

眼に見えない光を操り、影と透過像から非破壊3D検査応用を実現

カーボンナノチューブセンサによるミリ波-赤外帯コンピュータビジョン

学校法人 中央大学
 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所

要 点

- 電波と可視光に挟まれた眼では見えない電磁波-光(ミリ波・テラヘルツ・赤外線:MMW-IR)計測とコンピュータビジョン(CV)技術を組み合わせて、従来に無い多機能な非破壊3D検査手法を確立。
- ヒトの眼では識別不可能な複雑化された観察物(外壁は不透明、内部では複数の材質が異なる姿形で幾層にも組み合わさる)を対象に、完全非接触・非侵襲で材質情報・構造情報を選択的に抽出。
- 従来の CV は可視光による物体表層の 3D アート・映像表現を志向する中、視体積交差(影→空間配置)・トモグラフィ(透け→詳細断面像)という 2 つの主要な立体構造復元手法を、透視・材質同定型の非破壊 MMW-IR モニタリングシステムへ組み込み、モノづくり現場での品質検査応用へ期待。
- カーボンナノチューブ型の独自イメージセンサで高感度 MMW-IR CV を実現し、産業実装へ前進。

概 要

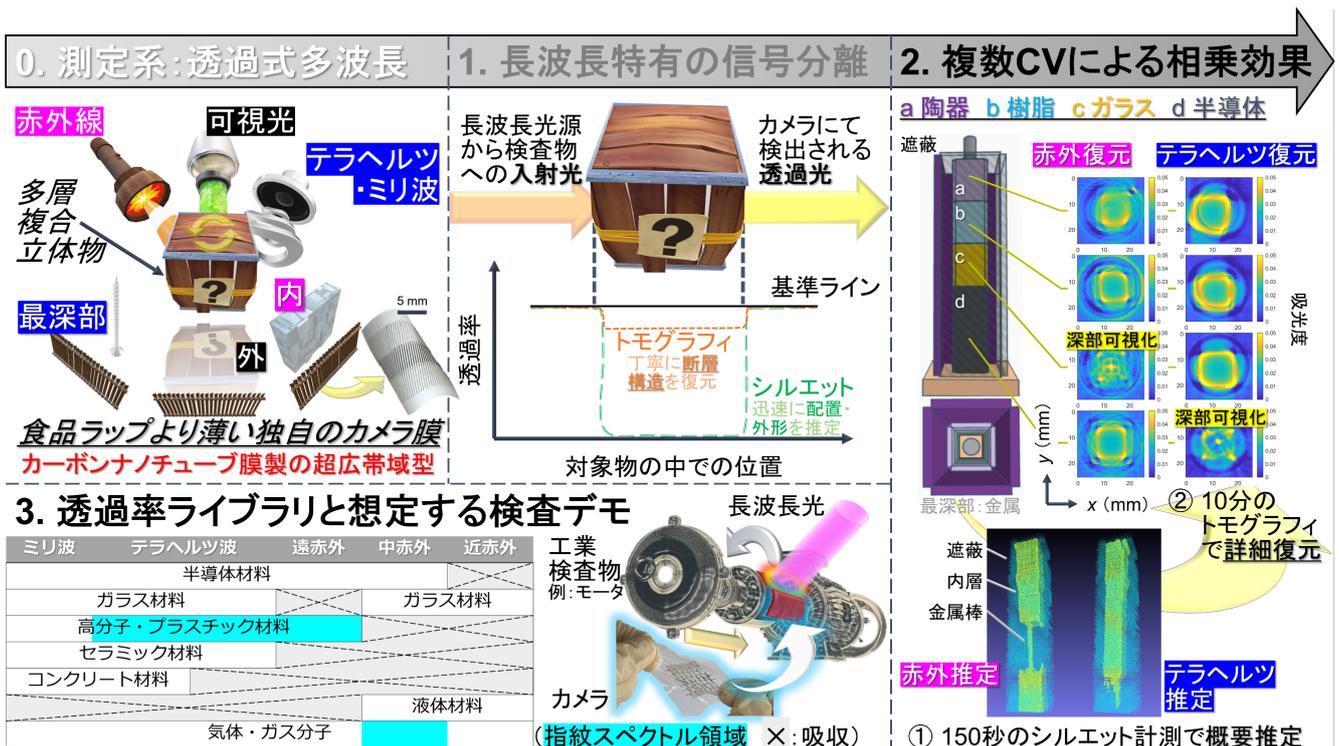


図1 本研究での強みである「独自の材料・デバイスに立脚した超広帯域 CV 計測」というコンセプト

中央大学(東京都八王子市、学長:河合 久) 理工学部 電気電子情報通信工学科の李 恒 助教、敷地 大樹 大学院生(理工学研究科 電気電子情報通信工学専攻・博士前期課程2年)、久保田 実樹 大学院生(同 博士前期課程1年)、河野 行雄 教授、太田 頼斗 学部4年生(※ 研究当時)らを中心とする研究チームは、佐藤 いまり 教授、池畑 諭 准教授、須山 孟 大学院生(博士課程)らから成る国立情報学研究所(NII、東京都千代田区、所長:黒橋 禎夫)の研究グループと共同で、ミリ波・テラヘルツ・赤外線(MMW・THz・IR)帯域でのコンピュータビジョン(CV)画像計測に立脚する新たな非破壊検査手法の確立に成功しました。上記の取り組みでは、中央大学側で李助教・敷地大学院生らが確立したカーボンナノチューブ(CNT)型イメージセンサによりMMW-IR照射特有の透視情報を高い効率で集約し、それらの数値情報をNII側で佐藤教授・須山大学院生らが構築したCV解析基盤により処理しています。具体的には眼では見透せない不透明な物体を対象に、本システムは操作員・観察物・設置環境の全てに安全な動作下において、隠された材質情報(モノが何で出来ているか?)および構造情報(モノの各材質が如何なる姿形で内蔵されているか?)を選択的かつ網羅的に抽出します。また数値情報・波形情報・平面画像と比較しても利用者に直感的理解を促す3Dモデルとして上記の特性が可視化され、将来的なモノづくり現場において本システムは即効性に富む詳細な非破壊品質モニタリングとしての活用が期待できます。

本研究において、鍵は光の「影」と「透け」です。MMW/THz/IRが電磁波として異なる波長を示す中、観察物毎にMMW-IR照射に対する影(シルエット)・透けの見え方は波長により変化します。不透明な多層複合立体状の観察物に対して、本システムでは影・透けの波長依存特性から材質を同定し、「影→空間配置」「透け→詳細断面像」への展開に特化する視体積交差法(VH)とトモグラフィ(CT)をハイブリッドなCVとしてそれぞれ組み合わせることで、3D検査モデルを提供します。

本研究成果は、2025年2月15日付で国際科学誌 *Advanced Materials Technologies* にオンライン



公開されました。

図2 本研究による「影・シルエット→VH」&「透け→CT」という独自アプローチの基本概念

【研究者】

李 恒	中央大学 理工学部	助教	(電気電子情報通信工学科)
敷地 大樹	中央大学 大学院 理工学研究科		(電気電子情報通信工学専攻)
		博士前期課程 2年	
久保田 実樹	中央大学 大学院 理工学研究科		(電気電子情報通信工学専攻)
		博士前期課程 1年	
河野 行雄	中央大学 理工学部	教授	(電気電子情報通信工学科)
太田 頼斗	中央大学 理工学部		(電気電子情報通信工学科)
		学士 4年 ※研究当時	
須山 孟	総合研究大学院大学		(国立情報学研究所 所属)
		博士課程学生	
池畑 諭	国立情報学研究所		(コンテンツ科学研究系)
		准教授	
佐藤 いまり	国立情報学研究所		(コンテンツ科学研究系)
		教授	

【論文情報】

雑誌名: Advanced Materials Technologies
論文名: Multi computer vision-driven testing platform: structural reconstruction and material identification with ultrabroadband carbon nanotube imagers
著者: Daiki Shikichi^{†,1}, Raito Ota^{†,1}, Miki Kubota^{†,1}, Yuya Kinoshita¹, Noa Izumi¹, Mitsuki Kosaka¹, Tomoki Nishi¹, Daiki Sakai¹, Yuto Matsuzaki¹, Leo Takai¹, Minami Yamamoto¹, Yuto Aoshima¹, Ryoga Odawara¹, Takeru Q. Suyama^{2,3}, Hiroki Okawa⁴, Zhenyu Zhou³, Tomoya Furukawa^{5,6}, Shota Wada^{5,6}, Satoshi Ikehata³, Imari Sato³, Yukio Kawano^{*,1,3,4}, and Kou Li^{*,1}
†共同筆頭著者
*責任著者
所属: ¹中央大学 理工学部 電気電子情報通信工学科
²総合研究大学院大学
³国立情報学研究所
⁴神奈川県立産業技術総合研究所
⁵東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所
⁶東京工業大学 工学院 電気電子系
DOI: 10.1002/admt.202401724

【研究内容】

1. 背景

モノづくりの機械化・全自動化により工業部品および日用製品の製造や流通が飛躍的に加速し続ける中、非破壊検査技術の社会的な役割は日に日に高まっています。モノを壊さず・触れずに点検する非破壊検査技術において、イメージング（画像計測）という形式により大面積情報を非接触で取得可能な電磁波-光モニタリングは注目を集めています。特に従来は高い透視性から X 線計測が検査技術の代表格と位置付けられており、工場における品質評価や空港内での安全審査へ積極的に用いられています。これはつまり、ヒトの眼で視認不可能なモノの内部を不透明パッケージ越しに可視化することを意味します。この様な利点の一方、被爆性が長年にわたって課題視されており、観察物が工業部品や日用品の場合においても、操作員を含めた環境全域への被爆事故も実際に報告され続けています。

上記の状況に対して、近年では MMW-IR 計測へ係る取り組みが全世界で精力的に進められています。MMW-IR 照射は非侵襲であり、非金属材料の識別にも特化しています（参考文献 1-3）。プラスチックやセラミック、半導体、ガラス等、工業部品や日用品はそれらの主要構造を非金属材料によって占めています。つまり透視という非破壊検査においては、ひび割れや傷の検知のみでなく、「対象は何の材料から成るか？」「どの非金属材料にて異常が生じているか？」といった詳細理解に資する MMW-IR 計測型の非金属材料への材質同定は、極めて重要な役割を担います。X 線計測は金属物・非金属物を明瞭に識別し、金属物を非常に高い空間分解能で観察することができるため、それらと相補的な役割を以って非破壊検査技術の拡充・モノづくりの持続性確保を実現するために、依然として萌芽的な MMW-IR 計測の更なる高機能化は喫緊の課題と言えます。

モノづくりの現場において MMW-IR 計測を活用する上では、特有の材質同定を行うだけでなく、さらに「モノの各材質が如何なる姿形で内蔵されているか？」という観点での構造復元を透視形式にて両立する必要があります。構造復元の観点では CV は以前より注目を集めており、電磁波-光計測により得られる数値情報（強度・時間・位相・座標等）に基づき、3D モデルを提供することができます。ここで従来の CV では、アート・映像技法向けとしての可視光帯域での利用や、安全面の観点で利用環境が限定的な X 線照射下での活用が主流となっています。一方で、MMW-IR 照射下での CV の活用は依然として不十分な状況と言えます。これは立体物を扱う CV 計測では一般的な平面撮像計測（写真・動画等）と比較してセンサの高い受光感度が求められるためであり、波長ごとに同定対象の材質が紐付けられる観点からは併せて広帯域動作性が必要となり、上記を同時に両立する MMW-IR 素子が発展途上である点が致命的なボトルネックに挙げられます。センサといった基本素子の未成熟さは、MMW-IR 照射が電波と可視光の間に位置する点に起因しており、電波素子（通信回路等）側・可視光素子（フォトダイオード等）側からの古典的なそれぞれのアプローチが十分に適応されにくい技術的ギャップを孕んでいます。

これらのバックグラウンドを総括すると、従来の MMW-IR CV では限定的な材質同定に終始する狭帯域センシングが主流となっていました。課題解決に向けて、李助教らもこれまでに独自の広帯域 MMW-IR センサによる CV 応用への基礎実証へ取り組んできましたが（参考文献 4）、素子は狭視野の単一面素に留まり、材質ごとの簡易的な空間配置を把握するのみとなっています。

2. 研究内容と成果

この状況を脱するために、李助教らは CNT がアレイ式で高密度に集積されたイメージセンサを創出しました (図 3)。これまでも李助教らは、独自の材料・デバイス研究として少数画素 CNT センサを確立していました (参考文献 5-9)。CNT 本来の MMW-IR に加えて可視光にかけて一貫して 90 % を超える吸光率から (参考文献 10-12)、既に CV 応用へと有用な超広帯域動作は実証されています。本研究では、さらに、取り扱いの起点として分散液処理が主流な CNT に対し、高濃度化により集積アレイセンサとしての加工精度が向上する点に着目しました。李助教らは実際に 0.65 mm 間隔で 40 画素が集積された CNT イメージセンサアレイを作製し、CV 検査に有用な高感度動作 (一桁 $\text{pWHz}^{-1/2}$ の雑音等価電力) を実証すると同時に、全ての光検出界面での感度誤差・形成位置誤差をそれぞれ 4.6 % と 2.7 % に抑制しました。本来の高感度・広帯域動作に加えて、本研究で行った高密度集積された大面積視野 (cm 台超) イメージセンサアレイとしての高精度な素子実装は、MMW-IR CV システムの操作性を飛躍的に高める位置付けです。

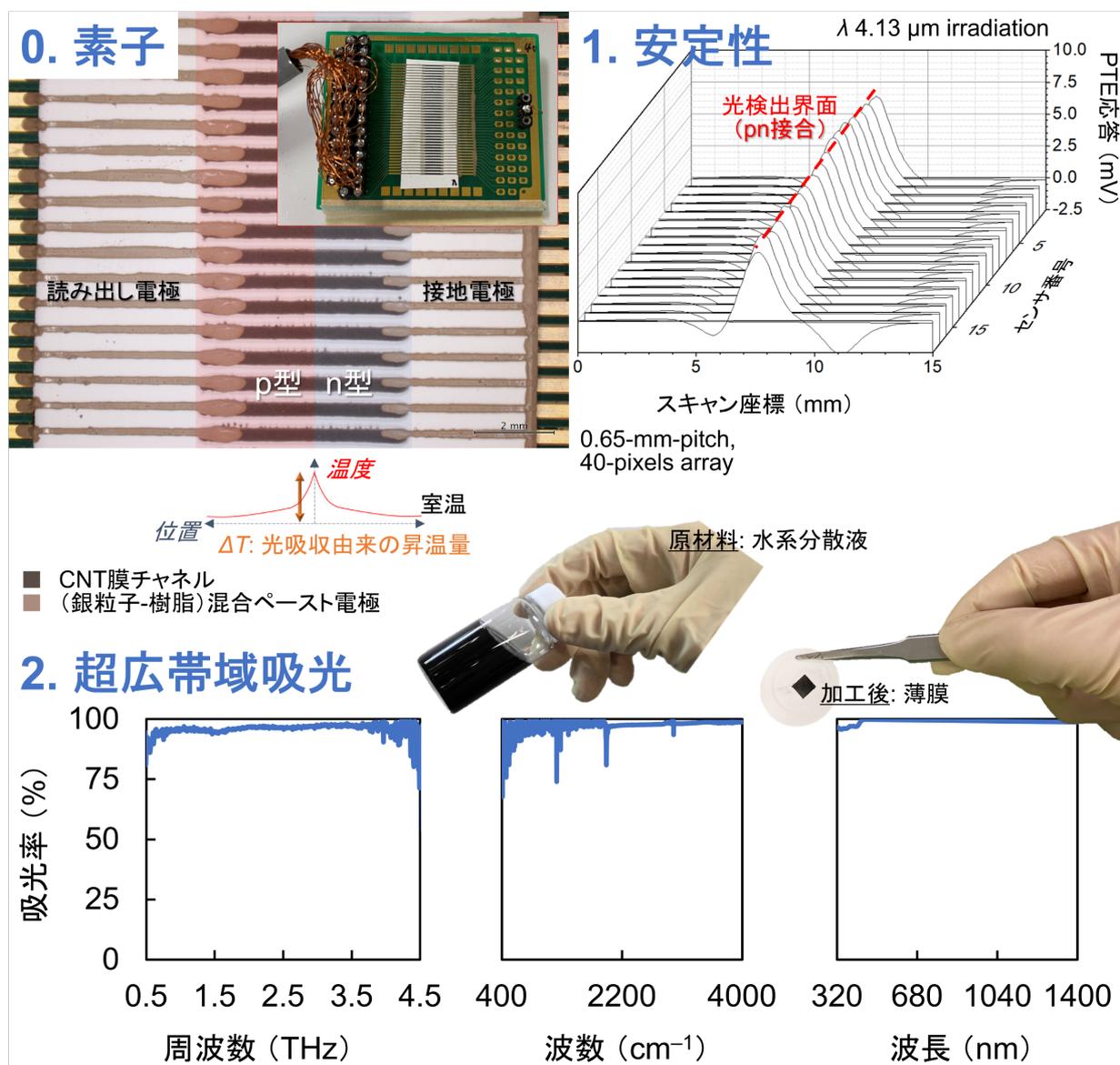


図 3 高濃度な分散液によって高密度に集積された CNT センサの基礎デバイス特性および性能

CNT イメージセンサを基に、李助教らは独自の MMW-IR CV システムを構築しました(図 4)。姿形を具体的に把握する上では、モノへの光照射に伴う深さ方向の情報(厚み、中空もしくは充填等)を把握する必要があり、この観点では CV の中で一般にトモグラフィ(断層)モニタリング(CT)が最適と言えます。一方で、空間座標内において観察物を非常に細かく操作する CT では数時間から数十時間という長時間計測を伴い、全数検査が望まれるモノづくり現場では更なる高速化が必要となります。そこで本研究では CV の中でも、深さ方向への情報量に欠けながらも 3D 空間内での迅速な配置把握を得意とする視体積交差モニタリング: VH に着目し、MMW-IR 照射下での CNT イメージセンサの高い操作性に支えられながら、CT とのハイブリッド化へと展開していきました。具体的には、李助教らが創出した本システムでは観察物における材質毎の 3D 空間配置(全体像)を数分間という迅速なスピード感で VH により把握し、その後は異常が疑われる箇所へ選択的に CT 計測を施すことで、同じく数分間のスピード感で特定領域の詳細な深さ情報を断層像として抽出していきます。

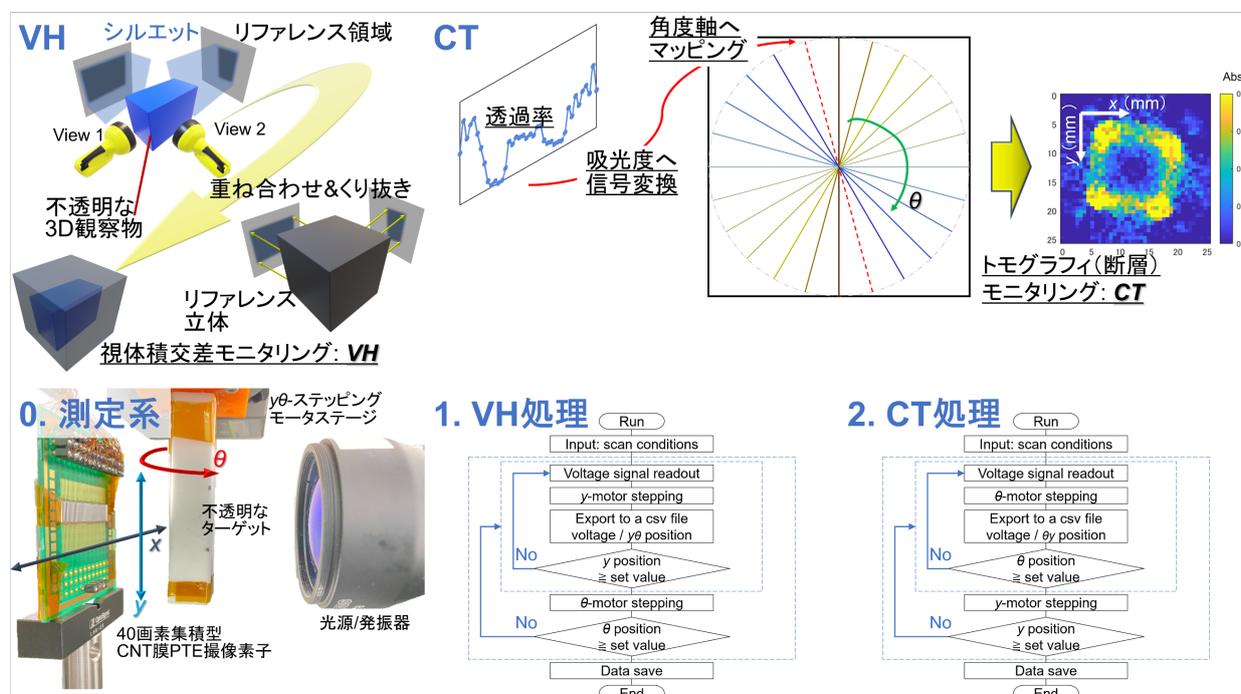


図 4 VH/CT が相補的・ハイブリッドに集約された本研究での CV システムのフローチャート

また李助教らは、開発システムに対する基礎動作性能の定量化にも取り組んでいきました(図 5)。具体的には先述の安全性、検査性、動作帯域に加え、CV システムにおいては空間分解能(いかに微細な観察を可能とするか?)の評価が極めて重要な位置付けを占めます。既存の CV 研究に目を向けると、極微観察に秀でる X 線では数十 μm から、そして MMW-IR 照射下の狭帯域タイプでは数百 μm から数十 cm の空間分解能が報告されています。これらに対して、本研究ではガラス筒の内部へ隠されたワイヤ(最小直径 1 mm)を復元することに成功しています。また李助教らは CNT センサアレイの集積化密度が開発システムの空間分解能を支配的に定義する点を明らかにし、現時点では 0.65 mm ピッチという精度を達成しています。本システムにより得られた 1 mm の復元精度は、工業ネジの最小規格に並ぶ点からも将来的な検査応用への適性がうか

がえますが、センサ集積ピッチとのギャップ要因の追究や更なる高解像度化は、今後の重要課題となります。

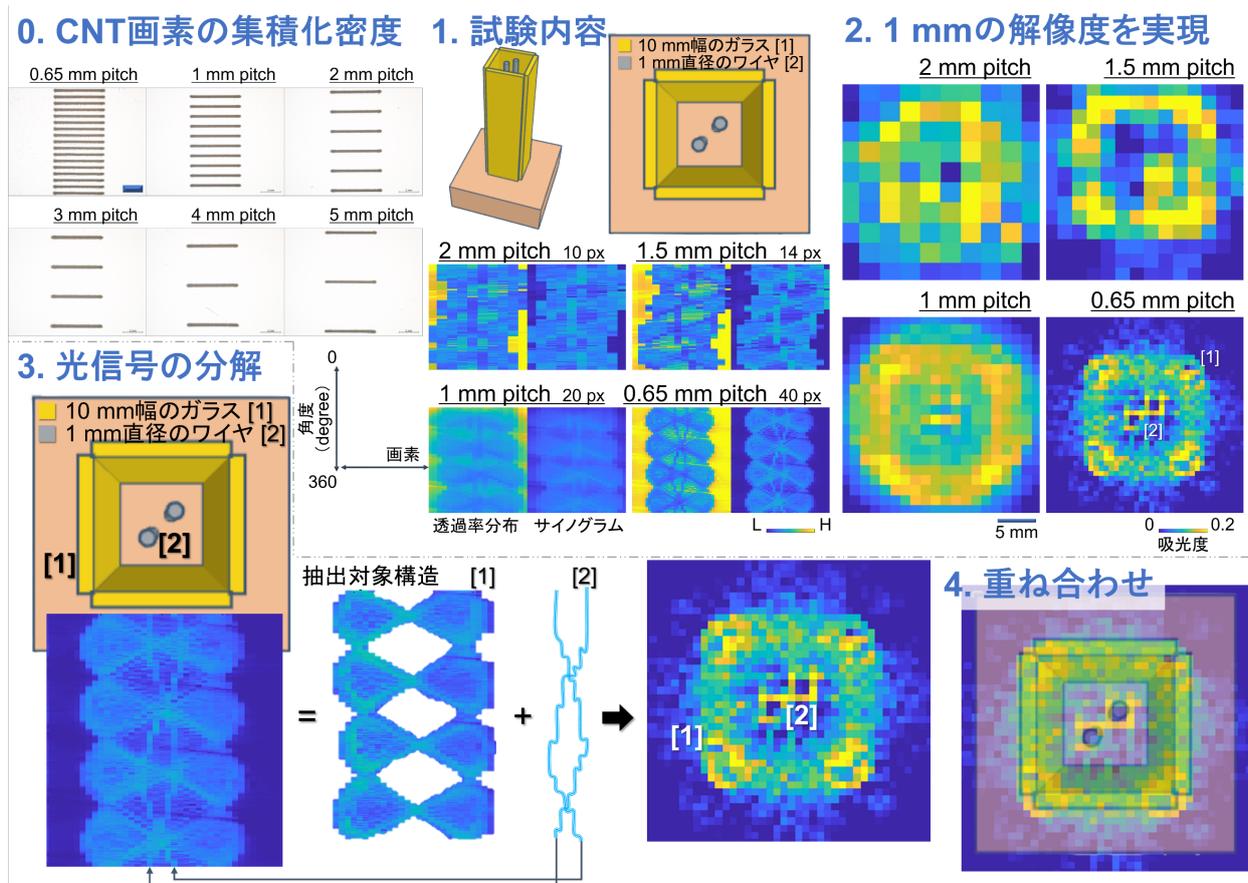


図5 CNTイメージセンサを用いたCT計測システムにおける空間分解能の基礎評価

材料・デバイス基礎特性、CV動作原理、システム性能評価に続き、李助教らは実地試験までを見据えた簡易的な非破壊検査デモンストレーションを実施しました（図6）。対象には複雑化された観察物（外壁は不透明・計6種の異なる材質が幾層にも立体的に組み合わさる）を用意し、CNTイメージセンサを用いたMMW-IR照射環境において、VH・CTのハイブリッドなCV計測を行いました。この結果では、CT計測により深さ情報を伴う断層像を材質毎に抽出することに成功しています。具体的には、今回のケーススタディモデルは外壁・内壁・最深部へと分割され、外壁・内壁は中空構造かつ最深部は充填構造であり、内壁は計4種の異なる材質が垂直に積層されている、等の詳細な情報が本システムにおいて非破壊に可視化されています。

これらの選択的かつ高効率な観察眼においては、先述の通りに事前の迅速なVH計測が鍵となります。例としてケーススタディモデルの仕様においては、外壁・内壁・最深部への分割や内壁の垂直4積層に関しては、VH計測の時点で明瞭に可視化されており、操作員に対してCT計測を行うべき箇所を選択的かつ高効率な形で提示することが可能となります。

これらの総括として、本システムにおいて660 nm–1.15 mmの超広帯域動作、雑音等価電力：一桁–二桁 $\text{pWHz}^{-1/2}$ の高感度動作、感度誤差・配置誤差：4.6%・2.7%精度での0.65 mmピッチの40センサ画素アレイ集積、最小1 mmの復元サイズ空間分解像、150秒（VH）・120秒（CT）の動作スピードといった基礎性能の下、深さ情報を含むMMW-IR CVを世界に先駆けて確立す

ることに成功しました。

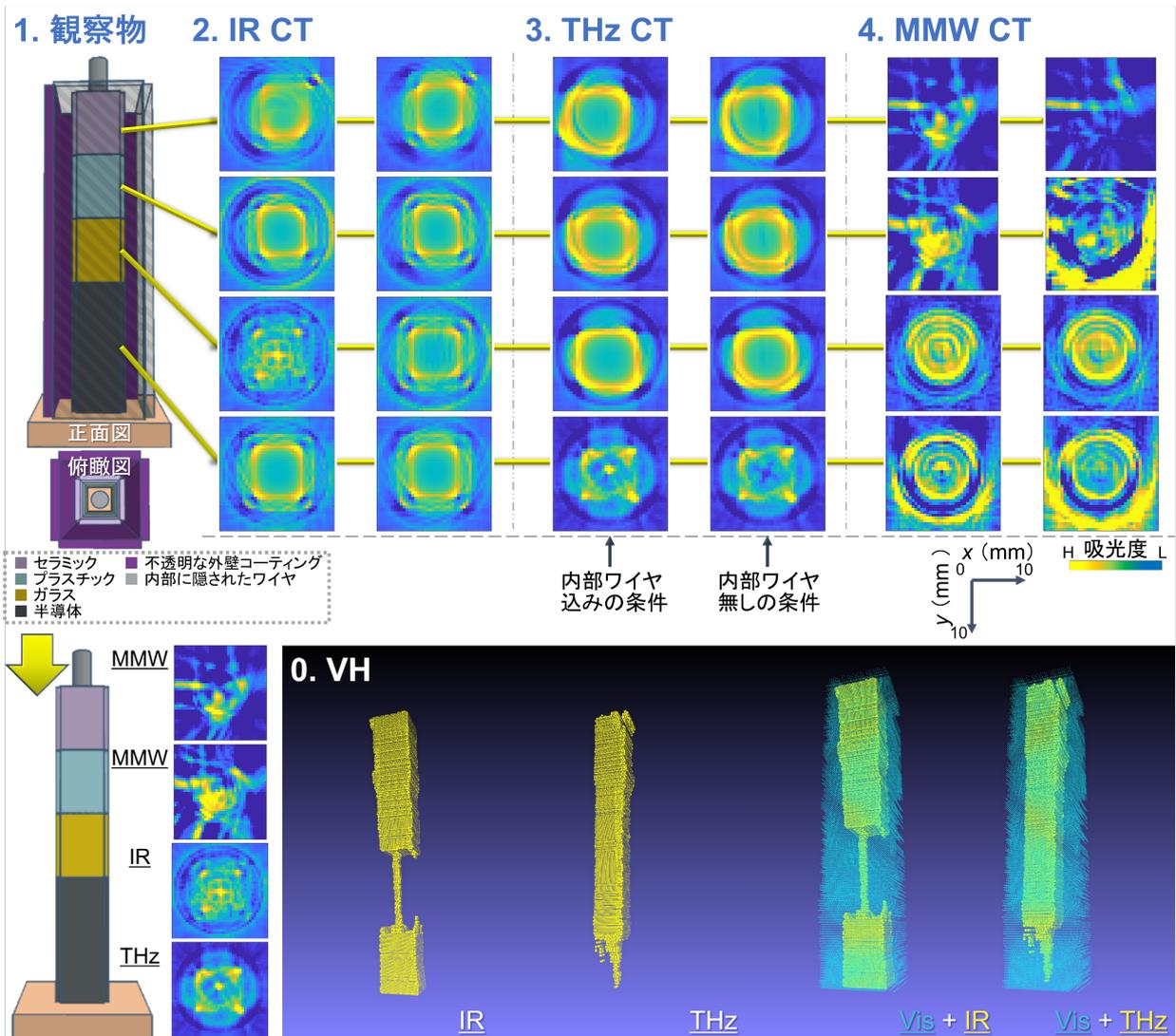


図6 複雑化された観察物に対する材質同定・構造復元型の非破壊なMMW-IRタイプ検査実証

李助教らは現在、本研究を基に、モノづくり現場での実地試験に向けた更なる準備を進めていますが、敷地大学院生が中心となって確立した本システムの要素技術を叩き台とし、先行して久保田大学院生による自動検査アプリへの展開に成功しています(図7)。具体的には、CNTイメージセンサによるCT計測システムにおいて、MMW-IR照射下での代表的な各種非金属材料の基礎光学特性をデータベースとして組み込み、断面像のリアルタイムな取得過程において異物混入箇所へのアラートを発する仕様となっております。MMW-IR照射は波長毎に固有の材質同定性を有する点からも、基礎光学特性データベースの継続的な拡充は、将来的な大規模機械学習との高い親和性を本システムにもたらしめます。総括として、独自の材料・デバイス・CV技術に立脚した李助教らの一貫通貫した取り組みは、持続的な社会循環に向けて非破壊検査分野の裾野を広げる位置付けを占めています(図8)。

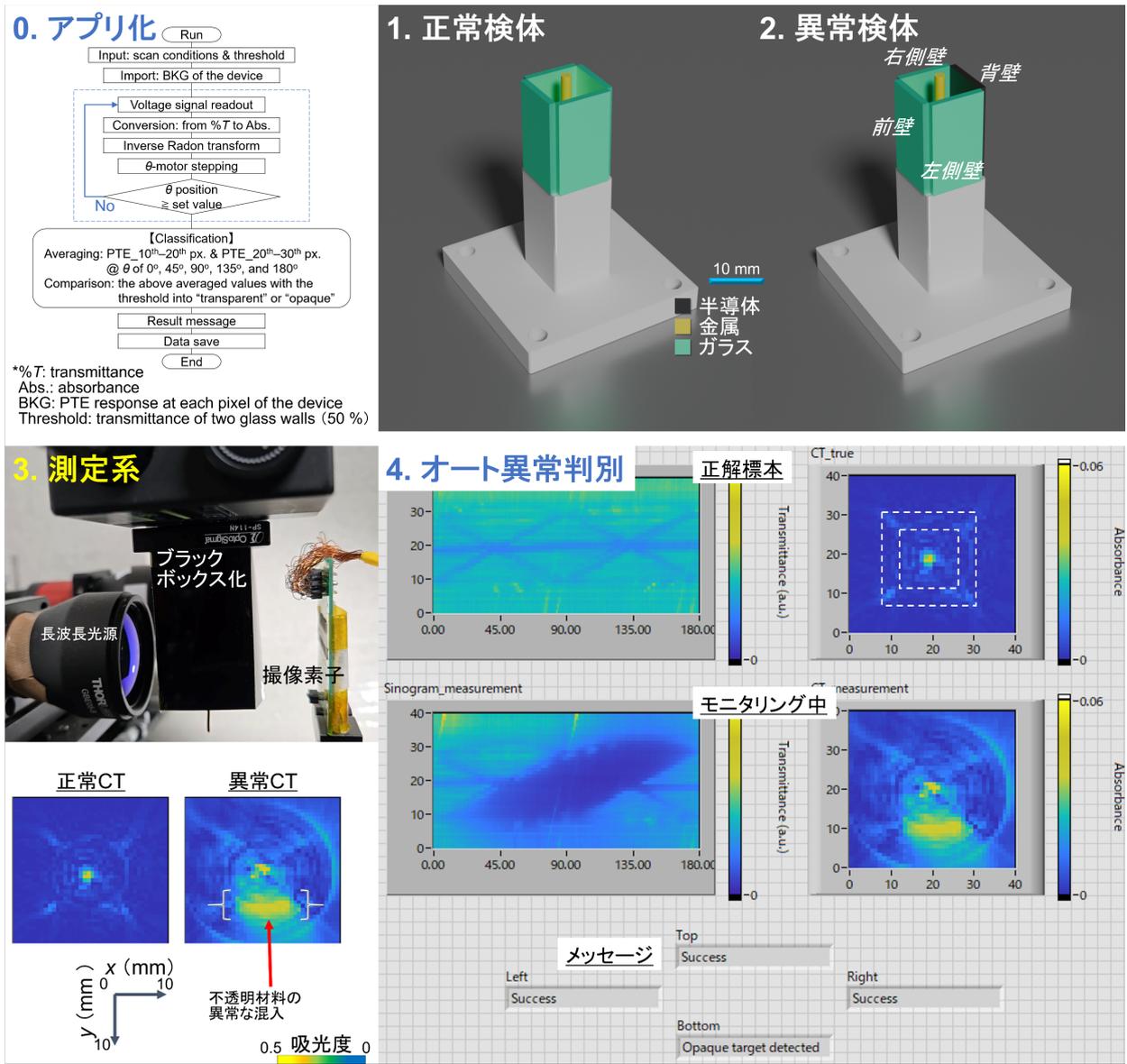


図7 本研究を基に久保田大学院生・敷地大学院生が中心となり開発した自動異物検査アプリ



図8 本成果を含めた李助教らのグループでの研究ロードマップ

3. 今後の展開

本研究成果を基に当グループでは、先述のCNTイメージセンサへの更なる高解像度化に加え、① LiDAR (Light Detection And Ranging : 光測距) 等に代表される反射光学系とのハイブリッド化、② 生体材料評価に特化する光音響モニタリングへの拡張検討、③ ベルトコンベア式のモノづくり現場のみでなく撮像素子によるソフトシート構造を活かしたモータ/タービン/エンジン内へのシステム組み込み検討、に取り組めます。これらの取り組みを通じて、将来的には10年以内を目途に、「操作員・動作環境・観察対象の全てにフレンドリー」なユビキタス非破壊検査システムプラットフォームとしての展開をゴールに掲げて、更なる研究を進めていきます。

【参考文献】

1. K. Li, Y. Kinoshita, D. Sakai, Y. Kawano, Recent Progress in Development of Carbon-Nanotube-Based Photo-Thermoelectric Sensors and Their Applications in Ubiquitous Non-Destructive Inspections, *Micromachines* **14**, 1, 61, 2023. DOI: [10.3390/mi14010061](https://doi.org/10.3390/mi14010061)
2. T. Araki, K. Li, D. Suzuki, T. Abe, R. Kawabata, T. Uemura, S. Izumi, S. Tsuruta, N. Terasaki, Y. Kawano, T. Sekitani, Broadband Photodetectors and Imagers in Stretchable Electronics Packaging, *Advanced Materials* **36**, 20, 2304048, 2024. DOI: [10.1002/adma.202304048](https://doi.org/10.1002/adma.202304048)
3. M. Nakatani, S. Fukamachi, P.S. Fernández, S. Honda, K. Kawahara, Y. Tsuji, Y. Sumiya, M. Kuroki, K. Li, Q. Liu, Y.C. Lin, A. Uchida, S. Oyama, H.G. Ji, K. Okada, K. Suenaga, Y. Kawano, K. Yoshizawa, A. Yasui, H. Ago, Ready-to-transfer two-dimensional materials using tunable adhesive force tapes, *Nature Electronics* **7**, 2, 119–130, 2024. DOI: [10.1038/s41928-024-01121-3](https://doi.org/10.1038/s41928-024-01121-3)
4. K. Li, Y. Kinoshita, D. Shikichi, M. Kubota, N. Takahashi, Q. Zhang, R. Koshimizu, R. Tadenuma, M.

- Yamamoto, L. Takai, Z. Zhou, I. Sato, Y. Kawano, Simple Non-Destructive and 3D Multi-Layer Visual Hull Reconstruction with an Ultrabroadband Carbon Nanotubes Photo-Imager, *Advanced Optical Materials* **12**, 14, 2302847, 2024. DOI: [10.1002/adom.202302847](https://doi.org/10.1002/adom.202302847)
5. D. Suzuki, K. Li, K. Ishibashi, Y. Kawano, A Terahertz Video Camera Patch Sheet with an Adjustable Design based on Self-Aligned, 2D, Suspended Sensor Array Patterning, *Advanced Functional Materials* **31**, 14, 2008931, 2021. DOI: [10.1002/adfm.202008931](https://doi.org/10.1002/adfm.202008931)
 6. K. Li, 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. DOI: [10.1038/s41467-021-23089-w](https://doi.org/10.1038/s41467-021-23089-w)
 7. K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Marteiijn, J.M.J. den Toonder, T. Sekitani, Y. Kawano, Stretchable broadband photo-sensor sheets for nonsampling, source-free, and label-free chemical monitoring by simple deformable wrapping, *Science Advances* **8**, 19, eabm4349, 2022. DOI: [10.1126/sciadv.abm4349](https://doi.org/10.1126/sciadv.abm4349)
 8. K. Li, 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. DOI: [10.1002/adpr.202000095](https://doi.org/10.1002/adpr.202000095)
 9. R. Kawabata, K. Li, T. Araki, M. Akiyama, K. Sugimachi, N. Matsuoka, N. Takahashi, D. Sakai, Y. Matsuzaki, R. Koshimizu, M. Yamamoto, L. Takai, R. Odawara, T. Abe, S. Izumi, N. Kurihira, T. Uemura, Y. Kawano, T. Sekitani, *Advanced Materials* **36**, 15, 2309864, 2024. DOI: [10.1002/adma.202309864](https://doi.org/10.1002/adma.202309864)
 10. K. Li, Y. Mastuzaki, S. Takahara, D. Sakai, Y. Aoshima, N. Takahashi, M. Yamamoto, Y. Kawano, All-Screen-Coatable Photo-Thermoelectric Imagers for Physical and Thermal Durability Enhancement, *Advanced Materials Interfaces* **10**, 35, 2300528, 2023. DOI: [10.1002/admi.202300528](https://doi.org/10.1002/admi.202300528)
 11. 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. DOI: [10.1002/adsr.202400159](https://doi.org/10.1002/adsr.202400159)
 12. 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*, Early View, 2400448, 2025. DOI: [10.1002/smsc.202400448](https://doi.org/10.1002/smsc.202400448)

【謝辞】

本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 ACT-X (JPMJAX23KL)、同 未来社会創造事業 (JPMJMI23G1)、日本学術振興会 科学研究費助成事業 (研究活動スタート支援 (JP23K19125)、同 若手研究 (JP24K17325) 基盤研究 A (JP23H00169)、同 基盤研究 B (JP22H01553、JP22H01555、JP24K01288)、同 学術変革領域研究 A (JP20H05953、JP22H05470))、服部報公会、精密測定技術振興財団、栢森情報科学振興財団、スズキ財団、双葉電子記念財団、電気通信普及

財団、東電記念財団、住友電工グループ社会貢献基金、岩谷直治記念財団、コニカミノルタ画像科学奨励賞・優秀賞、フジシール財団、パロマ環境技術開発財団、タカノ農芸化学研究助成財団、イオン工学振興財団、機械システム振興協会、島津科学技術振興財団、八洲環境技術振興財団、徳山科学技術振興財団、パワーアカデミー、神奈川県立産業技術総合研究所等からの事業の一環として援助を受け、並びに日本ゼオン株式会社からの試料提供の下に実施されました。

【お問い合わせ先】

<研究に関すること>

李 恒 (リ コウ)

中央大学理工学部 助教 (電気電子情報通信工学科)

TEL : 03-3817-1860

E-mail: li@elect.chuo-u.ac.jp

<広報に関すること>

中央大学 研究支援室

TEL : 03-3817-7423 または 1675 FAX : 03-3817-1677

E-mail: kkouhou-grp@g.chuo-u.ac.jp

国立情報学研究所 総務部企画課広報チーム

TEL : 03-4212-2164

E-mail: media@nii.ac.jp