

研 究 報 告 書

「柔軟な 3 次元微細構造を用いたポリマー振動発電」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015 年 12 月～2019 年 3 月

研 究 者: 鈴木 孝明

1. 研究のねらい

本研究では、PVDF(ポリフッ化ビニリデン)溶液を用いた圧電薄膜成膜技術と、独自の加工技術である 3 次元リソグラフィ技術、さらに、これまで構築してきた有限要素解析技術を組み合わせることによって、特殊な 3 次元微細構造を有する振動発電 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) デバイスを開発する。柔軟で複雑な 3 次元微細構造を組み合わせたポリマーMEMS 発電デバイスにより、面積・積層効果はもとより、振動モードとその構造の組み合わせを検討することで、デバイス対応周波数の低周波数化、広帯域化を図り、様々な環境の微小振動エネルギーを電力として高効率変換することを目的とした。

多種多様な環境での利用が可能であるが、本研究では特に、PVDF の柔軟性、低毒性などの特徴を活かし、人に近い場所(人が接触・介在・隣接する)微小振動エネルギーを電気エネルギーに変換する振動発電を目指した。

具体的な研究課題である、ウェアラブルデバイスを想定したねらい(For what?)として、

- ① 小型(10cc 以下)、
 - ② 低周波数(10Hz 以下・0.2～1G 程度)、
 - ③ ランダム振動・変形(ワイドバンド)、
- に対応した基本技術の構築を目指した。

研究の実施と成果創出にあたっては、以下の材料・加工・解析の 3 点をコア技術として常に意識しながら、研究期間後の応用展開も考慮にいった、基礎研究を展開した。

A. 材料開発: 従来、ポリマー圧電材料をデバイスに用いた研究の多くは、フィルム材を利用するものが多かったが、従来の微細加工方法では親和性が低く、加工形状に制限があったため、低毒性で均一な溶解が可能な有機溶媒を用いた PVDF 溶液を開発する。溶液化することで、スピン塗布やスプレー塗布が可能となり、微細加工への親和性が著しく上昇する。PVDF は、無機圧電材料(PZT など)に比べて圧電特性は低い、ポリマー特有の柔軟性による大変形と低周波数化が可能であり、また、様々な複雑形状を作製できる。

B. デバイス加工と評価: 従来の機械加工と半導体製造技術の間の領域をつなぐ加工技術である、3 次元リソグラフィ技術を用いて、柔軟なマイクロ構造を含む弾性層を形成し、電極形成と PVDF 溶液塗布法による圧電層との組み合わせにより、複雑 3 次元微細構造を有する PVDF 振動発電デバイスを作製、評価する。

C. 有限要素解析を用いた設計: 効率的に広範囲の応用を進めるために、有限要素解析を用いた振動発電向けのデバイスシミュレーション技術を構築する。3 次元微細構造の構造圧電連成解析により、様々な応用先の仕様を満たす形状を検討し、提案手法の実用化を進める。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、ポリマー材料と 3 次元微細構造の、柔軟性、可撓性、低毒性の特徴を活かし、人に近い場所の微小振動を電気エネルギーに変換する発電デバイスとその製作、設計手法を提案した。

前述のねらい(For what?)を実現する方法として、当該研究課題の最も新しい点・挑戦的な点(What's new?)は、従来にない 3 次元微細構造(メタマテリアル、ジグザグ、3 次元メッシュ)をデバイス内に組み込むことで、環境中の微小な機械エネルギーをデバイス内の機械振動・変形エネルギーに効果的に変換し、その機械エネルギーを電気エネルギーに変換する機能性材料である圧電材料にひずみ量の増大として伝達する点である。ねらいとしたウェアラブルデバイスに求められる特性を得るための一般的な障壁は、デバイスサイズの小型化による共振周波数の増加にある。本研究では、図 1 に示すようにポリマーを主材料として、その中に微細構造を組み込むことにより、小型化と低周波数共振を両立することで研究目的(数値目標)を達成した。

また、提案する 3 次元微細構造には、従来技術では製作が困難な複雑性・微細性・大面積化が求められるが、本研究で実現する方法(How to break?)として、オリジナルの微細加工技術である 3 次元リソグラフィ(日米特許保有)を用い、かつ、プロセスインテグレーション技術と有限要素法による圧電構造連成解析によって、用途に応じたデバイスへと具現化し、発電 MEMS デバイスの設計手法として構築した。

研究期間中には、様々なユースポイントを想定し、解析により各用途に適合した複数のデバイスを提案した。具体的には、図 2 に示すような、圧電層で弾性層を挟み込んだバイモルフ型カンチレバーを例にすると、弾性層に 3 次元微細構造(ジグザグ、メッシュ、メタマテリアル)を組み込むことで、中立軸と弾性層の距離(弾性層の厚み)を維持したまま、曲げ剛性を下げ、共振周波数の低下とひずみ量の増大を実現した。弾性層の厚みを変えることで曲げ剛性を変えることは可能であるが、中立軸と弾性層の距離が短くなり発電量が減ってしまう。また、厚みを維持するために低剛性の弾性層材料に変更する方法も考えられるが、半導体製造工程特有の問題であるプロセス設計における材料選択性の制限から、プロセスインテグレーションは容易でない。提案手法は、これらの問題を同時に解決する方法である。

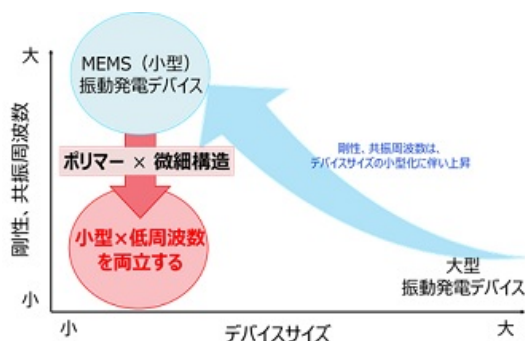


図 1 提案コンセプト(デバイスの小型化と低共振周波数駆動の両立)

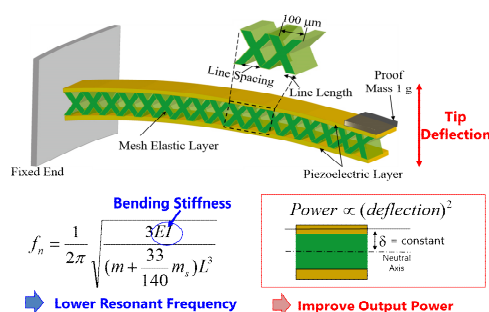


図 2 発電原理(メッシュ構造の例)

(2) 詳細

研究期間中は、材料・加工・解析の 3 項目に研究テーマを分類し、同時並行して研究を進め、各基礎技術の早期構築と、それらの組み合わせによるデバイス検証を行った。以下は各研究項目における主な成果であり、いずれも計画以上の成果が得られた。

研究テーマ A: 材料開発

- ・ 小型化、高機能化に向けて、半導体製造技術ベースの加工工程とするためのポリマー圧電膜の成膜技術を構築した。
- ・ スピン塗布法の場合、大面積化による歩留まり低下が課題として生じたが、フィルム貼付法を新たに提案し、有効性を示した。
- ・ 錘構造をアセンブルする方法として、フォトレジストに磁性粒子を混合し、高密度化を達成した。また、外部磁場を用いた荷重印加による振動特性制御機能付与を検討した。
- ・ 各種ポリマー材料を弾性層構造として用いることで、柔軟性を得ると共に、将来的なオールポリマーデバイス創製への基盤とした。

研究テーマ B: デバイス加工と評価

- ・ ポリマー圧電材料では比較的高性能な PVDF フィルムを用いたデバイス製作工程を構築し、デバイスの基本コンセプトの妥当性を評価した。
- ・ ポリマー 3 次元微細構造(ジグザグ、3 次元メッシュ、メタマテリアル)を製作し、対応周波数の低周波数、ワイドバンド化、発電効率を向上した。

研究テーマ C: 有限要素解析を用いた設計

- ・ 基本要素から複合構造の構造解析(変形・モーダル)により、より大きなひずみの生成、低周波数化、広帯域化が可能な構造を提案した。
- ・ 3 次元微細構造の構造圧電連成解析を行い、固有振動数、破断応力、発電量などを基準にした最適化方法を提案し、設計解析論として展開した。

以上の材料・加工・解析に分類した3つの研究項目について検討した結果に基づいて、

- ・ デバイス構造: カンチレバー(ユニモルフ、バイモルフ)、ダイヤフラム
- ・ 弾性層の 3D 微細構造: ジグザグ、3D メッシュ、メタマテリアル
- ・ 圧電層の形成方法: PVDF フィルム接着法、P(VDF/TrFE)溶液スピン塗布法

といった以上の要素の組み合わせのデバイスについて、シミュレーション、試作評価などを行った。いずれのデバイスにおいても、提案原理に基づいたデバイスを実現、実証できたことから、本研究課題をまとめることで、“ポリマー振動発電 MEMS デバイスの設計手法”を構築することができた。

また、特に、研究期間中での特徴的なデバイスの数値目標とした、①体積:10cc 以下(ボタン電池サイズ)、②共振:10 Hz 以下、③電力:数十 μ W を達成したデバイスの製作例として、3D メッシュを弾性層に組み込んだバイモルフ型振動発電デバイスの結果を示す。図 3 に示す 3D リソグラフィ法により作製した図 4 の構造を弾性層に組み込むことで、図 5 に示すように、共振周波数 7.9 Hz において、83.7 μ W のボタン電池サイズの発電デバイスを作製できた。さらに、一般的な平板型に比べて提案する 3D メッシュ型デバイスにおいて、発電量と発電可能周波数帯を 40%向上することができた。また、図 6 に示す従来研究との比較においても、目的とする低周波数領域において、提案デバイスの性能が高いことが分かった。



- ・従来の光造型法に比べて、シンプルな設備と工程で大面積加工ができる。
- ・既存の3Dプリンタ技術に比べて高精細な加工ができる。
- ・特に、中空構造を有する微細加工ではユニークな形状ができる。

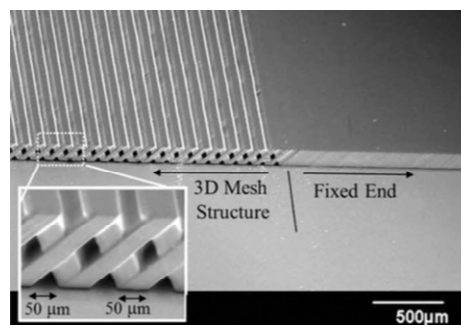


図3 3次元リソグラフィ

図4 3Dメッシュ構造のSEM像

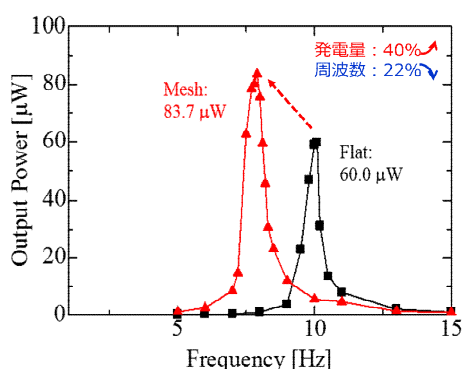


図5 バイモルフ型デバイスの発電量比較

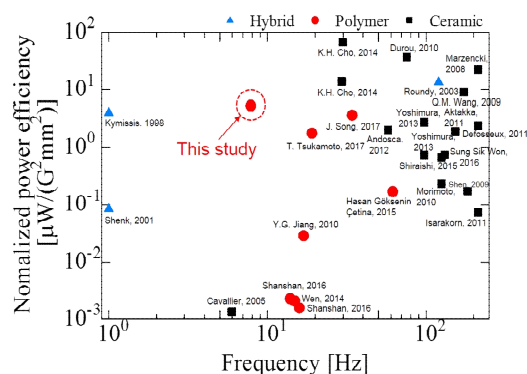


図6 従来研究との発電効率比較

さらに、実際の歩行振動時の発電特性を評価するために、人の足首に試作デバイスと加速度計を取り付けて評価を行ったところ、単純な平板構造と比較して、3Dメッシュ構造を組み込んだ提案デバイスが15倍程度の発電量が得られた(結果については、現在投稿準備中のため、掲載を控える)。

以上の結果から、提案原理の有用性の証明、および、目標数値を達成した。一方で、実用化に向けた課題として、環境中のより低周波数側に卓越周波数を有する微小振動エネルギーについては、振動がかなり不規則であることと、低周波数共振化によりデバイスの内部インピーダンスがかなり高くなり、回路設計が問題となることが分かった。そこで、周波数設定とインピーダンスマッチングの容易化を目的に、研究計画の先に進み、ポリマーデバイスの特徴を生かしたUp-Conversion機構について検討した。

具体的には、図7に示すように、柔軟なシリコンゴムであるPDMS(ポリジメチルシロキサン)を用いた環境振動により振動する加振カンチレバーと、その加振カンチレバーの衝突により自由振動が励起され発電する発電素子を近接して設置するデバイス構造を提案した。図8に示すように、加振カンチレバーの共振周波数で励振すると、発電素子に振動が伝わり発電できることが分かった。本研究課題で提案した微細構造を含む発電素子として、精密な設計に基づいた比較的低い内部インピーダンスとなる発電素子を作製できるため、この発電素子を共通として、加振カンチレバーを環境振動に合わせて付け替えるのみで、様々な周波数領域にチューニングできることを示した。

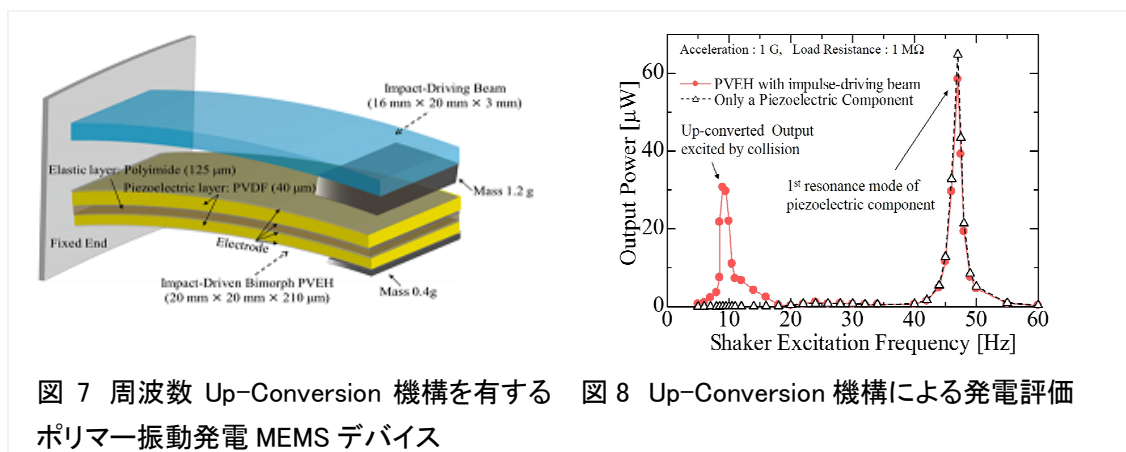


図 7 周波数 Up-Conversion 機構を有する ポリマー振動発電 MEMS デバイス 図 8 Up-Conversion 機構による発電評価

3. 今後の展開

当該研究期間の研究成果を通じて、環境発電の中でも、特に早期の実現性が期待されている環境中の振動から発電する振動発電、とりわけ人とその周りの環境をターゲットとして、低周波数(数十 Hz 以下)・広帯域(インパルス、ランダム)な振動に対する振動発電技術として、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)を用いて設計・製作するポリマーMEMS 振動発電デバイスについて検討し、環境や人に優しい材料(柔軟性・低毒性)とそれらが普段から発する微小振動エネルギー(人の移動、機械動作、風など)の利用が可能となる振動発電デバイスとしての基本原理の検証と、一部その応用について進めてきた。

得られた成果は、図 11 に示すような振動発電のパワーフローにおいて、デバイスの構造・材料と、その加工方法に独創性を有し、今後も、パワーフロー全体を勘案しながら、独創性を生かした、構造と加工方法を中心としたデバイス研究を加速していく。

特に、JST 微小エネルギー領域内での活動としては、2019 年度より東京大学・年吉洋教授の CREST チームにステップアップ参加し、環境中のエネルギーから機械振動エネルギーを効率的に内部の振動発電素子に伝達する構造やパッケージング技術の構築を進める。さきがけ研究期間に構築した、3 次元リソグラフィ法をはじめとする加工技術、プロセス設計技術や、振動解析技術を用いることで、これらの研究を進めていく。また、領域内のさきがけ研究者といくつかの連携をスタートし、連名での学会発表などを始めていることから、これらの連携研究についても、相互の強みや独創性を組み合わせて、今後も継続し、成果を創出していきたい。

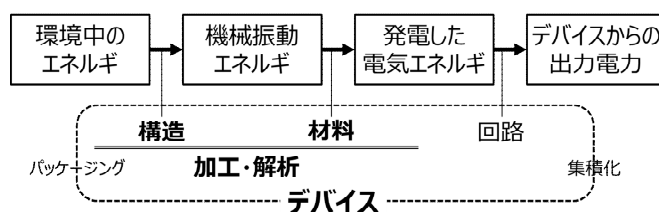


図 11 振動発電のパワーフロー

また、さきがけ研究期間内では、SciFoS 活動(H29年度上期)に参加しており、いくつかの共同研究企業や情報交換先を発掘し、現在も共同研究、交流を進めている。SciFoS 活動中

は、振動発電デバイスとしての成果がまだ十分に得られていない段階であったため、3次元リソグラフィ法の応用を中心に活動を進めていたが、今後は、振動発電デバイスについても、産学連携活動に含めて展開し、基礎研究と平行して、実用化検討を進めていく。

4. 自己評価

本研究では、図 14 に示すような研究計画を立案し、実施してきた。挑戦的な点として、独創的な 3 次元リソグラフィ法を用いて、デバイス外部の機械的エネルギーをデバイス内部の振動、変形エネルギーに効率的に変換する 3 次元微細構造の製作に取り組み、ユースポイントを想定した比較的大面積の、有機圧電材料との融合による革新的な新デバイスを検証・実証した。また、次の研究開発ステージに繋がるという点では、数値目標とした①体積:10cc 以下、②共振:10 Hz 以下、③電力:数十 μ W を達成したデバイスを、FEM 連成解析設計技術を駆使して開発し、提案する新原理を用いたデバイスの基盤的設計論の構築に至った。微小エネルギーの高効率変換・高度利用技術創出のための基盤的解析・設計技術として今後の展開を加速することができる。特に、図 6 に示したように、基本デバイスにおいても、他の従来研究と比べて特性が高い位置(図の左上の方が、より低い周波数で、より発電効率が高い)に性能を示すことができた点は、世界に先駆けた成果と考える。

また、この設計論の構築が、予定より半年程度早くできたことから、計画を超える取り組みとして、Up-Conversion 機構を組み込んだデバイスの設計、開発に取り組み、低周波数領域の特徴的な振動特性に対応したデバイス開発までを示すことができた。

研究の進め方においては、圧電材料の成膜方法について、当初の計画通り進まない点があったが、領域内連携と、計画外のフィルム貼付型プロセスを提案し、最終的にはポラスな立体構造同士を精度良く集積化する技術として構築し、計画外の特許出願に至った。本プロセスは、提案するような微細構造を含むエナジーハーベスタの開発にはもちろん、様々なバイオデバイスへの応用なども検討を開始しており、3 次元リソグラフィ法と組み合わせ、マイクロデバイスの新たな基盤的加工・集積化技術として、創出することができた。今後の各方面への応用が期待される。

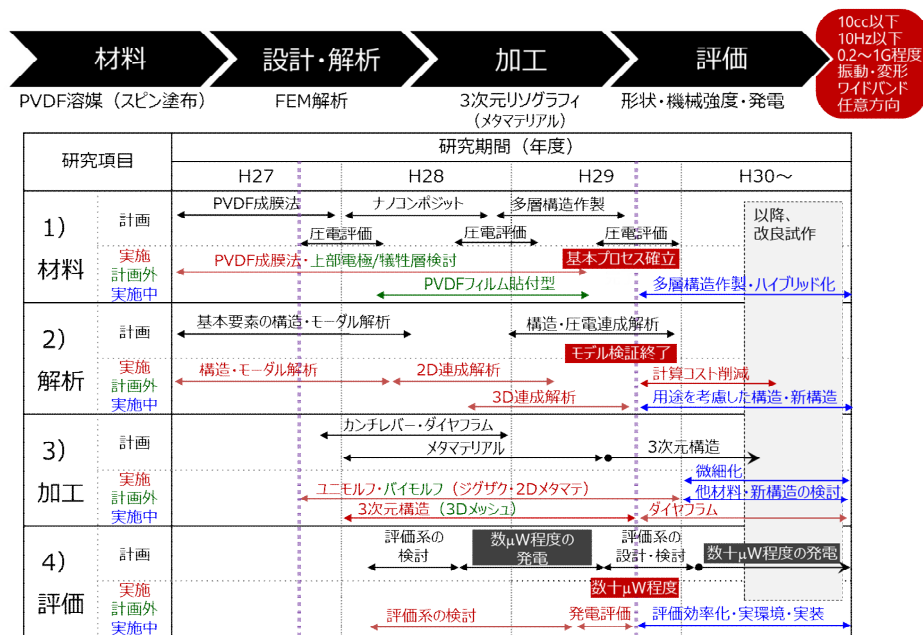


図 14 研究計画とその達成状況：デバイス研究開発の流れに沿って、4 項目に分けた。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Takuya Tsukamoto, Yohei Umino, Sachie Shiomi, Kou Yamada, Takaaki Suzuki, Bimorph piezoelectric vibration energy harvester with flexible 3D meshed-core structure for low frequency vibration, Science and Technology of Advanced Materials, Vol.19, No.1, pp.660-668, 2018.
2. Takuya Tsukamoto, Yohei Umino, Sachie Shiomi, Kou Yamada, Takaaki Suzuki, Bimorph Vibration Energy Harvester with Flexible 3D Mesh Structure, Journal of Physics: Conference Series, Vol.1052, 012021, Jul. 2018
3. Yohei Umino, Takuya Tsukamoto, Sachie Shiomi, Kou Yamada, Takaaki Suzuki, Development of Vibration Energy Harvester with 2D Mechanical Metamaterial Structure, Journal of Physics: Conference Series, Vol.1052, 012103, Jul. 2018.
4. Tasuku Nakahara, Junya Suzuki, Yuki Hosokawa, Fusao Shimokawa, Hidetoshi Kotera and Takaaki Suzuki, Fabrication of Magnetically Driven Microvalve Arrays Using a Photosensitive Composite, Magnetochemistry, Vol.4, No.1, ID:7, 2018.
5. Junya. Suzuki, Y. Onishi, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, F. Oohira, H. Miyagawa, T. Namazu, and T. Suzuki, Development of a two-dimensional scanning micro-mirror utilizing magnetic polymer composite, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.55, ID:06GP01, 2016.

(2)特許出願

研究期間累積件数:1 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(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(招待講演、主要国際会議口頭発表、受賞発表)】

- ・ Takaaki Suzuki, Three-Dimensional UV Photolithography Using Thick Photoresist for Microsystems, The 11th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2016), IEEE-NEMS, 2016/4/18, Matsushima bay, Sendai, Japan. (Invited)
- ・ Takaaki Suzuki, Simple Process Design for Polymer MEMS, International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016, JSME-MNM, 2016/12/16-18, Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan. (Invited)
- ・ 鈴木孝明、低周波数・広帯域対応を指向したポリマーMEMS 振動発電デバイス、第 66 回応用物理学会春季学術講演会 分科会シンポジウム「エネルギーハーベスティングの新展開」、応用物理学会、2018/3/11、東京工業大学大岡山キャンパス。(Invited、予定)
- ・ Takuya Tsukamoto, Yohei Umino, Sachie Shiomi, Kou Yamada, Takaaki Suzuki, Bimorph Vibration Energy Harvester with Flexible 3D Mesh Structure, The 17th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications [Power MEMS2017], W3A.4, 2017/11/14-17, Kanazawa, Japan. (主要国際会議口頭発表)
- ・ 塚本拓野、海野陽平、潮見幸江、山田功、鈴木孝明、10Hz 以下の低周波振動をターゲットとしたポリマー振動発電デバイスの開発、電気学会第 35 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 31pm2-PS-102, 2018/10/30-11/1, 札幌市民交流プラザ(北海道札幌市)。(国内主要学会での発表による受賞)

【受賞】

- ・ 第 21 回横山科学技術賞、鈴木孝明、「3 次元リソグラフィ法とそのマイクロナノシステム応用に関する研究」 2017/9/28.
- ・ 電気学会第 35 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム優秀ポスター賞、塚本拓野、海野陽平、潮見幸江、山田功、鈴木孝明、「10Hz 以下の低周波振動をターゲットとしたポリマー振動発電デバイスの開発」 2018/11/1.
- ・ 国際会議 International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2017 (ICMEMIS2017) Best Student Paper、塚本拓野(指導学生による受賞)、「Micro Inclined Cell Array to Improve Single Cell Collection」 2017/12/1
- ・ 日本機械学会 若手優秀講演フェロー賞、塚本拓野(指導学生による受賞)、「柔軟な 3 次元メッシュ構造を有するバイモルフ型振動発電デバイスの開発」 2018/2/1

【解説論文】

- ・ 厚膜フォトリソを構造体としたバイオマイクロデバイス、鈴木孝明、電気学会論文誌 (E), Vol.137, No.10, pp.314-317, 2017.