

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

山中 理*, 長岩 明弘*, 堤 正彦*,
永森 泰彦*, 初鹿 行雄**

* (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
東京都府中市東芝町1

** (株)東芝 社会インフラシステム事業部 公共システム技術第一部
東京都港区芝浦1-1-1

概要

本論文では、下水道高度処理で用いられる A2O 法による下水処理プロセスを対象として、窒素とリンの同時除去を目的とした制御方式について検討を行った。国際水質学会(LAWQ)が公表している活性汚泥モデル No.2(ASM2)を組みこんだ下水処理プロセスシミュレータを仮想的な対象プロセスとし、化学プロセス制御の分野において標準的なアドバンス制御の一手法であるモデル予測制御の適用を試みた。その結果、窒素とリンの除去には、相互にトレードオフの関係があるが、一定の範囲内で窒素とリンの同時除去が可能であることをシミュレーションにより確認した。また、モデル予測制御により、水質のみならず経済的なコストを評価できる可能性についても数値例を用いて示唆する。

キーワード

脱窒・脱リン, A2O 法, ASM2, 水質制御, モデル予測制御, 非線形制御

1. まえがき

近年、下水処理場においては、窒素やリンの除去(脱窒および脱リン)を目的とした高度処理の導入が推進されている。窒素やリンの除去手法の有効なアプローチの中に、生物学的処理法の一つである Anaerobic-Anoxic-Oxic (A2O:嫌気-無酸素-好気)法がある。A2O 法では、通常の下水処理で用いられる標準活性汚泥法と比較して、下水処理プロセスの挙動が複雑になり、プロセスを制御する操作量も増加する。このようなプロセスにおいて、窒素とリンの同時除去を目的とした最適な運転管理を行うためには、プロセスの挙動を表現する数式モデルを用いてプロセスを模擬し、複数の操作量を最適な値に調整することが望まれる。

下水処理プロセスを模擬する技術として、国際水質学会(LAWQ)が公表している Activated Sludge Model No.1~No.3 (ASM1~ASM3)がある¹⁾。これは、窒素やリンの除去に関する生物反応を非線形の微分方程式で記述したものであり、水理学的なモデルや沈殿池のモデルと組み合わせることにより、下水処理プロセスをシミュレーションすることができる。これを目的として、筆者らは、下水処理プロセスシミュレータを開発し、その精度検証を行ってきた²⁾。

一方、複数の操作量を同時に調整する方法の一つとして、モデルを用いて複数の最適操作量を求めるモデル予測制御が知られている³⁾。モデル予測制御は、種々の制約条件や複数の制御目的を同時に考慮することができる制御方式であり⁴⁾、主に化学プロセスを中心とするプロセス制御分野で広く用いられている。

本稿では、ASM2 を組みこんだ A2O プロセスシミュレータ (A2O プロセスモデル) から、制御系設計用の低次元線形近似モデルを導出し、これを用いて、入出力制約付きのモデル予測制御方式⁴⁾を適用する。また、構築した A2O プロセスシミュレータを制御対象とみなし、シミュレーションにより、窒素とリンの同時除去の可能性について検討を行った結果について報告する。

2. 対象システムと制御目的

下水処理プロセスは、物理的処理（沈殿による固液分離）、生物学的処理（微生物呼吸による有機物分解）、化学的処理（化学的凝集沈殿、薬品注入などの処理）に大別される。本稿ではこの中で、図1に示す生物学的処理と物理的処理の部分を対象システムとする。なお、図1に示す様に生物反応槽は、A2O法で構成されているとし、最初沈殿池以前の処理と最終沈殿池以降の処理は考察の対象外とする。

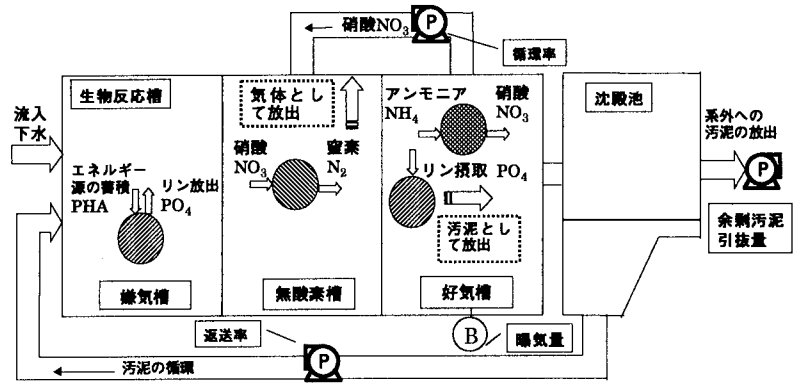


図1 A2O法による下水処理プロセス（窒素・リン除去メカニズム）

図1では、対象プロセスにおける窒素とリン除去の処理メカニズムを併せて表記している。窒素除去に関しては、好気条件での硝化菌による硝化と無酸素条件での脱窒菌による脱窒の2段階の反応を経由して、窒素ガスとして系外へ放出される。リン除去に関しては、リン蓄積性微生物が、嫌気条件下で体内にエネルギー源としての有機物を取りこむと同時にリン酸を放出し、好気条件において体内に蓄えた有機物を利用して反応槽内のリン酸を過剰摂取する。最終的にリンは汚泥として系外へ放出される。このように定性的に説明できる現象を定量化したモデルがASM2であり、筆者等はこのASM2を組みこんだ水質シミュレータを開発してきた²⁾。

本稿の目的は、A2O法による下水処理プロセスに対し、シミュレータを利用して窒素およびリンを除去できる多変数制御系を構築することである。具体的には、以下に示す操作量、外乱、および被制御量が与えられるという条件のもとで、以下に示す制御目的を達成することである。

【操作量(アクチュエータ)】 曝気量 Q_B (プロワ), 返送量あるいは返送率 Q_{ref} (返送汚泥ポンプ), 循環量あるいは循環率 Q_{circ} (循環ポンプ), 余剰汚泥引抜量 Q_{waste} (余剰汚泥引抜ポンプ)

【外乱】 流入下水量, 流入下水水質

【被制御量】 硝酸濃度 S_{no3} (NO_3), アンモニア濃度 S_{nh4} (NH_4), リン酸濃度 S_{po4} (PO_4), 溶存酸素濃度 S_{o2} (DO), 浮遊固形物濃度 X_{tss} (MLSS)

【制御目的】 図1の最終沈殿池(≈放流水)の全窒素濃度(TN), 全リン濃度(TP)を規制想定値以下(例: $TP < 1.0$ [mg/L], $TN < 15$ [mg/L])に押さえること。ただし、以下では $TN \approx NH_4 + NO_3$, $TP \approx PO_4$ と考える。

3. モデル予測制御による脱窒・脱リン水質制御系の設計

(1) モデル予測制御の概要

モデル予測制御方式には様々な定式化の方法があるが、どのような定式化においても、コントローラの内部に、通常以下の2つの機能を備えている。

- i) (未来の操作量が現在の操作量のままホールドされ続けるという条件の下で), 対象プロセスの被制御量の予め設定したある期間(予測ホライズンと言う)にわたる応答を予測するための予測演算。
- ii) 予め与えた未来目標値軌道とi)との誤差を最小化する様に、予め設定したある期間(制御ホライズンと言う)にわたる最適操作量を計算する最適化演算。

実際の操作量は、ii)で計算した最適操作量の1ステップのみを取りだし、i)とii)の計算は、制御周期毎に毎回繰り返される。モデル予測制御系の構成概念図を図2に示す。なお、【】内は本稿で具体的に用いているものである。

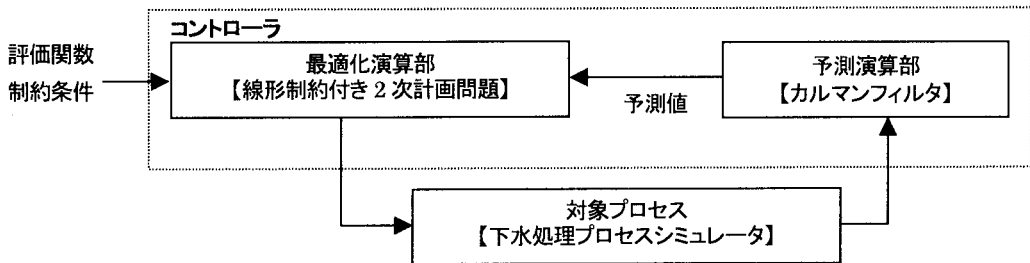


図2 モデル予測制御系の構成

(2) A2O プロセスを対象としたモデル予測制御

下水処理プロセス(A2O プロセス)を対象とした場合における、評価関数、制約条件、予測演算、最適化演算の概要を以下に示す。

【評価関数】

$$J = \underbrace{\sum_{t=now}^{fixed\ time\ in\ future} ((\sigma_1 \Delta S_{o2}(t))^2 + (\sigma_2 \Delta X_{iss}(t))^2 + (\sigma_3 \Delta S_{po4}(t))^2 + (\sigma_4 \Delta S_{no3}(t))^2 + (\sigma_5 \Delta S_{nh4}(t))^2)}_{outputs} + \underbrace{\sum_{t=now}^{fixed\ time\ in\ future} ((\lambda_1 \Delta Q_B(t))^2 + (\lambda_2 \Delta Q_{circ}(t))^2 + (\lambda_3 \Delta Q_{ret}(t))^2 + (\lambda_4 \Delta Q_{waste}(t))^2)}_{inputs} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta S_{o2}(t)$, $\Delta X_{iss}(t)$, $\Delta S_{po4}(t)$, $\Delta S_{no3}(t)$, $\Delta S_{nh4}(t)$ は、各被制御量の目標値偏差、 $\Delta Q_B(t)$, $\Delta Q_{ret}(t)$, $\Delta Q_{circ}(t)$, $\Delta Q_{waste}(t)$ は、各操作量差分を表し、 $\sigma_i, i=1, \dots, 5$ や $\lambda_j, j=1, \dots, 4$ は重みを表す。

【制約条件】

$0 \leq$ 各操作量 \leq 各操作量上限値 $\dots\dots\dots$ (2)

$0 \leq$ 各水質値 \leq 各水質規制値 $\dots\dots\dots$ (3)

【予測演算】

A2O プロセスシミュレータは 64 次の非線形微分方程式で記述されており、制御系設計の観点からは複雑すぎる。そのため、以下の方法で低次元線形近似モデルを導出し、予測演算を行う。

- i) シミュレータに対して、各操作量および流入下水量（以下入力と呼ぶ）に対するステップ応答試験を行う。ただし、1 回の試験で 1 つの入力のみを変化させ、その他の入力は各入力の動作範囲の中央値に保つ。
- ii) 得られたステップ応答波形より、1 次あるいは 2 次の線形伝達関数で近似モデルを作成する。
- iii) 得られた線形近似モデルに対してカルマンフィルタを構成し、予測演算を行う。

【最適化演算】

最適化演算は、(2)式や(3)式のような制約条件がある場合には、制約付きの最適化問題として解く必要がある。実際には、線形制約付きの 2 次計画問題として定式化することができ、最適化演算の一つである 2 次計画法を用いて解くことができる。詳細は、文献 4), 5)などを参照されたい。

4. シミュレーションによる検証

本章では、A2O プロセスシミュレータを仮想的に対象システムとみなし、3 章で説明したモデル予測制御を適用したシミュレーション結果を示す。

【シミュレーション条件】

各槽の水量: 嫌気槽, 無酸素槽, 好気槽, 最終沈殿池の順に, 54[m³], 216[m³], 324[m³], 216[m³]とした。

外乱: 流入下水量は, 100[m³/day]~1600[m³/day]の範囲で一日周期で周期的に変動するものとした。流入下水水質は一定とした。

制御条件: 評価関数の重み, 上下限, 目標値, 動作点, 流入水質値などの条件を表1に示す.

比較対象: 流入下水量に対して操作量の比率を一定に保つ流入比率一定制御を比較対象とした. 以下これを従来制御と呼ぶ.

【結果】

窒素およびリンの除去性能の結果を, 図3に示す. 図3において, 水質の細かい変動は, 外乱である流入下水量の変動に起因するものである.

表1 シミュレーション検証における制御の諸条件

		重み	上限	下限	目標値	動作点/流入値
操作量	曝気量[m ³ /day]	4.3	8000	100	—	5000
	循環率[%]	5	600	70	—	150
	返送率[%]	5	300	12	—	60
	余剰汚泥引掻量[m ³ /day]	86	25	2	—	15
	流入量[m ³ /day]	0	—	—	—	864
被制御量	PO4-P[mg/L]	20	8	0	0.5	3.6
	NO3-N[mg/L]	2	15	0	3.0	0
	NH4-N[mg/L]	2	15	0	3.0	18.0
	MLSS[mg/L]	0	—	0	—	—
	DO[mg/L]	1	6	0	2.5	0

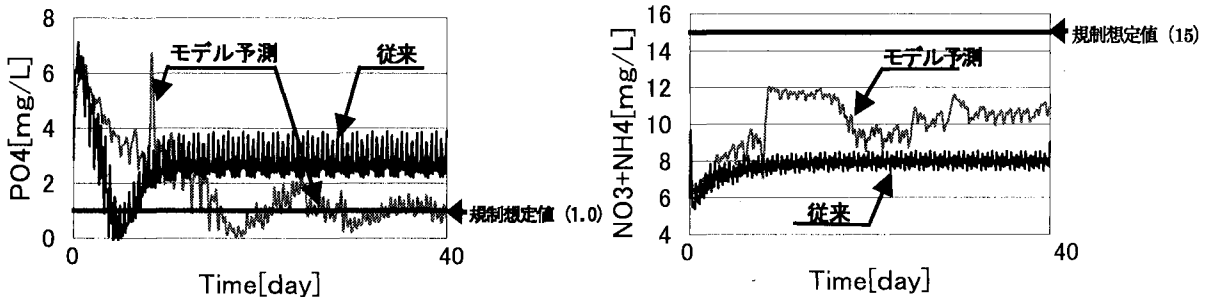


図3 リンおよび窒素の制御結果

【考察】

図3より, リン除去はモデル予測制御によって, 規制想定値とした1.0[mg/L]付近まで達成されている. しかし, このケースにおいては, 従来制御では, リン除去はほとんど行われていない. 一方, 窒素除去性能は従来制御の方が優れているが, モデル予測制御によっても, 規制想定値とした15[mg/L]以下の水質は達成されている. これは, 表1に示した様にリン除去に対する重みを大きくしているためである. これより, 以下のことがわかる. 1) モデル予測制御によって, 窒素とリンの除去のトレードオフを考慮して同時除去を行うことができる. 2) ただし, 任意の水質を達成することはできない. 3) (1)式の重みを調整することにより, 窒素とリンの除去性能には, 優先度を持たせることができる.

なお, モデル予測制御を行った場合の曝気量の平均は4165[m³/day]となっていた. これは, 従来制御の場合の5000[m³/day]と比較して, 2割近くの風量削減になっている. これは, 曝気量も(1)式の評価関数で考慮しているためである. このようなコスト評価も, (1)式の操作量の重みとして, 水質評価と同時に考慮することができる.

5. まとめ

下水処理場の脱窒・脱リン制御に対して, モデル予測制御方式の適用可能性を検討した. A2O法による下水処理プロセスを対象とした数値シミュレーションにより, 窒素とリンの除去には相互にトレードオフの関係があるが, 窒素とリンの同時除去をある程度行うことのできる制御系を構築できることを示した.

今後は, 流入下水水質の変動の考慮や担体投入型プロセスに対する検討など, 様々な条件下でのモデル予測制御の適用可能性を検討していく. また, コストの評価と水質の評価のトレードオフを定量的に考察していく.

<参考文献>

- 1) IAWQ: Activated Sludge Model No.2, IAWQ Scientific Technical Report No.3 (1995)
- 2) 堤 他: 「下水処理場 NP 除去型シミュレーション技術」, 電気学会産業応用部門大会講演集 III, pp.s.104-10 (1999)
- 3) C.E.Garcia *et al*: Model Predictive Control: Theory and Practice—a Survey, Automatica, Vol. 25, No.3, pp335-348 (1989)
- 4) Y.Iino *et al*: A Kalman Filter Based Robust Model Predictive Control with Constraints, Proc. of IFAC ADCHEM'94, pp.301-306 (1994)
- 5) 山中 他: 「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)