



|              |                                                                                       |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | 〈解説〉圧縮センシングを活用した省電力計測：大阪・関西万博におけるバッテリーフリー無線脳波伝送の公開実験紹介                                |
| Author(s)    | 兼本, 大輔                                                                                |
| Citation     | 計測技術 2026年3月号. 2026, 54(4), p. 19-22                                                  |
| Version Type | VoR                                                                                   |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/103969">https://hdl.handle.net/11094/103969</a> |
| rights       |                                                                                       |
| Note         |                                                                                       |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# 圧縮センシングを活用した省電力計測

Compressed-Sensing-Enabled Low-Power Measurement: An Overview of the Public Demonstration of Battery-Free Wireless EEG Transmission at Expo 2025 Osaka, Kansai, Japan

＜大阪・関西万博におけるバッテリーフリー無線脳波伝送の公開実験紹介＞

大阪大学 兼本 大輔

## 1. はじめに

デジタルツインやサイバーフィジカルシステムといった次世代情報基盤技術では、物理空間の状態を高精度かつ連続的に取得し、必要な情報をサイバー空間へ取り込む仕組みが不可欠である。こうした要請に応える手段として、無線センサーは配線不要で設置自由度が高く、ヘルスケアからインフラ監視まで幅広い領域で利用されている。

例えば生体領域では、脳波や心電図計測の無線化により、装着者から離れた場所でも記録・解析が行え、リアルタイム活用が進みつつある。インフラ領域でも、設備の状態量を経無線で収集することで、遠隔地での構造ヘルスマモニタリングの研究開発が進展している。

無線センサーシステムを社会実装として広く展開する上で、本質的な制約の一つが電力である。高密度な連続観測を実施すると、A/D変換とデータ管理、ならびに無線送信が繰り返し動作するため、サンプリング周波数や観測点数の増加に伴い消費電力が増大する。とりわけ小型の無線センサーでは、搭載可能な電源容量が限られるため、長時間動作の確保が難しくなる。

一方、光や熱、振動など身の回りのエネルギーを電力として活用する環境発電（エナジーハーベスティング）を用いれば、外部電源を要さず、バッテリー交換に依存しないバッテリーフリーセンシングの実現が見えてくる。ただし環境発電で回収可能な電力は小さく、

従来構成のままでは電力収支が成立しない場合が少なくない。したがって、電力供給の制約を乗り越えるには、無線センサー部の消費電力を下げる技術が重要である。

無線センサー部の消費電力は、A/D変換器や無線回路などの集積回路ブロックに大きく依存するため、従来は回路レベルの省電力化が主な解決策として進められてきた。しかし、集積回路の省電力化は進展してきたものの、従来手法の延長による低減は頭打ちになりつつある。例えばA/D変換器では、半導体微細加工技術の進化による電源電圧低下が設計制約を課し、さらなる省電力化が難しくなりつつある<sup>(1)</sup>。したがって、従来とは大きく異なる新しい省電力化技術が必要となる。このため、回路設計と信号処理を協調させ、取得段階からデータ量と動作回数を抑えるアプローチが重要となる。中でも圧縮センシング(Compressed Sensing)<sup>(2)</sup>は、取得データ量ならびに無線伝送量の削減と、高精度な信号再構成を両立する枠組みとして有効であり、省電力無線センシングの実装手段として注目されている。

本稿では、数式を用いず直観的な説明に基づき、圧縮センシングを用いた省電力無線センサーシステムの考え方を解説する。また研究成果の一例として、大阪・関西万博にて実施した、バッテリーや外部電源を用いず、体温と外気温の温度差から得られる僅かなエネルギーのみで無線脳波伝送システムを動作させた公開実験について紹介する。

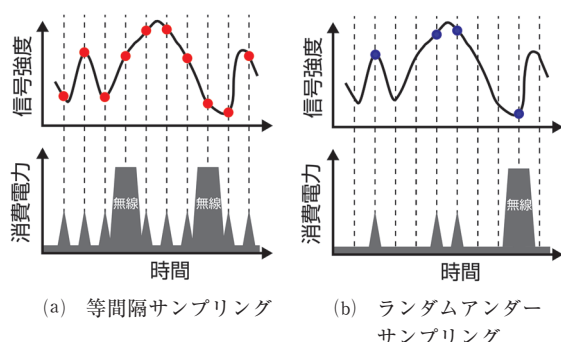
## 2. 圧縮センシングを活用した 省電力無線センサーシステム

圧縮センシングは、信号を「全部測ってから圧縮する」のではなく、最初から必要最小限だけ測り、あとで信号を再構成する。生体信号や機械振動のような信号には、「周期性」や「滑らかさ」といった“構造”があり、見た目のデータ点数ほど自由度は大きくないことが多い。よって、観測点を適切に削減しても、受信側で計算処理を行うことで、元の信号を一定の精度で再構成できる。

無線センサーシステムにおけるセンサー部は、消費電力の多くを「A/D変換によるサンプリングとデータ管理」、また「無線送信」が占める。したがって、サンプリング回数そのものが減るため回路の動作回数が低減するだけでなく、送るデータが減るため、センサー部の省電力化につながる。つまり圧縮センシングは、「後段の信号処理で信号を再構成できること」を前提にして、センサー部の仕事量（電力）を減らす技術である。

圧縮センシングの考え方をシステムに採用する際、省電力化に重要なのは、「センサー部の処理を複雑にしない」ことである。我々はその実装方法として、ランダムアンダーサンプリング<sup>(3)</sup>に注目している。これは、信号を等間隔に毎回サンプルする代わりに、サンプルする時刻をランダムに間引く方法である。圧縮のための特殊な回路を追加するのではなく、A/D変換器のサンプリングタイミングを制御するだけでよい。よって、回路実装が簡単で、省電力化と相性がよい。

第1図(a)は従来の多くのセンサーシステムで採用されてきた等間隔サンプリングである。一定の間隔で連続的にデータを取得するため、データ点数が多く、結果として無線送信の回数・送信量が増える。つまり、図の下段に示すように、サンプリング回数が増えるほどA/D変換器、および周辺回路の動作回数が増え、その分の消費電力が増大する。さ



第1図 サンプリングと消費電力の関係

- (a)一般的なセンサーで採用されている等間隔サンプリング  
(b)ランダムに間引きながらサンプリングし、少ないデータを取得・無線伝送するため、省電力化が可能

らに、無線通信に伴う大きな電力消費がその都度発生するため、消費電力の削減は難しい。

一方、第1図(b)のランダムアンダーサンプリングでは、A/D変換器が間欠動作となるため、サンプリングに伴う回路動作回数が減る。さらに、観測点を間引くためデータ量が減り、無線送信の頻度や送信量が小さく抑えられる。つまり、図の下段のようにセンサー部の省電力化が可能である。間引いた分の情報は受信側で再構成が必要になるが、受信側は計算資源を確保しやすいため、センサー部を軽くして全体最適を取る構成が現実的である。

なお「ランダム」と表現しているが、送信側と受信側が同じ間引きパターンを共有する必要があるため、実際には両方で再現可能な疑似ランダムを用いることが一般的である。これにより、受信側は「どのタイミングで測ったか」を把握でき、観測点の集合から元信号の再構成に利用できる。

再構成手法では、元信号が特定の基底に対してスパースに表現できる性質を利用する。一般にはDCT (Discrete Cosine Transform) 基底等の固定基底を用いるが、固定基底では信号の個体差に追従できず、十分なスパース性が得られない場合がある。つまり、高圧縮による省電力化を狙うほど再構成精度が悪化しやすく、省電力化と信号精度がトレードオ

フの関係となる。

我々は、過去に取得した信号（時間領域波形）を活用し、対象信号に適合した高スパースな表現を与える技術を有している<sup>(4)</sup>。このため、送信データ量を大きく削減しても信号精度を維持しやすい。したがって、無線伝送を含むシステム全体の消費電力が下がり、高圧縮と高精度を同時に満たすセンシングが可能となる。

実装面でも、既存のマイコン上でランダムアンダーサンプリングに基づく無線脳波伝送を実装し、低消費電力でシステムが成立することを確認している。さらに、同等機能の専用回路（ASIC）構成と比較しても、消費電力の低減が達成できている<sup>(5)</sup>。つまり、本省電力技術をセンサーシステムに適用することで、得られる電力が限られるエナジーハーベスターを用いたバッテリーフリーセンサーシステムの実現が期待される。そこで本記事では、圧縮センシングを活用したセンサーシステムの一例として、大阪・関西万博にて実施した、体温と外気温の温度差から得られる僅かなエネルギーのみで無線脳波伝送システムを動作させた公開実験を取り上げ、実環境における成功例について説明する。

### 3. 大阪・関西万博で実施した公開実験

2025年9月15日、我々は「省エネ技術で未来を創る 兼本グループ」（写真1）として、大阪・関西万博の「TEAM EXPOパビリオン」（夢洲）にて、研究紹介動画・ポスター展示、および講演を行った。さらに、圧縮センシング技術を用い、体温と外気温の温度差から得られる僅かなエネルギーのみで動作する無線脳波伝送システムの公開実験を実施した（写真2）。

本実験の狙いは、環境発電で得られる僅かな電力のみであっても、我々の提案する省電力技術により、信号取得と無線伝送が動作することを実証する点にある。公開実験では、収録済みの脳波信号をシステムの入力信号とし



写真1

大阪・関西万博にて展示を行った「省エネ技術で未来を創る 兼本グループ」。

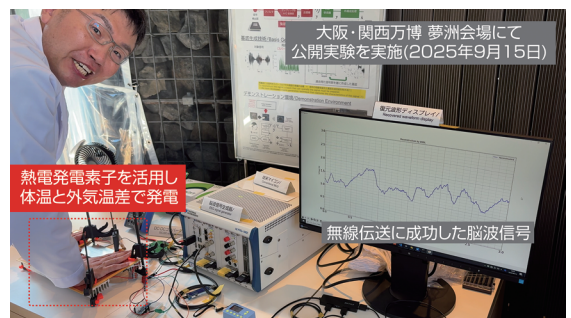


写真2

当日の公開実験の様子。圧縮センシングを活用した省電力化技術により、体温と外気温（32.5度）差で発電して得られた僅かなエネルギーだけで無線脳波伝送に成功。

て用いた。ランダムアンダーサンプリングに対応するようにファームウェアを改変した市販マイコン（A/D変換器、および無線機を内蔵）をセンサー側に用いた。受信側には、過去に取得した信号から構成した基底と再構成アルゴリズムを実装し、システム全体として高圧縮と高い再構成精度の両立を目指した。当日の実験では、体温と外気温（32.5℃）の僅かな温度差を熱電発電素子に与え、そこで得られた僅かな電力のみで無線脳波伝送システムが動作することを確認した。

公開実験では、来場者に対して「なぜランダムアンダーサンプリングが省電力化に直結するのか」、および「なぜ間引いても信号を再構成できるのか」について、ポスターと実機デモを組み合わせ示しながら解説した。

本展示に関する資料として、特設ページ<sup>(6)</sup>に研究説明動画や当日掲示したポスター等を掲載している。また、当日の公開実験の様子を収めた動画<sup>(7)</sup>、および展示全体を紹介する動画<sup>(8)</sup>もYouTube上で公開している。

## 4. おわりに

本稿では、受信側での再構成を前提に、センサー部の観測点をランダムアンダーサンプリングにより削減し、送信データ量と回路動作回数を同時に低減する省電力化手法を述べた。さらに、過去に得た信号を活用して対象信号に適合したスパース表現を実現し、高圧縮（省電力）と高い再構成精度を両立するシステム構成を示した。

提案手法により、大阪・関西万博において、体温と外気温の温度差由来の僅かなエネルギーのみで無線脳波伝送が可能であることを確認した。今後は、無線脳波伝送にとどまらず、多様なセンサーシステムへの産業応用に向けた検討を進めるとともに、高圧縮と高精度再構成の両立に関する学術研究をさらに深化させる予定である。

## 〔参考〕

- 【Web】 <https://kanemoto.tech>



- 【X】 @DaisukeKanemoto  
<https://x.com/daisukekanemoto>



- 【YouTube】  
[https://www.youtube.com/@KANEMOTO\\_GIKEN](https://www.youtube.com/@KANEMOTO_GIKEN)



- センサーの省電力化に興味のある方は、[contact@kanemoto.tech](mailto:contact@kanemoto.tech)まで。



## 〔謝辞〕

本稿で解説した研究は、JSPS科研費JP24K02914の助成を受けたものです。また、一部は(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP20004)の結果得られたものです。

## <参考文献>

- (1) D. Kanemoto : “Technical Note-Slowdown in the Energy Efficiency of Analog-to-Digital Converters and a Compressed-Sensing-Based Solution”, OUKA, pp.1-4 (Jun. 2025)
- (2) D. L. Donoho : “Compressed sensing”, IEEE Trans. Inf. Theory, Vol.52, No.4, pp.1289-1306 (Apr. 2006)
- (3) Y. Okabe, D. Kanemoto, O. Maida, and T. Hirose : “Compressed Sensing EEG Measurement Technique with Normally Distributed Sampling Series”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E105-A, No.10, pp.1429-1433 (Oct. 2022)
- (4) D. Kanemoto, and T. Hirose : “EEG Measurements with Compressed Sensing Utilizing EEG Signals as the Basis Matrix”, in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS), pp.1-5 (May 2023)
- (5) D. Kanemoto, E.Takimoto, and T. Hirose : “Development of Low-Power and High-Accuracy Wireless EEG Transmission System Using Compressed Sensing with an EEG Basis” in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS), pp.1-5 (May 2025)
- (6) <https://sites.google.com/view/expo2025dkanemoto/top>



- (7) <https://www.youtube.com/watch?v=H7k2fVm8veQ>



- (8) <https://www.youtube.com/watch?v=EFvUjuLU2YM>



(筆者紹介はp.79参照)

---

以下は本文中に掲載されなかった筆者の紹介です

**兼本大輔**

大阪大学 大学院工学研究科 准教授

〈主なる業務歴および資格〉

- 専門：集積回路設計・システム実装・信号処理
- 研究：ソフトウェアとハードウェアの協調設計による省電力・バッテリーフリーセンシングシステムの実現



(原稿掲載は19頁)

---