

環境適応電源・デジタル変換半導体集積回路の開発に成功

—22nm で実証、体内で自律動作する IoT の開発へ—

概要

京都大学大学院情報学研究科 新津 葵一 教授、劉 昆洋 同助教、張 瑞琳 同特定助教、北池 弘明 同修士課程学生、田川 宏紀 同修士課程学生らの研究グループは、涙液糖駆動（注1）が可能な0.9pWの消費電力、0.1Vの電源電圧で動作する環境適応型電源・デジタル変換半導体集積回路の開発に成功し、22nm（ナノメートル：10億分の1メートル）のCMOSプロセス（注2）で実証しました。

低電力・低電源電圧動作を達成するために、電源確保対象とセンシングデータ取得対象が同一のシステムにおいて、入力信号となる入力電源電圧の高低に応じて動作させる要素回路ブロックを自律的に最適化し、低電力化に寄与する手法を開発しました。環境に存在するエサの量に応じて動作を自律的に最適化するカエルのように、環境適応することで低電力化を実現します。

具体的には、異なるしきい値の電源電圧を有する複数の信号駆動回路（バッファ）を搭載し、クロック信号が与えられた際に動作したバッファ回路の数を数えることでデジタル化をする手法を提案しました。低入力電源電圧の際には少ない数のバッファが動作するため、消費電力を低減させることが可能となり、22nmの超低リーク電流CMOSプロセスにおいて提案回路の有効性を実証しました。

現在、涙液糖駆動の単独動作可能持続血糖モニターコンタクト（注3）やデジタル錠剤、スマートステント（注4）などへの展開を目指しています。

本研究成果は、2024年6月16日13:00（現地時間）から開催のIEEE Symposium on VLSI Technology and CircuitsにおいてDigest of Technical Papers誌に掲載されました。

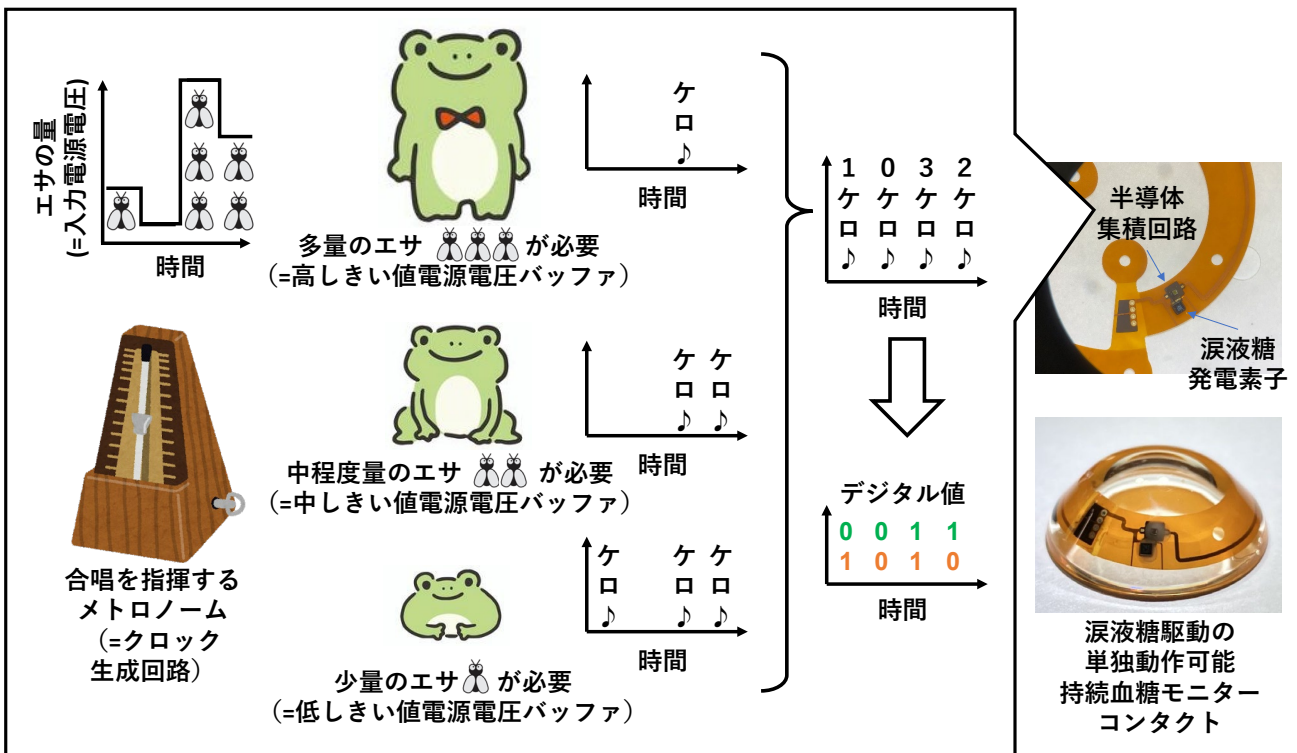


図1 本研究開発のイメージ図：提案回路の動作を、カエルの合唱と例えて表現している。歌声を発するのに必要なエサの量が異なるカエル達を複数設け（動作しきい値電源電圧の異なるバッファを複数設け）、環境中に存在するエサの量（環境中で得られる電源電圧）に応じて、指揮を受けた時に歌声を発するカエルの数（クロックを与えられた時に動作する回路の数）が変化することを活用してデジタル変換を行う。この技術を、涙液糖濃度に応じて出力が変化する涙液糖発電素子と組み合わせることで、涙液糖と相関のある血糖推定に活用する。

1. 背景

IoT (モノのインターネット)の開発においては、電源の確保が重要であり、バッテリーを不要とする環境発電駆動の実現が期待されています。しかしながら、一般的に環境発電はその出力が環境状況に依存してしまうため、電源が不安定になってしまうという課題がありました。そこで、電源が不安定な場合においてもIoTが安定して動作するようなシステムの開発プロジェクトを設立しました。コンセプトとして、生命体のようなIoTの実現を目標にプロジェクトに取り組んでいます。カエルのように食料の増減に応じて自身の動きを最適化し、自然環境に溶け込むIoTを実現して社会へと貢献することが最終目標です。

2. 研究手法・成果

環境に適応性を持たせるために、電源確保対象とセンシングデータ取得対象が同一のシステム(発電とセンシングを一体化して行うシステム)において、入力信号となる入力電源電圧の高低に応じて、動作する要素回路ブロックを自律的に最適化する半導体集積回路技術を開発しました。具体的には、異なるしきい値の電源電圧を有する複数の信号駆動回路(バッファ)を搭載し、クロック信号が与えられた際に動いたバッファ回路の数を数えることでデジタル化をする手法を提案しました。低入力電源電圧の際には少ない数のバッファが動作するため、消費電力を低減させることが可能となりました。

入力電源電圧をエサの量、クロック信号をメトロノームから発せられる指揮信号、異なるしきい値の電源電圧を有する複数のバッファを大・中・小のカエル達に例えて説明したものが図1です。入手可能なエサ量に変化する環境下において、必要エサ量の異なるカエルに合唱をさせると、エサの量に応じて声を出すカエルの頭数が増えます。この頭数を数えることで必要なエサの量を測ることが可能となります。十分なエサが得られないカエルは声を発することが出来ないため、合唱隊としての全体の消費エネルギーを下げる事が可能になります。

このコンセプトを、22nmの超低リーク電流CMOSプロセスで設計・試作した半導体集積回路上に実装し、有効性を確認しました。異なるしきい値の電源電圧を有する複数のバッファを、トランジスタのサイズや縦積み段数を調整することで実現しました。性能を評価したところ、消費電力0.9pW(同精度に換算した場合、従来技術の1/27程度)、電源電圧0.1V(従来技術に比べて44%低減)を達成しました。これにより、涙液糖駆動の単独動作可能持続血糖モニターコンタクトの開発が進展しました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究開発のコンセプトは、「電源電圧に応じて自律的に動作を最適化する」という汎用的な半導体集積回路設計に係るものです。AI需要の急激な増大に鑑みますと、半導体集積回路の低消費電力化は世界の喫緊の課題です。本研究開発を通じて、半導体集積回路の低消費電力化技術の発展へと波及することを期待しています。

今後は、低電力化設計基盤技術として、様々な集積回路において適用することを目指すとともに、応用開拓を進めたいと考えております。応用開拓においては、持続血糖モニタリングスマートコンタクトレンズや、デジタル錠剤、スマートステントといった、体内環境で動作するIoTシステムの開発に取り組んでまいります。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構(JST) さきがけ(JPMJPR2034)、ムーンショット型研究開発事業(ムーンショット目標1、JPMJMS2214)、NEDO先導研究プログラム/未踏チャレンジ2050(JPNP14004)、情報通信研究機構(NICT) B5Gプログラム、科学研究費補助金(22H03557、22K19917)の支援を受け、実施され

ました。

<用語解説>

注1 涙液糖駆動

涙液に含まれる糖分からのエネルギーで動作することです。

注2 CMOS プロセス

Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (相補型金属・酸化物・半導体)の頭文字を取った略語で、半導体素子の一種です。

注3 持続血糖モニターコンタクト

血糖濃度と涙液糖濃度の相関を活用して、涙液糖濃度から血糖濃度を推定し、持続的にモニターするコンタクトレンズのことです。

注4 スマートステント

電子デバイスを搭載し、スマート化したステントのことです。

<研究者のコメント>

研究を支えてくださる関係者の皆様に御礼申し上げます。半導体集積回路は、社会の基盤として多くの応用へと展開されています。今後とも、半導体集積回路設計において基盤技術開発と応用開拓を並行して研究開発を進めてまいります。

<論文タイトルと著者>

タイトル：A 0.9-2.6pW 0.1-0.25V 22nm 2-bit Supply-to-Digital Converter Using Always-Activated Supply-Controlled Oscillator and Supply-Dependent-Activation Buffers for Bio-Fuel-Cell-Powered-and-Sensed Time-Stamped Bio-Recording

(バイオ燃料電池で駆動とセンシングを行う、タイムスタンプ機能付きバイオレコーディングに向けた、常時動作電源電圧制御発振器と電源電圧依存活性バッファを用いた 0.9-2.6pW 0.1-0.25V 動作 22nm 2 ビット電源電圧デジタル変換回路)

著者：北池 弘明、稲田 雅治、寺内 充、田川 宏紀、長井 亮輔、徐 舒帆、張 瑞琳、劉 昆洋、新津 葵一
掲載誌：IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits DOI：未定