

マイクロマシンは小さいということを忘れずに

早稲田大学 教授
中村 桂子

1. マイクロマシンと聞いた時に

一年ほど前から、「チョウの舞い」と名づけた勉強会に参加している。生物学者、昆虫写真家、コンピュータの専門家、機械工学の専門家などから成るこのグループの勉強の目的は明快である。「葉の花畑をヒラヒラと舞うチョウ」という小学唱歌のイメージを頭に描き、優雅な舞いとチョウのハネの構造の関係を知りたいと考えたのである。チョウのハネには、数万とも言われるリン粉がついている。それが、あのハネの動きに何らかの関係を持っているのではないかと。まずは、チョウの動きを撮影してじっくり観察するところから始めようということになったのである。ところで、いざでき上がったビデオを眺めると、ヒラヒラ舞うと簡単に言うのがなんといい加減なことかと分ってきた。アゲハチョウとモンシロチョウの二種類を見たのだが、種類だけでなく個体によっても微妙にハネの動かし方が違うのだ。考えてみれば当たり前。二本足で歩く人間の姿を見ても人それぞれなのだから、チョウは皆同じ飛び方をしていると決めつけた方がおかしいわけだ。それはもちろん、個体の特徴であると同時に、飛んでいる時の微妙な環境の差もあるのだろう。人間の大きさで考えれば、ほとんど差がないと見える状況でも、チョウには影響するだろう。ましてやマイクロマシン、それ自体の精巧さが求められるのはもちろんのこと、それが使われる環境の影響は非常に大きいはずである。

となると、マイクロマシンに求められる基本的な性質は、環境を適確に読みとり、迅速に対応する能力ではないか—生きものを見ているとそんな気がする。

2. 生きもの基本構造

そこで、生きもの持つさまざまな特徴を、その構造と機能を見ながらつきつめてみよう。するとそこに見えてきたのは、やはり細胞である。

「生きもの基本単位は細胞である」という細胞説は、19世紀に提出されたものであり、日進月

歩の生物学の中では、ちょっとカビが生えて見える。それよりも、「生きものは遺伝子の乗りものさ」という方が、現代的だ。遺伝子、実体としてみればDNAは、近年大いに研究が進み、その姿が明らかになればなるほど、その魅力は増すばかりである。たとえば、ウイルスという存在を見よう。病原体として発見されたこの存在は、生物学の中では、生物とも無生物ともつかないおかしなものとしか見え、何ともつまらないものと位置づけられていた。しかし、これは今では、自然界での「遺伝子の運び屋」として、時には生態系を動かす主役の一つにさえ見えてきた。通常DNAは、親から子へと縦につながっていき、その中で変異や組換えで変化していくものだが、ウイルスは種を越えて（たまたまインフルエンザウイルスに侵されて、ひどい頭痛に悩みながらこの原稿を書いている。原稿の出来の悪さはウイルスのせいとお許しいただきたいのだが、このウイルス、どこかでブタの体を通過してきたのかもしれない）動きまわる。つまり横に遺伝子を動かすことができるという得意技で、我々にはできないDNAのシャフリングをしている可能性がある。

この例に限らず、DNAの動きはなかなかダイナミックで面白く、魅力的であることは否定できない。しかし、ここでDNAがどこで働いているかを冷静に見つめると、めざましい働きができるのは今のところ「細胞の中」でしかない。in vitro と言い、試験管の中にDNAが働けるような条件を作れば、少々のタンパク質を作るくらいのはするが、それも言ってみれば細胞の持つ基本的性質の一部をなんとか人工的に作り出しているのだ。

派手に活躍するDNAからちょっと眼をはずして、その働きを支えている細胞に注目すること、これはDNAを本格的に解明するためにどうしても必要なことである。そして細胞こそ、「環境の変化に適確に反応しながら、みごとに機能するマイクロマシンの原点」と言えるのである。私のように純粹に生物学の立場からみても、細胞の面白さが今浮び上りつつあるので、それを少し述べてみ

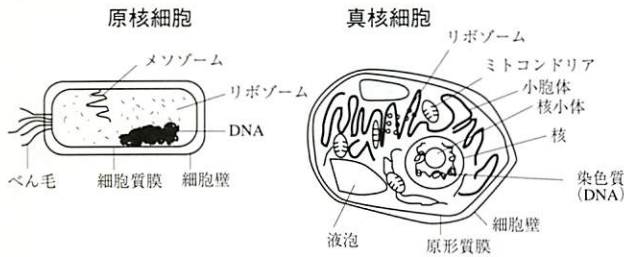


図1 原核細胞と真核細胞（真核細胞になると大きく複雑になる。また、細胞間で接着が起り多細胞生物ができる）

たい。

3. 同じ細胞でも、やはり真核細胞

ここまでは、細胞という言葉で話を進めてきたが、細胞には基本的に性質の違うものが二種類ある。原核細胞と真核細胞である。図1に見られるように、これらの細胞は、大きさも構造もまったく異なる。

原核細胞は、細菌類に代表される単細胞生物として存在する。字の通り、一個の細胞が一つの個体なのである。原核細胞の祖先は、35億年ほど前に地球上に出現したとされており、以来数千種類の細胞を産み出しはしたが、一個の細胞でできることにはやはり限りがある。細胞一つですべてをまかない、さまざまな環境に対応していくために、さまざまな物質を代謝する能力は獲得した。物質代謝、つまり化学反応系として見た時には、原核細胞の能力は称讃すべきものがある。シアン、水銀など、我々の細胞には猛毒となる物質もさりげなく代謝してしまう仲間もある。

しかし、機械として見た時には、形も、球や直方体のようなものがほとんどで、せいぜい螺旋形。周囲の毛で動きまわる程度である（これだって、人工的につくろうとすれば大変なことだが）。

真核細胞になると、様相がガラリと変る。ところで、真核細胞はいつ誕生したか。化石その他の証拠から、今から15億年ほど前と考えられている。その誕生は、それまで存在した原核細胞の中の大きめのものの中に、小さな細胞が入りこみ、いわゆる細胞同士の共生によって新しい機能を獲得したことに始まるとされている。真核細胞に存在するミトコンドリアは、酸素を活用して効率的にエネルギーを生産する小器官であるが、これが本来は小さな細胞だったと思われる。酸素の存在、それを活用する細胞の誕生が真核細胞という新しい細胞を生み出したと言える。

お気づきになっているだろうか。生命誕生から真核細胞出現までに20億年、真核細胞ができてからヒトが生まれるまでに15億年。原核細胞と真核細胞の間の距たりの方が、たった一個の真核細胞（今でも真核単細胞で生きている例はアメーバ）と私たち人間との間の距離よりも大きいとも言えるのである。私たちが日常眼にする生きものすべては、この真核細胞でできており、それ以外の何ものでもない。ヒトもイヌもクジラもゾウもサクラもユリも……真核細胞を組み立てて作られたものなのだ。その大きさは、 $10\mu\text{m}$ 程度が基本（もちろん神経細胞のように何メートルも繊維を伸ばすものができるなど、さまざまな変化をしているが）、人体でも200種ほどの細胞しかない。機械の部品の種類に比べて、これだけのことを200種類で行なっているのは、ちょっとした驚きではないだろうか。しかもその200種類がいずれも真核細胞という点では共通なのである。私たちの日常感覚から見ると非常に小さいが、マイクロシステムとしては、かなり大きかったと見える。

まず、先にも述べたように、その大きさにエネルギーを充分供給するには、酸化という効率よい生産系が不可欠だったことが、この大きさを基本単位にできる条件の整うことの難しさを示している。そして、真核細胞の中には、原核細胞には見られない細胞骨格と呼ばれる構造がある。細胞内の物質移動にしても、これだけの大きさになると単なる拡散では間に合わない。必要なものを必要な場所へ運ぶためにも、道路が必要なのである。細胞内は、大都市よりもはるかに密にハイウェイがはりめぐらされ、しかも渋滞などなしにそれが機能している。

こうして見ると、 $10\mu\text{m}$ は、「環境に対応しながら、みごとに機能するマイクロシステム」という立場から見た時には、「とても大きい」ということが分る。もちろん、これまでの機械、私たちの日常感覚からいえば $10\mu\text{m}$ は充分以上に小さい。マイクロマシンと言えども、これはやや小さすぎるかもしれない。しかし、最初に述べたように、マイクロマシンに不可欠なのは、私たちが日常的には変化と感じていないような小さな変化も大きな影響を与えるという視点である。環境との対応をみごとにやってのけている細胞の構造と機能を知ることが、機械づくり一辺倒の立場からは、やや忘れがちなことを学ぶよい機会になると思う。