

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22932

研究課題名(和文)正浸透膜を活用した下水のメタン発酵技術の開発

研究課題名(英文)Development of methane fermentation technology for sewage using forward osmosis membrane

研究代表者

西嶋 渉(NISHIJIMA, WATARU)

広島大学・環境安全センター・教授

研究者番号：20243602

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：下水等は含有する有機物の濃度が低く、メタン発酵技術を用いてエネルギー回収ができない。本研究では、海水と下水の浸透圧差を駆動力として正浸透膜を使って下水中の有機物を濃縮する技術の開発を目指した。本来正浸透膜は無動力で運転されるが、一定の加圧を行うことで流量の向上とメタン発酵を阻害する無機塩の除去性の改善が同時に達成された。1価の無機イオンと比較すると2価イオンは除去されにくい傾向にあったが、1価イオンのみの除去性を上げるだけでもメタン発酵阻害を抑制可能であることがわかった。海水側から次亜塩素酸ナトリウムを透過させ、ファウラントと膜の接着面で作用させることで、効率的な洗浄ができる可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

下水は、現在エネルギーをかけて処理されており、我が国の電力消費量の約0.35%を消費し、処理の過程で発生する污泥は産業廃棄物の20%に達する。しかし、下水等を濃縮することができればエネルギー回収技術であるメタン発酵によってエネルギー回収が可能となる。無動力で運転される正浸透膜を使った下水濃縮に期待がかかるが、流量が小さく、大容量の下水等の処理には向かないことに加えて、有機物とともに無機塩類が濃縮するとメタン発酵阻害が起こる。本研究では正浸透膜に多少の加圧を加えることで、処理量を増加させると同時に無機塩類の透過性を高めることに成功し、課題に克服に大きく貢献する成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：The concentration of organic matter in sewage is low and energy in it cannot be recovered using methane fermentation. In this research, we aimed to develop a technique to concentrate organic matters in it by a forward osmotic (FO) membrane (FO) using the osmotic pressure difference between seawater and sewage as a driving force. Originally, the FO membrane is operated without power, but by applying constant pressure, improvement of the flow rate and improvement of the removability of inorganic salts that inhibit methane fermentation were achieved. The divalent ions tended to be more difficult to remove than the monovalent inorganic ions, but it was found that the inhibition of methane fermentation can be suppressed by increasing the removability of only the monovalent ions. It was shown that efficient cleaning can be achieved by allowing sodium hypochlorite to permeate from the seawater side and act on the adhesive surface between the foulant and the membrane.

研究分野：環境工学

キーワード：下水 正浸透膜 メタン発酵

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

下水等低濃度有機性排水処理は、好気条件下で排水中の有機汚濁物質を微生物により分解・無機化する処理である。その際、好氣的な環境を維持するための曝気に我が国の電力消費量の約 0.35% (35 億 kWh) を消費する高エネルギー消費型のプロセスである。さらに処理に伴って増殖する微生物が廃棄物 (汚泥) となり、その発生量は我が国の産業廃棄物の 20% に達する。一方、排水中の有機物濃度が高ければ、嫌気性微生物を用いて有機汚濁物質を天然ガスの成分であるメタンに変換する「メタン発酵」という技術が存在するため、有機性排水からエネルギーをつくりだすことができる。メタン発酵では汚泥の発生量も小さい。ではなぜ下水等低濃度有機性排水処理にメタン発酵を使わないのかという理由は主に二つある。①有機物濃度が低すぎてメタン発酵できない (濃度制限)、②メタン発酵は好氣的な微生物分解と比較して処理速度が小さく大量に発生する下水等には適用できない (処理量制限)。この課題は下水を濃縮し、有機物濃度を高めると同時にメタン発酵に供する排水量を減らすことができれば克服される。

2. 研究の目的

本研究では、下水をターゲットとして、正浸透 (FO) 膜を用いて、メタン発酵阻害を引き起こす無機塩類の濃縮を抑制しながら下水中の有機物を濃縮するプロセスを開発する。

3. 研究の方法

大規模な下水処理場が沿岸部に立地していることに着目し、塩濃度が高い海水と低塩分である下水の浸透圧差を基本的な駆動力とした正浸透膜による排水中有機物の濃縮を行う。正浸透膜はまだ膜の種類が限定的であるため、本研究ではサポート部は異なるが分離部分が共通する逆浸透膜を用いて実験を行った。具体的な研究方法は、以下の通りである。

- 1) FO 膜は無動力でろ過可能であることが特徴であるが、単位時間、膜面積あたりのろ過水量 (流量) が非常に小さく、そのままでは下水のような大量の排水を処理できない。そこで、ある程度の加圧によって流量を高めることによるろ過流量の増加について検討を行った。
- 2) 有機物と同時に無機塩類も濃縮されるが、無機塩類濃度が高いとメタン発酵の阻害が起こることが知られている。そこで異なる塩阻止率を持つ膜で、下水中の無機塩類濃縮を抑制しつつ有機物を濃縮のための適切な膜の選択と FO 操作条件について検討した。
- 3) 海水側から次亜塩素酸ナトリウムを浸透させ、膜洗浄する方法について検討した。
- 4) 模擬濃縮下水を用いて、メタン発酵試験を行い、無機塩類のメタン発酵阻害について評価した。

4. 研究成果

4.1 加圧の効果

ポリアミド製 RO 膜 (NTR759HR、塩阻止率 93%) を正浸透膜として使用し、供給溶液 (FS) としてろ過下水、駆動溶液 (DS) として海水相当の 0.5 M (50,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) に調整を行った塩化ナトリウム水溶液を使用し、ろ過実験を行った。海水とろ過下水の浸透圧差は約 3 MPa である。圧力と得られた流量の関係を図 1 に示す。浸透圧のみを駆動力としたときの流量は 0.04 m/d と低い値であったが、加圧に応じて流量は上昇した。精密ろ過膜の操作圧力程度の 0.2 MPa では、2.25 倍、限外ろ過膜の操作圧力程度の 1.0 MPa では、11 倍の流量が得られた。使用膜における有機物の阻止率はほぼ 100% であった。加圧によっても有機物の阻止率に変化はなかったが、1.0 MPa 時の無機塩類阻止率は無加圧時の 9 割と加圧に伴って無機塩類の透過が起こりやすくなった。

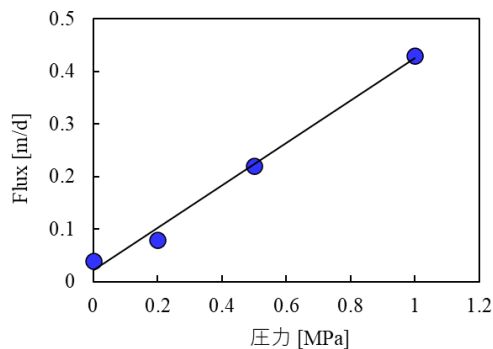


図1 Fluxに及ぼすFSへの加圧の影響

4.2 膜の違いによる有機物、無機塩類の透過性

異なる NaCl 阻止率を持つナノろ過膜から逆浸透膜 10 種を用いて、ろ過下水中の有機物及び無機塩類の阻止率を調べた (図 2)。実際の下水濃縮では固形分も濃縮されるので、固形分の有機物も含めた有機物阻止率 (全有機物) も算出した。有機物阻止率、塩阻止率ともに NaCl 阻止率 (カタログ値) が高い膜程高い傾向を示した。有機物阻止率は NaCl 阻止率が 15% の時 0.7 であったが、NaCl 阻止率の増加と共に増加し、膜の NaCl 阻止率が 60% 以上の膜では 0.9 以上を示し、下水濃縮に適用可能な性能を示した。下水濃縮に適した膜は、有機物の阻止率が高いこととともに、メタン発酵を阻害する無機塩類の阻止率が低いことが求められる。NaCl 阻止率 99.5% 以上の膜では、無機塩類阻止率はほぼ 1.0 であったが、NaCl 阻止率が 93% までの膜では有機物と比較して低い無機塩類阻止率を示し、一定の無機塩類は濃縮下水から排除されることがわかった。これらの結果より、有機物を濃縮しつつ、一定の無機塩類を除去可能な膜は NaCl 阻止率が 60% から 93% の膜であることが示された。

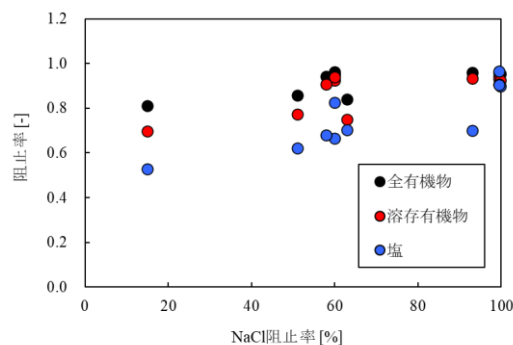


図2 ろ過下水中の有機物及び無機物の阻止率

4.3 イオン種による阻止率の違い

NaCl 阻止率の異なる 3 つの膜 (NaCl 阻止率 60%、93%、99.5%) を用いて、無機イオン種による膜透過性の違いを評価した (図 3)。NaCl 阻止率 99.5% の膜は全ての無機イオンで 80% 以上と高い阻止性を示したが、NaCl 阻止率 93% の膜では一価イオンの阻止率は二価イオンと比較して低く、30~50% の一価イオンは海水側に排除され、濃縮下水中には残らないことが示された。さらに、NaCl 阻止率 60% の膜においては、一価の全無機イオンと二価の陽イオンについては阻止率が 60% 以下となった。いずれの膜においても、二価陰イオンの阻止性は高かった。下水濃縮に適した二種の膜 (NaCl 阻止率 60%、93%) は、陽イオンの除去性に優れており、二価イオンと比べ一価イオンの膜透過性が高い傾向が確認された。

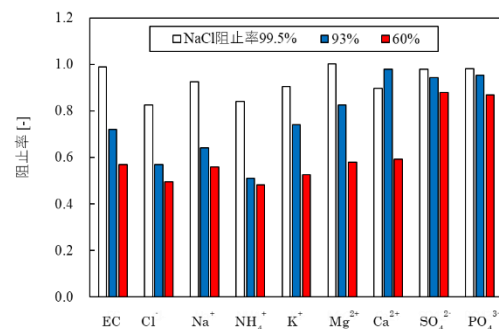


図3 ろ過下水中各種イオンの膜透過性

4.4 次亜塩素酸ナトリウムによる洗浄

膜汚染は下水 (FS) 側の膜表面で起こる。次亜塩素酸ナトリウム等洗浄薬品を汚染物質と膜の接着面で作用させることができれば容易に汚染物質を膜から剥離できると考えられるが、通常洗浄は FS 側に薬品を含む洗浄液を通水して行われるため、薬品は接着面ではなく汚染物質の外表面に作用し、接着面には薬品が届きにくい。そこで、洗浄起こる海水 (DS) 側から洗浄薬品である次亜塩素酸ナトリウムを透過させ、汚染物質と膜の接着面に直接作用させる洗浄法について検討した。下水濃縮に適した膜の中で次亜塩素酸ナトリウムの浸透が最も難しいと考えられる塩阻止率が最も高い 93% のポリアミド製 RO 膜 (NTR759HR) を用いて、検討を行った。遊離塩素濃度として 2.4~3.8 mg/L の次亜塩素酸ナトリウムを用いた実験で濃度に関わらず 16~18% の遊離塩素が DS 側から FS 側に透過することが確認され、DS 側から次亜塩素酸ナトリウムを用いた洗浄が可能であることが示された。本研究のろ過実験は短期の回分実験であるため、十分な膜汚染を起こすことができなかったため、本洗浄方法による洗浄効果の確認には至らなかった。

4.5 濃縮下水中無機塩類濃度のメタン発酵への影響

下水の有機物を 40 倍まで濃縮することを想定した濃縮人工下水を作成し、有機物と同様に全無機塩類も同倍率で濃縮された系列 (塩有機 100%)、一価イオンのみ 30% 透過することを想定した系列 (すなわち二価イオンは同倍率で濃縮、一価イオンは同倍率の 70% 濃縮)、全無機イオンが 30% 透過することを想定した系列 (塩 70%)、無機塩類の影響を完全に排除した有機物のみ濃縮された系列 (有機のみ) を設定した。有機のみの系列は 40 倍濃縮についてのみ評価した。有機物とともに無機塩類も完全に濃縮された系列では濃縮倍率が 20 倍以上でメタンガスの発生量が低下し、無機塩類濃度が高くなることによる発酵阻害が表れた。

一方で、全無機イオンが 30%透過する系列、一価無機塩類のみ 30%透過する系列においては、40 倍濃縮まで阻害は確認されなかった。

先の下水濃縮に適した膜の評価では、無機イオンの中でも二価イオンの阻止性は高いものの一価イオンの阻止性は低いことが示された。今回の結果は一価イオンがある程度透過し、濃縮下水中の一価イオンの濃度を低くすることができればメタン発酵阻害を回避できる可能性を示した結果である。濃縮下水の効率的なメタン発酵のためには、今回の 40 倍濃縮よりさらに濃縮倍率を高めることが有効であるが、さらに高倍率の濃縮における無機塩類の挙動およびメタン発酵への影響についてはさらなる検討が必要である。

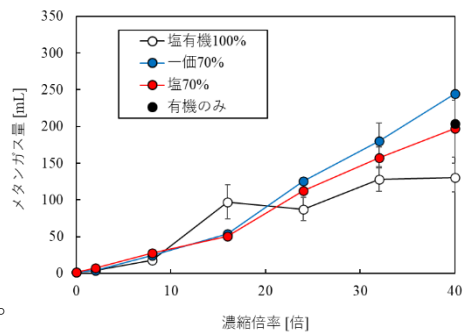


図4 メタン発酵における塩濃縮による影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 内田浩夢、中井智司、橋本くるみ、梅原亮、西嶋渉、大野正貴
2. 発表標題 正浸透膜法を用いたエネルギー生産型排水処理システムの開発
3. 学会等名 日本水環境学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------