

昆虫の円偏光と導電性高分子を組み合わせた可変円偏光反射素子を開発

円偏光を反射する昆虫（アオドウコガネ）のさやばねの表面に導電性高分子ポリアニリンをコーティングしました。これにより、ポリアニリンの酸化と還元による発色の変化と、昆虫のもつ円偏光反射特性を組み合わせ、円偏光の反射強度を調整可能な高分子素子が得られました。

アオドウコガネのような一部の甲虫は左円偏光（光の伝播方向に対して左回りに振動する電磁波）を強く反射します。これは外骨格形成の際のさなぎの時に光学活性でらせん構造をもつコレステリック液晶相を形成し、らせん構造を維持した状態で硬い骨格に固化するためです。一方、導電性高分子ポリアニリンは、円偏光は反射しませんが、電気的あるいは化学的に酸化や還元を行うと発色が変わり、これに伴って光の透過度が変わります。本研究では、このような、昆虫のさやばねの円偏光反射とポリアニリンの性質を組み合わせ、可変円偏光反射素子を作成しました。

まず、アオドウコガネの羽の円偏光反射性を調べました。アオドウコガネの緑色反射は染料などによるものではなく、構造色（表面の微細構造での光の反射による発色）であり、これが左円偏光を強く反射することを確認しました。次に、アオドウコガネの羽上にポリアニリンをコーティングし、導電性高分子とさやばねの二層構造による高分子素子を作成しました。これを用いて、ポリアニリンをドーピングにより酸化状態にした場合と、アンモニアにより脱ドーピングを行い還元状態にした場合の円偏光反射スペクトルを測定しました。その結果、酸化状態では円偏光反射がない一方で、還元状態では左円偏光を反射しました。本研究成果は、昆虫のもつ優れた光特性と導電性高分子のもつ外場応答性を組み合わせた新しいバイオ／合成光機能材料として期待されます。

研究代表者

筑波大学 数理物質系

後藤 博正 准教授

研究の背景

本研究グループはこれまで、らせん構造をもつ液晶中で高分子を合成し、その光学的性質を調べてきました。その中で、液晶中で合成した高分子の集合体の構造が一部の昆虫の外骨格に似ていることを見いだしましたが、昆虫のような大きな円偏光^{注1)}を反射するまでには至りませんでした。そこで、このような昆虫の外骨格を分光学的に調べたところ、人工的には合成が不可能なほどタンパク質の積層が高度に制御された厚いらせん構造をもつことが分かりました。この構造は変形に強いマイクロ構造物とも考えられ、光機能を発現するためというより、外骨格の強度を付加させるための仕組みであると推測されます。

本研究では、害虫でもあり、茨城県では最も多く見られる甲虫の一つであるアオドウコガネ（図1）のさやばねの強い円偏光と導電性高分子ポリアニリンの酸化-還元による光透過度の変化を組み合わせた、円偏光の制御が可能な可変円偏光反射素子の開発を試みました。

研究内容と成果

まず、アオドウコガネのさやばね表面について、円偏光反射スペクトル測定を行ったところ、構造色（表面の微細構造での光の反射による発色）として 448 nm の緑色の左円偏光を反射することが分かりました。次に、このさやばね表面に導電性高分子であるポリアニリンをコーティングした素子を作成し、その表面を光学顕微鏡および電子顕微鏡で確認しました（図2）。ポリアニリンは、酸化-還元により色彩や光透過が変化する特徴があります。そこで、この性質を利用して、この素子の円偏光反射の強度制御を試みました（図3）。アンモニアにより導電性高分子層を脱ドーブ（還元）したところ、赤外域でも左円偏光反射が生じました。一方、酸化状態はこの長波長領域での反射は見られませんでした。これは、ポリアニリンのドーブ状態で発生するポーラロン（ラジカルカチオン）が長波長領域の光を吸収するためと考えられます。また、右円偏光の照射では、構造色に由来する 550~600 nm の反射帯は見られませんでした。また、454 nm で平面偏光である P 偏光は S 偏光^{注2)}の 2.5 倍、584nm では 1.5 倍の反射強度が見られました。

ポリアニリン自体には右あるいは左に偏った円偏光反射はないことから、本素子では、ポリアニリン層は入射光、反射光の強度を調整する光学フィルターとしてのみ働き、その下のさやばね層が円偏光を反射したことが示唆されます。

今後の展開

魚、蝶、鳥などの中にも構造色をもつ生物がありますが、円偏光を反射する生物として今のところ確認されているのは、一部の昆虫に限られています。今後、アオドウコガネと異なる反射光帯域をもつ昆虫についても同様の実験を行い、バイオ/合成光機能材料による可変多色円偏光反射素子の開発を進める予定です。

生体材料と合成高分子の組み合わせは、今までにない機能をもつ新材料としての可能性があります。特に、生体材料の光機能性と導電性高分子の外場応答性を組み合わせたバイオ/合成光機能材料は、三次元ディスプレイの素子や量子コンピューターの材料など、次世代の光機能材料開発に新しい展開をもたらすと期待されます。

参考図

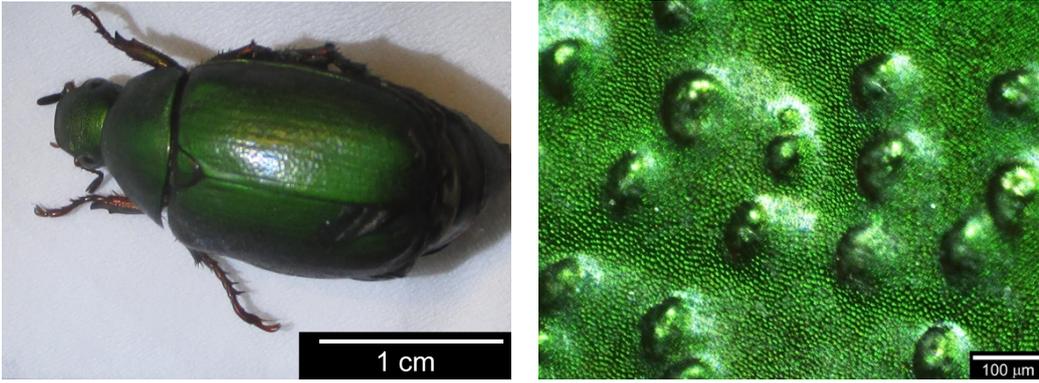


図1 アオドウコガネ（左）とそのさやばね表面（右）の光学顕微鏡写真

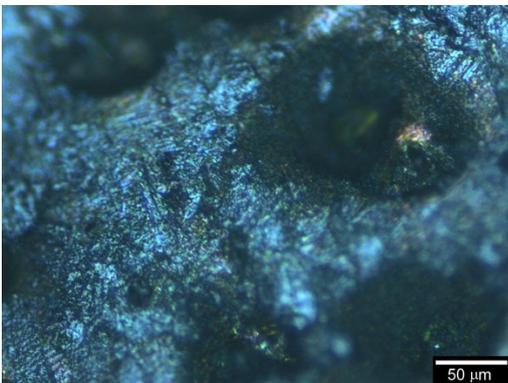


図2 アオドウコガネのさやばね表面にポリアニリンをコーティングした素子の光学顕微鏡写真。緑色のアオドウコガネ表面にポリアニリンの紫色の層がコーティングされている。

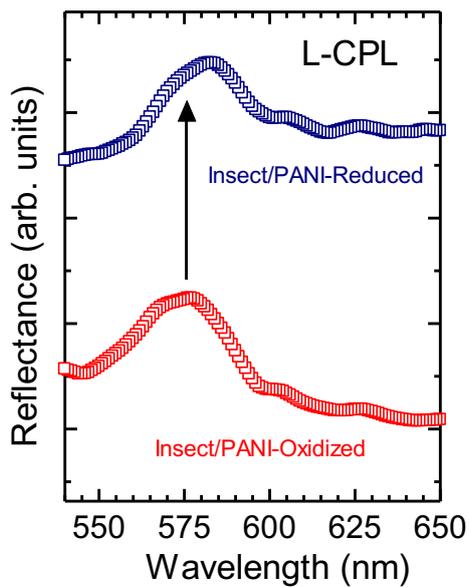


図3 アオドウコガネのさやばね表面にポリアニリンをコーティングした素子に左円偏光（L-CPL, left circularly polarized light）を照射したときの反射スペクトル。赤：ポリアニリン（PANI）を硫酸でドーブ（酸化）した際の光反射度、青：ポリアニリンをアンモニアで脱ドーブ（還元）した際の光反射度。

用語解説

注1) 円偏光

電場および磁場の振動方向の軌跡が、円を描く偏光状態のこと。振動方向が、観察する側から見て左回り（反時計回り）の円を描く偏光状態を左円偏光という。

注2) P 偏光、S 偏光

P 偏光は入射面に対して平行な直線偏光、S 偏光は入射面に対して垂直な直線偏光と定義される。

掲載論文

【題名】 Circularly polarized reflection spectra of a photonic beetle and preparation of tunable circularly polarized light reflecting device consisting of conductive polymer/beetle exoskeleton

【著者名】 Hiromasa Goto, Katsuto Yamaguchi, Ryo Miyashita

【掲載誌】 Next Materials

【掲載日】 2025年2月6日

【DOI】 10.1016/j.nxmte.2025.100516

研究資金

なし。

問い合わせ先

【研究に関すること】

後藤 博正（ごとう ひろまさ）

筑波大学数理物質系物質工学域 准教授

URL: http://www2.ims.tsukuba.ac.jp/~gotoh_lab/

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp