経済産業大臣賞

未利用環境振動で IoT センサを駆動する MEMS エナジーハーベスタ

[1] 株式会社鷺宮製作所、[2] 静岡大学、[3] 東京大学生産技術研究所

三屋 裕幸[1]　芦澤 久幸[1]　橋口 原[2]
本間 浩章[3]　年吉 洋[3]

1．緒　言

【IoT 社会の実現：小型自立電源の開発】世の中のあらゆる「モノ」の状態を小型センサで把握し、その全てをインターネットにつなぐ IoT（Internet-of-Things）技術は、ビッグデータとの相乗効果によって我々人類の暮らしをより豊かにするであろう。またそれに留まらず、限りある資源の持続可能性を示し、食糧問題、医療問題をも解決する手段としても期待されている。そのために必要な小型センサは、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems、微小電気機械システム）技術の進化に伴ってこれまでにも多くの研究開発が行われている。たとえば、近年のスマートフォンの普及や、自動車の自動運転システム開発などにも大きく貢献していることからも、その技術的進化を疑う余地はない。

ところが、これほど小型センサの開発が進歩しているにも関わらず、その普及は特定分野に限られており、冒頭で謳ったような IoT 社会はほとんど実現できていないのが現状である。その普及を阻害する最も大きな要因のひとつが、天候や昼夜を問わず電力を供給し、また電池のように交換を必要とせず、基本的にメンテナンスフリーの小型自立電源が実現できていないことにある。

本研究では、我々の身の回りにある微小な環境振動を電力に変換し、IoT 型無線センサノード（端末）の駆動に必要不可欠な小規模自立電源を実用化することを目指している。とくに、環境振動周波数10～100Hz、加速度0.1～0.2G 程度の、従来は未利用であった低周波・微弱な環境振動から100 μW 以上の電力を回収する振動発電素子を MEMS 技術によって実現したい。本研究グループでは、将来的に単価1,000円以下の産業製品として MEMS 型振動発電エナジーハーベスタを製品化することを目指している。

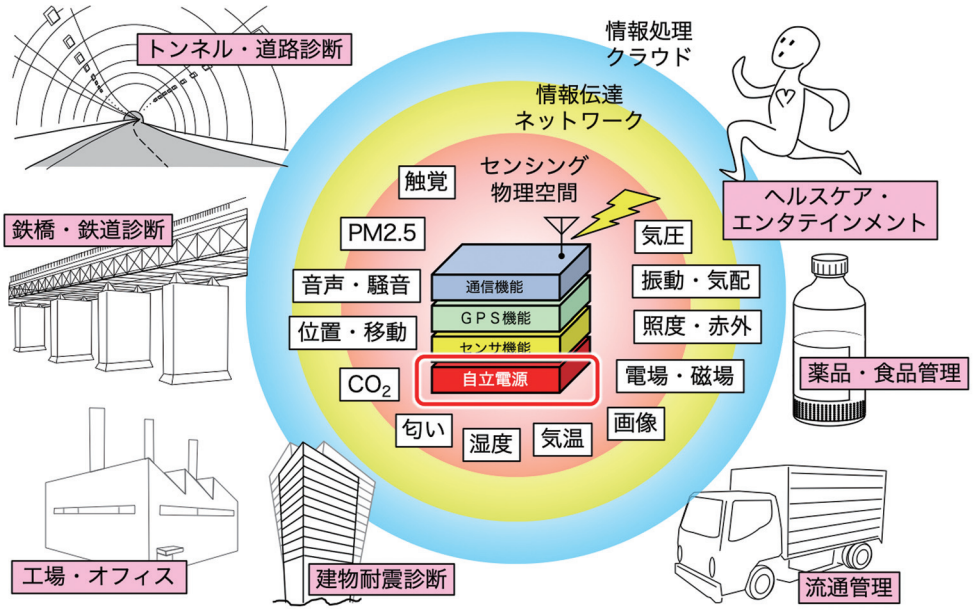


図1　IoT 無線センサの最大の課題はセンサや無線通信ではなく、自立電源の確保にある。

2．研究開発の背景

【社会インフラの経済的更新計画】我が国では、前回の東京オリンピックからすでに50年以上が経過し、当時の建設ラッシュで整備された高速道路、橋梁、鉄道等の社会インフラが老朽化を迎えている。これらの社会資産を維持し、かつ、経済効率良く更新計画を立てるために、IoT 技術を用いた無線センサ型の安全モニタリング装置〔1〕の普及が強く求められている（潜在顧客調査結果＝本研究より、**図1**）。とくに橋梁を例に取ると、全国で70万箇所にある橋梁のうち、約7割は市区町村が管理している（**図2**）。ところが人口減にともなう地方自治体の財政難のため、十分な点検作業、架け替え工事が進んでいないのが深刻な実情である。しかしながら我が国ではこの逆境を新たなビジネスチャンスと捉えて、高齢化社会に適したインフラモニタリングシステムの社会実装を世界に先駆けて実施すべき時期にあると言える。ところが、総数70万本の橋梁や、また例えば総延長距離2万7千 km にもおよぶ鉄道網に緻密に無線センサを配置するためには、センサの駆動に定期的な交換（10年）が必要な電池の使用は現実的ではない。また、すでに設置した無線センサでは、電池の消耗を極力抑えるためにセンサ感度や計測頻度を犠牲にしており、そのために本格的な無線センサ・システムの普及を妨げている。

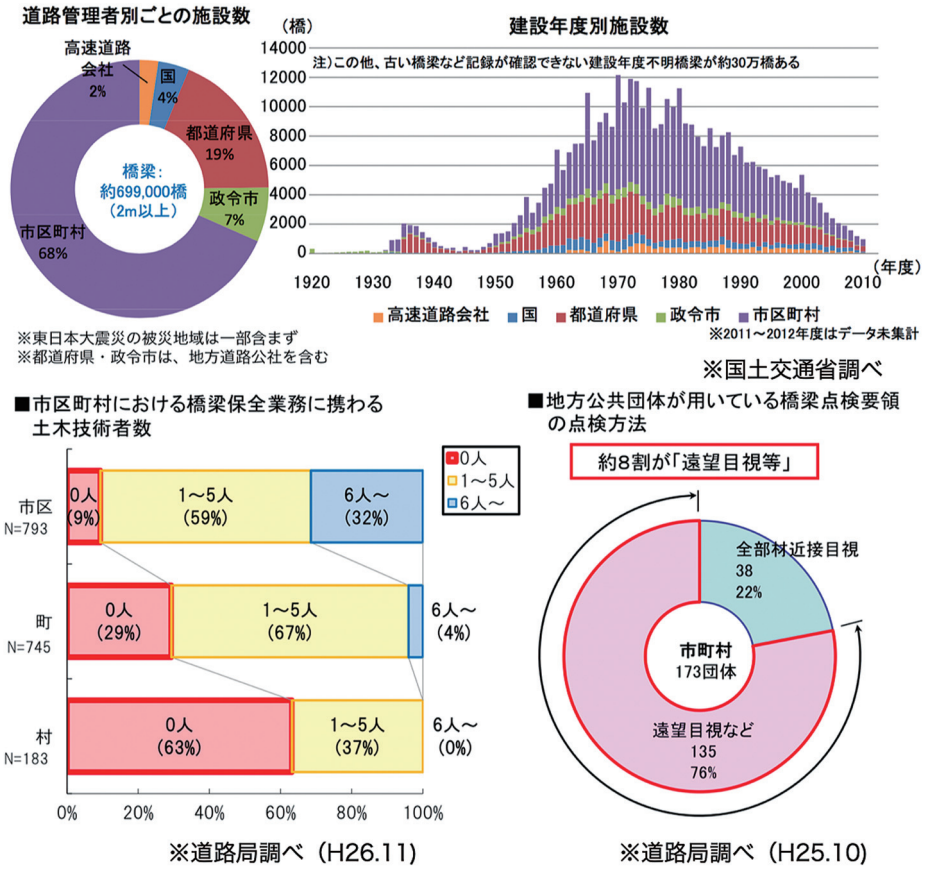


図2　橋梁の現状分析と市区町村の保全管理状況（国土交通省資料より）

表1　各種環境エネルギーの比較。暗所・夜間・電磁的閉空間でも利用可能なものは振動のみ。

方式	振動 (本研究)	太陽光	熱	電磁波
エネルギー 密度 (W/cm^2)	中 10^{-3}	中～大 10^{-4}～10^{-1}	小 10^{-5} (～室温)	小 10^{-6}
暗所・夜間	○	×	○	○
閉空間	○	× (○: 室内光)	○	△
封止	○ 完全封止	× 入射窓清掃	○ 完全封止	○ 完全封止
組立	○ モノリシック	○ モノリシック	× ペルチェ素子	× コイル

この問題を解決するために、従来は未利用であった環境エネルギーを回収して電力に変換する「エナジーハーベスタ」の技術が国内外で急速に研究開発されている（**表1**）。なかでも最も普及しているものは小型の太陽光･室内光発電である。太陽光のエネルギー密度は高いが、高架橋内部や建物深部、地下空間などの閉暗所では当然ながら利用できない。最近では廃熱を利用した熱電変換素子の基礎研究も盛んに進められているが、変換効率を表すZT値は目標値の1に遠く及ばず､その1／1000程度である。地上放送局からの放射電磁波をエネルギー源にすることも提案されているが､これも太陽光と同様に電磁的閉鎖空間では利用できない。これらのことから、本研究グループでは自然界にあまねく存在する「環境振動」に着目し〔2〕〔3〕、それを新たなエネルギー源とする振動発電型のエナジーハーベスタの研究開発に取り組んできた。

【電池の置き換え】振動発電とは、機械的な振動エネルギーを電気的なエネルギーに変換する技術の総称であり、本研究では特にエレクトレット（永久電荷）を用いた静電誘導型のMEMS振動発電素子を2021年までに事業化すべく研究開発を進めている。**図3**は、本研究グループが最終的に目指しているMEMS振動発電素子の概念図である。真空封止した1cm角程度のパッケージ内にシリコンマイクロマシニング技術（MEMS技術）で製作したバネ－質量系の振動子を搭載し、外部から流入する環境振動を受けて振動すると、その内部で静電誘導電流が発生するメカニズムを特徴としている。モジュール内部に高効率の整流回路と蓄電回路を搭載することで、従来の電池を置き換えて小型センサノードを駆動し、かつ一定の時間間隔で無線送信を可能とする。これにより、**図4**に示すように、従来は振動エネルギーとしては微弱すぎて利用できなかった未利用の振動領域から、小型センサノード駆動に必要な100μW以上の発電量を得ることを目標としている。

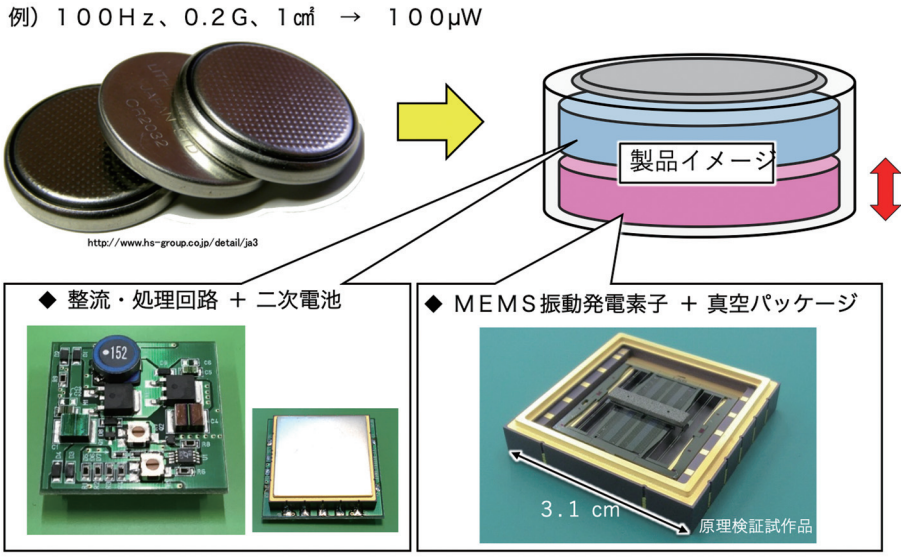


図３　将来実用化する製品の具体的な内容：ボタン電池 → 環境振動発電＋蓄電

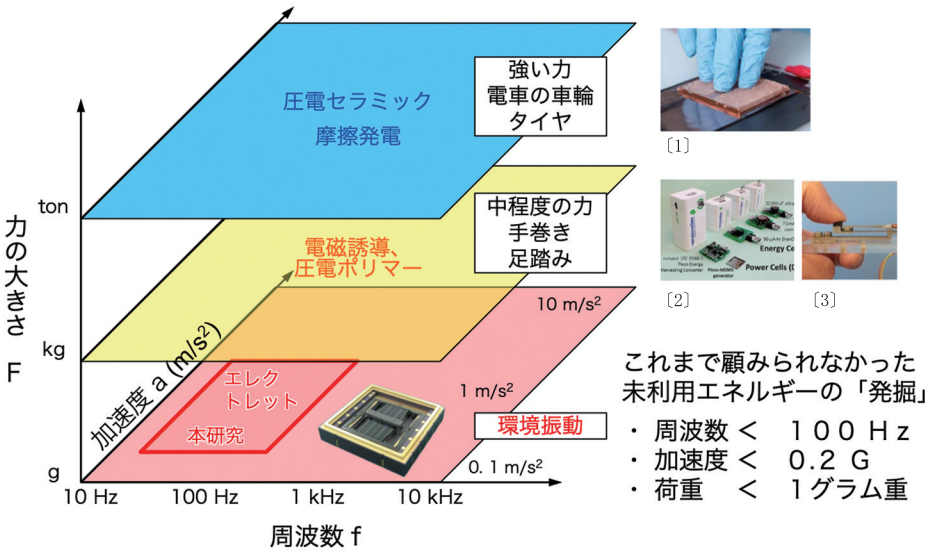


図４　振動発電のエネルギー源：低加速度、低周波数、小さい外力

〔1〕Georgia Tech. Inst.（米国）https://www.news.gatech.edu/2017/02/25/triboelectric-nanogenerators-boost-mass-spectrometry-performance、〔2〕MicroGen 社（米国）https://www.cornestech.co.jp/images/uploads/file/products/pdf/bolt.pdf、〔3〕金沢大学（日本）http://vibpower.w3.kanazawa-u.ac.jp/index2.htm

3. MEMS 高効率発電技術

3.1 微小振動構造

【MEMS 構造の新規性】これまでにも、国内外で報告されている振動発電素子の代表例として、圧電材料ＰＺＴ(Pb(Zr・Ti)O_3：チタン酸ジルコン酸鉛)の機械振動にともなう圧電効果によって100μW 程度の発電を実現したもの〔4〕や、金属系磁歪材料を用いた電磁型の発電素子による1mW 以上の発電の報告例などがある〔5〕。しかしながら現行の競合技術においては、低周波数・微小加速度でかつ、小さな外力の環境振動から高効率で100μW 以上の電力を回収する小型自立電源の報告例はない〔6〕〔7〕。

そもそも従来研究で低周波数・微小加速度の環境振動から効率良く発電できなかった理由は、発電の基本原理(圧電、電磁)に起因する効率の悪さに加えて、素子設計時に MEMS 機構の理解が不十分だったことが挙げられる。一方、本研究では1980年代から現在まで継続的に実施してきた東京大学の MEMS 研究の技術的資産を活用して、**図5**に示すような静電誘導発電に適したマイクロ構造を提案している。ここでは、シリコン基板の両面を半導体微細加工技術を用いてパタニングすることで、バネ、質量、発電用電極の構造をチップ内に高密度で集積化した。またその構造に外部から加速度を与えて振動させ、電極表面に静電誘導電荷を発生させることで、外部回路に電流を取り出す機構を考案した。

この発電メカニズムを可能にした技術は、本研究グループが2013年以来継続して実施している独自の固体イオンエレクトレット(永久電荷)の製造手法である。**図6**は数十μm の電極範囲を拡大した静電誘導発電の詳細を示している。単結晶シリコン製の電極表面に絶縁性のシリコン酸化膜を形成し、その内部に取り込んだ不純物を高温・高電界下で電気的に活性化することで、シリコン酸化膜そのものを永久的に帯電した電荷源として使用する。また、このエレクトレットを帯びた固定電極(左右)の中央に機械的に左右に動く可動電極を配置すると、初期状態ではエレクトレットによって誘起した電場が電極の左右に対称に発生する。ここで、外部から加速度が加わって可動電極が右にずれると、左右の電場の分布が変化する

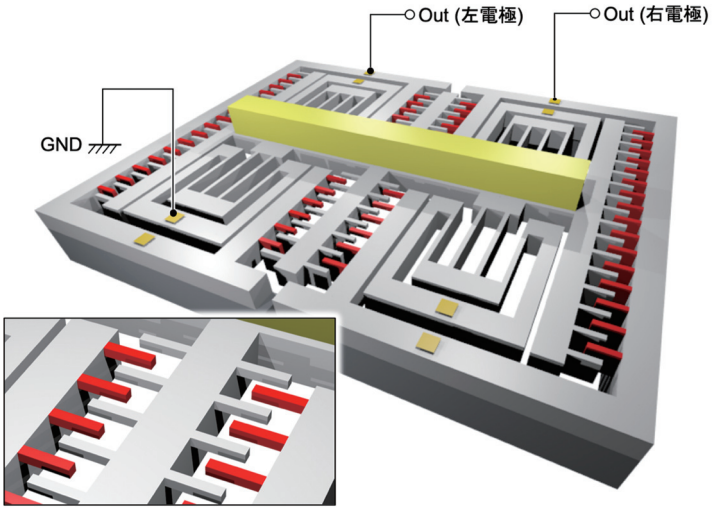


図5　本研究の振動発電素子の構造

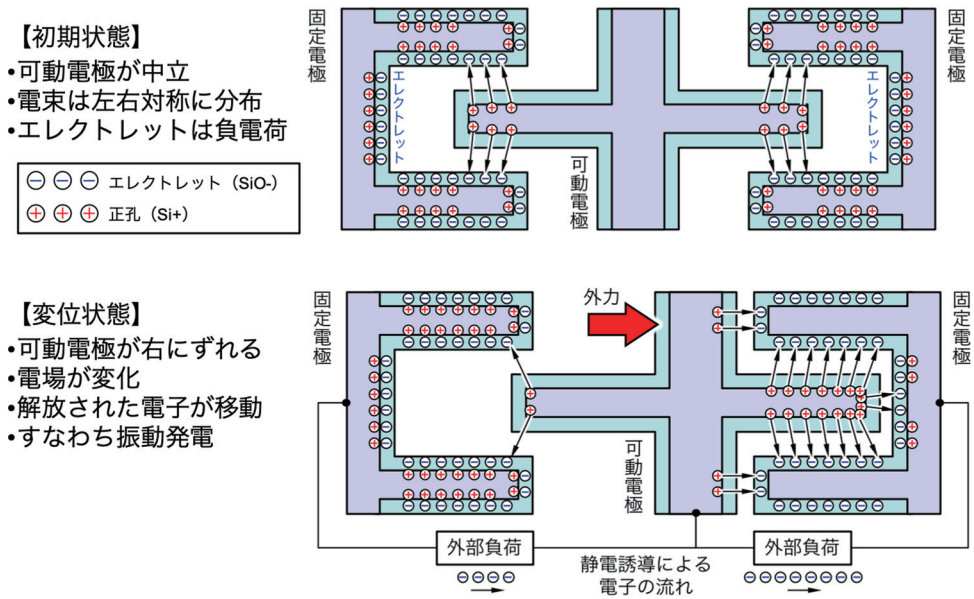


図6　エレクトレット（永久電荷）を用いた振動発電の原理

ため、電気力線の終点から解放された自由電子が外部回路を通って反対側の電極に移動する。このとき、外力が可動電極に対してした機械的な仕事が、電気的なエネルギーに変換される。この発電原理では、電極表面のエレクトレット密度が高いほど効率が向上し、得られる電力が増大する〔8〕〔9〕〔10〕〔11〕。この構造で重要な点は、高電場のエレクトレット電荷を機械的に左右対称な電極構造により打ち消している点である。この構造により、エレクトレットによる強い静電的拘束力をキャンセルし、重力加速度の1／10程度の微小な振動からも発電を可能としている。

3.2　固体イオンエレクトレット

【エレクトレットの独創性】本研究の基盤技術は、寿命性能に優れたエレクトレットの形成手法にある。単結晶シリコン（Si）層とシリコン酸化膜（SiO_2）の界面近傍に、本研究独自の手法で高密度のエレクトレット層を形成している。絶縁物表面に電荷を固定する従来技術として、これまでにもコロナ放電などが知られているが、本研究の振動発電が特徴とする高アスペクト比の櫛歯構造の側面を帯電させることは困難である。このために従来は数十μm以下の微細なエレクトレット電極の形成は難しく、発電デバイスやアクチュエータとして実施例は報告されていなかった。また、櫛歯構造電極の帯電手法として、軟X線で空気をイオン化し、バイアス電圧でイオンを打ち込む方法が提案されている〔12〕。しかしながらこの手法では、電荷は絶縁体表面への物理吸着にとどまることが多く、電荷の固定深度やエレクトレット電位の制御が困難である。また、表面吸着された電荷は空気中の水蒸気と反応して中和することが多く、エレクトレットの寿命が短いという問題がある。

一方、本研究では、シリコン酸化膜の加熱と電圧印加によって、膜内部でエレクトレットを形成する点に特徴がある〔13〕。シリコン酸化膜が半導体化する高温（700℃程度）に加熱し、

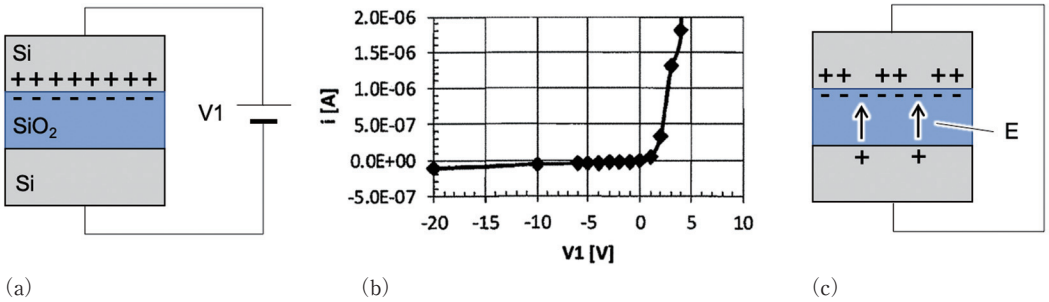


図7　(a) Si/SiO_2界面に負電荷トラップ (b) 高温状態(610℃)での Si/SiO_2界面の整流効果 (c) Si/SiO_2界面負電荷により発生する電場

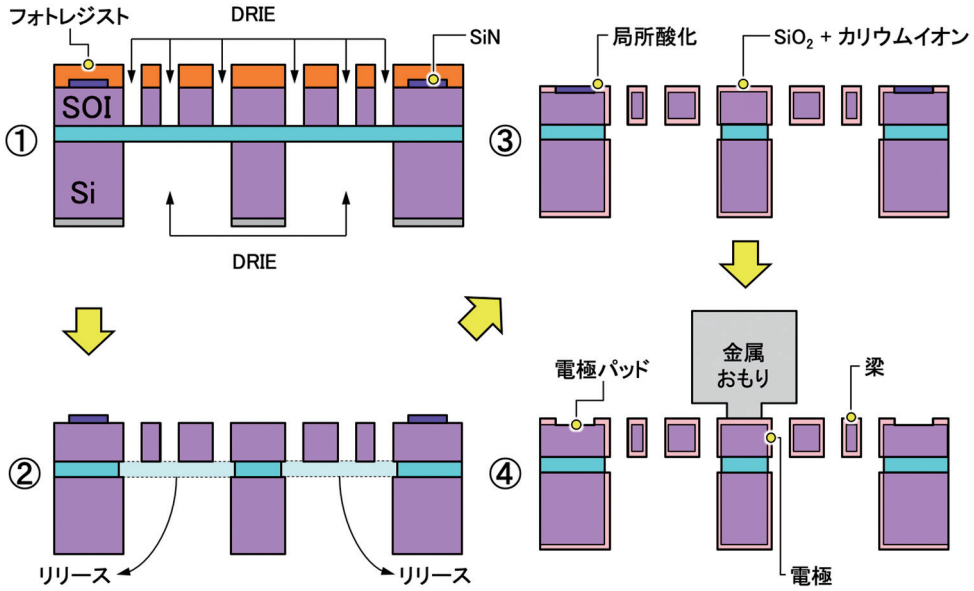


図8　本研究のプロセスフロー：①フォトリソグラフィ、Deep-RIE 等により SOI＝Silicon On Insulator ウエハのデバイス層、ハンドル層を加工　②埋め込み酸化膜 (SiO_2) 層をエッチング可動構造を基板から部分的にリリース　③エレクトレット形成　④金属製のおもりを可動部に搭載

図7 (a) に示すように電圧 V を印加すると、両者の界面には電気二重層が形成される。この高温状態における界面は図7 (b) に示すような電流－電圧特性を示し、シリコン酸化膜に負電荷が蓄積される。次に、電圧を印加した状態で温度を常温に戻し、シリコン酸化膜を絶縁性にすると、そこに蓄積された負電荷はその領域に恒久的に固定される。その後に、図7(c) に示すように、さきほど固定した電荷によって自発的な電場 E が形成される。この電場 E が、エレクトレットによる電場である。このように、本研究のエレクトレットは絶縁材料の内部に電荷を固定する方法であるため、他の方式に比べて寿命性能に優れている。本稿ではこれを他の手法と区別し、固体イオンエレクトレットという。

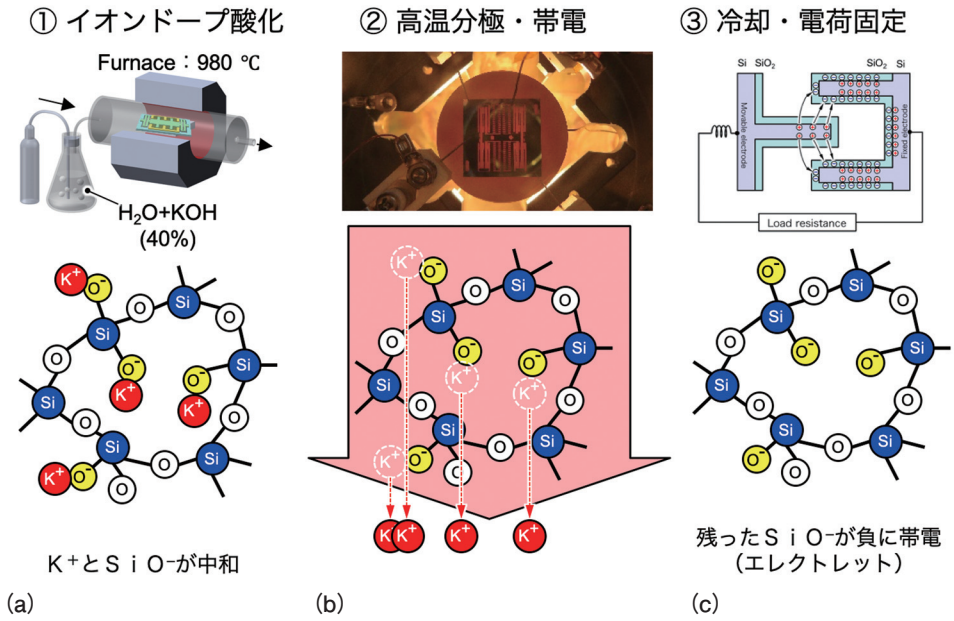


図9　固体イオンエレクトレット形成プロセス

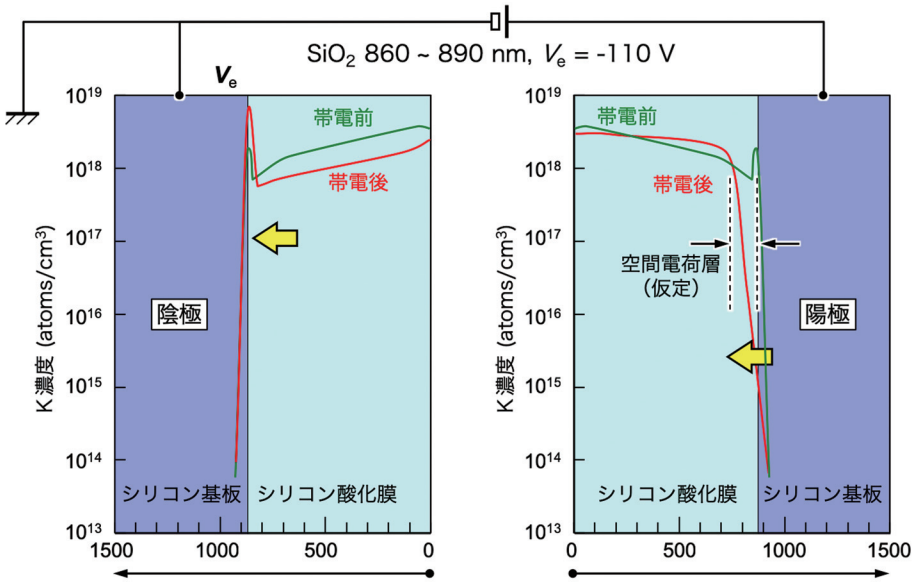


図10　Si/SiO_2界面の SIMS 分析結果

本研究の振動発電デバイス作製プロセスチャートを**図8**に示す。また**図9**は、固体イオンエレクトレット形成のプロセス詳細である。まず、MEMS加工済みのシリコン製デバイス全体の表面にカリウムイオン含有の熱酸化膜を成膜する。ここではKOH水溶液(40wt%)をN_2ガスでバブリングして酸化したものであり、酸化膜中に高濃度のカリウムイオンを含有した状態となる(**図9(a)**)。次に700℃程度の高温環境下で直流バイアス電圧を印加し、膜中でカリウムイオンを偏在化する(**図9(b)**)。最後に、直流バイアス電圧を印加したまま室温に冷却することで、イオンが酸化膜内に固定される。これにより、外部バイアス電圧がない状態でも、ギャップ間に電場が発生した状態を作り出すことができる(**図9(c)**)。**図10**には帯電前後の対向する櫛歯電極内部を、それぞれＳＩＭＳ(Secondary Ion Mass Spectrometry：二次イオン質量分析法)により、カリウムイオン濃度(atoms/cm^3：1cm^3あたりの原子数)の調査をした結果である。このように、電極表面から深い陽極側に、固体イオンエレクトレットとなっている空間電荷層が形成されており、安定で長寿命が実現可能である。

4. 実用的MEMS振動エナジーハーベスタ

4.1 発電理論による設計指針

【実際のデバイスの理論限界】図11に、速度に比例したダンピングを持つ振動発電の単純なモデル(VDRG:Velocity-Damped Resonant Generator)を示す。このモデルにおいて共振状態での発電電力Pは、

$$P = \frac{1}{2} m\, \omega_n^3\ y_0^2 \cdot Q \cdot \frac{1}{1 + \frac{Q_e}{Q_m}}$$

と表されることが知られている〔14〕。なお、式中に現れるパラメタは以下の通りである。

m	振動体の質量
ω_n	振動体の共振角周波数
y_0	外力による励振の振幅
Q	総合的Q値　　$Q = (1/Q_e + 1/Q_m)^{-1}$
Q_e	電気出力に係わるQ値
Q_m	振動体内部の機械的損失に係わるQ値

発電量を最大にするためには、この式に従ってデバイス設計する必要がある。ここで注意すべきことは、実際のデバイスには有限なサイズがあり、振動体の振幅はそのサイズ以下に限定される点である。**図12**に、Q値をパラメタにした出力のコンター図を示す〔15〕。ここで横軸は振動発電デバイスの機械的な応答を表すQ値(Qm)、縦軸は電気的なQ値(Qe)である。一見するとこれらの値が大きいほど出力が大きくなるかのように思えるが、ハッチ部分は振動体の振幅が振り切れた領域であり、実際には実現不可能な条件である。この結果から、Qmは極力大きく、かつ、Qeはある程度小さくしたときに発電量が最大化できることが理論的にわかった。

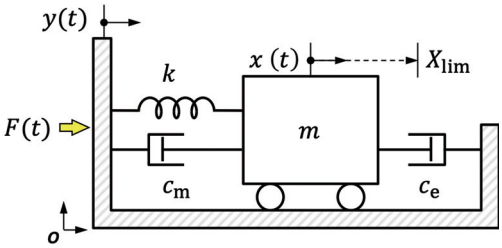


図11　速度に比例する系の振動発電の単純なモデル（VDRG：Velocity-Damped Resonant Generator）

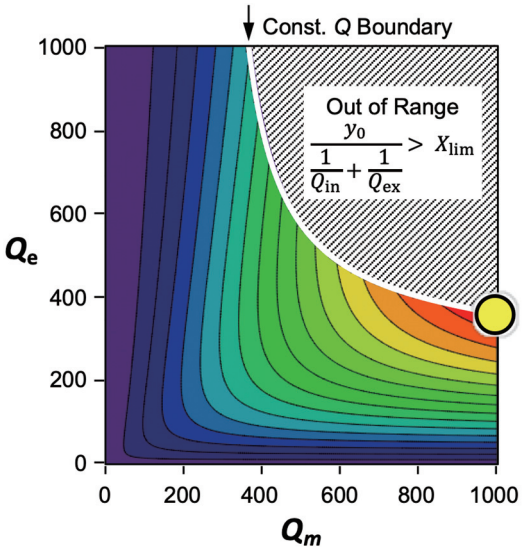


図12　実際のデバイス振幅制限を考慮したコンター図

また、ここで言う「振動エネルギーから電気エネルギーへの変換」とは、振動に連動して動くエレクトレットによる誘導電荷の移動である。言い方を変えれば、力学的に充電した櫛歯キャパシタからの放電とみなすことができる。このため、もし外部抵抗 R が小さすぎると、十分な電位差がつく前に電荷が放電されて、十分な静電エネルギーを外部に供給できず、振動の1周期あたりのエネルギー変換量が小さくなる。一方、R が大きすぎると、櫛歯キャパシタから十分に放電する前に振動の位相が進み、脱調した結果として1周期あたりのエネルギー変換量が小さくなる。よって、振動発電に関する最適負荷 R とは、振動1周期あたりのエネルギー変換量が最も大きくなる場合であり、振動の時定数とキャパシタ放電の時定数が調和したときである。そこで、配線などの寄生容量を含んだ平均静電容量を C_0、共振角周波数を ω_0 として、この整合条件を式で表すと、

$$C_0 R = \frac{1}{\omega_0}$$

である。このときの最適負荷 R は、

$$R = \frac{1}{C_0\,\omega_0}$$

である。機械ダンピングを r_f、エレクトレット帯電電圧を V_0、くし歯の係数を α とすると、Qm と Qe は以下のように表すことができる。

$$Q_m = \frac{\sqrt{mk}}{r_f}$$

$$Q_e = 1 + \frac{C_o k}{\alpha {V_o}^2}$$

したがって本研究では、真空セラミックパッケージを用いて r_f を極めて小さくすることで Qm を大きくした。また、エレクトレットの帯電電圧 V_0 を高くして、Qe を適切に抑制することでデバイスを設計した。

4.2　振動エナジーハーベスタの製作

【機械的な損失低減、高密度エレクトレット】本研究では、**図13**に示すように、チップサイズが21 mm × 21 mm の左右対称のくし歯電極構造を持つ MEMS デバイスを製作し、セラミックパッケージに搭載した。発電素子のチップは、前述の MEMS プロセスにより SOI (Silicon On Insulator) ウエハを加工した後に、可動構造を遊離し、電極表面をエレクトレット化した。また、より大きな機械的なエネルギーを得るために、可動構造上におもりを乗せた。ここで先ほどの設計指針に従って、①空気による機械的な損失低減と、②高密度エレクトレットの形成を実施している。とくに①に関して、電極間に残った空気による粘性流動による機械的損失は、振動発電素子の出力を低下させることがわかっている。そこで本研究では、セラミックパッケージを用いて真空封止することで機体的な損失を減らし、機械的な応答として Qm ＞1000 を目指した。電気的ダンピングをなくした状態で測定した機械的なインパルス応答を**図14**に示す。ここで、Δt を半減時間、τ を周期とすると、Qm は以下のように表せる。

$$Qm = \frac{\pi \Delta t}{\tau \cdot ln \dfrac{V(t_o)}{V(t_o + \Delta t)}} \qquad = \frac{4.53 \Delta t}{\tau}$$

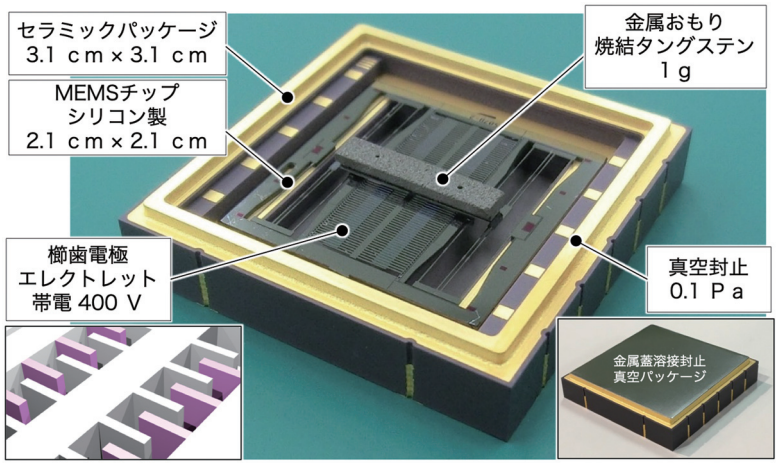


図13　本研究で作製した MEMS デバイスとパッケージ

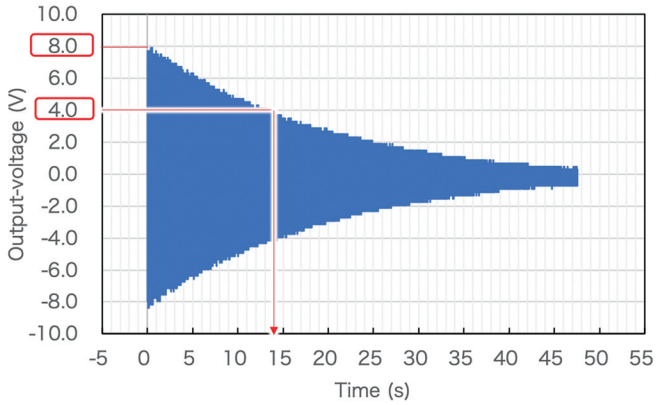


図14　エレクトレット帯電電圧を打ち消した状態での機械的なインパルス応答

その結果、

$$Qm = 4.53 \times 14\ \mathrm{s} / 10.3\ \mathrm{ms} = 6154$$

となり、十分に高い Qm を実現した。

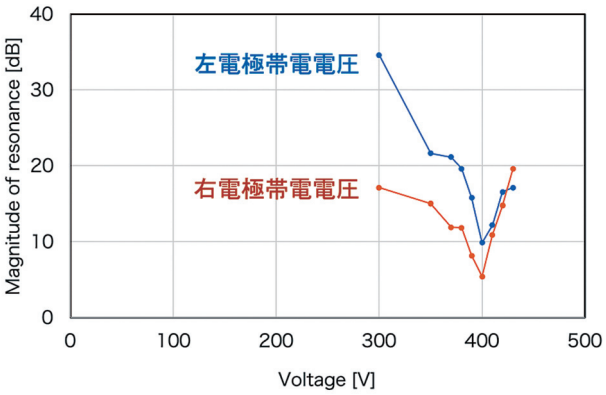


図15　左右のくし歯電極のそれぞれの帯電電圧

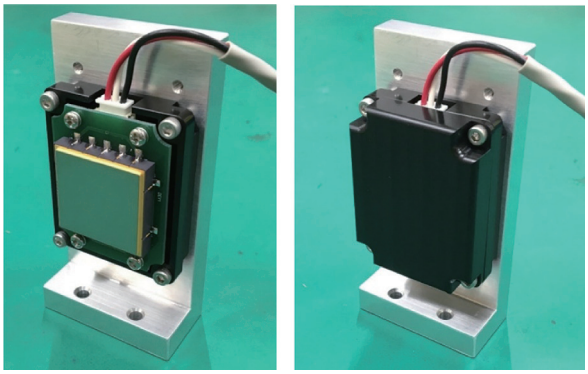
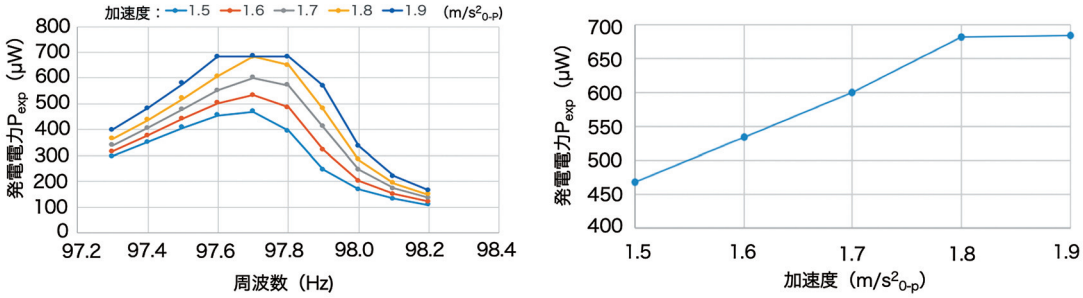


図16　本研究の樹脂パッケージング

さらに②として、構造体の左右に高密度な固体イオンエレクトレットを形成して、櫛歯電極間に高い電圧を発生させる必要があった。**図15**に、左右のくし歯電極の帯電電圧を示す。帯電電圧の測定には、振動発電素子電極に外部から逆特性の電圧を徐々に印加し、同時に微小振動での静電駆動の様子を測定する手法をとった。外部電圧によってエレクトレット帯電電圧が打ち消されると、グラフ上に振幅のボトムが現れるため、そのときの電圧でもってエレクトレット帯電電圧を定義する。本研究では、櫛歯電極間に400V の電圧が発生していることがわかる。

4.3　発電量とエネルギー取り出し効率

【世界トップレベル性能：エネルギー取り出し効率92％】実際に外部から振動を与えて発電実験を行い、得られたエネルギーを評価した。ここでは、振動発電素子を実装したセラミックパッケージを樹脂パッケージに収納し（**図16**）、それを振動発生器に取り付けて振動を加えた。振動条件は、周波数が100 Hz 付近、加速度（0-Peak）が1.8 m/s^2 = 0.13 G の正弦波とした。この振動は、水の入ったコップをこの振動条件で加振すると、わずかに水面が揺らいでいるのがわかる程度の非常に小さな振動である。**図17 (a)** に、加速度を1.5 m/s^{2}から1.9



(a)　　(b)

図17　(a) 加速度毎の発電電力の周波数特性　(b) 各加速度での最大発電量

m/s^2にしたとき、各周波数（横軸）での発電量（縦軸）の周波数特性を示す。**図17 (b)** には各加速度（横軸）での最大発電量（縦軸）をプロットした。この結果として、振動周波数97.7 Hz、加速度1.8 m/s^2において発電電力682 μW が得られた。加速度1.9 m/s^2での発電量は、周波数97.6 Hz から97.8 Hz までほぼ同じ値であることがわかる。これは、デバイスの振幅制限によるものであり、チップ内では可動部がストッパに衝突している状態を表している。

そこで、振幅制限の直前まで励振した加速度1.8 m/s^2のデータを用いて、理論的に得られる最大発電量と実際の発電量を比較した。発電の理論値は、

$$P(\text{理論値}) = 0.5 \times 2.0g \times 2\pi \times 97.7\text{Hz} \times 670\mu\text{m} \times 1.8\text{m/s}^2 = 738.7\mu\text{W}$$

であるから、これを実測値 Pexp と比較することで、エネルギー取り出し効率として

$$EH = Pexp/P(\text{理論値}) = 682\mu\text{W}/738.7\mu\text{W} = 0.92$$

が得られた。すなわち、本研究の振動発電素子はほぼ理想的な92％ものエネルギー取り出し効率を示しており、理論限界に達していることを示している。この結果は、現在では世界的にもトップレベルである。

4.4　デモンストレーションと応用

【市場性、波及効果】実証実験として、本研究の振動発電デバイスを用いて IoT 小型センサを駆動し、温度・湿度などの信号を無線送信した様子を**図18**に示す。このように、無線センサノードを間欠的に駆動し、振動発電の電力のみで無線センサを駆動できることを実証した。さらに、**表2**に各種エレクトロニクスの必要電力をまとめた。例えば Apple watch などの比較的大電力を必要とするアプリケーションに対しては、振動発電による電力の補充により電源アダプタによる充電頻度を減らすことが考えられる。また LoRa WAN や Bluetooth 4.0 などの中程度電力では、充電と放電を繰り返す「ししおどし的」な間欠駆動の方法が考えられる。さらに、タイマーやクロック等の低消費電力素子であれば、本研究の振動発電素子により連続動作が可能である。このように、本研究の振動発電素子は様々な IoT 応用に適用可能である。

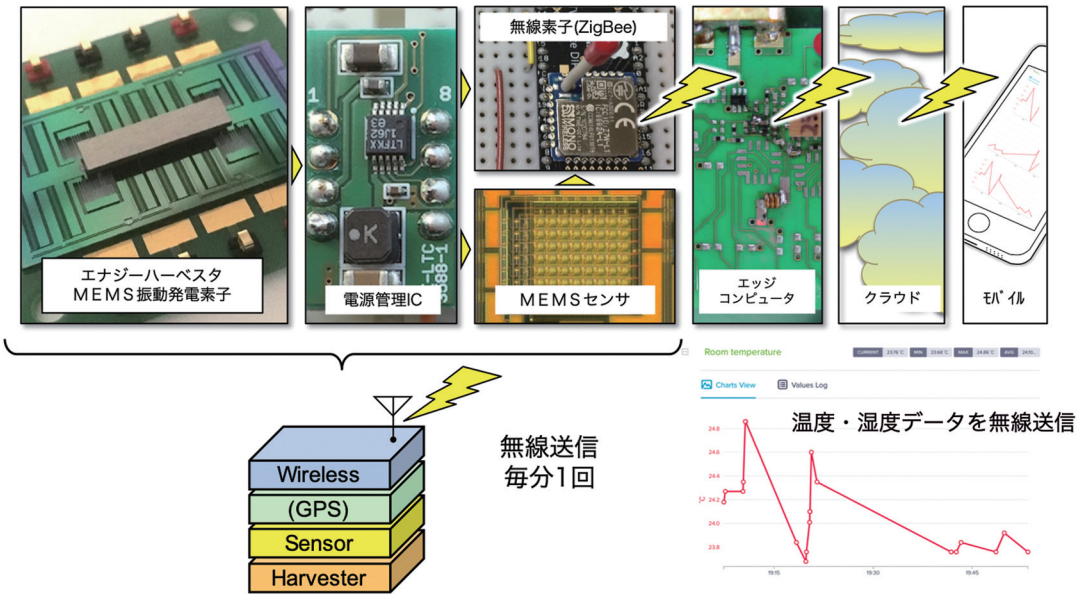


図18　振動発電素子による温度・湿度データ無線送信デモンストレーション

表2　各種エレクトロニクスの必要電力

Device	Power	Current	Voltage	Note
LoRa WAN (Class A)	23 μW sleep 115 mW peak	7 μA 35 mA	3.3 V	Excluding power for Raspberry Pi
ZigBee	60 mW peak	20 mA	3.0 V	IEEE 802.15.4, datasheet [6]
Apple Watch	52 mW avg	13.8 mA	3.76 V	Battery 250 mAh for 18 hours by official benchmark protocol [7], [8]
Bluetooth 4.0 (BLE)	45 mW peak	15 mA	2.0 ~ 3.6 V	Manufacturer datasheet [5]
GPS Tracker (BLE)	↑ (intermittent)	↑ (intermittent)	3.0 V	CR2016 (90 mAh) for 1 year [10]
Felica (readout)	~ 15 mW peak	~ 5 mA	3.0 V	Manufacturer datasheet [9]
Hearing Aid	~ 1 mW avg	0.67 mA	1.4 V	Battery 100 mAh for 150 hours [1]
Heart Pace Maker	33 μW avg	13 μA	2.5 V	Battery 1.15 Ah for 10 years [2]
Analog Clock LSI (Wrist Watch)	2.8 μW avg	1.0 μA	2.8 V	Manufacturer datasheet [3]
	0.39 μW avg	0.25 μA	1.55 V	Manufacturer datasheet [3]
Timer IC	88 nW avg	35 nA	2.5 V	Manufacturer datasheet [4]

[1] Zinc-Air type, iCellTech, PR536
[2] Medtronic Advisa MRI A3DR01
[3] SEIKO NPC Corp., http://www.npc.co.jp/product/clock/
[4] Texas Instruments TPL5010/TPL5110
[5] Lapis Semiconductor, http://www.lapis-semi.com/jp/semicon/telecom/ble.html
[6] Texas Instrument, http://www.tij.co.jp/lsds/ti_ja/wireless-connectivity/zigbee/technical-documents.page
[7] https://www.apple.com/watch/battery.html
[8] http://www.onefruit.co/blog/2015/06/29/how-big-is-the-42mm-apple-watch-battery/
[9] http://nocoly.co/
[10] TrackR, https://get-trackr.io/

5．結　言

本研究では、振動発電素子の設計理論を構築した。またその設計指針から、真空パッケージにより機械Q値を6000以上に改善し、400 V以上のエレクトレット帯電電圧によって電気Q値を下げることで、極めて高い電力取り出し効率92％にあたる682 μWの振動発電を実現した。これにより、我々の身の回りにある微小な振動をMEMS振動発電によって電力に変換し、IoT型無線センサノードの駆動を可能にする小型自立電源を実証した。

これらの研究開発成果に基づいて、鷺宮製作所ではチップサイズのさらなる小型化、真空ウエハレベルパッケージによるコスト低減や、エレクトレット形成の工数削減などの、実用化のための生産技術を開発している。今後の計画として、まずは2021年までに小規模上市を実施し、将来的には単価1,000円以下の誰でも簡単に使える製品として実用化することで、IoT社会への貢献を目指している。

6．謝　辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究業務の結果得た成果です。また、本研究の一部は、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（グラント番号　JPMJCR15Q4）の支援を受けています。

参考文献

［1］ Luigi Atzori, Antonio Iera, Giacomo Morabito: “The Internet of Things: A survey”, Computer Networks, Vol. 54, Issue 15 pp.2787-2805（2010）

［2］ 花塚泰史，樋口知之，松井知子“HMMに基づくタイヤ振動波形解析による路面状態判別”，電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J95-D, No.3, Mar. 2012, pp.570-577

［3］ 樋田昌良 , 古田修一“高架道路等からの振動伝搬特性について”, 名古屋市環境科学調査センター年報 , Vol.1, Mar. 2012, pp.61-66

［4］ Liu H, Tay C J, Quan C, Kobayashi T and Lee C, “Piezoelectric MEMS Energy Harvester for Low-Frequency Vibrations with Wideband Operation Range and Steadily Increased Output Power”, 2011 J. Microelectromech. Syst. 20, Sep 2011, pp.1131-42

［5］ Toshiyuki Ueno, “Performance of improved magnetostrictive vibrational power generator, simple and high power output for practical applications”, J. Appl. Phys. 117, 17A740（2015）

［6］ Roundy S, Wright P K and Rabaey J, “A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes”, Comput. Commun, Vol. 26, Issue 11, July 2003, pp. 1131-1144

［7］ R. A. C. Altafim, J. A. Giacometti, J. M. Janiszewski “A novel method for electret production using impulse voltages”, Proc. 7 th International Symposium on Electrets（ISE 7）, Berlin, Sep.1991, pp. 267-271（IEEE Catalog No. 91CH3029-6）.

［8］ H. Koga, H. Mitsuya, H. Honma, H. Fujita, H. Toshiyoshi, and G. Hashiguchi, “Development of a Cantilever-Type Electrostatic Energy Harvester and Its Charging Characteristics on a Highway Viaduct”, MDPI Micromachines, vol. 8,no. 10, 2017, p. 293

［9］ H. Koga, H. Mitsuya, T. Sugiyama, H. Toshiyoshi, and G. Hashiguchi, “1 mW output

electrostatic vibratory power generator allowed by optimization of the proof mass", in Proc. 16th Int. Conf. on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2016), Paris, France, Dec. 6-9, 2016

[10] G. Hashiguchi, "Electromechanical theory of microelectromechanical devices", IEICE Electronics Express, Vol.11, No.18, 2014, pp. 1-15

[11] G. Hashiguchi, D. Nakasone, T. Sugiyama, M. Ataka, and H. Toshiyoshi, "Charging mechanism of electret film made of potassium-ion-doped SiO2", SIP Advances, 6,035004,2016

[12] K. Hagiwara, M. Honzumi, M. Goto, T. Tajima, Y. Yasuno, H. Kodama, K. Kidokoro, K. Kashiwagi, Y. Suzuki, "Novel Through-substrate Charging Method for Electret Generator Using Soft X-ray Irradiation", PowerMEMS 2009, Washington DC, Dec. 2009

[13] T Sugiyama, M Aoyama, Y Shibata, M Suzuki, T Konno, M Ataka, H Fujita and G Hashiguchi, "SiO2 Electret Generated by Potassium Ions on a Comb-Drive Actuator", Appl. Phys. Express. 4, Nov. 2011, pp.114103-1-3.

[14] Mitcheson PD, Yeatman EM, Kondala Rao G, et al. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. Proc IEEE. 2008;96 (9):1457-1486.

[15] Hiroshi Toshiyoshi, Suna Ju, Hiroaki Honma, Chang-Hyeon Ji, and Hiroyuki Fujita, "MEMS vibrational energy harvesters", Sci. Techno. Adv. Mater., vol. 20, no. 1, 2019, pp. 124-143.