

## 〈研究発表〉

# 水質や管理指標の制約を考慮した極値制御による下水処理プラントの最適運用

大西 祐太<sup>1)</sup>, 山中 理<sup>1)</sup>, 西室 勇岐<sup>2)</sup>, 平岡 由紀夫<sup>2)</sup>  
日高 浩一<sup>3)</sup>, 大森 浩充<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 東芝インフラシステムズ(株) インフラシステム技術開発センター  
(〒183-8511 府中市東芝町1 E-mail: yuuta.onishi@toshiba.co.jp)

<sup>2)</sup> 東芝インフラシステムズ(株) 社会システム事業部  
(〒212-8585 川崎市幸区堀川町72番地34 E-mail: yuki.nishimuro@toshiba.co.jp)

<sup>3)</sup> 東京電機大学 工学部 電気電子工学科  
(〒120-8551 東京都足立区千住旭町5番 E-mail: hidaka@cck.dendai.ac.jp)

<sup>4)</sup> 慶應義塾大学 理工学研究科 総合デザイン工学専攻  
(〒223-8522 横浜市港北区日吉3丁目14番地1 E-mail: ohmori@a7.keio.jp)

### 概要

本論文では、下水処理プラント運用における、事業者が設ける放流水質の管理値や運用管理指標の上限値に関する複数の制約を考慮した、水質改善と運用コストの低減を図る最適制御を立案し、効果をシミュレーションで検証した結果について報告する。特に、実運用においては、全ての制約を満たす状況に加えて、流入下水の負荷状況により全ての制約を同時に満たすことが困難な状況にも対応が必要である。そこで、探索型のリアルタイム最適制御手法として知られる極値制御手法に、優先順位を付けた複数の制約を組み込んだ新しい手法を提案する。

キーワード：下水処理プラント、極値制御、シミュレーション、制約  
原稿受付 2020.7.3

EICA: 25(2・3) 12-17

## 1. はじめに

河川や湖沼などの環境負荷低減のための下水処理水質の向上は、健全な水循環の維持の観点からも重要であり、高度処理の普及が進められている<sup>1)</sup>。一方、財政状況や更新時期の問題により、全面的な増改築による高度処理の導入が難しい事業者を対象に、既存施設の部分的改造と運用管理の工夫により、運用コストを増加させずに、処理水質を向上させる段階的処理の導入も期待されている<sup>2,3)</sup>。

段階的処理に代わる技術として、筆者らは、排水賦課金の考え方でコスト換算した水質を運用コストに加えて評価する総コスト指標<sup>4)</sup>を用いて、探索型の極値制御と呼ばれる手法により下水処理プラントの総コストを最小化する制御手法について検討してきた<sup>5)</sup>。極値制御は、評価関数の値をオンラインで取得し、複雑な最適化問題を解くことなく、その極値(局所最適値)を探索する制御手法<sup>6)</sup>であり、比較的簡単なロジックで実現できるため、処理能力に制約があるPLC(Programmable Logic Controller)に実装できる。文献5)では、この様な特徴を持つ極値制御を、返送率制御と、嫌気/好気の兼用区画のDO濃度を1mg/L以下の低い値に維持する送風量制御に適用する方法を検討している。シミュレーションにより水質向

上と運用コスト低減の観点で評価した結果、極値制御の適用により、標準活性汚泥プロセスと同程度の運用コストで窒素やリンの水質を向上できる可能性を示唆している。一方、極値制御を実際の下水処理プラントに適用する際には、放流水の水質や運用管理指標に関する制約を満たす必要がある。この制約は、例えば窒素やリン濃度が、法令で定められている水質基準を常に下回るように、事業者が水質ごとに設ける管理値に相当する。また、運用管理指標における制約は、下水処理プラントの運用に支障をきたす恐れのある事象を避けるために、汚泥濃度などの管理指標に設ける上限値に相当する。ただし、実際の下水処理プラントは、常に変動する流入量や流入負荷などの外乱の影響を受けるため、全ての制約を同時に満たすことをできない状態で運用を継続しなければならない場合もある。この場合、放流水の水質の管理値よりも、運用管理指標の上限値を優先させるといった、優先順位付けを行う対応が重要になる。しかし、従来の極値制御<sup>5)</sup>では、このような制約を組み込むことができなかった。

そこで、本論文では、優先順位を考慮した制約付きの新しい極値制御手法を提案し、実際の下水処理プラントの運用で考慮すべき複数の制約を考慮した最適な運用を実現する制御手法について検討する。

本論文の構成は次の通りである。2章では対象プラ

ントと実用化を想定した課題を示し、3章ではその課題を解決する新たな極値制御手法を提案し、その後、提案された極値制御アルゴリズムの有効性を4章の評価結果で示す。最後に、まとめを5章に示す。

## 2. 対象プラントと実用化を想定した課題

段階的高度処理<sup>2,3)</sup>を想定し、標準活性汚泥プラントを部分的に改造することで実現できる、下水処理プラントを Fig. 1 に示す。本プラントは、反応槽の活性汚泥中の微生物によって下水に含まれる有機物、窒素（アンモニアと硝酸）およびりん（りん酸）を除去する A2O 方式に基づいている。本論文では、運用コストを増加させずに運用改善で水質除去の効率を上げる観点から、操作量として汚泥の返送率を採用する。返送する汚泥量を変えることにより、反応槽内の様々な微生物の活性のバランスが変わり、りん酸性りん (PO<sub>4</sub>-P) 除去とアンモニア性窒素 (NH<sub>4</sub>-N) 除去の間のトレードオフを制御することができる。例えば、放流水の NH<sub>4</sub>-N 濃度が高く、PO<sub>4</sub>-P 濃度が低い場合は、返送率を上げて PO<sub>4</sub>-P の除去性能を少し低下させることで、NH<sub>4</sub>-N の除去性能の改善を図る運用が可能となる。

一方、返送率制御を実際の下水処理プラントへ適用する際には、複数の運用上の制約を考慮する必要がある。

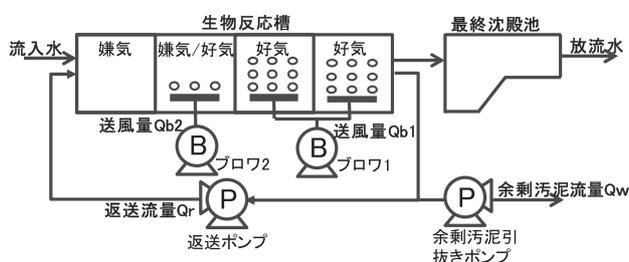


Fig. 1 Layout of wastewater treatment process for evaluation

る。まず、放流水の NH<sub>4</sub>-N 濃度や PO<sub>4</sub>-P 濃度に対する管理値を考慮する際、下水の処理状況が、流入量、流入水質や水温などの環境条件の影響を受けて、必ずしも両水質を管理値以内にとどめておくことができない状況が起こる。この状況への対応として、PO<sub>4</sub>-P は凝集剤の追加的な投入で除去できるが、NH<sub>4</sub>-N は生物学的に処理する必要があるため、返送率制御では NH<sub>4</sub>-N を管理値以内に維持することを優先することが好ましい。また、返送率を積極的に制御する場合には、運用管理指標である MLSS (浮遊固形物) 濃度も変化するため、放流水の管理値以外にも MLSS の上限値を考慮する必要がある。これは、反応槽内の MLSS 濃度が極端に高くなると、反応槽から汚泥が流出し、放流水の水質悪化を招いてしまう恐れがあるためである。よって、返送率制御では、MLSS 濃度を上限値以内に抑えることを最優先し、次に NH<sub>4</sub>-N の管理値以内に抑えることを優先し、最後に PO<sub>4</sub>-P の管理値以内に抑えることを優先する、といった優先順位をつけた運用上の制約の考慮が必要となる。そのため、次章で述べる極値制御を返送率の制御手法として採用し、実際の下水処理プラントに適用する場合は、優先順位に従って制約を満たす機構を組み込むことが必要になる。

## 3. 複数の制約を考慮した極値制御による最適運用

本論文で提案する制御系を Fig. 2 に示す。本制御系の基本的な構成は、文献5) に基づいており、放流水質をコスト換算した水質コストとブロワやポンプの消費電力などの運用コストの総和である総コストを低減させる。水質コストは、計測している水質や流量データからオンラインで計算する。返送ポンプの返送率を、制御の操作量として選定し、操作量を増減させ

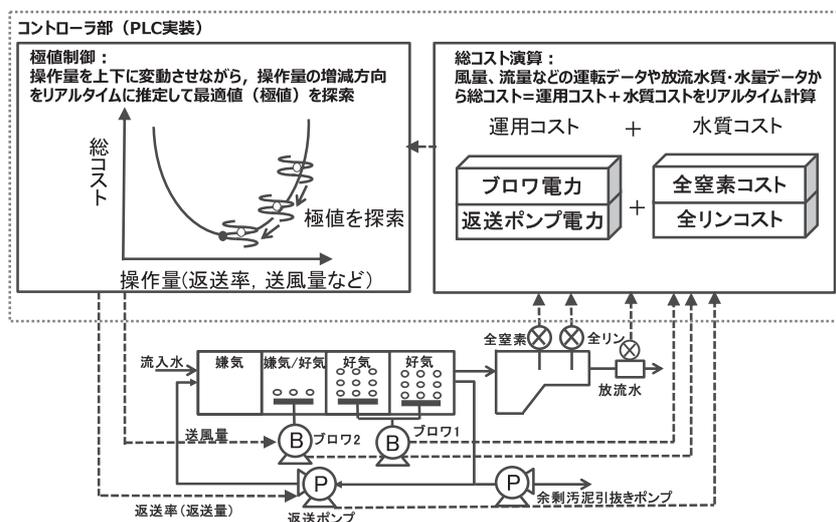


Fig. 2 Basic control scheme

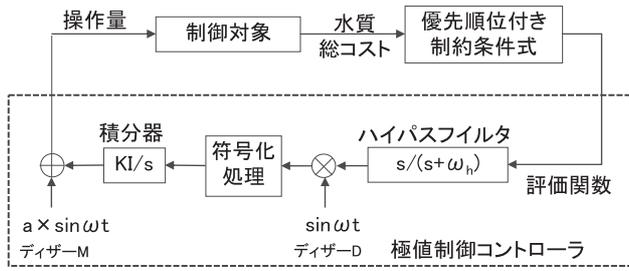


Fig. 3 Proposed extremum seeking scheme

ながら、総コストの値の変化（勾配）を観測して、総コストが減少する方向を探索する仕組みが基本となっている。この様に、操作量を常に増減させながら、総コストの勾配が減少する方向に操作量を徐々に変化させることによって、総コストの極値を探索する制御が極値制御と呼ばれる制御手法である。Fig. 3 に提案する制御系に用いる極値制御アルゴリズムを示す。この極値制御アルゴリズムでは、文献5) の構成に対して、評価関数を定める部分に、以下に示す考え方に基づいて優先順位付きの制約式を組み込んでいる。

制約式を極値制御に組み込む基本的な考え方は、境界追跡法<sup>7)</sup>に基づいている。境界追跡では単一の出力制約を扱っており、以下の式に従い評価関数  $y$  を定める。例えば、 $\text{NH}_4\text{-N}$  のみに出力制約である管理値 ( $\leq \text{NH}_4\text{-N}_{\text{lim}}$ ) が設定されている場合、境界追跡法に基づいた評価関数  $y$  は、総コスト (TCI) を用いて以下の式となる。

$$y = \sigma_1 \text{NH}_4\text{-N} + (1 - \sigma_1) \text{TCI}$$

$$\sigma_1 = 0 \quad (\text{NH}_4\text{-N} \leq \text{NH}_4\text{-N}_{\text{lim}})$$

$$\sigma_1 = 1 \quad (\text{NH}_4\text{-N} > \text{NH}_4\text{-N}_{\text{lim}})$$
(1)

ここで、 $\sigma_1$  はスイッチング係数である。 $\sigma_1$  を変更すると  $y = \text{TCI}$  または  $y = \text{NH}_4\text{-N}$  が切り替わることを意味する。つまり、 $\text{NH}_4\text{-N}$  が制約内にある場合、 $y = \text{TCI}$  となり TCI そのものが最小化されるが、 $\text{NH}_4\text{-N}$  が制約外にある場合、 $y = \text{NH}_4\text{-N}$  となり、 $\text{NH}_4\text{-N}$  が最小化される。一方で、単一の出力制約を考慮した (1) 式を他の MLSS や  $\text{PO}_4\text{-P}$  などの複数の制約を考慮した形に拡張すると、 $y$  は以下の式で表現できる。

$$y = \sigma_1 \text{MLSS} + \sigma_2 \text{NH}_4\text{-N} + \sigma_3 \text{PO}_4\text{-P} + (1 - \sigma_1) (1 - \sigma_2) (1 - \sigma_3) \text{TCI}$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = 0 & (\text{MLSS} \leq \text{MLSS}_{\text{lim}}) \\ \sigma_1 = 1 & (\text{MLSS} > \text{MLSS}_{\text{lim}}) \\ \sigma_2 = 0 & (\text{NH}_4\text{-N} \leq \text{NH}_4\text{-N}_{\text{lim}}) \\ \sigma_2 = 1 & (\text{NH}_4\text{-N} > \text{NH}_4\text{-N}_{\text{lim}}) \\ \sigma_3 = 0 & (\text{PO}_4\text{-P} \leq \text{PO}_4\text{-P}_{\text{lim}}) \\ \sigma_3 = 1 & (\text{PO}_4\text{-P} > \text{PO}_4\text{-P}_{\text{lim}}) \end{cases}$$
(2)

(2) 式は、一見自然なように見えるが、全ての制約

が同時に満たされない場合に問題が発生する。例えば、MLSS と  $\text{NH}_4\text{-N}$  が制約を満たさない場合は、評価関数  $y = \text{MLSS} + \text{NH}_4\text{-N}$  となり、MLSS と  $\text{NH}_4\text{-N}$  の両水質が低減する方向を探索する制御となる。しかしこの時、それぞれの制約に区別がついていないため、片方の制約を優先的に満たすことが困難である。この問題に対処するために、複数の制約に優先度を付加できる次の新しい制約式を提案する<sup>8)</sup>。

$$y = \sigma_1 \text{MLSS} + \sigma_2 (1 - \sigma_1) \text{NH}_4\text{-N} + \sigma_3 (1 - \sigma_1) (1 - \sigma_2) \text{PO}_4\text{-P} + (1 - \sigma_1) (1 - \sigma_2) (1 - \sigma_3) \text{TCI}$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = 0 & (\text{MLSS} \leq \text{MLSS}_{\text{lim}}) \\ \sigma_1 = 1 & (\text{MLSS} > \text{MLSS}_{\text{lim}}) \\ \sigma_2 = 0 & (\text{NH}_4\text{-N} \leq \text{NH}_4\text{-N}_{\text{lim}}) \\ \sigma_2 = 1 & (\text{NH}_4\text{-N} > \text{NH}_4\text{-N}_{\text{lim}}) \\ \sigma_3 = 0 & (\text{PO}_4\text{-P} \leq \text{PO}_4\text{-P}_{\text{lim}}) \\ \sigma_3 = 1 & (\text{PO}_4\text{-P} > \text{PO}_4\text{-P}_{\text{lim}}) \end{cases}$$
(3)

$\sigma_1$  は MLSS,  $\sigma_2$  は  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\sigma_3$  は  $\text{PO}_4\text{-P}$  のそれぞれの濃度に依存して、濃度が制約を満たしていないと 1 をとり、制約を満たしていると 0 をとる係数とする。例えば、1 番優先度の高い MLSS と 2 番目に優先度が高い  $\text{NH}_4\text{-N}$  が制約を満たせない場合、1 番目の項を除く全ての項が 0 となり、評価関数  $y = \text{MLSS}$  となる。このように出力の値に応じて係数が優先順位を反映したスイッチの役割を果たし、評価関数を低減させたい評価値に切り替えることができる。したがって、全ての出力が同時に制約を満たさない場合は、優先度の高い制約が選択的に満たされる。一方で、極値制御では、評価関数値の勾配に応じて、次に動かすべき操作量が決まる。このため、本論文で提案する出力の制約を切り替えるような仕組みを取り入れていると、スイッチング係数の値が 0 から 1 (または 1 から 0) に機械的に切り替わるタイミングで評価関数値の勾配が急変し、制御が不安定化する恐れがある。そのため、(2), (3) 式におけるスイッチング係数  $\sigma_1 \sim \sigma_3$  は、それぞれの濃度に応じて 0~1 の範囲で連続的に変化する係数とする。また、制約を考慮している出力はそれぞれ評価値そのものが異なっているため、スイッチング係数の変化に伴い、評価関数値が切り替わる途中で評価関数の勾配が増大する可能性がある。このため、Fig. 3 に示すように、評価関数値の値に符号化処理を施す機能を追加している。これにより、評価関数の勾配の大きさではなく、評価関数の増加または減少の傾向のみをつかんで操作量を定めることができ、系の不安定化を抑制する効果がある<sup>9)</sup>。

## 4. 評価結果

### 4.1 評価方法

3章で提案した極値制御の有効性を評価するために、生物学的下水処理プラントモデルを使用したシミュレーションを実施した。下水処理プラントモデルには、活性汚泥モデル (ASM2d)<sup>10)</sup> が組み込まれたプラントシミュレータを使用した。また、活性汚泥モデルのパラメータは、文献10)に記載されているデフォルト値を用いた。実運用上の複数の制約がある状況で、制約の優先順位付けの返送率制御に対する有効性を確認するために、Table 1の条件1、条件2の固定の環境条件と、運用条件を設定し、シミュレーション評価を行った。条件1は、放流水のNH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、MLSSがそれぞれの制約を同時に満たすことができる状況を設定している。一方で、条件2は、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、MLSSがそれぞれの制約を同時に満たすことができない状況を設定している。基本的な環境条件および運用条件については、文献11)に示されている典型値を参考に設定した。また、各制約について高度処理における放流水質計画値を参考に、PO<sub>4</sub>-P濃度の管理値は1.0[g/m<sup>3</sup>]に設定し、MLSS濃度の上限値は3000[g/m<sup>3</sup>]に設定した<sup>12)</sup>。さらに、NH<sub>4</sub>-N濃度の管理値は、硝化が十分に進む目安を考慮し1.0[g/m<sup>3</sup>]と設定した。各制約に対しては、以下の順序で優先順位付けを行う。

1. MLSS濃度 ≤ 3000 [g/m<sup>3</sup>]
2. NH<sub>4</sub>-N濃度 ≤ 1.0 [g/m<sup>3</sup>]
3. PO<sub>4</sub>-P濃度 ≤ 1.0 [g/m<sup>3</sup>]

提案した極値制御において、制約の優先順位付けが

Table 1 Operational and influent conditions

	条件項目	単位	条件1	条件2
環境条件	流入量	m <sup>3</sup> /day	2232	3200
	HRT	h	10	7
	流入アンモニア性窒素 (NH <sub>4</sub> -N) 濃度	gN/m <sup>3</sup>	16	16
	流入りん酸性りん (PO <sub>4</sub> -P) 濃度	gP/m <sup>3</sup>	3.6	3.6
	流入化学的酸素要求量 (COD) 濃度	gCOD/m <sup>3</sup>	260	260
	水温	℃	20	15
運転条件	余剰汚泥引き抜き量	m <sup>3</sup> /day	26.6	26.6
	SRT*	day	7.0~17.5	7.0~17.5
	1区画目のDO目標値	g/m <sup>3</sup>	0	0
	2区画目のDO目標値	g/m <sup>3</sup>	0	0
	3区画目のDO目標値	g/m <sup>3</sup>	0.5	0.1
	4~7区画目のDO目標値	g/m <sup>3</sup>	1.0	1.0
	放流アンモニア性窒素 (NH <sub>4</sub> -N) 濃度の管理値	gN/m <sup>3</sup>	1.0	1.0
	放流りん酸性りん (PO <sub>4</sub> -P-N) 濃度の管理値	gP/m <sup>3</sup>	1.0	1.0
MLSS濃度の管理値	g/m <sup>3</sup>	3000	3000	

\* 返送率 (0.2~1) によって変わる最小7日, 最大17.5日

行えるかどうかを定性的に確認するため、シミュレーション評価を行い、返送率、MLSS濃度、NH<sub>4</sub>-N濃度、PO<sub>4</sub>-P濃度の時系列データを確認した。また、比較として、制約の優先順位付けを行っていない文献5)の従来の極値制御、優先順位付けが不十分である制約式(2)を組み込んだ極値制御、および提案した制約式(3)を組み込んだ極値制御におけるシミュレーション評価を実施した。

### 4.2 結果と考察

MLSS、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-Pが全ての制約を同時に満たす運用条件が存在する場合の、Table 1の条件1を設定した返送率制御のシミュレーション結果をFig. 4に示す。また、全ての制約を同時に満たすことが困難な場合の、Table 1の条件2を設定した返送率制御のシミュレーション結果をFig. 5に示す。Fig. 4、Fig. 5において従来の極値制御<sup>5)</sup>を適用した結果を薄い灰色線、提案した極値制御の適用結果を灰色線、(2)式の制約式を組み込んだ極値制御を黒色線で示す。また、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-Pの管理値、MLSSの上限値の濃度レベルを破線で示す。なお、実際の下水処理運用におい

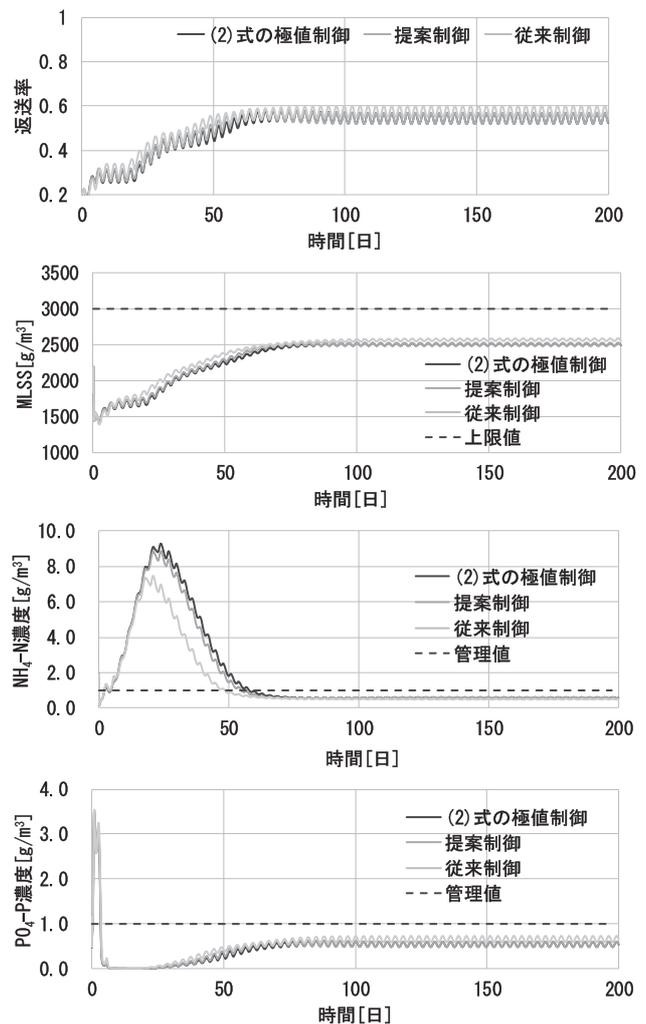


Fig. 4 Result for the case that all constraints are satisfied

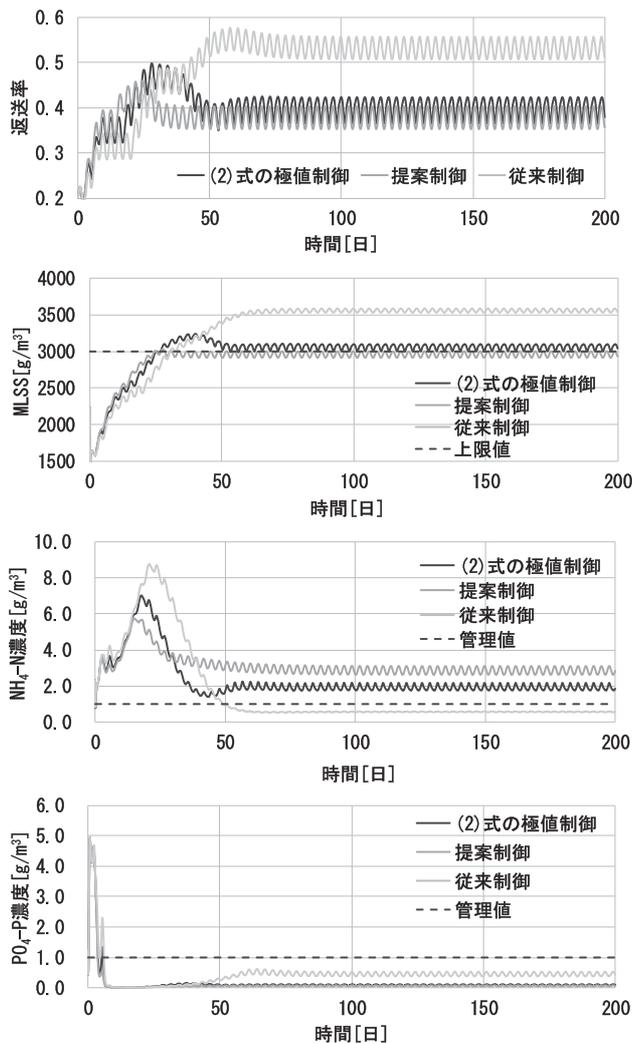


Fig. 5 Result for the case that all constraints are not satisfied simultaneously

ては、返送率が最適値付近 (0.5 付近) で運用することが多いが、本結果においては制御性能の差異を明確にするために、処理状況が悪化している 0.25 を返送率の初期値に設定している。

Fig. 4 の結果では、いかなる制御においても、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、MLSS の全ての制約が満たされる返送率の条件に収束することが確認できた。一方で、Fig. 5 の結果では、いかなる制御においても、全ての制約が同時に満たされる条件が存在せず、返送率や水質の結果に差異が生じていることが分かる。従来の極値制御においては、主に MLSS 濃度が上限値を大幅に超過する様子が確認できる。また、(2) 式の制約式を組み込んだ極値制御では、従来制御よりも MLSS 濃度の上昇は抑えられているが、上限値を超過する返送率に収束していた。これらは、常に最も優先度の高い MLSS 濃度の制約が満たされていない現象が生じていることを示している。これに対して、提案制御の結果では、MLSS 濃度が上限値を超過しそうになると返送率の上昇を抑えるような動きになっており、それによって  $\text{NH}_4\text{-N}$  の除去速度が少し悪化する様子が確

認できる。以上により、提案制御においては、実運用上の複数の制約がある状況で優先度の高い制約を満たすように働いた。また、提案制御や (2) 式の制約式を組み込んだ極値制御の結果では MLSS 濃度の上昇の抑制に合わせて、制約内にある  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度も改善されている。 $\text{NH}_4\text{-N}$  の制約の方が優先度が高いが、本条件においては、MLSS 濃度と  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度がトレードオフの関係にあるが、MLSS 濃度と  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度には相関の関係があるため、MLSS 濃度の増加抑制に合わせて  $\text{PO}_4\text{-P}$  の除去性能が改善したと推察できる。

## 5. まとめ

下水処理プラント運用における、事業者が設ける放流水質の管理値や運用管理指標の上限値に関する複数の制約を考慮した、水質改善と運用コストの低減を図る最適制御を立案し、効果をシミュレーションで検証した。実運用上、全ての制約が満たされる状況に加えて、流入下水の負荷状況により全ての制約を同時に満たすことが困難な状況においても対応できる優先順位付き制約を考慮した極値制御手法を提案した。両状況におけるシミュレーションを行い、提案制御が有効に動作することを確認した。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：第 1 回水環境マネジメント検討会資料，<http://www.mlit.go.jp/common/000220851.pdf>, 2016/4/20 アクセス
- 2) 国土交通省：既存施設を活用した段階的高度処理の普及ガイドライン (案)，[www.mlit.go.jp/common/001097916.pdf](http://www.mlit.go.jp/common/001097916.pdf) 2016/4/20 アクセス
- 3) 東京都下水道局：東京都における段階的高度処理の取組及び普及展開，[www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TB.../H\\_01\\_03\\_02.pdf](http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TB.../H_01_03_02.pdf) 2016/4/20 アクセス
- 4) COST 624 : Optimal Management of Wastewater Systems, <http://apps.ensic.inpl-nancy.fr/COSTWWTP/> 2016/4/20 アクセス
- 5) 山中理, 大西祐太, 小原卓巳, 平岡由紀夫, 中川祐一: 水質維持と運用コスト低減の両立を図る極値探索型最適制御の適用性検討, 学会誌「EICA」, Vol. 21, No. 2/3, pp. 30-38 (2016)
- 6) K.B. Ariyur and M. Krstic: Real-Time Optimization by Extremum — Seeking Control, Wiley-InterScience, (2003)
- 7) R. Herrera and M. Antonio, “Extremum Seeking for Spark Advance Calibration under Tailpipe Emissions Constraints”, in Master thesis, the University of Melbourne, Australia, 2016.
- 8) Y. Onishi, O. Yamanaka, Y. Hiraoka, K. Hidaka, and H. Ohmori, “Extremum Seeking Control for Wastewater Treatment Plant with Prioritized Output Constraint”, Proc. of SICE Annual Conference 2020, 23-26, September, 2020, Chiang-Mai, Thailand, to appear., 2020.
- 9) O. Yamanaka, Y. Ohnishi, Y. Hiraoka, K. Hidaka, and H.

- Ohmori : Extremum Seeking Based on Approximated Sign of Gradient of Unknown, Proc. of SICE Annual Conference 2020, 23-26, September, 2020, Chiang-Mai, Thailand, to appear., 2020.
- 10) M. Henze, W. Gujer, T. Mino, M. Loodrecht : Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d, and ASM3, IWA Publishing (2000)
- 11) 社団法人：「下水道維持管理指針 後編 — 2003年版 —」日本下水道協会, (2003)
- 12) 国土交通省：高度処理ナレッジ集,  
<https://www.mlit.go.jp/common/001033454.pdf>, (2014)