

背骨を考慮した変形を行う魚の水面近くにおける

遊泳制御の数値シミュレーション

Numerical simulation of swimming control near water surface for fish deformation considering spine

- 平松 晴喜, 横浜国大院, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2, hiramatsu-haruki-cr@ynu.jp
 白崎 実, 横浜国大院, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2, shirazak@ynu.ac.jp
 松下 悠貴, 元横浜国大院, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2, matsushita-yuki-zf@ynu.jp
 Haruki HIRAMATSU, Yokohama National University, 79-2, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama
 Minoru SHIRAZAKI, Yokohama National University, 79-2, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama
 Yuki MATSUSITA, Yokohama National University, 79-2, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama

This paper presents a numerical simulation of a deforming and swimming fish near water surface considering spine using three level set functions to capture the liquid-gas, solid-gas and solid-liquid interfaces. Linear blend skinning method, which is used in field of the computer graphics, is applied to deforming surface of fish model depending on joints of spine. This method enables fish model to bend and to turn direction. That is expected to be applied to trajectory tracking control for swimming.

1. 緒言

魚類だけではなくイルカ等の哺乳類も含めた水棲生物を"魚"と呼ぶことにすると、魚の遊泳運動は広く研究が行われている一方で、未解決の問題や謎が多く残されている。例えばイルカの遊泳効率に関する問題である"Gray のパラドックス"が有名であるが、その他にも魚の跳躍運動についてその挙動や理由については不明な部分が多い。魚の遊泳に関する研究としては実際の魚の観察¹⁾やマグロなどの遊泳フォームを参考にした魚型ロボット²⁾などが挙げられるが、実際の魚や魚型ロボットによる跳躍などの実験は困難であるため、CFD により新たな知見が得られる可能性がある。

著者らはこれまで、水面を考慮した魚の遊泳運動に関して、なぜ魚は跳躍をともなう遊泳を行うのかについて興味を持ち、水面付近を遊泳する際には水平遊泳より跳躍をともなう遊泳の方が効率の面において優れているのではないかという仮説を立てた上で研究を進めてきた。例として対称翼型を用いた 2 次元解析³⁾、魚モデルを用いた 3 次元解析⁴⁾、推進効率を考慮した水平遊泳と跳躍の比較⁵⁾等が挙げられる。

しかし、これらの解析においては、実際の魚が骨格を持ちそれに連動した変形を行うことや変形により生じる流体力によって本来発生するはずの進行方向以外のブレが考慮されていない。また、魚が天敵からの逃避行動を行う際に体を弓なりに大きく曲げ、方向転換と急加速を行う C-start と呼ばれる動作などを再現することが非常に困難であった。そこで本稿では骨格を考慮した魚モデルまわりの 3 次元解析の前段階として、背骨を組み込んだ対称翼型を用いた 2 次元数値シミュレーションを行うことで、背骨が遊泳に対して与える影響およびそれにより可能になる旋回動作について定性的な議論を行い今後の解析へ応用していくことを目的とする。

2. 計算手法

等間隔直交格子ベースの有限差分法により気液三相流れの計算を行った。計算格子には Staggered 格子を用いた。気液界面の捕獲と変形する移動物体を取り扱うために Level Set 法および Level Set 関数の移流方程式を用いた。支配方程式には非圧縮流体における連続の式および Navier-Stokes 方程式を用い、Fractional Step 法により計算を行った。時間微分項の差分法として移流項には 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法、それ以外の部分には Euler 陽解法を用い

た。空間微分項の差分法として移流項には 5 次精度 WENO 法、粘性項には中心差分法を用い、圧力 Poisson 方程式の解法には幾何的マルチグリッド前処理付き BiCGStab 法を用いた。また、表面張力のモデルには CSF モデルを用いた。

3. 計算モデル

魚モデルの形状には関連研究にてよく用いられる上下対称翼型 NACA0012 を使用した。この翼型の中心線上に沿って Fig. 1 のように背骨を設定した。関節数は 10 とした。

背骨の動作について、推進には Akimoto⁶⁾らや小笠原⁷⁾らが用いた 2 次元翼型に対する変形式を、方向転換にはこれに加え体を弓なりに曲げる変形 (以下、曲げ動作) を再現する式⁸⁾を利用して変形後の魚モデルの中心線を生成し、各骨の長さを保ち関節が中心線上に乗るように関節角度および関節位置を計算した。

表面の変形にはコンピュータグラフィックスなどで用いられる LBS (Linear Blend Skinning) 法⁹⁾の式

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} w_i \mathbf{M}_i \mathbf{x}_0 \quad (1)$$

を用いて背骨の動作と連動させた。ただし \mathbf{x}_0 は変形前の表面点群の位置、 \mathbf{M}_i は関節周りの回転行列、 w_i はどの骨に連動するかを表す重みであるスキニングウェイト、 \mathbf{x} は変形後の表面点群の位置である。



Fig. 1 NACA0012, spine, and joints

4. 計算条件

計算条件と計算領域を Fig. 2 に示す。領域として長さ 80 cm、高さ 40 cm の水槽を考え、この領域の x, y の各方向をそれぞれ 800 格子、400 格子に分割した。初期水面高さを 20 cm とし、壁に対する流速の境界条件には no-slip 条件、圧力の境界条件には底面以外には法線方向勾配ゼロを、底面には初期時刻での静水圧値を課した。

また魚モデルの大きさは5 cm とした. 初期状態において魚モデルの頭部先端位置は水面から5 cm, 右端から6 cm の位置にあり, モデルの水面に対する仰角は0 とする.

次に, 計算の内容について説明する. 「はじめに水平遊泳を行った後, 上方方向に方向転換し跳躍する. 着水後, 元の高さまで戻り水平遊泳を行う」状況を模擬した. 右端から20 cm の地点 (以下, turning point とする) に到達後, 前述の方向転換時における曲げ動作を行い上方方向に方向転換する. ただし, turning point を通過してから曲げ動作を行うため, 魚モデルはより進んだ位置で方向転換すると考えられる. また跳躍時の仰角についても直前の遊泳速度および曲げ動作の速さや曲げ具合によって大きく変化するため, こちらからは直接指定しないものとする.

更に, 跳躍のための方向転換を行うまでと, 跳躍後再度着水しからは水面からの距離を一定に保つように適宜方向転換を行うように設定した. ただし現状, 曲げ動作は一度完了するまで次の曲げ動作に移らせていないことに留意されたい.

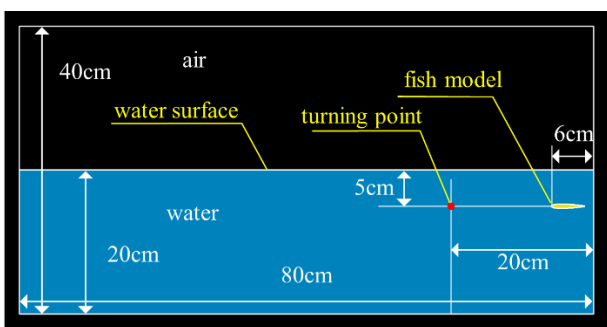


Fig. 2 Computational region and initial position of fish model

5. 計算結果

Fig. 3 に turning point 到達後, 時刻 $t=0.32$ s における魚モデルまわりの渦度およびその前後 0.06 s 毎における魚モデルの動きの様子を示す. 方向転換時の曲げ動作が顕著にみられており, 後方に渦を放出するとともに加速していることがわかる.

Fig. 4 は時刻 $t=0.20$ s 以降における 0.06 s 毎の魚モデルの動きの様子である. 着水後の動作としてはある程度元の高さに近づけることはできたものの, 完全な水平遊泳に戻すことはできていない. これは元の高さに戻る際の曲げ動作による加速が生じており, 再度曲げ動作が可能になるまでに元の高さを通り過ぎてしまうためと考えられる.

このほか, C-start を再現する計算も行った. Fig. 5 はその動きの特徴的な部分を抜き出した概略であるが, 詳細は講演にて紹介する予定である.

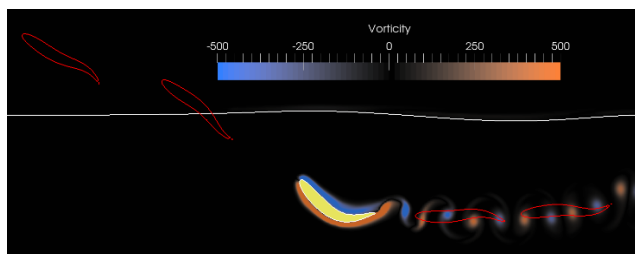


Fig. 3 Motions of fish model and vorticity
(yellow : $t=0.32$ s, red lines : motion per 0.06 s)

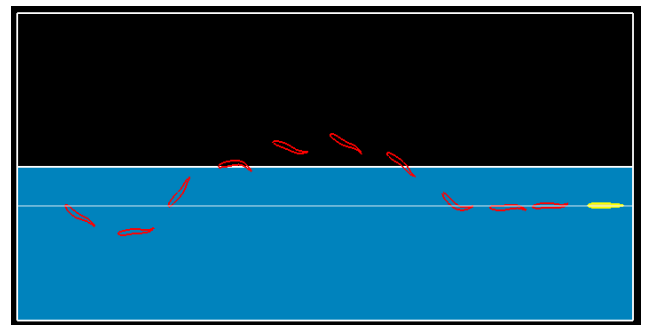


Fig. 4 Time trace of swimming motions of fish model
(yellow : $t=0.0$ s, red lines : motion per 0.06 s from 0.2s, sky-blue line : initial height)

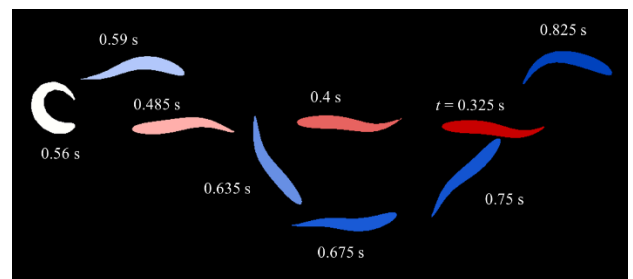


Fig. 5 Simulation of tum around by C-start

6. 結言

背骨の動作を考慮した変形式を用いて魚の水面近くにおける遊泳制御を行った. これにより従来の変形手法と比べて変形動作の自由度が高くなり, より現実的な魚の方向転換を再現できているといえる. また, 方向転換時の曲げ動作により, 後方に渦を放出するとともに加速することが確認できた.

一方で, 曲げ動作による水平遊泳の方向制御については特に着水後が不完全であり, 跳躍姿勢をとるための方向転換についても正確な仰角を与えることは困難である. このため曲げ動作による魚モデルの運動については定量的な解析が必要であると考えられる.

今後の課題として一定の深さを維持する水平遊泳のみならず, 曲線状のルートを遊泳させること, より現実に近い条件下でエネルギー効率や力学的な作用を解析するために筋力の考慮を行うことなどが挙げられる.

謝辞

本研究の一部はHPCIシステム利用研究課題および平成29,30年度地球シミュレータ公募課題の成果によるものであり, 計算には京都大学学術情報メディアセンターのシステム E Cray XC30 with MIC (HPCI 課題番号 : hp150204, hp160175), 東北大学サイバーサイエンスセンターのSX-ACE (HPCI 課題番号 : hp150204, hp160175, hp170216), 海洋開発研究機構の地球シミュレータ (HPCI 課題番号 : hp160175 および平成 29,30 年度地球シミュレータ公募課題) を利用した. また, JSPS 科研費 JP17K06148 の助成を受けた. ここに記して謝意を表する.

参考文献

(1) 青木ほか, “階段式魚道の呼び水がつくり出す流れとそれに対する魚の行動,” 環境システム研究論文集 Vol.36, (2008).

- (2) Koca, G. O. *et al.*, "Implementations of the route planning scenarios for the autonomous," *Measurement* 93, (2016), pp.232-242.
- (3) 松本, 白崎, "水面を跳躍しながら遊泳する魚まわりの CFD 解析," *ながれ* 第 32 巻 第 2 号, (2013), pp. 89-94.
- (4) 佐々木, 白崎, "解適合格子を用いた水面付近の魚の自律推進・跳躍運動の 3 次元解析," 第 29 回数値流体力学シンポジウム 講演予稿集, (2015).
- (5) 松下, 白崎, "推進効率を考慮した水面付近における魚の遊泳と跳躍に関する 3 次元数値解析," 第 31 回数値流体力学シンポジウム 講演予稿集, (2017).
- (6) Akimoto, H. and Miyata, H., "Finite-volume simulation of a flow about a moving body with deformation," *In 5th Inter.Symposium on Computational Fluid Dynamics* vol.1, (1993), pp.13-18.
- (7) 小笠原, 尾形, "魚体運動を模した変形薄翼推進効率の運動依存性に関する数値的考察," 第 24 回計算力学講演会, (2011).
- (8) Su, Y.-C. and Wu, T., "Numerical Simulations of Fast-Start Motions of Fish," *Procedia Engineering* 79, (2014), pp. 66-75.
- (9) Magnenat-Thalmann, N. *et al.*, "Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping," *Graphics Interface '88*, (1988), pp. 26-33.