

非破壊画像検査用スマートシートの創出

研究代表者：中央大学 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、高度経済成長期に建設されたインフラの寿命の近さなどから、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、センサ材料の機械的強度、柔軟性、大面積化・集積化といった加工の容易さを利用した、折り曲げ可能シート状カメラ「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の光熱起電力効果を用いた広帯域光センサ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)。このセンサは近年活発に開拓が進むテラヘルツ領域を包括し、赤外線などの光領域からミリ波などの電波領域まで至る広帯域において感度を持ち、かつカーボンナノチューブ薄膜の強度と柔軟性により形状を自在に変えられる。

本研究は、このセンサの非破壊検査への応用を目的として、センサのアレイ化といったハードウェア開発のみならず、アレイセンサによって得られたデータに対する情報処理技術を統合することで、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。

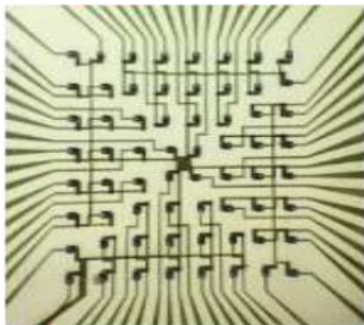


図1：2次元センサアレイの作製例

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) カーボンナノチューブの材料特性・構造の最適化

本研究項目では、テラヘルツ領域での光学特性を明らかにするための実験を行い、光と熱の両面からセンサ構造を最適化した[1]。図2に、カーボンナノチューブセンサの光熱起電力特性の最適化について示す。図2(a)に示すように、本センサはカーボンナノチューブの高い吸光特性を用いて光を熱に変換し、p型あるいはn型にドーピングされたカーボンナノチューブのゼーベック係数を利用して温度勾配を起電力に変換している。カーボンナノチューブのドーピングは、図2(b)のように試薬を用いることで行う。図2(c)に示す通り、この化学ドーピングにより、p型からn型への簡便で自在な変換が可能であり、pn接合を用いることで高効率な熱電変換につながる。

また、カーボンナノチューブ材料はその構造から単層ナノチューブと多層ナノチューブ、半導体型と金属型に分類できる。図2(d)~(g)に示す通り、半導体型単層ナノチューブが高いゼーベック係数を示すものの、光吸収率やノイズも考慮すると総合的には半導体型と金属型の混合が好適であることを見出した。また、ドーピング濃度についても光検出特性の観点からの最適化を行った(図2(h)~(m))。熱伝導、電気抵抗、光吸収を含めて、光センシングにとって信号・雑音比が最適となるドーピング濃度を見出した。

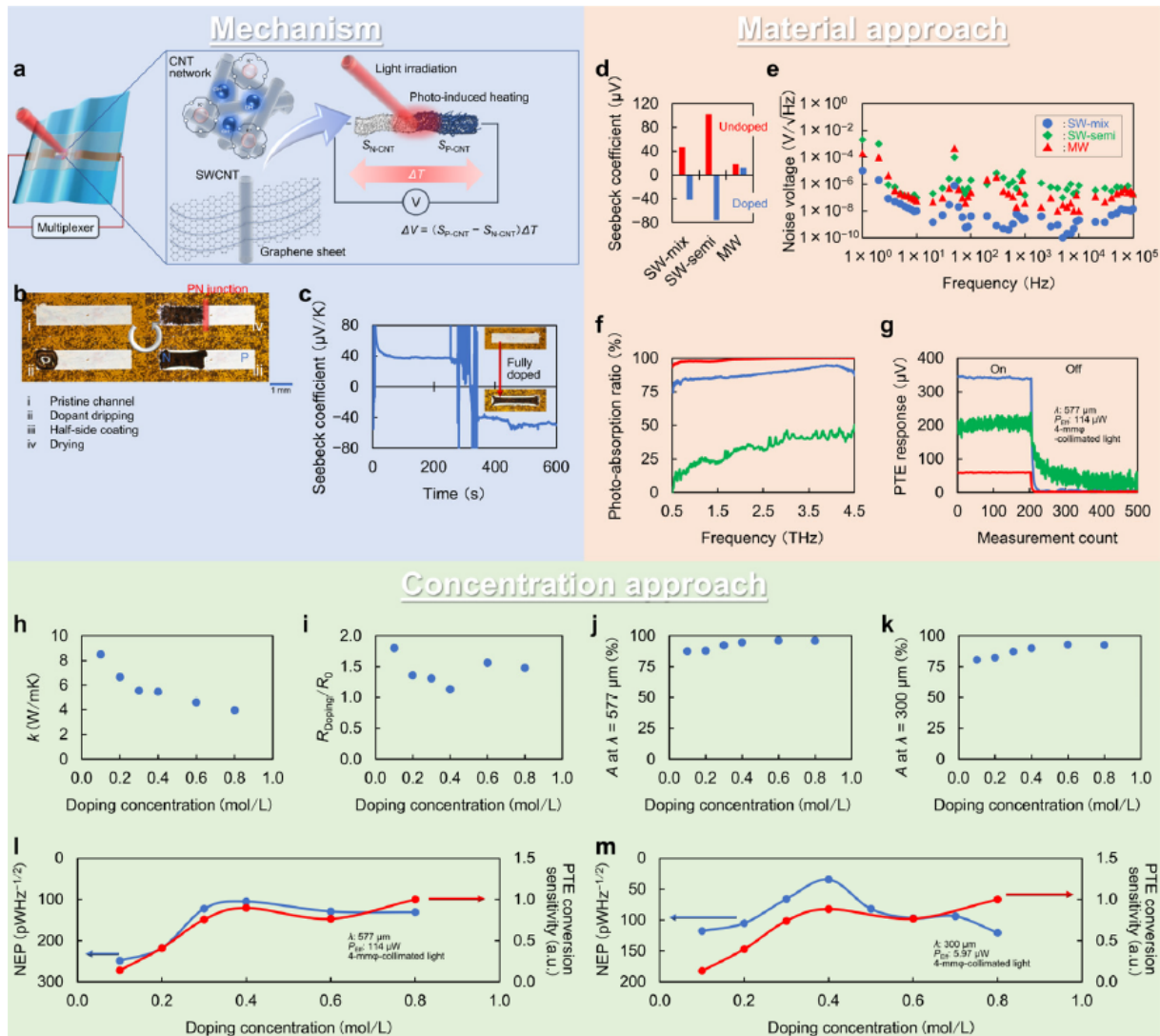


図 2: pn 接合界面における光熱起電力特性 (a)動作原理 (b)n 型キャリアのドーピングプロセス (c)ドーピング前後でのゼーベック係数の推移 (d)カーボンナノチューブ材料の種類によるゼーベック係数の比較 (e)雑音電圧の周波数特性 (f)テラヘルツ領域での吸光比 (g)応答特性比較 (h)~(m)ドーピング濃度による熱伝導率・電気抵抗・吸光率・雑音等価パワー (NEP) 値および光熱起電力感度の変化 [1]

(2) 任意アレイセンサ作製プロセスの構築

本研究項目では、従来の濾過法だけでなくインクジェットプリンタを用いたパターニングを実現する材料の最適化を行った[2]。カーボンナノチューブ分散液やドーピング試薬は濃度によってその粘度が変化し、印刷物の精度と安定性を左右する。本研究ではこれらの濃度を最適化することでインクジェット印刷でのセンサ作製を達成した。これによりパターニングの自動化による大面積化だけでなくセンサ構造の最適化に関する研究にも寄与した。実際にパッシブ回路を用いたアレイセンサからの信号読み出しの評価により、その性能の検証を行った。

(3) 光情報処理技術の統合

カーボンナノチューブセンサアレイを利用したテラヘルツ帯での CT 画像の再構成を実証した。従来の CT 検査では、主に大型の X 線発生装置を用いることから侵襲性だけでなく、装置が大型化するという問題が挙げられる。一方、本研究で開発されたカーボンナノチューブセンサは

柔軟性が高いことから対象の形状に合わせた変形が可能であり、張り付けて使用することもでき、正確な CT 画像再構成が可能となることを示した。さらに、テラヘルツ帯だけでなく、ミリ波といった様々な周波数帯域を使用できることから、低非侵襲でありながら材質の識別をも実現した。

図 3 に、CT による 3D 画像再構成の実証実験の概要図を示す[3]。不透明素材による外壁の中に金属のポール

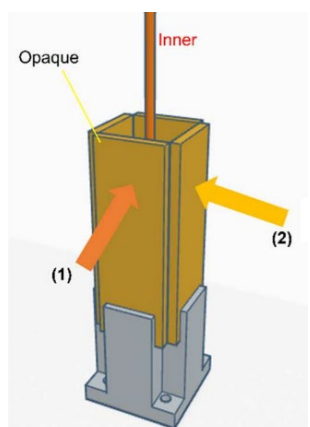


図 3: フレキシブル光センサを用いた 3D 検査の概要図 [3]

が入っているサンプルを用意した。可視光や高い周波数の光では外壁を透過しない一方で、ミリ波帯域を利用する

と内部の金属材質の像を測定することができる。これらの画像から、3D 像を再構成することができ、このように材質の透過率が周波数帯域によって異なることを利用して 3D 構造と材質を同時に推定する技術を実現した。

3. 今後の展開

令和 5 年度では、前年度に引き続き検査対象物や測定系に応じた信号処理や光情報処理の有効性を検証する。必要に応じて、センサ構造やセンサパターンニングの最適化を適宜行う。さらに、この光センシングの応用の観点から、テラヘルツ・光画像情報を遠隔からコンピュータ画面上で自動で表示することにより、無人リモート検査の原理実証を行う。これらのシステムのデモンストレーションとして、静止画や動画による非破壊画像検査が可能であることを示す。同時に、今後の実用的応用展開を見据えて、検査対象やその問題を分析し解決方法を提案することで、応用に向けた課題を抽出し検討を進める。

【参考文献】

1. K. Li, Y. Kinoshita, D. Sakai, and Y. Kawano, *Micromachines*, 14(1), 61 (2023).
2. D. Sakai, K. Li, and Y. Kawano, *Proceedings of 2022 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*, 955-957 (2023).
3. Y. Kinoshita, K. Li, Z. Zhou, I. Sato, and Y. Kawano, *Proceedings of 2022 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*, 327-329 (2023).

業績

【論文】

- 1.T. Araki, K. Li, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, S. Yasui, Y. Kawano, T. Sekitani, *Proceedings of 2022 International Conference on Electronics Packaging*, 77-78 (2022)
- 2.D. Suzuki, Y. Takida, H. Minamide, N. Terasaki, Y. Kawano, *Science and Technology of Advanced Materials*, 23(1), 424-433 (2022)
- 3.Y. Kinoshita, K. Li, Z. Zhou, I. Sato, Y. Kawano, *Proceedings of 2022 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*, 327-329 (2023)
- 4.D. Sakai, K. Li, Y. Kawano, *Proceedings of 2022 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*, 955-957 (2023)

【総説】

- 1.K. Li, Y. Kinoshita, D. Sakai, Y. Kawano, *Micromachines*, 14(1), 61 (2023)

【書籍】

- 1.酒井大揮, 木下祐哉, 李恒, 河野行雄, *月刊 MATERIAL STAGE*, 22(8), 37-44(2022)
- 2.木下祐哉, 酒井大揮, 李恒, 河野行雄, *機械学習・ディープラーニングによる”異常検知”技術と活用事例集*, (2022)
- 3.李恒、河野行雄, *月刊配管技術*, 65, 19-27 (2023)

【口頭発表】

- 1.Y. Kawano (invited)
Making the Invisible Visible with Terahertz: The Last Frontier of the Electromagnetic Wave
Innovation Harbour Lectures, 05/2022
- 2.河野 行雄 (招待講演)
シート状ブロードバンドイメージャーと非破壊検査分析応用 ～テラヘルツ光から可視光まで～
第 28 回画像センシングシンポジウム, 06/08/2022, 横浜
- 3.河野 行雄 (招待講演)
カーボンナノチューブ膜型フレキシブルテラヘルツ波撮像シートカメラ
2022 年度日本写真学会オンライン年次大会,
07/2022, オンライン
- 4.Y. Kawano (invited)
A flexible terahertz imaging sheet for multi-view visualization and inspection
12th International Conference on Metamaterials Crystals and Plasmonics, 07/2022, Spain
- 5.河野 行雄 (招待講演)
シート状ブロードバンド撮像センサと検査分析応用

～テラヘルツ光から可視光まで～

- 2022 年度第 2 回プリンテッド・エレクトロニクス研究会, 08/2022, 大阪
- 6.廣川清華、木下祐哉、李恒、酒井大揮、松崎勇斗、青嶋祐斗、太田頼斗、敷地大樹、大川拓樹、河野行雄
テラヘルツ・赤外光の広帯域多周波撮像によるインライン薬剤評価
第 7 回フォトニクスワークショップ 11/2022, 沖縄
- 7.敷地大樹、太田頼斗、李恒、酒井大揮、松崎勇斗、青嶋祐斗、須山孟、大川拓樹、池畑諭、佐藤いまり、河野行雄
広帯域・多波長光の CT 撮像による多層立体・複合材料構造の復元
第 7 回フォトニクスワークショップ 11/2022, 沖縄
- 8.太田頼斗、敷地大樹、李恒、酒井大揮、松崎勇斗、青嶋祐斗、須山孟、大川拓樹、池畑諭、佐藤いまり、河野行雄
光熱起電力型カーボンナノチューブ撮像素子アレイによる広帯域多波長 CT 計測
第 49 回炭素材料学会年会, 12/2022, 姫路
- 9.木下祐哉、廣川清華、酒井大揮、松崎勇斗、青嶋祐斗、太田頼斗、敷地大樹、大川拓樹、河野行雄
カーボンナノチューブ型広帯域電磁波センサによるインライン非破壊薬剤品質検査
第 49 回炭素材料学会年会, 12/2022, 姫路
- 10.Y. Kawano (invited)
A Flexible and Stretchable Terahertz Imaging Sheet for Multi-View Visualization
The 29th International Display Workshops, 12/2022, Fukuoka
- 11.河野行雄
広帯域フレキシブル光撮像センサと非破壊検査分析応用
nano tech 2023, 02/2023 東京
- 12.河野 行雄 (招待講演)
シート状広帯域テラヘルツ・赤外撮像センサと全方位検査分析応用
第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 03/2023, 東京