

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330278

研究課題名(和文) 情報技術を活用した魚の群れ行動に関する研究

研究課題名(英文) Studies on a shoal of glass catfish using information technology

研究代表者

立野 勝巳 (Tateno, Katsumi)

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授

研究者番号：00346868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：グラスキャットフィッシュの群れ行動と、正弦波電気刺激下における神経行動学的研究を行った。群れ行動解析では、半自動的に解析するソフトウェアを開発した。得られたデータを元に遺伝的アルゴリズムを用いて群れ行動モデルのパラメータを推定し、分離行動の距離を推定した。正弦波電気刺激に対するグラスキャットフィッシュの行動反応を調べる実験では、刺激周波数と刺激電流の振幅に依存した忌避行動を明らかにした。電気受容器官の神経活動を記録した結果では、求心性線維のバースト放電化が忌避行動に対応することを明らかにした。また、スパイクニューロンのアナログ回路を用いて、正弦波刺激に対する非周期的な神経活動を再現した。

研究成果の概要(英文)：We investigated schooling behavior of the tropical non-electrogenic transparent catfish, glass catfish, and their swimming behavior under sinusoidal electrical stimulation. The schooling behavior was analyzed by a custom made software. We inferred the separation distance between fish from their schooling behavior. In the swimming behavior experiments, glass catfish avoided the sinusoidal electrical stimulation in a low frequency range. We also investigated spiking patterns of electroreceptors of glass catfish in response to the sinusoidal electrical stimulation and revealed its nonlinear characteristics. Non-periodic bursting electrical activity of nerve impulses were associated with the avoidance behavior. Further, the nonlinear property of spiking patterns were reproduced by an analog electric circuit.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：電気受容器 群れ行動 非線形応答

### 1. 研究開始当初の背景

魚や鳥の群れは、捕食者から身を守るために有効な行動であると考えられているが、一緒に行動する他者の認識に関するメカニズムはまだ十分に明らかにされていない。

近年、行動学研究に情報工学的アプローチも取り入れられてきている。行動解析に画像処理手法が取り入れられたりするほかに、他者に認識を調べるための研究として、コンピュータアニメーションによる視覚刺激を呈示したりする方法がある。自由度の高さからコンピュータアニメーションを行動学的な研究に取り入れる事例が増えている。

本研究ではグラスキャットフィッシュという群れで泳ぐ習性がある魚を対象とした。この魚は視覚や嗅覚などの感覚器官に加えて、電気受容器という電氣的な刺激を感覚として認識できる器官を有している。当研究室の予備的研究として、グラスキャットフィッシュが特定の周波数の正弦波電気刺激を忌避する傾向があることが示唆されていた。魚は電気魚でなくとも、筋活動などで体の周囲に微弱ではあるが電場（生体電位）を形成する。研究開始当初、このような生体電位を検出する能力を群れの形成に利用している可能性などが考えられた。そこで、視覚的刺激や電氣的刺激に対する魚の行動について着目した。

併せて、電気刺激に対する電気受容器の神経応答を明らかにすることにより、感覚情報処理を理解することが期待された。

### 2. 研究の目的

魚が群れを形成する行動を指標として、他個体の認識における情報処理機構を明らかにすることを目的とした。群れを形成するという判断には他個体の形状だけでなく、動きも関係している可能性がある。本研究は、グラスキャットフィッシュという群れで泳ぐ習性のある魚を対象に、コンピュータアニメーションにより魚の動きを再現し、本物の魚と相互作用させることで、群れの形成に必要な要素を抽出することを目的とする。グラスキャットフィッシュは電気受容器をもつ魚でもある。グラスキャットフィッシュが特定の周波数帯の電気刺激を忌避することから、他個体と適切な距離を保つために電気受容器を利用している可能性がある。電気受容器の電気生理学的特性を調べ、群れの形成における神経行動学的知見へ展開する。

### 3. 研究の方法

群れ行動実験（実験A）と単独行動実験（実験B）に分けて、実験を遂行した。

実験A) グラスキャットフィッシュの群れ行動実験：

魚の群れ行動モデルを作製することに取り組んだ。10匹を1組としてグラスキャットフィッシュを自由に泳がせ、群れ行動を記録した後に、行動軌跡を抽出し、群れモデルのバ

ラメータ推定を行った。

研究開始当初、複数の魚の行動軌跡を抽出する方法がなく、フレームごとに手作業で魚の位置を記録する作業を行っていたが、負荷の高い作業であり、特に高速撮影した場合、行動軌跡の解析だけで膨大な時間を費やした。そこで、半自動的に行動軌跡を取得するプログラムを用意した。画像処理としては主に差分画像を利用する手法であるが、水槽下部より撮影できるように実験装置を設置したり、解像度の高いカメラを用意したりして、画像処理手法が効果的に適用できる実験環境を整えた。

群れ行動モデルとしてボイドアルゴリズムにフィティングすることを試みた。ボイドアルゴリズムは、分離・整列・結合の3つの行動を起こす個体間距離を設定して、群れ行動を再現するモデルである。行動軌跡データに対し遺伝的アルゴリズムを用いて、ボイドアルゴリズムの各パラメータの推定した。群れを形成する明室条件下に対して、推定を行った。

実験B) グラスキャットフィッシュの単独行動実験：

グラスキャットフィッシュは特定の正弦波電気刺激を忌避する傾向にあることが先行研究により示されていたが、その忌避行動と電気受容器の神経応答との関連は不明であった。実験Bでは、行動実験(1)と電気生理学実験(2)を平行して行うことで、電気刺激環境下での神経行動学的実験を行った。

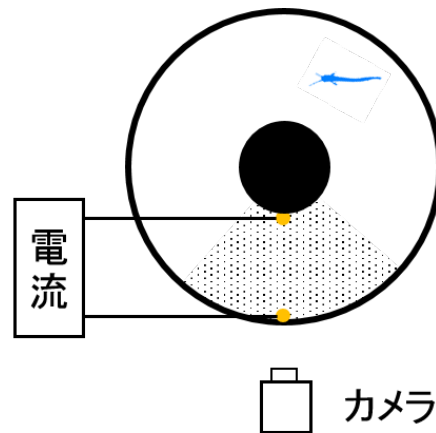


図 1: 実験装置。円筒形水槽にグラスキャットフィッシュを泳がせ、水槽の一方に微弱な電流を流す。橙の丸は電極。

1) 円筒形水槽内にグラスキャットフィッシュを泳がせ、水槽の一方から正弦波電気刺激をする実験を行った(図1)。先行研究では水槽への刺激は電圧刺激であったのに対し、電気生理学実験では電流刺激をするため、結果を比較できなかった。そこで、電圧-電流変換器を作製し、電流刺激を行った。電流刺激強度を3段階(200 nApp, 500 nApp, 1000

nApp) に変えて, 100 Hz 以下の刺激周波数を実験水槽に流した。

記録後, 魚の位置を追跡ソフトウェアにより抽出し, 電極付近の領域(図 1 網掛け領域)での滞在時間を評価した。

2) グラスキャットフィッシュの電気受容器内にガラス微小電極を接近させると, 神経活動を拾うことができる。麻酔をかけ, チャンバーに静置したグラスキャットフィッシュに正弦波電流刺激を加え, 神経応答を記録した。正弦波電流刺激の振幅と周波数をパラメータとした。

神経応答を解析するに当たり, 活動電位の発生間隔 (Interspike interval, ISI) を抽出し,  $i$  番目の ISI を横軸にして,  $(i+1)$  番目の ISI を縦軸にした図 (1 次元写像) にプロットした。1 次元写像上にプロットした点が散在するような図ではなく, ある関数形状になっていれば, システムが決定論的な振舞いをしていることを意味する。1 次元写像を作成し, 解析することにより電気刺激に対する応答の非線形的性質を明らかにした。

電気受容器の正弦波電流刺激に対する応答を再現するアナログニューロンモデル回路を作製した。ニューロンモデル回路に正弦波電流刺激を加え, 活動電位を記録し, 電気生理学実験と同様に活動電位の ISI を 1 次元写像により解析した。

#### 4. 研究成果

実験 A) 群れ行動実験: 複数の魚の行動を半自動的に取得できるようになった。高解像度のカメラを用いることで, 行動記録画像から頭の向きも取得できるようになった。

10 匹のグラスキャットフィッシュを数分間泳がせて, 行動を記録したが, 明暗条件, 水流の有無による行動が異なる結果となった。特に, 明るい条件下では群れを形成するが, 暗室条件下では群れを形成しないことが明らかとなった(図 2)。また, 水流があるほうが頭の向きの揃った群れが形成された。

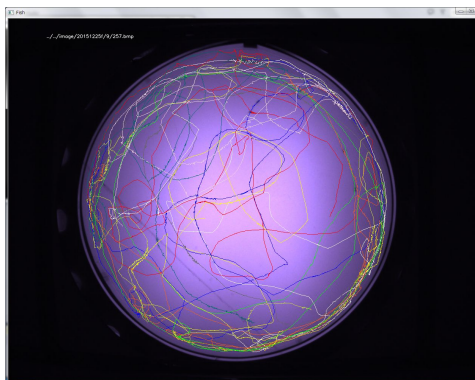


図 2: 暗室における 10 匹のグラスキャットフィッシュの行動軌跡。暗室では群れを形成しない。色の違いは, 個体の違いである。

群れの行動軌跡データに対し, 遺伝的アルゴリズムを用いて, ボイドアルゴリズムのパラメータ推定を行ったところ, 整列と結合については, 収束が不十分で結論が得られなかったが, 分離距離は魚の体長に一致することが示唆された。ボイドアルゴリズムを適用するに当たり, 周囲のどの魚と相互作用させるかについても, 4 つの条件 (Metric 条件・トポロジー条件・ポロノイ条件・Visual 条件) を検討したが, 結論は出すには十分ではなかった。

グラスキャットフィッシュに群れモデルを呈示する予定であったが, 群れモデル作成に時間がかかったため, プロジェクターを用いて画像刺激を行い, その応答を調べる実験を行ったが, グラスキャットフィッシュの反応は芳しくなかった。

#### 実験 B) 単独行動実験

1) 電気刺激に対する行動学的研究: グラスキャットフィッシュは, 振幅 250 nApp で 1 Hz の正弦波電流刺激を忌避するように行動した。500 nApp では 40 Hz 以下の周波数帯を忌避する行動を示した。図 3 は, 10 Hz 刺激の際の魚の行動軌跡である。1000 nApp の刺激においても同様に 40 Hz 以下の刺激周波数を忌避した。

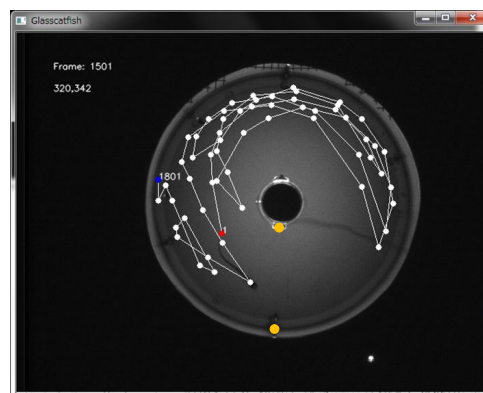


図 3: グラスキャットフィッシュの行動軌跡例。赤丸は初期位置, 青丸は最後の位置。刺激電極は写真下部に設置 (橙色)。

2) 電気受容器の電気生理学的研究: グラスキャットフィッシュを静置したチャンバーに行動実験と同様の正弦波電流刺激し, 尻ビレの電気受容器から神経活動を記録した。電流刺激の振幅と周波数をパラメータとした。電流刺激なしで自発的に活動電位が繰り返して周期的に発生している。そこへ正弦波電流刺激を入力すると, 刺激電流振幅と刺激周波数に応じて, 活動電位の発生周期 (Interspike interval, ISI) が変調された。忌避行動が引き起こされる刺激周波数帯 (40 Hz 以下) に注目すると, 高い周波数で活動電位が連続的に発生する時間帯としばらく停止する時間帯が交互に現れるバースト放電と

いう発火パターンになることがわかった。

活動電位の発生間隔の時系列データに対し、1次元写像解析を適用すると、10 Hz 前後で中程度の刺激振幅のときに、準周期パターンのもが見られた(図4)。

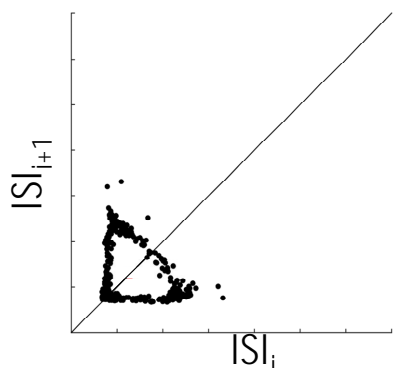


図4：電気受容器の求心性線維の正弦波電流刺激に対する応答例。活動電位の発火間隔 (ISI) が変動し、その  $i$  番目と  $i+1$  番目をプロットすると環状の応答が現れる。

電気受容器から中枢への投射経路を明らかにするために染色実験も行ったが、用いた染料では長距離にわたる神経を染めることができず、投射先を明らかにすることができなかった。

電気受容器のアナログニューロンモデル回路を作製し、正弦波電流刺激をしたときの応答を調べると、電気受容器で見られたような準周期応答やバースト放電応答が得られた。活動電位の間隔を1次元写像にプロットすると、環状の非周期応答が得られた(図5)。

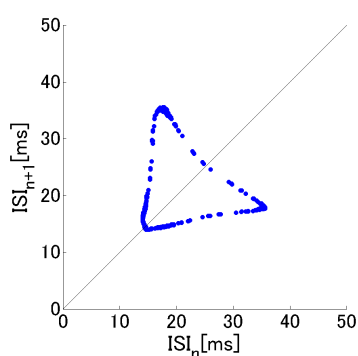


図5：アナログニューロンモデル回路の正弦波電流刺激に対する応答の例。

以下に結果をまとめる。グラスキャットフィッシュは、500 nApp 程度の微弱な電気受容器を感じることができ、刺激周波数に依存して忌避するような行動を示すことが明らかになった。忌避行動を引き起こす周波数帯は、グラスキャットフィッシュの生体電位周

波数(約4 Hz)に一致する。このことは、ポイドアルゴリズムの分離との関連が示唆されるが、視界の効かない暗室条件では群れを形成しないという結果から、電気刺激の受容と群れ行動との関連については明らかにすることができなかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計6件)

Katsumi Tateno (2017) Bursting spiking patterns of electroreceptors of glass catfish and associated behavior responses. 2017 NTU-Kyutech seminar, 2017年3月22日, 台湾大学, 台北市(中華民国).

Yu Adachi, Katsumi Tateno (2017) "Nonlinear Characteristics of electroreceptors of glass catfish to electrical stimulation and its behavior responses" Proceedings of 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), pp. 233-236, 2017年3月1日, グラム(アメリカ).

Katsumi Tateno (2016) Electroreception in glass catfish and its nonlinear dynamics. 2016 NTU-Kyutech seminar, 2016年3月10日, 台湾大学, 台北市(中華民国).

Yu Adachi, Katsumi Tateno (2015) Non-periodic responses to sinusoidal electric stimulation in ampullary electroreceptors of glass catfish. Neuroscience 2015, 2015年10月17日, シカゴ(アメリカ).

Yu Adachi, Katsumi Tateno (2015) Nonlinear characteristics of electrosensory afferent nerve impulses elicited by sinusoidal electric stimulation in glass catfish. 第53回日本生物物理学会年会, S218, 2015年9月14日, 金沢大学(石川県金沢市).

立野 勝巳, 蛭田 昌也(2014) グラスキャットフィッシュの忌避行動における正弦波電気刺激周波数依存性. 日本動物行動学会第33回大会, p.69, 2014年11月2日, 長崎大学(長崎県長崎市).

[その他]

ホームページ等

<http://www.brain.kyutech.ac.jp/~tateno>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

立野 勝巳 (TATENO, KATSUMI)

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授

研究者番号: 00346868