

平成 23 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20360149

研究課題名 (和文) 多媒体量子ナノ集積デバイスの反応拡散ダイナミクス
を利用した情報処理システム研究課題名 (英文) Information-processing system using reaction-diffusion dynamics
in multi-medium quantum integrated circuits

研究代表者 雨宮 好仁 (AMEMIYA YOSHIHITO)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号 80250489

研究成果の概要 (和文)：本研究では生命現象の一端を担う反応拡散メカニズムを模倣する単電子集積システムの構成法を提案した。反応拡散系を電子化するために、多数の単電子トンネル振動子をマトリクス配置して容量結合した二次元ネットワークを設計した。動作シミュレーションによれば、この系には時空間秩序をもった負のノード電位パターン (電子的な散逸構造) が発生して成長・分裂・増殖など生命的な挙動を示した。よって、この系は電子的な疑似生命体を生み出す反応拡散系である、という結論を得た。

研究成果の概要 (英文)：We proposed a single-electron device that is analogous to the reaction-diffusion system, a chemical complex system producing various dynamic phenomena in the natural world. Our electrical reaction-diffusion device consists of a two-dimensional array of single-electron nonlinear oscillators that are combined with one another through capacitive coupling. Computer simulation revealed that the device produces animated spatiotemporal patterns of node voltages, e.g., a rotating spiral pattern similar to that of a colony of cellular slime molds and a dividing-and-multiplying pattern that reminds us of cell division.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2009年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：反応拡散 単電子 生命 散逸構造 電子デバイス

1. 研究開始当初の背景

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や生物の視覚をまねたセンサLSIの開発がその例である。さらに進めて生命の本質そのものをLSI上で実現できれば、それによって新しい信号処理システムの糸口をつかめるかもしれない。しかし、そのような学際的な研究は

これまでに例がなかった。

2. 研究の目的

本研究では、生物の模倣を押し進めて、「生きている」ということ自体をLSIでまねることを試みた。すなわち、生命の本質である成長・増殖・形態づくりなどの生き生きとしたダイナミクス---生命らしさ---をLSIの上で電子的につくり出すことを目的とした。

3. 研究の方法

生命ダイナミクスの電子化は難しいように見えるが、しかし一つの手掛かりがある。それは「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さまざまな複雑現象の舞台となっている。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・空間的な秩序をもつ構造をつくる。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。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図1のように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。

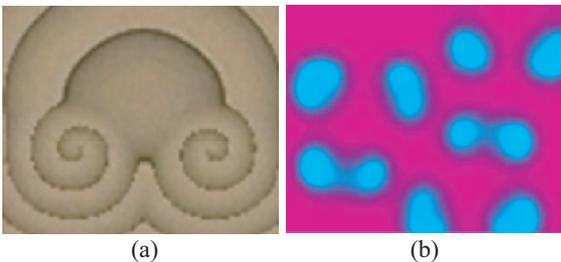


図1 反応拡散系が示す散逸構造の例。二次元系で物質濃度を濃淡表示したもの：(a) ブリュッセレータ反応系に生じるラセンパターン；(b) グレイスコット反応系に発生する自己複製パターン。

この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---と見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かえれば、反応拡散系の電子版をつくることのできる。ただし、小さい反応拡散系であっても何百万という多数の振動子を考える必要がある。そのため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。本研究では、単電子集積回路による反応拡散系を提案し、そこに生き生きとしたダイナミクス（擬似生命とも呼べるもの）が発生することをシミュレーションで示した。

4. 研究成果

化学的な反応拡散系が生む散逸構造のダイナミクス（物質濃度の秩序ある時空間パターン）は次の反応拡散方程式で表される。

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

ここで 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あらわす非線形関数、 $D_i \nabla^2 u_i$ は拡散による物質の移動、 t は時間を示す。

この反応拡散方程式に類似した動作を電子的に実現するため、以下のように単電子トンネル素子の集積ネットワークで反応拡散系をつくることを提案し、その剛作をシミュレーション解析した。

(1) 単電子トンネル素子の非線形振動

このネットワークの単位素子は、図2(a)のように単一トンネル接合と多重トンネル接合を直列してバイアス電圧を加えたものである。この素子はクーロンブロッケードが働く低温下で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2(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バラツキがある。そのためダイナミクス（化学的な反応拡散方程式の反応項に相当するもの）は解析的には表せない。

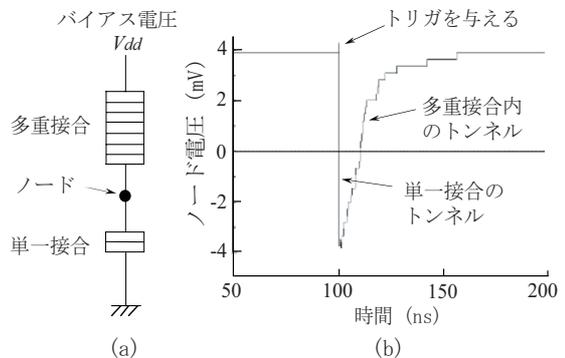


図2 単電子トンネル素子と非線形振動；(a) 振動子の回路。単一のトンネル接合と多重のトンネル接合を直列してバイアス電圧を加える；(b) 単安定振動の波形。ノード電

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 = 10 aF およびトンネルコンダクタンス = 1 mS, 多重接合の各接合の容量 = 300 aF および各接合のトンネルコンダクタンス = 0.05 mS, 多重接合の直列数 = 30, バイアス電圧 = 7.8 mV)。

(2) 単電子トンネル素子のネットワーク

この単電子トンネル振動子を図3のようにマトリ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化学的な反応拡散方程式の拡散項 $D_i \nabla^2 u_i$ 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。

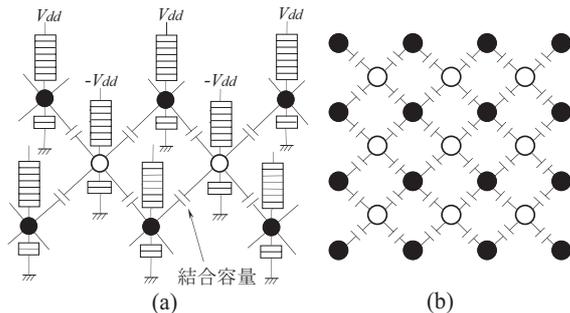


図3 電子的な反応拡散系。多数の単電子振動子を容量結合したもの：(a) 振動子のネットワーク；(b) ノード部分の配列を示す平面図。主たる振動子は正バイアスの振動子（黒ノード）。負バイアスの振動子（白ノード）は結合のための仲介振動子。

(3) ネットワーク動作のシミュレーション

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もった負のノード電位パターン、すなわち電子的な散逸構造が生じる。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観察された例を以下に示す。

図4はラセンパターンを描く散逸構造である。この図では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、自発的にトグルを巻きながら成長していく。これは化学的な反応拡散系が描くラセン（図1(a))と似たメカニズムによる。

図5に示す散逸構造は分裂と増殖を行う。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、同じく分裂増殖する散逸構造化学的な反応拡散系（図1(b))とメカニズムが異なるが、見かけの上では似たような様相を示す。

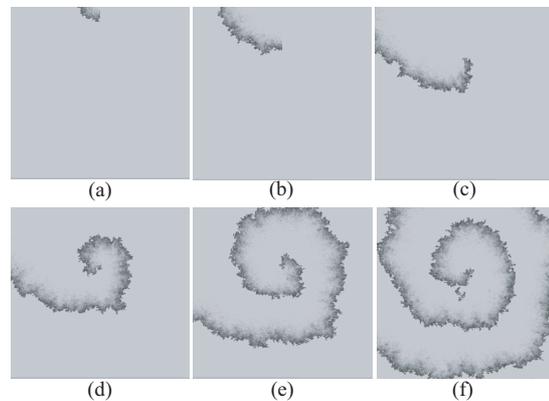


図4 単電子の反応拡散系に発生したラセン状の散逸構造。電圧トリガにより生まれて、自発的にらせんを巻きながら(a)-(f)のように成長する。201×201個の主振動子からなる系のシミュレーション。各振動子のノード電位を濃淡表示したもの（黒が負電位）。

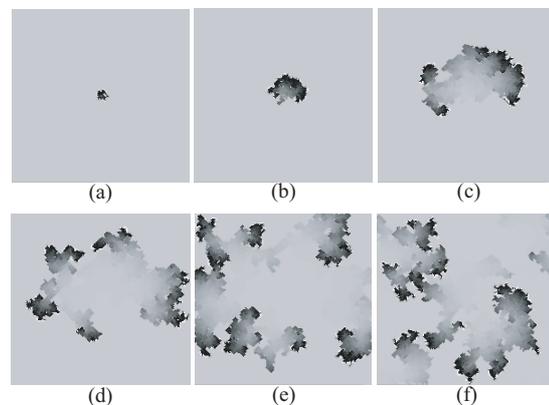


図5 単電子の反応拡散系に発生して増殖する散逸構造。電圧トリガにより生まれて(a)-(f)のように成長と分裂を繰り返しながら動き回る。201×201個の主振動子からなる

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、この系の主人公は散逸構造であり、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。つまり図4や図5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。

(4) まとめ

本研究では、生命現象の一端を担う反応拡散系を模倣する集積システムの構成法を提案した。動作シミュレーションによれば、この系には電子的な散逸構造が発生し、それが成長・分裂・増殖など生命的な挙動を示す。よって、この系は電子的な擬似生命体を生み出す可能性を持つ反応拡散系である、という結論を得た。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計10件, すべて査読あり)

(1) Akou N., Asai T., Yanagida T., Kawai T., and Amemiya Y., "A behavioral model of unipolar resistive RAMs and its application to HSPICE integration," *IEICE Electronics Express*, vol. 7, no. 19, pp. 1467-1473 (2010).

(2) Kikombo A.K., Tabe M., and Amemiya Y., "Photon position sensor consisting of single-electron circuits," *Nanotechnology*, vol. 20, no. 40, 405209, 2009.

(3) Utagawa A., Sahashi T., Asai T., and Amemiya Y., "Stochastic resonance in an array of locally-coupled McCulloch-Pitts neurons with population heterogeneity," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer*, vol. E92-A, no. 10, pp. 2508-2513, (2009).

(4) Kikombo A.K., Schmid A., Asai T., Leblebici Y., and Amemiya Y., "A bio-inspired image processor for edge detection with single-electron circuits," *Journal of Signal Processing*, vol. 13, no. 2, pp 133-144, (2009).

(5) Kikombo A.K., Asai T., Oya T., Schmid A., Leblebici Y., and Amemiya Y., "A neuromorphic single-electron circuit for noise-shaping pulse-density modulation," *International Journal of Nanotechnology*

and Molecular Computation, vol. 1, no. 2, pp. 80-92 (2009).

(6) Kikombo A.K., Asai T., and Amemiya Y., "An elementary neuro-morphic circuit for visual motion detection with single-electron devices based on correlation neural networks," *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 6, no. 1, pp. 89-95 (2009).

(7) Tovar G.M., Asai T., Fujita D., and Amemiya Y., "Analog MOS circuits implementing a temporal coding neural model," *Journal of Signal Processing*, vol. (8) no. 6, pp. 423-432 (2008).

Kasai S. and Asai T., "Stochastic resonance in Schottky wrap gate-controlled GaAs nanowire field effect transistors and their networks," *Applied Physics Express*, vol. 1, no. 8, 083001 (2008)

(9) Utagawa A., Asai T., Hirose T., and Amemiya Y., "Noise-induced synchronization among sub-RF CMOS analog oscillators for skew-free clock distribution," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer*, vol. E91-A, no. 9, pp. 2475-2481 (2008).

(10) Asai T., Yamada K., and Amemiya Y., "Single-flux quantum logic circuits exploiting collision-based fusion gates," *Physica C*, vol. 468, no. 15-20, pp. 1983-1986 (2008).

[学会発表] (計13件)

(1) Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "Stochastic resonance in a simple electric circuit having a double-well potential ---Circuit experiments with a single operational amplifier ---," *Proceedings of 2010 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, pp. 55-59, Krakow, Poland (Sep. 5-8, 2010).

(2) Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "Stochastic resonance in neuromorphic semiconductor devices having a double-well potential," *Proceedings of the 14th International Conference on Cognitive and Neural Systems*, p. 86, Boston, USA (May 19-22, 2010).

(3) Kikombo A.K., Asai T., and Amemiya Y., "Bio-inspired single-electron circuit architectures exploiting thermal noises and device fluctuations to enhance signal transmission fidelity," *Proceedings of the 2009 International*

Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, pp. 429-432, Kanazawa, Japan (Dec. 7-9, 2009).

(4) Kikombo A.K., Asai T., Amemiya Y., "Pulse-density modulation with an ensemble of single-electron circuits employing neuronal heterogeneity to achieve high temporal resolution," Proceedings of the 4th International Conference on Nano-Networks, pp. 51-56, Luzern, Switzerland (Oct. 18-20, 2009).

(5) Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "Noise-induced phase synchronization among analogue oscillator circuits: Experimental results with discrete MOS devices," Proceedings of the 17th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, pp. 110-113, Rapperswil, Switzerland (Jun. 21-24, 2009).

(6) Kikombo A.K., Asai T., Oya T., Schmid A., Leblebici Y., and Amemiya Y., "A pulse-density modulation circuit exhibiting noise shaping with single-electron neurons," Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1600-1605, Atlanta, USA (Jun. 14-19, 2009).

(7) Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "High-fidelity neuromorphic pulse-density modulator based on a model of vestibulo-ocular reflex," Proceedings of the 13th International Conference on Cognitive and Neural Systems, p. 140, Boston, USA (May 27-30, 2009).

(8) Sahashi T., Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "Theoretical analysis of collective stochastic resonance with population heterogeneity," Proceedings of the 2009 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp. 605-608, Honolulu, USA (Mar. 1-3, 2009).

(9) Yamada K., Asai T., and Amemiya Y., "Single-flux quantum circuits for digital cellular automata and analog reaction-diffusion computing," Proceedings of the 3rd International Workshop on Natural Computing, p. 85, Yokohama, Japan (Sep. 23, 2008).

(10) Utagawa A., Asai T., Sahashi T., and Amemiya Y., "Stochastic resonance in retinomorphic neural networks with nonidentical photoreceptors and noisy

McCulloch-Pitts neurons," Proceedings of the 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Budapest, pp. 124-127, Republic of Hungary (Sep. 7-10, 2008).

(11) Yamada K., Asai T., and Amemiya Y., "Combinational logic computing for single-flux quantum circuits with asynchronous collision-based fusion gates," The 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Shimonoseki, Japan (Jul. 6-9, 2008).

(12) Kikombo A.K., Asai T., and Amemiya Y., "A neuromorphic circuit for motion detection with single-electron devices based on correlation neural networks," The 2008 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, #P1-31, Honolulu, USA (Jun. 15-16, 2008).

(13) Kikombo A.K., Schmid A., Asai T., Leblebici Y., and Amemiya Y., "Implementation of early vision model for edge extraction with single-electron devices," Proceedings of the 12th International Conference on Cognitive and Neural Systems, p. 125, Boston, USA (May 14-17, 2008).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

雨宮 好仁 (AMEMIYA YOSHIHITO)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 80250489

(2) 研究分担者

葛西 誠也 (KASAI SEIYA)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 30312383
浅井 哲也 (ASAI TETSUYA)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 00312380

