

(ご記入日) 令和 7 年 5 月 21 日

公益信託 N E X C O 関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金
受託者 三菱 U F J 信託銀行株式会社 宛

研究概要書

研究課題：道路環境から常時発電するエネルギーハーベスタと設備監視システムへの応用検討

研究代表者：神戸大学大学院工学研究科 准教授 本間 浩章

●はじめに

高速道路やトンネル設備、橋梁などの老朽化による被害を未然に防ぐため定期的な点検が義務付けられている。点検は土木技術者による近接目視や打音検査が行われる。しかし、例えば橋梁に関して、全国にある 73 万橋のうち約 6 割に当たる 52 万橋は地方自治体の管轄で、それらの自治体の多くで人手不足のため土木技術者がいなくなり、未点検のまま通行止めとなる橋梁がこの 10 年で 3 倍(3000 橋)に増えた。今後、人口減少はさらに進むと予想され、人的コスト、さらに脱炭素化が叫ばれる中でエネルギーコストが少ない持続的な設備監視システムが求められている。

近年、センサと通信技術を活用した設備監視システムの研究が進められている。設備の損傷度合いを計測可能なセンサと無線機を搭載した小型端末を様々な箇所に設置できれば、設備を一括に監視できる遠隔システムを実現できる可能性がある。しかし、設置する箇所の周囲には電源設備が届いていないことが多い。端末を電池で駆動する場合、センサの消費電力が大きいため電池交換頻度が高くなってしまい、メンテナンスコストも高くなることからシステムは普及できていない。

システムの普及には、環境発電技術(エネルギーハーベスティング)を端末へ搭載することで端末自身が設置場所で電力を補給することが有効である。すでに無線端末の多くで太陽電池が利用されているが、発電には光が必要なため端末の設置場所が限定的となり、素子を外部に露出させなければならないため汚れによる発電量の低下や破損の恐れから実用化はできていない。そこで、封止が可能で、普遍的に存在する微弱振動を電力に変換する振動発電素子が注目されている。従来の振動発電素子は、微弱な振動から電力を得るため共振により振幅を増幅させ静電誘導、電磁誘導、圧電効果のいずれかで振動を電力へと変換する。共振周波数に一致する振動源であれば加速度 50 mG で 10 μ W 以上の電力供給が可能である[1]。ただし、事前に設置場所の振動を計測しそれに合わせた素子を設計する必要がある、設置場所に対する汎用性がないため設備監視用の端末へ搭載することは困難であった。

そこで本研究では、共振に依存せずに発電する MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)非共振型振動発電素子を搭載した無線センサ端末を実現する。図 1 に非共振型振動発電素子のチップ写真を示す[2]。パネにより支えられた可動電極に幅 10 μ m の櫛歯電極が並んでいる。櫛歯電極は数 100 V に帯電するエレクトレット(永久電荷)膜で覆われており、可動電極が外部振動により励振した際、静電誘導により電流が流れ発電する。開発した非共振型は、櫛歯電極を高密度とすることで従来素子に比べ強い静電誘導効果を持ち、素子の共振周波数から外れた振動においても出力電力を得ることができる。図 2(a)に製作した非共振型振動発電素子の発電スペクトルを示す。発電する周波数帯域幅は 70 Hz を超えていることがわかる。図 2(b)には周波数が時事刻々と変化する橋梁からの微弱振動(加速度: 10 mG 程度)で非共振型を揺らした際の大容量コンデンサ(470 μ F)の充電結果を

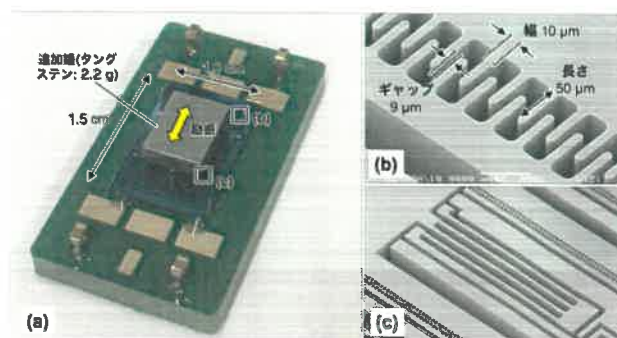


図 1 MEMS 非共振型振動発電素子、(a)チップ写真、(b)エレクトレット膜で覆われた櫛歯電極、(c)可動電極を動かすパネ。

示しており、周波数ランダム性が強い振動からの充電を実証した。ただし、充電速度が 0.1 mV/s と遅く、端末を高頻度で駆動しデータを収集する場合には電力供給が追いつかない。監視システムの適用範囲を拡張するには非共振型振動発電素子の高出力化が必要である。そこで本助成研究での目的は、

1. 非共振型振動発電素子の高出力化手法の解析的実証
2. 検証用素子の開発

である。

●まとめ、今研究で得られた成果、今後の課題等

1. 非共振型振動発電素子の高出力化手法の解析的実証

振動発電における出力電力 P_{out} は、

$$P_{out} = \frac{1}{2} m \omega^3 X_{lim} y$$

で表すことができる。 m は質量、 ω は振動周波数、 y は入力振動の変位である。 X_{lim} は振動子の最大ストロークであり振幅増幅率 Q と変位 y の積で書き直すことができる。また、帯域幅 FWHM (Full-Width at Half-Maximum) は、

$$FWHM = \frac{f_0}{Q}$$

で表され f_0 は共振周波数であり、環境振動の多くが低周波数を持つため一般的に 200 Hz 以下に設定される。これより、微弱振動での出力改善には Q 値の増強が必要だが、同時に帯域幅が狭まるため周波数ランダム性のある道路等の振動では発電しにくくなる。そこで本研究では、 Q 値を一定に保ちつつ質量 m を増強し出力を改善する手法を提案する。改善手法の有効性検証のため、回路シミュレータ SPICE を用い質量を従来の 2.2 g から 22 g へ増やした振動発電素子の等価回路モデルを作成した。加速度 1 mG の周波数ランダム振動で揺らした場合、コンデンサへ充電される電圧は時間に対して比例で増加したことで共振に依存しない電力供給が行われていることが推測される。また、低質量素子と大質量素子での充電電圧を比較すると、低質量素子では充電時間 2 秒で 0.03 mV にしか到達していないが、大質量素子では 0.3 mV に到達した。充電速度は質量を 10 倍に増やすことで 10 倍改善し、質量増強による非共振型の高出力化が可能であることが解析的に示された。

2. 検証用素子の開発

20 g を超える大質量振動発電素子の実現可能性検証のため、実際に 22 g の錘を載せた振動発電素子を試作し振動発電を実証する。従来の発電素子チップでは、チップ作製後に可動部上に比重の大きいタングステン錘を追加質量として貼り付けている。しかし、20 g 以上の質量とするためには錘のサイズが大きくなり、チップサイズも大きくなることからコスト増加につながる恐れがあった。そこで本研究では、集積回路と振動発電素子チップの接続のために利用するプリント基板を、可動部質量と見立てた振動発電素子を提案する。可動部にプリント基板を機械的に固定、電気的にも接続することで 22 g の大質量振動発電素子を試作した。振動発電実証のため振動試験機に試作した大質量振動発電素子をセットし加速度 10 mG の微弱振動で揺らしたところ、13 M Ω 負荷接続時に 4 μ W の出力電力が得られた。これより、20 g を超える大質量振動発電素子による振動発電素子を実証できた。設備監視システムに利用する無線端末への電源供給用としても有効だと考えられる。

3. 今後の研究方針

非共振型振動発電素子は設備監視システムに利用する無線端末への電源供給用としても有効だと考えられる。今後は、無線機、センサと共に端末に組み込み、道路の振動から発電し駆動する無線センサ端末の動作を実証する。

[1] H. Honma, et al., JMM, vol. 31, 125008 (2021).

[2] H. Honma, et al., in Proc. Transducers2023, pp. 1252-1255 (2023).

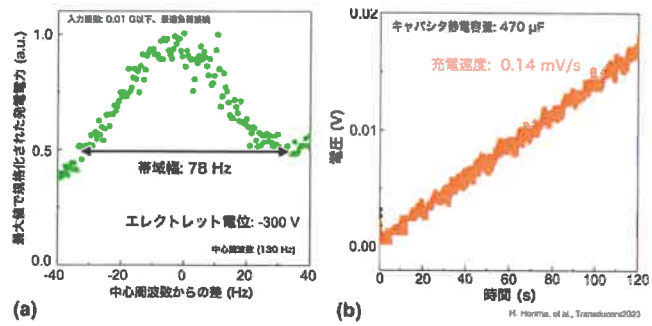


図2 (a)製作した非共振型振動発電素子の発電する周波数帯域幅、(b)橋梁からの振動でのコンデンサ(470 μ F)の充電実験。