

「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」  
平成 28 年度採択研究代表者

H29 年度  
実績報告書

鈴木 雄二

東京大学大学院工学系研究科  
教授

高出力環境発電のための革新的エレクトレット材料の創成

## § 1. 研究実施体制

### (1)「東京大学」グループ

- ① 研究代表者:鈴木 雄二 (東京大学大学院工学系研究科 教授)
- ② 研究項目
  - ・分子レベルの議論に基づくエレクトレット荷電メカニズムの解明
  - ・新しい異方性誘電率液体の開発
  - ・革新的有機無機ハイブリッド・エレクトレット材料の開発
  - ・振動発電・熱発電におけるエレクトレット発電性能評価

### (2)「東京理科大学」グループ

- ① 主たる共同研究者:田中 優実 (東京理科大学工学部 准教授)
- ② 研究項目
  - ・バルクセラミックスの帯電・電荷保持機構に関する系統評価
  - ・第一原理計算を利用したバルクセラミックスの欠陥種に関する解析
  - ・革新的セラミックス・エレクトレット材料(薄膜セラミックス・エレクトレット)の開発

### (3)「東京都市大学」グループ

- ① 主たる共同研究者:吉田 真史 (東京都市大学知識工学部 教授)
- ② 研究項目
  - ・有機無機ハイブリッド・エレクトレットの荷電メカニズム解明のための分子軌道法計算
  - ・3次元電場中の液晶の粗視化シミュレーション

(4)「日本大学」グループ

① 主たる共同研究者:中川 活二 (日本大学理工学部 教授)

② 研究項目

- ・高空間分解能の表面電位計測のための電極探針試作
- ・表面電位計測システム構築

## §2. 研究実施の概要

東京大学では、革新的エレクトレット材料の創成とその応用に向け、材料、発電デバイスの試作を行った。まず、有機無機ハイブリッド・エレクトレットのモデル系として CYTOP を用い、末端基の種類による荷電性能の違いの第一原理計算による再現を試みた。LC-BLYP および 6-31G\*基底関数系を用いて、CYTOP 単分子に異なる末端基を接続した分子のエネルギー準位を算出し、末端基によって大きく異なり、 $-\text{CF}_3$ で終端された CTL-S に対して、CTL-A ( $-\text{COOH}$ )、CTL-M (3-aminopropyltriethoxy-silane) の順で電子親和度が増大し、実験結果と定性的に一致することを明らかにした(文献1)。

また、異方性誘電率による発電量向上のため、ネマチック液晶について引き続き検討を進めた。フッ素系のネマチック液晶である BCH-5F.F.F を候補として選び、体積抵抗率が 5CB よりも 250 倍大きいこと、完全に垂直配向とするための電界が  $2.5 \text{ V}/\mu\text{m}$  であること、を明らかにした。そして新たに構築したモデルが液晶を電極間に満たした場合の発電実験データをよく再現することを示した。現在、さらに発電に適した液晶の検討を進めている。

さらに、エレクトレット発電性能評価については、プリント基板を用いた回転型エレクトレット発電器に取り組んだ(文献2)。発電器は、機械加工により製作された回転子、固定子、ミニチュアベアリング、電極側・エレクトレット側の2種類の PCB 基板からなる。極数は 109 であり、回転子側には  $15 \mu\text{m}$  厚さの CYTOP EGG を用いた。軟 X 線荷電を用いて荷電し、表面電位は  $-850 \text{ V}$  程度が得られた。回転子と固定子の空気ギャップが  $200 \mu\text{m}$  の場合、発電出力は  $2 \text{ rps}$  で  $80 \mu\text{W}$  程度となった。また  $1.45 \text{ m/s}$  の歩行速度において、平均  $80 \mu\text{W}$  の発電出力が得られた。今後、デバイスとして性能を向上させるとともに、本研究で開発する新エレクトレット材料、および発電用液晶の適用の検討を進める。

これまで、回転型発電機の評価は、特定の対象者、あるいは単純な振り子に取り付けて計測が行われており、一般的な人体の歩行時にどの程度の出力が得られるかについて検討した例はなかった。そこで、標準的な人体歩行モデルを用いた標準的試験方法の確立を目指し、初期的な検討を行った。腕の動きを模擬した単純な2リンクモデルにおいても、振り子運動と比較すると特に垂直方向の振幅、加速度に大きな違いが現れており、腕の運動のモデル化の重要性が示唆される。発電機モデルと組み合わせることによって、発電機の各種パラメータの最適化・最適設計に有用である。また、運動モデルの挙動を正確に再現するためのマルチリンクロボットを導入して予備実験を進めた。

さらに、昨年度に引き続き東京理科大学と連携してセラミックス・エレクトレットのための水酸アパタイト・バルクモデルの第一原理計算を進めた。また、東京理科大学と実験面での協力を進めるため、C 軸配向を制御したアパタイト薄膜の作製を行なった。

東京理科大学では、 $4 \text{ kV}$  超の表面電位を発現させることに成功しているオキシ水酸アパタイト(OHA)系バルクセラミックス( $\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6[\text{OH}, \text{O}, \text{V} \cdot \text{OH}]_2$ )を対象に、表面電位の起源に関する基礎的知見を得ることを目的として、OHA エレクトレット上に配した対向電極内に静電誘導される電荷と表面電位との関係という観点に基づく検討を行った。また、東京大学と共同で、OHA のバルクセラミック・エレクトレットを発電素子とする初期的な発電モデルを用いて発電特性に関する基礎評

価を実施し、 $0.9\mu\text{W}$ (最大  $50\text{ Vpp}$ )と小さいながらも OHA を用いて初めて発電出力が得られることを示した。また、薄膜でかつ高い表面電位を維持する HA 系エレクトレットの開発に向けて、1) SUS 基板上に溶射製膜した HA 薄膜のエレクトレット化、2) OHA セラミック粒/ポリマー系ハイブリッド薄膜の作製とエレクトレット化および 3) c 軸垂直配向 HA/ポリマー系自己組織化薄膜の作製とエレクトレット化についての検討を進めた。

東京都市大学では、DFT を用いてポリマーエレクトレットの荷電メカニズムについて検討を進め、無機化合物に関してニトロ基やシアノ基を有する芳香族化合物を用いると電荷トラップが深くなる可能性があることが判った。また、実際の振動発電素子において外部電場が電荷トラップに及ぼす影響を計算し、通常の振動発電素子の内部に生じると予想される  $10^8\text{ V/m}$  程度の電場では電荷トラップの位置や深さに影響が生じないことを明らかにした。

日本大学では、これまで構築してきたシステムに、新たに樹脂コーティングを行った先端加工探針電極(先端  $0.5\mu\text{m}$  加工)を用い、 $10\mu\text{m}$  幅楕円電極(+1V 電極: $10\mu\text{m}$ 、スペース: $10\mu\text{m}$ 、-10V 電極: $10\mu\text{m}$  の繰り返し構造)の表面電位を計測した。その結果、従来の  $5\mu\text{m}$  加工の探針では、ほとんど正弦波的な形状しか観測できないが、先端加工探針電極を使う事で、電極エッジ部の電位の急峻な変化を観測することが可能であり、十分な S/N を有するシステムであることを実証した。

文献:

- 1) Kim, S., Suzuki, K., Sugie, A., Yoshida, H., Yoshida, M., and Suzuki, Y., "Effect of Terminal Group of Amorphous Perfluoro-Polymer Electrets on Electron Trapping," *Sci. Tech. Adv. Mater.*, in press (2018).
- 2) Miyoshi, T., Adachi, M., Suzuki, K., Liu, Y., and Suzuki, Y., "Low-profile Rotational Electret Generator Using Print Circuit Board for Energy Harvesting from Arm Swing," 31th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'18), Belfast, pp. 230-232 (2018).
- 3) Kasamatsu, S., and Sugino, O., "First-principles investigation of polarization and ion conduction mechanisms in hydroxyapatite," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol. 20, pp. 8744-8752 (2018).