

歓迎挨拶・講演 1

バイオリファイナーの展望

神戸大学学長 福田 秀樹



ただ今ご紹介いただきました神戸大学長の福田でございます。本日は、京都大学附置研究所センターシンポジウム「京都からの提言」にお招きいただきまして誠にありがとうございます。一言ごあいさつを申し上げまして、その後、私の講演に移りたいと思っております。

このシンポジウムは、京都大学に附置されている研究所及び研究センターが共同で開催する一般の市民の方々に公開されるシンポジウムということで、先ほど松本総長からご紹介がございましたように、2006年から始まり、毎年一回、国内の主要都市を巡回されているとお聞きしております。

そして、このシンポジウムによりまして、我が国を代表する教育研究機関である京都大学の研究所及び研究センターの優れた研究活動や成果を広く社会に還元されますことを願っております。

さて、この場をお借りいたしまして、神戸大学について少し触れさせていただければと思います。神戸大学は「真摯・自由・協同」の精神のもとで、開放的で国際性に富む固有の文化を造り、人類社会に貢献するために知を創造するとともに、人間性豊かな指導的人材の育成を目指しております。

1902年に高等教育機関として設置されました神戸高等商業学校創立を起点としておりまして、今年でちょうど創立110周年を迎えることになります。この記念となる年に、このような素晴らしいシンポジウムが神戸で開催されることは大変喜ばしいことと感謝しております。

さて話は変わりますが、神戸大学は、京都大学、大阪大学とともに、平成19年度から毎年3大学連携シンポジウムを開催しております。このシンポジウムは、科学技術、文化、芸術等の振興に関する共同の教育研究事業であり、3大学が順に幹事となり輪番で実施しております。

来年度は6回目の開催であり、神戸大学が幹事で実施する予定ですが、この連携シンポジウム以外にも、3大学の総長・学長によるシンポジウムもございます。昨年と一昨年は、大阪において、それぞれ関西活性化および日本復興のテーマで開催いたしましたが、来年度は日本を飛び出し、中国の蘇州におきまして、中国の大学関係者もお招きして国際化を

テーマに開催する予定で、現在準備を進めております。

今後とも3大学が連携して、関西の活性化を推進し、また日本や世界の学術研究の発展につながればと願っております。

最後になりましたが、本日のシンポジウムの成功を心よりお祈りいたしまして、私の歓迎のあいさつとさせていただきます。どうもありがとうございました。(拍手)

それでは引き続きまして、私の講演に移らせていただきます。

私に与えられましたテーマは、「バイオリファイナリーの展望」ということで、私が専門に研究しておりますバイオテクノロジーの一分野でございますが、本日少しご紹介をさせていただきますと思います。

さてご存知の通り、地球温暖化の問題はエネルギー資源の消費量との関連が非常に強く逼迫した状況にあります。

従来より、化石資源であります石油資源から燃料あるいは化学品等、多種多様な製品が大量に生産されております。このような製品を石油資源から製造するプラントや工場を“石油リファイナリー”と呼んでおりますが、ご存知のとおりCO₂の増加に悪影響を与えております。

それに対しまして、植物資源(“バイオマス”と呼ばれています)を原料とし、発生したCO₂を再度バイオマスに固定化し、再度原料として利用し製品化するプラントや工場を“バイオリファイナリー”と呼んでおります。

バイオリファイナリーでは、ここに示しますような微生物や酵素、その他いろんな生物由来の材料を使って変換することができます(図は省略)。

次に、バイオマスを使えば、なぜCO₂の増加抑制が可能かということを模式的に示したのが図(1)です。バイオマスを原料とし、多様な生物由来の生体材料を使って、現在注目されているようなエタノールとか、メタンガス、あるいは、ここで示しますようなポリ乳酸等の生分解性プラスチック等、いろんな製品をバイオマスから生産することができます。

このような製品は最終的には燃焼後あるいは土壌微生物等による分解作用によっ

て、CO₂と水とに分解されますが、ここで発生したCO₂は先ほど言いましたように、太陽の光と水があれば、バイオマスに再度固定化されます。したがってCO₂は、このようにサイクル循環するだけで、決して大気中のCO₂の濃度が収支的には増える訳ではありません。



しかしながら石油のような化石資源を使いますと、地中に埋蔵されている資源を汲み上げて使用し、大気中にCO₂を放出するだけですから、地球温暖化を助長することになります。

我々は、石油から生産されている多種多様な製品をバイオマスから生産することによってCO₂の増加を防げないかと、そのために最先端の技術を使って展開させていこうと取り組んでおります。

ところで、バイオリファインリーの実現化には課題も多くありますが、その中でも、やはり製造コストの問題です。石油ベースということで、例えば、原油の値段が1バレル120ドル、あるいは150ドルの場合、イソプロパノールおよびノルマルブタノールの製造に、どれぐらいのコストがかかるのかをバイオマスを使用した場合と比較して試算しました。

結果として、1バレル120ドルの場合で比べると、バイオマスの場合には若干高めのレベルになりますが、もし1バレル150ドルになれば、バイオマスから製造した方が安くなります。従って、将来的には原油のコストが増加することが予想されるということと、もう一つ大事なことは、コストにかかわらず、CO₂の増加を抑制する必要性が生まれることも想定されますので、バイオマス利用技術の革新が期待されると考えております。現時点では、基本的には技術開発をする一つの目標として、1バレル120ドル程度の水準のコストで生産する必要があるだろうとは思っております。

次に、将来のビジネス市場の規模について、他の文献等のデータを含めて、ここに示しました（図は省略）。2007年には5.3兆円規模の実績がございますし、将来、2017年には、20兆円から30兆円のレベルに達するだろうと言われております。このように、石油資源からバイオマス資源へと、バイオベースになる市場が著しく膨張していくだろうと想定されますので、近年、世界的に技術開発競争が激しさを増しております。

神戸大学の我々のプロジェクトでは、バイオマス資源を用いた生産プロセスのイノベーションによって、著しく安価なコストで多種多様な製品が生産できる技術開発を目指して、過去十数年前から取り組んできており、現在も大きなプロジェクトを編成し研究を進めております。

次に、使用する原料の一例を図（2）に示しますが、ご存知の多くのバイオマス資源を使うことが可能で、我々は、ここに示したようなバイオマス資源を使って、製品を安く生産するという研究を続けております。

具体的には、この図（3）に示しますように、燃料、化成品、プラスチック、繊維、



およびバイオファインケミカル等、こういった多様な製品を、可食用のバイオマスとパッティングしない非可食のバイオマスを使って生産するという研究にシフトしているところです。そしてこのような製品をプロジェクトチームに参画していただいている多くの企業と連携して、それぞれの企業が得意とする製品をバイオマスから作っていかうと研究しております。

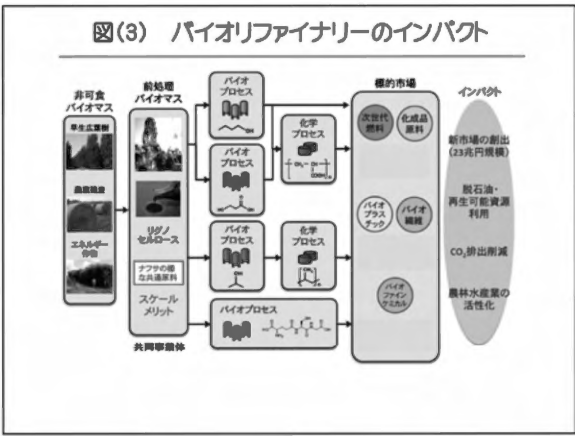
もう一つ、このプロジェクトの大きな課題は、日本にはバイオマス資源が豊富でないということです。

そのための対応策として、バイオマス資源を確保するためのバイオコンビナートの形成を考えております。バイオコンビナートというのは、例えばユーカリあるいはポプラ等の木本系バイオマス資源を利用する場合、オーストラリア、南米等の植林地からバイオマスを国内に搬入して、国内のコンビナートに工場を持っている企業群が中心となって、これらの原料を使って製品化いたします。一方、このようなバイオコンビナートの形成は国内に限らず、インドネシア等の豊富な草本系バイオマス資源を有している東南アジア諸国において、多くの企業が集積している地域でバイオコンビナートを形成し製品化することもできます。いずれにしても、バイオコンビナートの形成と立地は原料バイオマスの選定に依存いたします。

さて、そのような原材料の問題もありますが、先ほど申し上げましたように、プロセスイノベーションによる製品コストの低減化が、我々エンジニアリングの研究者としては大きな課題でして、与えられた使命です。

バイオマス原料から製品までの生産プロセスにおいては、図（４）に示しますように、バイオマスを前処理プロセスにおいて微生物が利用できる形態にまで分解させた後、微生物を使って発酵プロセスにおいて目的物質を生産し、最終的に分離や精製プロセスを経て製品化します。これらのいずれのプロセスにおいても技術革新が必要ですが、本日は時間の都合上、微生物のイノベーションについてご紹介いたします。

微生物を用いて反応を行う場合、ご存知のとおり化学反応と異なりまして、反応に使う触媒が微生物の内部に多く存在していますので、内部に拡散していく速度も遅くて、反応速度が一般的に非常に遅いと考えられます。しかも、高分子のような物質を原料にする場



合、取り組み速度が遅く反応に適さないのが、ここが微生物を使う場合の大きな弱点になっております。そこで、我々はこのような弱点を何とか解消しようということで、次に示しますユニークな微生物を開発いたしました。

ここに示しました模式モデル図（5）をご覧ください。遺伝子組換え技術を用いて、アンカーたんぱく質と多種多様な機能性たんぱく質とを微生物の表面に提示させます。このようにすれば、従来所有していない能力が新たに付与される訳ですから、非常にパワフルな微生物に変身いたします。

この新しい次元の微生物は、背後に多くの手を配置された万能の神である“千手観音像”のように、あらゆる悩み、煩悩等の問題を、解決してくれる素晴らしい微生物に変身しますので、私は、これを千手観音（表層提示）微生物と呼んでいます。

さらに、この微生物表面に機能性たんぱく質を提示させるだけではなくて、微生物の内部にも遺伝子組換え技術を使いますと、今までその微生物が持っていなかった反応の経路を新たに付け加えることもできます。

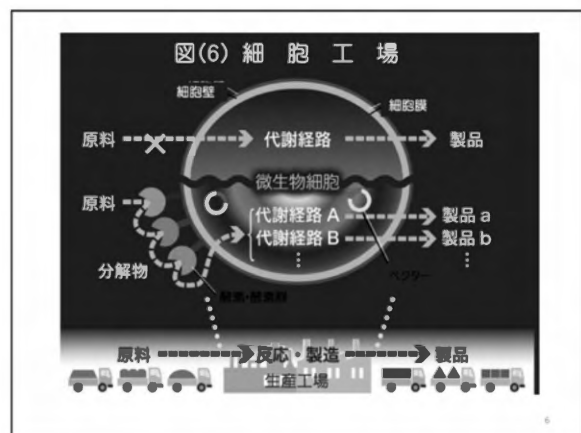
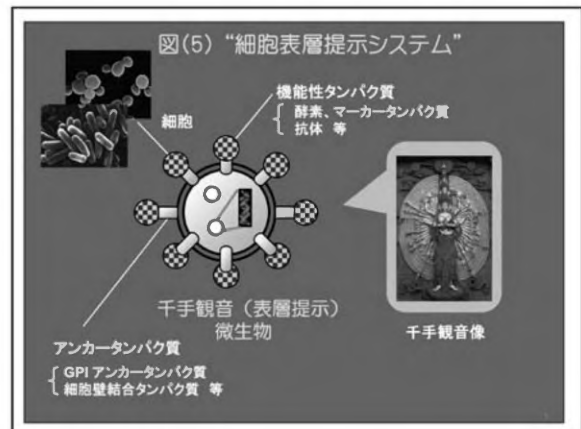
従って、図（6）に示すように微生物そのものが一つの工場のように、すなわち、細胞工場とも言うべき微生物となり、より高度な微生物として利用できるようになります。

このように微生物の表面を反応の場として利用する技術は、「細胞表層工学」として発展し、分子認識、バイオセンサー、シグナル伝達、細胞接着等多くの応用分野での研究が進められております。

次に、千手観音微生物が、どのような効果を持っているのかということを、具体例で紹介させていただきたいと思います。

よくご理解いただくために、皆様もよくご存知の生産物として、エタノールを取り上げたいと思いますが、バイオマス为原料とすることからバイオエタノールと呼ばれている物質です。これは燃料として利用できますので、自動車あるいは飛行機等にも使用されておりますし、さらに需要量も増加しつつあります。

まず最初にトウモロコシやお米等のデンプン質を原料にした場合を取り上げます。図（7）に示しますように、アメリカ等多くの国々で生産されている従来の製造プロセスでは、微生物の酵母によって発酵させエタノールを製造するには、デンプン質を前もってグルコ



ースにまで分解するための複数のステップが必要となります。そのために、このような分解のためには複数の酵素（ここでは2種類）を別途必要とし、さらにプロセスも複雑となりコスト高となります。

これに対し、千手観音微生物を使えば、このような酵素群を微生物の表面に提示することができますから、直接一段階でデンプン質からエタノールをつくることができます。従って、酵素の生産が不要で、しかもプロセスのステップも省略できますので、かなりのコスト低減化が図れます。

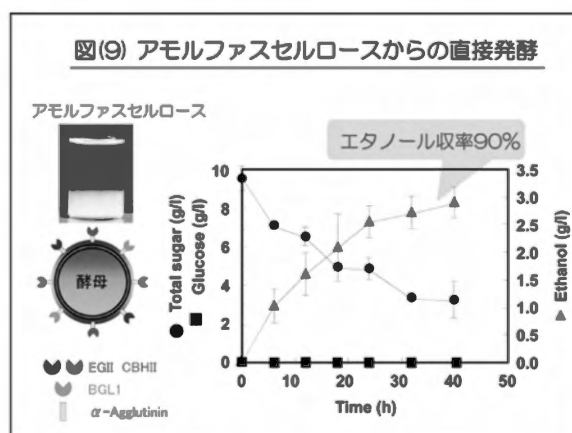
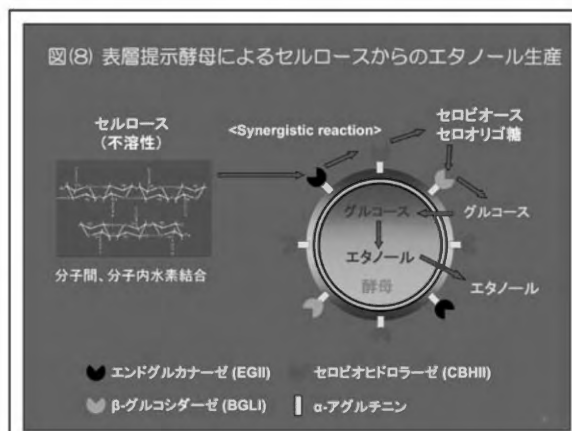
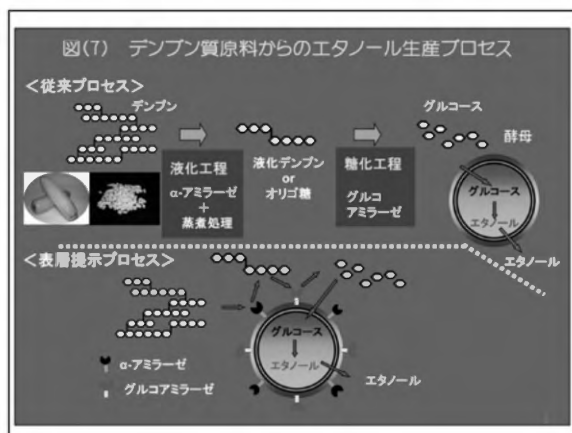
ここには、デンプン質のお米から千手観音微生物を用いて直接エタノール発酵を行った場合の実験例を示しますが、図のように精米および玄米のいずれの場合も効率よくエタノールが生産されており、千手観音微生物の特徴や優位性を御理解いただけることと思います（図は省略）。

もう一つ、最近、我々のプロジェクトでは、稲藁、麦藁、古紙、木材等のリグノセルロース系原料からのエタノール生産に注力しております。と言いますのは、このようなバイオマスは未利用で食糧とパッティングせず、しかも地球上に豊富に存在しているからです。

しかしながら、このようなリグノセルロース系バイオマスを使用する場合、グルコースにまで分解するまでのステップが長く、先ほどのお米の場合と比べさらに多くの分解ステップが必要になってきます。

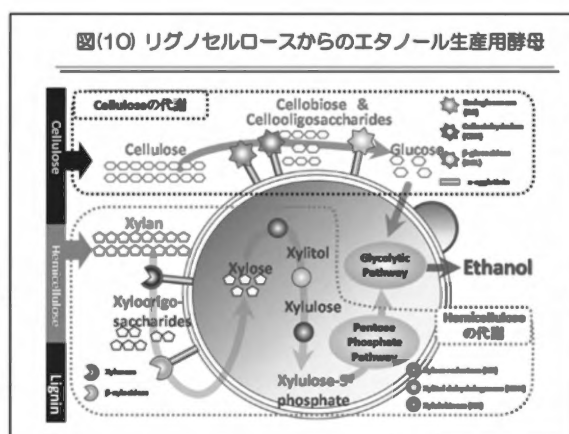
我々は、セルロースからグルコースにまで分解するのに必要な3種類の酵素を図（8）に示すように酵母の表層に提示させました。

この図（9）は、図（8）で作成した酵母を用いて、不溶性セルロース原料である試薬のアビスルを酢酸で膨潤させた後、エタノール発酵させた場合の結果を示しておりますが、エタノール収率が90%という非常に高い収率で直接エタノールに変換で



きることがわかりました。この実験結果は7、8年前に論文にて発表しましたが、当時、セルロースから一段でアルコールに変換できるというデータを世界に最初に示した論文となっております。

次に、主にセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンから構成されている稲藁や木材等の実際のリグノセルロースを原料にする場合、原料を効率よく利用するためには単にセルロース部分だけではなくヘミセルロース部分もエタノール変換する必要があります。そのために、開発したのが図(10)に示す酵母(細胞工場)で、セルロース部分は細胞表層に提示させた酵素群、一方、ヘミセルロース部分は細胞内部に発現させた酵素群によってそれぞれ分解され、最終的にいずれの部分からもエタノールが生産されることになります。この酵母を用いて、稲藁を水熱分解させた液体を原料として発酵させた場合、図からおわりの通りセルロース部分もヘミセルロース部分も効率よくエタノールに変換できております(図は省略)。



このように千手観音微生物の特徴とその効果を実験的にも証明することができたかと思えます。

本日は、エタノールのお話だけをご紹介しましたが、例えば、車の部品や生活必需品として利用されているプラスチックや繊維等の多くの製品も地球環境を損なわないためにもバイオマスから生産することが期待されています。そのためには、製造コストの低減化が不可欠であって、千手観音微生物のような革新的な微生物の開発が重要となってきます。もちろん、その他の前処理や分離・精製プロセスにおける技術革新も必要で、総合的な製造プロセスにおけるコスト低減化を図る必要があります。

このような技術開発は一つの大学だけでできる技術ではございませんし、先ほど申し上げましたように、多くの企業や大学との連携が不可欠であります。今後、神戸大学としても、産学官連携の取り組みを推進し、できるだけ早く社会に貢献していきたいと願っております。

甚だ簡単なお説明でしたが、こういったコンセプトを持って、地球温暖化の防止に少しでも貢献できればと思っております。

以上で、お話を終わらせていただきます。ご清聴ありがとうございました。(拍手)