

簡易的循環システムとしての「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）

キーワード：泥、電池、微生物、触媒

1. はじめに

下水道は国民の衛生的で快適な暮らしに多大な貢献を果たしている。400年くらい昔のヨーロッパでは下水設備が無く、汚物を路上に投げ捨て、川にはそのまま流していた。そこから、ハイヒールの原形が現在と別の意味で使われ、ペストなどの感染症も大流行した。¹⁾ 現在、日本では先人の叡智により、下水道処理人口普及率は80%に達し国内最大級の基幹インフラになった。また、汚水の収集・処理はもとより、雨水などの貯留・排除などの浸水被害から生命や財産を守る役目も下水道は果たす。日本の上下水道に関する社会インフラは昔から世界最先端である。今後、水・資源・エネルギーなどの先進的循環システムとしての期待が極めて大きい。一方で、世界に目を向けると、社会環境インフラが十分に整備された国が少ないことは、既にご承知の通りである。観光客が訪れる中心街では意識することはほとんどないが、少し市街から外れるとそのようなインフラが整備されていない地域は遙かに多い。本稿では、最近、我々が取り組んでいる「泥の電池」について紹介したい。ここでの「泥」とは、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である。我々の「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。それも可能とは思いますが、コストが高くなる。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ている。

2. 背景と原理

著者らは、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、金属ナノ粒子を触媒とした酸化極の研究開発を進めてきた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。これらの触媒にはそれぞれ一長一短はあるものの、触媒として機能するのは、原則として純粋な単一の燃料（基質）である。一方、生き物の栄養源は多種多様である。それは体内で多くの酵素が触媒として関与するためである。エネルギー源の多様性を求めるならば、反応の数だけの触媒が必要であろう。下水汚泥や干潟泥には、極めて多く

のエネルギーが含まれているものの、そこからコストに見合うだけのエネルギーが取り出せないのは、エネルギー源がピュアな物質ではないためである。すなわち、エネルギーを取り出すための反応数だけの触媒が必要になり、獲得エネルギーに対してコストが極めて高くなるためである。自然界には、膨大なエネルギーが極めて薄く広がっているため、コスト的採算の理由からそのまま放置される。

ところで、触媒という観点に着目すると、生物は触媒がパッケージ化されたものと考えることができる。とりわけ微生物は、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ものもいる。その環境に適した生物が勝手に生息して、もしくは生息できるように微生物が進化する。微生物は、コストのかからない素晴らしい触媒パッケージである。この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⁾。一般に、生き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（細胞外電子伝達）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できる。取り出された電子は、酸素の還元などで消費される。最近までは0.1 mW/m²にも満たない出力密度であったが、近年の研究成果により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/m²を越える高出力密度も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、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る。

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。汚泥を污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さらにコストがかかる。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。上記の細胞外電子伝達は、嫌氣的雰囲気環境が微生物には必要とされる。泥は酸素透過性が極めて低いため、電池には酸素透過を防ぐバリア材などは必要ない。すなわちコストがかからない。さらに「泥の電池」には、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。すなわち、微生物が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、好氣的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、嫌氣的環境

において有機物を分解すること可能にすると考えている。「泥の電池」のコンセプト図を図1に示す。

3. 研究紹介

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。本浄化センターは、メタン発酵とそれに続く燃料電池発電の設備を有する。ラボレベルでの「泥の電池」の発電量は、メタン発酵前の汚泥では 1000 mW/m^2 程度、メタン発酵後の汚泥では、 400 mW/m^2 程度であった。最大電圧にばらつきはあるが、それぞれ 570 mV 、 450 mV 程度であった（図2）。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た。泥上に設置した酸素還元極の触媒効率を上げると出力も向上した。例えば、白金触媒ナノ粒子を修飾した炭素電極に交換すると、出力は3～5倍程度に向上した。このことから、酸素還元反応が発電律速になっていることが解る。しかしながら、コストが跳ね上がり、著者らが考えている「泥の電池」のコンセプトに合致しないため詳細は検討していない。身近な泥や泥っぽいものもいろいろと試した。例えば、米ぬか、腐葉土、猫の糞、河川敷の土、山の土、などを泥状にしたものである。これらの発電量は全く異なるが、基本的にはいずれ全て「泥の電池」になった。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った。その性状が変われば発電量が変わるため、環境モニターへの展開も考えられる。

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」の出力測定を約2年間継続している（図3）。その最大電圧は $400\sim 650 \text{ mV}$ で、発電量は $400\sim 1000 \text{ mW/m}^2$ であった。発電量のばらつきは季節の影響、すなわち温度の影響であった。一方で、実はそれ以外の影響もあることが判った（図4）。原因を突きとめることで環境センサへの応用展開が可能と思われる。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（図5）。干潟に沿って立ち並んだ住居には下水設備がなく、その干潟からのニオイがきつかったため高い発電量を期待したが、上記の有明海の干潟と同程度の発電量であった。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、ここでも酸素還元極が発電の律速になったのではないかと考えられた。ちなみに、バリ島の砂浜でも測定したが、当然、極めて小さな発電量であった。

4. おわりに

泥中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。さらに浄化が促進されるのであれば一石二鳥である。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

の海底汚泥は、酸素が透過しないため微生物の分解が進みにくいため、「泥の電池」が有効に働くことが期待できる。

近年の東南アジア地域の経済発展は著しい。しかし、コストと時間を要する下水設備のような基幹インフラはまだまだである。インドネシアのように、東南アジアの諸国は島も多く、国土全体のインフラ整備には相当の時間を要するであろう。まだ社会インフラが行き渡っていない地域に、「泥の電池」が少しでもお役に立てたらこれ以上嬉しいことはない。

<参考資料>

- 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).
- 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).
- 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).

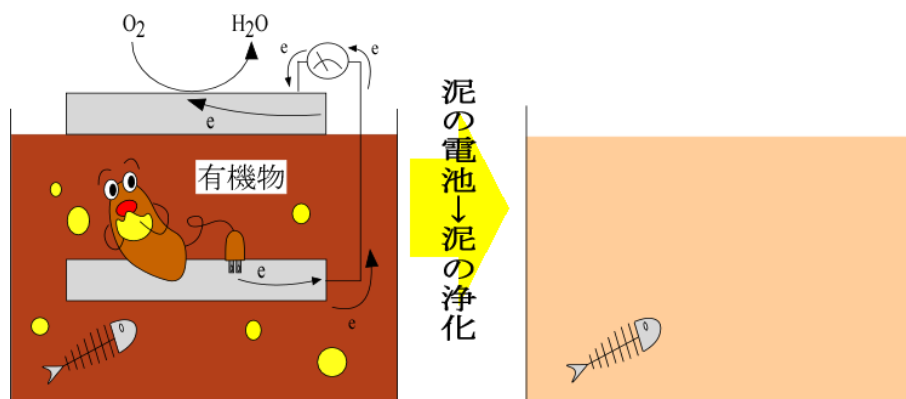


図1 「泥の電池」の概念図

(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)

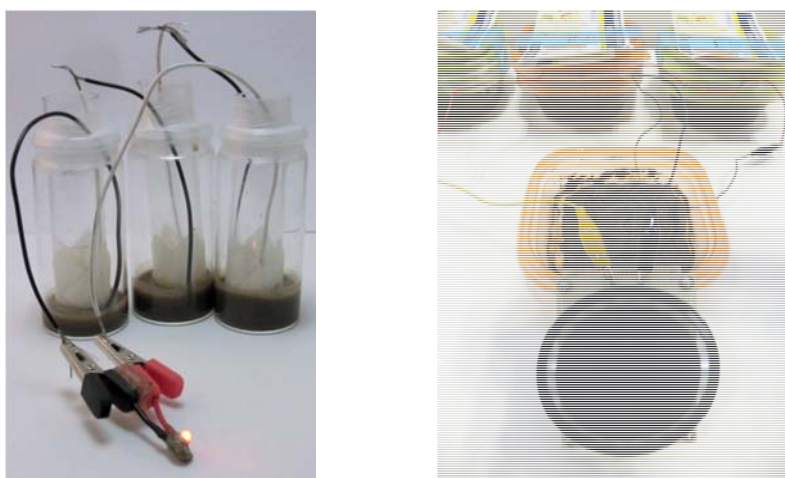


図2 「泥の電池」による発電（白金触媒は使用していない）

左：下水汚泥、右：干潟の泥



図3 有明海干潟での測定の様子

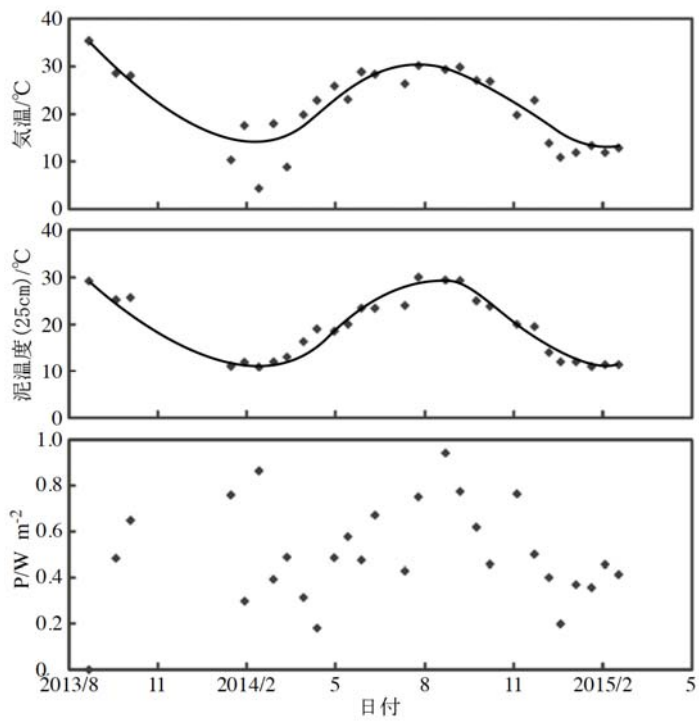


図4 有明海干潟に設置した「泥の電池」における発電量



図5 インドネシア・スラバヤ市郊外の干潟