

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14408

研究課題名(和文)耐熱性歪み可視化シートの創製とモニタリングシステムの構築

研究課題名(英文) Fabrication of heat resistant strain imaging sheet and construction of monitoring system

研究代表者

不動寺 浩 (Fudouzi, Hiroshi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー

研究者番号：20354160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：社会インフラなど構造物の新しい検査技術として歪みを構造色変化として可視化する歪み可視化シートを研究している。歪み可視化シートの耐熱性向上のためシリカ粒子のコロイド結晶の成膜とその固定に成功した。また、太陽電池駆動遠隔自動撮影システムとカメラ付き携帯端末による画像解析アプリの開発を通じて、歪み可視化シートのリモートセンシングとリアルタイム・モニタリングが可能であることを示した。これらは老朽化した構造物の安全管理を低コストで実現する道を拓くものである。

研究成果の概要(英文)：We have been studying on strain imaging sheet with structural color change for new inspection technology in infrastructures. In order to improve the heat resistance of the strain imaging sheet, we successfully formed and fixed colloidal crystal of silica particles. We also demonstrated a remote sensing system and a real-time monitoring application for strain imaging sheets, namely, an automatic remote photographing system driven by a solar battery and an application of image analysis for mobile phones and tablets. They have a potential to maintain the safety of degraded buildings and bridges with low cost.

研究分野：材料化学

キーワード：コロイド結晶 構造色 モノのインターネット(IoT) 常時モニタリング リモートセンシング 画像解析 シリカオパール 耐熱エラストマー

1. 研究開始当初の背景

自然災害や社会資本の経年劣化あるいは航空機や高速鉄道などの大量普及に伴い構造材料や構造物の変形や歪みをモニタリングできるスマート材料に期待されている。我々はこれまでに構造材料の変形や歪みを色の变化として視認可能な”歪み可視化シート”という新材料とその応用を研究している(図1)。

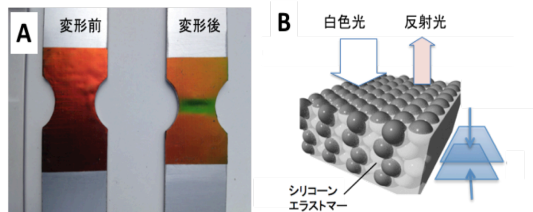


図1 歪み可視化シート：(A)塑性変形領域の構造色変化と(B)薄膜の発色メカニズム

写真Aは金属(アルミニウム)の塑性変形を可視化しており変形領域が赤色から緑色へと変色している。この新材料は支持基盤となるプラスチックシート表面に粒径の揃った単分散粒子が規則配列したコロイドフォトニック結晶という3次元規則構造(模式図1B)である。入射した白色光がブラッグ回折で選択反射することで構造色が発色する。

2. 研究の目的

現在、歪み可視化シートは構成材料の制約から室温~50°C程度での使用である。しかし、産業インフラや交通機関ではエンジンやボイラーなど100°Cを超えるような運転温度での使用や過酷な環境で適用するには、シートの構成材料を抜本的に変えていく必要がある。耐熱性のある歪み可視化シートの設計が最初のテーマの目的である。

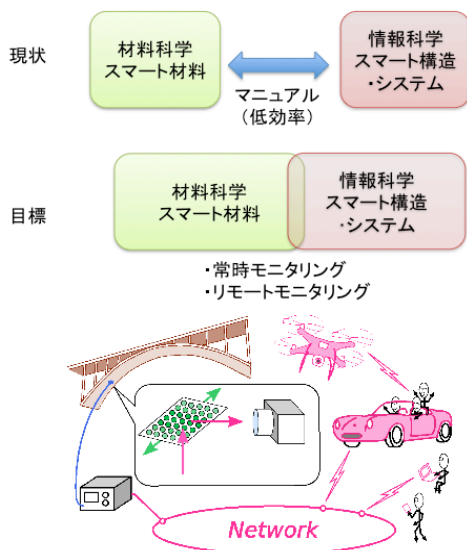


図2 歪み可視化シートのIoTシステム化

また、本研究のもう1つの挑戦目標として図2に示すよう材料科学と情報科学を融合した歪み可視化シートのIoTシステム化を試みる(図2)。これは図1Aのように歪み可視化シートでは、直感的に色変化を人は判断できる。視覚情報として機能するスマート材料も、伝える相手がコンピュータとなると大きな障壁が立ち上がる。人間がスマート材料に対して行っている判断そのものをコンピュータに代行させ、最終的にデジタル情報に落とし込まなければならないからである。

このインターフェースを実装することでスマート構造のシステム化が実現され、昨今のICT技術の進展(モノのインターネット化:IoT)や莫大なセンサをインターネットに繋げることでSociety 5.0が目指す超スマート社会の実現に貢献できると考えている。

3. 研究の方法

歪み可視化シートは単分散コロイド粒子であるポリスチレン(PS)の最密充填とその粒子間をシリコンエラストマーで充填しており、耐熱性が十分でない有機物質のPS粒子(ガラス転移温度が100°C前後)を無機物質のシリカ粒子に代替することでガラス転移温度や熱分解を抑制し耐熱性の材料設計を行う。

歪み可視化シートの作製フローを図3に示す。コロイド結晶成長は既存の縦型成膜プロセスを利用した。写真Aは成膜工程の様子である。(B)の概念図に示すよう基板を固定しステージ上のサスペンションの入ったアクリル容器が下降することで基板表面に成膜する。なお、本研究ではシリカ粒子を使用するため沈降減少を抑制するプロセス改良が必要である。Cはコロイド結晶成長したシリカ粒子の隙間に耐熱性のエラストマーを充填させ、さらに粒子間を拡大する工程を示している。

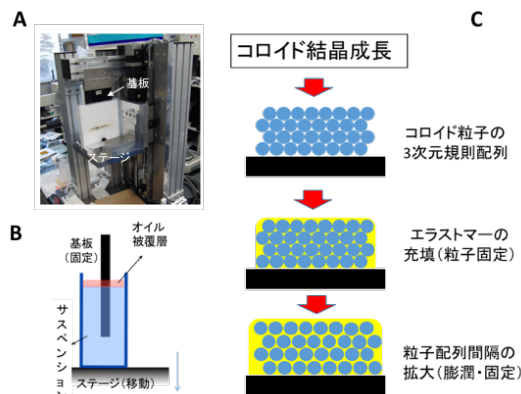


図3 歪み可視化シートの作製フロー

他方、歪み可視化シートを情報ネットワークに接続可能なセンサに仕立てる技術を開発する。具体的には、歪み可視化シートの色変

化情報を、コンピュータが取扱い可能な電子情報に変換する手順を確立する。ただし、色変化情報の取得は高価な分光器を使うのは避け、スマホなどの携帯端末に搭載されたカメラやコンピュータに接続しやすい USB カメラを用いる。画像解析技術やコンピュータネットワーク通信を組み合わせ、リアルタイム・モニタリングやリモートセンシングを実現する。そこで下記の3課題の研究開発を実施した。

- (1) 耐熱性・耐環境性を有する歪み可視化シートの材料設計。
- (2) CCD カメラ等を利用した低コストの観察・計測装置の実装：太陽電池によって給電されるカメラ付き省電力マイクロサーバを使って歪み可視化シートを遠隔自動撮影する。
- (3) 可視化した歪み状態の電子情報化：スマホ等のカメラから撮影した歪み可視化シートの画像をリアルタイムで画像解析し、応力が印可された領域を際立たせて表示するアプリの開発を試みる。

4. 研究成果

- (1) 耐熱性・耐環境性を有する歪み可視化シートの材料設計

シリカ粒子には日本触媒社製の市販品（シーホスター-KE-W20 or 30）を使用した。このシリカ粒子はアモルファスシリカで屈折率は1.43で純水に分散したサスペンションである。適切な濃度に調製しコロイド結晶を成膜した。

シリカの真密度は 2 g/cm^3 とポリスチレンの 1.05 g/cm^3 と比較して重力沈降の影響を受けやすい。同一粒径の両者のサスペンションを静置した場合、数ヶ月にわたってポリスチレンで沈降現象が観察されないのに対し、シリカ粒子では数時間で沈降現象によるサスペンションの不均一化が観察される。この沈降現象は縦型成膜においても観察され、成膜工程の課題であった。図4の写真Aは成膜が進行するとともに膜厚が薄くなっている。そこでその対応を検討し、写真Bに示すような

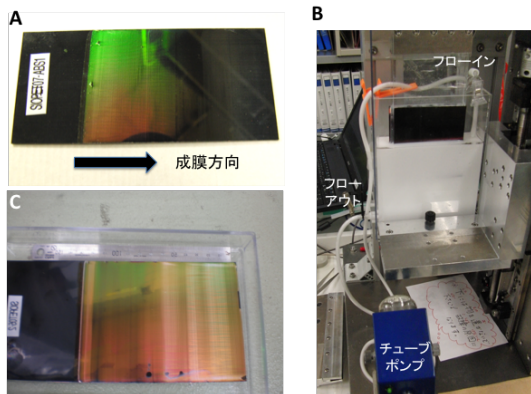


図4 ポンプ循環による沈降現象の抑制

サスペンションをポンプで循環することで攪拌することで沈降現象の抑制に成功した。

ポンプ循環による攪拌操作は成膜時の結晶成長に悪影響を与えることはなく、ポリスチレン粒子と同様に均一で高品質なシリカ粒子のコロイド結晶薄膜が形成した。写真Cは粒子径 280nm のシーホスター (KE-W30) で $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の領域に赤色の鮮明な構造色が発色している。この状態ではコロイド粒子は固定されない状態で3次元規則配列 (図3C) を形成しているだけなので、振動や衝撃で配列構造は容易に破壊される状態にある。

次の工程としてエラストマー充填で固定した。既存のポリスチレンではシリコンエラストマー (Dow Corning 社製: Sylgard 184 や信越化学工業社製: KE-106) を使用している。しかし、これらのエラストマーの屈折率 (1.41: Sylgard184) はシリカ粒子 (1.43) と非常に近いので屈折率マッチングによって構造色がほとんど視認できない透明な被膜を形成する。

そこで、耐熱性で高屈折率のシリコンエラストマーとして二液付加反応型の透明封止材料を使用した。入手可能な市販品として信越化学工業の ASP-1111A/B (屈折率 1.575@589nm, 25°C) を選択した。この材料は発光ダイオードの封止材として開発されたフェニル基を有するシリコンエラストマーである。

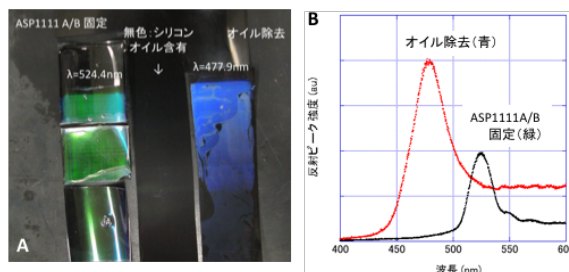


図5 シリカコロイド結晶の形成と固定

図5にシリカ粒子(KE-W20)で成膜したコロイド結晶薄膜と反射スペクトルを示す。なお、この成膜では基板には従来のポリエチレンテレフタレート(PET: 約 200°C)より耐熱性の優れたポリイミド(PI: 約 400°C)を使用した。成膜直後は成膜工程で使用したシリコンオイルがシリカ粒子間に残留するため構造色が観察されない(中写真)。オイルを除去すると青色の構造色が観察された。さらに耐熱性シリコンエラストマーで固定した(左写真)。これらの反射スペクトルを図5に示す。シリコンオイルが含有状態ではスペクトルに回折ピークが発現しなかった。オイル除去状態のシリカコロイド結晶は青色(488.9nm)でASP-1111の充填固定化で緑色(574.4nm)へと変化した。

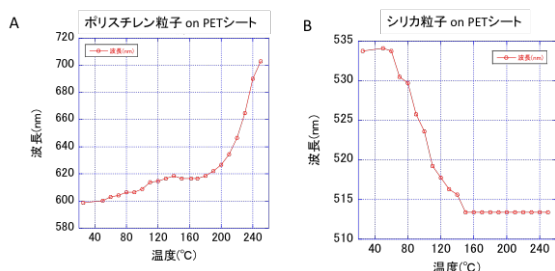


図6 加熱による反射スペクトルの変化

シリカ系オパール結晶で室温から 250°Cまでオープンで加熱した状態の反射分光スペクトルを測定した。これは耐熱性歪み可視化シートの評価法の一つとして耐熱性のファイバースコープで歪みを計測するための予備実験として実施した。図6にPET基板上に成膜したポリスチレンとシリカのコロイド結晶の回折ピーク波長の温度依存性である。室温から150°Cまではピークに20nm程度のシフトが見られる(シフト方向は異なる)。150°C以上で両者に大きな違いが見られた。ポリスチレンでは急速にピークが高波長側にシフトするのに対しシリカではピークはほとんど変化せず一定であった。この結果よりポリスチレンからシリカに代替することで回折ピークの温度変化による移動が抑制できることが判った。歪み可視化シートとして、温度変化の影響が少ないシリカに有用性があると言える。

図3の粒子固定後、粒子間を膨潤現象により拡大する工程がある。本研究課題では耐熱性で高屈折率(1.57)の耐熱性シリコンエラストマーで固定はできたものの、粒子間隔を拡大する歪み可視化シートの創製までには至らなかった。

(2) CCDカメラ等を利用した低コストの観察・計測装置の実装

太陽電池によって給電されるカメラ付き省電力マイクロサーバを使って歪み可視化シートを遠隔自動撮影するシステムを組み上げた(図7)。これにより電源を確保できない場所にある構造物の歪み状態をリモートセンシングすることが可能であることが示された。



図7 コンクリート橋壁面での実証実験

図7に観察装置と橋梁に施工した歪み可視化シートを示す。限られた電力で連続運転できるように、ハードウェアとソフトウェアの両面で節電運用するためのノウハウを投入し、その一方で、構成する部品はすべて一般的な市販品を用いてコスト軽減を図った。具体的には、撮影のタイミングは日中の1時間毎に限定し、その時だけカメラへの通電と無線接続が行われるようにIoT用マイクロコンピュータに簡単なスイッチ回路を増設し、その回路と内蔵された携帯電話SIMを操作する専用ソフトウェアを作成した。また、木陰でも連続運転できる発電量を確保するため太陽光パネルを3枚接続した。以上のようなカスタマイズは、市販の屋外防犯カメラ等では望めないことである。観察対象の歪み可視化シートは研究所敷地内に掛かる橋梁のコンクリート壁面に施工した。日照と携帯電話回線接続が確保できる小さな脚立程度の設置場所があれば、歪み可視化シートの映像をネットワーク経由で監視できることが示された。

撮影環境の影響を図8に示す。晴天時の昼間の撮影では太陽の移動に伴い照明条件が変化する問題が露呈したが、可視光暗視が可能な高感度カメラを使うと街灯程度の光でも色が判別できるので、固定光源による撮影が可能であることが示された。

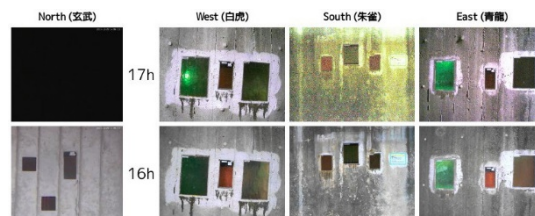


図8 撮影環境の影響についての実証実験

今後の課題として、歪み可視化シートの画像を継続的に自動遠隔収集・画像解析するシステムを構築する。時刻や天候によって変化する環境光の変化に対して、歪みの有無の評価がどこまで可能かを見極める必要がある。

(3) 可視化した歪み状態の電子情報化

当初計画した歪み可視化シートの色分布測定よりも、画像解析評価の方が簡便で汎用性があるので、応力に関する情報は「ある・なし」の二択しか得られないものの、リアルタイム評価ができることの方が歪み可視化シートの付加価値を高める点で優位であると判断した。そこで、携帯端末の汎用的なプラットフォームであるiOSとandroidのアプリを開発した。

このアプリに採用したアルゴリズムを図9に示す。テレビや映画において背景合成の手

段で用いられるクロマキー合成を応用し、RGB 画素を HSV 色空間に変換した後、同系色が集中する無歪み領域を特定し画像に残す。

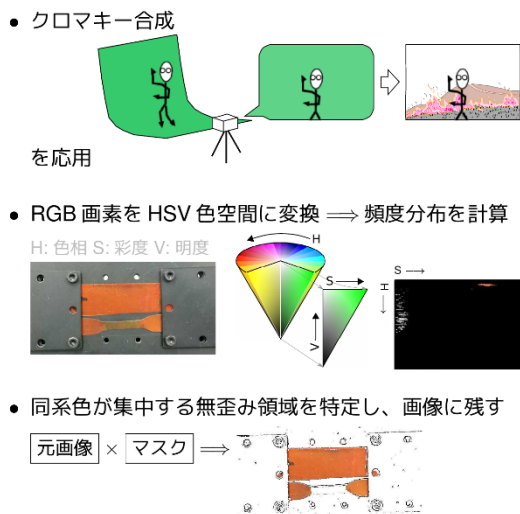


図9 可視化シートの評価支援アプリの開発

これをユーザーが簡単に行うことができるようにユーザインターフェースを実装した。

以上により、歪み可視化シートの画像をリアルタイムで解析し、応力が掛かっている領域以外を脱色表示するアプリを開発することができた。これにより、歪み状態を常時モニタリングすること、および専門知識を持たない多数の一般人にも歪み評価の手段を提供することが可能であることが示された。なお、前項のリモートセンシング技術と組み合わせれば、人手を介さずに ICT 技術を駆使して構造物の危険予知をする道が拓かれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

H. Fudouzi, K. Tsuchiya, **S. Todoroki**, T. Hyakutake, H. Nitta, I. Nishizaki, Y. Tanaka, T. Ohya, *Proc. SPIE*, 査読有り, **10168**, 1-6, 2017.

〔学会発表〕 (計 1 件)

不動寺浩、澤田勉、濃縮結晶化によるシリカコロイド粒子のコロイドフォトニック結晶薄膜、第 56 回セラミックス基礎科学討論会、平成 30 年 1 月 12 日、つくば国際会議場(つくば)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 件) なし

○取得状況 (計 件) なし

〔その他〕

ホームページ等

・研究組織(コロイド結晶材料グループ)HP : <http://www.nims.go.jp/research/group/softopal/>

・IoT 技術による歪み可視化シートの屋外遠隔モニタリング:<http://www.nims.go.jp/KO-ZO/news/20170831.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

不動寺 浩 (Hiroshi Fudouzi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構

・機能性材料研究拠点・コロイド結晶材料グループ・グループリーダー

研究者番号：20354160

(2) 研究分担者

轟 眞市 (Shin-ichi Todoroki)

国立研究開発法人物質・材料研究機構

・機能性材料研究拠点・コロイド結晶材料グループ・主席研究員

研究者番号：40343876

久保 祥一 (Shoichi Kubo)

国立研究開発法人物質・材料研究機構

・機能性材料研究拠点・コロイド結晶材料グループ・主任研究員

研究者番号：20514863

(3) 連携研究者

該当無し

(4) 研究協力者

澤田 勉 (Tsutomu Sawada)

国立研究開発法人物質・材料研究機構

・機能性材料研究拠点・コロイド結晶材料グループ・外来研究員