

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06355

研究課題名（和文）微生物燃料電池を電源とした環境センシング装置の開発

研究課題名（英文）Development of an environmental sensing device powered by microbial fuel cells.

研究代表者

横山 浩（Hiroshi, Yokoyama）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・畜産研究部門・上級研究員

研究者番号：40391370

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、池や川など水のある環境に設置できる低コストで耐久性のある実用的な微生物燃料電池（MFC）システムの開発を行った。MFCを実際の池に設置して1年以上運転した。負極はステンレス鋼の表面を炎で酸化させた電極であり、池底に埋設して使用した。正極は浮きを付けて水面に浮かべて使用した。その結果、およそ通年に渡って1～3 mWの発電が観察された。MFCを電源として、池の水温、気温、MFC起電力を測定するセンサーを駆動して、測定データをLoRaモジュールで長距離無線送信する実験を行った。高い発電が得られた時期では、1～3分に1回の頻度でLoRaモジュールを駆動できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低コストで実用的なMFCを開発できた。炎酸化ステンレス鋼電極は、一般的な電極用の電極用のカーボクロスと比較して約1/100の価格である。白金触媒など高価な部材は一切使用していない。物理的に強靱なので大型化と長期運転が可能である。LoRaモジュールの駆動には大きな電力が必要である。これまでMFCでLoRaモジュールを駆動した報告では1報しかない。その報告では1日に1回しかLoRaモジュールを駆動できなかった。1日あたりの送信回数が多い程、多くの環境情報が得られる。本研究では、LoRaモジュールを1～3分に1回と、短い間隔で駆動でき、本MFCは既存技術よりも優れていることが示された。

研究成果の概要（英文）：This research The anode was an electrode made of stainless steel whose surface was flame-oxidised and buried in the pond bottom. The cathode was floated on the surface of the water with a float. The MFC was used as a power source to drive sensors measuring pond water temperature, air temperature and MFC outputs, and to transmit the measured data wirelessly over long distances using a LoRa module. During periods of high power generation, the LoRa module could be driven once every 1-3 minutes.

研究分野：環境工学

キーワード：微生物燃料電池 環境モニタリング 発電細菌

1. 研究開始当初の背景

微生物燃料電池 (Microbial fuel cell) とは、発電細菌が無酸素の条件下で有機物を分解する際に生じる余剰のエネルギーを、電気として回収する新しいバイリアクターである。発電細菌が MFC の負極に付着して、有機物からの電子を負極に伝達することで発電する (図 1 左)。発電細菌は土壌や海底、家畜排泄物など様々な嫌気性環境に幅広く存在しており、*Geobacter* 属細菌など多くの細菌種が知られている。MFC は土壌や都市下水に含まれている有機物など、既存の手法では電力に変換することができない物質から直接発電できる。環境に優しく再生可能エネルギーを生み出す装置として注目されている。

近年、地球温暖化や異常気象などに対する懸念から地球規模での環境モニタリングの重要性が高まっている。温暖化の未来予想モデルの構築などには、地球上の様々な地点で気温や CO₂ 濃度を継続的に測定する必要がある。その際、測定装置の電源確保が問題になる。MFC の出力は低いので大規模な発電には使用できないが、無電源地帯での環境モニタリング装置の電源として必要な電力は、理論上、備えている。太陽光と風力による発電は有用な技術であるが、その発電量は天候に左右される。太陽光発電は夜間に発電できず、風力発電も無風では発電できない。一方、MFC は天候に依存せず、夜間でも発電できる利点がある。

MFC には様々な利点があるが、実際に得られる出力は低く、さらにリアクターの作製コストが高いことから MFC 技術は未だに実用化していない。また、出力が低いので MFC はセンサー等のアプリケーションモジュールを直接駆動できない。MFC から利用可能な電力を得るためには、Energy harvester (=boost converter, 昇圧装置) が必要である。しかし、既存の Energy harvester の変換効率は低いため、MFC から電気エネルギーを効率的に抽出できない。我々は MFC に適した新しい Energy harvester を開発した (Yamashita et al., 2019, J Power Sources, 430:1-11.)。新規 Energy harvester は MFC から電力を効率的に抽出して、そのエネルギーをキャパシタ (低容量バッテリー) に一旦充電する。その後、蓄えられたエネルギーを一気に放出することで大きな電力を一時に生み出すことができる。充電と放出を繰り返す間欠的な運転により、多くの電力を必要とするモジュールを駆動できる。新規 Energy harvester は電圧を 3 V に上昇させるのに必要な MFC からの入力電力は、わずか 2 μW であり、従来型 (100~5,000 μW) と比較して 2 桁も低い値である。これは、新規 Energy harvester は低出力で小型、低コストの MFC からでも利用可能な電力を引き出せる Energy harvester であることを意味している。

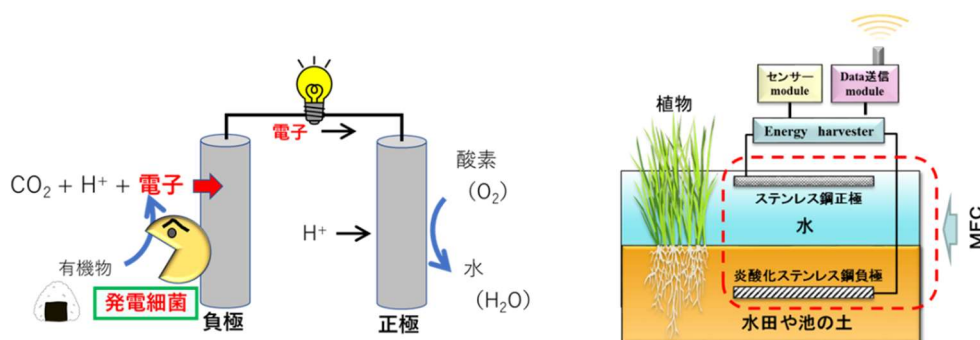


図 1 発電細菌による発電イメージ (左) と MFC 駆動型の環境モニタリング装置 (右)

2. 研究の目的

本研究の目的は、池や川など水のある環境に設置できる低コストで耐久性のある実用的な MFC システムを開発して、環境モニタリング装置の電源として利用することである。MFC を唯一の電源として、実際に温度湿度センサーを駆動して、測定データを長距離 (> 10 km) に無線送信するシステムを構築する。MFC 駆動型環境モニタリング装置は、異常気象の解析やデータ駆動型のスマート農業など、多方面への貢献が期待できる。

3. 研究の方法

MFC の電極は、一般的にカーボン系素材が使用されており、金属系電極の利用は稀である。しかし、我々はステンレス鋼の表面を炭で酸化させた電極 (炭酸化ステンレス鋼電極) を MFC の負極として使用すると、発電力を増強できることを発見した (Yamashita et al., 2016, Biotechnol. Biofuels, 9, 62.)。その発電力は一般的なカーボンクロス電極と比較して高い。電極用として販売されているカーボンクロスやフェルトは非常に高価であるが、ステンレス鋼はそれらと比較して 1/10~1/100 の価格であり、さらに、物理的強度および導電性が高いので大型化できる利点がある。本研究では、白金触媒や H⁺ 交換膜など、高価な部材は一切使用せず、安価な部材のみで MFC を構築した。負極は、ステンレス鋼メッシュ (40 cm x 30 cm x 3 重、SUS304, 1 mm mesh) を都市ガスで炭酸化処理を 15 分間行って作製した。正極は、導電性のある安価な断

熱用途のカーボンフェルト(86cm x 30cm、電極用ではない)に発泡スチロール製の浮き取り付けて作製した。新規 Energy harvester で MFC の電力を 400 mF のスーパーキャパシタに充電して、温湿度センサー (DHT11, Dragino Technology) および電圧センサーを駆動した。測定したデータは、LoRa module (SX1276, Semtech) で無線送信した。



図2 農研機構畜産部門つくばの敷地内の池(左)と設置したMFCの正極(右)

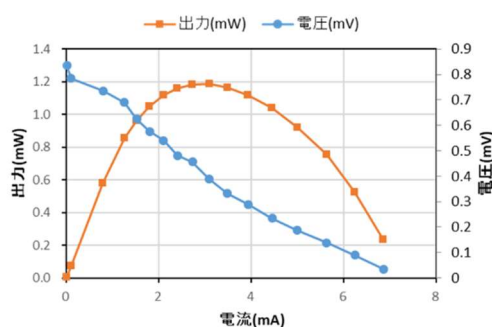


図3 池に設置したMFCの出力

4. 研究成果

開発した MFC は、正極を水面に浮かべて負極を池底に埋設した構造である (図1 右)。負極を池底に埋設する際、水と泥で作業は困難であった。そこで、水深の深い池でも容易に設置できるようにコンクリートブロックの底面にメッシュ状の炭酸化ステンレス鋼負極を張り付けて、埋設せずに単に沈めるだけの新しい負極を考案した。その負極を農研機構畜産研究部門(つくば)の敷地にある池に沈めて発電実験を行った (図2)。負極を設置すると、泥に含まれている発電細菌が自発的に負電極に付着して、自然に発電が始まった。外部から発電細菌の添加は必要なかった。炭酸化処理により電極の表面には酸化鉄 (ヘマタイト、 Fe_2O_3) からなる微小な隆起物が形成される (Yamashita et al., 2016, *Biotechnol. Biofuels*, 9, 62.)。酸化鉄が発電細菌の誘引をしたと考えられる。1カ月の馴養培養を行った後、ポテンショスタットで出力を解析したところ、センサーを駆動するのに十分な出力である 1.1mW が得られた (図3)。長期間の発電試験を行った結果を図4に示す。発電と同時に池の環境情報 (気温、水温、池底の土温) も測定した。負極が埋設されている土の温度は気温と水温と比較して、夏季は低く冬季は高かった。年間を通して 10°C 以上を保っており、発電細菌にとって良好な温度であった。MFC は、およそ通年に渡って 0.4~0.8V の電圧 (電力: 1.3~3.0mW) が得られた。途中、測定装置トラブルによりデータ収集が中断したが、その間も発電していたと推測される。MFC の出力は基本的にはスケールアップ可能であり、正極と負極の面積を大きくすれば出力も大きくなる。本 MFC は安価で大型化が可能なので目的に応じて電極サイズを変更すれば、様々なアプリケーションに利用できると考えられる。

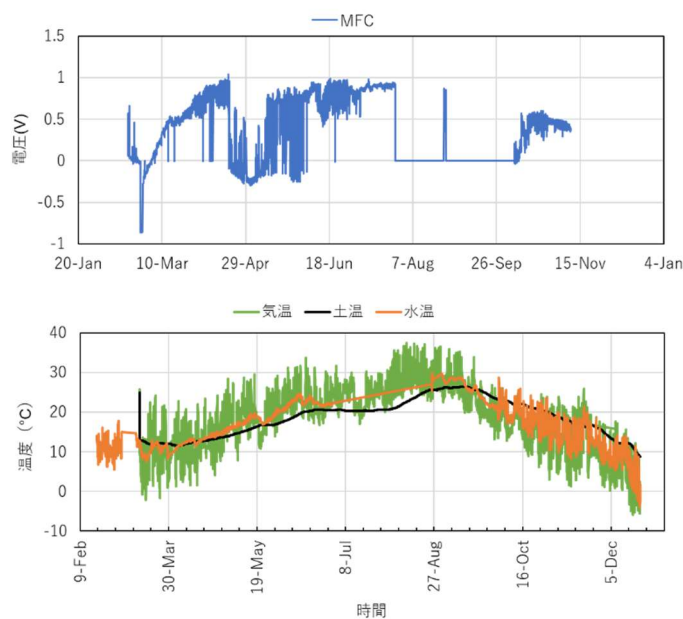


図4 MFCの長期間発電実験におけるMFC出力と池の周囲環境の経時変化

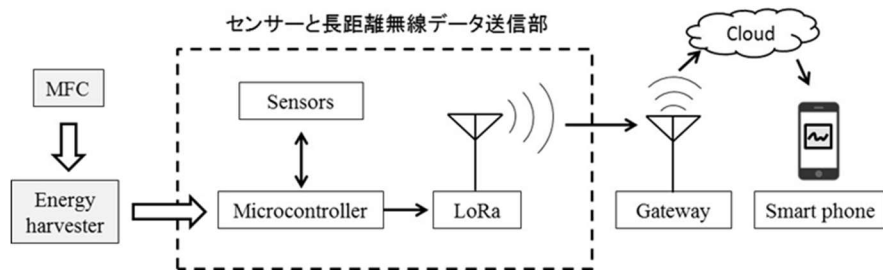


図5 環境センシング装置のブロック図

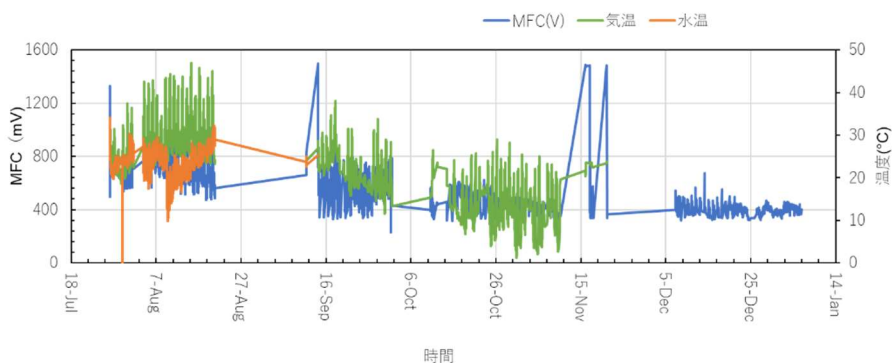


図6 LoRa moduleで送信された測定データ

MFCにEnergy harvesterと温湿度センサーと電圧センサー、LoRaモジュールを接続して、環境モニタリング装置を作製した(図5)。センサーで気温と池の水温、およびMFC自体の発電の電圧を測定した。測定データは200m先の建物5Fの室内にある受信機にLoRaモジュールで送信した。データが送信されない時期はあったが、6か月以上に渡ってセンシングとLoRaモジュールを駆動することができた(図6)。本研究では、200m先に受信機を設置したが、LoRaモジュールは10km先まで電波を送信する設定で実験を行った。温湿度センサーなどのセンサーの駆動に必要なエネルギーは、僅か数 μJ である。一方、LoRaモジュールの駆動には68mJと、1,000倍以上の大きなエネルギーが必要である。これまでMFCでLoRaモジュールを駆動した報告は1報しかない(A. Schievano, et al., (2017), J. Power Sources, 340, 80-88)。その報告では、1日に1回しかLoRaモジュールを駆動できなかった。1日あたりの送信回数が多い程、多くの環境情報が得られる。本研究では、良好に駆動していた期間においてLoRaモジュールを1~3分に1回と、遥かに短い間隔でLoRaモジュールを駆動できた。この結果から本

MFC システムは既存技術よりも優れていることが示された。

太陽光発電は有用な電源であるが、落ち葉や砂などがパネルを覆うと発電効率が下がるので定期的なメンテナンスが必要である。風力も定期的なメンテナンスが必要である。現在、池に設置した MFC は 2 年以上運転を続けているが特段のメンテナンスをしなくても発電は続いている。池には落ち葉や虫の死骸など様々な有機物が供給されるので MFC は半永久的な発電が可能と考えられる。炎酸化ステンレス鋼電極は 1 年以上使用しても劣化は見られなかった。ICP を使った高感度な解析でも金属の溶出は検出されなかったことから、炎酸化ステンレス鋼電極は長期運転に耐える頑丈な電極であり、発生した電流は金属の溶出によるものではないと結論できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahiro Yamashita, Yorihiro Yamashita, Masahiro Takano, Naoko Sato, Shizuka Nakano & Hiroshi Yokoyama	4. 巻 in press
2. 論文標題 3D Printed lattice-structured metal electrodes for enhanced current production in bioelectrochemical systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Environmental Technology	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/09593330.2022.2056083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計1件

1. 著者名 植田充美ら	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 289
3. 書名 バイオエネルギー再燃	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------