

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「微小エネルギーを利用した革新的な  
環境発電技術の創出」  
研究課題「MEMS 振動発電を用いた  
パーペチュアル・エレクトロニクス」

## 研究終了報告書

研究期間 2019年04月～2024年03月

研究代表者: 年吉 洋  
(東京大学 生産技術研究所 教授)

## §1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究は「MEMS 振動発電を用いたパーペチュアル・エレクトロニクス」と題し、研究代表者（年吉、東京大学）と共同研究者（橋口、静岡大学）との連携により、シリコン半導体プロセス技術との整合性のよい局所的エレクトレット（永久電荷）形成技術を研究開発するとともに、それを静電誘導電流の発生源に利用した MEMS 振動発電素子（エネルギーハーベスタ）を構成して、環境中に普遍的に存在する微弱な機械振動から回収した電力で電子回路を駆動するパーペチュアル・エレクトロニクス（永続的に稼動する電子回路）の実現に向けて行った研究である。また、共同研究者（鈴木、群馬大学）との連携によって、上記の振動発電素子に効率よく外部振動を伝達するインターポーズ機構を研究開発するとともに、これらの素子を実装するプリント基板そのものが外部振動によって発電する新たなエネルギーハーベスタに関する研究開発を行った。

本研究で独自に開発したシリコン酸化膜由来のエレクトレットとは、単結晶シリコンの熱酸化膜形成時に不純物元素（カリウム）を高濃度で取り込み、それを高温（500～600℃）・高電界（～0.5MV/cm）下で分極・帯電することで得られた固定電荷であり、永久的に周囲に電場を形成する。このエレクトレット形成手法を微細な櫛歯電極構造を有した MEMS 振動子に適用することで、電極対の片方に高密度のエレクトレット電荷を帯びた振動発電素子を構成した。高温加速試験の結果、このエレクトレットの帯電電位が 1dB 劣化するまでの時間は室温で数百年と予想された。このように安定なエレクトレット材料となりうる物理メカニズムを分子動力学に基づく第一原理計算によって解析したところ、カリウムイオンが脱離したあとのシリコンが 5 配位構造となり、負の荷電状態をとることを見出した（名古屋大学白石研究室との共同研究）。また、エレクトレット電位が緩和する物理メカニズムとして、水素イオン、炭素不純物、エレクトレット構造内のシリコン結合の挙動に由来する説明を見出した。

共振型の振動発電素子の一般的特性として、系の共振周波数に一致した外部振動が入力したときには出力が最大化する一方で、共振以外の周波数に対しては出力が極端に低下する問題があった。これを解決するために、本研究では MEMS 振動発電素子の共振周波数を外部負荷抵抗によって電氣的に制御する手法を新たに考案し、外部振動からの位相遅延情報をもとに PLL (Phase Locked Loop) 形式のフィードバック制御を掛けることで、入力周波数に追従する共振型 MEMS 振動発電素子が構成可能であることを示した。また、振幅制限のある振動発電素子の出力を最大化するには、従来のインピーダンス整合条件が求める以上に機械-電気変換係数を高める必要があることを理論的に見出し、エレクトレット電位の増強でこれを解決して、MEMS 素子としては世界最大レベルの 1.2mW の発電量を実現した。またその成果をもとに、環境振動発電だけで駆動可能な無線センサの動作を確認した。

さらに、環境振動の卓越周波数と発電素子の共振周波数の不一致を解決する別の手法として、振動源と発電素子の間に挿入して、機械的座屈による双安定現象を用いて物理的に励振周波数を変換するインターポーズを実現した。さらに、MEMS 振動発電素子を実装するプリント基板そのものから発電電力を得る手法として、接触・摩擦を利用した静電型の発電素子と、圧電ポリマーを用いた圧電型の発電素子を実現した。とくに後者では、振動子内部の微細構造を工夫して負のポアソン比を実現し、曲げ応力下における長手方向と幅方向の剪断応力を相殺せずに効率よく発電するオーセチック・メタマテリアル型の振動発電素子を実現した。

なお 2023 年度には、研究成果を連携先企業に技術移転して MEMS 振動発電素子を実用化するために研究期間を1年間延長し、(1)エレクトレット安定性の根拠となる5配位シリコン結合の観測実験とエレクトレット形成理論モデルの構築、(2)レーザー加熱エレクトレット形成とウエハレベル・パッケージング、(3)位相ロック回路方式を用いた周波数追従システムによる大出力維持に関する実証実験を行った。またその成果として、連携先企業の株式会社鷺宮製作所は、特定周波数におけるエレクトレット振動発電信号を建造物の異常振動検出に利用するイベントドリブン型センサ（製品名：フリークエンター）を B2B 向け製品として実用化した。同セン

サは国土交通省点検支援技術カタログの計測・モニタリング技術(トンネル)に掲載されており、トンネル内壁照明灯具等の取り付け状態を点検する技術として社会実装中である。

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

### 1. シリコン酸化膜エレクトレットの形成メカニズム解明

概要:

カリウムをドーブしたシリコン酸化膜が熱的に安定なエレクトレット材料となりうる物理メカニズムを、分子動力学に基づく第一原理計算によって明らかにした。特に、カリウムイオンが脱離したあとのシリコン酸化物は 5 配位の  $\text{SiO}_5$  構造となり、負の荷電状態をとることが判明した。これにより、陽極側で帯電したシリコン酸化膜が結果的に負に帯電する理由を説明できた。また、エレクトレット電位が緩和する物理メカニズムを、水素イオン、炭素不純物の挙動をもとに説明できた。

### 2. 機械-電気変換Q値最適化による振動発電能力の拡大

概要:

共振型の振動発電素子には、系の共振周波数に一致した振動が入力すれば出力が極大化する特徴がある一方で、共振以外の周波数に対しては出力が極端に低下する問題がある。これを解決するために、MEMS 振動発電素子の共振周波数を負荷抵抗によって電氣的に制御する手法を考案した。また、PLL (Phase Locked Loop) 形式のフィードバック制御回路を併用することで、入力周波数に追従する共振型 MEMS 振動発電素子を構成した。

### 3. 材料力学的メタマテリアル構造による圧電型発電素子の特性改善

概要:

従来の圧電カンチレバー型の振動発電素子では、曲げ応力によって長手方向に伸張性の剪断応力が発生すると同時に、幅方向には圧縮性の剪断応力が発生する。このために  $d_{31}$  定数を介した圧電性分極が相殺されて発電効率が低下する問題があった。そこで本研究では、長手・幅方向ともに同じ極性の剪断応力を発生するオーセチック性のある材料力学的メタマテリアル構造を考案し、発電効率の改善(約 2 倍)を実証した。

### 4. エナジーハーベスタの有効電力を最大化するプロセス技術

概要:

本研究も含めて、ほとんどすべての静電誘導型 MEMS 振動素子は貼り合わせ型シリコン基板 (SOI, Silicon on Insulator) を使用している。このため、支持基板と構造体 (電極、ボンディングパッド等) の間に埋め込み酸化膜を介した浮遊容量が必ず存在し、このために外部に取り出せずに素子内部を環流する無効電力が無視できない。これを根本的に解決する手段として、SOI 基板ではなく単層のシリコン基板を使用する新たなプロセスを検証した。(※1 年追加支援時の成果)

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

### 1. MEMS 振動発電素子の産学連携研究

概要:

静電誘導型の MEMS 振動発電素子では、エレクトレット電位を高めることで発電可能な周波数帯域を大幅に拡大できることを実証した。とくに、回転機器等を振動源とする場合には、振動周波数 (100Hz の倍数) に数 Hz から数十 Hz 程度の周波数変動が含まれている。この周波数変動を広帯域の振動発電で吸収することで、従来はエネルギー源として顧みられなかった微小振動を、IoT 無線センサ等の電源として新たに利用可能にした。

## 2. エレクトレット MEMS 素子による IoT センサのイベントドリブン化

概要:

近年の IoT センサでは、クラウド上の計算機負荷を低減するために IoT 端末で積極的に情報処理するエッジコンピューティング型の構成が求められているが、同時にエッジの消費電力も増大している。これを解決する手法として、MEMS 振動発電素子を特定周波数の異常振動検出に用いるイベントドリブン型のセンサ構成を実証した。これにより、異常振動センサから D/A 変換・FFT 処理を省略し、センサ端末の消費電力削減に成功した。

## 3. 圧電ポリマー薄膜を用いたバイオメテックスセンサ

概要:

CREST 研究成果である圧電ポリマー振動発電 MEMS デバイスの設計技術を、バイオメテックス応用振動センサに適用した。本センサ研究は、環境中の様々な振動と人体の反応・感覚の関係を明らかにするために、国内企業との共同研究として実施したものである。この研究では特に、生体の振動を感知する器官の構造と機能を再現する手法として、フレキシブル圧電ポリマー薄膜を用いた振動発電技術と微細構造形成技術を用いた。

## 4. エレクトレットの長期信頼性を担保した実用的生産技術の構築

概要:

シリコン酸化膜エレクトレットの劣化メカニズムを特定し、対策を明らかにした。具体的には、シリコン酸化膜形成後にさらに熱酸化を追加することで、所望のエレクトレットとは逆極性の正に帯電しやすい Si-Si 結合を排除した。また、エレクトレット形成直後の水分吸着を阻害する疎水性の自己組織化単分子膜や、エレクトレット電位を中和する酸素・水素を排除する真空パッケージとゲッタ材を併用した。これらを組み合わせて、エレクトレット MEMS 素子形成に有用なトータル・プロセス技術を構築した。(※1 年追加支援時の成果)

< 代表的な論文 >

1. Hiroshi Toshiyoshi, Suna Ju, Hiroaki Honma, Chang-Hyeon Ji, and Hiroyuki Fujita, "MEMS vibrational energy harvesters", Science and Technology of Advanced Materials, vol. 20, no. 1, 124-143 (2019).

概要:

MEMS 振動発電素子に関する解説論文。各種機械-電気変換機構(静電、電磁、圧電等)に基づく振動発電素子のベンチマークとして、体積出力密度と、それを入力加速度の自乗で割った規格化体積密度を比較した。また、振幅に制限のある振動発電素子の出力を最大化するためには、従来のインピーダンス整合が求める条件以上に機械-電気変換係数を高める必要があることを理論的に見出した。

2. Toru Nakanishi, Takeshi Miyajima, Kenta Chokawa, Masaaki Araidai, Hiroshi Toshiyoshi, Tatsuhiko Sugiyama, Gen Hashiguchi, and Kenji Shiraiishi, "Negative-charge-storing mechanism of potassium-ion SiO<sub>2</sub>-based electrets for vibration-powered generators", Applied Physics Letters, 117, 193902 (2020).

概要:

カリウムイオンをドーブしたシリコン酸化膜が高温・高電圧下で負に帯電したエレクトレットを形成する現象は知られているが、その微視的なメカニズムは明らかではなかった。本論文では分子動力的計算により、カリウムイオンを排除したあとのシリコン酸化物が 5 配位の SiO<sub>3</sub> 構造をとり、そのイオン価数が負になることを理論的に見出した。

3. Ryo Ichige, Nobuaki Kuriyama, Yohei Umino, Takuya Tsukamoto, and Takaaki Suzuki, "Size optimization of metamaterial structure for elastic layer of a piezoelectric vibrational energy harvester", Sensors and Actuators A: Physical, vol. A318, 112488 (2021).

概要:

材料のポアソン比  $\nu$  は一般的に正であるため、曲げて伸長した面にはその直交方向に縮み方向の剪断応力が発生する。よって面内方向の全体的な剪断応力が緩和されて、圧電  $d_{31}$  定数を用いた発電の効率が低下する。これを避ける手法として、本研究では梁構造体内部に負のポアソン比を発生する微細構造を MEMS プロセスで集積化した。またその副次的な効果として、同じ面積の振動体に比べて共振周波数を大幅に低下できるため、低周波数領域の環境振動に適した実用的な素子設計が可能となった。

#### 4. Hiroaki Honma, Sho Ikeno, and Hiroshi Toshiyoshi, “MEMS Electrostatic Energy Harvester Developed by Simultaneous Process for Anodic Bonding and Electret Charging”, *Sensors and Materials*, vol. 35, no. 6(2), 1941-1955 (2023).

概要:

本研究ではこれまでに、エレクトレットを帯びた MEMS 振動発電素子の材料として貼り合わせシリコン基板を用いていたが、実用化する上で材料コスト高が課題になっていた。そこで本論文では、エレクトレット形成とガラス-シリコンの陽極接合が本質的に同一のプロセスであることに着目し、安価な単層シリコン基板をガラス基板上に接合して振動発電素子を作成する新たな製作手法を実証した。(※1年追加支援時の成果)

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 東京大学グループ

研究代表者: 年吉 洋(東京大学生産技術研究所 教授)

研究項目

- ・ハイブリッド融合プロセス
- ・モノシック融合プロセス
- ・パーペチュアル・エレクトロニクス応用研究

#### ② 静岡大学グループ

主たる共同研究者: 橋口 原(静岡大学大学院工学領域 教授)

研究項目

- ・レーザーアニールによるエレクトレット形成
- ・ウエハレベル・パッケージ統合プロセス
- ・エレクトレット帯電膜の改善

#### ③ 群馬大学グループ

主たる共同研究者: 鈴木 孝明(群馬大学大学院理工学府 教授)

研究項目

- ・周波数変換インターポータ
- ・発電する圧電プリント基板回路
- ・発電する静電プリント基板回路