



藻類による D-乳酸の発酵生産 「カーボンニュートラル」を超えるバイオリファイナリー

酒井 謙二

バイオリファイナリーとは、バイオマス資源の多段的な変換による化成品、エネルギー、燃料の生産を骨格とするシステムのことである。オイルリファイナリーに近似して、石油の代わりに植物体などを製品化するところからこの造語があるが、生物材料の変換技術や生物活性の工業利用 = ホワイトバイオテクノロジーと、環境負荷の低減を目指した化学工業 = サステナブル（グリーン）ケミストリーが融合することで、経済的にも資源的にも持続可能で環境負荷の最小化を目指した化学製品の生産を目指すトータルプロセスと言えよう。

本来、バイオリファイナリーは原料である植物バイオマスの持続的生産や再生が可能であることに第一義的な意義があると考えられてきた。しかし、現在ではさらに、原料のバイオマス炭素は植物などによって同化されたものなので、使用後分解・燃焼しても大気中の炭酸ガス増加はゼロとなる「カーボンニュートラル」であるという評価を受けており、緊急の社会的課題である炭酸ガス排出量低減へのメリットも有すると考えられている。

ポリ乳酸はバイオリファイナリーにより作られるプラスチックの代表格である。現在の製造工程は植物バイオマスや食品廃棄物からの糖質抽出・乳酸発酵・ポリエステル製造・プラスチック製品化と流れる。ポリ乳酸プラスチックの場合、乳酸の光学活性は製品の結晶性に影響するため、高い光学純度が要求される。さらに、ポリ L-乳酸とポリ D-乳酸のステレオ複合体は耐熱性を上昇させることから、一般的な L-乳酸発酵とは別に、効率的な D-乳酸生産菌の分離や育種も求められている。乳酸菌では *Lactobacillus derbrueckii* subsp. *derbrueckii* などが D-乳酸を生産するが、キシロオリゴ糖から D-乳酸を生産する *Leuconostoc lactis* などにも新たに報告されている¹⁾。大腸菌は元来 D-乳酸を蓄積する混合有機酸発酵菌であるが、主系路以外の遮断によって乳酸生産菌へと育種可能であり、栄養要求性を解消し、糖と無機質のみから D-乳酸を生産する株も報告されている²⁾。また、酵母 *Saccharomyces cerevisiae* の場合、アルコール生成系の完全な遮断ができないため、収率に限界があるが、低い pH でも発酵が進

行し、高い光学純度の D-乳酸を生産できる菌が育種されている³⁾。

昨今のエネルギー開発に例えると、前段の D-乳酸生産がバイオエタノールとすれば、ソーラーエネルギーに相当する D-乳酸生産についての報告もある。 *Nannochlorum* は我が国の海洋で分離された微細藻類であるが、独立栄養的に D-乳酸を生成させることが可能である⁴⁾。初めに 0.5% の CO₂ をパージし、15,000 lux の光を当てて硝酸を窒素源とした海水培地で増殖させ、光合成産物であるデンブンを蓄積させる。集菌・濃縮後リン酸を補足し、暗所にて 25～35℃、3 日間培養することで蓄積したデンブンの 70% が光学純度 99.9% 以上の D-乳酸に変換される。生産量は 26g/l (-broth) に達し、照光面積あたり 2.3g/m²・d の生産性を示した。著者らはこの嫌気呼吸による化合物変換を self-fermentation と表現している。直接の基質として CO₂ を「吸収」するため、炭酸ガスの純減技術として捉えることもでき、得られた乳酸から合成されるポリ乳酸プラスチックで耐久消費財を製造する場合は、「カーボンニュートラル」を超える「カーボンマイナス」な製品とも表現できよう。

藻類をツールとしたバイオリファイナリーは BDF (bio diesel fuel) 生産でより研究が進んでいる。これは、価格が大きな意味を持つ基盤的燃料の場合、食飼料生産や森林保全との競合の問題からバイオエタノールやパーム油 BDF は一定以上の量的寄与が難しいのに対し、藻類の培養は土壌の肥沃度や降雨などに左右されず、工学的制御がしやすく、安定生産が可能なメリットを持つからである。ただし、大きな問題点は設備を含めた 10 倍近い生産コストである⁵⁾。バイオリファイナリーは全体設計も含めてまだまだ改良が必要である。

- 1) Ohara, H. et al.: *J. Biosci. Bioeng.*, **101**, 415 (2006).
- 2) Zhou, S. et al.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**, 399 (2003).
- 3) Ishida, N. et al.: *J. Biosci. Bioeng.*, **101**, 172 (2006).
- 4) Hirayama, S. and Ueda, R.: *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **119**, 71 (2004).
- 5) Chisti, Y.: *Trend Biotech.*, **26**, 126 (2007).