「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、製品に要求される品質の高まりや、数十年前に建設されたインフラの寿命の問題などにより、対象を破壊せずに検査を行う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り、非接触で対象の特性を取得することが可能である。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求し、非破壊画像検査の機能および適用範囲の拡張を図っている。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。本プロジェクトの特徴は、各レイヤーにおける専門家が結集し、分野横断的な研究を展開する点にある。最終的には、実際の多様な現場において活用可能な、より簡便な検査・分析手法を実現し、社会の安全と安心に貢献することを目標としている。

1.　2024 年度の研究目的

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[1-9]の高性能化、マルチスケール計測化[10,11]を行っている（図 1 -3 にそれぞれセンサアレイの作製例[4]、複数波長画像化の例[5]、センサの分析応用例[6]、微小領域計測用アンテナの例[11]）。これらのセンシング技術をより高度化し、電波領域から光領域にまで至る広帯域、かつマルチスケールで分析可能な技術の創出を行う。2024 年度では、マルチスケール計測用の光集光素子、センサの形状チューニング、分光画像分析のための特徴量抽出や新たな解析手法の開発を目的とした研究を実施した。

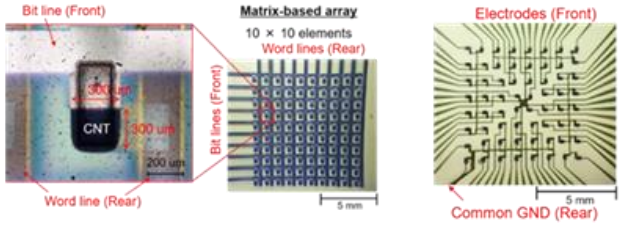


図 1：2 次元センサアレイ[4]

2.　2024 年度の研究成果

戦略的研究シーズ育成事業における成果を土台として、2024 年度より新たに研究をスタートした。マルチス

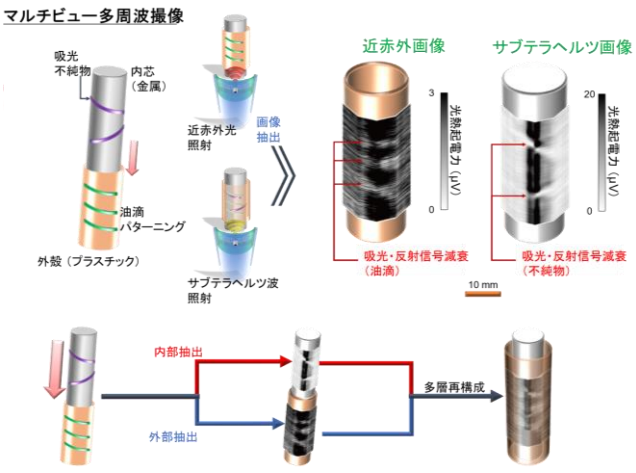


図 2：マルチビュー画像化と複数波長帯画像融合による多層イメージング[5]

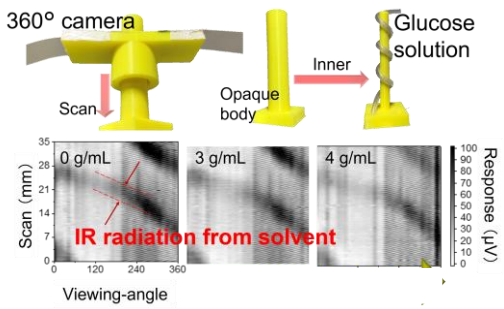


図 3：光センサアレイによる非採集水質検査[6]

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。

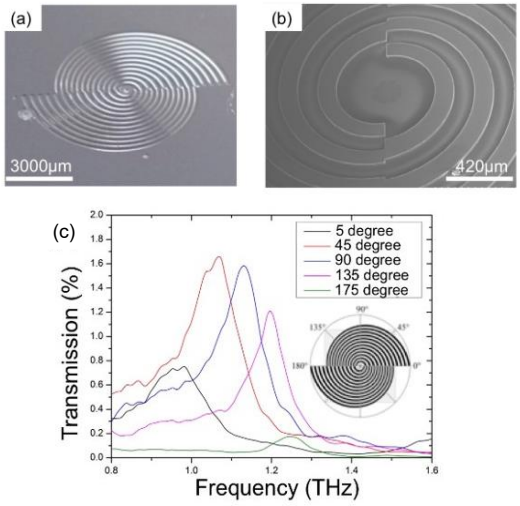


図 4：(a) 周波数可変の非円形プラズモニック構造の写真。(b) (a) の拡大画像。(c) 入射テラヘルツ波の偏光方向を変えた場合の (a) の透過スペクトル[11]。

① 光電界集中素子の開発

照射光を所望のセンシング領域へ集中させるための素子開発に着手した。電磁界シミュレーションにより、検出感度を向上させる素子構造の検討を行い、モデルに応じた共鳴周波数で大きな電界増強が生じることを確認した。また、電磁波が集中する箇所での素子形状が電磁界増強に大きく関係することを見出した。

この構造体と当研究室で開発している光センサを組み合わせることで、検出感度約 2.6 倍、検出速度約 15 倍の改善を達成した。検出感度・速度の改善は検査精度の向上につながる。今後、この素子を検査システムに組み込むことを検討している。また、この構造体は、凸凹のパターンを変えることで任意の周波数に対応可能であることから、今後、他帯域への展開も進める予定である。

② 分光画像分析・解析手法の開発

検査対象を構成する材料（無機物・有機物）に関して、特徴量を抽出するための分光画像測定を行った。様々な材料の解析にとって重要となる水の結合状態、タンパク質、糖、セルロースなどの情報を引き出すことができた。また、インフラ検査に向けて、電磁波の干渉を利用した手法の開発、光学画像情報の微分や積分による高解像度化の手法の提案を行った。これらの知見を元に試作機を制作し、実用化に向けた検討を行っている。

③ センサ材料のサイズチューニング

センサを構成する材料の自在なサイズチューニングを目指した研究を行った。材料や破断装置の各種パラメータを調整することで、材料サイズを細かくチューニングすることが可能となった。これは対象物に応じたマルチスケール計測に資する技術となり得る。

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。

来年度は本プロジェクトのラボが立ち上がり、研究員が 1 名増え研究資源が集約される。ここを核として各方面の研究を有機的に融合させることで、プロジェクトを加速する。

【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. Marteijn, 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. T. Iguchi, T. Sugaya, and Y. Kawano, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 151105 (2017).
11. X. Deng, L. Li, M. Enomoto, and Y. Kawano, *Scientific Reports* **9**, 3498 (2019).

マルチスケールセンサーによる
非破壊診断技術の開発

「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
大川　拓樹

1.　はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物や社会インフラは、設計寿命の 50 年を超え、老朽化が社会的な課題となっている。これらの劣化診断や予防保全を目的とした非破壊検査技術の高度化は、社会インフラの安全維持に不可欠であり、特に広域構造物やトンネルなど非平面対象への適用が求められている。

本プロジェクトでは、紫外から GHz までという広帯域な周波数特性を利用する。特に GHz 帯域はコンクリートなどの高密度物質に対しても透過特性を持ち、構造物内部の診断に有効な周波数帯域とされる。一般的な電磁波検査では単一周波数を用いたコンクリートレーダーなどで誘電率の差を可視化することで鋼材の位置や状態を推定している。しかしながらこれらの情報の識別はオペレーターの熟練に依存するところが大きく、非平面形状や人間の立ち入りが難しい箇所における大面積測定は困難であるという課題があった。これに対して、我々はスペクトル測定により腐食の有無を識別するという手法を着想した。図 1 にコンクリートに埋設された鋼材サンプルとその反射スペクトルを示す。図 1（下）は深さの異

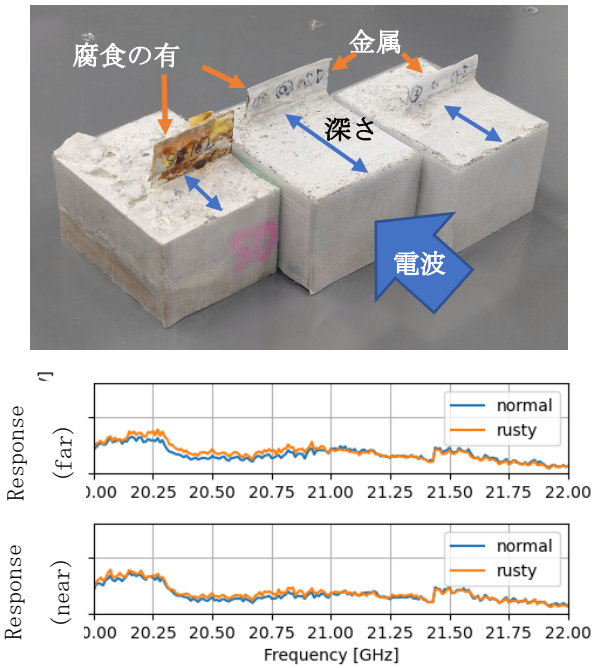


図 1　コンクリート埋設鋼材の概観（上）と GHz 反射スペクトル（下）

なる鋼板位置で腐食の有無を変化させたスペクトルを比較しており、特定の周波数で違いが表れていることが示唆された。このことから本研究では本プロジェクトで開発するセンサーを用いたシステムの構築を目指す。

このセンサーをインフラ構造物の検査測定に高い適性を持つ。しかし一方で、GHz 帯で利用するためには微小な信号測定や高いコヒーレンスによって発生する電磁波干渉がスペクトル測定に与える歪みという課題がある。これらを克服するため、信号増幅回路と ADC（アナログ-デジタル変換器）を一体化した専用基板の設計・製作、さらに干渉影響を積極的に活用した新たな分光測定手法の開発を行った。本報告では、これらの開発と得られた成果を紹介するとともに、今後の応用展開の可能性についても考察する。

2.　実験と結果

(1) 増幅及び ADC の一体化専用基板の設計

本プロジェクトで開発しているセンサー材料の吸光帯域は、多様な機序に起因しており、特に GHz 帯においてはこの材料が準導体的に振る舞うことで、伝導損失として電磁波を熱エネルギーに変換する現象が報告されている [1]。しかしながら、コンクリート構造物内での実用化を想定した場合、電磁波の減衰は著しく、たとえばコンクリート厚 10 cm では−10 dB 以下という大幅な減衰が確認されている [2]。こうした環境下では、本センサーの信号電圧が非常に小さく、特に構造物の欠陥や異常部位に由来する微小な信号差を正確に検出することが大きな課題であった。一方で、従来型の高性能 ADC（アナログ・デジタルコンバータ）を用いることで微弱な信号の高精度測定は技術的には可能であるものの、その手法では本センサーが本来有する大面積展開性（スケーラビリティ）との適合性に乏しく、多素子展開や広域測定には向かないとの判断に至った。

そこで本研究では、センサーからの応答電圧を高 S/N 比で増幅し、かつ測定系としてのスケーラビリティを損なわない一体型基板の開発を進めた。増幅出力を後段の

回路に直接接続することで、測定素子の個別選択が可能となり、今後の多素子化・並列化の検証にも対応できる設計とした。

開発した一体型基板において、センサー部は基板上にセンサー材料を製膜し、交換可能なコネクタ接続とすることで、構造物への適用や消耗部材のメンテナンス性を向上させた。増幅器には、低ノイズかつ温度ドリフトの少ないアンプを採用し、信号電圧を後段回路で確実に検出できるレベルまで増幅した。また、測定系においては、素子ごとに短時間でデータ取得が可能であり、多素子を用いたマッピング測定では、高速なデータ取得に成功している。さらに、これらのハードウェア開発に併せて、PC 上で制御・モニタリングを行う専用 GUI アプリケーションの開発も行った。乾電池電源と USB 接続だけで駆動可能なポータブルな測定系を実現し、現場におけるリアルタイムデータ取得を可能としたことで、携帯性・操作性に優れた実用的な測定システムを構築することができた。

(2) GHz 帯スペクトルの干渉除去手法

コンクリート構造物の非破壊検査においては、内部劣化や異常を評価するために、主に反射測定法が用いられる。これは、コンクリート自体が高い電磁波吸収特性を有し、またその厚みが大きいことから、透過測定が現実的でないためである。しかし、反射測定では、測定対象物（サンプル）からの反射波のみを理想的に検出することが望ましいものの、実際の測定系ではビームスプリッター（BS）や集光レンズといった光学部品に加え、アンテナ自体、装置筐体の内部構造に起因する反射が複合的に干渉を引き起こし、スペクトルの歪みとして現れることが課題となる。

図 2 に、理想的な光路と、装置内部反射が発生した際の例を示す。左図のような理想的な測定系では、センサーに入射するのはサンプル反射波のみであるが、右図のように実際の系では、レンズ表面などで反射された電磁波がサンプル反射波に重畳し、測定結果に干渉として現れる。さらに、こうした装置内部反射は単一要素によるものではなく、複数の反射成分が干渉し合った結果が測定信号に現れており、そのため干渉成分は波長依存性や位相依存性を伴って複雑なスペクトル歪みを生じさせる。

この現象を理論的にとらえるために、本研究では装置内部反射波$\boldsymbol{I_r}$、サンプル反射波$\boldsymbol{I_s}$、そして観測される合成波$\boldsymbol{I_m}$をそれぞれの振幅$\boldsymbol{C_r}$，$\boldsymbol{C_s}$，$\boldsymbol{C_m}$で表現した電波干渉モデルを構築した（図 3）。このモデルでは、観測波の振幅$\boldsymbol{C_m}$は以下の式で表される：

$$\boldsymbol{C_m = \sqrt{C_r^2 + C_s^2 + 2C_rC_s\cos(kl - \theta_0)}}$$

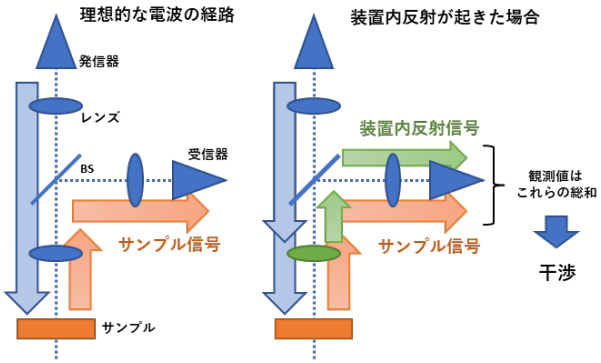
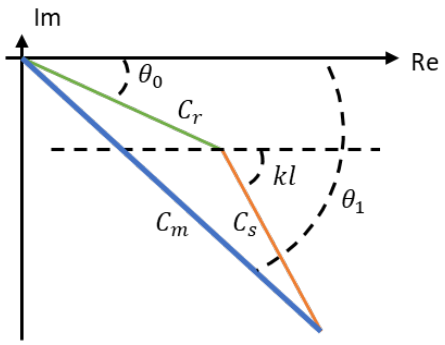


図 2　反射光学系における干渉の発生



$$I_r = C_r e^{i\omega t - i\theta_0} \quad I_s = C_s e^{i\omega t - ikl}$$

$$I_m = I_r + I_s = C_m e^{i\omega t - i\theta_1}$$

$$C_m = \sqrt{C_r^2 + C_s^2 + 2C_rC_s\cos(kl - \theta_0)}$$

図 3　干渉の数理モデル

ここで、$\boldsymbol{k}$は波数、$\boldsymbol{l}$はサンプルまでの距離、$\boldsymbol{\theta_0}$は装置内部反射波の合成位相を表す。この式から分かる通り、観測される信号の振幅は波数$\boldsymbol{k}$やサンプル距離$\boldsymbol{l}$に依存して変動するため、たとえサンプルの反射特性$\boldsymbol{C_s}$が一定であっても、干渉によりスペクトルに周期的なひずみが生じる。この干渉の影響は、装置とサンプルの距離を固定しても避けることができず、従来はこれを物理的なパルス変調やチョッパーを用いた高コストな抑制手法で対応してきた。

本研究では、この理論モデルに基づき、サンプルからの真の反射成分と装置由来の干渉成分を分離する新たな干渉除去手法を開発している[3]。この手法では、サンプルの位置（距離）を微小に変化させながら得られた一連のスペクトルデータを用いて、干渉項と本来の反射成分を数理的に分離する。複数距離でのデータ収集により、干渉項の周期的変動を捉え、サンプル固有の反射成分を抽出する解析アルゴリズムを適用した。

図 4 に示すように、本手法を適用することで、従来はスペクトル上に現れていた周期的な歪みが効果的に除去され、より正確な反射特性の解析が可能となった。さらに、本手法は既存のパルス変調方式と比較してシステムコストを大幅に低減でき、測定系の簡便化と現場適用性

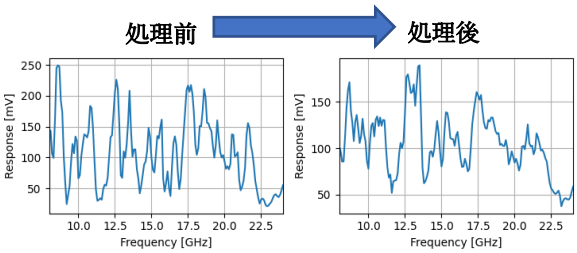


図 4　GHz スペクトル測定における干渉歪除去

の向上にも貢献した。この成果は、GHz 帯の高感度非破壊検査における信号の高精度解析を実現する基盤技術として、今後の実構造物評価への展開が期待される。

3.　考察及び今後の展望

本プロジェクトでは、マルチスケールセンサーを基軸とした非破壊検査システムの開発に取り組んできた。特に、コンクリート構造物内部の腐食診断を可能とする GHz 帯スペクトル測定手法の確立を目指し、センサー、信号処理回路、測定系の最適化を図った。その結果、微小な信号電圧の安定測定を可能とする一体型基板の開発に成功し、従来困難とされた大面積・多素子化による測定も現実的なものとなった。さらに、リアルタイム測定を可能とする GUI アプリケーションの実装は、現場での実用化に向けた大きな前進といえる。

一方で、GHz 帯測定において不可避となる電磁波干渉の問題に対しては、数理モデルに基づく干渉成分除去手法を新たに開発した。装置由来の反射波成分を除去することによって、これまでオペレーターの経験に依存していたスペクトルの解釈が、より客観的かつ高精度に行える可能性が示された。

これらの成果を踏まえ、今後は現場環境を模した大型構造物での実証実験を進めるとともに、干渉除去アルゴリズムと測定システムの統合化を図る。また、腐食進行度の定量評価に資するデータ解析手法の高度化や、センサー素子のさらなる高感度化を目指した材料改良にも着手する予定である。

本技術が実用化されれば、これまで技術者の経験と勘に頼っていた社会インフラの健全性診断が、客観的なデータに基づく定量的評価に移行し、非破壊検査技術の新たなスタンダードとして社会実装されることが期待される。今後も、現場ニーズを的確に捉えた技術開発を推進し、社会インフラ維持管理分野への貢献を目指す。

【参考文献】

1.Yan, M. et al., *J Mater Sci: Mater Electron*, 29, 20260-20270 (2018)
2.ITU-R, Recommendation P.2040-1, (2015)

赤外吸収特性を利用した物性評価モデルの構築

「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

(1) 本研究の位置づけ

本研究室では、広帯域な受光特性を用いた評価系の構築を目指している。特に、多波長の吸収特性を統合的に利用する評価モデルの構築を推進している。本研究では、評価系の基礎検討として、多成分系の物性評価に着目した。

(2) 物性評価の重要性と課題

産業界において、製品開発や品質管理を目的として多様な評価手法が導入されている。本プロジェクトでは、その応用先の一つとして、多成分系の物性評価に着目している。

現在、多成分系の物性評価には人による感覚的な判断や機械的破壊試験が用いられているが、それぞれに課題がある。前者は評価者の経験や感覚に依存するため、再現性や客観性に課題があり、後者はサンプルを破壊するため全数検査には適用できず、製造ラインでの連続的な監視には不向きである。

このような背景から、客観的かつ再現性があり、非破壊で評価可能な技術の開発が強く求められている。

(3) 赤外吸収特性の利用

赤外分光法は、分子内の化学結合が固有の振動数で赤外光を吸収する現象を利用した分析手法である。化学結合は構造により特定の波数領域で赤外光を吸収するため、吸収スペクトルから分子構造や官能基を推定することができる。この利点から、赤外分光法は製薬分野における成分同定、石油化学分野での組成解析、精密工業における異物検査など、幅広い産業分野で応用されている。

検査分野では、一般的に近赤外（NIR）領域が試料透過性に優れることから、近年応用研究が活発化している。しかし、NIR は振動の重畳により吸収ピークが広がりやすく、その応用システムは多変量解析データを基盤とする場合が多い。一方、中赤外（MIR）領域は、透過性が NIR に劣るものの、物体表面から化学結合や官能基に直接対応する鋭い吸収が得られるため、物理状態や分子間相互作用の変化を捉えやすく、より明確な解釈が可能である。

(4) 本研究のアプローチ

本研究では、多成分系のサンプルにおいて、中赤外の吸収特性から物性を把握することを検討した。多成分試料の吸収スペクトルでは様々な成分の吸収が重なって現れるため、スペクトルから分子構造や組成情報を一義的に決定することは困難である。しかし、主成分や物理状態、分子間相互作用に起因する情報が含まれると考えられることから、多成分の吸収特性は物性評価に有用な情報を含んでいる可能性がある。

本研究で検討する評価デバイスでは、実験的に選定した複数波長の光源を組み合わせ、各波長における吸収の程度を定量化することで、多成分系物性の光学的評価を実現することを目指す。

2. 実験と結果

(1) 赤外吸収特性と物性の計測

赤外吸収スペクトルの測定には、フーリエ変換赤外分光光度計と ATR プリズムを用いた。ATR 測定は、プリズムと試料の接触面で起こる光の吸収（エバネッセント光）を利用する手法である。

物性の測定には、テクスチャーアナライザーを用い、2 バイトテクスチャー試験により数値化した。この試験は、圧縮と緩和を機械的に 2 回繰り返し、荷重の変化を時間軸方向に記録した試験曲線から、あらかじめ定義した条件に基づいて硬さや粘りなど複数の物性パラメータを算出する手法である。各試料 3～4 回測定した。

(2) 物性評価 I

多成分試料の物性評価を目的として、まずはタンパク質や脂質、炭水化物などがそれぞれ含まれている試料を測定した。同サンプルのふわふわとした物性は、空隙のようなマクロ構造による効果が大きいが、一方で乾燥や状態変化による硬化など、マクロな構造を維持しつつも変化する状態が存在する。このような硬化現象は、水分の蒸発に加えて、澱粉の再結晶化が重要な役割を果たすことが知られている。このように、化学的な組成や結合の状態から定量できる物性がある可能性を踏まえ、数日室内で放置したサンプルについて、糖質と水の赤外吸収特性と硬さの相関を分析した。

赤外吸収スペクトルは ATR プリズムにスポンジ部分を潰すように押し付け密着させた状態で取得した。糖質の吸収ピークから 960 cm^{-1} と 1000 cm^{-1}（主に C-OH 伸縮）、水の吸収ピークから 3275 cm^{-1} と 3100 cm^{-1}（OH 伸縮）の吸光度を pick し、それぞれの吸光度比を各成分の吸収特性とした。物性は、スポンジ面の圧縮試験を行い、60 秒の圧縮範囲における最大試験力を「硬さ」と定義した。測定は Day 0 から Day 3 まで経日的に実施した。その間、サンプルの重量は表面からの水分蒸発に伴い徐々に減少した。

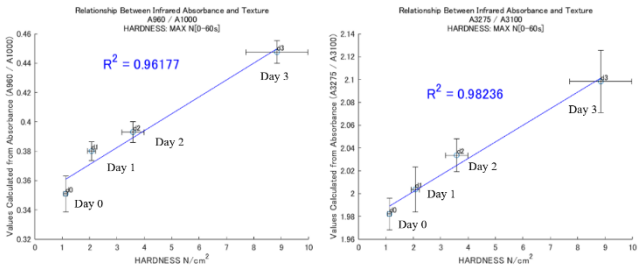


図 1. 糖質および水の吸光特性と硬さの関係

左図 Y: 糖質の吸光度比

右図 Y: 水の吸光度比

X: 圧縮試験で計測した応力，4 回計測 N / cm²

結果を図 1 に示す。糖質および水の赤外吸収特性が硬さと強く相関することが確認され、決定係数はいずれも $R^2 \geqq 0.95$ であった。この結果は、含水率の変化に伴って糖質および水の結合状態が変化し、さらには糖質の結晶化が進行することで、物性が変化する様子を観測したものと考えられる。この結果から、赤外吸収特性の変化を観測することで、分子レベルでの構造変化に起因する物性の評価が可能であることが示唆された。

(3) 物性評価 II

物性評価の対象とする多成分系試料を拡張するため、引き続き、赤外吸収特性と物性の関係を解析した。ここで、サンプルに含まれる代表的な成分として、水・油・糖・小麦粉・タンパク質の赤外吸収スペクトルを図 2 に示す。各成分は特徴的な吸収バンドを有している。これらの特徴的なピークから、解析に用いる 10 の波数を選定した。

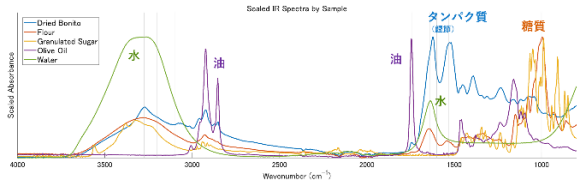


図 2. 代表的な多成分試料の中赤外吸収スペクトル

解析では主原料が類似したグループに分類し、グループごとに赤外吸収特性と物性の関係を解析した。選定した波数から最大 4 波数、最低 2 波数の吸光度を乗算あるいは積算により、機械的に最適な組み合わせによる回帰モデルを作成し、物性の決定係数が高いモデルの傾向を分析した。

分析の結果、硬さ、付着性、粘りにおいて物性推定に有効と考えられる評価モデルを作成することができた（決定係数 $R^2 \geqq 0.9$）。

作成した物性推定モデルの例として、硬さ推定モデルを示すことができた。また、水分含量の増加に伴い、マトリックス内での水分子間の相互作用や、水和状態による吸光特性の変化が物性に対して指数関数的に影響を与える可能性を示した。

以上の結果から、中赤外領域の多成分系の特性吸収を利用することで、決定係数が高い物性推定モデルを構築可能であることが示された（図 3）。しかし、このアプローチの妥当性についてはより統計的な評価を行う必要がある。そこで、線形回帰の代表的な手法である 5 つ（Linear, PLS, LASSO, Ridge, PCR）を検証した。この検証では、データセットの 80%を訓練データ、20%をテストデータとすることで過学習の影響を考慮した。

この評価から、中赤外光による物性推定は、サンプルの種類に応じて評価物性と回帰手法を適切に選ぶことで、線形モデルでも十分な精度が得られることが示唆された。一方で、一部のグループについては線形回帰では高い決定係数が得られず、非線形性を考慮する必要があることが示された。

3. 考察及び今後の展望

(1) 考察と展望

本研究において、赤外吸収特性から高い決定係数（$R^2 \geqq 0.9$）の物性推定モデルが構築できた理由として、以下の技術的要因が挙げられる。第一に、成分に帰属される特性吸収帯から 10 の解析波数を選定することにより情報量が最適化されたこと、第二に、物性推定モデルを構築する際に主成分が類似するグループに分類した上で検討を行ったことが有効であったと考えられる。

多成分系であっても、赤外吸収スペクトルには分子構造に関する情報はもちろん、成分や分子の状態が寄与する物性に関する情報が含まれている。本研究の成果は、従来の赤外分光法が主に定性分析に用いられてきた枠組みを超えて、潜在的な情報を効率的に抽出しモデル化することで、物性を定量的に評価できることを示している。

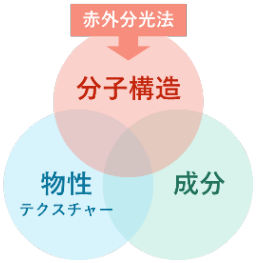


図 3. 赤外分光法で得られる情報の概念図

(2) 今後の取り組み

今後は、分子レベルから集合体レベルまでの多階層的な物性情報の取得を可能にする計測・解析技術を構築する。これにより、従来の単一波長領域の分析では得られない新たな評価手法の獲得が期待される。

【参考文献】

1. T. Hasegawa, Quantitative Infrared Spectroscopy for Understanding of a Condensed Matter, Springer Japan, (2017)

2. D. Suzuki, S. Oda, and Y. Kawano, Nature Photonics, 10, 809 (2016)
3. 荒木峻 ら, 有機化合物のスペクトルによる同定法-第７版-, 東京化学同人, (2010)
4. 小林三智子, 神山かおる 編著, 食品物性とテクスチャー, 建帛社, (2022)
5. 尾崎幸洋, 分光法シリーズ第 2 巻 近赤外分光法, 講談社, (2015)
6. K. Kohyama, Textural Characteristics of World Foods, Wiley-Blackwell, (2020)
7. O. Anjos et al., Food Chemistry, 169, 218-223 (2015)
8. M. Szymanska-Chargot et al., Carbohydrate Polymers, 115, 98-103 (2015)
9. S. Ding et al., Trends in Food Science & Technology, 111, 670-679 (2021)
10. D. Wu et al., Food Chemistry, 145, 417-426 (2014)
11. R. Karoui et al., Chemical Reviews, 110, 6144-6168 (2010)
12. J. Workman Jr., Spectroscopy Supplements, 39(s8), 22-28 (2024)

業績

【原著論文】
（投稿掲載）

01. 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)

02. 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*, Early View 2401724 (2025) [6.4]

03. 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) [11.2]

【総説】

01. 敷地 大樹, 松﨑 勇斗, 河野 行雄, 李 恒, "カーボンナノチューブ膜を用いたフレキシブル非破壊検査シートの開発と応用", *テラヘルツ波の発生、検出、制御技術と最新応用*

02. 久保田 実樹, 小田原 遼河, 高井 怜於, 河野 行雄, 李 恒, "カーボンナノチューブを用いた折り曲げ性・伸縮性撮像センサと検査応用", *検査技術 10 月号(2024)*

【口頭発表】

01. 久保田 実樹, 木下 祐哉, 河野 行雄, 李 恒
超広帯域・多波長光の撮像計測による医薬成分錠剤のインライン非破壊検査
2024 年度 日本写真学会年次大会, 2024 年 05 月, 千葉

02. Ryoga Odawara, Minami Yamamoto, Yukio Kawano, Yoshihiro Watanabe, Kou Li
Flexible carbon nanotube broadband cameras for non-destructive inspection with projection mapping
The 7th Event of the Young Researchers Society for Flexible and Stretchable Electronics (第 7 回 FSE 若手), 2024 年 05 月, 大阪

03. Leo Takai, Minami Yamamoto, Yuto Matsuzaki, Yukio Kawano, Kou Li
p-/n-type inks-printed carbon nanotube photo-thermal pixels for mechanical high-yield integration as deformable millimeter-wave infrared imager sheets
The 7th Event of the Young Researchers Society for Flexible and Stretchable Electronics (第 7 回 FSE 若手), 2024 年 05 月, 大阪

04. 久保田 実樹, 木下 祐哉, 松﨑 勇斗, 山本 みな美, 河野 行雄, 李 恒
赤外・テラヘルツ帯域の多波長光照射による医薬品のインライン撮像検査
第 133 回 日本画像学会年次大会, 2024 年 06 月, 横浜

05. 河野 行雄
カーボンナノ材料によるテラヘルツ・光撮像シートと全方位画像分析応用
2024 度 第 2 回 CPC 研究会, 2024 年 06 月, 東京

06. Y. Matsuzaki, R. Tadenuma, Y. Aoshima, M. Yamamoto, L. Takai, Y. Kawano, K. Li
Hybrid integration of high Seebeck coefficient materials with carbon nanotube film photo-thermoelectric broadband image sensors
The 40th International and 20th European Thermoelectric Conference(ICT2024), 2024 年 07 月, ポーランド

07. Miki Kubota, Yuya Kinoshita, Yuto Matsuzaki, Minami Yamamoto, Leo Takai, Yukio Kawano, Kou Li
Ultrabroadband photo-thermoelectric imager for in-line multi-wavelength pharma inspection in a non-destructive manner
The 40th International and 20th European Thermoelectric Conference (ICT2024), 2024 年 07 月, ポーランド

08. D. Shikichi, R. Ota, R. Odawara, M. Kubota, Y. Kawano, K. Li
Multi-wavelength computer vision imaging for 3D composite materials structure restoration with a photo-thermoelectric detector
The 40th International and 20th European Thermoelectric Conference (ICT2024), 2024 年 07 月, ポーランド

09. Ryoga Odawara, Minami Yamamoto, Norika Takahashi, Yukio Kawano, Kou Li
Faster operation and integration of photo-thermoelectric sensor in carbon nanotube film camera,Faster operation and integration of photo-thermoelectric sensor in carbon nanotube film camera
The 40th International and 20th European Thermoelectric Conference (ICT2024), 2024 年 07 月, ポーランド

10. L. Takai, M. Yamamoto, D. Sakai, Y. Matsuzaki, Y. Kawano, K. Li
All printable carbon nanotube film type photo-thermoelectric broadband 2D camera sheets
The 40th International and 20th European Thermoelectric Conference(ICT2024), 2024 年 07 月, ポーランド

11. Qi Zhang, Honghao Li, Ryo Koshimizu, Norika Takahashi, Kou Li and Yukio Kawano, K. Li
Microwave-based non-destructive monitoring by photo-thermoelectric sensors with carbon nanotube films beyond the diAraction limit
The 40th International and 20th European Thermoelectric Conference (ICT2024), 2024 年 07 月, ポーランド

12. Ryoga Odawara, Minami Yamamoto, Yukio Kawano, Yoshihiro Watanabe, Kou Li
Physical and chemical composition optimization of CNT imagers for augmented reality non-destructive inspections
Nanocarbon photonics and optoelectronics (NPO2024), 2024 年 08 月, フィンランド

13. Miki Kubota, Yuya Kinoshita, Yuto Matsuzaki, Minami Yamamoto, Leo Takai, Yukio Kawano, Kou Li
CNT film photo scanner for in-line pharma agent pills imaging in infrared-terahertz bands
Nanocarbon photonics and optoelectronics (NPO2024), 2024 年 08 月, フィンランド

14. Masakazu Konishi, Hiroki Okawa, Shun Hashiyada, Yuto Matsuzaki, Qi Zhang, Kou Li, Yoshito Tanaka, and Yukio Kawano
Designing Bull's eye structures for non-destructive inspection using GHz waves and carbon nanotube film
Nanocarbon photonics and optoelectronics (NPO2024), 2024 年 08 月, フィンランド

15. L. Takai, Yuto Matsuzaki, Minami Yamamoto, Yukio Kawano, Kou Li, Kou Li, Yoshito Tanaka, and Yukio Kawano
Two-dimensional high-yield printable integration of carbon nanotube photo-thermal pixels for realtime, large-area, and broadband non-destructive testing camera applications
Nanocarbon photonics and optoelectronics (NPO2024), 2024 年 08 月, フィンランド

16. Yukio Kawano
Multi-view terahertz and infrared imaging sheets for non-destructive inspection
SPIE Optics + Photonics 2024, 2024 年 08 月, サンディエゴ

17. 佐世 美帆, 大川 拓樹, 小川 剛伸, 田中 充, 河野 行雄
加工食品の赤外吸収特性を利用した食感の非破壊検査デバイスの開発を目指した基礎検討
第 71 回 日本食品科学工学会, 2024 年 08 月, 名古屋

18. Yukito Kon, Minami Yamamoto, Yuto Matsuzaki, Leo Takai, Ryoga Odawara, Yukio Kawano, Kou Li
Optical geometric pixel-alignment design for nanocarbon photo-thermoelectric camera sheets
第 67 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, 2024 年 09 月, 高知

19. Hayato Hamashima, Ryoga Odawara, Kouhei Murakami, Minami Yamamoto, Yukio Kawano, Kou Li
Performance evaluations of carbon nanotube photo-thermoelectric imagers by controlling chemical solvents via high-yield post-cleaning approaches
第 67 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, 2024 年 09 月, 高知

20. 河野 行雄
ナノカーボン光学撮像センサによる分光画像情報の高度利用創出
M&BE 新分野開拓研究会 2024, 2024 年 09 月, オンライン

21. 佐世 美帆, 大川 拓樹, 小川 剛伸, 田中 充, 河野 行雄
酸素の赤外吸収特性を利用した、野菜や果実のテクスチャー評価
第 76 回 日本生物工学会, 2024 年 09 月, 東京

22. 村上 幸平, 小田原 遼河, 高井 怜於, 山本 みな美, 濱島 隼人, 河野 行雄, 李 恒
オンサイト非破壊検査に向けた表示機能付きシート状カーボンナノチューブカメラ
第 42 回レーザセンシングシンポジウム, 2024 年 09 月, 大阪

23. 小坂 充輝, 敷地 大樹, 久保田 実樹, 出水 のあ, 山本 みな美, 河野 行雄, 李 恒
非破壊な多層構造復元に向けた光熱起電力型スキャナによる反射系赤外計測
第 42 回レーザセンシングシンポジウム, 2024 年 09 月, 大阪

24. 松﨑 勇斗, 蓼沼怜士, 青嶋祐斗, 山本みな美, 高井怜於, 河野 行雄, 李 恒,小川 剛伸,田中 充,河野 行雄
ハイブリッド光熱電ナノカーボン-ビスマス化合物型超高感度広帯域イメージャー
第 21 回 日本熱電学会学術講演会, 2024 年 09 月, つくば市

25. 河野 行雄
光が持つポテンシャルをいかに引き出すか：可視化技術の高度利用創出へ
さきがけ「構造機能と計測分析」, 2024 年 10 月, 別府

26. 小西 優一, 西山 黎, 橋谷田 俊, 河野 行雄
キラルサブ波長構造体によるテラヘルツ円偏光近接場生成
第 9 回フォトニクスワークショップ, 2024 年 11 月, 沖縄

27. Y. Matsuzaki, R. Tadenuma, Y. Aoshima, M. Yamamoto, L. Takai, Y. Kawano, K. Li
All-solution-processable ultrasensitive terahertz–infrared detectors with printable nanocarbon-inorganic hybrid structures
17th International Conference on Nanostructured Materials, 2024 年 11 月, UAE アブダビ

28. D. Shikichi, R. Ota, R. Odawara, M. Kubota, Y. Kawano, K. Li
Multi-wavelength computer vision for structure restoration with a carbon nanotubes imager
17th International Conference on Nanostructured Materials, 2024 年 11 月, UAE アブダビ

29. Q. Zhang, A. Sano, Y. Kawano, K. Li
Micro-wave-based non-destructive monitoring by photo-thermoelectric sensors with carbon nanotube films beyond the diffraction limit
17th International Conference on Nanostructured Materials, 2024 年 11 月, UAE アブダビ

30. L. Takai, Y. Matsuzaki, M. Yamamoto, Y. Kawano, K. Li
Two-dimensional high-yield printable integration of carbon nanotube pixels for real-time, large-area, and broadband non-destructive inspection camera applications
17th International Conference on Nanostructured Materials, 2024 年 11 月, UAE アブダビ

31. R. Odawara, M. Yamamoto, Y. Kawano, Y. Watanabe, K. Li
Two-dimensional integration design of carbon nanotube sensor for realizing visualization of long wavelength information
17th International Conference on Nanostructured Materials, 2024 年 11 月, UAE アブダビ

32. Y. Matsuzaki, R. Tadenuma, Y. Aoshima, M. Yamamoto, L. Takai, Y. Kawano, K. Li
Hybrid Structured Ultrasensitive Photo-Thermoelectric Ultrabroadband Image Sensors with Nanocarbon and Bismuth Composites
The 8th International Conference on Electronic Materials and Technology for Green Environment, 2024 年 11 月, 韓国

33. 黒崎 天翔, 根本 樹希, 佐野 明日美, 河野 行雄, 李 恒
カーボンナノチューブ広帯域光学画素のワンタッチスプレー塗布型集積化に向けた前処理タイプ支持基板ロールの表面材料・形状検討
第 51 回炭素材料学会年会, 2024 年 11 月, 福岡

34. 山田 大翔, 山本 みな美, 松﨑 勇斗, 高井 怜於, 昆 裕樹仁, 河野 行雄, 李 恒
光熱起電力効果型カーボンナノチューブ膜カメラシートの高歩留 まりな回路モジュール組み込み実装に向けた異種基板間での印刷工程
第 51 回炭素材料学会年会, 2024 年 11 月, 福岡

35. 西 智貴, 久保田 実樹, 出水 のあ, 敷地 大樹, 河野 行雄, 李 恒
非破壊でオンサイトな二系統テラヘルツ・赤外モニタニングに向けたカーボンナノチューブ膜イメージャーによる基礎反射計測の検証
第 51 回炭素材料学会年会, 2024 年 11 月, 福岡

36. 高井 怜於, 松崎 勇斗, 昆 裕樹仁, 山本 みな美, 河野 行雄, 李 恒
カーボンナノチューブ薄膜広帯域カメラシートの作製と非破壊検査応用
第 21 回薄膜材料デバイス研究会, 2024 年 11 月, 京都

37. 根本 樹希, 黒崎 天翔, 佐野 明日美, 河野 行雄, 李 恒
スプレー塗布による作製と水洗浄による廃棄へ向けた広帯域光センサ薄膜の基板条件検討
第 21 回薄膜材料デバイス研究会, 2024 年 11 月, 京都

38. 金 峻宇, 佐野 明日美, 張 棋, 河野 行雄, 李 恒
液中洗浄耐性を有する超広帯域ミリ波-可視光イメージセンサシートの設計および作製
第 21 回薄膜材料デバイス研究会, 2024 年 11 月, 京都

39. Yukio Kawano
Sheet-Type Terahertz and Infrared Imagers for Multi-View Visualization and Analysis
The 31st International Display Workshops, 2024 年 12 月, 札幌

40. 佐世 美帆, 大川 拓樹, 小川 剛伸, 田中 充, 河野 行雄
中赤外光による食品の栄養成分およびテクスチャーの推定
日本食品化学工学会 関東支部大会, 2025 年 03 月, 東京

【特許】

・ 国際特許出願 1 件