[農化 第 52 卷, 第 2 号, R9~R20, 1978]

廃水の生物処理に出現する微小動物について

(1) 活性汚泥および生物膜の微小動物相†

須 藤 隆 一

(国立公害研究所)

1. は じ め に

有機廃水の処理には、水の自浄作用過程のある部分を人工的に能率よく進行させる方法が広く普及しており、これは生物処理とよばれている。生物処理には、活性汚泥法、生物膜法、安定化池法などの好気性処理と消化法などの嫌気性処理とがある。最近では、栄養塩類の除去および蛋白資源の回収を目的として特殊な生物処理も開発されている。これらの生物処理も含めて生物処理法を分類したのが表-1 である。一般に生物処理法には、細菌、菌類、原生動物、微小後生動物など多種多様な微生物が出現し、数十種以上の混合培養系を構成していることが多い。一方、廃水は種々雑多の成分を含み、きわめて複雑な多成分系である。このように生物処理は、混合培養された微生物によって、混合基質を除去するプロセスであるから、合理的な設計基準や操作基準を確立することが難しく、経験や勘に頼らなければならない場合がかなり多い。

廃水中に含まれる溶解性の有機質は、細菌や菌類など

によって直接摂取されるが、微小動物はこれらの有機質を栄養源にできない。このため、廃水の浄化は細菌などの腐生栄養性の微生物が主役であると考えられているが、実際には原生動物、袋形動物などの完全動物性（動物性）栄養の微生物が共存しないと廃水の浄化は十分に達成できない。

本文では、生物処理のなかで最も使われている活性汚泥法と生物膜法に限って微小動物相と処理水質との関係について述べることにする。

2. 活性汚泥と生物膜の比較

(1) 活 性 汚 泥

活性汚泥は、300~1000 μm の不定形のフロックであり、主として細菌が凝集したものである。このフロックの周囲に微小動物が付着あるいははふくしている。エアレーションタンクの混合液を静置すると、通常 5~10 分間で上澄液と活性汚泥が分離する。良好な活性汚泥であれば 30 分程度の沈殿時間で上澄液は透明になる。

エアレーションタンクは池沼と同じように完全な水中

の環境であるが、エアレーションによってたえず激しく攪拌されているために、大形の生物の生存にとってはきわめて不利である。このため、活性汚泥に出現する生物の大きさは、おおむね 1 mm 前後までである。活性汚泥に出現する主要な微生物は細菌と原生動物であるが、活性汚泥の種類によっては菌類や微小後生動物が現われることもある。図-1 には、活性汚泥と生物膜における食物環を比較

表-1 生物処理の分類

生物処理	好気性処理	— 活性汚泥法：高速活性汚泥法，標準曝気法，長時間曝気法
		— 生物膜法：散水汙床法，浸漬汙床法，回転円板法
		— 安定化池法：高速酸化池法，通性酸化池法
	嫌気性処理	— 嫌気性消化法
		— 嫌気性ラグーン法
	— 特定生物による処理：光合成細菌，酵母，クロレラ	
	— 栄養塩類の処理：生物学的脱窒，生物学的脱磷	

† Studies on the Smaller Animals in the Biological Waste Water Treatment. 1. Microfauna of the Activated Sludge and Microbial Film. Ryuichi SUDO (Water and Soil Division, The National Institute for Environmental Studies)

図-1 活性汚泥と生物膜における食物環の比較

図-2 原生動物の構造

左: *Paramecium* 右: *Vorticella*

1. せん毛 2. 細胞口 3. 細胞咽頭 4. 食胞 5. 収縮胞
6. 大核 7. 小核 8. 毛胞 9. 柄 10. 糸筋体

して示した。

1) 原生動物 原生動物は、べん毛虫類、せん毛虫類、肉質類、孢子虫類の4綱からなるが、孢子虫類を除いた3綱の原生動物は活性汚泥に出現する。種類数としても個体数としても多く認められるのはせん毛虫類である。原生動物は単細胞であるが、その細胞はかなり分化し、種々の細胞器官を有している。これらの形態が分類の基準になっている。図-2には、*Vorticella* (ツリガネムシ) と *Paramecium* (ゾウリムシ) を例にして細胞構造を示した。わが国における下水処理場での調査によると、活性汚泥に出現した原生動物は、せん毛虫類 37 属、べん

毛虫類 10 属、肉質類 3 属の計 50 属である⁽¹⁾。

この中で特に *Vorticella* は常時出現し、その個体数も多く、活性汚泥生物の中で圧倒的に優位を占めている。正常な活性汚泥で優占種になるのは主に有柄性せん毛虫類として知られている。*Vorticella*, *Carchesium*, *Zoothamnium*, *Opercularia*, *Epistylis* などである。またときには *Aspidisca* が優占種になることもある。

2) 後生動物 多細胞でできている生物をすべて後生動物というが、活性汚泥に出現するのは通常、袋形動物の輪虫類と線虫類である。輪虫類としては、*Rotaria*, *Philodina*, *Lecane*, *Notommata*, *Lepadella*, *Colurella* などが出現するが、個体数はそれほど多くない。線虫類はふつう *Dorylaimus*, *Rhabdolaimus*, *Diplogaster* などが出現する。

3) 細菌 活性汚泥を構成している細菌のうち、顕微鏡によって確認できるものは、フロック形成細菌である *Zoogloea ramigera*, 糸状体を形成する *Sphaerotilus natans* である。*Zoogloea* は、活性汚泥フロックを形成する細菌として注目されてきたものであるが、多量に出現することはない。この細菌は、菌体がゼラチン状物質に包まれて指状、樹状あるいは雲状

に増殖する。*Sphaerotilus* は、桿菌が透明なさやの中に並んだ糸状体を形成し、この糸状体は偽分岐することが多い。*Sphaerotilus* が異常に増殖すると、活性汚泥がバルキングを引き起こし、最終沈殿池で固液分離ができなくなる。これ以外に活性汚泥中には多くの種類の細菌が出現するが、培養試験の結果では、*Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas* などに属するものが多い。なお、活性汚泥中の細菌数は、正常な都市下水の活性汚泥（30分沈殿後）で $10^8 \sim 10^9/\text{ml}$ 程度である。

4) 菌類 活性汚泥の菌類に関する報告はほとんどないといつてよい。菌類は、工場廃水の活性汚泥には比較的多く出現するようであり、藻菌類の *Leptomitus*, *Mucor*, 不完全菌類の *Geotrichum*, *Trichoderma*, 酵母の *Candida*, *Rhodotorula* などが認められる。菌類が異常に増殖してバルキングを引き起こすこともある。

(2) 生物膜

生物膜の構造を模式的に示したのが図-3である。廃水中の有機質（BOD）および窒素、リンなどは、生物膜に存在する微生物によって、酸素存在化において摂取される。これは生物膜の反応において主として栄養源（とくにBOD）と酸素が制限要因（律速段階）になることを示している。生物膜の生長が続き、その厚さが増大してくると、酸素が生物膜の深部に透過しなくなり、嫌気性層が形成されてくる。酸素の貫入しうる生物膜の厚さは2～3mm程度までといわれている。3次処理以外の生物膜では、一般に嫌気性層が存在している。嫌気性層では、微生物の嫌気性代謝によって、有機酸や硫化水素が

生成される。このため生物膜が肥厚しすぎると嫌気性層が増大し、有機質の嫌氣的分解によって悪臭を発生するようになる。好気性層で増殖した微生物の一部は、嫌氣的に分解される。この分解が進むと、生物膜は基盤（戸材あるいは円板）から脱落し、新しい生物膜が形成されはじめる。嫌気性層が著しく増大することは、好気性処理にとっては不利益であるので、生物膜の更新を速めることが望ましく、最近の処理法ではそのための工夫がなされている。

生物膜に關与する生物は、活性汚泥と著しく異なることはない。生物膜の生物相の特徴は、①日光にさらされる部分に藻類が出現する、②糸状菌や糸状細菌が多量に出現する、③線虫類、輪虫類、貧毛類、昆虫類などの後生動物の出現頻度が高い、などである。生物膜を構成する生物の種類数は活性汚泥よりかなり多い。

1) 原生動物 原生動物は非常に豊富であり、せん毛虫類が圧倒的に多い。活性汚泥とは異なり、分岐して増殖する *Carchesium*, *Epistylis*, *Opercularia* などが優占種であることが多く、ときにはこれらの生物は数百細胞の群体をつくることもある。Curds ら⁽²⁾は、イギリスの散水汚床（52か所）を調査し、53種のせん毛虫類を同定している。

べん毛虫類では、*Oikomonas termo*, *Notosolenus orbicularis*, *Peranema trichophorum*, *Bodo caudatus*, *Cercobodo crassicauda*, *Trepomonas agilis*, *Pleuromonas jaculans* などが出現頻度が高い。肉質類では、*Amoeba*, *Vahlkampfia*, *Arcella* などの出現頻度が高いが、ほとんどの生物膜に存在するのは、*Arcella vulgaris* である。

2) 後生動物 後生動物は輪虫類、線虫類、昆虫類、貝類、貧毛類などが出現する。生物膜に出現する輪虫類の種類は、活性汚泥とおおむね同様であるが、個体数は活性汚泥よりかなり多い。*Philodina*, *Rotaria* などのヒルガタワムシは、ほふくできる場所が十分に与えられるので、原生動物より増加して優占種になることがある。*Lecane*, *Colurella*, *Trichocerca* などの出現頻度も高い。

線虫類は、活性汚泥よりかなり多く、生物膜では常時認められる。

生物膜に多い線虫は、*Rhabditis*, *Diplogaster*, *Pelodera*, *Rhabdolaimus*, *Diplogaster*, *Dorylaimus* などである。出現頻度の高い貧毛類は、*Aelosoma*, *Nais*,

図-3 生物膜における代謝の模式図

(1) 典型的な活性汚泥フロック, 長径 700 μm
Carchesium および *Tokophrya* が認められる.

(2) *Vorticella microstoma* が優占種の回転円板
 生物膜

(3) 脱室回転円板生物膜 *Paramecium caudatum*
 および *Beggiatoa* (糸状体) が認められる.

(4) *Vorticella convallaria*

(5) *Vorticella microstoma*

(6) *Carchesium polypinum*

(7) *Epistylis* sp.

(8) *Opercularia* sp.

(9) *Aspidisca costata*

(10) *Arcella vulgaris*

(11) *Euglypha* sp.

(12) *Philodina* sp.

Chaetogaster, *Pristina*, *Limnodrilus* などである。

昆虫類では、もっとも多いのがチョウバエ、あるいは汚床バエとよばれている *Psychoda* に属するものである。生物膜中には、*Psychoda alternata*, *P. cinerea*, *P. severini* などが認められるが、前者が圧倒的に多く、汚材 1 l 中 40,000 個体以上に達することもある。*Psychoda alternata* は、幼虫のときは生物膜中で重要な働きをするが、成虫になると、汚床周囲に飛散し、トラブルの原因になる。したがって、成虫が周囲に飛散しないように管理しなくてはならない。散水が均一でないと羽化が顕著に起こる。

3) 細菌および菌類 細菌類では、*Zoogloea romigera*, *Sphaerotilus natans*, *Beggiatoa alba* は多量に存在し、検鏡によっても確認できる。散水汚床の生物膜中の細菌を調べたいいくつかの報告のなかで、属名まで記載されている種類は、*Sphaerotilus*, *Zoogloea*, *Thiobacillus*, *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Nocardia*, *Chromobacterium*, *Sarcina*, *Streptococcus faecalis*, *Escherichia coli*, *Paracolobacterium*, *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* などである。

生物膜中に見られる菌糸体は、*Sepedonium* sp., *Subbaromyces splendens*, *Ascoidea rubescens*, *Fusarium aquaeductuum*, *Geotricum candidum*, *Trichosporon cutaneum* などであることが多い。このほか、*Phoma*, *Leptomitius lacteus*, *Pythium gracile*, *Rhizotorula*, *Mucor*, *Sarolegnia* などとも現われることがある。

4) 藻類 散水汚床、回転円板、浸漬汚床とも日光を受ける部分には藻類が発生する。藻類が現われる場所は、ごく表面に限られるので、廃水の浄化に対しては大きな役割はないと考えられる。光合成による酸素の発生、栄養塩類の摂取などは、全体の浄化からみればそれほど大きなものではない。

散水汚床に通常現われる藻類としては、*Chlorella*, *Chlorococcum*, *Phormidium*, *Oscillatoria*, *Stigeoclonium*, *Ulothrix* などである。

3. 活性汚泥の微小動物相

表-2 には、きわめて良好な処理水を放流している下水処理場の活性汚泥の微小動物相の 1 例を示した。エアレーションタンクは、MLSS 1000~2000 mg/l, BOD 負

表-2 活性汚泥における微小動物相の 1 例

処 理 場 名	落 合 芝 浦 砂 町 処理場	処理場	処理場
MLSS (mg/l)	1190	1470	1960
<i>Vorticella nebulifera</i>	360	220	
<i>Vorticella convallaria</i>	1260	3720	
<i>Vorticella longifillum</i>	60	120	
<i>Vorticella microstoma</i>		60	3140
<i>Epistylis plicatilis</i>	620	120	
<i>Epistylis</i> sp.		1000	420
<i>Zoothamnium arbuscula</i>	920		200
<i>Opercularia</i> sp.			640
<i>Aspidisca lynceus</i>	2920		
<i>Aspidisca</i> sp.	160		
<i>Euploes</i> sp.	20		
<i>Carchesium polypinum</i>	200		720
<i>Loxophillum</i> spp.	300	140	
<i>Litonotus</i> sp.	420	460	850
<i>Amphileptus</i> spp.	40		
<i>Astasia</i> sp.	60		
<i>Dileptus</i> sp.		20	
<i>Tetrahymena</i> sp.		20	
<i>Oikomonas termo</i>	60		
<i>Peranema</i> sp.	20		
<i>Bodo edax</i>			100
<i>Tokophrya</i> spp.	60	180	
<i>Acineta</i> spp.		80	
<i>Podophrya</i> sp.		20	
<i>Amoeba</i> spp.		280	40
後生動物 { <i>Philodina roseola</i>	40		
{ <i>Rotaria rotatoria</i>		20	
総個体数 (1/ml)	7520	6510	5800

(活性汚泥混合液 1 ml 中の個体数)

荷 0.2~0.3 kg/kg MLSS/day で運転されている。表-2 に示した生物個体数は活性混合液 1 ml として示しているが、30 分沈殿活性汚泥 1 ml あるいは MLSS 1 mg 当りの個体数として表わすこともある。表-2 に明らかなように活性汚泥中の原生動物の優占種は、*Vorticella*, *Epistylis*, *Aspidisca* などである。活性汚泥中の原生動物の総個体数は活性汚泥混合液 1 ml 中 5000~20,000 程度であることが多い。活性汚泥に出現する原生動物は、処理される廃水の性状、処理施設の操作条件などによってかなり異なり、少数でも出現する種類をあげれば相当広範囲の種類を記載することができる。活性汚泥に出現頻度の最も高い重要な種類を示したのが表-3 である。表-3 から、活性汚泥の中で最も重要な原生動物は、*Vorticella microstoma*, *Vorticella convallaria*, *Aspidisca costata* の 3 種類であることがわかる。

一方、表-2 には後生動物は輪虫類が 2 種 (*Philodina*

表-3 活性汚泥に出現頻度の高い原生動物

種類	Barker (1949)	Brown (1965)	Curds ら (1970)	Schofield (1971)	須藤 (1976)
植物性 べん毛 虫類	<i>Anthophysa vegetans</i> <i>Oikomonas steinii</i> <i>Oikomonas termo</i>		<i>Peranema trichophorum</i>		
動物性 べん毛 虫類	<i>Bodo caudatus</i> <i>Bodo lens</i> <i>Cercobodo crassicauda</i> <i>Cercobodo longicauda</i> <i>Cercobodo ovatus</i> <i>Pleuromonas jaculans</i>				
肉質類	<i>Amoeba actinophora</i> <i>Amoeba guttula</i> <i>Vahlkampffia limax</i>	<i>Euglypha alveolata</i>	Small amoebae <i>Arcella vulgaris</i> <i>Euglypha</i> sp.	<i>Amoeba</i> sp. <i>Cochliopodium</i> sp.	
せん毛 虫類	<i>Carchesium polypinum</i> <i>Opercularia</i> sp. <i>Oxytricha fallax</i> <i>Paramecium</i> sp. <i>Vorticella alba</i> <i>Vorticella campanula</i> <i>Vorticella communis</i>	<i>Aspidisca costata</i> <i>Aspidisca lynceus</i> <i>Aspidisca robusta</i> <i>Chilodonella cucullulus</i> <i>Epistylis plicatilis</i> <i>Euplotes aediculatus</i> <i>Litonotus fasciola</i> <i>Vorticella campanula</i> <i>Vorticella convallaria</i> <i>Vorticella microstoma</i> <i>Vorticella nebuli- fera</i> var. <i>similis</i> <i>Vorticella striata</i> var. <i>octava</i>	① <i>Aspidisca costata</i> ② <i>Vorticella convallaria</i> ③ <i>Vorticella microstoma</i> ④ <i>Trachelophyllum pusillum</i> ⑤ <i>Opercularia coarctata</i> ⑥ <i>Vorticella alba</i> ⑦ <i>Carchesium polypinum</i> ⑧ <i>Euplotes moebiusi</i> ⑨ <i>Vorticella fromenteli</i>	<i>Aspidisca costata</i> <i>Chilodonella uncinata</i> <i>Drepanomonas</i> sp. <i>Epistylis</i> sp. <i>Hemiphrys</i> sp. <i>Vorticella convallaria</i> <i>Vorticella microstoma</i>	① <i>Vorticella microstoma</i> ② <i>Vorticella convallaria</i> ③ <i>Aspidisca costata</i> ④ <i>Epistylis plicatilis</i> ⑤ <i>Vorticella campanula</i> ⑥ <i>Opercularia</i> sp. ⑦ <i>Vorticella alba</i>

せん毛虫類の①～⑨は出現頻度を示す。

および *Rotaria*) 出現したにすぎず, その個体数も少ない。しかしながら, BOD 負荷がきわめて低く, 余剰汚泥の排出の少ない活性汚泥 (汚泥の滞留時間の長い活性汚泥) には, 輪虫類および貧毛類が優占種になることがある。この場合の生物相の 1 例を示したのが表-4 である。輪虫類は, 普通の活性汚泥では混合液 1 ml 中 100~200 個体以下であり, 微小動物総個体数の 5% 程度以下を占めるにすぎない。表-4 では, *Philodina*, *Lecane*, *Colurella*, *Aeolosoma* などが, 混合液 1 ml 中それぞれ 500~1000 個体現われている。Y 学園生活排水処理場のように貧毛類 (*Aeolosoma*) が優占種になることは, きわめてまれである。貧毛類の優占的出現は, 長時間曝気法に限られるようである。貧毛類が混合液 1 ml 当り 500

個体以上になると, 活性汚泥が赤褐色を呈する。線虫類は, 100~200 個体現われることが多いが, 優占的な増殖は認められていない。その他の後生動物としては, 腹毛類の *Chaetonotus*, 甲殻類の *Moina*, クマムシの *Macrobiotus* などがきわめてまれに現われることがある。ほとんどの場合, これらの微小動物は混合液 1 ml 中 100 個体以下である。

4. 活性汚泥管理のための指標生物

(1) 指標生物

上述した微小動物およびその他の顕微鏡で判定できる微生物は, 活性汚泥の良否, 処理施設の環境条件などを把握するためのよい指標になる。この指標生物の概要を

表-4 輪虫類および貧毛類が優占種の活性汚泥の微小動物相

生 物 名	森ヶ崎 処理場	北坂戸 処理場	Y学園生 活排水処 理場
<i>Vorticella convallaria</i>	200	160	
<i>Epistylis</i> sp.			280
<i>Aspidisca costata</i>	120		
<i>Aspidisca lynceus</i>			40
<i>Trachelophyllum pusillum</i>			320
<i>Chilodonella</i> sp.	40		
<i>Arcella vulgaris</i>	160	2800	100
<i>Euglypha</i> sp.		160	1480
<i>Pleuromonas</i> sp.	300		
<i>Monas</i> sp.		400	
<i>Philodina</i> sp.		1160	
<i>Lecane</i> sp.	440		
<i>Colurella</i> sp.	620		
<i>Trichocerca</i> sp.		1120	
<i>Aeolosoma hemprichi</i>			1280
<i>Macrobiotus macsonyx</i>			80
BOD 負荷 (kg BOD/kg MLSS/day)	0.10~ 0.17	0.05~ 0.10	0.02~ 0.03

図-4 活性汚泥性生物の個体数と処理水CODとの関係

調査した下水処理場:

○ 砂 町 ▲ 森ヶ崎 ● 三河島
◇ 落 合 △ 芝 浦 ◆ 小 台

次に示す。

1) 活性汚泥が良好のとき出現する生物 (活性汚泥性生物) *Vorticella*, *Epistylis*, *Aspidisca*, *Opercularia*, *Zoothamnium*, *Carchesium*, *Zoothamnium*, *Carchesium*, 各種の輪虫類および吸管虫類のように固着性であるか、あるいははふくする種類である。図-4に示したように、通常、これらの生物が混合液 1 ml 中 1000 個体以上で、全個体数の 80% 以上存在すれば、浄化効率の高い活性汚泥と判定してよい。

2) 活性汚泥の状態の悪いとき出現する生物 (非活性汚泥性生物) *Bodo*, *Cercobodo*, *Pleuromonas*, *Oikomonas*, *Colpidium*, *Paramecium* などのように、速く泳ぐ種類である。これらが出現するときには、フロックが一般に小さい (100 μ 程度)。かなり状態の悪いときは、*Bodo*, *Cercobodo*, *Oikomonas* のみ、また極端に悪化したときは、原生動物および後生動物はまったく出現しない。

3) 活性汚泥が悪いときから回復するとき出現する生物 (中間汚泥性生物) *Litonotus*, *Loxophyllum*, *Chilodonella*, *Oxytricha* などのゆっくり泳ぐかほふくする生物である。このような生物が 1 か月間程度継続して優占種になった場合も、観察されている。

4) 活性汚泥が分散、解体するとき出現する生物 *Vahlkampfia limax*, *Amoeba radiosa* などの肉質類である。これらが数万個体以上出現すると、フロックは小さくなり、放流水は濁るようになる。このようになってからでは遅すぎるので、これらの生物が急増してきたら、返送汚泥量と送気量を少なくする。これで解体現象はある程度抑えることができるようである。

5) バルキングのときに出現する生物 *Sphaerotilus natans*, *Thiothrix*, 各種のカビなどの糸状微生物が、バルキングの原因生物である。SVI が 200 以上になった場合には、糸状微生物が糸くずのように存在していることが認められる。バルキング汚泥にも微小動物は現われるが、個体数は一般に正常汚泥よりも少ない。

6) 溶存酸素が不足しているとき出現する生物 *Beggiatoa alba*, *Metopus*, *Caenomorpha* などの溶存酸素が低いところを好む生物が現われる。このような生物が現われると、ときには活性汚泥が黒色を呈して腐敗臭を発生する。

7) 曝気過剰のとき出現する生物 曝気過剰が長時間続くと、種々の *Amoeba* および輪虫類が優占種とな

る。

8) 廃水濃度が極度に低いとき出現する生物 *Euplotes*, *Colurella*, *Lepadella*, *Trichocerca* などが多量に出現する。

9) ショックロードおよび毒物流入のとき出現する生物 原生動物は、細菌に比較して外的環境の変化に感受性が高いので、原生動物を観察することによって活性汚泥への影響が推定できる。活性汚泥性生物のなかで

もっとも感受性の高いのは、*Aspidisca* であるから、*Aspidisca* が急減した場合は、ショックロードあるいはごく少量の毒性物質が流入した証明になる。ほとんどの生物がへい死したときは、活性汚泥は破壊されたと考えて、その回復を待たねばならない。

(2) 指標生物による維持管理

表-5 に示した活性汚泥の微小動物相の一例から、維持管理の方針の概要を示してみることとする。表-5 の

表-5 活性汚泥の微小動物相からみた汚泥の性状の判定

生 物 名	A : 活性汚泥性生物が 優占種の場合 (砂町処理場)	B : 中間汚泥性生物が 優占種の場合 (森ヶ崎処理場)	C : 非活性汚泥性生物 が優占種の場合 (砂町処理場)
SV (%)	7.0	10	4.5
MLSS (mg/l)	1080	2230	1160
SVI	65	45	39
エアレーションタンクの溶存酸素 (mg/l)	3.8	5.9	1.8
処理水透視度 (cm)	40	28	16
処理水 COD (mg/l) (直火法)	23	32	35
<i>Vorticella microstoma</i> ○	140	700	240
<i>Vorticella alba</i> ○	100		
<i>Epistylis plicatilis</i> ○	240		360
<i>Carchesium polypinum</i> ○		40	
<i>Tokophrya</i> spp. ○	60		
<i>Podophrya</i> spp. ○	60		
<i>Aspidisca costata</i> ○	21,000		480
<i>Litonotus fasciola</i> △	120	360	
<i>Euplotes</i> sp. △		40	
<i>Tetrahymena</i> sp. ×			960
<i>Trachelophyllum pusillum</i> △	160		
<i>Loxophyllum meleagris</i> △		1200	
<i>Uronema</i> sp. ×			180
<i>Bodo edax</i> ×	160		5400
<i>Oikomonas termo</i> ×			3800
<i>Peranema</i> sp. ×		40	
<i>Astasia</i> sp. ×			
<i>Amoeba</i> spp.		80	60
<i>Vahlkampffia limax</i>		500	
<i>Arcella vulgaris</i>	80		
<i>Lecane</i> sp. ○		80	
<i>Philodina</i> sp. ○		120	
<i>Pleuromonas</i> sp. ×	140	120	
<i>Monas</i> sp. ×		660	
総 個 体 数 (1/ml)	22,260	3940	11,480
活性汚泥性生物 (%)	97.0	23.9	9.4
中間汚泥性生物 (%)	1.2	40.6	0
非活性汚泥性生物 (%)	1.3	20.8	90.1
そ の 他 (%)	0.5	14.7	0.5

(活性汚泥混合液 1 ml 中の個体数)

○ : 活性汚泥性生物, △ : 中間汚泥性生物, × : 非活性汚泥性生物, 無印 : その他 (肉質類)

Aは、*Aspidisca* が圧倒的に多く、活性汚泥性生物が総個体数の 97% も占めている。処理水はきわめて良好であり、30 分沈殿させた上澄液には残存するフロックが認められない。このような所見の場合には、現在の運転条件を変えないで安定な操作を続けられよい。Bは過剰エアレーションの傾向にあり、フロックもやや小さくなり、30 分沈殿の上澄液には微細なフロックが残存している。微小動物相は *Loxophillum* および *Litonotus* などの中間汚泥性生物が優占種 (40.6%) であった。この結果から、送気量を低下させるとともに余剰汚泥の排出量を多くし、MLSS を低くさせるのがよいと判定した。Cは沈殿下水の SS が高く (汚泥消化タンクからの返水の影響)、活性汚泥が悪化し、回復させるための操作を行っている過渡期の状態である。Bodo, *Oikomonas*, *Tetrahymena* などの非活性汚泥性生物が優占種 (90.1%) であり、フロックは黒色で分散状を呈している。処理水は濁っており、微細なフロックの流出が観察できる。悪化した活性汚泥を多量に排出したため、MLSS は低くなったが、この状態で送気量を増加させて溶存酸素濃度を高くするとともに、消化タンクからの SS の戻りを少なくするように努めた。この結果、活性汚泥性生物が徐々に増加し、約 2 週間で処理水質の向上が認められた。

肉質類は、活性、中間、非活性の 3 分類に入っていないが、もし、すべての生物を 3 型に分けるとするならば

中間汚泥性生物に含めるのが妥当であろう。

5. 生物膜の微小動物相

生物膜法にはいくつかの方法があるが、それぞれの生物膜に出現する微小動物は共通している。ここでは回転円板法を中心に述べることにする。回転円板法は、①水量、水質の変動に対応できる、②硝化が進行する、③汚泥の発生が少ない、④動力消費が少なく操作がきわめて簡単である、などの特徴があるためにきわめて注目されている処理法である。回転円板法では返水や汚泥の返送がないので、多段 (通常 4 段) にした場合、各段で異なった生物量と生物相を示す。散水汙床および浸漬汙床では汙床の上部と底部で微小動物相に大きな相違は認められない。生物膜 (散水汙床) に出現頻度の高い原生動物を表-6 に示した。生物膜で最も重要な原生動物は、*Opercularia*, *Carchesium*, *Epistylis* である。

2 基の 4 段から 3 回転円板のパイロットプラトンに家庭下水を供給した処理実験の結果を例示する⁽³⁾。円板 (直径 47 cm) は、ポリエチレン製で、1 基を硝化用 (表面積 23 m², 40% 浸漬)、他の 1 基を脱窒用 (表面積 27 m², 100% 浸漬) とし、両者を直列につなぎ、13 rpm で円板を回転させた。脱窒用には、メタノールを酸化態窒素の 3 倍量加えた。水量負荷は、60~125 l/m²/day の範囲である。検鏡によって生物相を調べた。生物膜における微小動物の個体数は、通常基盤表面積 (cm²) 当りか、

表-6 生物膜 (散水汙床) に出現頻度の高い原生動物

種 類	Barker (1943)	Curds ら (1970)	Frye ら (1929)	中島 (1959)
植物性べん毛虫類	<i>Oikomonas termo</i> <i>Notosolenus orbicularis</i>	<i>Peranema trichophorum</i>		
動物性べん毛虫類	<i>Pleuromonas jaculans</i>	<i>Bodo caudatus</i> <i>Trepomonas agilis</i>	<i>Bodo</i> sp. <i>Cercobodo</i> sp.	<i>Bodo</i> <i>Oikomonas</i>
肉 質 類	<i>Amoeba guttula</i> <i>Vahlkampfsia limax</i> <i>Arcella vulgaris</i> <i>Cochliopodium bilimbosum</i> <i>Trinema lineare</i>	Small amoebae <i>Arcella vulgaris</i>	<i>Naegleria gruberi</i> <i>Vahlkampfsia albida</i> <i>Vahlkampfsia limax</i> <i>Arcella vulgaris</i> <i>Chlomondophrys</i> sp. <i>Euglypha alveolata</i>	<i>Arcella</i>
せん毛虫類	<i>Carchesium polypinum</i> <i>Chilodonella uncinata</i> <i>Cinetochilum margaritaceum</i>	<i>Aspidisca costata</i> <i>Carchesium polypinum</i> <i>Chilodonella uncinata</i> <i>Cinetochilum margaritaceum</i> <i>Opercularia coarctata</i> <i>Opercularia microdiscum</i> <i>Trachelophyllum pusillum</i> <i>Vorticella convallaria</i> <i>Vorticella striata</i> var. <i>octava</i>	<i>Colpoda</i> sp. <i>Uronema</i> sp.	<i>Carchesium</i> <i>Opercularia</i> <i>Epistylis</i> <i>Vorticella</i> <i>Zoothamnium</i>

表-7 2次処理回転円板生物膜の微小動物相

生 物 名	第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段	活性 汚泥
生物膜量 (mg/cm ²)	3.75	3.17	1.63	1.17	
<i>Epistylis</i> sp.	4200	750			
<i>Vorticella</i> sp.	180	250			
<i>Zoothamnium</i> sp.		150			
<i>Chilochilum margaritaceum</i>	60	550			
<i>Pyxidium</i> sp.			100		
<i>Colepus</i> sp.				200	
<i>Opercularia</i> sp.				1800	
<i>Uroleptus</i> sp.				200	
<i>Colpoda</i> sp.				400	
<i>Vorticella convallaria</i>				3500	
<i>Aspidisca lynceus</i>				750	
<i>Litonotus fasciola</i>				120	
<i>Tokophrya</i> sp.				90	
<i>Bodo</i> sp.	260	550	18 × 10 ³		
<i>Oikomonas</i> sp.		400			
<i>Monas</i> sp.			45 × 10 ³		
<i>Peranema</i> sp.				200	
<i>Pleuromonas</i> sp.				3200	390
<i>Amoeba</i> sp.	60				
<i>Euglypha</i> sp.				600	
<i>Dorylaimus</i> sp.	40				
<i>Arcella vulgaris</i>				1000	
<i>Lecane</i> sp.				90	
<i>Chaetogaster</i> sp.	10	300	200	800	
<i>Nais</i> sp.		500			

(生物膜あるいは活性汚泥 1 mg 中の個体数)

あるいは生物膜 (乾燥重量) 1 mg 当りで表現するのがよい。試料を採取した面積が測定できない場合 (とくに浸漬汚床) は生物膜 1 mg として表わさざるを得ない。

表-7 には, 2次処理 (硝化) 回転円板における生物膜量と微小動物相の 1 例を示した。生物膜量は, いずれの場合も第 1 段で最も多く (2.1~7.0 mg/cm²), 段が進むに従って減少し, 第 4 段ではきわめて少ない (0.4~2.0 mg/cm²)。微小動物相は, 活性汚泥と比較して示してある。この活性汚泥は実プラント (BOD 負荷 0.1 kg/kg MLSS/day) のものであり, 原水は回転円板処理と同じである。表-7 から明らかなように第 1 段から第 4 段まで微小動物相の質的量的構成が著しく異なる。第 1 段, 第 2 段が *Epistylis*, 第 3 段が *Monas*, 第 4 段が *Opercularia* がそれぞれ優占種である。生物数は, 生物膜, 活性汚泥ともバイオマス 1 mg 当たりの数として示して

ある。回転円板 1 cm² 当たりの生物数は, バイオマス 1 mg 当たりの数に生物膜量を掛けることによって求められる。回転円板に出現する原生動物は, 活性汚泥と比較して著しい相違が認められないが, バイオマス 1 mg 中の個体数は, 第 1 段では活性汚泥より多い。 *Epistylis*, *Opercularia*, *Vorticella* などは, 第 1 段では 1 mg 中 2000~5000 個体 (10,000~25,000/cm²) 程度出現することが多い。第 3 段, 第 4 段では, せん毛虫類よりも肉質類 (*Euglypha*, *Arcella*, *Amoeba* など) が多量に出現する。第 1 段, 第 2 段では, 輪虫類, 線虫類, 貧毛類, *Shaerotilus natans*, 菌類などが, 活性汚泥よりも著しく多く出現する。 *Philodina* は, バイオマス 1 mg 当たりの最高約 2000 個体出現した。その他の輪虫類としては, *Trichocerca*, *Cephalodella*, *Rotaria* などが認められた。線虫類は *Rhabdolaimus*, *Diplogaster*, *Dorylaimus* などが出現し, 最高 500 個体/生物膜 1 mg になった。貧毛類は, *Chaetogaster*, *Nais*, *Pristina* などが, それぞれ 20~500 個体/生物膜 1 mg 現われる。

表-8 には, 3次処理 (脱窒) 用円板の生物膜量と微小動物相の 1 例を示した。脱窒処理の接触槽内には, 溶存酸素がほとんど存在しないにもかかわらず, *Vorticella*, *Carchesium*, *Opercularia*, *Epistylis* などが多量に出現し, ときには硝化処理の生物膜に匹敵するほどの個体数になる。また *Euplotes*, *Aspidisca* などの下毛類もかなり多く現われる。 *Paramecium caudatum*, *Metopus striatus*, *Caenomorpha medusula*, *Beggiatoa*, *Bodo* などの溶存酸素が低いところを好む生物の出現頻度が高

表-8 3次処理回転円板生物膜の微小動物相

生 物 名	第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段
生物膜量 (mg/cm ²)	0.85	0.77	0.54	0.08
<i>Vorticella convallaria</i>	4200	9000	18,000	
<i>Aspidisca lynceus</i>			600	
<i>Euplotes</i> sp.	1600	400	600	3000
<i>Chinetochilum margaritaceum</i>	200			
<i>Loxophillum</i> sp.	200			
<i>Monas</i> sp.	19 × 10 ⁴	36 × 10 ³	14 × 10 ³	
<i>Bodo</i> sp.	5400		4800	11,000
<i>Pleuromonas</i> sp.		5000	9500	16,000
<i>Arcella vulgaris</i>	3200	3200	1400	
<i>Amoeba</i> spp.		400		
<i>Dorylaimus</i> sp.	400			
<i>Chaetogaster</i> sp.	200			

(生物膜 1 mg 中の個体数)

表-9 浸漬汙床生物膜の微小動物相

種 類	個 体 数
<i>Paramecium caudatum</i>	28
<i>Uronema</i> sp.	630
<i>Chilomonas</i> sp.	5
<i>Amoeba</i> sp.	96
<i>Philodina</i> sp.	7600
<i>Lecane</i> sp.	46
<i>Rhabdolaimus</i> sp.	110
<i>Dero</i> sp.	9

(生物膜 1 mg 中の生物数)

い。貧毛類、線虫類、輪虫類なども認められ、2 次処理と比較しても生物相に著しい差異はない。生物膜量も 2 次処理と同程度である。

表-9 にはハニカムチューブを充填した浸漬汙床でメリヤス工場の廃水処理を行った場合の生物膜の微小動物相を示した。この場合は輪虫類の *Philodina* が優占種で、7600 個体/生物膜 1 mg 出現した。このように生物膜では、活性汚泥に比較して微小動物の個体数がかかなり多い。写真 1~12 に生物膜と活性汚泥およびそれらに出現する代表的な微小動物を示した。

6. 生物膜管理のための指標生物

生物膜も活性汚泥と同様に出現する微小動物および検鏡で同定できる微生物を指標にして、生物膜の良否、生物膜の環境条件などを判定することができる。指標生物の概要は次の通りである。

- 1) 高負荷の生物膜 菌類がいちじるしく増加し、せん毛虫類は、ほとんどの場合消失する。*Oikomonas*, *Bodo*, *Corcobodo* などのべん毛虫類がみられる。このようなときは、処理水質もきわめて悪い。
- 2) 処理水質が悪い生物膜 1) で述べたべん毛虫類, *Paramecium*, *Colpidium*, *Holophrya*, *Glaucoma* などの遊泳性の原生動物が多くなる。
- 3) 適正な負荷で処理水質が良好な場合 *Carchesium*, *Zoothamnium*, *Epistylis*, *Opercularia* などの大きい群体が出現する。*Vorticella* も多くなる。
- 4) 低負荷の生物膜 3) で述べた生物も現われるが、このほか *Aspidisca*, *Oxytricha*, *Arcella*, *Euglypha* などが現われる。このような生物が多いときは、処理水

の BOD は 10 mg/l 以下であることが多い。また *Arcella* および *Euglypha* が優占種の生物膜では硝化が進んでいるとみなしてよい。

5) 生物膜の更新が速い生物膜 輪虫類、線虫類、貧毛類、昆虫類などが多い場合、嫌気性層が少なくなり、生物膜の肥厚が起こらない。また脱落汚泥の発生量が少ない。

6) 嫌気性層が厚い生物膜 *Metopus*, *Caenomorphia*, *Beggiatoa* などが出現する。これが現われる生物膜では、悪臭の発生がひどくなる。

7) 汙床閉塞 菌類、糸状細菌, *Zoogloea* が顕著に増殖した場合、汙床の閉塞を引き起こす。

8) 阻害物質が流入した場合 阻害の程度によって原生動物、後生動物が殺滅される。輪虫類より、線毛類の方が阻害物質に対する感受性が強いようであるから *Carchesium* や *Epistylis* が正常のときに現われる生物膜では、これらの生物の多寡を指標にすればよい。

9) 汙床バエの発生 生物膜に多数の *Psychoda* の幼虫が認められる。

7. お わ り に

本文では、廃水の好気性処理、とくに活性汚泥と生物膜に出現する微小動物の種類、およびそれらが処理の適否や処理条件を示す好適な指標生物になることを示した。これらの微小動物を同定および計数することによって、おおまかな処理状況を把握することができる。したがって好気性処理のパイロットプラントや実プラントを操作する研究者および技術者は、そのプラントの微小動物相をととき観察することが望ましい。次号では、好気性処理における微小動物の役割について述べる。

- (1) 須藤隆一：廃水処理の生物学，産業用水調査会，東京，1977。
- (2) C. R. Curds and H. A. Hawkes: Ecological Aspects of Used Water Treatment. Vol. 1, Academic Press, London and New York, 1975.
- (3) 須藤隆一，岡田光正，森 忠洋：用水と廃水，19, 855 (1977)。

(昭和 52 年 12 月 7 日受理)