

文部科学大臣賞

しなやかな環境親和性を持つ非破壊撮像プラットフォーム

～世紀の発見から30年：カーボンナノチューブが織り成す匠の眼～

東京工業大学 工学院電気電子系電気電子コース
博士課程2年

李 恒

1. 緒言

私達は今、ヒトとモノ、そして機械が相互に調和する時代を生きている。全世界に広まった SNS により人々はボーダレスに繋がり、IoT の夜明けと共に多様な工業製品・産業施設があたかも肉体の一部分の様に生活に溶け込んでいる。恒久的な調和の鍵を握るのは、ユビキタスな検査技術による安全品質保証である。



図1. a, 産業・工業・流通分野でのサイバー空間・フィジカル空間の融合。内閣府 HP より[1]。b, SDGs の第9項目。公益財団法人日本ユニセフ協会 HP より[2]。c, 水道管及び送電線の有人検査。パブリック技研株式会社 HP [3] 並びに北陸電力送配電株式会社 HP より[4]。

Society 5.0に代表される工業、産業、更には流通の全自動化が、政府主導で強力に推進されている(図1)。2050年の在るべき姿を念頭に、5年間の投資額は26兆円を見込む大構想である[1]。世界に目を向けても、SDGsの第9項目「産業と技術革新の基盤をつくろう」を標榜し、電気・水道といった社会インフラの拡充が進められている。特に開発途上地域では未だ25億人が安定的な電力供給を受けられていない現実があり[2]、送電線網の大規模建設とそれに伴う地域雇用創出等が注目されている。これらは個々の安全品質保証抜きでは成しえず、産業オートメーションや大規模インフラ展開のスピードを損なわないためにも革新的な非破壊検査技術の確立が不可欠である。中でも電磁波計測による画像診断は、検査物の大面積な状態観察を非接触で可能にする。従来のX線検査では生体検査物の被曝、また無機質な検査物であっても検査員や検査環境の被曝、というリスクが際立つ。しかし電波と光の中間に位置する赤外線・テラヘルツ波・ミリ波の帯域では、X線同様に高い透過性を持ちながら極めて低侵襲な計測に特化する。現にテラヘルツ波の光子エネルギー(一桁 meV)は室温の熱エネルギー(~26meV)よりも低い。ガスや高分子の指紋スペクトルも豊富に存在するため、非破壊撮像に加えて検査物の材質同定を可能にする(図2a)。また電磁波計測では広帯域撮像素子が重用され、対象物の複数帯域での光学特性を重ね合わせてより詳細な非破壊検査を

支援する(図2b)。検査物組成に加えて検査物構造の観点からは、汎用性に富むフレキシブル撮像素子の貢献が大きい。対象構造に合わせて撮像素子自体の構造を変形し、全方位を画素で包囲することで、側面や裏面、凹凸部といった死角を解消する(図2c)。これは立体物への死角を多く抱える固体半導体型素子との優位な差別化となる。更には中空や柱体等の対象構造に応じて、前者の検査に特化する透過撮像系、後者の検査に特化する反射撮像系を任意に切り替えることができる(図2d)。操作性の観点からは撮像システムの携帯性は不可欠であり、組成・構造に加えて対象物の位置による制約を打破することができる。携帯化に向けては撮像素子と小型光源の結合によるコンパクトなシステム設計が効果的である[11]。関連して撮像素子の室温動作は検査物の変質を防ぐのみならず、巨躯な冷却装置を伴わずにシステムを小型化する。最後にこれらの集約としてロボット支援型のシステム制御が注目されており、地中・水中・高所・狭所といった難所環境の遠隔無人点検を後押しする[12]。有人検査から無人点検への転換はユーザーフレンドリーかつ持続的な安全品質保証に欠かせない理念である。例として地中下水道管検査では現状排水に囲まれた狭所での有人作業が求められ、架空送電線検査では地上から熟練技師の目視確認や高所での危険な有人作業が行われている。

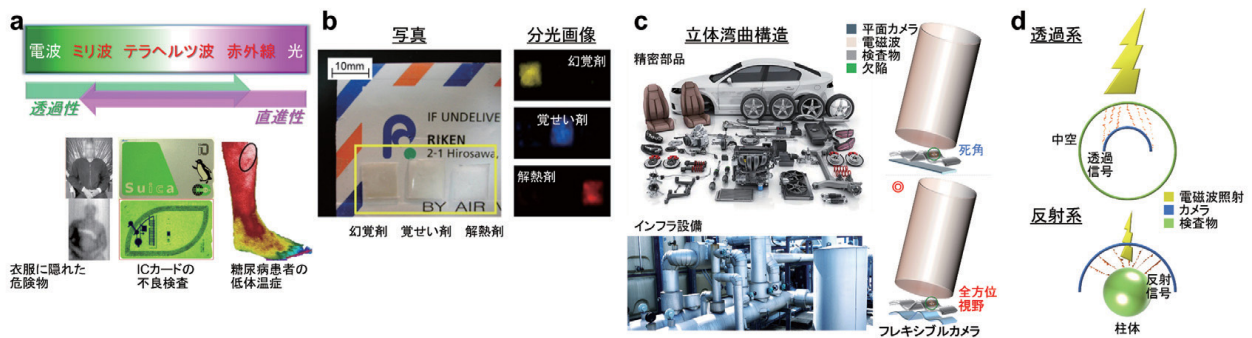


図2. a, ミリ波・テラヘルツ波・赤外線の特徴。[5-7]より修正して作成。b, テラヘルツ帯での広帯域画像診断例。[8]より修正して作成。c, 非破壊検査の需要が高い立体湾曲構造とフレキシブルカメラ利用の利点。株式会社キーエンス HP [9]並びに住友電設株式会社 HP [10]より。d, 透過系・反射系でのフレキシブルカメラの構成例。

以上を踏まえると、ユビキタスな安全保証プラットフォームの実現に向けて、中核的な役割が見込まれる画像計測システムを中心に下記の項目を達成する必要がある。

- I) 任意に変形可能な薄膜状の室温広帯域電磁波吸収材料を用いて3Dマルチビュー撮像モジュールを構築し、検査物構造に応じた自由度の高い透過系・反射系システムの切り替えを可能にする。
- II) フレキシブルな3Dマルチビュー撮像モジュールに対して複数の小型光源の一体化搭載を施す。
- III) ロボット支援型のモジュール制御により検査位置に依らない高速全方位画像計測を実証する。

これらの実現に向けて、各分野での要素技術の醸成が日々精力的に進められている。例としては、操作性に優れた小型光源・発振器の作製[13,14]、フレキシブルな3Dマルチビュー撮像の実証[15,16]、高効率な室温広帯域電磁波吸収材料の評価[17,18]、更にロボット支援

型無人センシング応用 [19,20] 等が挙げられる。一方これらの体系的な融合は未だ十分に成されておらず、ユビキタスな画像診断型非破壊安全保証プラットフォームは未完の状態である。

これを受け筆者らは、機能性電磁波検出技術・3Dプリンタによる自由度の高いシステム設計・ロボット支援型の難所環境でのシームレスな動作の協奏により、ユビキタスな非破壊画像計測プラットフォームを開発した (図3、表1)。検査物の構造や組成、位置に依らず、表面や内部といった任意階層の状態観察を、3D全方位非破壊画像計測を通じて可能にする。撮像素子にはカーボンナノチューブ (CNT) フィルム型のセンサを採用し、室温で超広帯域な電磁波を高感度に検出することができる。元来フレキシブルな撮像素子に対して、検査物に合わせて樹脂製の支持基板を3D造型することで、任意構造への全方位視野が提供可能となる。更に光源を搭載したコンパクトな撮像モジュールを自走や多軸関節といった機能性ユニットへと組み込むことで、ヒトの目には届かない視界を手取るようにクリアにもたす。本研究は電磁波画像計測やナノカーボン材料といった既存の研究分野の裾野を広げるだけでなく、しなやかな環境親和性と匠の眼を持つ安全保証技術として、持続的なモノづくりの実現に向けて新たな気づきを与える位置付けと言える。

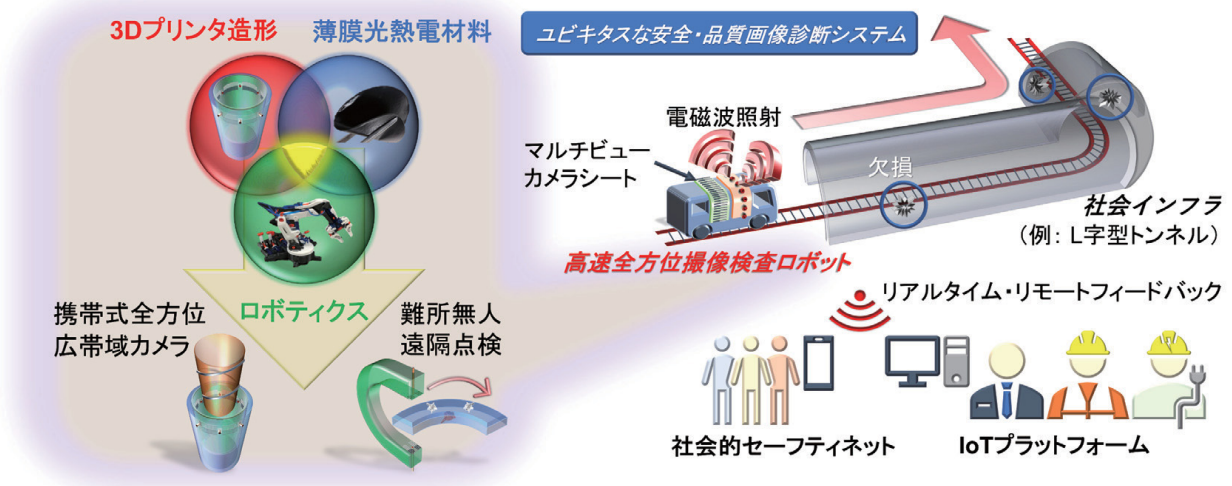


図3. 本研究のコンセプト。

表 1. 代表的な電磁波計測技術に対する本研究の位置付け。

	本研究	分光装置 ²¹	短パルスレーザー 励起装置 ²²	固体平面 サーモカメラ ²³
測定環境 動作温度	オンサイト 室温	計測装置内 室温	インライン 室温	オンサイト 室温
動作帯域	広帯域 (ミリ波～可視光)	狭帯域 (紫外線・可視光 or 赤外線 or テラヘルツ波)	狭帯域 (テラヘルツ波)	狭帯域 (赤外線)
検査対象	難所インフラ 工業製品	工業製品 生体材料	工業製品 生体材料	動植物 工業製品・設備
携帯性能	○	△	△	○
変形性能	○	×	×	×
撮像視野	360° 立体	平面	平面	平面
具体事例		非破壊繊維成分評価	非破壊薬剤成分評価	非接触体温計測

2. フレキシブルな室温動作型高感度・広帯域電磁波撮像シート

撮像シートはCNT フィルムチャンネルを中心に構成される。CNT は炭素原子一層状のシート型材料であるグラフェンを筒状に丸めた構造をとる。グラフェンやフラーレンと並び代表的なナノカーボン材料の一つであり、1991年に飯島澄男博士により発見された[24]。カイラリティにより半導体質・金属質等の材料特性を制御することが可能であり、更に層数や長さ、直径による依存性も確認されているユニークな材料である(図4a-c)。興味深い電子・熱・光学特性により将来的なエレクトロニクス・エネルギーデバイスとしての役割が期待され、更にはアルミニウムや銅に代わる超軽量・高強度な素材としての展開も進められている(図4d)。この様に活発な動向が見受けられる中で、筆者らは無数のCNTを繊維状に成膜することで発現するフレキシビリティと、室温でミリ波から可視光までの電磁波を超広帯域にカバーする高効率吸光特性に着目した。矩形型に薄膜加工したCNTフィルムの中央部にPN接合界面を作製し、受光界面として作用させる。受光界面での外部照射電磁波の検出は光熱起電力効果に基づき、検出応答信号は下記で表される。

$$\Delta V = (S_{P-CNT \text{ film}} - S_{N-CNT \text{ film}}) \times \Delta T \quad 1$$

ここで ΔV 、 $S_{P-CNT \text{ film}}$ 、 $S_{N-CNT \text{ film}}$ 、 ΔT はそれぞれ光熱起電力、P型・N型領域のCNTフィルムのゼーベック係数、吸光発熱によるチャンネル内の温度勾配を示す(図5a)。この様にCNTフィルム型撮像シートでは外部照射電磁波が直流電圧信号の光熱起電力として検出され、画像計測時は光熱起電力の強度が色の濃淡として反映される。例としてテラヘルツ帯での非破壊透過撮像結果を図5bに示す。遮蔽された板の裏面に形成された樹脂模様が、CNTフィルム型撮像シートにより取得した光熱電変換画像において鮮明に可視化されている。これは樹脂のある箇所では入射テラヘルツ波の透過率が下がり、撮像シートの光熱起電力応答強度が低下するためである。ここでは撮像シートの応答強度を白～黒色にスケール化し、撮像領域を二次元方向にスキヤニングし、各測定座標での応答強度をモノクロスケールに反映させることで画像が得られる。この様に撮像素子として振る舞うCNTフィルムチャンネルは、

代表的室温広帯域検出器のボロメータと比肩する一桁ミリ秒の電磁波検出速度を示し、また外部温度変化に対する安定性や、ボロメータに対する優位性としての優れた曲げ耐久性を示す(図5c-d)。

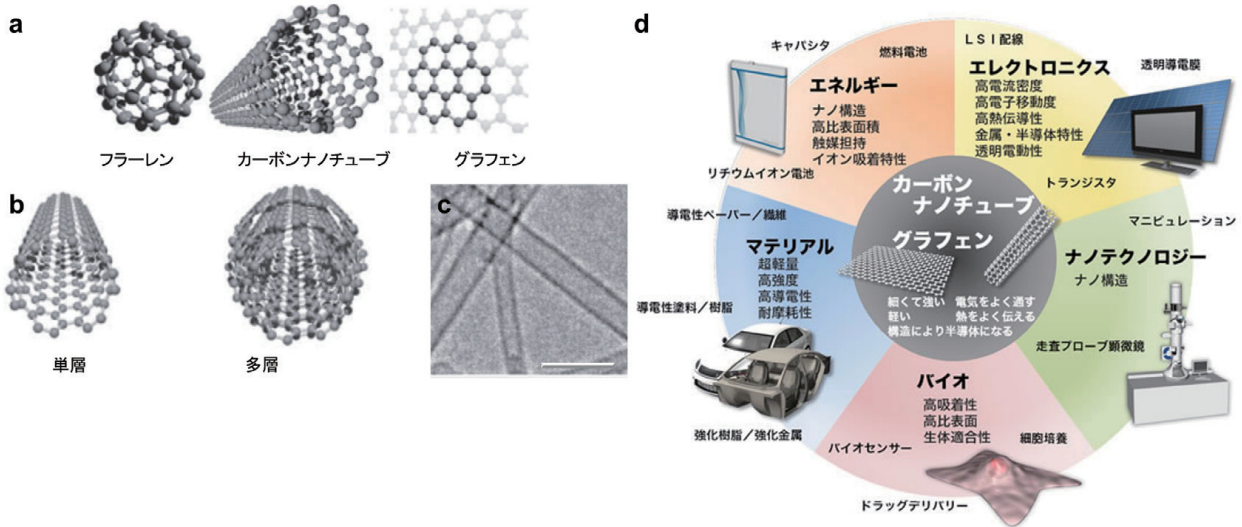


図4. CNTの基礎構造。a, 代表的ナノカーボン材料。b, CNTの層構造模式図。[25]より修正して作成。c, 単層CNTの高解像TEM像。[26]より修正して作成。d, CNTに期待される応用展開。株式会社名城ナノカーボン・HPより[27]。

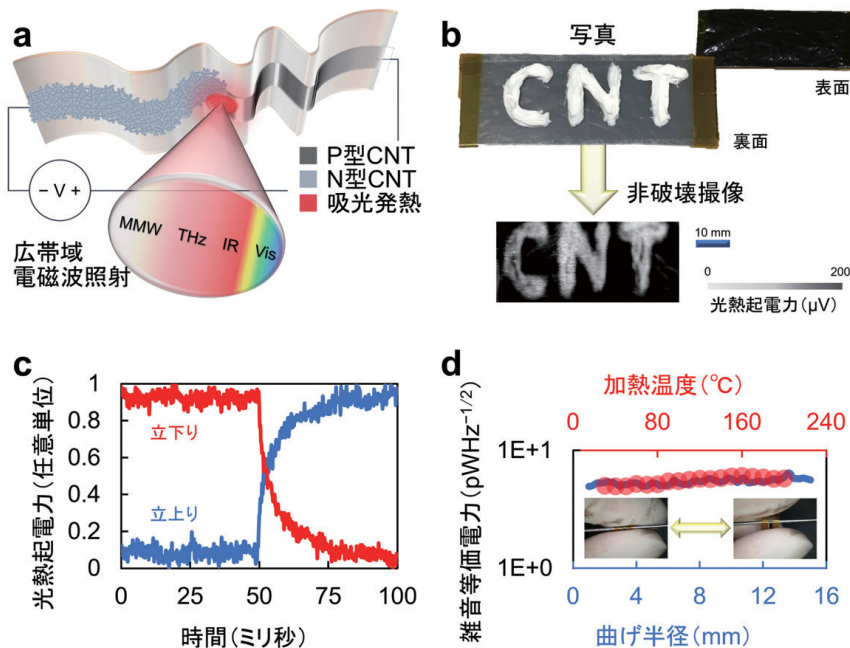


図5. 撮像シートの基礎概要。a, 素子構図模式図。b, 非破壊検査デモンストレーション。c, 応答速度。d, 物理的耐久特性。[28,29]より修正して作成。

CNT フィルム型撮像シートの更なる特徴としては、溶液プロセスによる自由度の高い素子作製が可能な点である。図6a-dに示す通りCNT分散液を起点に大面積自立膜やパターンニングレイへと任意に形成可能であり、更には転写技術により様々な基材上でプロセスを展開できる。例として粘着性フィルム上にCNTフィルムパターンニングを形成することで、任意三次元構造上に密着させ包囲することができる。これら設計自由度の高いCNTフィルム加工プロセスを、筆者らは選択的濾過パターンニング法により実現した(図6e)。通常の吸引濾過法では濾紙上にCNT分散液の大面積自立膜加工が可能であるが、本研究ではパターンニングマスクを導入した。マスクにはレーザー描画により穴開け加工が施され、分散液の吸引時に濾紙上にマスクを設置することで、CNT成膜領域をサイズ及び位置の観点から自由に制御することができる。従来ではCNTフィルムの加工に手作業の切り貼りや、直接的なレーザー描画が用いられてきた。前者は不均一性が課題で、後者はCNTフィルム表面への損傷が懸念されていた。本技術は均一性と歩留まりに優れた加工を可能とし、加工分解能は10 μm である。更には分散液の滴下量に応じて、CNTフィルムパターンニングを濾紙・マスクへ選択的に形成することができる。撮像シート応用の観点からは個々のCNTフィルムがチャンネル、つまり画素となるため、撮像電磁波波長や対象物構造に応じて画素数やピッチ、画素サイズを任意に制御することができる。

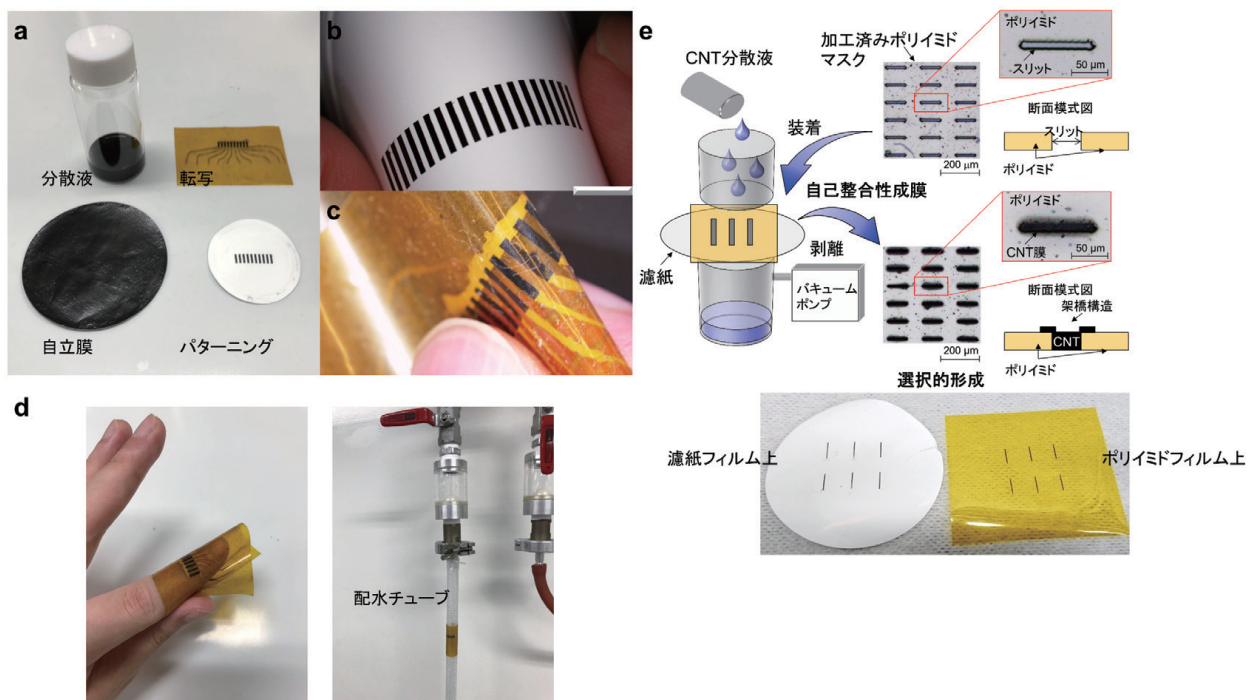


図6. 撮像シートの作製工程。a, CNT分散液を利用した加工例。b, 濾紙フィルム上及びc, ポリイミドフィルム上へのパターンニング例。スケールバー:5mm。d, 立体湾曲検査物への装着例。e, 選択的濾過パターンニング法の概要。[30,31]より修正して作成。

CNT フィルム型撮像シートは、先述のフレキシビリティやハンドリングの容易さに加えて、既存の固体半導体型電磁波検出器と十分に比肩する動作感度を示す。言い換えると、現行の電磁波検出技術の中でも、極めて独創的かつ優位な位置付けである。本研究において撮像シートの高感度動作に寄与する要因は、CNTフィルム組成の最適化である。図7a-dに撮

像シートの基本的性能に対するCNT組成依存特性を示す。CNTの組成が単層半導体質、単層金属質、単層無分離、多層構造に分類される中で、筆者らは単層無分離構造を用いることで撮像シートの動作感度が最大限向上することを明らかにした。撮像シートの動作感度は雑音等価電力により定義され、電磁波入射検出時の光熱起電力応答強度に対する素子熱雑音の比で得られる[29]。検出可能な最小信号を意味し、雑音等価電力の値が小さい程、高感度である。一般的にCNTの半導体比率が支配的である際にフィルムのゼーベック係数は増大し[32]、式1の観点からは単層半導体質、単層無分離、多層構造が候補組成となる。更に電子・光学物性の観点から考察を進めると、多層構造では吸光度が優れる一方で半導体質特性が効果的に発現せず、ゼーベック係数及び光熱起電力強度が抑制される。単層半導体質構造ではCNT組成中最大のゼーベック係数が得られる一方、吸光度の抑制に伴い光熱起電力強度が頭打ちとなり、また熱雑音の影響が顕著に見受けられる。単層無分離構造では金属質CNT由来の優れた吸光度と抑制された熱雑音、半導体質CNT由来の比較的高いゼーベック係数を両立し、光熱起電力強度の最大化と最高感度での動作が可能となる。結果的にCNTフィルム型撮像シート同様に室温広帯域電磁波検出が可能なボロメータやゴーレイセルに対して、動作感度・帯域の観点でそれらを凌駕する性能が得られた(図7e)。また通常各帯域での動作感度は広帯域検出器と比較して狭帯域検出器にてより高感度となるが、赤外帯で狭帯域素子とも十分に比肩する感度を示しており、本素子の更なる優位性が伺える。既存のフレキシブルな検出器が狭帯域かつ低感度であることを踏まえると、本研究の取り組みは非常にユニークであると言える。

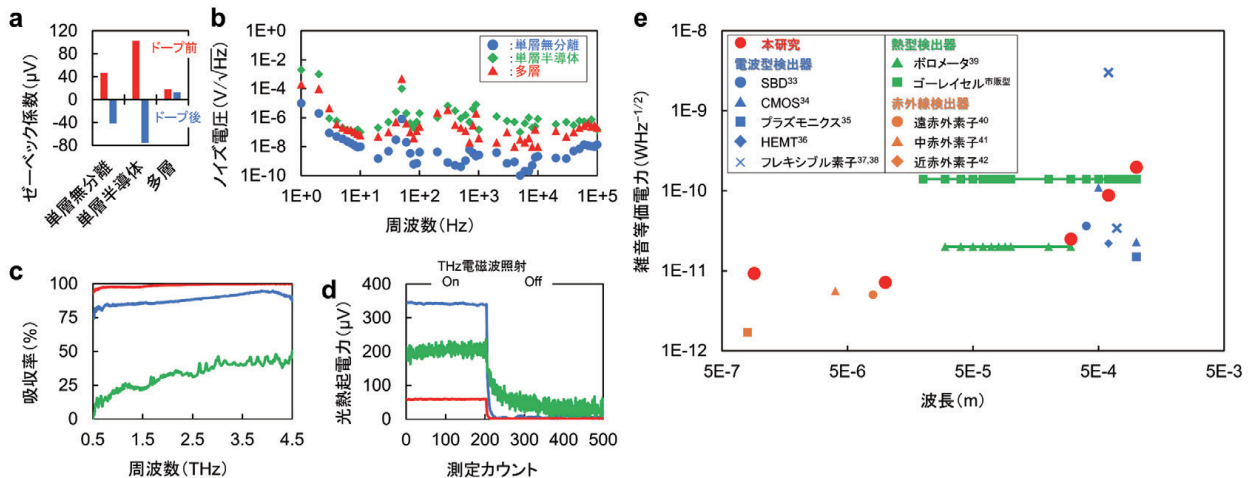


図7. CNT組成評価による撮像シートの性能最適化。CNT構造が単層無分離型、単層半導体型、多層型である場合の a, ゼーベック係数、b, ノイズ特性、c, 吸光特性、及び d, 電磁波検出応答。[29]より修正して作成。e, 既存の電磁波検出器に対する本撮像シートの動作感度比較。

3. 3D 全方位非破壊画像計測の基礎動作原理

CNTフィルム型撮像シートの豊かな特性により、任意構造検査物に対する3D全方位非破壊画像計測が可能となる。図8の例では複雑に湾曲したプラスチック構造体の、ヒトの目には見えない欠陥検知を扱う。検査物の湾曲箇所には微小な欠損が生じており、また金属片

が混入している。それらは被膜により隠されている。検査物構造に沿う支持基板を3Dプリンタにより造型し、そこへCNTフィルム型撮像シートを実装する。両者を重ね合わせながらスキャンし、大面積赤外光照射の下で透過撮像を行う。被膜と検査物を僅かに透過する赤外光を撮像シートが高感度に検出し、3Dプリンタ設計時に得られる各画素の空間座標情報と併せて3D画像を復元する。欠損箇所では赤外透過強度が増大し、金属片箇所では表面反射により赤外透過強度が減衰する。これら局所的な透過率変化が3D復元画像上で非破壊に可視化される。

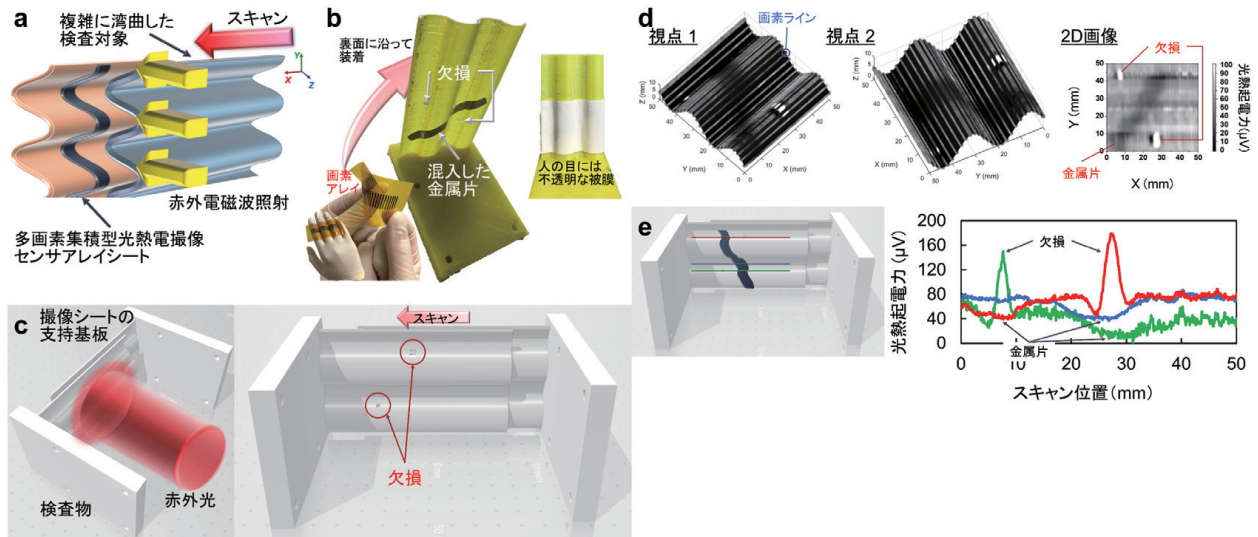


図8. 3D全方位非破壊画像計測例。a, 計測コンセプトとb, 検査物及び撮像シートの写真。c, 3Dプリンタによる立体撮像機構設計。d, 非破壊で取得した立体3D全方位透過画像。e, 欠陥箇所での透過信号変化。[28]より修正して作成。

更に3D全方位非破壊画像計測技術に対して、CNTフィルム型撮像シートの超広帯域電磁波検出特性を組み合わせることで、立体多層検査物の任意階層断面抽出が可能となる。図9に反射系計測のプロトタイプとなる外部光源結合型マルチビューカプセルイメージャーを用いた例を示す。反射系計測に好適な円柱状検査物に対してカプセル状の支持基板を3Dプリンタ造形し、撮像シートを実装する。併せて設計した窓枠に外部光源・発振器を挿入し、検査物からの反射信号を網羅的に捕捉する。この時マルチビューな3D画像を非破壊で復元するのみならず、照射電磁波周波数の適切な選択により検査物の多層構造を復元することができる。本研究では金属内芯とプラスチック外殻により構成される積層円柱を扱う。外殻表面には油滴が離散的に存在し、内芯表面には吸光不純物が隠されている。これらに対して近赤外・サブテラヘルツ帯にて撮像を行う。近赤外光は外殻を透過せず表面観察を可能にし、微弱な表面反射に対して油滴箇所では局所的に反射強度が減衰する。サブテラヘルツ波は油滴を含めて外殻を透過することで、内部観察を可能にする。内芯での高強度な金属反射に対して、不純物箇所では同じく局所的に反射強度が減衰する。これら二帯域の内部・外部抽出3Dマルチビュー画像を重ね合わせにより再構成し、各階層の状態観察に加えて検査物構造の全体像の把握が非破壊で可能になる。

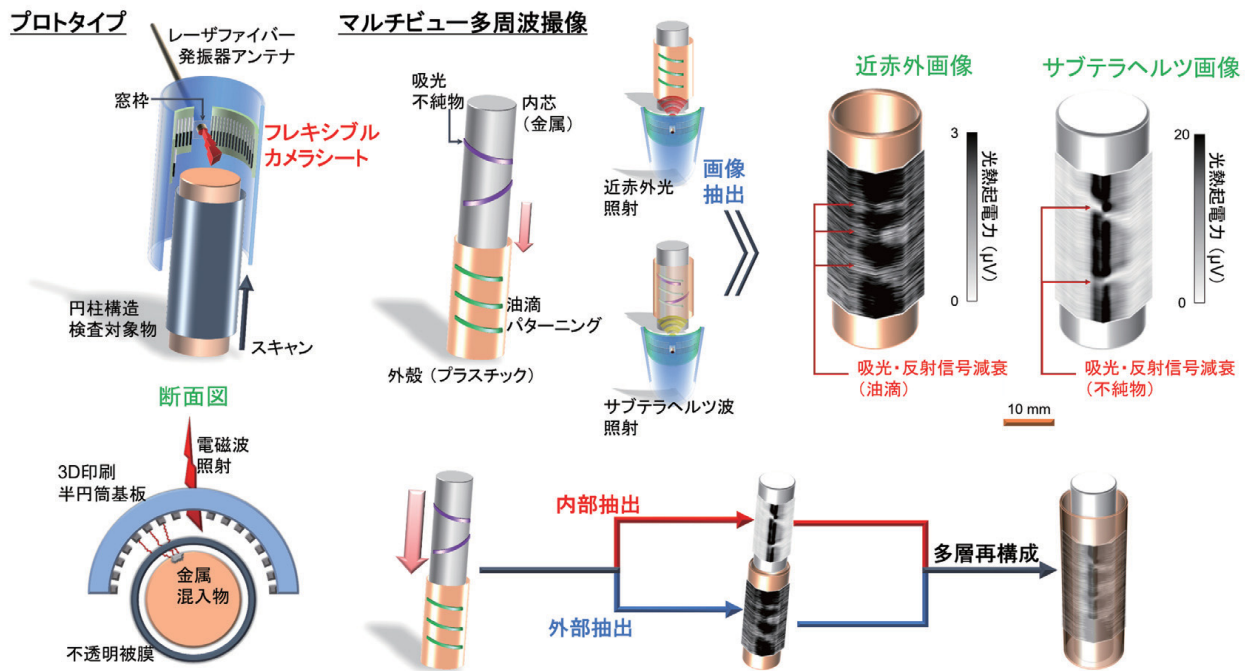


図9. 外部光源結合型・反射系モニタリングモジュールのプロトタイプと、多周波撮像による多層立体物の非破壊任意階層断面画像抽出応用。[29]より修正して作成。

4. ロボット支援・小型光源搭載型リモート3D全方位非破壊画像計測

ここまでに述べた本研究の取り組みは、移動体との結合というロボット支援運用により更なる機能を発揮する。図10に透過系計測のプロトタイプ(マルチビュー内視鏡モジュール)と、ロボット支援型モニタリングによるリモート3D全方位非破壊画像計測例を示す。透過系計測に好適な円筒状検査物に対して円柱状支持基板を造型し、CNTフィルム型撮像シートを実装することでマルチビュー内視鏡が完成する。内視鏡スキャン中に外部から大面積電磁波照射を施すことで、局所的な透過率変化に基づく検査物状態観察が可能である。離散的な微小欠損が生じた実物の工業用ガス管に関しては、欠損箇所での透過信号強度増大を網羅的に捕捉し、非破壊同定に成功している。これら基礎知見に則り自走ユニットの車体表面に撮像シートを実装し、ロボット支援型マルチビュー内視鏡を作製した。狭く閉ざされたL字型トンネル模型の内部を無人でシームレスに探索し、3D全方位画像を復元する。更に外部照射電磁波の局所的な高強度透過を検出し、離散的な微小欠損を非破壊で可視化した。

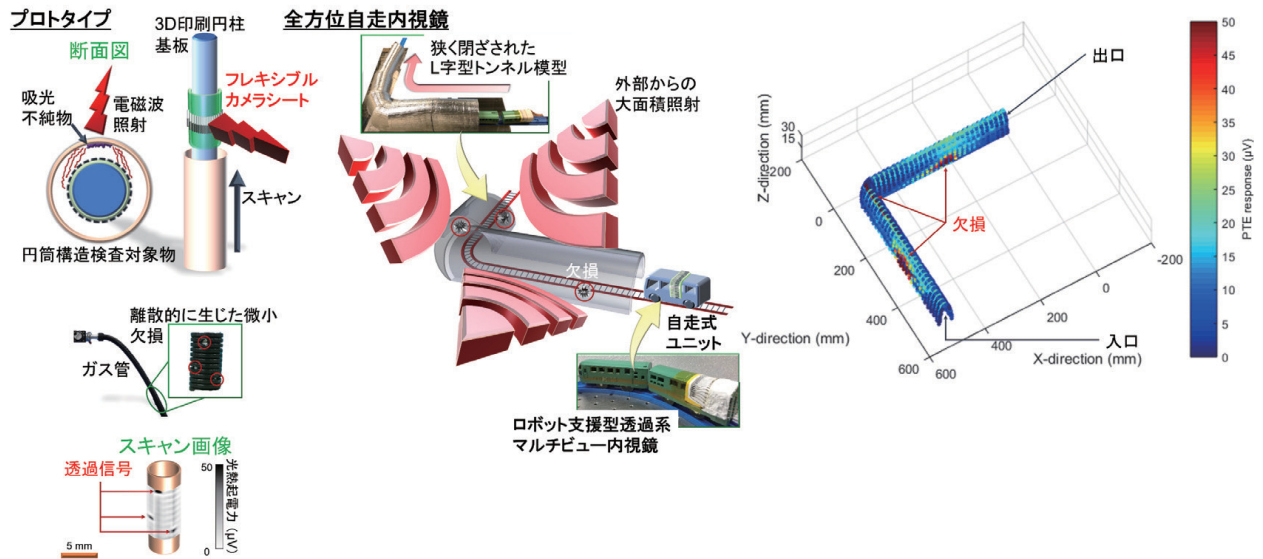


図10. 外部光源結合型・透過系モニタリングモジュールのプロトタイプと、ガス管のマルチビュー非破壊内視鏡計測例、及びロボット支援型の全方位自走内視鏡応用。[29]より修正して作成。

本技術をより汎用性に富んだプラットフォームへと昇華するためには、据え置きの大規模光源・発振器からの大面積外部電磁波照射に依存せず、複数の小型光源・発振器をロボット支援型モニタリングモジュール自身に一体化搭載する取り組みが肝要である。特に難所環境でのモニタリングでは、モジュール自体を極力コンパクトに保つことが求められる。そこで筆者らは先述のCNTフィルム型撮像シート実装用の支持基板に対して、3Dプリンタの設計・加工自由度を活かした複数小型光源の一体化搭載機構を導入した(図11)。例として直径2mmの小型高出力赤外LEDに対しては、LEDの外形に沿った窓枠をCADソフト上で設計し、円筒状支持基板内部に計6素子を搭載した。支持基板内壁には24素子CNTフィルム画素アレイも実装されており、直径20mm・高さ30mmの非常にコンパクトなポータブル3D全方位スキャンカメラの作製及び360°視野での基礎撮像実証に成功した。

1. 3D印刷 2. 光源組込み 3. 360°撮像シート成膜 4. ビルトイン結合

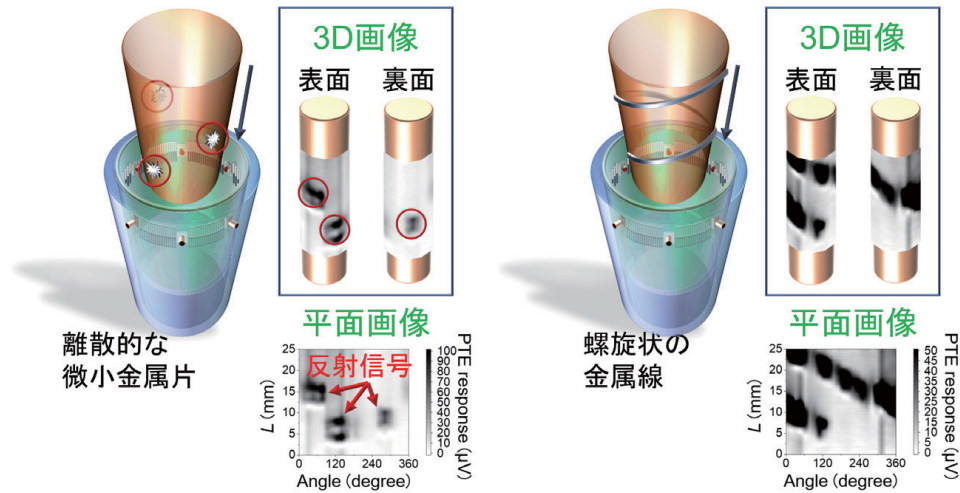
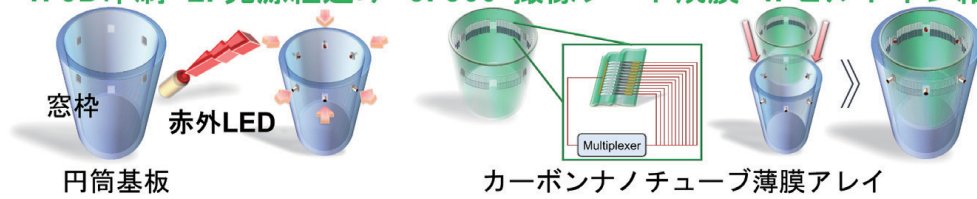


図11. 複数小型光源一体搭載型ポータブル3D全方位スキャンカメラ。[29]より修正して作成。

これら基盤技術を相互に融合させることで、本研究で筆者らは最終的に図12に示すオール・イン・ワン型ロボット支援3D全方位モニタリングモジュールの実証に成功した。多軸関節可動式ユニットに対して、アーム部分にCNTフィルム型撮像シートと赤外LEDを共に実装する。アームはXYZθ空間を自由に探索可能であり、更にヒトの手を模倣した握る・離すという動きにより、難所での検査物構造に沿うスキャンが実現する。例として曲がりくねった架橋道路模型を扱う。架橋道路の表面には金属片が離散的に配置され、裏面には金属舗装上に吸光不純物が生じている。これらに対して空中で湾曲形状に沿った反射系スキャンを施し、表面では金属片での局所的な高強度反射を、裏面では不純物での局所的な反射強度減衰を、網羅的に捕捉する。結果的にこれら難所検査物が抱える欠陥は、それぞれシームレスかつ非破壊に可視化された。

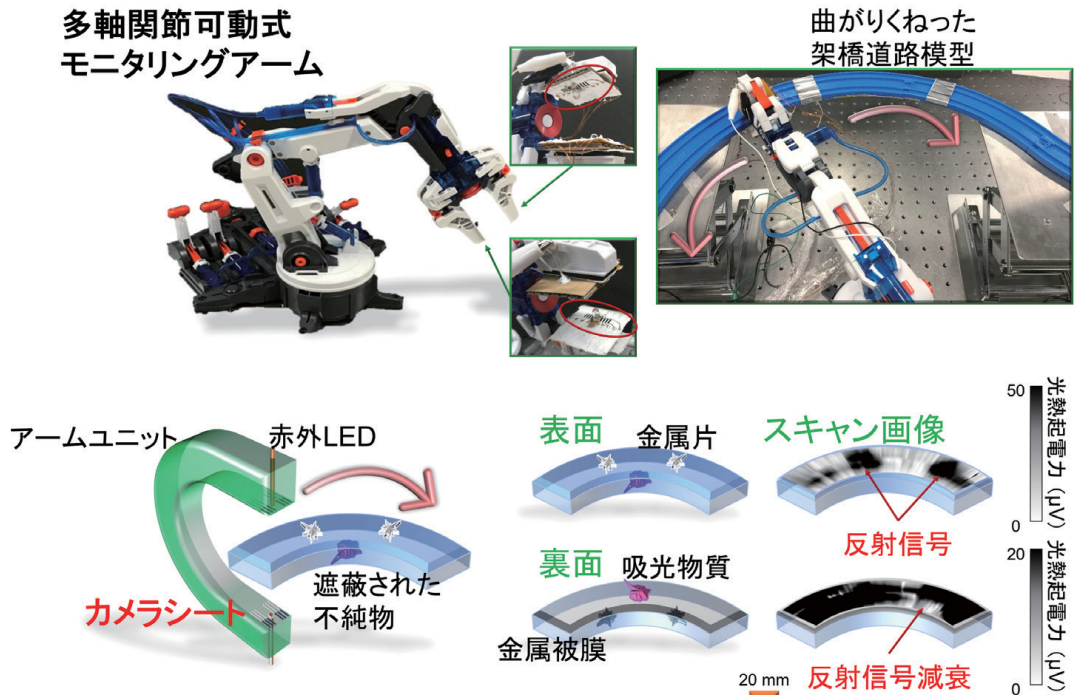


図12. オール・イン・ワン型ロボット支援3D 全方位モニタリングモジュール。[29] より修正して作成。

5. 結論と展望

本研究ではCNTの極めてユニークかつ豊かな電子材料としての潜在能力を最大限引き出し、電磁波画像計測技術の根源的な技術課題を打破した。また3Dプリンタ造形やロボティクスといった周辺要素との強力な相乗効果によって、世界に先駆けて難所設備のオンサイトな3D全方位非破壊画像計測を実証した。特筆すべきは撮像シートがフレキシビリティと室温での高感度・広帯域電磁波検出を両立する点である。これらはロボット支援型モニタリングモジュールのしなやかな環境親和性として発現する。検査物形状に最適な全方位撮像視野を提供しながら、冷却装置の無いコンパクトな構成で、検査階層に適した計測電磁波周波数での僅かな欠陥検知さえも可能にする。発見から30年で軽量高耐久素材や次世代エネルギーデバイスへの利用が目されてきたCNTは、その傍らでモノづくり現場の持続性を革新的に高め得る匠の眼を秘めていた。

これらを踏まえ、今後は主に以下二点の取り組みに注力する。一つ目は、撮像センサの二次元集積とそれに伴うリアルタイムでの動画撮影展開である。現状の撮像シートは一列アレイ状のセンサ集積構造であり、画像取得にはスキャン操作が必要である。これに対して筆者らは既にCNTフィルムチャネル及び読み出し電極配線の二次元行列集積の試作に成功している(図13a)。先述の選択的濾過パターンニングの拡張技術に相当し、本研究でのリモート3Dマルチビューモニタリングモジュールへの組み込みに着手する。二つ目はモニタリングモジュールへのより多様な小型光源・発振器の一体化搭載である(図13b)。既出の赤外LEDに加え、遠赤外・テラヘルツ帯では量子カスケードレーザが、サブテラヘルツ・ミリ波帯で

は共鳴トンネルダイオードが、代表的な高性能小型光源・発振器として挙げられる。これらの一体化搭載により、難所設備の内部状況をオンサイトで非破壊観察することが可能と考えられる。予備実験として静的環境での遠赤外・テラヘルツ計測を通じて、架空送電線の実物サンプルに対する非破壊内部検査に成功している。具体的には、ゴム被膜で覆われた金属素線上の微小な漏油や断線を可視化している。これらの知見を基に架空送電線や架橋道路、地中埋め込み下水パイプ等に対する、オンサイトでリアルタイムな全方位非破壊内部動画観察の実現に資する基盤技術へと展開していく。また筆者らが並行して実証した撮像シート伸縮化、及び黒体放射型で外部光源が不要な完全非破壊・貼り付け式オンサイト液質化学計測[48]との融合も進めていく。

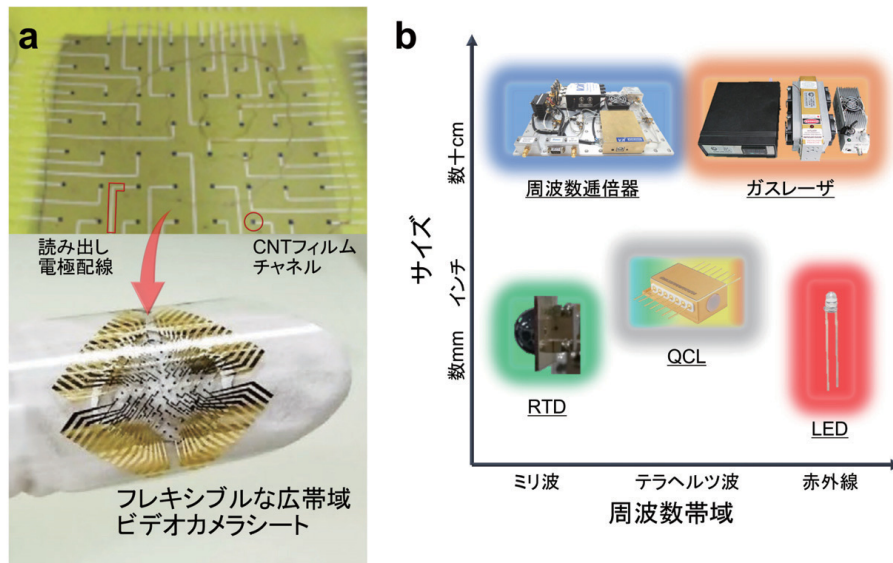


図13. a, CNT フィルム型撮像シートの二次元画素集積試作例。[31] より修正して作成。b, ミリ波～赤外線周波数帯域の代表的な小型発振器・光源。Virginia Diodes 社 HP[43]、サンインスツルメント株式会社 HP[44]、引用文献[45]、及び浜松ホトニクス株式会社 HP[46,47]より。

謝 辞

本研究の遂行に際し、日々熱心なご指導を賜りました指導教官の河野行雄特定教授（東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所、中央大学 理工学部 電気電子情報通信工学科教授兼任）に心より深く感謝申し上げます。また、共同研究者であります鈴木大地博士（産業技術総合研究所）、研究室卒業生の落合雄輝氏、湯浅遼一氏、徳本悠氏、卯滝峻伍氏、孫美玲氏に感謝申し上げます。更に CNT 分散液をご提供頂きました日本ゼオン株式会社様に御礼申し上げます。

引用文献

1. 内閣府, https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
2. 公益財団法人日本ユニセフ協会, <https://www.unicef.or.jp/kodomo/sdgs/17goals/9-industry/>
3. パブリック技研株式会社, <https://www.pub-tc.co.jp/business/sewer/>

4. 北陸電力送配電株式会社, https://www.rikuden.co.jp/nw_mirai/soudenkouji.html
5. L. Yujiri, M. Shoucri, P. Moffa, Passive millimeter wave imaging, *IEEE Microwave Magazine* **4**, 3, 39–50 (2003).
6. A. Dobroiu, M. Yamashita, Y.N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, K. Kawase, Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator, *Applied Optics* **43**, 5637–5646 (2004).
7. S. Bagavathiappan, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar, B. Raj, R. Karunanithi, T.M.R. Panicker, M.P. Korath, K. Jagadeesan, Infrared thermal imaging for detection of peripheral vascular disorders, *Journal of Medical Physics* **34**, 43–47 (2009).
8. K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, H. Inoue, Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints, *Optics Express* **11**, 2549–2554 (2003).
9. 株式会社キーエンス, <https://www.keyence.co.jp/ss/products/measure/sealing/production/automotive-parts.jsp>
10. 住友電設株式会社, https://www.sem.co.jp/business/plant_hvac/
11. G. Liang, Q.J. Wang, Integrated terahertz optoelectronics, *Proceedings of SPIE/COS Photonics Asia 2016*, 10030 (2016). DOI: 10.1117/12.2246400.
12. S. Freitas, H. Silva, J. Almeida, E. Silva, Hyperspectral Imaging for Real-Time Unmanned Aerial Vehicle Maritime Target Detection, *Journal of Intelligent & Robotic Systems* **90**, 551–570 (2018).
13. M.F. Witinski, R. Blanchard, C. Pfluegl, L. Diehl, B. Li, K. Krishnamurthy, B.C. Pein, M. Azimi, P. Chen, G. Ulu, G.V. Rhodes, C.R. Howle, L. Lee, R.J. Clewes, B. Williams, D. Vakhshoori, Portable standoff spectrometer for hazard identification using integrated quantum cascade laser arrays from 6.5 to 11 μm , *Optics Express* **26**, 12159–12168 (2018).
14. X. Zhang, J. Zhong, B. Tang, X. Chen, L. Zhu, P. Huang, J. Wang, M. Zhan, Compact portable laser system for mobile cold atom gravimeters, *Applied Optics* **57**, 6545–6551 (2018).
15. D. Suzuki, S. Oda, Y. Kawano, A flexible and wearable terahertz scanner, *Nature Photonics* **10**, 809–813 (2016).
16. T. Yokota, T. Nakamura, H. Kato, M. Mochizuki, M. Tada, M. Uchida, S. Lee, M. Koizumi, W. Yukita, A. Takimoto, T. Someya, A conformable imager for biometric authentication and vital sign measurement, *Nature Electronics* **3**, 113–121 (2020).
17. B. Wang, S. Zhong, Y. Ge, H. Wang, X. Luo, H. Zhang, Present advances and perspectives of broadband photo-detectors based on emerging 2D-Xenes beyond graphene, *Nano Research* **13**, 891–918 (2020).
18. P. Yu, L.V. Besteiro, Y. Huang, J. Wu, L. Fu, H.H. Tan, C. Jagadish, G.P. Wiederrecht, A.O. Govorov, Z. Wang, Broadband Metamaterial Absorbers, *Advanced Optical Materials* **7**, 1800995 (2019).
19. Y. Hu, K. Qi, L. Chang, J. Liu, L. Yang, M. Huang, G. Wu, P. Lu, W. Chen, Y. Wu, A bioinspired multi-functional wearable sensor with an integrated light-induced actuator based on an asymmetric graphene composite film, *Journal of Materials Chemistry C* **7**, 6879–6888 (2019).
20. S. Konishi, A. Hirata, Flexible Temperature Sensor Integrated with Soft Pneumatic Microactuators for Functional Microfingers, *Scientific Reports* **9**, 15634 (2019).
21. M.A. Ktash, O. Hauler, E. Ostertag, M. Brecht, Ultraviolet-visible/near infrared spectroscopy and hyperspectral imaging to study the different types of raw cotton, *Journal of Spectral Imaging* **9**,

- a18 (2020).
22. D. Suzuki, Y. Kawano, Flexible terahertz imaging systems with single-walled carbon nanotube films, *Carbon* **162**, 13–24 (2020).
 23. C. Burke, M. Rashman, S. Wich, A. Symons, C. Theron, S. Longmore, Optimizing observing strategies for monitoring animals using drone-mounted thermal infrared cameras, *International Journal of Remote Sensing* **40**, 439–467 (2019).
 24. S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature* **354**, 56–58 (1991).
 25. Y. Miyato, Basics of Carbon Nanotube and its Applications —High expectations of technological innovation by carbon nanotube as new carbon material, and facing challenges for its practical applications—, *Journal of MMIJ* **127**, 61–68 (2011).
 26. K. Hata, D.N. Futaba, K. Mizuno, T. Namai, M. Yumura, S. Iijima, Water-Assisted Highly Efficient Synthesis of Impurity-Free Single-Walled Carbon Nanotubes, *Science* **306**, 5700, 1362–1364 (2004).
 27. 株式会社名城ナノカーボン, <https://meijo-nano.com/applications/use.html>
 28. K. Li(申請者), D. Suzuki, Y. Kawano, Series Photothermoelectric Coupling Between Two Composite Materials for a Freely Attachable Broadband Imaging Sheet, *Advanced Photonics Research* **2**, 3, 2000095 (2021).
 29. K. Li(申請者), R. Yuasa, R. Utaki, M. Sun, Y. Tokumoto, D. Suzuki, Y. Kawano, Robot-assisted, source-camera-coupled multi-view broadband imagers for ubiquitous sensing platform, *Nature Communications* **12**, 3009 (2021).
 30. 古川智也, 須山孟, 李恒(申請者), 佐藤いまり, 河野行雄, カーボンナノチューブフィルムセンサーを用いた広帯域テラヘルツコンピュータトモグラフィの創出, 映像情報メディア学会 2021年冬季大会(2021年12月・オンライン・口頭)。
 31. D. Suzuki, K. Li(申請者), K. Ishibashi, Y. Kawano, A Terahertz Video Camera Patch Sheet with an Adjustable Design based on Self - Aligned, 2 D, Suspended Sensor Array Patterning, *Advanced Functional Materials* **31**, 14, 2008931 (2021).
 32. D. Suzuki, Y. Ochiai, Y. Nakagawa, Y. Kuwahara, T. Saito, Y. Kawano, Fermi-level-controlled semiconducting-separated carbon nanotube films for flexible terahertz imagers, *ACS Applied Nano Materials* **1**, 2469–2475 (2018).
 33. D.Y. Kim, K.K. O, Reduction of NEP variations for terahertz detectors using Schottky barrier diodes in CMOS, *Electronics Letters* **53**, 732–734 (2017).
 34. R. Huang, X. Ji, Y. Liao, J. Peng, K. Wang, Y. Xu, F. Yan, Dual-frequency CMOS terahertz detector with silicon-based plasmonic antenna, *Optics Express* **27**, 23250–23261 (2019).
 35. M.W. Ryu, J.S. Lee, K.S. Kim, K. Park, J.R. Yang, S.T. Han, K.R. Kim, High-Performance Plasmonic THz Detector Based on Asymmetric FET With Vertically Integrated Antenna in CMOS Technology, *IEEE Transactions on Electron Devices* **63**, 1742–1748 (2016)
 36. M. Bauer, A. Rämmer, S.A. Chevtchenko, K.Y. Osipov, D. Čibiraitė, S. Pralgauskaitė, K. Ikamas, A. Lisauskas, W. Heinrich, V. Krozer, H.G. Roskos, A High-Sensitivity AlGaIn/GaN HEMT Terahertz Detector With Integrated Broadband Bow-Tie Antenna, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **9**, 430–444 (2019).
 37. G. Auton, D.B. But, J. Zhang, E. Hill, D. Coquillat, C. Consejo, P. Nouvel, W. Knap, L. Varani, F.

- Teppe, J. Torres, A. Song, Terahertz Detection and Imaging Using Graphene Ballistic Rectifiers, *Nano Letters* **17**, 7015–7020 (2017).
38. X. Yang, A. Vorobiev, A. Generalov, M.A. Andersson, J.A. Stake, *A flexible graphene terahertz detector*, *Applied Physics Letters* **111**, 021102 (2017).
39. Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai, K. Hirakawa, Room temperature, very sensitive thermometer using a doubly clamped microelectromechanical beam resonator for bolometer applications, *Applied Physics Letters* **108**, 163503 (2016).
40. J. Zhou, M.A.R. Miah, Y. Yu, A.C. Zhang, Z. Zheng, S. Damle, I.A. Niaz, Y. Zhang, Y.H. Lo, Room-temperature long-wave infrared detector with thin double layers of amorphous germanium and amorphous silicon, *Optics Express* **27**, 37056–37064 (2019).
41. Q. Gao, A. Pospischil, M. Bhuiyan, H. Jiang, H. Talin, D. Farmer, B. Deng, C. Li, S. Han, H. Wang, Q. Xia, T. Ma, T. Mueller, F. Xia, Black Phosphorus Mid-Infrared Photodetectors with High Gain, *Nano Letters* **16**, 4648–4655 (2016).
42. J. B. Wang, W. L. Li, B. Chu, C. S. Lee, Z. S. Su, G. Zhang, S. H. Wu, F. Yan, High speed responsive near infrared photodetector focusing on 808 nm radiation using hexadecafluoro-copper-phthalocyanine as the acceptor, *Organic Electronics* **12**, 34–38 (2011).
43. Virginia Diodes Inc., <https://www.vadiodes.com/en/products/custom-transmitters>
44. サンインストルメント株式会社, <http://www.sun-ins.com/lineup3/accesslaser/product/l3s.html>
45. Y. Nishida, N. Nishigami, S. Diebold, J. Kim, M. Fujita, T. Nagatsuma, Terahertz coherent receiver using a single resonant tunnelling diode, *Scientific Reports* **9**, 18125 (2019).
46. 浜松ホトニクス株式会社, <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/news/products-and-technologies/2018/20181029000000.html>
47. 浜松ホトニクス株式会社, <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/light-and-radiation-sources/led/L12756.html>
48. **K. Li**(申請者), T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Marteijn, J.D. Toonder, T. Sekitani, Y. Kawano, Stretchable broadband photo-sensor sheets for non-sampling, source and label-free chemical monitoring by simple deformable wrapping, *Science Advances*, in press.