

新たな省エネルギー型下水処理技術の開発 ～嫌気性ろ床の採用による曝気槽の半減～

岡安祐司・重村浩之

1. はじめに

下水道事業はわが国の年間消費電力量の約0.7%を占める大口需要家である。下水道施設での電力使用量のうち、下水処理工程での使用が約5割を占めており、平成17年以降、下水処理に係る電力使用量原単位は若干増加している¹⁾。一方で下水道事業は、人口減少による使用料収入減少など経営管理への影響が懸念されており²⁾、下水処理工程の省エネルギー化による下水道事業の維持管理コスト縮減が期待されている。

そこで本研究は、従来から一般的に下水処理手法として用いられている、消費電力を多く必要とする浮遊性の好気性微生物法（標準活性汚泥法やオキシデーションディッチ法等）を改良した省エネルギー型下水処理技術の開発を行うことを目的とした。

2. 研究内容

2.1 研究方法の概要

家庭等から集められ下水処理場に流入する下水（流入下水）に含まれる有機汚濁物質のうち、懸濁態有機物の多くの部分は、最初沈殿池において沈殿分離除去される一方、流入下水に含まれる溶解性有機物は、最初沈殿池で除去される割合は小さく、後段の曝気槽にて、酸素を消費する浮遊性の好気性微生物の増殖による汚泥への変換や、二酸化炭素への酸化による大気中への放出により除去されるのが一般的である。下水処理場での電力消費の約50%を下水処理工程が占めており³⁾、曝気のために必要な電気エネルギーは無視できない。また、一般的な処理法は水処理後に発生する余剰汚泥の量が多く、汚泥処理に係るエネルギー消費量が大きいのも特徴である。

酸素のない環境下で生息する嫌気性微生物は増殖のために酸素を必要としないことから、曝気による酸素の供給を行う必要がなく、また、単位有

機物量あたりの菌体への変換割合（菌体収率）が好気性微生物に比べて、極端に小さいことから、嫌気性微生物を用いる手法は、余剰汚泥の発生量の大幅な削減が期待される手法である。

そこで、本研究では、下水処理場で一般的に用いられている下水処理方式である標準活性汚泥法の曝気槽の前段半分に他の省エネルギー型の溶解性有機物の除去手法を導入し、曝気槽を後段半分に圧縮し、曝気に必要なエネルギーを半減する手法を検討した（図-1参照）。曝気槽への有機汚濁負荷削減手法としては、最初沈殿池で凝集剤を添加し、溶解性有機物の一部を最初沈殿池汚泥として回収する前凝集処理^{4),5),6)}や、浮上担体を用いて、最初沈殿池での懸濁態物質の回収効率を向上

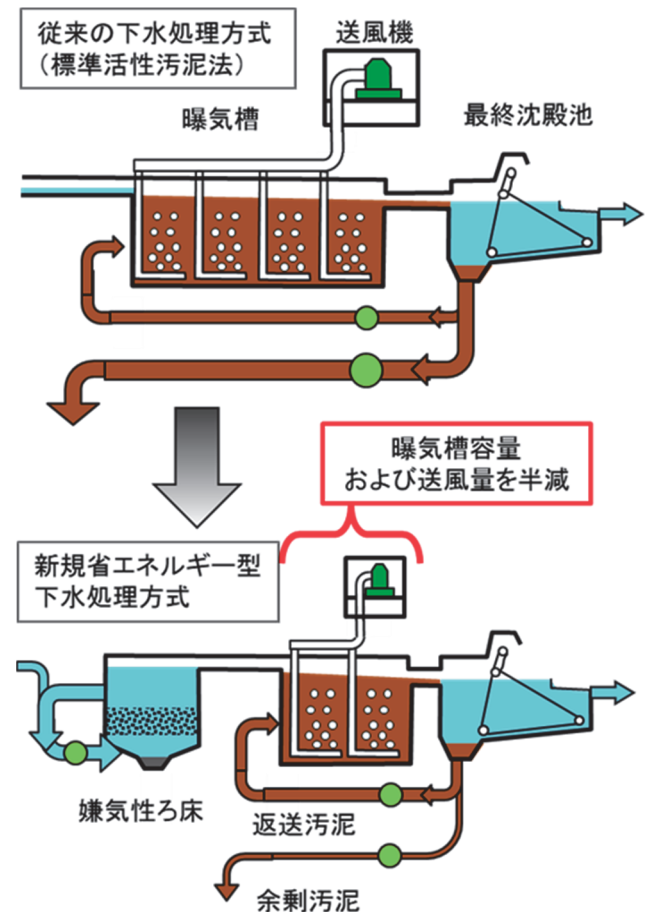


図-1 最初沈殿池以降の下水処理工程における省エネルギー型下水処理技術の導入イメージ

させる手法⁷⁾が実証されているものの、最初沈殿池で沈殿分離除去できない溶解性有機物の省エネルギー型の処理は依然として必要である。本研究では、こうした溶解性有機物の除去手法として、嫌気性微生物を活用する省エネルギー型下水処理技術を開発することとした。具体的には、最初沈殿池流出水を、付着性嫌気性微生物を保持するろ材を充填した部分循環式嫌気性ろ床にて処理することで、溶解性有機物の一部を除去し、後段の好気処理への負荷を削減するものである。

2.2 実験の手順

2.2.1 実験装置の構成

最初沈殿池実験装置（図-2）、部分循環式嫌気性ろ床実験装置（図-3）および好気処理実験装置（図-4）から構成された省エネルギー型下水処理実験装置を屋内に設置し、この実験装置に一部合流式を含む分流式の下水処理場へ流入した下水を流入させ実験を行った。流入下水は図-2→図-3→図-4の順に通過して処理される。

2.2.2 最初沈殿池実験装置

最初沈殿池実験装置（図-2）は塩ビ製円筒状で、底部から500mmまでの部分はコーン状とし、低速で常時回転するピケットフェンスと沈殿物の排出口を装着し、流入下水は中心下部より下方向へ流入する構造とした。この最初沈殿池実験装置に、流入下水を480L/dの流量で、常時流入させ、沈殿処理を行った。本装置における水面積負荷は $0.38\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、水学的滞留時間（HRT）は2.25hである。沈殿汚泥の排出は、底部より1時間に1回の頻度で、1回あたり1L引き抜くことで実施した。また、本実験装置を2式並行して運転し、1日あたり合計960Lの流入下水を処理した。

2.2.3 部分循環式嫌気性ろ床実験装置

部分循環式嫌気性ろ床実験装置（図-3）は塩ビ製の円筒状で、底部から200mm～600mmの間（図の網掛け部分）にプラスチック担体（寸法（mm） $15\phi \times 12\text{L}$ 、比表面積 $450\text{m}^2/\text{m}^3$ ）を充填し、ろ層厚を400mmとした。ろ材の上端部分には直径5mmの穴を20mm間隔に空けた塩ビ板を固定し、ろ材の流出を防止した。この部分循環式嫌気性ろ床実験装置に、最初沈殿池実験装置流出水を510L/dの流量で流入させ、線速度が $5\text{mm}/\text{min}$ となるように設定した。また、ろ材の表面の付着性微生物と水中の溶解性有機物が十分に接触できる

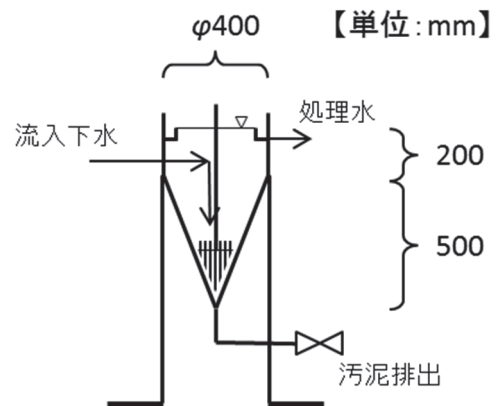


図-2 最初沈殿池実験装置の概略図

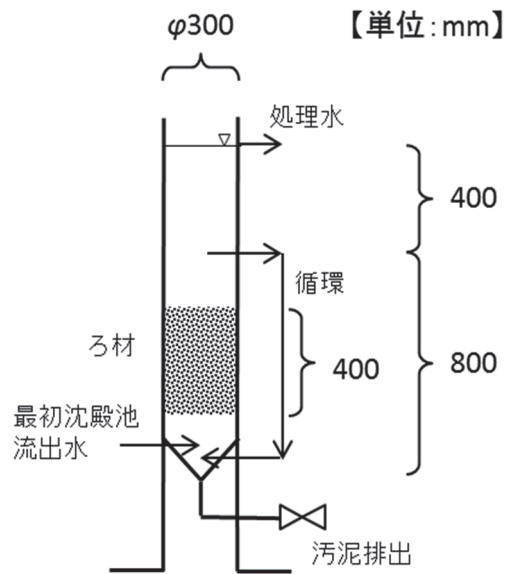


図-3 部分循環式嫌気性ろ床実験装置の概略図

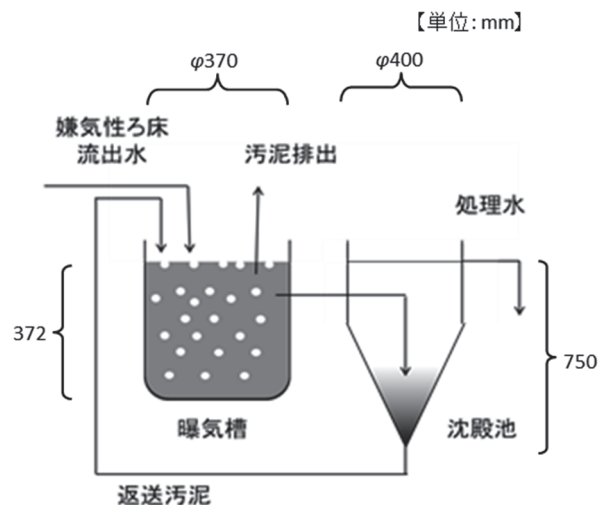


図-4 好気処理実験装置の概略図

ように、ろ材を通過した液を、底部から800mm地点より底部付近へ、流入水の流量に対して2倍の流量で循環させた。ろ材部分における線速度は15mm/min.、底部から800mm～1200mm部分での線速度は5mm/min.、装置全体のHRTは4hである。余剰汚泥の排出は、底部より1週間に1回、1L引き抜くことで行った。

2.2.4 好気処理実験装置

好気処理実験装置（図-4）の曝気槽は有効容量40Lの円筒状の完全混合槽で、底面上に設置したエアストーンを通じで、大気を水中へ送り込み、曝気した。曝気槽の後段には円形沈殿池を設け、活性汚泥と処理水の固液分離を行った。この実験装置に、部分循環式嫌気性ろ床実験装置の流出水をポンプで連続的に注入した。流量は10L/hとし、曝気槽におけるHRTは4h、沈殿池における水面積負荷、HRTはそれぞれ1.91m³/m²・d、4hとした。余剰汚泥の排出は、曝気槽における活性汚泥混合液浮遊物質（MLSS）濃度が一定に保たれるように適宜調整し、最終的には混合液を1日あたり1L採取することで行った。結果として、好氣的固形物滞留時間（ASRT）は40日となった。なお、実験に先立ち、馴致期間として約4か月を設定し、実験は3月～6月の期間で行った。

3. 結果

流入下水、最初沈殿池実験装置流出水、部分循環式嫌気性ろ床実験装置の流出水、好気処理実験装置の流出水中の有機汚濁の指標である全化学的酸素要求量（T-COD_{Cr}）、溶解性化学的酸素要求量（S-COD_{Cr}）の平均値と、流入下水から各工程の流出水の間での除去率の平均値を表-1、表-2に示した。なお、試料は1週間に1回程度の頻度でサンプルを採取した。T-COD_{Cr}の流入下水からの除去率は、最初沈殿池流出水、部分循環式嫌気性ろ床流出水、好気処理流出水で、それぞれ21%、40%、84%であった。一方、S-COD_{Cr}の除去率は、T-COD_{Cr}の除去率に比べて低く、それぞれ2%、22%、77%であった。仮に、既往の研究⁸⁾で得られているCOD_{Cr}と生物学的酸素要求量（以後、BODと記す）の関係式（COD_{Cr} = 1.34 × BOD + 48.4）を用いた場合、わが国の下水放流水に求められるBODの基準値15mg/Lは、COD_{Cr} 68.5mg/Lに換算されるが、本研究で得られた好

気処理流出水（下水放流水に該当）では、この数字を下回っており、良好な有機物除去が達成されていた。また、好気処理流出水中の、亜硝酸性窒素・硝酸性窒素濃度はいずれも1mg/L未満と低く、硝化抑制型の処理となっていた。曝気槽混合液のMLSS濃度、活性汚泥混合液有機性浮遊物質（MLVSS）濃度の平均値は、それぞれ1360、1160mg/Lであり、実験期間中、大きな変動はなかった。流入下水あたりの好気処理実験装置から排出された汚泥の累積固形物量は、0.0057kg-DS/m³で、実験装置を設置した近傍の標準活性汚泥法を採用している下水処理場における、流入下水あたりの発生余剰汚泥の固形物量0.040kg-DS/m³程度に比べると、約1/7であった。一般に、標準活性汚泥法を採用している下水処理場では、最初沈殿池汚泥の固形物量が余剰汚泥と同程度発生すること、部分循環式嫌気性ろ床実験装置から排出される余剰汚泥の固形物量が、好気処理実験装置から排出された余剰汚泥の約1/10であったことを考慮すると、下水処理工程全体から排出される汚泥の固形物量は、約42%減となると考えられた。このため、汚泥処理に係るエネルギー消費量の削減に貢献できると考えられる。

表-1 省エネルギー型下水処理実験装置の流入下水、各工程流出水と処理水の平均T-COD_{Cr}濃度とその除去率

| | T-COD _{Cr} (mg/L) | 除去率 (%) |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 流入下水 | 235.1 | — |
| 最初沈殿池流出水 | 185.5 | 21.1 |
| 部分循環式嫌気性ろ床流出水 | 142.3 | 39.5 |
| 好気処理流出水 | 38.3 | 83.7 |

表-2 省エネルギー型実験装置の流入下水、各工程流出水と処理水の平均S-COD_{Cr}濃度とその除去率

| | S-COD _{Cr} (mg/L) | 除去率 (%) |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 流入下水 | 108.3 | — |
| 最初沈殿池流出水 | 105.9 | 2.2 |
| 部分循環式嫌気性ろ床流出水 | 84.4 | 22.0 |
| 好気処理流出水 | 25.5 | 76.5 |

参考文献

- 1) 下水道における資源・エネルギー施策の現状分析、第3回下水道政策研究委員会会議資料、平成25年12月17日、2014
<http://www.mlit.go.jp/common/001022698.pdf>
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部、公益社団法人日本下水道協会：下水道長期ビジョン実現に向けた中期計画、新下水道ビジョン、p.4.2、平成26年7月、2014
- 3) 日本下水道協会：下水道統計（平成23年度版）（第68号）、2013
- 4) 高岡昌輝、廣田淳一、武田信生、藤原健史：前凝集沈殿汚泥の嫌気性消化特性、土木学会論文集、No.685/VII-20、pp.17~26、2001
- 5) 宗宮 功、津野 洋、貫上佳則、長谷川明巧、木下 巖、日高 平：前凝集沈殿・浮遊微生物処理法による都市下水の高度処理に関する研究、下水道協会誌論文集、Vol.36、No.436、pp.87-97、1999
- 6) 日高 平、津野 洋、鄭 晋宇、岸本直之、織田稔幸：生物膜ろ過反応器での前凝集汚泥活用に関する研究、下水道協会誌論文集、Vol.40、No.487、pp.103~116、2003
- 7) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：B-DASHプロジェクト No.1 超高効率固液分離技術を用いたエネルギーマネジメントシステム導入ガイドライン（案）、国土技術政策総合研究所資料、No.736、2013
- 8) 後藤雅子、甘長准：下水処理における窒素除去と放流先の窒素挙動を加味した温室効果ガス排出量の一考察、第50回下水道研究発表会講演集、pp.565~567、2013

4. まとめ

下水処理場で一般的に用いられている下水処理手法である標準活性汚泥法の曝気槽の前段半分を水理学的滞留時間（HRT）4時間の部分循環式嫌気性ろ床に置き換え、連続的に最初沈殿池流出水を適用した結果、部分循環式嫌気性ろ床部分における化学的酸素要求量（T-COD_{cr}）の除去率は、流入下水に対して18%であった。さらに、後段半分に圧縮された曝気槽（水理学的滞留時間（HRT）4時間）を有する好気処理においては、有機物の安定した除去を達成した。

部分循環式嫌気性ろ床では、単位有機物あたりの菌体への変換割合（菌体収率）が小さい嫌気性微生物を保持し、それらに下水中の有機物を極力消費させることで、後段の好気処理への有機物負荷を削減し、好気性微生物の増殖に伴い発生する余剰汚泥の量を削減した結果、好気処理から発生する余剰汚泥量は、標準活性汚泥法を採用している下水処理場の場合に比べて1/7程度であり、下水処理工程全体から発生する汚泥の総発生量についても約42%減少すると考えられた。

以上から、本下水処理手法は、生物反応槽（嫌気性ろ床+曝気槽）の容積は不変でありながら、曝気槽容積の半減による曝気に必要なエネルギーの半減、余剰汚泥の発生量削減に伴う汚泥処理に必要なエネルギーの削減もできる手法となる可能性が示された。

今後は、部分循環式嫌気性ろ床における担体充填方法・循環方法、好気処理における運転の最適化等を検討し、省エネルギー型下水処理技術の開発を引き続き行う予定である。さらには、パイロットプラントや実証実験規模へのスケールアップの展開を目指し、詳細なエネルギー削減効果を評価していきたいと考えている。

謝 辞

実験装置の設置や汚泥採取などでお世話になりました下水処理場関係各位に謝意を表します。

岡安祐司



研究当時 土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ主任研究員、現 国土交通省国土技術総合研究所下水道研究部下水道研究室長、博士（工学）
Dr. Yuji OKAYASU

重村浩之



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 上席研究員
Hiroyuki SHIGEMURA