

〈研究発表〉

処理水質の窒素・リン情報に基づく好気容積比制御のシミュレーション評価

小原卓巳¹⁾, 時本寛幸¹⁾, 山中理¹⁾, 平岡由紀夫²⁾

¹⁾ (株)東芝 プラントシステムソリューション開発部
(〒183-8511 東京都府中市東芝町1 E-mail: takumi.obara@toshiba.co.jp)

²⁾ (株)東芝 水・環境システム技術部
(〒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

本論文では、下水処理施設における段階的高度処理に対応する制御方式として、処理水のアンモニアならびにリンの水質情報に基づいて生物反応槽の好気区画の容積を制御する好気容積比制御アルゴリズムを提案する。本制御の目的は、好気区画の容積を制御することにより、硝化機能を維持しながら、リン除去の改善を図ることである。提案する制御のアルゴリズムを示すとともに、活性汚泥モデルを組込んだシミュレータを使って、その制御アルゴリズムの特徴と有効性を評価した結果を報告する。

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
原稿受付 2015.6.30

EICA: 20(2・3) 63-67

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、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、普及率は伸び悩んでいる状況にある¹⁾。この状況に対して、各自治体では既設の有機物除去を主目的として構築された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、既設躯体を大幅に改築することなく、窒素・リン除去を行う段階的高度処理の取組みが行われている²⁾。しかしながら、現在、段階的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。

本論文では、この段階的高度処理に対応する制御方式の一つとして、標準活性汚泥プロセスの下水処理施設を対象に、生物反応槽の「好気区画の容積比（好気容積比）」を生物反応槽出口水のアンモニア性窒素濃度（NH₄-N）、リン酸性リン濃度（PO₄-P）に応じて、ダイナミックに制御し、アンモニアの除去（硝化）とリン除去の両立を図る制御方式（以下、「好気容積比制御」）を提案する。硝化は、N-BOD（アンモニア起源BOD）の低減によるBODの低減と窒素除去を目的に既に多くの実施設で行われて

いるものであるが、提案する制御方式は、硝化機能を維持しながら、更にリン除去の改善を図ることを目的としている。

本論文では、提案する好気容積比制御の制御アルゴリズムについて述べ、下水処理施設の生物反応をモデル化した活性汚泥モデル No. 2d（ASM2d）³⁾ を組込んだプロセスシミュレータを利用して、好気容積比制御の重要なパラメータである制御周期に関して検討した結果、ならびに制御目標値、処理施設の運転条件変更に関して、硝化とリン除去性能の観点から、提案する制御方式の特徴、有効性を評価した結果を報告する。

2. 対象システム

2.1 対象プロセス

Fig. 1 に示す全16区間からなる生物反応槽を有す

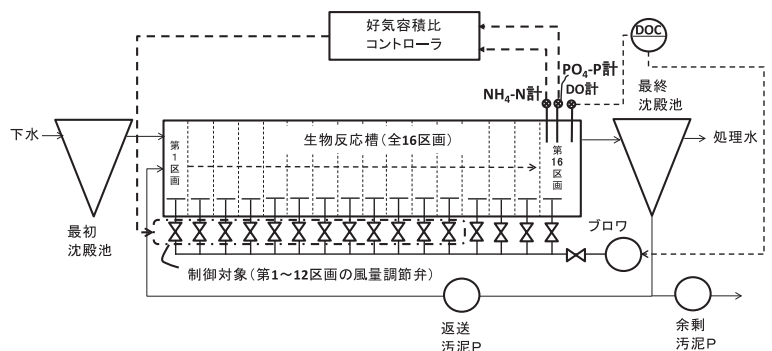


Fig. 1 Target Process

る標準活性汚泥プロセスを対象プロセスとした。流下方向に沿って、最前段区画を第1区画とし、最後の区画を第16区画と定義した。

2.2 制御システム

ブロワからの総空気量は、DOコントローラにより、第16区画のDO値が1 mg/LとなるようにDO一定制御を行うことを想定した。好気容積比コントローラの制御対象は、第1～第12区画の風量調節弁とし、第13～第16区画の風量調節弁は常時開とし、所定の好気容積は確保するものとした。制御動作は、第16区画の $\text{NH}_4\text{-N}$ 計と $\text{PO}_4\text{-P}$ 計の計測値から、**Fig. 2**の判定基準に従い、第1区画～第12区画に設置した風量調節弁を開閉することにより、好気槽の容積を1区画ずつ増減させるものとした。**Fig. 2**中の $\text{NH}_4\text{-Nref}$ 、 $\text{PO}_4\text{-Pref}$ はそれぞれ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の制御目標値であり、好気容積の増減の判断基準となる値である。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 計の値が $\text{NH}_4\text{-Nref}$ より大きい場合は、好気区画を拡大し、アンモニアの酸化(硝化)が進むように制御する(状態A)。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 計の値が $\text{NH}_4\text{-Nref}$ より小さい場合は、かつ $\text{PO}_4\text{-P}$ が $\text{PO}_4\text{-Pref}$ よりも大きい場合は、好気区画を縮小し、嫌気区画を拡大することで、リンの除去が進むように制御する(状態B)。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ がともに制御目標値よりも小さい場合は、水質としては良好なため、その状態を維持するよう働くものとした(状態C)。尚、好気容積比を減らす場合は、前段区画から順次行うものとし、好気容積比を増やす場合は、後段区画から順番に行うものとした。このように $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の計測値情報を基に好気区画を増減させるシンプルな制御方式である。 $\text{NH}_4\text{-N}$ が目標値を超えた場合は好気区画を増やす方向に制御が働くため、硝化機能を維持することを優先した方式である。

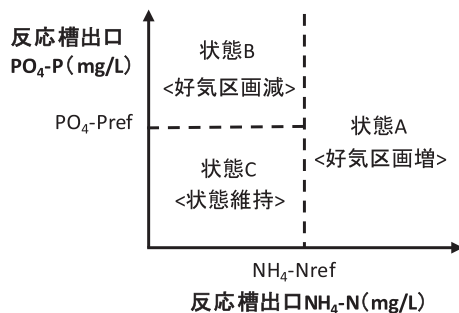


Fig. 2 Control scheme of aerobic volume control system

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

Matlab[®]/Simulink[®]上に構築した。シミュレータは、3.2節に示す流入条件、運転条件を入力とし、反応タンク内及び処理水の水質、曝気風量、汚泥発生量等を演算するものである。生物反応槽内の反応は、16個のASM2dを直列に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の模擬のために仮想無酸素槽を返送汚泥ラインに設けた⁴⁾。

尚、ASM2dのモデルパラメータに関しては、**Fig. 1**と類似のプロセス構成で疑似嫌気好気運転を実施している下水処理場の実施データに基づき、硝化菌の死滅速度0.15 → 0.075 (1/日)、硝化菌の酸素飽和定数0.5 → 0.25 (g O₂/m³)に調整した。その他のパラメータは、文献3)に示されるデフォルト値とした。

3.2 シミュレーション条件

(1) 流入条件

流入量は、平均2,790 m³/日(HRT 8 h)となるように与えた。流入量の変動パターンに関しては、IWA(国際水学会)のタスクグループが公開している変動パターン⁵⁾の内、雨天パターン、晴天パターンを組み合わせ、**Fig. 3**に示す28日分(4週間分)の流入量パターンを作成した。これに平均流入量を乗じることで、流入量の入力とした。流入水質の変動パターンは、国内の某下水処理施設の最初沈殿池出口水の通日試験データをベースにして、COD_{Cr}、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動パターンを**Fig. 4**のように定義した。**Fig. 4**の水質変動パターンに**Table 1**に示す平均水質を乗じることで、流入水質とした。以降の検討では、**Fig. 3**、**Fig. 4**の流入パターンを10回繰り返した280日間のシミュレーションを実施した。

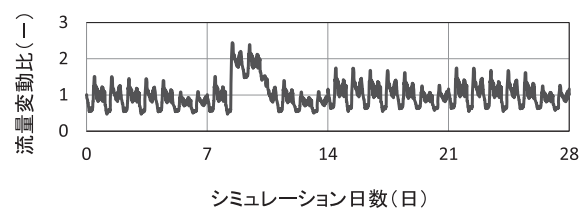


Fig. 3 Variation pattern of influent flow rate

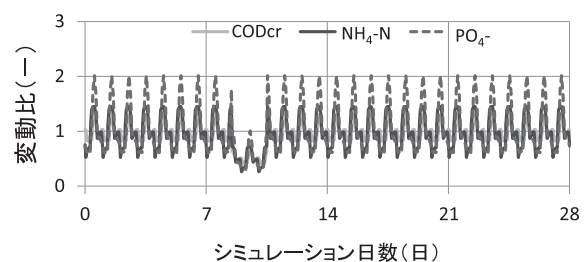


Fig. 4 Variation pattern of influent-wastewater quality

Table 1 Average of Influent-wastewater quality

記号	名称	単位	平均値
S _{O2}	溶存酸素	mg/L	0
S _F	易分解性有機物	mg/L	14.7
S _A	発酵生成物(酢酸)	mg/L	9.8
S _{NH4}	アンモニア性窒素	mg/L	17.2
S _{NO3}	硝酸及び亜硝酸性窒素	mg/L	0.1
S _{PO4}	無機リン酸	mg/L	2.3
S _I	不活性有機物	mg/L	17.1
S _{alk}	アルカリ度	mg/L	5
X _I	不活性有機物	mg/L	17.1
X _S	遅分解性有機物	mg/L	124.5
X _H	従属栄養生物	mg/L	29.9
X _{PAO}	りん蓄積生物	mg/L	0.1
X _{PP}	PAO中のポリリン酸	mg/L	0
X _{PHA}	PAOの細胞内蓄積物	mg/L	0.1
X _{AUT}	硝化菌	mg/L	0.1

(2) 運転条件

返送率 50%, SRT 10日, 第16区画 DO 制御目標値 1 mg/L を標準の運転条件として与えた。

(3) 好気容積比制御の条件

好気容積比制御の初期条件は, 全区画好気状態とした。好気容積比制御の条件パラメータとして, 「①制御周期」, 「②制御目標値」, 「③処理施設の運転条件の変更」に関して, 検討を行った。

①の制御周期とは, **Fig. 2** の判定を行う周期で, 今回は, 2 h, 4 h, 8 h, 16 h, 1日, 7日 で比較評価を行った。**Fig. 2** の判定は, 瞬時値に対して行うのではなく, 制御周期分データの移動平均値に対し判定を行い, 好気容積比を制御するものとした。処理水質目標値は, 硝化の維持基準として, NH₄-N 1 mg/L 以下, リン除去に関しては, 高度処理プロセスと同等レベルを想定し, PO₄-P 2 mg/L 以下を設定し, 検討を行った。

②の制御目標値の検討では, リン除去の水質目標値がより厳しい施設を想定した。硝化機能の維持基準である NH₄-N 目標値は 1 mg/L とし, PO₄-P 目標値を 2, 1, 0.5 mg/L とした場合の評価を行った。尚, ①の検討結果を受けて, 本検討の制御周期は 1日 と 7日 の設定で行った。評価は, (4) で後述する指標により, 好気容積比制御を実施した場合と好気区画数を 8~16 区画にそれぞれ固定した場合(容積比制御なし)との比較により行った。

③の処理施設の運転条件変更に関しては, 運転条件変更の代表例として, 返送率を施設運転中に変更した場合の評価を行った。シミュレーション期間は, 308 日間とし, 1~140 日目を標準条件である返送率 50%, 141~224 日目を返送率 40%, 225~280 日目を返送率 30% で運転した場合の評価を行った。

(4) 評価指標

好気容積比制御は, 硝化とリン除去の両立を目的としているため, 制御良否の指標は, 「処理水 NH₄-N 平均値」, 「処理水 PO₄-P 平均値」, 「NH₄-N, PO₄-P 目標両立率 (以下, 目標両立率)」とした。目標両立率 (R_{NH4^PO4} (%)) の定義は(1)式の通りとした。

$$R_{NH4^PO4} = 100 \times T_{sim}^{NH4^PO4} / T_{eval} \quad (1)$$

T_{sim^{NH4^PO4}}: シミュレーション結果の処理水 NH₄-N, PO₄-P が共に制御目標値以下の達成時間 (h)

T_{eval}: 評価対象期間 (h)

②の評価に関しては, 最後の 28 日間 (253 日目~280 日目) を評価対象期間とした。③の評価に関しては, 返送率の変化に対する応答性の評価のため, 返送率を標準条件の 50% から変更した後の期間 (141~280 日目) を評価対象期間とした。

4. 結 果

4.1 制御周期の評価結果

制御周期別の処理水 NH₄-N, PO₄-P の平均値ならびに目標両立率の評価結果を **Fig. 5** に示す。制御周期にかかわらず, 処理水 NH₄-N, PO₄-P 平均値ともに目標値以下を達成できている。一方, 目標両立率に関しては, 制御周期が長いほど, 良好であることがわかる。

目標両立率が低い制御周期 2 h の場合と, 目標両立率が高い制御周期 7日 の場合の処理水 NH₄-N, PO₄-P の経時変化に関して, **Fig. 6** に示す。特に PO₄-P に関して, 制御周期 7日 のケースに比べ, 2 h のケースで変動が大きく水質が悪化していることが読み取れる。これは, 生物学的リン除去の応答時間が 2h よりも長いにも関わらず, それ以下の周期で頻繁に好気区画数を増減させることで, リン除去が不安定になることが要因と考えられる。このため, 生物学的リン除去の応答時間に制御周期を合わせる事が適当と考えられ, 制御周期は, 日~週オーダーが良いと考えられた。

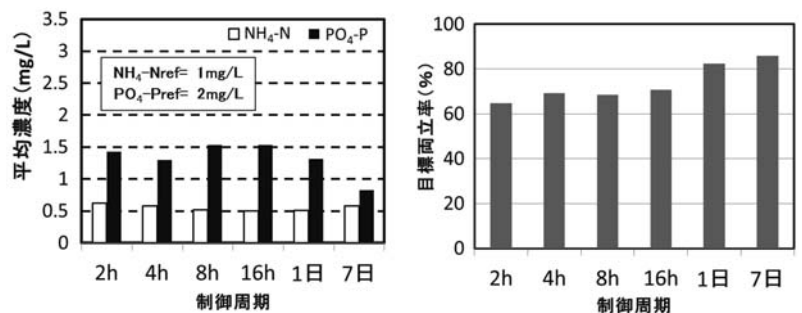


Fig. 5 Evaluation results for control cycle

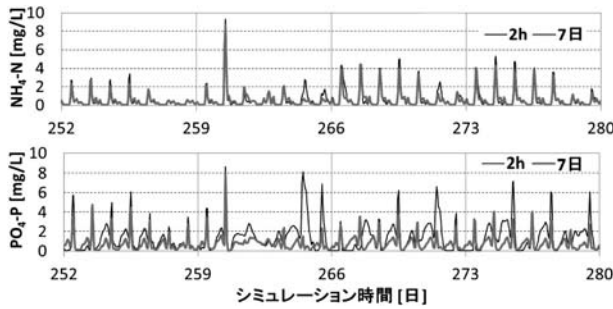


Fig. 6 Simulation results of effluent $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$

4.2 制御目標値の評価結果

容積比を固定した場合の処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 平均値を Fig. 7、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 目標値別の目標両立率を Fig. 8、好気容積比制御（制御周期 1 日、7 日）を実施した場合の $\text{PO}_4\text{-P}$ 目標値別の処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の平均値ならびに目標両立率の評価結果を Fig. 9、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 目標値別の好気容積比制御の動作を Fig. 10 に示す。

Fig. 7 より、好気容積比を固定した場合、好気容積が大きいほど、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均値が良好となる一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 平均値が悪化しトレードオフの関係にあることがわかる。以降では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 目標値別に評価を行う。

(1) $\text{PO}_4\text{-P}$ 目標値 2 mg/L のケース

Fig. 9 左図より、制御周期 1 日、7 日ともに処理水平均値として、 $\text{NH}_4\text{-N} \leq 1 \text{ mg/L}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P} \leq 2 \text{ mg/L}$ の目標を満たしている。Fig. 10 より、制御周期 7 日の場合、好気区画数 12、制御周期 1 日の場合、好気区画数 13 に収束する結果となっている。Fig. 8 より、容積比固定の場合で目標両立率が高い好気区画数は、12、13 であり、好気容積比制御の収束先と一致している。

(2) $\text{PO}_4\text{-P}$ 目標値 1 mg/L のケース

Fig. 10 より、制御周期 1 日、7 日ともにほぼ好気区画数 12 に収束する結果となっている。Fig. 8 より、容積比固定の場合、目標両立率が高い好気区画数は 11、12 の順であった。Fig. 9 左図の平均値を見ると、好気区画数 11、12 とともに、 $\text{NH}_4\text{-N} \leq 1 \text{ mg/L}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P} \leq 1 \text{ mg/L}$ の目標値を満たしている。Fig. 2 で提案する好気容積比制御は、硝化を優先した型となっている

ため、好気区画数 12 に収束したものと考えられる。

(3) $\text{PO}_4\text{-P}$ 目標値 0.5 mg/L のケース

Fig. 10 より、制御周期 7 日の場合、好気区画数 10~11 の間、制御周期 1 日の場合、好気区画数 9~13 の間で変動する結果となった。Fig. 8 より、容積比固定の場合、目標両立率が高い好気区画数は、10、11 であった。Fig. 7 において容積比固定の場合、 $\text{NH}_4\text{-N} \leq 1 \text{ mg/L}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P} \leq 0.5 \text{ mg/L}$ を平均値で満たす条件は存在しないのに対し、Fig. 9 の左図より容積比制御（制御周期 7 日）の場合、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 0.88 mg/L、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 0.48 mg/L となり、いずれの目標も満たすことがわかる。制御周期が 1 日の場合は、7 日の場合と比べ、好気容積比を頻繁に変更しているにもかかわらず、処理水の平均水質や目標両立率の改善効果は見られず、制御周期 7 日の方が良好な結果となった。

(4) まとめ

好気容積比制御は、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 目標値の変化に対して、平均水質で、水質目標を満たしながら、硝化とリン除去の目標両立率の高い好気区画数に収束し、短期の流

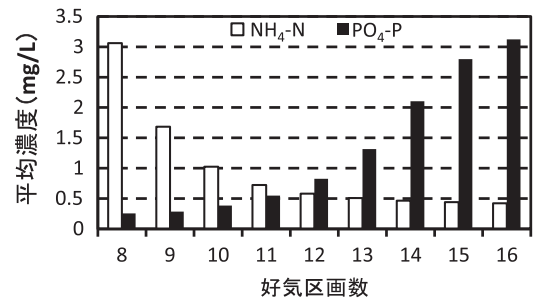


Fig. 7 Evaluation results of average $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ in case of fixed aerobic volume

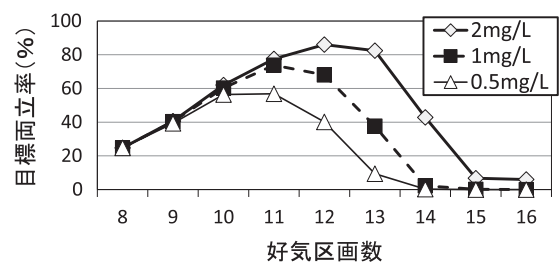


Fig. 8 Evaluation results of achievement ratio in both $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ target in case of fixed aerobic volume

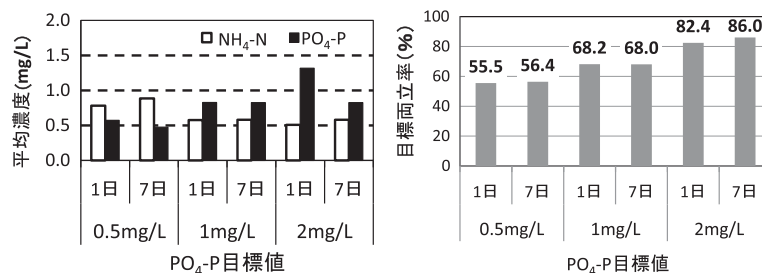


Fig. 9 Evaluation results for $\text{PO}_4\text{-P}$ set values in case of aerobic volume control

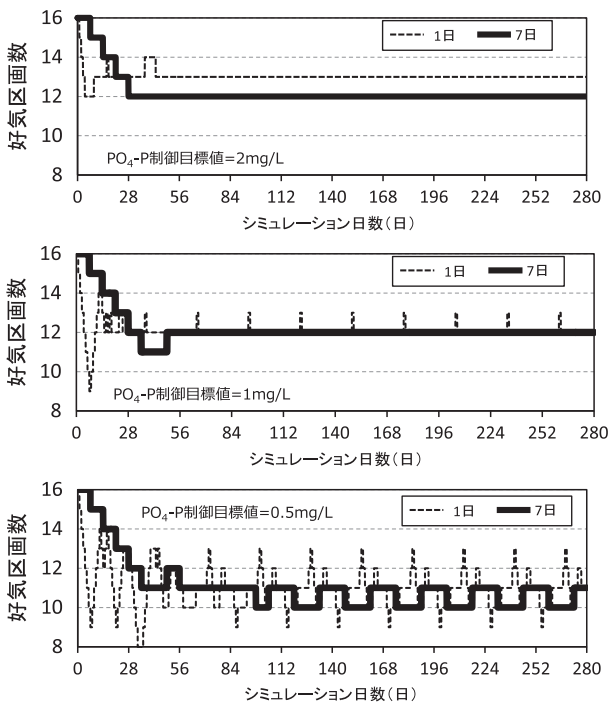


Fig. 10 Simulation results of aerobic volume for PO₄-P set values in case of aerobic volume control

入負荷変動には対応できないが、長期的視点で硝化とリン除去目標の両立に有効であることがわかった。

4.3 運転条件変更に対する制御応答の評価結果

返送率を変更した場合の好気容積比制御の動作（制御周期7日，NH₄-Nref=2 mg/L，PO₄-Pref=1 mg/L）について，Fig. 11 に示す。返送率40%では変化がなく，返送率30%で好気区画数を増やす方向に動作した。「制御なし（返送率50%で最も目標両立率が高くなる好気容積区画数（12区画）に固定）」との比較結果をTable 2 に示す。返送率40%の場合，「制御あり」，「制御なし」共に同区画数となり，評価結果は変わらないが，返送率30%の場合，「制御なし」では，処理水NH₄-Nが悪化し1 mg/L以上となる一方，「制御あり」では，NH₄-N，PO₄-Pの目標値を平均値で満たしつつ，目標両立率も高くなることがわかる。このことから，好気容積比制御が返送率の運転条件の変更に対し，有効であることがわかる。

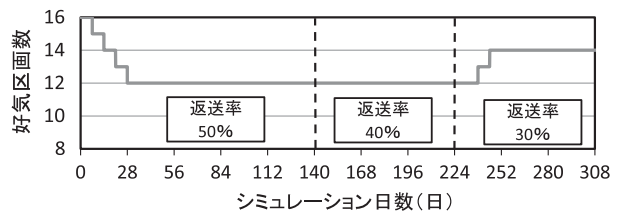


Fig. 11 Simulation results of aerobic volume for change of return sludge rate (NH₄-Nref=1 mg/L，PO₄-Pref=2 mg/L)

Table 2 Comparison results for change of return sludge rate

	単位	返送率 40% 期間		返送率 30% 期間	
		制御あり	制御なし	制御あり	制御なし
NH ₄ -N 平均値	mg/L	0.77	0.77	0.93	1.38
PO ₄ -P 平均値	mg/L	0.62	0.62	1.38	0.41
目標両立率	%	80.6	80.6	61.7	46.7

5. ま と め

本論文では，処理水のアンモニアならびにリンの水質情報に基づいて生物反応槽の好気区画の容積を制御する好気容積比制御アルゴリズムを提案した。

シミュレーション評価により，提案した制御システムは，平均水質を処理目標以下とするよう動作し，長期的視点で硝化機能の維持とリン除去の改善を図るために有効な制御方式であることを示した。また，運転条件（返送率）の変更に対しても有効に働くことがわかった。今後，流入負荷の短期変動等への対応のために凝集剤によるリン除去制御との親和性についても評価していきたい。

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) IWA Task group on Benchmarking of control strategies for WWTTPs: <http://www.benchmarkwwtp.org/>