

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01679

研究課題名(和文)1立方mm無線給電センサノードの開発と実世界ユーザインタフェースへの応用

研究課題名(英文)Development of mm-cubic wirelessly-powered sensor node and its application to tangible user interface

研究代表者

橋本 昌宜 (Hashimoto, Masanori)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：80335207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,800,000円

研究成果の概要(和文)：小体積コンピューティングの応用として、立方mm級の無線給電無線通信センサノードを多量に埋め込んだ実オブジェクトによる実世界指向ユーザインタフェースiClay向けの要素技術(1)ノード間距離測定(2)無線通信(3)ノード位置推定(4)無線給電)を開発した。開発した技術を融合し、無線給電、無線通信、ならびに測距機能を集積した小型センサノードを開発し、その機能をプロトタイプの測定により確認した。今後は、iClayシステムの実装と評価に取り組む。

研究成果の概要(英文)：We developed element technologies ((1) distance sensing to adjacent nodes, (2) wireless communication, (3) node localization, (4) wireless power supply) for tangible user interface called iClay that embeds a number of mm-cubic wirelessly power-supplied sensor nodes with wireless communication capability into clay, as one of applications of small volume computing. Integrating the developed element technologies, we developed a tiny sensor node that integrates wireless power supply, wireless communication and distance sensing, and verified the functionalities by measuring the developed prototype. We are now developing iClay system integration.

研究分野：集積システム設計

キーワード：センサノード 実世界ユーザインタフェース 無線給電

### 1. 研究開始当初の背景

人間とコンピュータの直感的なインタラクションを目指して、マウスやキーボードではなく実物体を用いる様々な研究が行われてきた。研究分担者が開発した ActiveCube は CPU が内蔵された立方体ブロックである。ブロックの接続時にブロックとホスト PC が通信し、組み立て形状をリアルタイム認識するため、3次元形状モデリングを容易に行うことができ、子供向けのインタラクティブな積み木遊びツール等へ応用されている。操作の容易性・直感性を活かした脳の認知能力評価ツールがあり、アルツハイマー病の早期診断や子供の発達性協調運動障害診断に有効であることを明らかにしてきた。しかし、80gの質量と一辺が 5cm というサイズから、10個程度のブロックで表現できる形状に限られている。一方、実物体を用いたリアルタイム詳細形状モデリングが実現できれば、リアルタイムインタラクションを活用した創造性を高める教育や、アルツハイマー病、発達性協調運動障害の早期診断・リハビリ医療などへの展開も期待できる。特に脳障害の早期診断は患者の QOL の確保に大きく関わるため、高齢化社会を迎えようとしている我が国に必須の技術である。

環境モニタリングや流通追跡、災害の障害報告などの幅広いアプリケーションを実現するインフラとして、センサネットワークが盛んに研究されている。センサネットワークはセンサノードと呼ばれるセンサとプロセッサ、通信回路からなる集積デバイスで構成される。センサノードは設置容易性から電池駆動が多いが、さらに電池交換が不可能なアプリケーションへの展開するため、光、熱、振動、電磁波といった環境エネルギー活用技術や無線電力送電が研究されている。研究代表者は、超低電力センサノードを実現する技術として、集積回路を MOSFET の閾値電圧よりも低い電源電圧で動作させるサブスレッショルド回路に注目し、センサノード向けプロセッサの研究を推進してきた。研究分担者の研究グループでは、MOSFET のサブスレッショルド領域動作を前提とした超低電力アナログ集積回路の基本要素回路技術を開発している。電流源・電圧源回路、超低電力・高速動作を両立する増幅回路の開発に成功した。さらに、微弱な自然環境エネルギーを利用した超低電力エネルギー変換システムの研究を推進している。

1mm<sup>3</sup> 級小体積デバイスの研究は米国ミシガン大学で活発に行われている一方、他大学での取り組みは見受けられない。ミシガン大学では、眼球内に埋め込んで眼圧をセンシングするデバイスを開発している。センサネットワーク利用は想定していない。1mm<sup>3</sup> 級小体積デバイスのセンサネットワーク応用、ユーザインタフェース応用は申請者の知る限りで本研究のみである。

### 2. 研究の目的

集積デバイスの微細化により、小面積なチップで高い計算能力が実現できる環境が整い、小体積コンピューティングという新たなパラダイムが生まれてきた。我々は、これまでに小体積コンピューティングの応用として、1mm<sup>3</sup> 級の無線給電無線通信センサノードを多量に埋め込んだ実オブジェクトによる実世界志向ユーザインタフェース iClay(図1)向けの要素技術を開発してきた。提案研究では、距離センシング、無線給電、無線通信の間で起こる電磁干渉を解決し、給電能力の向上と通信方式の策定により、これまでに開発した要素技術を 1mm<sup>3</sup> の体積に集積化する。開発した 1mm<sup>3</sup> 級センサノードを用いて iClay システムを実装し、リアルタイムユーザインタフェースとして医療や教育への応用を考え、有効性を実証する。

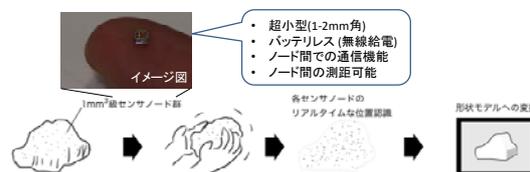


図1: 実世界志向ユーザインタフェース iClay

### 3. 研究の方法

これまでに開発してきた要素技術((1)ノード間距離測定(2)無線通信通信(3)ノード位置推定(4)無線給電)の性能向上と融合に取り組む。まず、距離測定で用いる電極と無線通信用アンテナの共通化を図るとともに、距離測定と通信の実機評価を行う。無線給電効率の向上を図り、二次電池/キャパシタを用いた蓄電制御と融合させて、ノードの継続動作を実現する。MATLAB 上で開発してきたノード位置推定アルゴリズムを GPGPU 実装し、リアルタイム形状更新に対応する。続いて、センサノードをプロトタイプ実装する。実装したプロトタイプを用いて機能と性能を評価する。多数のセンサノードを製作してシステムを実装し、提案 iClay の有用性を実証する。

### 4. 研究成果

#### 無線通信と測距技術

無線通信、測距技術について、立法 mm 級の磁界通信と電界測距が両立できるアンテナを提案した。提案アンテナは二つのスパイラルコイルから構成されており、各モードでコイルアンテナと2つの電極として利用できる。アンテナをプロトタイプ試作し、通信モードの S21 を評価したところ、6mm から 24mm の範囲で -8.3 dB から -45.1 dB であった。また、ASK/OOK 通信が可能であることを実機で確認した。また、測距モードでは cm 級の測距が可能であることを確認した。

さらに、超小型無線送信機の開発を進めた。LC 発振と電磁波放射でコイルを共用することで外部アンテナを省略する VHF 帯 OOK

トランスミッタを提案した。チップ部品を利用して試作したトランスミッタの体積は  $2.8 \times 2.8 \times 4.2$  立方 mm であった(図 2)。提案方式は小電力化と高速通信を同時に実現するため、トランスミッタの非発振時にもコイルに微弱電流を流している。これにより LC 発振の起動時間を 400ns から 40ns に削減し、1m の距離で 3Mbps の通信速度を、ビット当たりエネルギー 205pJ をそれぞれ実現した。



図 2: 開発した無線送信機

### 無線給電

小型センサノードに向けた無線給電技術の確立に向け、送受信アンテナの設計、整流回路、そして低消費電力集積回路設計技術に関する検討を行った。

磁界共鳴方式による空間電力伝送部と超低消費電力で動作するパワーマネジメントシステムを構築し、有効性を確認した。一般に送受信アンテナの設計においてインピーダンスマッチング回路が用いられる。本研究では、空間電力伝送部で外付けインダクタとキャパシタを用いないインピーダンス整合手法を提案し、シミュレーション評価と実デバイス実装を行った。送受信アンテナに負性インダクタを導入することで、送信部、共振部、そして受信部の各機能ブロックに分割し、最大電力を導出可能な設計方式を開拓した。整流回路に関する検討においては、受信アンテナから負荷側を見込んだインピーダンスの理論導出を行い、接続状態に応じてインピーダンス制御が可能であることを見出した。

また、空間電力伝送部から得られる電力を LSI の動作電圧に変換するパワーマネジメントシステム設計を行った。動作周波数を 144 MHz とした評価実験により、距離 10mm において高効率に電力伝送ができることを確認した。またパワーマネジメントシステムの評価実験により、低電圧の入力電力から 1.8V の動作電圧を生成できることを確認した。

さらに、小型センサノードで受信できる電力は限られた電力であることが想定されるため低消費電力で動作する集積回路技術の設計を行った。リファレンス回路等のアナログ要素回路技術の設計を行い、サブマイクロワットの低消費電力化を実現可能である見通しを得た。

### センサノード開発

無線給電、無線通信、ならびに測距機能を集積した小型センサノードを開発した(図 3)。センサノードは無線給電と無線通信時にア

ンテナとして用いる 2つのコイルを持つ。測距時には、2つのコイルは近くのノードに電界を生じさせる電極として働く。これらの機能を切り替えるため、通常時にオンとなる JFET を導入し、ノード内に電力が残っていない場合に自動的に無線給電モードになるように設計した。実験結果より、ノードに電力がなくても無線給電モードになって受電できることを確認した(図 4)。無線通信モードでは、10 cm の距離を 1 kbps で通信できることを確認した。さらに 30mm の範囲でノード間の距離測定が可能なことを確認した。

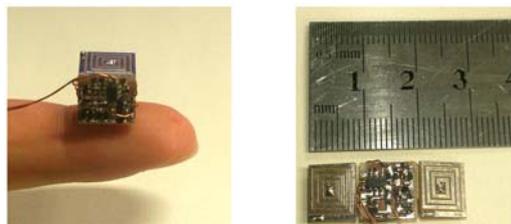


図 3: 開発したセンサノード

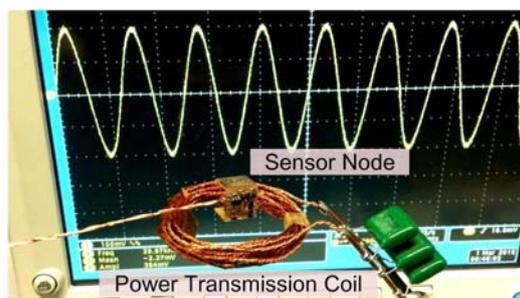


図 4: 無線給電で受電している様子

### ノード位置推定

ノード位置推定については、これまでに検討してきたクロスエントロピー法を用いた手法の目的関数を改善した。フリップ多義性による推定問題を解決するために、距離情報が得られないノード間の評価を行えるように目的関数を修正した。角や表面部分の推定誤差が改善されていることを確認した。さらに得られた距離情報からノード位置を推定する手法を GPU 実装して高速化した。従来の 80CPU を用いた実装に比べて 61.5 倍の高速化を達成した。さらに、多次元尺度構成法を用いて高速に 3次元構造を高速に再現する手法を開発した。

### アプリケーション開発

iClay の前段階として、10 個程度の無線センサノードを実装し、ぬいぐるみ内に埋め込むことでぬいぐるみの形状がリアルタイムに PC 上に再現できるシステムを実装している。このシステムの評価を進め、iClay の実装評価に進んでいく予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 30 件)

- [1] R. Shirai, T. Hirose, and M. Hashimoto, "A Multifunctional Sensor Node Sharing Coils in Wireless Power Supply, Wireless Communication and Distance Sensing Modes," Proceedings of International NEWCAS Conference, 2018.
- [2] H. Asano, T. Hirose, Y. Kojima, N. Kuroki, and M. Numa, "A fully integrated, wide load range, high power conversion efficiency switched capacitor DC-DC converter with adaptive bias comparator for ultra-low-power power management integrated circuit," Jpn. J. Appl. Phys. 57, 04FF03, 10.7567/JJAP.57.04FF03, 2018.
- [3] H. Asano, T. Hirose, T. Miyoshi, K. Tsubaki, T. Ozaki, N. Kuroki, and M. Numa, "A Sub-1- $\mu$ s Start-up Time, Fully-integrated 32-MHz Relaxation Oscillator for Low-power Intermittent Systems," IEICE Trans. Electron., vol. 101-C, no. 3, pp. 161-169, 10.1587/transele.E101.C.161, 2018.
- [4] R. Shirai, T. Hirose, and M. Hashimoto, "Dedicated Antenna Less Power Efficient OOK Transmitter for mm-Cubic IoT Nodes," Proceedings of European Microwave Conference (EuMC), pp. 101-104, 10.23919/EuMC.2017.8230809, 2017.
- [5] M. Hashimoto, R. Shirai, Y. Itoh, and T. Hirose, "Toward Real-Time 3D Modeling System with Cubic-Millimeters Wireless Sensor Nodes (Invited)," Proceedings of IEEE International Conference on ASIC, pp. 1087-1091, 10.1109/ASICON.2017.8252663, 2017.
- [6] R. Shirai, J. Kono, T. Hirose, and M. Hashimoto, "Near-Field Dual-Use Antenna for Magnetic-Field Based Communication and Electrical-Field Based Distance Sensing in mm<sup>3</sup>-Class Sensor Node," Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 124-127, 10.1109/ISCAS.2017.8050251, 2017.
- [7] K. Hirose, S. Ukawa, Y. Itoh, T. Onoye, and M. Hashimoto, "GPGPU-Based Highly Parallelized 3D Node Localization for Real-Time 3D Model Reproduction," Proceedings of International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI), pp. 173-178, 10.1145/3025171.3025183, 2017.
- [8] R. Matsuzuka, T. Hirose, Y. Shizuku, K. Shinonaga, N. Kuroki, and M. Numa, "An 80mV-to-1.8V Conversion-Range Low-Energy Level Shifter for Extremely Low-Voltage VLSIs," IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, vol. 64, issue 8, pp. 2026-2035, 10.1109/TCSI.2017.2682320, 2017.
- [9] Y. Tsuji, T. Hirose, T. Ozaki, H. Asano, N. Kuroki, and M. Numa, "A 0.1–0.6 V Input Range Voltage Boost Converter with Low-Leakage Driver for Low-Voltage Energy Harvesting," Proc. of 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2017), pp. 502-505, 10.1109/ICECS.2017.8292004, 2017.
- [10] T. Sato, T. Hirose, H. Asano, N. Kuroki, and M. Numa, "An Ultra-Low-Power Supercapacitor Voltage Monitoring System for Low-Voltage Energy Harvesting," Proc. of 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2017), pp. 498-501, 10.1109/ICECS.2017.8292003, 2017.
- [11] H. Asano, T. Hirose, Y. Kojima, N. Kuroki, M. Numa, "A wide load range switched capacitor DC-DC converter with adaptive bias comparator for ultra-low-power power management integrated circuit," Extended abstract of the 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2017), pp. 511-512, 2017.
- [12] H. Asano, T. Hirose, T. Ozaki, N. Kuroki, and M. Numa, "An Area-Efficient, 0.022-mm<sup>2</sup>, Fully Integrated Resistor-less Relaxation Oscillator for Ultra-low Power Real-time Clock Applications," Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2017), pp. 477-480, 10.1109/ISCAS.2017.8050350, 2017.
- [13] S. Masuda, T. Hirose, Y. Akihara, N. Kuroki, M. Numa, and M. Hashimoto, "Impedance Matching in Magnetic-Coupling-Resonance Wireless Power Transfer for Small Implantable Devices," Proc. of 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), pp. 1-4, 10.1109/WPT.2017.7953839, 2017.
- [14] R. Shirai, Y. Itoh, T. Fukamachi, M. Yamashita, and T. Onoye, "OptRod: operating multiple various actuators simultaneously by projected images," Proceedings of SIGGRAPH ASIA 2017 Emerging Technologies, 10.1145/3132818.3132828, 2017.
- [15] T. Ozaki, T. Hirose, H. Asano, N. Kuroki, and M. Numa, "Ultra-low quiescent current and wide load range low-dropout linear regulator with self-biasing technique for micro-power battery management," Japanese Journal of Applied Physics 56, 04CF11, 10.7567/JJAP.56.04CF11, 2017.
- [16] H. Asano, T. Hirose, T. Miyoshi, K. Tsubaki, T. Ozaki, N. Kuroki, and M. Numa, "Sub-1- $\mu$ s Start-up Time, 32-MHz Relaxation Oscillator for Low-Power Intermittent VLSI Systems," Proc. of The 22th Asia and South Pacific Design Automation Conference

- (ASP-DAC), pp. 35-36, 10.1109/ASPDAC.2017.7858289, 2017.
- [17] Y. Kojima, T. Hirose, K. Tsubaki, T. Ozaki, H. Asano, N. Kuroki, M. Numa, "A Fully On-Chip Three-Terminal Switched Capacitor DC-DC Converter for Low-Voltage CMOS LSIs," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, No. 4S, 04EF09, 10.7567/JJAP.55.04EF09, 2016.
- [18] T. Ozaki, T. Hirose, H. Asano, N. Kuroki, and M. Numa, "Fully-Integrated High-Conversion-Ratio Dual-Output Voltage Boost Converter with MPPT for Low-Voltage Energy Harvesting," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 51, no. 10, pp. 2398-2407, 10.1109/JSSC.2016.2582857, 2016.
- [19] T. Ozaki, T. Hirose, T. Nagai, K. Tsubaki, N. Kuroki, and M. Numa, "A highly efficient switched-capacitor voltage boost converter with nano-watt MPPT controller for low-voltage energy harvesting," IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E99-A, no. 12, pp. 2491-2499, 10.1587/transfun.E99.A.2491, 2016.
- [20] H. Asano, T. Hirose, T. Miyoshi, K. Tsubaki, T. Ozaki, N. Kuroki, M. Numa, "A Fully Integrated, 1-us Start-Up Time, 32-MHz Relaxation Oscillator for Low-Power Intermittent Systems," Proc. of 14th IEEE International NEWCAS conference, 10.1109/NEWCAS.2016.7604819, 2016.
- [21] H. Asano, T. Hirose, K. Tsubaki, T. Miyoshi, T. Ozaki, N. Kuroki, M. Numa, "A 1.66-nW/kHz, 32.7-kHz, 99.5ppm/°C, Fully Integrated Current-Mode RC Oscillator for Real-Time Clock Applications with PVT Stability," Proceedings of the European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC), pp. 149-152, 10.1109/ESSCIRC.2016.7598264, 2016.
- [22] T. Ozaki, T. Hirose, H. Asano, N. Kuroki, and M. Numa, "A Self-Biased Low-Dropout Linear Regulator for Ultra-low Power Battery Management," Extended abstract of the 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2016), pp. 463-464, 2016.
- [23] Y. Akihara, T. Hirose, S. Masuda, N. Kuroki, M. Numa, and M. Hashimoto, "Analytical Study of Rectifier Circuit for Wireless Power Transfer Systems," Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), pp. 338-339, 2016.
- [24] S. Masuda, T. Hirose, Y. Akihara, N. Kuroki, M. Numa, and M. Hashimoto, "Highly-Efficient Power Transmitter Coil Design for Small Wireless Sensor Nodes," Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), pp. 512-513, 2016.
- [25] T. Ozaki, T. Hirose, H. Asano, N. Kuroki, M. Numa, "A 0.38-uW Stand-by Power, 50-nA-to-1-mA Load Current Range DC-DC Converter with Self-Biased Linear Regulator for Ultra-Low Power Battery Management," Proc. of Tech. Papers, IEEE Asian Solid-State Circuits Conference 2016 (A-SSCC 2016), pp. 225-228, 10.1109/ASSCC.2016.7844176, 2016.
- [26] T. Shinada, M. Hashimoto, and T. Onoye, "Proximity Distance Estimation Based on Electric Field Communication between 1mm<sup>3</sup> Sensor Nodes," Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 10.1007/s10470-015-0563-6, May 2015.
- [27] T. Ozaki, T. Hirose, H. Asano, N. Kuroki, M. Numa, "A Fully-Integrated, High-Conversion-Ratio and Dual-Output Voltage Boost Converter with MPPT for Low-Voltage Energy Harvesting," Proc. of Tech. Papers, IEEE Asian Solid-State Circuits Conference 2015 (A-SSCC 2015), pp. 297-300, 10.1109/ASSCC.2015.7387486, 2015.
- [28] Y. Kojima, T. Hirose, K. Tsubaki, T. Ozaki, H. Asano, N. Kuroki, and M. Numa, "A Fully On-Chip Switched-Capacitor DC-DC Power Converter with Startup/Fail-Safe Circuit," Extended abstract of the 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2015), pp. 158-159, 2015.
- [29] Y. Akihara, T. Hirose, Y. Tanaka, N. Kuroki, M. Numa, and M. Hashimoto, "A Wireless Power Transfer System for Small-Sized Sensor Applications," Extended abstract of the 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2015), pp. 154-155, 2015.
- [30] R. Matsuzuka, T. Hirose, Y. Shizuku, N. Kuroki, and M. Numa, "A 0.19-V Minimum Input Low Energy Level Shifter for Extremely Low-Voltage VLSIs," Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 2948-2951, 10.1109/ISCAS.2015.7169305, 2015.

〔学会発表〕(計 19 件)

- [1] 白井僚, 河野仁, 廣瀬哲也, 橋本昌宜, "近傍界磁界通信・電界測距共用 mm<sup>3</sup>級アンテナの実装と評価," 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, 2017.
- [2] 白井僚, 廣瀬哲也, 橋本昌宜, "IoT ノード向けアンテナ組込型小体積高効率トランスミッタの開発," 電子情報通信学会 集積回路研究会, 2017.
- [3] 浅野大樹, 廣瀬哲也, 椿 啓志, 三好太朗, 尾崎年洋, 黒木修隆, 沼 昌宏, "時間計測アプリケーションに向けた超低電力フルオンチップ電流比較型 RC 発振器," 電子情報通信学会 集積回路研究会, 2017.

[4] 辻 佑斗, 廣瀬 哲也, 尾崎 年洋, 浅野大樹, 小國 一道, 黒木 修隆, 沼 昌宏, "極低入力電圧を昇圧するチャージポンプ回路の設計"第 29 回 回路とシステムワークショップ, 2016.

[5] 浅野大樹, 廣瀬哲也, 三好太朗, 椿 啓志, 尾崎年洋, 黒木修隆, 沼 昌宏, "間欠動作型 VLSI システムに向けた高速起動可能な 32-MHz フルオンチップ弛張発振器," LSI とシステムのワークショップ, 2016.

[6] 浅野大樹, 廣瀬哲也, 三好太朗, 椿 啓志, 尾崎年洋, 黒木修隆, 沼 昌宏, "高速起動を特徴とした間欠動作型 VLSI システム用 32-MHz オンチップクロック源回路," 電子情報通信学会 集積回路研究専門委員会 集積回路研究会, 2016.

[7] 浅野大樹, 廣瀬哲也, 三好太朗, 椿 啓志, 尾崎年洋, 黒木修隆, 沼 昌宏, "1 マイクロ秒以内の高速起動を特徴とする高精度 32-MHz 弛張発振器," 平成 28 年度 VDEC デザイナーズフォーラム, 2016.

[8] 竹川和希, 廣瀬哲也, 尾崎年洋, 浅野大樹, 黒木修隆, 沼 昌宏, "適応バイアス技術を用いた低電流・高速スイッチトキャパシタ型増幅回路," 電子情報通信学会集積回路研究会, 2016.

[9] 佐藤孝憲, 廣瀬哲也, 尾崎年洋, 浅野大樹, 黒木修隆, 沼 昌宏, "超低電力・環境発電デバイスに向けた最大発電量予測システム," 電子情報通信学会 集積回路研究会, 2016.

[10] 尾崎年洋, 廣瀬哲也, 長井崇浩, 椿啓志, 黒木修隆, 沼 昌宏, "低電圧入力で動作するマイクロ環境発電のための高効率 3 端子昇圧コンバータ," 平成 27 年度 VDEC デザイナーズフォーラム, 2015.

[11] 松塚 凌, 廣瀬 哲也, 雫 譲, 黒木 修隆, 沼 昌宏, "幅広い電圧レベル変換を実現する低消費電力レベルシフタ," 平成 27 年度 VDEC デザイナーズフォーラム, 2015.

[12] 小島裕太, 廣瀬哲也, 椿 啓志, 尾崎年洋, 浅野大樹, 黒木修隆, 沼 昌宏, "スイッチトキャパシタ回路を用いたオンチップ電源回路の高効率化," 第 28 回 回路とシステムワークショップ, 2015.

[13] 佐渡健司, 廣瀬哲也, 椿 啓志, 尾崎年洋, 浅野大樹, 松本 香, 黒木修隆, 沼 昌宏, "高耐圧 CMOS プロセスによる超低電力・適応バイアス型シリーズレギュレータ," 第 28 回 回路とシステムワークショップ, 2015.

[14] 秋原優樹, 廣瀬哲也, 田中勇氣, 黒木修隆, 沼 昌宏, 橋本昌宜, "小型センサデバイスに向けた無線給電システムの設計," 第 28 回 回路とシステムワークショップ, 2015.

[15] 坪井惇紀, 廣瀬哲也, 尾崎年洋, 浅野大樹, 黒木修隆, 沼 昌宏, "適応バイアス技術を用いた超低電力・高速オペアンプの高性能化," 第 28 回 回路とシステムワークショップ, 2015.

[16] 篠永恭平, 廣瀬哲也, 雫 譲, 松塚 凌, 黒木修隆, 沼 昌宏, "サブスレッショルド領

域動作に適したスタンダードセルのサイジング手法," 第 28 回 回路とシステムワークショップ, 2015.

[17] 三好太朗, 廣瀬哲也, 椿 啓志, 浅野大樹, 尾崎年洋, 黒木修隆, 沼 昌宏, "高速起動を特徴とするフルオンチップ 32 MHz 弛張発振回路," 第 28 回 回路とシステムワークショップ, 2015.

[18] 佐渡健司, 廣瀬哲也, 椿啓志, 尾崎年洋, 浅野大樹, 松本 香, 黒木修隆, 沼 昌宏, "振動エネルギーを用いた環境発電のための超低電力・適応バイアス型シリーズレギュレータ," 第 41 回アナログ RF 研究会, 2015.

[19] 尾崎年洋, 廣瀬哲也, 長井崇浩, 椿 啓志, 黒木修隆, 沼 昌宏, "低電圧エネルギー・ハーベスティングに向けた高効率 3 端子昇圧コンバータ," LSI とシステムのワークショップ, 2015.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 昌宜 (HASHIMOTO, Masanori)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 80335207

### (2) 研究分担者

廣瀬 哲也 (HIROSE, Tetsuya)  
神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70396315

伊藤 雄一 (ITO, Yuichi)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 40359857