

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04047

研究課題名(和文)イルカの立ち泳ぎメカニズムの解明と高推力水中推進機構開発への応用

研究課題名(英文)Clarification of the mechanism of dolphin tail walk and its application for the development of high-thrust underwater propulsion mechanism

研究代表者

小林 俊一 (Kobayashi, Shunichi)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号：50225512

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：水棲生物の中でもイルカの運動能力は高く、胴体を水上に持ち上げる立ち泳ぎができる。しかし、その立ち泳ぎの力学的な解析はされておらず、どのようにしてイルカは立ち泳ぎを実現しているのかが十分に明らかにされていない。そこで、本研究はカマイルカの立ち泳ぎにおける水上と水中における運動挙動を撮影、3次元動作解析によって明らかにし、その胴体を水上に持ち上げる推力を発生するメカニズムを検討した。また、その結果をイルカの尾びれを規範としたフィンを用いた水中推進機構に技術的に移転させ、高推力化を実現させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水棲生物の尾びれを規範としたフィンによる水中推進機構は、現在広く用いられているスクリュプロペラの問題点である、高速回転による危険性や魚網や藻などの巻き込みなどを解決できるものである。本研究ではそのフィンによる水中推進機構について、フロートや空中ドローンなどを追加させずに、水上での重量物保持を瞬時に行うことができる「水上リフトアップ」を、イルカの立ち泳ぎの動作解析から得られる知見から実現させるところに学術的意義がある。また、水族館などイルカに負荷をかけないトレーニングや健康管理に参考となる資料を提供できるものである。

研究成果の概要(英文)：Among aquatic organisms, dolphins have highly locomotive power and can do tail stands, lifting their bodies above the water. However, the dynamics of the tail stand have not been analyzed in detail, and how the dolphin achieves the tail stand has not been fully clarified. In this study, we took the video of the motion behavior of the Pacific white-sided dolphins over and in the water during the tail stand and analyzed their three-dimensional motions. We examined how the dolphins generate the thrust to lift their body over the water. The results were transferred to an underwater propulsion mechanism using fins based on the dolphin's tail fin to achieve higher thrust.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：バイオメカニクス バイオミメティクス イルカ 生物規範型ロボット 水中推進

1. 研究開始当初の背景

水棲生物の中でもイルカは高速で水中を遊泳し、ハイジャンプや立ち泳ぎができる能力を持っている。そこで、その能力を解析しようとする試みが古くからなされており、特に1936年に動物学者のグレイによって提唱された「グレイのパラドックス」(イルカはその筋肉量から想定される遊泳速度よりも、さらに高速で遊泳できる)をきっかけに、イルカの高速度遊泳のメカニズムについて様々な研究が行われてきた。イルカの立ち泳ぎについては、図1に示すように胴体を水上に持ち上げ、尾びれで水をかいて歩いているような運動で(Tail walk, tail stand とともいわれる)、高速で泳ぐものではないが、水上におけるイルカの体重を尾びれで支持させるため、大きな推進パワーが必要とされる。しかし、「どのようにしてイルカは立ち泳ぎを実現させているか?」については十分に明らかにされていない。そこで、これについて解き明かすことは学術的に意義深く、生物の力学的な解析(バイオメカニクスによる解析)のアプローチから解明することがひとつの手段となる。また、水族館などにおけるイルカの立ち泳ぎは何度も行うことができず、そのためにイルカにかかる負荷を把握することはイルカ健康状態のためにも必要である。

一方、現在、生物の機能や構造などから着想を得て新しい技術の創出に活かすバイオメカニクスの研究開発が多く行われている。研究代表者においても、水棲生物の尾びれを規範としたフィンを用いた水中推進機構の研究を行ってきた。この機構は、現在多く用いられているスクリュープロペラの高速度回転による水中推進機構の問題点(水中生物に対する危険性、海藻や魚網の巻き込み、攪拌による汚泥の巻き上げによる水質汚染など)を解決する、環境負荷の少ないところに特長がある。そこに、今回取り上げたイルカの立ち泳ぎの力学的な解明によって、新たな知見を水中推進機構に技術的に移転することは、その推力向上や機能を増やすことにつながる。



図1 カマイルカの立ち泳ぎ

左: 水上, 右: 水中(イルカの下から撮影) 名古屋港水族館で研究代表者撮影

2. 研究の目的

以下の3項目を目的とした。

- (1) 大きな推進パワーを必要とするイルカの立ち泳ぎのメカニズムを、その運動挙動から解析する。
- (2) 水族館などイルカを飼育する環境において、イルカの立ち泳ぎの挙動からイルカ健康状態などを評価するために、上記(1)の結果をイルカ飼育支援に提供する。
- (3) 上記(1)の結果によって明らかにされた大きな推力を得るメカニズムを、イルカの尾びれを規範としたフィンによる水中推進機構に技術的に移転させ、水中推進機構の高推力化を実現させる。特に、フロートや空中ドローンなどの特別な機構を追加させる必要がなく、水上での重量物保持を瞬時に行うことができる水上リフトアップの実現のための基礎データを得る。

3. 研究の方法

以下の4項目の方法で実施した。

(1) イルカの立ち泳ぎの挙動の把握

【イルカの立ち泳ぎの撮影】 名古屋港水族館において、同館の研究協力者の支援を受け、カマイルカの立ち泳ぎにおける撮影方法の構築と実施を行う。イルカの後方移動(背側方向に移動する)立ち泳ぎと前方移動(腹側方向に移動する)立ち泳ぎについて、水上でのイルカの胴体、水中でのイルカの胴体と尾びれの動きを、複数の高速度ビデオを用いて撮影し、3次元解析用の映像を得る。また、運動挙動の比較として、ハイジャンプ前的高速遊泳についても同様に撮影する。なお、名古屋港水族館で実施するイルカの観察・撮影においては、日本動物園水族館協会の倫理規定を遵守し、同館の研究協力者の指導によって行う。

【イルカの立ち泳ぎの3次元動画解析】 撮影された映像から3次元動作解析ソフトウェアを用いてイルカの運動挙動を求める。特に、尾柄(尾びれのくびれ部分)と尾びれの運動(振幅、振動数)と尾びれ変形、リフトアップ量、水上における胴体の動き、立ち泳ぎ時間と移動距離(前進移動と後進移動)を求める。

(2) イルカの立ち泳ぎメカニズムの解析

【尾びれの変形と推力の解析】 動画解析データから尾びれの変形形状と変形の大きさを求め、立ち泳ぎ動作と合わせ、大きな推力が発生する要因について解析する。

【イルカの水上移動の解析】 動画解析データから立ち泳ぎにおける前進、後進移動の速度を求め、水中と水上の動作の関係について明らかにする。

(3) イルカ飼育に関する支援資料の提供

イルカの立ち泳ぎメカニズムの解析結果から、イルカの立ち泳ぎ時の胴体角度・水上の位置・移動方向・移動速度などから、立ち泳ぎを評価する資料を水族館に提供する。

(4) 高推力水中推進機構の開発

イルカの立ち泳ぎメカニズムの解析結果から、フィンによる水中推進機構の高推力化を図るための検討を行う。フィンの材料や運動において、立ち泳ぎに寄与する条件を見いだして水中推進機構の推力を評価する。

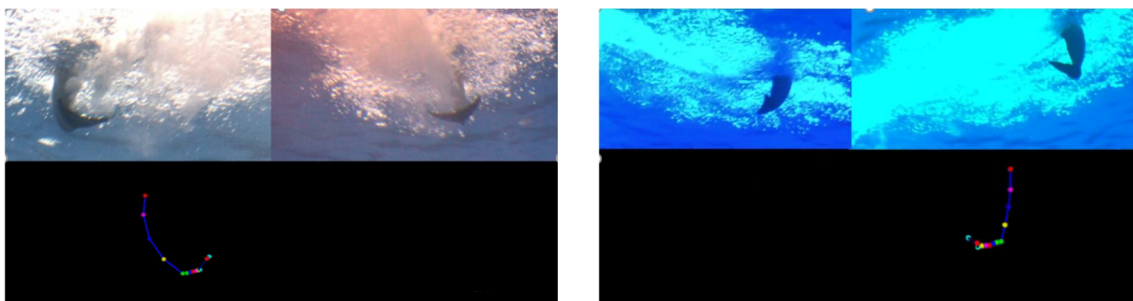
4. 研究成果

研究計画で記した項目ごとに記載する。

(1) イルカの立ち泳ぎの挙動の把握

まず、カマイルカの后方移動と前方移動の立ち泳ぎの撮影方法を構築した。水中撮影においては、大型水槽外において、立ち泳ぎするイルカを見上げるような位置に2台の高速度ビデオカメラを設置、撮影した。水上撮影においては、3台の高速度カメラで撮影、3次元解析用の映像を得た。ハイジャンプ前は、大型水槽外から水中映像のみ撮影した。

なお、イルカにはマーカを付けることが出来ないため、各画像において特徴点から仮想メーカを設置し、その位置を計測した(図2:イルカの立ち泳ぎ時における水中での動作解析)。また、すべてのカメラで記録された同一水面形状を探索し、その瞬間を基準して同期して解析した。これらの撮影映像から3次元動作解析ソフトウェアを用いて、立ち泳ぎ時の運動(尾びれの平均的な振幅や振動数等)について解析・検討した。



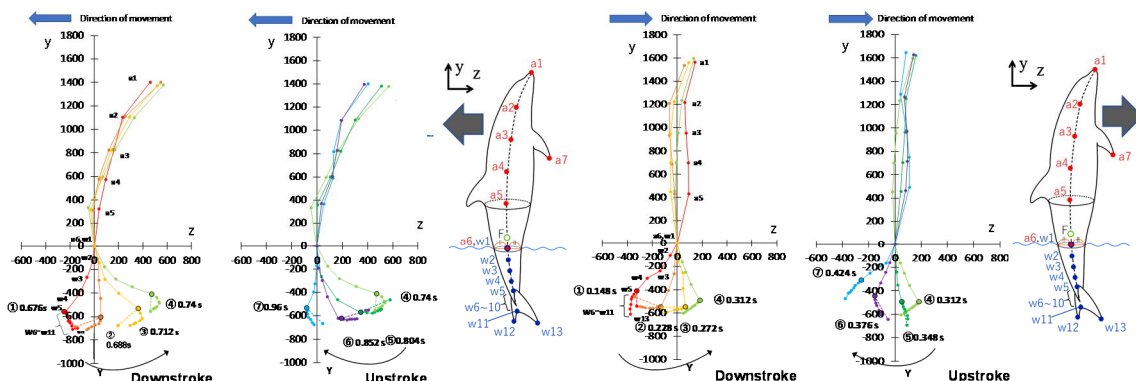
後方移動立ち泳ぎ

前方移動立ち泳ぎ

図2 イルカの立ち泳ぎ時における水中での動作解析

(2) イルカの立ち泳ぎメカニズムの解析

図3にイルカの後方移動立ち泳ぎと前方移動立ち泳ぎのスティックピクチャーを示す。



後方移動立ち泳ぎ

前方移動立ち泳ぎ

図3 イルカの立ち泳ぎ時のスティックピクチャー

【後方移動立ち泳ぎ】

尾柄揺動運動: 背中側には小さく、腹側に大きく振っており、これが後方移動に寄与しているこ

とがわかった。尾柄揺動運動と尾びれ揺動運動に位相差があり、尾びれが水を下方に押し出すような挙動を示した。なお、平均的な移動速度は 3m/s、揺動の振動数は 3Hz 程度で、水上リフトアップ率（水上から鼻先の長さ / 体長 × 100）は 70%程度、アップストロークとダウンストロークの時間比は約 6:4 で、ダウンストロークの方が速く振っていた。

尾びれの変形：リフトアップに必要な推力が正となるような尾びれの運動の時（は変形角度が小さく、尾びれの投影面積は大きくなり、推力が負となる運動の時は、投影面積は小さくなった。これはアップストローク、ダウンストローク同様に変形をするが、立ち泳ぎは後方へ進んでいるため、アップストロークの方がダウンストロークに比べて早めに投影面積は小さくなると示唆された。

イルカ胴体（上体）の挙動：尾柄揺動運動と同期して動き、上体は前方に傾いていることが分かった。

【前方移動立ち泳ぎ】

尾柄揺動運動：振幅が小さいながら背側にも振れていた。これが前方移動に寄与し、平均移動速度の大きさや振動数、水上リフトアップ率は後方移動立ち泳ぎの際よりも大きく、アップストロークとダウンストロークの時間比率は 5:5 であった。また、尾柄揺動角と尾びれ揺動角の位相差は後方移動立ち泳ぎの際よりもやや少なかった。

尾びれの変形：後方移動立ち泳ぎと同様に変形するが、最大変形量は後方移動より小さかった。これは後方移動立ち泳ぎの際よりも振動数は大きいものの、尾柄揺動の振幅が小さく、尾柄の周速度が小さいためである。

イルカ胴体（上体）の挙動：尾柄揺動運動と同期して動くが、特に後方移動立ち泳ぎの際よりも前方に傾いていないことが分かった。

【後方移動立ち泳ぎと前方移動立ち泳ぎの違い】

上述の通り、尾柄揺動運動の振幅、上体の傾き、運動速度に差が見られた。特に、前方移動立ち泳ぎでは、前方移動に必要な背側の屈曲が構造上難しいため、小さい振幅で速く振ることで推力を発生していることが分かった。これは背側の腱や筋肉をしっかり包み込む結合組織があるためと示唆された。

【立ち泳ぎとジャンプ前加速時遊泳との違い】

立ち泳ぎとジャンプ前加速時遊泳の振動数はあまり変わらないが、尾柄揺動運動の振幅は、比較的大きな後方移動立ち泳ぎの際よりも大きいことから、立ち泳ぎは水上で安定させるために小さく振っていると示唆された。

【立ち泳ぎでの大きな推力を発生するメカニズム】

尾びれが水を下方に押し出すような挙動や、尾びれの変形による尾びれ運動方向の投影面積の変化によって高い推力を発生することが分かった。

以上より、イルカの立ち泳ぎの挙動から立ち泳ぎのメカニズムを解析し、本研究課題の次のステップとなる、イルカの筋骨格構造からの立ち泳ぎの力学的解析につなげる基礎を得ることができた。

(3) イルカ飼育に関する支援資料の提供

イルカの立ち泳ぎ挙動の解析の結果、特に尾柄の曲げの量、尾びれの変形量などを提供できた。次のステップとして、イルカの立ち泳ぎ時に尾柄にかかる負荷などを検討など、イルカ健康管理に資するデータとして提供する基礎を得ることができた。

(4) 高推力水中推進機構の開発

イルカの立ち泳ぎメカニズム解析の結果、尾びれの変形による尾びれ運動方向の投影面積の変化が高い推力を生むことが分かった。これより、水中推進機構に用いるフィンについては、比較的速い運動で正の推力を発生するには変形量を少なくして運動方向の投影面積を大きくさせ、比較的遅い運動で負の推力が発生するには変形量を大きくして運動方向の投影面積を小さくさせて、高推力化を図った。

これを実現させるために、フィンの材料と動作方法について検討した。フィンの材料は粘弾性材料であるダイラタントコンパウンドを用い、フィンの変形速度が大きいとその剛性が高く、変形速度が小さいと剛性が低い特性を持つように調製した（図 4：ダイラタントコンパウンドを用いたフィン）。そのフィンを静止流体中で揺動運動させて、リフトアップ力に相当する推進力を実験的に計測した。同フィンの揺動動作方法としては、揺動周期は変更せずに、正の推進力を発生する位相では大きな平均角速度（ ω_+ ）にさせ、負の推進力を発生する位相では小さな平均角速度（ ω_- ）にさせた。その角速度の割合（ ω_+ / ω_- ）を「速度比」と定義し、変化させて検討した（図 5：フィンの揺動運動）。

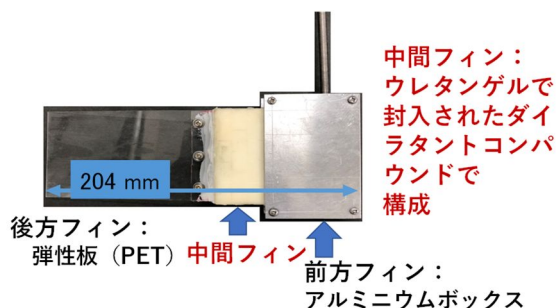


図 4 ダイラタントコンパウンドを用いたフィン

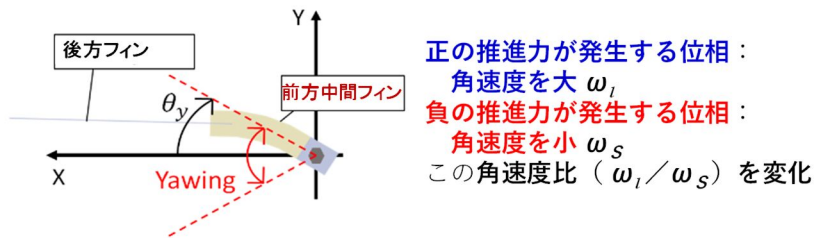


図5 フィンの揺動運動

その結果、フィンのダイラタンシーによる揺動角速度が増加すると、フィンの剛性が増加し、揺動角速度が減少するとフィンの剛性が減少する性質も加わることによって、速度比を大きくすると最大推進力と平均推進力が大きくなり、高推力化に寄与することを確認した。

以上より、本研究課題の次のステップとなる、立ち泳ぎの時の安定化制御、筋骨格系を規範としたフィン駆動系の開発に継続するための基礎資料を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 木村俊希, 佐古大智, 小林俊一, 阿久根雄一郎, 森朋子
2. 発表標題 イルカの立ち泳ぎにおける尾びれの動作と変形の解析
3. 学会等名 第42回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会資料集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林俊一, 木村俊希, 佐古大智, 阿久根雄一郎, 森朋子
2. 発表標題 イルカの立ち泳ぎにおける胴体と尾びれの動作解析
3. 学会等名 第43回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会資料集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上西祐介, 木村俊希, 山口美月, 小林俊一
2. 発表標題 ダイラタントコンパウンドを用いた生物規範型水中推進機構の静止流体中における推進力増加の検討
3. 学会等名 第39回日本生体医工学会甲信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林俊一, 杉山皓亮
2. 発表標題 ダイラタント流体を封入した繊維複合粘弾性フィンによる生物規範型水中推進機構 静止流体中における推進力特性
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shunichi Kobayashi, Kousuke Sugiyama
2. 発表標題 Bio-inspired Aquatic Propulsion Mechanism Using Viscoelastic Fin Containing Fiber Composite Dilatant Fluid
3. 学会等名 7th International Symposium on Aero-aqua Bio-Mechanisms (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上西祐介, 小林俊一
2. 発表標題 生物規範型水中推進機構の静止流体中における推進力増加の検討
3. 学会等名 第17回日本生体医工学会甲信越支部長野地区シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 俊一, 上西 祐介
2. 発表標題 粘弾性フィンを用いた生物規範型水中推進機構の静止流体中における推進力特性
3. 学会等名 日本機械学会 第33回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林俊一, 木村俊希, 佐古大智, 阿久根雄一郎, 森朋子
2. 発表標題 イルカの立ち泳ぎにおける尾びれの運動と変形 尾びれの速度と変形の関係
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------