



Tokyo Tech

平成 28 年 11 月 9 日

報道機関各位

東京工業大学広報センター長

岡田 清

カーボンナノチューブを使い、折れ曲がるテラヘルツカメラを開発

ー非破壊・非接触検査における新たな手法として期待ー

【要点】

- フレキシブルかつウェアラブルなテラヘルツ帯撮像デバイスを実現
- 電極金属の最適化、新手法の **pn** 接合により検出器の小型化・高感度化を達成
- 注射器など円筒形器具でも全方位検査を達成

【概要】

東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所の河野行雄准教授らの研究グループは、カーボンナノチューブを利用したフレキシブルなテラヘルツ帯（用語 1）撮像デバイス（カメラ）を世界で初めて開発した。このデバイスを用い、注射器やペットボトルといった 360 度歪曲した物体に対しても、内部の破損・異物混入を瞬時に撮像することに成功した。また人体に装着したまま画像観測を行うためのウェアラブルデバイスも製作した。

電極金属の最適化やイオン液体（用語 2）を用いた **pn** 接合（用語 3）などの新手法を用いて検出器の小型化・集積化・高感度化を達成、多素子化による撮像カメラを実現した。これはテラヘルツ帯技術の実用化に近づく成果といえる。

テラヘルツ波は電波と光波の中間の周波数帯の電磁波で、様々な応用が期待されている。河野准教授らは以前、カーボンナノチューブにおける光熱起電力（用語 4）を用いたテラヘルツ波検出器を作製したが、小型化に伴う感度低下が問題となっており、多素子化によるカメラ開発が困難であった。研究は日本ゼオン株式会社の試料提供を受けて実施した。研究成果は 11 月 14 日発行の英国の学術誌「*Nature Photonics*」誌に掲載される。

●研究の背景と経緯

電磁波の活用は我々の生活や産業、基礎科学といった多くの分野において大きな変革をもたらしてきた。広大な周波数帯の中で、テラヘルツ帯と呼ばれる電磁波は電波としての透過性や光波としての直進性、水に対する高い吸収率、固体素子や高分子の物性解析に有力といった特性を有している。

このため、近年、非破壊・非接触での金属・非金属探知や爆発物検知、ICカードの偽造防止、農作物のモニタリング、医療・薬学応用といった様々な応用が期待されている。だが、この周波数帯は電子技術（エレクトロニクス）としては周波数が高く、光技術（オプティクスやフォトンクス）としては光のエネルギーが低い。このことから、この周波数帯を活用する技術が十分に開発されておらず、他の周波数帯に比べて発振器や検出器という基本的な素子ですら発展途上という課題を抱えている。

また、電磁波の重要な応用であるイメージング計測では、一般に様々な形状の物体に対応する必要がある。そのためには、複数の視野から画像化する立体計測が必要であるが、従来のシステムでは大型化する問題があり、テラヘルツ帯イメージング技術の実用化を難しいものとしていた。

以上を背景として河野准教授らは、カーボンナノチューブフィルムを用いて、電極材料の最適化やイオン液体による pn 接合などの新手法を取り入れた検出器の改良、ならびにテラヘルツ帯フレキシブルカメラの開発・応用に向けて取り組んだ。

●研究成果

折り曲げ可能なテラヘルツ帯カメラを作製するために、カーボンナノチューブフィルムを材料に選定した。分散液をフィルタリングすることで得られるカーボンナノチューブフィルムは、大面積かつフレキシブルで容易に加工ができることから、検出器の材料として有力である（図 1）。



図 1. 折り曲げ可能なカーボンナノチューブフィルム

今回の研究では、微弱なテラヘルツ光でも受光できる高感度検出器の実現に向けて、電極材料の最適化及びイオン液体による pn 接合などの手法を用いた。検出原理である光熱起電力のテラヘルツ応答強度は、材料間での温度差に比例して大きくなるという性質がある。

テラヘルツ応答強度の電極金属依存性を測定すると、図 2a に示すように電極金属の熱伝導率が高く、すなわち熱抵抗が低くなればなるほど応答強度が強くなるという特性が分かった。例えば、Ti 電極に比べて Au 電極は約 6 倍強い応答強度を示す。また、左右の電極に異種材料を用いることで、テラヘルツ吸収によって発生した熱を熱抵抗の低い電極の方に支配的に流す構造にした。この工夫により、検出器を小型化しても感度を維持できることが明らかになった。(図 2b)

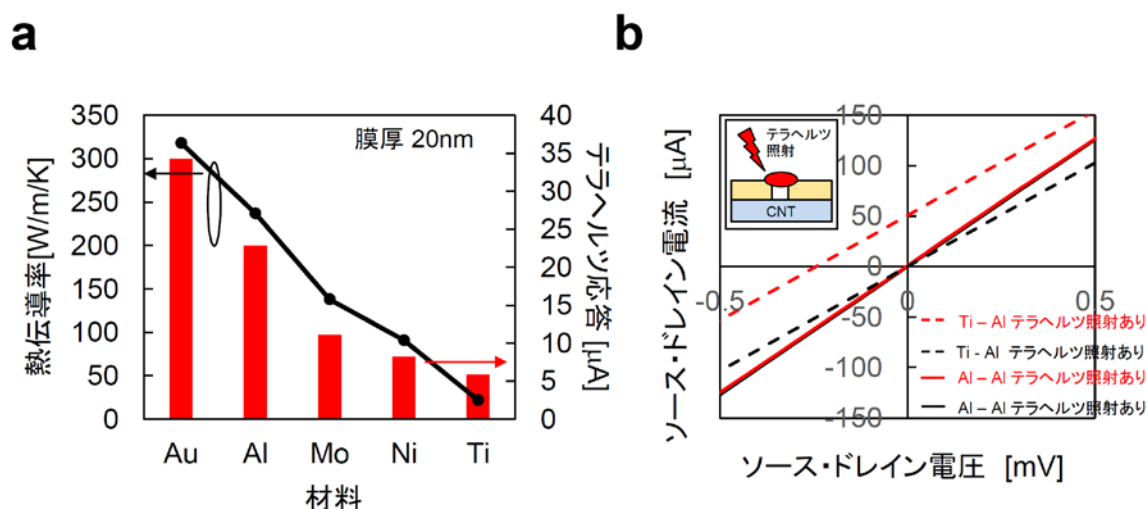


図 2. テラヘルツ応答の電極金属依存性。(a) 電極金属の熱伝導率が高い (熱抵抗が低い) ほどテラヘルツ応答が強くなる。(b) 同種電極 (実線) と異種電極 (破線) のテラヘルツ応答。異種電極を用いて両電極の熱抵抗を変えることで、検出器を小型化しても感度を保持できていることがわかる。

次に、pn 接合の作製を試みた。従来、カーボンナノチューブフィルムでは膜厚がマイクロメートル程度以上の厚さになると、既存のゲート電極を用いた電界制御では pn 制御ができないという問題があった。そこで今回の研究では、イオン液体を用いた電気二重層 (用語 5) トランジスタを作製することで (図 3a)、100 マイクロメートルという厚いカーボンナノチューブフィルムにおいても pn 制御を行うことができた。

図 3b, c に示すとおり、pn 接合を用いることで 4 倍の高感度化を達成した。以上から、フレキシブルデバイスに必要な厚み (機械的強度) と感度の高さを両立することが可能となった。この成果は、テラヘルツデバイス応用にとどまらず、今後、カーボンナノチューブフィルムを様々なフレキシブルデバイスへ

応用展開する上で高い意義を持つ。

さらに、カーボンナノチューブから外への熱放出を抑制することで、約 3 倍感度が上昇した。以上の 3 点の工夫（電極構造、pn 接合、熱放出抑制）により、格段の検出感度向上を達成した。

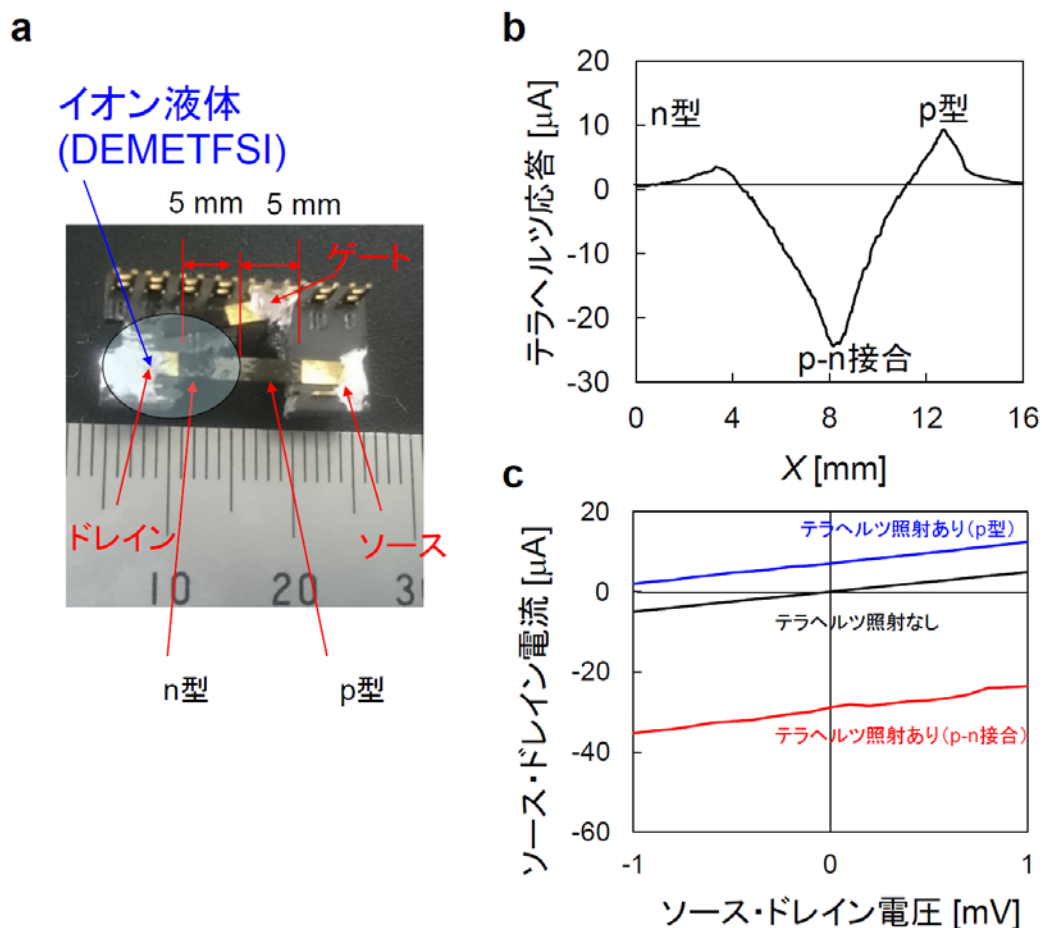


図 3. イオン液体による pn 接合カーボンナノチューブデバイス。(a) デバイス図。(b) テラヘルツ応答のマッピング結果。pn 接合部で強いテラヘルツ応答が発生している。(c) pn 接合及び電極金属界面でのテラヘルツ応答。pn 接合を用いることで約 4 倍の高感度化が達成できている。

以上の知見を用いて多数の検出器をアレイ状に集積化し、フレキシブルかつウェアラブルなテラヘルツ帯カメラの作製、ならびにテラヘルツイメージング検査応用を行った。図 4a~c がそれぞれ 0.14 THz, 1.4 THz, 29 THz の電磁波を用いたテラヘルツイメージングの測定図である。

テラヘルツイメージングによって、紙や半導体に隠された金属や、プラスチック

ックケースの内部構図（柱やガム）の非破壊・非接触検査ができていることがわかる。

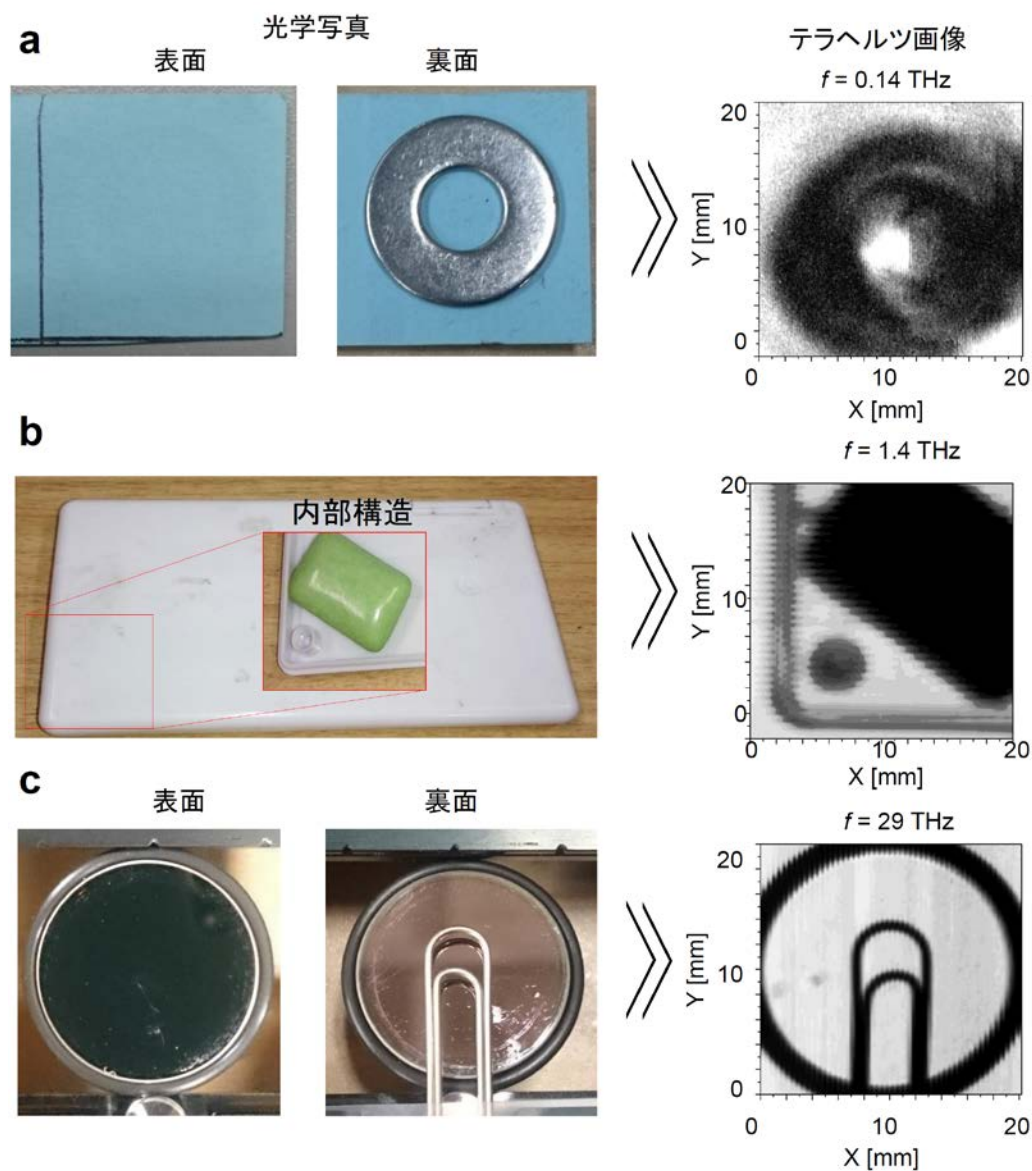


図 4. テラヘルツイメージング。(a) 0.14 THz によるイメージング図と写真。紙に隠された金属が可視化されている。(b) 1.4 THz によるイメージング図と写真。プラスチックケースの内部構造（柱やガム）が可視化されている。(c) 29 THz によるイメージング図と写真。半導体基板（ゲルマニウム）に隠された金属が可視化されている。

また、図 5 に医療器具（注射器）のマルチビュースキャンの結果を示す。注射器のような歪曲した形状の物体であっても、本フレキシブルカメラを用いる

ことで、360度の全視野を瞬時に画像計測することができる。従来は複数台のカメラを用いていたが、本技術により大規模な測定系なしで、全方位破損検査が可能であり、既存技術とくらべて大きな優位性がある。

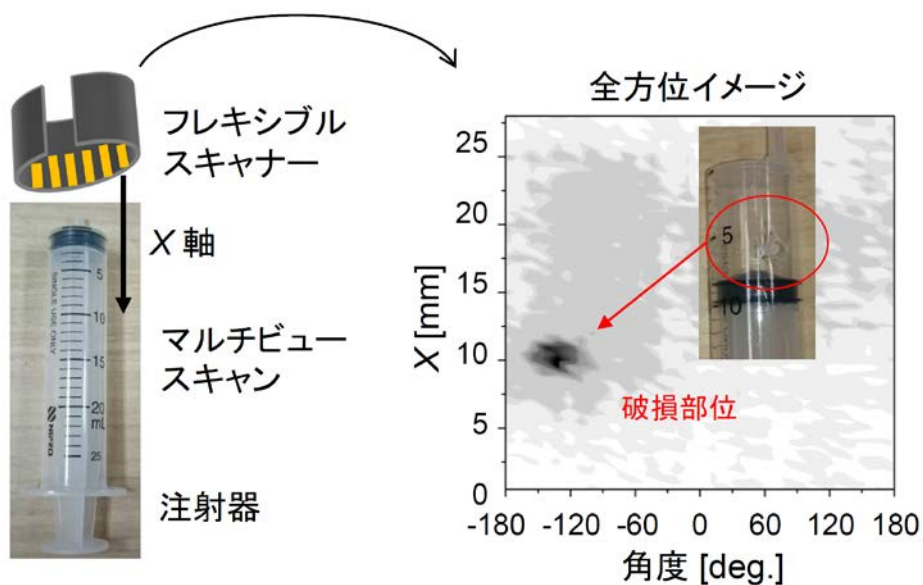


図5. フレキシブル撮像デバイスを用いた医療器具（注射器）の360度全方位検査。本撮像デバイスを用いることで、大規模な測定系なしでの全方位破損検査ができています。

●今後の展開

テラヘルツ帯フレキシブルカメラを開発し、テラヘルツイメージングによる内部構造の可視化や全方位破損検査といった新規なデモンストレーションを行った。さらに、人体に装着可能なウェアラブルカメラの開発にも成功した(図6)。

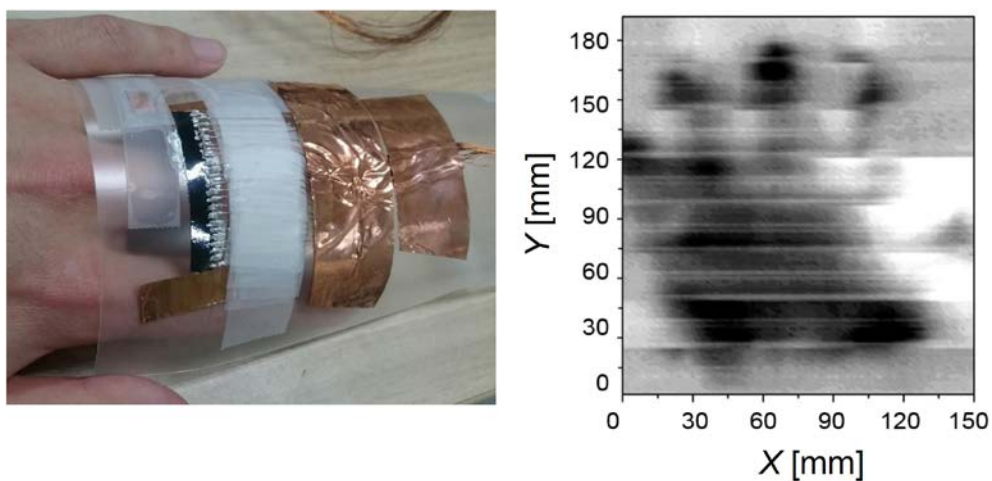


図6. 人体に装着可能なウェアラブルテラヘルツカメラと手のテラヘルツ画像。

今後、検出器を高感度化・高集積化することで、より高精度のテラヘルツイメージングが可能となり、食物・医薬品への異物混入検査、農作物のモニタリング、ウェアラブルな生体検査といった様々な分野において、既存の技術では成し得ない恩恵や革新をもたらす。

特に、本カメラはフレキシブルで生体系の形状にフィットするという他にはない長所を有するため、医療検査に向けた強力な手段となることが期待できる。日常生活でもリアルタイムで検査可能な“ウェアラブル医療端末”としての活用も可能となろう。この技術は、現在、東工大が中心になって進めている COI プログラム「『以心電心』ハピネス共創社会構築 (※)」において、大きく貢献することが期待される。

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構の「産学共創基礎基盤研究プログラム」、独立行政法人日本学術振興会の科学研究費助成事業（新学術領域研究「原子層科学」、新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」、基盤研究(B)、特別研究員奨励費）の援助により行われた。

(※) 文部科学省革新的イノベーション創出プログラム (COI STREAM) による事業であり、本学及び産学官の関係機関との連携により、革新的な研究開発と、その成果を実用化するための取組を行っている。全世代の人々が文化・習慣の違いを越え、人口構造に依らない活力ある社会の実現に資することを目的とする。

【用語説明】

- (用語 1) **テラヘルツ帯**：周波数 100 GHz から 10 THz 程度の領域に位置する電磁波帯のこと。かつては未開拓領域だったが、物質・バイオ分析や高速無線通信など、様々な応用可能性から近年急速に注目を集めている。
- (用語 2) **イオン液体**：室温において、液体状態で存在するイオン結合化合物のこと。
- (用語 3) **pn 接合**：正孔が流れる材料 (p 型) と電子が流れる材料 (n 型) を接合した構造のこと。
- (用語 4) **光熱起電力**：物質に光を照射した際に物質内で温度勾配が発生し、その温度差が電圧に変換される現象のこと。
- (用語 5) **電気二重層**：荷電粒子が印加電場によって移動した結果、界面に正負の荷電粒子が対を形成して層状にならぶ現象のこと。本研究では、イオン液体中の陽イオンと陰イオンが電場に沿って移動する。

【論文情報】

論文名 : A flexible and wearable terahertz scanner

著者 : Daichi Suzuki, Shunri Oda, and Yukio Kawano

掲載誌 : *Nature Photonics*

DOI : 10.1038/NPHOTON.2016.209

【問い合わせ先】

東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 准教授 河野行雄

E-mail: kawano@ee.e.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-3811

FAX: 03-5734-3811

【取材申し込み先】

東京工業大学 広報センター

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975

FAX: 03-5734-3661