

## 研究成果報告書

「AI/IoT エッジコンピューティングに向けた超小型太陽電池に関する研究」

神戸大学工学研究科

松本 香

### 1 研究の背景と目的

近年、AI (Artificial Intelligence) ・ IoT (Internet of Things) と呼ばれる高度情報化社会の実現に注目が集まっている。あらゆるモノ同士をインターネットに接続することで、情報を共有・活用する次世代情報社会のことである。収集した情報は、医療・流通・防犯・農業等のあらゆる分野に応用され、我々の生活の質を高めることが期待されている。これらの社会では、我々の生活の質を高めることが期待されている。

図1のようなエッジコンピューティングを担う超小型ウェアラブル IoT デバイスの実現に向けた技術課題として、長期間にわたり【バッテリーレス】・【メンテナンスフリー】動作が可能なが求められる。IoT デバイスの実現に向けた技術課題として、【電力供給】の課題があげられる。その解決手法として、微小なエネルギーを収穫（ハーベスタ）して、電力に変換する技術である環境発電（エネルギーハーベスティング）が注目されている。

超小型ウェアラブル IoT デバイスへの運用には、電力供給の課題が挙げられる。アプローチとして、小型ボタン電池等の利用が考えられるが、サイズが大きくなる課題に加えて、①環境面（電池廃棄問題）、②資源面（希少金属資源の枯渇）、そして③労働（メンテナンスコスト増）の課題から、化学電池に代わるエネルギー源が期待されている。周りの環境から得られる再生可能エネルギーを用いた環境発電技術には様々な方法があるが、今回は光エネルギーを利用した超小型太陽電池（PV cell: Photovoltaic cell）の高効率利用について検討した。PV cell を使用するにあたり、いくつかの課題がある。1 つ目は、PV cell の出力電圧が 0.6V 以下と低電圧なことである。2 つ目は PV セルの出力電圧は環境によってかなり左右されてしまうことである。3 つ目は PV セルの直列化の問題である。PV セルを直列に接続することで 0.6V 以上の電圧が出力可能となるが、電流の値は最も少ない電流が流れる。単一 PV cell の出力電圧を、IoT デバイスや二次電池に利用できる電圧まで昇圧する回路が求められる。そこで本研究では、超小型 IoT ウェアラブルデバイスの自立電源化を目指し、太陽光などの環境から得られる再生可能エネルギーを高効率に利用する技術を開拓することを目的とする。

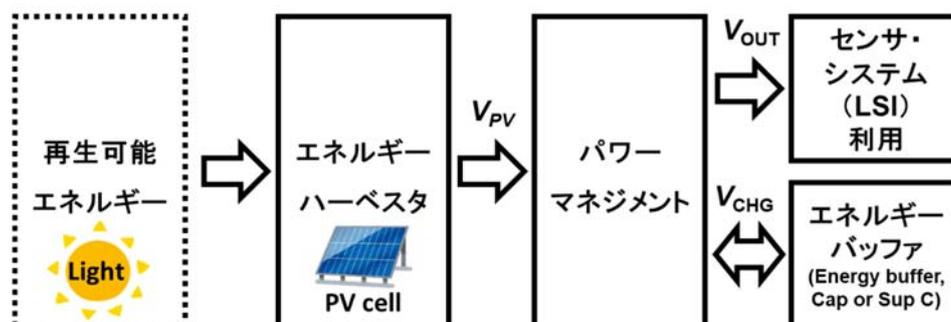


図1 超小型ウェアラブル IoT 機器の構成例

## 2 研究方法・研究内容

図2にPV cellの特性を示す。この図では、黒線が出力電圧特性を示し、赤線が出力電力特性を示す。電流-電圧特性では、PV cellの出力端子から電流を出力すると、出力端子の電圧は開放電圧から徐々に低下し、ある一定の電流付近で急激に低下する。一方、出力電力はPV cellの出力端子から電流を出力すると、出力電力は増加していき、ある一点で電力が最大となり、その後電力は低下していく。このとき、多くのPV cellでは最大電力( $P_{MAX}$ )点における出力電圧( $V_{MPP}$ )は、開放電圧( $V_{oc}$ )の約80%となることが知られている。

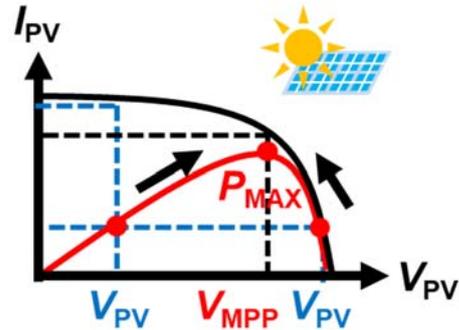


図2 太陽電池の特性

図3に、想定しているパワーマネジメントシステムの構成を示す。低電圧エネルギーハーベスタであるPV cellの出力電圧で直接センサ・システムを駆動することはできないため、パワーマネジメントシステムで所望の電圧に調整し、エネルギーバッファに充電、または、アプリケーションを駆動する。このシステムは、昇圧回路とMPPT制御回路で構成されている。昇圧回路は、PV cellから得られる低出力電圧( $V_{PV}$ )を、IoTデバイスや二次電池で扱える電圧に昇圧する回路である。また、MPPT制御回路は、昇圧回路部の動作周波数を制御することで、システムの高効率化を行うために使用する。これらの回路により、光エネルギーハーベスティングに向けた昇圧システムの高効率化を実現する。

MPPT制御回路は、昇圧回路を効率よく動作させるために最大電力点追従(MPPT: Maximum Power Point Tracking)制御を行う。これは、太陽電池から供給する電力量を最大化し、負荷へ供給する電力量を最大化できる回路である。従来回路では、MPPT制御自身の消費電力が大きいため、システム全体の効率が低下していた。また、供給する電力量を最大化するまでに時間を必要とした。そこで、本研究ではMPPT制御の高効率化に向け逐次比較型MPPT制御の提案を行い、昇圧回路を搭載した高効率なパワーマネジメント回路について検討を行う。

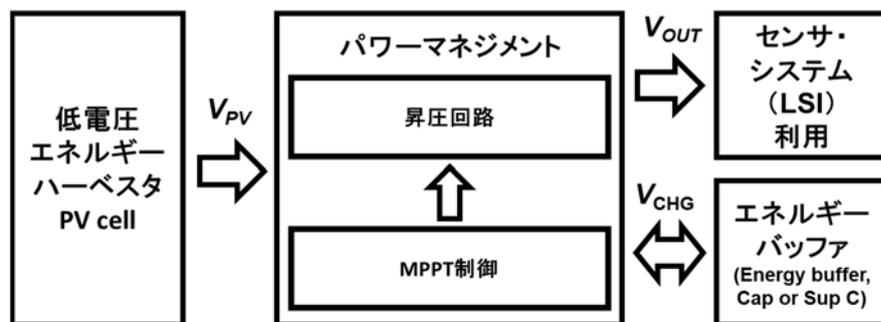


図3 本研究で開拓するパワーマネジメントシステム

また、従来のアナログ MPPT 制御回路では、アナログ電圧値として制御情報を保持していたため、リーク電流の影響等により時間とともに電圧値が減少し、誤った比較結果を出力するという問題が生じた。そこで本研究では、デジタル MPPT 制御を用い、制御情報をデジタルコードとして保持することで、リーク電流等に影響されずに結果を得られる回路を提案する。

### 3 研究成果

提案するパワーマネジメントシステムについて、TSMC 0.18- $\mu\text{m}$  プロセスにて実際にチップを製作し、測定評価を行った。今回提案した回路は、フルオンチップで構成し、昇圧回路 (SC VBC) と MPPT 制御回路を実装した。図 4 に今回製作したチップの写真を示す。提案するシステムの面積は  $1.57 \text{ mm}^2$  であった。面積の大部分は、6 倍昇圧回路 (SC VBC) 内部のキャパシタが占めている。図 5 に PV cell を  $200 \text{ lx}$  で照らし、測定した PV cell と提案システムの入力電圧結果を示す。MPPT 制御前は、PV cell の開放電圧  $V_{PV}$  は  $0.58 \text{ V}$  であった。MPPT 制御を行った後、最大電力点

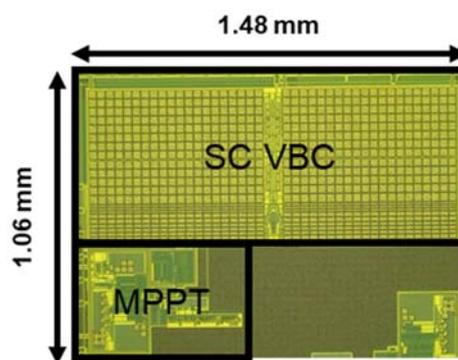


図 4 チップ写真

(開放電圧の約 80%) である  $0.46 \text{ V}$  を出力することを確認した。また、昇圧システムの入力電圧  $V_{OUT}$  は、約 6 倍を出力しており、設計した回路が所望の動作を行っていることを確認した。図 6 に電力変換効率を示す。負荷電流が  $2.21 \mu\text{A}$  のとき、最大 63.6% の電力変換効率を達成した。これは、デジタル MPPT 回路と高効率な設計により、従来のパワーマネジメントシステム[1-3]と比較して高い電力変換効率を達成した。

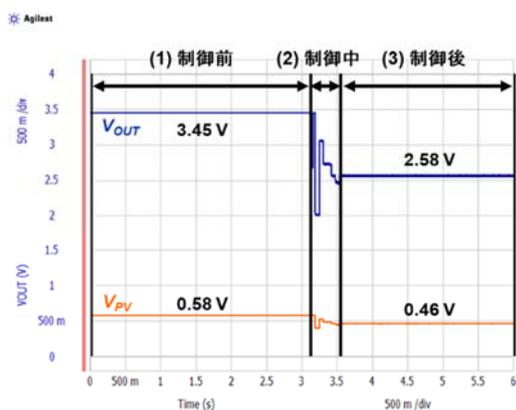


図 5 PV cell と提案システムの入力電圧

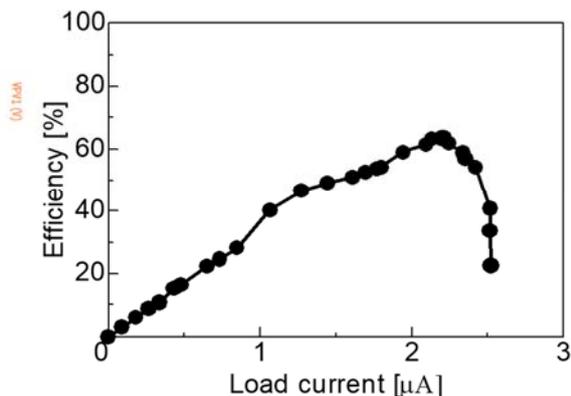


図 6 電力変換効率

### 4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究では、小型センサノードのバッテリーレス・メンテナンスフリー動作を実現する創造性の高い回路技術を実現する。システムが利用する電力を、その場発電、その場蓄電、その場利用することを特徴とし、我々の周りのインフラ・環境・生体情報の取得を目的と

した次世代情報システムの実現に向けた基盤技術開拓を行っている。超低消費電力 LSI と小型発電・蓄電デバイスを集積統合した次世代の技術基盤の発展が期待される。

<参考文献>

- [1] J. Wanyeong et al., *IEEE JSSCC*, pp. 398 - 399, 2014.
- [2] J.tasai et al., *IEEE JSSC*, 2015, pp. 2533 - 2548.
- [3] X.Wu et al., *IEEE JSSC*, 2017, pp. 972 - 984.

<研究発表>

国際学会

1. K. Matsumoto, R. Ikeda, H. Sebe, N. Kuroki, M. Numa, D. Kanemoto, T. Hirose, “Switched-Capacitor Voltage Boost Converter with Digital Maximum Power Point Tracking for Low-Voltage Energy Harvesting,” Extended abstract of the 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2022), K-9-07, pp. 800-801, Sep. 26-29, 2022.

学術論文

1. K. Matsumoto, R. Ikeda, H. Sebe, N. Kuroki, M. Numa, D. Kanemoto, T. Hirose, “Fully-integrated switched-capacitor voltage boost converter with digital maximum power point tracking for low-voltage energy harvesting”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 62, SC1071-1-SC1071-9, 2023.