

新・省エネルギーと資源リサイクルに貢献する生物学

渡部 良朋

エネルギーと経済は“鉄の結末”を示し、エネルギー使用量と経済発展は強い相関を持っていたのが20世紀の特徴であった。前世紀末の1990年代には、トリレンマ構造すなわち、経済発展、資源・エネルギーの確保、環境の保全の3つを鼎立させることの難しさが認識されるようになった¹⁾。社会の持続的発展が21世紀の命題となり、現代社会のキーワードとして、地球温暖化、エネルギーセキュリティ、低炭素社会などが認識されるようになってきている。また2011年の東日本大震災を経験し、我々は、エネルギー供給とエネルギー利用の光と影を強く認識することとなった。本稿では、トリレンマの改善などに役立つことが期待される新エネルギー・省エネルギーや資源リサイクルについて、生物工学的なアプローチによる貢献について電力中央研究所の取り組みを中心に述べることにしたい。

新エネルギー・省エネルギーの「ギャップ」と「バリア」

新エネルギー（新エネ）は、“新エネルギー利用などの促進に関する特別措置法（新エネルギー法）”において定義され指定されるもので、すべて再生可能エネルギーである。具体的には、バイオマス（エネルギー利用）、太陽熱利用、雪氷熱利用、地熱発電、風力発電、太陽光発電が該当する。省エネルギー（省エネ）は、同等の社会的・経済的効果をより少ないエネルギーで得ることとされ、「暖房を我慢してエネルギー削減を図る」というようなことは狭義には省エネとは呼ばない。省エネ対策は、産業、家庭・業務、運輸などの分野で多岐に渡る。

新エネルギー・省エネルギーの意義は、地球規模の資源制約への対応、気候変動問題への対応、成長が期待される産業分野などにあるとされ、課題は、技術設計・技術開発、政策・制度設計、実践でのさまざまな工夫などがある。

新エネルギー・省エネルギーには、普及を妨げるもの＝「ギャップ」と「バリア」が存在する²⁾。図1に、その概念を省エネの事例に示した。

省エネギャップは、経済的に採算が合う省エネ技術の導入によりエネルギーの最適利用が可能な状態（理想）と現実に乖離があることで、省エネバリアは省エネギャップの原因となっている現実社会のさまざまな障壁を指す。ギャップが生じる理由として、エネルギーの最適利用が可能な状態（理想）の「理想」とは何かの判断

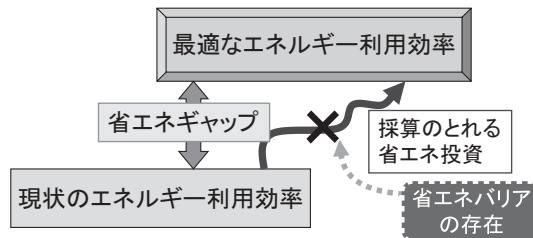


図1. 省エネ「ギャップ」と「バリア」の概念

の基準が複数あって明確になっていないことがある。またバリアについては、ギャップの原因となっている現実社会のさまざまな障壁とは何か、について、技術・制度・社会的コンセンサスが得られていないことがある。

新エネ・省エネのギャップやバリアを克服し、また資源リサイクルにも貢献するため、戦略的なアプローチを生物学分野でも求められるのではないかと。そこで、新エネの一つバイオマスに関わる、微生物変換技術の動向を整理・把握した結果について次に示す。

バイオマス活用に関わる微生物変換技術の動向

従来、バイオマスのエネルギー利用については、燃焼によるエネルギー資源としての利用が主体であったが、近年国内外において、バイオマスを炭素資源とし、化学的・生物的な変換作用によって高付加価値の物質を生産するバイオリファイナリーの技術開発が注目されている。そこで、バイオマス活用に関わる微生物変換技術の最近の社会的動向や技術開発状況について調査し、課題の抽出をおこなった。具体的には、学術論文および政府、企業などのホームページに公開された情報を調査した結果、以下の知見を得た³⁾。

技術活用に関わる国内外の動向～2007年以降～

2007年以降、欧米を中心にバイオリファイナリーの技術開発が活発化していることが明らかとなった。一方、我が国においては、バイオマス活用推進基本計画（2010年12月発表）のなかで、バイオマスの活用が進んだ将来の姿が示され、エネルギーを最大活用するカスケード利用や、バイオリファイナリーによる生産物の多様化が望まれていることが明らかとなった。これらの実現のために、高効率で多様な反応を有する微生物の利用が有効であると考えられた。微生物によるバイオマスの高効率

著者紹介 電力中央研究所環境科学研究所（スタッフ〈研究戦略担当〉・上席研究員）（兼）東北大学大学院環境科学研究科（連携講座客員教授） E-mail: y-wata@criepi.denken.or.jp

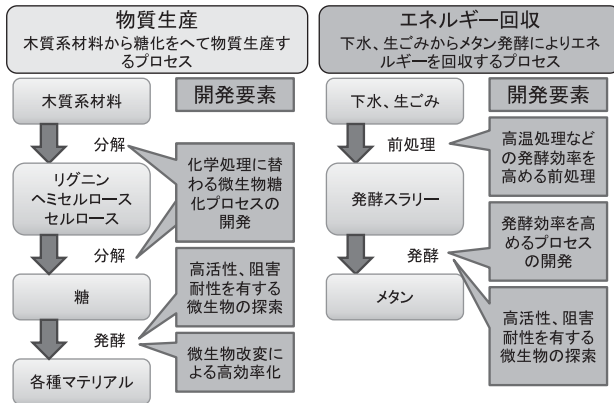


図2. バイオマス活用に資する微生物変換技術の分類と課題

変換が達成された場合のエネルギー産業界への効果を見通した結果、バイオリファイナリーによる新規CDM（クリーン開発メカニズム）事業の創出や、廃棄物のカスケード利用によるエネルギー回収が期待された。

技術の現状と課題の抽出 上記を踏まえ、バイオマス活用に資する微生物変換技術を、木質系材料からの物質生産と、有機廃棄物からのエネルギー回収に分けて、必要とされる課題を整理した（図2）。

その結果、物質生産に関しては、セルロースの糖化を経た発酵による生産が主体であり、短期的課題として発酵プロセスの高効率化、中期的課題として微生物変化による糖化プロセスの改善、長期的課題として化学処理に替わる生物的前処理法の確立があげられた。エネルギー回収に関しては、下水、生ごみからのメタン発酵によるバイオガス生産が主体であり、短期的課題として発酵効率を高めるプロセスの開発、中長期的課題として高活性・阻害物質耐性を有する微生物の探索などが挙げられた。

これらの動向を踏まえ、抽出された課題を精査し、新エネ・省エネ・資源リサイクル/リユースに貢献する新技術によるバイオマス変換を目指し、電中研の有する微生物の電気培養技術/電位制御培養技術^{4,5)}や複合微生物利用といった技術を利用して、バイオマス活用の促進につながる微生物変換技術の開発を進めている。その最新の成果について以下に述べる。

電気培養法を用いたバイオマスの微生物変換技術（1） ～セルロースからのメタン生産～

メタン発酵はさまざまな有機物からメタンを回収できるため、家畜排せつ物や食品廃棄物などの廃棄物系バイオマスや稲わら粉がらなどの農作物非食用部や間伐材などの未利用バイオマスを活用できる技術の一つである。我が国の主な未利用バイオマスは主成分としてセルロース

系の有機物を多く含む。セルロース系有機物のメタン発酵では固形分の可溶化プロセスが必要となるため、通常では処理能力に課題がある。電中研では、これまでに微生物の増殖促進や代謝活性向上のための電気培養技術を開発しており、多種多様な微生物が同時に作用するメタン発酵に対して適用することによりその処理向上の可能性が期待される。そこで、セルロース系有機物の例としてろ紙を用いてメタン発酵を行い、メタン発酵槽への通電による処理能力に対する効果および微生物群集への影響を明らかにした⁶⁾。

ろ紙のメタン発酵に対する通電の効果 容積250 mlのメタン発酵槽に電極を設置し、0.0 Vから-0.8 Vの設定電位で通電を行いながら、ろ紙のメタン発酵を行った（図3）。

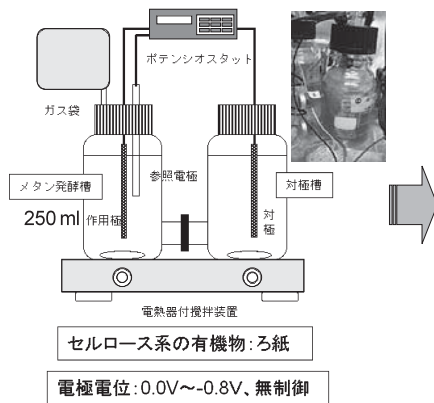
その結果、-0.6 V以下の通電により、ろ紙の可溶化促進が観察された。また、メタンを含むガスの生成量も通電していない条件の約1.4倍となり、発酵槽への通電によってメタン発酵の処理能力の向上がみられた。

通電による発酵槽内の微生物群集への影響 発酵に関与する微生物群集に対する通電の影響を明らかにするために、発酵液中の微生物濃度および群集構造解析を行った。その結果、-0.6 V以下の通電によって、発酵液中の微生物の増殖が促進することが明らかとなった。特に発酵初期のメタン生成に関わるメタン菌の増殖促進が顕著にみられ、メタン発酵の処理向上への寄与が示唆された。

以上の結果から、メタン発酵槽への通電がセルロース系有機物のメタン発酵の処理能力や微生物群集の増殖に影響を与えることを明らかにした。今後は、メタン発酵に関与する各種微生物を取得し、通電が個々の微生物に及ぼす影響を評価することでメタン発酵の処理能力や安定性に対する通電の効果を明らかにする予定である。

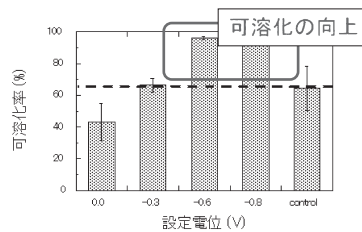
電気培養法を用いたバイオマスの微生物変換技術（2） ～糖からのブタノール生産～

微生物を利用した廃棄物系バイオマスからの有用物質生産の中でも、次世代バイオ燃料であるブタノールの微生物による生産が注目されているが、生産性の低さが問題となっている。ブタノールの生産経路は多数の電子授受が関与する経路であるため、生産性の向上には電子の流れを考慮した生産制御法が必要と考えられている。一方、電中研では電気を用いて微生物の生育を促進する電気培養法を開発を行っているが、この電気培養法をブタノール生産微生物に適用することにより、生産速度および量を含めた生産性を著しく向上できる可能性がある。そこで、ブタノールを生産する細菌である*Clostridium acetobutylicum*を対象に、廃棄物系バイオマスの分解中間体であるグルコースをモデル基質とした場合の電気に

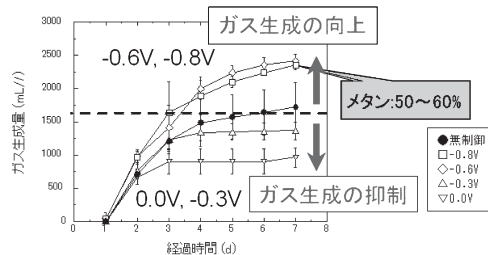


実験装置の概略図

特願:2010-26402号



試験終了時の発酵液のろ紙の可溶化率



ろ紙のメタン発酵における累積ガス生成量

図3. セルロース (モデル:ろ紙) のメタン発酵における通電の効果

よるブタノール生産の高効率化を図った⁷⁾。

電子媒体の添加によるブタノール生産および生育への影響 電気化学特性の異なる6種の電子媒体を各々培養液に添加し、未添加の培養液とブタノール生産を比べたところ、メチルビオロゲン (MV) を添加した場合のみブタノール生産が促進された。また、MVは細胞からの電子移行を受けて、生育に障害を示す還元型となった。従って、通電により還元型MVを酸化型とし、細胞に供給することで、生育を障害せず電子の移行を活発にし、ブタノール生産の促進を図れると予想された。

通電による生育およびブタノール生産の促進効果

+1.2 V ~ +0.3 V (vs. Ag/AgCl) の範囲で設定した電位で通電を行い、細胞により還元されたMVを電氣的に酸化しながら培養を行った。非通電時に比べ、通電時には生育およびブタノール生産が早期に開始され、特に +0.3 V, +0.6 V では細胞当たりのブタノール生産は約1.5倍に促進された (図4)。

本法の適用により、ブタノール生産量を通常の培養法 (MV非添加, 非通電) に比べ、約7倍向上させることができた。

通電による生育およびブタノール生産の促進メカニズム

通電による生育・ブタノール生産の促進効果について3つのメカニズムが推定された。①MVの還元型から酸化型への酸化による生育障害の解消、②細胞からMVへの電子移行に伴う代謝変化、③電位環境の調整によるブタノール生産の促進。今後はモデル基質で得られた成果を利用し、廃棄物系バイオマスからの効率的なブタノール生産技術の確立を目指す。

電気培養法を用いたバイオマスの微生物変換技術 (3) ~グリセロールからのエタノール生産~

油脂からバイオディーゼルを生産する際に副生成物として生じるグリセロールは、供給過多の状態にあり有効利用策が検討されているが、その一つとして有用物質への微生物変換が試みられている。電中研では、微生物の培養の際に通電を施すことで、培養困難な微生物の探索と代謝を制御可能な電気培養法を開発してきた。この方法をバイオマス変換に関わる微生物の探索に利用することで、新たな物質生産系の提案につながる可能性がある。そこで、グリセロールの微生物変換に着目し、電気培養による微生物の探索をおこなうとともに、新たな物質生産系を提案した⁸⁾。

電気培養によるグリセロール変換微生物の探索

湖沼底泥より取得した環境微生物群に対し、グリセロールを炭素源として含む培養液中で -0.6 V (vs. Ag/AgCl) の電位を与えながら3週間培養した結果、顕著な微生物の増殖が生じ、グリセロールの減少に伴うエタノール生成が見られた。遺伝子解析の結果、増殖した微生物は、これまでグリセロール分解に関する報告例が極めて少ない *Paenibacillus* 属であることが分かった (図5)。

電気培養によるエタノール生成促進効果の検証

取得した微生物を種々の酸化還元電位の下で3週間培養した結果、-0.2 V (vs. Ag/AgCl) 以下の還元電位を与えた場合のみ、エタノール生成が起こることが明らかとなった (図5)。これは、微生物のエタノール生成経路に含まれる還元反応に、電極で生じた電子が供給された結果、エタノール生成が促進されたことを示唆している。還元

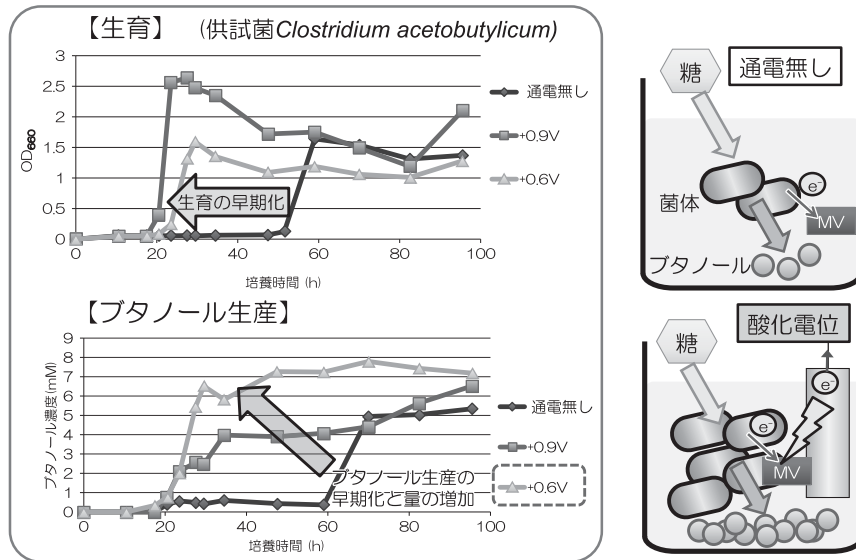


図4. 通電による微生物生育およびブタノール生産の促進効果

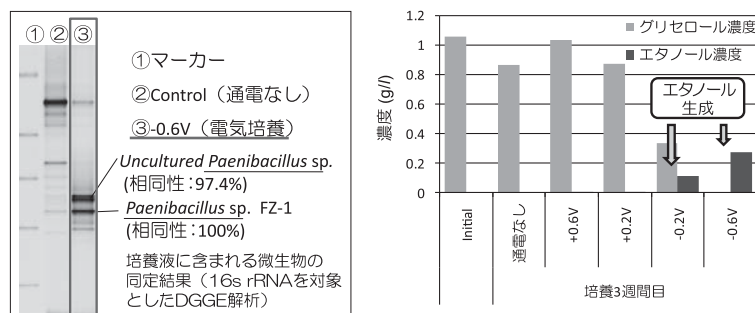


図5. 電気培養により増殖した微生物の遺伝子解析結果 (左図) と取得グリセロール変換微生物のエタノール生成能力の電位依存性 (右図)

反応によるグリセロール変換促進の事例はこれまでになく、電気培養を用いた新しい微生物変換系を提案することができた。今後は、条件の最適化と微生物の変換活性向上を図り、グリセロール実廃棄物を対象とした微生物変換の高効率化を目指す。

おわりに

今我が国では、東日本大震災を受けて、安全を最重視する社会の構築が求められている。では安全とは何か。安全には、エネルギー供給の安定は不可欠である。また中長期的に安全を担保するものである低炭素社会を実現するためには、効率的なエネルギー利用法が不可欠である。その効率性を高めるには、さまざまな電気利用法が寄与するようになるであろう。エネルギー供給と利用が技術

的にも制度的にも高度に体系化され、社会全体としてエネルギー利用の必然性、安全性が担保される。このような社会の構築に貢献すべく、生物工学を適用した技術の開発・確立そして実用化を進めてゆきたい。

文 献

- 1) 電力中央研究所編著：【基礎講座】2010 エネルギーと地球環境、エネルギーフォーラム (2010)。
- 2) 若林雅代ら：電力中央研究所研究報告、Y08046 (2009)。
- 3) 松本伯夫ら：電力中央研究所研究報告、V10010 (2011)。
- 4) 松本伯夫：生物工学、**87**, 224 (2009)。
- 5) 平野伸一ら：電力中央研究所研究報告、V09026 (2010)。
- 6) 渡邊 淳ら：電力中央研究所研究報告、V10019 (2011)。
- 7) 平野伸一ら：電力中央研究所研究報告、V10028 (2011)。
- 8) 松本伯夫ら：電力中央研究所研究報告、V10033 (2011)。