京都工芸繊維大学

氏　　名	かざま　いおり **風間　伊織**
学位(専攻分野)	博　士（工学）
学位記番号	博甲第 1128 号
学位授与の日付	令和 6 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　バイオベースマテリアル学専攻
学位論文題目	Development of Microbial Fuel Cell Equipped with Bipolar Membrane （バイポーラ膜を用いた微生物燃料電池の開発）
審査委員	(主査)教授　麻生　祐司 教授　櫻井　伸一 教授　田中　知成 京都工芸繊維大学 名誉教授　＊小原　仁実

論文内容の要旨

電気エネルギーの脱石油化には、風力、太陽光発電などの他に未利用バイオマスを利用した発電が挙げられる。その方法には、直接燃焼、メタン発酵、ガス化などの他に微生物燃料電池（MFC）が注目されている。MFC は、様々なバイオマスに蓄えられた化学エネルギーを微生物の代謝により電気エネルギーに変換する装置である。従来の MFC は、プロトン交換膜でアノード槽とカソード槽を仕切り、アノード槽ではバイオマスから微生物により発生した電子が外部回路へ流れる。同時に発生したプロトンはカチオン交換膜を透過しカソード槽へと移動する。カソード槽ではプロトンと酸素が外部回路から流れてきた電子と反応し回路が完結する。この方式では、カソード槽に酸素を供給する必要があり、また酸素とプロトンを反応させるためには白金などの高価な触媒が必要という問題があった。バイポーラ膜は、海水の淡水化などで用いられ、大規模に工業生産されている。本研究では、バイポーラ膜を用いた新奇構造の MFC（bMFC）を発案し、2 種類の微生物とバイオマスを発電用燃料に用いて、その開発と発電機序の解明を行っている。本論文は次の 4 章からなる。

第 1 章では、研究背景として近年における脱石油化の国際的状況を説明し、従来型 MFC 構造と発電機序、およびバイポーラ膜の構造や機能について概説するとともに、本研究の目的について説明している。

第 2 章では、アノード槽に鉄還元細菌 *Shewanella oneidensis* と燃料である乳酸を添加し、カソード槽には水酸化鉄(III)を添加した bMFC が 20 日間の連続発電に成功したことを報告している。その際の最大電流密度は 33.2±14.6 mA m^{-2}、内部抵抗は 500 Ωであった。この bMFC は従来の MFC とは全く異なった発電機序を持つと考え、4 種の対照実験から新しい発電メカニズムを提案した。

第 3 章では、アノード槽にリン酸緩衝液にセルロース資化性放線菌 *Cellulomonas fimi* と燃料であるセルロースを加えた溶液を添加し、カソード槽にはリン酸緩衝液のみを添加した bMFC が 20 日間の連続発電に成功したことを報告している。その際の最大電流密度は 38.8±10.0 mA m^{-2}、内部抵抗は 8 Ωであった。この bMFC は第 2 章での反応機序とも異なると考えられるので、5 種の対照実験から新しい発電メカニズムを提案した。

第 4 章では、本論文で得られた成果について総括した。この反応機構は、発電や廃水処理など広い範囲

にわたって適用可能であることが示唆される。スケールアップが容易なことから、将来的には大規模な発電や廃水処理への応用が期待される。

論文審査の結果の要旨

本論文の研究対象である微生物燃料電池（MFC）は、微生物の代謝を利用して再生可能資源であるバイオマスを電気エネルギーに変換する装置であり、次世代のエネルギー技術として注目されている。現在、新たな仕組みを有した高出力型の MFC の開発が世界中で盛んに行われており、本論文の研究内容は時流に即している。一方、MFC は生物反応と化学反応を融合させて発電を行うため、その機構には不明な点も多く、発電効率向上のためには MFC の発電機序の解明は必須となっている。

従来の MFC はアノード槽とカソード槽をプロトン交換膜で分離した単純な構造を有するが、本論文の MFC はプロトン交換膜の代わりにバイポーラ膜を持つ独自の構造を有しており、これまでの研究と一線を画す。また、本論文では MFC の開発に留まらず、微生物（*Shewanella oneidensis, Cellulomonas fimi*）、燃料（乳酸、セルロース）、カソード槽に添加する最終電子受容体（水酸化鉄(III)、リン酸二水素イオン）の種類を変えたときの発電効率を化学量論的に解析しているほか、得られたクーロン効率と内部抵抗から発電性能も詳細に解析しており、MFC の発電機序に関する新たな知見を得ることに成功している。特に、従来型の MFC では最終電子受容体が酸素であるのに対して、開発した MFC では最終電子受容体が水酸化鉄(III)やリン酸二水素イオンに成り得ることを明らかにしている点で独創性に優れる。また、広範な微生物と燃料の組み合わせにも応用可能であり、MFC の持つポテンシャルを高めた点でも評価できる。さらに、安定出力による数十日間の長期運転が可能なことが示されており、社会実装に向けた成果も得ている。

このように本論文は、環境問題とエネルギー問題の両方を解決し得る革新的な成果を報告しており、社会的な波及効果も大きいといえる。

本論文の基礎となる学術論文は以下の通り、申請者を筆頭著者とする公開済みの論文 2 報である。いずれもレフェリー制度の確立した国際的に著名な学術誌に掲載されており、二重投稿等の研究者倫理に反するような背徳行為のないことを確認した。

1) Iori Kazama, Yuji Aso, Tomonari Tanaka, Hitomi Ohara. Microbial fuel cell equipped with bipolar membrane using iron (III) hydroxide as final electron acceptor. *Energies*, 16(6):2527 (2023).

2) Iori Kazama, Naoto Hirose, Yuji Aso, Tomonari Tanaka, Hitomi Ohara. Cellulose-fueled microbial fuel cells equipped with a bipolar membrane using hydrogen phosphate as the final electron acceptor. *Biotechnology Letters*, 45(11-12):1467-1476 (2023).