

高度下水処理プロセスにおける運用コスト最小化水質制御 Operational Cost Minimization Control of Effluent Quality for Advanced Wastewater Treatment Process

80222472 佐藤文 (Jo Sato) Supervisor 大森浩充 (Hiromitsu Ohmori)

1 はじめに

すべての社会は気体、液体、固体の廃棄物を排出するが、その液体の部分を下水といい、地域変動、季節変動、日夜変動、天候変動などにより、下水に含まれる成分は大きく変動する。一方、放流水に対する法的規制は、年々厳しくなり、規制値の達成が地方自治体に課せられている。したがって、下水処理プロセスは、負荷変動の大きさにかわらず定められた規制値を守るようにプラントを操業できることが求められている。さらに、プラント操業に関しては社会的に要請されている省エネルギー、省力化を図ることもまた重要な視点である。

本論文では、窒素除去高度下水処理システムにおいて、認定された評価関数を直接最小にするような極値制御方式を、アップーレベルコントローラに用いる新しい高度下水処理システムの構成法を提案し、さらに、提案手法を IWA (国際水処理機構) で開発されたシミュレータに適用し、その有用性を示す。

2 問題設定

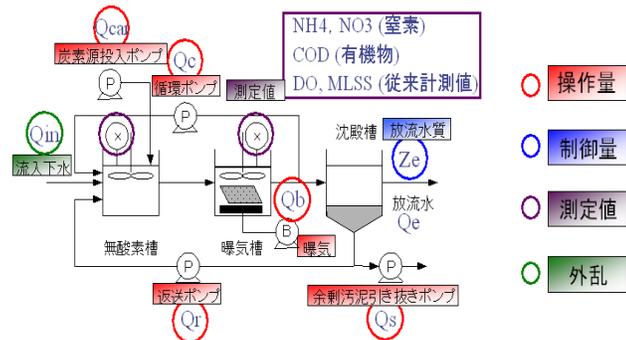


図 1: 循環式硝化脱窒プロセス

対象システムとして図 1 の、有機物と窒素の同時除去を目的とした循環式脱窒硝化プロセスを考える。このプロセスを、下水処理分野では定評のある、物質収支や物理化学反応に基づいて構築された活性汚泥モデルに基づ

いて定式化すると (1) ~ (3) 式のようにして表される。

$$\frac{dz_{a,i}}{dt} = m_i^T r(z_a) + \frac{1}{V_a} \{Q_{in} z_{in,i} + Q_c z_{b,i} + Q_r z_{s,i,n} - (Q_{in} + Q_c + Q_r) z_{a,i}\} \quad (1)$$

$$\frac{dz_{b,i}}{dt} = m_i^T r(z_b) + \frac{Q_{in} + Q_c + Q_r}{V_b} (z_{a,i} - z_{b,i}) \quad (2)$$

$$\frac{dz_{s,i,k}}{dt} = \frac{Q_{k,in}}{v_s} z_{s,i,k,in} - \frac{Q_{k,out}}{v_s} \psi_{s,i,k}(z_{s,k-1}, z_{s,k}, z_{s,k+1}) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

z_* は下水の水質を表す、各種水質成分の濃度がベクトルとなっているものであり、添え字の a, b, s はどの反応槽における濃度なのかを区別している。これら状態変数は濃度を表しているために必ず正の値をとり、制御入力値も正の値しか出力することができないため、これはポジティブシステムである。

表 1: システムの操作量と制御量

(a) 操作量		(b) 制御量	
概要	記号	概要	記号
総括酸素移動容量係数	$K_L a$	有機物	S_S
炭素源投入量	$u_{a,2}$	アンモニア態窒素	S_{NH}
返送汚泥量	Q_r	消散態窒素	S_{NO}
循環量	Q_c		
余剰汚泥引抜き量	Q_s		

制御目的としては、表 1(a) の量を動かすことで表 1(b) の量を小さくすることがまず第一であり、第二にこれにともなうコストを、可能な範囲で小さくすることとなる。

$$y = \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} [(w_1 COD + w_2 BOD + w_3 SS + w_4 TN + w_5 TP) Q_e + w_6 Q_b + w_7 Q_r + w_8 Q_c(4) + w_9 Q_s + w_{10} Q_{car} + w_{11} Q_{sludge}] d\tau$$

なお、コストの評価には (4) 式の評価関数を用いる。COD, BOD, SS, TN, TP はそれぞれ放流水の化学的酸素要求量, 生物化学的酸素要求量, 浮遊固形物量, 全窒素, 全リン濃度を表すものであり、 w_* は水質濃度や操作量などの金額換算係数を表す重みである。 t_0 と t は評価を開始する時刻と評価区間である。

3 極値制御設計

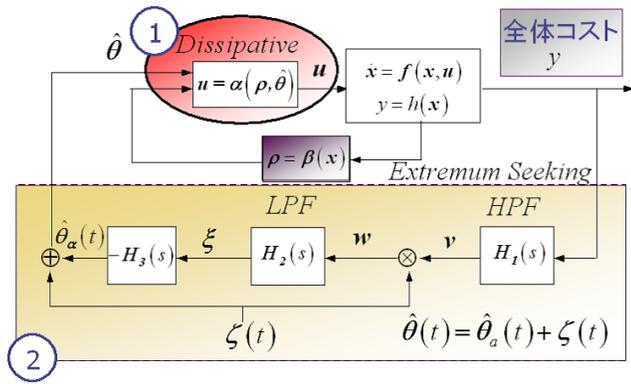


図 2: 提案する極値制御系

制御目的を達成するにあたって、図 2 のような極値制御系を構成する。また、

$$x = \begin{bmatrix} z_a^T & z_b^T & z_s^T \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

であり、各反応槽の状態変数をひとまとめにしたものである。システムは直接の入力発生機構 $\alpha(x, \hat{\theta})$ を担当する下位系の①と、下位コントローラのパラメータを最適化する上位系の②から成る。この際にシステムの下位系として消散コントローラを選ぶ。 $\beta(x)$ は測定できない物理量を考慮したソフトセンサーである。

この制御系の基本的なアイデアは、システムの制御信号に周期的なテスト信号である正弦波による応答波形を出力側で観測することで、対象となる非線形システムの勾配情報を入手し、出力 y が最小となる点を探索するというものである。

4 数値例

表 2: 極値コントローラパラメータ

記号	値	記号	値	記号	値
k_1	5	k_2	5	k_3	1000
a_1	0.05	a_2	0.04	a_3	0.05
ω_1	15	ω_2	23	ω_3	17
$\omega_{h,1}$	10000	$\omega_{h,2}$	10000	$\omega_{h,3}$	1000000
$\omega_{l,1}$	0.01	$\omega_{l,2}$	0.01	$\omega_{l,3}$	0.001
k_4	15000	k_5	2000	k_6	500
a_4	60	a_5	0.03	a_6	0.0001
ω_4	19	ω_5	12	ω_6	12
$\omega_{h,4}$	1000000	$\omega_{h,5}$	1000000	$\omega_{h,6}$	12000
$\omega_{l,4}$	0.005	$\omega_{l,5}$	0.005	$\omega_{l,6}$	0.01

提案した制御系に関して、表 2 のように設定した上位系パラメータのもとでシミュレーションを行った結果得

られた、全窒素濃度に関する応答を図 3 に示し、コスト比較を図 4 に示す。提案手法では放流水質と運用コストとのトレードオフを考慮しているため、比較のために下位系のみでの制御実験も行っている。なおシミュレーションには、下水処理の分野で広く認められている、ifak system 社の下水処理シミュレータ SIMBA を用いている。これ

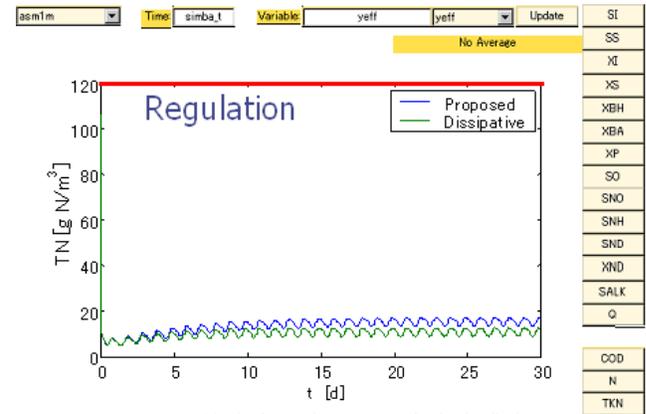


図 3: 放流水に含まれる全窒素濃度

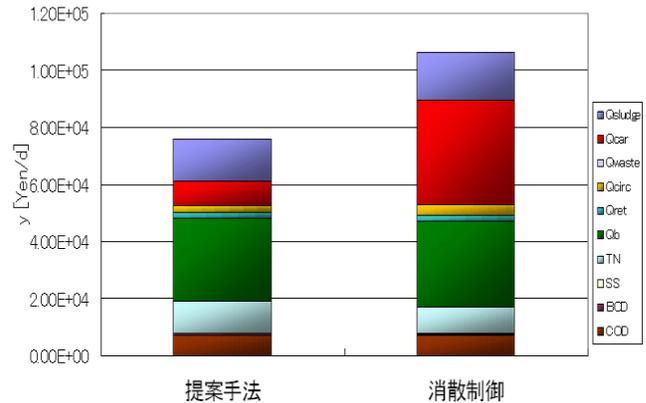


図 4: 消散制御のみの場合とのコスト比較

は水質汚濁防止法で定められた排水基準を満たしており、水質の面で目的が果たせたことが確認される。なお、応答の揺れは外乱としてシステムに入ってくる流入下水の変動によるものである。コストの面でも消散制御を施した場合のみと比べておおよそ 28.7%の低下が確認できる。

5 結論

本研究では有機物と窒素の除去を目的としている、循環式硝化脱窒プロセスを対象とした運用コスト最小化を目指した制御系構成方法を提案した。放流水質を金額換算した、コストも同時に考慮できる経済的指標を評価関数として採用することでプロセスを極値問題として置き換えた。シミュレーションに関しては、高い信頼性で定評のある下水処理シミュレータ SIMBA を用いて提案手法の有効性を確認することができた。