

開発項目 「エネルギー・環境新技術先導プログラム／トリリオンセンサ社会を支える高効率MEMS振動発電デバイスの研究」

平成26年度～平成28年度のうち平成27年度分中間年報

委託先名 技術研究組合NMEMS技術研究機構

(再委託) 国立大学法人東京大学

[記載項目]

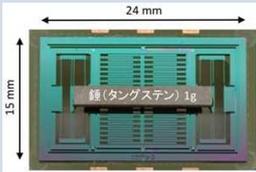
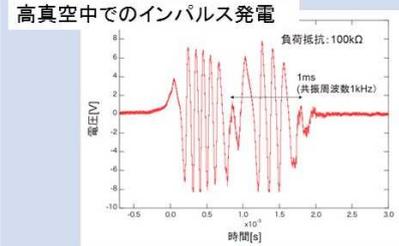
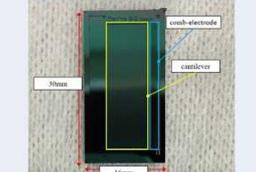
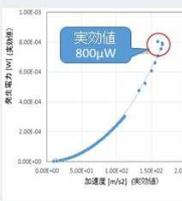
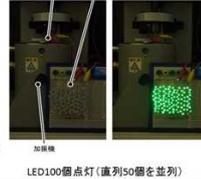
1. 研究開発の内容及び成果等

本先導研究（トリリオンセンサ社会を支える高効率MEMS振動デバイス）においては、次世代トリリオンセンサ社会およびIoT社会に必要な高効率の小型自立電源（エネルギーハーベスタ）として、環境振動から未利用エネルギーを回収するMEMS型の振動発電素子の開発を実施している。本研究ではとくに、MEMS・マイクロマシン技術の新設計・新工法を新たに導入することで、2020年度までに直径20mm程度の一円玉サイズの面積で発電効率を従来比2桁以上に飛躍的に高めた10mW級の振動発電素子を実現するための設計・製作・評価技術を確立することを研究の目的としている。

研究開発項目①「高密度固体イオンエレクトレットのエネルギーハーベスタ応用」における目標は、発電素子の負荷はキャパシタンスへの充電（すなわち容量性負荷）である特性を踏まえ、発電電力のみならず発電電流を増大する観点から設定されている。発電電流は力係数と振動速度の積で表される。このうち、①-(1)の項目では大きな力係数を得るための開発、①-(2)は小さな振動外力でも大きな振動速度を得るための開発項目である。以下、それぞれの成果について説明する。

①-(1) 高電荷密度シリコンエレクトレットの形成法の開発

力係数を大きくするには、変位に対する静電容量の変化を増大するMEMS構造において、帯電電圧を高める必要がある。そのために4種の振動構造を候補として検討した結果として、多極型振動子とカンチレバー型振動子が上記の観点から有利であると判断し、設計・試作を実施した。実施状況をまとめた表を下記に示す。

試作素子	現状	実験データ	来年度の課題
<b>A:多極型</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>力係数<math>1.5 \times 10^{-4}</math></li> <li>発電出力:300<math>\mu</math>W以上(負荷抵抗100k<math>\Omega</math>)</li> <li>短絡電流100<math>\mu</math>A以上</li> <li>帯電電圧200V以上</li> <li>0.004G(実効値)でのLED2個同時点灯(低加速度発電の実証)</li> </ul>	<b>高真空中でのインパルス発電</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>力係数を目標の<math>5 \times 10^{-4}</math>まで大きくする。(エネルギー変換部の増大、帯電電圧の増大による)</li> </ul>
<b>B:カンチレバー型</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>力係数: <math>1 \times 10^{-4}</math></li> <li>発電電力800<math>\mu</math>W以上(実効値、錘3g)</li> <li>短絡電流15<math>\mu</math>A以上</li> <li>帯電電圧:300V</li> <li>100個のLEDを連続点灯</li> </ul>	 	<ul style="list-style-type: none"> <li>現状最大理論出力電力(最適負荷時)に対する効率が8%と低い。ため、その改善を図る。(真空パッケージ化、力係数の増大)</li> <li>エネルギー変換部の構成を見直し、20mm<math>\times</math>20mm(1円玉の直径程度)の大きさに小型化する。</li> <li>力係数を目標の<math>5 \times 10^{-4}</math>まで大きくする。</li> </ul>

多極型素子では、シミュレーションモデルを新たに構築し、実験と一致することを確認した。また3回目の試作素子で、帯電電圧200V以上、発電電力300μW以上(実効値、真空中)を達成した。カンチレバー型では実効値で800μW程度の発電を達成し、100個のLEDを連続点灯することに成功した。最大理論出力電力(最適負荷時)と比較すると、現状の発電効率は8%程度であることから、今後は効率を改善し、低加速度での大電力発電を目指す。

① - (2) エレクトレット振動発電素子のパッケージ技術と信頼性評価

研究の進め方として、まず真空度と発電電力の関係を把握し、次に実際にパッケージを施してさらにその特性を評価する手順で進めている。同時に等価回路によりダンピング抵抗と発電素子の出力インピーダンスの関係を調査した。

図1は真空度とQ値の関係であり、高真空領域ではQ値が高く一定の値となっている。低真空領域では、大気中と比較して若干Q値は良くなるものの、その効果は小さいことが判明した。また中真空領域の圧力では、帯電の消失が観測された。この圧力範囲では放電が起こりやすいことから、この領域を避けたパッケージ設計が必要であることが新たに明らかになった。図2は発電素子の等価回路であり、作製した発電素子のインパルス応答から実験的に確認できたものである。出力インピーダンスは、Q値および力係数の2乗に反比例することが確認できた。また、発電電圧は力係数に反比例するものの、発電電流は比例して大きくなるため、電力は力係数に関係なく一定となる。電力を決めているのは振動子の有する機械的なエネルギーであることも確認できた。

。

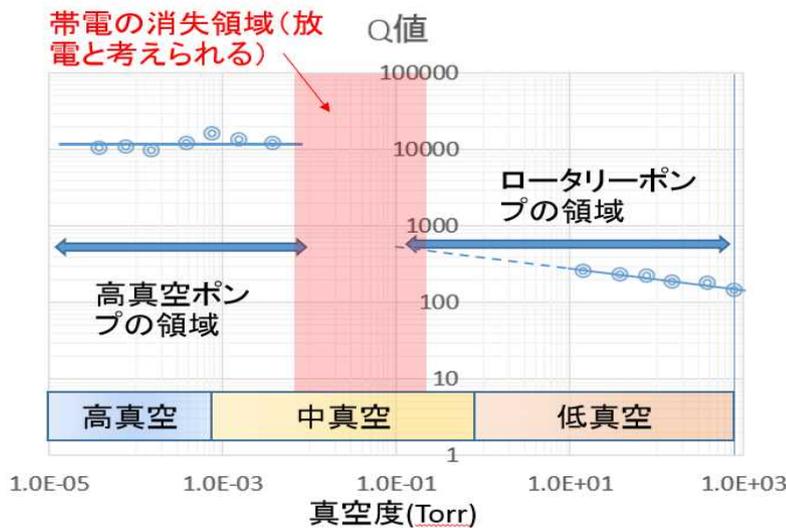


図1 真空度とQ値の関係

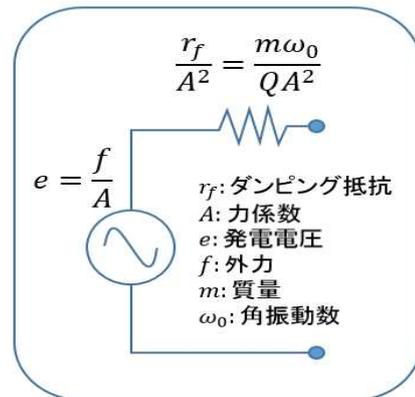


図2 実験的に確認できた発電素子の等価回路モデル

研究開発項目②「大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエネルギーハーベスタ応用」では、エネルギーハーベスタ応用のためのイオン液体と、ゲル化のためのポリマー、および、重合開始剤などの選定基準となる知見を得た。また、研究開発項目①の固体イオンエレクトレットとの組合せに必要なパラメタについても把握できた。特に、イオン液体を1V/nm程度の絶縁皮膜を持つ液体導体としてモデル化することで、大幅に理解が進んだ(図3)。また、ゲル化イオン液体の弾性を利用し、静電引力による電極-イオン液体間の接触界面の面積変化の減少を抑える新たな技術を開発した。この技術に関して電気学会センサシンポジウムにおいて速報発表を行い(図4)、優秀ポスター賞を受賞した。また、当初計画に先行してイオン固定イオン液体ゲルについても検討し、試作確認を進めた。その結果、従来は難しいとされた低周波・低加速度・微小力の入力状況にお

いても  $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の電流を得ることに成功した(図5)。この成果は国際会議 Power MEMS 2015に採択され、2015年12月に米国ボストンにて口頭発表した。

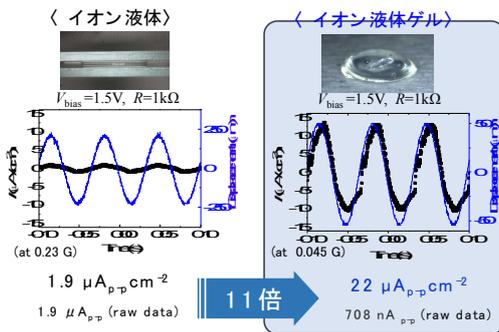


図3 断面図

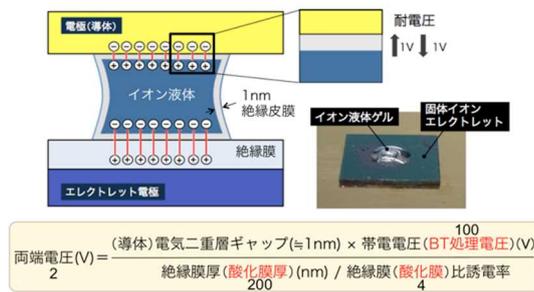


図4 イオン液体のゲル化による発電量増加

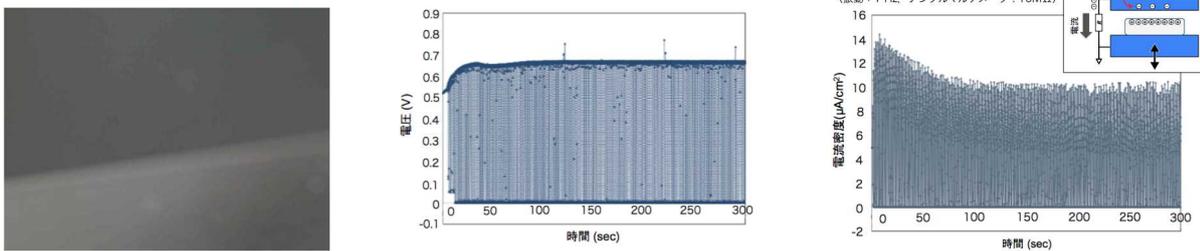


図5 イオン液体ゲルの時間—電流/電圧特性

研究開発項目③「高効率エネルギーハーベスタの開発」では、既存の加工装置を用いてインパルス加振タイプのエネルギーハーベスタの一次試作品を製作した(図6)。ボイスコイルで加振し、出力インピーダンスが非常に小さい事(0.6 MΩ)を確認した(図7)。短絡電流は  $64 \mu\text{A}_{\text{p-p}}$  を超えており、LEDを直接点灯させることにも成功した(図8)。出力電力の瞬時値は  $280 \mu\text{W}$  に達した(図9)。この成果は国際会議 Power MEMS 2015に採択され、2015年12月に米国ボストンにて口頭発表した。さらに、より小さな振動で発電可能な構造を考案し、特許を一件出願した。この実証と新規に導入した加工装置の調整を兼ねて、二次試作品を製作した結果、新構造の効果が確認できた。しかしパッケージ工程において帯電の低下が観測され、製品化に向けての課題のポイントが明らかになった。

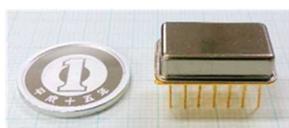


図6 一次試作品の外観写真

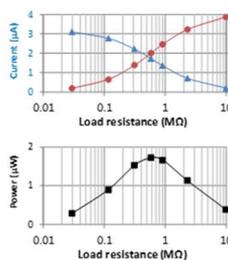


図7 ロード抵抗値—電力特性

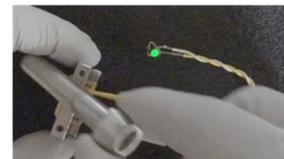


図8 発電によるLED点灯



図9 出力電力の時系列的変化



図10 二次試作品の外観写真

研究開発項目④「交通インフラでの振動発電デバイスの導入開発」では、想定した交通インフラにおいて、センシングを要するセンサ端末設置場所を設定し、振動環境（振動状態）を計測し、振動の最大加速度と卓越周波数を評価した。

(a) 京都縦貫自動車道の連続鋼板桁とコンクリート床板の組み合わせ橋梁において、構造の異なる4カ所の交通振動を計測し、最大値としてはジョイントの衝撃側で最大加速度 $1.1 \text{ m/s}^2$ 、卓越周波数帯 $30 \sim 130 \text{ Hz}$ を得た。

(b) 京都縦貫自動車道のトンネル、および道路の構造の異なる4カ所の交通振動を計測し、最大値としてはトンネル入口歩道路面で最大加速度 $1.8 \text{ m/s}^2$ 、卓越周波数帯 $100 \sim 200 \text{ Hz}$ を得た。

(c) 京都縦貫自動車道の道路の付帯設備である防護柵、および遮音壁、表示設備、照明柱の4カ所における交通振動を評価し、最大値としては遮音壁で最大加速度 $1.0 \text{ m/s}^2$ 、卓越周波数 $88, 249, \text{ および } 401 \text{ Hz}$ の振動を得た。

さらに、上述の振動環境の特性を評価するとともに、発電デバイスの開発を行う研究者と計2回のアプリケーション検討会を開催して、振動特性から発電量を推定するための手法を検討した。

研究開発項目⑤「オフィス・工場等での環境発電デバイスの導入開発」では、オフィス・工場での主要な振動環境の把握を目的として、人体、空調機、工作機械で振動波形測定と周波数解析を実施した。最大振幅は、人体>工作機械>空調機の順に大きい結果となった（ $3.8 \sim 8.9 \text{ m/s}^2$ ）。また、卓越周波数は固定値ではなく変化しており（ $1 \sim 105.5 \text{ Hz}$ ）、人体は揺らぎの影響、機械はインバータ制御の影響が見られた。さらに、期待される発電量の試算を行った。データは、デバイスの共振周波数と発電量の関係が確認できるように整理した。

上述の振動測定・解析結果を踏まえ、『振動発電が得意とするところ』で『現場ニーズ』を満たす下記のアプリケーション候補を抽出した。

- ・オフィス向けアプリ：「足部の振動」で温度センサに電力を供給し、温度データをワイヤレス通信で回収し、室内温度制御に利用

- ・工場向けアプリ：「設備の振動」で振動センサに電力を供給し、振動データを利用した異常診断・予知に利用

また、空調機等の振動する装置における待機電力を整理し（ $0.01 \sim 2.82 \text{ W}$ ）、振動発電により期待される待機電力削減効果を試算した。さらに、歩行者用ビーコン、ペット用活動量センサ等のアプリケーション候補を追加抽出し、マップに整理した。このマップは、各アプリケーション候補に適した振動の性質（インパルスの振動、連続振動）と必要電力が確認できるようにまとめた。

研究開発項目⑥「標準化の戦略立案」では、標準化の戦略立案のためIEC/SC47Fシンガポール会議（6月）、ミンスク会議（10月）に出席し、MEMSエレクトレット振動発電デバイスの審議を通じて国際標準化動向を調査した。

2. 成果（当該年度分についてのみ記載）

(1) 研究発表・講演（口頭発表も含む）

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2015年10月26日	電気学会主催「第32回センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	ゲル化イオン液体によるエネルギーハーベスタ応用	鷺宮製作所 三屋裕幸
2015年12月2日	PowerMEMS2015 – the 15th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (口頭発表)	Soft Electret Gel For Low Frequency Vibrational Energy Harvesters	鷺宮製作所 三屋裕幸
2015年12月2日	PowerMEMS2015 (同上、口頭発表)	Impulse-Excited Energy Harvester based on Potassium-Ion-Electret	鷺宮製作所 芦澤久幸

(2) 特許等

出願日	受付番号	出願に係る特許等の標題	出願人
2015年10月2日	特願 2015-196736	振動発電素子	株式会社鷺宮製作所 国立大学法人東京大学

(3) 受賞実績

「第32回センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム，優秀ポスター賞受賞  
鷺宮製作所 三屋裕幸

3. その他特記事項（当該年度分についてのみ記載）

(1) 成果普及の努力（プレス発表等）

特になし。

- (2) その他  
特になし。

契約管理番号	1 4 1 0 2 9 2 1 - 0
--------	---------------------