

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：14303
 研究種目：若手研究
 研究期間：2019～2021
 課題番号：19K15421
 研究課題名(和文) 高度の圧電特性を示すポリマナノ/マイクロ圧電ファイバの動作メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigatiotn of origin of high piezoelectric response from piezoelectric nano/micro polymer fibers

研究代表者

石井 佑弥 (Ishii, Yuya)

京都工芸繊維大学・繊維学系・准教授

研究者番号：30633440

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：フィルムでは圧電効果を示さないポリマーが、電界紡糸のワンステップによるナノマイクロファイバ膜化のみにより、圧電ポリマーの圧電特性に酷似した疑似圧電特性を示すことを初めて明らかにした。特に、廉価な汎用ポリマーであるアタクチックポリスチレンの電界紡糸ファイバ膜は、優れた疑似逆圧電特性と疑似正圧電特性を示した。さらに当該ファイバ膜が、上側付近に正電荷が偏って担持され、下側付近に負電荷が偏って担持された強誘電エレクトレットであることを明らかにし、これが上記特性の発現メカニズムの基本部分であることを明らかにした。また優れた疑似圧電特性は、良好な帯電と非常にやわらかい特性に由来するものと結論付けた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、これまで世界的に未解明であった「フィルムでは圧電性を示さないポリマーを電界紡糸法によりナノもしくはマイクロファイバ膜化することにより、なぜ極めて高い疑似圧電性が発現したのか？」という学術的問いに始めて答えを見出した。また本研究成果は、例えば高価な圧電ポリマーに限定されずに、安価な汎用ポリマーで高感度な圧力センサや発電素子を製造できる可能性を示した。加えて、本研究の電界紡糸ナノマイクロファイバ膜は、通常の圧電材料に必要なポーリングなどの後処理を必要としないため、作製プロセスの省工程化や省エネルギー化が期待される。

研究成果の概要(英文)：This research demonstrated that as-electrospun fiber mats comprising polymers, films of which normally do not show piezoelectric responses of piezoelectric polymers, showed outstanding electromechanical responses. In particular, as-electrospun fiber mats of atactic polystyrene, an inexpensive general-purpose polymer, showed outstanding direct and converse electromechanical properties. Furthermore, it was clarified that the fiber mat was a ferroelectret with positive charges held near the top and negative charges held near the bottom; consequently, this unique charge distribution was the basic mechanism of the above electromechanical responses. The outstanding electromechanical properties are attributed to the modestly charged and very soft properties of the fiber mats.

研究分野：高分子エレクトロニクス

キーワード：ナノマイクロファイバ 圧電 極細繊維 エレクトレット 電界紡糸 エレクトロスピンニング 電気機械特性 ポリマー

1. 研究開始当初の背景

圧電素子は、電源不要で動作可能な圧力センサとして広く普及している。これまでに、圧電特性の高さからチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)などのセラミック系圧電材料が広く普及してきた。しかし今後、モノのインターネット(IoT)の普及に伴い大きな需要が予想される生体などのやわらかい対象物には、よりやわらかいセンサが求められる。他方、強誘電性ポリマー[P(VDF)、P(VDF-TrFE)]のフィルムや多孔性ポリマーエレクトレットがフレキシブルな圧電素子として開発されているが、ヤング率はMPaオーダー以上である。筆者は、これらの圧電素子よりも1桁以上やわらかい、ポリマーのナノファイバもしくはマイクロファイバからなる「ポリマナノ/マイクロ圧電ファイバ」の研究に取り組んでいた。

2010年にC. Changらは、電界紡糸法で作製した強誘電性ポリマー(PVDF)からなるナノファイバが圧電性を示すことを報告した。この論文を皮切りに、強誘電性ポリマーであるP(VDF-TrFE)やキラル高分子結晶を形成する結晶性ポリ乳酸(PLLA)といった、フィルムでも圧電性を示すポリマーの電界紡糸法によるファイバ化と圧電性に関連する論文が多数報告されている状況であった。また、これらのファイバの圧電挙動のメカニズムはフィルムと同様のメカニズムで説明されていた。このような潮流のなか、筆者らは既成概念に反して、フィルムでは圧電性を示さない非晶性ポリマー(ポリメタクリル酸メチル、非晶性ポリ乳酸)を電界紡糸法によりナノもしくはマイクロファイバ膜化し、逆圧電特性を評価したところ、極めて高い疑似逆圧電特性($d = 8500 \sim 29000 \text{ pm/V}$)を示すことを世界に先駆けて明らかにした[1-3]。なお、当該ファイバ膜にはポーリング処理などの後処理は行っていない。これらの研究結果は再現性良く確かに得られているが、従来の常識に反することから懐疑的な見方をされることが多い。また、研究開始当初は発現メカニズムも未解明であった。

2. 研究の目的

上記の1. 研究開始当初の背景を踏まえて、「フィルムでは圧電性を示さないポリマーを電界紡糸法によりナノもしくはマイクロファイバ膜化することにより、なぜ極めて高い疑似圧電性が発現したのか?」という本研究課題の核心をなす学術的「問い」が生じた。

したがって、この核心をなす学術的「問い」を明らかにするために、本申請課題では「電界紡糸法で作製したポリマナノ/マイクロ圧電ファイバの動作メカニズムの解明」を研究目的とした。

3. 研究の方法

上記の目的「電界紡糸法で作製したポリマナノ/マイクロ圧電ファイバの動作メカニズムの解明」を達成するために、以下の2段階の目標を設定し研究を進めた。

- [1] そもそもの「なぜ圧電性が発現したか?」の解明
- [2] 高度の圧電特性(圧電 d 定数)が得られた原因の解明

4. 研究成果

フィルムでは通常圧電効果を示さないアタクチックポリスチレン(aPS)などの非晶性ポリマー(非圧電ポリマーと呼称)が、電界紡糸のワンステップによるナノマイクロファイバ膜化のみにより、既成概念に反して圧電ポリマーの圧電特性に酷似した疑似圧電特性を示すことを世界に先駆けて明らかにした[4, 5]。特に、廉価な汎用ポリマーであるaPSの電界紡糸マイクロファイバ膜(図1)は、優れた疑似逆圧電特性[見かけの圧電 d 定数(d_{app}) $\approx 31200 \text{ pm V}^{-1}$](図2)、および疑似正圧電特性($d_{app} \leq 2894 \text{ pC N}^{-1}$)(図3)を示した。なお、従来の圧電ポリマーフィルムの圧電 d 定数は、 $d \leq 53 \text{ [pC N}^{-1} \text{ or pm V}^{-1}]$ である(図4)。ここで、当該ファイバ膜の疑似正圧電特性は新規に共同開発した圧電特性評価装置[PF-02B、リードテクノ株式会社]を用いた。新規開発の理由は、PZTや圧電ポリマーのフィルムの圧電特性評価に用いられる従来の評価装置では、非常にやわらかい当該ファイバ膜の正確な評価が困難であったためである。さらに、上記の疑似正圧電特性と疑似逆圧電特性は、高い周波数の振動印加および電圧印加に対しても良好に応答することも示した[5]。なおこの疑似圧電特性は、他のナノ/マイクロファイバの作製法(複合溶解紡糸やメルトブローなど)では発現せず、高電圧を使用する電界紡糸法でのみ発現する特性と考えられる。

続いて、当該ファイバ膜がヒステリシス特性を示すことを初めて観測し、強誘電性を示すことも明らかにした。すなわち、電界紡糸のワンステップの

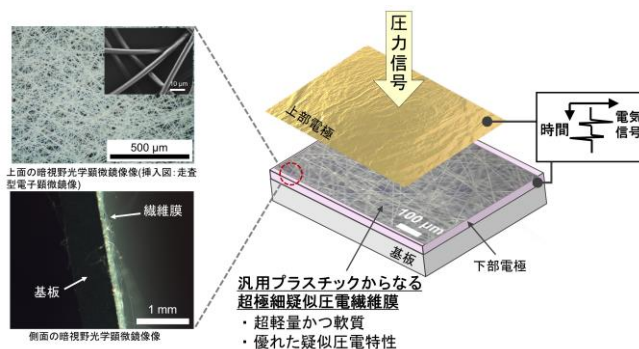


図1 電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜の概説図 ([6]の図1を転載)

みにより作製したファイバ膜が、強誘電性と疑似圧電特性を示すことを世界に先駆けて明らかにした。

次に、この疑似圧電特性の発現の原因の基本部分を明らかにした。具体的には、異なる積層方向で電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜を積層したときの表面電位を測定したところ(図 5)、単層の当該膜の表面電位は約 439 V であり、電界紡糸で使用した正の高電圧と同極性の表面電位をもつエレクトレットであることが分かった。次に、2 枚の当該膜を順方向積層と逆方向積層し表面電位を測定したところ、順方向積層で約 536 V と増加する一方で、逆方向積層で約 -26 V と相殺されるように大きく減少することが分かった。以上の結果から、当該ファイバ膜の上側付近に正電荷が偏って担持され、ファイバ膜の下側付近に負電荷が偏って担持された強誘電エレクトレット(図 6)であることが示され、これが疑似圧電特性の発現メカニズムの基本部分であることを明らかにした。

次に、これらの疑似正圧電特性および疑似逆圧電特性を良好に説明する数理モデルも初めて提案した[5]。この数理モデルを用いて、当該ファイバ膜の実効的な表面電荷密度とヤング率を見積ったところ、実効的な表面電荷密度は $44 \times 10^{-6} \text{ C m}^{-2}$ 、ヤング率は $1.4 \times 10^3 \text{ Pa}$ であった。この結果は、当該ファイバ膜が良好に帯電し、かつ非常にやわらかいことを示した。上記の数理モデルにおいて、 d_{app} は実効的な表面電荷密度に比例し、かつヤング率に反比例することが示唆されている。このため、当該電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜で得られた d_{app} は良好に帯電しかつ非常にやわらかい特性に由来するものと結論付けた。

続いて、異なる 6 種のポリマー {poly(methyl methacrylate) (PMMA)、aPS、poly(vinyl alcohol) (PVA)、poly(D, L-lactic acid) (PDLLA)、poly(L-lactic acid) (PLLA)、poly[(R)-3-hydroxybutyric acid] (PHB)} をそれぞれ電界紡糸し、得られたナノマイクロファイバ膜の疑似正圧電特性を作製 22 時間後と 30 日後に測定した[9]。作製 22 時間後では、PMMA、aPS、PDLLA、PLLA、PHB の各ファイバ膜が疑似正圧電特性を示した。特に PMMA、aPS、PDLLA はフィルムでは通常圧電特性を示さないポリマーである。一方で、PVA ファイバ膜は疑似正圧電特性を示さなかった。また作製 30 日後では、PMMA と aPS の各ファイバ膜は見かけの圧電 d 定数 (d_{app}) の値をほぼ保持したものの、PDLLA、PLLA、PHB の各ファイバ膜では d_{app} の顕著な低下が見られた。これらの異なる経時特性は、各ポリマー種が有する電荷保持特性の違いに由来するものと考察している。

最終年度には、第一に連続押し込み法を用いたナノマイクロファイバ膜の疑似正圧電特性評価法を新規に開発した[10]。本手法により、特に微小圧力の印加領域における疑似正圧電特性を詳細に評価可能とした。

第二に、異なる紡糸条件(紡糸時間および紡糸電圧)でポリスチレン電界紡糸ファイバ膜を作製し、上記の連続押し込み法を用いて疑似正圧電特性を評価した。この結果、特に紡糸時間の変化に対して大きく疑似正圧電特性が変化することを初めて明らかにした。さらに、特定の紡糸時間で d_{app} がピーク値を示すことも明らかにした。この結果は、当該ファイバ膜をより多く堆積させても

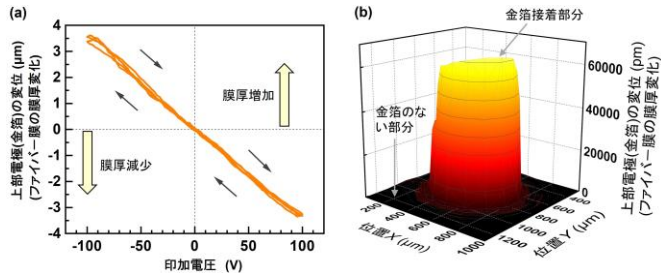


図 2 (a) 電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜にゆるやかに電圧を印加したときの上部電極(金箔)の変位(準静的な疑似逆圧電特性)。(b) 高周波(1 kHz)の交流電圧を電極間に印加したときの 3 次元変位像(最大変位時) ([7]の図 2 を転載)

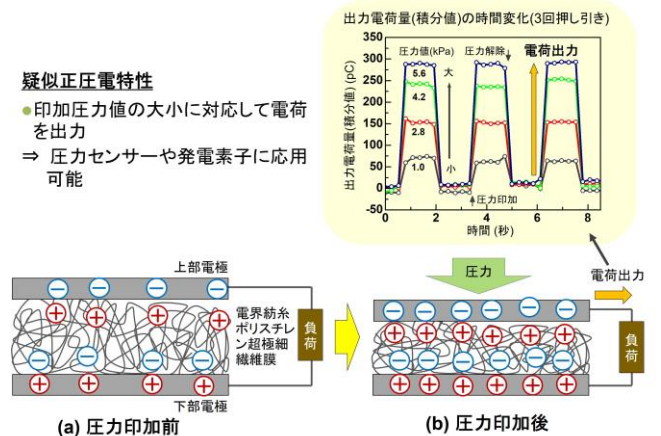


図 3 電界紡糸ポリスチレン超極細繊維膜が示す疑似正圧電特性の概説図 ([6]の図 2 を転載)

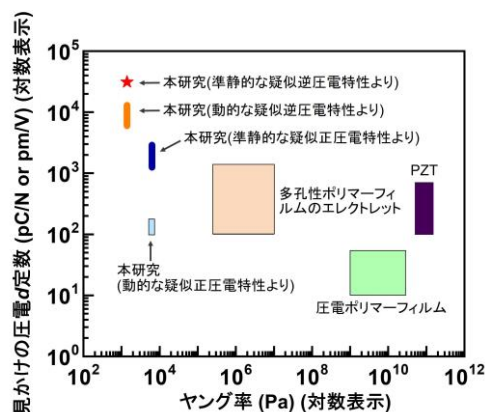


図 4 代表的な圧電材料および本報告書の電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜の見かけの圧電 d 定数とヤング率 ([6]の図 5 を転載)

d_{app} が必ずしも向上するわけではないことを意味する。 d_{app} が異なる紡糸時間に対してピーク値を示す原因を調査したところ、当該ファイバ膜の実効的な表面電荷密度と弾性係数の紡糸時間に対する変化が支配的に影響していることを突き止めた[11]。

第三に、低分子有機色素であるブROMOKREZOLGRÜN (BCG) を添加した電界紡糸ポリスチレンファイバ膜を作製し、疑似正圧電特性を評価した[12]。この結果、BCG を添加したファイバ膜の方が高い d_{app} を示した。この原因を以下のように考察した。(i) BCG の添加により試料溶液の導電性が向上した結果、ファイバ膜に荷電される電荷量が増加。(ii) BCG の深い準位での帯電電荷のトラップにより帯電電荷の漏洩が低減。(iii) BCG を添加したファイバ

の直径とファイバ膜の密度が、BCG の添加の無いものと比して減少した結果、弾性係数が減少。これらの研究成果は、例えば高価な圧電ポリマーに限定されずに、安価な汎用ポリマーで高感度な圧力センサや発電素子を製造できる可能性を示した。加えて当該繊維膜は、通常の圧電材料に必要なポーリングなどの後処理を必要としないため、作製プロセスの省工程化や省エネルギー化が期待される。

参考文献

- [1] T. Nobeshima et al. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **16**, 3349 (2016).
- [2] T. Nobeshima et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 05GC06 (2018).
- [3] Y. Ishii, et al. *Macromol. Mater. Eng.* **303**, 1700302 (2018).
- [4] Y. Ishii et al. *Smart Mater. Struct.* **28**, 08LT02 (2019).
- [5] Y. Ishii et al. *Macromol. Rapid Commun.* **41**, 2000218 (2020).
- [6] 京都工芸繊維大学 注目研究の紹介 2021年2月, 「汎用プラスチックの超極細繊維膜で圧力センシング」, 2021年2月, <https://www.kit.ac.jp/chuumokukenkkyu/chuumokukenkkyu202102/>
- [7] 京都工芸繊維大学と産業技術総合研究所の共同プレスリリース, 「汎用樹脂のマイクロファイバーで高度の電気機械特性を発見」, 2020年6月25日, <https://www.kit.ac.jp/2020/06/news20200630/>
- [8] 京都工芸繊維大学と北陸先端科学技術大学院大学の共同プレスリリース, 「汎用プラスチックの極細繊維で圧力センシング」, 2019年8月5日, <https://www.kit.ac.jp/2019/08/news190805/>
- [9] C. Iumsrivun et al. *Polymer* **224**, 123732 (2021).
- [10] Y. Ishii, *Sens. Actuator A Phys.* **326**, 112717 (2021).
- [11] C. Iumsrivun et al. *Polymers*. **14**, 1840 (2022).
- [12] Y. Ishii et al. *Mater. Chem. Phys.* **278**, 125666 (2022).

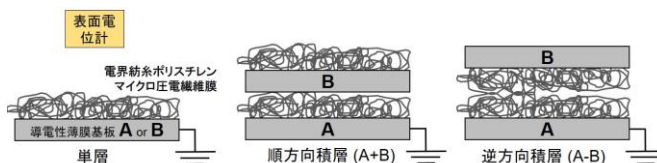


図5 異なる積層方向で当該ポリスチレンファイバ膜を積層したときの表面電位測定の概説図([8]の図3を転載)

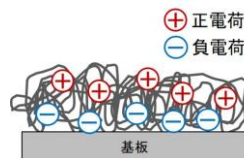


図6 電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜の帯電モデル([8]の図4を転載)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Iumsrivun Chonthicha, Kazuki Matsuda, Shunsaku Ohkubo, Yuya Ishii	4. 巻 14
2. 論文標題 Variable Direct Electromechanical Properties of As-Electrospun Polystyrene Microfiber Mats with Different Electrospinning Conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 1840 ~ 1840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym14091840	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ishii Yuya, Sanemoto Keiji, Iumsrivun Chonthicha	4. 巻 278
2. 論文標題 Multi-sensing dye-doped electrospun polystyrene microfiber mats	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 125666 ~ 125666
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matchemphys.2021.125666	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishii Yuya	4. 巻 326
2. 論文標題 Investigation of electromechanical properties of as-electrospun polystyrene fiber mat via sequential approaching/loading technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 112717 ~ 112717
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2021.112717	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishii Yuya	4. 巻 77
2. 論文標題 汎用ポリマーからなる電界紡糸ナノマイクロ疑似圧電ファイバ膜	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 繊維学会誌	6. 最初と最後の頁 514 ~ 519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2115/fiber.77.514	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iumsrivun Chonthicha、Yui Takayuki、Yokoyama Atsushi、Ishii Yuya	4. 巻 224
2. 論文標題 Quasistatic direct electromechanical responses from as-electrospun submicron/micron fiber mats of several polymers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 123732 ~ 123732
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2021.123732	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ramadoss Tamil Selvan、Ishii Yuya、Chinnappan Amutha、Ang Marcelo H.、Ramakrishna Seeram	4. 巻 11
2. 論文標題 Fabrication of Pressure Sensor Using Electrospinning Method for Robotic Tactile Sensing Application	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 1320 ~ 1320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano11051320	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishii Yuya、Yousry Yasmin Mohamed、Nobeshima Taiki、Iumsrivun Chonthicha、Sakai Heisuke、Uemura Sei、Ramakrishna Seeram、Yao Kui	4. 巻 41
2. 論文標題 Electromechanically Active As Electrospun Polystyrene Fiber Mat: Significantly High Quasistatic/Dynamic Electromechanical Response and Theoretical Modeling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Macromolecular Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 2000218 ~ 2000218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/marc.202000218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishii Yuya、Kurihara Shintaro	4. 巻 115
2. 論文標題 Charge generation from as-electrospun polystyrene fiber mat with uncontacted/contacted electrode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 203904 ~ 203904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5126777	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Yuya, Kurihara Shintaro, Kitayama Ryusei, Sakai Heisuke, Nakabayashi Yuji, Nobeshima Taiki, Uemura Sei	4. 巻 28
2. 論文標題 High electromechanical response from bipolarly charged as-electrospun polystyrene fiber mat	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Smart Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 08LT02 - 08LT02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-665X/ab2e3a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 石井佑弥
2. 発表標題 疑似圧電特性を示す電界紡糸ナノマイクロファイバ膜
3. 学会等名 繊維学会関西支部 第42回関西繊維セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川道敬, 宇賀亮人, 石井佑弥
2. 発表標題 電界紡糸ポリ-L-乳酸ファイバ膜の帯電評価
3. 学会等名 2021年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今吉海斗, 石井佑弥
2. 発表標題 芯鞘構造を有する電界紡糸ファイバ膜の作製と疑似正圧電特性評価
3. 学会等名 2021年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林蒼, 松田和樹, 石井佑弥
2. 発表標題 電界紡糸ポリスチレンファイバ膜の帯電モデル
3. 学会等名 2021年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒田涼太, 大久保舜策, 影山稔, 石井佑弥
2. 発表標題 電界紡糸ポリスチレンファイバ膜からなる無給電動作が可能な軟質圧力センサ
3. 学会等名 2021年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Iumsrivun Chonthicha, 横山敦士, 石井佑弥
2. 発表標題 Electromechanical investigation of significantly soft electrospun fiber mat with sequential approaching/loading technique
3. 学会等名 日本繊維機械学会第74回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井佑弥
2. 発表標題 電界紡糸ナノ・マイクロファイバの作製と光電子素子への応用
3. 学会等名 電気学会東海支部学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大久保舜策, 石井佑弥
2. 発表標題 ポリスチレン電界紡糸ファイバ膜からなる高負荷動作可能な圧力センサ
3. 学会等名 2020年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 實本恵土, 川嶋拓馬, 石井佑弥
2. 発表標題 異なる濃度で色素を添加した電界紡糸ポリスチレンファイバ膜の電気機械特性
3. 学会等名 2020年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田和樹, 大久保舜策, 石井佑弥
2. 発表標題 電界紡糸ポリスチレンファイバ膜の堆積時間と電気機械特性の関係
3. 学会等名 2020年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Iumsrivun Chonthicha, Yui Takayuki, Yokoyama Atsushi, Ishii Yuya
2. 発表標題 Quasistatic direct electromechanical properties of as-electrospun fiber mats composed of different polymers
3. 学会等名 2020年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇賀亮人, 由井陽之, 石井佑弥
2. 発表標題 マルチノズル電界紡糸法を用いたポリ乳酸ファイバ膜の作製と電気機械特性
3. 学会等名 2020年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井佑弥, 栗原慎太郎, 北山流星
2. 発表標題 汎用ポリマからなる電界紡糸ファイバ膜の電気機械特性と特性解析モデル
3. 学会等名 2020年度繊維学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川嶋拓馬, 北涉, 石井佑弥
2. 発表標題 pH応答性色素を添加した電界紡糸ポリスチレンファイバ膜のガス応答性と電気機械特性
3. 学会等名 日本繊維機械学会第73回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 由井陽之, 仲林裕司, 石井佑弥
2. 発表標題 バイオベースポリマーからなる電界紡糸ファイバ膜の帯電および電気機械特性
3. 学会等名 日本繊維機械学会第73回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Yui, R. Kitayama, Y. Ishii
2. 発表標題 Electromechanical Properties of Electrospun Poly(lactic acid)Fibrous Mats
3. 学会等名 5th International Symposium on Advances in Sustainable Polymers (ASP-19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C. Iumsrivun, S. Kurihara, R. Kitayama, A. Yokoyama, Y. Ishii
2. 発表標題 Piezoelectric response of amorphous electrospun fibers of atactic polystyrene
3. 学会等名 Comfort and Smart Textile International Symposium 2019 (ISSTTCC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ishii, R. Kitayama, S. Kurihara
2. 発表標題 Electromechanical response from as-electrospun fiber mats of nonpiezoelectric polymers
3. 学会等名 Conference on Nano-Micromaterials for Circular economy and Sustainability (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井佑弥
2. 発表標題 エレクトロスピンニング法で作製した機能性ポリマファイバ
3. 学会等名 第167回東海高分子研究講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川嶋拓馬, 北渉, 石井佑弥
2. 発表標題 ガス応答性と圧電挙動を示す電界紡糸ファイバ膜
3. 学会等名 2019年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 由井陽之, 北山流星, 石井佑弥
2. 発表標題 バイオベースポリマ からなる電界紡糸ファイバ膜の電気機械特性
3. 学会等名 2019年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 堀 照夫	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 9
3. 書名 スマートテキスタイルの最新動向 (第7章2 汎用ポリマーからなる電界紡糸極細ファイバ 膜が示す疑似圧電特性)	

1. 著者名 石井佑弥	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 9
3. 書名 エレクトロスプレーノスピニング法とその応用 材料合成・成形・加工技術 (第 編第17章 汎用ポリマーからなる電界紡糸極細ファイバ膜が示す疑似圧電特性)	

1. 著者名 石井佑弥	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 10
3. 書名 ナノファイバーの製造・加工技術と応用事例(第9章1節ポリマサブミクロンファイバの作製とセンシング応用)	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 発電素子および発電素子の製造方法	発明者 石井佑弥, 延島大樹, 植村聖	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-072448	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>京都工芸繊維大学研究者総覧 https://www.hyokadb.jim.kit.ac.jp/profile/ja.7fa0df662b348aee002eb8b95079000d.html スマートテキスタイル研究室webページ https://www.fibro.kit.ac.jp/lab/ishii/ Researchmap研究者情報ページ https://researchmap.jp/yishii/</p>

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------