

研究終了報告書

「人感覚を模倣した多機能ソフトセンサーの開発」

研究期間：2021年10月～2024年3月

研究者：鈴木 大地

1. 研究のねらい

日本の産業競争力の強化に向けて Intelligence of Things (IoT)・人間拡張等による強靱社会「Society 5.x」の達成が提言されており、主要テーマとして革新的なセンシング技術の開発が求められている。強力なセンシング応用を実現する際に重要となる手法が、異なるセンシング技術の「融合」であり、これまでも LiDAR(距離計測)・カメラ(画像認識)・GPS(自車位置情報)等を融合させた自動走行システムのように多角的な情報の融合により単一センサーの性能を超えた新しい価値が創出されてきた。この視点から技術融合の核となるセンサーの開発動向をみると、近年伸展著しいのが有機半導体材料によるソフトセンサーであり、従来の無機半導体にはない「柔軟性」を活用した圧力・ひずみ・温度・湿度等の様々なセンサーの開発が行われている。これらソフトセンサーにおいても「融合」は強力な手法であるが、人の指のように圧覚・温覚・痛覚・触覚といった様々な情報を「感覚」として読み出すためには、対象との接触点において複数の情報を同時計測する必要があるため、個々の情報を単純に融合している既存技術ほど実現は容易ではない。接触点での多情報計測を行うためには圧力・光・熱等の異種センサー群を接触点に集積する必要があるが、各センサーの検出原理や材料が異なるために作製プロセスの不一致や配線の複雑化による集積難、開口面積の低下に伴う感度劣化といった問題が発生してしまう。すなわち、複数のセンシング技術を融合することで個々のセンシング技術が破綻してしまうという相反する課題を抱えているのである。そこで本研究ではこの難題の解決にむけ、同一素子で複数の異なる情報(マルチパラメータ)を計測可能なマルチパラメータソフトセンサーの開発に挑戦する。

同一素子で複数の異なる情報を計測するためには、圧力・温度・光といった様々な信号に反応できる材料を選定する必要がある。そこで本研究では、グラフェンを筒状にした1次元構造体であるカーボンナノチューブ(CNT)の積層膜を材料として使用する。本研究ではCNT膜における光センシング技術に物理的接触による圧力・温度センシング技術を融合させることを目指し、多情報の信号分離手法の開発やセンサーの高感度化や高耐久化といったデバイス開発に取り組むことで、同一素子で圧力・温度・表面形状・内部構造・材質等の複数のパラメータを計測可能なマルチパラメータソフトセンサーを創出する。

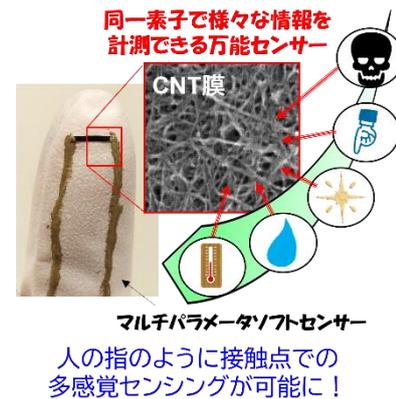


図1 本研究のコンセプト

【研究期間内の達成目標: CNT 膜を材料としたソフトセンサーの多信号同時計測技術・高感度化技術・強靱化技術を構築し、同一素子で複数(5つ以上)の異なる情報を計測可能なマルチパラメータソフトセンサーを創出する。】

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では CNT 膜における光センシング技術に物理的接触による圧力・温度センシング技術を融合させることを目指し、多情報の信号分離手法の開発やセンサーの高感度化や高耐久化といったデバイス開発に取り組んだ。

研究課題1「マルチパラメータ計測に向けたセンサー構造・光学系に関する研究」については、CNT 膜を材料として用いることで、曲げ・温度・光(紫外-可視-赤外-テラヘルツ(THz)帯)といった幅広い要素を計測可能なセンサーを作製した。また、複数の入力信号に対する応答を個別に分離するマルチパラメータセンシングのアルゴリズムを構築し、同一素子でのマルチパラメータ同時計測を実現した。

研究課題2「センシング感度向上に関する研究」については、レーザアブレーション法を利用することで CNT 膜を 1 マイクロメートルの空間解像度で切り出す微細加工系を構築し、素子密度として 200 素子/cm² の高密度集積を達成した。開発した微細集積技術によりセンサーの素子密度を高めることで光応答に対する感度を 13 倍に向上し、光検出感度 5pW Hz^{-1/2} を達成した。熱応答に関する感度については、有限要素法による伝熱解析の結果、センサーの感度が基板の熱物性に依存することを発見。転じて、センサーの感度(光熱応答)から貼り付けた物質の熱物性値を計測する新規計測技術「非定常吸熱法」を発明。本技術を論文化するとともに特許出願を行った。

研究課題3「センサー強靱化に関する研究」については、CNT に対する N 型ドーパントの経年劣化(最長 6 か月で素子が壊れてしまう)のメカニズムを解明。パリレンの保護層を導入することで、物理的・化学的刺激に対する素子性能の 1 年以上の高安定化と、酸・アルカリ性熱水からの熱電発電といった劣悪環境におけるセンサー応用を達成した。

(2) 詳細

研究課題1: マルチパラメータ計測に向けたセンサー構造・光学系に関する研究

【当初達成目標: 各シングルパラメータにおける測定系の構築・センシング応用の達成、および単一素子での 5 つのマルチパラメータの計測・判別手法の確立】

研究課題1「マルチパラメータ計測に向けたセンサー構造・光学系に関する研究」については、CNT 膜を材料として用いることで、曲げ・温度・光(紫外-可視-赤外-THz 帯)といった幅広い要素を計測可能なセンサーを作製した。また、複数の入力信号に対する応答を個別に分離するマルチパラメータセンシングのアルゴリズムを構築し、同一素子でのマルチパラメータ同時計測を実現した。

【達成事項: 各シングルパラメータにおける測定系の構築・センシング応用の達成、および単一素子での 5 つ(動き・温度・紫外・可視・THz)のマルチパラメータの計測・判別手法の確立】
→当初目標を全て達成

研究課題2: センシング感度向上に関する研究

【当初達成目標: センサーの高密度アレイ化…1 cm² 当たり 200 素子、光検出感度…雑音等価電力 < 10 pW Hz^{-1/2}】

研究課題2「センシング感度向上に関する研究」については、レーザーアブレーション法を利用してCNT膜を1マイクロメートルの空間解像度で切り出す微細加工系を構築し、素子密度として200素子/cm²の高密度集積を達成した。開発した微細集積技術によりセンサーの素子密度を高めることで光応答に対する感度を13倍に向上し、光検出感度5pW Hz^{-1/2}を達成した。熱応答に関する感度については、有限要素法による伝熱解析の結果、センサーの感度が基板の熱物性に依存することを発見。転じて、センサーの感度(光熱応答)から貼り付けた物質の熱物性値を計測する新規計測技術「非正常吸熱法」を発明(図2)。本技術を論文化するとともに特許出願を行った。

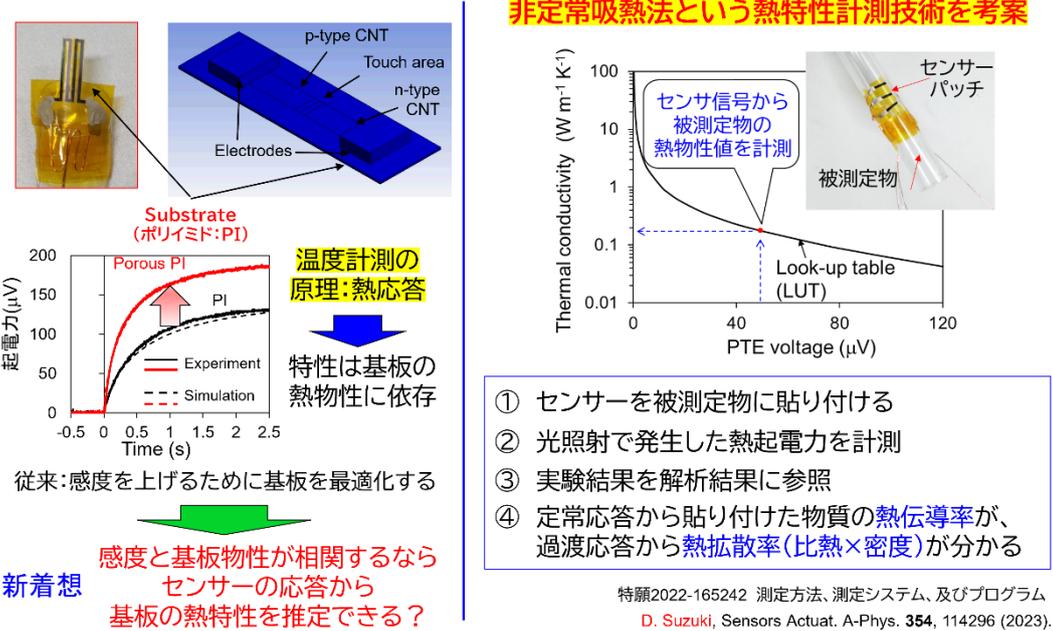


図2 開発した新規計測技術「非正常吸熱法」

【達成事項:センサーの高密度アレイ化…1 cm²当たり200素子、光検出感度…雑音等価電力 = 5 pW Hz^{-1/2}、温度測定部位と動き測定部位に役割を分割した新たなセンサー構造の考案、非正常吸熱法の開発】

→当初目標を全て達成するとともに当初予定になかった追加の成果を達成

研究課題3: センサー強靱化に関する研究

【当初達成目標: 接触刺激・大気暴露等の外的刺激に対して感度劣化を 10%以内に抑えたまま 1 年以上の性能保持】

研究課題3「センサー強靱化に関する研究」については、CNT に対する N 型ドーパントの経年劣化（最長 6 か月で素子が壊れてしまう）のメカニズムを解明。パリレンの保護層を導入することで、物理的・化学的的刺激に対する素子性能の1年以上の高安定化と、酸・アルカリ性熱水からの熱電発電といった劣悪環境におけるセンサー応用を達成した(図 3)。

【達成事項: 接触刺激・大気暴露等の外的刺激に対して感度劣化を 10%以内に抑えたまま 1 年以上の性能保持】

→当初目標を全て達成

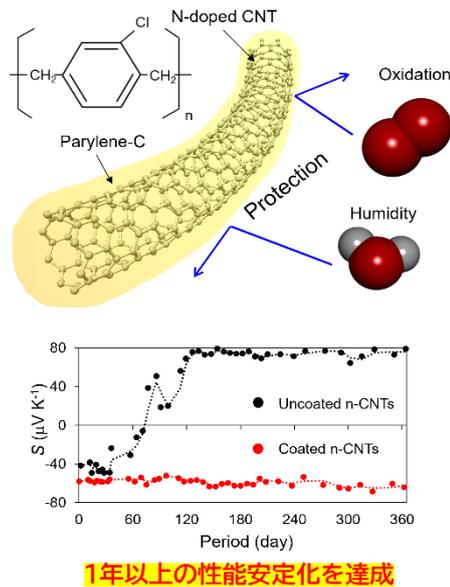


図 3 パリレンコーティングによる強靱化

3. 今後の展開

本研究期間において当初計画していた全ての目標を達成することができた。今後、開発した信号分離アルゴリズムおよびデュアルパラメータタッチパネル等について特許出願を行うとともに論文投稿を行う予定である。その後、展示会等でのデモ機の出展を通じて多機能ソフトセンサーの実用化を目指す。

4. 自己評価

研究目的の達成状況については、当初計画していた目標を全て達成したことに加えて、当初予定になかった追加の成果を達成した。当該研究に関する実績として 7 本(うち 1 本は査読中)の原著論文発表、3件の特許出願、3件の招待講演、そして2件の受賞という数多くの成果を挙げることができた。また、「同一素子による信号分離アルゴリズムと接触・温度同時計測タッチパネル」、「非定常吸熱法」、「領域内外の研究者との新規共同研究契約締結」の研究成果は、ACT-X の事業趣旨である「若手研究者が独自のアイデアからなる研究を進め、研究領域内外の異分野の研究者と相互触発することで、研究者ネットワークを形成しながら研究者としての個を確立することを目指します。」と合致しており、事業趣旨に沿った成果を挙げていると判断できる。

これらのことから、本事業において高い研究成果を挙げることができたと自己評価する。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 7件

1. Daichi Suzuki, Daniela Serien, Kotaro Obata, Koji Sugioka, Aiko Narazaki, Nao Terasaki,

公開

<p>Improvement in laser-based micro-processing of carbon nanotube film devices, Applied Physics Express, 2022, 15, 026503.</p>
<p>レーザアブレーションによる CNT 膜の微細加工技術を構築した論文。研究課題2「センシング感度向上に関する研究」において各種センサーを作製するための基盤技術であり、自身の研究の核となる加工技術。</p>
<p>2. Daichi Suzuki, Yoshiyuki Nonoguchi, Kazumasa Shimamoto, Nao Terasaki, Outstanding Robust Photo- and Thermo-Electric Applications with Stabilized n-Doped Carbon Nanotubes by Parylene Coating, ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15, 9873-9882.</p>
<p>研究課題3「センサー強靱化に関する研究」において得られた成果をまとめた論文。センサーの経年劣化の原因が大気中の酸素・湿気に由来することを突き止めた。また、センサーを有機高分子膜(パリレン)でコーティングすることで化学的・物理的耐久性を付与。手で触れても壊れない強靱なマルチパラメータセンサーを作ることができた。</p>
<p>3. Daichi Suzuki, Nao Terasaki, Freely attachable thermal property measurement method based on the photo-thermo-electric effect, Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 354, 114296.</p>
<p>研究課題2「センシング感度向上に関する研究」においてセンサーの感度が基材の熱物性値に依存することを発見。転じて、センサーの感度(光応答)から貼り付けた物質の熱物性値を計測する新規計測技術を構築。本技術を論文化するとともに特許出願を行った。</p>

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 3 件(特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	鈴木大地, 寺崎正
	発 明 の 名 称	テラヘルツ帯バンドパス偏光子およびテラヘルツ帯バンドパス偏光子の製造方法
	出 願 人	国立研究開発法人産業技術総合研究所
	出 願 日	2022/01/28
	出 願 番 号	特願 2022-011423
	概 要	本研究で構築した CNT 膜微細加工技術を活用し、テラヘルツ帯バンドパス偏光子を作製した。センサーの特性向上の他、無線通信等への応用が期待される。

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 【招待講演】鈴木大地、カーボンナノチューブ膜を用いたパッチ型テラヘルツ撮像デバイス、第 11 回 FNTG 若手研究会、2022/08/30.
2. 【招待講演】鈴木大地、光熱起電力効果を原理としたテラヘルツセンサーパッチの開発、第 67 回光波センシング技術研究会講演会、2023/01/17.
3. 【招待講演】鈴木大地、カーボンナノチューブを利用した光熱センシング技術、FIoT コンソーシアム第 2 回次世代センサ基盤技術分科会、2024/01/11.
4. 【受賞】鈴木大地、第 18 回飯島奨励賞、フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会、2022/03/03.
- 5.【受賞】鈴木大地、矢崎学術賞(奨励賞)、公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団、

公開

2024/01/10.