

天野 浩氏

ノーベル物理学賞受賞(2014年)
名古屋大学教授

あまの・ひろし

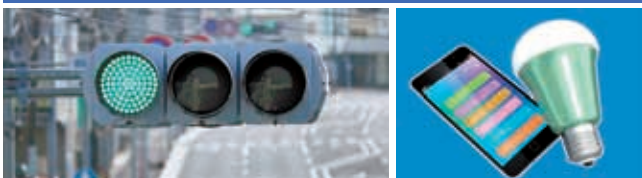
静岡県生まれ。1983年名古屋大学工学部電子工学科卒業、同大学院工学研究科博士課程後期課程単位修得(工学博士)。名古屋大学工学部助手、名城大学理工学部講師、助教授、教授を経て名古屋大学教授に就任。名古屋大学赤崎記念研究センター長も務める。米国IEEE/LEOSエンジニアリングアチーブメント賞(1996年)、英国ランク賞(98年)、文化勲章(2014年)、ノーベル物理学賞(14年)を受賞。近著『天野先生の「青色LEDの世界」』(講談社ブルーバックス)



青色LED (Light Emitting Diode) とは

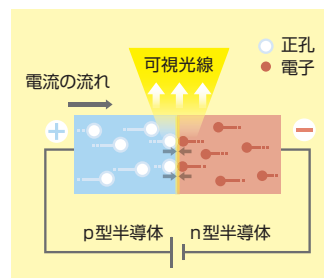
青色発光ダイオード。2個の電極に電気を流すと青色に発光する半導体素子。電気を直接光に変えるためエネルギーの変換効率が高い。青色が開発されたことで、先行していた赤・緑と合わせて光の三原色が揃い、LEDですべての色彩を表現できるようになった。実用化された高輝度青色LEDは、その後開発された白色LEDとともに照明機器のほか、交通信号機、薄型テレビやスマートフォンのバックライトなどに使われている。

LEDの商品例



長崎・ハウステンボス「花と光の王国(2016年4月18日まで)」 ©ハウステンボス/J-16877

LEDの発光原理



LEDは、電子が余っているn(negative)型半導体と、電子が足りないp(positive)型半導体を接合し、一方へ電流が流れるようにしたダイオード。p型半導体からn型半導体へ電流が流れると、電子がp型半導体内の正孔(ホール)と結合してエネルギーが発生し発光する。

LEDの特徴(照明の場合)

- 省エネ
- 高い発光効率
- 長寿命
- 小形・薄形
- 赤外線・紫外線をほとんど含まない
- 低温で発光効率が低下しない
- 環境に有害な物質を含まない
- 衝撃・振動に強い
- 調色・調光・点滅が自在



宮坂 明博

新日鉄住金(株) 代表取締役副社長



世の中を変える信念を持ち、あきらめずに成功を目指す

ディスプレイやスマートフォン、照明機器などの豊かな色彩表現を可能にし、私たちの暮らしに大きな変化をもたらした青色LED。2014年、多くの半導体工学者の夢だったこの技術の開発・実用化を実現した日本人3人がノーベル物理学賞を受賞した。今回の技術対談は、そのなかの一人で、実用化に向けた基盤技術の開発に貢献した名古屋大学教授の天野浩氏を訪問し、青色LED開発・実用化の経緯や研究者としての信念、今後の目標、次代を担う若い技術者へのメッセージを伺った。

世の中に役立つ価値が評価された 2014年のノーベル物理学賞

宮坂 改めましてノーベル物理学賞受賞、誠にありがとうございます。最近では、世の中に役立つことが授賞理由として重視されると言われており、これまで理学系のテーマが多かった物理学賞において、製品開発・実用化の実績が高く評価されたことはまさにその好例だと思います。昨年一緒に受賞された赤崎勇氏(名城大学終身教授)、中村修二氏(カリフォルニア大学サンタバーバラ校教授)も含め3人とも工学博士であり、それも日本人では初の快挙です。世の中に役立つもののづくりを目指して工学を専攻した技術者が多い当社社員にとって、大変勇気付けられる出来事でした。

天野 確かにこれまでは加速器研究など理学系のビッグサイエンスの受賞が多かったので、今回の受賞は大変驚きました。私自身、高校時代は数学など理学系の分野に興味がありましたが、大学の工学部に入學したばかりの工学序論の授業で、「工学の「工」の字は「一(ひと)」と「工(く)」をつなぐもの」という話を聞き、工学の意義や社会における必要性を学びました。勉強として数学は楽しいものの、何のためにやるのが見えなかったなかでバツと明かりが灯った、未来が見えた瞬間でした。受賞後の反響の大きさなどを見る限り、社会に対するインパクトがあったのかなと思いますし、それは大変うれしいことです。



© SCANPIX/時事通信フォト



© EPA＝時事



授賞式（2014年12月10日）を挟むノーベルウィークは、記念講演や現地の学生との交流、ノーベル財団主催のさまざまな行事に出席。ご本人は「夢のような1週間だった」と語る。

先人の研究成果をもとに仮説を立て、地道に実験を繰り返す

宮坂 受賞からの約1年、マスコミからの取材も含めて大変お忙しい時期を過ごされたかと思いますが、振り返られていかがですか。

天野 日中の省エネフォーラムなど環境技術に関する講演の場でさまざまな方と意見交換する機会を得て大変有意義でした。また今年は夏にかけて、普段はあまり対話することがない中高生など、若い世代の人たちと話す場にも恵まれました。皆さん大変素直で、私が普段意識していない思いがけない質問などもあり、それを聞くのが楽しかったですね。

宮坂 青色LEDの開発ストーリーについては、これまでさまざまなところで話されています。その研究開発の歴史は長く、多くの研究者が取り組んできましたが、素材である窒化ガリウム（窒素とガリウムの化合物、以下のGaNの結晶化をはじめ、実用化への道は大変に険しかったと伺っています。

天野 GaNの研究は1937年に始まり、59年にドイツで発光素子としての可能性が見出されました。71年にはアメリカでLEDがつくられたものの、エネルギー変換効率が悪く実用化できなかった。それを引き継いで地道に研究を続けてこられたのが赤崎勇先生です。当初の研究の場であった松下電器産業（現パナソニック（株））が開発を中止したあと、名古屋大学に移られて研究を継続されました。私は大学4年（82年）のとき、パソコンのディスプレイを青色LEDで薄型にして世の中を変えたいという思いで、先生の研究室の門を叩きました。

宮坂 そして85年、「低温バッファ層技術※1」によって青色LEDのもとであるGaN単結晶の開発に成功されました。改めて、成功につながったブレイクスルーについてお聞かせいただけますか。

天野 ブレイクスルーには、①均一で高品質な結晶をつくる、②輝度の高いプラスの電極を持つp型半導体にする、そして③きれいな青色を強く発光させるために必要なインジウム（In）を混ぜたInGaNの結晶をつくるという3つの技術が必要でした。

きれいな結晶については、従来の職人芸による結晶成長方法ではなく、定量的かつ緻密に実験できるMOVPE（有機金属化合物気相成長）※2装置の導入が大きかった。研究費用が300万円しかなかったので市販の装置はとても買えず、実験装置を学生だけで自作して結晶成長に取り組みました。その過程では、日本で初めてゲルマニウムのトランジスタラジオをつくった有住徹弥先生など半導体研究の先人たちの結晶成長法の見識が役立ち、きれいな結晶成長に成功した低温バッファ層技術も研究室の講師のお話がヒントとなりました。

※1 低温バッファ層技術：基板（サファイア）と生成する結晶（GaN）の間に、両者の原子配列の違いなどが及ぼす影響を和らげる緩衝層を比較的低温で形成させ、結晶生成時に生じるひずみを減らす技術。



自製のMOVPE装置による赤崎研究室での研究風景

宮坂 インタビュー記事などで、炉の調子が悪くた

またま温度が上がらない結果として低温バッファ層技術が生まれた、とする記述を読みました。本当にたまたまなのか、ある程度結果を予測された上のことだったのか、技術者としても興味があります。実際のところはどうかだったのでしょうか。

天野 自分と同年齢ぐらいの古い炉で、いくら頑張っても1000℃以上にならないこともありましたが、バッファとして中間に敷く窒化アルミニウム(AlN)は高い温度では基板上に付かないという認識がありました。さらに、当時講師だった先生のお話として、緩衝材をちょっとだけ先に流しておくことと結晶化しやすいという先人の研究事例もありました。そのことを思い出したのは偶然ですが、頭の中ではきちんとストーリーを考えていました。すでに1500回以上も失敗していたので今回も

だめかなと思いつつも、もしかしたらと期待して実験したところ、GaNの結晶がきれいに成長していました。それを顕微鏡で確認したときはとてもうれしかったですね。

さまざまな実例・現物を検証し、本物を見抜く力を養う

宮坂 膨大な数の実験や先人の実験結果のリサーチなどご自身の努力に加えて、GaNのきれいな結晶をつくるという、誰も成し得なかったことをやり遂げた要因や背景は何だとお考えですか。

天野 赤崎研究室だったからこそできたと思います。そもそも青色LEDの研究はセレン化亜鉛(ZnSe)や炭化けい素(SiC)が主流だった世界において、タフ

なGaNこそが最大の候補と信じて研究を続けてこられた赤崎先生の信念の賜物でもあります。

そのなかで赤崎先生が松下電器産業時代につくったGaNの結晶や、アメリカで最初につくられたLEDなどを実際に顕微鏡で見せてもらいました。全体としてはぼろぼろ、細かくかつ欠陥だらけの結晶のなかに、ごく部分的で微小ではありますがひび割れも孔もない、透明で平らなGaNの完璧な単結晶があるのを見て、目指す単結晶の姿が見えました。常にそのイメージを頭に描いて実験できたことが大きかったですね。赤崎研究室には、そうしたサンプルを実際に目で見て感じ、それをベースに考える環境があり、恵まれていたと思います。

宮坂 単結晶はこうであるはずだという、本来あるべき姿を見抜く力を身に付けられたわけですね。その後成功したp型半導体の開発は、亜鉛添加で実験されてなかなかうまくいかなかったとき、先人の研究をヒントにマグネシウム(Mg)を採用されたことがきっかけだったと伺いました。

天野 亜鉛添加のGaNは電子線を照射すると発光が強くなるという事実(低加速電子線照射効果)ですが、たまたまインタナシッブに行っていた先でGaAs(砒化ガリウム)のカソードルミネッセンス※3を測るといふ仕事のなかで、2週間のうち1・9週間というか、ほとんどずっとGaAsの仕事をして、1日だけ私の亜鉛添加のGaNの結晶を測る時間をいただいた。それで一生懸命測っていたら、どんどん青色発光が強くなるのでびっくりしました。こうして事実であることを確認し、論文にしようとしたら、すでにモスクワ大学の方がロシア語で発表していたことがわかり、とてもがっかりしました。ドクターを取るのに必要な3本目

※2 MOVPE:有機金属化合物の蒸気を基板上に吹きかけ、結晶方位のそろった単結晶の薄膜を成長させる方法。

※3 カソードルミネッセンス:電子線を当ててエネルギーを与えたときに物質が発光する現象。テレビのブラウン管もその一例。

の論文を書くことができなかったのですが、助手にしていたきました。

その後試行錯誤していた時期に、文献を読んで着目したのがMgでした。Mgで上手くP型半導体をつくることができ、さらにP-n接合で青色LEDを世界で初めて開発できました。ただ、最初につくったのは暗かったので、赤崎先生に「できた、できた」と見せたら、どこができたって(笑)。その後も頑張つて電子線照射量を調整して明るいLEDがようやくできました。

宮坂 天野先生は何度実験して失敗してもめげずに繰り返し挑戦されたことが多くの記事に書かれています。Mgのときはいかがでしたですか。

天野 まずMg原料を買うのが大変でした。Mg有機化合物は25グラムで50万円もするとても高価な原料で、自分の研究費では払えず赤崎先生に買っていたいただきました。電子線照射装置(WDX)も名古屋大学にはなかったため、86年から共同開発を始めていた民間企業(豊田合成(株))に1時間以上かけて原付バイクでサンプルを運んで実験し、電子線の照射条件を繰り返し調整してようやく明るいLEDができました。亜鉛添加から始めてMgで成功するまで、たぶん3000回以上は実験したと思います。

宮坂 世界で初めてP型青色LEDを発表された1989年、NTTがきれいな青色に発色するInGaN結晶化の技術を開発。1992年には、昨年共にノーベル物理学賞を取った中村修二氏が電子線照射ではなく熱処理によるP型半導体を開発して、その後の量産化に大きく拍車をかけました。多くの研究者の努力が融合して実を結び、花開いた技術と言えますね。

見て現象を理解することから 技術開発は始まる

宮坂 青色LEDの開発・実用化の流れをお伺いして、材料開発は「材料をよく見る」こと、経過も含めて実験結果としての「現象をよく見る」ことが重要だと改めて感じます。見ることによって発見もあり、新たなアイデアも浮かびます。

天野 結晶をつくるときの基本は、顕微鏡で見ることです。見てきれいで欠陥のない結晶ができれば一段落ですが、実際にはいろいろなことが起きる。なぜそれが起きるのかを考え、その仮説をもとに実験条件を変えて再び見る。そのプロセスが楽しいですね。

宮坂 現象を見るときに、何が起きているのか、そして条件や時間による変化を見逃さないことが重要です。鉄鋼材料は半導体材料など単結晶の対極に在る材料で、合金元素や金属組織も多種多様なため、無限の組み合わせがあります。これだけ社会に浸透した今でも、まだまだ発展する大きな可能性を秘めた材料です。メタラジの大家であり、当社の顧問をされた京都大学名誉教授の牧正志先生がよく「金属組織をよく見て、鉄と対話なさい」と言われました。実験の条件や手法の改善による変化を通して鉄が何かを語りかけてくる、それを見逃さないことが大切です。これはどの分野にも共通する技術開発の基本姿勢だと思います。

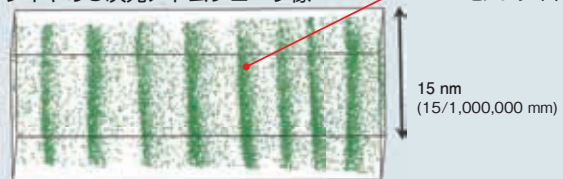
天野 私もそう思います。鉄鋼材料開発も、結晶や新たなデバイスをつくる半導体開発のプロセスに似ています。結晶をじっくり見て、何が起きているのかを考え、改善するための方法や条件を一

① ワイヤの透過電子顕微鏡写真



セメンタイトとフェライト2相でできた層の幅が均一かつ細くなると強度が高まる。

② ワイヤの3次元アトムプローブ像



①よりも層の幅が狭まり、原子レベルでもセメンタイトが規則正しく並んでいて、①の2倍の強度を発現する。

(1) 強度の異なる2つの高強度線材の分析(例)

M文字に光る青色LED。電子線照射した部分がP型化して明るく光っている。



※4 1ナノメートル(nm)=1/1,000マイクロメートル(μm)=1/1,000,000ミリメートル(mm)

※5 TRIP鋼: 軟らかい組織と硬い組織が複合して、プレス成形時は加工しやすく、衝突時には強くなる特性を持つ。

一つ試していくだけでも多くの実験が必要です。

宮坂 製鉄所では広大な敷地で鉄づくりを行っており、一見巨大で大雑把なイメージがありますが、トン単位のものづくりをナノ^{※6}レベルの鉄鋼組織制御で実現しています。最も強度の高い材料であるワイヤは引張り強さが炭素繊維と同等の4000MPaであり、10nmレベルで軟らかい組織と硬い組織の配列を制御して硬くて粘り強い材質をつくり込んでいます。また、自動車用ハイテン材料であるTRIP鋼^{※7}は、軟らかい組織と硬い組織が複雑に配置された構造をとり、衝突時に大きな強度を発現します。このような組織制御を実現する上で、当社で開発した3次元アトムプローブ^{※6}や電子顕微鏡を用いた原子レベルの観察技術が大変重要な役割を担いました。

省エネなどの社会貢献を目指し、 応用技術の開発に挑み続ける

宮坂 先生は、大きな省エネ効果を生む青色LEDのように「社会貢献につながるもの」を研究の目的として明確化されています。GaNやLEDの応用技術開発などを含めた今後の研究開発テーマについてお聞かせください。

天野 GaNには、バックライトや照明だけでなく、レーザー、紫外線、トランジスタ、太陽電池など、社会貢献につながる多彩な要素技術と応用分野があります。特に波長の短い紫外光は水の除菌など、身近な生活での利用が期待されます。現在、中央アフリカや南アジアでは、井戸水に細菌や砒素などが含まれる地域が多く、世界で6億6000万

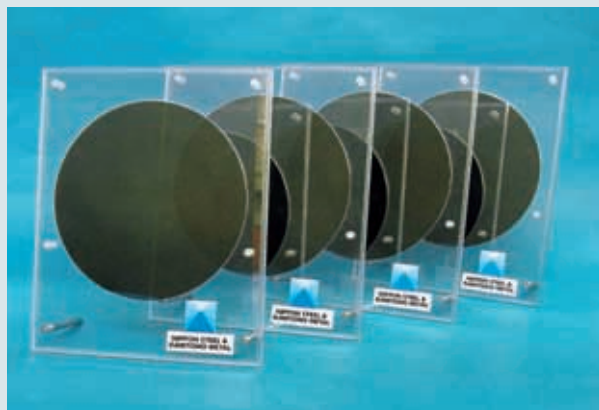
人の人々がきれいな水を飲めません。そうした汚染水に紫外線を当てると、殺菌はもちろん砒素を無害化できるそうです。

宮坂 社会貢献という点では、私たち鉄鋼業もエネルギー多消費型産業でありながら、省エネを極限まで追求しています。日本鉄鋼業のエネルギー効率（生産エネルギー/原単位）は世界一です。現在は鉄鋼製品をつくる工程での省エネ・CO₂削減を実現するエコプロセスと、材料開発を通して自動車など最終製品の省エネに貢献するエコプロダクツ[®]、そして培った省エネ・CO₂削減技術を外に提供し、グローバルな観点から環境保全に役立てるエコソリューションの3つの取り組みで、微力ながら貢献しています。

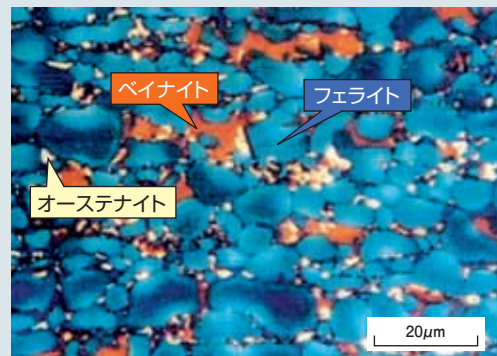
電力損失を低減する今後の省エネ技術としてGaNのパワーデバイス^{※7}も有望視されています。当社が開発しているSiC基板を用いたパワーデバイスも省エネデバイスですが、欠陥を抑えながらいかに大口径の結晶をつくるかに技術的な挑戦があります。GaNとSiCそれぞれの特徴による用途のすみ分けも含め、先生ご自身はパワーデバイスの将来をどのようにお考えですか。

天野 GaNのパワーデバイスでは、LEDでは問題にならない結晶欠陥が、故障などの信頼性を左右します。シリコン(Si)やSiCなど先行している技術から学び、ノウハウを蓄積することが重要だと考えています。電力変換容量が大きく高い電圧でも動作するSiCは、送電システムや電車、産業用モーターなど高出力・高耐圧向けが主流で、高い周波数で動作でき、スイッチング特性が高いGaNは周波数に応じて機器を小さくできることから、IT・電子機器を中心に身近なところで応用

新日鉄住金が開発したパワーデバイス用SiC基板



ナノレベルで制御してトン単位でつくり込む鉄鋼研究事例



(2) 自動車用低合金TRIP鋼の顕微鏡写真

※6 3次元アトムプローブ：観察対象の構成原子を1個ずつ分離測定し、その原子の種類と存在位置を調べる分析装置。

※7 パワーデバイス：インバータなどの電力機器に用いられる半導体素子。電気自動車、ハイブリッドカー、エアコンなどのインバータ制御や各種汎用モーターに不可欠な電子部品。

されていくのではないかと見ています。例えば、パソコンのACアダプタを小型化、極端に言えばチップ化してパソコンに内蔵することも可能だと考えています。また、GaNはSi上にも付けられるので、将来的にはGaNとSiの組み合わせで従来はなかった集積回路の開発も可能だと思っています。

理科教育のあり方と 産官学連携の重要性

宮坂 そうした新たな技術を生み出す原動力は人材ですが、近年は若い人の理科離れ、理工系離れが懸念されています。今の小学校以降の理科教育では自ら体感して発見・理解する「実験」の機会が減っていると思います。理科は自ら試して、失敗しながら経験を重ねていくことが重要だと思います。その点はいかがですか。

天野 私自身を振り返ってみると、年号を覚える歴史など、単純に記憶する勉強が自分には合いませんでした。日本史を学ぶときも、その時々欧米の出来事などとあわせて横のつながりを見て、世界のなかの日本の立場や位置付けを考え、理解することができれば興味が持てたはずで、理科教育も記憶だけにならないための教え方が重要ですね。

宮坂 おっしゃるとおりで、理科教育は自分で考えることが大事で、実験もそうですが、もともと物事、現象に興味を持たせて考えさせる教育をしてほしいと思います。また、先生は日本のドクター教育の充実の必要性についても言及されています。最近ではドクターに進む人が増えていると思いますが、その点はどのように見ておられますか。

天野 現在、私の研究室にいる7〜8人のドクターのうち日本人は一人だけで、あとは中国、韓国、アルジェリア、ギニアの学生やポスドクです。特にアジアの学生のモチベーションは明確で、見識と視野を広げ国に帰って希望する企業や研究所に入る事が目標です。日本もドクター課程修了後の進路、活躍の場を視野に入れた教育のあり方を考えるべきだと思います。目の前の研究課題しか見えない蛸壺に陥らせないように、さまざまな課題に対して前向きに挑戦できる環境をつくらなければなりません。学生の経済的負担を軽減する点からも、人材の価値を企業の方々に認めてもらえるような基盤づくりが必要です。

宮坂 当社はポスドク研究員制度を設けています。我々の研究テーマと専門分野が合致した博士号取得者を嘱託として3年間採用し、期間中の成果や双方の意向を踏まえて正社員に採用するものです。期間満了後に大学に戻れた方もいますが、多くは正社員になり、現在までに30人近い採用実績があります。彼らの存在は社内研究者に対しても大変良い刺激を与えています。

天野 一定期間社会人としての経験を積み、ものづくり企業で腰を据えて新たな道を切り拓く。素晴らしいことですね。今後ますます広がっていただきたいと思っています。

宮坂 また、先生が青色LEDを民間企業と共同で実用化されたように、新しい技術を世の中に出して社会貢献するためには、企業と大学の連携が重要です。青色LEDは早いタイミングで国の援助も得られるなど、実用化に向けた産官学連携の仕組みがうまくいった理想的なケースだと思います。
天野 名古屋大学で開発した青色LEDの発表を

豊田合成の方が見られて、ぜひやりたいと熱心に言われ、その1年後にはJST(国立研究開発法人科学技術振興機構)のサポートも得られました。当時、20世紀中に青色LEDの実用化は不可能と言われていたなかで、援助に踏み切ったJSTの方の先見の明があったと思います。

次の時代をつくる気概と夢を 若い世代につなぐ

宮坂 学生への指導を含め、先生の研究者、教育者としての今後の目標をお聞かせください。

天野 一番の目標は、研究を若い世代にバトンタッチすることです。例えば、パワーデバイス、紫外線や可視光のデバイス、赤・緑・青色を組み合わせた多波長による大容量光通信など、新たな活用領域を若い世代に切り拓いてもらいたいと思います。

宮坂 若い世代を牽引するにはリーダー、上司としての資質も問われます。天野先生にとつて共同で研究開発を進められた赤崎先生は、リーダーとしてどのような存在だったのですか。また、ゆとり世代と言われる今の若者の指導において、天野先生は何を心がけていらっしゃいますか。

天野 青色LEDの開発という道程を示し導いてくださったのが赤崎先生です。先生は生涯をかけてLEDの開発に取り組まれており、最初のLEDがアメリカで商品化された1962年当時、先生も松下電器産業で赤色・緑色LEDを開発されていた。私にとつてはまさに「生き字引」のような存在です。先生からはふだん細かい指示はありませんが、重要な場面での確かな指摘、ご指導をいただいでい



名古屋大学東山キャンパスのシンボルである豊田講堂前で。



2001年11月、豊田講堂屋上部の時計台に青色LEDが採用された。

ます。「実際に現場でやっている人間が一番よく知っているんだから」とよくおっしゃっていました。学生を信頼し任せる指導法も、自由闊達と言われる名古屋大学の伝統だと聞いていますが、私自身も、設定した開発テーマに対して、学生が自分でやりたいと興味を持ってくれたら、できるだけ彼らに任せるようにしています。

宮坂 細かく指示すると結果は早く出るものの、言われたことしかやらない研究者になり、育たない。かといって完全に任せてしまいうけにもいきません。企業の技術開発ではそのバランスが非常に難しい

ところですよ。

天野 企業は大学とは違い、まず収益を上げないと成り立たないので経営判断が難しいですね。その点、大学は少し余裕を持って専門教育ができるぶん、その環境を有意義に活かせる人、勉強や研究にのめり込める人でないとダメです。江崎玲於奈先生が「人間の創造力と分別力は歳とともに変わる。創造力は20歳で最大、70歳でゼロに。分別力は20歳がゼロで70歳には最大になる」と言われました。私は今55歳ですが、若い人たちの創造力をできるだけ活かしてあげたいと思います。若い人たちが自分自身で感じ目指すことを最大限にサポートしていきたいですね。

宮坂 最後に、当社に限らず、日本の若い研究者や技術者にアドバイス、激励のメッセージをいただければ幸いです。

天野 次の時代をつくるのは自分たちだという意識を強く持つてもらいたいです。まずは、いろいろなことに興味を持つことです。私自身も大学1年から3年まで、自分の感性のアンテナを張り情報を取り入れて、何をやるべきかを考えました。そういう目で世界を見ると、自分のやるべきこと、自分しかできないことが必ず見つかるはずです。それをぜひ見つけて自分の人生を築いてほしいと思います。

宮坂 当社も、次の時代を自らつくる気概のある若い研究者が明確な目標を持ち、社業を通じて社会貢献を果たす場として、研究・技術開発環境のさらなる充実に取り組みます。本日は工学者としての姿勢や研究環境のあるべき姿など、示唆に富むお話をいただきありがとうございました。

（本対談は、2015年8月26日に名古屋大学で行いました）