

数理モデルを用いた内部抵抗削減による微生物燃料電池の最大電力化

Maximization of Electric Power of Microbial Fuel Cells
by Decreasing Internal Resistances using Mathematical Models

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)の研究が世界中で進められている。有機物を含む廃水や汚泥などの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。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あげられる。それらを分類すると、①「抵抗損失」と呼ばれる、電子が電極や電線を通る際の抵抗、また水素イオンが溶液中を通る際の抵抗による熱損失がある。また、②「活性化損失」と呼ばれる電極上の化学反応による熱損失がある。さらに、③「濃度損失」と呼ばれる電極上で電子を供給する際に消費した有機物を拡散などで供給するまで時間がかかる損失がある。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、この濃度損失を数理モデルで表すことを提案している¹⁾。

MFC の電力向上のためには、濃度損失を防げる MFC を開発する、または MFC の使用方法を考えることが必要となる。ここでは MFC の使用方法として、MFC を連続使用すると電力低下するので、MFC を複数個使用し、リレースイッチを用いて、その内の 1 個だけを使用する（その他は使用しない）方法、および並列接続により、1 個あたりの使用電流を低減させる方法を実験と数理モデルによるシミュレーションで解析を行う。

2. 実験および解析方法

2.1 MFC の製作と実験条件

牛ふん堆肥 200 g に蒸留水 200 g を加え、直径 9 cm の容器の底面に直径 8.0 cm のグラフアイト製の負極、表面に正極を設置した。実験条件を表 1 に示す。外部抵抗:1000 Ω 、測定時間:10 分か 20 分、実験開始前には、1 時間連続で電流を流し、電池のばらつきを抑えた。表 1 に実験条件として、実験 A と B の 2 種類に、シミュレーションの 2 種類を示す。また、図 1 (A)と(B)に実験 A と B の回路図を示す。

表 1 実験条件

実験	接続方法
実験 A	リレースイッチで 1 秒ごとに接続 (MFC 4 個)
実験 B	並列接続 (MFC 2~6 個)
シミュレーション 1	実験 B を数理モデルで計算
シミュレーション 2	初期電流が全く同じ MFC として計算

2.2 数理モデルを用いた解析

たい肥間隙中の有機物濃度 C_b と電流の関係を示す式(1)を示す。そして、負極表面上の有機物濃度 C_s の変化を電流に応じた消費と拡散による供給で表した式(2)を示す。

$$I = I_{max} \frac{C_s}{K+C_s} \quad (1)$$

ここで、 I : 電流(mA), I_{max} : 最大電流(mA),

C_s : 負極上の COD (mg/L), K : 定数 (mg/L)。

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

ここで、 C_b : バルク溶液の COD (mg/L), 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, d : 拡散層厚(cm), 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 cm)。

3. 結果および考察

3.1 実験 A およびシミュレーション 1(リレースイッチ)

MFC を連続使用すると時間と共に電流が低下していくが、リレースイッチを使用し MFC 4 個を順番に使用したものは電力低下がかなり防げた。

3.2 実験 B およびシミュレーション 2(並列接続)

MFC の個数が多い程、電流の低下を防げるという実験結果を、シミュレーションで示すことができた。そして、初期電流が同じ MFC を複数作製できるとすれば、並列接続することによって、電流低下をどの程度防ぐことが出来るか計算出来た。その結果、MFC の数が増えるごとに電流低下を防ぐ効果が現れ、MFC が 3 個で 1 個の単独使用の 1.5 倍の電流が得られた (図 2 参照)。また、電流低下を防ぐためには、MFC は 5 個位で十分という結果になった。実験では MFC が 5 個以上の評価が難しかったのが、シミュレーションでは可能となった。

4. おわりに

MFC の電流低下を防ぐために、複数の MFC をリレースイッチで接続すること、また並列接続することで可能であることを、実験と数理モデルを用いたシミュレーションで示した。また並列接続のシミュレーションから、MFC 3 個で MFC 1 個の 1.5 倍の電流が得られ、MFC 5 個程度の並列接続にすれば電流低下を十分防げることが分かった。

参考文献 1) Fujinaga A, et al.(2019) Model-based evaluation of the effect of repeating discharge-charge modes of microbial fuel cell on electric power generation. J. Water Environ. Technol., 17 (2), 100-108.

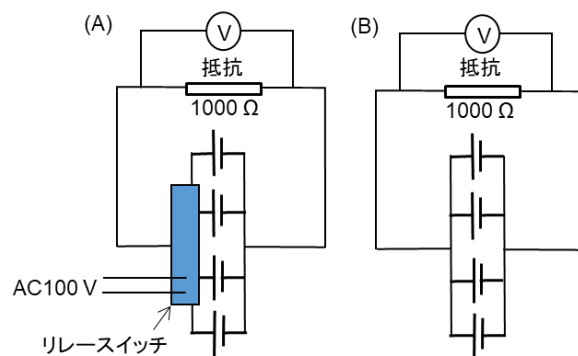


図 1 (A) MFC4 個のリレースイッチによる接続, (B) MFC 4 個の並列接続

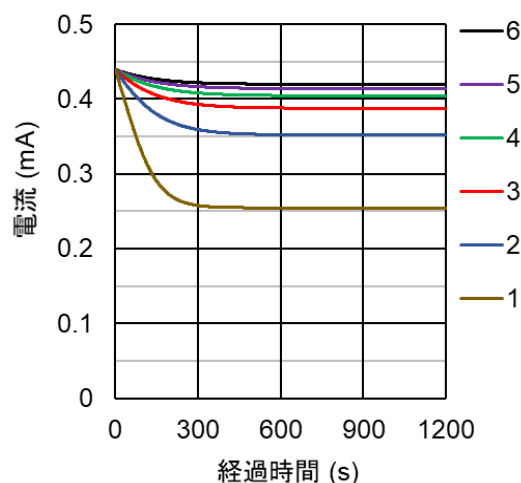


図 2 シミュレーション 2 (並列接続 MFC 2~6 個) の電流変化