

## シアノバクテリアの光合成能力を利用したバイオ燃料生産

蘆田 弘樹

近年化石燃料の将来的な枯渇が予測されており、エネルギー問題が日々、大きく取り上げられている。この問題の解決のため、化石燃料に頼らない次世代エネルギー生産技術の確立が急務となっている。バイオ研究分野からのアプローチの一つとして、シアノバクテリアや藻類を利用したバイオ燃料生産研究が注目されている。これらの光合成生物は、光をエネルギー源とし、CO<sub>2</sub>と水から、光合成で固定した炭素を原料にバイオ燃料を生産することが可能である。食糧原料と競合しないこと、カーボンニュートラルな燃料生産が可能なことから、次世代エネルギー生産系として期待が持たれている。特に、シアノバクテリアは、生育が速く、高い光合成能力を有することから、バイオ燃料生産宿主としての研究がもっともよく進められている。

シアノバクテリアは、酸素発生型光合成を行う原核光合成生物であり、植物や真核藻類の光合成器官である葉緑体の起源と考えられている。その多くは淡水、海水に生息するが、高温、低温、乾燥、高塩濃度環境など、広く環境に分布している。ここでは、代謝改変シアノバクテリアを用いた光合成に依存したバイオ燃料生産の最近の研究について紹介したい。

一般にバイオエタノール生産は、糖類、デンプン、セルロースを含む植物や藻類のバイオマスから酵母の発酵によって行われる。これに対し、シアノバクテリアを用いたバイオエタノール生産では、光合成で固定したCO<sub>2</sub>の炭素からエタノールを直接生産することが可能である。シアノバクテリア *Synechococcus elongatus* PCC7942 に優れたエタノール発酵特性を持つ通性嫌気性細菌 *Zymomonas mobilis* のピルビン酸脱炭酸酵素（ピルビン酸からアセトアルデヒドへの反応を触媒）とアルコール脱水素酵素（アセトアルデヒドからエタノールへの反応を触媒）の遺伝子を導入し、4週間の培養で培地1 Lあたり0.23 gのエタノール生産が報告されている<sup>1)</sup>。この系では、細胞内で合成されたエタノールは細胞外に分泌され、生育液体培地中に蓄積される。同様に、同じ遺伝子セットを *Synechocystis* PCC6803 に導入し、2倍程度のエタノール生産に成功している。シアノバクテリアを用いたエタノール生産の利点は、光合成的に直接エタノールを合成できることと、エタノールが培地中に蓄積されることで、エタノール抽出のための菌体回収と酵母による発酵槽でのエタノール生産を行う必要がないことである。米国アルジェノール社は、遺伝子組換えエタノール

ル産生シアノバクテリアを培養しながら、蒸発・濃縮によるエタノール回収を行うことができる閉鎖系フォトバイオリアクターを開発している。一般に、シアノバクテリアは酵母のように高いエタノール耐性を有していないため、エタノールの生産と回収を同時に行い、蓄積するエタノール濃度を低く保つバイオリアクターは有効な技術である。

エタノールだけでなく、ガソリン代替燃料として期待されるイソブタノールのシアノバクテリアを用いた生産も報告されている<sup>2)</sup>。代謝改変によりバリン前駆体である2-ケトイソバレリン酸への代謝を強化した *Synechococcus elongatus* PCC7942 に乳酸菌の2-ケト酸脱炭酸酵素（2-ケトイソバレリン酸からイソブチルアルデヒドへの反応を触媒）と大腸菌のアルコール脱水素酵素（イソブチルアルデヒドからイソブタノールへの反応を触媒）遺伝子を導入することで、イソブタノールの生産に成功している。この系において、培地1 Lあたり最大で0.45 gのイソブタノール生産が可能である。

エタノールとイソブタノール以外にも、代謝改変により、バイオ燃料である1-ブタノール、イソブレン、または燃料原料である脂肪酸の生産が可能な遺伝子組換えシアノバクテリアの作製も報告されている<sup>3)</sup>。

以上のように、シアノバクテリアを用いて、光合成に依存した大気CO<sub>2</sub>の炭素を原料にしたさまざまなバイオ燃料生産技術が確立されようとしている。しかしながら、その生産量・効率はまだ低いレベルであるといえる。今後、メタボローム解析などによってバイオ燃料生産代謝系の律速段階の同定とその強化やシアノバクテリアのバイオリアクター開発による培養の最適化など、生産量増加のための改良の余地はまだある。また、これまでの研究では淡水性シアノバクテリアが用いられてきたが、海洋性、好熱性などさまざまな環境に適したシアノバクテリアを用いることで、バイオ燃料生産場所も広がるだろう。シアノバクテリアを用いたバイオ燃料生産研究は、はじまったばかりであり、今後の発展が大いに期待できる。

- 1) Deng, M. D. and Coleman, J. R.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**, 523 (1999).
- 2) Atsumi, S. et al.: *Nat. Biotechnol.*, **27**, 1177 (2009).
- 3) Machado, IM. and Atsumi, S.: *J. Biotechnol.*, **162**, 50 (2012).