低コスト・ハイパフォーマンス
技術による水処理革命

堀　　克敏　監著

松山 秀人
齋藤 永宏　編著
市野 良一

コ ロ ナ 社

監修者・編著者・執筆者一覧（執筆順）

		（所属，執筆担当章）
監 修 者	堀（ほり）　克敏（かつとし）	（名古屋大学）
編 著 者	松山（まつやま）　秀人（ひでと）	（神戸大学）
	齋藤（さいとう）　永宏（ながひろ）	（名古屋大学）
	市野（いちの）　良一（りょういち）	（名古屋大学）
執 筆 者	堀　克敏	（1 章）
	松山　秀人	（2 章）
	向井（むかい）　康人（やすひと）	（名古屋大学，2 章）
	佐伯（さえき）　大輔（だいすけ）	（神戸大学，2 章）
	齋藤　永宏	（3 章）
	上野（うえの）　智永（ともなが）	（名古屋大学，3 章）
	市野　良一	（4 章）
	神本（かみもと）　祐樹（ゆうき）	（名古屋大学，4 章）
	三浦（みうら）　篤人（あつと）	（帝人株式会社，5 章）
	藤岡（ふじおか）　正剛（まさたけ）	（株式会社フジミックス，6 章）
	中川（なかがわ）　勝統（かつのり）	（株式会社フジミックス，6 章）
	福崎（ふくざき）　康博（やすひろ）	（株式会社明電舎，7 章）
	Bernhard Wett（バーナード ウェット）	（ARA consult GmbH，7 章）
	鈴村慶太郎（すずむらけいたろう）	（旭化成ケミカルズ株式会社，8 章）
	朝倉（あさくら）　義幸（よしゆき）	（本多電子株式会社，9 章）
	野村（のむら）　記生（のりお）	（株式会社三進製作所，10 章）

（2013 年 10 月現在）

ま　え　が　き

日本ではかつて水質汚濁が深刻化し，大気汚染と並んで公害をもたらした。その後，さまざまな対策が取られ，排水処理技術の革新も進んだ。下水道や浄化槽の整備も進み，水環境はかなり改善された。今や日本の排水処理技術は世界トップレベルにあるといってもよいであろう。

他方，低濃度有害化学物質による汚染，規制項目の増加と基準の厳格化，富栄養化への継続的対策の必要性などから，より高度な処理が求められている。しかし，処理の高度化はコストの上昇を招く。多くの企業においては，排水処理は静脈側の工程と位置付けられており，生産現場の表舞台には現れにくい。コストの上昇はできるだけ避けたいところであろう。

世界に目を向けると，新興国の経済発展は目覚ましいが，同時に環境破壊も深刻化している。また，産業や都市の発達とともに水需要も高まる一方である。飲料水はむろん，農業・工業用水は人々の生活や経済活動には欠かせず，水資源の確保は極めて重要な課題である。排水処理の重要性に対する認識も広がってきており，産業用水や飲料水のレベルにまで浄化する技術の需要も生まれている。

上述のような状況下，排水処理分野における海外ビジネスチャンスも確実に広がっている。インフラ輸出は日本政府が進める成長戦略にも位置付けられており，高度な排水・下水処理技術と設備を積極的に世界に売っていくべきである。日本経済の再生・成長と環境問題への貢献を両立し得る分野である。実際に私が共同研究などでお付き合いさせていただいている企業も，この分野で積極的に海外展開されている。

しかし，ここで重要なことはコストである。環境破壊が深刻化しているとはいえ，新興国はまだまだ経済発展を重視している段階であり，環境設備・イン

フラの導入に割ける予算は決して大きくはない。当然，コストの高い技術の導入は難しく，低コストの技術や設備が求められているのが現状である。世界で水ビジネスを展開していくための“低コスト・ハイパフォーマンス技術”が本書のテーマの一つである。

本書のもう一つのテーマは“水処理革命”である。これからの排水処理技術に求められるものは，処理の高効率化とランニングコストの削減技術，付加価値の付与である。これらは相互に関連しており，効率化や付加価値の付与はランニングコストの削減に直結する。特に重要なのは，余剰汚泥の減量と省エネであろう。日本全国から出る余剰汚泥の総量は，全産業廃棄物量の半分を占めており，その減量は，環境関連の研究者にとって長年のテーマである。企業にとっても産廃処分コストの削減に直結する。また，排水の生物処理では，好気処理である活性汚泥法が普及しているが，酸素の供給，すなわちばっ気のために多大なエネルギーを消費している。排水処理工程のランニングコストのうち，ばっ気のための消費電力が占める割合はかなり高く，半分を超えることもある。

しかし，排水に含まれる有機物自体はエネルギー源であり，そこからエネルギーを回収できれば，省エネは可能である。メタン発酵による嫌気消化がよい例である。さらに，多くの排水は重金属などを含んでおり，これらの中にはレアメタルなど資源価値のあるものもある。これらを効率的に回収することができれば，排水処理に付加価値を与えることができる。これからの排水処理は，単なる処理ではなく，エネルギーや希少資源を回収する工程に進化させねばならない。

このような高度・高性能な排水処理技術は，現在，つぎつぎと生み出されているだけでなく，すでに市場にも出始めている。例えば，本書でも取り上げるが，エネルギーを完全に自給自足できるだけでなく，余剰エネルギーの生産にまで成功している排水処理プロセスも登場している。エネルギー多消費型施設であった排水処理場を，エネルギー生産施設に変換する技術が構築されているのである。それら“革命的”ともいえる水処理技術が，本書のもう一つのテー

マである。

最新の水処理技術を理解するためには，基礎となる理論や理屈をまず理解しなければならない。本書は，そもそも化学工学会東海支部が主催する進歩講習会に使用するテキストとして企画したものである。講習会の主たる対象者は，水処理技術者や関連の研究者，水処理に関わるビジネスマンであるが，本書は専門書として，水処理に関わる，または興味・関心のあるすべての方を対象とした。

特に，環境工学・化学工学・生物工学等を学ぶ学生が，理論とともにそれらが最新技術にどのように利用されているのかを学ぶことができるように配慮し，学部後半の専門課程や大学院のテキスト・参考書としても利用できることを念頭に置いた。そのため全体を二編構成とし，第Ⅰ編で新技術を生み出す理論を扱い，第Ⅱ編で注目すべき新技術・新しい排水処理システムを紹介した。

第Ⅰ編を大学教員に，第Ⅱ編を新技術を掲げて水ビジネスの最先端で活躍中の企業の方に執筆いただいた。また，処理技術も生物処理から物理化学処理まで幅広く取り上げた。読者には，新技術を基礎から理解いただき，日本の成長を支えるインフラ技術としての水ビジネスに大いなる関心と期待，さらに共に関りいただければ，監修・筆者としてこのうえない喜びである。

2013 年 10 月

名古屋大学大学院工学研究科化学・生物工学専攻　堀　克敏

目　　次

Ⅰ編　新技術を生み出す基礎と理論

1　有機排水の生物処理技術

1.1　本 章 の 概 要 …… 2
1.2　微生物による浄化メカニズム …… 3
　1.2.1　排水処理に関わる微生物の種類 …… 3
　1.2.2　代謝と食物連鎖による浄化 …… 5
1.3　有機汚濁の指標と管理項目 …… 8
　1.3.1　有機汚濁と排水管理の指標と測定法概略 …… 8
　1.3.2　管 理 項 目 …… 9
1.4　活 性 汚 泥 法 …… 16
　1.4.1　標準活性汚泥法 …… 16
　1.4.2　各種活性汚泥法 …… 20
1.5　生物膜法・バイオフィルム法 …… 22
　1.5.1　生物膜・バイオフィルムの特徴 …… 22
　1.5.2　従来型生物膜法 …… 24
　1.5.3　バイオフィルム法の新技術 …… 27
1.6　高度処理による窒素とリンの除去 …… 28
　1.6.1　硝化脱窒処理法 …… 29
　1.6.2　生物学的リン除去 …… 32
1.7　嫌 気 性 処 理 …… 34

1.7.1　メタン生成機構 …… 34
1.7.2　嫌気消化プロセス …… 35
1.8　微生物のエネルギー獲得機構の視点からみた浄化 …… 36
1.9　お　わ　り　に …… 39
引用・参考文献 …… 39

2　膜を用いた水処理技術

2.1　本 章 の 概 要 …… 41
2.2　多孔膜の作製方法 …… 41
2.2.1　膜 の 分 類 …… 41
2.2.2　膜を用いた水処理 …… 42
2.2.3　多孔膜の製膜 …… 44
2.2.4　相分離を利用した多孔膜の作製 …… 45
2.2.5　膜細孔径の評価方法 …… 48
2.2.6　ナノファイバー膜の製法と基本性能 …… 52
2.3　膜ファウリング …… 57
2.3.1　膜ファウリングの基本モデル …… 57
2.3.2　膜ファウリングモデルの精密ろ過膜への応用例 …… 59
2.3.3　RO 膜のファウリング低減の試み …… 63
引用・参考文献 …… 67

3　物理化学処理

3.1　本 章 の 概 要 …… 71
3.2　物理化学的な水処理技術 …… 72
3.2.1　マイクロバブル …… 74
3.2.2　プ ラ ズ マ …… 77
3.3　ま　と　め …… 94
引用・参考文献 …… 95

4 排水からの有価元素（レアメタル）の回収

4.1 本章の概要……97
4.2 リサイクル対象となる元素……99
4.3 分離・濃縮技術……101
4.3.1 溶解度積を用いた処理……101
4.3.2 吸着材……103
4.3.3 溶媒抽出……106
4.3.4 膜分離……108
4.4 固液分離法……108
4.4.1 重力沈降……109
4.4.2 凝集分離……110
4.4.3 ろ過……111
4.4.4 浮上分離……115
4.5 金属還元法……115
4.5.1 乾式法……115
4.5.2 湿式法……116
4.6 おわりに……118
引用・参考文献……118

Ⅱ編 市場に出てきた驚きの新システム

5 多段式生物処理装置――余剰汚泥極小化処理システム

5.1 本章の概要……124
5.2 MSABP® 紹介……125
5.2.1 技術概要……125

5.2.2　技術展開イメージ……127
5.3　MSABP® 性能検証……128
5.3.1　小型 MSABP® による下水処理……128
5.3.2　余剰汚泥削減機構……130
5.3.3　結　　論……134
5.4　50 m^3 MSABP® による下水処理場での実証試験……135
5.4.1　試 験 方 法……135
5.4.2　試 験 結 果……136
5.4.3　実証試験のまとめ……139
5.5　実施例紹介（瀋陽市下水処理事業について）……140
5.5.1　瀋陽市の概況……140
5.5.2　プロジェクト概要……141
5.5.3　瀋陽市の MSABP® 採用のメリット……143
5.6　お　わ　り　に……143
引用・参考文献……144

6　油脂分解微生物を活用した高濃度油脂含有廃水の処理システム

6.1　本 章 の 概 要……145
6.2　油 脂 の 性 質……145
6.3　油脂含有廃水を排出する工場が抱える課題……147
6.4　弱酸性条件下で油脂分解能に長けた微生物の探索……148
6.5　油脂分解微生物製剤を活用した
工場廃水の油分解処理の実証例……151
6.6　油脂分解微生物を活用した排水処理システムの新開発……155
6.7　今後の展望―食品廃棄物の有効活用と
ゼロ・エミッション化に向けた取り組み―……157
引用・参考文献……160

7 嫌気性アンモニア酸化細菌を活用したエネルギー自給自足型下水処理法

7.1 本章の概要 …… 162
7.2 新しい下水処理法の必要性 …… 162
7.3 AB-process …… 163
7.3.1 A-stage …… 164
7.3.2 B-stage …… 167
7.4 嫌気性汚泥消化 …… 168
7.5 アナモックス …… 170
7.5.1 アナモックス反応 …… 171
7.5.2 一槽型脱アンモニア処理 …… 174
7.6 エネルギー自給自足型下水処理場 …… 177
7.6.1 AB-process と脱アンモニア処理の組合せ …… 177
7.6.2 消化ガス発電によるエネルギー自給自足 …… 179
7.6.3 エネルギー自給自足型下水処理場の例：Strass …… 179
7.7 まとめ …… 183
引用・参考文献 …… 184

8 膜分離活性汚泥法

8.1 本章の概要 …… 186
8.2 MBR の特徴と分類 …… 186
8.2.1 MBR の特徴 …… 186
8.2.2 MBR の分類 …… 189
8.3 MBR の運転方法 …… 190
8.3.1 MBR の運転工程 …… 190
8.3.2 膜モジュールの洗浄 …… 192
8.3.3 MBR の設備設計と維持管理における留意事項 …… 193

8.4　MBR の適用事例 …… 194
8.4.1　適用事例 1：食品排水での事例（国内）…… 196
8.4.2　適用事例 2：下水での事例（国内）…… 197
8.4.3　適用事例 3：下水での事例（韓国）…… 198
引用・参考文献 …… 199

9　超音波利用による水処理

9.1　本 章 の 概 要 …… 201
9.2　超 音 波 と は …… 201
9.3　超音波による水処理の原理 …… 202
9.4　水処理に適した超音波装置 …… 204
9.5　超音波による水処理 …… 205
9.5.1　難分解性物質の分解 …… 206
9.5.2　殺　　菌 …… 212
9.5.3　活性汚泥の超音波処理システム …… 214
引用・参考文献 …… 216

10　めっき廃液からの金属資源回収

10.1　本 章 の 概 要 …… 219
10.2　めっき廃液の性状 …… 219
10.2.1　めっき加工と浴組成 …… 219
10.2.2　めっき廃液の発生要因および性状 …… 221
10.3　めっき廃液処理の現状 …… 221
10.4　金属資源回収に利用される技術操作 …… 222
10.4.1　不溶化物法（スラッジ化）…… 223
10.4.2　イオン交換樹脂法 …… 224
10.4.3　隔膜電解法 …… 225

10.4.4　電　解　法……225
10.4.5　イオン交換膜法……225
10.4.6　蒸発濃縮法……225
10.4.7　多成分系金属排水の選択分離……225
10.5　資源リサイクルセンターシステムによる金属資源回収……228
10.5.1　資源リサイクルセンターの特徴……229
10.5.2　再資源材の付加価値向上策……229
10.6　めっき工程における資源循環システム
（無排水・クローズド化）……231
10.6.1　基本概念と注意事項……231
10.6.2　クロムめっき工程における循環利用……232
10.6.3　ニッケルめっき工程における循環利用……233
10.6.4　亜鉛めっき工程における循環利用……234
10.6.5　汲み出し量削減方法……235
10.6.6　水洗水量削減方法……235
10.6.7　蒸発濃縮装置……236
10.7　酸洗浄浴からの金属資源回収……237
引用・参考文献……238

索　　引……239

Ⅰ編

新技術を生み出す基礎と理論

1 有機排水の生物処理技術

1.1 本章の概要

生物処理の対象となる排水は汚濁物質として有機物を含む排水であり，都市下水，生活雑排水，工場排水，農業集落排水などである。工場排水の中では食品加工工場からの排水などが多量の有機物を含む。通常の有機物は自然環境中で比較的容易に分解され，最終的には二酸化炭素と水にまで無機化される。「三尺流れれば水清し」とはこのことを表現しており，河川も流れる間に有機物を分解する自浄作用をもっている。そしてその分解を担っているのが，河川などに生息している微生物なのである。しかし，一度に多量の有機物が河川などに流れ込めば，微生物による分解が追いつかなくなるとともに，多量の有機物を急速に分解することで水中の微生物が急増殖する。急増した微生物により水中の酸素が消費しつくされ，魚類などの水生生物が酸欠によって死滅する。さらに急増した微生物自体も死滅し，川床に沈積しヘドロとなる。すでに酸素がないため，酸素を必要としない微生物の嫌気発酵により悪臭物質や有毒物質が放出される。

この水質汚濁を防ぐため，有機物を分解除去するための排水処理が必要になるわけだが，その基本的な方法論は，河川の自浄作用をいわば促進することである。すなわち，生物処理技術とは，微生物による有機物の分解を促進し，多様で無数の微生物によって構成される生態系のメカニズムを利用することにより，われわれの生活や産業活動から大量に生じる有機排水を効率的に処理する

ものである。代表的な排水処理法である活性汚泥法では，好気性微生物による有機物の分解に不足しがちな酸素を供給するためにブロアーで空気を送り込む（ばっ気）ことで，好気性微生物を活性化している。その歴史は古く，考案されてから 100 年以上経つ。近年，微生物解析技術が飛躍的に進歩するとともに，新材料の利用や他技術とのインテグレートにより，より効率的な生物処理技術が登場してきている。近年普及著しい膜分離活性汚泥法を含むこれら新処理技術については他章に譲り，本章では，生物処理の基本となる微生物による浄化メカニズム，すでに普及している生物処理技術の原理を解説する。新技術を理解するためにも，また，さらなる革新的な生物処理技術を生み出すためにも，根本的なメカニズムと原理を理解することが重要である。

1.2　微生物による浄化メカニズム

1.2.1　排水処理に関わる微生物の種類

微生物とは肉眼で見ることが不可能または困難な極微小な生物の総称である。多くは一つの細胞で生命活動を営む単細胞生物であり，一般的な動物や植物のような多細胞生物とは異なる（人は約 60 兆個の細胞からなる）。そもそも細胞とは小さなものであり，血液の中に含まれる赤血球も細胞であるが，肉眼では識別できない。よって微生物が眼で見えないのも当然である。赤血球の直径は約 7 μm であり，醸造やパンの製造で活躍する酵母という微生物は約 5 μm であるから似たような大きさといえよう。

酵母は微生物の中では進化が進んだほうの部類であり，遺伝情報の担い手である染色体 DNA が核膜に覆われた核に存在し，われわれ高等生物と同様に真核生物に属する。より下等で排水処理の主役になる微生物が細菌と呼ばれるもので，英語で**バクテリア**（Bacteria）という。よって，細菌とバクテリアは同じものを指す単語である。細菌は核膜をもたず，DNA が細胞質中に剝き出しの状態で存在し，原核生物といわれる。原核生物の大きさは真核生物の細胞（真核細胞）の 10 分の 1 ほどであり，1 μm 程度である。

原核生物の中には，細菌のほかに古細菌といわれるものが存在し，細胞構成分子などが細菌とは異なるが，大きさは同レベルであり，顕微鏡でもこれら二つを識別するのは難しい。古細菌とはいえ，生物進化上は細菌より真核生物に似た要素を多くもつため，最近では**アーキア**（archaea）とか始原菌と呼ぶことが多くなった。嫌気性処理で主役を演じるメタン生成菌はすべてアーキアである。

排水処理において，可溶性の有機汚濁物質を取り込み分解しているのは細菌である。そもそも**活性汚泥**（activated sludge）とは，好気性微生物が有機物を分解しながら増殖する際に形成するフロックと呼ばれる浮遊物のことであり，その中には 10^8 ～ 10^9 個/mL 以上の細菌が存在し，その種類も *Pseudomonas* 属，*Acinetobacter* 属，*Bacillus* 属，*Alcaligenes* 属，*Flavobacteria* 属など無数であり，下水処理の専門家にとって有名なズーグレア（*Zooglea*）属細菌も決して優占種ではない[1)†]。これら細菌は，排水中の有機物を栄養源として分解，資化することによって生きており，従属栄養微生物といわれる。排水や活性汚泥中には，他の従属栄養微生物として，真核生物に属する酵母やカビなどの真菌類も含まれるが，通常は細菌と比べ数はずっと少ない。

排水や活性汚泥の中には，従属栄養微生物を捕食する原生動物も存在する。原生動物は単細胞の真核生物であり，口や肛門の働きをもつ細胞小器官が発達し，数～数百 μm の大きさになる。ゾウリムシ（*Paramecium*），アメーバ（*Amoeba*）などは一般にも聞く名前であるが，それぞれ繊毛虫類，肉質虫類に属する原生動物である。最近注目を集めているミドリムシ（*Euglena*）も鞭毛虫類に属する原生動物である。また，繊毛虫類に属するツリガネムシ（*Vorticella*）は活性汚泥の良好な状態を反映する指標生物として有名である。

さらにこれら原生動物を捕食する二次捕食者である後生動物としてミジンコ，ワムシ，ミミズなどがある。これらはすべて多細胞生物であり，大きさも 1 mm 以上になるものも多く，肉眼でも存在が確認できる。原生動物や後生動

† 肩付き数字は，章末の引用・参考文献の番号を表す。

物の存在は良好な食物連鎖が形成されていることを示すものであり，処理水の透明度の向上や余剰汚泥の減量に重要な働きを担っている[2)]。こういった捕食者をどのように利用するかが，生物処理の新しいテーマにもなっている。

1.2.2　代謝と食物連鎖による浄化

〔1〕 細菌による有機物の分解

生物処理の過程は，有機汚濁物質の**吸着**，**取込み・分解**，**固液分離**からなる[1)]。第一段階はフロックへの有機物の吸着である。この過程で，有機性高分子物質は微生物によって分泌生産された酵素によって低分子化される。具体的には，タンパク質はペプチドやアミノ酸へ，多糖類はオリゴ糖や単糖類へ，油脂は脂肪酸とグリセリンにまで分解される。

第二段階ではこれら低分子の有機物が細菌細胞内に取り込まれ，栄養分として利用される。ここで重要なことは，この過程は細胞内で行われる化学反応であり，そこには質量保存の法則が成り立つということである。すなわち，「化学反応の前後で，それに関与する元素の種類とおのおのの物質量は変わらない」。よって，有機汚濁物質を構成する元素は生物処理によって消滅するわけではなく，存在形態を変えるだけである。

例えば，排水中の有機物の主要元素である炭素は，新たな微生物体を構成する細胞成分か代謝産物に変換されるだけである。代謝産物は有機酸のように細菌細胞外に分泌されるものもあるが，これも多くは可溶性有機成分として再び吸着するか別の細菌の細胞に取り込まれる。そして最終的には二酸化炭素にまで無機化されることで，その分，有機汚濁物質が分解され排水は浄化されたことになる。嫌気性処理の場合にはメタンに変換される炭素成分もあり，メタン発酵の場合はエネルギーとして回収する。他方，細胞成分に変換された分は新規の汚泥成分となる。よってこの分が多いと，余剰汚泥量が増大することになる。

細菌は，細胞内に取り込んだ有機物を無機物にまで分解する過程で，生きるためのエネルギーを生産して生命を維持するとともに，このエネルギーを利用

して有機物を細胞成分に変換して微生物体をつくり，増殖する。細菌の平均的な化学組成をもとに微生物体を化学式で表記すると $C_5H_7O_2N$ と示される。これらは，排水処理の化学量論，物質収支を考えるうえでの基本となるものである。例えば，排水中の有機汚濁物質としてカゼインを考えるとつぎのようになる[3)]。

$$C_8H_{12}O_3N_2 + 3O_2 \rightarrow C_5H_7O_2N + NH_3 + 3CO_2 + H_2O$$

カゼイン　　細菌細胞

化学式量	184	96	113	17	132	18

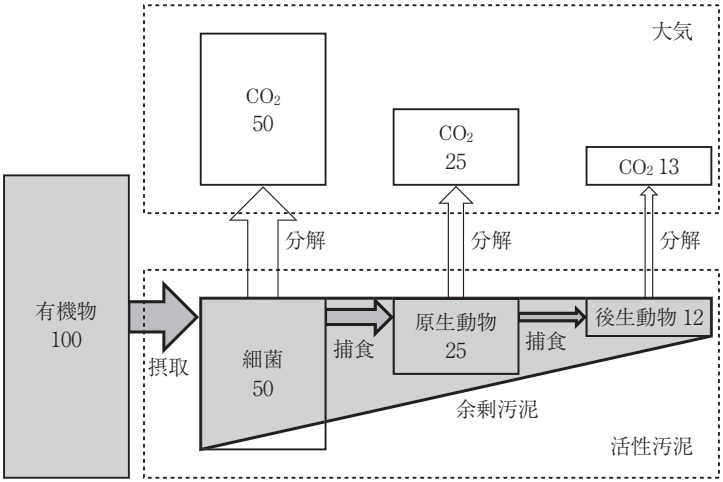
この式より，排水中の 184 g のカゼインが細菌に取り込まれると，96 g の酸素を使って，132 g の二酸化炭素と 18 g の水，さらに 17 g のアンモニアにまで酸化分解され，113 g の新規細胞成分が生合成されると考えると物質収支が合う。

第三段階は固液分離で，主として微生物細胞からなる汚泥を沈降分離により処理水と分離する。そのため，汚泥の沈降性は重要である。処理水は塩素消毒後に放流される。分離した汚泥は返送汚泥として生物反応槽に戻され，残りは余剰汚泥として系外へ引き抜かれる。定常状態で運転している際には，新規に生合成された微生物細胞，すなわち新たに生じた活性汚泥と等量の余剰汚泥を引き抜くこととなる。

〔2〕 食　物　連　鎖

好気条件では，細菌に取り込まれた有機汚濁物質は，細胞成分になる以外は最終的には二酸化炭素と水にまで酸化分解され，これによって排水は浄化される。炭素成分で考えるとその割合はおおよそ 50 % である。すなわち，細菌によって取り込まれた有機物の半分は二酸化炭素となり大気中に放出されることで系外に除かれ，残り半分は汚泥になる。この汚泥はそのままなら余剰汚泥，すなわち廃棄物となる。大雑把にいえば，細菌の作用により汚れの成分は半減するが，残り半分は廃棄物の元になる。しかし，排水や活性汚泥中に存在する原生動物は，この細菌を捕食してエネルギーと細胞成分を生産し，生きている。細菌が有機汚濁物質を取り込んだ後と同様に，原生動物によって捕食され

た細菌成分の半分は無機化されると考えると，原生動物の細胞成分になるのは，最初に細菌に取り込まれた有機成分の 1/2×1/2=1/4 である。これこそが，有機排水の微生物処理の根本的で最も重要なメカニズムである（**図 1.1**）。



汚濁物質である有機物は活性汚泥中の細菌に摂取され，その半分が分解されて二酸化炭素となり大気中に放出される。残り半分が新規の細菌細胞となり，生成汚泥として活性汚泥に加わる。細菌は原生動物に，原生動物は後生動物に順次捕食されていき，一段階食物連鎖が進むごとに，半分が二酸化炭素に無機化され残り半分が微生物体となる。よって三段階で最初の有機物の約 12 %が微生物体となり，残り 88 %は無機化され浄化が進む。最終的に残った新規合成微生物体は余剰汚泥となる。

図 1.1　有機排水の生物処理による浄化メカニズム

活性汚泥や排水中にはさらに後生動物も存在し，微生物生態系が形成されている。そこでは，微生物がいわゆる食う・食われるの関係でつながっている，すなわち**食物連鎖**が成り立っているのである。上では細菌が原生動物に捕食される段階まで考えたが，さらに後生動物による捕食まで考えると 1/8 までになる。すなわち，捕食段階が一段進むごとに，有機汚濁物質を元にした廃棄物は半減していき，排水の浄化が進むのである。しかも実際には，高次の微生物ほど微生物体に変換される割合は 50 %から減少していき，後生動物によっては 20 %を下回るものもあるため，捕食が進むほど微生物体，すなわち汚泥量

は急減していくのである。しかし，広く普及している標準活性汚泥法では，細菌が有機汚濁物質を取り込み分解した後の固液分離を重視しており，微生物生態系の食物連鎖が安定的に成立していないため，食物連鎖による浄化作用は限定的である。余剰汚泥は産業廃棄物の総量の半分を占めており，その削減は排水処理の最重要課題の一つである。食物連鎖を利用して余剰汚泥を極小化する新しい排水処理システムは，5章で紹介されている。

1.3　有機汚濁の指標と管理項目

1.3.1　有機汚濁と排水管理の指標と測定法概略

ここでは，排水処理技術と排水の管理に携わるのに重要な，有機物による汚濁の程度の指標，排水の管理指標と測定方法の概略について述べる。

〔1〕 **有機汚濁物質の指標：BOD，COD，TOC**

微生物が水中の有機物を酸化分解するのに消費する酸素量を**生物学的酸素要求量**（biological oxygen demand，**BOD**）という。暗所，20℃における5日間での分解試験による消費酸素量を測定する $\mathbf{BOD_5}$ が一般的である。一方，水中の有機物を微生物ではなく酸化剤により酸化分解するのに消費する酸素量を**化学的酸素要求量**（chemical oxygen demand，**COD**）という。酸化剤としては過マンガン酸カリウムまたは二クロム酸カリウムを用い，それぞれの測定値を $\mathbf{COD_{Mn}}$，$\mathbf{COD_{Cr}}$ のように表記する。日本では有害なクロムを使用せずに操作時間も短い前者を使うことが多いが，酸化力が弱いので分解しきれない成分が残るという欠点がある。欧米では，より酸化力の強いクロム法が広く用いられる。当然，同じ水を分析しても，COD_{Cr} のほうが COD_{Mn} より高い値となる。また，BOD と COD を比べると，微生物が分解しにくい難分解性物質の濃度が高いと，前者のほうが低い値となる。BOD にしろ COD にしろ，有機汚濁の程度がひどいほど消費する酸素の量は多くなるので，これらの値が高いほど汚染の度合いが高いということになる。

BOD，COD が酸素の消費量という有機物汚染の間接的な指標であるのに対

し，水中の有機物量を含まれる炭素の総量で示したものが**全有機炭素**（total organic carbon，**TOC**）である。有機物を完全酸化して二酸化炭素に変えて炭素量を測定する。TOC は，測定において酸化剤の酸化力や生分解性，炭素以外の還元物質の影響を受けず，また必要酸素量ではなく炭素の量そのものなので，水中の有機物量としては最も正確な値を表しているといえる。そのため，科学的な研究レベルでは TOC が使われることが多いし，また，水道法の水質基準項目としても採用されている。

〔2〕 懸濁物質の指標と測定法

SS（suspended solid）は水質指標の一つで，水中に浮遊する粒径 2 mm 以下の懸濁物質の総称であり，1 L 中の乾燥重量〔mg/L〕として表す。SS はいわゆる水の濁りを示す指標の一つである。これに対し，生物反応槽内の原水と活性汚泥の**混合液**（mixed liquor，**ML**）中に含まれる活性汚泥浮遊物質を**MLSS**（mixed liquor suspended solid）と呼ぶ。これは，ML 中の浮遊物質を遠心分離あるいはろ過法により分離し，洗浄乾燥後の重量〔mg/L〕から求めたもので，測定が簡便なため，生物反応槽内の微生物量の指標として用いられる。しかし，実際の汚泥中には砂や粘土鉱物などの微生物以外の浮遊物質を多く含むこともあるので，より正確に微生物量を示す指標が活性汚泥有機性浮遊物質であり，**MLVSS**（mixed liquor volatile suspended solid）という。これは，MLSS を 600 ℃で 1 時間強熱したときに揮散した物質を有機物としてみなし，その**強熱減量**分〔mg/L〕である。MLVSS は無機性の SS を MLSS から差し引いた値であり，MLVSS/MLSS は分流式標準活性汚泥法で 75 ～ 85 %を示すことが多い。

1.3.2　管　理　項　目

ここでは生物処理の状況を把握し効果的に運転するために管理すべき項目について述べる。

〔1〕 DO

嫌気消化によるメタン発酵を除けば，好気処理が有機排水処理の主流であ

る。これは，生物反応槽をばっ気して酸素を供給することで，微生物による有機物の酸化分解を促進しようというものである。微生物を含む水中生物は水に溶け込んだ酸素を利用するので，**溶存酸素**（dissolved oxygen，**DO**）濃度が重要である。酸素の水に対する溶解度は圧力と温度によって変化し，大気圧下，20 ℃では約 8.8 mg/L である。温度が上昇すると酸素は水に溶けにくくなり，25 ℃で 8.1 mg/L，30 ℃で 7.5 mg/L となる。元来，酸素は水に溶けにくいものであるという認識が必要である。生物反応槽において連続的に有機物を酸化分解するには，DO は 0.5 mg/L 以上あればよいとされているが，槽内のバラツキや測定精度の問題があるため，ばっ気槽内の DO を 1.0 mg/L 以上に保つように管理基準を設定すべきである[4)]。DO は微生物の活動によってつねに消費されるから，生物反応槽内にブロアーを使って空気を供給，すなわちばっ気が必要になる。

どれだけの酸素が必要で空気を供給せねばならないかが，好気処理の重要な設計項目・操作因子となる。必要酸素量は次式で求められる。

必要酸素量〔kg-O_2/d〕

$$= a \times \text{除去 BOD 量〔kg/d〕} + b \times \text{MLVSS〔kg/L〕} \times \text{ばっ気槽容量〔L〕} \tag{1.1}$$

ここで

除去 BOD 量〔kg/d〕

$$= \text{排水量〔m}^3\text{/d〕} \times (\text{BOD}_{in} - \text{BOD}_{out})\text{〔kg/m}^3\text{〕} \tag{1.2}$$

であり，また理論的には MLVSS が正しいが，簡便のため MLSS で代用または推定換算してもよい。a，b は以下のとおりである。

a：除去 BOD のうち，新規の細胞成分を合成し微生物が増殖するために必要なエネルギーを供給するために使われる率〔kg-O_2/kg-BOD〕。0.3 ～ 0.7 程度であり，通常は 0.5 を使用する[4)]。

b：維持代謝のために活性汚泥を自己消化する（内生呼吸ともいう）のに必要な酸素量〔kg-O_2/(kg-MLVSS･d)〕であり，0.01 ～ 0.10 kg/(kg-MLVSS･d) 程度である。

索　　引

【あ】

アーキア　4
亜硝酸酸化細菌　29, 171
油分解槽　148
アンモニア酸化細菌　29, 171

【い】

イオン交換再生溶離液　225
イオン交換樹脂　224
イオン交換樹脂法　222, 224
イオン交換膜法　222, 225
一次光沢剤　233
一次処理水　16
一槽型　174
陰極室　225
インライン洗浄　191

【え】

液相還元　117
液中プラズマ　90
エネルギー自給自足型下水処理場　179
エレクトロスピニング　52
遠心脱水　115

【お】

オキシデーションディッチ　22, 127, 180
オーシスト　213
オゾン　85
汚泥再ばっ気法　21
汚泥滞留時間　134, 166
汚泥転換率　13, 18
汚泥日令　15
汚泥濃度　166
汚泥負荷　11
汚泥返送比　17
汚泥容量　15
汚泥容量指標　15
音響キャビテーション　203
音響キャビテーション気泡　203
音響バブル　203

【か】

加圧浮上分離装置　148
加圧浮上法　193
加圧ろ過　114
加圧ロール脱水　114
回転円板法　24
回分型　174
回分式活性汚泥法　22
界面重合法　44
化学合成生物　36
化学合成独立栄養微生物　30
化学洗浄　192
化学的酸素要求量　8, 152, 182
核　化　45
隔　膜　225
隔膜電解法　222, 225
加水分解　165
活性汚泥　4, 186, 214
活性汚泥濃度　126, 187
活性汚泥法　3
活性炭吸着　223
可搬式ボンベ（カートリッジ）型イオン交換樹脂塔　228
環境基準　100
完全混合型　20
完全閉塞　57

【き】

希釈率　17
揮発性懸濁物　130
揮発性有機化合物　209
逆浸透膜　42, 108, 113
逆　洗　190
キャリーオーバー　15
球　晶　47
凝集沈殿　26
強熱減量　9
金属イオン　223
金属含有排水　223
金属水酸化物　223
金属硫化物　223
菌体外酵素　164
菌体外ポリマー　164
菌体収率　17, 18

【く】

汲み出し量　231
クラーク数　100
グラニュール　36, 175
グラフト重合　64
グリーストラップ　159
クリプトスポリジウム　213
クローズドシステム　219
クロムめっき浴　220

【け】

ケークろ過　58
減圧型蒸発濃縮装置　232
限外ろ過膜　41, 113
嫌気消化　34
嫌気性アンモニア酸化　163
嫌気性汚泥消化槽　163
嫌気性処理　4, 5, 34

嫌気発酵 2
原生動物 4, 6

【こ】

好気処理 9
好気性微生物 3, 4
光合成生物 36
後生動物 4, 7
光沢ニッケルめっき 220, 233
高度処理 29
鉱物油 193
固液分離 5, 6, 15, 17
コーダイジェスション 183
固定床 25
混合スラッジ 226
コンポスト化 158

【さ】

細　菌 3
最終沈殿池 17, 165
最終電子受容体 37
最初沈殿池 16, 164
細胞外代謝産物 63, 192
細胞分裂 165
細胞膜 106
酢酸生成細菌 35
酢酸セルロース 43
酸化還元電位 37
酸化分解 223
散水ろ床法 25
酸素呼吸 37

【し】

シアン含有排水系 221
資源回収 98
糸状性細菌 19
磁性吸着材 105
脂肪酸 146
従属栄養性 171
従属栄養生物 4, 36
循環脱窒法 31
硝　化 23, 29, 31
消化ガス 165
硝化菌 30
硝化脱窒法 21
硝酸呼吸 30, 38
省スペース化 186
蒸発濃縮装置 236
蒸発濃縮法 222, 225
食物連鎖 5, 6, 7, 24
浸漬型（一体型） 189
浸漬型（槽別置型） 189
浸漬洗浄 191
真空ろ過 113

【す】

水酸化物スラッジ 219
水質汚濁防止法 100
水理学的滞留時間 166, 198
スクリュープレス 114
スクリーン 193
ステップ・フィード法 20
ストークスの式 109
砂ろ過 112
スラッジ 113, 219
スラッジ化 223

【せ】

生物化学的酸素要求量 196
生物学的酸素要求量 8, 152
生物学的リン除去 32
生物還元 118
生物処理技術 2, 3
生物反応槽 16
生物膜法 22, 24
精密ろ過膜 41, 113
ゼータ電位 110
接触ばっ気法 26
セメンテーション 118
ゼロ・エミッション化 158
洗浄排水 219
選択的金属回収 226
選択分離 225
全有機炭素 9

【そ】

槽外型 189
装飾クロムめっき 220

【た】

大気型 232
大腸菌 212
滞留時間 126
多成分系金属排水 223, 225
多槽水洗 231
多段式生物処理装置 124
脱アンモニア処理 174
脱水ろ液 170
脱　窒 23, 29, 30, 31
脱窒菌 30
脱離液 170
炭素性 BOD 137
炭素繊維 27
担　体 23, 25, 26

【ち】

窒素除去速度 172
窒素性 BOD 137
窒素代謝経路 163
窒素容積負荷 172
中間沈殿池 164
中間閉塞 58
中空糸 194
長時間ばっ気法 21
沈降性 6, 13, 15, 18

【て】

電解還元 116
電解法 222, 225
電　子 36
電子供与体 37, 38, 39
電子受容体 37, 39
電流効率 229

【と】

動植物油 193
独立栄養性 171

独立栄養生物 36
トリグリセリド 145
トリメゾイルクロリド 44, 66

【な】

内生呼吸 10, 14
ナノファイバー 52
ナノろ過膜 113
生汚泥 163
難溶解性化合物 101

【に】

二次処理水 17

【ね】

熱誘起相分離法 45

【の】

濃縮操作 221
ノルマルヘキサン抽出物 152

【は】

バイオソープション 164
バイオディーゼル 158
バイオファウリング 63
バイオフィルム 22, 23, 26, 27, 36, 63
バイオフィルムリアクター 27
バイオリアクター 16, 27
廃　酸 238
排水処理 97, 221
薄層クロマトグラフィ 150
バクテリア 3
ばっ気 10
ばっ気槽 164
発酵熱 13
バルキング 12, 15, 19
半光沢ニッケルめっき 233

【ひ】

比基質消費速度 17
微生物顆粒 36
微生物コミュニティ 23, 24, 35
微生物燃料電池 38
比増殖速度 17
標準活性汚泥法 11, 16
標準閉塞 57
非溶媒誘起相分離法 45

【ふ】

フィルタープレス 114
富栄養化 29
物理洗浄 192
部分亜硝酸化 172
不溶化物法 222, 223
不溶性陽極 234
プラグフロー 20
プラズマ 77
フロック 4, 5, 13, 16
分注法 20

【へ】

平均・可溶性化学的酸素要求量 128
平均・懸濁物質濃度 128
平均滞留時間 14
閉鎖型の大気型蒸発装置 234
閉　塞 24, 25, 26
閉塞ろ過 57
ベクトルプレス 114
ベースメタル 99
返送汚泥 6, 17, 166
返流水 170

【ほ】

捕　食 4, 6
捕食者 5
泡末分離法 105
ポリアクリロニトリル 43
ポリエチレングリコール 64
ポリエーテルスルフォン 43
ポリスルフォン 43
ポリフッ化ビニリデン 43
ポリリン酸 32

【ま】

マイクロバブル 72, 74
膜ばっ気 192
膜ファウリング 57
膜分離活性汚泥法 130, 186
膜モジュール 187
膜モジュールユニット 187
膜ろ過流束 197
マクロボイド 46

【め】

メタン生成アーキア 35
メタン生成菌 4
メタン発酵 5, 36, 38
めっき加工 219

【や】

山元還元 221

【ゆ】

油　脂 145
油脂分解微生物 148

【よ】

溶解性微生物代謝産物 192
溶解度積 101
陽極室 225
容積負荷 11
溶存酸素 10, 166
溶存酸素濃度 194
溶媒抽出法 226
余剰汚泥 5, 6, 8, 14, 17, 18, 24, 165

【り】

リゾチーム 65
リパーゼ 149

硫化水素 38
硫化物 102
流動床 26

【れ】
レアメタル 99
劣化（老化）廃液 219

【ろ】
六価クロム含有排水系 221
ロール型電析装置 229

【A】
AB-process 177
（A/O）法 33
（A_2/O）法 33
Anammox 163

【B】
BDF 158
BOD 8, 152, 196
BOD：N：P 12
BOD 負荷 11

【C】
C-BOD 137
COD 8, 152

【D】
DO 9, 10, 194

【E】
EPS 192

【F】
fill and draw 22
flux 197
F/M 比 11

【H】
HRT 126, 198

【M】
MBR 186
MCPA 208
MFC 38
MF 膜 113
MLSS 9, 126, 154, 188
MLVSS 9
MPC 64
m-フェニレンジアミン 44, 66

【N】
N-BOD 137
NF 膜 113
NIPS 法 45
Nitrobacter 30
Nitrosomonas 30

【O】
OD 127

【P】
PEG 64
PVDF 194

【R】
RO 膜 108, 113

【S】
SMP 192
spinodal 分解機構 46
SRT 14
SS 9, 188
SV_{30} 15
SVI 13, 15, 18

【T】
T-BOD 137
TIPS 法 45
TLC 150
TMC 66
TOC 9

【U】
UASB 35
UF 膜 113

【V】
VOC 209

【数字】
2-アミノエチルメタクリレート 65
2-メタクリロイルオキシエチルホスホリルコリン 64
4-クロロ-2-メチルフェノキシ酢酸 208
6-アミノカプロン酸 67

―― 監著者略歴 ――

1988 年　東京理科大学理工学部応用生物科学科卒業
1991 年　東京工業大学大学院総合理工学研究科修了（生命化学専攻）
1994 年　住友化学工業株式会社勤務
1995 年　東京工業大学大学院総合理工学研究科修了（化学環境工学専攻）
　　博士（工学）
1995 年　グリーンブルー株式会社勤務
1998 年　東京工業大学助手
2004 年　名古屋工業大学助教授
2006 年
～ 2010 年　科学技術振興機構さきがけ研究員（兼任）
2007 年　名古屋工業大学准教授
2011 年　名古屋大学教授
　　現在に至る

低コスト・ハイパフォーマンス技術による水処理革命
Innovative Systems for Waste Water Treatment Through Technologies
with High Performance and Low Costs
© Katsutoshi Hori 2013

2013 年 12 月 11 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

監 著 者　堀（ほり）　克（かつ）　敏（とし）
発 行 者　株式会社　コ ロ ナ 社
　　代 表 者　牛 来 真 也
印 刷 所　新日本印刷株式会社

112-0011　東京都文京区千石4-46-10
発行所　株式会社　**コ　ロ　ナ　社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140-8-14844・電話（03）3941-3131（代）
ホームページ　http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-06630-2　（高橋）　（製本：愛千製本所）
Printed in Japan

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めておりません。
落丁・乱丁本はお取替えいたします