微生物の基礎

小林 達治*

はじめに

今迄の微生物に関する書物は発酵微生物、医学や獣医学微生物、水産微生物、植物病理学微生物、土壤微生物等々専門化したものがほとんどであった。しかし微生物は広く、この自然界に分布し、お互いに関連しあひながら生存を続けている以上、地球上において、微生物は一体どのような役割を果しているか、という相互の関連性において論じなければならないと思う。

私は土壤微生物学が専門であるので、土壤微生物を基盤として、一般微生物、環境に関連の深い微生物の役割と利用について次のような項目について論述したい。

- (1) 微生物の基礎
- (2) 微生物の取り扱い方
- (3) 廃水中の微生物と水処理技術
- (4) 光合成細菌
- (5) 土壤微生物の役割と利用
- (6) 微生物によるエネルギー生産
- (7) 微生物のその他の役割と利用
(重金属化合物の変化・金属腐食・バクテリアリーチング、微生物災害、悪臭発生と防除等)
- (8) 自然界の物質循環に果す微生物の役割

自然環境における微生物の作用を十分理解し、農耕土壤においては植物を健全に生長させる肥沃な土壤を保つことができるようにし、また、微生物の管理を正しく行い、汚染公害を引き起さないようにつとめなければならない。さらに微生物の基礎を十分理解することにより、有用な微生物を上手に利用して、有効成分を抽出する資材にしたり、廃水処理を効率よくするなど、応用面を益々拡大させるよう努力することも必要である。

1. 微生物の基礎

微生物は微小なるため顕微鏡を通してのみ観察できる。その分類は表1¹⁾に示す如くである。

表1 微生物の分類学上の位置

多細胞で組織分化が非常に発達している動物、植物と組織分化がほとんど見られない単純な構造の原生生物(微生物)に大別し、その微生物はさらに動植物のような核膜のある真核細胞をもつ高等微生物と、核膜をもたない原(始)核細胞からなる下等微生物に分けられる。

ウイルスは生物と無生物の性質をもつ超微小体である。また輪虫や線虫などは細菌や放線菌などに比較してかなり大きい。自然界においてはそれらと相関性をもちながら活躍しているので微生物として取扱うことが多い。

(A) 細菌

形態と大きさ：細菌(*Bacterium*, 複数*Bacteria*)は幅がほぼ1μ(ミクロン)以下の単細胞微生物で、

* 京都大学農学部農芸化学教室助教授 Michiharu KOBAYASHI

一般に単純な形態のものが多く、その形によって球菌(coccus)、桿菌(rod)、らせん菌(spirillum)に大別される(図-1参照)。普通、細菌は細胞を2分裂して増

図-1 細菌の形態・孢子・鞭毛

殖する。桿菌は常に長軸の方向に分裂し、細胞が離れないときは、普通連鎖状になるが、分裂後、細胞が、V、Y、L字状につながるコリネ型と呼ばれるものや、環境浄化(廃水処理等)に関係の深い鉄バクテリアの一種 *Sphaerotilus* 属のように細胞が菌鞘に包まれ、枝分かれしたように見える桿菌もある。

菌体がらせん状に捻転している菌をらせん菌と呼ぶが、その中で細胞の短いコンマ状のものを特に弧菌(vibrio)という。

細菌の大きさは球菌では直径0.5~1 μ 、桿菌で0.5~1 $\times$ 2~3 μ 程度のものが多い。しかし細菌は環境条件が不都合な状態になると、しばしば多形現象(多形態性, pleomorphism)を示し、形態を非常に変形することがあり、形態のみで分類することは非常に困難であることが多い。

ある種の細菌は高分子化合物からなる粘質物を生成し、これが莢膜(capsule)や粘質物(slime layer)として細胞を囲んでいることがあり、これらの粘質物は土壌の団粒構造形成や水処理の際のフロック形成に関与するのである。

(B) 細菌の孢子と鞭毛、グラム染色性

ある種の細菌は環境条件が悪くなると孢子(spore)を形成する種類がある。孢子ができると周りの菌体はやがて自己消化して溶けてしまう。孢子は普通の栄養細胞に比べて、乾燥や熱、薬品などに対する抵抗性が

非常に強い耐久体であり、それ自体は代謝活性がほとんどないが、適当な条件下では発芽して、再び栄養細胞になり、増殖する。

孢子形成の有無は細菌を分類する重要な特長の1つとなっている。ほとんどが桿菌で好気性または通性嫌気性(酸素の存在の有無にかかわらず生育できる菌)の *Bacillus* 属と嫌気性の *Clostridium* 属がある。

孢子ができただけの場合、前者では細胞の形がそのままである *Bacillus* 型を、後者では細胞の中央部が膨大する *Clostridium* 型か、孢子が先端にできて、そこだけが膨れる *Plectridium* 型をとることが多い。

細菌の種類によっては運動器官として鞭毛(flagella)をもつものがある。鞭毛の有無、着生部位、本数は分類における重要な指標の1つとなっている。その着生の仕方でも図-1のように極毛と周毛があり、極毛はさらに単毛、束毛、両毛に分けられる。鞭毛は発育の旺盛な細胞にだけ認められ、培養が古くなったり、条件が悪くなると脱落する。

細菌を分類するに際して、必ず試験すべき性質にグラム染色性がある。菌体をゲンチアン・バイオレット液で染めたのちヨード液、ついでアルコール処理する。いわゆるグラム染色法によって、紫色に染まるものをグラム陽性菌、アルコールで脱色されるもの(ただし、脱色後うすいフクシン液などで染めるため、桃色に染まる)をグラム陰性菌という。

(C) 細菌・放線菌の分類

細菌を分類する場合は通常 Bergey の細菌分類便覧(Bergey's Manual of Determinative Bacteriology)第8版(1974)²⁾に従って行う。この書では細菌を形態、利用するエネルギー源、グラム染色性、酸素ならびに窒素依存性、孢子形成能などをもとに表2

表2 Bergey 8版による細菌・放線菌の分類

(1)光合成細菌 (2)滑走細菌 (3)菌鞘細菌 (4)発芽細菌および付属器官をもつ細菌 (5)スピロヘータ (6)らせん状およびわん曲型細菌 (7)グラム陰性、好気性の桿菌、球菌 (8)グラム陰性の通性嫌気性桿菌 (9)グラム陰性の嫌気性細菌 (10)グラム陰性、好気性の球菌、球桿菌 (11)グラム陰性の嫌気性球菌 (12)グラム陰性の独立栄養細菌 (13)メタン生成細菌 (14)グラム陽性球菌 (15)孢子形成桿菌、球菌 (16)グラム陽性の無孢子桿菌 (17)放線菌とその関連微生物 (18)リケツチア (19)マイコプラズマ

に示すような19の菌群に大別している。その中の主なものについて概略説明する。

(1) 光合成細菌 (Phototrophic bacteria)

光合成細菌はBergeyの細菌分類便覧7版までは *Photosynthetic bacteria* と命名されていたが8版か

表3 光合成細菌の分類

Order Rhodospirillales (Pfennig and Trüper)

Family 1. Rhodospirillaceae

Genus 1. Rhodospirillum

Species : rubrum, tenue, fulvum, molischianum, photometricum

Genus 2. Rhodopseudomonas

Species : palustris, viridis, acidophila, gelatinosa, capsulata, sphaeroides

Genus 3. Rhodomicrobium

Species : vannielii

Family 2. Chromatiaceae

Genus 1. Chromatium

Species : okenii, weissei, warmingii, buderi, minus, violascens, vinosum, gracile, minutissimum

Genus 2. Thiocystis

Species : violacea, gelatinosa

Genus 3. Thiosarcina

Species : rosea

Genus 4. Thiospirillum

Species : sanguineum, jenense, rosenbergii

Genus 5. Thiocapsa

Species : roseopersicina, pfennigii

Genus 6. Lamprocystis

Species : roseopersicina

Genus 7. Thiodictyon

Species : elegans, bacillosum

Genus 8. Thiopedia

Species : rosea

Genus 9. Amoebobacter

Species : roseus, pendens

Genus 10. Ectothiorhodospira

Species : mobilis, shaposhnikovii, halophila

Family 3. Chlorobiaceae

Genus 1. Chlorobium

Species : limicola, vibrioforme, phaeobacteroides, phaeo vibrioides

Genus 2. Prosthecochloris

Species : aestuarii

Genus 3. Chloropseudomonas

Species : ethylica

Genus 4. Pelodictyon

Species : clathratiforme, luteolum

Genus 5. Clathrochloris

Species : sulphurica

らは *Phototrophic bacteria* と変更された。表3に示すように3科にわけられており、これまで紅色非硫黄細菌と呼ばれていたものが *Rhodospirillaceae*, 紅色硫黄細菌といわれていたものは *Chromatiaceae*, 緑色硫黄細菌といわれていたものは *Chlorobiaceae* として分類されることになった。

Chromatiaceae と *Chlorobiaceae* は嫌気条件を好み、次の反応式にみられるように水素供与体として硫化水素や水素を光エネルギー利用のもとによく生育する。また菌種によってはリンゴ酸のような低級脂肪酸を水素供与体として利用するものもある。光合成細菌はそのような基質を利用して、炭酸同化作用や窒素固定をする能力をもち、また、水素ガスを発生する点が藻類と大いに異なるところである。基質が不足すると硫黄をさらに酸化して、硫酸にすると共に水素ガスを発生する。*Chromatiaceae* は硫化物が多量含まれている環境においては、菌体内に硫黄粒を蓄積することができるが、*Chlorobiaceae* はそのような硫黄粒を菌体内に蓄積することなく菌体外に貯わえるといわれている。

Rhodospirillales は水素供与体として低級脂肪酸等を用い、下記に示すような式に従いよく生育する。

Rhodospirillales を用いた光合成に関する研究の初期の時代には低級脂肪酸を水素供与体としてのみ使用すると考えていたが、その後、次の酪酸の反応式に示すように炭素源としても資化することが確認された。

また、水素ガスを発生する能力をもっている。

光合成細菌の特性の概略を参考までに表4に示して

表4 光合成細菌の特性

Phototrophic bacteria	Colour	Hydrogen donors effective for growth			Requirement of growth factors	Growing ability under dark condition	Ability of nitrogen fixation
		Inorganic ^a materials	H ₂	Organic ^b materials			
Chromatiaceae	purple reddish	+	+	+	—	+	+
Chlorobiaceae	green	+	+	—	—	—	+
Rhodospirillaceae	purple reddish brownish	+	+	+	+	+	+

^a H₂S, H₂S₂O₃, etc., ^b Organic acids, alcohol, etc

* The observation of the present author.

おく。

放線菌：放線菌は *Actinomycetales* 目として次の8科にわけられている。1. *Actinomycetaceae*, 2. *Mycobacteriaceae*, 3. *Frankiaceae*, 4. *Actinoplanaceae*, 5. *Dermatophilaceae*, 6. *Nocardiaceae*, 7. *Streptomycetaceae*, 8. *Micromonosporaceae*

形はカビ(糸状菌)に類似して、分岐した長い菌糸状を示すものが多い(図-2参照)。大きさはカビよりは、

はるかに小さく、原核細胞をもち、細菌に極めて近い菌群である。土壌や堆肥に非常に多く、また、下水汚泥中にも、しばしば認められる。その形態は図-2に一例を示すが、菌糸の形状や胞子をつくるものは胞子柄の形態でもって分類している。しかし放線菌は抗生物質を生産するものが多く、世界的にその方面への研究が進展し、次々と新種として登録され、分類学上、確立されたといえない面もある。

放線菌の特徴はいろいろあるが、堆肥の熟成過程で65℃ないし、それ以上に耐えるものがある。中でも植物病原性糸状菌に拮抗して、その糸状菌を喰い殺す特徴があるので、その応用が有望視され、実用化されている。

放線菌は特有の臭をもち、完熟堆肥や土壌の臭は主として放線菌の臭である。また、生育条件によっては不快臭を除去する能力が強いので、除臭技術に利用されるようになった。

真菌類：真菌類 (*Eumycetes*) は主として菌糸をのばして栄養をとり、繁殖のために有性、または無性の様々な胞子をつくる高等微生物である。いわゆるカビ、キノコ、酵母をすべて含むため、細菌類とともに、最も重要な微生物群である。

(D) 真菌類の分類

真菌類は菌糸の隔壁の有無と有性胞子の特長をもとに4大別される。まず菌糸に隔壁のないものを藻(状)菌類 (*Phycomycetes*) と呼び、隔壁をもつものをさらに3群に分ける。このうち有性胞子(有性生殖によってできる胞子)として子嚢胞子(子嚢と呼ばれる特殊な細胞の中につくられる胞子)を生ずるものを子嚢菌類 (*Ascomycetes*)、担子胞子(菌糸が発達した担

図-2 放線菌の形態

- (1) アクテノマイセス (*Actinomyces*)
- (2) ストレプトマイセス (*Streptomyces*)
- (3) サーモアクテノマイセロ (*Thermoactinomyces*)
- (4) サーモモノスポラ (*Thermomonospora*)

子の上に着生する孢子)をつくるものを担子菌類(*Basidiomycetes*)という。また、有性孢子形成が認められないもの、あるいは有性生殖を行う菌類の無性世代のものを不完全菌類(*Fungi Imperfecti* または、*Deuteromycetes*)といい、無性孢子の特長によって、さらに細かく分類される。

ところで真菌類に含まれる、カビ、キノコ、酵母などの名称は、いずれも分類学上の正しい呼び名ではない。キノコという名は孢子を着生する子実体が肉眼でも見られるほどの大きさに発達したものの俗称で、その大部分は上記の担子菌類に含まれる。

酵母の中で孢子をつくるものは、ほとんど子囊菌類に属し、孢子を形成しない酵母はすべて不完全菌類に入られる。

また、カビ(Mold)は糸状菌ともいわれるが、真菌類のうちで、キノコと酵母を除いたものの総称である。

糸状菌は菌糸の先端部分を伸長させることにより生長する。菌糸の状態では終生をすごすものがある一方、高等菌類では糸状の菌糸が環境条件により盛んに分岐と癒合をくりかえし、菌糸細胞は変形して、種々の菌糸組織をつくり、菌核や子実体を形成する。糸状菌の分類は菌糸の状態で区別することはむづかしく、図-3に示すように孢子や孢子柄の形態を中心に、分類している。

藻状菌類のカビではMucor(ケカビ)属、Saprolegnia(ミズカビ)属、Leptomitius(フシミズカビ)属 Zoophagus属などが廃水の生物処理に出現するが、

Zoophagus属菌は菌糸に粘着細胞をもち、これに付着した輪虫類を捕食することで知られる。土壌中にはArthrobotrysやTrichotecium属のものがおり、連作障害に関連する寄生性線虫を捕捉するのでその利用が有望視されている。

(E) 酵母

酵母(yeast)はカビやキノコと違って図-4のように球形、卵形、楕円形などの単細胞からなり、主として出芽によって増殖する真菌類の総称である。出芽は多くの場合、細胞の何ヶ所かでおこる多極出芽であるが、両端でおこる両極出芽のものや、細胞が分裂する種類もまれにある。また出芽した細胞が離れずに長くのびてつながり、菌糸状の偽菌糸をつくる種類も見られる。酵母の中で有性孢子を形成するものを有孢子酵母というが、その大部分は子囊菌類に、ごく一部が担子菌類に含まれる。一方、孢子をつくらない無孢子酵母は不完全菌類に属する。

有孢子酵母に入るSaccharomyces属は、応用微生物学上、もっとも重要な属で、とくにSaccharomyces cerevisiaeはビール、ぶどう酒、清酒、パンなどの製造に用いられる。同じく有孢子酵母のHansenula anomalaは醸造物の表面に薄膜を生じる産膜酵母であるが、Saccharomyces、Hansenulaとも殿粉廃水など濃厚廃水の処理に利用されるようになった。

後述するがこのような濃厚有機廃水処理後酵母菌体を除去した後の廃水処理に光合成細菌法で処理すると廃水はさらに浄化される。

無孢子酵母ではCandida属、Torulopsis属、赤色酵母のRhodotorula属などがしばしば活性汚泥に出現する。Candida utilisは亜硫酸、パルプ廃液などで培養した菌体が飼料として利用されてきた。また、酵

母は土壤中でも有効菌に属し、連作障害土壌の改変に大きな役割を果す。

(F) 藻類

藻類 (Algae) は主として水中で生育して、光合成を行う下等植物であるが、湿度の高い環境ではしばしば糸状菌と共生して地衣 (苔) を形成する。主として単細胞からなる微小な緑藻 (Green algae) や珪藻 (Diatom) の類は微生物として取扱われる。褐藻や紅藻はほとんどが大きな海藻であるため微生物の対象とはしていない。藍藻は藻類と異なり、分類学上、細菌に近い微生物である故、次項にわけて説明する。

微小緑藻の中 *Chlorella* は増殖が最も早く、後述の光成細菌利用により、濃厚有機廃水処理した後、最終浄化に利用すると、ほぼ完全に近い浄化水となる。*Chlorella* は良質のたん白質を多量に含み、各種ビタミンの含量も多いので、餌飼料の添加物として、また健康食品として広く利用されるようになった。

(G) 藍類

藍藻 (らん藻) (Blue-green algae) は単細胞、あるいは多細胞の糸状体からなり、光合成独立栄養性で細胞質中に葉緑素やその他の色素を含み、青緑色ないし青紫色を呈する。原核細胞をもつ細菌に極めて類似する微生物であり、真核細胞をもつ、高等微生物の緑藻や珪藻とは分類学上明らかに区別しうるものである。

らん藻は湖沼、海水、土壌などに広く分布し、温泉に生育する好熱性のものもある。通常の生物処理では増殖がクロレラより遅いので、まず出現してこないが、富栄養化の著しい湖沼や酸化池では多量に増殖して廃水の浄化に役かっている。しかし、まれには異臭を発したり、細胞が分散して汙池を通過し障害を引起すことがある。らん藻は窒素固定する能力があるので水田などでは土壌の肥沃化に貢献する藻類として歓迎されるものである。

(H) 原生動物

原生動物 (Protozoa) は原虫ともいわれ、大きさが 30~100 μm 程度の単細胞の微細な動物である。その運動器官の形や生殖の仕方などから鞭毛虫類、肉質 (虫) 類、(偽足によって運動する)、繊毛虫類 (滴虫類ともいわれ、体毛に繊毛をもち、これによって運動する)、孢子虫類 (すべて寄生性) の 4 群に分けられる。

その中で廃水の生物処理に関係深く、とくに活性汚泥が良好なときに出現するものとしては *Vorticella* (ツリガネムシ) *Carchesium* *Zoothamnium*,

Epistylis, *Opercularia* などの属で、これらが増殖するときは一般に良好な処理水がえられる。

原生動物は微生物等を食物源としている以外、土壌中で、どのような行動をしているかについては不明な点が多い。しかし孢子虫は、後述する連作障害の 1 つの要因である寄生性線虫を殺す作用のあることが認められている。

(I) 微小後生動物

単細胞の原生動物に対して多細胞からなる後生動物のうち、体が数 mm 以下の小さなものを微小後生動物と呼んでいる。その中で廃水の生物処理に出現するものは主として袋形動物に属する輪虫類や線形動物の線虫類などで、細菌、原生動物、活性汚泥の破片などを摂食している。

輪虫類 (*Rotifera Rotatoria*)

輪虫はクルマムシともいう。主に淡水 (少数は海産) のプランクトンでそのほか固着性および他生動上に寄生するものが少数ある。体は左右相称をなし、体壁と諸内臓との間は広大な原体腔で体は袋状をなす。表皮はクチクラ層でおおわれ、原生動物や細菌等の微小生物を捕食して生長する。雌雄異体であるという。魚介類の稚魚期のえきとして利用されている。輪虫は、懸濁している微小生物を捕食して処理水を透明にしたり活性汚泥のフロック形成を促進する効果があるといわれている。

線虫類 (*Nematoda*) は自由生活性のものと寄生性のものがある。水処理に関与するものはほとんど自由生活性のものといわれるが、土壌中には両者が生息し、とくに寄生性のものは、植物根に寄生して、しばしば病気を引起す原因となる。

廃水を生物的に処理する活性汚泥法などでは排出してくる 2 次汚泥の中にキチン質を含む微小生物がたくさんいるので、連作した畑作土壌改変・肥沃化に貢献できるものが多い。(但し廃水の種類によっては、——例えば、製紙・パルプ廃液処理のような場合には植物病原性糸状菌が多いので、土壌施用の際、堆肥化するなど注意が必要である)

文 献

- 1) 高尾彰一, 「微生物による環境制御管理技術マニュアル」 (環境技術研究会) pp. 1-10 (1982)
- 2) Bergey's Manual of Determinative Bacteriology 8 Ed. (Williams and Wilkins Co.) (Baltimore, U. S. A) (1974)