

結言

田中秀吉

近年における情報通信技術（ICT）の目覚ましい発展により、今や地球規模での情報収集やリアルタイムコミュニケーションが可能となり、その用途や有用性はなおも拡大の一途をたどっている。これらは国民の生活を豊かなものとする一方、デジタルデバイドやエネルギー問題など様々な問題も発生させてきた。特にトラフィックの増加に伴うエネルギー消費の増大や通信インフラの容量逼迫に関する問題は解決すべき喫緊の課題である。有用性が増すほどに深刻化するというこれら背反する課題を同時に解決することがICT社会の持続的成長のためには必要不可欠であり、これまでにない発想に基づく不連続な技術発展、画期的なブレークスルーが必要となる。その鍵を握るのは新たな機能を生み出す素材とそのポテンシャルを引き出す精緻な加工技術であることは間違いない。

本号では、このような観点から、我々ナノ ICT 研究室が長年にわたって取り組んできた研究開発の現状や成果、方向性についてその一部を紹介した。光高速通信における高速化と低消費電力化を両立する切り札として開発を進めている有機 EO デバイスを構成する有機素材は理論上の性能指数が現在主流の LiNbO_3 素材よりも格段に優れているのに加え、そのミクロスコピックな配列や構造を分子スケールにて制御することによって、さらなる高性能化が期待できる。また、光通信デバイスは用いる光の波長によって装置の大きさやパフォーマンスが制限を受けるが、ナノスケール加工技術の応用によって光の速度や分散関係を制御することにより、このような制限を突破することができる。超伝導特性を示す薄膜素材もこれらをナノレベルの細線パターンに精密に加工することによって究極的な感度を有する光子検出器とすることができる。このように、優れたポテンシャルを有する素材をナノスケールにて整形、加工することによってこれまでの概念を打ち破るような高性能なデバイスがいくつも産み出されつつある。優秀な素材の獲得と精緻な加工技術の確立はナノデバイス開発における車の両輪のようなものであり、ナノ ICT 研究室が長い時間をかけて培ってきた技術基盤である。また、ナノ加工技術そのものを高度化するための技術開発も重要である。例えば、原子分子レベルの構造からより高次な構造へと発展させ新たな機能をボトムアップ的に生み出す技術がこれにあた

る。この課題に対してナノ ICT 研究室では有機分子の自己組織化現象に注目して研究を進めてきた。これは基本部品となる有機分子の形状や分極配置を化学合成手法に基づいて精密に制御することによって、自発的により高次な構造を生み出す技術であり、複雑なリソグラフィックプロセスを行うことなく、数ナノメートル幅の分子ワイヤや分子グリッド構想、分子数個からなる光化学スイッチなどを作製することができる。今後はこの高次構造を組み合わせることで有用な機能を生み出すための技術戦略が重要となる。

機能の創出という点ではバイオ素材がよい手本になる。生物を構成するすべての素材や構造、機能は遺伝情報に基づいてひとつひとつの分子を組み合わせることによって形作られている。その意味でバイオ素材はボトムアップ的に作られた究極の分子マシンと言える。生物システムはひとつひとつは単純な分子の物理的、化学的性質を巧みに組み合わせて最先端技術の粋を集めて作られたデバイスと同等、あるいはそれ以上の性能を実現していることに気づく。例えば視覚を例にとる。人間の網膜には明暗を認識する 1 億の「桿体細胞」と色を認識する 600 万の「錐体細胞」がある。視覚に直接関係しているのは錐体なので、これをデジタルカメラに例えるなら 600 万画素の撮像素子が備わっているということになる。ただし、網膜に配置される視細胞、すなわち、撮像セルのひとつひとつは光によるレチナル分子の異性化を利用した、どちらかと言えば低スペックなものであり、あまり早い変化には追従できない。これを補うために、隣接する視細胞間で情報演算のような処理がなされ、その結果、最終的には 120 万画素程度の情報になって脳に送られる。こう考えると、人間の視覚能は構造的には 10 年前のデジカメにすら及ばないように思われるが、機能的には、数千万画素を有する最新の業務用カメラと同等以上のスペックを持っている。デバイス解像度の低さについても、あえて 120 万画素程度の情報量にて視覚野に送信することによって通信手段としては極めて低スペックな情報インフラである「神経」への負担を軽減しているというポジティブな解釈もできる。微細加工技術を結集して作られる高度な撮像素子と同等の性能が、どちらかと言えば単純な分子構造の集合体によって達成されていることは注目に値する。この背後にあるからくりは

まだ完全に解明されているわけではないが、脳による情報補完が重要な役割を果たしているのは間違いない。

別の例として嗅覚を考察する。嗅覚については、目下様々な模倣（ミミック）技術が提案されているがいまだ生体ベースの物を超えるものは存在しない。嗅覚の基本は匂いの原因となっている分子と選択的に結合しシグナルを発する分子受容体にある。これはある種の抗体反応であり、生物の、匂いに対する検出感度の高さの要因ともなっている。感度だけでなく、得られた匂いシグナルに対する識別性の高さも注目に値する。近年の分子生物学的研究によって、この分子受容体の種類は人間の場合 388 種類が存在することが解明されている。これに対して識別可能な匂いの種類は数 10 万以上と言われており、初めて体験する匂いについてもその微妙な違いを識別し過去の経験から類推することができる。嗅覚能のからくりについては、嗅球体上に多数配置されネットワーク様構造を形成する分子受容体の出力信号の時空相関に基づくパターン認識に基づくものであることがこれまでの研究から示唆されている。これは ICT で言うところの、センサーネットワークによる情報収集やそれに基づく状況把握、予測、いわゆるビッグデータの運用と通ずる部分がある。

バイオ素材の特徴を生かして作り上げられるデバイスは効率性や機能性だけでなく、必然的に生物の感覚を模倣し、再現するインターフェースとしての特性も備える。これらはネットワーク社会におけるコミュニケーション手段としてのニーズがある。例えば、現在用いられているセンサからの情報に基き、ネットワークや ICT リソースを介してユーザー間で伝達、共有される感覚と現実世界の感覚には、ギャップがある。例えば、言葉や映像による説明だけでは伝えることが困難な臭いや触感、味覚などがこれに当てはまる。例えば、仮想空間でショッピングする場合に実際に現実空間で買い物をしているような感覚を実現するには、より生物感覚に近いセンシング技術を構築する必要がある。このような仮想空間の情報と現実世界の情報を共有できる技術の構築は ICT リソースに基づいた新たなビジネスの創出につながることは間違いない。

さらに、やや空想的な推察ではあるが、生物にはいわゆる第六感と呼ばれるものが備わっていると言われる。はっきりとした理由はないが、風景を見ていて何か言葉にできない違和感がある、何か危険な雰囲気を感じるといったものを誰もが経験したことがあるのではなかろうか。この感覚は時として潜在的な危険因子を回避したり、災害の発生を事前に予知したりするのに役立つ。現実的にはこれらは第六感というよりも、五感情報が脳や神経から構成される生物システムに入力され、それらを総合的に処理し、判断したうえで導

出された結論と考えるのが適切である。生物が長い年月をかけて築いてきた生き残りメカニズム、本能と言っても良いかもしれない。こういった活動や判断に際して生物がどのような情報の取得と処理を行っているか、何をもって危険と判断しているのかを調べて理解することも有用と考える。例えば生物の感覚器官を模したデバイスからなるセンサーネットワークを人工的に作り上げ、脳の情報処理プロセスを模したアルゴリズムを適用することで、生物が外界からどの程度のスペックでどのような情報を得ているのか、それらがどのように処理されて「危険」を感じているのかについて知ることが可能となり将来的には災害の予知などにも活用できると考える。

生命活動を支える様々な感覚器官やシステムはシンプルな機能を巧みに組み合わせることでパワフルではないが、必要となる機能と効率を高いレベルで両立しており、時には既存の技術では太刀打ちできないパフォーマンスを発揮する。しかし、その巧みさはまだ必ずしもすべてが解明されているわけではなく、謙虚に学ぶべきところが多数あると考える。

競争力のある独自の原石（素材）を持つということの重要性。その原石を高度に磨き上げて宝石にする技術（ナノ）。それらを賢く組み合わせるこれまでにない有用な「機能」を発現させ、活用する方法を開拓し技術指標として提示する。これが我々ナノ ICT 研究室の使命であると考えている。



田中秀吉（たなか しゅうきち）

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室研究マネージャー／テラヘルツ研究センターテラヘルツ連携研究室主任研究員兼務
博士（理学）
ナノ固体物性、走査プローブ顕微鏡および分光測定、物性物理学、ナノスケール構造科学