

非線形物性の応答

真原 仁

研究の目的

本研究では、興奮性媒体の応答について調べた。興奮性媒体は、ある信号に対して発火現象を示す系である。この系は、神経（ニューロン）心筋細胞などにみられる。近年、この興奮性媒体を模範とした信号処理などが注目されている[1]。そこで興奮性媒体が信号に対しどのような応答を示すかを解明することを研究の目的に設定した。

基本的な興奮性媒体の性質として、ある閾値以上の刺激に対し発火を行うことが挙げられる。この興奮性媒体は、刺激の中に埋もれた信号も取り出す性質をもつ。これは、検出されにくい微弱信号にノイズが加わることにより信号の検出率が増加するStochastic Resonance (SR)として知られている[2]。従来の研究では、閾値と信号の関係によって興奮性媒体の発火が議論されてきた。本研究では、興奮性媒体の周期的な信号に対する応答を研究することにより、信号の微分が発火現象にどのような影響をおよぼすかを研究した。

研究方法

今回興奮性媒体として用いた系は、光感受性Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応である[2]。この系の3変数モデルを示す。

$$\dot{x} = x(1-x) + y(q-x) - \epsilon k_f x + p_2 \beta \Phi, \quad (1)$$

$$\epsilon \dot{y} = 2hz - y(q+x) + \epsilon' k_f (y_0 - y) + p_1 \beta \Phi, \quad (2)$$

$$\dot{z} = x - z - \kappa_f z + \left(\frac{p_1}{2} + p_2\right) \beta \Phi, \quad (3)$$

ここで、 k_f と Φ はそれぞれ流量と光照射強度を表す。(他のパラメータは定数) この系は、光照射強度の値により系の性質が変化する。光強度がある値(分岐点)より大きいとき、この系は興奮性媒体となる。また、分岐点よりも低い光強度を設定すると振動現象が起こる(振動性媒体)。本研究では、系が興奮性媒体になるように光強度を初期値として設定した。また、信号は光強度を周期的(sin曲線)に変化させて与えている。例として図1に系の応答と振動の時系列を示した。(詳しくは、図1の説明を参照)

研究成果

1. 最適振動数と引き込み現象

単一パルス系に与えたときの閾値は、系の分岐点と一致する。しかし、この閾値は周期的振動に対しては成り立たないことが知られている。まず、この閾値周辺で見られる引き込み現象の様子を調べた。周期的振動の振動数に対する閾値を計測したとこ

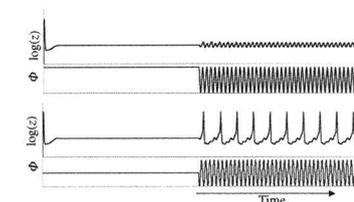


図1 系の応答と振動の時系列 (1:2の発火)
上段は、系の化学物質濃度(z)のlog表示。下段は、光強度 ϕ を表す。下段の最小値は系の分岐点の値である。系の大きなピークが発火現象である。2回の信号に対して1回の発火を示す。

ろ閾値が振動数の関数であることがわかった(図2)。この閾値の関数は、最小値(最適振動数)をもつ。このとき、最適振動数付近では振動が閾値を直接越えなくとも発火が起こることがわかる。安定性解析によると定常点近傍における振動数を計算した値は、最適振動数に近い値であった。そのため、定常点近傍の振動数と最適振動数に相関があると思われる。

系は振動の振動数や振幅に応じて発火の振舞いを変えることがわかった。図1のほかにも、この系はn:mの周期的発火などを示すこともある。図2は、振動数-振幅平面上に1:mの発火領域を明示している。これにより、引き込み現象の領域を特定することができた。この図からみられるようにこの引き込み現象は、振動性の系に周期的信号を与えたときに現れるアーノルド・タン構造[3]を持つことがわかった。これらの引き込み現象は、定常点まわりの振動数に対してではなく、系が振動性媒体になったときの振動数に対して起こっている。つまり、定常点まわりの振動数と発火したときの振動数の両方に依存するといえる。

2. 位相引き込みと発火

上記のように引き込みが起こるとき、信号の位相に対して系の振舞いが固定される。したがって、通常は信号の初期位相を変えても定常状態における系と発火の位相関係は変化しない。ところが、位相が1つに固定されず時間的に変化するカオス発火が現れた。また、同じ振動に対して2つの安定位相が存在するパラメータ領域があることがわかった。

位相引き込みが起こらず発火現象が起こるとその発火現象はカオスとなる。この発火がカオスであることは、リアプノフ数やポアンカレマップをとることにより検証し確認している。このカオス発火は最適振動数よりも振動数が高いとき現れやすいことがわかった。(図は割愛)

通常位相引き込みが起こる場合、安定状態は1つである。ところが信号の初期位相を変えることにより安定定常状態が2つあるパラメータ領域があることがわかった。図3は、信号の初期値以外の条件を全て同じにしてシミュレーションを行った結果である。初期状態により、発火が起こる場合と起こらない場合が存在することがわかった。この現象は、位相引き込みで2つの定常状態が共存しうること示している。このような位相による2安定状態は、振動性媒体に第二高調波成分を含んだ信号を加えたときには、すでに観測されている[4]。しかし、単独の正弦波成分を信号としたときにこのような2定常状態が確認できたのは初めてである。

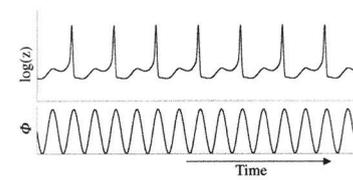


図2 引き込み領域の分布
振動数fと振幅a相関発火がU形の線より上の領域において発火現象が見られた。1:mは、引き込みの比でそれぞれの領域が明示されている。(a>1.0において信号が分岐点を越える。)

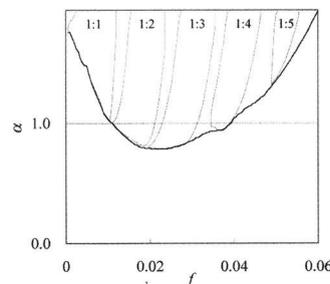


図3 初期位相の違いによる定常状態の変化
全く同じ条件で、光強度の初期位相だけを変えたシミュレーション。上の図では発火が現れず、下の図では、発火が現れた。初期位相により発火条件が異なることを示す。

産業技術への貢献

興奮性媒体は、信号の振動数に依存した振舞いをすることがわかった。また、この系は信号をOn line処理している。おそらく生体が行っているであろう信号の相関関数や振動数成分のOn line処理に応用できると期待される。

参考文献

- [1] A. Longtin, and K.R. Chialvo, 81 (1998) 4012.
- [2] T. Amemiya, et al. J. Phys. Chem. A, 102 (1998) 4537.
- [3] K. Tomita and T. Kai, J. Stat. Phys. 21(1979) 65.
- [4] T. Yamamoto, et al. Chem. Phys. Lett. 307(1999) 433.

連絡先

電話 0826-85-9550 (VBL多目的室)
FAX 0836-85-9550
E-mail: hmahara@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp