

青色 LED 開発の軌跡とこれからの豊田合成の皆さんへの期待

天野 浩^{*1}

In memory of the development of blue LEDs with TG members and expectations for their continuing contribution for establishing sustainable society

Hiroshi Amano^{*1}

1. はじめに

私が豊田合成技報に報告を書かせていただくのは、2回目になります。1回目は4年前の2011年でしたが、前回とは自分を取り巻く環境が、まるで変わってしまいました。下の写真は、赤崎先生とともに御社に寄贈させていただいたノーベル賞のレプリカメダルです。レプリカといっても、職人の方が本物と同様に作ったもので、素材以外、光沢等も含めて見分けがつかません。レプリカは合計三つで、他の二つは名古屋大学と名城大学に寄贈させていただきました。お世話になった豊田合成の皆様に日々ご覧いただけるのは、私にとってこの上ない光栄です（図-1）。



図-1 御社ロビーに展示されている赤崎先生と私のノーベル賞レプリカメダル

思い起こせば、1985年2月の低温バッファ層以来、1986年から本格的に御社と名古屋大学赤崎研究室との共同研究がスタートしました。当時、私は博士課程の学生でしたが、p型の実現ばかりに気を取られており、低温バッファ層の詳細を開発担当の方にあまり熱心に伝えなかったため、大変ご苦労されたと伺っております。当時はまだ誰もやったことが無い仕事で、開発が困難を極めたことから、量産化の決定までには社内でも多くの議論

があったことと思います。その後1987年からのJSTからの援助もあり、量産化を決定されました。

今回の内容は、1番目のテーマとして、御社と私とのかかわりの中で、特に1986年から1993年まで、御社と赤崎先生および私がGaNのLEDの共同研究を始めたころのエピソードを交え、独断と偏見に満ちた話として、2番目のテーマは、少し視点を変えて、世界でどのようなことが問題になっているか、その問題に対して、皆様のような研究者・技術者は、解決に向けてどれくらい貢献ができそうか、という話を紹介させていただきます。

2. 1986年から1993年まで

まず私が青色LEDに強く惹かれたのは、大学3年生の冬に、4年生で行う卒業研究の研究室を決めるときでした。1年生から3年生まで大学での講義は全て楽しかったですし、あこがれていた量子力学についてもDirac先生の書かれた原著などを読んで楽しんでおりましたが、一方で物足りなさも感じておりました。当時は、ビルゲイツさんやスティーブジョブスさんに憧れ、マイコン(現在のPC)に強く惹かれて、夜勤のアルバイトをして富士通のFM-8を買い、ゲームなどを作って楽しんでおりましたが、やはり人の作ったコンピュータやプログラムを勉強するだけでは、物足りなさを感じておりました。そのようなときに、青色LEDという研究テーマを見て、装置も含めて何でも自分でできる、ということに大きな魅力を感じて、赤崎研究室に入れて頂きました。私は浜松の出身で、小学生の頃は、イロハのイの字の高柳健次郎先生の話をおそらく何回も聞きます。マイコンでもそうですが、高柳健次郎先生の使われていたのもブラウン管で、自分としてはディスプレイをもっとスマートにしたい、郷土の偉大な研究者である高柳先生のご業績を超えるようなことをしたい、という、今から考えれば若気の至りのよ

*1 名古屋大学 教授・赤崎記念研究センター長

うな気持ちもありました。始めたころは、青色 LED が大変難しいということは、全く理解していませんでした。多分豊田合成の方が青色 LED を始めたのも、当時の私と似たようなお考えだったかもしれません。

豊田合成の方々と特に記憶に残っているのは、フォトルミネッセンス (PL) の測定と、電子線照射です。1985 年、修士 2 年生の時に低温バッファ層を使って、当時世界で最もきれいな GaN 結晶を作ることができるようになり、博士課程進学後は、いよいよこれまで誰も達成できなかった p 型結晶にチャレンジすることを決めました。当時は、自分たちだけがきれいな結晶を作っているのだから、自分たちができなければ世界のだれもできない、自分は挑戦する責務がある、などと、かなり気負った気持ちで日々研究に没頭しました。不純物としては、GaP や GaAs など他の材料ではよく用いられ、Pankove 先生が最初 1971 年に作られ、赤崎先生が 1970 年代に研究リーダーを務められた松下電器(株)のグループでも作られていた MIS 型 LED でも用いられた亜鉛 (Zn) にこだわって、実験を行っていました。しかし、1985 年の博士 1 年生から 1988 年の 3 年生が終わるまで、ずっとやってきましたが p 型結晶は一度もできませんでした。しかし、興味深い現象も 2 つ見つけておりました。

一つは、極低温、液体ヘリウム温度での PL です。Zn 濃度を適正化した試料では、液体ヘリウム温度で非常に発光線幅の狭い中性アクセプタに束縛された励起子発光が観測されました。これを是非論文にしたいと思いましたが、問題は液体ヘリウムです。当時、研究室には液体ヘリウムを使う予算がほとんどなかったもので、測定はできませんでした。1986 年に御社との共同研究がスタートし、測定装置も揃えられたので、御社では液体ヘリウムでの PL 測定もできました。今から考えれば、青色 LED とはあまり関係ないテーマでしたが、PL 装置の使用をご許可いただき、更に夜遅くまで測定につきあっていただき、本当にありがたかったです。途中、ホップの香りのする会社の前を小さなスクーターで何度も通い、漸く変形ポテンシャルに関するきれいなデータをまとめることができました。応用物理学会で発表したとき、会場にいたのは残念ながら 4 人、座長、赤崎先生、その他どなたかと私、即ち話を聞いていただいたのはたった一人だけでしたが、JJAP に投稿した論文は受理されました。

もう一つは博士課程の 2 年生の時、NTT にてインターンシップを行っているときに見つけた、電子線照射すると Zn 添加した GaN の青色発光が非可逆的に増大する LEEBI 現象です。残念ながら p 型にはならなかったのですが、これは必

ず論文になる、と思い名大に帰ったのち、急いで図書館で調べたら、自分よりも 4 年も前に当時ソ連のモスクワ大学のサパリンという方が、全く同じ現象を見つけていて、がっかりしたことを今でも鮮明に覚えております。ただこの結果は、中国北京で行われたルミネッセンス国際会議で口頭発表しました。初めての国際会議での英語発表で非常に緊張しました。最初、席の最後列に座られていた 1973 年ノーベル物理学賞を受賞された江崎玲於奈先生が、私の講演の途中で最前列まで来られて聞いてくださるのを見て、大変感激しました。その時に座長をしていただいたのはスウェーデン、リンチョピン大学のモネマー先生です。

ということで Zn では p 型を作るのはできなかったのですが、1987 年に JST からの御社への事業化支援が決まり、名大にも ULVAC 製の新しい横型 MOVPE 装置が導入され、そこで以前御社にも在籍された方が低温バッファ層で苦労され、その後現在名大に居られる鬼頭雅弘氏が主に p 型の実験を行うことになりました。最初 Zn を考えていたのですが、J.C.Phillips 先生の手記“Bonds and Bands in Semiconductors”という教科書の中で、GaP 中では Zn よりも Mg の方が p 型に向いているというグラフを見て今までの間違いに気が付き、高価な Mg 原料を買っていただいて、鬼頭氏が結晶をたくさん作ってくれました。そのままではやはり高抵抗で p 型ではなかったので、Zn の時に行った LEEBI をやろう、と思いつきました。問題は電子線照射装置です。名大になかったので、探していると豊田合成の島津製 EDX 装置なら可能、ということがわかり、お借りすることにしました。PL 装置の時と同じように、片道 1 時間かけて通わせていただきました。試料一つ処理するのに 7 時間から 8 時間かかり、大変時間のかかる処理でしたが、夜中まで付き合ってください、本当にありがたく思っております。おかげで世界初の p 型および pn 接合型青色 LED を世に送り出すことができ、それがノーベル賞の受賞につながったと思っております。

3. 世界規模の問題にどう取り組むか

2015 年 6 月、外務省からの招請でロシアサンクトペテルブルグとモスクワに行かせていただき、都心での交通渋滞のひどさにびっくりしました。日本では東京と大阪ですが、一極集中は日本だけの問題ではなくて、世界中至る所で同じことが起きていることを実感しました。交通渋滞でのイライラを解消する方法として、今後自動運転技術は益々重要になるでしょう。その際、認識用の画像は、より高精細になり、センサーの種類も数

も大幅に増えることから、車内での通信ネットワークは、より広帯域化が必要になります。現在銅線のワイヤーハーネスで行っていることが、いずれすぐに安価なプラスチック光ファイバを用いた光通信システムに代わると思われます。

一方、都市部への一極集中は、社会全体で考えると効率低下の原因です。また生活環境も悪化します。地方への分散化は、社会全体の効率向上及び優れた環境で生活するために重要なテーマと思われれます。将来は、自然の豊かな地方に住んで在宅勤務することが、ライフスタイルの一つとして定着するかもしれません。その際に重要になるのが、特に地方への情報ネットワークの拡充です。ここでも、日本のバックボーンとなる石英光ファイバ網から、各家庭につながるラストワンマイルでの低コスト光ファイバ通信が重要になります。現在赤色 LED や LD で通信が行われていますが、そこに、青色、緑色、黄色などの LED、LD を混載すれば、将来の 4K や 8K にも対応した超広帯域通信システムも普及するでしょう。

電力問題は、日本では正解が見えにくい問題です。2011 年前までは、原発の発電量が全体の約 30% 程度、約 300TWh でした。日本には 48 基の原子炉がありますが、2014 年にはすべて動作が止まり、2015 年の 8 月 11 日によろやく川内原発一号機が運転を再開しました。その発電能力は年間 4～8TWh 程度です。この原稿が皆さんの目に触れるころには、あと数台運転を再開している炉があるかもしれません。残りの必要電力は現在、天然ガスと石炭の輸入を増やし、古くて効率が悪いために止めていた火力発電施設を再稼働しております。従来より日本の火力発電は環境対策が進んでいるために、人間の健康を害するような環境負荷物質はほとんど排出しません。ただ CO₂ だけは排出を免れることができません。ご存知の通り CO₂ は地球温暖化を加速させます。日本ではこれから人口が徐々に減少することから、それに伴って GDP も減少して、必要発電量も減少すると予想されます。一方、世界に目を向けると、近くで若干一休みしている国もありますが、世界全体では GDP の伸びは非常に大きく、そのため 2025 年ころには、世界的に電力供給が不足すると指摘されております。

新しいエネルギー源として再生可能エネルギーが期待されていますが、その多くはコストが高いことが欠点です。特に御社の皆様に声を揃えてアピールしていただきたいのが、日本及び世界での電力問題を解決する手段の一つとしての省エネです。皆さんが開発した青色 LED を用いた LED 電球は、日本では 2020 年までに全照明のうちの 3/4 を占め、その省エネ効果は全発電量のうち

の約 7%、電力料金にすると年間 1 兆円と試算されています。2011 年前までに原発が賄っていた約 30% のうち、原発再稼働で約半分程度は賄われるとすると、残り 8% 程度を他の手段で埋め合わせる必要があります。御社も開発を行っておられるパワーデバイスによる省エネにより、その実現が可能です。例えば電気自動車やハイブリッド車は直流のバッテリーを積んでおりますが、モーターは交流モーターです。したがって直流から交流へ変換するインバータが必要になります。インバータには、現在 Si による IGBT が主に用いられています。その効率は大凡 95% で、決して低くはありません。ただ 5% は損失で熱になっております。これを皆様が開発された GaN を用いたトランジスタに置き換えると、損失を 0.5% 程度にまで低減できることがわかっております。この応用は自動車だけではなく、冷蔵庫や空調機などモーターを用いるものはほとんどすべて、更に最近では直流で動作する家電の割合が急速に増加しており、直流の電圧を直接変換可能なコンバータにも GaN を用いた低損失トランジスタは欠かせません。さらに GaN トランジスタは高速でスイッチングができるので、回路全体を周波数に合わせて小さくできる特徴があります。将来はインバータやコンバータも集積化されてワンチップ化され、どこにあるかわからなくなるような時代が来るかもしれません。その実現のためにも、GaN パワートランジスタをいち早く事業化することが重要です。

4. ノーベルウィーク及びその後色々とお世話になった話

ところで、昨年 2014 年の 12 月のノーベルウィークでは、荒島社長（当時）、太田顧問にご同行頂き、大変お世話になりました。12 月 10 日の授賞式直前でお二人との写真が次頁の通りです(図-2)。その日の昼には昼食会を開いていただき、名城大学および名古屋大学の方々と共に食事と飲み物を堪能させていただきました。授賞式後の晩さん会とダンスの後、太田顧問には、学生連盟が主催するスチューデントナイトキャップにもご同行いただきました。特に朝の 2 時くらいになって、家内の体力が限界に近かったので、わがままを言ってホテルに連れて行っていただきました。

また、お二人には BBC のノーベルマインズという番組収録でもご同行いただきました。



図-2 左が荒島社長(当時), 右が太田顧問。お二人ともタキシード着用。真ん中の私が首からぶら下げているのは文化勲章。

下の写真は、総務の山田部長と広報の半田さんです。お二人には、赤崎先生ご家族のケアと私の家族のケアをしていただきました。特に家内や娘のわがままをいろいろ聞いてくださり、大変ありがたく思っております(図-3)。



図-3 ノーベルウィークでご同行された左：半田さんと右：山田さん。お二人にも、赤崎先生ご家族および私の家族、特に家内と娘が大変お世話になりました。

右上の写真は、授賞式の昼食会で紹介された、青色LEDと白色LEDの紹介キットです。人工光源の歴史と実際のLEDチップ、および白色LEDの原理が大変わかりやすく説明されています(図-4)。



図-4 ご準備頂いたLEDキット。

このキットを広報の稲葉さんにご準備いただき、下記の学校や政府機関などに寄贈させていただきました。

静岡県立浜松西高等学校
浜松科学館
浜松市立広沢小学校
浜松市立蛸塚中学校
ロシア科学アカデミー
ユネスコ日本政府代表部

そのほか、現在研究室で保管させて頂いております。貴重な資料をご提供くださり、この場を借りてお礼申し上げます。

以上とりとめもなく、思いつくままに原稿を書かせていただきました。御社での青色LED開発もインジケータやディスプレイへの応用が最初であったと思います。それが今や照明にも使われ、省エネの代名詞といえるほど大きく発展し、まさに世界を変えています。新しい技術が世界を変える好例で、御社の方々の頑張りが、それを強力に推し進めたといえるでしょう。是非この体験に味を占めて頂きたく思っております。皆様方のこれからもたゆまぬご尽力で、青色LEDに続く第2、第3の大変革が次々と生まれ、持続可能で、より住みやすい新しい世界が実現して、人々がみな幸せな未来になることを祈念しております。

著 者



天野 浩