

## 〈研究発表〉

# 段階的高度処理を実現する多変数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>

<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 東京都府中市東芝町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 神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34 E-mail: yuki.nishimuro@toshiba.co.jp)

### 概要

本論文では、下水処理プラント運用において、ポンプやブロワなどの複数の操作量を同時に動かしながら、水質改善や運用コストの低減を図る最適制御を立案し、その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。最適化手法としては、探索型のリアルタイム最適制御として知られる極値制御手法を採用し、複数の操作量を同時に最適化する場合に考慮すべき干渉の問題に対処することができる新たな手法を提案する。

キーワード：極値制御、下水処理プラント、複数の操作量、最適化

原稿受付 2021.7.8

EICA: 26(2・3) 25-30

## 1. はじめに

三大湾などの閉鎖性水域における窒素・りんを起因とする富栄養化問題に対応するため、下水処理施設では高度処理を推進している<sup>1)</sup>。しかしながら、財政状況や更新時期の問題により、既存施設の全面的な増改築による高度処理の導入が難しい事業体も多い。このような自治体では、既存施設の部分的改造と運用管理の工夫により、窒素・りんの処理水質を向上させる段階的高度処理の導入が進められている<sup>2,3)</sup>。

一方で、筆者らは、探索型の極値制御<sup>4)</sup>と呼ばれるリアルタイム最適制御の開発を行っている。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であり、比較的簡単なロジックで実現できるため、PLC(Programmable Logic Controller)に実装できる。そこで、我々はこの極値制御を、段階的高度処理を進める下水処理プラントの制御への適用に向けた取り組みを開始した。その中で、排水賦課金の考え方を取り入れてコスト換算した水質を運用コストに加えた総コスト指標<sup>5)</sup>を評価関数として、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>6)</sup>。文献6)では、この様な特徴を持つ極値制御を、返送率制御や、嫌気/好気の兼用区画のDO濃度を1.0 mg/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確立した。この手法において、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りんの水質を向上できる可能性を示唆している。

ただし、文献6)の評価においては、極値制御により最適化する操作量は常に単一のものであった。下水処理プラントは、ポンプやブロワなど複数の操作量の運用条件に基づいて、水処理性能が決まるため、単一の操作量のみで極値制御を適用するだけでは、プラント全体としての最適な運用を実現することは難しい。下水処理プラント運用全体の最適化を行うためには、複数の操作量を同時に最適化する多変数の極値制御系の設計法を確立する必要がある。多変数の極値制御系において、複数の操作量間に干渉があるため、従来の極値制御アルゴリズムを複数の操作量に個別に適用するだけでは、適切な最適値探索の挙動が得られない場合がある。

本論文では、複数の操作量を最適化する際に発生する干渉問題を解決する新たな極値制御手法を提案する。また、下水処理プラントの運用において、処理水質の改善に効果的な操作量である汚泥返送率および、反応槽内の嫌気/好気領域を同時に最適化する制御に提案する手法を適用し、提案手法の有効性を示す。本論文の構成は次の通りである。2章では下水処理プラントを対象とした極値制御系を示し、3章では複数の操作量を最適化する極値制御における問題提起とその解決手法を提案し、その後、提案する極値制御アルゴリズムの有効性を4章の評価結果に示す。最後に、まとめを5章に示す。

## 2. 下水処理プラントを対象とした極値制御系

対象とするプラントは、Fig. 1に示すように、最も多く採用されている標準活性汚泥法(以下、標準法)

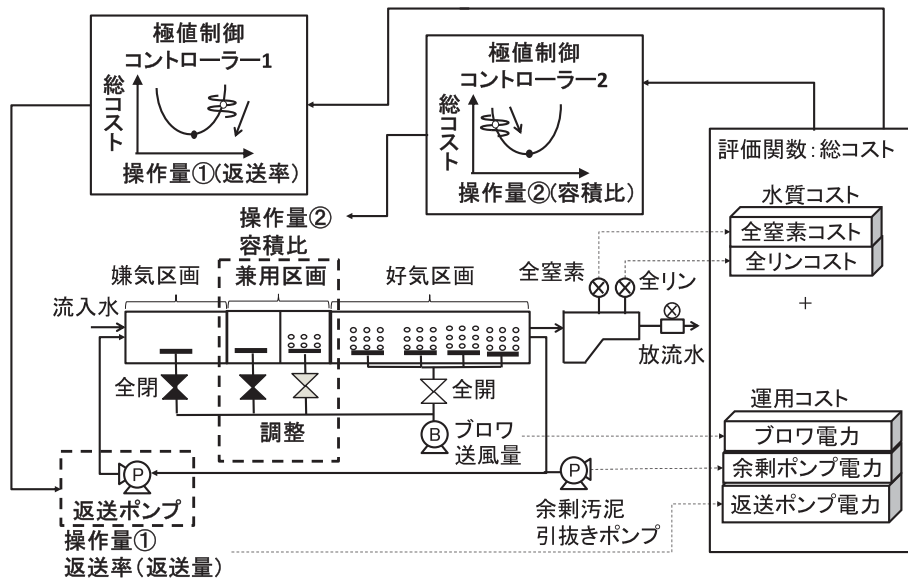


Fig. 1 Control scheme for Extremum seeking of optimizing multiple control handles

を部分的に改造することで実現できる段階的高度処理<sup>2,3)</sup>を想定した下水処理プラントである。本プラントには、反応槽内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）を除去するために、部分的に反応槽の運用を変更している。具体的には、前段区画の風量を限りなく絞ることで嫌気区画を構築し、さらに図中の兼用区画と示している部分については、空気配管に電動バルブを設置し、空気量を調節することで嫌気状態と好気状態を切り替えることができるようにしている。本論文では、対象プラントにおける窒素・りんの除去性能を改善するための操作量として、①兼用区画に占める嫌気区画の容積比、②返送率を対象とした。この2つの操作量を同時に動かすことで、窒素・りんの除去を担う硝化菌、脱窒菌、りん蓄積菌のバランスを制御し、窒素・りんの除去性能の改善を狙う。Fig. 1に示すように、本論文で対象とする極値制御の制御系の基本的な構成は、文献6)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ー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。操作量を増減させながら、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。

### 3. 複数の操作量を最適化する極値制御

#### 3.1 複数の操作量を扱う上で生じる問題

極値制御における最適値探索の際の操作量の増減には、通常、ディザ信号と呼ばれる正弦波信号を用いる。このディザ信号を操作量に印加し、その結果として変化する総コストの挙動から、操作量が最適値に対してどの動作点にいるかを推定し、最適値の方向へ操作量を動作させていくのが最適値探索の仕組みである。このとき例えば、Fig. 1の極値制御コントローラー1に示すように、総コストが最小となる操作量の値（最適値）を持つような場合、操作量①の動作点が、最適値に対して右側にあると、操作量を下げると総コストが下がり、操作量を上げると総コストが上がる関係にある。このときの操作量①と総コストの挙動は、Fig. 2の従来手法における操作量と総コストの挙動に示すように、操作量①に正弦波を印加して変動させると、総コストの応答は、操作量①に印加した正弦波と同位相の波形で振動する。一方で、Fig. 1の極値制御コントローラー2に示すように、操作量②の動作点が最適値に対して左側にあると、操作量を下げると総コストが上がり、操作量を上げると総コストが下がる関係にある。このとき、Fig. 2に示すように、操作量②に正弦波を印加して変動させると、総コストの応答は、操作量②と逆位相の波形で振動する。本論文で対象とする複数の操作量を同時に最適化する極値制御においては、操作量①と操作量②が同時に変動するため、上記の場合、操作量①に対する総コストの変動と操作量②に対する総コストの変動が干渉し打ち消しあいが生じる。このため、総コストの変動が正しく抽出できなくなり、場合によっては最適値探索が行えない状況に陥る。

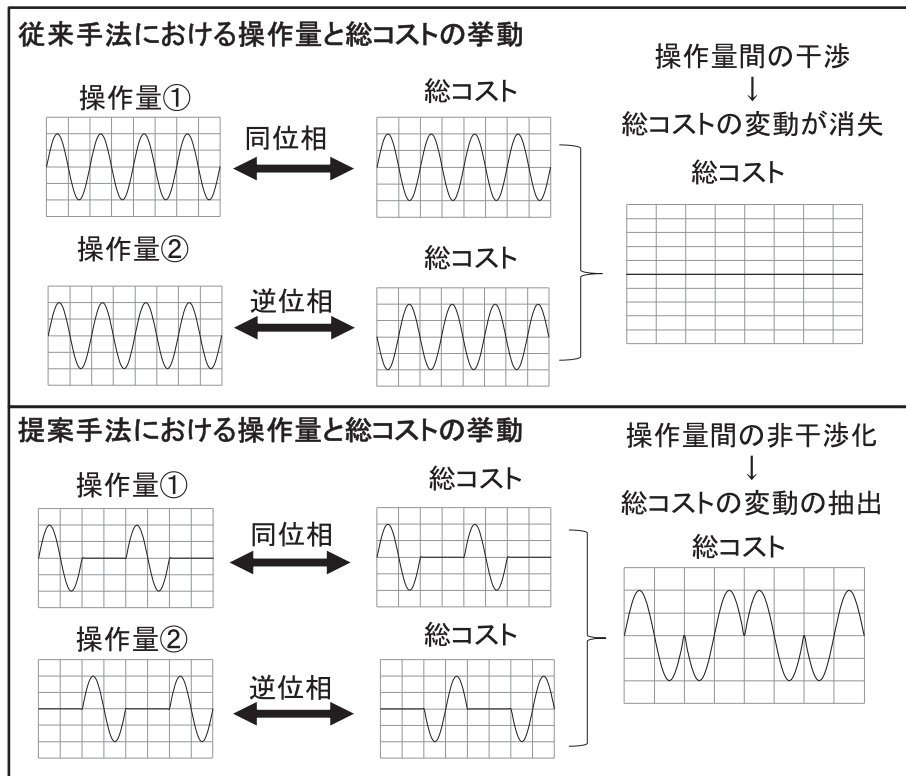


Fig. 2 Problems and solutions in case of arising interference between control handles

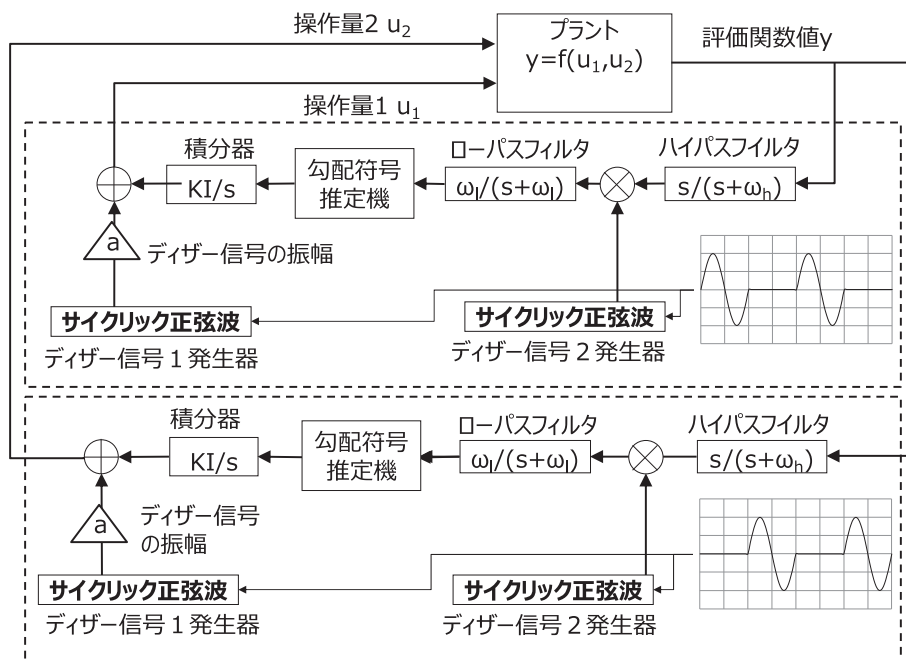


Fig. 3 Proposed extremum seeking scheme

### 3.2 提案する極値制御アルゴリズム

3.1 に示した問題に対応するため、操作量①および操作量②に印加する周期信号を非干渉化することを目的とし、それぞれの操作量に印加する正弦波の印加のタイミングをずらすサイクリック手法を適用する<sup>7)</sup>。この手法は、片方の操作量に正弦波を印加している時間に他の操作量には正弦波が印加されないような休止期間を設けることを特徴としており、一波長分の印加

と、同じ時間の休止期間を繰り返す。Fig. 2 の提案手法における操作量と総コストの挙動に示すように、操作量①に印加する信号と、操作量②に印加する信号で、印加と停止のタイミングが互い違いになる設定することで実現できる。

Fig. 3 に提案制御を実現するための極値制御のブロック線図を示す。操作量間の非干渉化を実現するために、ディザ信号を設定する部分にサイクリック手

法を適用している。また、操作量の変化に対して、評価関数の応答が大きくなると、制御の破綻や、プラントへの過大な入力につながるため、筆者がこれまでに提案した、評価関数の変化を正規化し、制御の不安定化を抑制することが可能な勾配符号推定器<sup>8)</sup>を採用している。

## 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、活性汚泥モデル (ASM2d)<sup>9)</sup>を生物反応モデルとして組み込んだ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9)に記載されているデフォルト値を用いた。処理量は標準法に近い平均的な滞留時間を設定した。その他の環境条件および運転条件については、文献10)に示されている典型値を参考に **Table 1** のとおり設定した。また、最適化する総コストは、文献6)を参考に、1 m<sup>3</sup>の処理量あたりにかかるコストとして、運転コスト (OC) と、水質コスト (EC) を足し合わせた下記の式で定義した。

**Table 1** Operational and influent conditions

	条件項目	単位	条件
環境条件	流入量	m <sup>3</sup> /d	9360
	HRT (水理学的滞留時間)	h	8
	流入 NH <sub>4</sub> -N 濃度	gN/m <sup>3</sup>	16
	流入 PO <sub>4</sub> -P 濃度	gP/m <sup>3</sup>	3.6
	流入化学的酸素要求量 (COD) 濃度	gCOD/m <sup>3</sup>	260
	水温	℃	20
運転条件	余剰汚泥引き抜き量	m <sup>3</sup> /d	140
	SRT (汚泥物滞留時間)	d	3.7~11*
	嫌気区画の容積	m <sup>3</sup>	780
	嫌気区画の DO 目標値	g/m <sup>3</sup>	0
	兼用区画の容積	m <sup>3</sup>	780
	兼用区画の DO 目標値	g/m <sup>3</sup>	1.0
	好気区画の容積	m <sup>3</sup>	1560
	好気区画の DO 目標値	g/m <sup>3</sup>	2.0
	放流 NH <sub>4</sub> -N 濃度の管理値	gN/m <sup>3</sup>	1.0
	放流 PO <sub>4</sub> -P 濃度の管理値	gP/m <sup>3</sup>	1.0

\* 返送率 (0.2~1) によって変わる最小 3.7 日, 最大 11 日

$$TC = OC + EC \quad (1)$$

$$OC = (0.33 \times Q_b + 0.2 \times Q_r) \div Q_{in} \quad (2)$$

$$EC = 0.1 \times NO_3-N + 0.3 \times NH_4-N + 0.4 \times PO_4-P \quad (3)$$

なお、Q<sub>b</sub> [m<sup>3</sup>/day] はブロワの風量、Q<sub>r</sub> [m<sup>3</sup>/day]

は返送汚泥量、Q<sub>in</sub> [m<sup>3</sup>/day] は流入量、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P はそれぞれ硝酸性窒素、アンモニア性窒素、りん酸性りんの濃度を示している。OC の算出式におけるブロワコストに関する Q<sub>b</sub> の係数は、電気料金 10 [円/kWh] × ブロワの消費電力原単位 0.033 [kWh/m<sup>3</sup>] と設定、ポンプコストに関する Q<sub>r</sub> の係数は、電気料金 10 [円/kWh] × ポンプの消費電力原単位 0.02 [kWh/m<sup>3</sup>] と設定した。さらに、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P に対しては、自治体などで管理値が設けられている場合があり、なるべく管理値を超えないようにする運用が求められる。これに対応するため、管理値を超えると、値が増大するような下記のペナルティ関数<sup>6)</sup>を総コストに足し合わせる。

$$X_{new} = X(1 + \exp(X - X_{lim})) \quad (4)$$

$$TC' = TC + X(1 + \exp(X - X_{lim})) \quad (5)$$

ここで、X は NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P の濃度に対応し、X<sub>lim</sub> は、両水質の管理値である。今回は、両水質ともに管理値を **Table 1** のとおりに設定した。(4)式の採用により、水質の管理値の超過をなるべく回避しながら総コストの最小化を図ることができる。

提案した極値制御において、汚泥返送率、兼用区画に占める嫌気区画の容積比の二つの操作量の探索性能を定性的に確認するため、従来手法を適用した極値制御および、提案手法を適用した極値制御手法の2パターンのシミュレーション評価を行い、返送率、兼用区画に占める嫌気領域の容積比、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、事前に各操作量の設定値をいくつかのパターンでシミュレーションを行い、総コストが最小となる時の操作量の最適値をあらかじめ求めた。この最適値を探索できるか否かについて、従来手法と提案手法の比較することで評価を行う。なお、評価関数ならびにペナルティ関数については従来手法、提案手法ともに同じものを用いた。

### 4.2 結果と考察

**Fig. 4** に、従来の極値制御におけるシミュレーション結果、**Fig. 5** に提案手法を適用した極値制御におけるシミュレーション結果を示す。それぞれの図において、上側のグラフは、返送率、および容積比の時系列結果を示しており、下側のグラフは PO<sub>4</sub>-P、および NH<sub>4</sub>-N の時系列結果を示している。なお、返送率および容積比の初期値は、制御性能の差異を明確にするために、処理状況が悪化する場合 (Case 1) と、最適な運用に近い場合 (Case 2) の2パターンに設定し評価した。Case 1 の結果を黒線、Case 2 の結果を灰色

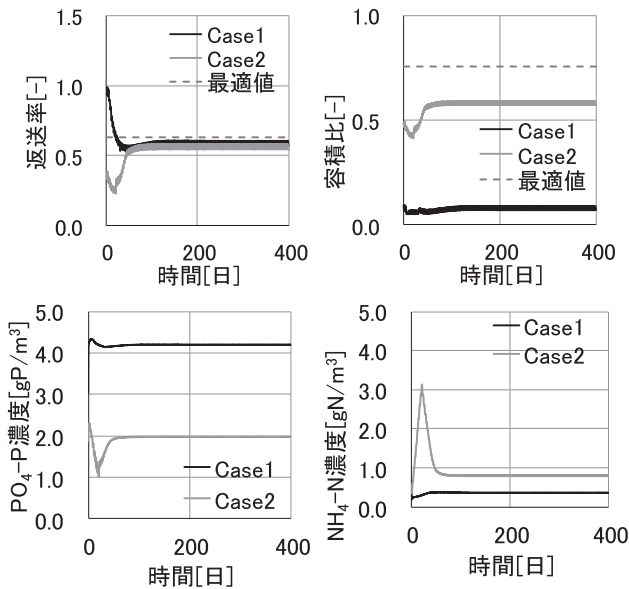


Fig. 4 Result for case in traditional Extremum seeking

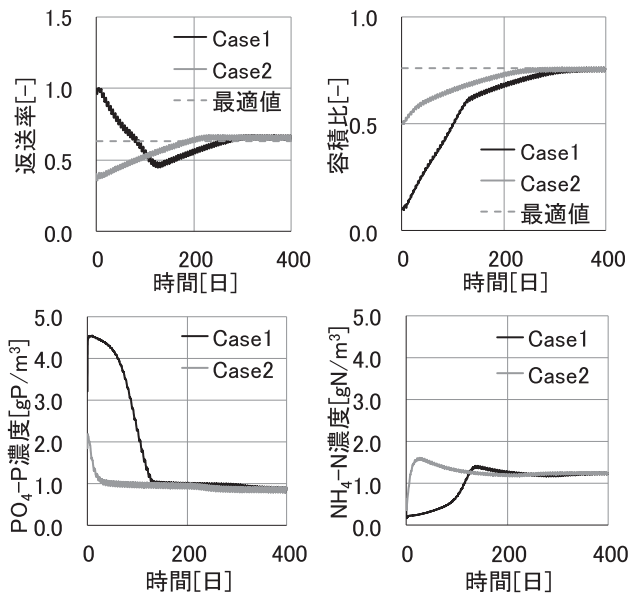


Fig. 5 Result for case in proposed Extremum seeking

線、操作量の最適値を灰色の点線で示している。

Fig. 4より、Case 1とCase 2において、返送率は最適値の方向へと収束する様子が確認できたが、容積比については、最適値近傍への収束が確認できなかった。これは、最適運用のためには容積比を上昇させなければならないところを、返送率と容積比の間に発生した干渉により、返送率の動作に同期してしまい、最適値付近まで操作量を変化させることができなかったと考えられる。特にCase 1において、操作量の初期値が最適値から離れている場合の結果(黒色線)では、放流水のNH<sub>4</sub>-NとPO<sub>4</sub>-Pの濃度に顕著な差が生じており、放流水のPO<sub>4</sub>-P濃度は4.0 [gP/m<sup>3</sup>]を超過するほど悪化する結果となった。従来法がこのような結果になったのは、PO<sub>4</sub>-P濃度が管理値を大きく超過していることにより、ペナルティ関数を含む総コスト

の値も増大している状況であるが、操作量間の干渉の影響を受け、操作量を最適値の方向に向かわせることができなかったためであると考えられる。

Fig. 5では、Case 1とCase 2において、返送率および容積比が互いに干渉せずに、それぞれ最適値の方向へ収束していく様子が確認できた。これに伴い、操作量の初期値によらず、放流水のNH<sub>4</sub>-NとPO<sub>4</sub>-Pの濃度は互いに、管理値付近まで除去できており、トレードオフの関係にある水質が同時に除去される運転条件を探索することができることがわかった。

一方で、最適値に収束するまでの時間は、提案手法の方が従来手法より4倍程度長い結果となった。これは、提案手法では、2つの操作量を動作させている事、また操作量を変化させない休止期間を設けていることに起因していると考えられるが、今後はより速やかな収束を実現できるような仕組みの検討を行う必要がある。

## 5. ま と め

本論文では、下水処理プラント運用において、ポンプやブロワなどの複数の操作量を同時に動かしながら、水質改善や運用コストの低減を図る最適制御を立案した。複数の操作量を同時に動作させる際に発生する干渉を抑制した新しい極値制御アルゴリズムを提案し、汚泥返送率および兼用区画に占める嫌気区画の容積比の制御に適用し、シミュレータにて提案手法の有効性を確認した。一方で、提案手法において、収束するまでに時間がかかることを確認したため、今後、収束性を改善する方法の検討を行っていく。

## 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>, 2021/6/30 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), 2021/6/30 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), 2021/6/30 アクセス
- 4) K.B. Ariyur and M. Krstic, "Real-Time Optimization by Extremum Seeking Control", Wiley-InterScience, (2003)
- 5) COST 624: Optimal Management of Wastewater Systems, [http://www.cenn.ge/electronic\\_library/Wastewater/Optimal%20Management%20of%20Wastewater%20Systems/Part\\_2.pdf](http://www.cenn.ge/electronic_library/Wastewater/Optimal%20Management%20of%20Wastewater%20Systems/Part_2.pdf), 2021/6/30 アクセス
- 6) 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)

- 7) S. Wildhagen, S. Michalowsky, J. Feiling, and C. Ebenbauer, "Characterizing the learning dynamics in extremum seeking", 2018 IEEE Conference on Decision and Control, (2018)
- 8) 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)
- 9) M. Henze, W. Gujer, T. Mino, M. Loodrecht : Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d, and ASM3, IWA Publishing, (2000)
- 10) 社団法人日本下水道協会 : 「下水道維持管理指針 後編 — 2003年版 —」, (2003)