バーストを含むニューラル振動子を結合した系でみられる発振現象

正地 裕貴† 上手 洋子† 西尾 芳文†

† 徳島大学 〒 770-8506 徳島県徳島市南常三島 2-1 E-mail: †{shoji,uwate,nishio}@ee.tokushima-u.ac.jp

あらまし 蔵本モデルや van der Pol 結合系発振器の発振・同期現象は現在までに様々な分野で研究が行われている. 一方で人工ニューラルネットワークの分野においても、ニューロンにより引き起こされる発振・同期現象が多数存在 する.ニューロンによる発振モデルを研究することは、ロボット運動制御などの工学的応用のためには非常に重要で ある.しかし、ニューロンの結合系発振モデルは結合パラメータ設定の難しさの要因もあり構築することが困難であ り、十分な研究がなされていない.ここで、大脳皮質のニューロンにはバーストと呼ばれる周期的高頻度発火現象が 存在する.このバースト発火は、ニューラルネットワークに対して様々な同期現象をもたらすことで知られている. 本研究では、バースト発火をもたらすニューラル振動子の結合系について調査を行う.ネットワークトポロジーとし て、ニューラル振動子と同様の発振原理を持つ van der Pol 発振器の結合系を参考とする.また、結合素子として電気 シナプスによる抵抗結合としてトポロジーを構成する.加えて、結合定数を変化させた場合における系での発振・同 期現象の遷移についても調査し報告する.

キーワード 神経振動子,バースト現象,同期現象

Oscillatory Phenomena of Coupled Neural Oscillators with Bursting

Yuki SHOJI[†], Yoko UWATE[†], and Yoshifumi NISHIO[†]

† Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokushima University
 2–1 Minami-Josanjima, Tokushima 770–8506, Japan

E-mail: $^{shoji,uwate,nishio}@ee.tokushima-u.ac.jp$

Abstract The synchronization phenomena of coupled oscillators have been researched widely in the fields of communication systems, robot engineering, biological systems, social networks, and so forth, mainly using the van der Pol oscillator and the Kuramoto model. On the other hand, the brain network and other biological neural networks can also cause synchronization. The oscillation and synchronization phenomena of neural networks arise from neurons. However, coupled oscillator models based on neurons have not been investigated sufficiently. It is important to investigate oscillator models based on neurons in order to reveal various complex synchronization phenomena in the brain. In the cerebral cortex, there are the bursting neurons which cause fast rhythmic burst firing. These neurons affect a synchronization phenomenon in the neural network. In this study, we focus on coupled neural oscillators with bursting. The network topologies of coupled neural oscillator are applied from the one of coupled van der Pol oscillator which has a same principle of oscillation. The coupled neural oscillators are composed by resistive couplings as electrical synapses. Furthermore, transition of oscillatory states when a coupled constant is changed. **Key words** neural oscillator, bursting, shynchronization

1. まえがき

人工ニューラルネットワークとは、人間の脳機能の一部を模 して作られた数理モデルである。脳や脊髄構造の基本単位とな るニューロン(神経細胞)を数式モデルとし、様々な結合方式 を取り入れることで最適化問題やパターン認識に挙げられる処 理を行うことができる.模倣される脳機能は様々であるが,本 研究では脊髄に存在するリズム発生機能に着目する.生体内 のリズム発生機能は,脊髄に存在する CPG (Central Pattern Generator)や中枢パターン発生器と呼ばれる神経回路網によ り引き起こされる.生物はこの CPG にて生み出される振動を 運動リズムとすることにより,歩行や呼吸,咀嚼など様々な周 期運動を行う. この CPG 内の神経細胞が引き起こす発振現象 を再現したニューラルネットワークモデルは,ニューラル(細胞)振動子と呼ばれている.

近年ではロボット工学の分野で動物行動学に基づいた制御方 法として、ニューラル振動子の Amari-Hopfield モデル(松岡 モデル)を用いたロボットの運動制御が注目されている[1]-[4]. このモデルをロボットの運動制御に応用する利点として、同一 の自励振動を引き起こす van der Pol 発振器にはない引き込み と呼ばれる現象が挙げられる.本来,発振器は特有の発振周波 数によって振動現象を行う.対してニューラル振動子では、ロ ボットの運動制御角等をフィードバックすることによって発振 周波数が制御対象の固有周波数に同調する。この引き込み現象 により、よりエネルギー効率の高い制御が可能となる。また、 Amari-Hopfield モデルの構造が複雑ではないことも利点とし て挙げられる.ニューラル振動子によるロボットの制御方法に おいて重要な役割を担うのが同期現象である。歩行運動を例に 挙げると、左右それぞれの足に対応する振動子が同期すること により、左右の足が交互に振り子運動を行うことで運動が実現 している、そのため、複雑な運動を実現するためにはそれぞれ の振動子の同期現象が重要である。加えて、近年では振動子の 集合体に着目した制御手法について提案されている [5]. ところ が、現在まで van der Pol 系や蔵本モデルにおける結合系発振 器の同期現象については様々な研究が行われているが、同期現 象を持つ結合系ニューラル振動子については十分な研究がなさ れていない[6][7].

我々はニューラル振動子の Amari-Hopfield モデルに対し, ニューロンのギャップ結合(電気シナプス結合)を使用するこ とで van der Pol 結合発振器のトポロジーを取り入れたモデル を提案し、それぞれの発振や同期現象の調査を行った [8]. 本研 究では Amari-Hopfield モデルにに周期外力を加える事でバー スト発振を実現できることに着目し、バースト細胞を含んだ結 合系ニューラル振動子を提案する. バースト細胞とは、周期的 高頻度発火現象 (バースト発火) を引き起こすニューロンを指 す. このバースト発火は、ニューラルネットワークの同期現象 に対して様々な影響をもたらすことで知られている。この現象 の具体例としては、同期バースト発火による過剰放電を示すて んかんが有名であり、バースト発火によるニューロン間の同期・ 非同期の切り替わりなど、複雑な同期現象をもたらすことも報 告されている。これらの現象を引き起こすバーストを含む結合 系ニューラル振動子に対して、コンピュータシミュレーション で発振現象や同期状態について調査する.

2. ニューラル振動子

2.1 Amari-Hopfield モデル

ニューラル振動子における Amari-Hopfield モデルを図 1 に 示す. Amari-Hopfield モデルは van der Pol 発振回路と同じく 自励振動を引き起こす発振回路であるが,神経振動子特有の特 徴の一つとして引き込みと呼ばれる現象を引き起こすことで 知られている. この引き込みとは,制御対象の運動制御角等を フィードバックすることにより発振周波数が制御対象の固有周 波数に同調する現象である.この引き込み現象により,よりエ ネルギー効率の高い制御が可能となる.また,他の代表的な特 徴として回路構造の単純さが挙げられる.この Amari-Hopfield モデルはそれぞれ一つづつの興奮性および抑制性ニューロンモ デルで構成され,これらのニューロンを相互結合し,ニューロ ン自身の自己結合を加える事で自励振動を発生させる.次に Amari-Hopfield モデルの回路方程式を示す.

$$\tau \frac{du_1}{dt} = -u_1 + W_{12}f(u_2) + W_{11}f(u_1)$$

$$\tau \frac{du_2}{dt} = -u_2 + W_{21}f(u_1) + W_{22}f(u_2)$$
(1)

$$f(u) = tan^{-1}u$$

方程式中の変数 u は各ニューロンの平均膜電位を, τ は時定 数を示す. f(u) は出力関数を表し, tan^{-1} を用いる. W は結 合荷重を表し,興奮性ニューロンを N_1 とすると結合荷重 W_{11} および W_{21} は正値に,抑制性ニューロン N_2 の結合荷重であ る W_{12} は負値に定義される.抑制性ニューロンの自己結合は $W_{22} = 0.0$ とする.本研究では興奮性ニューロンの結合荷重 を $W_p = 2.0$,抑制性ニューロンの自己結合を除く結合荷重を $W_n = -2.0$ と定め,シミュレーションを行う. Amari-Hopfield モデルにおける発振現象を図 2 に示す.以降は興奮性ニューロ ンの発振現象に着目して報告を行う.



図 1 Amari-Hopfield モデル



図 2 Amari-Hopfield モデルによる発振現象 ($W_p = 2.0, W_n = -2.0, \tau = 2.0$)

2.2 バーストを含む Amari-Hopfield モデル

バーストとはニューロンが周期的に高頻度発火を示す現象で あり、同期バースト発火による過剰放電を示すてんかんなど、 同期状態に様々な影響を与えることで知られている.このバー スト発振について、Amari-Hopfield モデルでは外力項に周期 外力を与えることにより実現可能であると報告されている[9]. これは、振動子の回路方程式に対して周期外力を加える事で分 岐曲線を跨ぐ変化を持たせ、発振状態と非発振状態を繰り返さ せることでバースト発振を再現する手法である.以下に、バー ストを含む Amari-Hopfield モデルの回路方程式を示す.

$$\begin{cases} \tau \frac{du_1}{dt} = -u_1 + W_{12}f(u_2) + W_{11}f(u_1) + \rho_1 + Bsin\omega t \\ \tau \frac{du_2}{dt} = -u_2 + W_{21}f(u_1) + W_{22}f(u_2) + \rho_2 \\ f(u) = tan^{-1}u \end{cases}$$
(2)

バーストの形状は加える周期外力の振幅や周波数,分岐図 の跨がせる領域により大きく変化する.そのため,式中にお ける外部入力 ρ_1 , ρ_2 の値を適当に定める必要がある.以下の 図 3 に, $\rho_1 = -2.5$, $\rho_2 = 0.0$ における周期外力を加えたモデ ルのニューロン N_1 におけるバースト発振現象を示す.シミュ レーションにおける周期外力項の定数はそれぞれ B = 1.00, $\omega = 0.05$ と定めた.



t 図 3 周期外力を加えた Amari-Hopfield モデルのバースト発振現象 $(W_p = 2.0, W_n = -2.0, \tau = 2.0)$

2.3 結合系モデル

ニューラル発振器と van der Pol 発振器には自励振動の発生 構造など,多くの共通点が存在する.しかし,ニューラル振動 子は短所として結合パラメータを適切に定めることの困難さが あり,結合系を構成することの難しさにつながっている.そこ でニューロンのシナプス結合に着目し,結合構造の構築を考え る.シナプス結合とは,ニューロンがお互いにを通して信号伝 達を行うためのものであり,二種類に分類することができる. 一つは化学シナプスと呼ばれ,神経伝達物質により情報のやり とりを行う.一般的なニューラルネットワークで使用される結 合やニューラル振動子を構成する結合はこの化学シナプスに分 類される.もう一方は電気シナプスと呼ばれ,ニューロン間の 電気抵抗が低い箇所から膜電位を伝達することで信号伝達を行 う.この結合はギャップ結合であり,以下の式によって表すこ とができる.

$$I_{gap} = -W_{gap}(U - U_{pre}) \tag{3}$$

本研究では、ニューラル振動子間をギャップ結合で接続する ことで結合系 van der Pol 発振回路の構造を応用した結合系 ニューラル振動子の構築を行う.以下の図4に2個のニューラ ル発振器を用いた結合系を、図5に3個のニューラル発振器に よる結合系を示す.各ニューラル振動子間は、それぞれの興奮 性ニューロンを介してギャップ結合で接続される.

3. シミュレーション

本研究では、系のダイナミクスについて4次のルンゲクッタ 法を用いることで調査を行う.ステップサイズはh = 0.05と する.



図5 ニューラル振動子の三結合系

3.1 二結合モデル

二結合モデルでは、外部入力を $\rho_1 = -2.5$, $\rho_2 = -0.0$,周期 外力のパラメータを B = 1.00, $\omega = 0.05$ と定めてシミュレー ションを行う.

3.1.1 完全同期 ($W_{gap} > -0.26$)

ギャップ結合荷重 W_{gap} がこの値域であると,それぞれの ギャップ結合は正抵抗として働く.よって各ニューラル振動子 の起こすバースト発振現象は完全同期となる.

3.1.2 二相バースト発振 (-0.26 $\leq W_{gap} < -0.40$)

ギャップ結合荷重 W_{gap} が $W_{gap} = -0.26$ より小さな値を取 ることで、それぞれのギャップ結合は負性抵抗として働く。周期 外力を有しない場合では、それぞれの発振現象が逆相同期となる ために系全体で二相発振を示す。以下の図 6 に、 $W_{gap} = -0.30$ における周期外力を含む二結合モデルの発振現象を示す。そ れぞれの波形は、各振動子における興奮性ニューロン N_1 、 N_3 における平均膜電位 u_1 、 u_3 の時間変化、およびこれらを重ね あわせた結合系全体の興奮性ニューロンによる発振を表す。各 ニューラル振動子が示すバースト発振においてバースト箇所の み位相差が生じている。結果、結合系全体で二相バースト発振 現象を示すことを確認した。

3.1.3 二相スイッチング発振(-0.40 $\leq W_{gap} < -0.51$)

以下の図7に、 $W_{gap} = -0.45$ における周期外力を含む二結 合モデルの発振現象を示す.ここで、図6では時間軸tにおい て 350 ステップを表示するのに対し、図7では1750 ステップ を示している.各興奮性ニューロンの平均膜電位に注目すると、 バースト発振状態と非バースト発振状態を繰り返している.こ の状態変化に関して周期性を確認することがはできていない. 次に系全体の興奮性ニューロンの平均膜電位に注目する.一方 の振動子が非バースト状態にあると、もう一方の振動子はバー スト状態であり、各ニューラル振動子が交互にバースト・非バー スト状態を繰り返すスイッチング状態であることがわかる.こ のスイッチング現象に関して、上記と同様に周期性を確認する ことはできない.



図 6 周期外力を加えた二結合系ニューラル振動子の N_1 , N_3 , 系 の興奮性ニューロン におけるバースト発振現象 ($W_p = 2.0$, $W_n = -2.0$, $W_{gap} = -0.30$, $\tau = 2.0$)



図 7 周期外力を加えた二結合系ニューラル振動子の N_1 , N_3 , 系 の興奮性ニューロン におけるバースト発振現象 ($W_p = 2.0$, $W_n = -2.0$, $W_{gap} = -0.45$, $\tau = 2.0$)

3.2 三結合モデル

三結合モデルでは、外部入力を $\rho_1 = -2.1$, $\rho_2 = -0.0$, B = 1.00, $\omega = 0.05$ と定めてシミュレーションを行う.

3.2.1 完全同期 (W_{gap} > -0.18)

ギャップ結合荷重 W_{gap} の値がこの値域であると,それぞれ のギャップ結合は正抵抗として働く.そのため,各ニューラル 振動子の起こすバースト発振現象は完全同期となる.

3.2.2 三相バースト発振 (-0.18 $\leq W_{gap} < -0.30$)

ギャップ結合荷重 W_{gap} が $W_{gap} = -0.18$ より小さな値を取 ることで、それぞれのギャップ結合は負性抵抗として働く。周 期外力を有しない場合では、系全体で三相同期を伴う発振現象 を示す。以下の図 8 に、 $W_{gap} = -0.25$ における周期外力を含 む三結合モデルの発振現象を示す。それぞれの波形は、各振動 子における興奮性ニューロンの平均膜電位 u_1 , u_3 , u_5 の時間 変化、およびこれらを重ねあわせた結合系全体の興奮性ニュー ロンによる発振を表す。この状態の発振現象は図 6 に示した二 相バースト発振と同様に、バースト部分のみの三相同期を示す ことがわかる。 3.2.3 三相スイッチング発振(-0.30 $\leq W_{gap} < -0.322$) 以下の図9に、 $W_{gap} = -0.32$ における周期外力を含む三結 合モデルの発振現象を示す.ここで、図8の時間軸tでは350 ステップを表示するのに対し、図9では1750ステップを示し ている.それぞれの平均膜電位は二結合モデルの場合と同様に バースト・非バースト状態を繰り返す.系全体では、一つのの 振動子が非バースト状態にあると、他の振動子はバースト状 態となり、各ニューラル振動子がバースト発振を行う中で交互 に非バースト状態を繰り返すスイッチング現象を示す.このス イッチング現象に関して、非バースト状態の遷移条件や規則性 については確認できていない.

3.2.4 同期外れ含む二相発振(-0.322 $\leq W_{gap} < -0.325$) 以下の図 10 に、 $W_{gap} = -0.323$ における周期外力を含む三 結合モデルの 1750 ステップの発振現象を示す。ギャップ結合荷 重 W_{gap} の値がこの値域の場合にはスイッチング現象が発生せ ず。 $u_1 \geq u_5$ の逆相同期 $\geq u_3$ の発振現象に別れることが確認 できる。

4. まとめ

本研究ではギャップ結合により構成されるニューラル振動子 の結合系に対して周期外力を加える事で、バースト発振を含む 結合系の発振、同期現象について調査を行った.結果、それぞ れの振動子間で逆相や三相同期現象、非バースト状態のスイッ チング現象などを確認した.今後の展望として、より複雑な結 合状態を取り入れた系の状態変化やスイッチング現象の遷移条 件に対する理論解析、どの振動子が同期外れ状態となるかの検 討が挙げられる.



図 8 周期外力を加えた二結合系ニューラル振動子の N_1 , N_3 , N_5 , 系の興奮性ニューロン におけるバースト発振現象 ($W_p = 2.0$, $W_n = -2.0$, $W_{gap} = -0.25$, $\tau = 2.0$)



図 9 周期外力を加えた二結合系ニューラル振動子の N_1 , N_3 , N_5 , 系の興奮性ニューロン におけるバースト発振現象 ($W_p = 2.0$, $W_n = -2.0$, $W_{gap} = -0.320$, $\tau = 2.0$)



図 10 周期外力を加えた二結合系ニューラル振動子の N_1 , N_3 , N_5 , 系の興奮性ニューロン におけるバースト発振現象 ($W_p = 2.0$, $W_n = -2.0$, $W_{gap} = -0.323$, $\tau = 2.0$)

謝 辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 26540127 の助成を受けたも のである.

文 献

- C. Liu, Q. Chen and T. Xu, "Locomotion control of quadruped robots based on central pattern generators," Intelligent Control and Automation (WCICA), pp. 1167-1172, 2011
- [2] X. Wu and S. Ma, "CPG-based control of serpentine locomotion of a snake-like robot," Mechatronics, vol.20, No.2, pp.326-334, 2010
- [3] G. Endo, J. Morimoto, J. Nakanishi and G. cheng, "An empirical exploration of a neural oscillator for biped locomotion control," in IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.3, pp.3036-3042, 2004

- [4] K. Watanabe, G.L. Liu, M.K. Habib and K. Izumi, "Neural oscillators with a sigmoidal function for the CPG of biped robot walking," in IEEE Annual Conference on Industrial Electronics Society, pp.128-133, 2007
- [5] 山内翔,川村秀憲,鈴木恵二,"恒常性創発にむけた自発的同期 に基づく振動子の集合体による自律制御,"人工知能学会論文誌 vol. 30, No. 1, pp.1-11, 2015
- [6] Y. Uwate, Y. Nishio and R. Stoop, "Synchronization in three coupled van der Pol oscillators with different coupling strength," International Workshop on Nonlinear Circuits, Communication and Signal Processing, pp.109-112, 2010
- [7] Y. Uwate and Y. Nishio, "Synchronization in several types of coupled polygonal oscillatory networks," IEEE Transaction on Circuit and Systems, vol. 59, No.5, pp.1042-1050, 2012
- [8] Y. Shoji, Y. Uwate and Y. Nishio, "Synchronizations and oscillations of negative coupled neural oscillators," International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications,, pp.827-830, 2014
- [9] S. Tsuji, T. Ueta, H. Kawakami and K. Aihara, "Bifurcation of burst response in an Amari-Hopfield neuron pair with a periodic external force," Electrical Engineering in Janan, vol.146, No.2, pp.43-53, 2004
- [10] X. Shi, Q. Lu and H. Wang, "In-phase burst synchronization and rhythm dynamics of complex neuronal networks," International Journal of Bifurcation and Chaos, vol.22, No.5, 1250101, 2012