2020年度論文奨励賞（廣瀬賞）受賞

Effect of different light conditions on ammonium removal in a consortium of microalgae and partial nitrifying granules

秋月　真一（創価大学プランクトン工学研究所・講師）

この度は，栄誉ある論文奨励賞（廣瀬賞）を賜り，誠にありがとうございます。ご推薦，ご選考いただきました先生方と日本水環境学会の関係者の皆様に，心より御礼申しあげます。

受賞対象となった論文は，微細藻類と亜硝酸型硝化グラニュールの共存系において，異なる光強度がアンモニア除去率と除去経路に与える影響を評価し，共存系が円滑に進む最適光強度の範囲を推定した内容です。無限の太陽光を利用する微細藻類による廃水処理は，持続可能な開発目標（SDGs）への関心の高まりとともに，世界中で広く注目を集めています。アンモニアは，食品製造業，電子部品製造業，化学薬品および医薬品製造業，メタン発酵施設等の多様な産業施設で発生する廃水に含まれ，微細藻類を用いたアンモニア含有廃水処理に関する研究も進められてきました。しかし，光合成にともなうpH上昇により遊離アンモニア濃度が増加し，微細藻類単独の槽では，しばしば処理が破綻することが知られています。そこで，本研究では，微細藻類と硝化菌を組み合わせることで，アンモニアを窒素酸化物（NO_2^-またはNO_3^-）に酸化し，遊離アンモニア阻害を回避する“微細藻類－硝化菌共存系”に着目しました。微細藻類と好気性細菌の共存系による廃水処理は古くから知られている手法ですが，微細藻類—硝化菌共存系の研究は比較的新しく，とくに，異なる光強度が両微生物の機能に与える影響についての知見は非常に限られていました。先行研究の多くは，光強度を200 μmol photons m^{-2} s^{-1}以下に制御して処理性能を評価していましたが[1]，屋外環境下では日中の光強度が1000～2000 μmol photons m^{-2} s^{-1}に達します。本手法を屋外環境下で利用した場合どのような挙動を示すかを予測する上でも，光強度の影響評価が重要な基礎的知見となります。

そこで本研究では，まず，光強度を0（暗所），100，450，1600 μmol photons m^{-2} s^{-1}の4条件設け，72時間の回分実験により，各光強度におけるアンモニア除去率と除去経路（微細藻類による摂取か亜硝酸型硝化か）を比較しました。その結果，暗所では亜硝酸型硝化が優先し，100 μmol photons m^{-2} s^{-1}では微細藻類による摂取と亜硝酸型硝化が進み，それぞれ，65％と62％の除去率を示しました。一方で，450 μmol photons m^{-2} s^{-1}以上では，強光阻害により両微生物の活性が著しく低下しました。当初期待していたグラニュール形状による強光からの保護作用[2]は12時間目では見られたものの，24時間目以降はほとんど確認されませんでした。これらの結果から，屋外環境下で共存系を円滑に進めるためには，遮光ネットの利用や強光環境へのバイオマス順化等の対策が必要になると考えられました。

次に，アンモニア除去経路を制御する要因を明らかにするために，本研究と既存の微細藻類－硝化菌共存系の実験結果を統合し，運転パラメータ（光強度，日平均光強度，温度，pH，初期アンモニア濃度）とアンモニア除去における硝化寄与率の関係を検証しました。その結果，除去経路は日平均光強度に最も強く制御されていることが明らかとなりました。反応槽外部から酸素供給を行わずに共存系を成立させる場合，微細藻類の光合成による酸素供給量と硝化菌による酸素消費量のバランスに留意する必要があります。そこで，日平均光強度と硝化寄与率の関係式と，光合成反応，亜硝酸型硝化反応，硝酸型硝化反応それぞれの化学量論式から，日平均光強度に対する理論的な酸素生成量および消費量を求めました。その結果，光合成による酸素供給量は，日平均光強度が27 μmol photons m^{-2} s^{-1}以下では亜硝酸型と硝酸型硝化反応の要求量を下回り，27～35 μmol photons m^{-2} s^{-1}では亜硝酸型硝化反応の要求量を上回り，35 μmol photons m^{-2} s^{-1}以上では硝酸型硝化反応の要求量も上回ると推定されました。一方で，日平均光強度が200～300 μmol photons m^{-2} s^{-1}以上では，過剰な酸素供給による過飽和溶存酸素や，強光による阻害が生じる可能性があります。

光合成微生物を利用した廃水処理技術は，比較的温暖で太陽光が豊富に存在する“サンベルト地域”での利用に適すると考えられます。サンベルト地域には，廃水処理施設の普及率が低い，東南アジア，中南米，アフリカ等の開発途上国が集約しています。本研究で得られた成果を基に，今後は，屋内外での連続運転性能評価と実際のサンベルト地域での応用研究を進めていきたいと考えております。

最後に，本研究は日本科学協会の笹川科学研究助成29－642と科学研究費助成事業 若手研究（B）17K12851の助成を受けました。また，本研究の遂行と論文執筆にあたり多大なご支援とご助言をいただいた共著者の皆様に，この場をお借りして深く感謝申しあげます。

参　考　文　献

1）Karya, N.G.A.I., van der Steen, N.P., Lens, P.N.L., 2013. Photo-oxygenation to support nitrification in an algal-bacterial consortium treating artificial wastewater. Bioresource Technology 134, 244-250.

2）Akizuki, S., Cuevas-Rodríguez, G., Toda, T., 2020. Application of nitrifying granular sludge for stable ammonium oxidation under intensive light. Biochemical Engineering Journal 160, 107631.

2020年度論文奨励賞（廣瀬賞）受賞

Energy consumption in a baffled membrane bioreactor (B-MBR): estimation based on long-term continuous operation

三好　太郎（前澤工業株式会社　現：国立保健医療科学院生活環境研究部・主任研究官）

この度は，栄誉ある論文奨励賞（廣瀬賞）を授与いただき誠にありがとうございます。ご審査にあたりまして，ご推薦，ご選考いただいた先生方，ならびに日本水環境学会の関係者の皆様にこの場をお借りしまして厚く御礼申しあげます。

受賞対象となりました論文は，膜分離活性汚泥法（MBR）の運転方式を改良し，MBR運転の省エネルギー化を目指した検討の成果を取りまとめたものであります。ご存じのように，近年では省エネルギー化が社会的に重要な課題であります。下水処理においても，処理能力を向上させつつ電力使用量を低減できる方策の確立が喫緊の課題となっております。本研究で検討対象としたMBRは，既存下水処理技術と比較して処理水質の向上や処理施設の省スペース化が可能であり，次世代の下水処理技術として長年注目を集めております。しかし，運転時の電力使用量が大きいことが課題であり，現段階においても広範な普及には至っておりません。MBRの運転時の電力使用量を削減することができれば，持続可能な下水道の構築に大きく貢献できるものと考えられます。

そこで本研究では，単一槽で硝化脱窒を通じた窒素除去が可能な仕切板挿入型MBR（baffled MBR：B-MBR）[1, 2]の省エネルギー性を評価することを目的としました。B-MBRでは生物反応タンク内に仕切板を設置し，原水を間欠流入させることで硝化液循環ポンプが不要となるほか，生物反応タンク容積等の条件によっては無酸素タンクの撹拌機も使用せずに運転することが可能となります。結果として，これらの機器の電力使用量を削減することが可能となります。本研究では，実際の下水処理場内にパイロットスケールのB-MBR実験装置を設置し，実都市下水を原水とするB-MBRの連続運転を約半年間実施しました。連続運転の結果，適切な運転条件下において，B-MBRは有機物（生物化学的酸素要求量（BOD）で評価）および全窒素（T-N）に対して良好な除去性能を有することが明らかとなりました（処理水中BODおよびT-N濃度としていずれも5 mg L^{-1}未満を達成）。また，B-MBRはリン除去を意図した設備構成は採用していないものの，リンに対しても良好な除去率が得られました。MBRで重大な課題となる膜ファウリングに関しても，本連続運転にて採用した運転条件では，膜透過性能の回復を目的とした槽外洗浄は実施せず，標準運転サイクルに組み込まれているメンテナンス洗浄のみで連続運転期間全体を通じて安定した膜ろ過を継続することが可能でした。適切な運転条件を設定することでB-MBRは処理性能ならびに膜ファウリングの両面において，安定した運転が継続できることが明らかになったといえます。

続いてパイロット試験によってB-MBRの安定運転が可能であると見出された運転条件を採用して実規模B-MBR設備を運転した場合の電力使用量原単位を試算しました。本研究で使用したパイロットスケール実験装置と実設備の間では有効水深が異なるため，パイロットスケール実験装置で使用した中空糸膜の有効長（0.8 m）は実設備で使用される膜（3 m）よりも短いものとなっておりました。このような差異を考慮し，試算に用いる膜洗浄用曝気空気量の補正を行い，B-MBRの安定運転に必要となる単位膜透過水量あたりの膜洗浄用曝気空気量（SAD_p）として3.84 m^3-air m^{-3}-permeateを採用して電力使用量原単位を試算しました。このSAD_p値は，既存のMBRにおける一般的な報告値（10 m^3-air m^{-3}-permeate以上）と比較して大幅に低い値であります。試算は，日平均汚水量が10,000 m^3 day^{-1}である仮想の下水処理施設を想定して実施しました。B-MBRの電力使用量原単位の試算では，B-MBRの運転に必須となる機器（硝化液循環ポンプおよび無酸素タンク用撹拌機は除く）の電力使用量を積算し，処理水量で除すことで電力使用量原単位を求めました。下水処理施設の電力使用量は流入下水の水質によっても変化することから，本検討では国内の一般的な下水（BOD：120 mg L^{-1}およびT-N濃度：30 mg L^{-1}）に加え，海外事例としてタイの下水（BOD：50 mg L^{-1}およびT-N濃度15 mg L^{-1}）を処理する場合の電力使用量原単位を試算しました。その結果，国内およびタイでB-MBRを運転した場合の電力使用量原単位はそれぞれ0.22 kWh m^{-3}および0.20 kWh m^{-3}となるものと試算されました。これらの電力使用量原単位は窒素除去能力を有さない標準活性汚泥法と同等の水準であります。以上の結果より，B-MBR技術を採用することで，電力使用量の負担を増大させることなく，MBRの利点を享受することができる可能性を示すことができました。

最後になりましたが，本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業（JPNP14033）の助成を受け実施したものです。また，本研究の推進にあたりご指導，ご助言を賜りました北海道大学の渡辺義公先生，木村克輝先生，ならびに前澤工業株式会社の皆様に深く感謝申しあげます。

参　考　文　献

1）Kimura, K., Nishisako, R., Miyoshi, T., Shimada, R., Watanabe, Y., 2008. Baffled membrane bioreactor (BMBR) for efficient nutrient removal from municipal wastewater. Water Research 42, 625–632.

2）Miyoshi, T., Tsumuraya, T., Nguyen, T.P., Kimura, K., Watanabe, Y., 2018. Effects of recirculation and separation times on nitrogen removal in baffled membrane bioreactor (B-MBR). Water Science and Technology 77(12), 2803–2811.