生物学的磷除去法の基礎的操作因子*

津 野 洋

1. 概 論

活性汚泥による廃水処理過程において、活性汚泥を嫌気 (anaerobic) 条件及び好気 (oxic) 条件に交互にさらすという操作を行うことにより、通常の活性汚泥より高い磷含有率 (過常の活性汚泥では1.5~2.0%P/MLSS) の活性汚泥が生成する。この磷高含有汚泥は、嫌気条件下では磷を放出し、好気条件下ではより多くの磷を摂取して、結果的には通常の活性汚泥法操作におけるより多くの磷を媒体中より除去する。また嫌気及び好気の両条件下において、有機物を媒体中より除去する。これらの現象を利用して、廃水中の磷を有機物と同時に除去しようとするのが生物学的磷除去法である。

生物学的磷除去法は、原理的に大別すると図1に示すA方式とB方式がある。A方式は、汚泥と基質の混合後一定時間嫌気条件にして磷を放出させ、続く好気条件下で多量の磷を摂取させる方式である。この場合、この水処理系に流入した磷は放流水中で流出する量以外は引抜汚泥中の磷として系外に取り除かれる。したがって、磷除去が安定して良好に行われている場合には、除去磷量 $\Delta P(\text{mg})$ は次式で示される。

$$\Delta P \div P_x \cdot Y \cdot \Delta \text{BOD} \quad (1)$$

ここで、 P_x ；汚泥中の磷含有率 (mgP/mgMLSS)

Y ；汚泥生成係数 (mg 増加 MLSS/mg 除去 BOD)

ΔBOD ；除去 BOD 量 (mg)

B方式は、返送汚泥の一部あるいは全部を磷溶離槽で嫌気条件下にさらして、基本的には内生呼吸のもと

図1 生物学的磷除去システム

に磷を放出させた後、この汚泥をばう気槽に返送し、好気条件下で多量の磷を摂取させるものである。この方式では、溶離槽で放出された磷は凝集沈殿処理により除去され、一面では物理化学処理の併用とも考えられる。この場合、廃水の流入から流出までの間の磷の水処理系外への除去量は、A方式でのそれに更に次式で示される量加わる。

$$\Delta P \div P_x \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \text{MLSS} \quad (2)$$

ここで、 α ：汚泥中の磷のうち溶離槽で放出される割合

β ：返送汚泥のうち溶離槽に回される割合

生物学的磷除去法の基本的操作因子としては、上述のことより、磷高含有汚泥をいかに集積培養しうるか、及びこの汚泥をいかに磷除去のために活躍させようかということに関連するものが考えられる。生物学的磷除去法における主要な状態変数、基礎的な操作因子等の関連を図2に示す。以下、この図に示される各々の基礎的な操作因子について言及することとする。この場合、わが国でのこの2、3年間の研究・調査の報告等²⁻⁹⁾のデータ (A方式において一部でも物理化学凝集を付加しているものは対照外とした) をもとに若干の考察を試みるとともに、Annapolisにおいて開催された都市下水の生物学的磷除去に関するワークショップ (1982年) の報告要旨¹⁾ (以下、磷除去ワークショップ要旨と略称する) での値をも参考とする。

2. 嫌気条件及び好気条件

嫌気槽での嫌気条件は、磷高含有汚泥の集積培養の

Hiroshi Tsuno

昭和47年 京都大学大学院工学研究科
修士課程修了

同年 大阪府土木部

48年 京都大学工学部助手

50年 環境庁

58年 京都大学工学部助教授
工学博士

* Fundamental Operation Factors of Biological Phosphorus Removal Process, 昭和59年9月27日受理

注) 以上の他水温、pH などの水質項目や環境条件は重要ではあるが、簡潔化のために省いてある。
 —— 定義、あるいは比較的定量的に知られている関係を示す。
 定性的に知られている関係を示す。

図2 状態変数及び基本的操作因子の関連模式図

ためには極めて重要であり、また後に続く好気槽での磷の多量の摂取（すなわち良好な磷除去）に関連する嫌気槽での磷の放出の観点からも重要である。この場合、「嫌気」という単語は、測定可能な濃度の溶存酸素または窒素酸化物のない状態をいい、溶存酸素はないが窒素酸化物の存在する状態をいう「無酸素」とは区別されて使われるのが一般である。嫌気槽での磷の放出あるいは磷除去効率に及ぼす $\text{NO}_x\text{-N}$ の影響濃度については、いくつかの研究・調査報告において言及されており、1～5 mg/l 前後の間の値が示されている。磷除去効率の観点からすると、嫌気槽ですみやかに脱窒が生じ、かつその後には磷の溶出のための十分な滞留時間があれば、表面上は影響はないということとなるので、これらの値は同等に評価し難いということに注意を要する。また、嫌気状態を示す指標として酸化還元電位 (ORP) が用いられる。ORP 値が正の場合は磷の放出は見られず、ORP 値が負で絶対値の大きい値を取る程磷の放出量は多くなることが知られており、この指標を用いている研究者の多くは -200～-300mv 前後の値をとっている。

好気槽での過剰の磷の摂取のためには、好気槽での溶存酸素濃度は 0.5mg/l 以上であれば良いとの報告もあるが、全槽にわたって好気状態とすること及び最終沈殿池での嫌気状態—磷溶出を防止すること等のため 1～3 mg/l 以上の溶存酸素濃度に設定する必要がある

との報告が多い。

なお、最終沈殿池での嫌気状態—磷溶出を防止するためにはそこでの汚泥滞留を短くする必要があり、磷除去ワークショップ要旨では、0.3～0.6m 以下の汚泥ブランケット厚さで運転する必要があることが示されている。

3. 嫌気槽滞留時間及び好気槽滞留時間

生物学的廃水処理法においては、処理の主役である微生物量及び反応時間である滞留時間が基本的に重要である。更に生物学的磷除去法では、嫌気槽での磷の放出及び好気槽でのその放出磷も含めた過剰の磷の摂取による磷除去法である (B 方式は異なる) ため、嫌気槽での滞留時間及び好気槽での滞留時間、並びにそれらのバランスが重要となる。

磷除去ワークショップ要旨では、A 方式での嫌気槽実滞留時間は 0.5～2.0 時間 (A/O 法で 0.5～1.0 時間、バーデンフォ法では 1.0～2.0 時間)、並びに好気槽滞留時間は硝化を考えない場合 1.8～2.5 時間、及び硝化を考慮する場合は 3～8 時間 (A/O 法では 3～6 時間) の値が示されている。わが国におけるビーカーテストから実規模運転等まで含めた事例 (同一のケースの重複はできる限り避けており、直接報文等に表示されていない値でも他の諸元や指標値により計算できるものについては筆者が計算し、また時間的には平均的データの取り

扱いを行った。以下の解析でも同様である)の好気槽実滞留時間及び嫌気槽実滞留時間、並びにそれらの比のヒストグラムを図3に示す。嫌気槽実滞留時間は0.5~2.5時間に設定したものが多く、なかでも1.0~2.0時間に設定したものが大半を占めている。なお嫌気槽実滞留時間が0.5~1.0時間のときの磷除去効率等の低下事例は水温の低下時期、 $\text{NO}_x\text{-N}$ の流入等のケースである。好気槽の実滞留時間は磷除去のみを目的とする場合は2~4時間に設定しているケースが多く、硝化まで進める目的では4~6時間に設定しているケースが多い。なお好気時間を嫌気時間に比し長くとり過ぎたり、極端に短くとした場合には、磷除去等が低下する傾向が示されている。

B方式では、溶離槽での実滞留時間は β により異なるが6~10時間程度に設定するケースが多いようである。この場合、槽の大きさとしてはA方式の嫌気槽にほぼ匹敵するであろう。また好気槽の実滞留時間は硝化を生じさせるか否かで異なるが、4~8時間程度のケースが示されている。

4. MLSS

反応槽(A方式では嫌気及び好気槽、B方式では好気槽)でのMLSSについては、磷除去ワークショップ要旨ではA方式で2,000mg/l前後及びB方式では600~5,000mg/lの値が示されている。わが国の事例では両方式で差はないようであり、同一に取り扱った場合のMLSSのヒストグラムを図4に示す。MLSSは好気槽でのばっ気効率の制限よりあまり高くは取れな

図3 嫌気槽及び好気槽の実滞留時間並びに好気/嫌気の時間比についてのケース分布図

いこともあり、標準的な活性汚泥法と同様で2,000~4,000mg/lに設定したケースが大半である。

5. BOD—MLSS 負荷

A方式を一般の都市下水に適用する場合、嫌気槽での嫌気状態の達成・維持は流入水中のBODの酸化、分解等によることとなる。したがって、流入水中の溶存酸素や $\text{NO}_x\text{-N}$ の除去に十分足る易分解性のBODが必要(溶存酸素の消費は除去BODの0.35~0.5倍程度であり、また1mgの $\text{NO}_x\text{-N}$ の脱窒除去のためには2.5mg前後のBODが消費されるといわれている)である。さらに、磷除去のために重要な嫌気槽での磷の放出は微生物内へのBODの摂取に伴う(BOD 1mg摂取に伴い 10^{-1}mg オーダーの磷が放出されるようである)ものであり、十分な磷の放出が生じるためには一定以上のBODが必要である。また、A方式においては、系外への磷除去は式(1)で示されるので、流入水中の磷量に対応する微生物増殖量を維持する観点からも流入水BOD濃度は重要である。この場合、流入水BOD濃度が何mg/l以上必要かについては、各流入水質や操作条件等により異なるため、BOD—MLSS負荷や最初沈殿池流出水の磷/BOD比で論じられることが多い。

磷除去ワークショップ要旨では、A方式のうち磷除去を主目的とするA/O法について0.15~0.75kgBOD/kgMLSS・日(0.08~0.4kgS—BOD/kgMLSS・日)が示されている。わが国におけるA方式の事例についてのBOD—MLSS負荷のヒストグラムを図5に示す。磷除去を主目的とする事例では、0.1~0.3kgBOD/kgMLSS・日の値に設定したケースがほとんどであり、窒素除去の単位プロセスを付加した事例ではこれより低く0.05~0.2kgBOD/kgMLSS・日のケースが多くなっている。

BOD—MLSS負荷が0.1kgBOD/kgMLSS・日以下になると磷除去の低下が生じたとする報告もあり、A

図4 MLSSのケース分布図

図5 BOD-MLSS 負荷のケース分布図

方式での磷除去と窒素の同時除去が単純ではないことも考えられよう。なおわが国での生物学的磷除去の研究・調査等の行われている都市下水処理場の最初沈殿池流出水中の BOD については、溶解性の割合は 4 割程度であることが多いようである。

6. 最初沈殿池流出水中の磷/BOD(P_0/BOD_0)比及び除去磷/除去 BOD($\Delta P/\Delta BOD$)比

磷除去ワークショップ要旨では、良好な磷除去を行うための因子として、A/O 法で $P_0/S-BOD_0 < 0.1$ mg/mg 及びバーデンフォ法で $P_0/BOD_0 < 0.05$ mg/mg という値が示されている。わが国の A 方式での事例についての P_0/BOD_0 及び $\Delta P/\Delta BOD$ のヒストグラム、並びに両者ともデータのあるケースについての両者の関係を図 6 (1) に示す。 P_0/BOD_0 は大半が 0.025~0.065 mg/mg と広い範囲に分布しているが、60%以上の事例が 0.05 mg/mg 以下に存在している。一方、 $\Delta P/\Delta BOD$ についてみると、標準的な活性汚

泥法では 0.01 mg/mg 程度であるが、0.025~0.03 mg/mg のケースが最も多く、大半が 0.05 mg/mg 以下であることが知られる。

P_0/BOD_0 と $\Delta P/\Delta BOD$ との関係を示す図中には点線と実線を参考のために示してある。点線は、傾き 1.0 の原点を通る直線であり、BOD 除去率と同一の除去率で磷が除去される場合で、式(1)において Y を一定と仮定した場合に P_x は流入水中の P_0/BOD_0 に相当して増加するとすることに対応する。一方実線は以下の観点から引いたものである。BOD の除去率を γ とし、放流水中の磷として満たすべき濃度を P_c とすると、この処理系で満たすべき $\Delta P/\Delta BOD$ は、

$$\begin{aligned} \Delta P/\Delta BOD &= (P_0 - P_c)/\gamma \cdot BOD_0 \\ &= \frac{1}{\gamma} (P_0/BOD_0) - P_c/(\gamma \cdot BOD_0) \end{aligned} \quad (3)$$

で表される。この式において、仮に $BOD_0 = 100$ mg/l, $\gamma = 0.9$, $P_c = 1.0$ mg/l として、関係を求めたものである。プロット対象となった事例の BOD_0 及びその組成、 P_0 、水温、操作条件等が種々異なるので断定はできないが、 P_0/BOD_0 が 0.05 mg/mg 以上になると、この実線より下方に大きくバラツク傾向がみられる。

汚泥中磷含有率 P_x のヒストグラム及びそれと $\Delta P/\Delta BOD$ との関係を図 6 (2) に示す。 P_x は、3.0~4.5% P/MLSS の値となったケースが大半を占め、一般的には 6% 程度までであるようである。A 方式において、式(1)が成立するものとすれば、 $\Delta P/\Delta BOD$ と P_x とは傾き Y の比例関係で示される。両者の関係を示す図中には参考のために Y=1.0 及び Y=0.75 (値が示された事例は少なかったが、それらの大半は 0.7~0.8 mgMLSS/mg ΔBOD 前後であった) の場合の関係直

図6 $\Delta P/\Delta BOD$, P_0/BOD_0 及び P_x のケース分布図、並びに $\Delta P/\Delta BOD$ と P_0/BOD_0 及び P_x との関係

線を示してある。A方式では P_x が6%P/MLSS以上となることが希であるとすれば、 $\Delta P/\Delta BOD$ は0.05 mg/mg程度が限度であり、 P_x が4%前後が多いとすれば、 $\Delta P/\Delta BOD$ は0.03 mg/mg程度となるであろう。なお、 P_0/BOD_0 と P_x との関係を両者のデータが知られる事例について、プロットしたものを参考のために図7に示す。

B方式においては、溶離槽での放出磷は凝集沈殿で除去するために式(2)で示される磷除去量が付加するので、システムの磷除去には余裕があるとして、磷除去ワークショップ要旨では、 $BOD_0 70 \sim 300 \text{ mg/l}$ 及び $P_0 3 \sim 20 \text{ mg/l}$ に対応しうると示されている。

7. 汚泥齢又はSRT

生物学的磷除去法においては、磷高含有率の汚泥を集積培養することが不可欠であり、更にはA方式においては系外への磷除去は基本的には引抜汚泥によるものであり、汚泥管理は極めて重要である。また、窒素除去を同時に行うための単位プロセスを付加することとなれば硝化菌や脱窒菌の集積培養の必要性も加わり、一層重要となる。磷除去ワークショップ要旨では、SRTの操作因子の重要性は述べられているが、具体的な数値は設計値としては示されておらず、バーデンフォ法の実施事例として、20日あるいは30～40日のSRT値が示されている。わが国の事例においても汚泥齢あるいはSRTを示した事例は少ないが、A方式で

図7 P_0/BOD_0 と P_x との関係

磷除去のみでは3.5～7.0日程度及び窒素同時除去の場合の20日程度のSRT値となったケースが示されている。なお、3.5日のSRTは約0.4 kgBOD/kgMLSS・日及び7日は約0.19 kgBOD/kgMLSS・日に、また20日は0.1 kgBOD/kgMLSS・日にほぼ相当するであろう。

8. 水温及びpH

水温については10℃前後から30℃前後まで適用事例があり、他の生物処理と同様、高温になるにつれて諸反応速度は速くなることが示され、また10℃以下では処理効率の低下を示唆する報告もみられるが、今後、更に実規模での事例の蓄積が望まれよう。

pHについては、大半の事例が6.5～8.0の範囲でなされており、また、6.0以下及び8.0以上では磷除去が低下するという研究報告もなされている。

9. おわりに

以上、概観したとおり、わが国においても多くの研究・調査事例が蓄積されてきている。ここでは、平均値的なデータについて考察を試みたが、関連する諸因子の相互関連が複雑であり、また降雨時の処理効率の低下、運転開始後安定した処理のためには1カ月程度を要すること、トラブル後の回復に比較的長期間かかること等の安定性の問題についての検討も残されており、今後更に、実規模レベルでの調査・研究の蓄積が望まれる。また、生物学的磷除去法は液中の磷を汚泥中に濃縮分離する方法であり、その分離された汚泥中の磷は嫌気性条件下では容易に溶出しうる形のものであるため、引抜汚泥の適切な処理・処分がなされなければ再び水処理系や環境水中へ添加されることとなる。この方面での検討も緊急の課題である。

引用文献

- 1) E.F. Barth Summary Report Workshop On Biological Phosphorus Removal In Municipal Wastewater Treatment, U.S. EPA (1982)
- 2) 土木学会 第18回衛生工学研究討論会講演論文集(1982)
- 3) 下水道協会 第19回下水道研究発表会講演集(1982)
- 4) 産業用水調査会 特集「生物処理におけるリンの除去」用水と廃水 Vol.24, No.10(1982)
- 5) 深瀬哲朗他 生物学的リン除去法の機構に関する基礎的検討 水質汚濁研究, Vol.5, No.6(1982)
- 6) 下水道協会 特集「下水の窒素及びリン除去」下水道協会雑誌, Vol.20, No.230(1983)
- 7) 下水道協会 第20回下水道研究発表会講演集(1983)
- 8) 下水道協会 第21回下水道研究発表会講演集(1984)
- 9) 土木学会 第39回年次学術講演会講演概要集(1984)