

自動車用ポリ乳酸の課題と高純度乳酸の生産技術

高橋 治雄^{1*}・石田 亘広¹・齋藤 聡志²

近年の地球温暖化問題などにより、化石燃料に依存したCO₂排出型社会からCO₂循環型（カーボンニュートラル）社会への転換が21世紀の重要課題として取り上げられている。

この中でも、植物由来プラスチックの開発は重要な取り組みのひとつである。植物から得られるデンプン・糖などを原料として、乳酸発酵を経て合成されるポリ乳酸はこの代表格であり、農業用シートや家電の一部に採用されるなどして実用化されている。自動車用部品としても、すでにスペアタイヤカバーやフロアマットなどにポリ乳酸が使われ始めている。トヨタ自動車（株）では植物由来の糖などを原料としてポリ乳酸を生産する実証プラントを国内に建設中であり、乳酸の発酵・精製からポリ乳酸の重合（高分子化）までを一貫して手がけている。

しかし、ポリ乳酸を自動車用部品として本格的に展開するためには物性（耐熱性、耐衝撃性など）の大幅な向上とコストの低減が不可欠である。この問題を解決するために、物理化学的手法としてケナフやクレイを用いたナノコンポジット化の検討に加え高性能ポリ乳酸製造に必須な高光学純度の乳酸を遺伝子組換え酵母を用いて製造する技術に関して紹介する。

ポリ乳酸におけるカーボンニュートラルの概念

自動車用ポリ乳酸におけるカーボンニュートラルの概念を図1に示した。植物資源から得られた糖から発酵、精製を経て純粋な乳酸が得られる。重合により得られたポリ乳酸は自動車に使用可能となるように高性能化の処理が施され、材料として使用された後、焼却や分解によりCO₂が発生する。このCO₂は光合成により植物体内に再び固定化される。したがってCO₂は結果としては増加しないカーボンニュートラルの概念が成り立つ。もちろんLCAとしてポリ乳酸作成時に発生するCO₂を加味してトータルとして削減できなければ意味がないが、たとえばサトウキビバガスをエネルギーとして使用した場合、最大80%程度の削減が可能との試算結果も出ている。

物理化学的性能の向上

表1にポリ乳酸（PLA）とPET、PPの物理化学的性質の比較を示した。従来のポリ乳酸を自動車用材料として

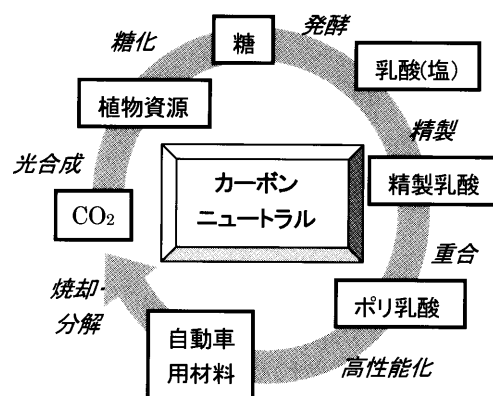


図1. 自動車用ポリ乳酸におけるカーボンニュートラルの概念

表1. ポリ乳酸（PLA）とPET、PPの物理化学的性質の比較

	PLA	PET	PP
引張り強度（MPa）	63	57	37
破断伸び（%）	5	300	20
曲げ強度（MPa）	102	88	48
曲げ弾性率（GPa）	3.2	2.7	1.5
Izod 衝撃値（J/m）	30	59	50
熱変形温度（℃）	55	67	113

最も多く用いられているPPと比較するとIzod 衝撃値や熱変形温度の値が非常に低く破断伸びの値も低い。したがって、自動車用部品として本格的に展開するためには物性（耐熱性、耐衝撃性など）の大幅な向上が不可欠である。

この問題を解決するために、トヨタグループの材料開発チームの取り組みの一環としてケナフ繊維やクレイを用いたコンポジット化が検討された。まずケナフ繊維とのコンポジット化に関してはケナフ繊維に対して約20%程度のポリ乳酸をバインダーとして用いることにより加熱プレス成形を行った。その結果、図2示すように耐衝撃性が大幅に改善されPP単独よりもすぐれた値を示した。またポリ乳酸単独で用いる場合よりも約50%の軽量化にもつながった。¹⁾

またクレイ（アンモニウムモンモリロナイト）とポリ乳酸のナノコンポジット化に関しても検討した。シリカ

*著者紹介 ¹（株）豊田中央研究所材料分野バイオ研究室（室長・主席研究員） 〒480-1192 愛知郡長久手町長湫横道41-1
TEL. 0561-63-5397 FAX. 0561-63-6498 E-mail: e1092@mosk.tytlabs.co.jp

²トヨタ自動車（株）バイオ・緑化事業部

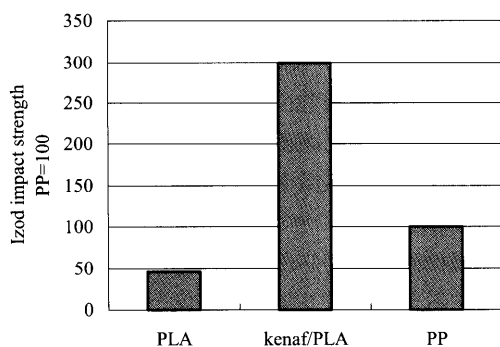


図2. ケナフとのコンポジット化による耐衝撃性の改善



図3. ポリ乳酸とクレイのナノコンポジット化

層間に存在しているナトリウムイオンを有機アンモニウム塩により置換し、その部位でポリ乳酸を結晶化させることでナノコンポジット化を目指した。用いる有機アンモニウム塩としてアルキル鎖が18でOH基を有する側鎖を用いることでポリ乳酸とクレイがナノサイズで良好な分散性を示すことが明らかとなった（図3）。

ポリ乳酸とクレイハイブリッド材料においては型内での結晶化が可能となると同時に耐熱性を50°C以上上昇させることが可能となった。²⁾

組換え酵母による乳酸生産

基本原理 自動車に用いることができる高品質・高結晶性のポリ乳酸を得るためには、高光学純度（99%以上）の乳酸を安価に効率的に得ることが必要である。^{3,10)} 乳酸菌の多くはL-乳酸とともにD-乳酸も同時に生産するものがほとんどであり、⁴⁾ 発酵の段階で高光学純度の乳酸を得ることができず、下流の精製工程で光学分割（ス

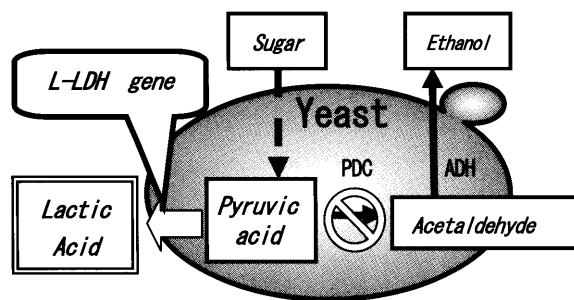


図4. 代謝工学を用いた酵母での乳酸生産の基本原則

テレオ分離）のステップが必要となることが多い。⁵⁾ 今回、高光学純度の乳酸を効率的に生産するための新たな技術の1つとして、酵母を用いた生産技術の開発を行ったのでその内容について紹介する。

酵母は高密度培養が可能などの工業的なメリットを有するため代謝工学を用いた酵母での乳酸生産を試みた。その基本原理を図4に示した。今回用いたワイン酵母などのアルコール発酵に用いられる実用酵母では、糖からピルビン酸を経てPDC (pyruvate decarboxylase)によりアセトアルデヒドが合成され、さらにADH (alcohol dehydrogenase)によりエタノールが生産される。この経路で主に働いているPDC1の遺伝子を破壊し、このPDC1プロモーター下流にL-乳酸合成酵素LDH (lactate dehydrogenase)を導入して酵母での乳酸生産を試みた。この際、LDHはNADHを補酵素として用いるがADHも同様にNADHを補酵素として用いるためレドックスバランスとして問題なく乳酸製造が可能である。⁶⁾

LDHの種類とゲノムへの導入の効果 用いるLDHとして乳酸菌 (*Bifidobacterium longum*)⁷⁾とそれよりピルビン酸に対する K_m が低いウシ (Bovine)⁸⁾由来の2種類を用い、従来の2 μ プラスミドでのLDH導入とゲノム中のPDC1プロモーター下流へのLDH導入を試みた。その時のLDH活性を測定した結果が図5である。プラスミドで導入した場合には両者の活性に差は認められなかったが、ゲノムに導入した場合にはウシ由来のLDHが2倍近い活性を示した。実際に100g/lの糖から乳酸発酵を行ったところ、プラスミドでは15g/l程度の乳酸生産であったのに対してゲノムに導入した場合には乳酸菌由来のLDHで30g/l、ウシ由来のものでは約60g/l程度の乳酸の生産が認められた。⁹⁾ この違いの原因に関しては現在のところはっきりしないがゲノムに導入することで安定性などが向上し K_m をある程度反映した結果が得られたものと考えられる。

多コピー化の効果と光学純度 ウシ由来LDHに

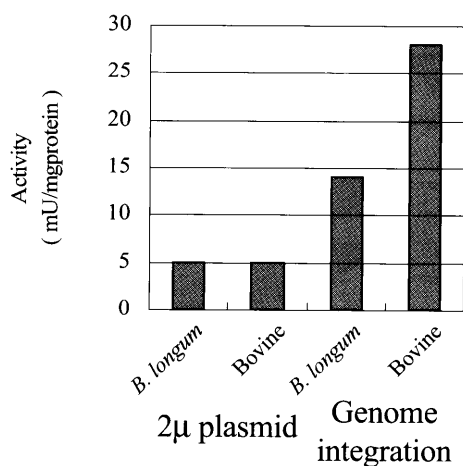


図5. LDHの違いによる2μプラスミドまたはゲノム導入時の酵素活性

PDC1 プロモーターを用い、酵母のゲノム中に多コピー導入して乳酸の生産性の向上を試みた。その結果、コピー数に伴ってある程度の向上が可能となった。コスト低減に必須である工業用原料によって乳酸発酵が可能か否かを検証するためにケーンジューズを糖源として用いて、6 コピーの LDH 遺伝子を導入した株で乳酸生産を行った。発酵はケーンジューズを用いても従来の培地を用いた場合と同等に行うことが可能であり 120g/l 以上の乳酸生産が認められ乳酸菌と遜色ない結果が得られた。このときの光学純度を測定したところ 99.9% 以上であることが確認され、目的とした高光学純度の乳酸が工業用培地を用いて、高効率で生産することができた。¹⁰⁾ しかしながらエタノールが製造されるなどの問題点もあり、今後精製工程も酵母を用いた発酵に適した手法を開発する必要がある。

今後の展望

ポリ乳酸を自動車用部品として本格的に展開するためには、物性（耐熱性、耐衝撃性など）の大幅な向上とともにコストを大幅に低減する必要がある。物性向上の取り組みの一環としてケナフやクレイを用いたナノコンポジット化の検討を紹介した。また高性能のポリ乳酸を安価に供給するための取り組みの一環としては、高性能ポリ乳酸製造に必須な高光学純度の乳酸を遺伝子組換え酵母を用いて製造する技術に関して紹介した。自動車用材料として本格的に展開するためにはまだまだ物性も不十分であり、また高性能ポリ乳酸を PP 並みの価格で供給する必要がありハードルは高い。しかしながら、真の循環型社会の実現のためには LCA として CO₂ を確実に低減できる手法で高性能ポリ乳酸を製造する方法を開発していかなければならない。また、食料と競合しない廃棄バイオマスを原料にした生産技術の開発も重要であり、今後積極的に取り組んでいきたいと考える。

文 献

- 1) Isobe, Y. *et al.*: *Polym. Prep. Jpn.*, **51**, 2295 (2002).
- 2) Ouchi, M. *et al.*: *SAE 2003 World Cong. Tech., Pap. Ser.*, 2003-61-1124 (2003).
- 3) Tsuji, F.: *Polymer*, **43**, 1789 (2002).
- 4) Hofvendahl, K. *et al.*: *Enzyme Microb. Technol.*, **26**, 87 (2000).
- 5) Van Breugel, J. *et al.*: U.S. patent 6, 630, 603 (2002).
- 6) Adachi, E. *et al.*: *J. Ferment. Bioeng.*, **86**, 284 (1998).
- 7) Minowa, T. *et al.*: *Gene*, **85**, 161 (1989).
- 8) Ishiguro, N. *et al.*: *Gene*, **91**, 281 (1990).
- 9) Ishida, N. *et al.*: *Appl. Environ. Microbiol.*, **71**, 1964 (2005).
- 10) Saitoh, S. *et al.*: *Appl. Environ. Microbiol.*, in press.