

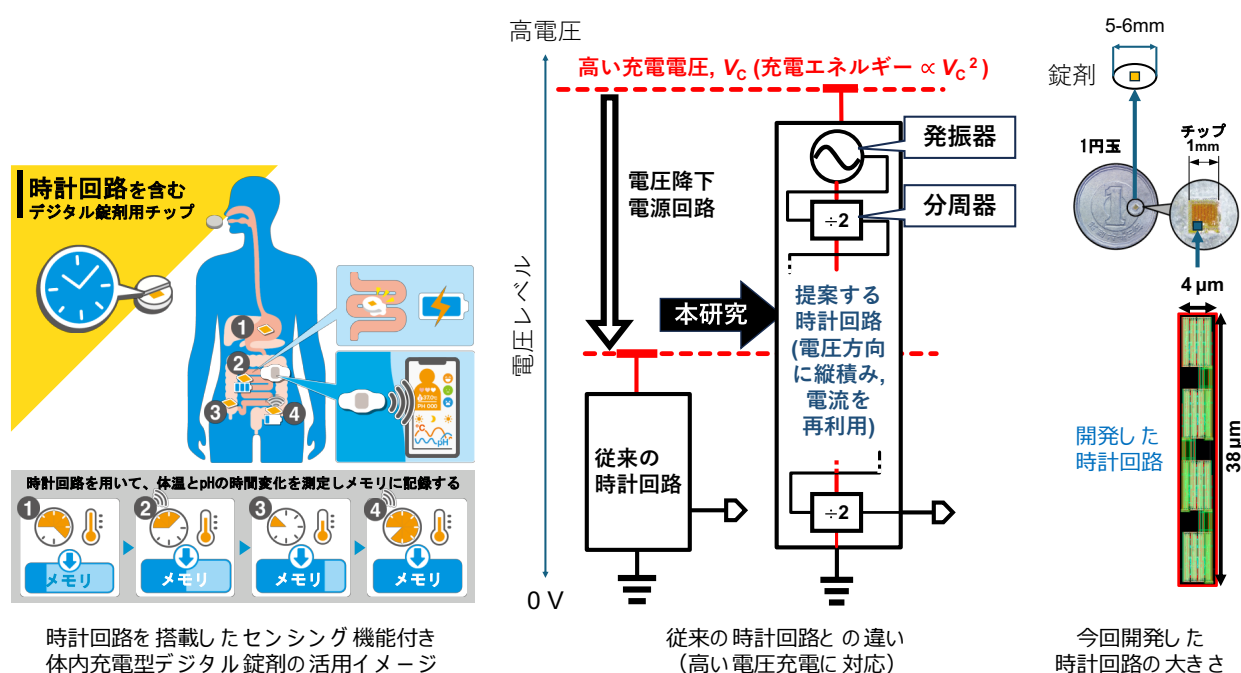
デジタル錠剤向け超低電力時計回路を開発 —体内発電に対応し、極小面積を 7nm で実証—

概要

京都大学大学院情報学研究科の新津葵一 教授、劉昆洋 同助教、ウ ヨウ 同修士課程学生、京都大学工学部電気電子工学科 石岡悠吾 学部学生らの研究グループは、大塚製薬株式会社と共同で、のみ込んで体内を計測するデジタル錠剤に向けた超低消費電力のタイマ（時計）回路を開発し、最先端の 7 ナノメートル世代の半導体製造技術で試作し、動作を確かめました。

デジタル錠剤では、常に動き続けるタイマ回路の電力と大きさが重要です。本研究では、同じ回路を電圧方向に積み重ねて電流を再利用する技術を発展させ、回路モジュールごとにウェル（トランジスタを作る領域）を分離することで、従来は再利用できなかったゲートリーク電流まで再利用可能にしました。その結果、従来の約 47 分の 1 の面積 (0.00015mm²)、0.79nW の消費電力で 0.96Hz のクロック信号を生成できました。7nm 世代の先端プロセスで 1Hz を下回るタイマを実現した本成果は、体内環境を時間情報と共に継続的に記録するデジタル錠剤の実現につながると期待されます。

本研究成果は、2026 年 10 月 8 日～10 日に韓国・仁川で開催される国際会議「IEEE BioCAS 2026」で発表されます。



図：開発したタイマ回路とデジタル錠剤への応用イメージ。一般的な錠剤の直径は 5～6mm 程度で、その中に約 1mm 角のチップを搭載することを想定しています。図右では 1 円玉（直径 20mm）と大きさを比べています。タイマ回路は、このチップの中のわずか 4μm×38μm (0.00015mm²) の領域に収まります（図右下）。

（クレジット：京都大学大学院情報学研究科 新津研究室）

1. 背景

のみ込んで体内の情報を計測するデジタル錠剤（注 1）は、消化管内の温度や pH を連続的に記録できる技術として期待されています。研究グループはこれまでに、胃酸を電解液として発電する電池（胃酸電池）で充電しながら動作する集積回路を、65nm CMOS で開発してきました。

こうした体内デバイスでは、「いつ計測するか」を決めるタイマ（クロック源）（注 2）回路が常時動作し続けるため、その消費電力が装置全体の動作時間を大きく左右します。数十秒に一度の計測で足りる用途では、1 秒間に 1 回を下回る極めて低い周波数で、かつ極小の電力で動作するタイマが求められます。

一方、コンデンサに蓄えられるエネルギーは電源電圧の 2 乗に比例するため、電圧は高いほど有利です。しかし半導体回路は一般に、電源電圧が高いほど高速に動作します。この「高い電圧で、ゆっくり動く」という相反する要求を満たすため、従来は電圧を降圧する DC-DC コンバータが用いられてきましたが、これ自体が面積と電力を消費することが課題でした。

さらに、微細化が進んだ 7nm 世代では、トランジスタの絶縁膜をすり抜けて流れるゲートリーク電流（注 3）が無視できない大きさとなります。回路を積み重ねて電流を再利用する従来の手法では、トランジスタのチャネルを流れる電流（チャネルリーク電流、注 3）は再利用できても、ゲートリーク電流は共通の基板領域を通して回路の外へ逃げてしまい、再利用できませんでした。このことが、先端プロセスにおけるサブヘルツ（注 4）のタイマの実現を困難にしていました。

2. 研究手法・成果

研究グループは、同一の回路モジュールを電圧方向に積み重ねる電圧スタッキング（注 5）を発展させ、モジュールごとに半導体基板のウェルを分離する構造（ウェル分離、注 6）を新たに考案しました。ウェル分離をトランジスタ単位で行う技術は以前からありますが、本研究では発振器や分周器といった回路モジュールを単位としてウェルを分離する点が異なります。

回路を積み重ねると、上段を流れ終えた電流を下段が再利用できるため、回路全体の電流を増やすことなく高い電源電圧を扱えます。加えて、ウェルの電位をモジュールごとに独立させたことで、ゲートから漏れ出た電流もそのモジュールの中にとどまり、下段のモジュールへと受け渡されます。これにより、従来再利用されてきたチャネルリーク電流に加えて、共有ウェル方式では回収できなかったゲートリーク電流まで、エネルギーとして循環させることが可能になりました。また、各モジュールを同一構成とすることでインピーダンスが整合し、積み重ねた段の中間電位が安定するため、DC-DC コンバータを介さずに高電圧から低周波数のクロックを直接得られます。

7nm FinFET（注 7）プロセスで試作した集積回路では、16 段を積み重ねた構成において、3.0V の電源電圧から 0.96Hz のクロックを出力しながら、消費電力は 0.79nW にとどまりました。蓄電エネルギーあたりの性能指標は $11.4\text{V}^2/\text{nW}$ となり、従来の最高値の 1.74 倍にあたります。回路面積は 0.00015mm^2 で、従来方式のおよそ 47 分の 1 に縮小しました。

積み重ねる段数を 4 段・8 段・16 段と変えることにより、電源電圧と出力周波数を設計段階で選択できることも実証しました。10nF のコンデンサを 3.6V まで充電した場合、この回路はおよそ 37 秒間にわたって連続動作します。胃酸発電によって充電が継続されるため、この値は充電が途切れた際の保持時間にあたります。なお、今回の動作確認は、胃酸の代わりに模擬胃液を用いた場合の発電出力を想定した電源条件のもとで行いました。

3. 波及効果、今後の予定

本成果は、体内で発電・充電しながら、温度や pH などの体内環境を時間情報と共に継続的にモニタリングすることを可能にする基盤技術です。将来的には、錠剤をのみだけで、胃や腸を通過する間の体内の変化を「いつ」の情報と結び付けて記録できるようになると期待されます。例えば、食事や服薬の後に消化管内の温度や pH がどう変化するかを、病院での検査に頼らず普段の生活の中で把握することにつながります。

ムーンショット目標 1 は、2050 年までに「人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会」を実現することを目指しています。本研究が参画するプロジェクトでは、体内で働く小さなデバイス（生体内サイバネティック・アバター、注 8）が体温や pH などの体内の情報を取得し、時間や場所とともに変化する体内環境をモニタリングすることで、自宅にいなが健康状態を見守ったり、診断に役立てたりできる社会を目指しています。デジタル錠剤はその代表的なデバイスの一つであり、本成果の超小型・超低消費電力の時計回路は、計測したデータに「いつ」の情報を付けるための基本部品となります。通院や検査のための時間や場所の制約なく、体内環境を手軽に診断できるデジタル錠剤の社会実装を通じて、目標 1 の実現への貢献が期待されます。

また、本技術はデジタル錠剤に限らず、涙液糖で駆動する持続血糖モニタリングコンタクトレンズやスマートステントなど、体内・体表で自律動作する医療 IoT 機器全般への展開が期待されます。

今後は、温度・pH センサーや無線送信回路と組み合わせたシステムとしての評価や、実際の体内環境により近い条件での検証を進めていく予定です。

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）ムーンショット型研究開発事業（ムーンショット目標 1）における研究開発プロジェクト「生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化」（プロジェクトマネージャー（PM）：新井 史人、東京大学大学院工学系研究科 教授、JPMJMS2214）の支援を受け、実施されました。

また、本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 情報通信科学・イノベーション基盤創出（CRONOS）川原領域における研究開発課題「動的環境順応時空間拡張に資する半導体共進化微細 IoT」（研究開発代表者：新津 葵一、京都大学大学院情報学研究科、JPMJCS24K9）の支援を受けました。

さらに、本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「NEDO 先導研究プログラム／未踏チャレンジ 2050」（JPNP14004）の支援を受けました。

<用語解説>

注 1 デジタル錠剤 電子デバイスを搭載した錠剤型の医薬品・医療機器。のみ込むことで、外科的な処置を伴わずに消化管内の情報を計測・記録できる。

注 2 タイマ（クロック源） 回路がいつ動作するかを決める基準信号を生成する回路。センサーが休止している間も動作を続けるため、待機時の消費電力を決定づける中心的な要素となる。

注 3 ゲートリーク電流、チャネルリーク電流 トランジスタを流れる意図しない微小な電流（リーク電流）のうち、ゲートの絶縁膜をすり抜けて流れるものをゲートリーク電流、トランジスタのチャネル（ソースとドレインの間）を流れるものをチャネルリーク電流と呼ぶ。ゲートリーク電流はプロセスの微細化に伴って増大し、28nm 以降の世代では待機電力の主要因となる。

注 4 サブヘルツ 1 ヘルツ（1 秒間に 1 回）を下回る周波数。長い間隔での間欠的な計測動作に適する。

注 5 電圧スタッキング 同一の回路を電圧方向に直列に積み重ね、上段を流れた電流を下段で再利用することで低消費電力化を図る手法。

注 6 ウェル分離 トランジスタを形成する半導体領域（ウェル）を電氣的に分離すること。本研究では、トランジスタ単位ではなく回路モジュール単位でウェルを分離し、各モジュールのウェルの電位を独立させることで、ゲートリーク電流の再利用を可能にした。

注 7 FinFET チャネルを立体構造とした電界効果トランジスタ。7nm 世代をはじめとする先端の半導体プロセスで用いられる。

注 8 生体内サイバネティック・アバター 体内で活動し、体温や pH などの生体内の情報の取得や、薬の局所的な投与などを行う小型のデバイス。ムーンショット目標 1 の研究開発プロジェクト「生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化」で研究開発が進められている。

<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。今回、先端の 7nm FinFET において、体内で自律的に時を刻む回路を極めて小さな面積と電力で実現できました。基盤技術の開発と応用の開拓を並行して進め、体内環境モニタリングの実用化に貢献してまいります。」（新津 葵一）

<論文タイトルと著者>

タイトル：A 7nm FinFET 3.0V 0.96Hz 0.79nW 0.00015mm² Gate/Channel-Leakage-Recycling Timer Using Module-Based Well-Separated Voltage Stacking for In-Body-Energy-Harvesting Biomedical IoTs
（和訳：体内発電型の生体医療 IoT に向けた、モジュール単位でウェルを分離した電圧スタッキングによるゲート／チャネルリーク電流再利用型の 7nm FinFET タイマ）

著 者：ウ ヨウ（京都大学）、石岡 悠吾（京都大学）、山根 育郎（大塚製薬株式会社）、劉 昆洋（京都大学）、大西 弘二（大塚製薬株式会社）、新津 葵一（京都大学）

掲 載 誌：IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS 2026) (2026 年 10 月 8 日～10 日、韓国・仁川) DOI：発表後に付与