

生命ダイナミクスと次世代集積回路

Novel integrated circuits imitating the dynamics of life

雨宮好仁

Yoshihito Amemiya

北海道大学 工学部 電子工学科

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

email: amemiya@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

要旨

次世代の集積回路-LSIに向けた先端テーマの一つは「生命ダイナミクスの一端を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」ということである。その第一歩として、ここでは反応拡散系---化学的な複雑系---をLSIで電子的に模倣することを考える。

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。そこでは多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、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。自然界には多くの反応拡散系が存在し、時間的・空間的な秩序とリズムをもった多種多様の散逸構造を生み出している。生命そのものが地球という反応拡散系の生み出した散逸構造である、という説も提唱されるようになった。

反応拡散系は非線形な化学振動子の集合体として近似モデル化できることが知られている。集合した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。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。大規模な反応拡散LSIを構成するためには、集積規模を大きくできる量子ナノデバイスを使う必要がある。ここでは量子ナノデバイスの一種、単電子デバイスの使用を考えた。単電子デバイスはトンネル効果にもとづく非線形振動を簡単な構成で発生する。化学振動子のかわりにこの単電子トンネル振動子を使用し、そ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した。この反応拡散系LSIを発展させることにより、電子的な「疑似生命体」を創り出すことができるかもしれない。

1. 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[3-6]。

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---物質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、という期待が高まっている。生命物理学の分野では「生命は地球という反応拡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。

反応拡散系の挙動(物質濃度の時空間パターン)

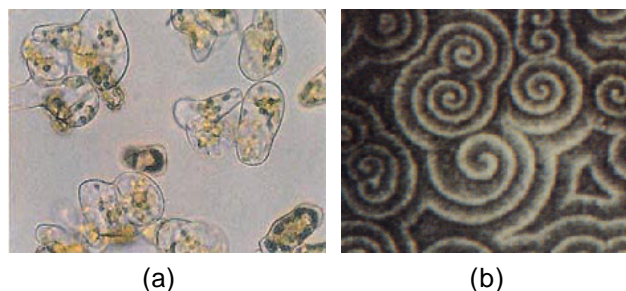


図1 生命現象が示す生き生きとした挙動の例

- (a) アスパラガスの細胞が分裂増殖する様子 [1],
- (b) 細胞性粘菌が集合して移動体になるときに描くラセンパターン [2]。

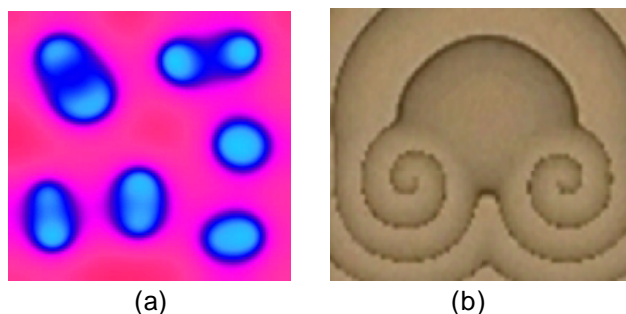


図2 反応拡散系が示すダイナミクスの例。二次元の系で物質濃度を濃淡表現したもの。

- (a) グレイスコット反応系が描く自己複製パターン,
- (b) ブリュセレータ反応系が描くラセンパターン。

は反応拡散方程式と呼ばれる連立偏微分方程式で表される。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変数系における例を図2に示した。図1との類似性に注目されたい。

(付記)

図1と図2の類似性について。図1の生命現象---とくに細胞の分裂増殖---のメカニズムが図2のモデルで直ちに説明できる、と述べているわけではない。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端をよく表した例といえる。

2. 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。これを図3に示す。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。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電子デバイス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。しかし、既存の電子デバイスは面積が大きいのので、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使用を考える。次章で述べるように、単電子デバイスの物理現象を利用すると簡単に非線形振動子をつくることことができる。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。

3. 単電子回路の非線形振動子

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[7, 8]。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トンネル接合とキャパシタをいずれも微小寸法(数十 nm

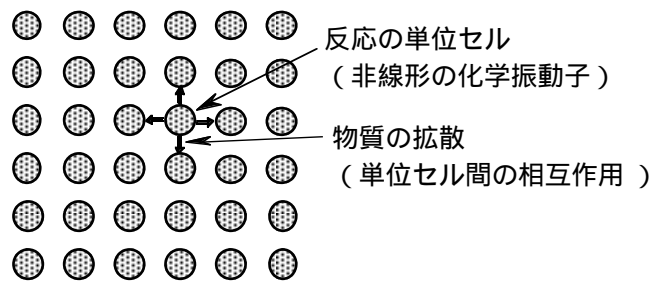


図3 反応拡散系のモデル。多数の化学振動子が集合したものである。化学振動子は物質拡散を介して相互作用を行う。

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けられるようになっている。

最も簡単な単電子回路は図4に示すものである。クーロンブロッケード現象が生じる条件下において、この回路はこれだけで非線形振動を生じる。その動作はバイアス電圧 V_{dd} の値によって自励振動と単安定振動に分かれる。バイアス電圧がしきい値---トンネル接合の容量で決まる値---より大きいときは自励振動の状態となる。すなわち、トンネル接合を通じた電子移動(電子トンネル)が連続的に生じてノードの電荷量が増加し、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5(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、バイアス電圧がしきい値より小さいときは図5(b)のような単安定振動の状態になる。

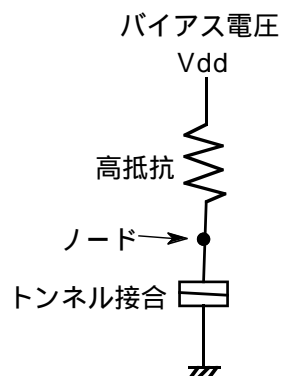


図4 単電子回路の振動子。ノードの電位が非線形振動を示す。バイアス電圧の値によって、自励振動と単安定振動のいずれかの動作モードになる。

このときは外部擾乱がなければ回路は安定状態に落ち着き、ノード電位はバイアス電圧に等しくなる（休止期）。外部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、電子トンネルが起きた後しばらくはノードの電位が低くなっているため、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。

4. 単電子回路による反応拡散 L S I

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---反応拡散 L S I---をつくることができる。その構造を図6に示す。各々の振動子のノードを隣接する振動子4個のノードに結合容量Cで連結する。そのとき隣接振動子の間ではバイアス電圧が逆極性となるように設定する。なお場合に応じて自励振動子と単安定振動子を使い分ける。

このように振動子を結合させると、一つの振動子で電子トンネルが生じたとき、その振動子のノード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6の構造は、非線形振動子を「拡散的」に結合したものと見える。そして、回路パラメータ（接合容量, 抵抗値, バイアス電圧, 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2(b)に類似するラセンパターンの発生を図7に示す。回路パラメータを変えることで、図2(a)のような自己複製パターン

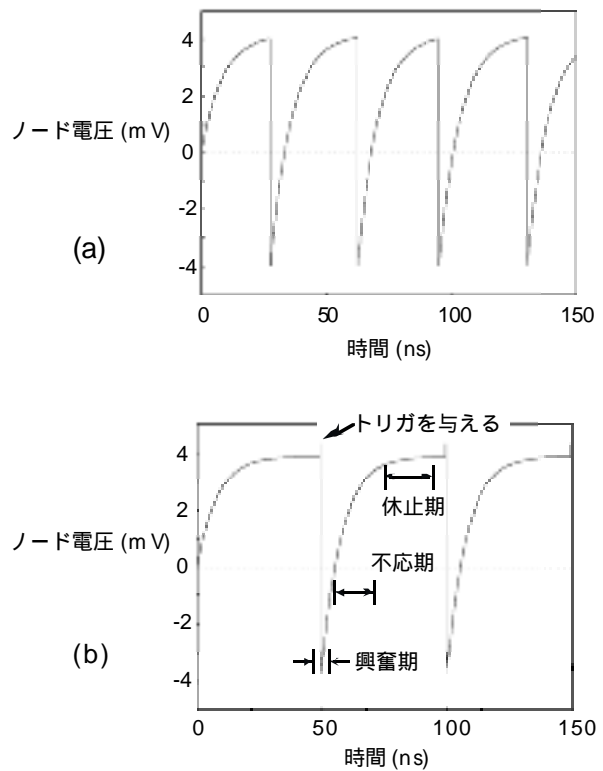


図5 単電子振動子の非線形振動。数値シミュレーション。(a) 自励振動, および (b) 単安定振動。回路パラメータは以下のとおり: トンネル接合の容量 = 20 aF, トンネル抵抗 = 1 M Ω , 高抵抗の値 = 400 M Ω , バイアス電圧は自励振動のとき $V_{dd} = 4.2$ mV, 単安定振動のときは $V_{dd} = 3.8$ mV。

(付記: 波形の立ち上がり部分は連続曲線。印刷上の都合で刻みがあるように見えている。立ち下がり部分は不連続であり、これは電子トンネルの発生に対応する。)

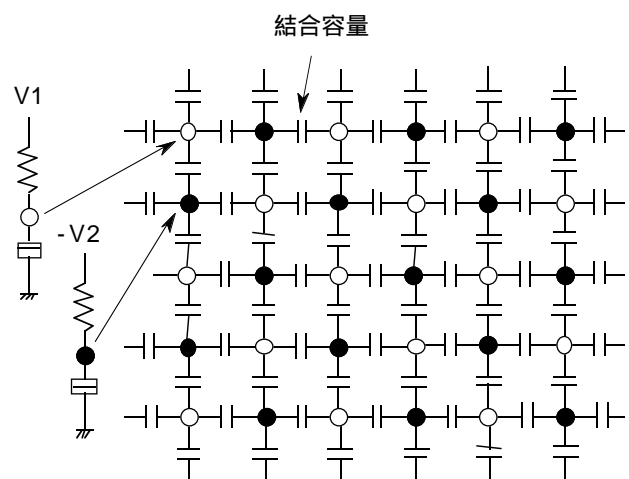


図6 単電子振動子で構成した二次元の反応拡散系。バイアス電圧の極性が異なる2種類の振動子を交互に配列し、それらのノード（白丸と黒丸）を結合容量で結んでネットワーク構造とする。

を発生させることもできる。その例を図8に示す。
 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。

この研究の最終の目的は、上記の反応拡散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創ることにある。まだ具体的な着想を考えつくには到らないが、生物のもつ自己組織化やホメオスターシスの機能を模擬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考えている。

(文献)

- [1] http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/nougaku/nougaku_ouyou.html
- [2] A. T. Winfree and S. H. Strogatz, "Organizing centers for three-dimensional chemical waves," Nature, Vol. 311, pp.611-615 (1984).
- [3] G. Nicolis and I. Prigogine, Self-organization in nonequilibrium systems---from dissipative structures to order through fluctuations, John Wiley & Sons (1977) (訳書「散逸構造---自己秩序形成の物理学的基礎」岩波書店)。
- [4] H. Haken, Synergetics---an introduction, nonequilibrium phase transition and self-organization in physics, chemistry and biology, Springer-Verlag (1978) (訳書「協同現象の数理---物理・生物・化学的系における自律形成」東海大学出版)。
- [5] 吉川研一「非線形科学---分子集合体のリズムとカタチ」学会出版センター (1992).
- [6] 三池秀敏, 森義仁, 山口智彦「非平衡系の科学 III ---反応拡散系のダイナミクス」講談社 (1997).
- [7] H. Gravert and M. H. Devoret, Single Charge Tunneling --- Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures, New York: Plenum (1992).
- [8] 春山純志「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」コロナ社 (1992).

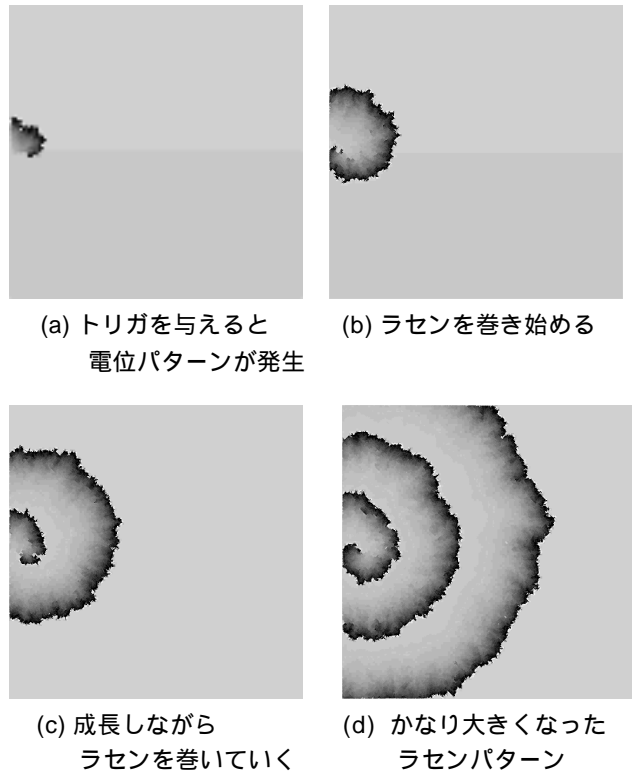


図7 単電子の反応拡散系に発生するラセンパターン。
 200×200個の単安定振動子からなる系の数値シミュレーション結果。ノード電位がつくる二次元パターンを濃淡表現したもの。明色が高電位、暗色が低電位。

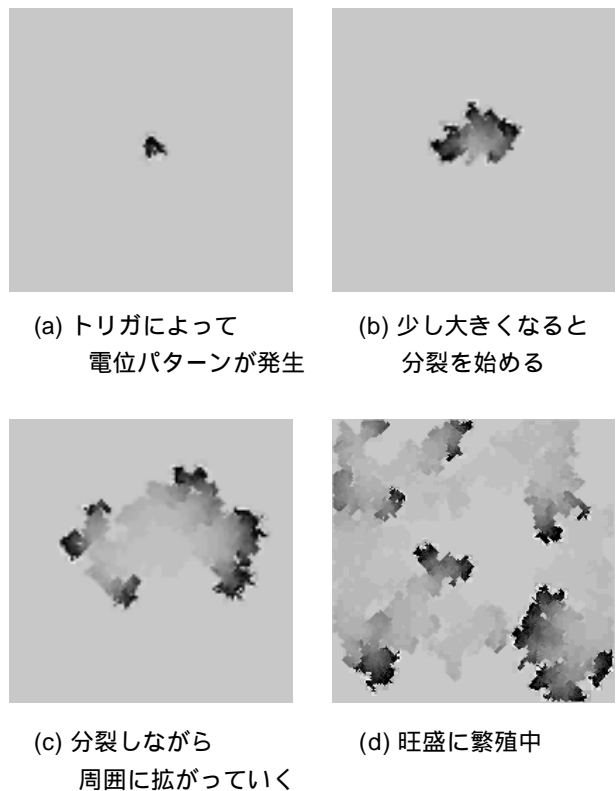


図8 単電子の反応拡散系に発生する分裂増殖パターン。
 200×200単安定振動子の系の数値シミュレーション。