

< 特集 >

高度処理プロセスのモデルベース制御

Model Based Control for Enhanced Wastewater Treatment Processes

山中 理

(株) 東芝 電力・産業システム技術開発センター 社会システム開発部
〒 183-8511 東京都府中市東芝町1(府中事業所)

OSAMU YAMANAKA

Abstract

This paper discusses the applicability of advanced model-based control to enhanced wastewater treatment processes (EWWTP's). A typical EWWTP called A2O process consisting of an anaerobic reactor, an anoxic reactor and a oxic reactor is introduced in order to explain how nitrogen and phosphorus are removed biochemically in the reactors. Then, the models of the A2O process are briefly described. After introducing the fundamental idea of model predictive control (MPC) scheme that is one of major model-based control schemes, an example of the MPC for the A2O process illustrates the effectiveness and the limitation of the presented MPC scheme through numerical simulations. Based on the results, the paper discusses the problems to be solved and/or examined in order to apply the model-based control technologies such as the MPC to real-world A2O processes and other EWWTP's.

Key Words : モデルベース制御, モデル予測制御, 非線形モデル, 低次元化, パラメータ同定, 評価関数, 脱窒・脱リン, 高度処理プロセス, 活性汚泥モデル
(Model based control, model predictive control, nonlinear model, model reduction, parameter identification, cost function, phosphorus and nitrogen removal, enhanced wastewater treatment process, activated sludge model)

1 はじめに

高度処理プロセスは、従来の有機物 (C: Carbon) 除去に加えて、閉鎖性水域の富栄養化の原因物質である窒素 (N: Nitrogen) やリン (P: Phosphorus) の除去を目的とした下水処理プロセスの総称である¹⁾。A2O (嫌気-無酸素-好気) プロセスに代表されるように、高度処理プロセスの多くは微生物の代謝を利用した従来の標準活性汚泥法のプロセス構成を変更することによって構築できる。ここでは、C, N, P を除去するために、硝化菌, 脱窒菌, あるいはリン蓄積性微生物などの微生物群の個々の (数学的には非線形な) 活動を適切に制御する必要があるため、高度処理プロセスの制御は多変数非線形制御と考え

ることができる。また、巻頭言で述べられている様に高度処理プロセスの運転コスト削減に対するインセンティブも高まりつつあり、高度処理プロセスの制御は、C, N, P 除去と運転コスト削減を同時に目的とする多目的制御でもある。

プロセスの挙動を模擬するモデルを用いて制御を行ういわゆる「モデルベース制御」は、このような複雑な多目的多変数非線形制御問題を扱うための有力な制御方法の一つである²⁾。窒素やリンに関連する物質のオンラインセンサーの開発や、C, N, P 除去に関わる微生物群の動力学を表現した IWA (International Water Association) の活性汚泥モデル (ASM1~ASM3) などに代表されるモデルベース

制御に不可欠なプロセスモデルの出現は、高度処理プロセスにおけるモデルベース制御の実現を現実のものにする可能性を予感させる³⁾。モデルベース制御は、狭義には「インテリジェント情報処理を用いた制御」には含まれないと考えられるが、「プロセスモデル」をプロセスの挙動を内在したプロセス知識のジェネレータと捉えるならば、プロセスモデルに基づく制御は究極のインテリジェント制御と解釈することもできる。

本解説では、化学プロセスの制御で十分な実績のあるモデルベース制御の一つであるモデル予測制御の高度処理プロセスへの適用方法について議論する。まず、2章では、典型的な高度処理プロセスであるA2Oプロセスを用いて窒素およびリン除去の原理を説明し、A2Oプロセスを構成するモデルの概要を示す。3章では、モデル予測制御の概要を説明する。4章では、高度処理プロセスの一つであるA2Oプロセスにモデル予測制御を適用したシミュレーション事例を紹介する。5章では、モデル予測制御を実用化するために今後検討しなければならないいくつかの課題について議論する。6章では、本解説のまとめを行う。

2 高度処理プロセスとプロセスモデル

本章では、A2Oプロセスを例として、窒素およびリン除去の原理を簡単に説明し、A2Oプロセスの構成要素となるモデルの概要を説明する。

2.1 A2O プロセス

Fig.1 に示す A2O プロセスでは、生物処理を行う反応槽は、嫌気槽 (Anaerobic Reactor)、無酸素槽 (Anoxic Reactor)、好気槽 (Oxic Reactor) と呼ばれる3つの槽から成る。

窒素除去は、好気槽での独立栄養性微生物 (硝化菌) による硝化 (アンモニア性窒素 \Rightarrow 硝酸性窒素) と、無酸素槽での従属栄養性微生物 (脱窒菌) による脱窒 (硝酸性窒素 \Rightarrow 窒素ガス) の2段階の生物反応によって行われる。リン除去はリン蓄積性微生物によって行われる。リン蓄積性微生物は嫌気槽で有機物を体内に蓄積すると同時に一旦体内のポリリン酸をリン酸性リンとして放出する。そして好気槽

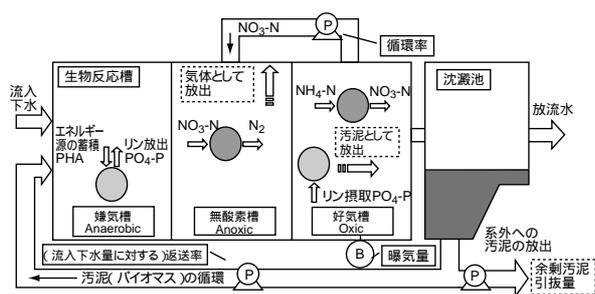


Fig.1 A2O プロセスの構成図

において、蓄積した有機物をエネルギー源として反応槽中のリン酸性リンを過剰に摂取する。最後にリン蓄積性微生物を汚泥として引き抜くことによって除去される。

2.2 A2O プロセスの要素モデル

A2O プロセスのモデルは、以下の様な生物反応槽モデルと沈澱池モデルからなる (Fig.1 参照)。

A. 生物反応槽モデル：生物反応槽は、生物反応を表す部分、水理学的な混合を表す部分、および酸素供給を表す部分から構成され、水理学的に完全混合であることを仮定すると形式的には、以下の様に記述できる¹²⁾。

$$\frac{dz_*(t)}{dt} = \underbrace{S^T r(z_*(t))}_{\text{生物反応}} + \underbrace{q_*(t)z_{*in}(t) - q_*(t)z_*(t)}_{\text{完全混合}} + \underbrace{(0, KLa, 0, \dots, 0)^T (S_{O_2} - S_{O_2^*}(t))}_{\text{酸素供給}} \quad (1)$$

$$q_*(t) := \frac{Q_*(t)}{V_*} \quad (2)$$

$$KLa := KQ_B(t) \quad (3)$$

ここで、 $z_*(t)[g/m^3] \in \mathcal{R}_+^n$ は反応槽内のアンモニア性窒素や DO (溶存酸素濃度) など n 個の水質濃度からなるベクトルである。 $z_{*in}(t)[g/m^3] \in \mathcal{R}_+^n$ は、各槽に流入する $z_*(t)$ と同じ水質要素の濃度を表すベクトルである。 $V_*[m^3] \in \mathcal{R}_+$ は反応槽の容積、 $Q_*(t)[m^3/day] \in \mathcal{R}_+$ は流入量を表す。 $S \in \mathcal{R}^{p \times n}$ と $r(\cdot) \in \mathcal{R}_+^p$ は、それぞれ化学量論定数を表す $p \times n$ の行列と反応速度を表す p 次のベクトルである。 p は要素反応の数を表し、 $*$ は行列 $*$ の転置を表す。 S と $r(\cdot)$ には、文献³⁾の活性汚泥モデル ASM1~ASM3 が用いられることが多い。生物反応

部分のモデルの詳細な定義は文献³⁾を、また生物反応モデル構築の考え方は文献⁴⁾を参照されたい。 $S_{o2^*}(t)[g/m^3] \in \mathcal{R}_+$ は溶存酸素濃度を表し、 $z_*(t)$ の要素である。 $\bar{S}_{o2}[g/m^3] \in \mathcal{R}_+$ は飽和溶存酸素濃度、 $KLa[1/day] \in \mathcal{R}_+$ は総括酸素移動容量係数である。 $Q_B(t)[m^3/day] \in \mathcal{R}_+$ は曝気量で $K[1/m^3] \in \mathcal{R}_+$ は定数である。 $*$ は各反応槽を表す文字列を意味し、例えば $* := aerobic$ は好気槽を表す。また、 \mathcal{R}^n は n 次の実数の集合、 \mathcal{R}_+^n は各要素が正の n 次の実数の集合である。

B. 沈澱池モデル: 沈澱池モデルには、文献^{5),6)}の様に沈降速度を考慮した詳細なものもあるが、完全沈降を仮定した簡略化モデルは次式の様に表される。

$$\frac{ds_{sd}(t)}{dt} = q_{sd}(t)s_{sdin}(t) - q_{sd}(t)s_{sd}(t) \quad (4)$$

$$\frac{dx_{sd}^b(t)}{dt} = q_{sdin}^c(t)x_{sdin}(t) - q_{sdout}^c(t)x_{sd}^b(t) \quad (5)$$

$$x_{sd}^u(t) = 0 \quad (6)$$

$$q_{sd}(t) := \frac{Q_{sd}(t)}{V_{sd}} \quad (7)$$

$$q_{sdin}^c(t) := \frac{Q_{sd}(t) - Q_{sdout}^e(t)}{\alpha V_{sd}} \quad (8)$$

$$q_{sdout}^c(t) := \frac{Q_{sdout}^w(t) + Q_{sdout}^r(t)}{\alpha V_{sd}} \quad (9)$$

ここで、 $s_{sd}(t)[g/m^3] \in \mathcal{R}_+^s$ は s 個の溶解性水質濃度を表すベクトル、 $x_{sd}^b(t)[g/m^3] \in \mathcal{R}_+^{n-s}$ は、 $n - s$ 個の沈澱池底部の浮遊性水質濃度を表すベクトル、 $x_{sd}^u(t)[g/m^3] \in \mathcal{R}_+^{n-s}$ は $n - s$ 個の沈澱池上澄部の浮遊性水質濃度を表すベクトルである。 $s_{sdin}(t)[g/m^3] \in \mathcal{R}_+^s$ と $x_{sdin}(t)[g/m^3] \in \mathcal{R}_+^{n-s}$ はそれぞれ沈澱池に流入する溶解性と浮遊性の水質濃度を表すベクトルである。 α は沈澱池容積に対する汚泥の沈澱容積の比率を表す1未満の定数である。 $Q_{sdout}^w(t)$ 、 $Q_{sdout}^r(t)$ 、 $Q_{sdout}^e(t)$ 、 $Q_{sd}(t)$ は、それぞれ余剰汚泥引抜量、返送量、放流量、沈澱池への流入量である。

これらの生物反応槽モデルと沈澱池モデルを Fig.1 の構成に従って結合することによって、A2O プロセスモデルを構築できる。A2O プロセス以外の高度処理プロセスの構築も原理は同じである。

3 モデル予測制御の概念

モデル予測制御 (MPC: Model Predictive Control) は、プロセス制御の分野では、最もポピュラーなモデルベース制御の一つであり、(a) DMC (Dynamic Matrix Control) 等の様に産業界で開発されたもの⁷⁾、(b) GPC (Generalized Predictive Control) 等の様に適応制御の分野から発生したもの⁸⁾、(c) Receding Horizon Control の様に最適制御の分野から発生したもの⁹⁾、など様々なバリエーションがあるが、基本的な原理はほぼ同じである^{10),11)}。典型的なモデル予測制御では、

- (I) 予測モデル (プロセスモデル) によって、プロセス出力の所定期間 (= 予測ホライズン) の予測を行う
- (II) 予測値と目標値の誤差および操作量が定常値に至るまでの変化量 (Fig.2 の斜線部分) の重みつき和 (= 評価関数) を最小化する様に所定期間 (= 制御ホライズン、Fig.2 では制御ホライズン = 予測ホライズン) の最適操作量を決定する
- (III) 決定した最適操作量の第1ステップ (Fig.2 の楕円で囲んだ部分) のみを実際の操作量としてプロセスを操作する
- (IV) 制御周期毎にホライズンを移動 (Moving Horizon) して同じ手続きを繰り返す

といった一連の操作によってプロセスの制御を行っている。

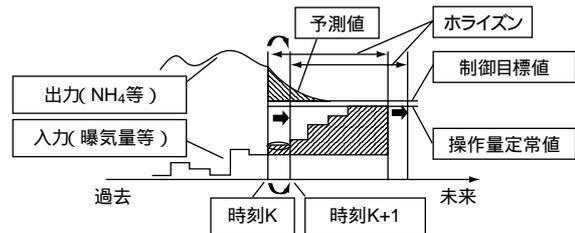


Fig.2 モデル予測制御の原理

モデル予測制御の実現に際しては、通常 (1) ~ (9) に相当するプロセスモデルを何らかの形で簡略化した予測モデルを用いることが多い。これについては、5章で再度議論する。モデル予測制御の具体的なアルゴリズムは、文献^{8),9),12)}などを参照されたい。

4 A2O プロセスへの MPC 適用例

本章では、2章で述べた A2O プロセスに対して、3章で紹介したモデル予測制御を適用したシミュレーション事例を紹介する。Fig.3 は、ここで紹介するモデル予測制御系の構成図である。

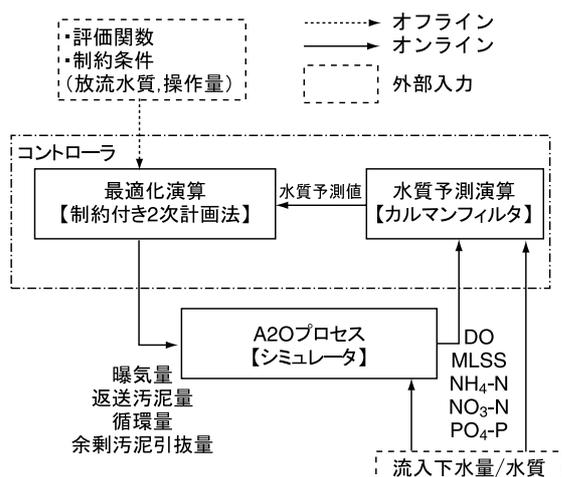


Fig.3 A2O プロセスのモデル予測制御系構成例

下水処理プロセスは、流入下水を外乱とみなすと、外乱を除去あるいは抑制する制御系であると考えられる。この制御系の諸条件、すなわち、制御対象のプロセス構成、外乱、操作量、被制御量を以下を各々以下の様に設定した。

プロセス構成: 嫌気槽、無酸素槽、好気槽、最終沈殿池の順に、 $54[m^3]$ 、 $216[m^3]$ 、 $324[m^3]$ 、 $216[m^3]$ である A2O プロセス。

外乱: 下水流入量は、 $100[m^3/day]$ ~ $1600[m^3/day]$ の範囲で一日周期で周期的に変動するものとした。下水流入水質は一定とした（全窒素濃度 = $25.4 [mg/L]$ 、全リン濃度 = $6 [mg/L]$ 、 $COD_{Cr} = 260 [mg/L]$ ）。

操作量 (アクチュエータ): 曝気量 (プロワ)、返送量あるいは返送率 (返送污泥ポンプ)、循環量あるいは循環率 (循環ポンプ)、余剰污泥引抜量 (余剰污泥引抜ポンプ)

被制御量: 全窒素濃度 $TN (\approx NO_3-N + NH_4-N)$ 、全リン濃度 $TP (\approx PO_4-P)$ 、 DO 、 $MLSS$ 。

さらに、モデル予測制御系を実現するための諸条件、すなわち、制御の有効性を確認するための想定規制値、予測モデル、評価関数と制約条件を以下の様にした。

想定規制値: 最終沈殿池の全窒素濃度 (TN)、全リン濃度 (TP) を各々 $TN < 12 [mg/L]$ 、 $TP < 1.0 [mg/L]$ とした。

予測モデル: (1) ~ (9) によって構築した A2O プロセスモデルに対するステップ応答試験を行い、ステップ応答波形を近似する様な 2 次の伝達関数モデルを同定し、この伝達関数モデルに基づいてカルマンフィルタを構成した。詳細は (4), (13) を参照されたい。

評価関数および制約条件: 制御目的として最適化すべき評価関数は標準的なモデル予測制御で用いる 2 次形式評価関数を用い、制約条件として操作量および被制御量に関する上下限值を設定した。詳細は (4), (13), (14) を参照されたい。

また、制御系の良否を比較するために、以下の 3 つの制御系を比較した。

- (A) リン除去重視の評価関数に基づく MPC (MPC1)
- (B) 窒素除去重視の評価関数に基づく MPC (MPC2)
- (C) 流入下水水量に対する比率一定制御 (CRC: 従来制御)

窒素およびリンの除去性能の結果を、Fig.4 と Fig.5 にそれぞれ示す。また、曝気風量を平均下水流入量に対する倍率で示した空気倍率の時間変化を Fig.6 に示す。

Fig.4~Fig.6 より、以下のことがわかる。

- (I) MPC1 ではほぼ規制想定値以下 (リン除去については規制想定値付近) の窒素とリンの同時除去を行える (Fig.4, Fig.5)。従って、モデル予測制御の評価関数を適切に設定すれば、窒素とリンの同時除去を行える可能性が高い。
- (II) 一方、窒素とリンの除去にはトレードオフの関係があり、窒素とリンの濃度を任意の値に制御することは不可能である (Fig.4, Fig.5)。
- (III) 曝気風量変動は従来の比率一定制御 (CRC) よりもモデル予測制御 (MPC1 と MPC2) の方が小さく、平均的にも風量が少ない (Fig.6)。従って、モデル予測制御によってコスト削減 (電力量削減) を行える可能性が高い。

本シミュレーション結果から、A2O プロセス等の高度処理プロセスへのモデル予測制御を適用することの有効性が示唆されると同時に限界も示唆される。次章では、モデル予測制御の実用化に向けて検討すべきいくつかの課題について議論する。

5 実用化に向けての課題

本章では、前章のシミュレーション結果と筆者の文献調査や経験に基づき、高度処理プロセスのモデル予測制御の実用化に向けて検討すべき課題について文献を参照しながら私見を述べる。

5.1 アクチュエータに対する検討

4章で示したシミュレーション事例では、アクチュエータ(操作量)として曝気やポンプなど通常のA2Oプロセスに基本的に設置されているものを想定した。その結果、窒素とリンの同時除去を達成できる可能性が示唆されるものの、本質的に窒素とリンの除去はトレードオフの関係にあることも明らかになった。従って、流入下水の過負荷時や雨天時等には同時除去が達成できない場合も十分に考えられる。そのためには、窒素とリンの同時除去達成に必要なアクチュエータの選定を十分に検討する必要があるだろう。ステップ流入、初沈汚泥(あるいはこれを発酵させた汚泥)のバイパス投入、酢酸やメタノール等の外部炭素源の投入、あるいはリン除去に対する凝集剤の投入といった操作量を付加することの可否、あるいはどのような場合に付加すべきかに関する検討は重要な課題であると思われる。一例として、炭素源投入制御の窒素除去効果については、^{15),16)}などに報告がある。

5.2 センサーに対する検討

信頼できる意味のあるセンサーの計測情報が存在することが、モデル予測制御に限らず制御系が望みどおり動作するために必須の条件である。シミュレーションでは、センサー計測値は計算によって算出されているが、実際には、活性汚泥の反応メカニズム、水理学的な条件とそれに伴うセンサーの汚れにくさなどを考慮したセンサーの種類選定と設置場所の検討も重要な課題である。反応槽が完全混合である場合には、活性汚泥の反応メカニズムを考慮してセンサーの種類を特定すると同時にそれを設置する反応槽を決めれば十分である。実際には完全混合で無い場合が多いので、ある程度の水理学的な解析に基づいて、センサーの設置位置を特定する必要がある。また、制御への利用を前提とした場合には、センサーは連続計測あるいは所定周期で計測されている必要が

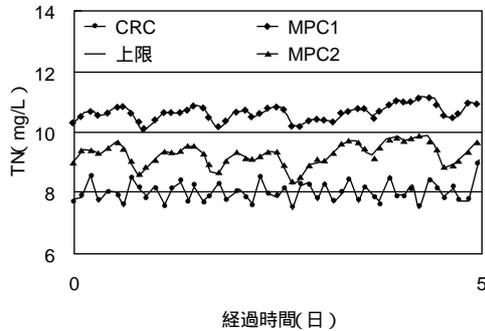


Fig.4 制御出力(全窒素濃度)

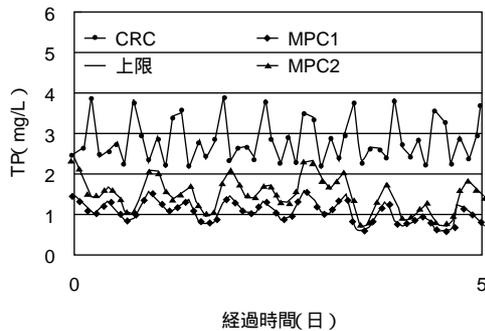


Fig.5 制御出力(全リン濃度)

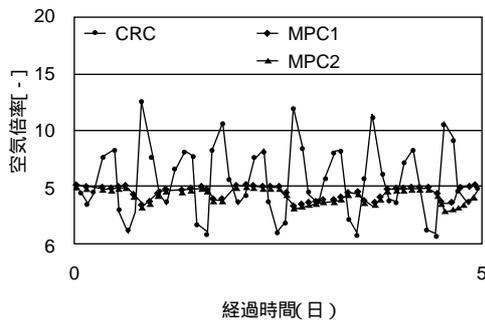


Fig.6 制御入力(曝気空気倍率)

ある。このようなセンサーは徐々に実用化されつつあり^{17),18)}、これによって高度処理プロセスの(モデルベース)制御系の実現は加速するだろう。

5.3 評価関数に対する検討

4章で示したシミュレーションでは、標準的なモデル予測制御で用いられる2次形式の評価関数を採用したが^{13),14)}、最適化(最小化)すべき評価関数の意味を明確にしておくことは、下水処理プロセスなどの公共性の高いプロセスでは特に重要なことであると思われる。ヨーロッパでは、放流水質をCOD_{Cr}を基準としたEQという単位で計量し、これに賦課金を与えることによって、曝気やポンプ運転に伴う電力コストや汚泥処理コストと同次元で議論することが既に行われている¹⁹⁾。文献²⁰⁾では、リン除去や薬品コストも考慮し、国内でも適用できる様に修正した評価関数を提案している。このような評価関数に対する議論が発展し、定量的な評価が可能になれば、本稿で扱っているモデル予測制御に限らず、高度処理プロセスの最適な(モデルベース)制御系についての議論が可能になる。

5.4 予測モデルに対する検討

4章で述べたシミュレーション検討では、(1)~(9)のプロセスモデル(60次以上の非線形モデル)を直接用いず、ステップ応答試験から導出した伝達関数モデル(2次の線形モデル)に基づくカルマンフィルタを予測モデルとして利用した。制御系設計において、このような低次のモデル(低次元化モデル)を利用することの重要性は良く知られている^{21),22)}。ステップ応答を適合させる考え方は、低次元化の一つの方法であるが、(1)高度処理プロセスの非線形性を無視してしまう、(2)物質収支などの概念が失われてしまう、などの問題もある。予測モデルをカルマンフィルタとして構成することにより、ある程度ロバストな予測が可能となるが、定量的な議論は十分でない。他のアプローチとして、物質収支の概念あるいはプロセスの非線形性を保存しながら、低次元化する方法も提案されている^{12),23),25)~27)}。どのようなアプローチが最も適切であるかは一概には結論することはできないが、制御系設計の観点からは以下のことを考慮することが必要であろう。

(A) オンラインセンサーによって測定可能あるいはは

推定可能な状態変数(NH_4-N などの水質要素)のみを用いてモデルが構築されていることが望ましい^{23)~25),28)}。これは可観測性(Observability)の概念と関連している^{22),24)}。

- (B) 予測モデルのパラメータをオンラインセンサーの計測データから一意に同定できるようにモデルが構築されていることが望ましい。パラメータを一意に同定できるための条件は可同定性(Identifiability)として知られており、文献^{28)~30)}などで議論されている。また、感度解析に基づいてモデルのパラメータを同定する方法については、文献^{31),32)}等で議論されている。
- (C) 実用的な観点からは最適化問題をなるべく実行しやすい様にモデル化に工夫をすることも重要である。4章で示した方法は最適化問題を2次計画問題という比較的容易に実行できる形に帰着させている点では実用性がある。その他に文献^{23),26)~28)}などの考え方は制御系設計を意識したモデル化方法である。

6 まとめ

本稿では、高度処理プロセスへのモデルベース制御の適用について解説した。まず、高度処理プロセスとして、窒素とリンの同時除去を目的としたA2Oプロセスを取り上げ、生物学的な窒素とリンの除去の原理を簡単に説明すると同時に、A2Oプロセスを構成する要素モデルの概要について述べた。次に、プロセス制御系では最もポピュラーなモデルベース制御の一つであるモデル予測制御の概念を解説した。さらに、A2Oプロセスを対象としてモデル予測制御を適用したシミュレーション事例を紹介した。これにより、A2Oプロセスに対するモデル予測制御の有効性を示唆すると同時に、実用化に向けてさらに検討すべき課題について文献を参照しながら筆者の私見を述べた。紙面の都合上、参考文献を示すにとどめた箇所が多くあるが、適宜参照頂きたい。

参考文献

- 1) 社団法人日本下水道協会, “高度処理施設設計マニュアル(案)”, 1994.
- 2) G. Olsson and B. Newell, “Wastewater Treatment Systems –Modeling, Diagnosis and Control–”, IWA publishing, 1999.

- 3) M. Henze *et al*, "Activated Sludge Models –ASM1, ASM2, ASM2d, and ASM3–", *IAWQ Scientific Technical Report* No.9, 2000.
- 4) 山中, 長岩, 堤, 岸原, 初鹿, "水質予測モデルを用いた下水処理プロセスの脱窒・脱リン制御", 電気学会産業計測制御研究会, pp.IC-01-35 53–59, 2001.
- 5) G. A. Ekama *et al*, "Secondary Settling Tanks – Theory, Modeling, Design and Operation", *IAWQ Scientific Technical Report* No.6, 1997.
- 6) <http://www.ensic.u-nancy.fr/COSTWWTP/>
- 7) J. B. Froisy, "Model Predictive Control, Past, Present and Future", *ISA Transactions* 33, pp.235–243, 1994.
- 8) D. W. Clarke *et al*, "Generalized Predictive Control – Part I The Algorithm", *Automatica*, Vol.23, No.2, pp.137–148, 1987.
- 9) D. Q. Mayne and H. Michalska, "Receding Horizon Control of Non-linear Systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.* Vol.35, No. 5, pp.814–824, 1990.
- 10) 飯野, "産業応用におけるモデル予測制御の現状と課題", 計測自動制御学会 第38回適応制御部会資料, pp.1–26, 1996.
- 11) 大島, "実用的制御技術Ⅲ. モデル予測制御", 電学論C, Vol.116, No.10, pp.1089–1093, 1996.
- 12) O. Yamanaka *et al*, "Application of Model Predictive Control for Enhanced Wastewater Treatment Biological Process for Phosphorus and Nitrogen Removal", *Proc. IFAC Workshop on Modeling and Control in Environmental Issues*, pp.319–324, Yokohama, Japan, July 2001.
- 13) O. Yamanaka *et al*, "Biological Nitrogen and Phosphorus Removal in Activated Sludge Process Applying a Kalman Filter Based Model Predictive Control", *Proc. of 1st IWA-ICA Conference*, pp.89–96, 2001.
- 14) 山中, 長岩, 堤, 永森, 初鹿, "モデル予測制御を用いた下水処理場脱窒・脱リン水質制御", 第8回制御技術シンポジウム予稿集, pp.459–462, 2000.
- 15) P. R. Barros and B. Carlsson, "Iterative Design of A Nitrate Controller Using an External Carbon Source in An Activated Sludge Process", *Wat. Sci. Tech.* Vol.37, No.12, pp.95–102, 1998.
- 16) 小原, 山中, 堤, 本木, "ORP計を用いた硝化脱窒制御の実験的検討", 第14回EICA研究発表会予稿集, pp.43–46, 2002.
- 17) 堤, 小原, 山中, 本木, 小林, "脱窒素・脱リン型下水処理プロセスの計測と水質予測モデルの評価", 電気学会産業計測制御研究会予稿集, pp.71–74, 2002.
- 18) 古川, 安齋, 廣辻, 田中, "硝化制御による曝気風量の節減", 第14回EICA研究発表会予稿集, pp.39–42, 2002.
- 19) P. A. Vanrolleghem *et al*, "Robustness and Economic Measures as Control Benchmark Performance Criteria", *Proc. of 1st IWA-ICA Conference*, pp.213–220, 2001.
- 20) 山中, 小原, 代田, 堤, 本木, "下水高度処理プロセス制御における運用コスト評価関数の導入と評価関数に基づく制御系の評価", 第14回EICA研究発表会予稿集, pp.61–64, 2002.
- 21) 北森, "モデルの低次元化", *コンピュータ制御システム同定の理論と技術*, No.23, pp.92–96, 1988.
- 22) B. C. Moore, "Principal Component Analysis in Linear Systems; Controllability, Observability, and Model Reduction", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **AC-26**, pp.17–32, 1981.
- 23) U. Jeppson and G. Olsson, "Reduced Order Models for On-Line Parameter Identification of the Activated Sludge Process", *Wat. Sci. Tech.* Vol.28, No.11–12, pp.173–183, 1993.
- 24) E. Ayesa *et al*, "Observability of Reduced order Models -Application to a Model for Control of Alpha Process", *Wat.Sci.Tech.* Vol.31, No.2, pp.161–170, 1995.
- 25) 中島, 井手, 伊藤, "下水処理プロセスの制御設計に向けた低次元モデルの開発と検討", 計測自動制御学会 第45回自動制御連合講演会, 発表予定, 東北大学 11月26~11月27日, 2002.
- 26) J. S. Anderson *et al*, "Control of an Alternating Aerobic-Anoxic Activated Sludge System I: Development of a Linearization-based Modeling Approach", *Control Engrg. Practice*, Vol.28, No.3, pp.271–278, 2000.
- 27) L. J. S. Lukasse *et al*, "Adaptive Receding Horizon Optimal Control of N-Removing Activated Sludge Processes", *Proc. of Med. Fac. Landbouww, Univ. Gent*, 62/4b, pp.1665–1671, 1997.
- 28) S. Julien *et al*, "Theoretical and Practical Identifiability of A Reduced Order Model in an Activated Sludge Process Doing Nitrification and Denitrification", *Wat. Sci. Tech.* Vol.37, No.12, pp.309–316, 1998.
- 29) D. Docahin *et al*, "Structural Identifiability of Biokinetic Models of Activated Sludge Respiration", *Wat. Res.* Vol.29, pp.2571–2579, 1995.
- 30) P. A. Vanrolleghem *et al*, "Practical Identifiability of a Biokinetic Model of Activated Sludge Respiration", *Wat. Res.* Vol.29, pp.2561–2570, 1995.
- 31) S. R. Weijer and P. A. Vanrolleghem, "A Procedure for Selecting Best Identifiable Parameters in Calibrating Activated Sludge Model No.1 to Full-Scale Plant Data", *Wat. Sci. Tech.* Vol.36, No.5, pp.69–79, 1997.
- 32) J. Sato and H. Ohomori, "Sensitivity Analysis and Parameter Identification of Wastewater Treatment System Based on Activated Sludge Model No.1 (ASM)", *Proc. of SICE Annual Conference 2002 in Osaka*, pp.1253–1258, 2002.