

〈研究発表〉

凝集剤添加を含む高度下水処理の非線形 Receding Horizon 制御

大西 彰¹⁾, 大塚 敏之¹⁾

1) 大阪大学大学院基礎工学研究科 (〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3,
E-mail: onishi@sc.sys.es.osaka-u.ac.jp)

概要

下水処理施設において、放流水質と施設稼働量を非線形 Receding Horizon 制御(以下 RH 制御)により制御する事を目的とする. 本研究では、窒素に加えりんも同時に除去し複雑な非線形プロセスを持つ高度下水処理に対し、RH 制御による制御法を、化学的りんの沈殿プロセスを含む反応モデル ASM2d を用いて提案する. また数値シミュレーションを例示し、放流水質の考察を行う.

キーワード: 下水処理, モデル予測制御, 凝集剤, 最適制御, 活性汚泥モデル

1. はじめに

1.1 背景

環境問題が重要視される中、河川のヘドロ化、赤潮などの水質問題に関しても例外ではない. これらの水質問題の解決策の一つとして、下水処理技術の向上が挙げられる. 多くの水処理施設では、活性汚泥法¹⁾と呼ばれる多種の微生物の増殖反応を利用した生物学的下水処理法が用いられている. しかし、その生物反応の複雑さから、活性汚泥法は技術者の経験に基づいて制御が行われることが多く、安定した処理水質の実現が困難なため、定量的な制御法が求められている. また現在、プロセスが複雑な高度下水処理が閉鎖性水域に放流する処理場で普及しつつある²⁾.

それに対し従来研究³⁾では Activated Sludge Model No.2d(ASM2d)⁴⁾に対して非線形 Receding Horizon(RH)制御⁵⁾を用い、高度下水処理の水質、施設稼働コストの最適制御法を提案した. さらに文献⁶⁾で評価関数を改善することにより、微生物が死滅する現象(ウォッシュアウト)と放流水質の改善を行った. 本論文ではりん除去率を高めるため、凝集剤を新たな入力とし、RH 制御を用いて放流水質の改善を目指す.

2. 問題設定

2.1 活性汚泥法と高度下水処理

活性汚泥とは、微生物群を含む浮遊性有機汚泥の総称を指し、微生物の増殖反応を利用して、有機性汚濁を除去する方法を活性汚泥法と呼ぶ. さらに、異なる環境条件では異なる生物反応が起こるのを利用して窒素・りん除去性能を高めた処理法を高度下水処理法と呼ぶ. 本研究では、嫌気槽、無酸素槽、好気槽の3種

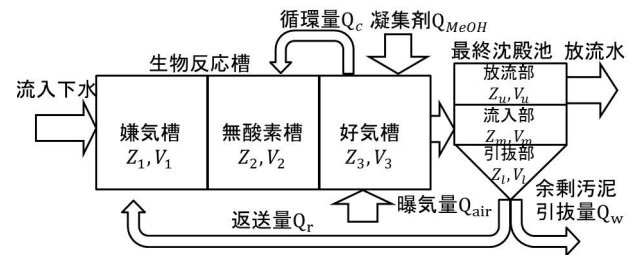


Fig. 1 A2O(Anaerobic-Anoxic-Oxic) process

の生物反応槽を持つ嫌気無酸素好気法

(Anaerobic-Anoxic-Oxic: A2O)⁷⁾を対象としている (Fig. 1). 生物反応槽で汚濁物質が除去された処理水は、沈殿池に流れ込む. その後、上澄み液を放流水とし、沈殿した汚泥は反応槽に返送する事で適正な量に調整し、不必要な汚泥は系外に引き抜かれる.

より高度にりんを除去する手法として、反応タンクに凝集剤⁸⁾を添加する施設を設ける方法がある. これは反応タンクにアルミニウム塩や鉄(III)塩などの凝集剤を添加することで、りん除去機能を付加する高度処理プロセスとなっている. りん除去の原理は3価金属イオン(Me^{3+})が下水中のりん酸イオン(PO_4^{3-})と反応して難水溶性の物質を生成する反応に基づいている.



この反応により、りんを含むフロックを生成し、最終沈殿池で沈殿分離される.

化学的りんの沈殿・再分解プロセスは ASM2d を利用する. シミュレーションにおいて、金属水酸化物 X_{MeOH} は $Fe(OH)_3$ 、金属りん酸塩 X_{MeP} は $FePO_4$ と仮定する. また、凝集剤の投与に関して文献⁹⁾を参考に、好気槽へ X_{MeOH} (1000[g/l]) を投与する.

2.2 A2O 法プロセスモデル

生物反応項に ASM2d, 沈殿項に Takacs の沈降モデル¹⁰⁾を用いて、各槽の物質収支に基づきモデルを作

成する。制御入力を u として、曝気量 Q_{air} 、返送量 Q_r 、余剰汚泥引抜量 Q_w 、循環量 Q_c 、凝集剤 Q_{MeOH} を与える。従来研究と同様、各変数の添え字は嫌気槽を1、無酸素槽を2、好気槽を3、沈殿池の放流部を u 、流入部を m 、引抜部を l と記述し、まとめて $*$ と表す。槽内水質を Z_* 、槽への流入水質を $Z_{*,in}$ 、流出水質を $Z_{*,out}$ 、流入水量を $Q_{*,in}$ 、流出水量を $Q_{*,out}$ 、反応項を P 、沈殿項を v 、槽容積を V_* 、沈殿池表面積を S 、化学量論係数行列を Φ 、飽和溶存酸素濃度を $S_{O_2,max}$ 、総括酸素移動容量係数を k 、添加する金属水酸化物の濃度の濃度を C とすると次式が成り立つ。

$$V_* \frac{dZ_*}{dt} = Q_{*,in}Z_{*,in} - Q_{*,out}Z_{*,out} + V_*\Phi P(Z_*) + Sv(Z_*) + kQ_{air}(S_{O_2,max} - S_{*,O_2}) + Q_{MeOH}C \quad (2)$$

ただし、反応項は反応槽、沈殿項は沈殿池、曝気項は好気槽の酸素、凝集剤添加項は好気槽の金属水酸化物のみに影響する。最終沈殿池は上部、中部、下部の3つに分割して考える。各槽の Z_* は19次元で、6つの槽で定義されるので状態は合計で114次元となる。ただし、アルカリ度 S_{ALK} は流入水に十分含まれているとし、増減はないものとする。また、プロセス挙動に影響しない S_j 、 S_{N_2} も同様に増減は考えない¹¹⁾。

3. 制御方式

本論文で用いる非線形RH制御⁶⁾の仕組みと定式化を説明する。なお制御する運転操作量は、曝気量 Q_{air} 、返送量 Q_r 、余剰汚泥引抜量 Q_w 、循環量 Q_c 、凝集剤 Q_{MeOH} とする。

3.1 非線形RH制御

状態ベクトルを $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 、制御ベクトルを $u(t) \in \mathbb{R}^m$ と定義する。制御対象の非線形状態方程式が次のように表せるとする。

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (3)$$

また状態や入力に関する拘束条件が以下で表されるとする。

$$C(x(t), u(t)) = 0 \quad (4)$$

なお次元は m^c 次元とする。RH制御は各時刻 t において、次の最適制御問題を解く必要がある。初期条件 $x(t)$ とし、以下の評価関数 J を最小化する。

$$J = \phi(x(t+T)) + \int_t^{t+T} L(x(t'), u(t')) dt' \quad (5)$$

評価区間として、現在の時刻 t から T までの未来の区間 $[t, t+T]$ をとる。 $t' \in [t, t+T]$ において、 J を最小化する最適な制御入力 $u^*(t'; x(t), T)$ を求め、その初期値 $u^*(t; x(t), T)$ を時刻 t における実際の制御入力 $u(t)$ として与える。これを各時刻毎に行う、つまり評価区間(horizon)が徐々に未来の方向に後ずさる(recede)とい

う特徴から、Receding Horizon制御と呼ばれている。以上の事から、RH制御は状態 $x(t)$ のフィードバック制御則であり、次式の様に表される。

$$u^{RH}(x(t)) = u^*(t; x(t), T) \quad (6)$$

非線形RH制御において、オンラインで各時刻の状態 $x(t)$ に対する最適制御入力を計算する。数値計算における桁落ちを少なくするため入力に無次元化をしてシミュレーションを行った。計算アルゴリズムにC/GMRES法^{12) 13)}、プログラム作成に自動コード生成ツールAutoGenU¹⁴⁾を本研究で使用している。

3.2 評価関数

評価関数 J は、次のように運転量項 J_u 、ウォッシュアウト回避項 J_w 、放流水質項 J_c の和で構成される⁶⁾。

$$J = \int_t^{t+T} [J_u(t') + J_w(t') + J_c(t')] dt' \quad (7)$$

$$J_u(t') = \sum_i (\lambda_i Q_i^{+2}(t') + b_i (Q_i^{+2}(t') - Q_{i,max}^{+2}(t')))$$

$$J_w(t') = \sum_j e^{-E_j} \frac{dX_j^{bacteria}(t')}{dt}$$

$$J_c(t') = \sum_k \sigma_k \Delta S_k(t')^2 + \sum_l \sigma_l \Delta X_l(t')^2$$

ただし λ_i 、 b_i 、 E_j 、 σ_k 、 σ_l は重み係数、 Q_i^+ は入力を規格化定数[m³/d]により規格化した無次元量、 $Q_{i,max}^+$ は入力の最大値の無次元量、 S_k 、 X_l は各々溶解性、浮遊性物質の濃度、 Δ は目標値との残差を表す。 J_u は、ペナルティ関数とバリア関数から成り立っている。拘束条件 $0 < Q_i^+ < Q_{i,max}^+$ を満たすような入力はバリア関数を用いることで求められる。各入力の上限值はTable. 1のようになる。 J_w は、評価区間で微生物の濃度が減少する場合、 J を大きくするのでウォッシュアウトを回避するペナルティ関数になっている。文献¹⁵⁾を参考に、微生物が反応槽(好気槽)内で増殖するために必要となるA-SRTを確保する条件を以下のように考慮した。

$$\frac{dX_j^{bacteria}(t')}{dt} = (\text{好気槽の微生物}j\text{の濃度変化量}) \geq 0$$

ここで X_j は X_H 、 X_{PAO} 、 X_{AUT} である。 J_c は最終沈殿池の放流部における S_{PO_4} 、 S_{NH_4} 、 S_{NO_3} 、 X_{PP} 、 X_{TSS} に対するペナルティとした。

4. シミュレーションによる提案制御系の検討

流入水量は8000[m³/d]で一定とし、各槽の体積は

Table. 1 Upper limit of inputs

入力	上限値	単位
曝気量 Q_{air}	320	[m ³ /d]
返送量 Q_r	20000	[m ³ /d]
余剰汚泥引抜量 Q_w	600	[m ³ /d]
循環量 Q_c	20000	[m ³ /d]
凝集剤 Q_{MeOH}	1.5	[m ³ /d]

変数	項目	容積[m ³]	HRT[h]
V_1	嫌気槽容積	2000	6.0
V_2	無酸素槽容積	2000	6.0
V_3	好気槽容積	3000	9.0
V_u	放流部容積	2300	6.9
V_m	流入部容積	2300	6.9
V_l	引抜部容積	2300	6.9

Table. 2 Volume of biological tanks and a settler

Table. 2 のように設定した. 流入水質(Table. 3)一定の下で, 凝集剤を添加せず一定入力で初期水質を得た後, 添加入力を含む非線形 RH 制御を行った結果を Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 に示す.

RH 制御のシミュレーション時間は 10[d]としている. Fig. 2 において凝集剤入力がある場合とない場合の COD, 全窒素量, 全りん量, 全浮遊物質量の除去率のグラフを示す. 凝集剤がない場合, 4 つの水質指標のうち, りん以外の除去率において良好な結果がみられるが, りんは最終沈殿池でうまく処理できていなかったことにより除去率が 50%程度しか得られなかった. しかし, 凝集剤入力をモデルに追加したことで りんの沈殿が促進され, 除去率は 70%を達成し, 除去率が改善した. Fig. 3 では 5 つの入力, つまり曝気量 Q_{air} , 返送量 Q_r , 余剰汚泥引抜量 Q_w , 循環量 Q_c , 凝集剤 Q_{MeOH} の時間履歴を示している. 拘束条件を満たしつつ, 各時刻で入力を更新できていることが見て取れる. Q_{MeOH} の入力が 6[d]以降減少しているのは処理場の りん濃度のごくわずかになっているためである. Fig. 4 において従属栄養生物 X_H , りん蓄積生物 X_{PAO} , 硝化細菌 X_{AUT} の濃度を示す. 10 日間のシミュレーションにおいて死滅させることなく, 濃度を保てている.

また, シミュレーション環境は一般の PC(Intel Core2 Duo 2.93GHz)を使用した. サンプル周期 8[s]に対し, 1 回の入力更新にかかる時間の最大値は 4.82[s]という結果から, 下水処理場の大規模で複雑な非線形モデルに対してリアルタイムで最適制御入力を更新できていることも確認できた.

5. おわりに

高度下水処理プロセスの制御に対し, 凝集剤添加プロセスを追加し, 非線形 RH 制御を適用した. 流入水量・流入水質一定の下, 10[d]のシミュレーションを行い, 4 つの水質指標すべてにおいて良好な除去率を達成し, 実時間で入力を更新することも確認できた. 今後の課題は, 変化する流入水質・水量を考慮すること, より現実に即したパラメータ調整, DO 一定制御及び循環比一定制御と RH 制御の比較である.

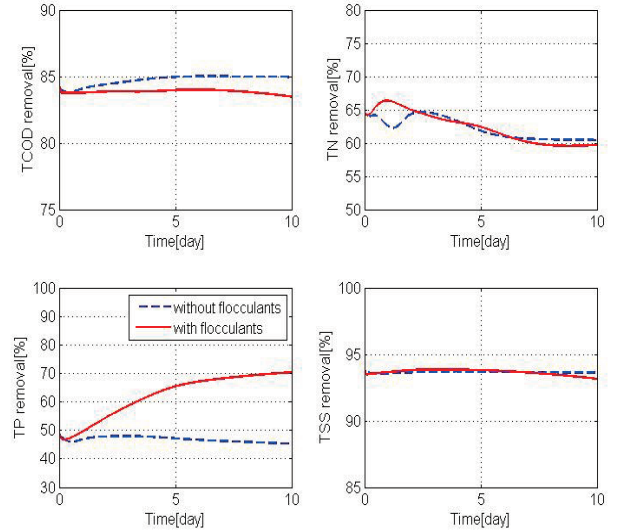


Fig. 2 Removal of TCOD, TN, TP and TSS

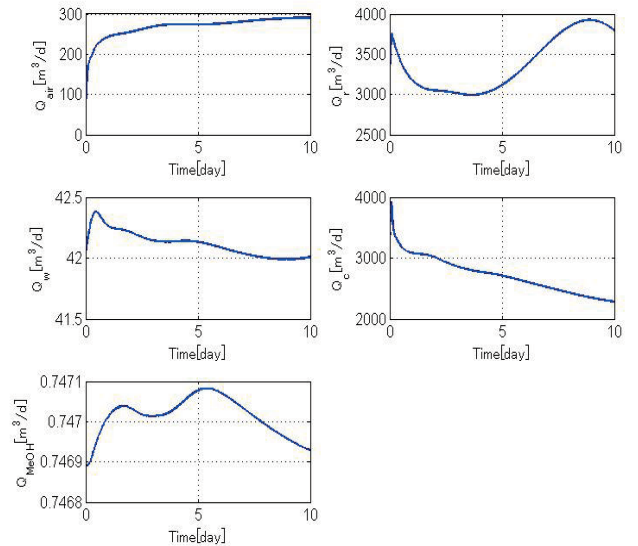


Fig. 3 Inputs

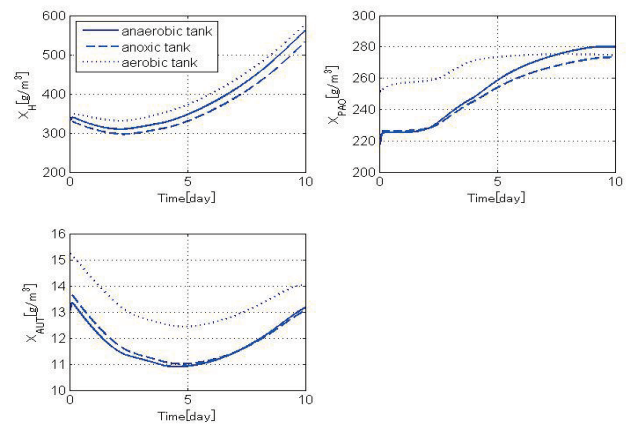


Fig. 4 Components of bacteria

参考文献

- 1) 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説(後編). pp. 12-23 (2009)
- 2) 古屋勇治, 橋田邦彦, 水谷高明, 佐々木康成, 古米弘明: 高度下水処理運転支援用活性汚泥シミュレータの開発. 学会誌 EICA, Vol. 5, No. 1, pp. 105-110 (2000)
- 3) 末長亮太: 高度下水処理における非線形 Receding Horizon 制御. 大阪大学大学院基礎工学研究科修士論文 (2011)
- 4) M. Henze, et al: Activated Sludge Models. IAWQ Scientific Technical Report, No. 9 (2000)
- 5) 児島晃, 大塚敏之: モデル予測制御の考え方. 計測と制御, Vol. 42, No. 4, pp. 310-312 (2003)
- 6) 大西彰, 大塚敏之: 窒素・りん同時除去を目的とした高度下水処理の非線形 Receding Horizon 制御. 第56回システム制御情報学会研究発表講演論文集, pp.479-480 (2012)
- 7) 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説(後編). pp. 215-219 (2009)
- 8) 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説(後編). pp. 191-197 (2009)
- 9) K. Gernaey, et al: Control Strategy Evaluation for Combined N and P Removal Using a Benchmark Wastewater Treatment Plant. 15th Triennial World Congress, IFAC, pp. 381-386 (2002)
- 10) Optimal Management of Wastewater Systems, <http://www.ensic.inpl-nancy.fr/COSTWWTP/> (2012年6月10日アクセス)
- 11) 山中理, 小原卓巳, 足利伸行, 山本勝也: コスト評価指標に基づく循環式硝化脱窒プロセスの最適制御-ベンチマークプロセスを用いた制御の有効性評価-. 学会誌 EICA, pp. 91-98 (2004)
- 12) 大塚敏之: 非線形 Receding Horizon 制御の計算方法について. 計測と制御, Vol. 41, No. 5, pp. 366-370 (2002)
- 13) 大塚敏之: 非線形最適制御入門. コロナ社, pp.161-181 (2011)
- 14) T. Ohtsuka: AutoGenU, http://www.sc.sys.es.osaka-u.ac.jp/~ohtsuka/code/index_j.htm (2012年6月10日アクセス)
- 15) 山中理, 小原卓巳, 堤正彦, 本木唯夫: コスト評価指標に基づく循環式硝化脱窒プロセスの最適制御. 学会誌 EICA, No.8, pp.27-31 (2003)

Table. 3 The mean inflow qualities of the water

No	変数	項目	流入水質
1	S_{O_2}	溶存酸素	0.5[g/m ³]
2	S_F	発酵性易分解性有機物	30.0[g/m ³]
3	S_A	発酵生成物	20.0[g/m ³]
4	S_{NH_4}	アンモニア	16.0[g/m ³]
5	S_{NO_3}	硝酸態窒素	0.0[g/m ³]
6	S_{PO_4}	溶解性無機りん酸	3.6[g/m ³]
7	S_I	溶解性不活性有機物	9.0[g/m ³]
8	S_{ALK}	アルカリ度	5.0[mol/m ³]
9	S_{N_2}	窒素ガス	0.0[g/m ³]
10	X_I	浮遊不活性有機物	25.0[g/m ³]
11	X_S	遅分解性有機物	120.0[g/m ³]
12	X_H	従属栄養生物	30.0[g/m ³]
13	X_{PAO}	りん蓄積生物	0.1[g/m ³]
14	X_{PP}	ポリりん酸	0.0[g/m ³]
15	X_{PHA}	りん蓄積生物の貯蔵物	0.0[g/m ³]
16	X_{AUT}	硝化細菌	0.1[g/m ³]
17	X_{TSS}	浮遊物質	180.0[g/m ³]
18	X_{MeOH}	金属水酸化物	0.0[g/m ³]
19	X_{MeP}	金属りん酸	0.0[g/m ³]