

微生物を触媒にしたバイオ燃料電池

— 生命が生み出す電気エネルギー —



研究ノート

東 雅之*

Development of microbial biofuel cell
- Electric energy which was produced through the life -

Key Words : microbial fuel cell, MFC, yeast, catalyst

1. 研究背景

微生物や細胞内で生命活動の担い手として働く酵素を用い、有機物の化学エネルギーを電気エネルギーに変換するバイオ燃料電池が注目されている。すでに、携帯用の酵素型燃料電池の開発において100mWを超える出力が報告され¹⁾、ブドウ糖を燃料にウォークマンによる音楽の再生が実現している。また、廃水を燃料にした発電も積極的に検討されており、徐々にバイオ燃料電池が我々の生活に近づいている。

微生物を触媒としたバイオ燃料電池は、一般に微生物燃料電池 (Microbial fuel cell) と呼ばれMFCと略される。MFCでは、微生物が細胞内のエネルギー通貨であるATPを得るために有機物の分解から得たエネルギー (電子) を、人間が細胞外に取り出して利用する構図となる。微生物から見ると大変迷惑な話である。有機物例えばブドウ糖で考えると、細胞内で二酸化炭素と水に酸化されると、計算上はブドウ糖1分子から24個の電子が得られる。MFCの課題はこれらの電子を細胞内から効率よく回収することにある。理想的な回収が実現すれば、有機物からのエネルギー回収効率はバイオエタノール生産よりも高くなる。また、電気として回収できることは大きな利点で、エタノール発酵後の蒸留操作などの工程を必要としない。その他にも、廃水中の有機

物を原料とする場合、発電時に有機物の分解が進むため、有機性廃棄物の減容にも繋がるなど、出力さえ向上すればその利用価値は高い。

MFC研究の歴史は以外と古く、1911年に微生物から電気を取り出すことに成功している²⁾。その後は大きな進展は見られなかったが、近年になり電池構成要素の技術開発が進み、最近の10年でMFCの性能は著しく改善された。先にも述べたように、携帯用電源の開発や廃水や廃棄物からの発電を目的としてMFCの研究が進められてきたが、最近では μL スケールの超小型電池の検討も進められている。生体内の有機物を燃料に使う体内埋め込み型電源への応用が期待されている。

我々は、微生物燃料電池の構成成分の一つである触媒微生物について検討している。世界各地で混合微生物系あるいは純粋培養系での触媒微生物の研究が進められている。後者では、近年の傾向として鉄還元微生物として知られている *Shewanella* 属や *Geobacter* 属を用いた研究報告が多い。これらは細胞表面に電子伝達体を持つため外部から添加する電子伝達体がなくても発電できる能力を持つ。しかし、電子伝達メカニズムについてはまだ不明な点が多く、現在も鋭意研究が進められている。触媒微生物に関しては、「細胞内の代謝により効率的に電子を発生させること」と「細胞内の電子を電極に運ぶ経路の確立」が課題である。電極表面での触媒微生物のバイオフィーム形成は後者の課題である。バイオフィームと言えば、様々な分野でその除去が課題とされているが、ここではバイオフィーム形成の促進が求められる。

2. 触媒微生物に酵母を

我々のグループは酵母を触媒に用いMFCの検討を続けてきた。酵母 *Saccharomyces cerevisiae* は、



* Masayuki Azuma

1962年4月生
大阪大学大学院工学研究科醸酵工学専攻
修了 (1987年)
現在、大阪市立大学工学研究科化学生物
系専攻 教授 博士(農学)
TEL : 06-6605-3092
FAX : 06-6605-3092
E-mail : azuma@bioa.eng.osaka-u.ac.jp

食経験のある安全な微生物で、遺伝的な改変操作が容易で、高い糖資化能を持つなどの特徴を有し、触媒微生物としても有望と考えられる。当大学工学研究科機械物理系専攻の脇坂名誉教授が、「誰でも手に取ることができる安全な材料を使う」というコンセプトで、酵母を用いたグルコース燃料電池の研究を始め、我々のグループがそれを引き継ぐ形で研究を進めている。他のグループの報告もあるが、酵母での出力は他種の触媒微生物を用いた結果と比べ低い。例えば、*S. cerevisiae* を用いたグルコース燃料電池で、電子伝達物質としてメチレンブルー、酸化剤にシアン化鉄を用いた時、体積あたりの出力は 0.15 W/m^3 と報告されている³⁾。また、近年 μL スケールの MFC が検討されており、小型化することで電池体積あたりの出力は上昇傾向にある。*S. cerevisiae* を触媒とした場合 32 W/m^3 の出力が報告されている⁴⁾。しかし、MFC ではすでに 1000 W/m^3 を超える報告もありそれらと比較すると低いレベルにある。

我々は、グルコースを燃料にした小型2槽型電池（各電極溶液量 30 cm^3 ）で（図1参照）、家庭でも入手できる市販の乾燥パン酵母（*S. cerevisiae*）を触媒とし、グルコースや触媒の濃度、電子伝達体と緩衝液の種類や濃度、陽イオン交換膜の種類、ヘキサシアノ鉄濃度の最適条件を決定した。その結果、最大 9 mW の出力が得られた。負極溶液量当たりの最大出力は 300 W/m^3 になり、他の酵母を用いた結果と比べると高い体積当たりの出力が得られた⁵⁾。また、このセルを直列につないだ電池を電源とし小型モーターを駆動させグルコースで動く簡単なロボ

ットも試作した⁵⁾。最近、短期間で出力評価が可能ならに小型の燃料電池を製作した（各電極溶液量 7.5 cm^3 ）。電極に炭素繊維を用いるなど、条件を再検討した結果 6 mW を超える出力を得、体積当たりの最高出力はさらに向上している。我々のこれまでの検討から、燃料にグルコース、触媒にパン酵母、電子伝達物質にビタミン K を用いることが可能で、正極を最近開発が進んでいるエアカソードを用いれば、子供でも触れる安全で比較的高い出力の MFC が製作できる。

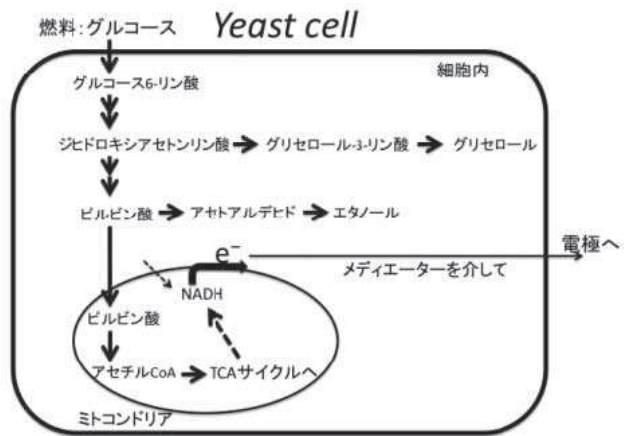


図2 酵母細胞内でのグルコース代謝

グルコースからの電子回収率はクーロン効率で示され、グルコース1分子から24電子を回収した場合その効率は100%となる。現状では上述したように最高出力は向上したが、グルコースからのクーロン効率はまだ低い状況にある。酵母では、呼吸経路以外にエタノール発酵やグリセロール発酵へとグルコースは代謝される（図2参照）。クーロン効率の上昇には、多くの電子を生み出す呼吸経路から電子を獲得する必要がある。現在、電池内でエタノールやグリセロールの生成を抑えるために、*S. cerevisiae* の各種遺伝子欠損株や代謝阻害剤を用いて検討しており、クーロン効率の改善が期待される成果を得ている（未公表）。今後も継続して代謝工学的な育種を進めることで、さらなるクーロン効率の上昇が期待される。また、酵母でのバイオフィーム形成など電極への電子伝達に関する取り組みも必要で、出力向上に向けた伸び代はまだ多く残されている。

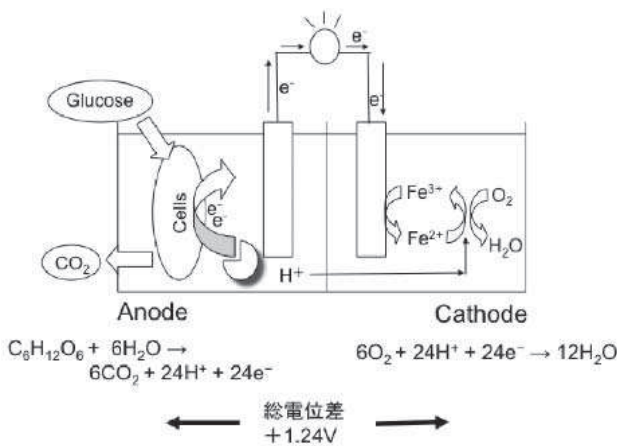


図1 2槽型酵母燃料電池の模式図

参考文献

- 1) H. Sakai *et al.*, Energy Environ.Sci., 2, 133 (2009).
- 2) M. C. Potter, Proceedings of the Royal Society London, B, 84, 260 (1911).
- 3) A. Gunawardena *et al.*, Int. J. Mol. Sci., 9, 1893 (2008).
- 4) S. Choi *et al.*, J. Lab Chip, 11(6), 1110 (2011).
- 5) 脇坂知行・高田洋吾・東雅之, 高温学会誌, 35(5), 283 (2009).
- 6) S. Fishilevich *et al.*, J. Am. Chem. Soc., 131(34), 12052 (2009).

