

平成 29 年 4 月 24 日

公益信託 NEXCO 関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金
受託者 三菱UFJ 信託銀行株式会社 御中

研究概要書

研究課題：高速道路のひび割れを検出する方法の開発

研究代表者：東京工業大学物質理工学院 准教授 道信 剛志

共同研究者：土木研究所先端材料資源研究センター 主任研究員 百武 壮

はじめに

インフラ構造物の高齢化が進む中、建設時に想定されていなかった巨大地震や天災などの潜在的な重大事故リスクを低減させるための長寿命化研究のニーズが高まっている。一般的な打音検査や最先端装置を用いた大掛かりな点検技術は高コストになるため、新しい安価な日常的モニタリング技術の開発が求められている。また、それによって効率的かつ安心安全な社会インフラが実現できる。

1. 研究の目的

本研究では、特に高速道路や箱桁橋の安全に焦点を絞り、コンクリートのひび割れを高感度で検出するためのセンサー塗料を開発することを目的とした。安価に大量生産するために有機高分子材料からなる塗料とすることを選択した。高分子は溶剤に溶かすとインクとなるため実用的価値が高い。また、センサー素材として酸素濃度に応答して発光強度が変化する有機色素を塗膜中に少量混合しておく。これにより、塗膜のひび割れ部位に侵入した酸素に反応して消光が起こるため、ひび割れを高感度で検出することができる（図 1）。この方法は高分子光学酸素センサーの原理を上手に活用しており、酸化セラミックス等の無機材料を用いたセンサーより安価で簡単に作製でき、大量生産にも対応できる^[1]。最終的には、高速道路内壁および箱桁橋内壁に塗布してそれらを定常的に計測する技術として確立する。

2. センサー塗料高分子の開発

まず、マトリックスとなる有機高分子とセンサー機能を有する色素を選択した。有機高分子としては大量に生産されている汎用プラスチックが適しており、ポリスチレン（PS）またはポリ塩化ビニル（PVC）を選択した。有機色素としては酸素感度が高いパラジウムポルフィリン（PdTPP）を選択した。クロロホルム中に PS と PdTPP（1 重量%）を溶解させ、スプレーコート法によりアルミ板上に膜厚 2~4 μm の高分子膜を作製した。酸素感度（ S_p ）の評価は定温条件下で酸素圧を変えて発光強度を測定し、Stern-Volmer 式より解析した。 S_p は 0.90%kPa であり、通常の高分子光学酸素センサーと同程度の値を示した。さらに酸素感度を向上させるため、PS と PdTPP の溶液を電界紡糸してナノファイバーを作製した。直径約 210nm の均一ナノファイバー膜を作製することができた（図 2）。ナノフ

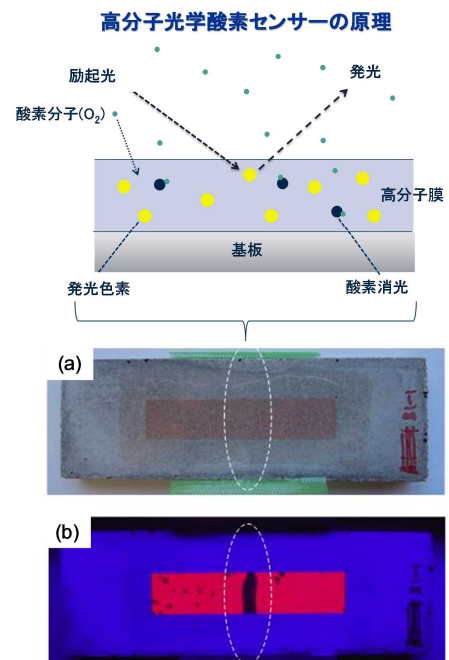


図 1 高分子光学酸素センサーの原理および実際の塗料を用いた (a) 自然光照射および (b) 紫外光照射下におけるひび割れ検出の様子

ファイバー膜の酸素感度を評価したところ、 S_p は0.99kPaへと向上し、試料表面積の増大が検出感度の向上に寄与することを示唆した^[2,3]。また、化学の観点から有機色素の構造を変化させ、それによって高分子膜のガス透過性がどのように変化するかについても検証した^[4,5]。マトリックス高分子として一部のエンブラも有望であることを明らかにした。

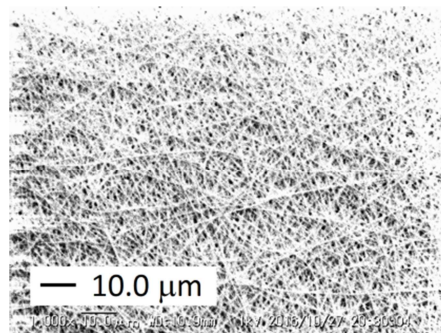


図2 PS/PdTPP ナノファイバー膜のSEM像

3. 温度応答性の解消

社会インフラに用いるひび割れ検出塗料には年単位で安定したセンサー機能が求められる。季節によって検出感度に差が出ることを避けるため、PdTPPの温度依存性を解消する方法について調査した。一番簡単な方法は、酸素応答する感圧色素 (PdTPP) に加えて発光強度が温度にのみ依存する感温色素 (EuDT) を併用して二色センサーにすることである。EuDT 発光の温度依存性から正確な温度を算出し、その値を用いて PdTPP の酸素感度を補正した^[3]。スプレーコート膜の補正前の二乗平均平方根 (RMS) は16.2kPaであったのに対し、補正後は4.2kPaまで低減しており、本方法の有効性が示唆された。また、ナノファイバー膜でも同様に補正後はRMS値が約1/5に低下しており、試料形状によらず用いることができた。

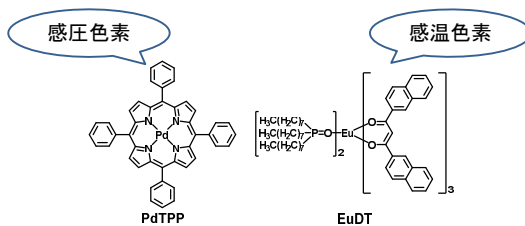


図3 二色センサー用色素の組合せ

さらに、PdTPPをPVCの側鎖に共有結合で連結させる方法についても調査した。PVCをアジ化ナトリウムで処理することで一部アジド化し、銅触媒によるアルキン-アジド付加環化反応を用いて1重量%程度のPdTPPをPVCに連結させた。この方法では一部のアジド基が未反応のまま残存しているため、スプレーコート後に光架橋することができる。架橋膜は架橋前に比べて熱運動が抑制されるため S_p の温度応答性が減少していた^[6]。

4. まとめと今後の展望

ひび割れ検出塗料の開発とその検出感度の最適化は予定通りの期間で完了することができた。今後はひび割れ塗料の実装に向けた研究に進展していく。一番重要なのはセンサー塗膜のトップコート層を重ねて耐環境性を向上させることである。エポキシ樹脂やフッ素樹脂は架橋密度の調節が容易で、耐薬性や機械強度も十分高いため有望である。ひび割れ検出塗料を実装した実際の構造部材を用いた載荷試験や試験橋梁におけるフィールド試験まで実施していく。

参考文献

- [1] 百武 壮, 西崎 到, 道信 剛志, *検査技術*, **2015**, *20*, 18.
- [2] 道信 剛志, *繊維学会誌*, **2016**, *72*, 333.
- [3] S. Sano, T. Yuuki, T. Hyakutake, K. Morita, H. Sakaue, S. Arai, H. Matsumoto, T. Michinobu, submitted.
- [4] Y. Li, Y. Washino, T. Hyakutake, T. Michinobu, *J. Fiber Sci. Technol.* **2017**, *73*, 82.
- [5] Y. Li, Y. Washino, T. Hyakutake, T. Michinobu, *Anal. Sci.* in press.
- [6] A. Hamasaki, T. Hyakutake, K. Morita, H. Sakaue, T. Michinobu, in preparation.