

きど じゅんじ

城戸 淳二

(山形大学大学院教授 兼 有機エレクトロニクス研究所長)

有機 EL の光で世界を照らす



世界で初めて白色有機 EL 素子を開発し、米国の週刊誌「ウォール・ストリート・ジャーナル」の1面を飾った。有機 EL 国家プロジェクトの座長として大手企業を束ねる。有機 EL パネルの実用化と地域の振興に向け、ブルドーザーさながらの大奮闘を続けている。

1. ピンク色で世界が変わった

ガッカリした様子で学生が実験結果の報告にやって来た。城戸淳二が山形大学工学部に助手として赴任してきてから4年目の1993年のことであった。既に、城戸は高分子系有機材料(ポリマー)を使った青色の有機 EL(イーエル) (EL = Electroluminescence: エレクトロルミネッセンス)発光には成功していたので、続いて赤色の有機 EL 発光を得るための実験をその学生に指示していた。

この実験は青色高分子系有機材料の中に低分子系の赤色色素を混ぜて、赤色の有機 EL 発光を目指していた。有機 EL ではいろいろな色素を混ぜても一番エネルギー・レベルの低い色素の色で発光することが分かっていた。そこで城戸がその学生に指示した実験では、青色と赤色の二種類の色素が混ざっているので、エネルギー・レベルの低い赤色の発光が得られるはずであった。

その学生が持ってきた有機 EL 素子に城戸自らが電気を流すと、なるほど赤色ではなく白っぽいピンク色に光っていた。

光の三原色といわれる赤、緑、青の三色を混ぜると白色になるはずであるが、有機 EL の場合には、赤と緑と青の三色の発光物質を混ぜても白にならず赤になる。これがそれまでの有機 EL の世界での常識であった。これを理解するには少し面倒な説明が必要である。

有機 EL で発光する光の色は、それぞれの色素が持つエネルギー・レベルの高さによって

決まっている。例えば、青色の励起エネルギー・レベルは 2.8eV(エレクトロン・ボルト:エネルギーの単位)程度で、波長が 440nm 程度の青色を発する。緑色(波長:約 550nm)は青色よりも励起エネルギー・レベルが低く 2.3eV 程度、赤色(波長:約 700nm)の励起エネルギー・レベルはもっと低く 1.8eV 程度である。

発光色の異なる色素が混ざっていると、高いレベルにある励起エネルギーはより低いエネルギー・レベルへと移っていく。そこで青色と緑色と赤色の色素が混ざっていると、青色色素の持つ高い励起エネルギーはまず緑色のエネルギー・レベルへ移動し、更に赤色のエネルギー・レベルへと移っていくことになり、結局エネルギー・レベルの最も低い赤色の発光だけが起きることになる。つまり、何種類の色素を混ぜても、結局はエネルギー・レベルの一番低い色素のもつエネルギー・レベルへ励起エネルギーが移り、その色素が持つエネルギー・レベルに対応した発光を示す。

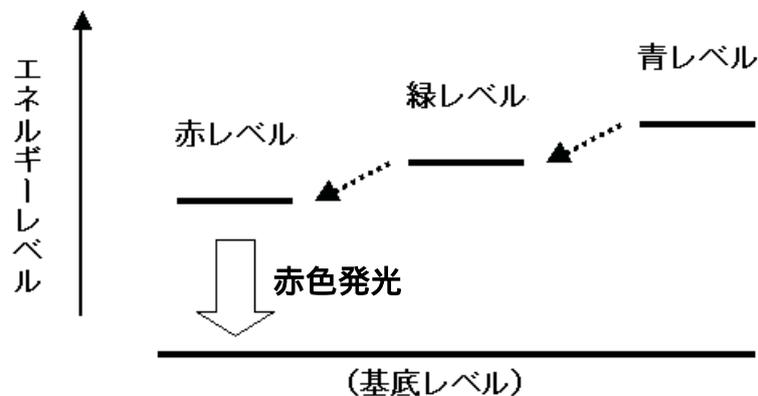


図1 三色の色素を混ぜた有機 EL は赤く光る

従って、これまでの有機 EL の世界では青色だけ、緑色だけ、赤色だけというように別々の発光はあっても、三色が混ざり合った白色発光はありえないと考えられていた。

ところが、学生が持ってきた有機 EL パネルは赤色ではなく、白っぽいピンク色に光っている。これを見た城戸は小躍りして喜んだ。この「失敗した実験」で白っぽいピンク色に光るということは、赤色色素の量が少なすぎたために青色のエネルギー・レベルにいた電子が全て赤色のエネルギー・レベルへは移らず、一部は青色として発光して全体として白っぽいピンク色になっているということである。

ここまで分かれば後は早い。今度は、青色の色素に赤色色素を少し混ぜたものに更に少量の緑色の色素も添加すると、思った通りピンク色ではなく正真正銘の白色発光が実現した。世界で初めての白色有機 EL 発光に成功した瞬間である。1993 年のことであった。

2. 東大阪から東京、ニューヨークを経由して米沢へ

城戸は1959年に大阪で生まれた。誕生日はエジソンと同じ2月11日で、城戸はこのことを殊のほか強調する。『日本のエジソン 城戸淳二の発想 成功は成功を呼ぶ!』¹という題名の本まで出版した。

城戸の父親は陸軍士官学校の出身で、それから京都大学に移り高分子の研究をした後、祖父が創業していた東大阪市(大阪府)のプラスチック成型工場「長瀬化学工業所」の後を継いだ。東大阪市は、東京の大田区と並んで日本における中小企業の大集積地として知られている。

この東大阪の地で城戸家の次男として生まれ育った城戸にとって、日本のモノづくりを支える中小企業の実態が手に取るように分かる。城戸の研究が研究のための研究でないのは、この幼いときからの記憶がそうさせるのであろう。

父親の京都大学時代の恩師が古川淳二であり、この古川の名前に因んで城戸の淳二という名前が決まったという。城戸にとって父親は恐い存在であり、尊敬すべき存在でもあったが、いつか父親を超えたいとも思っていた。この気持ちが知らず知らずのうちに城戸を前へ前へと突き動かす内なる力になっていった。

小学生時代はプラモデルの全盛時代で「TAMIYA 1/35 スケール」プラモデル・シリーズに熱中して戦車や飛行機を大量生産し、夏休みには近くの生駒山まで遠征してクワガタ虫を探し歩いた。

小学2年生の担任教師が、この子は勉強すればできるのですがねと母親に言った。この話を母親から聞かされた城戸の脳裏にこの言葉が焼きついた。自分も勉強すればできるのだと思いつくようになり、いつかチャンスがあれば自分の力を試したいと考えるようになった。心の底に焼きついたこの考えが後に城戸の人生を大きく変えることになる。教師のひと言、母親のひと言が子供の将来にとっていかに大きな影響を及ぼすか、良い意味でも悪い意味でもまさに恐るべきことである。

又こんな話もある。ある時、母親が占い師に観てもらおうと、この子は将来新聞に載ると言われた。これを聞いた母親は淳二がいつか犯罪か何か悪いことをしてかして新聞に載るものと思いつく、心ひそかに恐れたという。母親にしてみれば自分の言うことも聞かない淳二のことである、新聞に載ると言われれば犯罪者ぐらいしか思い浮かばなかった。ところが、白色有機ELの成功で城戸の名前が新聞に載った時に母親が初めてこの話をし、我が子の成功を喜ぶよりも何よりもホッとしたと言う。このような母親を持った城戸は幸せである。

中学生のとき、学校が終わると家に飛んで帰って美術の課題「魚の彫刻」を仕上げるため

¹ 城戸淳二、「日本のエジソン 城戸淳二の発想 成功は成功を呼ぶ!」、KKベストセラーズ、2004.

に夕食も忘れて延々と彫刻刀を動かし続けたという。根っからのモノづくり少年であった。かと思ふと街の空手道場に通い始めた。全国の中学・高校で校内暴力が荒れ狂っていた時期であった。

高校は司馬遼太郎の出身校に進み、そこで創造的な仕事に興味を待ち工業デザイナーや建築技術者にあこがれた。

ここで忘れてならないのは中学、高校時代を通じて城戸は釣りに熱中していたことである。川釣りでも池釣りでも海釣りでも何でもこいである。友達と泊りがけで釣りに出かけたりして、本格的である。たかが釣りといえども結構お金がかかる。城戸はそのために新聞配達のアルバイトを始めた。その後、牛乳配達の方がアルバイト料の高いことを知って牛乳配達に変更した。

高校を卒業していざ大学入試になると、すんなりとは行かない。製図が好きだったので一年間の浪人生活をしてから関西にある大学の機械工学科に入学したが、中途退学して早稲田大学にチャレンジした。今度は負けなくなかったので本気で勉強し、その甲斐あって早稲田大学へ合格。兄がいるので自分が父親の会社を継ぐことはないにしても少しでも役に立てればと考えて理工学部応用化学科に進んだ。城戸の優しさが感じられる。

しかし、一旦、大学に入学してしまうと勉強はどこかに飛んでしまい、スキーサークルに入って競技スキーに明け暮れる毎日であった。何かに熱中していなければ気がすまないタイプなのかもしれない。4年生になって卒業研究のために化学の実験に取り組み、初めて化学の面白さを知ったという。

1984年、城戸は無事に早稲田大学を卒業した。このとき指導教官の土田英俊教授が何故か150人中ピリから3番目の城戸に米国のポリテクニク大学大学院への留学を勧めるのである。ゼロからやり直せと言う。小学2年生の時の担任教師と同様に、この土田教授にもまだ表に顕れない城戸の隠れた本当の能力が見えていたのかもしれない。

そんなことはどうでもよい城戸は、この話に飛びついた。城戸の言葉を借りると、早稲田大学の在学中は競技スキーに熱中していて基礎学力は無かったが、元々極楽トンボで喜び勇んでアメリカへ行くことになったと。しかし、米国へ留学してみると語学の壁もあって授業が全く理解できない、死に物狂いで勉強せざるを得なくなった。その甲斐あって5年間の留学中に5本の論文を書くことができた。更に、語学もモノにしたようである。その成果は、留学先の後輩として入ってきた台湾から来た杏林(シンリン)さんと目出度く結ばれたことで証明された。

留学して5年目の1988年秋、米国留学を勧めてくれた恩師の土田から、今度はアメリカで博士号を取ったら帰国して山形大学工学部の助手になるように勧める電話が突然入った。土田にしてみると、何故か気になって仕方がない弟子なのであろう。

山形大学工学部は上杉鷹山ゆかりの地である米沢市にある。山形大学工学部の前身は旧制米沢高等工業学校である。その昔、この旧制米沢高等工業学校に赴任してきた秦 逸三が日本で初めてビスコースから人造絹糸を合成した。更に、秦はこの米沢の地に後に帝人(株)となった東工業(株)米沢人造絹糸製作所を1915年に創業している²。まさにベンチャー・スピリットの歴史を持った土地柄である。

生まれ、話は城戸である。土田から帰国の誘いを受けた城戸は、関西の出身であることもあって米沢の地については土地勘が無く、山形大学の先生が書いた論文も目にしたこともなかった。土田からの誘いを丁重に断った。

一週間後にまた土田から誘いの電話が入って、意志の強い城戸でも恩師からの強い誘いに結局断わりきれずに1989年3月に渋々帰国して米沢に赴くことになった。

城戸が山形大学に赴任してみて、自分が予想していた以上の最悪の状況に愕然とした。研究室の床のタイルは剥がれ、フラスコがあるぐらいで全く何も無い。有機ELどころの話ではなかった。米国での設備が完備した研究室を見慣れていた城戸にしてみれば、20年前にタイムスリップした気分であった。

いくら悔やんでも後の祭りである。仕方がないので城戸は山形大学にこれから3年間勤めて土田への義理を果たした後、他に移ることを決心した。ここを出ないと自分の研究者としての人生はジ・エンドになると思った。同時に、山形大学から他に移るまでの3年間に有機EL分野で実績を上げてみせると決意した。

城戸は助手として山形大学に来た。一般的にいうと大学における助手の役目は教授の手伝いをするのであるが、赴任先の高分子化学科の長井勝利教授は自分の手伝いでなく、城戸に好きなようにやらせてくれた。これで城戸は自分自身の有機ELの研究に没頭することができた。城戸はこのことを今でも非常に感謝している。何が幸いするかわからない。有機ELの女神(存在するかどうか保証の限りでない)が城戸を必要としたとしか思えない。

結果として、山形大学に赴任してきたときに心に決めていた3年間が過ぎても城戸は米沢を去らなかつた。そして4年目にでっかいご褒美が来た。1993年、世界で初めての白色有機EL素子を発明したのだ。母親をホッとさせるとともに、世界中の有機EL関係者をアツと言わせた瞬間である。この研究成果を英国の科学雑誌「Science」に投稿し、1995年に掲載された

² 米沢と人造絹糸: 米沢藩9代藩主の上杉鷹山が、藩財政の立て直しの為に奨励した米沢織は、国内有数の高品質絹織物であった。一方、人造絹糸がヨーロッパで開発され、明治末には日本にも輸入されるようになった。山形大学工学部の前身である旧制米沢高等工業高校の講師として赴任した秦 逸三が、ビスコース(木材パルプを苛性ソーダで処理し、これに二硫化炭素を加えたもの)から人造絹糸を作ることによって日本で初めて成功した。鈴木商店の援助を受けて、1915年(大正4年)に秦が工場長となって東工業(株)米沢人造絹糸製造所を設立。その後、1918年(大正7年)に帝国人造絹糸(株)として独立した。これが現在の帝人(株)の前身である。

³。「Science」の威力は凄いもので、城戸の成果が米国の経済紙「ウォールストリート・ジャーナル」の1面を飾った。

3. 希土類の研究は語呂合わせから始まった

早稲田大学での卒業研究のとき、指導教官の土田教授が、城戸君だから希土類(きどるい)を研究したらどうかと言ったことから城戸の希土類人生がスタートした。語呂合わせから始まったようなものだが、思えば運命的なひと言だったと城戸は後に述べている。

当時、土田研究室は群馬県高崎市にある原子力研究所と共同研究をしていた。原子力発電所の廃液の中に混じっている放射性元素を選択的に捕集して再利用するための金属イオンの捕集研究である。しかし、大学では放射性金属イオンを扱えないので、放射性金属と性質のよく似た希土類をモデル物質として希土類をうまく捕集できるイオン交換樹脂を作るのが城戸の卒業研究テーマとなった。

1984年に早稲田大学を卒業した後、土田から紹介されて高分子研究で有名な米ニューヨークのポリテクニク大学大学院の岡本善之教授研究室へ留学し、高分子と希土類金属イオンの結合反応の研究を行うことになる。高分子を合成したり蛍光の発光特性を測定したりしていたが、岡本研究室には希土類金属錯体が入ったプラスチックがゴロゴロしていたので、これを電氣的に光らせたいと思うようになった。

過去の論文を調べてみるとニューヨーク大学のポーブ(M. Pope)教授が同じような研究をしていて、1963年にアントラセン(分子式: $C_{14}H_{10}$)という有機物の単結晶に直流電圧をかけて発光させていることが分かった。指導教官の岡本教授は、以前ニューヨーク大学で教鞭をとったことがあり、しかもポーブ教授のために例のアントラセンの単結晶を作っていたという不思議な巡り合わせである。そこで、直ぐに岡本教授に連れられてポーブ教授を訪問した。

その後、城戸は手元にある希土類金属錯体を使って片っ端から発光実験を行ったが、アメリカ留学中には一度も光ることはなかった。

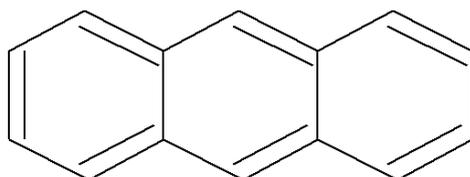


図2 ベンゼン環「亀の甲」3個からなるアントラセンの構造式

土田の勧めで 1989 年に日本に戻った城戸は山形大学工学部の高分子科の助手になっ

³ J.Kido, M.Kimura and K.Nagai, "Multilayer White-Light-Emitting Organic Electroluminescent Device," Science, 267, pp.1332-1334 (1995).

た。日本に戻ってから、あの有名なイーストマン・コダック(Eastman Kodak)社の C.W.タン(C.W.Tang)が書いた有機 EL 発光に関する論文⁴を目にすることになる。タンが実験に使ったのはアルミニウム錯体と呼ぶ有機物であったが、発光スペクトルの幅は広く光の純度はそれほど高くなかった。

城戸は自分が研究していた希土類錯体の方がアルミニウム錯体よりも発光スペクトルがシャープであることを知っていたので、城戸は希土類錯体を使った有機EL素子ならきれいな光を出すことが出来ると確信した。

余談ながら、日本でカラーテレビの普及が始まった頃のテレビは赤色の発色が良くなく、家電メーカー各社は赤色の鮮やかなカラーテレビ用ブラウン管の開発に苦労していた。このような状況下で日立製作所はブラウン管の蛍光体として希土類の一つユウロピウムを使い、新しい19型カラーブラウン管を完成させた。その結果、鮮やかな赤色が出るカラーテレビを実現し、「キドカラー」と名付けて1965年に商品化した。「キドカラー」の「キド」とは、希土類蛍光体の「キド」とテレビの明るさを表現する「輝度」とを掛け合わせた言葉であるといわれている。この「キドカラーテレビ」の宣伝のために、戦後初めての飛行船(国内の特殊航空機として戦後一番機で、番号は「JA1001」)を作り、1968年から1969年にかけて半年間、日本各地を飛び回り宣伝を行った。

閑話休題。城戸は希土類錯体を使って有機EL素子を作れば、絶対にきれいな光が出ると確信したが、いざ実験を始めようとしても山形大学には実験装置が全くない。仕方なく国内の企業に頼み込んで装置を借りたり、大学の休み期間を利用して米ブルックヘブン国立研究所へ出かけて行って実験をした。その甲斐あって1990年にはようやく発光する有機EL素子が開発できて、論文を書けるところまで来た。

4. ところで「有機EL」は何？

これまでは説明もなしに有機ELについて書いてきたが、「有機EL」という言葉はあまり馴染みがない。例えば、同じ表示素子の「液晶パネル」といえば電卓、パソコン、携帯電話の表示パネルから始まって液晶テレビに至るまで、実際の「液晶パネル」は見慣れているし、新聞・雑誌等でその名前を目にすることも多い。その構造や詳細を知らなくても何となく分かったつもりになってくる。

ところが「有機EL」の方は、有機ELパネルを使った実際の商品も出ているもの目にする機会も新聞や雑誌への露出度もまだ少ない。その上、「有機」とか「EL」とかいった難しそうな言葉が並んでいて、少し抵抗感を感じるのかもしれない。

⁴ C.W.Tang and S.A.VanSlyke, "Organic Electroluminescent Diodes," Appl. Phys. Lett., Vol.51, No.12, pp.913-915, 1987.

液晶パネルは自分自身では発光せず、光を透過させたり遮断したりするいわばシャッターのような働きをしており、液晶パネルの裏側にはバックライト(小型蛍光灯や LED)を置き、このバックライトの光を液晶パネルでオン/オフしながら画像を表示している。バックライトは常時点灯しておかなければならず、バックライトの厚みや重さが液晶パネルの厚みや重さの大きな足枷になっている。

一方、有機 EL 素子の場合は、自分自身で発光する自発光素子であり、更に 1~2 ミリメートルという薄さと非常に軽量という大きな利点を持っている。このため次世代薄型テレビの表示パネルは有機 EL パネルになると予測する向きも多い。

次世代照明光としては LED (Light Emitting Diode) が注目を浴びており、交通信号灯は白熱電球灯から LED 信号灯へ急速に移行しつつある。自動車用ライトにも LED が進出し始めた。また、家庭用照明も蛍光灯から LED へと移るチャンスを窺っている。ところが LED は点光源であることから、蛍光灯の置き換えを考えた場合には沢山の LED を敷き詰めて面光源を得る必要がある。それに対して有機 EL パネルは元々が面発光のパネルであり、家庭用照明に適している。有機 EL パネルが自発光の面発光パネルであることから、液晶パネルのバックライトにも利用できるなど今後いろいろな応用展開が期待されている。

ということで、城戸の凄さを知るには「有機 EL」に対するある程度の理解が必要なので、少し回り道ではあるが有機 EL の紹介をする。

(1) 有機化合物には低分子系と高分子系がある

有機化合物というのは炭素を含む化合物の総称で、炭素原子を骨格にした分子構造を持つものをいうが、一酸化炭素(CO)や二酸化炭素(CO₂)のような単純な酸化物、炭酸塩、硫化物、シアン化物、炭化物は除かれる。

もともとは生物によって作り出される物質であるから有機物と呼んでいたが、1828年に28歳のドイツの化学者ウェーラーが、生体だけが作り出せると思われていた尿素(H₂NCONH₂)をシアン酸アンモニウム(NH₄OCN)の水溶液を加熱して合成することに成功したため生物によって作り出される物質を有機物とする定義が怪しくなってきた。そこで現在では炭素原子を骨格にした分子構造を持つものという定義に落ち着いているが、名前だけは有機物という名称が使われ続けている。

簡単な構造で馴染みのある有機化合物としては、炭素原子(C)1個と水素原子(H)4個からなるメタン(CH₄)、炭素原子2個と水素原子6個からなるエタン(C₂H₆)、炭素原子3個と水素原子8個からなるプロパン(C₃H₈)などがあり、炭素原子の鎖の長さによって次々と新しい化合物になっていく(図3参照)。これら一連の化合物はメタン系炭化水素と呼ばれている。

炭素原子のもっと長い鎖をもったメタン系炭化水素も簡単に作ることができ、これをポリエ

チレンと呼んで一般化学式は(C_nH_{2n+2})と表される(図4参照)。

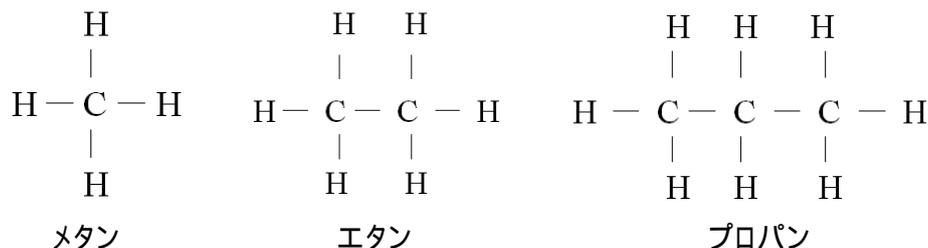


図3 有機化合物(メタン系炭化水素)の分子基本構造例

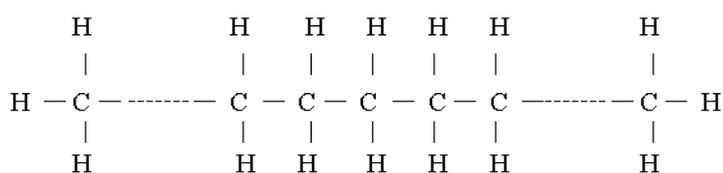


図4 ポリエチレンの分子構造

有機 EL に使用する有機材料には、構成している分子量の違いによって低分子(スモールモレキュール)系と高分子(ポリマー)系の二種類に分類され、低分子系有機材料と高分子系有機材料とは性質に明らかな違いがある。低分子と高分子の分子量の区分を表1に示す。低分子と高分子の中間の分子量を持った有機材料にも重要な材料があり、必ずしも明確に区別できるわけではなく、表1の分子量による区分はあくまで目安である。

表1 低分子と高分子の分子量区分

低分子 / 高分子	分子量
低分子	1,000 以下
高分子	2,000 ~ 3,000 以上

低分子系有機材料と高分子系有機材料の性質上の大きな違いは、低分子系は真空中で蒸着できるが高分子系はできない点である。その結果、低分子系有機材料は真空蒸着法で成膜し、高分子系有機材料は有機溶剤に溶かした状態でスピコーティング法やインクジェット法を使って成膜する。

低分子系有機材料の開発は高分子系材料に比べて各段に先行しており開発の歴史も長い。低分子系材料を開発している企業の数も世界中に20社以上あり、低分子系有機材料を使った有機 EL パネルは商品化されて既に市場に出ている。一方、高分子系有機材料を開発している企業数は世界中で2~3社しかなく、高分子系有機材料を使った有機 EL パネ

ルはまだ商品化されていない。

高分子系有機材料の中で、最初に 共役高分子有機材料を用いて有機 EL 素子を作製したのが英ケンブリッジ大学のフレンド教授(R.H.Friend)等のグループで、後に英 CDT (Cambridge Display Technology)社を設立している。

高分子系材料の薄膜は、室温でスピコーティング法を使って構成できるので、真空蒸着を使って薄膜を構成する低分子系よりも製造上は非常に有利であるが、スピコーティング法は材料の利用効率が極端に悪く、均一な膜厚分布制御も難しく、赤/緑/青の三色を塗り分けることもできない等の幾つかの問題点を抱えている。一方、セイコーエプソンなどはインクジェット技術を使って高分子系材料の三色塗り分けを実現している。現在の高分子系有機材料を使った有機 EL パネルは、低分子系有機 EL パネルに比べて素子寿命が短く、輝度が低いなど基本機能上でも克服すべき課題をまだ幾つか抱えている。

(2) アメリカで生まれ、日本で花開いた有機ELパネル

1963 年、米ニューヨーク大学のポー プ(M.Pope)らはアントラセンの単結晶を使って、約 400 ボルトの直流電圧をかけて弱いながらも世界で初めての有機 EL 発光を観測した。城戸が米国の留学中に岡本教授に連れられて訪問したあのポー プ教授であり、発光に使ったアントラセンの単結晶は岡本教授が作ったものである。

ポー プらの有機 EL 発光を契機として有機 EL の研究が始まったが、有機固体結晶を使っていると発光させるためには数百ボルトの電圧印加が必要であることから、その後の有機 EL 研究は発光材料を薄膜化して低電圧駆動ができるような方向へと進む。

1982 年、ピンセット(P.S.Vincett)らのグループは真空蒸着を使って薄い(膜厚:0.6 ミクロン)アントラセン薄膜を形成して青色の有機 EL 発光を観測している⁵。発光は弱いものの 30V 程度の電圧で発光を確認でき、薄膜を使った有機 EL 素子とその後の有機 EL 素子開発の中心となる。

次に登場したのがイーストマン・コダック社の C.W.タン (C. W. Tang) であり、1987 年に低分子系有機材料であるアルミニウム錯体(Alq_3)を真空蒸着によって 2 層に積層化した有機 EL パネルを作り、僅か数分間であるが有機 EL 発光に成功している。

これ以降は、多層化した薄膜による有機 EL 素子の開発が主流になり、日本での研究開発も本格化することになる。そして遂に、東北パイオニアが世界で最初の有機 EL パネル(パシッパ型緑色単色エリアカラー)を 1997 年 11 月に商品化し、パイオニアの車載用レシーバの表示部として採用された。同じく東北パイオニアが 1999 年にカーオーディオのディスプレイ・パ

⁵ P. S. Vincett, W. A. Barlow, R. A. Hann, G. G. Roberts, Thin Solid Films, 94, 171, 1982.

ネルとして4色エリアカラーの有機 EL パネル(パシブ型)を商品化した。更に同社は 2000 年に有機 EL パネル(パシブ型エリアカラー)を米モトローラ社に供給して携帯電話機のディスプレイとなった。2003 年、今度は三洋電機が世界最初のフルカラー有機 EL パネル(2.16 インチ、アクティブ型)を開発しコダックのデジタルカメラ用モニターとして採用され、2004 年にはソニーが 3.8 インチのフルカラー有機 EL パネル(アクティブ型)を開発して自社の PDA「クリエ」に搭載した。このように有機 EL パネル商品化の先陣を切ったのは日本メーカーであり、初期の有機 EL パネルの商品化は日本メーカーの独壇場であったが、最近では韓国や台湾メーカーの商品開発も活発化している。

低分子系有機材料は真空蒸着法で成膜するため、有機 EL パネルの大型化には不利であるといわれていたが、2005 年 5 月の「ディスプレイ国際会議SID」において、韓国サムスン電子が 40 インチ有機 EL パネルの試作品を展示した。低分子系有機材料を使った大型有機 EL パネルの実現により、パネルサイズの大小にかかわらず有機 EL パネルの実現可能性が見えてきた。有機 EL パネルの今後の展開がますます楽しみである。

(3) サンドイッチ構造の有機 EL 素子

有機 EL 素子の基本的な構造は陽極と陰極の二つの電極間に有機発光物質を挟み込んだサンドイッチ構造をしており、その代表的な構造例を図 5 に示す。

陽極はガラスのような透明基板上に ITO (Indium Tin Oxide)や IZO(Indium Zinc Oxide)と呼ぶ透明な電極で構成され、陽極からはプラス電荷をもった正孔(ホール)を有機発光物質に注入する。一方の陰極は透明である必要がないので、アルミニウムやマグネシウムといった金属を使って構成され、マイナス電荷をもった電子を有機発光物質に注入する。

それぞれの電極から正孔と電子の注入を効果的に行うために、陽極側には正孔注入層を、陰極側には電子注入層を置いたり、注入された正孔や電子が効率よく有機発光層に到達するように正孔輸送層や電子輸送層を置く場合もあり、有機層は多層構造になっている。

現実には注入層と輸送層を兼ねる材料もあり、低分子系の有機 EL 発光素子では陰極電極側から順番に電子注入層、発光層、正孔輸送層、正孔注入層と 4 層で構成され、その下に陽極電極のある 4 層構造型が多い(但し、図 5 の構造は 3 層構造の例を示している)。一方、高分子系有機 EL 発光素子では、発光層だけで構成した単層型が多い。

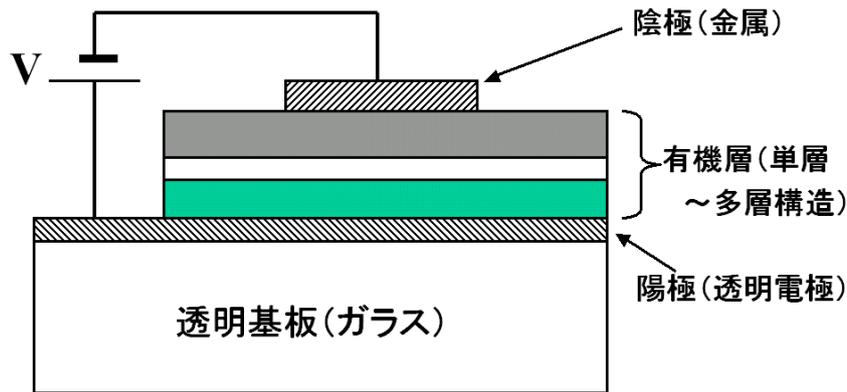


図5 有機EL発光素子の構造例

図5に示した構造例では、ガラス基板の上に陽極電極として透明電極を付けている。アクティブ型有機ELパネルの場合、発光画素毎にその素子を発光させるかどうかを決めるスイッチとして薄膜トランジスタ(TFT:Thin Film Transistor)が透明電極側に構成されており(図には示していない)、有機EL発光層で発光した光は薄膜トランジスタのあるガラス基板側から外部に取り出される。このような構造では図5の下側から光が出ることになるので、一般にボトム・エミッション構造と呼ばれている。このボトム・エミッション構造では外部に取り出す光は薄膜トランジスタ側から外部に出るので、薄膜トランジスタによって発光面積が小さくなり、より高い輝度で外部発光させなければならず、素子に対する負担が大きくなる。

一方、ガラス基板側にそれぞれの発光画素毎にスイッチするための薄膜トランジスタを構成するのは同じであるが、その上に金属の陽極電極を作り、もう一方の陰極電極(図5の例では上側)として透明電極を使用した構造の有機ELパネルも開発されている。この場合、光は構成図の上側から出るのでトップ・エミッション構造と呼ばれる。トップ・エミッション構造の場合、薄膜トランジスタとは反対側から光を取り出すため薄膜トランジスタによって発光面積が小さくなることなく、素子に対する負担が小さい。

要約すると、有機EL素子では陽極から注入された正孔と陰極から注入された電子とが有機発光層で再結合し、そのときに発生するエネルギーが光に変換されて発光する自発光素子である。

ところで、正孔と電子の再結合により発生するエネルギーが光に変換される仕組みには2種類あり、その一方の仕組みで発光する光を「蛍光(fluorescence)」と呼び、もう一方の仕組みで発光する光を「燐光(phosphorescence)」と呼んで区別している。

図1に示した例でいえば、あるエネルギー・レベルに励起された電子がそのエネルギーに相当する光を放出して基底レベルへ落ちる。詳しい仕組みは別にして、このときに放出されるエネルギーの約25%は蛍光となり、残り約75%は燐光となる。しかし、これまでは主に蛍光だ

けを利用してきたので、残りの約75%分は光としてではなく熱として失われていた。

1998年、プリンストン大学および南カリフォルニア大学のバルド(M.A.Baldo)らは燐光発光素子(低分子系)を開発し、この両大学の技術を使って米ベンチャー企業UDC(Universal Display Corporation)⁶が各種の燐光発光材料や素子の開発と販売を行っている。

東北パイオニアはUDCから低分子系の赤色燐光材料の供給を受けて1.1インチのパッシブ型カラー有機ELパネルを開発し、携帯電話機のサブディスプレイ用として2003年12月に富士通へ供給を開始した。これが世界初の燐光有機材料を使用した量産型の有機ELパネルである。

一方、低分子系だけではなく高分子系の燐光の研究も進められている。例えばNHK放送技術研究所が赤/緑/青三色の高分子系燐光有機EL素子を開発したり、英ケンブリッジ・ディスプレイ・テクノロジー(CDT: Cambridge display Technology)も高分子系燐光有機EL材料の開発を進めているものの、まだ実用段階には達していない。

5. またまた城戸がホームランを飛ばす

城戸は藤沢市(神奈川県)にあるアイメス社と共同で有機EL素子を多段化する研究・開発に取り組んでいた。その結果、発光ユニットを二つ持った有機EL素子の開発に世界で初めて成功し、2002年3月の応用物理学会⁷において発表した。「内部量子効率が世界で初めて100%を超える」と発表して会場に詰め掛けた関係者を驚かせた。

内部量子効率とは電極から注入された電子が光量子(フォトン)に変換される効率のことであり、内部量子効率が本当に100%を超えるのかどうかという議論は残るものの、電流効率⁸は重ねた段数にほぼ比例して高くなる。

更に、城戸とアイメスは3層の発光層を積層した有機EL素子も共同で開発し、その結果を2002年9月の応用物理⁹と2003年5月に米ボルチモアで開催された「ディスプレイ国際会議SID」において発表した^{10,11}。

⁶ <http://www.universaldisplay.com/>

⁷ 城戸、他、「電荷発生層を有する高量子効率有機EL素子」、第49回応用物理学関係連合講演会、27p-YL-3、p.1308、2002年3月(2002)。

⁸電流効率:注入された電流のうちどれだけ光として取り出せるかを示すもので、カンデラ(candela)/アンペア(A)の単位を用いる。(カンデラ:光度の単位。光の強さを示し、光源から或る方向にどれだけ光の量が出ているかを示す)

⁹仲田、他、「電荷発生層として電荷移動錯体を有するマルチフォトンエミッション有機EL素子」、第63回応用物理学関係連合講演会、27a-ZL-12、p.1165、2002年9月(2002)。

¹⁰ J.Kido and A.Yokoi, "High efficiency organic EL devices having charge generation layers," Digest 27.1, pp.964-965, SID 2003, (2003)。

¹¹ A.Yokoi and J.Kido, "Multiphoton organic EL device having charge generation layer," Digest 27.5L, pp.979-981, SID 2003, (2003)。

このように城戸が先鞭をつけた有機 EL 素子を多段化したタンデム型有機 EL の技術は、マルチフォトンエミッション素子(MPE)と呼ばれ、今後の有機ELパネルの主流になると思われる。

6. 今日もブルドーザーが唸りを上げる

城戸は町工場の立ち並ぶ東大阪市に生まれ育った。大学は日本の首都東京にある早稲田大学へ進み、卒業後は世界最大の町ニューヨークで 5 年間を過ごすことになる。ニューヨークで城戸は生まれ変わったという。そこに大学の恩師である土田からの誘いがあり、断わりきれずに 1989 年に米沢へ移った。

山形大学に着任するや否や、城戸は研究環境の酷さから 3 年後に他所へ移ると決意した。がなぜか米沢にそのまま居着いてしまった。米沢が城戸の好きなアユ釣りやスキーに適していたからかどうかは分からないが、現在も城戸は家族とともに自然に恵まれた環境の中で新しい人生をエンジョイしているかのように見える。しかし、3 ヶ月先まで城戸のスケジュール表はピシッと詰まっており、文字通りの東奔西走の日々で、エンジョイどころではないのかもしれない。

2003 年 3 月、山形県は城戸をプロジェクトリーダーとする有機エレクトロニクス関連産業の集積による産業創出を目指して「山形有機エレクトロニクスバレー」構想を打ち出した。その中核として米沢に「有機エレクトロニクス研究所」が完成。この研究所の所長はもちろん我らが城戸である。

この「有機エレクトロニクス研究所」は 43 億円をかけた 7 年間のプロジェクトで、製造プロセス開発室、商品開発室、有機デバイス開発室の三つの開発室から構成されている。地元企業の技術力と競争力の強化、技術者の人材育成、新規商品開発、ものづくり工房(レンタルラボ)の提供など地に足の着いた研究所として 2003 年 11 月から活動を始めた。

県内企業の参加費は 200 万円/年、県外企業の参加費は 500 万円/年とどちらにしても格安で共同研究に参加でき、現在は 20 社が参加して共同研究を進めている。県内外企業との共同研究を通して用途開発、製品試作、商品化、事業化まで支援する。

見ての通り、城戸はこれまで有機 EL 研究一筋に打ち込んできた。その一方で、この国の理科離れや教育問題に大きな危機感を抱いており、見るに見かねてその対応にも軸足を伸ばしつつある。

例えば、日本科学技術振興財団が主催する「サイエンスキャンプ」というプログラムがある。高校生と高等専門学校生を対象に春休みを利用した最先端の科学技術を直接体験学習できる合宿プログラムである。2004 年春に城戸研究室を開放して 2 泊 3 日の「スプリング・サイエンスキャンプ」に 12 名を受け入れた。有機蛍光物質の合成から始まり有機 EL 素子を実際

に作り、その発光スペクトルや輝度の測定まで行う、まさに本格的な研究プログラムである。参加者は皆一様に目を輝かせていたという。女性参加者の母親からお礼の手紙を受け取ったことを城戸が筆者に話してくれたのが印象的であった。よほど嬉しかったのであろう。

本当の教育とは単に暗記をすることではなく、手足を動かして実験をしたり、人と人との触れ合いを大事にすることから始まることを城戸は身をもって知っている。

小学校や中学校、高校から講演依頼の声が掛かると、厳しいスケジュールを遣り繰りをしてでも飛んで行き、有機 EL パネルを皆の前で光らせると「オー」となる。理科が面白いということ在必死になって PR して廻っている。まさに「理科の布教伝道師」である。自分自身の例を引き合いに出して、大学の受験に失敗した落ちこぼれでもこうして大学の教授になれる。やればできるという。単に面白いだけではインパクトが少ないと思ったのか、青色発光ダイオード発明者の中村修二の例を挙げて理科系でも金持ちになれる時代がきたとも話す。

学校の先生に話をする機会も増えてきたので、城戸は先生方に向かっても教育の重要性を訴え続けている。教育に情熱を持った先生が減っていることにも城戸は危機感を募らせている。教育ということを見ると大学生では遅すぎる。中学生、高校生からの教育が重要であり、もっといえば小学校での教育、幼稚園での教育、更に乳幼児教育にまで戻る必要性を城戸は感じている。そこで乳幼児教育の大先輩としての井深大¹²を尊敬し、井深の書いた乳幼児教育に関する本を熱心に読んで勉強している。幼稚園の父兄会に呼ばれると喜んで出て行き、親、特に母親の重要性について話をしていくという。

そうかと思うと地元の中堅企業から声が掛かると、有機 EL とは全く縁もゆかりも無い分野の技術や商売の話にも首を突っ込み、親身になって相談に乗っている。理屈ではなく、東大阪で祖父や父親の後ろ姿を見て育った城戸の DNA がそうさせるのであろう。城戸のスケジュール表がいつも一杯なのがよくわかる。

21世紀の新しい薄型ディスプレイの代表と目される有機 EL ディスプレイに関連した一大産業クラスターを米沢の地に拓くべく、城戸は八面六臂の大活躍である。漸く城戸の秘められた実力が発揮され始めたが、城戸の頭の中には「人類への貢献」という大きな夢が秘められており、城戸の本当の力が発揮されるのはまだまだこれからかもしれない。日本の有機 EL 産業界の先頭に立って荒地に未来の輝ける楼閣を建設するため、城戸はまさにブルドーザーさながらの大奮闘を続けている。

¹² 井深 大(いぶか まさる):1908年、栃木県生まれ。1930年、早稲田大学理工学部卒業。1945年、東京通信研究所(東京通信工業を経て、現ソニー)を設立し、世界的企業に育て上げた。企業人としての活躍とともに1969年には幼児開発協会(EDA)を設立し、幼児教育の重要性を訴えてきた。1997年に89歳で逝去。1992年、文化勲章受章。「幼稚園では遅すぎる」、「0歳は教育の適齢期」、「0歳からの母親作戦」、「胎児から」などの著書がある。

[参考資料]

本文中ではいちいち断らなかったが、多くの資料を参考にさせていただいた。主な参考資料のリストを挙げて、お礼を申し述べる。

- ・ 城戸淳二、「有機 EL のすべて」、日本実業出版社、2003.
- ・ 城戸淳二、「日本のエジソン 城戸淳二の発想 成功は成功を呼ぶ!」、KK ベストセラーズ、2004.
- ・ 吉野勝美、「有機 EL のはなし」、日刊工業新聞社、2003.
- ・ 中村修二、城戸淳二、『「突然変異」を生み出せ!』、日本実業出版社、2003.

【略 歴】

- 1959年2月11日：大阪府生まれ(建国記念日、エジソンと同じ誕生日)
- 1984年3月：早稲田大学理工学部応用化学科(高分子化学、土田研究室)卒業
同年9月：米ポリテクニク大学 (Polytechnic University)大学院 高分子化学専攻入学
- 1987年2月：米ポリテクニク大学大学院 修士過程修了
- 1989年2月：米ポリテクニク大学大学院 博士課程修了、Ph.D
- 1989年3月：山形大学 工学部高分子化学科 助手
- 1990年～92年：米ブルックヘブン国立研究所 客員研究員
- 1995年5月：山形大学 工学部物質工学科 助教授
- 1996年4月：山形大学大学院 工学研究科 生体センシング機能工学専攻 助教授
- 2002年10月(～07年)：経済産業省プロジェクト「高効率有機デバイスの開発」研究統括責任者
- 2002年11月：山形大学工学部機能高分子工学科 教授
- 2003年11月：山形県産業技術振興機構「有機エレクトロニクス研究所」所長

【受 賞】

- 1990年5月：高分子学会 若手奨励金受賞
- 2002年5月：高分子学会 学会賞受賞
- 2002年5月：米ディスプレイ国際会議SID (Society for Information Display) 特別功績
賞受賞
- 2003年12月：(財)光産業技術振興協会 櫻井健二郎氏記念賞受賞