



熱活性化遅延蛍光分子の創製と Kyulux における実用化展開

精密分子設計でディスプレイの世界を変える!

安達千波矢 Chihaya ADACHI

巧みな分子設計に基づいた芳香族化合物によって 100% の量子効率で電流-光変換を可能とする熱活性化遅延蛍光材料が日本で生まれ、今、株式会社 Kyulux では量産に向かって研究開発を進めている。ベンチャーに優秀な人材を集積し、次の有機光エレクトロニクス産業を切り拓いていく。

OLED の基礎から TADF まで

有機物質に電流を流して発光させる、それが有機 EL (OLED) である。筆者が、1987 年、九州大学大学院修士課程 1 年生のときに、当時、指導教官であった斎藤省吾先生から与えられたテーマが OLED であった。まさに、そのときに自分の運命が決まったのである。その当時、決して導電材料とは認識がなかった有機薄膜に数十 mA/cm² オーダーの電流通電によって有機化合物を発光させるには、多くの研究者が違和感を抱いていた。事実、OLED の研究に取り組んでいたのは、世界でも米国 Eastman Kodak 社など、数カ所に限られていた。

当時、半導体に素養のあった筆者は、有機化合物の多くが正孔 (ホール) を輸送し、電子を輸送する物質が極少数に限られていたことに疑問を持った。有機物質で電子を輸送する材料が見つければ、まさに、そこ

あだち・ちはや

九州大学最先端有機光エレクトロニクス研究センター センター長、同大学大学院工学研究院応用化学部門 主幹教授

〔経歴〕1991 年九州大学大学院総合理工学研究科材料開発工学専攻博士後期課程修了、博士 (工学)。株式会社リコー化成品技術研究所研究員、信州大学繊維学部機能高分子学科助手、プリンストン大学 Center for Photonics and Optoelectronic Materials 研究員、千歳科学技術大学光科学部物質光科学科教授を経て、2005 年九州大学未来化学創造センター教授、10 年より同大学大学院工学研究院主幹教授となり現在に至る。12 年同大学最先端有機光エレクトロニクス研究センターセンター長。2023 年紫綬褒章受章。〔趣味〕園芸、読書、旅先でのジョギング、車。

E-mail: adachi@cstf.kyushu-u.ac.jp

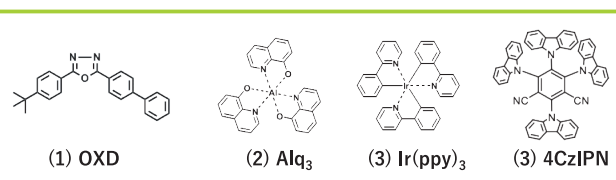


図 1 OLED に用いられる典型的な材料

左から、(1) オキサジアゾール誘導体 (OXD)、(2) 蛍光材料 (Alq₃)、(3) リン光材料 (Ir(ppy)₃)、(4) TADF 材料 (4CzIPN)。

には多彩な pn 接合デバイスの展開が可能になると直感的に感じていた。そして、2 年間の徹底した材料探索の末に、オキサジアゾール誘導体 (図 1) が優れた電子輸送特性を有していることを発見し、有機デバイスにおける初めてのダブルヘテロ (DH) 構造の構築に成功した¹⁾。DH 構造は現在の OLED の基本構造となっている。しかし、実はこの成功とは裏腹に筆者は大きなミスを犯している。

OLED において、DH 構造が優れた性能を示す理由は、ホール輸送層/発光層/電子輸送層の構成によって数十 nm 程度の狭い発光層内に電子、ホール、励起子を完全に閉じ込めることができるためである。これによって、理想的なキャリアバランスと励起子の非放射失活を完全に抑制することができた。DH 構造の意義は、ホール輸送層と電子輸送層を直接接触させると、Exciplex 等の分子間相互作用が発生し、発光効率の低下や発光スペクトルが長波長にシフトしてしまうのを回避できることである²⁾。ところが、この分子間 Exciplex が熱活性化遅延蛍光 (TADF) の源泉であったのだ。1990 年に、すでに筆者自身は Exciplex を実験室で観測していたのだが、Exciplex は本当に厄介者であり、

いかにしてそれを排除するかということに注力した結果、DH構造の創出に至ったのである。しかし、約20年の月日を経て、2012年、*Nature* 誌に100%の電流-光変換を可能とするTADF-OLEDを報告した³⁾。

米国ベンチャーへのりん光 OLED 技術移転

1999年、筆者は様々な理由で米国にポスドクとして渡米した。そして、プリンストン大学のStephan R. Forrest教授（現ミシガン大学教授）の下で、りん光OLEDの開発に取り組んだ。筆者自身は、それまでに、大学、民間企業でOLEDに関する様々な経験を積んでおり、りん光材料の高効率化は比較的容易であった。着任から1年以内に、材料精製からデバイス構造の最適化に取り組み、内部量子効率100%のりん光デバイスの構築に成功した⁴⁾。そのときのForrest研は、Marc Baldo, Vladimir Bulović（ともに現マサチューセッツ工科大学教授）をはじめ、多くの優秀な研究者が集積しており、ラボとして最盛期であり、彼らと同じ時を過ごせたことは、まさに夢のような時間でもあった。さらに、りん光OLEDのアカデミックな成果は、Forrest教授が立ち上げたベンチャーであるUniversal Display Corporation (UDC)⁵⁾に迅速に技術移転がなされ、それが瞬く間に実用化へ進んでいく様子は衝撃の連続であった。そのときに目撃したのは、米国ではベンチャーにトップクラスの人材が容易に集まることである。研究者はもとより、経営、財務、知財、会社経営に必要とされるトップクラスの人材が迅速に集結したのである。プリンストン大学の大学院生に就職はどうかと尋ねれば、多くの学生がベンチャーへの就職を第一希望に挙げる。ベンチャーがダメなら、しか

たがないので大会社に就職するといった風で、日本の院生とは真逆である。2001年に米国から日本に戻ったときに思ったのは、米国に負けない世界初の独自の発光物質の開発に取り組み、日本発のベンチャーを立ち上げようと固く誓ったことである。既存の蛍光でもない、りん光でもない、ひたすら新しい発光機構の開発に10年間取り組み、上手くいったのがTADFである。そして、2015年、念願の株式会社Kyulux⁶⁾を安達淳治さん、故水口啓さんらと立ち上げた。その当時、100社以上のベンチャーキャピタル（VC）に出資のお願いに駆けずり回った。しかし、どこのVCも材料ベンチャーには強い興味は示してはくれなかった。VCの科学技術に対する理解度はこんなものかという落胆もあった。暖簾に腕押し状態であったが、そんな中、地元福岡のQBキャピタルの坂本剛さん、MSIVC（三井住友海上キャピタル株式会社）の平井宏明さんの支援は本当にありがたかった。最終的には、サムスン、LGディスプレイが出資を迅速に決断したことで、日本のVCが外圧で出資を決めてくれた。当時は、IT産業が花盛りであり、Deep Techに出資をすることには、大きな違和感があったため、海外勢の評価によって出資が決まったのである。10年前の日本はそんな様子であった。

Kyulux における事業化について

現在のKyuluxの研究開発状況について述べる。2015年3月の創業以来、KyuluxではTADF/ハイパーフルオレッセンス（HF）（図2）の研究開発に取り組み、2019年にはTADFを用いた最初の商品が台湾のWisechip社から上市された⁷⁾。

現在、HF-OLEDは、高い色純度を達成することが

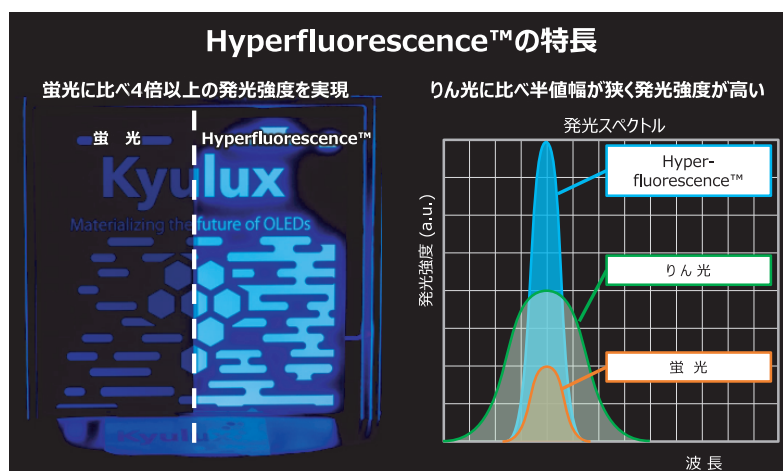


図2 Hyperfluorescence™ の特長
(左) 青色蛍光 OLED と HF-OLED の発光の様子。(右) HF、りん光、蛍光-OLED の EL スペクトルの特徴を表した概念図。

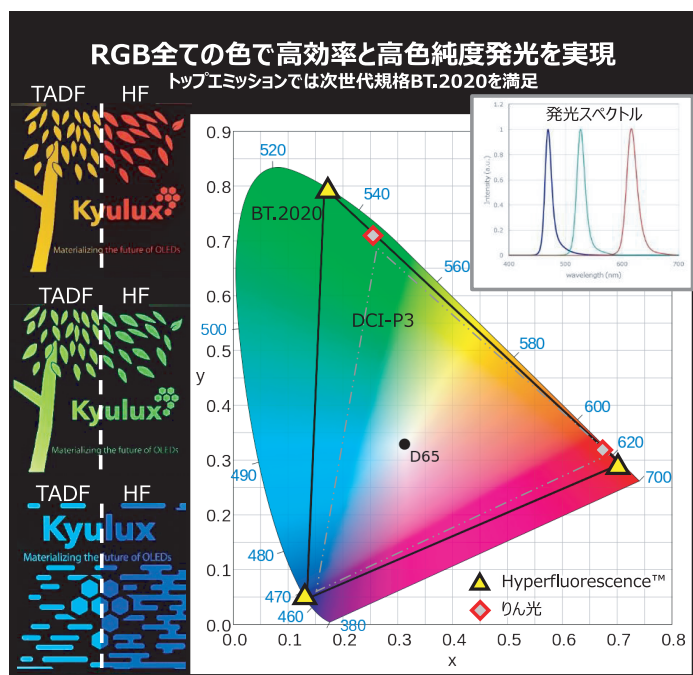


図3 次世代ディスプレイ規格 BT.2020 をカバーする HF-OLED 材料の CIE 色度座標

でき、次世代の Display 規格である BT.2020 の色域の 95% をカバーすることにも成功している (図3)。これは、現在のスマートフォンに使われている Display 規格である DCI-P3 よりも 35% 色度が広くなり、より自然な映像を表現できる。特に緑色に関しては、BT.2020 を満足する色度で 200 cd/A 以上の高い電流効率を達成し、赤色に関しては、現行のりん光 OLED を超える長寿命化が達成され、2025 年前半での量産化の準備が予定されている。一方、青色発光は、OLED においても無機 LED と同様に難関の技術である。現在、青色 HF において、半値幅 20 nm 以下の発光スペクトルが可能となり、BT.2020 の色度 $CIEy = 0.05$ および Blue Index > 400 を達成している。この値は、蛍光 OLED に比べて 1.6 倍以上の値であり、実用化に大きな期待が寄せられている。これらの材料開発を支えているのが、2016 年にハーバード大学から導入し、独自の機能を加えたマテリアルズインフォマティクス (MI) システム (Kyumatic) である。現在、分子物性の予測に加えて、ホスト、TADF、蛍光ドーパントを組み合わせた薄膜物性や OLED のトータル設計にも活用され、開発スピードは 100 倍に達している。

緑色、赤色 HF の事業化については、2026 年からのパネルメーカーでの HF-OLED の量産に向けた準備を進めている。また、青色 HF に関しては 2027 年からの量産化を目指している。Kyulux は、ファブレスのビジネスモデルを推進しており、製造委託による量産体制

の構築を目指して、2024 年 10 月に日本曹達株式会社と TADF の量産委託業務契約を結び、2026 年度以降の量産に向けた体制を構築している。HF-OLED の最終製品は、スマートフォン、タブレット、ノート PC、大型 TV、AR/VR、自動車と多岐にわたる。2026 年の量産以降、緑色・赤色を HF に置き換え、その後、青色を加え、全色 HF-OLED への置き換えを目指している。

Kyulux は、開発に時間と費用がかかり、ベンチャーには難しいと言われる先端材料の実用化に取り組み、2015 年の設立から 10 年が経過した。これまで、130 億円を超える資金を調達、また、NEDO や JST の競争的資金も活用し、ようやく実用化の出口が見えてきた状況である。今後、さらに、各アプリケーションに適した新規材料の開発、MI システムの高度化、量産に向けた生産プロセス開発など技術陣の充実に加え、顧客であるパネルメーカーとの事業開発や、知財、法務、財務経理、人事、IT 等のコーポレートガバナンスに関わる部門の強化も必須である。Kyulux では、グローバルなビジネス展開に興味をもってもらえるトップクラスの人材を幅広く求めている。Kyulux の成功が日本の材料ベンチャーの先駆けとなり、日本が材料、デバイス、IT 技術において世界をリードできる産業構造の変革に繋がっていくことを祈願している。

〔謝辞〕 Kyulux の創業時から事業開発までご尽力いただき、2023 年 9 月に病に倒れ、帰らぬ人となってしまった水口啓さんのご冥福を心からお祈り申し上げます。また、大学における基礎研究の創出を起点に、これまで研究開発および事業開発に真摯に従事していただいたすべての Kyulux の皆様、Kyulux を支えていただいた VC や JST の皆様に深く感謝いたします。本文の執筆にあたり、一部データと図表を提供いただいた安達淳治さんをはじめ、Kyulux の関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

- 1) C. Adachi, T. Tsutsui, S. Saito, *Appl. Phys. Lett.* **1990**, 57, 531.
- 2) C. Adachi, T. Tsutsui, S. Saito, *Appl. Phys. Lett.* **1990**, 56, 799.
- 3) H. Uoyama, K. Goushi, K. Shizu, H. Nomura, C. Adachi, *Nature* **2012**, 492, 234.
- 4) C. Adachi, M. A. Baldo, M. E. Thompson, S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.* **2001**, 90, 5048.
- 5) <https://oled.com/>
- 6) <https://www.kyulux.com/?lang=ja>
- 7) <https://www.kyulux.com/wisechip-discusses-its-hyperfluorescence-tadf-pmoled-with-oled-info/?lang=ja>