

【公開版】

令和元年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「縫製及び洗濯耐久性に優れたスマートテキスタイル向けセンサー用
並びに配線用導電性縫い糸の開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

目 次

第 1 章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究開発の背景	1
1-1-2 研究目的及び目標	1
1-1-3 目的及び目標に対しての実施結果	4
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	7
1-2-1 研究組織・管理体制	7
1-2-2 研究者・協力者	8
1-3 成果概要	10
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本論	11
2-1 I.センサー用導電性縫い糸	11
【1. めっき被膜強度の強化の課題への対応】	11
【1-1】プラズマ処理による被膜強度強化	11
【1-2】超臨界流体処理によるめっきの核付けによる皮膜強度強化	11
【2. めっき斑の解消の課題への対応】	12
【2-1】超音波による振動	12
【2-2】還元剤の種類、処理温度と分割投入	13
【2-3】実機検証装置の設計と試作	16
【3. 実証検証】	17
2-2 II.配線用導電性縫い糸	18
【1. 繊維内部での導電性及びその耐久性の確保の課題への対応】	18
【1-1】導電性の確保	18
【1-2】還元分解の手法	18
【1-3】より安価な金属錯体の選定	18
【1-4】金属錯体との同浴染色	19
【2. 炭酸ガス回収に関するプロセス技術の開発の課題への対応】	19

【3. 実証検証】	19
2-3 Ⅲ.製品実証	19
【1. 製品での配線機能評価】	19
【2. 製品でのセンサー機能評価】	20
第3章 全体総括	20
3-1 複数年の研究開発成果	20
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	21

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

スマートテキスタイル分野は、日本国内繊維産業の成長期に先行して構造改革を成し遂げたヨーロッパの繊維産業においても、行政のバックアップの元、活発に展開されている分野であり、日本国内においてもウェアラブル繊維としての開発が注目されている。また、日仏繊維協定の中でも、スマートテキスタイルの研究開発や、標準化、リサイクルなどで活発な情報交換や議論を行うなど、積極的に取り組んでいる分野でもある。

また、市場としては、米調査会社によると、センサーなどハイテクを織り込んだ「スマートテキスタイル（布地）」は2018年までに20億ドル市場に育つとされていた。

求められる機能としては、①センシング、②エネルギー、情報などの生成、伝達、③環境変化に応じた性状変化、④特殊条件への高度な対応といった用途に分けられ、夫々、衣料、産業、生活分野に適用されている。

1-1-2 研究目的及び目標

株式会社フジックスが目標としているのは、繊維そのものがセンサー機能や配線としての機能を担うことである。スマートテキスタイル普及への課題として、バイタルセンシング等のセンサー部の洗濯耐久性や、デバイスと電源等との配線コードが阻害する着心地の問題がある。本研究では新技術を用いた研究を通じ、これらを解決するため、①堅ろうな金属皮膜を有するセンサー用及び、②繊維内部に導電性を持ち、その縫い目を通じてセンサー部と電源等とを接続する配線用の導電性縫い糸を開発し、衣料のみならず、医療、健康分野を含む幅広い産業分野に貢献するものである。

【研究目標】

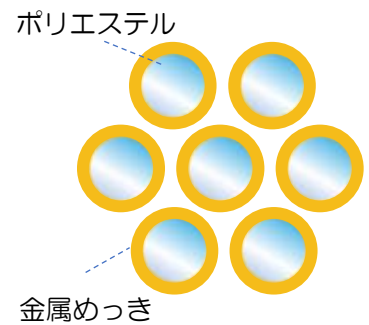
本研究開発は、フィルムなどに適用されてきた金属ナノ粒子接合技術を縫い糸（繊維）に拡大するものであり、縫製や洗濯により金属被覆膜が剥がれ落ちない対応を図ることや、金属ナノ粒子接合技術や超臨界二酸化炭素流体処理技術により、従来の有害物質を用いるめっきや水を使うプロセスと比較し、乾燥や排液処理を低減させた環境にやさしいプロセスを実現するものである。

具体的には以下の新技術開発への取り組みを通じて、実現を図る。

I. センサー用導電性縫い糸

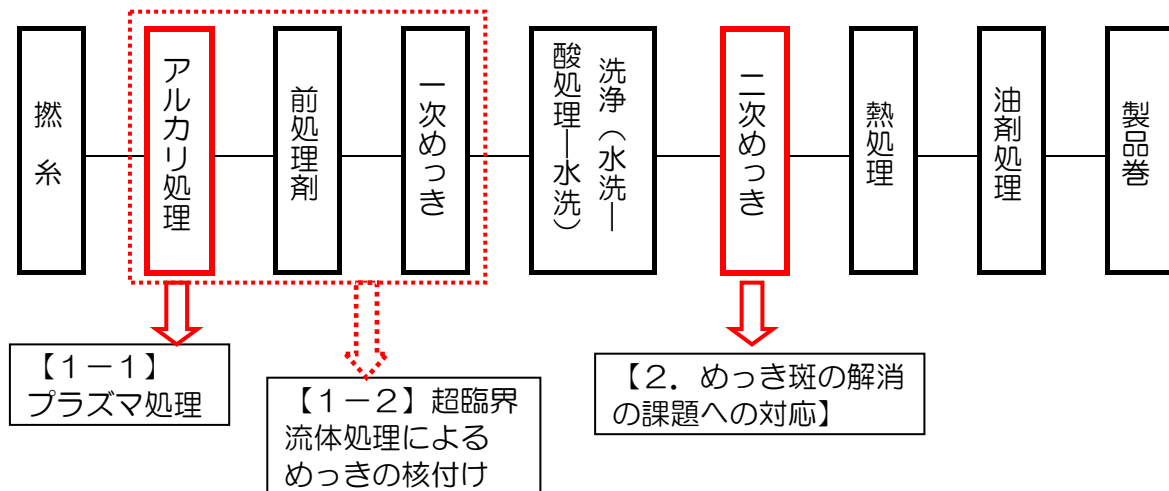
各々の課題への対応として、下図に示す株式会社フジックスと大阪府立大学とが共同で取り組んだ工程に関して、繊維と金属との密着性を高めるため、「アルカリ処理」を【1-1】プラズマ処理へ置き換えることや、「アルカリ処理～一次めっき」までを【1-2】超臨界流体処理によるめっきの核付けへと置き換えるべく、条件の最適化を研究する。

また、「二次めっき」の部分については、前工程との条件と組み合わせながら、処理条件の最適化を図る。



センサー用導電性縫い糸

《今までの取り組みにおける課題》



【1. めっき皮膜強度の強化の課題への対応】

【1-1】プラズマ処理による皮膜強度強化、【1-2】超臨界流体処理による核付けによる皮膜強度強化 における条件の最適化を図る。

【2. めっき斑の解消の課題への対応】

【2-1】超音波による振動 では、繊維同士の接触する部位において、めっき液の浸透を促進するため、超音波の周波数、強度、時間などについて最適条件を詰める。

【2-2】還元剤の種類、処理温度と分割投入 では、めっき液による皮膜化が徐々に進行するよう、還元剤の種類を検討すると共に、処理温度を 5℃～35℃程度の範囲で、分割して還元剤を投入する方向で、条件を検討する。

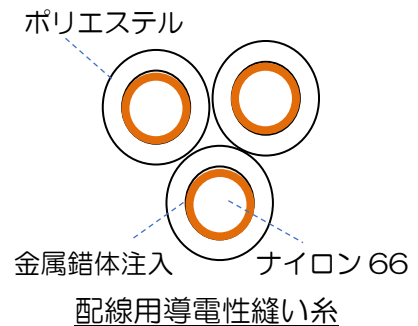
また、【2-1】、【2-2】の検討を進めるにあたり、【2-3】実機検証装置の設計と試作を行い、めっき斑解消への効果を検証する。

【3. 実証検証】

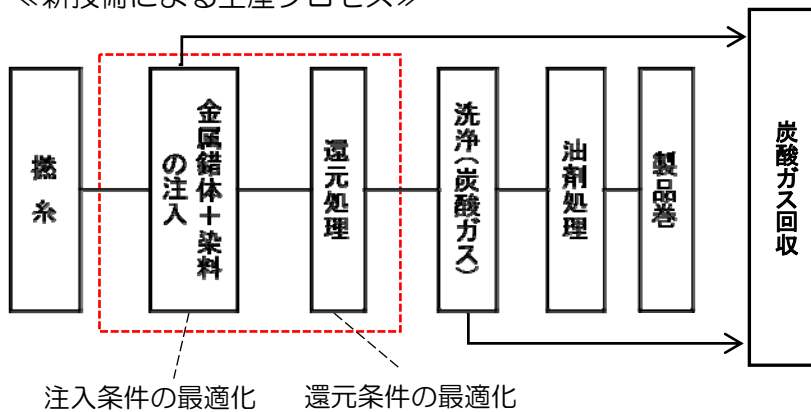
センサー用導電性縫い糸を用いて、刺しゅうミシンでセンサー部を形成し、センサー機能の実証試験を行う。

II. 配線用導電性縫い糸

繊維内部に導電性を持つ配線用導電性縫い糸は、右図、二層構造となるマルチフィラメントに超臨界二酸化炭素流体を用いて金属錯体を注入した後、金属のみを繊維内部に残すことで導電性を確保する。



《新技術による生産プロセス》



【1. 繊維内部での導電性及びその耐久性の確保の課題への対応】

新技術による生産プロセスにおける【1-1】導電性の確保、【1-2】還元分解の手法、【1-3】より安価な金属錯体の選定、【1-4】金属錯体との同浴染色の検討を行う。

【2. 炭酸ガスの回収プロセス技術の開発】

既設の超臨界流体処理試験装置へ回収試験装置を接続する形で、炭酸ガスを回収し、再利用できる循環型試験プラントの確立を図る。これを用いて、炭酸ガスと金属錯体や染料の残物との分離条件を検討し循環プロセスを確立することで、環境影響の少ないプロセス技術を確立する。

【3. 実証検証】

配線用導電性縫い糸を用いて、縫製後及び洗濯後、バギング試験後の導電性について検証を行う。

III. 製品実証

【1. 製品での配線機能評価】、【2. 製品でのセンサー機能評価】を行う。

1-1-3 目的及び目標に対しての実施結果

センサー用としては、初期の電気抵抗値 $8\Omega/\text{cm}$ 以下を達成し、また、刺しゅうしたセンサー部を洗濯 30 回した後の電気抵抗値は、金めっきにおいて、 $20\Omega/\text{cm}$ 以下を達成した。

また、配線用としては、目標の $20\Omega/\text{cm}$ 以下の達成は成らなかったが、導通が全く得られないところからスタートし、 $2.1 \times 10^4\Omega/\text{cm}$ を得るに至ったことから、電気抵抗値の向上に目途が立ったと考えている。更には、負荷試験として縫製及びバギング試験（500 回繰り返し曲げ伸ばし）に加え洗濯 30 回を行っても、電気抵抗値は $1.0 \times 10^5\Omega/\text{cm}$ に留まり、負荷試験後もセンサー系を刺しゅう電極として配線用導電性縫い糸と組み合わせ、心電計測が可能なことを確認した。

各開発項目での目標値と、それに対する実績を以下に示す。

センサー用導電性縫い糸については、金めっきにおける最終実績をまとめた。また、配線用導電性縫い糸については、芯部にカーボンを有する二層構造糸を用いた場合の最終実績をまとめた。

I. センサー用導電性縫い糸

開発項目	目標値	実績
<p>【1. めっき皮膜強度の強化の課題への対応】</p> <p>【1-1】プラズマ処理による皮膜強度強化</p> <p>【1-2】超臨界流体処理による核付けによる皮膜強度強化</p>	<ul style="list-style-type: none"> 初期段階での電気抵抗値 $8\Omega/\text{cm}$以下 摩擦試験機（抱合力試験機）にて 200 回～500 回往復後に、電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$以下を保持 	<ul style="list-style-type: none"> 初期抵抗値；ラボ試験レベルにおいて $8\Omega/\text{cm}$以下を達成した。更には、超臨界流体処理を通じてのスケールアップ試験においても、$8\Omega/\text{cm}$以下を達成した。 プラズマ処理、超臨界流体処理共に摩擦試験後の電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$以下を達成した。
<p>【2. めっき斑の解消の課題への対応】</p> <p>【2-1】超音波による振動</p> <p>【2-2】還元剤の種類、処理温度と分割投入</p> <p>【2-3】実機検証装置の設計と試作</p>	<ul style="list-style-type: none"> 試験糸をカードに巻き、めっき斑を変退色スケールで評価し、3-4 級以上を確保 縫製に伴う負荷後、電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$以下を保持 外観上の金属剥離、電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$以下を保持 	<ul style="list-style-type: none"> めっき斑 3-4 級以上を達成。 刺しゅう後に洗濯を行った結果、電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$以下を達成した。 外観上の金属剥離に伴う断線は 3%に抑制され、電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$以下を保持した。

<p>【3. 実証検証】</p>	<ul style="list-style-type: none"> 縫製に伴う負荷後、電気抵抗値 20Ω/cm以下を保持 試作水準毎の筋電位計測の可否を検証し、電気抵抗値との相関を取る。 KES の曲げ試験機を用いて、無電解めっきの繊維等との風合いの対比を行い、どれだけ上回るのか評価する。 	<ul style="list-style-type: none"> 刺しゅう後も電気抵抗値 20Ω/cm以下を達成し、断線も認められなかった。 刺しゅう機を用いて刺しゅう電極を作製し、心電計での計測が可能であること確認した。 KES 曲げ試験機を用いた風合い評価を行った結果、未処理のものよりも、曲げ剛性並びに歪特性の値が低く、無電解めっきにおいては、未処理よりもこれらの数値が高くなったことから、今回開発した導電性縫い糸は柔らかさにおいて優れ、風合い評価の目標を達成した。
------------------	---	---

II. 配線用導電性縫い糸

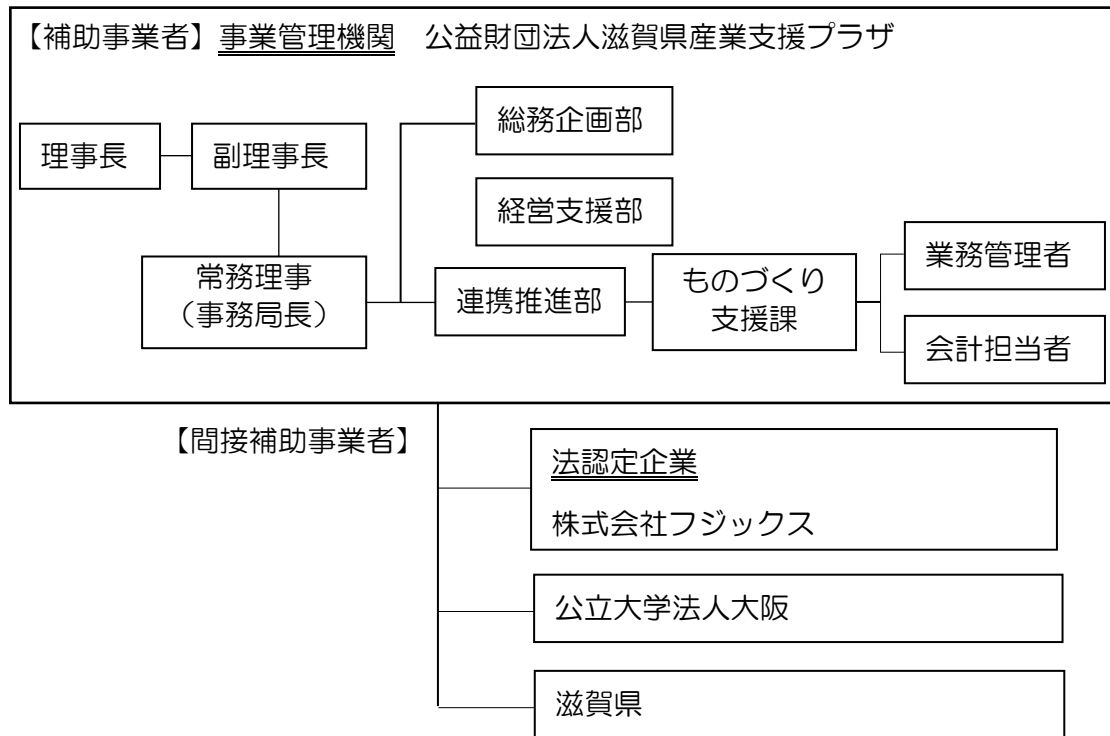
開発項目	目標値	実績
<p>【1. 繊維内部での導電性及びその耐久性の確保】</p> <p>【1-1】導電性の確保</p> <p>【1-2】還元分解の手法</p> <p>【1-3】より安価な金属錯体の選定</p> <p>【1-4】金属錯体との同浴染色</p>	<ul style="list-style-type: none"> 初期段階での電気抵抗値 8Ω/cm以下 縫製に伴う負荷後、電気抵抗値 20Ω/cm以下及び繊維表面における絶縁性を保持 家庭用洗濯 JIS L103号を 30 回に伴う負荷後、電気抵抗値 20Ω/cm以下及び繊維表面における絶縁性を保持 ※繊維断面における金属の分布を、X 線分光装置を備えた走査型電子顕微鏡で確認する。 染色濃度が、2.0%owf において、繊維評価における JIS L の摩擦堅ろう度、洗濯堅ろう度(A-4 号法)、昇華堅ろう度における、変退色 4-5 級以上、汚染 4 級以上を保持 	<ul style="list-style-type: none"> 二層構造糸の原糸構造並びに、金属錯体注入に至るまでの工程の検討を重ねた結果、目標の初期段階での電気抵抗値 8Ω/cm以下には届かなかったものの、$2.1 \times 10^4 \Omega/cm$の電気抵抗値にまで向上をさせるに至った。 下糸として用いて縫製した結果、縫製後は電気抵抗値 $6.7 \times 10^4 \Omega/cm$となった。 染色性については、二層構造糸の芯部のカーボン色を覆い隠して、発色の良い色を出すことができなかったことから、鞣側繊維の染色が可能であると確認するに留まった。
<p>【2. 炭酸ガスの回収プロセス技術の開発】</p>	<ul style="list-style-type: none"> 炭酸ガスの回収率 90%を検証する。 	<ul style="list-style-type: none"> 炭酸ガスの回収率 90%以上を達成した。
<p>【3. 実証試験】</p>	<ul style="list-style-type: none"> 縫製に伴う負荷後、電気抵抗値 20Ω/cm以下を保持 縫製後のバギング試験（繰り返しの曲げ伸ばし）：200～500 回において、20Ω/cm以下を保持 	<ul style="list-style-type: none"> 下糸として用いて縫製した結果、縫製後は電気抵抗値 $6.7 \times 10^4 \Omega/cm$となった。 バギング、洗濯の負荷試験を実施したところ、導電性が低下する傾向は認められたが、心電計測は可能となるレベルであった。

Ⅲ. 製品実証

開発項目	目標値	実績
【1. 製品での配線機能評価】	<ul style="list-style-type: none"> ①縫製後の初期状態、②運動中、③バギング試験後、④洗濯後（30 回後）における電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$以下及び繊維表面における絶縁性を保持 	<ul style="list-style-type: none"> 製品での配線用導電性縫い糸が、負荷を加えても機能することを検証した。 試作糸は、目標の $20\Omega/\text{cm}$には達しなかったものの、下糸として用いて縫製することにより、$6.7 \times 10^4 \Omega/\text{cm}$を維持した。 更に、バギング試験に加えて洗濯 30 回を行うも、心電計測は可能となり、負荷試験に対する耐久性が認められた。
【2. 製品でのセンサー機能評価】	<ul style="list-style-type: none"> ①縫製後の初期状態、②運動中、③バギング試験後、④洗濯後（30 回後）において筋電位測定値の誤差が、許容範囲内に収まるのかを検証する。 	<ul style="list-style-type: none"> 作製した製品における配線用導電性縫い糸とセンサー用導電性縫い糸とが、負荷を加えても同時に機能することを検証した。金めっき試作糸を刺しゅう電極とし、配線糸を用いて接続した結果、縫製後の初期状態、バギング試験に加えて洗濯 30 回後においても、心電計測が可能と分かった。

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織・管理体制



総括研究代表者 (PL)
氏名：伴野 統哉
所属組織：株式会社フジックス
所属役職：生産部 研究開発室 室長

副総括研究代表者 (SL)
氏名：椎木 弘
所属組織：公立大学法人大阪 (大阪府立大学)
所属役職：工学研究科 准教授

【公開版】

1-2-2 研究者・協力者

① 研究者氏名

【間接補助事業者】株式会社フジックス

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
伴野 統哉 (PL)	生産部 研究開発室 室長	I:【1-1】【1-2】【2-3】【3】 II:【1-1】【1-2】【1-3】【1-4】【2】【3】 III:【1】【2】
福元 綾真	生産部 研究開発室	I:【1-1】【1-2】【2-3】【3】 II:【1-1】【1-2】【1-3】【1-4】【2】【3】 III:【1】【2】
多田 和貴	生産部 研究開発室	I:【1-1】【1-2】【2-3】【3】 II:【1-1】【1-2】【1-3】【1-4】【2】【3】 III:【1】【2】
太田 浩二	生産部 製造課 染色ライン ライン長	I:【1-1】【1-2】【2-3】【3】 II:【1-1】【1-2】【1-3】【1-4】【2】【3】 III:【1】【2】
赤枝 志保	生産部 品質環境課	I:【1-1】【1-2】【2-3】【3】 II:【1-1】【1-2】【1-3】【1-4】【2】【3】 III:【1】【2】

【間接補助事業者】公立大学法人大阪（大阪府立大学）

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
椎木 弘 (SL)	工学研究科 准教授	I:【2-1】【2-2】【2-3】
山本 陽二郎	工学研究科 客員研究員	I:【2-1】【2-2】【2-3】
赤木 与志郎	研究推進本部 URA センター 専門役	I:【2-1】【2-2】【2-3】

【間接補助事業者】滋賀県（東北部工業技術センター）

氏名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
三宅 肇	有機環境係 係長・参事	I:【3】 II:【3】 III:【1】【2】
谷村 泰宏	繊維・デザイン係 係長・専門員	I:【3】 II:【3】 III:【1】【2】
上田中 隆志	有機環境係 主査	I:【3】 II:【3】 III:【1】【2】

【公開版】

② 事業管理機関

【補助事業者】公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

氏名	所属部署・役職	実施内容
平井 圭介	連携推進部 部長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
篠原 弘美	連携推進部 副部長 (兼)ものづくり支援課 課長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
船越 英之	連携推進部 ものづくり支援課 副主幹	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
松本 貴雄	連携推進部 ものづくり支援課 サポイン事業推進 コーディネータースタッフ	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務、 間接補助事業先との連絡調整業務

③ 協力者

氏名	所属部署・役職	実施内容
藤原 一彦	株式会社デサント R&D センター 機能開発部 機能・品質開発課	スマートテキスタイルにおける導電性縫い糸を用いた縫製物の試作や、マーケット調査を通じてのアドバイスをいただく。
堀 照夫	国立大学法人福井大学 客員教授	超臨界二酸化炭素流体を用いた金属錯体注入を伴う導電性縫い糸の開発に関して、素材特性との関係や処理条件の方向付けなど、総合的にアドバイスをいただく。
廣垣 和正	国立大学法人福井大学 学術研究院 工学系部門 准教授	超臨界二酸化炭素流体を用いた金属錯体注入・還元などの一連のプロセスに関して、アドバイスをいただく。
高橋 秀也	公立大学法人大阪 大阪市立大学大学院 工学研究科 教授	スマートテキスタイル用途を想定した導電性縫い糸に対する電気・電子回路設計上の課題の注出や、その解決に向けた回路設計の方向付け並びに、デバイス等との接続方法をアドバイスいただく。

1-3 成果概要

センサー用導電性縫い糸で作製した刺しゅう電極を介して読み取った心信号を、縫製により配した配線用導電性縫い糸を配線として用いることで、心電計測を可能にした。

更には、両糸に対しての負荷試験として刺しゅう並びに縫製後における、500 回の曲げ伸ばし、更には洗濯 30 回を行った後においても、心電計測が可能なことを確認でき、実用化への布石となった。

未達となった課題は、センサー用について、金めっきは目標を達成したが、銀めっきにおいて求める皮膜強度は未達に終わった。また、配線用については、初期及び負荷試験後の電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$ を達成できず、今後の課題として残った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

連携推進部 ものづくり支援課 参与 山本 博之

〒 520-0806 滋賀県大津市打出浜2番1号 コラボしが21 内

電 話 077-511-1414 FAX 077-511-1418

E-mail : h-yamamoto@shigaplaza.or.jp

【法認定管理機関】

株式会社フジックス

生産部研究開発室 室長 伴野 統哉

〒 527-0064 滋賀県東近江市尻無町字堀之内 988 番地

電 話 0748-36-3356 FAX 0748-22-3511

E-mail : banno.to@fjx.jp

第2章 本論

2-1 I. センサー用導電性縫い糸

【1. めっき被膜強度の強化の課題への対応】

縫製時や洗濯により金属被覆膜が剥がれ落ちない対応を図るためには、繊維と金属との密着性を高める必要がある。本研究開発では、従来的一次めっき処理の前に行う「アルカリ処理」を「プラズマ処理」へ置き換えることによるめっき被膜強度の強化【1-1】と、従来の「アルカリ処理～一次めっき」を「超臨界流体処理によるめっきの核付け」へ置き換えることによるめっき被膜強度の強化【1-2】の2つの研究に取り組み、コスト面で優れた後者【1-2】の超臨界流体処理を採用する事で最適なめっき被膜強度の強化方法を確立した。

また、研究方法に関しては、平成29年度は、1m試料を用いてピーカー実験で製作された試料での試験を行い、平成30年度は、前年度の成果を踏まえ、実際の生産状態に近い量をスケールアップしたプロセスを用いて研究開発を進めてきた。

ラボ試験による二次めっき後の摩擦耐性を検証した結果、【1-1】と【1-2】とはほぼ同等レベルであることを確認した。また、摩擦500回後の電気抵抗値は $20\Omega/\text{cm}$ 以下となり、目標を達成した。よって、コスト面を踏まえ【1-1】は平成30年度で計画通り終了し、その後は【1-2】で開発を進めた。

【1-1】 プラズマ処理による被膜強度強化

平成29年度は、酸素プラズマ処理試験水準につき、大阪府立大学での二次めっき後(1m試料)の抱合力試験機を用いた500回往復後の確認で電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$ 以下を達成した。

平成30年度は、糸長を30mにスケールアップし、酸素プラズマ処理を、前処理剤を塗布する前後に施した水準に対し、大阪府立大学で無電解用ミニバレル(30m)を用いて二次めっきを行った結果、平成29年度と同様に電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$ 以下の目標を達成した。また、この結果は、次項【1-2】で記載の方法と同等レベルであることを確認した。

【1-2】 超臨界流体処理によるめっきの核付けによる皮膜強度強化

平成29年度は、ポリエステル糸へアルカリ減量加工を施し、金属錯体の注入を図ることで、1m試料での二次めっき後の評価を行ったところ、金属錯体注入後に還元処理を行っていない水準において、摩擦500回後、電気抵抗値が $20\Omega/\text{cm}$ 以下を達成した。

平成30年度は、スケールアップしたラボ試験により金属錯体の注入量の最適化を図り、チーズ形態での再現を行った。同試験糸を用いて、大阪府立大学での無電解用ミニバレルによる二次めっきを行った結果、初期電気抵抗値 $8\Omega/\text{cm}$ 以下、抱合力試験機を用いた500



【図1 チーズ形態の糸】

回往復後の電気抵抗値が $20\Omega/\text{cm}$ 以下を達成した。

令和元年度は、金めっきのみならず、銀めっきの核付け条件を選定し、協力工場においてチーズ形態での2次めっきに成功し、初期抵抗 $0.6\Omega/\text{cm}$ 、抱合力試験機を用い500回往復後の電気抵抗値が、 $20\Omega/\text{cm}$ 以下となった。

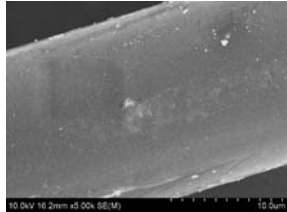
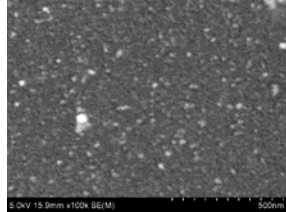
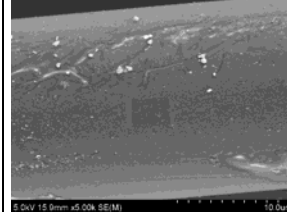
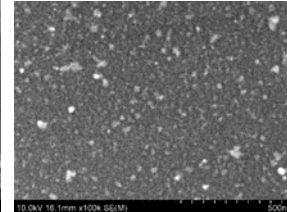
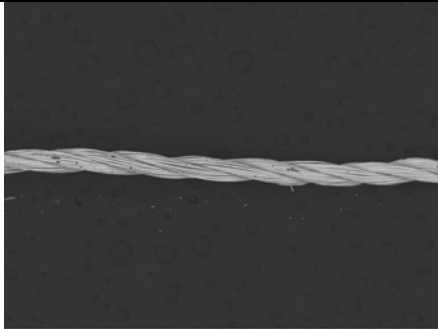
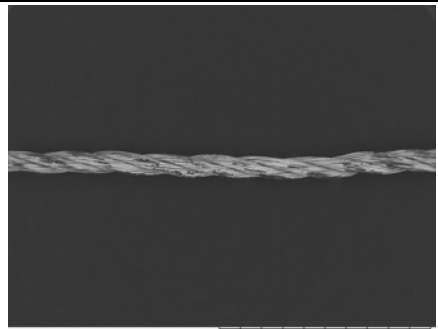
【2. めっき斑の解消の課題への対応】

ラボ試験での被覆率90%、糸のカード巻での目視判定において、3-4級以上を目標に、実装を想定しためっき処理装置での条件確立に向けた検討を行った。

【2-1】超音波による振動

繊維同士が接触する部位において、めっき液の浸透を促進するため、超音波の周波数、強度、時間などについて条件を最適化した。平成29年度は、超音波の強度100Wで各周波数（28kHz、40kHz、100kHz）について検討した結果、100kHzでの処理が有用であった。時間については、二次めっき反応時間に依存し、3時間が最適であった。また、一次めっきについても超音波処理の有用性が明らかになった。これらの検討により、めっき斑の低減化が達成され、被覆率90%以上（最大99.4%）を達成した（表1）。

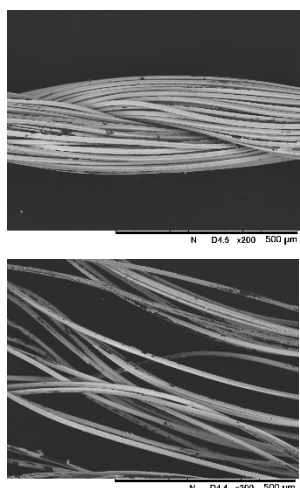
【表1 一次めっき、二次めっき表面の電子顕微鏡像と被覆率】

条件：一次めっき 55℃ 0.5h		条件：一次めっき 25℃ 2h	
			
↓		↓	
二次めっき 5℃ 3h (還元剤分割投入)		二次めっき 25℃ 3h (還元剤一括投入)	
			
被覆率 99.4%		被覆率 85.7%	

【公開版】

平成30年度は、一次めっき及び二次めっき反応の開始から終了までの間で、超音波振動の使用条件（連続か断続かなど）を検討した。その検討過程において、二次めっきにおけるめっき斑の生成は、めっき液の浸透、つまり糸の濡れ性によるところが大きいと考えられた。そこで、反応溶液に種々の助剤を添加し、効果について検討した。二次めっきにおいて、助剤を添加することで均一なめっき皮膜が得られた。糸の濡れ性が向上されたものと考えられる。めっき斑の低減化と密着性の付与の観点から、二次めっきにおける助剤添加の有用性が明らかになった。

令和元年度は、二次めっきの最適条件を選定するため、金属錯体により核付けをした水準を用いて検討を行った。超音波処理に代わり、種々の助剤添加によるめっき斑の低減化に向けた検討を行った。結果、いずれについても良好な結果が得られた。電気抵抗は $0.8\Omega/\text{cm}$ ($120\Omega/\text{m}$) となり、表面観察ではめっき斑の低減が明確であった（図2）。助剤添加量の最適化を行った結果、0.2～5%において良好な導電性（電気抵抗の変動率13%）、めっき斑の低減化が達成された（表2）。



【図2解繊前後のSEM像】

【表2 めっき液中における助剤添加の効果】

サンプル No.		1	2	3	4
糸種		金属錯体導入			
二次めっき 3時間	金属イオン	Au			
	還元剤投入	一括			
	温度	25℃			
	超音波	×			
	助剤	0.1%	0.2%	1%	5%
電気抵抗/ Ω	1cm 測定 (偏差)	1.5 (0.3)	0.8 (0.1)	0.8 (0.1)	0.8 (0.1)
	1m 測定	474	115	120	110

【2-2】還元剤の種類、処理温度と分割投入

平成29年度は、めっきによる皮膜化が徐々に進行するよう、還元剤の種類を検討すると共に、処理温度を5～35℃で還元剤を分割投入する組み合わせにより検討した。還元剤としては過酸化水素が最適であり、処理温度5℃では還元剤の一括、分割投入にかかわらず、低い（初期）電気抵抗が得られ、電気抵抗値 $3\Omega/\text{cm}$ 程度を達成した（表3）。

【表3 めっき条件の検討結果】

サンプルNo.		1	2	3	4	5	6	7	8
糸種		マルチフィラメント (プラズマ等の処理)						未処理 (元糸)	
一次めっき	金属ナノ粒子	Au							
	チオール薬剤	有							
	温度/時間	25℃ /3h	25℃ /3h	25℃ /3h	25℃ /3h	55℃ /0.5 h	55℃ /0.5 h	55℃ /0.5 h	55℃ /0.5 h
	超音波	有							
	乾燥	有			無		有		
二次めっき	金属イオン	Au							
	還元剤投入	分割	一括	分割					
	温度	5℃		25℃	5℃		25℃	5℃	25℃
	超音波	有							
熱処理		180℃							
電気抵抗値Ω/cm	平均	3.2	3.5	2.9	2.6	2.5	3.9	2.0	5.5
	標準偏差	1.6	1.3	1.0	0.5	1.2	2.6	0.9	3.8

平成30年度は、めっき液による皮膜化が徐々に進行するよう、還元剤の種類と投入のタイミングなど、前項との連動を含め処理条件を検討した。さらに、めっき処理装置での最適条件を探索するために、無電解用ミニバレルを用い反応系のスケールアップについて検討した。還元剤の分割投入及び温度を下げる方向に加え助剤の添加について検討した。

金ナノ粒子による一次めっきの迅速化を図る目的で反応溶液の温度を調節したところ、室温（25℃）では3時間で均一な皮膜が形成されたのに対し、55℃では30分で同等の皮膜の形成が達成された（表4）。二次めっきにおけるめっき斑の生成を抑制するために、めっき反応が徐々に進行するよう室温（25℃）および5℃で反応を行った。還元剤として過酸化水素を選定し、一括、あるいは5回に分割して投入した。結果、還元剤の分割投入により、温度制御することなく均一なめっき皮膜が得られた。

めっき皮膜における斑がどの工程で生じるかを解明するため、金属錯体で核付けした水準を用い、二次めっきについて重点的に検討した。二次めっき処理中、スケールアップ（1m→30m）に伴って燃糸束の表面に気泡が認められた。この気泡を除去するために、超音波振動を採用した。超音波によって二次めっき液が赤色に変化し、燃糸表面のみならずめっき液全体で金ナノ粒子の生成が明らかであった。そこで、超音波振動の代わりに助剤を添加し、二次めっきについて検討した。二次めっき液の色に変化は見られず、めっき後の電気抵抗は約1Ω/cmであった。測定箇所による電気抵抗のばらつきが小さい（標準偏

【公開版】

差13～23%)ことから助剤により糸の濡れ性が向上し、糸表面で選択的にめっき反応が進行するものと推察された。株式会社フジックスでの負荷試験(500回)の後であっても10Ω/cm以下の電気抵抗を示した。めっき斑の低減化と密着性の付与の観点から、二次めっきにおける助剤の有用性が明らかになった。

【表4 めっきの検討結果】

水準		1	2	3	4
一次めっき	金属種	Au ナノ粒子		金属種	金属錯体
	チオール		○		
	温度	25℃		55℃	
	時間	3時間		30分	
二次めっき	超音波		○	導入量	多
	乾燥		○		少
	金属イオン			Au	
	還元剤投入			分割	
電気抵抗	温度			25℃	
	超音波		○		×
	助剤		×		○
	熱処理			180℃	
平均	平均	2.6	1.4	1.5	1.3
	標準偏差	1.1 (42%)	0.8 (57%)	0.2 (13%)	0.3 (23%)

令和元年度は、めっき斑の低減とともに処理時間の短縮の観点から、ラボでスケールアップした糸を用いて二次めっき条件の最適化について検討した。超音波処理に代わる助剤添加により、還元剤の種類と投入のタイミングについて、前項との連動を含め、処理条件を再検討した。また、二次めっき液に用いる水に関する検討を行った。

一次めっきを施した糸を用いた場合、室温での還元剤分割投入の条件では6時間の二次めっき反応において糸の電気抵抗は0.6Ω/cm(63Ω/m)であった。これに助剤を用い検討を行ったところ、室温で還元剤一括投入の条件で3時間に短縮できた。その際の電気抵抗は0.5Ω/cm(53Ω/m)であった。めっき斑の低減とともに処理時間の短縮が達成された。一次めっき、および核付けした糸に対して、いずれについてもめっき斑に関して電気抵抗変動率30%以内で処理時間を従来の半分に短縮(3時間)することに成功した。

二次めっき液に用いる水として、超純水、軟化水、イオン交換水を用いめっき液を作製し、金属錯体を核付けした糸の二次めっき後の電気抵抗への影響を調べた。超純水では1.3Ω/cm(134Ω/m)、軟化水では1.4Ω/cm(144Ω/m)、イオン交換水では1.5Ω/cm(148Ω/m)となり、顕著な影響がないことを確認した。

【2-3】 実機検証装置の設計と試作

平成 29 年度は、ラボ試験で得た最適条件を 3 kg 程度の輪状の糸束である総(かせ)形態での糸に適応させる試験装置（ウィンス型）を開発した。

平成 30 年度は、試験装置（ウィンス型）を用いためっき処理で、ラボ試験では発生しなかっためっき斑が発生した。原因を検討した結果、めっき斑を生じた要因として、総糸（糸の束）が拡布状態で回転していないことと、めっき液自体の性状を不安定にしていたステンレスへのテフロンコーティングに生じたピンホールの存在が明らかになった。そこで、総糸の糸同士の空間を確保する試みとしてシリコンバーを総糸に取り付け、めっき浴の材質を樹脂製とすることで改造を行った。【1-2】において試作した超臨界流体処理によるめっきの核付け処理済みの糸をチーズ形態でスケールアップすることにより作製し、【2.めっき斑の解消の課題への対応】に適用した。

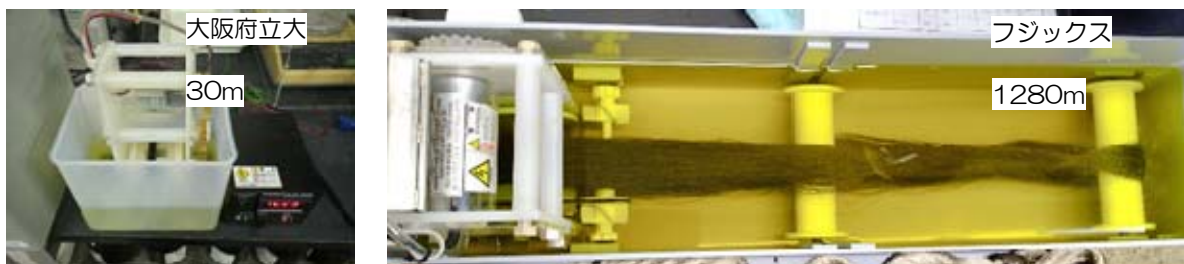
大阪府立大学にて最適化された条件に基づき、株式会社フジックスとのベース条件（水質、浴比、被処理物の形態）の違いを無電解ミニバレルで調整後、改造した総糸めっき染色・水洗試験装置を用いて条件最適化を目指した（図 3）。これらの検討から、二次めっき反応において糸が気相と液相を出入りする過程で、気泡の発生による濡れ性の変化が還元反応に影響を与えることが示唆された。そこで、できる限りめっき液の中で糸を回転させることでめっき斑の低減化について検討した。



【図 3 気/液のめっきのスケールアップ】

令和元年度は、めっき液の中で糸を回転させて二次めっきを行った（図 4）。大阪府立大学で一次めっきした糸（30m）を用い、室温で還元剤一括投入、助剤 0.2% 添加、3 時間反応の条件で、 $1.6\Omega/\text{cm}$ ($86\Omega/\text{m}$)、電気抵抗の変動率 3% であった。

株式会社フジックスで金属錯体核付け水準（1280m）を用いて二次めっきを行った結果、 $2.7\Omega/\text{cm}$ ($250\Omega/\text{m}$)、電気抵抗の断線率 26% であった。



【図 4 液中めっきのスケールアップ】

【公開版】

更なる改善を求め、総糸の絡み合いを防ぐために糸軸と垂直方向に等間隔で入れる縛り（ヒビロと呼ぶ）を緩く結ぶことと、投入の順序として、浸透剤を入れ 5 分ほど攪拌し、塩化金酸を投入した後、過酸化水素水を投入することでめっき斑は解消し、糸の長手方向への断線率についても 3%に収まり目標を達成した。

【3.実証検証】

- ① 金めっきは、4mm角(糸長約15cm)の刺しゅうを100個行った後の電気抵抗値として、平均値1.4Ω/個（約2.5Ω/cm）となり、20Ω/cm以下を達成した。また、抱合力試験機による500回摩擦の結果、11Ω/cmとなり、この点においても目標を達成した。また、銀めっきについては、初期抵抗値は0.6Ω/cmと優れる結果となったが、刺しゅう後は、すべて断線状態となった。



【図5 めっき糸を刺しゅうした状態】

- ② 滋賀県東北部工業技術センターにて、センサー用導電性縫い糸と無電解めっき繊維等との比較で、KES曲げ試験機を用いた風合い評価を行った結果、未処理のものよりも、曲げ剛性並びに歪特性の値が低く、無電解めっきにおいては、未処理よりもこれらの数値が高くなったことから、柔らかさにおいて優れる結果となり目標を達成した。銀めっきについては、二次めっきの膜厚が厚いためか、硬く、無電解めっきよりも劣る結果となった。

【表5 一本曲げ硬さの評価】

糸種	加工	B (曲げ剛性) (gf·cm ² /yarn)	2HB (歪特性) (gf·cm/yarn)
ポリエステル撚糸 ○断面 78T- 24F/1×3	未処理	4.6×10 ⁻³	4.4×10 ⁻³
	無電解めっき(銅)	↓ 9.9×10 ⁻³	↓ 7.7×10 ⁻³
	センサー用試作糸(金)	↓ 5.7×10 ⁻³	↓ 2.1×10 ⁻³
ポリエステル撚糸 △断面 130T- 72F/1×2	未処理	↓ 2.5×10 ⁻³	↓ 1.2×10 ⁻³
	センサー用試作糸(金)	↓ 1.7×10 ⁻³	↓ 1.0×10 ⁻³
	センサー用試作糸(銀)	× 20.5×10 ⁻³	× 14.7×10 ⁻³

- ③ 刺しゅう後の洗濯試験(30回)を行った。金めっきは、針糸側、銀めっきは下糸使用での検証を行った。洗濯30回後には、金めっきは1.3Ω/個（約2.3Ω/cm）且つ断線率は0%となり目標を達成した。銀めっきについても、6.6Ω/個（約11.8Ω/cm）且つ断線率は10.1%と金めっきに比べて高くはなったが、目標値としては達成した。

2-2 II.配線用導電性縫い糸

【1. 繊維内部での導電性及びその耐久性の確保の課題への対応】

【1-1】導電性の確保

平成 29 年度は、まずは繊維表面での導通を試み、そこで得た条件に基づき、内部導通へと向かうプロセスを念頭に置き、取り組んだ。金属錯体の組み合わせを選定し、注入処理中の還元分解を制御するために、加工条件を検討した結果、繊維表面での電気抵抗値にバラつきはあるものの $20\Omega/\text{cm}$ 以下となった。そこで、二層構造系に適応し、内部導通を期待したが、滋賀県東北部工業技術センターでの試験においては、内部導通が得られなかった。

平成 30 年度は、ポリエステル繊維とナイロン繊維との界面に金属錯体を偏析させることを狙った結果、導通は得られなかったものの偏析率を 29.4Wt%まで高めることに成功した。

また、芯部にカーボンを含む二層構造系を用いた結果、この注入条件を適用したラボ試験において電気抵抗値 $7.2 \times 10^5 \Omega/\text{cm}$ となり、平成 30 年度の目標値 $1.0 \times 10^6 \Omega/\text{cm}$ を達成した。

令和元年度においては、原糸構造並びに、金属錯体注入に至るまでの工程を検討することにより導電率を高め、電気抵抗値 $2.1 \times 10^4 \Omega/\text{cm}$ を達成した。

【1-2】還元分解の手法

平成 29 年度は、繊維表面において偏析させた金属錯体を還元し、バラつきはあるものの還元前 $3.5 \times 10^{10} \Omega/\text{cm}$ から還元後 $20\Omega/\text{cm}$ 以下となり、還元条件としては比較的良好な条件となった。

平成 30 年度は、還元処理条件を検討することにより、前工程において繊維表面に偏析していた金属錯体を含め、繊維内部への移行を果たすことで、繊維内部への金属錯体の偏析率が、20.0Wt% から 27.3Wt% へ向上する結果が得られた。令和元年度に至っては、より安全に且つ、今後、産業として製造することを考慮し、水素ガスを 5%含む窒素ガス（フォーミュラーガス）を用いて還元処理を行い、平成 30 年度と同等水準の還元効率を得ることに成功した。

【1-3】より安価な金属錯体の選定

平成 30 年度は、安価な金属錯体を選定し、更には、芯材にカーボンを含む二層構造系を採用することで、後から注入する金属錯体の投入量を減らすことができ、結果として低コスト化が図れた。

令和元年度は、金属錯体を回収するため、繊維に吸尽されずに残った金属錯体を、投入槽から回収すると共に、 CO_2 と分離した金属錯体を回収できる機構に CO_2 回収装置を改造し、回収効率の向上を図った。

【1-4】 金属錯体との同浴染色

平成 29 年度は、測定した染色堅ろう性における変退色 4-5 級以上、汚染 4 級以上を満たす染料を、4 本選定するに至った。平成 30 年度は、選定した染料を金属錯体と同浴で処理する条件確立を試みたが、困難を極めた。令和元年度は、二層構造原系の構成素材を変更したことにより、芯部のカーボン色を覆い隠して、発色の良い色を出すことができなかったことから、鞘側繊維を染色するに適した染料（3 原色）を入手し、染色が可能なることを確認するに留まった。

【2. 炭酸ガス回収に関するプロセス技術の開発の課題への対応】

平成 29 年度は、回収装置の導入と検収を行い、78%の回収率となり、回収した炭酸ガスを、再度、処理槽に注入できることを確認した。平成 30 年度は、回収効率の向上を求めて、回収条件の調整を行った。結果、缶体の圧力が、0.5Mpa を切るところまでは回収できることを確認した。少なくとも 93.4%が回収でき、目標の 90%以上を達成した。

【3. 実証検証】

平成 29 年度は導通が得られなかった。平成 30 年度は、カーボン芯の二層構造原系で構成された縫い糸について、初期抵抗値 $7.2 \times 10^5 \Omega/cm$ となり目標を達成した。なお、負荷試験後の電気抵抗値は、バギング試験後(500 回)： $4.9 \times 10^6 \Omega/cm$ となり、洗濯後(10 回)： $3.3 \times 10^7 \Omega/cm$ となるに留まった。

令和元年度は、目標の $20 \Omega/cm$ 以下を達成するには至らなかったが、 $2.1 \times 10^4 \Omega/cm$ を達成し、下糸として用いて縫製した場合、 $6.7 \times 10^4 \Omega/cm$ となった。この数値は、昨年度の初期の電気抵抗値が $7.2 \times 10^5 \Omega/cm$ であり、その 10 分の 1 以下となることから、向上が認められた。

また、バギング、洗濯の負荷試験を実施したところ、導電性が低下する傾向は認められたが、 $1.0 \times 10^5 \Omega/cm$ に留まり、心電計測は可能となるレベルであった。

2-3 Ⅲ.製品実証

【1. 製品での配線機能評価】

配線系を下糸として縫製し、バギング試験後及び洗濯試験後(30 回後)を行った。次いで、電気抵抗値を測定した結果、バギング試験後には $1.35 \times 10^5 \Omega/cm$ となり、電気抵抗値が縫製後の約 2 倍となった。また、引き続き行った洗濯試験後の電気抵抗値は、 $1.0 \times 10^5 \Omega/cm$ となり、心電計(チェックミープロ)を用いた計測はいずれの段階でも可能



【図 6 ウェアへの装着】

となった（図 6）。

【2. 製品でのセンサー機能評価】

刺しゅう及び金属ホックを用いた電極を形成し、縫製した配線用（10 本）で接続した上で、負荷試験としてバギング試験に加え、洗濯（30 回）を行った糸を用いたが、心電計（チェックミープロ）を用いた計測は可能となった。

ウェアに実装した状態を、図 6 に示し、着衣状態と運動を兼ねた状態を、図 7 に示す。



【図 7 実使用の例】

第 3 章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

【平成 29 年度】センサー用並びに配線用導電性縫い糸についてのラボ試験による基礎検討を行った。平成 29 年度の結果として、センサー用については、プラズマ処理した水準及び金属錯体を伴うめっきの核付けをした水準は、負荷試験後、未処理糸が測定圏外であったのに対し、電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$ 以下を達成した。

一方、配線用については、ラボ試験での繊維内部導通は全く得られず、目標を達成できなかった。しかし、繊維表面においては、電気抵抗値が $20\Omega/\text{cm}$ 以下（1 cm長での測定値）、 $1.7 \times 10^4\Omega/\text{cm}$ （15 cm長での測定平均値）となる部分も認められ、更には繊維表面の金属を硝酸で洗い落しても繊維内部で一部、金属の偏析が認められたことから、繊維全体の還元率を上げ、繊維表面よりも繊維界面の電気抵抗値を相対的に低くすることで内部導通を得る可能性を見出した。

【平成 30 年度】センサー用に関して二次めっき条件を検討するに当たり、大阪府立大学での最適化された条件を再現するために、株式会社フジックスとのベース条件（水質、浴比、被処理物の形態）の違いを明らかにするなかで、二次めっき条件を選定した。改造した総糸めっき染色・水洗試験装置を用いて再現した結果、バラつきは大きいものの、目標となる負荷試験後の電気抵抗値 $20\Omega/\text{cm}$ 以下を達成するに至った。

一方、配線用については、電気抵抗値の評価に当たり、導電性ペーストを用いて株式会社フジックスと滋賀県東北部工業技術センターとの協業により、二層構造系の繊維断面での導通を測定する方法を確立した。

また、金属錯体の注入量増加を狙い、超臨界二酸化炭素（scCO₂）流体中での繊維と金属錯体との接触回数を増やすために、A 社との共同によりラボ装置の設計を行うと同時に、狙いとする金属錯体注入による導電化を補強するため、静電気防止性能を有するカーボン素材を含む二層構造系を用いて金属錯体の注入条件を検討した結果、目標となる電気抵抗値

$1.0 \times 10^6 \Omega/\text{cm}$ を達成するに至った。

【令和元年度】センサー用については、大阪府立大学で選定された条件に基づき、めっき処理時間を半分となる 3 時間に短縮することに成功し、装置面からは、総糸めっき処理装置をめっき液面で総糸が回転する方式に改造することで、電気抵抗値のバラつき（糸の長手方向への断線率）を 3%にまで低減し、めっき斑の改善を達成した。また、刺しゅう後の導電性についても維持され、電気抵抗値を $20 \Omega/\text{cm}$ 以下を達成した。

配線用については、金属錯体の注入並びに還元効率を高めるために、これまでの知見を投入した二層構造原糸を試作し、更には別途注入する金属錯体を選定し、二層構造となる繊維界面での金属の偏析を促進することを狙った。

結果として $2.1 \times 10^4 \Omega/\text{cm}$ となり、目標の $20 \Omega/\text{cm}$ 以下には届かなかったものの、前年度 $7.2 \times 10^5 \Omega/\text{cm}$ と比較して凡そ 30 分の 1 にまで電気抵抗値を低減するに至った。

製品実証としては、配線系は、下糸として縫製に用いることで $6.7 \times 10^4 \Omega/\text{cm}$ への低下は認められたが、センサー用として金めっき糸で作製した電極を用いて読み取った心信号を、配線用導電性縫い糸を配線として用いることで、心電計に伝えることで計測が可能となった。

また、負荷試験を伴う耐久性については、上記に述べたセンサー用導電性縫い糸と配線用導電性縫い糸とで構成した布帛上の回路そのものを、バギング試験並びに洗濯(30 回)した後においても、心電計測が確認できるに至った。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

(a) 配線用に係る技術開発

- ① これまでの知見を基に、原糸構造を検討し、金属錯体の注入効率を上げ更に電気抵抗値を下げるための研究を行う。
- ② 繊維側に吸尽されない金属錯体につき、再利用可能かどうか、または投入の方法を検討する。
- ③ 繊維が伸ばされることで断線することから、補強材との組み合わせを検討し、ミシンの針糸として実使用の耐えるものにブラッシュアップしてゆく。

(b) センサー用に係る技術開発

- ① 銀めっきの皮膜強化のために、膜厚の制御方法や密着性向上に伴う、剥離強度の向上を検討する。
- ② 金めっきについては、協力工場にてチーズ巻でのめっきを試み、商品化できるレベルにまで高める。

(c) ウェアラブルエキスポでの展示・発表

- ① 具体的なアパレル商品への実績をアピール

【公開版】

実使用に耐え得る縫い糸としての発表を行うことをファーストステップとしての目標とする。

例えば、スマートフォンに対応したヒーター付きジャケットを販売しているような企業と協業する中で、センサー用導電性縫い糸を用いたスイッチと、配線用導電性縫い糸を用いて、ヒーター部とを合せて接続することで導電性の確保を検証し、縫製や洗濯に対する耐久性のある導電性等に関して実証検証を行った結果に基づき、同展示会で発表を行う。

② インナーメーカーへのアピール

筋肉の補正機能を持ったインナーウェア（運動時の筋肉疲労を軽減するタイツ等のアイテム）に対し、更に筋肉疲労やダメージを和らげるために、筋肉の運動情報を捉え、締め付けの度合を調整する機能を持たせるなどのセンシング機能により付加価値を付与する提案を、本研究での滋賀県東北部工業技術センターとの間で行ったセンサー用導電性縫い糸にかかる測定データ等を用いて、共同研究を提案し、潜在的なニーズを掘り起こす。

また、もう一つの側面として、インナー向けの金銀刺しゅう糸として、デザイン性を高める縫い糸としての提案を行い、刺しゅう用途への展開を同時に進める。

(d) 手芸用途への展開

Maker Faire Tokyo などにおいて、手芸との組み合わせによる発表と展示を行い、実用性とさまざまな用途への展開をイメージ付ける。

(e) 更なるユーザーニーズの獲得

上記販促活動に基づき、実績を作り、まずはスポーツアパレルを1社に絞り込み、例えば、医療や健康分野へ向けた取り組みを積極的に展開している先には、本研究における筋電位測定データ等を活用し、販促を展開する。

以上