

流れを考慮した下水微生物燃料電池によるアノード電流生産の予測計算

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○藤井健, 正会員 吉田奈央子

1. はじめに

下水道では下水処理（特に曝気）に最も電力を費やす一方、下水自体に消費電力を上回るバイオマスエネルギーが潜在する。微生物燃料電池（Microbial fuel cell：以下 MFC）は下水から直接電流生産が可能な非曝気処理であるが、有機物分解および電流生産能力に技術改善が必要である。我々は制限要因としてアノード微生物への有機物供給の律速に着目した（図1）。本研究では下水中に設置した MFC に流れを与え、流速が電流生産に与える影響を定量的に評価した。さらに酵素反応速度式であるミカエリスメンテン式を、流れを考慮した有機物分解速度式に適用することで、下水の流速と有機物濃度から電流生産を計算するとともに、3 種の仮想流路における MFC の電流生産を試算し比較検証した。

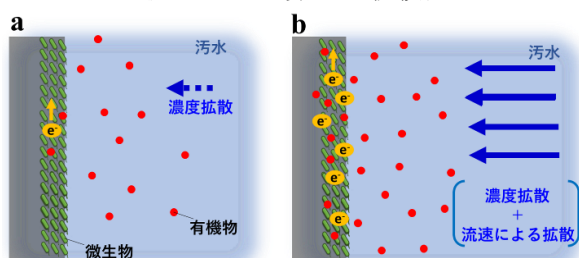


図-1 アノード表面略図 (a:流れ無し, b:流れあり)

2. 実験方法

2.1 実験に用いた装置

本研究では、アニオン交換膜型非白金触媒 MFC(図-2a)を使用した⁽¹⁾。下水で満たした反応槽内に MFC を設置し（図-2b,c）、水中ポンプで MFC に流速を与え電流生産を記録した。下水は COD_{Cr}[mg/L]=320 および 76, MFC に接続する外部抵抗は R=3 および 22 Ω とした。

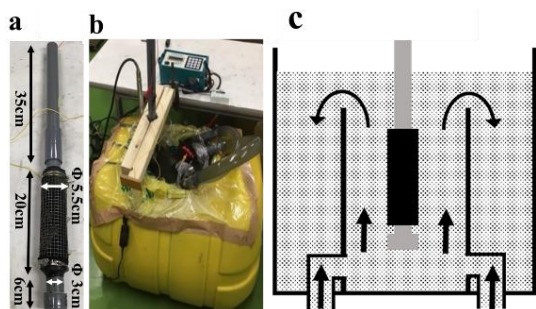


図-2 実験に用いた装置 (a:MFC, b:反応槽, c:略図)

2.2 電流生産密度の計算式

電流は微生物による有機物分解量に比例し(1)式で表せる。微生物の有機物分解速度はバイオマス量が一定であれば基質濃度が反応速度を決めるミカエリスメンテン式で表せる。流れ場にある MFC アノードでは微生物が有機物に対して過剰に存在するため有機物が流れによりどれだけ供給されるかが反応速度を決める。よって本研究では濃度に代わる指標として単位時間あたりに単位アノード面積に特定の濃度の基質が供給される有機物量を用いミカエリスメンテン式を(2)式のように改変して用いた。2.1 の結果に基づき(2)式の V_{max} , K_s , HRT' を最小二乗法により決定した。

$$I = CE \times \frac{dC}{dt} \times \frac{b}{M} \times F \cdots (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{V_{max} \times COD_{Cr} \times \left(\frac{v}{V_e} + \frac{1}{HRT'} \right) \times V_e}{K_s + COD_{Cr} \times \left(\frac{v}{V_e} + \frac{1}{HRT'} \right) \times V_e} \cdots (2)$$

I : 電流密度 [$\mu A/cm^2$], CE : クーロン効率 (22 Ω 接続時 $CE=0.30$, 3 Ω 接続時 $CE=0.15$) [-], b : 酸素 1 モルから生じる電子のモル数 ($b=4$) [-], M : 酸素の分子量 ($M=32$) [g/mol], F : ファラデー定数 ($F=96500$) [C/mol], V_{max} : 基質供給最大時の COD_{Cr} 分解速度 [$\mu g/(cm^2 \cdot s)$], COD_{Cr}: 汚水中の溶存有機物濃度 [mg/L], v : アノード近傍流速 [cm/s], V_e : 1cm² のアノード部分が処理する汚水体積 ($V_e=1$) [cm³/cm²], HRT' : 流速に関わらず生じる水理学的滞留時間 [s], K_s : 基質の半反応定数 [$\mu g/(cm^2 \cdot s)$]

2.3 仮想流路における MFC の電流生産の試算

続いて 100cm×100cm×100cm に MFC を配置した 3 つの仮想流路（水制無し以下 NON, 水平流れ制御：以下 HOR, 鉛直流れ制御：以下 VER）を想定し, MFC 近傍の流速分布を COMSOL Multiphysics を用いて計算し 2.2 での式(1)(2)を用いて電流生産密度を試算し, 流路の流れ制御が MFC の電流生産に与える影響を比較検証した。

キーワード 微生物燃料電池, 循環型社会, 下水処理, 有機物除去, 流速

連絡先 〒466-0006 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 TEL 052-732-2111

3. 結果と考察

3.1 流速が電流生産に与える影響

76mg/L COD_{Cr} の下水中に設置した外部抵抗 3Ω を接続した MFC に徐々に流れを与えた時の電流生産を図-3a に示す。流速の増加にともない電流生産が増加する様子が観察された。この促進効果は特に有機物濃度が低く外部抵抗が小さいときに大きく、最大で静置時の電流生産の 5.4 倍であった。各条件における下水流速に対する電流生産をプロットし(1)・(2)式で近似した結果を図-3b に示す。外部抵抗 22Ω では電圧が電流よりも電圧に分配され全体的に電流値が小さく、流速 7cm/s 以上で電流値はおおよそ一定になった。近似は特に COD=76mg/L, R=3Ω ではよく一致し、外部抵抗が大きく有機物濃度が濃い条件では数点実験と計算値にずれが見られた。

3.2 仮想流路における MFC 電流生産の試算

図-4 に、3 つの仮想流路に流入速度 0.1cm/s を与えた時の流速分布を計算した結果を示す。MFC 近傍の流束では VER が最も高く平均で 8.9×10^{-1} cm/s、次いで HOR (6.3×10^{-1} cm/s)、NON が最も低く 1.3×10^{-1} cm/s を示した。これより管水路において一定流速を与えた場合では特に鉛直流れを生じる水制配置によ

り MFC 近傍の流速が増すことが示唆された。続いて、この流速分布および図-3 で近似した式(1)(2)から各流路に 3Ω の外部抵抗を接続した MFC を設置した条件の電流生産密度を計算した結果を図-5 に示す。下水の COD 濃度が低いとき、水制の設置が電流生産をより促進し VER では NON の最大 1.7 倍の電流生産が生じると試算された。一方で COD_{Cr} 濃度が高い条件では、水制設置による電流生産の促進効果は小さいと考えられる。

4. 結論

非白金触媒アニオン交換膜型 MFC を汚水中に設置し流速を与えた結果、電流が増加した。この電流増加は、特に有機物濃度が低く接続抵抗が小さい場合に大きく、最大で静置時の 5.4 倍であった。下水流れ場における電流生産は濃度にかわり単位時間あたりに供給される有機物量を用いたミカエリスメンテン式で概ね表すことができ、この計算式を用いることで仮想流路における MFC の電流生産が試算可能である。

5. 参考文献

¹⁾ Sugioka et al. (2019) *Front. Energy Res.*, 7: 91

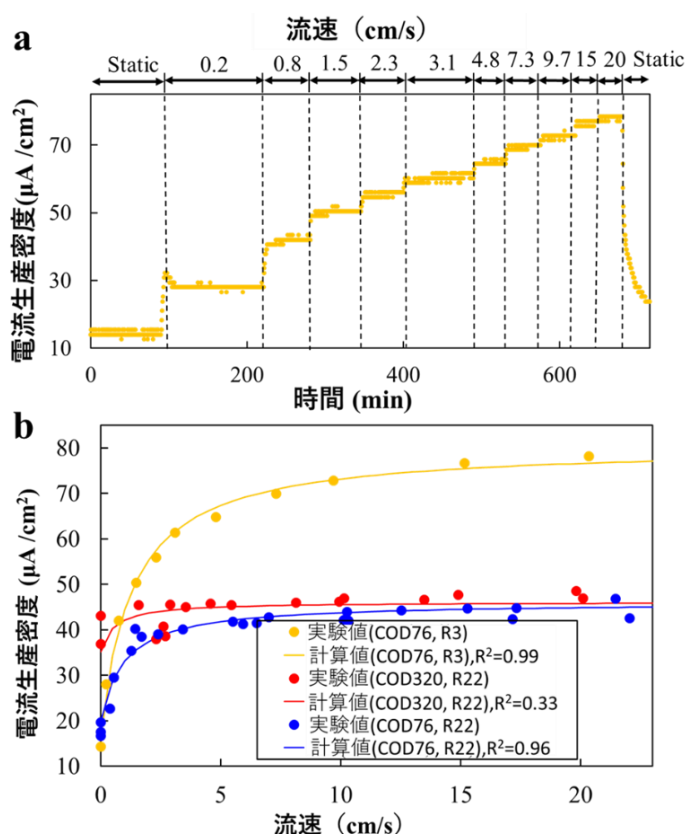


図-3 流れが MFC 電流生産に与える影響 a: 段階的に流速を増加した時の MFC 電流の推移, b: ミカエリスメンテン式による流速と電流生産の関係の近似

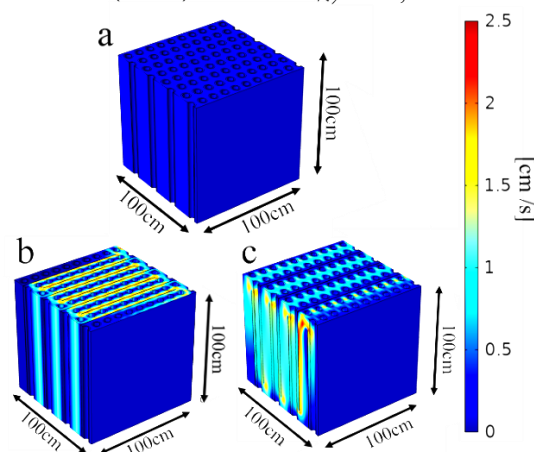


図-4 本研究で想定した 3 つの仮想流路における流速分布 a: 水制なし (NON), b: 水平流水制配置 (HOR), c: 鉛直流水制配置 (VER)

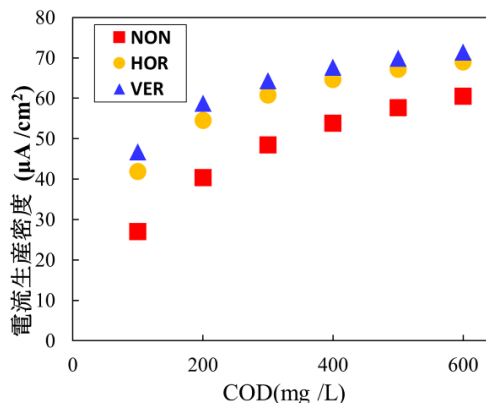


図-5: 3 つの仮想流路における MFC 電流生産の試算