

<特集>

下水処理におけるシミュレーション技術の活用

—活性汚泥モデルを利用したアンモニア計設置位置の決定と 風量制御性能の評価—

Applications of Process Simulation Technology for Biological Wastewater Treatment Process
—Determination of Ammonium Sensor Set Position and Evaluation
of Aeration Control Performance Using Activated Sludge Model—

小原卓巳*, 足利伸行, 山中 理, 山本勝也

株式会社 東芝

Takumi Obara*, Nobuyuki Ashikaga, Osamu Yamanaka and Katsuya Yamamoto
Toshiba Corporation

Abstract

This paper introduces an application of process simulation technology for biological nutrient wastewater treatment process to the multiple-mode aeration control scheme²⁾, which has been developed by the authors, by using an ammonium-ion sensor and a dissolved oxygen sensor. Prior to control performance evaluation, this paper shows that the process simulation technology is useful to determine a suitable set position for control of ammonium ion sensor by predicting the distribution of ammonium concentration. The simulator for the prediction incorporates a so-called Activated Sludge Model (ASM)¹⁾ which can simulate behaviors of carbon, nitrogen and phosphorus by microorganisms activity in the process. Numerical simulations also illustrate that the aeration control scheme shows a good control performance for the improvement of effluent water quality and for the reduction of aeration cost.

Key Words :biological wastewater treatment process, activated sludge model, nitrogen, phosphorus, simulation

1. はじめに

近年、内湾・湖沼など閉鎖性水域において、窒素、リンの栄養塩類による富栄養化問題が顕在化しており、その排出源の一つである下水処理場においても、従来の有機物除去に加え、窒素・リンの除去を行う高度処理プロセスの導入が進められている。高度処理プロセスの導入・運用は、従来までの主流プロセスである標準活性汚泥処理プロセスと比較すると、放流水質は改善されるものの費用負担増を伴う。このようなことから、下水処理においては、放流水質の向上とともに運転コストを削減する

ことが要求されている。こうした社会背景の下、下水処理場における放流水質を予測するツールの一つとして、活性汚泥モデル (Activated Sludge Model)¹⁾ が開発されてきている。

本稿では、活性汚泥モデルを組み込んだシミュレータにより、筆者らが開発したマルチモード風量制御²⁾ のアンモニア計設置位置の決定及び制御性能を評価した結果について報告する。

2. 対象プロセスと活性汚泥モデル

対象処理場は Fig. 1 に示す代表的な高度処理プロセスである A2O プロセス (嫌気-無酸素-好気プロセス) で、

* 〒183-8511 東京都府中市東芝町1
TEL: 042-333-2563 FAX: 042-340-8060
E-mail: takumi.obara@toshiba.co.jp

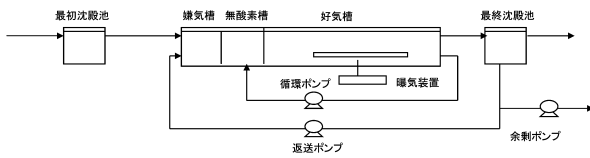


Fig.1 A2O(Anaerobic-Anoxic-Oxic) Process.

処理量 40,000 [m³/day] の処理場である。下水処理においては、経済的に最も優れているという点から主に生物反応を利用して、汚濁物の除去を行っている。

このプロセスにおいて、有機物は嫌気槽、無酸素槽で嫌気性菌により分解され、酸素の供給される好気槽では好気性菌により、酸化分解（以下、有機物の酸化）されることにより、除去される。窒素は、主にアンモニアとして下水処理場に流入する。アンモニアは、好気槽で酸素の供給の下、硝化菌により硝酸に変換される（以下、硝化）。硝酸は循環ポンプにより無酸素槽に返送され、脱窒菌により窒素ガスに変換され、水中から除去される。リンは、リン蓄積微生物が、好気槽において酸素を供給されることにより、体内にポリリン酸の形態でリンを取り込み（以下、リンの吸収）、リン蓄積微生物を含む汚泥が、余剰ポンプにより系外に排出されることにより除去される。

生物反応槽内での有機物・窒素・リンの除去に関わる微生物の増殖・死滅及びそれに伴う窒素・リン・有機物の物質収支を記述したモデルとして活性汚泥モデル¹⁾がある。活性汚泥モデルに、ポンプによる下水・汚泥の輸送/排出、及びブローによる酸素の供給を記述するモデル、及びそれら機器の動力費を算出するモデルを付加することにより、放流水質の予測や運転にかかるコストを演算するシミュレータを構築することが可能となる。シミュレータは下水処理場の設計や運用改善、運転支援など様々な用途に利用することができるが、本稿では、筆者らが主に取り組んでいる新制御方式の開発、評価に利用した事例を報告する。

3. 従来の風量制御とマルチモード風量制御

Fig. 1 のプロセスにおける最大のコスト要因は、生物反応に必要な酸素を好気槽へ供給する曝気装置(ブロー)の動力で、処理場の運転コストの約4割～6割を占めている。このようなことから、供給する風量の適正化が求められている。

従来、好気槽に供給する風量の制御は好気槽末端に設置された DO 計の計測値が一定となるよう制御を行っていた（以下、DO 制御）。これに対し、DO 計の代わりにアンモニア計を利用した風量制御（以下、アンモニア制御）を適用することにより、風量を削減できる可能性がある^{3),4)}。アンモニア制御は、アンモニアの硝化反応の速度が好気槽でおこる有機物の酸化やリンの吸収反応に比べて遅いことを利用した制御方法である。従って、アンモニアを好気槽末端で消失するよう風量を制御することにより、有機物・リンの除去に必要とされる酸素も供給できると同時に、DO 制御に比べ、酸素供給に関わる動力を削減できる。しかしながら、アンモニア制御においては、雨天時などに流入水のアンモニア濃度が低濃度になった場合、風量を低下するように制御が働くため、DO が過剰に低下することに起因し、放流水質が悪化する恐れがある²⁾。その対策として筆者らは、Fig. 2 に示すアンモニア計と DO 計を利用したマルチモード風量制御を提案してきた²⁾。この制御方式は Fig. 3 に示すように、アンモニア制御目標値と DO 下限値、DO 最下限値を設定し、① DO 下限値以上ではアンモニア濃度によらずアンモニア制御、② DO 最下限値以下ではアンモニア濃度によらず DO 制御、③ DO 濃度が下限値以下、最下限値以上ではアンモニア濃度により制御方法を切替える、とい

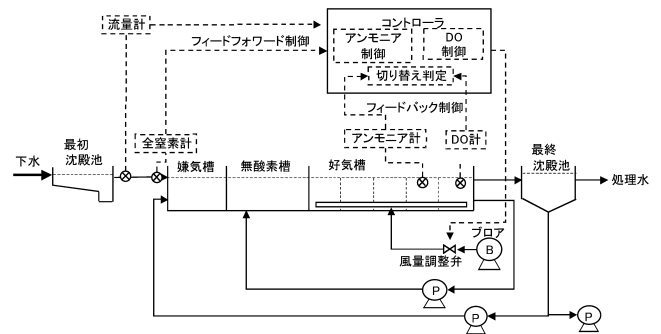


Fig.2 Multiple-mode Aeration Control Scheme.

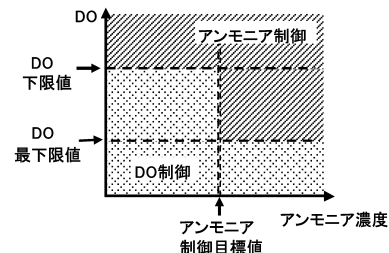


Fig.3 Switching Control Logic.

うものである。この制御導入により、アンモニア制御の欠点であるDOの過剰低下を防止することができるため、放流水アンモニア濃度の悪化を抑えつつ、風量を削減できる。

4. マルチモード風量制御への活性汚泥モデルの活用

本章では、このマルチモード風量制御（以下、マルチモード制御）の導入にあたり、活性汚泥モデルを活用して、(1) アンモニア計の設置位置の決定、(2) 立案した制御方式の評価を行う。

アンモニア計を利用した制御方式を導入する際にはアンモニア計の設置位置が重要となる。センサの設置位置として、できるだけ放流水に近い側で制御することが望ましいが、好気槽末端ではアンモニアが低濃度となるため、アンモニア濃度と制御目標値の微小の偏差に対して風量の変動幅を大きくする必要がある。そのため、計測誤差に対する影響を受けやすく、制御の安定性が劣化する。従って、センサの測定限界と制御の安定性を考慮して、制御値を決定する必要がある。本稿の検討においては、センサ仕様と制御の安定性の観点から、アンモニアが2.0 [g(N)/m³] 残存する位置にアンモニア計を設置し制御することとした。この際、設置位置を前方にしすぎると風量が過大となり、後方にしすぎると放流水質にアンモニアが残存してしまう。よって本章では、まず、シミュレータを構築し、次にアンモニア計設置位置の検討を実施する。最後にマルチモード風量制御の効果を評価する。

4.1 シミュレータの構築

アンモニア計設置位置の確定、制御評価を行うために、シミュレータを構築した。Fig. 4 に示すようにシミュレータ上で好気槽を9分割した。この分割数は土木構造的にセンサ設置ができる点に対応させ決定したものである。嫌気槽、無酸素槽、好気槽（9分割）に完全混合を仮定した活性汚泥モデル No. 2d¹⁾ を適用し、最終沈殿池には、固形分はすべて沈殿し、溶解性成分は沈殿池内で一様であると仮定した完全固液分離モデルを適用した。

活性汚泥モデルは60を超えるモデルパラメータを有しており、実プロセスを模擬するためにはパラメータの調整を行う必要がある。好気槽の流れ方向に沿って、Fig. 4 のA点～F点で採水し、アンモニア、リンに関し

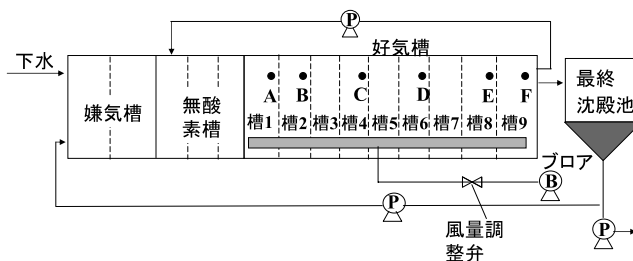


Fig. 4 Aerobic Tank Division of Simulator (A~F: sampling point).

て水質分析を行った結果が Fig. 5, Fig. 6 の real である。

このデータをもとにシミュレータのモデルパラメータを調整した。調整前、調整後のシミュレーションデータが Fig. 5, Fig. 6 に示す def, sim である。

結果、パラメータ調整により、アンモニア、リンの実データを良く再現できた。本稿では図示しないが、硝酸に関してもよく再現できた。調整したパラメータ値の一覧を Table 1 に示す。

4.2 アンモニア計設置位置の決定

4.2.1 実データによる検討

Fig. 7 は Fig. 4 のA点～F点で採水し、好気槽内の有機物成分の代表指標であるCOD_{Mn}（過マンガン酸による

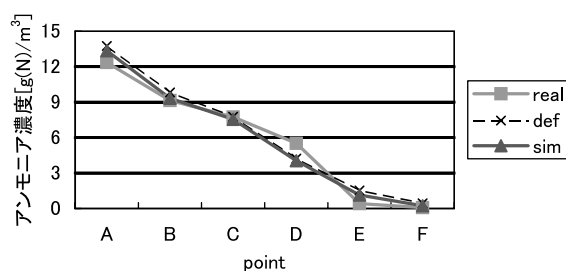


Fig. 5 Ammonium Concentration Profile (Simulation).

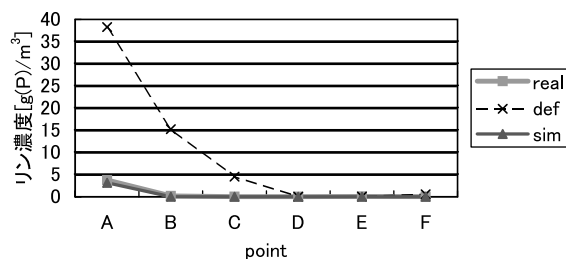


Fig. 6 Phosphorus Concentration Profile (Simulation).

Table 1 Tuning Parameter List

記号	名称	調整前 (def)	調整後 (sim)	単位
μ_H	従属栄養微生物の増殖速度係数	6	4	1/day
μ_{AUT}	硝化菌の増殖速度係数	1	1.5	1/day
Y_{PO4}	リン蓄積微生物の収率	0.4	0.24	g(P)/g(COD)
$K_{O_2,h}$	従属栄養微生物の酸素に対する半飽和定数	0.2	0.05	g(O ₂)/m ³
η_{NO3}	脱窒減衰係数	0.8	0.3	—

化学的酸素要求量), アンモニア及びリンの好気槽流れ方向の濃度を測定した結果である. 採水時は制御目標値 5.0 [g/m³] の DO 制御を実施していた. COD_{Mn} は B 地点以降で値の変化が小さく, 生物分解性の有機物の除去は B 地点で完了していると考えられる. リンに関しては C 地点, アンモニアに関しては E 地点で濃度がゼロ近傍になっており除去が完了していると考えられる. したがって, 有機物, リンの除去はアンモニアの除去よりも先に完了していると考えられる. また, 現状の DO 制御ではアンモニアは E 地点でゼロ近傍となっており, 好気槽末端でアンモニアが消失するよう風量制御を行うことにより風量を削減する余地があることが分かる. 一方, D 地点では 5.0 [g(N)/m³] 以上残存していることから, この地点を 2.0 [g(N)/m³] に制御するとより多くの風量が必

要となる. よって, Fig. 4 の D 地点 (槽 6) 以降の地点である槽 6, 槽 7, 槽 8 を設置位置の候補とし, シミュレーション検討を行う.

4.2.2 シミュレーションによる検討

Table 1 の調整後のパラメータを適用したシミュレータを用いて, 設置位置の決定を行う. 流入流量, 流入水質の変動も考慮するため, 1ヶ月分のデータを用いて, シミュレーションを行う. 流入流量は流量計の計測値を利用した. 流入水質条件を Table 2 に示す.

4.2.1 で検討した結果, 設置位置の候補として挙げられた一台のアンモニア計を Fig. 4 の槽 6, 槽 7, 槽 8 に設置し, その地点でのアンモニア濃度を 2.0 [g(N)/m³] に

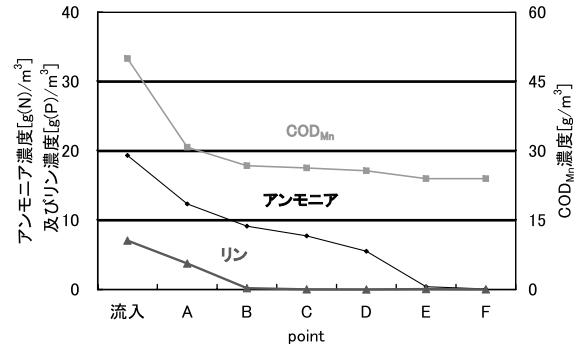


Fig. 7 Water Quality Profile in Aerobic Tank (Real).

Table 2 Inflow Water Quality Condition

記号	名称	入力値	単位
S _{O2}	溶存酸素	0	g(O ₂)/m ³
S _F	易分解性有機物	流入 COD _{Mn} × 3 × 30/260	g(COD _{Cr})/m ³
S _A	酢酸	流入 COD _{Mn} × 3 × 20/260	g(COD _{Cr})/m ³
S _{NH4}	アンモニア	流入 T-N 計測値 × 0.6	g(Nr)/m ³
S _{NO3}	硝酸	0.5	g(N)/m ³
S _{PO4}	リン	流入 T-P 計測値 × 0.9	g(P)/m ³
S _I	難分解性有機物	流入 COD _{Mn} × 3 × 30/260	g(COD _{Cr})/m ³
S _{N2}	窒素ガス	0	g(N)/m ³
S _{ALK}	アルカリ度	5	g(COD _{Cr})/m ³
X _I	難分解性有機物	流入 COD _{Mn} × 3 × 25/260	mol(HCO ₃ ⁻)/m ³
X _S	遅分解性有機物	流入 COD _{Mn} × 3 × 125/260	g(COD _{Cr})/m ³
X _H	従属栄養微生物	流入 COD _{Mn} × 3 × 30/260	g(COD _{Cr})/m ³
X _{PAO}	リン蓄積性微生物	0.1	g(COD _{Cr})/m ³
X _{PP}	ポリリン酸	0	g(P _r)/m ³
X _{PHA}	リン蓄積性微生物細胞内有機物	0	g(COD _{Cr})/m ³
X _{AUT}	硝化菌	0.1	g(COD _{Cr})/m ³
X _{MEOH}	水酸化鉄	0	g(Fe(OH) ₃)/m ³
X _{MEP}	リン酸鉄	0	g(FePO ₄)/m ³

制御した場合の風量，放流水アンモニア濃度をシミュレーションにより計算した．結果を **Table 3** に示す．風量削減率は槽8>槽7>槽6の順に大きく，放流水アンモニア濃度はその逆となる．このように風量削減率と放流水アンモニア濃度はトレードオフの関係にある．最適な設置位置は，放流水アンモニア濃度の制約条件に依存する．今回の検討では，仮に，放流水アンモニア濃度の制約条件を $1.0 \text{ [g(N)/m}^3\text{]}$ とし，槽7付近にアンモニア計を設置することが望ましいと判断した．

4.3 マルチモード制御の有効性評価

風量制御にアンモニア制御とマルチモード制御を適用した場合のシミュレーションを行った．**Fig. 8** に放流水アンモニア濃度，**Fig. 9** に好気槽末端 DO のシミュレーション結果について示す．**Fig. 8** より，アンモニア制御に比べ，マルチモード制御は雨天時の放流水アンモニア濃度の悪化を防ぐことができることが分かった．これは，**Fig. 9** に示すようにマルチ制御モードにより雨天時の DO の過剰低下を防ぐことができるためである．また，DO 制御，アンモニア制御，マルチモード制御導入時の平均風量を **Table 4** に示す．マルチモード制御とアンモ

Table 3 Evaluation results for ammonium set position

アンモニア計設置位置	槽6	槽7	槽8
風量削減率 [%]	10%	18%	22%
ピーク放流水アンモニア濃度 $[\text{g(N)/m}^3]$	0.6	0.8	1.6

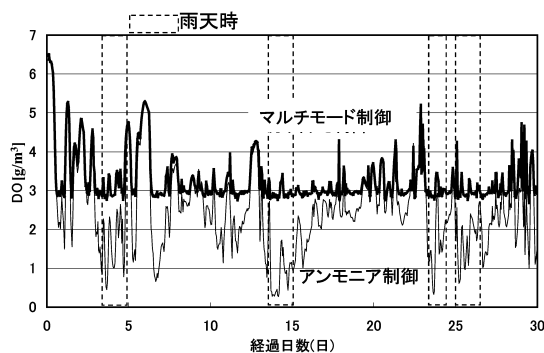


Fig. 8 Evaluation Results of Effluent Ammonium for Control Scheme.

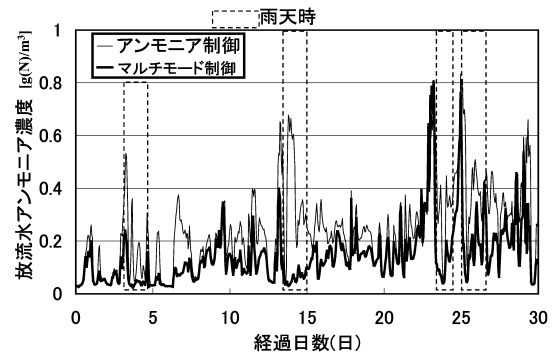


Fig. 9 Simulation Results of Dissolved Oxygen.

Table 4 Average Aeration Flow (simulation)

	DO 制御	アンモニア制御	マルチ制御モード
平均風量 $[\text{m}^3/\text{h}]$	2,473	2022	2095

ニア制御の間で風量の差はわずかであり，放流水アンモニア濃度が改善できている．また，DO 制御に比較して，約 16% の風量削減効果が得られており，有効な制御方式であることを確認した．

5. おわりに

本稿では，マルチモード風量制御におけるセンサ設置位置の決定，制御評価に活性汚泥モデルを利用したシミュレーション技術を適用し，その有用性を示した．開発・設計を行う際，シミュレーション技術による検討は有用であると考えられる．今後も，シミュレーション技術を利用した開発を継続していきたい．

[参考文献]

- 1) IWA Task Group: Activated Sludge Models — ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 —, IWA Scientific Technical Report NO. 9, (2000)
- 2) 足利他: 「マルチ制御モード方式による曝気風量制御」, 第 16 回環境システム計測制御学会, (2004)
- 3) P. IngLidsen: Realizing Full-Scale Control in Wastewater Treatment Systems Using In-Situ Sensors, Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, (2002)
- 4) 時森他: 「嫌気好気活性汚泥法における硝化制御システム」, 第 36 回下水道研究発表会, pp. 879–881 (1999)