

〈研究発表〉

雨天時放流負荷を低減する運転制御技術の適用性検証

西田 佳記¹⁾, 圓佛 伊智朗¹⁾, 井原 賢²⁾, 田中 宏明²⁾

¹⁾(株)日立製作所

(〒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: ihara@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp)

概要

近年、気候変動や管路老朽化に伴い、分流式下水道においても雨天時浸入水量が増大し、溢水や機器水没、水質悪化などのリスクが懸念されている。下水の浄化機能を担う下水処理場では、雨天時処理においても生物処理を最大限引き、簡易処理放流に伴う放流負荷を低減することが求められるが、処理水質や処理機能の維持のために最終沈殿池からの活性汚泥の流出抑制も両立する必要がある。そこで、汚泥流出濃度の推定モデルを構築し、モデル活用による処理水量制御の適用性を実施での処理データに基づき検証したので、報告する。

キーワード：分流式下水道、雨天時処理、汚泥流出推定モデル、処理水量制御

原稿受付 2021.7.2

EICA: 26(2・3) 20-24

1. はじめに

下水道における雨水リスクとして、浸水や溢水、ポンプ施設等の水没、雨天時越流水（CSO: Combined Sewer Overflow）などによる公共用水域の水質悪化などがあり、気候変動に伴い雨水対策の重要性は高まっている。分流式下水道においても雨天時浸入水に係る問題が認識されてきており、2020年1月に国土交通省より雨天時浸入水対策ガイドライン（案）¹⁾が発刊された。ガイドライン（案）では、発生源対策や施設能力増強に加え、ポンプ施設や下水処理場での運転管理手法が対策として提唱されている。

本研究では、雨天時放流負荷の低減に向け、下水処理場の施設能力を最大限活用する運転管理手法の構築を目的とした。分流式下水道においても雨天時に流入水量が増大し、一部下水を生物処理せずに簡易処理水として放流する場合がある¹⁾。これを抑制するため、生物反応槽への流入下水量（以下、二次処理水量）を過度に増大すると、最終沈殿池（以下、終沈）での活性汚泥の沈降性が低下し、汚泥流出リスクを高めるといった課題がある。そこで、終沈流出水（以下、二次処理水）SS濃度の推定モデル（以下、汚泥流出推定モデル）を構築し、運転制御への適用を検討した。

2. 汚泥流出推定モデルに基づく運転制御

2.1 概要

従来の雨天時処理では、水面積負荷の上限など所定の設定値に従うことが多いのに対し、本手法は二次処

理水量や MLSS 濃度、水温、SVI の変動下での二次処理水 SS 濃度をモデルにより推定し、運転に反映する。例えば、計画面として二次処理水量の上限値検討や、運用面として汚泥流出のアラート早期表示や適正流量ガイダンスなどを実施する。これらにより、汚泥流出の抑制、二次処理水量の最大化、簡易処理水量の低減を図る。

2.2 汚泥流出推定モデル

本モデルは、1) 終沈底部から汚泥界面までの高さ（以下、界面高さ）を計算する、2) 汚泥流出に係るパラメータとして界面高さに加え、二次処理水量や汚泥濃度の影響を反映した指標（越流/清澄比）を導出する、3) 予め構築した近似式に基づき、越流/清澄比から二次処理水 SS 濃度を推定する。モデル計算に係るパラメータを **Fig. 1** に示し、手順 1), 2) について述べる。

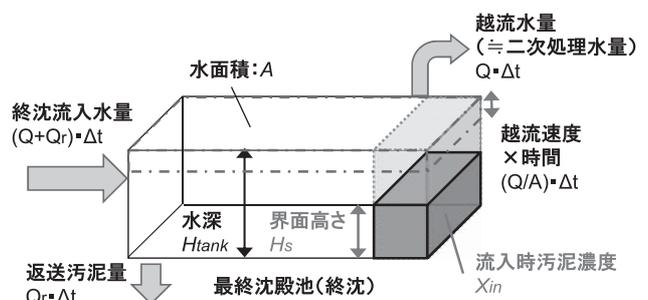


Fig. 1 Parameters for estimation of SS in secondary effluent

1) 界面高さの計算では、単位時間当たりに終沈に流入した活性汚泥塊を1つの汚泥柱と定義し、汚泥

柱の移流は押出流れにより、汚泥界面下降は式(1)により再現した汚泥沈降モデル²⁾を用いる。モデルでは、所定時間ごとに汚泥柱の位置、汚泥濃度、界面高さの情報を更新し、終沈末端での界面高さを算出する。

2) 越流／清澄比の導出では、水面から汚泥界面までの距離、つまり清澄部分の深さが同様でも、越流速度(二次処理水量÷水面積)が大きく、終沈内汚泥濃度が高いほど、二次処理水SS濃度は高くなると考えた。そこで、式(2)に基づき、清澄部分に対する越流速度の比と、晴天時平均MLSS濃度に対する終沈流入時の汚泥濃度の比との関数として、越流／清澄比を算出する。

$$V_{down} = V + (Q_r - Q_{ex}) / A \quad (1)$$

$$R = \frac{(Q/A) \cdot \Delta t}{H_{tank} - H_s} \cdot \frac{X_{in}}{X_{ave}} \quad (2)$$

V_{down} (m/h)：汚泥界面下降速度、 V (m/h)：汚泥沈降速度、 Q_r (m³/h)：返送汚泥量、 Q_{ex} (m/h)：余剰汚泥量、 Q (m³/h)：二次処理水量、 A (m²)：終沈の水面積、 R (-)：越流／清澄比、 Δt (h)：計算周期(本報では0.1h)、 H_{tank} (m)：終沈の有効水深、 H_s (m)：界面高さ計算結果、 X_{in} (g/L)：終沈末端の汚泥柱の初期(流入時)汚泥濃度、 X_{ave} (g/L)：晴天時平均MLSS濃度である。

3. 実験方法

本研究では、分流式下水道のA処理場を対象に、採水調査による雨天時処理の実態把握、汚泥流出推定モデルに基づく二次処理水量の上限値探索、実施設での検証実験を実施した。

3.1 対象施設

本研究では、A処理場の処理系列のうち、Fig.2に示すステップ流入式多段硝化脱窒法の処理系列を対象とした。対象系列では、晴天時は二次処理水量2,300~2,500 m³/h程度(全8池の合計)で運転されている。一方、雨天時は、二次処理水量を3,600~4,100 m³/hまで増大しているが、流入下水量が著しく増大した場合、1,000 m³/h程度を簡易処理放流している。二次処理水と簡易処理水は他系列と混合され、

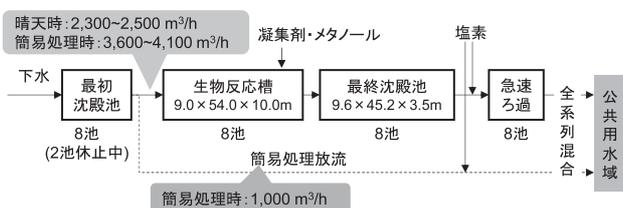


Fig.2 Wastewater treatment flow in WWTP A

公共用水域へと放流される。この放流水中のSS濃度について、下水道法施行令に基づく放流水質基準は40 mg/Lであり、さらに自主基準値6 mg/Lが設定されている。

3.2 採水調査等に基づく雨天時処理データの取得

対象系列において雨天時採水調査を夏季・秋季(2020年7月, 同10月)の2回実施した。また、冬季の晴天時処理(2019年2月), 雨天時処理(2021年1月)のデータを取得した。それらの処理データをTable 1に示す。雨天時採水調査では、ともに最大4,100 m³/h(晴天時の約1.8倍)まで生物処理されたが、簡易処理放流も発生した。また、時期に応じたMLSS濃度調整により、冬季(1月, 2月)のMLSS濃度は高くなった。

採水調査では、対象系列の最初沈殿池流出水(以下、一次処理水)と二次処理水に加え、放流水を採水し、濁度やSS濃度、その他の水質項目(TOC, 全窒素, 大腸菌群など)、水温を計測した。

Table 1 Obtained operation data in WWTP A

期 間	降雨量		二次 処理水量 (最大) (m ³ /h)	簡易 処理水の 期間 (h)	MLSS (mg/L)	SVI (mL/g)	水温 (℃)
	総量 (mm)	最大 (mm/h)					
'19/2/14~15 (晴天時)	0.0	0.0	2,544	—	2,701~ 2,835	161~ 183	18.0~ 18.4
'20/7/3~5	84.0	10.5	4,130	5.25	1,468~ 2,646	179~ 211	24.6~ 25.4
'20/10/9~11	86.0	8.5	4,160	18.0	1,409~ 2,450	154~ 165	24.5~ 25.7
'21/1/22~24 (採水なし)	50.5	2.5	3,638	0	2,215~ 2,894	142~ 162	計測 なし

3.3 冬季運転を想定したシミュレーション

汚泥流出リスクが高まる条件として、冬季の低水温や高MLSS濃度での運転を想定し、水質基準を満足する範囲での二次処理水量の上限値を探索した。

(1) 汚泥流出予測モデルの計算方法

モデルにおける界面高さや越流／清澄比の導出に必要な流量やMLSS濃度、SVIは日報値、水温は計測値を用いた。式(1)の汚泥沈降速度 V は、既往の報告³⁾から式(3)により算出し、式(2)の晴天時平均MLSS濃度 X_{ave} は、取得データの平均値(夏季・秋季:2,190 mg/L, 冬季:2,760 mg/L)を入力した。近似式に基づく二次処理水SS濃度の推定では、雨天時採水調査時の二次処理水量の範囲ではSS濃度の上昇が小さく、近似式を構築できなかった。そこで、汚泥濃度の上昇データが十分にあった他サイトでの近似式(式(4))を適用した⁴⁾。

$$V = 1.78 \cdot 10^7 \cdot X^{-1.46} \cdot T^{0.853} \cdot SVI^{-0.804} \quad (3)$$

$$SS_{ef} = 0.682 \cdot \exp(22.80 \cdot R) \quad (4)$$

V (m/h) : 汚泥沈降速度, T ($^{\circ}\text{C}$) : 水温, SVI (mL/g) : SVI, X (g/L) : 汚泥濃度, R (g/L) : 越流/清澄比, SS_{ef} (mg/L) : 二次処理水 SS 濃度である。

(2) シミュレーション

Table 2 に, シミュレーションで設定した二次処理水量を示す。設定条件は, 冬季における水量増大実験(3.4 節)を想定したものであり, 13~16 時は二次処理水量を増大させ, 他の時間帯は晴天時の平均的な二次処理水量 2,400 m^3/h 一定とした。13~16 時の水量は, 簡易処理放流発生時の通常範囲(二次処理水量 3,600 m^3/h , 簡易処理水量 1,000 m^3/h)である No.1 を基準に設定した。他の条件として, 返送比は管理設定値の 0.5 とした。MLSS 濃度は, 冬季の濃度範囲を基に構築した近似式(**Fig. 3**)により設定した。また, 水温は 2019 年 2 月(**Table 1**)の平均値 18.2 $^{\circ}\text{C}$ とした。

各条件の二次処理水 SS 濃度を 2.2 節の手順により試算し, 自主基準値 6 mg/L を満足する二次処理水量の最大値を選定した。なお, 自主基準値は 1 日平均であるが, 確実な基準達成のため, 本シミュレーションでは, 1 時間平均値が 6 mg/L 以下であることを条件とした。

Table 2 Treatment flow rate in simulation

No.	二次処理水量 (m^3/h)		簡易処理水量 (13:00~16:00)		備考 (最大二次処理水量について)
	13:00~16:00	それ以外の時間	想定量 (m^3/h)	削減率	
1	3,600	2,400	1,000	0%	・雨天時処理での通常範囲 ・冬季での実績最大
2	3,700	2,400	900	10%	—
3	3,800	2,400	800	20%	—
4	3,900	2,400	700	30%	—
5	4,000	2,400	600	40%	—
6	4,100	2,400	500	50%	・夏~秋季での実績最大

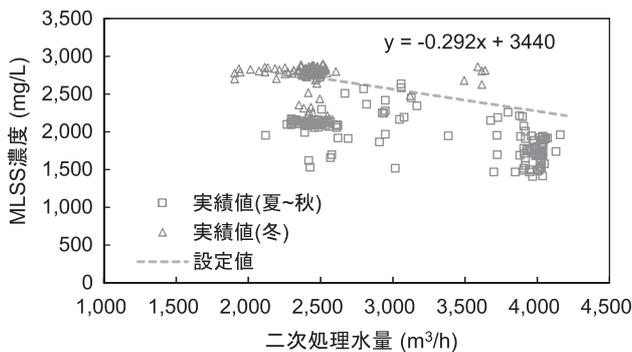


Fig. 3 MLSS in simulation

3.4 水量増大実験

(1) 実験方法

シミュレーション結果(4.3 節)より, **Table 2** の No.3 (二次処理水量の上限値 3,800 m^3/h)を実験条件として選定した。実験は, 雨天時実験の事前検討として晴天時(2021 年 2 月 19 日)での実施を考え, 13~16 時に対象系列の二次処理水量を増大させた。実験中は, 二次処理水 SS 濃度/濁度を計測した。

(2) 放流 SS 負荷の低減効果の試算

今回の実験は晴天時で実施したが, 汚泥流出推定モデルに基づく運転制御の効果を評価するため, 式(5)により, 雨天時を想定した放流 SS 負荷を試算した。式(5)において, 二次処理水量 Q , 簡易処理水量 Q_b , 簡易処理放流の発生時間 t_b は **Table 2** の条件とした。また, 二次処理水 SS 濃度 SS_{ef} は実験における平均値 1.48 mg/L とし, 簡易処理水 SS 濃度 SS_b は雨天時採水調査における一次処理水の平均濃度 43.9 mg/L を設定した。

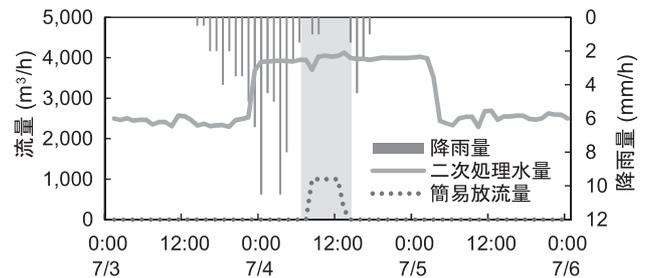
$$SS_L = (Q \cdot SS_{ef} \cdot (24 - t_b) + Q_b \cdot SS_b \cdot t_b) / 10^3 \quad (5)$$

SS_L (kg-SS/d) : 放流 SS 負荷, Q (m^3/h) : 二次処理水量, Q_b (m^3/h) : 簡易処理水量, SS_{ef} (mg/L) : 二次処理水 SS 濃度, SS_b (mg/L) : 簡易処理水(一次処理水) SS 濃度, t_b (h) : 簡易処理放流の発生時間である。

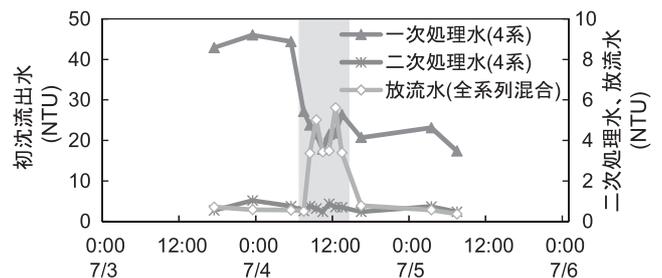
4. 実験結果

4.1 採水調査結果

Fig. 4 に 2020 年 7 月の調査結果を示す。**Fig. 4(a)** において, 7 月 3 日午後より続いた降雨の影響を受け,



(a) Rainfall, flow rate of secondary effluent and bypass discharge



(b) Turbidity in primary, secondary and final effluent

Fig. 4 Sampling survey results (2020/7/3-5)

3日23時に2,300 m³/hから4,000 m³/hまで二次処理水量が増大されたが、4日8~13時に簡易処理放流が発生した。Fig. 4(b)において、二次処理水濁度は平均0.7 NTU以下と良好に維持されていた。放流水では、簡易処理放流がない場合は平均0.6 NTUであったが、簡易処理放流の発生時には最大5.6 NTUと大きく上昇した。2020年10月の調査、またSSなど他の水質項目も同様の傾向が確認されており、簡易処理水量の低減の重要性を確認できた。なお、汚泥流出推定モデルの検証(4.2節)では、これらの雨天時調査結果を用いた。

4.2 冬季運転を想定したシミュレーション結果

雨天時採水調査での二次処理水SS濃度の実測値と、汚泥流出推定モデルによる推定値との比較をFig. 5に示す。平均絶対誤差が0.40 mg/Lと小さくなったことから、シミュレーションに適用可能と考えた。

3.3節で述べたシミュレーション結果として、二次処理水量と二次処理水SS濃度のそれぞれ最大値の関係をFig. 6に示す。自主基準値6 mg/L(点線)に対し、今回検討したケースでは、二次処理水量3,800 m³/hが自主基準値を満足する範囲での最大値となった。

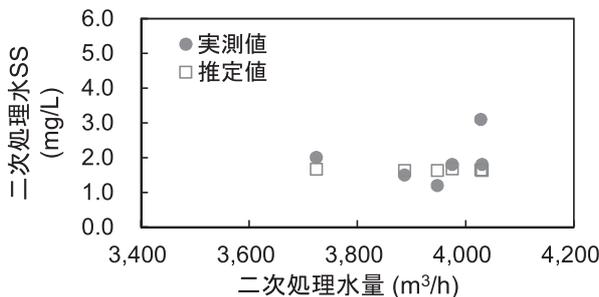


Fig. 5 Estimated and measured effluent SS in sampling surveys

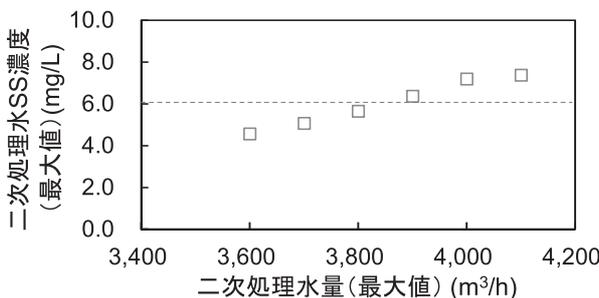
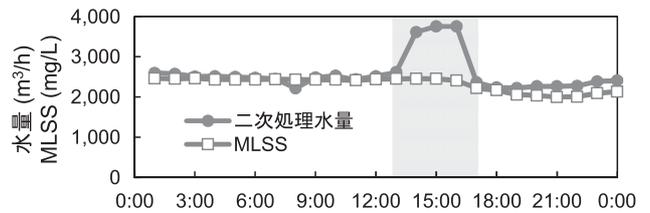


Fig. 6 Estimated effluent SS in simulation for winter treatment

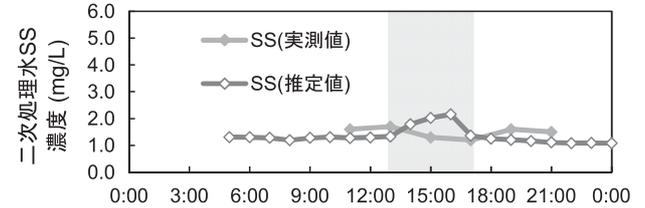
4.3 水量増大実験結果

(1) 二次処理水SS濃度の変動

水量増大実験において、二次処理水量とMLSS濃度の実測値をFig. 7(a)に示し、二次処理水SS濃度の実測値、推定値をFig. 7(b)に示す。なお、推定値は、MLSS濃度やSVIなど実験中の実測値に基づく



(a) Treatment flow rate and MLSS



(b) Measured and estimated secondary effluent SS

Fig. 7 Results of overloading experiment in treatment plant

計算結果である。二次処理水量の増大期間(13~16時)において汚泥界面の上昇は見られたが(図示せず)、二次処理水SS濃度は自主基準値の6 mg/Lを下回った(Fig. 7(b))。これより、汚泥流出を抑制しつつ、二次処理水量を冬季実績の3,600 m³/hから増大できる見通しを得た。なお、二次処理水SS濃度の推定値が実測値より大きくなったが、SVI計測値等に基づく汚泥沈降速度の推定値と比べ、凝集剤添加により実際の沈降速度は大きくなり、実測値が低くなったことが考えられる。モデル係数の調整などにより、推定精度の向上を図っていく。

(2) 簡易処理水量の低減による効果試算

汚泥流出推定モデルに基づく運転制御の適用効果を評価するため、雨天時処理の想定の下(3.4節(2)参照)、従来条件(二次処理水量の上限値3,600 m³/h; Table 2, No.1)と、実験条件(二次処理水量の上限値3,800 m³/h; Table 2, No.3)の放流SS負荷を試算した。その比較結果をFig. 8に示す。今回、簡易処理放流の発生時間が3時間と短い想定であったが、簡易処理水量20%減により、放流SS負荷を11%削減できる試算結果を得た。

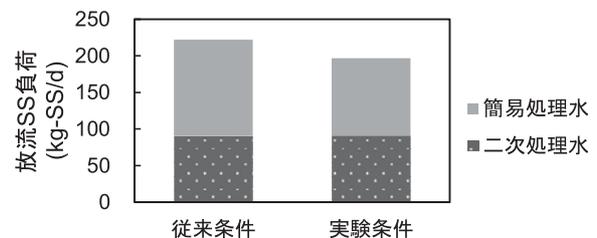


Fig. 8 Estimation of reduction in SS load from WWTP A

5. おわりに

本研究では、簡易処理放流に伴う雨天時放流負荷の

低減に向け、汚泥流出推定モデルに基づく運転制御手法の成立性を実施設での実験により検証した。

- (1) 雨天時採水調査における放流水濁度は、簡易処理放流により、発生前の 0.6 NTU から最大 5.6 NTU と大きく上昇した。
- (2) 冬季（低水温・高 MLSS）を対象に、汚泥流出推定モデルを用いたシミュレーションおよび実施設での検証実験の結果、3 時間と短い³が、SS に係る自主基準値 6 mg/L を満足しつつ、冬季実績（3,600 m³/h）を上回る二次処理水量（3,800 m³/h）での運転が可能であることを確認した。
- (3) この二次処理水量の増大は簡易処理水量 20% 減、放流 SS 負荷 11% 減に相当する試算結果を得た。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部：雨天時浸入水対策ガイドライン（案）（2020）
- 2) 西田佳記，圓佛伊智朗，西田光希，松葉祐亮，田中宏明：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，環境システム計測制御学会誌，Vol. 24, No. 2/3, pp. 14-21（2019）
- 3) 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）
- 4) 西田佳記，佐々木暁，細田周吾，藤井亮太：雨天時下水処理における汚泥流出リスク評価手法の検証（その 2），第 58 回下水道研究発表会講演集，発刊予定（2021）