祝ノーベル賞受賞！ 中村修二氏によるLED革新を振り返る

ボブ・ジョンストン

2007年の著書「Brilliant! Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology」（中村修二と光学テクノロジー革命）の中でボブ・ジョンストン氏（BOB JOHNSTONE）は、中村修二氏のノーベル賞受賞を予言していた。今回、同氏の予言が当たったことを受け、米プロメテウス・ブックス社（Prometheus Books）は同書の改訂版を新たに出版し、中村氏の受賞までの道のりと、その研究の最新情報を紹介している。本稿ではその一部を抜粋して掲載する。

優れたエンジニアならば誰もがそうであるように、中村修二氏も自身を主に問題解決者であると考えている。窒化ガリウムに関する取り組みにおいて最大の問題として残っていたのは、専門用語で「ネイティブ」基板として知られているものが欠けていることだった。それ以外の半導体材料はすべて、同種の材料上で成長させることが行われる。例えば、シリコン素子はシリコンウエハ上で作製される。しかし窒化ガリウムは、サラミのようなバルク結晶ブールを作成することが非常に難しかったため、研究者らはサファイアや炭化ケイ素（SiC）といった「異種」基板を代用せざるを得なかった。このような基板上で成長させた素子には、欠陥が多く含まれていた。したがって壊滅的な破損を防ぐために、発光体を高電力で動作させることはできなかった。

低電流においても、「ドループ」と呼ばれる厄介な問題が生じる。電流を上げるとLEDの発光効率（光に変換される電気の割合）が低下する現象である。これは大きな問題だった。素子の効率改善は、研究者らが永遠に追求し続ける課題だからである。今日の商用LEDの発光効率は一般的にわずか50%で、蛍光体を添加すると効率はさらに低下する。ノーベル賞受賞者発表の数日後に中村氏と話した際、同氏は自身の究極の目標は、効率を「100%にできる限り近づけることだ」と語ってくれた。

しかし、窒化ガリウムのバルク結晶の作製は困難ではあったが不可能ではなかった。住友電気工業、住電日立ケーブル、三菱化学といった日本の大手企業には、製造施設に投資できるだけの潤沢な資金があった。これらの企業がこの材料の製造に資金をつぎ込んだのは、それがもたらす収益性の高いニッチ市場が魅力的だったためである。ブルーレイデジタルビデオディスクプレーヤーや、高い人気を誇るソニーの「プレイステーション」などのゲーム機には、日亜化学工業での中村氏の取り組みの流れを汲む青紫色レーザが採用された。サファイア上で成長させた窒化ガリウムは欠陥密度が高すぎることから、レーザをGaN上で成長させる必要があった。

中村氏は、窒化ガリウムをネイティブ基板上に成長させたいという夢をずっと抱き続けていた。後に「GaN-on-GaN」として知られるものである。2006年になって、新しいブルーレイ基板が発売された。2インチの窒化ガリウムウエハは1枚数千ドルもするものだったが、それによってついに同氏は、自分の構想を実践する機会を得た。当時は、GaN-on-GaNの素子は実用化可能ではあるがあまりにも高価すぎるというのが一般的な認識だった。サファイアウエハが1枚数ドルで販売されていることを考えると、そのようなものを製造しようと考えることさえ常軌を逸しているように思われた。しかしそれまでと同様に、何かを成し遂げるためのより良い方法があると確信した中村氏を、制止するすべはなかった。ここでも同氏の統率力は、他者に活力を与えた。「修二は、最も新しいことにトライすることを常に考えている」とスティーブ・デンバーズ教授（Steve DenBaars、カリフォルニア大サンタバーバラ校（UCSB）における中村氏の同僚）は述べた。「GaN-on-GaNは、修二がジム（スペック教授（Jim Speck）、UCSBの別の同僚）と私を説得し、そして学生たちを説得しなかったならば、誰もトライしようとは思わな

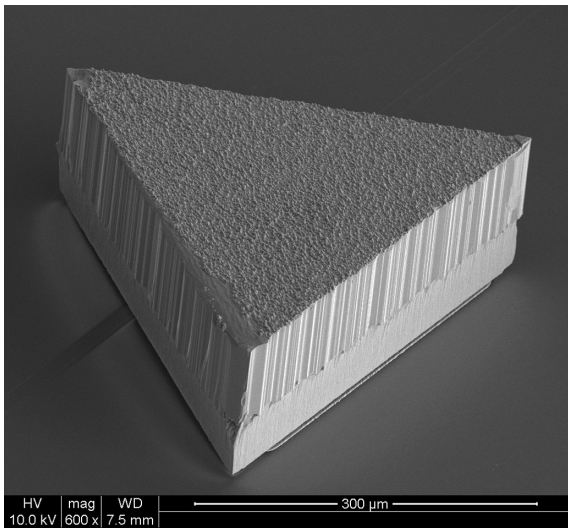
2015年2月3日に再版されたボブ・ジョンストン氏（Bob Johnstone、写真）の著書「Brilliant! Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology」（改訂版、http://bit.ly/1M1QIZqで購入可能）から抜粋。著作権は、米ペンギンランダムハウス社（Penguin Random House, Inc.）の1部門である米プロメテウス・ブックス（Prometheus Books）社に帰属する（2015年2月）。

かったものである」(デンバーズ教授)。

2007年1月、中村氏とその同僚らは、新材料を使用して「画期的な進歩」となる低消費電力の青紫色レーザを開発したことをプレスリリースで発表した。このプレスリリースに最も興味を示した人の一人が、ベンチャーキャピタリストのビノッド・コースラ氏(Vinod Khosla)だった。シリコンバレーの重鎮として知られるコースラ氏は、新興事業に投資して成功に導いてきた実績の持ち主である。同氏の企業である米コースラ・ベンチャーズ社(Khosla Ventures)は、クリーンテクノロジ分野への投資に力を入れていた。つまり、LEDのように、商業的なメリットをもたらしつつ、気候変動といった環境問題にも対処する技術である。コースラ氏が最初に中村氏にアプローチしたのは2001年、中村氏がサンタバーバラ校に移った直後のことだった。同氏は中村氏、デンバーズ氏、スペック氏に、LED企業の設立を提案した。「修二は、数億万長者であるこの人物をまっすぐに見つめて、『ノー』と回答した。まだ時期が適切ではない。われわれは独自の新技術を生み出す必要があると答えたのだ」とデンバーズ氏は述懐した。

その6年後、コースラ氏は、3人の教授に会うためにサンタバーバラを訪れた。「『よし、これで新技術を手にしたわけだから、企業を設立する準備ができたかね』と同氏は言った。われわれは1週間ほど考えた末、『はい』と回答した」(デンバーズ氏)。

3人は、日本語の「空」にちなんで新企業をソラー(Soraa)と名付けた。3人に事業計画はなく、事業の立ち上げにあたって不可欠と思われるキャッシュフロー分析やその他の経験もまったくなかった。3人が持っていたのは、画期的な研究成果だった。「それこそが、修二が非常に得意とすることだ。(前に進むことを)可能にする成果を作り出すのは彼である」とデンバーズ氏は述べた。「ただ技術を適用すれば、成功は後からついてくると思っていた」(デンバーズ氏)。



走査型電子顕微鏡(SEM:scanning electron microscope)で撮影した、米ソラー社(Soraa)のLED技術「GaN-on-GaN」の写真。

それは、事業設立をあまりにも単純にとらえ過ぎた考えだったことが、その後明らかになった。GaN-on-GaN技術には法外なコストがかかるため、商業的な実用化は不可能という一般的な見解に対抗する新興企業の同社にとって、他の投資家らを納得させることは不可能だった。創業したての頃は、従業員への給与の支払いが毎月減額される始末だった。倒産の危機に瀕したことも何度もある。ソラー社の操業を続けるために、多額の個人ローンを借り入れる必要があった。ある意味において、ビノッド・コースラ氏は、日亜化学工業創業者で元社長の小川信雄氏のような存在で、中村氏のビジョンを全面的に支援する覚悟ができた後援者だった。2014年までに、ソラー社は1億ドルを超える資金を調達することができたが、その大部分を出資したのがコースラ・ベンチャーズ社である。

ソラー社は、中村氏の名前に惹きつけられた優秀な人材を採用することができた。ソラー社が雇用した最初の従業員の1人が、最高技術責任者(CTO)として同社に加わったマイク・クレイムズ氏(Mike Krames)である。クレイムズ氏は、オランダのフィリップス社(Philips)の子会社である米ルミレッズ社(Lumileds)でAdvanced Laboratoriesを統括していた。米アップル社(Apple)の「iPhone」に使用されているLEDを開発したグループである。また、ドループ現象が発生するメカニズムである「Auger recombination」(オージェ再結合)を特定したのも同グループである(本誌では詳細は割愛する)。クレイムズ氏は2009年、CTOとしてソラー社に入社した。同社は拠点をサンタバーバラ近郊のゴリータから、シリコンバレーのクリーンテクノロジの中心地であるフレモントに移転した。

ソラー社の創設を促したのはレーザだったが、GaN-on-GaNがより優れたLEDの開発にも理想的であることがまもなく明らかになった。同社は、第2世代の発光ダイオードを意味する「LED 2.0」と呼ぶものを開発することに、焦点を切り替えた。ソラー社は4年間、ひそかにこつこつと開発に取り組み、

2012年2月に同社初の製品を発表して、照明業界をあっと驚かせた。それは、50WのMR16ハロゲンランプを置き換えるものだった。この製品は、その小さなサイズと高い輝度という点において、高品質で高輝度なLEDを提供するメーカーがそれまで実現できなかったレベルに達していた。

チップサイズが他よりもかなり小さいという点で、GaN-on-GaNには本質的なメリットがあった。少ないウエハで、同じルーメン値を達成することができる。それでも窒化ガリウムウエハは、サファイアウエハと比べて100倍以上高価であったため、基板コストを抑えることが急務だった。バルクGaNを製造するための現行技術であったハイドライド気相成長法（HVPE：hydride vapor phase epitaxy）では、材料品質という点において大いに不満が残る状態だった。しかしその他に、アモノサーマル法（ammono-thermal growth）という、コストと欠陥密度の両方を低減する別の成長法も存在していた。この技術は、他の分野において十分な試行と検証が行われていた。例えば、腕時計や置時計の水晶発振器などの用途向けに、年間数千トンもの水晶を製造するために利用されていた。

例のごとく、中村氏はかなり以前からこの代替手法を利用したいと考えていた。クレイムズ氏によると、「修二は最初から、アモノサーマル法に多大な関心を寄せていた」という。1999年、まだ日亜化学工業に在籍していた中村氏は、窒化ガリウムを成長させるためのアモノサーマル法の開発を目指していた、ポーランドのアモノ（Ammono）という企業を訪問している。日本を発つ直前には、アモノの開発に日亜化学工業が出資するよう手配していた。

2014年度ノーベル物理学賞を受賞し、ストックホルムシティホールで開かれた授賞式でスピーチする中村修二氏。

UCSBにおいても、中村氏はこの技術を追究し続けた。アモノ社は、従来のオートクレーブを適応させるという点で問題に遭遇していた。この反応器では成長速度がどうしようもなく遅いなどの問題があった。外部加熱のオートクレーブでは、十分に高い温度と圧力が達成できなかった。この反応器を一から再設計して、窒化ガリウムのバルク結晶を成長させるためにカスタマイズされた、新しい内部加熱のオートクレーブを構築する必要があった。より優れた装置が開発されれば、成長速度が向上する。それによって基板コストを、1ケタ抑えることができる。バルク成長は、高い注目を集めるようになった。窒化物に関する最近の各種カンファレンスにおいて、成長法に関する論文の本数は、他のどのテーマよりも多い。

ソラー社は、UCSBからアモノサーマル法特許のライセンス供与を受けている。米エネルギー省（DOE）からの助成金を得て、同社の研究者らは5年の歳月をかけてこの技術を改良した。「新興企業としてはかなり大がかりな取り組みだった」とクレイムズ氏は述べた。ソラー社は2014年末までに、直径2インチの非常に高純度の窒化ガリウムのブール成長に成功している。しかし、商用生産には4インチのブールが必要である。同社が独自のニーズに社内で対応できる段階に達するには、さらに2年が必要になると、クレイムズ氏は見積もっている。

第1世代のLEDが既にあらゆる分野で活用され、第2世代もまもなく実現されようとしている今、SSLの分野にまだ何か彼が成し遂げるべき課題は残っているのかと、筆者は中村氏に尋ねた。ある、と同氏は答えた。レーザ照明だという。レーザはまず、LEDとは異なり、ドループ現象とは無縁である。「したがって効率は非常に高い。小さなチップを用いて非常に輝度の高い光を生成することができる」と中村氏は説明した。UCSBではかなり力を入れてレーザ照明に取り組んでいる。デンバーズ教授によると、「博士課程の学生たちのほとんどがそれに取り組んでいる」という。この新しい取り組みは既に、商用分野で最初の成果を見せ始めている。その分野としては、車載ヘッドライトやシネマプロジェクタなどがある。

レーザ照明を普及させるには、まだいくつかの課題が残されていることを中村氏は認めた。まずは安全性である。実世界では研究室の中のように、レーザ光から目を保護するための安全メガネを着用するわけにはいかない。そして必ず付いて回るのが、コストの問題だ。「レーザは高価だと誰もが考えている。したがってコストを引き下げなければならない」と同氏は述べた。レーザ光は、次なるトレンドになるだろうか。業界関係者らは懐疑的だ。しかし、その素晴らしい軌跡の中で、中村氏は何度も懐疑的な見解を覆してきた。同氏がまたしても、通説の誤りを実証しそうな気配を筆者は強く感じている。LEDJ