

数理モデルを用いた微生物燃料電池の内部抵抗最小化 による最大電力の算定とその実証

Calculation and Experimental Proof of Maximizing Electric Power Using
a Mathematical Model of Microbial Fuel Cells Based on the Internal Resistances

藤長 愛一郎 (Fujinaga Aiichiro)

1. はじめに

近年、廃水が無曝気処理できる微生物燃料電池(MFC)の研究が再生可能なエネルギーの必要の高まりを受けて、実用化に向けての研究開発が 2010 年位から急速に進められている。MFC は有機物処理と同時に発電もできることがメリットであるが、その電力が小さいことが課題である。そこで、本研究では、MFC の電力を最大化するために、MFC の内部抵抗を考慮した数理モデルを作成し、解析した。MFC の電力が小さい原因として、燃料電池など実用化された電池に比べて、エネルギー損失が大きいことが挙げられる。エネルギー損失にも要因が複数あり、①「抵抗損失」と呼ばれる電流が流れる際や水素イオンが溶液中を流れる際の抵抗による熱損失がある。また、②「活性化損失」と呼ばれる化学反応による熱損失がある。さらに、③「濃度損失」と呼ばれる有機物が拡散で供給されるまで時間がかかることによる損失がある。①と②はどのような種類の電池にも存在するので、MFC では特に③「濃度損失」が重要であると考え¹⁾、この濃度損失を数理モデルで表すことを提案している。

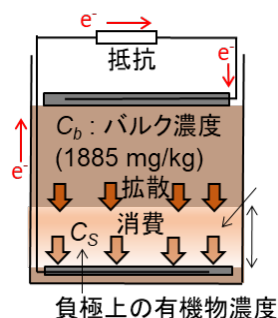


図 1 MFC の拡散層における有機物消費と拡散による供給のイメージ図

このエネルギー損失を抑制する方法として、MFC を並列接続、直列接続、またそれらの組み合わせの方法があり、これらの実験を実施している²⁾。また、負極付近の有機物の拡散に着目した数理モデルを作成している。そこで、本研究では、最大電流が得られる接続の組み合わせを実験と数理モデルによるシミュレーションで計算して、検討する。

2. 実験および解析方法

(1) 実験方法

牛ふん堆肥 100 g に蒸留水 180 g を加え、内径 8.0 cm の容器の底面に直径 8.0 cm

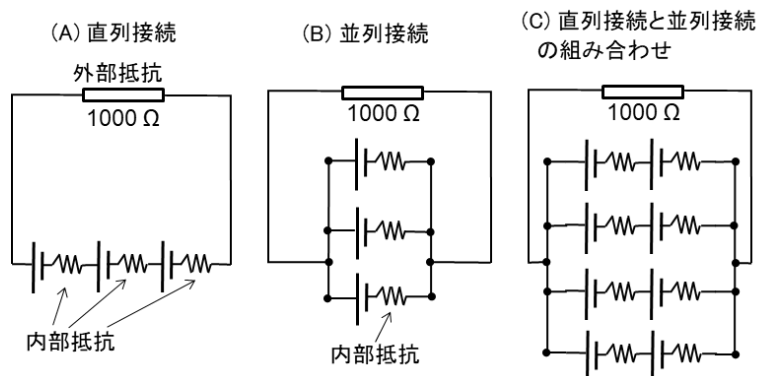


図 2 内部抵抗を含む MFC の(A) 直列接続、(B) 並列接続、(C) 直列接続と並列接続の組み合わせの模式図

のグラファイト製の負極を，表面に正極を設置した（図 1 参照）。今回実施した実験の直列接続，並列接続，およびそれらの組み合わせ（図 2 参照）の接続条件を表 1 に示す。

表 1 実験および計算条件

実験	接続方法
実験 A	直列接続 MFC 2～7 個（各 3 回実施）
実験 B	並列接続 MFC 2～6 個（各 1 回実施）
実験 C	直列接続 MFC 5・6 個を並列に 2～4 組（各 2 回）

(2) 数理モデルを用いた解析

負極上付近の有機物濃度 C_s と電流 I の関係を式(1)に示す。そして，電流の最大値と内部抵抗の関係を式(1-1)に示す。また MFC を n 個，直列接続した場合の電流の最大値を式(1-2)に，並列接続した場合の電流の最大値を式(1-3)に示す。さらに，直列接続と並列接続を組み合わせた場合の電流の最大値を(1-4)に示す。

$$I = I_{\max} \frac{C_s}{K + C_s} \quad (1) \quad I_{\max} = \frac{E}{R + r} \quad (1-1: \text{内部抵抗を含む単独 MFC})$$

$$I_{\max} = \frac{n \cdot E}{R + n \cdot r} \quad (1-2: \text{直列接続})$$

$$I_{\max} = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} \quad (1-3: \text{並列接続})$$

$$I_{\max} = \frac{\frac{n_s E}{R + \frac{n_s r}{n_p}}}{1} \quad (1-4: \text{直列接続と並列接続の組み合わせ})$$

ここで， I : 電流(mA), $I_{\max}$: 電流の最大値（通常，初期値）(mA), C_s : 拡散層中の COD (mg/L), K : 定数 (mg/L), n : 接続した MFC の個数, n_s : 直列接続した MFC の個数, n_p : 並列接続した MFC の個数。

次に式(2)に，負極表面上の拡散層中の有機物濃度 C_s の変化を電流による消費と拡散による供給で表した物質収支式を示す(図 1 参照)。

$$\frac{dC_s}{dt} = -\frac{M_a}{n_e F C E \pi r^2 d} I + D \frac{C_b - C_s}{d^2} \quad (2)$$

ここで， C_b : バルク溶液の COD (平均 1885 mg/L, 実験前後で変化せず), n_e : 酸素 1 分子あたりの電子数 (4), F : ファラデー定数 (96,500 C/mol), M_a : 酸素 1 モルの質量 (32 g/mol), $C E$: クーロン効率（実験の電流値から最小二乗法で求めた）, d : 拡散層厚(cm)（閉回路 10 分後を定常状態として求めた）, D : 間隙水中酢酸の拡散係数($6.45 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$), r : MFC 容器の半径(4.0 cm)。

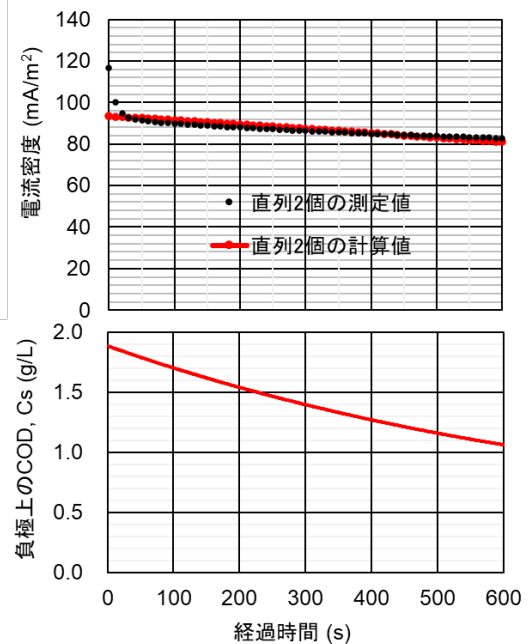


図 3 実験 A の MFC の直列接続 2 個での電流密度 (mA/m^2) の変化（実測値と計算値）と負極上 COD (C_s) の変化（計算値）

3. 結果および考察

(1) 実験 A(直列接続)

直列接続の場合(図 3 参照)は、MFC の個数に応じて電流密度が上昇した。しかし、上昇する値には限りがあり、MFC 6 個と 7 個の差はなかった。

(2) 実験 B(並列接続)

並列接続の場合は、MFC の個数が多いほど、電流密度が高い状態を維持できた。これは、並列接続にすると電流を分割するために、内部抵抗が減少するためである。

(2) 実験 C(直列接続と並列接続の組み合わせ)

実験と計算の結果(図 4 参照)、電流密度に関して、最適な接続の組み合わせは、MFC を直列に 6 個、並列に 4 組接続した場合と推定された。

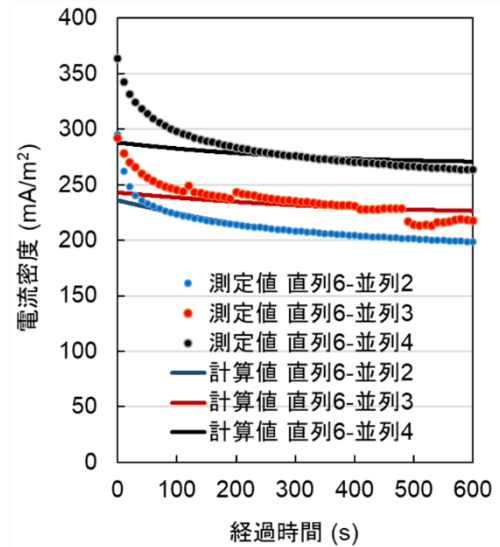


図 4 実験 C の MFC の直列接続 6 個と並列接続 2 組の組み合わせの電流密度 (mA/m^2) の変化 (測定値と計算値)

4. おわりに

MFC の内部抵抗を考慮した電流の式を作成することで、直列接続、並列接続、また直列接続と並列接続の組み合わせた場合の電力密度を予測することができた。今後は、実験で行っていない条件を計算で求め、内部抵抗の最小となる条件を見つけ、実際の実験で確認していきたい。

参考文献

- 1) Fujinaga A, et al. (2023) Maximizing the Electric Power Using a Mathematical Model of Single-chamber Air-cathode Microbial Fuel Cells in Series and Parallel Connected, Water and Environment Technology Conference 2023, 1 B-1-a.
- 2) Fujinaga A, et al. (2022) Evaluation of Methods for Measuring Internal Resistances of Discharging Microbial Fuel Cells, Journal of Water and Environment Technology, 20 (1), 1-10.