

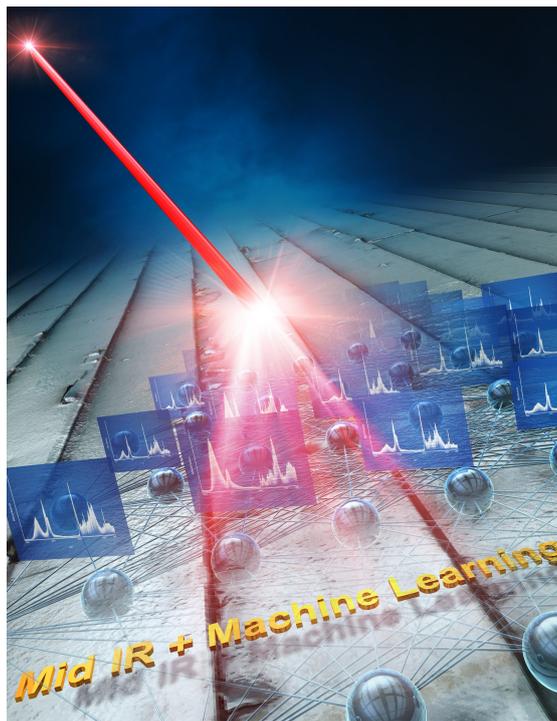
木材塗装の“見えない劣化”を予測 —赤外分光と機械学習で木材を守る新技術—

概要

京都大学大学院農学研究科の寺本好邦准教授、山本千尋修士課程学生（研究当時）、西村香穂修士課程学生らの研究グループは、木材塗装の劣化を非破壊・早期に予測する新たな技術を開発しました。中赤外分光法と機械学習（PLS 回帰）を組み合わせることで、塗膜の外観には表れない分子レベルの変化をとらえ、劣化の度合いを高精度に予測することに成功しました。これにより、従来のような目視点検に頼らず、塗膜の劣化進行を早期に察知し、木材の腐朽や建築物の劣化リスクを未然に防ぐことが可能になります。木造建築の利用が広がるなか、建物の長寿命化や点検作業の省力化、メンテナンスの効率化に大きく貢献すると期待されます。

本研究は、京都市「産学連携実装化プロジェクト」ならびに公益財団法人日本化学繊維研究所「2024 年度研究助成」の支援を受け、木材塗料メーカーである玄々化学工業株式会社との共同研究として行われました。

本研究成果は 2025 年 3 月 19 日に国際学術誌「*Advanced Sustainable Systems*」にオンライン掲載されました。



赤外スペクトルと機械学習によって塗膜の劣化状態を解析する技術のイメージ

元画像：Advanced Sustainable Systems front cover picture（2024 年、Teramoto et al. Vol. 8, Issue 2, 2300354）より改変。© Wiley-VCH. 掲載許諾取得済。

1. 背景

近年、木造建築の需要は世界的に高まっており、日本でも「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律（通称：都市（まち）の木造化推進法）」などの政策的後押しを受けて、公共施設や中高層建築での木材利用が拡大しています。木材は再生可能資源であり、建築物内に長期間炭素を固定できることから、環境負荷の低減に貢献する素材として注目されています。

一方で、木材は紫外線・湿気・温度変化などの外的要因によって劣化しやすく、特に屋外で使用される場合には、塗装などによる表面保護とその維持管理が重要です。木材塗装は比較的安価で施工しやすい手段である一方、その性能を持続させるためには、定期的な点検と再塗装が欠かせません。劣化が視認できるようになった時点では、すでに木材内部の腐朽が進行しているケースも少なくないため、早期の対応が重要とされています。こうした点検や補修には、目視による状態確認や塗膜の剥離処理など、時間と労力のかかる作業が伴い、実務上の負担も大きくなります。

また、塗膜の初期劣化は外見上ほとんど変化が見られず、従来の点検手法では見逃されてしまうことも少なくありません。最近では、木造建築の維持管理に関する課題が社会的な関心を集めつつあります。こうした状況から、“目に見えない劣化”を早期に検出して、メンテナンスの効率化と信頼性の向上を図る技術の必要性が高まっています。本研究は、そうしたニーズに応えるための新たな診断手法の開発を目指しました。

2. 研究手法・成果

本研究では、中赤外分光法（ATR-FTIR）と機械学習による統計解析を組み合わせることで、木材塗装の潜在的な劣化を非破壊かつ高精度に予測する手法を開発しました。

対象としたのは、木材用途においても一般的に使用されている水系アクリル樹脂塗料で、環境負荷の少ない塗装材料として位置づけられています。さらに、塗料中に植物由来のセルロースナノファイバー（CNF）を添加し、その濃度を変えた複数の塗膜を作製しました。CNFは、塗装木材の変色や割れの抑制に有効とされる新しい機能性添加剤であり、森林総合研究所と玄々化学工業株式会社の共同研究により木材塗料への応用が進められ[文献：1. T. Shimokawa, Y. Hishikawa, E. Togawa, H. Shibuya, M. Kobayashi, A. Ishikawa, X. He, H. Ohki, K. Magara, J. Wood Sci. 2021, 67, 74.]、すでに市販製品としても展開されています。

これらの塗膜に対し、人工気象装置による加速劣化試験を行い、劣化の進行とともに中赤外スペクトルを取得しました。得られたスペクトルデータをもとに、回帰モデル（部分最小二乗法：PLS）を構築し、塗膜の“劣化時間”を数値として予測しました。

塗膜の劣化は初期段階では視覚的な変化が乏しく、従来の目視点検では捉えにくいという課題がありますが、本研究では、赤外分光によってそうした「目に見えない劣化」の兆候を化学的な変化として可視化し、それを統計的に解析することで、より客観的で高精度な診断を可能にしました。さらに本研究では、遺伝的アルゴリズム（GA）による波数選択を組み合わせた発展的な手法（GAWNSPLS）を導入し、予測精度の向上とモデルの解釈性の両立を図りました。

3. 波及効果、今後の予定

本技術により、塗装木材建築物の迅速かつ非破壊な点検が可能となり、木材の生物劣化に至る前段階の“目に見えない劣化”を省力的にかつ数値的に把握できるようになります。これにより、従来の目視点検に頼らずにメンテナンスの効率化を図ることができ、再塗装の適切なタイミングの把握や維持管理費用の削減につながります。

また、本手法は木材塗料に限らず、金属やコンクリートといった他素材の塗膜にも応用可能であり、広範な建築・インフラ分野における耐候性評価の効率化にも貢献が期待されます。

現在、実際の木造建築物において現場試験も実施しており、今後は実フィールドでの検証データをもとにモデルの精度をさらに高めるとともに、より高度な統計手法の導入や劣化予測の標準化にも取り組んでいく予定です。さらに、塗膜の劣化挙動を定量的に可視化できるという特性から、塗料材料の開発・改良プロセスへの応用も期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、2024年度「京都市産学連携実装化プロジェクト」ならびに公益財団法人日本化学繊維研究所「2024年度研究助成」の支援を受け、京都大学大学院農学研究科 寺本好邦准教授の研究グループと、木材塗料メーカーである玄々化学工業株式会社（愛知県津島市）との共同研究として実施されました。研究課題名は「中赤外分光と機械学習による木材塗料の劣化診断技術の開発」であり、研究成果は2025年3月19日、国際学術誌 *Advanced Sustainable Systems* にオンライン掲載されました。

<用語解説>

① ATR-FTIR (Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

中赤外線を用いて物質表面の化学構造を非破壊で分析する分光法の一つです。塗膜表面に赤外線を当てて内部反射させ、反射光の吸収スペクトルを通じて分子構造の変化を可視化することができます。携帯型装置もあり、現場での計測にも適しています。

② CNF (Cellulose Nanofiber : セルロースナノファイバー)

植物由来のナノサイズの繊維で、軽量かつ高強度なバイオマテリアルです。近年は塗料への応用も進んでおり、塗膜の割れや変色の抑制、耐久性の向上など、木材塗装における機能性添加剤として注目されています。

③ PLS 回帰 (Partial Least Squares Regression)

多変量解析の一手法で、説明変数（今回はスペクトルの各波数に対する吸光度）と目的変数（人工気象装置による加速劣化時間）との関係を見出し、予測を行う統計的モデルです。本研究では、塗膜の状態をスペクトルデータから数値的に推定するために活用されました。

④ GAWNSPLS (Genetic Algorithm-based Wavenumber Selection with Partial Least Squares Regression)

赤外スペクトルのように情報量の多いデータから、予測に役立つ特徴（波数）だけを賢く選び出して分析する手法です。「GA（遺伝的アルゴリズム）」は、生物の進化になぞらえた方法で、最もよい組み合わせを“世代交代”させながら探すアルゴリズムです。このGAを使って赤外線の波数の中から重要な部分だけを選び出し、「PLS 回帰」という統計モデルに組み合わせることで、より正確で解釈しやすい予測ができるようになります。

<研究者のコメント>

木材塗装の劣化は、見た目では気づきにくい「静かな変化」として進行し、気づいたときには内部まで損傷していることもあります。今回の研究では、そうした“目に見えない劣化”を科学的根拠に基づいて捉える手法の確立を目指しました。赤外分光によって塗膜中の化学構造の変化を可視化し、機械学習により劣化状態を数値として予測することで、感覚や経験に頼らない診断が可能となる一步を示すことができました。

今後は、木材塗装に限らずさまざまな材料・製品へと応用範囲を広げ、持続可能な社会を支える「スマートメンテナンス技術」へと発展させていきたいと考えています。また、維持管理業務の効率化や判断のデータ化を通じて、木材利用関連産業のDX（デジタルトランスフォーメーション）にも貢献していければと期待しています。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Quantitative Prediction of Latent Deterioration in Waterborne Coatings for Wood Using Mid-Infrared Spectroscopy and Machine Learning

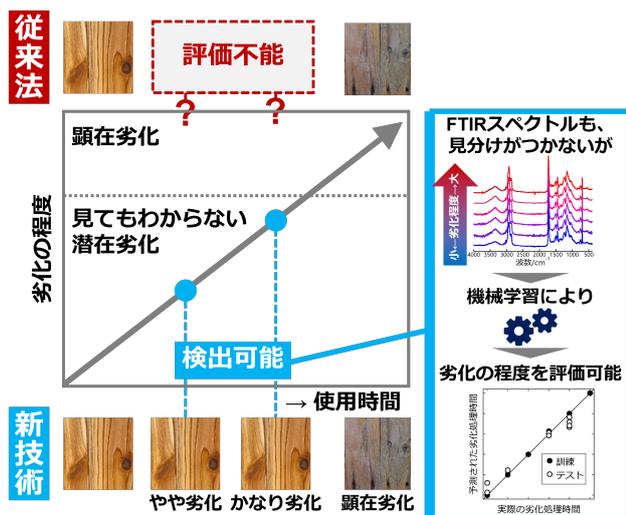
(中赤外分光と機械学習による木材水性塗料の潜在的劣化の定量予測)

著者：Yoshikuni Teramoto*, Takumi Ito, Chihiro Yamamoto, Kaho Nishimura, Toshiyuki Takano, Hironari Ohki (*責任著者)

掲載誌：Advanced Sustainable Systems

DOI：10.1002/adsu.202401052

<参考図表>



図：目視では判断できない塗膜の潜在劣化を定量評価

従来法では視認できる段階にならなければ劣化の評価が難しかったが、本研究では中赤外分光と機械学習により、見た目ではわからない段階の劣化を定量的に評価できるようになった。新技術では、劣化のごく初期から劣化度合いを予測可能。