

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330288

研究課題名(和文) 低電力駆動確率演算素子としての神経細胞の作動原理の解明

研究課題名(英文) Mechanism of stochastic calculation by cortical neurons as low energy consumption devices

研究代表者

坪 泰宏 (Tsubo, Yasuhiro)

立命館大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：40384721

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)：従来のコンピュータシステムと相補的な計算システムを構築することを目指し、脳神経システムの特に確率性に着目した汎用情報処理様式の構築の検討を試みた。活動中の脳神経活動の観察から得られた情報処理原理である制約付エントロピー最大化原理を、神経細胞のような確率的パルス間隔素子とは異なる、一般的な確率的素子に適用できるように拡張した。また神経細胞のネットワークを構築して、数値シミュレーションにより、そのネットワークの発火活動を解析することで、双方向結合度や三角モチーフ数などのネットワークの局所的構造の統計的性質によって、ネットワークの出力時系列の統計的性質が受ける影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Aiming to develop a complementary system to the conventional computer system, we attempted to construct a general stochastic information processor inspired by the stochastic property of neuronal activity. First, we expanded "constrained entropy maximization principle", which is an information processing principle obtained from an observation of cortical neural activity, so that it can be applied to general stochastic elements including a stochastic neuronal pulse generator. Second, by constructing cortical neural networks and analyzing their firing activity by using numerical simulation, we analyzed how the statistical property of the output spike sequence depends on the statistical properties of a local network structure such as the degree of bidirectional coupling and the number of triangular motifs.

研究分野：神経情報科学

キーワード：脳・神経 神経科学 情報工学 生体生命情報学 ソフトコンピューティング

## 1. 研究開始当初の背景

現代社会では、社会の成熟や工学技術の発展とともに情報や知識が多様化、高度化してきている。このような多様な種類の情報を効率的に処理し統合するためには、情報内容によらない普遍的な情報変換・伝達様式（汎用情報処理様式）の構築が重要な基盤技術となる。

従来のいわゆるコンピュータシステムは、ブール代数を用いて情報処理を行い、デバイスを集積化、高精度化することで情報処理能力を向上してきた。現在体系化されている最も一般的な情報処理様式であり、原理的にはこのシステムでほとんどの情報加工が可能である。しかしながら、近年の急速な情報量の増大やエネルギー資源の低減などという状況を踏まえると、全ての情報処理をこの様式で行うことには限界があり、相補的な情報処理アーキテクチャの開発が望まれる。

一方で、脳神経システムは膨大な情報を低エネルギーで処理しているという特長がある。このシステムでは、確率的に発生する電気パルス信号（スパイク）という共通のキャリアによって、視覚、聴覚などの感覚情報、運動制御情報、記憶による判断情報といった異質の情報が表現され、加工されている。

信号伝達精度や消費エネルギーといった情報処理上の仕様が従来のコンピュータシステムと脳神経システムで異なることは、例えば素子（ノード）の仕様の違いとして反映されている。従来のコンピュータシステムでは、ノードである論理素子を構成する電子デバイスの均質性、確実性がほぼ必須の仕様であり、結果として高消費電力になっている。一方、脳神経システムでは、ノードである神経細胞が多様性、不確実性、低エネルギー性という、電子デバイスとは相反する3つの特徴を持っている。

そこで、神経細胞の性質に焦点を当てることで、脳神経システムの特徴をとらえた新しい情報処理アーキテクチャを構成することができれば、従来のコンピュータシステムと相補的なシステムを構築できることが期待される。脳神経システムにおける情報処理機構の解明へむけた研究は半世紀近く行われてきたが、これまでの多くの研究は、ノードの数が多いという性質に基づいた情報処理であり、素子の多様性や不確実性、ダイナミクスを十分に繰り込むことはできていなかった。

## 2. 研究の目的

このような状況を踏まえ、代表申請者はこれまで受けた2つの科研費課題、「階層化された皮質局所回路における情報処理機構の解明」及び「皮質神経回路のスパイク時系列から読み解く新しい情報処理原理」において、神経細胞という情報処理素子に対して、これまであまり注目されてこなかった確率性（不

確実性）や多様性、非線形ダイナミクスといった側面から捉えなおすために、自ら電気生理学実験を行い、データ解析及び数理理論構築を行ってきた。

脳スライスから記録される神経細胞単体の入出力関係と、運動課題中のラットの脳神経細胞から観測されたパルス時系列を比較、解析することで、単一の神経細胞の発火率はガンマ分布に従うべきであることを示した。この結果は、神経細胞が発火率をパルス時系列に変換する際に、もしできるだけ発火率を正確に変換することを目指しているとするれば、発火率はバイナリのような離散的な値をとり、ガンマ分布のような連続分布には従わないという理論的結果に矛盾する。むしろ「神経細胞では発火率をスパイク時系列に変換する際のノイズの上限値と、消費するエネルギーの上限値を制約したなかで、発火率によって表現できる情報量を最大にするように発火率が分配される」（制約付エントロピー最大化原理）、と仮定すれば、発火率のガンマ分布を矛盾なく説明できる。これは、一般のコンピュータの「できる限り信号を正確に伝えようとし、できない場合は情報量を減らすことで対応する」（相互情報量最大化）という指針とは異なるものである。

この得られた結果は、神経細胞が確率的パルス間隔生成素子であるという一般的な仮定のみを用いており、普遍的な結果である。

また、これは情報伝達に関する原理であるが、伝達する信号であるクラス（バイナリかガンマ分布か）を限定することにより、情報変換様式に対しても示唆を与える原理になっている。インビボの実験データにインビトロの電気生理実験と情報量解析を組み合わせることで、神経細胞の信号変換の普遍的性質の一端を見出すことに成功し、神経細胞は発火率という情報を伝える際に、正確に伝達することを犠牲にして多様な演算を行えるようにしているかもしれないということが示唆された。

この仮説で多くの実験結果を矛盾なく説明できるが、さらに重要な問題である「この情報表現原理に従うとどのような情報処理上のメリットがあるのか」については明らかになっていなかった。

そこで、本研究課題では、以上を踏まえた次の段階として、脳神経システムの確率性に着目した汎用情報処理様式の構築が可能であるかの検討を試みた。

## 3. 研究の方法

(1) 制約付エントロピー最大化原理を確率的パルス間隔素子でない一般的な確率的素子に適用できるように拡張し、理論的な枠組みを構築した。制約付エントロピー最大化原理では、発火率に反比例するパルス間隔を生成する確率素子を仮定していた。この原理の適用限界をより一般的な入出力対応を持つ

た確率素子の場合に拡張し、発火率の定常分布がどのようになるのかを計算した。

(2) 情報伝達に関して、制約付エントロピー最大化原理が素子の多様性にどのように依存するのかを解析した。複数の多様な送信側の神経細胞からスパイクを受け取る1つの受信側の神経細胞が、制約付エントロピー最大化原理に従うスパイク時系列を生成する為の条件について詳細に調べた。

(3) 脳神経ネットワークとしての情報変換原理を検討する為に、神経細胞のネットワークを構築して、数値シミュレーションによりその発火活動を解析した。素子の性質に加え、双方向結合度や三角モチーフ数などのネットワークの局所的構造の統計的性質によって、出力時系列の統計的性質が受ける影響を調べた。

#### 4. 研究成果

(1) 神経細胞の内部状態として発火率  $r$  を考え、その出力値として発火間隔  $T$  を考える。このとき、内部状態である発火率  $r$  が分布  $k(r) dr$  に従っているとすると、出力される発火間隔  $T$  の分布は、

$$P(T) = \int q(T|r)k(r)dr$$

で与えられる。

制約付エントロピー最大化原理とは、内部状態である発火率の分布  $k(r)$  は、エネルギー（平均発火率）

$$\int rk(r)dr$$

の上限と、発火率  $r$  からスパイク間隔  $T$  へ変換する際の条件付エントロピー

$$\int \left( - \int q(T|r) \log q(T|r) dT \right) k(r) dr$$

の上限が制約された上で、発火率の分布  $k(r)$  のエントロピーを最大化するような分布として得られる、という仮説である。この仮説に従うと、発火率の分布は、

$$k(r) \propto \exp \left( I_1 \int q(T|r) \log q(T|r) dT - I_2 r \right)$$

となる。神経細胞の発火間隔  $T$  と発火率  $r$  の間のように、本質的に反比例という関係がある場合には、

$$q(T|r) dT = f(Tr) r dT$$

という性質をもち、この場合には制約付エントロピー最大化原理に従う発火率の分布は、ガンマ分布

$$k(r) \propto \exp(I_1 \log r - I_2 r)$$

となる。

次に、より一般の伝送路（上記では発火率が入力、発火間隔が出力に対応）で考える。入力  $x$  と出力  $y$  の変換において、

$$q(y|x) dy = f(y s(x)) s(x) dy$$

のように、入力  $x$  に応じたスケール  $s$  で変換できる場合、入力のモーメント

$$\int |x|^m k(x) dx$$

の上限が制約された上での入力分布のエントロピーを最大化するような分布は

$$k(x) \propto \exp \left( I_1 \log s(x) - I_2 |x|^m \right)$$

で得られる。

神経細胞の例では、 $m=1$ ,  $s=x$  であり、平均パワー制約下での加法型白色ガウス雑音通信路では、 $m=2$ ,  $s=$ 定数である。従って、加法型白色ガウス雑音通信路では、制約付エントロピーを最大化する入力の分布と、よく知られた相互情報量を最大化する入力の分布は、ともにガウス分布となり一致する。加法的雑音通信路に限れば、この原理に従うならば通信路の詳細によらずに入力の制約のみを満たした最大エントロピーの分布が得られる。

神経細胞の発火率-発火間隔変換のように、入力の値に応じた乗法的な雑音がかかっている場合には、上式の形で最大エントロピー分布に反映される。一方で、相互情報量を最大化する入力分布は、先行研究で報告されている通り、ほとんどの場合で離散分布となる。

(2) 多様な確率素子が複数あった場合の情報伝達に関して、制約付エントロピー最大化原理に従うことでのメリットを調べる為に、複数の多様な送信側の神経細胞からスパイクを受け取る1つの受信側の神経細胞が生成する発火時系列の間隔分布が、インビボの神経細胞から観測される制約付エントロピー最大化原理に従う分布（つまりべき的な分布）に従う為の条件について詳細に調べた。受信側の素子として、単純な積分発火型の神経細胞を考えた場合、送信側の神経細胞集団は興奮性の神経細胞と抑制性の神経細胞の両方で構成されていること、それらの平均発火率が数100ミリ秒から1秒程度の長い時定数を持ってお互いに相関して変動していること、が重要であることがわかった。また、興奮性神経細胞集団と抑制性神経細胞集団の平均発火率が変化することによって、発火間隔分布のべきの傾きが変化することがわかった。

(3) 神経ネットワークとしての情報変換原理を検討する為に、神経細胞のネットワークを構築して、数値シミュレーションによりその発火活動を解析した。具体的には、双方向結合度や三角モチーフ数などのネットワークの局所的構造の統計的性質をコントロールしてネットワークを構築する方法を提案し、その手法を用いて構成したネットワーク上の神経ネットワークの局所的構造とダイナミクスの関係を調べた。大脳皮質では自発的な発火活動が広く観測され、その機能的な意味が盛んに議論されている。この自発発火活動の統計的性質に関して、ランダムネットワークの場合と、提案手法で構築したネットワークの場合で比較したところ、ランダムネットワークでは平均発火率の分布が対数正規分布でよく記述されたのに対し、提案手法

で構築した大脳皮質のネットワークでは、べき的分布でよく記述できた。発火率の従う分布として、対数正規分布とべき的分布は、ガンマ分布とあわせて、それぞれ脳の異なる状況、部位で観測されることが知られており、ネットワークの構造と自発発火活動の発火率の分布が関係しているというこの結果は、自発発火活動の発火率の分布を調べることによって、その部位のネットワーク構造について知ることができることを示唆している。また、自発発火活動の発火率の分布からどのようにして活動中の発火時系列が従うガンマ分布が形成されるのかについては、今後の課題である。

また、これらの結果から、分布を用いた確率素子としての神経細胞の演算原理を考える際には、当初想定していたような入力を演算して結果を出力として出すような単純な構造に加え、ネットワークの強い再帰性の影響をくりこんだ形で定式化する必要性が示唆された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Yasuhiro Mochizuki, Tomokatsu Onaga, Hideaki Shimazaki, Takeaki Shimokawa, Yasuhiro Tsubo, Rie Kimura, Akiko Saiki, Yutaka Sakai, Yoshikazu Isomura 他 45 名, Similarity in Neuronal Firing Regimes across Mammalian Species, the Journal of Neuroscience, 査読有, 36, 2016, 5736-5747

〔学会発表〕(計 14 件)

Yuichiro Nomura, Jumpei Mita, Shingo Takizawa, Takuma Arimura, Shinichiro Suzuki, Shohei Ikuta, Akira Amano, Yasuhiro Tsubo, Kazuhiro Shimonomura, Yasuhiro Seya, Chieko Koike, Touchscreen-based visual temporal discrimination task in the behaving mouse by the constant method, ARVO 2016 Annual Meeting, 2016/5/2, シアトル (アメリカ合衆国)

吉村拓馬, 坪 泰宏, 大脳皮質局所回路の統計量を再現するネットワーク生成モデル, 2015 年度第 3 回電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス研究会, 2015 年 11 月 9 日, 京都大学 (京都・京都市)

近藤秀明, 芳野裕規, 坪 泰宏, バイノール・ビートに誘発される脳波のスペクトル解析, 2015 年度第 3 回電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス研究会, 2015 年 11 月 9 日, 京都大学 (京都・京都市)

芳野裕規, 近藤秀明, 坪 泰宏, ヒルベルト変換を用いた事象関連電位の位相解析, 2015 年度第 3 回電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス研究会, 2015 年 11 月 9 日, 京都大学 (京都・京都市)

坪 泰宏, 神経細胞の作動原理の経済性,

行動経済学会第 8 回大会 2014 年 12 月 7 日, 慶應義塾大学 (東京・港区)

Yasuhiro Tsubo, Non-Gaussian Order-Parameter Fluctuation in Complex Oscillator Network, 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), 2014/9/18, ルツェルン(スイス)

〔図書〕(計 1 件)

三國信啓, 深谷親編, 坪泰宏他, 文光堂, 脳神経外科診療プラクティス 6 脳神経外科医が知っておくべきニューロサイエンスの知識, 2015, 13-15

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坪 泰宏 (TSUBO, Yasuhiro)  
立命館大学・情報理工学部・准教授  
研究者番号: 40384721

### (3) 連携研究者

磯村 宜和 (ISOMURA, Yoshikazu)  
玉川大学・脳科学研究所・教授  
研究者番号: 00415077