

6G・7G 通信の非破壊検査応用とナノカーボン撮像素子の超解像高集積な回折限界打破

代表研究者

李 恒

中央大学 理工学術院 助教

1 アブストラクト

本研究において報告者は、マイクロ波（MW: Micro-wave）検出器の設計におけるサイズ面でのボトルネックを解消しました。MW は cm 台の極めて長い波長から、一般的に検出器の設計においてはボウタイ・パラボラ・プラズモニック巨軀なアンテナ併設が前提となっております。MW へ期待される用途は 6G・7G といった次世代の高速大容量無線通信が主となっておりますが、ヒトにとっては不透明な物体への深部にまでおよぶ透視性から、非破壊撮像検査への潜在能力にも注目が寄せられています。非破壊撮像では既存 MW 検出器の巨軀な構成は致命的な課題となり、具体的には検出器の集積密度が空間走査速度を律速する撮像において、小型・高密度集積への不適性から低速（長時間）撮像が強いられていました。これらの状況に対して、本研究において報告者はカーボンナノチューブ（CNT）型の光熱起電力効果（PTE）センサが単体で MW 検出へ有効である点を見出し、巨軀なアンテナ併設を要せずに小型センサの MW 検出感度は 1,400 超（信号対雑音比）へと到達しました。本成果は CNT 型 PTE センサ本来の電極材質・構造が、上記挙動の支配的メカニズムである点を特定し、「アンテナ不要な小型センサ」というコンセプトから MW 検出器における固定概念を覆しました。更に当研究室がこれまでに実証してきたミリ波・テラヘルツ・赤外（MMW, THz, IR）帯での非破壊モニタリング技術と融合させ、世界に先駆けた MW- IR センサシートという位置付けを科学的価値・社会応用性の両面から確立しています。

2 背景・目的

マイクロ波（MW）を用いた電磁波センシング技術は、コンクリート構造物の品質評価、公共機関におけるボディスクリーニング、プラスチック製品の欠陥検査など、多様な非破壊検査分野で活用されています。MW は多くの非金属材料を透過できるため、可視光（Vis）では観察できない対象内部を非侵襲的に可視化できるという利点を有します。更に、MW 帯は次世代の高速・大容量無線通信にも利用されており、センシング技術としてだけでなく社会インフラを支える重要な周波数帯としても注目されています^[1-5]。

一方で、MW センシング技術には実用化に向けた課題も存在します。MW は波長が長いので、電磁波の回折限界によって照射スポットやセンササイズの微細化が制限されます。一般にイメージング計測の高速化には、多数のセンサを集積したアレイ設計が有効であり、単一画素では二次元走査が必要であるのに対し、二次元アレイでは一軸走査、二次元アレイでは走査不要の高速計測が可能となります。しかし、MW 帯では回折限界に起因してセンササイズが大きくなり、高密度なセンサ集積が困難であるため、高速イメージングデバイスの実現が大きな課題となっています^[6-8]。

この問題を解決するため、従来の MW センサやイメージングシステムでは、ダイポールアンテナ、ボウタイアンテナ、パラボラアンテナ、プラズモニックアンテナ等の大型外部構造・微細加工構造が広く利用されてきました。これらのアンテナは MW 信号を効率的に集光し、センシング感度の向上や通信性能の改善に寄与しています。しかしながら、ダイポールやボウタイアンテナの寸法は依然として最小でも非常に長い MW 波長の 1/3～半分程度を必要とし、大規模センサ集積化の障害となっています。また、プラズモニックアンテナは微細な金属パターン形成を必要とするため、製造プロセスが複雑化し、デバイス構造やシステム構成の簡素化を妨げる要因となっています^[11-18]。

このように、従来の MW センシング技術は回折限界およびアンテナ構造への依存という本質的な課題を抱えています。そのため、アンテナを用いず、あるいは大型で複雑な結合構造を必要としないシンプルなデバイス構成によって、高感度かつ高集積な MW センシングを実現する新たな技術の開発が強く求められています。しかし、そのようなコンセプトを十分に満たす研究例は依然として限られており、新規な MW センサおよびイメージングシステムの創出が重要な研究課題となっています。

そこで本研究において報告者は、CNT 型 PTE センサが回折限界の制約を超える小型構成においてもマイク

ロ波を検出できることを示しました。CNT 薄膜は MMW から Vis までの広い周波数帯域にわたり高い電磁波吸収特性を有し、従来から高感度な電磁波センサ材料として利用されてきました。CNT センサの動作原理である PTE では、電磁波吸収による発熱と、温度差に起因する熱電変換を組み合わせることで電気信号を生成します。この効果により、冷却機構を必要としない常温環境下での超広帯域電磁波検出が実現されました。更に、CNT 薄膜は数 μm 程度の薄いシート構造であり、高い柔軟性と耐変形性を有します。そのため、曲面を含む三次元対象物へ容易に貼り付けることが可能であり、広い視野角を活かした死角の少ないセンシングを実現しました。これらの特徴から、CNT 型 PTE センサは、高性能な電磁波検出能力と優れた機械的柔軟性を兼ね備えたセンシングデバイスとして有効であることを示しました (図 1)。

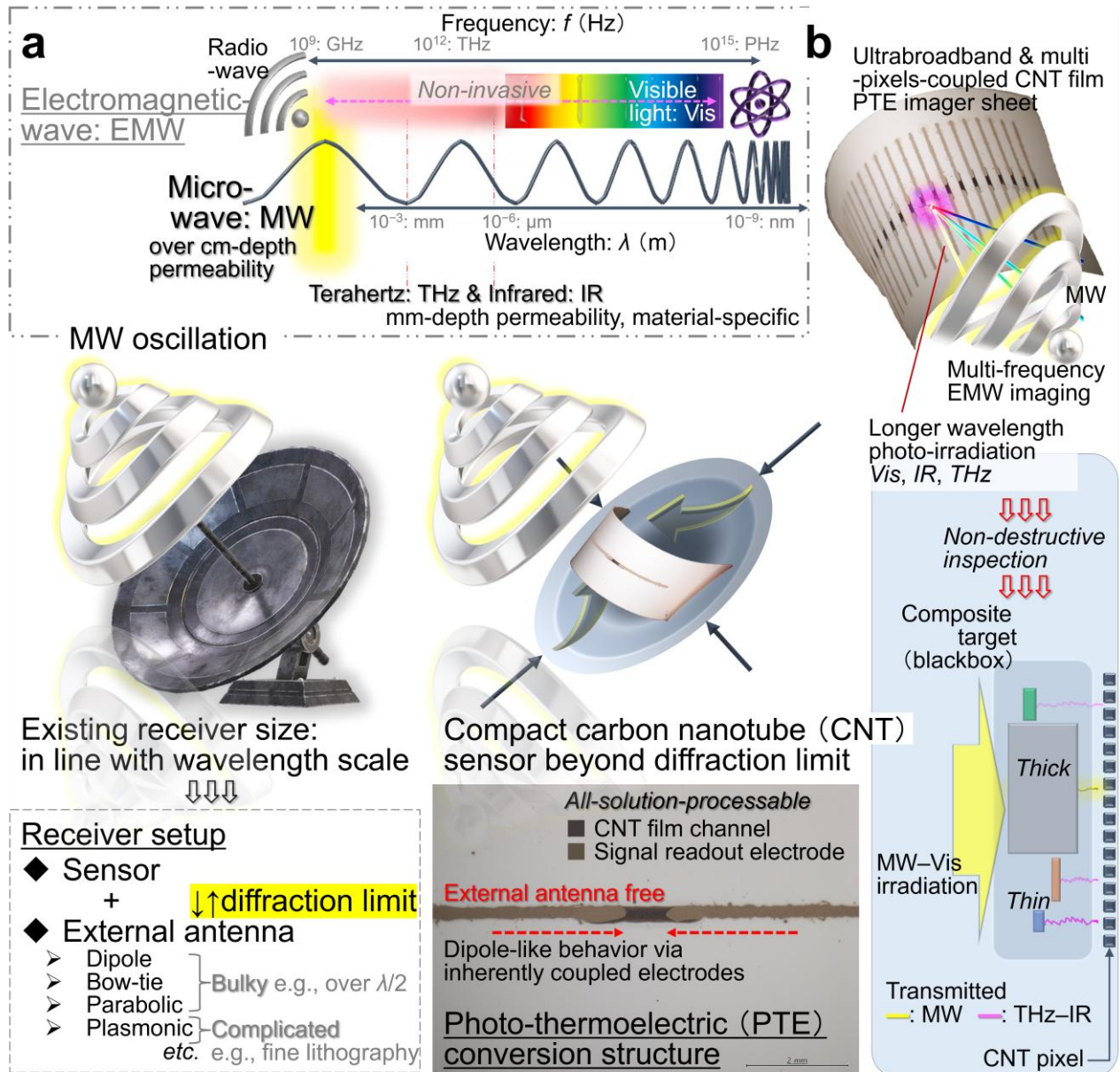


図 1 コンセプト (報告者の原著論文成果 (doi.org/10.1002/adsr.202400159) より引用)

3 結果・考察

3-1 CNT 型 PTE センサの基礎特性

(1) デバイス作製工程および PTE 特性

本研究では、回折限界を超えるコンパクトな CNT 型 PTE センサによるマイクロ波検出機構を明らかにする

ため、まずデバイス構造および動作原理を検討しました。センサはCNT 薄膜チャネルから構成されており、CNT 水分散液を膜基板上にろ過成膜することで作製しました。また、マスクを用いることでCNT 薄膜の形状や寸法を任意に制御でき、最小加工幅は300 μm でした。

作製したCNT 型PTE センサは、PTE 効果を利用して外部電磁波を検出しました。電磁波の吸収による発熱と、それに伴うチャネル内の温度分布によってゼーベック効果が発現し、電気信号が生成されました。チャネルにはpn 接合構造を形成し、これを電磁波検出界面として利用しました。PTE デバイスでは、検出界面における有効ゼーベック係数が応答信号強度を左右するため、高感度化を目的としてCNT 薄膜チャネルの半分をn 型化しました。そのために液体塗布型の化学ドーパントを用いてキャリア制御を行い、CNT 薄膜のゼーベック係数の極性を反転させました。これにより、有効ゼーベック係数を増大させ、電磁波に対する高感度検出を実現しました(図2)。

また本研究では、液体ドーパントの塗布領域を制御することで、CNT 薄膜チャネルのゼーベック係数の極性を変化させました。チャネル両端に6 $^{\circ}\text{C}$ の温度差を与えて評価した結果、p 型領域が支配的な場合には正の熱電応答およびゼーベック係数を示しました。一方、チャネルの約半分をドーパした場合には、p 型領域とn 型領域の寄与が相殺され、熱電応答とゼーベック係数は大きく減少しました。更に、ドーパ領域が大部分を占める条件では、熱電応答およびゼーベック係数は負の極性を示しました。

また、高いPTE 応答を得るためには、チャネル内にpn 接合を形成することが重要であることを確認しました。pn 接合では、p 型領域とn 型領域のゼーベック係数の絶対値が加算されるため、単一材料や同極性接合よりも大きな有効ゼーベック係数が得られました。実際に、チャネル内の各位置で熱電応答を評価した結果、pn 接合部が最も高い熱電応答を示しました。これらの結果に基づき、以降のCNT 型PTE センサの電磁波検出では、pn 接合を電磁波検出界面として採用しました。また、本デバイスは低雑音環境下でも安定して動作する特長を有していることを確認しました。

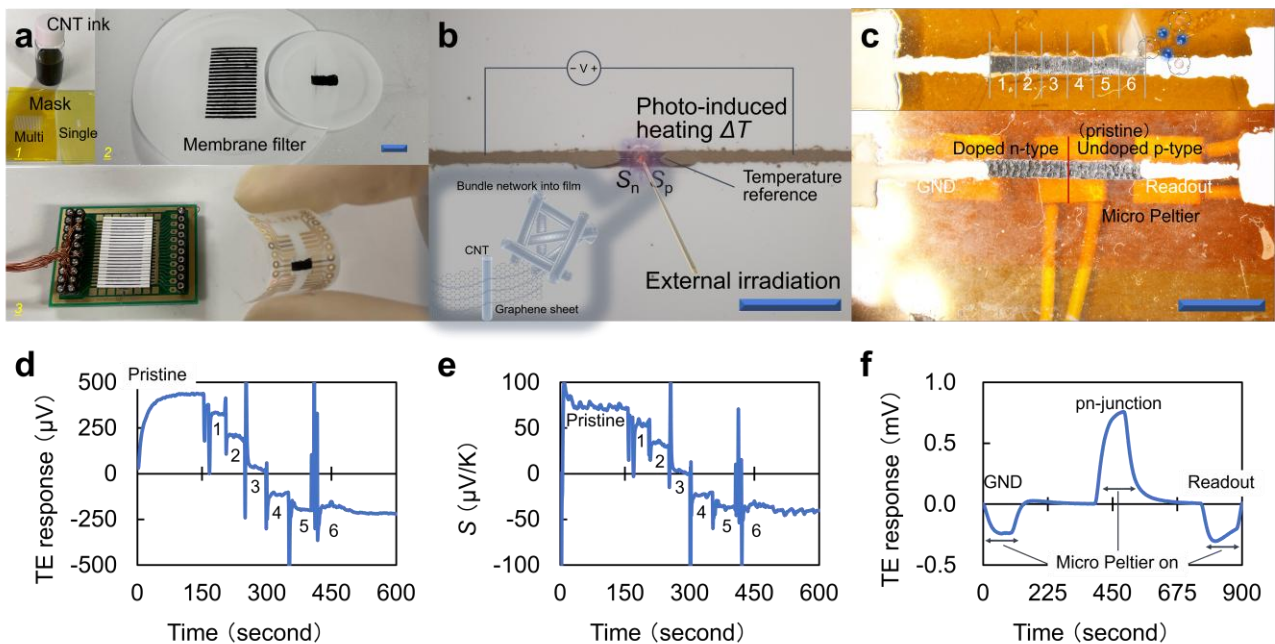


図2 CNT 型PTE センサの基礎特性 (報告者の原著論文成果 (doi.org/10.1002/adsr.202400159) より引用)

(2) デバイス作製工程およびPTE 特性

CNT 型PTE センサは、ゼロバイアス条件下において動作し、電磁波検出時のノイズレベルは熱雑音限界に近い低い値を示しました。また、冷却機構を必要としない常温環境で動作したことから、外部電源を用いない小型・簡素なセンシングシステムの構築が可能であることを示しました。更に、測定結果において観測された50 Hz のピーク信号は、センサデバイス自体に由来するものではなく、測定系の電源に起因するものでした(図3)。

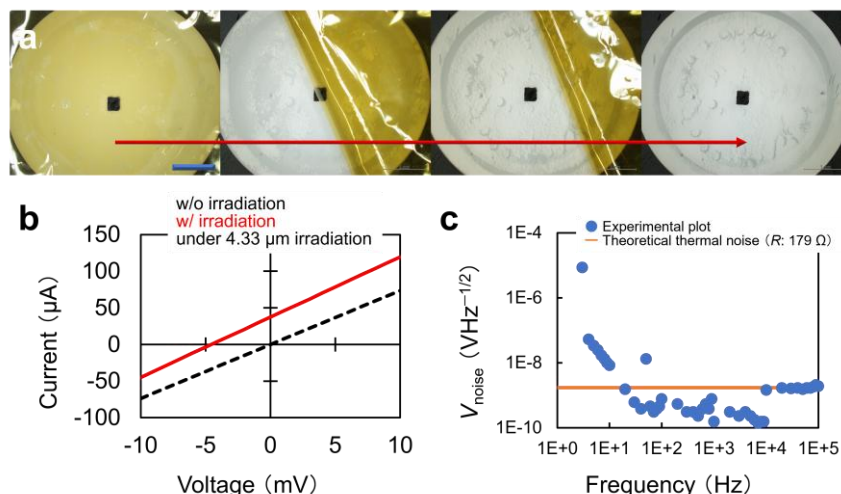


図3 CNT センサの PTE 挙動（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202400159）より引用）

3-2 CNT 型 PTE センサによる MW 検出

（１）基礎動作

本研究では、回折限界を超える小型デバイス動作を検証するため、CNT 型 PTE センサの寸法を変化させながら、マイクロ波照射下での基本特性を評価しました。実験では、マイクロ波発生器から CNT 型 PTE センサへ直接マイクロ波を照射し、ステージを用いてデバイス位置を制御しながら応答を測定しました。

その結果、CNT 型 PTE センサは外部から照射されたマイクロ波を適切に検出しました。マイクロ波照射位置をチャンネル長手方向に沿って走査したところ、PTE 応答分布は pn 接合部で最大の信号強度を示しました。一方、CNT 薄膜チャンネルと電極の界面では、それよりも小さい負極性の応答が観測されました。

この応答分布は、既報の赤外光検出時およびテラヘルツ波検出時の挙動と良く一致していました。以上の結果から、CNT 型 PTE センサがマイクロ波を検出可能であるという点が実験的に実証されました。

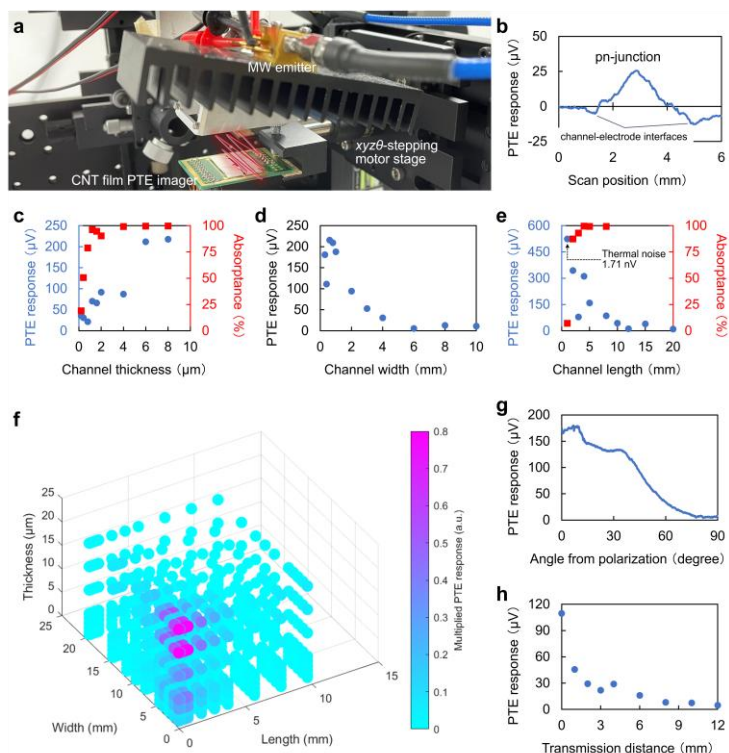


図4 CNT 型 PTE センサの MW 検出（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202400159）より引用）

(2) CNT 型 PTE センサのサイズ依存性

本研究では、CNT 型 PTE センサが回折限界を超える小型デバイスとして動作する可能性を検証するため、デバイス寸法とマイクロ波検出応答の関係を評価しました。まず、CNT 薄膜の厚さを変化させた結果、膜厚が増加するほどマイクロ波照射に対する PTE 応答が増大しました。これは、厚い CNT 薄膜ほどマイクロ波吸収量が増加し、発熱効果が高まったためと考えられました (図 5)。

次に、デバイス平面サイズの影響を調査しました。まずチャンネル幅を変化させたところ、幅が狭いほどマイクロ波検出応答が向上しました。これは、マイクロ波の吸収が偏波方向に沿って支配的であったことに加え、チャンネル幅の縮小によって CNT 薄膜の熱抵抗が増加し、より大きな温度勾配が形成されたためと考えられました (図 6)。

更に、チャンネル長さを変化させた結果、チャンネル長が短いほどマイクロ波検出応答が増加しました。この傾向は、一般的なマイクロ波吸収の挙動とは異なっていました。通常は回折限界の影響により、偏波方向に沿った寸法が短くなるとマイクロ波吸収が低下し、検出性能も低下すると考えられます。しかし、本研究では波長 60 mm のマイクロ波を用いたにもかかわらず、10 mm 以下の短いチャンネル長においても高い応答が得られました。また、この結果は熱電応答に関する一般的な熱計算から予測される傾向とも異なっていました。以上より、CNT 薄膜 PTE センサは回折限界を超える小型サイズにおいても優れたマイクロ波検出性能を維持できることが示されました (図 7, 8)。



図 5 厚みの異なる CNT 膜 (報告者の原著論文成果 (doi.org/10.1002/adsr.202400159) より引用)

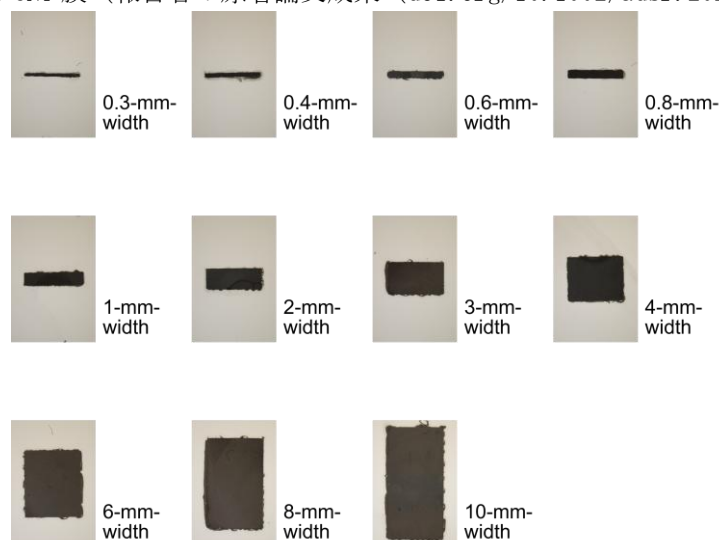


図 6 線幅の異なる CNT 膜 (報告者の原著論文成果 (doi.org/10.1002/adsr.202400159) より引用)

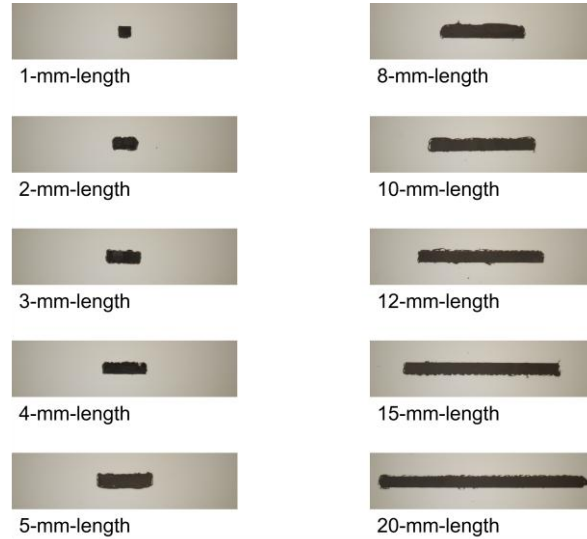


図7 線長の異なるCNT膜（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202400159）より引用）

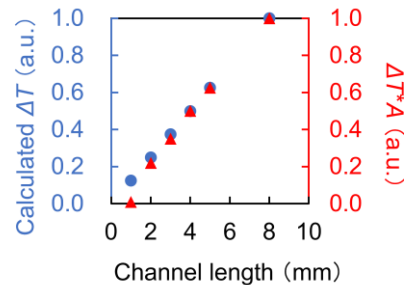


図8 PTEモデルによるCNTの熱解析（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202400159）より引用）

（3）疑似アンテナ効果の考察

本研究では、長さ1 mm、幅1 mmのCNT型PTEセンサにおいて、外部マイクロ波検出性能を詳細に評価しました。その結果、信号対雑音比1,497、時定数375 msという良好な検出特性を示しました（図9）。また、この高いマイクロ波応答には、センサに本来備わっている配線電極が重要な役割を果たしていることを実験的に明らかにしました。同一サイズのCNT薄膜チャネルに対して電極材料を変更して比較したところ、低抵抗な銀電極では大きなPTE応答が得られた一方、高抵抗な電極ではほとんど応答が観測されませんでした。この結果から、銀電極がダイポールアンテナに類似した働きを示し、外部マイクロ波を効率的に集中的に取り込んでいることが示唆されました。そのため、本センサは大型で複雑な外部アンテナを追加することなく、回折限界を超える小型構成でマイクロ波検出を実現しました（図10）。

更に、チャネル寸法依存性の結果を総合的に解析したところ、平面サイズを小さくし、膜厚を増加させるほどマイクロ波に対するPTE応答が向上しました。その結果、最適なチャネル寸法は長さ1 mm、幅1 mm、厚さ8 μm であることを見いだしました。

また、本センサの基本的なマイクロ波検出特性も評価しました。偏波特性では、マイクロ波の偏波方向とチャネル長手方向のなす角が大きくなるにつれて応答が低下し、一般的なマイクロ波の偏波依存性と一致しました。更に、伝搬距離特性では、マイクロ波発生器とセンサ間の距離が長くなるほど応答が減少し、一般的なマイクロ波伝搬特性と一致しました。以上より、CNT型PTEセンサは回折限界より小さいサイズでありながら、マイクロ波センサとしての基本特性を維持し、従来から有していたテラヘルツ波からVisまでの超広帯域検出能力に加えて、マイクロ波領域にも適用可能であることを示しました。

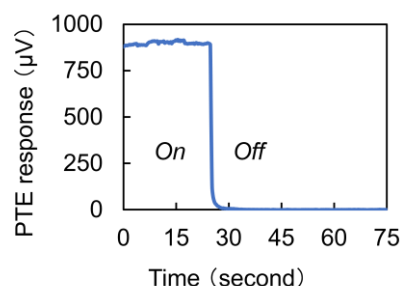


図 9 CNT 型センサの MW 検出速度（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202400159）より引用）

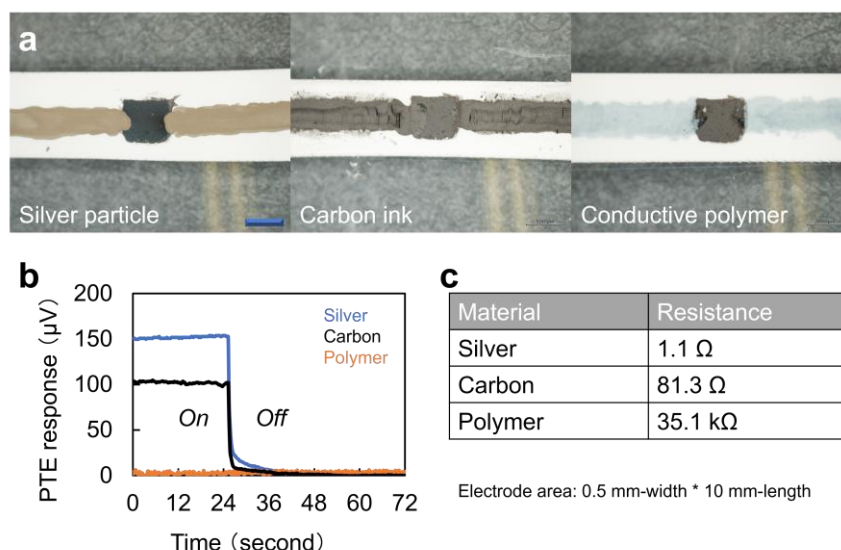


図 10 CNT 型 MW センサの電極依存性（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202400159）より引用）

3-3 MW 検出動作性能における CNT 型 PTE センサの材質依存性

本研究では、デバイス構造や寸法の検討に続いて、CNT 材料そのものの特性がマイクロ波検出性能に与える影響を評価しました。特に、CNT 薄膜の代表的な材料パラメータである半導体型 CNT と金属型 CNT の混合比（sm 比）に着目し、CNT 型 PTE センサのマイクロ波検出感度を制御しました。

実験では、長さ 5 mm、幅 1 mm の CNT 薄膜チャネルを用い、分離精製した半導体型 CNT 分散液と金属型 CNT 分散液を 10 %刻みで異なる割合に混合することで、さまざまな sm 比を有する CNT 薄膜を作製しました。その後、これらの CNT 薄膜チャネルを搭載した PTE センサに対して直接マイクロ波を照射し、得られる PTE 応答を比較しました。これにより、CNT の電子物性を調整することで、マイクロ波検出特性を制御できる可能性を検証しました。

作製した各 CNT 薄膜 PTE センサのマイクロ波検出応答を比較した結果、金属型 CNT の含有率が 50～90 % の範囲で高い PTE 応答が得られました。この傾向は、各 CNT 薄膜のマイクロ波吸収特性とよく一致していました。実際に、金属型 CNT の割合が高い試料ほど、マイクロ波吸収率が高くなることを確認しました。これは、一次元構造を有する CNT に特有の自由キャリアによる電磁波吸収に起因すると考えられました（図 11）。

一方で、半導体型 CNT を多く含む CNT 薄膜は、PTE 効果に重要なゼーベック係数が大きいという利点を有していましたが、マイクロ波吸収率が低いため、高い検出応答には結び付きませんでした。そこで本研究では、材料のマイクロ波吸収率とゼーベック係数の積を指標としてセンサ応答を評価しました。その結果、この材料設計指針から予測される応答傾向は、実際のマイクロ波検出実験で得られた PTE 応答とよく一致しました。

以上より、本研究では図 4 で示したデバイス寸法の最適化に加え、半導体型 CNT と金属型 CNT の組成比を制御することで、CNT 薄膜 PTE マイクロ波センサの性能を更に最適化できることを示しました。

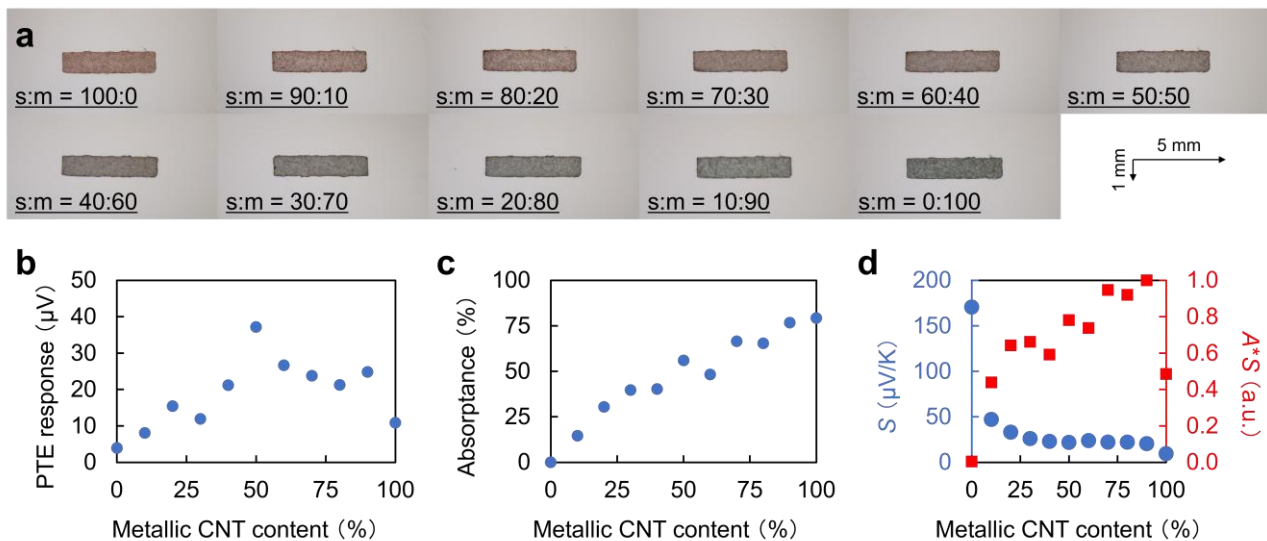


図 11 CNT 型 MW センサの半金制御（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202400159）より引用）

3-4 CNT 型 PTE センサによる超広帯域な非破壊検査デモンストレーション

本研究では、これまでに得られた知見と技術を活用し、CNT 型 PTE センサが有するミリ波～赤外光帯域の検出機能と新たに実証したマイクロ波検出機能を組み合わせることで、非破壊検査への応用を検証しました。

評価試料には、厚さ 0.5 mm のプラスチックフィルム、厚さ 18 mm のプラスチックブロック、小型金属部品、および厚さ 1 mm の不透明な半導体基板の 4 種類の材料を用いました。これらは日用品や産業製品を構成する代表的な材料であり、本試験を通じて CNT 型 PTE センサの非破壊検査デバイスとしての有用性を評価しました。

実験では、単一画素の CNT 型 PTE センサを用いた透過型イメージング測定を行いました。試料を電磁波光源とセンサの間に配置し、光源およびセンサの位置は固定したまま、試料のみを二次元方向に走査しました。その際、試料を透過した電磁波によって生じる PTE 応答信号を測定し、その強度分布から透過イメージを取得しました。

本研究では、CNT 型 PTE センサを用いて、IR、THz、および MW による透過型非破壊イメージングを実証しました。IR イメージングでは、不透明な半導体基板内部に隠された小型金属部品を高解像度で可視化しました。一方で、プラスチック薄膜などの非金属材料は十分に観察できませんでした。続いて THz イメージングを行ったところ、IR では確認できなかったプラスチック薄膜の円形パターンを可視化できました。これは THz 波がプラスチック材料を透過しやすいためでした。しかし、THz では波長が長いため、小型金属部品を鮮明に観察することは困難でした。このように、IR と THz イメージングは互いに補完的な情報を提供しました。

更に、IR および THz では内部構造を観察できなかったプラスチックブロックに対して MW イメージングを実施しました。その結果、プラスチックブロック内部の構造を反映した透過信号分布が得られ、金属フレーム内に存在する円形開口部の構造を非破壊で可視化しました。これにより、CNT 型 PTE センサによる MW 計測が、従来の IR および THz 計測では得られない内部情報を取得できることを示しました。

また、本研究では回折限界を超える小型 MW センサを活用し、CNT 型 PTE センサの一次元アレイ化も実証しました。作製したアレイは 18 画素で構成され、各画素は長さ 1 mm、幅 1 mm、ピッチ 1 mm の構造を有していました。このアレイセンサを用いて透過型 MW イメージングを行った結果、移動する金属棒の位置と軌跡を明瞭に可視化することに成功しました。各画素は金属表面での反射による局所的な透過率低下を検出し、二次元画像として再構成しました（図 12）。

以上の結果から、CNT 型 PTE センサは、IR・THz・MW にわたる超広帯域イメージングを実現するとともに、回折限界を超える小型デバイスおよびセンサアレイとして動作することを示しました。これにより、高機能な非破壊検査やモニタリングへの応用可能性を実証しました。

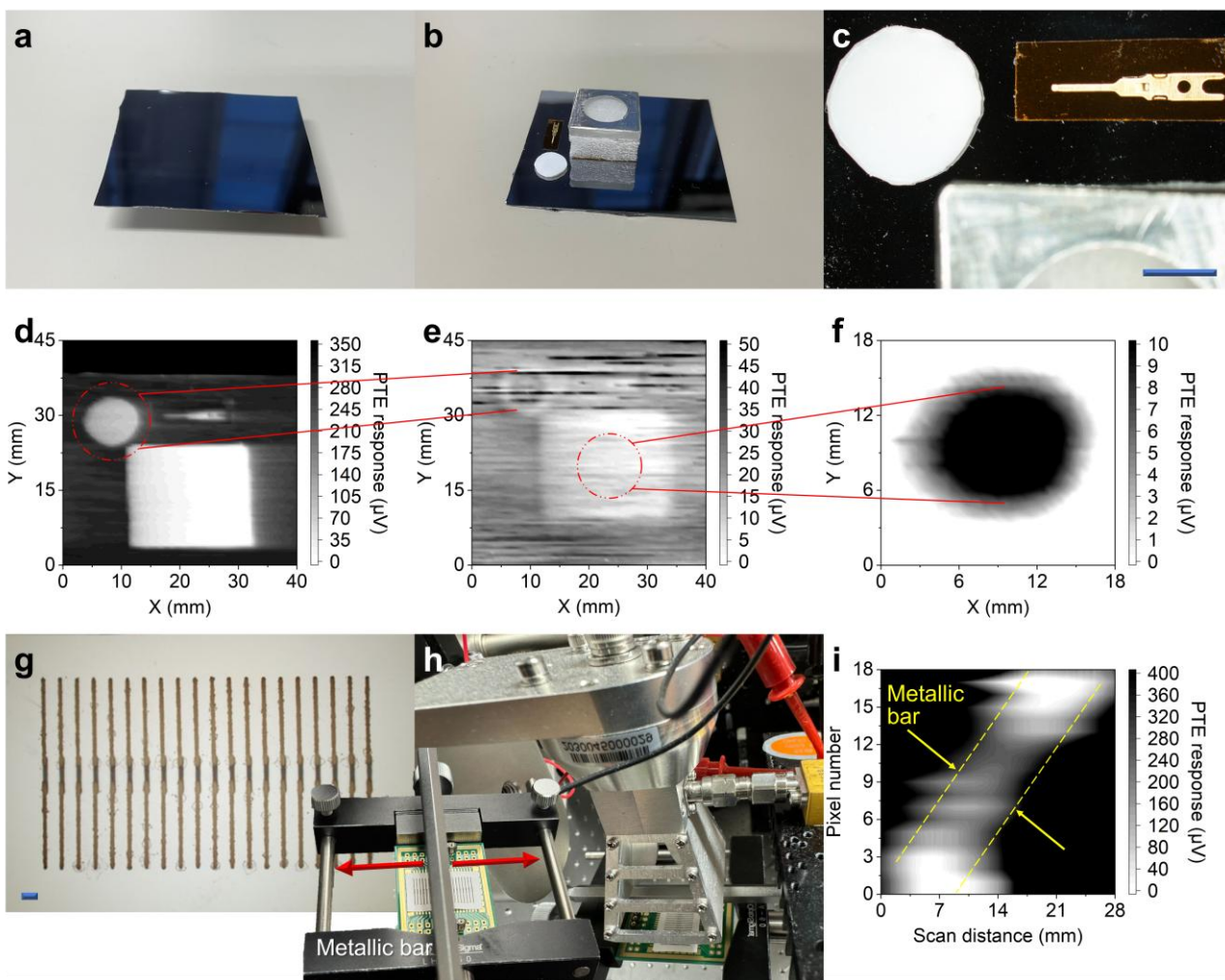


図 12 非破壊 MW- IR 検査（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202400159）より引用）

3-5 レーダー・ライダー応用に向けたコンピュータビジョン（CV）計測

CNT 型 PTE センサによる基礎的な高感度 MW 検出の実証により，MW 帯で盛んなレーダー・ライダーといった 3D 計測をコンパクトな CNT 型 PTE センサで実現することも今後の研究課題と位置付けられます．そこで報告者は CNT 型 PTE センサを用いた MMW・THz・IR 計測における幾何学情報にも着目し，特に情報工学分野において発展が著しい CV へと展開しました．CV は，2D 画像計測における光学的情報（透過・吸収・反射・散乱の信号強度等）を時空間情報（座標変化，位相ずれ，時間遅れ等）と関連付けることで，観察対象の 3D 構造を復元できる技術です．従来の CV は，侵襲的な X 線計測やデジタルアート分野における可視光計測で主に利用されていましたが，報告者は CNT 型 PTE センサが有する潜在能力に着目し，透視性および材質同定性に優れた超広帯域かつ超高感度な MMW・THz・IR モニタリングへと応用範囲を拡張しました．

具体的には，報告者は CNT 型 PTE センサを活用した THz- IR 帯域におけるコンピュータドトモグラフィ（CT）非破壊検査において，センサ画素を広視野な 2D 平面上へカメラ構造として集積することで，先行研究の 1D アレイ画素計測と比較して 37% のシステム動作時間短縮を実証しました．報告者が確立したエアジェットディスペンサ技術に基づき，本成果では CNT 型 PTE センサを 1 mm ピッチ・20 画素アレイ・5 mm ピッチの 3 アレイラインからなる 2D カメラ構造へ集積しました．このデバイス基盤を活用することで，直線空間走査を必要としない 10 mm 角超の広視野範囲を 976 nm～10.3 μ m の波長域における CT 計測で実現しました．その結果，目視では不透明な遮蔽物によって隠された複合検査対象（4 種類の異種材料で構成）に対して，11 分という高速なシステム動作と 10 %未満の計測誤差率という高い信頼性を両立し，非破壊での材質同定および 3D 構造復元を実現しました（図 13）．

MMW- IR 帯 CV による材質同定・構造復元を融合したハイブリッド非破壊検査手法において、その基盤となる CNT 型 PTE センサの集積密度がシステム動作速度を支配する重要な要因であることを解明しました。報告者は、広視野 2D カメラ実装設計というデバイス集積化の第一歩を実現することで、非破壊検査システムの高速度化を達成しました。

更に報告者は、CNT 型 PTE センサによる基礎的な CT 計測に加え、対象物の影（シルエット）の重ね合わせから外観形状を推定する 3D 構造復元技術である視体積交差法（Visual Hull：VH）を導入することで、品質評価分野に新たなブレークスルーをもたらす非破壊検査手法を創出しました（図 13）。本成果の鍵となったのは、光の「影」と「透け」の活用です。MMW, THz, IR はそれぞれ異なる波長を有するため、観察対象に対する影や透過像の見え方も波長によって変化します。本システムでは、不透明な多層複合立体構造を有する対象物に対して、MMW- IR 照射時の影および透過像の波長依存特性から材質を同定しました。更に、「影」から空間配置情報を取得する VH と、「透け」から詳細断面情報を取得する CT をハイブリッドな CV 技術として組み合わせることで、対象物の 3D 検査モデルを構築しました。

また、報告者が設計した広視野 2D 集積 CNT 型 PTE カメラでは、CNT 吸光発熱膜と接地金属電極配線との接合部が画素座標に相当しました。この構造は、フォトダイオードに代表される面画素型イメージセンサとは異なり、線画素として機能する独自の特徴を有していました（図 14）。

CT 計測自体のフローチャートは、可視光計測や X 線計測と同様の工程で構成されていました。言い換えれば、CNT 型 PTE カメラは高い操作性を有しているため、THz- IR 光源を除けば既存の CT 計測システムを汎用的に流用できるという簡便性が利点でした（図 15）。また、以下に示す基礎動作実証においても、データ処理は MATLAB ソフトウェア上で完結しており、特別な画像解析環境を必要としませんでした。

当初目標であった材質同定・3D 構造復元を融合したハイブリッド非破壊検査の実証に先立ち、報告者は CNT 型 PTE カメラによる CT 計測の基礎動作精度評価を実施しました（図 16）。本評価は、基礎形状復元検証と基礎サイズ復元検証の二段階で構成しました。

基礎形状復元検証では、不透明遮蔽層の内部に異なる形状の柱体を積層し、目視では識別が極めて困難な条件下において、CNT 型 PTE カメラを用いた高透視 CT 計測を実施しました。取得した断層画像では、円柱、三角柱、四角柱をそれぞれ反映した吸光度分布が得られ、撮像位置ごとの形状情報も実際の観察対象と良好に一致しました。この結果から、提案システムが高い形状復元性能を有することを実証しました。

基礎サイズ復元検証では、同様に不透明遮蔽層の内部に辺長の異なる 3 つの正三角柱を積層しました。CNT 型 PTE カメラによる高透視 CT 計測で取得した断層画像は、観察対象における辺長の違いを忠実に再現しました。例えば、一辺 18 mm の三角柱に対して、復元された辺長は 17.0 mm, 17.2 mm, 17.2 mm となり、提案システムのサイズ復元誤差率は 5.56 %でした。

更に、当初目標であった材質同定・3D 構造復元を融合したハイブリッド非破壊検査を実証するため、報告者は不透明遮蔽層内に配置した複合材質・複合形状モデルを観察対象とし、広視野 2D 集積 CNT 型 PTE カメラによる THz- IR 帯の高透視 CT 計測を実施しました。本デモンストレーションでは、976 nm の短波長 IR, 1,310 nm の長波長 IR, および 10.3 μm 波長の THz を照射光として用いました。観察対象を構成する各材料は、これらの波長に対して異なる透過率および吸光率を示しましたが、CNT 型 PTE カメラは全ての波長領域において高感度な CT 計測を実現しました。

取得した断層画像では、同一層内に異種材料が混在する状況（図中の「最下層」におけるガラスと半導体の混在）に対しても、複数波長の計測結果を重ね合わせることで、材質情報と空間配置情報を同時に取得できました。これにより、提案システムが多様な対象物に対して適用可能な、高い汎用性を有する非破壊検査技術であることを示しました（図 17）。

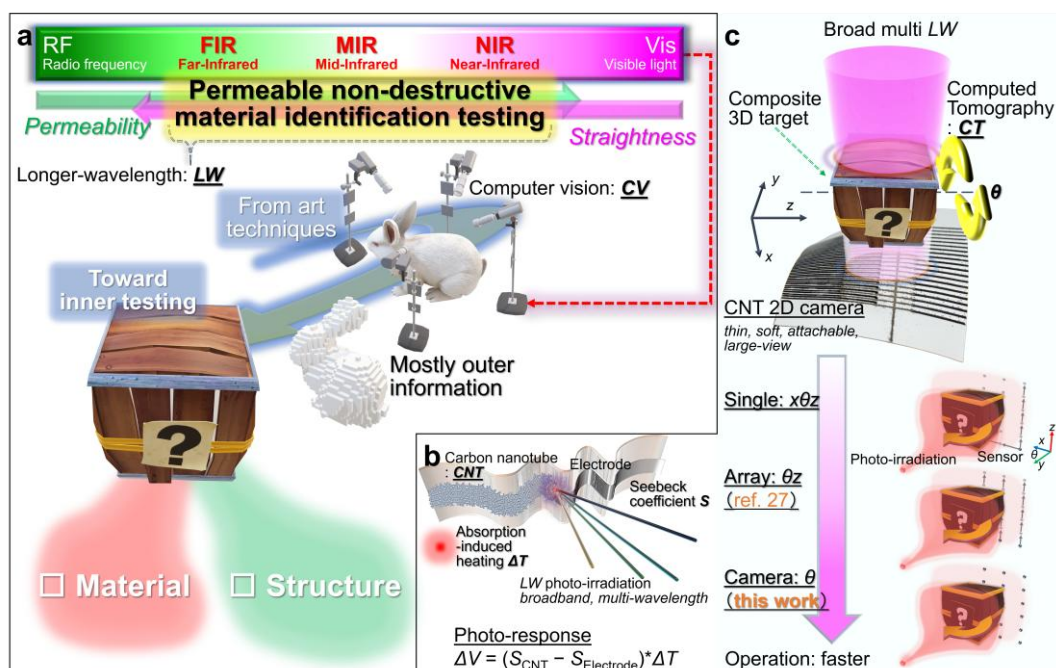


図 13 CNT センサによる CV (報告者の原著論文成果 (doi.org/10.1002/adsr.202500132) より引用)

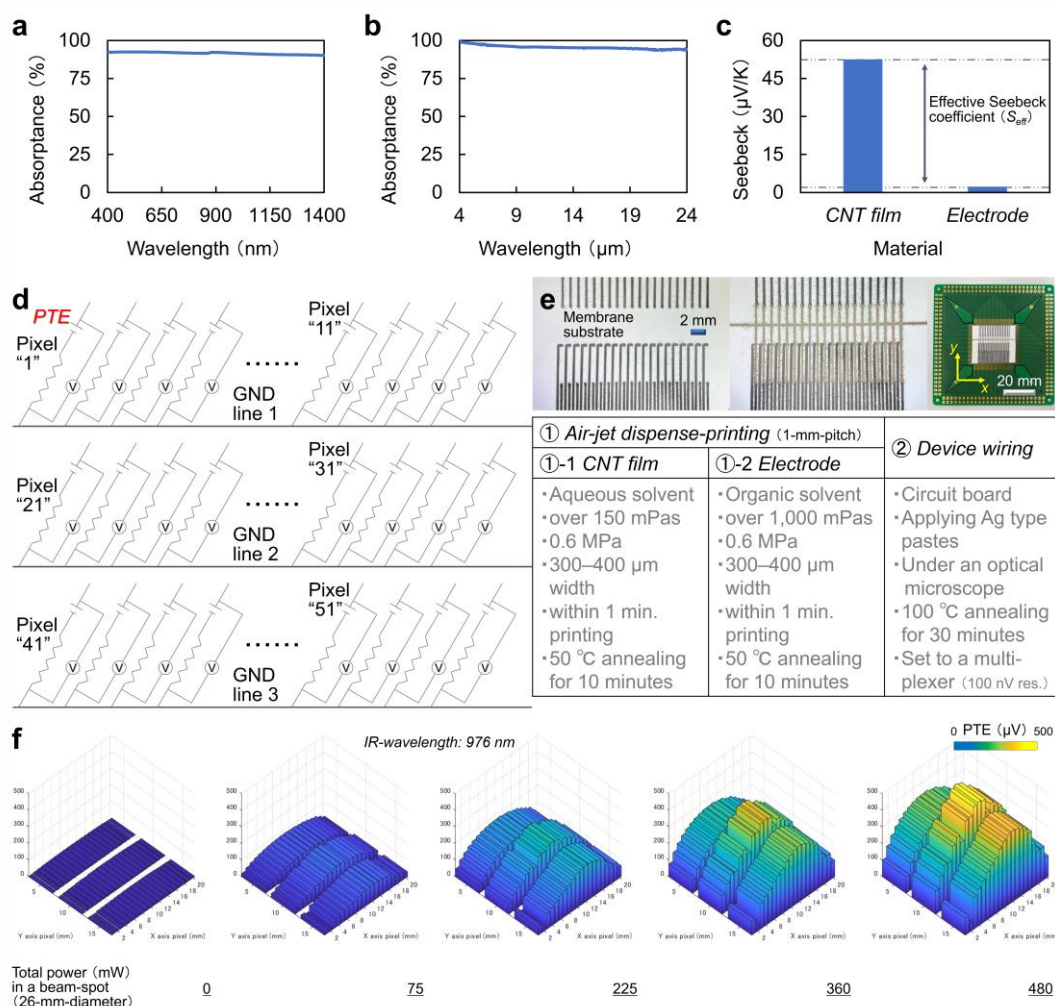


図 14 CNT 型 PTE カメラ (報告者の原著論文成果 (doi.org/10.1002/adsr.202500132) より引用)

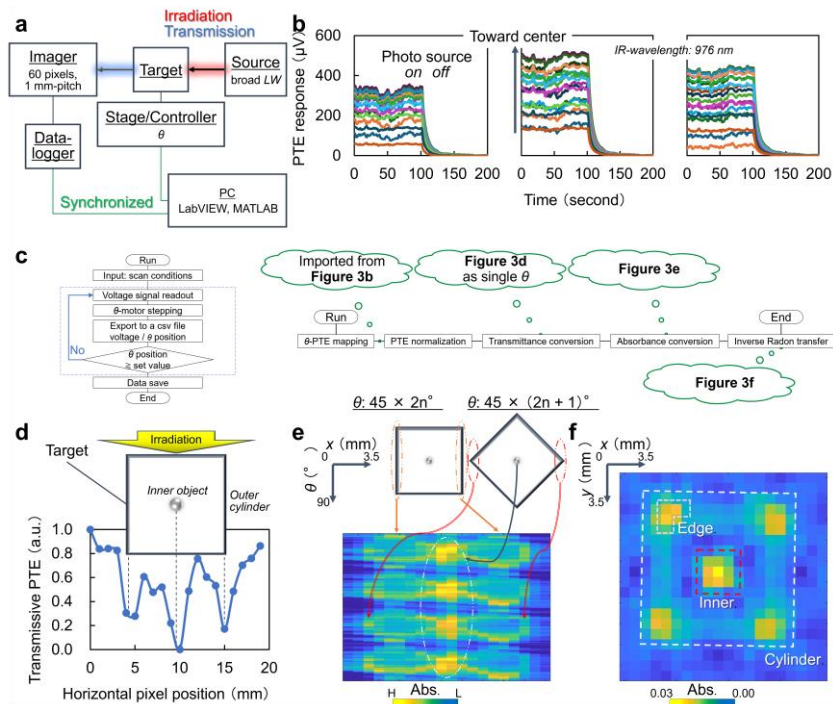


図 15 CNT カメラの測定系（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202500132）より引用）

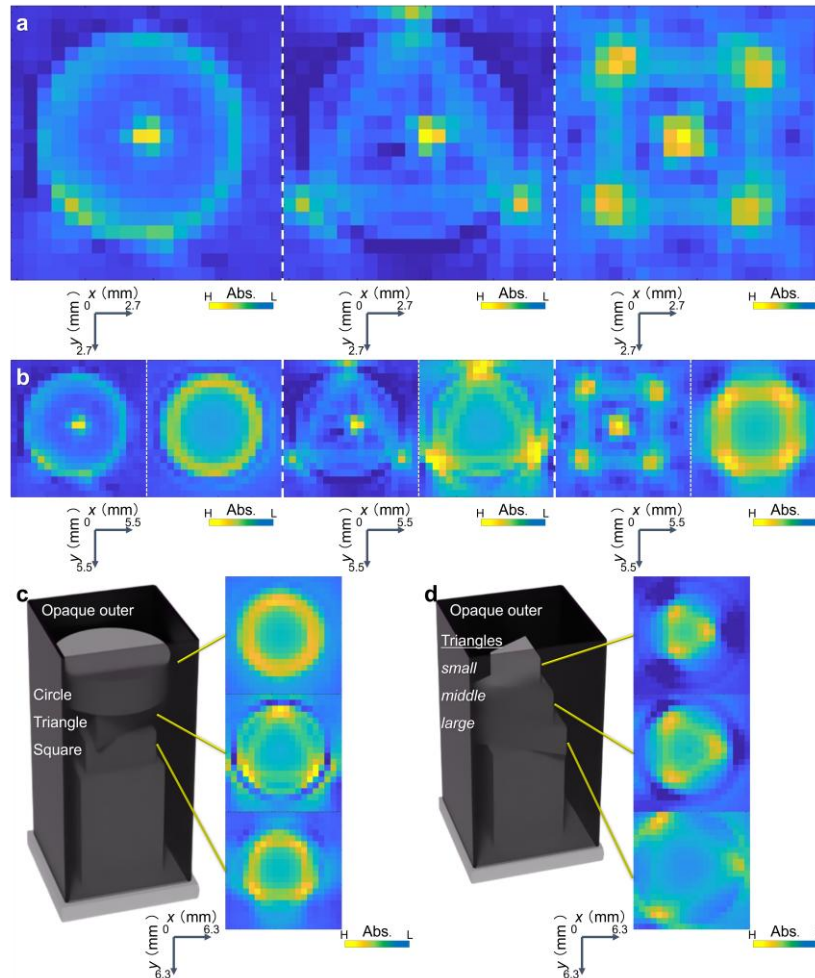


図 16 CNT カメラの撮像制度（報告者の原著論文成果（doi.org/10.1002/adsr.202500132）より引用）

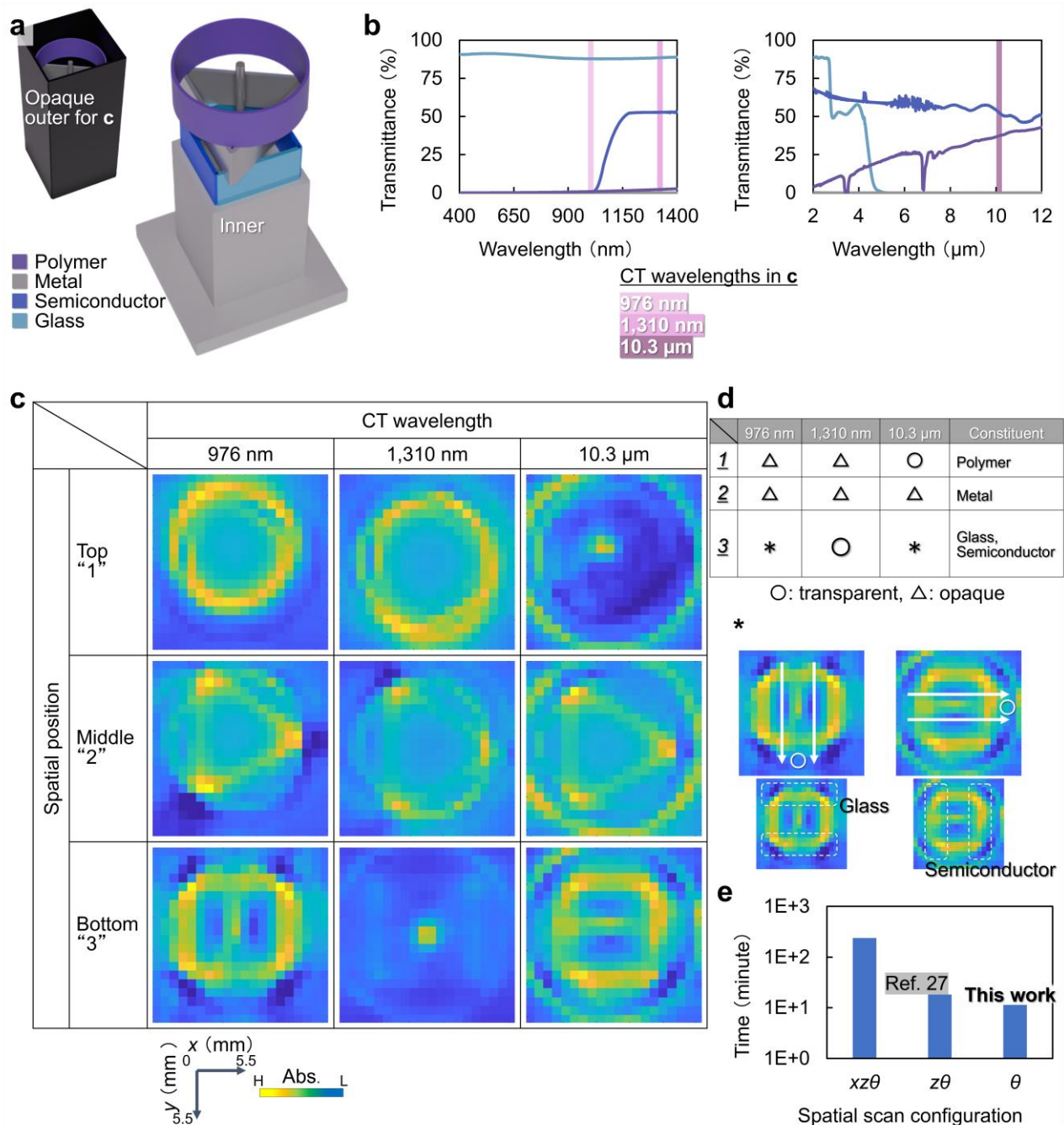


図 17 CNT カメラによる非破壊検査（報告者の原著論文成果 (doi.org/10.1002/adsr.202500132) より引用)

4 結論

本研究の結果は、提案した CNT 型 PTE センサが従来の MW 計測技術と比較して高い実用性を有することを示しました。従来の MW センサでは、ダイポールアンテナやプラズモニックアンテナなどの構造が高感度な MW 検出を実現し、無線通信やレーダー計測に広く利用されていました。一方、本研究で提案した CNT 型 PTE センサは、大型で複雑なアンテナモジュールを用いることなく、回折限界を超える小型構成で MW 検出を実現しながら、既存デバイスと同等の基本的な検出性能を維持しました。

また、本センサは MW だけでなく、MMW から IR、更に Vis に至る超広帯域な電磁波検出能力を有していました。そのため、MW 計測による内部構造の可視化と、MMW・THz・IR を用いた詳細な材料識別を組み合わせた高

機能な非破壊検査への応用可能性を示しました。

特に、数 μm 厚の柔軟なシート型 CNT 型 PTE センサは、回折限界の約 60 分の 1 に相当する 1 mm サイズのチャネルにおいても、信号対雑音比 1,497 の高感度な MW 検出を実現しました。この結果は、アンテナレスかつ小型な MW センサとしての有効性を示すものでした。

更に、本研究は今後の発展可能性についても示しました。例えば、応答速度や信号変調特性を更に詳細に評価することで、非破壊検査と大容量無線通信を両立するマルチモーダルデバイス^[19-22]への展開が期待されました。また、異なるサイズの CNT 型 PTE センサを積層する構造を導入することで、超広帯域な電磁波に対して波長選択性を付与し、より高度な現場型非破壊検査システムへ発展できる可能性が示されました。

結論として本研究では、CNT 型 PTE センサを用いることで、回折限界を超える小型構造での MW 検出と、同一デバイスによる IR までの超広帯域非破壊イメージングを実証しました。従来の MW センサは、長波長に起因する回折限界のため、小型化が困難でした。これに対し、本研究では、本来 MMW から Vis までの広帯域電磁波検出が可能な CNT 型 PTE センサが、デバイスサイズを大型化することなく MW 領域にも対応できることを示しました。

MW 検出においては、CNT 薄膜が電磁波吸収体として機能し、PTE 効果によって信号を生成しました。また、チャネル長を短くし、チャネル幅を狭くすることで MW 応答が向上することを明らかにしました。更に、センサに標準的に備わっている導電性配線電極が、外部アンテナを追加することなくアンテナ様の役割を果たし、回折限界を超える小型構成での MW 検出を可能にしていることを実験的に示しました。

材料設計の観点では、CNT 特有の半導体型・金属型混合比 (sm 比) が MW 検出感度に大きく影響することを明らかにしました。その結果、MW 吸収特性と PTE 特性を両立する最適な混合組成を見だし、小型 MW センサとしての性能向上を実現しました。

更に、最適化したデバイスを用いて、MW から NIR にわたる複数波長のイメージングによる非破壊検査を実証しました。MW は厚みのある構造体内部の透視に優れ、MMW・THz・IR は材料識別に優れるため、それぞれの長所を相補的に活用することで、複雑な構造や材料組成を有する対象物を詳細に評価できました。

以上より、本研究は、CNT 型 PTE センサが回折限界を超える小型 MW センサとして機能するとともに、MW から IR・NIR 領域までを活用した高機能な非破壊検査を実現できることを示しました。この技術は、多様な材料や構造から構成される日用品や産業製品の安全性評価に応用でき、利用者や対象物に優しい社会インフラの構築へ貢献する可能性を示しました。

最後に本研究への電気通信普及財団様からのご支援に際しまして、心より深く感謝を申し上げます。

【参考文献】

- [1] W. Shao, T. McCollough, IEEE Microw. Mag. 2020, 21, 94.
- [2] R. K. Amineh, IEEE Instru. Meas. Mag. 2024, 27, 54.
- [3] S. Kharkovsky, R. Zoughi, IEEE Trans. Instrum. Meas. 2007, 10, 26.
- [4] S. S. Ahmed, IEEE J. Microw. 2021, 1, 191.
- [5] S. S. Ahmed, A. Schiessl, F. Gumbmann, M. Tiebout, S. Methfesseland L. P. Schmidt, IEEE Microw. Mag. 2012, 13, 26.
- [6] H. Lee, Y. Xiong, N. Fang, W. Srituravanich, S. Durant, M. Ambati, C. Sun, X. Zhang, New J. Phys. 2005, 7, 255.
- [7] A. Grbic, G. V. Eleftheriades, Phys. Rev. Lett. 2004, 92, 117403.
- [8] M. F. Imani, J. N. Gollub, O. Yurduseven, A. V. Diebold, M. Boyarsky, T. Fromenteze, IEEE Trans. Antennas Propag. 2020, 68, 1860.
- [9] B. Borja, J. A. Tirado-Méndez, H. Jardon-Aguilar, Prog. Electromagn. Res. B 2018, 80, 173.
- [10] M. Z. Mahmud, M. Z. Mahmud, N. Misran, A. F. Almutairi, M. Cho, Sensors 2018, 18, 2951.
- [11] A. Darvazehban, S. A. Rezaeie, A. Abbosh, IEEE Trans. Antennas Propag. 2020, 68, 5955.
- [12] G. S. Kanter, P. M. Moraw, K. F. Lee, F. A. Juneghani, M. G. Vazimali, K. Kim, IEEE Photon. J. 2023, 15, 1.
- [13] P. P. Sitompul, P. Razi, T. Manik, M. Batubara, M. Lathif, F. Mumtahana, R. Suryana, I. N. Huda, T. Hidayat, Y. Taryana, F. Sobirin, Aerospace 2024, 11, 52.

- [14] H. Ibili, T. Blatter, M. Baumann, L. Kulmer, B. Vukovic, J. Smajic, IEEEJ. Sel. Top. Quantum Electron. 2023, 29, 1.
- [15] M. S. Rana, M. M. R. Smieeee, Bull. Electr. Eng. Inform. 2022, 11, 3329.
- [16] M. Ezuma, C. K. Anjinappa, M. Funderburk, I. Guvenc, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2022, 58, 27.
- [17] A. Kadir, G. D. Chris, R. Soc. Chem. 2008, 133, 1469.
- [18] S. Yannick, M. Ping, B. Benedikt, E. Alexandros, F. Yuriy, H. Wolfgang, C. Bojun, J. Arne, L. Juerg, ACS Photon 2018, 5, 3291.
- [19] M. Bauer, A. Rämer, S. A. Chevtchenko, K. Y. Osipov, D. Cibiraitė, S. Pralgauskaite, K. Ikamas, A. Lisauskas, W. Heinrich, V. Krozer, H. G. Roskos, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2019, 9, 430.
- [20] R. Huang, X. Ji, Y. Liao, J. Peng, K. Wang, Y. Xu, F. Yan, Opt. Express 2019, 27, 23250.
- [21] D. Y. Kim, O. K. Kenneth, Electron. Lett. 2017, 53, 11.
- [22] X. Yang, A. Vorobiev, A. Generalov, M. A. Andersson, J. Stake, Appl. Phys. Lett. 2017, 111, 021102.

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Structural stability-driven dynamic range analysis of carbon nanotube photo-thermoelectric sensors	Advanced Sensor Research	2026 年 2 月
Simultaneous multi-layer stacking for longer-wavelength broadband computed tomography with a carbon nanotube film photo-thermoelectric camera sheet	Advanced Sensor Research	2026 年 2 月
Operation speed tuning for infrared computer vision testing with pixel integration structures of carbon nanotube photo-thermoelectric imagers	Optics Continuum	2025 年 12 月
All-solution-processable robust carbon nanotube photo-thermoelectric devices for multi-modal inspection applications	Materials	2025 年 10 月
In-line multi-wavelength non-destructive pharma quality monitoring with ultrabroadband carbon nanotubes photo-thermoelectric imaging scanners	Light: Science & Applications	2025 年 9 月
A chemically enriched, repeatedly deformable, and self-recoverable broadband wireless imager sheet	Communications Materials	2025 年 7 月
Microwave Monitoring by Compact Carbon Nanotube Photo-Thermoelectric Sensors Beyond the Diffraction Limit Toward Ultrabroadband Non-Destructive Inspections	Advanced Sensor Research	2025 年 6 月
Mechanically alignable and all-dispenser printable device design platform for carbon nanotube-based soft-deformable photo-thermoelectric broadband imager sheets	npj Flexible Electronics	2025 年 5 月
All-Solution-Processable Hybrid Photo-thermoelectric Sensors with Carbon Nanotube Absorbers and Bismuth Composite Electrodes for Nondestructive Testing	Small Science	2025 年 5 月

n-type carbon nanotube inks for high-yield printing of ultrabroadband soft photo-imager thin sheets	FlexMat	2025 年 4 月
Multi Computer Vision-Driven Testing Platform: Structural Reconstruction and Material Identification with Ultrabroadband Carbon Nanotube Imagers	Advanced Materials Technologies	2025 年 4 月