

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04355

研究課題名(和文) 魚群行動の流体力学的機能性の解明

研究課題名(英文) Swimming efficiency and flow field around fish in school

研究代表者

鳥澤 真介(Torisawa, Shinsuke)

近畿大学・農学部・講師

研究者番号：80399097

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：魚類が群れを形成する物理的意味の解明のため、群形成時の移動エネルギーコストの利得が単一魚体よりどの程度アドバンテージとなるか明らかにした。PTV(流体可視化計測)実験ではマアジを対象として3尾で群泳する場合、またCFD(数値流体力学)解析実験ではピワマスを対象として魚体の遊泳運動から遊泳運動関数を算定後、3個体の魚体モデルに遊泳運動を与えて群泳を再現し、CFD解析で魚体モデルに作用する圧力と分布を算出して流体力学的効果を求めた。個体間距離を全長の0.4倍から2.0倍まで変化させた様々な配置で群泳させた結果、単体の場合と推進効率が変わらない配置と効率が10%程度向上する配置があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球規模での漁業資源水準の低下を背景に、賢く獲る漁業技術の開発が求められているが、生産手段の最適化は対象生物(魚類)の行動特性を理解せずには実現できない。従って、魚類の群行動についての基本的理解とその研究は不可欠である。

本研究では、魚類が群れを形成する意味を物理的側面からアプローチし、その本質的意義の解明を目指す。背景となる力学的論理基盤から群を形成したことによる移動エネルギーコストの利得が単一魚体よりどの程度アドバンテージとなり、魚群の配置によりどのような差がでてくるのかを明らかにする。これをベースに、種の違いにより魚群の移動距離、移動速度と移動エネルギーコストの適値と限界が明らかになる。

研究成果の概要(英文)：Computational fluid dynamics analysis was carried out using the formulated swimming motion to determine the fluid force acting on the fish body model with real fish swimming motion. The swimming efficiency of the fish model under parallel swimming was obtained from the calculated surrounding fluid force and compared for different neighboring distances. The flow field around the fish model was also examined. The swimming efficiency of two fish models swimming parallelly was improved by approximately 10% when they were separated by a distance of  $0.4L$ , where  $L$  is the total length of the model. In addition, the flow field behind the fish body was examined under both inphase and antiphase conditions and at inter-individual distances of  $0.8L$  and  $1.2L$ . The apparent flow speed in the distance range of  $0.5-2.0L$  from the midpoint of the snouts of the two individuals was lower than the swimming speed.

研究分野：水産学・漁業学

キーワード：バイオメカニクス 魚群行動 PTV(流体可視化計測)解析 CFD(数値流体力学)解析 エネルギーコスト

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球規模での漁業資源水準の低下を背景に、持続可能な水産業を展開するため様々な取り組みが行われている。漁業では近年、獲る量をコントロールするだけでなく、種やサイズを制御して漁獲する技術開発も要求されている。賢く獲るための技術開発は対象生物(魚類)の行動特性を理解せずには実現はできない。そのため、魚群の行動特性についての基本的理解とその関連研究は不可欠である。これまで魚群行動の意味を解明しようとした研究は、種の生存や行動戦略的意義から読み解こうとするものが殆どで、たとえば捕食者からの被食リスクを回避するという一般に知られている理論 (Pitcher, 1993)や、群れていることにより餌の場所を早く探索できるという報告(Pitcher et al., 1982) など多数ある。しかし、申請者らは魚類が群を形成するのは行動戦略的な高次元意義は重要視しているものの、群形成することの物理的意義がその根源的な背景にあると考えている。

同様な問題意識を最初に抱いたのは航空工学を専門とする Weihs (1973)で、彼は魚類の群形成を流体力学的視点から理論定式化して説明することを試みた。その理論では様々な事前仮定がおかれているため、実際の状況とは異なる部分も多いが、それによれば、群で遊泳したほうが単一個体で遊泳するよりもその遊泳時エネルギーは半分程度に削減されるというものであった。この結果は当時 *Nature* 241 に掲載されたが、その後多くの魚類生物学や行動学の専門家から実証的論拠に乏しい推論として懐疑的に受け取られ生体実験による十分な検証結果が得られないまま現在に至っている。この理由としては魚類遊泳時のエネルギー消費の正確な計測が生体実験では困難なこと、また、Weihs の定式化方法や具体的数値に不明な点が多いため、理論的に確認できない状況となっていたことが大きい。

そこで、申請者らは Weihs 博士(イスラエル工科大学元学長)を JSPS 事業で招聘し、その理論について討議・確認する機会を得た。その結果、彼の理論は2次元に限定されるものであったがその解析理論を発展させることにより、実際の魚群の移動エネルギーと群を構成する個体配置により移動エネルギーがどのように変化するのかを定量評価できることがわかり、現在の計測機器を活用すれば、魚群の機能性を力学的側面から理解することを生体実験を用いて解明できる可能性があることが推察できた。

### 2. 研究の目的

こうした背景から、本研究代表者および研究分担者らは近畿大学-北海道大学間で「流場解析による魚類の遊泳能力の解明」と題した共同研究契約を締結し、魚群行動の流体力学的機能の解明に取り組む研究体制を整備した。本共同研究の実現により、恒常的に魚類遊泳時の後流域の流れと渦度を可視化する実験系の構築がまず行なわれ、続いてマサバとウグイの推進力と推進効率を PTV (Particle Tracking Velocimetry) 解析を用いた流場解析から推定することに成功した。さらに、尾鰭を左右に振り推力を獲得する一般的な魚類の後方に生成される流場を詳細に解析できる生体実験系が構築されたことにより、遊泳する魚群では、Weihs の予想と同様に、複数個体が遊泳した際にその後流域で流れの低速度域が出現し、後方個体にとってその移動コスト削減につながるということが強く示唆される結果が示された。

そして、さらに、魚群として移動することの物理的機能性として次にあげることとも予想された。

- ・群構成個体の後流域には尾ビレにより発生した渦により流速の高速・低速領域が島状に交互に出現することが予想されること。

- ・このことは、個体が移動するのに都合の良い位置を選択して遊泳し、ひいては自発的な個体意志に基づくものではなく、エネルギー的に移動が楽な位置に個体が収まる形で遊泳できる可能性を示すものであること。

- ・さらに、このことから、魚群を構成する個々の個体の尾ビレを振動させる周期的運動が魚群構成個体の等間隔な配置をもたらす結果になるのではないかと推論された。

こうした極めて興味深い魚類の群構造に関する物理的推測が実証されることになれば、その論理基盤から、魚群全体の移動エネルギーが個体で移動するより、はるかに移動コストを低減でき、それを定量化できること。また魚群規模や魚群を構成する個体の空間的位置でもそれぞれ異なること。そしてそれは尾鰭から吐出される渦の形成機構に強く依存し、種や成長ステージによっても異なることなど魚類が群として移動する意義を極めて独自性のある観点から理解することを可能とする。また、この説明原理を応用することにより、ある魚種がなぜその魚群規模となるのか？群を構成する個体がなぜそのような立体配置構造 (configuration) で移動するのかを解明することも可能となる。

群を形成したことによる移動エネルギー利得、遊泳時移動コスト、移動速度と移動距離の利得が単一個体よりどの程度のアドバンテージとなり、魚群の規模によりどのような差がでてくるのか明らかにすることができる。本研究では、これを足掛かりに種ごとに魚群の移動距離、移動

速度と移動コストの適値と限界, また魚群規模の極限や最適規模, さらに群の立体構造の必然性や構造の最適性について, 物理的側面の説明と解釈を可能とする。本研究では魚類の群形成メカニズムを群行動の流体力学的意義から読み解き, 群行動の機能性の解釈とその理論体系化を今までに無い独創的なアプローチで確立することを目指す。

### 3. 研究の方法

**1) 個体の遊泳運動パラメータの取得** Weihs が提唱した理論には様々な仮定がされていた。特に個体の遊泳時の運動パラメータ(尾ビレ振動数や遊泳速度)は推測により限定的な値を用いている。そのため, 実際の魚類の遊泳時の運動パラメータを把握する必要がある。申請者らは魚類の遊泳運動を詳細に分析するための技術を既に開発している。これにより, Weihs が当時推測値としてしか与えられなかった遊泳運動パラメータを, 実際の魚類の遊泳映像から導出する。特に本研究では群形成しやすく, 入手飼育が行いやすいマアジ類等を対象として運動パラメータの推定を行った。

**2) 群遊泳中の個体が生成する渦流と移動エネルギーコスト推定のためのモデル化** 魚類の推進は尾ビレ振動によって生成される交互に出現する渦流れが後方へジェットを発生し, その反作用として魚体が前進するというメカニズムに基づいている。群れで移動する場合, 各個体が生成する渦が互いに干渉することにより流れに強弱を与え, 個体はこの流れ場中の適切な position を選択して移動エネルギーの利得を得ていると予想される。しかし Weihs の個体の移動エネルギーの理論定式化では 2 次元の理想流体を仮定しているほか, 限定的な渦配列でしか検討がなされていない。個体が生成する渦の大きさや強さ, そしてその発生間隔は個体の尾ビレ振動数と遊泳速度, 近傍個体の尾ビレ周期の位相差によって決定される。そこで, 本研究ではこれらのパラメータを実際の魚類の遊泳運動に則して設定し, より現実的な渦流れのモデル化を行う。実際の流体では渦は粘性により次第に減衰する。そこで, 粘性影響を考慮した渦流れ場を CFD 解析をとおして構築する。これらの実際現象の考慮により, 群で遊泳した個体の移動エネルギー量の算出アルゴリズムが構築される。

**3) PTV 実験** PTV (particle tracking velocimetry) 解析技術は流体内の粒子物質を高速度撮影することにより流体の流れ場を可視化する技術である。申請者らは PTV 解析により, 遊泳中の魚類周辺の流れ場を解析する手法を開発している。この解析技術により, 2) で導いた渦流れのモデル化の妥当性を評価する。モデルの妥当性の検証により, 群遊泳する個体の移動エネルギー推定の定式化手法を実際の魚群に適用可能となる。

**4) 魚群の構造と大きさによる移動エネルギーコストの評価** 2) の尾ビレ振動による渦流れのモデル化の実現は, 魚群を構成する 3 次元的な個体配置の仕方によって魚群内の流れの構造を大きく変化させるはずである。構成個体が空間的にどこまでも拡がりをもって展開しても移動エネルギーコスト的に利得があるかどうかは, 種による遊泳運動パラメータと個体配置によって異なることが予想される。このことを系統的に分析し, 遊泳運動様式が異なる種でどのように群れの構造と大きさによって違いが生じるのか, 2) で得られた移動エネルギーモデルを用いて考察する。魚は遊泳中呼吸により流体内の溶存酸素を消費する。このことは魚群の空間的規模が大きくなるほど群内部では酸素濃度の極端な低下を招くことになり, 個体の酸素消費は魚群規模への拘束条件として作用する。一個体が消費する酸素消費量は 2) 移動エネルギーコストの定式化と 3) の PTV 実験から推定することは可能となるので, 群れの移動エネルギーコストモデルに酸素消費の拘束条件を組み込むことによって, 魚群の規模の限界が種毎に評価が可能になる。

**5) 実際の魚群の構造と比較評価** 魚群内の個体の配置が実際の魚群でどのようになっているのか, 本研究成果による推定と比較し評価する。また, 実海域の魚群規模からその構造と移動エネルギーコストを推定する理論的なモデルの基盤を構築する。

### 4. 研究成果

本研究では, 魚類が群れを形成する意味を物理的側面からアプローチすることにより, その本質的意義の解明を目指す。背景となる力学的論理基盤から群を形成したことによる移動エネルギーコストの利得が単一個体よりどの程度のアドバンテージとなり, 魚群の規模によりどのような差がでるのか明らかにすることを試みた。

PTV (流体可視化計測) 実験では, マアジを対象種として 3 尾で形成される魚群を回流水槽で巡航遊泳させるケースと実際のマアジと翼形状の魚体モデルを用いて魚群のように遊泳させるケースについて, 魚体後流域の流況可視化実験を 2 種類のレーザー光源と高速カメラを用いて実施した。当該実験で撮影した画像から流況を明かにするために, 魚体後流域の流速ベクトルや渦度分布の解析および圧力分布の算定を行った。

CFD (数値流体力学) 解析実験では, ビワマスを対象種としてデジタルビデオカメラで撮影した遊泳運動から魚体の遊泳運動関数を算定した後, 魚群を形成する 3 個体の魚体モデルに遊泳運動を与えて群泳を再現し, 数値流体力学解析により魚体モデルに作用する圧力とその分布を算出することで流体力学的効果を求めた。個体間の距離を全長の 0.4 倍から 2.0 倍まで変化させながら様々な配置で 3 個体の魚群を形成させた結果, 単体で遊泳した場合と推進効率が変わらない配置と推進効率が 10%程度向上する配置があることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Doi Keisuke, Takagi Tsutomu, Mitsunaga Yasushi, Torisawa Shinsuke	4. 巻 16
2. 論文標題 Hydrodynamical effect of parallelly swimming fish using computational fluid dynamics method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0250837, 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0250837	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Abe S., Takagi T., Torisawa S., Abe K., Habe H., Iguchi N., Takehara K., Masuma S., Yagi H., Yamaguchi T., Asami S.	4. 巻 93
2. 論文標題 Development of fish spatio-temporal identifying technology using SegNet in aquaculture net cages	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Aquacultural Engineering	6. 最初と最後の頁 102146, 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aquaeng.2021.102146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ikeya Koki, Torisawa Shinsuke, Yamane Hiroyuki, Mitsunaga Yasushi	4. 巻 21694
2. 論文標題 Estimating the total length of Mekong giant catfish, <i>Pangasianodon gigas</i> , in an aquarium via stereo video shooting and direct linear transformation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Zoo Biology	6. 最初と最後の頁 41, 554-559
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/zoo.21694	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Ina, T. Takagi, S. Miyashita, M. Kurata, T. Honryo, Y. Sawada, H. Fukuda, S. Torisawa	4. 巻 90
2. 論文標題 Analysis of sinking death using video image of swimming performance of Pacific bluefin tuna ( <i>Thunnus orientalis</i> ) larva	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Aquacultural Engineering	6. 最初と最後の頁 102099, 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aquaeng.2020.102099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 江口剛, 鳥澤眞介, 竹原幸生, 高木カ
2. 発表標題 翼近傍の低圧領域を利用した 魚類の無振動遊泳について
3. 学会等名 第45回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 表原陸・川崎亜美・南波裕之・山本剛・白樫正・鳥澤眞介・光永靖
2. 発表標題 ハダムシ症が宿主のカンパチの遊泳行動に及ぼす影響 - 代謝量からみる影響評価 -
3. 学会等名 令和3 年度 日本水産学会近畿支部例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸田成実・奥山隼一・有田蒔実子・久米菜月・藤田健登・西澤秀明・鳥澤眞介・光永靖
2. 発表標題 衛星通信から得られた潜水プロファイルの評価～アカウミガメをモデル種として～
3. 学会等名 令和3年度第17回日本バイオロギング研究会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原 健介・光永 靖・鳥澤眞介・田熊靖史・三木亮二
2. 発表標題 沖合養殖ブリの行動モニタリング
3. 学会等名 令和2年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金田彩花, 阿部孝司, 波部齊, 谷口義明, 井口信和, 阿部悟, 鳥澤眞介, 高木力
2. 発表標題 映像を用いた生簀内クロマグロの尾数計測
3. 学会等名 電子情報通信学会関西支部学生会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹原 幸生 (Takehara Kosei) (50216933)	近畿大学・理工学部・教授  (34419)	
研究分担者	高木 力 (Takagi Tsutomu) (80319657)	北海道大学・水産科学研究院・教授  (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------