

魚は流れ場の変化に応じて最も楽な遊泳姿勢を選ぶ

～尾ヒレを振らずに推進する「ドラフティング」の仕組みを解明～

ポイント

- ・尾ヒレを振らないまま流されず定位したり、他個体に追従したりする「ドラフティング」に着目。
- ・実際に生きた魚と翼模型を用いて魚のドラフティングを再現、魚体まわりの流れ場の解析に成功。
- ・魚体にかかる力が最小になるよう、流れ場に応じて最適な遊泳姿勢を選んでいた魚の機能性を解明。

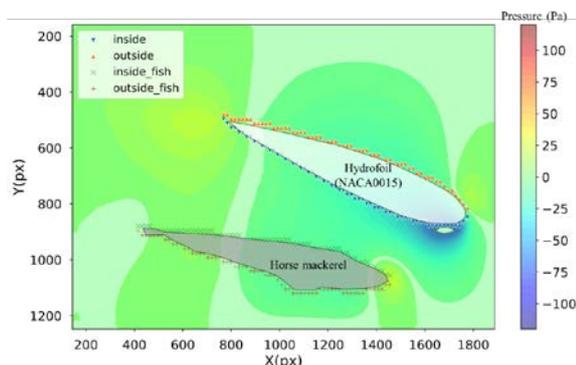
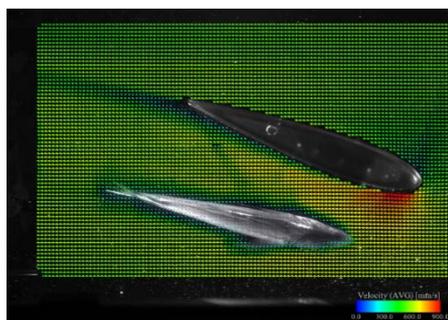
概要

北海道大学大学院水産科学院博士後期課程3年（研究当時）の江口 剛氏と同大学大学院水産科学研究院の高木 力教授らの研究グループは、魚が尾ヒレを振らずとも推進できる「ドラフティング」についてマアジやウグイと翼模型を用いた生体実験を行い、魚が魚体まわりの流れ場の変化に伴う圧力差を利用することで魚体にかかる力を低減させるメカニズムを明らかにしました。

魚は尾ヒレを振って流体を押し出し、その反作用で推進します。ただ、例えば川の岩など構造物周辺では尾ヒレを振らずに定位する様子も報告されます。これらは構造物の影となる死水域や前方の淀み域に魚が入ることで流れから受ける抗力と釣り合わせています。そのため似た個体サイズが集まる魚群内で同様の現象が起きるとは考えにくいです。

そこで本研究では魚群を想定し、魚の流線形に似た翼模型を構造物に採用しました。粒子画像流速測定法（PIV）を用いて流れ場を可視化・解析した結果、流れの剥離がほぼない状態で比較的高い流速を受ける環境下でも、翼模型近傍に生じる局所的な低圧領域を利用して魚はドラフティングを実現させていました。この仕組みは生体実験のほか、魚を再現した模型実験や数値流体力学（CFD）でも検証し、魚の能動的な遊泳姿勢の制御がなければドラフティングの維持は困難だと明らかにしています。構造物まわりの局所的な圧力差すら推進力に利用できる魚の優れた形態や、常に魚体にかかる力を最小限に留めようとする柔軟な機能性が示唆されており、魚群遊泳における遊泳時の消費エネルギー節約の仕組みを説明する一因として発展が期待できます。

なお、本研究成果は2024年4月20日（土）に *Journal of Theoretical Biology* 誌でオンライン公開されました。



魚体まわりの平均流速分布（左）と圧力分布（右）の解析

ドラフティングの動画：<https://youtu.be/p6V7hgVLw7E?si=n0tvVCzdgXWMoQaO>

【背景】

他個体との直接的な接触なく力の作用が起きて泳ぐ現象は「ドラフティング」と呼ばれ、例えば子イルカが尾ヒレを振らずとも親イルカに追従できる「抱っこ泳ぎ」が知られています。魚については先行研究で半円状の D 型構造物とサケ科魚類を用いた検証があり、構造物の背後に生じた流れの剥離に伴う乱流域を吸引力として川の流れに対し定位できるとしていました。魚群内でも、ときおり尾ヒレをあまり振らずとも他個体に付いていく様子が報告されています。しかし瞬間的な現象であり、実際に生きた魚で検証するには再現性が難しく直接的な仕組み解明には至っていませんでした。

そこで本研究では、魚群内でどのようにドラフティングが起こりうるのかを安定的に検証するため、魚体を想定した構造物として鉛直方向に細長い翼模型を採用しました。実験魚としては集群性のあるマアジとウグイの 2 種を採用し、生きた魚と翼模型と一緒に泳がせたときにどのようなメカニズムでドラフティングが生じうるかを調べました。

【研究手法】

ウグイの実験は北海道大学水産学部で、マアジの実験は共同研究先である近畿大学農学部で行いました。設定した流速を発生させる回流水槽に微粒子を懸濁させ、レーザーシート光で流れ場を可視化しました（図 1）。実験魚は全長 20 cm 前後のウグイとマアジを使用し、翼模型は魚と同サイズの翼弦長 20 cm の NACA0015 を 3D プリンタで作成しました。流速は 40 – 60 cm/s、翼模型の流れに対する迎角は 0 – 50° まで変更し、魚がドラフティングを取った環境条件と魚体まわりの流速や圧力分布を PIV 解析で求めました。また特に安定したドラフティング（マアジ、流速 50 cm/s、翼模型迎角 20°）に注目し、実験魚の体測データから再現した魚体模型を同じ位置や遊泳姿勢で設置した際の魚体にかかる力を分力計で実測したほか、CFD 解析による流体シミュレーション上でも検証しました。

【研究成果】

生体を用いた PIV 解析では、先行研究同様に翼模型が 40° や 50° の時は剥離領域が発達し、魚が引き付けられ定位する様子が見られました。一方で、本実験条件下で剥離領域が発達しない迎角 20° 以下でも魚はドラフティングができていました。この時の魚が経験する流速は、迎角を持った翼まわりの循環により回流水槽の設定流速より高い値です。そのため通常ならば魚が受ける抗力が増大しますが、魚は翼近傍と翼から離れた領域との間に生じた圧力差を吸引力として利用することで、流されず定位できていたことが PIV 解析によって得た流速及び圧力分布から示唆されました（図 2）。

ここで興味深いのが、魚もまた翼模型同様に流れに対し迎角を持っていた点です。実際に模型実験で魚体にかかる力を、翼模型との位置関係を維持したまま魚の迎角を重心中心で -10° から 30° まで 5° 間隔で検証したところ、実際の魚が選択した迎角の時に魚体に働く前後左右の合力が最も 0 に近い値を示しました。魚が流れ場に応じて最適な迎角を選択することで左右方向の力のつり合いも取り、翼模型に衝突することなくドラフティングが維持できていました。

一方で魚体にかかる回転モーメントを CFD 解析で調べたところ、迎角が正の値に大きくなれば回転モーメントもまた迎角を更に増加させる正の方向に働く傾向が見られました。これは魚にとって最適な迎角から外れたときに遊泳姿勢の維持が困難になることを示唆しており、ドラフティングを続けるには魚が流れ場の状況に応じて能動的な姿勢制御をする必要があります。実際、魚はドラフティングをしている最中に胸ビレを片方のみ開いたり、魚体の曲率を変えたりする行動が確認されました。魚が魚体の回転を防ぎながら最適な遊泳姿勢を維持するため、胸ビレや魚体の曲率で飛行機の翼でいうスポイラーやフラップのような機能性を果たした可能性が考えられます。

【今後への期待】

本研究で、物体後方の流れの剥離による死水域での低圧や物体前方の淀み域での高圧だけでなく、物体側方の高流速に伴う局所的な低圧領域でも魚はドラフティングが可能であることを示しました。更に魚が前後方向だけでなく、魚体の位置や迎角を能動的に選択することで左右方向の力も釣り合わせ、魚体にかかる前後左右の合力が最も0に近い値となる最適な遊泳姿勢を選択する柔軟な機能性を持つことも明らかにしました。この仕組みが魚群遊泳中での魚体まわりの圧力や流速の変化に応じて発揮されることで、魚群遊泳による遊泳時の消費エネルギーの節約に寄与することが期待されます。ただし、遊泳中に迎角を持つことは通常ならば抗力が増大するため、魚群内での遊泳位置の変更や方向転換など瞬間的にしか見られない可能性もあります。より自然環境に近い魚群を想定して検証するためには、翼模型ではなく魚に近い形状の模型を複数用意したり、個体数を増やしたりした検証が今後必要です。

論文情報

論文名 Drafting behaviors in fish induced by a local pressure drop around a hydrofoil model
(翼模型近傍での局所的な低圧領域による魚のドラフティング行動)
著者名 江口 剛¹ (研究当時)、高木 力²、鳥澤眞介³、竹原幸生⁴ (¹北海道大学大学院水産科学院、²北海道大学大学院水産科学研究所、³近畿大学農学部、⁴近畿大学理工学部)
雑誌名 Journal of Theoretical Biology (理論生物学の専門誌)
DOI 10.1016/j.jtbi.2024.111821
公表日 2024年4月20日(土)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院水産科学研究所 教授 高木 力 (たかぎつとむ)

T E L 011-706-2323 メール tutakagi@fish.hokudai.ac.jp

U R L <https://sites.google.com/view/laboratoryoftakagi>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

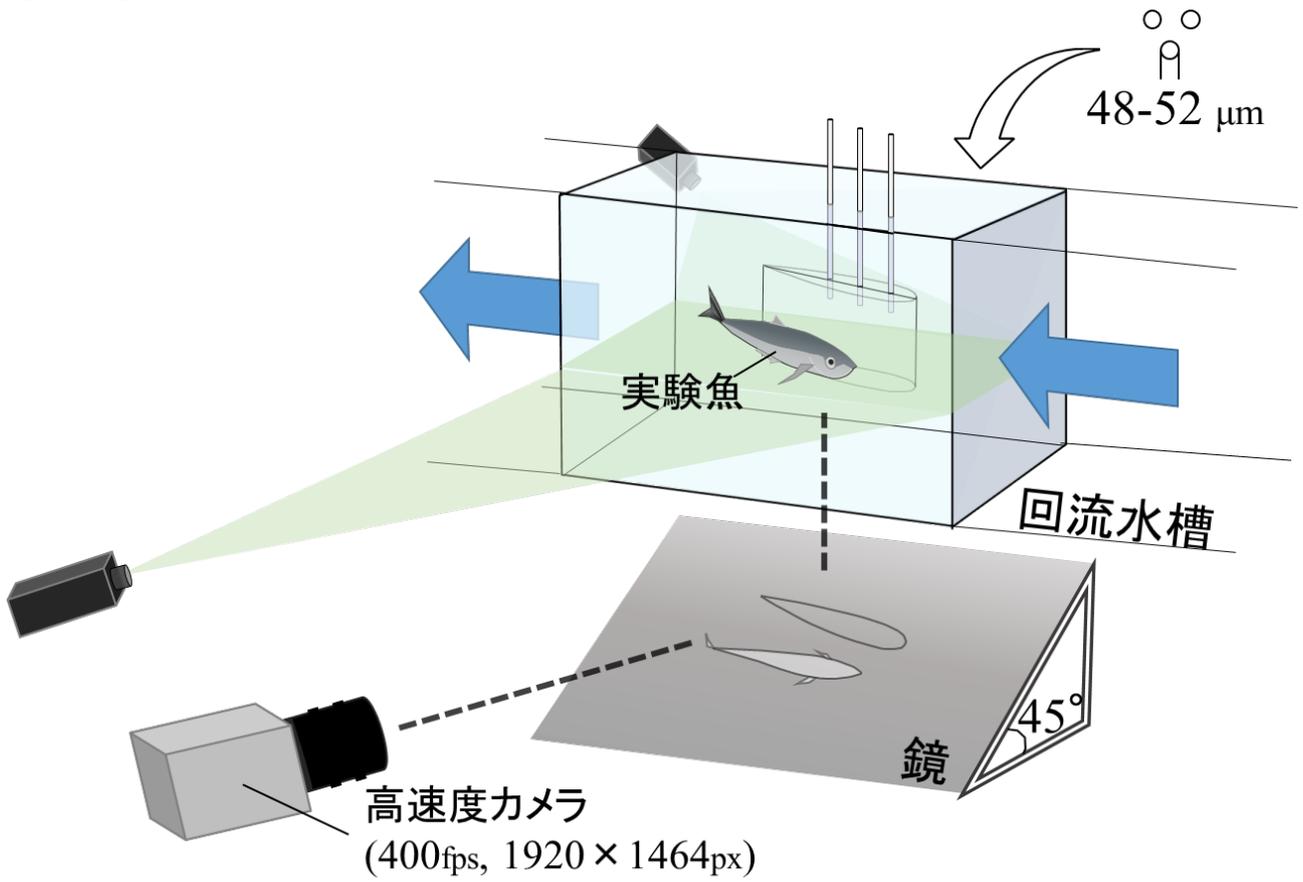


図 1. 翼模型と生きた魚を用いたドラフティングの PIV 実験の概略図

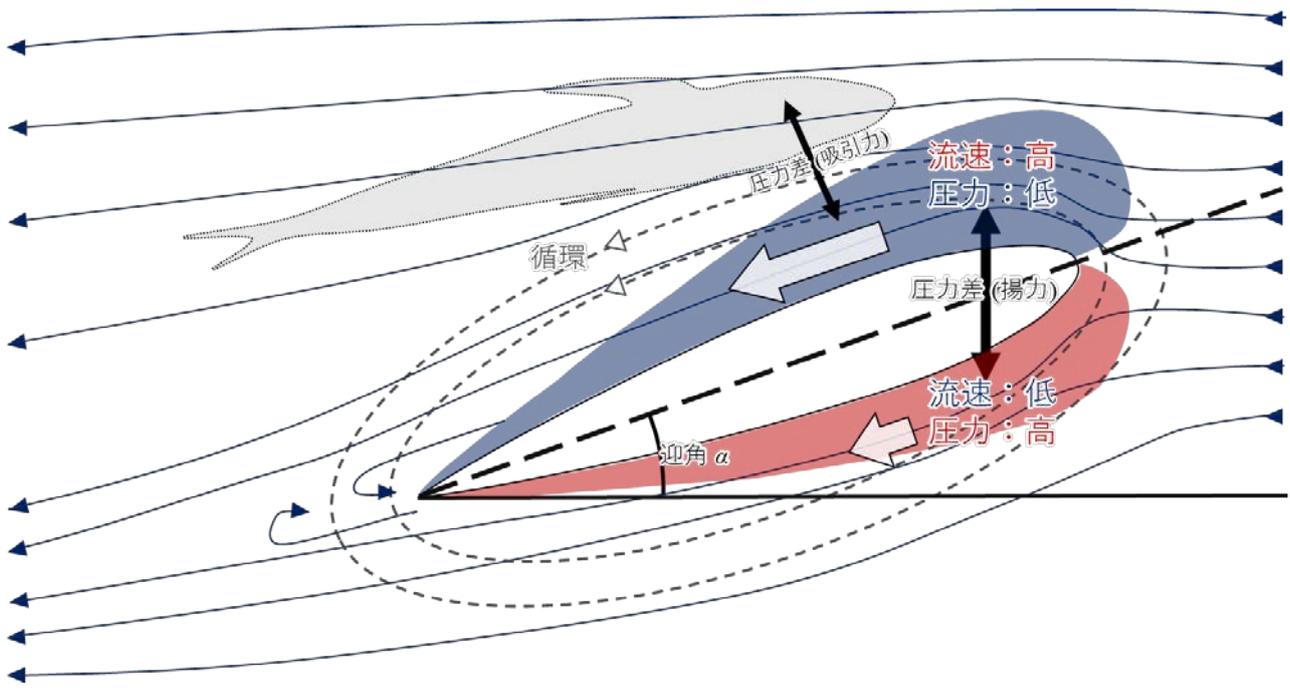


図 2. 翼模型近傍で尾ヒレを振らずに推進するドラフティングの仕組み