

N-12 下水処理エネルギー効率改善のための 微生物の有機物一時貯蔵能力の活用

○佐藤弘泰^{*}、Huda Syed Mohammad Shamsul、石維、味埜俊
東京大学大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

^{*} E-mail: hiroyasu@k.u-tokyo.ac.jp

1 はじめに

これまで環境改善のためにはそれなりのエネルギーと資源を投入すべきであると考えられてきた。その一方、世界のエネルギー事情はますます厳しくなりつつある。我が国では電力消費量の約 0.7% が下水処理のために用いられており、そのほぼ半分を活性汚泥法における曝気のための動力が占める。省エネルギーを進めるために、散気装置を改良したり DO 制御を組み込んだり、さまざまな工夫がなされている。微生物の機能を利用してエネルギー効率を改善しようという研究も多く、特に窒素除去と関連させての研究は *annamox* 反応を利用しようという物まで含めて幅広く展開されている。

しかしその一方、我が国では直接太平洋や日本海のような閉鎖性の低い水域に処理水を放流する場合も多く、栄養塩の除去は必ずしも必要ではない場合も多い。そうした栄養塩除去が必ずしも必要ではない下水処理場でのエネルギー効率を改善するために、微生物のもつ機能を活用する余地はないのであろうか。

著者らの研究グループは微生物が一時的な形態で有機物を細胞内に貯蔵する能力について研究を行ってきた。初期にはポリリン酸蓄積細菌の生理生態と関連しての研究であったが、その後、生物分解性プラスチックの生産を模索した時期もあった。そして今日、下水処理場の BOD 除去におけるエネルギー効率を改善するために、微生物のもつ有機物一時貯蔵能力を活用しようという方向で研究に取り組んでいる。

本稿では、下水処理におけるエネルギー効率を改善するために、微生物のもつ一時貯蔵能力をどのように活用しうるのか、可能性を考える。

2. 微生物のもつ有機物一時貯蔵能力と有機物除去

本論に入る前に、有機物一時貯蔵能力について触れておく。下廃水と活性汚泥を混合し、曝気をする、活性汚泥中の微生物が下廃水中の有機物を摂取し増殖ために利用する。その際、どちらかというとも有機物が利用されるよりも、摂取される反応の方が

先立って行われる事が多い。例えば、活性汚泥に好気条件下で酢酸を投与すると、酢酸の多くが一旦ポリ-β-ヒドロキシ酪酸 (PHB) に変換され微生物細胞内に蓄積され、さらに曝気を継続すると細胞内の PHB はやがて消失する。

なぜ PHB のような一時貯蔵物質が生成される場合があるのか、いくつかの説がある。一つは、基質濃度が変動するような環境下で、タンパク質や核酸等の細胞構成成分の合成速度を一定に保つためであるという説である¹⁾。一方、細胞構成成分のような複雑なものを合成するには時間がかかる。そこで、まずは速やかに有機物を摂取し、本格的に利用するまでの間、一時的な貯蔵形態で細胞内にためておく、という説明ももっともらしく聞こえる。特に、活性汚泥中の微生物にとっては下廃水中の有機物は大切なエネルギー源であり、その獲得をめぐる競争は熾烈であろうと想像される。

活性汚泥中の微生物による有機物の一時貯蔵現象は、古くから知られていたと思われるが、特に生物学的リン除去プロセスの原理機構との関連で注目された。生物学的リン除去プロセスでは活性汚泥中の微生物によって嫌気条件下で有機物が摂取されるが、その際、微生物は摂取した有機物を酸化的に利用する事はできない。そこで、摂取された有機物のほとんどは、好気条件になるまで一時貯蔵物質として細胞内に貯蔵されることとなる²⁾。また、一時貯蔵物質の中でも PHB をはじめとするポリヒドロキシアルカン酸類 (PHA) は生分解性プラスチックの原料としても知られている。活性汚泥中の PHA 蓄積細菌を活用し、プラスチックの生産を目指そうという研究も多々行われている³⁾。

その一方、標準活性汚泥法のような通常の活性汚泥法においてみられる好気条件下での有機物一時貯蔵現象については、国際水協会(IWA)活性汚泥モデル No.3 には組み込まれているものの、理解を深めて活用しようという研究はそれほど多くない。しかし、押木ら⁴⁾は活性汚泥プロセスに流入する COD の最大 4 割程度は一時貯蔵あるいはそれに関連する代謝を経て除去されるとの結果を発表している。

通常、活性汚泥法での有機物除去の仕組みは、次

のように説明される事が多い。即ち、「有機物は微生物が行う異化代謝と同化代謝により除去される。異化代謝では有機物は酸化剤によって水と二酸化炭素にまで分解され、その際微生物はエネルギーを得る。微生物はそのエネルギーを用いて残りの有機物を自身の細胞成分に同化する。微生物の増殖分は活性汚泥中の微生物によって同化され、やがて余剰汚泥となる」。こうした説明に、「微生物は摂取した有機物の一部を異化代謝・同化代謝により用いるまで、PHAのような一時的な貯蔵物質として蓄積する場合がある。」という但し書きを加えた方が、実態に近くなる。

3. 有機物一時貯蔵能力の活用案

以下、微生物のもつ有機物一時貯蔵能力を、下水処理のエネルギー効率を改善するために活用する方向について、いくつか提案する。効果のある程度具体的に示した方がよいと思うので、次のような仮定をおいた上で話しを進めたい。

代表的な一時貯蔵有機物である PHA が活性汚泥中に蓄積される量であるが、Takabatake et al.⁹⁾は実際の下水処理場の活性汚泥に好気条件下で過剰量の酢酸を投与し培養を行い、一時間あたり MLSS の 2～3%程度(最小 0.4%、最大 4.9%)に相当する量の PHB が蓄積された事、また、PHB の蓄積は過剰摂取開始から数時間はほぼ一定の速度で進行したことを報告している。また、彼らは MLSS に対して最大 29.5%の PHA 含有率を達成している。こうしたことを考えると、MLSS に対して 5%～10%程度の PHB 等の一時貯蔵物質を蓄積させる事は十分可能であるといえよう。

MLSS の 5～10%程度という数字は一見小さく見えるかもしれない。しかし、活性汚泥が一日あたり処理している有機物の量と比べてみよう。BOD/SS 負荷として通常用いられているのは 0.2～0.4kg/kg/d である。つまり、活性汚泥が一日に処理する BOD の量は、その VSS 量の 20～40%に相当する量である。PHB 1kg の理論的酸素要求量は 1.67kg に相当する。BOD は多くの場合理論的酸素要求量の 3割～5割程度であろうと仮定すると、PHB1kg は BOD としては 0.7～0.8kg 前後に相当することとなる。

簡単のため、MLSS の 10%に相当する一時貯蔵物質(主として PHB)を蓄積させる場合についてさらに考察を進める。MLVSS あたりに換算すると、蓄積は 11～12%程度ということになる。そこに 0.7～0.8kgBOD/kgPHB をかけると、活性汚泥が蓄積することのできる BOD 量は VSS の 10%弱ということになる。すなわち、活性汚泥が一日に処理している

BOD 量の 1/4～半分程度に相当する量の BOD を、活性汚泥微生物に一時貯蔵させる事が可能であるとわかる。しかも、そのためにかかる時間は、数時間に過ぎない。

(1) 電力消費シフトへの活用

電力消費量が大きき日中は、下水処理場では曝気を控えめにする。少しぐらい曝気量を減らしても、活性汚泥中の微生物が蓄積している一時貯蔵物質の量が増えるだけで、案外処理水の BOD は変化しないのではないかと著者らは期待している。先に述べたように、活性汚泥が一日に処理している BOD の数分の一に相当する量を微生物に一時貯蔵させることができるとするならば、夏場一番暑い時期の一番暑い時間帯に曝気を意図的に少し減らすような事(その分酸化的に除去するのではなく微生物に一時貯蔵させて除去する)はできるであろう。また、日中曝気を減らした分、安価な夜間電力を使って曝気を補うようなことを行えば、水処理全体として経費節減につながる。

さらに、将来、太陽光や風力のような自然エネルギーへの依存度をもっと高まった場合はどうだろうか? 天気予報を見ながら、あるいは降雨監視用のレーダーを見ながら、「もう少しまったら天気がよくなるから(強い風が吹くから)、今は曝気を控えめにしておこう」というような制御をする時代が来るのではないだろうか。

硝化を一日中十分に行わなければならない場合や生物学的リン除去を行っている場合には、上記の発想は適用しにくいであろうが、放流先が閉鎖性の低い海域である場合には十分に試みる価値があるのではないかと。また、最終沈殿池で汚泥が脱窒をして浮上しやすくなる事が予想されるし、曝気を減らした時間帯、処理水中の細菌濃度もやや上昇するかもしれない。

また、一時貯蔵物質を蓄積させた状態で呼吸を制限するような運転を長期間継続すると、低濃度の基質(酸素や汚泥からにじみ出てくるような低濃度の有機物)を利用する能力に長けた糸状性微生物が増殖しやすくなるかもしれない。

そうした欠点はあるものの、将来のエネルギー事情を想像すれば、探求するに値する技術であろうと思う。

(2) FAREWEL プロセス

通常余剰汚泥は最終沈殿池から採取引き抜かれている。余剰汚泥は曝気槽で十分に曝気されたあとに引き抜かれることになるので飢餓に近い状態にあり、

利用可能な有機物と接触すれば速やかに一時貯蔵物質を合成する能力をもつと考えられる。著者らが提唱している FAREWEL プロセス (Final Aeriation of Excess sludge With an Excess Loading) あるいは FAREWEL 反応は、余剰汚泥を汚泥処理系に送る前に下廃水と共に短時間反応させ下廃水中の有機物を一時貯蔵物質として除去することで、曝気のための動力を低減するとともに、バイオマスエネルギー資源として回収しようというものである⁶⁾。

ケーススタディーを考える。生物反応槽への流入有機物からの汚泥発生の収率を簡単のため COD_{Cr} ベースで 0.5 とする。この場合、1kg の COD_{Cr} を処理すると、0.5kg の酸素が微生物によって消費され、また、COD_{Cr} として 0.5kg の余剰汚泥が発生することとなる。COD_{Cr} として 0.5kg の余剰汚泥は VSS 量としては 0.36(=0.5/1.4)kg にあたる。

一方、FAREWEL 反応において、この余剰汚泥に 0.2kgCOD_{Cr} の有機物を投与し、曝気して反応させ、概ね上清の有機物が除去されたところで反応を止めるものとする。一部の有機物は酸素によって酸化分解されるが、通常の活性汚泥プロセスの場合よりも無機化される分は少なくすむ。仮に 3 割が無機化され、残り 7 割が一時貯蔵物質になるとしよう。その場合、0.06kg の酸素が消費され、また、約 0.14kgCOD_{Cr} に相当する一時貯蔵物質が余剰汚泥に蓄積される事となる。つまり、この場合、汚泥量の 28% に相当する一時貯蔵物質が蓄積されたということになる。先に触れた Takabatake ら⁵⁾の報告と比べると、やや虫の良い方の想定である。なお、この際の酸素消費量は 0.06kg である。

上記の場合における酸素消費の削減効果を計算する。処理された COD_{Cr} の量は、全部で 1.2kg。通常の活性汚泥法でこの量の COD_{Cr} を処理しようとする、0.6kg の酸素が消費される。一方、FAREWEL 反応を導入した場合に消費された酸素量は、通常の活性汚泥法での 0.5kg と FAREWEL 反応での消費量 0.06kg の合計、即ち 0.56kg である。従って、削減効果は 7%弱である。

同様の計算によって、回収されるバイオマスの量は 7%ほど増加するとの結果を得ることができる。なお、Huda ら⁷⁾は活性汚泥によって蓄積された PHB の約 3/4 は嫌気性消化の際に速やかに分解され酢酸を経てメタンガスに変換される事を報告している。少なくとも PHB に関しては、通常の余剰汚泥バイオマスよりもよりもメタンに転換しやすい。

曝気動力として例えば 200Whr/m³ 使用しているような場合、1m³ あたりの水処理にかかる曝気エネルギーを 14Whr 削減することができる。一方、余分に

回収されるバイオマス量は、初沈越流水の COD_{Cr} を仮に 400g/m³ とすると、10g/m³ ほど増加するだけであるが、エネルギー量としては 37kCal/m³ (43Whr/m³) ほどとなり、あわせればそこそこの量である。

(3) コンタクトスタビライゼーション法

コンタクトスタビライゼーション法そのものは以前から存在する技術ではあるが、処理水質にやや不安があるためか、我が国では適用例はあまり多くないようである。コンタクトスタビライゼーション法では、処理対象の水と活性汚泥を混合しての曝気はごく短時間ですませ、その後汚泥と処理水をすぐに分離してしまう。そして、汚泥中に蓄積されている一時貯蔵物質を、汚泥返送系においてゆっくり分解する。曝気槽の容積を小さくできる事、また、曝気する液体の体積が小さくてすむので曝気のための動力費を低減できる事がメリットである。また、やりようによっては既存の施設をわずかに改造するだけで実施することができる。

東日本大震災で津波被災した下水処理場の二次処理能力を復旧させる過程で、あるいは被災地で人口分布が急に変化し下水量が増加し処理能力の限界に近づいたような場合に、あるいは、最終処分が何らかの理由で困難となってしまった汚泥を処理場内に保管する空間を確保するために、コンタクトスタビライゼーション法は選択肢の一つとして考える価値があろう。

(4) 散水ろ床法や DHS 法と組み合わせて

散水ろ床法や DHS 法は、曝気動力を削減するためには非常に効果的である。散水装置が回転しながら下水を供給するため、通常でもろ床やスポンジは有機物を含む下水と酸素を含む空気に交互にさらされる事となる。とはいえ、その間隔はごく短いのが通常である。一時貯蔵を行う微生物が存在する事を頭におくと、やや高濃度の廃水を短時間散水し、その後数時間ろ床・スポンジを休ませるような運転の仕方ができないかと思う。

参考文献：

- 1) van Loosdrecht et al. (1997) *Water Science and Technology*, 35(1),41-47.
- 2) Mino et al. (1998) *Wat. Res.*, 32, 3193-3207.
- 3) Jiang et al. (2011) *The ISME Journal*, 5, 896-906.
- 4) 押木守ら(2009) 下水道協会誌. 46(566). 126-137.
- 5) Takabatake et al. (2002) *Wat. Sci. Tech.*, 45(12), 119-126.
- 6) 押木 守ら(2009) 用水と廃水 51(9): 41-49.
- 7) Huda et al. (2011) to be presented at 4th ASPIRE.