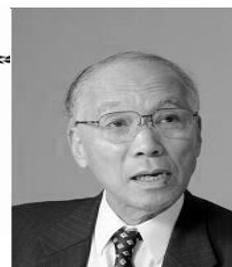


青色LEDのノーベル物理学賞受賞と若干の私見

技術ジャーナリスト(協会顧問) 志村 幸雄



左よりノーベル物理学賞を受賞した、赤崎勇、天野浩、中村修二の各氏

1. 「基礎研究後進国」の汚名を晴らす快挙

2014年のノーベル物理学賞は青色発光ダイオード(LED)の発明と実用化に貢献した赤崎勇名城大教授、天野浩名古屋大教授、中村修二米カリフォルニア大サンタバーバラ校教授の3人の日本人研究者(ただし中村氏は現時点で米国籍を取得)に授与された。近年、日本の半導体産業が生産・市場展開の両面で苦戦を強いられていることを考えると、勇氣百倍の快挙であり、今回の授賞を契機に往時の活況を少しでも取り戻せるなら幸いだ。

戦後70年を数えて「基礎研究後進国」の汚名を晴らしつつあるのも予期せぬ成果の1つ。実際、21世紀に入ってからの自然科学系ノーベル賞3賞(生理学・医学、物理学、化学)の受賞者数は表1に示すように、別格の実力国の米国(53人)は論外としても、日本は今回の3人を加えて13人に達し、英国(10人)、ドイツ、フランス(各6人)を上回るナンバー2の地位にある。伝

え聞くところでは、ここ数年、日本人候補者は増加傾向にあり、次年以降への期待度も高い。

それはともかく、私自身にとっても快報に映ったのは、赤崎氏を始めとした受賞者諸氏が、取材や原稿執筆を通してお世話になった方ばかりであり、その点で江崎玲於奈氏の同賞受賞の場合と重なり合う。江崎氏がトンネルダイオードの研究で1973年に受賞した際には、直後に氏がフェローの任にあったIBMワトソン研究所を訪ねインタビューや研究室の写真取材に応じて頂いた。今回の場合も、もし現役の編集者ならどんな対応をとったかと、あれこれ夢想している。

振り返って、1997年には赤崎氏の編書で『青色発光デバイスの魅力』(工業調査会 K ブックス)を刊行し、LEDはもちろんレーザーダイオード、EL、光二次高調波発生(SHG)など青色デバイス全般の開発動向と将来性を俯瞰している。LEDに限ってもGaN系とZnSe系が別章で詳しく解説されており、国内最初の成書として広く読まれた。一方、私個人の著作『誰が本当の発明者か』(講談社ブルーバックス、2006年)の第5章「並び立つ発明者」の一節で、特に青色LEDを取り上げ、「元祖・赤崎勇と開発者・中村修二」のタイトルの下に両氏の考えの立脚点や取り組みの違いを私なりに解説している。また、同じく『世界に勝てる!日本発の科学技術』(PHPサイエンスワールド新書、2011年)では、第II部「21世紀を担う日本発の科学技術」の一章で「青色LED——固体照明時代の先導役」を取り上げ、章末で今回の受賞を予知して、こんな私見を述べている。

「この技術革命の推進力になった2人の研究者にノ

表1 国別自然科学分野 ノーベル賞受賞者数

	1901～ 1950年	1951～ 2000年	2001～ 2014年	計
米国	28	167	53	248
英国	30	38	10	78
ドイツ	38	25	6	69
フランス	15	10	6	31
日本	1	5	13	19
スウェーデン	7	9	0	16
スイス	8	6	1	15
その他	37	45	17	90

(注)文部科学省資料より作成。南部陽一郎、中村修二両氏は米国籍なるも日本とした。

ーベル物理学の呼び声が高いが、まだ実現していない。日本経済新聞の文化欄『歌壇』に登場した『2009年の秀作』で選者の岡井隆が、こんな短歌を紹介している。

ノーベル賞知る由もなき海月(くらげ)たち今夜も発
す青き光を 東賢三郎

この作者の見果てぬ夢が、今回ついに正夢になったのである。ちなみに同書には私が注目する「日の丸先進技術」として12項目を取り上げているが、このうち鉄系高温超電導体の細野秀雄 東工大教授、光触媒の藤嶋昭 東京理科大学長らが青色LEDの成果と並んで今回のノーベル賞候補に挙げられたのは、偶然の符合と言ふべきか(前掲の拙著2冊は電子書籍化されており、端末を通して購読可能)。

2. 「不可能」を可能にした赤崎・天野両氏の執念

ノンフィクション作家、最相葉月の『青いバラ』を開くと、「ブルーローズ」は「不可能、ありえないもの」を意味するとあり、「不可能であったはずの青いバラが現れたら、21世紀の辞典はこの訳語をどう書き換えるのだろう。夢の実現、それとも夢の喪失」と読者に問いかけている。結論だけを記すと、バラには赤やオレンジの色素はあっても青の色素がなく、いくら掛け合わせても「青く見える花」しかできない。しかし、日本の研究者たちは、最新の遺伝子組み換え技術を駆使することにより、「不可能」だったはずの「青いバラ」を見事に可能とし開花させた。

LEDについても同じことが言える。米ゼネラル・エレクトリック(GE)社のN. ホロニアック氏が1962年、GaAsPの3元化合物半導体を用いて赤色の発光現象を初めて確認して以来、黄色、橙色、緑色などを実現したが、ひとり青色LEDの開発・実用化だけは遅々と進まず、内外の専門家の間でも「20世紀中の工業化は不可能」などと半ば絶望的に論じられてきた。

ところが、その20世紀のうちに3人の日本人研究者がそれぞれ独自の立場から、そのジレンマを打ち破って世界を驚かせた。

中でも大学を拠点にして基礎研究の立場から青色LED実用化の突破口を切り開いたのが赤崎勇・天野浩両氏のグループだった。その先導役の赤崎氏は1952年に京都大理学部を卒業後、神戸工業(現在の富士通テン)に入社し、電子管材料の研究を担当した。折から白黒テレビの試験放送が始まり、ブラウン管用蛍光体の研究に取り組む。この蛍光体はCdを含むZnSで、テレビの映像は、この蛍光面に電子線を照射して発光させたものだ。この研究を通して赤崎氏は

「ルミネッセンス」の不可思議さに興味を覚え、特に計測の仕事に携わっている。

だが赤崎氏にとっての悩みの種は、この蛍光体粉末の再現性が悪いことで、材料的にもっと素性のよいZnS単結晶膜のようなものをつくれないうか、と考えた。やがて氏は、その望みをかなえようと半導体単結晶の研究に着手、それも発光素子の研究に携わることになるが、この体験こそが、次なるステップの布石となった。

赤崎氏が念願の研究を開始したのは、名大工学部で助教授職などを務めた後の1964年、松下電器東京研究所(後の松下技研)にスカウトされてからだ。ちなみに、私が松下電器東京広報部の案内で赤崎氏に初めてお目にかかったのも、この頃のことだ。東北大学教授から転身した小池勇二郎氏が2代目所長とし活躍されていたのを今も覚えている。同研究所で赤崎氏は新材料探索の研究室長として、各種化合物半導体の光デバイスとしての可能性を探る。その中で出会ったのがGaNだった。

研究者の間では、窒化物半導体が青色発光の有力材料になることが早くから知られていた。その決め手になったのが、この材料が持つバンドギャップの大きさ(3.4eV)である。赤や緑に比べて波長の短い青色を発光させるためには、電子をより高いエネルギー位置から落下させて正孔と結合させねばならない。ワイドギャップ半導体の代表格のGaNは字義通りその条件を満たしていた。

赤崎氏がこの研究に本格的に着手したのは1973年のことだが、研究は一筋縄には進まず悪戦苦闘が続く。何しろGaNは融点がダイヤモンド並みに高いため、結晶の作成が容易ではなく、結晶性も悪い。目指す素子を形成するためには、基板上に薄膜を幾重にも重ねねばならないが、相性のいい基板材料が見つからない。そのため1970年代も後半に入ると結晶の作成が容易なZnSeを選ぶ研究者が多数派を占め、GaNはむしろ少数派の扱いを受けるようになる。

しかし、「青色発光はGaN」との信念に燃えた赤崎氏は、有機金属気相成長法のような手段を用いれば、誰にもできなかった良質な結晶が得られるに違いない、と考えた。

その頃だったか、赤崎氏から「私は論語にある、『ぶんしつひん文質彬彬』という言葉^{ぶんしつひん}を大事にしている」という話を聞いた。広辞苑を開くと「外見の美と実質とが適度にまじって調和しているさま」とある。察するに、青色LEDの実現には物性的にGaNが最適と突き止めたものの、取り扱いの難しい素材で良質な結晶がつけられな

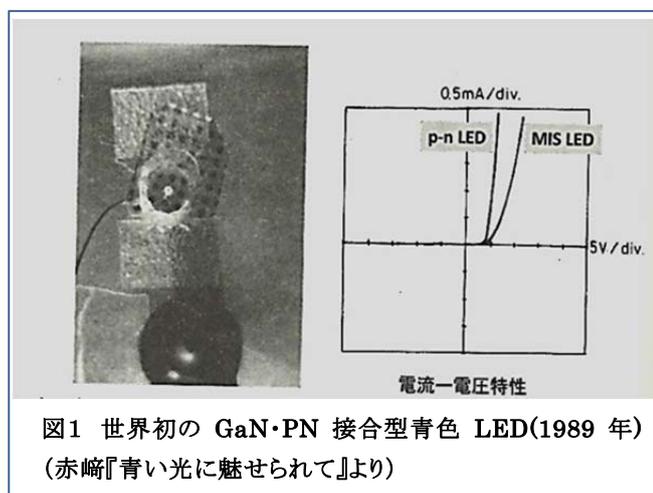
い。多くの研究者が他の素材に足場を移す中で、氏は表面のきれいなGa₂N薄膜に仕上げれば、電気特性も間違いなくいいはずだと考えて、以後、終わりの見えない研究生活が続く。論語の教えはそんな体験から生まれた、自らへの戒めの言葉であり、励ましの言葉ではなかったか。

話を元に戻すと、赤崎氏は1981年5月にMIS型という特殊な構造を採用して発光効率0.12%、光度2mcdの青色LEDを試作している。ただ、この程度の明るさでは実用化に程遠いばかりか、半導体素子本来のPN接合型を採用していないことにも不満が残った。

赤崎氏の構想が大きく前進したのは、同年に再び名大工学部に戻り、教授として研究を続行するようになってからだ。大学院生の教え子の中に、その後逸材として共同研究に加わり、しかも今回の受賞の荣誉に浴した天野浩氏がいた。その天野氏の強力なサポートを得て、あみ出された手法がサファイア基板上にAlNという別の素材を使った層を低温で形成、それを介して高品質のGa₂N膜を成長させる方法である。この層はバッファ層と呼ばれるもので、サファイアとGa₂Nとの間にあった格子定数上のミスマッチが解消され、高輝度発光への足がかりができた。

赤崎氏らの業績でもう1つ高い評価を得ているのは、PN接合型の素子形成に不可欠なP型Ga₂N膜の実現である。一般の半導体では、N型半導体にP型不純物を注入すると、P型半導体になる。ところがGa₂Nは頑固な材料でP型不純物を入れてもP型半導体にならず絶縁物になってしまう。そこで赤崎氏らはMg添加のGa₂Nに電子線を照射することでP型半導体化を図り、Ga₂NによるPN接合型LEDを世界で初めて実現している。1989年のことだ。

図1は同LEDの外観、電流-電圧特性で、立ち上



がり電圧がばらついては実用に向かないが、このLEDでは理論通りに3.3V程度の電圧できちんと電流が立ち上がっている。赤崎氏は、この曲線をオシロスコープで確認した瞬間を「本当にうれしかった」と喜色満面に語り、素子から発光した青色光を目のあたりにして「この時の感動は生涯忘れません」と振り返る。

昨年12月上旬、ノーベル賞授賞式に参列した赤崎氏は記者団から感想を求められて「長い道のりだった」と、こもごも語っている。青色LEDはその意味でも「執念が生んだ、文字通り光輝く青色光」だった。

紙面の都合で詳述しないが、赤崎・天野グループの研究成果は新技術開発事業団を介して豊田合成によって工業化された。産学官連携の格好のお手本である。

3. 工業化で決定的役割を果たした中村修二氏

赤崎・天野グループの研究とは別個に青色LEDの開発に取り組み、この素子の実用化に貢献したもう1人の研究者が中村修二氏である。徳島県阿南市を拠点にした日亜化学工業時代には同LEDの工業化に必要ないくつかの独創的な発明をあみ出し、若手研究者ながら早くも頭角を現した。

その中村氏が同社を辞めて前記カリフォルニア大教授に赴任して間もなくの2001年8月、古巣の日亜化学に対し巨額の発明対価を求める裁判を起こして話題になったことは記憶に新しい。

中村氏が在籍した日亜化学はもともと蛍光体製造の国内大手だった。金属Gaの精製を手がけていたこともあって、半導体材料としてのGa₂Nの研究を進めるには好都合だった。地元の徳島大工学部で結晶成長を学んだ氏は1979年に入社以来10年間ほどはGaAsやGaPの結晶作成に取り組んでいる。

とはいえ、これらの材料はすでに既存の大手半導体メーカーが手がけており、新進の中小企業には勝ち目がなかった。そこで氏は「どうせやるなら大手企業が手がけていないものをやろう」と考え、1988年に「半ばやけくそ気味に手がけた」のがGa₂Nだった。

折よく、米フロリダ大学に招かれていた徳島大の酒井士郎助教授(当時)の仲介で、中村氏は同年4月から約1年間、同大学に留学する機会を得て、主として結晶薄膜作成に必要な気相成長の基礎を学んでいる。一方の日亜化学側も中村氏の帰国に合わせて有機金属気相成長装置を購入し、会社挙げての研究態勢を整えている。同装置は、たとえばGaを含んだ有機化合物を分解し、基板上にGa₂Nなどの薄膜を成長させることができる。

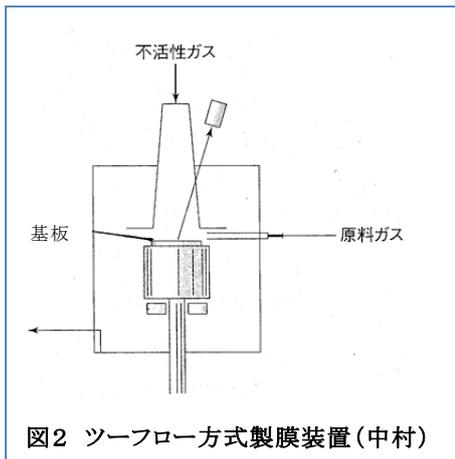


図2 ツーフロー方式製膜装置(中村)

といっても、サファイア基板上にGa_Nの薄膜を成長させようとしても、なかなか良質のものが得られない。そこでこの装置を改良しようとして考案したのが、前記裁判の一大争点になった「ツーフロー方式製膜装置」(図2)だった。発明にあたって中心的役割を果たしたのが中村氏で、いわゆる「404号特許」として成立している。

この装置は、その名称通りガスの流れを2つ持ち、横方向から原料ガスの有機金属 GaやNH₃、H₂などを流し、上方から押圧ガスとしてN₂などの不活性ガスを吹き込む。すると原料ガスの流れを不活性ガスで上から押さえつけて、均一で高品質の膜が得られる。

同装置の完成によって、1990年9月には高品質のGa_N結晶膜、1991年3月頃にはバッファ層として最適の低温Ga_N層の作製に成功している。後者は赤崎氏らによるAlNバッファ層の開発を一步前進させたもので、工業化の有力手段となった。

中村氏のもう1つの大きな成果は、Ga_NのP型半導体化に通常のアニール、すなわち加熱処理を適用して実現可能にしたことだ。先行の赤崎氏らは電子線照射による方法を考案して成功に導いているが、中村氏は600℃前後でアニールすれば、電子線を用いなくてもP型化できることを見だし、工業化への可能性を高めた。

日亜化学が1994年に製品化した青色LEDは、このような技術の積み重ねに加えて、図3に示すように発光層にInGa_N、その上下にクラッド層としてのAlGa_Nのダブルヘテロ(二重異種)構造を採用して実現した。室温連続発振の半導体レーザーなどから学んだ構造である。

この種の構造を採用することにより、電子と正孔とを小さな領域に閉じ込めて密度を上げ、効率よく結合・消滅させることが可能になった(ちなみに赤崎氏らはAlGa_NとGa_Nの組み合わせで同構造を作製)。実際、

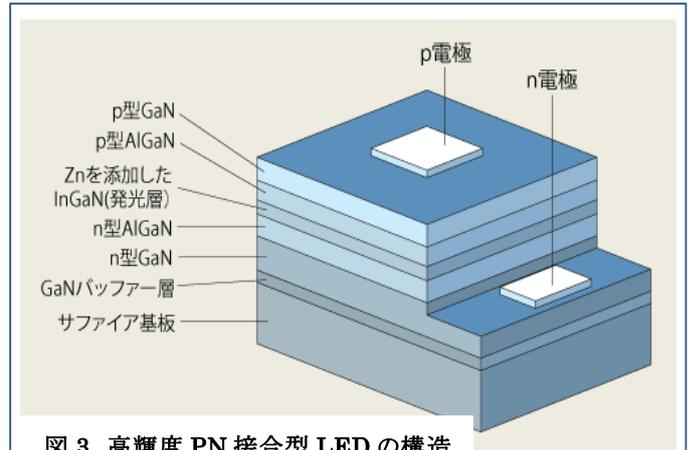


図3 高輝度PN接合型LEDの構造(中村)

その効果は大きく、日亜化学で中村氏が製品化したLEDの量子効率_{2.7%}、発光輝度も1.2cdで、従来のSiC青色LEDの100倍にのぼった。

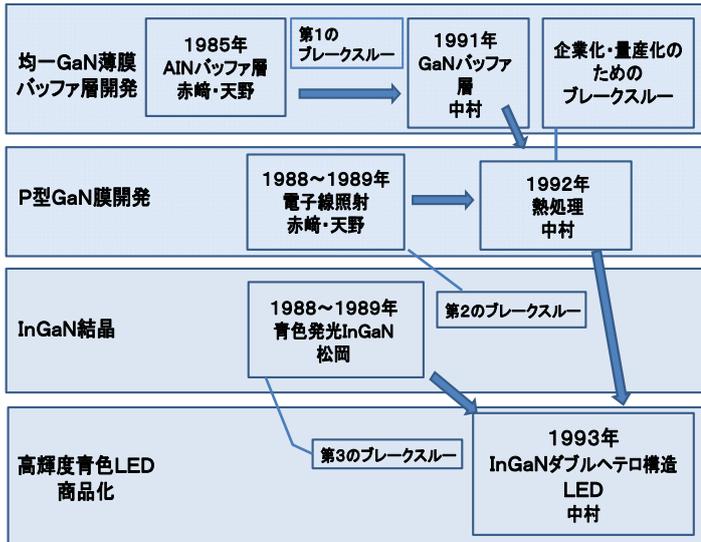
4. 3人の業績の関係性、赤・緑色LEDの評価 etc

以上、ノーベル物理学賞受賞の荣誉に輝いた青色LEDの発明と実用化に至る経緯をたどったが、2つの研究グループによる快挙が奇しくも日本人研究者だったとは大変誇らしいことである。2つのグループの役割分担をあえて指摘するなら、冒頭にも少し触れたように赤崎・天野両氏のグループは半導体材料の研究者として、この発明の糸口を開き、特に「川上」の基礎研究ないし基礎技術の面で大きな足跡を残した。他方、中村氏は企業に属する研究者の立場から「川下」の実用化研究、量産技術などの面で数々の成果を上げた。誤解を恐れずに言えば、同じ青色LEDの発明者でも、赤崎氏らは「科学」の側面から、中村氏は「技術」の側面からアプローチし、それにふさわしい実績を収めたと評価できる。

両グループの関係性は、互いに連続性を保ち、しかも相互補完的だったと言える。参考までに図4に『2005年版科学技術白書』所収の「Ga_N青色LEDの技術進化」とうたった図表をそのまま示す。

ここで若干私見を述べると、日亜化学側が中村氏から発明報酬提訴を受けた際、問題の404号特許に関して「当社の工業化にまったく役にたっていない」と否定的な見解を述べているのは、いま1つ理解に苦しむ。量産化が進んだ今日では、かりにそうだとしても、中村氏の発明が工業化の重要な引き金になったことは動かし難い事実である。科学ないし技術の世界では、実用化のブレークスルーに寄与した者の努力に最大限の敬意を払わねばならない。

図4 GaN青色LEDの技術進化



(注)『2005年版 科学技術白書』より引用

今回の授賞を契機にして、一部メディアは発明者間の角逐を伝えていたが、意気軒高で一番若い中村氏が授賞式を前にそんな噂や過去の発言を振り払うように懐の深いところを見せていたのは良かった。

ちょっと興味深かったのはその中村氏が受賞インタビューに応じて「もう取れないかと思っていた。これまでは基礎理論の研究で受賞したものがほとんどで、ものづくりでは無理なのかと半ばあきらめていた」と打ち明けていることだ。

中村氏がもともと蛍光体メーカーで半導体の研究開発に着手し、青色LEDの実用化を図るため特にGaNの結晶製造技術や、素子の量産技術の確立に長年取り組んできたことを考えると、はからずも口をつけて出た率直な感想ではなかったか。

一般通念として、ノーベル賞の中でも物理、化学、生理学・医学の自然科学3賞は、自然界のしくみの研究や新原理・新現象の発見にかかわる業績に与えられ、その限りで中村氏も指摘するように、技術よりも科学、開発・製品化研究よりも基礎研究の成果が重視される。

しかし私の見るところ、ここ数十年、ノーベル賞の授賞対象には明らかに変化の兆しが生じている。その変化は一言でいうなら、研究開発のリニアモデルの「川下」に位置する応用開発や産業化への寄与度に着目し、しかも社会的なインパクトの大きさに配慮しているという事実だ。

そのいい例が2000年の授賞対象で、物理学賞は集積回路(IC)と半導体レーザー、化学賞は導電性ポリマーと、いずれの場合もその時点で産業化され、身の周りで使われているものばかりだった。

ICの場合などは、単にトランジスタの集積体にすぎず、物理的な新知見の発見にも乏しいとの見方が流布していて、発明者の J. キルビー氏自身も長らくそう思い込んでいたふしがある。実際、私が氏にインタビューした際にも、「自分は、あくまでは技術者であり、そんな賞には縁がありそうもない」と話していた。

にもかかわらず、20世紀最後の年に半導体レーザーとともに受賞した理由は「IT(情報技術)革命」の原動力となり、地球規模のイノベーションを引き起こしたからにほかならない。

科学と技術の相互関係の変化にも注目したい。私は21世紀のイノベーションのあり方を「サイエンス型イノベーション」という言葉で説明しているが、これは最新の科学的成果が技術開発の場で主体的な役割を演じることを意味する。新しい科学的成果に依拠したものだから、総じて新規性や急進性に富み、社会的な影響力も大きい。

その意味でも、日本発の青色LEDの実用化によってもたらされた「固体照明革命」の意義は大きく、今後の展開に期待がかかる。

最後に、今回の授賞の発表直後に米国の企業や研究者らから、「彼が選から漏れたのはおかしい」という声が上がった一件がある。彼とは「LEDの父」と称され、現在なお米イリノイ大名誉教授の任にある、前述のホロニアック氏のことだ。なかでも、エジソン発明の白熱電球の流れを汲み、ホロニアック氏の成果の母胎となったGEライティング社のM. シルベスター社長は「3人の画期的な業績はノーベル賞にふさわしい」と述べながらも、「(彼らの業績と)すでに発明されていた赤色、緑色との組み合わせが、21世紀の世界の見え方を根本的に変えたのだ」とコメントしているのは意味深長で示唆的である。

この件については私も日本経済新聞や日経産業新聞に私見を公表しているのでここでは繰り返さないが、結論だけを示すと、たしかにホロニアック氏の貢献度は大きい。しかし同時に、赤、緑の高輝度化を図るため温度差法液相成長技術や蒸気圧制御法などを採用し、技術面で決定的な役割を果たしたのは西澤潤一東北大名誉教授だった。とりわけ後者の手法を駆使して現用の緑色LEDの基盤づくりに貢献した氏は今日、緑色の実質的な開発者として広く認められている。

もともと、ストックホルムの王立科学アカデミーは、こう弁明するかもしれない。

「何しろノーベル賞の椅子は3っしか用意されていませんので」