

生物学的排水処理のプロセスとその維持管理

生物学的排水処理の基本原理とプロセス

竹内正美*・山崎博人*・村上定暉**

キーワード：排水処理、微生物、基本原理、処理プロセス

はじめに

水質汚濁の発生源は、生活や産業の活動に伴う排水である。生活系排水については、下水道、屎尿処理施設、浄化槽、農業集落排水施設などの生活排水処理施設により汚濁負荷の軽減が図られている。産業系排水については、水質汚濁防止法によりその水質基準が定められ、個々の事業所の状況に対応した処理施設により排水が処理・放流されている。

排水中の汚濁物質の組成や濃度は、生活系・産業系で全く異なる。生活系排水は、夾雑物を除くと生物由来の汚濁物質が主成分で、生物学的処理技術を中心とするプロセスにより浄化される。産業系排水は、その事業分野により、無機系または有機系あるいは双方の汚濁物質を含み、組成や濃度も異なり、その浄化プロセスには様々な処理技術が適用されている。

本稿では、生活系・産業系とともに、多くの分野において適用されている生物学的排水処理法について、その原理とプロセスの基本的な事項について概説する。

1. 排水の性状と処理計画

1.1 排水の性状と処理技術

汚濁物質の処理技術は多岐にわたり、①生活系か産業系か、②汚濁物質は有機系か無機系か、懸濁性か溶解性か、化学分解性か生物分解性か、③汚濁物質の濃度、排水量、排出基準などにより適用技術も異なり、通常いくつもの要素技術の組み

合わせにより処理プロセスが構成される。水処理の要素技術は、様々な原理に基づいており、これらは物理法、物理化学法、化学法、生物法に分類される（参照：本特集号「化学工業排水における生物処理プロセスとその維持管理」の表2（46頁））。排水の量と性状に応じた最も適切な方法を選択して組み合わせ、効果的で経済的な処理プロセスが採用される。

1.2 排水処理プロセスの計画¹⁾

排水処理プロセスを計画する場合の大まかな手順を図1に示す。

まず、排水中の夾雑物を除いた後、固体分を分離除去する。固体分が粗大粒子である場合には、沈降分離あるいは浮上分離を採用する。溶解性物質は、生物分解性であるかどうかにより、処理法が異なる。生物分解性物質の場合、汚濁物質濃度の高い排水（BODおよそ1,000mg/l以上）には嫌気性生物法が採用され、濃度が低い排水には好気性生物法が採用される。嫌気性生物法では目標の水質が達成されないことが多く、後段に好気性生物法を採用することが多い。汚濁物質が生物難分解性の場合には、汚濁物質の種類や濃度に応じて、蒸発乾固、焼却・液中燃焼・湿式酸化、酸化還元、吸着、不溶性塩生成などの化学法あるいは物理化学法を選択して除去する。また、有機化合物の場合にはオゾン等の酸化剤により生物分解性中間体へ改質して生物処理する方法もある。一般に、処理コストは固液分離、生物処理、物理化学処理の順に高くなるので、この順に従って、処理計画を立てるのが一般的な手順である。また、汚

濁物質を除去
清浄度の高い
適用する。

2. 生物処理

2.1 排水処理

排水中汚濁物質の解消・除去でき、有機化合物および無機化合物を用する微生物の活性化と酸素を必要

従属栄養

The Basic Principle and Process of Biological Wastewater Treatment

*宇部工業高等専門学校 Masami TAKEUCHI, Hirohito YAMASAKI

**広島商船高等専門学校 Sadaaki MURAKAMI

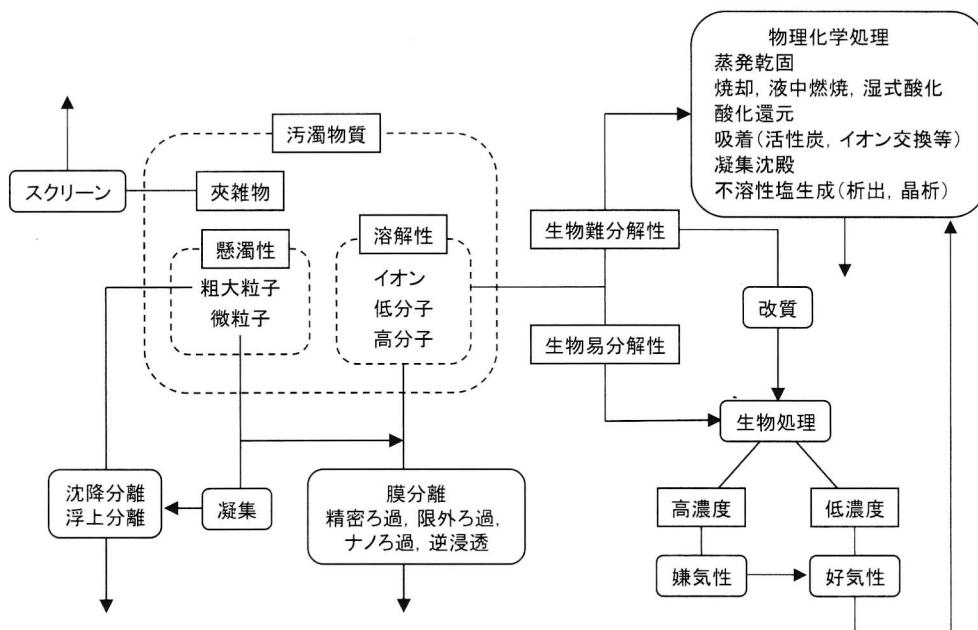


図1 排水処理の計画と手順

濁物質を除いた排水をリサイクルする場合には、清浄度の高い水を得る方法として膜分離法などを適用する。

2. 生物処理の基本原理とそのプロセス

2.1 排水処理に利用される微生物の分類

排水中の汚濁物質の中で、微生物により摂取・分解・除去できるものは、主として有機化合物、窒素化合物およびリン化合物である。排水処理に利用する微生物は、酸素を必要とする好気性細菌類と酸素を必要としない嫌気性細菌類に分けられ

る。また、生命維持や増殖に有機物を必要とするものは従属栄養細菌と呼ばれ、必要としないものは独立栄養細菌と呼ばれている。図2に、排水処理に利用される主な微生物を示す。

2.2 生物処理プロセスの設計因子・操作因子

排水の生物処理プロセスは、一般的には、微生物（汚泥）を保持し、流入水中の汚濁物質を除去する反応槽および微生物と処理水を分離する固液分離槽から構成される。反応槽および固液分離槽には様々な方式があり、また、固液分離槽が不要な生物処理法もある。さらに、気体が発生する反

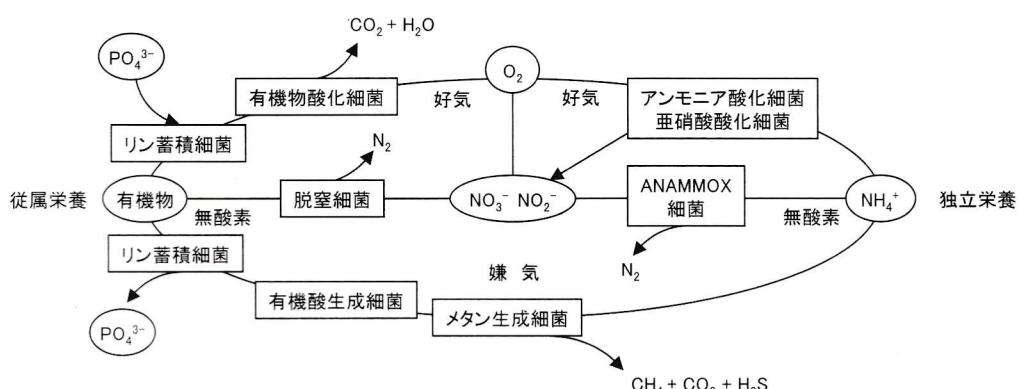


図2 排水処理に利用される主な微生物

応槽では気液固分離部が付設される。

定常状態における生物処理系モデルと設計因子・操作因子を図3に示す。本モデルでは、反応槽は浮遊・完全混合型とする。なお、嫌気性生物プロセスでは、酸素(空気)の導入は不要である。

浮遊・完全混合型に限らず、生物処理プロセスの設計因子・操作因子の中で、重要な項目は、①反応時間(流入水の反応槽での滞留時間)HRT、②汚泥滞留日数SRT、③汚泥増殖量(余剰汚泥量) ΔX 、④汚泥酸素消費量A(好気性処理)、⑤反応槽内の汚泥濃度MLSS(浮遊型)または汚泥量 X_r (付着型)である。図3には記載していない重要な因子として、温度、pH、溶存酸素濃度DO[mg/l](好気性処理)、汚泥負荷 $L_x (= S_i / X_r)$ [kg-汚濁物質/kg-汚泥]、容積負荷 $L_v (= S_i / V_r)$ [kg-汚濁物質/m³]、また、浮遊型生物法では汚泥容量指数SVI($= V_x / X_r$)[ml/g](V_x :30分静置後の汚泥容積[ml/l])、汚泥返送比Rなどがある。

生物処理プロセスの設計や維持管理に係わる詳細は文献^{2,3)}を参照されたい。

2.3 反応槽の類型とその処理プロセスの特徴

生物反応槽は、利用する微生物(汚泥)の種類及びその保持法により表のように分類される。

反応槽内を攪拌して微生物を浮遊状態で保持する浮遊型、微生物を担体に付着して保持する付着型、微生物に塊状集合体を形成させ反応槽内に保持する自己造粒型および浮遊型・付着型の併用がある。

付着型には、担体を反応槽内の水中で流動させるもの(流動床)と、担体を反応槽内に充填しその担体を固定して使用するもの(ろ床)がある。

浮遊型の特徴は、SRTの設定により、反応槽内の汚泥濃度MLSSや目的とする微生物の優占種を制御できることにある。例えば、汚泥膨化の原因となる糸状菌の増殖を抑制するには、 $SRT < 1/\mu$ (μ :糸状菌の比増殖速度)に設定し糸状菌を系外へ排出する。また、有機物とアンモニアを除去するには、増殖速度の遅いアンモニア酸化細菌を系内に保持するため、 $SRT > 1/\mu$ (μ :アンモニア酸化菌の比増殖速度)に設定する必要がある。

付着型の特徴は、担体に微生物を付着するので、

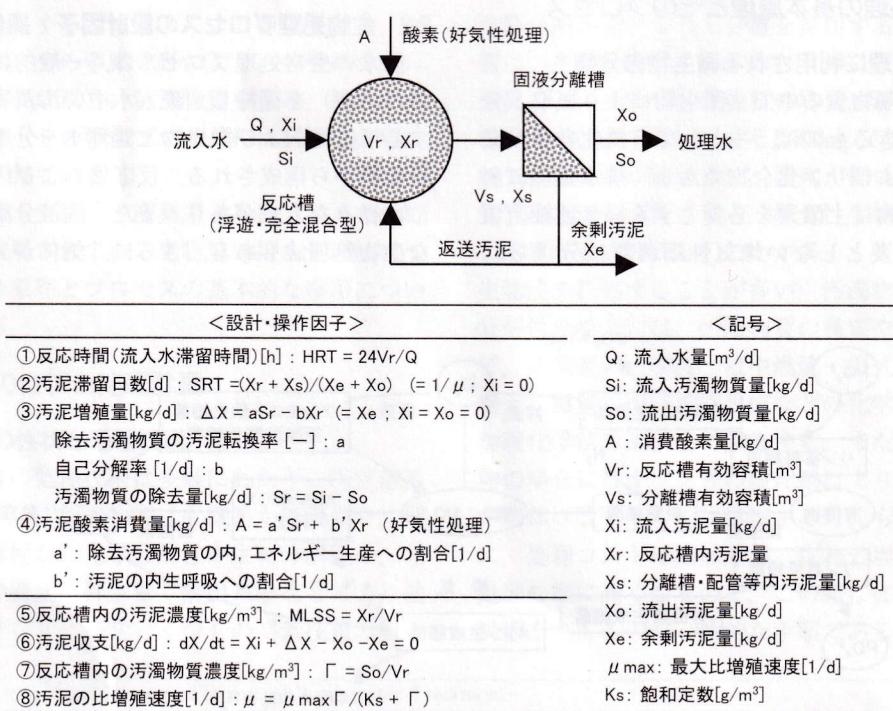


図3 定常状態における生物処理系モデルと設計因子・操作因子

SRT を長く設定する反応槽内に保持する微生物の優占種を制御できることによる。また、浮遊型では、汚泥膨化の原因となる糸状菌の増殖を抑制するには、SRT $< 1/\mu$ (μ :糸状菌の比増殖速度) に設定し糸状菌を系外へ排出する。また、有機物とアンモニアを除去するには、増殖速度の遅いアンモニア酸化細菌を系内に保持するため、SRT $> 1/\mu$ (μ :アンモニア酸化菌の比増殖速度) に設定する必要がある。

付着型の特徴は、担体に微生物を付着するので、

SRT の長い間

プロセスの特徴

汚泥) の種類
現れる。
状態で保持す
保持する付着
反応槽内に保
着型の併用が

中で流動させ
内に充填しそ
末) がある。
り、反応槽
微生物の優占
汚泥膨化の
るには、SRT
に設定し系状
ヒアンモニア
ンモニア酸化
 $>1/\mu$ (μ :
設定する必要

着するので、

表 反応槽の類型とその処理プロセスの特徴

類型	浮遊型	付着型	自己造粒型	浮遊型・付着型併用
好 気	標準活性汚泥法 長時間曝気法 酸化溝法	散水ろ床法 接触曝気法 回転円盤法		担体利用活性汚泥法
嫌 気	嫌気性消化法	嫌気性ろ床法	UASB 法	嫌気性流動床法
特 徴	微生物種や反応槽内の汚泥濃度を SRT の設定により制御できる。操作因子が多い。	微生物を担体に付着生息させ、長い SRT に保つ。反応槽内の汚泥量を制御できない。	塊状集合体を形成させ、反応槽内に特殊な微生物群を高濃度に保持できる。	短い SRT (浮遊型) および長い SRT (付着型) を独立に設定できるので、増殖速度の異なる微生物群を単一槽内に保持できる。

・付着型：微生物を担体表面・内部への付着保持あるいは担体内に包括保持する。

・UASB 法：Upflow Anaerobic Sludge Blanket process, 上向流嫌気性汚泥ろ床法

SRT を長く設定でき、増殖速度の遅い微生物を反応槽内に保持することができる。しかし、SRT 設定による反応槽内の微生物量や生物種を自在に制御できない。生物膜（付着微生物）を適度な厚さに保つことで、好気ゾーン・嫌気ゾーンが生じ、好気・嫌気の機能を有することができる。嫌気ゾーンでは付着力の低下やガスの発生により、生物膜剥離による汚泥の更新が行われる。担体を固定する反応槽では、生物膜が過大に成長すると、流入水のバイパスができる腐敗の進行や反応槽の閉塞が起こるので、自動的または定期的に生物膜を適度に剥離・除去する必要がある。

自己造粒型の特徴は、反応槽内に特定の機能を有する微生物を高密度に保持できるので、反応槽がコンパクトとなる。しかし、グラニュール（自己造粒したもの）と流入水中固形物質との分離が困難な場合には、固形分を含む排水の処理には適さない。

浮遊型・付着型併用の特徴は、双方の特徴を活用できるので、反応槽の多機能化が達成できる。具体的な事例として、微生物で速やかに分解できる易分解性物質と、その分解に時間を要する難分解性物質が共存する排水が挙げられる。通常の微生物では難分解性でも、その物質を分解できる微生物が自然界には存在する。また、世代交代の速い細菌類では、新機能を有する遺伝子の獲得や細菌類間での遺伝子交換による新機能の獲得などの可能性が高い⁴⁾。また、一般に難分解性物質を分解できる細菌類は、その増殖速度が遅く、SRT の短い浮遊型反応槽では生存できない。しかし、SRT の長い付着型を採用することで、このよう

な細菌類を反応槽内に保持できるようになる。なお、流動型担体を使用する場合には、反応槽流出側に担体分離装置を設ける。浮遊型・付着型併用反応槽は、様々な物質を含む化学工業排水への適用事例が多い。

2.4 微生物環境による処理プロセスの構成

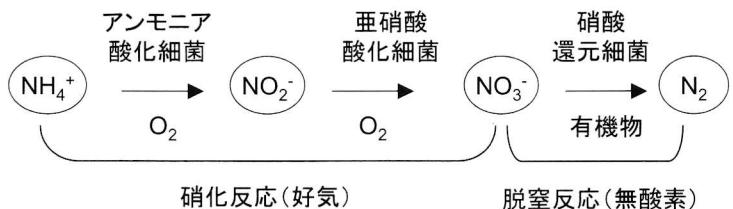
反応槽内に保持される汚泥（微生物群）を構成する生物種は、その生息環境により大きく異なる。環境因子としては、流入水（排水）の組成・濃度、pH、温度、酸素の有無（好気・無酸素・嫌気）、SRT、固液分離法などが挙げられる。

処理プロセスでは、酸素が供給される系を好気槽、酸素は存在しないが硝酸イオン・亜硝酸イオンなどの結合酸素が存在する系を無酸素槽、酸素や結合酸素が全く存在しない系を嫌気槽と呼んでいる。また、酸素があってもなくても生育できる細菌は通性嫌気性、酸素があると生育できない細菌は絶対（偏性）嫌気性と呼ばれる。酸素の有無により処理プロセスは、次のように分類される。

A タイプは、好気性あるいは絶対嫌気性の微生物群から構成される汚泥を、好気槽または嫌気槽内に保持して排水を処理するプロセスである。代表的なプロセスとして、標準活性汚泥法、接触曝気槽、嫌気性消化法、UASB 法などがある。

B タイプは、好気性細菌および通性嫌気性細菌から構成される同一の汚泥を、好気・無酸素・嫌気など異なる環境に暴露させ、それぞれの環境下で発現する細菌群の多様な機能を利用するものである。代表的なプロセスとして、無酸素-好気（間欠曝気硝化脱窒法、循環式硝化脱窒法：図 4-I）、嫌気-好気（生物脱リン法）、嫌気-無酸素-好

I. 硝化脱窒素法



II. ANAMMOX (anaerobic ammonium oxidation) 法

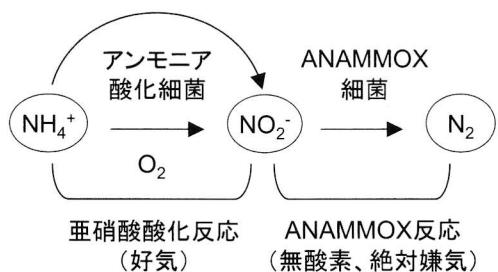


図4 塗素化合物の生物学的除去プロセスの事例

気（生物脱窒・脱リン法）などがある。好気性細菌を系内に保持するための操作因子として、好気条件下での汚泥滞留日数 ASRT (= SRT · τ_A / τ ; 好気時間 τ_A , 系内滞留時間 τ) を用いる。

Cタイプは、異なるAタイプの反応槽を組み合わせて、汚濁物質を除去する処理プロセスである。UASB-活性汚泥法や部分亜硝酸化-ANAMMOX法(図4-II)が代表的なものである。

BとCの違いは、Bではプロセスの最終段に固液分離槽があるのでに対して、Cでは各槽にそれぞれ分離槽が設置されていることである。

3. 代表的な生物処理プロセスの特徴と留意事項

排水の生物処理プロセスの維持管理の留意事項は、その方式により大きく異なるので、代表事例を取り上げて概説する。

3.1 活性汚泥法

活性汚泥法は、下水や産業排水の処理に最も広く用いられている。土砂や繊維・プラスチック類などの異物を除いた排水は最初沈殿池に送られ、固形物質、油分などが除去される。次に排水は、生物反応槽(曝気槽)に導かれ曝気攪拌下で微生物フロック(活性汚泥)と接触する。ここで排水

中の汚濁物質は、活性汚泥により吸着・摂取・酸化・同化されて除去される。活性汚泥混合液は、次の沈殿池で重力沈降により活性汚泥と処理水とに分離され、処理水は塩素などにより殺菌されて放流される。

一方、活性汚泥の一部は返送汚泥として曝気槽に戻され、残りは余剰汚泥として、最初沈殿池で除去された固形物質(初沈汚泥)とともに系外に排出されて別途に処理・処分される。活性汚泥法を用いた下水処理場では、処理水量の1~2%の濃縮汚泥(含水率98.5%程度)が発生している。

維持管理には、機械・電気・計装設備、配管系、反応槽、沈殿池など、維持管理の項目が多い。負荷変動、汚泥管理、汚泥の異常(異臭発生、異常発泡、汚泥膨化、汚泥解体、除去機能低下など)に留意する。異常対策は、早く察知して速やかに処置することが重要である。

3.2 生物膜法

支持体(接触材)の表面に微生物を膜状に付着保持する方法を生物膜法という。微生物の支持体は、材質、形状、構造も様々なものが用いられ、この支持体を装置内に充填した部分をろ床といいう。代表的な生物膜法として散水ろ床法、浸漬ろ床法(接触曝気法)、回転円盤法などがある。

生物膜法の特徴から原生動物から原生動物処理装置ごとSRTが長いのが特徴であれば、汚泥の自己酸化による余剰汚泥の柔軟に対応できる。操作条件の変更で物膜が肥大しないのである。

3.3 嫌気性法

嫌気性生物の固形状や溶解性メタンや二酸化炭素発酵法による反応は三段階の反応過程である。機酸へ変換され機酸がメタノール(36~38℃)pH(6.8~7.5)

嫌気性生物を必要とする好気性生物のことと、回転円盤法のエネルギー

3.4 UASB

UASB法とはprocessの略である。有機物のグラニード法である。有機物2,000~3,000ppm排水中に含まれる温度およびpHである。UASB法は可能な有機物低級アルコール例えばビール。

ある。利用する微生物は好気性および嫌気性に分類され、微生物を反応槽に保持する方法に工夫がなされ、様々な機能と特徴のある処理プロセスが開発され普及している。排水処理に生物法を適用する場合には、処理プロセスの基本原理と設計因子・操作因子を十分に理解することが、計画・設計や維持管理において極めて重要である。

参考文献

- 笠倉忠夫、村上定暉、他；エコテクノロジー入門、60-61、朝倉書店、2001。
- 日本下水道協会；下水道施設設計・設計指針と解説（後編）、日本下水道協会、2001。
- 日本下水道協会；下水道維持管理指針（後編）、日本下水道協会、2003。
- 藤田正憲；新しい活性汚泥法の開発と展望－特定微生物による機能創生、排水・汚水処理技術集成、66-74、NTS、2007。

WORK・ねっとわーく

沢野伸浩
星稟女子短期大学
海洋汚染防除と事故抑止

2007年8月からこの2月までの約半年間、フィンランド国立技術研究所（VTT Technical Research Centre of Finland）に日本学術振興会の特定国派遣研究者として滞在し、主としてフィンランド湾における海洋汚染事故防止策についての研究を行った。フィンランド湾は、湾奥部にロシアの工業地帯を抱えるため、もともと、タンカーをはじめとして船舶航行量が極めて多い海域として知られている。そこに、2000年以降、ロシアの目覚ましい経済発展に加え、石油・天然ガスなどの輸送量も急増し、なお一層、船舶航行の過密化が起こり、潜在的な事故リスクが急増した。このリスクに対処するため、フィンランドを中心に沿岸国のエストニア・ロシアを巻き込み、上りと下りの船舶にそれぞれ航行レーンを設けると同時に、GOFREP（Gulf of Finland Report）と呼ばれる湾内の定められた地点を通過する際、入港する国の港湾当局に対してVHF無線を使った通報を義務づける制度の運用を2004年に開始した。

会員通信

GOFREPと同様な通報は、日本でも東京湾をはじめとする船舶が輻輳する海域で義務づけられている。しかし、近年、VHFの電波を用いて船舶の位置や行き先を自動的に通報するAIS(Automatic Identification System)の普及とこの装置の搭載がSOLAS条約により義務化されたため、日本やイギリスでは従来行われていた「位置通報」が条件付で免除されるようになった。一方、GOFREPではそれとは正反対に単純な人為ミスの発生やもともとAISの位置把握がGISに依存するため、その信頼性に対する懸念等から「位置通報」に相当する「Short Report」のVHF無線による口頭での通報が義務づけられている。



これら、一連の対策によりフィンランド湾では、近年船舶航行数が増加しているのにもかかわらず、事故発生件数は反対に減少している。ここで強調しておきたいことは、これら最近行われた事故対策が全てフィンランド湾・バルト海の「環境保全対策」として実施されている点である。残念ながら我が国においては、船舶の事故対策を海洋環境保全の対策の一つとして位置づける発想そのものが極めて希薄な事実を指摘したい。