Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-16

Development of a novel wastewater treatment system combined direct up-concentration using forward osmosis membrane and anaerobic membrane bioreactor

Onoda, Sosuke

(Degree)
博士（工学）

(Date of Degree)
2016-09-25

(Date of Publication)
2017-09-01

(Resource Type)
doctoral thesis

(Report Number)
甲第6743号

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006743

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

（別紙様式 3）

論文内容の要旨

氏　　名　小野田　草介

専　　攻　応用化学

論文題目（外国語の場合は，その和訳を併記すること。）

Development of a novel wastewater treatment system combined direct up-concentration using forward osmosis membrane and anaerobic membrane bioreactor

（正浸透膜による直接濃縮と嫌気性膜分離活性汚泥法を組み合わせた新規下水処理システムの開発）

指導教員　松山　秀人

（注）2，000字～4，000字でまとめること。

第1章　諸言

多くの下水処理場で採用されている好気性処理では、ばっ気により好気性微生物に酸素を供給することで、下水中の有機物（すなわちエネルギー源）を二酸化炭素に変換し、大気へ放出している。水中の有機物をメタンガスを主成分とするバイオガスに変換することができる嫌気性処理を下水処理に適用することができれば、下水処理におけるエネルギー消費を低減でき、さらには下水処理を行いながらエネルギー生産を行える可能性がある。しかし、下水のような有機物濃度が比較的希薄な水に嫌気性処理を適用するためには、水中の有機物を高濃度に濃縮する必要がある。そこで本研究では、低動力な分離プロセスとして近年注目されている正浸透膜（FO 膜）をこの濃縮工程に適用し、FO 膜による直接濃縮と嫌気性処理を組み合わせた新規下水処理システムを提案した。本研究では、提案したシステムの技術的な実現可能性を示すこと、および実用化に向けた重要な知見を収集することを目的とし、種々の検討を行った。

第2章　FO 膜による下水の直接濃縮および濃縮下水のメタン生成ポテンシャルの評価

本章では、下水を FO 膜で直接濃縮することと、濃縮した下水を用いてメタン発酵を行うことの技術的な適用可能性を実験的な手法で評価した。実際の下水を用いた FO 膜ろ過実験では、下水を体積ベースで 19 倍まで濃縮することができ、この間の有機物の回収率は 84% と良好であった。また、濃縮下水を用いたラボスケールの回分式メタン発酵試験では、0.22 $m^3 \cdot CH_4/kg \cdot COD_{rem}$ のメタン収率が実測され、これは一般的なメタン発酵と同等の性能であった。以上により、FO 膜による下水の直接濃縮と濃縮下水のメタン発酵の技術的な実現可能性が示された。

第3章　嫌気性 MBR 処理水中に含まれる栄養塩類の FO 膜による阻止

嫌気性処理は窒素やリンといった栄養塩類を除去する機構を有していないため、嫌気性処理の後段ではこれらに対する後処理が必要である。本章では、ここに FO 膜を適用することを前提として、FO 膜での栄養塩類の阻止に関する検討を行った。模擬嫌気 MBR 処理水を用いた FO 膜ろ過試験では、リンについては非常に高い阻止性が認められたが、アンモニアについては阻止率が FO 膜の運転条件（膜の向き、駆動溶液（DS）の塩濃度、供給水（FS）中のアンモニア濃度）に強く依存することが明らかになった。原水中のアンモニア濃度が高いほどアンモニアの膜透過流束は大きかった。また、DS からの塩の逆拡散が大きいほどアンモニアの阻止率が高かった。この傾向は、FO 膜の向きを変更しても、また、DS の溶質を変更しても同様であった。これは、今後の FO 膜のアンモニア阻止性向上、および膜の運転条件の選定において重要な知見である。

（氏名：　小野田 草介　　NO. 2　）

第4章　FO膜を用いた都市下水濃縮プロセスにおけるファウラントの特性

本章では、都市下水のFO膜ろ過において膜ファウリングを引き起こす有機物の調査を行った。実際の都市下水を用いたFO膜ろ過における膜ファウリングは、人工下水（フミン酸、BSA、アルギン酸ナトリウム、およびこれらの混合物）を用いた時の膜ファウリングより強固であった。この結果は、人工ファウラントを用いた実験では実際に起こり得るFO膜における膜ファウリングを正しく理解することが困難であることを示している。次に、三次元励起蛍光マトリクス分析（EEM）および液体クロマトグラフィー有機炭素検出分析（LC-OCD）によって膜から剥がし取ったファウラントの特性を調査した。この結果では、バイオポリマーと呼ばれる有機物画分（すなわち、多糖類およびタンパク質など）がFO膜における主たるファウラントであることが示され、逆に、原水中での構成割合の大きいフミン酸様物質は膜ファウリングに対しては大きく寄与しないことが示された。本章により得られた知見は、本システムの実用化に向けて今後必要となるであろうFO膜ろ過の前段処理プロセスの選定、および低ファウリング性FO膜の開発において重要な極めて知見である。

第5章　FO膜による下水の直接濃縮と嫌気性処理を組み合わせたシステムのエネルギー生産性の評価

本章では、FO膜による下水の直接濃縮と嫌気性MBRを組み合わせた新規下水処理システムが正味のエネルギー生産システムとなるための運転条件を実験と計算によって求めた。本システム全体のエネルギー収支においては、嫌気性MBRの運転温度が最も重要なファクターである。都市下水を用いて運転温度を変更して行ったラボスケールの回分式メタン発酵試験では、運転温度の低下とともに有機物の除去速度が低下したが、得られるバイオガス中のメタン濃度はほぼ一定であり、有機物除去量あたりのメタン生成量（すなわちメタン収率）は運転温度に関わらず一定の値を示した。得られたメタン収率を基に、提案システム全体のエネルギー収支を試算した結果、26℃以下の運転温度で嫌気性MBRを運転することが出来れば、本システムはエネルギー生産型の下水処理システムになり得ることが示された。本章により得られた知見は、本システムの実用化に向けて今後継続されるであろう開発における重要な目標値を示している。

以上により、FO膜による下水の直接濃縮と嫌気性処理を組み合わせた新規下水処理システムの技術的および経済的な実現可能性が示された。また、本研究により、本システムの実用化に向け今後行われる実践的な開発において考慮すべき重要な知見が与えられた。

以　上

（別紙1）　　論文審査の結果の要旨

氏名	小野田 草介		
論文題目	Development of a novel wastewater treatment system combined direct up-concentration using forward osmosis membrane and anaerobic membrane bioreactor （正浸透膜による直接濃縮と嫌気性膜分離活性汚泥法を組み合わせた新規下水処理システムの開発）		
審査委員	区　分	職　名	氏　　名
	主　査	教授	松山　秀人
	副　査	教授	西山　覚
	副　査	教授	森　敦紀
	副　査		印
	副　査		印

要　　旨

地球上の水循環において、下水道は雨水や排水を収集し、適切な処理を行い放流するという極めて重要な役割を担っている。日本の下水道を統括している国土交通省は、今後の下水道の目指すべき姿として2011年に「新下水道ビジョン」を策定し、この中では「循環型社会の構築へ貢献」、「新たな価値の創造」が明確に謳われており、今後の下水道では「処理」以外の付加価値が求められている。多くの下水処理場で採用されている標準活性汚泥法に代表される好気性生物処理では、好気性微生物の代謝を利用し下水中の有機物をCO_2に変換、あるいは菌体内に固定化し、菌体を焼却処分している。この下水処理に要するエネルギー消費は、国内の総エネルギー消費の約0.7%を占めており、その約半分が好気性生物への酸素供給（ばっ気）によるものである。ここで、有機物はエネルギー源になり得ることと、昨今の世界的なエネルギー不足を踏まえてこの現状を見ると、現行の下水処理では莫大なエネルギーを投じて貴重なエネルギー源をCO_2として放出しているということになる。一方、上述の好気性処理とは逆に嫌気性微生物の代謝を利用した嫌気性処理は、嫌気条件での反応であるためばっ気が不要である、また、水中の有機物はメタンを主成分とするバイオガスに変換することができ、エネルギー源として利用することができる。嫌気性処理の一種である嫌気性膜分離活性汚泥法（AnMBR）は、膜による固液分離を組み合わせた嫌気性処理であり、運転管理が容易であること、高負荷運転が可能であることから、その適用の拡大が期待されている。しかしながら、嫌気性処理では、嫌気性微生物の至適温度である38℃付近までリアクター内を加温する必要があることから、有機物濃度が希薄な水に適用すると、生成するエネルギー（すなわちバイオガス）よりも加温に要するエネルギーが膨大になるため、下水処理には適用が困難とされている。しかしながら、低エネルギーな手法で下水中の有機物を濃縮することが出来れば、下水処理に嫌気性処理を適用でき、下水処理に費やされているエネルギーを低減でき、さらには下水処理を行いながらエネルギーを創出することが可能になると考えられている。

以上の背景から、本研究では、低エネルギープロセスとして近年注目されている正浸透（FO）法により下水を濃縮し、有機物濃度を高めた下水をAnMBRで処理すると同時にバイオガスを回収するという新規下水処理システムを提案した。本システムは、下水処理に費やされているエネルギーを低減でき、さらには、エネルギー生産型の下水処理システムとなり得る可能性を有している。

第1章は序論であり、消費エネルギーの観点から現行の下水処理における問題点を指摘し、FO膜を用いた新たな下水処理システムを提案した。そして、このシステムの実現に向けた課題を列挙し、本論文の目的を述べた。

第2章では、下水をFO膜で直接濃縮することと、濃縮した下水を用いてメタン発酵を行うことの技術的な適用可能性を実験的な手法で評価した。実際の下水を用いたFO膜ろ過実験では、下水を体積ベースで19倍まで濃縮することができた。また、濃縮下水を用いたラボスケールの回分式メタン発酵試験では、0.22 m^3-CH_4/kg-COD_{rem}のメタン収率が実測され、これは一般的なメタン発酵と同等の性能であった。以上により、FO膜による下水の直接濃縮と濃縮下水のメタン発酵の技術的な実現可能性が示された。

氏名	小野田 草介

第 3 章では、嫌気性処理の後段では窒素やリンに対する後処理が必要である旨を述べ、ここに FO 膜を適用することを想定し、FO 膜での栄養塩類の阻止に関する検討を行った。模擬嫌気 MBR 処理水を用いた FO 膜ろ過試験では、リンについては非常に高い阻止性が認められたが、アンモニアについては阻止率が FO 膜の運転条件（特に、膜の向き、駆動溶液の塩の種類と濃度）に強く依存することを明らかになった。原水中のアンモニア濃度が高いほどアンモニアの膜透過流束は大きかった。また、DS からの塩の逆拡散が大きいほどアンモニアの阻止率が高かった。この傾向は、FO 膜の向きを変更しても、また、DS の溶質を変更しても同様であった。これは、今後の FO 膜のアンモニア阻止性向上、および膜の運転条件の選定において重要な知見であった。

第 4 章では、都市下水の FO 膜ろ過において膜ファウリングを引き起こす有機物の調査を行った。実際の都市下水を用いた FO 膜ろ過における膜ファウリングは、人工下水（フミン酸、BSA、アルギン酸ナトリウム、およびこれらの混合物）を用いた時の膜ファウリングより強固であった。この結果は、人工ファウラントを用いた実験では実際に起こり得る FO 膜における膜ファウリングを正しく理解することが困難であることを示している。次に、三次元励起蛍光マトリクス分析（EEM）および液体クロマトグラフィー有機炭素検出分析（LC-OCD）によって膜から剥がし取ったファウラントの特性を調査した。この結果では、バイオポリマーと呼ばれる有機物画分（すなわち、多糖類およびタンパク質など）が FO 膜における主たるファウラントであることが示され、逆に、原水中での構成割合の大きいフミン酸様物質は膜ファウリングに対しては大きく寄与しないことが示された。本章により得られた知見は、本システムの実用化に向けて今後必要となるであろう FO 膜ろ過の前段処理プロセスの選定、および低ファウリング性 FO 膜の開発において重要な極めて知見であった。

第 5 章では、FO 膜による下水の直接濃縮と嫌気性 MBR を組み合わせた新規下水処理システムが正味のエネルギー生産システムとなるための運転条件を実験と計算によって求めた。本システム全体のエネルギー収支においては、嫌気性 MBR の運転温度が最も重要なファクターであった。都市下水を用いて運転温度を変更して行ったラボスケールの回分式メタン発酵試験では、運転温度の低下とともに有機物の除去速度は低下したが、バイオガス中のメタン濃度は一定であり、有機物除去量あたりのメタン生成量（すなわちメタン収率）は運転温度に関わらず一定の値を示したことから、低温の AnMBR においても効率的なメタンガス生成が行えることが示唆された。得られたメタン収率を基に、提案システム全体のエネルギー収支を試算した結果、26℃以下の運転温度で嫌気性 MBR を運転することが出来れば、本システムはエネルギー生産型の下水処理システムになり得ることが示された。本章により得られた知見は、本システムの実用化に向けて今後継続されるであろう開発における重要な目標値を示すものであった。

第 6 章では、本研究の結論と今後の展望を述べた。

以上、本研究では、FO 膜による下水の直接濃縮と AnMBR を組み合わせた新規下水処理システムの技術的・経済的な実現可能性を示し、実用化に向けた課題解決における重要な知見を収集することができた。これは、現行のエネルギー消費型の下水処理方式から脱却し、エネルギー生産型の下水処理を実現するための重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の小野田草介は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。