

# 腸内環境モニタリング機能付きデジタル錠剤に向けた

## 胃酸充電半導体集積回路の開発に成功

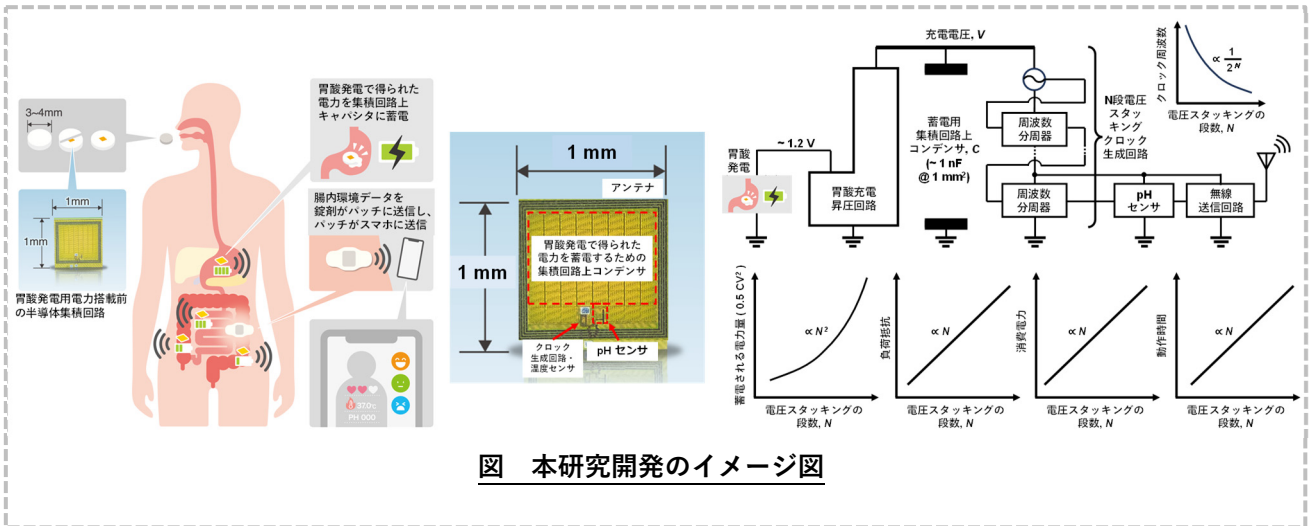
—65nm CMOS で実証、消化器官内の温度・pH モニタリングに目途—

### 概要

京都大学大学院情報学研究科 新津 葵一 教授、ウ ヨウ (Wu You) 同修士課程学生、大塚製薬株式会社 ポートフォリオマネジメント室 大西 弘二 プリンシパル、同デジタル事業室 山根 育郎 課長らの研究グループは、腸内環境モニタリング機能付きデジタル錠剤（注1）に向けた胃酸充電機能を有する半導体集積回路の開発に成功し、65nm（ナノメートル：10 億分の 1 メートル）の CMOS プロセス（注2）で製造した半導体集積回路を用いて実証しました。

生体内センシングは、健康状態を把握するうえで有効なアプローチの一つです。特に、腸内環境の継続的なモニタリングは、近年の研究によりその有用性が明らかになり、注目を集めています。しかしながら、腸内環境の継続的なモニタリングを日常的に行うことは困難を伴います。そこで研究グループは、腸内環境モニタリング機能付きデジタル錠剤の開発に取り組みました（図）。今回開発したデジタル錠剤は、胃酸発電用電極を搭載した 1 mm 角程度の微小な半導体集積回路と薬剤で構成されています。米国において、服薬状況を客観的に把握できる服薬管理機能付きデジタル錠剤は既に実用化されていますが、胃酸発電で得られた電力は充電に活用できず胃内のみで用いられていました。デジタル錠剤を腸内環境モニタリング、例えば温度・酸度（pH）モニタリングへと活用させるためには、電力の確保が必要になります。そこで本研究開発では、胃酸発電で得られた電力を半導体集積回路内のコンデンサに充電・蓄電し、その電力を効率的に腸内環境モニタリングへと適用する基盤技術の開発に成功しました。また、65nm の低電力 CMOS プロセスにおいて提案回路の有効性を実証しました。

本研究成果は、2025 年 10 月 28 日 9：00（現地時間）から開催された IEEE Nordic Circuits and Systems Conference において発表されました。



## 1. 背景

生体内センシングは、健康状態を把握するための有効な手段と考えられており、特に腸内環境のモニタリングは大きな注目を浴びています。近年の研究により腸内環境が心身の健康と関連することが明らかになり、腸内環境（例えば、温度やpH）をモニタリングする需要が高まっていました。しかしながら、腸内環境を簡易的にモニタリングする技術は現存せず、困難でした。

腸内環境をモニタリングする将来技術として、デジタル錠剤が注目を浴びており、研究開発が行われているが、実用化については胃酸発電を用いた服薬管理への適用にとどまっており、デジタル錠剤を用いた体内モニタリング機能については実現されていませんでした。

デジタル錠剤を体内モニタリングへと適用するためには、電力の確保が課題となっていました。デジタル錠剤は、胃酸発電用の電極を搭載した半導体集積回路と薬剤成分で構成されており、電池やバッテリー、積層セラミックコンデンサなどの部品を搭載するスペースがないため、半導体集積回路のみでの電力の確保が必要でした。

## 2. 研究手法・成果

そこで、研究グループは、腸内環境モニタリング機能を実現するために、デジタル錠剤を構成する半導体集積回路上のコンデンサに胃酸発電で得られた電力を充電・蓄電し、腸内の深部体温やpHをモニタリングするための基盤技術を提案・確立しました。具体的には、胃酸発電された電力を集積回路内に充電する際の充電電圧を工夫しました。集積回路上の限られた容量のコンデンサで十分な電力量を蓄電するための高電圧充電技術を提案しました。蓄電される電力量は充電電圧の2乗に比例するため、飛躍的に電力量を大きくすることが可能となりました。さらに、高充電電圧下においても、低電圧耐圧トランジスタを安定的に動作させるための、電源電圧方向に回路を縦積みする電圧スタッキング技術を導入しました。高電圧を回路に印加させることは、不安定動作につながってしまいますが、1段あたりに印加される電源電圧を、段数分の1（1/段数）と分割して印加することで安定動作させることに成功しました。同時に、スタッキングされた回路間で電流を再利用することにより電力利用効率を高めることに成功しました。これらの提案技術の有効性を65nm CMOSプロセスで試作した半導体集積回路で実証しました。

## 3. 波及効果、今後の予定

体内モニタリング機能付きのデジタル錠剤を開発することで、簡易的な体内モニタリングが可能となり、疾病の早期発見や、健康状態の詳細な把握、日々の健康管理に貢献することが期待されます。例えば、腸内環境を把握し改善することで、免疫機能を高めることが期待されます。

体内モニタリングの基盤技術が確立されたため、さらに高性能化を進めるとともに安全性についての検証を行い、動物実験や臨床試験での有効性実証を目指します。

## 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）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）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）の支援を受け、実施されました。

### <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。

注2 CMOS プロセス N 型トランジスタと P 型トランジスタの 2 種類の MOS トランジスタを組み合わせ  
て集積回路を作る製造プロセス技術。

#### <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 1.4-V 260-pW 1-mm<sup>2</sup> 65-nm CMOS Temperature/pH Sensing IC Featuring Voltage-Stacking  
Timer and Wireless Transmitter for Stomach-Acid-Charged Tablet-Type Digital Pills with Long-  
Term In-Body Monitoring

著 者：ウ ヨウ（京都大学），栗野 慧（京都大学），山根 育郎（大塚製薬株式会社），北池弘明（京都  
大学），金子 優哉（株式会社メイテック），丸山央峰（名古屋大学），宮口 裕（芝浦工業大学），吉  
田慎哉（芝浦工業大学），小林 匠（大阪公立大学），安在大祐（大阪公立大学），藤藪 岳志（東京  
大学），稲垣奈都子（東京大学），武田 健嗣（東京大学），山中 俊郎（東京大学），伊藤大知（東  
京大学），川嶋啓揮（名古屋大学），藤城光弘（東京大学），新井 史人（東京大学），大西弘二（大  
塚製薬株式会社），新津 葵一（京都大学）

掲 載 誌：IEEE Nordic Circuits and Systems Conference (NorCAS)