

低コストで殺菌を実現する深紫外LED カンボジアに安全な水を提供したい

三宅 秀人 Miyake Hideto

三重大学 大学院工学研究科 教授
2020~22年 aXis共同研究者

特集 1

OVERVIEW

世界に目を向けると、衛生的な水を利用できない国はまだ多い。カンボジアもその1つだ。農村部には雨水を貯めて利用する地域もあり、安全な水を提供できる水処理装置が求められる。そのコア技術として期待されるのが、「深紫外線」と呼ばれる波長が短く殺菌能力の高い紫外線を放つ発光ダイオード(LED)だ。三重大学大学院工学研究科の三宅秀人教授らは、その深紫外LEDの出力を上げると同時に製造コストは抑え、科学技術の力で安全な水を提供するという持続可能な開発目標(SDGs)の達成に挑んでいる。

工学の使命は人類への貢献 社会を意識してものづくり

世界保健機関(WHO)と国連児童基金(UNICEF)が公表した「衛生施設と飲料水の前進:2014年」によれば、衛生的な水を利用できる人口が半分未満という国は、世界にまだ40カ国以上ある。このデータこそ、三重大学大学院工学研究科の三宅秀人教授の原点だ。「衛生的な水を利用できないと、新生児や乳児の死亡率が上がります。日本は0.3パーセントですが、アフリカのある国は16.7パーセントに達します」と三宅さんは驚きを隠さない。

この課題に際し、2020年に名古屋大学未来材料・システム研究所附属未来エレクトロニクス集積研究センターの天野浩教授を研究代表者とする持続可能開発目標達成支援事業(aXis)「カンボジアにおける安全な水処理装置の開発と殺菌の科学的検証」が立ち上がった。三宅さんは共同研究者として、三重大学の研究チームを率いることになった。

安全な水の必要性は、SDGsで掲げる17の目標のうち、目標6「安全な水とトイレを世界中に」にも据えられている。このSDGsを、三宅さんは強く意識する。「工学分野はものづくりを通して人類に貢献するのが使命だと考えています。SDGsのような社会の方向性を常に把握しておく必要があります」。

名古屋大学と三重大学の共同研究チームが着目したのが深紫外線だ。深紫外線を水へ照射すると、水中の菌のDNAを不活化させ、菌の増殖を抑えた衛生的な水を提供できる。光源にLEDを用いるため、深紫外LEDとも呼ばれる。青色LEDの開発で14年にノーベル物理学賞を受けた3人のうちの1人でもある天野さんが、さらに短波長のLED開発に三宅さんと取り組んできたものだった(図1)。

途上国のように安全な水を確保しにくい地域では、得てして電力事情も良くないが、太陽電池と共に用いることができる深紫外LEDによる水処理装置はまさに理想的だ。深紫外LED自体は10年ほど前から製品化されているものの、課題も抱えている。出力の割に価格が高く、普及に向けては改良が必須となる点だ。三宅さんはまず、この改良に取り組むべく、三重大学が知的財産権を持つ「三宅方式」と呼ばれる高温熱処理による基板作製技術を土台に据えた。この技術ならば、高出力を可能とする高品質の基板を低コストで量産できる。

この方式を説明する前にまず、深紫外LEDの一般的な構造を簡単に整理する。その構造は大きく「下地基板」「n型層」「LED発光層」「p型層」の4層に分かれている(図2)。サファイア基板の上に窒化アルミニウム(AIN)の層を作製して、それを下地基板として、その上にn型層、LED発光層、p型

層を重ねる。この発光層に電流を流すと光を放つ、という仕組みだ。

製造コストを抑える観点からは、基板には青色LEDで用いられている比較的安価なサファイアを用いるのが定石である。しかし従来の結晶成長法では、サファイア基板上的AIN層に欠陥が生じやすいという欠点があった。結晶性が悪いと、深紫外LEDとしての出力と寿命を十分に確保できない。その欠陥の画期的な低減と製造コストの抑制を実現したのが16年に確立された三宅方式だった。

結晶成長後に熱処理でAIN層形成 「三宅方式」で高品質・低コスト

三宅さんは20年以上もの間、半導体研究の中でAIN結晶成長に興味を持ち続けてきた。メカニズムにまで迫り、得られた理論を基に次の展開を図る、という研究姿勢を貫いてきたという。ある日、従来は高温での結

図1 深紫外LEDの産業ニーズ

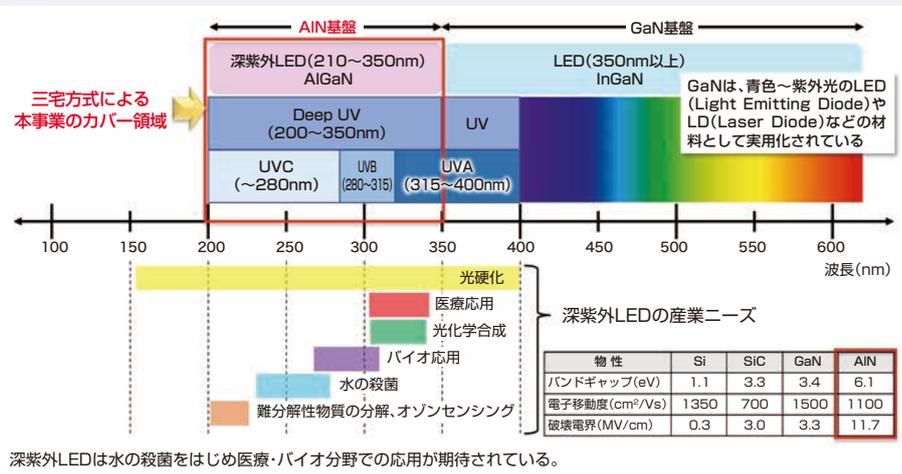


図2 深紫外LED

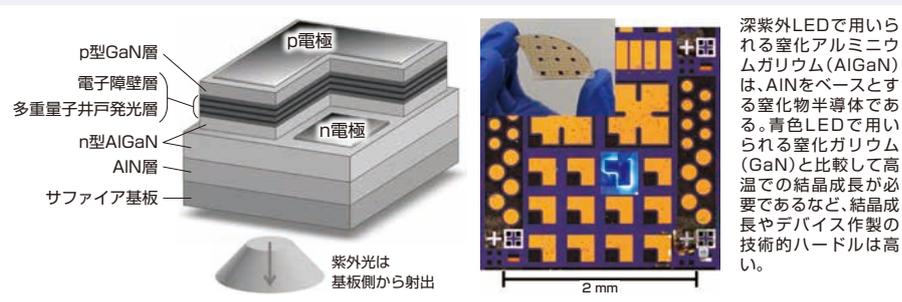
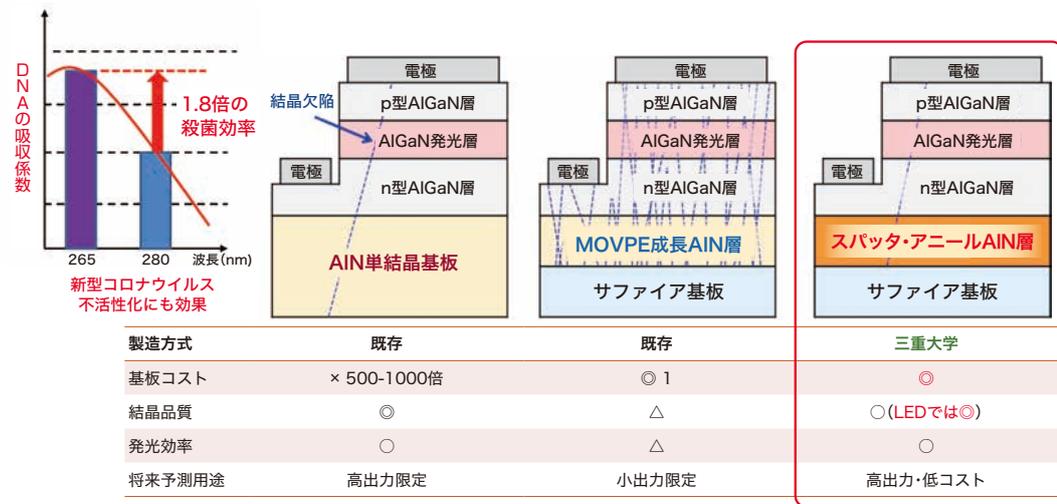


図3 三宅方式の深紫外LEDと従来技術の比較



サファイア基板にスパッタ法と高温熱処理で作製したAIN層を用いた三宅方式による深紫外LEDは、低コストかつ高い結晶品質を実現した(右)。AIN基板を用いたLEDと同じ発光波長265ナノメートル(nm)での高出力が期待できることで、サファイア上LEDで主流の280nm発光のものより1.8倍程度の殺菌効果も見込まれている(左)。

さらに短い265ナノメートル。菌のDNAを不活化させる効果は1.5～1.8倍の強さとなる(図3)。

これらの技術を携え、プロジェクトで掲げた研究課題は2つ。1つは、波長265ナノメートルの深紫外線での出力の向上を目指した深紫外LEDの要素技術の開発だ。もう1つは、水処理に関する実証実験と殺菌

晶成長が必須と考えられていたAIN層作製を、結晶成長と熱処理という別工程に切り分けてもいいのでは、と考えるに至った。きっかけは、結晶成長装置の度重なる故障だった。

当時、結晶成長の温度を1300～1500度に上げると欠陥が比較的少なくなるとわかっていた。しかし、AINの結晶成長は、毒性や腐食性のあるアンモニアガスを用いて高温で行うため、基板ヒーターの破損が続いた。「熱処理で高品質化するという仮説を検証しようと、結晶成長と熱処理の工程を切り分けたところ、AIN層の欠陥は驚くほど減りました」と三宅さんは語る。さらに、結晶成長の工程をスパッタ法で行うことで欠陥が多く生じるものの、熱処理の工程で原子の再配列が起き、結晶粒が合体することで世界最高レベルの結晶品質が達成された。また工程の切り分けにより、高価な有機金属気相成長装置の代わりに、安価で大面積作製にも対

応可能なスパッタ装置を用いることで、コスト面の優位性も生まれた。

この三宅方式では、低コストの結晶成長法を採用した上で、「Face-to-Faceアニール」という独自の熱処理を1700度で加える。この方式で作製したLEDの強みは、殺菌能力の高さにもある。殺菌用途に用いられる深紫外線LEDの波長は一般に280ナノ(10億分の1)メートルであるのに対し、三宅方式の深紫外LEDから放たれる深紫外線の波長は

用の水処理装置の開発である。いずれも、深紫外LEDの社会実装には必要不可欠だ。

深紫外LEDを組み込んだ水処理装置で安全な水を提供する場としては、カンボジアを選んだ。農村部に限れば、安全な水を口にできる人が人口の2割に満たないという深刻なデータさえある。

幸い、三重大学には人の縁もあった。三重大学の卒業生であるプノンペン王立大学のロイ・レスミー教

図4 プロジェクトの運営体制図(2021年度時点)

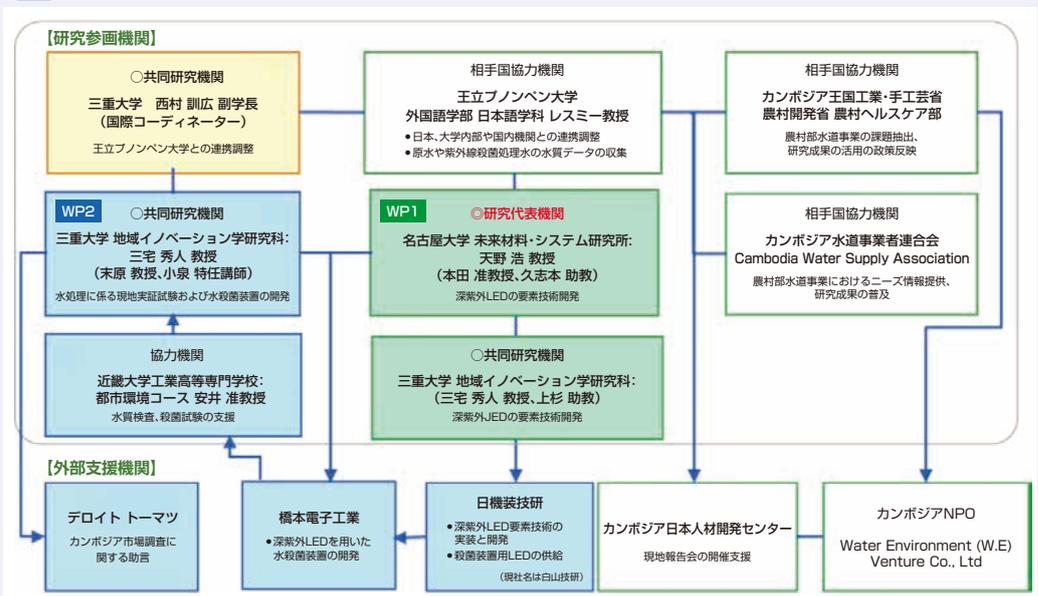
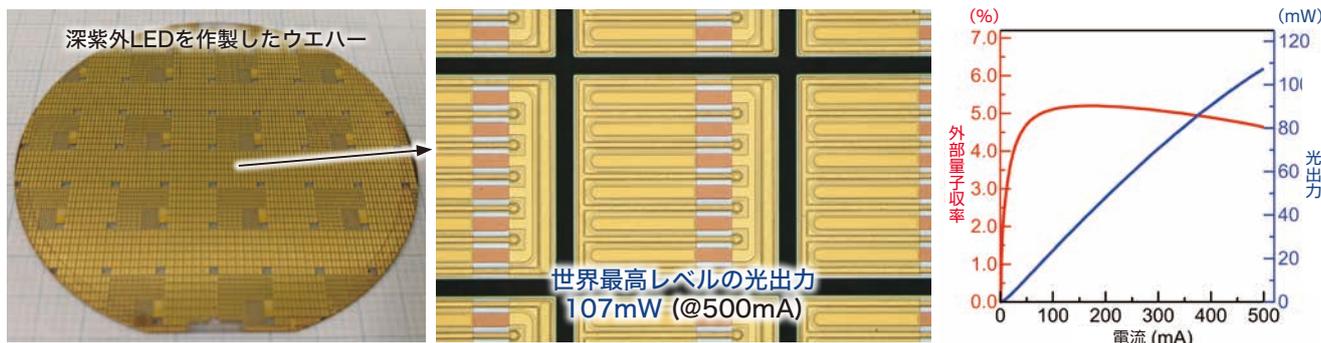


図5 三宅方式で試作した深紫外LED素子



深紫外LEDが作り込まれた直径50ミリメートルのウェハー(左)とその中の大きさが1ミリメートル角のチップ(中央)。21年12月時点で、1チップあたり世界最高レベルの出力を実現した(右)。赤線は電流に対する外部量子効率で、最高値は5.2パーセントである。青線は電流に対する光出力で、500ミリアンペアで107ミリワットの光出力を達成した。

教授が、帰国後も三重大学の地域イノベーション学に関する国際ワークショップを通じ、プロジェクト国際コーディネーターの西村訓弘教授や三宅さんと交流を持っていた。このネットワークを生かし、農村部でのヘルスケア行政をつかさどる省庁や水道事業者の業界団体とも協力関係を結ぶことができた。

また、民間企業の支援も受けている。1つは、深紫外LEDの量産化にすでに乗り出しており、天野さんの指導を仰ぎ、深紫外LEDの実用化に向けた開発を手掛ける企業である日機装(現社名は白山技研)。もう1つは、三重県に本社を置き、水処理装置の開発には欠かせない技術を持つ機器メーカーの橋本電子工業だ。三宅さんたちは産学、そして国境を越えた運営体制の下、研究を推し進めていった(図4)。

下地基板の両面にナノ構造を試作 世界最高水準の外部量子効率達成

深紫外LEDの要素技術の開発では、波長265ナノメートルの深紫外線を放つ深紫外LEDとして、21年12月時点の世界最高水準となる外部量子効率5.2パーセントを達成した(図5)。外部量子効率とは、発光層に注入する電子数に対して外部に放射する光子数の割合で、出力効率を示す数値ともいえる。200×300マイクロ(100万分の1)メートルの小

チップでは、8.0パーセントを達成しており、光取り出しの向上により、さらなる出力向上に大きな期待が持てる。

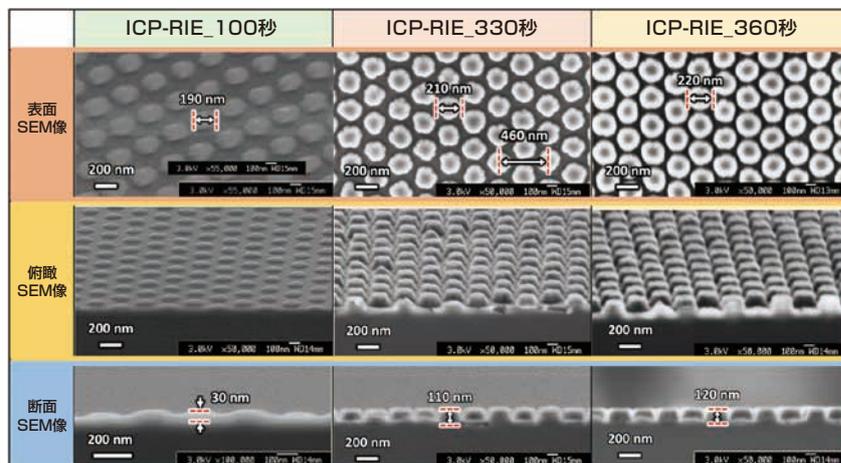
成功をたぐり寄せるために三宅さんが取り組んだ要素技術の1つは、サファイア基板の両面に紫外線の波長と同じナノメートル単位の凹凸を持つ微細なナノ構造を作製することだ。「下地基板の表面にナノ構造を取り入れると、そこがフラットな場合には反射してしまい外に出て来なかった深紫外線を外に引き出せるようになり、光取り出し効率を上げられるのです」と説明する。

ただ、ナノ構造を採用する場合、凹凸をどのような大きさや間隔で配置すれば、光取り出し効率を上げられる

のかはわからない。また微細加工に用いるナノインプリント技術の加工精度も考慮する必要がある。「条件を見直しながらシミュレーションを重ねました」と、三宅さんは語る(図6)。

もう1つの研究課題である水処理に関する実証実験と殺菌用の水処理装置の開発については、研究内容を見直さざるを得なかった。研究開始とほぼ同時に、新型コロナウイルス感染症が世界中に拡大したためだ。「日本、カンボジアの行き来ができないだけでなく、カンボジアでは大学にも入れない時期が続きました。現地に水質調査を頼もうにも、ロックダウンで活動自体ができない状態です。研究の支援期間は限られているのに見通しが立たず、とても戸惑いました」

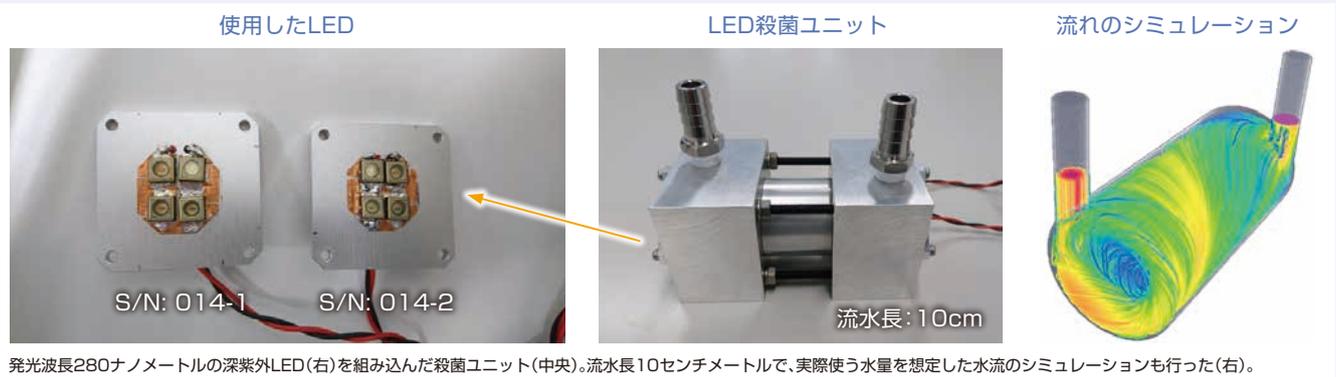
図6 下地基板へ採用したナノ構造



ICP: 誘導結合プラズマ、RIE: 反応性イオンエッチング、SEM: 走査電子顕微鏡

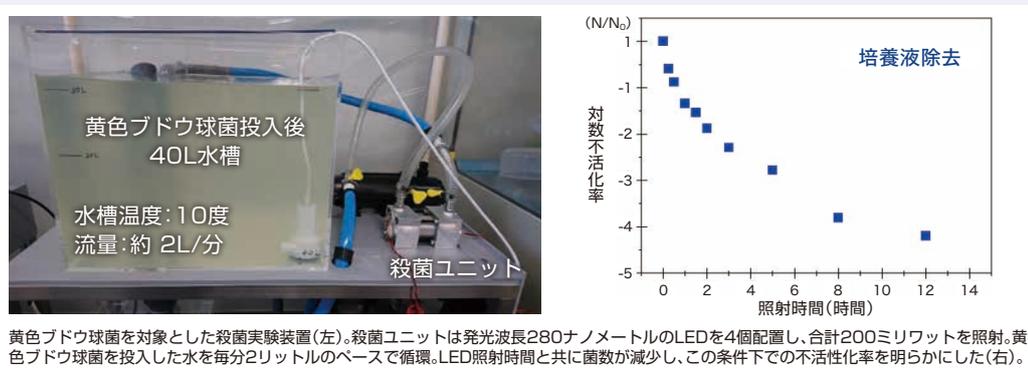
深紫外LEDの高出力化に向けた要素技術開発の中で、ICP-RIE_330秒が最もパターン形状が残る最適条件だとわかった。試作を重ね、周期460ナノメートル(nm)、幅210nm、高さが110nmの均一な裏面ナノ構造を作製した。

図7 深紫外LEDを用いた水の殺菌ユニット



発光波長280ナノメートルの深紫外LED(右)を組み込んだ殺菌ユニット(中央)。流水長10センチメートルで、実際使う水量を想定した水流のシミュレーションも行った(右)。

図8 LED照射による菌数の時間依存性



黄色ブドウ球菌を対象とした殺菌実験装置(左)。殺菌ユニットは発光波長280ナノメートルのLEDを4個配置し、合計200ミリワットを照射。黄色ブドウ球菌を投入した水を毎分2リットルのペースで循環。LED照射時間と共に菌数が減少し、この条件下での不活性化率を明らかにした(右)。

の良くない地域でも水処理が可能だ。

「レスミーさんをはじめとしてカンボジアの研究パートナーたちに、深紫外LEDで殺菌した安全な水を提供するという目標が実現できそうです」と自信を見せる三宅さん。今後は現地にも

と三宅さんは当時を振り返る。

当初の計画を見直し、深紫外LEDを用いた水の殺菌能力の検証作業は国内で実施し、殺菌用の水処理装置は設計検討で終える計画に改めた。現地の水に含まれる菌類の分析結果を参考に、現地に多い大腸菌と病原性の強さから黄色ブドウ球菌の2種類を殺菌対象とした。この菌をターゲットにすることで、カンボジアの水に潜む他の菌への殺菌能力も適切に見極められると考えたのだ。

濁った水でも殺菌力を検証 低電力・高効率な間欠照射

検証作業ではまず、流水経路の長さが10センチメートルの殺菌ユニットを試作した(図7)。ユニット内では、要素技術の開発を重ねる中で集大成として製造した深紫外LEDからの光を水流に照射し、水中の菌を死滅させる。問題はユニット内に流す水が濁っている場合だった。濁っ

ていると深紫外線が透過せず、水全体の殺菌能力に支障をきたす。

そこで、深紫外LEDの向かいに受光素子を配置し、深紫外線が十分に透過しているか否かを計測できるようにしたのである。実は深紫外LEDを用いた水処理装置そのものは、すでに製品化が進んでいる。しかし、三宅さんは「これくらい濁った水には、深紫外LEDを何秒間照射すれば殺菌できる、といったデータが不明な装置が多々あります。私たちの殺菌ユニットでは、そこも科学的に検証しています」と話す。

検証の結果、深紫外LEDで効率よく殺菌できることが見込めると確認できた(図8)。加えてユニークな結果も得られた。大腸菌への深紫外線の照射の仕方だ。大腸菌は、増殖を止める定常期に深紫外線への耐性を持つ。そのため、殺菌と休止を交互に繰り返す間欠照射が効果的であることが明らかになった。間欠的照射は電力消費も少なく済むため、電力事情

主体的な動きが生まれていくことを期待しているという。「私たちにできることは限られています。カンボジアに安全な水の提供を目指す拠点が生み出し、次の国際共同研究に取り組むことができれば、社会実装に向けた動きにますます広がりが生まれるでしょう」。

三宅さんが半導体研究の道を歩み始めたのは、およそ40年前。当時、半導体産業は日本の花形産業だった。ところが今、日本の半導体産業には見る影もない。往時を知る三宅さんは、そこにもどかしさも抱いている。「日本の科学技術力は世界の中でもまだまだ評価に値するレベルにもかかわらず、日本の半導体産業はいま苦戦を強いられています。大学の研究者は社会をもっと意識し、課題解決に貢献できる研究に取り組むべきです」と意気込む。日本が科学技術力で世界をリードし、かつての存在感を取り戻す未来を三宅さんは見据えている。

(TEXT: 茂木俊輔、PHOTO: 石原秀樹)