

平成29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

「カーボンナノチューブ電線の合成・紡織技術とCNT電線の応用開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 杉田電線株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景
- 1-2 研究目的及び目標
- 1-3 研究体制（研究組織・管理体制）
- 1-4 成果概要
- 1-5 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 長尺CNT線材の量産化技術の確立
- 2-2 CNT線材の表面・内部処理開発
- 2-3 CNT線材の2段階目の燃り合わせ技術開発
- 2-4 モーションセンサーの技術開発、シールド用リボンの開発
- 2-5 安全性評価

最終章 全体総括

- 3-1 研究開発成果まとめ
- 3-2 研究開発後の課題
- 3-3 事業化展開について

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景

カーボンナノチューブ(CNT)線材は従来困難であった高強度かつ超軽量の電線材料となることから、自動車、飛行機等の運搬輸送機の軽量・高強度化を実現し、省エネ推進に大きな期待を持たれている。本事業においては、電線の根本的な軽量化を図り、電線を使用するワイヤハーネス、モーター、センサー等の軽量化に資することを目的としてCNT電線化技術の確立を目指す。加えて、昨年度より国の重点施策であるロボット技術に関する部品の高速度応答歪みセンサー（モーションセンサー）としてCNT線材が重要視されつつあるのでこれも合わせて商品化を行う。従来技術と本事業で開発する技術の差異及び概要を図1に示す。

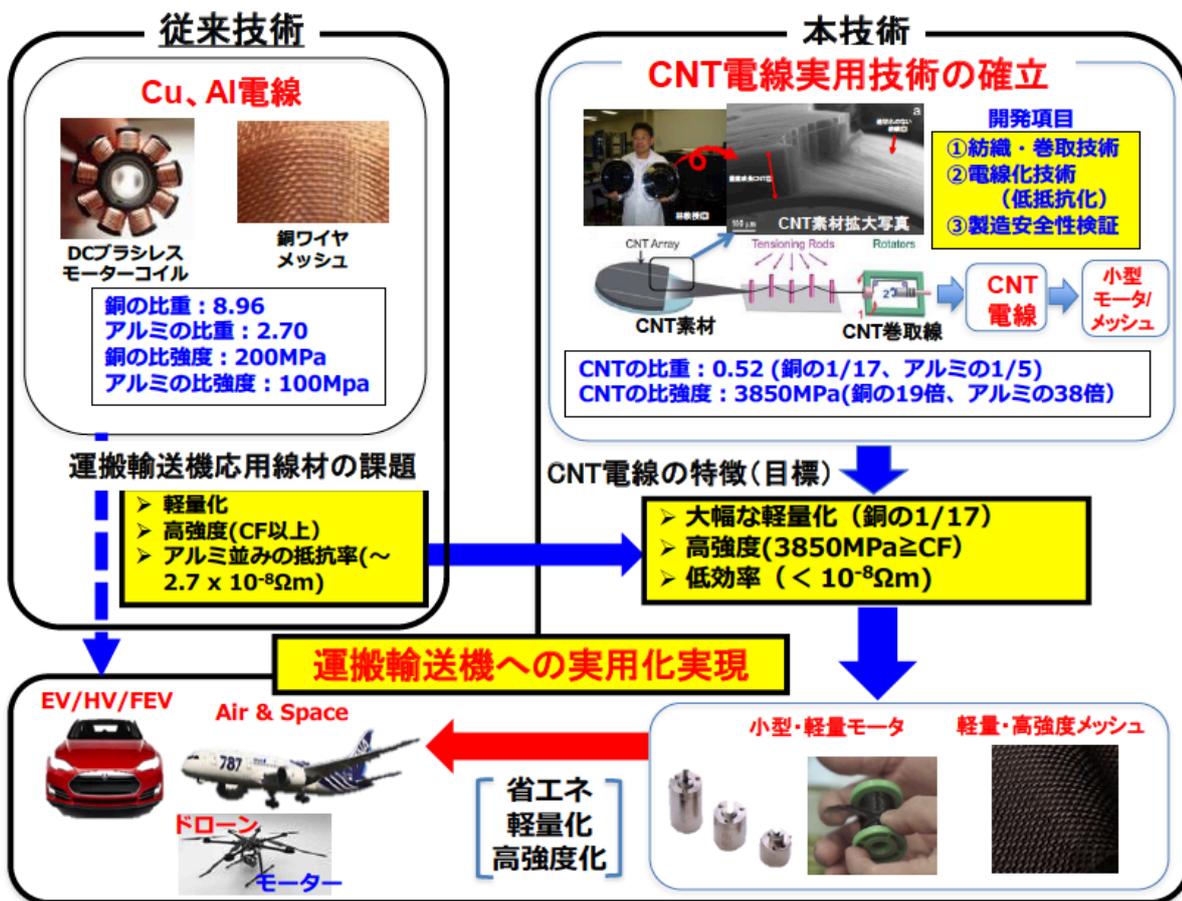


図1 従来技術と本事業技術の概要

○新技術を実現する為に解決すべき研究課題

電線及び繊維強化プラスチックは軽量化による省エネ/温暖化ガス排出削減と高耐久性・耐候性の要求から、航空機用として本格採用されて以降、炭素繊維(CF)を用いた応用用途開発が加速的に増加して様々な分野での製品開発が盛んに試みられている。しかし、CFの原糸の電気特性は金属並みの体積抵抗率だが、その具体的な製品形態はエポキシ樹脂で固めるために絶縁体となり導電性線材として利用す

ることは成功していない。CF は軽量架空電線用芯材としての実績は少しずつ増えているが、送電用としては実績が無い。軽量化の要求される輸送機器分野は、該当分野の温暖化ガスの排出量は我が国の場合でも総排出量の約 20%を占めるため、二酸化炭素排出抑制が急務になっており、2015 年に採択されたパリ協定を遵守する事が求められている。これをクリアするために車両の電動化と軽量化は重要な対策のひとつとなる。電動化対策であるハイブリッド車や電気自動車等では電気制御や駆動モーターが増えるので電線の使用量が飛躍的に増加し、車両・機体重量の増加を招いている。一部車種では既に総延長 4km を越えており電線重量増加は然るべき対策を取ることが要望されている。

このような背景から、銅に対する比重が約 1/17 であり、低抵抗化が可能となるため（理論的な低効率率は Cu の 1/10）超軽量電線材料である CNT 線材の実用化が望まれている。本事業では、電動車用に多く使用されることが計画されている小型モーター用の電線およびワイヤハーネス応用に対して、CNT 電線化技術を開発することを目的とした。さらに、近年、急速に CNT 線材を活用したモーションセンサー、ケミカルセンサーが注目を浴びているので、電線の派生応用としてセンサー用線材の商品作製を目指した。

1-2 研究目的及び目標

(1) 長尺 CNT 線材の量産化技術の確立

2層 CNT(DWCNT)垂直成長基板 1 枚（1 バッチ）あたり $\phi 10\sim 30\mu\text{m}$ 線で初年度は 1km、最終目標値は 5km/日を超える無断線連続長尺線材の紡織製造技術開発を目指す。この際、引き出しを容易にする DWCNT の合成条件、及び基板から引き出した粗線材どうしを紡ぐことで長尺化する技術（紡織技術）を、工業的に確立する。紡績技術と並行し複数の CNT 合成基板を用いて長尺（1,000 m 以上）の巻取をめざす。なお、基板からの撚線を 1 次撚線、1 次撚線を複数撚り合わせたものを 2 次撚線と称する。

(2) CNT 線材の表面・内部処理開発

導電性改善のため、1 次撚線の表面又は内部加工処理技術の開発を行う。アルミ合金電線の抵抗値を目指す。絶縁加工処理はシリコンゴム被覆と同等の絶縁性能($10^{10}\ \Omega\text{m}$ 以上)とする。工業製品などで品質管理は重要な工程であるが、金属と物性の異なる炭素は半導体のために、金属並みに導電性の高い CNT でも空間における静電容量が金属と異なる。すなわち、現在の金属線用絶縁品質管理方法が直ちに適用可能とは言えない。ゆえに塗布絶縁電線および樹脂絶縁被覆電線の絶縁被覆品質管理方法の技術開発を行う。管理目標値は銅電線の製品と同じ絶縁基準を目標とするものの、金属電線（金属）と CNT 電線（半導体）では物性が異なるのでユーザーのフィードバックを下に産業化基準を構築する。

(3) CNT 線材の 2 次撚線技術開発

CNT 線材の太径化の必要がある。ここでは、複数の 1 次撚線を束ねる多連装 CNT 紡織技術の開発を行う。本提案目標として、まずは均質な 1 次撚線の作製。巻取り機に CNT 合成基板を複数設置し、

撚線太さと撚り角を一手に管理する技術を確立する。これにより長手方向の品質が安定する。2次撚線は、ポピンへ巻き取った複数の1次撚線を杉田電線株式会社（以下、「当社」という）の撚線技術で行う。

（4） モーションセンサーの技術開発、シールド用リボンの開発

樹脂被覆電線、シールド線、センサー等、多様な用途別需要に対応した商品を、当社の電線製造技術を活用してCNT 線材を製品化する加工技術を開発する。

CNT 線材を使ったセンサー用織物の試作を協会社と行い、この技術の完成度を高めることを行う。センサー用に加えて、センサーのリード線としてもCNT 線材を用いるのでいわゆる電線用としても開発を進める。さらに、これらの製品をユーザーが容易に使えるものとするために、コネクタについて、ワイヤハーネス・コネクタメーカーと協業し開発を進める。

（5） 安全性評価

労働環境安全性確保においては米国国立労働安全衛生研究所(NIOSH)発行の Current Intelligent Bulletin 65(CIB65、2013)の指針（CNT 単独の空間濃度管理基準推奨値 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）を労働環境管理の指針として導入する。この数値は個別ばく露対策（マスク、ゴーグル等）の着用を必要としない労働環境基準推奨値である。電線加工工程においてこの基準に適合する線材そのものの仕様と製造工程を実現する技術開発を Responsible Development の潮流に則って製品開発に合わせて行う。

2017 年に厚労省国立食品医薬品衛生研究所の CNT 安全性研究に協力することになり、当社の DWCNT を提供することになった。この安全性評価研究はげっ歯類を用いて、長さ直径の揃った CNT を投与して、繊維的效果が現れる長さを特定するものである。さらに、英国国立医薬品研究寄稿(MRC)のCNT 中皮腫研究で当社 DWCNT が採用された。結果は国際的に認知されるものとなるので、当社 CNT が基準物質になる可能性がある。

1-3 研究体制（研究組織・管理体制）

本補助事業の管理・運営は、当社が実施する。

・事業管理者

【杉田電線株式会社】 最寄り駅：東武アーバンパークライン（東武野田線）「岩槻」駅

岩槻本社工場

〒339-0037 埼玉県さいたま市岩槻区浮谷 2290 番

・研究等実施機関

【国立大学法人 岡山大学】 最寄り駅：津山線「法界院」駅

津島キャンパス

〒700-8530 岡山市北区津島中 1 丁目 1 番 1 号

○研究組織（全体）

杉田電線株式会社

間接補助

研究等実施機関 国立大学法人 岡山大学

総括研究代表者 (PL)

所属：杉田電線株式会社
役職：代表取締役 社長
氏名：杉田 幸男

副総括研究代表者 (SL)

所属：国立大学法人 岡山大学
役職：教授
氏名：林 靖彦

アドバイザー

所属：国立大学法人信州大学
役職：特任教授
氏名：鶴岡 秀志

アドバイザー

所属：国立大学法人東京工業大学
役職：准教授
氏名：松本 英俊

1-4 成果概要

| 目標 | 結果 | 達成度 |
|---------------------------------------|-------------------------|-------|
| 1 CNT 線材紡績(1次撚線)：1,000m 以上*1 | 1,000 [m] | 100% |
| 2 CNT 線材の低抵抗化 10^{-7} [Ω m] | 10^{-7} [Ω m] | 100% |
| 3 安定した複数本撚り(2次撚線) | 4本撚りまで可能 | 100% |
| 4 製品開発(センサー用) | リボン(テープ)状に加工(経織り・緯織り) | 100% |
| 5 毒性評価 厚労省(日本)・MRC(英国) | 検証中 2019年末発表予定 | 50%*2 |
| 6 安全性：世界のベンチマークになる*2 | 毒性試験実施先が国研 | 100% |

注*1: 5,000m 達成は 1,000m達成により連続作業繰り返しで到達可能と判断した。

注*2: 毒性評価は48ヶ月を目標としているので達成度を50%とした。日本および英国の研究所の結果は WHO, OECD 等に報告される。

1-5 当該研究開発の連絡窓口

所属 杉田電線株式会社

氏名 杉田 晃一

電話 048-798-3165

FAX 048-798-5388

E-Mail sugita_a@sugita-ew.co.jp

第2章 本論

2-1 長尺CNT線材の量産化技術の確立

- 1) CNTの線材作製を行った結果、社内で標準化したサイズ一枚の基板から紡績出来るCNT線材の長さは40m~50mであった。
(参考資料(YOUTUBE) : <https://youtu.be/5cwP6JQrEgg>)
- 2) 複数の基板を使用し途切れないよう繋ぐ事で長さは1,000m以上の線材サンプルを作製することができた(図2参照)。
尚、技術的に長さの制限は無い。



図2 CNT線材 1,000m 巻ボビン

2-2 CNT線材の表面・内部処理開発

CNT線材(一次撚線)の低抵抗化として、還元雰囲気中でのCNT線材の通電加熱試験を行った。試験条件は、還元雰囲気での通電加熱、及びエタノールに浸漬させた状態で同様の加熱とした。また、絶縁処理として、当社既存設備にて絶縁被覆を行った。

- 1) 還元雰囲気中、エタノール浸漬状態それぞれの通電加熱前後の抵抗値を測定したが低抵抗化には至らなかった。
- 2) エタノール浸漬状態で通電加熱を行ったサンプル表面をSEM観察で確認した(図3及び図4参照)。表面の凹凸が減少、また径が太くなったことからエタノール由来の炭素が堆積したと考えられ、低抵抗化の可能性を確認した。

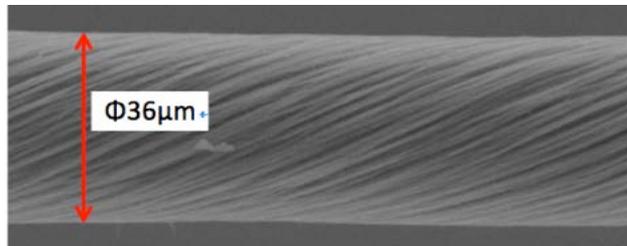


図3 還元雰囲気中で通電加熱を行ったCNT線材

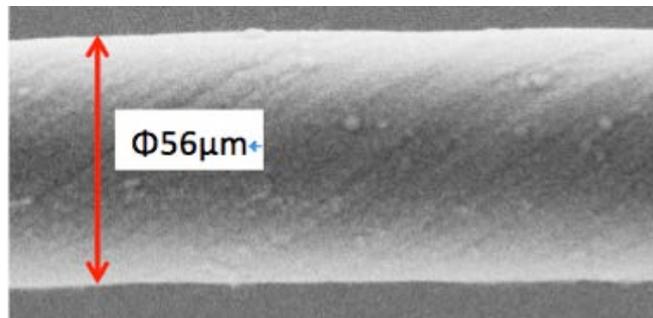


図4 エタノールで浸漬させた状態で通電加熱を行ったCNT線材

3) 絶縁被覆は電線製造に使用している既存設備で行い、CNT 線材表面に連続して被覆することが出来た(図5参照)。被覆の肉厚は約0.08mmである。今後は2次撚線により太線化した線材で長尺被覆を行い安定性を確認する必要がある。

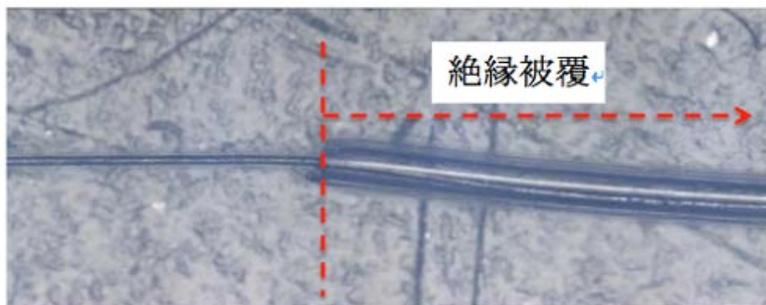


図5 CNT 線材の絶縁被覆部分

2-3 CNT 線材の2段階目の撚り合わせ技術開発

目標であるCNT 線材の太線化作製を以下の方法で行った。CNT 線材撚線機の送出側に4本のCNT 線材を取り付け、図6のように撚り合わせを行った。

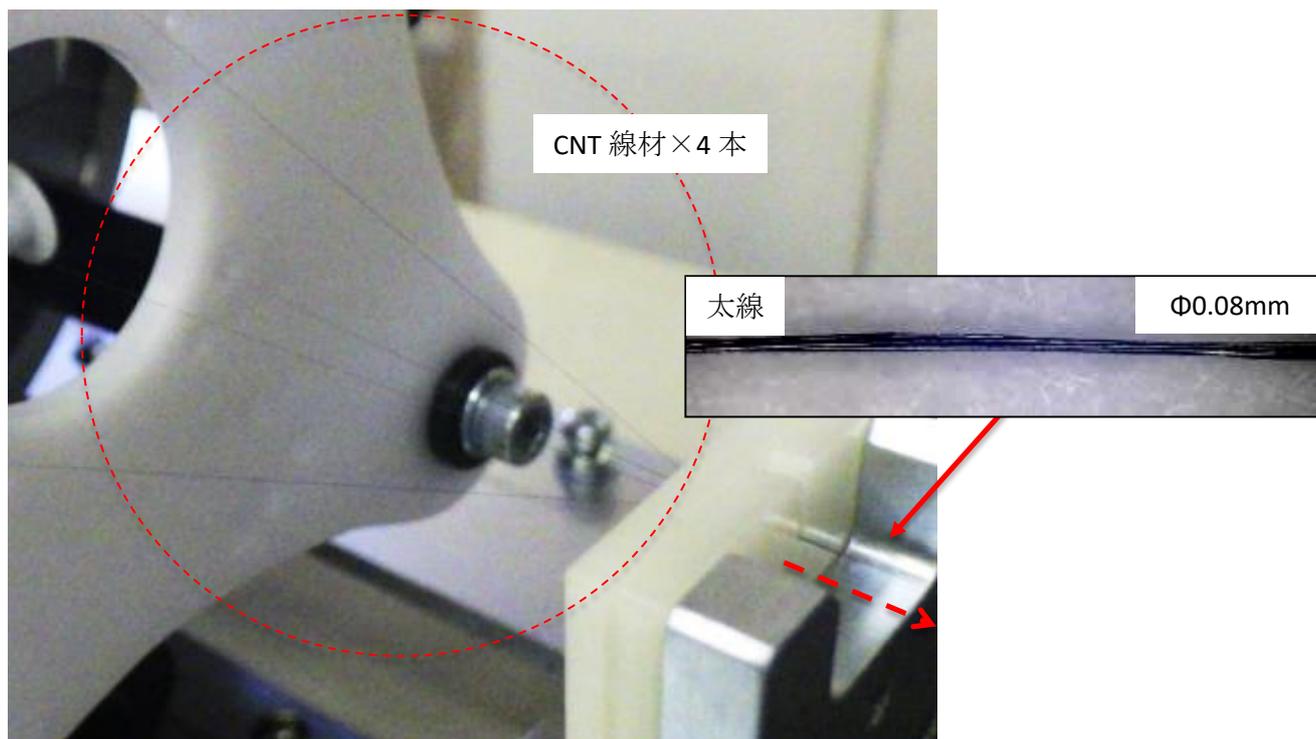


図6 2次撚線作製時の写真

- 1) 4本のCNT 線材を使用して撚線作製を行った結果、 $\phi 0.08\text{mm}$ のCNT 撚線を作製できた。
- 2) CNT2次撚線のピッチが荒くなってしまったが、これはCNT 線材の張力調整が不十分なためであり、再調整により改善できる。

2-4 モーションセンサーの技術開発、シールド用リボンの開発

導電性メッシュ作製の為、繊維メーカーと共同でCNT線材を織り込んだリボンテープの開発を行った。その前段階としてCNT線材を経(たて)糸のみ・緯(よこ)糸のみに使用して試作を行い、派生応用品としてセンサー特性の評価を行った。

図7にCNT線材を経糸として機織りしたリボン状センサーの写真、図8にCNT線材を緯糸に使用したリボン状センサーの写真、図9にセンサーの応用例を示す。

(参考資料(先端産業創造プロジェクト YOUTUBE) : <https://youtu.be/ravelaBULkM>)

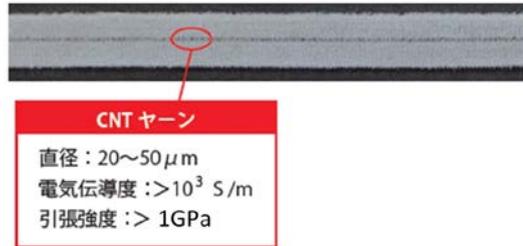


図7 CNTを機織りしたリボン状センサーの写真

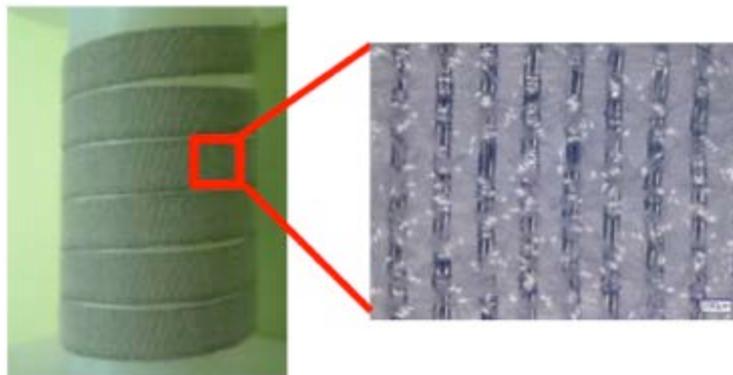


図8 CNT線材を緯糸に使用したリボン状センサーの写真

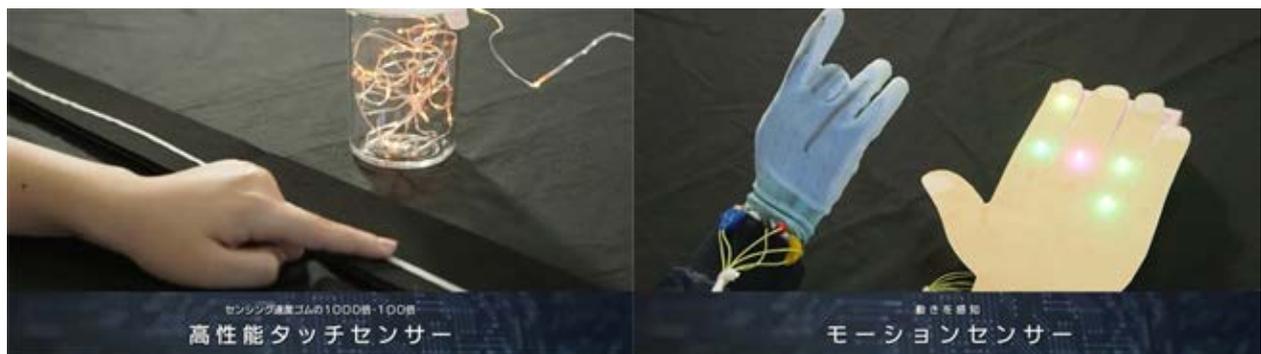


図9 センサーの応用例

1) CNT線材を機織りしたリボン状センサーの特性

リボンの接触により静電容量が変化するので、この特性を利用してタッチセンサーを試作した。

2) CNT線材を緯糸に使用したリボン状センサーの特性

リボンの伸縮によりインピーダンスが変化した。これにより、歪み検知(モーション)センサーを試作した。

2-5 安全性評価

製品と製造技術の開発及び検証の為、日本と英国の国立研究機関（MRC）がそれぞれ国家プロジェクトとして当社当該 CNT の生物学的毒性評価研究を行っている。厚労省ナノカーボン毒性評価プロジェクト（国立医薬品食品衛生研究所+名古屋市立大）では吸入暴露試験、英国国立医学研究機構（材料毒性試験部）では中皮腫発生試験を行っている。現在はまだ試験中であり評価結果は中間報告が 2018 年秋、最終報告は 2019 年末、公的機関としての最終報告書は 2020 年夏頃を予定している。いずれの研究結果も OECD 及び WHO に報告される。

最終章 全体総括

3-1 研究開発成果まとめ

基板を並列に並べて紡績を行い、複数の基板を使用し途切れないよう繋ぐ事で 1,000m 以上の CNT 線材を作製することができた。技術的に CNT 線材の長さに限界はない。また複数の 1 次線材を束ねることにより、太径な線材（2 次撚線）を作製できた。これにより、連続紡織・巻取技術の開発目標である長尺紡績線の作製と、多連装紡織・巻取技術の開発目標である太径線材の作製が可能であることが分かった。

静電容量センサー、及びモーションセンサーを作製することができたこれにより、応用開発の目標である導電性メッシュ作製が技術的に可能であることが分かった。

3-2 研究開発後の課題

センサーについては、応答性、感度のいずれも良好な試作品が得られた。しかも、繊維製品型の準量産品で達成されたのでゲーム、ロボット市場向けにマーケティングを進める。電線としては、連続製造設備における試作（連続電解銅メッキ）を実施中。CNT の電解メッキ品は世界初なのでワイヤハーネスメーカー、モーターメーカーへの供与を進める。

これらの商業化を速やかに達成するために、現有のパイロットスケール製造設備を量産設備へと順次増強する予定である。また、生産コストの改善を計るために合成・紡績技術の改良を行う予定である。

3-3 事業化展開について

CNT 線材の電線開発の過程で、現在量産化の設計段階となった。その過程で、線材の導電性・半導性を活用し、CNT 線材の軽量・テープ型のモーションセンサー、触感（タクタイル）センサー更に、脈拍センサーの開発を進めている。

モーションセンサーと脈拍センサーは良好な試作品が得られている。これが完成すれば、VR・ヘルスケア等の 3,000 億円市場に参入できる。最軽量品、コスト共に最も競争力ある新製品のため、5 年後に 5~10% 市場獲得をする。他者が類似品を販売してきても、現在は DWCNT 線材の量産は当社のみ技術である。設備投資は、当初 10 億円から漸次増強し、5 年後には 50 億円の紡績・クロスの設備投資を行う。内部利益率（IRR）は 15% 以上を確保する。