

# 研究報告書

## 「昆虫の嗅覚神経系を模倣したシリコン神経ネットワーク」

研究期間：2018年10月～2020年3月  
研究者番号：50182  
研究者：名波 拓哉

### 1. 研究のねらい

昆虫の脳は、わずか10万-100万ニューロンから成り、ヒト脳の1000億ニューロンに比べ非常に小規模である。しかし、近年の研究報告で、ハチが0を含む数の概念を認識し、簡単な加減算を理解し、球運びゲームを行うように訓練できるなど、高い感覚情報処理能力や柔軟な学習能力を示すことが明らかになってきている。

また、そのような効率的な知性を実現する昆虫の神経回路構造が、明らかになりつつある。ハワード・ヒューズ医学研究所では、専用の半自動化された電子顕微鏡システムを用いた、ショウジョウバエ全脳のコネクトーム解析が行われた。コネクトームの解明は、さらなる神経科学実験の基盤となるため、今後数年で昆虫脳の情報処理の解明は飛躍的に発展すると期待されている。

そのような背景の中で、申請者は、シリコン神経ネットワーク技術に基づいて、昆虫脳の構造を模倣しその情報処理を超低消費電力で実現する昆虫脳チップの創出に向けて研究を進めてきた。シリコン神経ネットワークは電子回路上に神経系を効率よく実現する技術であり、次世代人工知能の基盤技術として近年盛んに研究されている。申請者はこれまでの研究で、多種多様なニューロンを高い精度かつ少ない消費回路リソースで実現するシリコン神経ネットワーク技術の開発を行った。この技術を発展させる形で、本研究では昆虫の嗅覚神経系を再現するシリコン神経ネットワークの構築を目指す。

嗅覚神経系は、昆虫脳の中でも機能・回路構造が特によく理解されている領域であり、最初の研究対象として望ましい。本研究では、嗅覚神経系を再現する神経ネットワークモデルを構築し、その電子回路実装手法について検討する。また、近年開発されつつある匂いセンサとの連携について検討する。本研究の発展として、昆虫の神経系の効率的な情報処理を高い電力効率で実現する情報処理システムの創出が期待できる。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究期間では、神経回路規模が比較的小さく、構造・機能がよく理解されているとの理由から、嗅覚信号の処理を行う触角葉とキノコ体の一部を対象に研究を行った。触角葉は嗅細胞からの匂い刺激信号を統合し、キノコ体は匂い信号を含む様々な感覚信号を受け取り、それらを関連付ける感覚連合記憶を行うことが知られている。

初めに、神経科学で明らかにされた知見に基づき(a) 昆虫の嗅覚神経系を模倣する神経ネットワークモデルの構築を行い、次に(b) 構築したネットワークモデルについて、嗅覚神経系の機能を再現できていることをシミュレーションにより確かめた。

## (2) 詳細

### (a) 昆虫の嗅覚神経系を模倣する神経ネットワークモデルの構築

図 1 に示すように、各神経科学論文に基づき神経ネットワークモデルを構築した。ここで、局所ニューロンは電気生理学実験によって得られたデータ[6]を再現するように、独自開発したスパイクニューロンモデルのパラメータを調整した。図 1(a-d)における赤線が実験データ、青線がフィッティングされたニューロンモデルの応答である。ここで、実験データを基に、自動的にニューロンモデルのパラメータをチューニングする手法を開発し、研究成果リスト 1 にまとめた。また、投射細胞・ケニオン細胞については、[18][19]で報告された発火特性を基にパラメータを手動で調整した。キノコ体の学習神経回路は 15 のコンパートメントに分けられるが、コンパートメント間の相互作用や、コンパートメント毎の学習機構の差異について、まだ明らかにされていない点が多い。そこで、比較的よく理解されている  $\gamma$  lpedc コンパートメントで調べられた学習機構[16][17]を基に、報酬系と罰系の2つのコンパートメントから成るモデルとした。

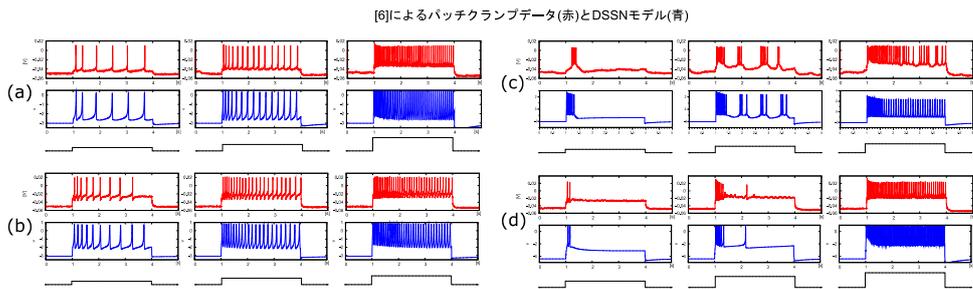
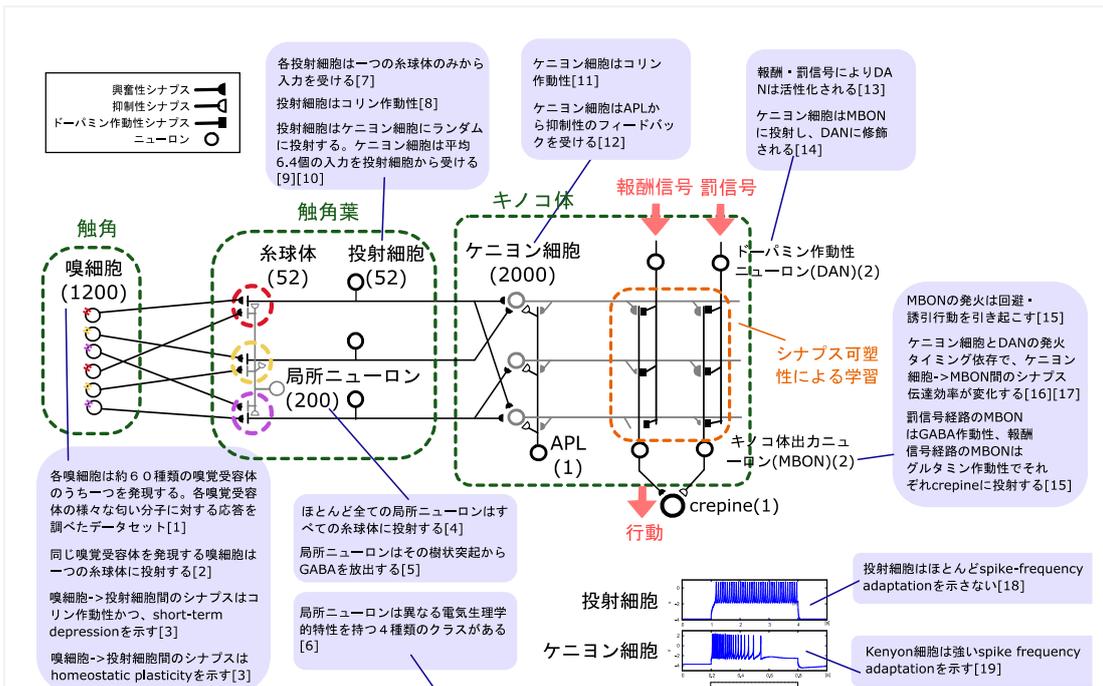
### (b) (a)で構築したネットワークモデルを用いた嗅覚神経系機能の再現シミュレーション

(a)で構築したネットワークモデルについて、嗅覚神経系の機能を再現できていることをシミュレーションにより確かめた。ここで、入力データとして、[1]で調べられた各嗅覚受容体の応答特性から、各匂いに対する嗅細胞の応答データを作成し使用した。図 2 にシミュレーション結果の一例を示す。ここで、4 種類の匂いが繰り返し与えられ、40 秒の時点で罰情報を担うドーパミン作動性ニューロンを発火させることで嫌悪性の匂い連合記憶を行っている。図 2 上段には、嗅細胞、投射細胞、ケニオン細胞の発火応答例を、下段にはキノコ体の出力部の一つである *crepine* の膜電位応答を示す。嗅細胞から与えられた匂い入力に対し、各細胞が応答しながら匂い情報が伝達され、*crepine* において罰情報と結びつけられた匂いのみ選択的に、神経活動が行われていることが確認できる。現在は、個々の神経細胞の活動特性や神経回路構造が、この匂い識別や記憶においてどのように貢献しているかについて検討し、外部発表の準備を行っている。

## 3. 今後の展開

本研究で構築した神経ネットワークモデルを基に、シリコン神経ネットワーク技術を用いて電子回路実装を行うことで、嗅覚神経系の情報処理を高い電力効率で実現する情報処理システムの開発を行う。また、近年開発されつつある匂いセンサ技術と連携し、農畜産業・医療・ロボティクス等の様々な分野に向けた、匂い情報処理システムとしての産業応用を目指す。

さらに、研究対象を視覚、触覚機械感覚野といった他の感覚一次中枢や、空間理解や運動を司る中心複合体へと広げていくことで、最終的に、昆虫脳全体の情報処理を再現する昆虫脳チップの実現を目指す。



- [1] D. Münch et al., 2016
- [2] L. B. Vosshall et al., 2000
- [3] H. Kazama et al., 2008
- [4] Y. H. Chou et al., 2010
- [5] M. Ng et al., 2002
- [6] Y. Seki et al., 2010
- [7] R. F. Stocker et al., 1990
- [8] K. Yasuyama et al., 1999
- [9] S. J. C. Caron et al., 2013
- [10] E. Gruntman et al., 2013
- [11] O. Barnstedt et al., 2016
- [12] M. Papadopoulou et al., 2011
- [13] C. Liu et al., 2012
- [14] Y. Aso et al., 2014a
- [15] Y. Aso et al., 2014b
- [16] T. Hige et al., 2015
- [17] Y. Aso et al., 2016
- [18] M. Jeanne et al., 2018
- [19] M. J. Palmer et al., 2012

図 1

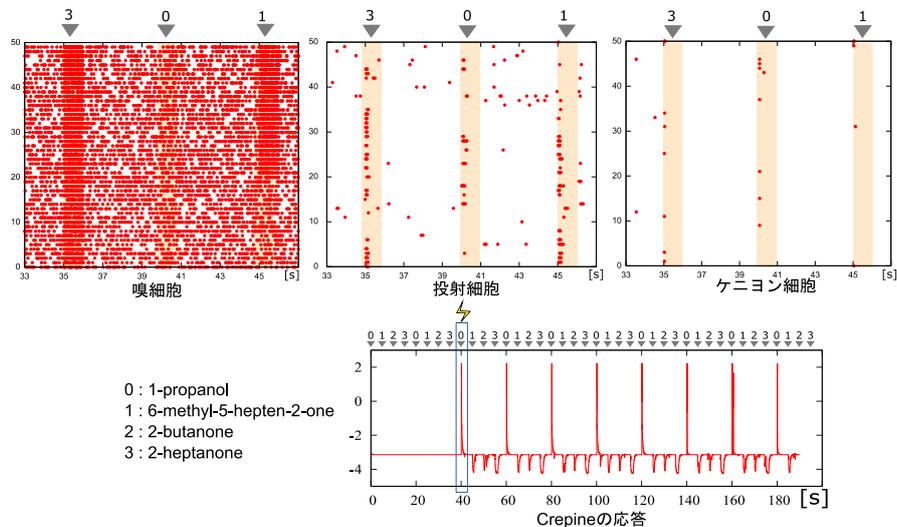


図 2

#### 4. 自己評価

##### ・研究目的の達成状況

本研究の最大の目標である、嗅覚神経系を再現する神経ネットワークモデルの構築についてはおおむね達成できた。一方で、専門ではない神経科学における最新の知見の収集に、当初の想定よりも時間を取られ、神経ネットワークモデルの電子回路実装とその評価まで手が回らなかった為、今後の研究で引き続き取り組んでいく。

##### ・研究の進め方

研究遂行において、昆虫の嗅覚神経系を専門とする神経科学者との連携が必要と考え、国内外の著名な研究者に連絡を取り何度もミーティングを行った。これまであまり関わりのなかった実験神経科学の研究者との密接な連携は、実験手法や今後の展望を含めた神経科学への深い理解への助けとなり、また、研究の方向性へのアドバイスや今後の共同研究の提案を得られた。

##### ・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

匂い情報は自然界では広く使われているのに対し、産業界での応用は限定的である。本研究の成果は、近年開発されつつある匂いセンサと組み合わせることで、匂い情報の活用に向けた情報処理基盤に発展することが期待できる。

##### ・研究課題の独創性・挑戦性

脳神経系は、長い進化の果てに獲得された究極の情報処理システムであり、その人工的な再現は、人類の大きな目標の一つである。本研究は、近年急速に理解が進む昆虫の脳神経系に着目することで、脳神経系の人工的な再現という大きな目標に向けた挑戦の第一歩であるという意義を持つ。また、神経系の情報処理原理が未だ不透明な中で、計算コストの制約を考慮しつつ神経系の活動をなるべく忠実に再現するモデリング手法を独自開発し発展させている点が独創的である。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. 名波拓哉. デジタルシリコンニューロンモデルに向けたパラメータ探索手法. 生産研究. 2020, 4月(in press)

##### (2) 特許出願

研究期間累積件数 : 0 件

##### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

なし