

先進的資源循環システムを目指した「泥の電池」

熊本大学大学院自然科学研究科 准教授 富永昌人（とみながまさと）

熊本大学大学院自然科学研究科 准教授 森村 茂（もりむらしげる）

【はじめに】

ハイヒール…この言葉から何を想像されるだろうか？そう、洋装における女性の重要なファッションアイテムである。しかしながら、現在のハイヒールの原形と言われる400年くらい前のパリでは、その目的が違っていた¹⁾。ご存じの方も多いかと思うが、当時のパリは下水設備が無く、ゴミや汚物を路上に捨てていたそうである。泥水の道を歩くとき、どうするだろうか？きっと、つま先立ちで歩く方と思う。当時は、その為のハイヒールであった。さて、ハイヒールと「泥の電池」とは全く関係ないようであるが、著者は、ハイヒールほどではないがそういった地域でこそ役に立つ技術開発になればと考えている。(写真:ハイヒール)

「泥の電池」の測定のために、2014年10月下旬にインドネシアの第二の都市であるスラバヤ市に行った。現地の干潟に行って驚いた。海岸近くにはバラック家が建ちならび、当然、上下水道は無かった。汚物を家屋に残して後で海に捨てるより、そのまま海岸で用を済ませた方が合理的である。はたして、そのとおりであった。日本の上下水道に関する社会環境インフラは昔から世界最先端である。しかしながら、日本のような社会環境インフラが進んだ国は少数であることは、既にご承知のとおりである。理解しているつもりでも、実際に世界の現実を目にするとそのインパクトは大きい。(写真:スラバヤ市郊外)

本稿では、栄養物を多量に含み、微生物が無数に生息している泥状のモノを「泥」として表現している。また、「泥の電池」は、ハイテク材料、ハイテク技術で発電効率を向上しようとする取り組みではない。それも可能ではあるが、コストが高い。社会環境インフラが十分に行き渡っていない地域でお役に立てるものを技術開発したい、と考える著者の最近の取り組みを紹介したい。

【開発背景】

著者は、グルコースを燃料としたバイオ燃料電池の研究開発として、金ナノ粒子を触媒とした電極の開発を進めてきた²⁾。また、酵素を触媒とした酵素型バイオ燃料電池の開発のための基礎研究も進めている³⁾。いずれも、触媒は金属であり酵素である。金属は酵素に比べて耐久性が高く、長期使用に耐え得る。一方、酵素は耐久性が劣るものの触媒としては抜群の性能をもつ。しかしながら、これらが触媒として機能するのは、原則として純粋な単一の燃料である。生き物のエネルギー獲得は、燃料電池の原理と全く同じと考えられるが、生き物の栄養源は

多種多様である。グルコースの酸化によって細胞はエネルギーを獲得するが、グルコースの酸化には多くの酵素が反応に関与する。エネルギー源の多様性を求めるならば、触媒も多様性が必要である。そこで当然のことながら、グルコースの酸化に関与する酵素を電極に修飾して燃料電池を作製し、より多くの酸化反応を起こしてよりたくさんのエネルギーを獲得しようとする試みの研究がある。しかしながら、コストも高くなりそうで、酵素の耐久性が実現には大きな問題でもある。酵素がパッケージ化された、より便利な(手間暇がかからない)コストも安い(タダがいい)触媒がないか?という、極めて勝手な都合の良い観点から見ると、微生物がその対象に浮かびあがる。

微生物は、栄養源がある至る所に生息しており、低温・高温、高圧・低圧、酸性・アルカリ性などの厳しい条件をクリアして生息する微生物もいる(すなわち、その環境で耐久性が高い)。その環境に適した、名前もないかもしれない、微生物が勝手に生息する(すなわち、手間暇がかからない。しかもタダ)。もしくは、生息できるように微生物が進化する(すなわち、触媒の自己改良)。微生物から電気を取り出せることを示した最初の研究として、100年ほど前のイギリスの科学者の実験が挙げられる⁴⁾。その後の研究報告でも、出力密度は 0.1 mW/m^2 にも満たない発電量であった。近年、シュワネラ属やジオバクター属といった高効率の電流生成菌が見いだされ、 1000 mW/m^2 を越える高出力密度が多く報告されるようになった⁵⁾。しかしながら、微生物(1000 nm 程度)を触媒に例えると、その大きさが金属ナノ粒子(数 nm 程度)や酵素(10 nm 程度)に比べ桁違いに大きいために、さらに高密度出力を得るには、微生物の代謝の高速化と電流放出速度の高速化が求められ、微生物にとっても過酷である。(図1)

著者らは、冒頭に述べたように社会環境インフラが未整備の地域で広く普及可能な技術開発を目指している。そのために、コストは発電量よりも優先すると考えている。汚泥を汚水にするためにはコストがかかる。発電量が高い微生物の生息に最適な環境を与えるためにはコストがかかる。それらを全部排除して、あるがままの「泥」で、あるがままの微生物で、可能なだけの出力が得られればよい、というコンセプトのもと、敢えて微生物燃料電池と言わずに、「泥の電池」と呼ぶことにしている。「泥の電池」には、次の原理にも記すように、嫌氣的な泥中の汚れを好氣的微生物で分解し浄化を促進するという特徴もある。

【原理】

微生物のエネルギー獲得のための代謝反応は、電子供与体から電子受容体への電子の流れを伴う多数の酸化還元反応で構成されている。微生物の有機物分解の代謝反応から電子を外部回路に取り出すことにより、微生物を触媒とした有機物の化学エネルギーから電気エネルギーを取り出すことが出来る。ここで、外部回路に効率よく電子を放出する菌が電流生成菌とよばれ、シュワネラ属やジオバクター属がよく知られる。ここまでの基本原理は、微生物燃料

電池と同じである。余談ではあるが、ジオバクター属の細菌は、ウラン鉱山等の地下水汚染防止に使われてきた歴史があるが、この電子を放出しやすい特徴と密接に関連することが最近解っている。

さて、「泥の電池」の発電の基本原理は上記の通りであるが、さらに、下記に記すように、「泥の電池」は、好気性微生物が有機物を酸化分解するのと同じような仕組みで、嫌気的環境において有機物を分解することを可能にすると考えている。好気性微生物が酸素を必要とするのは、人間が酸素を必要とする理由と同じであり、有機物の酸化によりエネルギーを獲得する際に発生した電子を、酸素の還元に使って消費する必要があるためである。すなわち、代謝で発生した電子を体外へ破棄できる環境を整えてあげると、好気的微生物が泥中の有機物を分解できることになる。「泥の電池」のコンセプトは、1) まずは好気性微生物に有機物を酸化分解してもらい、2) 酸化過程で発生した電子を導電性物質(電極)に渡してもらい、3) その電子を酸素が存在する環境まで導き、4) そこで酸素を還元して電子を消費するものである。このようにして、泥の発電と浄化が同時に進行する。(図2)

【現状】

「泥の電池」の発電と浄化についてであるが、浄化についてはここでの紹介は控えたい。発電量について簡単に紹介する。

有明海の干潟に電極を設置し、2週間に一度の頻度で「泥の電池」の出力測定を1年半程度継続している。その最大電圧は400~650 mVで、発電量は400~1000 mW/m²である。発電量のばらつきは、当然、季節の影響がある。しかし予想していなかったことではあるが、実はそれ以外の影響も大きい。その原因を突きとめることで環境センサへの応用も可能であろう。泥中の環境変化を微生物の代謝や群集変化による発電量変化ととらえて、自己発電で無線をとばすことで、広域環境センサとしての利用が期待できる。(写真:有明海干潟での測定の様子)

冒頭にも記したが、2014年10月下旬にインドネシア・スラバヤ市近郊の干潟で、有明海の干潟と同様な「泥の電池」の発電量を測定した。干潟のニオイがきつかったことから、高い発電量が予想されたが、発電量は上記の有明海の干潟と同程度であった。短期間の測定であったので結論づけることはできないが、酸素還元極が発電量の律速になったのではないかと考えている。ちなみに、バリ島の砂浜でも測定してみたが、当然、極めて小さな発電量であった。

熊本大学近郊の熊本北部浄化センターから下水汚泥を入手して、ラボレベルでの「泥の電池」を作製した。ラボレベルでの発電量は、メタン発酵前の汚泥では1000 mW/m²程度、メタン発酵後の汚泥では、400 mW/m²程度である。最大電圧もばらつきはあるものの、それぞれ570 mV、450 mV程度である。メタン発酵後の汚泥にもかなりのエネルギーが残っている。触媒の

効率を上げると当然出力も向上する。例えば、酸素還元のための電極を、白金触媒ナノ粒子を修飾した電極に交換すると、出力は3～5倍程度に向上することを確認している。しかしながら、コストが跳ね上がり、著者が考えている「泥の電池」のコンセプトに合致しない。身近な泥や泥っぽいものもいろいろと試してみた。例えば、米ぬか、腐葉土、猫の糞、河川敷の土、山の土、など。泥によって発電量は全く異なってくるものの、基本的には全て「泥の電池」になることを確かめた。泥の性状が変わらなければ、「泥の電池」の発電量もほぼ一定である。その性状が変われば発電量が変わる。すなわち、環境モニターへの展開が考えられる。(写真:泥の電池による発電)

【将来展望】

泥に含まれる有機物から電気としてエネルギーを取り出すことができれば、下水汚泥の他にも様々な不要・廃棄有機物の有効活用が可能となる。加えて、その浄化が促進されるので一石二鳥である。経年でその蓄積が課題となっているダム底の汚泥や養殖場の海底汚泥、畜産で大量に発生する家畜排泄物や農業や食品工場で発生する食品廃棄物などの廃棄有機物をエネルギーに変え、かつ浄化が促進されることが期待される。また、積極的に利用する用途として、遠隔地等、特に日光が届かない森林や地中におけるエネルギー源として利用することで広域環境モニターのオートセンサ、さらに将来的には人や動物と同じように有機物を摂取してエネルギーに変換するようなヒューマノイドロボットや動物型ロボットなど、さらなるイノベーションを生み出すことができると考えている。

【おわりに】

本研究開発は、微生物のド素人である富永と微生物専門家である森村との共同研究で進めてきたが、ようやく応用展開がみえつつある。2006年5月にインドネシア東ジャワで発生した熱泥の噴出は現在も続いており、噴出量は東京ドーム23個分を超えるそうである。訪問したスラバヤ市は熱泥噴出地の近くに位置しており、インドネシアの大学を訪ねた際に、この「泥の電池」を利用できないかとの相談を受け、現地の大学と共同調査中である。またインドネシアには、日本への輸出のためのエビの養殖池が多い⁶⁾。経年による汚泥蓄積とウイルスによるエビの大量死が問題になっている。東南アジアの経済発展は著しいが、その一方では地方の社会インフラが行き渡っていない地域も多い。「泥の電池」が上記問題やそれらの地域が抱える課題に少しでも貢献できたらと考えている。

<参考文献>

- 1) ローズ・ジョージ, 大沢章子(訳), 「トイレの話をしよう」, NHK 出版 (2009).
- 2) M. Tominaga, et al. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **624**, pp.1-8 (2008); *Electrochemistry Communications*, **9**, pp.911-914 (2007); *Electrochemistry Communications*, **9**, pp.1892-1898 (2007); *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **590**, pp.37-46 (2006); *Electrochemistry Communications*, **7**, pp.189-193 (2005).
- 3) M. Tominaga, et al., *Analytical Chemistry*, **86**, pp.5053-5060 (2014); *Electrochemistry Communications*, **31**, pp.76-79 (2013); *Biosensors and Bioelectronics*, **24**, pp.1184 –1188 (2009); *Physical Chemistry Chemical Physics*, **10**, pp.6928-6934 (2008).
- 4) M. Potter, *Proceedings of the Royal Society London, Series B*, **84**, pp.260-276, (1911).
- 5) B. E. Logan, *Nature Review*, **7**, pp.375-381 (2009).
- 6) 村井吉敬, 「エビと日本人 II」, 岩波書店 (2008).

原稿の写真と図

熊本大学大学院自然科学研究科 富永昌人



ハイヒール



インドネシア・スラバヤ市郊外の海岸

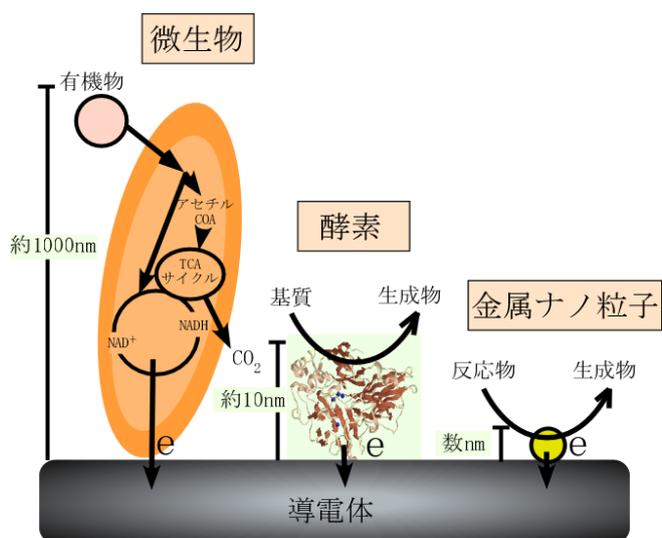


図1 触媒（微生物・酵素・金属ナノ粒子）サイズの模式図

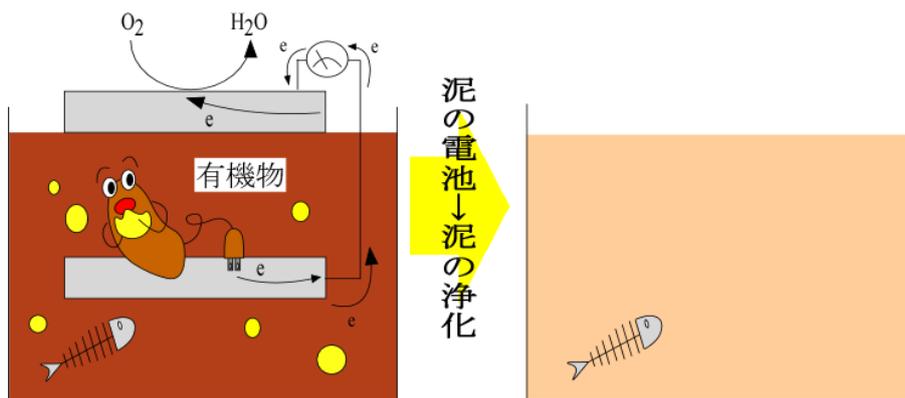
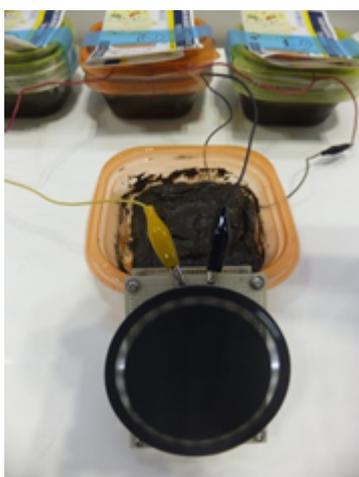


図2 「泥の電池」の概念図

(左図：有機物と微生物を多量に含む泥、右図：有機物が浄化された泥)



有明海干潟での測定



「泥の電池」による発電（白金触媒は使用していない）

左：下水汚泥、右：干潟の泥