

ナノエレクトロニクスとバイオの最近の事情

早水 裕平

昨年のもので、ご存知の読者も多いと思うが、ヨーロッパにおいて、二つの大型研究プロジェクトが始まった。欧州委員会は、これらに対して、10年間で総額10億ユーロの研究資金を準備している。一つは、その名も「Graphene」である。グラフェンは炭素の六員環が連なった単一原子層であるが、非常に薄い素材であるにもかかわらず、その強靱な力学特性や高い電気伝導度を示すことから、未来のエレクトロニクス材料として多くの研究者により注目されている。2010年には、この分野での貢献によって2名の研究者にノーベル物理学賞が贈られた。この2人が編み出した、剥離法というグラフェン作製方法は非常に単純で、グラファイト（黒鉛）の鱗片を、テープを使って何度も剥離し、最後にはシリコン基板上に一枚だけの原子層であるグラフェンを残すというものである。こちらの方法でどなたでもグラフェンが作製できる。今では、基礎研究から、フレキシブル・デバイスやディスプレイの透明電極といった産業や実社会への応用に向けて研究が進められている。もう一つの大型プロジェクトは、「The Human Brain Project」である。こちらは、人間の脳の機能と仕組みをスーパーコンピュータによってシミュレートする試みである。併せて、コネクトーム（脳の神経回路の接点の地図）の研究も行う。そもそも脳神経回路の解読は、研究が始まったばかりである。その地図を作製することにより、脳の働きや疾患の原因の解明につながると同時に、計算科学やロボット工学などの分野へも波及する革新的な技術開発が期待されている。時期を同じくして、アメリカではオバマ大統領の号令のもと、「Brain Initiative」が始まった。こちらも、脳の活動を空間的にマッピングすることにより脳の機構を理解しようとする試みである。これらの欧米での研究プロジェクトは、まさに時代の潮流を感じさせる。

一見、グラフェンに代表されるナノエレクトロニクスと脳研究の間には接点がないように思われるが、特に脳活動のマッピングにおいてはナノエレクトロニクスの活躍が期待されている¹⁾。ここで、ナノエレクトロニクスが与えるインパクトは以下の三つである：①高感度検出、②高速検出、③高空間分解能。①：一般に、ナノ材料は、非常に小さいサイズを持っているため、通常材料と比べて、構成する元素のうち表面に存在する元素の割合が非常に高い。よって、その電気特性は、表面の状態によって敏感に変化する。これまでナノ材料を用いたセンサーは単一分子レベルで検出できる感度を示している。これによりナノ材料が神経細胞と触れた場合には、非常に高い感度で細胞膜外の信号を検出することができる。②：グラフェンなどの材料では、その高い電気伝導度から非常に高速の信号検出が期待される。現に、グラフェン・トランジスタではコンピュータの駆動周波数である数GHzを凌駕する100 GHz以上の高速動作が確認されて

いる。③：ナノ材料は既存の半導体デバイスのプロセスと組み合わせてデバイス構造を作製できる利点がある。そのため非常に微小なセンサーをアレイ状に配列して、細胞の活動を空間的に画像化できると期待される。

グラフェンを用いた細胞活動のモニタリングは、すでに基礎研究レベルでは実証されている²⁾。最初の実証は、2011年にグラフェンの電気化学トランジスタを用いて行われた。この測定では、シリコン基板上に剥離法によって作製されたグラフェンのトランジスタ構造に、心筋細胞を直接載せることによって、その活動電位をグラフェンの電気伝導度の変化として検出した。最近では、“beyond graphene”ということで、ナノシート状の材料で、グラフェンの性能を超える材料の探索が行われており、その中でも二硫化モリブデン（MoS₂）などの層状金属カルコゲナイドと呼ばれる材料が注目されている。MoS₂は半導体特性を有するナノシートであり、表面に吸着した分子などにより電流が流れない状態から流れる状態へと急激に変化する。これにより電流を流しやすい半金属特性を有するグラフェンよりも、さらに高い検出感度が期待されている。現状はまだ、細胞の活動をモニターするまでには至っていないが、生体分子を検出するバイオセンサーの実証は行われ、グラフェンの数十倍の感度があることが示された³⁾。

グラフェンなどのナノシートと並んで今、生体細胞の活動検出で大きな期待を集めているのがナノワイヤーである。こちらは、その細い構造を利用して、細胞の表面だけではなく、内部の状態までも電氣的に観測しようというものである。最近のナノワイヤーの研究で興味深いものに、“kinked nanowire”がある⁴⁾。これは、数10 nmの直径のシリコン・ナノワイヤーを特殊な合成方法によってV字の形状にし、その折れ曲がった部分を細胞内部に刺し、V字構造の両端に電流を流すことによって、内部の電位変化を電気伝導度の変化として検出する。この際、ナノワイヤーは非常に細いため、細胞膜を破壊することなく、内部に侵入できる。この研究では心筋細胞が使用され、内部の活動電位の観測に成功した。この技術はすぐに神経細胞にも応用されると考えられる。

以上のように、ナノエレクトロニクスはバイオ分野において、今後も大型の研究予算のバックアップを受けながら、ますます世界的な広がりを見せることが考えられる。これらが「バイオ・ナノエレクトロニクス」として確立した分野になる日も遠くないかもしれない。

- 1) Alivisatos, P. A. *et al.*: *ACS Nano*, **7**, 1850 (2013).
- 2) Cohen-Karni, T. *et al.*: *Nano Lett.*, **10**, 1098 (2010).
- 3) Sarkar, D. *et al.*: *ACS Nano*, **8**, 3992 (2014).
- 4) Qing, Q. *et al.*: *Nat. Nanotechnol.*, **9**, 142 (2014).