

環境対策、環境負荷の無害化処理、集中処理

4.2.1 下水道と下水処理

下水道には複数の種類があり、下水の集水方法には合流式と分流式があります。下水処理の方法は微生物を利用する活性汚泥法が一般的で、都市部の施設は1施設が数万人から数十万人分の下水を処理しています。一方、施設の数では小規模分散型の下水処理施設も多く稼働しています。近年は海域の富栄養化を抑制するため、リンや窒素まで除去する高度処理施設が増えています。

下水道の歴史は古く、紀元前600年頃には古代ローマで整備されており、その後も多くの都市で建設されてきました。大規模な下水道は1740年に整備されたパリの環状大下水道で、都市部の汚水を生活圏から排除するのが目的でした。したがって集めてセーヌ川に流すだけで、処理施設はありませんでした。日本では1869年に横浜の外国人居留地で陶管製の下水道（暗渠）が作られていますが、処理施設が作られたのは1922年の東京三河島汚水処分場が最初です。このように、長期間にわたって下水処理は下水道が主体で、処理施設は付随的な機能に過ぎませんでした。一方、現在は下水の大部分が処理施設で浄化処理されています。したがって、下水処理施設を「下水を集めて流す」意味の「下水道」の一部として扱うには多少の違和感があります。しかし現在も公的には下水道の一部となっているので、本稿でも同じ扱いにします。なお、下水処理施設の正式名称は終末処理施設ですが、平易な表現として水再生センターと称する地区もあります。しかし本稿では、実態のイメージに近い下水処理施設とします。

1. 下水道の種類

表1に下水道の種類を整理しましたが、公共下水道と称する施設には数種類があります。一つは地方公共団体が整備して運営している一般的な下

水道で、生活に密着した身近な存在です。下水を集める導管は大部分が地下に埋設されていますから、普段は目にすることがありません。一般的な下水道には、下水道を整備した市町村が下水処理施設も整備している単独公共下水道と、下水処理施設を複数の市町村が共有している流域（関連）公共下水道があります。人口の集積密度が高い都市部は大部分が単独公共下水道で、大都市は一つの市町村が複数の下水処理施設を整備しています。一方、

人口が少ない市町村は、複数の市町村が流域で一か所の下水処理施設を共有しています。なお、表現の簡素化のため、単独公共下水道を公共下水道、流域（関連）公共下水道を流域下水道と称する場合があります。

特定公共下水道（特公）は起源が工業団地の排水処理で、現在も主に特定の事業者が利用しています。処理施設はほとんど設置していません。特定環境保全下水道（特環）は非市街地の下水道で、自然保護地区内の下水道、農村漁村下水道、人口規模1000人以下で特に水質保全が必要な下水道が該当します。下水処理施設を設置する場合と、単独公共下水道や流域公共下水道の下水処理施設に接続する場合があります。

雨水流域下水道は複数の公共下水道の雨水のみを排除する下水道で、集中豪雨による浸水を防ぐのが目的です。貯水設備を備えて雨水の放流を調整しています。都市下水路は雨水の排水路で、地上開放型ですからよく目にします。処理施設はありません。既存の水路を指定して整備することが多く、外観のイメージは小川です。住民の憩いの場になっていることが多く、「下水」のイメージを嫌って「せせらぎ緑道」、「砂川堀」、「妙観堀」などと、地域の愛称で呼ばれている例が多いです。

表1. 下水道の種類

公共下水道 構造：暗渠 管理者：市町村	一般的な公共下水道	・地方公共団体が管理する下水道で下記の2種類。 ①市町村が下水処理施設も保有する単独公共下水道。 ②複数の市町村が流域で下水処理施設を共有する流域公共下水道。
	特定公共下水道（特公）	・主に特定の事業者の活動に利用される下水道（工業団地など）。下水道の計画汚水量のうち、事業者の事業活動に附随する汚水量が概ね2/3以上を占める下水道。
	特定環境保全下水道（特環）	・自然保護地区内の下水道。 ・農村漁村下水道。 ・人口規模1000人以下で、特に水質保全が必要な地域の下水道。 ・下水処理施設を設置する場合と、単独公共下水道や流域公共下水道の処理施設に接続する場合がある。
雨水流域 下水道	・複数の公共下水道の雨水のみを排除する下水道。 ・貯水槽やポンプ設備など、雨水の放流調整に必要な設備を保有。	
都市下水路	・都市部の洪水防止のための雨水排水路として設けられている。 ・一般的に明渠で処理施設はなく、既存の水路を指定して整備するが多い。 ・外観は小規模河川で住民の憩いの場が多く、「下水」のイメージを嫌って愛称で呼ぶ例が少なくない（例：せせらぎ緑道、砂川堀、妙観堀など）。	

表2. 下水道の普及率（%）2018年度末

出典：日本下水道協会資料

都道府県	普及率	都道府県	普及率	都道府県	普及率	都道府県	普及率
北海道	91.2	東京都	99.6	滋賀県	90.2	香川県	45.3
青森県	60.5	神奈川県	96.8	京都府	94.7	愛媛県	54.6
岩手県	59.8	山梨県	66.7	大阪府	96.0	高知県	39.5
宮城県	81.6	長野県	83.8	兵庫県	93.2	福岡県	82.1
秋田県	65.5	新潟県	75.7	奈良県	80.7	佐賀県	61.1
山形県	77.0	富山県	85.3	和歌山県	27.9	長崎県	62.7
福島県	53.9	石川県	84.0	鳥取県	71.5	熊本県	68.5
茨城県	62.4	岐阜県	76.4	島根県	49.1	大分県	51.1
栃木県	67.1	静岡県	63.5	岡山県	68.1	宮崎県	59.8
群馬県	54.2	愛知県	78.7	広島県	75.3	鹿児島県	42.3
埼玉県	81.2	三重県	54.9	山口県	66.2	沖縄県	72.0
千葉県	74.8	福井県	80.3	徳島県	18.1	平均	79.3

2. 下水道の普及状況

表2に下水道の普及率を示します。全国平均で

は79.3%ですから、約8割の地域に下水道が普及していますが、100%が目標ではありません。下水道を整備するには、広範囲にわたる集水管と低位置に集まる下水の揚水ポンプ施設、および集中的

な下水処理施設が必要です。一方、費用対効果を考慮すると、人口の集積密度が一定水準以下の地域は下水道ではなく、合併浄化槽による排出源処理の方が適しているからです。表 2 から集積密度が高い都市地域の普及率が高く、集積密度の低い農業地域の普及率が低い状況が読み取れます。



図 1. 合流式の下水集水方法

3. 下水集水方法の種類と特性

下水の集水方法には、合流式と分流式の 2 種類があります。合流式は図 1 に示すように、汚水と雨水を同じ管路で集め、まとめて浄化処理して放流する方式です。早い時期に整備を開始した大都市に多く見られ、全下水道実施市町村の約 1 割を占めています。埋設する管路が 1 本なので分流式より施工が容易で安価です。一方、降雨時には下水の量が急増するので、簡易処理だけで放流せざるを得ず、放流水域の水質汚染原因になります。このため、部分分流化、雨水滞水池による一時貯水、路面雨水の地中浸透、雨水の流入を防ぐ雨水分離などの対策が採用されています。



図 2. 分流式の下水集水方法

分流式は図 2 に示すように汚水と雨水を別々の管路で集め、汚水は下水処理施設へ、雨水は固形物を除いて川や海に直接放流する方式です。水質汚染防止に適した方式なので、新設される下水道はほぼすべてが分流式です。埋設管が汚水管と雨水管の 2 本になるので施工費用が高くなりますが、下水処理が汚水のみになるので、処理負荷を少なくできます。汚水が雨水で希釈されないので、降雨による流量や水質の変動が少なく、下水処理が安定します。一方、汚水管が合流式より細くなるので、清掃や点検が困難な側面があります。

カ所が稼働しており、このうちの約 700 カ所が標準活性汚泥法です。標準活性汚泥法は、浄化水準が高く大規模化に適しているので、人口密度の高い都市部で広く採用されています。1 処理施設の処理能力は、日量 1 万トン～5 万トンが 5 割弱を占め、5 万トン～10 万トンが約 2 割、10 万トン以上が約 2 割です。なお、日量 10 万トンの処理能力は、約 30 万人の生活排水処理能力に相当します。一方、全国的にみるとオキシゲーションディッチ法の処理施設が標準活性汚泥法より多く、約 850 カ所で稼働しています。しかし、処理能力は約 8 割が日量 5 千トン以下で、人口密度が低い農業地域や村落の小規模分散型施設になっています。

4. 下水処理の方法

4.1 標準活性汚泥法（浮遊生物法）

図 3 に標準活性汚泥法の処理工程を示します。最初沈殿池では、下水に含まれて流入してくる砂や固形物を沈殿させて除去します。続く反応タンクが曝気槽で、好気性微生物群が主体の活性汚泥

日本の下水処理施設は、2018 年度末で約 2,200

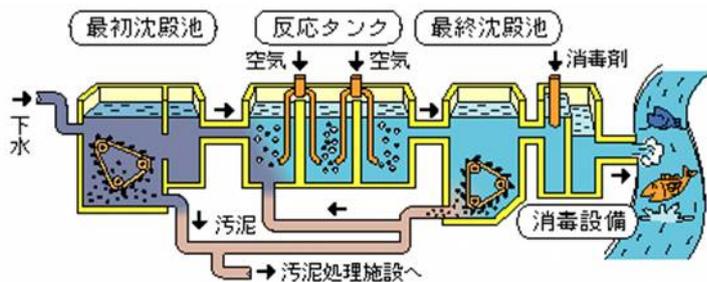


図 3. 標準活性汚泥法（浮遊生物法）の処理工程

が下水に含まれている有機物を水と炭酸ガスに分解します。曝気槽の深さは5～6mが多く、底部には空気を吹き込む（エアレーション）散気管か散気板が設置してあります。下水に酸素を溶解させるには曝気槽を深くし、空気はなるべく小さな泡にするのが効果的ですが、送風機に必要な動力が大きくなります。曝気槽の温度は20℃～30℃が好ましく、15℃以下や35℃以上になると微生物の活動が鈍くなり、分解効率が低下します。

微生物群は0.01～0.5mmの細菌類や原生動物で、曝気槽で有機物を分解しながら繁殖します。活性汚泥は次に最終沈殿池に送られますが、最終沈殿池は空気の吹込みがないので繁殖が止まり、フロック（小塊）を形成して沈降します。その結果、上部には浄化された透明度の高い処理水が得られます。図3では省略していますが、最終沈殿池の次には砂を充填したろ過槽があり、浮遊している微小な粒子を取り除きます。ろ過槽を経た処理水は、塩素で殺菌する消毒設備を経て河川や海域に放流されます。

沈降した活性汚泥は一部を曝気槽に返送し、余剰分を汚泥処理設備に送ります。活性汚泥の一部を曝気槽に返送するのは、曝気槽内の微生物の濃度を一定の水準に保つのが処理効率を高めるのに有効だからです。最終沈殿池で沈降した余剰汚泥は「生汚泥」といわれますが、水分が97%～98%の茶褐色の廃水ですから、汚泥と呼ぶには多少の違和感があります。生汚泥は脱水

して焼却処理するのが普通ですが、発生した下水処理施設で処理する場合と、複数の下水処理場で発生する生汚泥を集中処理する場合があります。集中処理には生汚泥の輸送が必要ですが、量が多いので通常は生汚泥専用のパイプラインを整備し、ポンプで圧送しています。

活性汚泥処理の性能は下水処理施設により異なりますが、処理水に含まれるBOD（生物化学的酸素要求量：微生物が分解するのに必要な酸素量）は通常は10mg/L以下、固形物を含めても20mg/L以下になります。流入下水のBODは概ね160mg/Lですから、除去率は90%～95%です。

4.2 オキシデーショondiッチ法

図4にオキシデーショondiッチ法の処理工程を示します。最初沈殿池は設けず、エアレーションは水産養殖場と同様に、回転ブラシなどの散気装置を使用しています。曝気槽に相当するのは、水深の浅い無終端水路（循環する水路）で、負荷の低い条件で活性汚泥が有機物を分解します。構造も維持管理も簡単な方法ですが、十分な処理には約24時間の滞留時間が必要なので、広くて長い水路が必要です。最終沈殿池では、標準活性汚泥法と同様に余剰汚泥を沈降させて処理水と分離します。なお、エアレーションを止めて嫌気性の微生物で処理することもできます。このため、窒素や

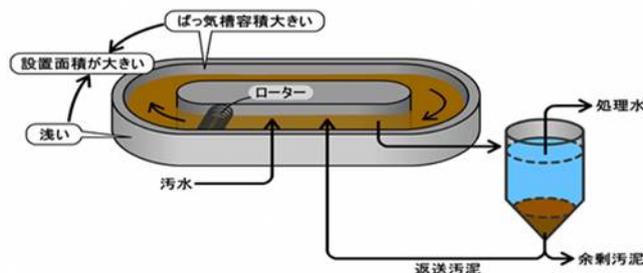


図 4. オキシデーショondiッチ法の処理工程

リンの除去を行う高度処理が可能で、特定環境保全下水道（特環）や小規模な下水処理施設に適用されています。

4.3 高度処理方法（脱リン・脱窒素）

リンや窒素は農作物の肥料に必要な基幹物質ですから、当然の結果として生活排水に含まれて下水に排出されます。有害物質ではないので、従来は下水処理施設で分離・除去する対象ではありませんでした。ところがリンと窒素は植物プランクトンの栄養源になるので、放流された海域で藍藻類のアオコが増殖する原因になります。アオコが異常に増えると水面が青緑色の粉をまいたように見えることから、青粉（あおこ）と呼ばれています。アオコが異常に増えると水中の溶存酸素が不足し、魚類や藻類の生育環境が損なわれます。このため近年では高度処理と称して、下水処理施設にリンや窒素を除去する設備を設置する事例が増えています。高度処理の採用比率は、下水処理対象人口の約半分です（2017年度）。

図5に示すのが日本の下水処理施設で採用されているリンと窒素の同時処理工程で、A2O法（嫌気－無酸素－好気法）と呼ばれており、流入した下水は嫌気槽→無酸素槽→好気槽の順に流れます。この工程は微生物を利用してリンを除去する「嫌

気好気法」と、窒素を除去する「硝化脱窒法」を組み合わせたプロセスです。

リンを除去する「嫌気好気法」では、活性汚泥処理の前半に嫌気槽を設置し、後半を好気槽として利用します。活性汚泥の微生物の中には、下水中のリン酸を体内にポリリン酸の形で貯蔵することができるポリリン酸蓄積細菌が存在します。この細菌は多数のリン酸分子が結合した高分子化合物で、一般的にPAO (Polyphosphate Accumulating Organisms) と呼ばれています。PAOは溶存酸素も化合物酸素も存在しない嫌気性の環境では、細胞内に含有しているポリリン酸を放出します。しかし溶存酸素が存在する好気性の環境では、水中のリン酸を細胞内に取り込んでポリリン酸の形で蓄積します。

嫌気好気法は、嫌気槽で返送されてきた汚泥のポリリン酸を放出させ、後工程にある好気層で放出された量より多いポリリン酸を蓄積させます。蓄積したポリリン酸は一部が嫌気層に返送されますが、残りは余剰汚泥として系外に排出されます。

窒素を除去する生物学的「硝化脱窒法」は、硝化過程と脱窒過程で構成されます。硝化課程は排水中のアンモニア(NH₄)を亜硝酸(NO₂)経由で硝酸

(NO₃)にまで酸化させる反応です。この反応に関与する微生物が硝化細菌で、溶存酸素が必要な好気性細菌ですから図5では好気槽で進行します。

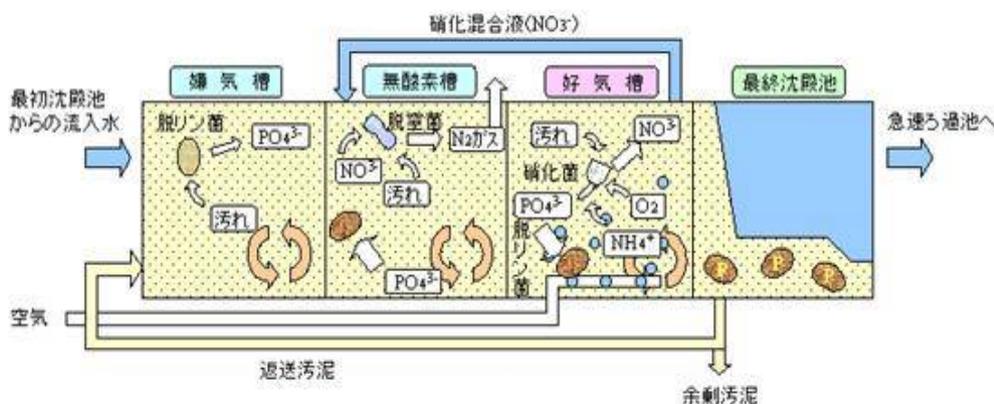


図5. A2O法（嫌気－無酸素－好気法）の処理工程

脱窒過程では、脱窒菌が無酸素槽で硝酸イオンまたは亜硝酸イオンを脱窒し、窒素を窒素ガスとして除去します。好気槽ではPAOによるリン酸イオンの取り込みと同時に、残留アンモニウムイオンの酸化が起きます。このため、好気槽内の処理水の一部は、硝酸イオンを処理するために無酸素槽に返送されます。

5. 下水汚泥の処理

日本には約 2200 カ所に下水処理施設がありますが、大部分は活性汚泥処理を採用しており、その結果、2017 年度には産業廃棄物として約 1 億 7 千万トンの汚泥が発生しています。この量は下水処理施設の最終沈殿池で引き抜かれる生汚泥ですから、水分を 97～98% 含む茶褐色の排水です。この汚泥を機械脱水で水分を 75% にまで絞ると「おから」状の脱水汚泥になり、約 9 割の減量効果が得られます。それでも発生量が膨大なので、汚泥処理は下水処理施設にとって大きな課題です。このため、下水処理人口の多い大都市は、下水処理施設とは別に汚泥処理専用の施設を整備しています。表 3 には下水汚泥の水分の状態を、表 4 には汚泥の処理に採用されている脱水・乾燥・焼却・消化の一般的な装置を示します。処理方法の一つである汚泥の消化は長時間を要しますが、メタンガスが得られるので燃料として利用できます。ガスエンジンで発電し、施設の電力に使用している

表 3. 下水汚泥の水分 水分 (%)、汚泥量 (100 基準)

呼称	内容	水分	汚泥量
生汚泥	下水処理施設の最終沈殿池から排出する汚泥。汚泥処理施設に送る場合はポンプで圧送する。	97～98	100
脱水汚泥	生汚泥の水分を脱水機で絞った汚泥。脱水ケーキともいわれる。	75～80	8～15
消化汚泥 脱水汚泥	生汚泥を消化させ、有機物の 30～40% をメタンと二酸化炭素に分解した残りを脱水した汚泥。無機物が多くカロリーが低い。	50～60	8～5

下水汚泥発生量 (生汚泥) (2017 年度) : 1 億 7 千万トン。

下水汚泥発生量 (乾物基準) (2018 年度) : 225 万トン。

一人 1 日当たりの汚泥発生量 (生汚泥 : 3.6 kg、乾物基準 : 0.5 kg)

一人 1 日当たりの一般廃棄物発生量 (0.9 kg : 2018 年度 : 参考)

表 4. 汚泥の処理装置

脱水機	乾燥機	焼却炉	消化槽
遠心脱水機、ベルトフィルタ ー、フィルター プレス、スクリ ュープレス	ドラムドライヤー 箱型乾燥機、攪拌 乾燥機、真空乾燥 機、他	縦型多段炉、 流動焼却炉、 ロータリー キルン炉	卵型消化槽 円筒形消化槽 発生ガス メタン 60% 炭酸ガス 40%

- ① 脱水機は遠心分離機、ベルトフィルター (ローラーで連続圧縮ろ過)、フィルタープレス (ろ布で加圧脱水 : 回分式) が多い。
- ② 焼却は縦型多段炉と流動炉が多い。海外は焼却が少なく、陸上埋立てか肥料化が多い。
- ③ 消化は日本では卵型消化槽が多い。海外は円筒形が多い。
- ④ 日本の最終処分は、焼却灰の路盤材利用が多い。

複数の事例が報告されています。また、消化ガスから炭酸ガスを分離し、メタンを都市ガスに利用する試みが行われています。

(おわり)

参考 : 国立環境研究所資料、国土交通省資料