

中部圏には、伝統と結びついた「あかり」と関連の深い豊かな文化が数多くあります。また、広範な光関連産業の発展のなかで、最先端の光に関する技術を利用した新しい様々な文化が育まれています。

調査季報「中部圏研究」では、こうした中部圏における「あかり」と関係の深い文化をシリーズで取り上げ、守っていききたい中部圏の文化、伝統文化と新しい文化の融合、新しい文化の動きなどについて、多面的に紹介していきたいと思います。

今号では「未来を創出するあかり『LED』の源流」を紹介します。

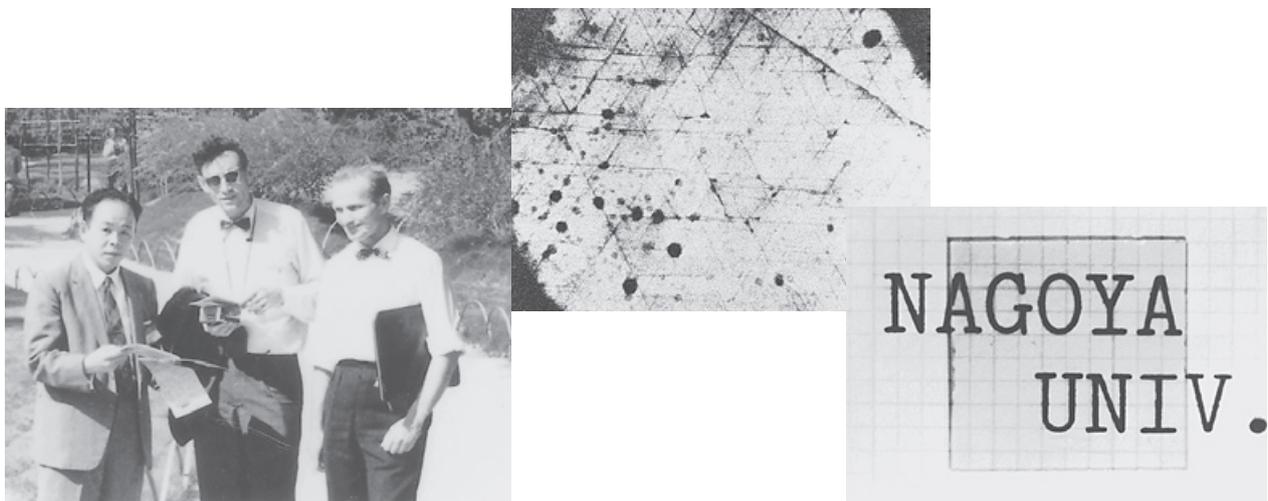
未来を創出するあかり「LED」の源流

青色発光ダイオード開発者・赤崎教授インタビュー

財団法人中部産業・地域活性化センター

客員研究員 坂口 香代子

人類は有史以来、さまざまな“あかり”を発明してきた。それらは大きく、火（炎）（第1世代）、電球（第2世代）、蛍光灯（第3世代）と分類され、今、それに続く第4世代のあかりとして注目されるのが、「LED（発光ダイオード）」である。近年、低消費電力かつ長寿命という特徴を持つLED電球の登場により一般にもLEDの知名度は高まりつつあるが、実はすでに我々の暮らしにLEDは欠かせない。街中のイルミネーション、フルカラーハイビジョン、信号機、車のフロントパネル、携帯電話のバックライトなど、身近に接している物の中にそうとは気づかずLEDは存在しているのである。さらに、その優れた特性から、農業、医療、通信分野を画期的に変える“未来を創出するあかり”としても世界規模で熱い視線が注がれる。このLEDの実質的な実用化は、世界中の研究者が次々撤退した「窒化ガリウム（GaN）系青色LED」の開発に日本の一人の研究者が粘り強く取り組み、ついに実用化に耐えうる高性能青色LEDを開発したことが源流にある。今回のあかりと文化シリーズは、「窒化ガリウム（GaN）系p-n接合型青色LED」の開発者・赤崎勇名古屋大学特別教授・名城大学教授に、その源流にかけた思いを伺った。



（写真左）最初の名古屋大学時代、国際会議にて。（写真中）1985年以前の典型的GaN。（写真右）完全に透明な結晶のため下の方眼紙上の「NAGOYA UNIV.」の文字がはっきりと見える、1985年に赤崎教授らが成功した低温バッファ層技術による高品質GaN単結晶。（写真左：名城大学赤崎研究室提供、写真中・右：赤崎記念研究館提供）

1 『LED（発光ダイオード）』とは

光を放つ半導体

LEDとはLight-Emitting Diodeの略で、「発光ダイオード」と呼ばれる“光を放つ半導体”のことである。

半導体は、導体と絶縁体との中間の電気伝導率を持つ物質で、低温ではほとんど電流を流さないが、高温になるに従い電気伝導率が増す。材料としてはIV族の珪素、ゲルマニウムのほか、Ⅲ－V族化合物半導体の砒化ガリウム、窒化ガリウムやⅡ－Ⅵ族化合物半導体であるセレン化亜鉛などがある。LEDは、これまでの白熱電球や蛍光灯の発光の仕組みとは異なり、「半導体中の電子の遷移によって光を生みだす」仕組みによるあかりである。

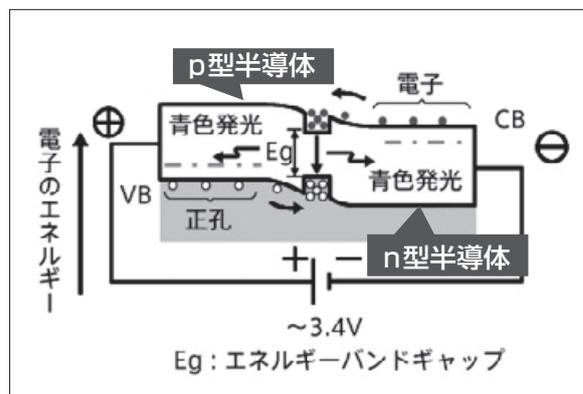
もう少し具体的にいうと、「p型」と呼ばれる正孔（価電子帯中の電子が抜けた状態、プラスの電荷を持つ仮想的粒子）が多い半導体と、「n型」と呼ばれる電子（マイナスの電荷を持ち半導体中を自由に動く粒子）が多い半導体を接合させて「p-n接合」をつくり、p側にプラスの電圧を加えることにより、電子、正孔をそれぞれp領域、n領域へ拡散させ、「電子－正孔」の再結合により光を放出させる仕組みである（資料1）。

LEDの特性

LEDはそれまでの光源とは全く違う仕組みでつくられる光源であり、以下のような優れた特性を持っている。

- ◆**低消費電力**…信号機の場合、従来の電球式が70Wであるのに対し、LEDは12W。
- ◆**長寿命**…電球の10倍以上。
- ◆**低発熱**…熱放射をとまなわない発光であり、熱放射を避けたい物の照明にも適している。
- ◆**応答速度が速い**…点灯消光の応答速度が速く、電球に比べると100万倍以上。調光・点滅が自在。可視光通信への応用も始まっている。
- ◆**小型・軽量**…照明器具の小型化、薄型化が可能で、設計・デザインをする上でも自由度が高い。

【資料1】LED発光のしくみ



エネルギーギャップに相当する程度の順方向の電圧を加えると、正孔はp型領域からn型領域へ、電子はn型領域からp型領域へ、それぞれ注入される。そこで相手方である多数キャリアと再結合して発光する。高性能LEDをつくるには、このp-n接合の仕掛けが非常に重要である。

（赤崎記念研究館資料をもとに作成）

◆**指向性**…電球などに比べて光の指向性（ある決まった方向に向かう性質）が強いため、光が拡散しにくく、一点を集中的に照らすことが容易にできる。

◆**衝撃に強い**…ガラス管を使用していないため、割れる心配がない。

これらの特性により、環境保全に貢献するあかりとしても期待されている。

2 LED開発の歴史

赤色・黄緑色LEDはトランジスタ発明後まもなく実現

半導体の発光（固体に電気を流すことで発光する）現象は1907年には発見されていたようだが、LEDとしての研究が進んだのは1960年代に入ってから。まず、赤外／赤色、次いで黄緑色のLEDが開発され、1970年代に入ると「赤」「黄緑」「黄色」のLEDが表示用途で実用化された。

「青色LED」の大きな壁と赤崎教授による開発の成功

問題は「青」の開発であった。赤・緑・青の3色は「光の三原色」と呼ばれ、その3色がそろっ

て初めてフルカラー表示が実現できる。

そこで、世界中の研究者が「青色LED」の開発に挑んだ。しかしエネルギーが大きい青色の場合、実用的な高い輝度や低電圧動作を実現するのは非常に難しく、1970年代後半になると多くの研究者が撤退。その中で、後で具体的に紹介するが、赤崎教授は、「窒化ガリウム (GaN)」半導体のp-n接合による青色LEDの研究に粘り強く取り組み、名古屋大学工学部教授時代の1989年、ついに輝度だけでなく優れた電気的特性を持つ高性能な「窒化ガリウム (GaN) 系p-n接合型青色LED」の開発に世界で初めて成功。この成果をきっかけに、一転、世界中で窒化ガリウム (GaN) による青色LEDの研究が盛んになり、1990年代に入ると、一気に実用化の時代へと突入したのである。

1996年には、青色LEDと黄色蛍光体の組み合わせによる白色LEDも実現され、その後多くの改良が加えられていった結果、今、注目を集めているLED電球が生まれた。

現在の白色LEDの主流は、「窒化ガリウム (GaN) 系高輝度青色LED+黄色蛍光体」または「紫外LED+多色蛍光体」の組み合わせであり、すべて「窒化ガリウム (GaN) 系p-n接合LED」が用いられている。

3 LEDの用途と応用分野

LEDのさまざまな特性が 未来を創出する

LEDは、青色LEDおよびそれを用いた白色LEDの実用化とともに、需要が拡大し続けている。

現在では、案内板などの表示用はもとより、携帯電話、デジタルカメラ、パソコン、テレビなどの液晶ディスプレイ (LCD) のバックライト、また交通信号機、自動車用照明、街頭などの大型フルカラーディスプレイ、一般照明といった多様な場面においてLEDの利用は急伸している。

さらに、その応用分野にも関心が高まっている。例えば、農業分野。野菜工場などにおける照明は、

LEDの特長である低消費電力や発熱の少なさが力を発揮する。また、LEDは特定波長の発光が可能であり、それぞれの植物の栽培に適した光源を供給できる。医療分野では、例えばカプセル内視鏡の光源として使用されている。さらに紫外線LEDを使った皮膚病治療など、医療にも応用領域が広がっている。通信分野においては、可視光通信の光源として応用が始まっており、美術館や博物館では、作品や展示品を照らしているLEDを利用して通信を行い、その展示品の情報を得ることができる仕組みも生まれている。

LEDのこうした実用化を格段に広げるベースとなった「窒化ガリウム (GaN) 系p-n接合型青色LED」の先駆的かつ基本的技術の開発に至る経緯を、その開発者、赤崎勇名古屋大学特別教授・名城大学教授へのインタビューをもとに紹介したい。

4 青色LED開発の源流

「光る結晶を夢見た」ことが出発点

赤崎教授が、そもそも発光現象の研究に興味を持ったのは1954年 (昭和29年) のこと。

「当時の勤務先・神戸工業 (現富士通) でブラウン管を担当した時でした。ブラウン管は電子を数十kVという電圧をかけて飛ばし、蛍光体を塗った面を光らせる。この蛍光体は単結晶ではなく多結晶粉末です。粉末ですからかなりの割合の光が吸収されてしまうのです。つまり、光のロスが大きい。そこでガラスのプレートの上に粉末ではない“光る単結晶”を敷き詰められないかと考えたことがあります。考えたというより“夢見た”のです。当時、それはまさに夢物語。1950年代にそんな無謀なことをまともに考えていた (笑) のです。」

エピタキシャル成長への挑戦

以来、「光る単結晶」「光る半導体」がずっと潜



赤崎 勇氏
名古屋大学特別教授、名城大学教授

1929（昭和4）年鹿児島県生まれ。1952年京都大学理学部卒、神戸工業（現富士通）入社。1959年、名古屋大学工学部助手。同講師、助教授を経て1964年松下電器産業（現パナソニック）東京研究所基礎第4研究室長に。その後半導体部長などを経て、1981年に再び名古屋大学に戻り、教授。1992年に定年退官し、現在、名古屋大学特別教授、名城大学教授。

（名城大学赤崎研究室提供）

在意識の中にあつた赤崎教授は、1959年、名古屋大学に新設された電子工学科に呼ばれて着任した後、ゲルマニウム（Ge）半導体の単結晶をつくる研究を始めたのである。

「ゲルマニウム（Ge）は光りませんが、『単結晶』は、私にはとても魅力的に映つたのです。そこでゲルマニウム（Ge）のエピタキシーを始めました。エピタキシーとは、下地の結晶に軸をそろえてその上に単結晶膜を成長させる技術です。私が入組んだのは、ゲルマニウム（Ge）単結晶のエピタキシャル成長というもので、世界的にも早い時期に行い、ある程度の成果を出したと思つていたのですが、ある時、親しくさせていただいていた大阪大学の菅田先生がアメリカから持ち帰ってきた冊子を見せてもらい、びっくり。『IBMジャーナル』のゲラ刷りのコピーでしたが、そこにまさに私がやりつつあつたことを成功させたことが出ていた。とても立派な装置を使い、解析もきちんとされている。一瞬凍りつきました。衝撃を受けたというのはあの時のようなことを言うのでしょね。」

赤崎教授の取り組みは、結果的にはGeエピタキシャル成長の初の成功とはならなかったが、赤崎教授がその研究について初期のころに書いた論文が、次のステップを運んできた。

松下電器・東京研究所で 「光る半導体」の研究をスタート

「私が書いた初期の論文に目を留めたのが、当時東北大学の教授で、松下電器（現パナソニック）が新設した東京研究所の所長となつた小池勇二郎先生だったので。松下電器は、従来からあつた大阪の中央研究所とは別に東京研究所を新設し、“脱松下”と称して、研究室長には全て全国の大学から若手の助教授クラスを引き抜き、世界の一流の研究を目指す研究所としてつくれたのです。松下幸之助さんが燃えておられた。そんな中で、私の論文に目を留めてくださった小池所長からお呼びがかつたのです。」

1964年、松下の東京研究所に基礎第4研究室長として着任した赤崎教授は、最初に自分でテーマを決めることになつた時、迷わず、ずっと夢見続けてきた「光る半導体」にしたのである。

「青」に魅せられた理由

当時、すでに赤と黄緑のLEDは開発されていた。しかし、青がないばかりに光の三原色がそろわず、表現できる色は限られ、その実用化の用途も限られていた。

「企業の研究所にいたこともあり、私が青色LEDの開発に成功したあと、『LED産業を育てることを目的に取り組みましたのですか？』とよく聞かれました。正直、そこまでの気持ちはありませんでした。では、なぜ青に取り組みうと思つたか？理由は至極簡単です。学生時代は将来、研究者になろうとは思つていませんでしたが、もし何かをやるのなら、たとえ小さなことでもいいから、今まで誰もやつていないことをやろうと思つていました。青のLEDは誰もやらない、いややつたけ

れどできていない、誰もできないのなら私がやろう。ただ純粋にそう思ったのです。」

なぜ青色は難しかったのか？

なぜ、青はそれほど難しかったのだろうか？

青色は、光の三原色のうち、エネルギーが最も大きく、その光は波長で表すと455～485nm、エネルギーで表すと2.6～2.8eVだという。このようなエネルギーの発光素子の実現には、次の4つの要件が必要となる。ここでは、赤崎教授の青色LEDの開発の流れを大まかに理解いただくために、そのポイントを紹介する。

【青色LED実現の4つの要件】

まず、以下の①②の2つが必要条件。実際にはこの2つだけでは不十分であり、③④の成功が青色LED実現の鍵を握った。

①半導体のエネルギーギャップ^(※1)が2.6eV以上…
炭化珪素 (SiC)、セレン化亜鉛 (ZnSe)、窒化ガリウム (GaN) などが候補として挙げられていた。

②直接遷移型半導体…
直接遷移型とは、正孔と電子 (「1 『LED (発光ダイオード)』とは」参照) の運動量が等しく、出会うとそのまま結びつく。間接遷移型は、その過程に原子の振動が関わってはじめて結びつく。つまり、直接遷移型の方がはるかに結び付きやすいので発光もしやすい。

③高品質単結晶の作製…
原子が規則正しく周期的に配列している固体の総称が結晶だが、「単結晶」とは、「試料のどの部分でも結晶軸の向きが同一の継ぎ目のない結晶」のこと。高性能半導体デバイスの実現には高品質単結晶が必須。

④「p-n接合」ができること…
「p-n接合」とは、一つの単結晶のある原子面を境として、片側が「p型半導体」で、他の側が「n

型半導体」である構造のこと (「1 『LED (発光ダイオード)』とは」参照)。このp-n接合は、ほとんどの半導体デバイスの基本構造であり、p-n接合ができることによって初めてトランジスタ作用や高効率発光などさまざまな優れた機能を発現させることができる。

なぜ「窒化ガリウム」に挑んだのか？

まず一番のポイントは、青色LED実現の4つの要件の①で紹介した3つの半導体材料の中から何を使うか。赤崎教授が選んだのは「窒化ガリウム (GaN)」であった。

「青色LEDの研究は、1970年ごろから1980年代にかけて世界中で盛んに行われましたが、炭化珪素 (SiC) は、p型・n型ともにできることが早くからわかっており、実際に青色に光るダイオードもつくられていたのです。しかし間接遷移型のため、暗い光しかつくれなかった。セレン化亜鉛 (ZnSe) は直接遷移型で良く光り、窒化ガリウム (GaN) と同じく当時まだp型はできてはいませんでした。世界中の多くの研究者はこれが青色LEDの本命材料として取り組んでいました。窒化ガリウム (GaN) に比べると結晶がつくりやすかったからです。しかし私は違うと思っていた。窒化ガリウム (GaN)こそ極めて安定な青色LEDの材料として適しており、これではなければいけないと信じていました。」

窒化ガリウム (GaN) は、融点、窒素蒸気圧ともに非常に高く、結晶をつくるのが極めて困難である。さらにセレン化亜鉛 (ZnSe) に比べてエネルギーギャップが大きいため、p型化はより困難であると予想されていた。赤崎教授がそれを承知の上で窒化ガリウム (GaN) に取り組んだのは、むしろ「加工しにくく難しい材料」であったからこそだ。

「最初に申し上げたように、私は産業化・実用化という言葉を使ったことはなかったけれど、将

【※1】半導体の電子の空帯 (伝導帯) と同充滿帯 (価電子帯) のエネルギー差

来レーザーをつくる時は大電流を流すわけですから、実際に使うものは、電流をどんどん流しても、また少々荒っぽい使い方をして、それに耐えるものでなくてはいけないと考えていました。窒化ガリウム(GaN)は厄介な材料だけれども、良い結晶をつくったあかつきには非常にタフな素子(デバイス)になる。また、エネルギーギャップが大きいということは将来応用できる範囲が広いということ。潜在能力という点で、窒化ガリウム(GaN)は究極の材料。そんな材料に挑みたいと思ったのです。」

失敗を繰り返し、「勘」を培った日々

赤崎教授が成し遂げた青色LEDの開発は、その道のりに大きく4度の飛躍的な前進(ブレイクスルー)があった。(資料2)

第1のブレイクスルーとなる「高品質GaN単結晶の成功」は1985年のことである。研究スタートから実に長い年月がかかっている。赤崎教授の中で、難しい材料に挑んだその信念がぶれたことはなかったのだろうか？

「ありませんでしたね。少し余談になるかもしれませんが、若い人にもよく言うことで大事なことだと思うのでお話すると、世界中でやっ

【資料2】

赤崎教授とその研究グループによる 青色LED開発の4つのブレイクスルー

- 1985年 高品質GaN単結晶の成長に成功(低温バッファ層技術)…論文発表は1986年〔第1のブレイクスルー〕
- 1989年 Mg添加高品質GaNへの電子線照射(LEEBI)によるp型伝導の発見〔第2のブレイクスルー〕
- 1989年 p-n接合型青色LEDの実現〔第3のブレイクスルー〕
- 1990年 SiH₄を用いたGaNのn型伝導度制御〔第4のブレイクスルー〕

※GaN: 窒化ガリウム、Mg: マグネシウム、SiH₄: シラン

予算がつきそうだからとか、これはやりやすいからといった理由で研究テーマを選ぶのはやめたほうがいい。大事なものは、本当にそれをやりたいと思っているかどうか。なぜなら、新しいことなのだから失敗はつきもの。私は失敗だらけです。しかし、失敗しても、自分が好きでやりたいことなら、あきらめない。

“失敗は成功のもと”と言いますが、本当にその通りです。なぜそうなのか。失敗しても続けていると、いつの間にか“勘”(intuition)が生まれる。私は、いわゆる山勘ではない“体験に基づいた勘”というものが研究者にとって非常に大事だと思っています。

例えば、結晶は1立方cmの中に10の23乗個の原子を含んでいます。そんな結晶を気相(物質が気体の状態にある相)からつくる場合、ガスの種類、流速、基板や反応管の形状、温度など多くのファクターが絡み合っていて関係しており、まだ完全にはコンピュータ制御はできていないと思います。結晶を原子一層一層積み重ねるといのはそういう世界であり、研究者の体験に基づいた勘が非常に大事な役割を果たすことがあるのです。

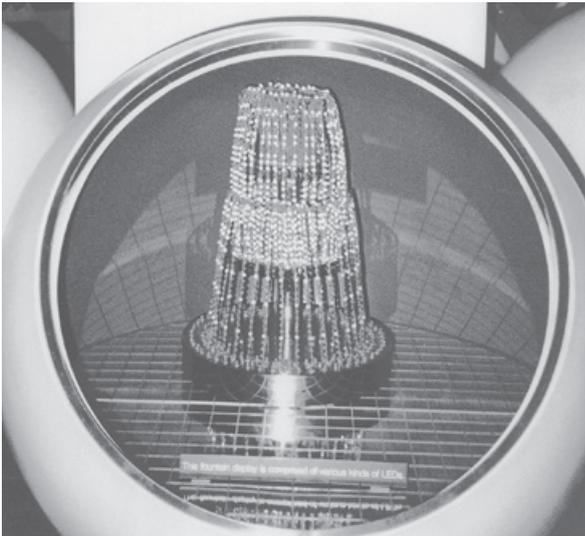
私は、“青色に魅せられていた”から、失敗を繰り返して何年も結果が出なくても、あきらめなかった。むしろ失敗の中から、今度はこういうふうになればこうできるのでは?という“勘”が培われたのだと思います。一般的にその勘がどういうものか、人にはうまく説明できませんが、しかし、そういう“直感”が大事だということだけは言える。それを“ひらめき”と言う人もいます。」

我一人、荒野を行く

そんな中、赤崎教授にとって青色LED研究の2度目の出発点になった出来事が1981年にあった。

「実は松下時代の1978年に、窒化ガリウムによる青色LEDを開発し、その構造と中身の性質を種々の事情から2年後の1981年に国際会議で発表しました(資料3)。まだp-n接合型ではありませ

【資料3】



松下電器東京研究所時代の1978年開発され1981年にシカゴショウに展示されたGaN青色LEDを含むディスプレイ
(赤崎記念研究館提供)

んでしたが、これまでと違うユニークな構造をとっており、従来、陰電極の取り出しが困難であった問題点を一挙にクリアできるもの。私は、国際会議では相当反響があるだろうと思っていました。ところが、何の反響もなかった。“全く”です。今でも忘れません、『我一人荒野を行く』とつぶやいたことを。」

「20世紀中の実現は困難」と多くの研究者が次々と挫折し、青色LEDから撤退していた。多くの努力にもかかわらず、結晶の品質は一向に良くなりならず、また「窒化ガリウム (GaN) のp-n接合はできない」という学説が専門家たちの間で信じられるようになっていた。もちろん、赤崎教授は、そういった学説のことは知っていた。知ってはいたが、発表に対しての全くの反響のなさに、「ショックというよりも、本当に、とうとう窒化ガリウムを用いた青色LEDをやっているのは私たちだけなんだなということを痛感し、思わずつぶやいた」のである。これは後でわかったことだが、それまで、かなり熱心に取り組んでいた海外の研究所さえも窒化ガリウム (GaN) の研究をやめていた。

「しかし、私はただ一人になってもやめようとは思いませんでした。国際会議に出したものは、私自身が追求していたp-n接合型のものではなかった。私は何としてでもp-n接合を実現しようと思っていたからです。そのころ、一見ガタガタの結晶の中にごくまれにキレイな微小結晶が混じっていることに気付いたのです。何とかして、このキレイな結晶を基板全体に拡げて積み重ねることができれば、きっとp型結晶もできるに違いないと確信しました。これを実現するには、問題は“結晶成長”だと。結晶全体がガラスのようにピカピカにならないといけない。こうして、原点である結晶成長の基礎に立ち返ったのです (1978年)。結晶の特性は、その成長方法と成長条件に左右されます。そこで原点に戻って、成長方法から検討し直したわけです。」

低温バッファ層を介した 高品質GaN単結晶の成長に成功

「結晶成長という原点に戻る」ということを決めた赤崎教授が、まず取り組んだのは、それまで窒化ガリウム (GaN) の成長にはほとんどやられていなかった「MOVPE」(有機金属化合物気相エピタキシャル成長、MOCVDともいう。*) という方法で結晶成長を行うということだった。

「MOVPEは、1971年にアメリカのマナセビッツという人が主にヒ化ガリウム (GaAs) などⅢ-V化合物半導体に適用した方法です。しかし、窒化ガリウム (GaN) は難しく結局良い結晶はできなかつた。以後何年も窒化ガリウム (GaN) に対しては誰もやっていなかったのです。しかし私はいろいろ考えて、窒化ガリウム (GaN) の成長にはこれが最適だと思い、詳細は省きます

〔※2〕 MOVPE(Metalorganic Vapor Phase Epitaxy) :

有機金属化合物を原料として用いるエピタキシャル成長法。一般には、基板支持と加熱のためのグラファイト上に基板となる単結晶を置き、有機金属化合物を水素や窒素(キャリアガスという)などに混ぜて供給し、基板の近くでその原料を分解させ基板の上に結晶を成長させる(出典：名古屋大学赤崎記念研究館冊子)。

が、実は1979年にはMOVPE法を採用することを決心し、MOVPE成長装置の設計図を書き始めていました。今ではMOVPEは広く用いられているので、世界中にその装置をつくっているメーカーも多く、装置もたくさんつくられています。が、当時は全くありませんでしたから。」

その後、赤崎教授は、名古屋大学へ戻り、研究を継続。

「1981年に名古屋大学に戻るようになったのですが、当時の電気・電子系の先生方が私の研究をサポートしてくださった。私は今もそれにとっても感謝しています。そして、当時、大学にはほとんどなかった本格的なクリーンルームをつくってもらったのです。これは全国の国立大学の中で先陣を切ることだったので、クリーンルームは当時の文部省規格にほとんど合わず、必要性を納得してもらうのに随分時間がかかりました。

一方で、松下時代に私がつくったLEDのサンプルなどを名古屋大学の学生に見せたところ、多

【資料4】



赤崎教授とその研究グループがつくった「MOVPE装置」(1号機)の反応管部の復元模型

(赤崎記念研究館提供)

くの学生が『やりたい』と飛び込んで来ました。実物は、『光るはずだ』という説明の何百倍も強い(笑)。私の研究室は定員オーバーで抽選をやりました。天野浩くん(現、名古屋大学大学院工学研究科教授)をはじめ、今、窒化物研究の第一線で活躍している人たちが入って来ました。彼らと一緒に、初めはありあわせの装置を組み合わせでMOVPEの実験を始めたのです。」

その試作機の経験をもとに、当時、赤崎研究室の大学院生だった小出康夫氏(現、物質・材料研究機構(NIMS)センサ材料センター工学センシング材料グループリーダー)や前述の天野浩氏たちが中心になってつくり上げたのが、今、名古屋大学の赤崎記念研究館にある「MOVPE 1号機」である(資料4)。そして、この装置を用いて、1985年に、第1のブレークスルーとなった「低温バッファ層を介した高品質GaN単結晶の成長」に成功したのである(論文の発表は1986年)。サファイア基板の上に低温で窒化アルミニウムの極薄膜をまず積み、この上に窒化ガリウム(GaN)を約1,000℃で成長させると良質の単結晶ができるという発見である。

「名古屋大学に来てから3年半ほどかかったわけですが、その間に私が考えたのが『低温バッファ』という緩衝層を挿入するという手法。松下時代、青色LEDとともに赤色のレーザも同時に研究し、そちらでバッファの特許も出していました。しかし、それはMOVPE法ではなく液相エピタキシャル法であり、また材料も違うので、なかなか結びつかなかったのです。しかしある日、それをふっと思い出した。私が考えた一番大事な点というのは、単なるバッファ層ということではなく『低温で堆積する極薄のバッファ層』ということ。窒化ガリウムもサファイアも両方ともすごくかたい。お互い主張し合う。私が考えたのは、両者間のひずみを減らすことです。そこで、低温でつけると、結晶のようながっしりした構造ではなく、アモルファスといって柔軟で、いわば融通無

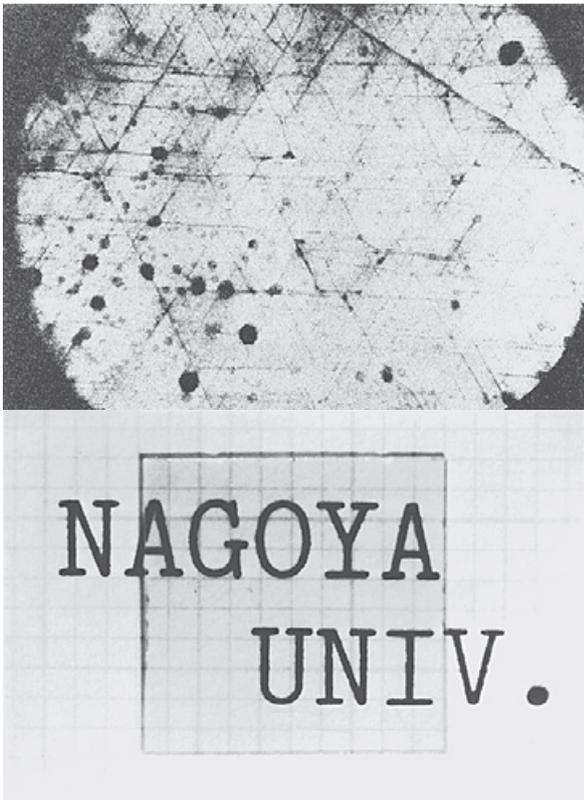
碍の構造になる。そのあと、だんだん温度を上げていき、窒化ガリウム (GaN) の単結晶を成長させる。バッファ層なしのものはガタガタの結晶だったのが、バッファ層を介した成長では歪が緩和され、その結果、透明なピカピカの単結晶ができたのです。

4年後、この成果をアメリカの学会で紹介しました。今度は予想以上の反響を呼びました。」(資料5)

1989年、 世界初の「高輝度青色LED」を実現

その後、赤崎教授とその研究グループは、1989年にそれまでの常識を覆すp型の窒化ガリウム (GaN) を実現 (第2のブレークスルー) し、同年、ついに世界初のp-n接合による「高輝度青色LED」の開発に成功 (第3のブレークスルー) したのである。

【資料5】



第1のブレークスルーとなった「低温バッファ層を介した高品質GaN単結晶の成長」。上がバッファ層を用いる以前、下がバッファ層を介して成長させたGaN単結晶。
(赤崎記念研究館提供)

さらには、1990年にはn型の伝導度の制御にも成功 (第4のブレークスルー)。これらの一連の先駆的かつ基本的技術が、現在の青色LED、緑色LED、紫外LED、青紫色半導体レーザーなどの実用化に非常に大きく貢献している。

豊田合成との縁

実用化については、1986年、豊田合成株式会社が赤崎教授の指導と株式会社豊田中央研究所の協力を受けて、窒化ガリウム (GaN) をベースとした青色LEDの開発に着手し、翌年の1987年に「窒化物半導体を用いた青色LED開発プロジェクト」を開始。現在、数々の商品化に成功している。

この具体的な契機は、1986年、名古屋商工会議所で開催された名古屋地区の企業経営者を対象にした講演会において赤崎教授が研究発表を行った際、それに豊田合成の社員が参加していたことだった。

「当時、名古屋大学の工学部と中部地区の企業は産学連携に取り組み始めていました。私も癒着した産学連携ではなく、学と産それぞれがやるべきこと、得意分野を生かした連携は大事だと思っていました。そんな中、名古屋商工会議所の会頭から名古屋大学の丸勢工学部長 (当時) に依頼があり、産学連携のきっかけづくりの一つとして、まず名大の先生がどのような仕事をしているかを皆さんに紹介してほしいという希望があったようです。3回目が私の番で、丸勢工学部長からは『自分がやっていることを宣伝してきてください』と言われていました。」

ところが、赤崎教授は、1時間半の講演で、ほとんど青色LEDの話をしなかったのである。

「1985～1987年にかけて日米半導体摩擦問題が噴出するほど、1980年代の日本は半導体技術の質・量ともに黄金期でした。私は半導体の講義をしていたので、世の中の多くの人に関心を持っているであろう当時最先端の大規模集積回路 (LSI) に

ついて話をしたのです。最後の5分、2枚だけ持っていった窒化ガリウム (GaN) のきれいな単結晶のOHPをお見せし、これができたから、今までこういう問題があったけれど、きっとp-n接合はできる。そうすると「青の時代が来る」とお話ししたのです。それで講演は終わりです(笑)。たったそれだけの説明でした。しかし、終了後、演壇のところに10人くらいの質問者が押し寄せてきたのです。」

その中で、翌日再び、名古屋大学の赤崎教授のもとを訪れたのが豊田合成だった。「ぜひ、ご指導をお願いしたい」という申し出である。

「申し訳ないがお断りすると申し上げました。その時は、まだ、p-n接合もできていません。それをやりたい私は、とても企業の方にお付き合いしている時間はないと。しかし、間もなく社長さんが直々に来られた。それでも私は色よいお返事はしませんでした。そしてそれ以後も、何度お断りしても熱心に頼みに来られた。また、新技術開発事業団(現、科学技術振興機構(JST))の人にも熱心に勧められ、私はその両者の熱意にほだされた(笑)のです。いよいよやることになった時、豊田合成さんは青色LED開発プロジェクトの出陣式を行われたのです。私はその記念講演に呼ばれて行ったわけですが、課長級以上の人全員を本社の大広間に集めて、社長自ら『これからこういうことをやっていくのだ』と決意を熱く語られた。それは非常に強く印象に残っていますね。」

「難しい」と「できない」は 決してイコールではない

「あれほど断り続けたわけですが、今、豊田合成さんが取り組まれて良かったと思っています。多くのLEDの専門家たちでさえ、『結晶がきれいになったからといって、窒化ガリウム (GaN) のp-n接合は実現できるかどうか分からない』と考えていた中で、逆に豊田合成さんには半導体やLEDの専門家がおられず、『青ができれば光の三

原色がそろおう』ということから、窒化ガリウム (GaN) LEDの実現がいかに困難であるかという先入観を持たずに、その有用性、可能性にまっすぐ熱い思いを注ぐことができたのではないのでしょうか。

一方、私がなぜ『窒化ガリウムでp型はできない』という理論にひるまなかつたのかというと、先にお話した『結晶は1立方cmの中に10の23乗個の原子がある…』という事実です。つまり、p型ができないと言われても、それはいろいろ仮定を立てた上での計算の上のことであり、実験で実証されたものではない。実際に毎日同じ装置を使って実験をしても、成長条件が毎日同じであるとは断定できない。装置にわずかに残った分子などの影響を受ければ、違ったものができてしまうということが起こるのです。

私が、ヒ化ガリウム (GaAs) や窒化ガリウム (GaN) の結晶をとことんきれいにしようと取り組んだ時も、周りからは『難しいのではないか』と言われました。しかし、挑戦し失敗を繰り返してきた中から得た“勘”が、『不純物をできるだけ減らしていけばできるのではないか』という強い思いを育ててくれた。

そして何より、結晶成長は、物理学、化学などいろいろな分野の境界領域にあり、良い結晶をつくるというのはとても難しい。けれど、“難しい”ということはイコール“できない”ということでは決してない。私は、逆に『だからこそやりがいがある』と思ったのです。」