

広がるバイオベースプラスチック

地球温暖化問題などを背景に、植物などを原料とする「バイオベースプラスチック」が注目されている。

すでに、ポリ乳酸などが実用化されており、現在、石油から作られているポリエチレンも、バイオベースの製品の商業生産が2011年にも開始される。

現在原料として主に利用されているのはトウモロコシやサトウキビなどの食料になる部分であり、今後は、植物のセルロースなど、非可食・未利用のバイオマス資源を利用するための研究開発が期待されている。

2010年11月



株式会社 旭リサーチセンター

東京都千代田区神田小川町3-7-5 神保町PR-EX

電話 (03)5577-6771 (代)

< 本リポートのキーワード >

バイオベースプラスチック、カーボンニュートラル、ポリ乳酸、
バイオベースポリエチレン、セルロース、PRO-BIP2009

(注) 本リポートは、ARCホームページ (<http://www.asahi-kasei.co.jp/arc/index.html>) から検索できます。

このリポートの担当

主幹研究員 石原 尚子

お問い合わせ先 03-5577-6775 (代)

E-mail ishihara.nc@om.asahi-kasei.co.jp

まとめ

地球温暖化や石油資源枯渇の問題を背景に、植物などのバイオマスを原料として作られるバイオベースプラスチックは、カーボンニュートラルな材料として注目を集めている。 (P. 1 ~ 4)

バイオベースプラスチックの実用化が進んでいる代表例としては、トウモロコシから作られるポリ乳酸 (PLA) と、1,3-プロパンジオールを用いたポリトリメチレンテレフタレート (PTT) が挙げられる。また、これまで石油から作られてきたポリエチレンなどの汎用プラスチックも植物から作ろうという開発が進んでおり、ブラジルで2010年から11年にも商業的規模での生産が始まる。

欧米の化学企業を中心に種々のバイオベースプラスチックが開発され、生産量だけでなく種類も徐々に増えてきている。 (P. 5 ~ 13)

バイオベースプラスチックの市場が拡大するためには、原料の長期的な安定確保や技術的な課題の解決が必要である。

まず、第一に懸念される課題は、食料との競合である。現在、バイオベースプラスチックの原料として主に利用されているのは、トウモロコシやイモ類、サトウキビなどの食べられる部分(可食部)であり、バイオベースプラスチックの生産量が増加すれば、食料への影響も大きくなると危惧される。それを解決する方法として、食料と競合しない非可食・未利用なバイオマス資源を原料とする開発が進められている。茎や葉などの草本系や、針葉樹、広葉樹などの木質系のバイオマスに多く存在するリグノセルロースの利用が注目されている。

また、第二に原料だけでなく製造から廃棄までライフサイクル全体を通して、温室効果ガスの排出量が低いことなど、環境負荷が低いことが期待される。 (P. 14 ~ 18)

石油由来のプラスチックの生産量と比較するとまだ小さいものの、バイオベースプラスチックの生産量は今後10年で3倍にも拡大すると見込まれている。 (P. 19 ~ 21)

CO₂排出量削減へのニーズが今後どれだけ高まっていくか、原油価格の水準、技術的課題の解決がどれだけの速さで進むか、市場拡大に影響を与える要因は多い。今後その動向が注目される。 (P. 22)

目 次

1 . はじめに	1
2 . バイオベースプラスチックとは	2
(1) バイオベースプラスチックとは	2
(2) バイオベースプラスチックの種類	2
(3) バイオベースプラスチックの開発の流れ	3
3 . バイオベースプラスチックの代表例	5
(1) ポリ乳酸 (P L A)	5
(2) ポリトリメチレンテレフタレート (P T T)	7
(3) 汎用プラスチックも植物由来に	8
(3) - 1 . バイオベースポリエチレン (P E)	9
(3) - 2 . バイオベースポリ塩化ビニル (P V C)	10
(3) - 3 . バイオベースポリプロピレン (P P)	10
(4) バイオベースプラスチックの製品例	11
4 . バイオベースプラスチックの市場拡大における課題	14
(1) 食料との競合：非可食、未利用資源利用への期待	14
(1) - 1 . セルロース	15
(1) - 2 . ヘミセルロース	16
(1) - 3 . リグニン	16
(2) ライフサイクルを通じた環境負荷が低いこと	17
5 . 今後のバイオベースプラスチックの生産量予測	19
6 . おわりに	22

1 . はじめに

家電製品、車の部品、容器など、プラスチック製品は身の回りに溢れている。世界のプラスチック生産量は2億6千万トン(2007年)で、最も多く使われているプラスチックはポリエチレン(PE)である。ポリプロピレン(PP)、塩ビ(PVC)がそれに続く¹⁾。こうしたプラスチックのほとんどは、石油を原料として作られている。しかし、近年、地球温暖化や石油資源枯渇の問題などを背景に、カーボンニュートラルで再生可能な資源である植物などのバイオマスを原料として作られる「バイオベースプラスチック」への関心が高まっている。

バイオベースプラスチックの中でも、実用化が進んでいるポリ乳酸(PLA)は、以前はその生分解性の特性が注目され、ゴミ問題に貢献するプラスチックとして開発が進められていたが、近年は植物を原料として作られることに関心が集まっている。包装材料などの使い捨て用途だけでなく、物性を改良して自動車や電気製品の部品など、耐久性が要求される用途へも広がっている。また、現在石油から作られている汎用プラスチックも植物を原料としてつくろうとする開発が進んでおり、バイオベースのポリエチレンは2010年中か11年にもブラジルで商業規模の生産が開始される予定だ。

しかし、現在原料の主力となっているのはトウモロコシやサトウキビなどの可食部で、バイオベースプラスチックの増産が進めば、食料へ与える影響も危惧される。そこでセルロースなど、非可食・未利用のバイオマス資源を利用するための研究開発が進められている。

今後も市場は拡大していくと予測されるが、食料との競合、ライフサイクル全体を通しての環境負荷の低さ、原料の安定確保など、課題もまだ多い。

本レポートでは、ポリ乳酸をはじめとした実用化が進んでいるバイオベースプラスチックの現状や、食料と競合しないセルロースを利用した開発状況など、最近の動向について概観し、今後のバイオベースプラスチックの市場拡大の課題について考えたい。

2. バイオベースプラスチックとは

(1) バイオベースプラスチックとは

植物は、水と大気中の二酸化炭素（ CO_2 ）を吸収して光合成を行い、その体を作っていく。この植物からデンプンや糖などの成分を取り出して原料化し、バイオベースプラスチックが製造され、さらに容器や部品などに成形、加工して利用される。プラスチック成形品はその役割を終えれば、焼却などの処分がなされる。バイオベースプラスチックも、従来の石油から作られるプラスチックと同様に、焼却されれば CO_2 を排出するが、このとき排出される CO_2 は、もともと植物が成長する過程で吸収した大気中の CO_2 である。したがって、バイオベースプラスチックは、大気中の CO_2 濃度を増加も減少もさせない、プラスマイナス0である、「カーボンニュートラル」な材料と考えられている（図1）。

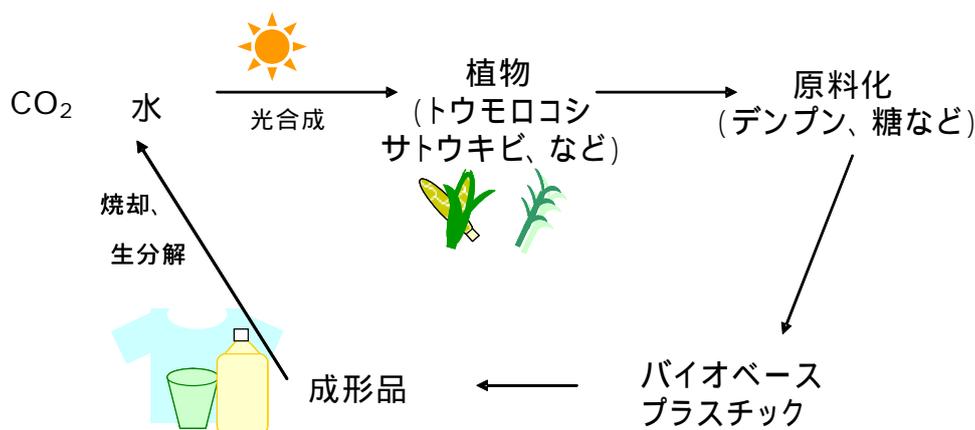


図1 バイオベースプラスチックのライフサイクル（カーボンニュートラルの考え方）

(2) バイオベースプラスチックの種類

バイオベースプラスチックには、バイオマス由来の原料のみから製造されるものと、バイオマス由来の原料と石油由来の原料の両方から製造されるものがある（図2）。前者では、生分解性プラスチックとして知られているポリ乳酸（PLA）が代表的なものとして挙げられる。PLAは、トウモロコシやキャッサバなどの植物から作られる乳酸を原料とする。一方、後者としては、トウモロコシから作られる1,3-プロパンジオール（1,3-

PDO)と、石油から作られるテレフタル酸の両方を原料として製造される、ポリトリメチレンテレフタレート (PTT) などがある。

		原料		
		石油由来	石油由来 + バイオマス由来	バイオマス由来
分解性	非生分解性	<ul style="list-style-type: none"> ・ポリエチレン (PE) ・ポリプロピレン (PP) ・塩ビ (PVC) ・PET ・ポリアミド6, 66 ・エポキシ樹脂 	<ul style="list-style-type: none"> ・デンプンとポリオレフィンのブレンド ・ポリアミド610 ・バイオベース1,3-PDOを用いたPTT ・バイオベースグリセリンを用いたエポキシ樹脂 	<ul style="list-style-type: none"> ・バイオベースPE ・バイオベースPP ・ポリアミド11
	生分解性	<ul style="list-style-type: none"> ・ポリブチレンサクシネート (PBS) ・ポリカプロラクトン (PCL) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ポリ乳酸ブレンド (+ 生分解性石油由来共重合体) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ポリ乳酸 (PLA) ・ポリヒドロキシアルカン酸 (PHA) ・変性デンプン ・再生セルロース

図2 原料と分解性によるプラスチックの分類と例

(3) バイオベースプラスチックの開発の流れ

また、バイオベースプラスチックは、その開発の流れから大きく三つに分けることができる。一つ目は、セルロースやデンプンなど従来からある天然物系やその化学修飾系のプラスチックである。

二つ目は、1980年代から生分解性の性質が注目され開発が進められたPLA、ポリヒドロキシアルカン酸 (PHA)、ポリブチレンサクシネート (PBS) などである。多くのプラスチックは環境中で分解されずゴミとして残ってしまうが、生分解性のあるプラスチックは、土中の微生物の働きにより分解され、環境に大きな負荷を与えない、ゴミ問題に貢献するプラスチックとして注目されていた。しかし現在日本では、ゴミを微生物によって発酵させ肥料として利用するコンポスト化があまり進まず、生分解性よりも植物由来であることのほうが関心を集めている。PLAは、開発が進んだ生分解性プラスチックの一つであるが、ポリマー構造や添加物などの検討によって耐久性のある用途へも展開が進んでいる。

三つ目は、バイオマス由来のエタノールや1,3-PDOなど、石油から作られる化学品と同じものを植物を原料に製造し、これらを原料としてプラスチックを製造するタイプのバイオベースプラスチックである。ブラジルのBraskemや、米国のDow Chemicalは、サトウキビ由来のエタノールからPEを製造し、2011年には商業生産を開始する計画を発表している。この三つ目のプラスチックは、これまで使用していた石油由来のプラスチックと同じであり、原料がバイオマス由来になっただけであるので、ユーザーにとっては新たな設備を作る必要がなくメリットが大きい。しかし、バイオベースプラスチックは、まだ石油から生産する場合と比べコストが高く、また原料の安定確保などの問題もある。

3 . バイオベースプラスチックの代表例

実用化が進んでいるバイオベースプラスチックの代表例としては、ポリ乳酸(P L A) と1,3-プロパンジオール(1,3- P D O)を用いたポリトリメチレンテレフタレート(P T T)、の二つが挙げられる。また、サトウキビ由来のバイオエタノールから作られるポリエチレン(P E)など、これまで石油から作られていた汎用プラスチックも植物から作る研究開発が進んでおり、11年にも商業的規模での生産が始まる予定だ。以下、これら3種のプラスチックを中心に、工業的に生産される主なバイオベースプラスチックについて述べる。

(1) ポリ乳酸(P L A)

ポリ乳酸(P L A)は、トウモロコシのデンプンを分解した糖や、サトウキビから抽出された糖から、乳酸菌などによる発酵によって得られた乳酸を重合して作られるポリエステル的一种である。一般的には乳酸の二量体であるラクチドの開環重合法により重合されるが、プロセス数が少ない乳酸からの直接重合法も検討されている(図3)。

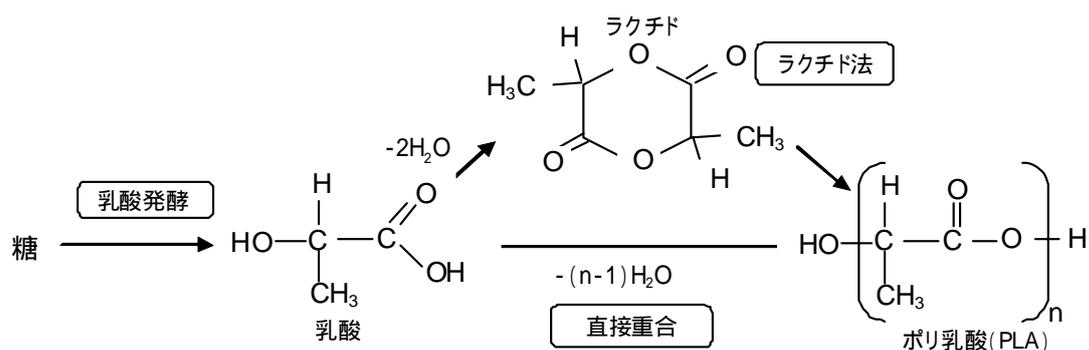


図3 ポリ乳酸(P L A)の製造プロセス

以前 P L A は精製が難しくコストが高いため、用途がなかなか見つからなかった。しかし、米国の穀物メジャー、Cargill が反応蒸留に基づいた高純度のラクチド生産の連続プロセスを開発し、工業的な大量生産が可能になり、汎用的に使えるようになってきた。

Cargillは97年にDow Chemicalとジョイントベンチャー、Cargill Dow LLCを設立し、02年から米国ネブラスカ州にて大規模生産を開始した。その後、05年にDow Chemicalは離れ、Cargill単独でNature Works LLCとなる。07年には帝人が保有持分50%出資で参画したが、09年には合弁を解消している。現在、Nature Works LLCは、年産14万トン規模の生産プラントを有する世界最大のPLAメーカーとなっている。また同社は、10年3月に中間体のラクチドの外販も開始した。既に販売しているPLA用にこれまでラクチドを内製していたが、このラクチドも外販することにより、PLA製品の普及が拡大し、さらに市場が広がることを狙っている。

PLAは需要が増え、今後も市場拡大が予測されるプラスチックであり、他社も参入してきている。70年以上の歴史のある乳酸メーカー、オランダのPuracは、07年にはPLAの原料となるラクチドの生産を拡大することを発表し、タイで年産10万トン規模の乳酸プラントをスタートさせた。さらに、11年の下期には年産7万5千トンのラクチドプラントが稼動する。

PLAは透明性や剛性が高く、バイオベースプラスチックの中でも、従来の石油由来の汎用プラスチックに比較的近い力学的物性を示すので、その代替品としても期待されている。しかし、耐熱性、耐加水分解性、耐衝撃性などの性能が低いという短所もある。そこで、ポリマー構造の制御や、異なるプラスチックを組み合わせたブレンド、アロイ化の工夫などが行われ、品質が改善されてきている。以前は、カップや容器など使い捨ての用途に用いられることが多かったが、品質の改善により、携帯電話やパソコンの筐体や自動車の部材など、耐久性が必要となる用途へも使われるようになってきている。

耐熱性を向上させる方法の一つとして、PLAのポリマー構造を制御して「ステレオコンプレックス構造」を作る方法がある。PLAには、右手と左手のように、立体構造が鏡像関係にあるL体とD体のPLAがある。このL体のPLAとD体のPLAが結晶化の過程で対になると、ステレオコンプレックス構造と呼ばれる強固な結晶構造が作られ、融点や耐熱性が高くなる。この耐熱性PLAの融点は210℃であり、従来のPLAよりも40℃も高い。ステレオコンプレックス構造をもつ耐熱性PLAについては、帝人が先行して開発しており、その商品「バイオフロント」は繊維として自動車のシート表皮

やドアトリムなどに採用されている。また、同社は、2009年9月から愛媛県松山市で年産1,000トン規模の実証プラントを稼働させている。11年度には5,000トン規模を目指し、将来的には数万トン規模の増設も視野に入れている。

(2) ポリトリメチレンテレフタレート (P T T)

実用化の進んだバイオベースプラスチックのもう1つの代表例は、DuPontのポリエステル、ポリトリメチレンテレフタレート (P T T) である。

P T T は、1,3-プロパンジオール (1,3- P D O) と、テレフタル酸あるいはテレフタル酸ジメチルとを原料に作られる (図 4)。従来は両者とも石油から化学合成によって作られていた。P T T は、P E T やポリブチレンテレフタレート (P B T) などの他のポリエステルと比べ、強度が高く耐熱性に優れるなど性能が高いものの、原料の1つである1,3- P D O の化学合成が難しく、コストが高くなるという難点があった。DuPontは、バイオテクノロジーを利用して、トウモロコシから1,3- P D O を製造する発酵法を開発した。この開発により比較的高い収率で1,3- P D O が製造できるようになり、バイオベース P T T の商業的生産が可能となった。

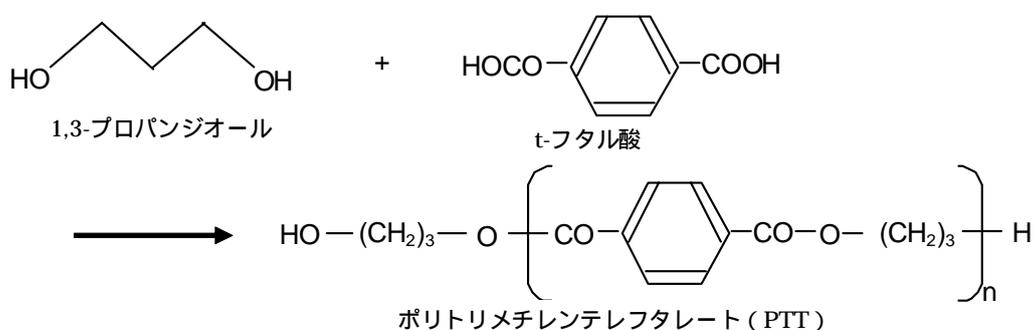


図 4 ポリトリメチレンテレフタレート (P T T) の重合

DuPontのバイオベース P T T 「ソロナ」から作られた繊維は、09年に発売されたトヨタのハイブリッド自動車「S A I」の天井、サンバイザーなどの表皮に採用されている。これらの表皮に植物由来のポリマーから作られた繊維が使用されるのは、量産車内装部品としては世界で初めてだという。植物由来のプラスチックであるという環境的な付加価値だけでなく、P T T 繊維のもつ質感と風合の良さや、自動車用としての厳しい要求

性能も満たしている。

PLAと同様に、トウモロコシから作られる1,3-PDOも増産が進められている。10年5月、DuPontとTate & Lyleの合併会社であるDuPont Tate & Lyle Bio Products LLCは、1,3-PDOの生産量を35%増産する計画を公表した。米国テネシー州の従来の設備を拡張するもので、建設は6月から開始され、2011年の第2四半期までには完了する見込みだ。

(3) 汎用プラスチックも植物由来に

プラスチックは、大量に使われるが価格の低い汎用プラスチックと、使用量が少なく価格が高いその他のプラスチックに分けられる。先述のPLAやPTTはどちらかといえば後者に含まれる。

汎用プラスチックの代表例はポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)、塩ビ(PVC)である。これら3種類の汎用プラスチックで、世界のプラスチック需要のほぼ7割が占められている(図5)。例えば、PEはレジ袋やゴミ袋、PPは生活用品の容器や自動車のバンパー、PVCは配管や電線コードの被覆材など、日常生活でもよく目にするものに使われている(図6)。これら大量に使われる需要の大きなプラスチックも植物から作るようとする動きが、欧米企業を中心に活発になっている。

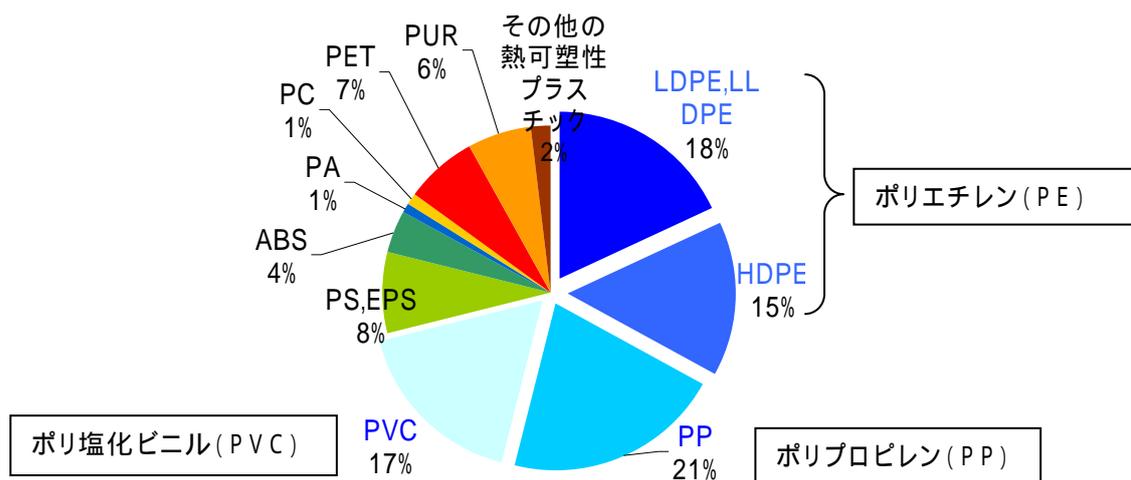


図5 世界のプラスチック需要割合(2007年)

データ出所:PlasticsEurope “Business Date and Charts 2007 by PlasticsEurope Market Research Groupe(PEMRG)”¹⁾



図6 汎用プラスチック（PE、PP、PVC）の成形品例

(3) - 1 . バイオベースポリエチレン（PE）

バイオベースポリエチレンは、サトウキビなどから得られる糖を発酵させてバイオエタノールを作り、それを脱水したエチレンを重合して作られる。石油からPEを作る場合は、石油を蒸留してナフサを得、ナフサを分解したエチレンを重合する（図7）。もとの原料が、植物であるか石油であるかの違いはあるが、どちらもエチレンという化学品から作られるPEであり、ユーザーは従来の石油由来のPEと同じ設備を用いて同じように製品を作ることができる。



図7 バイオベースポリエチレン

ブラジルの化学メーカーであるBraskemは、2007年6月にバイオエタノールからPEを製造することを発表した。このバイオベースPEは主にサトウキビの搾汁から砂糖を抽出した後に残る「廃糖蜜」を原料として作られる。これまで捨てられていた未利用の資

源を利用することになるので、食料とは競合しない。2010年から11年までには年産20万トン規模で商業生産を開始する予定だ。すでに2008年からは、食品包装やプラスチックフィルムメーカーをはじめとしたPEユーザーへ試験的に供給を行っている。日本でも、豊田通商を通して資生堂が供給をうけている。化粧品のボトルやチューブ容器への採用を検討し、商業生産が開始されれば、積極的にバイオベースPEに切り替えを始める。

また、Dow Chemicalもブラジルでサトウキビ由来のバイオベースPEの製造を計画している。ブラジルのバイオエタノールメーカー、Crystalsevと共同でジョイントベンチャーを立ち上げ、2011年から商業生産を始め、年産35万トンのバイオベースPEを製造する。

現在もっとも生産量の多いバイオベースプラスチックはPLAであるが、まだ23万トン程度でしかない。計画どおりバイオベースPEの商業生産プラントが立ち上がれば、その生産量はPLAを大きく上回り、バイオベースプラスチック全体の生産量は3倍にもなる。しかし、現時点では、バイオベースPEは石油から製造されるPEと比べ、コストが高い。バイオベースPEの価格は石油由来のPEの1.3~1.5倍程度になると見込まれている。ただ、原料となるサトウキビ由来のバイオエタノールの市場価格は、ブラジルにおいて2008年末で1バレルあたり80USドルであり、原油価格が1バレル45USドル以上になれば、バイオベースPEも価格競争可能だという見方もある。

(3) - 2 . バイオベースポリ塩化ビニル (PVC)

PVCについても、バイオエタノールから作られるエチレンをもとに、バイオベースPVCを製造しようという計画がある。

PVCの世界的メーカーであるベルギーのSolvayの系列会社、Solvay Indupaは、2007年、ブラジルのサントアンドレ市のPVC工場に1億3,500万USドルを追加投資し、年産36万トンのPVCを作る原料として、6万トンのサトウキビ由来のエチレンを製造すると発表している。

(3) - 3 . バイオベースポリプロピレン (PP)

バイオベースPEの製造を計画しているBraskemは、バイオベースPPの開発も行って

いる。2009年12月、デンマークの酵素メーカーのNovozymesと、サトウキビからPPを製造する大規模製造技術を共同で開発することを発表している。開発期間は少なくとも5年。すでにBraskemは08年9月に、実験室レベルおよびパイロットプラントレベルにおいて、再生可能な原料から作られるPPの開発に世界で初めて成功している。

日本でも、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託のもと、産業技術総合研究所、触媒技術研究組合、東京工業大学、広島大学が、「セルロース系バイオエタノールからプロピレンを製造するプロセス開発」を08年度から実施している²⁾。バイオエタノールからポリプロピレンの原料となるプロピレンを効率よく製造し、コスト競争力のあるプロセスを開発中である。

（４）バイオベースプラスチックの製品例

図8に、バイオマス原料とプラスチックを中心としたバイオベース化学品の例をまとめた。現在主力となっているバイオマス原料は、サトウキビ、大豆、トウモロコシなどで、これらは食料との競合が予想される。一方、バイオディーゼルを生産する際に副生するグリセリンや、食用ではないトウゴマから取れるひまし油もバイオマス原料として用いられている。先述の廃糖蜜など、非可食、未利用資源も利用が進められている。

また、図8では、世界の主な化学メーカーから発表されている生産量が大きな製品について示したが、日本の化学メーカーや米国のベンチャー企業においてもバイオベースプラスチックの開発は行われている。

三菱化学では、7大育成事業の一つとして「サステナブルリソース」を掲げており、「枯渇しない資源を用いたプラスチック」や「自然環境中で分解して消滅するプラスチック」を開発している。すでに上市されている生分解性プラスチック「GS Pla」（ポリブチレンサクシネート（PBS））は、現在、原料として石油から作られる化学品を使っているが、植物由来の化学品を原料に転換する計画を進めている。また、光学特性に優れ、耐光性や表面硬度などの高い、植物由来のポリカーボネートも開発中であり09年には量産を検討するためのプラントを建設している。

三井化学は、08年から始まった4ヵ年の中期経営計画において、「非化石原料の活用技

術の開発」として、「植物由来ポリウレタンの開発」と「非可食資源由来のバイオオレフィン類の開発」をあげている。ポリウレタンはポリオールとイソシアネートを反応させて作られるプラスチックであるが、同社では、ポリオールをひまし油由来の原料に置き換えたものを開発しており、自動車用シートのクッションに採用されている。また、バイオオレフィン類の開発においては、植物の非可食部に多く含まれるセルロースなどからプロピレンをつくりポリプロピレンを製造しようとしている。この「非化石原料の活用技術の開発」では、「三井化学バイオコンソーシアム」を立ち上げ、神戸大学などの大学や研究機関、企業と産学共同で複数の研究開発プロジェクトを進めている。

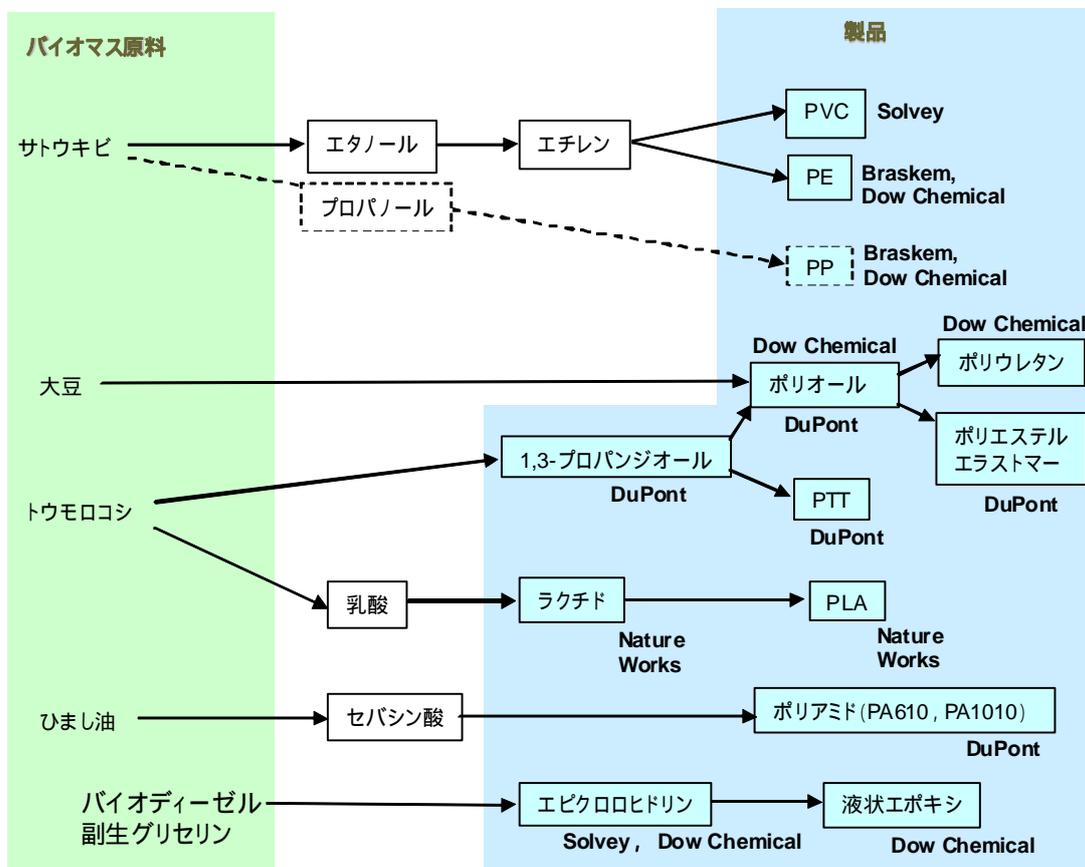


図8 バイオマス原料と製品例

米国のベンチャー企業、Rennoviaは、化学触媒を用いてコーンシロップなどから得られるグルコースからアジピン酸を製造する研究開発を行っている。アジピン酸は、エンジニアリングプラスチックの一つであるポリアミドの原料となる。現在は石油から得られるシクロヘキサンなどを原料に製造されているが、原油価格が1バレルあたり60ドル

以上であれば、同社の製造方法は従来のシクロヘキサン法のコストを下回ると発表しており、2013年～2014年には年産14万～23万トン規模で商業生産を行うことを目指している。また同社は、2009年1,200万ドルものベンチャー資金を集めている。

同じく米国のベンチャー企業、Verdezineもアジピン酸の製造方法を検討している。同社の方法は、発酵による糖からのアジピン酸の製造である。現在のシクロヘキサン法と比べ、製造プロセスを少なくすることができるので、長期的に見るとこの発酵法プロセスは従来法と比べ20～30%のコストメリットがあるという。

4 . バイオベースプラスチックの市場拡大における課題

(1) 食料との競合：非可食、未利用資源利用への期待

現在、バイオベースプラスチックの原料の主力となっているのは、デンプンや糖が得られるトウモロコシやイモ類、サトウキビなどであり、バイオマスを原料としたプラスチックの増産が進めば、食料への影響が懸念される。一方で、バイオディーゼルを生産する際に副生するグリセリンや、食用ではないトウゴマから取れるひまし油、廃糖蜜など、非可食、未利用な資源も利用されている。食料と競合するバイオマス資源も、将来的には、このような非可食、未利用資源への転換が期待されている。

Nature Worksでは、現時点ではトウモロコシをPLAの原料として用いているが、2013年から2014年に稼働開始を計画している2番目のプラントでは、キャッサバなどイモ類や他の植物も原料の候補としており、さらに将来的には、非可食のセルロースを原料とするための研究を進めている。

デンプンは種子や根などに栄養分として蓄えられている成分であり、トウモロコシの可食部では乾燥重量の60～80%、小麦では60～70%含まれている。しかし、人間の食料とはならない茎や葉の部分、わらやスイッチグラスなどの草本系バイオマスや、針葉樹や広葉樹などの木質系バイオマスにはほとんど含まれない。非可食の草本系や木質系のバイオマスの主な成分は、セルロース、ヘミセルロース、リグニンのリグノセルロースである(表1)。

表1 リグノセルロース

成分	構成単位	分解の特徴	木質系バイオマスにおける含有量 (木種により異なる)
セルロース	グルコース(6炭糖)	デンプンと比べ、糖化しにくい。	50%前後
ヘミセルロース	キシロース(5炭糖)、グルコース(6炭糖)など、植物の種類によって異なる。	5炭糖、あるいは5炭糖と6炭糖の混合物になる。	針葉樹：20% 広葉樹：30%
リグニン	フェノール性化合物		20～30%

Nature WorksによるP L Aの原料をセルロースにする転換する取り組みや、セルロースからバイオエタノールを製造する開発をはじめ、これらの成分を原料として化学品やプラスチックを製造する検討は、食料との競合を解決する方法として注目されている。

(1) - 1 . セルロース

セルロースはデンプンと同じく、グルコースという6つの炭素を含む単糖(6単糖)が多数結合した多糖である。分解してグルコースにすれば、デンプンと同じグルコースが得られ、同じようにエタノールや乳酸にすることができる。しかし、セルロースをグルコースに分解することはデンプンと比較して難しく、分解して化学品やプラスチックの原料にするための研究開発が各国で行われているものの、2010年1月に、世界で初めて米国でセルロース系エタノール実証施設が開所し、商業的な規模での生産が見えてきたばかりである。

セルロースの分解が難しい点の一つは、セルロースがヘミセルロースやリグニンと強固に結びついており、簡単に分離して取り出すことができないことである。植物の細胞壁は、よく鉄筋コンクリートに例えられ、セルロースは鉄筋、ヘミセルロースがそれを結びつける針金、リグニンがコンクリートといわれる。セルロースを取り出すためには、コンクリートであるリグニンを壊さなくてはならない。従って、水蒸気による爆砕や、希硫酸・高温処理などの前処理を行わなくてはならず、多くのエネルギーが必要となる。

セルロースの分解が難しい点の二つ目は、効率よくグルコースへ分解することができないことである。セルロースを分解するためには、塩酸や硫酸などの強酸を用いたり、セルラーゼといわれる酵素や、触媒が用いられる。強酸を使用する場合は、設備を耐酸性にする必要があり、廃液の処理も課題になる。また強酸を用いた場合、分解が進みすぎてグルコースの収率が下がることもある。一方、酵素を用いる場合は、マイルドな条件下で分解が進みグルコースの収率は高いが、酸を使った場合と比べて分解に長い時間がかかる。また植物の種類や前処理条件によってセルロースの結晶性や構造に違いがあり、それらの分解のために複数の種類の酵素が大量に必要な場合もある。さらに現時点では、酵素の価格が高く、安価な酵素を作ることも重要な課題となっている。

(1) - 2 . ヘミセルロース

ヘミセルロースは、複数の糖類の混合物で、植物の種類によって、構成する糖の種類や枝分かれの様式が異なる。セルロースやデンプンはグルコースという6炭糖からなる多糖であるが、ヘミセルロースはグルコースやマンノースという6炭糖だけでなく、キシロースやアラビノースなど、5つの炭素を含む5炭糖からも構成される多糖である。デンプンからバイオエタノールを作る場合は、デンプンを酵素などの働きによりグルコースに分解し、続いてグルコースを酵母などの働きによりエタノールに転換させる。一方、ヘミセルロースを分解すると、グルコースなどの6炭糖とキシロースなどの5炭糖の混合物が得られる。6炭糖は酵母の働きによって容易にエタノールに変換されるが、通常の酵母では5炭糖をアルコールにすることができない。5炭糖と6炭糖の両方をエタノールに転換する酵母や細菌が、遺伝子組換えによって開発されている。

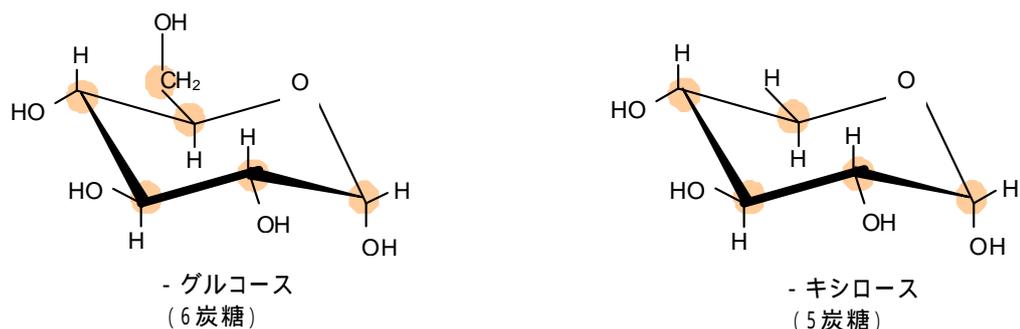


図9 6炭糖と5炭糖の例(グルコースとキシロースの構造)

は炭素Cの位置

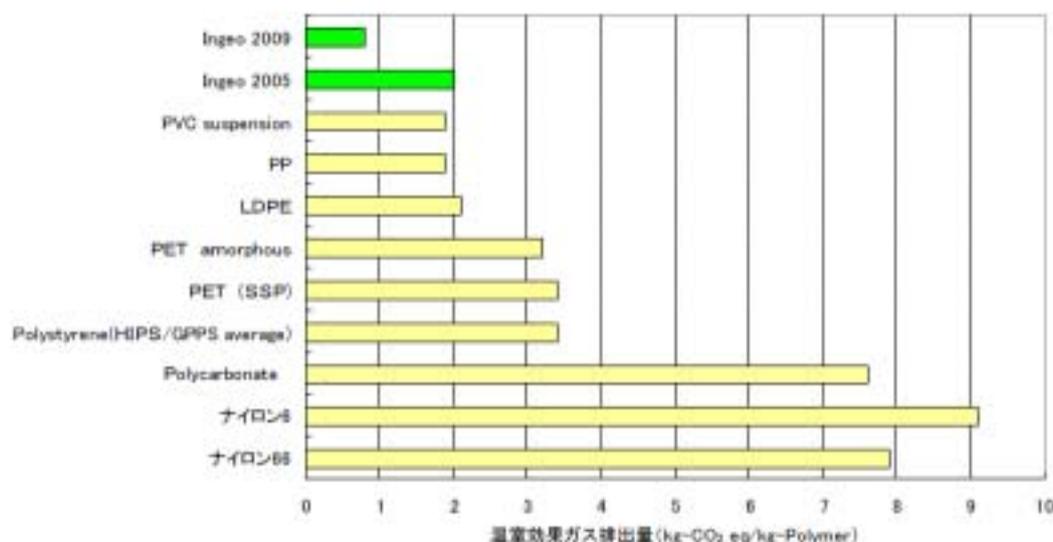
(1) - 3 . リグニン

リグニンは、植物の細胞壁に強度を持たせている成分であり、複雑な高分子のフェノール性化合物である。パルプの製造工程で排出される黒液にも多く含まれる。これまで、主に燃焼してエネルギーを回収することが行われているが、フェノールの骨格を活かして化学変換し接着剤として利用したり、分解して化学品を作ろうとする開発も行われている。

(2) ライフサイクルを通じた環境負荷が低いこと

バイオベースプラスチックが役目を終えて焼却処分される際に排出するCO₂は、原料の植物が成長時に大気中から吸収したCO₂であり、大気中のCO₂を増加させることも減少させることもない、カーボンニュートラルな材料であると考えられている。しかし、植物を集め、原料となる物質を作り、プラスチックを製造するさまざまなプロセスにおいて、機械や製造設備を動かすエネルギーが必要であり、そのために化石燃料を使えば、そこでCO₂を排出することになる。また、プロセスによっては廃棄物の処理の問題もあり、多くの廃棄物ができれば環境への負荷が大きくなる場合もある。

Nature Worksの評価によれば、同社のポリ乳酸を製造するために、原料のトウモロコシを育てるところから工場出荷までに排出する温室効果ガスは、石油からポリスチレンやPETなどを製造する際に排出する量と比べて半分以下である(図10)。



出典: Industrial Biotechnology, 3(1) p58-81 (2007)および NatureWorks LLC 2009年発表 "Comparing Environmental Footprint: Non-renewable Energy Requirements, from cradle to polymer factory gate" (<http://www.natureworksllc.com>)

図10 ポリマー製造に伴う温室効果ガス排出量比較

特許庁 平成20年度特許出願技術動向調査報告書バイオベースポリマー関連技術(要約版)³⁾
<http://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/biobase.pdf>より

もちろん、単に原料を植物にただけでなく、プロセスの技術革新によってエネルギー消費の削減も行うなどした結果である。今後も新しい原料に転換したり、プロセスの最適化を行ったり、風力発電やバイオマス発電などの再生可能なエネルギーを利用したり

することで、さらにライフサイクルを通して環境に負荷が少ないプラスチックとする開発が進められている。

5 . 今後のバイオベースプラスチックの生産量予測

米国では、バイオベース製品とバイオエネルギーの研究開発を促進させるために、農務省(USDA)とエネルギー省(DOE)により「バイオマス研究開発イニシアティブ」が共催されている。これは、2000年6月に成立した「2000年バイオマス研究開発法(Biomass Research and Development Act of 2000)」に基づき設立されたプログラムで、補助金の助成や政府機関による民間企業への委託契約、その他の財政支援を通じて、バイオマスの研究開発・実証を促進することを目的としている。2007年10月、イニシアティブを構成する機関の一つである「バイオマス研究開発技術諮問委員会」は、今後の研究開発目標や達成のための戦略を示す「米国のバイオエネルギー及びバイオベース製品ビジョン(The Vision for Bioenergy and Biobased Products in the United States⁴)」を公表した。これは02年に策定されたものを2006年11月に改訂したものである。この報告書では、2004年のバイオベース製品生産量176億ポンド(約800万トン)を、2010年には1.5倍、2020年には2倍、2030年には3倍程度に拡大していくことを目標として掲げている(表2)。

表2 米国におけるバイオベース製品の見通し目標

Vision Goals

	Units	2000	2004	2010	2015	2020	2030
Biofuels	Market share (%)	0.7	1.2	4.0	6.0	10.0	20.0
	Consumption (billion gasoline-equivalent gallons)	1.1	2.1	8.0	12.9	22.7	51.0
Biopower	Market share (%)	3.0	3.0	4.0	5.5	7.0	7.0
	Consumption (quadrillion Btu)	2.0	2.1	3.1	3.2	3.4	3.8
Bioproducts	Production (billion lbs)	12.8	17.6	23.7	26.4	35.6	55.3

出所：「The Vision for Bioenergy and Biobased Products in the United States」
http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/final_2006_vision.pdf

これとは別に、2008年2月に、「2005年エネルギー法(The Energy Policy Act of 2005)」に基づき、米農務省が2025年までのバイオベース化学品の金額ベースの世界市場の予測レポートを発行している(表3)⁵⁾。2005年の212億ドルから2010年にはバイオベース化学品の市場は1,320~1,830億ドル、2025年には4,830~6,140億ドルに拡大するとしている。

表3 バイオベース化学品の世界市場予測

10億米ドル

分野	2005年		2010年		2025年	
	計	バイオベース 化学品	計	バイオベース 化学品	計	バイオベース 化学品
汎用品	475	0.9	550	5~11	857	50~86
スペシャリティ	375	5	435	87~110	679	300~340
ファイン	100	15	125	25~32	195	88~98
ポリマー	250	0.3	290	15~30	452	45~90
合計	1200	21.2	1400	132~183	2183	483~614

出所：USDA U.S. Biobased Products:Market Potential and Projection Through 2025 (2008.2)
注) 医薬品は除く

バイオベースプラスチックの生産量予測について、欧州バイオプラスチック協会と欧州多糖研究ネットワーク(E P N O E)の委託のもと、オランダのユトレヒト大学の研究者がまとめた報告書「Product overview and market projection of emerging bio-based plastics.(PRO-BIP 2009)¹⁾」が2009年6月に出されている。この報告書によると、2007年末までに世界の新規バイオベースプラスチックの生産量は36万トンで、これは石油由来プラスチックの生産量と比べると1%にも満たない。しかし、2003年は10万トン不足であったことを考えれば市場は急成長している。また、企業へのインタビューをもとに、合成繊維も含めたプラスチックにおいて、最大240百万トンが、「技術的には」バイオベースプラスチックで代替可能であるという数字を出している。2007年の合成繊維も含めたプラスチック総需要量の90%に相当する途方もない量である。しかしこれは、「技術的」な可能性であり、大きな可能性が示されたものの、生産コスト、資本などの経済的課題、スケールアップにおける技術的な課題、原料確保の問題、ニーズの強さなどを

考慮しておらず、短中期的に実現することは不可能である。

さらに、この報告書では、技術的課題、大量用途への適応可能性、価格競争力、原料の問題、を考慮し、ベースケース（BAU）、高成長ケース（HIGH）、低成長ケース（LOW）の三つのケースのシナリオを想定して、2020年のバイオベースプラスチック生産量を予測している（図11）。ベースケースでは、2020年の生産量は3百万トンと予測される。石油由来のプラスチック生産量と比較すると、バイオベースプラスチックの予測される生産量はまだ小さいものの、今後10年で3倍にも拡大すると見込まれている。

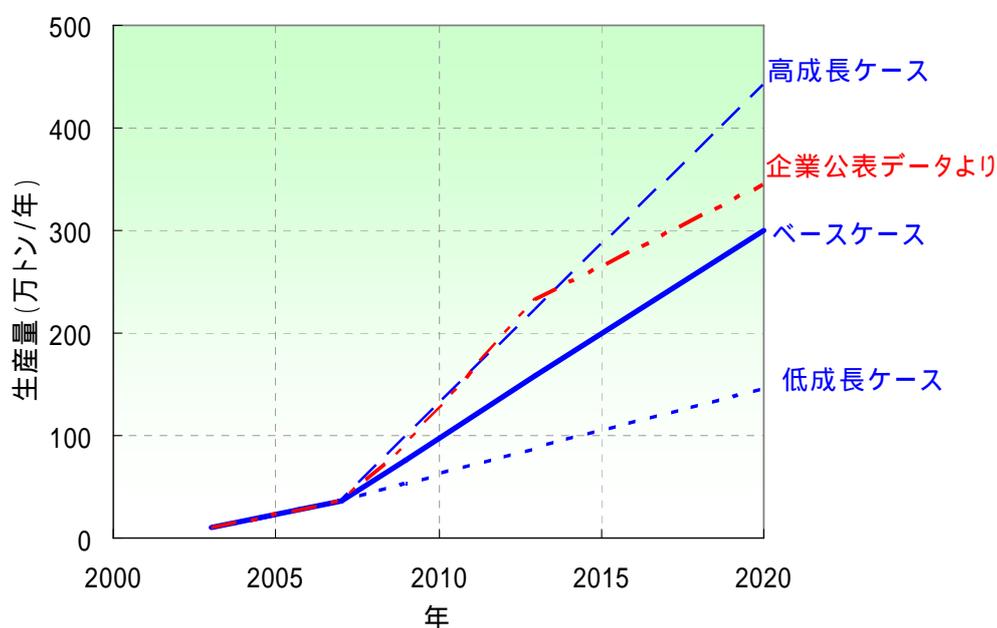


図11 2020年までのバイオベースプラスチック生産量予測 (PRO-BIP2009)

出所：Product overview and market projection of emerging bio-based plastics.

6 . おわりに

バイオベースプラスチックの生産量は年々増加しており、実用化が進んでいるポリ乳酸（PLA）やポリトリメチレンテレフタレート（PTT）の増産計画だけでなく、ポリエチレンなどこれまで石油から作られていた汎用プラスチックも植物から商業的規模で製造する計画も発表されている。現在はトウモロコシやサトウキビなど植物の可食部から得られるデンプンや糖を原料としているが、食料とは競合しない非可食のセルロースなどの成分を原料にする検討が精力的に進められている。しかし、実用化にはまだ解決しなくてはならない課題は多い。

原料が植物由来であれば、単純に「環境にやさしい」、「CO₂排出量が削減できる」のではなく、原料から製造するプロセス、廃棄まで含めたライフサイクル全体を通じた評価を考えなくてはならない。さらには、植物が大気中のCO₂を固定化しそれをプラスチックの形にしたのであるから、すぐに焼却処分をしてCO₂を大気中に戻すのではなく、再利用したりリサイクルも行いながら大事に使用するという考え方も必要ではないだろうか。

石油は分留によって、ガソリンやナフサだけでなく、軽油や重油にも分けられ、車を動かす燃料、火力発電、化学品の原料など、いろいろな用途に余すことなく用いられている。バイオマス資源も、デンプンやセルロース、リグニン、オイルなど様々な成分を含んでおり、特定の成分のみを利用するのではなく、いかに全体として活用していくかも重要である。またそれはコストダウンにもつながることである。

バイオベースプラスチックの市場がどれだけ拡大していくのか、CO₂排出量削減へのニーズが今後どれだけ高まっていくか、原油価格がどの程度の水準で推移するのか、技術的課題の解決がどれだけ速さで進むか、市場拡大に影響を与える要因は多い。今後もその動向が注目される。

引用文献

- 1) Li Shen, Juliane Haufe, Martin K.Patel(2009) Product overview and market projection of emerging bio-based plastics(PRO-BIP2009) .
http://www.european-bioplastics.org/media/files/docs/en-pub/PROBIP2009_Final_June_2009.pdf
- 2) N E D O webページ、バイオマスエネルギー先導技術研究開発
http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/pamphlets/08_1shinene/biomass
- 3) 特許庁 平成20年度特許出願技術動向調査報告書バイオベースポリマー関連技術 (要約版) <http://www.jpo.go.jp/shiryuu/pdf/gidou-houkoku/biobase.pdf>
- 4) バイオマス研究開発イニシアティブ「The Vision for Bioenergy and Biobased Products in the United States」 米国エネルギー省 webページ
http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/final_2006_vision.pdf
- 5) 米国農務省 U.S. Biobased Products:Market Potential and Projection Through 2025 (2008.2)
<http://www.usda.gov/oce/reports/energy/BiobasedReport2008.pdf>

参考資料

- 1 . 各社webページ
 - ・ Nature Works LLC <http://www.natureworksllc.com/>
 - ・ Braskem http://www.braskem.com.br/site/portal_braskem/en/home/home.aspx
 - ・ Dow <http://www.dow.com/>
 - ・ DuPont Tate & Lyle BioProducts <http://www.duponttateandlyle.com/>
 - ・ 帝人 <http://www.teijin.co.jp/>
 - ・ Purac <http://www.purac.com/>
 - ・ Solvay <http://www.solvay.com/>
 - ・ (株)三菱ケミカルホールディングス <http://www.mitsubishichem-hd.co.jp/>
 - ・ 三井化学(株) <http://jp.mitsuichem.com/>

・ Rennovia <http://www.rennovia.com/>

・ Verdezyne <http://www.verdezyne.com/Verdezyne/index.cfm>

2 (財)地球環境産業技術研究機構 編(2008) 図解バイオリファイナリー最前線 工業調査会

3 . 日本バイオプラスチック協会 編(2008) バイオプラスチック材料のすべて 日刊工業新聞社