

研究報告書

「非線形情報理論:環境雑音を活用する次世代情報処理の実現」

研究タイプ:通常型

研究期間:平成21年10月~平成25年3月

研究者:寺前 順之介

1. 研究のねらい

我々の脳や細胞内の遺伝子制御ネットワークなど、生命は、外界の情報を読み取り、状況に応じてそれらを適切に処理するための高度な情報処理システムを進化させて来た。これらの情報処理システムは、既存のコンピュータが行う情報処理とは対照的に、強い揺らぎ(ノイズ・雑音)の存在下で安定して動作するという著しい特徴を持つ。既存のコンピュータは、安定した情報処理を実現するために、膨大なエネルギーを割いて雑音を抑制しているが、雑音を許容する生命情報処理システムは、その必要がなく、わずかなエネルギー消費のみで安定した動作が可能になっている。情報処理に伴うエネルギー消費の急速な増大は、現代社会が直面している喫緊の課題であり、生命の情報処理システムのような雑音下で動作できる頑健な情報処理システムが実現すれば、その社会的メリットは計り知れない。本研究では、その新しい情報処理システムの実現に資するために、強い雑音の下で動作する生命情報処理原理と背景にある数理構造の解明をねらう。数理的な手段を用いる事で、単なる生命現象の理解に留まらず、人工的な新規情報処理システムの設計原理を獲得できる事が強く期待出来る。強い揺らぎと高精度な情報処理が共存する仕組み、揺らぎそのものの起源、さらに揺らぎを積極的に用いて情報処理精度を高める機構などを解明する。本研究では特に、我々の脳、なかでも大脳皮質での揺らぎとそこで実現している情報処理に重点をおく。脳は生命情報処理の中心であり、情報処理に特化して進化した器官であるため、その研究は生命情報処理研究の突破口として最も有望であり、かつ、機械学習や大規模データ処理、ブレインマシンインターフェイス、制御など多様な応用分野が期待出来る。神経生理学と協働し、最先端の生物学的知見と数理的アプローチとを統合する事で、課題の解決を図り、雑音を抑制する情報処理から、雑音を活かす情報処理への転換を可能にする理論基盤を確立する。

2. 研究成果

(1)概要

本研究における成果は「雑音を受ける非線形振動子の数理的記述の確立」と「大脳皮質の自発揺らぎの解明」の二つに大別出来る。

生命現象は自律的かつ動的な現象である。自律的なダイナミクスのうち最も基礎的な現象が振動現象であるため、生命現象の多くが、安定した振動子(非線形振動子、リミットサイクル振動子)、あるいはその集合として理解される。例えば脳を構成する神経細胞も、一定電流を受ける条件下では非線形振動子として記述される事が知られている。非線形振動子から振動タイミングに関する知見を系統的に取り出す数理的手法として、非線形振動子の位相縮約と呼ばれる手法が確立されており、非線形振動子の性質、特に、非線形振動子の集団現象の理解を可能にする強力な理論体系を提供してきた。しかし、雑音の下で振動する非線形振

動子の位相縮約法は未解明に残されていた。神経細胞をはじめ生体内での振動子は、ほぼ例外無く何らかの雑音の下で振動しているため、適切な位相縮約法の不在は、生命の振動現象や神経情報処理の妨げとなって来た。本研究では、確率微分方程式の理論と非線形振動子の数理を統合する事で、一般の雑音を受ける非線形振動子の位相記述を確立する事に成功した。

第二の成果は、大脳皮質での自発揺らぎの理論的解明である。大脳皮質は、認知、判断、推定といった、我々の高次脳機能の実現において中心的な役割を担う脳の部位であるが、その神経活動は、強い揺らぎ(神経雑音)を伴っている。この揺らぎは、神経ネットワーク自身によって自発的に形成され、我々の認知に影響を与えている事が実験的に示唆されてきたが、その詳細、特に、その揺らぎの起源と神経情報処理における機能的意義は未解明であった。神経細胞は強い非線形素子であるため、非常に同期しやすく、揺らぎを生成し維持する事は困難な事がその原因であった。本研究では、最新の生理実験によって得られた、興奮性神経細胞間の結合強度分布が鍵となり自発揺らぎが生成される事を数理的に示し、この揺らぎが様々な生理実験を統一的に説明する事を示した。さらに神経細胞間での情報伝達精度が、この揺らぎの存在下で、ほぼ最適になる事を明らかにした。神経情報処理において雑音が積極的に生成され、実際に情報処理精度を高める事を数理的に示した重要な研究成果である。

(2) 詳細

研究テーマ A「多様なノイズを受ける非線形振動子の位相記述の確立」(原著論文発表 1, 2)

生命現象の記述に現れる振動子を含め、非線形振動子は一般に多変数による高次元の微分方程式として記述される。この高次元の微分方程式から、振動のタイミングを記述する「位相」と呼ばれる単一変数が従う微分方程式(位相方程式)を系統的に導き出す数理的手法が非線形振動子の位相縮約である。これまで位相縮約は非線形振動子が時間的に連続な外力を受ける事を前提に研究が進められていたが、生命現象など雑音の存在下での振動子や振動子ネットワークの挙動を解明するために、位相縮約法の雑音下への拡張が強く求められていた。

位相縮約では、十分安定な非線形振動子(リミットサイクル振動子)で、安定軌道への緩和時間スケールが十分短い事、つまり緩和が速い事、を用いる。この短い緩和時間を展開パラメータとして用いる事で、安定軌道からずれる効果に対する位相への影響が摂動的に評価される。しかし、雑音下での非線形振動現象では、雑音自身が持つ短い時間スケールが加わるため、軌道への緩和時間スケールと雑音の持つ時間スケールという二つの短時間スケールを扱う必要が生じ、ナイーブな手法では正確な位相方程式を導出出来ない事が知られていた。この困難は、二つの時間スケールの比を固定した後に摂動的な一次の効果を取り入れる事で解決し、雑音下の位相記述では、単一の位相方程式ではなく時間スケールの比をパラメータとする位相方程式の族が導出される事が寺前自身の先行研究で明らかになっていた。しかし、そこで用いられた手法は雑音強度分布がガウス分布である事を前提としており、一般の強度分布を持つ雑音での位相縮約法は未解明であったため適用範囲が限られた物であった。本研究では、この課題を解決し、任意の時間構造と、強度分布を持つ雑音に対して非線形振動子の位相縮約を完成し、一般の位相方程式を導出する事に成功した。

短い時間スケールを展開パラメータとする代わりに、より単純に雑音強度自身を展開パラメータとして用い、ただし、展開の二次の効果まで取り入れる事で正確な位相方程式(位相確率微分方程式)が求められた。導出された方程式は、雑音の自己相関関数と、振動子の振幅方向への感受性関数との畳み込みの形で記述される新規な項を含む。本研究では、その妥当性を数値的にも検証し、さらに導出された位相方程式から、位相の平均角速度、拡散係数、共通雑音下でのリアプノフ指数など、位相ダイナミクスを特徴付ける様々な量を求め、雑音の持つ固有の構造に依存して、様々な非自明な効果が現れる事を具体的に示す事に成功した。

研究テーマ B「大脳皮質の自発的揺らぎの起源と機能の解明」(原著論文発表 3, 4)

大脳皮質は外界からの刺激が無くても随時弱い神経活動を続けている。これは大脳皮質の自発発火活動と呼ばれており、この活動中に神経細胞の膜電位は強い揺らぎを伴う、各神経細胞が生成するスパイク時系列の不規則性が高い、そのスパイク列の同期性が低い、神経細胞膜の典型的な時間スケールに比べて発火頻度が著しく低いといった特徴を持つ。このためこの活動は神経系の背景雑音と呼ばれる事もあるが、一方で我々の認知に影響を与える事が示唆されるなど、神経情報処理に極めて重要な効果を持つのではないかと考えられて来た。

本研究では数理的な手法により、大脳皮質での自発揺らぎの起源と、神経情報伝達における機能の両者を同時に明らかにする事に成功した。自発揺らぎの起源としては、単一神経細胞が信頼性の高い素子として振る舞う事や、雑音源として活動する部位が脳内に存在しない事などから、神経細胞ネットワークの働きにより生成されている可能性が示唆されていたが、神経細胞自身は非線形性の強い閾値発火素子であるため、簡単に同期発火あるいは高頻度発火を起こしやすく、低頻度非同期発火の実現は困難であった。この困難の主因は、興奮性神経細胞間の結合強度が一般に非常に弱い事にある。神経細胞は互いにスパイク発火を生成しそれを伝達する事で情報を伝達するが、スパイク発火は次の神経細胞の膜電位を上昇させ、その上昇が十分大きくなる事で再び次のスパイク発火を引き起こして情報伝達を実現する。そのため神経細胞間の結合強度とはスパイクによる膜電位の上昇度で定量化出来るが、典型的には数十から数百のまとまったスパイク入力が無ければ次のスパイクを誘導出来ないほど神経細胞間の結合強度は弱い。このため、自発的な活動の維持にはまとまったスパイク入力が必要となり、高頻度か高同期性の活動しか得られなくなっていた。

興味深い事に、実験的には、極めて稀に典型的な結合強度の数十倍を超える非常に大きいスパイク応答も観測される事が知られていた。これらは、これまで特異な外れ値として無視されて来たが、本研究では、多数の弱結合と極めて少数の強結合の共存こそが重要であり、その共存が大脳皮質自発揺らぎの生成と維持を説明する事を示した。結合強度分布は裾の厚い分布である対数正規分布で良く記述できる。この分布を考慮して神経ネットワークモデルの数値計算を行う事で、様々な生理学的知見に合致する自発揺らぎが自然に生成される事を示した。さらにその揺らぎの影響を、確率微分方程式を用いて解析する事で、各神経細胞へ入力する少数の強いシナプスを介した入力が、ちょうど実験的に観測される結合強度分布と自発揺らぎの強度の時に最適に下流のスパイク発火へと伝達することを示した。つまり、自発揺らぎはある種の確率共鳴現象のような仕組みを各神経細胞に対して実現しており、それ

によって強いシナプスを介した情報伝達精度が最適化されていえる。見方を変えれば、各神経細胞は、自発揺らぎを用いて強いシナプスからのスパイク入力を調整するゲート素子のようには振る舞っており、大脳皮質はその確率的ゲート素子のネットワークであると見る事が出来る。これはこれまで考えられて来た神経情報処理の仕組みとは全く異なる視点を提供しており、神経情報処理メカニズムを解明する極めて重要なステップとなる研究成果である。

3. 今後の展開

これまでの研究成果により、大脳皮質では自発揺らぎが単一神経細胞レベルでの情報伝達精度を最適化する事が分かり、単一神経細胞を確率的なゲート素子として捉えられる全く新しい可能性が示唆された。しかし、この素子を構成要素とするネットワークがどのような性質を持ち、どのような情報処理能力を持つのかは未解明の課題である。この問題の解決は、大脳皮質がネットワーク全体として、どのような情報処理を行っているのかという神経科学の最重要課題解決の突破口になる可能性が高く、本研究成果の重要な展開として期待出来る。

少数の非常に強い影響と、多数の弱い影響の両方によって相互に結合する系は大脳皮質の神経細胞に留まらず自然界に広く見いだせる可能性がある。具体的には我々の社会、生態系、細胞内の制御ネットワークなどがその潜在的な候補として挙げられる。本研究は大脳皮質の情報伝達を対象にしたが、もし同様の特性がこれらの他のネットワークでも観測されれば、本研究成果をこれらの分野に拡張出来る。その可能性を追求したい。またこれら多様な分野の実験的知見を合わせ用いる事で、揺らぎを生成し調整して情報処理を行う基礎的なメカニズムの解明をさらに加速させたい。

雑音を利用する情報処理メカニズムの解明は工学的応用に大きなインパクトが期待出来る。低エネルギーで動作する確率的情報処理デバイスや、通信ネットワーク等の適応的制御アルゴリズム、脳型の確率的情報処理メカニズムの提案といった課題は、これまでも様々な研究が行われているが、本研究成果はこれらの分野に直接応用出来る可能性が高い。実際にデバイスを作成し、アルゴリズムを提案するなど、単なる現象の解析を超えて、有用な工学的応用を実現したい。

4. 自己評価

大脳皮質の自発揺らぎの起源と機能の解明できた事に関しては、この課題が長く理論神経科学の重要な未解決問題であった点、この神経活動が大脳皮質の基底状態であり神経科学全体への大きな波及効果が期待出来る点、生物学的な実験結果と数理的な解析との協働がこの問題解決の決め手であった点、本研究のねらいであった雑音と生命の情報処理との関係解明に大きく貢献出来た点などを踏まえ成功を収めたとして評価したい。しかし、この研究成果ではまだ、雑音を活かす情報処理そのものが理解出来たとは言い難く、その点は大きな課題である。また本研究成果が数学の利用に留まっており、例えば新しい数学の問題を提示するなど、数学そのものに貢献できなかった点も課題である。この二つの課題は無関係ではなく、今後、本研究で得られた成果に基づきさらに研究を進め、雑音を積極的に生成し調整して実現される「情報処理」そのものを明らかにできれば、そこに新たな数学の問いが自然に山積しているのではないかと期待している。今後も精力的に研究を進め、何としてもその地点まで到達したい。また、本研究が脳科学との協働に偏りすぎており、工学的応用研究や他の生命科

学研究との協働に至れなかった点も課題である。本研究は、これらの分野との関連も深く、様々な貢献が期待出来るが、それを十分実行できなかった。今後はこれら多分野との連携を進める事で、本研究をさらに発展させていきたい。

5. 研究総括の見解

強い揺らぎと高精度な情報処理が共存する仕組み、揺らぎそのものの起源、さらに揺らぎを積極的に用いて情報処理精度を高める機構などを解明するという脳神経ネットワークダイナミクスにおける極めて根源的かつ困難な問題に立ち向かう、さきがけにふさわしい課題であり、それに対し一定の成果を挙げたことは大きく評価できる。寺前氏の言うようにこれは雑音を抑制する情報処理から、雑音を活かす情報処理への転換を可能にする理論基盤として重要である。最初の共存できる仕組みについては、ゆらぎの効果を確率微分方程式の方法論により取り込み、それとこれまでの非線形振動子の数理を統合する事で、一般の雑音を受ける非線形振動子の位相記述を確立する事に成功した。一方、自発揺らぎの起源に関しては、低頻度非同期発火をどのように実現しているかは長い間の疑問であった。寺前氏は最新の生理実験による興奮性神経細胞間の結合強度分布に着目し、自発揺らぎが生成される事を数理的に示し、この揺らぎが様々な生理実験を統一的に説明する事を明らかにした。この成果は重要である。実際、多数の弱結合と極めて少数の強結合の共存は脳神経ネットワークのみならず、より広い生命科学さらには社会ネットワークにも応用できる可能性が高い。実験家との協働により今後さらなる成果が生み出されるであろう。さらに数学へのフィードバックも期待される。

6. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. 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, 2010, 20, 033126
2. Denis S. Goldobin, Jun-nosuke Teramae, Hiroya Nakao, and G. Bard Ermentrout, Dynamics of Limit-Cycle Oscillators Subject to General Noise, Phys. Rev. Lett., 2010, 105, 154101-1-4
3. Jun-nosuke Teramae, Yasuhiro Tsubo, and Tomoki Fukai, Optimal spike-based communication in excitable networks with strong-sparse and weak-dense links, Sci. Rep., 2012, 2, 485
4. Naoki Hiratani, Jun-nosuke Teramae, and Tomoki Fukai, Associative memory model with long-tail-distributed Hebbian synaptic connections, Front. Comput. Neurosci., 2013, 6, 102

(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)

主要な学会発表(国際会議招待講演)

[1] A long-tailed EPSP distribution accounts for the up-state, low-rate asynchronous firings,



and precise firing sequences in cortical networks, Jun. 3 (2010), NIPS (Seiriken) International Workshop, "Fresh Perspectives of Computation in Neuronal Systems"

[2] Long-tailed EPSP distribution accounts for low-rate asynchronous firings, the up-state, and precise firing sequences in cortical networks, Sep. 6 (2010), Workshop on spatio-temporal neuronal computation

[3] Spike timing and possible roles of noise in cortical computation, Nov. 25 (2010), 17th International Conference on Neural Information Processing

[4] Long-tailed EPSP distribution accounts for origin and role of noise in cortical networks, Mar. 3 (2011), Japan-German Joint Workshop on Computational Neuroscience

[5] Long-tailed EPSP Distribution Reveals Origin and Computational Role of Cortical Noisy Activity, May. 24 (2011), SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems

受賞

[1] 日本物理学会 若手奨励賞, 2010 年 3 月 4 日

[2] Young Investigator Award, Asia Pacific Neural Network Assembly, 2010 年 11 月 24 日

[3] Best Paper Award, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics, 2011 年 6 月 11 日

[4] 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク, 若手優秀発表賞, 2011 年 8 月 23 日