

# AIを活用した画像分析による 下水処理活性汚泥の細菌吸着能力診断技術の開発

北海道大学 大学院工学研究院環境工学部門

中屋 佑紀

## 1. はじめに

SDGs の目標 6 は「安全できれいな水とトイレを世界中に」であるが、WHO によれば 2022 年においていまだに世界で約 20 億人が糞便で汚染された飲料水を利用している[1]。糞便には様々な病原体が混入するリスクが高いため、糞便で汚染された水を飲むと下痢症や、コレラや赤痢などの感染症にかかってしまう。したがって人口密集地（都市）の下水処理が不十分となると、放流先の水環境や水源水質を損ね人々の健康を脅かす。一方我が国の下水道事業は現在、職員の減少（ヒト）、設備の老朽化（モノ）、人口減少による減収（カネ）の問題に直面し、今後も事業持続のための様々な取り組みが必要になると考えられる。これらの問題により処理が不十分となると、水環境が汚染され健全な水循環が損なわれる。

これに対応する新技術の開発として、特に人工知能（AI）活用に関しては、2022 年に国土交通省が「AI による下水処理場運転操作 DX（デジタルフォーメーション）検討会」を設置するなど AI 活用の環境整備・DX 推進が進められている。これまで報告例のある AI 技術には、処理場管制室に表示されるコンベンショナルな物理・化学パラメーターを高頻度にデータ化し、ビッグデータを解析するもの[2]や、下水処理工程に多くのセンサーを仕込みリアルタイムモニタリングを行うもの[3]がある。これらは、対象処理場の規模や管制室性能によっては追加のセンサーやデータ解析の仕様を変える必要がある点で導入・維持のコストがかかると推察される。そこで著者らは、光学顕微鏡に比べて安価なデジタル顕微鏡やスマートフォンのカメラ機能により取得した活性汚泥の形状や動きを AI を活用して簡易迅速に分析することに取り組んできた[4,5,6]。導入初期は、画像を取得するだけでなく実際の処理能力を測定して画像のデータに紐づける「教師データ」の作成が必要となるが、その後は画像を取得するだけで汚泥の性状を迅速に診断できる。実際は十分なコストをかけて処理場を改善するに越したことはない。しかし、著者らは予算や人員の制約で大規模な DX がすぐにできない地方小規模処理場や発展途上国を見据え、低コスト技術の開発を目指している。著者らの研究グループはデジタル顕微鏡と自動ステージを組み合わせた活性汚泥画像自動取得システムを独自に有し、これにより取得した大量の静止画を使って AI により汚泥の類似度を見分けることに成功している[4]。

下水処理に求められる能力は、下水からの懸濁粒子（SS）、易分解性溶存有機物（BOD 成分など）、細菌の除去である。一方で、デジタル顕微鏡やスマートフォンにより低コストで取得できる画像や動画の情報には空間分解能の限界がある。そのため、活性汚泥法において有機物成分の分解・硝化・脱窒などの生物化学的な能力に関係する細菌の特定や監視にはこれらの情報を使うことができないと考えられる。しかしながら、汚泥の全体的な形状や、デジタル顕微鏡で観測可能なサイズである糸状菌の様態は、SS や細菌の活性汚泥への吸着除去や、汚泥の沈降性、脱水性などといった物理的な汚泥性能に影響を与えると考えられる[6]。しかし、これらの物理的性能と画像で簡易に取得可能な情報との関係性は未知の部分が多い。活性汚泥による SS や細菌の捕捉メカニズムとその条件を解明し、一方でフロック形状を画像解析により定

量化し、それらを組み合わせて活性汚泥の物理的性能を向上・維持し簡易に性能診断する技術を開発することができれば、下水処理の効率化に貢献できる。そこで本研究では、画像でフロックの形状を簡易に定量取得し、実際の物理的な性能として細菌の付着能力と形状との関係性を模擬実験により明らかにし、細菌の吸着除去能力の多寡や変化を低コストで診断することができる手法を開発することを最終的な目的とする。

## 2. 方法

活性汚泥は、北海道の B 処理場、E 処理場（標準活性汚泥法）および H 処理場（オキシデーションディッチ法）から採取した[4,5,6,7]。細菌除去実験は、培養された大腸菌 (*E. coli*) および処理場の活性汚泥を、B 処理場の初沈出水または終沈出水の濾液に再懸濁し、それらを同じ活性汚泥浮遊物質 (MLSS) 濃度で攪拌器によって混合するバッチ試験により実施した。また、B および H 処理場の活性汚泥を同じ MLSS 濃度で 3:1、1:1、1:3 で混合した活性汚泥混合サンプルについても同様の細菌除去実験を行った。細菌除去実験開始から 1、3、および 5 時間後に攪拌器を一時的に停止し、活性汚泥を沈降させた。上清中の大腸菌の濃度を、標準寒天培地による平板希釈法によって測定した[7]。

さらに、活性汚泥 50 $\mu$  を乗せたプレパラート（試料部分が 18 mm $\times$ 18 mm）を 154 枚に分割取得した静止画像を卓上デジタル顕微鏡、自動 XY ステージ、および制御ソフトウェアを用いて撮影し、先行研究[5,6]で報告されている方法により活性汚泥形状を定量した。周長対面積比（Perimeter-to-area ratio: PAR）は、すべての活性汚泥フロックについて、総周長（Perimeter）を総面積（Area）で割って計算した。本法では活性汚泥の二次元投影のみが画像から得られるので、PAR は比表面積（表面積対体積比）の代替パラメーターとして使用した。B および E 処理場の活性汚泥については、凝集フロック確率スコア  $P_{AF}$ （AF は Aggregated floc すなわち凝集フロックを意味する）を求めた。これは、凝集した活性汚泥と分散した活性汚泥をそれぞれ 1、0 とラベルした訓練データを Inception v3 モデルに学習させて作成した画像分類機[4]が、テストデータの画像がどちらに類似しているかの値を 1 から 0 の値で出力した値である。

## 3. 結果と考察

B および E 処理場の代表的な活性汚泥画像を図 1 に示す。画像分析の結果、E 処理場の PAR が 40 mm/mm<sup>2</sup>であった。それは B 処理場の PAR（17 mm/mm<sup>2</sup>）よりも大きかった。B および E 処理場から採取した活性汚泥の  $P_{AF}$  の値は、それぞれ 0.89 および 0.34 であった。これは、B 処理場の活性汚泥が凝集型で、E 処理場の活性汚泥が分散型であることを意味する。細菌除去実験の結果、活性汚泥に付着した大腸菌の量の経時変化は図 2 のようになった。これは、E 処理場の活性汚泥が B 処理場よりも優れた細菌除去性能を有することを示唆している。本研究での画像分類器を使用することにより、活性汚泥が凝集しているか分散しているかだけでなく、細菌が付着しにくい（凝集型）か付着しやすい（分散型）かを診断することができる可能性がある。

B 処理場と H 処理場およびそれらの混合活性汚泥について、細菌除去試験で活性汚泥に付着せず上清中に残存した大腸菌の濃度の経時的な減少を図 3 に示す。H 処理場の活性汚泥は、B 処理場よりも良好な細菌除去能を示した。さらに、異なる PAR と大腸菌除去能を有する活

性汚泥を混合した場合、混合活性汚泥での除去率は、元のそれぞれの活性汚泥単独での除去率の間中であることが示唆された。B 処理場と H 処理場の活性汚泥の平均直径 ( $D_{eq}$ ) [5,6]は、それぞれ 0.072 mm と 0.071 mm であった。しかし、この実験における B 処理場と H 処理場の活性汚泥の PAR は、それぞれ 37 mm/mm<sup>2</sup> と 47 mm/mm<sup>2</sup> であった。したがって、より大きな PAR を有する活性汚泥は、より多くの細菌を上清からより迅速に除去できると考えられる。

我が国では、下水処理場の処理水放流先の水環境を保全するため、放流水中の大腸菌濃度を 800 CFU/mL 以下とする排水基準が設定されているが、測定の頻度は少なくとも年 1 回とされている。著者らが本研究で対象とした処理場の職員に確認したところ、処理水中の大腸菌濃度が基準より十分に低い処理場では、処理水を消毒せずに放流することがある。一方、アメリカ合衆国の環境保護庁 (EPA) は、消毒による明らかな利益がない場合には消毒は必要ないとしている [8]。しかし、消毒の必要性を決定するためには、より頻繁な分析が必要とされるかもしれない。そのため、大腸菌濃度の結果を得るのに 24 時間かかる寒天培地での計測法に代わる迅速で簡単な大腸菌の分析方法が提案されている [9,10,11]。一方、本研究における活性汚泥の画像撮影と分析は 20 分以内に完了した [4,5]。今後、実際の活性汚泥プロセスにおける細菌除去率や能力と画像解析結果との関係をより詳細に調査する。活性汚泥ブロックの形状から細菌除去能力を推定できれば、画像による推定に基づいて処理水の消毒の必要性を診断し、過剰な消毒設備や薬品のコストを削減し、塩素処理による環境負荷を低減できることが期待される。

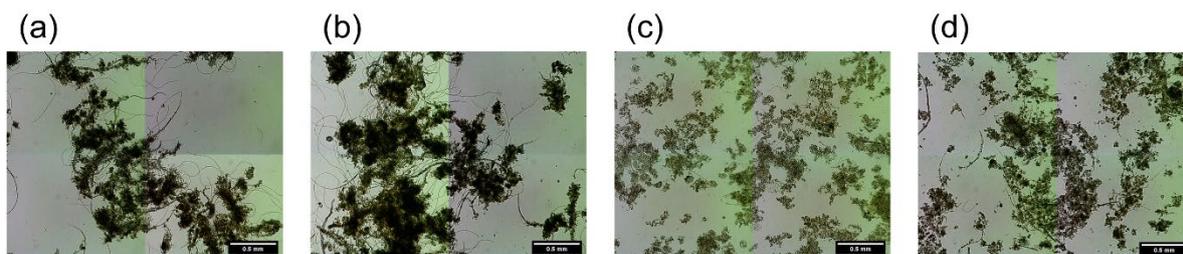


図 1. (a)(b)B 処理場および(c)(d)E 処理場の代表的な活性汚泥画像。それぞれ、4 枚の顕微鏡画像を結合したものである。

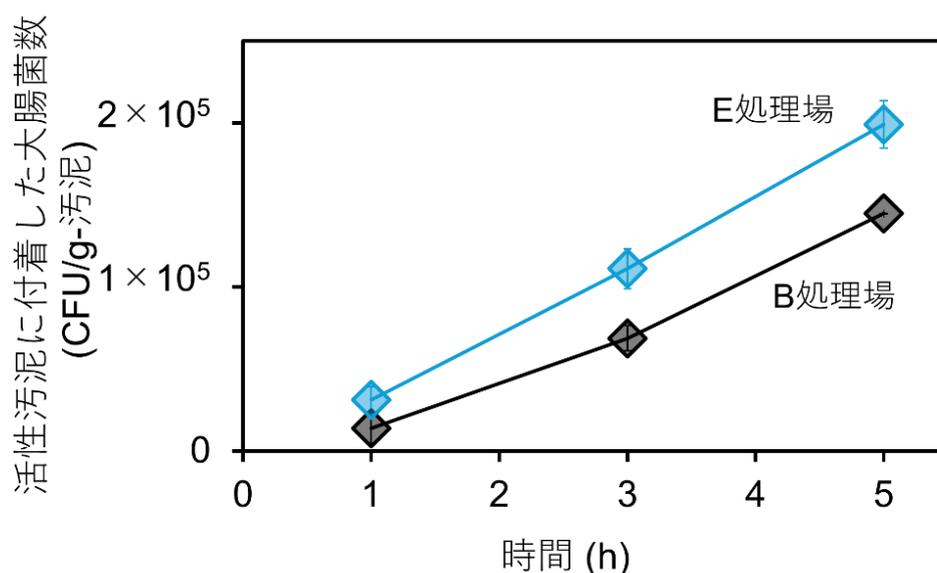


図 2. 細菌除去実験で B 処理場および E 処理場の活性汚泥に付着した大腸菌の量の経時変化。

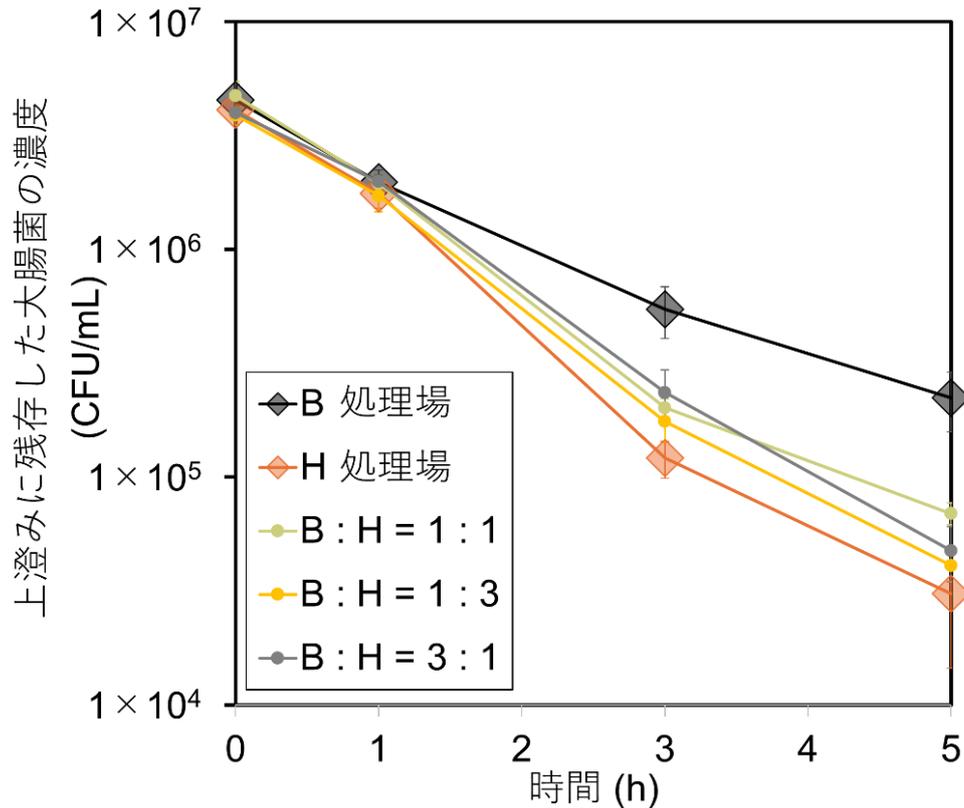


図 3. B 処理場および H 処理場の活性汚泥とそれらの混合活性での細菌除去実験において活性汚泥に付着せずに上澄に残存した大腸菌の量の経時変化。

#### 4. まとめ

活性汚泥の拡大画像に対する深層学習に基づく画像分類器と形状の定量化手法を用いて活性汚泥の細菌付着能力を推定することを目指し、活性汚泥への大腸菌付着のバッチ試験を行い、活性汚泥拡大画像を解析した。より大きな周長対面積比（PAR）すなわち比表面積を有する、より小さい、より分散した活性汚泥は、より多くの大腸菌をより迅速に除去できると考えられた。このような汚泥については、活性汚泥が凝集しているか分散しているかを画像診断する分類器が、細菌付着能力の推定にも使用できる可能性があることが分かった。本手法は、過剰な消毒設備とコストを節約し、塩素処理の環境への影響を低減するために、画像による推定に基づいて下水処理場の放流水の消毒の要否を診断することに利用できる可能性がある。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。また、採水にご協力いただいた処理場関係者および北海道大学大学院工学研究院の谷内翔技術職員に御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] World Health Organization “Drinking-water” 2023 年 9 月 13 日 <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> (アクセス日 : 2025 年 1 月 28 日)
- [2] Newhart, K. B., Holloway, R. W., Hering, A. S., Cath, T. Y. 2019 Data-driven performance analyses of wastewater treatment plants: A review. *Water Research* 157, 498–513.
- [3] 国土交通省 「下水道革新的技術実証事業(B-DASH プロジェクト)技術情報資料」令和 4 年度版 <https://www.nilim.go.jp/lab/eag/bdash/bdash.html> (アクセス日 : 2025 年 1 月 28 日)
- [4] Satoh, H., Kashimoto, Y., Takahashi, N., Tsujimura, T. 2021 Deep learning-based morphology classification of activated sludge flocs in wastewater treatment plants. *Environmental Science: Water Research & Technology* 7, 298–305.
- [5] Nakaya, Y., Jia, J., Satoh, H. 2023 Tracing morphological characteristics of activated sludge flocs by using a digital microscope and their effects on sludge dewatering and settling. *Environmental Technology* 45, 4042–4052.
- [6] Kaushalya, U., Nakaya, Y., Ishizaki, S., Sugino, K., Hirano, R., Satoh, H. 2025 Quantification of morphological characteristics and filamentous bacteria in activated sludge flocs through quantitative image analysis techniques incorporating image-processing software and U-Net deep-learning framework. *Journal of Water Process Engineering* 70, 107053.
- [7] Nakaya, Y., Nagahashi, N., Hirano, R., Ishizuka, Y., Satoh, H. 2024 Physicochemical parameters affecting the adhesion of ciprofloxacin-resistant *Escherichia coli* to activated sludge. *Water Science and Technology* 89(9), 2457–2467.
- [8] Stover, E., Haas, C., Rakness, K., Scheible, O. 1986 DESIGN MANUAL: MUNICIPAL WASTEWATER DISINFECTION. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/625/1-86/021 (NTIS PB98-126618).
- [9] Satoh, H., Kikuchi, K., Katayose, Y., Tsuda, S., Hirano, R., Hirakata, Y., Kitajima, M., Ishii, S., Oshiki, M., Hatamoto, M., Takahashi, M., Okabe, S. 2020 Simple and reliable enumeration of *Escherichia coli* concentrations in wastewater samples by measuring  $\beta$ -d-glucuronidase (GUS) activities via a microplate reader. *Science of the Total Environment* 715, 136928.
- [10] Satoh, H., Nakajima, M., Hirano, R., Nakaya, Y. 2022 Highly sensitive and homogeneous detection of unamplified RNA based on the light scattering properties of gold nanoparticle probes. *Biosensors and Bioelectronics: X* 12, 100249.
- [11] Shayan, M. N. M., Tanaka, Y., Hirano, R., Nakaya, Y., Satoh, H. 2023 A simple and rapid method for detecting fecal pollution in urban rivers by measuring the intrinsic  $\beta$ -D-glucuronidase activity of *Escherichia coli*. *Water Research* 246, 120689.