

公益財団法人パナック財団 成果報告書

完了

2024年 5月 14日

公益財団法人パナック財団
代表理事 伊藤 義治 殿

パナック財団の助成金による研究が終了しましたので、下記のとおり報告をいたします。

所属機関 名古屋大学大学院工学研究科

氏 名 竹岡 敬和 印 

【提出書類】

(1) 成果報告書(本紙)

添付書類: 研究状況を示す論文や写真等の資料

(2) 収支報告書

添付書類: 助成金を充当した経費の領収書や請求書等

(※原本が望ましいですが、やむを得ない場合には写しでも認めます。)

(1) 研究題目

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

遮熱性と断熱性を兼ね備えた環境対応型機能性フィルムの開発

(2) 本研究の期間

(西暦) 2023年 4月 ～ 2024年 3月

(3) 本研究の成果と今後の課題

研究の目的

持続可能な開発目標の観点から、生物や環境に配慮したものづくりが求められている。これまで、人類の生活をより便利にするためや好奇心を満たすために、あらゆる物質を用いて最高の技術を極めた研究開発に取り組んできたが、ものづくりに対する考え方を変えるべき時を迎えている。人類が利用してきた色材にも、有害な重金属や有機物質が含まれるため、それらが環境汚染を引き起こし、生物にも甚大な被害を与えていることが明らかになってきた。本研究では、自然界が広く利用している角度依存性のない構造発色性を示す色材に注目し、安全で安価で安定な色材としてだけでなく、従来の色材では見られない高機能性を示す新しい色材の開発を目指した。具体的には、安全で安価とされる素材の性質や微細構造を活かし、環境の浄化、室内温度変化の制御と省エネルギー化、次世代通信での有効利用、などに適用可能な高機能性構造発色性材料の構築とそのフィルム化に取り組んだ。本研究として SDGs に貢献できることは、9.産業と技術革新の基盤を作ること、11.住み続けられるまちづくりを、および、12. つくる責任つかう責任などが直接的に関与していると考えている。我々の研究がさらに発展することによって新たな産業が生まれ、生物や環境に優しい我々の未来生活が彩り鮮やかで豊かな状態に保たれることを願っている。

研究の意義

従来の色材に変わる新しい色材を開発する必要性が生じてきた。自然に倣って得られる構造発色性材料を従来の色材の代替品のみならず未来の生活に有効活用する方法を明示することは、社会に覆いに貢献すると考えている。

本研究では、以下に示す2つの高付加価値な構造発色性材料とその機能化フィルムの開発に取り組んだ。すなわち、1) 安全で安価な材料から成る環境対応型構造発色性材料、2) 省エネルギー化を可能にする遮熱効果と断熱効果を兼ね備えた構造発色性顔料、とそれらをマトリックス高分子(シリコーン樹脂など)によって包埋した機能化フィルムの開発である。これらの研究は、他の研究グループでは取り組まれていない独自性と創造性の高い内容である。

研究の特徴

① 革新性・先見性

シリカのような地球に无尽蔵に存在する安全で安価で安定な物質のみから様々な鮮やかな色を示す顔料を開発するということだけでも革新性および先見性があるが、そのような顔料が、環境の浄化、室内温度変化の制御と省エネルギー化を示すようになれば、社会への波及効果の大きさやイノベーション創出の可能性が非常に高い。

② 独創性

申請者が取り組む、1) 安全で安価な材料から成る環境対応型構造発色性材料、2) 省エネルギー化を可能にする遮熱効果と断熱効果を兼ね備えた構造発色性顔料、という研究内容は、他の研究グループでは取り組まれていない独自性と創造性の高い内容である。

※本書式に基づき収まるよう、本文は原則 10.5 ポイント以上の文字にてご記載願います。

研究実施内容

環境に対応したもののづくりが求められている今、毒性や耐久性が問題視されている従来の色材に替わる新しい色材を開発する必要性が生じてきた。自然に倣って得られる構造発色性材料を従来の色材の代替品のみならず未来の生活に有効活用する方法を明示することが、本研究の目的である。

申請者は、これまでに、構造色の定義を覆し、構造発色性材料の顔料としての有効性を示してきた。従来の定義では、“構造色は、複数の異なる材質によって光の波長サイズで屈折率が周期的に変化した構造を有する材料から生じ、光の照射方向や見る方向により色相が変わるガラガラとした色”とされてきた。これに対し、申請者は、構造色を発するには、屈折率の周期構造は必ずしも必要ではなく、短距離の秩序があれば良い（コロイドアモルファス集合体）ことを見出した（図 2A）。その結果、色相の角度依存性を無くせることを明らかにした。また、屈折率に周期構造があっても、その材料の構造を幾何学的に等方化（例えば、フォトニックボールの構築）することで、色相の角度依存性を軽減できる方法も見出した（図 2B）。つまり、従来の染料や顔料のような

色鮮やかさで角度依存性のない構造発色性材料を開発できるのである。その結果、地球上に無尽蔵に存在する安全で安価なアモルファスシリカのみから形成された構造発色性顔料によって、日本画や洋画を再現することも可能にした（図 2）。さらに、赤色、緑色、青色の三色のフォトニックボールを組み合わせれば、光の三原色によってあらゆる色の表現が可能になることも見出した（図 3）。従来の色材による色の三原色に比べて、光の三原色の利用は表現できる色の範囲が広くなることから、発色性も優れている。

本研究では、以下に示す 2 つの高付加価値な構造発色性材料の開発に取り組んだ。すなわち、1) 安全で安価な材料から成る環境対応型構造発色性材料、2) 省エネルギー化を可能にする遮熱効果と断熱効果を兼ね備えた構造発色性顔料、である。これらの研究は、他の研究グループでは取り組まれていない独自性と創造性の高い内容である。

社会への波及効果の大きさやイノベーション創出の可能性が高い高機能な構造発色性材料として、以下に示す 2 つの試みに取り組んでいる。現在の状況および今後の計画をそれぞれについて説明する。

1. 安全で安価な材料から成る環境対応型構造発色性材料の開発

科学やテクノロジーが目覚ましい発展を遂げてきた一方で、我々人類が地球での生活をより安全で安心な状態にするために、今後どのようなことを考慮すべきかを再考する必要がある。我々の生活を彩り鮮やかで豊かにしてくれる色材も、人の健康と環境に有害になると懸念される物質が多数あり、その利用が見直されている。例えば、鉛などの毒性の高い重金属を含む色材は廃絶されつつある。他にも、様々な色素が規制対象になり、このままでは、多くの色材が使えなくなるかもしれない。

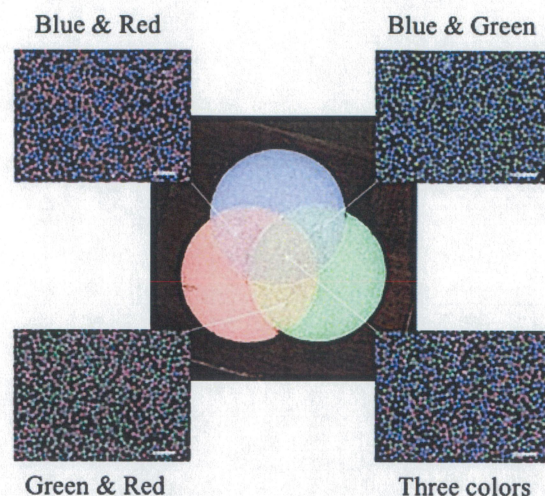


図3 光の三原色の原理によって発色するフォトニックボール: サブミクロンサイズ(約 200 nm から 300 nm)で粒径の異なる球状のシリカ微粒子からなる構造発色性フォトニックボールを組み合わせることで、様々な色を表現した写真。3色の組み合わせで、あらゆる色を表現可能となる。

以上のような背景の下、安全で安価な材料のみを利用したカラフルな色材の開発について研究を続けた結果、地球上に無尽蔵に存在する安全なアモルファスシリカのみを用いて、あらゆる色相の色材が開発可能であることを明らかにした。つまり、粒径の揃ったサブミクロンサイズのアモルファスシリカ微粒子が形成する球状のコロイド結晶であるフォトニックボールが、角度依存性のない鮮やかな構造色を示すことを発見し、青色、緑色、赤色の三色のフォトニックボールを組み合わせれば、光の三原色によってあらゆる色を表現できることを見出した。従来の色材と比べ、この色材の優位性は、1) シリカのような地球上に無尽蔵に存在する素材のみを用いているため環境に優しく、一種類の素材から構成されるので不要になった場合にも回収が容易になる、2) 素材が光や化学物質に対して安定なことから、長期保存に耐えられる堅牢性の高い非退色性の顔料となる、3) 光の三原色による発色のため、従来の色材よりも表現できる色相範囲が広がる、などが上げられる。現在の方法で得られるフォトニックボールは、同じ素材から発色性の異なる3種の異なる結晶構造が混在する（図4上図）ため、顔料として

の性質の異なるフォトニックボールを選択的に調製可能な手法を確立することに取り組む。最近の研究から、シリカ微粒子を懸濁させた液滴の蒸発速度および、フォトニックボールを構成するシリカ微粒子の粒子数に応じて、どの結晶構造を構築するかが明らかになりつつある（図4下図）。噴霧乾燥機および積層化マイクロ流路の利用に可能性があると考え、現在予備試験を行っている。

さらに、アモルファスシリカ以外の安全で安価な素材でありながら、抗菌や空気浄化に役立つ環境分野において高機能な構造発色性材料の開発にも取り組んでいる。本研究で用いる素材として、光触媒能や生分解を示す素材で、生物や環境に対する負荷が低いと見なされる酸化チタン（抗菌、防汚など）、酸化セリウム（空気浄化など）、酸化亜鉛（収れん作用など）、ポリ乳酸（生分解性）などを検討した。

2. 省エネルギー化を可能にする遮熱効果と断熱効果を兼ね備えた構造発色性顔料の開発

申請者らが開発したフォトニックボールは、特定の波長領域の可視光を反射することで鮮やかな色を示す顔料となる。この発色メカニズムを応用すると、赤外線も反射するため、いわゆる遮熱効果があることも明らかにしてきた。今回の提案は、粒径の揃った粒子の中に穴の空いた中空粒子のフォトニックボールを調製することで、光を反射する機能だけでなく、熱が伝わりにくくなる断熱効果も兼ね備えるようになる。本研究で開発したフォトニックボールを、住宅の室内温度に大幅な変化のない快適で安全な暮らしを実現できる環境に配慮した塗料に応用する。

日本の住宅は、外気の熱や直射日光の影響を受けやすく、季節変化のみならず、一日を通じても室内の温度変化が非常に大きい（図5）。夏の住宅内での熱中症や冬の住宅内でのヒートショックなどは、外気の熱や直射日光の影響の制御が十分にできないことで、一日での室内温度の変化や部屋の間での温度変化が20℃近くになってしまうことが原因である。そのため、高齢者の方のみが住んでいるような住宅では、このような室内の急な温度変化が自宅内での死亡事故を引き起こす。今後の高齢者社会においては、こうした室内の大きく急な温度変化による事故を減らすためにも、外気の熱や直射日光の影響を低減できるような工夫を施すことが必要になっている。現代の生活では、エアコンを

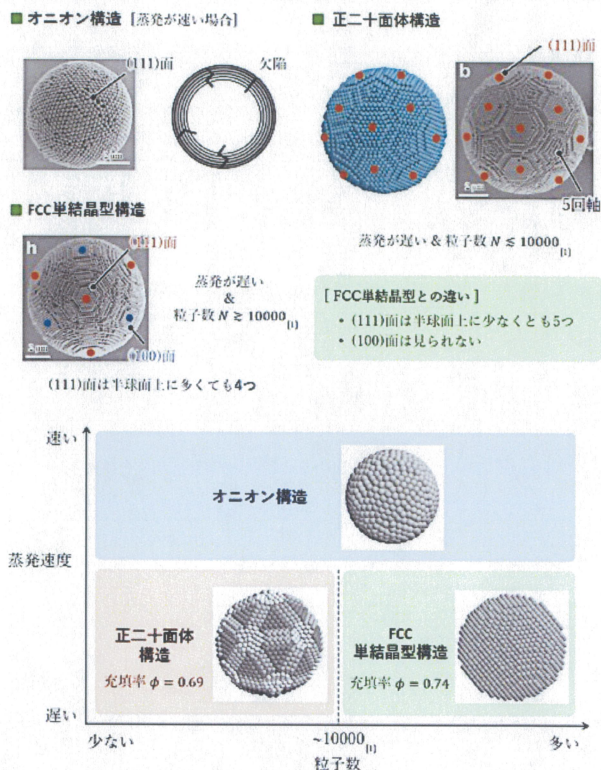


図4 調製条件の違いによって形成される3種類の異なる結晶構造を有するフォトニックボール。それぞれ異なる発色性を示し、顔料

一日中付けていれば、ある程度の温度制御はできるが、エネルギーを輸入に頼る日本では、節電をしなければならないので、他の工夫が必要となる。

熱の伝わり方は、大きく分けて以下の3つの機構で説明できる。一つ目は、主に固体を介した現象で、物体同士の分子レベルの衝突によって熱が高温から低温に移動する熱伝導、二つ目は、液体や気体のような移動できる物質によって熱が運ばれる熱対流、三つ目が、物体を介さずに、赤外線によって生じる熱放射という機構である。一つ目と二つ目の物質を介した機構によって全体の25%、三つ目の赤外線によって全体の75%が熱を伝える割合になっている。25%を占める熱伝導と熱対流を抑える方法としては、外と室内の間に断熱材を使用することが有効になる。一般的な断熱材としては、グラスウールや高分子の発泡体を用いて、熱伝導率の低い空気を沢山含むことで熱の伝わり方を抑える効果を示す。一方、赤外線を原因とする熱の放射に対しては、赤外線を反射するようなアルミ泊などが有効で、そのような材料を遮熱材と呼ぶ。

今回の研究では、粒径の揃った中空の微粒子を用いてフォトニックボールを形成することで、顔料としての発色性、赤外線を反射する遮熱性に加えて、断熱性も兼ね備えた顔料の開発に取り組む。材料中に熱伝導率の低い空気層などがあれば、熱の伝わり方を抑えられるようになるが、中空粒子は、閉じた状態にあることから真空状態にすることも可能なため、より熱の伝わりが低い状態を作ることができる。その結果、従来の断熱材よりも、もっと薄くて軽量の断熱材となる。申請者は、粒径の揃った高分子からなる微粒子を鋳型に用いて、シリカや酸化チタンからなる中空粒子の開発に既に取り組んでいる(図6左上に、申請者が有する中空粒子の電子顕微鏡写真を示す)。

以上のプロジェクトを通して、高付加価値な顔料を開発し、これらを適切なマトリックス高分子(耐候性、耐光性に優れたシリコーン樹脂など)に含有した状態の機能性フィルムを開発することを目標とした。

これまでの結果から、中空粒子の合成とこの粒子から成るフォトニックボールの合成ができた。また、このフォトニックボールは構造色を示すだけでなく、近赤外線を反射することも確認した。つまり、遮熱性を示すことが分かった。空隙の存在によって生じる断熱性に関しては、現在も調査中である。遮熱性を断熱性が明らかになった後に、適切な合成樹脂を利用した膜としての構築に取り組む予定である。

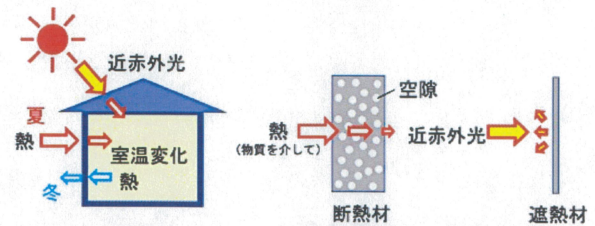


図5 左図：住宅が外気の熱や太陽の光の影響を受けると、室内の温度が大きく変化することを示した概略図。右図：断熱材と遮熱材の概略図

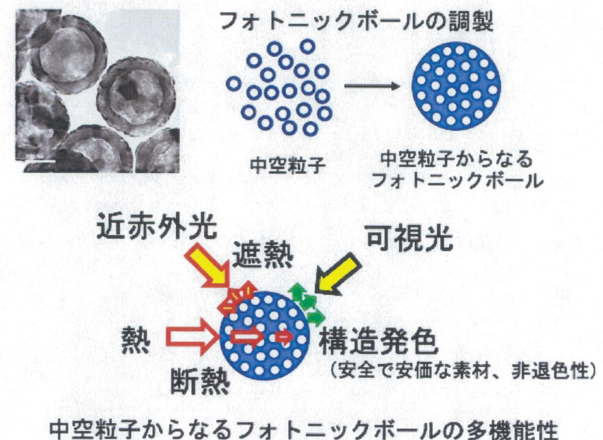


図6 左上図：申請者の合成した中空粒子の電子顕微鏡写真、右上図：中空粒子からなるフォトニックボールの調製の学略図、下図：中空粒子からなるフォトニックボールの構造発色性、遮熱性、断熱性を示す概略

(4) 共同研究者(所属機関名、役職、氏名)

なし

(5) 本研究の成果の公表先

現在準備中

[注]この報告書を当財団の WEB サイト等に掲載することがありますので、予めご了承ください。

※本書式に基づき収まるよう、本文は原則 10.5 ポイント以上の文字にてご記載願います。