

微生物培養系としての生物学的排水処理プロセス

池 道彦

下水を含めた有機性排水のほとんどが生物学的処理法によって処理されていることを御存知だろうか。応用微生物学や生物化学工学の教科書には、生物学的排水処理/廃液処理技術として必ず一節、一項を設けて解説がなされているので、「そういえば……」と思いつきしていただけるかも知れない。しかし、現実の排水処理は、土木工学の一分野としての衛生/環境工学の技術と位置付けられていることもあってか、微生物培養系としての特性を深く掘り下げて理解することなしに、設計・運転などがなされているように思える。ここでは、生物学的排水処理プロセス、特にその代表である活性汚泥法を、改めて微生物培養系として見てみたい。

排水処理の根源的な対象は有機物

排水処理の対象となる汚染物質といえば、水銀やカドミウム、塩素系溶媒のような有害化学物質を思い浮かべるかもしれないが、もっとも根源的であり重要な水質汚濁物質はごく普通の有機物である。物質としては無害な有機物でも大量に放出されると、河川などに存在している微生物の呼吸により分解され、結果として水中の溶存酸素を枯渇させてしまうことになる。高等生物は棲めない酸素のない水環境が形成され、嫌気代謝の産物であるメタンや硫化水素の発生するドブになってしまうのである。

自然界にいる微生物によって容易に分解される有機物は、易分解性有機物といわれ、BOD (biochemical oxygen demand) で表される。BODは水試料に酸素を供給して飽和させたのちに密閉し、常温で5日間保持する間に減少した試水中の溶存酸素濃度を測定して求める。この期間に試水中に存在する微生物が呼吸に使った有機物を、酸素消費量として表現しているものといえ、自然界で起こり得る酸素枯渇の程度を模擬している。

産業排水は個々に異なる特定の有害汚濁物質を含むことが多いが、生活排水(下水など)に含まれる主な汚濁物質はBODである。産業は年々変わっていくが、下水などの生活排水は大きく変わることがなく、ヒトが生きていく限りは常に大量に生じる排水である点で、排水処理の一義的なターゲットといえる。

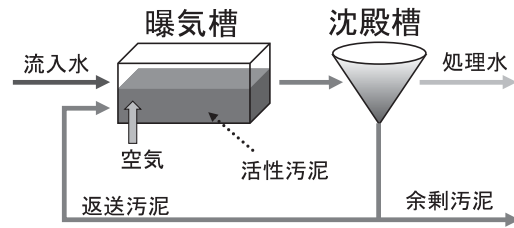


図1. 活性汚泥法の模式図

活性汚泥法の原理

排水処理の代表である活性汚泥法は模式的には図1のように示される。自然水環境に由来する微生物を、曝気槽と呼ばれる酸素(実際には空気)を過剰供給したバイオリアクターに入れ、そこに排水を導入すると、排水中に溶けていたBODは微生物に分解され二酸化炭素になって気相に揮散するか、固相である微生物細胞へと転換されて、水中から除去されるのが処理の原理である。微生物細胞は沈殿槽において水と固液分離されることで清澄な処理水が得られる。重力沈降により沈殿槽で分離された微生物は曝気槽に返送され、繰り返し処理触媒として利用される。この微生物はBODを効率的に分解することに長け、重力沈降で容易に水から分離される塊(フロック)を形成するのが特徴であり、活性汚泥(activated sludge)と呼ばれる。活性汚泥が増えすぎると固液分離が不能になるため、増殖分を系外に排出する必要があり、これを余剰汚泥という。

活性汚泥法以外の生物学的排水処理法では、微生物を曝気槽などで懸濁状態で使うものに加え、担体に生物膜として付着させて使う生物膜法もあるが、BODを対象とした場合の浄化原理は同じである。

多様な微生物を含み常に変動する混合微生物系

微生物培養系として活性汚泥法に特筆すべき最大の特徴は、きわめて多種多様な微生物の混合系である点だろう。活性汚泥を構成する微生物としては、数的には細菌が圧倒的に多いが($10^{10}/\text{ml}$ 以上)、真菌や酵母、ときには藻類や原生動物、さらには微小後生動物まで、栄養レベルの異なる微生物も混在しており、微生物培養系というよりもミニ生態系を形成している。薬品製造などでは

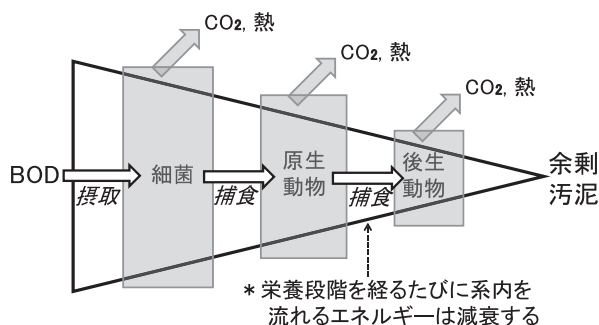


図2. 活性汚泥における食物連鎖

純粋培養系が使われているし、発酵生産では混合微生物系ではあるものの、ある程度限定された特定の微生物群が利用されているのに対し、活性汚泥法では特に同定もされていない無数の微生物が利用されているのである。

活性汚泥法においてBOD成分を直接摂取し、分解・資化するのには細菌であるが、原生動物もこれらを捕食し、浮遊性の懸濁物質を減少させて処理水の清澄性を高めるなど重要な働きを担っている。後生動物はさらに原生動物を捕食しており、活性汚泥内では数段階の食物連鎖が存在している(図2)。食う食われるの関係、つまり栄養段階を一つ経ると、その過程でバイオマスとして固定されたエネルギーをいったん取り出し、それを使って新たな細胞を合成し直すことになるため、エネルギーの一部は二酸化炭素や熱として失われる¹⁾。そのため、生態系のエネルギーフローがおよそ1オーダー減衰することから、この食物連鎖がしっかり成り立っている活性汚泥では最終的に生じるバイオマス=汚泥量は少なくなる。汚濁物質を直接浄化する細菌だけでなく、それ以外のさまざまな微生物が何らかの形で処理性能の向上に寄与しているものといえる。

下排水中のBODは明確に定義することもできない、多岐に渡る物質の混合物であるため、それらを基質として利用する活性汚泥には、代謝の異なるきわめて多様な微生物が混在している。言葉を換えれば、多様な代謝を組み合わせることで、エネルギー/炭素源として価値を有するすべての物質を食いつくせる微生物群集(コミュニティ)が形成されている。一部の難分解性化学物質は単一菌によっては分解されないが、複数種の細菌の共生作用を通じてなら分解されるともいわれ²⁾、活性汚泥内ではこの連携が成立し得る。

活性汚泥中に存在する微生物は多様なばかりでなく、常に変動するのが理屈である。下排水は滅菌されているはずがなく、曝気槽というバイオリアクターは常にコンタミされる運命にある。曝気に使われる空気ももちろん除菌したりしないので別なコンタミ源である。下排水は

時間的に量・質ともに大きく変動しており、培地としてみた場合こんなにもいい加減なものはない。培地組成や負荷が絶えず変動すれば、それに連れて増殖、あるいは生存が有利となる微生物が選択されて、微生物群集構造が変化することになる。逆にいえば、微生物群集の動きは、処理の状況を正確に反映している。

このため、活性汚泥微生物群集の動態をあまねく解明することが、処理性能を飛躍的に発展させるカギを握るものといわれ、最近では、多数の研究者がこの挑戦的な課題に取り組んでいる。しかし、その挙動はあまりにも複雑であり、処理性能の向上につながるようなまとまった知見がいつになったら得られるのかは明言できず、永遠のテーマといえるかもしれない。

活性汚泥内での代謝とマスバランス

多様な微生物が混在し、処理するBODの成分も定義できない活性汚泥法を、微生物工学的/培養工学的にいかにも合理的に設計・制御するのは大きな問題である。これは、多様な有機物の混合物をBODという一つの指標で表し、多様な微生物の混合系である活性汚泥を一つの微生物触媒であるかのように捉えることで行われている。発酵生産などの一般的な微生物プロセスで基質、発酵生物に当たるものが、活性汚泥プロセスではそれぞれ下排水中のBODおよび活性汚泥ということになる。このような捉え方をすると、活性汚泥中で起こっている複雑な反応は単純化して図3のように描くことができる。つまり、活性汚泥中の微生物(特に細菌)は曝気槽に供給される酸素を利用して呼吸し、BODを分解することによりエネルギーを獲得する。同時に有機物由来の炭素を使って同化し、新たな細胞を合成して増殖する。生物プロセスとしてのプロダクトは、二酸化炭素、生物反応熱と微生物細胞、つまり余剰汚泥ということになる。

発酵生産プロセスでは通常、培養液中に生じる物質、もしくはバイオマスが有価物であり、その生産速度や収率を最大限に高めることが目標といえるが、逆に、排水処理系で生成する余剰汚泥は引き取りコストを払って処

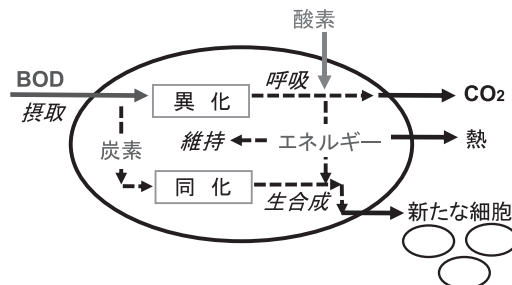


図3. 活性汚泥微生物による代謝

分しなければならない廃棄物であるため、従来の考え方によれば、その収率を最小限にすることが望まれる。培地＝下排水中の基質＝BODを最大限に利用する＝除去するが、プロダクト＝汚泥はできるだけ生産しないという極めて珍しい工業微生物プロセスといえるだろう。余剰汚泥の生成を最小化するということは、図3でいえば、細菌が摂取したBODの化学エネルギーを無効に消費し、二酸化炭素もしくは熱として捨ててしまうことを意味しており、微生物培養系としては独特の条件で運転されることになる。このことは、下記のように、曝気槽における汚泥増殖（発生量）のマスバランスを理解すると解りやすい。

曝気槽の定常状態における余剰汚泥発生速度 V (kg-MLSS/day, MLSS, mixed liquor suspended solidは曝気槽における活性汚泥の固形物濃度) は以下の式で表される³⁾。

$$V = a \cdot Lr - b \cdot Sa$$

ここで Lr は曝気槽におけるBOD除去速度 (kg-BOD/day), Sa は曝気槽内の活性汚泥量 (kg-MLSS) であり, a は収率係数 (kg-MLSS/kg-BOD) つまり除去BOD当たりの汚泥生成量, b は汚泥の自己分解速度係数 (/day) つまり内生呼吸により失われる1日・汚泥単位量当たりの汚泥量である。

余剰汚泥生成量/速度を低減するための運転操作は、最も単純に考えれば、BOD除去速度を落として汚泥の増殖を抑えるか、あるいは曝気槽内にできるだけ多くの汚泥を維持し自己分解を促進するかであることが解るだろう。そのためには、曝気槽におけるBOD濃度もしくは負荷をできるだけ低く設定し、活性汚泥微生物濃度を高め、かつ細胞滞留時間（活性汚泥法においては汚泥滞留時間SRT, sludge retention time) を長くとする運転が行われる。F/M (food-to-microorganism) 比を低く維持する運転であり、有価物生産速度を上げようとするプロセスとは真逆の制御である。典型的な微生物増殖曲線であれば、微生物の状態を、活性が高い対数増殖中期ではなく、むしろ低い対数増殖後期から定常期に維持することになる。

下水処理における曝気槽がバイオリクターとしては破格に“でかい”のは、処理しなければならない下水の流量が多いことに根ざすものではあるが、低負荷を維持しなければならない、SRTを5～7日と長時間に設定していることも寄与している。負荷を上げて活性汚泥を対数増殖期に保ち、どんどんと生じてくる余剰汚泥を片っ端から機械的に固液分離してやれば（沈殿槽での重力沈降では追いつかないので）、曝気槽はもしかしたら10分の1くらいの容量に縮小できるのではなどと考えてしま

う。こんなバーチャルシステムを想定して、実際に必要な容積を試算したり、そのことに伴って変更しなければならない装置諸元や運転制御、生じ得るトラブルや処理の制約は何かを考えてみたりすると、なかなかいい演習問題になりそうである。

汚泥発生を抑制するうえではまた、汚泥の収率係数 a が小さく、自己分解速度係数 b が大きい活性汚泥を用いることも考えられる。しかし、活性汚泥は極めて複雑な混合微生物系であり、運転操作の工夫だけで特定の微生物群の力を発揮させるのは容易ではなく、これらのパラメータを操ることはできていない。ちなみに、一般的な都市下水処理場の標準活性汚泥法では、 a は0.5 (kg-MLSS/kg-BOD), b は0.05 (/day) くらいと覚えておけば、下水のBOD濃度と流量、それにBOD除去率のデータから汚泥の発生量が推算できる。なお、最近の都市下水のBOD濃度は低くなってきており100mg/l程度、曝気槽内の活性汚泥濃度もこれに連れて低目であり1000mg-MLSS/l程度になっている。

おわりに

活性汚泥法の誕生からはすでに100年以上が経過しており、ここで描かせていただいたBODの浄化のみでなく、窒素やリンといった栄養塩類の除去にも対応して、さまざまな変法が生み出されてきた。さらに今世紀は、できる限りエネルギーをかけることなく（つまり二酸化炭素を発生することなく）、難分解化学物質などへの対応を含めたより高度な処理を達成することが求められるようになってきた。また、下排水処理系に資源・エネルギー回収系という役割を付加することも求められており、本稿では廃棄物として捉えてきた余剰汚泥はバイオマス資源と認識されるようになってきている。生物学的排水処理系を改めて微生物培養系として見つめ直し、本質を理解したうえで、全く新しいプロセスへと大きく進化させていくべき時代が来ているといえるだろう。

なお、紙面の制約もあり、ここでの議論は極めて単純化したものであり、生物学的排水処理プロセスの持つ多様な側面を正しく表せていないことを、お断りしておかねばならない。御理解・御容赦いただければ幸いです。

文 献

- 1) Odum, E. P. (三島次郎訳)：生態学の基礎（上），p. 79, 培風館（1974）。
- 2) Leisinger, T. et al. (ed.): *Microbial degradation of xenobiotics and recalcitrant compounds*, p. 77, Academic Press (1981)。
- 3) 合葉修一・永井史郎：生物化学工学—反応速度論—, p. 253, 科学技術社（1975）。