

バイオマス化学

“「石油化学」から「天然資源化学」へ”続編

バイオマス化学としてバイオ燃料、バイオ化学
品（モノマーなど）、バイオプラスチックに焦点
を当て、最近の技術進歩と工業化状況をまとめ
た。再生可能資源を最大限に活用すべく、発酵技
術はもとより従来の石油化学技術を動員し、統合
的技術開発が行われている。トピックスはセル
ロース系バイオエタノール、バイオコハク酸、バ
イオ PET の工業化などである。

2 0 1 4 年 9 月



株式会社 旭リサーチセンター

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

まとめ

- ◆ナフサを原料とする「石油化学」から、世界は石油、天然ガス、石炭、バイオマスなどの幅広い天然資源を統合的、融合的に利用する「天然資源化学」の時代になった。
- ◆本レポートは、再生可能資源からつくられるバイオ燃料、バイオ化学品（モノマーなど）、バイオプラスチックに焦点を当てて最近の動向をまとめた。
- ◆米国とブラジルは、トウモロコシやサトウキビを原料にバイオエタノールを大規模に生産し、それをガソリンにブレンドしている。一方、非食料のセルロースを原料とするバイオエタノールの生産は大幅に遅れており、本技術の難しさを示していたが、ようやく、2013-14年に本格的な工業プラントがイタリアと米国で稼働した。
- ◆バイオエタノールを脱水してバイオエチレンをつくり、これを重合してバイオポリエチレンをつくるようになった。発酵によるコハク酸の製造が、米国、カナダ、イタリア、スペインの4ヵ国で始まる。また、米国ベンチャーが開発した独自の微生物を利用した1,4-ブタンジオールの発酵生産が近々開始される。その他、バイオリファイナリーの構築をめざして、各種バイオ化学品の開発が盛んに行われている。炭素数2から10（C2-C10）のバイオ化学品24種について、その開発と工業化の状況をまとめた。
- ◆バイオプラスチックは、生分解性（Biodegradable）を特徴とする第一世代のPHA、ポリ乳酸、ポリブチレンサクシネートに加え、再生可能資源からつくられていることを特徴とする第二世代のバイオポリエチレンやバイオPETが登場した。生分解性を必要とする用途は限られることから、将来は第二世代が多くなり、主流になるものと予想される。Coca-Colaなど消費者ブランド企業が、バイオPET製のボトルや容器を積極的に採用している。
- ◆バイオ固有のビルディングブロック（骨格）を含む新規ポリマーとして、ポリエチレンフラノエート（PEF）が注目される。これは100%バイオベースで、ガスバリア性、強度がPETよりも優れている。またイソソルバイド骨格を導入したポリカーボネートが工業化された。これは従来のポリカーボネートより表面硬度が高いことが特徴である。
- ◆再生可能資源を最大限活用すべく、発酵技術はもとより従来の石油化学技術が動員され、それらを組み合わせた統合的技術体系が構築されつつある。

目 次

はじめに	1
1 「石油化学」から「天然資源化学」へ	2
1.1 石油化学	2
1.2 天然ガス化学	2
1.3 石炭化学	2
1.4 バイオマス化学	2
1.5 エネルギー産業と化学工業	3
2 バイオマス化学の特徴と課題	4
3 バイオ燃料——バイオエタノールとバイオディーゼル	4
3.1 バイオエタノール	7
(1) バイオ燃料としてのバイオエタノール	7
(2) 米国の再生可能燃料基準と年次別のバイオ燃料義務量	10
3.2 セルロース系バイオマスからの製造（可食性原料から非可食性原料へ）	13
(1) 背景	13
(2) セルロース系バイオ燃料	15
(3) セルロース系バイオエタノールの工業化	15
(4) イタリアの Beta Renewables の Proesa™ 技術	18
(5) セルロース系バイオエタノール生産プラントの売上高推定	19
3.3 バイオディーゼル	20
4 バイオ化学品とバイオプラスチックのつくり方と分類	21
5 バイオ化学品	22
5.1 伝統的発酵プロセス	22
5.2 合成プロセスよりすぐれるバイオプロセス（発酵プロセス）の例	23
5.3 バイオプロセス（発酵プロセス）のターゲット化学品	23
5.4 バイオ化学品の開発と工業化	25

(1)C2 化合物 (表 11)	26
(2)C3 化合物 (表 11)	26
(3)C4 化合物 (表 11)	27
(4)C4 コハク酸 (表 12)	30
(5)C4 1,4-ブタンジオール (表 12)	32
(6)C5 化合物 (表 13)	33
(7)C6 化合物 (表 13)	33
(8)C8 p-キシレン (表 13)	35
(9)C10 セバシン酸 (表 13)	36
5.5 ポリマーのビルディングブロックとしてのバイオ化学品	38
(1)重縮合系ポリマー	38
(2)ビニル重合	38
6 バイオプラスチック	39
6.1 天然素材と合成ポリマー (図 14)	39
6.2 紙と再生セルロース	40
6.3 第一世代のバイオプラスチック——生分解性プラスチック	41
(1)PHA (ポリヒドロキシアルカン酸)	41
(2)ポリ乳酸 (PLA)	41
(3)ポリブチレンサクシネート (PBS)	42
(4)ポリグリコール酸	42
6.4 第二世代のバイオプラスチック——ドロップ イン プロダクト	42
6.5 新規なビルディングブロックを導入したバイオプラスチック	44
(1)PEF (ポリエチレンフラノエート)	44
(2)イソソルバイト骨格をもつポリカーボネート	46
6.6 バイオプラスチックの市場と今後の予測	48
おわりに	50
引用・参考文献	51

はじめに

本リポートはARCリポート（RS-970）：“「石油化学」から「天然資源化学」へ”¹⁾の続編である。前報では、日本はナフサを原料とする「石油化学」一辺倒であるが、世界は「天然ガス化学」、「石炭化学」、「バイオマス化学」に拡大し、天然資源を統合的、融合的に活用する「天然資源化学」の時代に入ったことを述べた。特にシェールガス革命と「天然ガス化学」、および中国の「現代石炭化学」のインパクトにポイントを置いた。

また前報では、シェールガス革命による石油化学品のコストへの影響を解析した。低価格エチレンによるエチレン誘導品のコストダウンを推定し、反面、不足気味となり価格上昇が予想されるブタジエンや芳香族化合物（BTX）とそれらの誘導品のコストアップを推定した。また低価格の天然ガス（メタン）を原料とするメタノールとその誘導品のコストダウンを推定した。

本リポートでは、バイオマス化学、特にバイオ燃料、バイオマス化学品（モノマーなど）、バイオプラスチックに焦点を当ててまとめた。バイオベースの燃料、化学品、プラスチックが、従来の石油製品・石油化学品とコスト的に競合しうるかどうかが重要なポイントである。

再生可能な資源であるバイオマスを有効に活用すべく、世界的にバイオマス化学の研究開発と工業化が活発に進められてきた。米国とブラジルのバイオエタノールの大規模生産、ヨーロッパのバイオディーゼルの生産拡大、セルロースを原料とする第二世代バイオエタノールの開発と工業化、バイオコハク酸やバイオブタンジオールなどのバイオ化学品の工業化、バイオポリエチレンやバイオポリエステル（バイオPET）の登場など、注目されるいくつかの開発成果がある。しかし、当初考えていたよりもその研究開発スピードは遅く、工業化例は限られている。不純物の多い固体のバイオマスを原料とすることをはじめとして、工業化する上では多くの技術課題をクリアする必要がある。

しかし、従来の石油依存の「オイルリファイナリー」を脱却すべく、米国やIEAはバイオマスからバイオベースの燃料、化学品、プラスチックをつくる「バイオリファイナリー」の構築を継続的に進めており^{11,12)}、徐々に技術開発の収穫期に入っていくものと考えられる。

1 「石油化学」から「天然資源化学」へ

石油を原料とする「石油化学」から、世界は石油、天然ガス、石炭、バイオマスなどの幅広い天然資源を統合的、融合的に利用する「天然資源化学」の時代になった。

1.1 石油化学

日本の石油化学は石油成分のナフサを水蒸気分解（ナフサ・クラッキング）して、エチレン、プロピレン、C4留分、分解ガソリンを製造している。西ヨーロッパやアジアもナフサ・クラッキングが中心である。

1.2 天然ガス化学

米国は安価なシェールガス由来の軽質原料（NGL）の水蒸気分解（エタン・クラッキング）によりエチレンを製造するクラッカーの比率が増加している。中東は、以前より石油随伴ガスを活用したエタンクラッキングの比率が高い。

1.3 石炭化学

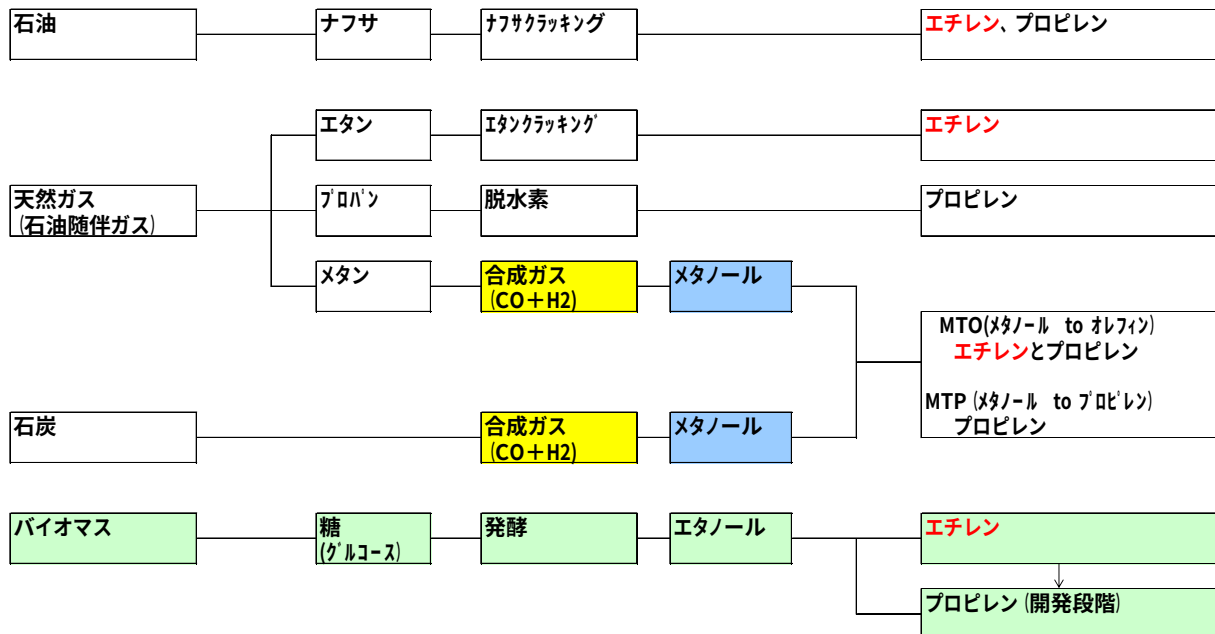
中国はナフサ・クラッキングに加えて、石炭由来のメタノールから、エチレンを合成するMTOプロセス（methanol to olefin）とメタノールからエチレンとプロピレンを併産するMTPプロセス（methanol to propylene）の大規模工業化を進めている。

1.4 バイオマス化学

バイオマスからつくられたバイオエタノールを脱水してエチレンをつくり、そのエチレンからポリエチレンを製造する技術が、ブラジルのBraskemによって事業化された。これにより、バイオマスからもエチレンがえられる時代になった。

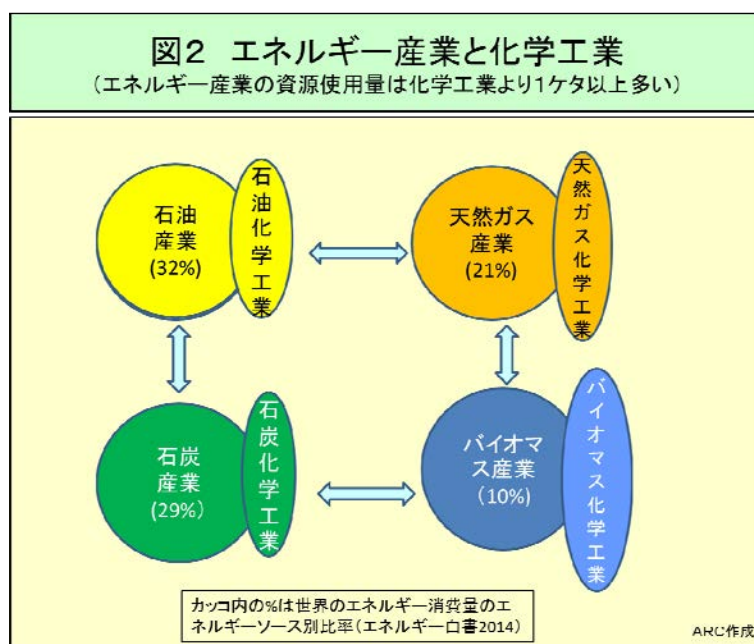
以上のように、代表的基礎原料であるエチレンとプロピレンを工業的に石油、天然ガス、石炭、バイオマスのいずれからでもつくることのできる新時代になった（図1）。

図1 石油化学、天然ガス化学、石炭化学、バイオマス化学による
エチレン、プロピレンの製造ルート（ARC作成）



1.5 エネルギー産業と化学工業

図2に示すように、これら石油化学、天然ガス化学、石炭化学、バイオマス化学には、それぞれの関連した巨大なエネルギー産業が存在している。各エネルギー産業の資源使用量は、それぞれの化学の資源使用量の10倍以上であり、エネルギー産業の動向は化学業界にとって影響が大きい。



2 バイオマス化学の特徴と課題

バイオマス化学の特徴としては、①再生可能資源であるバイオマスを原料とすること、②酵素、酵母、微生物などを利用するバイオプロセスを使うこと、③プロダクトがバイオデグラダブル（生分解性）の三つがある。本リポートでは①～③のいずれかに関係する技術や製品をバイオマス化学として取り扱う。

バイオマス化学の課題は、①バイオマス原料を安価に安定的に入手すること、できれば非可食性植物を使うこと、②昔から発酵法でつくられるエタノール、酢酸、乳酸などを除くと、発酵効率を上げるのが難しい。発酵効率の高い、安価な酵素、酵母、微生物を開発すること、③非可食性のセルロース系原料を使うバイオ化学品の製造には面倒な固体の取り扱いと、発生する多量の不要物や排水の処理が必要である。これらを解決してコストの安い工業的連続プロセスを開発すること、④発酵工程で原料の糖の一部が分解して二酸化炭素を発生することや、微生物の活性維持や増殖により糖が消費されるなど収率的に不利な点を何らかの形でコスト的に補うことなどがある。

3 バイオ燃料——バイオエタノールとバイオディーゼル

再生可能なバイオマスからバイオエタノールやバイオディーゼルの製造し、枯渇燃料の石油（ガソリン、ディーゼル油（軽油））を代替する政策が世界的に進められている。特に、バイオエタノールは米国、ブラジルを中心に、バイオディーゼルはヨーロッパを中心に進められている。バイオエタノールはガソリンとブレンドし（代表的には米国の10%ブレンド（E-10））、バイオディーゼルはディーゼル油にブレンドして使用されている。

図3と表3に示すように、世界のバイオ燃料は2003年の499千バレル/日（76億ガロン/年）から2011年は1,897千バレル/日（290億ガロン/年）と約3.8倍になった。

2011年の地域別生産量は、米国が51%、ブラジルが23%、ヨーロッパが13%、アジア・オセアニアが6%、その他が7%となっており米国とブラジルの比率が圧倒的に高

い。アジアの比率はまだ小さいが、今後増加していくものと予想される。

バイオ燃料の内訳は、バイオエタノールが79%で、バイオディーゼルが21%である。

図4と表4に示すように、バイオエタノールは2003年の465千バレル/日（71億ガロン/年）から2011年には1,493千バレル/日（228億ガロン/年）と8年間で約3.2倍に増加した。2011年生産量の地域別内訳（表6）をみると、米国が66%、ブラジルが26%と両国で世界の92%を占めている。米国はトウモロコシ（コーン）、ブラジルはサトウキビといずれも食料を原料とする第一世代のバイオエタノールである。

米国は2007年に定めた再生可能燃料基準（§ 3.1(2)参照）に基づきほぼ計画通りにコーン原料のバイオエタノールの生産を拡大してきた。

図5と表5に示すように、バイオディーゼルは、2003年の34千バレル/日（5.2億ガロン/年）から2011年には404千バレル/日（61億ガロン/年）へと約12倍増加した。2011年生産量の地域別内訳（表7）をみると、ヨーロッパの比率が44%と特に高い。ヨーロッパはディーゼル車が主流になっているため、バイオディーゼルの増産に力を入れている。米国の比率は17%と少ない。2010年に米国でバイオディーゼルの補助金が打ち切られた時に、生産量が22千バレル/日まで急減したが、補助金が復活した2011年には63千バレル/日まで回復した（表5）。米国はバイオディーゼルの生産上限を10億ガロン/年（65千バレル/日）に設けている。なお、2013年でバイオディーゼルの補助金は終了した。

EUは輸送部門の再生可能エネルギー比率を2020年までに10%にすることを目標にしているが、現時点の再生可能エネルギー比率は5%である。食料由来のバイオ燃料に対する批判が多いことから、2014年にEUは食料由来バイオ燃料の比率を上限7%とすることに同意した。表7に示すように、ヨーロッパはアジアや中南米よりバイオディーゼルを輸入して、使用義務量を満たしている。

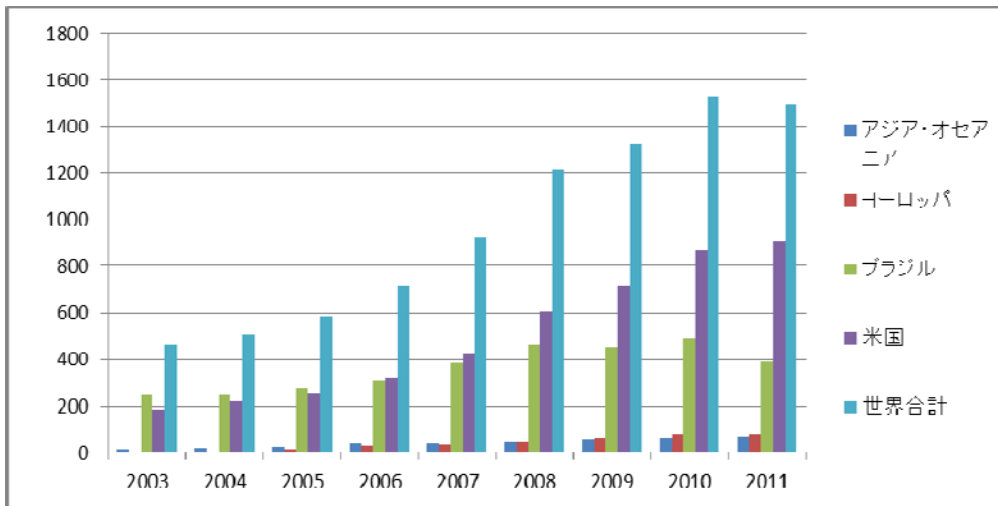
日本のバイオエタノール導入目標量は2012年が21万kl、2017年が50万klとなっているが、米国の909千バレル/日（5,200万kl）に比べるとはるかに少ない。

表1 単位換算

バレル	ガロン	リットル	ガソリン トン	アルコール トン
1	42	159		
	1	3.79		
	1,000,000	3,790,000	2,840	2,990
		1,000,000	750	790
	1,000百万	3,790,000kl	2,840,000	2,990,000
1千バレル/日	15,300,000 (ガロン/年)	58,000,000 (kl/年)	43,400 (トン/年)	45,700 (トン/年)

表2 燃料の性質比較²⁾

	密度 (g/cm ³)	発熱量 (kJ/g)	走行距離 比率
ガソリン	0.75 (0.73-0.76)	44	100
エタノール	0.79	27	70
ブタノール	0.81	33	88

図3 世界のバイオ燃料の生産推移（単位 千バレル/日）、出典 EIA³⁾表3 バイオ燃料合計生産量（単位 千バレル/日）、出典 EIA引用文献³⁾

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2011年比率
アジア・オセアニア	17	21	28	45	49	76	94	100	118	6%
ヨーロッパ	39	49	77	124	153	198	233	255	250	13%
ブラジル	249	252	276	307	395	486	477	527	438	23%
米国	184	223	260	334	457	650	747	890	971	51%
世界合計	499	554	656	840	1103	1477	1635	1865	1897	100%

注 世界合計には上記地域・国以外も含む

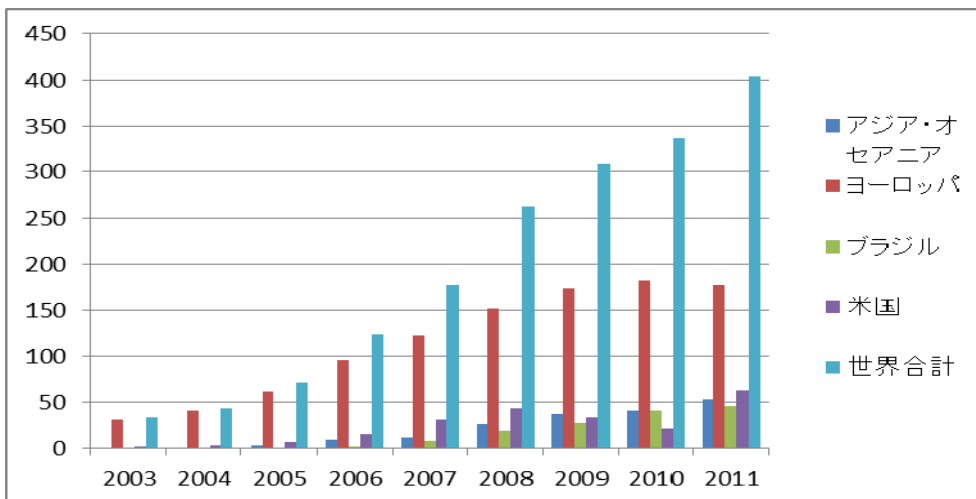
図4 世界のバイオエタノール燃料の生産推移（単位 千バレル/日）、出典 EIA³⁾

表4 バイオエタノール生産量（単位 千バレル/日）、出典 EIA引用文献³⁾

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2011年比率
アジア・オセアニア	17	21	26	36	38	48	55	59	65	4%
ヨーロッパ	7	8	15	27	31	47	59	72	73	5%
ブラジル	249	252	276	306	386	466	449	486	392	26%
米国	182	221	254	318	425	605	713	867	909	66%
世界合計	465	510	585	715	924	1215	1326	1527	1493	100%

注 世界合計には上記地域・国以外も含む

図5 世界のバイオディーゼルの生産推移（単位 千バレル/日）、出典 EIA³⁾

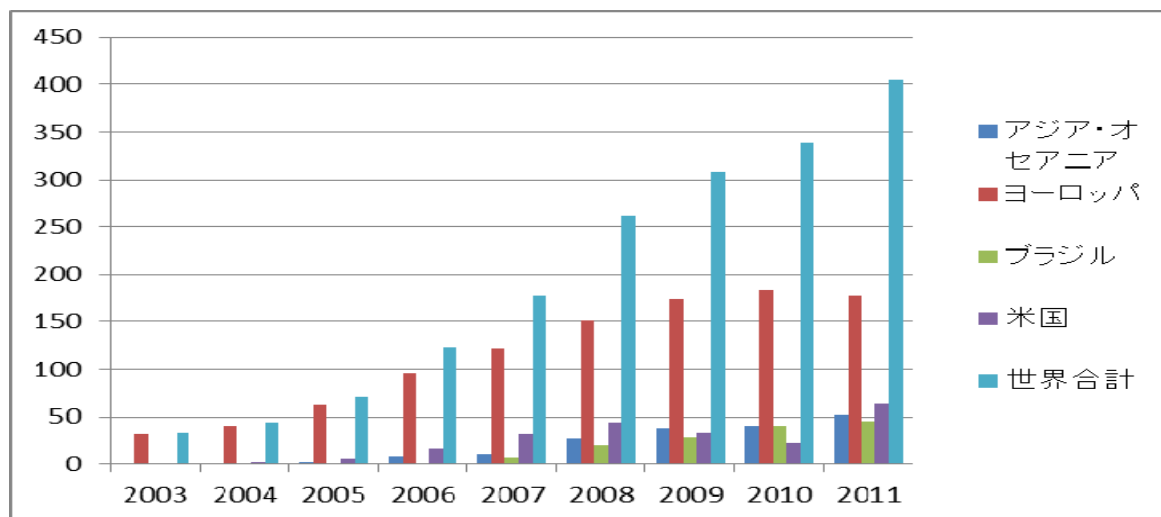


表5 バイオディーゼル生産量（単位 千バレル/年）、出典 EIA引用文献³⁾

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2011年比率
アジア・オセアニア	0	0	2	8	11	27	38	41	53	13%
ヨーロッパ	32	41	62	96	122	151	174	183	178	44%
ブラジル	0	0	0	1	7	20	28	41	46	11%
米国	1	2	6	16	32	44	34	22	63	16%
世界合計	34	44	71	124	178	262	309	338	404	100%

注 世界合計には上記地域・国以外も含む

表6 バイオエタノールの地域別生産量と消費量

	生産量	消費量
アジア・オセアニア	65	66
ヨーロッパ	73	104
中南米	415	350
北米	939	883
合計	1493	1407

出典 引用文献³⁾

表7 バイオディーゼルの地域生産量と消費量

	生産量	消費量
アジア・オセアニア	53	36
ヨーロッパ	178	240
中南米	103	73
北米	66	63
合計	403	414

出典 引用文献³⁾

3.1 バイオエタノール

(1) バイオ燃料としてのバイオエタノール

前述のように、米国とブラジルはバイオマスによるバイオエタノールの大規模な生

産を行っている。米国は税控除や補助金の特例を設けバイオエタノール製造を支援している。再生可能な資源を活用して、ガソリンの使用量を抑えることが最大の目的である。また、エタノールは酸素含有基材なのでガソリンのオクタン価を改良する効果がある。オクタン価向上のため使用されているベンゼンなどの芳香族成分は環境に悪いことから、ガソリン中の濃度を減らすことが義務づけられた（注）。これに代わるものとして、バイオエタノールの使用が有効である。

（注）米国では1991年の大気浄化法の強化により、ガソリン中のベンゼン含量を約3%から1%に減らすことが必要になった。また大気汚染レベルの高い9地域では、芳香族（トルエン、キシレンなど）含有量を36%から1995年まで26%に低下させなければならなくなった²⁾。

ガソリンのオクタン価を改良する酸素含有基材として、以前はMTBE（メチル-tert-ブチルエーテル：原料はイソブテンとメタノール）が使用されていた。しかし、MTBEは親水性がありガソリンスタンドなどで漏れると地下水を汚染する心配があり、米国などでは使用が禁止された（2004年にカリフォルニア州で最初に禁止された）。MTBEの生産は2002年の23百万トン（世界のガソリンの約2.4%）をピークに、それ以降急激に減少した。それに代わって同じ酸素含有基材のエタノールの使用が増加した²⁾。2011年のバイオエタノールの世界生産量は約68百万トン（うち米国は約39百万トン）と、MTBEの生産量を上回っている。EIA（U. S. Energy Information Administration：米国エネルギー情報局）の資料によれば、エタノールのガソリンブレンド率は、2003年の約2%から、2013年にはほぼ10%に達した（図6）。

エタノール10%ブレンドのガソリンはE-10とよばれ、米国の再生可能燃料基準（後述）の一つの目標であったが、これが実現したことになる。既に、E-10使用に対応する腐食対策（自動車やガソリンスタンドの仕様変更）は完了している。

図6 ガソリン消費量（単位 10億ガロン）とガソリン中のエタノール比率（%）⁴⁾

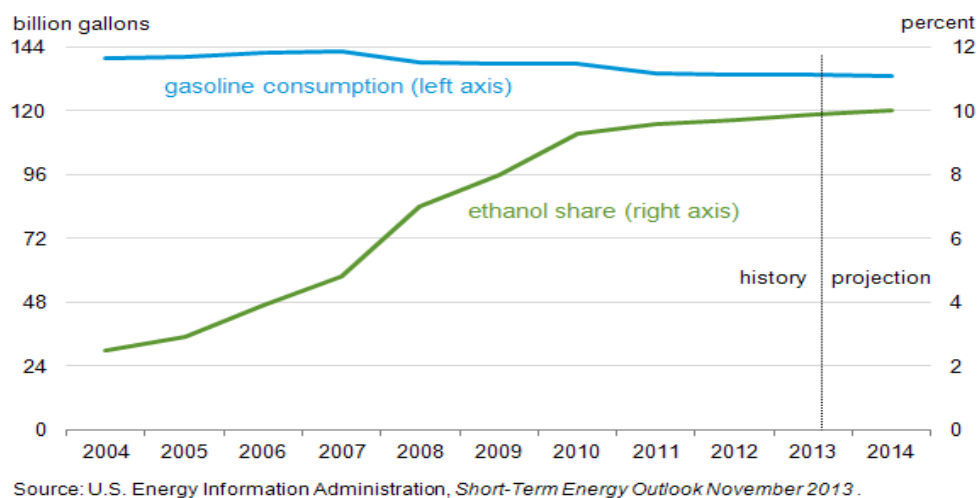
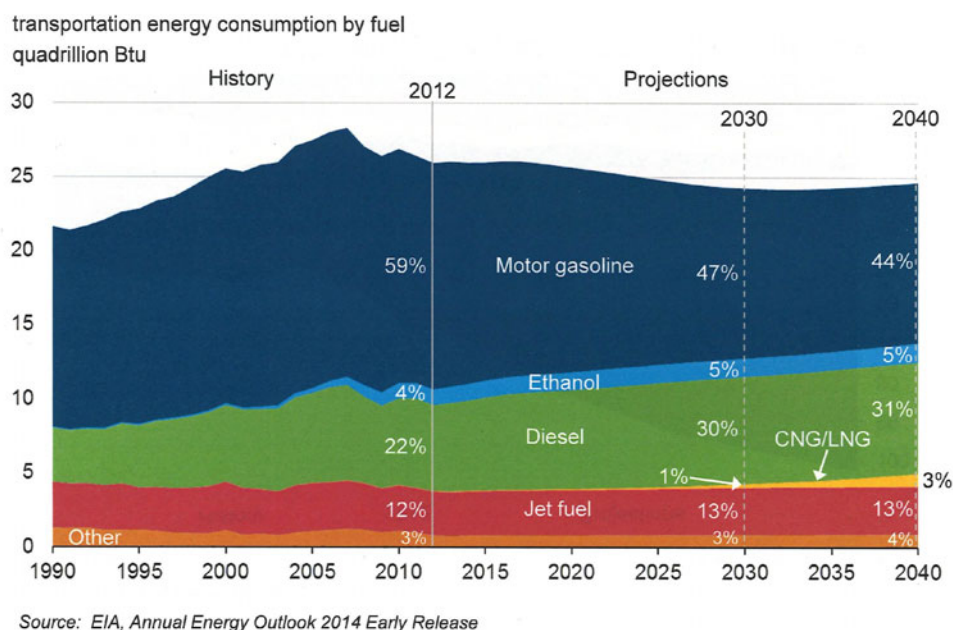


図7に、EIAが発表した輸送用燃料の燃料別予測を示す。これは予測であるが、一面で米国の政策を含むものである。2012年の自動車用燃料の比率（エネルギーベース）はガソリンが59%、エタノールが4%になっている。エネルギーベースではエタノールブレンド率は6.4%である。これを容量ベースに換算しなおすと（表2参照）、エタノールブレンド率は約9.5%となる。同様に容量ベースでは2030年は約14%、2040年は約15%と計算される。エタノールの消費量はほとんど変わらないにもかかわらず、ブレンド率が上がっているのはガソリンの消費量の絶対値が漸減しているためである。EIAは今後、燃費の改善と走行距離が短くなることによりガソリンの絶対消費量が減ると説明している。一方で、ディーゼルは2012年の22%から2040年の31%とかなり増加している。

このようにEIAの予測では、今後エタノールブレンド率が10%を超えて14-15%になる予想であるが、現在関係業界ではE-10の壁がささやかれている。E-10でエタノールのブレンド率は頭打ちになり、それ以上は伸び悩むという説である。E-10の壁を越えられないと、ガソリン使用量は図7の予測のように今後減少していくのでそれにしただがってバイオエタノールの使用量も減ることになり、アルコール業界への影響が大きい。

図7 米国における運輸部門の燃料別エネルギー需要推移と予測⁵⁾ (単位10¹⁵Btu)



(2) 米国の再生可能燃料基準と年次別のバイオ燃料義務量

米国は2007年に再生可能燃料基準2 (Renewable Fuel Standard 2 : 以下RFS2と略す) を定め、2008－22年の年次別のバイオ燃料義務量 (Renewable Volume Obligation : RVO) を表8のように定めた。バイオ燃料義務量 (RVO) の内訳は、コーンスターチ由来のエタノールと先進的バイオエネルギーからなっている。さらに、先進的バイオエネルギーはセルロース系バイオ燃料、バイオディーゼル、その他からなっている。コーンスターチ由来のエタノール (以下、コーンアルコール) については、これまでRFS2に沿った生産が行われてきた。一方、セルロース系については、2007年に決められた当初のRFS2と、EPA (米国環境保護庁) が毎年実態を考慮して決めるEPA実施義務量に大きな隔たりがある。表8のセルロース系欄の数字はEPA実施義務量で、カッコ内が当初のRFS2義務量である。RFS2に比べ、EPA実施義務量のはるかに少なく、RFS2がほとんど達成されていないことがわかる。たとえば、2013年は当初のRFS2義務量は1.0 (単位 10億ガロン) であったが、EPA実施義務量は0.006 (単位 10億ガロン) であり、達成率はわずか0.6%であった。なお、EPA実施義務量に達しない分についてはガソリン業界に課徴金が科せられる。2012年はこの課徴金を不服とする業界が裁判を

起こし、その結果政府が敗訴したことから、EPA実施義務量はゼロとなった。

表8 再生可能燃料基準（RFS2）によるバイオ燃料義務量、単位10億ガロン

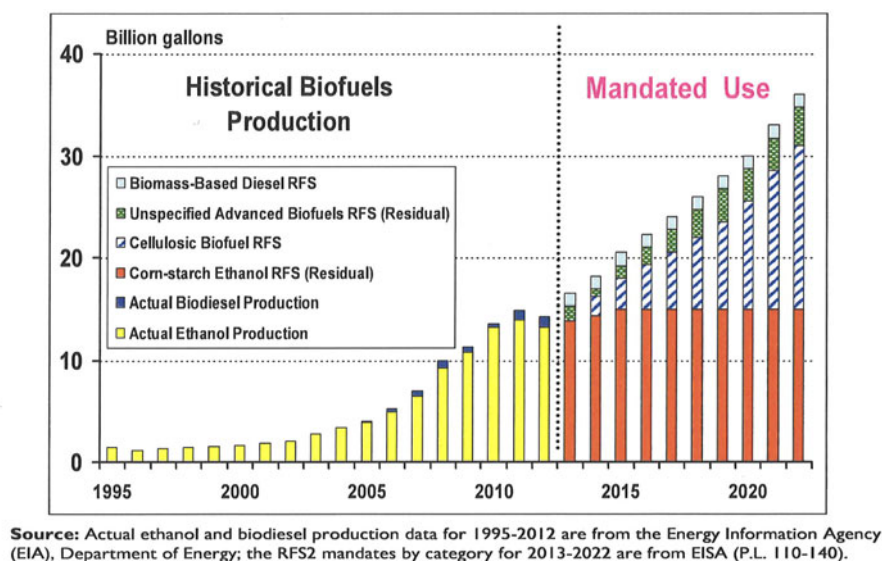
年	バイオ燃料 義務量合計 (A+B)	コーンスターチ 由来エタノール (A)	先進的バイオ 燃料小計 (B=C+D+E)	セルロース系 (C)	バイオディーゼル (D)	その他 (E)
2008	9	9	0	0	0	0
2009	11.1	10.5	0.6	0	0.5	0.1
2010	12.95	12	0.95	0.0065(0.1)	0.65	0.29
2011	13.95	12.6	1.35	0.006(0.25)	0.8	0.54
2012	15.2	13.2	2	0.000(0.50)	1	1
2013	16.55	13.8	2.75	0.006(1.00)	1.28(1.00)	1.46
2014	15.21 (18.15)	13.01 (14.4)	2.20 (3.75)	0.017 (1.75)	1.28(1.00)	0.9
2015	20.5	15	5.5	3	EPA指定/1.0以下	1.5
2018	26	15	11	7	同上	3
最終 2022	36	15	21	16	同上	4

2016,17,19-21は省略（図8を参照）

Source EISA (P.L.110-140)、section202（引用文献⁶⁾）

下記図8の左側は、2012年までのバイオ燃料全体の実際の生産量推移を示している。2003年以降、コーンアルコールの生産が堅調に増加していることがわかる。それに比べ、バイオディーゼルの絶対量と伸びは小さい。図8の右側は、再生可能燃料基準（RFS2）に基づく2013-22年の間の年次別義務量をグラフにしたものである。2013年以降のコーンアルコールの義務量はほぼ一定である。一方、セルロース系およびその他先進的バイオ燃料の義務量を急激に増やす計画である。最終年度の2022年はコーンアルコールが15（単位 10億ガロン）に対して、セルロース系バイオ燃料が16（単位 10億ガロン）となっており、セルロース系バイオ燃料がわずかながら上回っている。

図8 バイオ燃料生産と再生可能燃料基準2（RFS2）⁶⁾（単位 10億ガロン）



前述のようにEPAは再生可能燃料基準（RFS2）に基づき、供給可能量を考慮して毎年実施義務量を提示してきた。2014年はバイオ燃料総量を15.2（単位 10億ガロン）とするEPA実施義務量案を提示した⁷⁾。これは当初のRFS2による2014年のバイオ燃料総量18.2（単位 10億ガロン）より2.9（単位 10億ガロン）低いものであった。内訳をみるとコーンアルコールが14.4から13.0（単位 10億ガロン）に減少し、セルロース系エタノールが1.75から0.017（単位 10億ガロン）に減少している。これまでコーンアルコールについては、EPAはRFS2とほぼ同量を提案してきたが、それを下回る提案は今回が初めてである。バイオ燃料業界はEPA実施義務量がRFS2を下回ったことに強く反発するとともに、政府のエネルギー政策変更の兆しではないかと懸念している。シェール革命により石油や天然ガスの自給率が急回復していることが影響しているとの見方が出ている。

米国では、コーンの農業生産段階までさかのぼってバイオエタノール1kgをつくるのに投入したエネルギーと、1kgのバイオエタノールから回収できるエネルギーの大きさの比（EROEI：the energy returned on energy invested）が議論されている。いろいろな試算があるがコンセンサスのある数値は、米国のコーンアルコール（バイオエタノール）が1.3で、ブラジルのサトウキビからつくったバイオエタノールは8.0である²⁾。御園生 誠東大名誉教授の著書「新エネルギー幻想」（エネルギーフォーラム刊 2010年）によれば、その理由は、ブラジルでは燃料、肥料、電力をバイオマス資源や人畜の力で賄っているためである。一方、米国は大規模農場で大型農機具を使って機械化し、また化学品の肥料や農薬を使用することから投入エネルギーが大きくなる。農機具をつくるためのエネルギーやそれを使用するときのエネルギー、肥料や農薬を製造するのに必要なエネルギーなどバイオエタノールをつくるために投入されたすべてのエネルギーが算入される。

なお、一般にいわれるところの、サトウキビは糖でありコーン（デンプン）のように糖化工程が不要で、直接エタノール発酵ができプロセスがシンプルなためという理由は大きなものではない。

3.2 セルロース系バイオマスからの製造（可食性原料から非可食性原料へ）

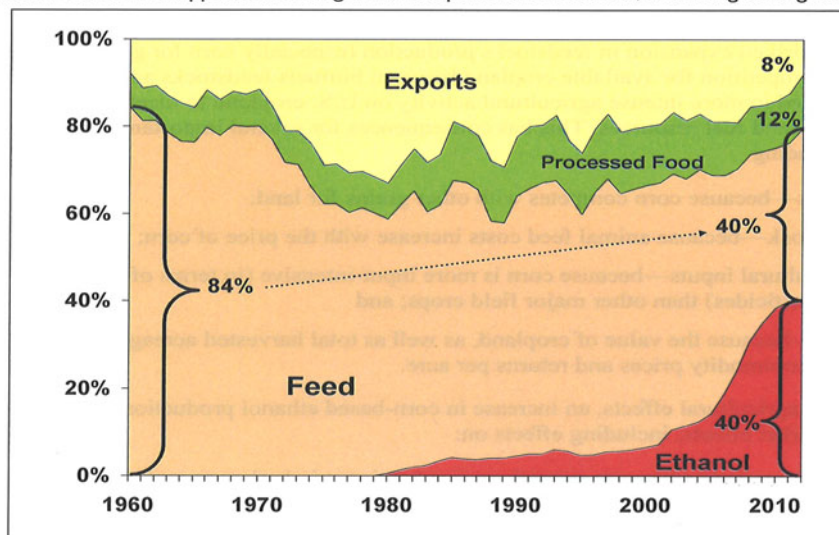
（1）背景

バイオエタノールの最大の課題は、原料をコーンやサトウキビのような食料資源から非可食性のセルロース系資源に転換することである。

米国のバイオエタノール製造用のコーン使用量は急増し、2011年にはコーン生産量の約40%がバイオエタノールの製造に使用されている（図9）。それ以外は飼料用40%、加工食品用12%、輸出8%である。バイオエタノール用が増えたため飼料用と輸出が大幅に減っている。

図9 米国生産コーンの用途別比率の年次変化⁶⁾

(annual U.S. corn disappearance categories, as a percent of total use, excluding ending stocks)



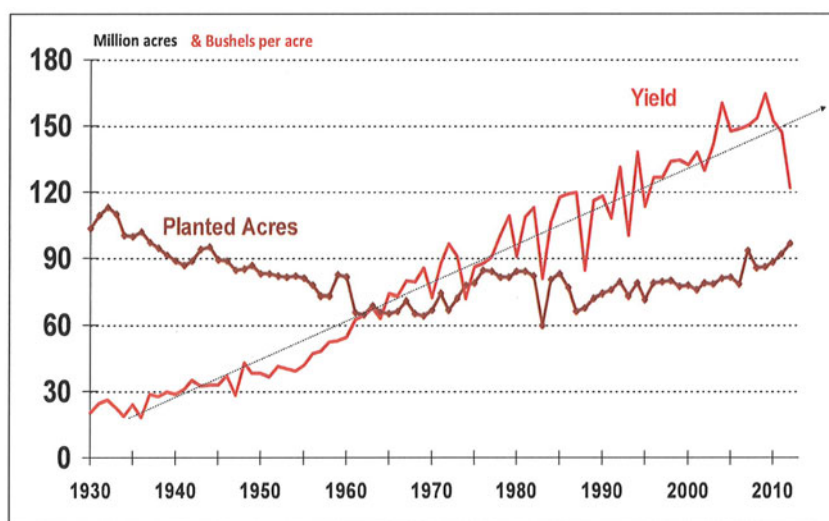
Source: USDA, Production, Supply, and Demand (PSD) database, February 8, 2013.

Note: Data do not account for use of ethanol by-products as animal feed; about 30% (by weight) of corn used for biofuels is left over from the production process and is useful as a relatively high-protein animal feed.

一方、図10に示すように米国のコーン作付面積当たりの収穫量は継続的に増加してきている。作付面積はここ数年を別にするとあまり変わっていないので、生産量が着実に増加していることになる。なお、ここ数年は作付面積が増えている。近年の収穫量の改善は、バイオ工学の進歩による干ばつやペストに対する耐性に優れた品種の開発によるものである。2009年に165ブッシェル/エーカーの新記録を出したが、その後3年間は悪天候などにより低下しており、2012年は122ブッシェル/エーカーと1995年以来の最低となった。ブッシェルは穀物の容量計量単位で1ブッシェルは35リットル、

コーンの場合は約25.4kgに当たる。

図10 米国のコーン農地面積と単位面積当たりの収穫量の年次推移⁶⁾

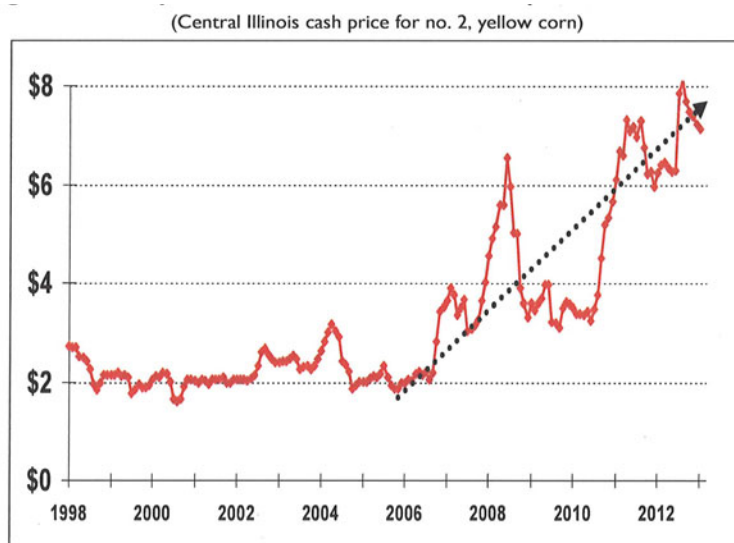


Source: USDA, PSD database, as of February 8, 2013.

またコーン価格はバイオエタノール生産が活発になった2006年ごろより乱高下を繰り返しているものの、平均してみれば上昇基調にある。そして、現在は高いレベルにある（図11）。コーンの価格の上昇はコーン生産者には恩恵だが、エタノール生産者の採算性を悪化させており、一部倒産する会社も出ている。

価格高騰は食料としてのコーン価格の高騰も意味するので影響が大きい。このため、コーンアルコール生産に対する批判が出ている。

図11 米国のコーン価格推移（2005年以降に上昇）⁶⁾、単位 ドル/ブッシェル



Source: USDA, ERS, Feed Grains Database, at <http://www.ers.usda.gov/Data/feedgrains/>; as of Feb. 26, 2013.

(2) セルロース系バイオ燃料

セルロース系バイオ燃料は第二世代のバイオ燃料と呼ばれる。前述のように、米国は2007年に定めた再生可能燃料基準（RFS2）により、セルロース系バイオ燃料の年次義務量を決めたが、これまで義務量を達成できていない。2013年のRFS2義務量である1,000百万ガロンに対して、EPAの実施義務量は6百万ガロンでわずか0.6%しか達成していない。セルロースからのエタノール製造が技術的に難しいことを示している。

そうした中で米国では、2013-14年にかけて4社のセルロース系バイオエタノールの商業プラントが稼働を始める。順調に稼働すれば、セルロース原料からのエタノール製造の“エポックメイキング”な年になるといわれている。

2014年のセルロース系バイオ燃料生産のEPA義務量案は17百万ガロンとなっている。2013年の6百万ガロンの3倍近い値である。EPAは、表9に示す5社からセルロース系バイオ燃料が8-30百万ガロン得られると予想している。2014年の年央には、最終的な本年のEPA義務量が発表される。

表9 EPAによるセルロース系バイオ燃料の生産能力と入手可能量の推定⁷⁾

会社	燃料のタイプ	能力 (百万ガロン)	プラントの生産 開始時期	2014年入手 可能量の予測
Abengoa	エタノール	24	2014年1Q	0~18
Dupont	エタノール	30	2014年後半	0~2
Ineos Bio	エタノール	8	2013年3Q	2~5
KiOR	ガソリンとディーゼル	11	2013年3月	0~9
Poet	エタノール	25	2014年前半	0~6
承認されたルートによる生産会社の合計				8~30
各種バイオマス生産者	CNG/LNG	各種	各種	35~54
Edeniq	エタノール	各種	2014年前半	0~7
Ensyn	加熱オイル	3	2007年	0~5
未承認の提案されたルートによる生産会社の合計				n.a.
総合計				53~83

(3) セルロース系バイオエタノールの工業化

表10にセルロース系バイオエタノールの工業化の概要をまとめた。各社のプロセスは類似している。先行するBeta RenewablesのProesaTM技術が普及しそうである。

例外はIneos Bio（米）の方法である。これは、いったんバイオマスを分解して合

成ガス（一酸化炭素と水素の混合ガス）をつくり、これを発酵してエタノールをつくるというものである。

なお、現状は政府からの資金援助や債務保証をもとに工場建設をしたものであり、工業化といっても採算が合うとは必ずしも言えない。

日本では独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）や地球環境産業技術研究機構（RITE）が開発をすすめているが、事業化には時間がかかりそうである。

表 10 セルロース系バイオ燃料の工業化例（ARC 作成）

会社 (親会社)	立地	生産能力(年) 百万ガロン [千kl] [千トン]	プラントの 生産開始 (設備投資)	2014年入手 可能量の 予測 (EPA) (百万ガロン)	原料 年間投入量 (発電量)	技術 (開発期間 開発費用)	備考
Abengoa Bioenergy (Abengoaはスペイン のエネルギー会社)	米カンサス州 Hugoton	24 [90] [72]	2014年1Q	0～18	350千トン (21MW)	自社 (開発10年)	2G Hugoton project Abengoaは世界でアルコールを 728百万ガロン生産
Dupont	米アイオワ州 ネバダ	30 [114] [90]	2014年後半 (>200億円)	0～2	トウモロコシ茎葉 375千トン	自社 (開発10年)	
Ineos Bio (親会社 Ineos)	米フロリダ州 ベロビーチ	8 [30] [24]	2013年3Q (約130億円 プラント外含む)	2～5	野菜・木の 廃棄物 (6MW)	自社	バイオマスをいったん分解して 合成ガスを作り、これを 発酵してエタノールを作る
KiOR (バイオベンチャー)	米ミシシッピ州 コロンバス	11 [42] [33]	2013年3月	0～9		自社	プラントの手直しのための 休止を発表、経営状況にも 問題 (2014年3月発表)
Poet-DSM (Poet 米・アルコール生産) (DSM オランダ)	米アイオワ州 Emmetsburg	25 [95] [75]	2014年前半 (250億円)	0～6	農業残渣 (リグノセルロース) 285千トン	自社	C5、C6の糖を同時に発酵で きる技術をDSMが開発
Canergy	米カリフォルニア州 Imperial Vally	30 [114] [90]	2016年 [着工は 2013年12月]		energy cane (サトキビの茎)	ProesaTM 技術採用	酵素の供給はNovozymes
Beta Renewables (BiochemtexとTPG (米投資会社) の合併)	イタリア Crescentino	13 [50] [40]	2013年10月 (100- 150億円)		麦や米の茎 200千トン (13MW)	ProesaTM (開発費200億 円を投じる)	酵素の供給はNovozymes
GraalBio	ブラジル Alagos	21 [81] [65]	2014年2Q [着工は 2013年2月]		energy cane (サトキビの茎) 350千トン	ProesaTM 技術採用	酵素の供給はNovozymes

注 1 生産能力は河川の数字が公表値

注 2 1 ドル＝100 円で換算

(4) イタリアのBeta RenewablesのProesa™技術

セルロース原料からのバイオエタノール製造の工業化例としてBeta Renewables（イタリア）を取り上げる。Beta RenewablesはBiochemtex（イタリア）とTPG（テキサスの投資会社）との合弁会社で、2011年に資本金250百万ユーロ（約350億円）で設立された。BiochemtexはMossi Ghisolfi Group（イタリア）のR&D部門である。また最近、Novozymes（デンマーク・酵素で有名なバイオ会社）がBeta Renewablesの株式の10%を取得した。

Beta Renewablesはセルロース原料からバイオエタノールを製造する固有技術（Proesa™）を開発した⁸⁾。同社はこの技術の開発に140百万ユーロ（約200億円）を投じたという。世界最初の本格的商業プラントをイタリアのCrescentinoに建設した。エタノール生産能力は40千トン/年で、副生物のリグノセルロースを燃料とする発電所（発電能力13MW）を併設し、2013年10月9日に稼働した。

年間200千トンのリグノセルロース系原料[麦やコメの茎やarundo donex（暖竹：背の高い草）]が投入され、40千トンのエタノールがつくられる。工場の水は100%リサイクルされるので、水の補給はいらない。

Beta RenewablesはProesa™技術をライセンスするビジネスモデルも実施している。最初のライセンス先は、ブラジルのGraalBioである。同社はサトウキビの茎を原料（原料フィード量 350千トン/年）とするエタノール生産能力65千トン/年のプラントをAlagosに建設中で、2014年第二四半期に完成の予定であるが、まだ完成の発表はない。また、Canergy（米）にもライセンスしている（表10参照）。また、Biochemtex（米）がノースカロライナ州に20百万ガロン（約60千トン）のプラントを建設中である（着工は2013年後半）。アジアにはライセンスのチャンスがあるとして、シンガポールに駐在を置いている。

Proesa™技術は、①バイオマス原料をスチーム処理により、主要三成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンに分ける“Smart cooking”工程（詳細は不明）②ヘミセルロースよりC5糖をまたセルロースよりC6糖を得るための、酵素による粘度低下と加水分解工程（糖化工程）③エタノールを得るための、微生物（Cellic

Ctec3 酵素) による発酵工程 ④エタノールとリグニンの分離工程、エタノールの脱水工程からなる。全体が連続生産プロセスとなっている。固体を含む物質の連続的処理技術、独自の酵素、微生物(ライセンスに当たっては、Novozymesが供給する)などが特徴で、プロセスに化学物質を使わないことなどから、コストが安いと言っている(cash cost 0.4ドル/l)。このバイオエタノールを、ガソリン燃料の代わりに使用すると温室効果ガス発生量の80-90%が削減される。

一方、親会社のMossi Ghisolfi Group(イタリア)は発酵法エチレングリコール生産のパイロット研究に成功した。セルロース系原料(1百万トン/年)を使ったバイオエタノールとバイオエチレングリコールのプラントを中国Anhui(安徽)省Fuyang(阜陽)市に建設することを発表した(2013年11月)。バイオエタノールの生産はProesa™技術を使い、規模はイタリアCrescentino工場の約3倍である。併設する発電所の発電量は45MWでイタリア工場の13MWの3倍以上である。バイオエチレングリコールもセルロース原料を用い、Proesa™技術で前処理した後、生成したC5糖を水素化分解する工程図を発表している⁸⁾。

(5) セルロース系バイオエタノール生産プラントの売上高推定

バイオアルコールの売値を700ドル/k1(0.7ドル/リットル)、売電単価を70ドル/MWH(0.07ドル/KWH)と仮定して、Beta RenewablesとDuPontの年間売上高を推定した。

①Beta Renewables

- ・バイオエタノールの売上高(100%稼働)

$40,000 \text{ トン/年} \times 700 \text{ ドル/k1} \times 0.78 \text{ k1/トン} = 21.8 \text{ 百万ドル/年}$

- ・売電による売上高

$13 \text{ MW} \times 8,000 \text{ h} \times 70 \text{ ドル/MWH} = 7.3 \text{ 百万ドル/年}$

- ・合計の売上高 $21.8 + 7.3 = 29.1 \text{ 百万ドル/年}$

注) Beta Renewables発表では、バイオエタノールのキャッシュコストは0.4ドル/リットルで、設備投資は100~150百万ドルである。

②DuPont

バイオエタノールの売上高(100%稼働)

$90,000 \text{ トン/年} \times 700 \text{ ドル/k1} \times 0.78 \text{ k1/トン} = 49.1 \text{ 百万ドル/年}$

売電による売上高（発表データがないのでBeta Renewablesを参考に推算）

$7.3 \text{ 百万ドル} \times 90,000 \text{ トン/年} \div 40,000 \text{ トン/年} = 16.4 \text{ 百万ドル/年}$

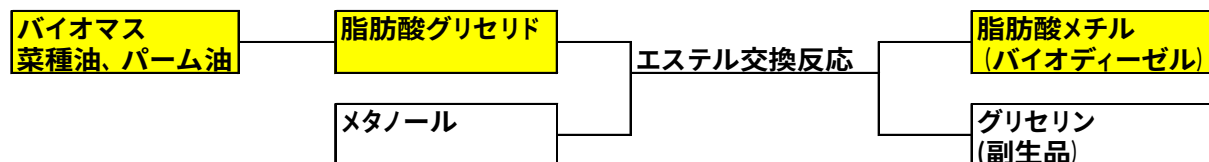
合計の売上高 $49.1 + 16.4 = 65.5 \text{ 百万ドル/年}$

注）DuPont 発表設備投資額 200百万ドル以上

Beta Renewablesのバイオエタノールと電力の年間売上高合計はMax 29.1百万ドル（29.1億円）と推定される。これは、設備費100－150百万ドル（100－150億円）の3分の1以下である。DuPontの年間売上高合計も設備費の3分の1以下である。商業ベースの投資として考えると、通常は設備費と同額程度の売上高がほしいところである。設備投資額の割に売り上げが小さいので、両社の採算性は厳しいと考えられる。実際は、政府からの資金補助でカバーしているのであろう。

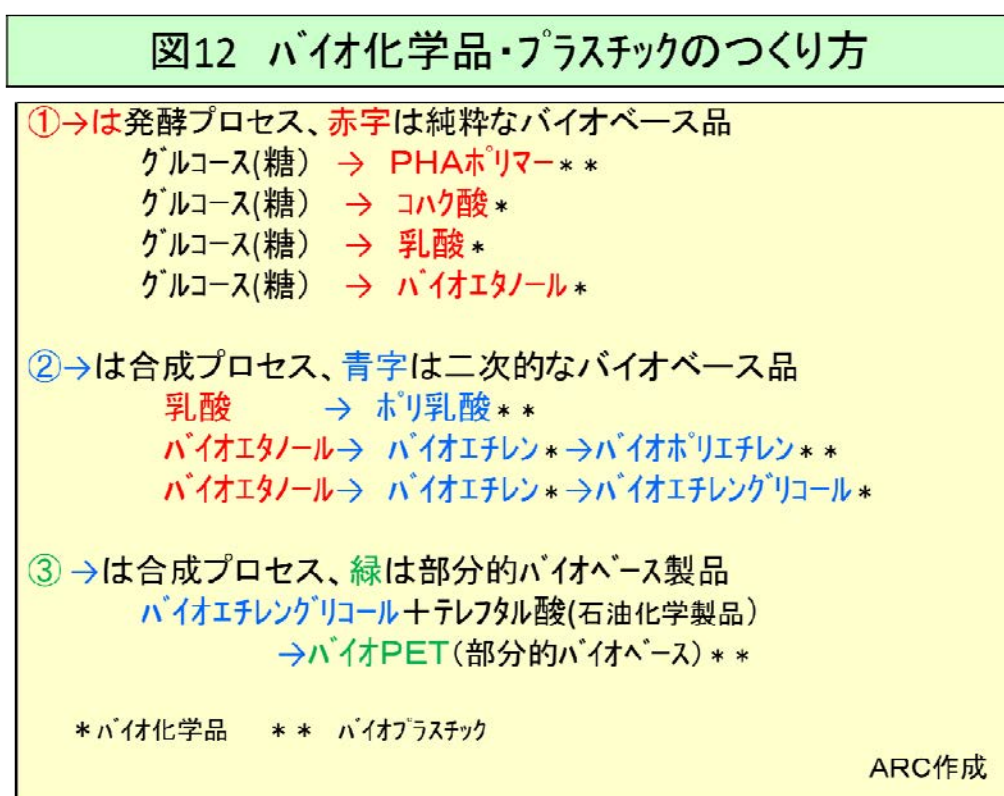
3.3 バイオディーゼル

菜種油やパーム油などから脂肪酸グリセリドを取り出し、これをメタノールとエステル交換すると脂肪酸メチル（FAME：fatty acid methyl ester）が得られる。これがバイオディーゼルであり、ディーゼル油（軽油）に混ぜて使用される。ヨーロッパが主要な生産地であり、消費地である。アジアでもパーム油からつくられるようになったが、森林を伐採しパーム農園をつくったため環境破壊が問題になっている。副生物のグリセリンが大量に生成し、これが現在の需要に対して多すぎるため、その用途開発が盛んに行われている。



4 バイオ化学品とバイオプラスチックのつくり方と分類

バイオマス原料からつくられる低分子量の有機化合物（モノマーなど）を、ここではバイオ化学品と定義する。バイオ化学品を原料にしてつくられた高分子物質を、ここではバイオプラスチックと定義する。工業化されているバイオ化学品とバイオプラスチックのつくり方を下記の図12にまとめた。



① 図の赤矢印は発酵などのバイオプロセス、赤字はバイオマス原料からバイオプロセスによってつくられたバイオ化学品とバイオプラスチックを示す。発酵で直接つくられるPHAポリマー、コハク酸、乳酸、バイオエタノールはいわば“純粋な”バイオベース品である。

② 青矢印は合成プロセス、青字はそれによってつくられた“二次的”バイオ化学品とバイオプラスチックを示す。ポリ乳酸、バイオエチレン、バイオポリエチレン、エチレングリコールは、純粋なバイオベース品を原料にして合成法でつくられた“二次的”バイオベース品である。

- ③ **緑字**は、バイオ化学品と石油化学品の両方の原料からつくられた“部分的”なバイオ化学品やバイオプラスチックを表す。バイオPETは、現状はバイオエチレンからつくられたバイオエチレングリコールと石油化学品のテレフタル酸からつくられているので、“部分的バイオプラスチック”といわれる。重量的にエチレングリコール部分が約30%なので、バイオPET30と呼ばれる。

なお、ポリエチレンやPETは同じ石油化学製品があるため、バイオベースのものはそれぞれバイオポリエチレン、バイオPETと呼ぶことが多い。



5 バイオ化学品

バイオマス原料からつくられる低分子量の有機化合物（モノマーなど）をここではバイオ化学品と定義する。前述のように、バイオマス原料ベースでなくともバイオプロセスによってつくられるものはバイオ化学品として扱う。

5.1 伝統的発酵プロセス

古くより発酵によりエタノール、酢酸、乳酸などの醸造品がつくられてきた。エタノール、酢酸、乳酸を生産するすぐれた酵素、酵母、微生物が天然に存在するため、発酵でつくりやすい化学品である。これらが、発酵法で工業的に大規模につくられてきたことは当然の成り行きであろう。古い話だが、かつてグルタミンソーダの化学合成法が開発されたが、食品に化学合成品を使うことに消費者の抵抗があり、天然物の糖蜜原料の発酵法が継続された。そのあと、化学合成のトリプトファンに含まれるごく微量の不純物が副作用を引き起こす事件が不幸にも起こった。現在、各国は法律や規則で食品用は天然物由来に限定している。

また、ABC発酵によりアセトン、ブタノール、エタノールが併産されてきた。アセ

トン、ブタノールも発酵でつくりやすい化学品といえる。

5.2 合成プロセスよりすぐれるバイオプロセス（発酵プロセス）の例

バイオ化学品として古くから知られているのはアクリルアミドである⁹⁾。アクリルアミドは凝集剤として重要な用途がある。アクリルアミドは例外的に効率の良い発酵法により三菱レーヨン（1988年）と韓国の東西石油化学（現旭化成）により工業化された。アクリロニトリルの加水分解でもつくれるが、コスト的に発酵法の方が安い。発酵法が優れるのは高性能の酵素ニトリルヒドラーゼの発見にあり、10℃以下の温度での転化率が99.9%以上で、50%濃度のアクリルアミドが得られる。バイオプロセスとしては驚くべき高成績である。本酵素は、よくある生成物による活性阻害を受けないで、異例の高濃度（50%濃度）まで反応が進むという。これは発酵法の方が合成法よりも優れる数少ない工業例である。

5.3 バイオプロセス（発酵プロセス）のターゲット化学品

どのような化学品がバイオプロセスのターゲットになるか。①～⑤が考えられる。

①合成ではつukれないかつくりにくいもの

- a. 光学活性物質などの精密化学品：抗生物質などの医薬品や医薬品中間体、アミノ酸などの高付加価値製品である。本リポートの対象外である。
- b. 合成物にはないバイオ由来の固有の構造：たとえばイソソルバイド骨格、フラン骨格など。
- c. 有機合成ではつくりにくい化合物：1,3-プロパンジオール（ポリトリメチレンテレフタレート（PTT）の原料）、ナフタレンジカルボン酸（ポリエチレンナフタレート（PEN）のモノマー）、グリコール酸、エチレングリコール（副生成物が少ない省エネルギープロセスが求められている）などがあげられる。このうち、1,3-プロパンジオールはすでにバイオプロセスに転換した。

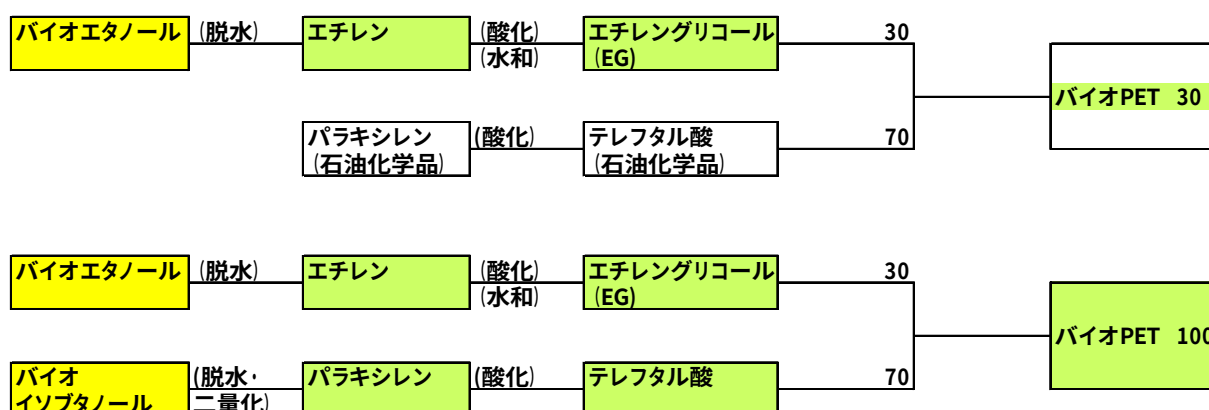
②合成法より安くできるもの

昔から発酵でつくられているエタノール、酢酸、乳酸、ブタノールなどは安くで

きるか、安くできるポテンシャルが高い。コハク酸も合成法より安くできるため4社が工業化する。合成法では、無水マレイン酸の水素添加法でコハク酸がつけられてきた。

③モノマーのバイオベース化

再生可能資源からつくられたバイオプラスチック（例 バイオPET）が望まれている。そのためにモノマーを石油化学品からバイオベースに転換する必要がある。現在、PETの原料のエチレングリコールはバイオベース化しているが、テレフタル酸は石油化学品である。そのバイオベース化が一つの焦点となっている。発酵でつくったイソブタノールを二量化して、これを脱水してパラキシレンをつくるルートなどが開発されている。パラキシレン以降は従来法と同じでテレフタル酸がつけられる。バイオベースのエチレングリコールとバイオベースのテレフタル酸からつくったPETは、100%バイオのPET100になる。



④将来供給不足や価格高騰の恐れのある化合物

クラッキング原料が軽質化（エタンクラッキングの増加）しているので、将来供給不足や価格高騰の恐れのある化合物としてブタジエンとイソプレンが考えられる。

⑤バイオプロセスの副産品の利用

バイオディーゼル製造時のグリセリンは大量の副産品である。需要が少ないので用途開発が積極的に進められている。リグノセルロース中のリグニンも副生成物であり、有効利用が進められているが、これはなかなか難しい。燃焼して、エネルギー

ギー回収することが多い。

米国では、2004年に開発重点対象の12種、15化合物のバイオ化学品を以下のように定めている¹⁰⁾。**赤字**は本リポートの表11－13で取り上げた化合物である。カッコ内は化合物の炭素数を示す。

1. **1,4-コハク酸** (C4)、フマル酸 (C4)、リンゴ酸 (C4)

(注 いずれもTCAサイクル (クエン酸回路) の化合物)

2. **2,5-フランジカルボン酸** (FDCA)、 (C6)

3. **3-ヒドロキシプロピオン酸** (C3)

4. アスパラギン酸 (C4) (注 アミノ酸)

5. グルカル酸 (C6) (注 C6H10O8)

6. グルタミン酸 (C5) (注 アミノ酸)

7. **イタコン酸** (C5)

8. レブリン酸 (C5) (注 ケト酸)

9. 3-ヒドロキシブチロラクトン (C4)

10. **グリセロール** (C3) (注、グリセリンのこと、バイオディーゼルの副生成物)

11. **ソルビトール** (C6)

12. キシリトール (C5) /アラビトール (C5)

(注 いずれもC5H12O5の糖アルコール、キシリトールはキシロースより合成される)

5.4 バイオ化学品の開発と工業化

化合物の炭素数別にバイオ化学品 (C2～C10) 24種について、開発と工業化の状況を表11－13にまとめた^{11, 12)}。表11－13に記載しているバイオ化学品は以下の文章で下線を入れた。なお、グルタミン酸、リジンなどのアミノ酸と、昔から生産されているフルフラールや酒石酸などは省略した。

(1) C2 化合物 (表11)

ブラジルのBraskemはバイオエタノールを脱水してバイオエチレンをつくり、これを重合してバイオポリエチレンをつくっている（バイオポリエチレンの生産能力は200千トン/年）。またバイオエチレンより既存の合成法でバイオエチレングリコールがつくられている。台湾のGTC（Greencol Taiwan Corporation：台湾人造繊維と日本の豊田通商の50：50の合弁会社）は、バイオエタノールからバイオエチレンをつくり、それからエチレングリコールをつくるプラントを完成し、2012年より生産を開始している。能力は150-200千トン/年である。エタノールからエチレンをつくるプロセスはPetron Scientech（米）の技術を採用した。原料のバイオエタノールは、長期契約に基づきブラジルのPetrobasから供給を受けている。

前述のように、Mossi Ghisolfi Group（イタリア）は発酵法エチレングリコール生産のパイロット研究に成功し、セルロース系原料を使ったバイオエタノールとバイオエチレングリコールのプラントを中国に建設することを発表した。バイオエチレングリコールはセルロース原料を用い、ProesaTM技術で前処理した後、生成したC5糖を水素化分解する工程を発表している⁸⁾。

グリコール酸は、現在はホルマリンを水の存在下でカルボニル化する方法（DuPont法）でつくられている。米国の研究開発企業Metabolic Explorerが発酵法を研究している。

(2) C3 化合物 (表11)

乳酸は昔からの発酵品であり、Purac（オランダ）、NatureWorks LLC（米・Cargill関係会社）、Galactic（ベルギー）、ADM（米・穀物メジャー）などが大手メーカーである。NatureWorks LLCとGalacticはポリ乳酸（PLA）のメーカーでもある。

中国の河南省に本社のあるHenan Jindan Lactic Acid Technologyは100千トン/年の生産能力をもつアジア最大の乳酸メーカーである。

グリセリンは天然油脂由来で、バイオディーゼル製造時に大量に発生する副生成物である。用途開発が進められていて、すでに工業化されているものにエピクロロヒドリンがある。Solvayがタイで、Dowが上海とともに大規模に企業化している。グリセ

リンの化学反応によりエピクロロヒドリンを合成している。エピクロロヒドリンはエポキシ樹脂の主原料である。

1,3-プロパンジオールは、合成ではつくりにくくコストの高いモノマーとして有名な化合物であったが、DuPont/Tate&Lyle（2005年設立の合併会社）は発酵法を開発してこれに切り替えた。DuPontは、1,3-プロパンジオールとテレフタル酸を縮合してポリトリメチレンテレフタレート（PTT）を製造している。Tate&Lyleは、イギリスに本社を持つ多国籍のアグリビジネス・食品加工の会社である。

1,2-プロパンジオール（プロピレングリコール）をADM（米）がグリセリンの水素化反応で製造している。技術は高温の触媒反応法である。

3-ヒドロキシプロピオン酸の発酵法を、Cargill（米）とOPXBio/Dowが開発中である。両グループは、3-ヒドロキシプロピオン酸の脱水によるアクリル酸の合成法を開発中である。OPXBio/Dow は2017年の企業化を目標にしている。Cargillは米・穀物メジャー、OPXBioは米・バイオマス化学会社、DOWは米・総合化学会社でアクリル酸のメーカーである。

アクリル酸の合成法としては、上記以外にもあり、Arkema（フランス・化学会社）は副生グリセリンの脱水と酸化による合成ルートを研究中である。乳酸の脱水でもできるが、現在の乳酸コストでは難しいといわれる。Myriant（米・バイオベンチャー）も研究中であるが、ルートは不明である。

(3) C4化合物（表11）

ブタノールは、米国ではガソリンへのブレンド義務が決まったことよりバイオ燃料として注目されている。ブタノールはエタノールに比べ、化合物中の炭化水素比率が高く水酸基比率が低いため、性状がガソリンに近い。エタノールに比べ腐食性が低く、ガソリンに16%ブレンドしても車に支障がない。1リットル当たりの走行距離もエタノールよりも長い特徴がある（表2）。エタノール並みのコストでできるようになれば、既存のエタノール発酵プラントはそのままブタノール発酵プラントに置き換わる可能性がある。

Butamax（BP・DuPont合併）が米国で生産し、Cathay Industrial Biotechが中国で

生産し、Cobalt Technologies/Rhodiaがラテンアメリカで生産することを計画中である。Cathay Industrial Biotechは中国・上海に本社のあるバイオ技術の会社で、別に発酵法で長鎖の二塩基酸をつくっている。Cobalt Technologiesは米国のバイオ燃料会社で、Rhodiaはフランスの化学会社である。

イソブタノールは、Gevo（米・バイオマス化学ベンチャー）が糖の発酵法で工業化している。糖ばかりでなくリグノセルロースを原料とする技術も開発中である。また、Gevoはイソブタノールを化学的に二量化したのち、脱水素してパラキシレンをつくることを検討している。最終目的は、バイオテレフタル酸の合成による100%バイオベースPET（PET 100）の製造である。

バイオブタジエンの研究も行われている。ブタジエンの供給不足や価格高騰の恐れがあることが、研究の動機となっている。Genomatica（米、バイオベンチャー）が取り組んでいる。同社は、2013年6月にBraskem（ブラジル）と商業プロセスを開発するために共同開発契約を結んだことを発表した。BraskemがGenomaticaに研究費やパイロット、セミコマーシャルプラントの建設費と運転費を提供する。Braskemは見返りに米国での独占的権利を取得する。Braskemは世界第三位のブタジエンメーカーである。

Versalis（イタリア）もGenomaticaとバイオブタジエンで提携している。VersalisはイタリアのEniグループの化学会社で、Novamont（イタリア）との合併で生分解性プラスチックを生産している。また、guayuleベースの天然ゴムについてタイヤメーカーのPirelli（イタリア）と共同開発している。Guayuleは、最近注目されている乾燥地に生えるグアユールゴムノキである。

Cobalt Technologies（米）はアジアの化学会社2社と、バイオマスからブタジエンを製造することに関して提携したことを発表した（2013年4月）。アジアで工場を建てる計画である。製法は開示されていないが、Cobalt Technologiesは発酵法n-ブタノールを開発中であるから、n-ブタノールの脱水法が考えられる。

また、ヨーロッパの主要な合成ゴムメーカーであるSynthos（ポーランド・化学会社）は、バイオマス化学専門会社であるGlobal Bioenergies（フランス）と提携した。Global Bioenergiesがもつバイオマスからブタジエンをつくる技術に注目した。研究費や今後のスケールアップ（パイロットなど）開発費用をSynthosが負担し、開発を

進める契約である（2012年12月に発表）。

表11 C2-C4のバイオ化学品の開発、工業化の状況（ARC作成）

Cn	バイオ化学品	化学式	プロセス	ステージ	会社(能力)
C2	エチレン	CH ₂ =CH ₂	バイオエタノールの脱水	商業化	Braskem(ブラジル) ポリエチレン200千トン/年 Greencol Taiwan (台湾)
	エタノール	CH ₃ CH ₂ OH	トウモロコシ、サトウキビ発酵	商業化	多数 米国はADMなど
			セルロース系原料発酵	商業化	Abengoa, Dupont, Ineos Bio, KIOR Poet-DSM, Beta Renewables
	エチレングリコール (EG)	HOCH ₂ CH ₂ OH	バイオエチレンの酸化 と水和(従来法)	商業化	India Glycols Ltd (インド) 1989年より生産 Greencol Taiwan (台湾) 150-200千トン/年
			ソルビトール (C6)の 高温触媒水素化分解	商業化	Global Bio Chem(中国、香港) 25千トン/年 収率 EG 25%, PG 50-60%, 1,2-, 2,3-BDO 25%
			セルロース原料のC5 糖の水素化分解	工場建設 計画中	Mossi Ghisolfi Group(イタリア) : 中国でバイオエタノールとの 併産計画、EGの能力不明
	グリコール酸	HOCH ₂ COOH	発酵	研究	Metabolic Explorer (米)
C3	乳酸 (300-400千トン)	HOCH (CH ₃) COOH	発酵	商業化	Purac (Corbion) (NL), ADM (米) Nature Works (米), Galactic (Bel.) : 両社はポリ乳酸の メーカーでもある。 HenanJidan (中国、アジア最大のメーカー), BBKA(中国)
	エピクロロヒドリン	C ₃ H ₅ ClO	副生グリセリンの 化学反応(GTE: グリセリン to エピクロ)	商業化	Solvay タイ 100千トン(2012年)、 中国 100千トン(2014年Q2) Dow 上海 150千トン(2010年)
	1,3-プロパン ジオール	HOCH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	発酵(トウモロコシの デンプン)	商業化	Dupont/Tate&Lyle 90千トン/年、PTT原料
	1,2-プロパン ジオール	HOCH ₂ CHOHCH ₃	グリセリンの高温 水素化反応	商業化	ADM(米)
	3-ヒドロキシ プロピオン酸	OHCH ₂ CH ₂ COOH	発酵	開発	Cargill(米) アクリル酸原料として注目している OPXBio(米)/DOW(米) アクリル酸原料として注目している
	アクリル酸	CH ₂ =CHCOOH	化学反応	開発	Cargill, OPXBio/DOWはヒドロキシプロピオン酸の脱水法 Arkema (フランス):グリセリンの脱水と酸化
					Myriant(米) ルート不明
C4	n-ブタノール	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	トウモロコシの発酵	商業化	Cathay Industrial Biotech 中国で90千トン/年 Butamax (BP・Dupont合併)
			バガスの発酵	計画中	Cobalt(米)/Rhodia(仏) ラテンアメリカで工場計画
	iso-ブタノール	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ OH	糖の発酵	商業化	Gevo(米) 55千トン/年 現在は糖が原料だが、セルロース原料の発酵技術開発中
	ブタジエン	CH ₂ =CH-CH=CH ₂	発酵	開発	Genomatica(米) がBraskem(ブラジル) と提携して開発中 Genomatica(米) はVersalis (イタリア) と提携して開発中
			n-ブタノールの脱水 発酵	開発 開発	Cobalt Technologiesはアジアメーカーと提携、企業化検討 Synthos(オランダ、合成ゴムメーカー) と Global Bioenergies(仏) が提携開発中

(4) C4 コハク酸 (表12)

バイオコハク酸の工業化が、DSM/Roquette (2012年、10千トン/年)、Myriant (2013年、14千トン/年)、BASF/Purac (2014年、10千トン/年)、Bioamber/三井物産 (2015年、30千トン/年) の4グループによって実現されている。カッコ内はプラントスタート年と生産能力である。4社合計の能力は、64,000トン/年となる。コハク酸はこれまで無水マレイン酸の水素化でつくられてきたが、発酵法の方がコスト的に安いといわれる。

DSMはオランダに本社を持つ多国籍性企業で、Roquetteはフランスのデンプンメーカーである。Myriantは米国のバイオマス化学会社である。BASFはドイツに本社を持つ多国籍企業で、Puracはオランダの大手乳酸メーカーである。Bioamberは、カナダに本社を持つバイオマス化学の会社で、三井物産は日本の商社である。

Myriantのホームページ¹³⁾ の中で石油化学法 (注1) とバイオ法 (注2) の比較が記載されている。kg当たりの相対コストとしてブタンを基準の1.0とすると、石油化学法では原料ブタンが1.0、中間のマレイン酸無水物が1.2、製品のコハク酸が1.23になる。バイオ法では原料のグルコースが0.37、バイオコハク酸が0.42となる。バイオ法コストは石油化学法コストの約3分の1である。これは、石油が97ドル/バレル、コーンが7.28ドル/ブッシェルの前提である。また、バイオ法は反応条件がマイルドである。

注1 石油化学法

ブタン→(酸化, 400℃、150kPa)→マレイン酸無水物→(還元, 130℃、30MPa)→コハク酸

注2 バイオ法

トウモロコシ→グルコース→(発酵, 37℃、常圧)→バイオコハク酸

Myriantのプロセスの概要は次のようなものである。トウモロコシを製粉にして、粉を加水分解して糖化すると単純な糖が得られる。実際には、粉と、熱水と、硫酸を混合し、スラリー化し加熱することによりデンプンを加水分解して中和する。できたトウモロコシシロップを次の段階で修飾したE.Coli 株 (non-GM) を使って発酵させる。発酵後溶液を濾過してコハク酸を得る。生成物は蒸発、結晶化法で精製する。

Myriantの14千トン/年のプラントの投資額は、80百万ドル（約80億円）であったが、米国エネルギー省（DOE）からプラント建設費として50百万ドル（約50億円）の補助を受けている。また地域自治体などから10百万ドル（約10億円）、米国農業省（DOA）より25百万ドル（約25億円）の援助を受けている。

コハク酸はC4のジカルボン酸であり、1,4-ブタンジオールと反応させると生分解性プラスチックのPBS（ポリブチレンサクシネート）が得られる。昭和電工はPBS（商標ビオノーレ）の原料に石油化学品を使用していたが、発酵コハク酸に切り替えることを最近発表した。また、バイオコハク酸は水素還元すると1,4-ブタンジオールを与える。

表12 C4：コハク酸と1,4-ブタンジオールの開発と工業化

Cn	ハ'イ'ハ'-ス化学品	プロセス	ステージ	会社(能力)
C4	コハク酸 $\text{HOOC}(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$	発酵	商業化	BioAmber(米)/三井物産(合弁会社 ハ'イ'ア'ン'ハ'-サ-ニア)は本プラント(能力30千トン/年)をカナダで2015年スタート。トウモロコシ由来のグルコースを発酵。技術はBioAmber(CargilのLow pH 酵母技術がベース) 三菱化学はBioAmberと提携、PBSの原料にする。
			商業化	DSM(オランダ)/Roquette(仏)(合弁会社 リ'ハ'ル'デ'イ'ア) 2010年実証プラント、本プラントはイタリア、能力10千トン/年が2012年スタート、LOW pH 酵母技術 Roquetteはフランスのデ'ン'ブ'ン'メ-カー
			商業化	Myriantは米国 LA で14千トン/年のプラントを2013年6月スタート、投資額 80百万ドル(80億円) 日本の双日はミリアント社と製造販売の戦略提携
			商業化	BASF/Purac(合弁会社:Succinity) ス'ペ'イ'ン'モ'ント'メ'ロ'に 10千トン/年のプラントを2014年にスタートすることを発表(2014年3月) 再生可能資源を微生物でコハク酸に転換する
	1, 4-ブタンジオール(BDO) $\text{HO}(\text{CH}_2)_4\text{OH}$ (市場規模 年産1.6百万トン)	発酵	商業化	BASF グルコースのワ'ス'テ'ッ'プ'の発酵。2013年後半に市場評価。 発酵技術はGenomatica(米)。 BASFは世界最大のBDOメーカーで全生産能力 650千トン/年
			テスト生産	Dupont/Tate&Lyle、発酵技術はGenomatica(米)、DupontとGenomaticaは米国 テ'ネ'シー'のDupont商業プラントで2,000トン生産のキャンペーン運転を実施した(2012年末)、運転期間5週間、製品は販売され、成功。
			開発	Novamont(伊)とGenomatica(米)の合弁会社を設立して工業化予定。 発酵はGenomatica技術。 グルコース原料、2014年に18千トン/年プラント(イタリア)をスタート。
		コハク酸の還元	開発	Bioamberは、Dupontからのライセ'ン'ス'合成技術を使って、 発酵コハク酸からBDOやGBL(γ-ブチロラクトン)を生産する計画。 2014年末にBDO 23千トン/年プラントをカナダで稼働の予定。 Evonicsの触媒技術も活用して技術を改良中。
			開発	Myriant/JM Davy、発酵コハク酸からBDOとPTMGを作る。 技術はJM Davyの合成技術。

(5) C4 1,4-ブタンジオール (表12)

1,4-ブタンジオール (BD0と略される) は、現在5つの合成法で生産されている。アセチレン原料法、ブタジエン原料法、プロピレンオキサイド原料法、マレイン酸無水物原料法、n-ブタン原料法である。1,4-ブタンジオールの世界のトップメーカーのBASFはこのうち、4つの合成法のプラントを世界に有している。圧倒的に優れたプロセスがない状況である。

コハク酸に続いて、この1,4-ブタンジ奥ールの発酵による製造が始まりつつある。

Genomatica (米) はこの分野のパイオニアである。2008年に糖を一段で1,4-ブタンジオールに変換できる微生物を遺伝子工学的に開発し、2010年に3,000リットルのパイロットを運転した。さらに、2012年末にGenomatica はDuPont/Tate&Lyleと共同で、コハク酸の“キャンペーン製造”を行った。DuPont/Tate&Lyleのテネシープラントを利用し、5週間かけて2,000トンの生産を行った。これが成功して、製品はすべて販売された。DuPontはGenomaticaの 技術を使って工業化することを検討中である。DuPontは1,4-ブタンジオール誘導体であるスパンデックスのトップメーカーである。

BASFはGenomaticaの技術を導入し、2013年末より試作品の市場評価に入っている。前述のように、BASFは1,4-ブタンジ奥ールの世界のトップメーカーである。

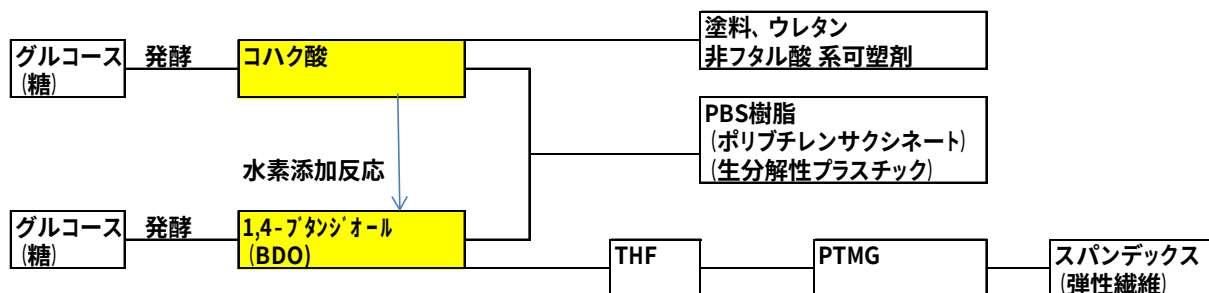
Novamont (イタリア) とGenomaticaの合弁会社は、2014年にイタリアに18千トンのプラントを建設することを計画している。

以上のようにキーとなる発酵技術は、すべてGenomaticaによるものである。

一方、発酵コハク酸を水素還元することにより1,4-ブタンジオールを合成するルートも開発されている。コハク酸の発酵メーカーであるBioamberとMyriantの2社が開発中である。

1,4-ブタンジオールは成長している化学品であり、代表的用途は弾性繊維のスパンデックスである。その他、溶媒に使用されるTHF、 γ -ブチロラクトンなどがある。

コハク酸と1,4-ブタンジ奥ールの誘導品の系統図を下記に示す。



(6) C5化合物 (表13)

イソプレンの発酵法による生産を、世界の手先タイヤメーカーと発酵メーカーが提携して開発中である。一つはGoodyear (米・タイヤメーカー) とGenencor (米・DuPontの子会社) の共同開発、もう一つはMichelin (フランス・タイヤメーカー) とAmyris (米・バイオマス化学ベンチャー) の共同開発 (2011年9月発表) である。日本でもブリヂストン (タイヤメーカー) と味の素 (発酵に強い食品メーカー) が共同開発を、2012年6月に発表した。事業化判断を急ぐと言っている。

イソプレンもブタジエンと同様に、クラッキング原料の軽質化により将来不足するとの危機感が開発動機になっている。

イタコン酸 (メチレンコハク酸) は無水マレイン酸と同じように不飽和二重結合をもつジカルボン酸であり、二重結合を利用してオリゴマーやポリマーをつくることができる。これらのオリゴマーやポリマーは複数のカルボン酸基をもっている官能性ポリマーであり、各種用途に展開されている。Itaconix (米) はイタコン酸のオリゴマーやポリマーの専門メーカーである。製品はすべてバイオベースである。Quingdao Kehai Biochemistry (青島科海生物有限公司) は中国 (青島) のイタコン酸の専門メーカーで、発酵でイタコン酸をつくっている。イタコン酸を脱水すると、メチルメタクリレート (MMA) が得られるが、企業化はされていない。

(7) C6 化合物 (表13)

アジピン酸は発酵、あるいは糖の化学反応で合成することが試みられている。①Rennovia (米)、②Verdezyne (米)、③Bioamber (カナダ)、④Genomatica (米)

が研究中であるが、事業化には至っていない。

- ① Rennovia（米）はバイオマス化学の研究開発専門会社で、バイオマス原料のアジピン酸とヘキサメチレンジアミン（HMD）を開発中で、両化合物を使って100%バイオベースのナイロン6,6を試作している。

グルコースを触媒存在下で酸化してグルカル酸をつくり、次いでこれを触媒存在下に水素化してバイオアジピン酸を得ている。グルカル酸は、2つのカルボン酸基と4つの水酸基をもつC6化合物で分子式はC₆H₁₀O₈である。現在、ミニプラントの建設を計画中である。また最近Johnson Matthey Davy Technologiesと連携して触媒・プロセスの共同開発契約を結んだことを発表した（2014年3月）。

また、HMDについては、グルコースからHFCS（High-fructose corn syrup：フルクトース高含量シロップ）をつくり、次いで触媒反応でキーとなる中間体をつくり、これをさらに触媒反応によりHMDにするというものである。詳細は公表されていない。

- ② Verdezyne（米）はバイオマス化学ベンチャーで、安価なバイオマス原料からアジピン酸を発酵法でつくる試作運転をしている唯一の会社と言っているが、工業化は見えていない。

- ③ BioamberはバイオのエンジニアリングメーカーのCelexion（米）に2011年にライセンスを与えている。

- ④ Genomaticaは発酵法で開発しているようだが、テーマの優先度は低い様だ。

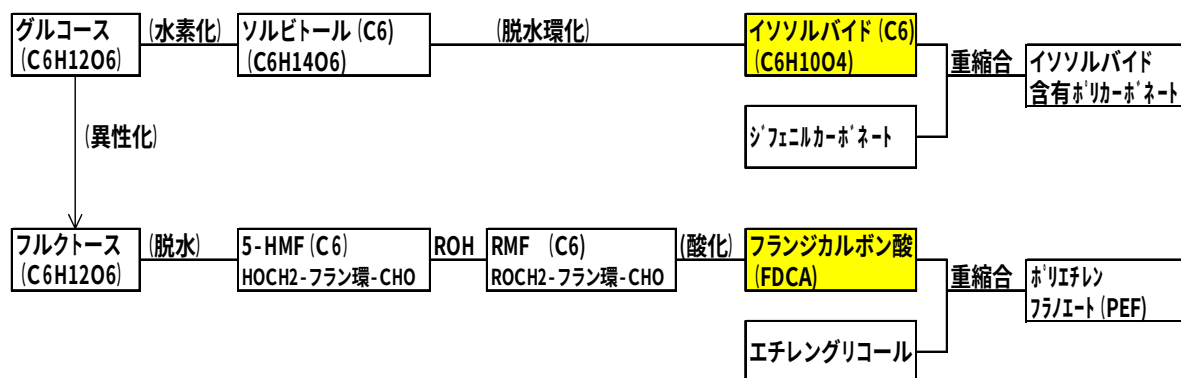
ソルビトールはグルコースの水素化で古くから製造されてきた。Roquette（フランス・デンプンメーカー）やADM（米国・穀物メジャー）などが生産している。

ソルビトールを脱水・環化すると環状ジオールのイソソルバイト（イソソルビドともいう）が得られる。これは特殊ポリカーボネート用のモノマーとして使用されている。Roquetteが製造している。特殊ポリカーボネートを製造している三菱化学は、Roquetteから輸入している。

グルコースを異性化してつくられるフルクトースを脱水すると5-ヒドロキシメチルフルフラール（5-HMF）が得られる。これをアルコールと反応させるとRMFが得られる。

RMFを酸化するとフランジカルボン酸（FDCA）が得られる。これをバイオエチレングリコールと反応するとポリエチレンフラノエート（PEF）が得られる（注）。100%バイオベースのポリエステルで、従来のPETより強度やガスバリア性に優れるということで注目されている（セクション6.5（1）PEFの項参照）。

（注）PEFとPETの区別がつきにくいので、PEFに下線を付けた。



FDCAとPEFの開発はAvantium（オランダ）が行っている。AvantiumはCoca-Colaと提携して開発中である。

またPurac系のCorbion（オランダ・バイオの会社）もFDCAの開発を進めている。同社は、FDCAなどのバイオ化学品をつくるための微生物・酵素技術を持つオランダのBird Engineeringを2013年に買収した。

（8）C8 p-キシレン（表13）

次の3社がバイオベースのp-キシレンの開発を進めている。

- ① Gevo（米・バイオマス化学の会社）はバイオイソブタノールを二量化した後、これを脱水してp-キシレンを合成する開発をしている。目的はPET100用のバイオテレフタル酸の開発である。東レと提携している。東レはバイオテレフタル酸を使い、PET100ができることを確認している。
- ② Annelotech（米・バイオマス化学の会社）は、Catalytic Fast Pyrolysis（CFP）技術を用いて、非加食性バイオマスの熱分解によりp-キシレンをつくる方

法を開発中である。Massachusetts Amherst大学のProf. W. Huberよりライセンスを受けた技術で、触媒はゼオライト（ZSM-5）である。p-キシレンの収率が従来の3倍になったという。100kg程度のサンプルがつくれるパイロットを検討中である。

- ③ Renomatix（米）とVirent（米）の2社が“バイオベースの容器・包装”について戦略的提携を発表した（2013年12月）。両社は共に2013年にICIS（Independent Chemical Information Service）のInnovation Awardsを受賞した。提携のポイントは、セルロース系バイオマスから糖をつくり、これからp-キシレン、テレフタル酸を経てバイオPET100をつくるというものである。Renomatixの受賞技術のPlantrose法™は、水の超臨界を利用して、セルロースからC5糖（キシロース）とC6糖（グルコース）をつくるというもので、従来の化学法や酵素法よりもコスト競争力が高いという。一方、Virentの受賞技術のBioFormPX™は、糖をクラッキングする技術である。Virentは触媒化学が得意なバイオ燃料やバイオ化学品の会社である。糖を水に溶かし、ゼオライト触媒（ZSM-5）を使って水相で接触改質（リフォーミング）することにより、トルエン、キシレン、p-キシレンを製造する。今回の戦略的提携により、Renomatixのセルロースから糖をつくる技術とVirentの糖からp-キシレンをつくる技術がドッキングする。

VirentはCoca-Colaと戦略的提携をしており、バイオPET100の開発を目指している。Coca-ColaのPlantbottle（商標）に採用されることが最終目標になる。VirentはCargill（米・穀物メジャー）とも戦略的提携をしている。

(9) C10 セバシン酸（表13）

天然のひまし油からつくられるセバシン酸はC10のジカルボン酸（1,8-オクタンジカルボン酸）であり、Nylon6,10やNylon10,10のモノマーになる。日本のダイセル・エボニックはヘキサメチレンジアミン（石油化学品）とセバシン酸からつくったNylon6,10と、バイオベースのデカメチレンジアミン（C10）とセバシン酸からつくったNylon10,10を販売している。Nylon6,10はセバシン酸が62%占めているので、62%植物由来であり、Nylon10,10は100%植物由来である。なお、エボニック（Evonik）

はドイツのスペシャルティケミカル会社である。また、ひまし油を原料に化学合成でウンデカンラクタムをつくり、これを重合するとバイオベースのナイロン11が得られる。これは100%バイオベースポリマーである。Arkema（フランス・化学会社）が製造している。

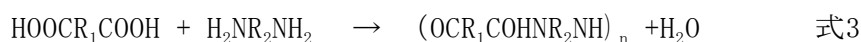
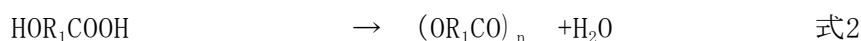
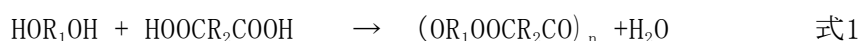
表13 C5-C10のバイオ化学品の開発と工業化例

Cn	バイオ化学品	化学式	プロセス	ステージ	会社(能力)
C5	イソブレン	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$	発酵	研究	Goodyear(米) / Genencor(米, Dupont子会社) Michelin(米) / Amyris(米) プリテストン(日) / 味の素(日) いずれも大手タイヤメーカーと発酵メーカーの組み合わせ
	イタコン酸 (メチレンコハク酸)	C5H6O4	発酵	商業化	Qingdao Kehai Biochemistry Co (中国) Itaconix(米) イタコン酸オリゴマー・ポリマーメーカー
C6	アジピン酸	$\text{HOOC}(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$	糖の化学反応	開発	Rennovia(米) $\text{H}'\text{イ}$ アジピン酸、 $\text{H}'\text{イ}$ HMDAを 試作中、両化合物から100% $\text{H}'\text{イ}$ のナイロン66を試作
			発酵	開発	Verdezyne(米) バイオマスから発酵で アジピン酸を製造(試作運転中)
			発酵		Bioamber(米) Celexion(米) にライセンス
			発酵	研究	Genomatica(米) テーマ優先度は低い
	ソルビトール	C6H14O6 $\text{HOCH}_2(\text{CHOH})_4\text{CH}_2\text{OH}$	グルコースの 水素化	商業化	Roquette(仏) ADM(米)
	イソソルバイド	C6H10O4	ソルビトールの 脱水環化	商業化	Roquette(仏) 三菱化学に供給中
	5-ヒドロキシメチル フルフラール (5-HMF)	C6H6O3 $\text{HOCH}_2\text{-フuran-CHO}$	フルクトースの 脱水素	開発	Avantium(オランダ)
	フランジカルボン酸 (FDCA)	C6H4O5 HOOC-フuran-COOH	5-HMFのアル コール化、ついで 酸化 発酵	開発 研究	Avantium(オランダ) FDCAを使ったポリエステルである ポリエチレンテレフタレート(PEF)を開発中、コカ-Colaと提携中 Corbion(オランダ, Purac系)
C8	p-キシレン	C_8H_{10} $\text{CH}_3\text{-Ph-CH}_3$	合成	開発	Gevo(米) イソブタール原料、バイオテレフタル酸合成が 目的、東レと提携、PET 100を狙う コカ-Colaと提携中
			セルロースの 熱分解	開発	Annelotech(米) 大学の技術を活用 ZSM-5触媒を 使用した、高速熱分解プロセス(CFP技術)
			セルロースの 糖化	開発	Renomatix(米) 水の超臨界法でC5,C6糖を得る プロセスを開発
			C5,C6糖の水相 リフォーミング		Virent(米) ZSM5触媒を使用するBioFormPXプロセス が特徴、目的はバイオテレフタル酸 RenomatixとVirentが戦略提携(13年12月) バイオテレフタル酸を用いたバイオPET100の開発が 目標で、コカ-Colaと提携開発中
C10	セバシン酸	C10H18O4 (1,8-オキタンジカルボン酸)	天然物のひまし 油から製造	商業化	生産会社多数 ナイロン 6, 10やナイロン10,10のモノマーになる

5.5 ポリマーのビルディングブロックとしてのバイオ化学品

(1) 重縮合系ポリマー

これまでに述べたバイオ化学品は、ジオール、ジカルボン酸、ヒドロキシカルボン酸が多い。これらは、ポリマーのビルディングブロックとして有用である。ジオールとジカルボン酸を反応させるとポリエステルができる（式1）。またヒドロキシカルボン酸を自己縮合させれば、同様にポリエステルができる（式2）。さらに、ジカルボン酸とジアミンを反応させればポリアミド（式3）ができる。



なお、ポリマー合成にはスチレン、ビスフェノールA、テレフタル酸などの芳香族系モノマーが必要だが、発酵法でこれらをつくることは一般に難しいといわれる。芳香族化合物は、発酵の阻害物質であることが多い。

バイオベースビルディングブロックとポリマーの関係を図13に示す。横軸はジオール、ヒドロキシカルボン酸（緑色ボックス）、ジアミンで、縦軸はジカルボン酸とヒドロキシカルボン酸（緑色ボックス）である。図中に工業化されているポリマー名を記した。黄色ボックスは生分解性ポリマーを表す。青色ボックスはその縦横のモノマーの組み合わせで、ポリマーができることを示す。ヒドロキシカルボン酸（緑色ボックス）は自己縮合するので、対角線のボックスにポリマーができる。また、図中のPBATはポリブチレンアジペート/テレフタレート（共重合体）を示す。このポリマーは生分解性である。

(2) ビニル重合

前述のようにエチレン、プロピレン、ブタジエン、イソプレン、アクリル酸などのバイオベースのビニルモノマーやジエンモノマーの開発や工業化が進んでいる。これらを重合すれば、バイオベースのポリエチレン、ポリプロピレン、ポリブタジエン、ポリイソプレン、ポリアクリル酸がそれぞれ得られる。

図13 バイオベースビルディングブロックと生成ポリマーの関係（ARC作成）

ジオール, HORCOOH 酸, HORCOOH	C2		C3			C4		C5	C6		C67ミン	C107ミン
	グリコール酸	エチレン- グリコール (EG)	乳酸	1,3-プロパン ジオール	1,2-プロパン ジオール	ブタンジオール (BDO)	3-ヒドロキシ 酪酸 (3HB)	3-ヒドロキシ 吉草酸 (3HV)	イソソルバイド	ε-カプロラク トン	ヘキサメチレン ジアミン (HMDA)	デカメチレン ジアミン
C2	グリコール酸	ポリグリコール 酸										
C3	乳酸		ポリ乳酸									
C4	コハク酸					PBS						
C5	3-ヒドロキシ酪酸 (3HB)						PHA (共重合体)					
	3-ヒドロキシ吉草酸 (3HV)											
	メチレンコハク酸											
C6	アジピン酸					PBAT					ナイロン 66	
	ε-カプロラク トン									ポリカプロ ラクトン		
	フレンジカルボン酸 (FDCA)	PEF										
C8	テレフタル酸	PET		PTT		PBT PBAT						
C10	セバシン酸										ナイロン 610	ナイロン 1010
	ジフェニルカーボネート (DPC)								特殊PC			

緑色はヒドロキシカルボン酸(OH-R-COOH)
PBATはポリブチレンアジペート/テレフタレート

黄色は生分解性プラスチック

青色は重合体が得られる可能性がある組み合わせ

6 バイオプラスチック

バイオ化学品を原料にしてつくられた高分子物質をここではバイオプラスチックと定義する。

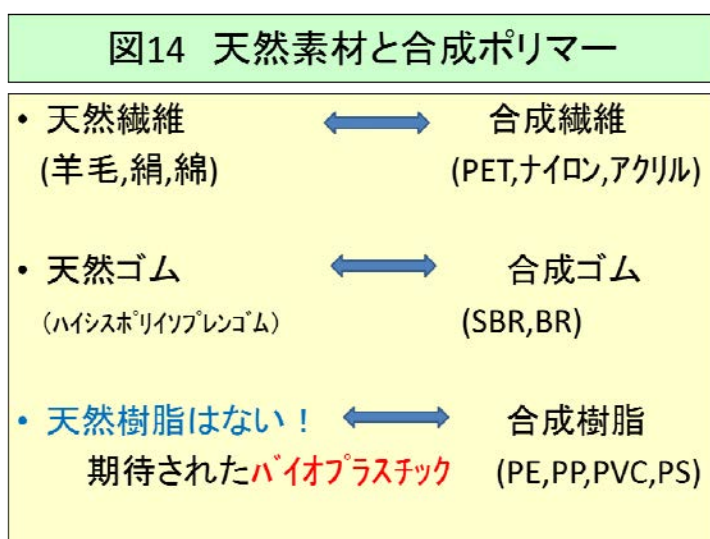
ただし、生分解性ポリマーは石油化学品でもバイオプラスチックに含める。

バイオプラスチックについては、ARCレポート（RS-926）、「広がるバイオベースプラスチック」、2010年11月に詳しい¹⁴⁾。

6.1 天然素材と合成ポリマー（図14）

天然ゴム、天然繊維は昔から知られている。天然ゴムや綿は植物バイオマス由来であり、羊毛や絹は動物がつくったタンパク質ポリマーである。天然ゴムはゴムの木か

らとったラテックスを凝固させて得られる高い分子量のポリイソプレンポリマーである。構造は99%以上の1,4-シス構造で極めて高い立体規則性を持っている。天然ゴムは弾性に特に優れ（走行時の発熱が低く）、乗用車タイヤのカーカス部分や大型トラックのタイヤにはなくてはならないものである。乗用車タイヤのトレッドを中心に使用されている合成ゴムとすみ分けている。天然繊維は立体規則性ポリマーですでに繊維状になっていることから、紡績により糸にすることができる。羊毛の風合いや高級感、絹の光沢、綿の吸水性など天然繊維の良さは合成繊維で置き換えることはできないので、両者は市場で共存している。



自然界の不思議であるが、天然ゴムと天然繊維は存在するが、“天然樹脂”はほとんど存在しない。テルペン樹脂、乾性油や半乾性油（塗料、現在はエステル基を導入したアルキド樹脂に変わった）などがあるが、ポリエチレン、ポリプロピレン、PETなどに比肩するようなものは見当たらない。かつて“バイオプラスチック”の研究が熱心に取り組まれた一つの理由は、自然界にない“天然樹脂”を自ら創造したいというケミストの夢があったのかもしれない。

6.2 紙と再生セルロース

再生可能資源であるセルロースを利用したものに、紙と再生セルロースがある。紙は木材のパルプからつくられる。副生物のリグニンは燃焼して発電に利用される。日

本の製紙メーカーは大きな発電能力を持ち、自家用以外に売電しているところがある。再生セルロースの代表はレーヨンである。パルプを二硫化炭素とアルカリで溶解した液を紡糸後、硫酸浴中で凝固再生してファイバーをつくるというものである。また、特殊な再生セルロース繊維にベンベルグがある。これは綿花のコットンリントーを原料にして、銅—アンモニア溶液に溶解して紡糸して、酸浴中で凝固させたものである。紙も再生繊維もセルロース原料であるためバイオベースであることは間違いない。

6.3 第一世代のバイオプラスチック——生分解性プラスチック

(1) PHA（ポリヒドロキシアルカン酸）

“バイオプラスチック”として最初に脚光を浴びたのは、PHA（ポリヒドロキシアルカン酸）であった。微生物が直接プラスチックを合成すること、生分解性であることが注目された。最初に見いだされたのは、ホモポリマーのポリヒドロキシ酪酸（PHB）であった。しかし高い融点のため、加工温度を高くしなければならずポリマーが劣化してしまう問題があった。ICIはポリヒドロキシ酪酸（PHB）とポリヒドロキシ吉草酸（PHV）の共重合体を産生する株を見出した。これは融点が低く、加工しやすいものであった。ICIは1981年にBiopoleの商品名で販売した。その後、このビジネスはMonsanto（米）に引き継がれ、さらに現在はMetabolix（米・1992年設立のバイオプラスチック会社）に引き継がれた。カネカも理研の土肥 義治教授との共同研究から新規なPHAを開発し、商品化している（商品名 アオニレックス）。

微生物の細胞内でPHAが産生することは驚くべきことであるが、当初はPHAを細胞から取り出すプロセスが面倒でコストがかかる問題があった。現在は相当改善していると思われる。

微生物に有用な天然樹脂をつくらせたという点で、PHAは人がつくった最初の“天然樹脂”ということができる。

(2) ポリ乳酸（PLA）

生分解性ポリマーの中で生産量が多いのは、ポリ乳酸である。コーン（トウモロコシ）を原料に発酵で乳酸をつくる。できた乳酸を二量化した後、開環重合してポリ乳

酸をつくるというものであり、発酵と合成の組み合わせである。原料にL型の乳酸を使い、L型のポリ乳酸を得る。生分解性があり、再生可能資源からつくられたバイオプラスチックである。ポリ乳酸は米国の穀物メジャーのCargillと化学会社のDowが共同で開発し、合弁会社Cargill・Dowが大規模に生産を始めた。現在はCargill系のNatureWorks LLCがビジネスを引き継いでいる。世界的に用途開発が行われ、需要が拡大し、バイオプラスチックの代表となった。ポリ乳酸はプラスチックとしては物性的に脆い欠点があり、これを改良すべく多くの研究が行われてきた。帝人はL型ポリ乳酸とD型ポリ乳酸のステレオコンプレックスをつくり、商品化した。エンジニアリングプラスチック並みの物性と言っている。

(3) ポリブチレンサクシネート (PBS)

ポリブチレンサクシネート (PBS) は、1,4-ブタンジオールとコハク酸の縮合でつくられる生分解性プラスチックである。昭和電工などが製造している。モノマーは石油化学品が使われていたが、両モノマーともにバイオベースのものに置き換わるであろう。

(4) ポリグリコール酸

ポリグリコール酸は生分解性プラスチックとして古くから知られていたが、高分子量が得られにくかった。クレハはグリコール酸を二量化した後、熔融重合し、さらに固相重合により高分子量化に成功した。米国に有機合成法のモノマープラント (DuPont法) とポリマープラントがある。製品は生分解性であるが、石油化学品なのでバイオベースではない。

以上のPHA、ポリ乳酸、PBS、ポリグリコール酸はいずれも脂肪族ポリエステルである。

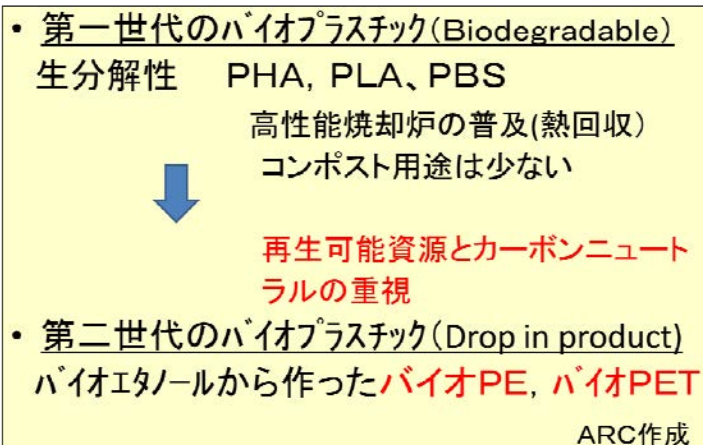
6.4 第二世代のバイオプラスチック——ドロップ イン プロダクト

図15に示すように、時代は移り、バイオプラスチックに求められる要件が変わってきた。

当初、バイオプラスチックといえば生分解性プラスチック (Biodegradable Plastic) の意味合いが強かった。いたるところにプラスチックの廃棄物あふれ、焼

却炉で燃やすと炉を傷めるので燃やせない、土に埋めても分解しないし、日本の場合は埋める場所にも事欠く状況であった。生分解性プラスチックはこれらの問題を解決してくれる救世主のように期待された。

図15 バイオプラスチックの変遷



しかし、生分解性プラスチックは供給量が十分でなく（生産量が少なく）、品質的にも十分ではなかった。またトウモロコシなど食料を原料としており、価格も高いという欠点があったため、石油化学製ポリマーを置き換えるには至らなかった。また、コンポスト（堆肥）への利用も限られていた。

そのうち、新規な高性能の高温焼却炉が開発され、プラスチックの焼却処理が可能となった。ポリ塩化ビニルの焼却も問題なくなった。全国の自治体にこの高温焼却炉が一斉に導入された。これまで燃えないゴミとして分類されてきたプラスチックごみが、燃えるごみになった。

その後、バイオプラスチックに新たな意味が持ちこまれた。バイオマス由来のプラスチックもバイオプラスチックと呼ぶようになったのである。再生可能資源由来であることと、地球温暖化の原因である温室効果ガスに関してはカーボンニュートラルであることが重視された。バイオエタノールから合成したポリエチレンはバイオポリエチレンと呼ばれる。またバイオエタノールからつくられたエチレングリコールを使ったPETまでバイオPETと呼ばれるに至った。これら、バイオポリエチレンやバイオPETは“ドロップ イン プロダクト”と呼ばれる。既存のポリエチレンやPETと同じもの

（品質）であるという意味である。従来品とバイオベース製品の区別が心配になるが、C14NMRを使えば区別がつくので認証が可能である。木材の年代測定に使う方法と同じである。

このように、バイオプラスチックの意味や範囲が大きく拡大してきている。しかもドロップ イン プロダクトに強力な支援企業群が現れた。Coca-ColaはPETボトルに再生可能資源を使ったPET 30を採用することを2009年に表明した。消費者ブランド会社（Consumer Brand companies）のCoca-Cola、Pepsi、Danone、Unilever、P&Gなどがボトルや包装容器などにバイオPETを続々と採用し始めたのである。差し迫った資源・環境問題に対して再生可能資源を利用することを企業理念に据えている。従来品と変わらないので品質的に安心であり、従来の加工機械が使えるので便利である。

6.5 新規なビルディングブロックを導入したバイオプラスチック

構造が公知のドロップ イン プロダクトだけでなく、バイオ由来の化学構造をもった新規バイオプラスチックの創出が期待される。そういう試みとして注目されるものを二つ挙げる。一つはPEF（ポリエチレンフラノエート）であり、もう一つはイソソルバイト骨格の入ったポリカーボネートである。

(1) PEF（ポリエチレンフラノエート）

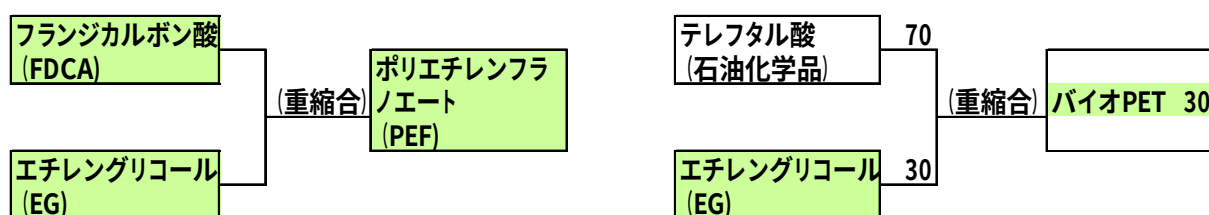
オランダのAvantium Chemicals（2000年にRoyal Dutch Shellからスピンオフした会社でコア技術は触媒化学）ではバイオベースの新規ポリマーであるPEFを開発中である（YXY technology）。

PEFは既存のPETの代替、特にPETボトルの代替することを目指している。Coca-Cola、Danone、ALPLA（オーストリア・ヨーロッパ最大のパッケージメーカーでPETボトルのコンバーター）と共同開発契約を結び開発中である。

Coca-Colaは次世代のPlantBottleとして、AvantiumのPEFボトルと100%バイオベースのPETボトルを候補に挙げてそれぞれ共同開発している。後者についてはバイオベースのテレフタル酸を開発中のVirent（米）とGevo（米）と提携した。

フルクトース（糖）を脱水素してつくったヒドロキシメチルフラールを酸化してつ

くったフランジカルボン酸と、バイオベースのエチレングリコールを縮合すると100%バイオベースのPEFができる。PETのテレフタル酸（石油化学品）の代わりにフランジカルボン酸（バイオベース）を使うことが特徴で、バイオベースのエチレングリコールを使用することは共通である。PEFは、100%バイオベースであることが大きな特徴になっている。一方、現状のPETはエチレングリコールの分の30%だけがバイオベースであるバイオPET 30である。



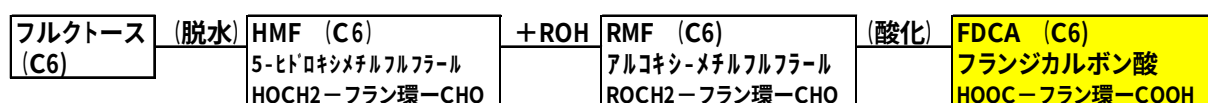
PEFはPETに比べ酸素バリアが10倍高く、炭酸ガスバリアが4倍高く、水蒸気バリアが2倍高い。また熱的にはガラス転移温度（Tg）が12℃高く（PEF 86℃、PET 74℃）耐熱性にすぐれ、結晶融点が30℃低い（PEF 235℃、PET 265℃）ので加工しやすい。また引張強度が1.6倍高い。以上のような優れた性能を持っていると宣伝している。二酸化炭素の発生量はPETに比べ70%少ない。また、PETに混ぜてリサイクルが可能で、量的に多くなれば単独のリサイクルも可能である。新規化学物質としての承認も得ており、食品に接触するプラスチック包装・容器としての安全性試験にも合格して承認を得ている。

用途面の特徴としては、従来の炭酸飲料用の複層ボトルに対して一層ですむことや、ポテンシャル用途としてビールボトル、ホームケア・パーソナルケア用のボトルなどを挙げている。ガスバリア性が高いため、これまでPETではできなかったビールボトルが可能になるといっている点が注目される。

ただし、いくつかの情報ではポリマーが黄色に着色しているといわれている。無色透明が理想である。フラン構造による本質的なものとは思われないので、モノマーの精製や重合技術の改良研究が必要である。よく知られているようにPETボトルを中空成形するには、繊維やフィルム用グレードに比べて熔融粘度の高い高分子量グレード

が必要である。通常の溶融重合法では高分子量化に限界があり、特別な固相重合法により分子量を上げている。PEFもボトルをつくるには、高分子量PEFが必要になる。高分子量化する際に着色することが多いので、着色しない重合法の開発が必要である。

モノマーのフランジカルボン酸（FDCA）は植物の糖を原料にHMFとRMFを経由してつくられる。ステップが長いので、ブレイクスルーがないとテレフタル酸にコスト的に太刀打ちできないかもしれない。



AvantiumはオランダのGeleenに20トン/年のパイロットを持っている。2015年に40-50千トン/年のプラント計画を発表していたが、具体化の発表はこれまでない。最近のAvantium ホームページのニュース（2014年6月5日）よれば、投資コンソーシアムが設立されAvantium に対して50百万ドル（約50億円）の投資が決まった。これにより、商業プラント建設が具体化するであろう。コンソーシアムのメンバーはSwire Pacific（香港、金融などのコングロマリット）、Coca-Cola、Danone、ALPLAとAvantiumの既存株主である。

(2) イソソルバイト骨格をもつポリカーボネート

三菱化学と帝人はイソソルバイト骨格（環状のジオール）をもつポリカーボネートを開発し、販売している。三菱化学品はイソソルバイト（環状のジオール）と他のジオールのジオール混合物とジフェニルカーボネート（DPC）を反応してつくられる共重合ポリカーボネートである。また原料のイソソルバイトは、フランスのRoquetteから輸入している。イソソルバイト骨格をもつポリカーボネートは従来のポリカーボネート（ビスフェノールAタイプ）に比べ、表面硬度が高いことなどが特徴である。

表14に、これまで取り上げたバイオプラスチックの概要をまとめた。

表 14 バイオプラスチックの概要 (ARC 作成)

略号	ポリマー名	モノマーの製法 原料、プロセス	モノマー	発酵・重合	生分解性	性質 ガラス転移温度、融点 T _g 、T _m	製造メーカー(商標など)
PHA	ポリヒドロキシアルカン酸 (ポリエステル共重合体)	グルコース→ 微生物細胞内産生 → PHAポリマー			あり	HDPE、PPライク 2℃、154℃	Metabolix (PHA ハイオポリマー) カネカ (アオニレックス) 1000トン (2011年5月稼働)
PLA	ポリ乳酸 (ポリエステル)	グルコース、発酵	乳酸	二量化した後 開環重合	あり	ポリスチレン、PEライク 62℃、170℃ (62℃、210℃)	NatureWorks (Ingeo) 14万トン (帝人 (バイオフロント) ステレオコン プレックス型PLA PLA: 性質のカッコ内)
PGA	ポリグリコール酸 (ポリエステル)	現状 合成品	グリコール酸	二量化した後 開環重合 (溶融 重合後固相重合)	あり	ガスバリア性 35-40℃、225-230℃	クレハ (クレダックス) 米ウエスト バージニアに工場建設 (2011年) シェールガス掘削用素材
PBS	ポリブチレンサクシネート (ポリエステル)	合成から発酵に 移行中	コハク酸	重縮合	あり	HDPEライク マイナス34℃、114℃	昭電 (ビオノレ、石化原料ベースから バイオコハク酸に切り替え 3000トンから5000トンへ 三菱化学 タイPTTと提携生産計画)
		合成から発酵に 移行中	1,4-ブタンジオール				
PEF	ポリエチレンフタレート (ポリエステル)	フルクトース (糖)、 化学反応	FDCA (フランジカルボン酸)	重縮合 (溶融重合後 固相重合か)	なし	PETよりガスバリアに に優れる 86℃、235℃	Avantium開発中
		バイオエチレン、 化学反応	エチレングリコール				
PTT	ポリトリメチレンテレ フタレート (ポリエステル)	パラキシレン、酸化 グルコース、発酵	テレフタル酸 プロパンジオール	重縮合	なし	PETの耐汚染性 とナイロンの弾性 回復性を併せ持つ	Dupont (Solona) 繊維が主用途 (カーペットなど)
特殊PC	イソソルバイドと他ジオール のポリカーボネート共重合体	グルコース、化学反応 合成品 合成品	イソソルバイド ジオール DPC	共重縮合	なし	PCライク PCより表面硬度 が高い	三菱化学 (DURABIO) (帝人 (Planext))
ハイオPE	バイオポリエチレン	バイオエタノール、 脱水反応	エチレン	既存の重合法	なし	既存PEと同じ マイナス70-20℃、132℃	Braskem (I am green) : HDPEと LLDPE合計で20万トン/年
ハイオPP	バイオポリプロピレン	バイオエチレン、 各種化学反応ルート	プロピレン	既存の重合法	なし	既存PPと同じ マイナス16℃、170℃	Braskem 工業化準備中
ハイオPET	バイオポリエチレンテレ フタレート (ポリエステル)	パラキシレン、酸化	テレフタル酸	既存の重合法 (PETボトル用: 溶融重合後に 固相重合)	なし	既存PETと同じ 74℃、255℃	多数
		バイオエチレン、 化学反応	エチレングリコール				
黄色 生分解性 緑色 ドロップ イン プロダクト					黄色 生分 解性		

6.6 バイオプラスチックの市場と今後の予測

ドロップ イン プロダクトは従来品と同じ物性と加工性が保証されるのでメーカーにとってもユーザーにとっても安心で、研究開発の手間もいらない。しかも再生可能資源からつくられたバイオポリマーとして、ユーザーや消費者に評価される。このような状況から、今後バイオPETやバイオポリエチレンが主流となることは間違いない。将来の大きな伸びを期待していたポリ乳酸など従来の生分解性プラスチックは苦しい立場に立たされると考えられる。

バイオプラスチックの需要予測は、いくつかの機関や調査会社が出している。このなかで、European Bioplasticsの調査結果が妥当のように見える。

European Bioplastics は EUのバイオプラスチック関連メーカー約70社が加盟している協会で、定期的に会議を開き、また市場予測を発表している¹⁵⁾。2013年に発表された資料には、2012年のバイオプラスチックの生産能力と2017年の生産能力予測（表15、図16）が記載されている。それによれば2012年の生分解性バイオプラスチックは605千トン、非生分解性のバイオプラスチックが791千トンで拮抗しているが、2017年には生分解性バイオプラスチックは1,000千トン、非分解性バイオプラスチックが5,185千トンになると予想している。非分解性バイオプラスチックが大きく伸びて、バイオプラスチック全体の80%を超える。非分解性バイオプラスチックのなかではバイオPET 30が94%を占めている。2017年のバイオPET 30の生産能力は4,725千トンである。PET 30を4,725千トンつくるためには、その30%にあたる約1,500千トンのバイオエチレングリコールを製造する必要がある。

バイオPETはバイオベースであること、通常PETと同様にリサイクルできることから環境イメージがよく、ボトルメーカー、化粧品や食品メーカーに採用され、ボトルや包装容器の使用が増えるものと考えられる。

表15 世界のバイオプラスチックの生産の生産能力推移と予測

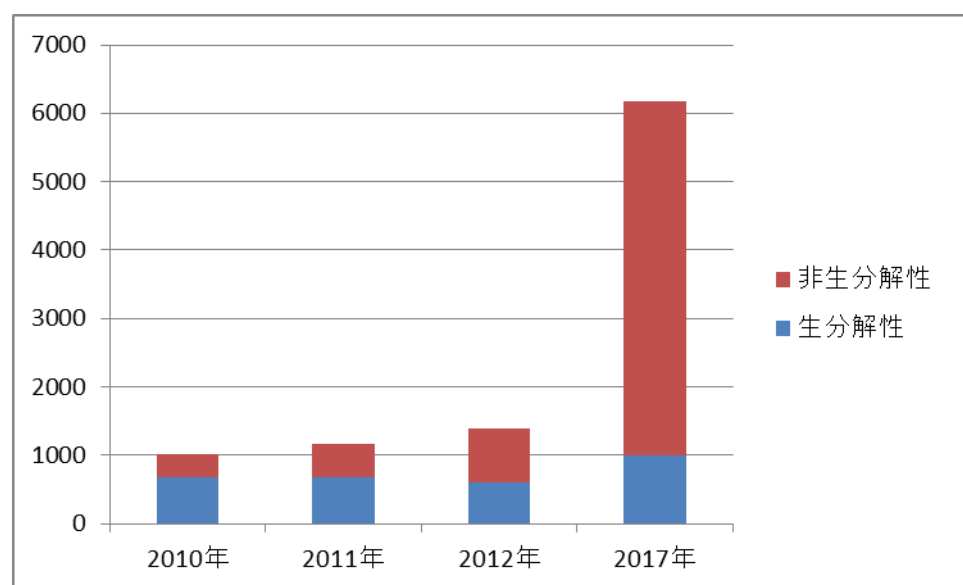
分類	バイオプラスチック	2010年生産能力 生産能力 (千トン)	2011年 生産能力 (千トン)	2012年 生産能力 (千トン)	2017年 生産能力 (千トン)	2017/2012 比率
生分解性	PLA			187	426	2.3
	生分解性ポリエステル*			191	222	1.2
	生分解性デンプンブレンド			159	167	1
	PHA			33	148	4.4
	再生セルロース**			28		
	その他			7	37	1.1
	(生分解性 合計)	674	673	605	1000	1.6
非生分解性 バイオベース (含 ドロップ イン プロダクト)	バイオ PE			200	272	1.4
	バイオ PET30			541	4725	8.7
	バイオ PA			34	87	2.6
	その他			15	100	9
	(非生分解性 合計)	342	486	791	5185	6.6
	合計	1016	1161	1395	6185	4.4

*PHA,PBS,PBAT(ポリブチレンアジバート/テレフレート) など

出典 European Bioplastics¹⁵⁾

**水和セルロースフォイルのみ

図16 世界のバイオプラスチック生産能力推移と予測¹⁵⁾、単位千トン



出典 European Bioplastics¹⁵⁾

おわりに

石油資源脱却、さらには化石燃料脱却を目指して、再生可能資源（renewables）を利用するバイオマス化学の研究開発が世界で進められてきた。全体的に遅れ気味であるが、開発が進み、いくつかは工業化された。

当初は、再生可能資源を原料に発酵技術を用いて各種化学製品がつくられることが想定されたが、現実には発酵技術ばかりでなく従来の石油化学技術が幅広く動員された。発酵技術の深耕ばかりでなく、バイオマス原料を使いこなすための新たな石油化学技術（新規合成ルート、触媒、プロセス）の開発が進んでいる。そして、バイオマス化学全体を見ると、これら技術が統合的、融合的に組み合わされた複合技術分野になっている。

ただし、セルロース原料利用の難しさをはじめ技術課題も多く、またコスト的には政府の支援なしには成り立たないことが多い。これは、太陽電池、風力発電など再生可能エネルギーと共通した状況である。しかし、長期的に予想される石油をはじめとする化石燃料の高騰や枯渇に対する一つの有効な選択肢として、バイオマス化学の継続的推進が必要である。

米国はガソリンの使用量を減らすべく、バイオエタノールを大規模生産し、約10%を代替する（E-10）というイノベーションを実現した。その評価はさまざまであるが、壮大な社会実験に取り組み、目標を達成したことは米国の底力を感じさせる。シェールガスがもっと早く見つかっていれば、この政策はここまで進まなかったであろう。

欧州はバイオマス化学の関心が高く、大きな研究投資を継続している。技術開発の遅れを認識し、技術開発スピードをあげるべく、EU全体で研究開発投資を強化する計画が最近発表された。

日本は以前からバイオプラスチックの関心は高く、研究と事業化が行われてきた。一方、バイオ化学品の開発には日本の化学会社はほとんど関与していない。むしろ、日本の商社の関与が大きい。

バイオマス化学についてのアジアのプレゼンスは大きくないが、今後発展して世界に

おけるアジアの比重は高まると予想される。世界から中国に持ち込まれる技術が開花し、また東南アジアで固有のバイオマス原料を活用したバイオマス化学が発展すると予想される。

バイオマス化学の今後を予想することは難しいが、ポイントになるのはバイオPETと燃料用バイオエタノールの動向である。

PETはもともと優れた品質とリサイクル性を持っており、これに100%のバイオベース化とガスバリアー性向上などの品質改良が実現するとバイオPETは大きく飛躍するものと思われる。それには、いくつかの技術のブレイクスルーが必要である。

米国は再生可能エネルギー基準を決めた2007年に比べ、シェールガス・オイルの発見、増産という燃料供給面の状況変化や、今後ガソリン使用量が暫時減少していくという需要面の状況変化がある。このように、米国のバイオ燃料のニーズは弱まっているので、バイオアルコールの将来はどうなるであろうか。燃料用途から化学用途への大きなシフトが起こる可能性がある。バイオマス化学の根幹原料になり、バイオPET用のエチレングリコールやバイオポリエチレンに大量に使用されることが想定される。

引用・参考文献

- 1) ARCレポート (RS-970)、“「石油化学」から「天然資源化学」へ”、2014年4月
- 2) Industrial Organic Chemicals, Wittcoff, Ruben, Plotkin, Wiley, 2011
有機工業化学の教科書（単行本、全807頁）で、有機工業化学全体を知るに便利で詳しい。本レポート作成に使用した参考書である。
- 3) EIA, International Energy Statics
www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm
- 4) EIA, Short Term Energy Outlook November 2013
- 5) EIA, Annual Energy Outlook 2014 Early Release
- 6) CRS Report for Congress : Renewable Fuel Standard (RFS) : Overview and issues
R. Schepf and B.D. Yacobucci (Congressional Research Service) 2013. 3. 14
- 7) Green Car Congress EPA proposes reduction in cellulosic biofuel and total

renewable fuel standards for 2014. (2014.5.28)

8) Beta RenewablesとMossi Ghisolfi Group関係

①JBA アルコール・バイオマス研究会講演会、2014年5月9日

Proesa™: breakthrough technology for production of advanced biofuel from cellulosic biomass, Mr P.Picciotti, Beta Renewables

②Bioplastics Conference 2013 ,17.Sept., Mossi Ghisolfi Group PET Project

www.proplast.it/Portals/0/files/Cecile_Bourland_17092013.pdf

9) 西崎 秀治、バイオプロセスによる化学品生産の開発動向とトピックス

DIC Technical Review, 21-35, No.13/2007

10) Top Value Added Chemicals from Biomass Volume 1-Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas (2004 Aug, DOE)

11) IEA Bioenergy Task42 (Biorefineries) 関連報告

Overview of biorefineries and current status, E.Jong (Avantium,cochair IEA bioenergy Task 42),Brussels,2014.2.11-12

[https://colloque.inra.fr/eubiorefineryprojectsfinalconf/.../1. %20Ed%20de %20Jong%20Avantium.pdf](https://colloque.inra.fr/eubiorefineryprojectsfinalconf/.../1.%20Ed%20de%20Jong%20Avantium.pdf)

12) IEA Bioenergy Task42 (Biorefineries) 関連

Green building blocks for biobased plastics P.Harmsen and M.Hackmann (Wageningen UR Food & Biobased Research),March,2013

13) Myriantホームページ www.myriant.com/products/bio-succinic-acid.cfm

14) ARCレポート (RS-926)、“広がるバイオベースプラスチック”、2010年11月

15) European Bioplastics (EUのバイオプラスチック関連メーカー約70社が加盟している協会、定期的に会議を開きまた市場予測を発表している。

2013年発表の市場予測は、

<http://en.european-bioplastics.org/market/market-development/production-capacity/>

16) 各社ホームページ (略)

以上

<本レポートのキーワード>

バイオマス化学、天然資源化学、石油化学、バイオ燃料、バイオエタノール、バイオ化学品、
バイオプラスチック、発酵、バイオプロセス、バイオリファイナリー、バイオPET

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

このレポートの担当

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

お問い合わせ先 03-3296-5056

E-mail fukawa.id@om.asahi-kasei.co.jp

株式会社旭リサーチセンター

東京都千代田区神田神保町1-105 神保町三井ビルディング

電話 (03)3296-3095 (代)

E-mail: arc@om.asahi-kasei.co.jp

注：このレポートはARC会員および旭化成グループを対象としております。内容の無断転載を禁じます。