

## 博士論文（要約）

光照射を用いたエレクトレット荷電技術と  
その MEMS 発電デバイスへの応用に関する研究

萩原 啓

本論文は、エレクトレット発電デバイスと親和性の高い軟エックス線および真空紫外線の光照射を用いたエレクトレットの荷電技術、およびその荷電技術を応用した薄型・軽量のフレキシブル発電デバイスについて行った研究成果をまとめたものであり、序章と結論を含む全5章から構成される。以下に各章における概略を示す。

## 第1章 序章

環境発電とは、生活環境に広く薄く存在するエネルギーを利用して発電する技術と定義されている。その対象は、光、風力、温度差、電波、振動、人体運動など多様である。個々の発電量は決して大きくないが、これまで捨てられてきたこれらのエネルギーを有効に活用することができれば、配線や電池交換・充電の必要がない機器の実現が期待できる。当面はモニタリング機器への応用が進められているが、将来は様々な電子部品の低消費電力化が進み、その適用範囲はさらに広がると予想される。

環境発電のエネルギーの中でも、振動や人体運動からの発電は、その安定性や確実性において有利である。様々な原理の発電デバイスが研究されている中で、特に静電誘導を用いたエレクトレット振動発電デバイスは、構造がシンプルで小型化に適している。MEMS技術をデバイス作製に適用し、高性能化や低コスト化を図る試みも進められている。一方、人体との親和性を考慮したフレキシブル発電デバイスが注目されている。樹脂フィルムを用いて作製されるため薄型・軽量であり、ウェアラブル機器などへの応用が期待できる。

エレクトレットとは、半永久的に電荷を保持した誘電体で、これまでは主にマイクロホンなどに利用されてきた。フッ素系樹脂などの誘電体にコロナ放電などを用いて荷電することでエレクトレットは作製される。

しかし従来、MEMSを用いた振動発電デバイスやフレキシブル発電デバイスにエレクトレットを適用する上では、荷電技術に課題があった。例えばコロナ放電を用いた場合、エレクトレットの表面電位の減衰を避けるため、量産化に必要な接合やダイシング、半田リフローなどの工程の適用に制限があった。また、MEMSで用いられる3次元構造や大面積への均一な荷電も困難であった。このため、エレクトレット発電デバイスと親和性の高い新しい荷電技術の開発が望まれていた。

本研究では以上の課題に鑑み、以下の2点を目的として挙げた。

1. エレクトレット発電デバイスと親和性の高い荷電技術を開発する。軟エックス線および真空紫外線 (VUV: Vacuum Ultra-Violet light) の光照射を用いた新しいエレクトレット荷電技術を提案し、それらの荷電メカニズムを明らかにする。
2. 薄型・軽量の特長を持つ、エレクトレットを用いた静電誘導方式のフレキシブル発電デバイスを開発する。樹脂フィルム基板を積層した構造で、曲げる動作によって発電する。作製には、MEMS技術および上記で開発したエレクトレット荷電技術を応用する。

## 第2章 軟エックス線照射を用いたエレクトレット荷電技術

軟エックス線は数十keV以下のエネルギーを持つエックス線である。軟エックス線光子が気体分子に吸収されると、光電離の作用によって多量のイオンと電子が生成される。本研究では、軟エックス線が持つこの性質を利用した二つの荷電技術を提案した[1,2]。

第一に、エレクトレット発電デバイスの組立後・実装後に外部から軟エックス線を照射することで、対向電極と誘電体との空隙内に含まれる気体分子を光電離し、内部に設けられた誘電体を荷電する技術である。全ての工程を終えた後に荷電できるため、量産化に欠かせない工程が適用可能となる。第二に、高いアスペクト比を持つトレンチの側壁など、3次元的な電極構造を持つデバイスへの荷電技術である。従来の荷電技術を用いた場合、開口部のチャージアップによってトレンチ内部にイオンを供給することは難しかったが、光電離を用いて深さ方向に均一に荷電することが可能になる。これにより、単一基板構造の発電デバイスや加速度センサが実現できる。

空隙を設けた対向電極と誘電体間にバイアス電圧を与え、対向電極を透過させるように軟エックス線を照射したところ、誘電体の表面電位は照射時間とともに直線的に上昇し、バイアス電圧と同じ電位に達すると自動的に飽和した。一方、バイアス電圧印加のみ、あるいは軟エックス線照射のみでは表面電位は上昇しなかった。これらのことから、本荷電技術が光電離に基づくことが明らかになった。一方、空隙距離が小さくなるにつれて、荷電速度が低下した。これはエックス線の透過率がBeerの法則に従うためであり、発電デバイスなど空隙距離が小さいアプリケーションにおける本荷電技術の課題が明らかとなった。また、これらの特性は、平行平板型電離箱の電流飽和特性を用いたモデルによって説明できることを示した。

荷電速度の課題を解決するため、吸収係数の高い気体の導入を試みた。この結果、Xeの導入により空気に比べ約10倍まで荷電速度を改善できた。表面電位の均一性は従来のコロナ放電に比べて良好であり、また長期の安定性を確認した。

狭い開口を持つ3次元構造への荷電により、開口幅のおよそ20～30倍の深さまで均一に荷電できることを明らかにした。SOI基板とパリレン樹脂を用いた単一基板構造のMEMS加速度センサを試作し、本荷電技術を適用した結果、加速度に対して直線的な出力が得られることを確認した。

### 第3章 真空紫外線照射を用いたエレクトレット荷電技術

VUVは200 nm以下の波長を持つ紫外線である。5 eV以上に相当するエネルギーを持ち、一般的な金属を含めた固体表面からの光電子放出を誘起するとともに、 $N_2$ や $O_2$ において多くの光子吸収過程が存在し、二段励起により荷電粒子が生成される。過去の研究から、これらの作用から得られる電流は減圧下で増倍することが知られており、本研究では、減圧下におけるVUV照射により大きな荷電速度が得られる荷電技術を提案した[3]。

真空容器内に配置したステージ上に金属電極を配置し、 $N_2$ の圧力に対するVUV照射時に観測される電流の変化を調べ、5 Pa付近にピークがあることを示した。これは衝突電離による電子の増幅作用が大きく、かつ再結合が少ないためであると考えられる。ただし、この条件下では、パッシェン則で決まる放電開始電圧が小さいため、大きな表面電位を持つエレクトレットを作製できない。-1000 V以上の表面電位を安定して得るためには、500 Pa以上が望ましいことを示した。500 Paでは1.5秒以内に-1000 Vの表面電位を持つ9 cm<sup>2</sup>のエレクトレットが得られ、従来のコロナ放電に比べて100倍以上高速であることを明らかにした。また、光電子放出と光電離の寄与について理論的検討を行い、真空容器の側壁からの光電子放出と衝突電離による増倍作用が支配的であることを示した。 $N_2$ に含まれる不純物が電子の生成を阻害するため、高速な荷電には高純度の $N_2$ が必要であることを明らかにした。

軟エックス線照射による荷電技術よりも均一性はさらに高く、長期の安定性を有することを確認した。本技術は大面積のエレクトレットを均一かつ高速に荷電する生産性の高い技術であることを示した。

### 第4章 フレキシブル発電デバイス

積層した樹脂フィルムで構成され、力をかけて曲げることでエレクトレットと対向電極の重なり面積を変化させて発電する、薄型・軽量のフレキシブル発電デバイスの動作原理を提案した。提案した動作を実現するため、柔軟性や耐熱性などの要件を満たす樹脂フィルムを選択し、同フィルム上に形成する電極構造や静電吸着を防ぐためのスペーサー構造の設計を行うと共に、発電量を見積もった。

樹脂フィルムのウエハへの仮接合や $N_2$ 添加によるスパッタリング成膜の応力緩和、熱圧着を用いたフィルムの積層、レーザー加工による切断などを含む作製工程を構築した。作製後に軟エックス線を照射して内部のCYTOPエレクトレットを荷電し、厚さ460  $\mu\text{m}$ 、重さ4 gのフレキシブル発電デバイスを試作した。

デバイスを巻き付ける円筒および回転機構、ばね、スライダ、ADコンバーターなどで構成される評価装置を構築し、試作したフレキシブル発電デバイスを直径30 mmの円筒に沿って曲げ・引き出しの1往復の動作により、1.6  $\mu\text{J}$ の発電出力が得られることを示した。これは設計上の発電出力17.4  $\mu\text{J}$ に対して約9.2%であり、力学的仕事に対する発電効率は、 $3.6 \times 10^{-4}\%$ であった。

## 第5章 結論

軟エックス線およびVUV照射を用いたエレクトレット荷電技術を提案し、その荷電メカニズムを明らかにした。これらの荷電技術はエレクトレット発電デバイスとの親和性が高く、今後の応用の見通しが得られた。また薄型・軽量のフレキシブル発電デバイスを提案し、曲げることによって発電出力が得られることを示した。将来はウェアラブル機器などへの応用が期待できる。

## 参考文献

- [1] K. Hagiwara, M. Goto, Y. Iguchi, Y. Yasuno, H. Kodama, K. Kidokoro, and T. Tajima. Soft X-ray charging method for a silicon electret condenser microphone. *Applied physics express*, Vol. 3, No. 9, 091502, 2010.
- [2] K. Hagiwara, M. Goto, Y. Iguchi, T. Tajima, Y. Yasuno, H. Kodama, K. Kidokoro, and Y. Suzuki. Electret charging method based on soft X-ray photoionization for MEMS transducers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19, No. 4, pp. 1291–1298, 2012.
- [3] M. Honzumi, K. Hagiwara, Y. Iguchi, and Y. Suzuki. High-speed electret charging using vacuum UV photoionization. *Applied Physics Letters*, Vol. 98, No. 5, 052901, 2011.