

集積回路に宿る生命 ——電子デバイスで生命体をつくるには——

Life on Integrated Circuits :
How to Create Living Things with Electron Devices

雨宮好仁

Abstract

「集積回路の上で電子的な生命体をつくれないうだろうか？」このような夢は反応拡散系を手がかりとして実現できるかもしれない。反応拡散系は化学反応と物質拡散が混ざり合っている複雑系であり、生き生きした生命のダイナミクスを生み出す舞台となっている。その反応拡散系を量子ナノ集積体で模倣すると「電子的な生命現象の芽生え」と呼べるものが現れる。この現象について、シミュレーション結果をもとに解説する。

キーワード：電子デバイス，集積回路，生命，反応拡散系，単電子

1. はじめに

「生命ダイナミクス的一端を集積回路（LSI）の上で模倣することにより新しい電子システムをつくり出す」という試みを紹介する。

生物は自然がつくり出した高度な集積システムであり、既存のLSIではとうてい及ばない優れた働きを見せる。そこで、生物の動作を電子デバイスで模倣する研究が行われるようになった。生体神経ネットワークをなぞらえたニューラルLSIや生物の視聴覚をまねたセンサLSIの開発がその例である。

ここでは生物の模倣を更に進めて、「生きている」ということ自体をLSIでまねようとする。「生きもの」が「もの」と違うところは、成長や増殖など生命に特有の生き生きしたダイナミクスにある。このような「生命らしさ」をLSIの上で電子的につくり出したい。

これは難しいように見えるが一つの手がかりがある。それが「反応拡散系」である。反応拡散系は化学反応と物質拡散が混ざり合った非平衡系であり、自然界や生物体で生じる様々な複雑現象の舞台となっている。ダイナミックな生命現象の一端は反応拡散系の動作で説明できることが知られている。また単純で無機的な反応拡散系でさえも生命活動に似た現象を生じることがある。この反応拡散系をLSIで電子的に模倣できればよい。

それでは反応拡散系をどのように電子化したらよいだろうか。反応拡散系は多数の化学反応セルが結合した場——すなわち化学振動子の集合体——とみなしてよいことが分かっている。したがって、化学振動子を電子デバイスの振動子で置き換えれば、反応拡散系の電子版をつくることができる。ただし普通のデバイスでは集積限界や消費電力の問題があるので、単電子素子などの量子デバイスが必要となる。したがって、量子ナノ集積体はその舞台となるであろう。これらのことを以下で順に説明する。そのような反応拡散系に発生する生き生きしたダイナミクスのシミュレーション結果も併せて示す。

2. 生命現象と反応拡散系

2.1 生命のダイナミクスを生み出すもの

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——の進歩には著しいものがあり、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。しかしDNAやたん白質はいわば生命体を組み立てる部品であり、それだけで生命の全体像が尽くされるわけではない。生命体の際立った特徴は、成長・増殖・形態づくりなどの生き生きとしたダイナミクスを生み出すことにある（図1^{(1),(2)}）。このダイナミクスがすなわち生命、といってもよい。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となる。そのような観点から反応拡散系が研究されるようになった。

反応拡散系は化学反応と物質拡散が混ざり合った化学的な複雑系である。そこでは複数の物質の間で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強い

雨宮好仁 正員 北海道大学大学院情報科学研究科情報エレクトロニクス専攻
E-mail amemiya@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp
Yoshihito AMEMIYA, Member (Department of Electrical Engineering, Hokkaido University, Sapporo-shi, 060-0814 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.92 No.12 pp.1041-1045 2009年12月
©電子情報通信学会 2009

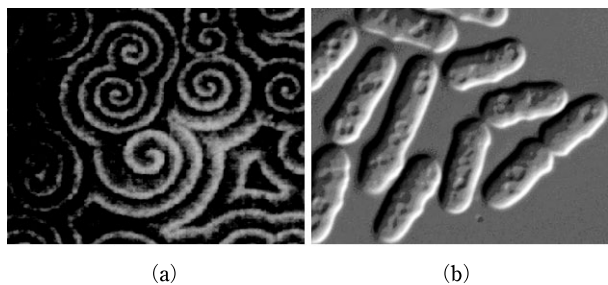


図1 生命現象における生き生きとした挙動の例 (a)細胞性細菌の集団が集合して移動体になるとき描くらせん模様(文献(1)から引用). (b)分裂酵母の細胞が増殖する様子(文献(2)から引用).

非線形性を示し、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。反応拡散系は珍しいものではなく、自然界や生物体の至る所に存在している。

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、物質の濃度パターンが均一ではなく、時間的・空間的な秩序を持つ構造をつくる。これを散逸構造という。系のパラメータに応じていろいろな散逸構造が現れる。生命現象に現れる秩序・リズム・自己組織化などは、反応拡散系が生み出す散逸構造が一因となっている。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」と考える人もいる(反応拡散系と散逸構造については文献(3)~(7)を参照)。

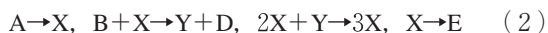
反応拡散系の動作(物質濃度の時空間パターン)は次の連立偏微分方程式で表される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = f_i(u_1, u_2, u_3, \dots) + D_i \nabla^2 u_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

これを反応拡散方程式という。 i は物質の種類、変数 u_i は物質の濃度、 D_i は拡散定数、 $f_i(u_1, u_2, u_3, \dots)$ は反応による物質の生成を表す非線形関数、 $D_i \nabla^2 u_i$ は拡散による物質の移動、 t は時間を示す。変数が多いほど散逸構造は複雑になる。しかし変数が少ない簡単な反応拡散系においても、生命活動に似た散逸構造が生じることがある。二変数系の例を図2に示した。

2.2 反応拡散系がつくる散逸構造

2.1の図2についてもう少し説明する。図2(a)の散逸構造は次の一連の反応によって生じる(ブリュセレータ反応系という)。



ここでは初期物質 A と B が反応して最終生成物 D と E を生じる。しかしここでの主役は、実は二つの中間生成物 X と Y である。その濃度 X と Y は次の反応拡散方程式に従って変化する。

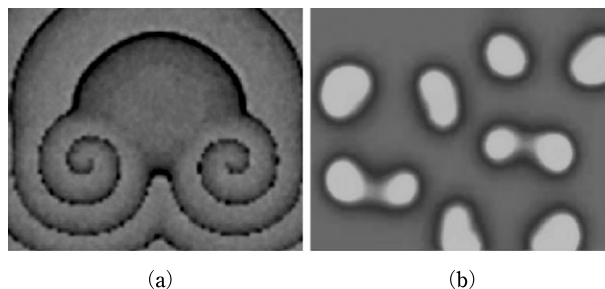


図2 反応拡散系が示す散逸構造の例 二次元系で物質濃度を濃淡表示したもの。(a)ブリュセレータ反応系に生じるらせんパターン。(b)グレイスコット反応系に発生する自己複製パターン。

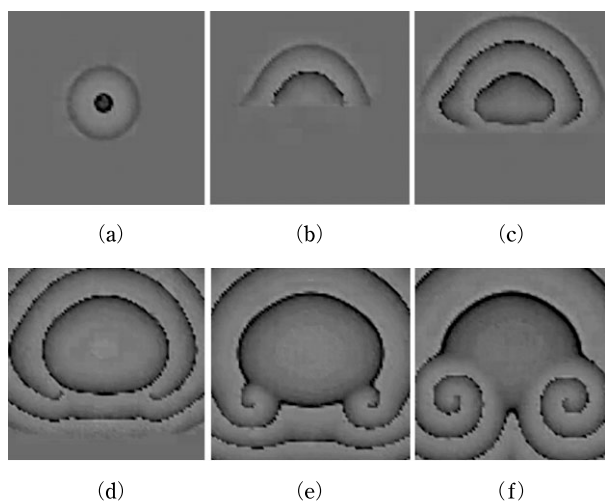


図3 ブリュセレータ反応系のらせん散逸構造 二次元系の数値シミュレーション。一つの間生成物の濃度を濃淡表示したもの。(a)刺激により同心円の濃度パターンが発生。(b)下半分をかき混ぜて均一化しパターンを切り欠く。(c)~(f)そのまま放置するとぐるぐるを巻いた軟体動物のような形態が成長する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= (a - X - bX - X^2Y) + D_X \nabla^2 X, \\ \frac{\partial Y}{\partial t} &= (bX - X^2Y) + D_Y \nabla^2 Y. \end{aligned} \quad (3)$$

右辺の括弧内は式(1)の反応項 $f_i(u_1, u_2, u_3, \dots)$ に相当する。係数 a と b はパラメータである。各点の化学反応は物質の拡散を介して互いに影響する。その結果として、系全体にわたって秩序ある物質濃度パターン——散逸構造——が発生する。時間による変化を図3に示した。この現象を次のように考えてもよい。すなわち、中間生成物が初期物質(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、秩序を持って自己組織化していく。主人公はあくまでも中間生成物であり、反応拡散系そのものは単なる場にすぎない。培養皿とその中で繁殖する微生物のような関係といえる。

もう一つの例、図2(b)は別の反応拡散系——グレイスコット反応系と呼ばれるもの——に生じる散逸構造の例である。これにも二つの濃度変数 X と Y があって、次の反応拡散方程式に従う。

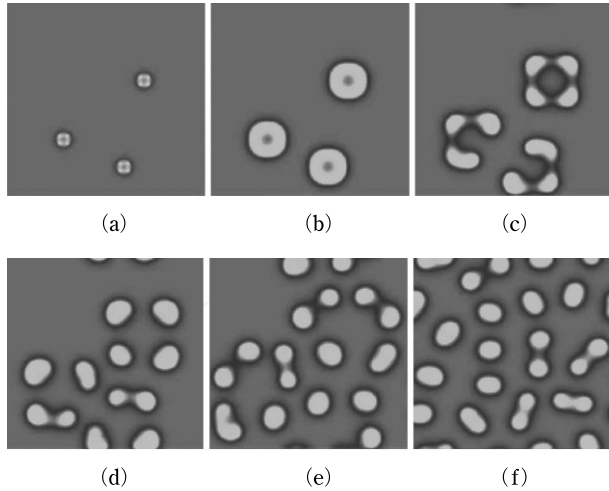


図4 グレイスコット反応拡散系の自己複製する散逸構造 二次元系の数値シミュレーション。一つの間生成物の濃度を濃淡表示したもの。(a)刺激により円形の濃度パターンが発生。(b)~(f)そのパターンが成長し、くびれて分かれながら増えていく。

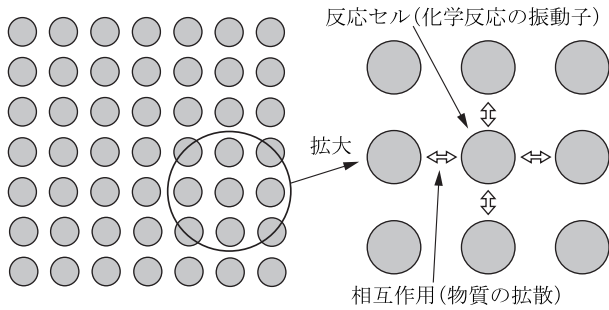


図5 反応拡散系の概念 微小な領域の化学反応(式(1)の右辺第一項)を表す化学振動子の集合体。各振動子は物質の拡散(式(1)の右辺第二項)を介して互いに影響する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= -XY^2 + c(1-X) + D_X \nabla^2 X, \\ \frac{\partial Y}{\partial t} &= XY^2 - (c+k)Y + D_Y \nabla^2 Y \end{aligned} \quad (4)$$

ここで c と k はパラメータである。時間による散逸構造の変化を図4に示す。細胞分裂のような振舞いが見られる。生命誕生に先立って、原始海洋の中でアミノ酸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。この自己複製ダイナミクスは反応拡散系の現象の中でも面白いものの一つである。(実をいえば、この現象は実際の細胞分裂とは関係がない。しかし生命現象をとらえる手段として反応拡散系が魅力的なことを示す例といえる。)

3. 量子ナノ集積体で反応拡散系をつくる

3.1 電子デバイスによる反応拡散系の構成

反応拡散系は多くの反応セル——化学振動子——が集まった反応場としてモデル化できる(図5)。各セルは微小な領域での化学反応——式(1)の $du_i/dt = f_i(u_1, u_2, u_3, \dots)$ ——を表す非線形の振動子である。近接する

振動子どうしは、物質の拡散により互いに作用して共鳴や引込みを生じる。つまり反応拡散系は非線形振動子の結合体であり、系全体として複雑なダイナミクスを生み出す。振動子の大きさは物質の濃度を均一と見てよい空間の大きさであり、液状の反応拡散系では数 μm 程度とされる。したがって、試験管の中の小さい反応拡散系でも、何百万という多数の振動子を考える必要がある。

反応拡散系を電子化するためには次のアプローチをとればよい。まず電子デバイスで「非線形振動の回路」をつくり、それを多数配列する。次に、近接する回路の間に「拡散現象と似ている相互作用」が生じるような工夫を設ける。しかし、普通のデバイスを使う限り、化学的な反応拡散系のような多数の振動子を集積することは難しい。

集積度の問題は、量子デバイスの一つ、単電子素子の使用で解決できそうである。単電子素子は、それだけで非線形の振動を発生する。そのため回路が単純となり、高い集積度が容易に得られる。これを使って反応拡散系を次のように構成する(詳しくは文献(8)を参照)。

3.2 単電子素子による非線形振動子

単電子素子は微小なトンネル接合からなる電子デバイスである。クーロンブロッケードという現象を利用すると、この素子を使って電子を一つ一つ制御しながら輸送できる。接合の容量を数 aF 以下と小さくしなければならないが、最近のナノテクノロジーの進歩により製作できるようになった。

単電子素子を使うと非線形振動の回路を簡単につくることができる。例えば、図6(a)のように、単一のトンネル接合と多重のトンネル接合を直列してバイアス電圧につなぐ。これだけで、クーロンブロッケードが働く低

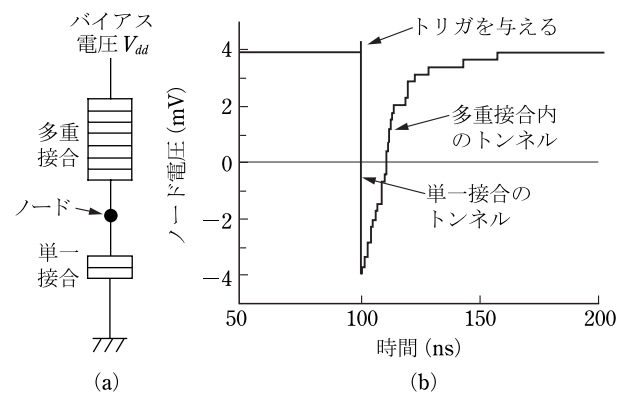


図6 単電子トンネル素子と非線形振動 (a)振動子の回路。単一のトンネル接合と多重のトンネル接合を直列してバイアス電圧を加える。(b)単安定振動の波形。ノード電位の時間変化をシミュレーションしたもの。単一接合の電子トンネルでノード電位が正から負に不連続変化。そのあと多重接合内のトンネルでゆっくり正に戻る。(回路パラメータ：単一接合の容量 = 10aF 及びトンネルコンダクタンス = $1\mu\text{S}$ 、多重接合の各接合の容量 = 300aF 及び各接合のトンネルコンダクタンス = $0.05\mu\text{S}$ 、多重接合の直列数 = 30、バイアス電圧 = 7.8mV)。

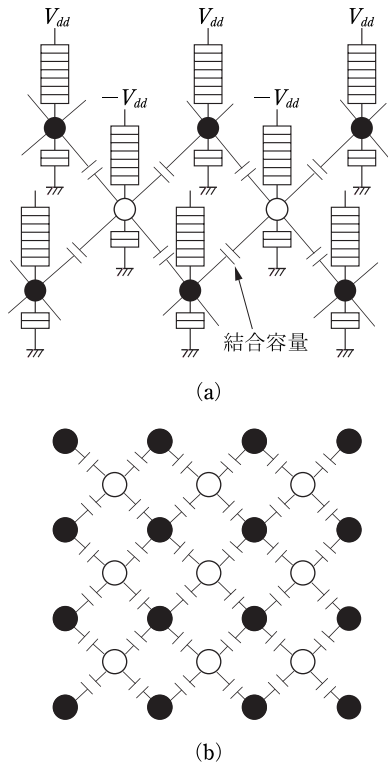


図7 電子的な反応拡散系 多数の単電子振動子を容量結合したもの。(a)振動子のネットワーク。(b)ノード部分の配列を示す平面図。主たる振動子は正バイアスの振動子(黒ノード)。負バイアスの振動子(白ノード)は結合のための仲介振動子。

温下では非線形振動を発生する。振動の変数はノードの電位である。この振動子には接合容量で決まるしきい値があり、それよりバイアス電圧が高いと自励振動、低いときは単安定振動を発生する。反応拡散系には単安定を用いる。その動作の例を図6(b)に示した。この振動には電子トンネルによる不連続の飛びがあり、かつトンネル待ち時間には確率ばらつきがある。そのためダイナミクス(式(1)の反応項に相当するもの)は解析的には表せない。

3.3 電子的な反応拡散系の構成

単電子振動子を図7のようにマトリックス状に配置して二次元の反応拡散系をつくる。各振動子どうしはノード間を容量で結合するが、そのとき仲介振動子を使って活性結合とする。一つの振動子で電子トンネルが発生するとノード電位が負になり、それが仲介振動子を介して隣の振動子の電子トンネルを誘起する。そのときトンネル待ち時間による遅れが発生して拡散現象のような効果が生じる。これは本当の拡散現象ではないから式(1)の右辺 $D_i \nabla^2 u_i$ のようには表せない。しかし拡散現象の代わりとして利用できる。

この反応拡散系では小さい振動子を高密度に集積するので、製作のときには自己形成的なプロセスが必要となる。一例として、結晶方位選択エピタキシャルプロセス

を用いたときのデバイス構造については文献(8)を参照されたい。実際のデバイスはまだできていないので、以下ではシミュレーションによる動作の予想を述べる。

4. 単電子の反応拡散系に生じる散逸構造

この電子的な反応拡散系においても、化学的な反応拡散系と同じく散逸構造が発生する。ただし、それは物質濃度のパターンではなく、二次元に並んだ振動子のノード電位によるパターンである。

外部からの刺激がなければ、この反応拡散系は安定である。並んだ振動子のノードはすべて同じ正電位で散逸構造は生じない。しかし振動子ノードの一つに電圧トリガを与えると、そこに電子トンネルが発生する。そのためノード電位が変化して隣の振動子の電子トンネルを誘発する。この現象が周囲に波及し、巨視的な時空間秩序を持った負のノード電位パターン、すなわち散逸構造が生じる。系のパラメータに応じていろいろな散逸構造が現れる。シミュレーションで見られた例を以下に示す。

図8の散逸構造は、先の図3に似たらせんパターンを描く。図では、シミュレーション結果をもとに各振動子のノード電位を濃淡表示してある。この電子スピロヘータは負の電位からなり、自発的にとぐるを巻きながら成長していく。その原理は化学的な反応拡散系のらせんと似たものである。

図9に示す散逸構造は、先の図4のように分裂と増殖を行う。この散逸構造も負の電位からなり、成長と分裂を繰り返しながら広がっていく。こちらの方は化学的な反応拡散系と原理が異なるが、見かけの上では似たような様相を示す。

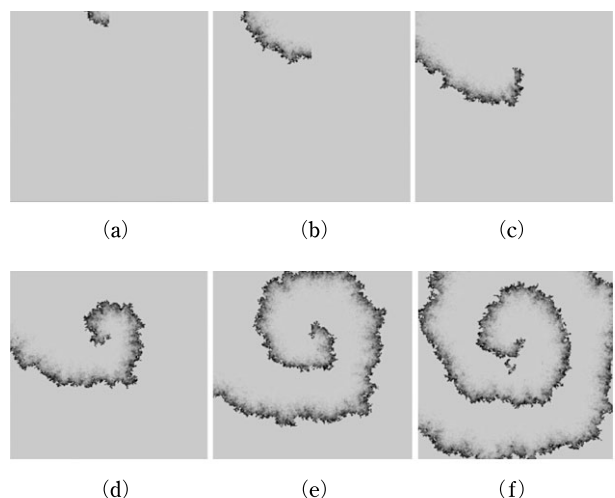


図8 単電子の反応拡散系に発生して成長するらせん状の散逸構造 *Spirochaeta electrica* 電圧トリガにより生まれて、自発的にらせんを巻きながら(a)~(f)のように成長する。201×201個の主振動子から成る系のシミュレーション。各振動子のノード電位を濃淡表示したもの(黒が負電位)。

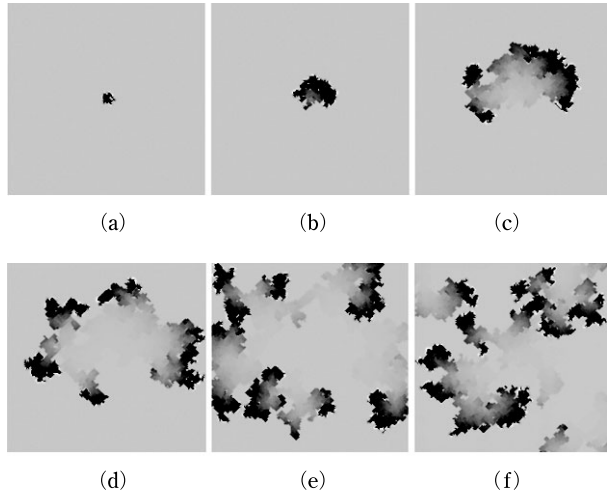


図9 単電子の反応拡散系に発生して増殖する分裂性の散逸構造 *Bacterium electricum* 電圧トリガにより生まれて(a)~(f)のように成長と分裂を繰り返しながら動き回る. 201×201個の主振動子から成る系のシミュレーション. 各振動子のノード電位を濃淡表示したもの(黒が負電位).

化学的な反応拡散系と同じように、この電子的な系でも主人公は散逸構造であり、反応拡散系そのものは単なる培養皿にすぎない。つまり図8や図9の現象を次のように考えることもできる。すなわち、この反応拡散系には負電位でできた電子微生物が住んでおり、振動子ノード上の正電荷を餌として成長し繁殖していく。

5. 今後の課題と多媒体量子システムへの道

この電子的な反応拡散系を改良して本当の「擬似生命体」をつくり出すにはどうしたらよいだろうか。そのためにはもっと複雑な散逸構造が必要であり、したがって非線形振動の変数をなるべく多くする必要がある。単電子の反応拡散系では変数はただ一つ、振動子のノード電圧であったが、この変数の種類をもっと増やしたい。

化学系ならば変数を増やすことは容易である。有機物には何十万もの種類があり、それらを変数の媒体として複雑な反応拡散系——生物体など——がつくられている。しかし電子的な反応拡散系では、変数の媒体として使えるものはそれほど多くない。その候補として、電子のほかにはフォトン、スピン、磁束量子、などが挙げられる。これらをなるべく利用しなくてはならない。

したがって、電子的な擬似生命体を生み出すためには、半導体ナノ構造の上で電子、フォトン、スピン、磁束量子が互いに作用し合う状況をつくる必要がある。このような集積システムを多媒体量子システムと呼ぶことにしよう。電子的な反応拡散系の次のステップは、この多媒体量子システムの開拓である。例えば北海道大学の量子集積エレクトロニクス研究センターでは、電子に加えてフォトンやスピンなどの情報担体を一緒に載せられる半導体ナノ構造の研究を進めている。このような先端プロセス技術は、電子的な反応拡散系を開発するための有力な手段となるであろう。

文 献

- (1) A.T. Winfree and S.H. Strogatz, "Organizing centers for three-dimensional chemical waves," *Nature*, vol.311, pp.611-615, 1984.
- (2) 理化学研究所 発生・再生科学総合研究センター
<http://www.cdb.riken.jp/jp/labtour/downloader/archive.html>
- (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, 1980).
- (4) H. Haken, *Synergetics—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, 1980).
- (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) B. Goodwin, *How the leopard changed its spots—the evolution of complexity*, Princeton University Press, 1994 (訳書, DNA だけで生命は解けない——場の生命論, Springer-Verlag, Tokyo, 1998).
- (8) T. Oya, T. Asai, T. Fukui, and Y. Amemiya, "Reaction-diffusion systems consisting of single-electron circuits," *International Journal of Unconventional Computing*, vol.1, no.2, pp. 177-194, 2005.

(平成 21 年 5 月 18 日受付 平成 21 年 6 月 14 日最終受付)



あめみや よしひと
雨宮 好仁 (正員)

昭 45 東工大・理工・電子卒. 昭 50 同大学院博士課程了. 同年日本電信電話公社 (現 NTT) 電気通信研究所, 昭 62 NTT LSI 研究所, 平 5 から北大教授, 現在に至る. 工博. CMOS デバイスや量子デバイスを用いた機能的な電子回路と LSI の開拓に従事.