

## 電界紡糸が極細繊維膜の荷電法としても優れることを実証 —エレクトレット極細繊維膜のワンステップ製造法に新たな道筋—

### 1. 発表者：

金子満雄（京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 博士前期課程（先端ファイブ科学専攻））  
高垣賢一（京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 博士後期課程（先端ファイブ科学専攻））  
土本倫太郎（京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 博士前期課程（先端ファイブ科学専攻））  
石井佑弥（国立大学法人京都工芸繊維大学 繊維学系 准教授）

### 2. 発表のポイント：

- ◆ 代表的な荷電法であるコロナ荷電法<sup>(注1)</sup>で荷電したエレクトレット<sup>(注2)</sup>極細繊維膜と比して、電界紡糸<sup>(注3)</sup>のワンステップでの作製(成型加工)と荷電を同時に行った極細繊維膜の方が約2.6倍以上高い電荷量で帯電していることを解明
- ◆ 上記の帯電電荷量の多寡関係は約8ヶ月経過しても維持
- ◆ 当該繊維膜の帯電電荷密度の従来モデルよりもさらに正確な数理モデルを世界に先駆けて提案

### 3. 発表概要：

京都工芸繊維大学 繊維学系の石井佑弥准教授らの共同研究チームは、代表的な荷電法であるコロナ荷電法で荷電したポリスチレン極細繊維膜と比して、電界紡糸のワンステップでの作製(成型加工)と荷電を同時に行ったポリスチレン極細繊維膜の方が約2.6倍以上高い電荷量で帯電していることを世界に先駆けて明らかにしました。加えて、この帯電電荷量の多寡関係が約8ヶ月経過しても維持されることも明らかにしました。これらの研究成果は、電界紡糸のワンステップで優れた帯電特性のエレクトレット極細繊維膜が製造できることを示すため、当該繊維膜の製造方法に新たな道筋を示します。加えて、ワンステップ製造により、製造工程の省工程化や省エネルギー化が期待できます。さらに、当該電界紡糸極細繊維膜とコロナ荷電した当該繊維膜の帯電電荷密度の数理モデルを、これまでに提案されていた数理モデルよりもさらに正確な形で提案しました。本数理モデルを用いることにより、帯電電荷密度という同じ土俵の指標で、エレクトレットとしての帯電量の多寡を定量的に比較議論することが可能となります。

本研究は、2024年8月29日付けで「Smart Materials and Structures」のオンライン版(<https://doi.org/10.1088/1361-665X/ad6bd8>)に掲載されました。

### 4. 発表内容：

#### 研究の背景

帯電電荷を長期間保持するポリマーエレクトレットは、環境発電素子の発電部材や圧力センサ部材など広く利用され高い注目を集めています。特に、極細繊維の集合体の膜である極細繊維膜の形状のポリマーエレクトレットは、高い通気性や軽量性、しなやかな柔軟性を活かして、超高性能フィルタ部材やウェアラブル圧力センサ部材、環境発電部材などとして実用化や研究が活発に進んでいます。

このようなエレクトレット極細繊維膜の製造方法として従来は、(1)溶融紡糸やメルトブローなどを用いた極細繊維膜の成型加工と、(2)コロナ荷電法や流動帯電法を用いたこの繊維膜の後工程での荷電処理



の2工程が必要でした。一方で電界紡糸は、高電圧を使って極細繊維膜を製造する、他の極細繊維膜の製造法には見られない稀有な成型加工法であるため、極細繊維膜の成型加工と荷電処理をワンステップで実現できる手法です。このため、製造工程の省工程化や省エネルギー化が期待されます。

本研究では、電界紡糸の荷電法としての特徴に着目しました。これまでに電界紡糸は、極細繊維膜の成型加工法として広く知られた手法でしたが、意外にも荷電法としてとらえた研究例は少数でした。特に、電界紡糸と他の荷電法を比較する研究報告は数例存在するのみであり、これらの報告であっても、異なる材料間で比較されていたり、濾過効率の比較だけに留まっていたりと、正確かつ詳細な比較は十分に行われていませんでした。そこで、京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 博士前期課程の金子満雄氏、同 博士後期課程の高垣賢一氏、同 博士前期課程の土本倫太郎氏、同大学 繊維学系の石井佑弥准教授の共同研究チームは、電界紡糸極細繊維膜の同一サンプルを電界紡糸(荷電の後処理なし)と、代表的な荷電法であるコロナ荷電法でそれぞれ荷電し、電界紡糸の荷電法としての特徴を正確かつ詳細に明らかにしました。

## 研究内容

極細繊維膜の材料として、廉価な汎用プラスチックであるポリスチレンを用いました。なお、これまでに石井准教授らの研究グループでは、フィルムでは通常圧電<sup>(注4)</sup>特性を示さないポリスチレンからなる電界紡糸極細繊維膜が、圧電材料の圧電特性に酷似した疑似圧電特性を示すことを報告しています[1, 2]。ポリスチレンを溶剤に溶かし、電界紡糸で極細繊維膜を作製しました(図1)。作製したポリスチレン極細繊維膜の平均膜厚は  $133 \pm 10 \mu\text{m}$  (本資料内のエラーは標準偏差を表す) であり、平均密度は  $2.7 \pm 0.9 \times 10^{-2} \text{ g cm}^{-3}$  (空隙率を試算すると約97.5%) と、非常に軽量の疎な膜でした。また、ポリスチレン繊維の単糸の平均直径は約  $4.94 \pm 0.28 \mu\text{m}$  でした。

電界紡糸ポリスチレン極細繊維膜の表面電位<sup>(注5)</sup>を作製から7日後に測定したところ、5サンプルの平均で  $446 \pm 7 \text{ V}$  でした。この結果は、当該繊維膜が帯電していることを示しており、電界紡糸のワンステップでの極細繊維膜化の成型加工と荷電処理が実現できていることを示しています。前述の5サンプルの電界紡糸ポリスチレン極細繊維膜にイソプロピルアルコールを噴霧したところ、全ての繊維膜の表面電位が約0Vに消失しました。この結果は、電界紡糸ポリスチレン極細繊維膜の帯電が、真電荷<sup>(注6)</sup>の帯電であることを示しています。この除電を確認した5つの電界紡糸ポリスチレン極細繊維膜に、それぞれ異なる時間のコロナ荷電処理を行いました(図2)。その結果、表面電位は荷電時間の初期では増加するものの、その後は110Vから170Vの範囲で飽和しました(表面電位の測定はコロナ荷電処理の直後に行った)。この飽和は、コロナ荷電法により荷電可能な最大の荷電量に達したためであると考えられます。ここで、電界紡糸で荷電(作製)したときの表面電位は7日後であっても、コロナ荷電した繊維膜の表面電位の約2.6倍以上の値を示しています。電界紡糸で荷電(作製)したポリスチレン極細繊維膜と、その後除電してコロナ荷電した繊維膜は同一のサンプルであるため、構造はほとんど同じです。このため、表面電位が約2.6倍以上の値を示したことは、電界紡糸で荷電(作製)した繊維膜の方が、コロナ荷電した繊維膜よりも約2.6倍以上多い帯電電荷量で帯電していることを示しています。電界紡糸で荷電(作製)した極細繊維膜でこのようなより多い電荷の帯電が生じた理由として、次のことが考えられます。電界紡糸では繊維の1本1本が荷電された状態で基板に堆積していくため三次元的な帯電膜を形成するのに対して、コロナ荷電法では繊維膜を荷電する側から見たときの露出部のみが荷電されるためです(図3)。



次に、電界紡糸で荷電(作製)したポリスチレン極細繊維膜と除電後にコロナ荷電した当該繊維膜を、それぞれ低湿度環境下、大気環境下、高湿度環境下で約8ヶ月間保管したところ、いずれの保管環境であっても表面電位値は残り、かつ常に電界紡糸繊維膜の方が高い表面電位を示し続けることも明らかにしました。この結果は、電界紡糸で荷電(作製)した繊維膜でのより多い帯電電荷量が、約8ヶ月経過した後も維持され続けることを示しています。ここで、低湿度環境下と大気環境下でそれぞれ保管したときの電界紡糸ポリスチレン極細繊維膜の表面電位の経時変化には顕著な差異が見られませんでした。この結果は、特別な低湿度環境下で当該繊維膜を使用せずとも、大気環境下でも同等の帯電電荷の保持特性を示すことを示しています。最後に、電界紡糸で荷電(作製)したポリスチレン極細繊維膜と除電後にコロナ荷電した当該繊維膜の帯電電荷密度の数値モデルを、これまでに提案されていた数値モデルよりもさらに正確な形で提案しました。本数値モデルを用いることにより、帯電電荷密度という同じ土俵の指標で、エレクトレットとしての帯電量の多寡を定量的に比較議論することが可能となります。

以上の研究成果は、電界紡糸のワンステップでの優れた帯電特性のエレクトレット極細繊維膜が製造できる可能性を示すため、当該繊維膜の製造方法に新たな道筋を示します。加えて、ワンステップ製造により、製造工程の省工程化や省エネルギー化が期待できます。

#### 研究支援：

- ・日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(B) No. 22H01811 No. 23K23079

#### 本発表関連の特許

- ・【発明名称】圧電素子【登録番号】特許第7370517号
- ・【発明名称】プラスチックナノファイバおよび光ファイバならびにプラスチックナノファイバの作製方法【登録番号】特許第6718159号

#### 参考資料：

- [1] 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/>
- [2] 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/>

#### 5. 発表雑誌：

雑誌名：Smart Materials and Structures

論文タイトル：Charging properties of atactic poly(styrene) microfibre mats charged with electrospinning and corona charging

著者：Mitsuo Kaneko, Kenichi Takagaki, Rintaro Tsuchimoto, Yuya Ishii

DOI 番号：10.1088/1361-665X/ad6bd8

アブストラクト URL：<https://doi.org/10.1088/1361-665X/ad6bd8>

#### 6. 用語解説：

(注1) コロナ荷電法：コロナ放電によって生成したイオンを対象物に照射して荷電する方法

(注2) エレクトレット：半永久的に電荷を保持する材料

(注3) 電界紡糸：プラスチックの溶液もしくは熔融体を高電圧で帯電させ、静電引力により極細繊維を紡糸する方法

(注4) 圧電：本資料では、チタン酸ジルコン酸鉛(PZT)や圧電樹脂などの圧電材料の結晶体に生じる正圧電効果と逆圧電効果を総じて圧電と表現している

(注5) 表面電位：物質表面の電位

(注6) 真電荷：外部に取り出した外部から加えたりすることができる電荷(対立概念は分極電荷)

## 7. 添付資料：

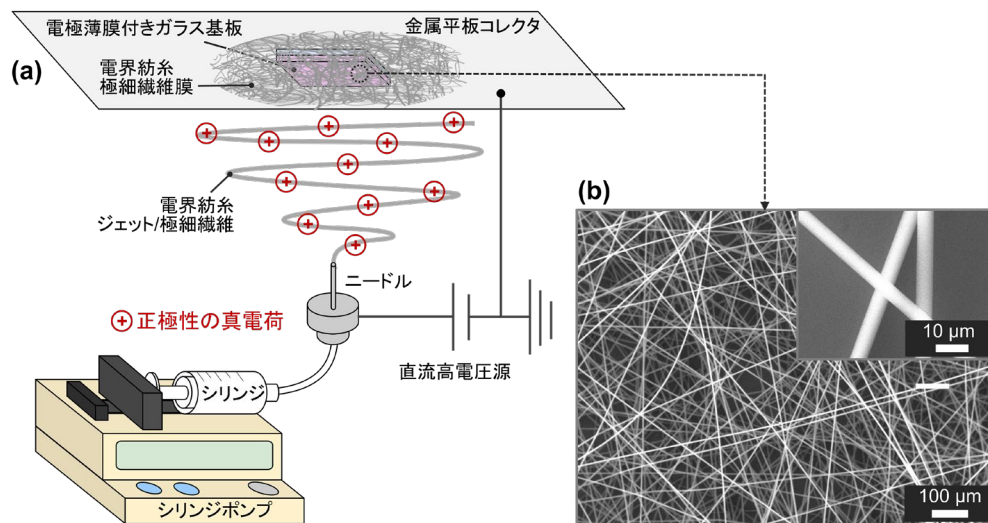


図1. (a) 電界紡糸の概説図と (b) 電界紡糸ポリスチレン極細繊維膜の走査型電子顕微鏡像(挿入図は拡大像)

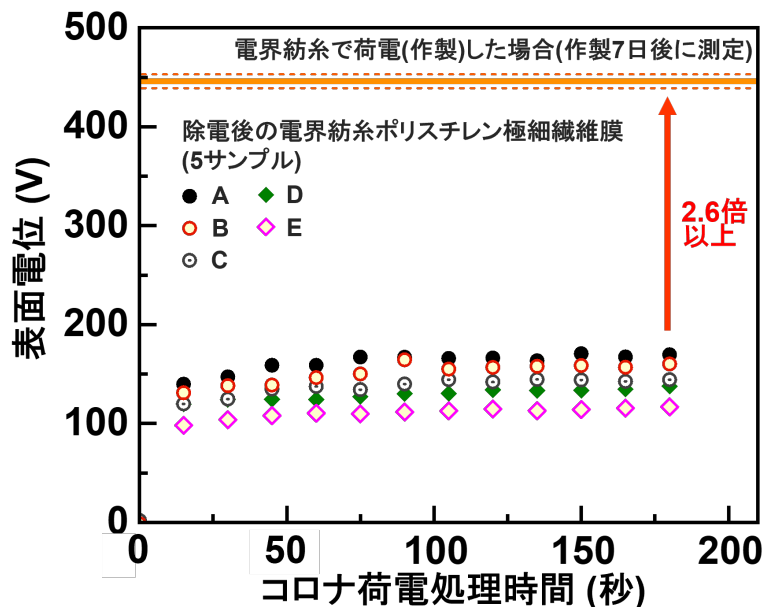


図2. 除電後の電界紡糸ポリスチレン極細繊維膜を異なる時間でコロナ荷電処理したときの当該繊維膜の表面電位

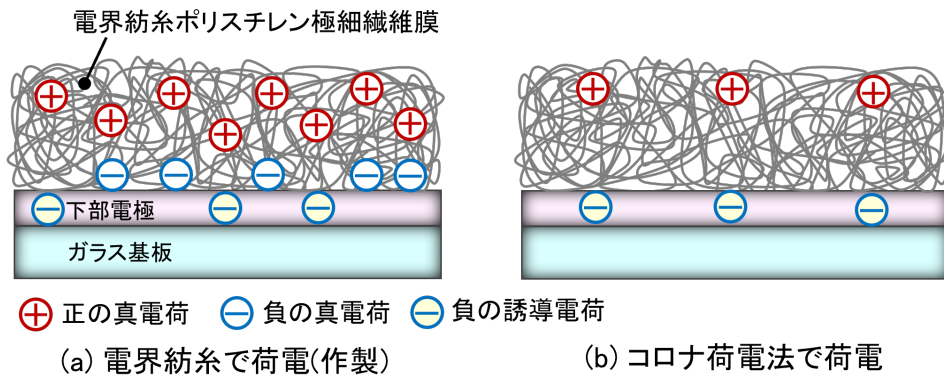


図 3. 電界紡糸で荷電(作製)したときとコロナ荷電法で荷電したときの電界紡糸ポリスチレン極細繊維膜の帯電電荷の分布モデル図