

《研究ノート》

インタビュー録：
GaN系青色LED開発の先駆者Herbert Paul Maruska博士(2)

藤 井 大 児

1. はじめに

Herbert Paul Maruska博士（以下、Maruska氏）はRCA（the Radio Corporation of America）在籍中にスタンフォード大学にて物質科学の領域で博士号を取得（1974年）、その間にGaN系青色LEDの第1号試作品とされる成果を得ている。Maruska博士はRCA倒産後も民間企業の研究員を務め、2003年からサウス・カロライナ大学の研究教授を1年半勤め、その後も技術コンサルタントとして活躍をした。我が国における青色LED研究者のノーベル賞受賞を受けて、アメリカの学会等でもMaruska博士の業績を再評価する動きもあるようである。

ここでは前号に引き続き、かつて筆者が行ったインタビュー録を翻訳し、一部編集を加えて掲載する。インタビューは2004年10月15日にサウス・カロライナ大学のMaruska博士のオフィスにて行われ、昼食や研究施設・市中の見学等を合わせると3時間以上ご一緒して戴いた。編集では、中村修二氏が渡米後に拠点を構えたサンタバーバラ市の様子など、とくに重要ではないと思われる部分について割愛するなどした。また第3節には、事前の通信文に添付されたMaruska博士本人によるGaN系LEDの開発史の抄訳を掲載し、またこれに基づいてアメリカでのGaN系LEDの開発史を整理した。翻訳には技術的な内容も含まれることから、その一部（とくにパワー半導体の部分）について株式会社パナソニック・システム・ネットワークス開発研究所の滝 秀士氏および今川保美氏に指導を得た。

2. インタビュー録

Maruska:

（承前）そのプログラムに開発費を投じることに関心がある。十分に効率的な白色LEDを開発できたら素晴らしい未来が待っているからだ。これが現在のわれわれの計画だ。これにだいたい集中していて、結晶成長のオペレーションの改良、とくに結晶欠陥を減らし、アルミニウムを50%以上ドーピングしてP型化する方法を見つけることに取り組んでいる。しかし現在の効率は非常に低くて、ほとんどすべての電流が熱に変換されてしまっている。

当然LEDは発熱する。そうすればさらに効率は低下する。負のスパイラルがかようなひどさだ。それでも熱を取り除けない。99.99%の電気エネルギーが熱になって効率が下がる。だからもしパルス電流であれば、そこまで悪くはない。直流だとダメだ。熱のせいだ。あらゆる努力をこの熱を取り除

くために行っている。チップのマウントの仕方をああでもない、こうでもないと試している。しかし重要な問題は、量子井戸に正孔を注入する方法が見つからないとダメなわけで、それができてない。高アルミニウム濃度でP型化した層の自由正孔ができていない。

これが、この研究をしているみんなが同じ状況に陥ってしまっている原因である。どんな操作も結局同じ結果になっている。誰かがこの状況にブレイクスルーを起こさなければならない。赤崎・天野の独創性を今こそわれわれが発揮する時なのだ。われわれの誰かが彼らに追いついて、この問題を解かなければならないのだ。

藤井:

わたしがいつも不思議に思ってきたことは、ZnSeです。非常に柔らかい物質なのでしょう。それはその業界の専門家なら、ある意味自明のことだったはず。そしてあなたが今おっしゃった通り、結晶欠陥は致命的だった。しかし1991年に3MがZnSeの成果を発表した。ソニーも続いた。かなり接近戦だったはずだ。そして皆がZnSeの柔らかさには目をつぶった。そうしてGaNの頑健さには見向きもしなかった。

Maruska:

あなたはなぜひとびとはZnSeに取り憑かれたかを聞いたのだけれど、ひとびとは常に何かに取り組んでいる。問題への解決法をきっと見つけられるだろうと感じているからだ。それはそういうものだと私は思うよ。たった今、われわれの紫外光LEDがイマイチであることを説明したけれども、その開発をやめることはない。馬鹿げたことのように見えたとしても、ひとびとは常に解決策を見つけるものだとわれわれは知っているし、新しいものを見方を考え出すし、問題を克服できるのだから。

どこの研究者でも普通こう言うと思う。「たとえ不可能に思えるようなことでも、もしそれを解決できたら、俺は一躍ヒーローになれる」と。そしてしばしば企業というのはそういう視点を採用しようとはしない。言い出しつpegが真っ先に手を引いたりする。だからこういう実現可能性が遠い研究は、大学の役割が大きいと思う。あえて言わせてもらえば、ZnSeの研究を続けることはそれほど悪手というわけではなかったし、その研究をしていたこの国のひとびとは皆もうやめてしまったし、GaNにとうに乗り換えている。われわれは完全にやめてしまったのだ。

藤井:

企業研究者にとっては、それは宿命ですか？

Maruska:

大学のひとびとであってもファンディングの問題はある。彼らもわかっている。ファンディングの問題がある以上、勝者の側に飛びつかざるを得ないだろう。よく知らないが、ZnSeは何年もの間、多くの問題を抱えていた。そういうことだ。

藤井:

研究者はもとより新しい視点でものを見て、問題を克服するというモチベーションで働いているはずだけれども、お金のことになると、反対の態度を取らなければならない。これはまさにトレードオフの関係だ。

Maruska:

その通りだ。あなたが大金持ちだとか、スポンサーがいるとかならば、まさに自分の信じることを主張すれば良いが、もしも資金の出し手がいなければ、それで済みます。

藤井:

日本が変わったところは、著名な研究者であればあるほど…ないしは有力大学に所属する研究者ほど…ZnSeを追求する傾向があった。GaNではない。赤崎博士は当時すでに著名な研究者だったが、彼の所属する名古屋大学は日本国内では素晴らしい大学だけれども、トップスクールと言えど他大学を思い浮かべるひとの方が多いだろう。もっと資金を得るとか、プロモーションを考えるとといった場合、必ずしも有利というわけではなかった。それでもGaNを追求した。これはアメリカでも可能ですか？

Maruska:

そういうことはいつも起こるよ。確かに大学の格式は重要だし、まさにそこがKhan博士の功績だと言える。この大学は半導体研究の拠点ではなかったし、何ら知られるところではなかったが、現在では非常に素晴らしい成果を出している。たくさん論文を発表して、多くの学生を輩出している。したがって彼は学界の中心に踊り出て、他大学のひとつとなんかはこの学部のことを、サンタバーバラに次ぐ第二の研究拠点だと考えているんじゃないかな。

中村氏がいるから、サンタバーバラがGaN研究のトップ校だとみんな考えていると思う。しかし聞いたところによれば、第二の拠点としてわれわれを見なしてもらえているようだ。彼はこの大学にこの学部を構築するのに、非常にいい仕事をした。だからあなたが言ったように、そういうことができる人というのが世の中にはいて、無から何かを作り出すということは、まったく可能なことなのだ。

サンタバーバラは長年にわたって非常に著名な教授を擁してきた。Ted BorisやMishra…やColder…など。お陰であそこは非常に評判が高い。スーパースターがいて、さらに中村氏がその学部に加わった。だから彼は最も良い大学のうちのひとつを選んだのだ。サンタバーバラには行ったことはあるか？非常に美しいキャンパスとしても有名だ。

彼の逸話でちょっと興味深いものがあるからお話ししよう。読んだことがあると思うが、彼は日雇で働いていて、経営者にフロリダ大学への留学を許可してくれるよう何とか説得した。そこではMOCVDについて学ぶつもりだった。私は数年前にフロリダから移ってきたから、フロリダ大学のひとつとを多く知っている。彼らは一応彼を招待はしたものの、彼が研究者としては全く知名度がないことを知らなかった。彼はMOCVD反応器を使って1年ほど作業をしたが、多分GaAsをやっていたはずだ。なぜなら彼らはGaNを研究していなかったからだ。

アメリカで、サバティカルを経験してそうした技術を学ぶことができるだなんて、彼の会社や彼自身にとっても素晴らしい機会だというべきだ。何も知らなかった技術だし、それを学んで本国に帰れるだなんて。Tim Anderson教授のもとで彼は研究してたのだが、彼は「なんて不思議な縁だ」と言っていた。彼がこのめぐり合わせの中心だったからだ。彼が中村氏を招待して、MOCVD反応器の勉強をさせたわけだから。いろんなめぐり合わせというのは、興味深いものだ。

藤井:

中村博士はよく、当時の経験はあまり良いものではなかったと言っていた。彼は英語が堪能ではなかったからと。フロリダでもそういうことは起こらないでしょうか？

Maruska:

確かにこの国で日本人に会うことはそんなにないことだから…。中国人はそこらじゅうで見かけるけれども、そして彼らはどうにかして英語を学習しているようだが、日本からの移住者というのはいないね…。自分たちの国から出たいと思わないのじゃないかな…。日本人留学生もいないし…。

藤井:

フロリダの教授は、中村氏のことを覚えていた？ ないしは中村氏の業績を評価していたということはある？

Maruska:

いや、そういう意味ではない。ただ、そこに滞在していたことを認識はしていた。教授は大きな研究室を擁していて、たくさんの反応器を設置していた。ZnSeも研究していた。彼らは26種類の化合物半導体を成長させる反応器を所有していた。ZnS、ZnSeの結晶成長をやっていた。ひとりの学生がそのオペレーションを担っていた。それは彼も見ているに違いない。私もフロリダを去るまでに何度も訪問したことがあるし。ZnSやZnSeの反応器は間違いなくあった。だから中村氏があそこにいた時に、彼はのちにGaNを選ぶ理由については、私は聞いたことはない。ZnSeを見る機会はあったし、Parkとかいうフェローがいて、彼は韓国人の名前のようだがアメリカ人だ、彼は3Mから来たんではなかったかな、それでZnSeの研究をやっていた。フロリダ大学で。だから多分もしかしたら、中村氏はZnSeの問題点をつぶさに見ていて、「これはよろしくない」と思ったのかも知れない。そしてParkも間もなくギブアップした。こういう影響はあったかも知れない。あくまでも想像だけれども。

藤井:

中村氏は非常に幸運な人だったと思うんです。基本的には地方の会社に働いていた人なわけで、普通の人生を送っていたわけですから。それが幸運に恵まれて、非常に有名になった。そういう見方もできると思うのですが。

Maruska:

これは私の個人的な意見だが、彼は優れた人物だと思う。新しいことを考え出した人物だ。見回してご覧なさい、ここにホチキスがあって、ここにテープがあって、でも、彼はその向こう側の全く別のものを見ていて、もっと先を行っていた。すべてにおいて。赤崎・天野だって電子走査顕微鏡で偶然が起こった。彼ら自身がそう言っていた。

電子ビームがより明るい材料を作ったが、次には中村が「自分はオープンで熱したらうまくいった。電子ビームは要らない」と言った。彼はそう論文で書いて、レーザーを作る方法を思いつくことができた。彼がやったことは、ひとつとが想像もしないようなことだ。なぜなら結晶欠陥がそもそも多過ぎた。そして結晶成長構造やレーザーを作ることなど、私はまさに素晴らしい能力だと思う。彼らは歴史に名を残した。科学におけるそうしたひとつとが、一般のひとつとの「わー！これはすごい！どうやってこれを思いついたのだ？」と言うような仕事をするのだ。例えば私はDeforestが真空管増幅器を発明した時のことをいつも思い巡らす。誰もそんなものを持っていなかった。コンセプトすら存在しなかった。

エジソンはたまたま真空管を発明した。なぜなら彼は電球を持っていたから。金属薄膜をガラスの上に蒸着させて、その金属部分とフィラメントに配線し、フィラメントの蒸発を止められるか観察しようとした。そして彼は電流が一方に流れ、次に他方に流れることを発見した。全くの偶然だった。しかしDeforestはさらに進んで格子を入れた。そんなことをできるか？ただただ驚くばかりだ。最初のLEDは、私はその論文を持っているが、Roulとかいう男は紙やすりからSiCを取り出して、それに配線して、光らせて見せた。そんなことは私も思いつかない。例えばこの缶に電線をつけて光るかどうかなんて試してもみないだろう。彼らはそういうことをやったひとつとなのだ。こういうすごいアイデアが、時にひとつとの中の頭に宿る。そういうことができるひとつともいるのだ。他の誰もが考えている以上のことを。

藤井:

そういうのには、何か秘訣はあると思いますか？

Maruska:

まあ、音楽の才能がある人は音楽を書くし、そうでない人は書かない。私も音楽はやらないし、オリジナルのメロディーが頭に浮かんだこともない。だから音楽を作れる人を私は尊敬する。そういう特別な能力があるのだから。他の人にはない才能を持つ人というのが存在すると信じている。そうだ、Ed MillersがRCAでLEDを作った時の物語のコピーを一部要りませんか？これはEd Millerからの手紙だ。RCAとレターヘッドについている。手書きで彼が一部始終を語っている。コピーを差し上げよう。

藤井:

ありがとうございます。GaNには他の用途はありますか？増幅器のようなものとか。

Maruska:

シリコンを置き換えるというアイデアが常に議論されている。高温でも機能する。軍用のアプリケーションなどと共に。建物の中で使うとか、必要なら水を流して冷やすといたことができない環境、ないしは携帯用器具などは冷やすことが難しくなる。その場合、高温でも機能するものが必要になるだろう。また大きな電力でということにもなる。LEDの時と同様に、自分自身で発熱するわけだから。

もし素子が熱を発生させ、また電力操作能力が低下したら、困ったことになる。だから窒化物やSiCベースのトランジスタを開発しようという努力がなされてきた。それらが現在のものよりはるかに高温・高電力でも作動することは明白だから。しかしまだ他にも利点はある。本質的に処理速度が速いことなどが分かっている、GaNトランジスタはドーピングが必要ないし、散乱中心が得られるから。速度が速いデバイスが出来るし、電荷移動速度も速い。

非常にたくさんの潜在的な優位性を有しているが、まだ商業化されたものはない。街中で誰かGaNのトランジスタを売っていないか？と聞いてごらん。誰もイエスとは言わない。まだ発売するレベルにまで信頼性が到達していないのだ。それも開発途上にある。1970年代この国に起こった問題は、どんな企業も開発を諦めてしまったことだ。あっさりと諦めてしまった。だから私はいつも日本人のことが羨ましかった。ずっとこだわりの続けることができ、何ら恥ずかしいとも思う必要がなかった。私は研究を続ける場所を見つけられなかったし、赤崎・天野が問題を解決できるまでサポートを得られたことがいかに幸運だったか、非常に羨ましいと思っていた。まさに何をすべきかを定めるうえで、お金を持っているひとびとが審判となって判断が下されたわけだ。

藤井:

最後に、私のシンプルな理解では、アメリカの研究者には日本の研究者に比べて、研究費の使い方について厳しく説明責任が求められるように感じますが、いかがですか。日本でも最近その手のことが厳しくなっています。広く批判にさらされるケースはまだごく少数ですが。

Maruska:

政府はわれわれのやっていることを監査することは事実だし、資金の趣旨と違うことにお金を使ったとすればトラブルになることは間違いない。逮捕されて投獄される。彼らは常に監視をしていると言って良い。監査人がやってきてあなたのやっていることを監視している。

彼らはすべてについて説明責任を求める。これはどこにある？と確認したがる。何かを買ったら、実際にそれを検収する。大学の場合はそれほど厳しくはないが、私が働いていた企業の場合には、購入品すべてに「国有財産」のタグが貼られた。すべてがきちんと設置されていて、使用目的が何で、もし異なるプロジェクトに使われていたら、持っていかれた。

持っていくのに「もう使っていないのだから、われわれのものだ」と言って持っていった。巨大な機械でも容赦はない。ある特定のプロジェクトのために購入されていて、そのプロジェクトが終わった途端に、トラックとともにやってきて撤去して別のところへ運んでいく。まったく自転車操業とはこのことだ。だから長期にわたる研究が非常に難しく、この設備が撤去され、今度はこの設備が付

け加わりという具合だから、同じ設備で同じ研究をずっと続けられる彼らは本当に幸運だったというべきだ。

確かに難しい研究だった。何ひとつ容易なことはなかった。解決には何年も必要だったし、Khan教授は1997年から素晴らしい業績を上げた。しかし同様のことをこの研究室で7年でやってきた。私の意見では、彼は素晴らしい能力を持っていた。たった7年で大金をかき集めてきた。彼個人のお金ではなく、政府機関から集めてきたのだ。すべての機材を購入し、多くの研究者を募集して、結果を出してきた。この領域の最前線にいること、彼にはその能力に非常に長けている。だから、私はここに来たかったし、何年かをかけてこのプロジェクトに挑戦してきた。ここが最善の場所だと思ったからだ。だからみんな彼に対して非常に敬意を抱いている。

3. Maruska氏本人によるレター（抄訳）

20世紀の初期以降、電界印加によって、いくつかの材料から光の放射が得られるとの報告があり、「電界発光（エレクトロ・ルミネセンス）」と呼ばれていた。材料物性は十分にコントロールされておらず、発光プロセスが十分理解されることはなかった。例えば、青色の電界発光は1923年に最初に報告されたが、紙やすり用の砂として製造されたSiCのかけらからの発光によるもので、偶然PN接合を含んでいた。1960年代後期までには、SiC薄膜がより慎重なプロセスで製造され、PN接合が構築されるようになった。こうして青色LEDの製造が可能にはなったが、電光変換効率はわずかに0.005%であった。その後数十年にわたって、SiCの大幅な改善は見られなかった。すなわちSiCは間接遷移の物質だからだった。1990年代初期には、多くのSiC系青色LEDが商業的に売られたが、現実的な製品とは言いがたいものだった。最終的には、最高品質のSiC系青色LEDは発光波長が470nmであり、発光効率は0.03%に留まっていた。

より組織化されたやり方では、III-V族化合物半導体の結晶成長は、1954年に始まったと言える。例えば1950年代中頃には、GaAsの大規模な単結晶ブール（インゴット）が溶融炉から引き揚げられるようになり、スライス・研磨したウェハが、液相ないし気相成長法によるPN接合型ダイオード構造の基板材料として用いられるようになった。1962年には最初のGaAs系赤外線LEDが発表された。可視光線によるLEDはGaAsとGaPとの合金によって間もなく実現された。またGaPは間接遷移であったために、GaAsほど効率的な発光は望めないことが間もなく明らかになった。続いて明らかになったのは、室温状態ではGaAsのみの時に約0.2%で最も発光効率が良く、P濃度が44%を超えると大きく何桁も減少し、0.005%未満となることであった。1968年までにはNによるGaPの等電子ドーピングの研究が始まり、非常に明るい黄緑色（550nm）LEDの開発が報告され、その発光効率はおよそ0.3%とされた。

当時、RCA社は、カラーテレビの主要メーカーの1つだった。当時のカラーテレビはブラウン管を使って映像を視聴者に表示する方式が取られていた。ニュージャージー州プリンストンにあったRCAの中央研究所では、James Tietjenが材料研究部門のディレクターになり、絵画のような壁に掛けられるフラット・テレビを開発したいと考えた。フルカラー映像を実現するために、赤・緑・青のピ

クセルを実現せねばならなかった。TietjenはGaAsP系赤色LEDはすでに利用可能で、緑色LEDはNドーピングGaP系が実現しつつあると理解した。したがってLEDベースのフラット・テレビに必要なのは、明るく輝く青色LEDのみだと考えた。

1968年5月、Tietjenは彼の部下のひとりであったHerbert Maruskaに対して、GaNの単結晶薄膜を成長させる方法を見出すよう指示した。それによってTietjenは青色LEDが実現できると見ていた。またMaruskaには、GaAsP系赤色LEDをHVPE (Halide Vapor Phase Epitaxy) 法によって構築した経験があった。伝統的なHVPE反応器では、GaのようなIII属元素は一塩化物として供給されていた。例えば摂氏850度ほどで液相Gaを流し、塩酸ガス雰囲気中でGaClを生成していた。V属元素はアルシンのような水素化物で供給されていた。基板は管状の炉に固定され、2つのガスが注入され基板表面で混合するようになっていた。

MaruskaはRCAのDavid Sarnoff Research Centerの図書館に行き、1930~40年代にかけて公表されたGaNに関するドイツの古い論文のコピーをすべて集めた。費用を節約するために、RCA社員はゴミ箱から故紙を拾って再利用することが奨励されていた。Maruskaが最初に手にしたコピーはまだ現存し、論文の裏側には法務部門のメモ書きの日付として1968年5月13日と刻印されている。これによってわれわれは、RCAでGaNプログラムが始まった正確な日付を知ることができる。

GaNは当初、液相Gaとアンモニアを高温で反応させて粉状の物質として作成された。様々な特性が報告され、例えばウルツ鉱結晶構造を有することが明らかになっていた。いろいろなドーパントの導入がこの粉末に試行され、また気相エピタキシャル成長が試されることはまだなかった。そこでMaruskaは、まず99%アンモニアのタンクを購入し、元のアルシンのビンと交換した。またアンモニアに反応しない基板材料としてサファイヤを選んだ。基板は、研究所内でシリコン・オン・サファイヤのプログラム (サファイヤ基板上にSiをエピタキシャル成長させる技術) が行われていたため、数センチほどのサイズのサファイヤ・ウェハが入手できた。サファイヤは今日に至るまで、一般的な基板材料となっている。

間もなく、GaNに適切な成長温度はどこかという問題に直面した。残念なことに、MaruskaとTietjenはLorenzとBinkowskiのデータを誤解してしまっていた。彼らは真空中で摂氏600度という低い温度でGaNが分解することを報告していた。初期のGaN薄膜は摂氏600度未満で成長させており、それで分解を防げると考えていた。その結果、すべて多結晶状態となっていた。1969年3月にはついに、Maruskaは真空とは異なりアンモニア雰囲気中でGaNは分解ではなく成長していることを発見し、炉温度を摂氏850度まで上げた。この温度はGaAs成長のために典型的に使われるものだ。GaN薄膜は透明で鏡面性を示した。彼はRCAの分析センターに走り、X線解析を行った結果、その堆積物は本当にGaNの最初の単結晶薄膜であることが明らかになった。より高品質のGaN薄膜は炉温度を摂氏950度まで引き上げることで成長可能であることもわかった。

またMaruskaは、いずれの薄膜も、意図的なドーピングなしではN型を示すことを発見した。当時利用できる解析手法では、N型の導電性を説明する不純物が何かについて明らかにすることはできなかった。そこでMaruskaとTietjenはN原子の空孔に着目した。この概念は、長年にわたって多くの論争を引き起こした。PN接合が可能になるよう、ひとびとはP型ドーパントを見つけようとし、Znが有望

なアクセプタだと考えられていた。というのはGaAsやGaPの場合にはそれが有効だったからである。Zn濃度が増すとGaNは絶縁するようになり、また色がオレンジ色へと変化した。しかしP型の電導性を示すことはなかった。

1969年、Jacques Pankoveはパークレー校で1年のサバティカルを費やし、半導体に関する古典的な教科書、『半導体における光学的処理プロセス (*Optical Processes in Semiconductors*)』を執筆した。1970年1月にRCA研究所に戻ったとき、彼はすぐに新しいGaN薄膜に興味を持つようになった。PankoveとMaruskaはチームとなって、一緒にGaN薄膜の光学吸収と電界発光の研究を行った。その時Ed Millerもチームに加わって、1971年夏にはGaNからの電界発光の最初の例をRCAは発表した。そのサンプルはZnをドーピングした絶縁層と2本の探針からなり、ピーク波長が475nmの青色発光をしていた。PankoveらはさらにドーピングされていないN型層、Znドーピングの絶縁層、Inの探針からなるデバイス（いわゆるMIS構造）を構築し、これが世界初のGaN系LEDとなった。これは緑色発光をしていた。

1972年4月、MaruskaはMgがZnより良いP型ドーパントであると考えた。彼は現在標準的となっているHVPE法を使用して、MgドーピングGaN薄膜成長を始め、1972年7月7日には、明るいすみれ色のLEDの開発に成功した（ピーク波長は430nm）。Maruskaはこの新しいデバイスの発明によって、大金持ちになれると確信していたが、結局それは実現しなかった。実際、今日に至るまで、彼はHVPE法によってGaN薄膜成長を続けている。またMgドーピング青色LEDは21世紀となってもまだ光を放し続けている。2002年7月7日は彼が開発した青色LEDの30回目の誕生日に当たる。MaruskaとPankoveは、1972年に彼らの努力を新聞で語っている。「MgドーピングGaN系LEDがすみれ色に発光」と。それ以降、GaNのMgドーピングはすべての窒化物LEDとLDの基礎であり続けている。

RCAチームはさらに、Fowler-Nordheimのトンネル効果に基づいて、これらのデバイスの発光メカニズムをモデル化した。なぜなら様々な特性が温度とは実質的に独立していたからである。しかし、トンネル効果を利用したデバイスは決して効率的と言えるものではなかったため、商品化されることはなかった。1974年までには、経営ミスのために収益が激減していたので、RCA社は倒産しつつあった。結果的に青いLEDプロジェクトは中止された。

その年以降、GaN系研究は至る所で実質的に終わってしまった。この材料については世界で1982年に論文が1本だけ公表されたのみである。しかし赤崎 勇は信念を曲げることを拒絶し、ついに1989年には、P型ドーピングのジレンマ（MgドーピングGaNの焼き入れによって伝導性を実現）を解決した。さらに1995年に日亜化学工業の中村は、青緑色GaN系ヘテロ構造LEDを10%以上の効率での開発に成功した。人は決して諦めてはならないのだ。

年表

- | | |
|-------|--|
| 1923年 | Lossevにより、青色の電界発光は最初に報告された。紙やすり用の砂として製造されたSiCのかけらからの発光によるもので、偶然PN接合を含んでいた。 |
| 1938年 | Juzaらにより、GaNの研究がドイツで発表されている。 |
| 1954年 | III-V族化合物半導体の結晶成長の研究が始まった。 |
| 1962年 | Nathanらにより、最初のGaAs系赤外線LEDが発表された。またHolonyakらによって、 |

- GaPとの合金により赤色LEDが発表された。またGaNについてLorenzらが真空中で低温でのGa_{0.99}N_{0.01}結晶成長を報告した。
- 1968年 NによるGaPの等電子ドーピングの研究が始まり，Loganらにより，黄緑色LEDの開発が報告された（発光効率はおよそ0.3%）。
- 1968年5月 ディレクターのTietjenが部下のMaruskaに対してGa_{0.99}N_{0.01}単結晶薄膜成長を指示した。
- 1969年 Violinらにより，SiC薄膜がより慎重なプロセスで製造され，PN接合が構築できることが報告された。青色LEDの電光変換効率はわずかに0.005%。またMaruskaらによって，アンモニア雰囲気中で高温でのGa_{0.99}N_{0.01}単結晶薄膜成長を報告した。
- 1970年1月 RCA研究所にてPankove, Maruska, MillerらがGa_{0.99}N_{0.01}薄膜の光学吸収と電界発光の研究を開始した。またMaruskaはスタンフォード大学の博士課程に進学した。
- 1971年夏頃 Pankoveらは，Ga_{0.99}N_{0.01}系MIS構造青色LEDを発表した。
- 1972年7月 MgドーピングによってGa_{0.99}N_{0.01}のP型化を目指し，Maruskaらによれば，青紫色LEDの開発に成功した。
- 1974年1月 Maruskaはスタンフォード大学の博士後期課程を修了したが，RCA社でのGa_{0.99}N_{0.01}系研究開発のプロジェクトは中止となった。MaruskaはExxonに移籍。
- 1989年 天野らによって，MgドープGa_{0.99}N_{0.01}の電子走査線照射による焼入れによってP型化することが報告された。
- 1995年 中村らによって，青緑色Ga_{0.99}N_{0.01}系ヘテロ構造LEDの開発成功が報告された（発光効率10%以上）。

4. まとめ

今回述べられた内容は，史実というより本稿筆者の理論的関心に基づいて質問し，Maruska氏が見解を一般論として答えたものである。第一にかつてZnSeの潜在的可能性について，ひとびとがそれほど懐疑的ではなかった理由について。第二に，所属する研究機関の学界での地位の影響について。第三に，運や才能の問題について。第四に，アメリカにおける研究費の予算執行に対する説明責任について。最後に，パワー半導体の特性についてである。

第一のZnSeの潜在的可能性について，筆者は従来よりZnSeの基本的特性から，発光素子の材料としてあまり有利とは言えない旨の見解をよく耳にしてきたので，Maruska氏の見解を尋ねた。彼は研究開発途上では，どのような技術的課題も何とか努力して克服できると皆が信じて研究しているのであり，それがうまくいかないかは結果論に過ぎないと立場であった。この点は，他の研究者から聞かれたことでもある。例えば前号に既出の宮原諄二氏も，かつて筆者との私的な会話で「どんな技術もやっついていけば面白い」と述べておられた。

第二に，研究費の調達にからみ，所属する研究機関の性質がどう影響するかについて尋ねた。ただし明確な回答は当然のことながら得られようもなく，結論から言えばケース・バイ・ケースであるとの見解が得られた。例えば大学と企業の研究所を比較しても，大学の方が基礎的な研究に向いている

とは言えるが、有力校だからと言って必ずしもうまくいくとは限らない。フロリダ大学は、半導体工学の分野で大きな研究施設を要していたが、ZnSeやZnSの研究は行われていた（また3M社と共同研究も行われていた）一方で、GaNは研究対象とはなっておらず、そこに研修目的で中村修二氏が滞在していたことは広く知られているが、結晶成長技術の習得以上の意味はなかったようである。一方で、インタビュー当時Maruska氏が特任教授として在籍したサウス・カロライナ大学は、半導体工学の分野では全くの無名な地位から、研究施設で中心的な役割を果たすKhan教授の尽力によって、ここ数年でGaN系の研究ではアメリカでもトップ・レベルの大学として認知されるまでに成長したとも言う。

第三に、運や才能についての一般的な問いかけに対して、Maruska氏は研究成果で評価すべきだと回答に加えて、一種のセレンディピティの効用についても言及があった。つまり現在の事物について、優れた研究者は凡人とは違う本質を見出し、画期的な成果を収める。ただし、ただアイデアがどこからともなく浮かんでくるというものではなく、過去の経験や学術的知見の広さ・深さに裏付けられたものであることが、言外に示されていたやに思われる。

第四に、アメリカにおける研究費の予算執行に対する説明責任については、かなり日本より厳しい基準が設けられているようである。とくに長期にわたる研究が非常に難しくなり、設備が撤去されたり付け加わったりを繰り返すため、同じ設備で同じ研究をずっと続けられた日本の赤崎氏らのチームの優位性は大きいと述べられていた。

最後に、GaNのパワー半導体としての用途について述べられた。SiCと並んでGaNは大電圧下でのスイッチングが可能とされている。従来品はSiベースで構築されているが、電力変換容量が高まるほど高速なスイッチングが困難になるとされており、電気自動車やスマートグリッドの普及、再生可能エネルギーによる発電事業の拡大などは、パワー半導体普及を後押しする要因となっている。またスイッチングのための電力損失が低減できることから、省エネルギー化の期待が大きいこと、またデバイスの小型化によってあらゆる電化製品にも実装可能といった利点がある。

Siのように大きなバルク単結晶を作成できないため、現在異素材の基板上にエピタキシャル成長させる方式が採用されるが、小さいながら単結晶ウェハの開発も進められている。基本物性の観点からはGaNがSiCを上回るが、熱伝導についてはSiCが優れており、またバルク単結晶の開発も後者が先行しているようである。ただしGaNはLED関連の生産量が圧倒的に多く、規模の経済性を活かして低価格化できる利点がある。またデバイスが小型化できることから、将来的には単結晶ウェハの小ささもそれほど不利ではないと考えることも可能である。こうした実用性の広がりから、GaN系デバイスへのさらなる研究開発努力を誘発し、アプリケーションが拡大し、技術的限界が乗り越えられていくことは、SiとGaAsの研究開発競争の歴史を振り返っても明らかであり、今後の発展が見込まれるところである。

