

# 非線形振動子を用いた反応拡散回路 II: Wilson-Cowan 神経振動子

## Analog Reaction-Diffusion Circuits II: Wilson-Cowan Neural Oscillators

林 秀樹, 浅井 哲也, 雨宮 好仁 (北海道大学 工学部)

Hayashi Hideki, Asai Tetsuya, and Amemiya Yoshihito (Department of Electrical Engineering, Hokkaido University)

### 1. はじめに

反応拡散系とは、化学物質などの反応種がダイナミクスを伴って空間を拡散する系である [1]。個々の反応種のダイナミクスを表す反応方程式に非線形性の強い関数を用いると、線形システムでは見られないような興味深い反応を見ることができる。これらの特長を利用して、新しい情報処理形態を発見できる可能性がある。本稿では、このような系を模擬する集積回路 (反応拡散チップ) の開発を目的として、非線形振動子のアナログ回路設計を試みた。

### 2. 神経細胞に学んだアナログ非線形振動子

反応拡散チップの基本デバイスは、反応種のダイナミクスを生成するための「非線形振動子」である。反応拡散系は多数の非線形振動子の組み合わせにより構成されるため、半導体デバイスが持つ物理現象を巧く利用したコンパクトな振動子回路を開発することが重要である。本稿では、反応拡散チップ開発の第一段階として、抑制性および興奮性神経細胞のカップリングによる神経振動子に学んだ「コンパクトな生体様振動子回路」の開発を試みた。

図 1(a) に、Wilson-Cowan 型神経振動子モデル [2] の概略を示す。神経細胞は互いに抑制 (黒丸) および興奮 (白丸) 性のシナプスを介して結合している。神経細胞の内部電位を  $u, v$  とすると、 $u$  の増加に伴って  $v$  が増加し、 $v$  の増加に伴って  $u$  が減少する。神経細胞の自己抑制はこれらの応答を遅らせる性質をもつため、このモデルがある条件下で振動解を持つことは容易に想像できる。図 1(b) に、この仕組みに学んで構成したアナログ回路を示す。図中の CR 回路が自己抑制の役割を果たし、差動対 (Dif) がシナプスとして働く (カレントミラーが接続されている側の MOS トランジスタのゲートが興奮性, 他方が抑制性入力)。また、振動状態を外部から制御できるように、差動対の抑制入力側にはフローティングゲート MOS トランジスタを用い、外部から制御電圧  $E$  を受けられるような構成にした。この回路構成は、極めてコンパクトかつ見通しがよいため、反応拡散チップの非線形振動子として利用できる。

### 3. 動作シミュレーション結果

図 1 に示した振動子回路の SPICE シミュレーションを行った。回路の基本動作を確認するために、比較的大きな容量と高い抵抗を導入してシミュレーションを行った ( $R = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $C = 10 \text{ nF}$ ,  $I = 100 \text{ nA}$ )。制御電圧  $E_1, E_2$  をそれぞれ  $0 \text{ V}$ ,  $0.5 \text{ V}$  としたときのシミュレーション結果を図 2 に示す。振動子回路の特異点 ( $u \approx v \approx 0.6 \text{ V}$ ) を中心とした位相空間上でリミットサイクル [図 2(a)] および緩和振動 [図 2(b)] が確認できた。

次いで、提案した振動子回路を局所結合した反応拡散系のシミュレーションを行った。振動子間の拡散が差動対 (シナプス) を介して行われるとすれば、系の回路方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u + f(u - bv - \theta_u + D_u \nabla^2 u)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -v + f(au - cv - \theta_v + D_v \nabla^2 v)$$

で表される [ $a, b, c, \theta_u, \theta_v$  は、フローティングゲート容量 ( $C_{11} \sim C_{22}$ ) により決まる量]。また、関数  $f(\cdot)$  は神経細胞の応答関数に相当するシグモイド関数 (差動対の特性により実現),  $D$  は拡散定数である。

図 3 に、画像処理を例にとった Wilson-Cowan 反応拡散系の応答を示す。シミュレーションでは、チューリングパターン的な応答を確認するために、抑制細胞 ( $v$ ) の拡散定数 ( $D_v$ ) を興奮細胞 ( $u$ ) の拡散定数 ( $D_u$ ) よりも大きくした状態で系の応答を調べた。図 3(a) に、 $D_u \ll D_v$  における系の平衡状態を示す。図 3(a) 中の左図、中心図および右図は、それぞれ入力画像、系の平衡分布および入力画像と平衡分布を重ね合わせた画像を示す。この条件では、振動を止めようとする力が極めて強く、かつ近傍の振動子が同じ位相を持つように動作するため、入力画像中の境界部で位相が  $\pi/2$  ずれた状態で系が平衡する。この処理は、入力画像のエッジを検出していることに他ならない。一方、 $D_u$  の大きさのオーダーが  $D_v$  に近づいてくると、図 3(b) に示したような「縞模様」が自己形成されることが確認できた。平衡分布は一定の空間周波数を維持しており、 $D_v$  で決まる拡散長の間隔で振動子の位相が  $\pi/2$  ずれた状態にある。これは、入力画像の特徴を保ったまま縞模様を形成するフィルタであると考えられる。

今後はここで提案した回路を発展させて、集積回路化に適した回路構成を検討する予定である。

### 参考文献

- [1] G. Nicolis and I. Prigogine, *Self-organization in Nonequilibrium Systems — From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- [2] H.R. Wilson and J.D. Cowan, Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons, *Biophys. J.*, Vol. 12, pp. 1-24, 1972.

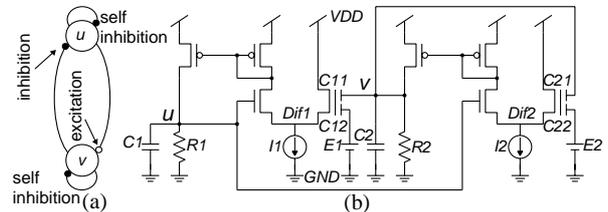


Fig. 1. The Wilson-Cowan neural oscillator and its circuit

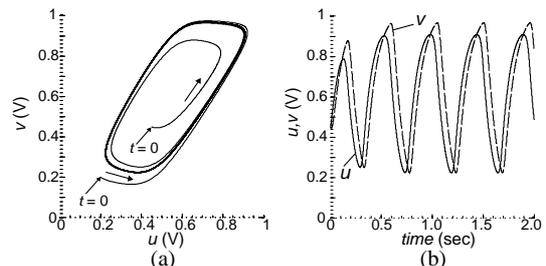


Fig. 2. SPICE simulation results for Wilson-Cowan model

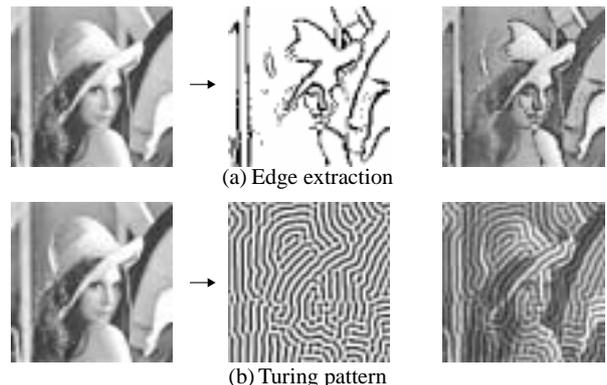


Fig. 3. Simulation results for 2-D Wilson-Cowan system