

「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」に係る

委託業務変更実施計画書（案）

（平成26年度～平成28年度）

平成28年2月8日

法人名：技術研究組合 NMEMS技術研究機構

1. 実施計画の細目（手法・手段・研究場所等）

（1）事業目的

次世代トリリオンセンサ社会に必要な超高効率の環境振動型発電素子（再生可能エネルギー）の実現を提案する。本研究では、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、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級の環境発電素子の設計・製作・評価技術を確立することを目的とする。

本研究では1年目の成果として300 μ W級の振動発電に成功している。先導研究2年目の平成28年度は発電効率の向上に重点をおき、1年目の成果をさらに発展させて、エレクトレット帯電電圧を現状の150Vから400Vに改善し、かつ、櫛歯電極の静電ギャップを現状の5 μ mから2 μ mに縮小するなどの改善を実施し、2年目終了時に1mW級の発電を実現する。

（2）事業概要

道路や鉄道等の交通インフラ維持管理、工場・家庭・オフィス等での省エネルギー、ウェアラブルセンサによる健康管理等の社会課題を出口イメージとして、超小型メンテナンスフリー無線センサ端末に搭載する振動発電素子の実用化に取り組む。さらに、センサ端末・システムを活用する企業群とコンソーシアムを形成し、振動発電素子の国際標準・認証規格への貢献も視野に入れて、次期の本格研究に向けた目標と指針を導出する。

（3）事業内容

① 高密度固体イオンエレクトレットのエナジーハーベスタ応用（担当：(国) 静岡大学）、 (株) 鷲宮製作所）

振動発電素子（エナジーハーベスタ）が振動から回収できる最大電力は、素子の機械パラメタのみで決定される。また、実際の出力電力は、最大電力に電気機械系相互作用の強さを表すパラメタが決定する効率との積となる。このパラメタは一般には力係数と呼ばれ、エレクトレット素子の場合には、電極の単位長さ当たりの電荷密度が最大の決定要因となる。本研究項目では、シリコン振動子型の効率を最大限に引き上げるために、高密度固体

イオンエレクトレット膜の形成に取り組む。さらに帯電電圧の劣化を防止して長期寿命を保証するためのパッケージ技術と、その信頼性を担保するデータを取得し、シリコン振動子を用いた発電素子を実用化するための基礎技術を構築する。

平成28年度は本研究の最終目標である、力係数 5×10^{-4} 以上の達成、エレクトレット発電素子の10年以上の長期信頼性担保の達成に向けて研究を加速していく。力係数をさらに大きくするためには帯電電圧を増大し、かつエネルギー変換に資する静電容量変化率を増加させる必要がある。平成27年度に得られた振動発電素子の構成において、400V以上の帯電電圧を達成するとともに、電極間容量をさらに拡大した振動発電素子構造の設計・試作を繰り返し実施する。力係数は、外部励振における発生短絡電流とMEMSの振動速度を同時測定し、その比を求めることで算出する。さらに試作した発電素子をパッケージし、高温加速試験による寿命予測を実施する。評価項目は、帯電電圧の劣化速度と同一励振加速度、同一負荷条件における発電電力とし、高温高湿状態に一定時間保持したデバイスの測定を繰り返す。これにより、試作したデバイスの劣化特性を明らかにするとともに、10年以上の信頼性を担保するパッケージ技術の確立を目指す。

(平成26～27年度)

①ー(1) 高電荷密度シリコンエレクトレットの形成法の開発

様々な梁構造に対して、シリコン振動子の電極間ギャップと帯電可能電圧の関係を実験的に把握する。

①ー(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

エレクトレット化シリコン振動子をパッケージし、真空度と電気特性の関係を把握する。その結果から、シリコン振動子の等価回路モデルとのフィッティングを行ない、パッケージしたシリコン振動子特性を把握する。

(平成28年度)

①ー(1) 高電荷密度シリコンエレクトレットの形成法の開発

5×10^{-4} 以上の力係数を持たせるための構造を設計・試作する。MEMS構造は、平成27年度に指針を得た水平振動型の多極構造型と、縦振動型のカンチレバー構造を採用し、それら2種類の開発を同時に進める。帯電電圧の向上は、酸化膜の膜厚を大きくすることでカリウムの含有量を増加させるとともに、帯電時のヒーター温度を高くするなどして大きな帯電電圧を確保する。

①ー(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

テーマ①ー(1)で試作した実際の振動発電素子をパッケージし、寿命試験に利用する試験デバイスは一定の加速試験毎に、その帯電電圧と発電電力を測定する。少なくとも85℃までの試験を複数の素子について測定し、-1dB(12%)劣化する速度を求める。このデータからアレニウスの原理に基づいて室温における長期寿命を推測する。場合によってはパッケージ内へのゲッター材の付加などを検討し、目標値達成を目指す。

また上記の技術的な検討と並行して、MEMS2017に出席して発表あるいは関連

提案の情報収集を行い、参加者との意見交換を通じてエレクトレット開発を深化させる。
テーマ終了時の目標（2年目）

振動発電素子において発電向上に効果をもたらす力係数（ 5×10^{-4} 以上）、エレクトレット帯電電圧（400V）を達成し、1mW級の発電の実証を行うこと。また今後の10mW級に向けた可能性及び道筋を示すこと、および、試験デバイスの劣化特性を明らかにし、10年以上の信頼性を担保するパッケージ技術を確立すること。

② 大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエナジーハーベスタ応用（担当：(株) 鷲宮製作所）

イオン液体の電気二重層からなるキャパシタは、実効的な電極間隔が極めて小さい（1ナノメートル程度）にもかかわらず外部の振動に対して短絡することなく極めて安定に利用できるため、エナジーハーベスタの発電効率の飛躍的な改善（従来比2桁以上）が期待される。本項目ではイオン液体の粘性や電位窓の評価、また電気二重層の形成に最適な電圧、電極材質の選定などを行い、イオン液体を用いた大容量可変キャパシタの実用化に向けた基礎技術の確立を検討する。また、イオン液体に少量のポリマーを混ぜることで、電位窓・電気二重層の特性を維持したままゲル化することにすでに成功しており、液体の状態に比べてより広い応用が期待できる。本研究では、ゲル化したイオン液体の弾性体としての性質を評価し、エナジーハーベスタ応用に重要なパラメータを把握して組成等の最適化を実施する。さらに、イオン自体をゲル内に固定してエレクトレット化する技術の確立と、さらにはゲル中のイオンを長期固定するための高信頼性技術を構築する。

（平成26～27年度）

②-（1） イオン液体のエナジーハーベスタ応用検討

イオン液体には正・負イオンとなる様々な有機分子が知られており、それらを組み合わせた多種のイオン液体が作られている。本研究では、各種イオン液体の機械特性（粘性・表面張力、およびその温度特性）や電気特性（電位窓幅・容量・リーク抵抗、およびその周波数特性）を評価する。さらに、イオン液体の濡れ性と電気二重層の形成状態に関して、電極材質・表面処理依存性を調べる。これらの結果に基づき、振動発電に適したイオン液体、電極材料、バイアス電圧等の選定基準を確立し、イオン液体を用いたエナジーハーベスタの設計指針を抽出する。

②-（2） イオン液体ゲル化の検討

ゲル化したイオン液体の機械特性（弾性・粘性損失・クリープとその経時変化）や電気特性（電位窓幅・容量その周波数特性、経時変化）を測定する。また、イオン液体の種類、ポリマーの種類とその配合比などを変えて評価し、振動発電に最適なゲル化イオン液体の重要なパラメータを把握する。

②-（3） ゲル化したイオン液体のイオン固定（エレクトレット化）検討

ゲル化したイオン液体のエレクトレット化手法を調査し、熱処理の条件（到達温度、

上昇・下降速度など) や分極電圧等の条件を把握する。

(平成28年度)

②- (3) ゲル化したイオン液体のイオン固定 (エレクトレット化) 検討

計画通りに②- (1) と②- (2) は一年目で完了した。

イオン液体中のイオン自体をゲル内に固定して、イオン液体を使った新たなゲル状エレクトレット化技術と、そのイオンを長期的に固定するための高信頼性技術を確立する。前年度において行なった技術検討から、最適なイオン液体の種類、またゲル化に最適なポリマーの種類、重合剤などについて多くの知見が得られた。また、当初計画よりも先行して、イオン自体をゲル内に固定する技術に必要な種々の条件を把握し、多くのデータを得ることができた。その結果、この技術は従来想定していた固体イオンエレクトレットとイオン液体を組み合わせたエネルギーハーベスタに加えて、これ自体で独立した全く新しいアプリケーションを創出でき得る可能性が見えてきた。特に人が身に付けるようなウェアラブルデバイス用のエネルギーハーベスタ用途では、振動周波数帯が非常に低く、また加速度・力も非常に小さいため、従来のどのような方法でも難しいと考えられてきた。ところが本研究の技術では、小さな力にもかかわらず、センサ用電源として有用な $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 級の発電電流を得られることがわかった。そこで、平成28年度は固定したイオンの信頼性を評価し、長期的に安定して使用できる高信頼性技術の確立を目指す。特に、雰囲気・使用温度・湿度等に対してイオン液体の種類、ポリマーの種類とその配合比などを考慮して評価し、長期安定化技術を確立する。

また上記の技術的な検討と並行して、Power MEMS 2016 に出席して発表を行い、参加者との意見交換も行ってイオン液体関連技術開発の発展に寄与する。

テーマ終了時の目標 (2年目)

センサ用電源等の有用な発電 ($10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 級) を見据えて、使用雰囲気温度、湿度の特性評価を踏まえた固定したイオンの信頼性評価、長期的に安定して使用できる高信頼性技術の確立を行うこと。

③ 高効率エネルギーハーベスタの開発 (担当: (株) 鷲宮製作所、再委託先: (国) 東京大学)

①と②の成果を受けて、超小型エネルギーハーベスタの設計・製作・評価技術を確立する。設計面では、微小振動から回収できる最大の電力を決める素子の機械パラメータと、エネルギーハーベスタの出力電力を決める効率を理論的に導出し、等価回路に照らし合わせて、出力電力を最大化する設計手法を構築する。製作・評価面では、エネルギーハーベスタの製作プロセスを確立するとともに、電極間ギャップをサブミクロン化して出力電力を拡大する。このために、高アスペクト比シリコン構造を実現するための最新のプロセス装置を導入して微細加工技術の研究開発を実施する。また、固体イオンエレクトレット技術とイオン液体可変キャパシタ技術を電気機械的に結合し、高効率・高出力のエネルギーハーベスタ

を開発する。

(平成26～27年度)

③ー(1) エナジーハーベスタの設計

エナジーハーベスタの動作特性はデバイスの構造と構成材料の特性に依存することから、それらの関係を精度良く再現する等価回路モデルを確立する。また、そのモデルに①、②で得られたパラメータを導入し、エナジーハーベスタの最適設計手法を理論的に構築する。

③ー(2) エナジーハーベスタの製作

高出力のエナジーハーベスタのための製作プロセスを実験的に明らかにする。特に高効率化を目指した狭ギャップ電極の設計・製作指針を確立する。

(平成28年度)

③ー(1) エナジーハーベスタの設計

共振が利用できないようなランダム性の大きな環境振動における発電デバイスの出力上限を検証する。また、固体イオンエレクトレットとイオン液体を利用した高アスペクト比構造を考案し、その出力上限に達するエナジーハーベスタを設計する。

③ー(2) エナジーハーベスタの製作

固体イオンエレクトレットとイオン液体の融合デバイスとして最適な構造・製造方法を実験的に研究・確立する。

上記項目に共通して、エナジーハーベスタの製作プロセスと狭ギャップ電極の形成技術を確認する。また、エナジーハーベスタのプロセス・ウィンドウ（設計・製作可能な特性の範囲）を拡大するためのプロセス条件を体系化する。さらに、設計・製作した高効率のエナジーハーベスタの特性を評価し、本研究が提案する固体イオンエレクトレットとイオン液体可変キャパシタの有効性を実証するデモンストレーションを行う。また、固体イオンエレクトレット技術とイオン液体可変キャパシタ技術を電気機械的に結合し、高効率化の指針を確立する。

また上記の技術的な検討と並行して、MEMS 2017に出席して発表あるいは関連提案の情報収集を行い、参加者との意見交換を通じてエナジーハーベスタ開発を押し進める。

テーマ終了時の目標（2年目）

固体イオンエレクトレットとイオン液体を利用した高アスペクト比構造にて出力上限に達するエナジーハーベスタの設計を行うこと、および、固体イオンエレクトレットとイオン液体可変キャパシタの融合による有効性を実証するデモンストレーションを行うこと。また固体イオンエレクトレット技術とイオン液体可変キャパシタ技術による高効率化の指針を示すこと。

④ 交通インフラでの振動発電デバイスの導入開発（担当：(一財) マイクロマシンセンタ

一)

道路・鉄道・港湾空港などの交通インフラにおいて無線センサネットを構築しインフラモニタリングを行うことで、これら設備の健全性を把握することは安心安全の向上や設備の維持管理の効率化に有用である。既存の無線センサでは主に太陽光発電による給電が行われているが、悪天候や夜間の途絶や、トンネル等では利用できない等の設置場所の制約問題があり、安定的な電源確保が課題となっており、とくに振動発電デバイスによって、終日安定した稼働と設置場所の制約問題の解決が期待されている。本研究項目では、交通インフラモニタリングにおいて期待される発電仕様を策定し、想定アプリケーションと応用先へのビジネスモデルの構築を検討する。

平成28年度は、前年度に得られた結果の精度を更に高めるために、追加の各種交通インフラ構造体の振動状態の計測を行う。これらの各種交通インフラ構造体の振動状態の計測結果を基に、期待される発電デバイスの発電量を、卓越周波数、及び最大加速度、また必要に応じてインパルス型振動の場合の振動頻度を参考に推定し、想定アプリケーションと応用先へのビジネスモデルの構築を検討する。この検討には、鉄道研のレポートなどの情報も活用する。

(平成26～27年度)

④ー(1) 交通インフラにおけるターゲット振動の調査と活用仮説立案

④ー(1-1) 各想定インフラでのセンサ端末設置場所での振動環境を調査する。

なお想定する交通インフラと振動源は以下を候補としている。

- (a) 道路、鉄道の橋梁、高架、トンネルなどの構造物における交通振動
- (b) 道路面、線路軌道などの土構造近傍における交通振動
- (c) 道路、鉄道の防音壁、側壁、照明設備、表示設備等の付帯設備における交通振動
- (d) 上記交通振動の他に自然風、水流などによる常時微振動

④ー(1-2) アプリケーションの仮説立案

④ー(1-1) 項の振動環境にて期待できる発電量からアプリケーションを想定する。また、並行して実施されている国土交通省の社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会の関係者との意見交換を通じて、新規アプリケーション候補を抽出する。

(平成28年度)

④ー(1) 交通インフラにおけるターゲット振動の調査と活用仮説立案

④ー(1-1) 各想定インフラでのセンサ端末設置場所での振動環境の追加調査

- (a) 道路、鉄道の橋梁、高架、トンネルなどの構造物における交通振動
- (b) 鉄道の防音壁、側壁、照明設備、表示設備等の付帯設備における交通振動
- (c) 振動環境に加えて、熱・塵・日射の影響を調査する。

④ー(1-2) アプリケーションの仮説立案

テーマ終了時の目標（２年目）

交通インフラにおける実用面の環境を見据えた追加調査を実施し、それに応じたアプリケーションを提案すること。

⑤ オフィス・工場等での環境発電デバイスの導入開発（担当：ダイキン工業（株））

オフィス・工場での人体情報センシングと周辺環境の情報センシングは、省エネや快適性改善、健康維持にとって重要な知見をもたらす。とくに健康モニタリングでは、脈拍・血圧・脈波・体温・血糖値などの様々な情報を常時監視することで、疾病の予防保全に役立てられる。また、体温と周囲の温湿度をモニタすることで、快適性を維持しながら人体近くのみでの空調制御を行うなど、快適性と省エネの同時実現が期待できる。同様のシステムは、空調にかぎらず照明制御や、製造ラインの最適空間の形成にも応用可能である。とくにこれらのセンサのウェアラブル化を考慮すると、①小型で薄いこと、②どこにでも設置できること、③非常に安価であることに加えて、④無線データ送信のための発電・蓄電素子の小型化と低コスト化が重要な課題となる。

また、空調装置には非稼働時にも総電力量の５％程度の待機電力が発生しており、省エネの足かせとなっている。オフィスや工場等の各設備の振動エネルギーから待機電力を供給することは、画期的な省エネ技術に繋がるものと考えられる。

本開発テーマでは、オフィスや工場等での人およびその周囲の振動の状況を把握することで、センサ端末の仕様や振動による期待される電力量を抽出し、想定アプリケーションと応用先へのビジネスモデルの構築を検討する。

（平成２６～２７年度）

⑤－（１） センサネットワーク用の端末の仕様抽出とアプリケーション開発

⑤－（１－１） 各想定環境でのセンサ端末設置場所での振動環境を（周波数、加速度、力）測定する。

- ・人体、特にセンサ端末を設置する指、手首・足首、上腕、首、頭部、腹部等の様々な動作時の振動環境を計測する。
- ・オフィスや工場等での様々な場所、装置での振動環境を計測する。

⑤－（１－２） アプリケーションの仮説立案

⑤－（１－１）項の振動環境にて期待できる発電量からアプリケーションを想定する。また、これまでの国家プロジェクト（グリーンセンサネットワークプロジェクトや道路インフラモニタリング）の参画企業との意見交換を通じて、新規アプリケーション候補を抽出する。

⑤－（２） 待機電力の削減に向けたエネルギーハーベスタの活用例の提言

- ・オフィスや工場での主要装置類の環境振動の計測と待機電力の把握をする。
- ・振動発電による期待される電力量削減効果の抽出をする。

（平成２８年度）

⑤ー(3) 実用的なアプリケーションとビジネスモデルの抽出

- ・前年度に実施した周囲の振動状況の把握、期待される発電量の試算、アプリケーション候補の抽出の各結果に、実用性や投資回収期間等の検討を加えて、実用的なアプリケーションとビジネスモデルの抽出を行う。そのために、これまでの国家プロジェクト（グリーンセンサネットワークや道路インフラモニタリング）の参画企業との意見交換や、学会・展示会参加等による情報収集を行う。また、必要に応じて、追加測定や詳細分析を行う。

テーマ終了時の目標（2年目）

使用される振動環境、期待される発電量を踏まえた実用性検討、並びに投資回収期間等の検討を行い、実用的なアプリケーションとビジネスモデルの提案を行うこと。

⑥ 標準化の戦略立案（担当：（一財）マイクロマシンセンター）

現在、エネルギーハーベスタには電磁方式、圧電方式、ポリマーエレクトレット方式などが検討されており、一部は産業化されている。しかしながら、振動を電気エネルギーに変換する点においてそれらの動作原理は共通であり、IEC/SC47Fへの1年後の提案を目標として、マイクロマシンセンターが中心となってエネルギーハーベスタの基礎的な特性測定方法の国際標準化に取り組んでいる。

一方、従来の方式では、発電量・発電効率の周波数依存性が高く、振動エネルギー資源を有効に活用していない。また、単一周波数における特性は理論限界からはほど遠く、電力、寸法、価格の観点で飛躍的な高効率化が望まれている。本研究では、桁違いの効率改善と周波数依存性の低減を図ったエネルギーハーベスタの特性評価に対応するために、特性測定項目と特性測定方法を抽出し、各々国際標準化の可能性と必要性を評価した上で、標準化提案内容に反映することを検討する。また、その後のアプリケーション開発に合わせて標準化項目を精査し、必要に応じて追加・見直しを実施する。

また、上記の技術的な検討と並行して、年に2回開催されるIECの国際標準化会議に出席して関連提案の情報収集を行い、参加各国との意見交換を通じて将来の技術標準提案に対する協力を要請する。

（平成26～27年度）

⑥ー(1) 標準化の戦略立案

標準化可能な特性測定項目及び特性測定方法の抽出等

（平成28年度）

⑥ー(1) 標準化の戦略立案

標準化可能な特性測定項目及び特性測定方法の抽出を継続し、特に現在NP（新業務項目提案：New work item Proposal）準備中のMEMS振動発電デバイスの特性測定方法について、IEC/TC47/SC47FへNP提案を行い国際標準化に取り組む。

また上記の検討と並行して、本年度も I E C の国際標準化会議に出席して関連提案の情報収集を行い、参加各国との意見交換を通じて技術標準提案に対する協力を要請する。
テーマ終了時の目標（2年目）

MEMS の標準化提案内容の精査を行い、国際標準化に向けた提案活動を実施すること。

⑦ プロジェクト推進及び研究支援（担当：(技) NMEMS 技術研究機構本部）

本プロジェクトの目的・目標達成に向けてプロジェクトの円滑な推進を図るため、進捗管理・調整、技術的課題の検討・対策、知財の有効的な取得ならびにその成果展開等を目的として、研究責任者の下、高効率MEH（Micro Energy Harvester）推進委員会、高効率MEH知的財産権分科会を開催する。平成27年度は以下の項目を実施する。

（平成26～27年度）

- ・プロジェクトの目的・目標達成に向け円滑な推進を図るため、参画団体の研究開発責任者クラスからなる推進委員と有識者からなる「高効率MEH推進委員会」を原則4半期に1回開催し、研究開発項目別の進捗状況や今後の進め方の整合、研究開発項目間の調整、及び知財委員会の決議事項の承認等を行う。併せて適宜個別の研究会を開催し、研究責任者への進捗報告と同時に研究責任者の指示に基づき適切な研究遂行を図る。
- ・高効率MEH知的財産権分科会に関しては、現存の(技) NMEMS 技術研究機構の知財委員会に新たに社会インフラ研究のメンバを追加して、(技) NMEMS 技術研究機構の知財ポリシーの策定、知的財産権の帰属、知的財産の管理・活用について、合理的なルールを確立する。
- ・上記委員会に出席するNMEMS 技術研究機構に所属する研究員以外の大学職員には(技) NMEMS 技術研究機構より組合規程に沿った謝金・旅費を支払う。

（平成28年度）

前年度に引き続き、平成28年度にも「高効率MEH推進委員会」と研究会を実施する。更に高効率MEH知的財産権分科会に関しても活動を継続する。

(4) 実施計画

事業項目	平成 26年 度	平成27年度				平成28年度			
	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
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									
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	→				→				→
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	→				→				→
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									
②-(1) イオン液体のエネルギーハーベス タ応用検討	→		→						
②-(2) イオン液体のゲル化検討	→				→				
②-(3) ゲル化イオン液体のイオン固定 方法検討			→		→				→
③高効率エネルギーハーベスタの開発									
③-(1) エネルギーハーベスタの設計	→				→				→
③-(2) エネルギーハーベスタの製作			→		→				→
④交通インフラでの振動発電デバイ スの導入開発									
④-(1) 交通インフラにおけるターゲッ ト振動の調査と活用仮説立案	→				→				→
⑤オフィス・工場等での環境発電デバイ スの導入開発									
⑤-(1) センサネットワーク用の端末の 仕様抽出とアプリケーション 開発	→				→				
⑤-(2) 待機電力の削減に向けたエナジ ーハーベスタの活用例の提言	→				→				
⑤-(3) 実用的なアプリケーションとピ ジネスモデルの抽出									→
⑥標準化の戦略立案									
⑥-(1) 国際標準開発	→				→				→
⑦プロジェクト推進、および研究支援	→				→				→

※ 研究期間の全体の実施計画を、「5. その他」に記載してください。

2. 委託期間

平成27年2月27日 から 平成29年2月28日まで

3. 研究体制

(1) 研究体制スキーム

