

## 細菌も整列する

森永 花菜

自然界では、雪の結晶や界面活性剤が形成するミセルなどのように、まるで機械で作られたかのような秩序だった構造が観察される。このように、外部からの力によらず、ある要素が相互作用することにより、システム全体として秩序のある構造や機能を生み出すことは、自己組織化と呼ばれ、生物が作り出す構造物、さらにはその生物自体にも自己組織化が見られることがある。それでは微生物においても自己組織化は観察されるのだろうか。有名な例として、細胞性粘菌の自己組織化があげられる。土壌に棲息する真核微生物の粘菌は、栄養状態の良い時には単細胞のアメーバ様に増殖する。一方、飢餓状態になると細胞が集合し、胞子とそれを支える柄からなる子実体を形成する<sup>1)</sup>。このような多細胞体制の構築は、細胞間のシグナリングによる細胞の配置、配向の規則性を生み出すことによって起こる。さらに近年、原核生物である細菌においても単細胞が集まり、秩序だった構造体を形成することが明らかになりつつある。そこで本稿では、細菌による自己組織化についていくつかの例を紹介する。

一円玉を平面上にもっとも多くの数並べるとしたら、どのように配置するだろうか。おそらく、一列並べた後に、一列目の円と円の間に二列目の円の中心がくるように並べよう。蜂の巣の六角形の各頂点を円に置き換えたような構造である。このような配置は最密充填構造と呼ばれ、同じ形の図形を並べた際に図形の隙間がもっとも小さくなる配置である。細菌においても類似の配置をとる菌種が報告されている。球状の細菌 *Thiovulum majus* は固液界面に集合した際に、細胞が上述した一円玉の例のように密に整列した構造をとる<sup>2)</sup>。この現象は素早い鞭毛運動により、液体中に竜巻のような流れを形成することで、周囲の個体が引き寄せられることにより起こる自己組織化である。また、桿菌の *Cellulophaga lytica* はコロニー内で細胞の中心を結ぶと六方格子になるように規則正しく並ぶ<sup>3)</sup>。本構造を形成するメカニズムは解明されていないものの、この自己組織化の結果、本菌のコロニーは光を当てると美しい虹色を呈する。上述の二種の細菌は、細胞の形状が異なるものの、類似の構造に整列する。このような形態で配向する細菌は今まで発見されていなかっただけで、実は少なくはないのかもしれない。

細菌による配向について詳細に解析した例をもう一つ

紹介したい。コレラの原因となる桿菌 *Vibrio cholerae* は、液体培地で培養すると、固体表面に付着しドーム型のバイオフィーム（微生物の集合体）を形成する。本菌は細胞周辺に、細胞間または細胞と固体表面間の接着因子として働く数種の多糖とタンパク質を放出しながら分裂を繰り返すことで、三次元的に秩序だったバイオフィームを形成する<sup>4)</sup>。このバイオフィーム内の固体表面に付着した一層目の細胞は、接着面に対して垂直に配向するが、この垂直化のメカニズムはシミュレーションモデルの構築および実験的に詳細に証明されている<sup>5)</sup>。

このように、数マイクロメートルの大きさしかない細菌も、自己組織化により整列することがわかってきた。上述の例以外にも細菌による整列の例はあるが、これらの形成メカニズムの多くが未解明である。そのため、これらが自己組織化によるものなのか、外部の力によってもたらされたものなのかは、わかっていないものも多い。しかしながら、このような細菌の配向メカニズムを解明し、自己組織化を利用することができれば、細菌の工業利用はさらに発展すると考えられる。たとえば、物質生産や廃水処理において、細菌の活性を維持したまま微生物固定化担体上に最密充填構造に付着させることができれば、単位体積あたりの活性向上につながり、プラントの縮小が可能となる。また、配向メカニズムや構造の特性を理解することで、有害菌を除去する際、その特性に応じた薬剤の選択、さらにその塗布方法を選択するヒントになることもあるだろう。細菌における自己組織化を解き明かすには、生物学的、物理学的知識や技術など、多様なアプローチの組合せが必要とされており、非常に難解である。しかしながら、細菌があらゆる分野で利用されていることを考えると、学際的に本分野の研究を進めることで、我々の生活がより豊かになることが期待される。

- 1) Camzine, S. 著, 松本忠夫, 三中信宏 訳: 生物にとって自己組織化とは何か, 海游舎 (2009).
- 2) Petroff, A. P. et al.: *Phys. Rev. Lett.*, **15**, 158102 (2015).
- 3) Kientz, B. et al.: *Sci. Rep.*, **6**, 19906 (2016).
- 4) Yan, J. et al.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **36**, E5337 (2016).
- 5) Beroz, F. et al.: *Nat. Phys.*, **9**, 954 (2018).