

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 1 日現在

機関番号：17104
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010 ～ 2012
 課題番号：22700235
 研究課題名（和文）ヘラチョウザメの電気感覚に発想を得たネットワーク型化学センサシステム
 研究課題名（英文）Development of a sensor system inspired by electroreceptors of paddlefish
 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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、動物の感覚受容機構に発想を得たセンサシステムを提案した。本センサシステムは、電気受容細胞が雑音を活用して神経活動を同期させる現象を利用して、入力信号の強度と違いを出力パルスの発火頻度と同期の程度に符号化する神経回路である。神経回路の構造は、マウス味蕾を参考にした。基礎データとして、マウスの味蕾細胞モデルを作成したり、グラスキャットフィッシュの電気刺激に対する行動を調べたりした。行動実験では、電気刺激に対するグラスキャットフィッシュの忌避行動を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We proposed a sensor system inspired by mouse taste buds and electroreceptors of paddlefish. In the present sensor system, the strength and identity of input signals were encoded into the output frequency and degree of synchronization between a pair of output neurons. The structure of the sensor system was based on a cell-to-cell network in the mouse taste buds. Further, we made a computational model of the mouse taste bud cells. The avoidance behavior of glass catfish in the weak electric field was also revealed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：ニューラルネットワーク

1. 研究開始当初の背景

(1) ヘラチョウザメの電気受容器において、雑音によって神経活動が同期する現象 (Noise-induced synchronization) が報告されていた。また、環境中の雑音を利用して、感覚受容器のセンサ感度を上げる現象 (確率共鳴) についても報告されていた。

(2) マウスの味蕾細胞は、I 型から IV 型に分類される。II 型細胞と III 型細胞では、活動電位の形状が異なることが報告されていた。

(3) マウスの味蕾内において、細胞間で情報伝達の可能性が指摘されていた。

(4) 研究代表者らは、上記感覚受容器の仕組みや構造をヒントに、市販のアルコールセンサを複数並べたネットワーク型センサシステムを作成していたが、センサ信号の分類やセンサ情報の符号化には未解決の点があった。

2. 研究の目的

(1) 魚の電気受容器とマウスの味物質受容器に関する知見に発想を得て、化学センサシステムを開発することである。マウスの味蕾内の細胞ネットワークに関する知見と、ヘラチョウザメが動物プランクトンを検出するときに利用する Noise-induced synchronization に関する知見を融合させて、センサシステムを提案する。特に、センサ部における神経符号化に関する提案を行うことが目的である。

(2) センサシステムのセンサ部で符号化された神経パルス列をフィルタリングする情報処理の仕組みを提案することも目的とした。

(3) マウス味蕾細胞の細胞型ごとの活動電位の特性を知ることが目的の一つである。マウスの味蕾細胞の数理モデルを作成し、味蕾内ネットワークの知見を得る。

(4) 電気受容器をもつ魚 (ヘラチョウザメ、もしくはグラスキャットフィッシュ) の電気刺激に対する行動を調べ、その神経情報処理を考察することも目的とした。

3. 研究の方法

(1) センサシステムの開発 : マウスの味蕾細胞の電気生理学的知見をもとに、その特性を簡素化した II 型細胞と III 型細胞の数理モデルを用いて、味蕾内の細胞ネットワークの構成を模倣したネットワークを作成した。

① 図 1 は、ネットワークモデルの概形である。4 個の II 型細胞モデルと 2 個の III 型細胞モデルからなる。II 型細胞モデル間に

結合はない。III 型細胞モデル間にも結合はない。II 型細胞モデルからの出力をテレグラフパルス状に変換し、論理和を取り、III 型細胞モデルに等しく入力した (common telegraph pulse)。入力パルスの種類と強度は、III 型細胞モデルの発火周波数と活動電位の同期の程度に符号化される。

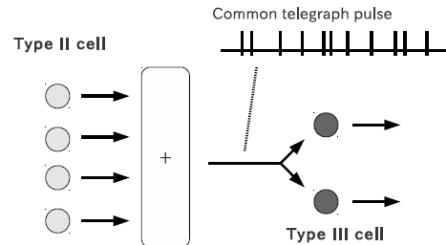


図 1 センサネットワークモデルの概形

② II 型細胞モデルは、次式で表される。

$$C_m \frac{dv_i}{dt} = \bar{g}_{Na} m_{\infty,i}^3 h_i (e_{Na} - v_i) + g_l (e_l - v_i) + I_{dc}$$

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{h_{\infty,i} - h_i}{\tau_{h,i}}$$

③ III 型細胞モデルは、次式で表される。

$$\epsilon \frac{d\psi_j}{dt} = 1 - \epsilon \sin \psi_j(t) + s(t) \quad (j = 1, 2)$$

④ シミュレーション手順は次の通りとした。III 型細胞モデルを II 型細胞モデルから切り離し、ランダム発生プログラムで生成したランダムパルスを入力した。ランダムパルスはポアソン分布に従う。次に、周期的パルスを入力し、III 型細胞モデルの応答をランダムパルス入力の場合と比較した。

⑤ II 型細胞モデルを脱分極させ、活動電位の周波数変化を求めた。さらに、複数の II 型細胞モデルを同時に脱分極させたときの出力パルスパターンをばらつきを評価した。

⑥ 最終的に、II 型細胞モデルと III 型細胞モデルを結合したネットワークモデルを作成した。ネットワークモデルの II 型細胞モデルを脱分極させ、III 型細胞モデルから出力される活動電位の周波数特性と同期の程度 (γ) を評価した。 γ 値は次式で求めた。

$$\gamma^2 = \langle \sin \Delta\phi \rangle^2 + \langle \cos \Delta\phi \rangle^2$$

ここで、 $\Delta\phi$ は 2 つの III 型細胞モデルの位相差で、 $\langle \cdot \rangle$ は時間平均である。

(2) フィルタ回路 : 背景のランダムパルス列を利用してフィルタ特性を可変にするネッ

トワークに関するシミュレーションを行った。

①神経ネットワークは、興奮性細胞モデルと抑制性細胞モデルで構成した。興奮性細胞モデルへのフィードバック抑制回路である。

②興奮性細胞モデルに対し、周期的なパルス列を入力し、ネットワークのパルス通過特性を調べた。周期的パルス列を入力すると同時に、抑制性細胞モデルにランダムなパルス列を背景入力し、周期的パルス列に対する通過特性の変化を調べた。

(3)味蓄細胞モデルの作成：電気生理学的実験の結果をもとに、II型細胞モデルとIII型細胞モデルを作成した。

①共同研究者から提供された TEA 非感受性電位依存外向き電流の電位固定実験の結果に対し、曲線当てはめを行った。既知のナトリウム電流と TEA 感受性電位依存外向き電流を加えて、Hodgkin-Huxley 型の細胞モデルを作成した。

②II型細胞モデルの主な外向き電流は、TEA 非感受性電位依存外向き電流とした。これに対し、III型細胞モデルの主な外向き電流は、TEA 感受性電位依存外向き電流とした。

③作成した細胞モデルを電流パルスで刺激し、活動電位を生成させた。II型細胞モデルとIII型細胞モデルにおける、活動電位の幅と後過分極の深さを比較した。

(4)魚の行動に関する実験：ヘラチョウザメ、およびグラスキャットフィッシュを実験水槽で遊泳させ、微弱な正弦波刺激を加えた。

①ヘラチョウザメの場合、水槽の複数の点で微弱な正弦波電気刺激を加え、ヘラチョウザメの捕食行動をハイスピードカメラで撮影した。

②グラスキャットフィッシュの実験では、魚の初期位置をみて、その近い水槽の端から電気刺激実験を加えた (図 2)。

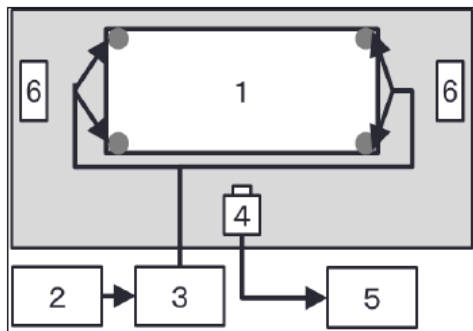


図 2 実験用水槽の配置図。1 は水槽、2 は刺激装置、3 はフィルタ、4 はカメラ、5 は記録用パソコン、6 が赤外線照射装置。

③グラスキャットフィッシュの行動をハイスピードカメラで撮影し、実験後魚の位置

を検出した。魚の位置検出ソフトウェアは自作した。

④水槽を仮想的に 3 分割 (Near, Middle, Far) し、セクションごとに魚の滞在時間を求めて比較した。Near が刺激電極に近いセクションである。刺激周波数を変えて、セクションごとに魚の滞在時間をチャンスレベルと比較した。

⑤電気受容器を持たない魚としてヒメダカに対して同様の実験を行った。

4. 研究成果

(1) センサシステムの開発：II型細胞とIII型細胞に特徴を簡素化した数理モデルによるセンサネットワークモデルを作成した。

①III型細胞モデルをII型細胞モデルから分離し、III型細胞モデルの組に、周期的なパルス入力とランダムなパルス入力を加えて応答特性を調べた結果、III型細胞モデルの組は、ランダムなパルス入力に対し、同期した応答を示すことがわかった (図 3)。

②II型細胞モデルは、脱分極性入力に対し、周期的な活動電位を発生し、入力強度に比例して発火頻度が上昇した。



図 3 2 個の III 型細胞モデルの発火特性。一番下のトレースは、入力のランダムパルス列。

③II型細胞モデルとIII型細胞モデルを結合したネットワークモデルでは、II型細胞モデルの発火周波数の上昇を受けて、III型細胞モデルの発火周波数も上昇した。このとき、3 個以上の II 型細胞モデルが活動すると、共通テレグラフパルスはランダム様のパルスパターンになり、2 個の III 型細胞の発火が同期した。

④II型細胞モデルが 1 個だけしか活動していない場合、III型細胞モデルには、周期的な共通テレグラフパルスしか入力されず、同期した応答は見られなかった。

⑤センサ入力信号の違いと強さを神経パルスの同期の程度と発火周波数に符号化することができた。

⑥先行研究より、必要な素子数を減らすことにも成功した。

(2) フィルタ回路：抑制性細胞モデルに入力した背景のランダムパルス列の分散に応じて、周期的パルス列に対する興奮性細胞モデルのパルス通過帯域が変化することを明ら

かにした。

①ランダムパルス列の分散が小さい場合、フィルタ特性は、 θ 周波数帯域を中心とした帯域通過型特性を示した。

②ランダムパルス列の分散が大きい場合、低域通過型の周波数特性であった。

(3) 味蕾細胞モデルの作成：Hodgkin-Huxley 型の II 型細胞モデルと III 型細胞モデルを作成した。

①II型細胞モデルの外向き電流を、主に TEA 非感受性電位依存外向き電流とすることで、電気生理学的な知見と一致する活動電位が再現できた。TEA 非感受性電位依存外向き電流の時定数は、TEA 感受性電位依存外向き電流に比べて長い。II 型細胞モデルの活動電位は、幅が広く、後過分極が従わない(図 4)。

②III 型細胞モデルの外向き電流は、TEA 感受性電位依存外向き電流であるとした。III 型細胞モデルの活動電位は、幅が狭く、深い後過分極が伴われた。

③外向き電流の違いを考慮することで、II 型細胞と III 型細胞の活動電位の形状の違いを数理モデルにより説明することができた。

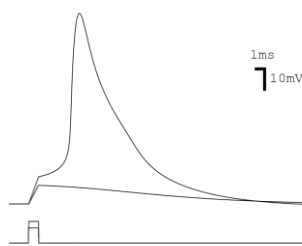


図 4 マウス II 型細胞モデルの幅の広い活動電位。後過分極がない。

(4) 魚の行動に関する実験：ヘラチョウザメが入手困難となったため、実験対象をグラスキャットフィッシュに絞った。グラスキャットフィッシュが電気刺激に対し忌避行動を起こすことを明らかにした。

①図 5 は、Near, Middle, Far における平均滞在時間である。Near は刺激電極に近い側のセクションである。10Hz 刺激のときに、Near セクションの滞在時間はチャンスレベルより有意に低く、刺激電極を有意に避けることがわかった。より高い周波数では、刺激電極そば (Near セクション) であっても滞在した。つまり、正弦波刺激の低周波数帯で忌避行動を起こすことを示している。

②忌避行動は、刺激電極の間隔にも依存していた。電極間隔が 1cm の刺激に対しては、低い周波数帯の電気刺激であっても忌避行動は見られなかった。

③ヒメダカに対して、同様の電気刺激を行ったが、刺激時と無刺激時の有意な差は見

られなかった。

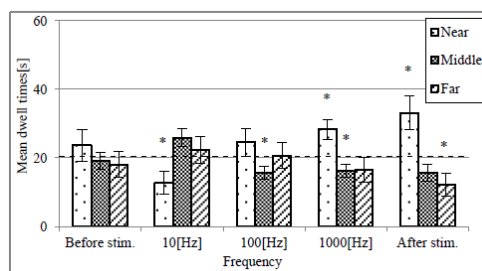


図 5 刺激周波数ごとに水槽の各セクションにおける滞在時間 (* $p < 0.05$)

④グラスキャットフィッシュもヒメダカも電気刺激に対して索餌行動は示さなかった。

⑤電気受容器をもつ魚の電気刺激に対する忌避行動は、これまで報告例が少なかったため、新たな知見を追加できた。本成果は、今後神経活動の記録と併せて、忌避行動における神経行動学的な知見につながる。

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 7 件)

- ① Hiroyuki Yoshimoto, Masaya Hiruta, and Katsumi Tateno, "Avoidance behavior of glass catfish to weak sinusoidal electric stimuli", 2013 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'13), 2013 年 3 月 6 日, ハワイ島 (アメリカ)
- ② Katsumi Tateno, Neural pulse coding in the taste bud-inspired sensor network, Workshop on Brain-Inspired Systems, 2013 年 1 月 29 日, Frankfurt Institute for Advanced Studies (ドイツ)
- ③ Katsumi Tateno, Yoshitaka Ohtubo, Kenji Kimura, Kiyonori Yoshii, Modeling of a slowly activating hemichannel current in mouse taste bud cells, 日本神経回路学会第 22 回全国大会, 2012 年 9 月 14 日, 名古屋工業大学 (愛知県)
- ④ Katsumi Tateno, Yoshitaka Ohtubo, Synchronization in the taste bud-inspired sensor network, 2012 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'12), 2012 年 3 月 5 日, ホノルル (アメリカ)
- ⑤ Katsumi Tateno, Yoshitaka Ohtubo, Input signal identification in the taste

bud-inspired sensor network, 日本神経回路学会第 21 回全国大会, 2011 年 12 月 16 日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県)

⑥ **Katsumi Tateno**, Hatsuo Hayashi, Satoru Ishizuka, A feedback neural network for filtering information processing, DFG-BMBF-JST Workshop Computational Neuroscience, 2011 年 3 月 3 日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県)

⑦ **Katsumi Tateno**, Jun Igarashi, Yoshitaka Ohtubo, Kazuki Nakada, Tsutomu Miki, Kiyonori Yoshii, Neural network model for taste information processing, The 10th POSTECH - KYUTECH Joint Workshop on Neuroinformatics, 2010 年 8 月 24 日, 九州工業大学 (福岡県)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: センサ装置

発明者: 立野勝巳, 大坪義孝

権利者: 九州工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-084239

出願年月日: 平成 24 年 4 月 2 日

国内外の別: 国内

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