

第6回 9月25日(火)

バイオフィルムってなんだろう

講師：大学院地球環境科学研究院 教授 森川正章

1. 物質循環と微生物

微生物(細菌)からヒトまですべての生物は有機物からできており、炭素と窒素は不可欠な主要元素である。すなわち地球上で生命が持続するためにはこれらの収支が合う必要がある。図1は地球上の炭素の循環の概要を示した図である。植物の光合成による炭酸固定と動物による炭酸ガスの発生がバランスを保っているように思われがちであるが、実は海洋などの水圏微生物や土壌微生物による炭酸固定量は陸上植物による量より多い。また動植物の死骸を分解して炭酸ガスに戻す作用は主として微生物が担っている。《第1回講義参照》

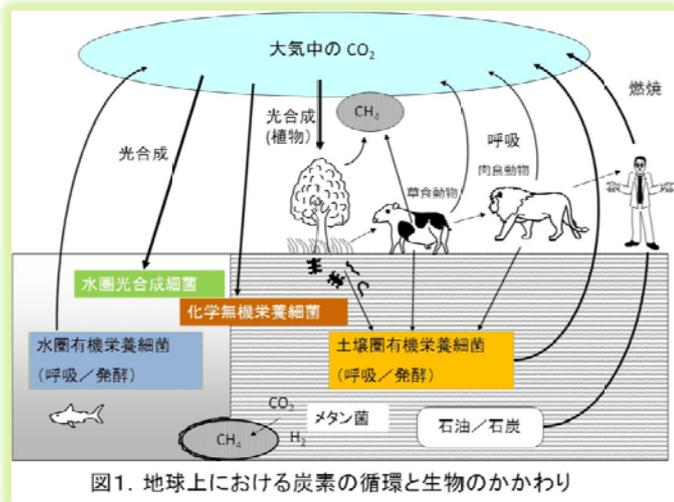


図1. 地球上における炭素の循環と生物のかかわり

2. 呼吸と発酵

私たち動物は酸素を使って好気呼吸をして生きているのだが、多くの微生物は酸素のない環境で生きてゆくのに必要なエネルギーを作り出すことができる。この作用を発酵といい、身近なところではアルコールや味噌さらにはチーズなど醸造食品の製造に利用されている。また生ゴミや糞尿から発酵で得られるメタンを石油の替りにしようという試みが我が国で始まっている。さらに温暖化に無関心であった米国も最近、トウモロコシを原料にした発酵法によるバイオエタノール生産に熱心である。以上のように地球上で炭素を滞りなく循環させるのに普段目に見えない微生物はとて大きな役割を果たしている。

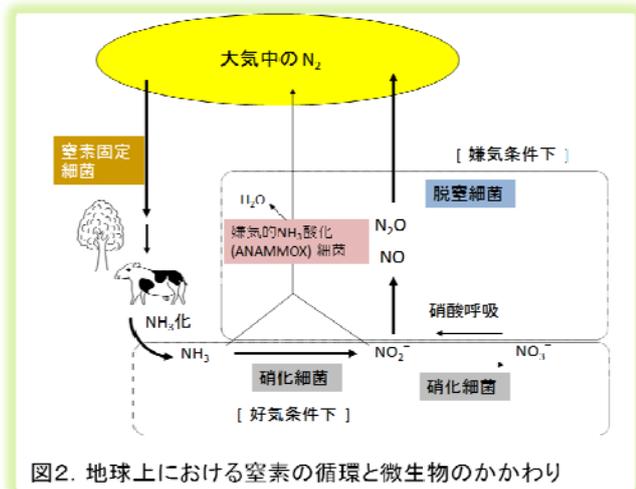


図2. 地球上における窒素の循環と微生物のかかわり

3. 窒素の循環

図2は窒素の循環を示したものである。窒素は大気約80%を占めて

いるが毒にも薬にもならない。これをアミノ酸など生物にとって不可欠な化合物に変換するのはやはり微生物である。これら窒素固定微生物は植物の根に共生していることがあり植物の生育にも役立っている。一方、動物はアンモニア (NH₃) を排泄し、これを硝化細菌や脱窒細菌というグループの微生物が再び大気へと窒素 (N₂) を戻す。この作用は下水処理場で活用され河川や海洋の環境保全さらには飲料水の供給という重要な役割も担っている。《第3回講義参照》

4. 環境微生物の存在形態—バイオフィルム

では微生物は環境中でどのような形態で存在するのであろうか。まずこの講座テキストの表紙をご覧ください、これは北大キャンパス内にある池の一滴の水を顕微鏡下で観察したものである。これらは光合成微生物の一種である珪藻の仲間でお互いに離れて浮遊して生育していることが分かる。これまでは単細胞である微生物はこのような姿が一般的であると考えられてきた。最近になって固体表面に付着した微生物群すなわちバイオフィルムが注目されている。図3は病原性細菌バイオフィルムの顕微鏡写真である。これらはいずれも非常に強固な構造体となっているため物理的に除去することが難しい。さらにやっかいな



図3. バイオフィルムの形成例

点は通常の浮遊細胞に比べて同じ細菌であってもバイオフィルムを形成すると抗生物質や界面活性剤などの薬剤に対する耐性が100倍から1000倍も上昇することである。体内に侵入した病原細菌はバイオフィルムを形成して宿主（ヒト）細胞からの攻撃に対抗しているのである。このようなバイオフィルムは自然環境中にも多く見られる。浴室や流しの壁面に見られるヌメリや小川や海岸の岩石表面あるいは裏面のヌメリもバイオフィルムである。流れに身をまかせるのではなくある場所に留まるのはそこが自分たちにとって居心地が良いからこそであり、そこは微生物たちにとっての楽園なのかも知れない。しかし、微生物はいつまでもひとつのバイオフィルムに留まっている訳ではない。バイオフィルムか

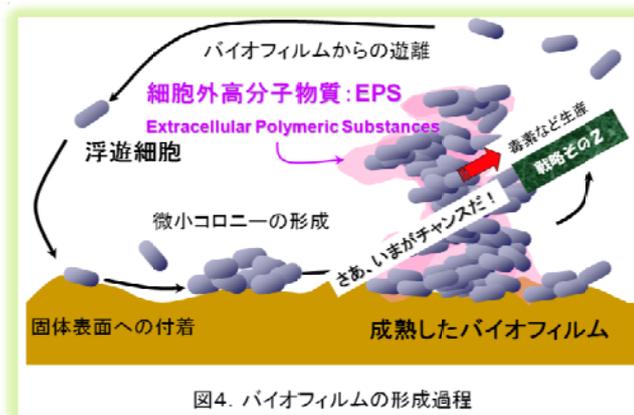


図4. バイオフィルムの形成過程

ら遊離した細胞はまた新たな快適環境を求めて放浪するのである（図4）。先に述べた物質循環に役立っている微生物群も多くの場合、環境中でバイオフィルムを形成している。

3. 単細胞なのにまるで多細胞のようにふるまうバイオフィルム

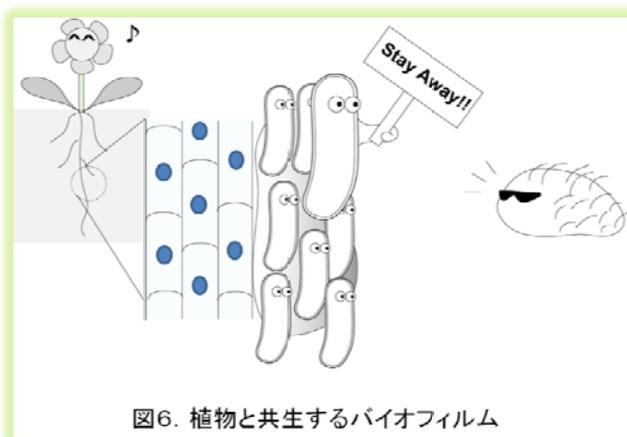
微生物は単細胞であり、いわば一匹狼で暮らしている。ところがバイオフィルムを形成するとそこでは細胞の間で様々なやりとり（会話）が行われ協調的な関係が成立する。土壌細菌の一種である枯草菌は孢子を形成することが知られている。この孢子をつくるために必要な遺伝子を操作して青く染まるようにしたところ、枯草菌バイオフィルムではその頂上付近で旺盛に孢子形成されていることが分かった（図5）。これは植物の種が遠くまで運ばれるように綿毛や羽をつけたりする工夫と似ているようにも思われる。60兆個もの細胞が調和をとりつつ違ったふるまいをすることによって私たちのひとつの体ができているように、バイオフィルムでも個々の微生物（細胞）が互いに支えあいながら生きていることが観察できる。そこで交わされる情報は化学物質が主体であるが、微生物の種類によっても異なる。



図5. 孢子形成はバイオフィルムの頂上で起こる

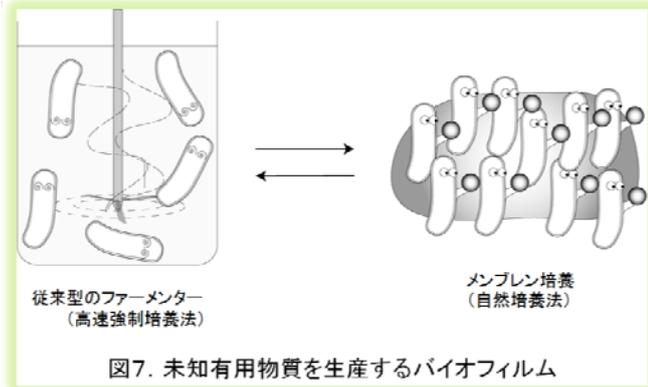
4. バイオフィルムの農業利用

植物を育てるには土が重要である。ここで土と根が接触する領域を根圏と呼ぶ。根圏を拡大して見るとそこにも微生物が観察される。図6は病害微生物から植物を守る根圏微生物のイメージ図である。逆に根圏微生物は植物から酸素や栄養分など生育に好都合なものを得ている。このような関係を共生（相利共生）と呼んでいる。この関係をうまく使えば農薬や化学肥料を減らしたいわゆる自然のちからを利用した持続的な農業が実現できるのではないかと期待されている。《第5回講義参照》



5. 物質生産へのバイオフィルムの利用

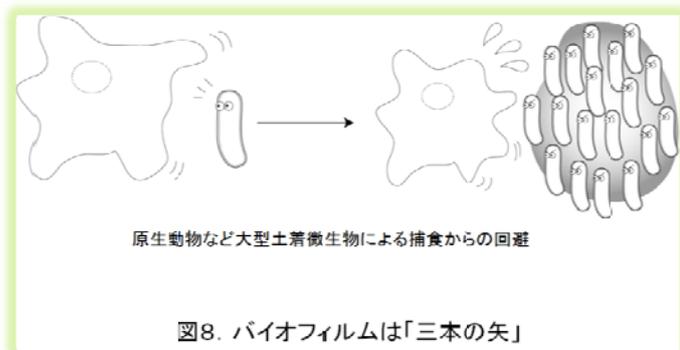
現在、抗生物質をはじめとするさまざまな医薬品の原料は微生物によって生産されている。また食品加工業などで用いられる酵素剤も微生物由来である。これらはファーメンターと呼ばれる通気攪拌槽で効率よく生産される（図7左）。ファーメンターではバイオフィルムは形成されない。一方、枯草菌の孢子形成のようにバイオフィルムによって制御される遺伝子群がある。例えば、魚の水槽の底泥の表面にもバイオフィルムが形成されるのだが、このバイオフィルム中の細菌が魚の糞や食べ残した餌を分解し清浄な水質を保っている。最近、この細菌がバイオフィルムを形成しないとき



(ファーメンターなどで強制培養したとき)には分解能力を示さないことが分かった。つまり従来の培養法では気付かない細菌の特性がバイオフィルムで見つかった訳である。このような発見はこれからますます増えるであろう。人間社会でも効率化の弊害があちこちに見られる。ゆっくり培養して(メンブレン培養法)微生物たちの声を聞いてやれば人間と微生物はさらに良い関係が築けるかも知れない。

6. 環境浄化技術へのバイオフィルムの利用

微生物など生物の能力を利用して環境浄化を行う技術のことをバイオレメディエーションという。《第2回講義参照》これまでに多数の石油など環境汚染物質分解細菌が発見され、実際に汚染現場への投入が試みられたが多くの場合に於いて期待する効果が得られていない。その原因のひとつに分解細菌が現場の土着微生物や原生動物などとの生存競争に負けてしまうことが挙げられる。これまでの分解細菌投入法(図8左)では捕食されてしまうが、あらかじめ分解細菌のバイオフィルムを形成しておけばより長期間定着できる(右)。



バイオフィルムの研究は始まったばかりであるが、微生物の世界は従来考えられていたよりもずっと奥深いようである。

以上、6回にわたって企画した環境微生物に関する公開講座を通して受講者の微生物にたいする興味が少しでも高まったとすれば幸いである。