

脱炭素に寄与するエネルギー生産型の下水処理技術

下水からメタンが生成可能な新しい下水処理システム

渡 邊 亮 哉

国内の多くの下水処理場で導入されている活性汚泥法は、曝気等の処理に係る電力量や処理に伴い発生する余剰汚泥量が多いことから、温室効果ガスの排出が多い処理方式である。一方で、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、下水道事業の脱炭素化を加速させる必要があることから、脱炭素に寄与する技術が求められている。

そこでこれらの下水処理の課題を解決でき、またエネルギーであるメタンを生成することが可能な、メタン発酵技術と膜分離技術を組み合わせた嫌気性 MBR による下水処理への適用が期待される。本研究では、嫌気 MBR の特徴とラボスケールでの検討について報告する。

キーワード：下水処理，嫌気 MBR，メタン発酵，膜分離

1. はじめに

世界的な地球温暖化の進行に伴い、各国がカーボンニュートラル社会の形成を目指し、様々取り組みが進められるようになった。日本においては政府が「カーボンニュートラル 2050」を宣言し、下水道分野においてもカーボンニュートラル実現に向けた取り組みが求められることになった。下水道分野においては脱炭素・循環型社会構築に向けた産業構造の転換拠点となる「グリーンイノベーション下水道」を目指す取り組みを開始した¹⁾。グリーンイノベーション下水道を実現するための方針として、①下水道が有するポテンシャルの最大活用、②温室効果ガスの積極的な排出削減、③地域内外・他分野連携の拡大・徹底の3つが挙げられる。水・資源・エネルギーが集約される下水道は、脱炭素社会に貢献できうる高いポテンシャルを持っているが、下水汚泥のバイオマスリサイクル率が34%（エネルギー化率24%、緑農地利用10%）と活用は一部に留まっている²⁾。

下水道分野で消費される電力量は年間70億kWhといわれており、これは国内で消費される総電力量の約1%を占めている³⁾。また、下水道分野で排出される温室効果ガス（GHG）はCO₂換算で年間約600万t-CO₂である⁴⁾。その内の約55%が処理場内で使用される電力由来となっており、それに次いで汚泥焼却時に発生する亜酸化窒素（N₂O）由来が約20%を占めている。以上より、下水道分野の脱炭素化を目指すに

は、徹底した省エネ対策や下水汚泥の有効活用等が求められる。そこで本稿では、これらの課題を解決することに加え、創エネルギーの効果が期待できる新たな下水処理システムについて紹介する。

2. 従来の下水処理技術について

国内の多くの下水処理場で導入されている好気処理は、酸素が十分にある条件において好気性微生物の代謝作用により下水に含まれる有機物を分解するプロセスである。取り込んだ有機物は微生物の増殖に使われるため、好気性微生物の増殖速度は速い。また好気性微生物は互いが絡み合うことでフロックと呼ばれる塊を形成する特徴を持っており、処理した水との分離が容易に行える。

好気処理の代表的な技術である標準活性汚泥法のフローを図-1に示す。流入してきた下水は、最初沈殿池にて固液分離され、分離した上澄み水は好気微生物がいる反応タンクに流れていく。最初沈殿池で固液分離する理由は、フロックの沈降性を維持するためである。反応タンクには大量の酸素が送り込まれ、有機

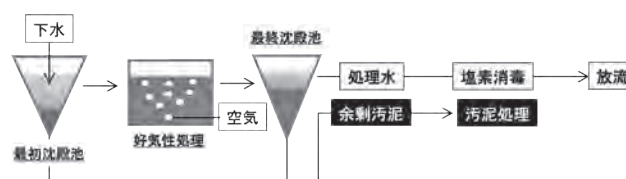


図-1 標準活性汚泥法のフロー

物等が分解・除去される。処理した水はフロックと共に最終沈殿池に流れ、処理水とフロックに固液分離される。固液分離された水は、病原微生物を殺菌するための塩素消毒を行った後に、河川等に放流される。また、最初沈殿池及び最終沈殿池で沈降したフロック等の沈殿物は汚泥として処分される。好気処理のメリットは、水質や水温等の外部環境の変化に強く、安定した処理水質が得られることや下水等の有機物濃度が低い排水処理に適用出来ることが挙げられる。一方でデメリットとしては、大量の酸素を供給するためのエネルギーがかかることや好気性微生物の増殖速度が速いことから発生する汚泥量が多くなり、処分に多大なコストがかかること、それらから排出される温室効果ガスが多いことが挙げられる。

3. 開発技術の概要及び特徴

排水処理には好気処理の他にメタン発酵(嫌気処理)と呼ばれる処理プロセスが存在する。メタン発酵は酸素がない条件下において嫌気性微生物と呼ばれる微生物群により排水中の有機物を分解し、メタンを生成するプロセスである。取り込んだ有機物は微生物の代謝によりメタンに変換されるため、好気性微生物と比較して増殖速度が遅いのが特徴である。メタン発酵のメリットは、酸素供給が不要のため消費エネルギーが少ないこと、発生する汚泥量が少ないため処分コストが小さい等が挙げられる。一方で、デメリットに関しては、水質や水温の変動による影響を受けやすく処理が不安定になりやすいこと、有機物濃度が低い排水処理に不適であること、フロックを形成しないため固液分離が難しく、その結果処理水質が悪いことが挙げられる。これらのデメリットを克服するには、反応槽内に嫌気性微生物を高濃度に保持することが重要となる。そこで、メタン発酵と物理的に固液分離が可能な膜分離技術を組み合わせた嫌気 MBR (Membrane Bio Reactor) が注目されるようになった。嫌気 MBR による下水処理のフローを図-2に示す。嫌気 MBR は、最初沈殿池が不要であり下水を直接反応タンクに流入することが可能である。流入した下水に含まれる有機

物は反応タンク内の嫌気性微生物により処理されると同時にメタンに変換される。処理した水は分離膜によりろ過されるため、最終沈殿池を経由しないで河川等に放流される。また、分離膜の作用により処理水から病原微生物の除去も可能であることから塩素消毒も不要となり、環境負荷の低減にも寄与する。また、発生したメタンに関しては専用のガスエンジンにより電気と熱に変換することが可能である。

ここで従来技術の好気処理(標準活性汚泥法)に対する嫌気 MBR システムの優位性を評価するために、10,000 m³/日の下水(人口規模:およそ4万人)に対して①消費エネルギー、②余剰汚泥量、③創エネルギー量及び④GHG 排出量に関するフィージビリティスタディを実施した。活性汚泥法の消費エネルギー及び余剰汚泥量は平成29年度下水道統計資料から10,000 m³/日前後の下水を処理している下水処理場の数値を引用して算出を行った。嫌気 MBR システムは、Kong らの論文⁵⁾を引用して試算を行った。GHG 排出量の算出には、下水道における地球温暖化対策マニュアル⁶⁾及び下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン⁷⁾を引用した。また、メタンの発熱量を55 MJ/kg、熱量からの電力換算値を0.278 kWh/MJ、発電効率を40%に設定して算出を行った。嫌気 MBR システムの数値は、活性汚泥法の消費エネルギー量、余剰汚泥量、GHG 排出をそれぞれ100とした場合の相対値を示す。その結果、嫌気 MBR システムの消費エネルギー及び余剰汚泥量は、活性汚泥法と比較して、各々30%、70%削減可能であることが示された(表-1)。また、回収したメタンガスをガスエンジンで発電した際に得られる創エネルギー量は、消費エネルギーを上回る結果となった。以上のエネルギー収支からGHG 排出量についても試算したところ、嫌気 MBR システムのGHG 排出量は、活性汚泥法と比較して86%もの削減が期待できる試算となった。以上の結果から、メタン製造システムは従来の活性汚泥法よりも消費エネルギー量、廃棄物量及びGHG 排出量において高い優位性を示すことが示唆された。

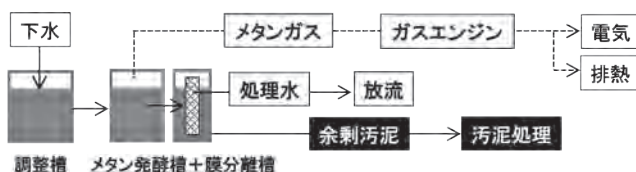


図-2 嫌気 MBR による下水処理のフロー

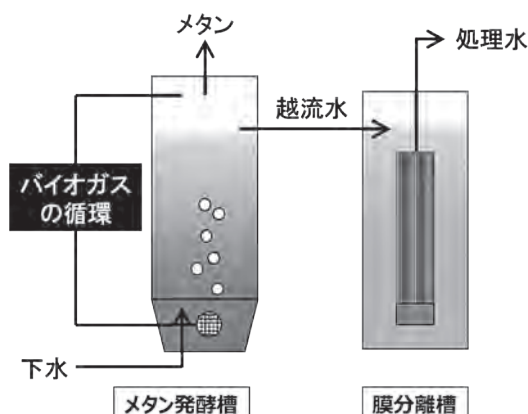
表-1 ケーススタディ試算結果 (10,000 m³/日処理)

設定条件 下水量:10,000m ³ /day		標準活性汚泥法	嫌気MBR法
消費エネルギー量		100	70(30%減)
余剰汚泥量		100	30(70%減)
創エネルギー量		0	71(消費エネルギーと同等)
GHG排出量	水処理	54	30
	汚泥焼却	46	14
	創エネルギー	0	-30
	合計	100	14(86%減)

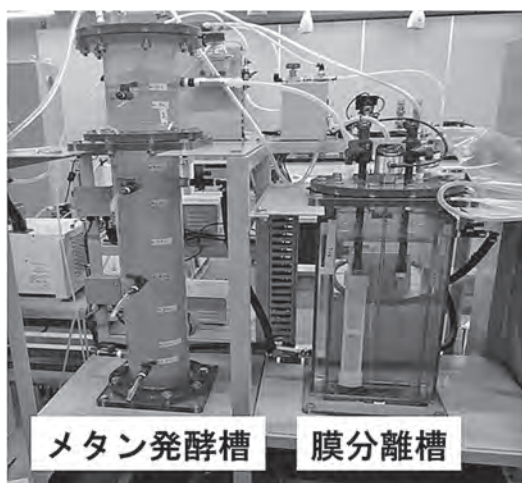
4. ラボ試験での検討

開発中の嫌気 MBR システムの概略を 図—3 に示す。開発システムはメタン発酵槽と膜分離槽の 2 槽式を採用している。メタン発酵槽の下部より供給された下水は、メタン発酵槽内で嫌気汚泥と混合される。この時、メタン発酵槽上部に溜まったバイオガスの一部をメタン発酵槽へ間欠的に循環することで下水と嫌気汚泥との接触効率を上げ、メタン発酵の立上げ期間の短縮とメタン生成速度を向上させることが期待できる。一方、膜分離槽ではメタン発酵槽からの越流水を分離膜にて汚泥と処理水に分離する。分離膜槽の汚泥濃度は、メタン発酵槽よりも低濃度に維持できるため、分離膜の目詰まり抑制も期待できる。そこで、バイオガス循環による効果を検証するために模擬下水によるラボ試験を実施した。

写真—1 に示すラボスケールの嫌気 MBR 装置（嫌気処理槽：有効容積 10 L、膜分離槽：有効容積 15 L）を示す。試験は、ガス循環を行わない系（Run1：循環無し）とガス循環を実施した系（Run2：循環有り）



図—3 嫌気 MBR システムの概略

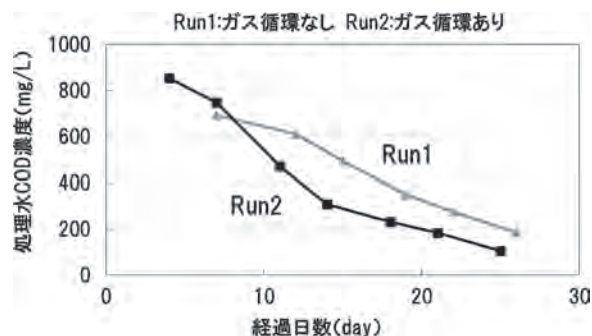


写真—1 ラボスケールの嫌気 MBR 装置

を行った。種汚泥は下水処理場の余剰汚泥を用いた。汚泥を投入後、30℃に維持しながら、一定期間静置させた。この間、メタン発酵槽上部のガスホルダーから随時ガスを採取し、ガス組成を TCD ガスクロマトグラフで分析した。採取したガス中にメタンが検出された段階で、模擬下水 (COD_C: 化学的酸素要求量、濃度: 500~600 mg/L、以下 COD と表記) をメタン発酵槽の下部から送液した。膜分離槽には、中空糸膜(住友電気工業製、膜表面積: 0.1 m²、膜孔径: 0.1 μm)を設置して膜ろ過を行った。水理的滞留時間は 24 時間に設定した。メタン発酵槽のバイオガス循環を行う試験では、図—3 に示すフローのようにメタン発酵槽上部のガスホルダーから処理槽下部に設置した散気管へ 1 時間当たり 5 秒間の間隔で 2 L/min のガス循環を行った。図—4 に各条件の単位容積当たりのメタンガス生成量の経時変化を示す。ガス循環を行った試験 (Run2) は、ガス循環無し (Run1) と比較して、メタンが生成する時期が早いことが明らかとなった。また、処理水の水質については、試験開始初期において、Run2 の方が COD 濃度が高い傾向であったが、時間の経過とともに処理水の COD 濃度は低下し、運転開始 5 日目以降では、Run1 よりも COD 濃度が低い値を示した (図—5)。この結果から、バイオガスの循環によりメタン発酵の立上げ期間を短縮できることが示唆された。



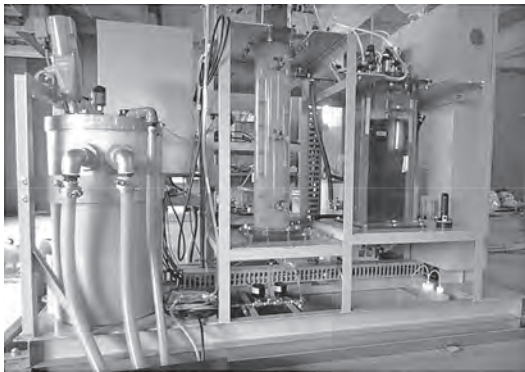
図—4 単位容積当たりのメタンガス生成量の経時変化



図—5 処理水 COD 濃度の経時変化

5. 実用化への展望・課題

現在、当社はNEDOの委託事業（プロジェクト名：生物メタネーションとバイオ燃料製造を可能とする新排水処理プロセスの開発）において、本技術の開発を進めている。このプロジェクトにおいて、実下水に対する本技術の適用性を評価するために、写真－2に示すラボ試験機（反応槽10L）を用いて実証試験（神奈川県三浦市東部浄化センター）を実施中である。本技術の課題として、水温による影響が挙げられる。前述したように嫌気性微生物は温度の影響を受けやすいことから、水温が低下する冬期に処理水の悪化が懸念される。そのため、本実証試験において、段階的に水温を下げていき水温による影響について評価する予定



写真－2 ラボ試験機による実下水を用いた実証試験

である。

今後、当社は水処理メーカー、大学、自治体らと連携し、本技術をエネルギー生産型の下水処理技術として確立させ、カーボンニュートラル社会の実現に向けて貢献したいと考えている。

JICMA

《参考文献》

- 1) 第5回脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会、脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書概要案、国土交通省、<http://www1.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/content/001466681.pdf>.
- 2) 下水汚泥中のバイオマス利用、国土交通省、https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000124.html.
- 3) 下水道における資源・エネルギー施策の現状分析、国土交通省、<https://www.mlit.go.jp/common/001022698.pdf>.
- 4) 脱炭素に関する動向について、国土交通省、<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/content/001444668.pdf>.
- 5) A
- 6) 下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等指針の解説～、環境省・国土交通省、2016.
- 7) 下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン－平成29年度版－、国土交通省、2018.

【筆者紹介】

渡邊 亮哉（わたなべ りょうや）
大成建設㈱
技術センター 都市基盤技術研究部 環境研究室
課長代理

