

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ハゼの機動遊泳における胸鰭の3次元運動と変形
Title(English)	3-D motion and deformation of pectoral fins of a goby in maneuvering swims
著者(和文)	田中博人, 高松亮太, 岸田宗範, 江口淳, 吉田瑞希, 菊地デイル万次郎
Authors(English)	Hiroto Tanaka, Ryota Takamatsu, Munenori Kishida, Jun Eguchi, Mizuki Yoshida, Dale Manjiro Kikuchi
出典(和文)	, , ,
Citation(English)	Proceedings of the 2023 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , ,
発行日 / Pub. date	2023, 6

ハゼの機動遊泳における胸鰭の 3 次元運動と変形

3-D motion and deformation of pectoral fins of a goby in maneuvering swims

○正 田中博人 (東工大) 学 高松亮太 (東工大) 岸田宗範 (宮内庁生研)
江口 淳 (東工大) 吉田瑞希 (東工大) 菊地デイル万次郎 (東京農大)

Hiroto TANAKA, Tokyo Institute of Technology, tanaka.h.cb@m.titech.ac.jp
Ryota TAKAMATSU, Tokyo Institute of Technology
Munenori KISHIDA, The Imperial Household Agency, BLIP
Jun EGUCHI, Tokyo Institute of Technology
Mizuki YOSHIDA, Tokyo Institute of Technology
Dale Manjiro KIKUCHI, Tokyo University of Agriculture

Motions and deformations of the flapping pectoral fins of a goby (*Tridentiger obscurus*) in maneuvering swims were three-dimensionally analyzed. Fluorescent markers were attached to the fins and body for video recording. The fish showed four types of maneuvers: hovering, ascending, turning, and backward swimming. It was found that the time difference between the left and right pectoral fin strokes varied widely from in-phase to out-of-phase depending on the maneuvers. The flapping angle varied as much as 150°, and the area of the pectoral fin was reduced to 33% of its maximum value. Furthermore, unlike previously known pectoral-fin-propelled fishes, the leading edge of the pectoral fin demonstrated notable bending deformation up to 41°. In addition, in backward swimming, the trailing edge of the pectoral fin preceded the leading edge unlike the other general fish of which leading edge precedes the trailing edge.

Key Words: Fish swimming, Biomechanics, Motion analysis, Fluorescent powder, Soft body

1. 序論

スズキ目ハゼ亜目ハゼ科は、日本の魚類で最も多くの種を含む科である[1]。その中でチチブ属 (*Tridentiger*) は、日本各地の汽水域から淡水域にかけて生息するハゼである[2]。大きく丸い団扇状の胸鰭を羽ばたかせて遊泳するのが特徴で、その他の鰭や胴体の曲げも駆使して、狭い範囲での俊敏な機動を行う。例えば水槽中で観察すると、胸鰭の羽ばたきによるホバリング (水中での静止)、急な方向転換、急発進・急停止、および後退を見ることができる。これまで、魚類の胸鰭を主体とした推進様式には、揚力型羽ばたき推進であるペラ型 (Labriform) と、鰭面の進行波による推進であるハリセンボン型 (Diodontiform) に分類されてきた[3]。どちらも胸鰭の前縁 (背側の縁) が先行して羽ばたき、後縁 (腹側の縁) は追従するように動く[4, 5]。一方、チチブ属に代表されるハゼの胸鰭の動きは、これらの分類は該当せず、俊敏な「ハゼ型遊泳」のメカニズムは未解明である。その解明は、新しい俊敏な魚型ロボットの発想につながると考えられる。

当研究室では、ハゼ型遊泳のメカニズムの解明を目指して、チチブ属の 3 次元運動解析に取り組んでいる。これまでに、運動解析用マーカーとして蛍光粒子粉末を微量の接着剤に混合して薄い鰭と胴体に貼付する方法を考案した[6]。3 原色の蛍光粒子をそれぞれ異なる割合で調合することで合計 7 色を実現し、多点の計測を可能とした。特に胸鰭の 3 次元変形に着目し、曲げとキャンパーで定量化する方法も提案した。

本研究では、上記手法をチチブ属のホバリング、上昇、方向転換、後退遊泳に適用した。胸鰭の羽ばたき角・変形・面積の範囲および左右のストロークの時間差を計測して、チチブ属の胸鰭の高い運動自由度を評価した。

2. 実験・解析方法

実験に用いたハゼは、多摩川の六郷橋付近で採取したチチブ (*Tridentiger obscurus*) の 1 個体 (全長: 90 mm, 体長: 75 mm, 体重: 4.724 g, 比重: 1.004 g/cm³) である。メントール水溶液に没して麻酔をかけ、43 か所に 7 色の蛍光粒子マーカー (3 色の蛍光粉末 (Lumis Marker Red, Green, Blue, セント

ラルテクノ社) を調合して瞬間接着剤 (Loctite 強力瞬間接着剤, ヘンケルジャパン社) に混合したもの [6] を貼付した (図 1)。ただし、鰭には片面に貼付し、第 2 背鰭前と臀鰭前のマーカーは体の左右に貼付した。暗室中で紫外線ライトに照らされた直方体水槽 (内寸幅 約 140 mm, 奥行き 約 140 mm, 水深 約 140 mm) に移して無人の状態で見守らせ、そのまま 5 台の市販ビデオカメラ (GoPro HERO9 Black, GoPro 社) で同時に撮影した (図 2)。水槽は上蓋によって密閉し、水面の揺れの影響を排除した。カメラのフレームレート, 解像度, 露光

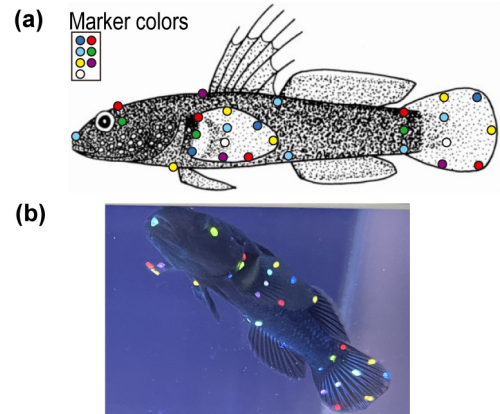


Fig. 1 (a) Positions of markers on the goby. (b) Photo of the goby with the markers illuminated by ultra-violet light. The illustration of the goby was cited from the article[7].

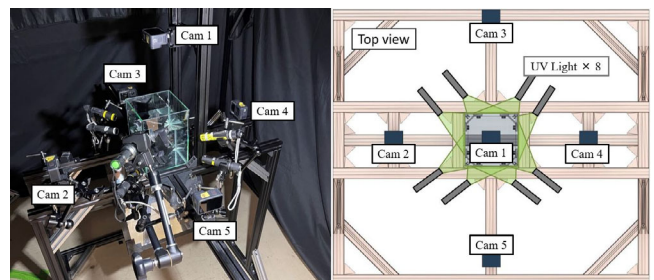


Fig. 2 Video recording setup.

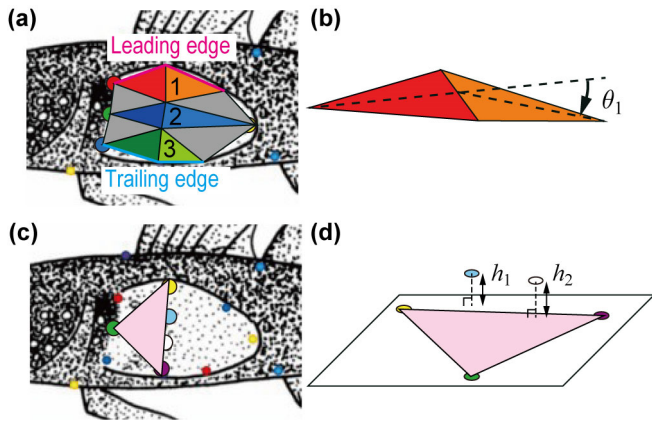


Fig. 3 Schematics of the mesh model (a) and flexural angle (b) of the pectoral fin. (c) Basal plane for the camber. (d) Camber heights.

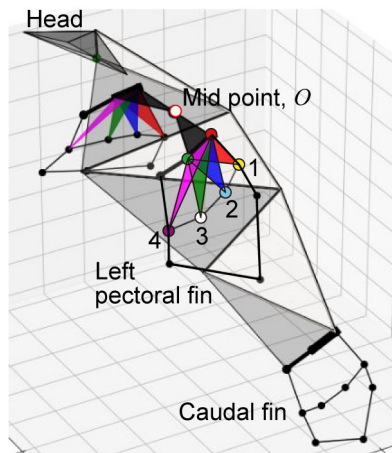


Fig. 4 Schematic of the meshes to determine the flapping angles.

時間はそれぞれ 120 fps, 2704×1520 pixels, 1/240 s とした。各カメラの時刻は、録画開始後に明滅する LED ライトを撮影しておき、その明滅タイミングから撮影実験後に同期した。

マーカの 3 次元座標は、取得した画像から運動解析ソフトウェア (DIPP-motion V/3D, ディテクト社, 日本) を用いて DLT (Direct Linear Translation) 法で算出した。カメラキャリブレーションは、実験前に 3D プリンタで製作したキャリブレータを撮影して、同じソフトウェアで実施した。ただし、尾鰭基部の 3 つ、第 2 背鰭前、臀鰭前のマーカについては、体の左右のマーカを両方とも解析できた場合は、両者の中点をマーカ座標とした。

胸鰭の 3 次元形状は文献[6]と同様に、マーカ位置に基づく 3 角形メッシュでモデリングした (図 3(a))。胸鰭の曲げは、基部側と外側のメッシュのなす角で表し (図 3(b))、前縁 (上側) から θ_{1-3} とした。 θ が正の時、胸鰭は体の後方に曲がる。胸鰭の膨らみは、鰭基部寄りの基準面 (図 3(c)) からの中央 2 点の高さ h で表した (図 3(d))。キャンバー高さが正の時、胸鰭が前方に膨らむ。面積は、メッシュ面積の和から算出した。

胴体に対する羽ばたき角の定義図を図 4 に示す。左右の胸鰭の基部最上点の中点を体の基準点 O とした。羽ばたき角 ϕ_{1-4} は、 O と胸鰭基部上部 2 点がなす面 (図中の黒色三角形) と、胸鰭前縁の基部側の面 (図中の赤、青、緑、桃色の三角形) がなす角とした。胸鰭が真横に開いたときは $\phi = 180^\circ$ であり、 180° より小さいときは後方に、大きいときは前方に胸鰭が位置する。

前方への羽ばたきストロークをアップストローク (打ち上げ)、後方への羽ばたきをダウンストローク (打ち下ろし)

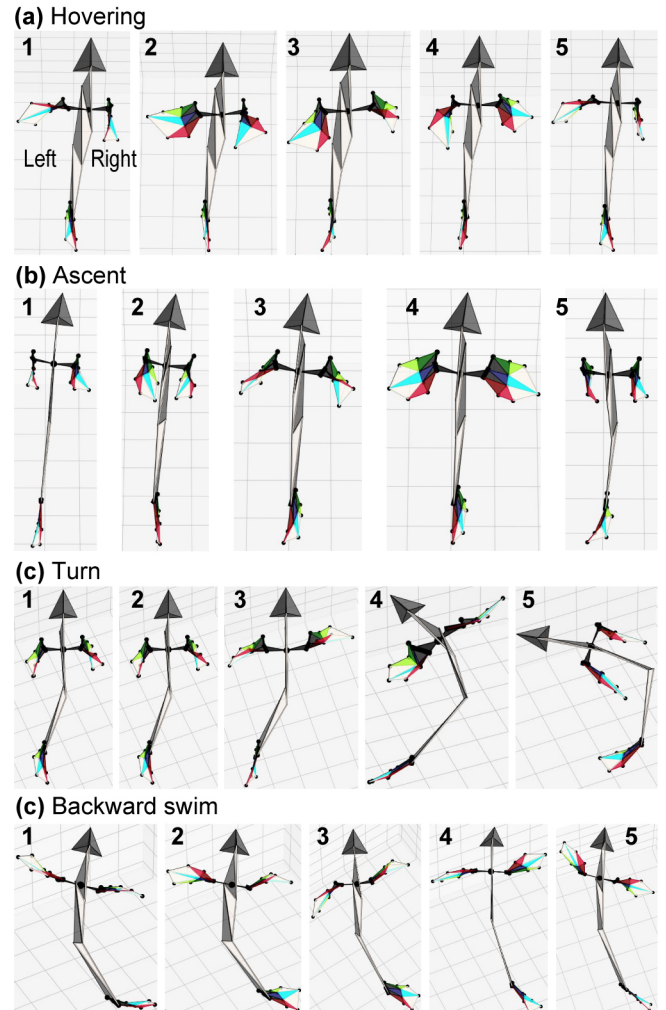


Fig. 6 Example motions of hovering (a), ascent (b), turn (c) and backward swims.

Table 1 Mean delay rate of the flapping stroke between the left and right pectoral fins.

Swimming type	Preceding fin	Stroke	Delay rate of the following fin
Hovering	Right fin	UP	117%
		Dow	96%
Forward ascent	Left fin	Up	0%
		Down	-2%
Turn	Inside fin	Up	7%
		Down	12%
Backward	Left fin	Down	173%
		Up	144%

とした。左右のストロークの開始時刻の差を、先行するストローク時間に対する時間差の割合で表した。

3. 結果

3.1 胸鰭・尾鰭・胴体の運動

本研究では、胸鰭の羽ばたきを伴う 4 種類の遊泳、すなわちホバリング (1 回, 3 羽ばたき)、上昇 (3 回, 各 1 羽ばたき)、方向転換 (3 回, 各 1 羽ばたき)、後退 (1 回, 1 羽ばたき) を解析した。なお方向転換は、左転換は右転換に反転して、すべて右転換として解析した。胸鰭を用いた後退遊泳は、従来の魚類の運動解析研究で報告された例は無い。

各遊泳の例を図 5 に示す。遊泳によって胸鰭のストロークに左右の時間差が異なった (表 1)。ホバリングでは右胸鰭が

参考文献

- [1] 中坊徹次 (編), 日本産魚類索—全種の同定(第三版), 東海大学出版会, 秦野, 2013.
- [2] 明仁親王, “チチブ類 色彩の相違/形態の相違/分布/生息水域/生息環境と形態上の適応/種と亜種の問題,” 日本の淡水魚類—その分布, 変異, 種分化をめぐって, 編: 水野信彦, 後藤晃編, 東海大学出版会, pp.167–178, 1987.
- [3] Lindsey, C., “Form, function and locomotory habits in fish”, *Fish Physiology*, vol. 7, pp.1–100, 1978.
- [4] Gibb, A. C., Jayne, B. C., and Lauder, G. V., “Kinematics of pectoral fin locomotion in the bluegill sunfish *Lepomis macrochirus*,” *J. Exp. Biol.*, vol. 189, pp. 133–161, 1994.
- [5] Wiktorowicz, A. M., Lauritzen, D. V., and Gordon, M. S., “Powered control mechanisms contributing to dynamically stable swimming in porcupine puffers (Teleostei: *Diodon holocanthus*),” *Experiments in Fluids*, vol. 43, no. 5, pp. 725–735, 2007.
- [6] 高松亮太, 吉田瑞希, 岸田宗範, 菊地デイル万次郎, 田中博人, “ハゼの巡回遊泳における胸鰭の3次元形状計測,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2A1-F06(1–4), 2022.
- [7] 明仁, 坂本勝一, 池田祐二, 藍澤正宏, “ハゼ亜目,” 日本産魚類索—全種の同定(第三版), 中坊徹次 (編), 東海大学出版会, 秦野, pp.1347–1553, 2013.

先行し, 上昇では左右がほぼ同時にストロークし, 方向転換では内側胸鰭が先行し, 後退では逆方向にストロークした.

ホバリング時には, 尾鰭は右胸鰭のアップストローク時に左に, ダウンストローク時に右に振られていた. その際, 尾鰭の前縁(背側)が先行して動いた.

さらに, 後退時には, 胸鰭は後縁が前縁に先行してストロークした. 左胸鰭の前縁は, 後縁に対して, ダウンストロークで 42%, アップストロークで 44% 遅れた. 右胸鰭の前縁の遅れは小さく, ダウンストロークで 4%, アップストロークで 8% だった. 後縁が前縁に先行する羽ばたきは, 一般的な前縁が先行するベラ型・ハリセンボン型遊泳とは逆である.

3.2 胸鰭の羽ばたき角と変形の範囲

前縁の羽ばたき角 ϕ_1 の最大値(最前方)と最小値(最後方)は, それぞれ後退遊泳の右胸鰭ダウンストローク開始時の 236° とホバリング時の左胸鰭ダウンストローク終了時の 86° であり, その差は 150° だった. これは, ハリセンボン型遊泳の約 100° [5] よりも大きい. 後縁の羽ばたき角 ϕ_2 の最大値と最小値は, それぞれ方向転換時の内側胸鰭の 288° と, 上昇の左胸鰭の 41° で, その差は 247° とさらに大きかった.

前縁の曲げ角 θ_1 の最大値と最小値は, 方向転換時の内側胸鰭の 41° と, 外側胸鰭の -34° であり, その差は 75° だった. このような前縁の大きな曲げ変形は, これまでの魚類遊泳の研究では報告されていない. 後縁の曲げ角 θ_2 の最大値と最小値は, それぞれ上昇時の左胸鰭の 27° と, 方向転換時の外側胸鰭の -61° で, その差は 88° だった.

キャンバー高の最大値と最小値は, それぞれ方向転換の外側胸鰭のダウンストローク終了時の 2.9 mm と, ホバリングの右胸鰭のアップストローク中の -3.9 mm だった. それぞれ, 前縁長さ約 6 mm の 48% と -65% である.

面積の最大値と最小値は, それぞれ上方直進の右胸鰭のダウンストローク中の 100 mm^2 と, 方向転換の内側胸鰭のダウンストロークからアップストロークへの反転時の 33 mm^2 だった. つまり, 胸鰭は扇子のようにたたむことができ, 面積は最大値の 33% まで小さくなる.

4. 結論

ハゼ科のチチブ (*Tridentiger obscurus*) の胸鰭などの各所の蛍光粒子マーカを貼付し, 胸鰭を羽ばたかせる 4 種類の遊泳, すなわちホバリング, 上昇, 方向転換, 後退遊泳を, 複数台のビデオカメラで撮影して 3 次元運動解析を行った. 特に後退遊泳は, 魚類遊泳研究において今回初めて解析が行われた. 運動解析の結果, 左右の胸鰭のストロークの時間差には, 遊泳種類によって同位相から逆位相まで幅広い変化があった. 羽ばたき角の変化幅も 150° と大きかった. 面積は, 最大値の 33% まで小さくなった. さらに, 従来知られていた胸鰭推進する魚類の場合とは異なり, 胸鰭の前縁の曲げが見られ, 前方には最大 43° , 後方には最大 34° 曲がった. そのうえ後退遊泳では, 他の魚類で一般的に見られる前縁が先行するストロークではなく, 後縁が先行するストロークが発見された. これらから, ハゼ型の機動遊泳の特徴は, 胸鰭の高い運動自由度と変形自由度であることが示唆された.

謝辞

本研究は JSPS 科研費新学術領域研究「ソフトロボット学」JP18H05468 の支援を受けた.