

知の交流シンポジウム2020



圧電MEMSによる振動型エネルギーハーベスタ

兵庫県立大学大学院工学研究科
電子情報工学専攻

准教授 神田 健介

IoTとエネルギーハーベスタ

現状ではボタン電池or有線で電源供給

大量のIoTセンサには電源としてエネルギーハーベスタが必須

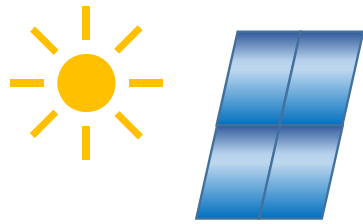
電池廃棄による環境負荷, 電池交換によるコスト低減

Energy harvesters

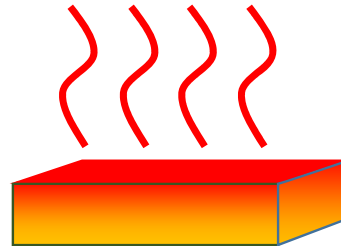
エネルギーを“収穫する”

身の回りにあるエネルギーを電気エネルギー変換して利用する

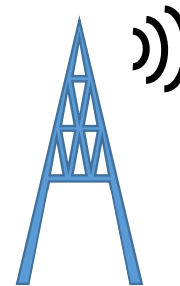
(環境発電)



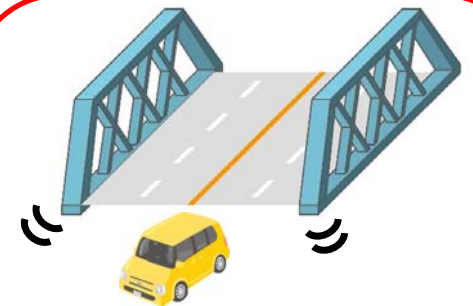
光
(太陽光パネル)



排熱(温度差)
(熱電素子)



電磁波
(電磁波発電)



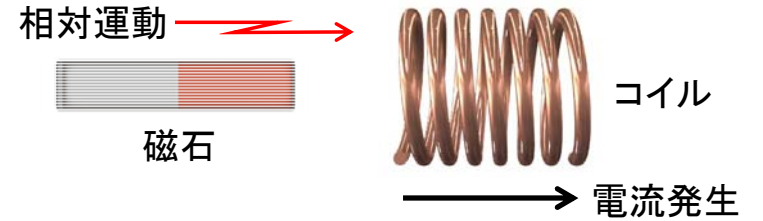
振動
(振動発電素子)

本研究で着目

機械振動⇒電気エネルギー変換

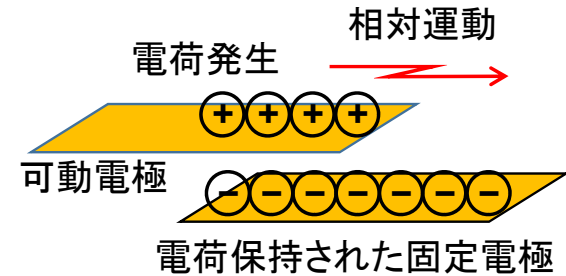
原理1: 電磁誘導 (電磁型)

コイルに対して外部磁場が変化すると電流が流れる



原理2: 静電誘導 (静電型)

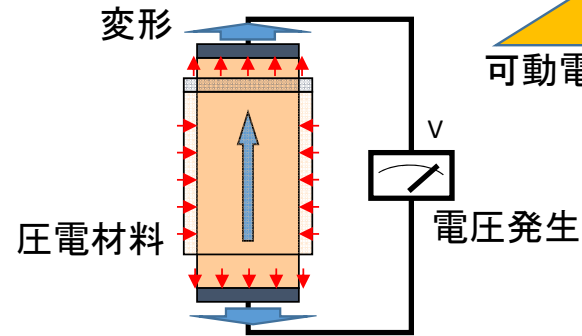
電荷が蓄えられた誘電体に対して電極が動くと電荷が誘起される



原理3: 正圧電効果 (圧電型)

圧電体が変形すると圧電体表面に電荷が生じる

本研究のターゲット



各タイプの特徴

電気的な出力抵抗

中庸な出力抵抗

小型化

静電誘導 > 圧電効果 > 電磁誘導

電流 大 → 小

電圧 小 ← 大

静電誘導: 半導体製造工程との相性◎

電磁誘導: 磁石の小型化が難しい

圧電: 圧電薄膜の微細加工により小型化○

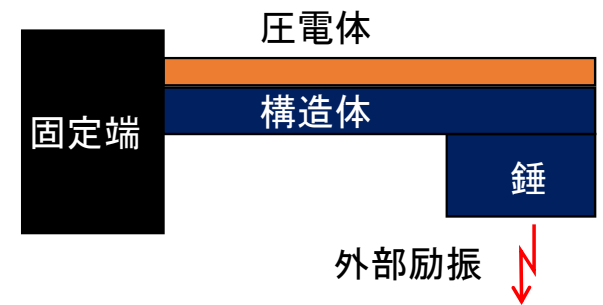
小型化も可能

圧電MEMSハーベスタ

圧電薄膜とSiベース半導体製造工程を融合させた圧電MEMSハーベスタ

- ・比較的高い電圧と電流が得られるため、後段回路設計における負荷が小さい
- ・圧電薄膜の微細加工ができれば回路やセンサとの集積化も可能
⇒大量生産IoTセンサでは低コスト化のためMEMS化が必須、好相性

圧電ハーベスタの一般的な形状



デバイス構成の種類と特徴

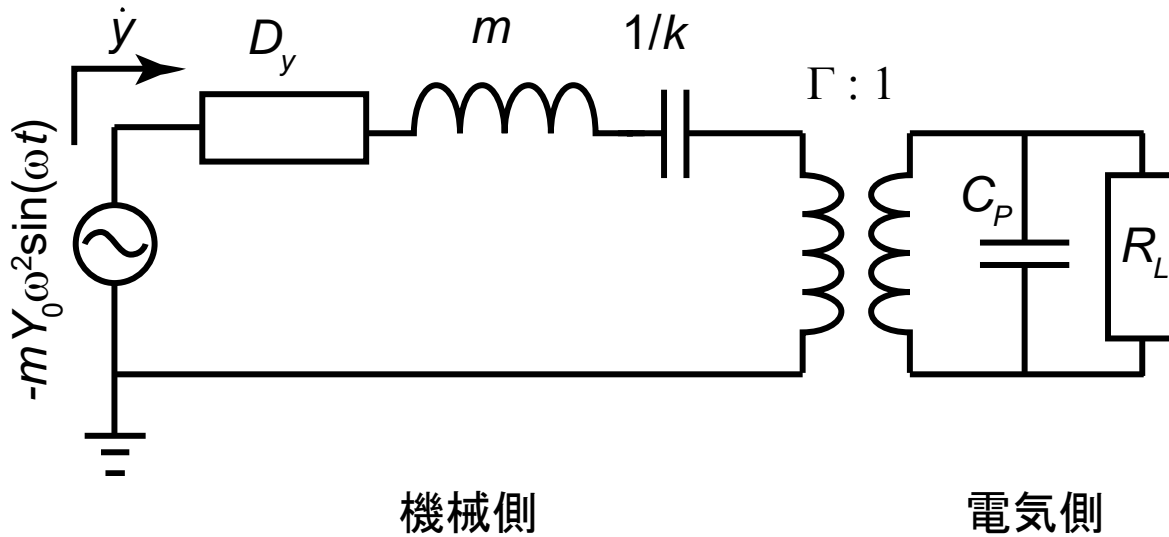
- ・バルク圧電材料・構造もバルク
- ・構造はMEMSでバルク圧電体を貼り付け
- ・圧電薄膜をMEMS構造体と集積・錘のみ後付け
- ・錘, 構造, 圧電体をすべて集積させた真のMEMS

サイズ	絶対発電量	製造
大	大	小ロット
小	小	バッチ生産

⇒MEMSになると絶対発電量が小さくなりがち

フルMEMSかつ絶対発電量の大きな圧電ハーベスタは実現可能か？

設計のための圧電MEMSハーベスタの等価回路モデル



$$m\ddot{x} + D\dot{x} + kx = F$$

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + Cq = V$$

のアナロジーより

機械系共振を左側で表す

- ・ 錘の速度が左側の電流に相当
- ・ 変位当たりの発生電荷を Γ として
理想トランスで機械電気結合をモデル化
- ・ 圧電体の静電容量: C_p , 負荷抵抗: R_L

⇒ 等価回路シミュレータ等で簡単に出力を見積可能

圧電ハーベスタ(共振型)の最適負荷抵抗接続時の出力

$$P_{opt} = \frac{mA_0^2 Q}{4\omega_0} \frac{1}{1 + \sqrt{\{1 + K^{-4}Q^{-2}\}}}$$

$$K^2 = \frac{\Gamma^2}{kC_p} = \frac{d_{31}^2}{\epsilon} \left(\frac{T}{F}\right)^2 k A_{ele} t_p$$

圧電層の体積が重要

寸法・形状依存 K^2 と機械的Q値が支配的

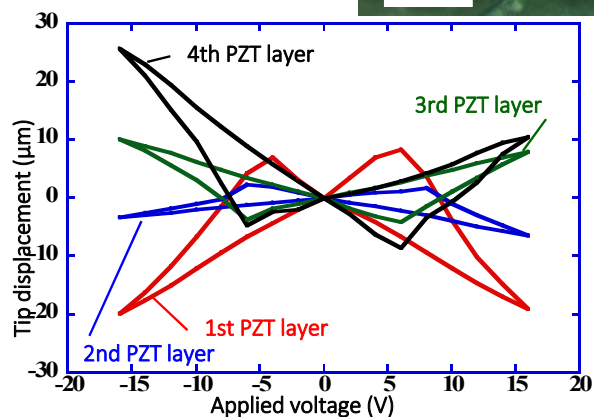
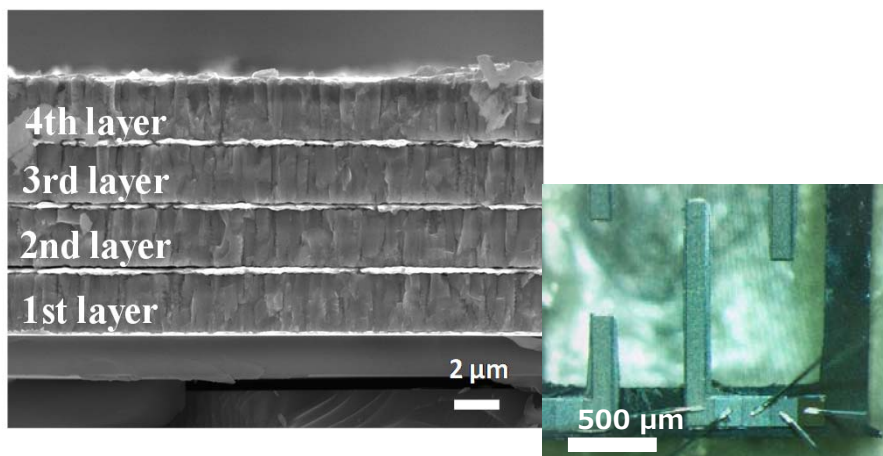
圧電層の多層膜化が必須

* K^2 : 電気機械結合係数, Q : 振動の品質係数, A_0 : 入力加速度, ω_0 : 共振周波数

多層積層による厚膜化

圧電特性に優れるチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)に内部電極を挟むことでSi上で厚膜化・微細加工を実現

JJAP 54 10ND03 (2015)

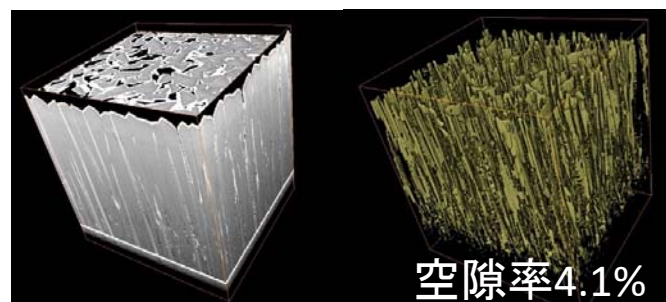


各層が良好な特性を持つことを確認

3次元再構築SEM像

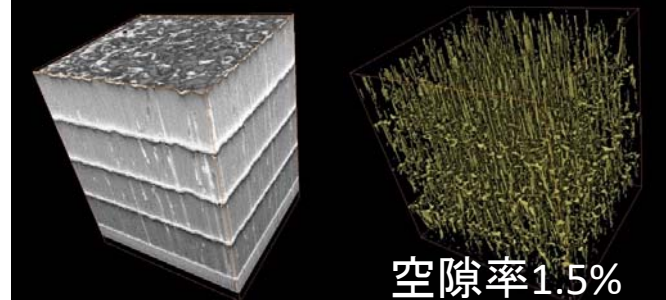
空隙抽出

単層厚膜



空隙率4.1%

多層厚膜

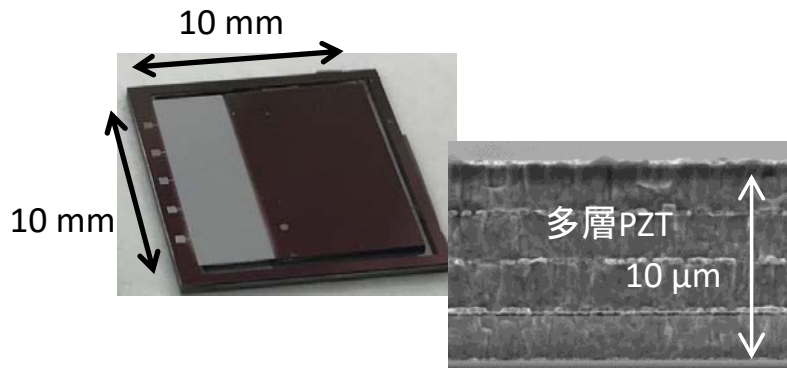
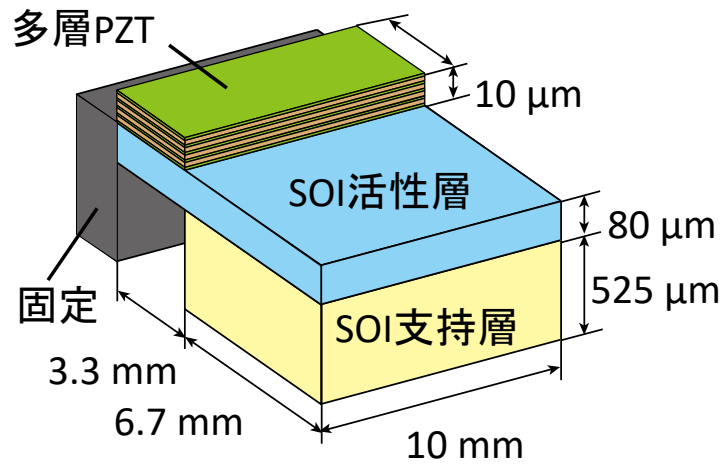


空隙率1.5%

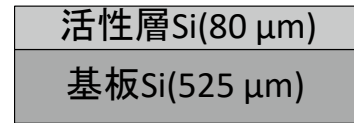
多層化によって空隙率を低減して良好な特性に

多層PZT薄膜によるMEMSハーベスタ試作

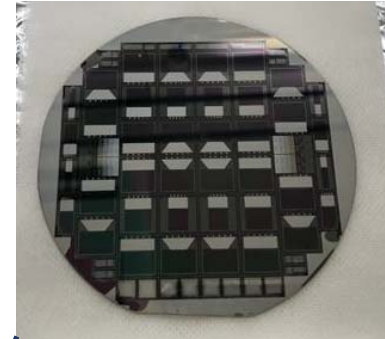
出力絶対値・大加速度耐性を得るために厚い活性層SOIを使用



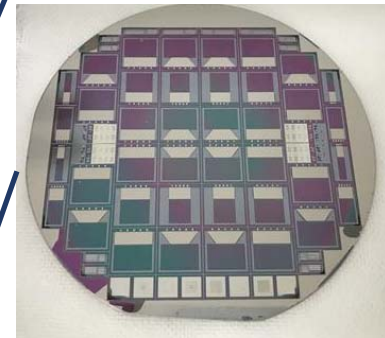
MEMSバッチ製造対応



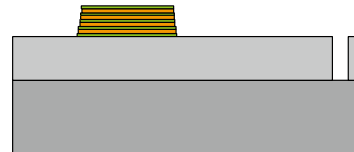
SOIウエハ



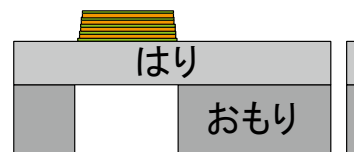
多層PZTスパッタ



電極・PZTエッチング



活性層エッチング



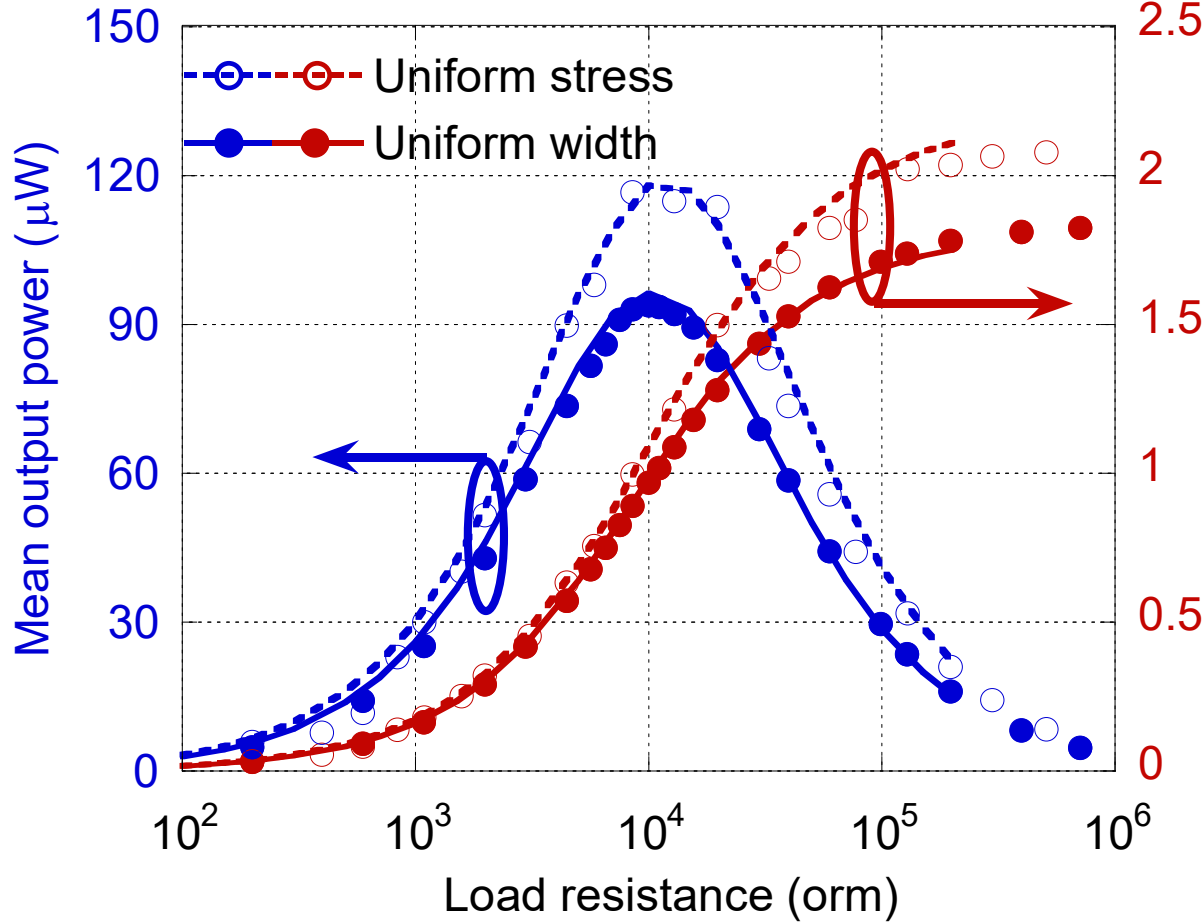
支持層エッチング



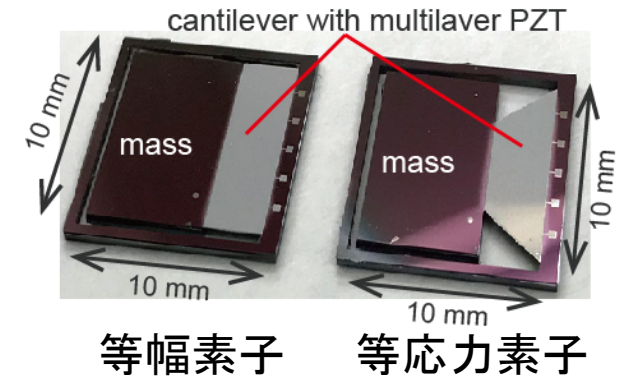
出力特性の評価

Sens. Actuators A 281 229–235 (2018)

入力: 重力加速度の1.2倍の振動加振



はり部分の形状が異なる2タイプを評価



出力電力

等幅: 90 μW

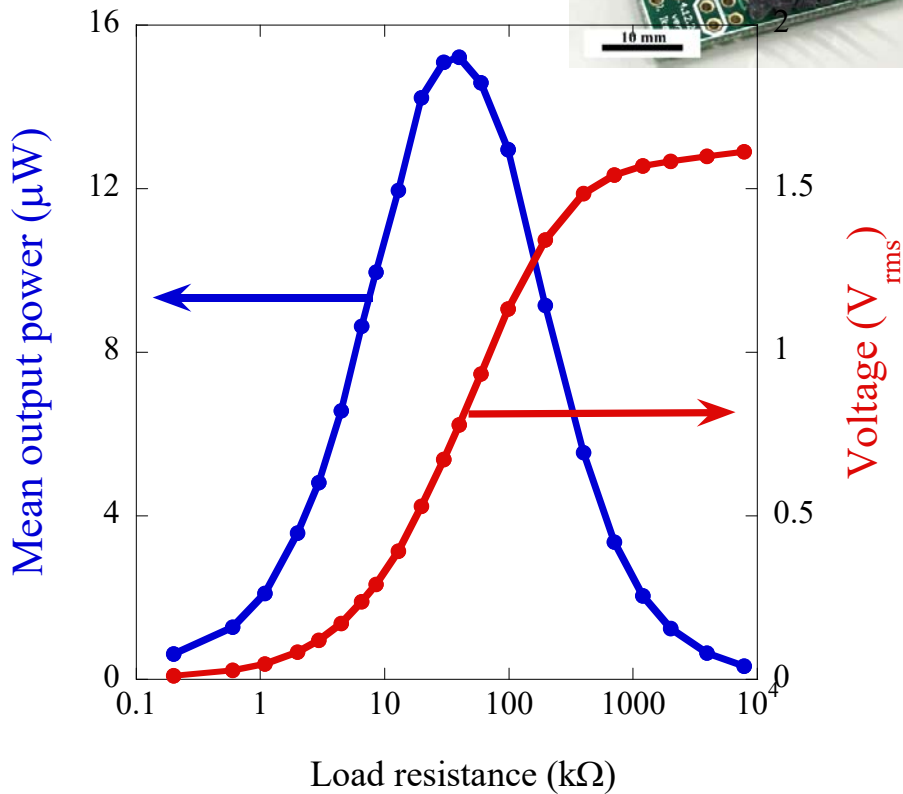
等応力: 120 μW

- ・完全MEMSの素子としては大きい絶対発電量
- ・IoTセンサ電源として利用可能な水準

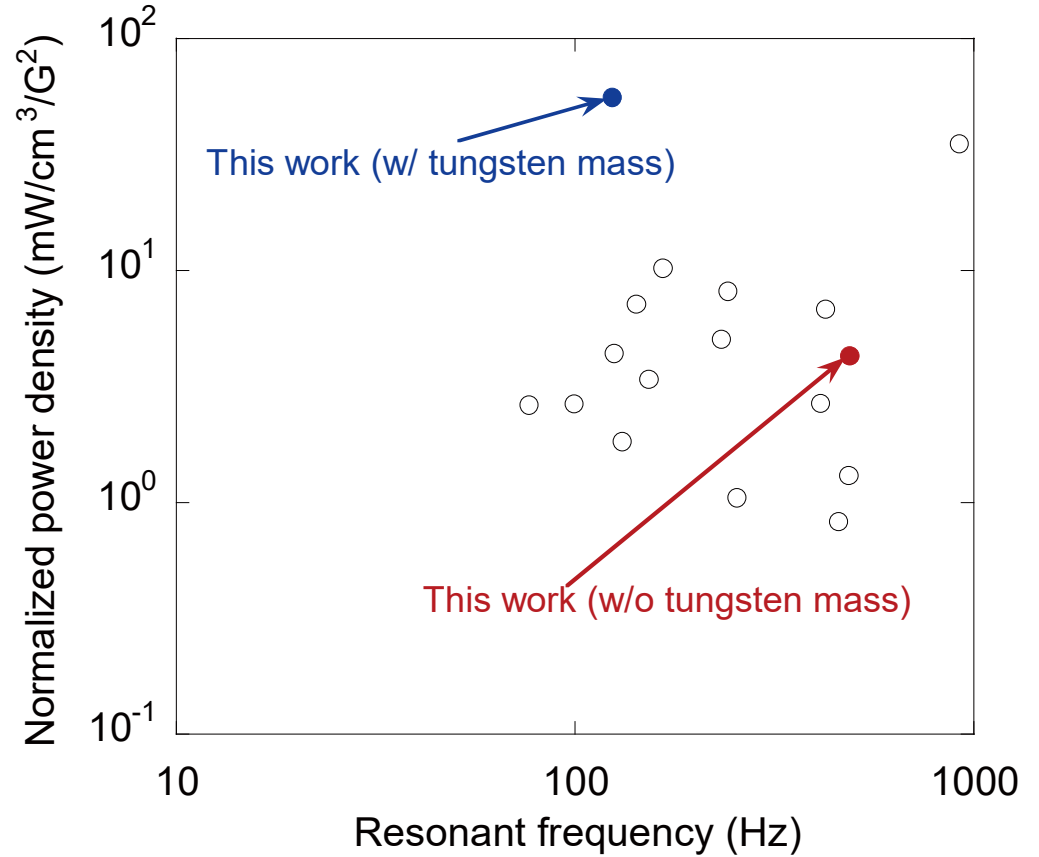
低加速度・低周波数入力向けの素子

JJAP 58 SLLD07 (2019)

1gのタングステン錘はりつけ
 共振周波数: 490⇒125Hz
 規格化発電量: 0.054⇒6.1 mW/G²



入力: 重力加速度の1/20



他研究機関との規格化発電量比較

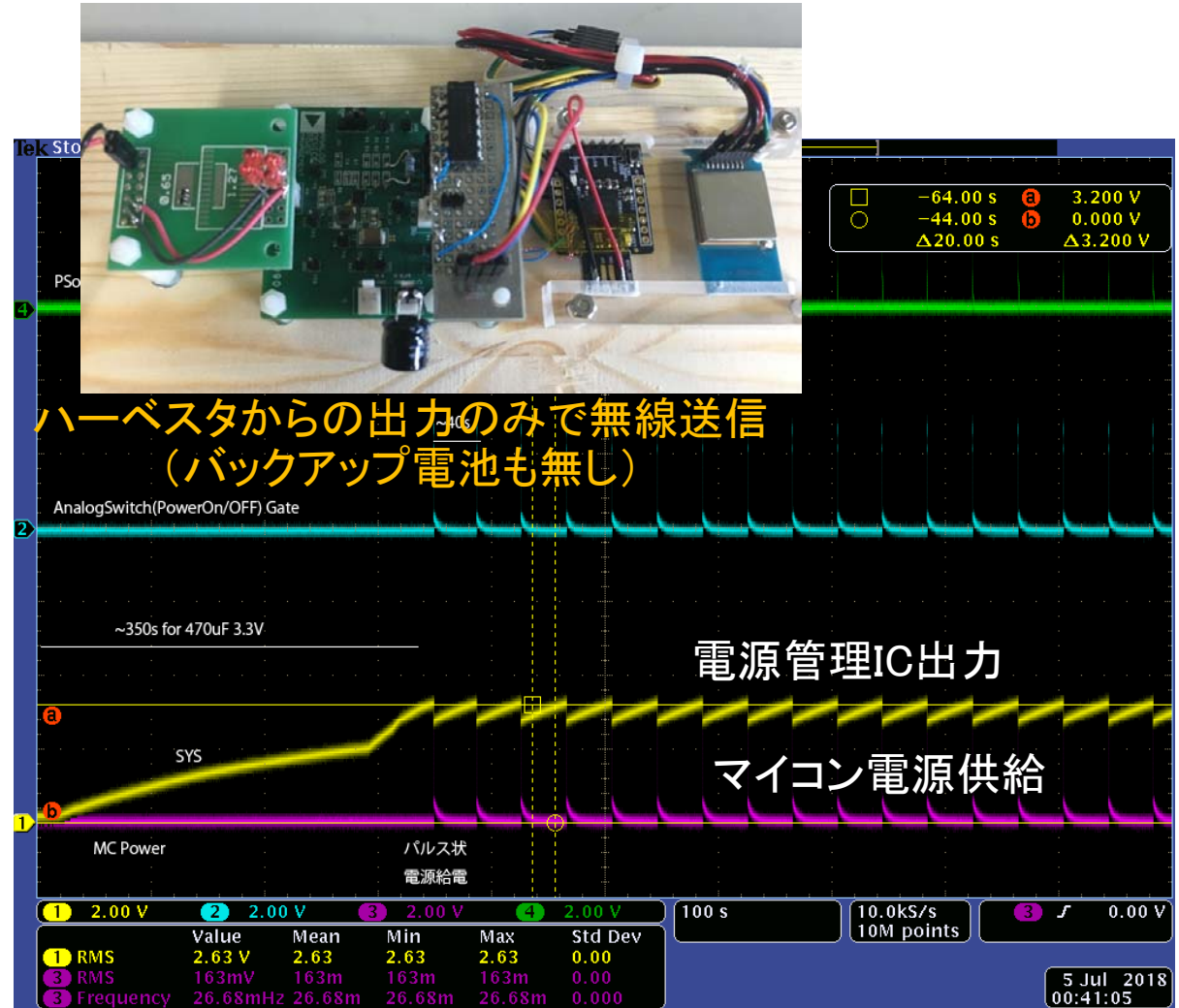
まとめと今後の展望

MEMS振動発電素子開発

- ・フルMEMS
- ・多層PZT膜による厚膜化素子
- ・錘貼付素子ではかなりの高性能を実現
- ・分割直接接続による出力抵抗の調整も可能
(紙面の都合上この資料には無し)

今後の展望

- ・利用環境やアプリに最適化した素子設計
- ・回路を含むシステム化



MEMSハーベスタによるデータ無線送信テスト