

研究成果報告書

研 究 題 目		下水処理水の逆浸透膜処理：海水による目詰まりした膜の洗浄と洗浄メカニズムの解明	実 施 年 度
			2020 年度
代 表 研 究 者	所 属	山口大学大学院創成科学研究科建設環境系専攻	
	氏 名	鈴木 祐麻	印

1. 研究の目的・背景

・研究の学術的背景

我が国に下水処理水の再生利用率は全国平均で見れば現在でも 1.3%であり決して高いとは言えないが、東京や福岡などの大都市では水資源の確保が大きな課題となっており、安定した水量を供給できる下水処理水の再利用はこれから確実に普及する。我が国における再生水の利用方法は主に修景用水、河川維持用水、そして融雪用水であるが、海外では逆浸透膜（RO 膜）を利用して下水処理水を飲料水レベルの水質まで処理する下水処理水再利用システムが既に稼働しており、シンガポールやアメリカのテキサス州では下水処理水の飲用利用も行われている。これらの処理プロセスにおいては、RO 膜の前処理として精密ろ過膜（MF 膜）が用いられている。しかし、この MF 膜では溶存性物質の大部分は除去できないため、MF 膜を透過した溶存有機物により RO 膜が目詰まりすることが課題となっている。

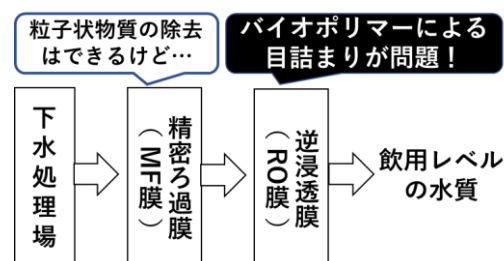


図 1. 下水処理水の再利用における逆浸透膜の目詰まり

・本研究の目的

Ca^{2+} が酸性多糖類を架橋・ゲル化して RO 膜の目詰まりを促進することは過去の多くの文献に報告されている既知の知見である。そこで、本研究は 2 つの検討項目それぞれに明確なテーマ目標を設定することで、ゲル化した多糖類の架橋構造を破壊して容易に洗浄する洗浄方法を提案し、更にメカニズムを解明して多角的に効果を実証する（図 2）。

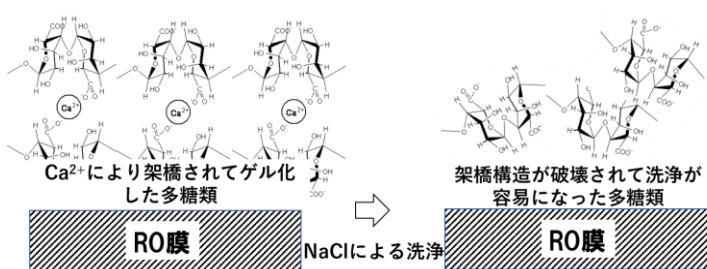


図 2. 本研究で検証する多糖類の洗浄メカニズム

テーマ 1: 多糖類で目詰まりを起こした RO 膜が NaCl 水溶液で容易に洗浄できることを示す。
 テーマ 2: NaCl 水溶液の代わりに海水を用いたより安価な洗浄プロセスを提案する。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

テーマ 1

まず、下水処理水に含まれるバイオポリマーの組成を調べるために、国内の 4 種類の下水処理場からサンプリングした下水処理水の DOC 濃度、バイオポリマー濃度、そしてバイオポリマーの N/C 比を LC-OCD-OND で測定した。その結果を図 1 に示す。

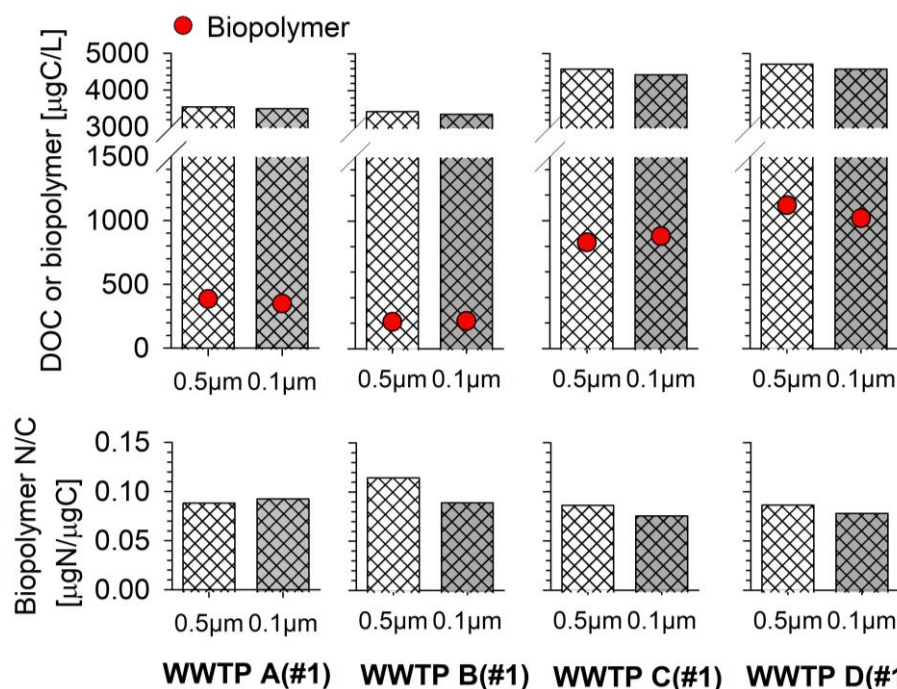


図 3. 国内の 4 種類の下水処理場からサンプリングした下水処理水の DOC 濃度、バイオポリマー濃度、そしてバイオポリマーの N/C 比を LC-OCD-OND で測定した結果

図 3 の上段に示すように溶存有機物質の濃度は 4 つの処理場で大きくは異ならずに 3383 - 4725 $\mu\text{gC/L}$ の範囲であった一方で、バイオポリマーの濃度は処理場ごとに大きく異なり、処理場 B(#1) (約 210 $\mu\text{gC/L}$)、処理場 A(#1) (約 360 $\mu\text{gC/L}$)、処理場 C(#1) (約 850 $\mu\text{gC/L}$) の順に高くなり、最も高い処理場 D(#1)は処理場 B(#1)の約 5 倍となる約 1050 $\mu\text{gC/L}$ のバイオポリマーが含まれていた。また、下段に示すように、N/C の重量比は処理場による違いは小さく 0.1 前後の値を示した。バイオポリマーの大部分は多糖類とタンパク質であることから、ここでは脂質や核酸などの他のバイオポリマーは無視する。また、カニの甲羅やエビの殻に含まれるキチンなどの窒素含有多糖類は考慮せず、バイオポリマーに含まれる窒素は重量比が N/C=0.33 の比率で全てタンパク質に由来するとする。これらの仮定で N/C=0.1 から算出した多糖類とタンパク質の炭素重量比は 2.3 であり、バイオポリマーにはタンパク質より多糖類が多く含まれることが示唆された。

次に、代表的な多糖類であるアルギン酸ナトリウム (20 mg/L, $\text{Ca}^{2+} = 2 \text{ mmol/L}$, イオン強度は NaCl により 10 mmol/L に調整) を用いたろ過実験により透水性が 50%程度減少した RO 膜を 0.5 mol/L の NaCl 溶液に浸漬して 1 時間ゆっくりと振とうした結果、透水性が

約 81%にまで回復した。また、NaOH により pH を 11 に調節した場合は透水性が約 95%にまで回復した。つまり、pH を高くした方が洗浄効率は高いものの、高濃度の NaCl で洗浄することによりアルギン酸カルシウムに含まれる Ca^{2+} がイオン交換され、ゲル状のアルギン酸カルシウムが溶解することにより RO 膜が洗浄できることが分かった。

テーマ 2

人工海水を用いた洗浄実験では、無機塩が析出するために pH の調節はできない。よって、pH が 8.2 の人工海水をそのまま用いてテーマ 1 と同様に洗浄実験を行った。その結果、1 時間の洗浄では透水性は約 64%にまでしか回復しなかったが、洗浄時間を 3 時間にすることで洗浄効率は改善して洗浄後の RO 膜は約 83%にまで回復した。しかし、洗浄時間を 5 時間にしてもそれ以上の回復はしなかった。

申請時の計画に対する達成度合

テーマ 1 に関しては、下水処理水に含まれるバイオポリマーの分析という当初は計画していなかったことまで研究することができた。しかし、テーマ 2 では、目標としていた 90%以上の回復には至らなかった。しかし、海水とアルカリ洗浄を組み合わせることにより薬品使用量を減らすことができるため、本研究で得られた結果は今後に期待が持てる結果と考えられる。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

【設備備品費】申請時の計画では高圧ポンプを 3 台購入するための予算として 120 万円を申請していたが、助成金額が 200 万円から 130 万円に減額になったこと、そして 2 台は既に所有していたことを踏まえて高圧ポンプは購入しなかった。その代わりとして下記の 4 つの備品を購入した一つ目は代表的なバイオポリマーであるタンパク質を定量するために Qubit 4 Fluorometer である。二つ目と三つめは逆浸透膜の透水性をモニタリングするための電子天秤である。そして四つ目はバイオポリマーを生産する細菌を培養するためのクールインキュベーターである。

【消耗品】申請時は 50 万円を申請していた消耗品だが、実際は約 52 万円の使用であった。

【旅費】申請時は 22 万円を申請していたが、新型コロナの関係で学会がオンライン開催となったことから必要なくなり、県内の下水処理場へのサンプリングおよび分析会社との打ち合わせ（約 6.3 万円）のみとなった。

【その他】申請時は計画していなかったが、純水装置の修理に約 15.6 万円を使用した。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

我が国における下水処理水の再利用目的は工業用水や景観灌漑用水などが主であるが、より高い水質を得るためにMF膜で濁質成分を除去した後にRO膜で処理する統合的膜処理システムが導入された例も報告されている¹⁾。つまり、我が国においても、統合的膜処理システムによる下水処理水の再利用は今後大きく普及すると考えられる。今後の課題として、下水の処理方式とバイオポリマーの濃度の関係を明らかにすること、そして多糖類やタンパク質を含むバイオポリマーの統合的膜処理システムにおける挙動を把握することが挙げられる。また、本研究では海水による安価なRO膜洗浄について検討したが、今後は統合的膜処理システム全体、つまりRO膜のみならずMF膜のファウリングおよび洗浄方法について研究を進め、全体の処理エネルギーを削減することも重要な課題の一つである。

1) 一般社団法人膜分離技術振興協会 膜に関する再利用事例集

<http://www.amst.gr.jp/reusecase/reusecasecollection.html>（令和3年5月29日閲覧）

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

英文学術誌に投稿するための原稿を作成中です（投稿予定 2021 年 8 月）