

課題番号	GR021
------	-------

**先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム)  
実施状況報告書(平成 25 年度)**

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名	超高性能ポリマーエレクトレットを用いた次世代環境振動・熱発電システムの開発
研究機関・ 部局・職名	国立大学法人東京大学・大学院工学系研究科 機械工学専攻・教授
氏名	鈴木 雄二

1. 当該年度の研究目的

これまで、ポリマー・エレクトレット中に電荷が保持される電荷保持機構の解明のため、エレクトレット膜中の電場のモデリング、評価手法の確立、真空紫外線を用いた新しい高速荷電装置の開発と荷電条件の最適化を行ってきた。また、3次元ナノ構造形成技術の検討を進め、液体による発電出力の向上を実証し、MEMS 技術を用いた、2つの異なるタイプのマイクロ環境振動発電器の高性能化、エレクトレットを用いた非定常熱発電のモデル化と予備実験を進めてきた。

平成25年度は、これらの成果を踏まえ、まず、耐液性を持ち、3次元ナノ構造を有する新たなエレクトレット材料の開発を目的とする。また、静電誘導型の MEMS エレクトレット発電器の電池レス無線センサ電源としての評価、および圧電ポリマー型の MEMS 発電器の発電性能のさらなる向上を進めるとともに、非定常熱発電デバイスのプロトタイプを試作、波力発電に適した発電器構造の提案を行うことを目標とする。

2. 研究の実施状況

1)ポリマー・エレクトレット膜中の電荷保持機構の解明

添加物由来のナノクラスターを有する CYTOP EGG エレクトレットの内部構造を模擬し、より高い表面電荷密度の実現の指針を得るために、アークプラズマガンで CYTOP 表面に酸化物ナノ粒子を制御性良く分布させ、初期表面電荷密度が最大40%向上できることを示した。

2)耐液性を持つ3次元エレクトレットの開発

ナノピラー構造により、Cassie-Baxter 状態を保って荷電面への液体の接触を抑制し、電荷の安定性を向上させる手法の検討を進め、気液界面を放物面と仮定した安定性に関する新しいモデルを構築し、図1に示すように、実験データを良く一致することを示した。また、Si ナノピラーを熱酸化した SiO<sub>2</sub> ピラーについて検討を行い、コロナ放電では荷電が困難であるのに対し、本研究で開発した光電離による荷電方法では荷電が可能であることを示した。

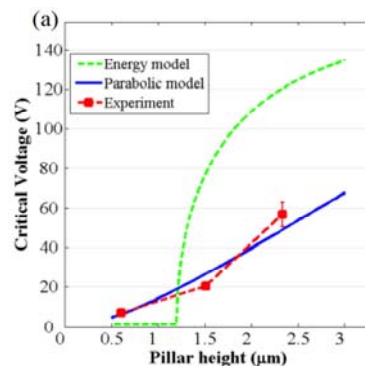


図1：電場による Cassie-Baxter 状態の安定性モデルと実験データの比較

### 3) MEMSエレクトレット発電器の開発

まず、これまで進めてきた発電器のさらなる出力向上のための検討を進めた。パリレン樹脂のハニカム構造上部に電極を形成することによって、等価的な基板の比誘電率を 1.8 にまで低減し、ガラス基板上の電極を用いた場合に比べて、出力が 50%増加できることを発電実験により明らかにした。また、この電極構造、および前年度に開発したX型のばね構造を組み合わせた発電器プロトタイプを試作した(図2)。

さらに、試作プロセスをより簡略化させ、エレクトレット材料の荷電性能劣化を防ぐため、通常酸素プラズマをアルゴンで希釈したエッチング方法の最適化を行い、図3に示すように平行平板 RIE 装置によっても2.5倍程度の選択比が得られることを明らかにし、このプロセスでパタニングされたエレクトレット膜が、スパッタアルミ膜をマスクとしてパタニングされたサンプルよりも高い荷電性能を持つことを明らかにした。

また、櫛歯型電極を持つ MEMS エレクトレット発電器について開発を進めた。小さな振動加速度でも、大きな振動加速度でも相対的に大きな発電量が得られるように、重なり面積変化型の櫛歯電極と間隔変化型の櫛歯電極を混合した構造を考案し、図4に示すプロトタイプを試作した。エレクトレット材料としては、parlylene-C を用い、軟 X 線による荷電を行った。その結果、間隔  $7\mu\text{m}$  の極めて狭い櫛歯電極の側壁に対しても、荷電時の印加電圧120Vに対して、 $\pm 60\text{V}$  の均一な表面電位が得られることをケルビン力顕微鏡(KFM)による測定で明らかにした。さらに、発電実験を行い、260 Hzの比較的低い共振周波数において、 $1.6\mu\text{W}$  の発電出力が得られることを明らかにした。これは、エレクトレット発電器としては最高レベルの変換効率57%に相当し、極めて高い効率を得られることを示した。

### 4) 圧電ポリマー型 MEMS 発電器の開発

パリレン樹脂のハニカム構造内部に荷電させた圧電ポリマー型の MEMS 振動発電器の性能向上を図るため、ハニカムを構成するパリレン梁の中に電極を埋め込み、荷電時の実効的バイアス電圧を上げられるデバイスの考案を行った。実現するための重要なプロセス技術として、パリレン梁内部に形成される幅数 $\mu\text{W}$  程度の空隙中に導電性樹脂を表面張力により導入する手法について検討し、特に選択的に電気的な絶縁を行うための「バルブ構造」について設計指針をモデル計算と系統的な実験から確立した。

図7に、並行する2組の電極に対して、機械的に接続する梁構造

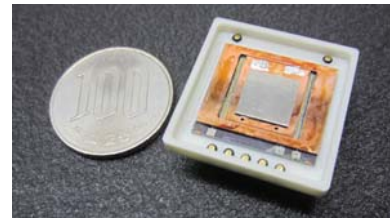


図2：ハニカム構造上電極と X型ばね構造を組み合わせた発電器プロトタイプ

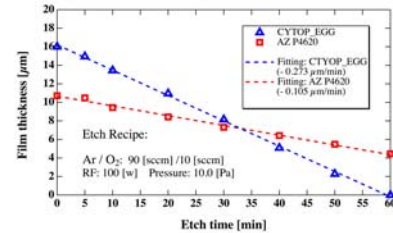


図3：CYTOP エレクトレット膜の Ar 希釈酸素プラズマエッチング

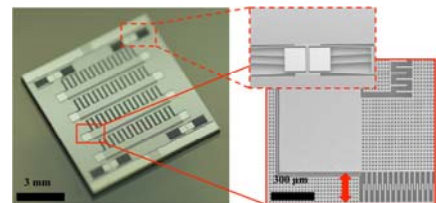


図4：櫛歯型電極を持つエレクトレット発電器

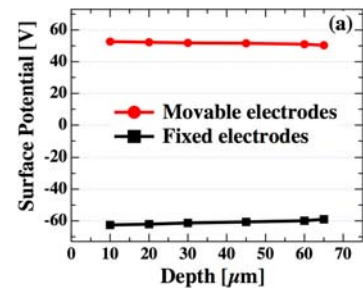


図5：KFMで測定された櫛歯間の表面電位

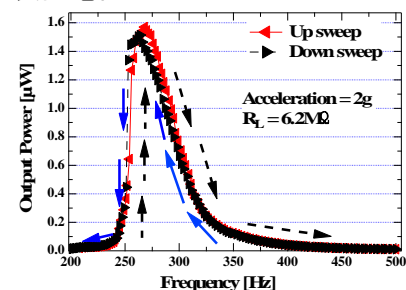


図6：櫛歯型電極を持つエレクトレット発電器の発電実験結果

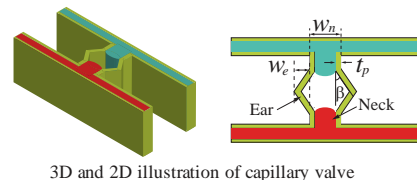
様式19 別紙1

にバルブを設けることで、表面張力駆動による導電性樹脂の流入を防いだ結果の画像を示す。この電極を有する振動子構造を試作し、 $10^6$ 回の繰り返し振動においても電極の抵抗が全く変化しないことを明らかにした。

さらに、この電極構造を組み込んだ圧電ポリマー発電器(図8)を試作し、初期プロトタイプながら  $1138 \text{ pC/N}$  の高い圧電係数を実現し、 $205\text{Hz}$  の振動から  $53\text{nW}$  の出力を得た。

5) 波力発電に適した発電器構造の提案

波力発電への将来的な応用を想定し、これまで取り組んできたマイクロ発電器よりも大面積の発電器構造を検討した。MEMS技術を最大限利用するため、 $100\text{mm}$  直径のウェハをそのまま基板として使用した回転型とした。本研究で開発された寄生容量のモデルを組み込んだモデル計算から、電極数、電極間隔の最適化を行い、 $2\text{Hz}$  の極めて遅い回転速度から  $10\text{mW}$  の発電出力が得られる設計を行って、試作を進めた。これは発電密度では  $1300 \text{ W/m}^3$  に相当し、電磁誘導を上回る出力が得られることを示した。



3D and 2D illustration of capillary valve

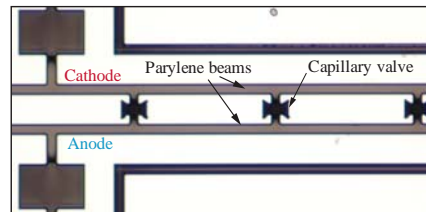


図7：表面張力駆動による導電性樹脂の導入とバルブ構造。上) コンセプト，下) 実験結果。

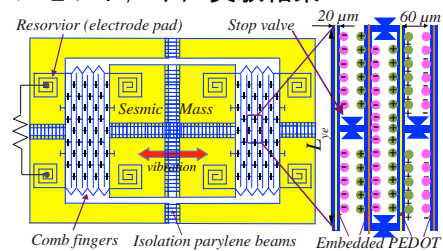


図8：導電性樹脂の電極を組み込んだ圧電ポリマー発電器

3. 研究発表等

雑誌論文 計 3 件	<p>(掲載済み一査読有り) 計 1 件 Chen, R., and Suzuki, Y., "Suspended Electrodes for Reducing Parasitic Capacitance in Electret Energy Harvesting Devices," J. Micromech. Microeng., Vol. 23, Issue 12, 125015 (2013).</p> <p>(掲載済み一査読無し) 計 2 件 鈴木 雄二,「振動発電技術の原理と将来展望」日本エネルギー学会誌, 93 巻, pp. 227-233, (2014). 鈴木 雄二,「エネルギーハーベスティングへの期待」空気調和・衛生工学, 87 巻, 2 号, pp. 79-82, (2013). (未掲載) 計 0 件</p>
会議発表 計 14 件	<p>専門家向け 計 12 件 Feng, Y., and Suzuki, Y., "All-polymer High-aspect-ratio Spring with Embedded Electrode," Proc. 17th Int. Conf. Solid-state Sensors, Actuators, and Microsystems (Transducers '13), Barcelona, (2013), pp. 1569-1572. Minakawa, Y., Chen, R., and Suzuki, Y., "X-shaped-spring Enhanced MEMS Electret Generator for Energy Harvesting," Proc. 17th Int. Conf. Solid-state Sensors, Actuators, and Microsystems (Transducers '13), Barcelona, (2013), pp. 2241-2244. Song, K.-Y., Morimoto, K., and Suzuki, Y., "New Mathematical Model for Electrostatic Stability of the Cassie State on MEMS-based Pillard Surface," 17th Int. Conf. Miniaturised Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2013), Freiburg, (2013), pp. 714-717. Fu, Q., and Suzuki, Y., " Large-Dynamic-Range MEMS Electret Energy Harvester with Gap-closing/Overlapping-area-change Electrodes," 13th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2013), London, (2013), pp. 542-546.</p>

様式19 別紙1

	<p>Yoshida, J., Morimoto, K., and Suzuki, Y., "Electrostatic Thermal Energy Harvester Using Unsteady Temperature Change," 13th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2013), London, (2013), pp. 376-380.</p> <p>Fu, Q., and Suzuki, Y., "MEMS Vibration Electret Energy Harvester with Combined Electrodes," 27th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS' 14), San Francisco, (2014), pp. 409-412.</p> <p>Feng, Y., and Suzuki, Y., "All-polymer Piezoelectret Energy Harvester with Embedded PEDOT Electrode," 27th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS' 14), San Francisco, (2014), pp. 374-377.</p> <p>吉田 洵也, 森本 賢一, 鈴木 雄二, 「高誘電率セラミックスを用いた静電誘導型 MEMS 非定常熱発電デバイス」, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, 仙台, 2013 年 5 月 29 日-5 月 31 日, pp. 552-553.</p> <p>K.-Y. Song, 森本 賢一, 鈴木 雄二, 「MEMS ピラー構造を用いた超撥水面におけるピッチの影響に関する研究」, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, 仙台, 2013 年 5 月 29 日-5 月 31 日, pp. 550-551.</p> <p>付 乾炎, 鈴木 雄二, 「Development of MEMS Vibration Energy Harvester with Soft-X-ray- charged Vertical Electrets」, 第5回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 仙台, 5AM2-C-3, 2013 年 11 月 4 日-11 月 6 日.</p> <p>植田 誠, 鈴木 雄二, 「エレクトレット振動発電器を用いた無線センサノードの性能評価」, 第5回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 仙台, 6PM3-PMN-010, 2013 年 11 月 4 日-11 月 6 日.</p> <p>鈴木 雄二, 招待講演, 「エレクトレットを用いた MEMS 環境発電デバイスの開発」, 第 7 回集積化 MEMS 技術研究会, オムロン京阪奈イノベーションセンター, 2013.5.24.</p> <p>一般向け 計 2 件 招待講演, 「環境振動発電」, 日本表面科学会関西支部・市民講座, 大阪, 2013.8.3. 基調講演, 「環境発電」, サイエンスフォーラム 2013, 日本電波工業, 狭山市, 2013.9.28.</p>
<p>図書</p> <p>計 0 件</p>	
<p>産業財産権 出願・取得状 況</p> <p>計 0 件</p>	<p>(取得済み) 計 0 件</p> <p>(出願中) 計 0 件</p>
<p>Webページ (URL)</p>	<p>熱流体工学研究室「ポリマーエレクトレットを用いた MEMS 環境発電システムの開発」 <a href="http://www.mesl.t.u-tokyo.ac.jp/ja/research/electret.html">http://www.mesl.t.u-tokyo.ac.jp/ja/research/electret.html</a></p>
<p>国民との科 学・技術対話 の実施状況</p>	<p>2013/7/17-19 に日本能率協会主催で東京ビッグサイトにて開催された展示会テクノフロンティア 2013(来場者数約 75,000 名)の環境発電展に, 旭硝子社, オムロン社など5社とエレクトレット環境発電アライアンスとしてブースを設け, ポスター展示, デバイス展示により, 本プロジェクトの成果の公開を行った(ブースの訪問者 2000 名以上). また, 2013.8.3 に大阪で開催された日本表面科学会関西支部・市民講座において一般向けの招待講演(参加者約 100 名)を行った.</p> <p>2013/12/6 に, ロンドンの英国王立協会にて, 「第3回日英環境発電ワークショップ」を主催した. 東京大学の他, インペリアルカレッジ, シェフィールド大学からの招待者, 日本の企業, 大学からの研究者から計8件の講演を行い, 50 名を超える参加者(4/5 が産業界)を得て, 活発な討論を行った. (詳細は, <a href="http://www.mesl.t.u-tokyo.ac.jp/UK-Japan/index-j.html">http://www.mesl.t.u-tokyo.ac.jp/UK-Japan/index-j.html</a> を参照).</p>
<p>新聞・一般雑 誌等掲載 計 4 件</p>	<p>2013/7/23 電氣新聞 4 面「振動発電の商品化へ 東大, オムロンなどが協議体設立」 2013/7/29 日刊工業新聞 21 面「微弱振動→電氣に変換 技術普及へ組織」 2013/8/5 日経産業新聞「揺れで発電, 能力 16 倍」 2013/9/16 03:00-03:28 NHK BS Great Gear (NHK 国際放送) テクノフロンティア2013特集</p>
<p>その他</p>	

4. その他特記事項

本プロジェクトの成果を実用化させるための共同体として, 旭硝子株式会社, オムロン株式会社, THHINK WIRELESS

## 様式19 別紙1

TECHNOLOGIES JAPAN, テクノデザイン株式会社, 小西安株式会社と, エレクトレット環境発電アライアンスを設立した.

経済産業省平成 25 年度社会ニーズ(安全・安心)・国際幹事等輩出分野に係る国際標準化活動(MEMS振動発電デバイスの特性測定方法に関する国際標準化)の標準化事業委員会委員長として, 本研究に関連した環境振動発電の標準化への取り組みを行った.

## 実施状況報告書(平成25年度) 助成金の執行状況

本様式の内容は一般に公表されます

## 1. 助成金の受領状況(累計)

(単位:円)

	①交付決定額	②既受領額 (前年度迄の累計)	③当該年度受領額	④(=①-②-③)未受領額	既返還額(前年度迄の累計)
直接経費	127,000,000	106,730,000	20,270,000	0	0
間接経費	38,100,000	32,019,000	6,081,000	0	0
合計	165,100,000	138,749,000	26,351,000	0	0

## 2. 当該年度の収支状況

(単位:円)

	①前年度未執行額	②当該年度受領額	③当該年度受取利息等額 (未収利息を除く)	④(=①+②+③)当該年度合計収入	⑤当該年度執行額	⑥(=④-⑤)当該年度未執行額	当該年度返還額
直接経費	169,990	20,270,000	0	20,439,990	20,439,990	0	0
間接経費	32,019,000	6,081,000	0	38,100,000	38,100,000	0	0
合計	32,188,990	26,351,000	0	58,539,990	58,539,990	0	0

## 3. 当該年度の執行額内訳

(単位:円)

	金額	備考
物品費	5,831,714	両面マスクアライナ, MEMSプロセス材料費他
旅費	2,051,160	研究発表(CCIB・スペイン), 共同研究打合せ(オムロン),他
謝金・人件費等	6,568,917	博士研究員、事務補佐員人件費
その他	5,988,199	国際会議参加登録費, 実験室・クリーンルーム借室料
直接経費計	20,439,990	
間接経費計	38,100,000	
合計	58,539,990	

## 4. 当該年度の主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関名
				0		
				0		
				0		