

【公開版】

平成30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

「精密伸線・表面処理技術を用いた繊維型太陽電池の生産性向上及び緯
糸挿入技術を用いた布帛型太陽電池製造プロセスの開発」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 住江織物株式会社

目 次

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・目的
 - 1-1-2 研究開発目標
- 1-2 研究体制
 - 1-2-1 研究組織
 - 1-2-2 研究員及びアドバイザー
- 1-3 成果概要
 - 1-3-1 金属繊維表面のラフネス制御
 - 1-3-1-1 表面ラフネスを抑えた金属繊維の製造
 - 1-3-1-2 表面処理による金属繊維表面ラフネスの低減
 - 1-3-2 繊維型太陽電池作製プロセス開発
 - 1-3-2-1 繊維型太陽電池作製プロセスの機械化
 - 1-3-2-2 繊維型太陽電池へのナノファイバー構造導入
 - 1-3-3 布帛型太陽電池製織プロセス開発
 - 1-3-3-1 布帛型太陽電池用細巾織機の開発
 - 1-3-3-2 布帛内での繊維型太陽電池の結線
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 金属繊維表面のラフネス制御
 - 2-1-1 表面ラフネスを抑えた金属繊維の製造
 - 2-1-2 表面処理による金属繊維表面ラフネスの低減
- 2-2 繊維型太陽電池作製プロセス開発
 - 2-2-1 繊維型太陽電池作製プロセスの機械化
 - 2-2-2 繊維型太陽電池へのナノファイバー構造導入
- 2-3 布帛型太陽電池製織プロセス開発
 - 2-3-1 布帛型太陽電池用細巾織機の開発
 - 2-3-2 布帛内での繊維型太陽電池の結線

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概容

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・目的

近年、生体情報を衣服で感知するウェアラブルセンサーや寒冷地向けに電熱線を内蔵した衣服などのいわゆるスマートファブリックの開発が盛んに行われている。特に衣服内に内蔵されたセンサによって着用者の健康状態を管理する衣服型ウェアラブルデバイス開発が多くの企業や研究機関で実施されており、国内外で広く発表されている。このようなウェアラブルデバイスが実現されれば、着用者の健康管理やトレーニング中のアスリートの身体負荷の測定に役立つことが期待されている。また、病院や介護現場にも応用可能であり、広範な分野への展開が見込める。プレス発表を行っているコンソーシアムも多数あり、既に販売されている商品もあるが、一般に広く普及しているとは言い難い。これは衣服型ウェアラブルデバイスに内蔵したセンサを駆動させるための電源に課題がある。

現在発表されている衣服型ウェアラブルデバイスには、生体情報あるいは位置情報を読み取るセンサや温度調節のための電熱線が搭載されている。これらの電子部材用電源として用いられているバッテリーは、携帯性ではあるが重く、また取り付け位置も腰部等に限定されてしまうため、着用者に与える違和感が大きいという欠点がある。そのためニーズとして、ウェアラブルデバイス分野、特に衣服型においては着用者に違和感を与えないような柔軟かつ軽量の電源の開発が求められている。

本事業の目的は、現状の衣服型ウェアラブルデバイスに使われているバッテリーと比較し、軽量化と着用者へ与える違和感を減らすことの出来る布帛型太陽電池の実用化開発を行うことである。既に当社は繊維/布帛型太陽電池の作成に成功しているが、工程内に手作業を必要とするため、生産性が悪い。そのため、製造工程の自動化および機械化により生産性を向上させる。

1-1-2 研究開発目標

繊維/布帛型太陽電池の生産性向上のため、下記の3テーマを設定し開発を行った。

①金属繊維表面のラフネス制御

目標：繊維型太陽電池の不良原因となる表面傷の少ないステンレス線の作製

②繊維型太陽電池作製プロセス

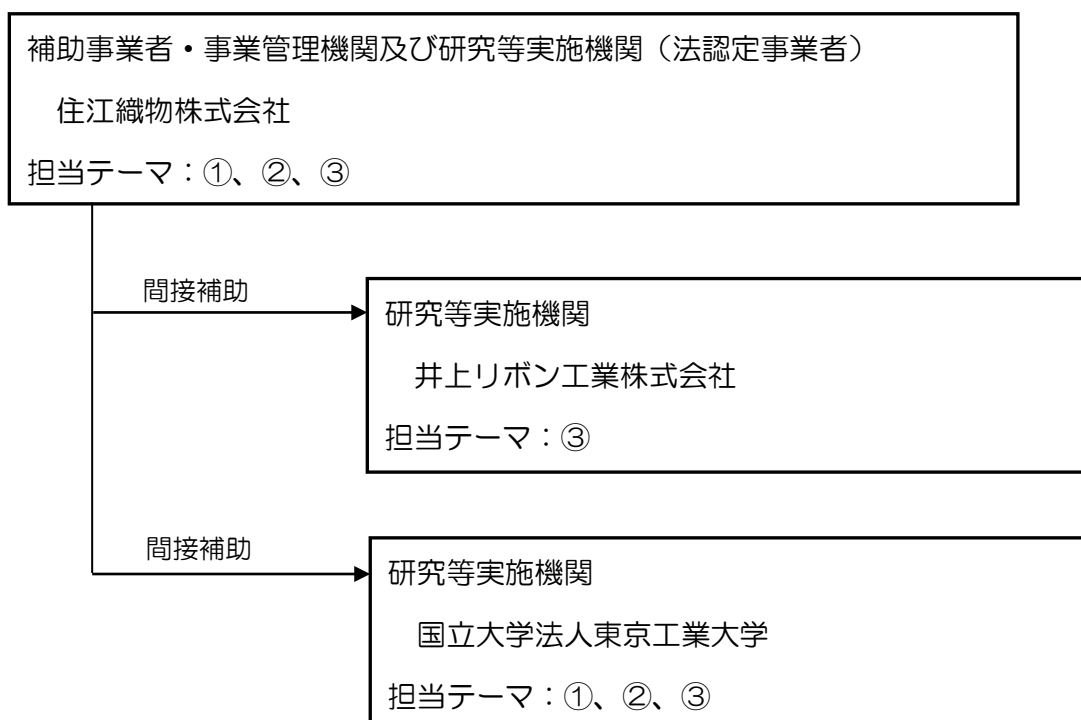
目標：繊維型太陽電池作製プロセスの機械化による生産能力の向上

③布帛型太陽電池製織プロセス

目標：専用織機開発による布帛型太陽電池の生産能力向上

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織



1-2-2 研究員及びアドバイザー

【事業管理機関及び研究等実施機関 (法認定事業者)】 住江織物株式会社

氏名	所属・役職	備考
源中 修一	テクニカルセンター・センター長兼開発部長	総括研究代表者
西野 善春	テクニカルセンター・統括 GL	
柴山 誉宏	テクニカルセンター機能材料開発 Gr. ・GL	
宮村 佳成	テクニカルセンター機能加工開発 Gr. ・GL	
福井 直美	テクニカルセンター機能加工開発 Gr.	
西谷 浩二	テクニカルセンター機能材料開発 Gr.	

【公開版】

前田 里恵	テクニカルセンター機能加工開発 Gr.	
杉野 和義	テクニカルセンター機能加工開発 Gr.	
岸 達也	テクニカルセンター機能加工開発 Gr.	
濱崎 孝浩	テクニカルセンター機能加工開発 Gr.	
武内 俊次	テクニカルセンター 契約社員	補助員

【研究等実施機関】 井上リボン工業株式会社

氏 名	所属・役職	備考
師田 雅伸	開発加工課 課長	
加藤 一夫	試作課 課長	
北西 悟	開発加工課 課員	
山村 亮	試作課 課員	

【研究等実施機関】 国立大学法人東京工業大学

氏 名	所属・役職	備考
松本 英俊	物質理工学院・准教授	副総括研究代表者

【アドバイザー】

氏 名	所属・役職	備考
楠田 泰文	大阪電気工業株式会社・取締役 技術担当	金属繊維の加工方法に関して
木村 睦	国立大学法人信州大学 繊維学部・教授	太陽電池の構成材料について
谷岡 明彦	国立大学法人信州大学 カーボン科学研究所・特任教授	布帛型太陽電池の高機能化について
増田 敦士	福井県工業技術センター新産業創出研究部 e-テキスタイル研究G ・主任研究員 (現：福井県産業労働部地域産業・技術振興課産学官連携推進G ・主任)	布帛型太陽電池製織技術について
藤原 孝行	公益財団法人東京都環境公社 東京都環境科学研究所・研究員	布帛型太陽電池実証実験について

本研究開発の成果概要を以下にまとめた。

1-3-1 金属繊維表面のラフネス制御

1-3-1-1 表面ラフネスを抑えた金属繊維の製造

繊維型太陽電池心材用の専用ノンスリップ式伸線機を導入し、専用ダイス使用の上でテンションや伸線速度等の加工条件を最適化することにより、表面ラフネスを抑えたステンレス線の製造に成功した。ラフネスの値は目標値を達成した。

1-3-1-2 表面処理による金属繊維表面ラフネスの低減

繊維型太陽電池の構成材料でもある陰極側バッファ層を用いた表面ラフネスの低減検討を行った。無機および有機半導体材料で検討を行ったが、ラフネス低減効果は伸線加工条件最適化に寄与するところが大きいことが分かった。

1-3-2 繊維型太陽電池作製プロセス開発

1-3-2-1 繊維型太陽電池作製プロセスの機械化

従来手作業で一本ずつ作製していた繊維型太陽電池を七本同時に作製する装置を開発し、複数バッチ行える環境を整えたことで生産能力を向上させた。また、工程の機械化により作業者の習熟度が性能に及ぼす影響を低減させることにも繋がった。事業開始前と比較すると生産能力は5倍となり、目標値に対する到達度は70%となっている。加えて、従来から問題となっていた歩留まりの低下について、作製環境条件を見直して改善することで良品割合90%超を確認し、歩留まり目標を達成することができた。

1-3-2-2 繊維型太陽電池へのナノファイバー構造導入

発電を担う有機半導体層（活性層）内にナノファイバー構造を導入し、p-n 接合界面の形状制御を行うことで繊維型太陽電池を高出力化する検討を実施した。結果として、活性層におけるp型半導体をナノファイバー化することにより電流密度の向上が確認され、高出力化の見通しが立った。

1-3-3 布帛型太陽電池製織プロセス開発

1-3-3-1 布帛型太陽電池用細巾織機の開発

繊維型太陽電池を緯糸として使用する布帛の製織に特化した専用織機を開発することで、布帛型太陽電池の製織能力を向上させることに成功した。織機には、繊維型太陽電池を緯糸として挿入する専用レピアを備えている。布帛型太陽電池の生産能力は従来比8倍となっており、目標を達成した。

1-3-3-2 布帛内での繊維型太陽電池の結線

布帛型太陽電池の織り組織を改良し、布帛製織と同時に結線を行える組織を見出した。結果として、目標として設定した生産能力を達成できた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属部署名：住江織物株式会社 技術・生産本部 テクニカルセンター

氏名：杉野 和義

Tel：0743-57-5441

Fax：0743-57-6409

E-mail：Kazuyoshi_Sugino@sin.suminoe.co.jp

第2章 本論

本研究開発は、平成28年度～平成30年度の3年間をかけ、設定した課題を解決すべく関係機関の協力の下で実施し、その実施内容を以下にまとめた。

2-1 金属繊維表面のラフネス制御

繊維型太陽電池は有機薄膜太陽電池を採用している。この種類の太陽電池は、基材となる電極上に光発電を行う有機半導体を厚み 100 nm オーダーで製膜、積層する必要がある。その際、基材電極上にある凹凸によって有機半導体層が不連続になってしまうと、有機薄膜太陽電池は電池内部でショートを起こし発電能力を失ってしまう。繊維型太陽電池の生産性、特に歩留まり向上のため有機半導体層製膜の障害となる凹凸を有さない電極基材として、表面傷の少ないステンレス線の製造技術を確立した。

2-1-1 表面ラフネスを抑えた金属繊維の製造

従来は表面傷の少ないステンレス線を探索し購入していたが、品質安定性およびコストの面から継続的に使用することについては問題があった。そこで、本事業においてノンスリップ式の専用伸線機を導入し繊維型太陽電池心材の製造を自社で行った。図1に導入した精密伸線機を示す。

母線を加工する速度および伸線に使用するダイスの減免率の最適化を行い、表面傷を抑えた加工条件の探索を行った。検討の結果、伸線速度を落とし低速加工を行うことで母線の微振動を抑えることができ、ダイスへの引っ掛かりを最小限に止められることが分かった。



図1 精密伸線機

しかしながら上記検討で得られたステンレス線材は表面傷に関しては良好ではあったが、伸線時の残留応力により線材が反り返ってしまい、繊維型太陽電池が弓形になってしまう問題が発生した。弓形であっても繊維型太陽電池としての性能には変化がなかったが、布帛型太陽電池の製織の際に緯糸として織り込めない点が問題となった。この残留反りの緩和についてはアドバイザーである大阪電気工業(株) 楠田氏の助言の下、真直加工を施すことによって対処することができた。図2に残留反りのある線材を使って作製した繊維型太陽電池と、真直加工線を心材とした繊維型太陽電池の写真を示す。

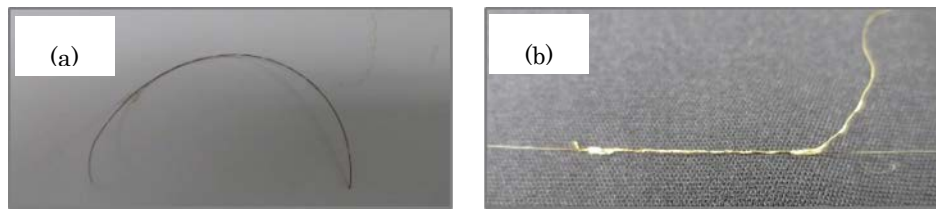


図2 試作線材を心材として使用した繊維型太陽電池

(a) 心材：残留反りのある線材、(b) 心材：真直加工線

上記のように真直加工を施した線材については、伸線加工後に更に真直加工を行うため表面傷の増加が懸念されたが、電子顕微鏡（SEM）観察の結果、従来品と比較して良好な表面を持っていることがわかった。なお、計画当初に設定した金属繊維表面ラフネスの数値目標についても達成できている。図3に従来品および本事業において製造したステンレス線表面の倍率2,000倍で観察したSEM像を示す。

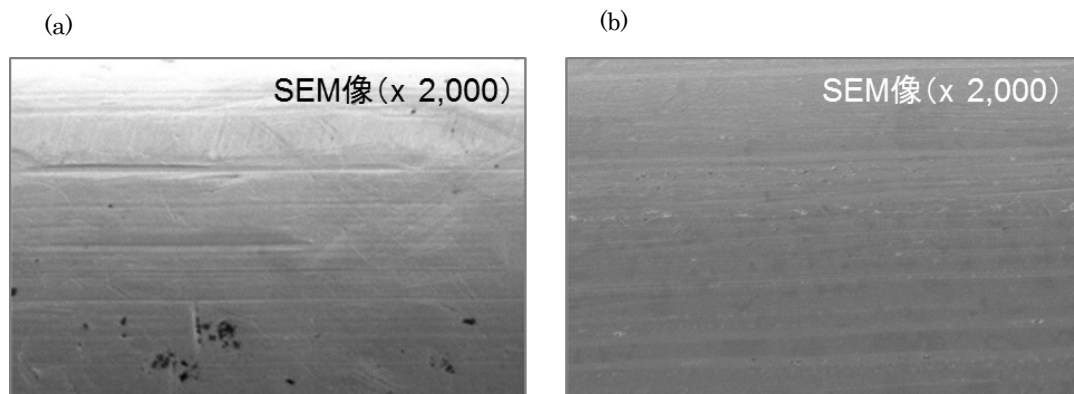


図3 繊維型太陽電池用心材であるステンレス線の電子顕微鏡（SEM）写真

(a) 事業開始前に使用していた従来品、(b) 本事業で製造した真直加工線

2-1-2 表面処理による金属繊維表面ラフネスの低減

繊維型太陽電池の構成模式図を図4に示す。先述のように、心材表面の凹凸などが原因で発電を行う有機半導体層（活性層）が不連続となって電池の陰極（心材）と陽極（上部透明電極）が接触してしまうと電池内部での短絡が発生してしまう。この現象を防ぐため、電池構成において陰極直上に位置する陰極側バッファ層を用いた改良の検討を行った。狙いとしては陰極側バッファ層による心材表面凹凸の平滑化である。

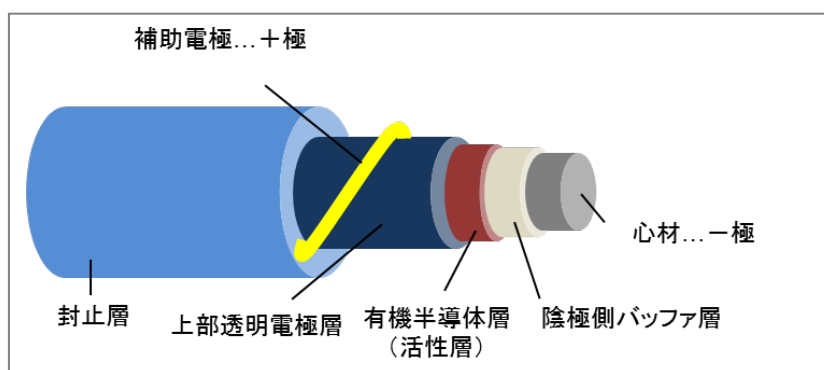


図4 繊維型太陽電池の構造模式図

使用した陰極側バッファ層材料は、金属酸化物半導体、フルオレン系有機化合物の2種類で検討を行った。

フルオレン系有機化合物は表1に示すように適切な膜厚で製膜することが出来れば陰極と活性層間の電气的エネルギーギャップ調整の効果により、有機薄膜太陽電池の性能向上に資する寄与できる。陰極側バッファ層材料は比較的高い電気抵抗を有する傾向があり、膜厚が厚い場合は電池の内部抵抗が増加してしまい、発電性能が落ちてしまう。

表1 フルオレン系有機化合物を陰極側バッファ層とした有機薄膜太陽電池の発電特性

フルオレン系有機化合物の膜厚	Voc [V]	Jsc [mA/cm ²]	FF	PCE [%]
なし	0.92	3.41	0.475	1.46
5 nm	1.05	4.41	0.428	1.99
20 nm	0.96	0.98	0.145	0.14

参考文献： J. Mater. Chem., **2010**, 20, 2617-2622

今回作製した有機薄膜太陽電池の発電特性を表2に示す。なお、測定は AM1.5G 条件において実施した。

表2 陰極側バッファ層を変更した有機薄膜太陽電池の発電特性

陰極側バッファ層材料	Voc [V]	Jsc [mA/cm ²]	FF	PCE [%]
金属酸化物	0.57	4.13	0.40	0.94
フルオレン系	0.34	5.84	0.19	0.37

測定結果としては、金属酸化物>フルオレン系の順に PCE（変換効率）が高くなっている。ここで、フルオレン系のみ発電特性結果は FF の値が 0.19 と低く、上記表1のフルオレン系有機化合物の膜厚 20 nm の結果と近い値になっており、電池の内部抵抗が高いと考えられる。今回の目的である心材表面凹凸平滑化を目指した条件で製膜を行う場合、この

【公開版】

高抵抗化の影響が現れてしまう傾向があることがわかった。金属酸化物半導体に関しても、フルオレン系有機化合物と比べれば厚膜化は可能なものの、発電特性との関係で心材表面凹凸を埋めるほどの厚みは持たせられないことが分かった。

以上より、陰極側バッファ層による心材表面凹凸の平滑化は困難であることがわかった。今回の事業においては、安定性を重視し陰極と活性層間のエネルギーギャップ調整のために金属酸化物半導体を陰極側バッファ層に用いることとした。

2-2 繊維型太陽電池作製プロセス開発

繊維型太陽電池の生産性向上のため、従来手作業で作業者の習熟が必要であった箇所の機械化を重点的に行った。また、繊維型太陽電池の発電性能向上についても着手した。

2-2-1 繊維型太陽電池作製プロセスの機械化

有機薄膜太陽電池作製工程のうち、溶液塗布による材料積層工程および補助電極取り付け+封止工程を機械化し、7本同時に加工を行えるよう改善した。材料塗布に用いる特殊太陽電池製膜テスト装置を図5に、特殊太陽電池 巻付成膜テスト装置を図6にそれぞれ示す。

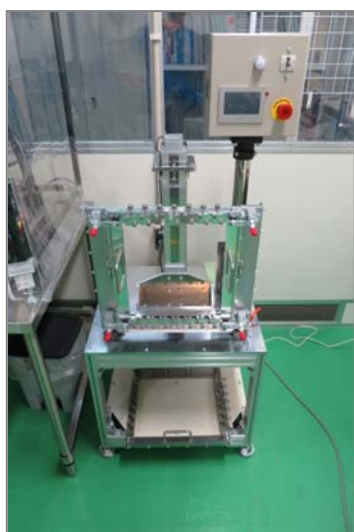


図5 特殊太陽電池製膜テスト装置

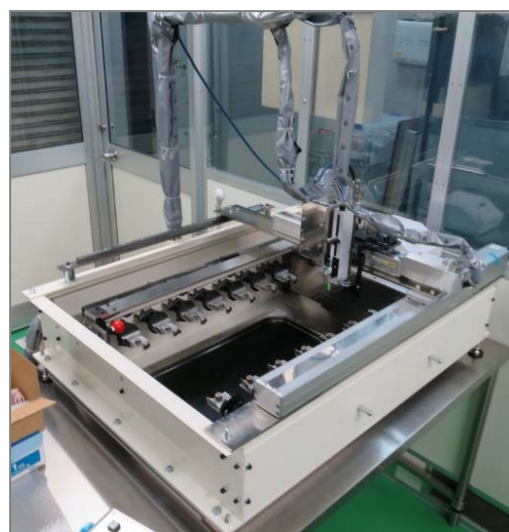


図6 特殊太陽電池巻付成膜テスト装置

【公開版】

これらの設備開発により、作業者の習熟を必要としない繊維型太陽電池の作製環境を整えることができた。また、生産能力に関しては本事業開始前の5倍以上となっており、目標としていた値への到達度は70%となっているが、材料製膜後の熱処理炉など周辺設備を整備することで更に生産能力を向上させていく計画である。

また、繊維型太陽電池の作製環境条件を見直すことで歩留まりの向上に成功し、従来の条件においては良品割合 40%だったところ 90%超まで改善することができた。

2-2-2 繊維型太陽電池へのナノファイバー構造導入

繊維型太陽電池の高出力化のため、活性層内へのナノファイバー構造導入の検討を行った。

有機薄膜太陽電池において発電を行う活性層は p 型と n 型の有機半導体を組み合わせた構成になっている。発電の原理としては、光エネルギーの入射によって主に p 型半導体内部で励起子と呼ばれるものが発生する。この励起子が p-n 接合界面まで到達することで電子・正孔へと分離し、それぞれ陰極・陽極側へと流れることにより発電が行える。励起子はエネルギー的に不安定な状態であり、活性層内部での拡散距離が制限されていて、すぐに失活してしまう。これが活性層を薄膜化しなければならない理由である。そのため高効率化のためには、活性層内部のいたるところに p-n 接合界面が存在していることが好ましいといえる。ナノファイバーとは数種の定義があるものの、繊維径が $1\mu\text{m}$ に満たない繊維を指しており、この構造を活性層内部に用いることで p-n 接合界面の増加と優れた電荷パスの生成を期待できる。

本事業においては、活性層中の p 型半導体をナノファイバー構造とすることで発電特性の向上を図った。ナノファイバー構造を導入した活性層と従来型活性層の有機薄膜太陽電池特性の比較を表3に示す。発電特性は AM1.5G の条件で測定した。

表3 活性層構造を変更した有機薄膜太陽電池の発電特性

活性層構成	Voc [V]	Jsc [mA/cm ²]	FF	PCE [%]
ナノファイバー構造	0.61	8.5	0.59	3.1
従来型	0.65	7.2	0.56	2.6

活性層にナノファイバー構造を導入した場合、従来型の活性層構造のものと比較して電流密度 (Jsc) の値の増加が見られた。今回のサンプルにおいては電圧が低下しているものの、Jsc 上昇および FF 向上の効果もあり変換効率としてみた場合は十分に優位差がみられる。

また、p 型半導体をナノファイバー構造とすることによる電荷パスの最適化について検証するため、空間制限電流の測定による正孔移動度の算出を行った。結果を表4に示す。

表4 活性層構造を変更した有機薄膜太陽電池の正孔移動度

活性層構成	正孔移動度 μ [$\text{cm}^2/\text{V s}$]
ナノファイバー構造	8.62×10^{-6}
従来型	2.12×10^{-6}

これらの結果から、p 型半導体をナノファイバー構造とすることでより有機薄膜太陽電池を高出力化できる見込みが得られた。また、このナノファイバー構造を繊維型太陽電池へと適用する設備も導入しており、継続して高出力化検討を進めていく。

2-3 布帛型太陽電池製織プロセス開発

布帛型太陽電池の生産能力向上のため、製織工程の機械化および自動化と、実用的な発電能力を得るための結線作業の効率化を実施した。

2-3-1 布帛型太陽電池用細巾織機の開発

布帛型太陽電池は繊維型太陽電池を緯糸として織り込むことによって作製する。本事業の



図7 繊維型太陽電池緯糸挿入織機

開始前から試作は行っていたが、繊維型太陽電池という特殊な糸を織り込むため通常の自動織機を寸動で動作させてほぼ手織りのような状態で作製する必要があった。布帛型太陽電池の製織能力を向上させるため、繊維型太陽電池の緯糸挿入を機械化した専用織機の開発を行った。開発した専用織機を図7に示す。

専用織機には、繊維型太陽電池挿入用の専用レピアが組み込まれており、繊維型太陽電池の内部構造にダメージを与えずに布帛内に緯糸として挿入することが可能となっている。

この専用織機開発により、従来は1日当たり 50cm しか製織できなかった布帛型太陽電池を 4m/日で生産可能となり、目標を上回る製織能力を達成した。作製した布帛型太陽電池を図8に示す。



図8 布帛型太陽電池

2-3-2 布帛内での繊維型太陽電池の結線

繊維型太陽電池一本の発電能力は、一般的なパネル型太陽電池と比較して小さいものとなっている。そのため、実用的な発電量を賄うためには繊維型太陽電池同士の集積化が必須といえる。繊維型太陽電池同士の集積化、つまりは結線構造を布帛型太陽電池内部で行う手法の開発を行った。

開発当初は小型のコネクタや基板を用いて接点を作製していたが、物理的強度が足りない、あるいは逆に布の柔軟性を損なってしまうという問題が発生した。そこで布帛という特性を活かし、織組織による結線構造の開発によりこの問題を解決した。

具体的な方法としては、専用織機にかけている経糸の一部に導電性を有する糸を予め配置しておき、その経糸で繊維型太陽電池の電極を絞絡することで接点を作製する。図8の布帛型太陽電池はこの手法で結線を行っている。これにより、布の製織と結線作業を一括して行えるようになったため、結線部分の物理的問題が解決されただけでなく生産能力の向上にもつながっており、目標として設定していた結線能力を達成することが出来た。

最終章 全体総括

本研究開発活動において、平成28年度から30年度までの三年間をかけて計画当初に設定した課題に取り組み、得られた成果及び残された課題、今後の事業化展開について下記にまとめる。

● 研究開発の成果

1. 金属繊維表面のラフネス制御

繊維型太陽電池心材用の専用生産設備を導入し、繊維型太陽電池の不良原因となる表面凹凸を低減させた心材製造が可能となった。

2. 繊維型太陽電池作製プロセス開発

繊維型太陽電池の作製工程を機械化し、バッチ式ではあるが事業開始前と比較して5倍まで生産能力を向上させることに成功。機械化により作業者の習熟度が性能に及ぼす影響を低減させることにも繋がった。また、作製環境条件を改善し良品割合90%超を確認した。

太陽電池出力向上について、ナノファイバー構造を活性層内部に導入することで正孔移動度を従来構成比4倍まで上昇させることができ、短絡電流密度の向上を確認した。

3. 布帛型太陽電池製織プロセス開発

布帛型太陽電池用の専用織機を開発し、従来比8倍まで製織能力を向上させることに成功した。また、布帛型太陽電池の織り組織を改良し、布帛製織と同時に結線を行える組織を見出した。結果として、目標として設定した生産能力を達成できた。

● 研究開発後の課題

繊維型太陽電池製造工程の機械化を行い、従来比で生産性を向上させることには成功したが、未だに市場流通可能なほどの生産能力を得られてはいない。また、有機薄膜太陽電池の欠点ともいえる長期耐久性についての解決にも至っていない。今後の事業化に向け、連続式の繊維型太陽電池製造装置開発及び高耐久性付与のための封止加工技術開発を推進していく。

● 今後の事業化展開

本事業における研究開発成果である布帛型太陽電池を用いて、現段階でBLE方式の無線センサ端末の動作を行えることを確認している。また、試験運用ではあるがマイコンを動作させて小型液晶の表示切り替えを行うシステムの全電力を賄うことにも成功している。

このように協力いただいている他業種の企業との連携を深め、布型の電源というユニーク性を活かした新規商材の事業化を目指す。