

# 反応拡散チップの開発

## 反応拡散系をシリコン LSI の上に実現する



浅井 哲也



非線形アナログ電子回路, 集積回路, 反応拡散系

### 1. はじめに

近年, 自然界や生体の機能に学んだアーキテクチャを半導体集積回路上に構築するという新しい研究分野が進展しつつある。これは, 自然界の生き生きとした現象(さまざまな秩序やリズム, いろいろな形や模様)の生成, および生命現象に現れる各種の自己組織化などの現象)をシリコンチップ上に具現化し, さらにそこから新しい応用分野を展開しようという挑戦的な試みである。その一つの例が, 「反応拡散系」と呼ばれる自然・化学反応系をシリコン LSI 上で模擬する「反応拡散チップ」の研究開発である。その目的は, 反応拡散系をより深く理解して工学応用に結びつけることにある。本稿では, この「反応拡散チップ」の構成概念と開発の現状およびいくつかの工学応用例について紹介する。

### 2. 反応拡散チップの概念と構成

反応拡散系とは, 非平衡状態において反応現象と拡散現象が混在したシステムのことをいう。物質やエネルギーの流れを伴う非平衡-開放系では, 反応の非線形性が著しく強調されて, 平衡系からは予想もつかない動的(ダイナミック)で多様性に富む世界が出現する。例えば, ベロソフ・ジャボチンスキー(BZ)反応に見られるようなダイナミックな螺旋パターンの発生, 熱帯魚など魚類の体表の模様(チューリング構造)の発生, 化学パターンの自己複製現象などは, 反応拡散系における現象の典型例である<sup>[1][2]</sup>。反応拡散チップは, 単純な線形システムでは決して起こりえないこれらの現象を模擬する「シリコン反応拡散系」である。先端の半導体集積技術を活用してシリコン LSI 上の新しい反応拡散系を構築し, さらにそれらを用いた応用の可能性を探ることが反応拡散チップ開発のねらい

である。

本稿で紹介する反応拡散チップは, チップ自体が化学反応と拡散の媒体を直接模擬するような構成を持つ。反応拡散系のモデル方程式を逐次的に解く(シミュレートする)デジタルプロセッサ的な構成ではない。例えば, BZ 反応と同様な散逸構造(エネルギーを消費しつつ生まれる時空間パターン)がチップ表面の電位分布として観測できるようなものと考えてよい(図1)。

反応拡散チップの構成要素は, 化学反応の素過程を模擬する「反応回路」と化学物質の拡散を模擬する「拡散デバイス」である。図2に反応拡散チップの構成例を示す。図では二種類の化学物質(AとB)の自己・相互作用(反応)と拡散を模式的に表してある。反応回路を格子状に敷き詰め, それらの間を拡散デバイスで相互結合して反応拡散チップを構成する。通常のデジタルプロセッサとは異なり, 個々の反応回路と拡散デバイスが並列に動作して時

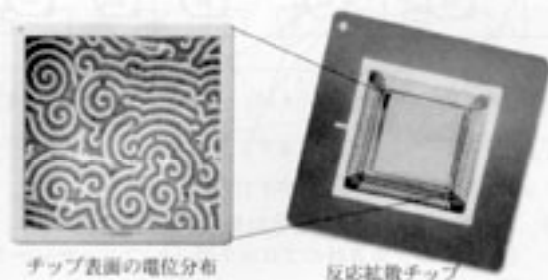


図1 反応拡散チップ(シリコン反応拡散系)の概念図

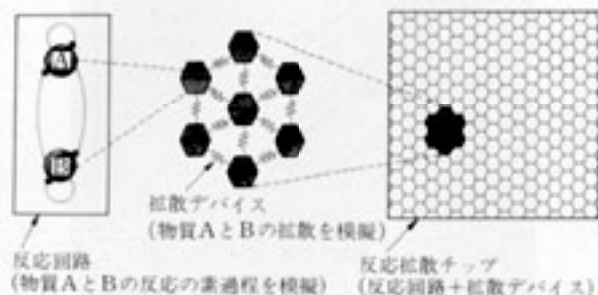


図2 反応拡散チップの内部構成

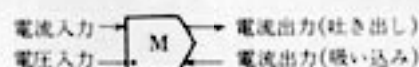
あさい・てつや 1999年豊橋技術科学大学大学院電子情報工学専攻博士後期課程修了。同年, 北海道大学工学部電子工学科に就任, 現在に至る。工学博士。

空間パターンを作り出す。反応回路と拡散デバイスの非線形性に応じて、さまざまな種類の反応拡散チップを構成することができる。

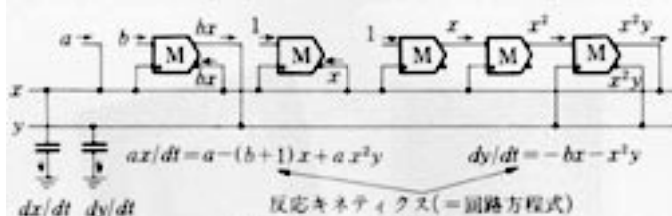
### 3. 反応拡散チップの開発例

#### 3.1 ブリュセレータのアナログ回路化

反応拡散系における化学反応の素過程は、乗算の組み合わせでモデル化できることが多い。それに対応して、反応拡散チップの反応回路も「アナログ乗算器」を組み合わせで構成できる。ここでは BZ 反応モデルの一つである「ブリュセレータ」を回路化した例を紹介する<sup>(9)</sup>。図 3(a)に示すような電圧と電流の入力の積を電流として出力するアナログ乗算器 (M) を用いる。乗算器を組み合わせで、回路方程式がブリュセレータの反応キネティクスと等価になるような図 3(b)の回路を設計する。この回路構成では、キャパシタ両端の電圧 ( $x, y$ ) が生成物の濃度に対応し、初期物質の濃度はバイアス電流 [図 3(b)の  $a, b, 1$ ] に対応する。バイアス電流値の大きさを変えると、減衰振動とリミットサイクルが入れ替わる分岐現象が生じる。図 4 に電圧変数  $x-y$  の平面でみたりミットサイクル動作例を示す。このブリュセレータ回路を拡散結合させて反応拡散回



(a) アナログ乗算器



(b) ブリュセレータ回路

図 3 アナログ乗算器の組み合わせによる反応回路  
(a)アナログ乗算器のブロック図 (b)ブリュセレータ回路

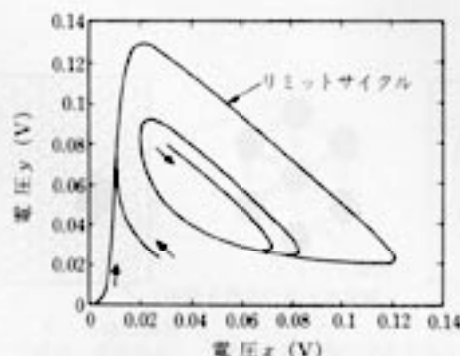


図 4 ブリュセレータ回路の動作例

路を構成すると、引き込み現象や反応拡散系特有の非一様定常状態が発生する<sup>(9)</sup>。

#### 3.2 CMOS デバイス・回路の非線形特性を利用した反応回路

シリコンデバイスや小規模な CMOS 回路の非線形特性を利用して散逸構造を生み出す反応拡散チップを構成する。これは「シリコンチップ上で実現できる新しい反応拡散系を構築する」という挑戦的なアプローチである。そのためには、以下のような反応回路が必要となる。

- (1) CMOS デバイスで構成可能 (チップ化の最低条件)。
- (2) 回路構成がコンパクトで低消費電力 (大規模集積化が可能)。
- (3) 反応回路の安定性が制御可能 (近傍の反応回路の状態に応じて自分自身の安定性を調整可能)。

ここでは、上記の条件を満たすように構成した回路の例を二つ紹介する。

図 5 に、MOS デバイスの指数関数特性を利用した反応回路の例を示す<sup>(10)</sup>。図中の V/I 変換器が MOS デバイス (nMOS トランジスタ) に相当し、トランジスタがしきい値以下で動作する時に伝達特性が指数関数的になる。この回路は振動解を持ち、電圧変数 ( $V_x, V_y$ ) のどちらか一方が増加 (減少) すると他方が減少 (増加) する。回路の安定性はバイアス電流 ( $I_a, I_b$ ) で制御可能である。バイアス電流の大きさは 1 nA 程度であり、消費電力の極めて低い反応回路が構築できる。

図 5 の回路方程式の両辺を対数化すると、Volterra の被食者-捕食者モデルのダイナミクスが姿を現す<sup>(10)</sup>。そこで本回路を Volterra 反応回路と呼ぶ。本来の Volterra 系は初期値依存性を持つ構造不安定な力学系であるが、この Volterra 反応回路は電圧ダイナミックレンジ制限やデバイスの漏れ電流などの散逸性により、定常解やリミットサイクル解を持つ<sup>(10)</sup>。

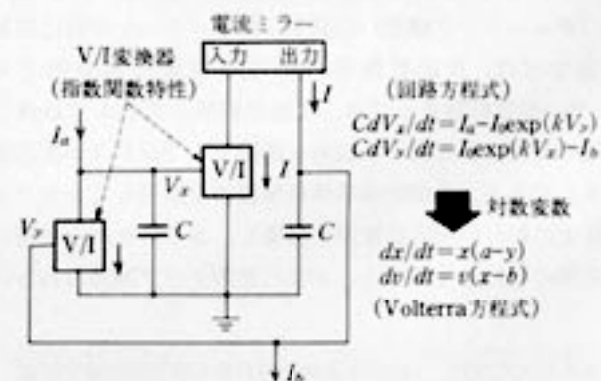


図 5 CMOS デバイスの指数関数特性を利用した Volterra 反応回路

Volterra 反応回路の集積回路レイアウト例を図 6 に示す (0.6  $\mu\text{m}$  CMOS プロセス)。図の上段が電流ミラーとバイアス電流源 ( $I_a, I_b$ )、下段がキャパシタと V/I 変換器 (nMOS トランジスタ) である。図 7 に試作した反応回路の応答例を示す。キャパシタを接続せずに約 1 nA のバイアス電流を与えた状態で、100 Hz 程度の周波数の安定な緩和振動を行う。

CMOS デバイスの非線形性を利用した反応回路をもう一つ紹介する。図 8 は、CMOS 差動対のシグモイド特性を利用した反応回路の例である<sup>14)</sup>。この回路は、Wilson-Cowan 神経振動子と呼ばれるモデル、すなわちシグモイド伝達特性を持つ興奮性と抑制性の神経細胞のカップリングモデル<sup>15)</sup>に相当する。両方の神経細胞間の相互作用を二物質の化学反応に対応させる。この回路を Wilson-Cowan 反応回路と呼ぶ。Wilson-Cowan 反応回路は、興奮性と抑制性の神経細胞回路 (それぞれ図 8 上段と下段) を組み合わせて構成する。回路中の V/I 変換器 (シグモイド伝達特性) は、差動対回路 (二個の nMOS トランジスタ) により構成する。V/I 変換器は興奮 (+) および抑制 (-) 入力を持つシナプスの役割を果たし、外部から興奮性 ( $u$ ) と抑制性入力 ( $v, \theta_u, \theta_v$ ) を受ける (図 8 左に結合の模式図を示す)。

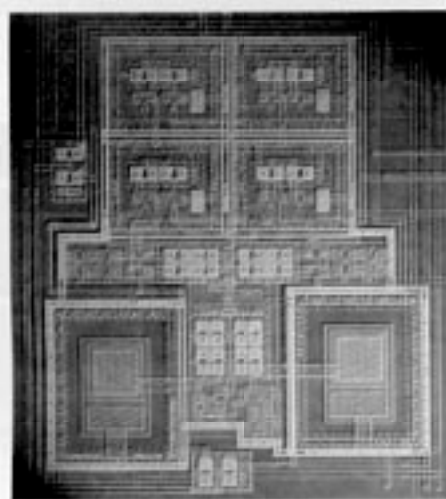


図 6 Volterra 反応回路 (単体) のレイアウト

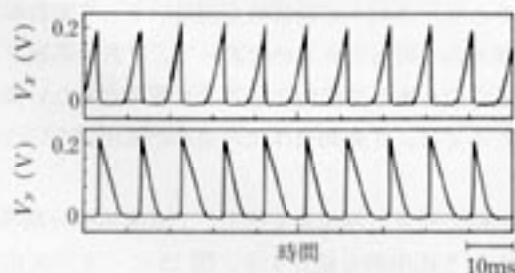


図 7 Volterra 反応回路の動作例

Wilson-Cowan 反応回路は、外部からの制御入力 ( $\theta_u, \theta_v$ ) に応じてリミットサイクル解と定常解 (入力に応じて二つの固定点を持つ) が切り替わる性質を持つ。図 9 に、パラメータ直線  $I_a$  の位置 ( $\theta_u$  の値) により安定性が変化する様子を示す。Wilson-Cowan 反応回路を拡散結合して、回路の安定性 ( $\theta_u, \theta_v$  の値) が周囲の状態 ( $u, v$ ) に応じて変化するような系を構築すると、螺旋パターンや縞

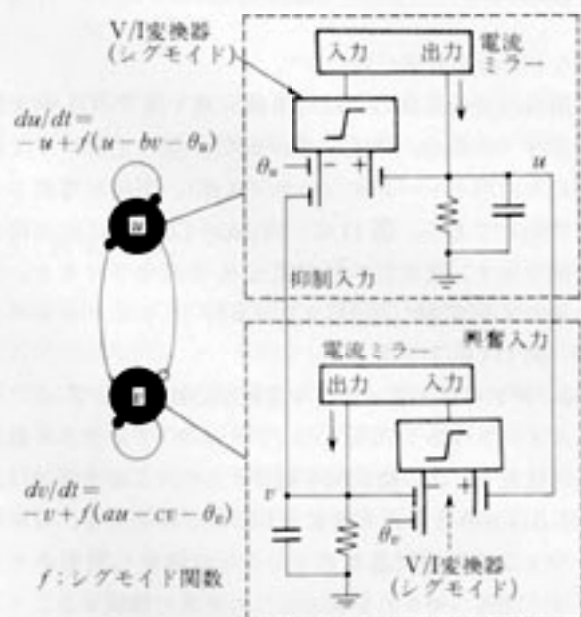


図 8 CMOS 回路のシグモイド特性を利用した Wilson-Cowan 反応回路

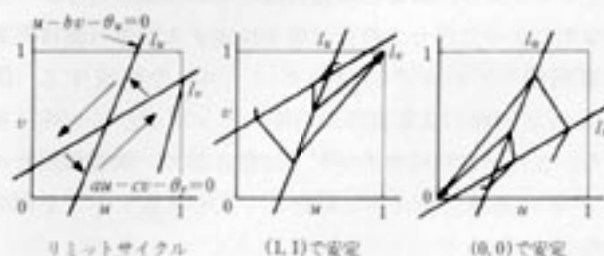


図 9 Wilson-Cowan 反応回路の安定性

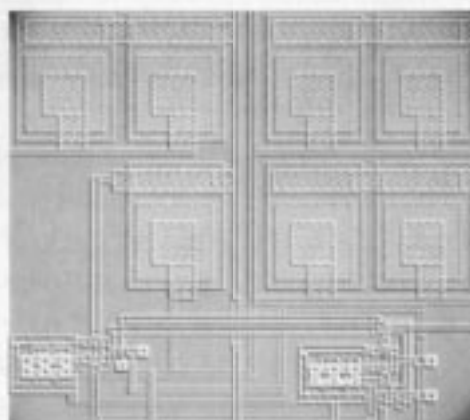


図 10 Wilson-Cowan 反応回路 (単体) のレイアウト

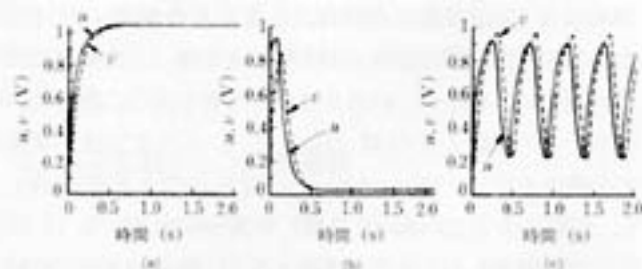


図 11 Wilson-Cowan 反応回路の動作例

模様などの散逸構造が表れる<sup>14)</sup>。

Wilson-Cowan 反応回路の集積回路レイアウト例を図 10 に示す (0.6  $\mu\text{m}$  CMOS プロセス)。図の上段が V/I 変換器の入力用キャパシタ (シナプス部)、下段が電流ミラーと差動対である。図 11 に、Wilson-Cowan 反応回路の応答例を示す。安定性の制御電圧  $\theta$  を変化させると、二つの異なる定常解 (図 11 (a), (b)) とリミットサイクル解 (図 11 (c)) が表れる。

### 3.3 アナログ・デジタル混載反応拡散チップ

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構成例を紹介する<sup>15)</sup>。このチップは、BZ 反応における休止・興奮・不応のプロセスを、セルオートマトンの手法によりモデル化・回路化したものである。反応回路 (セル) を次の三つの要素で構成する。すなわち、興奮の有無を表す活性変数 ( $u$ ) を記憶する 1 ビットメモリ、不応の度合いを表す抑制変数 ( $v$ ) を記憶する多ビットメモリ、および隣接周囲セルの状態を見ながら遷移規則によって自分の興奮状態を決定する回路 (遷移判定論理回路 + アナログ CMOS デバイス) で構成する (図 12)。反応回路の状態遷移は時間ステップごとに一斉に生じる。この反応回路をチップ上に敷き詰め、隣接周囲セルの  $u$  を CMOS デバイスと結合して反応拡散チップを構成する。

セルオートマトン反応回路の集積回路レイアウト例を図 13 に示す (0.6  $\mu\text{m}$  CMOS プロセス)。図の上段と下段が CMOS デバイスの結合キャパシタ、中段左がメモリ、中段右端が CMOS デバイス、上段左端が遷移判定回路である。

図 14 に、50  $\times$  50 の反応回路を六角格子状に配置した反応拡散チップの動作例を示す。各反応回路の状態はグレースケールで表してある (白: 興奮, 黒: 休止)。不応期の回路に接した回路 (初期状態の白いバー直下のセル群) は興奮が抑制されており、抑制の強さに応じて興奮・不応・休止のいずれの状態もとれる。これらの反応回路が興奮または休止の状態をとった場合、端点が回転して BZ 反応に特徴的な螺旋波が発生する。

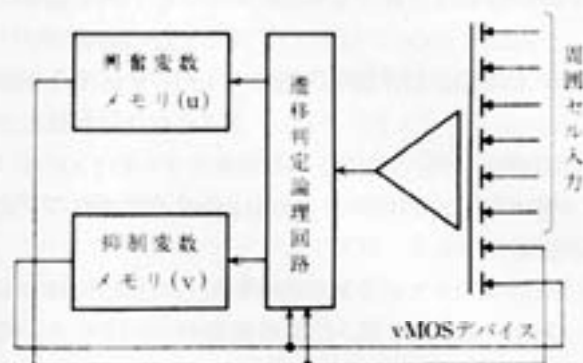


図 12 セルオートマトン反応回路のブロック図

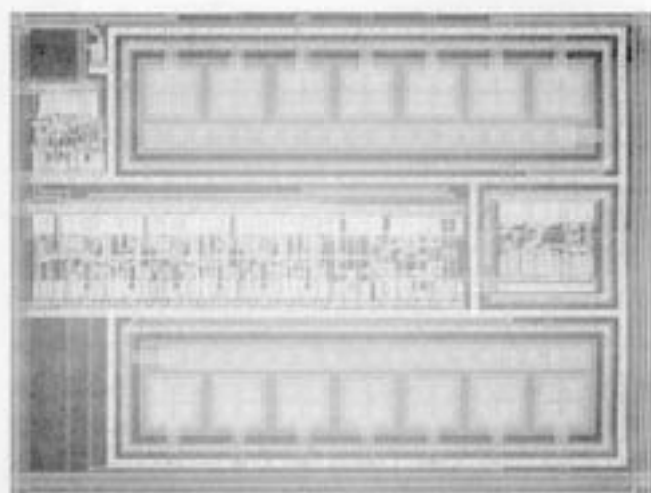


図 13 セルオートマトン反応回路 (単体) のレイアウト



図 14 セルオートマトン反応回路の動作例

## 4. 反応拡散チップの応用例

反応拡散系が行う情報処理の本質を見いだせれば、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して応用することは非常に難しい問題である。ここでは、比較的具体化の進んだ応用例を二つ紹介する。

反応回路の引き込み現象を利用して画像領域分割等の情報処理を行う応用例を紹介する。図 15 に一次元反応拡散ネットワークの構成例を示す。このネットワークに一次元



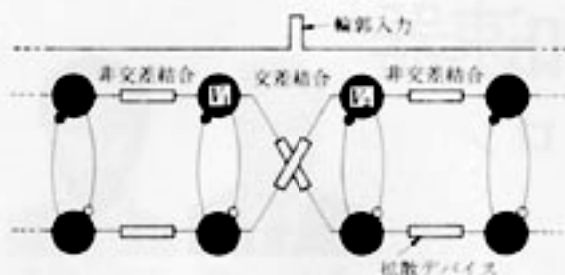


図15 画像のラベル付けを行う反応拡散システム

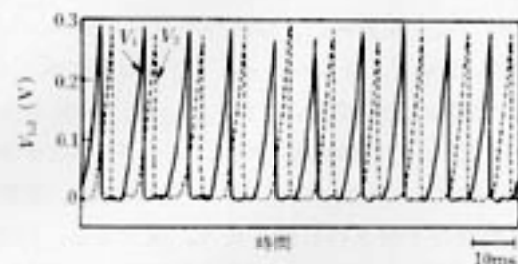


図16 画像領域境界の反応回路の動作例

画像が投影された時、輪郭に相当する部分の結合が交差結合、そのほかが非交差結合となるような構成にする（輪郭抽出を行う別回路の出力を参照して結合を切り替える）。反応回路が振動解を持つように回路パラメータを設定すれば、輪郭で囲まれた一つの領域に属する反応回路群が（非交差結合により）同位相で振動し、領域間に（交差結合による）位相差が生じる。図16に、Volterra反応回路を用いたチップの交差結合部（輪郭部）の応答例を示す。パラメータのばらつきが極めて大きいCMOSデバイスを使用しても、領域間の位相差が完全に固定される。この位相差を検出して、画像領域の判断を行う。

反応拡散チップを用いた画像処理の応用例をもう一つ紹介する。先に3.2節で紹介したWilson-Cowan反応回路を用いて反応拡散チップを構成すると、非一様な線構造が自発的に形成される<sup>21)</sup>。この性質を利用すれば、反応拡散系を用いた「縞状の画像パターンの発生・修復処理」（例えば、指紋画像処理<sup>22)</sup>など）に反応拡散チップを応用できる。図17に、Wilson-Cowan反応拡散チップを用いた指紋画像復元の例を示す。同図左の指紋パターン（原画像）を光電変換してチップに与えると、同図右に示したような「ノイズや欠損が除去された縞状パターン（空間電位分布）」が表れた状態でチップが安定する。このWilson-



図17 Wilson-Cowan反応拡散チップを用いた指紋画像復元

Cowan反応拡散チップを利用して、高度な指紋画像前処理プロセッサおよび指紋照合システムの実現が期待できる。

## 5. おわりに

反応拡散チップの構成概念、開発の現状およびいくつかの工学的応用例について紹介した。反応拡散チップの構成はセルオートマトンやニューラルネットなどの構成に極めて近く、チップの単位素子（反応回路・拡散デバイス）が並列に動作して複雑な時空間構造を作り出す。この時空間構造は、チップ上の反応回路・拡散デバイスが電気エネルギーを消費しながら作り出した散逸構造である。すなわち、反応拡散チップは人工的に作り出された実在の反応拡散系であり、反応拡散系の新たな実験環境と理論体系を生み出す上で非常に重要なツールとなりえる。今後、反応拡散チップの工学的応用可能性をさらに追及していくことが重要であると考えられる。

(平成13年1月29日受付)

## 文 献

- (1) 吉川、非線形科学—分子集合体のリズムとカオス—、学会出版センター (1992)
- (2) 三池、森、山口、「反応・拡散系のダイナミクス」、非平衡系の化学III、講談社 (1997)
- (3) 西宮、他、「化学反応系のアナログ回路化手法—ブレイクセルの回路化」、信学技報、NLP2000-80、7~14 (2000)
- (4) 加藤、他、「CMOSデバイスの非線形特性を利用した反応拡散システム—Wilson-Cowan型回路とLotka-Volterra型回路」、信学技報、NLP2000-81、15~22 (2000)
- (5) H. R. Wilson & J. D. Cowan: "Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons," *Biol. J.*, **12**, 1~24 (1972)
- (6) 浅井、他、「非線形アナログ集積回路と反応拡散チップ—反応拡散系をシリコンチップ上に実現する」、信学技報、NLP2000-79、1~6 (2000)
- (7) 藤田、他、「指紋画像処理のためのデジタル反応拡散システムの設計」、信学技報、NLP98-79、9~16 (1998)