バイオ燃料電池－有機性廃棄物・廃水を電力資源化する－

Biofuel Cell - Converting Organic Wastes to Electric Power Resources -

柿 園 俊 英*

Toshihide KAKIZONO

Bio-fuel cell, or microbial fuel cells (MFCs) can convert chemical energy of organic compounds to electric power, with their aerobic degradation to CO₂ and water. MFCs are analogous to polymer electrolyte fuel cell (PEFC) in terms of the reaction sequences: fuel oxidation, proton transfer and oxygen reduction, whereas MFCs can be also considered as a waste treatment reactor. In this review, in comparison with PEFC, the items explained are the mechanism of MFCs, application of MFCs to wastewater/organic waste (rice straw and excess sludge) disposal, and application of “exoelectrogens” to mediator-less MFCs. Feasibility of MFCs is discussed for designing reactor structures of MFCs as semi-continuous, mediator-less, and single-chambered form.

Key Words: Microbial fuel cell, Mediator, Mediator-less, Waste biomass, Waste treatment

1. 緒 言

バイオ燃料電池は酵素または微生物細胞を触媒に有機物を燃料に用いて発電する反応器である。多くの生物は有機物を酸化して二酸化炭素と水に変換する。その過程で獲得した電子を巧妙に使うことで生物エネルギーの合成を行う。バイオ燃料電池では、この電子が負極電極に集められ外部回路へと流動化されることで電力が生み出される。他の燃料電池と異なり、生体触媒のタンパク質で構成される酵素を用いるため、燃料電池の稼働条件は常温・常圧である。

本稿では1～数種類の酵素のみを触媒とするバイオ燃料電池については言及せず、多様な酵素を内包する微生物細胞を触媒とする微生物燃料電池（英語の microbial fuel cell に対応する）をバイオ燃料電池として述べていきたい。例えば水素燃料電池が水素を燃料とするため、そう名付けられるので、語義からすると、微生物燃料電池は、微生物を燃料とするわけではないから、本来バイオマス燃料電池と呼ぶのが適切であろう。なおバイオマスとは動植物を起源とする有機性資源、およびそれらから派生する廃棄物の総称と定義される。具体的には、糖質、多糖類、脂質、タンパク質など、あるいはこれらの混合物であり広い範囲に及ぶ。微生物の分解を受ける有機物はすべて燃料電池の対象となりうる。

2. バイオ燃料電池のしくみ

バイオ燃料電池は固体高分子型燃料電池に極めて類似した反応形態をとる。微生物の多くは、ヒトと共通して酸素

を最終電子受容体とするいわゆる「呼吸」代謝反応系を持つ。例えば、ブドウ糖 (C₆H₁₂O₆) なら下の加水分解反応でCO₂へ酸化分解する。

微生物燃料電池では、この酸化の際に生じた電子については、負極槽内で電子が電極へと取り出されて、

とするので、水素燃料電池の負極 Pt 触媒によって起こる

とよく似ていることがわかる。一方、バイオ燃料電池の正極では、

が起こるので、水素燃料電池の正極 Pt 触媒によって進む

の反応とまったく同一である。負極槽で生成したプロトンを選択的に正極槽へと透過して移動させるプロトン交換膜が必要であることも両者に共通する。

微生物燃料電池の模式図を図1に示す。固体高分子型燃料電池と同様、左側の負極槽と右側の正極槽がプロトン交換膜で仕切られている。まず反応の第一段階として、左側の負極反応槽において微生物にバイオマスを与えその酸化分解を行わせる。酸素を与えない無酸素状態であるため、

* 広島大学大学院先端物質科学研究科 (〒 739-8530 広島県東広島市鏡山 1-3-1)

Graduate School of Advanced Sciences, Hiroshima University (1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8530, Japan)

Fig.1 Principle of microbial fuel cell

通常発電時には酸化還元電位が -200 mV 以下の強い還元状態となる。ここで描いたバイオ燃料電池では、電子伝達剤（以下メディエータとする）を用いる場合である。メディエータ分子は微生物細胞に入り込み、エネルギー代謝途上の電子を取り出し、細胞外へ出てそれを炭素電極へ渡す。メディエータに必要な特性は2つあり、細胞膜を透過できるための分子全体の脂溶性、およびエネルギー代謝に関わるタンパク質・電子受容体から電子を奪って酸化型から還元型となり、電極へ電子を渡して再び酸化型へ戻ることができる分子の2形性である。代表的なメディエータであるメチレンブルーの構造を図2に示す。中央部の窒素原子と硫黄原子が正に荷電し電子受容体である。

第一段階に相当する微生物のエネルギー代謝とその定量解析の詳細については、著者の微生物燃料電池の総説¹⁾、あるいは生化学の教科書を参照されたい。

反応の第二段階は、負極槽で生成したプロトンがプロトン交換膜を透過して正極槽に移動することである。プロトン交換膜は硫酸基の修飾を受けて強く負に荷電しているため、プロトンが膜に引き寄せられ、両極間に形成されたプロトン濃度勾配を解消するべく、引き寄せられたプロトンが正極槽へ押し出される。正極槽ではプロトンが酸素還元反応で消費されるため、このプロトン移動が継続されることになる。プロトン交換膜には、水素燃料電池と同様、高度に硫酸化されたテフロン膜であるNafion® (DuPont) が汎用されるが、その耐久性と剛性には難がある。そこで、これまでにその代替として1価陽イオン交換膜である国産のNeoSepta CMSの有効性を示してきた²⁾。

反応の第三段階は、前述したように酸素の還元反応であるが、図1の正極槽では、Pt電極を用いていない。代わりに電気化学で常用される電子キャリアとして、フェリシアン化イオン $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ としての Fe^{3+} を用いて、炭素電極固体上にある電子を受け取らせて、いったんフェロシアン化イオン(Fe^{2+})に変える。 Fe^{2+} は液相にあるプロトンと、溶

Fig.2 Structure of a typical mediator methylene blue

解した酸素分子の3者で反応して水を生成する反応を媒介する。シアン錯体イオンとして鉄イオンを利用するのは、 Fe^{2+} が酸素と直接反応して不溶性の酸化鉄となるのを防ぐためである。研究室でシアン錯体を使う場合には、正極槽に空気を吹き込む必要があるが、水素燃料電池と同様にPt触媒を塗布した炭素電極を正極に使えば、鉄イオンの媒介は必要なく、正極電極が大気へ開放露出されている限り、受動的に酸素が正極電極へ供給されて水の生成反応が進行する。

酸素還元反応は酸素分子が電子によって還元される4回の連続した反応であるが、水素燃料電池における主要な律速段階である。また還元反応が完結せずに中途産物の活性酸素を生じる結果、プロトン交換膜が損傷を受けることが知られている。活性酸素には、酸素分子の一電子還元体であるスーパーオキシドアニオンラジカル($\text{O}_2^{\cdot-}$)、二電子還元体である過酸化水素(H_2O_2)、三電子還元体であるヒドロキシラジカル($\text{HO}\cdot$)であり、Nafion膜を酸化分解し、水素ガスのクロスリークを引き起こすことによって水素燃料電池に致命的な障害を与える。バイオ燃料電池においては、発生電流が高くないことがあり、このような障害は深刻ではないようである。Nafion膜の厚みが $20\text{ }\mu\text{m}$ 程度であるのに対し、NeoSepta CMSは $120\text{ }\mu\text{m}$ であり優れた剛性があることも理由の一つである可能性がある。

3. バイオ燃料電池の燃料には何が使えるか

最も活発に研究活動を進める微生物燃料電池研究者のひとりであるBruce E. Logan教授の所属する米国ペンシルバニア州立大学において、昨年5月に微生物燃料電池に関する第1回国際シンポジウムが開催され³⁾、200名余の参加者を集めた。バイオマス燃料として何を対象とするかについて、多くの参加者の総意は、有機性廃水・廃棄物であった。その理由は、次に述べる3つに集約できる。

第一に、先進国ではいずれも活性汚泥法に代表される浄水処理を行うが、活性汚泥中の微生物に酸素を供給するための曝気と攪拌に大電力が消費される。ところが、活性汚泥法に微生物燃料電池を組み入れると、前述したように曝気は不要となるため、消費電力削減と同時に、電力生産が行えるため、強力な温暖化抑制対策となりえる。国内の廃水処理にかかる消費電力は2005年において国内総電力消費量の0.7%に達する⁴⁾。

第二に、現行法では汚水中の有機物の化学エネルギーが生物エネルギーへと変換されて汚泥微生物は生命活動を行い細胞増殖する結果、浄水処理が汚泥の増加につながる。ところが、微生物燃料電池では、有機物を分解代謝しても生物エネルギーではなく電気エネルギーとして取り出されるので、微生物は増えることができず、汚泥は増加しない。国内の産業廃棄物の重量比4～5割が有機汚泥であるため、微生物燃料電池を浄水処理に流用する効果は大きい。言い換えると、現行法と違って汚泥を副生しない革新的な廃水浄化が行えることになる。

第三に、有機性廃水や廃棄物を燃料に使うことで発電することの優位性である。トウモロコシ澱粉を発酵して作るバイオエタノールや、大豆やパーム油などの植物油に由来するバイオディーゼルが食糧と競合する問題が、2007年以降特にこれらの穀物を輸入する途上国において顕在化した。2008年7月まで暴騰を続けた原油価格が一気に下落に転じたことで、バイオ燃料価格も低下したことで落ち着いたかに見える。第二世代のバイオエタノールは、トウモロコシ澱粉ではなく、非可食部のセルロース画分にセルロース分解酵素を作用させて発酵して作られることになるが、そのためにセルロース分解酵素が劇的な低価格化によって本格生産されない限り、バイオ燃料と食糧との競合問題は解消しないであろう。

以上3点にさらに補足すれば、微生物燃料電池では分解処理中に直接的に電力が得られる利点がある。天然ガスの主成分であるメタンを回収できるメタン発酵は運転稼働に大電力を必要としない。ところが、メタン発酵のバイオガス産物に4割含まれる二酸化炭素や、その微量成分として副生する硫化水素、ケイ素化合物のシロキサン等について、例えばメタンガス発電の前には事前にこれらを除去する必要がある。

このように微生物燃料電池では、発電時に電力を消費せず、副産物を派生せず、食糧とも競合せずに、直接的に電力を生み出す再生可能型バイオ燃料生産システムである。廃水・廃棄物は日常生活や産業活動から否応なく発生するため、微生物燃料電池を使えば、廃水・廃棄物を国産の電力資源と見直すことができる。

4. バイオ燃料電池の発生電力

電流は電荷の移動速度であるため、バイオ燃料電池において発生する電流は、メディエータの電子の収奪・搬送速度に依存する。メディエータが細胞のエネルギー代謝から電子を収奪するためには有機物の分解代謝が十分に進行している必要がある。細胞内で電子が著しく滞留していない限り、有機物の代謝分解速度が発生電流を決定すると考えられる。それでは、微生物燃料電池を使ってバイオマスからどの程度の発生電力が期待できるのであろうか。

まず電圧については、生化学的に反応基質と生産物の酸

化還元電位に依存して求めることができる。ブドウ糖の場合、負極反応では前述の(2)式、正極反応では(4)式であり、それぞれ -0.42 V 、 $+0.82\text{ V}$ であるため、全体反応の(1)式では総電位差は $+1.24\text{ V}$ となる。現実的には、 0.5 V 前後の報告がほとんどである。

電流については、ブドウ糖1モル(180 g)から24モルの電子が得られるので、電流(I)と電気量(Q)、ファラデー定数(F)の関係をを用いると、1時間にブドウ糖1 gから得られる電気量は、 $24 \times 9.6485 \times 10^4 / (3600 \times 180) = 3.57\text{ A} \cdot \text{h}$ ととめられる。したがって、これに上記電圧を乗じると、獲得電力は、 $1.8\text{ W} \cdot \text{h}$ となる。高容量化してきた単3ニッケル-水素電池は $2,600\text{ mA} \cdot \text{h} \times 1.5\text{ V} = 3.9\text{ W} \cdot \text{h}$ となるので、わずかに小さじ1杯に満たないブドウ糖1 gが $1.8/3.9 = 0.5$ 本分相当のニッケル水素電池の電力を生み出せる計算になる。廃水中の使えない有機成分について、何らかの前処理なく、そのまま使える電力へと変換することができる。微生物燃料電池の浄水技術を実用化すると、下水処理場が発電所へ生まれ変わり、大電力消費地、すなわち温暖化ガス発生地の汚名を返上して、まったく反対に電力を生み出す温暖化ガス発生抑制地となることができよう。

5. バイオ燃料電池の燃料に使える稲わら

廃水については多くの報告があり、分解率と発生電力について優れた数値が得られている。個々の報告は、最近の総説⁵⁶⁾、および微生物燃料電池の報文を多く掲載するウェブサイト⁷⁾から参照されたい。

冒頭で紹介したようにバイオマスは広い範囲におよび多種多様である。そのため、バイオマスの代表化合物で実験成果を求めることは大切であるが、一方で実際のバイオマス廃棄物で実証的研究を進めることも欠かせないと考え

る。そこで、我々はまずアジア地域では代表的な農産廃棄物である稲わらを取り上げた。国内では稲わらのおよそ7割は田畑に鋤き込まれ、残りは家畜飼料、堆肥、畜舎敷料、焼却などに処分される。初冬に鋤き込まれた稲わらは春の到来による地温の上昇とともに嫌気分解を受けるため、水田が世界的なメタン発生源のひとつとなる。メタンは大気へ蒸散するので、二酸化炭素の21倍の温暖化係数を持つメタンの発生抑制は必須である。しかし稲わらは、かさばるので運搬が容易でなく焼却しても大容量の熱源ともならないため、永く土壌改良と称して埋め立てることで処理されてきた。メタンガス放出と温暖化促進の問題が注目されるまでは。

稲わらは水分さえあれば好氣的には容易に微生物分解を受ける。食品工場の廃水処理場から譲り受けた多様な微生物が混在する活性汚泥を微生物源として、稲わらを燃料とするバイオ燃料電池を稼働した成果を図3に示す。メチレンブルーをメディエータとする電力変換システムは二種類

Fig.3 Power generation from rice straw by sludge-based microbial fuel cell

の汚泥についてほとんど同程度に電流発生が観察され、わずか1日以内で高い電流発生収率と稲わら重量の3割の分解率を得ることができた⁸⁾。このような繰り返し添加を16回にわたり40日に及ぶ長期間継続的に稲わら分解を行わせることができた。

このように燃料である廃棄物を逐次添加することができ、かつメディエータが微生物分解を受けず安定にその電子伝達の機能を長期間果たし続けることができるならば、メチレンブルーの場合は比較的安価であるためこの方式で実用化が可能となるかもしれない。

6. バイオ燃料電池の燃料に使える余剰汚泥

われわれは前述した余剰汚泥についても、汚泥を燃料バイオマスと微生物源として兼用するバイオ燃料電池を開発してその可能性を検討した。汚泥は現状では自治体や企業の活性汚泥法による廃水処理から発生している。浄水処理段階でバイオ燃料電池を組み込めば汚泥は増えないはずであるが、発生してしまった汚泥を本技術で分解処理できないか考えたのである。余剰汚泥は、汚泥中の微生物（主に細菌であり、これを食する原生生物が混在する。糸状菌はほとんどいない）とそれらの死骸（細菌の細胞壁など難分解性物質）から構成されるが、それは各処理場や排出廃水の性状などに依存して変化する。汚泥は生物分解の点では難分解性であるため、国内ではほとんど焼却されセメント素材となるか、一部埋め立てされる。汚泥は水分を98%と高く含むため、重力または圧力プレスにより脱水処理する必要がある。ただこの処理後でも自然しないため焼却には重油が必要となる。これら以外の処理法として、メタン発酵法で1ヶ月かけて半量に減量する実例もある。

図4に示すように余剰汚泥に対してメディエータとしてビタミンK₃を用いて加え、負極電極を挿入して微生物燃料電池を組み立てるだけで、およそ1週間強で汚泥濃度を55%も減らせることができた⁹⁾。嫌気消化法の4倍の速度で同程度の分解が達成されたことになる。電流値は0.8 mA

Fig.4 Excess sludge degradation by microbial fuel cell system

前後を維持したが、クーロン収率は1割に届かない低い値であった。全有機炭素濃度(TOC)は初期とほとんど変わらず溶解した汚泥の無機化したと推測される。また汚泥中の特定または不特定の微生物集団が分解されたのかどうか興味ある結果である。

微生物燃料電池を用いる汚泥分解について、より高速により高い分解収率を目指して、近年一部の処理場で汚泥の可溶化に取り入れられるようになったオゾン処理を本技術と組み合わせると、わずか2-3日の短期間で、90-95%の優れた分解率を達成できることが明らかとなった¹⁰⁾。処理時間では従来の10倍と驚異的な速度で分解が進み、ほぼ完全な分解収率が遂行できた革新技術である。汚泥は細菌が主体であるので、およそ重量の5割がタンパク質成分であり、おそらくそのために電子回収率が1割に届かない低い収率にあることが、電力変換の向上面における挑戦課題である。

7. メディエータを使わないバイオ燃料電池

バイオ燃料電池における発電のしくみで示したように外部から添加するメディエータは細胞のエネルギー代謝から電子を奪い、負極の炭素電極へ電子を渡すことで外部回路へ電流発生を導くとした。それがバイオマスの化学エネルギーを電力へ変換する原理であった。ところが、このような電子移動を人工的な電子伝達剤の助けを得ずとも、自ら外界へ電子を捨てる微生物の存在が明らかとなってきた¹¹⁾。20種に及ぶ微生物が外部メディエータを用いずに電流を発生させることができる。中には適切な培養条件に置くことが必要とある条件がつくものの、微生物の研究室ではたいへんなじみ深い大腸菌もいる。どのように、なぜ、細胞外へ電子を捨てるのかが解明されつつあるが、すべての理解にはいまだ遠いと思われる。

図5に示すように3つの方式が知られる。まず第一の方式は、電子受容体としての酸素の代替を金属酸化物にもとめた場合である。すなわち土壌には地殻の5割を占める鉄やマンガン等の金属酸化物があるが、5 cm 地下に酸素はほとんどない。そこであるときある微生物が有機物を酸化し

Fig.5 Some proposed mechanism on how exoelectrogens discharge electrons out of the microbial cells

てエネルギーを獲得した後の電子受容体に金属を選ぶ術を身につけたようである。これを酸素呼吸になぞらえて、鉄呼吸（あるいはさらに一般化して金属呼吸）と呼ぶ。通常なら呼吸鎖の末端に位置するはずのチトクロームタンパク質が、この目的のために細胞表層に露出することで外界の金属と直接接触できるようになったと考えられる。微生物燃料電池においては、金属酸化物の代替として炭素電極がその役割を果たすことができる。いずれの場合でも接触を一時的なものとしないうちに、主に多糖類からなる粘質性のバイオフィルムを細胞外に作って金属酸化物と密着することが重要である。このような能力を獲得した微生物にとっては生物エネルギーの合成に働いた電子は外部へ処分する必要があり、適切な電子溜め“electron sink”として外界に容易に見い出せる金属は願ってもないものであったと想像できる。

第二の方式は、エネルギー代謝のタンパク質複合体の間で電子伝達を担う低分子の電子キャリアなどが、自前の「メディエータ」として細胞外へ分泌される場合である。ごく微量であるため物質の単離同定に至った例は少ないが、フラビン系化合物やヒドロキノンが見つかった。

第三の方式は、第一にも共通するが、バイオフィルムを介して金属酸化物に接するときに、電気伝導性が明らかにされている「ナノワイヤ」を細胞外へ突出するかのように出して電子放出を行う場合である。図5の右中段の電子顕微鏡写真において外米状の細胞間を結ぶ直線上の物質がナノワイヤである。これは第一の方式と補完的に機能すると推測されるが、金属酸化物がいつも都合良く細胞に隣接してあるわけではないので、このようなナノワイヤを細胞間のあたかもネットワークのように張り巡らせれば、細胞外へ放出された電子はいずれ金属酸化物に到達できるのであろう。また細胞間の相互の助け合いがここまで発達していると読み込んでよいのであろう。ナノワイヤの存在は米国カリフォルニア州に位置するクレイグ・ベンター研究所（世界のバイオ研究機関に先駆けてヒト遺伝情報の全配列

解析を行った）において、近縁にない複数の微生物においてナノワイヤの存在を立証している¹²⁾。

このようなメディエータを使わず電子放出ができる微生物は、Exoelectrogen (exo 外へ、electro 電子、gen 生成する菌、電子生成菌)、あるいは Electrochemically Active Microorganism (電気化学的に活性な微生物) などと称される。これらの微生物は土壌を含めた多様な自然界に棲息することが示されている。我々も活性汚泥中に電子生成菌の存在を示し、別途培養した代表的な電子生成菌である *Shewanella* 属菌を汚泥に加えると発生電流が優位に増加することを見出した¹³⁾。さらに十分なバイオフィルム形成に向けては、培養を継続して行えば促進されることが示されてきた結果、メディエータ添加時と変わらないか、むしろそれを上回る数 mA に達する高い電流発生が可能となることを示している。

電子生成菌の存在は、微生物燃料電池による廃水浄化処理には必須である。外部メディエータを使う場合は浄化処理後には回収して取り除き、さらには再利用することが望ましいが、経済的にその実現性は乏しかった。ところが、電子生成菌をうまく生かして使えば、彼らはむしろ望んで電子発生を効率よく行って有機物分解代謝に貢献する。両者の利害が完全に一致するのである。また電子生成菌は土壌のみならず汚泥にも存在し、継代培養を工夫すれば、優占種とさえなることができるようである。

廃水浄化には多大な電力がいまも消費されている。固体廃棄物でいくつかの実証的研究を行ったように、今後廃水についても微生物燃料電池の適用可能性を明らかにすべく、個別の廃水浄化処理を行う必要がある。当面の標的廃水は、高濃度の澱粉、脂質、タンパク質を含む廃水となるであろう。好気処理並みの高速浄化、および余剰汚泥を出さない廃水処理システムの可能性を共同研究として進めていくことを考えている。

8. 結論に代えて

本総説では、まず初めにバイオ燃料電池がどのように有機物であるバイオマス燃料を電力変換するのか、生物系でない研究者にも受け入れていただけるよう説いた。次いで、有機性廃水に適用した場合の優位性に触れた。バイオマスの各論として、稲わらと余剰汚泥の実例を挙げ、廃棄物処理法としても従来法に優ることを示した。そして最後にメディエータを使わない微生物を使う発展型の微生物燃料電池の将来性を述べた。正極電極に Pt/C を用いれば、コンパクトで受動大気利用型の実用的なバイオ燃料電池を作って、廃水・廃棄物の処理と電力変換を兼用する革新的な装置として稼働できるであろう。水素ほどの高いエネルギー準位を持たないバイオマスを燃料に使う以上、バイオ微生物燃料電池へ水素燃料電池の高い電力は望めないのは当然であるが、本稿のバイオ微生物燃料電池には、太陽熱や地

熱、ミニ水力などとともに、分散型の小電力発電源としての可能性がある」と期待したい。低炭素社会を支える基盤技術は、言うまでもなく化石資源を大量消費する従来の重厚長大な技術であるはずはなく、これらからの大きな舵取り転換を必要とする。様々な燃料電池技術の技術展開がバイオ燃料電池にも波及して、その実用化が進み、再生可能なエネルギー社会が実現することを強く願いたい。

謝 辞

本総説で引用紹介した余剰汚泥の分解については、「微生物利用型バイオ燃料電池を用いた余剰汚泥からの電力変換法の開発」の研究題目のもと、(財)岡山県産業振興財団より平成 20 年度循環資源有効利用推進研究委託事業として研究支援を受けた。また有機性廃水については、「電子発酵微生物を用いる廃水処理並行型直接発電システムの開発」として、鉄鋼業環境保全技術開発基金の研究支援を受けた。これらの研究支援に対して、厚く感謝の意を表したい。

引用文献

- 1) 柿菌俊英：“微生物利用バイオ燃料電池の開発”「電池革新が拓く次世代電源」エヌ・ティー・エス（2006）
- 2) 生物燃料電池用隔膜及び生物燃料電池、特開 2007-287542、柿菌ら
- 3) Microbial Fuel Cells, First International Symposium, May 27-29, 2008, Penn State University Web site: <http://www.outreach.psu.edu/programs/microbial-fuel-cell/>
- 4) 国土交通省、第 7 回資源のみち委員会資料（H19.3.14）<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/gyosei/sigen.html>
- 5) DR Lovley: The microbe electric: conversion of organic matter to electricity. *Curr. Op. Biotechnol.*, 19, 564-571 (2008).
- 6) TH Pham *et al.*: Bioanode performance in bioelectro-chemical systems: recent improvements and prospects, *Trends Biotechnol.*, 27, 168-178 (2009)
- 7) Website of Microbial Fuel Cells, Publication から報文を参照可。
<http://www.microbialfuelcell.org>
- 8) 古川ら：農産系未利用バイオマスと複合汚泥を用いた微生物燃料電池の開発、日本生物工学会大会講演要旨集、59, pp98 2D09-1 (2007.08.02)
- 9) H Enkawa & T Kakizono: Excess Sludge Degradation by Sludge-Based Microbial Fuel Cell during Electric Power Generation, Asia-Pacific Biochemical Engineering Conference, B-5, Nov.4-7 (2007), Taipei, TAIWAN
- 10) 柿菌：微生物利用型バイオ燃料電池を用いた余剰汚泥からの電力変換法の開発、平成 20 年度循環資源有効利用推進研究委託事業リサイクル技術シーズ発信会、ピュアリティまきび、岡山 3.16.2009
- 11) BE Logan: Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells, *Nature Rev. Microbiol.*, 7, 375-381 (2009).
- 12) YA Gorby *et al.*: Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms, *Proc. Natl. Amer. Soc.* 103, 11358-11363 (2006).
- 13) 三原ら：廃水処理システムへのメデイエーターレス微生物燃料電池の応用、日本生物工学会大会講演要旨集、59, pp99 2D10-1 (2007.08.02)