

第5章：微生物は何でも変換する

微生物が動植物のあらゆる老廃物を分解するおかげで、地球上はゴミの山とならなくてすんでいます。しかし最近、光化学スモッグや酸性雨によって、土壌や河川の水が酸性化され、微生物の生態系に大きな影響が出てきています。弱アルカリ性を好む細菌が減少し、酸性条件を好む微生物（カビや酵母）が自然界に多くなり、地球上はゴミの山になるのではないかと心配されています。

皆さんがよくご存知の石室に描かれた奈良県にある飛鳥美人壁画で一躍脚光を浴び、今日の考古学ブームを巻き起こした高松塚古墳は、関西大学の網干が発掘しましたが、その壁画から黒カビが多く見つかり、その写真がマスコミで報道されたことで記憶に残る方も多いと思います。その後、飛鳥美人の古墳壁画は国宝に指定され、地元から離れて国が管理する特別史跡になりました。壁画は恒久的な保存施設の中で守られていましたが、5～6年前から壁面に黒カビが発生し、発掘当時に比べると壁画の劣化が著しく進みました。その原因として考えられることは、地震などの自然災害で、石室に有機物を含んだ水がカビと一緒に壁の表面を流れ、それ（有機物を含んだ水）を栄養源としてカビが増殖したように思います。また、狭い石室内に作業する人が入り、作業中に吐く息から有機物が漏れることでカビが発生し、そのカビによる劣化が進んだようにも思います。

前の章では、石油や石炭など、化石燃料の中の硫黄、窒素、炭素化合物などを変換する微生物について述べました。その後、石油を変換しやすい培養条件にすると分解する微生物がどんどん見つけだされ、現在では、数百種類の微生物が多種類の石油成分を変換することについて知られています。今後、何でも分解または変換する新しい微生物が次々と発見されることでしょう。化石由来の燃料を変換する主な微生物を表5-1にまとめてみました。この表の中では現在話題になっている代表的な微生物を紹介することにしまし

た。

表5-1. 化石由来の燃料を変換する主な微生物

ガス状の燃料を変換する微生物	微生物名
メタン、エタン、プロパン、ブタン	<i>Methanomonas, Mycobacterium, Pseudomonas, Bacillus, Nocardia.</i>
液体の燃料を変換する微生物	
ペンタン、ヘキサン、ヘプタン、炭素数19以下	<i>Alcaligenes, Corynebacterium, Torulopsis, Bacillus, Aspergillus, Pseudomonas.</i>
固体の燃料を変換する微生物	
エイコサン、炭素数20以上	<i>Pseudomonas, Achromobacter, Candida, Aspergillus, Fusarium, Penicillium.</i>
環状化合物を変換する微生物	
シクロヘキサン、シクロヘキサノール、シクロヘキサンカルボン酸など	<i>Corynebacterium, Pseudomonas, Nocardia.</i>
単環芳香族化合物を変換する微生物	
ベンゼン、トルエン、キシレンなど、	<i>Nocardia, Pseudomonas, Bacillus</i>
原油、灯油、重油、軽油等を変換する微生物	<i>Alcaligenes, Moraxella, Achromobacter, Candida, Torulopsis, Aspergillus, Fusarium, Penicillium.</i>

5.1 アルコールを変換する

日常生活の中にあって、微生物からつくられるエタノール（エチルアルコール）はよく知られ、殺菌剤（70%）としても利用されていますが、そのエタノールをさらに変換させることを多くの研究者が試んでいます。

坂口らは、カビにエタノールを変換させることによって、有機酸（クエン酸、フマル酸、シュウ酸等）がつくられていることを報告しています。その後、沖らによって、エタノールを変換させてからL-グルタミン酸を生産する研究が行われ、最近ではエタノールを炭素源として、微生物タンパク質を生産する研究も行われています。

エタノールを変換する微生物の分布はきわめて広く、多くの新しい菌株が分離されていますが、エタノールを変換する細菌としては、*Corynebacterium*、*Pseudomonas*、*Bacillus*等が見つけられています。また、酵母菌では、*Candida*、*Saccharomyces*がエタノールを変換し、さらに、カビ、放線菌、担子菌などもエタノールを変換することが知られています。

昔から、エタノールは糖類を原料として発酵することにより生産され、アルコール飲料として利用されてきました。そのことからエタノールに関する研究は多いように思います。

他の国では、酵母にエタノールを変換させて微生物菌体を生産し、その菌体を家畜の栄養源にする研究開発が行われています。

エタノールを変換する微生物菌体の主な成分を表5-2に示しました。表から明らかなように、菌体はその半分以上が微生物タンパク質で、表には記載されていませんが、菌体内にはビタミンB類や糖類も含まれて、高い栄養源を有しています。

表5-2. エタノールを変換する微生物菌体の主な成分*

組成	組成率 (%)
タンパク質	52~56
脂肪	5~8
灰分	6~8
繊維質	0.3

*Masuda, Y. : *Hydrocarbon Processing*, p.113 (1976)

将来、食料供給が重要な問題になることが予想されていますので、食料危機を乗り越えるために食料の増産が必要になってきます。家畜を飼育するのに必要な飼料を得るには、天候が大きく影響し、飼育するのに広い土地を必要としますが、微生物タンパク質を利用すると、天候に左右されず、細胞を増殖するための広い場所も必要としません。

例えば、500kgの牛は、24時間で0.5kgのタンパク質を合成しますが、500kgの微生物の細胞は24時間培養で2,500kgの細胞ができます。このことは

第5章 微生物は何でも変換する

細胞分裂の時間が非常に速いことを表します。さらに、太陽光線の制約を受けなくても微生物タンパク質を容易に合成することができるということです。

ソフゲンらによって、メタノールを単一の炭素源として生育する細菌をはじめで見つけられています。その後、いろいろなところから分離され、メタノールを原料とした微生物タンパク質（細菌、酵母）について、上林らが詳しく報告しています。メタノールを変換する微生物の特性としては、純度が高い、低価格、培地が単純な組成で細胞分裂が早い、タンパク質の含有量が高い、必須アミノ酸のバランスが良い等が挙げられます。以上のことから、他の国ではメタノールを原料とした微生物タンパク質の工業生産が盛んに行われています。

5.2 メタンを変換する

一般に微生物が好んで変換するのは、糖やデンプンなどの炭水化物ですが、メタンを炭素源として変換する微生物も多く見つかっています。

近年、メタンを変換する微生物は、自然界のさまざまな場所から分離されていますが、すべて好気性菌です。これまでにメタンを変換する微生物の多くは、メタンが自然に噴出しているガス田地帯から分離されていますので、メタンを変換する菌を得ようとすれば、メタンが出ているような場所の土壌から分離するのが得策です。メタンを変換する微生物には、銅イオンを必要とする菌株と、必要としない菌株があることから、銅イオンを培地に添加して微生物を分離しています。

このように、数多くの細菌や酵母はガス状の燃料を変換することが知られています。メタンを変換する多くの微生物は、まず、酸素をとり込んでメタノールへ変換し、変換されたメタノールをさらにホルムアルデヒドに変換することが知られています。

ストラビンスキーらが見つけた微生物は、エタン、プロパン、ブタンなどを変換せずに、メタンだけを変換します。メタンで生育した菌体をメタンのあるところで培養するとギ酸が蓄積し、ホルムアルデヒドも高収量で得られます。これらの結果から、メタンの微生物酸化経路を図5-1に示しました。

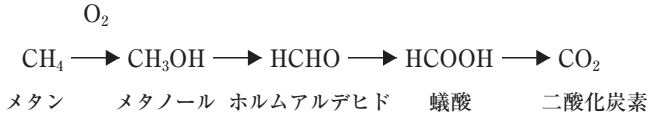


図5-1. メタンの微生物酸化経路

5.3 合成樹脂を分解する

合成樹脂の一種であるポリビニルアルコールは、親水性が非常に強く、温水中に可溶という特徴を有しています。別名をポバールとも呼ばれて、示性式 $(-\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})-)_n$ は、ビニルアルコールの重合体になっています。そのポリビニルアルコールは、合成樹脂、製紙、乳化剤、合成糊などをつくるときに使用されています。天然の高分子化合物（デンプンやタンパク質）は、微生物で容易に分解されますが、合成高分子化合物は一般に水に不溶性で、物理的、化学的に大変安定であるために、微生物が分解しにくいと考えられています。そのために、合成高分子化合物（ポリスチレン、発泡スチロールなど）由来の廃棄物は、環境問題や公害問題を起こす原因になっており、現在、大きな社会問題になっています。

そこで、近年は合成高分子化合物を分解する微生物を、土壌や湖沼、海などから見つけようとするのが盛んで、微生物がそれらを分解して代謝する機構も調べられています。

鈴木らは、ポリビニルアルコールを含む無機塩培地を用いて、ポリビニルアルコールを分解する細菌を分離し、7日間培養すると、ポリビニルアルコール（分子量 2,000～9,000）をほぼ完全に分解することを報告しています。さらに、ポリビニルアルコールを分解する微生物を利用することで、工業廃水を活性汚泥で処理する技術が開発されています。

酒沢らは、2種類の細菌を共生させたときだけ、ポリビニルアルコールを効率よく分解する現象を見つけています。その研究グループの報告では、そのうちの一種がポリビニルアルコール脱水素酵素を持っているものの、この

第5章 微生物は何でも変換する

酵素の補酵素であるピロロキノリンキノン (PQQ) をつくられないために、酵素がアポ酵素（酵素活性をもたないタンパク質）のままで働きません。ところが共存する他のもう1種の細菌は、PQQを培地中に生産することから、両菌をいっしょに培養したときには、ホロ酵素（補助因子が結合して触媒能をもつタンパク質）ができて、酵素が活性化し、ポリビニルアルコールを分解するようになります。このように2種類の菌が共存するときだけ生育がみられる現象を共生と呼んでいます。ポリビニルアルコールの分解共生細菌を図5-2に示しました。

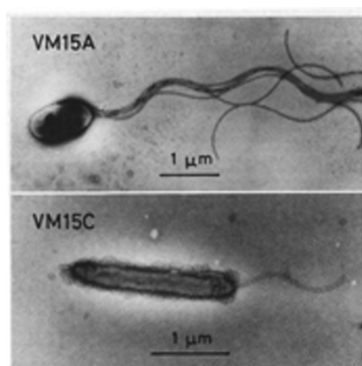


図5-2. ポリビニルアルコールの分解共生細菌*

(*Pseudomonas putida* VM15Aと*Pseudomonas* sp. VM15C)

*Sakazawa, C., Shinmao, M., Taniguchi, Y. and Kato, N. :

Appl. Environ. Microbiol., 41, 261 (1981).

最近、PQQが補酵素の働きだけではなく、新種のビタミン物質として機能していることが解明されています。ビタミンは、健康を維持する上で微量ではありますが必須の物質で、体内で作り出せないために食物から摂取しなければなりません。

ポリエチレングリコールは、エチレングリコールが重合した構造をもつ高分子化合物で、一般的な構造式は $\text{HO}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n-$ で示されています。ポリエチレングリコールは、水、メタノール、ベンゼン、ジクロロメタ

ンに可溶で、無毒であることから、いろいろな製品に、また、皮膚用クリームにも用いられています。医薬品用のタンパク質にポリエチレングリコールが結合すると、タンパク質の分解を抑制することにより、品質効果の期間が延長し、副作用も軽減します。

緒方らは、分子量300～2万の大きさのポリエチレングリコールを分解する細菌を見つけていますが、その分解経路については、グリオキシル酸を生成し、炭素原子2個ずつ脱離して分解する機構を報告しています。分子量6,000以上のポリエチレングリコールでは、2種の細菌の共生系が有効であることも報告しています。この場合にもPQQ酵素が関与しています。

またデイルらは、嫌気性細菌が分子量2万のポリエチレングリコールを酢酸とエチルアルコールにまで分解することを発表しています。

ポリプロピレングリコールは、界面活性剤の合成原料に使用されており、それを分解する細菌は、平均分子量2,000のものを好み、約80%のポリプロピレングリコールを分解します。1、4-ポリブタジエンの重合体（分子量、650～2,350）も、細菌によって分解されることが知られています。

ポリエチレンは、炭素数が約30までのものであれば、微生物が分解しますが、それ以上の高分子量になりますと分解できなくなります。常磐らは、カビがポリカプロラクトン（分子量2万5千）を、ほぼ完全に分解することを報告しています。ポリスチレンを分解する微生物は、現在のところ見つかっていません。微生物が私たちの身のまわりにあるいろいろな合成高分子化合物を分解することについての研究は、地球環境を保全する観点から盛んに展開されており、今後は新しい機能性微生物の発見が期待されています。

5.4 合成繊維の原料を変換する

ナイロンは、世界初の合成繊維で、米デュポン社のウォーレス・カロザースが合成し、その原料であるシクロヘキサノン、しみ抜き、洗浄剤、染色の安定剤などに使用されています。

微生物は、一般に直鎖状炭化水素に比べると環状化合物をあまり変換しませんので、この方面の研究はあまり進んでいません。ムレイらは、*Nocardia* 細菌がシクロヘキサノンを変換して、ナイロンの製造原料であるアジピン酸

第5章 微生物は何でも変換する

をつくることを報告しています。シクロヘキサノンを変換する微生物については、徳山らはシクロペンタノンを細菌が変換して、そのときの中間代謝物として塩化ビニール用の可塑剤を製造するのに必要なグルタル酸を、その外にも5-バレロラクトンや5-ヒドロキシバレリン酸なども生産することを明らかにしています。また、土壌から見つけた細菌がシクロヘキサンカルボン酸を変換して、4-ヒドロキシシクロヘキサンカルボン酸に変換し、それをさらに酸化して4-ケトシクロヘキサンカルボン酸に変換することも報告しています。

微生物がシクロペンタノール、シクロペンタンカルボン酸、シクロヘプタンカルボン酸などからアジピン酸を生産することが知られており、ナイロン製造の原料であり、塗料や溶剤にも使用されているシクロヘキサンをコウジカビが酸化して、種々の化合物を生産することなども知られています。

溶剤や自動車燃料に用いられているデカリンは、微生物が変換することで環状構造が壊れ、アジピン酸とピメリン酸ができることが知られています。

脂肪族環状炭化水素は、次期世代のエネルギー源として注目されているサンドオイルから分離されます。サンドオイルは、カナダやベネズエラに多く産出することで知られ、砂に吸着している油のことです。また、サンドオイルから砂を除いた油であるピチューメンの中にも脂肪族環状炭化水素がたくさん含まれています。そのピチューメンを分解する微生物が注目され、今後の研究に期待がもたれていることは前章でも述べました。

5.5 溶剤を変換、合成ゴムを分解する

代表的な溶剤であるベンゼンは、染料、合成ゴム、合成洗剤、有機顔料、合成繊維、合成樹脂、農薬、防腐剤、防虫剤、医薬品などの製造に使用されています。そのベンゼンをウサギに経口投与すると、ベンゼンの約40%はそのまま呼気中に、約40%は代謝されて尿中に排泄されます。そのときの主な代謝産物は、フェノール（合成樹脂、染料、除草剤、香料などの製造原料）であり、その他にカテコール（写真用の現像液や金属の分析試薬）やムコン酸なども検出されています。

カテコールは、細菌によって環状構造が壊れ、代謝されることが知られて

います。その開環反応としては、1, 2-開裂（水酸基と水酸基の間を開裂）、2, 3-開裂（水酸基の隣の結合を開裂）の2つが知られていますが、その他の開裂は報告されていません。

エヴァンスらは、カテコールが1, 2-開裂を受けて、シス、シス-ムコン酸になり、さらにムコンラクトン、 β -ケトアジピン酸-エノール-ラクトン、 β -ケトアジピン酸などが中間代謝物として生産されることを報告しています。また、西塚らは、細菌がカテコールをまず2, 3-開裂して、 α -ヒドロキシムコンセミアルデヒドに酸化し、それが γ -オキザロクロトン酸となり、それから二酸化炭素を発生して、 α -ケト- γ -ヒドロキシバレルン酸になり、さらにギ酸（有機薬品の合成原料、溶剤、ゴム乳液凝固剤）を放出して代謝していると報告しています。

環状炭化水素類は、水に不溶性の化合物が多いために微生物が変換しにくく、それらを変換しやすくするために培養条件（温度、攪拌、通気、乳化剤など）を工夫して、できるだけ変換しやすい状態にしてやります。そして微生物にベンゼンを変換させると、ベンゼン環に2原子の酸素が取り込まれ、水酸化されてカテコールが生産されることがわかっています。その後1, 2開裂か、2, 3開裂して代謝されていきます。ベンゼンの微生物変換を図5-3に示しました。

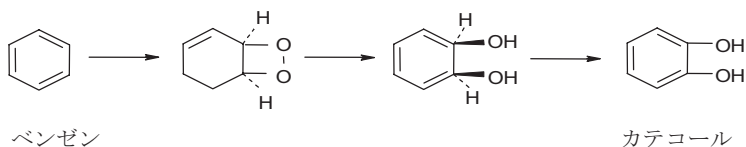


図5-3. ベンゼンの微生物変換

5.6 不凍液、溶剤を変換する

メタノールは、不凍液、溶剤、洗浄剤、光沢剤などの製造に用いられ、それらを変換する細菌や酵母は、土壤中から分離されています。メタノールを変換する微生物の分離は、通常の振盪培養法で、30~37℃で2~5日間培養します。生育の有無（培養液が濁るかどうか）でメタノールを変換しているか

第5章 微生物は何でも変換する

どうかを容易に判定しています。そして、濁った培養液から常法どおりに菌体をペトリ皿に移します。

メタノールを変換する微生物を分離するための栄養源としては、増殖因子を要求する菌株もあるために、培養液にビタミン類としてビオチン、サイアミン、ビタミンB₁₂などを添加します。

メタノールを変換する細菌については、廃水处理、醗酵生産、酵素利用などに応用する研究が多く行われています。細菌によるメタノール酸化は、まず、メタノール脱水素酵素によって行われ、メタノール脱水素酵素の補酵素は、PQQであることが明らかにされています。メタノール脱水素酵素は、メタノールを変換する細菌のペリプラズム（細胞膜と外膜との間の空間）の中であって、PQQ酵素のように細胞膜には結合していないので、細菌を破壊するだけで簡単に酵素を分離できます。

飴山らは、PQQ酵素の研究として、メタノールを原料として酢酸菌からPQQを発酵生産する研究をしていました。メタノールを変換する細菌がメチルアミンを変換するときに働く脱水素酵素は、トリプトファンが2つ重合してできるトリプトフィルキノン（TTQ）を補酵素としています。TTQも最近の研究で明らかになった新しい補酵素です。メタノール資化性細菌を用いるアミノ酸発酵も試みられ、セリン発酵の場合はメタノールを酸化することでホルムアルデヒドを供給し、外からグリシンを添加してセリンを合成させる方法がとられています。

加藤らは、ホルムアルデヒド耐性菌として分離した2つの共生細菌の菌体を同時に固定化した菌体では、0.6mol/Lのメタノールを75%の収率でギ酸に変換することを報告しています。

また、ハズーらは、約500株の酵母についてメタノールを変換するかどうかを調べたところ、4種の酵母にメタノールを変換する能力があることを報告しています。これらはメタノール資化性酵母と呼ばれています。細菌とちがって酵母の場合は、アルコールオキシダーゼという酵素によってメタノールを酸化します。菌体内には、その酵素が高い濃度で存在していることがわかっています。

以上のこととは別に、メタノールが経済的に安価な炭素源であることから、一部の国では微生物タンパク質を大量に生産する際の炭素源として利用しています。

5.7 洗剤、消毒剤を変換する

消毒剤として使われているクレゾールは、合成樹脂、可塑剤、農薬などにも使用され、コールタールから回収されるタール酸から精製されています。そのクレゾールには3つの異性体（オルト、メタ、パラ）があり、それぞれの異性体には毒性があることが報告されています。

異性体のひとつであるオルトクレゾールを*Pseudomonas*細菌が3-メチルカテコールに変換することが知られています。また、パラクレゾールは*Pseudomonas*細菌によって、メチル基が酸化されて、アルデヒドやカルボン酸になり、さらにプロトカテキュ酸に代謝される経路と、メチル基は酸化されずにベンゼン環が水酸化されて、4-メチルカテコールになる経路が知られています。

香料に用いられているトルエンは、顔料、染料、火薬、漂白剤、合成繊維、可塑剤、溶剤、医薬品などにも使用され、工業的に広く用いられている溶剤の一つです。トルエンを取り扱う人には、中毒症状が多くみられることが知られています。トルエンは古くは石炭から分離されていましたが、現在は石油から製造されています。

トルエンの微生物酸化経路は、メチル側鎖が酸化される系と環から水酸化される系の2つの経路があります。前者はメチル基が酸化されてベンジルアルコール、ベンズアルデヒド、安息香酸になり、カテコールに変換されます。後者はトルエンから2,3-ジヒドロキシトルエンになり、3-メチルカテコールに変換されていきます。トルエンの微生物変換を図5-4に示しました。微生物の種類によって経路は異なります。

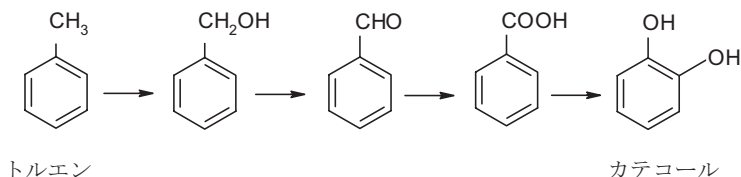


図5-4. トルエンの微生物変換

5.8 殺虫剤の原料を変換する

マッチの原料である硫黄 (S_8) は、殺虫剤や弾性ゴム製造の際の加硫などに使用されています。有機硫黄化合物は有害なものが多いのですが、元素 (S) としての硫黄は有毒ではありません。硫黄粉末は黄色で、硫黄が8つ結合して安定に保たれています。

硫黄は人の体の中では8番目に多い元素と言われていて、システイン、メチオニン、シスチン、グルタチオンなどのアミノ酸に含まれており、これらは含硫アミノ酸と呼ばれています。また、硫黄は地球上に遊離の状態、あるいは化合物として温泉や火山の付近で見かけられます。

火山活動によって莫大な量が地球上に蓄積されていてもよさそうに思える硫黄が、なぜ、もっとたくさん存在していないのでしょうか。それはおそらく、硫黄を変換する微生物が地球上にあらわれたために、硫黄の存在量が減っていったからだと考えられています。

岩塚らは、硫黄を含む土壌から硫黄を変換する微生物を分離しています。その菌はグラム陰性の桿菌で、単鞭毛を有した運動性をもつ細菌です。この細菌は硫黄を変換して硫酸にまで酸化することが知られています。

最近、深い海底のマグマの付近や高温の火山地帯からも、硫黄を変換する微生物が見つけれ、これらは好熱性硫黄細菌と呼ばれています。

ここでは常温で増殖する硫黄細菌について紹介します。硫黄細菌は硫黄を代謝する細菌の総称です。その硫黄細菌は大きく3群に分けられています。

- (1) 無色硫黄細菌は、温泉の代表的な臭いである硫化水素を変換して、菌体内に硫黄の粒を蓄積します。
- (2) 色素をもつ光合成細菌には、紅色の色素をもつ硫黄細菌と緑色の色素

をもつ硫黄細菌とがあります。

- (3) 硫黄やチオ硫酸を変換する微生物は、狭義の硫黄細菌と呼ばれています。

これらの細菌は、原油の脱硫や鉱石の微生物選鉱（バクテリアリーチング）に応用されることで注目されています。

硫黄を変換する硫黄細菌（*Thiobacillus*）とは、どのような細菌なのでしょうか。硫黄は糖類などちがって水に溶けないことから、固体の硫黄をどのようにして変換しているのか不思議です。

この菌を培養すると、培地に添加した固体の硫黄粒子の表面に硫黄細菌が付着していることが電子顕微鏡で確かめられています。付着してから増殖し、48時間以降になって菌が培地中へ遊離します。3日目以降にはpH1以下となります。このように強い酸性の中で生きていけるという硫黄細菌の特性は、一般の細菌では見られないことです。実際に細菌の表面で固体の硫黄がどのように反応しているのかはよくわかっていませんが、ステウデルらは硫黄（ S_8 ）の末端から酸化されてポリチオン酸硫黄が生成し、硫黄粒子が親水性になるのではないかと考えています。培地には通常の微生物でエネルギーとなっている炭素源が全く含まれておりません。しかしながら、硫黄細菌の増殖が認められるのは、硫黄の酸化で得られるエネルギーを用いて、大気中の二酸化炭素から細胞内成分を生合成する機能を持っていると思われます。このような細菌を化学合成細菌と呼んでいます。その化学合成細菌についての研究はスタートしたばかりで、今後の研究の発展が楽しみです。

5.9 プラスチックを分解する

プラスチックは美しく、軽く、強い素材として、私たちの生活を便利で豊かにするばかりではなく、近年、多くの産業の発展を支えてきました。しかし、自然界に放出され、捨てられたプラスチック類は、野鳥の足にからまったり呑みこまれたりして、野性生物にいろいろな被害を与えることから大きな社会問題になっています。

多くの微生物はエネルギーの貯蔵物質として、ポリエステル（プラスチックの一種）を生合成して体内に貯えています。最も良い条件で培養します

第5章 微生物は何でも変換する

と、菌体重量の80%にも達する大量のポリエステルを生産する微生物もいます。もちろん、微生物はポリエステルを分解することができることから、一般に微生物がつくり出す物質は微生物によって容易に分解されます。

そこで、近頃は微生物が容易に分解することができるような生分解性プラスチックの開発が進み、バイオマス由来のD-乳酸やデンプンを原料とした生分解性プラスチックについては、すでに一部商業生産が開始されています。今後、廃棄、リサイクル時の環境面における影響等に十分配慮し、耐熱性や強度等の物性の改良が進めば、さらに用途と需要の拡大が期待されます。これらの研究開発をさらに急がなければなりません。

生分解性プラスチックの開発のきっかけをつくったのは、1961年に発表された水素細菌によるポリ（3-ヒドロキシ酪酸）を生産する研究でした。その後、この物質をつくる微生物として、窒素固定菌、枯草菌、水素細菌、メタノールを変換する細菌などが次々に発見されました。

1980年イギリスのICI社は、活性汚泥から分離した水素細菌にプロピオン酸を炭素源として与えて培養することで、3-ヒドロキシ酪酸と3-ヒドロキシ吉草酸からなる共重合ポリエステルが出来ていることを見つけました。

日本でも、土肥らが、水素細菌に吉草酸を与えると、3-ヒドロキシ吉草酸を含むポリエステルが発酵生産できることを見い出しました。さらに、炭素源として吉草酸といっしょに酪酸を与えると、3-ヒドロキシ酪酸と3-ヒドロキシ吉草酸からなる共重合ポリエステルが高い効率で発酵生産できることを明らかにしました。また、炭素源として同じ水素細菌に4-ヒドロキシ酪酸を与えると、3-ヒドロキシ酪酸と4-ヒドロキシ酪酸からなる新しい共重合ポリエステルの発酵生産できることも見い出しています。

ゲッチンゲン大学（ドイツ）の研究グループは、水素細菌の遺伝子を大腸菌のDNAに組み込んで、大腸菌でも共重合ポリエステルの発酵生産できることに成功しています。

近い将来、バイオポリエステルが釣り糸、網、農業用のフィルム、医療用材料、電子材料などの新しい機能材料として開発されるだろうと土肥らは述べています。

今後、生分解性プラスチックが一般に普及されてくると、地球環境の保護に大いに貢献できるようになります。

合成繊維ビニロンの原料であるポリビニールアルコール（PVA）は、水に溶解し、接着剤、乳化安定剤、フィルム、糊剤等に使用されています。鈴木らは、PVAの分子量が2万から9万までであれば、土壌より分離された細菌で完全に変換することを、また、2種類の細菌の共生によって変換することも見い出しています。PVAの微生物変換を図5-5に示しました。

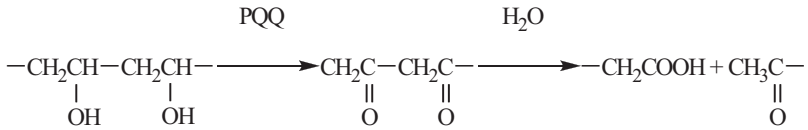


図5-5. PVAの微生物変換

ポリエチレングリコール（PEG）は、化粧品、医薬品、潤滑油などに広く使用されています。水溶性のPEGは、分子量2万までを変換する細菌が見つけられていますが、変換する細菌として、2種類の細菌（*Pseudomonas*、*Flavobacterium*細菌）の存在が必要で単独の細菌では変換しません。PEGの微生物変換経路を図5-6に示しました。

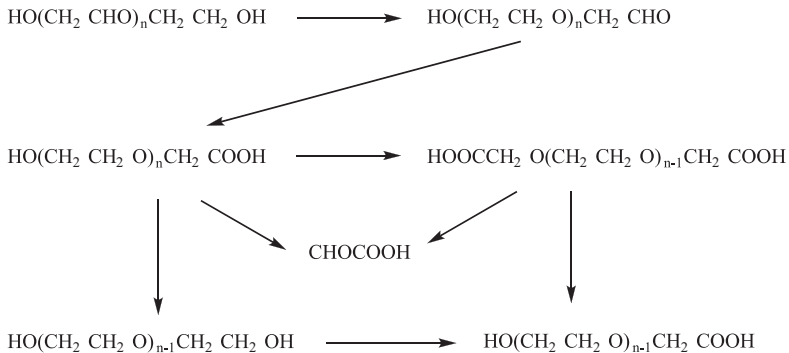


図5-6. PEGの微生物変換

5.10 塗料、界面活性剤を変換する

合成樹脂塗料の原料であるペンタエリスリトールは、アルキド塗料、ポリウレタン樹脂原料、塩化ビニール可塑剤、化粧品や界面活性剤をつくるときに使用されています。ペンタエリスリトールの製造は、1分子のアセトアルデヒドと4分子のホルムアルデヒドに、アルカリ触媒を添加して合成しています。

私たちの体にペンタエリスリトールを投与すると、その85%が変換しないまま約30時間で尿中に排泄されます。ペンタエリスリトールを変換する微生物の検索には、ペンタエリスリトールがこぼれてしみ込んでいるような場所から採取した土壌に、ペンタエリスリトールを含む培養液を加え、30℃で培養すると、目的の微生物を分離することができます。ペンタエリスリトールの構造を図5-7に示しました。

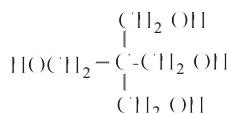


図5-7. ペンタエリスリトールの構造

私たちの行った実験で、ペンタエリスリトールに類似の化合物を変換する微生物がいるかどうかを調べた結果、ペンタエリスリトールを変換する細菌は、ペンタエリスリトール類似化合物、エタノール、ブタノール、糖類等は変換することはできましたが、ベンゼン、トルエン、メタノールは変換することはできませんでした。この菌は培養液の粘度が高いことから、菌体外に多糖類を生産していました。その多糖の構成糖を調べましたところ、グルコース、アラビノース、ラムノースからなっていることがわかりました。

5.11 防腐剤を変換する

防腐剤は一般にホルマリンとして市販され、約36%ホルムアルデヒド水溶液で、10%以下のメタノールが加えられています。その防腐剤に含まれているホルムアルデヒド (HCHO) は、メラミン系合成樹脂や消毒剤、農薬、ビ

ニロンなどの原料として使われています。そのホルムアルデヒドは、鼻や眼などの粘膜に対して刺激が強く、高い濃度のホルムアルデヒドに触れると、肺浮腫や肺炎をおこすことが知られています。この物質は、病院や医療関係の研究機関で器具の消毒や生物標本の保存などに広く使用されていますが、それを使った後の廃液処理が大きな環境問題となっています。化学的にホルムアルデヒドを処理することはできますが、このときに使用する化学物質によって起こる2次公害の恐れがあります。

太田らは福山市内の土壌から、菌株にホルムアルデヒドを気体状態で培地に供給して変換する細菌を分離しています。菌に一度とり込まれるとギ酸として再び培地中に排出されることはありませんので、ホルムアルデヒドの処理には有効です。

また、武末らは下水の汚泥からホルムアルデヒドを変換する微生物を分離しています。ホルムアルデヒドの濃度が最終濃度0.05%を含む培地に下水汚泥を加え、30℃で3日間培養すると、ホルムアルデヒドを変換する微生物が分離できます。変換された微生物の菌体の形、大きさ、染色剤での反応、酵素活性の有無など、どのような化合物を変換するのか、または変換しないかなどの菌学的諸性質を調べた結果、この微生物は*Pseudomonas*属の細菌であると同定されています。本菌株を培養した後、リン酸緩衝液でよく洗浄した洗浄細胞によるホルムアルデヒドの変換を調べてみると、ホルムアルデヒドを変換するときの反応液の最適pHは7から8の範囲でした。この場合、反応液のpHは反応時間の経過にともなって低くなります。これはギ酸が生成していることを示しています。洗浄菌体によるホルムアルデヒドの変換反応の最適温度は40℃付近でした。ホルムアルデヒドの減少にともないギ酸が生成していることもわかりました。生成したギ酸は徐々に変換されていきます。

5.12 合成樹脂の原料を変換する

ポリスチレン樹脂の原料であるスチレンは、無色ないし微黄色の液体で、都市ガスのような特異な臭いがあり、水には溶けにくい但有機溶媒にはよく溶けて、エチルベンゼンを脱水素して製造されています。スチレンの用途と

第5章 微生物は何でも変換する

してはポリスチレン樹脂、合成ゴム、ポリエステル樹脂、イオン交換樹脂、合成樹脂塗料などがあります。このようにスチレンはプラスチック工業において重要な合成モノマーですが、環境汚染をもたらすこともあります。スチレンの構造を図5-8に示しました。

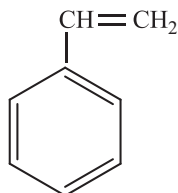


図5-8. スチレンの構造

私たちの体内にスチレンが侵入すると、その代謝経路としてはスチレンの側鎖のビニール基のエポキシ化が起こり、さらに酸化されて馬尿酸などができると考えられています。私たちがスチレンを吸った場合、200ppmでは気分が不快になり、400ppmでは頭痛が起こることが知られています。これまで微生物が酸化防止剤を含んでいる市販のスチレンを変換することは知られていませんでした。しかし、1990年にガリックらは、市販のスチレンから酸化防止剤を取り除いたスチレンを嫌気性微生物が変換することを見つけています。スチレンを唯一の炭素源およびエネルギー源とする培地に添加して、微生物を植えてから12日目に培養液中の成分を調べた結果、エチルベンゼン、トルエン、ベンゼン、安息香酸、ベンジルアルコール、ベンズアルデヒド、酢酸フェニル、2-エチルフェニール、パラクレゾール、オルトクレゾール、フェノール、メチルシクロヘキサン、酢酸、ギ酸などの多くの中間代謝物が見つかっています。

5.13 化粧品を劣化させる

生活物質の微生物による劣化は、化粧品、食品、生薬、プラスチック材料（可塑剤）などでよく起こることが知られています。また、文化財（木造彫刻）に微生物が繁殖して傷めてしまうことも時々報じられます。いろいろなものに微生物が生えることで劣化を受けると、変色、変形、変質、汚染、腐

敗などが起こりますが、微生物の中でもカビによる劣化が多いようです。木造彫刻の生物的劣化の原因としては、微生物の他にも昆虫や小動物などで被害を受けることもあります。

ここでは化粧品の微生物による劣化について述べてみます。化粧品が微生物で劣化を受けるという不思議に思われるでしょうが、よくあることです。化粧品の構成成分には、油脂類、界面活性剤、溶剤（エタノール、水）、湿潤剤（ポリオール類）、防腐剤、酸化防止剤、粉末（タルク、クレイ）、多糖類、ビタミン類、ホルモン、色素、香料などが含まれているので、乳液、シャンプーなどの化粧品は、微生物劣化を受け易いことは容易に理解できます。例えば、シャンプーが微生物劣化を受けると変色、不快臭、浮遊物、沈殿物などが認められるようになります。しかし、ボマード、口紅などの固形物や香水、ヘアー・トニックなどはアルコールの含有量が高いので、微生物劣化を受けることは少ないようです。化粧品の劣化が人間の体に作用して引き起こされる主な障害としては、結膜炎、皮膚炎、感染症などがあります。

化粧品から分離された微生物には、細菌では*Pseudomonas*属、*Bacillus*属、カビでは、コウジカビ属、アオカビ属が多く、酵母では、*Candida*属が多く分離されています。

一般に、化粧品には防腐剤が配合されていますが、防腐剤は、私たちの皮膚にとってはあまりよいものではありません。そのために多く配合することはできませんので、化粧品の微生物劣化を防ぐことが今後の大きな研究課題となります。

5.14 食品産業廃棄物を飼料化する

ビールや酒産業の副産物として得られる酵母菌体が、私たちの栄養源として利用できることはすでによく知られています。しかし、タンパク質源としての酵母の利用は、食品産業廃棄物を処理するにも莫大な費用がかかることにより、まだ広く行われていませんが、このような食品産業廃棄物をかけがえのない資源として有効利用することが重要になってきています。

こうした状況を背景に、食品産業廃棄物の有効利用を促進することで、環境への負荷を減らすことを目的とした法律が平成12年度に制定、平成13年5

第5章 微生物は何でも変換する

月に施行され、食品関連事業者は、平成18年度までに発生する食品産業廃棄物排出量の20%をリサイクル、または削減しなくてはなくなりました。

私たちの行った実験では、菓子業界から出る廃棄カスタードクリームを栄養源として良好に生育する食料酵母が得られました。その中のNBRC1101酵母は、廃棄カスタードクリームに良く生育し、10～15%（w/v）濃度、pH6～10の培地で好氣的に36時間、30℃の培養で最適な結果が得られました。細胞内栄養素をチェックする目的で栄養源を調べた結果、タンパク質、糖、エタノール、カロチノイド、ビタミンB₁、B₂、B₆、パントテン酸、葉酸、ニコチン酸、ビオチン等が菌体内に含まれていることがわかりました。

養殖魚の餌として魚粉が使われていますが、その魚粉の代わりに*Candida*酵母を含む餌が鮭科の魚に与える影響を調べた結果、25%から50%*Candida*酵母を含む餌に代えても魚に受け入れられることがわかりました。

一方、鯉には*Candida tropicalis*、*Candida utilis*などの酵母からのタンパク質を利用することができ、大豆や肉粉、骨粉を与えるよりも安価な栄養源で見劣りをしない魚に育つという良い結果が得られています。水産養殖では主な動物タンパク質源は魚粉ですが、その利用には限界があり、価格の高い動物タンパク質の餌を使うことは水産養殖の持続や収益に深刻な影響を与えていることから、その代わりとなるタンパク質源の研究は年々増えています。

餌の有効性をタンパク質源として魚粉を含む餌と、NBRC1101酵母菌体からつくられた餌を3ヶ月間与えて比較した結果、餌の栄養学上、成長パラメーター上の差異はほとんど認められませんでした。酵母の菌体内組成を表5-3と表5-4に示し、魚粉タンパク質で育ったテラピア（鯛に似た魚）と赤色酵母タンパク質で育ったテラピアを口絵1（E）に示しました。

テラピアの餌の中に酵母タンパク質と植物タンパク質を使うことは餌のコスト削減や養殖収益の増大になります。

表5-3. 酵母菌の菌体内組成 (mg/g 乾燥細胞)

菌名	タンパク質	全糖量	エタノール量 (g/l)	カロチノイド量
<i>Candida tropicalis</i>	22.9	147.3	0.2	—
<i>Rhodotorula rubra</i>	69.3	333.4	0.1	0.34
<i>Candida utilis</i>	77.8	303.3	2.3	—

表5-4. 酵母菌の菌体内ビタミン類の組成 ($\mu\text{g/g}$ 乾燥細胞)

菌名	B ₁	B ₂	B ₆	パントテン酸	葉酸	ニコチン酸	ビオチン
<i>Candida tropicalis</i>	12.0	3.7	11.4	49.2	5.5	280.0	0.4
<i>Rhodotorula rubra</i>	14.2	14.5	7.4	74.1	2.8	316.8	0.8
<i>Candida utilis</i>	10.0	10.2	14.7	84.0	0.9	459.5	0.5

5.15 材質を劣化させる

地球上には、いろいろな微生物が多種多様な環境条件の中で暮らし、自然界を形づくっていますが、特に日本の気候は、高温で多湿であるために微生物の宝庫だと言われています。微生物の繁殖による劣化は、文化財を傷めてしまうことが時々報じられますが、いろいろな物に微生物が生えることで劣化を受けると、変色、変形、変質、汚染、腐敗などが起ります。

微生物による被害を防止する防菌技術として殺菌と静菌があります。殺菌は、微生物を死滅させる方法で、静菌（制菌）は死滅させずに、ある期間微生物の活動を抑制する方法です。

食品工業での主な殺菌方法は、加熱殺菌（赤外線、高周波、マイクロ波）、冷殺菌（消毒剤、紫外線、X線、 β 線、 γ 線）、除菌（濾過、洗浄、沈降、電気集塵）等があります。

静菌方法には、低温保持、凍結保持、糖や食塩の添加、水分除去（乾燥、濃縮）、防腐剤添加、pHの低下（酸性側に）、酸素除去（真空、ガス置換）、雑菌遮断（包装、コーティング等）、発酵等があります。

微生物は住宅に被害をもたらす

この数年間に住宅様式が大きく変化しています。昔は木造住宅が多かった

第5章 微生物は何でも変換する

のですが、最近は大きく生活様式が変わり、コンクリート製の高層建築（湿度が高く、カビの発生しやすい環境）で生活する人達が多くなっています。

カビが発生しやすい場所には、水を多く使用する浴室、調理室等があり、また風通しの悪い壁、天井、床、倉庫等がカビの被害を受けやすくなっています。

カビは自然環境の中で広く分布し、農産物や土壌から容易に分離されています。カビの臭いの原因物質は、カビ臭前駆物質の2, 4, 6-トリクロロフェノール（防腐剤や殺菌剤）がカビ（*Trichoderma*, *Aspergillus*）によって、カビ臭原因物質である2, 3, 6-トリクロロアニソールに変換されて、強烈なカビ臭を発生するとされています。2, 3, 6-トリクロロアニソールの構造を図5-9に示しました。

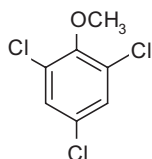


図5-9. カビ臭原因物質（2, 3, 6-トリクロロアニソール）

微生物は文化財を破壊する

日本の文化財は私たちの先祖が残してくれた貴重な文化遺産です。これを私たちはいかにして保存し、子孫に伝えるかが私たちの使命です。わが国の文化遺産は木質や紙質が多く、その上に高温多湿の気象条件が微生物の繁殖に好適な環境をもたらします。

1972年に発見された奈良県にある高松塚古墳（7世紀末から8世紀初め）は、湿度の高い状態で密封されていました。発見時から*Pencillium*カビや白カビの発生があり、その都度、殺菌するなどの処置はしていたのですが、2007年の10月の点検時には3ヵ所に黒カビが発生し、新たな対策をとることになりました。また検討会では、原状保存を前提として壁画の色があせないような修理方法を検討しましたが、やはり原状保存は難しく、石室を解体

し、保存・修理することになりました。最初に取り外された天井石の裏側などには、黒カビが広がっていたことがわかっています。

また、2008年9月、キトラ古墳（7世紀末から8世紀初め）の定期点検の結果、カビや細菌などの混合物と見られる黄色い粒状のものが見つかり、天井東南側の余白には、黒い粒状のカビらしきものが3か所から確認されています。これらの場所から出現した微生物の特性を調査し、解明することにより、問題となる環境条件を排除するような対策をとることが繰り返しの被害を避けることになると思います。

微生物はプラスチックを分解する

プラスチックは一般に物理的にも化学的にも安定した物質であり、微生物の影響を受けて変質、劣化や腐食を起こしにくいと言われています。しかし、プラスチックの用途はさわめて幅広く、使われている環境や、プラスチックの種類、カビや細菌の違いによって変質や腐食が発生しています。カビや細菌の影響を受けやすい合成樹脂は、ポリウレタン樹脂、シリコン樹脂、塩化ビニール樹脂です。

イヤホンのネオプレンとナイロンの部分に*Aspergillus*カビが繁殖して腐食が進み、使用不能になった例があります。また、わが国では、塩化ビニールを倉庫に入れてから約1ヶ月で塩化ビニールの表面にカビが発育し、シミが残り、小さい腐食孔が生じて電線としての機能が害され、製品価値がなくなってしまうという例があり、塩化ビニール被覆電線のカビによる被害がさわめて大きいこともわかっています。

プラスチックに及ぼす細菌の作用は5～6ヶ月の間に、分子量の小さいもの（紫外線防止剤、可塑剤等）に繁殖し、その後は、分子量4万以上のものにも影響を受けるようになります。高分子材料に含まれている可塑剤にも微生物の作用を受けやすいものが多くあり、特にエステル型の可塑剤は、微生物によって簡単に加水分解され栄養源になってしまいます。温度が20℃以上、湿度が50%以上の環境では、プラスチックは微生物の作用を受けて分解され、変色・腐食などの変化が起こることになります。

微生物は工業材料を分解する

工業材料の代表的な切削油は高度の精度が要求され、あらゆる面からの品質管理に注意しなければなりません。その切削油に微生物が繁殖するとコロイド性に変化して褐色から緑色に変色、悪臭を発生させて役に立たなくなります。切削油中に繁殖している細菌には、*Pseudomonas*が多いと言われています。また、同じ産業用油である電気絶縁油にカビが発生して火災になったこともあったようですが、その絶縁油内から見つかったカビは、*Pencillium*と判定されています。さらに、家庭やホテルなどのトイレや浴室によく使用されている白色セメントにもカビが一面に繁殖しているのをよく見かけますが、不快な感じを与えますので、使用する場所を考えて安全性の高いカビ殺菌剤の利用などを考える必要があります。一般に金属やレンズは、微生物の被害を受けることは少ないのですが、わが国のように高温多湿ですと、塵やゴミによって運ばれた微生物が金属やレンズの表面に付着して、塵やゴミを栄養源として生育した微生物が、酸性の化合物を分泌して金属やレンズの表面を侵害しますが、レンズを侵害する主なカビには、*Aspergillus*などが知られています。また鉄、銅、アルミニウム等の金属を変色、侵食、強度低下を起こす原因になっている主な微生物には、*Aspergillus*、*Rhizopus*、*Fusarium*、*Bacillus*、*Thiobacillus*、*Ferrobacillus*等が挙げられます。また、海では、海洋細菌が鉄片の表面に吸着し、海草の栄養源になり、変色や劣化させていると言われています。海水中の鉄片に付着していた海洋細菌の集落を口絵1(F)に示しました。電気製品の微生物被害は、特に、増粘剤、保護剤、乳化剤や低分子添加物の炭素源、窒素源を微生物が栄養源とする場合が多いように思われます。身のまわりの主な微生物被害を表5-5に示しました。

表5-5. 身のまわりの主な微生物被害

材料	主な微生物	主な被害
木材	<i>Aspergillus</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Pencillium</i> , <i>Cephalosporium</i> , <i>Ceratocystis</i> , <i>Chaetomium</i> , <i>Mucor</i> , <i>Coriolus</i> , <i>Paxillus</i> , <i>Schizophyllum</i> .	変色、劣化

5.15 材質を劣化させる

木綿	<i>Cellulomonas, Cellvibrio, Alcaligenes, Aspergillus, Fusarium, Trichoderma.</i>	劣化、汚染
羊毛	<i>Brachysporium, Bacillus, Curvularia, Aspergillus, Fusarium, Pencillium.</i>	劣化、汚染
ナイロン	<i>Botryodiplodia, Blennoria, Monascus, Spiegazzinia, Trichothecium.</i>	劣化
ビニロン	<i>Cladosporium, Alternaria, Pullularia, Corynebacterium.</i>	劣化
皮革	<i>Aspergillus, Fusarium, Cladosporium, Acremonium, Alternaria, Scherotium.</i>	劣化
プラスチック	<i>Chaetomium, Cladosporium, Candida, Rhodotorula, Pichia, Hansenula.</i>	強度低下
塩化ビニール	<i>Rhizopus, Aspergillus, Pencillium, Myrothecium, Aurobasidium, Mucor.</i>	侵食、汚染
塗料	<i>Alternaria, Cladosporium, Phoma, Pencillium, Dematium, Torula.</i>	変色
接着剤	<i>Aspergillus, Pencillium, Trichoderma, Pseudomonas, Bacillus, E.coli.</i>	腐敗、変色
アルミニウム	<i>Aspergillus, Pencillium, Rhizopus, Fusarium, Trichoderma, Corynebacterium, Bacillus, E.coli, Micrococcus, Vibrio.</i>	侵食、変色
鉄鋼	<i>Thiobacillus, Ferrobacillus, Clonothrix, Aspergillus, Gallionella.</i>	変色、侵食
