

中小規模下水処理場の未規制化学物質の挙動把握

平山孝浩・鈴木裕識・小森行也・山下洋正

1. はじめに

公共用水域の水質汚濁に係る環境基準においては、生物化学的酸素要求量(BOD)・化学的酸素要求量(COD)等が定められているが、これ以外に、水生生物保全に係る要監視項目^{注)}として、クロロホルム、フェノール、ホルムアルデヒド、4-*t*-オクチルフェノール、アニリン、2,4-ジクロロフェノールの6物質が定められ、指針値が設定されている。このような水質規制の対象となっていない化学物質(未規制化学物質)の中には、下水処理水に残存したまま水環境中に排出される物質も存在すると想定される。

下水処理システムは有機物、窒素、リン等を処理するために設置されており、化学物質除去が直接の目的ではないが、下水処理過程における吸着・沈降や生物分解などの作用により、流入下水中の化学物質濃度が低減され水環境中における化学物質のリスク低減に貢献できる可能性がある。

要監視項目等の未規制化学物質の水生生物への影響に関して、現時点で下水処理場放流水が規制を受けることはないが、将来の環境基準化、排水規制化の可能性も踏まえ、下水処理場での挙動及び除去特性把握が重要である。しかし、我が国の下水処理場、特に小規模下水処理場(おおよそ処理水量5千m³/d未満)では、これら未規制化学物質の挙動及び除去特性についてのデータが少ない。

このため、まずスクリーニング的な先行調査¹⁾として、小規模下水処理場で採用の多いオキシデーションディッチ法(浮遊生物処理の一つ)及び嫌気好気ろ床法(付着生物処理の一つ)それぞれ3ヶ所並びに中規模以上の処理場で最も一般的な標準活性汚泥法4ヶ所の計10ヶ所の下水処理場において、要監視項目6物質の流入状況等を調査した結果、フェノールだけが流入下水から公共用水

域での指針値を超える濃度で検出された。

フェノールは、化学物質審査規制法に基づく好氣的生分解性試験結果²⁾において好氣的生分解性が良好と報告されているが、実下水処理場での挙動・除去特性を把握するため、先行調査¹⁾10ヶ所の中で相対的に流入濃度が高かった下水処理場における詳細な挙動調査を行った。

2. 調査方法

2.1 嫌気好気ろ床法の下水処理場におけるフェノール挙動調査

現地調査は、先行調査¹⁾で対象とした嫌気好気ろ床法3ヶ所のうち、流入下水中のフェノールの濃度が最も高かった下水処理場(分流式、処理能力1,700m³/d)を対象として、2019年9月25日に行った。処理フローの概略を図-1に示す。試料採取は、スクリーン前後の流入下水(流入下水①、流入下水②)、第一分配槽出口、第二分配槽出口、好気槽出口、逆洗水槽上層水(処理水に相当)の6試料とし、13時50分～14時35分の間にスポット採取し、フェノール、浮遊物質(SS)、BOD等を分析した。

フェノールの分析は、過去に提案した方法³⁾に準じる方法とした。他の項目(SS、BOD等)については下水試験方法⁴⁾により分析した。

また、時間変動の確認のため、2020年2月18日～19日に流入下水のみの通日調査を行った。

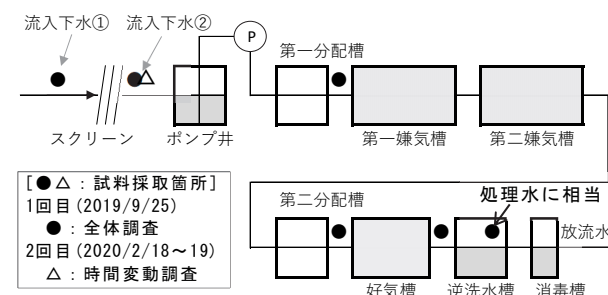


図-1 嫌気好気ろ床法の処理フロー

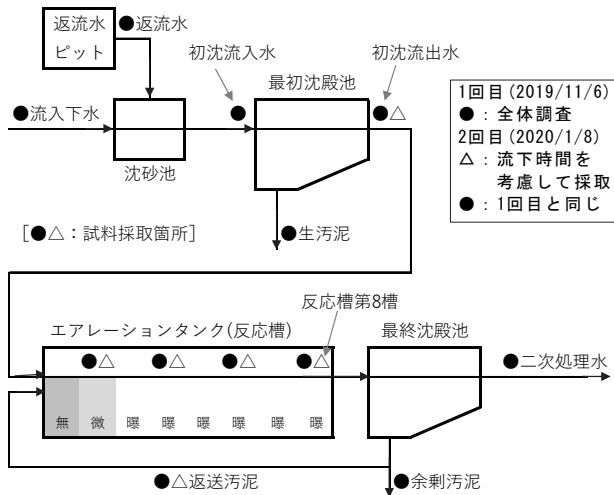


図-2 標準活性汚泥法の処理フロー
(無：無曝気、微：微曝気、曝：曝気)

2.2 標準活性汚泥法の下水処理場におけるフェノール挙動調査

現地調査は、先行調査¹⁾で調査対象とした標準活性汚泥法4ヶ所のうち、流入下水中のフェノールの濃度が最も高かった下水処理場を対象として、降雨の影響の少ない日を選定し、2019年11月6日と2020年1月8日に行った。調査処理場の処理フローを図-2に示す。また、1月8日は水の流下時間を考慮してフェノール濃度を把握することを目的とした試料採取を実施した。この処理場の現有処理能力は約140,000m³/d、下水の排除方式は分流式一部合流式であり、他の処理場の汚泥を受け入れている。試料採取を行った系列は、分流区域の下水だけを処理する系列で汚泥処理工程からの返流水が流入している。処理方式は、標準活性汚泥法であるが、試料採取を行った系列は、活性汚泥の沈降性を悪化させる微生物の増殖抑制のため反応槽8槽のうち1槽目はエアレーションなし、2槽目は微曝気としていた。

11月6日には、流入下水、汚泥処理からの返流水、最初沈殿池流入水（以下「初沈流入水」とする。）および流出水（以下「初沈流出水」とする。）、反応槽内活性汚泥混合液4か所（反応槽8槽のうち、流下する方向の順で第2槽等）、返送汚泥、最終沈殿池流出水（以下「二次処理水」とする。）を13時から15時（返流水だけは10時から11時）の間にスポット採取した。

1月8日には、水の流下時間を考慮して、初沈流出水、返送汚泥、反応槽内活性汚泥混合液（4か所）を、流量と反応槽容量から算出される滞留

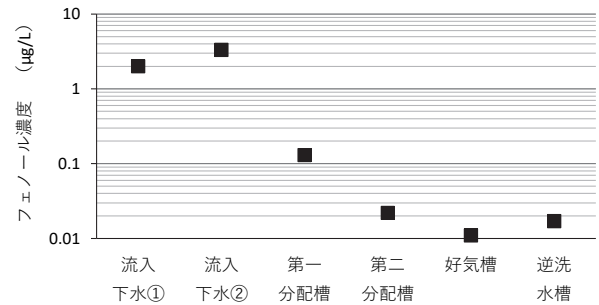


図-3 嫌気好気ろ床法の下水処理場におけるフェノール挙動調査結果

時間の差で、9時から17時に試料採取した。この他の流入下水等の試料は9時から11時にスポット採取した。

フェノールなどの分析は、2.1と同様に行った。

3. 調査結果

3.1 嫌気好気ろ床法の下水処理場におけるフェノール挙動調査結果

9月25日調査時の各採取試料の水温は18.8～20.0℃、pHは6.5～7.3であった。調査時の処理水（逆洗水槽）のSSは2mg/L、BODは2.6mg/L、CODは7.7mg/Lであり良好な処理が行われていた。

処理工程におけるフェノールの濃度変化を図-3に示す。流入下水①、②の濃度はそれぞれ2.0μg/L、3.3μg/L、第一分配槽出口の濃度は0.13μg/L、第二分配槽出口の濃度は0.022μg/L、好気槽出口の濃度は0.011μg/L、逆洗水槽上層水の濃度は0.017μg/Lであった。本処理方式の処理主体となる嫌気槽、好気槽の両反応槽において大きく減少し、その除去率は99%以上であった。嫌気槽に流入する前の第一分配槽出口において0.13μg/Lと流入下水濃度に比べて大きく減少していたが、その理由としては、ポンプ井、第一分配槽での何らかの除去等の可能性に加え、試料採取方法が滞留時間を考慮しないスポット採取であることによる水質の時間変動の影響が考えられた。

その時間変動を確認するため、自動採水器を用いて、流入下水のフェノール濃度の通日調査を行った。流入下水②を1時間間隔で24時間採取し、3時間分を等量コンポジットし、分析試料とした。フェノール分析結果を図-4に示す。フェノール濃度が高い時間帯は7:00～15:00で最大濃度が10:00～12:00の2.3μg/L、最小濃度が1:00～3:00の0.14μg/Lであった。9月25日の挙動調査時の採取

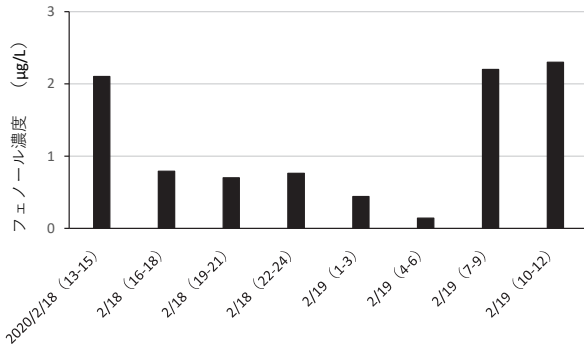


図-4 流入下水②のフェノール時間変動

時間帯は、流入下水のフェノール濃度が高い時間帯であり、そのフェノール濃度は2月の通日調査とほぼ同じであった。また、9月25日の調査では、その日の平均流量とポンプ井の容積から算出した平均滞留時間(11.6時間)を考慮すると、フェノール濃度が低い時間帯の流入下水が第一分配槽出口に到達したときにスポット採取したと考えられ、これが9月25日の流入下水①、②と第一分配槽出口のフェノール濃度差の要因と推測された。一方で、流入下水②の最小フェノール濃度0.14μg/Lと9月25日調査時逆洗水槽上層水の濃度0.017μg/Lから、フェノールが9割程度除去されていると考えられ、先行調査¹⁾と同様の結果であった。

時間変動に留意が必要なスポット採取であるが、嫌気槽と好気槽におけるフェノール除去速度を試算した。嫌気槽の除去速度は第一分配槽出口と第二分配槽出口のフェノール濃度、好気槽の除去速度は第二分配槽出口と好気槽出口のフェノール濃度を用いて算出した。嫌気槽と好気槽におけるフェノール除去速度は、それぞれ2.1、1.7 (フェノール・ng/L/h) となり、嫌気槽と好気槽はフェノール除去効果がほぼ同程度であると考えられた。

3.2 標準活性汚泥法の下水处理場におけるフェノール挙動調査結果

2019年11月6日調査時の水温は22.6～23.7℃、pHは6.4～7.2、同様に2020年1月8日調査時は、18.2～19.2℃、6.8～7.7であった。調査時の二次処理水のSSは両日ともに2mg/L以下、BODは5.6mg/L以下であり良好な処理が行われていた。

2回の調査の処理工程におけるフェノールの濃度変化を図-5に示す。流入下水のフェノール濃度は、両日の平均で43 μg/Lであり、公共用水域の指針値10 μg/Lを超える濃度であったが、下水処理により99%以上除去されていた。二次処理水の

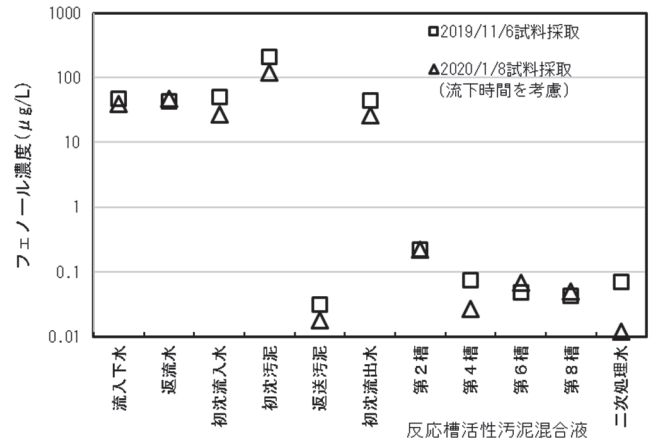


図-5 標準活性汚泥法の下水处理場におけるフェノール挙動調査結果

フェノール濃度は、両日の平均で0.041 μg/Lであり、指針値の約1/240であった。

流下方向の大きな変化としては、初沈流出水と返送汚泥が混合（比率は、ほぼ3：2）した後の反応槽においてフェノール濃度が大きく低下しており、反応槽に流入してすぐの第2槽において、初沈流出水に比較して濃度レベルが1/100以下であった。また、反応槽内のフェノール濃度は、今回調査を実施した時間帯（11月6日；13時～15時、1月8日；9時～17時）においては、両日間に大きな相違がなかった。また、返流水の濃度レベルは、流入下水とほぼ同じであった。

下水処理工程におけるフェノールの物質収支を把握するため、負荷量の変化を流入下水中の量を基準にした割合として図-6に示す。なお計算に用いた流量は、スポット採取を行った時間帯の1時間分とした。データが少なく誤差もあるが、概略としては流入下水の負荷量に返流水分が数%加わり、最初沈殿池汚泥として数%引き抜かれるが大きな変化はなく、活性汚泥処理の反応槽出口でフェノール量が流入下水の1%未満となり、明らかな減少が見いだされた。

このように、フェノールが本調査処理場の下水処理により99%以上除去されているという結果が得られた。好氣的生分解性が良好であることから、下水処理におけるフェノール除去は活性汚泥による生物分解が主体であると推測される。また、反応槽に流入した直後の大きな濃度低下は、活性汚泥による吸着や分解が要因と考えられた。

水の流下時間を考慮してサンプリングした1月8日のデータを用いて、反応槽流入直後の推定濃

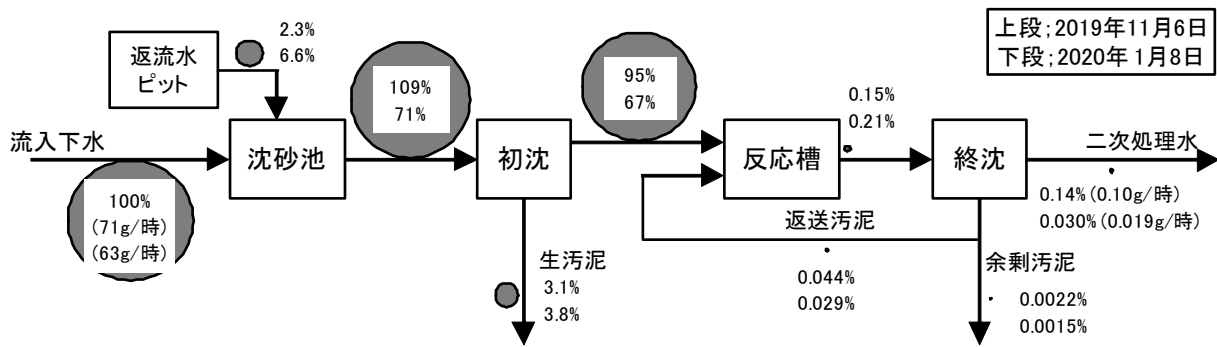


図-6 下水処理工程におけるフェノールの物質収支（負荷量の変化）
（流入下水中のフェノールを100%とした割合で示す。○の大きさは両日の平均を基に作図）

度から第2槽までと第2槽から第4槽までにおける除去速度（時間、MLSS当たり）を算出すると、それぞれ5.2、0.045（フェノール・ng/h /MLSS・mg）となった。「第2槽から第4槽まで」に比べ「反応槽流入直後から第2槽まで」の除去速度が百倍程度大きいことから、反応槽流入直後の活性汚泥による吸着や分解がフェノール除去に大きく寄与しているものと考えられた。

4. まとめ

流入下水から公共用水域の指針値を超える濃度での検出事例のあるフェノールを対象として、小規模下水処理場における採用が多い嫌気好気ろ床法と、最も一般的な標準活性汚泥法の2処理場において挙動把握調査を行った。両処理方式とも生物反応槽において大きく除去され、処理水では公共用水域の濃度指針値を下回る濃度であった。特に小規模処理場については、流入下水量・滞留時間の変動が大きく水質状況の詳細な把握が困難な場合が多いため、これまで知見が不足していたが、今回の調査でフェノールの挙動と低減を確認することができた。下水道での流入・処理状況を詳細調査して得られたこれらの知見より、フェノール

を含めた要監視項目について、下水道の放流水が現時点で水環境に影響を与える可能性は低いと推察できた。今後は、水環境全般において、要監視項目に関して引き続き知見の蓄積が取り組まれるものと考えられる。

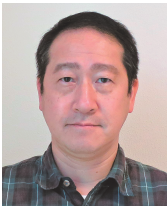
謝 辞

本調査の実施にあたってご協力を頂いた自治体等の関係各位、並びに、フェノール分析に関する検討にご協力頂いた高沢麻里専門研究員（研究当時）に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小森行也、鈴木裕識、平山孝浩、小川文章：下水処理場における水生生物保全に係る要監視項目の調査、第56回下水道研究発表会、pp.452～454、2019
- 2) 財団法人化学物質評価研究機構、CERI有害性評価書、フェノール、平成18年3月1日、https://www.cerij.or.jp/evaluation_document/yugai/108_95_2.pdf（令和3年2月10日確認）
- 3) 小森行也、鈴木裕識、小川文章：下水試料を対象とした要監視項目の分析検討、第52回日本水環境学会年会、p.607、2018
- 4) 下水試験方法-2012年版-、公益社団法人日本下水道協会、平成24年11月30日発行

平山孝浩



土木研究所流域水環境研究グループ水質チーム主任研究員
HIRAYAMA Takahiro

鈴木裕識



研究当時 土木研究所水環境研究グループ水質チーム 研究員、現岐阜大学、博士（地球環境学）
Dr. SUZUKI Yuji

小森行也



研究当時 土木研究所水環境研究グループ水質チーム 研究員特任研究員
KOMORI Koya

山下洋正



土木研究所流域水環境研究グループ水質チーム 上席研究員、博士（工学）
Dr. YAMASHITA Hiromasa