

# 弱電気魚の電気定位における電場位相差と位相差検知の神経機構

## Phase difference of electric field and neural mechanism of detection of phase difference in electrolocation of weakly electric fish

藤田 一寿 (PY)<sup>†</sup>, 榎森 与志喜<sup>‡</sup>

Kazuhisa Fujita(PY) and Yoshiki Kashimori

<sup>†</sup> 津山工業高等専門学校情報工学科

<sup>‡</sup> 電気通信大学大学院情報システム学研究科

kazu@spikingneuron.net

**Abstract**—In order to understand the neural mechanism of sensory processing, it is quite important to study the features of sensory stimuli. An electric fish can detect an object using electrosensory system. The fish generate a dynamic electric field by electric organ discharge. An object near the fish elicits the amplitude and phase modulations of electric field generated by the fish. The feature of amplitude modulation has been well studied, but the feature of phase modulation remains unclear. In this study, we calculate the phase modulation of electric field using Finite-element method. We also propose a neural mechanism for extraction of phase modulation on the basis of spike timing dependent plasticity.

**Keywords**— electric fish, STDP, FEM

### 1 はじめに

脳の感覚刺激の情報処理を理解する上で、刺激自体がどのような特徴を持っているかを知るとも重要である。弱電気魚の電気感覚システムの研究においても、電気刺激の研究がよく行われている。弱電気魚は、発電器官により周囲に 400Hz 程度の交流電場を生成する。周囲に物体や他の魚が存在する場合、電場の振幅と位相が変調を起こす。その変調を検知することで、周囲の情報を得ることができる。その電場変調の特徴を知るため、数値計算による弱電気魚の電場の研究が多く行われている [1–3]。しかし、これまでの電場の研究は、抵抗体としての物質は扱っていたが、容量性の物質はあまり扱っていなかった。本研究では、有限要素法により、魚が生成した交流電場の振幅と位相を計算し、容量性の物体により生じる電場の変調を求めるとともに、STDP (spike timing-dependent plasticity) により学習を行い、弱電気魚が受ける電気刺激の位相差の検出を行う。

### 2 モデル

#### 2.1 電場計算

弱電気魚は、発電器官で発電することで周囲に交流電場を生成する。本研究では、有限要素法を用い、魚の作り出す 2 次元の電場を計算する。魚は 350mm×200mm の水槽にいるものとする。魚は 100mm×8mm の長方形とする。そして、魚は水槽の中央に存在しているものとする。そのように配置したものを、一辺 0.5mm の正方形格子に区切り (図 1)、有限要素法によりそれぞれの格子の電位を計算する。それぞれの格子は、その場所にある物質に対応した電気抵抗と電気容量を持つ。

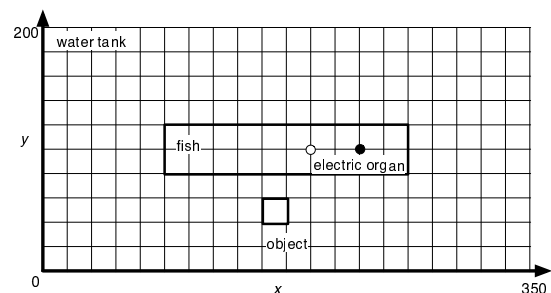


図 1: 空間に魚と物体を配置し、一辺 0.5mm の正方形格子に空間を区切る。

#### 2.2 神経モデル

弱電気魚は、受容器層から最終的な処理核まで体表面の位置情報が保たれながら情報が伝達する [4]。図 2 のように、皮膚上に 2 つの電気受容器があるとすると、受容器で処理した刺激は、上位核である TS (torus semicircularis) の神経細胞に送る。受容器の場所に対応した TS の神経細胞との間には可塑性はないものとする。しかし、受容器の場所と対応しない TS の神経細胞との接続には STDP による学習が生じるものとする。

### 3 結果

#### 3.1 魚が生成する電場

弱電気魚が生成する電場の変調を有限要素法により計算した。本研究では一辺 4mm の正方形の物体を、

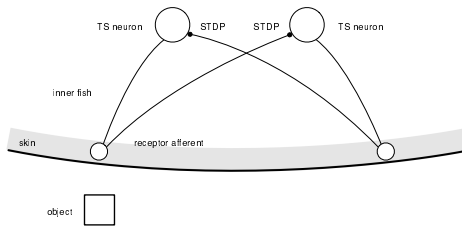


図 2: 神経モデル

$x = 145$ 、 $y = 90$ (魚の側方 4mm) の位置に配置した。物体の電気容量を  $100\mu\text{F}$  とした。計算した結果、弱電気魚の電気受容器が受ける電気刺激の位相は図 3 のようになった。図が示す通り、電気受容器が受ける電気刺激の位相は物体に近いところで位相が正の方向に変調している。その変調は、発電器官の反対側に広がっている。

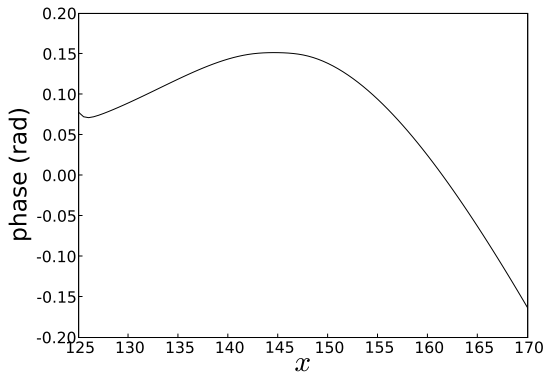


図 3: 体表面上に分布する電気受容器が受ける電気刺激の位相。横軸は場所、縦軸は位相を表す。

### 3.2 STDP を用いた位相差検出

弱電気魚の近傍に容量性物体がある場合、電気受容器が受ける電位に位相差が生じる。その位相差を STDP により抽出可能かどうかコンピュータシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、 $x = 145$  と  $x = 155$  に対応する細胞の応答を調べた。それぞれの場所の電気受容器が受ける電位の位相はそれぞれ  $0.151\text{rad}$ 、 $0.0816\text{rad}$  であった。その位相差は  $0.0694\text{rad}$  であり極めて小さい。このシミュレーションでは、 $0\text{--}100\text{msec}$  では位相差を生じさせず、 $100\text{msec}$  以上では位相差が生じるようにした。まず STDP が無い場合、TS でどのような応答になるか調べたが、TS の神経細胞の応答には差が出なかった。しかし、STDP がある場合では、図 4 のように、TS の神経細胞の発火の時間差が増加した。その時間差は、位相差に比べ大きいものである。このことは、STDP が微小な位相差を TS において拡大することができること

を示すものである。

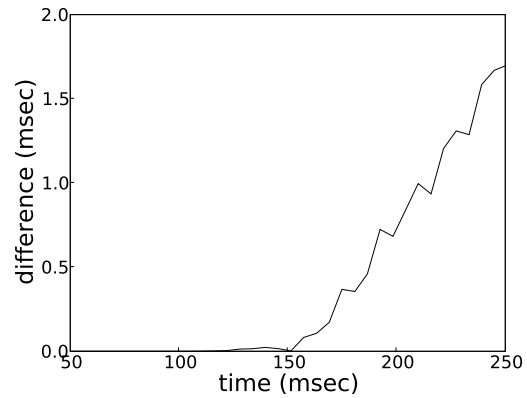


図 4:  $x = 145, 155$  に対応する TS の神経細胞の発火時間差。

## 4 まとめ

本研究では、容量性物体が引き起こす電場の振幅と位相の変調をコンピュータシミュレーションにより求めることを可能にした。本研究は、今まで物体がどのような位相変調を作り出すのか不明であったが、それを明らかにするものである。この成果は、弱電気魚の電気定位における位相変調の抽出メカニズムの研究に寄与するものである。

電場計算の結果、物体により生じた電場の位相差は微小なものであった。この微小な位相差を STDP により、TS で発火の時間差として拡大することが可能なことを示した。このことは、刺激の微小変化の検出に STDP が関与する可能性を示唆するものである。

## 参考文献

- [1] W. Heiligenberg (1975) "Theoretical and experimental approaches to spatila aspects of electrolocation" J. Comp. Physiol. 103, 247–272,
- [2] N. Hoshimiya, K. Shogew, T. Matsuno, and S. Chichibu (1980) "The apternotus EOD field: wave form and EOD field simulation" J. Comp. Physiol, A 135, 283–290
- [3] A. A. Caputi, R. Budelli, K. Grant, and C. C. Bell (1998) "The electric image in weakly electric fish: physical images of resistive objects in *gnathonemus petersii*" J. of Experi. Biol. 201, 2115–2128
- [4] J. Bastian (1986) "Electroreception, behavior, anatomy, and physiology" in: T. H. Bullock, W. Heiligenberg, eds, Electroreception(Wiely, N.Y), 577-612.