

【研究成果の要約】

氏名	李 恒
1. 研究題目	屋内給湯（ガス・温水供給）環境の複合的非破壊検査に向けたパッチ撮像システムの創出

2. 研究内容

本助成を通じて、報告者は独自のカーボンナノチューブ (CNT) 型ミリ波-赤外 (MMW-IR) イメージセンサを給湯環境での非破壊検査用パッチシートへ展開することに成功した (図 1)。これらを実現するにあたり、具体的には CNT の液体インクとしての取り扱いに着目することで、エアジェットディスペンサ印刷装置を素子作製工程へと導入している。上記アプローチでは CNT のみでなく、イメージセンサの基礎構造を成す信号読み出し電極配線やキャリアドーピング剤 (受光界面の形成用) に対して高伸縮ポリマー支持基板上での網羅的な全印刷が実現している。

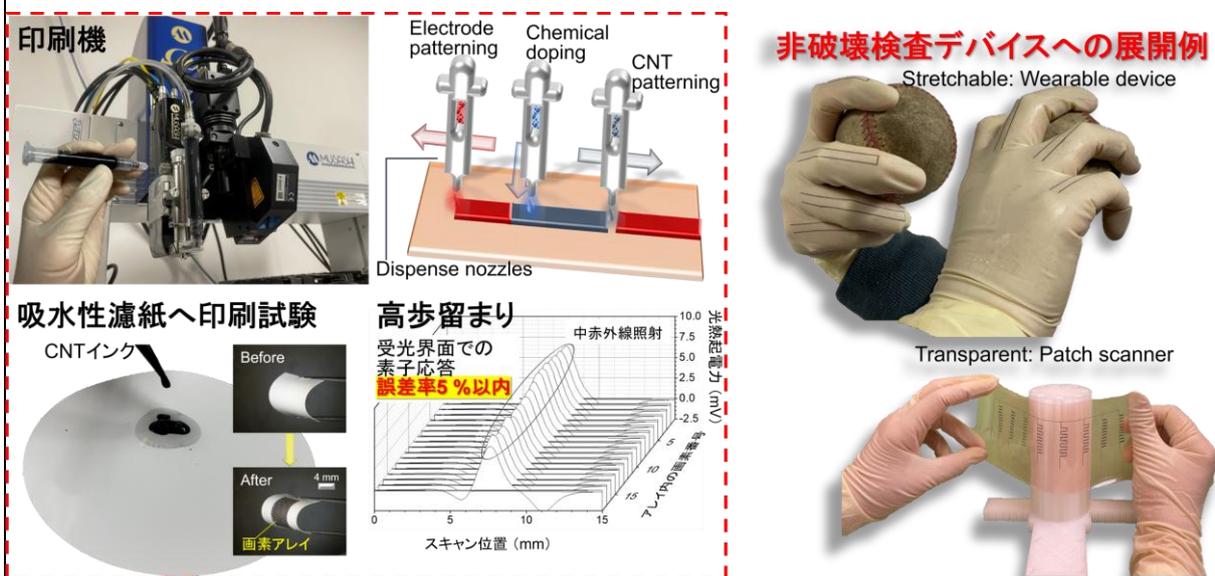


図 1 本助成による成果のコンセプト

3. 研究成果

【論文発表】 (その他、国内外での学会発表 38 件、専門書籍の分担執筆 3 報)

- L. Takai, **K. Li*** (*責任著者 / 最終著者), et al. n-type carbon nanotube inks for high-yield printing of ultrabroadband soft photo-imager thin sheets, *FlexMat*, Early View, 2025, (IF: N.A. as of 2024, [selected as Cover picture](#)).
- D. Shikichi, **K. Li*** (*責任著者 / 最終著者), et al. Multi computer vision-driven testing platform: structural reconstruction and material identification with ultrabroadband carbon nanotube imagers, *Adv.Mater.Technol.* **10**, 7, 2401724, 2025 (IF: 7, [selected as Frontispiece](#)).
- Y. Matsuzaki, **K. Li*** (*責任著者 / 最終著者), et al. All-solution-processable hybrid photo-thermoelectric sensors with carbon nanotube absorbers and bismuth composite electrodes for non-destructive testing, *Small Sci.*, Early View, 2400448, 2025 (IF: 12, [selected as Frontispiece](#)).
- Q. Zhang, **K. Li*** (*責任著者 / 最終著者), et al. Micro-wave monitoring by compact carbon nanotube photo-thermoelectric sensors beyond the diffraction limit toward ultrabroadband non-destructive inspections, *Adv.Sens.Res.*, Early View, 2400159, 2025 (IF: N.A., [selected as Back cover](#)).
- **K. Li*** (*責任著者), et al. Simple Non-Destructive and 3D Multi-Layer Visual Hull Reconstruction with an Ultrabroadband Carbon Nanotubes Photo-Imager, *Adv.Opt.Mater.* **12**, 2302847, 2024 (IF: 11).
- T. Araki†, **K. Li†** (†共同筆頭著者), et al. Broadband Photodetectors and Imagers in Stretchable Electronics Packaging, *Adv.Mater.* **36**, 20, 2304048, 2024 (IF: 26, [selected as Cover picture](#)).
- R. Kawabata†, **K. Li†** (†共同筆頭著者), et al. Ultraflexible Wireless Imager Integrated with Organic Circuits for Broadband Infrared Thermal Analysis, *Adv.Mater.* **36**, 2309864, 2024 (IF: 26, [selected as Frontispiece](#)).

【受賞】 (その他、指導学生による受賞が 7 件)

- 2024 年 第 17 回 廣野賞 ※レーザ研究分野で年間 1 名選出

【研究成果の概要】

氏名	李 恒
1. 研究題目	屋内給湯（ガス・温水供給）環境の複合的非破壊検査に向けたパッチ撮像システムの創出

【研究背景・目的】

社会生活・日常へ密接に沿う屋内での給湯環境において、ヒトによる利用を妨げることの無い非破壊検査技術は極めて重要な位置付けとなる。このようなコンセプトを実現するうえで、給湯インフラへ長期・安定的に貼り付け可能なパッチタイプの検査シートを創出することが鍵と言える。同時に、液体成分やプラスチック配管の取り扱いという観点から、非金属材料への非侵襲な透視や材質同定に秀でるミリ波-赤外 (MMW-IR) 帯での光学計測が不可欠と言える。これらを踏まえると、屋内給湯環境での持続的な非破壊検査の実現に向けて、パッチ構造 MMW-IR モニタリングシートの創出が課題となる(図 2)。

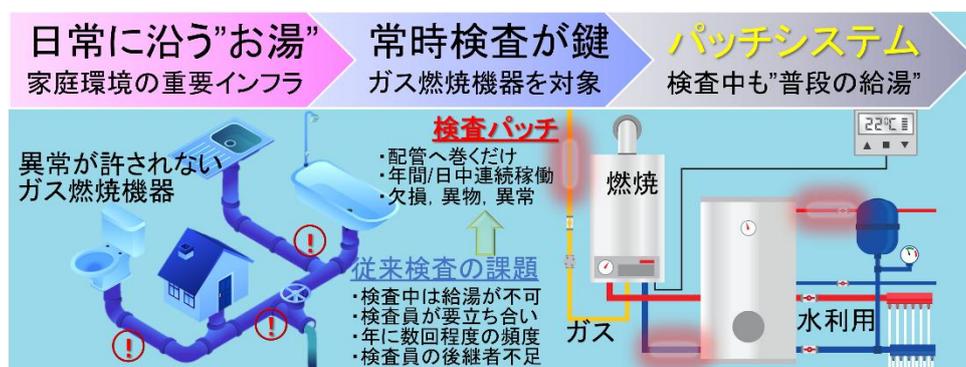


図 2 報告者が本助成において着目した給湯環境での非破壊検査技術

これらの達成目標に対して、報告者はこれまでに日本発の先端材料:カーボンナノチューブ (CNT) による MMW-IR 帯センサシートを創出してきた。CNT が持つ豊かな材料特性により既存の光センサでは成し得ない同一素子による MMW-IR 全域での高感度動作を実現し、食品ラップ程の機械構造から配水管パイプといった立体湾曲部位を含めて所望箇所へのシートとしての貼り付けが可能である(図 3)。しかしながら従来の CNT 型 MMW-IR センサに対しては、素子作製工程において依然として歩留まりの低い手動操作(切り貼り等)へ依存しており、プロセスの機械化は喫緊の課題と言える。

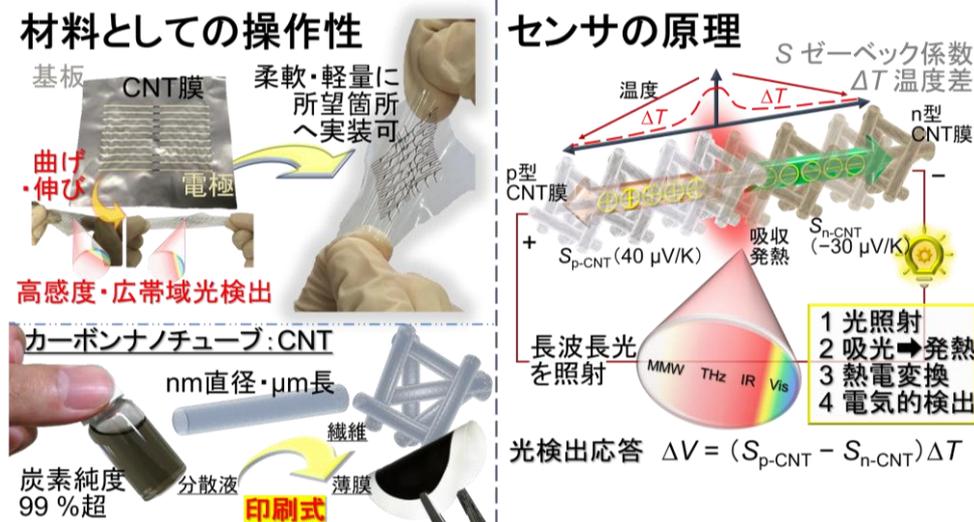


図 3 本助成での取り組みにおいて基盤を成す報告者の独自研究:CNT 型 MMW-IR センサ

【研究手法・成果】

CNT 型 MMW-IR パッチシートの創出に向けて、報告者は CNT の液体インクとしての加工性に着目した。つまり、CNT 型 MMW-IR パッチシートの作製においては、室温大気暴露下の印刷工程が適応可能となる。よってクリーンルームやリソグラフィといった高額設備類を要することなく卓上環境において CNT 型 MMW-IR パッチシートが作製され、印刷工程に特有である必要最低限な素子材料の消費という観点からも、社会へ溶け込む給湯設備において持続的な非破壊検査システムを構築するうえで、極めて重要な位置付けを占める。同時に、高温処理や真空工程を経ない点は、薄膜・軽量・高伸縮なポリマーシート基板の利用を司り、貼り付け可能な CNT 型 MMW-IR パッチの大規模集積に資する。

具体的に、報告者はエアジェットディスペンサ印刷装置による CNT 型 MMW-IR パッチシートの実装に取り組んだ。ディスペンサ装置はインクジェット印刷機やスクリーンコーターと比較して幅広い液体をインクとして適応可能な点が特徴であり、装置全体の構造において液体インクが充填されるシリンジ部を交換することにより、異種材料の重ね合わせが可能となる。また単一・同一のディスペンサ装置自身が材料間における空間座標関係を追従するため、一般的なセンサの作製における工程間(例:蒸着→リソグラフィ)での位置ズレを防ぐことができる。

上記の技術的背景の下、報告者は最小 200 μm 線幅・最小 400 μm ピッチ・サイズ誤差率 10%以内・センサ感度誤差率 10%以内での CNT ディスペンサ描画を実証し、信号読み出し電極配線とキャリアドーピング剤(受光界面の形成用)を含め、MMW-IR パッチシートの全印刷な集積を実現した(図 4)。更にこれらの技術的成果を創出する過程において、高精度印刷に適する高濃度・高粘度 CNT インクが MMW-IR センシングにおいても動作感度向上に寄与するという点を科学的に見い出している。

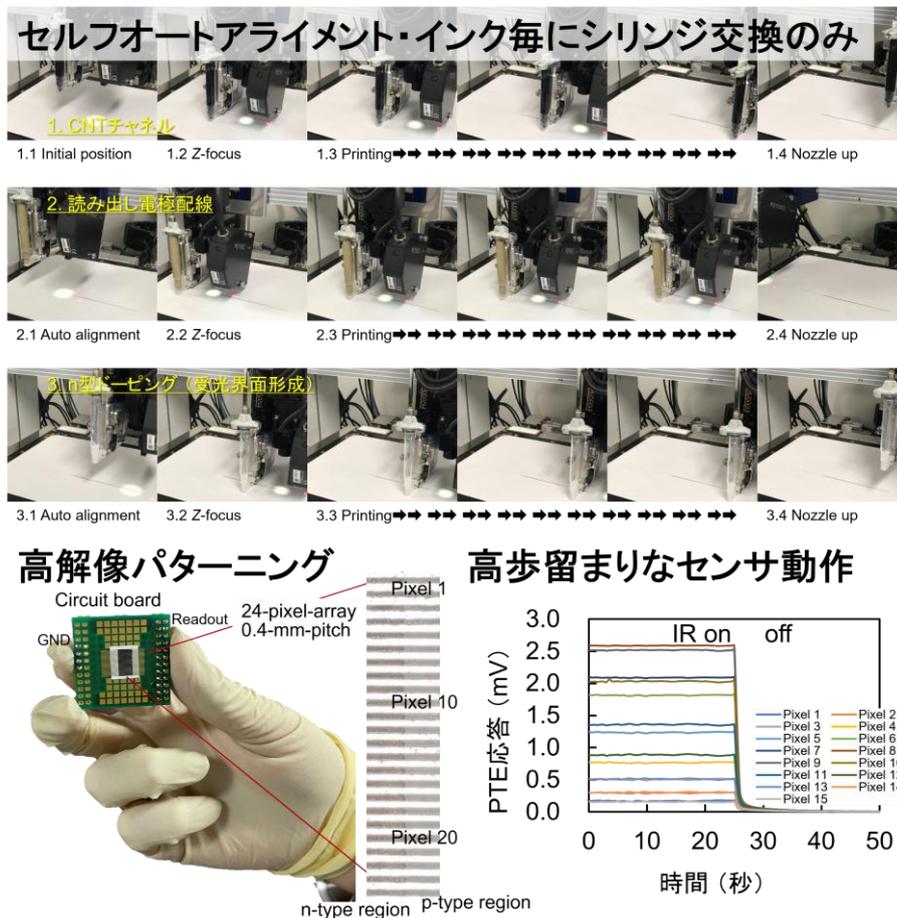
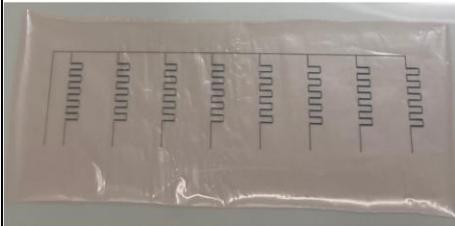


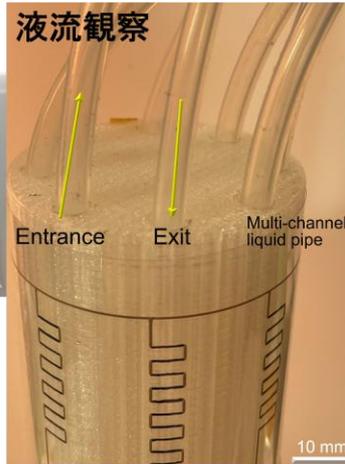
図 4 液体での加工性へ着目した CNT 膜 MMW-IR に対する全印刷式な素子作製工程

先述の内容を踏まえ、報告者は給湯環境における簡易的な非破壊検査デモンストレーションとして CNT 型 MMW-IR パッチシートによる液流のリアルタイムモニタリングを実証した(図 5). 循環中の温水から発せられる微弱な赤外輻射光を CNT センサが高感度に検出し、液温の変化を可視化する. またパッチシートとして検体形状に沿うことで、液流の位置を空間的な座標情報として出力可能となる. 報告者はこれまでに外部からのレーザ照射を対象に CNT センサへの設計を施してきたが、左記に基づき液流計測においても理論限界として 0.011 °C の極僅かな温度変化が検出可能となっている.

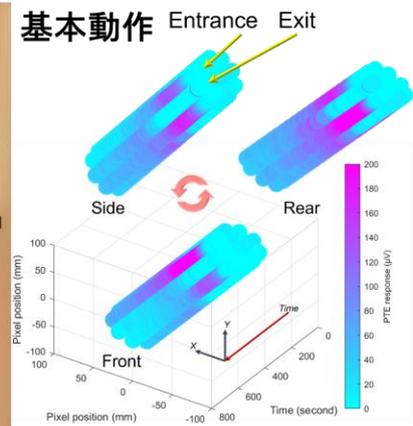
位置合わせ容易な撮像シート



液流観察

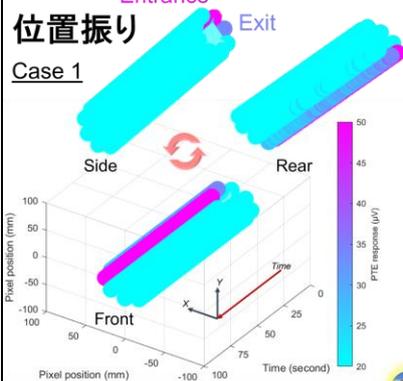


基本動作

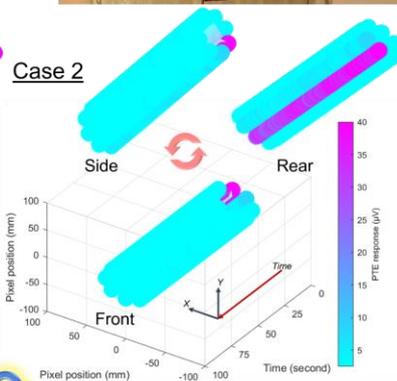


位置振り

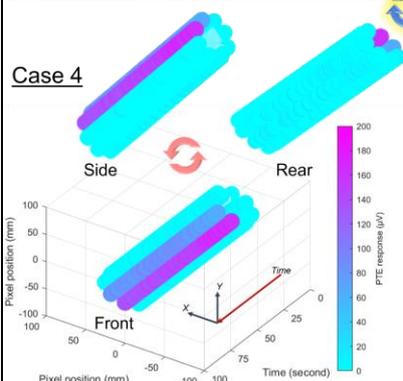
Case 1



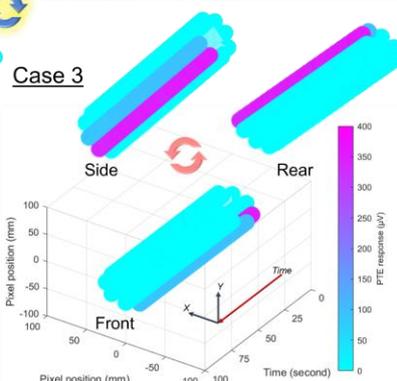
Case 2



Case 4

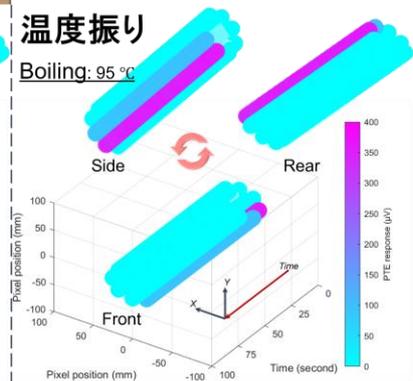


Case 3



温度振り

Boiling: 95 °C



Warm: 60 °C

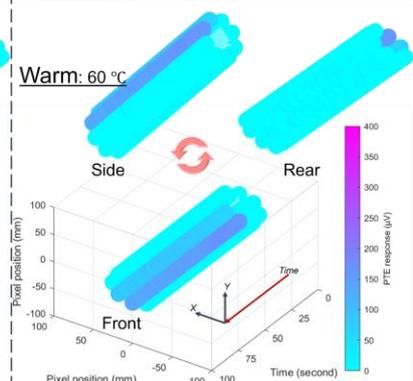


図 5 報告者が実装した CNT 型 MMW-IR 撮像パッチシートによる給湯環境での非破壊検査デモ

【総括】

本助成では当初の達成目標に対して、給湯環境での非破壊検査に向けたパッチ撮像シートの創出までを達成している. 今後は検査計測技術への更なる注力が求められ、具体的には現行の循環液体モニタリングに加えて、ガス雰囲気環境下における分子同定・異常検知といった項目が極めて重要なマイルストーンとして位置付けられる.

最後に、この度のご支援に際して、(一財)パロマ環境技術開発財団様に厚く御礼を申し上げます.