

《様式B》

研究テーマ 「摩擦帯電現象に基づくテキスタイル型エネルギーハーベスターの開発」

研究責任者 所属機関名 東海国立大学機構名古屋大学

官職又は役職 助教

氏 名 松永 正広 メールアドレス m-matsunaga@nagoya-u.jp

共同研究者 所属機関名

官職又は役職

氏 名

（令和5年度募集）第36回 助成研究 完了報告書

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要

本研究では、衣服への実装を見据えた柔軟・大面積かつ高出力なエネルギーハーベ스팅デバイスの開発を目的として、三層構造を有するテキスタイル型摩擦発電デバイス（TENG：Triboelectric Nanogenerator）の提案し、試作および発電性能評価を行った。

摩擦発電は、振動発電の一種であり、接触帯電と静電誘導により機械的エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギーハーベ스팅技術である。他の発電手法と比較し、高出力・簡易な構造・材料自由度の高さといった特徴を持ち、その高い材料自由度を活かしテキスタイルを基にした摩擦発電デバイスも研究されている。

先行研究で報告されている従来のテキスタイル型摩擦発電デバイスは、加工性や短絡リスク、大面積化に課題があったが、本研究で提案した三層構造は、誘電体—電極—誘電体を編み構造により一体化したものであり、電極を誘電体層内に埋め込むことで電氣的短絡リスクを減少させつつ、容易な裁断・縫製を可能とした。

テキスタイル型摩擦発電デバイスは、縫製業界にて一般的に用いられる横編機を用いて約 1.6 m × 4.0 m の大面積で作製され、素材には誘電体としてポリエステルやウール、電極としてポリエステル・ステンレス紡績糸を使用した。作製後の発電デバイスはハサミで容易に裁断でき、導電性ミシン糸での縫製やスナップボタンによる電気接続にも対応できることを確認し、スマートテキスタイルへの応用を見据えた構造的有用性を示した。

発電性能の評価は、リニアモータによる一定振動印加により行い、外部誘電体と

の接触-分離時に際に生じる出力特性を測定した。特に外部誘電体としてウールを用いた場合において、 $100\text{ M}\Omega$ 負荷抵抗時で最大約 40 mW/m^2 （瞬時値）の出力が得られた。さらに、人の動作から発電実証としてニトリル手袋を装着した手を用いた出力評価を行ったところ、最大 1.7 W/m^2 （瞬時値）の出力を確認した。この出力により直列接続した 14 個の青色 LED の点灯を確認した。加えて、裁断・縫製後においても出力が維持されることも実験的に検証した。

本研究の成果は、衣服に自然に組み込むことができる新しい発電技術として、将来的なウェアラブルデバイスの代替電源への活用が期待できる。これは、医療・介護・ヘルスケア・スポーツなど幅広い分野において、電池レスセンサへの応用が期待される。

2. 実施内容および成果の説明

2-1 背景

近年、ウェアラブルデバイスの需要は医療・スポーツ・介護などの分野で急速に高まっており、センサ駆動やデータ通信のための電源確保が課題となっている。既存の一次電池や電源配線は、重量・剛性・充電交換の手間といった観点から柔軟なウェアラブルデバイスには不向きである。その代替電源の一つとして期待されているのがエネルギーハーベスティング技術である。

摩擦発電（TENG）は、接触帯電と静電誘導により周辺環境の機械的エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギーハーベスティング技術の一つである。他の発電方式と比較し、高出力・高効率という特徴に加え、構成材料の自由度が高く、ランダムで低周波な動きからも発電できるため、ウェアラブル応用に極めて有望である。その材料自由度の高さを活かし、テキスタイルを基にした摩擦発電デバイスも研究されている。しかし、従来のテキスタイル TENG には、電極の露出による短絡リスクや、布間接着による大面積化の難しさ、加工性の低さなどの課題があった。

そこで本研究では、誘電体—電極—誘電体の 3 層構造を 1 枚の布の中に形成することで、短絡リスクを抑えつつ、裁断・縫製や電気接続が容易な新規構造のテキスタイル TENG の提案・実証を目的とした。

2-2 作製方法

本研究で提案する三層構造を図 1(a)に示す。提案デバイスは、誘電体層—電極層—誘電体層からなる 3 層構造であり、横編機を用いてプレーティング編・平編・接結法を組み合わせることで 1 枚のテキスタイル中にこの構造を実現した。

構成材料は以下の通りである。誘電体：ポリエステル糸、電極：ポリエステル・ステンレス混紡導電糸 (ELETEX)、導電性ミシン糸：銀メッキ糸 (Smart X)。図 1(b)に実際に作製した $1.6\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ のサンプルの写真を示す。本構造は、縫製業界で一般的な装置である横編機を用いて容易に大面積のデバイスの作製が可能である。

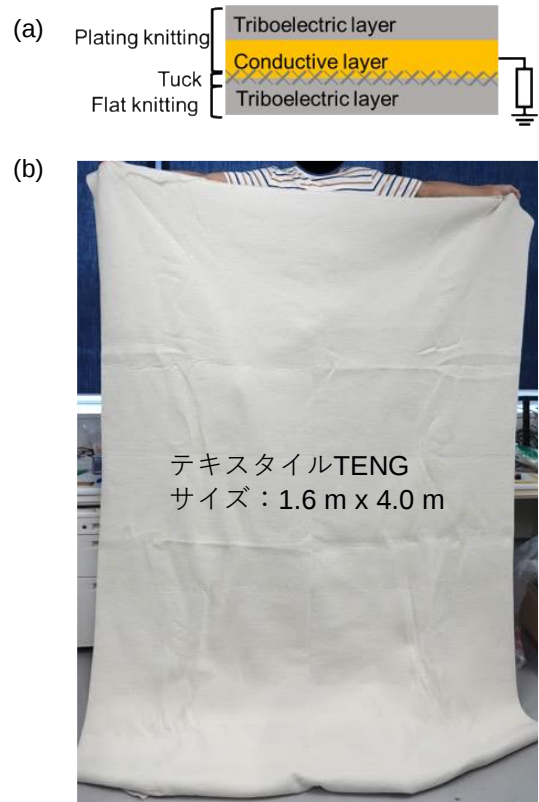


図 1(a) 三層構造テキスタイル TENG の構造の概略図。(b) 実際に作製した大面積テキスタイル TENG の写真。

2-3 発電性能評価

作製した TENG の発電性能は、リニアモータ (E1100, Linmot) を用いた一定振動を印加した際の出力電圧を測定することで評価した。作製したテキスタイル TENG の表面に、対向材料としてウール、コットン、ポジジメチルシロキサン (PDMS) といった材料を接触・分離させることで生じる出力電圧を計測した。

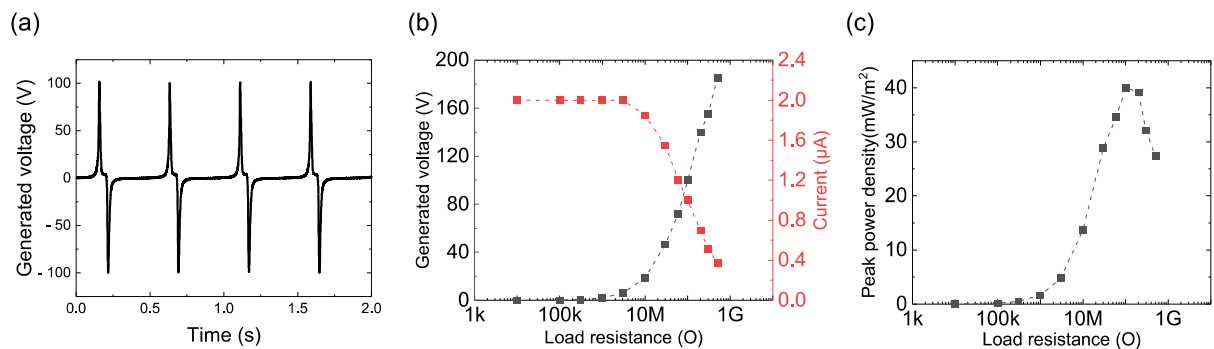


図 2(a) 典型的な出力波形（負荷抵抗 $100\text{ M}\Omega$ 接続時）、(b) 出力電圧・電流密度の負荷抵抗依存性、(c) ピークパワー密度の負荷抵抗依存性。

ポリエステル糸を誘電体糸としたテキスタイル TENG 表面に対向材料としてウール布により一定の振動を印加した場合の出力電圧波形と出力電圧、電流密度、ピークパワー密度の負荷抵抗依存性を図 2(a)-(c)に示す。図 2 よりウール布を対向材料とした場合、 $100\text{ M}\Omega$ 負荷時で 40 mW/m^2 （瞬時値）の出力電力密度が得られた。さらに、人の動作から発電実証としてニトリル手袋を装着した手を用いた出力評価を行ったところ、最大 1.7 W/m^2 （瞬時値）の出力を確認した。

次に、コットン、ポリエステル、PDMS を対向材料として用い、それぞれの出力電圧を比較した（図 3(a)）。 $3\text{ M}\Omega$ 負荷抵抗下での測定結果より、コットン使用時の出力が最も低く、PDMS 使用時には 6.4 V のピーク電圧

が得られた。これは、一般に化学繊維の方が天然繊維よりも静電気が発生しやすいことに起因していると考えられ、帯電列に従った傾向が見て取れる。さらに、コットンと PDMS に対応する波形を比較したところ（図 3(b),(c)）、電圧パルスの正負が逆転していることが確認された。これは、帯電列において PDMS、ポリエステル、コットンの順に負に帯電しやすく、デバイス表面に形成される電荷の極性が異なるためである。この結果は誘電体材料の選択が発電特性に大きく影響することを示唆している。

2-4 裁断・縫製による出力電圧

テキスタイル TENG の実用には、裁断し、導電糸により縫製する工程が必須である。そこで、裁断・縫製前後におけるテキスタイル TENG の発電性能の評価を行った。

15 cm 角に切断したテキスタイル TENG を 2 つ準備し、そのうち一方は半分に切断し、導電性のミシン糸で互いに縫い合わせた(図 4)。また、フレキシブルデバイ

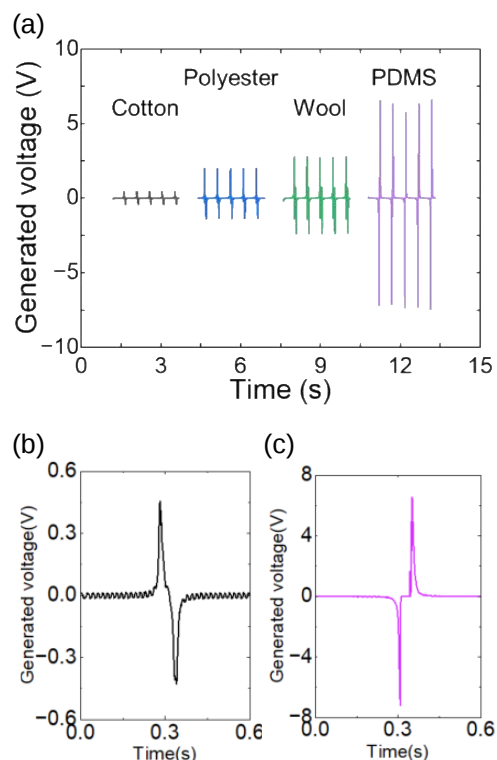


図 3(a) 異なる対向材料における出力電圧波形（負荷抵抗 $3\text{ M}\Omega$ ）、(b) コットンと(c)PDMS の出力電圧の拡大波形。

スへの給電を想定し、スナップボタンを用いた電気接続の確認も同時に行った。リニアモータによって裁断前後のテキスタイル TENG にそれぞれウールの接触・分離を行い、それぞれ $10\text{ M}\Omega$ 負荷抵抗時における出力電圧波形を比較した。

裁断・縫製前後での出力電圧波形を図 4 に示す。図に示すように、裁断・縫製の前後において出力電圧波形に顕著な変化は見られず、裁断・縫製後においてもテキスタイル TENG の機能が維持できていることが確認できた。また、本実験にて、スナップボタンを導電性のミシン糸で縫い付けることで簡便に出力電圧を取り出せることが確認できた。

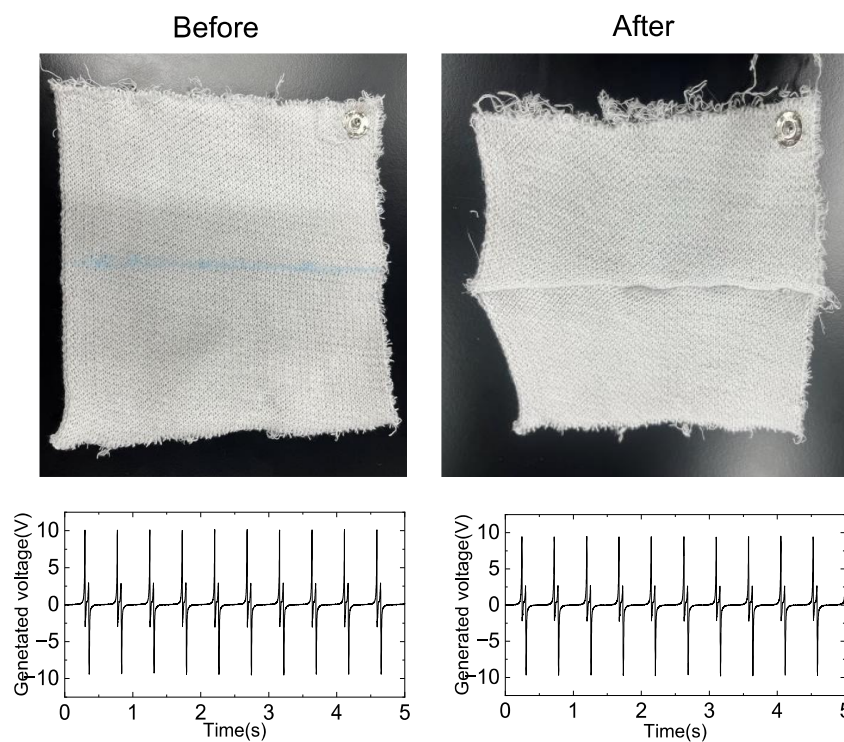


図 4 裁断・縫製前後のテキスタイル TENG（上）と対応する出力電圧波形（下）。

2-5 衣服型摩擦発電デバイスの試作

衣服型摩擦発電デバイスの作製には、ウールを用いた 3 層構造摩擦発電デバイスおよび導電糸ミシン糸を用いた。衣服型摩擦発電デバイスは通常の衣服同様、型紙に沿って各パーツを裁断し、各パーツを縫いあわせることで作製した。衣服全面を電氣的に接続させるために、各パーツの縫合には導電糸を用いた。作製した衣服型摩擦発電デバイスを着用した様子を図 5(a)に示す。衣服型摩擦発電デバイスの下にはポリエステル製のコンプレッションウェアを着用しており、身体動作により、コンプレッションウェアと衣服型摩擦発電デバイスとの間の接触・分離もしくは摩擦に

より発電する。

身体動作に伴う発電と、衣服上の任意の箇所から出力電圧の取り出しが可能であることを検証した。本実験では、図 5(b)に示すように、(i)左腕、(ii)右腕、および (iii)両腕を連続して曲げる動作を行い、異なる接続位置 (A—D) におけるそれぞれの出力電圧波形を測定した (図 5(c))。この結果より、いずれの動作においても複数の体の部位からの摩擦を利用して発電が可能であることが確認できた。また、出力電圧の取り出し位置に対し、出力電圧波形の形状および大きさに明らかな違いは見られなかった。

この結果は、従来の関節部といった局所的なエネルギーハーベスターと比較して、より広範囲な身体部位からの発電の可能性を示唆するものである。また、スナップボタン等の利用により、任意の位置から電源を取り出せる可能性を示した。これは、センサなどの外部デバイスの接続自由度を向上させることに繋がる実用化に向けた重要な知見である。

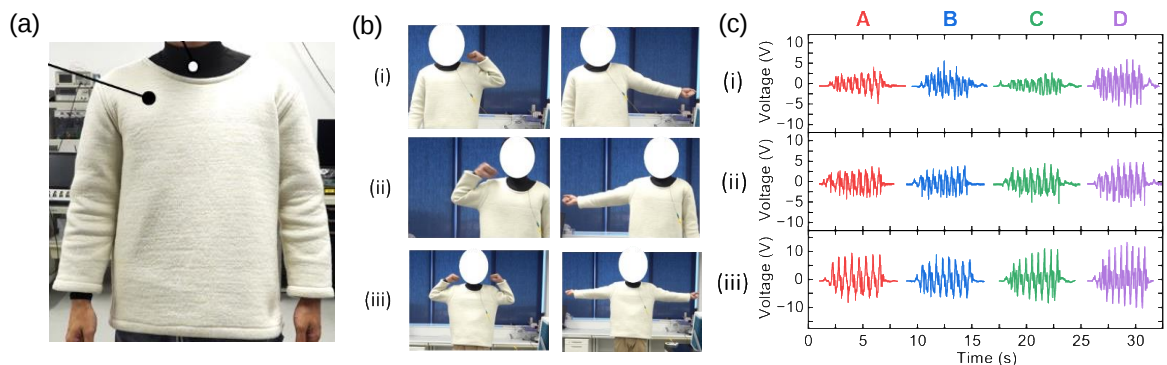


図 5 (a) 作製した衣服型 TENG を着用している様子、(b),(c) 腕を曲げる動作の様子と接続箇所ごとの出力電圧波形。

2-6. 成果のまとめ

本研究の成果は、衣服に自然に組み込むことができる新しい発電技術として、将来的なウェアラブルデバイスの代替電源への応用が期待できる。これは、医療・介護・ヘルスケア・スポーツなど幅広い分野において、電池レスセンサへの応用が期待される。

《様式8》

特許権・実用新案権・意匠権 出願届

令和 年 月 日

一般財団法人 東海産業技術振興財団

理 事 長 神 野 吾 郎 様

住 所

申請者

氏 名

印

令和6年 3月 6日付 第 号

研究テーマ「 」

上記助成研究は、令和 年 月 日付で特許権・実用新案権または意匠権について出願いたしましたのでご報告申し上げます。

〔添付書類〕

1. 出願届の一部分（写） 1部

出願名称、年月日が確認できるページのみで良い

《参考様式 A》

記入例

助成金の収支明細書

(単位：円)

項目 年度	収 入	支 出		
	令和 6 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	計
助成金額	1,000,000			
1. 設備費 (内訳)		0		
(小計)		0		0
2. 消耗品費 (内訳)				
蛍光体基板マスク他		104,250		104,250
腐食セルⅡ他		222,256		222,256
(小計)		326,506		326,506
3. 旅費 (内訳)				
学会参加、研究打合せ他		12,900		12,900
学会参加、研究打合せ他		270,210		270,210
(小計)		283,110		283,110
4. その他(謝金、会費等) (内訳)				
大学施設運営費他		222,451		222,451
学会参加費、論文掲載料		85,620		85,620
学会参加費、招待講演他		82,313		82,313
(小計)		390,384		390,384
合 計	1,000,000	1,000,000		1,000,000

※または、所属機関での収支明細書のコピーでも結構です。