

〈論文〉

放流汚濁負荷を低減する雨天時下水処理運転管理に向けた
汚泥流出リスク予測手法の検証西田 佳記¹⁾, 圓 佛 伊智朗¹⁾, 西田 光 希²⁾
松 葉 祐 亮²⁾, 田 中 宏 明²⁾¹⁾ 株式会社製作所 (〒319-1292 茨城県日立市大みか町7-1-1 E-mail: yoshinori.nishida.js@hitachi.com)²⁾ 京都大学大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター
(〒520-0811 滋賀県大津市由美浜1-2 E-mail: nishida.mitsuki.34w@st.kyoto-u.ac.jp)

概 要

雨天時下水の増大に対応し、放流汚濁負荷を低減するため、汚泥流出抑制と二次処理水量最大化を実現する下水処理の運転管理手法が必要となってきた。本論文では、汚泥流出リスク予測に用いる指標として、従来の二次処理水量、汚泥沈降モデル計算値、さらに汚泥沈降モデル計算値と複数の影響因子に基づくクラスタリング手法による評価精度を比較した。結果、評価精度に係るF値は、二次処理水量を指標とした場合の0.33に対し、クラスタリング手法において最大0.54となり、汚泥流出リスク指標として最も有効である見通しを得た。

キーワード：合流式下水道、分流式下水道、雨天時下水処理、汚泥沈降モデル、流量制御

原稿受付 2019.6.4 原稿受理 2019.7.11

EICA: 24(2・3) 14-21

1. はじめに

下水処理場では、雨天時において高級処理を行う計画下水量（以下、計画水量）を超える下水について、生物処理を経ずに簡易処理水として放流する場合があります。懸濁物質（SS: Suspended Solids）や有機物などの放流汚濁負荷の上昇や、病原性微生物の流出が懸念される^{1,2)}。この簡易処理水量を削減するため、計画水量を超えた下水を生物反応タンク（以下、反応タンク）の後段にステップ流入させる雨天時活性汚泥法が考案され、導入が進んでいる²⁻⁴⁾。一方、反応タンクへの流入水量（以下、二次処理水量）を過度に増加させると、最終沈殿池における活性汚泥の沈降時間が不足して沈降性が低下するため、最終沈殿池から活性汚泥が流出するリスク（以下、汚泥流出リスク）が上昇するという課題がある。そこで、汚泥流出を抑制しつつ、二次処理水量を最大化する運転管理技術が必要であると考えられる。

下水処理では、汚泥流出を抑制するため、様々な指標に基づき運転管理がなされている。代表的な指標として二次処理水量に係る指標があり、各下水処理場では処理能力や計画水量、最終沈殿池への水面積負荷の適正範囲が定められている⁵⁾。また、汚泥沈降特性を反映するため、汚泥沈降速度に基づく指標が設定される場合がある。例えば、限界フラックス理論⁶⁾や、最終沈殿池への水面積負荷に対する汚泥沈降速度の比率^{4,7)}から、水面積負荷や二次処理水量、MLSS

(Mixed Liquor Suspended Solids) 濃度の管理基準値を設定する事例も報告されている。さらに、最終沈殿池流出部に設置した濁度計により活性汚泥の流出状況を監視し、フィードバック的に二次処理水量を制御する事例もある³⁾。

これらの指標に基づく従来の運転管理手法の課題として、流入・処理状況や汚泥沈降特性によっては、汚泥流出リスクを所定値以下に維持しつつ、二次処理水量をさらに増大できるなど、運転適正化の余地があることが挙げられる。これは、管理基準値の設定時から汚泥沈降特性が大きく変動する場合があることや、二次処理水量やMLSS濃度など過去の運転履歴を踏まえた予測がされていないことが要因となる。また、二次処理水濁度に基づくフィードバック制御では、流量制御の時間遅れによって、濁度が急上昇した場合などでは十分に汚泥流出リスクを抑制できない可能性が懸念される。

そのため、本研究では、変動する流入・処理状況において、最終沈殿池からの汚泥流出リスクを予測し、その結果を運転支援や運転制御に反映する、運転管理手法の構築を目的としている。これにより、汚泥流出を抑制しつつ、二次処理水量を最大化し、雨天時放流汚濁負荷の低減を図る。本論文では、汚泥流出リスクの評価に用いる指標の選定を目的に、複数の指標による評価精度を比較検証した。

2. 研究方法

2.1 雨天時下水処理運転管理手法

(1) 概要

本研究における雨天時運転管理手法は、最終沈殿池での汚泥沈降モデルに基づく汚泥流出リスク予測手法と、汚泥流出リスクの予測結果に基づく運転支援手法や運転制御手法から構成される。

汚泥流出リスク予測手法では、汚泥沈降モデルに基づく汚泥流出リスク指標の算出値と、二次処理水SS濃度に対応したリスク判定基準とを比較して、汚泥流出リスクを評価する。例えば、SS濃度：5, 10, 20, 40 mg/Lに相当する汚泥流出リスク指標のリスク判定基準を設定し、5 mg/L超過時は汚泥濃度が上昇しつつある、20 mg/L超過時は放流基準40 mg/Lを超過する可能性があるなど汚泥流出リスクの大小を判断する。

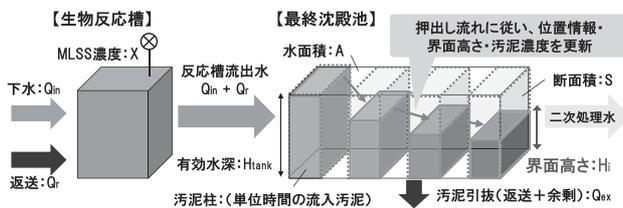
運転支援手法では、様々な運転条件での汚泥流出リスクを表示することで、オペレータによる運転判断を支援する。例えば、現行の運転を継続した際の汚泥流出リスクを予測して二次処理水量を操作する、また二次処理水量の受入上限値を増大できるMLSS濃度や返送汚泥量を探索するといった活用を想定している。

運転制御手法⁸⁾では、汚泥沈降モデルによる汚泥流出リスク指標の算出値を所定値以下とするように二次処理水量の上限値を算出し、それに基づき制御する。

以下、本論文で対象とした汚泥流出リスク予測手法において、基幹となる汚泥沈降モデルについて述べる。

(2) 汚泥沈降モデル⁸⁾

構築した汚泥沈降モデルの概要を Fig. 1 に示す。本モデルは、反応タンクから最終沈殿池へ単位時間当たり流入した活性汚泥混合液を1つの汚泥柱と定義し、汚泥柱の移流や界面下降を模擬するものである。モデルの入力項目は流量（流入下水・返送汚泥・余剰汚泥）、MLSS濃度のほか、モデル係数を規定する汚泥容量指標（SVI: Sludge Volume Index）や水温などの一般的な計測項目である。SVIには、計測器または



項目	式	最上流の汚泥柱(汚泥柱1)	最上流以降の汚泥柱(汚泥柱2以降)
界面下降速度	式(4)	汚泥沈降速度 + 引抜水面積負荷(下向流速) - 流入水面積負荷(上向流速)	
位置情報: 流入部からの距離	式(5)	汚泥柱の流下方向長さ (=反応槽流出水量/断面積)	最上流の汚泥柱分だけ移動 (前時刻の位置+現時刻の汚泥柱1の位置)
界面高さ	式(6)	最終沈殿池の有効水深	界面下降速度に従い、下降 (前時刻の界面高さ-前時刻の界面下降速度×Δt)
汚泥濃度	式(7)	MLSS濃度	界面高さの低下に伴い、上昇 (前時刻に対する現時刻の界面高さの比に反比例)

Fig. 1 Outline of the developed sludge settling model in final sedimentation tank⁸⁾

定期的な手分析による計測結果を入力し、直近の汚泥沈降特性をモデルに反映する。モデルの出力は、流出部の汚泥界面高さ（以下、界面高さ計算値）である。

最終沈殿池での活性汚泥の挙動は沈降、かき寄せ、巻き上げ、引抜など極めて複雑であり、精緻に再現するには複数のモデル式や係数が必要であり、係数調整など維持管理上の負担となることが懸念される。

そこで、本モデルでは、実運用での適用を想定し、汚泥沈降に係る影響因子の限定、局所的な影響の平均化によりモデルの簡略化を図った。また、界面高さ計算値は汚泥流出リスクに係る相対的な指標であり、事前に二次処理水SS濃度との関係に基づき設定したリスク判定基準と比較し、汚泥流出リスクを評価することとした。さらに、二次処理水量の制御ロジックにおいて、流入変動に応じて適切に反応タンク流入水量を算出するため、押し出し流れの概念を活用し、最終沈殿池に流入した汚泥柱の情報を追跡できるようにした。

干渉沈降における活性汚泥の沈降速度（以下、汚泥沈降速度）は、式(1)に示すように汚泥濃度に対して指数関数的に減少することが知られている⁶⁾。また、係数 V_0, k については、SVIや水温の関数で表される場合がある^{4,9-14)}。その一例¹⁰⁾を式(2)、(3)に示す。本論文では、式(1)～(3)に基づき、汚泥沈降速度を表すこととした。

$$V = V_0 \cdot \exp(-k \cdot X) \quad (1)$$

$$V_0 = \exp(2.605 - 0.00365 \cdot DSVI) \quad (2)$$

$$k = 0.249 + 0.002191 \cdot DSVI \quad (3)$$

V (m/h)：汚泥沈降速度、 X (g/L)：汚泥濃度、 $DSVI$ (L/g)：希釈汚泥に対するSVI、 V_0 (m/h)、 k (L/g)：係数である。

汚泥柱における単位時間当たりの界面高さの変化量として、界面下降速度の算出式を式(4)に示す。式(4)は、汚泥沈降速度に加え、下向流速に係る沈殿池水面積あたりの引抜汚泥量（式(4)の右辺第2項）、上向流速に係る沈殿池水面積あたりの越流量（式(4)の右辺第3項）から構成される。最終沈殿池での流入・越流・引抜による界面への影響は沈殿池内の位置により変化すると考えられるが、本モデルでは、水面積あたりの流量とすることで、沈殿池全体でその影響度を平均化する。なお、本論文では、界面高さを沈殿池底部から汚泥界面までの距離と定義した。

$$V_{down}(t) = V(t) + \frac{Q_{ex}(t)}{A} - \frac{Q_{in}(t)}{A} \quad (4)$$

$V_{down}(t)$ (m/h)：界面下降速度（以下、 t は時刻 t での値を表す）、 $V(t)$ (m/h)：汚泥沈降速度、 $Q_{in}(t)$ (m^3/h)：二次処理水量、 $Q_{ex}(t)$ (m^3/h)：汚泥引抜量（返送汚泥量と余剰汚泥量の和）、 A (m^2)：最終沈殿池の水面積である。

汚泥柱の位置、界面高さ、汚泥濃度の情報については、先述のとおり押し出し流れの考え方に基づき、時々刻々と更新していくものとした。各情報の計算式を式(5)～(7)に示す。位置および界面高さはそれぞれ最終沈殿池の流入部、底部を起点とした値である。最終沈殿池に流入した汚泥柱、つまり最上流の汚泥柱($i=1$)の位置は汚泥柱の流下方向の長さ、界面高さは沈殿池の有効水深、汚泥濃度はMLSS濃度とした。一方、最上流以降の汚泥柱($i \geq 2$)について、流入部からの距離は最上流の汚泥柱分だけ水平方向に移動するとし、界面高さや汚泥濃度は界面下降に従い変化するものとした。

上記のとおり、最終沈殿池における汚泥界面の時間的および空間的变化を追跡し、最終沈殿池流出部での界面高さを算出し、汚泥流出リスクを評価する。

$$L_1(t+\Delta t) = \frac{(Q_{in}(t) + Q_r(t)) \cdot \Delta t}{S}$$

$$L_i(t+\Delta t) = L_{i-1}(t) + L_1(t+\Delta t) \quad (5)$$

$$H_1(t+\Delta t) = H_{tank}$$

$$H_i(t+\Delta t) = H_{i-1}(t) - V_{down_i-1}(t) \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$X_1(t+\Delta t) = X(t)$$

$$X_i(t+\Delta t) = X_{i-1}(t) \cdot \left(\frac{H_{i-1}(t) - V_{down_i-1}(t) \cdot \Delta t}{H_{i-1}(t)} \right)^{-1} \quad (7)$$

$L_i(t)$ (m) : 上流側から*i*番目の汚泥柱*i*における最終沈殿池流入部からの距離, $Q_r(t)$ (m^3/h) : 返送汚泥量, S (m^2) : 最終沈殿池の流下方向の断面積, Δt (h) : 計算周期, $H_i(t)$ (m) : 汚泥柱*i*の界面高さ計算値, H_{tank} (m) : 最終沈殿池の有効水深, $V_{down_i}(t)$ (m/h) : 汚泥柱*i*の界面下降速度, $X_i(t)$ (g/L) : 汚泥柱*i*の汚泥濃度計算値, $X(t)$ (g/L) : 反応タンクMLSS濃度である。

2.2 実下水処理場での雨天時採水調査

本研究では、実下水処理場において採水調査を実施し、取得した雨天時処理データに基づき、汚泥流出リスクの評価精度を検証した。

雨天時処理データは、分流一部合流区域のA処理場にて採水調査を実施して取得した。A処理場での調査対象系列の概要、施設計画値、およびデータ取得内容をFig. 2に示す。計測器として、系列全体の流量を計測する各種流量計と、反応タンク4池のうち2池(No.2池・No.4池)にMLSS計, SVI計, DO計が設置されている。以降の検証では、流量は各池均等と仮定し、全体の流量を池数で除した値を用い、MLSS濃度およびSVIはNo.2池とNo.4池の平均値を用いた。また、最初沈殿池流出水および二次処理水を1-2時間ごとに採水し、濁度や有機物、窒素、病原性微生物¹⁵⁾を分析した。

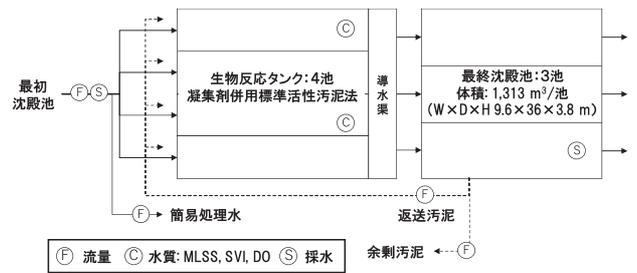


Fig. 2 Specifications of A-wastewater treatment plant where sampling survey conducted and sampling points

Table 1 Rain fall and volume of influent, secondary effluent and bypass discharge in sampling surveys during rain event in A-wastewater treatment plant

日付	降雨量		計画水量に対する各項目の最大水量の比率		
	総量 (mm)	時間最大 (mm)	流入下水 (-)	二次処理水 (-)	簡易処理水 (-)
11/13-15 (2017)	17.0	5.0	1.3	1.3	0.0
6/19-20 (2018)	50.3	14.0	2.8	1.9	0.9
8/23-24 (2018)	50.6	9.6	2.1	2.1	0.0

また、本論文で評価対象とした計3回の調査概要をTable 1に示す。計画水量の最大2倍程度まで生物処理がなされていたが、簡易処理放流が発生していた時間帯もあった。なお、2017年10月にも調査は実施したが⁸⁾、No.2池とNo.4池のSVIが大きく乖離しており、適切な評価が困難と判断したため、本論文での評価対象からは除外した。

2.3 汚泥流出リスク評価精度の検証

(1) 汚泥流出リスク指標

汚泥流出リスク指標として、(a) 二次処理水量、(b) 汚泥沈降モデルによる界面高さ計算値、(c) クラスタリング手法(適応共鳴理論(ART: Adaptive Resonance Theory)¹⁶⁾より分類したカテゴリ(以下、分類カテゴリ)を対象とし、二次処理水濁度の管理基準超過を判定できるか検証した。ARTの概要をFig. 3に示す。ARTはデータクラスタリング手法の一種で、入力データの特性に応じて自動でカテゴリ化する手法である^{17,18)}。最終沈殿池での汚泥沈降や汚泥流出は複雑な挙動であり、単一のモデルでは精緻に再現できない可能性がある。そこで、(c) 分類カテゴリでは、(b) 汚泥沈降モデルによる界面高さ計算値の結

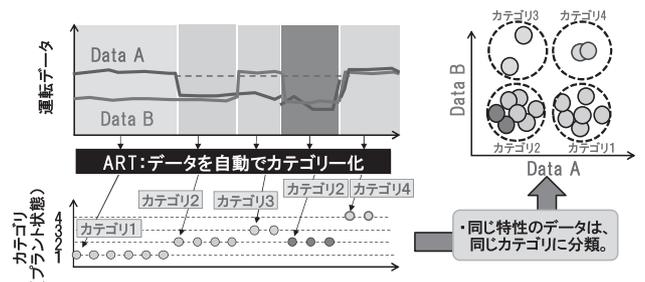


Fig. 3 Outline of ART (Adaptive Resonance Theory)

Table 2 Indicators of sludge overflow evaluated in this study

汚泥流出リスク指標	算出に用いた項目	汚泥流出リスクが高いとするリスク判定基準
(a) 二次処理水量	・二次処理水量	> 計画水量の2倍
(b) 界面高さ計算値	【汚泥沈降モデル】 ・二次処理水量 ・返送汚泥量 ・余剰汚泥量 ・MLSS濃度 ・SVI	>2.5 m
(c) 分類カテゴリ	【ART:クラスタリング手法】 ・界面高さ計算値 ・二次処理水量 ・濃縮汚泥濃度平均値	基準カテゴリに該当

果に加え、複数の影響因子のデータも ART 上で考慮することで、汚泥流出リスクの評価精度向上を図った。

二次処理水濁度の管理基準は、本論文における A 処理場での調査において濁度が最大 8 mg-SS/L 相当 (別途構築した推定式より換算) と低濃度であったことから、濁度上昇の兆候を判定するための基準として、SS 濃度 5 mg/L に相当する 2.5 NTU を設定した。

以下、汚泥流出リスク指標の概要 (Table 2 参照) と、各指標で設定したリスク判定基準について述べる。

(a) 二次処理水量は一般的な指標であり、下水処理場では計画水量など運転判断の根拠となる水量が設定されている⁵⁾。本論文では、A 処理場において計画水量の最大 2 倍程度まで二次処理されていたことから、従来の経験値やノウハウに基づくリスク判定基準として計画水量の 2 倍を設定した。

(b) 汚泥沈降モデルによる界面高さ計算値では、汚泥沈降速度の影響因子である MLSS 濃度や SVI も考慮するため、(a) 二次処理水量と比べて評価精度は向上すると考えた。リスク判定基準は、最終沈殿池の水面下 1.0 m~1.5 m まで汚泥界面が上昇すると、汚泥流出の恐れがあると報告されていること¹⁹⁾、また、界面高さ計算値と二次処理水濁度 (実測値) との関係性を踏まえて、水面から 1.3 m である 2.5 m に設定した。

(c) 分類カテゴリについては、汚泥沈降モデルによる界面高さ計算値に加え、二次処理水量 (実測値) と、最終沈殿池内に存在する汚泥柱の濃縮汚泥濃度平均値 (計算値) を ART に入力し、データを複数のカテゴリに分類した。そして、分類カテゴリと二次処理水濁度との関係性を検証した。さらに、高濁度のデータが多く含まれる分類カテゴリを基準カテゴリと定義し、基準カテゴリに該当する場合は汚泥流出リスクが高いと判定することとし、評価精度を検証した。ART の入力項目について、同様の界面高さにおいても、二次処理水量、つまり最終沈殿池からの越流水量が大きいほど、また最終沈殿池内の汚泥濃度が高いほど、二次処理水中の汚泥濃度も高くなると考え、二次処理水量と濃縮汚泥濃度平均値を設定した。なお、最終沈殿池内に存在する汚泥柱の濃縮汚泥濃度平均値 $X_{av}(t)$ は、式

(8) により算出した。

$$X_{av}(t) = \frac{X_1(t) \cdot L_1(t) + \sum_{i=2}^N X_i(t) \cdot (L_i(t) - L_{i-1}(t))}{L} \quad (8)$$

ここで、 $X_{av}(t)$ (g/L) : 時刻 t における濃縮汚泥濃度平均値、 N (-) : 最終沈殿池内に存在する汚泥柱の個数、 $L_i(t)$ (m) : 時刻 t における汚泥柱 i の最終沈殿池流入部からの距離、 L (m) : 最終沈殿池長さ、 $X_i(t)$ (g/L) : 時刻 t における汚泥柱 i の汚泥濃度である。

(2) 評価精度の検証方法

3 つの指標による汚泥流出リスクの評価精度検証のため、二次処理水濁度の実測値と汚泥流出リスク指標の算出値について、各項目の基準値との大小関係を比較し、Table 3 に示す対応表に基づきデータを分類した。例えば、False Negative (FN) は、二次処理水濁度は基準値を超過していたが、汚泥流出リスク指標に基づくリスク無しと判定されたものである。そして、式(9)-(12)に基づき、正解率、適合率、再現率、F 値を算出し、汚泥流出リスク評価精度を検証した。これらの指標において、適合率が高いと汚泥流出リスクの判定結果の誤りが少ないことを意味し、再現率が高いと高濁度データの判定漏れが少ないことを意味する。一般的に適合率と再現率はトレードオフの関係にあるため、最終的な評価精度は適合率と再現率の調和平均である F 値により比較した。

Table 3 Classification of measured turbidity and calculated indicators of sludge overflow

データ分類	汚泥流出リスク指標値	
	指標値 > リスク判定基準 または 分類カテゴリ = 基準カテゴリ	指標値 ≤ リスク判定基準 または 分類カテゴリ ≠ 基準カテゴリ
濁度 (実測値) > 基準	True Positive (TP)	False Negative (FN)
濁度 (実測値) ≤ 基準	False Positive (FP)	True Negative (TN)

$$R_a = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (9)$$

$$R_p = \frac{TP}{TP + FP} \quad (10)$$

$$R_r = \frac{TP}{TP + FN} \quad (11)$$

$$F = \frac{2 \cdot R_p \cdot R_r}{R_p + R_r} \quad (12)$$

ここで、 R_a (-) : 正解率、 R_p (-) : 適合率、 R_r (-) : 再現率、 F (-) : F 値、 TP (-) : TP (True Positive) に該当するデータ数、 FP (-) : FP (False Positive) に該当するデータ数、 FN (-) : FN (False Negative) に該当するデータ数、 TN (-) : TN (True Negative) に該当するデータ数である。

3. 結果および考察

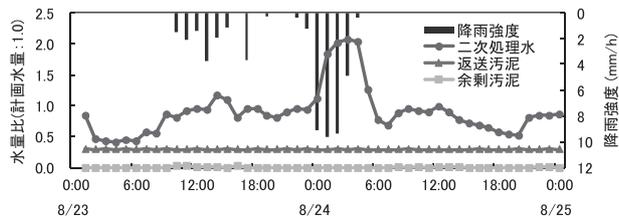
3.1 汚泥流出リスク指標に関する検討（二次処理水量，界面高さ計算値）

A 処理場における雨天時処理状況および汚泥沈降モデル評価結果の例として，2018年8月の結果を Fig. 4 に示す。

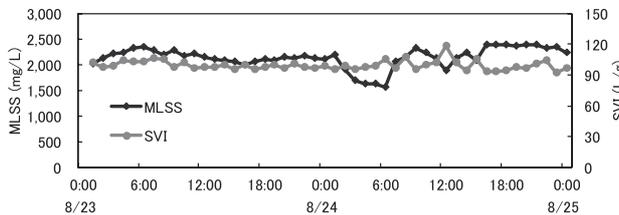
Fig. 4(a) に降雨強度と，計画水量（33,500 m³/d（1,400 m³/h））に対する二次処理水量，返送汚泥量，余剰汚泥量の各水量比を示す。8月24日0時から9mm程度の降雨が3時間続き，8月24日1時～4時まで計画水量の2倍程度まで生物処理がなされていた。また，返送汚泥量は概ね一定量で運転されていた。なお，調査期間中に簡易処理放流は発生しなかった。

次に，Fig. 4(b) に MLSS 濃度と SVI を示す。SVI は多少の時間変動はあるものの，降雨前後に大きな違いは確認されなかった。雨天時処理に伴う SVI の顕著な変化は他の調査期間においても確認されなかった。これは，対象系列においてリン除去を目的に凝集剤が添加されており，汚泥沈降性が安定していたためであると考えられる。

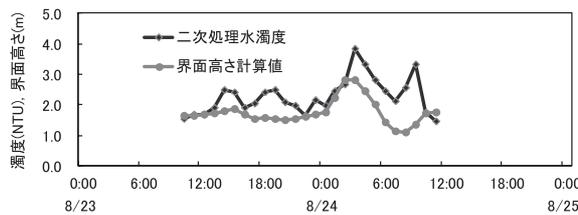
最後に，Fig. 4(c) に，二次処理水濁度と汚泥沈降モデルによる界面高さ計算値を示す。8月24日0時から7時において，二次処理水濁度の増加および減少に対し，界面高さ計算値も追従した。一方で，8月24日8時～9時において，二次処理水濁度の上昇に対し，界面高さ計算値が低い値を示した。これは，



(a) Rain fall and flow rate



(b) MLSS and SVI



(c) Turbidity in secondary effluent and calculated sludge height

Fig. 4 Results of wet weather treatment and sludge settling model calculation

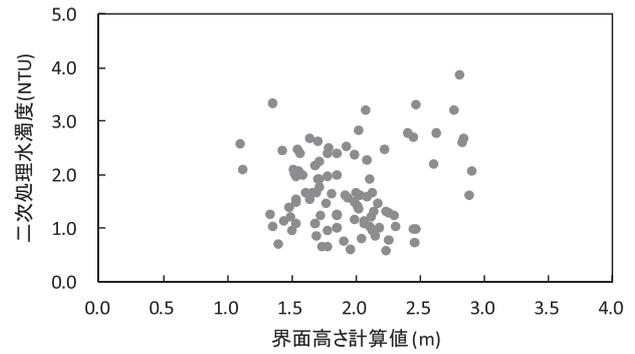


Fig. 5 Relationship between calculated sludge height and measured turbidity in secondary effluent

MLSS 濃度の急激な上昇（8月24日6時～9時，Fig. 4(b)）に伴い，界面高さ計算値も8月24日9時以降に高くなっていったが，実態としてモデル計算値よりも早く MLSS 濃度上昇による影響が出ていた可能性が考えられる。汚泥沈降性も含め，雨天時処理に伴う急激な処理条件の変化による汚泥沈降特性への影響について更に検討し，汚泥沈降モデルの精度向上を進めていく必要があると考える。

A 処理場での計3回の調査における界面高さ計算値と二次処理水濁度との関係を Fig. 5 に示す。二次処理水濁度は最大4 NTU，事前に構築した推定式に基づく SS 濃度 8 mg/L 程度と低濁度であり，大規模な汚泥流出はなかった。一方で，界面高さ計算値が高いほど，具体的には 2.5 m より大きい範囲（水面から 1.3 m 未満）において二次処理水濁度が高いデータが多くなっていったことから，界面高さ計算値に係るリスク判定基準として 2.5 m を設定した。また，同様の界面高さにおいても二次処理水濁度にばらつきも確認された。これについては，3.2 節にて後述するように二次処理水量の大小も影響していると考えられる。

3.2 汚泥流出リスク指標に関する検討（分類カテゴリ）

A 処理場における二次処理水量（実測値）と，汚泥沈降モデルによる界面高さ計算値，最終沈殿池内に存在する汚泥柱の濃縮汚泥濃度平均値（計算値）を入力項目として ART によりカテゴリ化した結果を Fig. 6(a)，(b)，(c) に，二次処理水濁度との関係について Fig. 6(d) に示す。また，各カテゴリにおける各項目の中央値を Table 4 に示す。カテゴリは，二次処理水濁度の中央値の大きさに従い整理した。界面高さ計算値が高くなったカテゴリ 5, 6, 7 において，二次処理水量の大きさに関わらず，二次処理水濁度も高い傾向を示した。この結果から，汚泥流出リスク判定のための基準カテゴリとして，これら3つを選定した。また，界面高さ計算値がともに約 2.1 m と今回の結果では中程度であったカテゴリ 0 とカテゴリ 4 において，

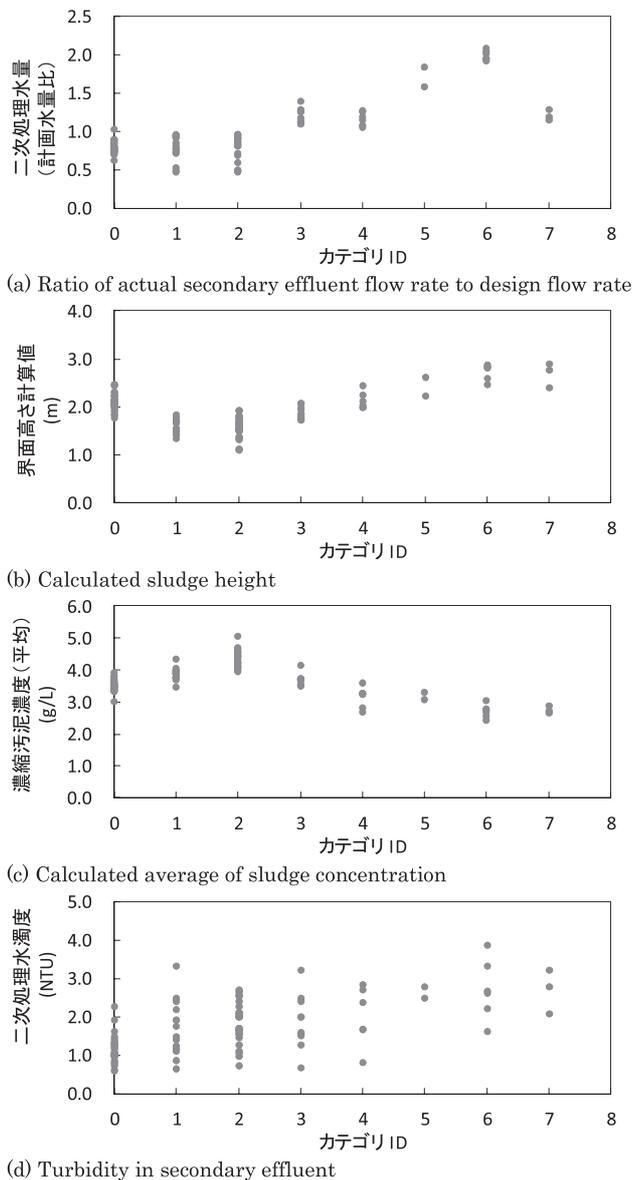


Fig. 6 Comparison of operational and calculated data in categories by ART

Table 4 Median values of factors about sludge overflow in categories by ART

項目 (データ数以外は中央値)	カテゴリ							
	0	1	2	3	4	5	6	7
データ数	29	16	25	10	6	2	6	3
二次処理水濁度 (NTU)	1.08	1.62	1.68	1.79	2.02	2.63	2.64	2.78
界面高さ計算値 (m)	2.11	1.62	1.59	1.85	2.08	2.43	2.82	2.77
二次処理水量 (計画水量比) (-)	0.78	0.79	0.85	1.21	1.17	1.71	1.98	1.19
濃縮汚泥濃度 (g/L)	3.52	3.91	4.37	3.70	3.26	3.20	2.73	2.74

二次処理水量が大きいカテゴリ 4 で二次処理水濁度が高くなった。これは、界面高さが同様でも、二次処理水量が大きいほど最終沈殿池からの越流量が大きくなるため、活性汚泥が多く流出したと考えられる。このようにクラスタリング手法 (ART) を活用することで、汚泥沈降・汚泥流出に係る影響因子と、実際の汚泥流出状況との関係を比較検討することができた。

3.3 汚泥流出リスク評価精度の検証結果

3.1 節および 3.2 節に示した 3 つの汚泥流出リスク評価指標 ((a) 二次処理水量, (b) 界面高さ計算値, (c) 分類カテゴリ) による汚泥流出リスクの評価精度を検証した。その結果を Table 5 に示す。(a) 二次処理水量では適合率が高くなった一方で、計画水量の 2 倍未満でも二次処理水濁度が 2.5 NTU を超過する場合が多かったことから、False Negative (FN) が多くなり、再現率は低くなった。一方で、汚泥沈降モデル活用 ((b) 界面高さ計算値) や、ART 併用 ((c) 分類カテゴリ) により、汚泥流出リスクをより正確に評価でき、再現率を向上できた。そして、汚泥沈降や汚泥流出に係る複数の因子を考慮した (c) 分類カテゴリにおいて F 値が 0.54 と最も高くなり、汚泥沈降モデルに加えてクラスタリング手法を併用する方式が最も適用可能性が高いことが示唆された。なお、A 処理場においては汚泥沈降性が良好であり、本論文において運転実績の中で高濁度として設定した 2.5 NTU は SS 濃度に換算すると 5 mg/L 程度と、汚泥流出の観点からは低い値である。実際に汚泥流出と判断されうる、より高い濁度基準値に対しては、適合率や再現率、F 値はさらに高くなると考えられる。

Table 5 Comparison of evaluation results about sludge overflow by each indicator

項目	(a) 二次 処理水量	(b) 界面高さ 計算値	(c) 分類 カテゴリ
リスク判定基準 (基準カテゴリ)	計画水量の 2 倍	2.5 m	カテゴリ 5, 6, 7
濁度 > 2.5 NTU のデータ数	TP	3	5
	FN	12	10
濁度 ≤ 2.5 NTU のデータ数	FP	0	3
	TN	82	79
正解率: (TP+TN)/全データ	0.88	0.87	0.88
適合率: TP/(TP+FP)	1.00	0.63	0.64
再現率: TP/(TP+FN)	0.20	0.33	0.47
F 値	0.33	0.43	0.54

4. 結 論

本論文では、汚泥流出リスクの評価に用いる指標選定を目的に、実下水処理場における雨天時処理データに基づき、(a) 二次処理水量, (b) 汚泥沈降モデルによる界面高さ計算値, (c) クラスタリング手法 (ART) による分類カテゴリの 3 つの指標による汚泥流出リスク評価精度を比較した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 3 回の雨天時採水調査において、汚泥沈降モデルによる界面高さ計算値により、二次処理水量増大に伴う二次処理水濁度の上昇を検知でき、界面高さ計算値が高いほど濁度は高くなる傾向を確認した。

- (2) 3つの汚泥流出リスク指標の評価精度をF値に基づき比較した結果、従来の指標である(a)二次処理水量のみの0.33に比べ、(b)界面高さ計算値では0.43、(c)分類カテゴリでは0.54となり、汚泥沈降モデルやクラスタリング手法の活用により、評価精度を向上できた。

以上の結果より、汚泥流出リスクの評価指標として汚泥沈降モデルによる界面高さ計算値と、クラスタリング手法を併用することが最も有効であるとの見通しを得た。

参考文献

- 1) 国土交通省：下水道技術ビジョン、
http://www.nilim.go.jp/lab/eag/01_h3002_ichibukaitei.pdf
(2019/5/24 アクセス)
- 2) 諏訪守, 安井宜仁, 南山瑞彦：合流式下水道の改善によるノロウイルス負荷の削減効果, 第53回下水道研究発表会講演集, pp. 431-433 (2016)
- 3) 山本高弘, 中村貴昭：大阪市における既存施設を活用した合流式下水道の改善——雨天時下水活性汚泥処理法の開発と実用化——, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 10, No. 2, pp. 8-13 (2005)
- 4) 笹本琢士：ステップ流入式2段硝化脱窒法と雨天時下水活性汚泥処理法の併用運転手法の確立, 第54回下水道研究発表会講演集, pp. 862-864 (2017)
- 5) (社)日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説—2009年版— (2009)
- 6) (社)土木学会：環境工学公式・モデル・数値集, 第1編, pp. 15-22 (2004)
- 7) 野村悠介, 佐藤直之, 中村慈実：最終沈殿池の定量的管理手法の検討, 第54回下水道研究発表会講演集, pp. 841-843 (2017)
- 8) 西田佳記, 圓佛伊智朗, 田中景介, 松葉祐亮, 山下尚之, 田中宏明：汚泥沈降モデルを用いた雨天時下水処理制御技術の成立性評価, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 23, No. 2/3, pp. 40-46 (2018)
- 9) 小松和也, 徳富孝明, 西村総介, 田中倫明, 安井英斉：活性汚泥のゾーン沈降速度とSVIの関係, 環境工学研究論文集, Vol. 39, pp. 21-29 (2002)
- 10) Koopman B. L., and Cadee K: Prediction of Thickening Capacity using Diluted Sludge Volume Index, *Water Research*, Vol. 17, No. 10, pp. 1421-1431 (1983)
- 11) Ekama G. A., et al.: Secondary Settling Tanks: Theory, Modeling, Design and Operation: *IWA Scientific and Technical Report* No. 6 (1997)
- 12) Daigger G. T.: Development of refined clarifier operation diagrams using updated Settling characteristics database: *Water Environmental Research*, Vol. 67, No. 1, pp. 95-100 (1995)
- 13) Pitman A. R.: Settling of nutrient removal activated sludge: *Water Science and Technology*, Vol. 17, pp. 493-504 (1980)
- 14) 川口幸男, 堺好雄, 見上博：活性汚泥性状を考慮した最終沈殿池水面積負荷設計手法に関する考察, 下水道協会誌, Vol. 37, No. 457, pp. 107-119 (2000)
- 15) 松葉祐亮, 田中景介, 西田佳記, 圓佛伊智朗, 山下尚之, 田中宏明：雨天時の下水処理場における指標微生物の制御に関する基礎検討, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 23, No. 2/3, pp. 47-51 (2018)
- 16) G. A. Carpenter, S. Grossberg: Invariant Pattern Recognition and Recall by an Attentive Self-Organizing ART Architecture in a Nonstationary World: *Proceedings First International Conference on Neural Networks*, IEEE (1987)
- 17) 陰山晃治, 武本剛, 中村信幸：適応共鳴理論を用いた凝集剤注入支援技術の開発, 第91回下水道研究発表会講演集, pp. 362-363 (2017)
- 18) Y. Hori, H. et al.: Online Anomaly Detection of Distillation Tower System Using Adaptive Resonance Theory, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 50, No. 6, pp. 430-438 (2017)
- 19) (社)日本下水道協会：下水道維持管理指針 実務編—2014年版— (2014)

Sludge Overflow Risk Evaluation Method for Reduction of Pollutant Discharge in Wet Weather Wastewater Treatment

Yoshinori Nishida¹⁾, Ichiro Enbutsu¹⁾

Yusuke Matsuba²⁾, Mitsuki Nishida²⁾ and Hiroaki Tanaka²⁾

¹⁾ Hitachi Ltd. Research & Development Group

²⁾ Kyoto University Graduate School of Engineering

† Correspondence should be addressed to Yoshinori Nishida :

(Hitachi Ltd. Research & Development Group

E-mail : yoshinori.nishida.js@hitachi.com)

Abstract

A wet weather municipal wastewater treatment system has been proposed to reduce pollutant discharge by increasing biological treatment capacity as much as possible. In this system, optimal control of influent wastewater to the activated sludge process is essential to prevent sludge overflow from final settling tanks in maximizing treatment capacity. This study aims at establishing a sludge overflow risk evaluation method using a sludge settling model for a treatment control system and compared with a conventional indicator based on monitoring data obtained in an actual municipal wastewater treatment plant in rainy events. As the results, the proposed evaluation method demonstrated superior to the conventional indicator.

Key words : combined sewer, sanitary sewer, wet weather treatment, sludge settling model, flow control