

広帯域・多波長なミリ波-赤外光学計測の動的な二系統への
拡張による豆類製品の即時非破壊検査

中央大学 理工学部 電気電子情報通信工学科

李 恒

食料品や医薬品等，加工現場でのリアルタイムかつオンサイトな非破壊検査が重要度を増す中で，これらはベルトコンベア状の搬送システムに沿い加工が進む観点から，インラインな検査が必須の達成項目に挙げられる．特に電磁波計測は非接触かつ大面積な画像計測という観点で非破壊検査の効率を高める位置付けであり，サブテラヘルツ（sub-THz：ミリ波・テラヘルツを包含）から赤外光（IR）といった長波長帯域は完全非侵襲での透視・非金属材料への広範な材質同定に特化している．一方で従来の sub-THz-IR 計測は巨躯で複雑な分光装置に依存しており，装置サイズに加えて暗所・除湿・密閉といった操作上の環境制約からも，モノづくり現場への直接的な組み込みは困難である．

これを受け本研究では，報告者独自の sub-THz-IR イメージャーシートを活用して，モノづくり現場を想定した環境におけるインライン・リアルタイムな非破壊透視・材質同定モニタリング検査に成功した．sub-THz-IR イメージャーシートは日本発の先端材料：CNT により構成され，豊かな光学特性からミリ波-可視光という電磁波の全体域（sub-THz-IR を含む）において吸光率は 90% を超える．本研究ではそれらを基に模擬搬送ラインを包囲するインライン撮像系を構成し，更に光軸調整が容易な透過系のみでなく反射系を併設させることで，網羅的な試料条件の検査実証へ繋げた．

実験方法

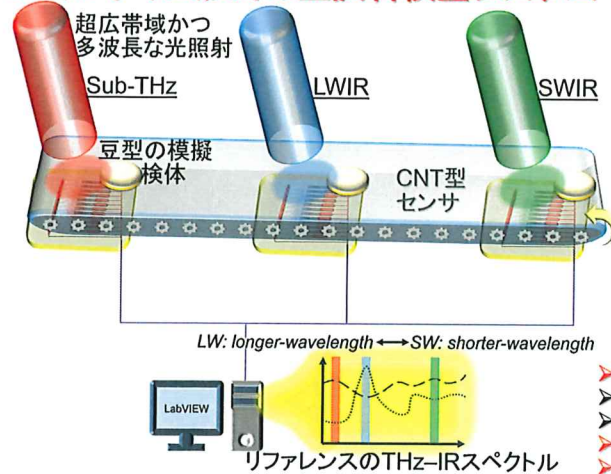
CNT 膜イメージャーは，光熱起電力（PTE）を動作原理とする．吸光発熱・熱電変換という 2 つの異なるエネルギー機構が融合し，CNT 膜のゼーベック係数，および光照射による昇温の積から，光検出応答信号強度（起電力）が得られる．光学系に関しては，sub-THz-IR 帯での掌サイズの単波長光源を 3 つ集積しており，集積方向は搬送ラインの進行に沿う向きである（波長：909 μm （sub-THz），6.13 μm （長波長 IR：LWIR），4.33 μm （短波長 IR：SWIR））．CNT 膜 PTE イメージャーは 300 μm 幅・4 mm 長の画素が 0.4 mm ピッチにより集積され（12 画素），3 つの集積アレイを用いた．

実験結果

本研究における CNT 膜 PTE イメージャーを用いた sub-THz-IR インラインモニタリングに際し，透過系での基礎実証内容を図 1 に示す．システムの動作速度は最速で 3 mm/s に及び，試料濃度を例に，分光計測とのモニタリング感度誤差は 5% 以内に抑制されている．目視では識別が不可能な白色検体を模擬豆試料として扱い，検体の成分濃度に対する非破壊かつリアルタイムな材質同定と並行し，試料内部へ不透明に混入した異物を対象とする材質同定へ拡張されている．特に，後者の実証はモノづくり現場における欠陥を流通前に発生源から特定する位置付けを占め，光学・センサ工学のみならず，非破壊検査技術分野の裾野を広げる成果と言える．本研究では具体的に，1 mm 角に満たない異物片を混入させており，プラスチック，ガラス，金属という 3 種類の材料を扱った．

これらの基礎実証において，事前の予備実験として分光計測による異物片への透過率計測を実施している．CNT 膜 PTE イメージャーによるリアルタイム撮像では，事前の分光計測での振る舞いへ準拠するデータが得られており，分光データベースによる機械学習への応用可能性が示唆された．

0. インライン形式の豆試料検査システム

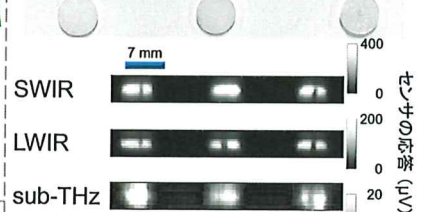


1. コンパクトなセットアップ

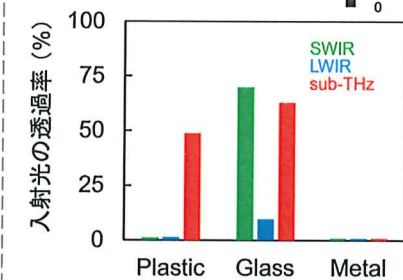
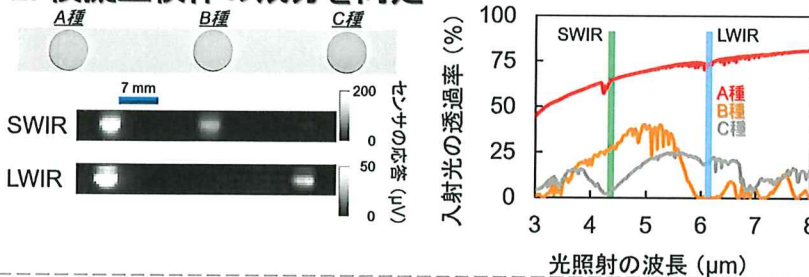


3. 混入異物の材質を同定

i) プラスチック ii) ガラス iii) 金属



2. 模擬豆検体の成分を同定



4. 全自動なモニタリング

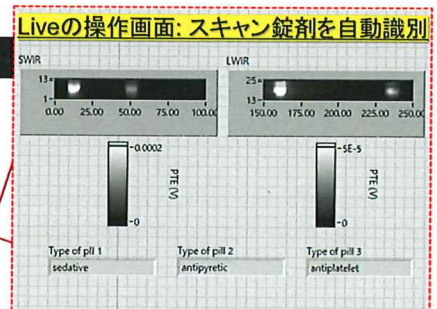
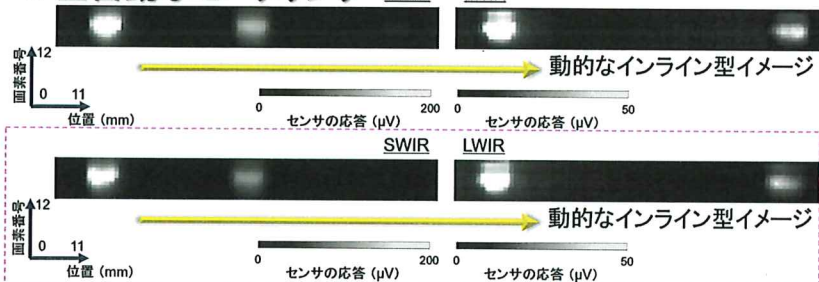


図1 CNT膜PTEイメージャーの超広帯域・多波長 sub-THz-IR 透視計測によるインライン・リアルタイム・非破壊な豆状試料への材質同定型モニタリング

先述の基礎実証では試料厚みを1 mm程度に薄膜化していた中で、本研究では食品・医薬品検査という出口戦略を想定のうち、最大の試料厚みを5 mmに拡張した。左記のサイズは、モノづくり現場での実情に準拠するスケールである。CNT膜PTEイメージャーによる透過撮像の結果を図2に示す。単一成分から成る通常試料 (Normal) に対する撮像結果に加え、内部に金属棒が不透明な状態で隠された異常試料 (Defective) ではSWIR照射下において異物の可視化へ至っている。上記の傾向からも、本研究で用いられている報告者の独自性：CNT膜PTEイメージャーは、素子自身の豊かな材料特性・デバイス性能からも、実スケールでの非破壊検査応用への適性を示唆している。

図2における試料の膜厚制御を含めて、本研究では検体の作製において加圧式のペレット形成器を用いている。最大の加圧強度は2.5 tonとなっており、ペレット直径は3 mm, 5 mm, 7 mm, 10 mmが具体的な適応条件となっている。1回の加圧形成では最大で1 mm厚程度のペレットを作製可能であり、図2にて扱われた厚膜試料に対しては、1 mm厚毎の形成に続いて、試料成分粉末を形成途中段階のペレットへ繰り返し添加していくことで、段階的な膜厚のコントロールを実現した。

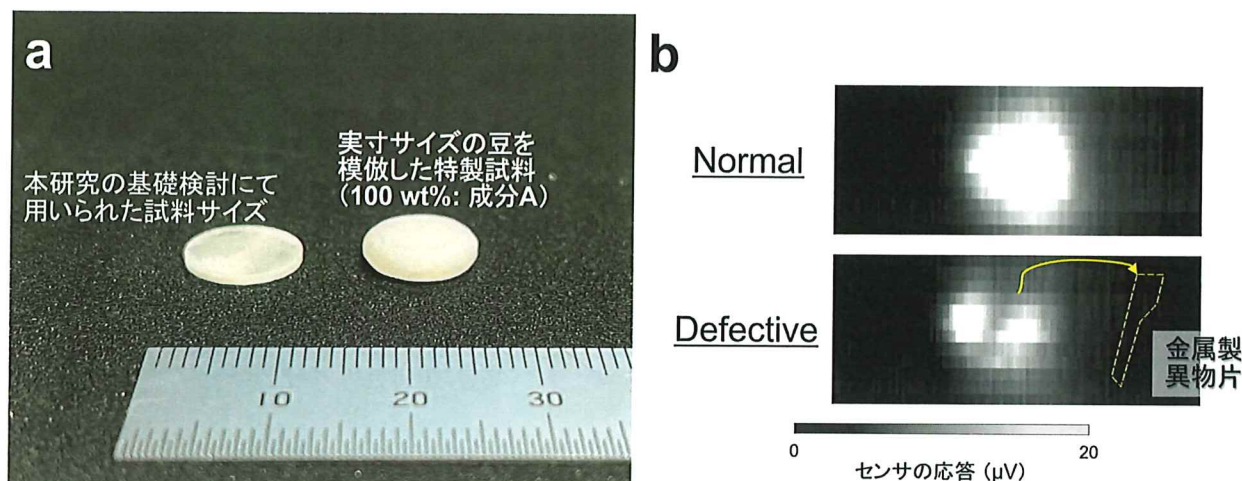


図 2 本研究における試料サイズの概要. **a**, 写真上でのサンプル比較. **b**, 実寸サイズの模擬豆検体に対する非破壊撮像.

実スケールでの透過系実証に続いて、図 3 に反射系との二系統のハイブリッドシステム実装例を示す. 分光の代表的手法: 全反射測定法 (ATR) に代表される通り、試料濃度の増大に対しては sub-THz-IR 照射による透過強度が減衰する中、反射系の光学計測が内部状態の可視化には有用である. 本研究では図 3 におけるデモンストレーションを通じて、透過系計測のみから選択的に抽出される試料情報、および反射系計測のみから選択的に抽出される試料情報を同一のインライン形式セットアップより取得しており、サイズ・濃度・混入異物といった試料制約が網羅的に打破されている.

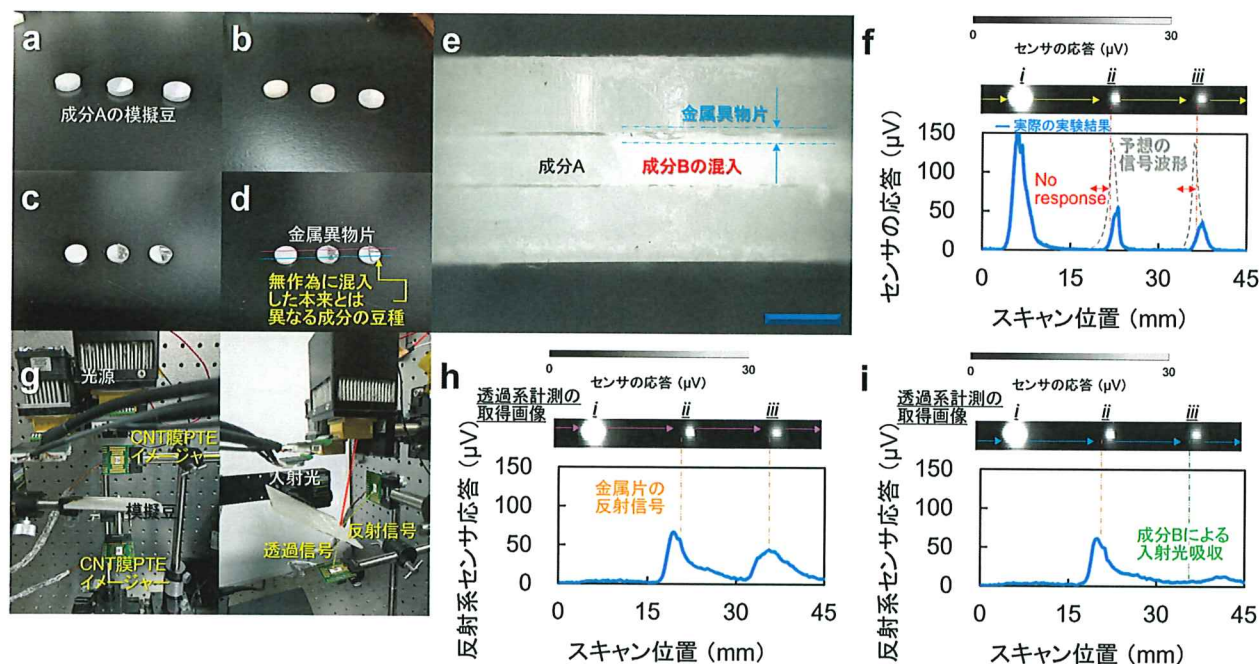


図 3 二系統 (透過系・反射系) でのハイブリッドシステム. **a**, 検体群の写真 (試料の表面から). **b**, 検体群の写真 (試料の裏面から). **c**, 検体群を解剖した内部写真 (試料の表面から). **d**, 検体群を解剖した内部写真 (試料の表面から・異種豆成分の混入有り). **e**, 検体となる模擬豆の断面画像 (スケールバー: 2 mm). **f**, 透過系での光学的なラインプロファイリング. **g**, ハイブリッド光学系. **h**, 反射系でのラインプロファイリング. **i**, 反射系でのラインプロファイリング (異種豆成分の混入有り).

考察

本研究での成果をより汎用性の高い検査技術基盤へと昇華させていくためには、検体や異物材料に対する網羅的な光学データベースの構築が極めて重要となる。これは報告者が提案する sub-THz-IR インラインモニタリングシステムが、同帯域における複数台の単波長光源を組み合わせているためである。sub-THz-IR 照射は材質毎に固有帯域での急峻かつ局所的な吸光ピークを有しており、これらは指紋スペクトルとして認識されている。言い換えると、網羅的な波長域の中において検査へ実質的に寄与している光特性は、指紋スペクトル波長近傍に集中している。よって、対象材質毎に吸光特性を事前の分光計測により把握し、インラインモニタリングシステムには特徴波長となる小型な単帯域光源を集約することで、モノづくり現場・搬送ラインにおける本来の稼働環境を阻害することなくコンパクトに検査系が実装される。これらの状況を踏まえて、本研究では計 10 種類の非金属材料に対する分光データベースの構築を実施した（図 4）。本研究における計測では、単純な分光波形の重ね合わせに終始することなく、CNT 膜 PTE イメージャーが動作可能な帯域レンジから 3 つの波長を離散的に選択し、sub-THz-IR インラインモニタリングシステムにおける構成へ合わせて、非破壊材質同定が可能なレパートリーの具体化に成功している。これらの分光的挙動は CNT 膜 PTE イメージャーによる取得応答信号強度と良好な相関を示しており（誤差率は 5% 以内）、閾値として対象材質と紐付けることにより、機械学習としての全自動的な検査判別が可能となる^[1]。

最後に、本研究における基盤技術としては CNT 膜 PTE イメージャーの超高感度動作^[2,3]、卓上型ロボットによる簡便・高速・高歩留まりな全印刷集積実装^[4,5]、および広帯域・多波長イメージングによる検査アルゴリズムの確立^[6]がそれぞれ効果的に寄与しており、更なる将来展望としては集積光源の波長最適化を通じた官能基レベルでの組成同定や、システム回路の最適化による無線通信・完全スタンドアロン型モニタリングへの拡張といった研究項目が挙げられる。

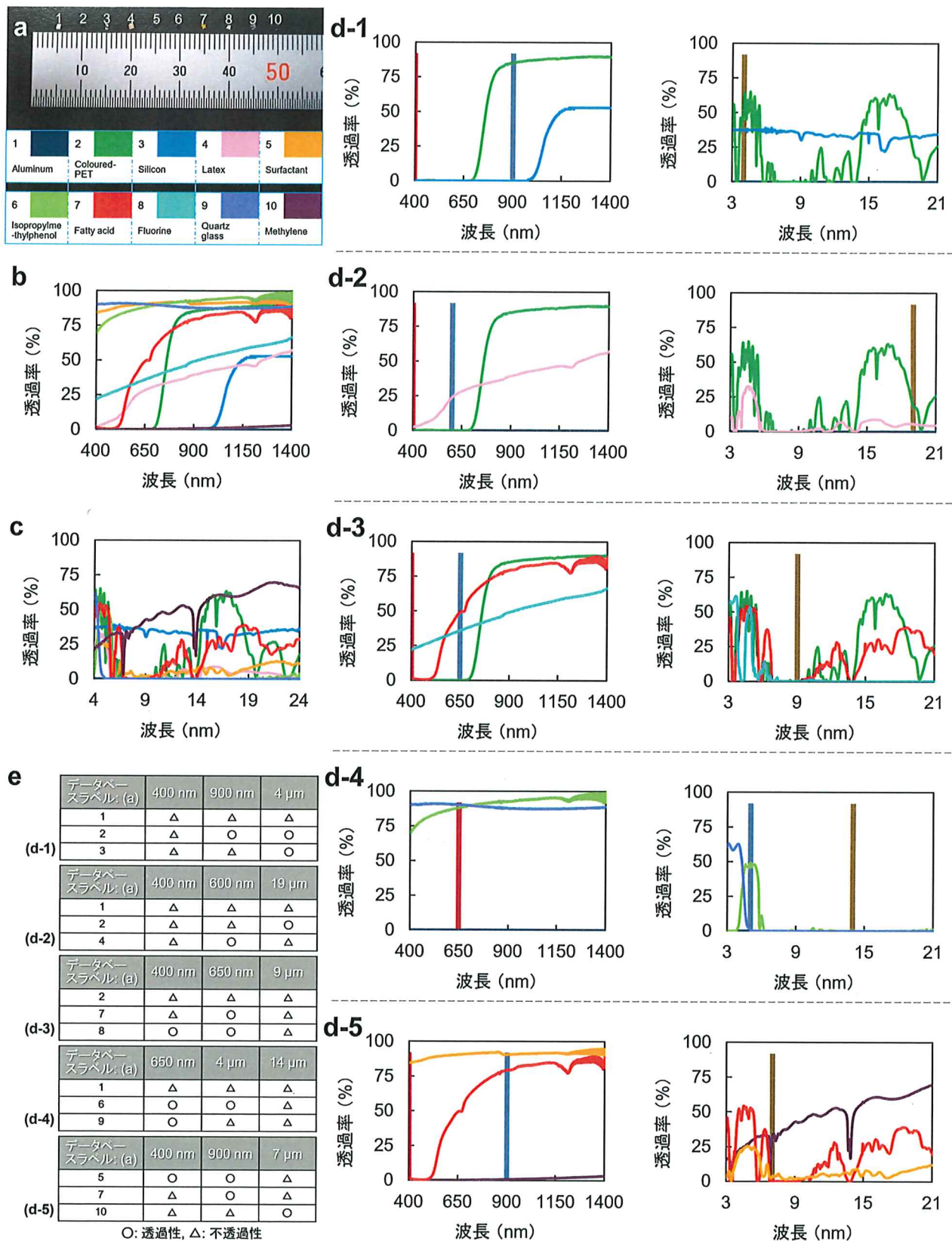


図 4 IR 帯を包括的に網羅する光学的な異物データベース. **a**, 異物写真. **b**, 短波長 IR 域での透過率分布. **c**, 長波長 IR 域での透過率分布. **d**, 三波長計測による材質同定の候補群. **e**, 判別表.

要約

本研究は、CNT 膜 PTE イメージャーシートによるインラインな sub-THz-IR 撮像システムを透過系・反射系のハイブリッドモニタリングへと拡張することで、加工環境を模した搬送ライン上での模擬豆サンプルに対するリアルタイムかつ詳細な非破壊品質モニタリング検査へと拡張した。

最後に、この度のタカノ農芸化学研究助成財団様からの 2024 年度 研究助成（若手部門）によるご支援に際し、心より深く御礼を申し上げます。

文献

1. M. Kubota, Y. Kinoshita, S. Hirokawa, D. Shikichi, N. Izumi, N. Hagiwara, D. Sakai, Y. Matsuzaki, M. Yamamoto, L. Takai, Y. Kon, Y. Aoshima, R. Ota, M. Kosaka, M. Sun, Y. Kawano, K. Li, In-line multi-wavelength non-destructive pharma quality monitoring with ultrabroadband carbon nanotubes photo-thermoelectric imaging scanners, *Light: Science & Applications*, under review, 2025.
2. Y. Matsuzaki, R. Tadenuma, Y. Aoshima, M. Yamamoto, L. Takai, Y. Kon, D. Sakai, N. Takahashi, R. Koshimizu, Q. Zhang, N. Hagiwara, M. Sun, D. Shikichi, R. Ota, S. Hirokawa, Y. Kawano, K. Li, All-Solution-Processable Hybrid Photothermoelectric Sensors with Carbon Nanotube Absorbers and Bismuth Composite Electrodes for Nondestructive Testing, *Small Science* **5**, 5, 2400448, 2025.
3. Q. Zhang, H. Li, R. Koshimizu, N. Takahashi, Y. Kinoshita, A. Sano, J. Jin, H. Okawa, Y. Matsuzaki, D. Shikichi, Y. Kawano*, K. Li*, Microwave Monitoring by Compact Carbon Nanotube Photo-Thermoelectric Sensors Beyond the Diffraction Limit Toward Ultrabroadband Non-Destructive Inspections, *Advanced Sensor Research*, early view, 2400159, 2025.
4. M. Yamamoto, D. Sakai, Y. Matsuzaki, L. Takai, Y. Kon, Y. Aoshima, N. Izumi, N. Hagiwara, H. Hamashima, D. Shikichi, J. Jin, Q. Zhang, K. Murakami, Y. Kinoshita, S. Yasui, N. Takahashi, H. Nishiyama, Y. Kawano, K. Li, Mechanically alignable and all-dispenser printable device design platform for carbon nanotube-based soft-deformable photo-thermoelectric broadband imager sheets, *npj Flexible Electronics* **9**, 42, 2025.
5. L. Takai, Y. Kinoshita, N. Takahashi, M. Yamamoto, D. Shikichi, N. Izumi, Y. Matsuzaki, Y. Kon, N. Hagiwara, Y. Kawano, K. Li, n-type carbon nanotube inks for high-yield printing of ultrabroadband soft photo-imager thin sheets, *FlexMat* **2**, 1, 115–125, 2025.
6. D. Shikichi, R. Ota, M. Kubota, Y. Kinoshita, N. Izumi, M. Kosaka, T. Nishi, D. Sakai, Y. Matsuzaki, L. Takai, M. Yamamoto, Y. Aoshima, R. Odawara, T. Q. Suyama, H. Okawa, Z. Zhou, T. Furukawa, S. Wada, S. Ikehata, I. Sato, Y. Kawano, K. Li, Multi Computer Vision-Driven Testing Platform: Structural Reconstruction and Material Identification with Ultrabroadband Carbon Nanotube Imagers, *Advanced Materials Technologies* **10**, 7, 2401724, 2025.