

ナノ炭素素材グラフェンがつくる明るい未来

五十嵐健輔

21世紀は炭素の時代といわれる。炭素の科学分野で近年、注目を集めているのがグラフェンを含むナノ炭素素材である。グラフェンは炭素の六員環が平面的に結合して構成される1原子厚のシート構造をしており、これが球状になったものがフラーレン、そして筒状になったものがカーボンナノチューブ（CNT）として知られている。グラフェンを構成する炭素原子は互いに3本の手で共有結合していることに加え、 π 電子間でも結合している。そのためグラフェンはきわめて高い機械的強度と電気・熱伝導性を併せ持っており、電極や放熱板をはじめとするさまざまな用途への応用が実現している。グラフェンは、ありふれた素材であるグラファイト（黒鉛）を粘着テープで徐々に剥離するという実に単純な方法で発見されたが、応用利用を目指した研究現場では、より安価で大量生産が可能なグラフェン酸化物である酸化グラフェン（GO）がよく用いられる。GOは電気伝導性を失っているものの、シートの表面や端に酸素を含む官能基を持つため親水性であり、細胞との適合性が高いことから生物工学分野への応用が盛んに行われている。本稿ではその例をいくつか紹介したい。

まずは、GOにさまざまな機能性分子を結合できることを利用したドラッグデリバリーへの応用例である。水に不溶性のため単独ではがん細胞に作用できない抗がん剤を、ポリエチレングリコール（PEG）の結合により親水性をさらに高めたGO（GO-PEG）に吸着させることで可溶化し、*in vitro*でがん細胞に取り込ませ作用させることに成功した例が報告されている¹⁾。ナノ炭素素材を用いたドラッグデリバリーはすでにフラーレンやCNTでも報告されているが、GOは、ほ乳類細胞への毒性がより低いことから将来有望な薬剤キャリアーとして認識されている。

また、GO自体の光学的特性を利用した*in vivo*でのがん治療例も報告されている。Yangらは、腫瘍を保持するマウスにGO-PEGを注入すると、腫瘍にGOが高濃度で蓄積することを見いだした²⁾。さらに彼らは、GOが近赤外光領域の光をよく吸収する性質を利用し、GOが蓄積した腫瘍に近赤外光を照射することでGOを励起させ、腫瘍を消滅させることに成功している²⁾。この抗がん作用は励起されたGOが、がん細胞に酸化ストレスを与えるとともにミトコンドリア膜電位を消失させ、アポトーシスとネクローシスを誘発させたことによると考

えられている。

GOと細菌との相互作用についても精力的に研究が進められている。GOとその還元物であるreduced GO (rGO)はさまざまな病原性細菌の増殖を抑えることが知られている。GOとrGOを層状に重ねることで作製した抗菌ペーパーは高い殺菌性を持つ³⁾。このような殺菌がおこる機構についてさまざまな説が提唱されているが、GOやrGOが細菌の細胞膜に突き刺さることで起きる膜の破壊と酸化ストレスが原因であると考えられる研究者が多い。一方、GOは細胞接着の足場を提供することで、細菌やヒト細胞の増殖を促進するという報告もあり⁴⁾、GOのどのような物性が細胞増殖の阻害と促進を決定しているのかについての統一見解は得られていない。

さて、原核生物の仲間には、代謝で生じた余剰の還元力を細胞外にある固体状の電子受容体（たとえば酸化鉄やGO）に捨てることで生存できるものがある^{5,6)}。たとえば*Geobacter*属の細菌である。このような細菌に、廃棄物などに由来する有機物を分解させることで生み出した還元力を、電極を介して電気として回収するシステム、すなわち微生物燃料電池（MFC）に関する研究が近年注目を集めている⁵⁾。自然環境由来の微生物群集を使用したMFCへGOを添加すると、*Geobacter*などの細菌がGOを還元しrGOを形成する。GOはrGOになると電気伝導性を復活するため、細菌から放出された電子はrGOを伝い効率的に電極へ回収される。そのためrGOを含むMFCは高い発電効率を維持できる。さらに、MFCへのGOの添加は細胞外に電子を放出できる細菌を選択的に集積させることから、今後、高効率なMFCを実現する方法の一つとして期待されている⁶⁾。

生物工学においてGOを扱った研究はここ10年程の期間で急速に増加している。しかし、GOと細胞との相互作用についての分子生物学的理解はまだ十分とは言えず、今後の課題となるだろう。グラフェンと生物工学との融合が明るい未来をつくることを期待する。

- 1) Liu, Z. *et al.*: *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 10876 (2008).
- 2) Yang, K. *et al.*: *Nano Lett.*, **10**, 3318 (2010).
- 3) Hu, W. B. *et al.*: *ACS Nano.*, **4**, 4317 (2010).
- 4) Ruiz, O. N. *et al.*: *ACS Nano.*, **5**, 8100 (2011).
- 5) Kato, S.: *Microbes Environ.*, **30**, 133 (2015).
- 6) Yuan, H. and He, Z.: *Nanoscale*, **7**, 7022 (2015).