

# 機能材料のインフラ点検技術への応用

百武 壮・新田弘之

## 1. はじめに

高度成長期以降に整備された社会資本構造物の老朽化が進んでおり、今後20年で建設後50年以上経過する施設の割合が50%を超過すると試算されている<sup>1)</sup>。これに対応するため、国土交通省では「社会資本の戦略的な維持管理・更新」に関した多くの施策を進めており、その一つとして、新技術の開発・社会実装にも取り組んでいる。また、平成30年に閣議決定された統合イノベーション戦略では、技術シーズを生み出すだけでなく、適切に社会に還元していく実用化・社会実装を見据えた研究開発の必要性・重要性を述べている<sup>2)</sup>。社会資本構造物の維持管理についても、IoT、ビッグデータ、AIなど情報技術による社会変革に対応し構造物劣化検出・診断技術を実現する技術革新イノベーションが期待されている。

土木研究所先端材料資源研究センターではこのような背景の元、材料研究から構造物劣化検出・診断技術に対するアプローチとして、構造物の変状をサイバー空間においてデジタル情報化しやすく、かつ、フィジカル空間においても専門知識不要で変状に気づきやすい、色調や発光などの「見え方」の変化で検知できる新材料に着目し、実用化研究を進めている。

## 2. 新材料を活用した構造物劣化検出の動向

構造物劣化検出・診断では非破壊検査の有効な活用が期待されるが、X線、超音波計測、あるいはひずみゲージや光ファイバーなど既存の非破壊検査法では、特殊な装置や多数のセンサー設置が必要であり、安価で精度高く広範囲の劣化情報を得るのは容易ではない。一方、最近ではひずみやひび割れに応答する機能材料が国内外で報告されてきており、土木分野への適用にも注目されつつある。このような材料を用いた研究例を表-1に示す。これら新材料はそれぞれにターゲットとな

る変状と「見え方」を発現する原理が異なるが、いずれも面的な情報が得られ、構造物の効率的な劣化検出に役立つ可能性がある。

筆者らは、以上を踏まえ、生体模倣、光化学、光干渉・幾何を背景とした機能性新材料を活用した、構造物の劣化検出・診断の効率化のための検討を行っている。本報告でその状況を紹介する。

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るひび割れの動的検出。	3)
力学応答樹脂	力学的刺激に応答して発光強度や色に変化。	4)
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。	5)
ひび割れ検出塗料	ひび割れによって侵入する酸素に応答して発光消光。	6)
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可視化。	7)

## 3. 生体模倣-オパール薄膜

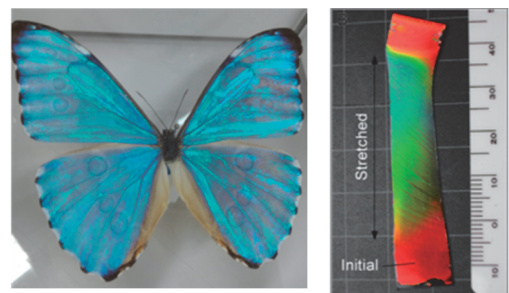


図-1 モルフォ蝶(左)とオパール薄膜(右)

生体模倣(バイオミメティクス)技術とは「生体の組成や形状を研究し、その優れた機能を工学技術として応用すること」とある(新語時事用語辞典より)。例えば、蓮の葉の微細構造を模倣することで撥水、撥油、防汚などの効果を得た製品が開発されるなど、身近な実用例も多い。

図-1に示すのは鮮やかな色と金属光沢をもつモルフォ蝶(左)、その蝶の羽の微細構造を真似たオパール薄膜(右)とよばれる薄いフィルムである。モルフォ蝶の羽根は色素や顔料を含まず、鱗粉の多層薄膜の周期構造による光の干渉によって色づ

いており、構造色と呼ばれる。これを模倣したオパール薄膜の発色も構造に由来しており、変形すると上記の周期構造が影響を受け、光の干渉する波長が変化し色が変わって見える。ひずみが色の变化として目視できるため、構造材料に設置することでひずみやひび割れの可視化ができる新材料としての応用が期待できる。

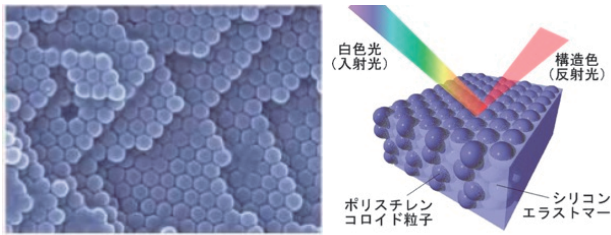


図-2 人工オパールのSEM像(左)とオパール薄膜の模式(右)

物質・材料研究機構(以下「NIMS」という。)では、粒子径(200nm)の揃ったナノスケール(1nmは $10^{-9}$  m)のコロイド粒子を最密充填した三次元周期構造体である人工オパールを開発している。この人工オパールをシリコンで充填固定化することで、粒子間距離を制御し、支持膜の変形を構造色として視覚化できることを報告している(図-2)<sup>8)</sup>。筆者らはNIMSとの共同研究によって、この人工オパールの変形と色の変化の関係について精査し、構造材料(金属、コンクリート)の塑性変形を記録できるシートとしてオパール薄膜を最適化した<sup>7)</sup>。

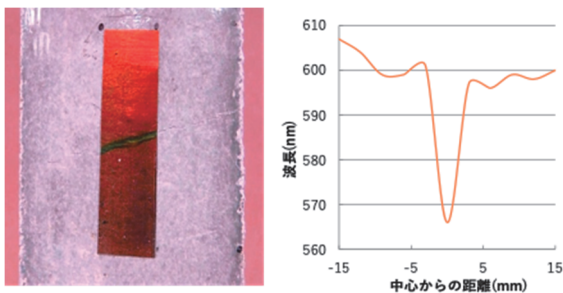


図-3 モルタル試験片のひび割れ可視化

例えば、中央に切り欠きのあるモルタル試験片にオパール薄膜を施工した試験片を作製し、ひび割れを導入したのが図-3である。目視が困難なひび割れの前兆時点でも応答(変色)し始め、1mm程度のひび割れが確認できるころには赤色から緑色に変色したのがはっきりと目視できた。さらに色の变化の見落とししなどがないようにスマートフォンアプリも共同で開発中であり、専門知識がなく

でも構造物の点検が可能になるような取り組みも行っている(図-4)。補修の再劣化検知、ひび割れ幅、ひずみの値への換算なども検討を進めているところであり、構造物の劣化検出の効率化に寄与できるように開発を進めている。

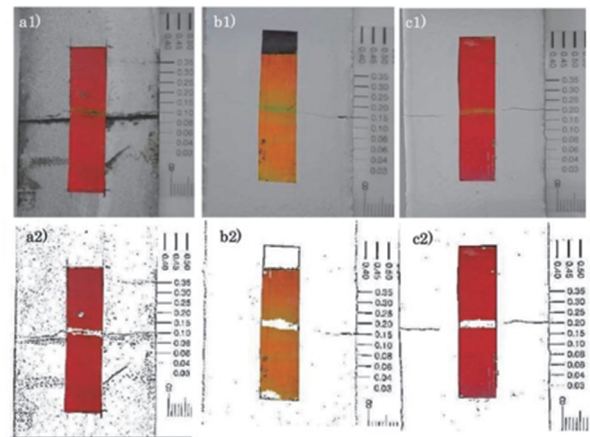


図-4 スマホアプリによる変状判定例。上段が元画像下段がクロマキー合成により健全部以外を透明化(a)ひび割れ注入部への施工(b)(c)表面被覆への施工

#### 4. 光化学- ひび割れ検知塗料

ブラックライトで照射すると光を発する塗料は、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。酸素に反応して発光強度が変化するため、光学酸素センサーとして研究され、細胞内酸素や航空機空気圧力モニタリング、食品の脱気などの用途で実用されている。筆者らは高分子合成の技術を有する東京工業大学と共同で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<sup>6)</sup>。

コンクリートの下塗りにセンサー層を塗布し、ガスバリア層を積層して一式とし、コンクリートのひび割れによって塗装内部に酸素が入ってくことで発光がひび割れを検知するものである。モルタル試験片に積層塗布した試験片を作製し、各層の厚みによって応答するひび割れ幅を制御できることを示した例が図-5である。ひび割れ検出塗料の発光は強く、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た場合でも十分な発光消光が目視できる(図-6)。

構造物内部などの暗視野での計測を模擬するため、コンクリート製のU形側溝の内面にひび割れ検出塗料を施工した(図-7)。载荷によって模型には鉄筋に沿ってひび割れが生じ、施工した箇所は健全部は強く光、ひび割れ部は消光によって暗視野でも可視化できた。

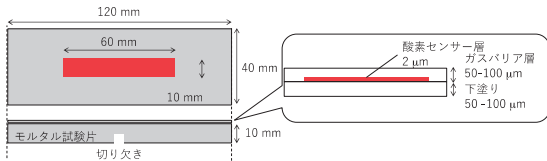


図-5 モルタル試験片へのひび割れ検出塗料施工例

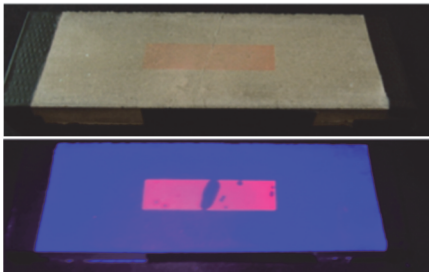


図-6 モルタル試験片に施工したひび割れ検出塗膜(a)室内灯下、(b)ブラックライト(波長405nm)下

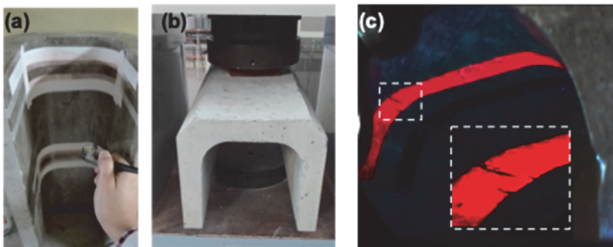


図-7 模型でのひび割れ可視化試験(a)塗装中(b)载荷試験(c)ブラックライト照射中下のひび割れ観察

今後はトンネル内などを想定し、投光器を用いて5メートル程度の遠方から十分な光量の励起光を照射する方法や、発光像を観測・記録する方法について検討を進める予定である。

## 5. 光干渉・幾何- モアレ縞

モアレ縞とは規則正しい繰り返し模様を重ね合わせたときに、周期のずれによって発生する縞模様のことである。身近な例では、ネットフェンス同士の重なりやモニターで縞模様を表示した時の画素と縞模様の重なりなどによっても生じることがある(図-8)。

モアレ縞を利用した変位の計測法は古くから知られ、最近ではサンプリングモアレ法など、デジタル画像処理を利用した定量的な方法が開発されている。しかし、これらのモアレ縞を用いた画像計測法は変状が生じた時と全くの同位置で計測した初期画像が必須となり、構造部材を定期的に点検・計測することは困難である。

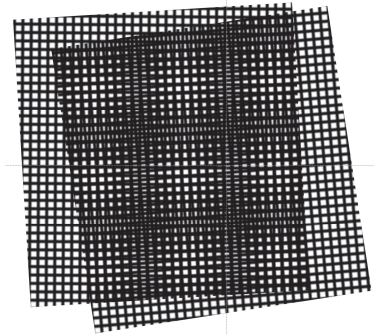


図-8 モアレ縞の例

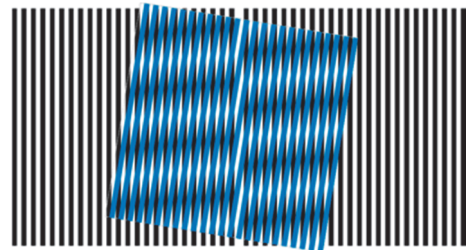


図-9 モアレ縞によるひび割れ部検出例

筆者らはNIMSと共同で従来のモアレ縞を応用した変位の計測とは全く異なる方法で構造部材のひび割れ幅を計測する方法を開発した<sup>9)</sup>。これによって、初期画像すなわち定点観測が不要になり、ひび割れ幅の計測法としての実用性が高くなった。本計測法では、ひび割れによって施工した格子の幅が広がることに着目するもので、画像処理によって格子を重ねた際に生じるモアレ縞のズレから幾何学的にひび割れ幅を算出する。図-9では黒い格子が施工する模様、青い格子が画像処理で用いる格子である。中央部に黒い格子間距離が広い箇所(ひび割れ模擬)があると発生するモアレ縞にズレが生じている。

ひび割れ幅 $w$ 、施工した格子ピッチ $a$ 、モアレ縞のズレ $\Delta d/d$ としたとき、この時の幾何学的な関係は式(1)ようになる。 $a$ は既知であることからモアレ縞のズレを計測することでひび割れ幅が算出できる。

$$w = a \times \frac{\Delta d}{d} \quad \text{式(1)}$$

図-10の例では格子ピッチ1.5mmの格子が施工されており、モアレ縞のズレが $\Delta d/d=1.5/2.8$ であったので、ひび割れ幅は0.27mmと算出された。ゲージ測定値は0.3mmであったので、正確にひび割れ幅が算出されている。

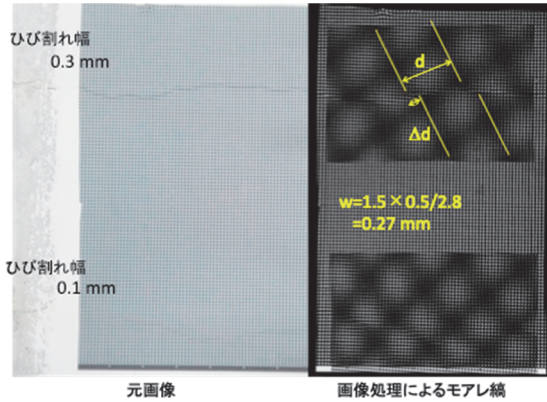


図-10 モアレ縞によるひび割れ幅の算出例

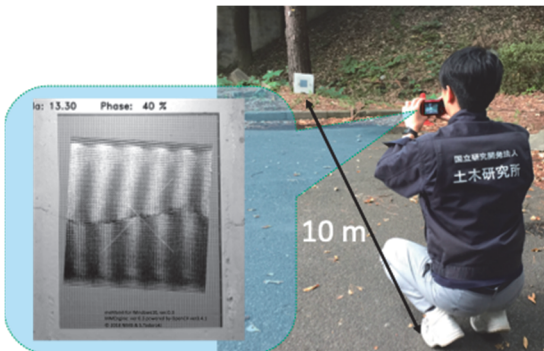


図-11 遠隔からのモアレ縞によるひび割れ部検出例

カメラで画像が取得できればひび割れ幅の計測が可能であることから、カメラのズームや望遠レンズを使用すれば遠隔での計測も可能である。さらに現場で解析可能なアプリの開発にも取り組んでいる(図-11)。

## 6. おわりに

異分野研究と協働する土木技術の例として、機能材料を応用してひずみやひび割れを検知する研究について報告した。今回報告した機能材料を用いた構造物の点検法に共通するのは

- (1) 電源不要で設置が簡便である。災害時にもすぐに点検ができる。
- (2) 計測に特殊な装置や技術が不要で、スマートフォン等を用いて誰にでも点検ができる。
- (3) 画像がデータとなるため望遠レンズ等を介して遠隔計測が可能である。

などの特長である。オパール薄膜は誰にでもわか

りやすい色の変化による判定、ひび割れ検知塗料は発光により暗所で効果が高い、モアレ縞はひび割れの発生だけでなく、幅まで計測できる。現在、それぞれの特長をより活かせる適用場所を検討しているところである。また、これら機能材料をインフラ構造物の維持管理に用いる際の信頼性を担保するための試験法の開発や技術基準を設定するための検討も進めている。

## 謝 辞

本研究は国立研究開発法人物質・材料研究機構、広島大学、東京工業大学との共同で実施され、一部はJSPS科研費(若手A: 25709036; 若手B: 22760334; 基盤B: 26289139)による助成を受けたものである。

## 参考文献

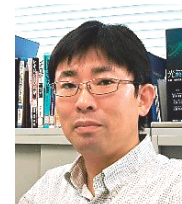
- 1) 平成25年度国土交通白書、2014
- 2) 統合イノベーション戦略 閣議決定、2018
- 3) 徐超男、上野直宏、寺崎正、山田浩志: 応力発光による構造体診断技術、NTS、2012
- 4) 例えば、Balkenende D., Coulibaly S., Balog S., Simon Y., Fiore G., Weder C., Mechanochemistry with Metallosupramolecular Polymers, J.Am.Chem.Soc. 136, pp.10493-10498, 2014
- 5) 例えば、李志遠、王慶華、津田浩、飯田伊佐務、佐藤浩幸、中島富雄: サンプルングモアレ法による構造材料のひずみ計測、非破壊検査、64、pp.160~165、2015
- 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) 百武壮、西崎到、新田弘之、不動寺浩、轟真市、田中義和: ひずみやひび割れを視覚化するシート材料を用いた計測システムの検討、土木学会年次学術講演会概要集、72、pp.55~56、2017
- 8) Fudouzi H., Sawada T., Photonic Rubber Sheets with Tunable Color by Elastic Deformation, Langmuir 2, pp.1365-1368, 2006.
- 9) 百武壮、新田弘之、岸本哲、轟真市: モアレ縞を利用したコンクリートのひび割れ計測システムの検討、土木学会年次学術講演会概要集、73、pp.73~74、2018

百武 壮



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

新田弘之



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. Hiroyuki NITTA