

前田 義信†

Yoshinobu MAEDA

1. はじめに

神経系における情報のキャリアは活動電位と考えられている。活動電位は細胞膜の内外に生じる電位差であり、Na や K 等のイオンが膜を横断することによって生成される。活動電位が生じた直後に、不応期と呼ばれる時間領域があり、比較的大きな刺激電流によって再興奮可能な相対不応期と、どのような刺激に対しても再興奮しない絶対不応期とに細分される。相対不応期の存在が活動電位のカオス的時系列を生み出す。一方で絶対不応期は、特に心臓を構成する細胞群で明確に観察され[1]、波形の形状から別名プラトー相と呼ばれている。一般に、他の神経系の細胞群では、これほど明らかな形状を持つ絶対不応期は観察されない。なぜ、絶対不応期が心臓の刺激伝導系でこれほど発達しているのだろうか。

このような不応期を持つ細胞群の特性を明らかにするため、Meunier[2]と河崎・土居ら[3]は、微分方程式で記述された振動子モデルにおいて、拡散結合系の同期振動周期が各々の振動子の固有周期(結合前の周期)よりも小さくなる加速現象を発見した。さらに、このことを数学的に調べている。しかし、振動子モデルに含まれるパラメータの物理的意味は明確ではなく、生体との対応関係が不明である。Maeda ら[4]は電子回路の振動子モデル(回路振動子)を構成し、その結合系において上述の加速現象が生じることを示した。具体的には、固有周期 0.89 秒と 0.94 秒の 2 つの回路を作製し結合させると、周期 0.83 秒で同期振動した[4]。回路における観測変数(電圧、電流など)は、すべて単位を有する物理パラメータである。加速現象を起こすために生体が必要とするエネルギーを評価するため、本研究では特に消費電力と加速振動の関係に注目し、絶対不応期の大きさ(プラトー時間)が異なる 2 つの回路振動子の結合系をシミュレーションにより調べた。

2. 回路構成

回路振動子は、自律的にバースト発振する回路モデル[5]を修正することによって得た。図 1 に回路構成を示す。上側が膜内、下側が膜外を表し、膜外から測定した膜内の電位が膜電位となる。4 つの点線矢印が膜を横断する Na と K のイオン流[1]を表しており、こうして設計された 2 つの回路振動子を図 2 のように抵抗を介して拡散結合 ($R_D = 100 \Omega$) する。図 1 の各素子の値は以下のとおりである：

$$\begin{aligned} V_{Na} &= 5 \text{ V}, \quad C_m = C_1 = 10 \text{ } \mu\text{F}, \quad R_1 = 200 \text{ k}\Omega, \\ R_2 &= R_4 = 100 \text{ k}\Omega, \quad R_3 = 10 \text{ k}\Omega, \\ \text{トランジスタ npn: } &2\text{SC}2458, \quad \text{pnp: } 2\text{SA}1048. \end{aligned}$$

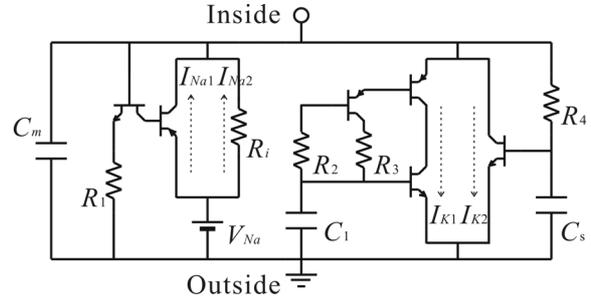


図 1 回路振動子。

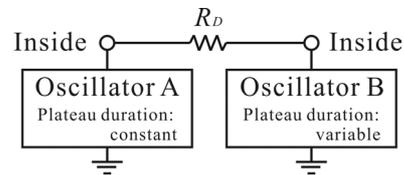


図 2 回路振動子結合系の概念図。

R_i と C_s は可変パラメータとして取り扱う。

3. 方法

回路シミュレータには B^2 -Spice2000 (SORA Computer Products) を用いた。2 つの回路振動子を振動子 A、振動子 B とし、振動子 A の固有周期を $T_A = 1$ 秒、プラトー時間を $\tau_A = T_A/2 = 0.5$ 秒に固定した ($R_i = 128 \text{ k}\Omega$, $C_s = 60 \text{ } \mu\text{F}$)。振動子 B の固有周期も $T_B = 1$ 秒に固定し、プラトー時間は R_i と C_s を調節して $\tau_B = 0.1$ 秒～0.8 秒まで変化させた。

消費電力を評価する際には、図 1 の回路図において回路に供給されるエネルギーが定電圧源 V_{Na} のみであるという理由から、以下の式を用いた：

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_{Na} \cdot [I_{Na1}(t) + I_{Na2}(t)] dt, \quad (1)$$

ここで T は周期である。 V_{Na} から流れる一周分分の電流を数値積分して消費電力を計算した。

振動子 A、B において周期は 1 秒に固定されるので、異なる時間情報はプラトー時間のみである。そこで、振動子 A、B の時間的な振舞いの相違を表す指標として、

$$\tau_{B-A} = \tau_B - \tau_A, \quad (2)$$

を定義する。また、結合後同期振動周期の結合前固有周期に対する比：

$$\phi(\tau_{B-A}) = T_{sync}/T_A = T_{sync}/T_B, \quad (3)$$

と、結合後消費電力の結合前消費電力に対する比：

$$\psi(\tau_{B-A}) = (P_{sync,A} + P_{sync,B}) / (P_A + P_B), \quad (4)$$

を定義する。

†新潟大学工学部福祉人間工学科

Dept. Biocybernetics, Faculty of Engineering, Niigata University

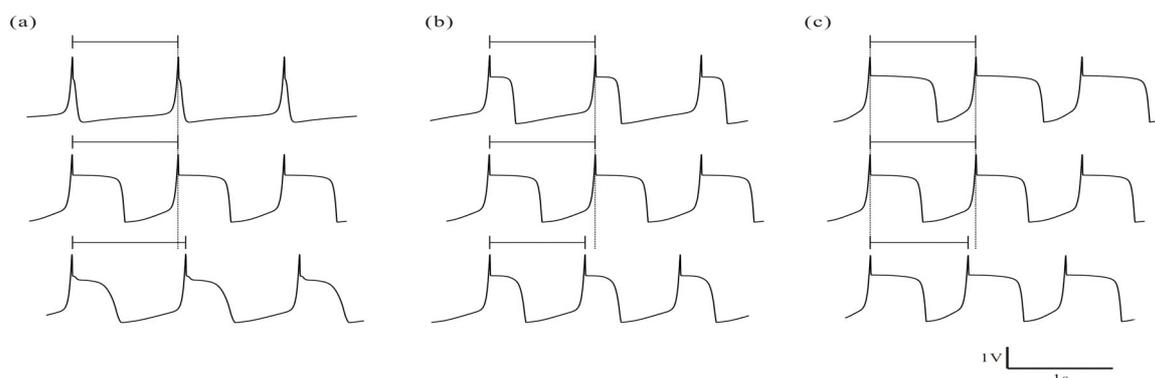


図3 拡散結合による振動の加速・減速の様子. (a) $\tau_B = 0.11$, (b) $\tau_B = 0.25$, (c) $\tau_B = 0.64$.
 上段: 結合前振動子 B の時間波形, 中段: 結合前振動子 A の時間波形, 下段: 結合後振動子 A の時間波形.

4. 結果と考察

図3に各振動子の時間波形を示す. 図3(a)では, 殆どプラトー時間が観察されない振動子 B (上段) を振動子 A (中段) に結合させたときに, 同期振動周期が増大し減速現象が生じた (下段). 図3(b)と図3(c)では逆に同期振動周期が減少し加速現象が生じた (下段). ただし, 図3(b)では振動子 A よりも小さなプラトー時間を持つ振動子 B を結合させたのに対して, 図3(c)ではプラトー時間の大きな振動子 B を結合させている (上段と中段). 振動の現象面では図3(b)と図3(c)に相違はないが, 両者の消費電力は異なっている.

図4に, プラトー時間の差 τ_{B-A} の値を変化させたときの周期比 ϕ と消費電力比 ψ の変化を示す. 図4(a)より, $\tau_{B-A} > -0.37$ のときに周期比が 1 より小さくなるので, 結合系の振動は加速する ($\tau_{B-A} = 0$ のときは性質の同じ振動子が結合しているので加速も減速もしない). 一方, 図4(b)より, 消費電力比が 1 より小さくなるのは, 区間 $-0.35 < \tau_{B-A} < 0.11$ のときに限定される. すなわち, 同じ加速現象であっても, 図3(b)では結合によって消費電力が低下しており, 図3(c)では逆に上昇する. つまり, プラトー時間が 0.2 秒~0.6 秒の間に適度な間隔で揺らいでいる回路振動子の結合系では, 加速振動かつ電力 (単位時間あたりのエネルギー) が低消費となる同期振動が出現する.

5. おわりに

一般に高速振動になれば, 多くの情報を伝送できることが期待されるので, そこでの消費エネルギーも上昇することが予想される. 本研究では, 細胞膜の特性をもつ非線形振動子が互いに結合することによって, 振動が加速し, かつ消費エネルギーが逆に低下し得ることを, 回路シミュレーションにより示した. つまり心臓の刺激伝導系では, 絶対不応期を利用した低消費高速情報伝搬がうまく使われている可能性があることを示唆した. 今回は示さなかったが, 消費電力はプラトー時間と高い相関を持っており, なぜ低消費加速振動が生じるかという問題は, なぜプラトー時間が結合によって短縮するのかという問題に帰着することができる. 今後は, そのような解析に加えて, 多数の回路振動子が 1 次元的に配置されたネットワークや環状ネットワークにおける加速現象と消費電力低下の関係も

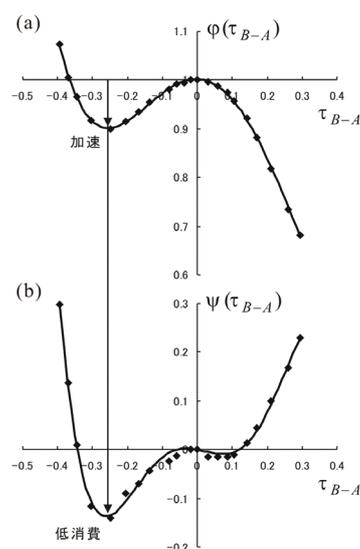


図4 プラトー時間の差 τ_{B-A} に対する (a)周期比 ϕ と, (b)消費電力比 ψ .

明らかにする.

一方で, 生体情報処理の特性を工学的に応用したニューラルネットワークのハードウェア化が行われている. しかし, 多くは差分方程式で記述できる離散時間型回路であり, 時間の発展過程は静的である. しかし, 微分方程式で記述される連続時間型回路には, 我々の予想を越えた現象がまだ含まれると思われる.

参考文献

- [1] Keener J and Sneyd J, *Mathematical Physiology*, Springer (1998)
- [2] Meunier C, The electrical coupling of two simple oscillators: load and acceleration effects, *Biological Cybernetics*, Vol.67, pp.155-164 (1992)
- [3] 河崎, 土居, 佐藤, 拡散により結合された BVP 振動子群の振動周期, *信学技報 MBE93-24*, pp.121-128 (1993)
- [4] 前田, 坂口, 牧野, 土居, 低消費加速同期振動を示す非線形回路振動子の拡散結合系, *信学論 A (条件付採録)*
- [5] Maeda Y and Makino H, A pulse-type hardware neuron model with beating, bursting excitation and plateau potential, *BioSystems*, Vol.58, pp.93-100 (2000)