

微生物燃料電池システムの実用化に向けた出力向上の検討

福田 枝里子（九州産業大学 理工学部 電気工学科）

Eriko FUKUDA, Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Kyushu Sangyo University

穂本 光弘（山陽小野田市立山口東京理科大学 工学部 電気工学科）

Mitsuhiro AKIMOTO, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Sanyo-Onoda City University

森田 廣（山陽小野田市立山口東京理科大学 工学部 電気工学科）

Hiroshi MORITA, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Sanyo-Onoda City University

1 はじめに

人間を含む一般的な生物は、酸素を利用して栄養素（有機物）から化学エネルギーを得ることで生命を維持している。この呼吸と呼ばれる一連の代謝プロセスには、酸素による有機物の酸化反応と、余剰電子を酸素に受け渡し水が生成される還元反応が含まれる。一方、嫌気性微生物は呼吸に酸素を用いず、かつその中には有機物からエネルギー生成を行う過程で生じた余剰電子を直接細胞外部に排出することができる細菌種（エクソエレクトロゲン）が存在する。エクソエレクトロゲンは特殊な細菌ではなく、海や湖沼の底泥に含まれる *Shewanella* 属や、一般的土壌内部に存在する *Geobacter* 属など、地球上の嫌気領域に広く存在する[1,2]。これらエクソエレクトロゲンが代謝の結果細胞外部に電子を放出する過程を電力として取り出し利用しようとする試みは「微生物発電」と呼ばれ、近年代替エネルギーの一翼を担うべく研究が活発化している[1,3]。多くの微生物発電の研究では、エクソエレクトロゲンを含む底泥や土壌を容器に封入し、アノード／カソード電極を取り付けたシステムを対象とする。本システムは従来型燃料電池と構造が似ていることから、「微生物燃料電池（Microbial fuel cell ; MFC）」と呼ばれることが多い。

MFC はエクソエレクトロゲンが活動している限りは電力を生成し続けるため、季節変動による環境温度の影響などを受けることはあるものの、発電量は日々の天候にはさほど左右されない。これは太陽光や風力による再生可能エネルギーを利

用した発電方式と比べて大きな利点である。微生物燃料電池は利用する嫌気環境に応じて堆積物（底泥）系、植物系、統合型人工湿地系などいくつかの種類があり、実用化の最終段階に到達しているものもある[3]。これに対し、本研究の対象である一般的土壌を用いた MFC が未だ実証段階にとどまっている理由の一つに、発電量の低さがある。MFC は電池内の微生物集団の定量化が難しいため、どこまで最大電力出力密度の向上が可能であるか示すことが難しい。しかし、これまでの先行研究の蓄積により、現状どのような系統の MFC であっても、化学燃料電池の最大出力電力密度よりも数桁小さいことが分かっている[4]。例えば、本研究グループが作製した MFC の場合、500 g 程度の一般的土壌を用いて作製した単位セルの持つ最大電力は 0.5~1 mW 程度である（2 節参照）。この値は理想値であり、MFC に負荷を接続して実際に消費された電力で評価した場合、最大電力はさらに低下する（4 節参照）。したがって MFC を実用に供するためには、(1) 出力の向上と (2) スケールアップが必要不可欠である。本報告では、これまで本研究グループが上記二点に関して行ってきた検討の一部を紹介する。

2 微生物燃料電池の構成と出力特性

図 1(a)に微生物燃料電池（MFC）の構造と実際に作製した基本セルの外観を示す。アノード極は土壌中に埋設されており嫌気環境にある一方で、カソード極は好気環境になるように設置する。土壌上部には土壌の嫌気環境を保持し、プロトン伝

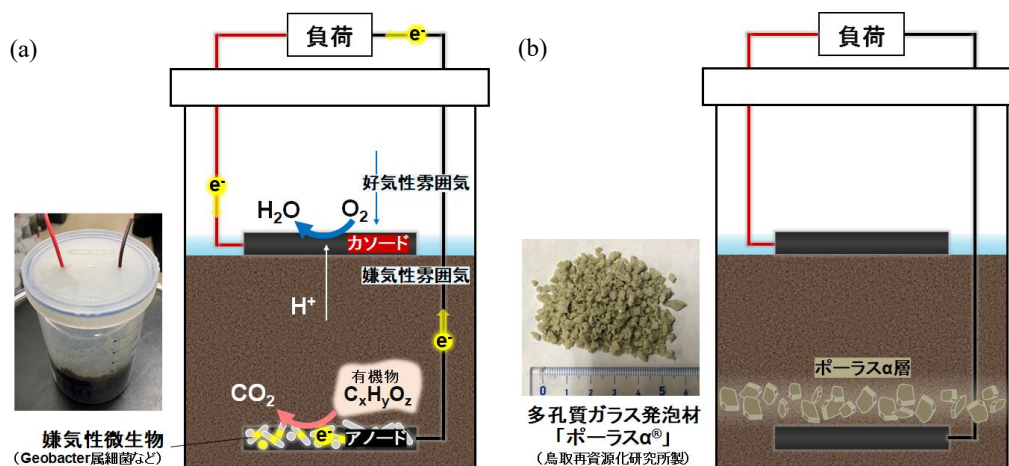


図 1 (a) 作製した微生物燃料電池基本セルの外観と構造, (b) 無機多孔質材料の埋設

導層としても働く水の層がある。その水位はカソード極上部表面よりも低く設定されており、全体として水田に類似した構造である。土壌中のエクソエレクトロゲンは、土壌中アノード極に電子放出嫌気呼吸を行いつつ有機物を分解し、電子はアノード極から外部回路（負荷）を経由してカソード極へ移動する。一方で土壌内ではプロトン伝導が生じ、全体としてアノードーカソード間に電位差（電力）が発生する。

本報告で作製した MFC 基本セル（図 1(a)写真）の構成部材を以下に示す。土壌は山陽小野田市立山口東京理科大学構内で採取し、基本セル 1 つに対し 400~500 g 使用した。使用土壌量に幅があるのは、採取時期によって土壌含水率に差があるためである。基本セル作製に際しては、適量の純水を採取土壌に加えることでできる限り土壌含水量が一定になるように調整した。アノードおよびカソード電極は、カーボンフェルト（日本カーボン製）を用いた。他に特別な工夫を要するところはなく、いたって単純な構造である。

基本セルの発電特性は、アノードーカソード間の開放電圧 V_{op} 、アノードーカソード間の短絡電流 I_{sh} をそれぞれ別個にデジタルマルチメータを用いて測定し、 $P = I \cdot V$ から電力を計算することで評価した。ただし、電流は短絡操作開始直後を最大値 I_{sh-max} として時間経過とともに減少しやがて飽和値 I_{sh-sat} に落ち着くため、それぞれの電流

値を用いて最大電力 P_{max} および飽和電力 P_{sat} を算出した。

作製直後の MFC は、アノード極近傍にはエクソエレクトロゲンの集積がなされていないため V_{op} および I_{sh} は観測されないが、時間経過とともにアノード極周辺に細菌コンソーシアムが形成されると継続的に発電する。本報告の基本セルの場合、およそ 10 日程度かけて開放電圧は $V_{op} = 0.7 \sim 0.8$ V程度、短絡最大電流 $I_{sh-max} = 2 \sim 3$ mA、短絡飽和電流 $I_{sh-sat} = 0.7 \sim 1$ mAに上昇し飽和する。したがって、最大電力 P_{max} は 2 mW、飽和電力 P_{sat} は 0.6 mW程度と算出される。

3 微生物燃料電池の出力向上

微生物燃料電池（MFC）基本セル単体の出力向上には、アノード極付近にエクソエレクトロゲンを含む活性の高い細菌コンソーシアムを形成することがカギとなる。近年、本研究グループの一人はアノード極付近の土壌に無機多孔質材料「ポラス α」を埋設することにより（図 1(b)）、基本セルの短絡電流 I_{sh} を大幅に向上させることに成功した[5]。これは埋設多孔質材料の微小な空隙に細菌コンソーシアムが効率的に形成されたことを意味する。また、無機多孔質材料に加えて様々な微生物を活性化させる土壌改質剤を導入すると、基本セルの出力がさらに向上することが見出された。一つの例として、図 2 に土壌改質剤として米ぬか

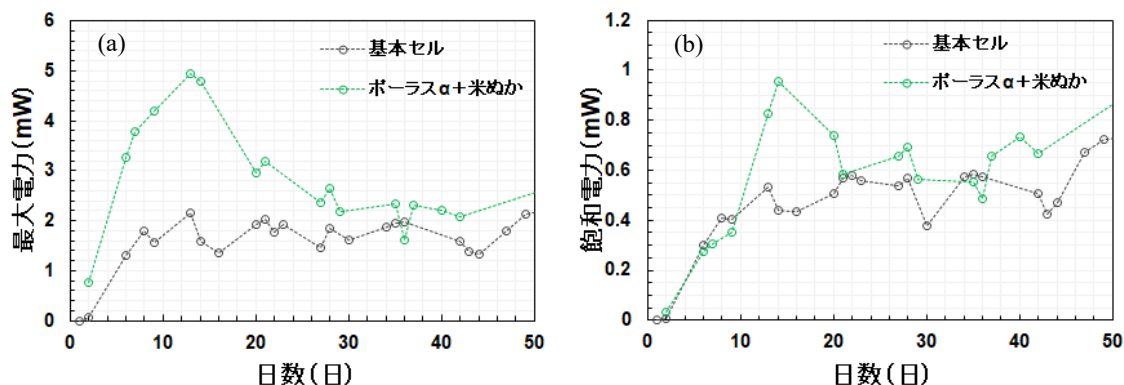


図2 (a) 単一の微生物燃料電池基本セルの最大電力 P_{max} , (b) 飽和電力 P_{sat}

を導入した基本セルの発電特性の時間経過を示す。最大電力 P_{max} に関しては作製直後から測定可能な電力が得られていることが分かる。すなわち、土壌改質による細菌コンソーシアムの活性化が微生物燃料電池の特性向上をもたらしたと言える。飽和電圧 P_{sat} については大幅な電力増大とは言えないものの、継続して高い出力が得られていることが分かる。

4 微生物燃料電池のスケールアップ

前節では、単一の微生物燃料電池 (MFC) 単位セルの発電特性について出力向上を目指した検討結果を示したが、実用化という観点からはより現実的に即した検討を行うべき点がいくつかある。一つは電池性能の評価方法である。前節では負荷を接続しない開放電圧 V_{op} と、両極を短絡した際に流れる短絡電流 I_{sh} から MFC の評価指標として最大電力 P_{max} および飽和電力 P_{sat} を算出したが、実際の運用ではそれぞれの極の出力端子間に実用回路 (負荷) があり、これら P_{max} , P_{sat} がそのまま取り出されるわけではない。したがって、出力に接続した負荷で消費された電力 P_L をもって微生物燃料電池の性能を評価する必要がある。もう一つはスケールアップである。単位セルに用いる土壌量を増やすことにより単位セルの出力を上げることも可能ではあるが、実用化を考えた場合、MFC 単位セルの直並列接続により取り出し可能電力がどのように変化するか調べる方が有益である。

そこで本研究グループは、2 節で述べた MFC 基

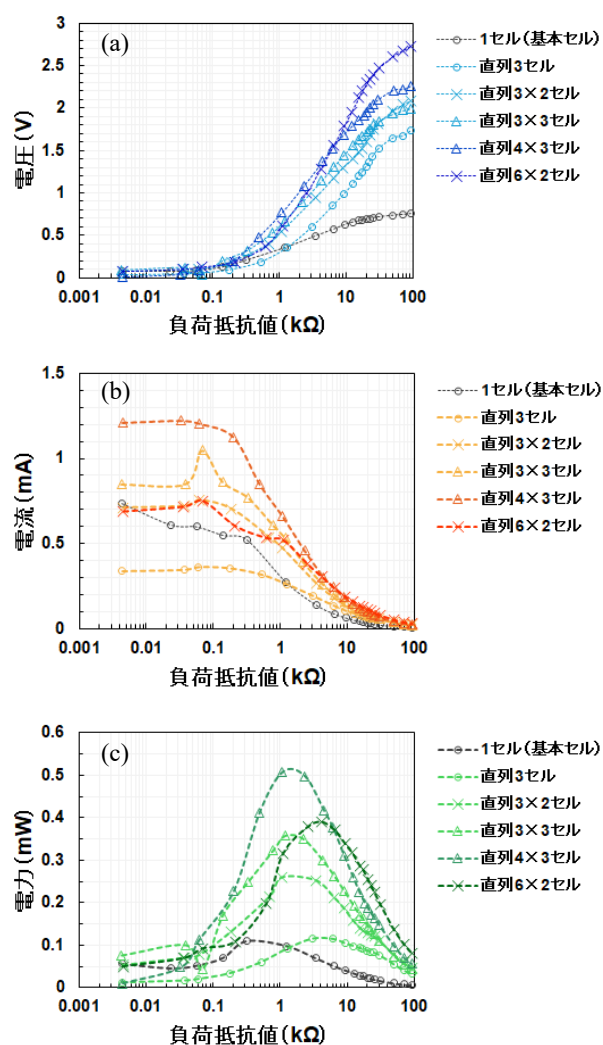


図3 直並列接続基本セルの各電気特性の負荷抵抗値依存性, (a) 端子間電圧 V_L , (b) 回路直流電流 I_C , (c) 負荷消費電力 P_L

本単位セルを複数個作製し、それぞれ飽和状態に落ち着いたことを確認した後に、直並列接続個数を変化させ、発電能の評価を行った。3 節とは異なり、基本セル出力端子間に可変抵抗を接続し、

デジタルマルチメータ 2 台を用いて端子間電圧 V_L および回路直流電流 I_C を同時に測定することで、ある負荷抵抗値に対する電圧・電流および消費電力 P_L を求めた (図 3)。

図 3(a)に示すように、単一基本セルの場合の V_L は負荷抵抗値が低い場合はほとんど差がないものの、 $1\text{ k}\Omega$ を超えたあたりから通常の化学電池と同様に直列接続数に応じて上昇していく。ただし直列接続数が同数でも並列接続数の違いで V_L が異なる。これは単位セルの出力あるいは内部抵抗のばらつきによるものと考えられる。次に I_C の測定結果を示した図 3(b)から、電流値は並列接続数を増やすことで増加することが分かる。これも通常の化学電池と同様である。最後に電力の負荷抵抗値依存性を図 3(c)に示す。まずすべての直並列接続に共通する特徴として、特定の負荷抵抗値で電力が極大値をとるということが挙げられる。すなわち、MFC にも電池自身の内部抵抗と外部負荷との整合がとれる最大電力点が存在するということである。抵抗の整合値は基本セルの直列接続数が多いほうが高く、同じ直列接続数でも並列接続数が高いほうが低くなるため、多少のばらつきはあるが単一の基本セルの内部抵抗は概ね同じでその値は数百 Ω 程度であると結論付けることができる。

5 まとめと今後の展望

これまで、山口東京理科大学周辺で採取した土壌を用いた微生物燃料電池 (MFC) について、様々な土壌改質やスケールアップによって出力電力の向上を達成してきた。最終的には、MFC を安定して発電可能な電源として用いる自律的な害獣監視システムの構築や街灯利用などを目標としているが、現状の出力では MFC をそのまま実用回路に接続するという運用は困難と言わざるを得ない。したがって現実的な運用方法として、本研究グループは MFC から取り出した電力をリチウムイオン電池等二次電池へ蓄電し、実用回路への電力供給はこの二次電池を用いるという方法を検討している。今後は昇圧・充電回路の最適化を含めた二

次電池への最適充電手法の検討を中心に研究を進めていく。

参考文献

- [1] Logan, B.E. (2008) *Microbial Fuel Cells*, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey, USA.
- [2] 加藤創一郎 (2014) 「細胞外電子伝達：固体を呼吸気質とする微生物たち」日本微生物生態学会誌, 20 巻 2 号, pp.65-75.
- [3] Gupta, S, et al. (2023) “The race between classical microbial fuel cells, sediment-microbial fuel cells, plant-microbial fuel cells, and constructed wetlands-microbial fuel cells: Applications and technology readiness level” *Sci. Total Environ.* 879, 162757.
- [4] Kim, B.H., Chang, K.I. & Gadd, G.M. (2007) “Challenges in microbial fuel cell development and operation” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 76, pp.485-494.
- [5] 森田廣 (2022) 「無機多孔質体を活用した土壌微生物燃料電池の発電電力向上」山陽小野田市立山口東京理科大学紀要, 5, pp.25-31.