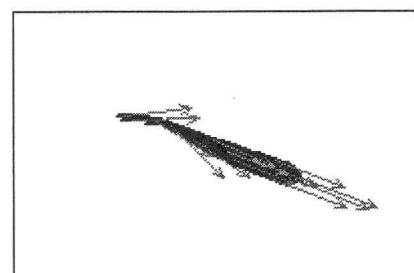
(b) 濃度勾配を利用した二値化画像



(c) 魚体内における特徴的な点の抽出結果



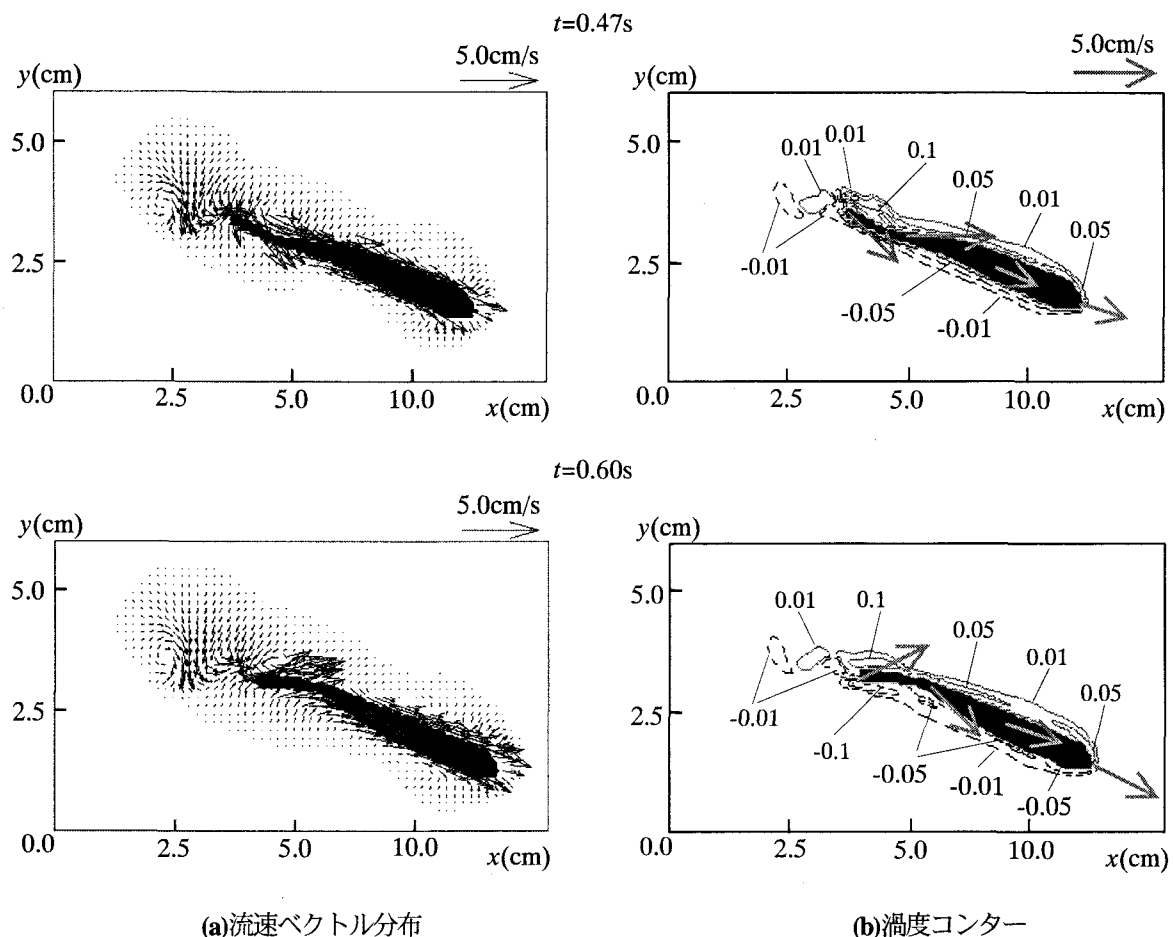
(d) 特徴点における速度ベクトルの算定結果



(e) 空間補間法に基づく魚体速度分布

図一 2 画像解析による魚体位置・速度の算定結果

4/30 秒とした場合の結果を同図(d)に示す。ここで得られた特徴点上の速度を用いて、空間補間操作を介して、魚体全体における速度を求める。ここで空間補間法としては、



図—3 魚周りの流動パターンに関する計算結果

距離の二乗を用いた重み付け補間法とする。その結果を同図(e)に示す。

このような画像解析手法を用いて、本実験で使用したタイリクバラタナゴの運動特性について検討したところ、尾鰭が約0.35sの周期で振動していること、そのような振動現象は尾鰭先端部と付け根部で位相が異なる波状運動となっていることが確認されている⁸⁾。

3. 魚周りの流動シミュレーション

(1) 流動モデルの概要

2. で得られる魚体位置・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。この流動シミュレーションでは、複雑な境界形状や魚群を対象とする際に、格子生成が容易かつ安定性の高い矩形格子座標系を適用する。流体運動の基礎方程式系は、非圧縮性を仮定して、連続式と Navier-Stokes 方程式とする。

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⁹⁾と類似して、スカラー量 c_s を用いて魚体位置を判別する。ここでのスカラー値としては、魚体が占有する格子では0、流体が占

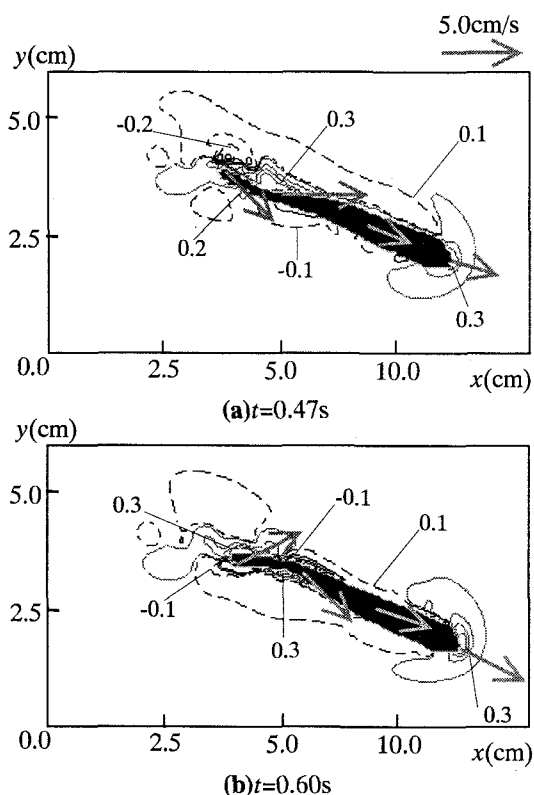
有する格子では1とする。魚体と流体の境界面上における境界条件に関しては、移動境界流れ解析における取り扱いを参考にして行う。まず、速度に関しては、魚体内格子や魚体・流体境界面上では、画像解析により得られた魚体速度を与えている。また、圧力に関しては、境界面に対して垂直方向の空間勾配を0とする。

(2) 計算条件

計算条件としては、前述した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 $22.35 \times 11.85 \text{ cm}$ の水平2次元場とし、格子数を 447×237 、計算格子幅を 0.05 cm 、計算時間間隔を $1/300 \text{ s}$ 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、境界条件として開放条件を課している。また、初期条件としては、静止条件としている。魚運動条件は、2. で得られた画像解析結果を入力することとし、尾鰭を振動させながら一定方向に進行している2秒間にわたる魚運動を計算対象として選定した。

(3) 計算結果

魚周りの典型的な流動パターンを見るために、流速ベク



図—4 魚体周りの圧力分布に関する計算結果
(contour interval: 0.1 N/m^2)

トルと渦度コンターを図—3に示す。図中には、計算開始後0.47s, 0.60s後の結果を示している。まず、流速ベクトルに着目すると、図中右下方向へ進んでいる魚の運動に伴って、魚の上半身部分周辺における流体は引きずられて、魚体速度と同方向の流れが生じており、魚周りに境界層が形成されている。また、魚の下半身部分周辺に関しては、尾鰭の波状運動に伴って剥離渦が生成され、魚後方には明確な渦構造が形成されている。次に、渦度コンターを見てみると、魚体上半身近傍では、渦層が魚体に沿うように分布している。この魚体周囲に形成されている渦層は、尾鰭の波状運動により、尾鰭の付け根付近より剥離していることが分かる。このように放出された剥離渦は、正負の渦が交互に千鳥状に配置し、wake内において渦列が形成されていることが分かる。

次に、魚に作用する流体力特性を検討するために、圧力コンターを図—4に示す。ここでも、図—3と同様に、計算開始後0.47sと0.60sにおける結果を示している。また、図中には魚体内の特徴点における速度ベクトルも合わせて示している。これを見ると、魚体の頭先端部では淀み点となるので圧力が高くなり、また、尾鰭付け根部から尾鰭先端部では圧力が正負に大きく変動していることがうかがえる。尾鰭付近における圧力分布と尾鰭進行方向を比較すると、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。また、尾鰭の付け根

部と先端部は、位相がずれた形で波状運動を行っているの⁸⁾、同一面においても圧力の正と負の部分が混在している。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って大きく変動しており、それに加えて、魚体進行方向に対して、正味の力、すなわち推進力を与えている。このように、尾鰭における波状運動は、魚周りの流動特性や渦構造、さらには流体力分布特性に多大な影響を与えていることが分かる。なお、魚体に作用する摩擦力に関しては、圧力と比べて極めて小さい値であることが確認されている。

4. 結論

本研究では、実際の魚体運動データを反映させるとともに、複雑な流れ場へも適応可能な、画像解析と数値シミュレーションをカップリングした魚行動解析モデルを開発することを試みた。主な結論は以下のとおりである。

- (1) 室内実験により得られた遊泳中の魚運動に関するビデオ画像を用いて、魚体位置や速度を算出するための画像解析手法を構築した。
- (2) そこで得られた実際の魚体運動を考慮して、矩形座標系に基づく魚周りの流動シミュレーションを実施した。その結果、魚周辺に形成される境界層は、尾鰭の波状運動に伴って、尾鰭付け根部付近において剥離し、魚後方のwake内には明確な渦列が形成されていること、また、このような尾鰭の波状運動により尾鰭周囲の圧力分布が大きく変化し、魚体運動に対する推進力が与えられていることが示された。

参考文献

- 1) 廣瀬利雄, 中村中六: 魚道的设计, 山海堂, 1991.
- 2) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, 1995.
- 3) 柏井条介: 魚道設置の意味と設計上の課題, 土木学会誌, Vol.83, No.4, pp.49-51, 1998.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 田中一郎, 永井實: 抵抗と推進の流体力学 —水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ—, 扇興社, pp.9-38, 1996.
- 8) 二瓶泰雄, 福永健一: 実際の魚行動を考慮した魚周りの流動シミュレーション, 土木学会論文集, 2002 (投稿予定).
- 9) 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.

(2002. 4. 15 受付)