

博士學位論文

内容の要旨

及び

審査結果の要旨

令和5年3月

近畿大学大学院

農学研究科

農 学 研 究 科

令 和 4 年 度

(課 程 修 了 に よ る)

(令 和 5年 3 月)

土 井 慧 祐

学位論文審査結果の報告書

氏 名 土 井 慧 祐

生 年 月 日 1985 年 12 月 27 日

本 籍 (国籍) 大阪府

学位の種類 博 士 (農 学)

学位記番号 第 258 号

学位授与の条件 学位規程第5条該当
(博士の学位)

論 文 題 目 群れで遊泳する魚体周辺の流れ場と遊泳効率

学位論文受理日 令和5年 1月 17日

学位論文審査終了日 令和5年 2月 7日

審 査 委 員

(主 査) 石橋 泰典

(副主査) 松野 裕

(副主査) 高木 力

(副 査) 光永 靖

指 導 教 員 多田 稔

論文内容の要旨

魚が群れを形成する理由は様々な解釈があるが、魚群を形成することによって遊泳時における個体のエネルギー消費が低減すると言われている。しかしながら、その流体力学的なメカニズムはまだ十分に解明されているとはいえない。尾鰭振動する魚体を模したモデルを用いた数値シミュレーションによる研究はこれまでに報告されているが、魚体モデルの動きを実際の魚の動きに基づいて再現させた研究例はこれまでに殆どなく、いずれも魚体モデルの動きは単純な調和振動を基にしたものにすぎない。さらに、複数個体で遊泳させた時の流体力学的な特性について、実際の魚の動きを与えて評価した例はこれまでにない。そこで、本研究では左右に尾鰭振動する一般的な魚類が群遊泳した時の個体への効果を流体力学的側面から理解するために、数値流体力学 (CFD) 解析を用いて分析する。魚体の動きはサケ科魚類であるビワマス (*Oncorhynchus* sp.) の遊泳運動を画像解析により分析し、その遊泳運動を定式化した。さらに、定式化した遊泳運動を用いてCFD解析を行い、実際の魚の遊泳運動を与えた魚体モデルに作用する流体力を求めた。魚体に作用する流体力から並列遊泳時の魚体モデルの遊泳効率を求め、個体間距離を変化させて比較した。また、魚体モデル周囲の流れ場についても評価した。2個体の魚体モデルが並行に泳ぐ場合の遊泳効率は、モデルの全長を L としたとき、逆位相かつ個体間距離 $0.4 L$ の場合に約10%向上することがわかった。さらに、個体間距離 $0.8 L$ かつ逆位相で並列遊泳した時に左右の個体の中心後方に流速の緩やかな領域が発生していた。そのような領域に他個体が定位した場合どのような効果が得られるか調べるために3個体で遊泳した場合についてもCFD解析を行なった。3個体遊泳でのCFD解析では、前後の個体間距離が $-0.4 - 0.4 L$ と近接し、前後左右にずれた千鳥配置で遊泳した場合に効率的であることがわかった。それに加えて実際の魚群での遊泳を三次元画像解析し、数値シミュレーション結果と比較した。その結果、実際の群遊泳においても数値シミュレーションで効率的に遊泳可能と推測された範囲の個体間距離に定位していた。このことはCFD解析によるシミュレーション結果を支持するものと考えられる。

遊泳運動の定式化と単独・二個体並列遊泳のCFD解析

魚類の遊泳運動を定式化するため、供試個体には滋賀県琵琶湖で採捕したビワマスを用いた。ビワマスの遊泳行動を撮影した映像データを解析し、魚体の体軸上の各点における振幅を求め、遊泳運動関数を導出した。その結果、供試個体1個体 (標準体長 39.7 cm) に対して5段階流速を変化させ ($1.01 - 2.02 \text{ BL s}^{-1}$) 遊泳運動関数を算出した。求めた遊泳運動関数から推定された魚体の体軸上の各点の振幅について実測値と計算値を比較した結果、遊泳運動関数により表された体軸の形状は実測値とほぼ同じ形状を示しており、遊泳運動を関数により表現できていることを示している。次にこの遊泳運動関数を魚体モデルに適用してCFD解析を行った。魚体モデルは単純化した翼形断面を持つ長さ (L) 43.9 cm 、高さ 8.9 cm 、厚さ 4.5 cm の矩形板状とし、遊泳運動関数の動きを与えて定常流を発生する数値水槽内に設置した。モデル表面上の圧力分布から推進力、抗力、仕事率、遊泳運動時の機械的効率を算出した。これら諸量は三次元熱流体解析システム (SCRUYU/Tetra V14, Software CRADLE社) を用いて推定された。最初に単独遊泳時の圧力分布を評価するために遊泳運動関数を導出した流速と同じ速さの流速 ($0.92 - 1.83 \text{ L s}^{-1}$) においてそれぞれ解析を行った。その結果、推進力と抗力の時間変化には周期性がみられ、推進力と抗力をそれぞれ時間積分して比較すると遊泳速度 1.38 L s^{-1} の場合において推進力と抗力が釣り合った状態であることを示している。次に複雑な物体の移動や物体同士の衝突を伴う解析が可能な重合格子法をCFD解析に適用して遊泳速度 1.38 L s^{-1} で2個体並列遊泳する場合について解析した。魚体モデルの左右の個体の遊泳運動の位相が同位相と逆位相の場合について、個体間距離を $0.4 - 2.0 L$ の範囲で変化させた。出力される流体力の値には重合格子法を用いた解析の特徴であるスパイク状の値が現れるため、メディアンフィルタ法を用いてスパイク値を除去した。

遊泳効率による比較と魚体周辺の流れ場

単独遊泳時と並列遊泳時について個体の遊泳時のエネルギー効率を比較する指標として遊泳効率を求めた。遊泳効率は魚体モデルの振幅運動が流体に及ぼす全仕事率に対する推進力の仕事率で表すことができる。その結果、並列遊泳時では個体間距離 $0.4 L$ かつ逆位相で遊泳した時に最も遊泳効率が高くなった。また、魚体周辺の流れ場に注目すると、同位相の場合と逆位相の場合では個体の後流域の流況が大きく異なり、逆位相かつ個体間距離 $0.8 L$ の場合においては魚体モデル後方に

同位相では現れない流れの緩やかな領域が生成されることが確認された。従って並列遊泳する2個体の後方中間にフォロワーが位置した時に経験流速が低下すると考えられる。2個体の吻端同士の中点から1 - 2 Lの距離の流速は、尾鰭振動の1周期で約0.97倍となる。抗力は流速の2乗に比例し、仕事率は流速の3乗に比例することから経験流速の低下は後方遊泳個体にとって約9%の消費エネルギー節約効果があると考えられる。

三个体遊泳のCFD解析

群れの最小単位である3個体が遊泳した際に、個体に対してどのような流体力学的利得があるのかを調べるために3个体遊泳でのCFD解析を行なった。左右の個体間距離を0.8 Lに固定し、中央遊泳個体の前後の個体間距離を変化させて解析を行なった。個体の配置を7種類、尾鰭振動の位相差を3種類に変化させた計21種類の解析条件について、個体の推進力/抗力比を遊泳時のエネルギー効率の指標として比較した。尾鰭振動数は2.75 Hzに固定して行った。その結果、両端の個体が左右に0.8 L離れた条件下では前後の個体間距離は-0.4 - 0.4 L と近接していれば推進力/抗力比は、3個体の位置が前後方向で一致して遊泳しているときを除いて、ほぼ1.1以上であった。このことから、個体は千鳥配置された状態で遊泳する方が効率的であることが示唆された。

実際の魚群との比較

実際の魚群での遊泳を撮影した画像について三次元画像解析を行い、個体間距離を三次元計測して自然界での魚の群れ構造を評価した。三次元画像解析法にはDirect Linear Transformation法（以下、DLT法）を用いた。DLT法は2台以上のカメラを使用し、1台のカメラでは感知できない奥行きを感知することで三次元の空間座標を復元する方法である。実験は和歌山県有田川水系室川で行い、供試魚にはビワマスの近縁種であるアマゴ (*Oncorhynchus masou ishikawae*) を用いた。撮影に際し水底に2台のビデオカメラ (GoPro HERO5 Session, GoPro社) を光軸が並行にならないようにフレームに固定して設置した。横1920ピクセル、縦1080ピクセル、1/30秒毎のフレームレートで記録し、三次元動画解析ソフト (MoveTR32, 7.9.1.0, Library 社) を使用して三次元画像解析を行なった。解析を行なった4シーンのうち、3シーンでは左右の個体間距離よりも前後の個体間距離の方が有意に小さい値をとる傾向にあった。本研究のCFD解析によるシミュレーション結果では左右方向の個体間距離によるエネルギー節約効果が得られる範囲は局所的であるのに対して、前後方向では-0.4 - 0.4 Lと幅広い結果を示した。実際の魚群の三次元画像解析の結果において数値シミュレーションで推進力/抗力比が1.1よりも大きい値をとった範囲の個体間距離にほぼ定位していた傾向にあることはCFD解析によるシミュレーション結果を支持するものと考えられた。

論文審査結果の要旨

なぜ魚は群れるのかという問いには様々な解釈がなされているものの、未だ明らかにされていないことが多い。群形成の理由の一つとして遊泳時のエネルギー消費の低減があるが、その流体力学的なメカニズムはまだ十分に解明されているとはいえないのが現状である。そこで、本研究では尾鰭振動する魚体を模したモデルを用いた数値流体力学 (CFD) 解析である数値シミュレーション手法によって、実際の魚の動きに基づいて再現させた遊泳運動する魚体モデルの流体力学的な特性について評価が行われている。

本研究では、複数の個体で遊泳させた時の流体力学的な特性について、実際の魚の動きを与えて評価している点は、これまでの研究では例のないもので、サケ科魚類であるビワマス

(*Oncorhynchus* sp.) の遊泳運動を画像解析により分析し、その遊泳運動魚体モデルの動きとして定式化が行われている。その遊泳運動が与えられたモデルに対してCFD解析が行われ、実際の魚の遊泳運動による流体力特性が評価されているほか、複数個体の並列遊泳時における遊泳効率が求められ、個体間距離を変化させた時についても比較・評価されている。また魚体モデル周囲の流れ場についても評価が行われている。2個体の魚体モデルが並行に泳ぐ場合の遊泳効率は、モデルの全長を L としたとき、逆位相かつ個体間距離 $0.4 L$ の場合に約10%向上することがわかった。さらに、個体間距離が $0.8 L$ かつ尾鰭振動が逆位相で並列遊泳した時に左右の個体の中心後方に流速の緩やかな領域が発生していることを明らかにした。そのような領域に他個体が定位した場合どのような効果が得られるか調べるために3個体で遊泳した場合についてもCFD解析が行われた。3個体遊泳でのCFD解析では、前後の個体間距離が $-0.4 \sim 0.4 L$ と近接し、前後左右にずれた千鳥配置で遊泳した場合に効率的であることが明らかとなった。これらに加えて実際の魚群での遊泳を三次元画像解析し、数値シミュレーション結果との比較が行われた。その結果、実際の群遊泳においても数値シミュレーションで効率的に遊泳可能と推測された範囲の個体間距離に個体同士が定位していた。このことからCFD解析によるシミュレーション結果が支持されることが明らかとなった。

第1章～第3章 遊泳運動の定式化と単独・二個体並列遊泳のCFD解析

魚類の遊泳運動を定式化するため、供試個体には滋賀県琵琶湖で採捕したビワマスが用いられた。ビワマスの遊泳行動を撮影した映像データを解析し、魚体の体軸上の各点における振幅を求め、遊泳運動関数が導出された。供試個体1個体 (標準体長 39.7 cm) に対して5段階流速を変化させることにより ($1.01 \sim 2.02 \text{ BL s}^{-1}$) 遊泳運動関数が算出された。この遊泳運動関数から推定された魚体の体軸上の各点の振幅について実測値と計算値を比較したところ、遊泳運動関数により表された体軸の形状は実測値とほぼ同じ形状となり、遊泳運動を関数により表現できていることが示された。次にこの遊泳運動関数を魚体モデルに適用してCFD解析が行われた。遊泳運動の推力発生機能に果たす役割を分析するために、魚体モデルは単純化した翼形断面を持つ長さ (L) 43.9 cm 、高さ 8.9 cm 、厚さ 4.5 cm の矩形板状とした。遊泳運動関数の動きを与えて定常流を発生する数値水槽内に設置された。モデル表面上の圧力分布から推進力、抗力、仕事率、遊泳運動時の機械的効率が算出された。これら諸量は三次元熱流体解析システム (SCRYU/Tetra V14, Software CRADLE社) を用いて推定された。最初に単独遊泳時の圧力分布を評価するために遊泳運動関数を導出した流速と同じ速さの流速 ($0.92 \sim 1.83 \text{ L s}^{-1}$) においてそれぞれ解析が行なわれている。その結果、推進力と抗力の時間変化には周期性がみられ、推進力と抗力をそれぞれ時間積分して比較すると遊泳速度 1.38 L s^{-1} の場合において推進力と抗力が釣り合った状態であることが示された。次に複雑な物体の移動や物体同士の衝突を伴う解析が可能な重合格子法をCFD解析に適用して遊泳速度 1.38 L s^{-1} で2個体並列遊泳する場合について解析が行われた。魚体モデルの左右の個体の遊泳運動の位相が同位相と逆位相の場合について、個体間距離は $0.4 \sim 2.0 L$ の範囲で変化させた。出力される流体力の値には重合格子法を用いた解析の特徴であるスパイク状の値が現れるため、メディアンフィルタ法を用いてスパイク値の除去が行われた。

第4章 遊泳効率による比較と魚体周辺の流れ場

単独遊泳時と並列遊泳時について個体の遊泳時のエネルギー効率を比較する指標として遊泳効率が求められた。遊泳効率は魚体モデルの振幅運動が流体に及ぼす全仕事率に対する推進力の仕事率として定式化された。その結果、並列遊泳時では個体間距離 $0.4 L$ かつ逆位相で遊泳した時に最も遊泳効率が高くなることが明らかとなった。また、魚体周辺の流れ場に注目すると、同位相の場合

と逆位相の場合では個体の後流域の流況が大きく異なり、逆位相かつ個体間距離0.8 Lの場合においては魚体モデル後方に同位相では現れない流れの緩やかな領域が生成されることが確認された。従って並列遊泳する二個体の後方中間にフォロワーが位置した時に経験流速が低下することが予想された。2個体の吻端同士の中点から1 ~ 2 Lの距離の流速は、尾鰭振動の1周期で約0.97倍となる。抗力は流速の2乗に比例し、仕事率は流速の3乗に比例することから経験流速の低下は後方遊泳個体にとって約9%の消費エネルギー節約効果があることが示唆された。

第5章 三个体遊泳のCFD解析

群れの最小単位である3個体が遊泳した際に、個体に対してどのような流体力学的利得があるのかを調べるために3个体遊泳でのCFD解析が行なわれている。左右の個体間距離を0.8 Lに固定し、中央遊泳個体の前後の個体間距離を変化させて解析が行なわれた。個体の配置を7種類、尾鰭振動の位相差を3種類に変化させた計21種類の解析条件について、個体の推進力/抗力比を遊泳時のエネルギー効率の指標として比較した。尾鰭振動数は2.75 Hzに固定して行った。その結果、両端の個体が左右に0.8 L離れた条件下では前後の個体間距離が-0.4 ~ 0.4 Lと近接していれば推進力/抗力比は、3個体の位置が前後方向で一致して遊泳しているときを除いて、ほぼ1.1以上となった。このことから、個体は千鳥配置された状態で遊泳する方が遊泳時のエネルギーは効率的であることが示された。

第6章 実際の魚群との比較

実際の魚群での遊泳を撮影した画像について三次元画像解析を行い、個体間距離を三次元計測して自然界での魚の群れ構造を評価した。三次元画像解析法にはDirect Linear Transformation法（以下、DLT法）を用いた。DLT法は2台以上のカメラを使用し、1台のカメラでは感知できない奥行きを感知することで三次元の空間座標を復元する方法である。実験は和歌山県有田川水系室川で行い、供試魚にはビワマスの近縁種であるアマゴ (*Oncorhynchus masou ishikawae*) を用いた。撮影に際し水底に2台のビデオカメラ (GoPro HERO5 Session, GoPro社) を光軸が並行にならないようにフレームに固定して設置した。横1920ピクセル、縦1080ピクセル、1/30秒毎のフレームレートで記録し、三次元動画解析ソフト (MoveTR32, 7.9.1.0, Library 社) を使用して三次元画像解析を行なった。解析を行なった4シーンのうち、3シーンでは左右の個体間距離よりも前後の個体間距離の方が有意に小さくなる傾向にあった。本研究のCFD解析によるシミュレーション結果では左右方向の個体間距離によるエネルギー節約効果が得られる範囲は局所的であるのに対して、前後方向では-0.4 ~ 0.4 Lと幅広い結果を示した。実際の魚群の三次元画像解析の結果は、数値シミュレーションで推進力/抗力比が1.1よりも大きい範囲の個体間距離にほぼ定位していた傾向にあったことは、CFD解析の結果が支持されることを示している。

CFD解析の結果から、左右の個体間距離による遊泳効率の向上は局所的となることを明らかにした。また、前後の個体間距離は0.4Lかつ左右にずれた千鳥配置であれば遊泳効率が向上することが明らかとなった。さらに、三次元画像解析の結果ではアマゴの魚群は左右は1L程度、前後は0.4L以下の個体間距離で遊泳していることが多いことがわかった。これらの結果から、三次元画像解析の結果はCFD解析の結果とよく一致することを明らかにした。高速遊泳時に魚の群れは並列に凝集する傾向にあるという先行研究の結果も、前後方向に密になる傾向があるという本研究の結果を支持していると考えられた。したがって、群遊泳の際には左右方向よりも前後方向に近接した方が流体力学的利得の得られる可能性が高いということが明らかとなった。

本研究ではサケ科魚類の動きをモデルに適用したが、これとは異なる動きの魚種についても解析することによって、特に様々な回遊性魚類のエネルギー効率や群形成機能を解明することが期待できる。また、本研究の結果を応用することで群形成が魚類の行動戦略に与える影響を力学的側面から評価できる可能性があり、魚類の個体群生態学領域においても物理過程を踏まえた論議の可能性を示した。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。なお、審査にあたっては、論文に関する専攻内審査および公聴会など所定の手続きを経たうえ、令和5年2月15日、農学研究科教授会において、論文の価値ならびに博士の学位を授与される学力が十分であると認められた。