

温暖化の抑制のためにバイオができることは

小林 肇

温暖化が進んでいる。原油価格の低下や米国のパリ協定離脱、日本では原子力政策の不確実性などから、CO₂排出量の削減は遅れている。バイオテクノロジーにできることはないだろうか？一つはバイオ燃料である。光合成産物から作るバイオ燃料は、燃焼しても温暖化には影響しない。ガソリンなど石油製品を代替することにより、交通セクターの低炭素化に寄与できる。

だが、温暖化を2°C以内に抑えるためには、社会全体での低炭素化が必要である。特に電力セクターでは、省エネやCO₂回収・貯留の推進とともに、再生可能エネルギーのシェアを60%以上とするほぼ脱炭素化に近い変革が必要となる。太陽光や風力など出力変動する電源の大規模導入は電力網への接続が課題である。そこで近年、“Power to Gas”が注目されている。これは、電力から貯蔵が可能な水素やメタンを製造するエネルギー変換技術で、欧州を中心に実証試験が進められている。

本稿では、温暖化の抑制にバイオ技術が貢献できる可能性の一つとして、Power to Gasに適用可能なバイオ技術「バイオカソードを用いた電力からのメタン生産」を紹介する¹⁾。バイオカソードとは、電気化学的な還元反応の触媒に微生物を利用した電極（カソード）である。電極の表面に定着している微生物が、電極から供される電子を利用し、還元反応による化合物の合成を触媒する。微生物の優れた代謝能により、バイオカソードは電気エネルギーを高い効率で利用し、CO₂から有機物（燃料や有用化合物の原料など）を合成する。

バイオカソードを利用してメタンを生成する反応系は特に電気化学的メタン生成（electromethanogenesis）と呼ばれる²⁾。バイオカソード上で電子（e⁻）とプロトン（H⁺）を用いてCO₂を還元し、メタンを生成する（CO₂ + 8H⁺ + 8e⁻ → CH₄ + 2H₂O）。この反応系は、基本的に水とCO₂、電力があればメタンを産み出せるため、バイオマスなどの原料を必要としない。また、反応の活性化エネルギーがきわめて小さく、電子を利用する効率が高い（ca. 96%）。これら利点から、バイオカソードをPower to Gasに利用できれば、化学触媒を用いる既存の技術に比べ、エネルギー効率を顕著に改善できる。

実用化には、しかし、反応速度の向上など、バイオカソード性能の更なる進化が必要である。現状はまだ基礎研究の段階にあり、電気化学的メタン生成を触媒する微

生物的な機構に関しても不明な点が多い。最終的なメタンの生成にはメタン生成アーキア（メタン菌）が関与していることが示されている。最近の純粋培養系を用いた研究から、カソードからメタン菌への電子の伝達には少なくとも三つの経路があることが明らかになった。

鉄腐食性を持つメタン菌IM1株を用いた研究から、少なくともある種のメタン菌は、電極から電子を直接受容し、CO₂還元を利用する能力を持つことが示された³⁾。しかし、その電子受容の分子機構は不明であり、特に細胞表面で電子の入口となる酸化還元活性物質の特定が待たれている。

また、遺伝子操作が可能なメタン菌 *Methanococcus maripaludis* を用いた研究では、同メタン菌種は電極から電子を直接受容することはできないが、細胞外の酸化還元酵素（ヒドロゲナーゼ、ギ酸デヒドロゲナーゼなど）が電子の伝達を媒介することが示された⁴⁾。これら酵素は通常の培養過程で培地内に放出され、カソード表面に吸着して電極から電子を受け取り、H₂やギ酸の合成を触媒する。それら産物を用いて *M. maripaludis* がメタンを生成する。

さらに、メタン菌への電子の伝達を別の細菌が媒介できることが示された。鉄腐食性を持つ硫酸還元菌 IS4 株は、単独で電極から電子を直接受容し、H₂を生成することができる⁵⁾。このIS4株を用いて形成したバイオカソードに *M. maripaludis* を加えると、同メタン菌がH₂を利用し、メタンを生成する。

三つ目の共培養系は、上述の培養系の中ではもっとも反応速度が高く、性能向上での応用が期待されている。他にも、リアクターや電極の改良、電子伝達を仲介する添加物の利用などさまざまな方法論が模索されている。しかし、温暖化の効果的な抑制には、低炭素化技術群の1日も早い拡充が必要である。飛躍的な技術革新を可能にする斬新なアイデアが希求されている。

- 1) Geppert, F. *et al.*: *Trends Biotechnol.*, **34**, 879 (2016).
- 2) Cheng, S. *et al.*: *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 3953 (2009).
- 3) Beese-Vasbender, P. F. *et al.*: *Bioelectrochemistry*, **102**, 50 (2015).
- 4) Deutzmann, J. S. *et al.*: *MBio*, **6**, e00496 (2015).
- 5) Deutzmann, J. S. *et al.*: *ISME J.*, **11**, 704 (2017).