

森から生まれた半導体デバイス

— 超低消費電力・脳模倣型 AI 光センサに向けて —

東京理科大学 先進工学部 電子システム工学科 教授 いくの たかし 生野 孝

① 木と石が織りなす次世代センサ

現代のデジタル社会を支えるスマートフォンやコンピュータは、その多くが「石」の成分であるシリコンという半導体によって駆動している。一方で、古来より人類の生活を支えてきたのは、樹木をはじめとする「植物」である。一見すると対極に位置する「最先端のエレクトロニクス」と「自然由来のバイオマス」だが、この二つが融合したとき、これまでの常識を覆す新しい知能デバイスが実現できる。

鍵となる材料は、植物の骨格をナノサイズまで解きほぐした超微細繊維「セルロースナノファイバー (CNF)」である。筆者らの研究グループでは、この軽くて丈夫な「木の繊維」に、酸化亜鉛 (ZnO) という「石の微粒子」を混練することで、まるで生き物のように光を感じ、自ら考える能力を持つ極薄自立膜デバイスを開発した。

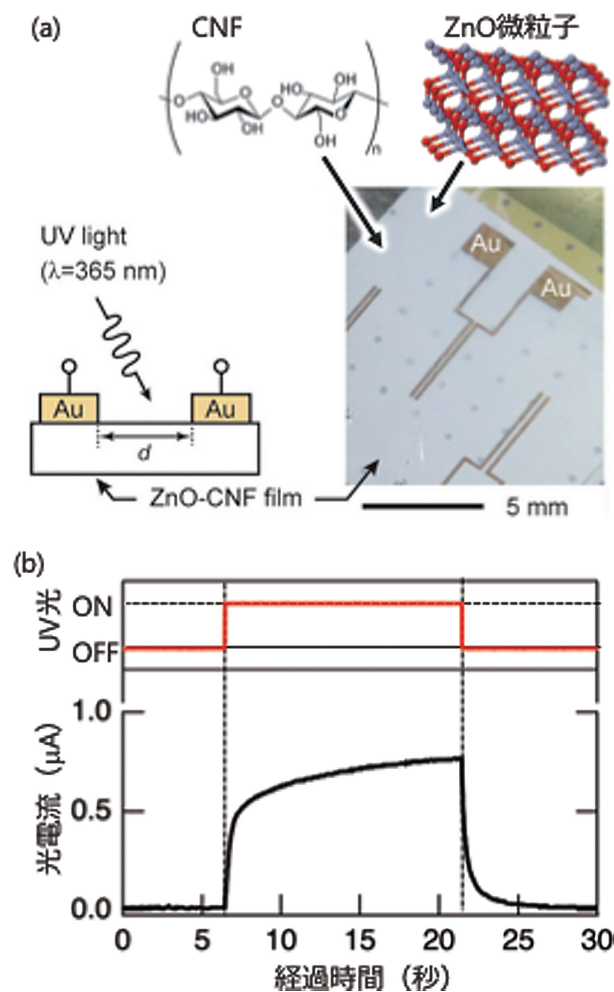
これまでのセンサは、光を捉えた後にそのデータを外部のコンピュータへ送り、複雑な計算処理を行う必要があった。しかし、本稿で紹介する「ZnO/CNF フィルム」は、フィルムそのものが光を感じ人間の脳の神経細胞 (シナプス) のような振る舞いを見せる。外部の計算リソースに頼ることなく、入力された光のパターンをその場で「文字」として認識できるインテリジェントな機能を備えているのである。さらに、「木」と「石」でできているため、使い終われば土に還るので、大量普及時代に相応しいセンサといえる。本稿では、分野を越えるバイオマス研究の最前線とその未来像について概説する。

② CNF フィルムに「視覚」を与える

本研究の第一歩は、絶縁体である CNF に対し、いかにして光応答機能を付与するかという点である。筆

者らは、半導体特性を持つ ZnO 微粒子を CNF の水分散液に混合し、溶液プロセスによって機能性複合材料を創出する手法を確立した。

具体的な作製手順を示す。まず、竹由来の CNF 水分散液に対し、平均粒径約 20 nm の ZnO ナノ粒子を添加した。これを超音波分散機によって均一に混練し混合液を作製した。その後、この混合液をスプレー噴霧法により混合フィルムを成膜し、乾燥させた後、厚さ約 30 μm の ZnO/CNF 複合自立膜を得た【図 1(a)】。



【図 1】 ZnO/CNF フィルムの(a)外観図と(b)UV 光に対する応答電流

この手法は、半導体製造で一般的に用いられる真空装置や高温プロセスを一切必要としない、極めて省エネルギーな手法である点が特徴である。

作製されたフィルムの性能を評価するため、波長 365 nm の紫外 (UV) 光を用いた光電流測定を行った。光を照射していない暗所状態では、フィルムの抵抗値は極めて高く、流れる電流は数 pA (ピコアンペア) 程度と極微量であった。しかし、強度 10 mW/cm² の UV 光を照射した瞬間、電流値は数桁にわたって急激に増大し、数 μ A オーダーにまで達した。

この光応答特性を定量的に解析すると、ZnO の混入比率 (重量比) が性能を大きく左右することが判明した。実験によれば、ZnO の含有量を 10 wt.% から 40 wt.% へと増加させるに従い、光電流の感度が向上する傾向が見られた。特に興味深いのは、光を遮断した後の電流の減衰挙動である【図 1(b)】。一般的な光センサとは異なり、このフィルムの電流は即座にゼロには戻らず、緩やかに減少する持続的光導電性

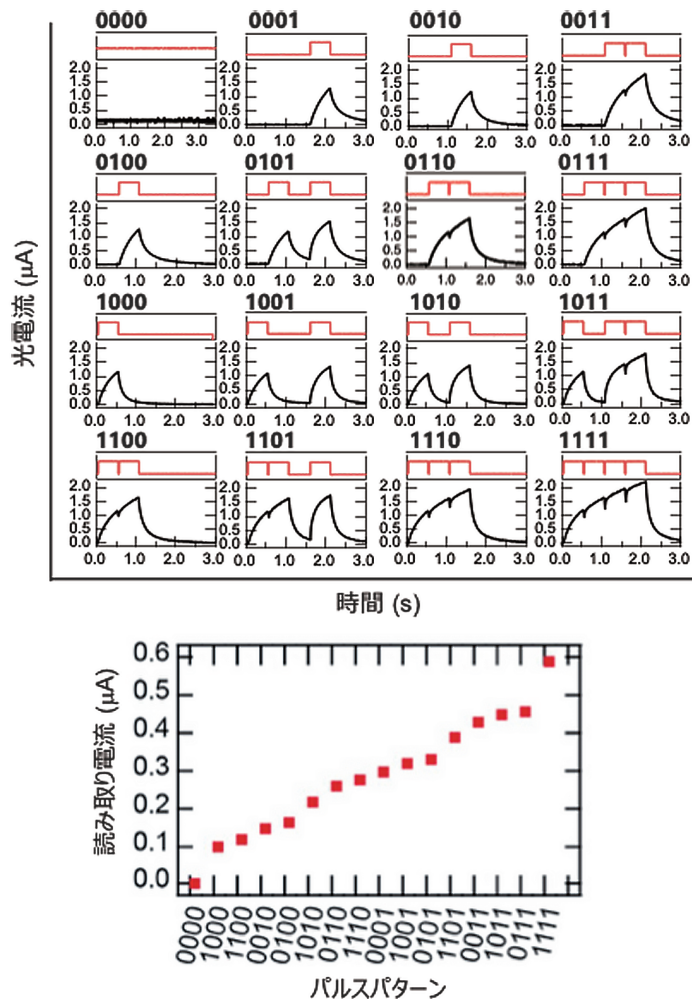
(PPC) を示した¹⁾。

一見すると、応答の遅れである PPC はセンサとしての弱点に見えるかもしれない。しかし、このような時間依存の挙動こそが、次章で述べる脳神経を模倣した演算を実現するための決定的な鍵になるのである。

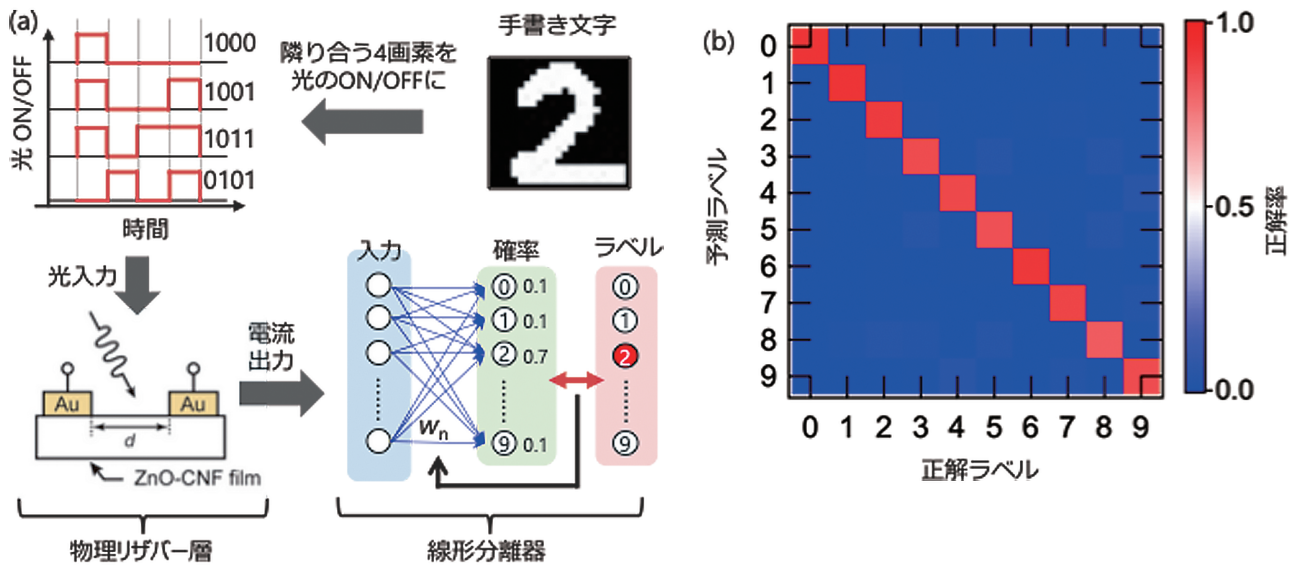
3 光を記憶し演算する

前述した PPC は、従来のセンサ工学においては、応答速度を低下させる欠点として忌避されてきた。しかし、視点を変えれば、この現象は外部からの光刺激を一定時間保持する記憶そのものである。筆者らは、この特性を逆手に取り、人間の脳における神経細胞の接合部であるシナプスの挙動を、ZnO/CNF フィルム上で再現できると考えた。

まず、記憶素子としての能力を検証するため、4 ビットの光パルス (0 と 1 の点滅パターン) を上記素子に照射した際の挙動を調べた。【図 2】に、パルス照射中の光電流と照射後の読み取り電流の変化を示す。



【図 2】 4 ビット UV 光パルスに対する応答電流とパルス照射後の読み取り電流



【図3】 (a)本素子を物理リザーバー層に用いた手書き数字認識プロセス、(b)混同行列

ここで注目すべきは、パルス照射が終わった後の電流値である。照射された光のパターンによって、照射後の電流値がそれぞれ異なる値を示していることがわかる。

これは、フィルムが単に光に反応するだけでなく、どのようなパターンを受光したかを、電流の強弱という形で分類していることを意味する。つまり、このフィルムは、入力履歴を保持しながら応答を変化させるという、時間依存の情報処理を自然に行っている。この性質は、単なる光センサを超え、材料そのものを計算装置として使うという発想へとつながる。

さらに、本研究の最も革新的な点は、このフィルムを「物理リザーバーコンピューティング」という次世代AI技術の心臓部であるリザーバー層として利用した点にある。通常、AIによる画像認識には膨大な数のトランジスタと複雑なソフトウェアが必要だが、リザーバー計算では、材料が持つ複雑な物理現象をそのまま計算リソースとして活用する。具体的には、時系列の光パルスをフィルムに入力すると、PPC特性によって過去の入力情報が現在の応答に重なり合い、複雑な非線形変換が行われる。この材料内で行われる自然な物理反応を計算の一部として利用することで、電力消費を劇的に抑えた知的な情報処理が可能となるのである。

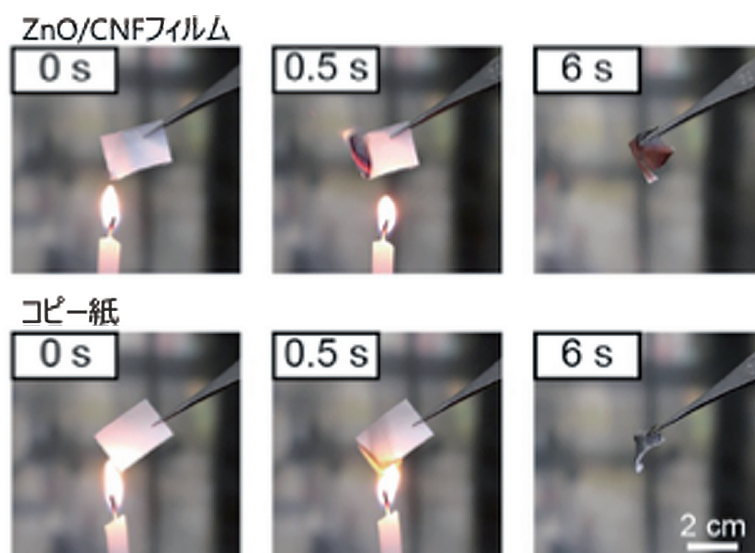
まず、人工シナプスとしての性能を評価するため、パルス状の紫外光を連続照射したところ、照射回数に応じて電流値が段階的に上昇するシナプス可塑性に似

た挙動が観測された。これは、入力の履歴に応じて情報の伝達効率(重み)が変化する、脳の学習プロセスを模倣できていることを定量的に示している。

さらに、このフィルムを用いて手書き数字データセット(MNIST)の認識試験を行った【図3】。まず、2値化した手書き数字画像(20×20ピクセル)を4ビット×100行に整え、各行の4ビットを光パルスに変換した。次に、光パルスをZnO/CNFフィルムに照射し、その出力電流を単純な線形分離器で解析した結果、驚くべきことに最大で約88%の認識精度を達成した。これは、複雑な集積回路を用いることなく、植物由来のフィルムという物理的な膜(とマイコン級の単純なシリコンコンピュータ)だけで、高度なパターン認識が可能であることを実証した成果である²⁾。

4 持続可能なディスプレイ・エレクトロニクスに向けて

本研究が目指す出口戦略は、高性能なセンサの開発に加え、環境負荷を最小限に抑えつつ高度な知能を社会に実装する「ディスプレイ・エレクトロニクス」という概念の確立である。従来の半導体デバイスは、廃棄後に環境中に長く残留するという課題を抱えている。対して、本稿で紹介したZnO/CNFフィルムは、その大部分が植物由来と石由来の素材で構成されており、最終的には土に還すことが可能である。【図4】に示すように、コピー紙と同様に本フィルムは容易に



【図4】 焼却デモンストレーション

焼却することができる。このように、必要な時だけ知的に働き、役目を終われば自然へと循環するデバイスは、真に持続可能なデジタル社会を実現するための理想形といえるだろう。

5 展望

本稿では、材料そのものが光を感じ、記憶し、演算する、という新しい情報処理のかたちを示した。この特徴は、従来のように、大量のデータをクラウドに送って処理する方法とは違い、センサの設置場所で判断を行うエッジ AI の実現を可能にする。

例えば、食品パッケージに貼り付けられた透明なセンサが、内容物の鮮度変化を光やガスの履歴から自律的に判断する。あるいは、衣服や包帯に組み込まれたウェアラブルデバイスが、身体の状態をリアルタイムで解析し、異常を検知する。このような用途では、超低消費電力で動作し、使い終われば安全に処理できる材料・システムであることが大きな利点となる。

今回の研究は、農学・植物学に由来する「CNF」、電気電子工学の「半導体」、そして情報科学の「AI」という異なる専門領域が重なり合うことで生まれた成果である。分野横断的な視点こそが、次世代の持続可能な知能デバイスを生み出す原動力になると考えている。

謝辞

本研究は、当研究室の修了生である小松裕明博士、細田乃梨花氏、河野上稔也氏の協力により実施された。また、本学理学部第二部物理学科村山真理子博士との議論、および、本学先進工学部マテリアル創成工学科西尾圭史教授による光学特性評価の支援に深く感謝する。

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）「次世代研究者挑戦プログラム」（JPMJFS2144）、および東京理科大学トップ研究者育成者支援費による支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) H. Komatsu, Y. Kawamoto, and T. Ikuno, *Nanomaterials* **12** (2022) 940.
- 2) H. Komatsu, N. Hosoda, T. Kounoue, K. Tokiwa, and T. Ikuno, *Adv. Electron. Mater.* **10** (2024) 2300749.
- 3) H. Komatsu, N. Hosoda, and T. Ikuno, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** (2025) 5056.