

細胞ロボティクス — ナノ材料で細胞を操る —

東京理科大学 先進工学部 機能デザイン工学科 教授 ^{かみむら まさお} 上村 真生

特集

バイオ・認知・ロボティクスの融合で人を支えるサイエンス

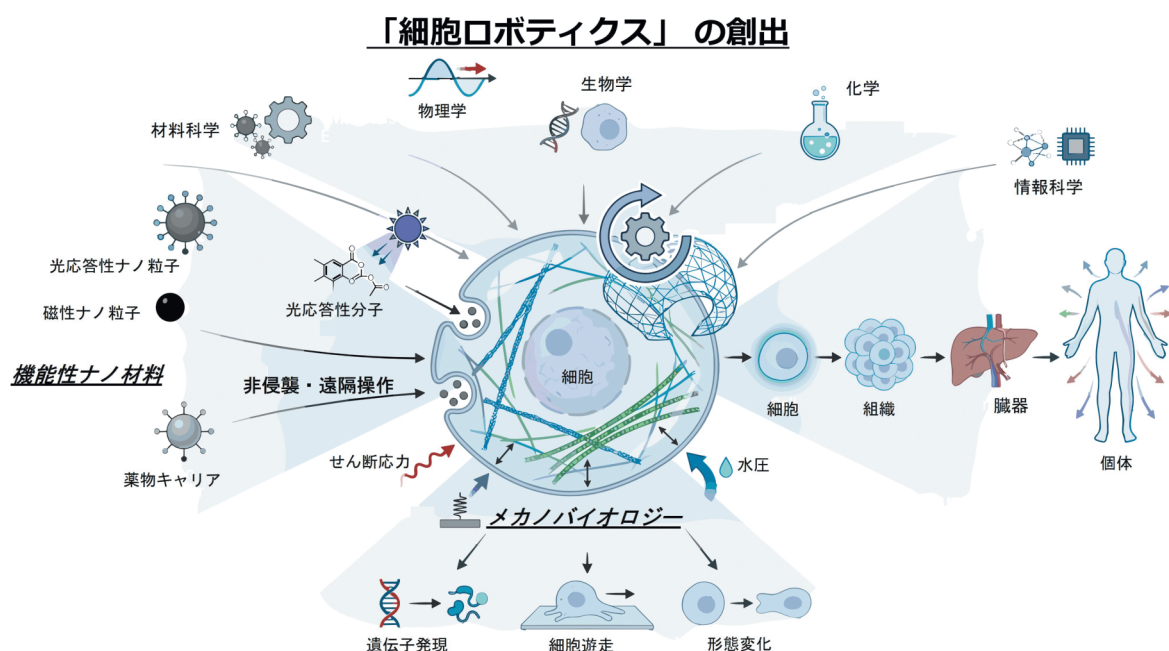
1 細胞を「材料」として考える

私たちの体は、およそ 37 兆個もの細胞からできています。これらの細胞は、互いに協調してはたらくことで、体のさまざまな生命活動が維持されています。普段はあまり意識することはありませんが、体のあらゆる現象は、この無数の細胞の働きの積み重ねによって成り立っています。このように考えると、細胞は単なる「生命の最小単位」ではなく、体を構成する「材料」として捉えることができます。実際、体内において細胞は三次元的に配置され、それぞれ異なる役割を担いながら集まることで、組織や臓器を形づくっています。たとえば、心臓は拍動する細胞、脳は情報を処理する細胞、骨は体を支える細胞といったように、細胞の種類と配置がそれぞれの組織や臓器の機能に直結しています。そして、それらが階層的に組み合わせることで、一つの個体としての身体が成立しています。

しかし、この「材料」は、私たちが日常的に触れる

金属やセラミックス、あるいは合成高分子（プラスチック）などの人工材料とは本質的に異なります。細胞は自らエネルギーを消費して動くことができ、周囲の環境を感じ取り、その情報に応じて形や性質、さらには機能までも変化させる「生きた材料」です。さらに重要なのは、細胞が単独で存在するのではなく、他の細胞と常に情報をやり取りしながら協調的に働くという点です。このような性質は、従来の材料には見られない特徴です。

では、このような高度で柔軟な性質を持つ細胞を、もし外部から思い通りに操ることができたとしたら、どのような世界が開けるのでしょうか。例えば、体内の特定の場所に細胞を送り届けたり、必要なタイミングで特定の働きをさせたりすることが可能になれば、医療のあり方は大きく変わるはずです。このような発想から生まれてきたのが、「細胞ロボティクス」という新しい概念です【図 1】。



【図 1】 細胞ロボティクスの概念図。

② 細胞ロボティクスとは何か

私たちが提唱する「細胞ロボティクス」とは、ナノスケールの材料を利用して、細胞の動きや機能を人為的に制御しようとする概念です。ナノメートルは1メートルの10億分の1という極めて小さな単位であり、細胞の内部ではタンパク質やDNA、細胞膜といった生命の基本構造がこのスケールで構成されています。つまり、細胞のはたらきはナノレベルの現象によって支えられているのです。そのため、細胞の機能を本質的に理解し、さらに制御しようとする場合には、このナノの世界に直接介入する必要があります。

細胞ロボティクスでは、ナノ粒子や微細構造といったナノ材料技術に加え、光、磁場、温度といった外部刺激を組み合わせることで、細胞に対してはたらきかけます。こうした刺激は、細胞の内部に存在する分子や構造に影響を与え、その結果として細胞のふるまいを変化させます。その結果、細胞の移動や増殖、分化といった基本的な生命活動だけでなく、特定の機能を発現させたり、逆にその働きを停止させたりすることも可能になります。このようにして細胞に対して適切な刺激を与えることで、「どこへ行くか」「いつ働くか」「何をするか」といった行動を制御するという発想が、細胞ロボティクスの基本的な考え方です。

③ 細胞は「力」を感じている

細胞ロボティクスを理解する上で重要な基盤となるのが、「メカノバイオロジー」という研究分野です。これは、細胞がどのように力を感じ、それにどのように応答するのかを明らかにする学問です。私たちの体内の細胞はさまざまな物理的な力を常に受けています。たとえば、血管内皮細胞は血液の流れによるせん断応力や圧力を受け、皮膚の細胞は外部からの圧縮や伸展を受けています。また、筋肉細胞は収縮と弛緩を繰り返しながら大きな力を発生させています。このほかにも、重力といった一見当たり前に存在する力も、細胞の働きに影響を与える重要な要因です。細胞の内部には、アクチンフィラメントなどからなる細胞骨格があり、これが外部からの力を感知するセンサーとして機能しています。細胞が力を受けると、その情報は細胞内のシグナル伝達を通じて化学的な情報へと変換され

ます。このプロセスを通じて、細胞の形の変化や移動、さらには遺伝子の発現といったさまざまな応答が引き起こされます。例えば、細胞は周囲の「硬さ」を感じる能力を持っています。硬い環境では強く力を発揮して活発に動き、柔らかい環境では異なる挙動を示します。さらに幹細胞においては、この硬さの違いが分化の方向を決定づけることが知られています。これは、細胞が単なる受動的な存在ではなく、物理的環境を能動的に読み取り、その情報に基づいて自らの運命を決定していることを示しています。

④ ナノ材料で細胞を操る

こうした細胞の性質を利用することで、ナノ材料を用いた細胞機能の制御が可能になります^{1)~4)}。例えば、磁性ナノ粒子を取り込ませた細胞に外部から磁場を加えることで、細胞を特定の方向に移動させたり、特定の場所に集めたりすることができます。これは、体内で細胞を狙った場所に送り届けるドラッグデリバリーや再生医療においても有用な技術となります。また、光応答性の分子やナノ材料を利用すると、光を照射した特定のタイミングや場所でのみ細胞の活動を制御することができます。このような技術は、空間的・時間的に精密な制御を可能にする方法として注目されています。さらに、ナノ粒子を介して細胞膜に存在するメカノセンサーに力を与えることで、細胞の機能を変化させることも可能です。このような方法は「メカノジェネティクス」と呼ばれ、遺伝子導入を行わずに細胞機能を制御できる点で、安全性の面からも重要な技術と考えられています。このように、ナノ材料は細胞に対する「小さな道具」として機能し、細胞に対して行動の指示を与えることを可能にしています。

⑤ メカノバイオロジーから細胞ロボティクスへ

従来のメカノバイオロジー研究では、細胞と力の関係を明らかにすること、すなわち「細胞がどのように力を感じ、どのように応答するのか」を理解することが目的でした。一方で細胞ロボティクスは、その理解を出発点として、細胞を意図的に操作する段階へと進んでいます。つまり、メカノバイオロジーが「知る科学」であるのに対し、細胞ロボティクスは「使う科学」

とすることができます。この研究の進展には、生物学だけでなく、材料工学、化学、物理学、さらには情報科学など、多様な分野の融合が不可欠です。特に材料工学は、細胞が感じる環境や力を精密に設計する役割を担っており、この分野の発展に大きく貢献することが期待されます。

6 医療への応用と未来

細胞ロボティクスは、将来の医療技術を大きく変える可能性を持っています。例えば、体内でがん細胞だけを見分けて攻撃する細胞や、血管内を移動しながら病気の兆候を検出する細胞、さらには損傷した組織をその場で修復する細胞といった応用が考えられています。これらは、従来の薬物治療とは異なり、必要な場所に必要な機能だけを発揮する「精密医療」を実現する手段となります。従来の医療では、薬剤を体内に投与すると全身に広がるため、目的以外の場所にも影響が及び、副作用が問題となることがありました。これに対して細胞ロボティクスでは、細胞そのものに機能を持たせ、それを必要な場所ではたらかせることができるため、副作用を抑えながら高い治療効果を得ることが期待されます。

7 ナノから身体へ

細胞ロボティクスの最大の特徴は、「ナノから身体まで」をつなぐマルチスケールな研究である点にあります。ナノスケールで設計された材料が細胞の機能に影響を与え、その結果が組織へと広がり、最終的には臓器や個体全体の機能にまで波及します。このように、非常に小さなスケールでの操作が、人体という大きなシステム全体に影響を与えるという点が、この分野の魅力であり、同時に難しさでもあります。

8 おわりに

細胞は、生命を構成する最小単位でありながら、極めて高度な機能を持つ「究極の材料」です。その細胞を自在に操るという挑戦は、まだ始まったばかりです。しかし、メカノバイオロジーの進展によって細胞の応答の仕組みが明らかになり、さらにナノ技術の発展によってそれを制御するための具体的な手段が整いつつあります。ナノスケールの技術によって細胞を操作し、

その結果として人の健康を支える。このようなマルチスケールの融合研究は、未来の医療や生命科学に新しい可能性をもたらすものであり、細胞ロボティクスはその中心的役割を担う分野として今後ますます発展していくことが期待されます。

参考文献

- 1) M. Kamimura et al., *Biomaterials Science* 4, 933~937 (2016)
- 2) S. Sakakibara et al., *Science and Technology of Advanced Materials* 24, 2206525 (2023)
- 3) K. Tatematsu et al., *Talanta Open* 9, 100319 (2024)
- 4) W. Chen et al., *Nanoscale* 14, 2210~2220 (2022)