

半導体デバイス上で成長する単電子ニューロン：量子効果と熱雑音を利用した樹状突起生成モデルの回路実装

Growing dendrites on single-electron semiconductor devices

大矢 剛嗣^{1,†}, 加賀谷 亮¹(PY), 元池 N. 育子², 浅井 哲也¹

Takahide Oya^{1,†}, Ryo Kagaya¹(PY), Ikuko N. Motoike², Tetsuya Asai¹

¹ 北海道大学大学院 情報科学研究科

² 公立はこだて未来大学 システム情報科学部

†toya@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

Abstract— We propose a novel semiconductor device where electronic analogue dendrites grow on multi-layer single-electron circuits. A simple cellular-automaton circuit was designed for generating dendritic patterns by utilizing physical properties of single-electron devices; i.e., quantum and thermal effects in tunneling junctions. We demonstrate typical operations of the proposed circuit, by extensive numerical simulations.

Keywords— Nanoelectronics, Single-electron circuits, Dendrites, Neurons

1 はじめに

神経細胞は複雑に分枝する多数の樹状突起を持ち、細胞の種類に対して特徴的な形態を持つ。例えば脊椎動物では、樹状突起の形態で、錐体細胞やプルキンエ細胞などを容易に識別できる。また、昆虫などの無脊椎動物では、個々の細胞の樹状突起の形態はそれぞれ特徴的で互いに異なる。樹状突起の特徴的な形態は、何らかの機能的役割を持つのだろうか？

近年の神経生物学研究の進展により、樹状突起は、従来考えられたように単なるシナプス入力の受け取り役ではなく、膜やスパインの多様な性質を駆使して機能的な情報処理を行くことが明らかになってきた。古くは文献 [1, 2] などで、細胞・樹状突起レベルでの情報処理モデルが提案されている。本稿では、樹状突起の形状が生み出す機能を取り込んだ脳型ハードウェアの実現を目指して、半導体上で樹状パターンを自己生成するニューロデバイスを提案する。第一段階として、バクテリアコロニーにおける樹状パターン形成モデルを基本としたセルオートマトン (CA) モデル [3] に着目した。

脳型ハードウェアを実現する上で解決すべき技術的な壁は、膨大な数の配線 (軸索と樹状突起に相当) を効率良く集積することの難しさである。ここでは、次世代半導体集積デバイスの候補として期待されている単電子ナノデバイスによる実装を試み、配線の集積度の向上を考える。さらに、単電子デバイスに特徴的な「量子効

果と熱雑音に対する敏感性」を積極的に取り入れた回路モデルを構築する。

2 樹状パターンを生成するセルオートマトンモデル

最初に、本稿は厳密な神経細胞の樹状突起の発達モデルを考えるものではないことを断っておきたい。あくまで、樹状突起の形状が生み出す情報処理とその応用を念頭に置いたものである。そのため、まず樹状突起のような空間パターンを形成するモデルを考えた。

樹状パターンの形成モデルとして、拡散律速凝集やバクテリアコロニーのパターン形成モデルなどが知られている。中でもバクテリアコロニー形成の反応拡散モデルは、樹状パターンの他にもディスク状パターンなどの多様なパターンを創り出す [4]。本稿では、パターンの多様性及びデバイス化の観点から、バクテリアパターンの形成モデルを基本としたセルオートマトン (CA) モデルを用いる。そのモデルの骨格は、成長点 (バクテリア) の拡散 (運動・分裂) と養分消費を考慮した、バクテリア密度と養分濃度の反応拡散方程式である。これを成長因子の拡散, 成長痕 (休止点), および消費物質のダイナミクスとみなし、系の振る舞いを一般化する。

CA モデルのアルゴリズムを以下に簡単に述べる。各セルは、成長因子 a , 成長痕 w , および消費物質 f の 3 変数を持つ (a, w は $\{0,1\}$ の二値変数, f は二値あるいは多値変数)。消費物質の量が十分にあり、かつ近傍の成長状態 ($a = 1$) のセルの数が多いセルは、次ステップにて成長状態 ($a \rightarrow 1$) となり、消費物質 (f) を消費しはじめる。消費物質が少なくなると、成長因子は成長痕へと変化する ($a \rightarrow 0$ および $w \rightarrow 1$)。また、消費物質はステップ毎にゆらぎを持って拡散する。したがって、消費物質が適度に豊富でない場合には成長因子どうしが消費物質獲得で競合し、分裂を起こしながら成長を続け、結果として成長痕の描くパターンは樹状となる。

3 樹状パターンを生成する単電子デバイス

前章のモデルにおける消費物質のゆらぎを持った拡散を模するために、熱雑音に敏感な単電子反応拡散デバイス (図 1) [5] を用いる。また、セルオートマトンの

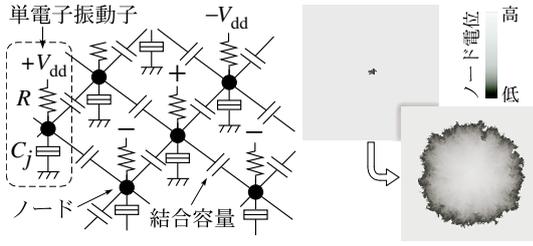


図 1: 単電子反応拡散デバイス [5]

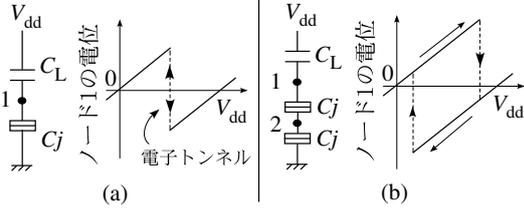


図 2: (a) 単電子箱と (b) 単電子メモリ [6]

ルール実装のため、単電子箱 [図 2(a)] および単電子メモリ [図 2(b)] [6] を利用する。

回路はトンネル接合 (量子デバイス) と、抵抗およびキャパシタから成る。トンネル接合は近接した二つの導体からできていて、静電的には単純なコンデンサである。電極間に蓄えられた電荷量 (接合間の電位差) があるしきい値を越えると、量子効果により電子が接合間をトンネルし、それによって接合の電位が不連続に変化する。トンネル接合を神経膜と考えれば、これはちょうど積分-発火型ニューロンのような動作をする。

極低温では、トンネル接合を介して電子の出し入れを行う際に、そのトンネルによって回路の静電エネルギーが増加するような電子のトンネルは禁止される。しかし、この効果が熱擾乱で乱されるような高温状態では、電子がランダムに接合をトンネルする。この物理的性質を利用して、前章のモデルのゆらぎを持った拡散を模する。図 1 右にその動作の一例を示す。単電子反応拡散デバイスの任意のノードに、電子トンネルに十分な大きさの刺激を与えると、ゆらぎを持った ‘電子のトンネル事象’ が周囲のノードに伝搬する [5]。

単電子箱は、入力電圧を二値化するために用いる。また、単電子箱のトンネル接合の数を増やした構造を持つ単電子メモリは、入力電圧に対してヒステリシス特性を有するため、これをメモリ素子として利用する。

前章のモデルと上記の回路を基に、図 3 のような六層構造の単電子回路を考えた。回路動作の補助のために、以下の二つのバイナリ変数

$$u_{i,j} = 1 \text{ (if } a_{i-1,j} + a_{i+1,j} + a_{i,j-1} + a_{i,j+1} = 1),$$

$$\theta_{i,j} = 1 \text{ (if } \overline{a_{i,j}} \cdot u_{i,j} \cdot f_{i,j} = 1),$$

をモデルに追加した (上記以外の条件では各変数の状態は 0)。各層は前章のモデルの $a_{i,j}$ (第一層: バイナリ動作), $u_{i,j}$ (第二層: バイナリ), $f_{i,j}$ (第三層: 拡散およ

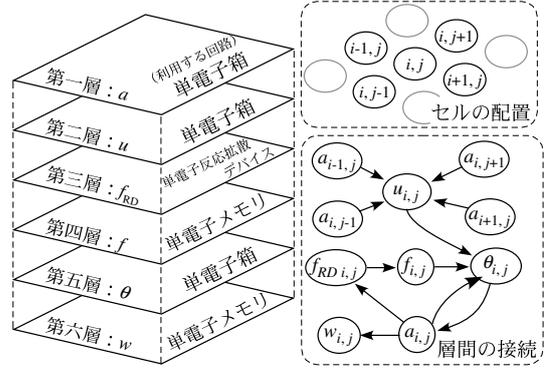


図 3: 提案デバイスの構造

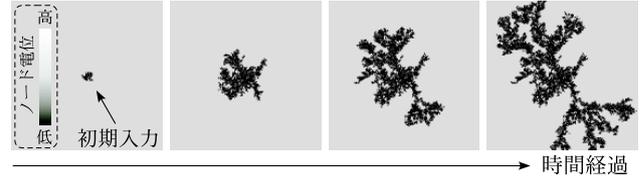


図 4: 提案デバイスが描く樹状パターン

び、第四層: メモリ), $\theta_{i,j}$ (第五層: バイナリ), $w_{i,j}$ (第六層: メモリ) の遷移ルールを実行する。また、反応拡散回路とメモリ回路の組み合わせにより、モデルの消費物質 f のルールを実行する。

各層の持つ単位セルの数を 200×200 個として回路シミュレーションを行った (図 4)。時間の経過と共に a は中央から外側に向かって成長するが、一部は成長を止めてしまう。結果として図のような樹状パターンが生成される。トンネル接合が持つ確率性のため、シミュレーション毎にさまざまな樹状パターンが生成される。また、回路の動作温度が変化するとトンネル頻度が変わるため、仮に回路パラメータが不変であっても、温度によって生成パターンを変化させることが可能である。

講演では、[1, 2] の文献にあるようなパターン識別処理への応用も併せて示す予定である。

参考文献

- [1] Mel, B.W. (1992) Neural Comput., 4: 502-516.
- [2] Blackwell, K.T. et al. (1998) Network: Comput. Neural Syst., 9: 107-121.
- [3] 元池 N. 育子. (2003) “時空間離散系での分岐 (樹状) 経路生成・信号伝播について.” 日本物理学会 2003 年秋季大会
- [4] Mimura, M. et al. (2000) Physica A, 282: 283-303.
- [5] Oya, T. et al. (2005) Int. J. Unconventional Computing, 1: 177-194.
- [6] Oya, T. et al. (2003) IEEE Trans. Nanotech., 2: 15-22.