

4.2 e-Textiles manufacturing methodologies and characterization

ファブリックは繊維状の材料をベースにした階層構造を持っている。この特殊な構造は、異なるレベルの統合からの e-テキスタイルの開発を可能にし、近年、いくつかの企業や研究者が最も効率的な製造プロセスを模索している。異なるレベルを理解するために、図 4.1 に生地（Fabric）の階層構造と最も一般的な加工技術を示す。繊維は最初の統合レベルである。この繊維は、長さ（Length）と厚さ（Thickness）の比が高いことが特徴である。糸（Yarn）は第二の統合レベルであり、さまざまな製造工程を経て、糸は布地（Fabric）になり、第三の統合レベルに達する。生地（Fabric）の異なる層を結合することで、他のレベルを開発することができる（すなわち、3D テキスタイル）。これらのレベルから、さまざまな e-テキスタイルの製造方法が発明され、開発されてきた。並行して、最終的なアプリケーションに応じて、従来のエレクトロニクス機能に近い最高の電気的挙動を達成するために、異なる基材がテストされてきた。

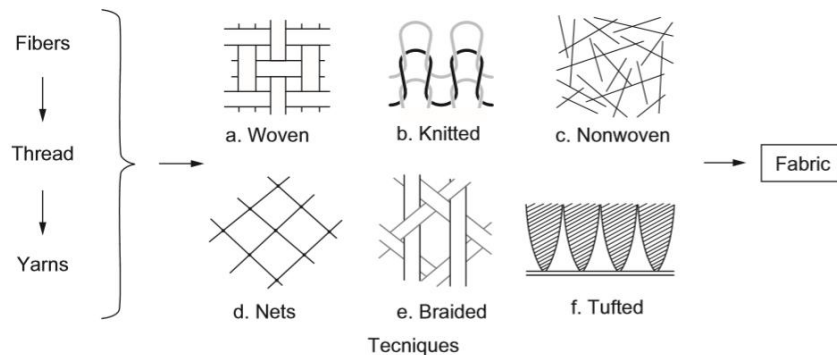


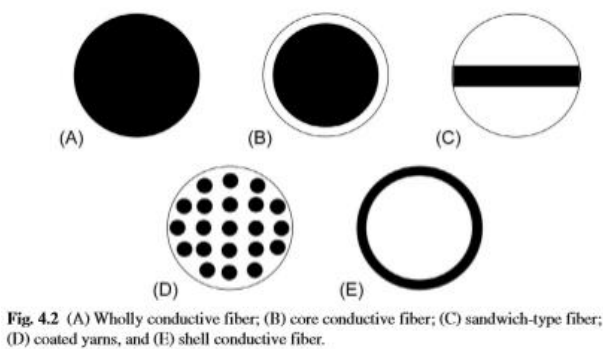
Fig. 4.1 Fabric construction platforms and relative techniques.

4.2.1 Conductive fiber

導電性繊維は、電線と繊維の世界をミックスしたもので、それぞれの特性を持っている。これらの繊維は、非導電性または非導電性の基材からなり、その基材に導電性の要素をコーティングまたは埋め込んだものである。テキスタイルとワイヤーの世界にまたがる導電性繊維は、重量または長さで販売されており、その形状／密度はデニールと AWG で測定される。当初、導電性繊維は、主に技術分野で使用されていました：クリーンルーム衣料、軍用アパレル、医療用途、電子機器製造。それらは、帯電防止アプリケーション、電磁干渉シールド、電子アプリケーション、赤外線吸収または爆発性領域での防護服のような様々な機能を有することができる。これらの導電性繊維を先行する用途に使用するためには、強度、柔軟性、環境安定性、化学薬品に対する耐性を有することが重要である。特に衣類のためには、伸縮性、せん断性、およびハンドルなどの触覚特性がかなり関連している。触覚的な快適さは、衣類材料と人体との間の機械的相互作用に関連しており、衣類において本質的かつ不可欠な性能要件である。ファブリックハンドルは素材の感触に関係しているため、専門家の主観的な評価は触覚に依存します。

この理由から、繊維は細く、織物は単位面積当たりの重量が低い(300g/m² 以下)ことが望ましい。これらの要求は、導電性を目的として必要とされる材料や形状とは矛盾している。図 4.2 は、導電性繊維の異なるタイプの導電性（黒）と絶縁性（白）の構造を示している。例えば、パルク信号伝送の必要がない場所（低周波と高出力、いわゆるスキニング効果のために周波数を上げながら、導体の非常に表面的

な層で伝導を持続させる)にはシェル導電性繊維が最適であり、完全導電性繊維は表面改質/酸化を受けることは想定されていない、コア導電性繊維は通常、表面改質/酸化を避けるためのソリューションである、などのように、それぞれ異なる用途を持つことができます。



導電性繊維の製造方法としては、熔融紡糸、湿式紡糸、電気化学的処理、従来の絶縁材料に導電性材料をコーティングするなど、様々な方法があります。採用された製造プロセスに従って、導電性繊維は、内在性と外在性に分けることができます。これらのプロセスは、表 4.1 にまとめられているように、異なる長所と短所を示している。固有導電性繊維は、高い導電性を特徴とする材料で作られており、特に、●金属繊維や金属合金繊維は、非常に高い導電性を有している。金属繊維や金属合金繊維は、直径が1～80μmの非常に細い金属フィラメントであり、束引き加工やシェービング加工によって製造される。衣類用の金属含有物は加工が困難であり、最終製品の着心地も悪くなる。その不活性度、言い換えれば、洗濯や汗に敏感になりやすいかどうかは、フィラメントを作るために使用される金属に依存します。均一な加熱ができず、また、脆い性質を持っているため、経時的に紡績機械を損傷させる可能性があります。

- 炭素繊維は黒鉛のような構造をしており、導電率は金属に匹敵する(104～106 S/cm)
- 本質的導電性ポリマー(ICP)は、ポリアニリン(PANI)、ポリ(3, 4エチレンジオキシチオフェン)ポリスチレンスルホン酸塩(PEDOT:PSS)、またはポリピロール(PPy)をベースとする有機導電性材料である。

Table 4.1 Advantages and disadvantages using intrinsic and extrinsic process with different base materials

Process manufacturing	Material	Advantages	Disadvantages
Intrinsic	Metallic and metallic alloy fiber	High conductivity (10 ⁶ S/cm) and mechanical resistance ^a	Low flexibility, stiffness, high weight, and poor weaving properties ^b
	Carbon fibers	High conductivity, strength, stiffness, low weight, and high fatigue resistance ^c	Hard integration into knitted and weaved structure and harmful to health ^c
	Intrinsically conducting polymers (ICPs)	Medium conductivity (~200 S/cm) and low weight ^d	Poor mechanical strength, brittleness, and difficult processing ^e
Extrinsic	Conductive filled fibers	High conductivity ^f	High manufacturing cost ^g
	Conductive coated fibers	High conductivity (10 ⁶ S/cm) and mechanical properties ^h	High manufacturing cost, stiffness, brittleness, and high weight ⁱ

固有の導電性繊維を考慮し、導電性と非導電性の材料を組み合わせで作られています。特別な処理には、混合、ブレンド、またはコーティングプロセスが含まれます。これらのアプローチは、処理された材料の良好な電気的および機械的特性を保証します。これらの繊維は、次のように分けることができます。

●導電性充填繊維は、ポリプロピレン、ポリスチレン、ポリエチレンなどの非導電性ポリマーに導電性フィラー（例えば、金属粉末、金属ナノワイヤ、カーボンナノチューブ（CNT）または ICP）を添加して製造される。この種の繊維を開発するための一般的なプロセスは、熔融紡糸および溶液紡糸である。溶液紡糸プロセスは、熔融紡糸で製造されたものよりも電気的および機械的特性が改善された繊維を保証する。

●導電性被覆繊維は、絶縁材料を導電性のもの（例えば、カーボンブラック、金属、CNTまたはICP）で被覆することによって製造される（Xue et al.）。これらの繊維の特性は、使用される導電性材料の種類および相対的な製造方法に依存する。金属コーティング、スパッタリング、真空蒸着、および繊維の充填または装填が最も一般的な方法である。溶液鑄造法、インクジェット印刷法、化学気相成長法、気相重合合法などにより、カーボンブラック、CNT、ICP を繊維表面に薄層として採用することで、導電性繊維の品質を向上させることができる。

電気的および機械的特性は、印加される張力に応じて、互いに相関し、紡糸された導電性繊維の抵抗変化を示す。柔軟性とは、折り曲げや曲げなどの応力下での永久変形に対する抵抗力と定義されています。糸の全体的な形状が個々の繊維の形状よりも先行するため、紡績や撚りなどの繊維加工によって改善することができる。一般的に、織物の曲げ挙動を評価するための最もよく知られた試験方法は、ASTM D13888（または米国の場合は連邦試験方法規格191A-5200）のハンギングループ試験である（Matericals, 2012）。典型的な機械は、カンチレバー曲げの原理を採用した曲げ剛性の迅速かつ正確な試験方法を提供する Taber Fabric Stiffness Tester である。この方法は、金属繊維および金属化ポリエステルシールドをホストする織物に適切に適応されており、これは、材料が任意の従来の織物と比較して剛性を増加させるという事実起因している。基準パラメータであるバス剛性（ K_b （N/in.））は、印加された力（ F ）と得られた相対変位 Δl との間の比として計算される（式 5.1 参照）。曲げ特性を評価するためのもう一つのパラメータとして、複数の導電性繊維の縫製性があります。この評価に採用されている方法は、先に述べたカールテスト（国際規格はありません）で、従来の縫い糸と比較して導電性ワイヤーの残留カールを確認することができます。前述したように、金属部分に導電性を加えると、機械的特性に影響を与え、カールテストにより、導電性ワイヤーがミシン縫製に適しているかどうかを知ることができます。洗濯性も考慮すべきもう一つの関連する特徴であり、機械的ストレスや高温に対する物理的耐性だけでなく、湿気や洗剤に対する化学的耐性にも関係しています。一般に、従来の電子機器のエージングを促進するために、洗浄試験が実施されている。この試験は、通常の洗濯をシミュレートするために、標準的な直立型攪拌機（例えば、GE スペースメーカーモデル）と標準的な洗剤の使用から構成されています。現在、多くの導電性繊維がこの方法で試験されており、その結果、洗浄試験後に電気抵抗が3桁増加する可能性があることが示された（例えば、シールドデックス繊維

維サイズ 40 22/7 PET で作られた導電性ストリップ 30cm の場合、3 k Ω から 3 M Ω)。今日では、いくつかの企業が異なる製造方法を採用して導電性繊維を製造している。繊維は、ステンレスウナギまたは他の金属のフィラメントと単に絡み合っているか、またはアルミニウム (Al) やマグネシウム (Mg) のような金属で覆われていることができる。しばしば文献では、金属線と金属繊維の区別がなされていない。しかし、スプリントメタル社では、金属繊維と線材を直径によって区別している。細線が 30 μm ~1.4mm の直径を持つのに対し、金属繊維は 2~40 μm の直径を持つ。

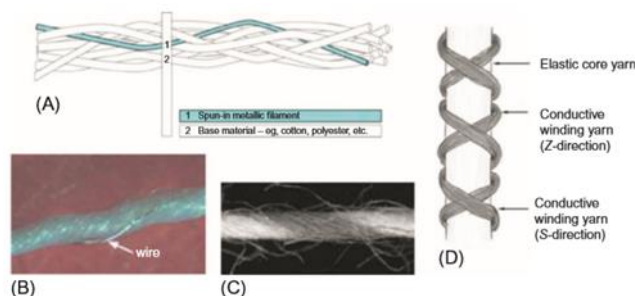


Fig. 4.3 (A) Schematic of conductive metal fiber twisted with the natural or synthetic fibers. From Swiss Shield. (B) Twisted metal wire: The metal wire is twisted around the polymer yarn. (C) Metal fibers: The conductive yarn consists of metal multifilament. (B) and (C) from Locher, I., 2006. Technologies for System-on-Textile Integration. Available at: <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:28457> (accessed 20.01.14). (D) Conductive winding yarns wound around an elastic core yarn in S- and Z-direction. From Schwarz, A., Kazani, I., et al., 2011. Electro-conductive and elastic hybrid yarns—the effects of stretching, cyclic straining and washing on their electro-conductive properties. Mater. Des. 32 (8), 4247–4256.

4.2.2 Conductive fabrics

導電性繊維の電気的特性および製造方法を理解した後、導電性織物を実現するために、次のレベルの統合は、導電性糸である。導電性ヤーンは、炭素繊維のような非金属導電性材料、または金属繊維のような金属材料に基づくものであってもよい。そのようなヤーンは、金属フィラメントのセット、例えばステンレス鋼フィラメントを含むことができ、これらのフィラメントは、互いに撚り合わせることができる。細い金属線をマルチフィラメント繊維の周りに撚り合わせるにより、機械的安定性の向上とともに糸の導電性が得られる(図 4.3B、C)。金属線の螺旋状の形状は、糸全体の柔軟性を可能にし、特に糸を伸ばした場合には、金属線が変形に追従することができる。導電性糸のアプローチを使用すると、導電性を確立するために、生地製造後の追加のステップは必要ありません。これらの糸の導電性は、10~500 Ω/m の範囲にある。延伸試験中の抵抗変化を評価するために、一般的には、Zwick/Z010 のようなひずみ試験機を用いて測定が行われる。サンプル糸は、アナログ測定の場合はデジタルマルチメータ、デジタルの場合はマイクロコントローラ/読み出し回路とリンクされ、同時に接続されている。Ohら(2003)は、伸びに関連した電気的パラメータとして導電率(S/cm)の変化を採用した。導電性糸の機械的特性の変化は、デジタルマルチメータと結合した標準的な試験方法(ASTM D 751-95)による引張試験機を用いて調査された。この実験的セットアップを用いた他の評価は、材料の経時変化およびヒステリシス特性に焦点を当てたものである。必要な導電性を達成するために、ステープル繊維材料と一定量の導電性ステープル繊維の混合物を混合して糸に紡糸することができる。金属含有量に応じて、これらのヤーンは、多かれ少なかれ、織物特性と金属特性を同時に有する。導電性繊維のわずかな割合を加えるだけで、結果として、低い導電性を特徴とする帯電防止衣類が得られる。Blum(2000)は、織物ロービングとモノフィラメント金属糸の複合糸の製造について説明している。リ

ングスピナーでの糸紡績工程では、コーティングされた金属線がロービングの中央に追加される。紡糸工程に続く熱処理では、熔融コーティングが中央のワイヤを紡糸された織物シースに付着させる。この工程の主な問題点は、糸の剛性である。さらに、導電性織物の製造工程において、織物内での導電性ヤーンの正確な位置は予測できない。糸の周りの螺旋状の経路は、この問題に関与する。電気伝導度に関しては、この方法は、約 $17.8\Omega/\text{m}$ のファブリック特徴を製造することを可能にする。導電性を達成する別の方法は、金属層で糸をコーティングすることである。電気化学的プロセスを採用して、銅 (Cu)、銀 (Ag)、または金 (Au) のような微細な金属層を繊維の表面に堆積させることができる (Schwarz ら、2009)。この技術の利点は、電気抵抗が約 $50\Omega/\text{m}$ と低いことである。一方で、通常は機械的特性に関しては欠点があり、金属コーティングは、糸の変形中や繊維製造工程中に破損しやすいためです。この問題を解決するために、Schwarz ら (2011b) は中空スピンドル技術を応用して、繰り返しひずみや洗濯に曝された後に、弾性と安定した電気-機械的特性を持つ導電性と弾性のある糸を製造した。図 4.3D は、中空糸紡績法により製造された導電性糸の設計図であり、洗濯・延伸試験に使用されている。電気抵抗は 100% までの伸びレベルにわたって一定 (銅ベースの導電性糸は $4\Omega/\text{m}$ 未満) であり、25 回の洗濯サイクル後、銀ベースの糸だけが電気抵抗を変化させませんでした。同じ構造を持つが、銅とステンレス鋼をベースにしたヤーンは、洗浄試験後に抵抗値の増加を示す。ステンレス鋼および銅をベースにした糸を、4 点プローブ法を用いて洗浄前後の電気抵抗の安定性を定量化することにより評価した。この方法は、典型的には、絶縁材料上の薄膜または拡散層の電気抵抗を測定するために使用され、実験は以下のセットアップで実施された。

- ・電圧計 (分解能 0.001mV の Keithley 195A デジタルマルチメータ)
- ・アンペアメータ (分解能 0.1mA の Solartron Schlumberger 7150 Plus デジタルマルチメータ)
- ・直流電流源 (RS PL シリーズ)

洗浄試験は、Wascator FOM71 CLS 洗濯機を使用して、国際規格 ISO 6330:2000 の手順に従っています。ナノテクノロジーの発展と e-テキスタイル分野への応用によって導入された中間的なアプローチとして、繊維 (綿、ポリエステル、ナイロン) に銀ナノワイヤー (Ag NWs)、言い換えれば、巨大なアスペクト比の単結晶銀フィラメント、典型的には長さ $15\mu\text{m}$ 、直径 35nm でコーティングする方法があります。適切に NW のネットによって繊維繊維をコーティングし、 150°C で 15 分間アニーリングすることにより、ネットワークの部分的な焼結と NW を介して伝導ブリッジの形成を得ることができます。これにより、電気信号/エネルギーを伝えることができ、200 回の曲げサイクルに耐えることができ、5 回の洗浄サイクル後に変化しない特性を有することができる $8\Omega/\text{m}$ に達する、コンフォーマルな、部分的に透明でありながら、柔軟性のあるコーティングを実現することができます (図 4.4 参照)。次の統合レベルに進むと、現在、導電性糸を布地に織ったり、縫ったり、刺繍したりすることで電気特性を実現していると考えられる。導電性糸を織物に組み込むには、原則として標準的な製造方法が用いられています。

- ・従来のワイヤーや導電糸を手作業で取り付けの方法では、針を使って繊維に導電糸を通すことで導電性を持たせています
- ・導電性糸の機械刺繍、糸を別の糸で織物の表面に固定する方法

・非導電性繊維を導電性繊維に置き換える方法

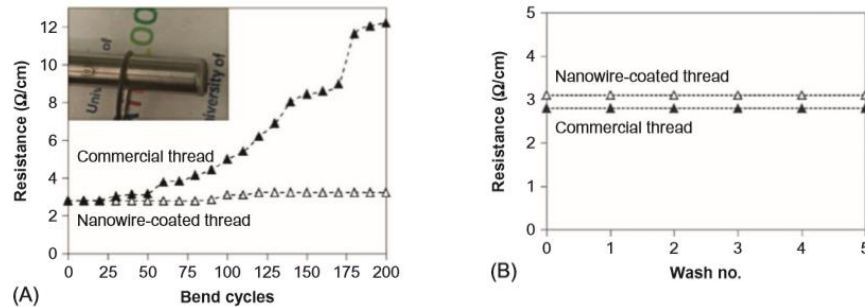


Fig. 4.4 Resistance of a NW-coated nylon thread and commercially available conductive thread after cycling of repeated bends over a 6 mm radius of curvature (A) and of repeated washings (B).

これらの方法では、導電糸は、このように、織物が作られた後、あるいは製品が実際の形状を受けた後に適用される。その代わり、織機で織る場合には、導電糸は織物全体と同時に織られます。

原則として、テキスタイルは着用、洗濯、保管、折り畳みを目的としており、電子テキスタイルの改良は本来の特性に影響を与えないものとする。特に、電気部品と導電性糸の間の破断点や、機械的ストレス後の導電性糸の電気的特性の変化が考慮されている。図 4.5 は、単一の布地サンプル(ポリエステルをベースとした非導電性マルチフィラメント糸)と比較した、単一の導電性糸の電気的および機械的応答を、印加されたひずみの関数として示しています。さらに、研究者らは、編み目のパターンによるひずみの特性の変化を観察した。英国の Baltex 社は、織物構造物に金属線を組み込むための編み込み技術を用いている。彼らが「Feratec®」という名称で商品化している彼らの織物は、主に「発熱する」織物と電磁波シールド材の 2 つの用途に使用することができる。デンマークの Ohmatex 社は、電子機器の織物、衣類の電子導体、織物の操作パネル(ソフトキーボード、ディスプレイなど)、マイクロセンサーなどを開発している。彼らが使用している導電性糸は、銅糸に銀層をメッキし、ポリエステルでコーティングしたものである。

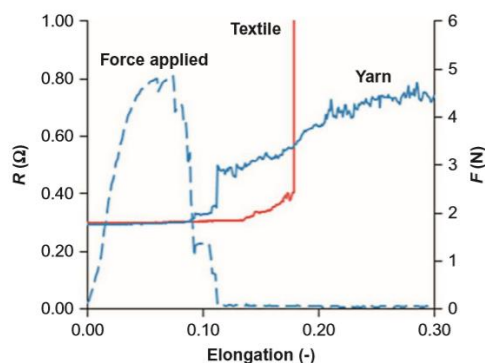


Fig. 4.5 Comparison between the resistance of conductive yarn and a textile sample versus elongation. Blue dashed line shows the force applied to both wires during the elongation phase.

4.2.5 Textile sensors

ここ数十年の間に、環境刺激に反応して繊維の機能を探り、強化するという点で大きなブレークスルーが達成されてきた。環境負荷に応じて電気的特性を変化させる導電性テキスタイルは、センサーとし

て利用することができる。スマートテキスタイルは、従来の繊維材料の特性を持ちながら、付加的な機能価値を持たせたものである。代表的な例としては、圧力センサー、ストレッチセンサー、呼吸センサーなどの変形に反応するテキスタイルがあります。テキスタイルセンサの容量性または抵抗性の挙動など、同じ目的に到達するために異なる物理的原理が採用されている。一方、生化学センサ、光学センサ、温度センサ、湿度センサ、生体電位センサは、スマートテキスタイルで作ることができる。

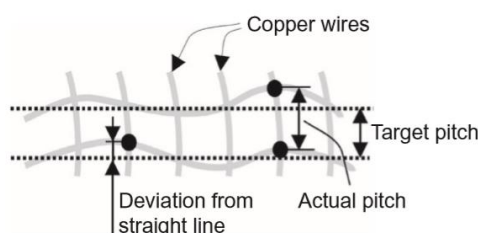


Fig. 4.13 Misalignment of the contact points with the target pitch.

4.2.5.1 Pressure sensors

織物や衣服に組み込まれた局所的な圧力検出や分散型圧力は、いくつかの応用分野で利用されている。ヘルスケアやスポーツの分野では、靴に埋め込まれた圧力センサが歩行の分析を可能にしています。圧電抵抗型センサは、被験者の心肺パターンを監視するために自動車の安全ベルトにも応用されている。リハビリテーション、例えば、脳卒中後のリハビリテーションでは、四肢の制御された動きが必要であり、対応する筋肉に取り付けられた圧力センサは、その活動と行動を監視する。圧痛(脱圧)を防ぐために、圧力センサは身体の脆弱な部位を監視し、着用者へのタイムリーなフィードバックを可能にします。一般に、これらのセンサは、編物中のCP、PDMS、およびシリコンからなる複合体のコーティングで作られている。触覚センシングアプリケーションは、通常、容量性織物で使用される。それらの電気的挙動は、材料センシング組成物および使用される読み出し回路に依存する。一般に、ファブリックコンデンサは、図 4.14 に示すように、誘電体材料によって分離された 2 つの異なる電極プレートから構成されています。導電部、すなわち電極は、導電性の糸の場合は縫製、織布、刺繍、導電性の材料がインクの場合は塗装することができます。誘電体材料としては、通常、合成発泡体、布帛スパーサー、ポリマーなどが用いられる。原理的には、感知部に加えられる圧力は、静電容量の変動または圧電共振周波数の変化を発生させる。静電容量式センサの場合、寄生容量と抵抗の変化は電子機器によって補償されるため、配線は感知された信号にわずかな影響を与えます。さらに、センサコンデンサをアレイ状に配置することで、マトリクス型の分散型圧力センサを実現することができます。例えば、Meyer ら(2006)は、上腕の筋肉の活動を検出するために、いくつかの静電容量式圧力センサとマトリックスを衣服に統合しました。その代わりに、Xu ら(2013)は、臨床目的で座位姿勢を分析するために圧力センサーアレイを使用しました。抵抗性アプローチを採用し、交差する刺繍された導電性系のグリッドで作られた圧力センサーは、圧力が加えられると交差する糸の接触抵抗を変化させる。導電性弾性糸を用いても同様の結果が得られる。これらの糸は、圧力をかけた後にセンシング材料の形状を変化させることで、電気抵抗の変化に反応する「テキスタイルチャンバ」に組み込まれている。圧力に関しては、0~2MPa の圧力範囲で約 3Pa の感度が得られている。図 4.15 は、上層と下層の歯の形状

がセンシング生地を変形させ、その固有の電気特性を変化させる動作原理を示しています。

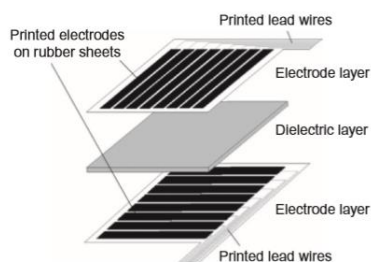


Fig. 4.14 The electrodes on the two-electrode layers are oriented orthogonally and each crossing point of the two perpendicular electrode arrays makes up a capacitive sensor cell on the sheet.

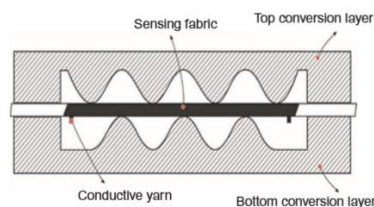


Fig. 4.15 Tooth-structured resistive fabric pressure sensor. From Wang, Y., et al., 2011. Novel fabric pressure sensors: design, fabrication, and characterization. Smart Mater. Struct. 20 (6), 65015.

この種のセンサは、異なるレベル、すなわち、繊維、糸、またはコーティングで製造することができる。特に発泡体は、接触時にコンダクタンスを変化させることができる導電性インクによって実現された追加の表面コーティングのおかげで、圧力に敏感になることができます。イタリア工科大学マイクロバイオリボティクスセンター（イタリア、ピサ）のチームは、市販の導電性布のみをベースにした複合容量性 3 軸センサーを製作し、操作下での高いコンプライアンスと安定性を実証しました。特性評価。表面形態は、JEOL JSM-7001F 電界放出 SEM を用いて調べ、FTIR スペクトルは Bruker Vertex 70 FT-IR 分光計を用いて測定した。導電性繊維中の銀の重量分率を熱重量分析 (Q50、TA インストルメント) を用いて評価し、USTER TENS RAPID 4 を用いて機械的強度試験を行った。静電容量測定は、Agilent E4980A, Precision 3 LCR Meter を用いて、周波数 300kHz で 1V の交流信号で行った。力とその周波数は、主に 0.01 N の分解能を持つ Teraleader のユニバーサルマニピュレータで制御しました。Lee ら (2015) は、Agilent E4980A (300 kHz、1 V AC 信号) と結合された 0.01 N の分解能を持つ Teraleader のユニバーサルマニピュレータを用いて提供される高感度 (0.21-1 kPa)、安定性 (3000 回の曲げ試験に対する)、高速応答、および緩和時間を備えた織物ベースの圧力センサについて説明しています。織物は、誘電性ゴム材料でコーティングされた (0.00015 Ω/m) 高導電性繊維をベースにした。この導電性繊維は、ポリ(p-フェニレンテレフタルアミド) (ケブラー) 繊維の表面にポリ(スチレン-ブタジエン-スチレン) ポリマーをコーティングした後、膨大な量の銀 (Ag) イオン (80 wt%) を SBS ポリマー中で直接 Ag NP に変換することで作製しました (図 4.16)。

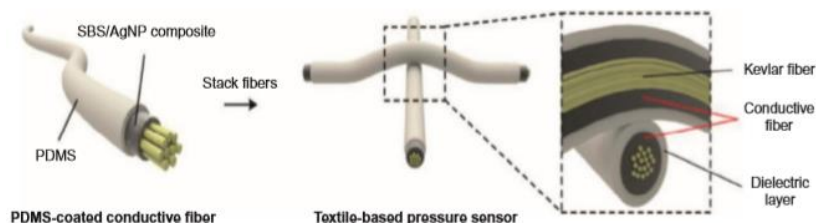


Fig. 4.16 Schematic illustration of the fabrication of the pressure sensor from a single sensing fiber to their implementation.

4.2.6 Textile energy harvesting systems

一般に、e-テキスタイル技術は、センサ、読み出し回路、および組み込み通信システムなどの複数の電子部品をホストしている。これらの電子部品はすべて電源を必要とし、電池や外部電源リンクはウ

ウェアラブルシステムの限界である。機械的な安定性、嵩高性、寿命は、外部エネルギー源を使用することのいくつかの負の側面に過ぎない。これらの理由から、ウェアラブルシステムは、運動、筋肉のストレッチ、熱流、または生化学的変化として、人体から散逸したエネルギーを収穫することができるものでなければならない。私たちの体はウェアラブルデバイスにとって完璧なエネルギー源であり、特に、体の動きのようないくつかの日常的な動作は、センサーや/またはウェアラブル電子部品に電力を供給するのに十分なエネルギーを生成することができます。表 4.2 は、人間の身体活動に利用可能な電力の平均値を示している (Wang, 2008)。マイクロ (MEMS) およびナノスケール (NEMS) で設計されたウェアラブル電子デバイスは、必要とされるエネルギーが非常に低いため、人体から電力を供給できる可能性がある。例えば、インフィニオンは現在、圧電材料を用いてジャケットに内蔵された Mp3 プレーヤーに電力を供給するために、体の動きによってエネルギーを回収しようとしている。圧電効果は、振動から機械的エネルギーを電気に変換するための実現可能な技術であり、織物の繊維から約 0.7mW の電力に達する。この効果は、ポリフッ化ビニリデンとそのコポリマーのような高分子圧電材料を使用することで有効に利用できる。人体相互作用の主な問題は、典型的な機械的運動の低周波 (<10 Hz) であり、低パワーハーベスティングにつながる。一方で、体温はもう一つの利用可能なエネルギー源である。Feinaeugle ら (2013) は、柔軟性のある繊維基板上に Ni-Ag 薄膜を蒸発させて作製した繊維ベースの熱電発電機を使用し、2 nW の最大パワーハーベスティングを実証した。半導体ナノワイヤは熱電特性に有望性を示しているが、新しい高度な製造技術を開発する必要がある。もう一つの技術は、新世代のフレキシブル太陽電池を通して太陽エネルギーを収穫するソーラーウェアに代表される柔軟性のある太陽電池を衣類に組み込むことで、携帯用電子機器に電力を供給することができる。

Table 4.2 Available power generated daily by human body activities for a 68kg adult (Wang, 2008)

Energy source	Available power
Footfalls	67 W
Arm motion	60 W
Body heat	2.4–4.8 W
Exhalation	1 W
Blood pressure	0.93 W
Breathing band	0.83 W
Finger motion	6.9–19 mW

今日では、携帯機器のエネルギー需要は十分に低く、衣類に内蔵された太陽電池がほとんどの携帯電子機器に電力を供給できるようになっている。織物のエネルギー貯蔵を可能にするためには、織物が良好な導電性を有することが必要である。柔軟性のあるエネルギー貯蔵デバイスは、伸縮性やウェアラブルエレクトロニクスへの統合性が有望であることから、近年注目されている。特に、スーパーキャパシタは、高い電力密度、長いサイクル寿命、および短い充電時間に関連して、エネルギー蓄積デバイスとして大きな関心を集めている。最近、研究者らは、セルロース繊維を CNT (Hu ら、2010) またはグラフェン薄膜でコーティングすることにより、綿織物を導電性織物に変換するソリューションベースの技術を開発した。このような織物の 3 次元 (3D) 高表面積特性は、電解質へのアクセスを容易にし、織物スーパーキャパシタの高い電気化学的性能を可能にする。Bao and Li (2012) は、綿織物を直接変換することにより、高導電性で柔軟性のある活性炭織物 (ACTs) を作製した。

1. 1 M の NaF 溶液に綿を浸漬

2. 120℃で 3 時間の乾燥工程

乾燥したテキスタイルを横型管状炉で 800～1000℃、真空、不活性雰囲気下で 1 時間のアニール処理を行います

SEM 分析の結果、繊維は直径 5～10μm のセルロース繊維を織り込んだ織物であり、Keysight デジタルマルチメータを用いて測定した折り畳み状態での高導電性(シート抵抗 $\sim 1\sim 2\Omega/\text{m}^2$)が確認された。さらに、MnO₂を担持した状態で、電位力学的電気化学測定的一种であるサイクリックボルタンメトリー(CV)試験を行ったところ、ACT と比較して比静電容量が 3 倍に増加するなど、静電容量性能の向上が確認されました。2 mV/s のスキャンレートでは、達成された比静電容量は 269.5 F/g であり、溶液処理されたグラフェン/MnO₂ テキスタイルに匹敵するものであった。Jost ら(2013)は、編んだ炭素繊維と活性炭インクをベースに、10 mV/s で約 0.51 F/cm の静電容量を持つ織物スーパーキャパシタを開発した。彼らは、液体電解質の代わりに固体電解質を使用し、漏れの可能性を低減した。また、90 度から 180 度に曲げた場合(図 4.20)のデバイスの性能も実証した。すべての実験は、Biologic VMP3 ポテンシオスタット-ガルバノスタット(BioLogic、米国)を使用して実施した。デバイスは、2 電極対称セットアップでテストされ、CV、ガルバノスタティックサイクリング、および電気化学インピーダンス分光測定の対象とされ、以前の研究で完全に説明された手順に従った。すべてのデバイスは、20 mV s⁻¹ で 100 回の事前サイクルにさらされ、キャパシタンスと ESR の値は、サイクリング後のテストから取得しました。彼らはまた、50%の延伸下で織物スーパーキャパシタを試験し、その結果は、デバイスの寸法を変化させたときに炭素粒子間の導電性ネットワークが壊れることに起因する静電容量の小さな損失であった。一方、スーパーキャパシタと比較して、リチウムイオン電池は重量あたりのエネルギー密度がはるかに高い。容量を高めるために、3次元電池電極の概念が用いられてきた(Long et al. 近年、Hu ら(2011)は、導電性テキスタイルの 3 次元細孔に電極材料を装填した導電性テキスタイルをベースにしたリチウムイオン電池を開発した。彼らは、導電性テキスタイルの有機電解質中での安定した電位範囲を見出し、質量担持量約 168mg/cm²、厚さ約 600μm のリチウムイオン電池を効果的に実証しました。織物導体(シート抵抗 $8\Omega/\square$)は、無地のポリエステル繊維織物と、1%ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウムを添加した水中によく分散させた単層 CNT インクを用いて作製した。導電性テキスタイルは、 $\sim 0.9\sim 3.7$ V の電圧ウィンドウで電気化学的に安定であることがわかった。バイオロジック VMP3 電池試験機または MTI 電池分析装置のいずれかを使用して、織物電池を実施した。フルセルを組み立て、最初に自己放電試験の前に 5 サイクルのために 1.4 と 2.6 V の間で循環させた。電池は 2.6 V まで充電され、その後、1.4 V まで完全に放電する前に一定期間切断された。EPSRC(Engineering and Physical Sciences Research Council)の資金提供を受けたプロジェクトでは、サウサンプトン大学の電子・コンピュータサイエンス学部(ECS)の研究者が、高速印刷プロセスとアクティブ印刷インクを使用して、テキスタイルにおけるエネルギーハーベスティングフィルムを開発している。その代わりに、ユニチカ株式会社のサーモトロンは、太陽光を無駄なく蓄熱しながら熱エネルギーに変換することができる特殊な生地です。サーモトロンの内部には、炭化ジルコニウムの微粒子が入っており、太陽光を熱エネルギーに変換することで、熱エネルギーを無駄なく蓄熱することができ

る。

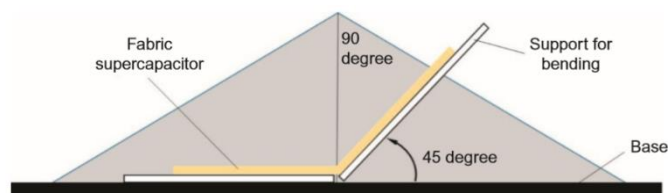


Fig. 4.20 Bending test experimental setup.

4.3 Conclusion

電子テキスタイルとは、電子機器とテキスタイルが融合して、感知、計算、通信、作動が可能なファブリックになったものである。本章では、製造と性能評価の観点から、現在の最先端の電子テキスタイルを概観した。最も効率的で高性能な電子テキスタイル構造を開発するという共通の目的を示す、テキスタイル統合のさまざまなレベルでのさまざまなアプローチを強調することが関連している。電氣的または感知特性を有する繊維、糸、または織物を実現するために採用された方法に関連して、原材料の選択は重要な役割を果たしています。繊維技術、新材料、ナノテクノロジー、および小型化された電子機器の現在の進歩は、ウェアラブルシステムをより実現可能にしているが、それにもかかわらず、ユーザがウェアラブルデバイスを受け入れるための最終的な鍵となる要因は、フィット感の快適性である。全体的に、望ましい結果は、柔軟性、着用性、快適性、洗濯性などの布地の本来の特性に影響を与えることなく、電氣的／感知機能を追加して、布地の構造と相互接続できる適切な材料を求めることである。屈曲・伸縮・洗濯時の性能低下など、いくつかの問題がまだ存在していますが、これを解決するためには、材料科学やナノテクノロジーなど、すでにリコールされている分野からの大きな貢献が必要とされています。ウェアラブル・コンピューティングのビジョンでは、将来の電子システムは、私たちの日常着の不可欠な一部として、インテリジェントなパーソナル・アシスタントとして機能すると説明されています。したがって、そのようなウェアラブル・センサーは、下地となる衣服/下地に深刻な機械的変形を課すことができる通常の着用の要求の下で、そのセンシング能力を維持しなければなりません。潜在的なアプリケーションはいくつかあり、e-テキスタイル技術は人体モニタリングと直接リンクしています。"衣服は私たちの個人的な家である"(Van Langenhove, 2007)と言われており、衣服のように人体と継続的に接触する装置は他にはない。このように、スマート素材、ウェアラブル電子機器、およびセンサーと布地との組み合わせは、特に臨床モニタリング分野において、多くのアプリケーションへの扉を開く。テキスタイルや衣服は、高速で生産性の高い機械でリーズナブルなコストで生産することができ、健康・美容業界もこれらのイノベーションの恩恵を受けています。最後に、ウェアラブルコンピューティングの背後にあるビジョンは、将来の電子システムが私たちの日常の服装の不可欠な一部となることを予見しており、回路設計、スマート材料、マイクロエレクトロニクス、化学の知識を統合して、新世代の繊維製造を理解する必要があります。