

## ひび割れを光検出する塗料と構造物劣化検出

百武 壮・西崎 到・道信剛志

## 1. はじめに

社会資本の高齢化が急速に進展しつつあり、一部では劣化にともなう重大損傷が発生するなどの事例も知られる。このような社会資本の老朽化対策として、国土交通省では第4次社会資本整備重点計画（平成27～32年度）において「社会資本の戦略的な維持管理・更新」を重点目標に掲げるなど、関連施策が進められている。例えば道路構造物については、法改正による点検が義務化されているが、多くの施設を管理する地方公共団体では、予算・人・技術力ともに不足しがちなのが現状であり、より安価で判断が容易で、信頼性が高く効率的な点検・診断技術の確立が切望されている。

こういった状況の中、内閣府に設置されている総合科学技術会議でも「次世代インフラ」は我が国が取り組むべき科学技術課題のひとつの柱として位置づけられている。社会資本の維持管理・更新について、予算・人・技術力に依存しにくい技術を生み出す、新材料やIT、ロボットを活用した構造物劣化検出・診断技術の高度化を実現する革新的な科学技術イノベーションが期待されている<sup>1)</sup>。

新材料を応用した構造物劣化検出・診断技術については、これまで様々な技術が検討・提案されてきた。その代表的な例としては光ファイバーなどの新材料を構造物に埋め込むタイプの非破壊検査技術<sup>2)</sup>があげられるが、埋め込み位置の情報しか得られないため、構造物の特定の部位の状況把握には適しているが、劣化部位が特定されない場合には用を足さないと考えられる。

一方、変状部位が特定されない場合には、構造物の弱点部分に、より広く適用でき、かつ、変状を色調や発光などの「見え方」の変化で検知できるタイプの新材料が期待される。このようなタイプの新材料の主な事例を表-1に示す。

これらはそれぞれに特徴があるが、応力発光体は他の材料と比較して自ら発光するという点特徴的である<sup>3)</sup>。構造物で比較的光が当たりにくく暗い部分（例えばトンネルや箱桁内など）にこのような材料が使えると、変状の検知に有力となるのが期待できよう。塗料としての適用が可能な点も、構造物の表面に劣化検知材料を設置するのが容易となる点で有利である。とはいえ、現状の応力発光体は応力が作用した瞬間のみに発光するので、適用用途も動的な変状を検知したい場合が主となるものと思われる。

表-1 新材料を活用した構造物劣化検出・診断技術の例

	技術の概要	文献
応力発光体	応力作用時に発光する塗料によってひび割れの動的検出。	3)
モアレ縞	干渉縞によって変形前後の画像処理で歪を可視化する。	4)
オパール薄膜	変形を検知して変色するシートによって歪を目視できる。	5)

構造物の変状を調べる際の点検項目の主たるものとしてはひび割れがあげられる。ひび割れはコンクリート、鋼材ともに発生する可能性がある。コンクリートの場合にはただちに異常を示す変状とは限らないが、発生部位や進展状況が把握されていることは重要である。点検において広い構造物表面から進行性の細かなひび割れを検知することは困難であり、比較的遠方からこの発見を容易にすることは、点検作業の省力化に寄与できることが期待できる。

これらの状況から、土木研究所先端材料資源研究センターでは、発光によりひび割れを検知する新しい塗装材料について基礎的な検討を行ってきた<sup>6)</sup>。本報告でその状況を紹介する。

## 2. 発光による酸素検出塗料

ブラックライトを照射すると蛍光やりん光を発する塗料は、紙幣やパスポートなどの偽造防止に用いられるほか、イルミネーションや装飾品など、身の回りにも利用されている。これらの塗料に含

まれる色素はブラックライトのエネルギーを吸収し、可視光で光る性質があり、蛍光色素と呼ばれる。このような色素の中には、周りの酸素濃度に応じて発光が増減するものが知られている。色素の周囲に酸素分子が存在する場合、ブラックライトによって得られたエネルギーが発光することなく酸素分子への移動することで、発光強度が減少する(図-1)。この発光消光挙動はStern-Volmer式に従い、以下のように記述することができる。

$$I_0/I = 1 + K_{sv}[Q]$$

$I$ : 発光強度

$I_0$ : 酸素なしの発光強度

$[Q]$ : 酸素濃度

$K_{sv}$ : Stern-Volmer定数

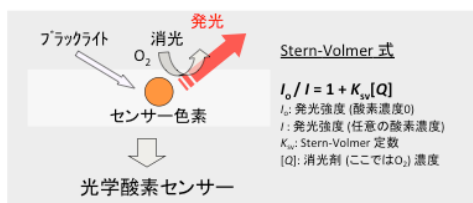


図-1 光学酸素センサー

この発光消光挙動、すなわち、発光の強弱で酸素濃度を示す酸素センサーは光学酸素センサーと呼ばれている。色素分子ひとつひとつが素子として働き、発光信号によって酸素濃度を直接計測することができるため、高い位置分解能、高速応答性、設置の簡便さといった利点がある。

酸素は生命活動、光合成、エネルギーや空気の流れにも関連する重要な分子である。この光学酸素センサーを用いた研究例として、模型に塗布して立体表面の空気の流れを可視化する<sup>7)</sup>、色素をタンパク質と結合させて生体中に送り込み、生きた細胞の酸素濃度をリアルタイム計測する<sup>8)</sup>などがあり、流体、エネルギー、環境、医療、食品などの様々な分野で応用、研究されている。筆者らは上記光学酸素センサーを土木構造物の塗装内に適用し、破断やひび割れに伴う塗装内部の酸素濃度変化から、劣化箇所の可視化、簡便なメンテナンス手法として活用する方法を検討している。

### 3. ひび割れ検知塗料の検出メカニズム

ひび割れ検出塗料(塗膜)は、ブラックライトを励起光として照射すると強いりん光を発する。母

材のひび割れ、あるいは塗装のはがれなどの劣化箇所から塗膜内に進入する酸素に応答して、劣化箇所付近が消光するセンサー新材料である。酸素センサーの素子となる色素をバインダー用高分子と溶剤に溶かした塗料をエポキシ樹脂などの下塗りの上に塗布成膜し、ガスバリア性の高い高分子で封止することで得られる。全体の構成を図-2に示す。エポキシ樹脂下塗り(50 $\mu$ m)は母材(ここではモルタル試験片)との接着性が良好で、ひび割れに追従するような硬い物性を有することで用いた。酸素センサー層は2~5 $\mu$ mであり、ガス透過性の高分子と酸素センサー色素(0.5wt%)トルエン溶液を用いてスプレー塗布した。酸素センサー層にガスバリアコーティングを積層(50 $\mu$ m)してひび割れ検出塗膜とした。ガスバリアコーティングはセンサー層と混合なく積層できるものを選択した。

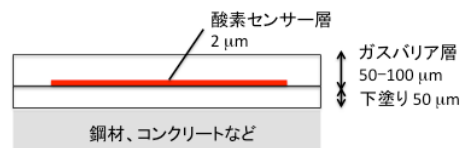


図-2 ひび割れ検出塗膜の積層例

### 4. 酸素センシングとひび割れ検出

酸素センサー色素をバインダー用高分子とトルエンに溶かした塗料を無蛍光ガラス上に塗布(膜厚: 約2 $\mu$ m)して標準試料(一般的な光学酸素センサー)とし、同標準試料の表面にガスバリア性のトップコート(膜厚: 約50 $\mu$ m)を積層したひび割れ検出塗膜を作製した。この2つの試料について蛍光分光光度計を用いて、一連の酸素濃度における発光スペクトルを計測した。ここでは、発光スペクトルおよび、酸素濃度を变化させた時の発光強度比の例を図-3に示す。標準試料は励起光(波長400nm、ブラックライトの波長)を選択することによって赤色発光し、発光強度は酸素濃度にもなって迅速(1秒以内)に消光した。一方で、ひび割れ検出塗膜の発光挙動はガスバリアされているため、酸素濃度に依存せず、高い発光強度を維持した(図-3(b)の■プロット)。

図-3(a)では光学酸素センサー標準試料の発光挙動を示している。酸素濃度0%の場合強い発光強度を示すが、酸素濃度21%(大気)になると発光

はほとんど観測されない。また、酸素濃度0%の時の発光強度  $I_0$  と、それぞれの酸素濃度  $I$  を除した発光強度比  $I_0/I$  と酸素濃度をプロット(図-3(b))した。ガス透過の良い高分子を用いた酸素センサー標準試料は(a)で示したように酸素濃度に応じて発光強度が変化しているが、バリア層を有するひび割れ検出塗膜では酸素濃度が変化してもセンサー層に酸素が届かないため発光強度は高いまま保たれている。

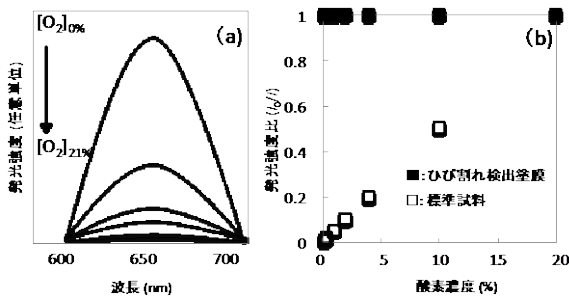


図-3 任意の酸素濃度における発光スペクトル(a)と発光強度変化比(b)の例

次にひび割れ検出塗膜のガスバリア層を破壊することで発光強度が変化し、塗膜の力学的破壊が発光強度に追従することを検証した。図-4に示すサンプルでは、ガスバリア層に用いるポリマーによって酸素センサー層が封入されているため、ブラックライト照射下で強い赤色発光を示している。この発光層の右上部に細かな傷(針径1mmで、刺し傷の直径0.1mm以下)をつけると酸素が侵入し、発光像に明らかな消光挙動が現れることが確認できた。

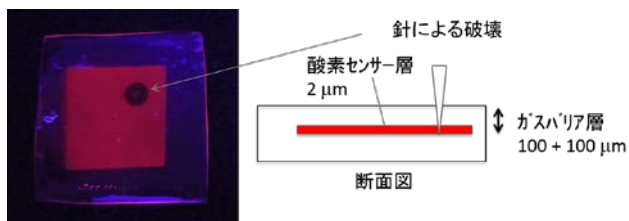


図-4 酸素センサーのガスバリアコーティング破壊応答

一般的な光学酸素センサーでは発光消光挙動を計測用デジタルカメラで撮影し、試験前と試験後の画像データから画像処理を経て酸素分布を解析する。本報のひび割れ検出塗膜では、ガスバリア層と酸素センサー層の酸素透過係数が大きく異なる材料を選択することで、ガスバリア層の破壊に

よってセンサー色素に接触する酸素が変化する。これによって特殊な計測用カメラを使用せずとも目視、あるいは市販のデジタルカメラでも発光強度の変化は容易に確認することができた。計測用カメラで詳細に発光像を解析したところ、発光部と消光部で発光強度の比は5程度であった。一般的な発光型のセンサー材料の感度指標である3.0以上の十分な感度であると考えている。

### 5. モルタル試験片のひび割れ可視化

10mm×40mm×120mmのモルタル試験片にエポキシ樹脂の下塗り、センサー層、ガスバリア層の順に塗布した試験片を作製した。センサー層は10mm×40mmの面積を塗布している。母材のひび割れとガスバリア層の破壊が同時に起こるようにガスバリア層および下塗りエポキシ樹脂の厚みを検討した結果、厚み50~100μmで0.1mm幅未満のひび割れに応答することがわかった。下塗り50μm、センサー層2μm、ガスバリア層50μmをモルタル試験片に積層し、引張試験に供した。ひび割れ幅が0.1mm以下の目視では発見が困難なひび割れであっても、発光像ではひび割れ箇所が消光して示された(図-5)。

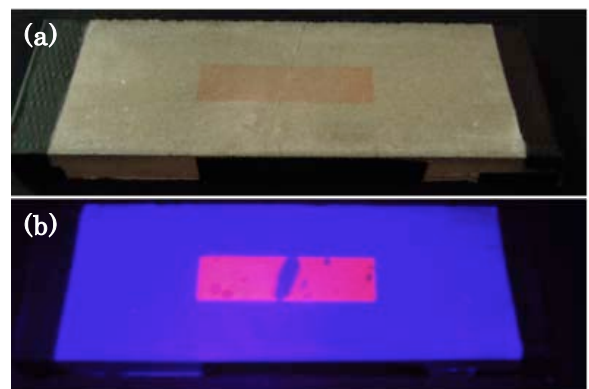


図-5 モルタル試験片に設置したひび割れ検出塗膜(a)室内灯下、(b)ブラックライト(波長405 nm)下

これらの知見から現在はひび割れ幅と発光消光の閾値をコントロールできるよう検討している。図-6が示すようにひび割れ検出塗料の発光は強く、また、発光部と消光部のコントラストが高いため、携帯型のブラックライトを励起光に用い、室内灯の下でも十分な発光消光が目視できる(現状では携帯型光源で数分間の照射が必要)。構造物の劣

化点検における実際の適用方法としては箱桁橋やトンネルの内部など、近接目視点検が困難な箇所に対して、自走式カメラやロボットと併用するような点検法として期待できる。酸素センサー色素は試薬として市販されており、センサー層5~10 $\mu\text{m}$ のうち0.5~1wt%の量を含み、1 $\text{m}^2$ あたり1万円以下のコストを試算している。下塗り、トップコートは既存の土木構造物用の塗料が使用できるため、最適な組み合わせを検討している。

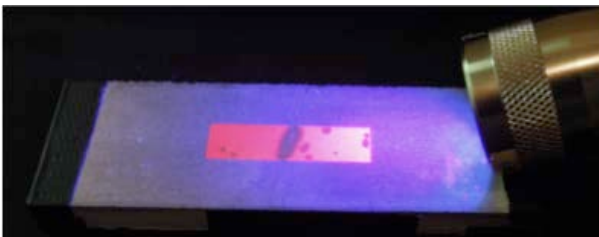


図-6 室内灯下でブラックライト照射したひび割れ検出塗料

## 6. まとめと今後の予定

光学酸素センサーを応用したひび割れ検出塗料をモルタル試験片に適用した実験例を報告した。ひび割れ幅0.1mmに反応し、室内灯下でも目視できる程度の発光像が得られた。今回紹介した光計測手法が現場で信頼性のある技術として実用するため、今後は耐候性、光照射と観測方法、メンテナンスシステムの構築などを経て関係機関と連携を図りつつ検討を重ねていく予定である。

## 謝 辞

本研究の一部はJSPS科研費(若手B: 22760334、若手A: 30468871)による助成、および前田記念工学財団研究助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 第111回総合科学技術会議科学技術イノベーション総合戦略(原案)  
<http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihu111/siryoy1-2.pdf>
- 2) Tomiyama T., Nishizaki I., Sakai T., Kubouchi M., Detection of concrete neutralization by novel fiber optic sensor, *Int. Soc. Struct. Health Monitr. Intell. Infrastr.* **4**, ID349, 2009
- 3) 徐 超男、上野直宏、寺崎 正、山田浩志：応力発光による構造物診断技術、エヌ・ティー・エス、2012
- 4) 李 志遠、王 慶華、津田 浩、飯田伊佐務、佐藤浩幸、中島富雄：サンプリングモアレ法による構造物のひずみ計測、非破壊検査、64、pp.160~165、2015
- 5) Fudouzi H., Sawada T., Hyakutake T., Nishizaki T., Tanaka Y., Ari I., Smart photonic coating as a new visualization technique of strain deformation of metal plates, *Proc. SPIE*, **8345**, 1-7, 2012
- 6) 百武 壮、西崎 到、道信剛志：ひび割れ検出塗料を用いた構造物の劣化検出技術、検査技術、20、pp.18~22、2015
- 7) Liu T., Sullivan J.P., Pressure and Temperature Sensitive Paints, Springer, 2004
- 8) Spencer J.A., Ferraro F., Roussakis E., Klein A., Wu J., Runnels J.M., Zaher W., Mortensen L.J., Alt C., Turcotte R., Yusuf R., Cote D., Vinogradov S.A., Scadden D.T., Lin C.P., Direct measurement of local oxygen concentration in the bone marrow of live animals, *Nature*, **508**, 269-273, 2014

百武 壮



土木研究所先端材料資源研究センター 研究員、博士(工学)  
Dr. Tsuyoshi HYAKUTAKE

西崎 到



土木研究所先端材料資源研究センター 上席研究員、博士(工学)  
Dr. Itaru NISHIZAKI

道信剛志



東京工業大学大学院理工学研究科 有機・高分子物質専攻 准教授、博士(工学)  
Prof. Tsuyoshi MICHINOBU