

〈論文〉

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

松 葉 祐 亮¹⁾, 田 中 景 介¹⁾, 西 田 佳 記²⁾, 圓 佛 伊 智 朗²⁾
山 下 尚 之³⁾, 田 中 宏 明¹⁾

¹⁾ 京都大学大学院工学研究科

(〒520-0811 滋賀県大津市由美浜1-2 E-mail: matsuba.yuusuke.55w@st.kyoto-u.ac.jp)

²⁾ 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)

³⁾ 愛媛大学大学院農学研究科

(〒790-8566 愛媛県松山市樽味3-5-7 E-mail: yamashita.naoyuki.kt@ehime-u.ac.jp)

概 要

近年、合流式下水道や分流式下水道において、雨天時越流水の問題が取り上げられている。放流先が重要影響水域の場合、公衆衛生の観点から、従来の合流式対策以上に、雨天時越流水の病原微生物除去に関して、下水処理場での対策が必要であると考えられる。一方、下水道事業での財源不足や更新費用の発生などから、下水処理場の運転制御の様なソフトでの対策が望まれる。本研究では、実下水処理場において雨天時処理実態を調査するとともに、活性汚泥法を最大限に活用する運転制御を目指して、生物処理での指標微生物除去モデルを構築した。

キーワード：CSO, SSO, 雨天時活性汚泥処理, 指標微生物, 除去モデル

原稿受付 2018.5.31 原稿受理 2018.8.6

EICA: 23(2・3) 47-51

1. は じ め に

1.1 雨天時下水処理の課題

近年、合流式下水道における雨天時越流水の水質問題が注目され、2003年に合流式下水道の改善事業が義務化されたことにより、水環境への有機物や夾雑物の流出負荷、雨水吐での越流頻度は削減傾向にある¹⁾。しかしながら、合流吐口の越流頻度を下げることにより、越流していた雨天時下水が下水処理場に流入するため、下水道における貯留能力が十分とれない場合、雨天時の下水処理が重要となる。大腸菌群などの細菌に加えて、特に公衆衛生上、重要性が増しているウイルスなど消毒耐性の高い病原微生物に対する対策は未だ不十分である。これまで環境での衛生指標として使われてきた大腸菌群は、糞便指標として不適切であるとして大腸菌に変更となる見込みであるが、病原細菌の他、ノロウイルスなどに代表されるヒト腸管系ウイルスが、下水や下水処理水に存在し、病原細菌よりも感染リスクが高く、水浴などの水利用でヒト健康に影響を及ぼすこと、また指標細菌と下水処理や環境での挙動が異なり、特に塩素消毒には指標微生物よりもウイルスの方が耐性が高いことが明らかになっている。さらに処理が不十分な下水では、不活化にほとんど効果がないことから、放流先がレジャー利用や水道水源に利用される重要影響水域の場合、特に注意する必要

がある²⁾。

合流式下水道だけでなく、分流式下水道においても、雨水侵入による下水処理場への流入下水量の増大が報告されているが、これまでの下水処理計画では、考慮されていないため、雨天時越流水が懸念されている。また、雨天時における分流式下水処理場での、病原微生物やウイルスの調査事例はほとんどない。分流式からの雨天時越流水においても、放流水域が重要影響水³⁾の場合、公衆衛生上の視点から、病原微生物に関して極めて注意が必要である。

一方で、我が国は、人口減少と高齢化による財政支出の抑制や、下水道などの社会インフラの老朽化に伴う更新費用の増大などから、このような雨天時の下水道での改善対策への財源確保が困難であるため、より低コストなソフト対策が求められる。そこで本研究では、既存の下水処理機能を最大限に活用し、雨天時における病原微生物の流出量を削減するための下水処理制御技術の構築を最終目標に、1) 実下水処理場における雨天時処理の実態調査、2) 回分実験による指標微生物の除去特性の把握、3) 生物処理における指標微生物の除去モデルの構築および予測精度の評価を実施した。

2. 方 法

2.1 調査対象の下水処理場について

調査対象とした A 下水処理場は、分合流区域が混在した排水区であったが、合流式下水道改善事業として、分流式と合流式下水道の分離、雨水貯留施設および雨天時越流水に対する高速凝集沈殿処理施設の設置が実施された。しかし、分合流の分離が困難な合流式区域が一部残っている。そのため雨天時において、合流下水が分流污水管に流入するとともに、他にも分流式污水管に、污水管の老朽化や污水管と雨水管の誤接などが原因となり雨水が侵入するため、下水処理場には計画処理能力を超える下水が流入している。この雨天時下水は全量一次処理され、固液分離が可能な水量までは高級処理が行われるが、これを超える下水は最初沈殿池から反応槽・最終沈殿池をバイパスし、高級処理水や高速凝集沈殿処理水とともに塩素消毒された後放流されている。本研究では、高級処理の 1 系列として凝集剤添加標準活性汚泥法が使われている処理系（以下、I 系）において、最初沈殿池越流水（以下、初沈越流水）と最終沈殿池越流水（以下、終沈越流水）の採水調査を行った。終沈越流水に関しては、簡易処理放流水が混合する前の地点で採水している。Fig. 1 に、A 下水処理場の処理フローと、採水地点（▼）を示す。また Fig. 1 の破線は、雨天時に発生しうるフローを示している。

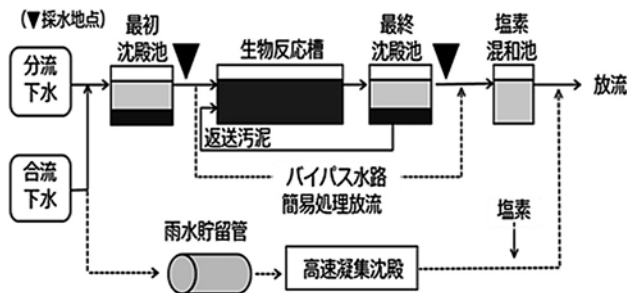


Fig. 1 Flow chart of A sewage treatment plant

2.2 調査方法と測定項目

採水方法は、上記の各採水地点に自動採水機 (ISCO6712) を設置し、採水量 1 試料当たり 500~1,000 mL で、1~2 時間間隔でスポット採水を行った。測定項目として濁度、電気伝導度（以下、EC）、大腸菌、F 特異大腸菌ファージ⁴⁾（以下、F-phage）を測定した。濁度の測定はポータブル濁度計 (HACH) を用いた。EC の測定はコンパクト電気伝導率計 LAQUAtwin EC-33B (HORIBA) を用いた。大腸菌は X-MG 寒天培地を用いた平板培養法、F-phage はブラック法⁵⁾を用いた。なお、処理場調査は 2017 年 10 月 21~23 日に実施した。

2.3 活性汚泥を用いた指標微生物除去の回分実験

本研究では、近年、環境基準が大腸菌群から大腸菌へと移行する兆候や、ヒト腸管系ウイルスなどの指標候補として注目されている F-phage に着目し、大腸菌及び F-phage を指標微生物として選定した。指標微生物の好気状態における除去速度式を構築するため、回分実験を実施した。回分実験では、A 下水処理場で採取した返送汚泥と初沈越流水を用い、活性汚泥濃度 (MLSS) と接触時間をパラメータとし、指標微生物の除去特性を評価した。Fig. 2 に示す実験フローのように、返送汚泥と初沈越流水を晴天時に採水し、その後直ちに MLSS 濃度が 500 mg/L から 2,000 mg/L 程度の範囲となるように適量調整 (Table 1 参照)、回分試験を開始した。本実験では、標準活性汚泥法を対象とした微生物濃度の変化を把握するため、1 時間間隔で採水した試料を 3,000 rpm, 1 min の条件で遠心分離を行い、回収した上澄み液に含まれる指標微生物を分析に供した。実験条件は Table 1 に示す。また Fig. 3 は、回分実験時に実測した、Run1~4 における MLSS の平均濃度を示している。



Fig. 2 Flow chart of batch experiment

Table 1 Experimental conditions

Run No.	初沈越流量	返送汚泥量	MLSS (mg/L)	備考
Run 1	9,000 mL	6,000 mL	目標 MLSS 2000 mg/L	温度条件: 25℃前後一定 曝気条件: 風量一定 (過曝気)
Run 2	9,000 mL	6,000 mL	目標 MLSS 2000 mg/L (Run1 と同条件)	温度条件: 25℃前後一定 曝気条件: 風量一定 (過曝気)
Run 3	11,250 mL	3,725 mL	目標 MLSS 1500 mg/L	温度条件: 25℃前後一定 曝気条件: 風量一定 (過曝気)
Run 4	9,000 mL	1,000 mL	目標 MLSS 500 mg/L	温度条件: 25℃前後一定 曝気条件: 風量一定 (過曝気)

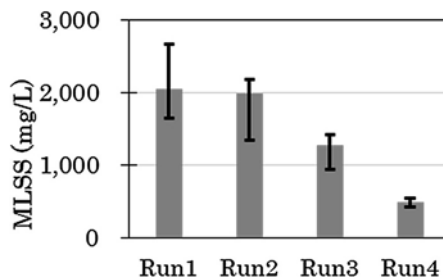


Fig. 3 Concentration of MLSS in batch experiment

2.4 指標微生物除去モデルの構築と予測結果の検証

下水が連続して流入する生物処理に対し、回分実験に基づき構築した除去速度式を用いて消長を予測する

には、滞留時間の推定が必要である。ここでは、初沈越流水は、反応槽流入後に直ちに返送汚泥と混合され、そのあと押し出し流れを想定して滞留時間を算出した。押し出し流れはある時間に反応槽に流入した水を1つの水塊とし、槽内のその他の水塊とは拡散、混合しないものとし、槽内を進んで行くと考え。A下水処理場における槽容量、反応槽流入水量、返送汚泥量、MLSSのデータを用いて、滞留時間を推定した。A下水処理場におけるI系の返送汚泥量は470~500 m³/hr、生物反応槽(以下、反応槽)は池数4で、1池の容量は1,988 m³、返送汚泥量はほぼ一定の条件で運転していた。計算間隔は10分に設定し、A下水処理場のデータ(反応槽流入水量、返送汚泥量、MLSS)や指標微生物の流入水濃度は1時間間隔のデータであるため、線形補完を用いて10分間隔のデータを作成し、計算に用いた。また予測結果の検証では、2017年10月21~23日に実施した調査時の実測値と比較した。

3. 結果及び考察

3.1 下水処理場での調査結果

2017年10月21~23日に行った採水調査での、初沈越流水及び終沈越流水における大腸菌の濃度(それぞれ●と○)、反応槽流入水量(実線)の経時変化をFig.4に示す。図の棒グラフは降雨強度(mm/h)、背景着色部は簡易処理放流(初沈越流水の未処理放流)が発生した期間を示している。初沈越流水中の大腸菌濃度は大きく変化していないが、反応槽流入水量上昇時に終沈越流水の大腸菌濃度が高くなる傾向が見いだされた。

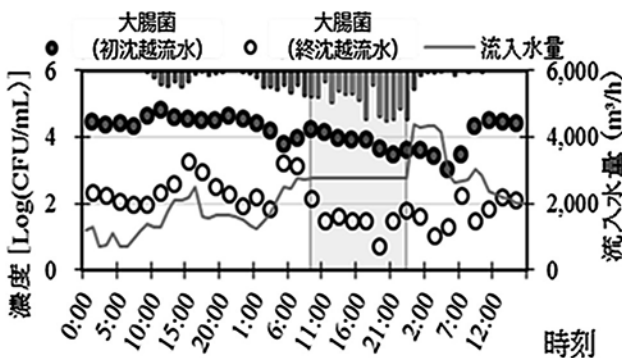


Fig. 4 Time course of the concentration of *E. coli* and the amount of inflow water

3.2 回分実験結果と除去モデル

回分実験から得られた、指標微生物の経時変化の例をFig.5に示す。指標微生物は、MLSS濃度が高いTable 1のRun1, Run2では、濃度が大きく減少し、次いでMLSS濃度が中程度のRun3では、緩やかな濃

度の低下がみられた。最後にMLSS濃度が低いRun4においては、濃度低下は極めて小さくなったことから、指標微生物の除去速度はMLSSがある値を下回ると極めて小さくなると考えられる。この回分実験から、指標微生物が時間とともに濃度が減少し、MLSSが高いほど除去効果大きい結果が得られ、MLSSと滞留時間がモデルの主な因子となることがわかった。また、Run1~Run3では、Fig.5の縦軸に示した大腸菌濃度でおよそ3.5 Log(約3,000 CFU/mL)の箇所、F-phage濃度でおよそ2.0 Log(約100 PFU/mL)の箇所を境界として、異なる2パターンの減少傾向が得られた。

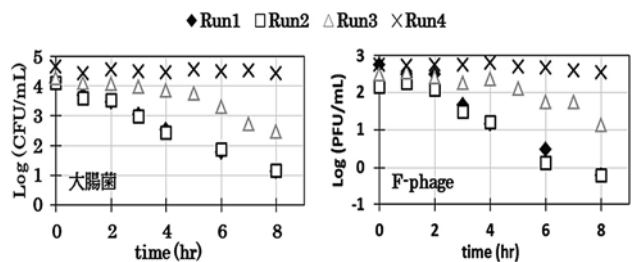


Fig. 5 Time change of *E. coli* and F-phage

この回分実験から、単位MLSS当たり的大腸菌の除去速度とその微生物濃度の関係を両対数に取り、プロットした結果をFig.6に示す。ここでの除去速度とは、単位時間・単位MLSS濃度あたりの上澄み液中の微生物濃度の変化量である。つまり、単位活性汚泥量当りに上澄み液中の指標微生物が活性汚泥へ吸着あるいは不活化⁶⁾する対数除去速度を表している。Run4は、ほとんど上澄み液中の指標微生物濃度に変化がなかったため、Fig.6にはプロットしていない。Fig.6について横軸には、指標微生物の濃度Log(CFU or PFU/mL)を対数軸で示し、縦軸に微生物の除去速度を表す対数除去速度Log(CFU or PFU/gss/hr)を示している。3.2節で述べた通り、異なる2パターンの減少傾向が見られた為、各々近似直線を示した。Fig.6よりプロットが近似直線と概ね一致し、決定係数が大腸菌ではR²=0.97(破線)、0.91(直線)と強い相関関係が得られた。またF-phageにおいてもR²=0.98(破線)、0.73(直線)と

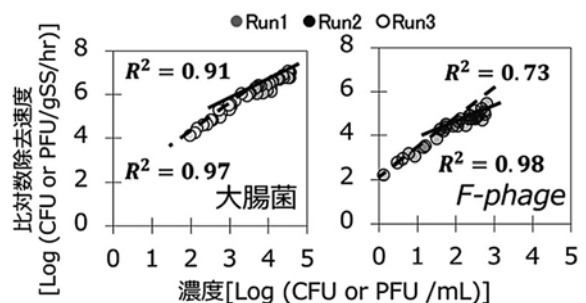


Fig. 6 Relationship between removal rate and concentration of *E. coli* and F-phage by experiment

相関関係が得られた。この結果から、上澄み液中の指標微生物の除去速度は、MLSS 濃度と指標微生物濃度に強く影響を受けることが明らかになった。除去速度と微生物濃度に相関がみられたことから、経験モデルとして、式 (1) を作成した。

$$\text{Log} \left[\frac{1}{M} \times \frac{dC}{dt} \right] = \alpha \times \text{Log} C + \beta \quad \text{式 (1)}$$

C : 大腸菌 (F-phage) 濃度
(CFU/mL, PFU/mL)

t : 時間 (hr)

M : MLSS 濃度 (mg/L)

α, β : フィッティング定数 (-)

式 (1) の左辺は指標微生物の除去速度の対数値であり、指標微生物濃度の対数値と線形関係があることを示している。またフィッティング定数 α, β に関しては、3.2 節で述べた通り減少傾向が 2 パターンに分かれることから、2 段階に分けて実験値と予測値が合うように定数 α, β をフィッティングした。Fig. 6 より、大腸菌は 5.7 Log (比対数除去速度) を境界値として、第一段階 $\alpha=0.916, \beta=2.8$, 第二段階 $\alpha=1.35, \beta=1.7$ を設定した。F-phage は 5.0 Log (比対数除去速度) を境界値として、第一段階 $\alpha=0.718, \beta=3.101$, 第二段階 $\alpha=1.314, \beta=2.3$ を設定した。

3.3 指標微生物除去モデルの構築と予測結果の検証

式 (1) と押し出し流れ式を用いた処理水の濃度予測値と 2017 年 10 月 21~23 日の調査日における初沈越流水濃度、反応槽への流入下水量をもとに、処理水の大腸菌と F-phage 予測値を算出し、実測値と比較した。この結果を Fig. 7 に示す。大腸菌と F-phage とともに、降雨開始後 24 時間程度の前半では、比較的予測値は実測値と一致する傾向にあったが、日報で簡易処理放流量が発生したとされる時間付近で、予測値は実測値より大きくなった。簡易処理放流量は A 下水処理場のデータを参照して算出した推定値であるため、実際の流量とは乖離していた可能性がある。また活性

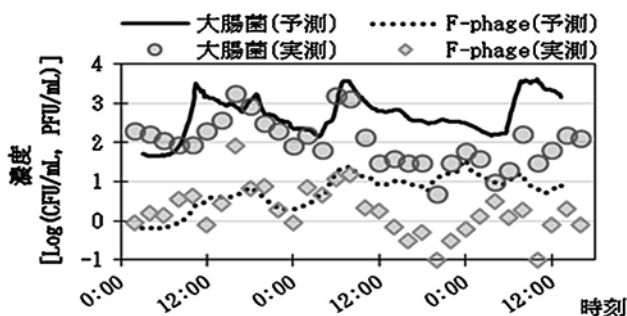


Fig. 7 Comparison between predicted and measured values of *E. coli* and F-phage

汚泥の回分実験では、長期間の活性汚泥と指標微生物の接触時間を取っていない。今後、さらに精度を向上させるためには流量の精査や凝集剤の影響、汚泥の性状の変化などの因子をモデルに組み込む検討が必要と考えられる。

4. 結 論

本研究では、既存の下水処理機能を最大限に活用し、雨天時における病原微生物の流出量を削減するための下水処理制御技術の構築を最終目標に、実下水処理場における雨天時処理の実態調査を行った。この結果、反応槽流入水量上昇時に終沈越流水の大腸菌濃度が高くなる傾向が見いだされた。これは反応槽への下水流入量増加に伴い、反応槽内での滞留時間及び MLSS が減少したためと考えられる。

次に、雨天時下水処理における指標微生物の処理水質の予測を行うために、実下水処理場の活性汚泥を用いて、最初沈殿池越流水に含まれる指標微生物 (大腸菌, F-phage) と接触させる回分実験を行った。この結果、MLSS の上澄みに含まれる指標微生物の単位 MLSS 当り、単位時間当たり除去される対数除去速度は、指標微生物濃度の対数と線形関係が認められた。そこから経験モデルを作成し、係数を実験値に合わせてフィッティングした。実測した下水処理場での運転にこのモデルを適用した結果、おおむね最終沈殿池での指標微生物の濃度変動を捉えることができた。以上のことから、雨天時下水処理において、最終沈殿池から越流する指標微生物濃度を概ね予測可能であることが示唆された。

はじめに述べたように、既存の下水処理機能を最大限に活用して、病原微生物を制御するために、水量・水質に応じた運転管理を消毒も含めて下水処理を最適化することが必要である。もし、流入下水、最初沈殿池越流水の指標微生物濃度の水質予測がオンラインで行えれば、次に生物反応槽での最適運転方法 (流入水量、返送汚泥濃度および返送量、流入点の変更など) により、生物処理を可能な限り行う場合、最終沈殿池越流水の指標微生物濃度がどのように変化するかを予測できる可能性がある。大腸菌や F-phage の直接的なオンラインモニタリングは現時点では困難であるが、下水処理場での流入下水量 Q 、電気伝導率 C_{EC} 、濁質 C_{Tb} はオンラインモニタリングが可能であり、 Q, C_{EC}, C_{Tb} と下水中の大腸菌の濃度 C_{Coi} や F-phage の濃度 C_{PPH} は統計的に相関が認められている⁷⁾。さらに、今後データをさらに積み重ね、ディープラーニングなどを行うことで、流入水の指標微生物濃度についてもオンライン測定に近い精度を持たせたいと考えている。

これらの成果および今後の研究から、簡易処理水と

最適に運転した生物処理水が混合した後の指標微生物濃度が予測できることで、放流目標とする指標微生物濃度の設定がされる場合に、塩素あるいは代替方法での消毒効果を考えた計画・運転に今後利用できると期待される。今後、病原微生物除去に適した雨天時の活性汚泥法の最適運転と消毒方法の計画・管理に役立てるための研究を継続する予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP, 合流式下水道の改善 (2010)
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000142.html, 2018/06/06 最終アクセス
- 2) 田中宏明, 「Swimmable」な水環境管理目標の改定と課題, 環境衛生工学研究, 32(2) 3-8(2018)
- 3) 国土交通省 重要影響水域の基本的な考え方 資料 3-6
http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/info/cso/cso011109/cso336.pdf, 2018/06/06 最終アクセス
- 4) Mooijman, Journal of biological Methods. 103 (2): 129-136 (2002)
- 5) 神子直之, 大垣真一郎, FRNA フェージの増殖耐性とウイルス指標としての有効性 水環境学会誌, 16(10), 723-731
- 6) 金台東, 本多裕之, 白神直弘, 矢野一好, & 海野肇, 活性汚泥混合液中でのウイルス感染価の低減について. 水環境学会誌, 16(5), 339-345. (1993)
- 7) 田中景介, 山下尚之, 田中宏明, 雨天時の下水処理場における病原微生物除去に関する基礎的検討, 第51回日本水環境学会年会講演集, 180-181

Basic Study on Control of Indicator Microorganisms in Sewage Treatment Plant in Rainy Weather

Yusuke Matsuba^{1)†}, Keisuke Tanaka¹⁾, Yoshinori Nishida²⁾, Ichiro Enbutsu²⁾

Naoyuki Yamashita³⁾ and Hiroaki Tanaka¹⁾

¹⁾ Kyoto University Graduate School of Engineering

²⁾ Hitachi Ltd. Research & Development Group

³⁾ Ehime University Graduate School of Agriculture

† Correspondence should be addressed to Yusuke Matsuba :

(1-2 Yumihama, Otsu, 520-0811 Japan

E-mail : matsuba.yuusuke.55w@st.kyoto-u.ac.jp)

Abstract

In recent years, the problem of untreated wastewater discharge in rainy weather has been taken up in combined sewers and sanitary sewers. If the release destination is an important influential waters, it is considered necessary to take measures at the sewage treatment plant concerning the removal of pathogenic microorganisms of untreated discharged water at the time of rain from the viewpoint of ensuring public health. Meanwhile, soft measures such as operation control of sewage treatment plants are desired, due to insufficient financial resources in the sewerage project and occurrence of renewal costs. In this research, we investigated the actual condition of rainy weather treatment at the actual sewage treatment plant and constructed a removal model of the indicator microorganisms in the biological treatment with the aim of controlling the operation to make maximum use of the activated sludge method.

Key words : combined sewer overflows, sanitary sewer overflows, wet weather treatment, indicator microorganisms, removal model