

医薬品製造過程での即時不良品検知に向けた広帯域多波長 オンライン撮像システムの創製

所属： 中央大学 理工学部 電気電子情報通信工学科

助成対象者： 李 恒

共同研究者：

概要

本研究では、報告者が独自に培ったシート型の光イメージセンサシートを活用して、医薬品の製造現場へ直接的に組み込み可能な非破壊モニタリング検査システムを創出した。センサシートは日本発の先端材料：カーボンナノチューブ（CNT）から成り、イメージングの対象としては眼には見えない光：テラヘルツ・赤外（THz・IR）を対象としている。また本システムでは工場内での大量生産を模したベルトコンベア状の搬送ラインにおいて、本来の左記環境における動作を妨げることなく、特に錠剤試料への接触や分解を介することなく、医薬成分の取り違えや異物に対する材質同定といった検査情報をリアルタイムに提供する。

abstract

While non-destructive in-line monitoring at manufacturing sites is essential for safe distribution cycles of pharmaceuticals, efforts are still insufficient to develop analytical systems for detailed dynamic visualization of foreign substances and material composition in target pills. Although spectroscopies, expected towards pharma testing, have faced technical challenges in in-line

setups for bulky equipment housing, this work demonstrates compact dynamic photo-monitoring systems by selectively extracting informative irradiation-wavelengths from comprehensive optical references of target pills. This work develops a non-destructive in-line dynamic inspection system for pharma agent pills with carbon nanotube (CNT) photo-thermoelectric imagers and the associated ultrabroadband sub-terahertz (THz)-infrared (IR) multi-wavelength monitoring. The CNT imager in the proposed system functions in ultrabroadband regions over existing sensors, facilitating multi-wavelength photo-monitoring against external sub-THz-IR-irradiation. Under recent advances in the investigation of functional optical materials (e.g., gallium arsenide, vanadium oxide, graphene, polymers, transition metal dichalcogenides), CNTs play advantageous leading roles in collectively satisfying informative efficient photo-absorption and solution-processable configurations for printable device fabrication into freely attachable thin-film imagers in pharma monitoring sites. The above non-destructive dynamic monitoring system maintains in-line experimental setups by integrating the functional thin-film imager sheets and compact multiple photo-sources. Furthermore, permeable sub-THz-IR-irradiation, which provides different transmittance values specific to non-metallic materials per wavelength or composition, identifies constituent materials for pharma agents themselves and concealed foreign substances in a non-contact manner. This work finally inspects invisible detailed features of pharma pills with the non-destructive in-line dynamic photo-monitoring system by incorporating performances of CNT imagers and compact optical setups.

研究内容

[背景]

医薬品への全数検査を実現するためには、検査システムの創薬環境への実装（図 1）が重要となる。ベルトコンベア状の搬送ラインにより創薬環境は組まれ、省スペースな検査網が鍵となる。

具体的な検査方法としては非接触な透視が挙げられる中、創薬現場の安全を保つべく、従来の透視計測における主役：X線撮像へ依存しないシステムが求められる。検査項目としては錠剤内での医薬成分に対する取り違え検知に加えて、混入した異物への材質同定が重要視され

る。異物の材質同定というコンセプトは、創薬の欠陥源を突き止めることに繋がる（図 2）。

[目的]

上記を踏まえた本研究の目的は、本来の創薬現場への実装が可能な超広帯域 THz-IR インライン撮像検査システムを確立することである。X線に代わる存在として THz-IR が挙げられ、同帯域の広帯域かつ多波長な計測は非侵襲な材質同定に資する。中でも多波長な計測ツールとして分光装置が挙げられ、創薬に伴う抜き取り検査へと活用されている。一方で分光装置は巨躯・複雑な装置構成から創薬現場へのインライン実装は困難であり、社会に求められる「医薬品の流通前段階での全数検査」には不適切である（図 3）。よって本研究は、分光機能のシートへの集約とインライン検査を目的とする。

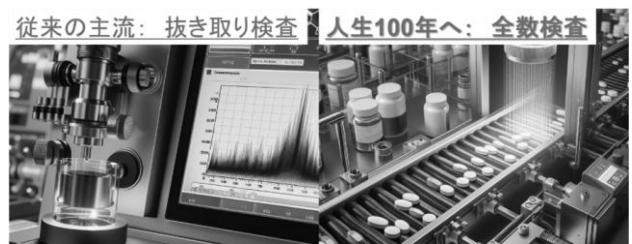


図 1 医薬品検査における目標像

項目	要求性能	例
観察対象	医薬製品に対する外形および内部の情報	X線照射を用いない透視形式のイメージング計測
観察方法	非破壊、非接触、かつ非侵襲（現場では無被爆）で、錠剤全体の大面積な情報源	
装置構成	連結ベルトコンベアから成る本来の創薬工程・環境を妨げないコンパクトタイプ	シールの様な貼り付け型
検査規模	創薬速度に並ぶスピードで全錠剤を対象	3 mm/s超の走査速度

図 2 具体的な検査項目

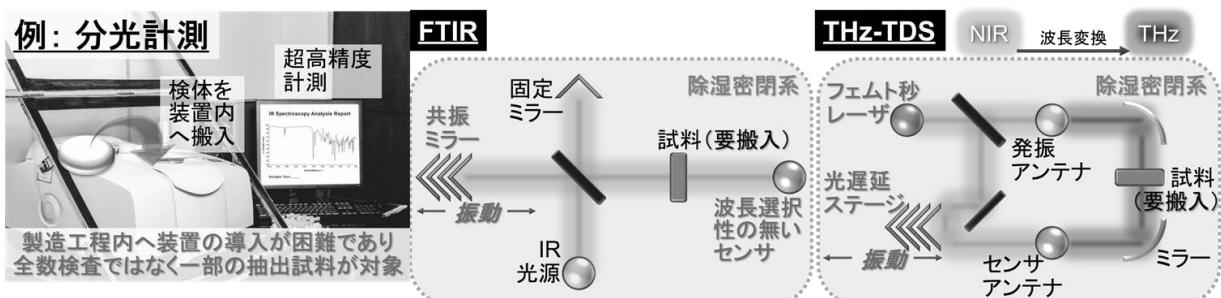


図 3 従来の抜き取り医薬品検査における主役：分光計測

[結果]

具体的に報告者は、超広帯域・超高感度 THz-IR 計測に特化する独自の CNT 型センサシートを用いて、コンパクトな非破壊撮像システムを確立した（図 4）。システムは紙の様なセンサシート、および THz から IR にかけての掌大の単波長小型光源のみから成り、ベルトコンベア状の創薬・錠剤搬送ラインを妨げることなく、非破壊透視画像を即時に提供する。上記の強みを実現する要因は、CNT 型センサシートの操作性に加え、材質同定に向けて特定波長の光を抽出するという着眼点である。医薬成分の分光データベースは広く普及しており、成分の特徴と紐付く光波長を選択し、CNT 型センサにより検査情報をシートへ集約することで、インライン化に繋がる。

本システムにより報告者は、非破壊かつリアルタイムな Live 形式での成分同定・異物材質同定を、オンライン搬送される医薬錠剤試料に対して実現した（図 4）。錠剤内に隠れた眼に見えない欠陥を可視化するだけでなく、光信号の機械学習を通じ、オンライン搬送中の錠剤に対する自動的な状態判別アプリへ展開している。これらは、社会実装への試金石と言える。検査精度では、従来の分光に対して本システムは誤差を 5 %以内へ抑制し、本成果でのオンライン化の優位性が窺える。

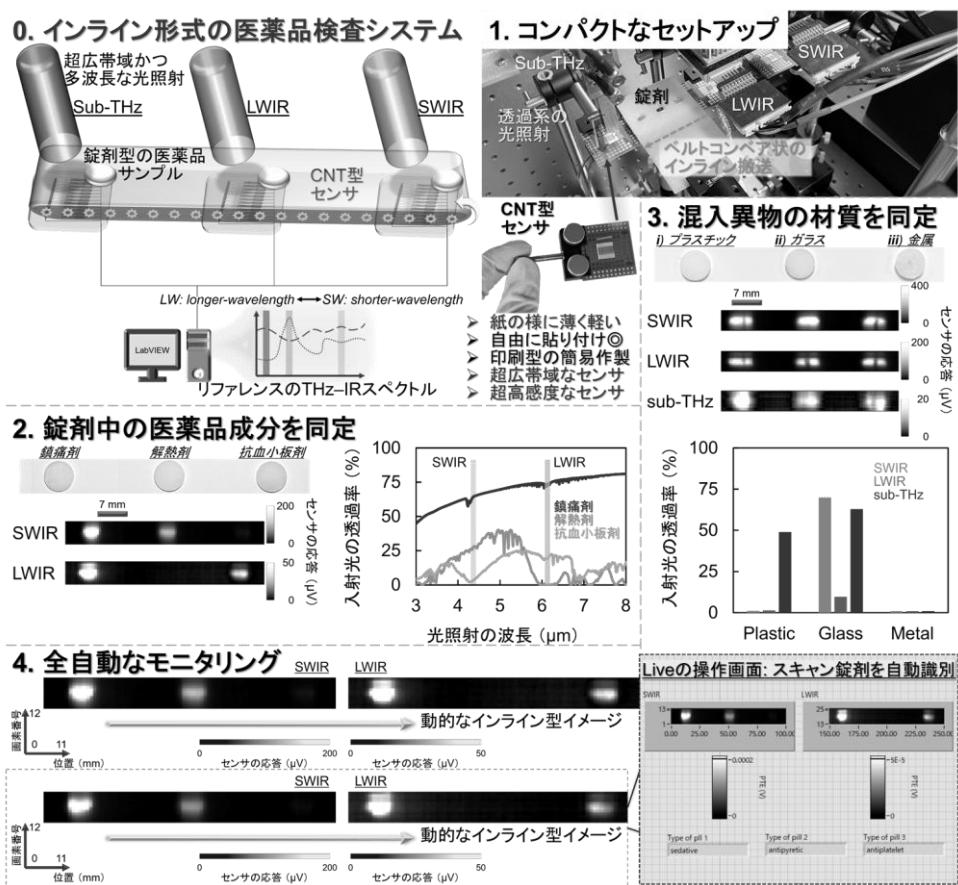


図 4 本成果における報告者の主な達成事項

本助成に関わる成果物

[論文発表]

- M. Yamamoto, K. Li* (*責任著者 / 最終著者), *et al.* Mechanically alignable and all-dispenser-printable device design platform for carbon nanotube-based soft-deformable photo-thermoelectric broadband imager sheets, *npj Flex. Electron.* **9**, 42, 2025 (IF: 13).
- 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 2*, 1, 115-125, 2025 (selected as Back cover).
- 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 (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).

[口頭発表] 他, 3 件

- ・李 恒, 松崎 勇斗, 山本 みな美, 高井 恵於, 昆 裕樹仁, 河野 行雄, カーボンナノチューブ・ビスマス化合物によるハイブリッド光学センサ, 第 72 回 応用物理学会春季学術講演会 (2025 年 3 月・千葉).
- ・李 恒, 敷地 大樹, 久保田 実樹, 河野 行雄, ナノカーボン型ミリ波-赤外イメージャーによる視体積交差タイプ非破壊検査実証, 第 42 回 レーザセンシングシンポジウム (2024 年 9 月・大阪).

[ポスター発表] 他, 31 件

- ・K. Li, D. Shikichi, M. Yamamoto, M. Kubota, Y. Matsuzaki, L. Takai, Y. Kawano, Concentration tuning of carbon nanotube inks for computer vision testing, The 68th Fullerenes-Nanotube-Graphene General Symposium (Mar., 2025, Nagoya).
- ・李 恒, 高橋 典華, 戸上 義章, 河野 行雄, 光熱電カーボンナノチューブの組成制御によるハイブリッド熱型センサの創出, 第 21 回 日本熱電学会 (2024 年 9 月・筑波).
- ・K. Li, Y. Matsuzaki, R. Tadenuma, Y. Aoshima, M. Yamamoto, L. Takai, N. Takahashi, Y. Kawano, Paste-like carbon nanotube-inorganic hybrid photo-thermoelectric sensors, The 67th Fullerenes-Nanotube-Graphene General Symposium (Sep., 2024, Kochi).
- ・K. Li, D. Shikichi, Y. Matsuzaki, M. Kubota, L. Takai, R. Odawara, Q. Zhang, M. Yamamoto, A. Sano, Y. Kawano, All-screen-coatable photo-thermoelectric patch imagers for computer vision-driven ultrabroadband on-site non-destructive testing, 第 7 回 フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクス研究会 (2024 年 5 月・大阪).

[その他]

- ・第 17 回 廣野賞 (2024 年) ※レーザ研究分野で年間 1 名選出
- ・9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics The Best Young Scientist Poster Presentation Award ※指導学生の受賞 (報告者は責任著者 兼 最終著者)
- ・The 40th International Conference on Thermoelectrics Outstanding Poster Prize ※指導学生の受賞 (報告者は責任著者 兼 最終著者)
- ・2024 年度 日本写真学会年次大会 学生優秀ポスター発表賞 ※指導学生の受賞 (報告者は責任著者 兼 最終著者)
- ・専門書籍の分担執筆 : 4 報