

非線形アナログ集積回路と反応拡散チップ

—自然界の生き生きとした非線形現象を模倣する—

Nonlinear Analog Integrated Circuits and Reaction-Diffusion Chips

浅井 哲也, 雨宮 好仁

Asai Tetsuya and Amemiya Yoshihito

北海道大学 工学部

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

1. はじめに

近年、散逸系や自己触媒システムなどの反応拡散系が形成する動的時空間パターンに注目が集まっている。古典的な対流問題から神経のダイナミクスにいたるまで、ほとんど全ての自然現象が反応拡散系に属する。反応拡散系が示すダイナミクスは多種多様であり、線形システムでは決して起こりえないような魅力的な現象を見ることができる。これらの言わば「生き生きとした」時空間パターンは、自然界の物理現象が行う何らかの情報処理の結果として生じたものである。

反応拡散系が行う情報処理の本質を見い出せれば、新しい情報処理形態の発見と応用につながる可能性がある。しかしおそらく、これらの系は彼ら自身にとって都合の良い情報処理のみを行っているのであって、それから我々に役立つ機能を引き出すには工夫が必要である。現在、これら反応拡散系の本質を理解するために様々な観点から研究が行われているが、その根本的な性質はいまだ十分には明らかにされていない。なぜなら、反応拡散系は一般に強い非線形性を持つので、見通しの良い理論解析は極めて困難だからである。そのため、現在は数値計算による解析が主流となっているが、扱う系の次数や空間規模の増加に伴って計算時間が急激に増加するため、パラメータ空間全体を網羅して系を把握することが難しい。このような状況下で、反応拡散系を効率良くエミュレートする高速演算ハードウェアの必要性が高まっている。

そこで我々は、上記ハードウェアの具現化に向けて「反応拡散系を模擬する LSI」の開発を行うことにした。以後、このような LSI を「反応拡散チップ」と呼称する。本講演に続く一連の講演は、我々が開発を行っている反応拡散チップの現状に関するものである。

2. 反応拡散系とは

反応拡散系は、反応方程式（非線形常微分方程式）と拡散方程式（線形偏微分方程式）の両方の効果を合わせもつ方程式が複数連立した系であり、一般的には

$$\frac{\partial u_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D_i \nabla^2 u_i(\mathbf{r}, t) + f_i(u_i(\mathbf{r}, t)) \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

で表される（ \mathbf{r} は空間、 t は時間、 D_i は拡散定数）。ここで f_i は反応種により異なる非線形反応項である。一般によく知られた Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応方程式、チューリングの反応拡散モデル、FitzHuge-南雲方程式、Gray-Scott モデルなどはこの形で表され、それぞれが異なった反応項を持っている。

図 1 に二次元二変数反応拡散系の例を示す（ $\mathbf{r} = (x, y)$, $N = 2$ ）。このように空間を離散化して考えると、反応方程式は各々の離散点のダイナミクスを表すことになる。一般に、反応方程式は振動解を持つため、これらの離散点は振動子であると考えてよい。つまり、この系は振動子を空間に配置して、それらを局所結合したものである。

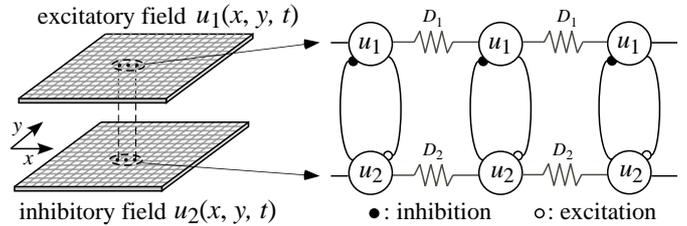


図 1 二次元二変数反応拡散系の模式図

3. 反応拡散チップの開発

今回我々が回路化を試みた反応拡散系は、二変数の非線形振動子（興奮・抑制性素子のペア）を用いたスタンダードな二次元の系である。それぞれの回路は、回路化指針に応じて以下のように分類できる：

1. 反応拡散系を記述する方程式を厳密に解く LSI
化学反応に代表される反応拡散系は乗算器の組み合わせで表現できる。この表現式をアナログ回路化する手法を提案する。今回は、BZ タイプの反応モデルの一つである Brusselator を例に取って回路化を行った。
2. 半導体デバイスが持つ物理現象を利用した LSI
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ので、コンパクトかつ低消費電力の振動子回路を開発することが重要である。今回は CMOS デバイスの物理現象を巧みに用いた二種類のアナログ非線形振動子回路の開発を行った。これらの提案回路は、系の振舞いが理論的に明らかにされている「Lotka-Volterra 型振動子」および「Wilson-Cowan 型神経振動子」と等価であることが示された。
3. アナログ・デジタル混載による反応拡散 LSI
セルオートマトンにもとづくアナログ-デジタル混載型反応拡散チップの設計を行った。離散時間で動作するセルオートマトンモデルの導入により、チップと既存の計算機との接続が容易になる（たとえば任意の時間に動作を停止させて系の状態を確認できる）。提案したセルオートマトン回路は、空間加算をアナログ回路（ ν MOS トランジスタを使用）で行い、加算値の保持をデジタル回路で行う形式である。

4. 今後の展望とまとめ

非線形性の強い系（モデル）をシミュレートするためには、系そのものを模倣するようなアナログ集積回路（エミュレータ）が不可欠である。本講演に続く一連の講演は、反応拡散系の挙動をエミュレートするハードウェアに関するものであり、反応拡散系の理解を深める上で有用なツールとなりうる。それに加えて、反応拡散モデルに基づく機能センサや前処理演算システムにも応用できるものであって、脳型コンピュータへの情報入力デバイスとして新しい分野を拓く可能性を持っている。