

氏 名	たかがき けんいち 高垣 賢一
学位(専攻分野)	博 士 (学 術)
学 位 記 番 号	博 1 1 4 8 号
学位授与の日付	令和 6 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 先端ファイブ科学専攻
学 位 論 文 題 目	Study on charging properties of electrospun electret ultrafine fiber mats and their applications (電界紡糸エレクトレット極細繊維膜の帯電特性評価およびその応用に関する研究)
審 査 委 員	(主査)准教授 石井 佑弥 教授 桑原 教彰 教授 山下 馨

論文内容の要旨

近年、健康管理や病気の診断に使用できるウェアラブルデバイスが注目されており、特に脈拍、呼吸、血圧などの生体信号を検出可能なフレキシブル圧力センサが注目されている。電界紡糸法により作製される電界紡糸極細繊維膜は、機械的に柔軟で優れた通気性と極軽量というユニークな特徴を持っている。さらに、フィルム状態では圧電性を示さないポリスチレン(PS)からなる電界紡糸マイクロファイバ膜が、強誘電エレクトレットとして機能し、圧電特性に酷似した疑似圧電特性を示すことが報告されている。これらの特徴により、電界紡糸極細繊維膜は自己発電型のフレキシブル圧力センサの材料として注目されている。しかし、電界紡糸法を荷電法として捉えたときの他の荷電法との差異や電荷の保持特性、ファイバ膜内部の電荷の分布などの詳細な帯電特性や、自己発電型の圧力センサとしてふるまう電荷の出力原理など多くの点が未解明のままである。本論文では、PS からなる電界紡糸マイクロファイバ膜を用いた電界紡糸法とコロナ荷電法の荷電方法としての比較、およびバイオマスから製造可能であり生分解性を示すポリ(L-乳酸) (PLLA)からなる電界紡糸サブマイクロファイバ膜の帯電特性の評価を行った。さらに、電界紡糸極細繊維膜の応用展開として、これらのファイバ膜を用いたマスク型音響および呼吸センサを開発した。

第 1 章では、代表的なフレキシブル圧力センサの概観を説明し、その後電界紡糸極細繊維膜が疑似圧電方式と静電誘導方式により電荷を出力することを述べた。また、これまでに報告されているフレキシブル圧力センサを用いた音響センサと呼気センサについて概説し、課題について述べた。そのうえで、本研究の意義と目的を述べた。

第 2 章では、電界紡糸法を荷電法として捉え、代表的な荷電法であるコロナ荷電法との帯電特性の差異を同等の構造を持ったファイバ膜を用いて比較した。電界紡糸ファイバ膜はコロナ荷電法により荷電を行ったコロナ荷電ファイバ膜に比べて多くの実電荷を担持出来ることが示され、その原因について考察した。また、低湿度環境下、大気環境下、高湿度環境下に 240 日保管しても、電界紡糸ファイバ膜は多くの実電荷を保持することを示した。さらに、最近提案された帯電電荷の分布モデルを用いた電界紡糸ファイバ膜とコロナ荷電ファイバ膜の

実効的な表面電荷密度の数理モデルを新たに構築した。

第3章では、電界紡糸 PS マイクロファイバ膜を市販の使い捨てマスクに組み込んだ、自己発電型のマスク型音響および呼気センサを開発し、その特性を評価した。当該マスク型センサに音波を照射すると、静電誘導と疑似圧電効果により電圧を出力した。特に、正と負のそれぞれの極性の高電圧で作製した電界紡糸 PS マイクロファイバ膜を両方組み込むことで、単一の電界紡糸 PS マイクロファイバ膜のみを組み込んだマスク型センサに比べて大きな電圧を出力することを明らかにした。さらに当該マスク型センサが、音響および呼気センサ、エナジーハーベスタとして機能することを示した。特に、当該マスク型センサをヒトが着用して発話を行うと、話した言葉に応じた電圧を出力し、さらにマスク型センサをタブレットに直接接続して発話をする、音声認識ソフトを通じて発話の内容を文字化できることを示した。

第4章では、電界紡糸 PLLA サブマイクロファイバ膜の帯電特性を評価した。始めに、当該ファイバ膜の優れた疑似圧電特性が分極電荷や結晶構造による圧電効果由来ではなく、主に実電荷の帯電に由来することを明らかにした。正極性の電圧で電界紡糸した電界紡糸 PLLA ファイバ膜は、当該ファイバ膜の上部に正の実電荷、下部に負の実電荷を担持するエレクトレットであることを明らかにし、さらに正の実電荷の方が多く担持されていることを示した。この帯電電荷の分布モデルを用いて、上部の電極とファイバ膜表面の距離が変化したときの電荷の出力モデルを新たに構築した。続いて電界紡糸 PLLA ファイバ膜の電荷の保持特性を評価したところ、低湿度環境下に保管することで 240 日を経過しても良好に電荷を保持できることを示した。この電界紡糸 PLLA サブマイクロファイバ膜の応用展開として、当該ファイバ膜をアクティブ材料とした、ほとんどの部品をバイオマスから製造可能であり生分解性を示す材料で構成するタッチセンサとマスク型センサを開発した。

第5章では、本論文で得られた成果を総括した。

論文審査の結果の要旨

本研究は、廉価な汎用ポリマーであるポリスチレン(PS)もしくは生分解性を示しバイオマスから製造可能なポリ(L-乳酸) (PLLA)を材料とした電界紡糸極細繊維膜の帯電特性や発電特性について、詳細に明らかにすることを目的とした。加えて、これらの電界紡糸極細繊維膜を用いた新たな応用展開について知見を得ることも目的とした。電界紡糸極細繊維膜は、機械的な柔軟性、優れた通気性、極軽量性といったユニークな特性を示す。加えて最近、フィルムでは圧電性を示さない PS からなる電界紡糸マイクロファイバ膜が、強誘電エレクトレットとしてふるまい、圧電特性に酷似した疑似圧電特性を示すことが報告されている。これらの特徴から、自己発電型のフレキシブルな圧力センサの材料として注目されている。しかし、電界紡糸極細繊維膜の帯電特性や発電特性については、未解明の部分が多く、特に電界紡糸を荷電法としてとらえたときの他の荷電法との差異や、帯電電荷の保持特性などの詳細な帯電特性、または当該繊維膜が自己発電型の圧力センサ材料として動作するときのより厳密な理論的理解は未解明であった。したがって、本研究の目的と研究内容の新規性は高い。

本研究は、代表的な荷電法であるコロナ荷電法で荷電した極細繊維膜と電界紡糸極細繊維膜の帯電特性を詳細に比較している。この結果、電界紡糸で特異的に生じる 3 次元的な帯電や帯電電荷の良好な保持特性などを世界に先駆けて明らかにしている。さらに、電界紡糸極細繊維膜の帯電電荷の分布のモデルについて、従来報告されていたモデルよりもさらに正確なモデルを提案し、このモデルから実効的な表面電荷密度や発電特性の数理モデルを新たに提案している。加えて、当該繊維膜が音波の照射に良好に応答して発電することを示し、マスク型の音響センサおよび呼吸センサおよびエネルギーハーベスタとして動作することも明らかにしている。特にマスク型の音響センサについては、ヒトがこのセンサを着用して発話したときに生じる電気信号をタブレットにそのまま入力すると、良好に文字化出来ることを示した。

一連の研究内容は、新規性、独創性ともに高く、これまで未解明の部分が多かった電界紡糸極細繊維膜の帯電特性や発電特性の学理解明に大いに貢献し、学術的な意義も高い。加えて、当該繊維膜を用いた新たな応用展開について、新しい研究領域を開拓している。

本論文の基礎となっている学術論文は、レフェリー制度の確立した学術雑誌に掲載されたもの 2 編である。全て申請者が筆頭著者であり、以下の論文において二重投稿など研究者倫理に反する事象は認められなかった。

基礎論文

1. Mask-Type Acoustic Sensor Featuring a Conventional Disposable Mask Embedded with Electrospun Poly(styrene) Fiber Mats, Kenichi Takagaki, Kyoka Takahashi, Tomoki Hayashi, Shunji Takeuchi, Noriaki Kuwahara, and Yuya Ishii, Advanced Energy and Sustainability Research, 2024, Vol. 5, 2300228.
2. Charging Properties of Electrospun Poly(L-lactic acid) Submicrofiber Mat and Its Electrical Applications, Kenichi Takagaki, Heisuke Sakai, Taiki Nobeshima, Sei Uemura, Mitsuo Kaneko, and Yuya Ishii, Advanced Energy and Sustainability Research, 2024, Vol. 5, 2300298.

以上の結果より、本論文の内容は十分な新規性と独創性、さらに学術的な意義があり、博士論文として十分な水準を満たしていると審査員全員が認めた。