

# 生命ダイナミクスと次世代集積デバイス

雨宮 好仁

北海道大学工学部電子工学科\*

## 1. はじめに

「生命ダイナミクスの一端を集積回路—量子ナノLSI—の上で模倣することにより新しい情報処理デバイスを創り出す」という試みを紹介する。

LSIは近年著しい進歩を遂げ、いまでは種々の情報処理を支えるハードウェアの主流となっている。LSIの地位は将来とも変わらないと予想され、その性能向上が当面重要な課題であることは異論がない。しかし同時に、新しい機能の開拓を目指して、既存LSIとは全く異なる原理の集積ハードウェア—新しいLSI—を創り出していくこともまた必要である。

新しいLSIを開発するためには、まず情報処理を行う新しい手法を考えなければならない。既存LSIでは情報処理のアルゴリズムをブール代数の論理演算で記述し、その演算をノイマン形アーキテクチャにより実行する。新しいLSIを創るためには、これとは別の処理手法を開拓する必要がある。しかし何も無いところから新しい手法を考え出すことは如何にもつらい。したがって何らかの手本が欲しくなる。そこで身近にある最も高級な手本を探すと、生き物がそれである。

生物は高度な情報処理ハードウェアといえる。外界からの様々な入力を受けて、自分が生きていくために必要な出力—判断と行動—をつくり出している。その情報処理は巧妙であり、既存LSIではとうてい及ばない高度な機能を生み出す。そこで、生物の情報処理を模倣することにより、新しい機能のLSIを創り出そうとする研究が行われるようになった。生物の情報処理の体系は複雑で未知の領域も多い。しかしそれでもメカニズムの解明とモデル化が少しずつ進展している。その結果を踏まえて、生体神経ネットワークを模倣したニューラルLSIや生

体の視聴覚機能を模倣したセンサLSIなどの開発が行われるようになった。

ここでは生物機能の模倣をさらに進めて、「生きている」ということ自体をLSI上で模倣することを考える。すなわち生命現象の根底にある「生命らしさ—成長や自己組織化などの生き生きとしたダイナミクス」をLSIの上で電子的に発現させたい。その最初のアプローチとして「反応拡散系—非平衡状態の化学反応系」の挙動をLSI上で模倣することを試みる。生命のダイナミクスは反応拡散系の非線形現象としてとらえることができる、という見解が生命物理学の分野で次第に有力となっている。したがってLSI上で反応拡散系の挙動を模倣することにより、電子的な擬似生命を創り出すことができるかもしれない。このようなLSIによって新しい情報処理ハードウェアをつくるのが最終の目的である。

以下の章では次のように話を進める。はじめに反応拡散系の概要を簡単に説明する。反応拡散系は生命のダイナミクスを生み出す舞台と考えられている（以上第2章）。この反応拡散系は化学振動子の集合体としてモデル化できる。化学振動子は物質拡散を介して相互に作用を及ぼし合い、系全体として秩序ある散逸構造を発生する（以上第3章）。反応拡散系をLSI上で模倣するためには、化学振動子に代えて電子デバイスによる非線形振動子を使えばよい（第4章）。大規模な反応拡散LSIを構成するために、ここでは集積規模を大きくできる単電子デバイスの使用を考える。すなわち、化学振動子かわりに単電子トンネル振動子を使用する（以上第5章）。この振動子を二次元配列して電子的な反応拡散系をつくる。近接する量子ドット振動子の間には、トンネル待ち時間を利用して拡散現象に似た相互作用を発生させる。この反応拡散系のダイナミク

\*〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

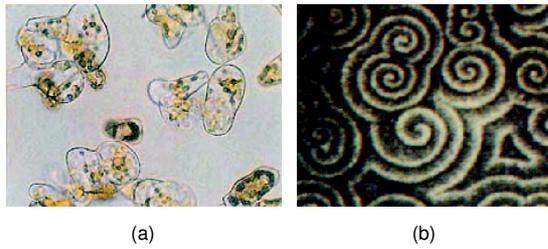


図 1 生命現象における生き生きとしたダイナミクスの例: (a) アスパラガスの細胞が分裂増殖する様子. 文献<sup>1)</sup>から引用; (b) 細胞性粘菌の集団が集合して移動体になるときに描かせんパターン. 文献<sup>2)</sup>から引用.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= f(u, v, w, \dots) + D_u \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= g(u, v, w, \dots) + D_v \nabla^2 v \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= h(u, v, w, \dots) + D_w \nabla^2 w \\ &\vdots \quad \quad \quad \uparrow \quad \quad \quad \uparrow \\ &\quad \quad \quad \text{反応項} \quad \quad \quad \text{拡散項} \end{aligned}$$

図 2 反応拡散方程式. 変数  $u, v, w, \dots$  は各化学物質の濃度で位置の関数;  $D_u, D_v, D_w, \dots$  は化学物質の拡散係数;  $f(\dots), g(\dots), h(\dots), \dots$  は化学物質の生成速度を表す関数であり, その多くは非線形.

スをシミュレーション解析し, 化学的な反応拡散系に類似した散逸構造が生じることを示す(以上第 6 章). おわりに, この反応拡散系 LSI を実用の情報処理デバイスとするための課題を付記する.

## 2. 生命のダイナミクスと反応拡散系

近年, 生命科学—生命現象を物理化学的に説明しようとする試み—の進展には著しいものがあり, とくに DNA 関連分野を中心とする分子生物学/分子遺伝学がその主流となっている. これはいわば生命体を組み立てる部品の研究を通して生命現象に迫ろうとするものである. しかし一方で, それだけでは「生命の全体像—成長・分化・形態形成などの生き生きとしたダイナミクス」を説明することができない, という問題が指摘されている. 「生きもの」が「もの」と違うところは, 自ら時間的・空間的な秩序を創り出していることにある(図 1). この生

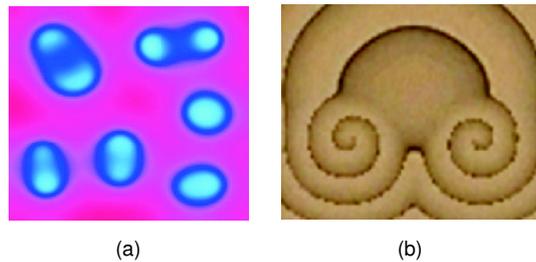


図 3 反応拡散系が示すダイナミクスの例. 二次元の系で物質濃度を濃淡表現したもの: (a) グレイスコット反応系に発生する自己複製パターン; (b) プリュセレータ反応系に見られる螺旋パターン.

命の本質を理解するためには別のアプローチが必要になる. そのような観点から反応拡散系の非線形科学が研究されるようになった.<sup>3-6)</sup>

反応拡散系とは化学反応と物質拡散が混在した非平衡-開放状態の化学系のことをいう. そこでは複数種類の化学物質が関与する多くの素反応が進行している. その結果として反応拡散系は高次の非線形挙動を示し, 平衡系からは予想もつかない動的で多様性に富む現象を生じる. 反応拡散系の大きな特徴は「散逸構造」を発生することにある. すなわち, 各化学物質の濃度パターンが空間的・時間的に均一ではなく, 巨視的な秩序をもった構造をつくる. 系パラメータの変化にともなって多種多様で複雑な散逸構造—濃度の時空間パターン—が現れる. この反応拡散系の挙動は, 自然界に現れる現象の多様性を理解するための重要な手がかりを与える. 反応拡散系は秩序ある時空間パターンを自ら創り出すことから, それによって生命ダイナミクスの一端を説明できるのではないかと, という期待が高まっている.

反応拡散系の挙動(物質濃度の時空間パターン)は図 2 の連立偏微分方程式—反応拡散方程式で表される. 変数の個数が多いほど複雑なダイナミクス, したがって複雑な散逸構造が発生する. しかし変数が少ない簡単な反応拡散系においても, 生命活動に似たダイナミクスを生じることがある. 2 変数系における一例を図 3 に示した. 図 1 との類似性に着目されたい.

(付記) 生命物理学の分野では「生命は地球という反応拡

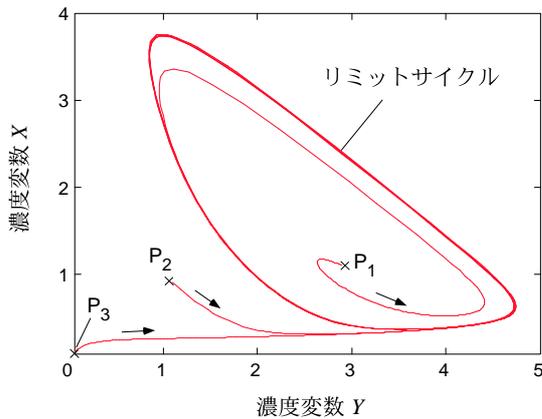
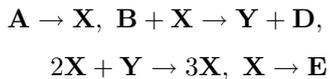


図 4 プリュセレータ反応系が描くリミットサイクル型アトラクタの例.  $a = 1, b = 3$  における濃度変数  $X$  と  $Y$  の非線形振動を図示したもの. 図中の  $P_1, P_2, P_3$  のどの点から出発しても必ず安定なリミットサイクルに落ち込む.

散系の中に生じた散逸構造の一つである」という考えを持つ研究者が少なくない.

### 3. 反応拡散系の散逸構造

前章の図 3 についてももう少し説明する. 図 3 (a) の散逸構造は次のような一連の化学反応によって発生する (プリュセレータ反応系という).



ここでは初期物質  $A, B$  が反応して最終生成物  $D, E$  を生じる. しかしここでの主役は初期物質や最終生成物ではなく, 実は 2 種の間中生成物  $X, Y$  である. もし物質の拡散がないとすれば, 中間生成物の濃度は次の速度方程式に従って変化する (初期物質の濃度は一定と仮定).

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= a - (b+1)X - X^2Y \\ \frac{dY}{dt} &= bX - X^2Y \end{aligned}$$

$a$  と  $b$  は物質濃度と反応速度に依存するパラメータである. この方程式は図 2 の反応拡散方程式の反応項に相当し, 濃度変数  $X$  と  $Y$  の非線形ダイナミクスを表している. そのダイナミクスはパラメータ  $a$

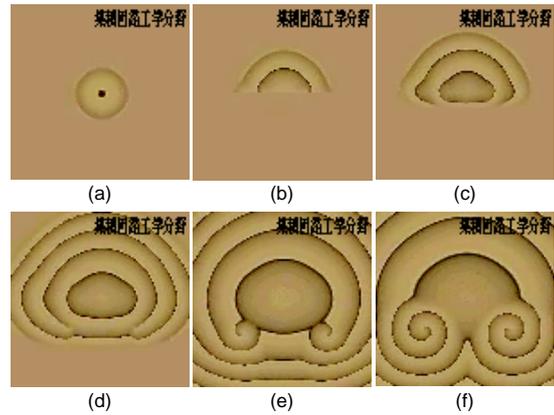


図 5 プリュセレータ反応系に発生する螺旋パターン. 数値シミュレーション結果. 一つの間中生成物の濃度を濃淡表現したもの: (a) 中心に刺激を加えると同心円の濃度パターンが発生する; (b) 擾乱によりパターンを切り欠いて端点をつくる; (c) ~ (f) そのまま放置するとトロロを巻いた軟体動物のような形態が成長していく.

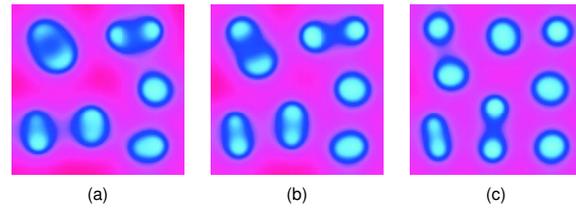


図 6 グレイスコット反応系に発生する自己複製パターン. 数値シミュレーション結果. 物質濃度の高い領域がくびれて分かれながら増えていく.

と  $b$  の値によって様々に変わる.  $X$  と  $Y$  が振動してリミットサイクルを描く例を図 4 に示した.

実際には物質の拡散があるので, 反応系の各部分が物質拡散を介して相互に影響し合う. その効果は反応拡散方程式の拡散項で表される. 拡散の結果として, 系全体にわたる物質濃度の複雑な時空間パターン—散逸構造—が発生する. 散逸構造の形状は系のパラメータにより様々に変わる. 二次元のプリュセレータ反応系に発生する散逸構造の一例を図 5 に示した. ここでは, 中間生成物の集団が初期物質 (食物) を摂取して最終生成物 (老廃物) に変えながら, そのとき得られるエネルギーを使って自分の形態をつくり, 次第に成長し, 秩序をもって自己組織化していく.

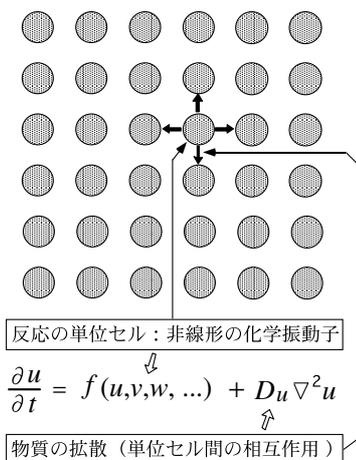


図7 反応拡散系のモデル. 化学振動子の集合体であり、それぞれの振動子は二つ以上の変数をもつ。各振動子は物質拡散を介して相互に影響を及ぼし合う。

一方、図3(b)の散逸構造は別種の反応拡散系—グレイスコット反応系と呼ばれるもの—が示す自己複製ダイナミクスの例である。プリユセレータ反応系と同じく二つの濃度変数がある。その一方の変数の時間変化を図6に示す。細胞の分裂増殖を連想させるような振る舞いである。生命誕生に先立って、原始海洋の中で蛋白質の集団がこのようなことを繰り返していたのかもしれない。自己複製ダイナミクスを生じる反応拡散系は他にもいくつか知られている。反応拡散系の現象の中でも面白いものの一つである。

(付記)ただし、これによって実際の細胞の分裂増殖メカニズムが説明できる、というわけではない。反応拡散系の非線形科学はまだ初歩的な段階にあり、生命の本質を解き明かすには到っていない。ただ生命現象をとらえるアプローチとして反応拡散系の非線形科学が有力な手法であることの一部をよく表した例といえる。

#### 4. 反応拡散系の電子デバイス化

反応拡散系は多くの単位セル—化学振動子が集合した反応場として近似モデル化できる(図7)。各セルは微小な空間領域内の化学反応に対応する非線形振動子である。近接する振動子どうしは物質拡散を介して相互に影響し共鳴や引き込みを生じる。反応拡散系は相互結合した非線形振動子の集合体であり、系全体として複雑なダイナミクス—形態

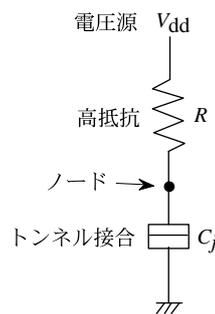


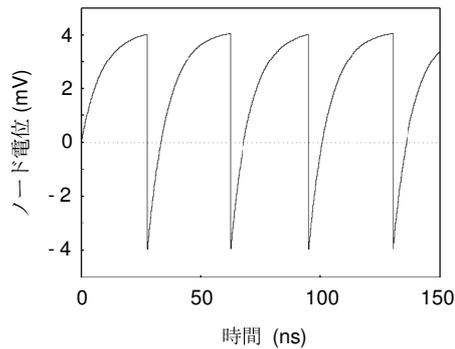
図8 単電子トンネル振動回路. 電圧源  $V_{dd}$ , 高抵抗  $R$ , トンネル接合  $C_j$  を直列接続したもの. 高抵抗とトンネル接合の接続点をノードという. この回路の変数はノードの電荷量(したがってノード電位)である。

形成や自己組織化などの時空間パターン—を生み出す。

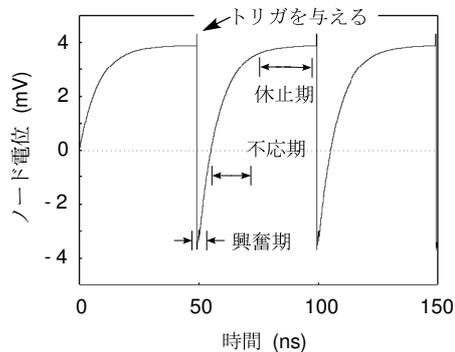
反応拡散系を電子デバイスで実現するためには以下のアプローチをとればよい。すなわち、まず多数の非線形振動子を用意して配列する。次に、近接する振動子の間に「拡散現象」と類似の相互作用が生じるような工夫を設ける。この非線形振動子をCMOS回路やpnpn素子でつくれば電子的な反応拡散系を構成することができる。<sup>7-9)</sup>しかし、これら既存のデバイスは面積が大きいので、化学的な反応拡散系に匹敵する多数個の振動子を集積することが難しい。そこで、量子ナノ構造による単電子デバイスの利用を考える。次章で述べるように、微細な量子ドットとトンネル接合で構成される単電子デバイスは、それだけで非線形振動子として動作する。そのため複雑な回路構成を必要とせず、容易に高い集積度を得ることができる。

#### 5. 単電子回路による非線形振動子

単電子回路とは、電子ひとつ一つの動きを制御して機能を出すように構成された電子回路である。<sup>10,11)</sup> トンネル接合を使用し、クーロンブロッケードという物理現象を利用して電子の動きを制御する。単電子回路を用いるとCMOS LSIよりはるかに大規模・極低消費電力の集積回路を構成できる可能性がある。クーロンブロッケード現象を発現させるためには、回路の容量を小さい値(数十 aF以下)にしなければならない。そのため回路要素の



(a)



(b)

図 9 単電子トンネル振動回路の非線形振動. 数値シミュレーション: (a) 振動モード. 連続した弛張振動を生じる. 回路パラメータは  $V_{dd} = 4.2$  mV,  $R = 400$  M $\Omega$ ,  $C_j = 20$  aF, トンネル抵抗 = 1 M $\Omega$ ; (b) 興奮モード. トリガが加わったとき 1 回だけ振動する. 興奮期, 不応期, 休止期がある. 回路パラメータは  $V_{dd} = 3.8$  mV,  $R = 400$  M $\Omega$ ,  $C_j = 20$  aF, トンネル抵抗 = 1 M $\Omega$ .

トンネル接合とキャパシタをいずれも微小寸法 (数十 nm 以下) につくる必要がある. このような微細加工も最近のナノテクノロジーの進歩により可能となってきた. 現在では, 単電子回路の論理ゲートやメモリセルなど単電子 LSI に向けた要素デバイスがつくられるようになっている.

単電子回路の最も簡単なものは図 8 に示す構成である (単電子トンネル振動回路と呼ばれる). この回路はこれだけで非線形ダイナミクスを生じる. そのダイナミクスは電源電圧の値  $V_{dd}$  によって「振動モード」と「興奮モード」に分かれる. トンネル接合の容量を  $C_j$ , 電荷素量を  $e$  として, 電源電圧がしきい値 ( $e/(2C_j)$ ) より大きいときは振動モード

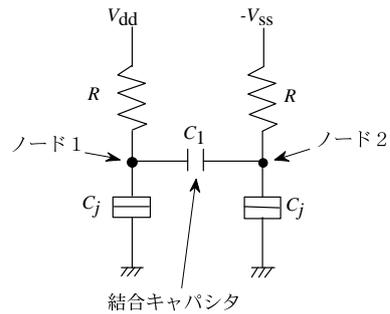


図 10 二つの単電子トンネル振動回路を組み合わせた非線形振動子. この振動子の変数は 2 個, つまりノード 1 とノード 2 の電荷 (または電位) である.

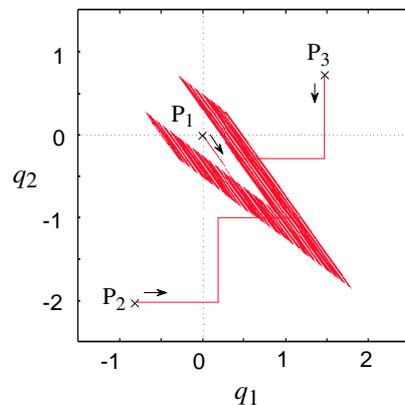


図 11 単電子の非線形振動子が描く矢じり形アトラクタの例. ノード 1 の電荷  $q_1$  とノード 2 の電荷  $q_2$  の非線形振動を図示したもの. ノード電荷は電荷素量で規格化してある. 図中の  $P_1, P_2, P_3$  のどの点から出発しても必ずアトラクタに落ち込む.

となる. すなわち, トンネル接合を通した電子移動 (電子トンネル) が連続的に生じてノードの電荷量が変化し, 自励的な非線形振動を生じる. したがってノードの電位が図 9 (a) のように変化する. 振動波形の不連続部は電子トンネル現象のために生じる.

一方, 電源電圧がしきい値 ( $e/(2C_j)$ ) より小さいときは図 9 (b) のような興奮モードの状態になる. このとき外部擾乱がなければ回路は安定状態に落ち着き, ノード電位は電源電圧に等しくなる (休止期). 外からノードに電圧擾乱 (トリガ) が加わると 1 回だけ電子トンネルが発生し (興奮期), それから再び安定状態 (休止期) に戻る. なお, 電子

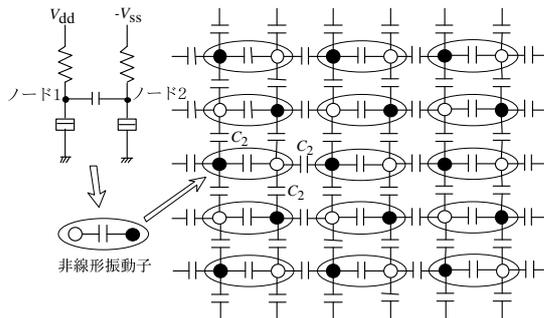


図 12 単電子回路による二次元反応拡散系. 各振動子の二つのノードを隣接する振動子のノードに結合容量  $C_2$  で連結する.

トンネルが起きた後しばらくはノードの電位が低い値になっているので, そのとき多少の電圧擾乱がノードに加わっても再度の電子トンネルは起こらない. そのため, 興奮期と休止期の間には外部擾乱に感応しない期間 (不応期) が生じる.

この振動回路を用いると反応拡散系の非線形振動子をつくることができる. すなわち, 電源電圧の大きさと極性が異なる二つの振動回路を組み合わせさせてキャパシタ  $C_1$  で結合し, 図 10 のような振動子をつくる. そうすると, 一方の接合の電子トンネルで生じたノード電位変化が他方の接合の電子トンネルを誘起して引込み現象を生じるようになる. この振動子の変数はノード 1 とノード 2 の電荷 (または電位) である. そのダイナミクスはパラメータによって様々に変わり, 単体の単電子トンネル振動回路と同じく振動モードと興奮モードがある. 二つの変数が振動する場合の例を図 11 に示した. この振動子のノード電荷は不連続的に変化する. したがってダイナミクスを簡単な速度方程式で記述することはできず, 解析には数値シミュレーションが必要となる. 図 11 の特性は第 3 章の図 4 に対応するものであるが, 不連続特性を反映してかなり趣の異なる様相を呈している.

## 6. 単電子回路による反応拡散系

この非線形振動子を多数用意してマトリクス状に連結することにより, 二次元の反応拡散系に似たシステムをつくることができる.<sup>12, 13)</sup> その構造を図 12 に示す. 各々の振動子のノードを隣接する振

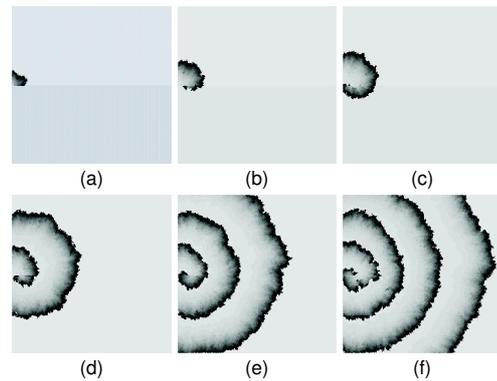


図 13 単電子の反応拡散系に発生する螺旋パターン.  $200 \times 100$  個の振動子からなる系の数値シミュレーション結果. 各振動子のノード 1 の電位を濃淡表現したものの. 文献<sup>12)</sup>を参照: (a) 左端中央付近の振動子にトリガを与えて電子トンネルを発生させると, 電子トンネル現象が時間遅れをもって周囲に伝搬を始める. そのとき振動子のノード電位に揺らぎを与え, 伝搬パターンを切り欠いて端点を形成する; (b) ~ (f) そのまま放置すると自発的にラセンパターンが形成され広がっていく. 電子トンネルが生じた後しばらくノード電位は低くなっており, それが図では暗色で示されている.

動子 4 個のノードに結合容量  $C$  で連結する. こうすると, 一つの振動子で電子トンネルが生じたとき, その振動子ノードの電位変化が結合容量を介して周囲に伝搬し, 隣接振動子の電子トンネルを誘発する. ここで電子のトンネル現象には「トンネル待ち時間」という時間遅れの要素があるので, 隣接振動子の電子トンネルはある時間を経た後にはじめて発生する. 電子トンネルが時間遅れを伴って周りに伝わっていくという動きは拡散現象に類似している. すなわち図 12 の構造は, 非線形振動子を「拡散的」に結合したものといえる. そして, 回路パラメータ (接合容量, 抵抗値, 結合容量) に応じて多様な散逸構造—時間・空間的に変化するノード電位の二次元パターン—が現れる.

一例として, 先に挙げた図 3 (b) と類似するラセンパターンの発生を図 13 に示す. 回路パラメータを変えることで図 3 (a) のような自己複製パターンを発生させることもできる. このようにして, 化学的な反応拡散系に類似したシステムを LSI 上に構成することができる.

## 7. おわりに

以上に述べた反応拡散 LSI をさらに高度なものに改良して新しい情報処理ハードウェアをつくるのが最終の目的である。そのために克服すべき課題が二つある。その第一は製作プロセス技術である。単電子回路ではトンネル接合やキャパシタなどの回路要素を数十 nm 以下の微小寸法でつくらなければならない。数個の振動子ならともかく、反応拡散 LSI に必要な数万～数十万の振動子をチップ上に集積することは現在の技術レベルではまだ難しい。しかしナノテク技術の進展状況からみて、この問題は近い将来に解決されるものと思う。たとえばチップ上に数十 nm ピッチで微細トンネル接合やキャパシタを集積配列するプロセスなどの開発が進められており、これは反応拡散 LSI の製作に流用できるものである。

克服すべき課題の第二は、反応拡散 LSI の良い応用分野を見つけることである。すなわち、反応拡散 LSI でなくてはならない情報処理の仕事を探したい。これが簡単なようでなかなか難しい。生物の情報処理を手本として LSI を開発するとき、普通は改めて応用分野と使用目的を考え出す必要はない。たとえば人間が持っている認識や判断の機能を LSI で模擬しようというときは、認識や判断そのものが LSI の使用目的である。眼や耳の機能を模倣したセンサ LSI など使用目的は初めからハッキリしている。しかし反応拡散 LSI の場合は話が違ってくる。これは「生物が生き生きしていること」の一端を模倣したものであり、人間に直接役立つ機能を模倣したものではない。したがって、反応拡散 LSI の動作から人間に役立つ機能を引き出すには相当な発想と工夫を必要とする。生物のもつ自己組織化やホメオスタシスの機能を模倣した柔軟な制御システムの構築などに応用分野があると思うが、具体的な着想を考えつくには到らない。読者の方々からアイデアをいただければ幸いである。

## 参考文献

- 1) [http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/nougaku/nougaku\\_ouyou.html](http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/nougaku/nougaku_ouyou.html)
- 2) Winfree, A. T. and Strogatz, S. H. (1984) : Organizing centers for three-dimensional chemical waves, *Nature*, Vol. 311, pp.611-615
- 3) Nicolis, G. and Prigogine, I. (1977) : Self-organization in nonequilibrium systems—from dis-

sipative structures to order through fluctuations. John Wiley & Sons (邦訳:「散逸構造—自己秩序形成の物理学的基礎」, 小島 陽之助, 相沢 洋二訳, 東京: 岩波書店 (1980))

- 4) Haken, H. (1978) : *Synergetics—an introduction, nonequilibrium phase transition and self-organization in physics, chemistry and biology.* Springer-Verlag (邦訳:「協同現象の数理—物理・生物・化学的系における自律形成」, 牧島 邦夫, 小森尚志訳, 東京: 東海大学出版 (1980))
- 5) 吉川 研一 (1992) : 非線形科学—分子集合体のリズムとかたち, 東京: 学会出版センター
- 6) 三池 秀敏, 森 義仁, 山口 智彦 (1997) : 非平衡系の科学 III—反応拡散系のダイナミクス, 東京: 講談社
- 7) 浅井 哲也 (2001) : 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—, *電気学会誌*, Vol. 121, No. 4, pp. 253-257
- 8) Asai, T., Nishimiya, Y. and Amemiya, Y. (2001) : A novel reaction-diffusion system based on minority-carrier transport in solid-state CMOS devices. *Proceedings of the International Semiconductor Research Symposium, Washington DC*, pp. 141-144
- 9) Daikoku, T., Asai, T. and Amemiya, Y. (2002) : An analog CMOS circuit implementing Turing's reaction-diffusion model. *Proceedings of 2002 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Xi'an*, pp. 809-812
- 10) Gravert, H. and Devoret, M. H. (1992) : *Single Charge Tunneling — Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures.* New York: Plenum
- 11) 春山 純志 (2002) : 単一電子トンネリング概論—量子力学とナノテクノロジー, 東京: コロナ社
- 12) 大矢 剛嗣, 上野 友邦, 浅井 哲也, 雨宮 好仁 (2003) : 量子ドット集積体による反応拡散系, *電子情報通信学会技報*, Vol. 102, No. 638, pp. 7-12
- 13) Oya, T., Ueno, T., Asai, T. and Amemiya, Y. (2003) : Reaction-diffusion systems using single-electron oscillators. *Proceedings of 2003 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto*, 6-02