

革新的インダストリアルマルチスケールセンサプロジェクト

プロジェクトリーダー 河野 行雄

【基本構想】

近年、対象を破壊せずに検査を行う非接触・非破壊検査の重要性が増しており、その市場は年々拡大している。対象物を画像化する検査手法は、視覚的に分かりやすい形で詳細な情報を得ることが可能であるため、様々な場面での活用が期待されている。特に、光を用いた分光画像計測はその代表例の一つである。一方、実際の検査対象は微細なものから大型のものまで多岐にわたり、これらをマルチスケールで可視化する必要があるが、統合的な分析は依然として困難である。革新的インダストリアルマルチスケールセンサプロジェクトでは、「新たな材料・構造体による光の自由度制御とマルチスケール光分析」というコンセプトのもと、新奇なセンサの構造や原理を探索し、非破壊画像検査の機能および適用範囲の拡張を行う。この目的を達成するために、材料や構造体の光・電子物性の研究から出発し、光の機能を最大限に引き出す技術の開発を行っている。その成果として、様々なスケールの対象物に対して分光画像分析が可能なシステムの提供を目指している。

1. 研究目的

検査対象を壊さずに画像化する非破壊画像検査の実現に向けて、当研究室では広帯域光センサ[1-10]の高性能化、マルチスケール計測化[11-13]を行っている(図1に微小領域計測用周波数可変アンテナの例[12])。これらのセンシング技術をより高度化し、広範囲なスケールで分析可能な技術の創出を行う。2025年度では、マルチスケール計測用の光制御素子ならびに分光画像分析・解析手法の開発、マルチスケール計測に必須の材料加工・表面観察体制の構築を実施した。

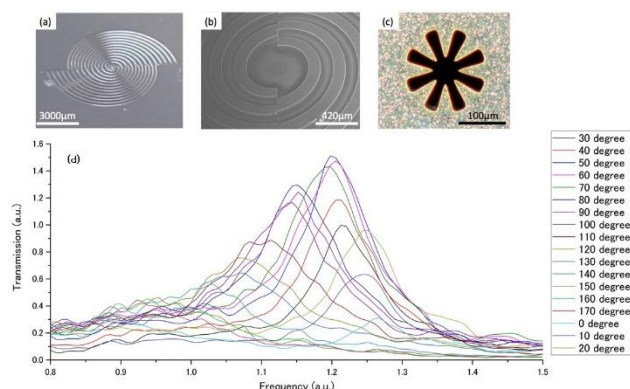


図1: (a) 周波数可変の非円形プラズモニック構造体の写真。(b) (a) の一部の拡大画像。(c) (b) の一部の拡大画像。(d) 入射テラヘルツ波の偏光方向を変えた場合の (a) の透過スペクトル[12]。

2. 研究成果

マルチスケール計測分析を実現するためには、複数分野に属する研究者の連携が重要となる。情報解析は大川研究員、分光分析は佐世研究員、材料作製・評価は秋本研究員が中心になって実施し、有機的に連携しながら研究を進めた。以下、主な成果について説明する。

① 電磁波の自由度に応じた素子の開発

照射電磁波の波長域や電界振動の特徴に応じた素子開発を行った。材料の物性と構造の両面から検討を行い、電磁界シミュレーションと実験による性能評価を実施した。波長域ごとの特異的な電磁波応答を見出し、その特徴にもとづく素子設計が可能となった。これにより、膜の材質、薄膜の表裏、吸着分子、膜サイズ・形状等による自在な制御を明らかにした。

今後は、分析システムの中で必要とされるスペックをもとに、素子を最適化し、一コンポーネントとして導入することで高性能化する予定である。

② センシングの多機能化に向けた分光画像分析・解析手法の開発

検査対象を構成する材料に関して特徴量を抽出するため、異種のセンシング信号を取得する研究を実施した。特に多成分系の場合、成分ごとの相互作用を考慮する必要がある。光学情報と、光以外の情報との相関から、上記の相

相互作用に関する影響を引き出すことが可能となった。これは、より複雑な構成による対象物に対しても複数種類の情報を取得可能なシステムの構築につながる可能性を示している。現在、上記の成果に基づく具体的な分析器の設計・試作・評価を行っている（図2）。

また、電磁波の新たな計測・方法として空間情報復元手法を開発した。前年度開発した手法と組み合わせ、よりロバストな手法を目指す。

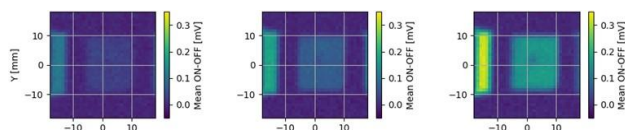


図2：試作した分析器による画像計測の例。

③ 材料加工・観察体制の構築

本プロジェクトでは、マルチスケールでの分析を主眼としているため、観測対象の試料、測定のための素子・光学部品などについて、様々なサイズの材料を加工し、状態を観察することが必須となる。このため、研究所内の技術部と連携し、所内にある設備（図3、レーザー加工機やレーザー顕微鏡等）を活用させていただくことで、材料・素子の一貫した評価が可能となった。これにより、作製や性能評価のスピードが格段に上がり、研究全体の加速につながった。現在さらに高周波測定や微細加工等での活用も検討しており、マルチスケール計測の範囲を広げる。

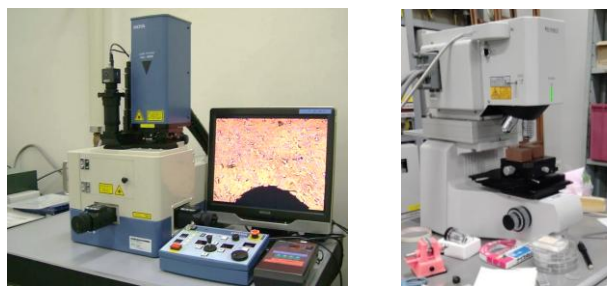


図3：本プロジェクトにおいて活用している、研究所内技術部のレーザー加工機（左）とレーザー顕微鏡（右）。

上記の通り、各研究項目とも順調に進んでおり、成果発表も積極的に行っているため、引き続き、それぞれの研究を進める。

来年度は、用途に応じたマルチスケール計測の分析器を試作し、性能を評価する。

【参考文献】

1. D. Suzuki, S. Oda, Y. Kawano, *Nature Photonics* **10**, 809 (2016).
2. D. Suzuki, Y. Ochiai, Y. Nakagawa, Y. Kuwahara, T. Saito, and Y. Kawano, *ACS Applied Nano Materials* **1**, 2469 (2018).
3. D. Suzuki and Y. Kawano, *Carbon* **162**, 13 (2020).
4. D. Suzuki, K. Li, K. Ishibashi, Y. Kawano, *Advanced Functional Materials* **31**, 2008931 (2021).
5. K. Li, R. Yuasa, R. Utaki, M. Sun, Y. Tokumoto, D. Suzuki, and Y. Kawano, *Nature Communications* **12**, 3009 (2021).
6. K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Marteiijn, J.D. Toonder, T. Sekitani, Y. Kawano, *Science Advances* **8**, eabm4349 (2022).
7. K. Li, Y. Matsuzaki, S. Takahara, D. Sakai, Y. Aoshima, N. Takahashi, M. Yamamoto, and Y. Kawano, *Advanced Materials Interfaces* **10**, 2300528 (2023).
8. Rei Kawabata, Kou Li, Teppei Araki, Mihoko Akiyama, Kaho Sugimachi, Nozomi Matsuoka, Norika Takahashi, Daiki Sakai, Yuto Matsuzaki, Ryo Koshimizu, Minami Yamamoto, Leo Takai, Ryoga Odawara, Takaaki Abe, Shintaro Izumi, Naoko Kurihira, Takafumi Uemura, Yukio Kawano, Tsuyoshi Sekitani, *Advanced Materials* **36**, 2309864 (2024).
9. K. Li, Y. Kinoshita D. Shikichi, M. Kubota, N. Takahashi, Q. Zhang, R. Koshimizu, R. Tadenuma, M. Yamamoto, L. Takai, Z. Zhou, I. Sato, and Y. Kawano, *Advanced Optical Materials* **12**, 2302847 (2024).
10. Minami Yamamoto, Daiki Sakai, Yuto Matsuzaki, Leo Takai, Yukito Kon, Yuto Aoshima, Noa Izumi, Naoko Hagiwara, Hayato Hamashima, Daiki Shikichi, Junyu Jin, Qi Zhang, Kohei Murakami, Yuya Kinoshita, Satsuki Yasui, Norika Takahashi, Hajime Nishiyama, Yukio Kawano, Kou Li, *npj Flexible Electronics* **9**, Article number: 42 (2025).
11. T. Iguchi, T. Sugaya, and Y. Kawano, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 151105 (2017).
12. X. Deng, L. Li, M. Enomoto, and Y. Kawano, *Scientific*

Reports **9**, 3498 (2019).

13. X. Deng, S. Oda, Y. Kawano, *Optical Engineering* **62**, 097102 (2023).

GHz 帯分光における干渉抑制手法と 材料表面状態識別への応用

「革新的インダストリアルマルチスケールセンサ」プロジェクト
大川 拓樹

1. はじめに

本プロジェクトでは、GHz スペクトルの分光情報を活用することで材料の表面状態変化の有無を識別する手法を着想してきた。

前年度までの取り組みとして、GHz 帯の反射測定に不可欠な光学系内部反射に起因する干渉歪みに対して、サンプル距離を微小変化させながら多点データを取得し、数値モデルに基づいてサンプル固有の反射成分のみを抽出する干渉除去手法を開発し、特許出願を行った。

本年度は、この干渉除去手法を実測データによって検証するとともに、無処理と酸化処理の金属を対象として表面状態の識別精度向上への応用を検討した。均質な樹脂サンプルを用いた定量評価、および金属サンプルへのイメージング応用を通じて、手法の妥当性と実用的な識別への有効性を確認した。

2. 実験と結果

(1) 実験系

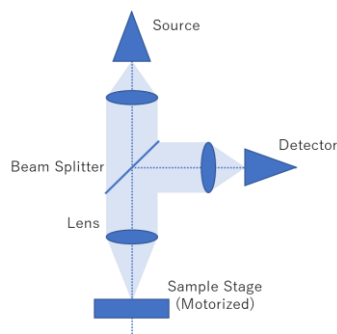


図1 光学系の概要

図1に使用した光学系を示す。ビームスプリッター・集光レンズ・電動ステージを備えた反射型垂直入射構成とし、GHz 帯電磁波源からの出力をサンプル上に集光して反射波を検出する。

干渉除去手法の適用にあたっては、サンプル-検出器間距離をステージで微小変化させながら各距離での反射スペクトルを連続取得する（インターフェログラム測定と同

様の手順）。取得した多点データと前年度に構築した干渉モデルを照合することで、光学系内部反射成分を分離し、サンプル固有の反射スペクトルを算出した。

(2) 干渉抑制手法の検証

手法の定量的な妥当性評価を目的として、まず均質な樹脂サンプルを用いた検証を行った。厚さの異なる複数の板を測定し、反射吸収スペクトルを取得した。

図2に測定結果を示す。提案法を適用したスペクトルでは、サンプル膜厚に起因する等間隔のフリンジ（干渉縞）が顕在化した。このフリンジの周波数間隔から、屈折率を逆算した。

各厚さのサンプルから求めた屈折率は、3 試料間で良好な一致が得られた。また、サンプルの可視域屈折率とも整合しており、提案する干渉除去・フリンジ解析手法がGHz 帯域においても光学的屈折率の定量評価に活用できることが実証された。

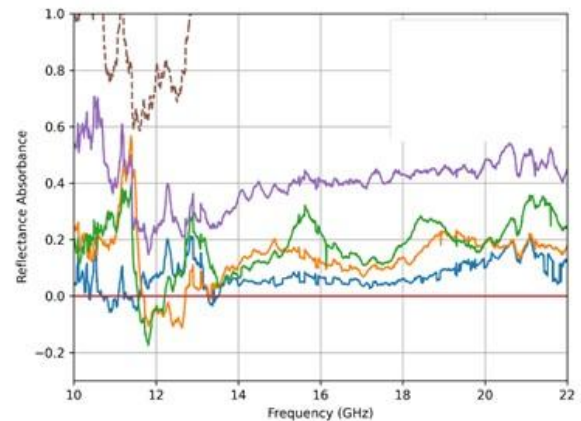


図2 樹脂サンプルの反射吸収スペクトル

(3) 表面状態変化の識別評価

次に、実際の金属サンプルを用いた識別実験を行った。無処理および酸化処理の反射スペクトルを、従来法（サンプル-検出器間距離固定）と提案法のそれぞれで取得し、比較した。

従来法では、光学系内部反射の強い条件下において全サンプルのスペクトル間に有意な差が認められず、電磁波

吸収体のスペクトルも他サンプルと同程度の強度を示した。これは干渉成分がサンプル固有の反射情報を埋没させていることを示している。

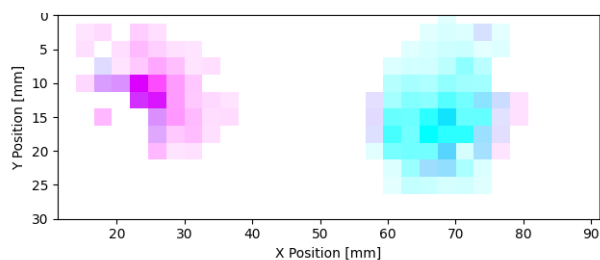


図3 スペクトル分離を用いた表面処理の有無の識別マップ

一方、提案法では吸収体のスペクトルが原理的にゼロ近傍に抑えられるとともに、無処理・酸化処理の間のスペクトル差異が明確に顕在化することが分かった。この結果は、不要反射成分の除去によってサンプル固有の反射特性が正確に抽出されたことを示す。

さらに、取得した反射スペクトルを基に、各材料の代表スペクトルとの差分を用いて、XY スキャン画像の各ピクセルに適用することで GHz 分光マッピングを実施した。結果として、無処理と処理領域が空間的に分離された識別マップが得られ（図3）、分光イメージングによる材料識別の有効性が実証された。

3. 考察および今後の展望

本年度の取り組みにより、前年度に提案した干渉除去手法の実験的妥当性が均質樹脂サンプルおよび実金属サンプルの双方で確認された。特に、提案法によって取得したスペクトルが既知の光学定数と整合したことは、本手法が GHz 帯においても定量的な分光計測として機能することを示す重要な根拠となる。また、表面処理識別マッピングの実現は、将来的な金属の品質診断イメージングへの道を開くものである。

今後は、識別アルゴリズムの高度化により、識別精度のさらなる向上に取り組む。これにより、材料の健全性診断を、客観的なスペクトルデータに基づく定量評価へと転換する検査技術の確立を目指す。

【参考文献】

- [1] 大川拓樹ほか, P11, 日本金属学会 2023 年秋期大会 (前々年度実績)
- [2] 大川拓樹ほか, GHz 帯域反射分光における干渉抑制手法と金属表面状態識別への応用, 日本金属学会 2025 年春期大会
- [3] ITU-R, Recommendation P.2040-1 (2015)
- [4] Yan, M. et al., J Mater Sci: Mater Electron, 29, 20260-20270 (2018)

分光法を利用した食品の品質評価に関する研究

「革新的インダストリアルマルチスケールセンサ」プロジェクト

佐世 美帆

1. はじめに

本プロジェクトでは、マルチスケールで対象物の検査が可能な検査システムの開発を進めている。柔軟でマルチスケールな計測特性を食品の品質評価に活かす技術の構築を目的として、2025年度に取り組んだ主な研究を二つ報告する。

一つ目は、農作物の非破壊的な腐敗検出に関する研究である。農作物の腐敗は、耕作・貯蔵・流通などの各過程においてリスクがあり、その検出技術には需要がある。このような、生体試料の内部情報を観測するアプローチとして、近年は、近赤外領域の応用研究が盛んである。実際に、果実の糖度計測や魚の脂質量検査では実用化が進んでいるが、これは、近赤外領域の光が適度に果実や魚などの生体を透過し、対象物の吸収特性を解析することが可能な波長域であるためである。

農作物の腐敗検出における課題は、いかに腐敗初期の局所的な変化を検出するかという点にある。従来の近赤外光を利用したライン検査システムは、反射や透過光を検出するための光路が固定されている場合が多く、対象物のサイズや向きにばらつきによって検査精度が低下する問題が報告されている。そのため、腐敗検出では対象物の形状や、耕作・貯蔵・流通などの工程に合わせて柔軟に対応可能な光学系が求められている。

本研究では、光ファイバーのような柔軟な光源と、広帯域な受光特性とフレキシブルな性質を兼ね備える検出器を組み合わせた新たな評価系を構想し、研究を進めている。

二つ目の研究は、テラヘルツ分光法による食品評価に関する研究である。

食品の品質は、味・香り・食感といった感覚的な要素に加え、安全性・保存性・栄養価・鮮度などの機能的な要素によって総合的に決定される。これらの品質については、要素ごとに評価技術の研究が進められてきた。味については近年、味覚センサの研究が盛んに行われており、香りについてはガスクロマトグラフィーや質量分析を応用した評価が主流である。食感などの力学特性の評価にはテクスチャアナライザなどが用いられ、ミクロな構造状態は光学顕微鏡や電子顕微鏡・各種の光散乱計測

によって評価される。水と油・液体と固体・固体と気体の間の界面等は食品物性と密接に関係している。

このように、食品の品質評価には分子スケールからマクロスケールにわたる多角的な情報が必要となる。しかし、これらの手法はそれぞれ独立した原理に基づいており、いずれも専用の装置や試料調製を要する。

テラヘルツ領域は近年、計測技術の進展に伴い、物理・化学・生命科学など幅広い分野で注目されている。しかしながら、多成分系においては観測されるスペクトルの物理的帰属が困難な場合が多く、得られる分光情報が未だ十分に活用されていない。本研究では、食品のような多成分系に対して、テラヘルツ分光法の応用可能性を探索するため、さまざまな品質の試料についてテラヘルツ吸収スペクトルを収集し、統計的な解析を進めることで、その応用可能性を開拓することを目指している。

2. 光学測定による食品腐敗の識別

(1) 概要

食品の内部腐敗は早期に外観から判別することが難しく、腐敗を非破壊的に検出する手法として近赤外分光法が注目されている。先行研究では透過や反射光学系を用いることで腐敗を識別可能であることが報告されているが、対象物のサイズや向きに起因する精度の低下が課題とされている。本研究では、食品を多方向から計測することで局所的な腐敗を検出することを目的とし、複数の位置における光学特性を分析した。

(2) 実験

腐敗程度の異なる複数の食品を対象に、複数部位の試料を採取した。試料の近赤外域スペクトルを取得し、クラスタリング解析を行った。

クラスタリングでは、主成分において健常と腐敗が明瞭に分離された。腐敗クラスタ内では部位（上部・下部）によって傾向が分かれており、腐敗が上部から進行するという観察結果と整合する傾向があった。また、目視では健常と判定された食品の一部においても腐敗クラスタへの帰属が認められ、外観では検出できない初期の内部変化を捉えた可能性が示唆された。

さらに、健常試料と腐敗試料からサンプリングした組織片について、上記とは別の波長領域における光吸収ス

ペクトルの測定を行った。これにより、成分組成に関するより明確な情報を提供する。結果として、腐敗液中においてその原因となる成分の特定ができた。

これらの結果は、局所的な腐敗の検出に向けた多点光計測の有効性を示すとともに、光学スペクトルの情報を幅広く活用することで、総合的に把握できることを意味しており、マルチスケールセンシングの意義を示すものである。

3. テラヘルツ分光法による食品の成分組成および物性評価

(1) 概要

テラヘルツ分光法では、電場の時間波形から物質の複素誘電率（実部・虚部）や屈折率、吸収係数などの光学定数を導出できる。これにより、一般的な可視～近赤外の分光法と比べ、テラヘルツ分光法では多角的な情報の解釈を行うことができる。本研究では、成分比を系統的に変化させた食品モデル試料を用い、成分組成とスペクトル特徴量の関係を解析した。

(2) 実験

テラヘルツ分光を用いて、水、タンパク質、糖質、脂質の成分比を系統的に変化させた食品サンプルを測定・解析した。スペクトルの分析では、試料の成分組成に応じてスペクトルクラスターが分離されることを確認した。さらに、複素誘電率の実部と虚部はそれぞれ異なる特徴量を示すことから、複数の光学定数を組み合わせることで、成分評価の精度向上や分子の運動性に由来する物性推定の可能性も期待できる。

本研究は、以上の知見をもとに、食品の分野への応用研究をさらに深めていく予定である。

4. 今後の展望

対象物に特殊な前処理を施さない光計測は、客観的で条件依存性の低い評価手段となる。光は帯域によって物質への透過性が大きく異なり、得られる情報もユニークである。分光スペクトルから得られる情報をマルチスケールに活用することで、化学結合の振動特性から分子の運動性に至るまで、幅広い情報を統合した多角的な解釈を行うことができる。今後、多点計測システムの構築を進め、実用化を目指す。

【参考文献】

- 1.西野守ら, 農業情報研究 79, 254-262 (2017)
- 2.黒木信ら, Postharvest Biol. Technol. 128, 18-23 (2017)

3.H. Hoshina, Y. Iwasaki, E. Katahira, M. Okamoto, and C. Otani, Polymer, Volume 148, 49, 2018

4.曾根 良介, CSJ Current Review 42 赤外線の利用—近赤外からテラヘルツまで, 化学同人, 2021

5.斗内政吉, テラヘルツ時間領域分光 物質科学への応用, 内田老鶴圃, (2021)

6.佐世美帆ら, テラヘルツ分光法と多変量解析によるゲル状食品の成分評価, 第 74 回日本食品科学工学会 関東支部大会, 2026 年 2 月

マルチスケールセンサの高度化に向けた 構造制御および高精度加工技術の開発

「革新的インダストリアルマルチスケールセンサ」プロジェクト

秋本 沙織

1. はじめに

現代社会において、産業製品を構成する微小な部品から、巨大な建造物に至るまで、安全確保や品質管理を目的とした検査技術の重要性が年々高まっている。これら多岐にわたる対象物を効果的に診断するためには、検査部位のスケールや複雑な形状に依存しない高い配置自由度を持ち、狙った領域を的確に網羅できる「空間的なマルチスケール計測」の実現が不可欠である。

以上を背景として、本プロジェクトでは、波長帯を超えた複合的なアプローチを可能とし、あらゆる検査ニーズに柔軟に対応する、革新的なマルチスケールセンサの開発を進めている。以前に開発したマクロ[1,2]からミクロ[3]にわたるセンシング技術をもとに、さらに、小さなものから大きなものまで対象のサイズや形状に合わせて曲面や複雑な構造体へ自由自在にセンサを配置することで、あらゆるスケールと環境に対応した、マルチスケールな非破壊診断を可能とする。

このマルチスケールセンサの実証には、多様な作製手法や成膜・塗布条件による特性変化を正確に評価するための、高品質かつ形状制御されたサンプルの安定作製技術が不可欠である。そこで今年度は、このセンサ作製の基盤となる材料薄膜・素子パターンの品質安定化、材料特性の解明、およびマスキングやレーザーアブレーションによるパターン加工技術の開発を実施した。本報告では、主に成膜条件がセンサ集積構造に与える影響の解明から、デバイス化に向けた形状加工プロセスの検討、および作製サンプルを用いたセンサ動作の基礎検証に至る一連の成果について述べる。

2. 実験と結果

(1) プロセス最適化と膜厚の一意制御技術の確立

前述の新拠点への成膜技術の完全な移転に伴い、まずは基盤となる成膜技術の最適化と安定化を目的として検証を行った。将来的な吸収特性や電気的特性といった比較評価を行うためには、作製再現性を高める必要がある。しかし、従来は成膜プロセスに関する詳細な検討が不十分であった。

今年度は、成膜プロセスによる物性変化を検証、最適化を試みた。品質検証として膜厚測定を実施した結果、図1に示す通り原材料の液量と実際の膜厚の間に極めて良好な線形性（正の相関）を確認した。これにより任意のターゲット膜厚を持つ薄膜を高い再現性で安定作製できる技術基盤を確立した。その結果、形状変化に伴う特性評価を正しく行うための、再現性の高い比較用サンプルの調製が可能となった。

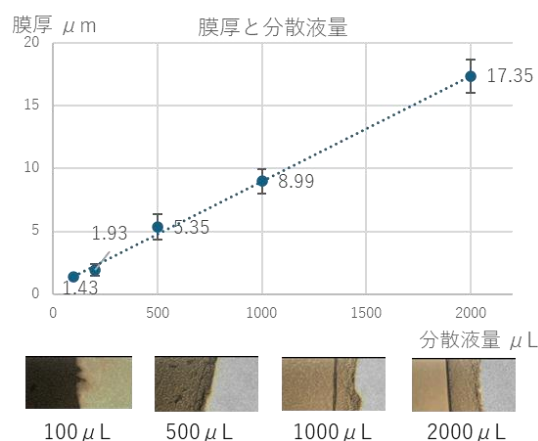


図1 超深度形状測定顕微鏡による膜厚の液量依存性および測定試料外観

(2) 光学測定による薄膜の集積構造および配向特性の評価

成膜時において、基材の材質や、その「表面」と「裏面」のどちらに成膜するかによって、完成した薄膜の表面光沢（外観）に顕著な差異が認められた。この目視レベルでの外観差（集積構造の違い）を解明するため、光

学測定装置を用いて、多角的な構造評価を実施した。その結果、下地材質や成膜面の組み合わせによって、センサの集積構造が変化することを突き止めた。なかでも特定の偏光条件で顕著な光吸収挙動（強度の変化）が観察されたことから、薄膜の極表層における分子や官能基等が、成膜条件に応じて特徴的な配向性を持つ可能性を明らかにした。一方、下地自体が持つミクロな不均一性（異方性）が、材料の配向挙動に影響を与える挙動も確認された。これらの知見により、成膜面や評価面の選定次第で薄膜の構造状態を制御・使い分けられるプロセス下地を構築した。

(3) デバイス化に向けた形状加工プロセスの検討

マルチスケールセンサとしての機能性をさらに引き出すため、マスキングやレーザーアブレーション技術を用いた、薄膜の精密なパターン形状加工プロセスの検討を行った。前述の膜厚制御技術を応用することで、厚みの均一性を維持したまま、形状の長短や細線化など、多様な素子パターンの成膜・加工を実現した。さらに、これらの加工技術を基盤として作製した高品質なパターン形状サンプルを用い、センサ動作に関わる機能検証を実施した。その結果、特定の測定条件下において、これまでにない新たな興味深い光学応答（電磁波吸収挙動）データの取得に成功した。これは、設計したパターンによる形状効果や、精密に制御された薄膜の集積構造の有効性を実験的に裏付ける成果である。

一方、加工パターンの微細化や厚膜化を進めるに伴い、境界（エッジ）部分の形状精度や、基材に対する膜の密着性において、新たなプロセス上の課題も明確化された。特定の加工条件下では、境界の直線性の確保や、パターン剥離時の微小な欠け・浮きの対策が必要となる傾向が確認された。これらはさらなるデバイス精度を左右する重要な因子となるため、次年度に向けたプロセスの最適化と、より精密な形状制御を達成するための課題とする。

3. 考察及び今後の展望

今年度は、成膜プロセスの最適化を達成し、予測されていた飽和挙動を覆す良好な膜厚一意制御技術を確立し

た。さらに、光学測定装置を用いた多角的な評価により、基材の材質や成膜面のミクロ構造を起点として、薄膜の集積構造や配向状態を高度に制御・使い分けられるプロセス下地を構築した。これらの技術を基盤とした形状加工と、その後の機能検証において得られた新たな興味深い光学応答の知見は、マルチスケールセンサのさらなる高感度化へ向けた極めて重要な足がかりとなる成果である。

今後は、今年度明確となった形状加工プロセスにおける境界部の直線性と均一性を高めるプロセス改良を進め、より精度の高い加工を目指していく。具体的には、マスキング材料の選定や密着プロセスの最適化、およびレーザーアブレーション条件の精緻化により、パターン精度を高める。これにより、作製サンプルの品質および形状効果のさらなる向上を達成し、社会実装に資するマルチスケールセンサへの応用展開を図る。

【参考文献】

- [1] D. Suzuki, S. Oda, Y. Kawano, *Nature Photonics* 10, 809 (2016).
- [2] K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Kawano, et al., *Science Advances* 8, eabm4349 (2022).
- [3] X. Deng, L. Li, M. Enomoto, and Y. Kawano, *Scientific Reports* 9, 3498 (2019).

業績

【原著論文】

(投稿掲載)

01. Miki Kubota, Yuya Kinoshita, Sayaka Hirokawa, Daiki Shikichi, Noa Izumi, Naoko Hagiwara, Daiki Sakai, Yuto Matsuzaki, Minami Yamamoto, Leo Takai, Yukito Kon, Yuto Aoshima, Raito Ota, Mitsuki Kosaka, Meiling Sun, Yukio Kawano, Kou Li, “In-line multi-wavelength non-destructive pharma quality monitoring with ultrabroadband carbon nanotubes photo-thermoelectric imaging scanners”, *Light: Science & Applications* 14, 306 (2025) [23.4]
02. Kou Li, Norika Takahashi, Yoshiaki Togami, Ryo Koshimizu, Noa Izumi, Naoko Hagiwara, Asumi Sano, Qi Zhang, Junyu Jin, Minami Yamamoto, Yukio Kawano, “A chemically enriched, repeatedly deformable, and self-recoverable broadband wireless imager sheet”, *Communications Materials* 6, Article number: 147 (2025) [9.6]
03. Minami Yamamoto, Daiki Sakai, Yuto Matsuzaki, Leo Takai, Yukito Kon, Yuto Aoshima, Noa Izumi, Naoko Hagiwara, Hayato Hamashima, Daiki Shikichi, Junyu Jin, Qi Zhang, Kohei Murakami, Yuya Kinoshita, Satsuki Yasui, Norika Takahashi, Hajime Nishiyama, Yukio Kawano, Kou 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, Article number: 42 (2025) [15.5]
04. Leo Takai, Yuya Kinoshita, Norika Takahashi, Minami Yamamoto, Daiki Shikichi, Noa Izumi, Yuto Matsuzaki, Yukito Kon, Naoko Hagiwara, Yukio Kawano, Kou Li, “n-type carbon nanotube inks for high-yield printing of ultrabroadband soft photo-imager thin sheets”, *Flexmat* Vol.2, Issue1, 27 April 2025 [-]
05. Miki Kubota, Leo Takai, Minami Yamamoto, Kohei Murakami, Asumi Sano, Yukio Kawano, Kou Li, “Simultaneous multi-layer stacking for longer-wavelength broadband computed tomography with a carbon nanotube film photo-thermoelectric camera sheet”, *Advanced Sensor Research* 5, Article number: 2 (2026) [3.5]
06. Hayato Hamashima, Norika Takahashi, Honghao Li, Ryoga Odawara, Asumi Sano, Naoko Hagiwara, Qi Zhang, Minami Yamamoto, Noa Izumi, Yukio Kawano, Kou Li, “Structural stability-driven dynamic range analysis of carbon nanotube photo-thermoelectric sensors”, *Advanced Sensor Research* 5, Article number: 2 (2026) [3.5]
07. Miki Kubota, Mitsuki Kosaka, Daiki Shikichi, Noa Izumi, Tomoki Nishi, Minami Yamamoto, Hayato Hamashima, Yukio Kawano, Kou Li, “Operation speed tuning for infrared computer vision testing with pixel integration structures of carbon nanotube”, *Optics Continuum* 4, Article number: 12

(2025) [1.4]

08. Hajime Nishiyama, Pham Nam Hai, Yukio Kawano, “Mid-infrared photothermoelectric detector using topological insulator BiSb thin film”, *Optical Materials Express* 16, Article number: 3 (2026) [3.1]
09. Masayuki Ishihara, Daichi Suzuki, Kazuhiro Yoshida, Kanae Oi, Kou Li, Yuhi Inada, Takeshi Yamao, Yukio Kawano, Yoshiyuki Nonoguchi, “Synergistic Plasmonic-Thermoelectric Enhancement in Semiconducting Carbon Nanotubes for Infrared Light Detection”, *Small Structures* Volume 7, Issue 2 (2026) [11.3]
10. Hajime Nishiyama, Pham Nam Hai, Tomohiro Amemiya, Shun Hashiyada, Yukio Kawano, “Infrared optical constants n , κ , and absorption of topological insulator BiSb thin films determined by the reflectance-transmittance technique”, *Optics Letters* Volume 51, Issue 7 (2026) [3.3]

【総説】

(投稿掲載)

01. Yukito Kon, Kohei Murakami, Junyu Jin, Mitsuki Kosaka, Hayato Hamashima, Miki Kubota, Leo Takai, Yukio Kawano, Kou Li, “All-solution-processable robust carbon nanotube photo-thermoelectric devices for multi-modal inspection applications”, *Materials* 2025, 18(21), 4980 [3.2]

【口頭発表】

01. Kohei Murakami, Minami Yamamoto, Ryoga Odawara, Hayato Hamashima, Leo Takai, Yukio Kawano, Yoshihiro Watanabe, Kou Li
Soft nanocarbon-based ultrabroadband thin-film camera sheet with visual augmented display
第8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, 2025年05月, 札幌
02. Hayato Hamashima, Ryoga Odawara, Kohei Murakami, Minami Yamamoto, Yukio Kawano, Kou Li
High-sensitive design of carbon nanotube photo-thermoelectric sensor by selective surfactant removal for flexible high-speed inspection camera sheets
第8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, 2025年05月, 札幌
03. Jin Junyu, Asumi Sano, Qi Zhang, Naoko Hagiwara, Yukio Kawano, Kou Li
Development of Repeatedly Washable, Ultrawideband, and Flexible Photo-Imaging Sensor Sheets
第8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, 2025年05月, 札幌

04. 昆 裕樹仁, 高井 怜於, 山本 みな美, 河野 行雄, 李 恒
多波長計測可能なカーボンナノチューブカメラによる
非破壊検査に適した写真撮影・動画撮影
2025 年度 日本写真学会年次大会, 2025 年 05 月, 東京
05. 小坂 充輝, 敷地 大樹, 出水 のあ, 久保田 実樹, 山本
みな美, 河野 行雄, 李 恒
カーボンナノチューブ膜センサを用いた広帯域反射型
構造復元
2025 年度 日本写真学会年次大会, 2025 年 06 月, 東京
06. Yukio Kawano, Kou Li
CARBON-BASED MULTI-VIEW TERAHERTZ AND
INFRARED IMAGERS
The 25th International Conference on the Science and
Applications of Nanotubes and Low-Dimensional
Materials, 2025 年 06 月, 京都
07. Junyu Jin, Asumi Sano, Qi Zhang, Naoko Hagiwara, Yukio
Kawano, Kou Li
Development of repeatedly washable ultrabroadband and
soft photo-imaging sensor sheets
CLEO/Europe-EQEC 2025, 2025 年 06 月, ミュンヘン
08. Masakazu Konishi, Hiroki Okawa, Shun Hashiyada, Yuto
Matsuzaki, Qi Zhang, Hajime Nishiyama, Kou Li, Yoshito
Tanaka, Yukio Kawano
Design and Evaluation of a Bull's Eye Structure for
Improving the Response Speed and Voltage of Carbon
Nanotube Films in GHz Range
CLEO/Europe-EQEC 2025, 2025 年 06 月, ミュンヘン
09. Mitsuki Kosaka, Daiki Shikichi, Noa Izumi, Miki Kubota,
Minami Yamamoto, Yukio Kawano, Kou Li
Reflective angular estimation with carbon nanotube
broadband infrared scanners for non-destructive
tomographic reconstruction
CLEO/Europe-EQEC 2025, 2025 年 06 月, ミュンヘン
10. Yukito Kon, Minami Yamamoto, Leo Takai, Ryoga
Odawara, Yukio Kawano, Kou Li
Carbon nanotube optical sensor sheet designed by
geometric pixel arrangement
The World Conference on Carbon, 2025 年 07 月, サン・マロ
11. Hayato Hamashima, Ryoga Odawara, Kohei Murakami,
Minami Yamamoto, Yukio Kawano, Kou Li
Selective extraction of chemical solvent residues with
carbon nanotube ultrabroadband sensors for noise signal
management
The World Conference on Carbon, 2025 年 07 月, サン・マロ
12. Leo Takai, Yuto Matsuzaki, Reiji Tadenuma, Yuto Aoshima,
Norika Takahashi, Minami Yamamoto, Yukio Kawano, Kou
Li
Hybrid integration of carbon nanotube inks and inorganic
pastes for high-performance testing devices
The World Conference on Carbon, 2025 年 07 月, サン・マロ
13. 村上 幸平, 小田原 遼河, 山本 みな美, 濱島 隼人, 高
井 怜於, 河野 行雄, 渡辺 義浩, 李 恒
現場でのリアルタイムな透過型非破壊検査に向けたデ
バイスの基礎構造検討
The 2nd Japan Visualization Symposium, 2025 年 07 月,
東京
14. 濱島 隼人, 小田原 遼河, 村上 幸平, 山本 みな美, 河
野 行雄, 李 恒
多波長な光を吸収するカーボンナノチューブ膜センサ
の熱ノイズ除去 による性能向上
2025 年度 第 1 回保守検査ミニシンポジウム, 2025 年
07 月, 東京
15. 小坂 充輝, 出水 のあ, 久保田 実樹, 山本 みな美,
河野 行雄, 李 恒
光熱起電力型カーボンナノチューブ膜センサを用いた
広帯域多波長計測 による構造復元
2025 年度 第 1 回保守検査ミニシンポジウム, 2025 年
07 月, 東京
16. Kohei Murakami, Ryoga Odawara, Minami Yamamoto,
Hayato Hamashima, Leo Takai, Mitsuki Kosaka, Yukio
Kawano, Yoshihiro Watanabe, Kou Li
Nanocarbon-based ultrabroadband longer-wavelength
camera sheet inspection system with dynamic visual
augmentation
35th International Conference on Diamond and Carbon
Materials, 2025 年 09 月, グラスゴー
17. Junyu Jin, Asumi Sano, Qi Zhang, Naoko Hagiwara, Yukio
Kawano, Kou Li
Development of an Ultrawideband (Millimeter-Wave–
Visible-Light) Image Sensor Sheet with Liquid Washing
Resistance Carbon Nanotube Layers
35th International Conference on Diamond and Carbon
Materials, 2025 年 09 月, グラスゴー
18. Miki Kubota, Minami Yamamoto, Noa Izumi, Yukio
Kawano, Kou Li
Multi-wavelength infrared–terahertz computer tomography
measurements for structure reconstruction with 2D
integrated carbon nanotube-based imager sheets
35th International Conference on Diamond and Carbon
Materials, 2025 年 09 月, グラスゴー
19. 大川 拓樹, 大橋 隆宏, 田邊 匡生, 佐藤 いまり, 河野
行雄
GHz 帯域反射分光における干渉抑制手法と金属表面
状態識別への応用
2025 年秋期(第 177 回)講演大会, 2025 年 09 月, 札幌

20. 河野 行雄
ナノカーボン物質の次元制御と光機能創出
日本物理学会第 80 回年次大会(2025 年), 2025 年 09 月, 広島
21. Hideaki Sato, Daiki Asamoto, Hayato Hamashima, Kohei Murakami, Toui Yamazaki, Minami Yamamoto, Yukio Kawano, Kou Li
Design and Fabrication of Carbon Nanotube Photo-thermoelectric Sensors with Wavelength-Selective Layers
第 69 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 2025 年 09 月, 台湾
22. Toui Yamazaki, Leo Takai, Minami Yamamoto, Yukito Kon, Kohei Murakami, Hayato Hamashima, Daiki Asamoto, Hideaki Sato, Yukio Kawano, Kou Li
Development of bottom-up layered camera sheets for simultaneous, real-time, and wavelength-selective infrared-visible light visualization
第 69 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 2025 年 09 月, 台湾
23. Kodai Kobayashi, Minami Yamamoto, Leo Takai, Yukito Kon, Hayato Kanno, Tsubasa Hiyoshi, Yukio Kawano, Kou Li
Carbon nanotube thin-film wearable longer-wavelength photo-sensor for non-destructive testing with skin-breathability and flexibility
第 69 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 2025 年 09 月, 台湾
24. Susumu Katahira, Mai Okumura, Tatsuya Shirasaki, Junyu Jin, Noa Izumi, Asumi Sano, Norika Takahashi, Yukio Kawano, Kou Li
p-type dope tuning for carbon nanotube films with different semi-metal ratios and monitoring of Seebeck coefficients for a sensor design database
第 69 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 2025 年 09 月, 台湾
25. 浅本 大輝, 佐藤 秀明, 濱島 隼人, 村上 幸平, 山本 みな美, 山崎 桃生, 河野 行雄, 李 恒
カーボンナノチューブを用いた波長分解赤外イメージセンサシートの基礎構造検討
材料シンポジウム 「若手学生研究発表会」, 2025 年 10 月, 京都
26. 日吉 翼, 菅野 颯人, 高井 怜於, 昆 裕樹仁, 山本 みな美, 佐野 明日美, 出水 のあ, 小林 晃大, 濱島 隼人, 河野 行雄, 李 恒
カーボンナノチューブ型イメージセンサのインクジェット印刷に向けた液中粒径制御及び基礎物性評価
材料シンポジウム 「若手学生研究発表会」, 2025 年 10 月, 京都
27. 昆 裕樹仁, 高井 怜於, 山本 みな美, 河野 行雄, 李 恒
多波長光検出カーボンナノチューブ薄膜センサシート
のカメラ構造設計による材料同定と非破壊検査可能なイメージングデバイスへの応用
第 22 回研究集会「GX を支える薄膜技術」, 2025 年 10 月, 京都
28. 菅野 颯人, 日吉 翼, 高井 怜於, 昆 裕樹仁, 小林 晃大, 山本 みな美, 河野 行雄, 李 恒
CNT 膜の低粘度化インクジェット印刷と p 型ドーピングによる導電性および光熱電応答
第 22 回研究集会「GX を支える薄膜技術」, 2025 年 10 月, 京都
29. 今村 恒水, 久保田 実樹, 出水 のあ, 小坂 充輝, 敷地 大樹, 山本 みな美, 河野 行雄, 李 恒
薄膜カーボンナノチューブセンサによる構造復元と材質同定
第 22 回研究集会「GX を支える薄膜技術」, 2025 年 10 月, 京都
30. 張 鐔鐔, 佐野 明日美, 黒崎 天翔, 根本 樹希, 金 峻宇, 王 世豪, 河野 行雄, 李 恒
カーボンナノチューブおよび導電性高分子の選択的なスプレー塗布工程によるオンサイト光センサの設計
第 22 回研究集会「GX を支える薄膜技術」, 2025 年 10 月, 京都
31. 小林 晃大, 山本 みな美, 高井 怜於, 昆 裕樹仁, 菅野 颯人, 日吉 翼, 李 恒, 河野 行雄
通気性・柔軟性を備えた非破壊検査用カーボンナノチューブ薄膜ウェアラブル長波長光センサ
2025 年度 秋季講演大会, 2025 年 11 月, 福岡
32. 佐藤 秀明, 濱島 隼人, 村上 幸平, 浅本 大輝, 山崎 桃生, 李 恒, 河野 行雄
非破壊検査への応用に向けた赤外-テラヘルツ波長選択性フレキシブルカーボンナノチューブセンサ
2025 年度 秋季講演大会, 2025 年 11 月, 福岡
33. Lwin Han Min, 久保田 実樹, 小坂 充輝, 出水 のあ, 今村 恒水, 奥村 まい, 李 恒, 河野 行雄
観察物の透過・反射・吸収が透視により識別可能な長波長光コンピュータビジョン
2025 年度 秋季講演大会, 2025 年 11 月, 福岡
34. 高井 怜於, 昆 裕樹仁, 菅野 颯人, 日吉 翼, 山本 みな美, 河野 行雄, 李 恒
インクジェット印刷を用いたカーボンナノチューブ薄膜広帯域イメージングセンサの微細化プロセス
第 10 回フォトニクスワークショップ, 2025 年 11 月, 沖縄
35. 佐世 美帆, 大川 拓樹, 小川 剛伸, 田中 充, 河野 行雄
テラヘルツ分光法と多変量解析によるゲル状食品の成分評価
日本食品科学工学会 令和 8 年度 関東支部大会, 2026 年 3 月, 東京