

〈論文〉

下水処理場最適制御システムによるCO₂排出低減の可能性の検討

山野井 一郎¹⁾, 武本 剛¹⁾, 隅倉 みさき¹⁾, 田所 秀之²⁾

¹⁾ (株)日立製作所 エネルギー・環境システム研究所 (〒319-1221 日立市大みか町7-2-1 E-mail: ichiro.yamanoi.rt@hitachi.com)

²⁾ (株)日立製作所 情報制御システム事業部 (〒319-1293 日立市大みか町5-2-1 E-mail: hideyuki.tadokoro.dw@hitachi.com)

概要

下水処理場の温室効果ガスを低減するオンライン制御の実現を目的として、処理水水質の目標値の設定やコスト換算が不要な評価関数をモデル予測制御に導入し、流入水の急変時のケーススタディにより、処理水水質の悪化抑制効果とCO₂排出量の低減効果を評価した。提案制御と、循環比・MLDOを一定とする従来制御の制御性を比較した結果、従来制御では流入水の急変に対応できない場合があったが、提案制御では急変時も水質規制値を順守できた。従来制御による標準運転の場合と比べて、提案制御ではCO₂排出量を約20%低減できる試算結果を得た。

キーワード：下水処理, CO₂, 温室効果ガス, 最適制御, 活性汚泥モデル

原稿受付 2009.7.1

EICA: 14(2・3) 3-11

1. はじめに

世界的に温室効果ガス対策が進められる中、下水処理分野においても、電力などに起因する温室効果ガスの対策が急務となっている¹⁾。下水処理場ではこれらの温室効果ガスの低減と同時に、公共用水域への環境負荷を低減するために、処理水水質を向上させる、より高度な制御も求められている²⁾。

従来、処理水水質を効率よく維持するため、循環流量や返送流量を流入流量に比例させる比率一定制御や、ブロウ送風量を制御し、好気槽の溶存酸素(DO)濃度を一定とするDO一定制御が用いられてきた³⁾。

しかし、近年の省エネ、温室効果ガス削減の要請から、さらに効率よい処理場運用のため、制御量に運転操作量と処理水水質を考慮した全コストを用い、これを最小化する最適制御の適用が検討されている。例えば、佐藤ら⁴⁾は処理水のCOD, BOD, SS, 全窒素、全りんと運転操作量に、設定した重み係数を乗じた量の線形和を評価関数とし、消散制御理論と極値制御理論を用いて評価関数を最小化する手法を提案し、処理水水質と運転コストの低減を達成できる試算結果を得た。山中⁵⁾らは、全コストを最適化する上位系と、上位系で得られた水質目標値をPI制御などにより実現する下位系とに制御系を階層化し、その有効性を明らかにした。その中で、全コストにおける処理水水質のコストとしてデンマークにおける排水賦課金などを参考に複数の重み係数を検討し、それぞれの最適解が異なることを示した。また、山中⁶⁾らは、未来の結果を予測し、現時刻の運転操作量を決定するモデル予測制

御(MPC)⁷⁾を下水処理プロセスの最適制御に適用、水質の目標値を設定し、その目標値偏差と運転操作量の変化量を評価関数として運転操作量を制御した。流入水水質が一定のもとで試算した結果、ブロウ送風量を削減できる試算結果を得ている。

いずれの最適制御においても評価関数に処理水水質のコストあるいは目標値が設定されている。しかし、日本においては処理水水質をコスト換算する公的な係数が存在しないため、各人の定める値にならざるを得ない。また、水質の目標値についても、処理場に応じた設定値を決定する必要があり、制御性の評価を難しくする。

そこで本研究では、処理水水質の目標値の設定やコスト換算の必要がないことを特徴とする評価関数を導入した。評価関数は処理水水質の制約条件と温室効果ガスに関する項で構成されているが、処理水水質の悪化により制約条件を超過した場合にのみ処理水水質に関する項の値が急増し、悪化を抑制する。制御手法として制約を考慮した最適制御が容易に実現できるモデル予測制御を用い、その制御性と温室効果ガスの削減効果を、流入水の急変を想定したケーススタディにより評価した。

2. 試算対象

2.1 対象プロセス

試算では、下水処理場の処理プロセスを再現し、運転支援情報の提供実績のある水質シミュレータ⁸⁻¹⁰⁾を下水処理場の代替として用いた。ここでの活性汚泥モ

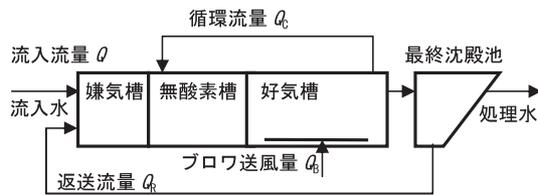


Fig. 1 Process of wastewater treatment plant for calculation

デルは国際水協会が提唱した活性汚泥モデル¹¹⁾のASM3に、ASM2dのりん反応モデルを加えた構造を基本とするが、有機物の入力項目をBODとしたモデル^{3,12)}である。

試算対象とする処理プロセスをFig. 1に示す。流入流量 Q (m³/d)、循環流量 Q_c (m³/d)、返送流量 Q_r (m³/d) のA₂O法で、ブロウ送風量を Q_b (m³/d)とした。生物反応槽の容量比は、嫌気槽：無酸素槽：好気槽=1：2：3とした。

2.2 日間変動と運転条件

下水処理場に流入する下水の日間変動とA₂O法の標準的な運転条件を、文献^{13,14)}を参考に設定した。Table 1に設定した日間変動（以下、設定流入条件）の平均値および最大・最小値を示す。ここで示した項目は水質シミュレータへの入力項目に対応する。BODは溶解成分である易分解性有機物と固形成分である難分解性有機物の合計である。Table 2に設定した運転条件（以下、標準運転条件）を示す。標準運転条件は、A₂O法の維持管理指針¹³⁾の範囲内の運転条件とした。

2.3 制御量と水質規制値

処理水水質のBOD、全窒素、全りん、CO₂排出

量と、MLDOを制御量とした。本試算では、処理水水質が順守すべき水質規制値を、処理方式と適合する計画放流水質区分の関係¹⁵⁾で示された最も厳しい計画放流水質である、BOD 10 mg/L、全窒素 10 mg/L、全りん 0.5 mg/Lとした。CO₂排出源はブロウ、循環ポンプ、返送ポンプの電力とし、CO₂排出量 Q_{CO_2} (kg/d)を式(1)で定義した。

$$Q_{CO_2} = (Q_B U_B + Q_C U_P + Q_R U_P) U_{CO_2} \quad (1)$$

ブロウ電力原単位 $U_B = 0.0260$ (kWh/m³)、ポンプ電力原単位 $U_P = 0.0250$ (kWh/m³)（いずれも実測値）とし、CO₂原単位 $U_{CO_2} = 0.555$ (kg-CO₂/kWh)¹⁶⁾とした。

3. 制御方式

試算に用いた制御方式をTable 3に示す。すべての制御方式で流入流量 Q とMLDOの計測値を得られるとした。返送流量を $0.5Q$ とした。制御する運転操作量は、ブロウ送風量と循環流量とした。

3.1 従来制御

従来制御では、循環流量を流入流量に比例させ、MLDOが設定値と一致するようにブロウ送風量を制御した。Table 2に示した標準運転条件の循環流量、すなわち $Q_c = 1.5Q$ 、MLDO = 1.5 mg/Lとする制御方式を従来1とした。比較のため、従来1よりCO₂排出量 Q_{CO_2} を低減させる運転として $Q_c = 1.0Q$ 、MLDO = 1.0の制御方式を従来2、 $Q_c = 0.5Q$ 、MLDO = 0.5の制御方式を従来3とした。

Table 1 Average, minimum, and maximum of setup diurnal fluctuation

	流入流量 Q (m ³ /hr)	BOD (mg/L)	易分解性 有機物 (mg/L)	全窒素 (mg/L)	アンモニア性 窒素 (mg/L)	硝酸性 窒素 (mg/L)	全りん (mg/L)	ポリリン酸 (mg/L)	アルカリ度 (mg/L)	SS (mg/L)	DO (mg/L)
平均値	422	92.2	42.0	27.6	19.2	0	2.08	1.59	137	44.5	0.5
最小値	250	72.6	31.1	22.8	16.0	0	1.72	1.38	114	39.3	0.5
最大値	544	135.3	65.1	36.5	26.8	0	2.55	2.42	169	47.0	0.5

Table 2 Standard operating conditions (Q : influent flow rate)

	HRT (hr)	BOD-SS (kgBOD/kgMLSS · d)	循環流量 Q_c (m ³ /d)	返送流量 Q_r (m ³ /d)	MLSS (mg/L)	MLDO (mg/L)
標準運転条件	18.3	0.061	$1.5Q$	$0.5Q$	2000	1.5
文献値 ¹³⁾	16~20	0.05~0.10	$1.5Q$	$0.5Q$	2000~3000	1.5~2.0

Table 3 Control methods for calculation

制御方式	制御に用いた項目					運転操作量	
	流入流量 Q	MLDO	処理水水質	CO ₂ 排出量 Q_{CO_2}	流入水水質	循環流量 Q_c	ブロウ送風量 Q_b
従来制御	従来1	○	○	—	—	—	$1.5Q$ MLDO = 1.5
	従来2	○	○	—	—	—	$1.0Q$ MLDO = 1.0
	従来3	○	○	—	—	—	$0.5Q$ MLDO = 0.5
提案制御	MPC1	○	○	○	○	—	MPC演算値 MPC演算値
	MPC2	○	○	○	○	○	MPC演算値 MPC演算値

3.2 提案制御

(1) 制御系の構成

本報で提案する制御方式には、MPC技術を用いた。試算には商用ソフトのMATLAB/SimulinkとModel Predictive Control ToolBox (R2008a, The MathWorks™)を用いた。MPCでは、モデルにより現時点以降の制御入力を予測し、その動きが別に設定した参照軌道(あるいは目標値)に出来るだけ近づくような運転操作量の入力系列を求める。求めた入力系列のうち、最初のステップ入力を制御対象に印加し、これらをステップごとに繰り返す¹⁷⁾。MPC技術はオペレータの現場での調整と類似していることから、演算結果を直感的に評価しやすく、オペレータの経験と調整が重要となる下水処理プロセスの制御に適していると考えられる。

Fig. 2に提案制御における構成を示す。MPC演算部には線形モデルを用いた。線形モデルは水質シミュレータで用いる非線形モデルを微分して求めた近似モデルであるが、線形モデルを用いるMPCは、非線形モデルの場合と異なり、実行可能な最適解の導出が保証され、かつ高速であるといった特長がある。MPC演算部では、流入流量、流入水水質などの外乱をフィードフォワード的に、処理水水質、CO₂排出量、MLDOなどの制御量をフィードバック的に用いて、水質の制約条件と、CO₂排出量の目標値のもとで、最適な運転操作量を演算する。

Table 3で示した提案制御のMPC1では、流入流量QとMLDOに加えて、処理水のBOD、全窒素、全りん、CO₂排出量Q_{CO₂}を制御に用いた。MPC2では、MPC1に加えて、Table 1に示した流入水の水質項目を制御に用いた。

(2) MPC制御での評価関数

MPCでは未来の結果を予測し、その予測が制約内で最適(評価関数が最小)になるように、現時刻の運転操作量を決定する。評価関数fと制約を式(2)、(3)に示す。

$$f = \sum_{i=1}^P \left\{ \sum_{j=1}^{n_y} \{w_j^y [r_j(k+i) - y_j(k+i)]\}^2 + \sum_{j=1}^{n_u} \{w_j^{u} \Delta u_j(k+i-1)\}^2 \right\} + \rho \varepsilon^2 \quad (2)$$

$$y_{j\min} - \varepsilon V_{j\min} \leq y_j(k+i) \leq y_{j\max} + \varepsilon V_{j\max}, \\ \varepsilon \geq 0, i=1, \dots, P \quad (3)$$

ここで、P: 予測期間内の制御回数、k: 現時刻、n_y: 制御量の数、n_u: 運転操作量の数、r_j: 制御量jの目標値、y_j: 制御量jの予測値、Δu_j: 運転操作量jの変化量、ε: スラック変数、ρ: スラック変数εの重み係数、y_{jmin}, y_{jmax}: 制御量jの制約値、w_{j^y}, w_{j^u}, V_{jmin}, V_{jmax}: 各評価量の重み係数である。

式(2)の第1項は制御量の目標値と予測値の差分を表す項、第2項は運転操作量の変化量を表す項、第3項は制約からの超過を表す項である。式(3)のスラック変数εは、制御量jの制約y_{jmin}, y_{jmax}を緩和するための変数で、重み係数V_{jmin}, V_{jmax}が大きい場合、“柔らかい”制約と呼ばれ、制約はより緩和される。y_jが制約値を超過しない場合は、ε=0となり、運転操作量の変化量を小さくしつつ制御量は目標値に近づく。しかし、y_jが制約を超過する場合はε>0となる。この場合、超過量を小さくするため、運転操作量が急変し、制御量が目標値から乖離することもある。

(3) 提案制御の制御ロジック

処理水水質とQ_{CO₂}は厳密なトレードオフの関係ではなく、Q_{CO₂}を低減する運転操作量で処理水水質が良化する場合もある。したがって、処理水水質に目標値を設け、その設けた目標値より処理水水質が良好な場合、処理水水質が悪化し、かつ、Q_{CO₂}が増加する可能性がある。また、流入条件や下水処理場に応じて処理水水質の目標値は異なると考えられ、目標値を論理的に決定することは難しい。

そこで提案制御では、CO₂排出量Q_{CO₂}に目標値を設ける一方で、BOD、全窒素、全りんという処理水水質には目標値を設けない。代わりに処理水水質には、水質規制値より下方に“柔らかい”制約を設けた。Q_{CO₂}の目標値は、常に低減を考慮できるように、達成困難な小さな値とした。以上により、提案制御では、処理水水質が制約の上限値よりも小さい、すなわち処理水水質が良好な場合は、Q_{CO₂}低減のみが考慮されるため、効率よくQ_{CO₂}を低減する条件を得られることが期待できる。

なお、Q_{CO₂}は積分定数など状態量を持たない静的な直達項であるため、入力即出力に反映される。したがって動的な制御が困難となる。そのため、実際にはQ_{CO₂}の積分値∫Q_{CO₂}dtを制御した。∫Q_{CO₂}dtに関する式(2)の第1項が時間とともに増大しないように、∫Q_{CO₂}dtの目標値と同値を∫Q_{CO₂}dtの現在値として返

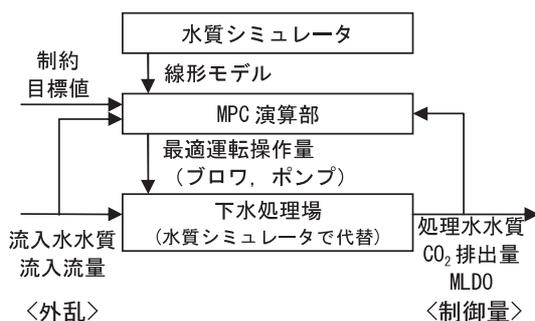


Fig. 2 Block diagram of control system of proposal method

した。また、MLDOが0に近づくと嫌気状態となり、水質が大きく変化するため、線形モデルと水質シミュレータで用いる非線形モデルの誤差が大きくなると考えられる。したがって、MLDOには、下方に比較的“硬い”制約を設けた。

線形モデルは外乱と運転操作量に対する制御量の応答を表し、ある水質近傍での非線形モデルの微分による近似である。本方式では、処理水水質の悪化時に正確な挙動を示すように、Table 1の流入条件の平均値で流入する流入水を従来3で処理した際の、比較的悪化した水質近傍で線形モデルを作成した。

4. 制御性の評価手段

4.1 無次元化と設定値

制御性の評価を容易にするため、制御量および運転操作量を無次元化した。Table 4に無次元化で用いた代表値を示す。

循環流量には従来1での循環流量 $1.5Q$ の平均値を、ブロウ送風量とCO₂排出量 Q_{CO_2} には、設定流入条件を従来1により制御した場合の平均値を用いた。BOD、全窒素、全りんに関する水質については、それぞれの水質規制値で無次元化した。MLDOの無次元化には、飽和溶存酸素濃度を用いた。以後、無次元化した変数には上付き*を加えて表現する。

Table 5に制御量に関する設定値を示す。 $\int Q_{CO_2}^* dt$ は積分値のため、その目標値 r も積分値とした。Table 6に運転操作量に関する設定値を示す。入力 u の最大値 u_{max} の値は実在の下水処理場の運転操作量の上限値を参考とした。入力 u の時間変化量の上下限値 du/dt は、30分で停止から最大に、最大から停止に移行できる傾きとした。MPCでの予測期間はHRTよりも長い24時間とした。Table 5, 6の他の設定値については、試行錯誤的に決定した。

スラック変数 ε の重み係数 ρ は、Model Predictive Control ToolBoxでの初期設定値である $\rho = 10^5 \times \max\{w_j^y, w_j^u\}$ で定義し、MPC1: $\rho = 10^6$, MPC2: $\rho = 3 \times$

10^5 とした。

4.2 線形モデルの妥当性の評価手段

作成した線形モデルの妥当性をステップ応答試験により評価した。非線形モデルでは、流入条件や運転操作量により変化する積分定数などの状態量（モデル内部の各槽の水質値に相当）に応じて応答が変化すると考えられる。そこで、線形化に用いた比較的悪化した水質を状態1、Table 1の設定流入条件の平均値で流入する流入水を従来1で処理した際の比較的良好な水質を状態2とし、これらを本試算の典型的な状態とみなして、二つの状態近傍で線形モデルを評価した。評価では、状態1、状態2に、運転操作量または流入水水質の一つをステップ状に増減した際の制御量の応答を、線形モデルと非線形モデル（水質シミュレータ）とで比較した。比較には式(4)で定義する1日間の平均誤差 $\varepsilon_i^*(-)$ を用いた。

$$\varepsilon_i^* = \sqrt{\int_0^1 (y_{Ni}^* - y_{Li}^*)^2 dt / \int_0^1 dt}, \quad (4)$$

$i = \text{BOD}^*, \text{全窒素}^*, \text{全りん}^*, \text{MLDO}^*$

ここで i は制御量の種類を表す。 y_{Ni}^* は非線形モデルによる制御量 i の計算結果を、 y_{Li}^* は線形モデルによる制御量 i の計算結果を表す。

4.3 ケーススタディ

提案制御の制御性を評価するため、ケーススタディにより処理水水質維持とCO₂排出量の低減効果を検証した。設定流入条件に対して従来1で制御した後、それぞれの制御方式を4日間適用した。評価には、この4日間の結果を用いた。

流入条件として、次の4ケースを考えた。

- 1) 通常流入：設定流入条件が毎日繰り返される条件
- 2) 流量急変：流入条件が毎日繰り返されるが、2日目のみ流入流量が1.5倍に急

Table 4 Values for dimensionless parameters

循環流量 (m ³ /hr)	ブロウ送風量 (m ³ /m ² /hr)	CO ₂ 排出量 (kg/d)	BOD (mg/L)	全窒素 (mg/L)	全りん (mg/L)	MLDO (mg/L)
633	7.13	1230	10	10	0.5	8.92

Table 5 Set values for dimensionless controlled variables
(*: dimensionless parameter)

	r	w^y	v_{min}	v_{max}	v_{min}	v_{max}
BOD*	—	—	—	—	0.5	10
全窒素*	—	—	—	—	0.5	10
全りん*	—	—	—	—	0.5	10
$\int Q_{CO_2}^* dt$	$\int (-0.5) dt$	MPC1: 10 MPC2: 3	—	—	—	—
MLDO*	—	—	0.078	0.1	—	—

Table 6 Set values for dimensionless operating manipulated variables
(*: dimensionless parameter)

	$w^{\Delta u}$	u_{min}	u_{max}	$du/dt _{min}$ (1/hr)	$du/dt _{max}$ (1/hr)
Q_B^*	3	0.1	2.2	-4.4	4.4
Q_C^*	3	0.1	2.4	-4.8	4.8

増する条件。

- 3) 全窒素急変：設定流入条件が毎日繰り返されるが、2日目のみ流入全窒素が1.25倍に急増する条件。
- 4) 降雨：設定流入条件が毎日繰り返されるが、2日目のみ流入流量が2倍に急増し、流入水質の濃度が半減し、溶存酸素濃度が2.5 mg/Lとなる条件。流入負荷は一定となる。

5. 試算結果と考察

5.1 線形モデルの妥当性評価

Table 7 にステップ入力に対する各制御量の平均誤差と計算終了時の MLDO を示す。斜体は平均誤差が0.05 より大きいことを表す。

Table 7(a) では入力を運転操作量 Q_B^* 、 Q_C^* とした。状態1を導出した際の運転操作量は $Q_B^*=0.86$ 、 $Q_C^*=0.33$ 、状態2では $Q_B^*=1.03$ 、 $Q_C^*=1.00$ であった。運転操作量の適用範囲を連続的にするため、ステップ量を各状態での運転操作量の差分の1/2よりも大きくした。ほぼ全ての条件で $\epsilon_i < 0.05$ となり、一日間の平均誤差が処理水水質の無次元化の代表値の5%未満となった。しかし状態1で Q_B^* を0.1減じた場合、 $\epsilon_{全窒素^*} > 0.05$ となった。この場合、同時に MLDO も0.23 mg/Lと小さくなった。

Table 7(b) では入力を Q^* 、全窒素* とした。これらはケーススタディで急変させた流入条件と対応する。ステップ量は Table 1 に示したそれぞれの設定流入条件の偏差とした。ほとんどの条件で $\epsilon_i < 0.05$ となった。しかし、運転操作量を入力とした場合と同様に、MLDO が小さくなると $\epsilon_{全窒素^*} > 0.05$ となった。

非線形モデルの生物反応の速度は非線形性の強い Monod 式で表されており、DO 濃度が小さくなると急激に減少する。そのため $\epsilon_{全窒素^*}$ が大きくなった。しかし、本試算の制御では MLDO を制御量として下方に比較的“硬い”制約を設け、所定値以下の減少を抑制しているため、誤差が大きくなると考えられる。

Table 7(b) では Q^* と全窒素* の減少時に、MLDO

> 1.5 mg/L となる条件で、 $\epsilon_{MLDO^*} > 0.05$ となった。この場合も反応速度の非線形性が原因である。しかし、BOD、全窒素、全りんといった処理水水質とは異なり、MLDO に規制値はない。さらに、用いた Monod 式の DO に関する半飽和定数は 0.5 mg/L であり、MLDO が 1.5 程度よりも大きければ、生物反応速度に大きな違いはない。したがって、ここでの誤差は、制御精度の向上という側面では検討すべき今後の課題であるが、処理水水質の維持に影響はないと考えられる。

以上より、本試算に用いた線形モデルは、非線形モデルの近似モデルとして妥当と判断した。

5.2 ケーススタディ結果

(1) 流量急変時

Fig. 3 に流量急変時の流入流量の変動と、無次元化された処理水水質および運転操作量の変動を示す。制御方式のうち従来1、従来3、MPC1を比較した。従来1ではすべての水質規制値を下回ったが、従来3では全窒素が水質規制値の1を超過する時期があった。一方、MPC1ではすべての水質規制値を下回った。MPC1の運転操作量は、1日目は減少したが、処理水の全窒素が急増する2日目から流入流量変動に対応した増減を繰り返した。その値は2日目で特に大きくなった。なお、通常流入時では、従来1および従来3ともにすべての処理水で水質規制値を下回った。これより、CO₂ 排出量を低減させるために運転操作量を単に小さくした従来3では流入流量の急変に対応できないことが分かった。

MPC1の場合、1日目は水質が良好なため、CO₂ 排出量を低減する運転条件が得られた。その後の処理水の全窒素の悪化に、プロワ送風量と循環流量の増加で対処した。その際、流入流量増加による全窒素増加の予測も踏まえ、流量変動に合わせて効率よく水質の悪化を抑制したと考えられる。BODと全りんは制御期間中には良好だったため、特に制御には影響を及ぼさず、CO₂ 排出量低減を阻害しなかったと考えられる。なお、従来2は従来1と従来3の結果の中間の値を示し、全ての処理水で水質規制値を下回った。また

Table 7 Average errors against step inputs and MLDO at the end of calculation (italic: $\epsilon > 0.05$)

(a) Step inputs of operating manipulated variables

(b) Step inputs of influent values

入力	状態	ステップ量	ϵ_{BOD^*}	$\epsilon_{全窒素^*}$	$\epsilon_{全りん^*}$	ϵ_{MLDO^*}	MLDO (mg/L)	入力	状態	ステップ量	ϵ_{BOD^*}	$\epsilon_{全窒素^*}$	$\epsilon_{全りん^*}$	ϵ_{MLDO^*}	MLDO (mg/L)
			(-)	(-)	(-)	(-)					(-)	(-)	(-)		
Q_B^*	1	+0.1	0.007	0.011	0.004	0.009	1.11	Q^*	1	+0.22	0.029	<i>0.109</i>	0.028	0.022	0.24
		-0.1	0.013	<i>0.065</i>	0.007	0.020	0.23			-0.22	0.001	0.023	0.005	<i>0.053</i>	1.72
	2	+0.1	0.020	0.019	0.035	0.037	2.36		2	+0.22	0.034	0.042	0.006	0.045	0.59
		-0.1	0.029	0.021	0.004	0.022	0.90			-0.22	0.020	0.025	0.015	<i>0.095</i>	3.02
Q_C^*	1	+0.4	0.022	0.030	0.012	0.019	0.42	全窒素*	1	+0.52	0.013	<i>0.051</i>	0.001	0.019	0.26
		-0.23	0.013	0.009	0.003	0.013	0.48			-0.52	0.008	0.027	0.005	0.026	1.34
	2	+0.4	0.037	0.043	0.021	0.031	1.61		2	+0.52	0.016	0.030	0.014	0.037	0.74
		-0.4	0.024	0.026	0.019	0.021	1.69			-0.52	0.010	0.031	0.043	<i>0.070</i>	2.69

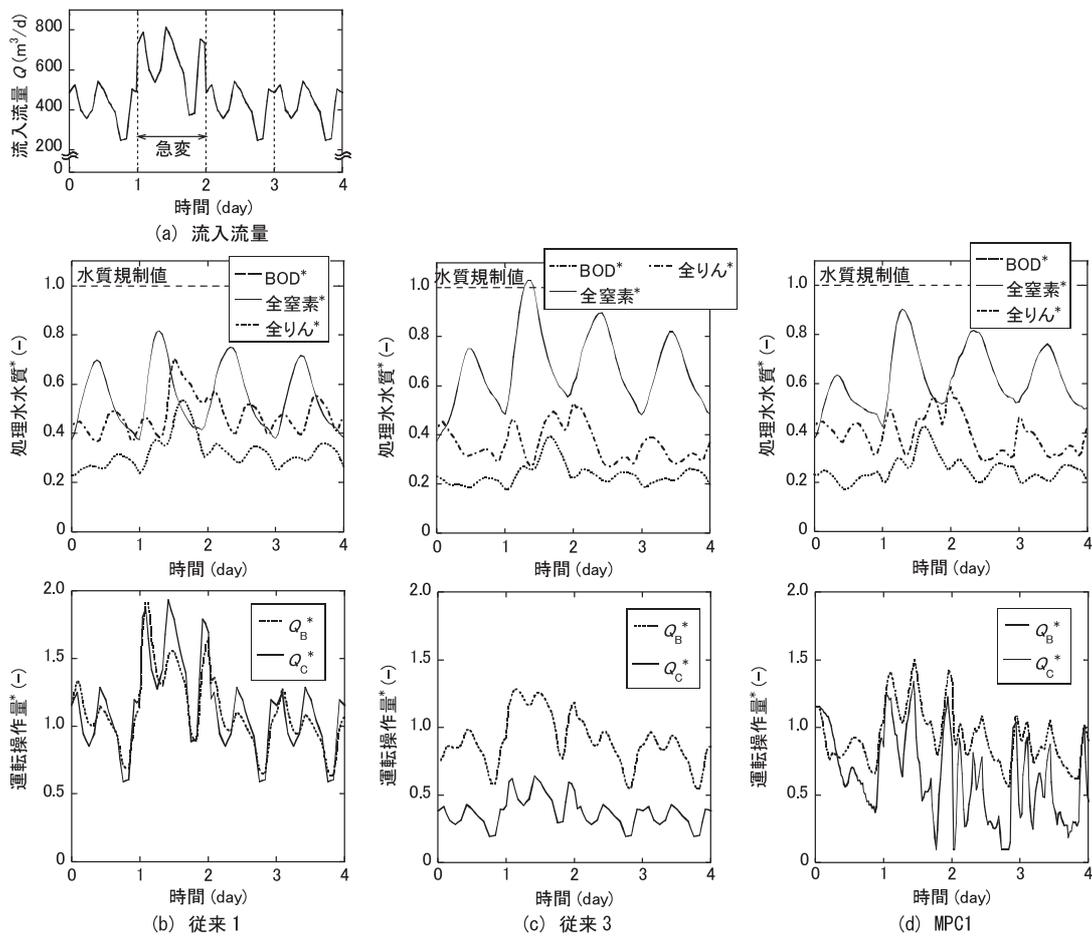


Fig. 3 Profiles of influent flow rate, dimensionless effluent qualities, and dimensionless operating manipulated variables in case of rapidly-varied influent flow rate (*: dimensionless value)

MPC2 も MPC1 と同様に処理水の全窒素の悪化にプロワ送風量と循環流量の増加で対処し、全ての処理水で水質規制値を下回った。

Fig. 4 に制御方式の比較結果を示す。流量急変時の処理水水質と CO₂ 排出量の 4 日間の平均値と最大値を比較した。棒グラフが 4 日間の平均、バーの上端が最大値を表す。水質規制値をすべて下回った従来 1 と比較して、従来 3 では CO₂ 排出量は低減したが、全窒素の最大値が水質規制値を超過した。一方、MPC1 では従来 3 と同程度の CO₂ 排出量で、水質規制値を

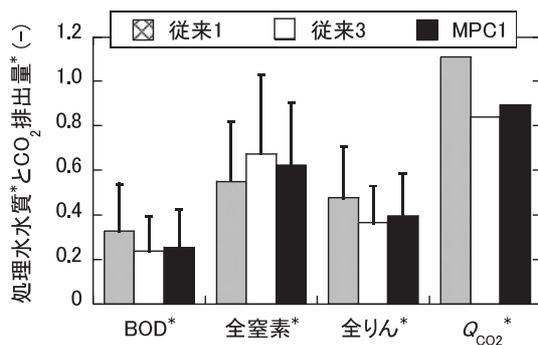


Fig. 4 Control methods comparison in case of rapidly-varied influent flow rate

順守できる試算結果を得た。

(2) 全窒素急変時

前節で、制御に用いる項目として、従来制御の項目に、処理水水質と CO₂ 排出量を加えて MPC 制御を実施する MPC1 方式により、処理水水質を維持しつつ CO₂ 排出量を低減できることが分かった。本節では、MPC1 にさらに流入水水質を加えた MPC2 の制御性について検討した。

Fig. 5 に全窒素急増時の流入全窒素と処理水全窒素と運転操作量の変動を示す。処理方式として MPC1 と MPC2 を比較した。

MPC1 の場合、流入水全窒素の 1 日と 2 日でのピークに対応して、処理水全窒素は 1.4 日と 2.3 日で増加した。1 度目のピークにはよく対処できた。しかし、2 度目のピークには、水質規制値こそ超過しなかったが、その最大値は水質規制値と同程度まで上昇した。流入水全窒素の急増により処理水全窒素は増加し、水質規制値までの余裕が少なくなったためと考えられる。これより、水質規制値までの余裕が少なくなると処理水水質の計測だけでは対処できない可能性があることが示唆された。

MPC2 の場合、処理水全窒素* の最大値を 0.87 に抑

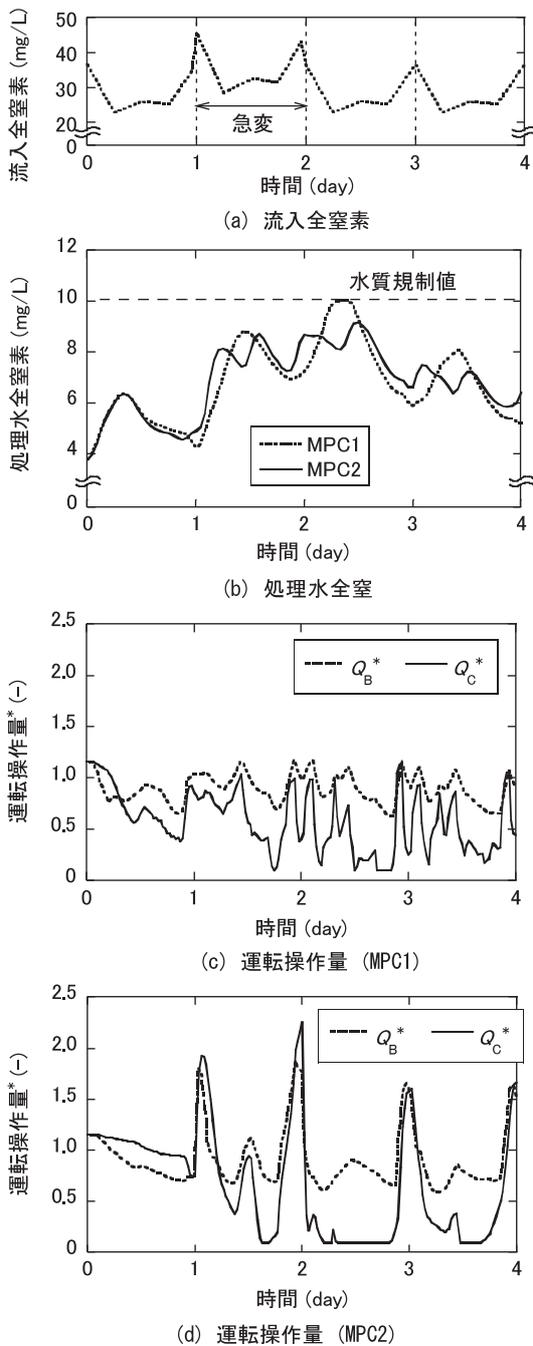


Fig. 5 Profiles of influent total nitrogen, dimensionless effluent total nitrogen, and dimensionless operating manipulated variables in case of rapidly-varied influent total nitrogen

制できた。Fig. 5(c) (d) の運転操作量の変動を見ると、MPC1 では流入流量変動に対応した運転操作量が得られることに対して、MPC2 では流入全窒素に対応した運転操作量であり、その変動も大きい。処理水全窒素への影響が大きい流入全窒素を計測することで、処理水全窒素の増加を高精度で予測できたため、あらかじめブロウ送風量と循環流量を適切に増加し、最大値を抑制できたと考えられる。

Fig. 6 に全窒素増加時の処理水水質と CO₂ 排出量の比較を示す。各制御方式の制御性を比較するため、

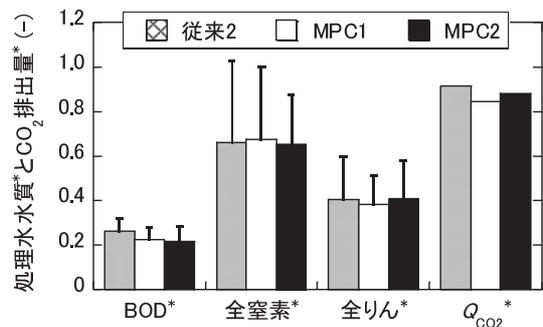


Fig. 6 Control methods comparison in case of rapid-varied effluent total nitrogen

同程度の CO₂ 排出量である、従来 2, MPC1, MPC2 を比較した。処理水の BOD, 全りんは、すべての制御方式で水質規制値を満足し、BOD, 全窒素, 全りんの平均値は同程度だった。しかし、処理水全窒素の最大値は、従来 2 で水質規制値を超過した。MPC1, MPC2 では水質規制値を下回り、MPC2 ではさらに処理水全窒素の最大値を抑制できた。

(3) 処理水全窒素と CO₂ 排出量の観点からの全制御方式の比較

Fig. 7 に通常流入時、流量急増時、全窒素急増時、降雨時の処理水全窒素と CO₂ 排出量の比較を示す。本試算では、特に処理水全窒素が水質規制値周辺で増減したため、処理水全窒素の結果を示した。

(a) の通常流入時を見ると、すべての制御方式で水質規制値を下回り、CO₂ 排出量は従来 3 で最も小さくなった。しかし、従来 3 および従来 2 では、(b) の流量急増時および(c) の全窒素急増時に最大値が水質規制値を超過した。一方、MPC1 と MPC2 では、すべてのケースで水質規制値を下回った。同様に水質規制値を下回った従来 1 と比較して、CO₂ 排出量は、通常流入時で 14~16%、その他の場合で 15~23% 低減できる試算結果が得られた。

Fig. 8 は、各ケースと各流入条件での CO₂ 排出量と、処理水全窒素の平均値および最大値との関係を表す。同じ制御方式の結果が囲む領域と、従来 1, 従来 2, 従来 3 の、それぞれの領域の図心を結ぶ線も示した。この線より左下方向に離れると、CO₂ 排出量が減少し、処理水水質が良化する。すなわち、従来制御に対して制御性が向上することを意味する。図より、CO₂ 排出量が減少すると処理水全窒素の平均値および最大値が増加する傾向が分かる。制御性を見ると、従来制御と比較して提案制御では、平均値に関しては、制御性は若干向上した程度であるが、最大値に関しては、明らかな向上が見られた。また、MPC1 と MPC2 の図心の位置を比較すると、流入水水質を制御に用いた MPC2 で制御性が向上したことが分かる。

実際の運用では、処理水水質のオンライン計測器を

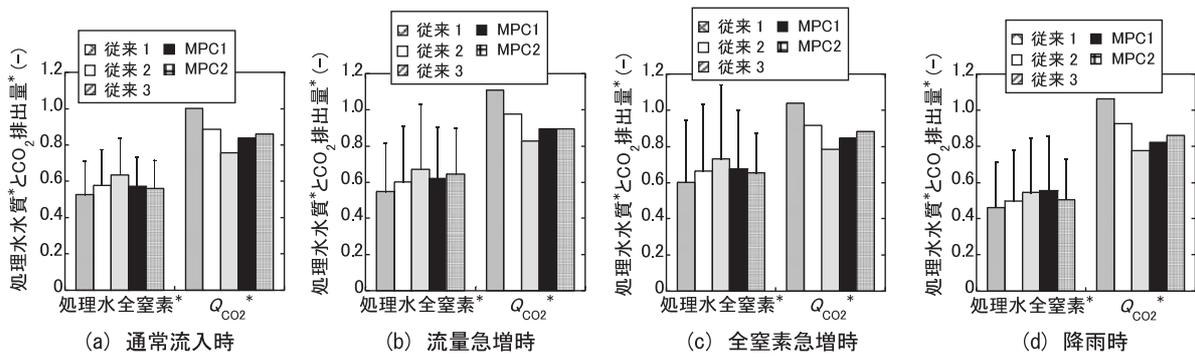


Fig. 7 Control methods comparison as dimensionless effluent total nitrogen and dimensionless CO₂ emission in all case studies

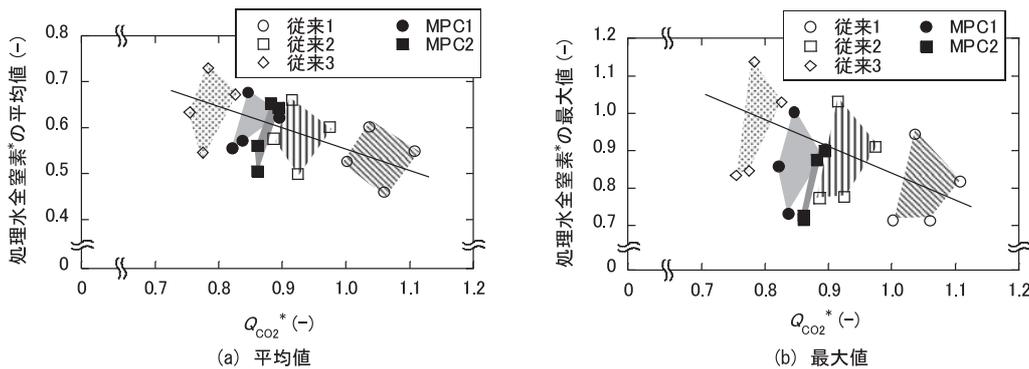


Fig. 8 Relations between dimensionless CO₂ emission and effluent total nitrogen

導入することで、MPC1の制御を実現でき、CO₂排出量を削減できる。さらに流入水水質のオンライン計測器を導入することで、MPC2の制御を実現でき、流入水質の変動に対するロバスト性の向上を期待できる。

6. おわりに

本報では、温室効果ガスの排出量の低減と処理水水質の維持を両立し、流入水の流量や水質の急変に対応できる制御システム構築を目的として、MPCを下水処理場の最適制御に適用し、流入水の急変を想定したケーススタディによりその制御性を評価した。提案制御での評価関数は、計測した処理水水質が良好な場合は水質を考慮しないことで、効率よくCO₂排出量を低減することを特長とする。この提案制御と、循環流量を流入流量に比例させ、MLDOを一定に保つ従来制御との制御性を、ケーススタディにより評価した。結果を以下に示す。

- (1) 従来制御では流入水の急変に対応できず、処理水水質が規制値を超過する場合があったが、処理水水質を制御量とする提案制御では、すべてのケースで水質規制値を下回った。
- (2) 提案制御において、流入水水質も制御量とした場合、制御性が向上した。特に全窒素急増時の

処理水全窒素の最大値を抑制できた。

- (3) 標準的な運転条件で従来制御を実施した場合と比較して、提案制御では処理水水質を維持しつつ、CO₂排出量を14~23%低減できる試算結果を得た。

今回の可能性検討の結果は、現時点では計算機上の試算であるため、提案制御のロジックの改善と制御対象の拡張と並行し、今後は制御効果の実証実験を実施する予定である。

参考文献

- 1) 森田弘昭：地球温暖化と下水道，水環境学会誌，Vol. 29, No. 2, pp. 62-66 (2006)
- 2) 川崎正彦：水環境行政の現状と今後の課題，環境技術，Vol. 38, No. 1, pp. 16-21 (2009)
- 3) 活性汚泥モデル研究会：活性汚泥モデルの実務利用に関する検討報告書 (2001)
- 4) 佐藤 丈，上田智一，大森浩充：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，学会誌「EICA」，Vol. 9, No. 2, pp. 15-18 (2004)
- 5) 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」，Vol. 9, No. 2, pp. 91-98 (2004)
- 6) 山中 理，長岩明弘，堤正彦，永森泰彦，初鹿行雄：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，学会誌「EICA」，Vol. 5, No. 1, pp. 111-114 (2000)

- 7) J. M. Maciejowski : モデル予測制御 制約のもとでの最適制御, 東京電機大学出版局 (2005)
- 8) 原 直樹, 木村文智, 渡辺昭二, 圓佛伊智朗, 長坂實上, 佐藤義典 : A2O 法におけるリン・窒素モデルのシミュレーション評価, 第33回下水道研究発表会講演集, pp.528-530 (1996)
- 9) 原 直樹, 木村文智, 武本 剛, 中山英則 : 初沈汚泥投入プロセスへの活性汚泥モデルの適用, 第39回下水道研究発表会講演集, pp.236-238 (2002)
- 10) 原 直樹, 武本 剛, 木村文智 : 2段ステップ嫌気無酸素好気法への活性汚泥モデル適用, 第40回下水道研究発表会講演集, pp.168-170 (2003)
- 11) M. Henze, W. Gujer, T. Mino and M. C. M. van Loosdrecht : Activated Sludge Model ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, Scientific and technical report No. 9, London, IWA Publishing (2000)
- 12) 原 直樹, 木村文智, 渡辺昭二, 早稲田邦夫, 長坂實上, 佐藤義典 : A2O 法におけるリン・窒素モデルのシミュレーション評価, 学会誌「EICA」, Vol. 1, No. 1, pp.110-113 (1996)
- 13) 日本下水道協会 : 下水道維持管理指針 後編, p.15, pp.131-135 (2003)
- 14) 土木研究所 : 土木研究所資料 高度処理施設設計資料検討プロジェクト報告書 (2003)
- 15) 国土交通省 : 下水道法施行令の改正に伴う事業計画認可の運用について, 国都下事第530号 (2004)
- 16) 環境省 : 特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令(平成十八年三月二十九日経済産業省・環境省令第三号) (2006)
- 17) 中川東一郎 : 第3回 多変数制御, 学会誌「EICA」, Vol. 10, No. 4, pp.34-43 (2006)

Feasibility Study of CO₂ Reduction by Optimum Control System of Wastewater Treatment Plant

Ichiro Yamanoi^{1)†}, Takeshi Takemoto¹⁾, Misaki Sumikura¹⁾ and Hideyuki Tadokoro²⁾

¹⁾ Energy and Environmental Systems Laboratory, Hitachi, Ltd.

²⁾ Information & Control Systems Division, Hitachi, Ltd.

† Correspondence should be addressed to Ichiro Yamanoi :

(Energy and Environmental Systems Laboratory, Hitachi, Ltd. E-mail : ichiro.yamanoi.rt@hitachi.com)

Abstract

To develop an on-line control system of wastewater treatment plants for CO₂ reduction in compliance with effluent standards even in the case of rapid-varied influent, we examined a model predictive control, which does not need any cost function to set target values of effluent quality and to economically evaluate the quality. The controllability of achieving effluent quality and reducing CO₂ emissions were evaluated by computer simulation with rapid-varied influent flow rate and concentration of total nitrogen. The comparison between the proposed method and conventional one which maintains internal recycle ratio and MLDO constant resulted as follows : 1) Rapidly-varied influent is sometime treated insufficiently by conventional method, but sufficiently by the proposed method in all case studies ; and 2) Reduction percentage of CO₂ emissions is estimated about 20% in the proposed method compared with the conventional method set at standard operating conditions.

Key words : wastewater treatment, CO₂, greenhouse gas, optimum control, activated sludge model