

機関番号： 82401  
 研究種目： 若手研究(B)  
 研究期間： 2008～2010  
 課題番号： 20700304  
 研究課題名（和文）  
 スパイク時系列の再現性を利用した大脳皮質一皮質間局所回路構造の詳細な推定  
 研究課題名（英文） Detailed estimation of local circuit structure based on spike time reliability of cortical neurons  
 研究代表者  
 寺前 順之介（TERAMAE JUNNOSUKE）  
 独立行政法人理化学研究所・脳回路機能理論研究チーム・副チームリーダー  
 研究者番号： 50384722

## 研究成果の概要（和文）：

単離された大脳皮質の神経細胞は、不規則に変動する入力に対して、数ミリ秒の精度で再現性ある応答をしめす。しかし応答の再現性は神経ネットワーク構造によって大きく影響を受ける可能性が高い。本研究計画では再現性とネットワーク構造を中心に研究を行い、神経細胞の応答再現性が、変動入力の統計性、ネットワーク構造、神経細胞固有の性質等によってどう変化するかを理論的に解明し、さらに脳内の変動信号の起源を解明した。

## 研究成果の概要（英文）：

Isolated cortical neurons have known to respond to fluctuating inputs with high temporal precision about few milliseconds. The reliable responses of neurons, however, may be influenced local network structure in cortex. Here, we provided theories which clarify relationship between response reliability of neurons and potential factors including network structure, intrinsic properties of neurons, EPSP (excitatory-postsynaptic potentiation) distribution, and statistics of input signals. We have also reveals possible generation mechanism of fluctuating input to cortical neurons and computational role of them.

## 交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2009年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 2010年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,700,000 | 810,000 | 3,510,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：神経科学・神経科学一般

キーワード：リミットサイクル、確率過程、ノイズ、スパイク、発火率、対数正規分布、ネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

認知、判断、推定、情報の統合や行動計画と調整といった我々の脳の高度な機能の多くは大脳皮質

の神経細胞ネットワークによって実現されている。神経細胞はスパイクと呼ばれる短時間の電位変化を生成し互いに信号をやり取りすることで高度な情報処理を実現する。これまで単離された神経細胞は、時間的に変動する入力に対し数ミリ秒という高い時間精度でスパイク応答を実現できるとの報告がなされてきたが、神経細胞は脳内で複雑なネットワーク構造を作り集団で働くため、スパイク情報処理の精度は単離された神経細胞と脳内の神経細胞では異なることが期待される。このスパイク時間精度は神経細胞が感覚情報をスパイク時系列に具体的にどう表現しているのかという符号化問題に直結するために、スパイク時間構造とネットワーク構造の関係は解明が待たれていた。また最新の実験報告により、皮質神経細胞群は従来観測されていたものより高度に組織化されたネットワーク構造を形成している可能性が指摘され始めており、その回路構造自体の解明も期待されていた、

## 2. 研究の目的

本研究計画では、神経細胞のスパイク生成の時間的精度（信頼性、再現性）と皮質ネットワーク構造との依存関係を解明する事を最初の目的とした。その解明を通じて、大脳皮質の局所回路構造を間接的だが大規模に推定することを目指す。局所回路の設計原理の青写真を明らかにする事で皮質回路の動作原理を提案する事を最終的な目的とした。

## 3. 研究の方法

神経細胞ネットワーク内での、変動入力に対するスパイク時刻の再現性の問題は、全く同一の二つの神経細胞ネットワーク間での、固定化されたノイズ（フローズンノイズ）によるスパイク発火時刻の同期の問題に置き換えられる事に着目する。そのためネットワークの応答再現性を、同期現象を記述する非線形動力学、及び、時間的に変動する確率現象を記述する確率微分方程式論を組み合わせる事でこの問題を取り扱った。

## 4. 研究成果

上述した問題の読み替えを用いる事で、神経細胞ネットワークを含む非線形素子の大規模なネットワークに対して、変動する入力（フローズンノイズ）に対する応答時間再現性を記述する数理的な理論を構築する事に成功した。それによれば、大脳皮質で観測されている興奮性結合と抑制性結合の総和がほぼ釣り合っているネットワークでは、たとえ単離された素子（単離された神経細胞）が高精度な応答再現性を示しても、ネットワー

ク内では他の神経細胞との相互作用により一般に応答再現性が低下する事が明らかになった。その低下度合はネットワークの統計的な性質によって予言できる。領野内での回帰的結合の強い高次野では、感覚野等に比べて応答の再現性が低く、入力のみでなくネットワーク自身の内的な状態をより反映した出力を生成する事が明らかになった。この成果は Physical Review Letters, 2008 として出版された。

上述の研究成果は、非線形素子、特に非線形振動子のノイズに対する振動タイミング（振動の位相）を記述する理論に基礎をおいている。しかし、ノイズの時間的構造と振動子の時間的構造が最も単純な場合以外は、ノイズを受ける非線形振動子の位相記述は確立されていなかった。本研究ではその拡張も行い、広いクラスの振動子とノイズに対する位相記述の標識を導出する事に成功し、Physical Review Letters, 2009; Chaos, 2010; Physical Review Letters, 2010 として出版された。

さらに、本研究計画の最終段階として、皮質で観測されるノイズ活動の性質と回路構造の関係を探る事で、神経細胞間の興奮性結合（Excitatory-postsynaptic potential, EPSP）の強度分布が、従来考えられてきた正規分布ではなく、対数正規分布に従っている時に、大脳皮質の諸性質がきわめて整合的に説明できる事を発見し、その理論的妥当性を検証する事に成功した。提案されたネットワーク構造は、様々な実験事実によって検証された。この成果は国内外の複数の学会で発表された。

## 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）

〔雑誌論文〕（計5件）

① Denis S. Goldobin, Jun-nosuke Teramae, Hiroya Nakao, and G. Bard Ermentrout "Dynamics of Limit-Cycle Oscillators Subject to General Noise" Phys. Rev. Lett. 105, 154101 (2010) 査読有

② Hiroya Nakao, Jun-nosuke Teramae, Denis S. Goldobin, and G. Yoshiki Kuramoto "Effective long-time phase dynamics of limit-cycle oscillators driven by weak colored noise" Chaos 20, 033126 (2010) 査読有

③ Jun-nosuke Teramae, Hiroya Nakao, and G. Bard Ermentrout "Stochastic Phase Reduction for a General Class of Noisy Limit Cycle Oscillators" Phys. Rev. Lett. 102, 194102 (2009) 査読有

④ Jun-nosuke Teramae and Tomoki Fukai "Temporal precision of spike response to fluctuating input in pulse-coupled networks of oscillating neurons" Phys. Rev. Lett. 101,

248105 (2008) 査読有

⑤ Jun-nosuke Teramae and Tomoki Fukai "Complex evolution of spike patterns during burst propagation through feed-forward networks" Biol. Cybern. 99, 105-114 (2008)

[学会発表] (計 2 1 件)

① Jun-nosuke Teramae "Spike timing and possible roles of noise in cortical computation" Nov. 25 (2010) 17th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2010), Sydney, Australia

② Jun-nosuke Teramae and Tomoki Fukai "A log-normal EPSP distribution accounts for the UP state, low-rate asynchronous firings, and precise firing sequences in cortical networks" Nov. 16 (2010) 40th Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2010), San Diego, USA

③ 寺前 順之介, 深井朋樹 "裾野の広い EPSP 分布は大脳皮質の UP 状態、低頻度非同期発火、精緻な発火時系列を一括して説明する" 9 月 4 日 (2010), 第 33 回日本神経科学大会・第 53 回日本神経化学学会大会・第 20 回日本神経回路学会大会合同大会, 神戸

④ Jun-nosuke Teramae, Matthieu Gilson, and Tomoki Fukai "A long-tailed EPSP distribution accounts for the up-state, low-rate asynchronous firings, and precise firing sequences in cortical networks" Jun. 27 (2010) The 4th International Neural Microcircuitry Conference, "Signal Processing Mechanisms of Cortical Neurons", Okinawa, Japan

⑤ 寺前 順之介, 深井朋樹 "大脳皮質強結合回路の数値計算と機能" 6 月 19 日 (2010), 第 29 回日本シミュレーション学会大会, 山形

⑥ 寺前 順之介 "弱いノイズを受けた非線形振動子の同期と位相記述の一般化" 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山, 3 月 22 日 (2010)

⑦ 寺前 順之介, 深井 朋樹 "皮質神経回路網の低頻度安定発火状態" 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山, 3 月 21 日 (2010)

⑧ Jun-nosuke Teramae and Tomoki Fukai

"Trade-off between cell-to-cell synchronization and trial-to-trial reliability in recurrent networks of spiking neurons" 39th Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2009), Chicago, USA, Oct. 12 (2009)

⑨ 寺前 順之介, 中尾 裕也, G. B. Ermentrout "ガウスノイズを受ける非線形振動子の位相縮約" 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本, 9 月 27 日 (2009)

⑩ 寺前 順之介, 深井 朋樹 "皮質ニューロン回路網における細胞間同期発火と試行間再現性の相反関係" 第 32 回日本神経科学大会, 名古屋, 9 月 17 日 (2009)

⑪ 西垣 泰宏, 寺前 順之介, 深井 朋樹 "共通入力を受けるフィードフォワードネットワークにおける出力スパイク間の相関関係" 第 32 回日本神経科学大会, 名古屋, 9 月 17 日 (2009)

⑫ Jun-nosuke Teramae and Tomoki Fukai "Reliability of response spike timings in pulse-coupled networks of neurons" 18th Annual Computational Neuroscience Meeting (CNS\*2009), Berlin, Germany, Jul. 19 (2009)

⑬ 寺前 順之介, 深井 朋樹 "神経細胞リカレントネットワークにおける細胞間同期発火と試行間応答再現性との相反関係" 電子情報通信学会、ニューロコンピューティング研究会 (NC), 奈良先端大, 7 月 13 日 (2009)

⑭ Jun-nosuke Teramae and Tomoki Fukai "Temporal precision of spikes in pulse-coupled networks of oscillating neurons" Computational and Systems Neuroscience 2009 (Cosyne 2009), Salt lake city, USA, Feb. 28 (2009)

⑮ 寺前 順之介, 深井 朋樹 "神経細胞集団のスパイク時刻精度を与える自己無撞着方程式" 日本神経回路学会第 18 回全国大会 (JNNS2008), つくば, 9 月 25 日 (2008)

⑯ 寺前 順之介, 深井 朋樹 "結合振動子集団の揺動入力に対する情報伝達精度" 日本物理学会 2008 年秋季大会, 盛岡, 9 月 22 日 (2008)

⑰ 坪 泰宏, 寺前 順之介, 深井 朋樹 "位相応答が多様な振動子系における不連続転移" 日本物理学会 2008 年秋季大会, 盛岡, 9 月 22 日 (2008)

⑱ 寺前 順之介, 坪 泰宏, 深井 朋樹 "多細胞集団の情報伝達精度を測定する in vitro 実験の可能性" 日本物理学会 2008 年秋季大会, 盛岡, 9 月 21 日 (2008)

⑱寺前 順之介 “自発発火のべき乗則と皮質局所回路構造への理論的アプローチ” マルチニューロン研究会 2008, (文科省特定領域研究「統合脳」支援班), 東京, 7月12日 (2008)

(2) 研究分担者

⑳寺前 順之介, 坪 泰宏, 深井 朋樹 “皮質神経細胞の回路内での発火時刻信頼性: 理論実験の統合的アプローチ” 第31回日本神経科学大会 (Neuroscience 2008), 東京, 7月10日 (2008)

(3) 連携研究者

㉑寺前 順之介, 深井 朋樹 “リカレントネットワーク内でのスパイク時刻信頼性と非線形振動子のノイズ誘起位相同期” バイオ情報学研究会・ニューロコンピューティング研究会・非線形問題研究会合同研究会 2008, 沖縄県西原町, 6月27日 (2008)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ

<http://nct.brain.riken.jp/~teramae/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

寺前 順之介 (TERAMAE JUNNOSUKE)

独立行政法人理化学研究所・脳回路機能理論  
研究チーム・副チームリーダー

50384722