

世界のグリーンバイオ研究動向

穴澤 秀治

生き物である人間がその社会生活を営む中で密接に関わりあう基本技術であるバイオテクノロジーは、広範な産業分野において、今後も重要な役割を果たしていくことは間違いない。健康医療、食糧、化学品資材、農業、森林、植物、漁業などなど、広義のバイオインダストリーとして今後も着実な発展が期待される。事実、欧米、中韓、BRICSなど今後の工業社会を担うと思われる各国では、バイオインダストリーは成長産業として集中的に投資を行うべき技術分野とされ、この分野の研究開発は活況を呈している。

本特集のグリーンバイオ/ホワイトバイオの分野においては、巨大な新市場の登場に連動して、研究開発動向に大きな変化が生じてきている。ここには、高付加価値で少量の製品から、安価で大量のコモデティーケミカルへと目標とする製品の転換があり、わが国においても研究開発の方法論や方向性に新しい課題が加わった。

たとえば、期待される生産量に見合う原材料確保、従来のバイオ生産プロセスの10倍から100倍の大規模スケールでの生産、生産に必要なエネルギー収支、炭素収支に代表される効率指標など、コスト以外にも研究開発の新しい目標要素が加わった。

バイオによるモノづくり技術において、これまで世界に一步先んじていたわが国も、これらの新しい課題に挑戦する必要がある。これらをクリアすることが、わが国のこの産業分野の成長において求められている。

本稿では、わが国にふさわしい研究開発の方向性を考えていきたい。

グリーンバイオ研究の現状と期待

わが国の名目上のGDPが20世紀末からほぼ横ばいの中、バイオテクノロジーを活用した市場は、2.8倍余の増加を示している。内容は、バイオ医薬品と輸入組換え穀物が牽引しており、日本発の技術の貢献度は多くはない。

政府の科学技術に対する施策として、1995年から科学技術基本法に基づく3回の5カ年計画の結果、1995年から2010年までにわが国全体で66兆円の研究開発投資

が行われた。

ライフサイエンスの分野に限っても文部科学省、農林水産省、文部科学省、経済産業省の合計で、2009年度360億円の研究開発投資が行われている。

また、研究開発の実用化の促進を目指した、技術ライセンスに関する法律、国の資金で行った研究開発の知財権に関する法律、ベンチャー企業育成促進に関する施策など、いろいろな手が打たれて、技術立国日本への期待に応えようとしている。

地球温暖化対策への対応として、CO₂排出削減の方策の一つとして、エネルギー、有機物資源の石油からの脱却が大きな目標として取り上げられてきている。

バイオマス資源をその代替原材料と考える場合には、エネルギー資源として考えるのか、プラスチック材料として考えるのかに経済性を考える際の相違点があることを明確にしておく必要がある。

つまり、現在、ガソリン代替資源として市場に出ているバイオエタノールやバイオディーゼルは、製造効率の面から、穀物やサトウキビ、パーム油、菜種油などの食糧との競合が懸念されるバイオマスから製造されているケースが多い。そこで原材料を廃棄物系の農産物の活用に移行していく過程において、新しい技術開発が必要になってきた。

一方、原材料の収集、製造に必要な消費エネルギー収支を詳細に検証すると、最終製品であるバイオエタノールのガソリンとしての燃焼エネルギーと、原材料であるバイオマスを直接燃焼して得られる電気エネルギーを比較すると、エタノール生産に優位性はないとする検討結果がある。科学的に見れば当然で、バイオマスの元素組成(C, H, O)とエタノールの元素組成を比較すれば、燃焼エネルギーは前者のほうが大きいことは容易に推定できる。このケースでは、小型自動車が使えるエネルギー源としての比較をすべきであり、従来の内燃エンジンと電気自動車の比較を原料調達から利用するエネルギー形態への転換まで総合的に行わないと正確な判断ができない。

さらに、原材料として廃棄物系の有機物を活用する

表1. バイオベースポリマーの海外での開発状況

企業名	製品		出発物質	生産規模		
	化合物名	製品名		年産(トン)	場所	
ブラステム (ブラジル)	ポリエチレン (PE)		サトウキビ→エタノール→エチレン	20万	ブラジル	
	ポリプロピレン (PP)		サトウキビ→プロパノール			
ダウケミカル (米国)	ダウエポキシ	エピクロロヒドリン (GTE)	グリセリン	15万	中国 (上海)	
		液体エポキシ (LER)		10万		
	クリスタルセブとJV	PE		サトウキビ→エタノール→エチレン	35万	ブラジル
	ダウポリウレタン	ポリオール	Renuva	大豆オイル→ポリオール		
	RITEと共同研究	PP		糖→プロパノール→プロピレン		米国, 中南米
デュボン (米国)	テート&ライルのJV	1-3プロパンジオール (PDO)	Zemea/Susterra	とうもろこし→糖	4.5万	米国
		ポリトリメチレンフタレート (PTT)	Sorona	PDO→テレフタル酸との縮合		
		ポリオール	Cerenol/Polyol	PDDホモポリマー		
		熱可塑性ポリエステルエラストマー	Hytrel RS	PDDのポリオール		
		ポリアミド (PA610, 1010)	Zytel	ひまし油→セバシン酸		
ソルベイ (米国)	塩ビ (PVC)		サトウキビ→エタノール→エチレン	6万	ブラジル	
	エピクロロヒドリン	Epicerol	グリセリン	12万	タイ	

ケースでは、従来は土壌中への廃棄や堆肥化、活性汚泥処理を通して微生物によってCO₂として大気中に放出されてしまっていた光合成によって固定された太陽エネルギーや炭素ポリマーを、十分に有効活用すべきとの観点に気づくべきであろう。とくにプラスチック原材料をバイオマスに転換する場合だけではなく、エネルギー生産においても重要な視点であると考えます。

これまでのLCA (ライフサイクルアセスメント) やCFP (カーボンフットプリント) の考え方や計算方法にもこれらの観点を反映させる必要があると考えます。植物、藻類などのバイオマス資源は、CO₂を太陽エネルギーによって固定し、ポリマー生産とエネルギー固定を行う、再生可能な唯一の有機質資源であることをきちんと再認識する必要があります。わが国における最大の課題は、その資源の調達にあり、海外との連携が必須である。

わが国の政策は、バイオマスニッポン総合戦略策定(2002.12)、その見直し(2006.3)が行われ、

- ・ バイオマス輸送用燃料利用の促進
 - ・ 未利用バイオマス活用によるバイオマスタウン構想の加速化
 - ・ 原料資源の大量安価な調達、低コスト高効率生産技術開発
 - ・ 未利用バイオマス活用のモデル化
- が示された。

海外では、米国ではバイオマス研究開発法 (Biomass R&D act; 2000) が制定され、バイオマスR&Dイニシアティブが提言されたのを皮切りに、Vision for Bioenergy & Biobased Products in US (2002.10)、そのRevise版 Bioeconomy for a Sustainable Future (2006)、Biomass Multi year program plan (2009.7)、Top Value added Chemicals from BioMass vol.1 (2004.8): 12 building blocks for chemicals, vol. 2 (2007.10) from biorefinery Ligninなど矢継ぎ早に提言、施策が示された。バイオ燃料を中心とするが、その経済性向上のための化成品製造を並行すること、油脂原料生産、非可食バイオマスの利用、セルロースだけでなく、リグニンを化成品原料とすることが提案された。

欧州では、第7次フレームワークプログラム (2007~2013/FP7) で、リグノセルロースの活用、バイオマス分解、複合材としての活用が提案され、具体的に各国では、オランダ: Platform Biobased Raw Materials/30%をbiobasedに転換目標、フィンランド: BioRefineプログラム (2007~2012) バイオエタノール、バイオディーゼル、スウェーデン: 森林バイオリファイナーPJが提案された。ここでもバイオ燃料を中心とし、リファイナーを経済性向上要因ととらえ、木質バイオマスを主原料とし、成長の早い樹木開発のブラジルと共同研究を開始している。

表2. 化学品のうちバイオ製品の割合の推移予測

	2005		2010		2025	
	Total	Biobased	Total	Bibased	Total	Biobased
Commodity	475	0.9 (0.2%)	550	5-11 (0.2-2%)	857	50-86 (6-10%)
Speciality	375	5 (1.3%)	435	87-110 (20-25%)	679	300-340 (44-50%)
Fine	100	15 (15%)	125	25-32 (20-26%)	195	88-98 (45-50%)
Polymer	250	0.3 (0.1%)	290	15-30 (5-10%)	452	45-90 (10-20%)
All Chemicals	1200	21.2 (1.8%)	1400	132-183 (9-13%)	2183	483-614 (22-28%)

単位：10億USドル

出典：The Bioeconomy to 2030: Designing a policy Agenda; 2009, 121 (OECD)

表3. バイオベースプラスチック進出プラン

	品目	2008年生産量 (千トン)	価格 (円/kg)	2020年転換率 (%)	転換量 (千トン)	中間原料 (モノマー等)	用途
熱可塑性 樹脂	ポリプロピレン	2870	200~210	20	574	ナノファイバー コンポジット材	自動車, 電気トレイ他
	ポリアミド系樹脂成形材料	276	500~580	10	28	ジアミン, ジカルボン酸, ラクタム	自動車部品, 漁網他
	ポリカーボネート	347	470~530	10	35	ジオール	DVD/CD, レンズ他
	ポリエチレンテレフタレート	686	200~450~650	10	69	ジオール, ジカルボン酸	絶縁材, 磁気テープ他
	ポリブチレンテレフタレート	197	410~420	10	20	ジオール, ジカルボン酸	電気部品他
熱硬化性 樹脂	フェノール樹脂	287	300~430	20	29	フェノール	配線基盤, 他
	エポキシ樹脂	213	420~450	10	21	フェノール等	電気製品, 塗料他
	その他樹脂	185	250~300	10	19	ナノファイバー コンポジット材	
合計	プラスチック製品合計	13043		6.3	822		

NEDO 調査2010.3

生産量：http://www.jpca.or.jp/4stat/02stat/y7gousei

価格：15308の化学商品（日刊工業2008）

石油依存脱却のためのバイオマス資源を利用した高度部材開発に関する調査委員会（2010年）資料より

表1にバイオマスを原材料としてポリマーの開発状況を取りまとめる。比較的機能性の高い材料から転換は進んでいるが、エタノールからエチレンへの転換やプロパノール、ブタノールの製造が経済的に成立できれば、バイオ原料の利用は一気に進展する。

表2に化学品のうちバイオ製品の割合の推移予測を示す。2025年までに22~28%がバイオマス由来に転換されるとOECDでは予測している。

表3に現在のわが国のプラスチック製品とバイオ原料への転換の可能性をまとめた。2020年には全体の6.8% (822千トン) のバイオマスを原材料とすることが期待されている。

可食性バイオマス原料では、高純度で大量の原料入手が可能であり、利用が先行している。デュボンのポリエステル、ネーチャーワークスのポリ乳酸が商品化されている。プラスチック、ダウケミカルのPE（ポリエチレン）、PP（ポリプロピレン）も商品化進行している。

非可食性バイオマス原料は、大量入手しても食糧との競合の課題がなく、将来のバイオベースポリマー原料の中心として期待される。材料の選定、前処理技術のキーテクノロジーとして集中的に検討中である。地域、環境により、使える有機材が異なり、研究に多様性がある。

油脂原料では、植物油脂を原料としたポリウレタン、エピクロロヒドリンの商品化が始まり、藍藻類による油

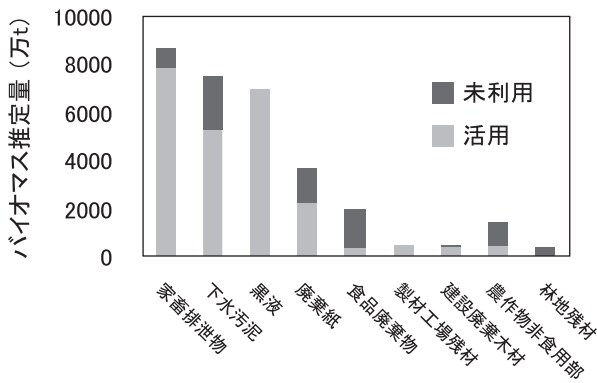


図1. わが国の2005年度バイオマス推定量と利用率
(出典：バイオマスニッポン総合戦略資料2006)

脂材料の発酵研究が積極的に展開されている。

複合材料化として、セルロースなどの天然繊維による複合材料化、リグニンの部分分解などによる原材料化研究が進行中である。

わが国に向けた研究開発

バイオ燃料、バイオプラスチックいずれにおいても、その生産量が従来の発酵、酵素によるモノづくりとは比較にならない規模である点が大きな課題である。従来の少量高付加価値品から、多量安価な製品群への転換である。生産技術としてもスケールアップは発酵タンクのみならず精製、廃棄物処理にいたるまで新しい考え方が必要になる。

最も厳しい課題は、わが国には米国のトウモロコシ、ブラジルのサトウキビに相当する大量、安価、均一な有機資源が見当たらない点にある。これらの輸入は食糧との競合の課題にすぐにつき当たる。

図1にわが国の有機系廃棄物の量と活用状況がまとまっている。すでに使われている割合が多いものもあるが、堆肥や燃料活用では、用途の変更も考慮すべきであろう。このような廃棄物系の有機資源を原材料とする際には、多様な有機物を資化する発酵菌の育種が重要な研究課題となる。さらには産物の精製についても新しい課題となると考えられる。

わが国の発酵、酵素によるモノづくり研究において、筆者の考える今後の課題についてまとめる。

○設計どおりの生産能を発揮できる菌株の造成

そのためには、発酵菌株の徹底的な理解が必要で、シ

ステムバイオロジー的発想が役立つであろう。たとえば、機能未知遺伝子を極力少なくすることにより、予想外の制御機構による変異や遺伝子導入の効果の低減が生じないことを狙いとする。不要有害な遺伝子を発酵菌から削除するミニマムゲノムファクトリーの発想や必要な遺伝子だけを連結してゲノムを構成する合成生物学の発展が期待される。

○発酵生産菌株として、圧倒的な生産性（石油化学工業→バイオ化学工業の転換に見合う）を示す菌株の育種

菌株育種で重要な遺伝子導入、変異の効果が制御をまぬかれ、有用な効果が大きく増幅されるためには、すべての生物が持つ生体機能の恒常性維持機能（ロバストネス）を脱却させる必要がある。

さらに、触媒としての酵素の安定性の大幅な向上、また化学触媒の持つ熱、溶媒、再活性化など長時間の反応に耐える性能を生物の触媒にも付与するためには、タンパク質工学的な改変と新たな探索資源へのアプローチが必要であろう。

○多様な有機物を資化・発酵できる微生物の育種（有機廃棄物系のバイオマスの活用）

基質の取り込み、転換能、生産物の分解、膜輸送、生産物の排出などの機能向上が研究課題となる。その上で、設計どおりの代謝、物質転換能を発揮する発酵菌に近づける。

もう一点は、原材料の前処理により生じる高塩濃度、pH、温度、発酵阻害物質などの悪環境での発酵、反応が行える発酵菌、酵素の創製が上げられる。膜機能の解析、強化、代謝系の改変、酵素タンパクの改変が課題になる。

バイオインダストリーは知的集約型・高付加価値型産業であり、資源小国であるわが国が、技術で生きるのに向いた産業である。そのバックボーンとして伝統的な醸造技術に培われた経験と技術が豊富に蓄積しており、これまででも、日本に向いた産業分野と考えられてきた。市場が安価、大量の製品に移ったとしても、その製造技術の基盤は発酵と酵素反応によるモノづくりであり、日本の得意分野であることは間違いなく、その地位を譲り渡すことなく、今後の研究開発が大いに発展することを期待したい。