

安価な材料を用いた自己発電型のマスク型音響および呼気センサーを開発
— 発話の文字化や呼吸の常時検出ができる使い捨てマスク兼センサーへの応用可能性 —

1. 発表者：

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））
石井佑弥（京都工芸繊維大学 繊維学系 准教授）
武内俊次（京都工芸繊維大学 繊維科学センター 特任准教授）
桑原教彰（京都工芸繊維大学 情報工学・人間科学系 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆ ヒトの声や呼吸をセンシングする自己発電型のマスク型音響および呼気センサーを開発
- ◆ 安価な汎用プラスチックであるポリスチレンを用いて電界紡糸(注 1)で作製したマイクロファイバ膜を市販の使い捨てマスクに組み込むことにより作製
- ◆ 当該ファイバ膜が示す疑似圧電特性(注 2, 3)を利用し、声の音圧や呼吸の風圧を自己発電で電気信号に変換
- ◆ 当該センサーをタブレットに直接接続するだけで、発した言葉を文字化することが可能
- ◆ 当該センサーは、発話を文字化したり呼吸を常時検出したりするウェアラブル型のセンサーとして、Internet of Things (IoT) やヘルスケアの関連分野での応用展開が期待される

3. 発表概要：

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）の高垣賢一氏、同大学繊維学系の石井佑弥准教授、同大学繊維科学センターの武内俊次特任准教授、同大学情報工学・人間科学系の桑原教彰教授らの共同研究チームは、一般的に普及している使い捨ての不織布マスクに、安価な汎用プラスチックであるポリスチレンからなる電界紡糸マイクロファイバ膜を組み込むことにより、自己発電型のマスク型の音響および呼気センサーを開発しました。

当該マスク型センサーは、市販の 3 層構造の使い捨て不織布マスクを基材として使用し、このマスクの不織布上またはフィルタ上にポリスチレンの電界紡糸マイクロファイバ膜を直接堆積させて作製します。電界紡糸のみの工程で、ポリスチレンを極細繊維化し、同時に圧電材料の圧電特性に酷似した疑似圧電特性を発現させます。さらに、多くの圧電材料で必要なポーリング(注 4)などの後工程を必要としないため、安価かつ省工程で製造できる可能性があります。

当該マスク型音響および呼気センサーは、電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜の優れた疑似圧電特性により、人の声や呼吸を電気信号として自己発電的に出力することが可能です。また、正極性の高電圧または負極性の高電圧で電界紡糸した 2 種類の電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜を用いると、それぞれの単一のマイクロファイバ膜を用いる場合よりも、約 2 倍高い電圧が出力されることを明らかにしました。電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜は極軽量であり、高い通気性を示すことから、基材として用いた一般的な使い捨てマスクの着け心地を損わず、かつフィルタ性能を保持した状態で使用できると考えられます。加えて、当該電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜はエレクトレット(注 5)であるため、基材のマスクだけの場合よりも優れたフィルタ特性を示す可能性が高いです。

当該マスク型音響および呼気センサーを用いると、会話を文字化してモニタに表示したり、外国語の会話を同時翻訳したり、睡眠時無呼吸症候群の発症有無を診断する呼吸モニタに活用されることが期待できます。

4. 発表内容：

研究の背景

Covid-19 のパンデミックを経験し、感染症対策におけるマスク着用の重要性が世界的に再認識されました。Covid-19 のパンデミックは収束化していますが、将来的に新たな感染症が流行したときには、再びマスク着用が日常化することが予測されます。他方で、感染症が流行していないときであっても、医療現場や花粉症対策のようにマスクの着用頻度が高くなる状況も日常的に存在します。

マスクは口を覆うことが出来るので、マスクにセンサー機能を付加して声や呼吸を検出する新しいウェアラブルデバイス(スマートマスクなど)としての研究開発が進んでいます。これまでに、フッ素系プラスチック[ポリフッ化ビニリデン(PVDF)やその共重合体など]などをメルトブローなどで繊維化し、さらにポーリングなどの後工程で帯電させた繊維膜を用いたマスク型の音響および呼気センサーが提案されていました。しかし、これらの過去の例で報告されている材料は材料コストが高く、またポーリングなどの後工程の追加により製造コストが増加するため、使い捨てとして使用するには製品価格が課題となります。他方で、センサーが搭載された電子デバイスを市販の使い捨てマスクに取り付けるタイプのマスク型センサーも提案されていますが、この電子デバイスの付け替えや保管に手間がかかったり、衛生的な問題が生じる懸念があります。

このような状況のなか、京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 博士後期課程の高垣賢一氏、同 博士前期課程の高橋京華氏、林知希氏、同大学繊維科学センターの武内俊次特任准教授、同大学情報工学・人間科学系の桑原教彰教授、同大学繊維学系の石井佑弥准教授の共同研究チームは、市販の一般的な使い捨てマスクに、安価な汎用プラスチックであるポリスチレンからなるマイクロファイバ膜を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ーを新たに開発しました。当該マイクロファイバ膜は、電界紡糸のワンステップで繊維化と帯電処理を同時に実現しているため、後工程不要による省製造コストが期待されます。

研究内容

これまでに石井准教授らの研究グループは、フィルム状態では通常圧電効果を示さない安価な汎用プラスチックであるポリスチレンが、電界紡糸によりマイクロファイバ膜化するだけで、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世界に先駆けて明らかにしました[1, 2]。さらに当該ファイバ膜は、高い通気性と極軽量というユニークな特徴を持ちます。本研究では、この電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜を、市販の一般的な使い捨てマスクに組み込むことで、安価に製造できる可能性のあるマスク型の音響および呼気センサーを開発しました。

図 1 に開発したマスク型音響および呼気センサーの概説図を示します。分解した使い捨てマスクの不織布層とフィルタ層の中央部分に導電性の塗料を塗布し、その後乾燥させることで、通気性を失わせることなく対の導電化部(電極)を形成します。不織布層の導電化部には、負極性の高電圧で電界紡糸した

ポリスチレンファイバ膜を直接堆積させました。一方で、フィルタ層の導電化部には、正極性の高電圧で電界紡糸したポリスチレンファイバ膜を直接堆積させました。これらを用いて、外側から(A)から(D)の順で4層のマスク型センサーを組み立てます(図1参照)。

- (A) 負極性電界紡糸ファイバ膜を堆積させた不織布層
- (B) (A)層と(C)層の導電化部のショートを防ぐ無加工の不織布層
- (C) 正極性電界紡糸ファイバ膜を堆積させたフィルタ層
- (D) ヒトと(C)層の導電化部の接触を防ぐ無加工の不織布層

開発したマスク型音響および呼気センサーは、一般的な市販の使い捨てマスクを基材として用いているため、マスクとしてのフィルタ性能や着け心地は保たれたまま、音響および呼気センサーとして利用できる可能性があります。加えて、当該電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜はエレクトレットであるため、基材のマスクだけの場合よりも優れたフィルタ特性を示す可能性が高いです。

開発したマスク型音響および呼気センサーに音波を照射すると、音圧に比例して出力電圧値が増加することが分かりました[図2(a)]。この結果は、開発したマスク型センサーが音響センサーとして正常に動作していることを示しています。また、異なる周波数の音波を照射して出力電圧値を測定したところ[図2(b)]、低周波側で出力の高い音響センサーであることが分かりました。日本人男性の発音の周波数がおおむね120 Hz付近であり、日本人女性の発音の周波数がおおむね240 Hz付近であることを考えると、日本人の発音に対して比較的高い出力を示すことが分かります。また、本研究で照射可能であった最高周波数である1 kHzの音波の照射であっても有意な出力電圧が得られることが分かりました。

当該マスク型センサーでは、音波によって(C)層の一部もしくは全体が振動することで、(A)層と(C)層の一部もしくは全体の位置関係が変化します。この結果、導電化部で静電誘導(注6)される電荷量に変化し、出力回路に誘導電荷が流れることにより、電圧出力として検出されます。開発したマスク型音響および呼気センサーでは、正極性電界紡糸ファイバ膜と負極性電界紡糸ファイバ膜の2つの電界紡糸ファイバ膜を用いました。本研究では、それぞれの単一の電界紡糸ファイバ膜を用いる場合よりも、この2つの電界紡糸ファイバ膜を組み合わせることにより、約2倍高い電圧が出力されることを明らかにしました。

当該マスク型センサーを音声認識ソフトを備えたタブレットに接続して、ヒトの発話を文字化できるか検討したところ、信号を増幅する回路やノイズフィルタなどの追加回路を必要とせずに発話内容が文字化できることが分かりました(図3参照)。加えて、当該マスク型センサーを着用して呼吸をすると、通常の呼吸や激しく早い呼吸に応じた電圧を出力することも分かりました。さらに、声や呼吸による出力電荷を蓄積することで、エネルギーハーベスタとしての利用も可能です。耐久性に関しては、当該マスク型センサーに音波を12時間連続して照射しても電圧出力の低下は見られませんでした。耐候性については、当該センサーに用いたものと同様の電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜を高湿度環境下(湿度: 90%RH、温度: 30°C)に24時間保管しても、表面電位(注7)の大幅な減少は見られませんでした。当該マスク型音響および呼気センサーは、使い捨てマスクと同様に使い捨てを想定しておりますので、24時間の帯電性保持でも十分であると考えています。

当該マスク型音響および呼気センサーを用いると、会話を文字化してモニタに表示したり、外国語の会話を同時翻訳したり、睡眠時無呼吸症候群の発症有無を診断する呼吸モニタに活用されることが期待できます。

ファンディングエージェンシー：

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

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：Advanced Energy and Sustainability Research

論文タイトル：Mask-Type Acoustic Sensor Featuring a Conventional Disposable Mask Embedded with Electrospun Poly(styrene) Fiber Mats

著者：Kenichi Takagaki, Kyoka Takahashi, Tomoki Hayashi, Shunji Takeuchi, Noriaki Kuwahara, Yuya Ishii

DOI 番号：10.1002/aesr.202300228 (Early Viewにて2023年12月19日にweb公開)

アブストラクト URL：<https://doi.org/10.1002/aesr.202300228>

6. 用語解説：

(注1) 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、静電引力によりナノマイクロファイバを紡糸する方法

(注2) 圧電：本資料では、チタン酸ジルコン酸鉛(PZT)や圧電樹脂[poly(vinylidene fluoride) (PVDF) 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

(注3) 疑似圧電特性：圧電材料の圧電特性に酷似した特性

(注4) ポーリング：高電界などを利用して物質内の電荷の偏りの方向をそろえる処理方法

(注5) エレクトレット：半永久的に電荷を保持する材料

(注6) 静電誘導：帯電した物質に導電体を近づけると、帯電した物質の帯電電荷の極性と逆の極性の電荷が導電体に誘導される現象

(注7) 表面電位：物質表面の電位

7. 添付資料：

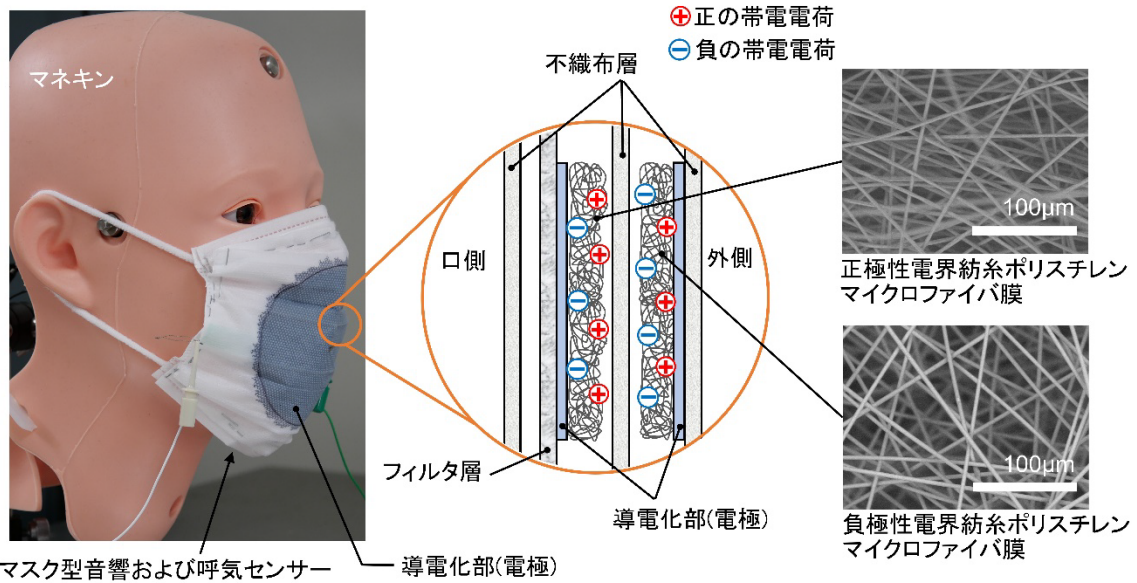


図 1. マスク型音響および呼吸センサーの外観(左図)と積層構造の概説図(中央図)と電界紡糸ポリスチレンマイクロファイバ膜の走査型電子顕微鏡像(右図)

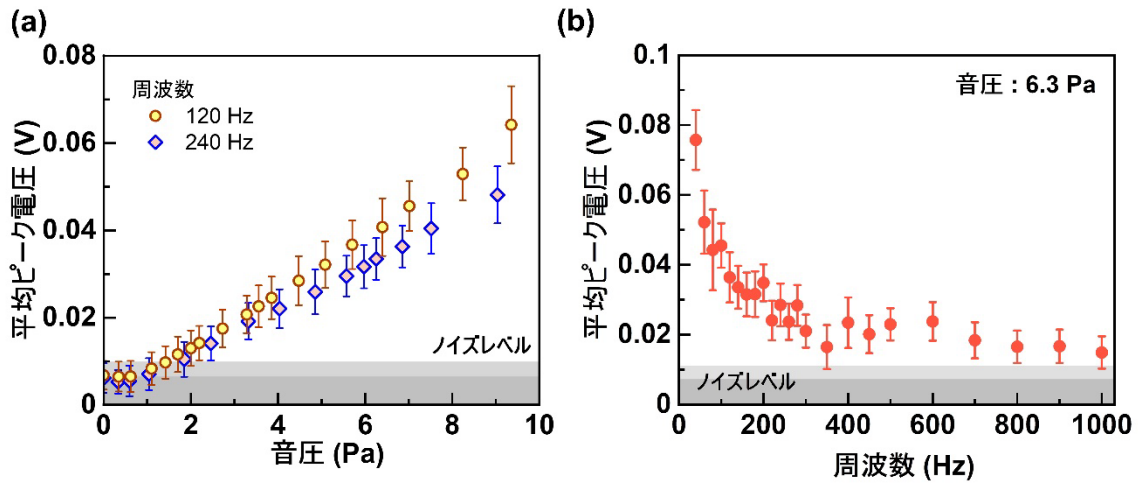


図 2. 開発したマスク型音響および呼吸センサーから出力された平均ピーク電圧：(a)異なる音圧の音波を照射した場合、(b)異なる周波数の音波を照射した場合

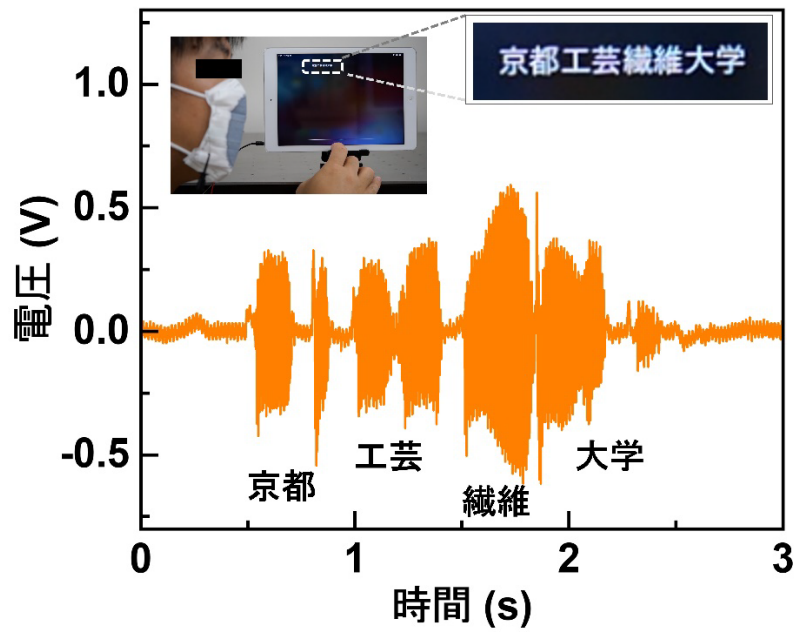


図 3. 開発したマスク型音響および呼気センサーを着用して「京都工芸繊維大学」と発声したときの出力電圧波形と音声認識ソフトを備えたタブレットで文字化したときの様子