

令和 3 年 5 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15002

研究課題名（和文）超スマート社会における即時検査を目的としたウェアラブル非破壊検査デバイスの開発

研究課題名（英文）Development of wearable non-destructive inspection devices for immediate inspection in society 5.0

研究代表者

鈴木 大地（Suzuki, Daichi）

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：80823640

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではテラヘルツ（THz）帯ウェアラブル非破壊検査デバイスの開発に取り組んだ。まず、センサーの熱デバイス設計としてソース・ドレインの電極にゼーベック係数の極性の異なる金属を導入する構造と、THz光吸収領域を架橋構造にして基板方向への熱の拡散を抑制する構造を取り入れることで、感度を保持したまま1素子のサイズを0.1mmまで小型化した。次に、センサーの材料となるカーボンナノチューブ（CNT）膜を0.1mm角のサイズで二次元アレイ状に成膜する自己整合成膜技術を開発した。上記2技術により100画素のフレキシブルTHzカメラを作製し、工業資材等の非破壊品質検査応用を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モノを壊さずに製品内部の劣化状況を診断することができるTHz帯センシング技術の社会実証に向けては、煩雑な測定系を必要としない計測自由度の高い検査デバイスの実現が求められている。本研究はこれまでの技術的課題であったフレキシブルTHzセンサーのカメラ化に向けたデバイス構造の最適化及び二次元アレイ化技術の開発を達成したものである。本研究で開発したウェアラブル非破壊検査デバイスにより、既存の検査手法では難しかったロボット等革新技術の即時検査応用が実現可能となることから、来る超スマート社会勃興の一翼を担う即時検査手法として活躍することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we worked on the development of a terahertz (THz) wearable non-destructive inspection device. First, as a thermal device design for the sensor, a structure in which metals with different Seebeck coefficient polarities are introduced into the electrodes of the source and drain and a structure in which the THz light absorption region is crosslinked to suppress heat diffusion toward the substrate are adopted. Therefore, the size of one element was reduced to 0.1 mm while maintaining the sensitivity. Next, we developed a self-align filtration process that forms a carbon nanotube (CNT) film, which is the material of the sensor, in a two-dimensional array with a size of 0.1 mm square. A 100-pixel flexible THz camera was fabricated by the above two technologies, and non-destructive quality inspection application for industrial materials was achieved.

研究分野：センシングデバイス

キーワード：テラヘルツ カーボンナノチューブ 非破壊検査応用 フレキシブルデバイス 光熱起電力効果

### 1. 研究開始当初の背景

2017年5月、モノのインターネットや人工知能等の革新技術を基盤とする超スマート社会の実現に向けた“新産業構造ビジョン”が策定された。ロボットや産業機械がより身近な存在となる超スマート社会の勃興に必要な不可欠となるのがモノの“安心・安全”であり、これら革新技術の信頼性を保証するための高機能な検査手法の開発が強く求められている。そのなかで、THz帯電磁波を活用したセンシング技術は、モノを壊さずに製品内部の劣化状況を診断することができる強力な検査手法として注目を集めており、THz時間領域分光法等を用いた産業資材の非破壊品質検査応用例が報告されている。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。多種多様なモノがあらゆる場所に混在する超スマート社会においては、測定環境に制限されず、モノの稼働現場で即時に非破壊で品質検査することができる検査技術を確認することが必要である。この背景を受け申請者は検査物の形状・場所によらず非破壊検査が行えるウェアラブルTHz検出器の開発に取り組んだ。

### 2. 研究の目的

申請者のこれまでの研究において、カーボンナノチューブ（CNT）膜における光熱起電力効果を検出原理とすることで、指先に装着可能なウェアラブルTHzセンサーの作製および非破壊検査応用を達成してきた。本研究では、検出器の小型化や2次元配列技術の開発に取り組み、リアルタイムでの非破壊検査が可能なフレキシブルTHzカメラを作製すると共に、煩雑な測定系を必要とせず、任意の場所であらゆるモノを簡単に検査することができる計測自由度の高い非破壊検査応用の達成を目指す。

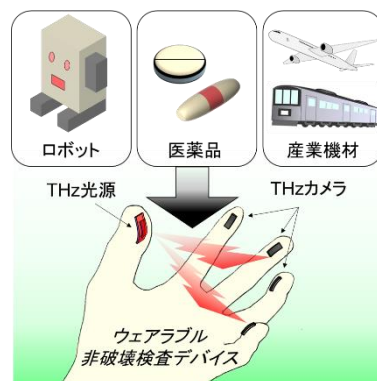


図1 研究目的概要図

### 3. 研究の方法

(1) 検出器の小型化技術の開発を目的に、①センサーサイズの小型化と②熱デバイス構造の最適化に取り組む。①については、CNT膜に0.1mm以下の解像度で微細PNパターンニングを行うためのドーパント塗布法を開発する。②についてはCNT膜の薄膜化や架橋構造化によりTHz光照射による発熱量を向上させる方法を確立する。

(2) センサーの材料であるCNT膜を0.1mm角のサイズで2次元にアレイ化する加工技術を開発する。CNT膜を成膜後に0.1mm角のサイズにパターンニングするトップダウンの手法では加工品質やレジスト等への薬品耐性に問題があるため、「パターン箇所のみCNT膜を成膜する」という新しい手法を取り入れる。CNT膜の支持基板であるポリイミドフィルムに予めレーザーアブレーションにより2次元状のドットパターンを形成し、その箇所のみ選択的にCNT膜を製膜する自己整合成膜技術の構築を行う。

(3) (1)および(2)の技術を組み合わせることで、単一のフレキシブルTHzセンサーを2次元状にアレイ化したフレキシブルTHzカメラを作製する。加えて、作製したカメラを使用して自由度の高い非破壊検査応用の実証に取り組む。

### 4. 研究成果

#### (1)①

まず、検出器の小型化に向け、材料であるCNT膜に0.1mm間隔でドーピング液を塗布する技術の開発に取り組んだ。当初の計画ではニードル式塗布機構やナノインクジェット法を用いてドーピング液の微量塗布を行うドーパント塗布法を開発する予定であったが、CNT膜のような膜上構造体の場合、毛細管現象による吸出しや膜構造の不均一性により0.1mmスケールで狙った位置に再現性良く正確な量のドーピングを行うことが困難であることが判明した。そこで代案としてCNT膜をTHz光の吸収・発熱体とみなし、電極金属の熱起電力効果でTHz光を検出する構造を提案。ソース・ドレイン電極それぞれで発生した熱起電力の和を最大化するために、片方をビスマスの直列接続、もう片方を金の並列接続にする異種電極構造にすることで、検出器のサイズを0.1mm程度まで小型化することを達成した。

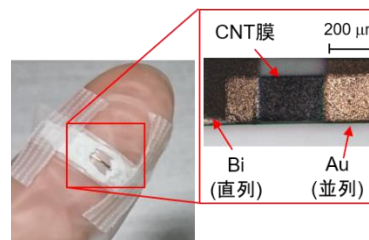


図1 異種電極構造による小型化

(1)②

検出感度を定める熱デバイス構造を設計するための解析・実験を行った。伝熱解析の結果、CNT 膜を小型化すると①THz 光照射部分の熱容量の低減による温度上昇、②熱流に対する熱抵抗の増加による温度上昇の恩恵を受けて感度が向上することが判明。ただし、デバイスの開口面積を決めるチャンネル長およびチャンネル幅については電磁波の回折の影響により狙った周波数の半波長 (1THz の場合 0.15mm) が小型化の限界値、CNT 膜の膜厚については、入射した電磁波を吸収して熱へと変換するのに必要な膜厚として、1THz の場合 0.1mm 程度の膜厚が必要となることが明らかになった。

次に、CNT 膜の土台となる基板が感度に与える影響について解析した。CNT 膜が基板と接触している場合、THz 光によって発生した熱が基板方向に拡散してしまい低温化するため感度が下がる。また、その感度低下量は基板の熱伝導率に強く依存していることを明らかにした (図2)。この結果から、PDMS のようなプラスチック基板 (熱伝導率 0.3 W/m K) に転写するよりも発熱部である CNT 膜を架橋構造 (空気の熱伝導率 0.025 W/m K) にすることで3 倍程度高感度になることが明らかになった。

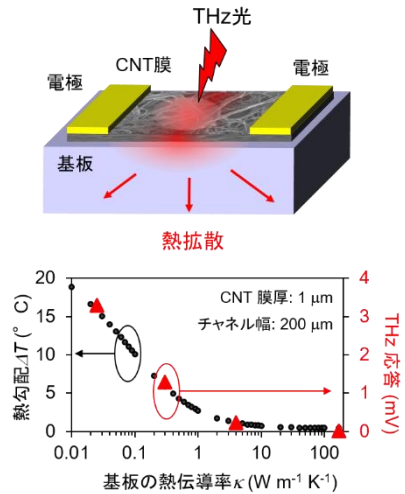


図2 熱デバイス構造最適化

(2)

初めに、CNT 膜の支持基板となるポリイミドフィルムに波長 1064nm のフェムト秒レーザーを用いて 0.1mm のスリットを形成する。レーザー加工済みのポリイミドフィルムを多孔質メンブレンフィルムに張り付け、その状態から CNT の分散液を吸引濾過する。濾過に使用する CNT 分散液のバンドルサイズや使用するポンプの吸引速度を調整することで、スリット加工した部分のみに CNT が自己整合的に濾過・成膜される。乾燥後にポリイミドフィルムをメンブレンフィルムから剥離することで、スリットの縁を支えとしたマイクロサイズの CNT 膜架橋構造 2次元アレイを形成することができる。本研究で開発した自己整合成膜技術により、レーザーでマーキングした任意の位置に架橋構造 CNT 膜を形成することが可能となった。

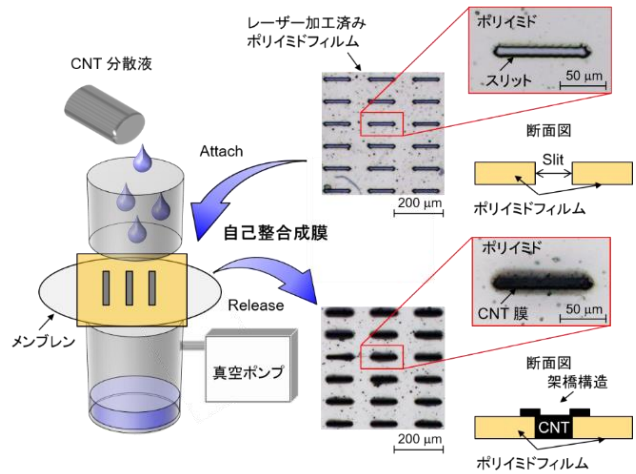


図3 自己整合成膜技術の概要図と架橋構造 CNT 膜 2次元アレイ

(3)

(1)および(2)で開発した CNT 膜の小型化・2次元アレイ化技術を組み合わせて、フレキシブル THz カメラを開発した (図4)。電極はシャドーマスクを用いた蒸着法で形成しており、上部電極が金、下部電極がビスマスとなっている。最大 100 画素のカメラエレメントを集積したカメラパッチシートを作製し、測定対象のサイズに合わせて切り貼りして使用できる自由度の高い非破壊検査デバイスを開発することができた。

加えて、開発したデバイスを用いた非破壊検査応用に取り組んだ。THz 光に対する透過強度の違いを計測することで、合成樹脂内部の金属異物・破損・接着剤の塗りムラを可視化する非破壊品質検査や、ヒートワイヤーの輻射熱を光源とした水道管のリアルタイムモニタリングを達成した。

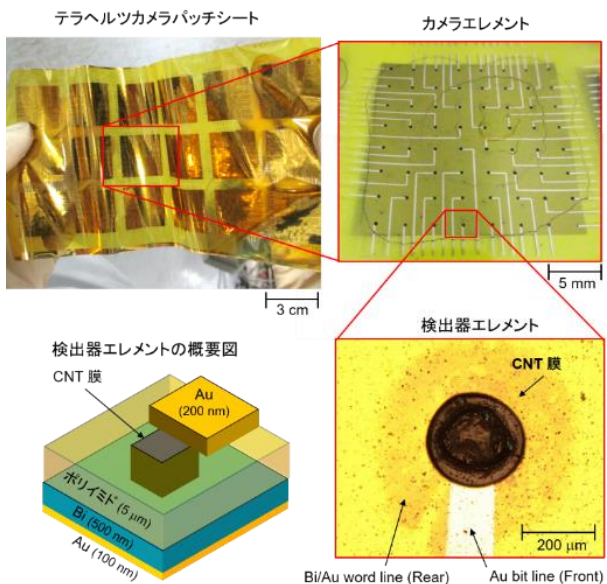


図4 開発したフレキシブル THz カメラ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 D. Suzuki, K. Li, K. Ishibashi, Y. Kawano	4. 巻 31
2. 論文標題 A Terahertz Video Camera Patch Sheet with an Adjustable Design based on Self Aligned, 2D, Suspended Sensor Array Patterning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2008931
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202008931	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Li, D. Suzuki, Y. Kawano	4. 巻 2
2. 論文標題 Series Photothermoelectric Coupling Between Two Composite Materials for a Freely Attachable Broadband Imaging Sheet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Photonics Research	6. 最初と最後の頁 2000095
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adpr.202000095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 D. Suzuki, T. Okamoto, J. Li, Y. Ito, T. Fujita, Y. Kawano	4. 巻 173
2. 論文標題 Terahertz and infrared response assisted by heat localization in nanoporous graphene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 403 ~ 409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.10.059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Daichi, Kawano Yukio	4. 巻 162
2. 論文標題 Flexible terahertz imaging systems with single-walled carbon nanotube films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 13 ~ 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.01.113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 鈴木 大地
2. 発表標題 品質情報可視化に向けたテラヘルツ非破壊検査技術
3. 学会等名 接着・接合技術コンソーシアム 第2回非破壊検査ワーキンググループ（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木大地
2. 発表標題 カーボンナノチューブ積層膜によるテラヘルツ-赤外フレキシブル撮像デバイス
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大地
2. 発表標題 テラヘルツ技術の進展と社会実装に向けたデバイス開発
3. 学会等名 九州大学分子・物質合成プラットフォームセミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大地
2. 発表標題 テラヘルツ分析技術の進展と社会実装に向けたデバイス開発
3. 学会等名 第55回 X線分析討論会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大地
2. 発表標題 Broadband Bendable Terahertz Camera for Built-in Infrastructure Sensor
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (IRMMW-THz 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木大地
2. 発表標題 Flexible terahertz camera with microscale free-standing carbon nanotube film array
3. 学会等名 NT19: International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関