

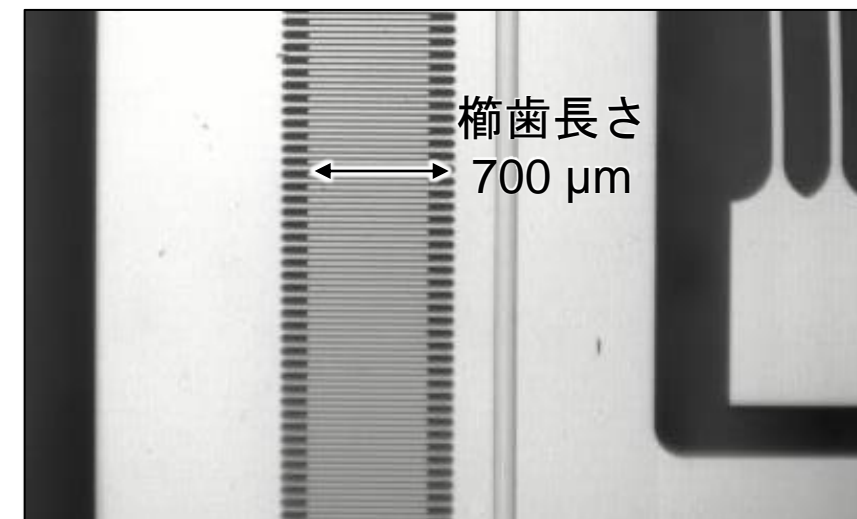
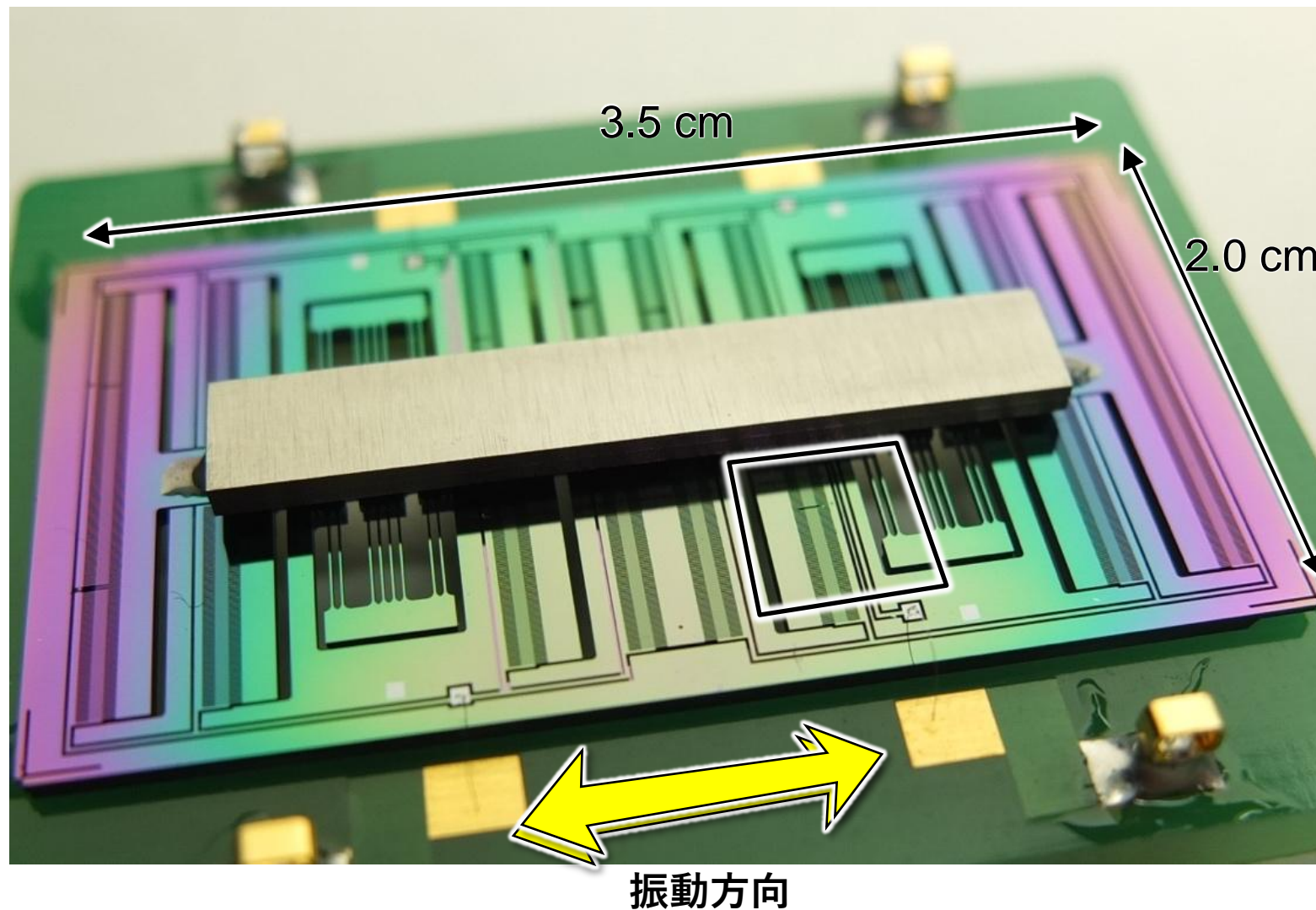
振動発電の高出力化によって 自己発電型加速度センサを実現

神戸大学 大学院工学研究科 機械工学専攻
准教授 本間 浩章

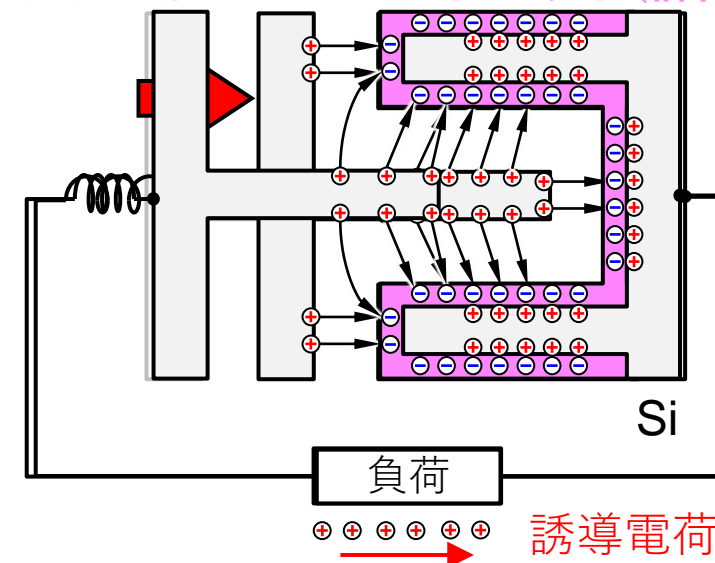
2025年10月30日

研究実績

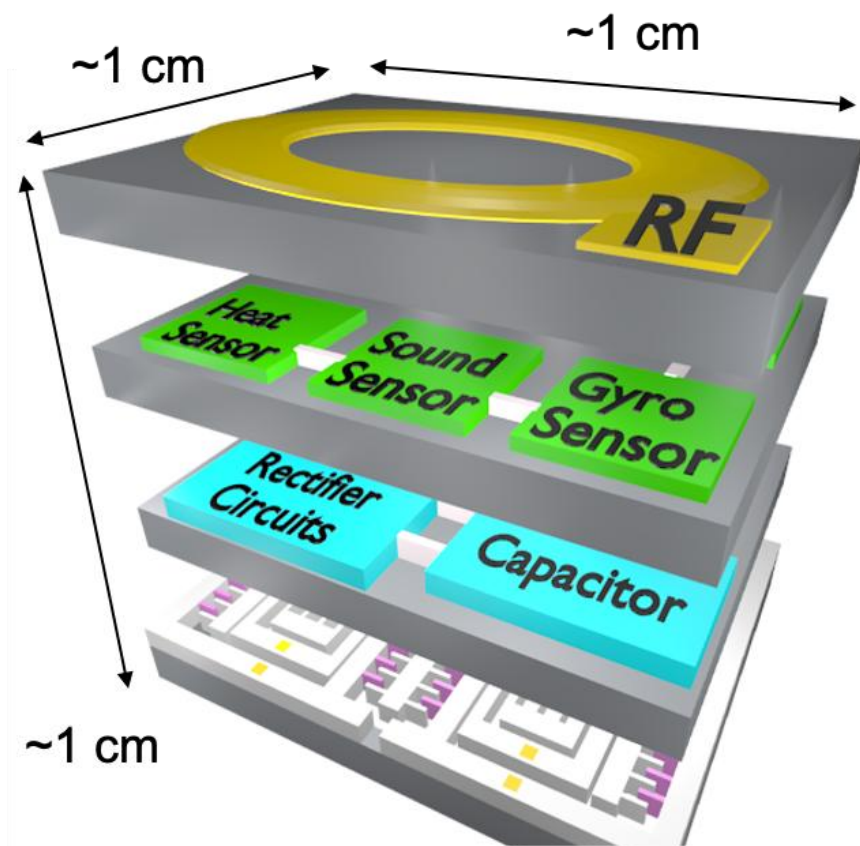
微弱振動を電気に変換するMEMS振動エネルギーハーベスタ



カリウムイオンエレクトレット(櫛歯側面)

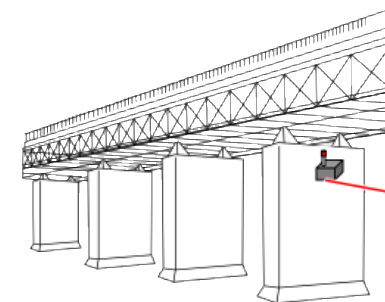


自立型無線センサ端末による環境モニタリング



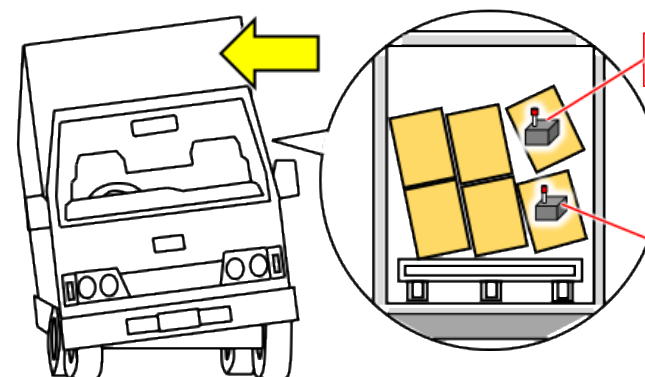
自立型無線センサ端末

MEMSセンサ+無線機を様々な箇所に設置
多種多様なアプリケーションを構築可能



橋梁やビルの自動劣化診断システム

加速度センサによる固有振動数変化の検出

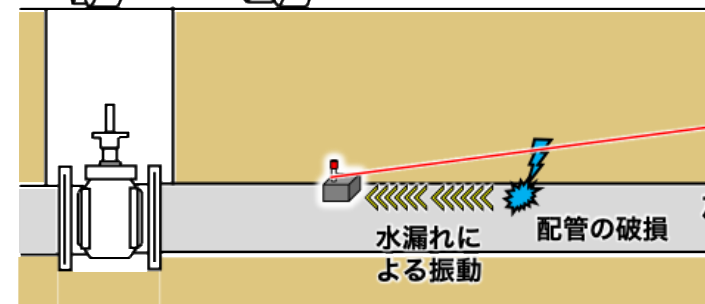


製品の異常温度検知用データロガー

温度センサによる保存温度の監視

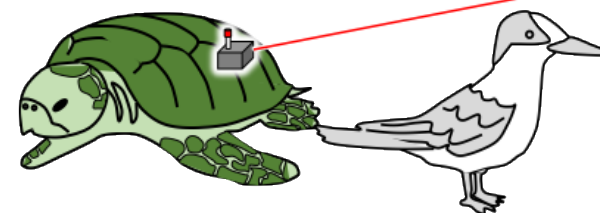
製品への衝撃検知用データロガー

加速度センサによる衝撃の監視



配管からの水漏れやガス漏れ監視

加速度センサによる固有振動数変化の検出



生物の生態調査や健康管理

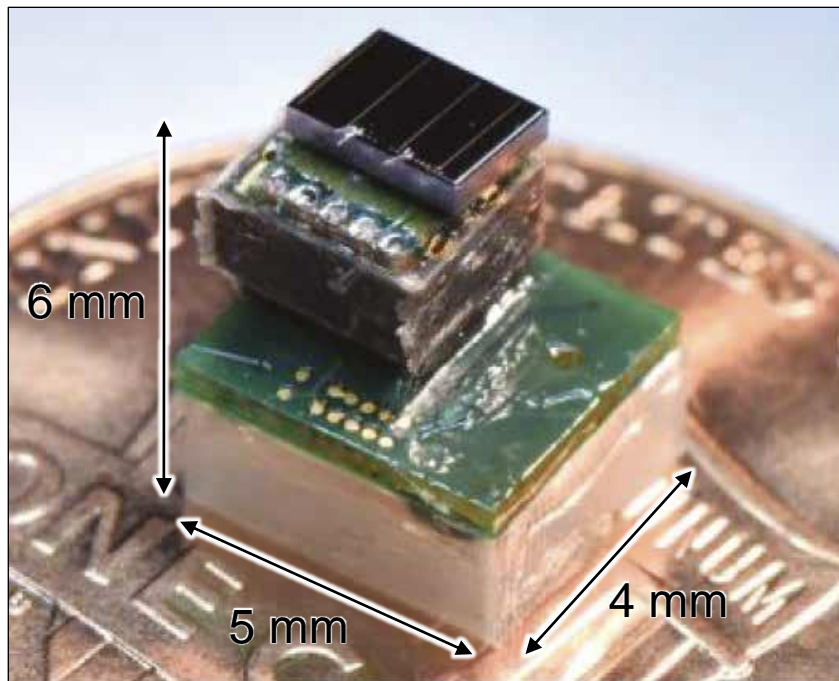
温度センサによる気温・海水温度の監視

加速度センサによる生物の行動監視

【バイオリギング】

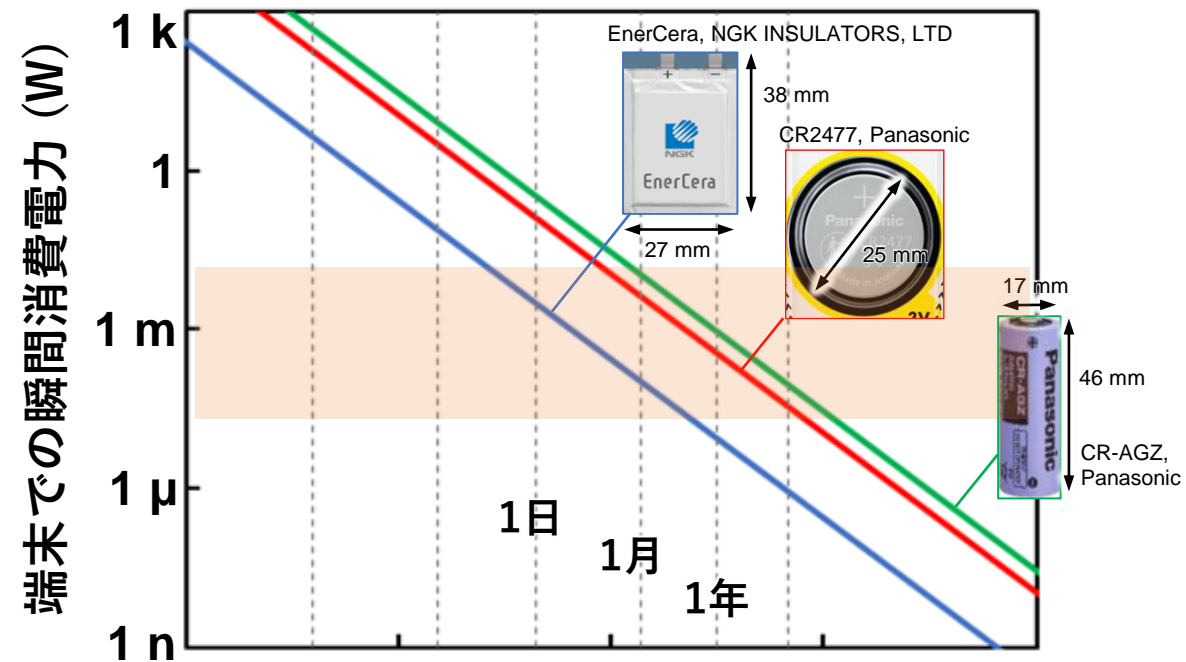
野生動物にデータロガーを装着し、その生態や地球環境を観察

センサネットワーク実現に向けた端末の電源問題



S. Oh, et al., *IEEE Design & Test*, vol. 36, pp. 65-72, 2019

部品	瞬間消費電力	備考
ZigBee	60 mW _{peak}	IEEE 802.15.4, datasheet
Bluetooth(BLE)	45 mW _{peak}	Manufacturer datasheet
MEMSマイクロフォン	0.4 mW	KRM0300, Hosiden, datasheet
加速度センサ	22 μ A, 2.5 V	https://www.analog.com/jp/products/adxl372.html

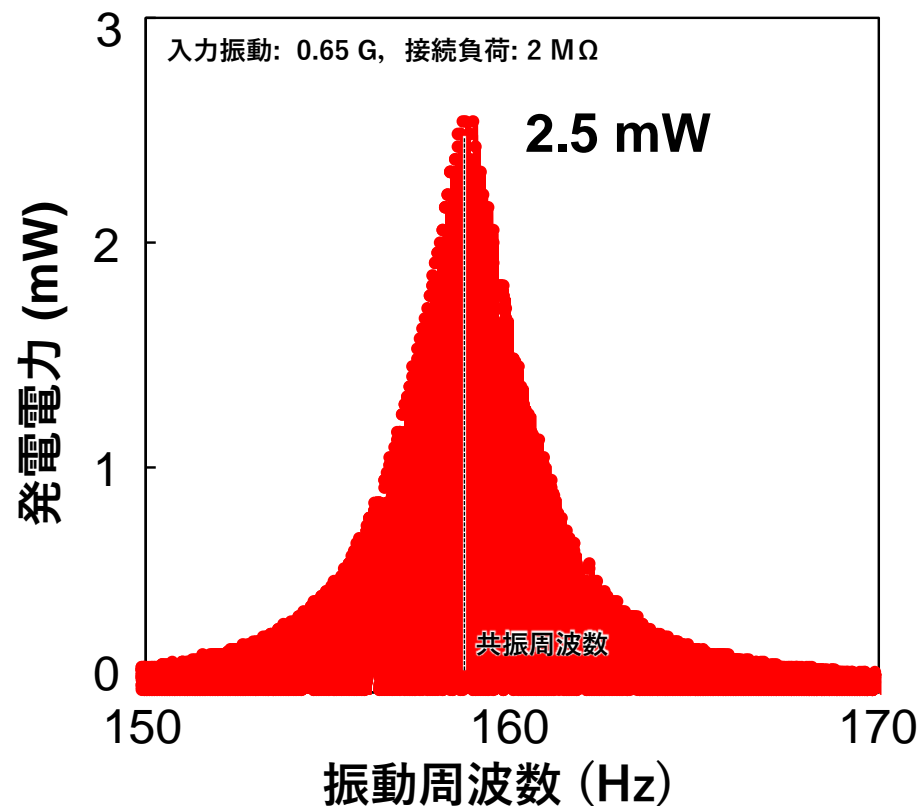
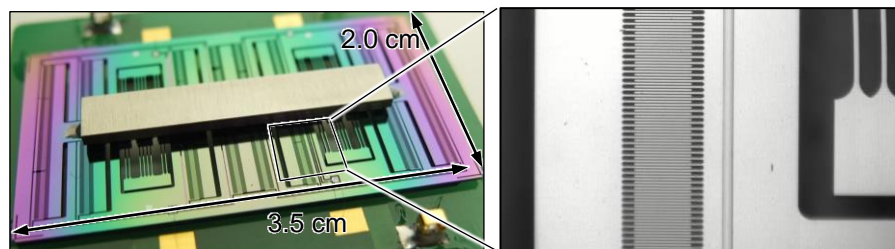


小型電池の電池切れまでの期間

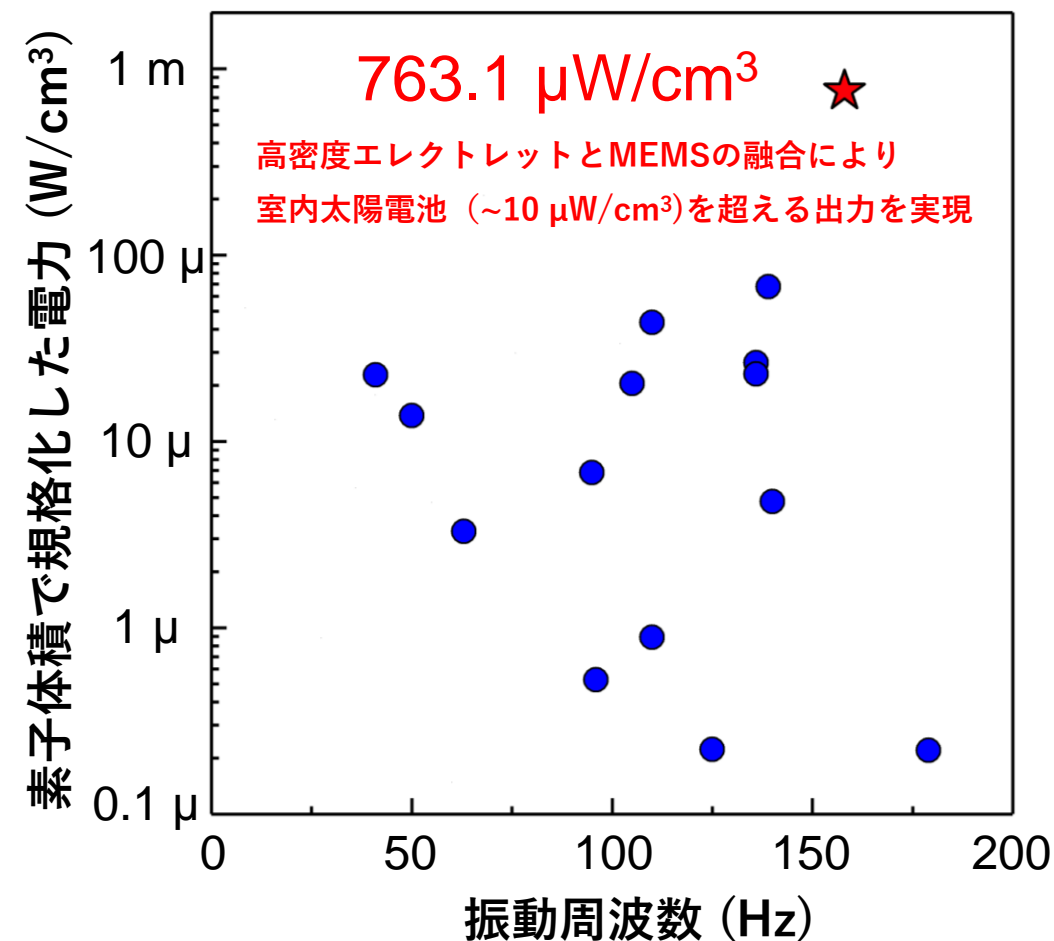
【欧州委員会による1次電池撤廃】
2030年以降に段階的に1次電池を撤廃することになっており、
現在のように気軽に電池を使うことができなくなる。

出典：<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>

振動エネルギーハーベスタの出力性能



他の振動エネルギーハーベスタとの出力の比較

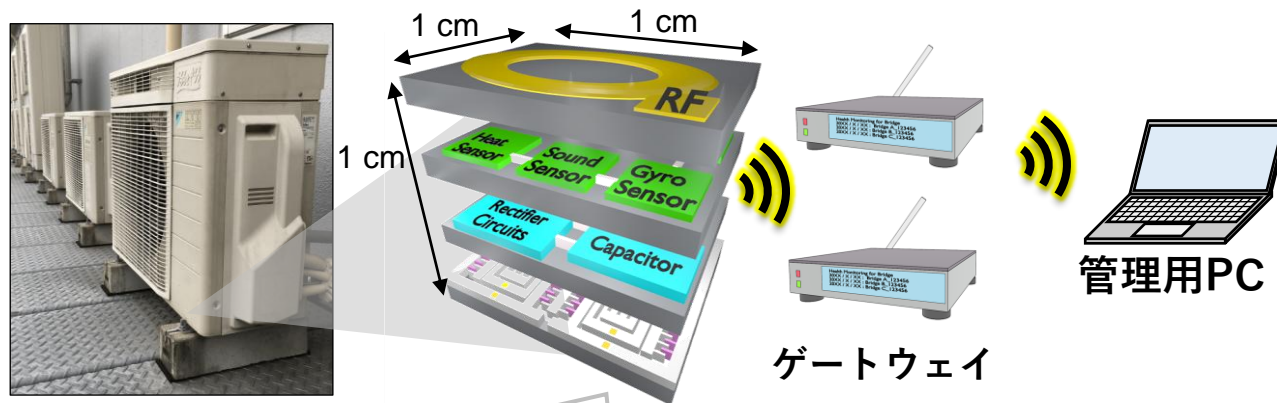


H. Honma, et al., *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 28, p. 064005, 2018.
H. Honma, et al., *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 29, p. 084002, 2019.
H. Honma, et al., *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 31, p. 125008, 2021.

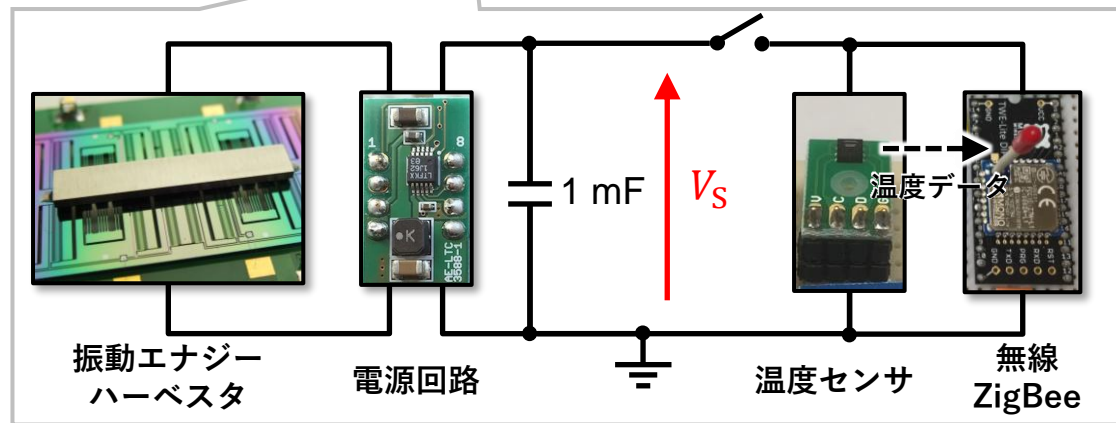
開発した振動エネルギーハーベスタは室内太陽電池 ($\sim 10 \mu\text{W}/\text{cm}^3$) を1桁以上超える電力供給が可能
超微弱 (重力の1/1000程度) な振動からも数 μW 以上の電力供給

環境モニタリングの実証

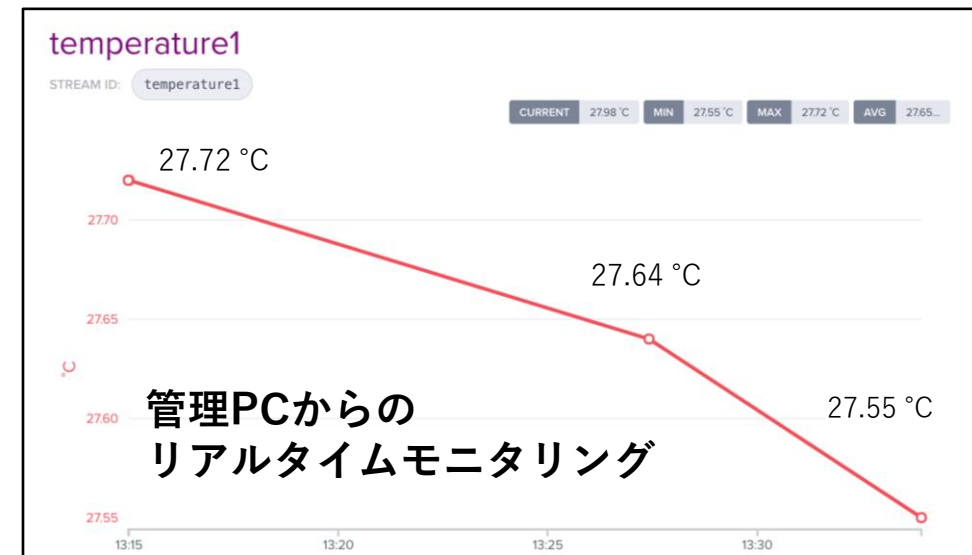
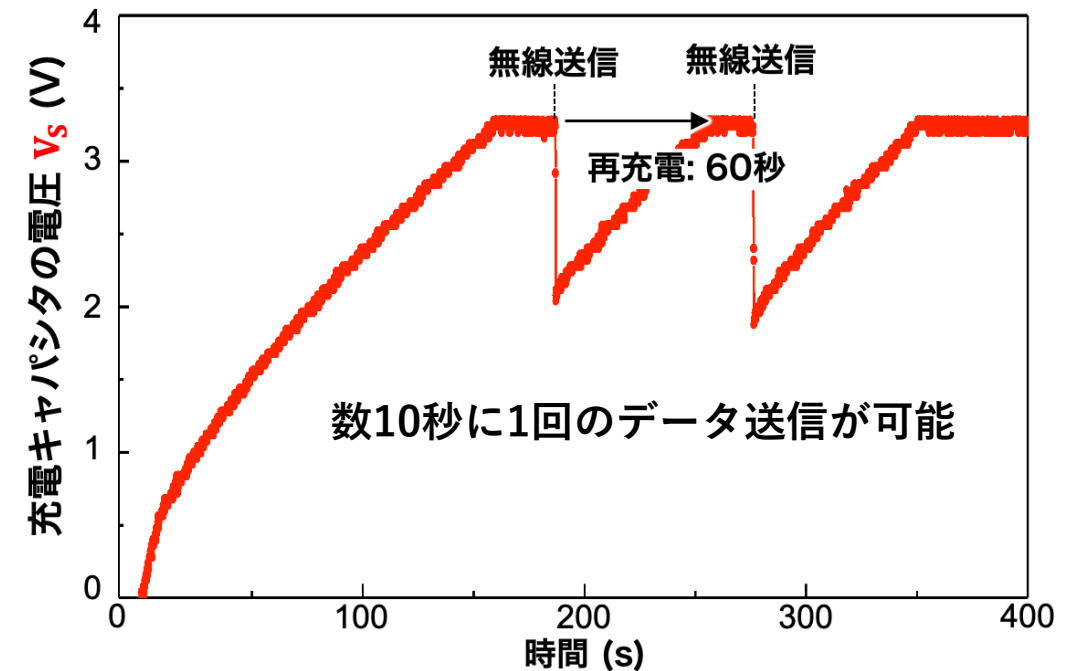
温度を測定する小型無線センサ端末



<https://www.daikin.co.jp/air/life/laboratory/disaster>



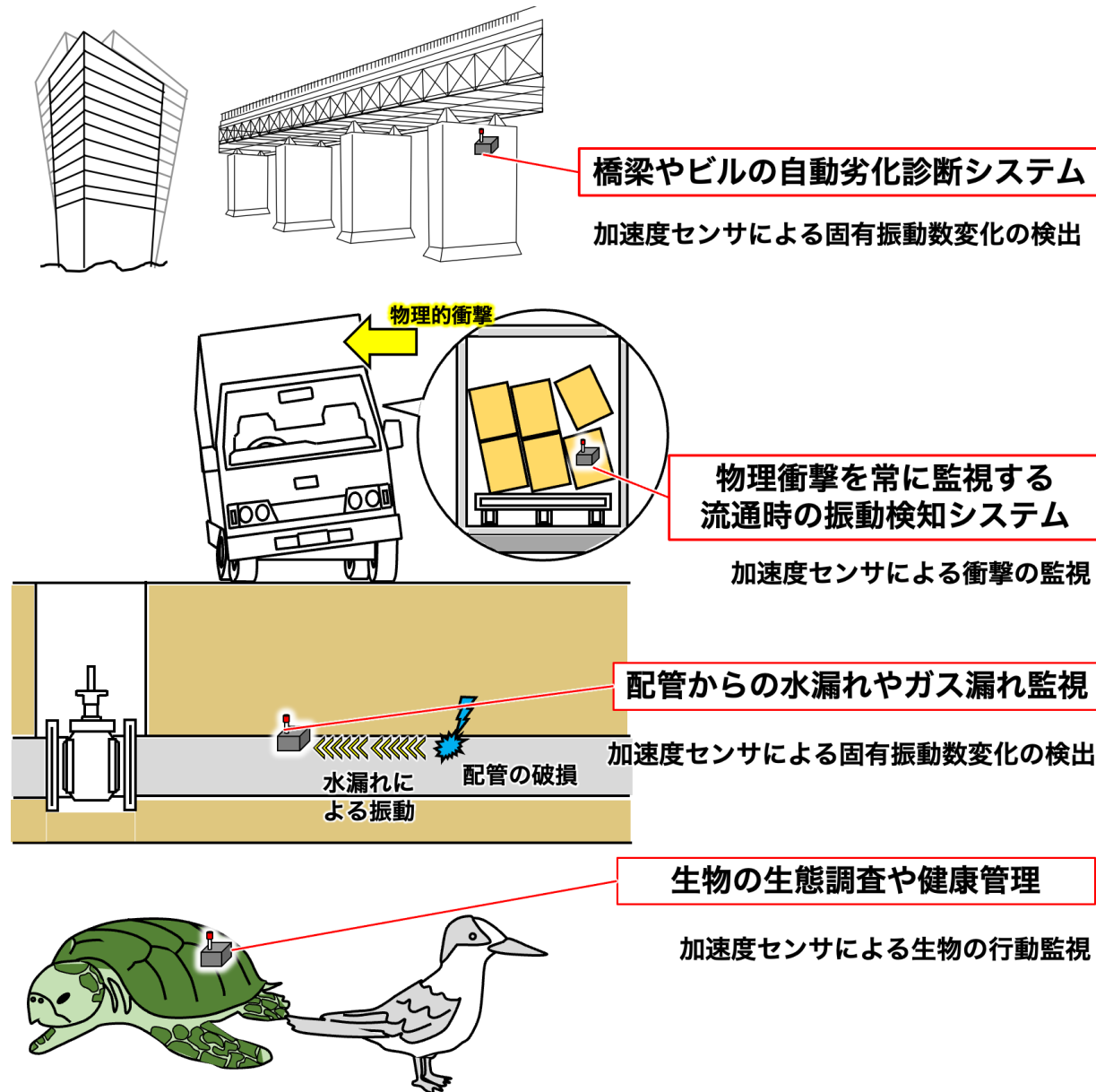
- ✓ 監視システムのメンテナンスコストは低い（電池交換不要）
- ✓ 有線接続不要でモニタリング可能（既設設備へも取り付け可）
- ✓ 汚れがひどい箇所や暗所の設備にも設置可能（太陽電池は苦手）
- ✓ センサや無線回路の組み合わせは他にも選択可能



本間浩章 et al., 応用物理学会・第14回集積化MEMSシンポジウム (2022) .

消費電力が高くハーベスタの出力では未だ不十分

加速度センサの常時駆動が求められる応用例



部品	瞬間消費電力	常時/間欠駆動	備考
ZigBee	60 mW _{peak}	間欠	IEEE 802.15.4, datasheet
Bluetooth(BLE)	45 mW _{peak}	間欠	Manufacturer datasheet
加速度センサ	22 μ A, 2.5 V	常時	https://www.analog.com/jp/products/adxl372.html

- ✓ 自立端末の中でセンサを常時駆動が求められる
- ✓ 容易に電池交換・メンテナンスに行くことができない

解決策

安定出力が見込める大出力のエネルギーハーベスタ

→ 現在研究中

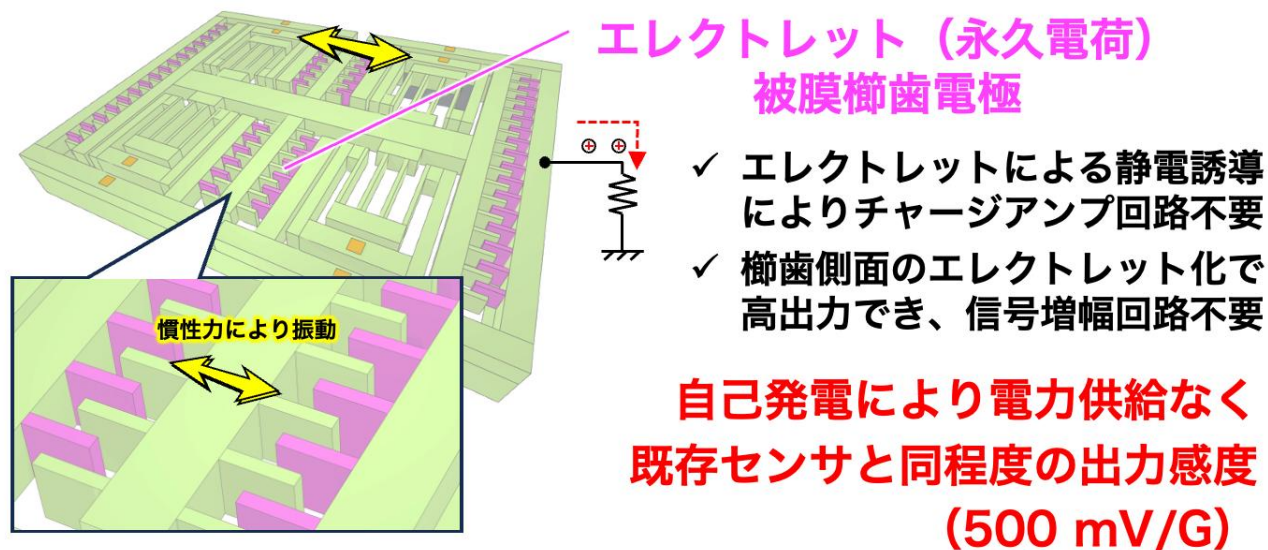
センシングに電力を消費しない（低消費）センサが必要

→ **環境発電技術**を応用した**自己発電型センサ**

(加速度センサ)

自己発電型センサと振動エネルギーハーベスタによる 電池交換不要の振動モニタリング

エレクトレット被膜櫛歯電極を持つ自己発電型加速度センサ



■ 自己発電型加速度センサ

- ✓ 振動-電気変換機能を強めることで振動発電の出力がそのまま加速度信号

余計な回路がいらないため、振動計測に電力供給不要

■ メンテナンスフリー無線センサ端末の開発

- ✓ 汚れに強い振動発電素子 + 自己発電型センサ

電池交換不要で継続的な振動モニタリングが可能



電池交換不要の無線・加速度センサ端末

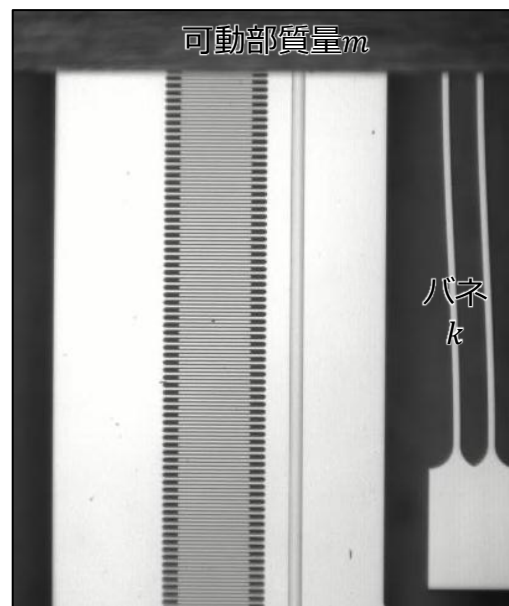
従来技術とその問題点

【提案】 振動発電からの出力電圧を加速度信号として出力

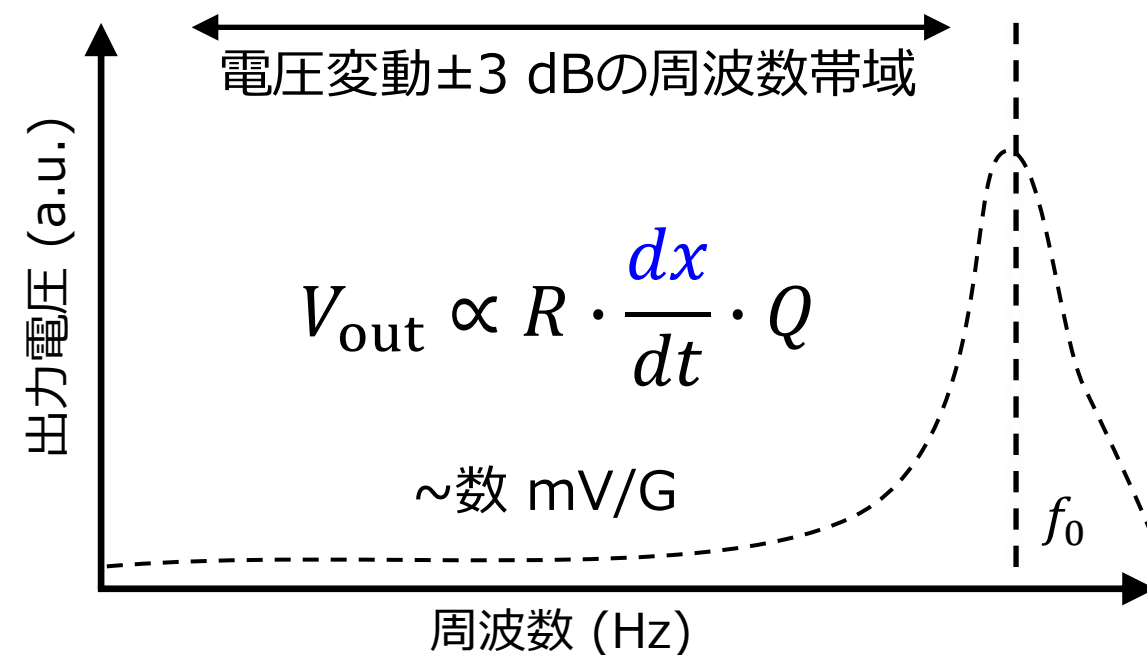
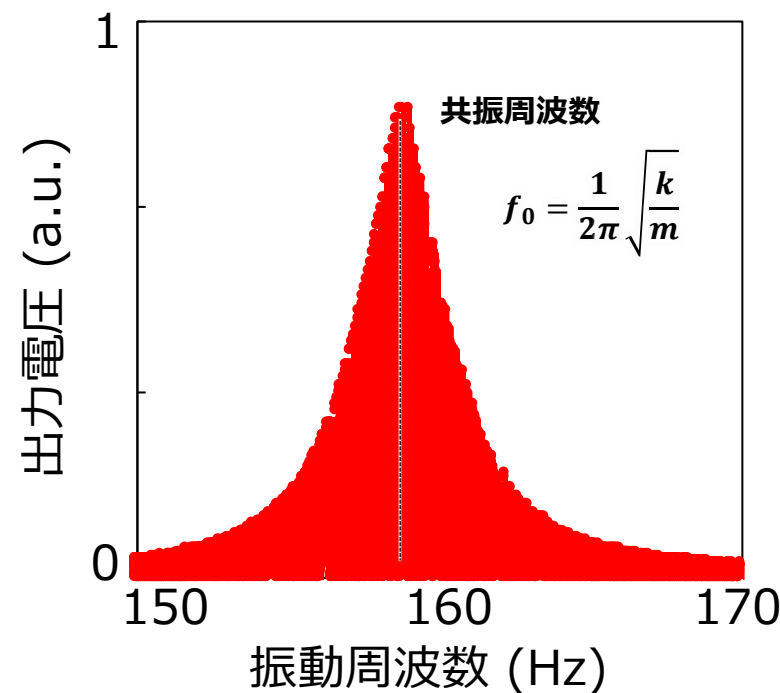
【従来技術の課題】

出力電圧が加速度だけでなく周波数にも依存
(帯域: 周波数における電圧変動が ± 3 dB)

共振以外の周波数帯では出力感度が低い
(既存センサの1/10以下)

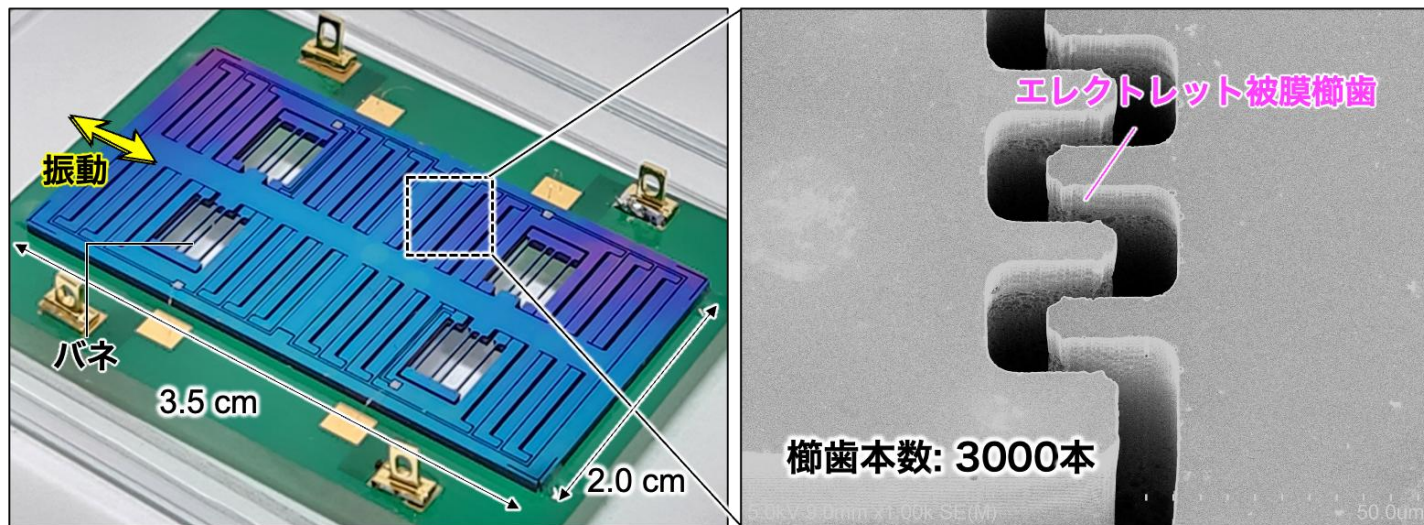


振動-電気変換機構
(エレクトレット被膜櫛歯電極)



新技術の特徴

自己発電型加速度センサ

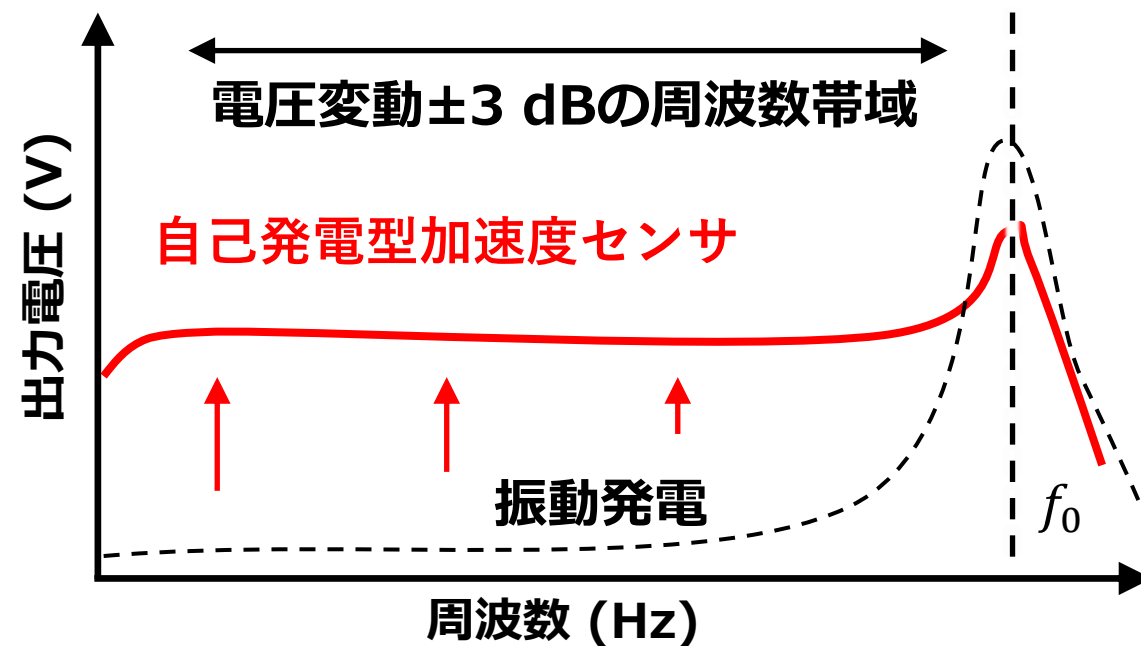
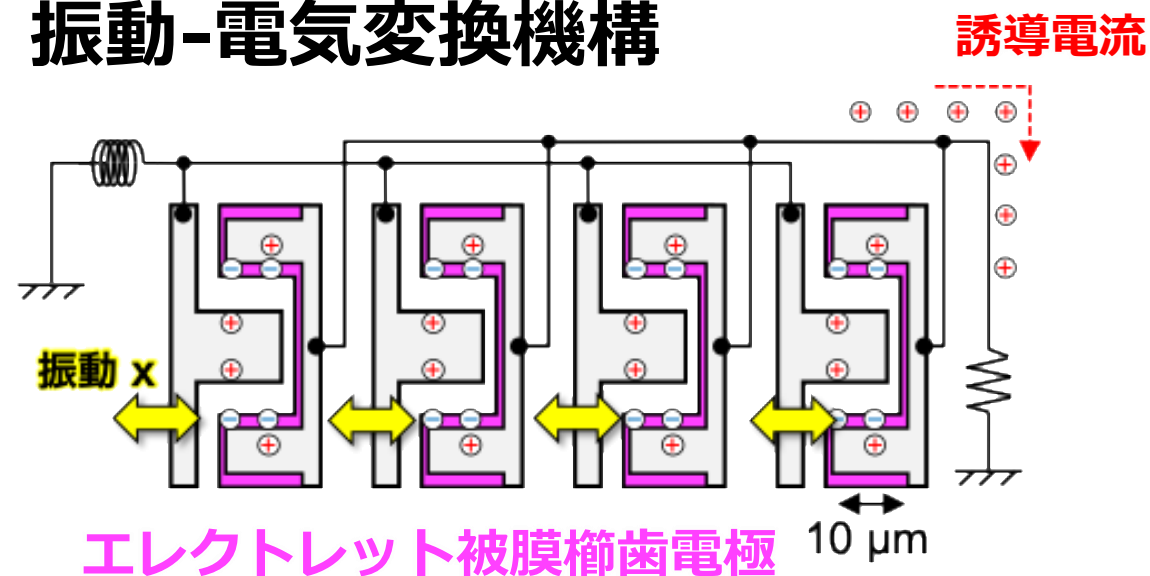


出力電圧

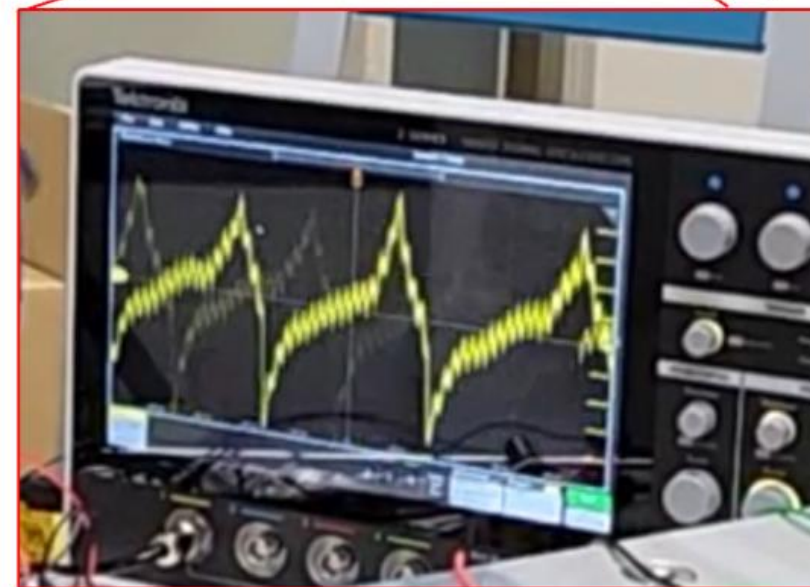
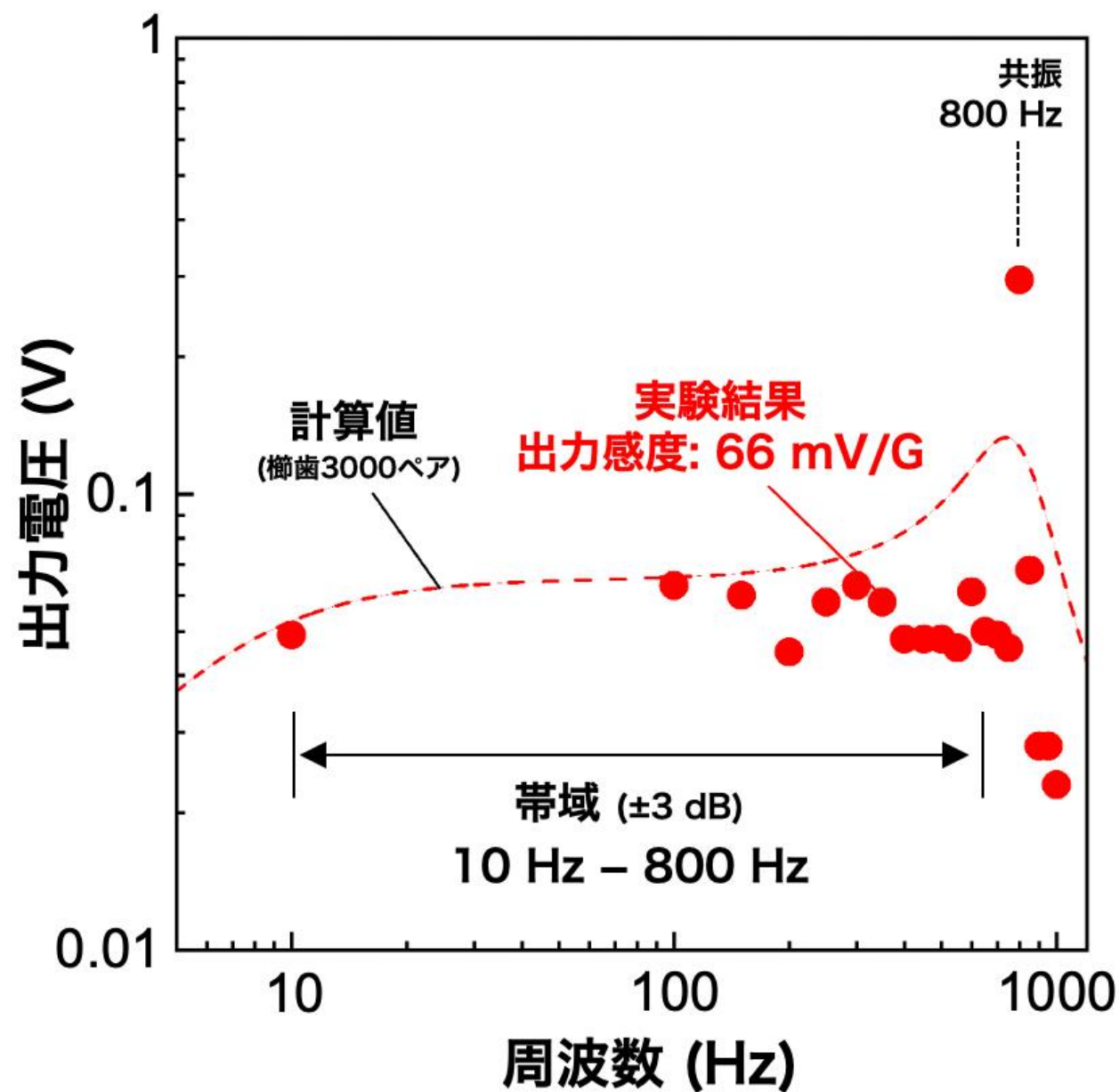
$$V_{\text{out}} \propto R \cdot \frac{dx}{dt} \cdot \frac{\varepsilon_0 H N V_e}{g}$$

エレクトレット高密度化による静電誘導増強

振動-電気変換機構



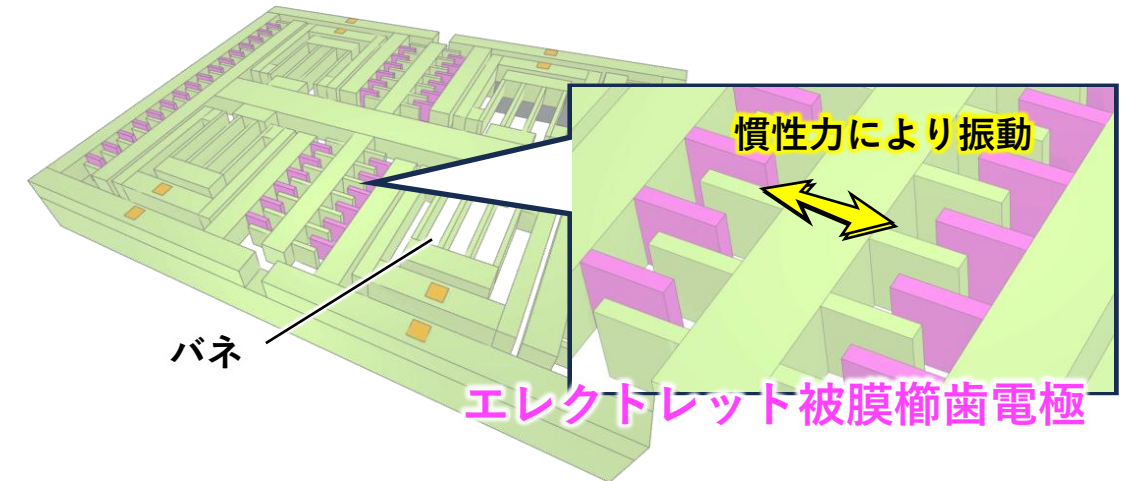
自己発電型加速度センサの実証



従来素子との性能比較

	電力供給の必要性	出力感度 (mV/G)	周波数帯域 幅 Δf (Hz)
SD-1221	必要 チャージアンプ・信号 増幅回路によって信号 を変換、増幅する必要 がある。	204.0	0.1-25
LIS3L02DQ		67.3	0-56
SD-1221L		204.0	0.1-100
LIS2L02AL		67.3	0-50
LIS2L06AL		22.43	0-100
AC310-002		204.0	0-300
SF1600		122.4	0-1500
SF1500		122.4	0.1-1500
自己発電型 加速度センサ 試作素子	不要 振動発電の応用で チャージアンプ・信号 増幅回路を使わずに信 号供給	70 mV/G	10-800 Hz

自己発電型加速度センサ (エレクトレット被膜櫛歯式)



- ✓ エレクトレットとバネ部は構造的に分離しているため、発電量と周波数特性の独立した設計可能。
- ✓ 櫛側面が帯電しているため、素子面積を維持しつつ静電容量・帯電増強が可能。

500 mV/G以上に感度の改善ができる見込み

A. Sabato, IEEE Sensors Journal, vol. 17, 2017, pp. 226-235.

想定される用途

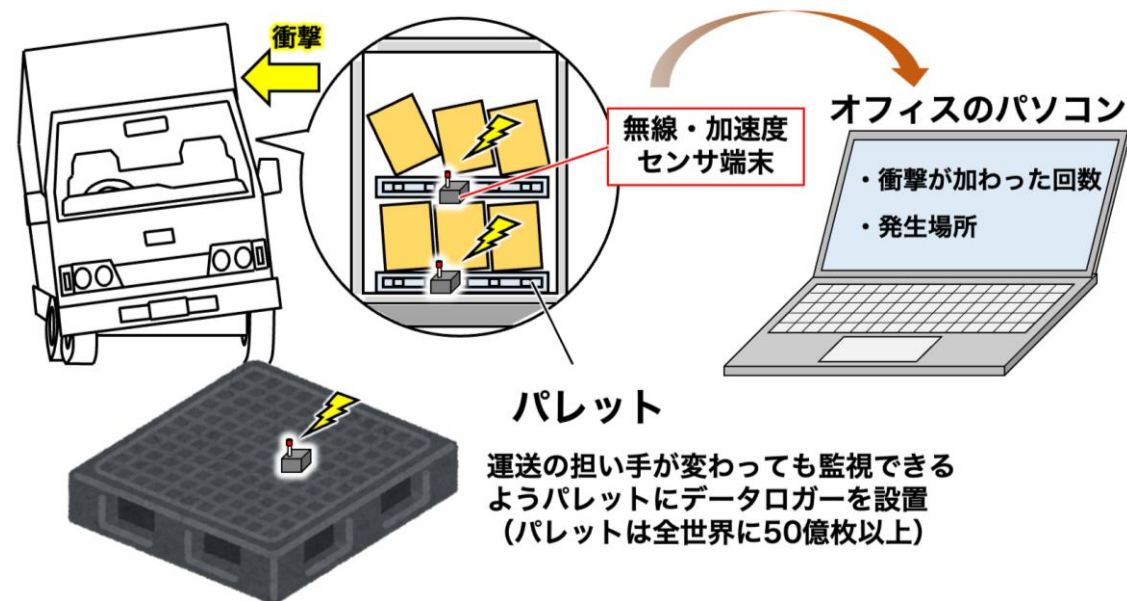
自己発電型加速度センサと振動エネルギーハーベスタによる メンテナンスフリーの振動モニタリングシステム

1. 流通品の衝撃履歴収集システム

- ✓ パレットやコンテナへ無線・加速度センサ端末を取り付けることで、流通品に加わった振動を常にセンシングし収集
- ✓ 適切な積載法や配送ルート の提案、破損時の状況確認が可能になる

流通時の破損原因が物理的衝撃である割合は、食品で90%、骨董品で75%、電子・精密機械で42%

(国際貨物海上保険実務 (三訂版) より)



2. 電池切れの心配がない人感センサ

- ✓ 人の振動により無線モジュールが駆動し接近を知らせる
 - ✓ 電池切れの不安がない, 電源設備がない箇所にも設置可
- 人感センサの市場規模は2024年段階で39億ドル

出典 : https://researchstation.jp/report/MAM/16/Occupancy_Sensor_2024_MAM1659.html



実用化に向けた課題

- 素子サイズを変えずに出力感度を既存センサと同等の 500 mV/Gまで改善する。
- 今後、信号処理のためにインピーダンス変換回路の検討やセンサ小型化にも取り組む。
- 実用化に向けて、環境モニタリングについての実証実験を行う。

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装の取り組み
現在	<ul style="list-style-type: none"> 振動発電技術を応用した自己発電型加速度センサを実証 	<ul style="list-style-type: none"> 官民による若手研究者発掘支援事業／マッチングサポートフェーズに採択
2年後	<ul style="list-style-type: none"> 出力感度の改善 (既存センサと同等の500 mV/Gを達成) 	<ul style="list-style-type: none"> 官民による若手研究者発掘支援事業／共同研究フェーズへ移行
4年後	<ul style="list-style-type: none"> インピーダンス変換回路と一体化 センサの小型化に成功 (1 cm×1 cm以下) 	<ul style="list-style-type: none"> 環境モニタリング（例：流通品の衝撃監視）の実証実験
5年後	<ul style="list-style-type: none"> 自己発電型加速度センサと振動エナジーハーベスタを搭載した無線・加速度センサ端末を実現 	<ul style="list-style-type: none"> 環境モニタリングの実証試験 システム開発

企業への期待

以下のような業界の企業ご担当者様と意見交換したいと考えています。

1. 物流業界

- ✓ 自己発電型加速度センサを組み込んだパレットの開発
 - ✓ いつどこで衝撃が加わって商品が壊れたか、履歴を残せるシステム開発
- 共同研究のイメージ: センサを使ったシステムを共同開発

2. インフラ業界

- ✓ 機器の故障を固有振動数の変化で検知することができるか?
 - ✓ 配管からの水漏れ, ガス漏れの振動をセンサで検知可能か?
- 共同研究のイメージ: 振動による異常検知の実証実験→システム開発

3. セキュリティ業界

- ✓ センサを使った人感センサの開発
- 共同研究のイメージ: センサを使ったシステムを共同開発

企業への貢献、PRポイント

- 本学の微細加工技術センターにおいて、MEMSセンサの設計・製作・評価を一貫して行うことが可能。デモンストレーションや試作機（～数10チップ）を提供することもできる。
- 本研究グループでは、MEMSによる振動-電気変換技術を広く研究しており、センサと振動エナジーハーベスタの両方の開発を進めることも可能。

本技術に関する知的財産権

【対象出願 1】

- 発明の名称 : 櫛歯電極、振動発電素子、および櫛歯電極の作製方法
- 出願番号 : 特願2025-065901
- 出願人 : 神戸大学
- 発明者 : 本間 浩章

【対象出願 2】

- 発明の名称 : 加速度センサ
- 出願番号 : 特願2025-076955
- 出願人 : 神戸大学
- 発明者 : 本間 浩章

お問い合わせ先

神戸大学 産官学連携本部

T E L 0 7 8 - 8 0 3 - 5 9 4 5

e-mail oacis-sodan@office.kobe-u.ac.jp