

研究終了報告書

「極性分子配向薄膜を備えた新規振動発電器の創生」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：田中 有弥

1. 研究のねらい

これまでより安心・安全な社会を実現するために、近い将来、大量のワイヤレスセンサ(wireless sensor: WS)が利用されるようになる。WSを駆動するための電源にはボタン電池を利用することもできるが、WSの数は1兆個を超えると考えられている。そのため定期的に交換が必要であり、また使用後に有害な廃棄物になる電池は、WSの適した電源ではない。そこで身の周りにある光や熱、振動といったエネルギーから電力を得ることができる環境発電素子の研究が盛んに行われている。特に居住区の内外や室内外、時間帯問わず存在する振動は有力なエネルギー源であり、振動発電素子(vibrational energy generator: VEG)が現在非常に注目を集めている。VEGには電磁誘導や圧電効果を利用したものなど複数の種類があるが、エレクトレット型のVEG(E-VEG)は微小電気機械システム(micro electro mechanical systems: MEMS)の製造技術が利用でき小型化が容易という類を見ない長所があり、次世代の自立型電源の筆頭候補と言える。

E-VEGは上部電極と下部電極の間にエレクトレットと空隙が挟まれたコンデンサ構造をしている。ここでエレクトレットとは“半永久的に電荷、もしくは電気分極を有する絶縁体”であり、E-VEGに電荷を溜める役割を担っている。E-VEGが充電された状態で振動により静電容量が変化すると、それに伴い電荷量が時間変化するので、外部回路に電流が流れる。E-VEGはこのようにして振動を利用して発電するため、E-VEGにとってエレクトレットは必要不可欠な材料である。

エレクトレットを作製するためには、絶縁体に荷電処理を行う必要がある。コロナ放電は最も広く用いられる荷電方法であり、フッ素樹脂系のポリマーを絶縁体として使用することで、 2 mC/m^2 もの高い表面電荷密度(σ)を有するエレクトレットが実現されている(Kashiwagi, J. Micromech. Microeng., 2011.)。しかしながらコロナ放電は条件の最適化が難しく、また均一に絶縁体を荷電することも困難である。コロナ放電以外にも電子線やX線、電界と熱、電界と光を利用した様々な荷電処理方法も提案されているが、いずれもエレクトレットの製造プロセスを難化させてしまう。結果的にE-VEGの低コスト化は実現できておらず、現状ではその実用化も極めて限られている。

そこで本研究では、有機発光ダイオード(organic light-emitting diode: OLED)用の材料である極性有機分子に注目した。これらは基板面外方向に自発的に配向し、成膜するだけで膜表面には巨大な電位が発現する。本研究ではこの極性分子配向薄膜をエレクトレットとして利用し、荷電処理が一切不要なE-VEGの実現を目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、極性分子配向薄膜をエレクトレットとして備えた新しいE-VEGを提案した。

OLED 用材料である極性有機分子の自発的な配向現象を利用することで、当初の構想通り、世界で初めて荷電処理が不要な E-VEG を実現した。これは従来型の E-VEG の延長線上にない、革新的なデバイスであるといえる。以下では、本研究で使用したこの新しいエレクトレットを自己組織化エレクトレット (self-assembled electret: SAE)) と呼ぶ。

E-VEG を実用化するためには、高い出力とその安定性が必須となる。そのためには σ が大きく、かつ寿命(τ)の長いエレクトレットが必要となることから、まずは SAE の膜物性評価に注力した。その結果 SAE の σ を向上させることができる成膜条件を発見し、荷電処理を行っていないにもかかわらず、従来材料とほぼ同等の σ を達成した。また SAE において τ の制限している主要因を明らかにし、それを改善するための膜構造も提案した。さらに微小エネルギー領域内の協働を通じて、従来材料と遜色ない τ を達成できた。この共同研究を足掛かりにして、現在は企業とも協力しながら実用化を視野に入れた開発研究も進めている。

(2) 詳細

本研究の目的は、極性分子配向薄膜の適用による製造が簡易な E-VEH の実現とその高性能化、つまり高出力化と長寿命化である。本研究では下記に示す3つの研究テーマに分けて研究・開発を進めた。

- 研究テーマ A (膜物性評価): 高表面電荷密度・長寿命な極性分子配向薄膜の成膜プロセスの確立
- 研究テーマ B (デバイス開発): 簡易的なモデル素子を利用したデバイス特性評価及び課題抽出
- 研究テーマ C (実用化研究): モデル素子への極性分子配向薄膜の適用とその高性能化

研究テーマ A (膜物性評価)

テーマ A の研究成果

本研究テーマでは、コロナ放電によって作製したポリマー型のエレクトレットの表面電荷密度($\sigma = 2 \text{ mC/m}^2$)を超え、かつ長い保持時間(τ)を有する極性分子配向薄膜を実現することを目的とした。極性分子配向薄膜とは、図 1 に示すように、極性優位分子が膜厚方向に自発的に配向した薄膜のことであり、膜の表面と裏面にはそれぞれ正・負の分極電荷が形成されている。ケルビンプローブ (KP) を用いてその σ を詳細に評価し、デバイスの試作を行うことなく E-VEG に最適な成膜プロセスの検討を可能にすることで、効率的に開発を進める計画とした。

まずは σ の評価に必須な KP の導入を行った。極性分子配向薄膜は真空蒸着プロセスによって成膜するため、真空中で高精度測定が可能な機種を候補に挙げた。メーカーとの打ち合わせを行い、2017 年度の第 4 四半期に KP Technology 社製の UHVKP020 を導入した。

次に、できるだけ早く極性分子配向薄膜の表面電位 (V_{sp}) 測定と安定性評価に着手するために、2018 年度の第 1 四半期に評価システムの立ち上げを行った。サンプル作製後にすぐ V_{sp} 計測を行えるように、測定槽と真空蒸着槽を直接接続し、トランスファーロードでサンプル

ル輸送を行うシステムとした。

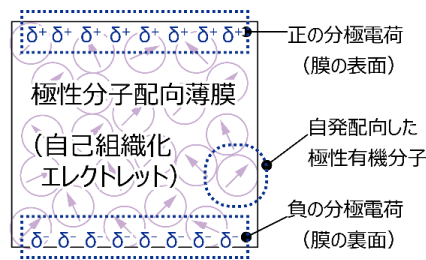


図 1 極性分子配向薄膜。極性有機分子が自発的に膜厚方向に配向することで、膜の表面と裏面に正負の分極電荷が発現し、巨大な表面電位(100 nm で約数 V)が発現する。本研究では、この極性分子配向薄膜が荷電処理が不要なエレクトレットとして機能することを実証した。この新しいエレクトレットを“自己組織化エレクトレット”と呼ぶ。

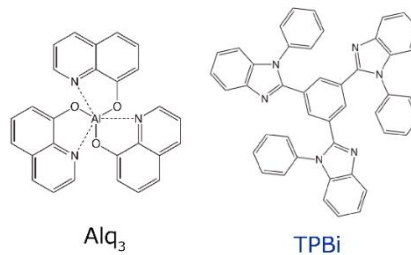


図 2 実験で使用した tris-(8-hydroxyquinolinato) aluminium (Alq₃, 左)と 1,3,5-tris(1-phenyl-1H-benzimidazole-2-yl)benzene (TPBi, 右)。両者とも代表的な OLED 用の極性有機分子である。

その後立ち上げた評価システムの動作を確認するために、代表的な OLED 用の極性有機分子である tris-(8-hydroxyquinolinato) aluminium (Alq₃, 図 2 左)と 1,3,5-tris(1-phenyl-1H-benzimidazole-2-yl)benzene (TPBi, 図 2 右)を用いて実験を行った。 V_{sp} の膜厚依存性を測定した結果を図 3 に示す。どちらの材料も V_{sp} は膜厚に比例して増加していることから、先行研究同様、膜の表面と裏面にそれぞれ正負の分極電荷が形成されていることがわかる。この結果は本研究にて導入した評価システムが問題なく稼働していることを意味している。比誘電率を ϵ_r 、真空の誘電率を ϵ_0 、極性分子配向薄膜の膜厚を d として $\sigma = \epsilon_r \epsilon_0 V_{sp} / d$ より σ を求めると、Alq₃は0.26 mC/m²、TPBiは0.70 mC/m²となった。この値はコロナ荷電後のポリマー型エレクトレットの2 mC/m²には及ばないものの、得られた σ から極性分子の平均配向度($\langle \cos \theta \rangle$)を見積もるとどちらの材料も0.03より小さいことがわかる。これは理論的には30倍以上向上の余地があることを意味しており、成膜プロセス等の最適化により、従来材料を凌駕する性能の薄膜の実現も期待できる。現段階では σ は従来材料に見劣りするものの、図 3 の結果は真空蒸着のみで帯電した膜が実現できていることを示しており、エレクトレットとして機能する可能性は高い。

次に V_{sp} の安定性を調べるために、様々な環境下で TPBi の V_{sp} の時間依存性を評価した。その結果を図 4 に示している。実験は暗状態の真空中(図 4(a))、暗状態の大気中(図 4(b))、明状態の真空中(図 4(c))、明状態の大気中(図 4(d))で行った。図 4(c)と図 4(d)の測定は室内光照射下にて実験を行った。また図 4 の結果の縦軸は初期値の V_{sp} で規格化してある。明状態で行った場合でのみ、 V_{sp} は1 h で0.3%程度減少することから、光が V_{sp} の安定性を制限していることがわかる。

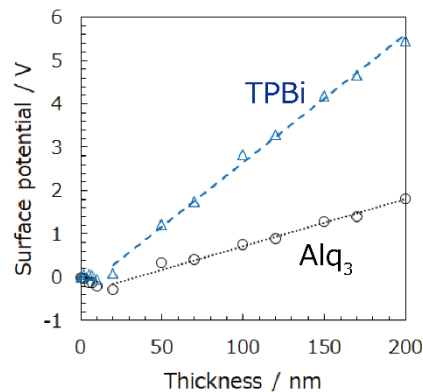


図 3 Alq₃と TPBi 薄膜における表面電位の膜厚依存性。表面電位は膜厚に比例して増加していることから、先行研究同様、膜の表面と裏面にそれぞれ正負の分極電荷が形成されていることがわかる。

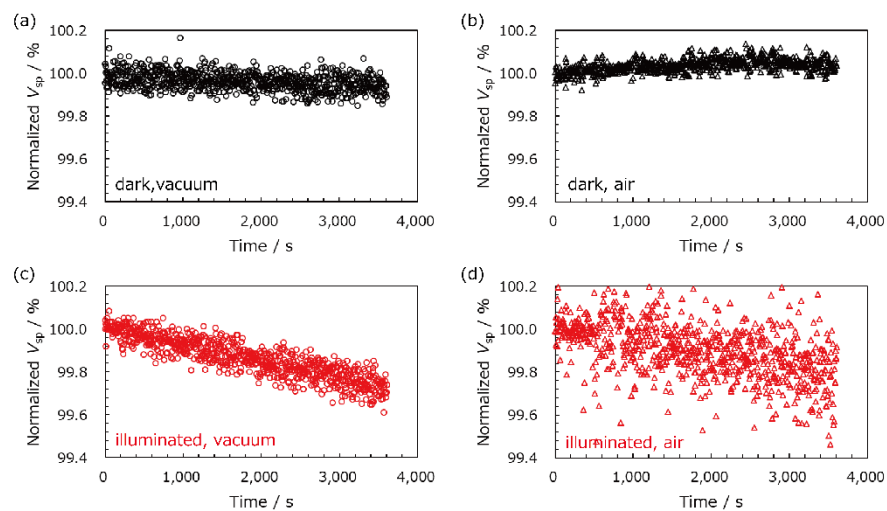


図 4 TPBi 薄膜における表面電位の時間依存性:(a) 暗状態真空中、(b) 暗状態大気中、(c) 明状態大気中、(d) 明状態大気中。明状態で行った場合でのみ、表面電位は1 h で0.3%程度減少する。

光が極性分子配向薄膜に与える影響をより詳しく調べるために、Xe ランプ(MAX-350, Asahi Spectra)と300,400,500 nm を透過するバンドパスフィルターを導入し、 V_{sp} の時間依

存性を評価した。まず Alq₃ と TPBi の吸収スペクトルを図 5(a)に示す。Alq₃ の吸収ピークは TPBi に比べて100 nm 程度長波長側に位置しており、光学バンドギャップが狭いことを示している。またこの結果から、Alq₃ は300 nm、400 nm、TPBi は300 nm の波長の光を吸収しやすいことがわかる。

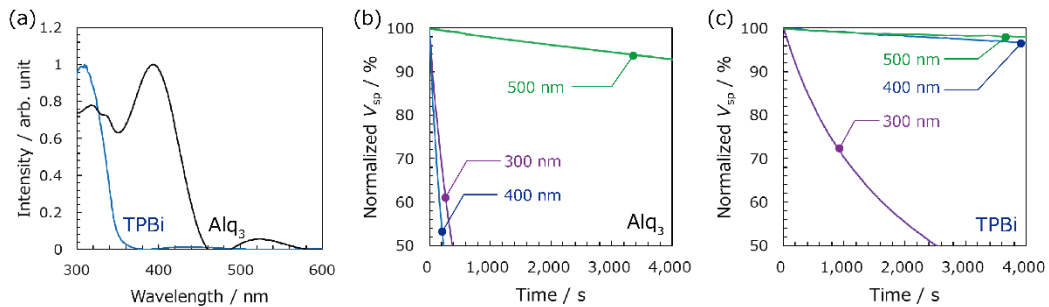


図 5(a) Alq₃ と TPBi 薄膜の吸収スペクトル、(b)、(c) 光照射下における表面電位の時間依存性:(b) Alq₃、(c) TPBi。図中の300 nm、400 nm、500 nm はバンドパスフィルターのピーク波長を示している。吸収が生じる波長の光を照射した場合、表面電位は急速に減少することがわかる。

テーマ A の達成状況

本研究テーマでは、コロナ放電によって作製したポリマー型のエレクトレットの σ (2 mC/m²)を超え、かつ長い τ を有する極性分子配向薄膜を実現することを目的とした。図 3 で示した σ は Alq₃ で0.26 mC/m²、TPBi で0.70 mC/m²であったが、最新の研究結果では、荷電処理を一切行っていないにもかかわらず、従来材料とほぼ同等の σ を実現している。また τ については、 σ の減少の主原因が光照射によるものであることを示し、その対応を行ったサンプルにおいて長寿命化を実現した。さらに領域内の共同研究通じて、従来材料にも劣らない寿命を実現しているが、論文発表を行っていないため詳細は割愛したい。

研究テーマ B (デバイス開発)

テーマ B の研究成果

本研究テーマでは、デバイス応用を想定した実験、つまり極性分子配向薄膜を備えた簡易的な E-VEG のモデル素子を作製して評価を行い、課題抽出とその対策を目的とした。そのために、まずデバイス作製に必要な真空蒸着装置と、モデル素子評価のための振動試験装置、発電特性評価システムの設計と発注、立ち上げを 2018 年第 1、第 2 四半期に行った。

評価システムを構築しながら E-VEG について議論していく中で、KP によるV_{sp}測定と、E-VEG における発電特性評価の類似性に気が付いた。具体的には、まず KP ではサンプル表面付近でプローブを振動させ、そこに流れる電流がゼロになる外部電圧の値から、サンプルのV_{sp}を得る(図 6 中のV_{sp}測定を参照)。一方 E-VEG の評価では、電極の振動に伴い発生

する電流(J_g)を測定する(図 6 中の J_g 測定を参照)。つまり端的に言えばその違いは外部電源の有無のみである。このため図 6 に示すように、接続を切り替えることで V_{sp} と J_g の両方を測定できる評価システムを構築した。

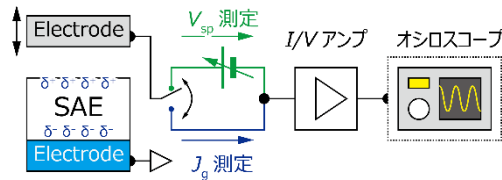


図 6 構築した V_{sp} と J_g の測定系。KP による V_{sp} 測定と、E-VEG における発電特性評価の類似性に着目し、接続を切り替えることでその両方を評価できるシステムとなっている。

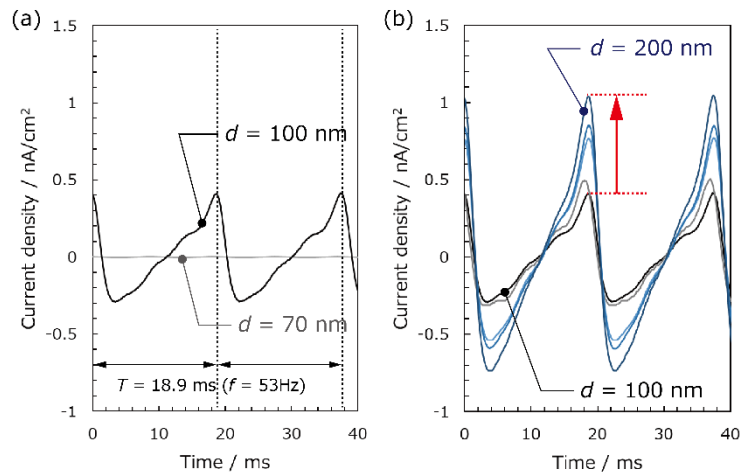


図 6 Alq₃ 薄膜をエレクトレットとして利用した E-VEG の発生電流:(a) 膜厚が70 nm と100 nm の場合、(b) 膜厚を100 nm から200 nm まで増加させた場合の測定結果。図中の T, f はそれぞれ振動電極の周期と周波数を示している。

図 6 の測定系を用いて行った Alq₃ 薄膜における J_g の測定結果を図 6(a)に示す。これは図 3 の測定と並行して行った実験結果である。縦軸は J_g 、横軸は時間である。また振動電極の振動周波数(f)は53 Hz に設定したため、1周期(T)は18.9 ms である(図 6(a)中の縦点線参照)。

まず Alq₃ の膜厚(d)が70 nm の場合は J_g はほぼゼロであり発電していない。これは $d = 70$ nm は V_{sp} が0.5 V 以下と小さいためと考えられる。実際 $d = 100$ nm まで増加させると($V_{sp} = 0.75$ V)、図 6(a)を見ればわかるように、電極の振動周波数に完全に一致した J_g が流れる。この結果は、Alq₃ を用いることで、荷電処理を一切必要としない E-VEG が実現できたことを示している。

さらに図 3 で示したように、Alq₃ の V_{sp} は d に比例して増加していくが、図 6(b)に示すように、 J_g も d に伴い増加していく。この結果はこの E-VEG が Alq₃ の V_{sp} によって駆動していることを示しており、Alq₃ が間違いなくエレクトレットとして機能していることがわかる。また TPBi に

においても同様の結果が得られた。これより極性分子配向薄膜は荷電処理が不要な自己組織化型のエレクトレット (self-assembled electret (SAE)) とみなせる。

最後に SAE を備えた VEG (SAE-VEG) の安定性の評価結果を図 7 に示す。縦軸は初期値で規格化した V_{sp} と J_{gr} の実効値 (J_{gr}) である。SAE として Alq₃ と TPBi を用い、Alq₃ は室内光照射下で、TPBi は室内光照射下と暗状態にてすべて大気中で測定を行った。図 7 中の実線、破線、点線はそれぞれ光照射下の Alq₃ と TPBi、暗状態の TPBi の V_{sp} を示しており、また丸、三角、四角の記号はそれぞれ光照射下の Alq₃ と TPBi、暗状態の TPBi の J_{gr} を示している。

まず Alq₃ の結果を見ると、 V_{sp} と J_{gr} が完全に一致しながら変化していることがわかる。この結果も Alq₃-VEG が Alq₃ の V_{sp} によって駆動していることを示している。ただしその寿命は短く、初期値の70%に達する時間 (τ_{70}) は約2 h である。これに対して TPBi-VEG では、 τ_{70} は80 h 程度と約40倍程度向上した。これは図 5 での結論同様、ワイドギャップな SAE が E-VEG に適していることを示している。

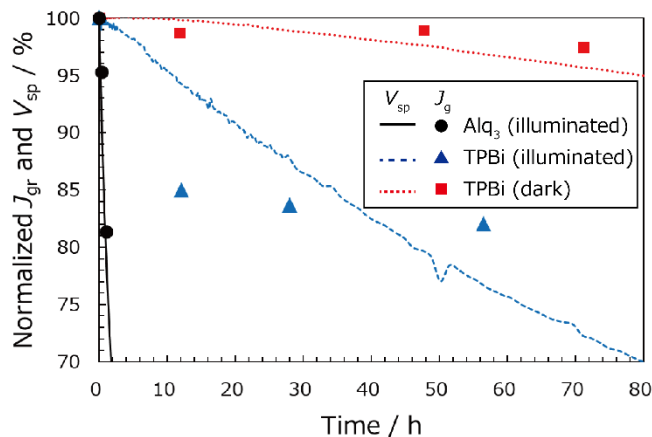


図 7 大気中における V_{sp} と J_{gr} の時間依存性。SAE として Alq₃ と TPBi を用い、Alq₃ は室内光照射下で、TPBi は室内光照射下と暗状態にて測定を行った。図中の実線、破線、点線はそれぞれ光照射下の Alq₃ と TPBi、暗状態の TPBi の V_{sp} を示しており、また丸、三角、四角の記号はそれぞれ光照射下の Alq₃ と TPBi、暗状態の TPBi の J_{gr} を示している。

一方で、OLED 用材料としては比較的ワイドギャップな TPBi を使用したとしても、光による減衰は生じてしまう。実際に完全に暗状態で評価した TPBi の V_{sp} は80 h 経っても5%程度しか減少しない。この結果は封止など適したパッケージングを施すことで、SAE-VEG を長寿命化できることを示している。

テーマ B の達成状況

本研究テーマでは、デバイス応用を想定した実験、つまり極性分子配向薄膜を備えた簡易的な E-VEG のモデル素子を作製して評価を行い、デバイス応用に向けた課題抽出とその対策を行うことである。まず図 6 で示したように、Alq₃ を用いた VEG が動作したことから、極性分子配向薄膜がエレクトレットとして機能することを示した。さらに TPBi-VEG が Alq₃-VEG

よりも長寿命であることを示し、SAE-VEG ではワイドギャップ材料が有用であるということを実証した。暗状態であればさらに安定であることもわかり、適したパッケージングを行えば長寿命化が可能といったデバイス応用への指針は得られた。

研究テーマ C(実用化研究)

テーマ C の研究成果と達成状況

本研究では、実用化を視野に入れて構築されている精巧な VEG に SAE を導入し、高性能で簡便な振動発電器を創生することである。領域内の先生と共同で開発を進める計画としており、実際に予定通り着手している。これに加えて企業との共同研究を通じて SAE-VEG の試作も開始したが、両者とも結果は未報告であり、詳細は掲載を控えたい。

3. 今後の展開

SAE をエレクトレットとして利用することで、荷電処理が一切不要な E-VEG を実現した。ここで紹介した SAE の性能は従来材料に見劣りするものの、最新の結果ではほぼ従来材料同等の σ や τ を有する SAE 実現は実現できている。さらに改善の余地は十分残されているとともに、ある程度具体的な設計指針も得ることはできている。今後は高い σ と長い τ を両立できる SAE に関する開発を進めながら、産学間の共同研究を進めて SAE-VEG の実用化研究を推進する予定である。

また本研究は、OLED 用の極性有機分子がエレクトレットとして機能することを実証したものである。エレクトレットの応用は振動発電素子に限らず、マイクやセンサ、フィルタ等多岐にわたるため、これらエレクトレットデバイス全てが SAE の応用先となる。今回のさきがけ研究を足掛かりとして、基礎から応用まで幅広く研究を行い、産学連携を進めて極性分子エレクトロニクス学問分野の創出へとつなげていく。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

エレクトレットやそれを用いた E-VEG について全くの門外漢であり、本研究を発展させることができるかどうか不安を感じていたが、当初の構想通り、極性分子配向薄膜を利用することで、世界にさきがけて荷電処理を一切必要としない E-VEG を実現することができた。これは E-VEG の全く新しい設計指針であるとともに、独創性の高い成果であると自負している。

主に「適した査読者が見つからない」という理由で投稿から受理まで約 11 ヶ月もかかったが、最終的にはこの成果を Scientific Reports 誌で報告できた。この論文へのアクセス数は発表から7ヵ月ほどで 1800 回を既に超え、また論文の注目度を表す Altmetric Attention Score は 25 と高く、TOP10%論文に選定されている。また千葉大学と科学技術振興機構を通してプレスリリースを行った結果、日本経済新聞や化学工業日報等の新聞に取り上げられたこともあり、客観的にみてもインパクトの高い成果であったと自己評価できる。

また本研究では、コロナ放電によって作製したポリマー型エレクトレットの σ である 2 mC/m^2 を一つの目標としており、荷電処理を必要としない SAE でほぼ同等の値を達成できたことは特筆すべき点である。 τ については主な制限要因を明らかにし、対策を施して長寿命化に成功した。

この時点では従来材料の安定性に遠く及ばなかったが、領域内での共同研究を通じて先行研究と遜色のない寿命を実現できた。また本研究では SAE-VEG を作製し先行研究以上の出力 ($> 6 \cdot W$) を目標としていたが、出力は素子構造に強く依存すること、また提案されていた素子構造が最適とは限らないことから、開発の優先順位を下げている。しかしながら幸いなことに共同開発をご依頼いただき、予定よりやや遅れてしまったものの、現在その企業と共に開発を進めている。この共同研究は科学技術振興機構のイノベーションジャパンでの発表をきっかけとなった。通常の学会以外でも報告を行った成果だと実感している。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

極性有機分子の E-VEG への適用は、従来の素子開発の延長線上にない新しい開発指針である。VEG の専門家に SAE の長所を理解していただくことで、異分野融合と新しい連携体制が築けると確信している。また本研究を通じて、OLED 材料がエレクトレットとして有用であることを示すことができた。そのため今後はこの分野への材料分野の専門家の参画が期待できる。さらにエレクトレットが利用されているデバイスは VEG 以外にもマイクやセンサ、フィルタと幅広い。この全てが OLED 材料の新しい応用展開先となることから、社会・経済に与える影響も大きいと考えている。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

本研究はさきがけ研究者と、ごく少数の学生と共に行った。研究費もほぼ計画通りに執行でき、滞りなく研究・開発を進めることができた。

その他領域独自の評価項目

専門外の研究を始めて結果につなげることができたのは、CREST・さきがけ微小エネルギー領域の先生方のお力添えも大きい。特に右も左もわからなかった研究開始直後、現在は東京都市大学で、当時東京大学にいらした領域アドバイザーの藤田博之先生、同じく東京大学で CREST 微小エネルギーの鈴木雄二先生、年吉洋先生の研究室をおたずねし、相談にのっていただいた。これをきっかけにお近づきになれ、その後の領域会議でも様々なご意見をいただけるようになったので、研究室訪問をさせていただき非常に良かったと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 3件

1. Yuya Tanaka, Yuki Tazo, Hisao Ishii. Enhanced orientation of 1,3,5-tris(1-phenyl-1H-benzimidazole-2-yl)benzene by light irradiation during its deposition evaluated by displacement current measurement. IEICE Transactions on Electronics. 2021, 6, in press

1,3,5-tris(1-phenyl-1H-benzimidazole-2-yl)benzene (TPBi) は振動発電素子 (VEG) 用の自己組織化エレクトレット (SAE) である。今後 SAE-VEG の出力を向上し実用化するためには、TPBi を高配向化し、表面の電荷密度 (σ) を高める必要がある。そこで本研究では光照射しながら成膜する新しい SAE 作製方法を提案し、TPBi の σ を 1.7 倍向上させるこ

とに成功した。
2. 田中有弥, 松浦寛恭, 石井久夫. 自発的に配向する極性有機分子を利用した荷電処理が不要なエレクトレット型振動発電素子. 表面と真空. 2021, in press
自己組織化エレクトレット(SAE)型の振動発電素子(VEG)は微小な振動から電力を得ることができる有力なデバイスであり、また荷電処理を一切必要としないという類を見ない特徴がある。本研究では二種類の極性有機分子を用いて、SAE-VEG の動作、及び安定性を評価した。
3. Yuya Tanaka, Noritaka Matsuura, Hisao Ishii. Self-assembled electret for vibration-based energy generator. Scientific Reports. 2020, 10, 6648
エレクトレット型の振動発電素子(VEG)は微小な振動から電力を得ることができる有力なデバイスだが、エレクトレットの作製には荷電処理が必須であり、これが製造コストを増加させる一つの要因であった。本研究では、極性を持ち、かつ自発的に配向する有機発光ダイオード用の材料を利用することで自己組織化型のエレクトレットを実現し、これをデバイスに展開して荷電処理を一切必要としない VEG を開発した。

(2)特許出願

研究期間累積件数: 3 件(特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	田中 有弥, 石井 久夫, 松浦 寛恭
	発 明 の 名 称	振動発電器及びエレクトレット
	出 願 人	千葉大学
	出 願 日	2018/8/29
	出 願 番 号	特願 2018-159860
	概 要	極性有機分子をエレクトレットとして利用することで、荷電処理が不要なエレクトレット型の振動発電素子の実現できることを提案した。

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表

1. **Yuya Tanaka**, Noritaka Matsuura, Hisao Ishii, Polar molecules-based electret for vibrational energy generator, 7th International Conference of Sabaragamuwa University of Sri Lanka (ICSUSL 2019), FTPL-05, 2019/11/14-15 (11/14), Belihuloya, Sri Lanka. 【招待講演】
2. **Yuya Tanaka**, Noritaka Matsuura, Hisao Ishii, Utilization of polar molecules with spontaneous orientation polarization for vibration-based electret generator, 13rd Japan-China Joint Symposium on Conduction and Photoconduction in Organic Solids and Related Phenomena (13JS), IL-62, 2019/10/20-23 (10/22), Shanghai, China. 【招待講演】
3. **Yuya Tanaka**, Noritaka Matsuura, Hisao Ishii, Demonstration of an electret generator for energy harvesting without any charging process: Utilization of spontaneous orientation of polar molecules, The 18th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (Power MEMS 2018), T4B-02, 2018/12/4-12/7 (12/6), Daytona Beach, FL.

4. 田中有弥, 松浦寛恭, 石井久夫, 有機半導体材料の配向分極現象を利用したエレクトレットの作製と静電誘導型振動発電器への展開, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 18p-211A-8, 2018/9/18-921 (9/18), 名古屋国際会議場, 名古屋市.

プレスリリース等

1. 千葉大 振動発電向けエレクトレット 荷電処理不要, 低コスト, 2019 年 12 月 18 日, 化学工業日報に記事掲載.
2. 荷電処理が一切不要なエレクトレット型振動発電素子を開発, 2020 年 4 月 17 日, 千葉大学と科学技術振興機構よりプレスリリース.
3. 千葉大, 荷電処理が一切不要なエレクトレット型振動発電素子を開発, 2020 年 4 月 21 日, 日本経済新聞.
4. 振動発電をより高性能に／千葉大が素子の低コスト化成功, 2020 年 4 月 23 日, 電気新聞に記事掲載.
5. 荷電処理不要 振動発電素子 千葉大が開発, 2020 年 5 月 15 日, 科学新聞に記事掲載.
6. エレクトレット型振動発電素子 荷電処理せず低コスト 千葉大, 有機 EL 材料使う, 2020 年 5 月 19 日, 化学工業日報に記事掲載.