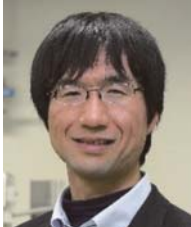


## [研究助成 (A)]

人とモノを繋げるウェアラブル光学検査グローブの開発と  
触診型分析への応用展開Development of Wearable Optical Inspection Gloves Connecting People and Objects  
and their Applications to Tactile Analysis

22I1007



研究代表者

中央大学 理工学部

教授

河野 行雄

## [研究の目的]

近年、IoT 社会の勃興とともに人とモノとの結びつきが強まるにつれて、その社会構築に必要な不可欠となるのが、そこに携わる人の“安全・安心”である。そのため、モノを構成する製造部品の安全性や人の安心な生活を保証するための検査技術の開発が強く望まれている。この検査・分析に貢献する技術として、光画像計測の重要性と需要が年々高まっている。可視光や X 線等による従来型画像計測法が幅広く普及している一方、これら以外の電磁波帯には既存の画像化装置では取得不可能な、有用な光学情報が秘められている。

また撮像機能に関して、既存固体半導体素子の多くは二次元平面での画像計測に特化しているため、三次元立体曲面に対しては数多くの死角が高精度画像検査の妨げとなる。

以上を背景として、研究代表者らは 2016 年にカーボナノチューブ (CNT) 膜を用いたフレキシブルな広帯域 (サブ THz~可視光領域) 撮像デバイスを開発し、3 次元曲面を持つ物体の全方位非破壊検査を初めて実現した (Nature Photonics **10**, 809 (2016), 特許登録第 6758720 号)。従来は 5, 6 台のカメラを組み合わせたりしたが、このような複雑な機器構成が不要である。

本研究は、上記の光センサを元に、難所・狭

所での検査を可能にするため、任意の形状の測定対象を、所望の場所で簡便に検査することができる触診型光学検査の創出を目的とする。これにより、今までネックであった測定対象の制限や大規模な測定系等の問題から解放され、工場内の入り組んだ環境での品質検査といった従来の技術では難しいとされた検査応用の実現が期待される。

具体的に本研究では、光センサの環境変化に対する安定性を検証し、その上で、検査の一例として、液体中の化学物質分析をターゲットとした。液中化学分析技術は、生活・産業排水や植物の発育状況といった多様な環境の可視化に寄与する。既存手法は、サンプル採取や測定器内での試薬投与といった工程が求められ、観察対象に対するオンサイトかつ動的な環境での計測を実現する上でボトルネックとなっていた。サンプル非採取かつラベルフリーな液質検査手法の代表例として、紫外線計測が挙げられる。しかしながら、この光学計測は外部光源や光学系を要するため、携帯性に課題がある。加えて、照射光に対して透明性の高い材料を用いた配管に限定され、不透明な配管内部に対する非破壊液質検査への障壁となる。以上に対して今回は、サンプル非採取かつラベルフリーな非破壊計測手法に資する基盤技術を開発した。

## [研究の内容, 成果]

## 1. 広帯域光撮像シートの基本特性

本研究で作製した撮像シートは, CNT フィルムチャネル, 高分子フィルムから成る薄膜支持基板, 及び読み出し電極から構成される。用いた CNT フィルムは無数の CNT がネットワーク上に結合した構造になっており, 機械的柔軟性, 室温でミリ波から可視光までの電磁波を超広帯域にカバーする高効率吸光特性を示す。CNT フィルムの中心部に, 受光界面に相当する pn 接合を形成する。この素子による外部照射光の検出応答信号は光熱起電力効果に基づき下記で表される。

$$\Delta V = (S_{p-CNT} - S_{n-CNT}) \times \Delta T$$

ここで  $\Delta V$ ,  $S_{p-CNT}$ ,  $S_{n-CNT}$ ,  $\Delta T$  は, それぞれ光熱起電力, p 型及び n 型 CNT フィルムのゼーベック係数, 吸光発熱によるチャネル内での温度勾配を示す (図 1)。以上から, pn 接合を直

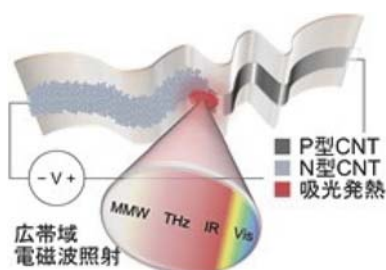


図1 CNT フィルム広帯域光センサの模式図  
K. Li, D. Suzuki, Y. Kawano, *Advanced Photonics Research* 2, 2000095 (2021) より転載。Copyright 2021, Wiley-VCH GmbH.

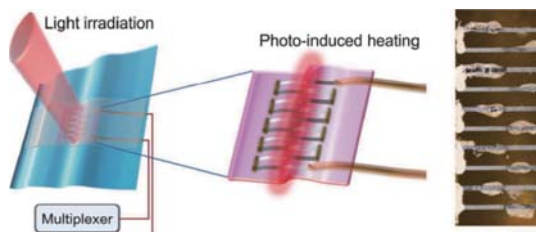


図2 直列 pn 接合型 CNT フィルム光センサ  
K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Martijn, J. D. Toonder, T. Sekitani, Y. Kawano, *Science Advances* 8, eabm4349 (2022) より転載。Copyright 2022, American Association for the Advancement of Science.

列に接続することで, 検出感度を高めることができ, 図 2 はその試みの一例である。

CNT フィルム光撮像シートへの外部照射光は直流電圧 (電流) 信号の光熱起電力として検出され, 画像計測の際は光熱起電力の強度が色彩のグラデーションとして表示される。

本 CNT フィルム光撮像シートの更なる特徴として, 溶液式の加工プロセスにより自由度の高いセンサアレイパターンニングが可能という点が挙げられる。図 3 に示す通り, CNT 分散液の選択的濾過パターンニングにより, 大面積自立膜や多素子アレイへと任意に形成可能であり, 更には転写技術により様々な基材上でのプロセス展開が可能である。レーザ描画でスリット加工されたパターンニングマスクを作製し, 分散液の吸引時にフィルタ上にこのマスクを設置することで, サイズ及び位置の観点から CNT 成膜領域を自由に制御できる。

従来では手作業による CNT フィルムの加工や, 直接的なレーザ描画が用いられてきた。前者は不均一性が課題で, 後者は CNT フィルム表面への損傷が懸念されていた。本技術は均一性と歩留まりに優れた加工が可能である。更に, 分散液の滴下量に応じて, CNT フィルムを, マスク (センサ架橋構造) かフィルタ (センサ非架橋構造) のどちらかへ選択的に作り分ける



図3 CNT 分散液を用いた選択的濾過パターンニング法の概要  
D. Suzuki, K. Li, K. Ishibashi, Y. Kawano, *Advanced Functional Materials* 31, 2008931 (2021). Copyright 2021, Wiley-VCH GmbH より転載。

ことができる (図3)。撮像シート応用の観点からは個々のCNTチャネルが画素となるため、撮像電磁波波長や対象物構造に応じて画素数やピッチ、画素サイズを任意に制御することができる。

## 2. 実験結果 (1)：光検出の安定性評価

図4に、pn接合型CNT光センサの熱耐久性と光学安定性評価の実験結果を示す。図4(a)に示した実験システムを用いて、光検出信号分布のチャネル長さ方向ラインプロファイルを測定した。この測定で、光センサはヒーター上に置かれており、温度変化に対する光検出特性の安定性を調べた。図4(b)の実験結果から、近赤外光照射スポット (波長 870 nm) の走査下で、pn接合部での検出信号増大が確認できた。さらに、200℃まで温度が上昇しても、この光応答プロファイルはほぼ維持されることが分かった。これは外部の温度変化に対して、光検出特性が影響されにくいことを意味している。

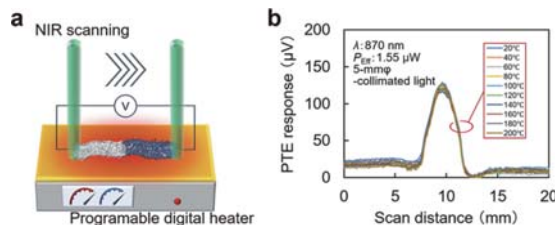


図4 CNTフィルム光センサの熱的安定性評価  
a 測定系と b CNTチャネル長さ方向の光応答プロファイルの温度依存性。

K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Marteijn, J. D. Toonder, T. Sekitani, Y. Kawano, *Science Advances* **8**, eabm4349 (2022) より転載。  
Copyright 2022, American Association for the Advancement of Science.

次に図5に、本CNT光センサシートの変形に対する耐久性と光学的安定性を調べた結果を示す。外部光源として近赤外線発光ダイオード (波長 870 nm) を使用し、光センサに 6,700 Pa の圧力を印加した。図5の結果は、この光センサシートに繰り返し折り目をつけても、安定した光検出動作が可能であり、デバイスの機械的耐久性を示すものである。

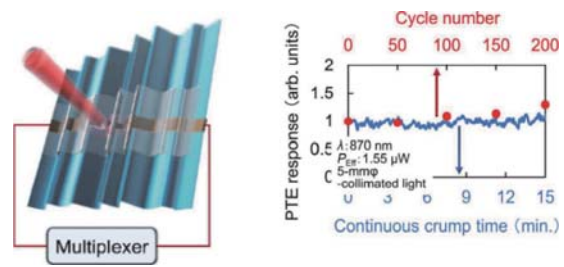


図5 CNTフィルム光センサの機械的安定性評価

繰り返し折りたたむ動作に対する光応答の変化を測定。  
K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Marteijn, J. D. Toonder, T. Sekitani, Y. Kawano, *Science Advances* **8**, eabm4349 (2022) より転載。Copyright 2022, American Association for the Advancement of Science.

## 3. 実験結果 (2)：検体非採集・染色不要の水質検査応用

本CNTフィルム光撮像シートの検査応用として、今までにない簡便な液体化学分析手法を確立した。従来の環境計測用の液質化学検査では、液体サンプルの採取や試薬の混合が必要とされてきた。現場で継続的に計測を行う簡便な検査分析の実現には、サンプル非採取でラベルフリーな手法の開発が求められている。

まず、本センサを用いて、可視光では不透明な配管中の水の流路を可視化した (図6)。この画像化は、水からの赤外放射検知に基づいており、液体の流動位置を確認できる。さらに、この水に化学物質を投入したところ、投入回数や溶質の濃度に応じた光検出信号の変化を観測できた。この振る舞いは、溶媒からの赤外放射が局所的に溶質に吸収されることによって生じていると理解できる。

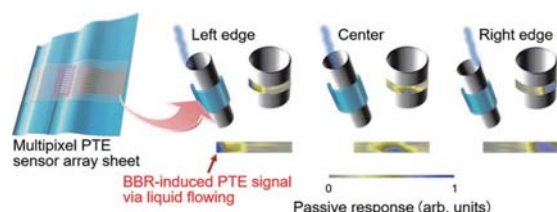


図6 CNTフィルム光センサアレイによる不透明配管内の水の流路可視化

K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Marteijn, J. D. Toonder, T. Sekitani, Y. Kawano, *Science Advances* **8**, eabm4349 (2022) より転載。  
Copyright 2022, American Association for the Advancement of Science.

このセンシング技術の活用が見込まれる具体例として、飲料品製造現場、化学合成プラント、医療現場といった環境での品質管理が挙げられる。自在に変形可能な本シートは、塩ビパイプ、蛇腹管、ゴムチューブといった柔らかい素材の液体配管にぴったりと貼り付けることができ、液体の流れによる配管の変形に対しても安定して追従可能である。簡便な水質検査に資する基盤技術の実証という本研究成果により、将来、水を含む様々な液体の品質に関わる安全安心に貢献できると期待される。

#### [成果の発表、論文など]

##### 1. 原著論文

1. K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Marteijn, J. D. Toonder, T. Sekitani, and Y. Kawano, "Stretchable broadband photo-sensor sheets for non-sampling, source and label-free chemical monitoring by simple deformable wrapping", *Science Advances* **8**, eabm4349 (2022).
2. Kou Li, Ryoichi Yuasa, Ryogo Utaki, Meiling Sun, Yu Tokumoto, Daichi Suzuki, and Yukio Kawano,

"Robot-assisted, source-camera-coupled multi-view broadband imagers for ubiquitous sensing platform", *Nature Communications* **12**, 3009 (2021).

##### 2. 総説・解説

1. 河野行雄, "カーボナノチューブの光・熱物性制御によるフレキシブル全方位テラヘルツ撮像検査チップ・システム", 「応用物理」90巻, pp.303-307 (2021年)
2. 河野行雄, "テラヘルツカメラパッチ：フレキシブル非破壊検査シートへの応用", 検査技術, 26巻, pp.7-14 (2021年)

##### 3. 新聞報道

1. 産経新聞 (2021年11月7日) "科学の「目」でインフラを守る"
2. 日経産業新聞 (2021年6月2日) "シート状カメラ 電線・配管点検"
3. 日刊工業新聞 (2021年5月25日) "非破壊検査に活躍するテラヘルツカメラ"

##### 4. 招待講演

1. Y. Kawano (**Keynote**), "A carbon nanotube terahertz camera patch sheet for multi-view imaging", 5th International Caparica Symposium on Nanoparticles/Nanomaterials and Applications 2022 (January, 2022, Caparica, Portugal, Online)