

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24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	東京大学・大学院工学系研究科・教授
氏名	鈴木 雄二

1. 当該年度の研究目的

本研究では、直接・間接的に CO2 削減に貢献しうる3つの出口目標を設定し、まず、その基盤となる3次元ナノ構造を持ち耐液性を有する超高性能エレクトレット膜開発のため、1)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、2)全く新しい高速荷電方法の開発、3)保持電荷量を増やし、より多くの発電量を得るための3次元ナノ構造形成技術の開発を目標としている。さらに、グリーン・イノベーションに貢献するエレクトレット応用発電デバイスとして、1) マイクロ環境振動発電、2) 非定常熱発電、3) 波力発電、の検討を目指している。

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、KFM による表面電位の測定、TSD による電荷の熱安定性評価手法の確立を進め、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、3次元ナノ構造形成技術のための準備を行ってきた。また、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試作、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24年度は、これらの成果を踏まえ、まず、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を進めるとともに、それに基づく、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高性能化と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評価を進めるとともに、非定常熱発電デバイスの設計とプロトタイプを試作、波力発電に適した発電器構造の設計を進めることを目標とする。

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

極めて高い表面電荷密度をもたらす、CYTOP 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、CYTOP 表面に酸化物ナノ粒子を制御性良く分布させる手法を開発した(図1)。現在、ナノ粒子が電荷保持機構に与える効果について明らかにすべく、荷電性能の評価、および熱的安定性の評価を進めている。

2) 耐液性を持つ新たなエレクトレット材料の開発

CYTOP 表面の酸素プラズマ処理により、表面粗さ(RMS 値)を 600nm

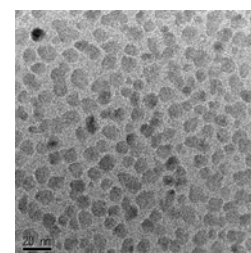


図1 アークプラズマで形成した SiO<sub>x</sub> ナノ粒子の TEM 画像 (直径 10 nm)

(図2)まで増加させ、接触角が 160 度に顕著に増加するとともに、シリコンオイル中での荷電性能が改善されることを示した。第二段階として、図3のようなナノピラー構造を持つ SiO<sub>2</sub> エレクトレットを試作した。表面に撥液コーティングすることにより、絶縁油のような低表面張力流体に対しても Cassie-Baxter 状態を保つことができ、荷電面に液体を接触させないことが可能である。静電場による気液界面の安定性についても検討し、ピラー部でのピニング効果を加味した新たなモデルを構築した。実験データと整合するこのモデルにより、500V の表面電位に対しても Cassie-Baxter 状態が保てること が示され、耐液性を持つエレクトレット膜の方向性が示された。

### 3) MEMS エレクトレット振動発電器の高出力化

MEMS 発電器の高出力化のため、新しいばね構造、電極構造の検討を行った。図4は、振動子の回転を抑制するための X 型の Parylene 樹脂ばね構造である。このばね構造により、共振周波数を低く保ったまま、振動子の回転振動を従来の 1/5 に減少できることが明らかにした。これにより、電極幅を 150 $\mu$ m まで狭くした場合、従来のばね構造よりも 2.5 倍の発電出力が得られることが見積もられ、試作デバイスを用いた発電実験でその傾向を明らかにした。

また、Parylene 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、寄生容量を低減でき(図5)。これにより、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。さらに、垂直エレクトレット膜を持つ楕歯型 MEMS 振動発電器(図6)、Parylene 樹脂のハニカム構造内部に軟 X 線荷電させた圧電ポリマー型の MEMS 振動発電器についても、プロトタイプを試作と発電試験を行い、高出力化の検討を進めた。

### 4) 非定常熱発電デバイスの設計とプロトタイプを試作

非定常温度変化による誘電体の誘電率変化を用いた静電誘導発電のモデル化を行い、BaTiO<sub>3</sub> プレートと SiO<sub>2</sub> エレクトレットを用いた初期プロトタイプによる発電実験を行い、約 30nJ の出力を得た。電圧出力はモデル計算の結果と一致しており、パラメータを最適に選ぶことによって、より大きな出力が得られることが判った。

### 5) 波力発電に適した発電器構造の設計

電極間に液体を満たしたエレクトレット発電の出力を見積もり、電磁誘導より優位になる可能性を示した。シリコンオイル(比誘電率 2.3)を液体として用いた場合、発電出力が 3.8 倍増大することを予備実験により明らかにした(図7)。単純な予測式による見積りでは増大率は 1.9 倍であり、モデル構築が必要であることが判った。

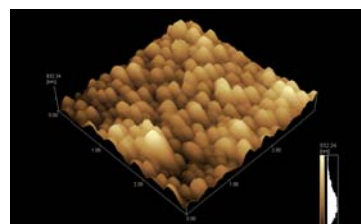


図2 酸素プラズマ処理した超撥水 CYTOP 表面の AFM 画像

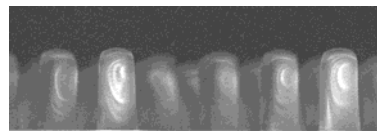


図3 ピッチ 5 $\mu$ m の SiO<sub>2</sub> ナノピラー構造

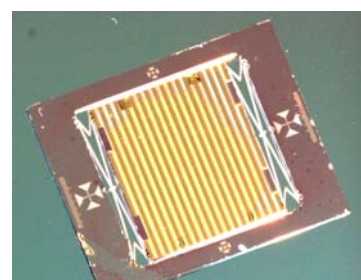


図4 X型 Parylene ばね構造

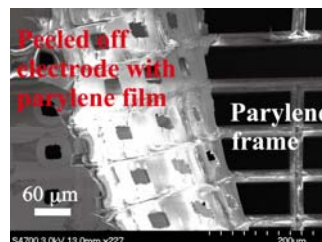


図5 寄生容量を低減させるハニカム構造で支持された電極

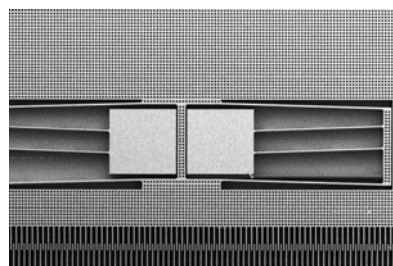


図6 楕歯型 MEMS 振動発電器

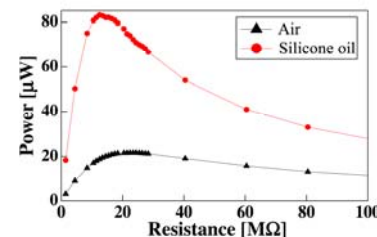


図7 発電出力の比較

3. 研究発表等

<p>雑誌論文 計7件</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計2件 Hagiwara, K., Goto, M., Iguchi, Y., Tajima, T., Yasuno, Y., Kodama, H., Kidokoro, K., and Suzuki, Y., "Electret Charging Method Based on Soft X-ray Photoionization for MEMS Applications," Trans. IEEE, Dielectr. Electr. Insul., Vol. 19, No. 4, pp. 1291-1298 (2012). Feng, Y., Hagiwara, K., Iguchi, Y., and Suzuki, Y., "Trench-filled Cellular Parylene Electret for Piezoelectric Transducer," Appl. Phys. Lett., Vol. 100, Issue 26, 262901 (2012).</p> <p>(掲載済み一査読無し) 計5件 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). 鈴木 雄二, 「振動発電によるエネルギーハーベスティング技術」, □ 2012 エネルギーハーベスティング技術, 電子ジャーナル, pp. 17-21, (2012). 鈴木 雄二, 「ポリマーエレクトレットを用いた MEMS 振動発電器の開発」, これからの蓄・省エネルギー材料の開発における機能性付与技術, 技術情報協会, 第9章6節, (2012). 鈴木 雄二, 「MEMS と電子デバイスの融合によるエナジー・ハーベスティング技術の期待」, 異種機能デバイス集積化技術の基礎と応用, CMC 出版, pp. 201-208, (2012). 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).</p> <p>(未掲載) 計0件</p>
<p>会議発表 計18件</p>	<p>専門家向け 計16件 Suzuki, Y., "MEMS Electret Generator for Energy Harvesting: Material, Design and Evaluation," Invited talk, 6th Asia-Pacific Conf. Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT 2012), Nanjing, 2012.7.8-11. Minakawa, Y., and Suzuki, Y., "X-shaped High-aspect-ratio Parylene Spring for Low-resonant-frequency MEMS Electret Energy Harvester," 6th Asia-Pacific Conf. Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT 2012), Nanjing, 2012.7.8-11, ac12000235. Suzuki, Y., "Nano-particle-enhanced High-performance Polymer Electret for Vibration Energy Harvesting," Keynote talk, IUMRS Int. Conf. Electr. Materials (IUMRS-ICEM2012), Yokoyama, 2012.9.23-28, B-7K24-005. Feng, Y., Hagiwara, K., Iguchi, Y., and Suzuki, Y., "MEMS-based Cellular Parylene Structure for Piezoelectric Polymer Electret," IUMRS Int. Conf. Electr. Materials (IUMRS-ICEM2012), Yokoyama, 2012.9.23-28, B-7O24-006. Feng, Y., and Suzuki, Y., "All-Polymer Soft-X-Ray-Charged Piezoelectret with Embedded PEDOT Electrode," 26th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'13), Taipei, 2013.1.20-24, pp. 865-868. Chen, R., and Suzuki, Y., "Metal-On-Nothing Electrodes for Reducing Parasitic Capacitance in Electret Energy Harvesting Devices," Proc. 12th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2012), Atlanta, 2012.12.2-5, pp. 121-124. Minakawa, Y., and Suzuki, Y., "Low-resonant-frequency MEMS Electret Energy Harvester with X-Shaped High-aspect-ratio Parylene Spring," Proc. 12th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2012), Atlanta, 2012.12.2-5, pp. 133-136. Y. Suzuki, "MEMS Energy Harvester Using Polymer Electret/Piezoelectret," Invited talk, Center for Wireless Integrated MicroSensing and Systems (WIMS<sup>2</sup>) Seminar, University of Michigan, Ann Arbor, 2012.12.7. 鈴木 雄二, 「高付加価値エネルギー源のためのマイクロ発電の展開」, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演資料集, 金沢, 2012.9.9-12, F22007, 4pp. 萩原 啓, Yue Feng, 井口 義則, 鈴木 雄二, 「軟X線光電離を用いたエレクトレット荷電法の開発とその MEMS 振動発電器への応用」, 第4回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 小倉, 2012.10.22-24, pp. 95-96. Rui Chen, 鈴木 雄二, "Reduction of Parasitic Capacitance of Electret Energy Harvester for Higher Power Output," 第4回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 小倉, 2012.10.22-24, pp. 101-102. 植田 誠, 鈴木 雄二, 「エネルギーハーベストに用いるエレクトレット発電器の電源管理回路の性能評価」, 第4回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 小倉, 2012.10.22-24, pp. 275-276. 鈴木 雄二, "MEMS 技術を用いたエレクトレット環境振動発電器の開発," 招待講演, 日本学術振興会 第151 先端ナノデバイス・材料テクノロジー委員会, 東京大学, 2012.7.23. 鈴木 雄二, "グリーンイノベーションのためのマイクロ環境発電," 招待講演, 日本機械学会北陸信越支部特別講演会「振動発電を中心としたエネルギーハーベスト技術」, 信州大学, 2012.11.12. 鈴木 雄二, "ポリマーエレクトレット・圧電ポリマーを用いた MEMS 環境振動発電," 招待講演, 半導体理工学センター・STARC アドバンス講座, 川崎, 2013.1.15.</p>

様式19 別紙1

	<p>鈴木 雄二, “MEMS 技術を用いたマイクロ環境発電の技術動向と将来展望,” 招待講演, 電子情報通信学会電子デバイス研究会専門委員会・特別ワークショップ「電子デバイスから見たエネルギーハーベスタの最新技術と展開」, 秋葉原, 2013.3.4.</p> <p>一般向け 計 2 件 Yuji Suzuki, “MEMS-based Energy Harvester Using Polymer Electret/Piezoelectret,” UK-Japan Workshop on Energy Harvesting (日英環境発電ワークショップ), 東京大学, 2012.9.28 (研究代表者が主催した国際ワークショップ).</p> <p>鈴木 雄二, “豊かな環境低負荷型社会のための環境振動を用いたエネルギーハーベスティング,” 基調講演 (参加者 367 名), ネプコンジャパン, 東京ビッグサイト, 2013.1.17.</p>
<p>函 書</p> <p>計 1 件</p>	<p>鈴木雄二 (監修および分担執筆), 環境発電ハンドブック ~電池レスワールドによる豊かな環境低負荷型社会を目指して~, エヌ・ティ・エス, (2012), 総ページ数 404 ページ.</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><a href="http://www.mesl.t.u-tokyo.ac.jp">http://www.mesl.t.u-tokyo.ac.jp</a></p>
<p>国民との科 学・技術対話 の実施状況</p>	<p>2012/7/11-13 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 2012(来場者数約 75,000 名)の環境発電展にブースを設け, 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 600 名以上). また, 2013/1/13 に開催された展示会ネプコンジャパンにおいて一般向けの基調講演(参加者 367 名)を行った.</p> <p>2012/9/28 に, 東京大学本郷キャンパスにて, 在日イギリス大使館のサポートも受けて「日英環境発電ワークショップ」(参加費無料)を主催した. 東京大学の他, イギリス大使館, 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10件の講演を行い, 80 名を超える参加者(3/4が産業界)を得て, 活発な討論を行った.</p> <p>(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>さらに, 東京大学が実施したポスター展示「未来からの招待状」(2012. 8-10 月, 東京大学病院, 2013. 1. 16-17, 文京シビックホール) 東京大学オープンキャンパスの際に工学部 2 号館で開催した「未来のエネルギー2011」に, 12 件の展示の 1 つとして, 本プロジェクトのポスター展示を行った.</p>
<p>新聞・一般雑 誌等掲載 計 0 件</p>	<p>なし</p>
<p>その他</p>	<p>2012. 8. 5 フジテレビ新報道 2001 (7:30 - 8:55) での UKTI (英国貿易投資総省) を紹介するコーナーにて, UKTI の日本での活動の一環として, UKTI の本研究への関心が紹介された.</p>

4. その他特記事項

経済産業省平成 24 年度国際標準化推進事業委託費 (戦略的国際標準化加速事業 (国際標準共同研究開発事業: 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フィージビリティスタディ)) 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24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	85,219,000	21,511,000	20,270,000	0
間接経費	38,100,000	25,565,700	6,453,300	6,081,000	0
合計	165,100,000	110,784,700	27,964,300	26,351,000	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	607,143	21,511,000	0	22,118,143	21,948,153	169,990	0
間接経費	25,565,700	6,453,300	0	32,019,000	0	32,019,000	0
合計	26,172,843	27,964,300	0	54,137,143	21,948,153	32,188,990	0

## 3. 当該年度の執行額内訳 (単位:円)

	金額	備考
物品費	9,646,020	Siウエハ, MEMSプロセス薬品, N2ガス発生装置
旅費	2,241,549	成果発表のための海外渡航, 国内出張
謝金・人件費等	3,086,363	博士研究員, 技術補佐員, 事務補佐員人件費
その他	6,974,221	クリーンルーム使用料, 機器保守費用, 展示費
直接経費計	21,948,153	
間接経費計	0	次年度に繰越したため
合計	21,948,153	

## 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
フォトリソナイザ	L9490 浜松ホト ニクス(株)	1	567,000	567,000	2012/4/6	東京大学
高速バイポーラ電 源	HAS-4051 NF回 路設計	2	294,000	588,000	2012/5/16	東京大学
サイトップ	旭硝子(株)	1	525,000	525,000	2012/5/18	東京大学
窒素ガス発生装置	PTN3-05-01	1	703,500	703,500	2012/9/24	東京大学