

下水道とバイオ技術

—空気が好きな微生物と空気が嫌いな微生物の織りなす世界—

橋本 隆*

1. はじめに

「下水」という言葉を聞いたとき、どんな印象を持たれますか。自分自身が使った水でさえ、「きたない」、「くさい」などネガティブなことを連想する人は少なくないのではないでしょうか。

しかし、下水道は、上水道と同様に、私たちの日々生活に欠かせない重要な都市基盤となっている。下水道法では、「下水」を、「汚水（生活若しくは事業に起因する廃水）又は雨水」と定義している。

この下水が下水管を流れ、下水処理場（他に、浄化センター、終末処理場、水処理センターなど数十種類の呼称がある）に到着したあと、約12～20時間後には、再び「きれいな水」となって、川や海に戻っていく。そのマジックの主役を演じるのが様々な微生物たちである。

明治以降、外国との交流によるコレラなどの腸管系の伝染病の流行により、何十万人もの国民が生命を失う事態が発生したことをうけ、公衆衛生の確保を目的に、全国で上水道や下水道が建設されることとなった。

現在施行されている下水道法は、昭和33年に公布されたもので、逐次改正が行われ今日に至っている。下水道の主な目的として次の4つをあげている。

- ① トイレの水洗化
- ② 生活環境の改善
- ③ 浸水の防止
- ④ 河川や海の水環境の改善

長年にわたり下水道の建設を行ってきた結果、平成28年度末の「下水道人口普及率」は78.3%

となり、日本の人口約1億2,700万人のうち、約9,982万人が下水道を使用するに至っている。また、農村集落排水施設や浄化槽による人口普及率を加えると、初めて90%（90.4%）を超えることができた。

2. 下水道のしくみ

(1) 下水の排除方式

家庭や工場で発生した汚水は、下水管を流れ、下水処理場に到達する。図1のように雨水を汚水と同じ下水管を使って流す方式を合流式下水道といい、雨水管を別に敷設し、汚水だけを下水処理場に導き、雨水を河川などに直接放流する方式を分流式下水道という。

古くから下水道の整備を始めた大阪市などの大

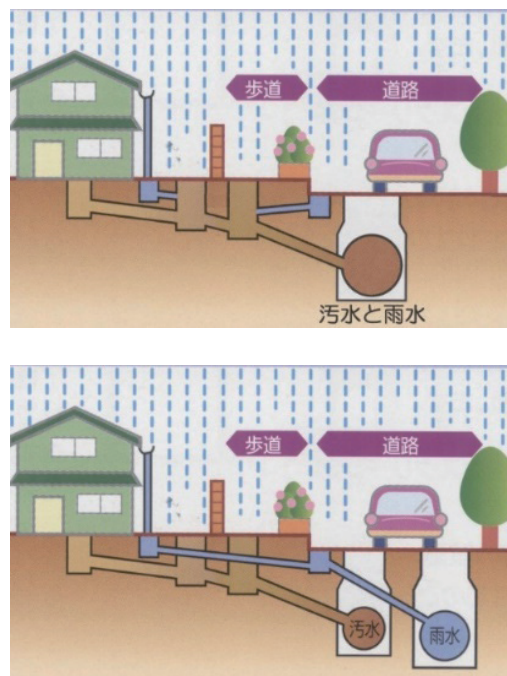


図1. 合流式下水道（上）と分流式下水道（下）
（国土交通省HPより）

* NPO 法人 下水道と水環境を考える会・水澄みずすまし

都市は河川の下流部に位置し、都市内の浸水防除と生活環境の改善を行うことが喫緊の課題であったため、合流式下水道が採用されていた。昭和45年の下水道法の改正では、下水道の役割として、公共用水域の水質保全が位置付けられ、それ以降の下水道は分流式が採用されるようになった。

平成26年度の下水道統計によれば、現在敷設されている下水管のうち、合流式下水道は11%、分流式下水道は89%となっている。

(2) 下水処理のしくみ

下水処理場は、水処理施設と汚泥処理施設の2つの主要施設で構成されている。

図2は、下水処理のしくみで、水処理施設である、沈砂池→最初沈殿池→反応タンク（生物反応槽）→最終沈殿池→消毒設備を経て、川などのいわゆる公共用水域へ放流される。また一部は、場内あるいは場外で再利用水として有効利用される。

一方、汚泥処理施設では、水処理施設で発生した汚泥を、濃縮槽→（消化槽）→脱水機→（焼却炉）の各工程を経て減量化し、廃棄物として最終処分されるが、一部は、肥料や、セメント・路盤の埋め戻し材などの建設資材として有効利用されている。なお、消化や焼却の工程は省略される場合がある。

水処理施設における生物反応工程、汚泥処理施設における消化工程は、いずれも微生物を利用した処理で、前者は、空気（酸素）を好む好気性微生物、後者は、空気を嫌う嫌気性微生物が、それぞれ処理の担い手となっている。

3. 下水道とバイオ技術

(1) 水処理におけるバイオ技術

日本では、約100年前に欧米で開発された活性汚泥法（浮遊生物法）が、ほとんどの下水処理場で採用されている。処理の対象となる物質は有機物であるが、瀬戸内海や東京湾、湖沼などの、いわゆる閉鎖性水域における窒素やリンによる富栄養化問題を解決するため、活性汚泥法をさらに進化させた高度処理法が開発され、実用に供されている。

活性汚泥は、細菌や藻類、原生動物、後生動物などで構成される微生物の集団で、下水と接触すると有機物の初期吸着が起これ、引き続き、空気の供給により酸化・同化（細胞合成）が進行する。

図3に微生物（汚泥濃度）と有機物（BOD）との関係を示す。BODは生物化学的酸素要求量（Biochemical oxygen demand）といい、有機物の汚濁を示す代表的な指標である。数値が大きいほど水が汚れていることを示す。類似の指標とし

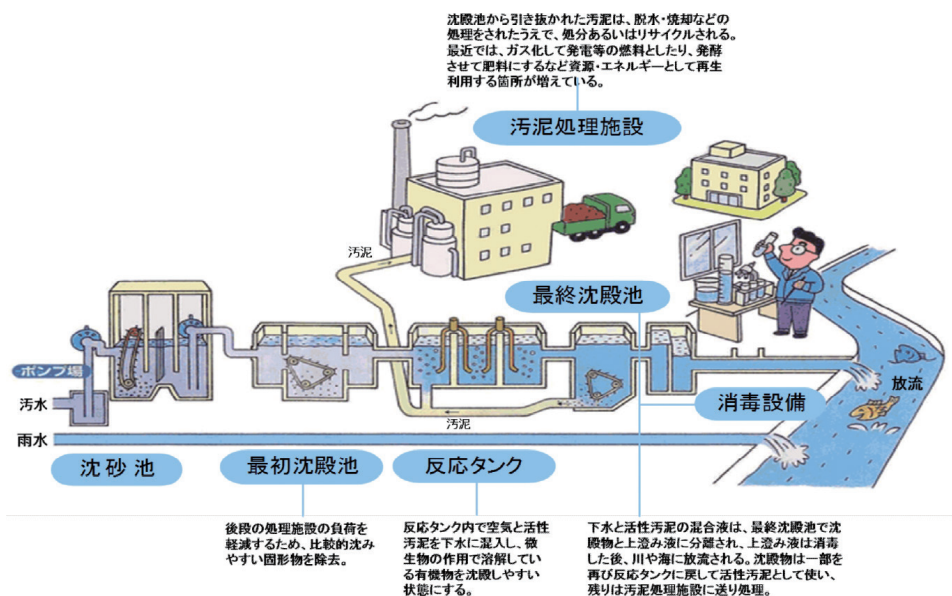


図2. 下水処理のしくみ（国土交通省 HP より）

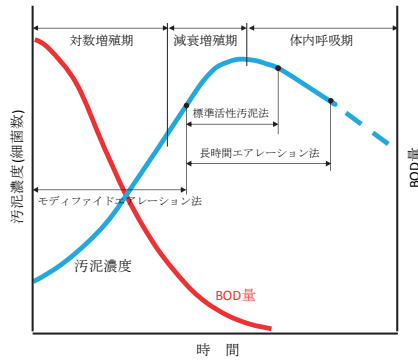


図3. 微生物の増殖過程

((公財)日本下水道協会発行 下水道施設設計指針より)

て、COD (化学酸素要求量) や TOC (全有機炭素) などがある。この図から、対数増殖は微生物に対する有機物が多いときに起こるが、凝集性や沈降性に乏しいとされる。有機物が減少してくると、減衰増殖期や体内呼吸期に入り、凝集性・沈降性が良くなるとされ、一般に下水処理場で広く採用されている。標準活性汚泥法や長時間エアレーション法は、この減衰増殖期や体内呼吸期を活用した処理法である。

他にも、図4に示すような様々な生物処理方法が採用されている。平成26年度の下水道統計によれば、全国で2,139の下水处理場が建設されている。

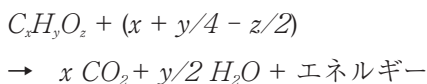
浮遊生物法	標準活性汚泥法
	循環式硝化脱窒法(窒素除去)
	嫌気無酸素好気法(窒素・リン除去)
	嫌気好気活性汚泥法(リン除去)
	酸素活性汚泥法
固着生物法(生物膜法)	オキシデーションディッチ法(OD法)
	長時間エアレーション法
	回分式活性汚泥法
	接触酸化法
	好気性ろ床法

図4. 主な生物処理方法の分類
(国土交通省のHPより)

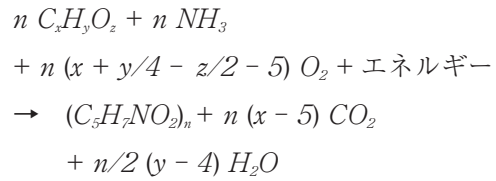
①有機物の酸化・同化

有機物の酸化や同化(増殖)は、ア.及びイ.の反応式で、また、体内呼吸による有機物の減少は、ウ.式で進むと考えられている。

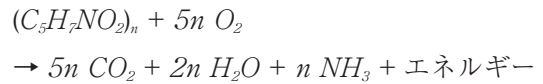
ア. 酸化



イ. 同化(増殖)



ウ. 体内呼吸(有機物量の減少)



②高度処理の例

窒素やりんによる富栄養化防止対策として、様々な高度処理法が開発された。図5のb.とe.は窒素を、c.はりんをそれぞれ単独で、また、d.は窒素・りん同時除去する方法である。e.はステップ段数を多くすれば窒素の除去率を上げることができる。a.は有機物の処理を目的とした標準活性汚泥法である。

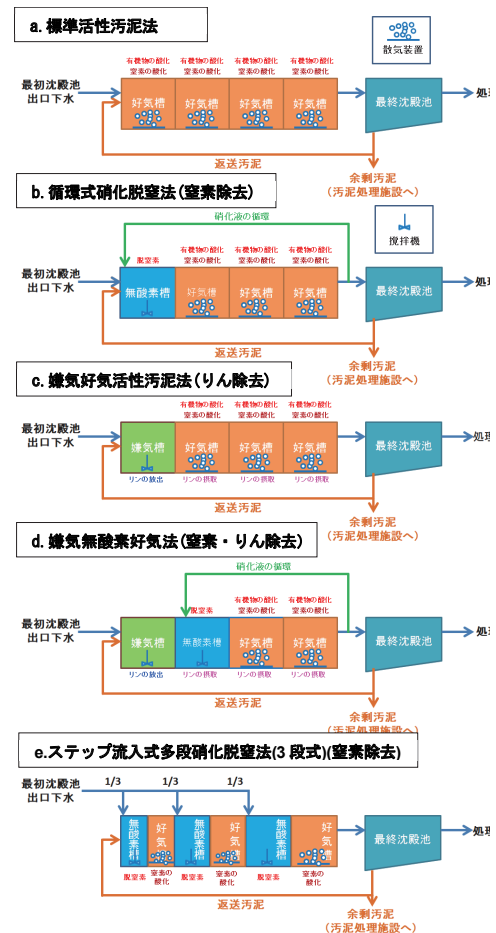


図5. 高度処理法のフロー

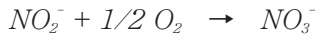
ア. 窒素の酸化

好気槽では、窒素の酸化が2段階（アンモニア性窒素→亜硝酸性窒素→硝酸性窒素）で行われ、硝化細菌（アンモニア酸化細菌や亜硝酸酸化細菌）が反応に関与している。

（アンモニア酸化細菌）



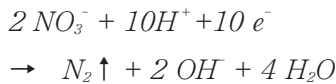
（亜硝酸酸化細菌）



イ. 脱窒

脱窒は無酸素槽で進行するが、脱窒反応では有機物（水素供与体）が必要であることから、これが不足する場合は、別途、メタノールなどを投入する必要がある。

（脱窒細菌）



好気槽で進行するア. の反応、無酸素槽で進行するイ. の反応におけるBODなどの濃度変化を図6に示す。

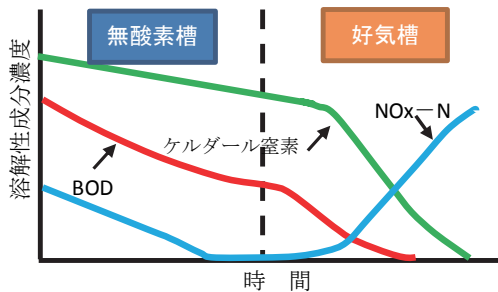


図6. 窒素の酸化と脱窒

ウ. リンの放出・摂取

嫌気槽で、ポリリン酸蓄積細菌（PAO：脱りん細菌）は、細胞内に蓄えたポリリン酸顆粒をオルトリン酸として下水中に放出する。その際、下水中の有機酸を利用して、ポリヒドロキシアルカノエート（PHA）を細胞内に蓄積する。

一方、好気槽では、PHAの酸化エネルギーで、嫌気状態で放出したりん酸を摂取し、ポリリン酸顆粒を生成する。また、エネルギーは、細胞の増殖にも利用され、結果として、嫌気槽で放出した以上のりんを摂取（過剰摂取）でき、下水中のり

んが除去される。りんの形態の変化を図7に、嫌気槽や好気槽で進行するウ. の反応におけるBODなどの濃度変化を図8に示す。

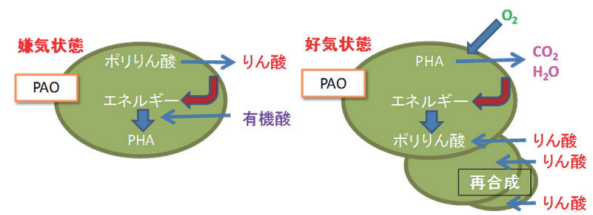


図7. リンの形態の変化

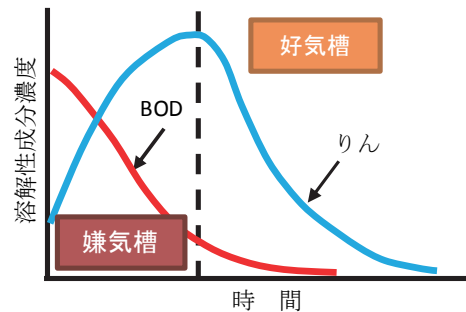


図8. リンの放出と摂取

(2) 汚泥処理におけるバイオ技術

水処理施設で発生した最初沈殿池汚泥と最終沈殿池汚泥は、汚泥処理施設に送られ減量化される。最終沈殿池汚泥には、活性汚泥微生物が多く棲息していることから、ほとんどは反応槽に戻され、再度、有機物などの処理に再利用され、増殖した分が余剰汚泥として処理の対象となる。

①汚泥処理工程

水処理施設から送られてきた汚泥の処理工程は次のとおりである。

濃縮槽→（消化槽）→脱水機→（焼却炉）

濃縮工程では、投入された汚泥量が約1/5～1/10に減量される。減量された濃縮汚泥は、脱水工程に送られる場合があるが、さらなる減量やメタンを主成分とする消化ガスの有効利用が可能となる嫌気性消化槽が設けられることがある。

水処理施設における反応タンク（生物反応槽）では、好気性微生物が処理の主役となっていたが、消化槽では、嫌気性微生物がその主役となっている。

②消化槽における反応

濃縮汚泥は、図9に示すように、主として炭水化物、脂肪、タンパク質で構成されている。

嫌気的条件下で進行する消化の主な反応は、有機物の加水分解などによる高分子の低分子化、揮発性有機酸の生成、メタンの生成へと進んでいく。

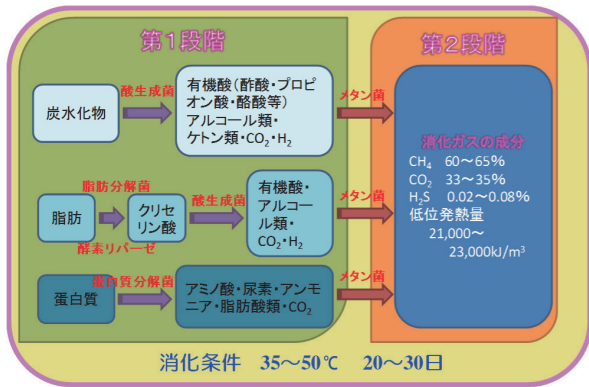


図9. 窒素の酸化と脱窒

ア. 嫌気性条件

消化工程は、空気（酸素）を完全に遮断した状態で、消化温度を35~50℃、消化日数を20~30日に保つことによって進行する。消化槽の加熱には温水ボイラーが用いられるが、近年、ガス発電機で発生する熱を利用する例も見受けられる。

イ. 第1段階

酸性発酵期、酸性減退期で構成される第1段階では、セルロースやでんぷんなどの炭水化物は、糖を経て有機酸、アルコール類などの可溶性化合物に分解され、炭酸ガスなどを生成する。

脂肪は、グリセリン酸を経て、炭水化物と同様に有機酸やアルコール類、ガスなどに、また、タンパク質は、アミノ酸を経て、尿素、アンモニア、脂肪酸類、ガスなどに分解される。

ウ. 第2段階

アルカリ性発酵期とよばれる第2段階では、第1段階で生成した有機酸がメタン菌によりメタンガスと炭酸ガスに分解される。この段階では、他の物質もさらに分解され、汚泥は黒色でタール臭を帯びてくる。発生したガスは、場内にある消化槽加温用ボイラーやガス発電機の燃料として再利用される。

また、最近では、PFI事業として、消化ガスで発電した電気をエネルギー固定価格買取制度（FIT（Feed-in Tariff））で活用する事例や、消化ガスを精製して、天然ガスバスの燃料にするなど、場外における様々な利用が模索されている。

「環境の世紀」といわれる21世紀において、今後とも、下水道に関する様々な技術開発が進められ、低炭素で持続可能な社会の実現に貢献できるよう期待したい。

4. おわりに

筆者は、現在、主に大阪市下水道OBで構成する「NPO法人 下水道と水環境を考える会・水^{みず}すまし」に所属している。

“みずすまし”では、大阪市下水道科学館で開催される「下水道親子休日スクール」や「下水道市民講座」などを通して、ひとりでも多くの方々に「下水道ファン」になっていただきたいと想っている。

また、3種類の機関誌「ちんちょうち」、「季刊水澄」、「交流のひろば」の3種類を発行しており、いずれもホームページで閲覧可能であるので、我々の活動についてもご理解をいただければ幸いである。

<https://mizusumasi.sakura.ne.jp/>

最後になりましたが、自治体の一行政職員であった筆者に、講演（平成29年2月 キンカ京都市化学者クラブ）と執筆（本稿）の機会を与えてくださいました宗林教授にお礼申し上げます。

参考資料

「下水道施設計画・設計指針と解説（1994年版）」

（社）日本下水道協会

「下水道施設計画・設計指針と解説（2009年版 後編）」（公社）日本下水道協会

「下水道維持管理指針（1979年版）」（社）日本下水道協会

「下水道用語集（2000年版）」（社）日本下水道協会