

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡崎 裕夫 殿

報告日 2025年 5月 30日

研究課題	汚染環境のオンサイト検査センサの創出に向けたカーボン・樹脂型洗濯パッケージの開拓	助成金額
		100万円
助成名	特別長期研究助成・研究助成・ 若手研究助成	
ふりがな	り こう	研究助成申請年度
研究者氏名	李 恒	2023年度
所属機関	中央大学 理工学部 電気電子情報通信工学科	研究期間
		2024.04-2025.03
役職	助教	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

1. 研究成果の概要

【研究背景】

モノづくり現場での非破壊検査素子としてカーボンナノチューブ (CNT) 型の光熱起電力効果 (PTE) センサが優れた適性・潜在能力を示す中、特に小型・軽量・貼り付け可能な仕様から、建設現場といった屋外での長期利用が期待されている。一方で屋外に特有な砂塵・雨汚れ等からセンサを保護するうえでは素子の洗濯が効果的と言えるが、既存の CNT 膜型 PTE センサにおいては洗濯耐性が十分に確保されていなかった (図 1)。

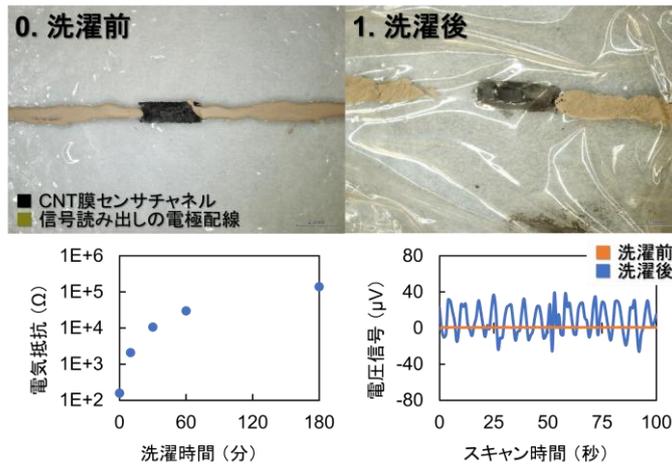


図 1 CNT 膜 PTE センサに対する洗濯耐久性という致命的な課題

【研究目的】

上記の状況を受けて、報告者は CNT 膜型 PTE センサに対する高耐久なコーティング保護構造を導入し、洗濯後も長期・安定的に繰り返しの感度復旧が可能な非破壊検査デバイス利用を実証する。代表者はこれまでにミリ波-赤外 (MMW-IR) の広帯域動作を CNT 膜型 PTE センサにより実現したが、本研究は更なる機能創発となる。

【研究手法】

本研究ではCNT膜型PTEセンサに対して、ポリジメチルシロキサン (PDMS)・フッ素樹脂のコーティングを施す (図 2)。ここで、PDMS は液体プロセスにより容易に膜厚が制御可能でありながらも、伸縮性に加え高い弾性を有しており、洗濯時の液流摩擦に対する物理的保護層として作用する。フッ素は強固な直鎖上の分子構造から他材料との反応性が著しく抑制されており、言い換えると洗剤刺激等に対する化学的な保護層として作用する。段階的にコーティング構造を施したCNT膜PTEセンサシートに対して、有機溶剤中への浸透試験を実施したところ、PDMS・フッ素のハイブリッド積層コーティング構造の採用のみで極めて安定的な電気特性が発現し、洗濯エレクトロニクスへの創出に向けた基盤技術を確立することができた。

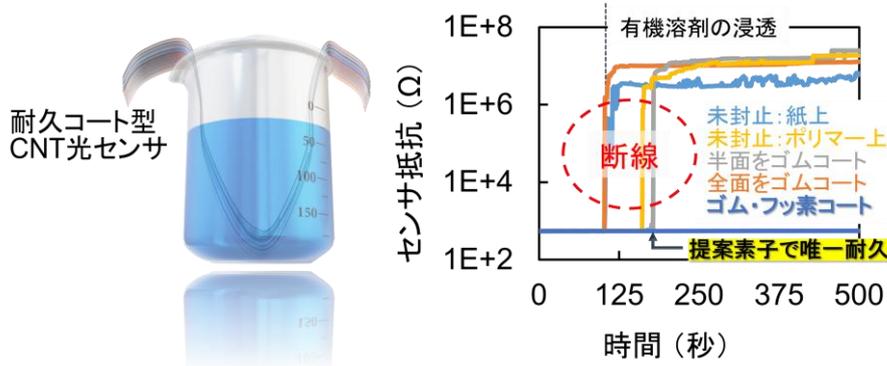
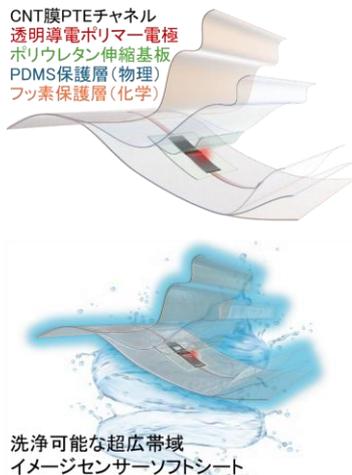


図 2 多層コーティング CNT 膜 PTE センサシートによる基礎的なデバイス動作特性

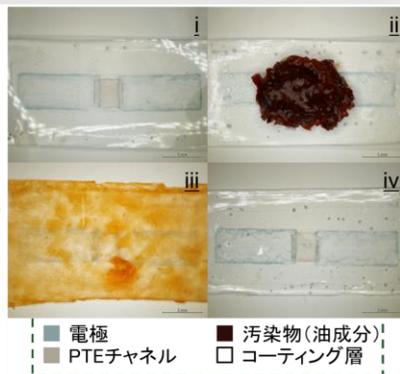
【研究成果】

上記の基礎検討事項に続いて、報告者は汚染前後および洗濯前後での非破壊検査デバイスとしてのCNT膜型PTEセンサシートのイメージング性能評価を行った (図 3)。外部からの汚染物としては油分塊を採用しており、イメージング性能の評価においては単一センサ素子によるxy走査型での透過系IR撮像を実施している。結果は油分汚染後のCNT型PTEセンサシートにおける著しい感度低下を反映しており、左記の状況は付着塊によるIR吸光 (つまりCNT膜部分への入射光量の減衰) を意味している。PDMS・フッ素コーティングを用いない条件下においても水洗濯への耐久性がCNT膜型PTEセンサでは得られているが、油分汚染に対しては洗浄性が十分ではなく、非破壊イメージング検査デバイスとしての動作感度は復旧には至らない。一方、報告者の提案構造は洗剤洗濯へ耐性を示し、付加価値として劣化したイメージング性能の復旧を実験的に実証している。

1. コンセプト構造図

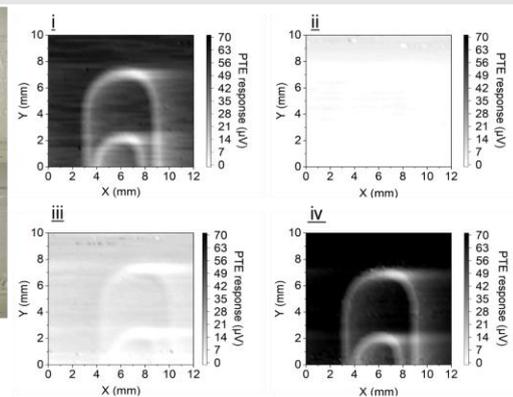


2. 各洗濯段階での様子



本来の光学特性を維持
洗濯後→初期性能まで
回復する

3. 汚染状況毎の素子感度変化



i: 洗濯前 (初期)

ii: 汚染直後

iii: 水洗濯後

iv: 洗剤洗濯後

図 3 多層コーティング CNT 膜 PTE センサシートによる洗濯エレクトロニクスとしての実証実験

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

【パッケージ研究への貢献】

本研究を通じて、報告者はハイブリッドな積層ポリマーパッケージ構造による洗濯エレクトロニクスという新しい学問分野の確立に貢献した。繰り返しの洗濯が可能、なおかつ光学素子として豊かな特性を有する CNT 膜型 PTE センサシートは、ポリマー系材料のパッケージ化をはじめとする化学研究分野のみに留まることなく、エレクトロニクス・デバイス分野においても裾野を広げる有用な取り組みであると言える。特にシートデバイスの台頭により屋外での電子デバイス利用が加速する昨今、素子耐久性に対する着眼点・成果は波及効果に富む。

【パッケージ技術への貢献】

本研究を通じて、屋外環境におけるオンサイト・長期安定・高機能な非破壊イメージング検査デバイスの運用が期待できる。パッケージ技術としてはヒートシュリンクラベルへ CNT 膜型 PTE センサシートやハイブリッドコーティング保護層を組み込むことにより、シート単体としての運用のみでなく、建設現場における屋外重機やドローン、自律型ロボットへ MMW-IR 計測による透視・材質同定型モニタリングを実装することが想定される。

最後に、この度のフジシール財団様からの 2024 年度 パッケージ若手研究助成によるご支援に際しまして、心より深く御礼を申し上げます。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「1. 研究成果の概要」、「2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

- M. Yamamoto, **K. Li*** (*責任 / 最終著者), *et al.* Mechanically alignable and all-dispenser-printable device design platform for carbon nanotube-based soft-deformable photo-thermoelectric broadband imager sheets, *npj Flex. Electron.* **9**, 42, 2025 (IF: 13).
- L. Takai, **K. Li*** (*責任 / 最終著者), *et al.* n-type carbon nanotube inks for high-yield printing of ultrabroadband soft photo-imager thin sheets, *FlexMat* **2**, 1, 115–125, 2025 ([selected as Back cover](#)).
- D. Shikichi, **K. Li*** (*責任 / 最終著者), *et al.* Multi computer vision-driven testing platform: structural reconstruction and material identification with ultrabroadband carbon nanotube imagers, *Adv. Mater. Technol.* **10**, 7, 2401724, 2025 (IF: 7, [selected as Frontispiece](#)).
- Y. Matsuzaki, **K. Li*** (*責任 / 最終著者), *et al.* All-solution-processable hybrid photo-thermoelectric sensors with carbon nanotube absorbers and bismuth composite electrodes for non-destructive testing, *Small Sci.* **5**, 5, 2400448, 2025 (IF: 12, [selected as Frontispiece](#)).
- Q. Zhang, **K. Li*** (*責任 / 最終著者), *et al.* Micro-wave monitoring by compact carbon nanotube photo-thermoelectric sensors beyond the diffraction limit toward ultrabroadband non-destructive inspections, *Adv. Sens. Res.*, Early View, 2400159, 2025 ([selected as Back cover](#)).
- **K. Li*** (*責任著者), *et al.* Simple Non-Destructive and 3D Multi-Layer Visual Hull Reconstruction with an Ultrabroadband Carbon Nanotubes Photo-Imager, *Adv. Opt. Mater.* **12**, 2302847, 2024 (IF: 11).
- T. Araki†, **K. Li†** (†共同筆頭著者), *et al.* Broadband Photodetectors and Imagers in Stretchable Electronics Packaging, *Adv. Mater.* **36**, 20, 2304048, 2024 (IF: 26, [selected as Cover picture](#)).
- R. Kawabata†, **K. Li†** (†共同筆頭著者), *et al.* Ultraflexible Wireless Imager Integrated with Organic Circuits for Broadband Infrared Thermal Analysis, *Adv. Mater.* **36**, 2309864, 2024 (IF: 26, [selected as Frontispiece](#)).
- 第 17 回 廣野賞 (2024 年)