

1. 氏名	鈴木 大地
2. 所属機関	理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子効果デバイス研究チーム
3. 研究題目	カーボンナノチューブ自立膜アレイを使用したウェアラブル検査デバイスの開発

4. 研究の目的:

医薬品や工業用材料等の製造業界における製品の安全性・信頼性への要求は年々増加しており、高い品質を保証するための高機能な検査手法の開発・導入が重要課題の一つとして挙げられている。そのなかで、テラヘルツ (THz) 帯電磁波を活用した検査手法は、製品の内部に渡る空間情報や材質情報を非破壊・非接触で得ることができる強力な手法として注目を集めている。しかし既存の THz 計測システムは検出器の構造上、大規模な測定系や極低温の冷却槽を用いるため自由に持ち運ぶことができず、検査には対象物を計測システムの設置場所まで運搬することが必須である。そのため、形状や稼働場所、運搬可能といった条件を満たすモノでなければ検査が行えないという問題を内包している。

本研究ではこの問題の解決を目的とし、任意の場所で簡便に検査が行えるウェアラブル検査デバイスの開発を行う。材料となるカーボンナノチューブ (CNT) の自立膜を任意の箇所形成する成膜技術を開発し、マイクロサイズで 2 次元に配列された CNT 自立膜アレイを材料とするフレキシブル THz カメラを作製する。作製したフレキシブル THz カメラを手袋の指先にマウントしたウェアラブル検査デバイスを開発し、大規模な測定系を必要としない非破壊検査応用の実現を目指す。

5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):

本研究の鍵となる材料が CNT 積層膜である。グラフェンを丸めた筒状の 1 次元構造体である CNT は高い導電・熱電特性、広帯域にわたる吸収特性、折り曲げ可能な機械的強度といった従来の半導体材料にはない魅力的な特性を有する革新的半導体材料として注目を集めている。申請者はこれまでの研究において、CNT 自立膜における光熱起電力効果を検出原理とすることで、室温で動作する広帯域フレキシブル THz 検出器を開発した (図 1)。次に申請者はリアルタイム THz モニタリングの実現を目指し、検出器を 2 次元にアレイ化したカメラの作製に取り組んだ。カメラ開発に最も重要となるのが画素である CNT 自立膜を 2 次元に均一配列させる技術であるが、従来のリソグラフィーやレーザー加工ではマイクロスケールの厚さの CNT 膜を精度よく加工することができず、転写やインクジェット、直接合成の手法では CNT を自立膜にすることができないというプロセス上の課題があった。

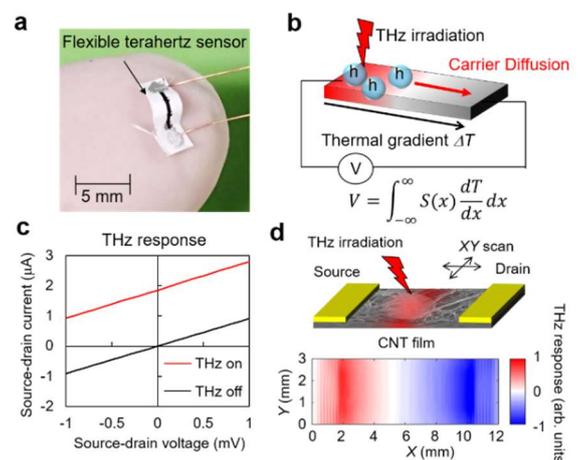


図 1 (a) CNT によるフレキシブル THz 検出器 (b) 光熱起電力効果概要図 (c) THz 応答 (d) 光熱起電力効果のマッピング

そこで本研究では革新材料である CNT の高いポテンシャルを活かした THz 計測システムの確立を目指し、「CNT 自立膜を任意の箇所形成する成膜技術の開発」及び「フレキシブル THz カメラの開発と検査応用」の 2 課題に取り組んだ。

## 6. 研究の成果と結論、今後の課題：

### 【研究の成果】

#### 課題1. CNT 自立膜を任意の箇所に形成する成膜技術の開発

本研究では CNT 自立膜を成膜後に加工するのではなく、あらかじめ決められた位置にのみ自立膜を成膜するという着想による自己整合成膜技術を確立した。図 2 に自己整合成膜技術の概要図を示す。レーザー加工機等でパターン加工されたポリイミドフィルムを用意し、本フィルムを介して CNT 分散液を濾過することで、スリット加工された部分のみ選択的に CNT が濾過されてゆき、最終的にポリイミドフィルムとの接合部を支えとした架橋構造の自立膜が形成される。本研究において CNT 分散液の条件(滴下量・バンドル径・吸引速度)やフィルム条件(ヤング率、耐熱・耐薬品性、膜厚)等の成膜条件を解明し、マイクロスケールの CNT 自立膜アレイを 99.9%以上の歩留まりで製膜することが可能となった。

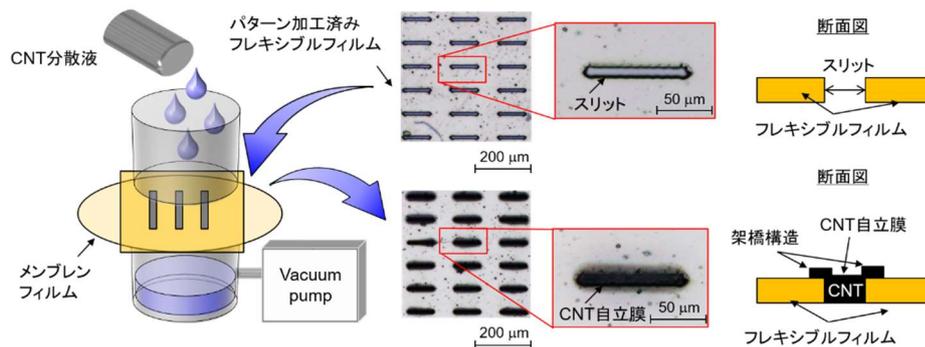


図 2 自己整合成膜技術により CNT 自立膜アレイ

#### 課題2. フレキシブル THz カメラの開発と検査応用

課題 1 において開発した成膜技術を用いて CNT 自立膜アレイを製膜し、その後上面と裏面の両方から電極を形成するというシンプルなプロセスによりカメラのような立体配線構造を形成することが可能となる。確立した技術をもとに自由に折り曲げられ、かつ指先やロボットのような任意の対象に装着できるフレキシブル THz カメラを作製した(図 3a)。開発したカメラを使用して封筒内の異物混入をリアルタイムで検査するリアルタイムモニタリングを達成した(図 3b, 読み出し方式:マルチプレクサ方式, ピクセルサイズ  $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ , 166 fps, 2020 年 5 月時点で論文投稿中)。

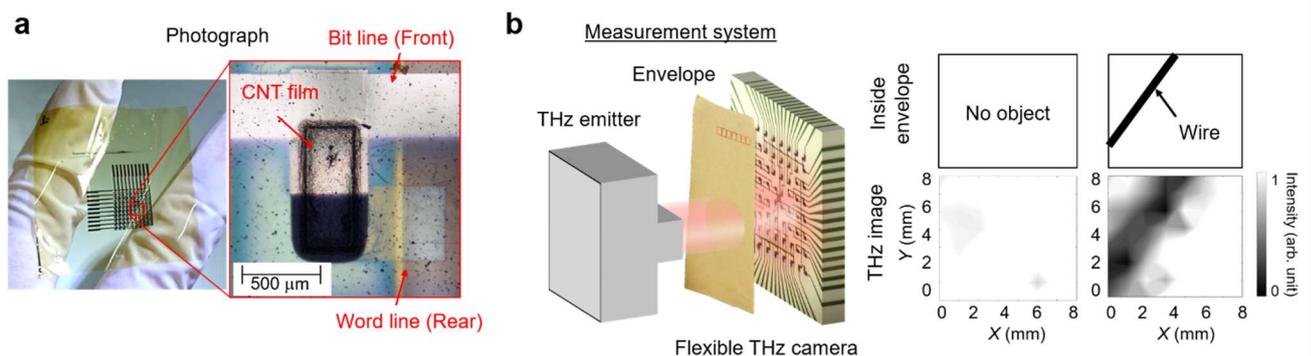


図 3 (a) 開発したフレキシブル THz カメラ (b) 封筒内混入物のリアルタイムモニタリング

### 【結論と今後の課題】

本研究において、CNT 自立膜を任意の箇所に形成する自己整合成膜技術を構築するとともに、当該技術を用いてフレキシブル THz カメラを作製し、混入物のリアルタイムモニタリングを達成することができた。今後の課題としては、カメラに使用する CNT 自立膜の単体構造・高次構造を制御することで検出能力の向上を狙う基礎研究と、開発したウェアラブル検査デバイスならではのインフラ設備・動植物等の非破壊モニタリング実証といった応用研究の両方に取り組むことで、本研究成果の実用化を目指す。

## 7. 成果の価値

### 7.1\_学術的価値:

1990年代に飯島博士により発見されて以降、CNTは革新的半導体材料として着目され、様々な研究が行われてきた。本研究はその歴史の中で『CNTを積層化した薄膜を自立膜の形状を保持したまま任意の箇所に形成する技術』を確立するもので、本技術は後に続くナノカーボン物性研究やフレキシブルデバイス等の工学研究における基盤技術として広く活躍することが見込まれる。また、THz検出器の観点からも、折り曲げ可能なTHzカメラというものは世界で報告例がなく、本研究成果であるフレキシブルTHzカメラ及びウェアラブル検査デバイスは、THz帯技術の研究者間における一つのベンチマークとして大きな波及効果をもたらすことが期待される。

### 7.2\_社会的価値:

X線検査や赤外分光といった従来の検査技術には、測定対象の形状や検査装置のサイズによる場所の制限があったが、本ウェアラブル検査デバイスを用いることで、あらゆる形状の測定対象を、任意の場所で簡便に検査することが可能となる。これにより、工場内の配管といった入り組んだ環境における品質検査や、信号機や配電線等の既に運用中で検査工場に持ち運ぶことが難しい機械の現地検査、訪問医療等の移動先での即時検査といった検査応用が実現可能となる。本研究により大規模な測定系を必要としない非破壊検査システムが開発された暁には、既存の検査技術の応用範囲は大幅に拡大し、非破壊検査市場にブレークスルーが起きることが期待される。

### 7.3\_研究成果:

#### 「研究論文」

- (1) D. Suzuki, Y. Kawano, “Flexible terahertz imaging systems with single-walled carbon nanotube films”, Carbon, 162, 13–24, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.01.113> (査読有)
- (2) D. Suzuki, K. Li, K. Ishibashi, Y. Kawano, “A terahertz video camera patch sheet with an adjustable design based on self-aligned, two-dimensional, suspended sensor array patterning”, 投稿中.(査読有)

#### 「国際会議発表」

- (1) D. Suzuki, K. Ishibashi, Y. Kawano, “Broadband Bendable Terahertz Camera for Built-in Infrastructure Sensor”, 44th International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (IRMMW-THz 2019), 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874223> (査読有)
- (2) K. Li, R. Yuasa, R. Utaki, M. Sun, Y. Tokumoto, D. Suzuki, Y. Kawano, “Multi-view Terahertz Imagers with Flexible Carbon Nanotube Film Arrays”, 44th International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (IRMMW-THz 2019), 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874273> (査読有)
- (3) D. Suzuki, K. Ishibashi, Y. Kawano, “Flexible terahertz camera with microscale free-standing carbon nanotube film array”, NT19: International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials, 2019. (査読有)