

配信先：大阪科学・大学記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会

2026 年 1 月 28 日

大阪公立大学

有機 EL の動作を中間体の電子スピン応答から探る ～電子正孔対と電場変化の新たな知見を獲得～

<ポイント>

- ◇電気化学発光セル (LEC) ※¹において、発光強度の変化を磁気共鳴で検出する ELDMMR 法で信号の観測に成功。また、その起源が電子正孔対であることを実証。
- ◇電圧変化に伴って LEC 内部の電場環境が変化する様子を明らかにし、電場の低下によって発光効率 (=発光強度/電流) および磁場効果が大きく向上することを示した。

<概要>

電気化学発光セル (LEC) は、発光層中に溶け込ませたイオンの働きにより駆動する高輝度の有機 EL 素子で、次世代の発光デバイスとして注目されています。しかし、イオン移動を伴う動作機構は非常に複雑で、特に素子内部の電場環境を直接把握することが難しく、発光メカニズムの理解は十分に進んでいません。発光強度のわずかな変化を磁気共鳴で検出する ELDMMR 法は、電子正孔対を捉えられるほぼ唯一の手法であり、その信号が電場に敏感であることから、内部電場の指標となる可能性が期待されています。

大阪公立大学大学院理学研究科の鐘本 勝一教授、堤 晴香氏 (研究当時、大学院生) らの研究グループは、LEC において初めて ELDMMR 法で信号の観測に成功し、その起源が電子正孔対であることを実証しました。さらに、電圧変化に伴って LEC 内部の電場環境が変化する様子を明らかにし、電場の低下によって発光効率および磁場効果が大きく向上することを示しました。これらの知見は、LEC に限らず一般的な OLED にも適用可能な、発光効率向上の新たな指針を与えます。

本研究成果は、2025 年 12 月 16 日に国際学術誌「Advanced Optical Materials」にオンライン掲載されました。

<研究者からのコメント>

LEC の動作メカニズムでは電場の影響が強いと考えられていながらも、なかなか発光輝度などとの関係は引き出せていませんでした。研究当時、修士学生だった堤さんの丹念な実験により、その中身の扉がようやく開かれた思いです。

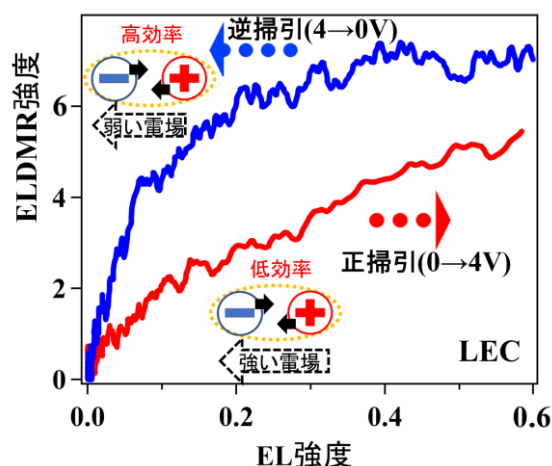


図: LEC への印加電圧の増加過程 (正掃引) 及び逆掃引過程において計測された ELDMMR 強度と EL 強度の関係。逆掃引では同じ EL 強度でも ELDMMR 強度が大きく、電場が弱いことを示す。

<研究の背景>

電気化学発光セル（LEC）は、有機 EL 材料にイオン性物質を混ぜ込み、イオンの移動によって電極からの電荷注入を助けつつ発光させるデバイスです。構造が単純でありながらも高輝度動作が可能のため、ポスト有機 LED（OLED）候補として注目されています。しかし、LEC 内部では、ホール（正孔）や電子などの電荷キャリアの輸送と同時にイオンの移動が進行し、その結果、イオンによる電場遮蔽（シールド効果）が生じます。このため、素子内部の電場分布は時間とともに変化する等で複雑化すると予想されますが、従来の手法では、このような電場変動を直接追跡することは困難でした。

また、発光過程の直前に一時的に形成される電子正孔対（e-h 対）は、キャリア（電子・正孔）から発光を担う励起子へと転換される過程における過渡的な中間状態であり、発光効率を支配する重要な要素です。しかし、e-h 対は寿命が短く、光学計測や電気計測によって選択的に検出することが難しいため、これまでその詳細な情報を引き出すことは困難でした。

<研究の内容>

本研究では、動作中のデバイスからの電子スピン遷移（磁気共鳴）を介した発光強度変化に着目し、磁気共鳴により e-h 対の情報を選択的に検出できる光学検出磁気共鳴法（Optically-Detected Magnetic Resonance: ODMR）法の一つである ELDMR 法（Electroluminescence-Detected Magnetic Resonance）を、オペランド^{*2}条件下で LEC に対し新規に適用することで、LEC 動作中の内部電場の変動を“見える化”することを目指しました。

まず、本研究で対象としたポリマー系 LEC において、初めて高感度 ELDMR 信号の取得に成功し、その信号が e-h 対の電子スピン共鳴^{*3}に由来することをスペクトル解析等により実証しました。次に、印加電圧を往復させながら ELDMR 信号を評価した結果、電圧掃引方向によって ELDMR 応答が大きく変化するヒステリシス現象が観測されました。これは、イオン配向の変化に伴われる素子内部の電場変動を e-h 対が感受した結果が反映されたものです。e-h 対では正孔と電子間の結合が弱く、電場の変化に大変敏感なため、ELDMR 信号強度を通して、素子動作下における電場環境の変化を映し出すことに成功しました。特に、電圧を上げた後に戻す「逆掃引」過程では、イオンによる電場遮蔽が顕著となり、e-h 対が分離されにくい低電場状態が実現されることを明らかにしました。また、別途計測した EL の発光効率（=発光強度/電流）の計測では、逆掃引時の方が正掃引時よりも高いことがわかりました。

本研究結果を総合したところ、以下の知見が得られました。LEC を含めた有機 EL 素子の動作には内部電場制御という新たな設計変数が存在することが示唆されます。

- EL の再結合効率は、e-h 対が安定な低い電場作用下にて向上する。この現象は LEC に限らず一般の OLED でも起こりえる。
- 磁場に対する応答（磁気 EL 効果）が素子内の電場低下により顕著に増大する。その性質は e-h 対が磁気 EL 効果の起源であることに由来する。
- EL の再結合反応が促進される“好適な電場条件”が存在する。

<期待される効果・今後の展開>

本研究では、LEC の実動作環境下における内部電場環境を、非破壊かつ選択的に読み取る測定手法を提示し、LEC 動作における長年の課題であった「電場と発光効率の因果関係」を直接的に示しました。本成果は LEC を対象として得られたものですが、発光に至る再結合過程そのものは一般の OLED とも共通しているため、本研究で得られた知見は、OLED をはじ

めとする他の EL 素子へと一般化可能なものといえます。そのため、本研究の結果は、有機 EL 素子全般において、高効率化を目指したデバイス設計において電場の影響を考慮することの重要性を示したものです。

また本研究では、発光過程の中間状態である e-h 対のスピン物性に着目することで、素子動作に関する情報を引き出しました。用いた計測手法は、オペランド条件下において EL 信号から直接情報を抽出できる点に特徴があり、電子スピンを対象とした計測は高感度な量子センシング技術の一つとして位置づけられます。このことから、本研究は、量子計測技術を用いて発光デバイスの動作機構を解明する新たなアプローチを示す先駆的な研究であり、今後の素子動作探究への応用展開が期待されます。

<資金情報>

本研究は、JST CREST (JPMJCR2431)、科研費基盤 A (JP24H00475) の支援を受けて実施しました。

<用語解説>

- ※1 電気化学発光セル (LEC) : Light Emitting Electrochemical Cell の略。内在させたイオンによる電荷注入を介して光る有機 EL 素子の一種。
- ※2 オペランド : 半導体などの素子を評価する計測において、動作させている状態そのものから情報を探る計測法。
- ※3 電子スピン共鳴 : 磁場とマイクロ波を組み合わせる物質中の電子スピンを反転させる現象。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Advanced Optical Materials

【論文名】 Unveiling How Electric Fields Influence Electroluminescent Properties in Light-Emitting Electrochemical Cells via Operando Optically Detected Magnetic Resonance

【著者】 Haruka Tsutsumi, Moena Yasuda, Takayuki Suzuki, Katsuichi Kanemoto

【掲載 URL】 <https://doi.org/10.1002/adom.202502592>

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院理学研究科物理学専攻
教授 鐘本 勝一 (かねもと かついち)

TEL : 06-6605-2550

E-mail : kkane@omu.ac.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課

担当 : 谷

TEL : 06-6967-1834

E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp