

我が国における農産資源の変換利用技術開発の動向

誌名	農林水産技術研究ジャーナル
ISSN	03879240
著者	佐々木, 堯
巻/号	20巻5号
掲載ページ	p. 6-14
発行年月	1997年5月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



特集

農林水産物の非食料利用と技術開発

— 再生可能な生物資源の活用 —

我が国における農産資源の変換利用技術開発の動向

佐々木 堯

我が国は資源・エネルギーを海外に大幅に依存している。しかし長期的にみて多消費型産業並びに経済活動を継続していくことは困難になると考えられる。また、化石エネルギーの大量消費に伴う環境問題が地球規模において顕在化しつつある。こうした背景のもと将来に向けての我が国の潜在的食料自給力の維持向上、環境にやさしい生物資源の活用、並びに石油代替エネルギー等の資源開発を前提としての「バイオマス」を食料・飼料・エネルギー等に総合的、効率的に変換・利用する革新的な技術体系の開発と利用システムを確立することが必要である。

本稿では、21世紀にむけての環境・資源・エネルギー課題をキーワードとして、技術のシステム化をはかり、ビジネスとして成り立つようにバイオインダストリーという新産業を育てていくことを提案したい。

現在、我が国は経済大国として、高度経済社会を形成しているが、資源・エネルギーの面からみると弱小国であり、欧米先進諸国に比較すると、その自給率は著しく低い。例えば、エネルギー自給率は18%程度であり、米の自給率は、100%であるが、食用農産物総合自給率では70%弱となり、飼料自給率まで考慮すると30%弱に留まる。これはカロリー・ベースでの食料自給率に換算すると42%となり、エネルギーや工業原料ばかりでなく、食料・飼料も大幅に海外に依存しているのが現況である。

現在、農産物の国際市場は過剰感に満ちているとはいうものの、地球的な視野に立てば、21世紀半ばには総人口が100億人を超えるとの予測があり、長期的にみて、このままでは世界の

資源・エネルギーの供給は一層逼迫することが容易に予測される。我が国においても、従来のような海外依存による資源・エネルギーの多消費型産業並びに経済活動は継続することが困難になるものと考えられる。また、化石エネルギーの大量消費に伴う環境汚染問題が深刻化し、大気の二酸化炭素濃度の上昇、あるいは酸性雨被害など、地球規模における環境汚染が顕在化しつつある。

こうした背景の中で、環境にやさしい新資源・エネルギーの開発が緊急の課題になっており、特に、太陽エネルギーの蓄積物であり、再生可能な生物資源を、食材としての利用のみならず食以外に利用する技術開発が、改めて注目されてきている。

本来、農林水産業は自然生態系とその調和を保ちつつ生物資源を生産し、これを食材のみならず生活・工業資材として有効かつ総合的に利

Takashi SASAKI: A trend of conversion and utilization of Agricultural Products in Japan

用する産業である。しかし、最近では生物の持つ多面的な価値が十分に活かされず、目的とする部分以外の多くは未利用・低利用のまま廃棄・放置され、時には環境汚染問題を起こしているのが現状である。

このような状況のもと、我が国の農林水産業が21世紀において新たな発展をしていくためには、現状のような農業＝食糧生産から脱皮し、食糧自給力の向上と環境にやさしい生物資源の活用ならびに潜在的農地の保全を目標とした農業＝食糧＋生活・工業資材生産に向けた新たな展開が求められている。換言すれば、豊富な太陽エネルギー・水資源等を利用して生産された生物資源の総体、即ち、「バイオマス」を食料・飼料・エネルギー等に総合的、効率的に変換・利用する革新的な技術体系の開発と利用シ

ステムを確立する必要がある（図1）。

このような背景のもと農林水産省においては、21世紀に向けての技術開発の一環として、次の2つの国家的プロジェクトを推進してきた。

1. バイオマス変換計画（正式名：生物資源の効率的利用技術の開発に関する総合研究）

このプロジェクトの背景には、1973年の石油危機を契機として、欧米諸国で石油代替エネルギー資源の開発が盛んに行われた経緯がある。米国ではトウモロコシ澱粉から自動車用アルコール、ブラジルでは蔗糖から自動車用アルコール、EUでは家畜ふん尿からメタンガス等バイオエネルギーの技術開発、さらには実用化試験

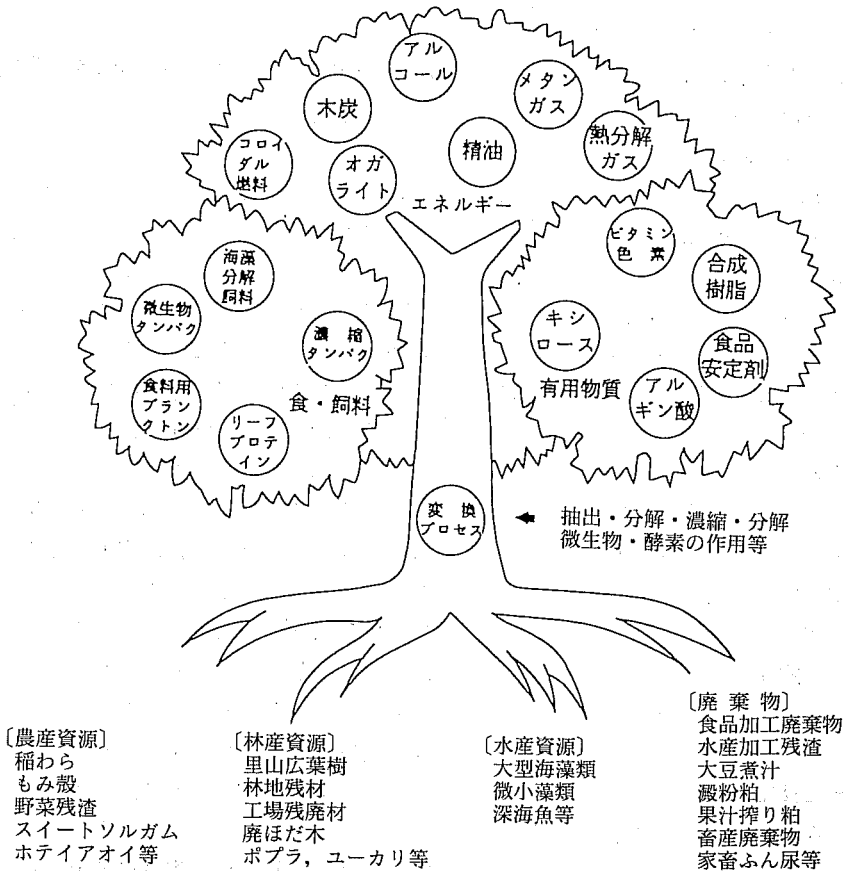


図1 バイオマスの変換利用（バイオマスプロジェクト資料より）

も行われた。他方、日本においても通産省がセルロース系バイオマスからのアルコール化パイロットプラント試験を推進、一方、農林水産省では、農林水産バイオマスを総合的に利用する本バイオマスプロジェクトを推進したわけである。このプロジェクトは、1981年から10ヶ年計画で農林水産省の研究機関と一部民間企業も参画して行われた。バイオマスとしては、主として未利用・低利用のバイオマスを対象として、利用可能なバイオマス量の評価技術、それらの食材、飼料、新素材、バイオエネルギー等への変換利用技術の開発が行われた。

次に主要な研究成果の個別事例を紹介する。

1) 利用可能なバイオマス評価技術

- (1) 日本におけるバイオマスの潜在的な賦存量評価技術の開発

2) 食材化技術

- (1) スイートソルガムの生産と利用の開発
- (2) ヒマワリの生産と利用の開発
- (3) 未利用魚肉の利用技術の開発
- (4) 生澱粉分解菌の開発と利用技術の開発
- (5) 脱脂大豆粕等のエクストルーダーによる食品素材化技術の開発

3) 飼料化技術

- (1) 木材成分の有効利用技術の開発
- (2) シラカンバの飼料化技術の開発
- (3) ジャイアントケルプ等の生産と利用技術の開発

4) 新素材化技術

- (1) 海藻・カニ殻の多糖類利用技術の開発
- (2) ブドウ糖から発酵新甘味料エリスリトールの生産技術の開発
- (3) 澱粉からサイクロデキストリンの生産と利用技術の開発
- (4) セルロースからオリゴ糖生産技術の開発

5) エネルギー化技術

- (1) もみ殻セルロースの糖化技術の開発
- (2) 新規好熱嫌気性菌とアルコール発酵技術の開発

(3) 家畜糞尿のメタン発酵システムの開発

(4) もみ殻のエネルギー化技術

これらを原料別の変換利用システムでまとめると

- (1) 農産系バイオマスの総合的変換利用システム
- (2) 林産系バイオマスの総合的変換利用システム
- (3) 水産系バイオマスの総合的変換利用システム
- (4) 畜産系バイオマスの総合的変換利用システム

に整理される。

(2),(3),(4)の具体的成果に関しては、別項で取り上げているので、ここでは(1)の農産系バイオマスの変換利用システムの具体的成果のいくつかを紹介する。

2. 農産系バイオマスの総合的変換利用システム

低利用・未利用バイオマス資源の主成分は、一般に難分解性多糖類から成っており、その有効利用には効率的かつ省エネルギー的変換技術の開発が必須となる。そのため、常温・常圧の条件下で特定の基質にのみ作用する微生物・酵素の機能を利用して、難分解性バイオマス資源を有効利用する技術開発が行われた。

ここでは難分解性多糖類として、生澱粉、セルロース等を中心に変換利用する研究を行っており、図2に、食品総合研究所が主として研究を行ったフローが示してある。澱粉、セルロースは結合様式が異なるグルコースのポリマーであり、分解してグルコースにしたものは、澱粉由来であろうと、セルロース由来であろうと、同じ物質であり食品工業やアルコール生産などの発酵工業の原料として利用することができる。

1) 生澱粉分解酵素生産菌の開発と利用技術

澱粉の酵素糖化は、現在、原料を加熱蒸煮し

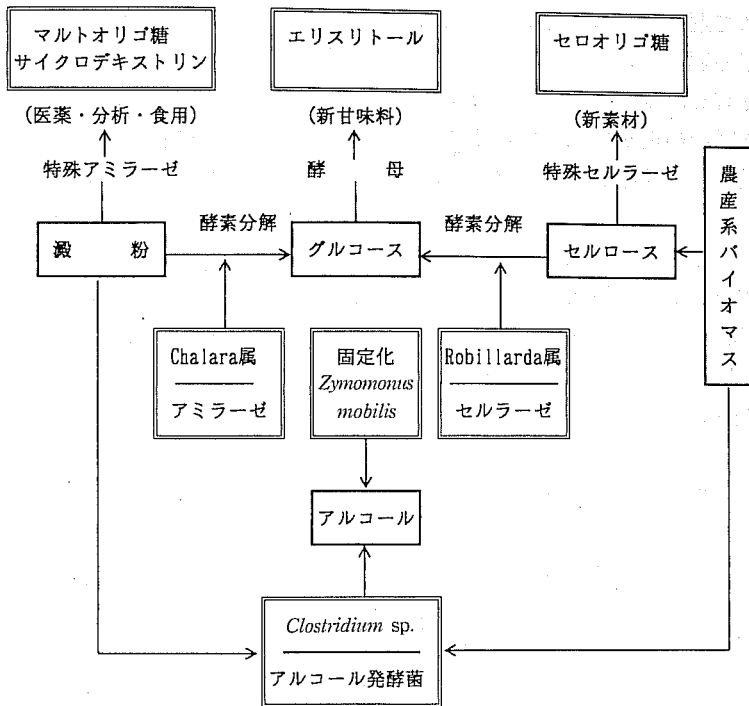


図2 農産系バイオマスの総合的変換利用

た後に、アミラーゼを作用させる方式で行われている。しかし、低利用澱粉を原料とする変換利用では、投入するエネルギーを可能な限り低くすることが必要であり、澱粉を加熱糊化することなく、生澱粉のまま分解する高活性アミラーゼの開発がポイントとなる。本プロジェクトで開発した生産菌 *Chalara paradoxa* の生澱粉分解本酵素は、米、とうもろこし、小麦などの生澱粉を、48時間後には96～99%にまで糖化する高分解率を示した。さらに、アルコール生産の実証試験を行い甘藷や米の生澱粉から15%のアルコールを生産する技術を開発した。

2) 新規好熱嫌気性菌の開発とアルコール発酵技術の開発

新たな検索で温泉地土壌からセルロース、ヘミセルロース、澱粉等バイオマス資源を直接アルコールに変換する効率の高い好熱嫌気性菌を発見した。

本菌は *C. thermocellum* と *C. thermohydrosulfuricum* の共生菌であり、前者が澱粉や

セルロースをグルコースやセロピオースに分解し、後者がエタノールに変換する。従来菌に比較して2倍の2%のアルコールを生成する能力をもち、強いセルラーゼ活性を持つため、6～8倍速い速度でセルロースをエタノールに変換することができる。さらに本菌は、多種のペントース、ヘキソース、ヘミセルロース、生澱粉を資化し、農産、林産廃棄物としてのバイオマス中に含まれるほとんどすべての糖類を効率よく、エタノールに変換することができる機能を有している。いわば万能型エタノール生産菌とみられ、農林系バイオマスの直接アルコール変換には、まさにうってつけの有望な菌株と評価されている。

さらに、2%アルコールを50%にまで回収濃縮しながら発酵するパーペーパレーションリアクターを開発した。

3) 高活性セルラーゼ生産菌・*Robillarda* sp. とセルロースの糖化技術の開発

天然セルロースのセルラーゼによる分解反応

は、一般にきわめて遅く、分解率も低い。天然セルロースが酵素分解されにくいのは、セルロースが結晶構造を有し、リグニン、ヘミセルロースと不溶性の強固な構造を形成していること、ならびに作用の異なる3種の酵素が分解反応に関与することによる。

新たに見出した、*Robillarda* sp. のセルラーゼは、3種の活性の中で、非晶性セルロース分解能が約5倍と高活性であり、さらに高分子のセロオリゴ糖を分解する β -グルコシダーゼ活性を有するのが特徴である。

イナワラ、バカス等のセルロースは12時間で75%程度分解され、さらにセルロースを分解する代表菌 *Trichoderma viride* セルラーゼと本酵素を組み合わせることにより相乗効果が認められ、各酵素単独で作用させた場合よりも約1/2の時間でセルロースをほぼ完全に糖化する技術を開発した。

4) アルコール生産菌・*Zymomonas mobilis* を固定化したバイオリアクターの開発

メキシコの酒から分離された *Z. mobilis* は Entner-Doudor-off 経路によりエタノール発酵を行い、酵母による発酵と比較すると、生体内でのエネルギーが少なくすみ、バイオマス変換利用分野で、省エネルギー型のアルコール発酵菌として注目されている。多孔性セラミックに固定化した *Z. mobilis* を用いて、簡易型のカラム型のリアクターを試作し、7%のアルコールを連続生産する技術を開発した。

5) 澱粉・セルロース等から新規有用物質生産技術の開発

コストの安いバイオマスを原料に付加価値の高い有用物質の生産技術は、一番実用化に近い分野と有望視されている。ここでは、新規有用物質として、サイクロデキストリン、エリスリトール、セロオリゴ糖を対象にした研究開発が行われた。

澱粉からのサイクロデキストリンの生産は

Bacillus macerance 酵素を用いて、溶解性の高い包摂機能を有するサイクロデキストリンの大量生産技術を開発した。この技術は食品産業分野で応用性が高く、実用化されている。さらにグルコースからノンカロリー新甘味物質エリスリトールの生産は、新規酵母を用いた発酵法による大量生産技術を開発し、商品化されている。一方、セルロースからのセロオリゴ糖の生産は、*Celvibrio girvus* セルラーゼによりセロビオースを主体とするノンカロリーオリゴ糖の生産技術を開発した。

以上いくつかの成果例を紹介したが、本プロジェクトでは、70を超える特許が取得されるなど注目すべき成果をあげており、新素材化技術の中にサイクロデキストリンやエリスリトールなど、実用化技術として実際に利用されているものもある。しかし、全体としてみると開発された技術は、コスト的に高い。例えば、米から作ったアルコールは約3倍、セルロースから作ったブドウ糖は、現市場のグルコース価格に比較して約3倍高くなる。コストが技術の評価基準であるかぎり石油中心の現産業体系への導入は困難であるのが現状であり、将来役に立つであろうという技術開発で終了している。

3. バイオルネッサンス計画 (正式名: 新需要創出のための生物機能の開発・利用技術の開発に関する総合研究)

このプロジェクトは、前述のバイオマス変換計画に続いて、1991年から10ヶ年計画で行われているもので、現在、途中段階にある。このプロジェクトでは、最近の健康・環境等の社会的ニーズを背景に、農林水産物のもつ多様な特性に着目し、例えば、農産物の健康機能性や環境にやさしい特性を活用した利用技術の開発により、従来用途の拡大のみならず新規用途の創出を目指した研究、さらには地域の立地条件に即した生物素材について生産から変換・利用に至

る一貫したシステム化技術を開発することを目的としている。

当プロジェクトの“バイオルネッサンス”という名称であるが、これは“バイオ（生物）”と“ルネッサンス（文芸復興）”を組み合わせた造語である。農林水産生物の機能を利用した新しい利用・生産技術を開発し、もって“生物機能の復興”に資するという、本プロジェクトの目的がこの名称に表されている。

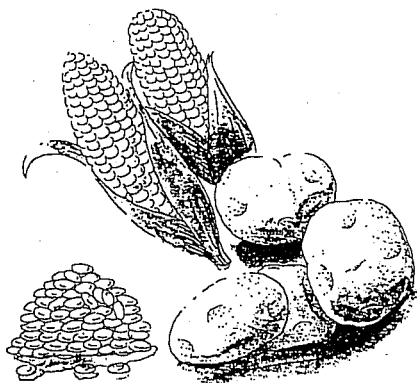
現在研究されているいくつかの事例を紹介する。

1) 新しい機能を持つ農林水産生物の検索と利用技術の開発

- (1) 機能性成分の検索
- (2) 生理機能の解明
- (3) 食品素材の開発

2) 環境にやさしい産業素材の開発

- (1) 生分解性プラスチックの開発
- (2) エネルギーの開発
- (3) 次世代木材の開発



農作物から採れる澱粉

品質や生産量の安定した澱粉は、プラスチックの原料としても適している。生分解性プラスチックへの利用は、農作物の新しい用途として世界中で注目されている。

3) 農林水産生物を利用した環境保全技術の開発

- (1) 農業環境の保全・向上
- (2) 水域環境の保全・向上

さらに、日本の農地は、狭いうえで気候・風土も地域により異なっているため、各地域に適した農業生産と複合的利用システムを開発する研究も行っている。

4) 地域に根ざした農林水産生物の新しい用途の開発

- (1) 寒冷地農工複合利用技術
- (2) 温暖地農工複合利用技術
- (3) 地域環境複合利用技術
- (4) 高機能農林水産生物の地域複合利用技術

次に本プロジェクトで行われている本稿の話題に関係する生分解性プラスチックとバイオエネルギーの開発の研究について紹介する。

膨化成形

澱粉を膨らませて成形すると、発泡スチロール状になる。澱粉の種類や混ぜる物質によって膨らみ方や強度が異なるため、材料の組成や加工装置の研究が必要。

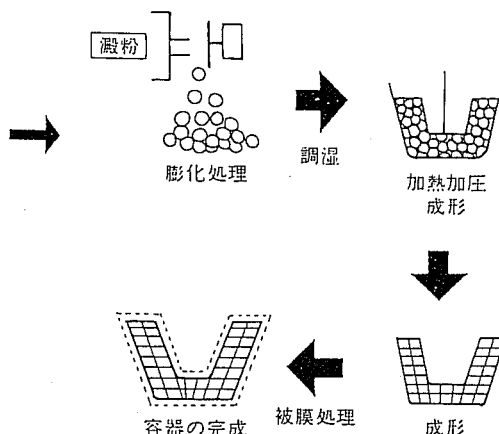


図3 農産物からつくる生分解性プラスチック（バイオルネッサンス計画資料より）

4. 環境に優しい生分解性プラスチックとバイオエネルギーの開発

現在使用されている石油由来のプラスチックやガソリンは大変安価で便利な資材であるが、非生分解性であるため生態系の破壊や大気汚染などの環境破壊の原因になっている。そこで環境にやさしいバイオプラスチック、バイオエネルギーの開発研究が行われている。

1) 生分解性プラスチックの開発

ここでは、図3に示したように、農産物の澱粉や林産物リグニン等の天然高分子を利用して、「土にかえる」食品包装や農業用フィルム等の高機能資材の開発を行っている。

2) バイオエネルギーの開発

てん菜やさとうきびなどは、蔗糖を主成分にしているため、澱粉に比べて直接アルコールに発酵できる利点を持っている。また、自動車のガソリン等の化石燃料の一部をアルコールに代替えることにより大気汚染の軽減につながる。そのため、図4に示したように、てん菜やソルガムからの糖類を原料にアルコールの効果的な生産技術の開発が行ってきている。

5. 農産物の多用途利用に向けての世界の動向

日本で実用化見込みなしとして技術開発を打ち切った前述のバイオマスの利用技術開発が、欧米では環境問題、エネルギー問題、農業問題の救世主ということで、中止することなく研究開発が行われてきた。つまり、米国やEUでは1980年以降エネルギー危機は解消したが、代わって問題となってきた環境危機の解決策として、環境に優しいバイオエネルギーを導入する方へシフトしてきた。これはバイオエネルギーは酸素分子を含んでおり、燃焼効率を高めCOガスの排出が減少する効果があるためである。そして、高いコストの問題を“環境”というキーワードを導入することにより、国民のコンセンサスを得、補助金などの制度を活用し、社会に導入している。このような世界の動きを背景に、平成8年10月につくば市で、国際ワークショップ「農林水産物の多面的変換利用に向けての研究戦略」が開催された。

詳細は別項で米国とEUの動向について紹介されている。

表1に示したように、米国ではとうもろこし澱粉からのアルコールを自動車燃料として、中

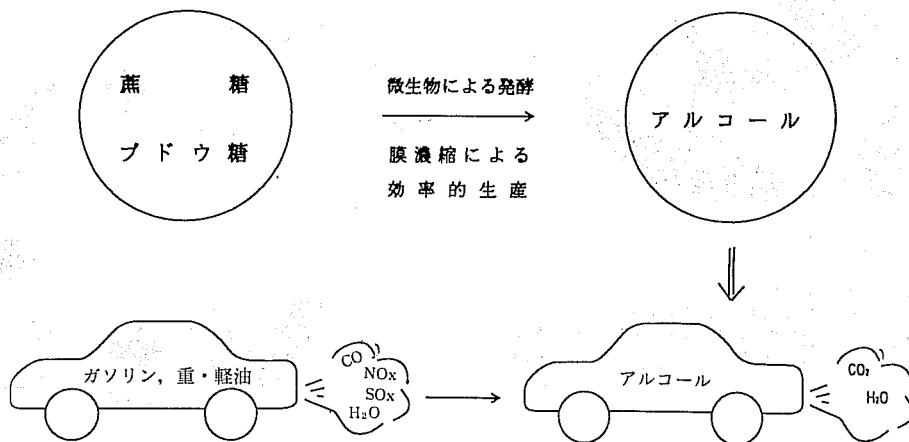


図4 糖質からつくる燃料用アルコール (バイオルネッサンス計画資料より)

表1 米国およびEUにおける農産資源の Nonfood uses

背景：エネルギー問題・環境問題・農業問題		
対応：農産物の工業的利用		
(1) 米国	とうもろこし	①アルコール =自動車燃料 ②超吸水性高分子 =ダイパー、生理用品 ③バイオプラスチック=包材
	大豆	①インク =新聞、公刊書類 ②メチルエステル =バイオジーゼル
(2) EU	なたね	①メチルエステル =バイオジーゼル

西部の20州でガソリンに10%混合し、レギュラーガソリンとして販売されている。アメリカといえども澱粉からのアルコールは高価であり、アルコール入りレギュラーガソリンの1/3を州政府の補助金でカバーしている。さらに2000年には大豆からのソイジーゼル油が、実用化に向け主要5都市の公共輸送バスで試運転が行われており、2010年にはセルロース・バイオマスからのアルコールが実用化に向けてパイロットレベルで開発研究されている。そのうえ、2020年に向けてエネルギー作物の開発研究も始まっている。

日本と同じ状況のヨーロッパでもバイオエネルギーの実用化が始まっており、EU協定のもと、各国が一定面積のナタネを生産し、ジーゼルオイルに20%混合したものが90%の消費税免税で社会に導入されている。また、農村地域では、家畜ふん尿をメタン発酵し、バイオガスとして活用されている。

さらに、エネルギー以外では、米国において、環境に優しいインクが大豆オイルから作られ、新聞や公刊書類の印刷に実用化されている。また、とうもろこし澱粉を原料に超吸水性高分子が作られ、おしめや生理用品として実用化されている。

以上のように、米国やEUの先進国では、環境のためにはお金をかけてでも守っていく、そして将来に向けての石油代替エネルギーの一つとしてバイオエネルギー開発並びに農業ビジ

ネスの振興という国策で、国民の合意のもと強力に推進されている。

6. 今後の展開

我が国として環境・資源・エネルギーをキーワードとして21世紀に向けてどのような可能性が考えられるであろうか。ここでは、これまでのバイオマスの利用の研究成果をふまえ、技術のシステム化という視点で、技術サイドからみた2つのケースについてまとめてみる。

1つは、現産業体系での廃棄物等の変換利用のシステム化であり、最近話題になってきている、いわゆる環境をキーワードにした「ゼロエミッション」の方向である。

これまでのバイオマス・プロジェクトで、くず米、もみ殻、おから、廃材、家畜ふん尿、くず肉、廃油などの変換利用について個別技術の開発研究が行われた。今後は、開発された個別技術を組み立て、廃棄物を1つの資源とみて活用し、出てきた廃棄物を新たな資源として利用していくプロセスをくり返し、廃棄物ゼロを目標にしたシステムの構築が重要である。すでに実用化を目指した「ゼロエミッション・プログラム」が欧米で始まっており、我が国でも国連大学や農林水産省食品流通局の助成事業で推進されている。

2つめは、積極的に生産したバイオマスを多目的に変換利用し、環境にやさしい新産業を創

出する方向である。これまでのプロジェクト等で、バイオマスとしてアマランサス、ホテイアオイ、ジャイアントケルプ、ポプラ、てん菜などを生産し、食・飼料、バイオエネルギー等に変換利用する研究が行われてきている。これらをさらに発展させ、全国で生産可能なバイオマスを考えていく必要がある。前述したように、将来にむけて我が国の食糧自給力の維持向上、環境保全のために環境にやさしい生物資源の活用、並びに将来に向けて石油代替エネルギー等の資源開発を前提として、潜在的農地を最大限活用してバイオマスを生産し、多面的に活用していく方向、例えば「ライスマスプロジェクト」への展開である。これは、米粒をはじめ、米ぬか・もみがら・イナワラの総体全てを利用するもので、米の工業的利用という分野である。例えば米は、澱粉産業、パルプ産業、高分子産業、プラスチック産業、アルコール産業等の原料として、また米ぬかは油脂産業や健康機能成分を利用する機能性食品産業に利用されていく。

一方もみがら、イナワラは飲料産業、多糖類産業、良質のケイ酸を利用するシリカ産業、オリゴ糖産業への利用および最近開発された強固なケイ酸組織を利用したすべらない運動靴、タイヤへの利用など新規産業へ利用される。

これらのシステム化に必要な個々の利用技術は基本的に出来上がっており、一部は実用化されている。このプロジェクトの出口は、個々の技術を組み立てて、ビジネスとして成り立つようにシステム化することであり、農村地域に農業振興に役立つバイオインダストリーという新産業を育てていくことである。

最後に、このような新産業創出のためには、欧米の例にあるように、先ず国策ありきが必要であり、「環境はお金を出しても守る」というコンセンサスが、そして実際にこれらのことを実行していくためには各省庁間の連携協力が非常に重要であろう。

(食品総合研究所 所長)