

# 非破壊画像検査用スマートシートの創出

プロジェクトリーダー 河野 行雄

## 【基本構想】

近年、製品に要求される品質の高まりや、数十年前に建設されたインフラの寿命の問題などから、対象を壊さずに検査する非破壊検査の重要性が増しており、その市場は年々拡大している。特に検査対象を二次元に画像化する非破壊画像検査は、視覚的に分かりやすい形でより詳細な情報が得られることから注目され、様々なシーンでの活用が期待されている。一方で、狭いスペースや危険な場所などが立ち入ることが難しい環境でも運用できる柔軟な検査技術が求められている。本研究では、センサ材料の光学的・電子的・機械的特長を活かした、形態可変撮像シート「スマートシート」を開発し、より簡便な検査を実現し、社会の安全安心へ貢献することを目指す。

## 1. 研究目的

近年、コンクリート構造物の寿命や産業製品に求められる品質の高度化などにより、非破壊検査市場が急速に拡大している。特に検査対象を壊さずに画像化する非破壊画像検査は、詳細な検査分析結果を提供できることから様々な分野での活用が始まっている。一方で、狭所や難所など、従来検査が難しかった状況でのモニタリングも必要となっており、検査デバイスに求められる性能が高まっている。

当研究室ではカーボンナノチューブ材料を用いた広帯域光センサ[1-9]の開発を行っている(図1に2次元センサアレイの作製例[4])。このセンサは、テラヘルツ・ミリ波領域から赤外・可視光領域にまで至る広帯域において検出感度を持ち、かつ材料の機械的強度と柔軟性により形状を自在に変えられる(図2, 3に画像化の例[5,6])。

本研究は、このセンサの非破壊検査への応用を目的とし、装置から運用までを包括的にフレキシブル化したスマートシートの創出を目指すものである。

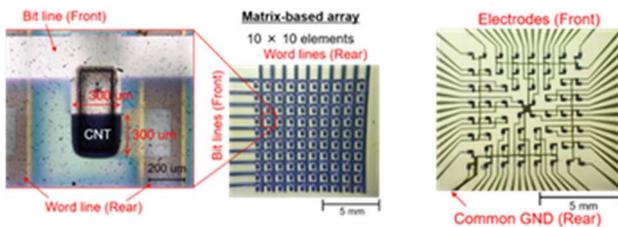


図1：2次元センサアレイ[4]

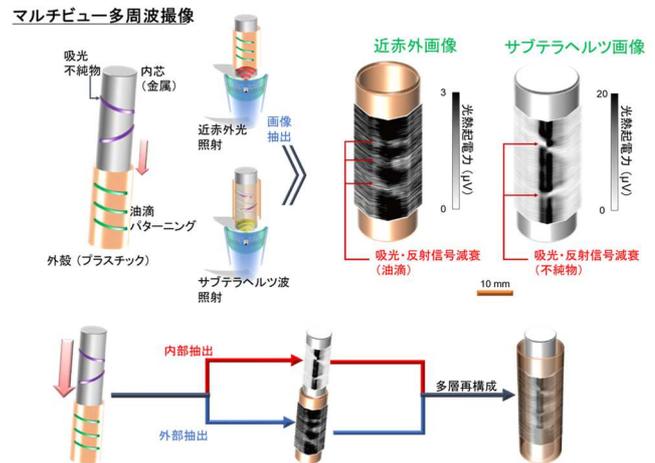


図2：マルチビュー画像化と複数波長帯画像融合による多層イメージング[5]

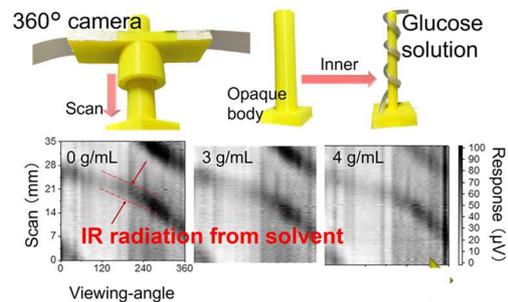


図3：光センサアレイによる非採集水質検査[6]

## 2. 研究成果

以下に、具体的な研究成果について報告する。

### (1) センサアレイ作製プロセスの開発

これまでに当研究室で開発した濾過法やディスペンサ式を用いたパターンニングにより、センサ作製を自動化してきた。これらの手法を用いて、多数センサアレイを作製し、画像化を達成した。今回は以上に加えて、インフラ等の大型対象物の検査も想定し、更なる大面積パターンニングを可能にするスクリーン印刷法も開発した[7]。この手法でもカーボンナノチューブセンサをアレイ化することができ(図4)、非破壊光画像化を確認した(図5)。以上から、複数のパターンニング法を併用することで、検査対象物のサイズや形状に応じた、柔軟かつ自在なセンサアレイ設計が可能となった。

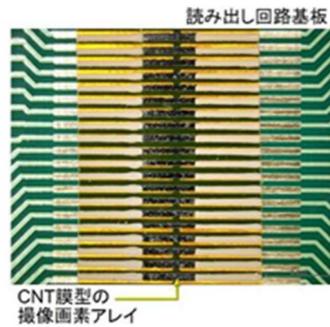


図4：スクリーン印刷により作製されたセンサアレイ[7]

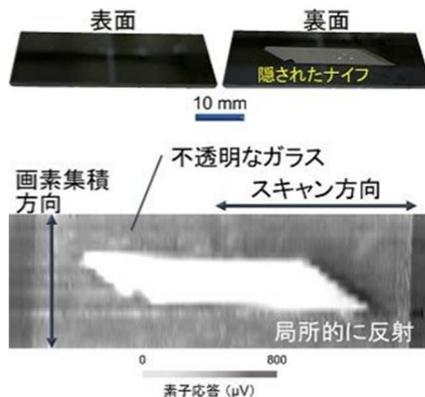


図5：図4により作製されたセンサアレイを用いた非破壊光画像化[7]

実際の画像化においては、検出信号を読み出し伝送する回路も重要な要素技術である。アクティブ式による読み出しセンサの切り替えや信号増幅を達成し、より鮮明な画像化を達成した[8]。

また、小型の無線機とセンサを結合することで、光検出信号の無線伝送を可能にした。これは今後の無人リモート検査につながる成果である。

### (2) 電磁波・光解析技術の利用

カーボンナノチューブセンサのミリ波・テラヘルツ波～光領域の広範囲な電磁波検出の特性を用い、各波長帯での物体の透過率の差異を利用することで、内部の物質識別をしながら画像化する手法を開発した[9]。

また、光領域では考慮されてこなかった電磁波の干渉がサブテラヘルツ・テラヘルツ領域では影響を与えることを考慮し、反射スペクトル測定における干渉除去手法や干渉を積極的に利用した埋設物反射スペクトル測定並びに画像化手法を開発した(特許出願済み)。

### (3) 非破壊画像検査への応用

これまでに実施してきたセンサ性能向上や信号処理技術、解析技術を元に応用実証に取り組んだ。1つ目は、コンクリート内部の状態可視化に成功した。ここでは、分光スペクトルの解析により、内部状態の推定を達成した。また、アレイ化されたカーボンナノチューブセンサとの組み合わせにより、画像化測定の高速度化を達成した。

2つ目は、医薬品の識別であり、ベルトコンベア上での検査を想定して、動きのある中での画像化を実現した。以上から、静止画、動画双方の撮像が可能となった。

## 3. 今後の展開

今後は、マルチスケールで対応可能な検査システムを構築していく。扱う光や電波の状態を空間的に制御し、アプリケーションに応じたシステム展開を実施する。そのために必要なセンサ、アンテナ、回路、分光画像解析の各技術を開発し、用途に合わせて実装化する。

### 【参考文献】

1. D. Suzuki, S. Oda, Y. Kawano, *Nature Photonics* **10**, 809 (2016).
2. D. Suzuki, Y. Ochiai, Y. Nakagawa, Y. Kuwahara, T. Saito, and Y. Kawano, *ACS Applied Nano Materials* **1**, 2469 (2018).
3. D. Suzuki and Y. Kawano, *Carbon* **162**, 13 (2020).
4. D. Suzuki, K. Li, K. Ishibashi, Y. Kawano, *Advanced Functional Materials* **31**, 2008931 (2021).
5. K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Marteiijn, J.D. Toonder, T. Sekitani, Y. Kawano, *Science Advances* **8**, eabm4349 (2022).
6. K. Li, R. Yuasa, R. Utaki, M. Sun, Y. Tokumoto, D. Suzuki, and Y. Kawano, *Nature Communications* **12**, 3009 (2021).
7. K. Li, Y. Matsuzaki, S. Takahara, D. Sakai, Y. Aoshima, N. Takahashi, M. Yamamoto, and Y. Kawano, *Advanced Materials Interfaces* **10**, 2300528 (2023).
8. Rei Kawabata, Kou Li, Teppei Araki, Mihoko Akiyama, Kaho Sugimachi, Nozomi Matsuoka, Norika Takahashi, Daiki Sakai, Yuto Matsuzaki, Ryo Koshimizu, Minami Yamamoto, Leo Takai, Ryoga Odawara, Takaaki Abe, Shintaro Izumi, Naoko Kurihira, Takafumi Uemura, Yukio Kawano, Tsuyoshi Sekitani, *Advanced Materials* **36**, 2309864 (2024). *Selected for front cover*
9. K. Li, Y. Kinoshita, D. Shikichi, M. Kubota, N. Takahashi, Q. Zhang, R. Koshimizu, R. Tadenuma, M. Yamamoto, L.

Takai, Z. Zhou, I. Sato, and Y. Kawano, *Advanced Optical Materials* **12**, 2302847 (2024).

# 業績

## 【論文】

1. K. Li, Y. Mastuzaki, S. Takahara, D. Sakai, Y. Aoshima, N. Takahashi, M. Yamamoto, Y. Kawano, *Advanced Materials Interfaces*, 10, 35, 2300528 (2023)
2. X. Deng, S. Oda, Y. Kawano, *Optical Engineering*, 62, 9, 097102 (2023)
3. K. Li, Y. Kinoshita, D. Shikichi, M. Kubota, N. Takahashi, Q. Zhang, R. Koshimizu, R. Tadenuma, M. Yamamoto, L. Takai, Z. Zhou, I. Sato, Y. Kawano, *Advanced Optical Materials* 12, 14, 2302847 (2024)
4. R. Kawabata, K. Li, T. Araki, M. Akiyama, K. Sugimachi, N. Matsuoka, N. Takahashi, D. Sakai, Y. Matsuzaki, R. Koshimizu, M. Yamamoto, L. Takai, R. Odawara, T. Abe, S. Izumi, N. Kurihira, T. Uemura, Y. Kawano, T. Sekitani, *Advanced Materials*, 36, 15, 2309864 (2024) *Selected for front cover*
5. M. Nakatani, S. Fukamachi, P.S. Fernández, S. Honda, K. Kawahara, Y. Tsuji, Y. Sumiya, M. Kuroki, K. Li, Q. Liu, Y.C. Lin, A. Uchida, S. Oyama, H.G. Ji, K. Okada, K. Suenaga, Y. Kawano, K. Yoshizawa, A. Yasui, H. Ago, *Nature Electronics*, 7, 119 (2024)

## 【総説】

1. T. Araki, K. Li, D. Suzuki, T. Abe, R. Kawabata, T. Uemura, S. Izumi, S. Tsuruta, N. Terasaki, Y. Kawano, T. Sekitani, *Advanced Materials* 36, 2304048 (2024) *Selected for front cover*

## 【口頭発表】

1. K. Li, N. Takahashi, Y. Togami, H. Li, M. Hamanaka, Y. Kawano  
Compositional device design strategies of carbon nanotubes photo-thermoelectric imager sheets、第 65 回 フラレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 5/9/2023
2. 河野 行雄  
シート状テラヘルツ・赤外撮像センサと非破壊マルチビュー画像検査応用, 光設計研究グループ 第 75 回研究会「インフラモニタリングのための光技術」, 5/10/2023
3. 太田 頼斗, 中村 優花, 李 恒, 酒井 大揮, 松崎 勇斗, 青嶋 祐斗, 須山 孟, 大川 拓樹, 佐藤 いまり, 河野 行雄  
多波長近赤外線コンピュータトモグラフィ像による多層立体・複合材料検査物の完全非破壊な構造復元及び材料同定, 第 39 回近赤外フォーラム年次大会, 15/11/2023, 東京

## 4. Y. Kawano

Flexible and Stretchable Terahertz/Infrared Imagers for Multi-View Visualization and Inspection, 33th International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory, 22/11/2023, Kagawa

## 5. D. Shikichi, R. Ota, K. Li, D. Sakai, Y. Matsuzaki, Y. Aoshima, T. Suyama, H. Okawa, S. Ikehata, I. Sato, Y. Kawano

Multi-wavelength computed tomography with carbon nanotubes broadband imagers, 23rd International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-dimensional Materials, 6/2023, France

## 6. D. Shikichi, R. Ota, K. Li, D. Sakai, Y. Matsuzaki, Y. Aoshima, T. Suyama, H. Okawa, S. Ikehata, I. Sato, Y. Kawano

Carbon nanotubes photo-thermoelectric broadband imagers for multi-wavelength, and multi-layer computed tomography, 39th International Conference on Thermoelectrics, 7/2023, USA

## 7. D. Shikichi, R. Ota, K. Li, D. Sakai, T. Suyama, H. Okawa, S. Ikehata, I. Sato, Y. Kawano

Millimeter-wave-Infrared multi-wavelength computed tomography, 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 9/2023, Canada

## 【特許】

### (1) 国内特許出願 1 件

大川拓樹, 河野行雄, 田邊匡生, 大橋隆宏  
測定装置、測定方法及びプログラム、  
特願 2024-031501

### (2) 国際特許出願 0 件