

下水処理プロセス運転管理シミュレータの開発

Development of a Simulator for the Operation Management of Sewage Treatment Processes

周藤 孝雄 SUDO Takao JFE 技研 アクア・バイオ・ケミカル研究部 主任研究員(課長)
大橋 一聡 OHASHI Kazutoshi JFE エンジニアリング 水エンジニアリング事業部 水システム技術部第一技術室
小野 俊郎 ONO Toshio JFE 環境サービス 津雲出事業所長

要旨

下水処理プロセスの運転管理を定量的、合理的に検証するシステムが求められている。筆者らは、実処理場を対象として、一年を通じて使えるパラメータと流入水質の推定式を実装し、処理場運転管理者の利用に適したシミュレータを開発した。本シミュレータを用いて実施設の運転操作条件を解析・検討し、通常運転時の計算結果(処理水質や処理プロファイル)と測定値との適合性を検証し、シミュレータの妥当性を実証した。また、本シミュレータを用いて新たに増設された高度処理施設をスムーズに立上げ、運転管理に本シミュレータを用いる有効性を実証した。さらには、反応タンクの運転方法の最適化を図ることで、処理水の窒素濃度低下と送風量削減の可能性を見出した。

Abstract:

A new simulator which verifies the operation management of sewage treatment processes is requested by users to evaluate the performance quantitatively and rationally. Model parameters which can be used throughout the year and an estimating formula of influent quality have been introduced to the simulator to be easily adopted at actual sewage treatment plants. Comparison of simulation results and sample data under normal operation conditions the adaptability and the validity of the simulator. A new advanced treatment plant has been successfully started by predicting operation conditions by the simulator. Furthermore, the reduction of nitrogen concentration and the energy consumption of blowers can be achieved by optimizing the operating method of reaction tanks.

1. はじめに

下水処理の代表的プロセスである活性汚泥法は、適正な運転条件下では、有機物だけでなく富栄養化の原因物質である窒素(N)、リン(P)も除去できるという優れた特色を有している。しかし、活性汚泥の挙動については、生物反応であるためメカニズムが複雑であり、これまでブラックボックスとして扱わざるをえず、送風量や返送汚泥量、汚泥引抜量などの運転操作因子がプロセスに与える影響を定量的に判断することができなかった。そのため、これまでの下水処理場の設計・運転管理では主に経験則に基づいて余裕を持った施設設計や運転管理を行わざるをえず、コスト削減や省エネルギー化には限界があった。

これに対し、昨今の公共工事費の低減や運転経費の節減、CO₂排出量の削減などの必要性を受けて、下水処理場の設計・運転管理では建設費の削減、運転の合理化・省エネ

ギー化が一層求められている。また、下水処理施設の運営に関して、従来より地方自治体の職員が行っていたが、指定管理者制度や包括的民間委託制度の導入が始まりつつあり¹⁾、これを受託する民間業者としては処理場の運営を合理的・論理的に行える手法の確立が望まれている。

一方、長年ブラックボックスとして扱われていた活性汚泥による生物反応の数式化は、コンピュータ演算処理能力の増大にともない、近年急速な進化をし、国際水協会(IWA)の活性汚泥モデル(ASM)²⁾が事実上の標準モデルとなっている。これを適用したシミュレーション技術/ソフトが市販されつつあるが、処理場の運転管理者の利用に適したマンマシンインターフェースが優れ、パラメータのオートチューニング機能を備えたシミュレータの開発が望まれている。

筆者らは、ASMを適用したシミュレーション技術/ソフトの開発を手掛けてきた。本報では、処理場の運転管理者の利用に適した下水処理プロセス運転管理シミュレータに

ついて紹介し、実処理場にて本シミュレータを用いた運転を行い、計算結果の妥当性と本シミュレータの有用性を実証したので述べる。

2. シミュレータの紹介

2.1 従来のシミュレータ

下水処理施設の設計・運転管理への適用のためのシミュレータが市販されつつある³⁾。これらは、下水処理施設の設計・運転管理の実務に精通し、かつシミュレータやASMの知識を持つ技術者が下水処理施設の設計・運転管理の検討を行うためのツールとして有意義であった。しかし、下水処理施設の設計・運転管理の実務でシミュレータを用いるにはなお、以下のような課題があるのが実状である。

- (1) 「シミュレータ」の専門知識を持たない人が扱う場合が多く、パラメータのチューニング（調整）やプロセスモデルの構築を必要とする汎用シミュレータでは、一般的なユーザが機能を扱いきれない。
- (2) 処理場で通常測定される流入水質（5項目）に対して、計算に要する流入水質は18項目と多い。そのため、シミュレータに入力する流入水質を測定値より適正に設定（推定）できる必要がある。

2.2 本シミュレータの特長

本シミュレータが対象とした雲出川左岸浄化センターは、標準活性汚泥法による処理系列（3池）、擬似嫌気好気法による処理系列（2池）と、新たに増設された嫌気(anaerobic)-無酸素(anoxic)-好気(oxic)法による高度処理系列（2池）から構成されている。本シミュレータは、その中の「高度処理系列」を対象に開発した「運転管理支援ソフト」である。高度処理系列の1池当りの反応タンク容積は5120 m³で、隔壁によって7区画に分割されており、7区画が直列に並んだ構造となっている（Table 1）。また、堰により反応タンクの複数区画に流入水を分けて注入させる（ステップ流入）ことができる構造となっている。7区画のすべてに水中エアレータが設置されているので、すべての区画で曝気することができる。処理場全体の流入水量は約20000 m³/dで、現在はその約2/3（13000~14000 m³/d）が高度処理系列で処理されている。

本シミュレータは、汎用パーソナルコンピュータ（PC）上で使用できる。活性汚泥モデルには、国際水協会のASM2d⁴⁾を用いて、積分方法はRunge-Kutta法にて計算を行うこととしている。

本シミュレータでは、最初沈殿池の越流水質を反応タンクへの流入水質（以下、流入水質）として入力する。流入条件（反応タンクへの流入水量、流入水質、水温）、運転操作条件（硝化液循環量、返送汚泥量、余剰汚泥引抜量、送風量）の変動（時間変動、日変動）を考慮してシミュ

Table 1 Volume of reactor

		(m ³)
Total volume of reactor		5120
Volume of each cell	1st cell	490
	2nd cell	750
	3rd cell	750
	4th cell	790
	5th cell	790
	6th cell	790
	7th cell	760

レーション計算を行うことができる。また、反応タンクの複数区画に流入水を分けて注入させたり（ステップ流入化）、各区画への送風の有無や送風量を変更させてシミュレーション計算を行うことができる。なお、本シミュレータでは、最終沈殿池の汚泥滞留部での生物反応も考慮した計算を行っている。

本シミュレータの特長は以下のとおりである。

- (1) 一年を通じて使えるようにチューニングしたパラメータのセットを実装した（64個中14個を調整・固定）。そのため、ユーザがモデルパラメータの再調整を行わずに、一年を通じたシミュレーション計算を行うことができる。
- (2) 処理場の分析データ（5種類）から、ソフトに入力する必要のある流入水質（18種類）を季節・流入変動の要素を加味して推定する式を構築した。そのため、ユーザが日常の測定データだけを用いてシミュレーション計算を行うことができる。
- (3) わかりやすいマンマシンインターフェース（Fig. 1）と、実用的な計算速度を発揮できるモデルを実装した。そのため、ユーザはストレスなく短時間でシミュレーション計算を行うことができる。なお、CPUがPentium M、CPUクロックが1.7 MHz、物理メモリが768 MBの市販ノートパソコンを用いた場合、30日分の計算に要す

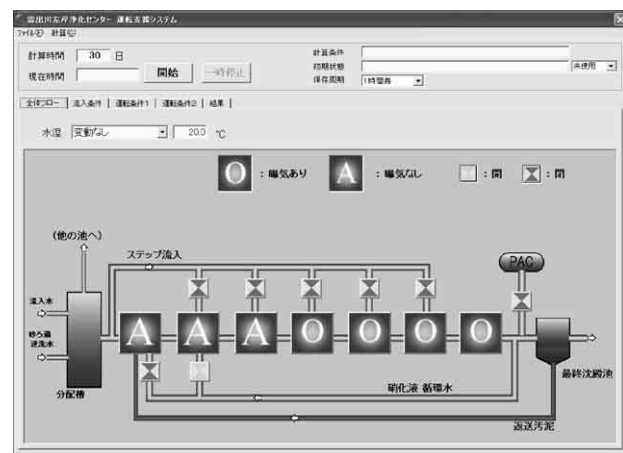


Fig.1 Sample of graphical user interface

る時間は約 3 min であった。

3. 実施設でのシミュレータの適合性調査

3.1 通常運転における処理状況の把握

本シミュレータを実務で利用するには、シミュレーション計算結果の妥当性を検証しておくことが必要である。そのため、通常運転時のデータを用いてシミュレーション計算を行い、予測計算結果と実績値を比較し、シミュレーション計算結果の妥当性を検証した。

入力データを **Table 2** に示す。流入水質として用いたデータは、生物学的酸素要求量 (BOD)、過マンガン酸カリウムによる化学的酸素要求量 (COD_{Mn})、全窒素 (T-N)、全リン (T-P)、浮遊物質 (SS) である。流入条件 (流入水量、流入水質) および運転操作条件 (硝化液循環量、返送汚泥量、余剰汚泥引抜量、送風量) については時間変動を考慮し、反応タンク水温については時間変動がないものとしてシミュレーション計算を行った。なお、リン除去のための凝集剤の添加は行われていなかった。

予測計算結果と実績値を比較したところ、処理水の有機物、窒素、リン濃度、および MLSS 濃度の予測計算値は実測値とほぼ一致しており (**Table 3**)、一回の比較ではあるが、シミュレーション計算結果は処理実績を良好に表現できた。ここで、処理水の BOD の計算値は、生物分解性有機物濃度とアンモニア性窒素 (NH₄-N) の硝化にともなう酸素要求量を含んだ値である。

また、計算結果が示す反応タンク各区画における成分濃度変化のプロファイル (**Fig. 2**) は実測のプロファイルと良く一致しており、各反応タンクでの反応の状況を良好に表現できた。以上より、通常運転データを用いた本シミュレー

Table 2 Input data of simulation about usual operation

Operation	1st cell	Aa	
	2nd to 3rd cell	Ao	
	4th to 7th cell	Ox	
	Influent flow	(m ³ /d)	7 500
Circulation flow	(m ³ /d)	9 600	
Return sludge flow	(m ³ /d)	3 000	
Excess sludge flow	(m ³ /d)	96	
Air flow	(Nm ³ /d)	23 800	
Temperature	(°C)	20	
Influent quality (Daily average)	(mg/l)	BOD	140
		COD _{Mn}	70
		T-N	30
		T-P	4.2
		SS	54

Aa: Anaerobic
Ao: Anoxic
Ox: Oxidic

Table 3 Comparison between calculated and measured values of effluent, and MLSS of aeration tank (Simulation about usual operation)

	Calculated	Measured
BOD	< 2	< 2
SS	1.8	1.6
T-N	7.3	7.9
NH ₄ -N	0.1	0.1
NO ₃ -N	6.9	6.6
T-P	1.0	0.6
PO ₄ -P	0.9	0.5
MLSS	2 130	1 920

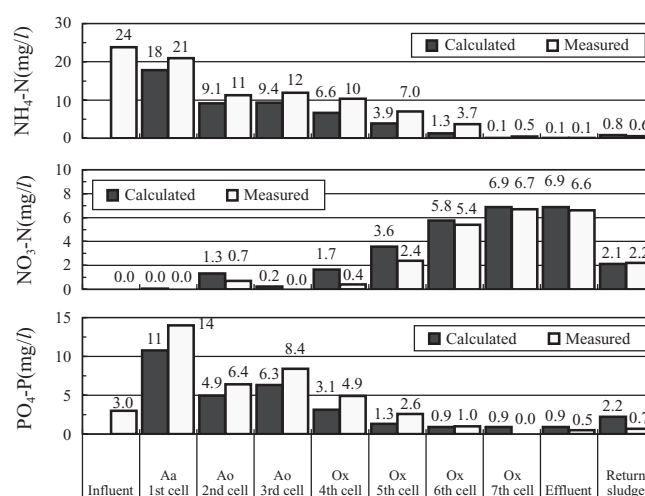


Fig. 2 The profile of water quality in each cell

ション計算結果は妥当であったといえる。

なお、送風量を 5% 増加させると処理水の全窒素濃度の計算値は 0.2 mg/l 上昇した (硝酸性窒素 (NO₃-N) が 0.4 mg/l 上昇)。また、送風量を 5% 減少させるとアンモニア性窒素 (NH₄-N) が 0.5 mg/l 上昇し、アンモニア性窒素の酸化反応 (硝化反応) が不安定になることが分かった。これより、窒素除去を安定して行うことができる量の空気がおおむね供給されていることが分かった。

3.2 増設系列の立上げ運転方法の検討・実証

変動の大きい処理状況あるいは通常実施していない運転条件下での処理状況を、通常の処理状況や経験則に基づいて定量的に予測することは、極めて困難である。そのため、過去に運転を経験していない新しい仕様の増設施設の立上げ運転は、運転管理者にとって非常に不安であり、事前にシミュレーション解析を行い、運転操作手順を論理的に計画できることは有効である。そこで、シミュレーション解析を行い、結果に基づいて選定した運転方法を増設系列の立上げに適用した。さらに、処理水質の予測計算値と実績値を比較して、シミュレーション解析結果の有効性・妥当

性を検証した。

シミュレーションにより、処理水質を満足する反応タンクの嫌気・好気配列パターンとして、反応タンク7区画のうちの第3, 4, 6, 7区画に送気し、「嫌気 (Aa)-無酸素 (Ao)-好気 (Ox)-無酸素 (Ao)-好気 (Ox)」(AAOOAOO) という配列で運転することとした。複数の運転条件について検討し、「高度処理」を「短期間で順調に」立上げるために、以下の運転方法を選定した。なお、シミュレーションを行うための流入水質データには、過去の当該時期の水質データを用いた (Table 4)。反応タンク水温も過去の当該時期の 18°C に設定した。

ステップ1: 稼働中の高度処理系列の送風量を増やさずに MLSS 濃度を 2 400 mg/l まで高めても、処理水質が悪化 (BOD や NH₄-N が上昇) する可能性は低いことが分かった。したがって、既存系列の MLSS 濃度を事前に 2 400 mg/l まで高め、一部を増設系列の種汚泥とする。

ステップ2: 流入水と種汚泥を所定の比率で供給し、5日間で増設系列の反応タンクを満水にする。曝気は種汚泥供給と同時に反応タンク全7区画で開始する。この際に、送風量を適正に調整しないと汚泥の生物活性が低下することが、シミュレーション解析結果から示唆された。したがって、解析結果を参考に送風量を適正に調整する。

ステップ3: 流入水量と送風量を適正に調整すれば、連続通水開始直後でも処理水質が悪化 (BOD や NH₄-N が上昇) する可能性は低いことが分かった。また、硝化

Table 4 Input data of simulation about start-up operation of enlargement

Operation of each cell	1st cell	Aa	
	2nd cell	Ao	
	3rd to 4th cell	Ox	
	5th cell	Ao	
	6th to 7th cell	Ox	
Influent flow	(m ³ /d)	6 000	
Circulation flow	(m ³ /d)	8 300	
Return sludge flow	(m ³ /d)	2 200	
Excess sludge flow	(m ³ /d)	72	
Air flow	(Nm ³ /d)	25 000	
Temperature	(°C)	18	
Influent quality (Daily average)	(mg/l)	BOD	100
		COD _{Mn}	60
		T-N	27
		T-P	3.4
		SS	55

Aa: Anaerobic
Ao: Anoxic
Ox: Oxidic

Table 5 Comparison between calculated and measured values of effluent, and MLSS of aeration tank (Simulation about start-up operation of enlargement)

Days*	(mg/l)			
	After 1day		After 15days	
	Calculated	Measured	Calculated	Measured
BOD	1.2	3.8	1.7	3.4
SS	2	4	2	4
T-N	5.6	8.6	5.8	6.9
NH ₄ -N	0.1	0.8	0.1	0.1
NO ₃ -N	5.3	6.1	5.4	4.7
T-P	0.5	0.3	0.4	0.3
PO ₄ -P	0.4	0.1	0.3	0.1
MLSS	990	1 100	1 800	2 100

* Days after starting of continuous operation

液の循環と汚泥の返送を行って連続通水を開始すると、処理水の全窒素、全リン濃度は一時的に高くなるが、その濃度レベルは低いことが分かった (T-N 濃度は 8 mg/l 未満、T-P 濃度は 1 mg/l 未満)。したがって、硝化液の循環と汚泥の返送を行いながら送風量を適正に調整して連続通水し、高度処理運転を開始する。連続通水開始から4日間は流入水量を 3 000 m³/d として、次の4日間は 4 000 m³/d、次の3日間は 5 000 m³/d と段階的に増やし、それ以降は 6 000 m³/d で連続通水運転する。

連続通水開始1日後 (流入水量 3 000 m³/d) および同15日後 (流入水量を 6 000 m³/d に増やして4日後) の処理水の有機物、窒素、リン濃度は処理目標値よりも低く、シミュレーション解析結果から予測されたとおり、連続通水開始初期から安定して高度処理が行われていた (Table 5)。また、予測計算結果と実績値を比較したところ、処理水の有機物、窒素、リン、MLSS の予測計算値は実測値とよく一致しており (Table 5)、シミュレーション計算結果は処理実績を良好に表現できた。以上より、増設施設の立上げ運転という過去に経験のない非定常的な処理状況の予測シミュレーションにおいても、その解析結果は妥当であったといえる。また、運転管理の実務に本シミュレータを用いることの有効性を示すことができた。

4. 省エネルギー・高度処理化へのシミュレータ適用の有用性調査

現在、本処理場は処理目標値を満足しているが、機器の増設・増強やエネルギー投入量の増加 (送風量の増加) なしに処理水の汚濁成分濃度を下げられれば、環境負荷の低減、処理の安定化を図ることができるため有益である。

そこで、現有の施設を利用した運転条件の変更による処理コスト低減を目指して、シミュレーション解析による運

転条件の検討を行った。具体的には、反応タンク7区画への送気を変えることで嫌気-無酸素-好気タンクの配列パターンのシミュレーション解析を行い、送風量を同等もしくは減少させた上で処理水の全窒素濃度を下げられる配列について検討した。

本検討事例では、高度処理系列を対象に検討を行った。検討した構成は嫌気-無酸素-好気-無酸素-好気という配列(AAOOAOO)、比較対照の構成は嫌気-無酸素-好気という現在の配列(計画設計時の構成:AAAOOOO)とした。水量、汚泥量、流入水質はTable 6に示したとおりである。反応タンクの水温は、月平均値の最低値の16°Cに設定した。

送風量を減らし、処理水のNH₄-Nが1 mg/l以下で全窒素濃度が最低となる時の送風量および処理水質を比較した。好気タンクの送風量のバランスは、全送風量に対して、好気タンク1~4の順に25%、25%、24%、26%となるように設定した。表中の送風率は、データ採取時の送風量(基準送風量)を100%とした時の設定送風量の割合である。余剰汚泥引抜き量は、MLSSが2 500 mg/lとなるように調整した。

処理水の全窒素濃度が最低となる時の送風量および処理水質をTable 7に示した。本検討での流入負荷は、計画負荷に対してBODが1.2倍、SSが0.7倍、T-Nが同等、T-Pが0.8倍であったが、検討した構成では、処理水の全窒素

Table 6 Input data of simulation about operation for improvement of nutrient removal

		Contrasted	Examined
Operation of cell	1st cell	Aa	Aa
	2nd cell	Ao	Ao
	3rd cell	Ao	Ox
	4th cell	Ox	Ox
	5th cell	Ox	Ao
	6th cell	Ox	Ox
	7th cell	Ox	Ox
Influent flow	(m ³ /d)	7 000	
Circulation flow	(m ³ /d)	10 000	
Return sludge flow	(m ³ /d)	2 800	
Excess sludge flow	(m ³ /d)	96	
Air flow	(Nm ³ /d)	21 300	
Temperature	(°C)	16	
Influent quality (Daily average) (mg/l)	BOD	140	
	COD _{Mn}	62	
	T-N	29	
	T-P	3.7	
	SS	57	

Aa: Anaerobic
Ao: Anoxic
Ox: Oxidic

Table 7 Comparison between calculated and measured values of effluent, and MLSS of aeration tank (Simulation about operation for improvement of nutrient removal)

		Contrasted	Examined
Air flow rate	(%)	97	94
BOD	(mg/l)	5.4	5.4
T-N	(mg/l)	7.4	6.6
NH ₄ -N	(mg/l)	0.6	0.7
NO ₃ -N	(mg/l)	6.2	5.4
T-P	(mg/l)	0.3	0.3
MLSS	(mg/l)	2 500	2 500

Air flow rate: Air flow at simulation/ Air flow at normal operation

濃度を低下させ(現構成に比べて0.8 mg/l低下、処理水のT-Nは6.6 mg/l)、かつ送風量を削減させる(基準送風量に対して6%減、設計時の構成に対して3%減)ことが可能であることが分かった。これにより、本シミュレータにて現有施設のままで、より省エネルギー・高度処理化を行えることが確認できた。

5. まとめ

処理場運転管理者の利用に適したシミュレータを目指し、実処理場を対象とした下水処理プロセス運転管理シミュレータを開発した。このシミュレータは、モデルパラメータの再調整を行わず日常の測定データだけを用いて、短時間で一年を通じたシミュレーション計算を行うことができるという特長を有している。

実施設の運転条件の検討では、通常運転および過去に経験がない非定常的な運転(増設施設の立上げ運転)の予測シミュレーション解析を行い、計算結果が妥当であることを実証した。増設施設の立上げでは、シミュレーション解析結果より選定した運転方法を適用して当初から安定した高度処理を行い、運転管理の実務に本シミュレータを用いる有効性を示した。また、反応タンク7区画の配列(嫌気-無酸素-好気タンクの配列)を変更することで、処理水の全窒素濃度の低下と送風量の削減の可能性を見出した。

筆者らは、運転管理の利便性の追求と環境負荷の低減のため、引き続き、本シミュレータの発展を続けていきたい。具体的には、運転操作量を流入水量・流入水質の変動に対して、自動的に解析するシステムを構築したいと考えている。

本シミュレーションシステムを開発するにあたり、実施設における数々の貴重なデータをご提供いただきと同時に、調査実験の遂行にあたっては多大なご協力をいただきました。ご協力いただきました三重県下水道公社、ならびに、雲出川左岸浄化センターの関係諸氏の方々に深甚の謝意を

表します。

Sci. Tech. vol. 39, no. 1, 1999, p. 165-182.

参考文献

- 1) 国土交通省公表. 性能発注の考え方に基づく民間委託のためのガイドライン. 2001-04.
- 2) Henze, M.; Gujer, W.; Mino, T.; van Loosdrecht, M.C.M (IWA Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment). Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report. no. 9, IWA Publishing, London, 2000.
- 3) 産業用水調査会発行. 特集/活性汚泥モデルの実務への展開. 用水と廃水. vol. 46, no. 10, 2004.
- 4) Henze, M.; Gujer, W.; Mino, T.; Matsuo, T.; Wentzel, M.C.; Marais, G.v.R.; van Loosdrecht, M.C.M. Activated sludge model No. 2d, ASM2d. Wat.



周藤 孝雄



大橋 一聡



小野 俊郎