

〈特集〉

微生物燃料電池を用いた下水からのエネルギー回収への挑戦

廣岡 佳弥子¹⁾, 市橋 修²⁾¹⁾ 岐阜大学 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 E-mail: khirooka@gifu-u.ac.jp)²⁾ 岐阜大学 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 E-mail: ichihashi@gifu-u.ac.jp)

概要

微生物燃料電池は、廃水の処理と同時に電気エネルギーを回収することができる技術であり、下水をはじめとするさまざまな廃水処理への応用が模索されている。本稿では、微生物燃料電池の構造や原理、内部の微生物、性能の評価方法などについて解説する。さらに、微生物燃料電池による下水や生活廃水の処理事例を紹介する。

キーワード：廃水処理、微生物燃料電池、エネルギー回収、発電

原稿受付 2015.11.30

EICA: 20(4) 31-34

1. はじめに

現代社会の豊かな生活は、大量のエネルギー消費の上に成り立っている。しかし、そのエネルギー源は化石燃料に大きく依存しており、その消費に伴うCO₂の放出は、地球温暖化という深刻な問題を人類に突きつけている。この問題の解決のために、我々はエネルギー消費量の削減と、自然エネルギーへの移行を一刻も早く進める必要がある。

廃水処理は、水域の水質保全のために欠かせない技術である。しかしながら、現在の廃水処理の主役である活性汚泥法は、曝気と汚泥の処理に多くのエネルギーを消費するプロセスでもある。このエネルギーは下水処理だけでも日本全体の電気消費量の0.67%に相当する年間約72億kWhにのぼり¹⁾、廃水処理の省エネ化が強く求められるようになってきている。

さらに近年、廃水や余剰汚泥に含まれるエネルギーがカーボンフリーのエネルギー源として注目を集めるようになってきた。廃水中の主な汚濁物質は有機物であり、潜在的に化学エネルギーを有しているためである。

このような背景から、曝気が不要で余剰汚泥発生量が少なく、さらに廃水中の有機物をエネルギー源として発電を行うことができる、微生物燃料電池という技術が注目を集めている。

そこで本稿では、微生物燃料電池による下水などの廃水からのエネルギー回収に関わる試みについて紹介する。

2. 微生物燃料電池による廃水処理

2.1 微生物燃料電池とは

微生物燃料電池とは、微生物を利用した燃料電池の一種である。通常の微生物は、有機物を酸化した際に発生する電子を、最終的に酸素などの周辺の分子に渡す。しかし、微生物燃料電池に用いられる電子生産微生物は電子を最終的に電極に渡すため、エネルギーを電力として取り出すことができる。

微生物燃料電池で廃水処理を行った場合、廃水の浄化とともに発電を行うことができる。好気処理に近い処理速度を有している²⁾ことや、理論エネルギー効率が低い³⁾という特長を有している。さらに、好気処理に比べ余剰汚泥の発生量が少ない⁴⁾ため汚泥処理のためのエネルギーが小さくなること、後述する1槽型微生物燃料電池では曝気のエネルギーも不要となることなどの利点がある。

2.2 微生物燃料電池の構造と発電原理

微生物燃料電池の構造には様々なものがあり、大別すると1槽型、2槽型、および底泥型に分類することができる。本稿では1槽型と2槽型のみについて解説する。まず、構造が理解しやすい2槽型 (**Fig. 1**) から説明する。2槽型の微生物燃料電池では、水槽が膜(プロトン交換膜など)で仕切られ、嫌気条件のアノード槽と好気条件のカソード槽に分けられている。アノード槽内にはアノード(マイナスの電極)、カソード槽内にはカソード(プラスの電極)が設置され、外部回路で繋がっている。有機性汚濁物質を含む廃水はアノード槽に流入し、処理される。ここで有機物は微生物によってCO₂とH⁺、電子に分解される。電子

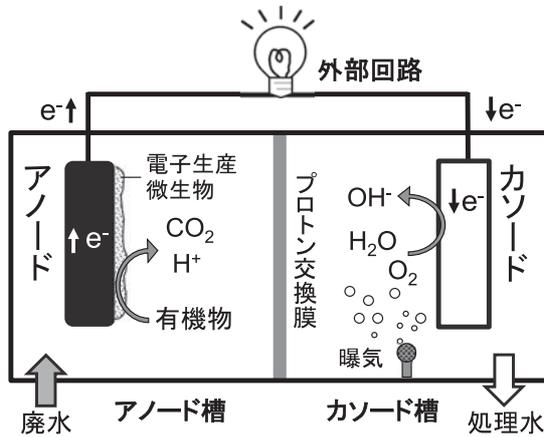


Fig. 1 Structure of a double-chamber microbial fuel cell

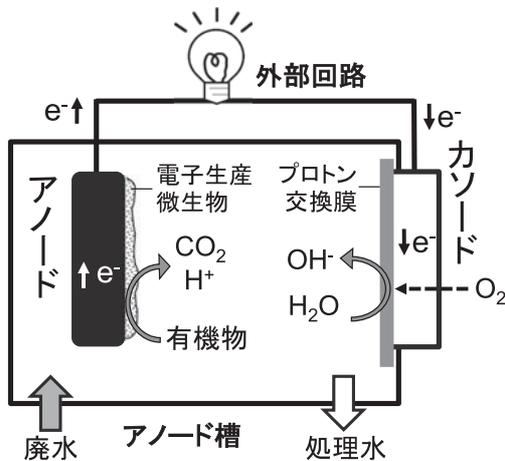


Fig. 2 Structure of a single-chamber microbial fuel cell

はアノードに渡され、外部回路を通過してカソードに移動する。この過程で回路上に負荷を置くことで電気エネルギーを取り出すことができる。カソードに到達した電子は、酸化剤の還元反応に用いられる。そのため、酸化剤として酸素や硝酸、フェリシアン化カリウムなどがカソード槽に供給される。酸素が用いられる場合は、カソード槽内で曝気が行われる。また、カソード反応を促進するために、カソードに白金等の触媒が用いられることが多い。

一方、1槽型 (Fig. 2) の場合は水槽には仕切りがなく、アノード槽のみとなる。アノードは2槽型と同様に槽内に設置されるが、カソードには防水性およびガス透過性を持つ電極であるエアカソードが用いられ、水槽の外壁の一部として設置される。1槽型の場合、カソードでの酸化剤には酸素のみが使われ、外部大気からエアカソードを透過して供給される。そのため曝気が不要となり、さらに2槽型より効率的な酸素供給が行われる。アノード槽に廃水が流入して処理されること、および発電に至る原理は2槽型と同じである。また、膜はエアカソードの水槽側の面上に設置することができるが、必ずしも必要ではない。

2.3 微生物燃料電池の微生物

微生物燃料電池において、アノードに電子を渡し、発電に寄与する微生物を電子生産微生物 (electrogenic microorganisms) と呼ぶ。代表的なものとして、異化的金属還元細菌の *Shewanella* 属や *Geobacter* 属がポピュラーであるが、その他多くの微生物種が知られている⁵⁾。これら微生物は海底や河川、湖沼の堆積物や、各種廃水、水田土壌、湿地などの嫌気的な環境から採取することができる。これらを植種源として微生物燃料電池を運転すると、数日から数週間程度で系内に電子生産微生物が優占し、発電を行うようになる。この時、純粋培養にこだわる必要はない。というのは、系内に選択圧がかかることによって、電子生産微生物が自然に増加し、優占するからである。また、系内には有機物摂取において電子生産微生物と競合するものも存在するが、発電に直接的には寄与しない微生物が全て悪者というわけではなく、中には重要な役割を担うものがあると考えられる。すなわち、電子生産微生物が利用しにくい複雑な有機物を分解して利用できるような形にするという役割である。従って、様々な有機物を含む実廃水においては、電子生産微生物のみの純粋な系よりも、その他の微生物との混合系の方が、より効率的な処理を行うことができると考えられる。

2.4 微生物燃料電池の性能の評価

微生物燃料電池の発電能力は、電極の単位面積当たり (W/m^2)、または水槽の単位容積あたり (W/m^3) の発電量で表されることが多い。現在世界で最も発電能力の高い微生物燃料電池でも、発電能力は数 W/m^2 程度である。また、廃水処理技術として期待されているため、CODの容積あたり除去速度 ($COD\ kg/m^3/day$) や除去率 (%) なども評価される。さらに、クーロン効率という評価項目も重要になる。これは、除去された有機物のうち発電に使われたものの割合を表す指標である。

2.5 微生物燃料電池の基質

微生物燃料電池は、多くの有機物を発電の基質として利用できる。人工基質を用いた実験では、糖類 (グルコース、アラビトール、ガラクトース、リビトール、マンニトール、ソルビトール、スクロース、キシリトール、キシロース)、エタノール、短鎖脂肪酸 (蟻酸、酢酸、プロピオン酸、乳酸)、アゾ色素 (グルコースと混合して処理)、カルボキシメチルセルロース、セルロース粒子、システイン、1,2ジクロロエタン、フルフラール、グルクロン酸、NTA、フェノールなどによる運転が報告されている⁶⁾。

中でも酢酸は、単純な組成であり電子生産微生物の生育を誘導しやすいため炭素源として広く用いられて

いる⁶⁾。また酢酸は多くの複雑な化合物の代謝の最終生成物である⁷⁾ため、室温では発酵などの変化を起こしにくく、リアクターの構造や運転条件のチェックにもよく用いられる⁶⁾。酢酸は、他の基質に比べてクーロン効率が高い。例えば、同じ装置を使った場合に酢酸のクーロン効率が72%であったのに対し、グルコースは15%であった⁸⁾。

グルコースもまたよく利用される基質である。グルコースのクーロン効率が低くなるのは、発酵の影響を受けやすいためだと思われる。また、グルコースは酢酸に比べてエネルギー効率も低くなる。同じ装置による比較の結果、酢酸ではエネルギー効率が42%であったのに対し、グルコースは3%だった⁹⁾。グルコースでMFCを馴致することのメリットは、系内の微生物の多様性に富むようになるため幅広い基質に対応でき、電力密度も大きくなる点である。

2.6 微生物燃料電池の発電と基質濃度の関係

基質となる有機物の濃度が高くなると、微生物燃料電池の発電能力は高くなることが知られている。Liuらは、1槽型微生物燃料電池を用いて、酢酸と酪酸を基質とした運転を行い、基質濃度と電力の関係を調べた¹⁰⁾。その結果、外部抵抗の大きさが同じ場合、電力は基質濃度の飽和型関数となることがわかった。また、半飽和定数の大きさは外部抵抗の大きさの影響を受けた。

3. 実廃水での微生物燃料電池の運転

3.1 ラボスケールの微生物燃料電池

人工基質以外に、実廃水を用いた運転も数多く行われている。ラボスケールの微生物燃料電池では、生活廃水、養豚廃水、病院廃水、ビール廃水、チョコレート工場廃水、家庭廃水、食品加工廃水、肉加工廃水、再生紙工場廃水、など様々な実廃水での処理が報告されている⁶⁾が、都市下水を用いた運転はそれほど多くない。

(1) 都市下水を処理する微生物燃料電池

Zhangらは、1槽型の微生物燃料電池を用いて、都市下水の最初沈澱池後の廃水の処理を400日以上行った¹¹⁾。彼らの装置は容積4Lの円筒型で、HRT(水理的滞留時間)は基本的には11時間だった。温度制御をしない部屋で運転を行ったため、運転中の温度は -10°C ~ 36°C の間で変化した。また、流入廃水中のCOD濃度の変動も大きく、平均 279.7 ± 144.4 mg/Lであった。運転の結果、COD除去率は65-70%(処理水COD: 90.3 ± 48.3 mg/L)で、COD除去速度は最大 0.40 kgCOD/ m^3/day だった。また、 2.32 W/ m^3 の発電量を示した。

(2) 微生物燃料電池と他の廃水処理技術の組み合わせ

微生物燃料電池による処理水中の有機物濃度はそれほど低くないことが多い。これは、処理後の有機物濃度と発電量がトレードオフの関係にあり、環境中に直接排出できる水準にまで処理を行うと、発電の効率が非常に低くなり、微生物燃料電池のメリットが失われてしまうためである。そこで、微生物燃料電池と別の廃水処理方法を組み合わせて処理を行う方法も検討されている。Renらは、一槽型の微生物燃料電池の後段に嫌気流動床膜分離のリアクターを設置し、生活廃水の処理を行った¹²⁾。その結果、流入時に 210 ± 11 mg/LだったCODは、処理水では 16 ± 3 mg/Lにまで低下し、92.5%を除去できた。このシステムは、ポンプの駆動などのために運転に 0.0186 kW/ m^3 のエネルギーを必要としたが、MFCによる発電量は 0.0197 kW/ m^3 に達し、投入エネルギー量の1.06倍のエネルギーが得られ、さらにメタンガスも回収(0.005 kW/ m^3 相当)することができた。

3.2 パイロットスケールの微生物燃料電池

これまでの研究は、ほとんどが数十mLからせいぜい数L程度の小型リアクターを用いたラボスケールの実験だった。しかし近年では、実用化に向けてパイロットスケールの実験も行われるようになってきている。

世界初のパイロットスケールの実験は、2007年にオーストラリアのクイーンズランド州で、ビール工場の廃水を処理する容積約 1 m^3 の微生物燃料電池で行われた¹³⁾。この装置は、12本の円筒(高さ3m×直径0.18m)から成り、それぞれの円筒の容量は76Lだった(Fig. 3)。円筒の素材は陽イオン交換膜で、内部にはアノードとしてカーボンブラシが入っている。また円筒外壁もカーボンブラシで覆われ、こちらはカソードとして働く。カソード触媒は使われなかった。



Fig. 3 A picture of the pilot scale microbial fuel cell treating breweries wastewater in Australia¹³⁾

廃水は円筒内部を下から上に流れて上部から溢れ、円筒外壁を伝って流れ出る。流入廃水の COD 濃度は 5000 mg/L、電気伝導度は 1 mS/cm だった。運転の結果、円筒容積あたり 8.5 W/m³ の発電を示し、また、この時の COD 除去速度は 0.2 kg COD/m³/day だった。

また、中国のハルビン市で、生活廃水を処理する容積 250 L の微生物燃料電池が運転されたことが、報告されている¹⁴⁾。この装置は、底面が正方形の直方体（底面 1 m×1 m、高さ 0.25 m）の形をしており、有効容積は 250 L である。カソード（1 m²）はカーボンメッシュ板を基材として白金触媒が塗布されており（0.25 mg Pt/cm²）、直方体の底面と上面に 1 枚ずつはめ込まれている。アノードとしては、カソードの廃水側（直方体の内側）にカーボンブラシが設置されている。またアノードとカソードの間に、接触を防ぐために、多孔質のポリプロピレンの板が挟まれている。さらに、カソードの外型に、支持体としてステンレススチール網が設置されている。直方体の 1 辺の横に廃水が流れる溝、対辺には処理水が流れる溝が設置されている。廃水は溝の堰を超えて直方体内部に流れ込み、対辺側に流れて行き、処理水が流れる溝に堰を超えて排出される（処理水側の堰は廃水側の堰よりも 2 cm 低い）。運転の結果、容積あたり最大電力密度 0.46 W/m³ を示し、また長期運転での COD 除去率は 79±7%（処理水 COD：70±17 mg/L）だった。しかしながら、この時のクーロン効率も 3～5% 程度であった。これは、有機物除去は主に電子生産ではなく好気または嫌気的な代謝によって行われたことを意味している。

4. おわりに

微生物燃料電池は、廃水の浄化と同時に電気エネルギーを取り出すことが可能な技術である。実験室規模では、他の廃水処理技術と組み合わせて処理能力を高めた系においても、処理に必要なエネルギーを発電のみでまかなうことができるものが報告されるまでになってきた。しかしながら、装置の大型化に関する研究事例はまだわずかであり、それらの処理性能や発電能力も十分に高いとは言えない。さらに、下水を基質とした場合は、有機物濃度が低いために、発電能力がより低くなってしまふ。このように、微生物燃料電池によって下水処理をエネルギー創生型（回収エネルギーが運転エネルギーを上回る）プロセスとすることは未だ挑戦的な段階にあるといえる。

しかし、低い発電性能を差し引いたとしても、曝気が必要な上に余剰汚泥の発生量が少なくなることのメリットは大きい。将来的にエネルギー創生型の廃水処

理とすることを視野に入れつつ、まずは省エネ型の廃水処理としての実用化に向けた研究が進んで行くものと思われる。

参考文献

- 1) 下水道協会：下水道統計（平成 20 年度）
- 2) T. Yoshizawa, M. Miyahara, A. Kouzuma, K. Watanabe: Conversion of activated-sludge reactors to microbial fuel cells for wastewater treatment coupled to electricity generation, *Journal of bioscience and bioengineering*, Vol. 118, No. 5, pp. 533-539 (2014)
- 3) U. Schröder: Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 9, No. 21, pp. 2619-2629 (2007)
- 4) B. H. Kim, I. S. Chang, G. M. Gadd: Challenges in microbial fuel cell development and operation, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 76, No. 3, pp. 485-494 (2007)
- 5) B. E. Logan: Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells, *Nature Reviews Microbiology*, Vol. 7, No. 5, pp. 375-381 (2009)
- 6) D. Pant, G. Van Bogaert, L. Diels, K. Vanbroekhoven: A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production, *Bioresource technology*, Vol. 101, No. 6, pp. 1533-1543 (2010)
- 7) J. C. Biffinger, J. N. Byrd, B. L. Dudley, B. R. Ringeisen: Oxygen exposure promotes fuel diversity for *Shewanella oneidensis* microbial fuel cells, *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 23, No. 6, pp. 820-826 (2008)
- 8) K. J. Chae, M. J. Choi, J. W. Lee, K. Y. Kim, I. S. Kim: Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells, *Bioresource Technology*, Vol. 100, No. 14, pp. 3518-3525 (2009)
- 9) H. S. Lee, P. Parameswaran, A. Kato-Marcus, C. I. Torres, B. E. Rittmann: Evaluation of energy-conversion efficiencies in microbial fuel cells (MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates, *Water Research*, Vol. 42, No. 6, pp. 1501-1510 (2008)
- 10) H. Liu, S. Cheng, B. E. Logan: Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell, *Environmental science & technology*, Vol. 39, No. 2, pp. 658-662 (2005)
- 11) F. Zhang, Z. Ge, J. Grimaud, J. Hurst, Z. He: Long-term performance of liter-scale microbial fuel cells treating primary effluent installed in a municipal wastewater treatment facility, *Water Research*, Vol. 47, No. 9, pp. 4941-4948 (2013)
- 12) L. Ren, Y. Ahn, B. E. Logan: A two-stage microbial fuel cell and anaerobic fluidized bed membrane bioreactor (MFC-AFMBR) system for effective domestic wastewater treatment, *Environmental science & technology*, Vol. 48, No. 7, pp. 4199-4206 (2014)
- 13) P. Ledezma, P. Kuntke, C. J. Buisman, J. Keller, S. Freguia: Source-separated urine opens golden opportunities for microbial electrochemical technologies, *Trends in biotechnology*, Vol. 33, No. 4, pp. 214-220 (2015)
- 14) Y. Feng, W. He, J. Liu, X. Wang, Y. Qu, N. Ren: A horizontal plug flow and stackable pilot microbial fuel cell for municipal wastewater treatment, *Bioresource technology*, Vol. 156, pp. 132-138 (2014)