

電気を使ったCO₂からのモノづくり

平野 伸一

産業活動によって排出されるCO₂は温暖化ガスとして気候変動を引き起こす要因となるため、その削減が重要な課題となっている。その一方で、産業活動における炭素の流れという観点においては、CO₂は最終産物であり、その増大は地球上で利用可能な炭素資源の減少を意味する。炭素資源の減少に伴って、将来的には燃料および化成品原料としての化石資源は言うまでもなく、利用しやすいバイオマスに関しても獲得競争が熾烈になることが想定される。そこで、大気中に放出されたCO₂を原料としたモノづくりを行うことで再度産業活動の流れに炭素を引き戻し、循環の流れを作り出すことが重要である。この考えに基づいたさまざまなCO₂変換研究が進められているが、本稿では微生物を利用した新しい試みについて紹介したい。

CO₂は前述の通り燃焼などの最終産物であるため、それ自体は低エネルギーレベルの物質である。そのためCO₂変換反応には外部からのエネルギー投入が必須である。微生物のCO₂固定・変換反応に対して外部から投入できるエネルギーの種類は非常に限られており、光、水素、無機元素（鉄、硫黄など）である。それに対して、最近CO₂の微生物変換において新しい還元力の形として電気（電子）を供給する新技術開発の方向性が示されている（electrosynthesis）^{1,2)}。光、水素、無機元素いずれを還元力とするとしても最終的には電子として細胞内の代謝経路を駆動させるため、電子を直接的に利用することにより、効率的なCO₂変換プロセスを構築できる可能性がある。

米国エネルギー省管轄のARPA-E（Advanced Research Projects Agency-Energy）ではelectrofuelsという野心的なプロジェクトが進められている¹⁾。このプロジェクトでは電気を使って微生物反応を駆動し、CO₂をアルコールなど燃料に変換することを目的としている。当然反応には電気が必要となるが、このプロジェクトではその電気は再生可能エネルギー（太陽光、風力）から取得することを想定している。それによって、CO₂の削減、燃料の生産、気象条件によって出力が変動する再生可能エネルギー由来の電気を化学結合として貯蔵する、という一石三鳥をコンセプトとして掲げている。電気を還元力として供給する場合、電極を介して電子を供給することになるが、当然ながら電極は微生物にとっての天然の電子供与体ではない。そのため、どの微生物でもこの手法が適用できる訳ではなく現在のところ適用可能性が明らかになっているのは水素酸化性微生物のグループであるメタン菌と酢酸菌である。まず、初めに見いだされたのが

メタン菌 *Methanobacterium palustre* を主としたバイオフィームである。このバイオフィームは還元電位を印加した電極上において形成され、電流値に比例したCO₂からのメタン生成活性を示したことから、電気化学的メタン生成（Electro-methanogenesis）と命名された³⁾。引き続きNevinらによって *Sporomusa ovata* を初めとした *Clostridium ljungdahlii*, *Clostridium aceticum*, *Moorella thermoacetica* のような酢酸菌においても、電流依存的な有機酸（酢酸、2-オキソ酪酸、ギ酸）の合成が報告された^{2,4)}。合成された物質は燃料ではないが、電子の高い変換効率（約80%）、CO₂を原料、電子を還元力として炭素-炭素結合を合成することに成功している点で大きな進展と言える。このように電気を還元力として利用できる微生物が見いだされているが、依然として合成される化合物が限定的であることが問題である。一方、Liらは少し違う切り口で電気を利用し、CO₂を高級アルコールに変換する手法を報告している⁵⁾。この報告ではまず電極反応によってCO₂が効率的にギ酸に還元可能であることに着目し、ギ酸を炭素源として生育できる *Ralstonia eutropha* H16 に遺伝子組換えにより高級アルコール（3-メチル-1-ブタノール）生産能力を付与した。電気化学的にCO₂をギ酸に還元しながら同一槽内でH16組換え株の培養を行った結果、電気により駆動されるCO₂から3-メチル-1-ブタノールへの変換プロセスの構築に成功している。本成果は後段の遺伝子組み換え次第で生産される化合物を選択できることから今後のプロセス汎用化への可能性を開いたと言える。

電気化学と微生物の関連としては電流発生微生物を利用した燃料電池が知られているが、逆に電気を微生物に供給することでクリーンな燃料を合成できる可能性がある。この分野の研究はまだ萌芽的な研究であり変換速度、量など問題は多いが、化石燃料より安くカーボンニュートラルな燃料が得られ、再生可能エネルギーの構図を大きく書き換える可能性がある。今後、電気化学、微生物学、材料工学など多面的かつ融合的なアプローチによる本技術の発展を期待したい。

- 1) <http://arpa-e.energy.gov/ProgramsProjects/Electrofuels.aspx>
- 2) Nevin, K. P. et al.: *MBio*, **1**(2), e00103 (2010).
- 3) Cheng, S. et al.: *Environ. Sci. Technol.*, **43**(10), 3953 (2009).
- 4) Nevin, K. P. et al.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **77**(9), 2882 (2011).
- 5) Li, H. et al.: *Science*, **335**(6076), 1596 (2012).