

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月 1日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22550172

研究課題名（和文） 次世代ヒューマンインターフェース構築のための伸縮性導電インクの開発

研究課題名（英文） Development of Stretchable Conductive Inks for Advanced Human/machine Interfaces

研究代表者

井上 雅博（INOUE MASAHIRO）

群馬大学・先端科学研究指導者育成ユニット・講師

研究者番号：60291449

研究成果の概要（和文）：スマートテキスタイル（E-テキスタイル）への応用を目的として、アクリル系あるいはポリウレタン系エラストマーに Ag フレークを添加した伸縮性導電インクを開発した。この導電性インクの電気抵抗率はバインダ組成に依存して変化したが、80-100 °C でキュアしたところ 20-200 $\mu\Omega\text{cm}$ の抵抗率が得られた。このインクを用いて作製した印刷配線の電気抵抗は引張ひずみが増加するにしたがって増加する傾向があった。この導電性インク配線の保護層を作製するために電氣的絶縁インクも開発した。伸縮性電子回路をこの導電性および絶縁性インクを用いて布地に印刷形成した。この印刷回路をリードとして用いることにより、日常的活動中の人からの心電モニタリングの実証実験に成功した。

研究成果の概要（英文）：Stretchable conductive inks composed of an acrylic- and a polyurethane-based elastomer containing Ag flakes were developed for smart textile (E-textile) applications. Although variation in electrical resistivity depending on the binder chemistry was apparently observed, the conductive inks exhibited very low electrical resistivities of 20-200 $\mu\Omega\text{cm}$ when they were cured at 80-100 °C. The electrical resistance of the printed wires increased with increasing elongation. An insulative ink was also prepared to be used for cover layers of wires made of the conductive inks. Stretchable circuits were formed using the electrically conductive and insulative inks on fabrics by the additive printing method. Electrocardiograms (ECG) were successfully monitored using the printed wires as leads from human bodies during normal activities of daily life.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：電子実装材料工学

科研費の分科・細目：材料化学・有機工業材料

キーワード：E-テキスタイル，導電インク，伸縮性導体，印刷工法，生体信号計測

1. 研究開始当初の背景

近年、スマートフォンやタブレット PC などに代表されるように電子デバイスのポータブル化が急速に進行した。さらに、腕時計型や眼鏡型などのウェアラブルデバイスも開発され、アンビエント・エレクトロニクスの実現に向けた大きな潮流の中でデバイスが継続的に進化している。このような潮流に呼応して、軽量で柔軟性に富み、場合によっては伸縮性を有するデバイスの実現に対する要望が高まりつつある。

次世代のヒューマンインターフェースとして注目されているものの一つに E-テキスタイル (スマートテキスタイル) がある。E-テキスタイルは、衣類の中に電子デバイスを組み込んだ新しいタイプのマイクロシステムと捉えることができ、様々なウェアラブルデバイスを実現するための一つの手段となることが期待されている。現在、衣服に多数の LED を実装した電飾衣装などが試作されるとともに、エネルギーハーベスティング応用を目的とした発電スーツなどの開発が進められている。しかし、布地に電子回路を形成するための材料や実装技術に関して多くの課題が残されているのが実情である。

2. 研究の目的

通常の E-テキスタイルでは、導電性繊維を編み込むことにより電子回路を形成している。しかし、多様な回路の作製に対応するためには、編み込み式回路形成とアディティブ印刷法を組み合わせることも必要となってくると考えられる。本研究では、 Apparel 印刷に適合した電氣的絶縁性および導電性 (樹脂結合型) インクを用いた布地上への印刷回路形成について報告する。

また、この印刷プロセスで作製したストレッチャブル電子回路を利用して、日常生活環境下で活動中の健常者からの生体信号計測の実証実験を行った。実証実験のポイントは下記の 2 点である。

従来から行われてきた生体信号計測では、皮膚に固定された電極から計測機器をつなぐ多数の配線ケーブルによって被験者の活動が制限を受ける。また、被験者が運動を行う場合、ケーブルが動いたり、変形する過程でノイズが発生し、生体信号計測を正確に行うことができなくなる問題もある。被験者の運動やケーブルの変形によるノイズ発生状況の調査が 1 つ目のポイントである。

さらに、実際に生体信号計測を実施する際、被験者の発汗等により衣服が濡れ、配線間にリーク電流が生じるため、計測が不可能になる恐れがある。そこで、食塩水や人工汗液中での印刷配線の絶縁耐性試験や、これらの液体で濡らした印刷配線付き衣服を着用した

際の実験結果を報告し、生体信号計測の可否を検証した。

3. 研究の方法

(1) インクの調整

アクリル系とウレタン系バインダを用いて、絶縁インクおよび導電インクを調整した。絶縁インクはバインダ樹脂をそのまま用いることもできるが、絶縁性フィラーを添加することで隠ぺい性や塗工性をコントロールした。

また、導電インクのフィラーとしては Ag フレークとアセチレンブラックを使用し、これらのフィラーを所定量添加することにより Ag インクと C インクを調整した。

これらのインクは、100~120 °C で 10~20 min でキュアすることが可能であることを確認した。

(2) 伸縮配線の印刷形成

本研究では、印刷法としてステンシル印刷法を用いた。印刷形成プロセスの概略を図 1 に示す。まず、下地になる絶縁層を印刷後、仮キュアを行った。さらに、その上で Ag インク配線の印刷・仮キュアを行った後、上部の絶縁層を印刷し、最終的に 100 °C、20 min の条件で完全キュアした。

また配線端部については、Ag インク配線上に C インクを印刷することで、Ag フィラーの硫化等を防止する保護電極を形成した。

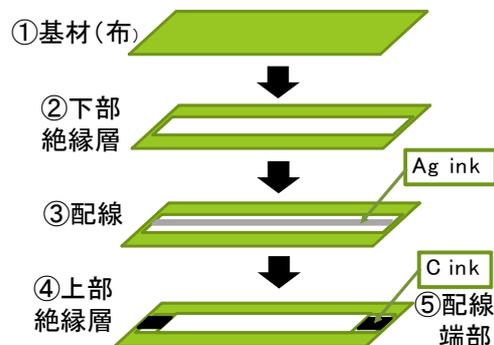


図 1 布地への配線の印刷形成プロセス

(3) 衣服への回路形成と生体信号計測

双極標準肢誘導法により心電計測を行うため、Einthoven の三角形を形成する 3 つの電極が適正な位置に配置できるように伸縮配線を衣服に印刷形成した (図 2)。電極は直接、衣服に印刷形成することも可能である。本研究では市販のフレキシブル電極を使用する方法と印刷電極を使用する方法の二通りの実証実験を行った。

また、反対側の配線端部は、市販の医療用

ケーブルを介して、携帯型計測器を接続した。この計測機器からパソコンに無線通信することで心電計測データを取得した。



図2 試作した生体信号計測用 T-シャツ (印刷電極を使用) の一例 (T-シャツを裏返して撮影した写真)

4. 研究成果

(1) 導電インクの電気伝導特性

導電インクの電気伝導特性は様々な因子によって調整可能であるが、今回はバインダケミストリを主体とする材料設計を行った。

例えば、2種類のアクリル系バインダに同じ Ag フレークを添加したインクを 100 °C、20 min の条件でキュアした場合の電気抵抗率と Ag フレーク添加量の関係 (伸縮率 0%) を図 3 に示す。この図に示した binder 1 を用いたインクの場合、50~65 wt% の Ag フレーク添加量でも 50~200 $\mu\Omega\text{cm}$ の抵抗率を示した。今回の心電測定用リードのように比較的高い配線抵抗が許容できる場合には、配線の伸縮性の観点から Ag フレーク添加量を低めに設定することが望ましいので、このような電気伝導特性を有するインクが有利である。

一方、binder 2 を用いたインクでは、Ag フレーク添加量が低い場合には高抵抗率を示すが、80 wt% 程度の添加量になると 20

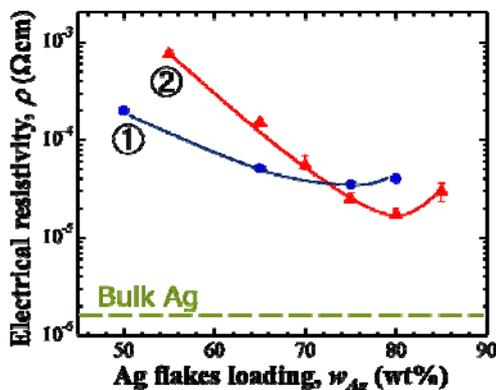


図3 2種類のアクリル系バインダを用いた導電性インクを 100 °C でキュアした場合の電気抵抗率 (伸び: 0%)

$\mu\Omega\text{cm}$ 以下の抵抗率が得られた。

このように 80~100 °C 程度のキュア温度で 10~20 $\mu\Omega\text{cm}$ 程度の比較的低い電気抵抗率を示す樹脂結合型 Ag フレーク含有インクは、アクリル系だけでなくウレタン系も含めたいくつかのバインダ配合組成で作製することが可能になっている。これらのインクは、比較的低い配線抵抗が必要とされる伸縮配線を形成する際に有利となると考えられる。

目的に応じて適切な配合のインクを使い分けることにより、多様な伸縮性回路形成が可能になると思われる。

(2) 印刷配線の伸縮特性

E-テキスタイルで使用する電子回路では、被着者の動作に追従して伸縮することが必要とされる。図 4 に、図 3 に示した binder 1 を使用したインク (Ag フレーク添加量 65wt%) で作製した配線の電気抵抗と引張りずみ (伸び) の関係を示す。電気抵抗は伸びが増加するとともに増加する傾向があった。また、引張のサイクル数が増えるにしたがって、電気抵抗の絶対値も上昇することがわかった。

今後は印刷配線の疲労特性の評価を進め

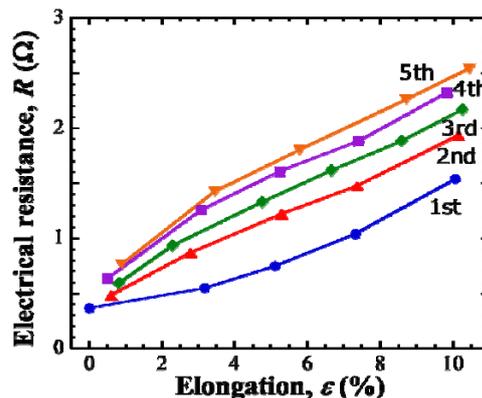


図4 導電性配線サンプル (3mm×45mm×50 μm , 配線ターミナルは C インクで封止) の電気抵抗と伸びの関係

て行く必要があるが、E-テキスタイルにおける疲労試験の評価基準は未だ決められていない。配線の疲労劣化現象を詳細に解析し、疲労試験の評価基準を決定する必要がある。

また、配線の疲労特性は、バインダ配合組成、フィラーの形状、粒径、添加量などによって変化するので、疲労耐性を改善するという観点からインクのマテリアル設計を見直していく必要があると考えられる。

(3) 布地上に形成した伸縮配線の絶縁特性

重ね刷り印刷により布地上に形成した伸縮性配線を心電計測用リード配線として使用する場合、上下の絶縁インク層の絶縁特性は重要である。人体のインピーダンスが数百

k Ω 程度であることから、リード配線間の電気抵抗が少なくとも数 M Ω 以上でなければ人からの生体信号を正確に取得することはできない。

また、通常のエレクトロニクス製品とは異なり、衣服に印刷したリード配線を用いる場合には、被験者の発汗等により衣服がイオン性成分などの不純物を多く含む水で濡れることを想定する必要がある。

そこで、我々は、絶縁層に使用するインクのスクリーニング試験として、2本の伸縮性配線を一定間隔で形成し、食塩水や人工汗液に浸漬しながら配線間に一定の電位差を与えることで配線間抵抗測定を実施した(図5)。

この試験によって数 M Ω 以上の配線間抵抗

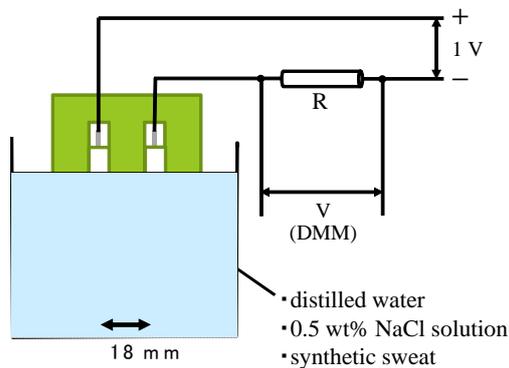


図5 配線間電気抵抗測定の概略

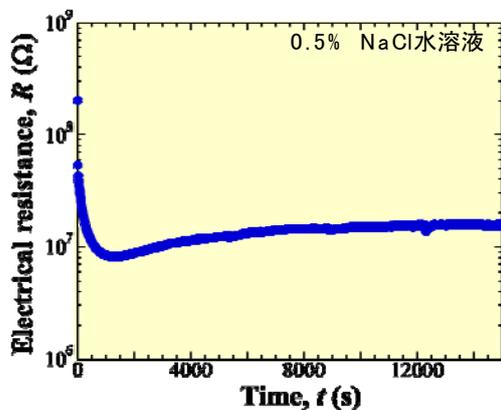


図6 配線間電気抵抗測定結果の一例 (0.5wt% NaCl 水溶液中での測定)

が確保できると判断されたインクを生体信号計測の実証実験に使用した。図6に、このスクリーニングテストをパスしたサンプルの測定結果を示す。この場合、試験開始直後から初期ドリフトが起こったが、やがて配線間抵抗は安定し、十分な絶縁性が確保できると判断することができた。

(3) 人からの心電計測の実証実験

木綿製のシャツの内側に伸縮性リード配線を印刷形成し、端部にフレキシブル電極と携帯型計測機器を接続した。このシャツを被験者に装着させ、心電計測を実施した(図7)。その結果、被験者が静止している状況下ではノイズ等の影響がない、きれいな心電波形を得ることができた(図8)。

本計測システムの開発目的は、日常生活で

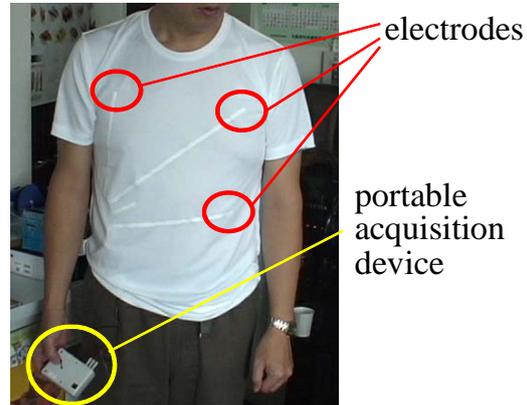


図7 心電測定実験の様子

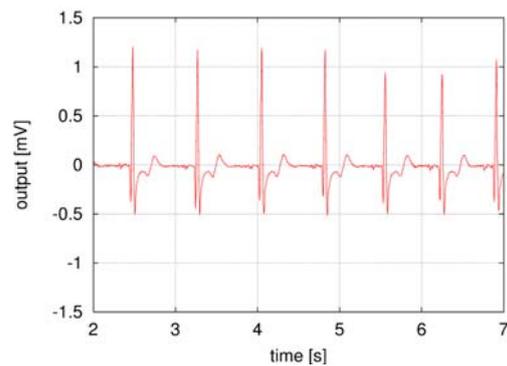


図8 静止状態の被験者から得られた心電波形

活動中の人からの生体信号計測を実現することにある。そこで、心電計測中にシャツを伸縮させることで人為的に配線を変形させ心電波形の状態を調べた。図9に示すように配線を変形させた場合でも心電波形が乱れることはなかった。また、印刷配線周辺部を人工汗液で濡らした場合にも心電波形の乱れは見られなかった。

今回の検証実験では、ジャンプなどのやや激しい動作の場合、筋電も同時に検出されることになる(ノイズによって波形が乱れるのではない)ので心電波形の医学的診断が難しくなる場合があった。医学的応用を実現するためには、測定データから筋電と心電を分離して抽出するためのアルゴリズムの開発も必要である。

5. 主な発表論文等

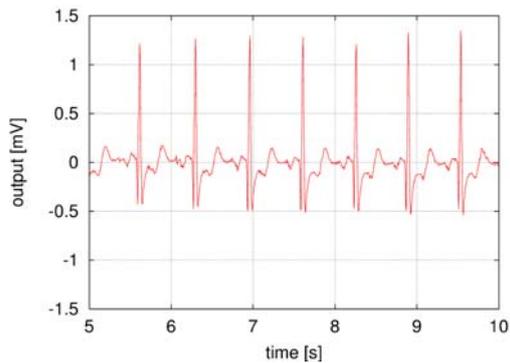


図 9 印刷配線を伸縮させながら測定した心電波形

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

① 多田泰徳, 井上雅博, 導電性インク電極を用いた心電測定用肌着, 2013 マイクロエレクトロニクスショーアカデミックプラザ, 2013. 6. 5, 東京ビッグサイト (東京)

② M. Inoue, Y. Tada, T. Tokumaru, Electrically Conductive and Insulative Inks for Additive Printing Process of Smart Textiles, International Conference on Electronics Packaging 2013, 2013. 4. 12, Osaka International Convention Center (Osaka, Japan)

③ Y. Tada, M. Inoue, T. Tokumaru, A Characteristic Evaluation of a Conductive Ink Wire Suited for Measuring the Biological Signal, International Conference on Electronics Packaging 2013, 2013. 4. 12, Osaka International Convention Center (Osaka, Japan)

④ 井上雅博, 多田泰徳, 得丸智弘, アディティブ印刷法を利用したスマートテキスタイルシステムの開発と生体信号モニタリングへの応用, 第 27 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2013. 3. 14, 東北大学 (仙台)

⑤ M. Inoue, Y. Tada, Y. Hayashi, H. Muta, T. Tokumaru, Development of Highly Conductive Inks for Smart Textiles, The 14th International Conference on Electronic Materials and Packaging, 2012. 12. 15, Citygate, Lantau Island, (Hong Kong, China)

⑥ 多田泰徳, 井上雅博, 得丸智弘, 着衣型生体信号計測装置に用いる導電性インク配線, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会, 2012. 9. 20, 札幌コンベンションセンター (札幌)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 導電性ペースト
 発明者: 井上雅博, 多田泰徳
 権利者: 国立大学法人群馬大学
 種類: 特許
 番号: 2013-013735
 出願年月日: 2013. 1. 28
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:
 発明者:
 権利者:
 種類:
 番号:
 取得年月日:
 国内外の別:

[その他]
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 雅博 (INOUE MASAHIRO)
 群馬大学・先端科学研究指導者育成ユニット・講師
 研究者番号: 60291449

(2) 研究分担者

牟田 浩明 (MUTA HIROAKI)
 大阪大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 60362670
 林 大和 (HAYASHI YAMATO)
 東北大学・工学研究科・准教授
 研究者番号: 60396455

(3) 連携研究者

()

研究者番号: