

研究終了報告書

「抵抗変化素子を活用した環境発電用回路技術の創成」

研究期間：2017 年 10 月～2020 年 3 月

研究者：矢嶋 赳彬

1. 研究のねらい

近い将来、環境発電によって電源配線や電池が不要となり、任意の場所に半永久的にデバイスを設置できるようになることが期待される。しかし環境発電で得られる電力は小さいため、デバイス自身のこれまで以上の低消費電力化も不可欠である。そこでは、デバイスを間欠動作させることで電力の大部分を削減することができる。一方で、環境発電の電源回路だけは常時動作させる必要があり、電源回路の低消費電力化が課題となる。電源回路の消費電力を下げるための手がかりとして、電源回路が環境変化に合わせて比較的ゆっくりと動作する点が挙げられる。従って、高速性を重視してきた従来回路をそのまま適用することは必ずしも最善策とはならない。環境発電に特化したアナログ回路設計も広く行われてきたが、ゆっくりとした動作のために長い時定数を作るには巨大な外付けキャパシタが必要となり、面積も消費電力も劇的には下がらないという問題があった。

他の分野に視野を広げれば、環境変化に合わせて動作する超低消費電力なシステムとして、ヒトの神経回路が挙げられる。特に末梢神経回路は、ニューロンがスパイク信号をやり取りする単純な構造で、生存に必要な様々な機能を実現している。この末梢神経回路の特徴を部分的に利用すれば、従来とは異なる新しい回路技術が構築できるのではないかと考えた。またそこでは、回路技術と相補的に、材料技術を活用することで、さらなる低消費電力化を追求できると考えられる。このように、末梢神経回路の特徴と材料機能とを利用して、環境発電に最適な新しい電源回路を設計し、劇的な低消費電力化を実現することが本研究の狙いである。

2. 研究成果

(1) 概要

末梢神経回路のニューロンとスパイク信号に基づく動作様式を、環境発電の電源回路に適用することを試みた。主要な成果は以下の3点である。

1つ目の成果は、ニューロン回路を用いて低消費電力にタイミング制御を行う技術を構築したことである(特許 1)。ニューロン回路は、MOSFET のサブスレッシュホールドリークによって寄生容量を充電していき、充電電圧がある閾値を超えたところで急峻なスパイク状のデジタル信号を出力する回路である(図 1a)。これによって、100ns～100ms の多岐にわたる時定数を実現し、極めて低消費電力に回路の「待ち時間」を作り出すことができる。ニューロン回路から出力されたスパイク信号は、別のデジタル回路を始動して一瞬演算を行い、次のニューロン回路を起動する。これを繰り返すことで、決められた待ち時間ごとに仕事をする非同期デジタル回路を構築できる(図 1b)。このような「待てるデジタル回路」は、ゆっくりとした環境変化に合わせて動作しなければならない環境発電用電源回路に最適である。

2つ目の成果は、「待てるデジタル回路」を用いて、小型エレクトレット振動発電のための電源回路の試作を行い、100nW 程度の消費電力で回路動作させることに成功したことである(論文

3)。試作した回路は、主に、整流回路、電圧変換回路、コールドスタート回路、充電管理回路から構成され(図 2a)、発電素子とインピーダンスの絶対値が整合するように制御を行った。また外付けのキャパシタやインダクタと共にテスト基板上に実装し、モジュールレベルの動作も確認した(図 2b)。

3つ目の成果は、抵抗変化材料を用いた回路設計によって、従来技術の限界を超えた低消費電力化を示したことである。特に上記の「待てるデジタル回路」では、MOSFET のサブスレッシュホルドリークを利用しているため温度補償が不可欠である。温度に対して急峻に抵抗値が変化する酸化バナジウムを利用して、ほぼゼロ消費電力で温度の閾値判別を行うバイナリサーミスタを開発し、温度補償に利用することを提案した(図 3a,b)(論文 1,2、特許 3)。

以上のように、末梢神経回路の特長や材料機能といった従来回路技術にはないものを取り入れることで、新しい切り口から電源回路の低消費電力化を行った。本研究で構築した「待てるデジタル回路」は、環境発電の電源回路に留まらず、低消費電力回路技術として一般的な応用展開も期待できる。以下に、3つの成果それぞれについてより詳細に説明する。

(2) 詳細

研究テーマA「ニューロン回路の実証とそれに基づくアーキテクチャの構築」

ニューロン回路は、充電電圧が 0.5V に達すると、約 30ns 幅の 1V スパイク電圧を出力して、充電電圧を 0V にリセットする回路である(図 1a)。この充電電圧が 0V から 0.5V に上昇する時間を利用して、様々な「待ち時間」を作成する。10 μ s 未満の比較的短い待ち時間を作るには、チャネル長(L)が大きい MOSFET の ON 電流を充電電流として用い、それ以上の長い待ち時間を作るには閾値電圧が低い MOSFET のサブスレッシュホルドリーク電流を用いた。一方で、0.5V に到達した時に出力されるスパイク信号は、後段のデジタル回路で利用するために十分に急峻でなければならない。急峻なスパイク電圧を生成するため、ラッチ回路に類似の正帰還回路と、インバーターチェーンの遅延帰還回路を組み合わせ、さらに両者が競合して貫通電流が発生しないように NOR 構造で二つの帰還回路を結合した。これによって、1 スパイク当たり 100fJ 未満の超低消費エネルギーで、様々な「待ち時間」を作る回路を実現した。本回路はさらに、正帰還回路、遅延回路、NOR(NAND)型結合の3つを軸に一般化を行い、ニューロン回路とそれを用いた回路技術として、JST から特許出願した(特許1)。

超低消費電力なニューロン回路を試作レベルで実現できたこと、それによって6桁に渡る様々な時定数を作り出しタイミング制御を行うアーキテクチャを構築できたことから、さきがけプロジェクトの中で、本テーマは十分に達成できたと考えている。

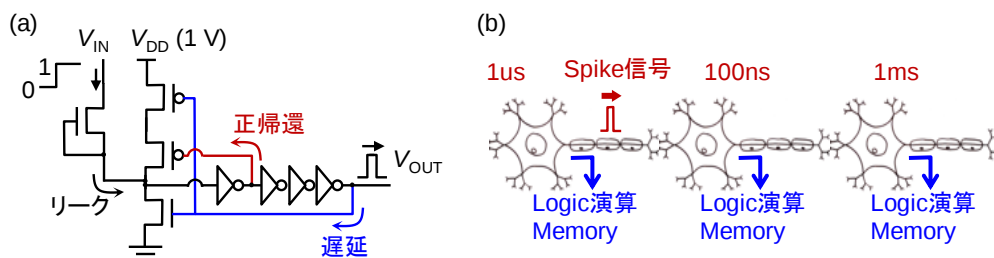


図1: (a)ニューロン回路の回路図。(b)ニューロン回路を用いた「待てるデジタル回路」の模式図。

研究テーマB「環境発電用電源回路の実証」

ニューロン回路を用いた「待てるデジタル回路」によって、エレクトレット MEMS 振動発電用の電源回路を設計し、LSI チップ試作を行った。電源回路では、発電素子の振動や環境変化に合わせて様々なスイッチング動作が必要であり、そのタイミング制御が肝となる。タイミング制御は、回路内のイベントを検知して利用する場合と、遅延回路によって自らタイミングを生成する場合があり、前者は場面ごとの創意工夫が、後者は外付け素子が必要であり、低消費電力回路設計の課題となってきた。そこで本研究では、「待てるデジタル回路」を活用し、簡便かつ低消費電力なタイミング制御を実現した。

試作した回路は、主に、整流回路、電圧変換回路、コールドスタート回路、充電管理回路から構成される(図 2a)。整流回路として、ダイオードブリッジ回路と、それと並列に同期整流回路とを配置し、発電出力が小さい時には、同期整流回路に切り替えてダイオードの閾値電圧ロスを回避できるようにした。電圧変換には、650 mH の外付けインダクタを接続した昇降圧回路(buck-boost コンバータ)を用いた。変換動作ごとに電流値をゼロに戻す離散電圧変換を採用し、これを一定周期で動かすことで、入力側から見たインピーダンスが一定値(約 $1.2 M\Omega$)となるようにし、発電素子とインピーダンスの絶対値を整合させた。650 mH の外付けインダクタには、補聴器用の小型インダクタ(Global Coils 社、 $2.4 \times 2.4 \times 7.4$ mm)を採用した。電圧変換回路の後段には充電管理回路を配置し、3 種類の充電キャパシタのうち1つを選択して充電するようにした。3 種類のキャパシタは全て積層セラミックキャパシタであり、1 V の内部電源用の 10 μ F、3.3 V 外部電源用の 220 μ F、余剰電力用(最大 5.5 V)の 220 μ F(全て村田製作所)である。各キャパシタの電圧値をコンパレータで監視し、電圧値が不足したり過剰になったりすると回路を切り替えて、充電制御を行った。試作した電源回路チップの実測データを図 2b に示す。内部用 1 V 電源と外部用 3.3 V 電源が順次生成された後、余剰電力が蓄積されていく様子がわかる。本回路の制御にかかる総消費電力は約 100 nW であり、タイミング制御の消費電力を切り詰めることで、多彩な機能を極めて低消費電力に実現できることを確認した。

また金澤工科大学の上野先生と協力し、磁歪式振動発電用の電源回路の開発にも取り組んだ。発電素子が小型化すると発電電圧が下がるという問題があったが、振動に同期させて回路動作させる同期技術を、本発電素子に適用できるように拡張した新しい方式を考案し、理想的なインピーダンス整合に迫る高効率な電力変換を実証した(特願 2020-111945)。

エレクトレット振動発電の電源回路を設計し、試作チップの正常動作を確認できたこと、また他の発電様式の電源回路の開発も行ったことから、本テーマは十分に達成できたと考えている。

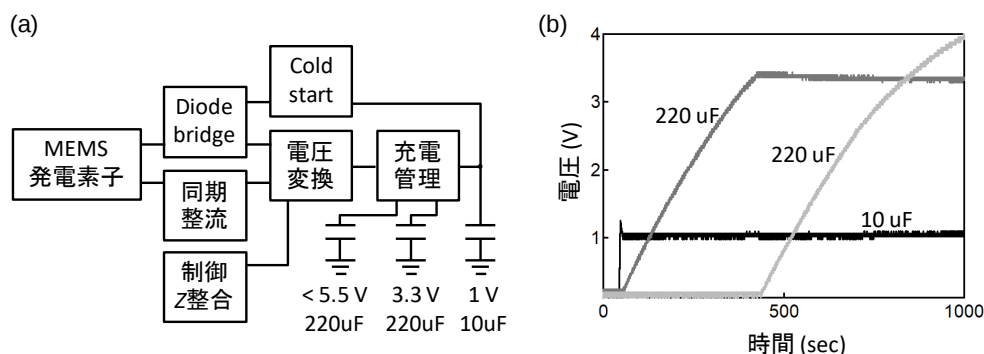


図2: (a)エレクトレット振動発電用の電源回路。(b)試作モジュールの実測結果。3種類の外付けキャパシタが充電されていく様子を示している。

研究テーマC「超低消費電力回路のためのデバイス開発」

極限的な低消費電力化を行うには、回路技術だけでは限界がある。そこで材料特性を相補的に利用して、超低消費電力電源回路に活用することを検討した。実際に上記のエレクトレット振動発電用の電源回路設計での課題として、①サブスレッシュホールド電流の温度補償と、②ゼロ電流検知、の2つに着目した。

①サブスレッシュホールド電流の温度補償

ニューロン回路はサブスレッシュホールドリーク電流を利用して待ち時間を作り出すため、温度依存性が高い。これを回路技術だけで、ナノワットレベルの消費電力で補償するのは困難である。そこで酸化バナジウムの金属絶縁転移を利用してほぼゼロエネルギーで温度センシングを行うデバイスを開発し、温度補償に利用することを考案した(論文1、特許3)。従来のサーミスタは、温度に対して連続変化する抵抗値をAD変換するため、この変換部分が回路的に大きな負荷となる。これに比べてVO₂は、急峻な相転移によってデジタル素子としてふるまうためAD変換が不要であり、消費エネルギー、センシング速度、回路の専有面積全てにおいて数桁の特性向上が期待される。図3aはバイナリサーミスタ回路であり、相転移材料を利用することで、本来トレードオフにある低消費電力性と高速性の両立が可能であることを明らかにした。このサーミスタを用いれば、温度域ごとにパラメータの異なる回路を切り替えて実質的に全ての温度で正常動作を保证することが可能である。

②ゼロ電流検知

同期整流や電圧変換など、電流の符号が切り替わるタイミングを検知したい場面は数多い。一般的には、シャント抵抗を挿入し、その両端に発生する電圧をコンパレータ回路で観察する方法が用いられるが、電流が大きい時の電圧損失と、電流が小さい時の感度に、本質的なトレードオフがある。これは、特に環境発電のように入力電流が変動する場合、大きな問題となる。この問題を回避するために、材料特性を利用する手法を提案した(特願 2019-200205)。

当初は、ニューロン回路の内部に材料機能を埋め込む予定だったが、初年度の段階で研究総括からニューロン回路はMOSFEETだけで組んだ方がいいのではとアドバイスを頂き、材料と回路を相補的に用いるco-designを進め、IEDMでの発表や複数の特許出願につながったことから、本テーマは十分に達成できたと考えている。

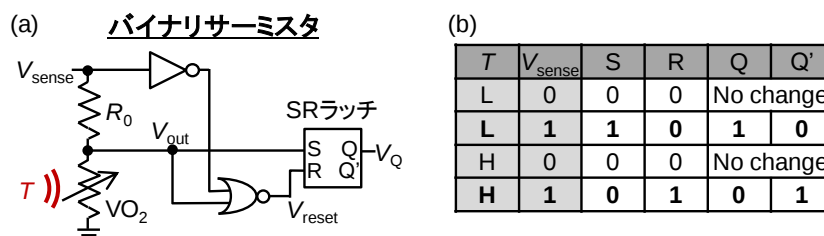


図3: (a)VO₂を用いたバイナリサーミスタ回路と、(b)温度(T)と印加電圧(V_{sense})に対する真偽表。V_{sense} = 1 Vを印加したときに、Tが閾値温度より高いか低いかに応じて、SRラッチに値が書き込まれる。

3. 今後の展開

ニューロン回路の待ち時間の信頼性をある程度確保できれば、「待てるデジタル回路」技術は様々なシーンに応用可能になると思われる。信頼性の向上は、「研究成果(非公開)」に記載の方法によって行い、今後 1-2 年以内に試作チップで効果を確認する。その後、以下の方向での研究展開を考えている。

- ① 複数の環境発電の電源回路に本技術を応用する。これは今後 2 年、微小エネ領域の CREST SU で進めていく予定である。
- ② 本技術は、環境発電で自己給電する無線センサデバイスに最適である。今後 1-2 年で、様々な企業にヒアリングを行い、本技術で可能になるピンポイントのキラーアプリを探る。既にさがしかけ期間中にJSTの新技术説明会に参加し、連携を希望する複数の企業とコンタクトをとっている。
- ③ 本技術を応用展開していく上で、自分一人で回路設計を続けるのは限界がある。今後 3-4 年かけて、シリコンアーティスト等、高度な回路設計の技術と人材を持つ企業との協力を模索していく。

4. 自己評価

研究達成状況

本研究は、「神経回路の特長を利用して環境発電用の電子回路を劇的に低消費電力化できないか」という抽象的なアイデアから始まったものの、最終的には「待てるデジタル回路」という新しい技術を構築し、チップ試作でそれを実証できた。またプロジェクトには「材料機能を回路と相補的に活用する」という目標があったが、総括のアドバイス通り核心部には材料機能を入れないことで、むしろ材料の「相補的な活用」に集中することができた。その結果、材料機能の回路応用に関する複数の出願を行い、その一つはIEDMにアクセプトされるなど、高い達成度が得られたと考えている。

研究実施体制

大学での立場上、学生を戦力とすることができなかったが、様々な方のサポートによって研究を比較的スムーズに進めることができた。まずプロジェクト開始時は、回路技術に関する専門的な知識が不足していたが、企業で回路設計の経験を積んできた方を研究補助者として雇用したり、知り合いの集積回路分野の研究者(東京大学 飯塚哲也准教授)にサポートして頂くなどして、回路設計のための環境づくりを行った。また、回路設計の一部(レイアウト作業)を外注することで、測定用バッファ回路、耐静電気回路、ノイズ対策など、集積回路の試作に不可欠な技術支援を受けることができた。さらに村田製作所から本プロジェクトに興味を示して頂けたため、チップ及び外付け素子の実装に関して多くの技術支援を受けることができた。こうしたサポート体制を構築できたことは、本プロジェクトにおいて極めて重要だったと考えている。

研究費執行状況

当初は大学(VDEC)の安価な回路試作サービスの利用も検討したが、本プロジェクトに最適なプロセスが見つからず、代わりに外部の試作サービスを利用した。その結果、試作に関する費用の割合が増加することとなった。しかし最適なプロセスを利用することで初めて、最短距離でプロジェクトを進めることができたため、良い判断だったと考えている。

波及効果

本プロジェクトで開発した「待てるデジタル回路」は、小型環境発電素子の応用を拡大するだけでなく、IoT のエッジデバイスの低消費電力化に広く応用できるものだと考えている。テレメトリを始め、自己給電型無線センサの応用範囲は将来急速に拡大していくと考えており、本技術がそこでの主要な要素技術の一つになれば、社会に大きな波及効果を及ぼすと思われる。既に JST の新技術説明会で連携を希望して頂いた複数の企業とコンタクトをとり、本技術の応用例を検討している。このように、さきがけ期間中に、新しいアイデアから初めて、応用にアプローチするところまで到達できたのは、プロジェクトをスムーズに進められた結果だと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 9件

1. Takeaki Yajima, Takahisa Tanaka, Yusuke Samata, Ken Uchida, Akira Toriumi. High-speed low-energy heat signal processing via digital-compatible binary switch with metal-insulator transitions. IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). 2019, 19, 903-906

相転移材料の物性値がデジタルに変化する性質を使って、AD コンバータに依らないデジタルセンサを提案した。例えば酸化バナジウム(VO₂)は、温度に対して金属絶縁体転移を起し電気抵抗値を3桁急峻に変化させ、デジタル回路に接続されれば転移温度を基準とする温度の2値センサとして機能する。この場合、AD コンバータの機能は相転移現象によって代替され、電源エネルギーを消費しない。さらにデジタル回路による2値温度の読出しは超低エネルギー(〜fJ)かつ高速(〜ns)に行えるため、従来の回路技術の限界を超えたセンシングが可能となる。

2. 矢嶋赳彬. 金属絶縁体転移材料を利用した回路技術の研究. 電子情報通信学会論文誌C. 2020, J103-C, 420-427

データ処理に係るエネルギー量が加速的に増加する中、トランジスタをほぼ無尽蔵に利用するデジタル回路的な考え方に修正が必要である。本研究では新しいハードウェア技術の一つとして、トランジスタへの依存度を減らし機能性材料を活用する回路技術の検討を行った。その結果、酸化バナジウムの金属絶縁体転移を利用して、センシングやアナログ処理における低消費電力性と高速性を両立できること、またアトラクタダイナミックスに基づく堅牢なアナログ機能が設計可能であることを示した。

3. 矢嶋赳彬. スパイキングニューロン回路を用いた超低消費電力制御回路. 機能材料. 2021, in press

環境発電ではしばしば 100uW〜10mW 程度の発電量が目標とされるが、環境エネルギーにとってこの値は比較的大きい。これを実現するには、設置方法の最適化や初期カリブレーション等を必要とし、素人ユーザが利用できない。本研究では、少ない発電量でも電源が不足しないよう、「1uW で動作する無線センサデバイス」を目指すことにした。MEMS エレクトレット振動発電の電源回路を例に、トランジスタのサブスレッショルドリークを利用し

たタイミング制御によって、劇的な低消費電力化を行った。

(2) 特許出願

研究期間累積件数: (特許公開前のものも含む) 6件

1	発 明 者	矢嶋赳彬
	発 明 の 名 称	スパイク生成回路、情報処理回路および電力変換回路
	出 願 人	JST
	出 願 日	2019/2/18
	出 願 番 号	2019-036951
	概 要	超低消費電力なニューロン回路の構造と、それを利用した低消費電力回路技術について出願した。
2	発 明 者	矢嶋赳彬、年吉洋、本間浩章、遠山幸也、三屋裕幸
	発 明 の 名 称	環境発電装置
	出 願 人	国立大学法人東京大学
	出 願 日	2019/6/24
	出 願 番 号	2019-116310
	概 要	MEMS 振動の位相・振幅情報を用いた振動発電用電源回路技術について出願した。
3	発 明 者	矢嶋赳彬, 田中貴久, 内田建, 鳥海明
	発 明 の 名 称	半導体デバイス
	出 願 人	国立大学法人東京大学
	出 願 日	2019/11/12
	出 願 番 号	2019-204806
	概 要	相転移材料の物性値がデジタルに変化する性質を使って、AD コンバータに依らないデジタルセンサを提案した。

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

＜学会発表＞Takeaki Yajima, Tomonori Nishimura, and Akira Toriumi, Analog Spike Processing with High Scalability and Low Energy Consumption Using Thermal Degree of Freedom in Phase Transition Materials, 2018 IEEE Symposium on VLSI Technology (VLSI 2018), 2018.

＜受賞＞Takeaki Yajima, SSDM 2019 Young Researcher Award (51th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2019)), 2019.

＜受賞＞Takeaki Yajima, The Oxide Electronics Prize for Excellency in Research (26th International Workshop on Oxide Electronics (iWOE26)), 2019.

＜招待講演＞矢嶋赳彬, スパイクニューロンを用いた超省エネ環境発電用回路, 春季応用物理学会, (東京, 2020)

＜著作＞矢嶋赳彬, 1 μ W 無線センサデバイスに向けた低消費電力電源回路技術, 新訂版環境発電ハンドブック2021, 2021.