

セントラル科学株式会社



The Biological Basis
of Wastewater Treatment

排水処理における生物学の基礎

Peter Spencer Davies B. Sc, Ph. D
Strathkelvin Instruments Ltd
(日本語版翻訳: セントラル科学株式会社)

排水処理における生物学の基礎

The Biological Basis of Wastewater Treatment

緒言

本書は排水処理を裏打ちする生物処理プロセスについて簡略に説明するために著したものである。バクテリアが下水中の有機炭素をどの様に処理するかを示そうと思う。そこには3つの主要なプロセスが関わっており、それはまさにプラントで使われている3つの主要プロセスを正確に映し出すものである。すなわち、微生物分解、水中の酸素消費、そしてスラッジ生成である。

本稿は2つの部分に分かれる。はじめの部分はバクテリアの生物学を取り扱う。後の部分は排水処理プラントの管理を裏打ちするプロセスの方法を説明する。概観することの必然として、多くのことを積み残さざるを得なかった。しかしながら、本稿が基本原理の説明と単純化を十分に行うものであることを願うものである。

詳細については、N.F Gray による”Biology of Wastewater Treatment (排水処理の生物学)”(Imperial College Press, 2004)が、本題について優れて読みやすい説明をしている。

生物プロセス

活性汚泥による生物処理

排水源として主に二つのものがある。人が排出する下水と製造工業からのプロセス排水である。英国においては工業排水の総量は国内下水水量のおよそ7倍である。もし未処理のまま環境に直接排出されれば、給水は汚染され飲料水媒介の病気が蔓延するであろう。20世紀初頭に生物処理の方法が考案され、そしてそれが今では世界中で排水処理の基本となっている。それは自然界に発生するバクテリアを、高濃度で水槽の中に閉じこめることである。これらのバクテリアは原生動物や細菌類と共に、**活性汚泥** (Activated Sludge)と総称されている。処理の考え方は極めて単純である。バクテリアは小さい有機炭素分子を「食べる」ことによってこれらを除去する。その結果として、バクテリアは成長し、排水は浄化される。処理済み排水または放流水は、通常、河川や海の放流域に放流される。

考え方は非常に簡単であるけれど、数多くの変数が影響を与えるので、処理プロセスのコントロールは大変複雑である。これらの変数としては、処理水槽の細菌叢(細菌フローラ)の組成変化や、プラントへ流入する下水の変化がある。流入水は流量、化学組成、pH や温度等が変化する。多くの処理場はまた雨水による流量の急増にも対処しなければならない。工業排水を受け入れるこれらのプラントは、バクテリアが非常にゆっくりとしか分解することの出来ない手強いケミカルや、活性汚泥の働きを阻害する毒性ケミカルにも対処しなければならない。毒性ケミカルの濃度が高くなると毒性ショックを引き起こし、バクテリアを死滅させてしまう。このようなことが起きれば、死んだバクテリアが処理槽から除かれ、新しいバクテリアの“種”が導入されるまで、プラントは未処理の水を環境に直接排出することになってしまう。

世界的に放流水の水質は国の環境当局によって規制されている。ヨーロッパにおける規制法は Urban Waste Water Treatment Directive (都市排水処理指令)(1991)であり、もっと最近では Water Framework Directive (2000)である。米国では環境保護局(EPA)が Clean Water Act (浄水法 1977)への遵守を請け負っている。規制法は汚染防止に関わるものであり、それ故に、(BOD または COD としての)溶存有機炭素と、放流域の富栄養化を引き起こす窒素及びリンに対して濃度上限を定めている。また、放流水における許容濃度限界を定めることによって既知の毒性物質の放出に制限を設けることも行っている。ヨーロッパ

においては最近、放流水には未知の毒性物質が含まれているということを前提にして、Direct Toxicity Assessment (DTA:直接毒性評価)試験を採用し、規制に対してより実的なアプローチが導入されつつある。米国においてはこの様な試験は長年行われて来ており、Whole Effluent Toxicity (WET:全放流水毒性)試験として知られている。これらの試験法は、放流域の代表的な生物に対して放流水の毒性が与える影響を測定するために使われるものである。放流水に検出されるいかなる毒性も、プラントに流入する排水に存在していることは明らかである。驚くべき事に、生物処理プロセスの働きに影響を与え得る排水処理プラントへの流入水に対する直接的な毒性評価は、規制の中にまだ盛り込まれたことがないのである。

排水の性質と組成

国内の下水は、溶存または固形分としてのいずれかにおいても、大部分が有機炭素からなっている。およそ 60%が固形分であり、この内の半分弱は沈殿分離するのに十分な大きさである。1nm から 100 μm までの粒子はコロイド状浮遊物として残留し、処理中に活性汚泥フロックに吸着される。タンパク質、アミノ酸、ペプチド、炭水化物、脂肪及び脂肪酸からなる大部分の有機物は簡単に生物分解される。平均的な炭素:窒素:リン(C:N:P)比は 100:17:5 または 100:19:6 と様々に言われている。この比率は活性汚泥バクテリアの成長にとって理想に近いものである。しかしながら、工業排水は組成が非常に変わりやすいものである。例えば、醸造業とパルプ・製紙工業での排水は窒素及びリンが不十分である。従ってこの様な排水においては、不足している栄養素を添加してバクテリアの成長のために適正な C:N:P 比を維持し、処理が最適に行われる様にする必要がある。

分解性炭素と非分解性炭素

処理設備の生物プロセスをコントロールするために、流入排水の有機物強度または有機物負荷について少し知識が必要である。このために3つの異なる測定方法があり、それぞれが特長及び弱点を有する。全有機炭素(TOC)は分析的には直接的に測定するものである。高温で燃焼酸化し、結果としてのCO₂を測定する。しかしながら、TOC値は生物的に分解することの出来ない安定した有機炭素成分も含んでしまう。

有機炭素は化学酸化によっても測定できる。サンプル水を、重クロム酸カリウムを含む強硫酸の中で加熱し、酸化された炭素量は反応で消費された重クロム酸塩の量によって求められる。結果は炭素ではなく酸素を単位として表される。この方法は化学的酸素要求量(COD)と称される。この方法も分析的には簡単なやり方である。しかしながら、生物的に酸化されない多くの手強い有機物が、結果値の中に含まれてしまうことがその弱点である。逆にバクテリアが分解することの出来るベンゼン、トルエン、ピリジン等のいくつかの芳香族化合物はCOD法では部分的にしか酸化されない。CODは活性汚泥が除去することの出来る有機炭素を概して過大に測定してしまう。

生物分解可能な有機炭素量を求めるために使われている現状の方法は 5 日間生物学的酸素要求量(BOD₅)である。これは、排水を入れた容器にバクテリアの小さい“種”を閉じこめ、暗所で 5 日間に摂取される酸素量の測定を行うものである。この時間の間にバクテリアは生物分解可能な有機炭素を取り込み、その炭素のあるものはバクテリアの呼吸のために使われるので、それに相当して溶存酸素が減少する。呼吸とは生物酸化の一つの形であり、このことについては後述する。不親切なことに、COD試験と同じように生物分解可能な炭素量は酸素の単位で表される。これは、この試験方法がもともと、放流水に残留する生物分解可能な有機炭素による放流域の酸素枯渇を測定する目的で導入されたからである。その価値は処理設備からの放流水組成を規制することにある。プロセス管理のためには、流入水の有機負荷についての知識が必要であるが、BOD₅は測定を行うのに 5 日間を要するので、その価値は限定されたものである。現在、流入水強度(負荷)の測定にBOD₅に代えて、30分から数時間の内に試験結果を出す短時間試験(BOD_{5T})を使う動きがある。

BOD₅値は二つの理由によりCOD値よりも常に低い。

- ・ 活性汚泥バクテリアは、COD 試験では化学的に分解できる有機物のあるものを分解出来ない。
- ・ BOD 試験の間に除去される有機炭素のあるものは酸化されずに新たな細菌性バイオマスになってし

まう。従って、BOD はバクテリアが実際に酸化することのできる生物分解可能な炭素を測定しているだけである。

BOD₅/CODの比は排水の組成に依存する。国内の下水、及び食肉処理場、乳製品製造所、醸造所、ゴム工業等における排水においては、その比はおよそ0.5から0.6である。しかしながら、処理設備からの放流水においてはその値は0.2に近い。これは、容易に生物分解できる有機炭素は処理工程の間に取り除かれ、後にはバクテリアによっては容易に分解されない成分、“ハードBOD”が取り残されてしまうためである。これらの成分は化学的酸化では容易に測定されるが、BOD容器の中のバクテリアによっては容易には分解されず除去されないものである。

“ソフト”BOD と“ハード”BOD

有機炭素を取り除くための時間的経過は、活性汚泥バクテリアがこれを摂取する能力に応じて変化する。分子量の小さい物質は排水が活性汚泥槽に流入するとすぐに除去され始める。除去は1～2時間の内に終わる。このような物質グループはしばしば、易生物分解性 BOD またはソフト BOD と称されている。一方、高分子成分は分解及び除去に数時間を要する。もっと手強い物質もあり、数日経ってもまだ存在するものもある。このような容易に生物分解できない BOD のことをハード BOD と称する。バクテリアによる分解と除去のメカニズムについては後述される。

その結果として、有効な処理時間(滞留時間)が限定されているので、分子量が大きく複雑な成分は分解されずに放流水の中に流れ出てしまう。排水中の有機炭素をまとめると以下の様に表すことが出来よう。

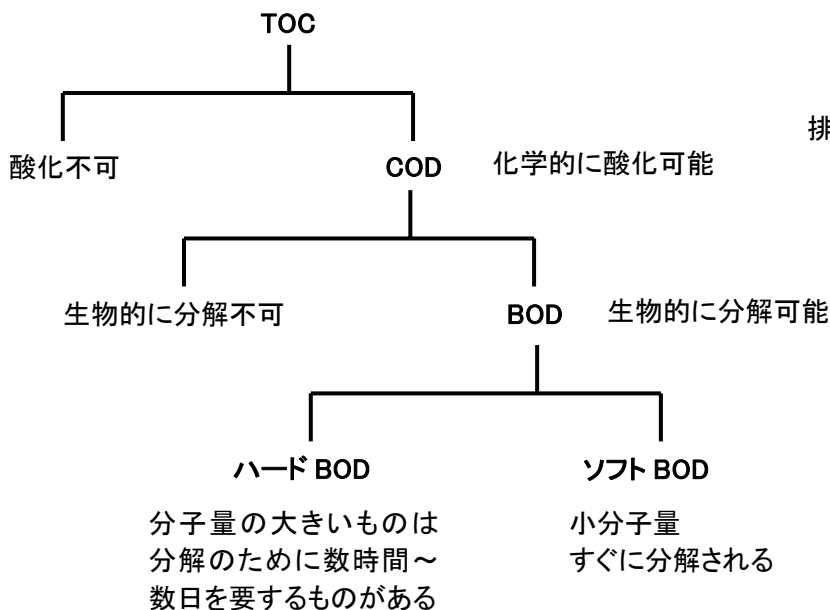


図 1. 排水中の有機炭素の分類

活性汚泥の組成

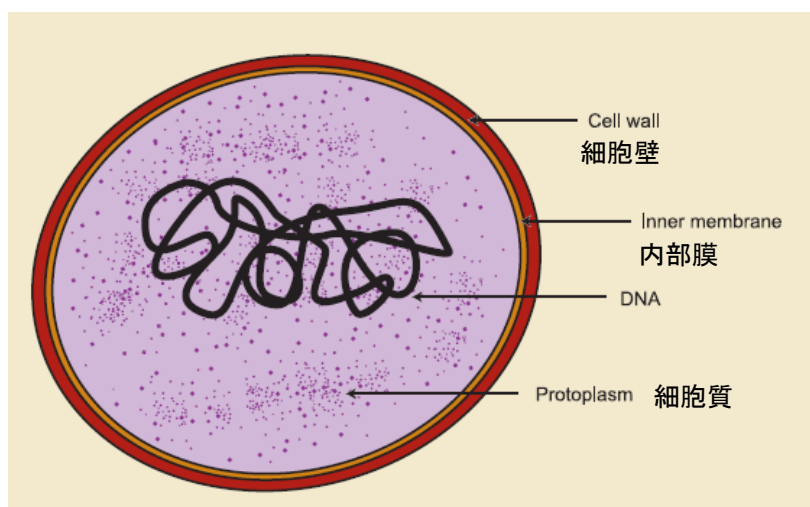
活性汚泥バクテリア

排水処理場の曝気槽における活性汚泥は、生物が競争しあう複雑な生態系である。支配的な生物はバクテリアであり、その種類は 300 も存在する。バクテリアは最も小さく最も豊富にある生物である。それぞれ大きさ0.5～2 μmの単細胞生物である。外面から見ると、細胞は境界膜を介して周囲の水からイオン及び分子の流入を調節している。その外側は砂糖の高分子からなる硬い細胞壁に囲まれている。細胞内部には細胞質(cytoplasm)と多くの異なるケミカルがあり、それらの働きは酵素(enzyme)によって調節される。バクテリアの細胞は細胞核を有していない。ほとんどのバクテリアは球体であるが、竿状や渦巻き状のものもある。糸状バクテリアは小さなバクテリア細胞が長い鎖状に出来ており、時に円筒形の包皮に囲まれ、100 μm の長さに達する。

分子量の小さい物質は細胞壁を通してバクテリアの中に拡散する(摂食: ingestion)。同時に、バクテリア

内で合成されたもっと大きくて複雑な分子は外側に出て行く。このプロセスは**分泌**(secretion)と呼ばれる。

図 2.
バクテリア断面図
内部の細胞質は DNA 分子を含むが細胞核はない。内部膜と細胞壁に囲まれている。



分泌物には粘液性のものとゼリー状のものがあり、それがバクテリア同士や酵素を結合している。酵素は大きな分子を、摂食するのに十分なより小さい分子へと分解する。バクテリアは摂食した分子を、その成長プロセスにおいて、新たな分子合成のために使用する。バクテリアが成長して普通の大きさになると、バクテリアは二つに分割し、このプロセスが繰り返される。栄養となる成分に制限が無ければ、バクテリアの数は指数関数的に増殖していくことになる。

排水処理プラントのバクテリアは**従属栄養細菌**(heterotrophs)と**自家栄養細菌**(autotrophs)の両方がある。従属栄養細菌または**資化性**(carbonaceous)バクテリアは、細菌グループの支配的なものである。これらは無機炭素ではなく主に有機炭素分子を餌とすることにより特徴付けられる。対照的に、自家栄養細菌は無機物質を取り込み、それを有機合成に使用する。排水からアンモニアを取り除く**硝化菌**(nitrifying bacteria)は、このグループの中で最も重要なものである。自家栄養細菌の種類は相対的に少なく、成長速度が遅いので、成長が速い従属栄養細菌との競争に負ける傾向がある。

バクテリアフロック

よくメンテナンスされた曝気槽では、バクテリアはあるものは排水中に常に浮遊しているが、活性汚泥の柔毛に覆われた物質の中に集まっている。フロックは、恐らくバクテリアが分泌する非生物性の有機高分子の塊により成っている。開かれた多孔質の構造をしており、曝気槽での水流による剪断力に抗するだけの十分な頑丈さがある。その大きさは $10\mu\text{m}$ から 1mm ($1000\mu\text{m}$) である。

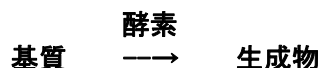
図 3.
活性汚泥の顕微鏡写真。濃い褐色はフロック中でバクテリアの個体数が多い部分を示す。中央の小さいフロックは表面から伸びている糸状菌を示す。隣り合うフロックとは結合していないので、このスラッジはよく沈殿する。



バクテリアはフロックの内部及び外表面に吸着される。中ぐらいの大きさのフロックは数百万のバクテリアを匿っている。排水が曝気槽に入ると直ちに、微粒子、コロイド状粒子および大きい分子はフロックに絡まって吸着される。このことにより、バクテリアが水の中に分泌する酵素が、フロックの近辺に閉じこめられ易くなるのでこれらの消化促進に有利に作用する。しかし、フロック内部で生きているバクテリアにとっては、酸素の入手が問題かも知れない。なぜなら、酸素は、排水からフロックの内部までの濃度勾配を通して拡散しなければならないからである。ばらばらのフロックのバクテリアは水中の酸素濃度が $0.6\text{mg O}_2/\text{L}$ であっても成長を続けるかも知れないが、大きいフロックの内部においてもこの濃度を維持しようとするれば、水中の酸素濃度は $1.2\sim 2.0\text{mg O}_2/\text{L}$ が必要となろう。曝気槽が $2.0\text{mg O}_2/$ 以下で運転されると、しばしば、フロックの中心は酸欠となり、**通性嫌気性細菌** (facultative anaerobic bacteria) がコロニーを形成する。活性汚泥フロックの外表面には、原生動物(protozoa) やクルマムシ(rotifers) 等の高い栄養レベルの微生物がよく住み着いている。これらはバクテリア及び排水中の微粒子を餌としている。全ての生態系と同じく、生物の構成は動的に安定した状態にある。かくして、優勢なバクテリア種は排水組成の変化に呼応して時には日単位で変化するのである。新たな栄養源を分解する酵素を分泌する能力を持つバクテリア種はさらに速く成長し、相対的な数を増やしていく。このプロセスは**適応**(adaptation) または**順応**(acclimation) として知られる。バクテリアが、例えばフェノールの様に、低濃度だが潜在的に毒性を有する化学物質に曝されると、その様な物質を消化する酵素が何日にもわたって誘発されることになる。この様なバクテリア種は、それからはその毒物を栄養源として摂取することが出来るようになるのである。

バクテリアの新陳代謝(metabolism)

曝気槽での排水処理は、バクテリアが摂取することにより水中の有機炭素を除去することである。一旦バクテリアに摂取されると炭素化合物が代謝される。物質の代謝は同時に起きるたくさんの化学反応から成り立っており、バクテリアの内部でいつも進行しているものである。これらの反応のそれぞれにおいて、基質が、酵素(触媒として作用する)の存在下で生成物に変換される。



生成物は次いで連鎖の次段階における基質となり、他の固有の酵素の存在下において、別の生成物へとほとんど即座に転換され、これが繰り返される。この様な反応を起こすためには、化学的なエネルギーを加える必要がある(endergonic reaction: **エネルギー吸収性反応**)。他の反応(exergonic reaction: **発エルゴン反応**)では、エネルギーは通常、熱の形で放出される。我々の関心がある物質代謝は、主に以下の様に区分される。

異化作用またはエネルギー代謝(catabolism or energy metabolism)

これは炭素物質が分解されて細胞エネルギーを生成する一連の反応から成る。生物酸化であり、バクテリアによる酸素摂取が行われる。これはまた、**呼吸**(respiration) と呼ばれるプロセスの基本でもある。

同化作用(anabolism)

これは小さい分子が集まって大きな分子量を持つ巨大分子を形成する一連の生物合成反応である。このためには異化作用からのエネルギーの充当が必要であり、成長のプロセスの基本である。

バクテリアの3つの主要プロセス

バクテリアの新陳代謝には非常に多くの化学反応が関わっているが、排水の生物処理に関わりを持つ以下の3つの主要なプロセスを特定することが出来る。

- ・ 摂取(摂食)
- ・ 呼吸
- ・ 成長と分裂

これらのプロセスは高度に一体となっているものであり、一つのバクテリア細胞におけるそれらの関係は次の図の様に示される。

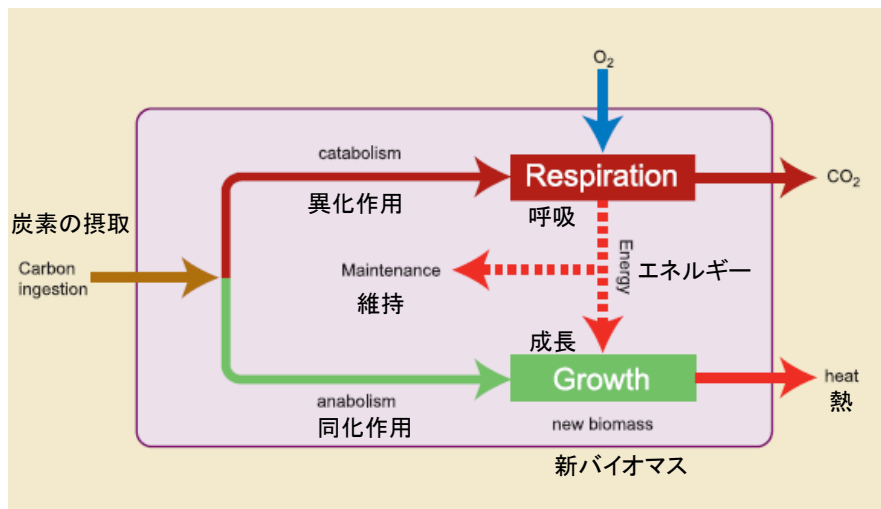


図 4.
3つのプロセスの関係を
示す単一バク
テリアの説明

図 4 は摂取された有機炭素の経路を示している。あるものは異化作用または呼吸の経路を辿り、最後は二酸化炭素になる。この有機炭素は系から失われることになる。残りの有機炭素は同化作用または成長の経路を辿り、最終的には新たなバイオマスとなる。それ故にこの炭素は系内に残り残されることになる。呼吸の目的はエネルギーを供給することであり、それはバクテリアの成長と維持のために必要なものである。(BOD₅測定に慣れた人にとって、その試験が成長のためのエネルギーを供給するために消費される炭素だけを測定していることは、図 4 から明らかである。)

これらの3つのプロセス、すなわち摂取、呼吸、成長は高度に連結または絡み合うものである。ひとつのプロセスだけが他よりも速く進むことはない。これが意味することの一つは、例えば、呼吸速度を測定すれば、間接的に成長速度や炭素の摂取速度を測定することにもなるということである。

成長はドライバーであり速度を制限するステップである。どの様なバクテリアも理想的な状態で成長速度を最大にする遺伝子が組み込まれている。バクテリアは成長するにつれて、その細胞質の中にある“貯水池”から炭素物質を引き出す。するとこの貯水池へ補給するために周りの水から炭素が入ってくる(摂取される)ことになる。同時に生物合成と成長のためにエネルギーが使われ、そこで、呼吸の代謝経路においても内部貯水池から炭素が引き出され、このことによっても炭素が摂取されることに繋がる。

この3つのプロセスは、私たちが処理場の曝気槽の運転を調べるときに見る主なプロセスに相当することに気がつくであろう。つまり以下の様にまとめることができる。

バクテリアのプロセス	処理場のプロセス
摂取	生物分解
呼吸	曝気の必要性
成長及び分裂	バイオマス生成

摂取

これは、周りの水からバクテリア内部に有機炭素物質や他の分子、及びイオンが移動することである。これを行うためには、これらの物質は細胞壁と内部膜を通過しなければならない。細胞壁は大きな障害にはならず、内部膜のところでの移動はコントロールされる。ナトリウムの様なイオンは、周りの水における濃度がバクテリア内部よりも高いので内側に拡散していく。これらは次いで、内部を一定状態に保つために再度排出されなければならない。分子量の小さい有機物も同様に濃度勾配に従って透過していくか、

または内部膜に備わる種々のメカニズムにより透過を助けられる。分子量の大きいものは大部分が除外される。これらの分子量の大きい物質を餌として成長のために使うために、バクテリアは水の中に酵素を分泌し、これらを消化して小さな単量体(monomer)にし、それから細胞の中に取り入れる。バクテリア種が異なれば、それらが分泌する酵素も異なり、そのことによってどのような物質を栄養源として取り込むことが出来るかが決まってくる。固有の酵素を分泌する能力は潜在的なものかも知れない。言い換えれば、バクテリアは水の中に特定の化学物質が存在していることが必要であり、それらの物質が、それを消化するために必要な酵素を合成する遺伝子のスイッチを入れているのである。これが前述した活性汚泥の順応または適応プロセスの基礎である。

バクテリアの成長

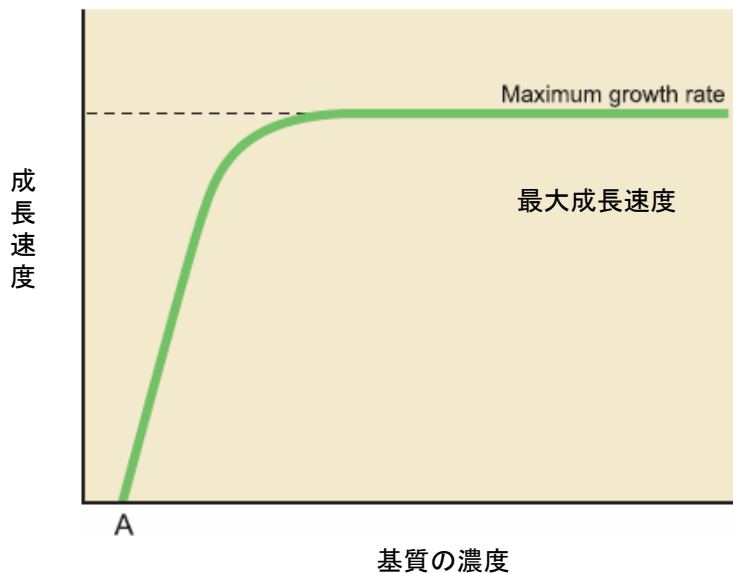
バクテリアは成長において驚くべき離れ業を見せる。温度やpH の条件が整い、有機炭素やその他の栄養素、微量成分等が豊富であれば、20 分位でその生物量が倍になるものもある。個々のバクテリアの成長能力は限定されている、つまり分裂して生成した娘細胞の大きさから通常大きさに成長するだけであることに注意すべきである。従って成長速度は、時間と共に増加する細胞数として測定される。

成長のために必要な条件はバクテリアの種類によって変わる。しかしながら、ある一般的な法則がある。得られた成長速度は、遺伝子学的要因と環境要因の双方の帰結である。成長曲線の形および最適条件における最大成長速度は遺伝子学的に決まる。環境要因の影響について以下に記述する。

基質の濃度

成長のための主たる基質は水中のBODまたは分解可能な有機炭素である。基質の濃度が上昇すれば、成長速度は指数関数的に増加し、それから横ばい状態となる。従って、水の中の基質の濃度がさらに上昇してもバクテリアの成長速度はさらに高まることはない。バクテリアは最大の成長速度にあるのである。

図 5
成長速度は基質の濃度
増加と共に指数関数的
に上昇し、最大になる。



成長速度カーブは原点を通らないことに注意。これは、濃度が非常に低い時は、基質はバクテリアの生命を維持するための呼吸にのみ使われるためである。図 5 で A 点以下の濃度ではバクテリアは生存するが成長しない。

基質濃度と成長速度の傾きは重要である。勾配が急であるほど、基質との相性またこれを使う能力がより大きいことを表している。以下に示す例において、Y 種は低濃度において X 種よりも基質との相性が良い。この濃度において Y 種はより速く成長し、X 種よりも強い。濃度が高い場合は、X 種の方がより大きい最大成長速度を持っており、Y 種よりも強い。次ページの図 6 に示す。

曝気槽に見られる糸状バクテリアのあるものは、高濃度基質での相性を持つ例である。

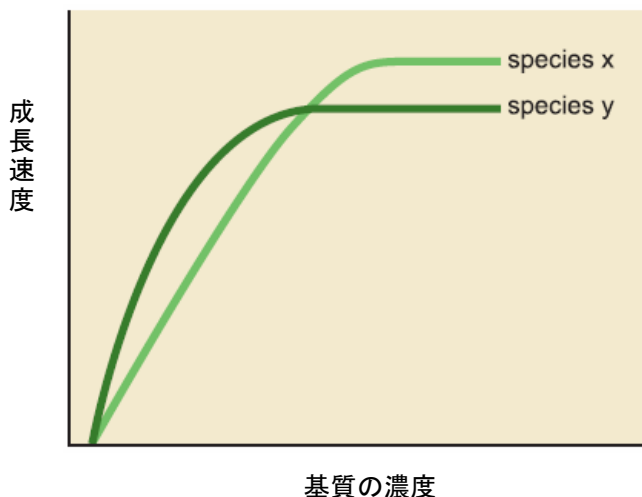


図6
X種の最大成長速度はY種よりも高い。しかしY種は低濃度においてはX種よりも基質との相性が良い。

他の栄養物の利用可能性 基質にとって必要なものは主に炭素であるが、バクテリアの成長は窒素と燐の摂取にも依存している。水の中のC:N:Pの最適比は一般的に100:5:1と考えられている。国内の下水におけるこれらの栄養物の比率は100:17:5や100:19:6等種々報告されている。このことは窒素及び燐はバクテリアの成長にとって制限するものではないことを示している。S、Na、Ca、Mg、K、Fe等の微量成分もまた必要であり、国内の下水には沢山含まれている。対照的に、醸造業やパルプ・製紙工業、食品プロセスの排水には窒素及び燐は不足している。従って、バクテリアの成長速度を最大にし、資化処理(炭化処理)を最適化するためには水に栄養剤を添加することが必要である。運転上の観点からは、重要な栄養素が欠落または不足していれば、バクテリアが最適に成長できないので、処理が不完全になってしまう。

酸素 曝気槽内の酸素濃度が非常に低いレベルになってしまえばバクテリアの成長が阻害される。これは酸素が呼吸を制限するようになるからである。このことについては呼吸についての以下のセクションでもっと詳細に扱う。

温度 バクテリアは遺伝子学的に決まる生存可能な温度範囲を有している。活性汚泥のほとんどの資化性バクテリアにとってこの温度範囲は0~30℃である。しかし、好温性バクテリアは30~60℃の間で生き、成長する。一般的に成長速度は、「化学反応の速度は温度が10℃上がると倍になる」というアレニウスの法則に従う。従って、温度が上昇するにつれて、成長速度と呼吸のための酸素必要量は増加する。

毒性 排水中の毒性物質がバクテリアに摂取され、異化または同化作用のいずれかの経路において酵素の分泌を妨げることがある。呼吸代謝が影響を受ければ、呼吸速度とエネルギーの生成が少なくなり、従って成長速度が減少する。一方、生物合成の同化作用の経路が抑制されれば、エネルギーの必要度が少なくなるので、成長速度が減じ、それに伴って呼吸速度が落ちる。このことが図7に示されている。

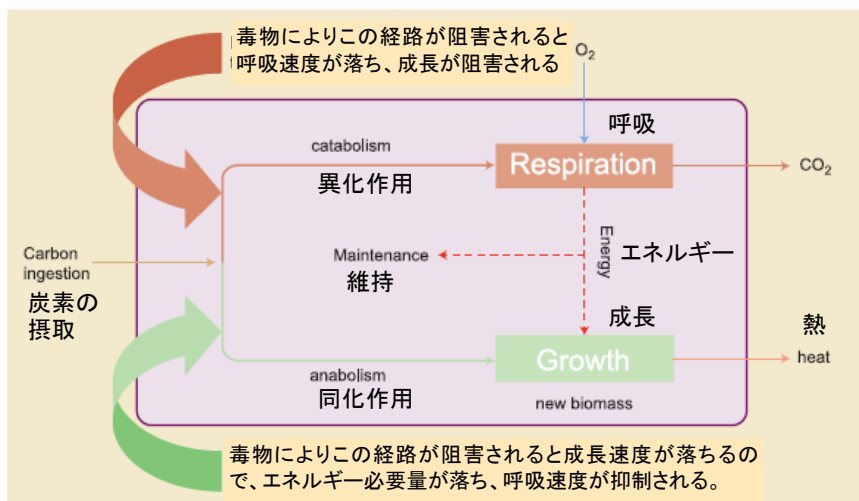


図7
毒性物質により呼吸代謝経路または成長代謝経路のいずれかが抑制されることがある。いずれの場合もその結果として、曝気槽での生物分解速度に相当するバクテリアの中への有機炭素の摂取速度が抑制されることとなる

摂取、呼吸、成長が固く関連していることは前に述べた。このことは、毒性物質がどこでその抑制効果を働かせるかということには関係なく、成長、呼吸そして摂取が一様に阻害されるということになるのである。従って曝気槽において、毒性物質は有機炭素の分解速度を減じる効果を及ぼす。このことは活性汚泥の呼吸速度の変化を観察することによって簡単にモニタリング出来るのである。

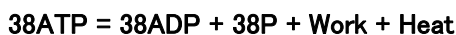
呼吸

呼吸とは基質の分子が酸化され、細胞内で作用するエネルギーを作り出す代謝反応の連鎖である。グルコースなどの基質に含まれるエネルギーは空气中で燃焼して酸化すると熱としてすぐに放散される。グルコースが呼吸において代謝される場合、同量のエネルギーが最終的に放散されるが、それはエネルギーのある部分が細胞の働きを行うために使われた後だけである。呼吸の間、エネルギーははじめ、アデノシン2リン酸塩 (Adenosine Diphosphate: ADP) 分子により捕捉される。これが別のリン酸塩グループに加わりアデノシン3リン酸塩 (Adenosine Triphosphate: ATP) を形成する。捕捉または転移されたエネルギーは、時々“高エネルギーリン酸塩結合”と呼ばれるところに蓄えられる。

そこでグルコースが代謝されるとき全体の反応は:



これはエネルギー捕捉メカニズムとしては完全に効率的なものではなく、エネルギーのあるものは熱として失われる。ATP は細胞内の別の場所に移り、以下に記述するように仕事をするためにエネルギーを放出する。同時に、リン酸塩グループは解放され、再び ADP を生成する。従って全体としては、



ATP は作られたら出来る限り素早く使われる。速度を制限するステップは実際にエネルギーにとって必要なことである。細胞のエネルギー消費が速ければ速いほど、呼吸反応は早く進行する。

上記の式から、呼吸速度が酸素摂取速度、二酸化炭素の生成速度または熱放散速度によって測定出来ることは明らかである。二酸化炭素を水中で測定することは難しい。熱放散はカロリーメーターで測定することが出来るが、呼吸速度を最も簡単に測定する方法は活性汚泥の呼吸計により酸素摂取速度を測定することである。

何故バクテリアはエネルギーを必要とするか？ 全ての生物は定常な状態を維持するためにエネルギーをインプットすることが必要である。例えば、バクテリアはどれも細胞壁を通して拡散してくるイオンを排出しており、また色々な方法で自己修復することを行っている。これらの作用は「維持」とまとめて言われるが、エネルギーを必要とするものである。バクテリアが動くことが出来るものであれば(大部分はそうではないが)、エネルギーは移動のためにも使われる。しかし、バクテリアは主に成長のための生物的合成に、エネルギーを使用している。成長は、小さい分子量の物質を一緒にして巨大分子にすることであり、これがさらに形を変え組み立てられて、膜や細胞壁等の構造を形成していくことになる。かくして、グルコースの様な簡単なヘキソース(六炭糖)糖はグリコシド結合によって結合し、アミノ酸はペプチド結合によって結合しタンパク質等を形成する。ATP 分子により移転されたエネルギーはこのプロセスのために使われる。このことが行われる過程で、エネルギーのあるものは熱として失われる。従ってバクテリアが成長するにつれて、熱が放出され、このことによって曝気槽の温度が周囲温度よりも高くなるのである。

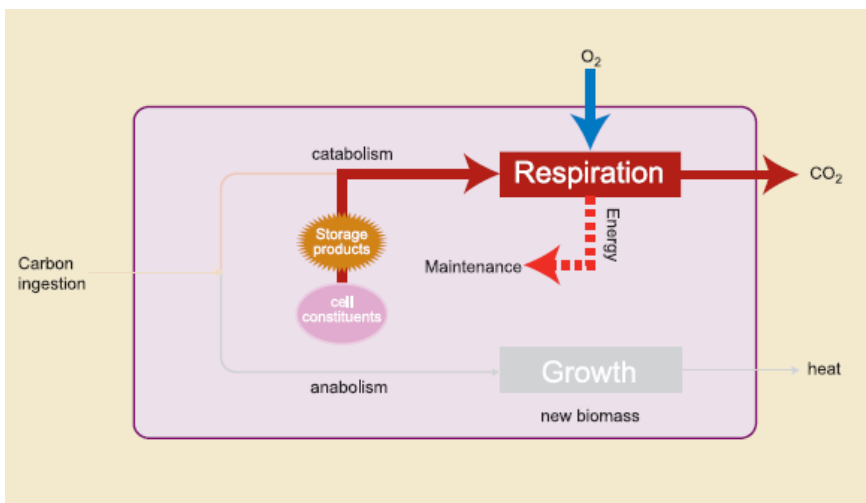
内生呼吸(または自己酸化 Endogenous respiration: 訳者注=微生物が、食べ物の濃度が低いために、自分の細胞質を補充することなく代謝すること。微生物の成長過程に起こる。) 普通に成長しているバクテリアにおいては、ある数の分子が貯蔵用として蓄えられている。これらは主にグリコーゲン及びポリβ-ヒドロキシ酪酸(PHB)の形で蓄えられている。水中の生物分解可能な炭素が全て使われてしまうと、プラグフロー(栓流、押し出し流れ)システム曝気槽の最後に見られる様に、成長は終わり、バクテリアは餓死を始める。死なさないためには維持するためのエネルギーが必要である。そこでそのエネルギーを供給するためにバクテリアは蓄えているものの代謝を始める。

成長は止まっているが、維持のためのエネルギーを供給するために、低い速度での呼吸が継続する。このことを**内生呼吸速度**(Endogenous respiration rate)と称している。蓄えているものを全て消費尽くすと、バクテリアは内生呼吸のための炭素を供給するために、細胞のタンパク質や他の構造体分子の代謝を開

始する。しかしこのことは、家を暖かくしておくために家具を刻んで燃やす様なものである。最終的に細胞は死に、ぱっくりと裂け、内側に残存する分子を放出し、それが今度はその他のバクテリアの栄養源になるのである。

図8.

バクテリアは飢えてくると、生命を維持するために、内生呼吸を行うための炭素源を内部に蓄えている物に求めるようになるが、それらが消費されてしまうと細胞の構造体そのものの代謝が行われるようになる。



非成長の内生状態(自己酸化状態)にあるバクテリアに餌が再び与えられれば、はじめに行われることは消費した細胞構造体の再構築である。成長の回復と、内部貯蔵物の作り直しが急速に行われる(図9)。

図9.

内生呼吸状態にあるバクテリアに基質(餌)が供給されると、その炭素は、飢餓状態の時にバクテリア内部で消費された炭素を再生するために使われる。また炭素のあるものは生物合成反応に必要なエネルギーを供給するために使われる。

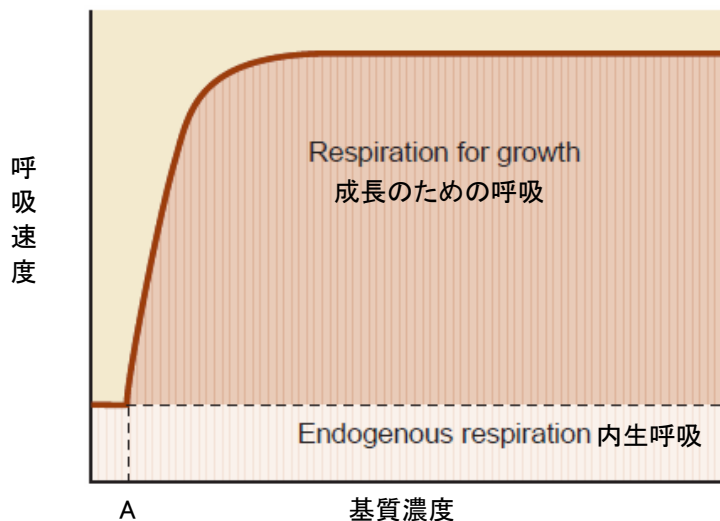
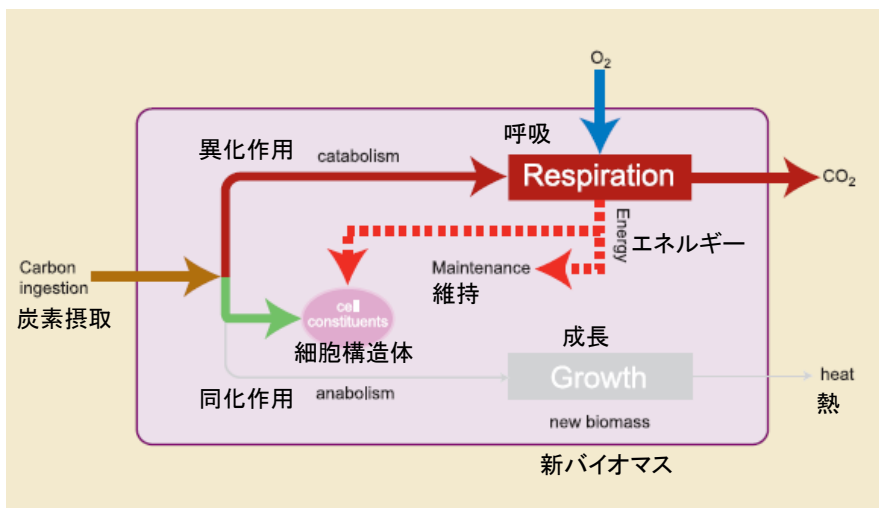


図10.

呼吸速度とバクテリア内部での基質濃度の相関。A点よりも高い濃度で、バクテリアは成長するが内生呼吸速度は全体の呼吸速度の一部のみである。

曝気槽で成長しているバクテリアにおいて、その呼吸は生物合成と成長のために使われるエネルギーを供給するためであるが、図4に示した様にその一部は細胞を維持するために使われることを思い出されたい。

摂取、成長、呼吸は深く関わり合っているので、呼吸速度は、成長速度に影響を与えるのと同じ要因、すなわち、基質濃度、栄養源の利用可能性、酸素濃度、温度及び毒性によって影響を受けるのである。

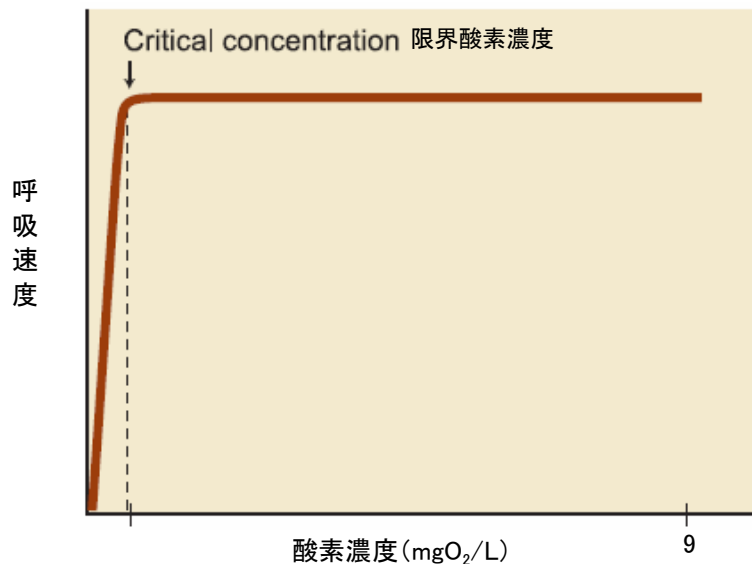
基質濃度の影響 プラグフローの曝気槽の終点で起きる様に、基質濃度がゼロの場合、バクテリアは内生的に呼吸を行い、成長しない。基質濃度が上昇するにつれて、成長のために十分な炭素摂取ができるポイントに至る。濃度がさらに上昇すると、呼吸速度も上昇する。この関係は図5に示した成長速度カーブと本質的に同じである。

内生呼吸状態にあるバクテリアに餌が与えられると、バクテリアが持つ生物合成装置のスイッチはすぐに入る。このことは分析室でいきいきと示すことが出来る。濃縮した餌を内生呼吸状態のバクテリアを含むフラスコに入れると、呼吸で生成した二酸化炭素が放出されるので、数秒の内に泡立ち、あぶくを沸騰させる様になる。

酸素 水中の酸素濃度が非常に低いと、呼吸は阻害され成長のためのエネルギーが活用出来なくなる。20℃で空気と飽和している場合、排水中の酸素濃度は約 9.2mgO₂/Lである。酸素は濃度勾配(正確には酸素分圧勾配)に従って水からバクテリア内へと移動して行く。水中の酸素濃度が高い程、酸素濃度がほとんどゼロであるバクテリア細胞内への勾配は大きくなる。前述の通り、酸素はフロック中のバクテリアに対しておよそ 1.5~2.0mgO₂/L、分散浮遊しているバクテリアに対してはおよそ 0.6 mgO₂/Lの濃度以上を限定するものではないが、これらの限界濃度以下では、図11に示す通り、酸素不足により急激に呼吸速度が低下する。糸状バクテリアはフロックバクテリアよりも、低濃度酸素に対してより大きい耐性を有している。限界濃度以下の酸素濃度では、糸状菌関連バイオマスが増加するので糸状菌のバルキング(後述)が起きやすい。

図 11

水中の酸素濃度が低下していても呼吸速度は一定のままである。限界濃度以下になると呼吸速度は急激に落ちる。

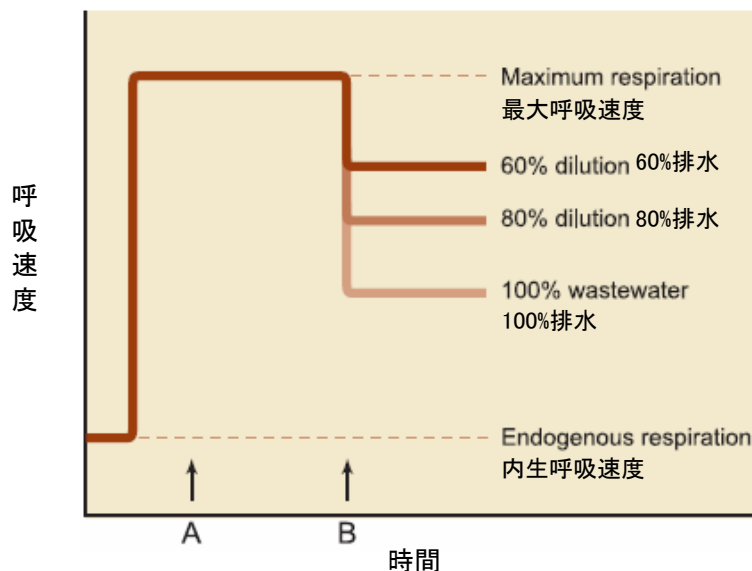


温度 成長のところで述べた様に、温度が 10℃上昇する毎に呼吸速度はおよそ倍になる。しかしながら、酸素の水への溶解度は温度上昇と共に減少する。このことの重要性は、酸素濃度の限界値が上昇するという点である。従って、曝気槽内の温度が高くなるにつれて曝気を最適に行うことがだんだん難しくなる。40~60℃で運転している大部分の好熱性プラントで、曝気のために純酸素を使っているのはこのことが理由である。

毒性 図 7 に示すとおり、毒性物質は呼吸のための異化作用経路または合成及び成長のための同化作用経路のいずれかを阻害し得る。どの経路が実際に阻害されるかに関わりなく、摂取、成長及び呼吸

の3プロセスは同様に阻害されてしまう。この理由のために、毒性試験として従来から呼吸阻害を測定している。これは酸素の摂取速度が呼吸計を使って簡単に測定出来るからである。図12は、内生状態の活性汚泥に餌を与え、続いて毒性排水の塊を与えた時に起こる変化を連続的に示したものである。餌を与えた直後に、呼吸速度は急激に高まり最大値に達する。毒性排水が導入されると、呼吸速度は低下し、より低いレベルになる。この新たな呼吸速度レベルと最大値の差が呼吸を阻害されている部分である。阻害は、通常、呼吸阻害を受けていない最大値に対するパーセントとして表される。阻害のパーセントは、図に示される様に水中の毒性物質の濃度上昇と共に高くなる。

図 12
内生呼吸状態の活性汚泥サンプルに(A)餌を過剰に与えた場合、(B)3つの異なる濃度で毒性排水を与えた場合のラボ試験時間経過。毒性排水の濃度が高いほど、より強く阻害され呼吸速度が低下する。



従来から毒性は EC_{50} 、 EC_{20} 、または EC_{10} と表記される。これはつまり、呼吸速度をそれぞれ 50%、20%または 10%阻害する場合の濃度のことである。

成長速度、呼吸速度と共に、基質濃度、他の重要な栄養素の存在、温度及び酸素濃度によって影響されることを見てきた。

これらのプロセスは摂取と強く関わっているので、摂取速度、つまり曝気槽での生物分解速度も同じように影響される。

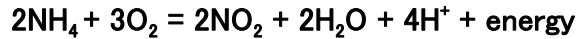
ここまでは、活性汚泥において優位を占める従属栄養細菌 (heterotrophs) または資化性(carbonaceous) バクテリアのことだけを見てきた。しかしながら、多くの排水処理場において、**硝化菌** (nitrifying bacteria) が重要な役割を果たしており、それらが示す基本的な違いを理解するために硝化菌についても以下に簡単に述べておこう。

硝化菌 (Nitrifying bacteria)

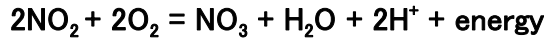
処理場に大量の窒素性物質が流入したら、処理過程において硝化菌によってこれを取り除くことが必要である。硝化菌は自家栄養細菌 (autotrophs) であり、エネルギー代謝と成長のために、出発点として無機物のみを必要としている。そこでアンモニアが取り込まれ、酸化して成長のために必要なエネルギーが作られる。炭素源として二酸化炭素が使われ、それがバクテリア内部で有機炭素物質へと新陳代謝される。このプロセスにおいてもエネルギーが必要である。硝化菌は比較的種類が少なく、細菌バイオマスの全体の中での割合は小さい。

アンモニアの酸化プロセスは**硝化** (nitrification) と呼ばれ、種類の異なる二つの硝化菌グループによって行われる。最初のグループがアンモニアを酸化して**亜硝酸塩** (nitrite $-NO_2$) を生成する。最も豊富に存在する属は *Nitrosomonas* であるが、他の硝化菌種も存在している。

全体の反応は以下の通りである。



亜硝酸の硝酸塩 (nitrate NO_3^-) への酸化は、Nitrobacterその他の菌種が行う。その全体反応は以下の通りである。



このプロセスは酸素を消費し、エネルギーを生み出す目的は同じであるが、呼吸とは呼ばないことに注意すべきである。呼吸とは資化性バクテリアと、植物や動物において見られるプロセスである。(活性汚泥では、酸素摂取は従属栄養細菌による呼吸と硝化菌による酸化の両方で行われるものである。便宜上、活性汚泥の酸素摂取速度をその呼吸速度と称している。)

硝化菌による化学酸化は従属栄養細菌による呼吸プロセスの様には効率的でない。単位量当たりのエネルギーを生み出すには相対的に大量の酸素が必要である。それ故に、硝化菌は相対的により多くの酸素を必要とし、ゆっくりと成長する。

主たる新陳代謝プロセスはあたかも単一のバクテリア細胞で起こっている様に、図 13 の様に表すことができる。

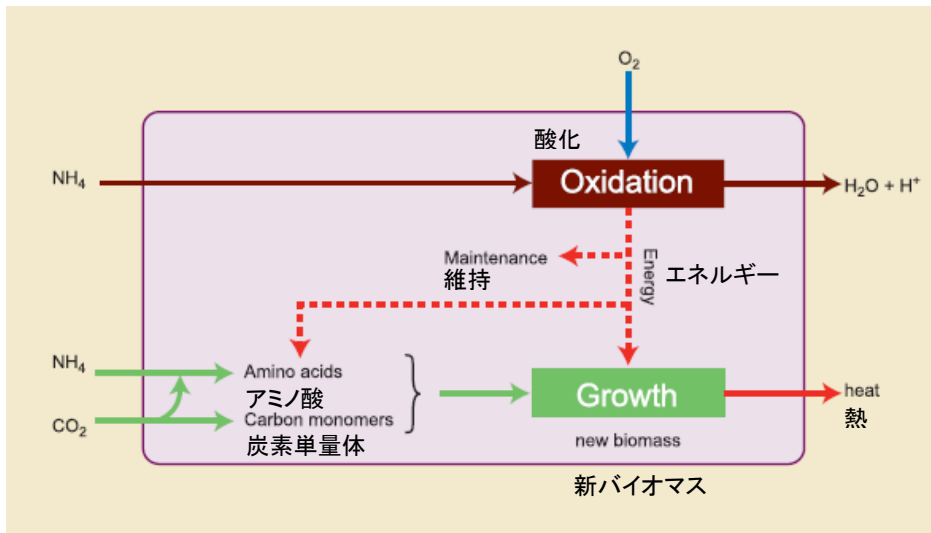


図13.

便宜上、二つのグループの硝化菌の主要プロセスをここでは一つの細胞で表している。図 4 に示した資化性バクテリアと基本的に同じであることに注意。ここでは、酸化はバクテリアによる呼吸ではなく、酸素を消費するプロセスのことである。

硝化菌は温度範囲が 8~30°Cと低いことでも特徴付けられ、15 - 20°C以下ではその新陳代謝速度は非常に低い。20°Cにおける限界酸素濃度が 2.0-2.5mgO₂/Lと高く、その成長は環境条件の変化によって変わってしまう。また、資化性バクテリアよりも毒性物質による影響を受けやすく、亜硝酸の酸化菌種はアンモニア酸化菌種よりもさらに影響されやすい。

生物処理プラントの運転

基本的な処理プラントのレイアウト

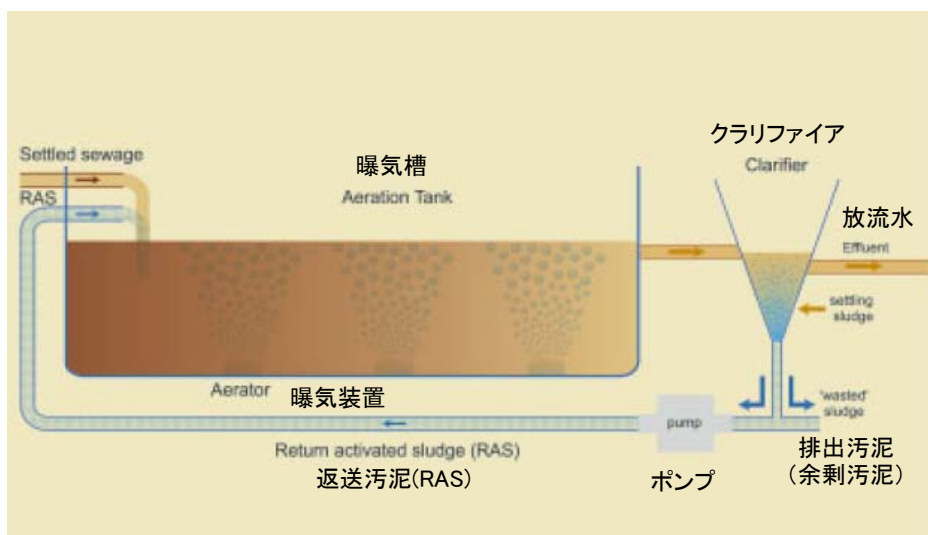
一般的に処理プラントは3つの処理段階から構成される。すなわち、1次、2次、3次処理である。1次処理はクラリファイアによる沈降分離である。排水は次いで2次処理または曝気槽に流入する。2次処理が活性汚泥バクテリアによる生物処理の主要段階である。3次処理は2次処理放流水の水質をさらに改善するためのものであり、必要に応じて窒素、磷、SSまたは病原体の除去を行う。

曝気槽の設計は数多くあり、プラグフロー式、完全混合式、浸透ろ過、回分式(SBR)、等がある。これらの中で最も簡単なものはプラグフローシステムであり、この方式により生物処理の基本原理を説明することにする。

プラグフローシステムは深さ 3-5mの長い長方形の槽で構成され、呼吸のための酸素を供給した活性汚泥を浮遊させておくための曝気装置が付属している。

図14.

プラグフロープラントのレイアウト。曝気槽を通過する間にバクテリアが成長する結果として活性汚泥量が増加する。曝気槽の出口で、クラリファイアによりスラッジを沈降させる。スラッジのある量は曝気槽入り口に返送される。残りは新たに発生したスラッジ量に応じて余剰汚泥として排出され、脱水、乾燥が行われる。



曝気槽入り口に、1次処理のクラリファイアで沈降処理した下水が流入する。また返送汚泥(RAS)もリサイクルされてくる。排水と活性汚泥が一緒になったものを**混合液**(Mixed Liquor)と呼ぶ。

流入水が曝気槽に入るにつれて活性汚泥との混合が行われる。非常に小さい粒子や分子量の物質は汚泥フロックに吸着する。同時に内生呼吸状態にある活性汚泥バクテリアが、成長のために必要とする高濃度の小分子量有機炭素と接触するようになる。成長は直ちに始まり、そのために必要なエネルギーを供給するために呼吸速度は急激に上昇する。

混合液が曝気槽に沿って流れて行くにつれて、ソフト BOD の濃度は低下し始め、バクテリアは、スラッジバクテリアが放出した酵素の作用で生成した小分子量の有機炭素化合物を餌として摂取する。これにより餌として利用可能になった基質濃度は処理の初期段階よりも低い。従って、成長速度は曝気槽のはじまりの部分よりも低く、呼吸速度もそれに相応して低くなる。プラグフローシステムの曝気槽の長さ方向における実際の処理経過は活性汚泥サンプルの呼吸速度(または固有酸素摂取速度: SOUR = Specific Oxygen Uptake Rate)を測定することによって簡単にモニターできる。

呼吸速度が低下するので、必要な曝気量も曝気槽のスタートポイントからの距離と共に低下していく。理

想的には、混合液が曝気槽終点にたどり着くまでに、流入水 BOD の 90-95%は除去されるべきである。放流点前にこの状態になれば、設備能力以下で運転していることになるし、逆に出口においてもこの状態に達していなければ、環境に大量の BOD を未処理のまま放流することになり、富栄養化を招くことになるであろう。

曝気槽での処理後に、混合液はクラリファイア(最終沈殿槽)と称される円錐形の容器を通って行く。活性汚泥はクラリファイアの底部に沈降し清澄水は処理水として出て行き、最後は放流域に放流される。曝気槽内のバクテリアの運転濃度を維持するために十分な量の活性汚泥が、返送汚泥(RAS)として曝気槽入り口に戻される。この量は通常、曝気槽を流れる流量の 25-50%である。沈降汚泥の残部は、排出汚泥(余剰汚泥)と呼ばれるが、ポンプで汲み出し、脱水、乾燥して廃棄される。

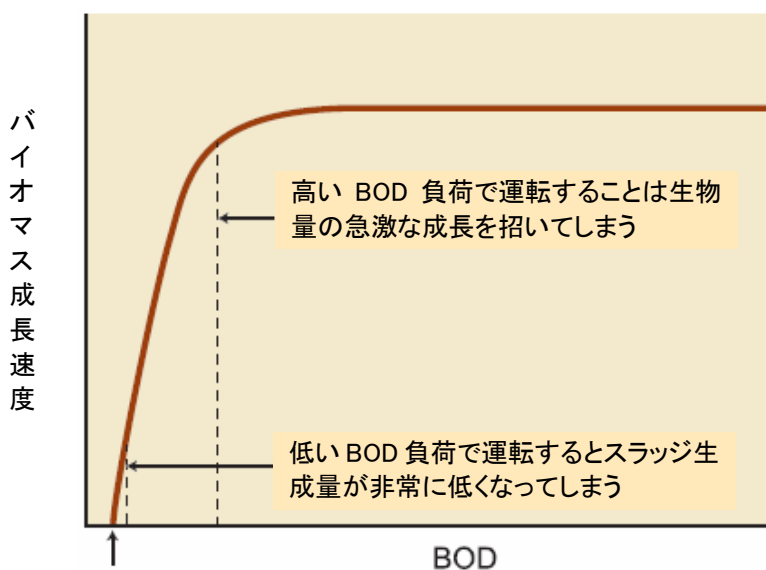
放流水と排出汚泥を足したものが、曝気槽への流入下水量に等しいことは明らかである。定常状態においては、排出される活性汚泥量が、曝気槽を通過する間に生物体の成長によって生成するスラッジの正味量に相当することになる。

処理プラントの運転

理想的な生物処理プラントは以下のような特徴を有する。

- 下水の高速処理能力
- 高い BOD 除去率
- クラリファイアでのスラッジの良好な沈降分離
- 少ないスラッジ生成量
- 最小の曝気コスト
- 良質な放流水水質—BOD、SS が低い等

実際の運転でこれらの全てを達成することは難しく、プロセスコントロールにより最適化達成のために色々な妥協が行われる。高い BOD 除去での高速処理は相対的に高い BOD 濃度(高 f/m 比—後述)を使うことで達成される。しかしながら、BOD 濃度が高くなると成長速度が速くなり、生物量またはスラッジ生成速度が高くなる(図5及び図15)。運転上は、曝気の問題を引き起こし、スラッジの沈降性が悪くなる結果になってしまう。



この BOD 負荷でバクテリアは固有呼吸状態にあり、スラッジの生成は行われな

図15.
BOD 負荷とバイオマス(生物量)成長速度の関係

スラッジの生成が多いと、脱水、乾燥、廃棄のコストが高くなってしまふ。BOD レベルを低くして(低 f/m 比—後述)プラントを運転することにより相対的なスラッジ生成量を減じることが可能である。結果として生物量の成長速度が低くなり(図15)、BOD 中の有機炭素の大部分はバクテリアが生命を維持するために使われる、つまり固有呼吸の状態になる。その結果として、BOD の大部分は二酸化炭素になってしまい、スラッジにはならない。このことが図16に示されている。

かくして低負荷システムにおいては、スラッジはほとんど生成されず、沈降性が良いという特徴を持つことになる。この運転モードのマイナス面は全体の処理時間が長くなり、それにより曝気の必要量も長くなることである。

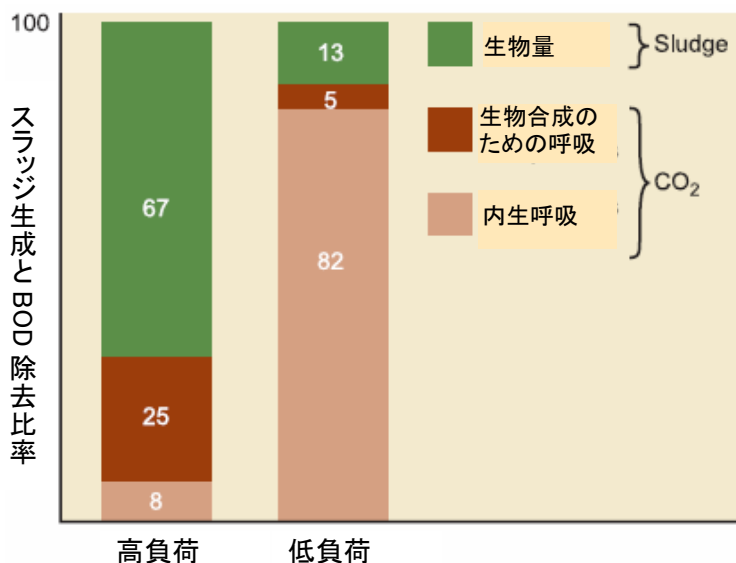


図16.

低負荷及び高負荷システムにおける、スラッジ生成及び呼吸によるCO₂として現れるBOD除去の比率。低負荷プラントでは成長速度が遅いだけでなく、スラッジに転換されるBODの相対比も非常に低い。

プロセスコントロールにおいて成長速度またはスラッジの生成速度と、BOD の間におけるこれらの関係を巧みに操作することによって、生物処理プラントは3つの主なタイプに分かれる。

- 高速 製薬や乳業の排水の様に高 BOD 排水の前処理または部分処理
- 通常 中速、ほとんどの公共処理場の特性
- 低速 低BOD 負荷、小規模な拡大曝気法の処理場及び大きな土地面積を必要とするラグーンでの特性

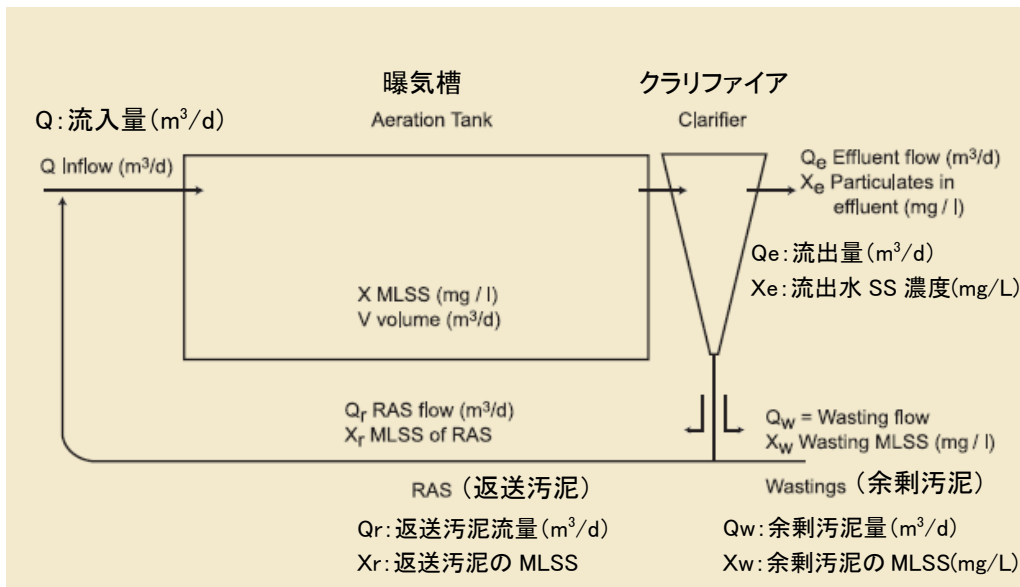
これらのタイプが異なるプラントのプロセス特性は後にまとめてある(表1)が、先ず、主なプロセス変数について見ていこう。

生物処理プロセスのコントロールに使われるプロセス変数

小規模な公共下水処理場においては、組成と流量におけるわずかな変化だけが下水受け入れ時の変化であるところもある。その様なところでは、プロセスコントロールを自動化して、現場での直接的な管理をほとんど必要としない様にする事が出来る。それとは対照的に大規模な処理場、特に多くの排水源からの工業排水を処理している処理場では、曝気槽での生物活動を管理するために、絶えず怠りのないコントロールが必要である。以降のセクションでは、排水処理のコントロールに一般的に使われるプロセス変数について述べる。これらのプロセス変数とは、スラッジ量の測定、処理の所用時間とシステム内での滞留時間、及び活性汚泥量に対する流入水 BOD 濃度の比である。

これらの変数に対する基礎式を適用するために、単純プラグフローのシステムを図17の様に図示することにする。

図17.
プロセスの諸式
に使われる変数
の記号表示



曝気槽混合液浮遊物 (MLSS: Mixed Liquor Suspended Solids)

良く運転されているプラントにおいては、大部分のバクテリアバイオマス(バクテリア生物量)は活性汚泥フロックと一体になっている。浮遊物(SS)サンプルをろ過・乾燥し、乾燥残留物の重量を測ることによって生物量の測定値が得られる。それは **MLSS** と呼ばれ、mg/L の単位で表されている。しかしながら、或る環境条件下においては、MLSS の大部分が無機物であることがある。このために、プロセスエンジニアはスラッジ中の有機物重量を導き出したいと考える。このためには、500°Cの炉の中で乾燥残留物を燃焼し、重量を再度測り、その値との差から揮発性有機物量を得ることができる。この値は、**MLVSS** (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids = 混合液有機性浮遊物) と呼ばれている。しかしこの重量測定方法でも、フロックの大部分は不活性の有機物で成り立っているため、活動している微生物バイオマスの測定には不正確である。

短所はあるけれども、MLSS は微生物量の測定に、プロセスコントロールにおいて普遍的に使われている。MLSS 値の範囲は、拡大曝気法や他の低速システムにおける 800–1,500mg/L から、高速システムにおける約 8,000mg/L またはそれ以上に渡っている。活性汚泥混合液中に生物が多ければ多いほど、BOD の摂取は速くなるので、MLSS を増加させることによって処理効率も高くなると、直観的に理解されるであろう。しかしながら、MLSS 濃度が高いと、曝気における問題や、クラリファイアでのスラッジ沈降に問題が出てくる。

滞留時間または容積負荷

これは流入下水が曝気槽に滞留する平均時間のことである。曝気槽容積 V (m³) を流入量 Q で割ることで求まる。流量 Q は通常 m³/D で表されるので、滞留時間 HRT は通常、時間 (H) で表され、式は、

$$HRT = \frac{V}{Q} \times 24 \text{ hours}$$

流入量 Q が多いほど、流入した下水は曝気槽出口に速く到達するので、滞留時間は短くなる。活性汚泥混合液から BOD を必要なだけ取り除くためには滞留時間は十分に長くなければならない。従来の活性汚泥システムにおいて、滞留時間 HRT は 5～14 時間である。プロセスエンジニアにとって HRT はほとんどコントロールできるものではなく、大雨で流入量 Q が増加した場合、実際の滞留時間は 1 時間ほどにも短くなってしまふことがある。

汚泥滞留時間 (SRT: Sludge Residence Time) または汚泥日齢 (sludge age)

汚泥日齢とは、微生物がシステム内に滞留する平均時間のことである。システム内の MLSS 全量を、毎日、

余剰汚泥及び放流水の中で失われていくMLSSで割ることで計算できる。すなわち、

$$\text{汚泥日齢} = \frac{\text{曝気槽容積} \text{m}^3 \times \text{MLSS} \text{ mg/L}}{\text{余剰汚泥流} \text{ m}^3/\text{D} \times \text{余剰汚泥の MLSS} \text{ mg/L} + \text{放流水流量} \text{ m}^3/\text{D} \times \text{放流水 SS} \text{ mg/L}}$$

または前記の記号を使えば、

$$\text{SRTまたは} t_e = \frac{V \cdot X}{Q_w \cdot X_w + Q_e \cdot X_e} \quad (\text{日})$$

返送汚泥のMLSSは計算に含まれていない。定常状態では上式の分母の値は毎日の正味スラッジ生成量になることに注意。活性汚泥が急速に成長した結果として、この分母の値が大きくなれば、汚泥日齢は低くなる。逆にスラッジ生成が非常に少なければ、これは例えば餌(food)対生物量(biomass)の比(f/m比)を非常に低くする場合であるが(後述)、スラッジは返送汚泥として何回もリサイクルされるのでシステム中のスラッジの平均日齢は増加することになる。

汚泥日齢の値は、高速システムにおける0.5日以下から、拡大曝気システムの様な低成長速度システムにおける75日位まで変化する。通常のプラントでは、SRTは通常3~4日の間である。スラッジの沈降性はSRTと関係している。SRT値が低いとスラッジの凝集性が悪くなり、沈降性が悪い特徴を持つことになる。

汚泥負荷(Sludge Loading)または f/m 比

生物量の成長速度、および呼吸速度(つまり、バクテリアが摂食することによるBOD除去速度)は、図5と図10に示される様にBOD負荷の増加と共に上昇する。しかしながら曝気槽でのBOD除去率は汚泥バイオマス(汚泥生物量)とも関係を持っている。生物量が多いほど、BOD除去速度も速くなる。単位生物量当たりの利用可能な餌の量を測るためには、BOD値をMLSSで割れば良い。得られた値がいわゆる**汚泥負荷**(sludge loading)であり、もっと一般的にf/m比またはfood(餌)/微生物(microorganism)比と呼ばれる。餌(food=BOD)の微生物量に対する比率が上昇するにつれて、BOD除去速度、成長速度、呼吸速度も上昇する。

f/m比は、その値を変えてプラントを運転するとその結果が予測出来るので、処理プラントの管理者にとって便利な値である。この値は毎日のBOD流入量を曝気槽内の全MLSSで割ることによって求まる。つまり、

$$f/m = \frac{\text{BOD} \text{ (g/L)} \times \text{流量} \text{ (m}^3/\text{日)}}{\text{MLSS} \text{ (g/L)} \times \text{曝気槽容積} \text{ (m}^3)} \quad (\text{gO}_2/\text{gMLSS}/\text{日})$$

または前記の記号を使って、

$$f/m = \frac{\text{BOD} \times Q}{X \times V}$$

活性汚泥バクテリアが餌として利用可能な有機炭素量を表すのにBODを用いている訳であるが、酸素の単位を使うことは多少紛らわしい。

f/m比の値の範囲は、およそ0.5から1.0にわたる。従来のプラントでは、通常f/m比として0.2と0.5の間を目指している。値が高いと、処理速度が高くなるが、スラッジの沈降性が悪くなるという犠牲を伴う。0.2以下のf/m比ではBOD除去速度が低下するが、スラッジの沈降性は非常に良い(次ページの表参照)。

汚泥負荷を測る別のやり方は、瞬時f/m比または、 BOD_{ST}/B である。ここにBはMLSSのことである。これは曝気槽のどの様な場所においても負荷を測定する方法である。グラブサンプルにより容易に測定出来、曝気槽長手方向の種々のポイントで、処理の進行度指標として使うことが出来る。まだ一般的に使われ

ているものではない。これは多分、 BOD_{ST} を迅速かつ効果的に測定する方法が不足しているためである。しかしながら、Strathtoxの様な迅速測定呼吸計があれば、この様な管理ツールはもっと広く行き渡る様になるであろう。

プロセス変数の比較 — 処理プラントのタイプの違い

前に示した様に、プラグフローの処理プラントは主に3つのタイプに分けることが出来、それぞれ、異なったプロセス変数の在り方によって特徴付けられる。これらの違いを以下の表1にまとめた。

表1

処理速度	滞留時間 HRT(h)	汚泥日齢 (日)	汚泥負荷(f/m) Kg BOD/Kg MLSS/D	汚泥生成量 汚泥 Kg/除去 BOD Kg
従来型	5 - 14	3 - 4	0.2 - 0.5	0.5 - 0.8
高速	1 - 2	0.2 - 0.5	> 1.0	0.8 - 1.0
低速	24 - 72	> 5 - 6	< 0.1	< 0.4

(出典: "Biology of Wastewater Treatment" by N.F. Gray, 2004)

沈降性の問題

上述した通り、高速処理ではしばしば沈降性が問題になり、低速処理においてはその逆も真である。沈降性は給餌のアンバランス、活性汚泥のバクテリア構成の変化及び汚泥混合液における毒性物質の存在により影響を受ける。クラリファイアでのスラッジの沈降性は **SVI**(Sludge Volume Index = **汚泥容量指標**)により表される。SVIとは、MLSS 1gを標準的な1Lメスシリンダーに入れて30分間静置した時のスラッジ容積をmLの単位で表したものである。これに変わる方法として **SSVI**(Sludge Specific Volume Index = **汚泥比容量指標**)があるが、これはクラリファイアでは静止する状態がないことを模倣するために、弱い水平方向攪拌が行われる様にした特別設計のメスシリンダーでスラッジ容積を測定するものである。

従来の沈降性の良い活性汚泥においては、フロックはしばしば糸状菌の繊維で形作られるコア(中核)構造を持っている。しかしながら、この繊維は成長してフロックの外側に飛び出してくる(図3参照)。この成長が続けば、隣のフロックとの間に橋が渡され(図18参照)、フロック個々の動きが妨害されることになる。逆に、繊維状構造を持たないフロックは曝気の乱流が引き起こす剪断力によってより小さいフロックへと壊れて行く。目では分かりにくい細胞外液の重合体物質によって、バクテリアが球状の群れを形成する場合もある。最後にはある環境下において、フロックは形成されず、バクテリアは別々の個々の細胞として存在するか、非常に小さい塊にしかならない。フロックの形状の違いが、様々な沈降性の問題に関わって来るのである。

解膠(Deflocculation) これはバクテリアがフロックを形成出来ないこと、または曝気の強度な乱流によってフロックが破壊されることで起きる。沈降性は最悪で、結果としてほとんど清澄化されない。このため放流水の濁度は上がり、SS濃度規制に適合しなくなる。もう一つの問題は、バクテリアが連続的に放流されるので、汚泥を返送することによって曝気槽のMLSSレベルを維持することが出来なくなることである。この状況は時間がたてばf/m比の上昇という結果になる。

解膠は曝気が不十分で、溶存酸素濃度が低くなることで起き、また汚泥負荷が高い時に起きる。これら二つの要因は、曝気の管理が良く行われていない場合に同時に起きるものである。また低pHや流入水に或る種の毒性物質が存在する場合に起きる。

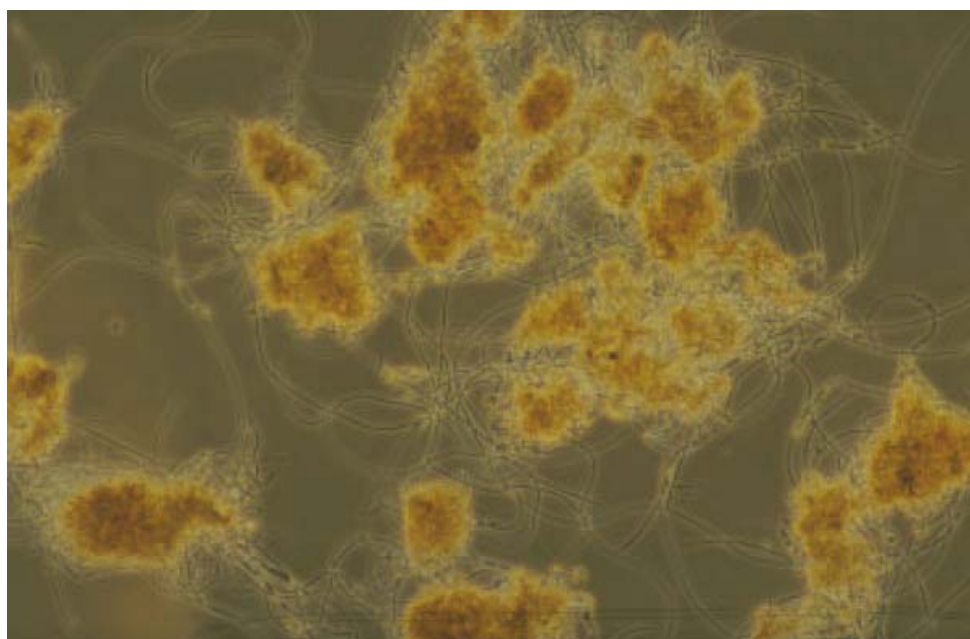
ピンポイントフロック 非常に小さくて緻密なフロック。お互いを結合するための細胞外液重合体物質(Extracellular Polymeric Substance = EPS)をほとんど持っていないので、曝気剪断力によって、成長するにつれてより小さい単位に壊れて行ってしまう。この様なスラッジは沈降性が悪く、放流水によって生物体が失われ、曝気槽のMLSS維持が困難になることは避けられない事態となる。この様なスラッジ生成は長い処理時間と関係している。すなわち、汚泥日齢が5~6日以上で、f/m比が非常に低い拡大曝気システ

ムにおいて現れるが、化学や医薬品排水を処理している高速プラントにおいても現れる。この様なプラントでは、フロック生成を助ける糸状菌の成長が毒性物質によって阻害されると考えられている。

泡立ちとムース(白色泡)の形成 泡成ちは排水中に非分解性の洗剤がある場合に起きることがある。この場合は、明るく泡立つ泡が出来る。しかしもっと扱いにくいタイプの泡成ちは、通常ムースと呼ばれ、別の原因で出来る。ノカルジア属(genus *Nocardia*)の糸状菌(filamentous fungal)の菌糸(hyphae)が、泡を結合して緻密な層にしてしまう。これが活性汚泥フロックを捕捉する。かくして泡成ちにより、返送汚泥から MLSS が失われてしまう。この問題を解決する一般的な方法は、排出スラッジ(余剰汚泥)の流量を増やして、その結果としてノカルジア属を系外に洗い流し、汚泥日齢を減少させることである。スカムトラップは、通常、大量に生成した泡に対処することが出来ず、消泡剤処理や表面塩素処理が時として行われている。

図18.

糸状性バルキングを示す活性汚泥の顕微鏡写真。糸状菌がフロックから外に成長し隣のフロックに橋を渡している。



糸状性バルキング これは、糸状菌が成長してフロックの外側に拡大し、隣り合うフロックからの菌糸と絡み合う様になるときに起きる。菌糸の編み目構造はフィルターとして作用し、小さい粒子を捕捉し、その結果放流水は非常に清澄なものになる。しかしながら、大きくなったフロックは沈降性が悪く、また沈降したフロックは緻密でなく、散らばり易い。その結果、クラリファイア底部でのスラッジブランケットのレベルは上方に向かって拡大し、フロックが放流水の中に流れ込むことになってしまう。クラリファイアでのスラッジ密度が低いことは返送汚泥の MLSS が低くなる結果となる。

糸状性バルキングは、プロセス変数の変化と関係していることがある。これらの変数には汚泥負荷、栄養剤濃度、及び酸素濃度が含まれる。一般に、糸状菌はフロックバクテリアよりも BOD 摂取速度が低く、また成長速度が低い。しかしながら、糸状菌はまた基質濃度とも深い関係を持っている(図6参照)。そのことは、基質濃度が低いまたは f/m 比が低い状態ではフロックを生成するバクテリアに打ち勝つことが出来ることを意味する。理想的には、汚泥負荷は、 f/m 比として $0.2 \sim 0.45 \text{ Kg BOD/Kg MLSS/day}$ の範囲にあるべきである。このことは流入水量、流入水 BOD または MLSS 濃度を変えることによって管理することが出来る。プロセスエンジニアが出来るのは後者のことだけであり、スラッジの排出量(余剰汚泥)を変えることにより達成できる。

前述した様に、理想的な BOD:N:P は 100:5:1 である。N や P が欠けていると、糸状菌はフロック生成バクテリアよりも良く成長する。醸造業や食品プロセスから排出される様な高炭水化物排水は特に汚泥バルキングを起こしやすく、これは給餌のアンバランスによるものである。この状態を改善するには、呼吸計を

用いて汚泥の呼吸速度を最大にするために必要な栄養剤の添加レベルを検討評価し、曝気槽入り口で必要な栄養剤を添加することが可能である。

酸素濃度が低い場合も糸状菌は成長しやすい。これは糸状菌が酸素に対してより深い関係を持っているからである。この様な形のバルキングは、曝気管理を良好に行うと共に、迅速閉鎖室型呼吸計を使って、活性汚泥にとっての限界酸素濃度を正確に決定する(図 11)ことによって防止出来る。

米国で行われた研究によれば、021N 型バクテリアによって起こされたバルキング事例の 80%は、工業排水の処理に関わっており、このことはこのバクテリアがある種の毒性物質に対する耐性が大きいことを示すものである。

バルキングのコントロールは、原因が分かっているプロセスの変量を変えることによって行うことが出来る。しかしながら、多くの場合に、プロセスエンジニアは糸状菌を選択的に殺すために、返送汚泥流や曝気槽での塩素処理を行おうとするであろう。汚泥の沈降性の改善は、石灰や鉄塩、有機合成物を添加することでも試みることが出来る。

結論

排水処理は主として、有機炭素あるいはBODの生物分解を主題としている。これは排水処理場の曝気槽で、従属栄養細菌または資化性バクテリアが行うことである。これらのバクテリアは汚泥混合液から有機炭素成分を摂取し、つまり取り除き、それを呼吸または新たな生物体の成長のために使用する。

摂取、呼吸及び成長という3つのプロセスは密接に関わっている。呼吸速度を測定することにより、間接的に生物分解や生物量の成長速度を測定することになる。

この事の帰結として、「呼吸」を排水処理プラントにおいて以下の様なアプリケーションの管理ツールとして使うことが出来る。

- 資化能力： 汚泥バクテリアにより単位時間にどれ位の BOD を除去することが出来るか？
- 硝化能力： プラントはどれ位のアンモニアを取り扱うことが出来るか？
- 給餌の必要性： 呼吸最大、従って生物分解速度最大にするにはどれ位の餌を与えなければならないか？
- 生物増加： 培養菌を添加すれば生物分解の速度と効率が良くなるか？
- 短時間 BOD： 容易に生物分解可能な BOD が流入下水にどれ位含まれるか？
- 毒性管理： 工業排水がどの程度、呼吸と生物分解速度を阻害するか？
- 活性汚泥の健康： 呼吸速度とプラント効率は汚泥混合液中の毒性物質と折り合っているか？
- 活動している生物量： MLSS のどれ位の割合が生きて成長できる生物体か？
- 限界酸素濃度： 呼吸や生物分解速度が阻害され、糸状性バルキングが増加しないように維持されるべき酸素濃度の限界はどの位か？

これらのアプリケーションの多くが、これまで日常的に、プロセス管理において使われてきている訳ではない。Strathtox の様な新世代の呼吸計の出現により、今やプロセスコントロールの最適化によって排水処理のコストを大きく低減させることが出来るようになった。

謝辞

以下の方々から本稿へのコメントを頂いたことに謝意を表す。

Karen Uprichard, Jim Reid, Michael Dooley, Martin Burns, Ken Diamond, Jeff Simpson, Ray Kenny, Nick Grey.
本稿のどの様な点についても議論されたい場合は、以下のアドレスに連絡されたい。

psd@strathkelvin.com

Peter Spencer Davies

Director, Strathkelvin Instruments Ltd.

日本語版翻訳： セントラル科学株式会社（〒113-0033 東京都文京区本郷 3-23-14 ショウエイビル）
翻訳初版／2009年10月14日 改訂1版／2010年11月26日（無断転載を禁ずる）

Strathkelvin Instruments Ltd.
1.05 Kelvin Campus, West of Scotland Science Park
Glasgow G20 OSP, UK
Telephone: 0141 942 3704
Web: www.strathkelvin.com

国内輸入総代理店
セントラル科学株式会社
〒113-0033
東京都文京区本郷 3-23-14 ショウエイビル
TEL: 03-3812-9186
FAX: 03-3814-7538
Web: www.aqua-ckc.jp