

## 〈研究発表〉

# 窒素・リン除去を目的とした区画別送風比率制御のシミュレーション評価

時 本 寛 幸<sup>1)</sup>, 小 原 卓 巳<sup>1)</sup>, 山 中 理<sup>2)</sup>, 平 岡 由 紀 夫<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (株)東芝 電力・社会システム技術開発センター  
(〒 183-8511 東京都府中市東芝町 1 E-mail: hiroyuki.tokimoto@toshiba.co.jp)

<sup>2)</sup> (株)東芝 電力・社会システム技術開発センター  
(〒 212-8581 神奈川県川崎市幸区小向東芝町 1 E-mail: osamu2.yamanaka@toshiba.co.jp)

<sup>3)</sup> (株)東芝 水・環境システム事業部  
(〒 212-8585 神奈川県川崎市幸区堀川町 72-34 E-mail: yukio.hiraoka@toshiba.co.jp)

### 概 要

下水処理場では、富栄養化対策として、既設躯体を利用し低コストで窒素・リンを除去する準高度処理の検討が進められている。筆者らは、生物反応槽の流れ方向の送風比率を変更することにより、生物反応槽内に嫌気、微好気領域を作り出す準高度処理対応の制御システムを考案した。考案した制御方式の有効性を検証するための第一ステップとして、送風比率の変更が放流水質の窒素・リン、放流水質指標と運転コスト指標に与える影響を、活性汚泥モデルによりシミュレーション評価した結果について報告する。

キーワード：曝気風量制御，活性汚泥モデル，下水処理，窒素除去，リン除去

## 1. はじめに

閉鎖性水域に接続する下水処理場では、富栄養化対策として、窒素・リン除去に対応した下水処理プロセス（以下、高度処理プロセス）の導入が進められている。しかしながら、公共投資が縮減されるなか、高度処理プロセスの導入は多大なコストがかかること等の理由により、普及率は低い状況にある<sup>1)</sup>。この状況に対して、各自治体では既設の標準活性汚泥法の躯体を有効に利用し、生物反応槽の前段部の曝気を制限し、嫌気、微好気領域を作り出すことにより、有機物の除去に加えて、低コストで窒素・リン除去を行う準高度処理の取組みが行われている<sup>2)</sup>。しかしながら、準高度処理に対応した制御方式が確立されているとはいえない状況である。

筆者らは、生物反応槽流れ方向の区画別の送風比率を変更することで、前段部に嫌気、微好気領域を作り出すことにより、窒素・リン除去を行う準高度処理向けの制御方式を考案した。本報告では、考案した制御方式の有効性を検証する第1ステップとして、区画別の送風比率の変更が放流水質・運転コストに与える影響を活性汚泥モデル No. 2d<sup>3)</sup>（以下、ASM2d）を利用し、シミュレーション評価を行った結果について述べる。

## 2. 対象システム

今回シミュレーション評価の対象とした下水処理プロセスを Fig. 1 に示す。4 区間からなる標準活性汚泥法とした。ブロワの空気量は、第 4 区間の DO 計により計測された DO 値が所定の DO 値となるようにコントロールされる。第 1 区間～第 4 区間に設けた風量調節バルブの開度を調節することにより、第 1 区間～第 4 区間の送風比率を変更することが可能なプロセスである。

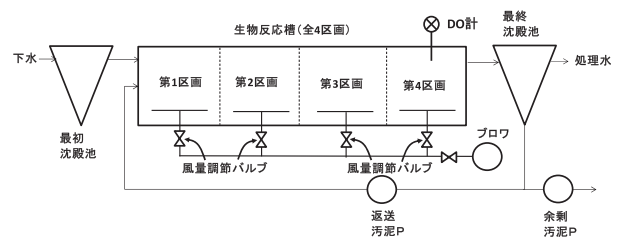


Fig. 1 Target process

## 3. 方 法

### 3.1 下水処理プロセスシミュレータ

Fig. 1 に示すプロセスを模擬するシミュレータを構築した。シミュレータは、3.3 節に示す流入条件、運転条件を入力とし、放流水質並びに曝気風量、汚泥発

生量を演算するものである。生物反応槽での微生物反応は、4つのASM2dを連結することで表現した。最終沈殿池は完全固液分離モデルとし、処理水へは固形物が流出しないものとした。また、沈殿池の汚泥堆積部での反応を模擬するために仮想無酸素槽を返送汚泥ラインに設けた<sup>4)</sup>。曝気風量の演算は、第4区画のDOが設定した値になるように全体の風量が制御されるものとし、各区画への送風比率を外部から設定することで、送風比率を変更できるようにした。

### 3.2 活性汚泥モデルパラメータの調整

ASM2dには各種モデルパラメータがあるが、Fig. 1のプロセス構成で、準高度処理運転を実施している下水処理場の実データを利用して調整し、硝化菌の死滅速度0.15(デフォルト値)→0.075[1/日]、硝化菌のDOに対する半飽和定数0.5(デフォルト値)→0.25[gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]とした。その他のパラメータは、デフォルト値とした。

### 3.3 シミュレーション条件

#### (1) 流入条件

流入水量をHRTで6, 8, 10, 12, 16[h]の5条件、流入水質をTable 1に示す低負荷(Inf1)、基準負荷(Inf2)、高負荷(Inf3)、BODと窒素・リンの比率が大小異なる2条件(BOD/NP=小(Inf4)、BOD/NP=大(Inf5))の5条件、合計25条件を流入条件とした。

#### (2) 運転条件

Table 2に示す通りOpt1~Opt4のように汚泥返送率、SRT、第4区画DO目標値を設定した。

生物反応槽の区画別送風比率は、Table 3に示すAir1~6の6条件とした。Air1は全面均等曝気、Air2はテーパードエアレーション、Air3~Air6は前段部に嫌気、微好気領域を構築することを目的とした条件である。

Table 1 Influent quality condition and ASM2d's input

項目	単位	Inf1	Inf2	Inf3	Inf4	Inf5
		低負荷	基準負荷	高負荷	BOD/NP =小	BOD/NP =大
BOD	mg/L	60	120	180	60	180
NH <sub>4</sub> -N	mg/L	15	25	40	25	25
PO <sub>4</sub> -P	mg/L	2	4	6	4	4
COD <sub>cr</sub>	mg/L	120	240	360	120	360
記号	名称	入力値				
S <sub>O2</sub>	溶存酸素	0	0	0	0	0
S <sub>F</sub>	易分解性有機物	8.4	16.8	25.1	8.4	25.1
S <sub>A</sub>	発酵生成物(酢酸)	5.6	11.2	16.8	5.6	16.8
SNH <sub>4</sub>	アンモニア性窒素	15	30	45	30	30
SN <sub>O3</sub>	硝酸性窒素	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
SPO <sub>4</sub>	リン酸性リン	2.0	4.0	6.0	4.0	4.0
S <sub>alk</sub>	アルカリ度	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
S <sub>I</sub>	非分解性有機物	9.5	19.2	28.8	9.5	28.8
X <sub>I</sub>	非分解性有機物	9.5	19.2	28.8	9.5	28.8
X <sub>S</sub>	遅分解性基質	69.9	139.9	209.8	69.9	209.8
X <sub>H</sub>	従属栄養菌	16.8	33.6	50.4	16.8	50.4
X <sub>PAO</sub>	リン蓄積菌(PAO)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
X <sub>PP</sub>	PAO中のポリリン酸	0	0	0	0	0
X <sub>PHA</sub>	PAOの蓄積有機物	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
X <sub>AUT</sub>	硝化菌	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

### 3.4 シミュレーション結果の評価方法

3.3節に示したシミュレーション条件を一定値で入力し、定常状態に達した値を評価した。生物学的窒素・リン除去プロセスにおいては、運転コストの低減と放流水質の向上、窒素とリンの除去等複数のトレードオフが存在し、運転の良否を一つの判断指標で評価することは難しい。今回、処理水T-N、T-Pの評価に加え運転の良否を判定する方法として、活性汚泥モデルによる運転評価のベンチマーク指標として文献<sup>5,6)</sup>にて提唱されている放流水質指標(以下、EQI)、運転コスト指標(以下、OCI)を評価した。

EQIは(1)式にて表現される指標で、放流水質負荷を一元評価した指標である。式中の各項目の算出方法に関してTable 4に示す。文献<sup>5,6)</sup>においてはリンに関する重みづけを行っていない。そこで、筆者らは下水道法施行令の最も厳しい計画放流水質区分のBOD10[mg/L]以下、T-P0.5[mg/L]以下を根拠に、T-PはBODに対して、10/0.5=20倍の重みであると仮定し、(1)式の通りT-Pの重みを設定した。

OCIは(2)式にて表現される指標で、運転コストに関わる指標である。式中の各項目の算出方法に関してTable 5に示す。今回の検討においては、汚泥処理は対象外としたため、EC、ME、MP、HEはゼロとした。

EQI、OCIともに値が小さいほど、それぞれ放流水質負荷、運転コストが小さくなり、良好な運転条件であると評価できる。

Table 2 Operation conditions

	Opt1	Opt2	Opt3	Opt4
汚泥返送率 [%]	50	50	50	50
SRT [日]	5	5	10	10
第4区画DO目標値 [mg/L]	1	3	1	3

Table 3 Aeration ratio for each section

	第1区画	第2区画	第3区画	第4区画
Air1	25%	25%	25%	25%
Air2	40%	30%	20%	10%
Air3	10%	10%	40%	40%
Air4	0%	33%	33%	33%
Air5	0%	20%	40%	40%
Air6	0%	0%	50%	50%

Table 4 Variable in relation to EQI

記号	単位	項目	算出方法
S <sub>Se</sub>	mg/L	放流水質SS濃度	0(完全固液分離モデルのため)
COD <sub>cr,e</sub>	mg/L	放流水質COD濃度	ASM2d計算値
BOD <sub>e</sub>	mg/L	放流水質BOD濃度	0.25・{S <sub>A</sub> +S <sub>F</sub> +X <sub>S</sub> +(1-0.08)・{X <sub>H</sub> +X <sub>AUT</sub> +X <sub>PAO</sub> }}
T <sub>Ne</sub>	mg/L	放流水質TN濃度	ASM2d計算値
T <sub>Pe</sub>	mg/L	放流水質TP濃度	ASM2d計算値
S <sub>NO<sub>3,e</sub></sub>	mg/L	放流水質硝酸濃度	ASM2d計算値
Q <sub>e</sub>	m <sup>3</sup> /日	放流水量	HRTと余剰汚泥引抜き量から算出

Table 5 Variable in relation to OCI

記号	単位	項目	算出方法
AE	kwh/日	曝気エネルギー	w1・Qair
PE	kwh/日	ポンプエネルギー	w2・(Qex+Qret)
SP	kgDS/日	汚泥発生量	Qex・Xtss_ex
EC	kgCOD/日	外部炭素源投入量	0
ME	kwh/日	メタン回収エネルギー	0
MP	kgCH <sub>4</sub> /日	メタンガス発生量	0
HE	kwh/日	加温エネルギー	0
w1	kwh/m <sup>3</sup>	ブロワのエネルギー換算係数	0.033
w2	kwh/m <sup>3</sup>	ポンプのエネルギー換算係数	0.02
Qair	m <sup>3</sup> /日	曝気風量	ASM2d計算値
Qex	m <sup>3</sup> /日	余剰汚泥引抜流量	流入量×引抜率
Qret	m <sup>3</sup> /日	返送汚泥流量	流入量×返送率
Xtss_ex	m <sup>3</sup> /日	余剰汚泥中の固形分濃度	ASM2d計算値

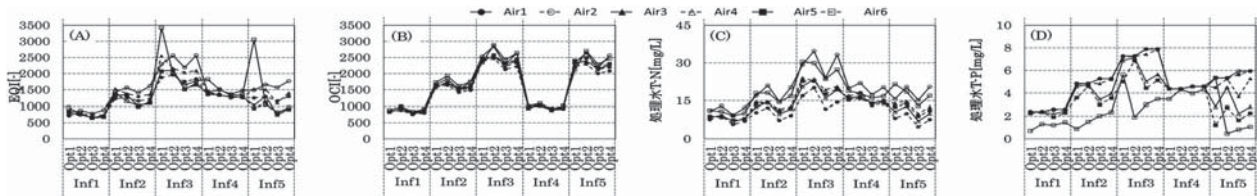
$$\begin{aligned} \text{EQI}[-] = & Q_e \cdot (2 \cdot \text{SSe} + \text{COD}_{\text{Cr}, e} \\ & + 30(\text{TNe} - \text{S}_{\text{NO}_3, e}) + 10 \cdot \text{S}_{\text{NO}_3, e} \\ & + 2 \cdot \text{BOD}_e + 40 \cdot \text{TPe}) / 1000 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{OCI}[-] = & \text{AE} + \text{PE} + 3 \cdot \text{SP} + 3 \cdot \text{EC} \\ & + \text{ME} - 6 \cdot \text{MP} + \text{HE} \end{aligned} \quad (2)$$

## 4. 結果

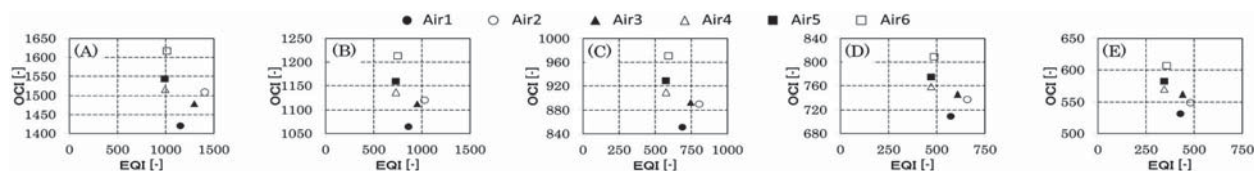
### 4.1 送風比率条件別の評価結果

HRT 6[h]における送風比率条件別の評価結果をFig. 2に示す。EQI, OCIとT-Nに関しては、Fig. 2(A)~(C)より、全ての流入水質条件、送風比率条件で、Opt3が低くOpt3の運転が良いことがわかる。



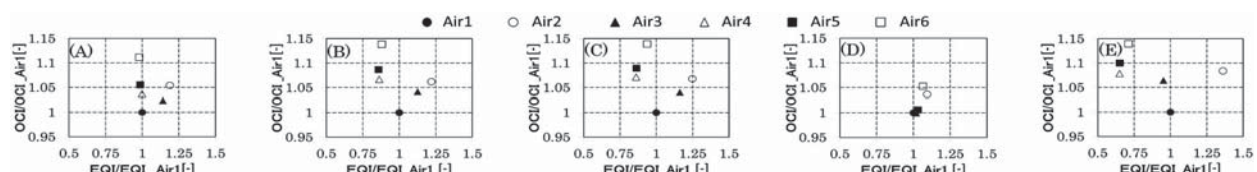
((A): EQI, (B): OCI, (C): Effluent T-N, (D): Effluent T-P)

Fig. 2 Evaluation results of EQI, OCI, Effluent T-N and T-P on HRT 6[h]



((A): HRT 6[h], (B): HRT 8[h], (C): HRT 10[h], (D): HRT 12[h], (E): HRT 16[h])

Fig. 3 Evaluation results of EQI and OCI on Inf2 and Opt3



((A)~(E): Inf1~Inf5)

Fig. 4 The ratio of EQI and OCI for Air1's on HRT 6[h] and Opt3

T-Pに関しては、Fig. 2(D)より、全ての流入水質条件で、Air6, Air5, Air4の順に低く、送風比率条件としてはAir6, Air5, Air4の順に良好であることが分かる。

### 4.2 送風比率条件別のEQIとOCI

EQI, OCIとT-Nの点で良好な運転であったOpt3に関して、基準負荷のInf2を代表例とし、EQI, OCIをFig. 3に示す。EQIとOCIは、Fig. 3より、HRTにより絶対値は変化するものの、各送風比率条件での大小関係は同様であることが分かる。他の流入水質条件でも同様であり、検討した条件では、HRTを変更した際の、各送風比率条件でのEQIとOCIの大小関係に違いは見られなかった。

HRT 6[h] Opt3の場合を代表例とし、EQI/EQI\_Air1 (以下、EQI比)とOCI/OCI\_Air1 (以下、OCI比)をFig. 4に示す。EQI比、OCI比は、各送風比率条件でのEQI, OCIをAir1でのEQI, OCIで除算し、Air1を基準に正規化した指標である。

OCIに関しては、Fig. 4よりAir2~Air6のOCI比が1より大きいことから、全ての流入水質条件で、Air1の送風比率条件が良好であることがわかる。

EQIに関しては、Fig. 4(D)より、Inf4の場合、Air1等の運転条件が良好であるが、Fig. 4(A)~(C)と(E)より、Inf4以外の場合は、Air4, 5の運転でEQI比が低い傾向にあり、Air4, 5の送風比率条件が良い



ことがわかる。さらに、Air4と5を比べると、OCI比はAir4の方が低い。このことから、Air4とAir5の比較では、Air4の送風比率条件が望ましいことが示唆される。特に、Inf5でAir4とする方が、EQI比が0.65と、最もEQIの改善効果が高いことがわかる。また、Fig.4より、全ての流入水質条件で、Air2のEQI比が最も高く、Air2の送風比率条件は、EQIの点では悪いことがわかる。

### 5. 考 察

Inf2, 5を代表例として、DO, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-Pの水質プロファイルを図5に示す。

まず、Air1の運転で、OCIが低くなることを考察する。Air1では、DOプロファイルより、両流入条件ともに第1~3区画がDO 0.1~0.2 [mg/L]の微好気領域となっている。NH<sub>4</sub>-Nのプロファイルより、この微好気領域で硝化反応が進行していること、NO<sub>3</sub>-Nプロファイルより、他の条件と比較して第4区画のNO<sub>3</sub>-Nが低くなっていることが確認できる。これらのことから、第1~第3区画で硝化・脱窒反応の両方が生じていることがわかる。Air1で、OCIが低くなるのは微好気領域が他の条件に比べ最も大きく脱窒量が多いことにより、脱窒過程で消費される有機物量が多く、BOD酸化に伴う曝気風量、汚泥発生量ともに下がるためと考えられる。

次に、Air2の運転で、EQIが高くなることを考察する。Air2では、DOプロファイルより、全体的に他の条件と比べ、第1~第3区画のDOが高く、全体が好気領域となっている。嫌気、微好気領域が存在しないことから、他の送風比率条件と比較して、窒素・リン除去ともに悪く、EQIが高くなっていることがわかる。

最後に、Air4の運転で、EQIが良好となることを考察する。Air4では、DOプロファイルより、両流

入条件ともに第1区画が嫌気、第2、第3区画が微好気領域になっている。微好気領域での硝化・脱窒反応による、T-Nの低減がAir1に次いで大きいことに加え、PO<sub>4</sub>-Pプロファイルから、リン蓄積菌による嫌気領域でのリン吐出反応、好気領域でのリン吸収反応が進んでいることが読み取れ、PO<sub>4</sub>-PがAir1よりも大きく低減でき、リン除去性能が高い分、EQI値が低くなっていると考えられる。特に流入水質のBOD/P比が大きいInf5の場合、リンの除去性能がより高く、Air1に対するEQIの低減率が大きい結果となったと推察できる。また、Air5と比較すると、リンの除去性能は若干低いものの脱窒性能が高いことから、EQI値は窒素除去とリン除去のトレードオフで同等となっているものの、BOD酸化に関わる運転コストが低くなり、OCI比はAir4が低い運転となっていると考えられる。

以上から、送風比率の変更により嫌気、微好気、好気領域の容量が変わることが、EQI, OCI, T-N, T-Pに影響を及ぼしており、送風比率の制御で各種評価指標を制御できる可能性が示唆された。

### 6. ま と め

本報告では、種々の流入条件で、送風比率条件の変更が運転コスト、放流水質に与える影響を評価した。

送風比率の変更で嫌気、微好気、好気領域の容量が変わり、特に微好気領域が大きくなる条件でT-Nが改善し、嫌気領域が大きくなる条件でT-Pが改善することがわかった。

今後、この知見を活用し、窒素・リンの処理状況をオンライン測定し、処理状況に応じて各区画への送風比率を制御する自動制御システムを構築し、実処理施設で有効性を検証していきたい。

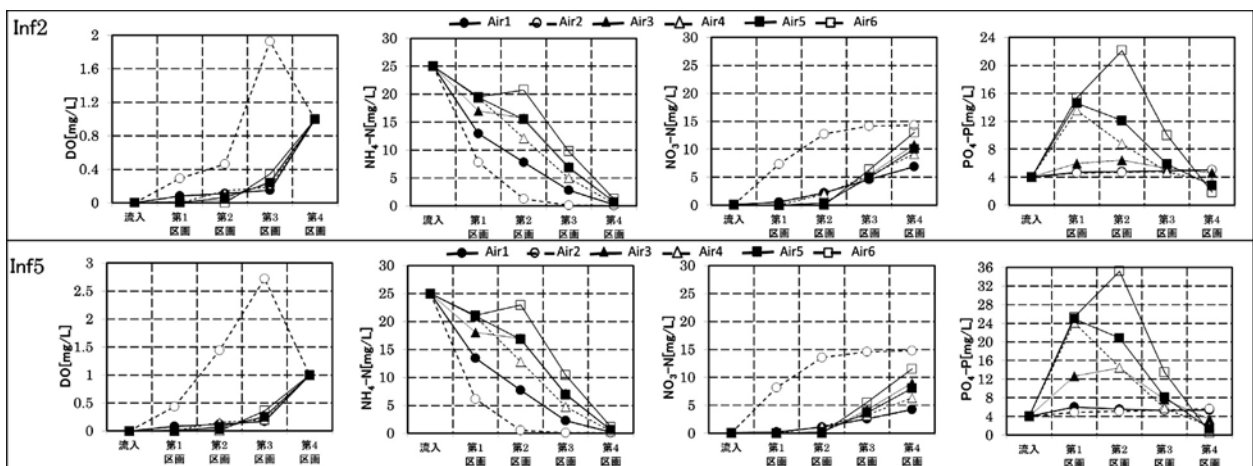


Fig.5 Evaluation results of DO, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P Profile on HRT 6[h] and Opt3

## 参考文献

- 1) 国土交通省：高度処理ナレッジ集 —— 既存施設を活用した段階的高度処理の取り組み ——，高度処理ナレッジ創造戦略会議，pp.1-149 (2014)
- 2) 薄井宗光：疑似嫌気好気活性汚泥法における嫌気部拡大による処理への影響と省エネルギー効果，環境システム計測制御学会，Vol.13, No.2/3, pp.101-104 (2008)
- 3) IWA task group: “Activated Sludge Model ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3” (2000)
- 4) 和田真澄，井元順一，浜本洋一，間 正文，橋本敏一，川口幸男，辻 幸志：担体投入活性汚泥法（リンポープロセス）への活性汚泥モデルの適用検討，第49回下水道研究発表会講演集，pp.970-972 (2012)
- 5) I. Nopens, L. Benedetti, et. al.: Benchmark Simulation Model No 2: finalization of plant layout and default control strategy, Water Science & Technology, Vol.18, No.1, pp.1967-1972 (2010)
- 6) J. Alex, L. Benedetti, et. al.: Benchmark Simulation Model no.1 (BSM1), Report by the IWA Taskgroup on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs, (2008)