

第4章：環境に役に立つ微生物

微生物は体が小さくても数が多いために、有機物と接触する表面積の総計がとても広くなり、その働きはさわめて大きく、さまざまな物質（動物の排泄物、家庭の排水汚染物、洗剤、殺虫剤、除草剤、合成有機化合物の製品等）を分解します。

一般の家庭では、台所や風呂、洗濯など、日常生活においてたくさんの水が使われ、使ったあとの汚水は下水管を通して汚泥処理施設に入り、そこで汚水の中の有機物は、好気性や嫌気性の微生物を含む活性汚泥によって分解され、金魚が棲めるほどきれいになった水を河川に放流しています。

最近、住民から寄せられる悪臭についての苦情件数は、騒音について2番目に多く、その対策として、いろいろな化学的あるいは物理的方法があります。しかし、悪臭の成分を除くには大きな装置が必要で、維持費も高つくため、微生物を使って容易に悪臭を除く方法が注目されるようになりました。

角田らは、家畜の糞などの悪臭成分である硫黄化合物を短時間で無臭化処理する微生物を見つけました。廃棄物の抽出液を培地として、そこから無臭化能のある微生物を分離、培養して、その洗浄菌体を用いて硫化水素を除く実験を行ったところ、菌体を入れた場合には硫化水素が数倍も早く減少し、無臭化能のある微生物の培養液からは、硫黄やチオ硫酸などが検出されています。本菌株は菌体だけでなく、菌株の無細胞抽出液も無臭化酵素活性を持っていることから、その微生物をカプセルやフィルムの中に固定化して、畜産業や食品製造業などで発生する悪臭を除くことも可能になりました。

1989年には、アラスカ湾沿岸で起こった原油による海洋汚染では海水を浄化するために、アメリカの環境保護庁（EPA）の研究者チームとエクソン社との共同事業で、アラスカ湾沿岸に適応して棲みついている微生物の増殖を促進させるための栄養物の散布を行って、自然界にいる微生物を活用して

第4章 環境に役に立つ微生物

汚染された海水を浄化することに成功しました。環境を浄化するために、近頃はやりの遺伝子組み換えの微生物を使うことなく、バイオ修復という方法を用いました。原油の分解を自然にまかせておくと、自然界は栄養物が少ないために、元のように修復するには年数がかかることから、自然界に栄養剤を局部的に散布して、その期間を短縮しました。栄養剤となるものは、親油的な性質をもった担体（支持物）に窒素とリンを含ませたもので、これを散布することにより、担体は原油と水の界面に集まることになります。EPAの調査によると、この微生物増殖栄養物の散布によって、原油を分解してできる副産物も自然界の食物連鎖の一部となり、海水に残留するなどの悪い影響はありませんでした。

1991年の湾岸戦争の時に報道されたような重油流出による海洋汚染や、あるいは工場や自動車の排気ガスによって起こる酸性雨の問題も大きく報じられるようになり、全ての企業が環境に対する配慮を抜きにしては成り立たない時代になっています。

今世紀の人類にとっての最大の課題の一つに、この地球環境汚染問題が挙がっています。その地球環境汚染問題を表4-1に示しました。

表4-1. 地球環境汚染問題

水圏	地圏	大気圏
富栄養化	難分解有機化合物	温暖化ガス (CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O)
地下水汚染	廃棄物	酸性雨 (SO _x 、NO _x)
難分解化学物質	重金属汚染	悪臭物質
重金属汚染	砂漠化	浮遊アレルギー物質
廃油	熱帯雨林の破壊	オゾン層の破壊
複合汚染	土壌酸性化	光化学スモッグ

4.1 石炭の中の硫黄や窒素を除く

地球上の生物にとって、生体の重要な構成物質であるタンパク質やビタミン類の中に含まれている硫黄は、生体成分の半分以上に含まれていて、生物体の中の硫黄と土中の硫黄の間での硫黄循環系には、土や水の中に生息して

4.1 石炭の中の硫黄や窒素を除く

いる一群の硫黄細菌が活躍しています。その細菌は、動植物の死体を分解して還元型の硫黄である硫化物に変え、これを細菌が硫黄粒子、さらに硫酸塩に酸化します。植物は、細菌が分解した硫酸塩を吸収し、その植物を動物が飼料として食べたものを分解することで、動物体内のタンパク質に含まれる硫黄含有アミノ酸に変換されます。このように生物圏での硫黄循環には、微生物が大きな役割を荷っていることがわかっています。

近年、東京電力技術研究所は、鉄酸化細菌を大量に培養し、石炭を粉末にして水を加えた液体にこの細菌を植えた結果、硫化鉄の硫黄は硫酸のかたちで石炭から分離され、3週間後には、無機硫黄分を90%程度も除くことができる技術を開発しています。

無機硫黄は、石炭を燃焼する前に化学的、物理的、微生物学的に除去できますが、有機硫黄の除去には、いろいろと問題が多く、そのために有機硫黄を取り除く工業技術はまだ開発されていません。

石炭から硫黄を取り除くための微生物変換には、困難なことが3つあり、1つ目は、石炭が水に溶けにくいこと、2つ目は、有機硫黄の分析技術の開発がおくれていること。3つめは、データの再現性が乏しいことです。

リーらは、鉱油、または鉱油と溶媒の混合物を用いて石炭を乳化させ、これを硫黄細菌の細胞、または、その無細胞抽出液で分解したところ、24時間後には、約48%の硫黄が減少したと報告しています。微生物による変換によって、効率よく石炭から有機硫黄をとり除くことが可能になれば、石炭産業に革命をもたらすといっても過言ではありません。

将来、石炭の脱硫処理でよい結果を得るためには、燃焼前に物理的、化学的、あるいは微生物的な処理を組み込んだ技術が必要になることでしょう。

生物体でも、産業のうえにおいても大きな役割を担う硫黄は、太古から微生物による硫黄循環系によって供給されてきました。微生物の硫黄循環を図4-1に示しました。

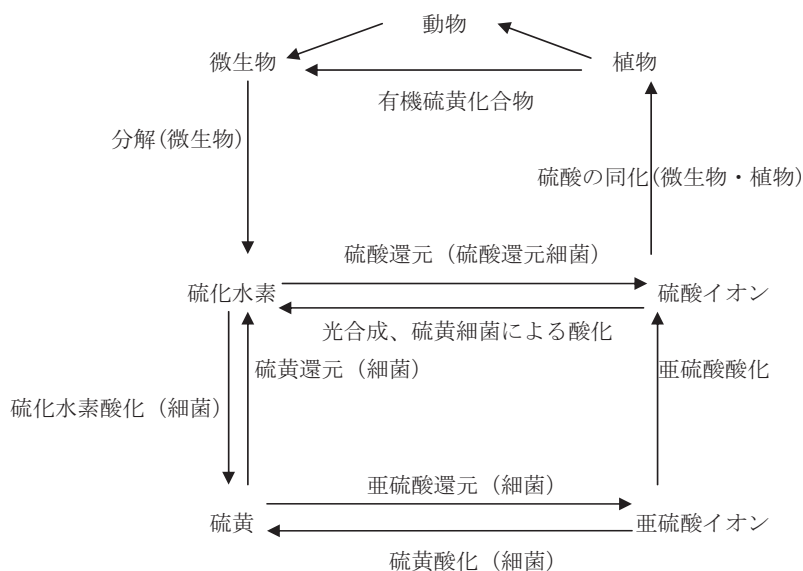


図4-1. 微生物の硫黄循環

大気の5分の4を占める窒素の循環に微生物の働きがあります。生体のほとんどをつくっている成分であるタンパク質には、8～16%の窒素が含まれており、生体に含まれている窒素が、最終的には微生物の働きにより分解されて空気中や土中に入ります。そして、空気中の窒素は窒素固定菌により、また、土中に入った窒素は土壌細菌の作用を受けて植物に同化され、それを動物が分解するというサイクルがこの地球上での窒素の循環系となっていますが、1年間で約10億トンの窒素がこの循環系で回っていると言われていす。微生物の窒素循環を、図4-2に示しました。

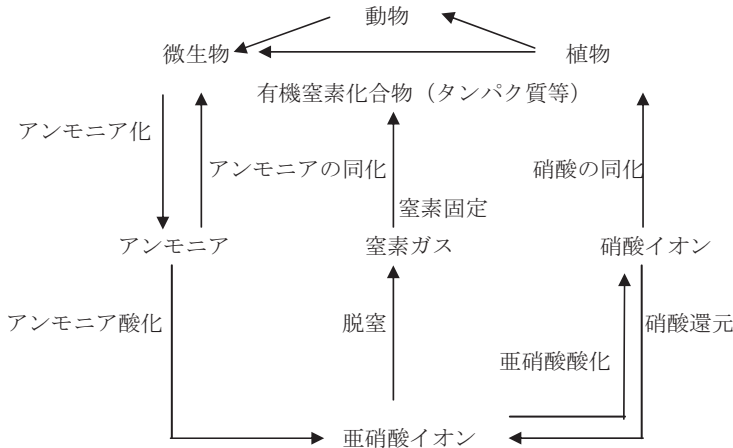


図4-2. 微生物の窒素循環

微生物が地球上で行っている炭素循環に果たしている役割にも大きなものがあり、地球全体の炭素循環は1年間で約100億トンと推定されています。植物や海洋の単細胞藻類が、太陽エネルギーを使って空気中の二酸化炭素を同化し、それらの体に蓄積された有機炭素化合物を動物が分解し、その有機炭素が再び生物に利用されるためには無機物の形に変換されなければなりません。しかし、有機炭素の無機化の90%は、主としてカビや細菌などの微生物によって分解が行われています。

4.2 有機塩素化合物を変換する

地下水は、これまでは安全なものと考えられていましたが、近頃は、各地の地下水から有機塩素化合物のトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどが検出されるようになり、これらが発ガン性をもっていることから大きな社会問題となっています。

トリクロロエチレンは、常温では無色透明の液体で、不燃性、甘い香りを持つ揮発性、水に難溶などの性質があり、冷媒フロンガスの製造、殺虫剤、ドライクリーニング、溶剤、脱油脂洗浄剤などに用いられているものです。上記の製品が多く使用される時代になり、地下水にトリクロロエチレンが混

第4章 環境に役に立つ微生物

入るようになったものと思われます。また、テトラクロロエチレンは、ドライクリーニング洗剤などに使用され、中枢神経障害、肝臓・腎臓障害などに影響があるといわれています。

矢木らは、土壤中の微生物によって、比較的高い濃度（100ppM）のテトラクロロエチレンが変換され、しかも、その時には中間物質ができること、嫌気条件下において代謝されることを報告しています。テトラクロロエチレンの微生物変換を図4-3に示しました。

高木らは、細菌によってテトラクロロエチレンがジクロロメタンと二酸化炭素に分解することを、また、別の細菌がテトラクロロエチレンを変換して、トリクロロエチレンを生成することを報告しています。このように、嫌気条件下においては、微生物がテトラクロロエチレンを変換することが見いだされています。トリクロロエチレンの微生物変換を図4-4に示しました。

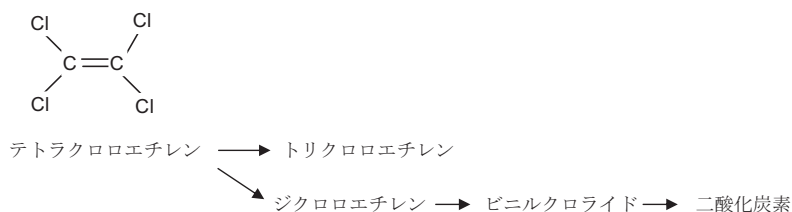


図4-3. テトラクロロエチレンの微生物変換

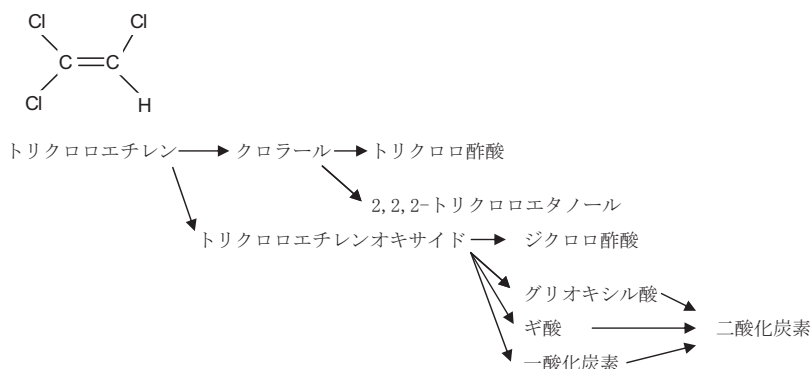


図4-4. トリクロロエチレンの微生物変換

4.3 二酸化炭素を分解する

好気性の微生物による変換については、1985年にウイルソンらが土壌中に天然ガスを通気すると、トリクロロエチレンが変換されることを見出し、最近では、ワケットらも、純粋に分離した細菌がトリクロロエチレンを好気的な条件のもとで変換することを報告しています。

矢木らは、トリクロロエチレンを好気的条件下で変換するメタン酸化性菌を純粋に分離することに成功しています。この菌株は、運動性を持たないグラム陰性菌で、メタンやメタノールを炭素源として増殖し、高い濃度（10mg/ml）のトリクロロエチレンを好気的な条件で変換します。この菌株によるトリクロロエチレンの変換経路では、まず、トリクロロエチレンは、メタン酸化酵素の作用によってトリクロロエチレンオキシドになり、さらに変換して、ジクロロ酢酸、グリオキシル酸、一酸化炭素、ギ酸に、その後、二酸化炭素に変換していくことが知られています。

これまでは、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンなどは、自然界ではほとんど変換されないと考えられていましたが、土壌から分離された微生物で変換することが明らかになっています。

4.3 二酸化炭素を分解する

地球環境の破壊の大きな問題の一つとして、大気中の二酸化炭素の濃度が年々高くなっていることが大きく取り上げられています。大気中には種々のガスが存在していますが、もっとも多いのが窒素ガスで約78%、ついで酸素の21%、両方あわせると99%になります。残りの1%にオゾン、水素、ヘリウム、ネオン、二酸化炭素（0.03%）などが含まれおり、これらが地球の気候の変化に重大な影響をあたえています。

1900年から2000年までの100年間に二酸化炭素が25%増え、地球上の気温が約0.8℃上ったと報告されています。この値は無視できないぐらいの大きな影響を気象上に与えることになりますが、温暖化の原因とされている二酸化炭素は、太陽から地球に届く短波長の光線を素通りさせてしまいますので、二酸化炭素の量が増えると、地上に届く赤外線の放射量が増加し、地表面に受ける放射量が増えるため、地球の温度が上がることになります。

2008年7月、日本の洞爺湖でサミット（主要国首脳会議）が行われ、「地球

第4章 環境に役に立つ微生物

温暖化対策」の議論の結果、主要8カ国（G8）は、2050年までに世界全体の温室効果ガス排出量を少なくとも50%削減するという目標を世界全体の目標として採用することについて求めるという認識で一致しました。

地球温暖化が進むと、土壤微生物による枯れ葉などの分解が活発になり、大気中の二酸化炭素濃度がこれまでの推定以上に高くなる可能性が大きくなることがわかり、2010年時点での地球の平均気温は、これまでの予測よりも最大で1.5℃高くなると見込まれています。しかし、これまでの温暖化予測は産業活動などに伴って排出される二酸化炭素で算出されており、2100年には1.4から5.8℃の気温上昇の恐れがあると推測されています。これまでの研究では、気温が上昇すると土壤微生物の活動が活発になり、二酸化炭素濃度に影響を与えるということは考慮されていませんでした。しかし、今回初めて、日米英など7か国の研究チームが微生物の影響を検証しています。その結果、光合成による大気中の二酸化炭素の吸収よりも、土壤中に堆積している枯れ葉や動物の死体などの有機物が土壤微生物によって分解されて大気中に放出される二酸化炭素の方が多いことがわかり、試算では従来の予測よりもさらに高い気温上昇が見込まれています。

二酸化炭素の問題は、単なる環境問題にとどまらず、私たちの生活にも深くかわる資源やエネルギーの問題でもあります。根本的には、植物が自然界での炭酸固定のほとんどを行っていると考えてよいのですが、微生物の行っている炭素固定も無視できない量であると以前から言われています。

この問題の緊急な対応策としては、増殖の早い微生物を利用することで、二酸化炭素から付加価値の高い物質を生産することが考えられています。

炭素固定機能を持つことがわかっている微生物には、光合成細菌や藻類などの光独立栄養微生物と水素細菌や硫黄細菌などの化学独立栄養微生物とがあります。

微生物が二酸化炭素を固定する経路としては、

- (1) カルビンサイクル
- (2) 還元的TCAサイクル
- (3) アセチルCoA経路などがあります。

4.4 環境汚染物の凝集剤をつくる

まず、(1)の経路で二酸化炭素を固定する微生物には、光合成細菌、化学合成細菌などが挙げられます。この経路は複雑で多くの酵素を必要とします。

(2)の経路で二酸化炭素を固定する微生物には、高温性水素細菌、緑色硫黄細菌等が挙げられます。この経路は、TCA回路を逆回転させて二酸化炭素を固定しています。

(3)の経路で二酸化炭素を固定する微生物には、メタン生産菌が挙げられます。この経路では、二酸化炭素を利用して有機化合物を生産させることができます。二酸化炭素を炭素源としての有効利用としては、菌体（タンパク質、脂質など）・代謝産物（菌体外多糖、菌体内ポリマー）・酵素類（ヒドロゲナーゼ）・ビタミン類（ビタミンB₁₂）・薬品類（メタン、ギ酸、酢酸）等がつくられことが考えられ、特に、水素細菌を培養して微生物の菌体を取り、その中のタンパク質や脂質などを生産することが有望視されています。

河田らは、酢酸生産菌による二酸化炭素からの酢酸の生産が150g/L/日となり、多くの酢酸を生産することを報告しています。また、メタン生産菌による二酸化炭素からギ酸の生産も有機物質の生産につながる方法です。二酸化炭素は地球上でもっとも豊富な炭素資源ですが、この二酸化炭素を微生物の働きを利用して、もっと付加価値の高い生産物に変えることができるならば、これからの産業として成り立っていくように思います。

4.4 環境汚染物の凝集剤をつくる

廃水処理に用いられている活性汚泥法は、それぞれの時期に応じて特徴的な微生物相（マイクロフローラ、微生物が何種類か集まったもの）をつくりながら変動します。有機物を微生物で分解するために、有機物を分解する能力の高い微生物を探すことや、浮遊物を凝集し、それを沈降させて液を清澄な状態にするために、凝集能の高い有機物分解菌を採取することも必要なことと思います。微生物が浮遊物を集め、それを沈めてしまう凝集現象は、自然界ではよく見られますが、どうして凝集するのかという機構については、微生物の菌体外につくり出す高分子化合物が影響を与えているものと考えられています。その菌体外に生産される高分子化合物としては、多糖、タンパク質、核酸、脂質、あるいはそれらの複合体が考えられています。

第4章 環境に役に立つ微生物

現在、広く利用されている合成高分子系の凝集剤には、ポリアクリルアミドがあり、機能や経済性の点ではすぐれていますが、環境面や安全性面において問題点が指摘されています。これらの欠点を解消するために、新しい凝集剤の研究と開発が各方面から望まれています。

倉根らは、粘土（カオリン）を凝集させる働きのある微生物の分離を試んでいます。現在、下記のような微生物が、凝集剤の生産能をもっていることがわかっています。

凝集剤を生産する能力のある微生物

グラム陽性菌：*Rhodococcus*（ロドコッカス）属（NOC-1）

Nocardia（ノカルジア）属

Corynebacterium（コリネバクテリウム）属

グラム陰性菌：*Alcaligenes*（アルカリゲネス）属

Pseudomonas（シユードモナス）属

菌株 NOC-1のつくる凝集剤は、環境汚染、あるいはヘドロに対して、めざましい凝集活性を示します。菌株 NOC-1のつくる凝集剤を使って、可溶性の着色液から色抜きする働きを、黒インクの水溶液をモデルにして調べてみたところ、黒インクの着色物質は凝集沈澱して、透明な上澄み液が得られました。さらに、その凝集剤は、豚の糞尿汚水を無色透明に近いほどまでにする凝集効果もあり、注目されています。

微生物がつくり出す凝集剤NOC-1の生産コストを下げるために、いろいろな培養法が検討されていますが、NOC-1の凝集活性をもっている部位にはタンパク質が含まれていて、それが重要な役割を果たしていること、またそのタンパク質は、疎水性アミノ酸を比較的多く含んでいることがわかっています。

多胡らは、活性汚泥から分離したグラム陰性菌のなかの一種である *Pseudomonas* 属が、浮遊物といっしょに凝集体となったまま生育し、培養液を静置すると、速やかに沈降して透明な上澄み液が得られることを報告し

ています。*Pseudomonas* 属細菌のフロック（水中の浮遊物が集まって肉眼的な大きさの集塊になったもの）については、細胞膜にあるタンパク質と複合体を形成しているムコ多糖同士が互いに絡み合っているために、細胞同士が多数凝集してフロックを形成することが知られています。

4.5 原油を強制回収する

石油の起源については、数億年前に海水中のプランクトンの死骸が海底に沈積して、長時間にわたって微生物の作用や圧力や熱の作用で変化してできたという生物起源説が有力です。このようにしてできた石油の中にある化石エネルギーは、陸地および海底の調査、あるいは採掘の技術の進歩によって、採掘可能な埋蔵量が将来さらに増加するものと思われます。

石油供給力の指標の一つに、可採年数と呼ばれるものがあります。確認されている埋蔵量を1年の採掘生産量で割ると石油の可採年数が出ます。1989年の末には、可採年数が46年と出ていましたが、この式では、新しい油田の発見や技術の開発によって生産量が増加することは考慮していないことから、石油の利用は、実際には46年以上になることでしょう。しかし、化石燃料の埋蔵量はおのずと限界があります。そこで、化石エネルギーのこれからの利用については、微生物の能力を用い、または微生物によって化石燃料から有用な生産物を取り出すなど、石油の3次回収と呼ばれる分野での有効利用が考えられます。

原油の自噴、あるいはポンプで汲み上げるのが1次回収、高圧ガスや水を油層に注入して回収するのが2次回収、そして、溶媒や界面活性剤などを加えて、岩石層に吸着している原油を流動化させて回収することが3次回収です。原油の回収には、1次回収、2次回収の操作後に、なお埋蔵量の65%以上の原油が油層内に残留していることが認められています。この残留量はたいへん大きな量と言わなければなりません。

そこで、3次回収としての物理化学的な石油強制回収プロセスがすでに開発されていますがまだ、操作のコストが非常に高くなります。最近、アメリカ合衆国のエネルギー省などの援助もあってオクラホマ大学とオクラホマ州の石油エネルギー研究所などが微生物による石油強制回収法の開発について

第4章 環境に役に立つ微生物

の研究を活発に進めています。

微生物によって石油を強制的に回収する方法には、微生物だけの働きだけではなく、微生物が生産する物質の有機酸や二酸化炭素、界面活性剤、多糖などが回収のための材料になると言われています。

石油の強制回収に期待されている微生物の一つとして、*Xanthomonas* 属細菌の生産する多糖のキサントンガムが挙げられます。

フィフナーらは、油田付近の土壌から分離した枯草菌が、耐塩性、耐熱性であり、かつ嫌気的な条件で生育してポリマーを生産することから、この微生物による石油の強制回収が期待できると報告しています。

石油の強制回収に期待されている微生物には、*Xanthomonas*属細菌の他に、*Bacillus*, *Clostridium*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Desulfovibrio*, *Pseudomonas*細菌などがいます。

石油は、人類全体にとっての有限なエネルギー資源です。その資源の有効利用を図る方法の一つとして、微生物による石油の強制回収についての研究と開発をさらに続けていくことが大切だと考えます。

今後、性能がよくて、かつ安価な3次回収剤を微生物の生産物の中から見出すことができれば、石油、石炭について大量にある化石エネルギー資源のサンドオイルについても、今後大きな期待がもたれます。

4.6 重油を分解する

湾岸戦争によって多量の重油が海に放出されて、世界的に重大な環境問題になったことはすでに提起しましたが、海洋に流出した重油は、最初は蒸発したり、溶解したりするなどの物理的あるいは化学的な変化を受けます。しかし、これらの変化は比較的短時間に終わってしまうので、海水から油分を十分に取り除くことは困難になります。これまでは、吸収マットや油処理剤を使用するか、表面の重油を柄杓などで少しずつとり除く方法しかありませんでした。このような方法では、重油を取り除くことに年数もかかり、その間に海で生活している動植物に大きな被害を与えてしまいます。そこで迅速に、かつ安全に汚染処理するために、微生物を利用するという研究がされるようになりました。

1990年に水産庁は、微生物を利用して、油による海洋汚染を除去する技術開発に乗り出す方針を固め、地球環境の保全に積極的に貢献するために、5年計画で微生物の培養と実用化の実験をはじめました。

村上らは、川崎港で採取した海水から分離したグラム陰性菌による原油の分解を調べた結果、細菌が原油を分解すると、乳化されて海水中に分散することが観察され、原油の乳化と細菌による分解とは密接な関係があることを報告しています。

原油から分離された重油が、船や貯蔵タンクから海上に流出すると、広い海域を汚染して、その海域の環境や生態系に重大な影響を与えることになり、水産業に多大な損害を与えるため、重油を微生物で分解する技術開発は重要な研究テーマになっています。また、重油の微生物分解についても、現在、いくつか報告がされています。

私たちの研究室では、長期間、油に汚染されていた土壌からA重油（硫黄含有量が2%以下の重油）を分解する細菌を分離し、菌学的諸性質を調べたところ、その細菌は *Moraxella* 属に分類されることがわかりました。A重油分解細菌を口絵1(D)に示しました。

4.7 重金属を変換する

重金属はある濃度以上になると微生物にとっては有毒です。しかし、重金属イオンの毒性がどのような機構で起こっているのかは、まだ十分にわかっていません。

基本的には、微生物の細胞内の酵素と重金属イオンとが結合することによって、酵素活性が低下するものと考えられています。微生物が金属化合物を変換するときに3つの反応が考えられます。それらは、微生物が持っている酵素によって起る反応、微生物が生産する生産物と金属との反応、および金属イオンが菌体に吸着する反応です。それぞれの反応について説明をします。

微生物が持っている酵素によって起る反応

水銀に耐性のある細菌によって、2価の水銀イオンは金属水銀に還元され、また、鉄酸化細菌によって、2価の鉄は3価の鉄に酸化されます。さらに、カビによって亜ヒ酸塩からトリメチルアルシンに変換されます。

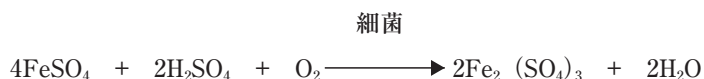
第4章 環境に役に立つ微生物

微生物が生産する生産物と金属との反応

微生物の生産物として硫酸、硫化水素、二酸化炭素、アンモニアなどがあります。これらの物質が金属と反応して金属化合物をつくり、さらに、金属を含む有機化合物が微生物で変換されることで金属イオンが遊離します。

金属イオンが菌体に吸着する反応

鉄酸化細菌の細胞の外膜に鉄イオンの吸着が認められます。また、鉄酸化細菌の作用によって酸性溶液中で、下記に示すような反応が起こり、この硫酸第一鉄が他の金属を酸化して、鉱石から金属イオンを溶出させます。



この反応を利用して、鉱石中の金属を採集する方法が開発されています。このような技術をバクテリアリーチング（微生物選鉱）と呼んでいます。土壌の中は弱酸性で、硫酸塩も含まれていますが、土壌の中での鉄の腐食には、硫酸還元菌が大きな役割を果たしています。

水銀イオンは、生体内のいろいろな有機物質と結合して、毒性を発揮します。例えば、アミノ基、カルボキシル基、チオール基、イミダゾール基、プリン塩基、ピリミジン塩基などと容易に反応することから、これらの反応基をもつタンパク質、核酸などの多くと結合し、そのために生物に対して強い毒性を示します。

微生物の中には、水銀化合物に耐性を示すものがあります。有機水銀は、わが国では、水俣病の被害で深刻な問題になり、最近では、アマゾン奥地での砂金採りの人たちに被害を及ぼしていることが報じられています。微生物が有機水銀化合物を分解する場合は、有機水銀の水銀 (Hg^{2+}) と炭素の結合が切断されて、水銀は金属水銀になり、これが気化して反応系の外に外れることになり、微生物の作用によって、無機水銀 (HgCl_2) からメチル水銀が生成することが知られています。大腸菌を無機水銀といっしょに培養すると、大腸菌は硫化水素を発生し、水銀を硫化水銀に変えることで水銀の毒性をなく

します。これは微生物が自分で解毒作用をしているものと考えられます。

アルミニウムも微生物によって作用を受けます。飛行機の燃料貯蔵タンク（アルミニウム）の中で微生物（カビや細菌）が増殖して、その微生物が生産する酸によってタンクが腐食し、飛行機の大事故につながる事が予想されます。井上らは、ジェット機のタンクを腐食する主役のカビは、ジェット燃料の中から分離された*Cladosporium* 属であると報告しています。またアメリカでは、このカビがジェット機の翼をはげしく腐食し、ジェットエンジンが翼から脱落する事故が起きたと伝えています。

ウランは、硫黄酸化細菌の作用によってできる硫酸がウランを酸化させることから、これを利用することで、ウラン鉱石からウランを溶出させることができます。

最近、リウマチ治療薬で使われる金コロイド溶液をコウジカビに加えると、カビの菌糸の表面に金粒子が吸着することがわかり、効率のよい金の回収法になりそうだといわれています。実験条件を工夫することで回収率は90%以上になり、カビの菌糸の表面についている金粒子をルツボで焼いたところ、金だけが残ることが確認されたといえます。上記の結果から、長井らは、金メッキ液や絹の染色液などから金を回収するのにこのカビが使えるそうだと報告しています。

微生物による無機化合物の変換については、まだ、十分に明らかにされていません。今後の研究が期待されます。

4.8 青酸カリウムやヒ素塩を分解する

毒性の強いシアン化合物は、製鉄工場、メッキ工場、化学工場などから出る廃液に多く含まれていて、それが河川へ流出すると大きな社会問題になります。

桃、梅、ビワのような植物は、実や葉や種子が傷つけられると、青酸を遊離することが知られています。これは植物に含まれている青酸配糖体（アミグダリン）の分解によるもので、ゴムの木の種子にふくまれているリナマリンも、青酸配糖体としてよく知られています。

ストロバルらは青酸配糖体を含む土壌が、青酸カリウムを分解し、土壌微

第4章 環境に役に立つ微生物

生物がシアン化合物を代謝することを見つけ、そのことを報告しています。彼らはシアン化水素を添加した培地で担子菌を培養した後、菌体内のアミノ酸の有無を調べた結果、アラニンが検出されたことも報告しています。

日本でも桜井は、川や池から多くのシアン化合物分解菌を分離したところ、有力な微生物は不完全菌類で、ある菌株は24時間以内に100ppmの青酸カリウムをほぼ完全に分解したと述べています。

スコロンスキーらは、土壌から分離した細菌が0.1モルの青酸カリウム濃度を最適とした培地で生育すること、さらに、2.5モルの濃度でも生存できることを確認し、この菌株は、0.1モルの青酸カリウム濃度を含む弱アルカリ性の培地で、振盪培養（40℃）すると、二酸化炭素とアンモニアを発生することを報告しています。

またマッキニーらは、シアン分解細菌によって青酸がホルムアミドを経て、ギ酸、アンモニアに分解され、さらにギ酸は微生物によって二酸化炭素と水に分解されると述べています。上記のように、多くの研究者によってシアン化合物の微生物分解が報告されています。

アメリカの研究者がボストン近郊の古い硫酸工場でヒ酸鉄などのヒ素化合物が含まれた廃棄物からヒ素を分解する微生物を見つけました。そのヒ素化合物に有機物として乳酸塩を加えたところ、ヒ酸塩が多いほど乳酸塩をよく分解し、生育も良くなりました。この微生物はヒ酸塩で汚染されている土壌を浄化すると思われますので、今後、ヒ素化合物の廃棄処理に使える可能性があります。

4.9 汚染物質を分解する

昔から人間は、生活の安定や、より快適さを求めて日々努力をしてきました。近代に入ってから、いろいろな工業が発展し、生活する上で大変便利になりましたが、その副次的な結果として、汚染物質による環境汚染を招くに至ってしまいました。

現在、問題となっている環境汚染物質を、微生物を利用してなくそうという研究課題がたくさんあります。環境汚染物質の微生物分解の研究課題を表4-2にまとめました。

表4-2. 環境汚染物質の微生物分解の研究課題

汚染の課題	研究課題
有機塩素化合物	微生物分解による再利用
二酸化炭素	光合成微生物による再利用
有害重金属	微生物による重金属の濃縮、回収
廃油流失	微生物分解による再利用
不溶性廃棄物	微生物による生産物の利用
合成物質の代替品	微生物による分解技術

私たちのまわりではエネルギー源である石油や灯油、それらから出来た化学合成品や農薬などの有機合成化合物が多量に捨てられ、海や河川、湖沼、田畑、山林、そして大気などあらゆる環境を汚染しつつづけています。こうした汚染環境下では、今まで以上に微生物が持つ自然浄化能に頼らなければなりません。汚染物質を分解する微生物についての研究は、まだスタートしたばかりです。今後研究の進展が期待されます。

4.10 微生物のいろいろな化学反応

微生物の化学反応は、微生物が生産する酵素の作用によって起こります。その微生物の化学反応には、(1)酸化反応、(2)還元反応、(3)脱炭酸反応、(4)脱アミノ反応、(5)糖重合反応、(6)加水分解反応、(7)エステル化反応、(8)脱水反応、(9)縮合反応、(10)アミノ化反応、(11)アセチル化反応、(12)カニッツァーロ反応等があります。下記にいろいろな反応例を書き、その酵素を有している微生物名をカッコ中に記載しました。

(1) 酸化反応

- (a) 乳酸 \longrightarrow ピルビン酸 (*Mucor*)
マンニトール \longrightarrow フラクトース (*Acetobacter aceti*)
- (b) プロピオン酸 \longrightarrow 乳酸 (*Aspergillus niger*)
コハク酸 \longrightarrow リンゴ酸 (*Aspergillus niger*)
- (c) アセトアルデヒド \longrightarrow 酢酸 (*Pseudomonas*)
アクロレイン \longrightarrow アクリル酸 (*Saccharomyces*)

第4章 環境に役に立つ微生物

- (d) エタノール → 酢酸 (*Acetobacter*, *Saccharomyces*)
エチレングリコール → グリコール酸 (*Acetobacter pasteurianum*)
- (e) 酢酸 → グリコール酸 (*Aspergillus niger*)
- (f) 酢酸 → コハク酸 (*Rhizopus nigricans*)
- (g) プロピオン酸 → ピルビン酸 (*Aspergillus niger*)

(2) 還元反応

- (a) アセタール → L-1, 2プロパンジオール
(*Saccharomyces cerevisiae*)
メチルグリオキサル → D、L-乳酸 (*Aerobacter*)
- (b) グリコールアルデヒド → エチレングリコール (酵母)
- (c) フマル酸 → コハク酸 (*Bact. Succinicum*, *E. coli*)
- (d) グリセリン → トリメチレングリコール (*Aerobacter*)
- (e) グリコール → 酢酸 (*Clostridium*)
- (f) セリン → プロピオン酸 (細菌)

(3) 脱炭酸反応

- (a) コハク酸 → プロピオン酸 (*Propionibacterium pentasaceum*)
リンゴ酸 → ピルビン酸 (*Marazella*)
- (b) アスパラギン酸 → β -アラニン (細菌)
グルタミン酸 → γ -アミノ酪酸 (細菌)
- (c) ピルビン酸 → 酢酸 (細菌)
 α -ケトグルタル酸 → コハク酸 (酵母)
- (d) ピルビン酸 → アセトアルデヒド (酵母)
- (e) グルタミン酸 → コハク酸 (酵母)

(4) 脱アミノ反応

- (a) D、L-セリン → エチレングリコール (酵母)
- (b) アラニン → プロピオン酸 (*Bacillus putrificus*)
アスパラギン酸 → コハク酸 (酵母)
- (c) アラニン → ピルビン酸 (細菌)
- (d) アスパラギン酸 → フマル酸 (酵母)

(5) 糖重合反応

- (a) D-グルコース → セルロース (*Acetobacter xylinum*)

(6) 加水分解反応

- (a) デンプン → デキストラン (*Macerans*)
 デンプン → グルコース (*Clostridium butylicum*, *Rhizopus*)
 (b) ペクチン → 酢酸 (*Erwinia carotovora*)
 オリブ油 → オレイン酸 (細菌)

(7) エステル化反応

- (a) エタノール → エチル燐酸 (*Sacch. cerevisiae*)
 グルコース → D-フラクトース1, 6-ニ燐酸 (酵母)
 (b) エタノール → エチルアセテート (酵母)
 乳酸 → 乳酸エステル (*Hansenula anomala*)

(8) 脱水反応

- (a) グリセリン → アクロレイン
 (*Bacillus*, *Clostridium*, *Lactobacillus*)

(9) 縮合反応

- (a) アセトアルデヒド → アセチルメチルカルビノール (酵母)

(10) アミノ化反応

- (a) α -ケトグルタル酸 → グルタミン酸 (グルタミン酸発酵菌)
 (b) フマル酸 → アスパラギン酸 (*E.coli*, *Staphylococcus aureus*)

(11) アセチル化反応

- (a) グリシン → アセチルグリシン (*Clostridium kluyveri*)

(12) カニッツァー反応

- (a) アセトアルデヒド → エタノール + 酢酸
 (*E.coli*, *Aerobacter aerogenes*)
 (b) ピルビン酸 → エタノール + 酢酸
 (*Acet. ascendens*, *Acet. xylinum*)

山田：「微生物利用学概論」(一部改変)、p.8 (1974)

第4章 環境に役に立つ微生物

これらの多くの微生物の化学反応は、工業生産の上で重要なものです。特に多くの微生物がいろいろな有機化合物を変換する能力を持っていることから、有機合成反応でつくり出すことが困難な化合物でも、常温常圧で菌体や無細胞抽出液を用いて、合成することができることで利用が期待されています。

難分解性の脂環式炭化水素は、芳香族炭化水素に比べて、微生物変換の文献が非常に少なく、その脂環式炭化水素であるシクロアルカンの微生物酸化は、シクロヘキサノールからシクロヘキサノンに変換され、その後は下記のような酸化経路で代謝されることが報告されています。シクロヘキサノンの微生物変換を図4-5に示しました。

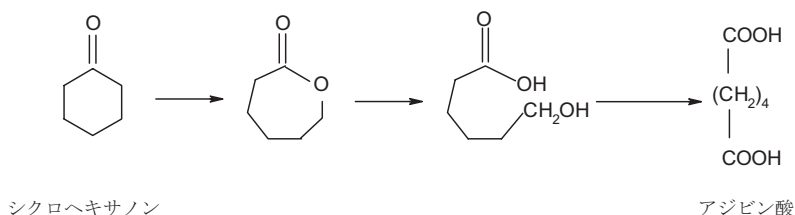


図4-5. シクロヘキサノンの微生物変換

次期の天然エネルギーと言われているオイルサンドから得られる重質原油量は、約4兆バレルで通常原油の2倍以上と推定されており、石油燃料代替資源として注目を浴びています。日本では新潟県の新津油田に、またカナダのアルバータ州では、従来の石油資源に加えて、世界最大のオイルサンド資源を保有しています。アルバータ州のエドモントン付近で採掘されるオイルサンドには、1兆7,000億バレルのピチューメンと呼ばれる重油の一種が含まれています。そのピチューメンには、シクロヘキサノンの誘導体が多く含まれ、その誘導体の一つであるシクロヘキサノールカルボン酸の微生物変換が金田らによって解明されました。この微生物変換を図4-6に示しました。

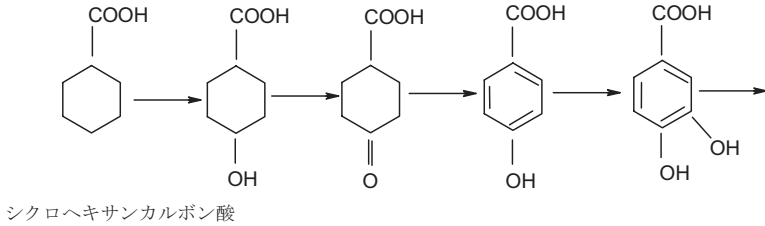


図4-6. シクロヘキサンカルボン酸の微生物変換

一般にアルケンの最初の微生物変換は、末端のメチル基と不飽和の両方を酸化し、それ以後は、2-ヒドロキシ酸になり、それが脱炭酸され、炭素数が1個少ない飽和脂肪酸に変換されます。アルケンがアルカンに比べて、一般に変換されにくい炭素源です。アルケンの微生物変換を図4-7に示しました。

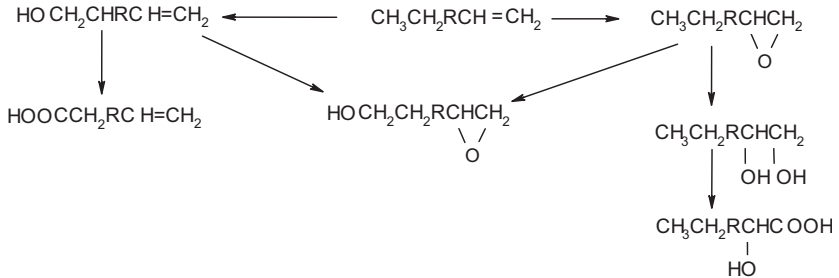


図4-7. アルケンの微生物変換

アルカンの微生物変換は、通常の脂肪酸代謝と同様に β 酸化を受けて代謝されます。初期の酸化の機構としては、最初に末端のメチル基が酸化されてアルコールが生成され、次にアルデヒドが、その後にカルボン酸に変換されます。アルカンの微生物変換は、 C_9 以下は毒性が強いために微生物変換が困難です。 C_9 以上のアルカンの微生物変換を図4-8に示しました。

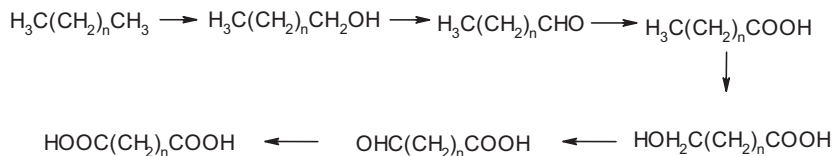


図4-8. アルカンの微生物変換

環境汚染物質であるポリ塩化ビフェニール（PCB）は、絶縁性、不燃性などの特性により、昔は、トランス、コンデンサーといった電気機器をはじめ幅広く利用されてきました。PCBの分子が保有する塩素の数は、209種類の異性体を持ち、塩素の置換性によって、微生物変換に大きく影響することがわかっています。PCB分解菌による主な代謝経路を図4-9に示しました。図から明らかなように、塩化安息香酸へ酸化分解されて、塩化カテコールになり、環状が開裂して分解されていきます。この微生物変換は、グラム陰性菌の*Acinetobacter*と*Alcaligenes*の2菌株によって代謝されることが明らかにされています。

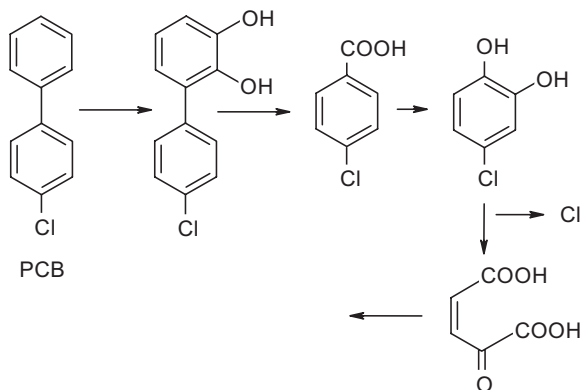


図4-9. PCB分解菌による主な代謝経路