下水処理におけるプロセス制御*

楠 田 哲 也

1. はじめに

下水処理システムは下水処理プロセスと汚泥処理プロセスから構成されている。これらのプロセスはそれぞれ独立ではなく、汚泥処理プロセスからの返流水が下水処理プロセスに影響し、下水処理の良否が汚泥の処理性に影響するというように相互に関係がある。したがって制御を考えるとき全体をひとつのシステムとして考えるべきであるが、下水処理システムの制御が未だ各プロセスをひとつのシステムとしてまとめて取り扱えるまでに至っていないこと¹⁾と本特集の目的から議論を下水処理プロセスのみに限定してすすめることにする。

下水処理プロセスでは固形物である大粒子、小粒子が通常の水処理ルール（物質除去は大粒子から小粒子へとという順で行う）にしたがってまず除去され、次いで溶解性物質が除去される。大規模下水処理場では図1に示すように常に固液分離プロセスとしてスクリーン、沈砂池、最初沈殿池の順に設置され大粒子から小粒子へと順次除去されていく。溶解性物質の除去には、生物学的、物理化学的な方法があるが現在では微生物を用いた生物学的方法が主流となっている。溶解性物質を基質として微生物を増殖させ、その結果として溶解性物質を固体化し最終沈殿池にて再度固液分離を行って排水中の物質の除去を終える。この生物処理には活性汚泥法、オキシデーションディッチ法、回転円板法、散水戸床法等がある。有機物の除去を主眼としたこれらの処理法は好気性処理を基本としたものであるが、嫌気性処理の方が有機物分解産物のメタンガス

が利用でき、汚泥発生量も少なくなる長所を有するので下水処理への応用を目指した実用化研究が盛んに行われている。

流入水中に含有されている物質の含有比率は微生物による代謝に必要な比率を満足させるようになっていない。特に窒素やリンは好気性生物処理を行うと除去されない余剰分を生じ、処理放流水による水域の富栄養化を招く。したがって窒素やリンの除去のための生物学的、物理化学的高度処理プロセスが考案されている。歴史的には物理化学的処理法がまず開発され²⁾、その後溶解性物質の除去プロセスに脱窒脱リン機能を組み込んだ生物処理法が開発された。現在は両処理法とも用いられている。

2. 下水処理プロセスにおける計測と制御の現状

下水処理プロセスにおける制御の目的は、処理効率の向上、処理水質の安定化、労働条件の改善、省エネルギー、省力化、処理費の節減等³⁾がある。処理水の水質が常に放流水基準に納まり、かつ安定させることができるになれば、他の目的の達成も必然的に容易となる。

下水処理プロセスを制御するには、少なくとも①プロセスの状態を把握できるセンサーや水質測定器があること、②操作変数を操作するための機構が備わっていること、③プロセスの状態方程式が記述されていることが必要である。①について現在のところ下水処理プロセスに信頼性、安定性からみて使用できるものは、連続測定ではMLSS、汚泥濃度、DO、pH、水温、ORP、UV、残留塩素濃度、不連続測定では維持管理が大変ではあるが、COD、TOCがあり（図1参照）、下水処理特有のものとして、SVI計、汚泥界面計、汚泥呼吸速度計がある⁴⁾。②については、下水処理では流入水を連続的に受け入れているために、量的、質的変動が極めて大きいこと、処理費の面からpHや水温は無制御であること等の厳しい条件下にあるので、水の流れはそのままに活性汚泥法では図1に示すようにMLSSとMLDOのみをポンプとブローで制御するようになっている⁵⁾。③については、処理条件と微生物種の関係、微生物種の遷移過程、微生物活性度の予測等に未解明の点があるため状態方程式としての可制御性は今

Tetsuya Kusuda

昭和40年 九州大学工学部土木工学科
卒業
45年 同大学院博士課程修了
48年 九州大学助教授
61年 同大学教授
工学博士

* Process Control in Wastewater Treatment, 昭和63年6月13日

図1 活性汚泥法による処理プロセスと計測・制御項目
(P:ポンプ, B:ブローア, 枠内上段は水質項目, 下段はその他の項目)

表1 溶解性有機物質の好気性生物学的除去プロセス

処理法 項目	活 性 汚 泥 法	オキシデーション デ ィ ッ チ 法	回 転 円 板 法	散 水 汙 床 法
原 理	好気性微生物による基質としての摂取・代謝			
長 所	小容積で済み硝化も可能	負荷変動に強い。硝化・脱窒が可能。汚泥生成率が低い。	負荷変動に強い。硝化が可能。汚泥返送が不要。汚泥生成率が低い。	
短 所	汚泥生成率が高い エネルギーが多量に必要	流出SSの沈降性が悪い	処理開始から安定化するまでに長期間必要。流出SSの沈降性が悪い	所要面積が広い 蠅の発生がある
酸素供給 プロセス	機械攪拌または散気		半水没円板の回転	汙材付着水膜の大気との接触
影響因子	BOD, MLDO, MLSS, HRT, SRT, pH, 水温		BOD, 生物膜厚, HRT, 水温	散水強度, 散水負荷
制御項目	MLDO, MLSS, SRT, 余剰汚泥量		回転速度	散 水 時 間 間 隔

のところ満されていない⁵⁾。したがって下水処理プロセスにおける制御はプロセスのある対象項目についてのみ行われている状況にある。

3. 処理プロセスの制御

溶解性有機物の除去のための好気性生物学的プロセスの特徴、制御項目等をまとめて表1に示す。活性汚泥法やオキシデーションディッチ法の制御項目となっているものにMLDO, MLSS, SRT, 余剰汚泥量がある。MLDOの制御は曝気槽内でのDOを $0.5\sim 2\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ 程度に安定させ、動力費を節減しようとするもので、BOD負荷の変動による生物処理の遅れ時間が小さければ、曝気槽の流出側でDOを制御すればよいことが知られている⁹⁾。MLDO制御の変法として、槽内DO

の変化率に着目した制御法⁷⁾、曝気槽からの炭酸ガス濃度を指標にして曝気風量を制御する方法⁸⁾等が考案されている。MLSS 制御には、MLSS を有機物負荷に対して一定比率に保つ F/M 制御と流入水量の変動に対応させる制御とがある⁹⁾。硝化を促進させる場合には SRT 制御が用いられている。

脱窒の方法にはアンモニアストリッピング法、不連続点塩素注入法、イオン交換法、生物学的プロセスがある。アンモニアストリッピング法は排水の pH を 11 以上に上昇させアンモニアを気散させる方法で、pH と気散のための送風量を制御項目としている。不連続点塩素注入法は排水中のアンモニウム塩を塩素で酸化し窒素ガスとして除去する方法で、通常 $\text{Cl}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比を 8 ~ 10 になるように比例注入制御する。生物学的

処理法は、好気状態でアンモニア酸化細菌により $\text{NH}_4\text{-N}$ を $\text{NO}_2\text{-N}$ に、亜硝酸酸化細菌により $\text{NO}_2\text{-N}$ を $\text{NO}_3\text{-N}$ に酸化し、無酸素状態で通性嫌気性菌により $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を窒素ガスとして除去する方法である。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を還元(硝酸呼吸)させるときの水素供与体の与え方により、表2のように分けられる。制御項目はアンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌の増殖時間確保のための SRT(おおよそ10日以上)¹⁰⁾、増殖環境維持のための pH(アンモニア酸化細菌で 7.0~8.5、亜硝酸酸化細菌で 6.5~8.0)、DO(硝化時に $2\sim 3\text{mg}\cdot\ell^{-1}$)、ORP(脱窒時に $-100\sim -200\text{mV}$) からなる。Bringmann 法では有機炭素の量を $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の量に応じて調節する。現在では有機炭素源として流入水に含まれているものを利用する循環法の採用が多くなりつつある。

脱リンの方法には嫌気-好気法、同時凝集剤添加法、凝集法、フォストリップ法、晶析脱リン法がある。表3にこれらの特徴、制御項目等を示す。嫌気-好気法は嫌気と好気状態を繰り返す条件下で微生物が好気状態のときに増殖に必要な量を超えてリンを過剰摂取し、細胞内に通常の 2~4 倍にあたる 4~8 % のリンを蓄積する現象を利用するものである。嫌気状態で有機物を摂取する一方でリンを放出するが、このとき絶対嫌気状態にし ORP で $-200\sim -300\text{mV}$ にする必要

がある。同時凝集剤添加法は曝気槽に PAC や塩化第二鉄等を添加しオルトリン酸イオンを金属塩にして不溶化させる方法である。最終沈殿池放流水に対して行うのを凝集法という。添加凝集剤はリン酸の金属塩の他に水和物も形成するため注入率はモル比(Al/P, Fe/P)として 2 倍以上注入する必要がある。注入率の制御には水量比例法や負荷量比例法がある¹¹⁾。フォストリップ法は嫌気状態でリンを放出させ、それを石炭で凝集・沈殿除去する方法で pH と薬品注入率が制御項目となる。晶析脱リン法は、同じく石灰を混和しヒドロキシルアパタイト $[\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6]$ を核となる種の表面上に晶析させる方法である¹²⁾。炭酸イオンが存在すると炭酸カルシウムが形成され晶析効率が低下するので石灰混和の前に pH を低下させた炭酸槽を設けることがある。

生物学的窒素・リンの同時除去も行われており、嫌気槽・無酸素槽・好気槽・沈殿池をこの順に並べ好気槽から無酸素槽へ返流し、沈殿池から嫌気槽へ汚泥返送する A_2O 法や他に Phoredox 法、ケープタウン大学法(UCT 法)がある。

4. 今後の課題

下水処理プロセスの制御のために、信頼性の高い維持管理の容易なセンサーと水質計測機器の開発、最終

表2 生物学的硝化・脱窒のプロセス

処理法 項目	Wuhrmann 方式	Bringmann 方法	循環法
原 理	NH_4^+ を酸素を電子受容体として酸素(硝化)生成 NO_2^- 、 NO_3^- を用いて硝酸呼吸を行う。水素供与体として有機炭素が必要(脱窒)		
有機炭素源	内生呼吸による細胞壁の利用	有機炭素を添加	流入水中の有機炭素の利用
長 所	処理費が低廉	除去率が高い	処理費が低廉
短 所	除去率が低い。処理槽容積が大	処理費が高い	除去率が低い
処 理 プ ロ セ ス			
影 響 因 子	好 気 槽 MLDO, MLSS, SRT, pH, 水温		
	無酸素槽 ORP, 有機炭素源, pH, 水温		
制 御 項 目	MLDO, MLSS, SRT, pH, ORP		
		有機炭素注入率	HRT

表3 脱リンのプロセス

処理法 項目	嫌気-好気法		同時凝集剤添加法	フォストリップ法		晶析脱リン法
原 理	嫌気状態後の好気状態下でのリンの過剰摂取		オルトリンの凝集による不溶化	嫌気-好気法と凝集剤添加法を組み合わせたもの		ヒドロキシルアパタイトの生成
長 所	薬品が不要		容易に行える	活性汚泥への影響が少ない。薬品費が少なくて済む		管理が容易で、処理費が安い。汚泥発生がない。
短 所	除去率が物理化学的処理より低い		発生汚泥量が増加。活性汚泥への影響がある	施設が別に必要		SS、炭酸イオンの除去が必要
処 理 プロセス
影響因子	嫌気槽	ORP, BOD, NO _x -N, 水温	pH, アルカリ度 凝集剤注入率, 水温	凝沈槽	pH, アルカリ度, 凝集剤注入率	pH, 石灰注入率, 炭素イオン濃度, 水温
	好気槽	MLDO, SRT, pH, 水温		曝気槽	MLDO, SRT, pH, 水温	
制御項目	ORP, MLDO, SRT		凝集剤注入率	凝沈槽	pH, 凝集剤注入率	pH, 石灰注入率
				曝気槽	MLDO, SRT	

沈殿池での固液分離・濃縮技術の開発、下水処理の状態方程式の記述等が望まれている。また微生物相は日単位でしか変化しないのでこれを計測するための顕微鏡下での微生物計測（種構成の把握）の実用化とその結果をフィードバックあるいはフィードフォワードする制御手法の開発も待たれる。この他ファジィ理論の利用、人間の経験をしのぐ学習機能を有するコンピュータの利用等も考えられる。

5. おわりに

下水処理プロセスの制御は浄水処理プロセスに比べると残されている問題が多い。下水特有の夾雑物の多さ、溶解性物質の多さ等いたしかたないところもあるが、これらの問題を将来の課題として自動制御化がますます発展することを願ってやまない。

文 献

- 1) 日本下水道協会(1984)下水道施設設計指針と解説, 695pp.
- 2) 野中八郎(1970)下水処理プロセスとプラントの設計285pp.,

日本下水道協会.

- 3) 日本下水道事業団(1975)下水処理場の自動制御方式に関する第一次報告書, p.268.
- 4) 田中宏明(1988)下水道用水质測定機器の現状と課題をみる, 月刊下水道, 11(5), 2-11.
- 5) 竹石和夫(1988)下水道技術の動向, 下水道年鑑, p.255, 水道産業新聞社.
- 6) 日本下水道事業団(1983)下水処理場の自動制御の評価に関する第3次報告書, 330-334.
- 7) 田沼良平ら(1984)ゲイン極大化法による活性汚泥プロセスのDOプロフィール制御, 水システム自動計測制御ワークショップ論文集, 141-144.
- 8) Nogita, S. et al (1982) Basic studies on carbon dioxide/air control system for activated sludge processes, *Water Research*, 16, 1017-1022.
- 9) 柏谷衛編(1984)計装と監視制御, 下水道実務講座13, 82-85, 山海堂
- 10) 関根孝夫ら(1988)活性汚泥法のSRT制御下における硝化特性と細菌相, 下水道協会雑誌, 25(289), 29-37.
- 11) 建設省(1981)凝集剤等の添加による二次処理水質の向上に関する調査報告書.