

導電性高分子のファラデー回転を制御する新手法を発見

偏光面を磁場により回転させるファラデー回転現象と、導電性高分子の電気化学的酸化と還元を組み合わせ、磁場中において低電圧で導電性高分子ポリチオフェンの光学回転を制御する新しい手法を発見しました。本手法は、磁場検出素子や光通信デバイスなどに用いる新しい素子への応用が期待されます。

導電性高分子は、導電性以外にも多様な特性を持ち、発光素子や電磁波の遮断材料、防錆材料などへの応用研究が行われてきました。その特性の一つに、電気化学的な酸化によりドーピングに伴って発生するポーラロン（電気伝導を担う仮想的粒子）の発生があります。これにより、光学的特性や磁気的性質が大きく変わります。本研究では、磁場中で光学不活性な物質に磁場に平行な方向に直線偏光を透過させると光学回転が生じる「ファラデー回転」という現象に着目しました。

本研究グループは、これまでに、液晶中で高分子を合成し、さまざまな光学活性を持つ導電性高分子を合成してきました。今回、光学不活性なポリチオフェンを合成し、ファラデー配置と呼ばれる形の磁場中において、1.5 V 程度の定電圧でポリチオフェンの電気化学的酸化-還元（ドーピング-脱ドーピング）を行いポーラロンの状態を変化させることにより、簡便に光学回転面を制御できる手法を見いだしました。本手法は、磁場検出素子や光通信デバイスなどに用いる新しい素子開発への応用が期待されます。

研究代表者

筑波大学 数理物質系

後藤 博正 准教授

宮下 椋（応用理工学学位プログラム博士課程3年：研究当時）

研究の背景

キラル^{注1}で光学活性な媒質中を光が通過すると、入射光に対して特定の方向に回転する現象（自然回転: キラルな置換基を持つため、磁場が無くても光学回転を生ずる）が見られます。ここで、光学回転とは入射光に対して出力光の振動方向が左または右側にずれる現象を指します。物理学者ファラデーは1845年、光学不活性な物質を磁場中に設置し、磁場に平行な方向に直線偏光を透過させると光学回転が生じることを発見しました（磁場なしでは回転しない）。この現象はファラデー回転と呼ばれます。本研究グループはこれまでに、光学活性のないモノマーから液晶のキラルな反応環境を用いて自然回転を持つ各種ポリマーを合成し、これらについて、磁場中で円偏光二色性スペクトルや旋光分散^{注2}（光学回転）スペクトルを測定してきました。今回、導電性高分子について同様の測定を行ったところ、磁場の感受性が高いため、ファラデー回転を確認することができました。さらに、磁場中でサンプルに電位を印加することにより、電気化学的ドーピングを行い、高分子に与える電位を変化させると、ファラデー回転角が変化することを見いだしました。

研究内容と成果

まず、アセトニトリル中で電解重合により導電性高分子のポリチオフェンを合成し、赤外線吸収スペクトルで分子構造を確認しました。このポリチオフェンは無磁場下では光学回転を示しません。次にドーナツ型ネオジウム磁石（永久磁石）を透過光と磁場の向きが同方向になるように配置（ファラデー配置）し、この磁場下でセル内のポリチオフェンに電気化学的に電場を印加すると、電荷キャリアとしてポーラロン（ラジカルカチオン）が発生し、電位を変化させると、それに応じて光学回転角が変化（ファラデー回転）することを確認しました（図1）。このようなポリチオフェンのファラデー回転には、ポーラロン（ラジカルカチオン）の発生を伴う主鎖の電子状態の変化と、主鎖間へのドーパントのインターカレーション（主鎖の間にドーピング剤が機械的に入り込む）が関与しています。こうした分子組織の変化は誘電率と磁化率を変化させ、ファラデー回転の変調をもたらします。すなわち、電気化学的ドーピング-脱ドーピングによる電荷キャリアの生成と、分子内の会合構造（集まり方）の変化の2つの現象が、磁場下における光学回転の変化をもたらすと考えられます。

以上のように、本研究では、電気化学的ドーピングと磁場の組み合わせにより、導電性高分子の光回転が変調すること（電気化学的ファラデー効果）を見いだしました。一般に、ファラデー回転の調整には磁場の変化が必要とされていますが、永久磁石を使用する場合、磁場の強さをダイナミックに変化させたり消滅させたりすることは困難であり、一方、電磁石は磁場の強さを調整できるものの、高電圧が必要となります。本研究での永久磁石を用いた電気活性共役系高分子の光回転は、電気化学的ドーピング-脱ドーピングにより、1.5V程度の低電圧・低消費電力で光学回転面の角度を簡便に変化・制御することを可能にします。このような、磁場下での光回転の電気化学的制御は初めての例です。

今後の展開

今後、電気化学的ファラデー効果を活用し、光アイソレーター（一方向にのみ光を伝送する光学部品）、磁場検出素子、光通信デバイスなどへの応用が可能な電気化学素子の開発を行う予定です。

参考図

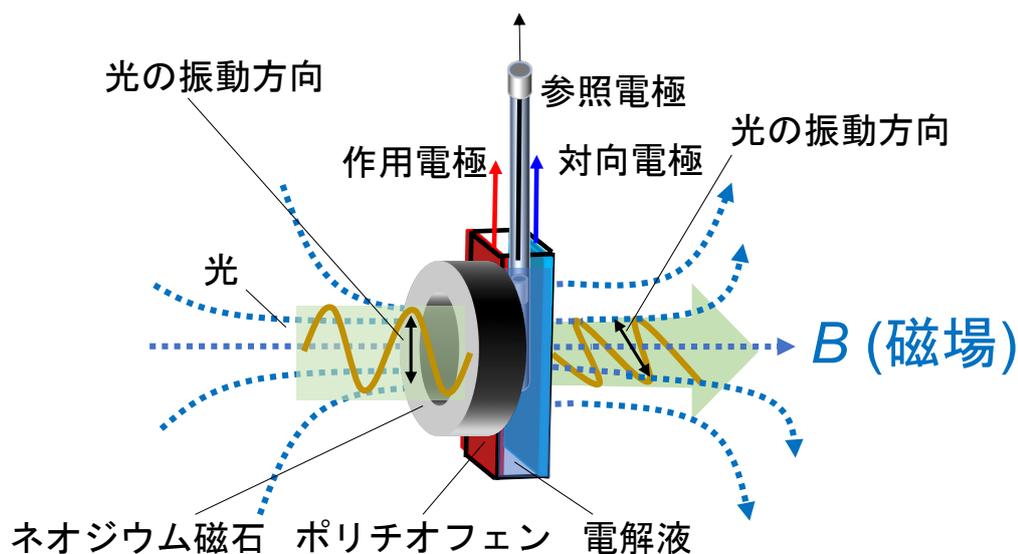


図1 ファラデー配置における電気化学的光学回転測定

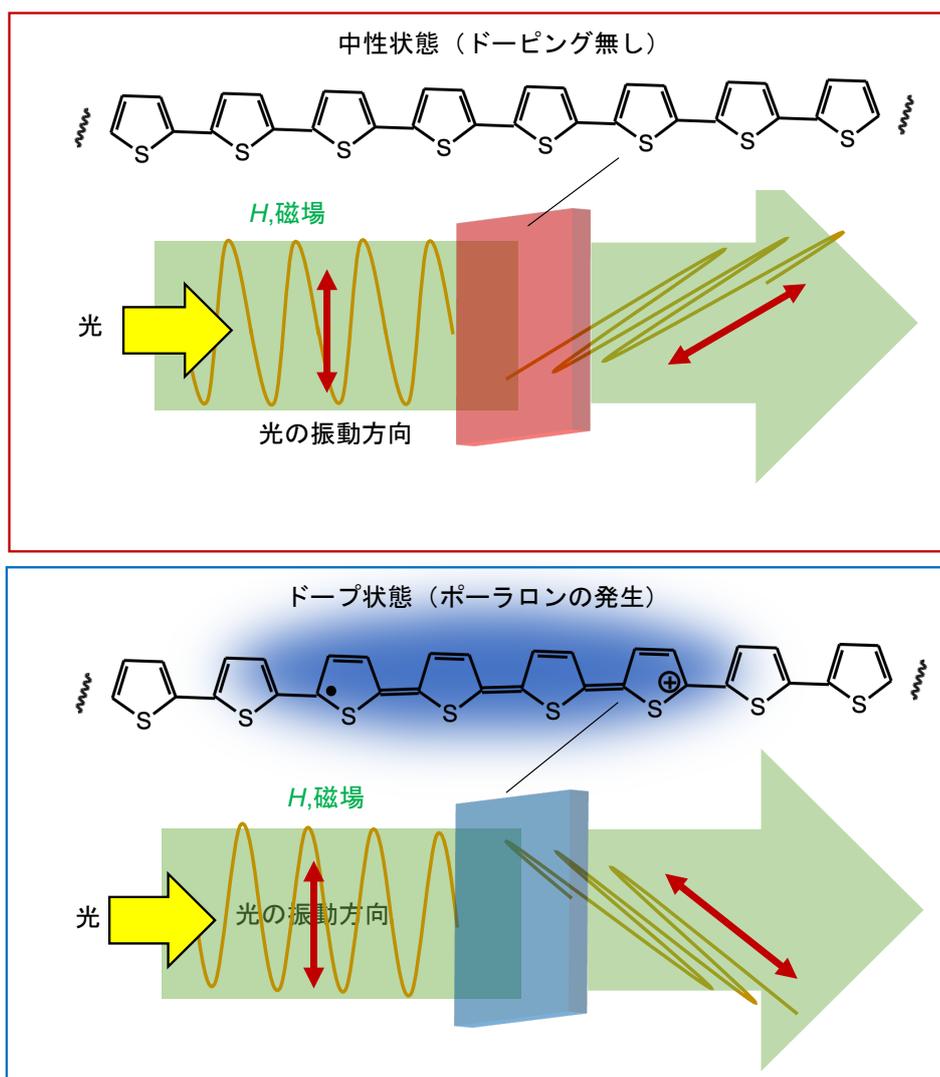


図2 ポリチオフェンの中性状態（ドーピング無し：上図）と電気化学的ドーピングによるポーラロン発生状態（下図）での磁場下における光学回転

用語解説

注1) キラル

ある物質が、右手と左手のように、その鏡像と重ね合わせることができない性質（光学活性）。キラル（chiro）はギリシャ語の「手（cheir）」に由来する。DNA や RNA、デンプン、砂糖、クリスタルなどの天然物をはじめ、宇宙空間から身の回りまで、キラリティーを持つ物質は多数存在する。

注2) 旋光分散

旋光性（光学活性）のある媒質中を光が通過する際に、光の波長によって偏光面の回転角が異なる現象。透過する波長により物質の旋光度は変わるため、旋光分散と呼ばれる。

研究資金

本研究は、科研費の研究プロジェクト（研究代表者：後藤博正）の一環として実施されました。

掲載論文

【題 名】 Electrochemical Faraday Effect of a Conductive Polymer

【著者名】 Ryo Miyashita, Hiromasa Goto

【掲載誌】 Molecular Crystals and Liquid Crystals

【掲載日】 2025 年 8 月 26 日

【DOI】 10.1080/15421406.2025.2548702

問合わせ先

【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