



Title	魚類の推進機能性と個体間の流体力学的相互作用に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	江口, 剛
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	甲第15706号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92419
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Go_Eguchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称：博士（水産科学）

氏名：江口 剛

学位論文題目

魚類の推進機能性と個体間の流体力学的相互作用に関する研究

多くの魚類は翼形状に近い流線形を持ち、より消費エネルギーを抑えて移動する性質を持つ。これらは魚体形状や遊泳行動に特徴として現れることが多い。例えば魚が群泳するメリットは生残率や摂餌効率の上昇など様々だが、その一つに流体力学的な推進効率の向上が提唱されている。魚群遊泳以外でも、大型魚の口吻付近の淀み域を利用した効率的な移動や、尾鰭を動かさず他個体に追従するなど、個体間の物理的な接触なしで力を伝える「ドラフティング」が報告されてきた。これらの遊泳メカニズムの解明は、従来の巡航速度と魚体の抵抗のみでは求められなかった魚の移動時の消費エネルギーのより正確な推定に繋がるほか、魚群構造を流体力学的な視点から把握し、行動生態を理解するうえで重要な知見になりうる。そこで本研究では、魚の遊泳による移動について実際に生体を用いて研究し、尾鰭振動の機能性や個体間の相互作用のメカニズムに注目しながら、魚類の移動戦略における群行動の果たす役割を流体力学的視点から明らかにすることを目的とした。

【単独遊泳 | 尾鰭振動による推進効率】 第1章では尾鰭振動で流体を押し出して推進する魚類を対象に、尾鰭による推進パワー P_T と筋肉が消費した正味の代謝 P_{net} を比較することで、尾鰭振動による推進効率を直接生体から評価した。供試魚にはマサバ (*Scomber japonicus*)、ウグイ (*Tribolodon hakonensis*) のほかマアジ (*Trachurus japonicus*) を採用した。 P_T は魚の後流域を粒子画像流速測定法 (PIV) によって可視化・解析し、尾鰭振動に伴い形成された逆カルマン渦を参考に推進力を算出した。 P_{net} は酸素消費量から得た総代謝から安静時の代謝を減算して求めた。比較した結果、正味の代謝に対する推進パワーが、魚種や遊泳速度を問わず一定の比率を示す結果を得た。

【魚群遊泳 | 群泳による後流域発達】 第2章では、魚群遊泳における流体力学的なエネルギーセーブの要因として提唱されている並列遊泳時の尾鰭振動による後流域発達について、実際に生体を複数個体用いて検証した。マサバやウグイ、マアジを用いて PIV で直接流場を解析した結果、尾鰭振動に伴う逆カルマン渦列を並列個体の後流域に確認し、渦の伴流によって後方個体の経験流速が 4 – 9 % 低減しうる後流域発達の存在を明らかにした。この現象は供試魚のいずれの魚種においても確認でき、集群性のある魚種なら群泳中に生じうることが示唆された。また 2 種類の波長の光源を用いて複数の可視化領域を解析する複層 PIV では、体軸から離れた領域で渦断面が確認されなかったにも関わらず、後流域に軽微な流速低減が生じた。これは群泳中の後方個体にとって、遊泳位置が前方個体の尾鰭端部まで鉛直 z 軸方向に離れたとしても低減効果が働くことを示唆している。

これらの後流域発達に第1章で得た単独遊泳での代謝式を適用すると、経験流速の低下によって 5 – 12 % のエネルギーセーブが見込めた。一方で、酸素消費量から魚群遊泳時の総代謝を求め、個体間の流体力学的な相互作用を遮断した場合と比較した結果、23 % のエネルギーセーブを計測した。後流域発達のみでは群全体のエネルギーセーブを説明できず、他の流体力学的な相互作用の存在が示唆された。

【ドラフティング | 個体間の流れの相互作用】 第1章, 第2章の研究結果より, 魚群遊泳には後流域発達以外にも他の流体力学的なメリットが存在し, 魚はそのメリットを利用できる推進機能性を持つと考えられる。そこで第3章では, 例えば他個体の前方で泳ぐ個体や, 並列近傍に個体がいる場合の個体を想定した, 個体間の流体力学的な相互作用に焦点を当てた。特に尾鰭をほぼ振動させずに推進する「ドラフティング」に注目し, 推進機能性やメカニズムの解明を目的とした。

まず, 後方に大型魚類がいることを想定した平板とウグイの実験では, 定常流に対して尾鰭を振らず平板前で定位するドラフティングを確認した。その際, 平板の中心付近では尾鰭を曲げずに伸長した遊泳姿勢 (Straight) だったのに対し, 平板の端部ではやや屈曲させて魚体に反りを持った遊泳姿勢 (Camber) を取るなど, 位置関係に応じて魚体の曲率を変えて定位する傾向があった。それぞれの魚体模型を透明なレジンで作成し, 平板との位置関係を変えながら2軸分力計で前後方向の抗力と左右方向の揚力を計測した。その結果, Straight は平板中心部に配置時に作用する合力が最小値となったのに対し, Camber は平板端部に配置時に合力が最小値を示した。前後方向は平板の淀み域を起因とした高圧で抗力を打ち消したが, 左右方向は魚体自体を曲げて翼模型のキャンバーのように揚力を発生させ, 釣り合いを取ったと考えられる。PIV 解析や数値流体力学 (CFD) で圧力分布を可視化し, 魚体に作用する力を推定した結果も, 模型実験の結果を支持する値を示した。

前後方向だけでなく並列でもドラフティングは生じうる。魚体を想定した翼模型とウグイやマアジを用いた実験では, 魚の経験流速増加にも関わらず尾鰭振動せず定位する遊泳行動を確認した。構造物近傍なら死水域や剥離領域による抵抗低減も考えられるが, 流れの剥離領域が発達していない低い迎角の翼模型でも尾鰭振動周波数 1 Hz を下回った。この時, 魚体も翼模型同様に迎角を持つ傾向が見られた。PIV 解析で魚体と翼模型周りの圧力分布を推定し, 魚体に作用する前後左右の抗力と揚力を求めた。その結果, 翼模型近傍に生じた局所的な吸引力を利用することで抗力を打ち消したほか, 魚体自身も翼模型のように迎角を持つことで左右方向の力も打ち消したことが明らかになった。供試魚の体測データから魚体模型を作成し, 魚体が異なる迎角を選択した場合に作用する力も2軸分力計で計測したが, 実際に生体が選択した迎角と同等の遊泳姿勢をとった時に合力が最もゼロに近い値を示した。CFD 解析の結果も同様であり, 魚体に作用する回転モーメントを質量中心で求めたところ, 同じく生体がとった遊泳姿勢と同じ迎角を選択時に最もゼロに近い値を示した。ただし, これは魚が最適な迎角から外れた時点で魚体に作用する回転モーメントがより迎角を増す方向に働く結果であり, 流場に応じて迎角を調整しなければドラフティングの維持は難しいことを示唆していた。例えば平板前方での魚体の曲率変更や, 胸鰭を適宜開くことで飛行機の翼におけるスポイラーのような役割を果たすなど, 魚の能動的な行動によって魚体の回転や最適な迎角の維持を可能にしたと考えられる。

以上より, 単独遊泳の推進効率の推定から, 魚群遊泳で後方個体に見込める経験流速の低減を明らかにし, さらに後流域発達だけでなく個体間の流体力学的な相互作用によるドラフティングのメカニズムを解明して, 群泳によるエネルギーセーブの向上を示した。魚には局所的な圧力低下など流場の変化に応じて曲率や遊泳姿勢を能動的に制御し, 魚体に作用する合力を最小化させる推進機能性があり, 魚群遊泳での流体力学的なエネルギーセーブに効果があると考えられる。これらは魚群構造やその形成の要因を流体力学的に把握するための知見となり, 漁獲過程での群行動の理解や魚群の密度推定を通じた資源量の推定にも有用と考える。さらに, 従来の魚群モデルは個体ごとに接近と反発の領域を持たせるルール規範型が多いが, 本研究のような流体力学的なエネルギー低減メカニズムを導入することで, より正確な魚群行動表現が可能となり, 行動モデルの基盤構築にも役立つものとなる。