

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

Three dimensional analysis for jumping motion of self-propelled fish near water surface using adaptive mesh refinement

- 佐々木一真, 横浜国大院, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2, sasaki-kazuma-hj@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
Kazuma SASAKI, Yokohama National University, 79-2, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama
Minoru SHIRAZAKI, Yokohama National University, 79-2, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama

This paper presents a three dimensional numerical analysis for jumping motion of a self-propelled fish-like object near water surface using level set functions to capture the liquid-gas, solid-gas and solid-liquid interfaces and the ghost fluid method to apply boundary conditions of the object surface. Adaptive mesh refinement method is used in the computational domain to refine mesh around free surface and the fish-like object. In this method fine mesh should be used only to where a high resolution is required and coarse mesh is for other area. Also it can guarantee high accuracy results and reduce computational time. The numerical results of the fish motion during jumping, the flow around it and swimming velocity when it jumps and returns to the water are mainly written in this paper.

1. 緒言

イルカや魚などの水棲生物の形状や体表, 遊泳運動は興味深く, それらの研究の成果は例えば抵抗軽減の技術に代表されるような工学の分野に限らず様々な分野へ応用されてきた. その中でも水棲生物の遊泳運動そのものについては非常に興味深く, イルカは自身の持つ筋肉量と遊泳時にかかる抵抗を考慮した際の遊泳速度を超える速度で遊泳しているという“Gray のパラドックス¹⁾”を代表とした謎や未解決の問題が多くある. また, 様々な水棲生物に見られる跳躍運動について, 跳躍を行う利点や目的は必ずしも明らかになっていないというのが現状である. 特に跳躍運動に関する実験や観測を実際の水棲生物を用いて実施することは, その制御の面で非常に困難であることから, 数値計算による解析は有効であり, 遊泳や跳躍運動に関する謎や未解決の問題に対する新たな知見の獲得の可能性があると考えられる.

水棲生物の遊泳, 跳躍運動に関する実験的解析について例を挙げると, Fishらはイルカが遊泳する際に水中にできる気泡の流れを DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) により測定することによってイルカの尾ひれまわりの流れを観測し, Gray のパラドックスの解明の糸口を見つけたと報告している²⁾. また, 馬淵らはアユの跳躍行動パターンとプールの水深の関係を観測, 報告をしている³⁾が, 力学的な視点からの解析はなされていない. 一方格子を用いた数値解析については, 水棲生物を模した 2 次元の翼型モデルの変形パターンを複数設定し推進効率などを議論した例⁴⁾や, 3 次元の魚モデルが計算領域内を自律推進する例⁵⁾など, 国内外問わずこれまで多く行われている. しかしながら, いずれの研究例も水面の存在を考慮しない水中を想定した解析である. SPH 粒子法を用いた数値計算では魚を模した 2 次元物体の水面を考慮した遊泳解析が報告されている⁶⁾が, 詳細な魚の形状や変形運動では解析されておらず, 水面を考慮した水棲生物の遊泳解析はほとんど見当たらない.

著者らはこれまで, 自律推進する水棲生物の水面付近での遊泳と跳躍運動の 2 次元解析^{8),9)}, 尾ひれのある魚型物体の水面付近での自律推進の 3 次元解析¹⁰⁾を行ってきたが, 跳躍運動の 3 次元解析や, 計算時間の短縮と自由表面や物体まわりの高解像度化を目的とした解適合格子 (AMR) の導入などが課題として残されていた. そこで本講演では, 水棲生物の水面における跳躍運動の 3 次元解析を, 解適合格子を用いて行い, その計算結果を報告することを目的とする.

2. 計算手法

計算には等間隔直交格子ベースの有限差分法を用い, Staggered 格子を採用した. Level Set 法と Ghost Fluid 法を組み合わせた, 変形を含む任意形状移動物体と自由表面である水面を同時に扱うことのできる手法¹¹⁾にもとづいて計算を行った. 支配方程式として, 非圧縮性の連続の式と Navier-Stokes 方程式, Level Set 関数の移流方程式を用いて, Fractional step 法に従ってこれらを解いた. 時間進行には 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法, 移流項には 5 次精度 WENO 法, 粘性項には 2 次中心差分, 圧力 Poisson 方程式の解法には BiCGStab 法を用いた. 詳しくは, 既報¹²⁾を参照されたい.

3. 解適合格子法 (AMR: Adaptive Mesh Refinement)

等間隔直交格子ベースの計算手法では, 自由表面である水面と物体まわりの高解像度な計算の需要と相反して計算コストが膨大になり, 現実的な時間での計算が困難になる問題がある. これに対して, 高解像度が必要な領域の格子を細かくし, それ以外の領域では格子を粗くする格子を用い, 時々刻々変化する流れ場に対して動的に格子を設定する“解適合格子法”を採用する. これにより全領域を高解像度に設定するよりも格子数を節約でき, 精度を保った計算が可能となる.

開発に要する時間や労力を軽減するために本研究では, 既存の解適合格子ライブラリ“PARAMESH”を利用した. PARAMESH は MPI 並列計算に対応した, 八分木型ブロック構造格子を生成するライブラリであり, 並列計算を伴った複雑なブロック構造を自動で管理するものである. Fig. 1 に八分木型ブロック構造 (Fig. 1 は 2 次元例なので四分木) を示す. 各ブロック内には計算格子が満たされているがここではその計算格子は表示していない. 太いラインの円を Leaf block (Children block) と呼び, 数値計算は主に Leaf

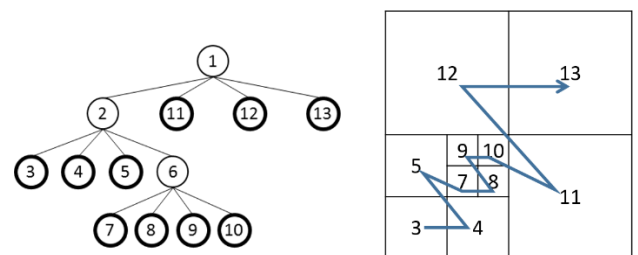


Fig. 1 Block structure of PARAMESH and Morton order

block のみで行う。また、ブロックは Morton order で並んでおり、ブロックの細分化と粗大化に応じて再度 Morton order に並べ替えられることで複雑なブロック構造を管理し、総ブロック数を並列数で割り複数プロセスで計算し適宜 MPI 通信を行うことで計算の動的負荷分散を行う。

4. 魚モデル

水棲生物の形状には、Fig.2 に示すような尾ひれのある 3 次元の魚モデルを使用した。この魚モデルの表面の座標値をもとに表面から各格子点までの距離を算出し、Level Set 関数とする。変形モデルには小笠原ら⁴⁾が用いた 2 次元の翼型に対する変形式を参考に以下の式(1)~(3)を用いて、ある時刻 t での、魚モデルの頭部の先端からの距離 x における y 方向の変形量である $h_y(x,t)$ を求めた。ここで、 L は魚の全長[m]、 λ は変形波長[m]、 c は位相速度[m/s]である。以後、この魚モデルを「魚」と呼ぶことにする。

$$h_y(x,t) = f(x) \cdot g(x,t) \quad (1)$$

$$f(x) = 0.15L(x/L)^2 \quad (2)$$

$$g(x,t) = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x-ct)\right) \quad (3)$$

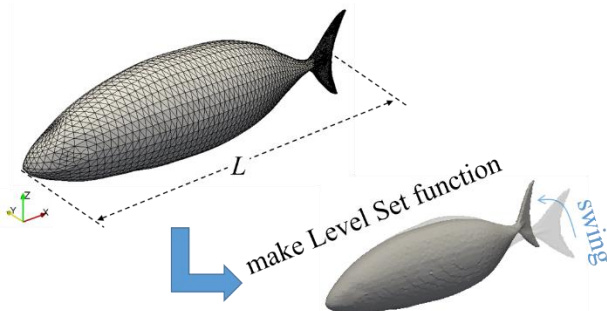


Fig. 2 3D fish model

5. 自律推進により水面を跳躍する魚の遊泳解析

水面の影響のない水中深くを遊泳する場合に比べて、水面付近を遊泳する場合は水面に波をつくる影響により抵抗が大きくなり遊泳効率が下がることが予想される。一方で水面を跳躍しながら遊泳する場合は水中よりも抵抗の少ない空中を移動することができ、跳躍時に水面を通り抜ける際のロスを考慮しても総合的に効率の良い遊泳ができるのではないかと推測できる。

そこで水面付近を跳躍し、空中を移動したのちに再度水中に入る遊泳を想定し、複数の条件での比較を行うための前段階として、完全直交格子による限定的な条件での解析例について述べる。解適合格子による解析の詳細については講演で述べる予定である。

5-1. 計算条件

Fig.3 に示すように計算領域として幅 0.4m、長さ 0.1m、高さ 0.16m の水槽を想定し、格子分割数は $800 \times 200 \times 320$ とした。この時、分割格子幅は $\Delta x = \Delta y = 5.0 \times 10^{-4}$ m である。壁に対する流速の境界条件はすべてすべりなしとし、壁に対する圧力の境界条件は法線方向の圧力勾配がゼロとなるように課した。

気相、液相はそれぞれ空気と水とし、密度はそれぞれ 1.0 kg/m^3 、

1000 kg/m^3 、粘性係数はそれぞれ $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ とした。また表面張力係数は $7.32 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ 、重力加速度は 9.8 m/s^2 とし、魚の密度を水と同じ 1000 kg/m^3 、魚の全長は $L=0.05 \text{ m}$ 、遊泳時の変形波長を $\lambda=L$ とした。魚の表面に対する流速の境界条件として魚と流体の相対速度がゼロとなるような流速を課した。初期水面の高さを 0.09 m 、魚の頭部先端から水面までの距離を 0.04 m とした。本稿では一例として、変形の位相速度 $c=2.0 \text{ m/s}$ について考察する。

水面を跳躍し空中を移動、そして再度水中に入り水平方向へ遊泳する運動を角速度の調節により行う。魚は水平面に対して迎角 $\theta=45^\circ$ で遊泳を開始して魚全体が初期水面位置より高くなるまで θ を固定する。魚全体が初期水面位置より高くなった時点での魚の鉛直方向の速度を V_z とし、跳躍を終え魚全体が再度水中に入るときに頭から着水するように一定の角速度 $\omega = \pi(2V_z)$ を与え回転を行う。さらに水面に突入し魚全体が初期水面位置よりも低くなった後は、初期水面と平行になるまで $-\omega$ の角速度で回転を行う。

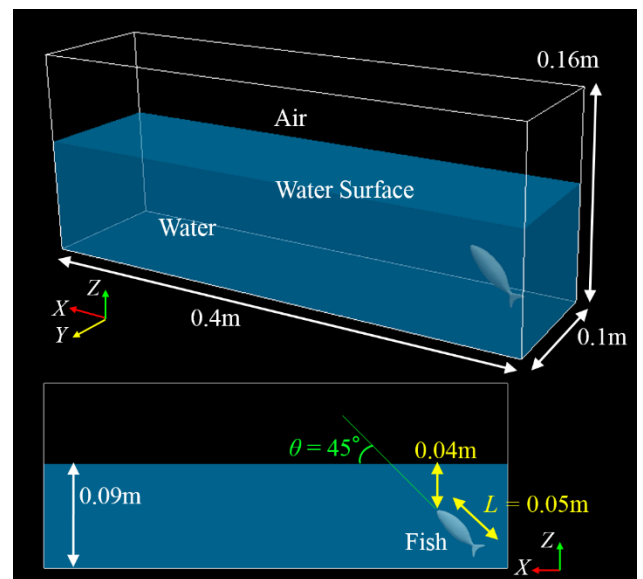


Fig. 3 Computational region and initial condition

5-2. 計算結果

Fig. 4 に、魚の跳躍の一連の動きと魚全体が初期水面位置より高くなった時刻である $t=0.18 \text{ s}$ の時点での水面の様子、魚が再度水中に入り魚全体が初期水面位置より低くなった時刻である $t=0.36 \text{ s}$ の時点での水面の様子を示す。 $t=0.18 \text{ s}$ において、魚が水面を通り抜けた影響により水しぶきが上がっている様子が見られ、その後魚は空中を姿勢を変えながら移動し水面に再突入し、水面にほとんど波をつくることなく魚全体が水中に入る様子が見られる。この時の魚の x 方向の移動速度を v_x 、 z 方向の移動速度を v_z とし、2 方向の移動速度の絶対値 $\sqrt{(v_x)^2 + (v_z)^2}$ の時間履歴を Fig. 5 に示す。グラフが途中で切れているが、これは魚が領域端に達したためである。魚が水中にいる $t=0.14 \text{ s}$ 以前では魚の角度が 45° であり、魚の密度は水と等しく浮力と重力が釣り合うことから、 v_x と v_z はほぼ等しい。 $t=0.14 \text{ s}$ 以降魚の一部が空気中に出てくるため、魚にはたらく浮力が小さくなり v_z は減少する。一方 v_x はほぼ一定の速度を維持しており、空気中における抵抗が少なく速度がほとんど減少しない様子を示している。 $t=0.24 \text{ s}$ 付近で魚は鉛直方向最高点に到達し、その後重力により落下し水面に到達する。 $t=0.33 \text{ s}$ 付近で魚は水面に再突入を行い水の抵抗を受け始めるため v_x は減少し、 v_z の絶対値も減少し 0 に近づく。また著者らの 2 次元計算の

結果⁹⁾よりも移動速度の減少の割合は 3 次元の方が少なく、水面突入時の抵抗が小さいと思われ、水面に突入する際に 3 次元的に迂回するような水の流れができ 2 次元の場合と比較して抗力が低下することを考えると妥当である。空中での進行方向の移動速度 v_x の減少がほとんどないことを考慮すると、跳躍を含む遊泳は水面付近を遊泳する場合と比べて優位である可能性があることがわかった。

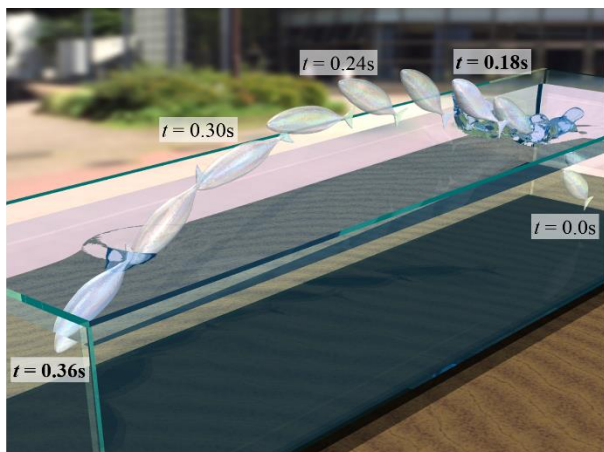


Fig. 4 Time trace of jumping motion and water surface at $t = 0.18$ s on the right side and at $t = 0.36$ s on the left side

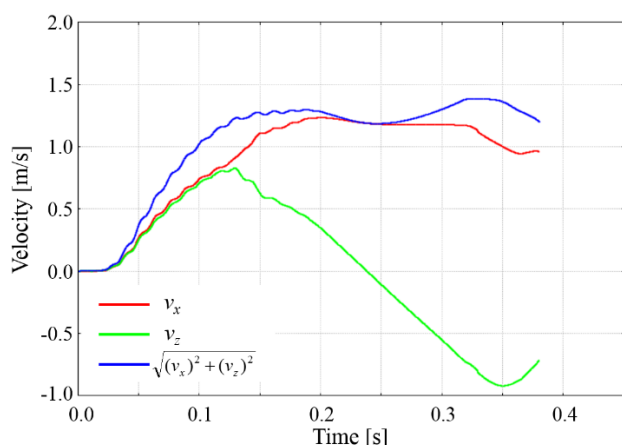
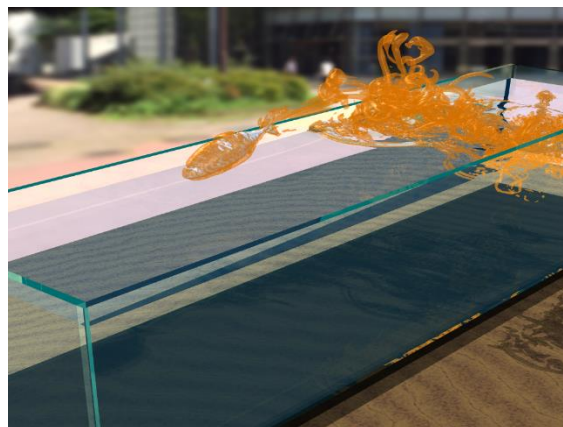


Fig. 5 Time history of swimming velocity

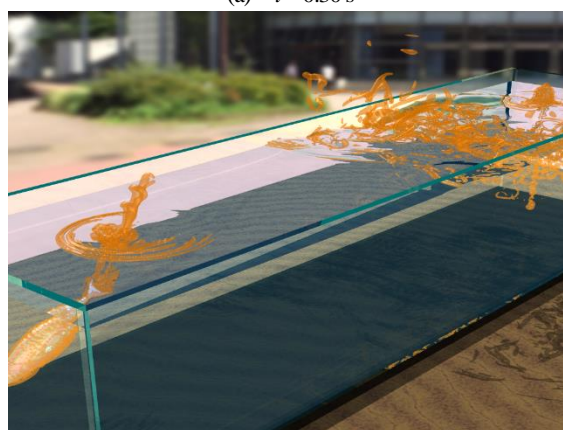
Fig. 6 に $t = 0.30$ s と $t = 0.38$ s における空気と水の渦の様子を示す。渦の可視化には、各格子点における速度勾配テンソルの第 2 不変量を用いた。跳躍を行う前に水中を遊泳したことによる渦や、空中を移動することにより発生する渦、水面に再突入する際の魚まわりや水面にできる渦を良く捉えており、魚が跳躍する際の水や空気の定性的な振る舞いを確認することができた。今後、異なる複数の条件での跳躍結果に対して詳細な解析が必要である。

6. 結言

水面付近における魚の遊泳・跳躍運動の計算を行い、魚の跳躍の様子や水面を通り抜ける際の水面の様子、跳躍運動時の魚まわりの空気と水にできる渦の様子を良く捉えた結果を得た。魚が跳躍中には進行方向に対する移動速度がほとんど減少することがなく、水面に再突入する際の速度減少が少ないことから安定した跳躍を行っている様子を確認でき、水面付近を遊泳する際に跳躍を伴う遊泳を行うことが抵抗軽減の一因になる可能性があることを



(a) $t = 0.30$ s



(b) $t = 0.38$ s

Fig. 6 Visualization of vortical structures of water and air

示唆する結果を得た。

今後、解適合格子を用いて異なる複数の条件での計算を行い、水面の存在が魚の遊泳に与える影響を調査し、特に水面付近の水中を遊泳する場合と跳躍を行う場合について比較を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、HPCI システム利用研究課題（課題番号：hp150204）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および東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 田中一郎, 永井實, “抵抗と推進の流体力学 - 水棲生物の高速遊泳能力に学ぶ -,” シップ・アンド・オーシャン財団, (1996).
- (2) F.E. Fish, P. Legac, T.M. Williams, T. Wei, “Measuring of hydrodynamic force generation by swimming dolphins using bubble DPIV,” *J. Experimental Biology*, Vol. 217, (2014), pp. 252-260.
- (3) 馬淵和三, 平松研, 板垣博, “アユの跳躍とプール水深について,” 農業農村工学会論文集, No. 260, (2009), pp. 39-46.
- (4) 小笠原烈, 尾形陽一, “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,” 日本機械学会第 24 回計算流体力学講演会 CD-ROM 論文集, (2011).
- (5) J. Wu, C. Shu, “Simulation of three-dimensional flow over moving objects by an improved immersed boundary-lattice Boltzmann method,” *Inter. J. Numerical Methods in Fluids*, Vol. 68, (2012), pp. 977-1004.

- (6) I. Borazjani, M. Daghooghi, "The fish tail motion forms an attached leading edge vortex," *Proc. R. Soc. B*, Vol. 280, (2013).
- (7) J.B. Kajtar, J.J. Monaghan, "On the swimming of fish like bodies near free and fixed boundaries," *European J. of Mechanics B/Fluids* Vol. 33, (2012), pp. 1-13.
- (8) 松本佑紀, 白崎実, "水面を跳躍しながら遊泳する魚まわりの CDF 解析," *ながれ* 第 32 卷 第 2 号, (2013), pp. 89-94.
- (9) 佐々木一真, 白崎実, "水面付近を自律推進し跳躍する魚まわり流れの 2 次元数値解析," 日本流体力学会年会 2015 講演予稿集, (2015).
- (10) 佐々木一真, 白崎実, "水面付近を自律推進する魚まわり流れの 3 次元 CFD 解析," 第 28 回計算力学講演会 講演予稿集, (2015).
- (11) K. Yokoi, "Numerical Method for Interaction among Multi-particle, Fluid and Arbitrary Shape Structure," *J. Sci. Comput.*, Vol. 46, (2011), pp.166-181.
- (12) 佐々木一真, 白崎実, "自由表面を含む変形により移動する物体まわり流れの 3 次元解析," *ながれ* 第 34 卷 第 2 号, (2015), pp. 125-130.