



デバイス応用をめざした 新材料・新物性研究の取り組み方

浅井 彰二郎*

1. はじめに

2014年ノーベル物理学賞に輝いた、赤崎 勇、天野 浩、中村修二の三氏による「青色発光ダイオード」は、科学技術的な意義ばかりか、社会的・経済的インパクトから見てももっとも成功した、「デバイス応用をめざした新材料・新物性の研究」の最好例です。日本の三研究者が基礎研究と製品事業化の両端を結ぶ偉大な業績を挙げ最高の栄誉に輝いたことをご同慶に思います。材料研究はまだまだ進歩するでしょうし、これに匹敵する成果を世に届けたいという志を抱く研究者・技術者、指導者が、金属学会会報「まてりあ」の読者の中に大勢いらっしゃることでしょう。またそれは、実現可能な夢である、と思います。

私は固体物性を専門とし、日立製作所、日立メディコ、リガクと、企業の技術畑に50年近く勤務しました。今や昔、1968年に大学院を出て日立の中央研究所に入った頃は、身の程も知らず「新しい物性を発見しそれを応用してデバイス開発新事業を拓く」と志していました。GaAs 高周波 FET, Si LSI 用 MOSFET の微細化、ツールとしてのデバイス動作シミュレーションや電子線描画技術の開発などに取り組みました。ノーベル賞にはとても及びませんが、多くの先輩や同僚のおかげで、いくらか社会の役に立つ仕事をする事ができたのを幸運と思っています。

そこへ思いがけず、本誌への執筆の機会をいただきました。浅慮を顧みず本題について述べ、読者、特に若手の研究者のお考えに供したいと思います。

2. 目標が大切

研究者、特にアカデミアに所属する方々には、それが美しいと考えるのか、まずは基礎科学の中で、知識体系への貢献をめざしてあるテーマを掘り下げる、という考えが多いようです。その場合、「研究の結果は学術論文に著わしたからそれでよい。私の論文に価値を見出す人がいたら、その人が応用してくれるだろう」という願望をもって研究を終えることが多いのではないのでしょうか。しかし、「こんなものが要る」という社会と時代の要請を知って研究すれば、基礎知識に止まらず有用な研究成果に至る確度が確実に高まります。またそこまで成功すれば大きな達成感が得られます。

昔は新しいデバイスの実現までに基礎研究から長い時間がかかりました。だから研究の出発点は知識の確立、原理の発見にあり、それが発明、概念実証、コスト確認を含めた製品化の長い過程を経て、ようやく実用化に至る、という理解が一般的であったと思われます。ところが実際には半導体デバイス、例えばトランジスタや半導体レーザなどの発明は、電気通信技術の進歩への強い要請があって、欧米の研究機関や大学が人材を集め、組織的に研究を推進したからこそ結果が出たのだと思います。冒頭に触れた青色発光ダイオードの研究も時代の要請に応えた基礎研究であった事は明白です。本題からちょっと外れますが、iPS 細胞の山中伸弥教授の研究目標は当初から「安全に使える幹細胞」であったと知り、すばらしい目標設定だと感銘を受けました。

注意すべきことは、社会的要請が出てから答えが出されるまでの時間がどんどん短くなっていることです。現在は、一方でありとあらゆる発見や発明が、一方で社会、産業、経済、人々のニーズとその充足に向けた提案や試みに関する情

* 株式会社リガク顧問(〒196-8666 昭島市松原町 3-9-12)
Research in New Materials and Material Properties—to Materialize in Innovative Electron Devices; Shojiro Asai(Rigaku Corporation, Akishima)
Keywords: *electron devices, materials, material properties, research goals, societal needs*
2015年 8月31日受理[doi:10.2320/materia.55.3]

報が、紙媒体よりはむしろインターネットで即時に報じられ、駆け巡っていますから、シーズがニーズに、ニーズがシーズに出会う可能性は格段に高まり、その所要時間も短くなっています。材料研究者といえども、その応用先としてどんなデバイスが求められているか、さらにその外側にはどんなシステムが作られようとしているのか、システム→デバイス→物性への外側からの要請を、感度を高めて知覚することが大切と思われます。つまり、「いつか役立つ物性の研究をする」ではなく、「必要とされているものに物性から答えを出す」態度が効果的なのです。

3. 目標に向けて突き進む。時折立ち止まって確かめる

だからと言って、研究をそっこのけにして、どこにどんなニーズがあるのかを嗅ぎまわってばかりいたら、それだけで時間がどんどん経って行きます。賢明な研究者は、自らのアイデアに集中没頭しつつも、時折立ち止まって、社会ニーズの発展方向と技術の発展方向が整合しているかどうか、また既存技術や競争技術に対する独自性、優位性かどうかを点検し確認しているようです。そうやって自分のアイデアを研ぎ澄まし、実データで実証することにより、研究の価値を高めていきます。そうした時期の研究者は、外から見ると頑固者に見えます。しかし結局は信念、むしろ執念が、研究を成功させるのだと思います。執念は成功の十分条件ではないが、必要条件であると言えるようです。

では、よい目標はどのようにすれば設定できるのでしょうか。「科学や社会の進歩はまっすぐではなく折れ曲がるように起こる」と言います。人間の努力は、単一の進路をとると必ず行き詰まるようです。そこに屈折点が生じます。その屈折点で、過去に一度考えられたが何かの理由で不可能と断念された応用目標、逆に挫折していた材料や方法、別の世界のブレークスルーなどが適用されたりすると、それまでの常識を覆す大変革が起きて新たな進歩が始まるものです。そういうきっかけが自分や周辺に起こったら、それは大きなヒントやチャンスになります。屈折点を知る、予測することが、優れた目標設定、独創的な手段を特定するよい方法と思われる。

しかし当初考えたアイデアやアプローチに狭くこだわるのが必ずしも賢明とは言えません。ニーズに起こるわずかな方向変化や、縦横の他分野に起きた顕著な進歩、他人がやっていること、などを見聞きして、自分の創造性、優位性、目的合一性を確かめながら進むのだと思います。「信念のある研究者は、自分の研究に没頭するから結果を出す。だから人のやっていることをあまり知らない方がよい」という見解もよく聞きます。しかし、良くできる人は、他人の研究もよく調べています。いろんなアプローチを比較検討しつつ、日々の努力の積み重ねから自分のアプローチの優位性に確信を深めて行くのです。

組織的研究の場合は、目標に向けて異なる複数のアプローチを比較検討し失敗のリスクを低くします。管理者は成功、不成功に責任を取るため何を選び何を捨てるか決めます。そ

のような場合、または研究資金に応募する場合、研究者は考えを売り込んで理解を求めねばなりません。その時キーとなるのは、たとえ小さな一歩でも、大きな方向に向けた進歩の証左を持っていることです。たゆまぬ努力で証左が積み上げられてくると、達成目標や競争相手との間合いも見えてきて、研究と目標(目標も多くの場合時間と共に少しずつずれて行く)の整合性が密になっていることが感じとられます。そうなる達成目標がさらに具体化し、目前にクローズアップされます。そして、いわばよい香りがしてくるようになり、周囲の理解も得られやすくなるものです。

4. これからのニーズは何か、そのために必要な物性、材料は何か

それでは、これからの社会や産業、生活で、いったいどんなデバイスが必要とされるのか、それらを実現するのにどんな物性、材料が必要かについて少し考えてみましょう。

これから伸びる産業は、情報通信、自動車、ロボット、エネルギー、医療、農業、インフラストラクチャーとその保全、宇宙、そしてこれらに必要な新デバイス産業、新材料産業でしょう。

情報通信は、ネットワーク技術の適用先が、通信そのものを目的としていた旧来の範疇を越えて広がるIoT(Internet of Things)の時代を迎え、様々な機器のスマート化・ネットワーク化とそれに伴うバンド幅要求を受けて、今までの目覚ましい発展をさらに越える大きな発展を遂げるでしょう。ここでは、機器のスマート化を実現するためのセンサやアクチュエータ、電気的エネルギーを機械的、熱(温度)的、化学的、光(電磁)エネルギーなどに変換する、またはその逆変換をするデバイスが重要になりそうです。電磁波と光の間にあるテラヘルツ波の利用も視野に入ります。コンピュータも、今のスーパーコンピュータ並みの計算力が掌にのる時代がやってきます。量子コンピューティングや量子暗号通信が不連続な進歩をもたらすと思われます。Si LSIは微細化の限界を迎えるので、原子的、分子的な新デバイス、新材料の研究に期待がかかります。LSIの実装技術にも3次元化、無線化、光接続などの技術革新が起きそうで楽しみです。

自動車でもスマート化・ネットワーク化が進み、自動運転が徐々に普及すると考えられます。こうなると自動車もロボットの一種ですが、家庭電器や工場や農場の生産力、医療・介護用機器、陸海空の輸送手段などがロボット化し、今世紀の最大の技術革新をもたらすでしょう。情報検索や情報分析、証券取引などもはやロボットと言ってよい仕組みで実行されているようです。

エネルギーについては、化石燃料の枯渇と地球温暖化に直面し、省エネルギー・高効率化技術、再生可能エネルギー技術が進みますが、加えて核融合の実用化が今世紀の最大の課題になるでしょう。こうしたエネルギー分野の展開のために新しいデバイス、材料が求められます。複合構造を持ち今までの単純な金属、非金属無機、有機材料では実現できない電

氣的/電磁的/磁氣的/機械的/熱的/化学的性質を示す新材料、各種センサや小さなエネルギー回生デバイスを内蔵スマート化・ネットワーク化された部品などの開発が進むと思われる。省エネルギーのために金属よりも軽量で機械的強度の高い構造材料カーボンファイバーで強化したプラスチック材料(CFRP)は航空機の主翼などに実用化されていますが、こうした材料にもさらに改良、進歩が起きます。水素吸蔵材料、燃料電池や2次電池の電極材料、化学反応の効率を高める新触媒が求められています。今まで用いられてきた遷移金属や希土類金属に代わりうる新材料が出てきそうです。注目すべき金属酸化物の最近の研究例として、東工大細野秀雄教授の鉄系高温超電導材料の研究があります⁽¹⁾。液体窒素温度よりも高い転移温度を持つ高温超電導材料は、磁気浮上輸送、核融合プラズマ閉じ込め、低損失直流送電などの応用を見ているが、銅酸化物系とは異なるアプローチであり、今後さらなる発展が期待されます。金属を含む有機錯体化合物⁽²⁾⁻⁽⁴⁾も自然に存在しない新しい材料で、触媒などの新機能を提供しようと、国内外で研究されています。

医療ではこれからも新しい医薬品や治療法が生み出され、激烈な伝染病や難病、生活習慣病などへの対抗手段が増えるでしょう。その過程で、新しい材料・デバイスを用いた生体反応の観察・可視化の方法が新たに開発され、遺伝子とその変異の病気との関係、それに人間の脳や神経の働きがさらに解明されるでしょう。東京大学の染谷隆夫教授の研究室で研究されている有機薄膜エレクトロニクスデバイスは、生体親和性や柔軟性が高く、生体装着による計測、検査、治療などに活用が期待されています⁽⁵⁾。農業でも医療と同様、バイオサイエンス、バイオテクノロジーの成果としてデバイス、材料、物性が生かされ、質と生産性の向上に貢献するに違いありません。

安全・環境モニターや通信高度化のための宇宙開発、土木建築、水道、交通などのインフラストラクチャーのスマート化、ネットワーク化、保全のためにも新しいデバイスや材料が開発されることでしょう。

また、適用対象が十分に特定されたか不明ですが、生体構造に学んだ、*bio-mimicking materials* という材料群がありますし、関連して自己組織化による材料合成法はバイオ・エンジニアリングやナノエレクトロニクス加工法として既に広く適用されています。

以上述べてきたことは、新しい材料、物性由来の大きなイノベーションの可能性を示すいくつかの例に過ぎません。このような、新材料によるイノベーションを幅広く狙った研究が、世界中で開始されています。アメリカでは、オバマ政権が始めた、「材料ゲノム計画(MGI)」⁽⁶⁾、「フレキシブル・ハイブリッド材料生産技術計画(FHMI)」⁽⁷⁾が走っており、日本でも内閣府 SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「革新的構造材料」⁽⁸⁾、新構造材料技術研究組合(ISMA—Innovative Structure Materials Association)⁽⁹⁾による研究開発が進行中です。いずれも巨大なプロジェクト研究であり、動向が注視されます。

5. 研究の手段について

前節では今後の社会、市場ニーズから求められるデバイス、そしてそのために必要となる材料について展望を述べました。続いて、その展望に向かうデバイス応用を目指した物性、材料の研究のために、どんな方法をとったらよいかについて考えてみましょう。

まずは目標となるデバイスに求められる機能、性能から、どのような材料特性、どのような物性上の特徴が有用であるかを推測し、有望な材料、有用な物性の候補について目星をつけることとなります。青色の波長における発光デバイスが求められて、バンドギャップから、GaNが候補になったことが一例です。しかしうまく行くと実証されるまでは候補材料と望まれる物性との関係は仮説です。前節で述べた複合材料やバイオ関係のマテリアルとなると、構造も機能もより複雑となるので、乗り越える障壁はより大きくなります。

そこで、研究上の手段を整えて仮説の実証に挑むことになります。まず、材料の作成と評価が決め手になります。材料の特性は純度や構造に敏感なことも多いので、材料の作成には古今東西の知識を用いて方法を選択し、なおかつ工夫することが必要です。さらに、材料を作成したら、それがどんな構造(元素構成を含み原子/分子/マクロレベルの構造)を取っているのか調べておくことは、物性・材料研究の鉄則です。そこで、電子線、X線、トンネル電流などを用いた構造同定により、客観的な物証の第一要件を確立します。次に、客観証拠の第二要件として、必要とされ着目する有用物性を求めて測定を行います。この時、直接的で有効な方法は、求められる機能をとにかく発揮するデバイスを試作してその特性(入力刺激と出力応答との関係)を測定することで。その外、第三証拠を提供するため、いくつかの関連する物性を測定すれば、目標地点への指針、距離感を与えてくれます。いずれの測定も、影響しうる因子(温度、電磁場、その他環境)をパラメータとして変化させつつ行う、たとえば電圧と電流などの物理量間の関係の測定です。

実測と合わせて有効なのが計算機シミュレーションです。原子や分子の既知の力学的原理またはモデルに基づいて、原子や分子の配置、巨視的な組織構造までを予測するシミュレーションが、コンピュータ技術の著しい進歩に助けられて、いまや「材料特性の設計ツール」の域に達しようとしています。また、デバイスの構造、材料情報、動作条件を与えて、特性を予測するデバイス・シミュレーションも目覚ましい発達を遂げています。こうした手段を駆使して、困難な要求に応えるデバイスを実現し、世の中に提供できたら、物性・材料研究者として冥利に尽きると言ってよいでしょう。

6. 特許は論文とならぶ、またはそれ以上の業績

新しい材料、物性を、新しいデバイスとして実現できたら、あるいはその見通しを立てられるエビデンスが得られた

ら、そこには発明として取り出せる概念が含まれているのであり、特許の種となります。研究者にとって、査読を受けた学術論文発表が、科学上の知識に貢献するオリジナルな研究成果として認められるものであり、最重要視される業績であることは言うまでもありません。しかし、発明を特許出願して受理されれば得られる知的財産権は、実用的、経済的な価値を持ち、学術論文とは異なる視点から、場合によっては論文にも劣らない業績、技術的貢献とみなされるものです。冒頭に触れた青色発光ダイオードにおいても、ノーベル賞受賞者による発明は大変重要なものがあり、高く評価されています。

以下、特許についてのヒントを少し記します。研究者は、原理的な事項を特許の請求項に記しておけば、強力な特許になると考えがちです。実は必ずしもそうではありません。発明は、オリジナルでなければ特許として認められないので、その点では論文と同じようなところがあります。しかし、原理発明が既に特許として権利化されていても、それを実現する上で避けて通れない構造、製法、用途などにつきオリジナルな考案があれば特許として認められることが多く、そちらの方が原理特許よりも権利としては長生きし、ゆえに効果が大きい場合が少なくありません。原理の用途が具体的に特定されて特許出願があり、新規な考案であると認められると、排他性の高い特許となります。ここが学術論文とは価値観の異なるところです。

ところが、折角よい発明をしても、競争相手に権利化で後れてしまうことは珍しくありません。同じことを考えている人が必ず世界のどこかにいるものです。したがって、良い評価を与えられた発明の権利化は急ぐのが得策です。特許は原理と応用を結ぶ通過地点につくる関所です。抜け道を許さない要所を抑える工夫が大切です。こうした工夫は、実際の課題、つまり応用をよく知ってこそ可能なもので、研究者は必ずしも自分で出願申請書の明細を書くことは得意ではありません。しかし、考案を得た場合には、所属組織の知財部門に連絡し、特許としての権利化につき相談してみることをおすすめします。最近の研究機関の知財部門が内外弁理士の助けを仲介、提供することも多くなっています。

7. 学会について

最後に、学会活動について記します。学会での発表は、他の研究者に自分の研究について伝える行為ですが、それは他の講演の聴講や質疑応答を通じ発表者にも跳ね返ります。自分が発表するからこそ得られるものも大きくなります。そのポジティブなフィードバックは、科学と技術の進歩にとっても、個々の研究者の成長にとっても必要不可欠なものです。

材料・物性の研究は、その上に属するデバイス・装置の階層を経由してシステム・アプリケーションに至るまで縦に並ぶ階層の構造(特に、上位階層ほど、ソフトウェアの重要性が増します)を全部通して始めて社会、経済に大きなインパクトを与えるため、その階層を通じた情報に接して研究の方

向性や目標を点検することの重要性は、既に述べたところで。さらに、最近では横の分野の融合(たとえば有機と無機)も進歩の源となっていますから、学会は分野間の縦横の情報交流をもっと盛んにするのがよいと思われます。

私はこれまで4つの学会に所属してきましたが、ここで米国に本拠のあるIEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)⁽¹⁾の活動に触れたいと思います。この学会は、40万人を超える大所帯で、電気、電子技術を中心に関連する広い分野をほぼ網羅していることが特徴です。核・プラズマ、電力・エネルギー、ロボティクス、宇宙航空、通信、コンピュータ、回路システム、車両、実装・製造、磁性、人工知能、コンピュータ、電子デバイス、フォトリソ、リモートセンシング、信頼性など、39分科会、6協議会をかかえ、電気電子分野をそっくりカバーしています。アメリカで会員数の増加が頭打ちになった1970年代から、国際的な会員確保にも力を入れています。

IEEEは、ここに至る過程で、1963年にはIRE (Institute of Radio Engineers)と、AIEE (American Institute of Electrical Engineers)を合併させ今の名称に統一し、その後も、新しく発展する分野に分科会活動を拡張してきたなど、一貫して特異性と総合性の両方を求めて組織の価値づくりをしています。また、規模の停滞や衰退は活動にも停滞衰退を招くと見なす考えがあり、会員数の成長も追及してきました。その結果、この大組織の活動を注視していれば、電気・電子システムの社会との関わり、市場と技術の新しい動向、技術階層間や異種技術間の縦横のインパクトなど、広範な情報が入ってきます。またIEEEはSTEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics)など、若者の教育、すなわち自らの再生産にもたいへん熱心で、こんなに面白いテーマが世の中にはあるよ、といろんなメディアを通じて発信しています。IEEEは例外的に大きな学会ですが、日本の諸学会は分化し過ぎていると感じています。したがって研究者の立場では、いくつかの学会にまたがって活動することをお勧めします。学会としてもより包括的な課題を取り上げ対応できるよう、複数の学会が連携して活動する、場合によっては合併も検討するのがよいのではないかとすら考えています。

8. 最後 に

本誌(まてりあ)に執筆の機会をいただき、たいへん光栄に思います。乏しい経験、見識を顧みず書き連ねた文を最後までお読み下さりありがとうございました。

本稿は、筆者が2014年10月に公益財団法人電磁材料研究所で行った講演をもとにしています。講演の機会を与えてくださった同研究所増本健理事長(当時)に感謝申し上げます。

参考 URL

- (1) 東京工業大学ホームページ：
http://www.titech.ac.jp/research/stories/hideo_hosono_1

