

微生物を使って水素からモノづくり

中島田 豊

広島大学大学院先端物質科学研究科分子生命機能科学専攻

〒739-8530 広島県東広島市鏡山1-3-1

1. 石油枯渇後のモノづくり

現在、我々は文明生活を支えているエネルギーの大部分を石油、石炭、天然ガスなどの化石資源に大きく依存している。しかし、地球温暖化への懸念とエネルギー安全保障の観点から、化石資源への過度の依存から脱却するため、太陽光、水力、風力、地熱、そしてバイオマスなど再生可能エネルギーへの転換が推進されている。また、先進国が現在の生活水準を維持するとともに、発展途上国が経済発展し、より豊かな生活を享受するためには、さらに大きなエネルギー供給が必要であり、化石資源は近い将来枯渇する。そうなった場合、ほぼ全てのエネルギーは核融合、および再生可能エネルギーから賄われるだろう。しかし、化石資源はエネルギーとして利用されるだけでなく、現在製造されているプラスチックなどの化成品のほぼ全ての原材料となっており、その枯渇はエネルギーのみならず、現在、生活を豊かにしている全ての物質の不足につながる。では、化石資源枯渇後に人類は何を出発原料としてモノづくりをしているのだろうか？

答えは水素と二酸化炭素であろう。というのも、エネルギー利用に関わるパラダイムシフトが起きない限り、再生可能エネルギーは電気に変換される。しかし、化学反応において電気のままでは使いにくい。そこで、電子を水素イオンに結合させた形態、つまり水素として反応器に導入されることになると考えられる。一方、プラスチックや合成繊維などのマテリアル類の骨格は炭素であり、これが将来別の元素に置き換わるとは考えにくい。化石資源は炭化水素の集合体であり、石油は長鎖炭化水素を主成分としており、従来の石油化学工業は長鎖炭化水素の限定分解や水素化などの化学修飾により様々な炭素基盤のマテリアル原料を製造することができた。しかし、これが無くなれば、逆に単純な炭素化合物を出発原料とせざるを得なくなる。そこで、大量に得られるも

のはCO₂をおいて他にない。従って、化石資源枯渇後、人類は水素とCO₂を出発原料として様々なものを製造することになる（図1）。では、水素とCO₂を原料として如何に物質生産を行うのか？この問題に対して、我々の研究室では、微生物を用いた水素とCO₂からの物質生産法に可能性を感じて研究を進めている。

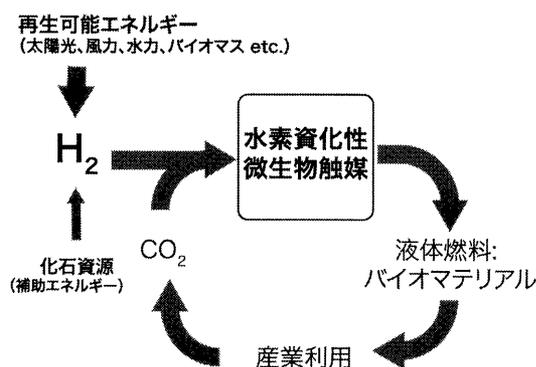


図1. 再生可能エネルギーを基盤とした水素を媒介とする有用物質生産概念図

2. 水素と二酸化炭素から有用物質をつくる微生物

微生物の中には糖だけでなく、H₂やCO₂を利用できるAcetogenと呼ばれる嫌気性酢酸生産菌の一群が知られており、H₂をエネルギー源（電子供与体）としてCO₂を固定して酢酸を生成する。本反応を行う微生物は1936年に初めて報告され、*Clostridium aceticum*と命名された。また、1977年には第2の菌が発見され、胞子を形成しない偏性嫌気性、グラム陽性桿菌で、*Acetobacterium woodii*と命名された。現在では、嫌気性酢酸生産菌は、30℃程度で増殖する*Acetobacterium*属や*Clostridium*属細菌を中心に、*Moorella thermoacetica*のような55-60℃で増殖する好熱性菌など、多くの微生物が報告されている。また、酢酸生産菌の多くは、H₂-CO₂の他にCOを利用できることが知られており、合成ガスから酢酸を生産することも可能である。

3. 微生物で水素と二酸化炭素から何がつくられるのか？

嫌気性酢酸生産菌は、通常、最終産物として主に酢酸を生産するが、中には副産物として液体燃料となるアルコールを生産することが知られている[1]。例えば、中温性水素資化酢酸生産菌 *C. ljungdahlii*、*C. autoethanogenum* は、合成ガスから酢酸の他にエタノールを生産することが報告されている。また、ブタノール、2-プロパノールを生産できるとの報告もされており、微生物を用いた水素、または合成ガスを原料とする液体燃料、バイオマテリアル原料製造の可能性は高い。*C. ljungdahlii* については詳細な検討が行われ、pH、培地組成などの最適培養条件や、基質ガスの培地への移動速度を高めたバイオリクターを用いて培養することによってエタノール生産量を最大で48g/Lにまで増加できたことも報告されている[2]。

我々の研究室では、コスモ石油(株)との共同研究により、 H_2 - CO_2 を基質とする好熱性アルコール生産菌を探索し、*Moorella thermoacetica*と多くの性状が一致するが、酢酸のほかエタノールを生産する好熱性細菌 *Moorella* sp. HUC221株を世界で初めて見いだした[3]。そこで、pH制御、ガス連続供給が可能なリアクターシステムを用い、 H_2 - CO_2 を用いた培養で菌体の回収、再利用を伴う反復回分培養を行ったところ、pH 6.2一定制御の時に、培地交換の操作によって菌体増殖の持続が見られ、1.51 g/lまで増加が可能であった。酢酸生産も増加が見られ、最終的に840 mmol/lに達した。一方、pH 5.8一定制御では、菌体量、酢酸生産量はpH 6.2一定制御よりも低い増加に留まったが、エタノール生産は、pH 6.2一定制御の時よりも増加が見られ、最終的に15.4 mmol/lであった[4]。さらに、分子育種によるエタノール生産能の増強を見据え、NAD(P)H依存性アルコール脱水素酵素 (*adh*) 及びアルデヒド脱水素酵素 (*aldh*) 候補遺伝子を *M. thermoacetica* ゲノムデータベースから網羅的に選択し、大腸菌内で発現、精製した候補酵素の活性を調べ、エタノール生成関連遺伝子の同定も行った[5]。原理的には、ここで得られた遺伝子をHUC221株に再導入することでエタノール生産は飛躍的に向上することが期待できる。そこで、現在、好熱性酢酸生成菌への遺伝子導入法の開発を鋭意進めている。

4. おわりに

現在、ドイツ、カナダなど欧米を中心に水素資化性嫌気性微生物を用いた合成ガスのバイオリファイナリー技術の開発が着々と進んでいる。つい最近、中温菌である *C. ljungdahlii* に外来遺伝子を導入することにより、本来は本菌がつかないブタノールを合成ガスから生産させることに成功したことが報告された[6]。これは、遺伝子工学技術を用いた水素資化性酢酸生成菌の分子育種の最初の例である。ブタノール生産量はまだまだ微量ではあるが、今後、水素資化性酢酸生成菌の遺伝子組換え技術がますます高度化すれば、将来、外来遺伝子を含めて、細胞内での遺伝子発現を制御することにより、微生物代謝を自由に改変できるようになるだろう。そうなれば、エタノールやブタノールなどの液体燃料や、エチレン、プロピレン、コハク酸、乳酸などのプラスチック製造原料を水素と二酸化炭素、または合成ガスから生産できる微生物触媒の開発も夢ではない。

もちろん、化学触媒を用いたC1ケミストリーでも同様のことが可能であろう。しかし、常温、常圧に近い穏やかな条件で操作でき、希少金属類を必要としない微生物触媒による物質生産は、グリーンイノベーションを達成するとともに、現在世界中で起きているレアメタルなどの戦略物質争奪戦を勝ち抜くための重要なツールの一つになると考えている。

参考文献

1. A.M. Henstra, J. Sipma, A. Rinzema and A.J.M. Stams; *Curr. Opin. Biotechnol.* 18, 200-206 (2007)
2. T. Klasson, M.D. Ackerson, E.C. Clausen and J.L. Gaddy; *Fuel* 72, 1673-1678 (1993)
3. S. Sakai, Y. Nakashimada, H. Yoshimoto, S. Watanabe, H. Okada and N. Nishio; *Biotechnol. Lett.* 26, 1607-1612 (2004)
4. S. Sakai, Y. Nakashimada, K. Inokuma, M. Kita, H. Okada and N. Nishio; *J. Biosci. Bioeng.* 99, 252-258 (2005)
5. K. Inokuma, Y. Nakashimada, T. Akahoshi and N. Nishio; *Arch. Microbiol.* 188, 37-45 (2007)
6. M. Köpke, C. Held, S. Hujer, H. Liesegang, A. Wiezer, A. Wollherr, A. Ehrenreich, W. Liebl, G. Gottschalk and P. Durre; *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 107, 13087-13092 (2010)

◆◆ 次号は、「東京ガス株式会社」研究者の声です ◆◆