

下水微生物燃料電池の電力を利用した有機物および栄養塩除去方法の検討

名古屋工業大学 学生会員 光岡恭介 正会員 吉田奈央子

1. 諸言

循環型社会の実現にむけ、下水処理場の資源循環インフラとしての活用が期待される。汚泥のバイオガス活用が進む一方、下水処理にかかる電力を上回る潜在エネルギーを有する下水の活用には至っていない。微生物燃料電池（以下:MFC）は下水中の有機物を直接電力に変換するが、有機物除去が不十分になる、または窒素化合物を除去できない課題がある⁽¹⁾。有機物および窒素化合物の除去方法として、MFC 電力によりミニエアポンプを駆動し酸素供給する方法が試みられているが⁽²⁾、曝気の影響によりエアポンプを稼働させるのに十分な電力をMFCが供給できない懸念がある。本研究では下水処理場に設置したMFCで回収した電力によりエアポンプを稼働し、曝気が電力生産ならびに有機物、窒素化合物の除去に与える影響について評価した。

2. 実験方法

2.1 実験に用いたMFCユニット

MFCユニットはMFCコアと炭素ブラシで構成した。MFCコアは、空芯のステンレスメッシュ（ $\phi 5.0 \times 100\text{cm}$ ）を、活性炭粉末を塗布したカーボンクロス（カソード）、アニオン交換膜（セパレータ）、黒鉛不織布（アノード）の順に巻き、ステンレスメッシュで再固定した。炭素ブラシ（ $\phi 4.0 \times 100\text{cm}$ ）はMFCコアを中心に5本配置した（図1A, B）。

2.2 MFCリアクターの運転

下水処理場に245Lスケールのリアクター（ $32 \times 90 \times 93\text{cm}$ ）を設置し、MFCユニットを12本設置した（図1C, D）。リアクター内部は水理的滞留時間（HRT）が40時間となるように下水を流入し、水流ポンプでリアクター内部の下水を循環した。また、流出口近傍に曝気部を設け（容積8%）、ポリウレタンスポンジ（ 1cm^3 ）を約380個設置した。曝気部中央の底部にエアストーンを設置し、シリコンチューブでエアポンプに接続した。MFCユニットと昇圧回路ADP5090を1:1で接続した12セットをキャパシタに接続し、ミニエアポンプに接続した。

2.3 部分曝気が曝気槽の溶存酸素濃度（DO）

およびMFCの電力生産に与える影響評価

DOはDOメータを曝気部中央に設置し、水面からの深さを変えて測定した。MFCの電力は、アノード、カソードを可変抵抗器に接続した際のセル電圧ならびに外部抵抗値によって決定した。さらにセル電圧を構成するアノード電位、カソード電位は、MFCコアの水面から15cmの高さに挿入したAg/AgCl電極を参照して測定した。

2.4 水質分析と有機物、 NH_4^+ 濃度の計算

MFCの流入および流出水について、生物学的酸素要求量（以下、BOD）および NH_4^+ 濃度を測定した。

MFC処理後の有機物、 NH_4^+ 濃度は、式（1）で計算した。

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

ここで、 C [mg/L]：培養開始から t 時間後における濃度、 k [1/h]：反応速度定数、 t [h]：水理的滞留時間（HRT）、 C_0 [mg/L]：流入濃度とした。

2.5 微生物群集構造解析

炭素ブラシ、黒鉛不織布、曝気部のスポンジ、流出水からDNAを抽出し、原核生物の16SrRNA遺伝子をPCR増幅した。PCR産物のアンプリコンパイロシーケンスを実施し、全リードに占める主要な属の相対比を比較した。

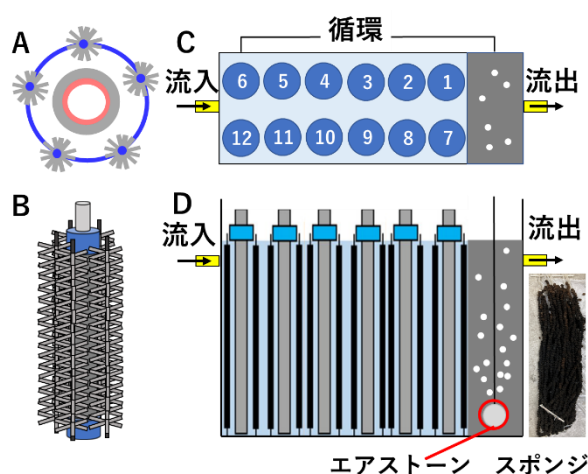


図1 実験に用いたリアクター

(A) MFCユニット上面図、(B) MFCユニット側面図、(C) リアクター上面図、(D) リアクター側面図

3. 結果および考察

3.1 部分曝気が曝気槽の DO および MFC の電力生産に与える影響

曝気槽の DO は曝気によって 0.00~0.01mg/L から 0.00~0.26mg/L に増加した (図 2). また, MFC の曝気時の電力密度は $0.028 \pm 0.018 \text{ W/m}^2$ で, 無曝気時の $0.084 \pm 0.029 \text{ W/m}^2$ から減少した (図 3).

3.2 部分曝気が有機物, NH_4^+ 除去に与える影響

流出 BOD, NH_4^+ 濃度を式 (1) に基づいて近似した. BOD の反応速度定数は曝気によって 0.044 から 0.069 に増加し, 計画放流水質を満たすのに必要な時間は 41 時間から 23 時間に短縮された (図 4A). NH_4^+ の反応速度定数は曝気によって 0.002 から 0.005 にわずかに増加したが, 計画放流水質を満たすのに必要な時間は 112 時間と長く, 改良が必要である (図 4B).

3.3 微生物群集構造解析

炭素ブラシでは, 嫌気条件において有機物分解を担う *Methanobacterium*, *Longilinea*, *Syntrophus* 属が 15.4~19.2% 存在し, 電力生産に関わる *Geobacter* 属は 1.3~1.7% にとどまった. 一方, エアカソード近傍の黒鉛不織布アノードおよび流出水で *Geobacter* 属がそれぞれ 5.3%, 9.2% 存在し, 電力生産に関わることが示唆された. 曝気槽底部のスポンジで, アンモニアと亜硝酸から嫌氣的に窒素ガスを生成するアナモックスである "*Candidatus Brocadia*" が 2.7% 存在し, アンモニアが曝気部で嫌氣的に除去されることが示唆された.

4. まとめ

MFC の回収電力でミニエアポンプを駆動し部分曝気した場合, 電力生産は減少するものの, 計画放流水準の BOD を満たす滞留時間が 18 時間短縮された. 部分曝気による NH_4^+ 除去の促進はわずかであったが, アナモックスの存在が確認されたことにより MFC 改良による曝気部の滞留時間がより大きく取れば, エネルギー自立的に有機物および窒素化合物を除去可能な下水処理技術が可能になることが示唆された.

参考文献

- (1) Sugioka et al., 2022. *Environ. Res* 205, 112416
- (2) Yamane et al., 2022. *RSC Adv.*, 12, 1509

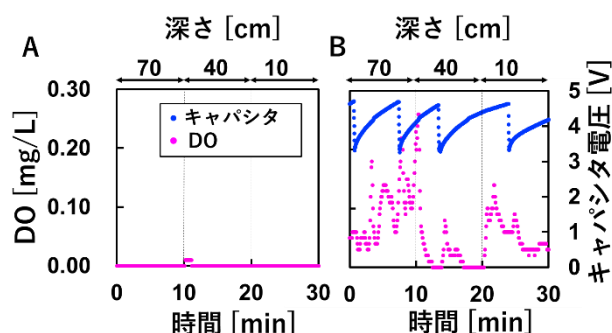


図 2 無曝気時 (A), 曝気時 (B) の曝気槽の DO およびキャパシタ電圧の変化

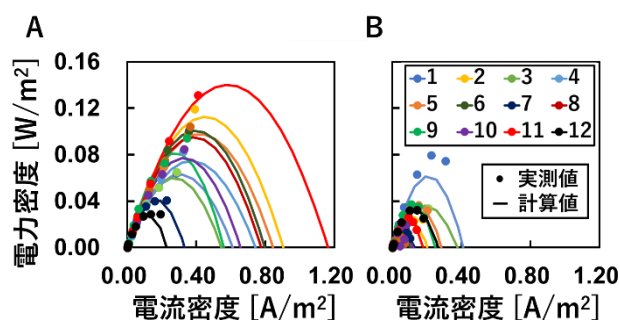


図 3 無曝気時 (A), 曝気時 (B) の MFC 電力比較

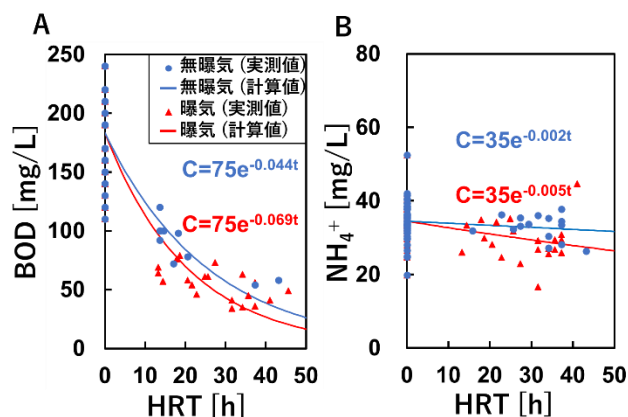


図 4 曝気が有機物 (A), NH_4^+ (B) に与える影響

表 1 MFC で検出された代表的な属

SP1, 2: スポンジ上部 (1) と下部 (2),
CB-T, M, B: 上部, 中部, 下部のカーボンブラシ,
GNWF: エアカソード近傍黒鉛不織布-アノード,
Anolyte: アノード槽流出水

属	全リードを占める割合(%)						
	SP1	SP2	CB-T	CB-M	CB-B	GNWF	Anolyte
<i>Methanobacterium</i>	1.1	0.1	2.4	4.7	4.3	1.9	0.0
<i>Longilinea</i>	12	3.3	12	12	14	0.3	0.1
" <i>Candidatus Brocadia</i> "	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Geobacter</i>	0.9	0.3	1.5	1.7	1.3	5.3	9.2
<i>Syntrophus</i>	2.9	3.7	3.5	4.5	5.3	0.2	0.3
<i>Syntrophobacter</i>	0.5	0.3	1.0	0.9	0.9	0.1	0.0
<i>Arcobacter</i>	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	12