

## 第4章 バイオポリマー開発における技術シーズと今後の動向

## 第4章 バイオポリマー開発における技術シーズと今後の動向

これまで、バイオポリマーはデンプンなどのバイオマス資源ベースのポリマーやバクテリアの産出するポリマーといった、石油ベースポリマーと異なる構造のポリマーが主流であったが、近年は、ポリエチレンやポリプロピレン、ポリカーボネートなど現在の化学産業で広く一般に使用されている石油ベースポリマーを、バイオ・エタノールやバイオメタノールなどから製造するための研究開発が活発化している。

このことから、既存のポリ乳酸に代表されるバイオポリマーの諸物性、関連技術シーズとともにバイオ・ポリエチレン、バイオ・ポリプロピレン製造に関する技術シーズまで広く調査することを目的とした。

本報告書では3節立てとして、以下について調査した結果をまとめている：

### 第1節：

バイオポリマーに関する社会的背景(行政上の施策及び社会的な取り組み)、社会的ニーズ、およびバイオポリマー利用の現状

### 第2節：

既存のバイオポリマー(ポリ乳酸などのバイオマスを原材料としたポリマーやポリヒドロキシアルカノエートなどのバイオで作るポリマー)の製造方法、諸物性、関連技術シーズ、さらに自動車部材への利用状況およびその可能性と課題

### 第3節：

既存のポリマーを化石資源ベースからバイオベースに置き換えるための技術の動向の現状

## 目 次

1. バイオポリマー:社会的背景・社会的ニーズ・利用現状	1
1.1 行政・政策上の扱い	1
1.1.1 バイオテクノロジー戦略大綱	1
1.1.2 バイオマス・ニッポン総合戦略	3
1.1.3 各種法上の扱い	6
1.2 普及に向けた社会的な取り組み	7
1.2.1 バイオテクノロジー戦略大綱、及びバイオマス・ニッポン総合戦略に基づく取り組み	7
1.2.2 自治体や民間で展開されている普及と活用への取り組み	12
1.3 BPの普及に向けたJBAの取り組み	18
1.3.1 バイオマス・プラスチックの実用化促進社会システム構築調査	18
1.3.2 バイオマス・プラスチック3Rシステム化可能性調査事業	21
1.3.3 バイオマスプラスチック容器包装再商品化システム検討事業	25
1.4 海外の取り組み(概観)	29
1.4.1 EU(ドイツ)	29
1.4.2 米国	29
1.4.3 OECDにおける論議	34
1.5 利用の現状(市場の動向)	35
1.5.1 市場規模	35
1.5.2 市場動向	36
1.6 バイオポリマーによる資源・環境負荷低減効果	39
1.6.1 役割の変化	39
1.6.2 資源・環境負荷評価の事例	39
1.6.3 高機能化バイオポリマーの事例	41
2. バイオポリマー:種類・製造方法・特性・技術的シーズ・自動車部材への利用状況及びその可能性	45
2.1 概観	45
2.2 天然物系ポリマー	47
2.2.1 セルロース及びセルロース誘導体	47
2.2.2 でん粉及びでん誘導体	49
2.2.3 バイオマス変性系、及びバイオマス複合系	50
2.3 化学合成系ポリマー	51

2.3.1	ポリ乳酸	.....51
2.3.2	ポリグルコール酸	.....52
2.3.3	ポリトリメチレンテレフタレート	.....52
2.3.4	ポリブチレンサクシネート	.....55
2.3.5	ポリオール	.....57
2.3.6	ナイロン・11	.....57
2.3.7	バイオ・ポリオレフィン	.....58
2.4	バイオ合成系ポリマー	.....59
2.4.1	ポリヒドロキシブチレート	.....59
2.4.2	ポリ- $\gamma$ -グルタミン酸	.....60
2.5	バイオポリマー と 生分解性プラスチック	.....62
2.6	特性	.....64
2.7	自動車部材への利用状況、及びその可能性	.....66
2.7.1	耐久性	.....66
2.7.2	耐熱性	.....67
2.7.3	自動車部材としての展開事例と課題	.....69
3.	バイオポリマー:既存ポリマーを化石資源からバイオベースに置き換えるための技術動向の現状	.....73
3.1	概観	.....73
3.2	ポリオレフィンの BP 化	.....75
3.2.1	ポリエチレンの場合	.....75
3.2.2	ポリプロピレンの場合	.....75
3.2.3	Braskem 社によるエチレン及びプロピレンの製造スキーム	.....78
3.3	既存ポリマーの BP 化実現に向けた課題	.....79
3.3.1	発酵法の技術課題	.....79
3.3.2	ガス化法の課題	.....80
3.3.3	既存ポリマーの BP 化実現の条件は	.....82

## 1. バイオポリマー:社会的背景・社会的ニーズ・利用現状

バイオ技術(BT)とは“生物の構成部分や機能を利用して有為な製品やサービスを作り出す技術”と定義され、微生物や直接的に酵素を利用した発酵技術に加えて遺伝子組換え技術・細胞融合技術などが要素技術とされる<sup>1)</sup>。ここではこれらのバイオ・プロセス(:生体内で酵素を触媒とする反応プロセス)を駆使してエネルギー生産・物質創出する技術を広く解して、バイオマス(生物資源)を原材料として、或いは資材として利用する技術を含む用語としてとらえる。

この様な視点から見ると、BTを多様なレベルで適用して多様なポリマーが製造され利用されている。この種のポリマーをここでは“バイオポリマー(BP)”と総称することとし、本章では我が国における行政・政策上の位置づけ、社会的な必要性と開発・利用状況について概観する。

### 1.1 行政・政策上の扱い

BPが国の政策対象になったのは2002年からである。

2002年は、日本バイオ産業人会議(JABEX)の”b-Japan 計画詳細提言”(5月)、内閣府の”バイオテクノロジー戦略会議”(7-12月)、経済産業省の“[生物機能活用型循環産業システム創造プログラム](#)”(4月)、農林水産省の“バイオ生分解素材の開発と普及に関する研究会”運営(3-7月)、及び“バイオマス・ニッポン総合戦略プロジェクト”(7-12月)など、BPの開発と普及に関連する施策が精力的に検討された。これらは1990年代後半からのBTを新産業創出のための中核技術の一つとしてとらえる一連の施策の延長上にあり(表 1.1.1)、“バイオテクノロジー戦略大綱”(BT戦略会議提出;同年12月6日総理大臣採択)と”バイオマス・ニッポン総合戦略“(1府5省提案施策;同年12月27日閣議決定)としてわが国の基本戦略となった。

今日BPは枯渇性資源の節約と地球温暖化防止に向けた低環境負荷資材としての期待が高く、またそれを担う資材であることが要請されているといえるが、当初はBTによる新産業創出政策の中で着目された資材であった。また当時は生分解性ポリマー(BdP)との識別意識も曖昧で、“漠然”とした概念であったともいえる<sup>2)</sup>。生分解性の概念からの意識的な“識別”は、表 1.1.1中に引用されている“バイオ生分解素材の開発と普及に関する研究会”の中で論議されていた。

#### 1.1.1 バイオテクノロジー戦略大綱

JABEX(世話人代表:歌田味の素株式会社相談役(当時))はBTによる新産業創出・経済活性化のための様々な提言活動を進め、“b-Japan 計画詳細提言”を発表した(02年5月28日)。

---

1) 太田隆久監修, (財)バイオインダストリー協会バイオテクノロジーの流れ編集委員会, ”バイオテクノロジーの流れ -過去から未来へ”(改訂第2版), p. 110(化学工業日報社:2002年)

2) 今日でも定義は定まっていない。

表 1.1.1 “BT戦略大綱” 及び “BN 総合戦略” に至る生物化学産業創出を巡る国の施策 (\*a)

---

---

**1. BT の21世紀を切り開く戦略的基幹技術としての位置づけと加速を意図した施策:**

- ① 経済構造の変革と創造のための行動計画 (1997年5月16日;閣議決定)
- ② ライフサイエンスに関する研究開発基本計画 (1997年8月13日;内閣総理大臣決定)
- ③ 産業再生計画 (1999年1月29日;閣議決定)

**2. 重点的かつ加速的な BT の展開による生物化学産業の創出を目指した基本戦略と施策:**

- ① BT 産業の創造に向けた基本方針 (1999年1月29日;5省庁<sup>(\*b)</sup> 申合わせ)
- ② BT 産業の創造に向けた基本戦略 (1999年7月13日;5省庁<sup>(\*b)</sup>)
- ③ バイオ産業技術国家戦略 (1999年12月10日;国家産業技術戦略委員会, JABEX バイオ産業技術戦略委員会)
- ④ 生命科学の21世紀に向けたバイオ施策 (2000年8月;5省庁)

5省庁<sup>(\*b)</sup> の政策提言:

21世紀を“生命科学の世紀”と位置づけ、バイオインフォマティクスを駆使した高度医療システムの開発と構築、及び環境負荷の少ないバイオプロセスをベースに高福祉社会と資源循環型社会の実現を目指す。

バイオプロセスによる資源・環境問題の解決に向け、バイオマス利活用・グリーンバイオイノベーションを提言。

⇒ “バイオ生分解素材開発普及”(後出3①), 及び“b-Japan計画”(後出2⑤)の前触れとなる施策となる。

- ⑤ “b-Japan 計画” と “詳細提言” (2001年10月&2002年5月;JABEX)

グリーンバイオイノベーション施策を更に整備した民間団体の提言 ⇒ BT 戦略会議の取り上げるところとなり, ”BT 戦略大綱”として結実。

**3. バイオマスの利活用を目指した施策提言:**

- ① バイオ生分解素材の開発と普及に関する政策提言 (2002年7月;バイオ生分解素材開発普及研究会)  
⇒ バイオマスの利活用により、地球温暖化防止・資源循環型社会実現・農業林業水産業の再生を目指すとし、エネルギー及び物質生産技術の開発と産業化の実現化を図る。物質の有力対象としてバイオマス由来資材(今日のBP)を挙げる。
- ② バイオマス・ニッポン総合戦略策定に向けた政策提言 (2002年12月;バイオマス・ニッポン総合戦略策定 Prj.Team)  
3①の施策を更に中広に総合化した基本戦略で、“バイオマス・ニッポン総合戦略”として結実。

---

(\*a) 日本バイオ産業人会議編:21世紀バイオインダストリーの創造に向けた政府の戦略」資料集(2000年4月)を基に編纂。

(\*b) 科学技術庁・文部省・厚生省・農林水産省・通商産業省(何れも当時)

これに呼応して政府は“BT 戦略会議”を設立、BT 展開を戦略化する構想を打ち立て(02年7月5日)、11月23日に発表された“バイオテクノロジー戦略大綱”(以後、BT 戦略大綱)では経済産業省や農林水産省の積極的なBTへの取り組みが示され、12月6日に総理大臣の採択するところとなった。

BTの推進により「生きる」・「食べる」・「暮らす」の3場面における国民生活の向上を大きなスローガンとして掲げ、その中の「暮らす」の場面においてBPの普及が重要であるとしている。

すなわち、

- ① BdP の様な BT 関連製品の環境負荷について、原材料の製造からの製品の廃棄に至るライフサイクルを通じてエネルギー使用・温暖化への影響、循環型社会システムへの影響、有害物質の排出による影響、生態系への影響などの観点から積極的に検討を行い、環境負荷低減に資する製品についてグリーン購入の推進などにより普及促進を図る(担当:環境省)
- ② またこれらの製品の普及を図るためには標準化が重要であり、BdPに関する国際標準の提案を行う(経済産業省)
- ③ “愛・地球博”(2005年日本国際博覧会)の場で BdP 製品を積極的に導入して循環型社会像を提案し、モデル実証を通して国民の理解を深める(農林水産省、及び経済産業省)などが謳われている<sup>1)</sup>。

### 1.1.2 バイオマス・ニッポン総合戦略

米国は再生可能資源から有為なエネルギー・化学物質を生産・創出する技術の開発による生物化学産業の勃興を国家戦略としたが、わが国の同じ方向の施策が“バイオマス・ニッポン総合戦略”(以後、“BN 総合戦略”)といえる。

農林水産省は前出の“バイオ生分解素材の開発と普及に関する研究会“(座長:木村筑波大学教授(当時))を発足させた(02年3-7月)。7月迄の5回の会合を経てまとめられた報告書では、“バイオ生分解素材”とは“バイオマスを原材料とした生分解性素材”と定義され、開発・普及の必要性に始まる7項目の政策提言がまとめられている(表1.1.2)。これは通商産業省基礎産業局長(当時)の諮問委員会“生分解性プラスチック実用化検討委員会”(座長:土肥理化学研究所主任研究員(当時))がまとめた18提言<sup>2)</sup>をこの時点で総括し、更なる展開を図る指針ともいえる。

この研究会からの提言が“BN 総合戦略”では積極的に採用されており、バイオ生分解素材の開発・普及に向けた施策が織り込まれている(表1.1.3)。

1) ここでは BdP として引用されているが、実際の政策展開の段階では多くの場合、BP として読み替えられて運用されたのが実態である。

2) 生分解性プラスチック実用化検討委員会(通商産業省基礎産業局長諮問委員会(当時), 1994-95), 「新プラスチック時代の幕開け」(1995年3月)

表 1.1.2 バイオ生分解素材の開発・普及に向けた政策提言  
( バイオ生分解素材開発普及研究会:2007年7月 )

1. 開発・普及の必要性(背景)

- 地球温暖化への対策 … “Carbon Neutral” ( 追加的な CO<sub>2</sub> 排出無し )
- 循環型社会の形成
- 国内農業・農村の活性化

2. 開発・普及に向けた政策提言－7項

① 長期国家戦略の策定:

- ・方向性の明確化 … “バイオマス・ニッポン総合戦略”
- ・阻害要因と成り得る関連法制度の見直し
- ・国内開発力の強化と戦略的な産業育成 … 未利用バイオマス資源活用

② 品質向上等技術開発及び関連研究の推進:

- ・技術開発の推進 … 農林水産省・技術開発補助事業
- ・LCA 研究の推進

③ 安全性の確認:

- ・運用ルールを整備
- ・国・第三者機関による安全性の保証

④ 経済性確保に向けた政策:

- ・量産化・初期市場の創出
- ・国産原料活用による低コスト化 … 行政上の仕組み
- ・容器包装リサイクル法(通称)等に於ける負担軽減… 行政上の仕組み
- ・農業資材分野に於ける競争環境整備

⑤ 情報提供と理解促進に向けた政策:

- ・一般消費者への普及啓発
- ・識別表示制度
- ・利用者の求める具体的情報・利用による効果情報の提供

⑥ 循環型社会システムに於ける位置づけの明確化に関する政策:

- ・循環システムの確立
- ・生ゴミ堆肥の品質基準の策定
- ・循環システム確立に向けた受け皿の確保

⑦ 初期需要喚起に向けた支援等に関する政策:

- ・先進的な取り組み間の横の連携
- ・行政による率先購入 … グリーン購入法
- ・実証モデル事業の実施 … 日本型カッセル市プロジェクト
- ・有機農産物の日本農林規格の明確化
- ・愛・地球博での循環型社会構築プロジェクトへの参加
- ・環境教育への活用

注:各項目後の斜体文は執筆者コメント



表 1.1.3 バイオマス・ニッポン総合戦略大綱 — バイオ生分解素材<sup>(\*a)</sup> に関わる戦略 —  
( 2002 年 12 月 27 日 : 閣議決定 )

## 1. 具体的目標

- (1) バイオ生分解素材の原料価格の目標: ¥200-/kg
- (2) リグニンやセルロース等の有効活用を推進し, 10 種以上の製品を創出する.

## 2. 基本的戦略 ( : 具体的な行動計画)

- (1) バイオマス利活用推進に向けた全般的事項に関する戦略
  - ① バイオマス利活用システムの LCA 評価手法の開発と適用
  - ② 地域・自治体に於けるバイオマス利活用実証事業の推進
- (2) バイオマスの生産・収集・輸送に関する戦略
  - ① バイオプロセスに投入する植物由来の原料の供給拡大
  - ② コーンスターチ製造用トウモロコシの関税割り当て制度運用の見直し
- (3) バイオマス変換に関する戦略
- (4) バイオマス変換後の利用に関する戦略
  - ① グリーンプラ及びバイオ生分解素材のグリーン購入法特定調達品目としての扱い
  - ② 環境配慮型バイオマス由来プラスチック<sup>(\*b)</sup> のグリーン購入法調達方針追加
  - ③ バイオマス由来プラスチックの識別手法の検討とマルチフィルムとしての利用法のモデル的実証試験の展開
  - ④ バイオ生分解性素材の工業原料製造に関わる経済性の検証・施策・品質評価・供給体制の在り方等の検討

(\*a) バイオ生分解素材とはバイオマスを原材料とする BdP。

微生物産生系ポリヒドロキシアルカノエート(PHA)や、ポリ乳酸(PLA), 更に澱粉基 BdP がこれに相当する。

BdP には枯渇性資源を原材料とするタイプ、例えばポリブチレンサクシネート(PBS: 1,4-ブタンジオールと琥珀酸との縮合ポリマー)もあるが、近い将来にはバイオ法コハク酸が現実的な製造法になれば実用的な BdP の多くがバイオ生分解素材となる。

(\*b) バイオマス由来プラスチックとはバイオマスを原材料とするプラスチック、すなわち BP。

### 1.1.3 各種法上の扱い

2000年から本格完全施行された“容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進などに関する法律”（通称：“容器包装リサイクル法”あるいは“容リ法”）において、BdP や BP は“その他樹脂”に組み込まれ、その成形加工された容器包装は一般プラスチック製品と同様の扱いを受け続けている<sup>1)</sup>。ライフサイクルアセスメント(LCA)評価が確定している EU における扱いとは乖離が大きい。

一方 2001 年施行の“食品廃棄物リサイクル法”（通称）では、BdP はその基本方針書の中で本法の円滑な施行のための補完資材として位置づけられ、更に生分解性を示す BP 製食器具類の生ゴミとの同時処理を認め、再資源化実績量に換算する運営法が検討されると伝えられたが（日本経済新聞：02 年 6 月 20 日）、現時点において実施事例は現れていない。

2001 年から施行されている“グリーン購入法”（通称）は中央省庁による環境低負荷製品の優先的購入を図るために特定調達品目を設けており、2003 年 4 月には生分解性を示す BP 製品として透明窓付き封筒や生ゴミ回収袋、水切りネットの 3 点が登録され、以後生分解性を担保とすることなく BP 製オフィス用品など 10 種ほどの品目登録がなされているが、絶対数が少ないことから存在感に乏しい。

この様に BP の普及に関しては政策上の積極的な取り組み姿勢と、法上の扱いとの乖離が大きいことが解決されない論点として残っている。

---

1) 先の容リ法改訂審議では、BP については、“その容器包装の高度な再商品化技術による廃棄物削減効果と環境負荷低減効果を市町村との連携の下、社会実験を通して実証すること”が課題として指摘されている。“バイオマスプラスチック容器包装再商品化システム検討事業”はこれに対応した農林水産省総合食料局補助事業（本章・1.3 節・(1.3.3)項）である。

## 1.2 普及に向けた社会的な取り組み

### 1.2.1 バイオテクノロジー戦略大綱、及びバイオマス・ニッポン総合戦略に基づく取り組み

#### 1.2.1.1 ”愛・地球博”会場への導入

BPの認知及び普及を目指す両戦略の政策実現施策の一環として、“愛・地球博（2005年日本国際博覧会）”への多様なBP製品導入事業が展開された<sup>1,2)</sup>。

すなわち、①会場案内標識や幟類として、②日本政府館の外壁として、③フードコートやテーマレストランで使用される食器具として、又④会場で廃棄される100種以上の廃棄物回収袋としてBP製品が導入され、実用性と再資源化特性の実証が進められた。

この中で、(財)バイオインダストリー協会(JBA;東京)は2004年4月1日付けで“バイオプロセス実用化開発事業 R&D コンソーシアム”を組織化し、③と④に関わる事業を経済産業省委託研究開発事業”バイオプロセス実用化開発事業”として推進した(～06年3月)。

“愛・地球博”は、テーマである「自然の叡智」を具現化するために、開催の前後を通じ、また会場内外にわたった多角的な環境への配慮が基本運営方針とされ、会場内でのBP製品の活用が考えられた。会場から発生する生ごみのメタンガス化及びコンポスト化を通じた循環資源化でBP製ごみ袋(この場合、“生分解性”を担保)を補完資材として活用し、更に会場内フードコート及びテーマレストランにBP製ワンウェイ食器具(この場合に限り“生分解性”を担保)リターナブル食器具が導入された。前者では生ごみと同じ扱いをしてコンポスト化処理(図 1.2.1)、後者では廃棄段階で多様な再資源化(図 1.2.2)を実証する事業であった。

会期前の事前事業(04年4月1日～05年3月24日)の成果を活かして会期間中(05年3月25日～9月25日;会場施設への導入)、及び会期後(05年9月26日～06年3月31日;資源・環境負荷低減効果の分析及び評価)に渡る実証事業が展開された。

#### (1) 導入の概要

調理済み軽食の提供を主体とするフードコートを中心に凡そ2千万点のワンウェイ食器具(写真 1.2.1・左)が導入され、食べ残しと共に収集袋で回収後、コンポスト化処理を経て完熟堆肥とし、農地施用・栽培した農産物(野菜・果物・花卉類)を来場者やレストランへ食材などとして提供する仕組み(“バイオ・リサイクル・システム:愛・地球博モデル”)が構築された(図 1.2.3)。

1) 戦略策定時にはBdP製品の導入が意図されていたが、事業実施時点ではBPと読み替えられて運用された。

2) 経済産業省生物化学産業課,平成16および17年度バイオプロセス実用化開発事業報告書(平成17及び18年3月)[委託先:財団法人バイオインダストリー協会];大島一史・鈴木博・金井康矩・國分幸美・増永ひとみ、バイオサイエンスとインダストリー誌(JBA発行), **64**(1),45(2006)



図 1.2.1 愛・地球博会場を舞台とした BP 製品のバイオ・リサイクル・システム  
 (出所:経済産業省,平成16および17年度バイオプロセス実用化開発事業報告書  
 (平成17及び18年3月),委託先:財団法人バイオインダストリー協会)

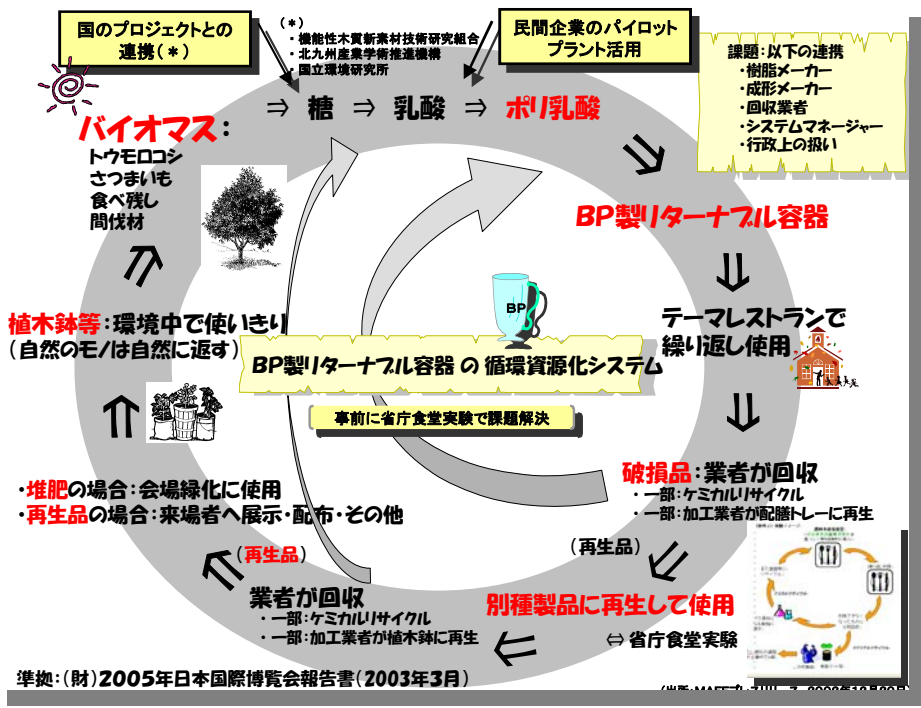


図 1.2.2 愛・地球博会場を舞台とした BP 製品の各種リサイクル・システム  
 (出所:経済産業省,平成16および17年度バイオプロセス実用化開発事業報告書  
 (平成17及び18年3月),委託先:財団法人バイオインダストリー協会)



写真 1.2.1 愛・地球博会場へ導入された BP 製食器具類

左:ワンウェイ食器具 右:リターナブル食器

( 出所:経済産業省, 平成 16 および 17 年度バイオプロセス実用化開発事業報告書  
(平成 17 及び 18 年 3 月), 委託先:財団法人バイオインダストリー協会 )

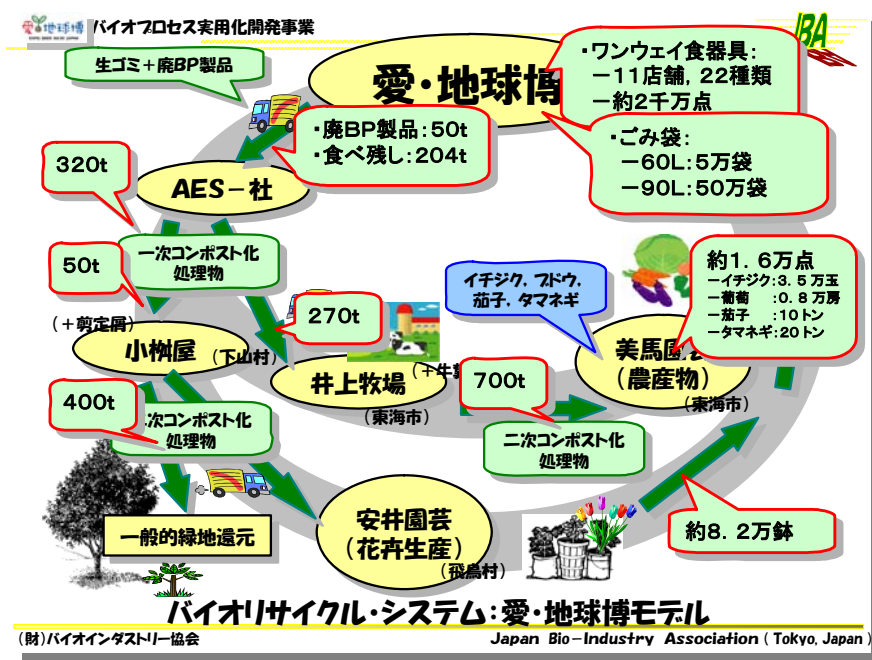


図 1.2.3 生分解性 BP のバイオ・リサイクル・システム "愛・地球博モデル"

( 出所:経済産業省, 平成 16 および 17 年度バイオプロセス実用化開発事業報告書  
(平成 17 及び 18 年 3 月), 委託先:財団法人バイオインダストリー協会 )

またテーマレストランを中心として新たに開発した凡そ 12 万点強のリターナブル食器具(写真 1.2.1・右)が導入され、更に会場起源の可燃物を除く全廃棄物回収のための収集袋についても 55 万点が導入された。

リターナブル食器具については閉幕後に会場から全点が回収され、様々な形での活用策が推進された。すなわち、再使用可能な物品については中央省庁及び地方自治体を中心にそれぞれの食堂などでの継続使用が、更に導入物品の成型時端材や破損品はカスケード的なマテリアル・リサイクル性(MR)、及びケミカル・リサイクル性(CR;モノマーへの変換)の実証が進められた(図 1.2.4)。

前者の例ではプランターやポットへの再生が成功しており、「リサイクル・プランター」は岡山県で開催された国民体育大会の会場などの飾り付けに使用され、使用後は県下小学校の環境資材として再活用された。2006 年度に開催された兵庫国体でもサテライト会場の飾り付けにこのリサイクル・プランターが採用されている。

## (2) 実証事項

### ー物品としての実用性:

リターナブル食器具で一部衝撃性改良課題が認められたが、多くの食器具が要求される機能を発現し、更に会期間中を通して衛生安全性の担保が示された。

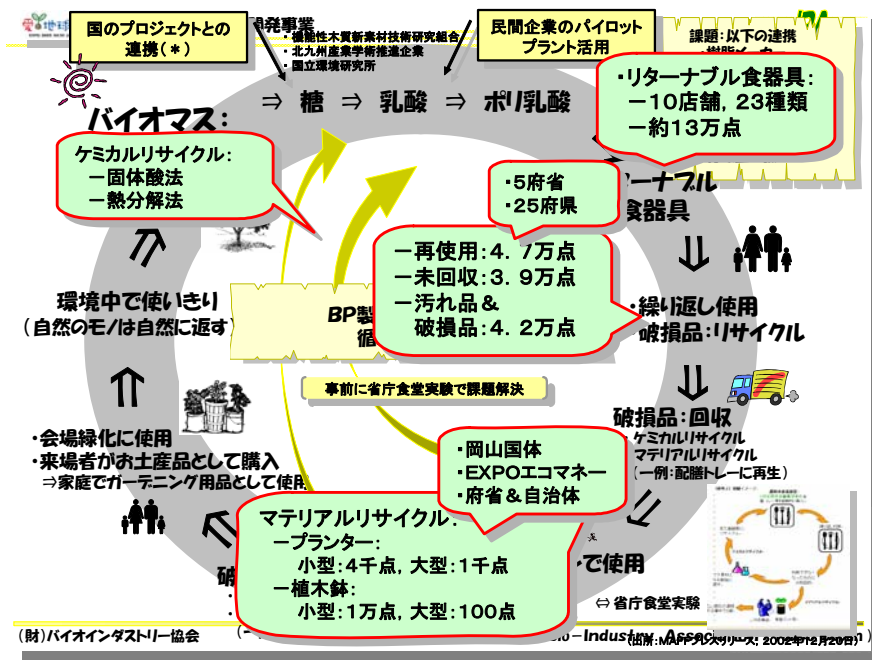


図 1.2.4 BP の各種リサイクル・システム "愛・地球博モデル"

( 出所: 経済産業省, 平成 16 および 17 年度バイオプロセス実用化開発事業報告書 (平成 17 及び 18 年 3 月), 委託先: 財団法人バイオインダストリー協会 )

#### ーバイオ・リサイクル・システム“愛・地球博モデル”の正常な機能:

特に開幕後約二ヶ月間の使用済みワンウェイ食器具と食べ残しのコンポスト化処理物を農地施用して白菜が栽培され、会場に戻して来場者へ展示・配布され、新たな資材の登場が強く訴えられた。

#### ー成型時端材/破損品からのマテリアル・リサイクル性:

プランターやポットなどへの再生技術が開発された。

BP は一般に伸長粘度が低く、成形し難い資材とされる。既存樹脂で問題なく成形可能な金型でも BP の場合には隅々まで均一に流れ難い・金型離れがし難いなど、克服すべき技術課題があり、更に食器具として使用された物品の破損品では資材自体の劣化も考えられ、これ迄「BP のリサイクルは、すなわち“バイオ・リサイクル”(コンポスト化やメタンガス化)」と捉えられていた。愛・地球博会場に導入された BP 製食器具の成形時に発生した端材や破損品を原料(の一部)とした実用物品への再生は、BP の MR 性を実証する最初のケースと位置づけられた。

#### ーケミカル・リサイクル性

BP 製食器具(主材はポリ乳酸(PLA))のモノマーへの変換性が実証された。

すなわち、固体酸、及び/又は酵素を触媒として使用する方法(慶応義塾大学・松村研究室)、また押し出し機を利用した熱分解法(九州工業大学・白井研究室/NPO 法人北九州エコ・サポーターズ)の適用である。

何れもモノマーである乳酸への変換は高効率で実現しており、更にその重合性能も確認された。

#### ー資源・環境負荷特性

再資源化性も含めた資源・環境に対する低環境インパクト性の実証が進められた。

コンソーシアム事務局による概算結果によれば、本事業での BP 製品の導入により、既存の非生分解性石油系樹脂製品使用の場合と比較して、大凡 1 本/人・年間の植林に相当する二酸化炭素排出量の削減に貢献できたことになる(再資源化については BP 製品ではコンポスト化、既存非生分解性樹脂製品では 10%エネルギー回収を伴う焼却処分を仮定)。

### (3) 得られた結論要旨

以上を背景に、BP は多様な再資源化システムに対応可能であること、すなわち畜産排泄物や剪定材などとのバイオ・リサイクルを通じた廃棄物削減にも貢献可能な資材であり、更に MR や CR を通して持続可能な資材であることが実証された。

BP は資源循環型社会の基盤資材としての基本的要件を満たしているとの結論であるが、当時においては資材の海外依存度が高く、コスト上の課題も含んでいた(残念ながら、今日でもこの状況は基本的には変わっていない)。また、この愛・地球博 Prj では管理された会場を舞台とした導入/回収であったが、この成果を活かして BP 製品の普及を図るためには、一般社会生活の場



面での3R システム化の可能性<sup>1)</sup>を検証すること、また法上の扱い課題、あるいは技術上の課題を整理し、解決に向けたシナリオ(道程表)<sup>2)</sup>の作成と推進が必要と考えられた。

#### 1.2.1.2 BP の市場形成を促進する施策

農林水産省はバイオマスの利活用において先端的な取り組みを進めている自治体や事業者を表彰する制度を運営し(04-06年度;事務局=(社)日本有機資源協会(JORA))、BPを含むバイオマス系市場形成政策を展開してきた(“バイオマス利活用優良表彰事業”)。

BPの活用に関連しては、

04年度:ソニー(株) [電子機器筐体/部品や包装への適用]

05年度:北越製紙(株) [耐熱強化BP<sup>3)</sup>の開発]

06年度:松下電器産業(株) [乾電池包装への展開]

が大臣賞を獲得している(ただし表彰対象にはBP以外のバイオマス利活用活動を含む)。

#### 1.2.2 自治体や民間で展開されている普及と活用への取り組み

##### 1.2.2.1 JORA:バイオマス認定制度

2004年度“バイオ生分解素材開発・利用評価事業”(農林水産省事業;委託先=JORA)でバイオマス・マークが制定された(図1.2.5a)。当初はBP製品を識別表示するためのマークとして募集・選考が行われたが、最終的にはバイオマスを利活用する製品全般に利用可能なマークとして運用されることになり、今日に至っている。

JORAは2005年度より本マークを使用するバイオマス認証制度の試用を、2006年度から本格運用を開始し、既に200件を超える資材・製品が認証されている。



図 1.2.5 バイオマスや BP のシンボル・マーク

- (a) JORA の定めるバイオマス・マーク (b) JBPA の定めるバイオプラ・マーク  
(c) 岐阜市の定めるバイオマス・マーク (主催もとより転載許可取得済み)

1) 経済産業省リサイクル推進課が進める3R、すなわち廃棄物原料化(Re-duce)・繰り返し使用(Re-use)・再商品化(Re-cycle)のシステム化可能性検証事業の一つとして2006年度に実施された(後述)。

2) 財団法人機械振興協会の調査事業の一つとして実施された(後述)。

3) 愛・地球博Prjにおいて、リターナブル食器(大型コップ/ジョッキ)として活用された。



#### 1.2.2.2 日本バイオプラスチック協会(JBPA)<sup>1)</sup>: バイオマス・プラ認定制度

バイオマス由来の熱可塑性樹脂 25%以上を含むプラスチック製品を対象とする認定制度で、2006年夏期より運営が始まった(図1.2.5b)。

バイオマス・マークとの相違は、前者ではバイオマス系製品全般を対象とし、したがって熱可塑性/熱硬化性を問わずに全てのプラスチック製品も対象になる点といえる。例えば、熱可塑性を示さない澱粉系樹脂をバイオマス資材で補強した製品はバイオマス認定制度対象となるが、バイオマス・プラ認定制度対象とはならない点など、前者の包括性が広い。

#### 1.2.2.3 富良野市: 生分解性 BP 製ゴミ袋を使用した生ごみ再資源化事業

自治体の廃棄物行政にとって、家庭生ごみの再資源化は埋設処分場の延命化と焼却処分の高効率化の上で避けて通れない施策とされる。

BdP製ゴミ袋が生ごみコンポスト化処理補完資材として欧米では定着しているが、わが国では先見的な自治体で見られる傾向が強い。板倉町(群馬県)、高根沢町(栃木県)や小坂町(秋田県)などが先行する例であるが、特に富良野市(北海道)では富良野地区環境衛生組合が近隣4町村と連携して約人口 5 万の家庭生ごみのコンポスト化処理を行っており、補完資材として使用する生分解性 BP 製ゴミ袋に対して PLA を 50%以上含むことを基準としている。

#### 1.2.2.4 三重県: BP 製リユース・カップによるデポジット導入実証事業

三重県は、2004年7-8月にかけて(株)鈴鹿サーキットランド及びJBAと連携してフラワーガーデンプールに BP 製リユース・カップ(愛・地球博会場に導入したリターナブルタイプの大型カップと同形:写真 1.2.1・右参照)を導入して、デポジット導入実証事業を実施した。

同県がまとめた報告書によれば、

ーリユース物品の使用とデポジット性の組み合わせは、ごみ発生抑制に対して極めて有効

ー但し、比較的低額な事業系可燃ごみ処分経費を背景にした安価なワンウェイ紙コップを使用した現行システムとの競合に勝つためには、店舗及び消費者の理解が前提

ーデポジット制度のシステム化が必要

が指摘されている。

#### 1.2.2.5 名古屋市: BP 製リユース・カップ導入事業

名古屋市は、(株)名古屋グランパス8(J1 サッカーチーム)及び JBA と連携して、同チームが主催する瑞穂競技会場で使い捨て紙コップに換えて BP 製リターナブル大型コップ(前項と同類)を繰り返し使用したごみ減量と二酸化炭素排出量削減に向けたモデル事業を推進した(04年9-11月)。

同市では、観戦者らの関心と協力が極めて大きく、90%を超える回収率を背景に、年間換算で

---

1) 前身: 生分解性プラスチック研究会 (BPS)

1.5 トン程の可燃ごみ減量と 6.3 トン程の二酸化炭素排出量の削減がもたらされたと評価している。

#### 1.2.2.6 NPO 法人北九州エコ・サポーターズ: イベント会場における BP 製クリアカップの導入とケミカル・リサイクル性実証事業

九州工業大学/NPO 法人北九州エコ・サポーターズ(北九州市)は、農林水産省補助事業として BP 製クリアカップ(愛・地球博会場に導入したクリアカップ;写真 1.2.1・左参照)をコンサート(坂本龍一 JAPAN Tour 2005:7-8 月)、スポーツ観戦(ヴァンフォーレ甲府(J2サッカーチーム)の対京都サンガ戦:8 月)や地域の催事(福岡県内大学の学園祭:11 月)などのイベント会場に導入し、使用後に回収して熱分解法による CR で原料乳酸に変換する実証実験を推進した(05 年度)。

PLA の製造工程負荷はグルコースからの乳酸合成過程にあることから、CR 処理の有利性が実証されている。CR 手法は、07 年以降には加圧水蒸気処理による加水分解の促進法が開発され、一般店舗に導入された食品食材容器への適用実験が推進されている(後出)。

#### 1.2.2.7 岐阜市: バイオマス利活用推進事業

岐阜市は地球温暖化防止と循環型社会形成を経て環境配慮市民社会の構築を目指す施策の一環として「岐阜市グリーン購入方針」の中で BP 製品の購入・使用を推進している。

これ迄に、

- ー 同市内事業者と協力して BP 製古紙回収箱を作製し庁内で試用(04 年 6 月)
- ー 「ビーンズフェスタ」(NPO 法人 G-Net 主催)で、枝豆などの容器に BP 製パックを使用し、イベント終了後に同市堆肥化プラントにてコンポスト化处理(04 年夏期)
- ー 市民・事業者・行政からなるバイオマスシンポジウム実行委員会を設立し、「バイオマスシンポジウム岐阜」を開催して市民に啓蒙(04 年以降毎年開催)
- ー バイオマス普及啓発実行委員会と岐阜市が「バイオマス普及啓発展示会」を開催し、愛・地球博会場に導入された BP 製品を展示(05 年 7 月)
- ー 愛・地球博会場に導入された BP 製リターナブル食器具の再使用を市庁舎及び市関連施設食堂で開始(06 年 1 月)
- ー 農林水産省総合食料局補助事業「バイオマスプラスチック容器包装再商品化システム検討事業」(JBA 受託;07~09 年度)に委員参加し、市内店舗への BP 容器導入・回収・再商品化システムの検討に参加
- ー 地元のプラスチック成形加工事業者と連携して BP 製バスケットを開発し、イベントでの活用を通じた市民への啓蒙活動を展開(08 年度~)

などを展開している。

更に岐阜市は独自のバイオマス・シンボルマーク(図1.2.5c)を定め、市民の認知度向上に努

めており、BP の普及・利活用に極めて積極的に取り組む自治体の代表的存在の一つといえる。

#### 1.2.2.8 岡山県：岡山バイオマスプラスチック研究会運営

岡山県は、県の産業及び環境政策と連携させたバイオマスの有効利用と BP 地場産業の創出を目指して「岡山バイオマスプラスチック研究会」を発足させている(04年5月)。

岡山県は農業県であると同時に、県内には高度の BT を展開する企業が多く、(株)林原(でん粉の扱い技術)、(株)クラレ(PLA)や三菱化学(株)(バイオ・コハク酸ベースのポリエチレンサクシネートを目指す)を擁し、更にプラスチック加工関連企業も幅広く集積しており、BP の開発・利活用ポテンシャルが極めて高い事が背景にある(09年2月央時点での同会会員は、企業会員46社、研究開発機関11、NPO や連合会など関係機関7で、総数64)。

2005年10月に開催された岡山国体と障害者スポーツ大会では、同研究会会員が開発した BP 製の弁当用トレー、テントの屋根や三角コーンなど5種類の製品が導入され、更に JBA と連携して BP 製リサイクル・プランターを会場などの飾り付けに使用した。弁当用トレーは、使用後に回収して県総合畜産センターで肥料化実験を行い、肥料は小学校で環境教育に活用された。また BP 製リサイクル・プランターは凡そ4千個が県下小学校の環境教材として再活用された(前述)。

地元アカデミア側との連携を軸に本研究会の活動は現時点でも継続している。

#### 1.2.2.9 バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議：バイオマスタウン推進

BN 総合戦略推進会議(内閣府・総務省・文部科学省・農林水産省・経済産業省・国土交通省・環境省)は、地域のバイオマスの総合的かつ効率的な利活用を図るバイオマスタウン構想を全国の市町村から募集しており、最新公表(08年9月末時点)によれば157市町村が認定されている。

これら市町村の中で新潟県上越市が BP の製造と活用を目指している(図1.2.6)。上越市は2004年度に国と新潟県の支援を受けて木質系バイオマス(地元間伐材)や政府備蓄米(いわゆる古米・古々米)の可塑化と BP などとの化合物製造設備及び成型加工設備を整備し、地元ベンチャーであるアグリフューチャー・じょうえつ(株)と連携して事業化に取り組んでいる。

既に学校給食用トレイや生ごみ袋などが開発・実用化されており、新しいコンセプトの資材として注目されている。

#### 1.2.2.10 グリーン購入ネットワーク(GPN)：バイオプラスチック研究会運営

近年、後述の様に BP を使用した電子・電気製品/部品が開発・上市され始め、更なる普及を目指すための課題・広報などを論議する場として設置された(05年12月)。

電気・電子製品/部品に使用される BP に限定し、家電企業など開発企業の BP 活用への取り組みと考え方、LCA 評価結果やリサイクル性能の比較などを行い、電気・電子製品についてのガイドラインの中に、再生材料使用に関する記述と同レベルの扱いで BP の記述を盛り込むことが構

想され、06年11月30日付で結果がコメント形式でまとめられている<sup>1)</sup>。

BPの種類・製造元、再商品化や資源・環境負荷評価事例などに限られていることから、深い議論はなされなかった模様で、結論先送りの内容であった。

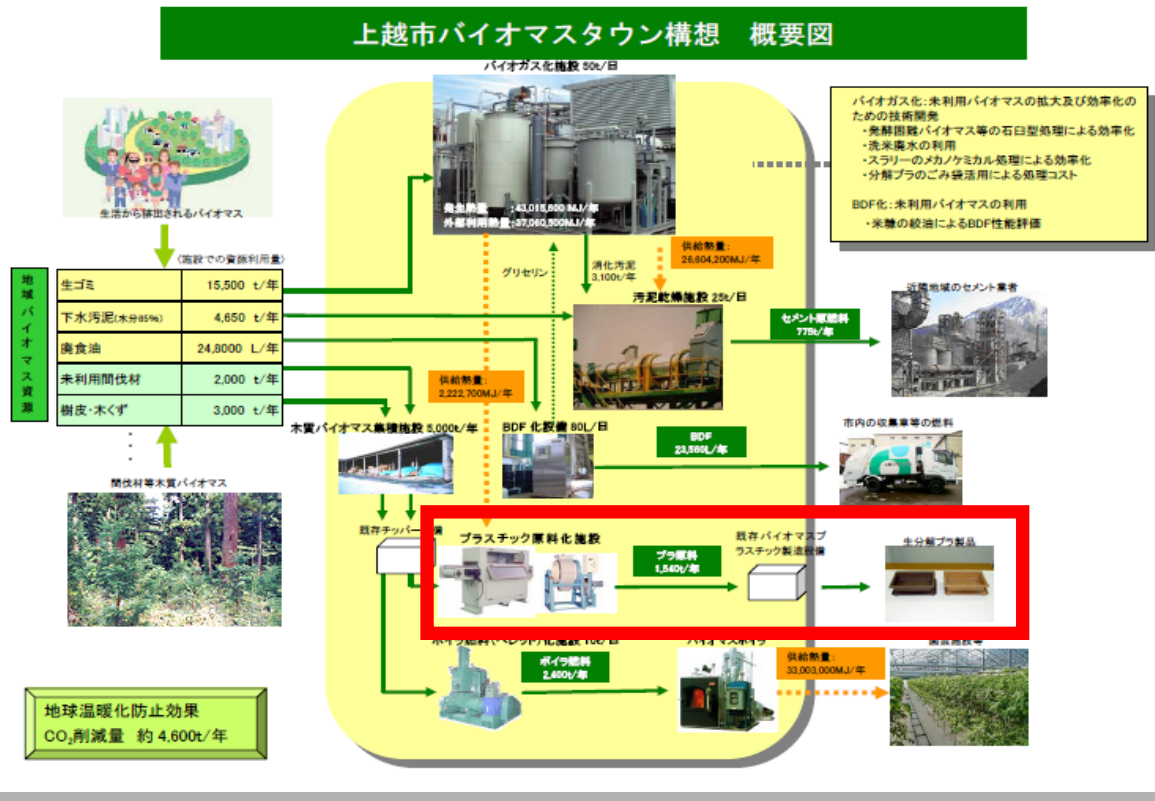


図 1.2.6 上越市のバイオマス・タウン構想図

( 出所: [http://www.biomass-hq.jp/biomasstown/pdf16/16\\_1.pdf](http://www.biomass-hq.jp/biomasstown/pdf16/16_1.pdf) )

### 1.2.2.11 2006年以降の民間事業者の取り組み

農林水産省農村振興局が推進してきた“バイオマス利活用フロンティア推進事業”(03～06年度補助事業)、次いで来年度まで継続する“広域連携等バイオマス利活用推進事業”(07～09年度補助事業)を背景に、イオン(株)及びユニー(株)がBP製食品/食材包装容器の導入に踏み切っている。また(株)モスフードサービスは独自にBP製飲料容器の導入を果たしている(何れも全国展開)。これらの中で、大手リテーラーに採択されたBP製果物容器は前述の愛・地球博Prjでイチジク包装パックとして導入されたものであり、また冷飲料容器は愛・地球博Prjのクリアカップそのものであり、愛・地球博Prjによる検証効果は極めて大きいといえる。

<sup>1)</sup> [http://www.gpn.jp/press\\_release/report\\_bioplastic.pdf](http://www.gpn.jp/press_release/report_bioplastic.pdf)

この様に、環境配慮活動を経営指針の一つとしている事業者が、価格差を克服してBP製品の採用を始めたことが特記される。

#### 1.2.2.12 石油樹脂のBP化への取り組み

(財)化学技術戦略機構が、近年製造コスト低減が著しいバイオ・エタノールの脱水反応でエチレンを合成し、ポリエチレン(PE)とする可能性調査結果概要を公表している<sup>1)</sup>。バイオマス資源に恵まれない我が国固有の前提条件があるものの、十分な可能性を示しており、極めて興味深い。

一方海外ではこの種の技術は既に開発・検証が完了されて、ブラジルの大手化学企業であるBraskem社が、サトウキビからのバイオ・エタノール由来高密度PEの合成に成功している(2006年6月21日)。技術スキーム自体はよく知られたものであるが、現実に利用可能なバイオマスを工業的規模で確保し、バイオ・エタノール、更に石油由来PEの生産実績を持つ企業においてのみ実現可能な資材と言え、同社は新たなBPの牽引役となる可能性が極めて高い。

この種の“バイオ・ポリオレフィン”が実用化されれば、既存ポリオレフィンの一部が置き換わるだけでもその影響は大きく、今後の動向が注目されよう<sup>2)</sup>。

---

1) 北島昌夫, 化学工学誌(社団法人日本化学工学会発行), **70**(8),411(2006)

2) 本報告書第3章で考察。

### 1.3 BPの普及に向けたJBAの取り組み

JBAは公益法人の立場から、アカデミア、企業、独立行政法人、NGOやNPOなどの支援を得ながらBPの普及を目指してきた。以下に愛・地球博Prj以降の取り組みを紹介する。

#### 1.3.1 バイオマス・プラスチックの実用化促進社会システム構築調査

JBAでは本事業を財団法人機械振興協会委託事業として受け、愛・地球博Prjの成果を活かしたBPの実用化を促進するための社会システム構築に向けた行政的/技術的課題、及び解決策を調査・提言し、普及・定着に資する事業として実施した(06年度)<sup>1)</sup>。

##### 1.3.1.1 事業の趣旨

愛・地球博会場に導入されたBP製物品(ゴミ袋・食器具など)はその実用性を十分に高い水準で実証されたが、この成果を一般社会に還元するためには実際の使用及び/又は排出・再資源化の現場で直面する障壁(例えば現行法体系の中でBP製物品の扱いが不透明⇒地方自治体では独自判断が出来ない状況や、一般プラスチックの再生化システムが整備される中で、BPといえども既存プラスチックと同等の品質と再生化が必要と指摘されていることへの対応)を解決することが前提になる。

具体的な行政的課題としては、現行の法体系の中でのBPの扱いが不透明であるために顕在化している課題であり、また具体的な技術課題としては、BP製物品の品質を既存プラスチック製物品同様のレベルに上げるための成型加工プロセス上の課題や再資源化システムの最適化課題であり、これら課題の解決策も含めて調査・提言がなされた(委員長:望月京都工芸繊維大学バイオベースマテリアルセンター特任教授(当時))。

##### 1.3.1.2 認識課題

行政的な課題としては

- －国の基本戦略の中で開発・普及が明示されているにもかかわらず、市場形成を誘導する国の優先調達の仕組みがないこと
- －廃掃法・容り法・食り法(いずれも通称)などにおけるBPの位置づけ・取り扱い基準が定まっていないこと
- －BPに特化した再商品化システムの整備がなされていないこと

また、技術的な課題としては

- －機能の不足(特に耐久性・耐熱性)
- －成形加工性の低さ(成形加工しにくさ・成形サイクルの長さなど)

が指摘されている。

---

<sup>1)</sup> 財団法人機械振興協会:平成18年度バイオマス・プラスチックの実用化促進社会システム構築調査報告書(07年3月)[委託先:(財)バイオインダストリー協会]

### 1.3.1.3 調査結果の概要

以下に要約を示す。

#### (1) BP の現状と課題

先ず現状として、BP の開発と普及が望まれている時代背景の下、実用化を目指して工業的スケールで生産されている BP の種類とその主なる用途の現状を概観した。

この中で最も生産体制が先行している BP として PLA を取り上げ、その物理化学的、さらに生物化学的な特性を調査し、指向されている用途開発の現状を調査した。簡易食器具や包装資材としての展開に加えて、BP の最大特徴であるカーボン・ニュートラル性に着目した新たな用途では耐久耐熱性が要求され、この点に克服すべき技術的課題が存すると指摘した。

次いで BP の実用化を目指す国内外の社会的及び技術的な取り組み事例を俯瞰し、更には BP 関連事業者の立場から見た普及に関わる諸課題を考察した。

すなわち、技術的な課題としては、加工特性の向上及び製品物性の高度化、行政的な課題としては分別回収など行政的な課題と資源・環境負荷が低いことの実証とこれに基づいた行政側による優先調達の仕事の構築、またプラスチック廃棄物処理施設としてのコンポスト化設備など施設整備の必要性を指摘した。

#### (2) BP 実用化のための行政的な課題と対応策

行政的な課題をより詳細に論点整理し、優先調達の対象資材として取り上げられるための要件、及び廃棄物処理に関わる扱いを地方自治体の意向集約を含めて調査した。

実用化に向けた要件としては、先行する海外事例を参照して、行政側による“BP 優先調達”の仕事の構築が必要であり、その一環としてグリーン購入法特定調達品目登録基準の明確化と登録件数を増やすこと、また自治体が優先調達する際の“BP 補助制度”の整備を指摘した。

また現行の廃掃法(通称)及び関係法上では BP は一般のプラスチック資材と同じ扱いであり、その特質を反映した扱いが定められていないことから、BP の扱い基準の明確化が必要であることを指摘している。例えば、セロファンはそのコンセプトの上では BP の一種とも見なされるが、容器包装リサイクル法(通称)では再資源化を義務化されない特殊資材として扱われている。この事実は広く認識されていないが、BP がセロファン並みの安全性を示す資材であれば同じ扱いで良いとする自治体関係者の意見が多いことが着目される。

#### (3) BP の実用化のための技術的な課題と対応策

ここでは成形加工品特性の向上、及び特徴的な再資源化性発現施設の確保に焦点を当てて、課題と対応策を調査した。

成形加工品の特性向上としては新たな市場獲得の上では耐久耐熱性向上が必須であり、BP の成形加工における課題を整理し、PLA の結晶化成型法の可能性に焦点を当てた。

すなわち、従来は結晶化促進化学物質(いわゆる核材)の添加が開発検討されていたが、それに加えて金型内での結晶化完了を可能ならしめるシステムの可能性を検討した。

小規模でのモデル実験調査の結果から、温冷金型方式で実現の可能性が高いことが確認され、BPに特化された成形加工システムの体系化が必要であることを指摘している。

また一般プラスチック資材の再資源化システムの構築が進む中、耐久耐熱強化BP製品の再資源化システムの構築が必要であり、特に現時点でPLAに着目すればそのバイオ・リサイクル性の確認の必要性を指摘し、至近の開発品及び上市品のコンポスト化性を評価している。その結果、現時点での耐久耐熱強化BP製品ではコンポスト化性が担保されていることが確認されている。すなわち、3R(Reduce・Reuse・Recycle)システム化の中で、生分解性BP資材に特化したリサイクル・システムとしてのコンポスト化処理施設整備の重要性を指摘した。

また、エネルギー回収システムとしての嫌気性雰囲気下におけるバイオ・リサイクル処理、すなわちバイオ・ガス化能の評価技術の現状を調査し、BPへの適用性の可能性・課題についても調査した。その結果、現時点で開発されているバイオ・ガス化システムの枠内でもBPのバイオ・ガス化能は確認されたが、その分解速度の改善が技術課題であることを指摘した。

この様にBPの再資源化は、一般のプラスチック資材と同様にMRやCR(高炉還元やモノマー変換)に加えて、特有のバイオ・リサイクルも可能であり、施設が整備されれば選択肢が広く、地域の特質に合わせた3Rシステム化が可能であると指摘している。

#### 1.3.1.4 まとめ

以上の調査研究に基づき、BPの実用化を目指すための社会システムを構築する上での課題と対応策(要件)を以下の様にまとめた：

・行政的な要件：

- － グリーン購入法特定調達品目など登録など、優先調達に関わる基準の明確化(制度化)
- － 優先調達に関わる補助制度の整備
- － リサイクル関連法体系の中でのBPの扱い基準の明確化(制度化)
- － 一般プラスチックとの識別表示方法の制度化

・技術的な要件：

- － 耐久性・耐熱性に特化した成形加工品特性、及び成形加工特性の向上
- － 多様なリサイクル手法のシステム化



### 1.3.2 バイオマス・プラスチック3Rシステム化可能性調査事業

経済産業省リサイクル推進課の3Rシステム化可能性調査事業の一つとして 06 年度に実施された調査事業である。

#### 1.3.2.1 事業の趣旨

BPについて愛・地球博 Prj の中で万博会場を舞台とした 3R(リデュース、リユース、及び各種リサイクル技術)の検証がなされた結果、今後の普及・拡大を目指すためには実社会に於いての 3R システムの構築が必要となる。

本事業ではその先駆けとして容器法、及び食り法(いずれも通称)に関わる食材/食品産業で使用されている容器包装材を対象として、BP の特性を活かした最適な回収方法とリサイクル手法の組み合わせなど、リサイクル・システムの構築可能性を“社会実験”(実際の食材/食品販売店舗に導入し、消費者が家庭で使用後に廃 BP 製品を店舗回収し、回収状況にベストマッチするリサイクル・システムを評価する実験)を通して評価・検討し、今後 BP をどの様に利用し、またリサイクル・処分していくのかにつき、あるべき姿を提言する事業であった(委員長:木村北海道大学大学院教授)。

#### 1.3.2.2 課題

具体的に BP 製食材/食品容器包装資材を

(小売)店舗などに導入 ⇒ 一般消費者の日常生活の場で使用 ⇒

⇒ 廃棄段階で適切に回収 ⇒ 多様なリサイクル・システムに適用

して、排出源毎・使用済製品種類毎の特性などに応じた分別・収集・運搬・3R手法などを、コスト及び資源・環境負荷の面から検討することにより、BP 製物品にとって最適なシステムを構築するための条件・課題が抽出され、これを一般化することにより BP 製物品の最適なリサイクル・システムのモデルが構築されると期待される。

#### 1.3.2.3 要約

以下に要約を示す。

BP 容器2種(カップ及びパック)を一般店舗へ導入し、購入者からの回収を受けてその回収状況を分析した。

##### (1) BP 容器及び導入店舗:

BPカップを(株)モスフードサービス6店舗(名古屋市内3店舗、瀬戸市内1店舗、及び小牧市内2店舗)へ、テイクアウト冷飲料用容器として導入した(導入期間:06年11月1日-12月1日)。BPパックをトヨタ生活協同組合10店舗(豊田市内9店舗、三好町内1店舗)へ、フ

---

1) 経済産業省リサイクル推進課:平成18年度バイオマス・プラスチック3Rシステム化可能性調査事業3Rシステム化可能性事業報告書(07年3月)[委託先:(財)バイオインダストリー協会]

ルーツ容器として導入した(導入期間:06年12月1日-07年1月31日)。

**(2) 回収状況:**

BP 容器の回収率は2-3%(カップ)、及び7%(パック)程度であった(回収期間:2006年11月1日-12月10日(BPカップ)、及び2006年12月1日-2007年3月15日(BPパック))。

消費者への認知に2-3週間程のアイドル・タイムが必要であり、導入期間が短期であったことが要因と考えられた。カップの場合、テイクアウトの際、購入者に直接呼びかけると回収率が10%程度にアップした事例があり、認知度があがれば高回収率が期待されると思われた。回収容器は見かけは汚れておらず、異物混入度も5%以下であり、比較的良好的な回収であった。

次いで回収BP容器のリサイクル処理の適正を調査したところBP導入回収実験が小規模・短期間であったことを反映して、回収総重量はBPカップで1kg強、BPパックで30kg程であった。このため、各種リサイクル手法のいずれについても工業的規模の適正試験は量的に不可能であったので、専用容器として調達はしたが在庫として残った容器も含めて各リサイクル法の適正評価を調査した。

**(3) サーマル・リサイクル処理/焼却処分の適性について:**

BPは既存石油系樹脂と対比して燃焼熱が低いが、焼却施設における処分プロセスではプラスチックの種類による具体的な影響は顕在化していないのが現状であった。専門事業者からはBP資材に問題ないとの指摘を受けた。

**(4) コンポスト化処理(“バイオ・リサイクル”処理)の適性について:**

今回の実験対象としたBP容器は生分解性及びコンポスト化性を担保したポリ乳酸製であったが、消費者へ回収を呼びかけるためのキャッチコピーが非生分解性インクにより印刷されており(BPカップ)、また紙シールが非生分解性接着剤で貼り付けられており(BPパック)、コンポスト化処理の際に障壁になるかどうかを実験的に検討した。

懸念された非生分解性インクは容器重量の1%以下であり、コンポスト化処理物の中で明示的には存在しなかった。また紙シールの分解は遅く、初期のコンポスト化処理段階で残っているが、形状保持のまま回収可能であり、最終的な熟成堆肥からは除去可能であると判断している。

**(5) MR処理の適性について:**

購入者から返却された使用済みBP容器は、家庭で洗浄されているケースが多く、見かけは汚れていなかったが、詳細に観察すると内容物の一部が残っている場合もあり、MR用原料としては、リペレット化の前処理として洗浄乾燥工程が不可欠と判断している。

**(6) CR 処理の適性について:**

BP、特に PLA に対しては原料モノマー化法が研究開発されているが、まだ実験室規模の結果のみが報告されている状況にある。

次に BP 容器の導入・回収実験結果、及びリサイクル処理適性調査結果を踏まえた BP 容器の資源・環境負荷に係わる評価を行い、さらに各リサイクル処理コスト評価結果から望ましいリサイクル処理のあり方を調査した。

**(7) サーマル・リサイクル処理:**

サーマル・リサイクルが現実的かつ妥当な処理と考えられた。

**(8) バイオ・リサイクル(コンポスト化)処理:**

処理施設が整備されている地域に限り対応可能な最適処理法とされ得る。

**(9) MR 処理:**

成形加工現場で発生する端材を副資材として使用する場合において有効であり、消費者からの回収品を原料として使用することは疑問とされた。

**(10) CR 処理:**

ポテンシャルの高さが示された。

スケールアップした実績データによる再評価が必要であろうが、この方法による再生材は原理的に“新材”扱い可能であるから競争力はあると評価している。

さらにこの手法はリサイクル処理と見るよりも“BP 製造法”と見なせると指摘している。

**(11) 対照品との比較(BP の意義)について:**

検討された全てのリサイクル法で、BP 容器はポリスチレン容器よりも低い資源・環境負荷を示した。

**(12) 最適なリサイクル法構築に向けた課題と提言:**

消費者にとって“利便性の高い回収システムの構築”こそが前提であることから、BP 資材の認知度が高いとはいえない現時点では、まずその認知度をあげること、次いで BP 容器に解りやすいマークをつけ、一般プラスチック容器との識別を容易にし、同じマークで識別した専用回収箱に廃棄可能な仕組みが望ましいとした。

専用回収箱は、BP 容器を使用した食品食材販売事業者の店舗に設置し、消費者が購入した店舗に限らず利用可能として自治体が運営する廃棄物回収センターにも設置できればなお望ましく、このためには新たな廃棄物分類を設けることに事業者と自治体の理解と支援を

得ることが課題と指摘した(図 1.3.1)。

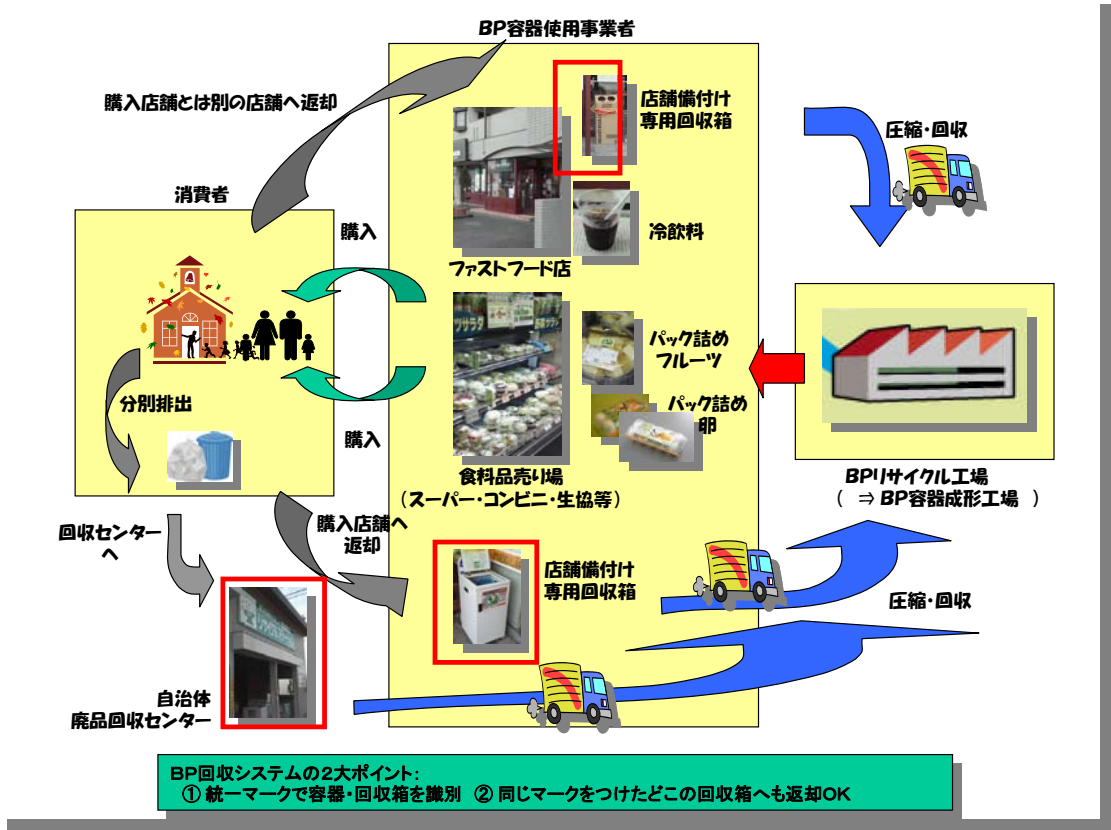


図 1.3.1 BP 容器の回収及びリサイクル・システムのありかた

(出所:経済産業省リサイクル推進課,平成18年度バイオマス・プラスチック3Rシステム化可能性調査事業報告書(07年3月),委託先:(財)バイオインダストリー協会)

### 1.3.3 バイオマスプラスチック容器包装再商品化システム検討事業

前節の成果を受けた 07 年度から 3 ヶ年度をかける農林水産省総合食料局補助事業である。

#### 1.3.3.1 事業の趣旨

先の ”容り法” 改訂時の指摘に沿って、市町村と連携した高度な再商品化手法やこのためのルート構築をモデル的に実施して、BP 容器の回収システムのあり方を 09 年度までに提言することを目標としている(07&08 年度の委託先:JBA)。

#### 1.3.3.2 概要

2007 年度はその起年度として、BP 容器の選定と調達、導入及び回収店舗の設定、さらに回収容器の内容分析とその状況に応じた再商品化手法の検討(以上、”社会実験”)を推進した<sup>1)</sup>(図 1.3.2)。

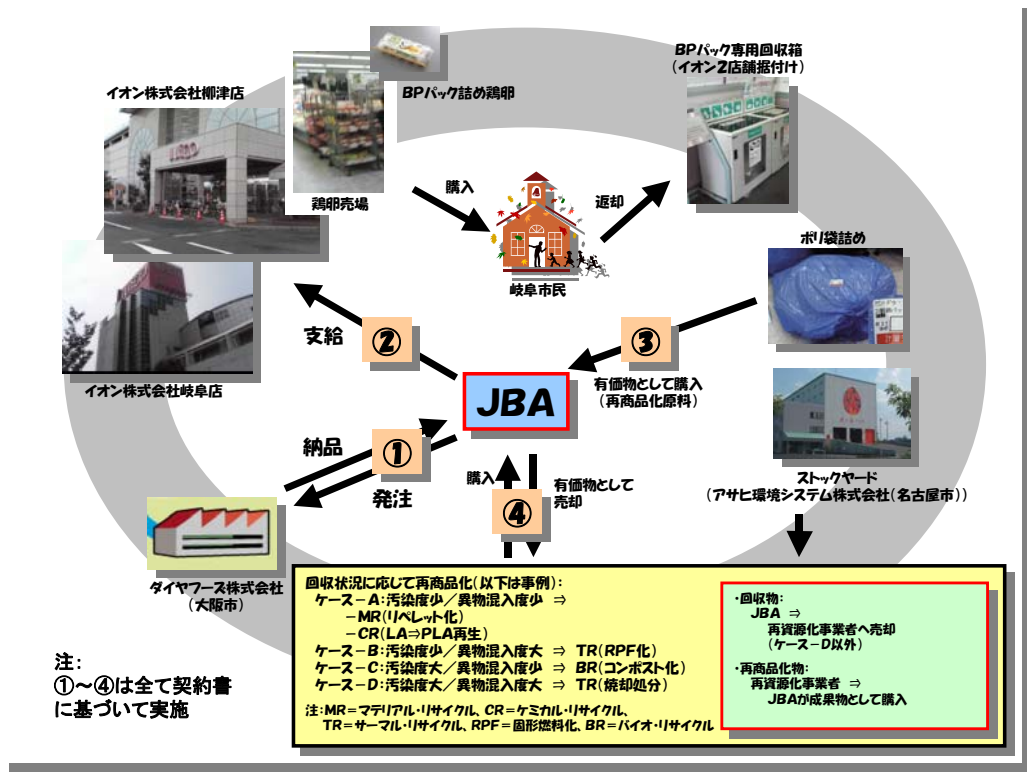


図 1.3.2 バイオマスプラスチック容器包装再商品化システム検討事業:社会実験スキーム

( 出所:農林水産省総合食料局,平成 19 年度バイオマスプラスチック容器包装再商品化システム検討事業報告書(08 年 3 月),委託先:(財)バイオインダストリー協会 )

1) 農林水産省総合食料局:平成 19 年度バイオマスプラスチック容器包装再商品化システム検討事業報告書(08 年 3 月)[委託先:(財)バイオインダストリー協会]

またこれら BP 容器導入・回収・再商品化工程の資源・環境負荷及びライフ・サイクル・コスト (LCC) の評価から BP 容器の望ましい再商品化システムのあり方を検討した。この際、使用済み容器回収・再商品化に関連の深い自治体の BP 容器分別回収意向、BP 容器の使用者たる食品食材関連事業者の動向(使用実績・計画など)、さらに消費者の BP 容器に対する視線が重要であることから、アンケート調査も実施されている。

### 1.3.3.3 要約

#### (1) BP 容器の導入・回収実験:

BP 製鶏卵パックを一般店舗へ導入し、購入者からの回収状況を分析した。

#### (2) BP 容器の再商品化検討:

回収状況に応じた回収容器再商品手法(サーマル・リサイクル(TR)としての RPF)、バイオ・リサイクル(BR)、マテリアル・リサイクル(MR)、及びケミカル・リサイクル(CR))を検討した。

#### (3) BP 容器導入・回収・再商品化工程の資源・環境負荷、及びライフ・サイクル・コスト評価:

上記を背景に各種再商品化手法の環境負荷が LCA の手法で評価し、以下の結果が得られている:

##### ・容器の LCA 評価結果

資材の如何に関わらず、資材の“社会蓄積”効果を併せ持つ MR 及び CR 処理が環境負荷の低い再商品化システムと判断された。

##### ・回収品の LCA 評価結果

回収容器の構成が BP:a-PET=3:7(重量比)では MR 処理の負荷が優位であり、この比率が逆転するケースでは CR 処理の負荷が MR 処理の負荷に接近することが示されている。

##### ・ライフ・サイクル・コストの評価

原料採掘/栽培から樹脂製造・成形加工・回収・各種再商品化に至る全生涯のかかる経費を LCC の観点から調査した。LCC の観点からは、容器資材の如何に係わりなく、

(低経費:) TR(RPF) < TR(焼却) < BR < CR, MR (:高経費)

となった。

##### ・a-PET 容器 ⇒ BP 容器への置き換えに伴う経費増負担の妥当性について:

a-PET 容器から BP 容器への移行に伴う LCC の増分はおよそ¥100/kg となり、置き換えに伴う二酸化炭素排出量削減コストは、最も安価なケースで¥23.4/- kg-CO<sub>2</sub>(TR(焼却))となり、二酸化炭素排出権の時価(≒¥4/-kg-CO<sub>2</sub>)の 6 倍程度であった。

グリーン・ハウス・ガス排出量削減コストの観点からは、CR 及び MR は TR(焼却)よりも割高になった。資材の置き換え、また再商品化手法の選択は、資源・環境負荷低減実

現に際して誰が、どこまでコストを追うのか、社会システムのあり方とも関係する論点と思われた。

(4) BP の実用化・普及に向けた自治体・事業者、及び消費者の考え：

BP について自治体、事業者及び消費者がどのような見方をしているのかについてアンケート調査し、普及化に向けた課題を整理した。

(5) 考察及び最適な再商品化システム構築に向けた課題と提言：

以上を背景に BP 容器包装再商品化システムのあり方を考察している。

- ・鶏卵パックについて(社会実験対象容器としての妥当性)  
形状が独特であり、消費者にとって身近な認知しやすいプラスチック容器であることから、導入・回収・再商品化実験資材として適当であった。
- ・回収率をあげるためには・異物混入度をさげるためには  
回収箱設置の工夫、地道な継続的広報活動、水蒸気処理施設の簡易化、及び識別表示法の確立が指摘された。
- ・容り法における扱い基準論議に向けた回収率の目標値は  
容り法改訂に向けた目標とする場合を想定し、ポリスチレン製発泡トレーの全国回収率がおおよそ 20%であることから、BP 鶏卵パックの当面の回収率目標を 10%程度と設定することが指摘されている。
- ・消費者の支援を得るためには  
再商品化の結果及び二酸化炭素排出量削減効果の広報の重要性が指摘されている。

以上の論点整理結果を踏まえて、BP 容器包装の再商品化システムとは、

- ・技術システムとして：  
鶏卵パックを対象にケミカル・リサイクル処理を第一候補とすれば、水蒸気処理を同処理の前工程と同時に分別工程(熱に弱い・加水分解に弱い BP と熱に強い・加水分解に強い石油由来プラスチックの分別)ととらえ、店舗のバックヤードで簡単に処理できるシステムであること。
- ・再商品化成果の広報：  
BP 特有の再商品化成果物、及び資源・環境負荷評価結果の継続的な広報に取り組むこと。
- ・識別しやすい排出システム：  
BP、あるいはバイオマス系容器であることを一目瞭然と識別表示する仕組み、及び店舗を選ばない返却システムであること(社会システム)

が要件骨子になると考えている(図 1.3.3)。



図 1.3.3 BP 容器包装のケミカル・リサイクル・システム(想定)

( 出所:農林水産省総合食料局,平成 19 年度バイオマスプラスチック容器包装再商品化システム検討事業報告書(08 年 3 月), 委託先:(財)バイオインダストリー協会 )



## 1.4 海外の取り組み(概観)

### 1.4.1 EU(ドイツ)

わが国に先行して BdP 市場が形成された EU では澱粉基 BdP 系が圧倒的なウエイトを占めており、従来から生分解性 BP が主流であった。澱粉がバイオマスの象徴とみなされていることが背景にある。

ドイツでは BdP に対して再資源化義務料を 2012 年末迄免除する臨時措置法が制定され(05 年 5 月)、従来からの BP 由来コンポストの農地施用承認と併せてコンポスト化可能 BP の市場形成を誘導する体制を整えた。呼応するかのように同国の BdP 業界である IBAW(ベルリン市)は 2006 年 5 月にその名称を“European Bioplastics”と改称し、活動の軸足を BdP から BP へ移行させている。

### 1.4.2 米国<sup>1)</sup>

米国は戦略の国である。

“生物化学産業”を“石油化学産業”と両立させることを 21 世紀の基本戦略としており、当初はでん粉、最近ではセルロース系をバイオマス原料とした物質生産を目指している。

この中で 2002 年よりバイオマス系製品の政府による優先調達プログラムを制定して市場形成を戦略化していることが注目される。すなわち、農業法 (Farm Security and Rural Investment Act of 2002) の改正を受けて Federal Biobased Preferred Procurement Program (FB4P) を制定し、“バイオベースド・プロダクト(Biobased Product)”の優先調達プログラムを開始し、BP などバイオマス系製品の利用促進を図っている<sup>2)</sup>(すなわち、米国においては自国農業の振興政策としてバイオ燃料やバイオマス由来資材の開発と普及を推進しておるのであり、環境政策としてではないことに留意しておく必要がある)。この施策に対応して民間の普及促進機関 BMA (Biobased Manufactures Association)が発足して、バイオマス系製品に付ける自己認証ロゴを作成し、認証制度を運営している。

#### 1.4.2.3 農務省(USDA)の”Biobased Product”<sup>3)</sup> 優先調達プログラム

##### (1) 活動の目的

需要拡大、農村の産業基盤発展、枯渇性資源からバイオマスへの代替によるエネルギー安全

---

1) 以下の概観の出所:財団法人機械振興協会,平成18年度バイオマス・プラスチックの実用化促進社会システム構築調査報告書(07年3月)[委託先:(財)バイオインダストリー協会]

2) 米国農務省ホームページ: <http://www.ars.usda.gov/bbcc/>

3) ”biobased product”という用語は、Farm Security and Rural Investment Act of 2002ではじめて定義され、利用される様になった。生物学的製品または再生可能な“国内”農業生産物(植物、動物、海産物、森林資源などを含む)からなる商業/産業製品とされており、広く一般的な(米国産)バイオマス系製品と解することが可能。

保障強化の3点を目的に挙げている。

## (2) 優先調達プログラムの概要

FB4Pでは、バイオマス製品、もしくは製造可能な製品を含む品目(製品分類)をリストアップし、品目毎に入手可能性、市場規模、性能、環境・公衆衛生面などの観点から評価を行い、優先調達する利点が高い品目から順次、優先調達指定品目として発表している。

指定品目に該当する製品について、製造事業者は自社の製品について製品情報を政府に提供し許可を得てから登録を行うことができる。この登録情報を基に、各連邦政府機関はバイオマス系製品情報にアクセスすることで調達を行える仕組みとなっている。

## (3) 品目指定の考え方

優先調達するバイオマス系製品を決定するカテゴリーは以下の通りである：

- 01: Adhesives (接着剤)
- 02: Construction Materials and Composites (建設資材、複合材)
- 03: Fibers, Paper, and Packaging (繊維, 紙, 包装)
- 04: Fuels and Fuel Additives (燃料, 燃料添加剤)
- 05: Inks (インキ)
- 06: Landscaping Materials and Composted Livestock and Crop Residue (造園材料, 家畜堆肥, 作物残渣)
- 07: Lubricants and Functional Fluids (潤滑油, 機能性流体)
- 08: Paints and Coatings (塗料, コーティング剤)
- 09: Plastics - Monomers and Polymers (プラスチックモノマー, ポリマー)
- 10: Solvents and Cleaners (溶媒, 洗浄剤)
- 11: Sorbents (吸着剤)

これらにあって BP にとっては特にカテゴリー09(プラスチック)の内容が参考になる。USDAでは、他の政府機関、民間産業団体、製造事業者などと共同で、上記のカテゴリー毎に検討を行い、バイオマス系製品および製造可能な製品を含む品目リストを下記項目を考慮して公表しているが、カテゴリー09については表1.4.1に概略をまとめた。この中でBPがリスト化(品目 No.=66&116)されていることが興味深い。

A: 指定候補品目のリストアップにおける優先考慮項目

- 非バイオマス系製品とのコスト競争力
- 産業品質基準(industry performance standard)の適合性
- 商業市場での普及度合い

B: 指定候補品目のリストアップにおけるその他の考慮項目

- － 生産者の関心度
- － バイオマス系成品の製造企業数
- － 利用可能なバイオマス系成品の有無
- － 品目指定に伴う困難さ
- － 連邦政府の需要度合い
- － 連邦政府の調達必要性
- － バイオマスの需要度合いへの反映
- － 農村活性化への影響度合い

C: 指定候補の除外品目

- － 自動車燃料, 電力
- － 既に成熟した市場が存在する品目

表1.4.1 カテゴリー09(プラスチック)に関する品目No. 及び リスト

26	ポリマー製消費財
29	耐久性フィルム
32	耐久性発泡材料
56	生分解性発泡材料
58	機械油
64	コンポスタブル成型品
66	BP
85	成型品
116	ブレンド系BP
129	水溶性ポリマー

(4) 優先調達指定品目の決定プロセス

優先調達品目の指定に関しては、Concurrent Technologies 社による調査結果、National Institute of Science and Technology の BEES 分析(環境・経済評価; 後述)などを含むいくつかの情報源をもとに情報収集を行い、製品について十分な情報が得られた品目から指定されている。

具体的な指定プロセスは以下の通りである。

Step-1: USDA が製品データを集め、製造販売者は自主的に以下の製品情報を提供する

- － 技術的、経済的実行可能性(機能上の性能、市販されているか、など)
- － バイオマス素材を調べるためのサンプル
- － BEES 分析(環境・公衆衛生面の利点と、ライフ・サイクル・コスト評価算出情報)

Step-2: USDA が品目を説明する為のデータを提供

Step-3: USDA は品目を指定する為のルール案を発表

Step-4: ルール案に関するパブリック・コメントの実施

Step-5: USDA はパブリック・コメントを考慮し、品目指定の最終ルールを発表

Step-6: 指定された品目をウェブサイト上发表

Step-7: 製造者/販売者に向けて、指定品目についての製品情報の募集をウェブ上で実施

(注) BEES 分析 (Environmental and Economic Sustainability Analysis) について

- ・ 米国標準局 (NIST, National Institute of Standards and Technology) が構築した分析手法であり、製品中の環境パフォーマンスと経済パフォーマンスの両方を分析することで評価を行う手法
- ・ 環境パフォーマンスは、ISO 14000 で定義された国際標準かつ科学的根拠に基づいた LCA で評価する。すなわち、製品のライフサイクルの全て段階(原料生産、製造、輸送、利用、リサイクルもしくは廃棄)を評価するとともに、ヒトへの健康影響についても評価する。
- ・ また生分解性のある製品については、BEES 分析に加えて、環境中へ放出された場合の悪影響を防止するため、米国材料試験規格 (ASTM) の生分解性 (: D5846, D6139, D6006, D6400, D6868) の基準を満たすことを求めている。
- ・ 経済パフォーマンスについては、ASTM E917 で定義された LCC の手法を用いて評価する。これは、製品の購入から廃棄までのタイムフレームを含んでおり、初期投資、交換、稼働、維持・補修、廃棄の各段階のコストを評価することができる。

以上に基づき指定品目と対応する最低バイオマス含量が制定され、運用に入っているとされる(バイオマス割合を規定する理由は、製造者間のより高い含有率への競争を促進し、バイオマス系製品の需要拡大など優先調達プログラムの目標を達成するためとしている)。なお、バイオマス量については、米国のバイオマス割合の測定方法規格 (ASTM D6866) に則り、製品中のトータルカーボン重量に対するバイオベース・カーボン重量の割合を政府が測定している。

#### (5) 優先調達プログラムの推進方法

優先調達プログラムのガイドラインに従い、連邦機関は各自の調達プログラムを作成することになっており、各連邦機関は可能な限りバイオマス系製品の調達を行う必要がある。

#### (6) ラベリング・プログラム

バイオマス系製品にラベルを添付するラベリング・プログラムが計画されている。

#### 1.4.2.4 民間側の動向: BMA (Biobased Manufactures Association) の活動状況

BMA では、バイオマス系製品に付ける自己認証ロゴを作成し、認証制度を運営している。

##### (1) 概要

BMA はバイオマス系製品の製造、販売、利用を促進し、また、再生可能資源について責任を持って利用開発することを目的としてバイオマス系製品の製造業者などから構成された団体とされる。機関としてのウェブサイトは見当たらないが、事務局長の学会講演会資料が公開されている<sup>1)</sup>。

##### (2) バイオマス系製品の種類

バイオマス系製品をバイオ燃料、バイオケミカル、バイオマテリアルの 3 種類に分けて規定している(BP はバイオマテリアルの範疇に属する)。

##### (3) 認証ロゴの使用規定

ロゴは BMA 会員は無料で利用できる。会員でなくても、申請フォームにロゴの付加を希望する製品などを記入して BMA に提出した後、ライセンスを得ることができれば利用可能である。

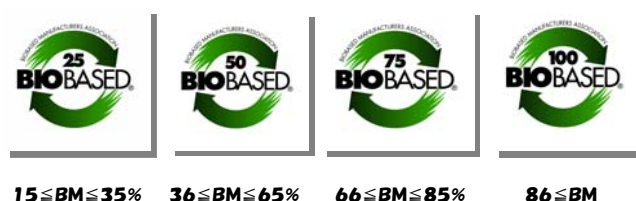


図 1.4.1 BMA(米国 MS 州 St.Louis 市)の自己認証マーク  
出所:

Mr. Dan Mantemach(BMA 事務局長)

POWER-GEN Renewable Energy Conference, Mar.1-3, 2004

1) 以下の2件を参考として引用する:

04 年版: <http://www.biobased.us/ppt/BMA%20Power-Gen%20Presentation.ppt> (但し現在は削除されている)

05 年版: [http://biomass.ucdavis.edu/materials/forums%20and%20workshops/f2005/f2005\\_Kristoff.pdf](http://biomass.ucdavis.edu/materials/forums%20and%20workshops/f2005/f2005_Kristoff.pdf)

バイオマス割合の測定方法については特に規定されていない。またバイオマス割合に関する詳細な書類の提出を求めているため、ロゴの使用を希望する主体の自己申告を基に BMA のライセンス委員会が判断し許可を出すものと考えられる。

ロゴは4種類あり、“Biobased Products”に含まれるバイオマスの割合(25, 50, 75, 100%)によって使い分けられている(図 1.4.1)。

#### (4) 認証ロゴの普及活動

BMA は、自己認証ロゴ制度の他、BM系製品のデータベースの作成と消費者への公知、全国的な販促キャンペーンの実施オンラインニュースレターの発行などを行っている。

#### 1.4.3 OECD における論議

枯渇性資源経済からBTに基づいた経済(バイオベース経済:”Bio-based Economy”)への移行課題が現状分析の基に論議されており、①価格、②品質、③消費社会としての受け入れ基準、及び④行政府による支援が重要との認識にある様だ<sup>1)</sup>。

---

<sup>1)</sup> 藪崎義康氏(JBA), 私信(2005年12月8日)

## 1.5 利用の現状(市場の動向)<sup>1)</sup>

### 1.5.1 市場規模

図1.5.1に国内のBP系資材の市場構成と規模を示した。

同図から解るように国内で最も産業資材として活用されているBPは酢酸セルロース(CA)と言える(EUにおいては化学修飾して機能化したセルロースを"第0世代"<sup>2)</sup>のBPと見なす立場をとっている模様である)。セルロース鎖の持つ水酸基間の水素結合を遮断するアセテート化によって可とう性が発現することから成形性が改善され、不燃フィルムや繊維としての展開に加えて近年は光学的機能が発見されて液晶など表示デバイス表面素子として活用されている。CAは世界規模で見ても数社による寡占生産品で、国内ではダイセル化学工業(株)が10万トン/年を大きく超えて製造している。

CAに次いで量的に存在感ある資材はバイオマス系コンパウンド(緩衝材として実用化されている澱粉ベースタイプ、その他変性/複合系;推定値1万トン/年前後)で、BPとしての着目度が一際高いPLAは財務省の貿易統計データ(樹脂原料としての輸入量)と原反など半製品の推定輸入量を加えて1万トン/年弱と思われる。現時点では帝人ネーチャー・ワークス(NW)社(米)のみが大規模生産設備(7万トン/年生産ライン2系列)を有しており、次いで浙江海正社(中国;公称5千トン/年)が続いている。ヨーロッパでは砂糖大根やサトウキビ由来のPLA生産構想が相次いで表明されているが、現実の工場建設・稼働は未定のケースが多い。

わが国では2007年1月からPLAの関税コードが決まり("3907.70-000")、財務省貿易統計で公開される様になった。これによれば2007年中の輸入量は実質米国から、すなわち帝人NW社樹脂による5,782トンで、年平均cif-価格は¥230/kgであった。2008年は6,213トンと微増に止まり、cif-価格は¥222/kgに低減している。浙江海正社製PLAも4月以降少量が輸入されている。

これらに加えて2010年前後の市場には、トウモロコシ由来1,3-プロパン・ジオール系ポリトリメチレンテレフタレート(PTT:デュポン社(米))、ひまし油由来11-アミノウンデカン酸縮合物であるポリアミド-11(PA-11:アルケマ社(仏))、サトウキビ由来エタノールを原料とするバイオPEやバイオPPなど(ブラスケン社(ブラジル))が本格登場すると見られる。

米国では大豆由来ポリオール系のポリウレタン(PU)が家具や自動車などのクッション材向け低発泡銘柄として既に実用化されているが(カーギル社:"BiOH")、国内では上市展開されてはいない。またMetabolix社とADM社が連携してポリヒドロキシアルカノエート(PHA:"Mirel")の生産を2009年度から始めるとしているが、この系統の樹脂は国内では(株)カネカが手がけているものの、市場への本格投入予定は明らかにされていない。

1) 大島一史:(社)高分子学会ポリマーフロンティア21・ワークショップ(08-5)予稿集,"バイオポリマーは石油由来ポリマーを超えられるか",p.1-6(2008年1月23日,東京工業大学にて開催)

2) Bonton, I.C., "Generation ZERO", bioplastics MAGAZINE, 3(5), 28-29(2008)

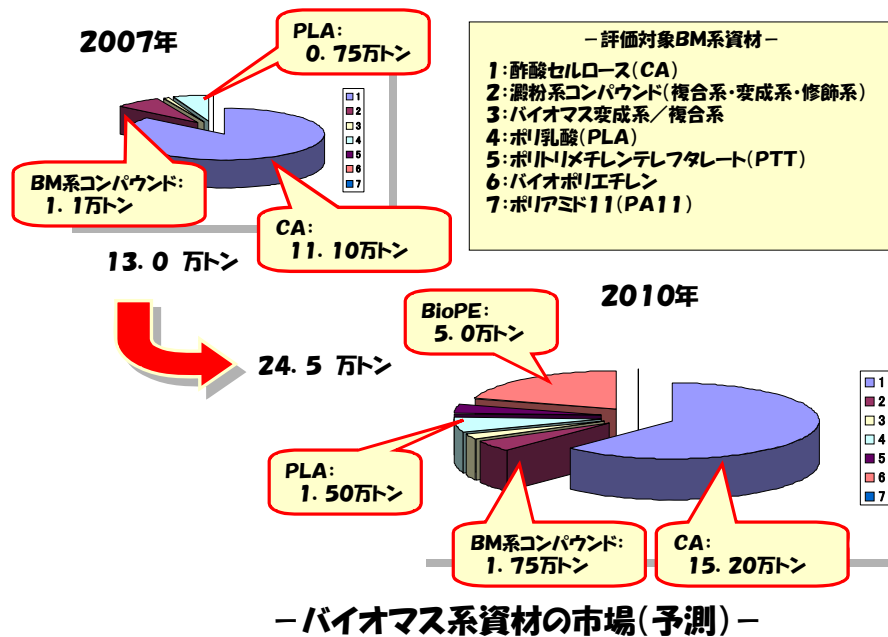


図 1.5.1 BP を含むバイオマス系資材の市場構成・規模・動向(推定)<sup>1)</sup>

## 1.5.2 市場動向

### 1.5.2.1 食品食材容器包装材としての展開

ポリオレフィン等衛生協議会によるポジティブリストへの PLA の登録、更に“愛・地球博”会場での実証事業を受けて食品食材容器包装への本格的な展開が始まっている(前述)。

すなわち、2006 年から全国チェーン展開を進めている大手スーパー店舗(イオン(株)及びユニー(株)、及びファストフード店(株)モスフードサービス)で、卵・野菜・果物やコールドドリンクなどの PLA 製容器包装の使用が始まっている。2007 年 4 月からはローソン(株)やファミリーマート(株)でも PLA 製サラダ容器などの導入が始まり、これら BP 製食品食材容器包装市場は 2007 年には 1000 トン/年を超える規模へと成長したと見られる。

またこの分野では日世(株)がエースコック(株)向けに澱粉をベースにした複合系 BP を使用したカップ麺容器の開発に成功したことが着目される。2008 年 5 月頃より大手リテーラーから販売が開始され、耐熱性が要求される食品容器として BP 系資材が本格使用された最初のケースとなった。

更に遅くとも 2011 年以降には前述のバイオ・ポリオレフィン製容器包装も投入され、この分野は

<sup>1)</sup> 大島一史, プラスチック産業年鑑 "PLASTICS AGE ENCYCLOPEDIA" 進歩編 2009, p.175-182(2008 年 10 月;株式会社プラスチック・エージ)



BP の市場開拓への努力が最も速く実を結ぶと期待されている。

#### 1.5.2.2 ポリ乳酸銘柄の多様化(産業副資材としての展開)

BP の中でも PLA は前述の食品食材容器包装への展開に加えて、

- －再生可能資源由来であることのコンセプト(三井化学㈱)
- －光沢と絹の様な感触を活かせる繊維・衣料分野への展開(カネボウ合繊㈱(当時)、及びクラレ㈱)
- －効果的な核材の発見(ADEKA㈱、日産化学工業㈱、ソニー㈱)・無機材料とのナノコンポジット化による耐熱性発現(ユニチカ㈱)・加水分解を抑制する技術(日清紡績㈱)を背景とする電子・電気機器筐体などへの展開
- －伸長粘度を発現する分子設計技術の展開を背景とした発泡分野への展開(カネボウ合繊㈱(当時))

などを背景に産業副資材としての期待が大きい。

特に PLA の耐久性・耐熱性を強化させた銘柄開発への取り組みが盛んで、耐久消耗品への展開が盛んである。AV 機器(ソニー㈱)、DVD デッキ(同)、パソコン筐体(富士通㈱、及び日本電気㈱)、携帯電話機筐体(日本電気㈱)やオフィス機器部品(富士ゼロックス㈱、及びリコー㈱)への適用が見られる(特に富士ゼロックス社の開発品は 07 年度エコプロダクツ経済産業大臣賞を獲得)。

自動車部材への展開も盛んといえる。トヨタ自動車㈱はスペアタイヤカバーとフロアマットシートを小型車に搭載している。スペアタイヤカバーでは PLA30%とケナフ繊維 70%の配合で加熱プレス加工して成形するとしている。更に最近では PLA とポリプロピレン(PP)との複合化による内装部材としての展開を公表した。これらは、我が国独自の PLA 用途展開で、高い配合技術と成形加工技術が背景にあり、今後も独自の市場を形成していくと期待されているが、コスト及び耐久性の担保が最大課題であろう(後述)。

PLA 銘柄の多様化もわが国独自の動向である。

大日本インキ化学工業㈱はポリ乳酸-ポリ(ジオール・ジカルボン酸)系ブロック・コポリマーを開発した("Plamate")。ポリ乳酸の衝撃性改質材として位置づけている。東洋紡㈱は D-乳酸含量を増やした PLA を自製して "バイロエコール" として上市した。対無機顔料との相溶性に特色があり、"BP インク" としての用途が見込まれている。

#### 1.5.2.3 ポリブチレンサクシネートの BP 化

ポリブチレンサクシネート(PBS)は軟質系 BdP として生ゴミ回収袋やマルチフィルムなど、生分解性が直接的に活かされる用途の主材として順調な伸展を見てきたが、6 年前に三菱化学㈱が植物製資材として上市する計画を発表している(日本経済新聞紙など;03 年 3 月 13 日)。

原料モノマーの一つであるコハク酸をバイオマス由来とし、味の素㈱が澱粉⇒グルコース経由で合成する。一方の PBS 製造事業者である昭和高分子㈱は(独)地球環境産業技術研究機構

(RITE)が開発した古紙由来セルロース⇒グルコース経由で琥珀酸を合成する技術の工業化プロジェクトに参加している。

現時点ではいずれの技術の工業化も実現されていないが、三菱化学㈱は 2010 年以降の工業化を目指すとしている。

#### 1.5.2.4 天然物系 BP の "健闘"

以上の化学合成系 BP に加えて天然物系 BP が健闘している。

トヨタ車体㈱は、ケナフ及びマオにプラスチックを結着成分とした熱プレス成形法によって一人乗り用電気自動車の外板を開発した(自動車技術展 2008)。外板の 70-80%が BP 系であるとされ、実際の上市車両への搭載が期待される。

またバイオマス変性タイプといえる“アグリウッド”(後述:第 2 章 2.2 節(2.2.3)項)がバイオマスの地産地消型ビジネスモデルとして注目され初め、存在感を増してきている模様だ。現状 1000 トン/年程の生産設備を2-3年後には 5 倍強の5-6000 トン/年への増設を発表している(08 年 6 月 4 日)。

従来から間伐材やコーヒー豆絞り滓などを変性もしくは一般プラスチックと複合化したタイプは存在していたが、最近は無利用バイオマスの利活用の観点から見直されている。例えば、バンダイ㈱が 2007 年から上市しているミニチュア玩具用資材として活用した例は 2007 年度エコプロダクツ農林水産大臣賞を獲得している。

#### 1.5.2.5 特殊 BP の登場

昭和高分子㈱が PBS 系エマルジョン(“ビオノーレ・エマルジョン”)、日本コーンスターチ㈱及びミヨシ油脂㈱が澱粉系エマルジョン(“ランディ”)、更に第一工業製薬㈱が PLA 系エマルジョン(“プラセマ L110”)を開発し、BdP 及び BP 基本樹脂のエマルジョン銘柄が出揃った。

無機微粒子の結着樹脂として、また紙との複合化の基材としての展開が始まっている。

## 1.6 バイオポリマーによる資源・環境負荷低減効果

### 1.6.1 役割の変化

従来、BPは環境経営を目指す事業者のシンボリックな役割を担うケースが多く、カテゴリー・トップ事業者の調達に留まる傾向が強かった。

BPの資源・環境負荷(LCA)及びライフ・サイクル・コスト(LCC)評価事例が増えるに伴い、最近大手リテーラーの中には国の資源環境政策との整合性を図る上で、単なる経営パフォーマンスではなく二酸化炭素排出量を具体的に削減する方策の一つとしてBP容器包装を導入する考えを取り入れ始めている(表1.6.1<sup>1)</sup>)。明らかにBPの役割が変わる契機になる可能性が窺える。

表 1.6.1 バイオポリマーへの期待

#### 二酸化炭素排出量削減に向けた大手リテーラーの取り組み

##### 趣旨:

2012年度に2006年度対比で二酸化炭素排出量を30%削減

##### 構成:

1. 店舗における取り組み: ≒ ▲ 50万トン(27%)
  - 08年度以降、エコストア(▲30%)を開発
  - 09年度以降のショッピングセンター⇒エコストア
  - 12年度までに太陽光発電施設を200店舗に導入
2. 商品での取り組み: ≒ ▲ 57万トン(31%)
  - 包装資材: バイオマスプラスチック製へ切り替え、軽量化
  - 商品流通
3. 植樹活動(国内外): ≒ ▲ 31万トン(17%)
4. 京都メカニズム・ベース排出権: ≒ ▲ 47万トン(25%)
  - 海外植林事業

185万トン-CO2

出所:イオン株式会社“温暖化防止宣言”. 080314

### 1.6.2 資源・環境負荷評価の事例

原料バイオマスの栽培から収穫・有効成分の抽出・モノマーへの変換と重合プロセス、次いで精製・ペレット化までの製造負荷を網羅的に総括した事例としては M.Patel 等による EU コミッションに向けた調査報告書<sup>2)</sup> が好適と言える。

1) イオン(株)(現・イオンリテール(株)):2008年3月14日付け“温暖化防止宣言”

2) M.Patel 等:Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe, prepared for the European Commissions Institute for Prospective Technological Studies (Oct.2004), Table 4-1(p.150)

## (1) BPの資源・環境負荷の概要

Patel 等は第 2 章で概観する天然物系としての澱粉系 BP(変性タイプ及び複合タイプ)、化学合成系 BP として PLA(ポリ乳酸)、PTT(ポリトリメチレンテレフタレート)及び PU(ポリウレタン)、バイオ合成系として PHA(ポリヒドロキシアルカノエート)タイプを評価対象資材の一部として取り上げている。

さらにこれら BP を、対照石油系資材として“仮想的な PE”(50%-LDPE/50%-HDPE)、PET 及び PU を設定して、その枯渇性資源節約量とグリーンハウスガス(GHG)排出削減量を概算評価している。結果を表 1.6.2 に示した。

## (2) 資源節約量及び環境負荷低減量の経済的効果

この資源節約量を石油節約量に換算し、更にその経済的効果を ¥200/L・石油及び ¥150/L・石油として評価した(表 1.6.2・経済効果①及び②)。

この効果は、

- 澱粉系資材の場合：¥220～165/kg 程度
- 当代 PLA の場合：¥210～155/kg 前後
- PTT の場合           :¥50～40/kg
- PU の場合           :¥95～70/kg(硬質)、¥175～130/kg(軟質)

であった。

- PHB の場合       :¥70～55/kg(グルコース由来)、¥110～85/kg(大豆由来)

であったり が、植物体内蓄積法の場合にはむしろエネルギーを対照資材よりも多量に必要としているためより多い経費を要する結果となった。

環境負荷低減効果については、二酸化炭素排出権取引相場程度(≒ ¥4/kg-GHG)の場合、及び 2007 年に日本の全産業が二酸化炭素排出削減に投資した経費平均値程度(¥14 万円/t-CO<sub>2</sub>)<sup>2)</sup> の 10%(≒ ¥14/kg-GHG)の場合を想定して経済効果を見た(表 1.6.2・経済効果③及び④)。

この効果を③(④)のケースで評価すると、

- 澱粉系資材の場合：¥12～15/kg(43～52/kg)程度
- 当代 PLA の場合   :¥18/kg(¥63/kg)前後
- PTT の場合         :¥4/kg(¥13/kg)

---

1) Patel 等の調査書のタイトルになっている "大規模生産" の定義は既存樹脂の凡そ 30%を置き換える量として捉えられており、ここで評価した経済効果が現状で直ちに BP の価格に反映されるという意味ではない。

2) 日本経済新聞紙、2007 年 12 月 1 日付記事

- －PUの場合                   : ¥4/kg(¥13/kg;硬質)、¥6/kg(¥22/kg;軟質)
- －PHBの場合                 : ¥9/kg(¥32/kg;グルコース由来)、¥10/kg(¥35/kg;大豆由来)

であった。

つまり、既存樹脂からの置き換えによってこれだけのカーボン・オフセットによる "メリット" が生まれることになる。一方、樹脂の市場価格、成形加工費(BP は一般に成形加工性が低く、加工経費は割高傾向にある)、及び再商品化、更に最終処分に至るまでの全生涯にかかる経費、即ちLCCを評価すると、当代PLAの場合、対照資材との差はおおよそ¥100/kg程度割高であった<sup>1)</sup>。すなわちカーボン・オフセット効果としておおよそ¥18/kg(¥63/kg)程度の経済的なメリットが生まれるが、実際に要するコスト負担はその5.6(1.6)倍ほど "重い" ことになり、"コスト・オフセット" にはなっていない。

### 1.6.3 高機能化バイオポリマーの事例

JBAでは1.3節(1.3.1)項で紹介した調査事業の指針に沿ったBPの高機能化に係わるフィージビリティスタディを実施し、耐久性と耐熱性を改善する原理的な手法を検討した<sup>2)</sup>。その具体事例については第2章2.7節で引用するが、ここでは高機能化したBPと対照資材としたABS(アクリルニトリル・ブタジエン・スチレン・タポリマー)及びPC(ポリカーボネート)をGHG排出量の視点で比較する。

結果を表1.6.3に示した。

BPとしてはPLAを取り上げ、3種の高機能化手法を開発した。

すなわち耐久性改善系(タイプ-A)では、高分子鎖末端及びエステル基起因酸基を封止する機能を持つカルボジイミドを添加して加水分解性を抑制した。耐久耐熱性改善系(結晶化促進タイプ:タイプ-B)はカルボジイミドと結晶化促進剤(すなわち核剤)としてフェニルスルホン酸亜鉛を添加し、更に急速加熱(110°C前後)/急速冷却(100°C以下)可能な金型による射出成形加工法を開発して実現した。また耐久耐熱性改善系(高密度架橋化タイプ:タイプ-C)は、架橋点発生促進剤としてトリアリル・イソシアヌレート(架橋点間分子量がPLA鎖持続長数個に相当する様に添加し、電子線照射によって高密度架橋を実現させた。

表1.6.3には最終処分に至る経路として焼却(エネルギー回収)、コンポスト化(タイプ-Cを除く)、及びマテリアル・リサイクル(MR;使用済み品の汚染度が高いケースと低いケース)を考慮している(MR品の最終処分はエネルギー回収方式焼却)。同時に各資材に対して全生涯の工程に係わるコストを見積もり、LCCとして記載している。

- 
- 1) 農林水産省総合食料局:「バイオマスプラスチック容器包装再商品化システム検討事業」報告書(平成20年3月)[補助先:(財)バイオインダストリー協会]
  - 2) 財団法人機械システム振興協会:「バイオマス・プラスチックの普及を実現する技術システムの開発に関するフィージビリティスタディ」報告書(平成20年3月)[委託先:(財)バイオインダストリー協会]

表 1.6.2 バイオポリマーと石油由来ポリマー：資材製造までの枯渇性資源由来エネルギー使用量と GHG 排出量の比較 (\*a)

資源・環境負荷	枯渇性資源由来エネルギー使用量, MJ/kg						GHG排出量, kg-GHG/kg					備考
	エネルギー使用量	対象資材	節約量	換算石油量 L/kg	経済効果, ¥/kg		GHG排出量	対象資材	削減量	経済効果, ¥/kg		
					ケース:1	ケース:2				ケース:1	ケース:2	
バイオマス由来プラスチック												
<b>1. 天然物系</b>												
熱可塑性デンプン系樹脂	25	A	51	1.10	219	165	1.1	A	3.7	14.8	51.8	変性タイプ: 石油樹脂含まず
85%同上+15%PVA	25	A	51	1.10	219	165	1.7	A	3.1	12.4	43.4	PVA: ポリビニルアルコール
<b>2. 化学合成系</b>												
PLA(NW社: デビュー品)	54	A	22	0.47	95	71	4	A	0.8	3.2	11.2	PLA: ポリ乳酸
PLA(NW社: 2006年出荷以降)	27.2	A	48.8	1.05	210	157	0.27	A	4.5	18.1	63.4	"
PTT	65	B	12	0.26	52	39	4.6	B	0.9	3.6	12.6	PTT: ポリトリメチレンテレフタレート(バイオ1,3-PD)
PU(硬質タイプ)	77.8	C	21.7	0.47	93	70	5.0	C	0.9	3.6	12.6	PU: ポリウレタン
PU(軟質タイプ)	62.9	D	40.1	0.86	173	129	4.4	D	1.6	6.4	22.4	"
<b>3. バイオ合成系</b>												
PHA(植物体内蓄積法)	81	A	-5	-0.11	-22	-16	no data	A	no data			PHA: ポリヒドロキシアルカノエート
PHB系(グルコース由来)	59.2	A	16.8	0.36	72	54	2.5	A	2.3	9.2	32.2	PHB: ポリヒドロキシブチレート
PHB(大豆由来)	50.2	A	25.8	0.55	111	83	2.3	A	2.5	10	35	"
<b>対象石油由来プラスチック</b>												
A: 50%LLDPE+50%HDPE	76						4.8					LLDPE: 低密度ポリエチレン HDPE: 高密度ポリエチレン
B: PET	77						5.5					PET: ポリエチレンテレフタレート
C: 石油由来PU(硬質)	99.5						5.9					
D: 石油由来PU(硬質)	103						6.0					

(\*a) M.Patel et al, Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe, prepared for the European Commissions Institute for Prospective Technological Studies (Oct.2004), Table 4-1(p.150) を編纂; 但しPLA(NW社: 2006年出荷以降)については報告者が追記; 表中の太字斜体数字は報告者が下記脚注(\*b~)の基で試算

注: エネルギー使用量の中にはバイオマス由来フィードストック相当分(固定化分)は含まず、GHG排出量は完全酸化処理した場合で、更にこの中にはバイオマス固定化分は含まずに評価している。

(\*b) 換算係数: 1MJ = 0.0239 kg-石油 = 0.0215 L-石油

(\*c) 経済効果換算係数①: 1L-石油 = ¥ 200

(\*d) 経済効果換算係数②: 1L-石油 = ¥ 150

(\*e) 経済効果換算係数③: 1 kg-GHG = ¥ 4 (= 現行二酸化炭素排出権取引額)

(\*e) 経済効果換算係数④: 1 kg-GHG = ¥ 14 (= 2007年に日本の全産業が二酸化炭素排出量削減に投資した平均額の10%)

表 1.6.3 高機能化バイオポリマーの LCA: ABS 或いは PC からの置き換えに伴う GHG 排出量削減コスト

銘柄 配合 & 評価項目	標準PLA	耐久性改善配合系	耐久耐熱性改善配合系 (結晶化促進タイプ)	耐久耐熱性改善配合系 (高密度架橋化タイプ)	ABS	PC	備 考
1. 配合	—	PLA/添加剤=95/5 (添加剤:カルボシイミド)	PLA/添加剤A/添加剤B=96/2/2 (添加剤A:カルボシイミド) (添加剤B:フェニルホスホン酸亜鉛)	PLA/添加剤=80/20 (添加剤A:トリアルル・イソシアレート) (架橋化:電子線照射)			
2. 再商品化(単位:kg-GHG/kg-資材)							
—焼却処分	4.2	4.4	4.6	5.4	9.8	14.6	ごみ発電による熱回収 資化50%
—コンポスト化処理	3.5	3.7	3.9				
—MR(ケースA:最終処分=焼却)				4.5	8.5	12	汚染度大;30%使用
—MR(ケースB:最終処分=焼却)				4.3	6.5	8.0	汚染度小;70%使用
3. ABS⇒耐久耐熱性改善配合系(結晶化促進タイプ)							
			( 焼却処分 )				
▲kg-GHG/kg-資材			5.2	¥14/kg-CO2 の 220%			
△¥-LCC/kg-資材			160				
¥/kg-GHG			31				
4. PC⇒耐久耐熱性改善配合系(高密度架橋化タイプ)							
			( MR(ケースB) )				
▲kg-GHG/kg-資材				3.7	¥14/kg-CO2 の 365%		
△¥-LCC/kg-資材				190			
¥/kg-GHG				51			
5. ライフ・サイクル・コスト評価(見積もり)							
LCC,¥/kg-資材	640/690	790/840	890/940	1175/1225	730/780	985/1035	
average			915	1,200	755	1,010	

出所:財団法人機械システム振興協会事業報告書(システム開発19-F-9)「バイオマス・プラスチックの普及を実現する技術システムの開発に関するフィージビリティスタ  
(平成20年3月:委託先=財団法人バイオインダストリー協会)

注:¥14-/kg-CO2は、日本の全産業が投資した二酸化炭素排出量削減平均コスト(¥14万円/t-CO2 ← 日本経済新聞紙071201)の10%値

## (1) BPの高機能化と環境負荷

標準BP(PLA)と高機能化BP(タイプ-A,B,C)を比較すると、何れのケースにおいてもGHGは増大している。単純な焼却処分の場合は以下の通りとなる:

標準銘柄⇒タイプ-A(耐久性改善系) :0.2 kg-GHG ↑ /kg-資材

標準銘柄⇒タイプ-B(耐久耐熱性改善系(結晶化促進タイプ)) :0.4 kg-GHG ↑ /kg-資材

標準銘柄⇒タイプ-C(耐久耐熱性改善系(高密度架橋化タイプ)) :1.2 kg-GHG ↑ /kg-資材

すなわちBPの高機能化は同時に環境負荷の増大をもたらすことから、対照資材との比較において環境負荷が低くない限り、BPの高機能化は認知を受け難いと思われた。

## (2) 高機能化 BP と対照資材との環境負荷比較

タイプ-BはABS並みの耐久性・耐熱性を発現すると期待されていることから、ABSとの比較を行った。単純焼却の場合のGHG及びLCCの推移は以下の通りとなった:

ABS⇒タイプ-B:  $9.8 - 4.6 = 5.2 \text{ kg-GHG} \downarrow / \text{kg-資材}$

$755 - 915 = \text{¥} - 160 / \text{kg-資材}$

すなわちGHG排出量は削減できるが、同時にコスト上昇を招いており、そのGHG削減コストは

$5.2 / 160 = \text{¥} 31 / \text{kg-GHG} \downarrow$

であった。このコストは削減経済効果(⇔前項の  $\text{¥} 14 / \text{kg-GHG}$ )のおよそ2倍強と評価される。

タイプ-CはPC並みの耐久性・耐熱性を発現すると期待されていることから、PCとの比較を行った。これら高機能化資材の場合、MR原料としてリサイクルされる機会が多いと考え、汚染度が低いケースのMRの場合のGHG及びLCCの推移を評価すると以下の通りとなった:

PC ⇒ タイプ-C :  $8.0 - 4.3 = 3.7 \text{ kg-GHG} \downarrow / \text{kg-資材}$

$1,010 - 1,200 = \text{¥} - 190 / \text{kg-資材}$

すなわちこのケースであってもGHG排出量は削減できるが、同時にコスト上昇を招いており、そのGHG削減コストは

$3.7 / 190 = \text{¥} 51 / \text{kg-GHG} \downarrow$

で、このコストは削減経済効果(⇔前項の  $\text{¥} 14 / \text{kg-GHG}$ )のおよそ3倍強と評価される。

ここでも "コスト・オフセット" には至っていないが、今後長期的には総枠は増大に限度が有りながら需要急増に伴う二酸化炭素排出権取引額の "高騰" が想定され、一方BPについては普及に伴う価格低下と成形加工性を含む品質設計が進むことによるLCCの低減が期待され得るので、 $\text{¥} 15 / \text{kg-GHG}$ 程度を実現することが、コスト面から見たBP普及に向けた現実的な目標になると思われる。



## 2. バイオポリマー:種類・製造方法・特性・技術的シーズ・自動車部材への利用状況及びその可能性

本章ではバイオポリマー(BP)をバイオマス自体をポリマーとする"天然物系ポリマー"と、バイオマス由来モノマーを化学的手法によって重合するタイプ("化学合成系")、及び人為的な環境下のバイオプロセスによって重合するタイプ("バイオ合成系")に分類して概観する。

### 2.1 概観

工業的に重要なBPを表2.1.1にまとめて概観した<sup>1)</sup>。

食材・食添・化粧品原材料として使用される資材が多いが、成形資材として実用上の観点から見た場合、天然物系としてはセルロースやでん粉、及びその化学的修飾による誘導体(アセチル化セルロース(CA)やエステル化でん粉など)、化学合成系タイプとしてはポリ乳酸(PLA)、ポリグリコール酸(PGA)、ポリリメチレンテレフタレート(PTT)やポリブチレンサクシネート(PBS)、バイオ合成系ではポリヒドロキシアリカノエート(PHA)に代表される微生物産生系脂肪族ポリエステルとポリアミノ酸<sup>2)</sup>の一種であるポリ- $\gamma$ -グルタミン酸(P- $\gamma$ -GA)が代表となろう。

留意すべきは化学合成系タイプの"新参組み"で、サトウキビ由来バイオ・エタノールの脱水で得られるエチレン(バイオエチレン)から誘導される石油系ポリマー群が代表例である(第1章1.2節(1.2.2)項)。海外では既にポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)やポリ塩化ビニル(PVC)などの開発が済み、一部は生産プラント建設が伝えられている。

---

1) アクリロニトリルの水和反応で得られるアクリルアミドをモノマーとするポリマーは、凝集剤・土壌改良材・紙力増強剤・接着剤・塗料樹脂として工業的に重要である。従来アクリロニトリルの水和法には硫酸法(:硫酸への直接注入)や接触法(:水との直接接触;触媒:ラネー銅)があったが、近年は微生物を利用した酵素法が工業的にも採用されている。したがってポリアクリルアミドもBTが駆使されて製造されたポリマーであるが、アクリロニトリルが主にSohio法(原料:プロピレン、アンモニア、空気)などで製造され、バイオマス由来ではないことから敢えてここでは取り上げていない。本書でのBPはバイオマス自体をポリマーとするか、あるいはバイオマス由来モノマーから重合されるポリマーとしている。また天然繊維系統のポリマーは加えていない。

2) アミノ酸は酸性を示すカルボキシル基(-COOH)とアルカリ性を示すアミノ基(-NH<sub>2</sub>)があり、カルボキシル基とアミノ基が脱水して形成するペプチド結合を有するが、蛋白質は遺伝子情報に従って特定アミノ酸が特定順序にペプチド結合したポリマーである。

化学合成や発酵法でもポリペプチド合成は可能であるが、蛋白質の様なアミノ酸の結合順序を制御は見られず、ポリアミノ酸(:アミノ酸ポリマー)と呼ばれる。表2.1.1で例示されているポリ- $\gamma$ -グルタミン酸とポリリジンはアミノ酸であるグルタミン酸とリジンが微生物体内で形成されるポリマー、すなわちポリアミノ酸である。

表2.1.1 工業用資材としてのバイオポリマー概観<sup>(\*a)</sup>

ポ リ マ ー	BTとの関わり			生分解性	備 考
	モノマー資源	モノマー合成	重合		
<b>1. 天然物系ポリマー<sup>(*b)</sup></b> ・多糖類系 ・セルロース及びその化学修飾系 ・澱粉およびその化学修飾系 ・キトサン ・蛋白質系 ・フィブロイン ・アルギン酸 ・グルテン ・コラーゲン ・ゼラチン ・グリシニン ・天然ゴム	モノマー資源:水, CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , 尿素 モノマー合成:バイオ合成 重合:バイオ合成 注-1: ここで言うバイオ合成は動植物体の生命活動そのもの("in vivo"合成) 注-2: セルロース及び澱粉の化学修飾は化学プロセス			○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	修飾系:アセチル化セルロース(:アセチル化度<2.4程度迄はセルラーゼによる分解を受ける)。用途:繊維等 修飾系:エステル化澱粉。用途:フィルム キチン(海老・蟹・昆虫の殻)の脱アセチル化(50%以上)体。水溶性。用途:水処理・食添・化粧品原料・生分解性シート 絹糸 藻(昆布・若布・ひじき)の細胞壁構成資材。水溶性。用途:食材(合成イクラ)・食添・繊維の糊剤・カプセル化剤 小麦蛋白。用途:食材・飼料(焼き麩)。ポリオールを可塑剤として射出成形・発泡成形可能 脊椎動物の皮・骨・腱。用途:食添・化粧品原料・縫合糸・人工皮膚・カットガット コラーゲンの部分加水分解物。可逆的なゾルゲル転移。用途:可食性シート 大豆蛋白。用途:可食性シート ゴムの木分泌物。主体:ポリイソブレン。光分解性もある。用途:多岐
<b>2. 化学合成系ポリマー<sup>(*c)</sup></b> ・ポリ乳酸 ・ポリグルコール酸 ・ポリトリメチレンテレフタレート ・ポリブチレンサクシネート <sup>(*d)</sup> ・ポリアミド11 ・ポリオレフィン(ポリエチレンなど) ・ポリエチレンテレフタレート ・ポリ塩化ビニル ・ポリウレタン	モノマー資源:バイオマス モノマー合成:バイオ合成 重合:化学合成 注: ここで言うバイオ合成は、微生物・酵素の持つ機能およびその発現を極大化させるBTを駆使した合成を指す。将来は "in vitro" 合成の可能性も。			○ ○ × ○ × × × × ×	モノマー:(澱粉, セルロース ⇒ グルコース ⇒ )乳酸。用途:硬質系BPとして多岐 最も単純な脂肪族ポリエステル。モノマー:(砂糖キビ等植物性バイオマス ⇒ )グリコール酸。用途:縫合糸・ガスバリア包装 モノマー:(澱粉, セルロース ⇒ グルコース ⇒ グリセリン ⇒ )1,3-プロパンジオール。用途:繊維 モノマー:(澱粉, セルロース ⇒ グルコース ⇒ )コハク酸。用途:軟質系BPとして多岐 モノマー:(ひまし油 ⇒ )11-アミノウンデカン酸。用途:軟質系。耐薬品性高く、自動車燃料用チューブ等多岐 モノマー:(サトウキビ由来エタノール⇒)エチレンなど。用途:石油由来ポリオレフィン用途と同一 モノマー:(バイオマス由来)エチレングリコール。用途:石油由来ポリエチレンテレフタレート用途と同一 モノマー:(バイオマス由来)塩化ビニル。用途:石油由来ポリ塩化ビニル用途と同一 モノマー:(大豆由来)ポリオール。用途:石油由来ポリウレタン用途と同一(現時点では低発泡銘柄による家具・自動車向けクッション材)
<b>3. バイオ合成系ポリマー<sup>(*e)</sup></b> ① 微生物脂肪族ポリエステル ・ポリヒドロキシブチレート ・ポリ(HB/HV) <sup>(*f)</sup> ・ポリ(HB/HX) <sup>(*g)</sup> ② 微生物多糖類 ・バクテリアセルロース ・カードラン ・ブルラン ③ 微生物ポリアミノ酸 ・ポリ-g-グルタミン酸 ・ポリリジン	モノマー資源:バイオマス モノマー合成:バイオ合成 重合:バイオ合成 注: ここで言うバイオ合成は、微生物・酵素の持つ機能およびその発現を極大化させるBTを駆使した合成を指す。将来は合成機能部分をコピーした合成遺伝子を大腸菌や植物体内に移植するバイオプロセスの実現も考えられる。			○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	ポリヒドロキシアルカノエート系 微生物:原核性(水素細菌・枯草菌・シュドモナス等)。炭素源:グルコース・アルコール・有機酸等 同上 同上と思われる(*h) リグニンやヘミセルロースを含まない純粋なセルロース。合成菌:酢酸菌。炭素源:グルコース等。用途:食材・スピーカーコーン紙 合成菌:土壌分離菌( <i>Alcaligenes Faecalis</i> )。炭素源:グルコース・マルトース・しょ糖等。用途:食添 合成菌:ブルラン菌(黒酵母)。炭素源:水飴・しょ糖等。用途:食添(食物繊維)・化粧品原料等 納豆の粘着物質。合成菌:グルタミン酸合成菌(納豆菌)。炭素源:グルコース。窒素源:尿素。用途:吸水性樹脂 合成菌:抗生物質産生放線菌。炭素源:グルコース。窒素源:硫酸。用途:飼料の栄養強化

(\*a) 大島一史:石油学会誌(ペトロテック), "バイオ技術を基盤としたポリマー製造技術・総論", 26(8),610-615(2003)掲載表を改編

(\*b) バイオマス(生物資源)の由来によって2つに分類可能:

- ・植物性バイオマス系ポリマー:セルロース系, 澱粉系, グルテン, グリシニン, 天然ゴム
- ・動物性バイオマス系ポリマー:キトサン, フィブロイン, アルギン酸, コラーゲン, ゼラチン等

(\*c) バイオマス原料から酵素合成したモノマーを化学工学的プロセスで重合するタイプ

(\*d) 現時点では石油化学由来モノマーを化学合成したタイプ。近い将来にバイオマス由来モノマーから化学合成される見込み(本文参照)

(\*e) バイオマス原料から酵素合成したモノマーを、微生物体内で酵素重合するタイプ

(\*f) ポリ(ヒドロキシブチレート/ヒドロキシバレート)

(\*g) ポリ(ヒドロキシブチレート/ヒドロキシヘキサノエート)

(\*h) P&G社及び鐘ヶ淵化学工業株式会社(現・株式会社カネカ)の開発による。

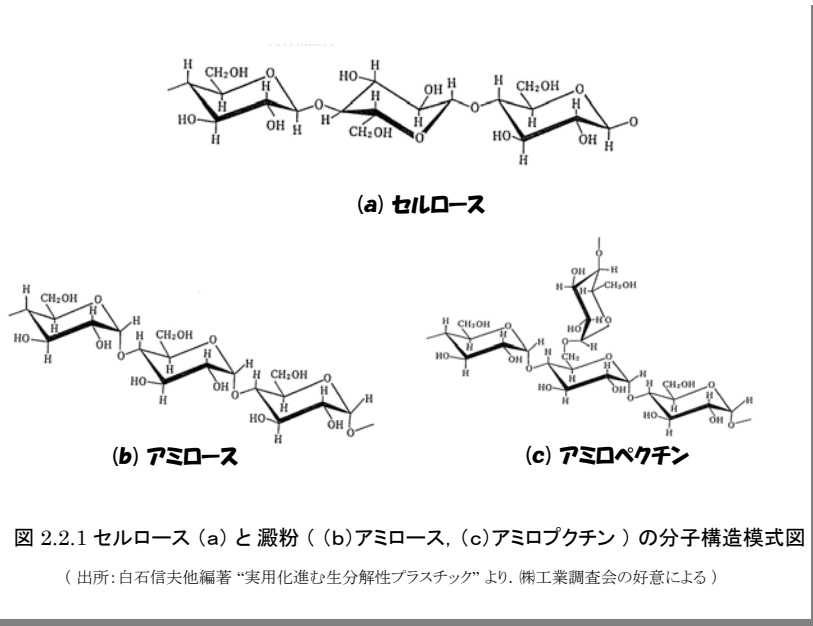
## 2.2 天然物系ポリマー

いわばバイオマスをポリマー骨格とするタイプで、セルロース及びでん粉に代表される多糖類系が最も重要な資材と言える。これらを可塑化した系は植物性プラスチックとする位置づけも可能である。今日的な BT の対象としてはむしろバイオマス・モノマーの原材料としての関心が強い(後述)。

### 2.2.1 セルロース及びセルロース誘導体<sup>1, 2)</sup>

セルロースは植物の細胞壁を構成する天然繊維として地球上で最も大量に生産される植物性ポリマーである(1千億トン/年オーダーのバイオマス、そのうち 10%程がセルロース類として生産される)。通常はリグニン及びヘミセルロースなどの多糖類と共存してリグノセルロースと呼ばれる。工業的にはパルプ(含量:40%前後)や綿(:木綿は最も純粋なセルロース)から採取するが、最近繊維含量が 60%以上と多いケナフ靱皮がトヨタ自動車(株)によってスペアタイヤ・カバー用部材に適用されたことから注目され、さらに矢野らによるナノサイズのセルロース繊維はマトリックス資材強化材としての期待が強い<sup>3)</sup>。

セルロースは図 2.2.1(a)に示す様にグルコースが $\beta$ 結合で連結したポリマーで、鎖間にはグルコースの持つ水酸基間水素結合が働き、凝集力の大きい結晶を形成し易い。加熱してもガラス転移点や融点を示さず、320℃以上で熱分解し、炭化する。



1) 白石伸夫・谷吉樹・工藤謙一編著:”実用化進む生分解性プラスチック”, 第4及び5章(工業調査会)

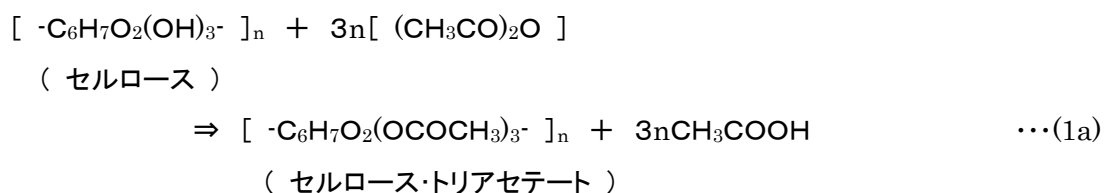
2) 生分解性プラスチック研究会編:”生分解性プラスチックハンドブック”, 第Ⅱ編第1-4章(エヌ・ティー・エス社)

3) 矢野浩之ら:”特集・未来を拓くバイオナノファイバー”, 月刊機能材料誌, 2009年3月号(㈱シーエムシー出版)

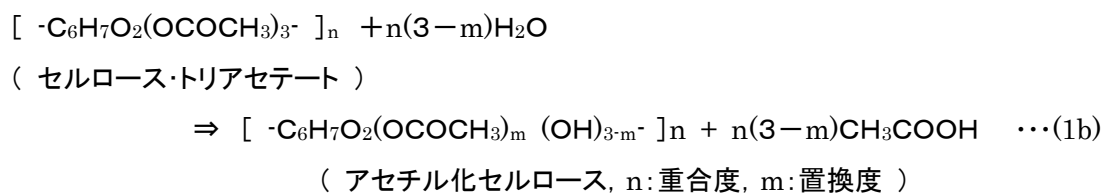
可塑性を持たず、流動性を示さない性質は木材として利用する範囲では問題とはならないが、工業用資材としての幅広い展開のためには加工特性の改善が望ましい。グルコースの3種の水酸基を化学的に修飾(：エステル化、エーテル化、あるいはカーボネート化など)して水素結合を遮断すると分子鎖の可動性が増大し、可塑性が生まれる。これらにあつてはエステル化体(セルロース・エステル)、特に酢酸セルロース(CA)が工業的には重要である。

CAの製造法はセルロースの酢酸及び無水酢酸を用いた酢化工程(触媒：硫酸)によるセルロース・トリアセテート(TAC)合成(1a)と、エステル基の加水分解で用途に合った酢化度のCAとする工程(1b)からなる：

－ 3-酢化工程：



－ エステル部加水分解工程：



m=2(セルロース・ジ・アセテート)は包装用途(：フィルム・シート)、射出成形用途(：自動車ハンドルやサングラス枠など)及び繊維(タバコフィルター用など)や塗料、m=3、すなわちTACは不燃性写真用フィルム用途があり、国内ではダイセル化学工業(株)が製造販売している(凡そ10万トン/年；90%が繊維用途)。

mが2.5程度迄の酢化度ではセルラーゼ(：セルロース分解酵素)による生分解性が大きく、半硬質タイプの生分解性プラスチック(BdP)として使用されている(発泡シート・施設園芸用品など射出成型品・食器具類)。最近はこれら用途に替わって分子篩資材や液晶表示素子の表面被膜資材(富士フィルム(株))としての用途拡大が著しく、国内市場規模は10万トン/年を大きく超えたとされる。

海外ではこの種のセルロース系ポリマーは“第0世代”のBPと認識されている(前述)。

### 2.2.2 でん粉及びでん誘導体<sup>1)</sup>

でん粉は穀物(小麦・米・トウモロコシなど)や芋類(ジャガイモ・サツマイモ・タピオカなど)などの植物性バイオマスに含まれるグルコース・ポリマーであり、セルロースと良く似たアミロース型( $\alpha$ -結合体の直鎖状ポリマー;分子量数10万:図2.2.1(b))とアミロペクチン型(分岐ポリマー;分量数億:図2.2.1(c))。これらは自然界では混在し、その混在比はバイオマスの種類に依存する(例えばトウモロコシ中ではアミロース/アミロペクチン $\approx$ 25/75%)。でん粉の食材用途は総収穫量の数%に過ぎず、市場規模を越えた余剰分は工業用途(飼料・油・糖原料など)に利用されている。最も工業用原材料として適しているのは集中的な栽培・収穫が可能な資源穀物としてのトウモロコシでん粉である(全世界規模で4-5億トン強/年)。

単純な応用製品としては、水或いはグリセリンを加えて糊状化させ、発泡成形したバラ緩衝材や低発泡カップ/トレイ用途が実用化されている。これだけでは耐水性・耐油性に乏しいために各種のBdP、例えばポリビニルアルコール(PVA)、ポリカプロラクトン(PCL)やPBSなどの脂肪族ポリエステル、またCAなどとブレンドしたタイプが開発されており、Novamont社(イタリア)が"MATER-Bi"として上市している(わが国では日本食品化工(株)が"プラコーン"として上市していたが、現時点では事業が凍結されている)。主な用途としては緩衝材(PVAとのブレンド)、生ゴミ回収袋(PCLやPBSとのブレンド:軟質化)、マルチフィルム(生分解性脂肪族ポリエステルとのブレンド:軟質化)、及び食器具類(CA( $m<2.5$ )とのブレンド:硬質化)が挙げられる。これらブレンド化でん粉系の最大の特徴は生分解速度が極めて早いことで、数日の間に生ゴミと共にコンポスト化装置の中で一次分解を受ける。

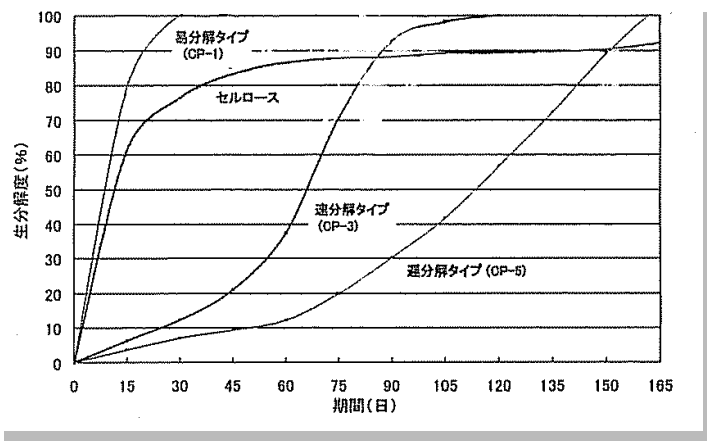


図 2.2.2 でん粉の生分解速度 - エステル化による制御

( 出所: 日本コーンスターチ(株)コーンポール・カタログ(許可を得て掲載) )

1) 白石伸夫・谷吉樹・工藤謙一編著:”実用化進む生分解性プラスチック”、第4及び5章(工業調査会)

(1b)で示したセルロースの場合と同じ様に、グルコースの3種の水酸基をエステル化、エーテル化、あるいはカーボネート化した可塑化でん粉は耐水性・耐油性に加えて耐熱性も改善される(但しセルロースと対比すると置換度は0.1程度が限界とされる)。このタイプの化学修飾系は日本コーンスターチ(株)が“コーンボール”として上市し、国内ではマルチフィルムとして展開されていたが、現在は一部銘柄を除いて生産が凍結されている。

注目すべきはこのエステル化度合いによって生分解速度を制御することが可能な点である(図2.2.2)。

### 2.2.3 バイオマス変性系、及びバイオマス複合系

最近、間伐材由来木質チップや古々米を可塑化して樹脂と複合化したタイプが登場した。

アグリフューチャー・じょうえつ(株)(上越市)が開発した“アグリウッド”は、これら変性したバイオマスが50%を超えるコンパウンドであり、天然物系資材として着目される。既に木質系BP(樹脂はPP)やPLAは配膳トレイなど、古々米系BPは規格袋(樹脂はPE)として、またコンテナ・ボックス(PP)として実用化されている(図2.2.3)。

瀬戸製土(株)はバイオマス複合系資材“アイコン”を開発した。

すなわち、BPとホタテ貝殻粉末及び粘土から構成される複合コンパウンドで、バイオマス系資材(BP及びホタテ貝殻粉末)の占める割合は3/4以上とされる。BPがエステル化でん粉の系ではリターナブル食器(麺用大型丼や鉢など)が愛・地球博会場へ導入され、その実用性が検証されている。最近では愛知県産業技術研究所と連携して、BPとしてPLAを使用して更に耐熱性を高めた資材を開発している<sup>1)</sup>。



図 2.2.3 バイオマス変性系資材(アグリフューチャー・じょうえつ(株)開発)

( 同社許可を得て撮影:051116 )

1) 北川陵太郎:"ポリ乳酸/ホタテ貝殻/カオリンからなるバイオマス成形体の開発", 愛産研ニュース, No.68, 3(2007)

## 2.3 化学合成系ポリマー

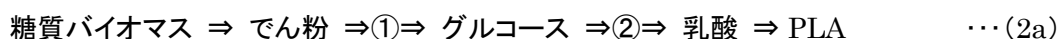
PLA、ポリグルコース酸(PGA)、ポリトリメチレンテレフタレート(PTT)、及びポリブチレンサクシネート(PBS)が工業用資材として重要である。

### 2.3.1 ポリ乳酸

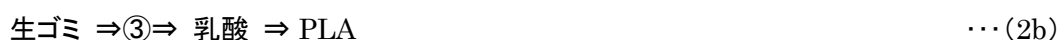
PLA(  $[-CH(CH_3)COO-]_n$  )は植物性バイオマス、すなわちトウモロコシ・砂糖大根・砂糖黍など再生可能な植物や古米から抽出したでん粉から合成される乳酸(2a)を原料とした脂肪族ポリエステルとして注目されている。

我が国では工業用バイオマスに恵まれないこともあって、国の研究開発事業として家庭生ゴミからの乳酸発酵法による乳酸(2b)を原料とする循環システムや、また茎などの農業収穫残・間伐材などの廃バイオマスから抽出するセルロースを糖化し、乳酸とするバイオ法(2c)が検討された経緯がある。

— 帝人・NatureWorks 社法:



— 北九州産業学術推進機構 & 国立環境研究所法:



— 機能性木質新素材技術研究組合法:



実用化されている(2a)におけるでん粉からグルコースへの変換①は酸加水分解法、又はグルコアミラーゼ(でん粉分解酵素)による分解法があるが、最近では収率及び品質上の優位性から酵素分解法が採用されている。グルコースから乳酸への変換②は乳酸発酵による。グルコース及び乳酸菌濃度・温度・pH が反応律速因子で、ここでは高純度 L-乳酸を得ることがポイントとされる。

(2b)の③では生ゴミを構成する糖質からの乳酸発酵による。また(2c)におけるセルロースからグルコースへの変換④は酸加水分解法(塩酸、硫酸、リン酸など)とセルラーゼ分解法が検討されている(機能性木質新素材技術研究組合)。

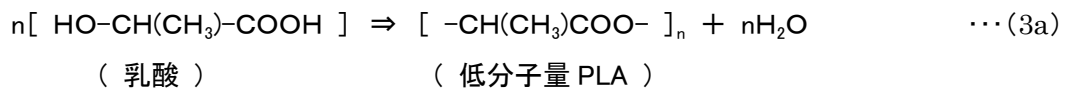
以上の様にPLAはモノマーとしての乳酸を合成する過程でBTが適用され、この意味で“バイオ・モノマー”系といえる。

次に乳酸の縮重合法について概観しておく。

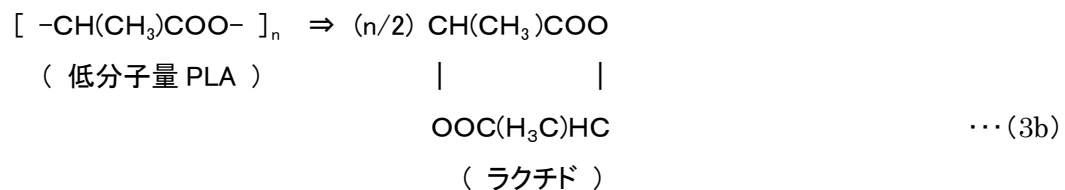
分子量の低いPLAは乳酸そのものの自己縮重合反応により式(3a)の様に反応中に生成する水を系外に除去して得られる。しかし現実にはこの方法では実用性のある高分子量物は得られ

ない。高分子量物は式(3b)の様に低分子量PLAを解重合して合成される環状ジエステルであるラクチドを開環重合して始めて製造される[式(3c)]。

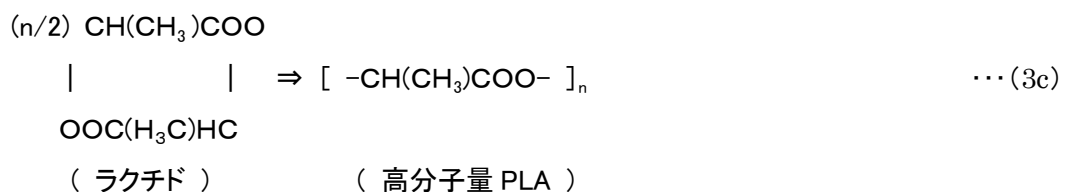
— 自己縮合重合反応:



— 解重合:



— 開環重合:



本法によるPLAの工業的生産は、先ず Cargill-Dow 社(米・当時);現・帝人 NatureWorks 社)から“NatureWorks”(現・Ingeo)として上市された。当時我が国では島津製作所(株)が小規模プラント(100トン/年)によって“ラククテイ”として上市していたが、2002年4月1日より上市を凍結・事業撤退し、トヨタ自動車(株)に譲渡することになった。

また浙江海正生物材料有限公司(中国・浙江省)が5千トン/年規模(公称値)の生産設備を整備し(06年)、2008年から“REVODE”として我が国への輸出をから始めている。

— 直接重合法:

PLAの合成においてラクチド経由を取らず乳酸の直接脱水縮合重合(3a)による高分子量化製造方法が三井化学(株)によって開発されている。この合成方法は Carothers が不可能と判断した反応として知られており、“常識”を覆した功績は大きい。

本法によるPLAは同社から“レイシア”として上市されていたが、2007年9月30日以降は事実上、事業凍結されている。

PLAは先ず25量体前後のオリゴマー迄非酵素的加水分解を受け、以後微生物分解が進む(最近になって直接分解する微生物種も発見されている)。したがって加工製品は土壌中埋設試験では穏やかな生分解が進行し数年かけて完全消失するが、ISO 14855(JIS K 6953)による品質管理されたコンポスト中での好氣的雰囲気下では速やかな生分解を受け、80%以上/45日



間の生分解度を示す(参考:図 2.3.1)。

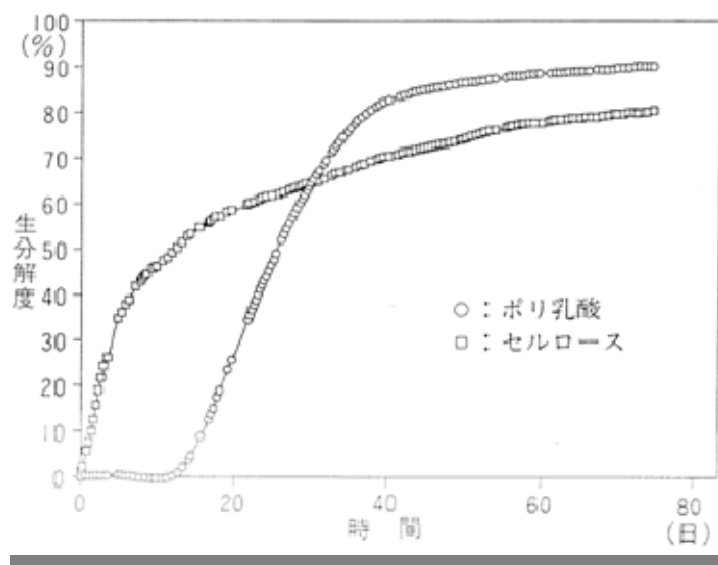


図 2.3.1 ポリ乳酸の完熟堆肥中での生分解挙動

(JIS K 6953-2000 (ISO K14853-1999) に準拠(58C) )

(出所:小原仁美, Health Digest, 14(1),1(1999);許可を得て掲載)

PLA のガラス転移点及び結晶融点はそれぞれ約 60℃、及び 170～180℃ で、熱的にはポリスチレン類似であり、室温ではガラス状態にある硬質系である。硬質性を活かして文具(ファイル・筆記具・定規など)や生活雑貨(化粧品ケース・ラップフィルムカッター・包装類)などへ展開されている。

加水分解性を抑制し、無機物とのマイクロなコンポジット化を実現したタイプでは、BP に共通して不足している耐久性と耐熱性が大きく向上し、電子・電気機器筐体への適用が始まり、また電子レンジ対応可能な食品容器も開発され、更に自動車内装材としての適用化が検討されている。しかしながら、耐熱性や衝撃性などの物性改良は配合設計、結晶核形成促進剤(核剤)添加や金型設計などにより実用水準に達するが、コスト上昇ももたらすこと、また製品寿命 10 年超を要求される自動車部材としての恒久的耐久性確保が困難であることなどから、当初期待された程の展開は実現されていない。

現在実用化されている BP の中で唯一透明性であることが大きな特徴であり、窓付き封筒の窓材として実用化されている(約 150～200 トン/年程の需要と思われる)。また PLA 繊維は絹のような光沢性と感触を示し、乳幼児向け肌着やアパレル向け衣料として独自の用途展開が試みられている。

### 2.3.2 ポリグルコール酸

PGA( [ -CH<sub>2</sub>COO- ]<sub>n</sub> )は、乳酸をグリコール酸に置き換えれば(3a)～(3c)がそのまま成立するポリマーである:



脂肪族ポリエステルとして最も単純なモノマー構造を持つBPであり、そのガラス転移点及び結晶融点はそれぞれ36℃、及び230～240℃である。

実用化は早く、既に1970年代に米国で生分解性を活かした抜糸不要の手術用縫合糸として実用化されている。最近はその高いガスバリア性から生分解性ラップフィルムや機密性が要求されるボトル用途への期待が高く、わが国では呉羽化学工業(株)がパイロット・プラントを立ち上げている(02年8月)。

### 2.3.3 ポリトリメチレンテレフタレート

PTTはテレフタル酸と1,3-プロパンジオール(:1,3-PD)との縮重合反応で合成される:

— Shell Chemicals & デュポン法:



強度・耐熱性で優れたポリエチレンテレフタレート(PET:アルコールはエチレングリコール)、染色性・伸縮性に特徴を持つポリブチレンテレフタレート(PBT:アルコールはブタンジオール)に次ぐ第3の夢の繊維とされ、ポリエステルとナイロンの特徴を合わせ持ち、柔軟性・染色性・対塩素耐久性で特性を示す。Shell Chemicals社が商標“CORTERRA”として米国で2万トン/年、メキシコで11.55万トン/年の製造プラントを、デュポン社が商標“SORONA”として5万トン/年の製造プラントを稼働させているとされる。国内繊維メーカーでは、旭化成(株)がShell Chemicals社と、東レ(株)がデュポン社と提携し、数千トン/年規模の紡糸設備を構えている。

デュポン社が原料の一つである1,3-PDのバイオ法を開発していることから注目を集めた。

1,3-PDの合成法として以下の3法が開発されている:

— Shell Chemicals 法:



— Degussa Huls 法:



#### ー デュポン社バイオ法:

でん粉 ⇒①⇒ グルコース ⇒⑦⇒ グリセリン ⇒⑧⇒ 1,3-PD …(6c)

⑤は EO をヒドロ・フォルミル化して3-ヒドロキシ・ピロピオン・アルデヒドとし、次いで水添する方法であり、⑥はアクロレインの水和反応である。デュポン社は現時点では本法を採用しているが、将来経済性が確保できた時点(10年を想定)でバイオ法(6c)へ切り替えるとしている。

同社は、①について現行法よりも更に効率的な Diversa 社の開発した組換え遺伝子を使う酵素分解法を採用し(07年7月12日)、更に⑦と⑧については Genencor 社と提携してグルコースから直接的に 1,3-PD への変換を目標とした組換え遺伝子法を検討していた(01年3月12日)。既に Tate&Lyle 社と連携して米国内に生産工場を建設し、トウモロコシ由来 1,3-PD を 2006 年より生産開始し、2009 年ころから中国内のデュポン社工場で本格的なバイオ PTT 生産に入ると伝えられている。一般的には(6c)にあるグリセリンを脂肪油などを由来とする方法もあり得る。また⑧については欧米では複数のプロジェクトが提案されていたが、進展についての詳細な発表はない。

自動車部材としての展開も始まっている。すなわち三菱自動車(株)は PTT を使ったフロアマットを開発した("自動車技術展:人とするまのテクノロジー展 2008", パシフィコ横浜, 2008 年 5 月 21~23 日)。フロアマット表面のパイル部に PTT を使用し、かかとが載るヒールパッドの部分は従来と同じポリアミドを、基材の部分は再生ポリエチレンテレフタレートを使う。フロアマットへの BP の適用はトヨタ自動車(株)の PLA につぐ事例となった。

#### 2.3.4 ポリブチレンサクシネート

ここで紹介する PBS は触媒によって高分子量化を計った BdP として 1991 年に登場したタイプである。

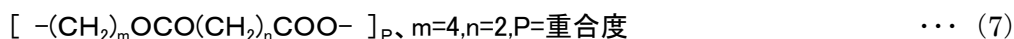
1980 年代迄は一般に脂肪族ポリエステルは通常の縮重合法では分子量が精々  $5 \times 10^3$  止まりで、生分解性があってもポリマーとしての用途は顧みられなかった。

分子量が増えるにつれて末端のグリコール基の濃度が下がり、芳香族ポリエステルの場合と違って逆反応、すなわち加水分解反応も起きて分子量の低下を招くことが原因であった。昭和電工(株)及び昭和高分子(株)は触媒などを使用して可及的に分子量を上げると共に、更にジイソシアネートの様な結合剤で分子を繋ぎ、分子量を数万から数十万に上げる検討を加えた。

PBS の融点を PE 並の  $90 \sim 120^\circ\text{C}$  程度と設計し、更に食品添加剤など安全性が高いとされている化合物を原料として選ぶとすれば、ジオールとジカルボン酸の組み合わせは限定され、ジカルボン酸としてはコハク酸、テレフタル酸、イソフタル酸、アジピン酸、セバシン酸などが、またジオールとしてはエチレングリコール、プロピレングリコール、ブタンジオール、ヘキサジオール、ノナンジオール、ジプロピレングリコールなどが考えられ、一般にはコハク酸又はアジピン酸と 1,4-ブタンジオール(1,4-BD)からの縮合反応で製造される。

一 昭和電工/昭和高分子法:

コハク酸 + 1,4-BD ⇒



この系は昭和高分子(株)から“ビオノーレ”として上市されている。

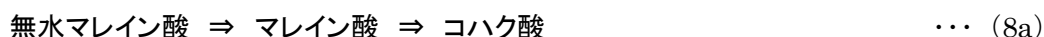
ISO 14851 (JIS K6953) による評価では3ヶ月以内で60%以上分解し、(7)にアジペートをモノマーとしてランダムに導入した変性タイプ(PBSA)はPBSよりも生分解性が3~5倍加速される。

ガラス転移点はPBSで-32°C、PBSAで-45°Cと低く、分子鎖の可とう性を反映している。熱変形温度及び結晶融点はPE並であり、軟質系BdPとしてコンポストバッグ(生ゴミ回収袋)やマルチフィルム、更に包装資材や土嚢など土木資材としての展開に実績を持っている。

PEの銘柄が多数あることに対応するかの様に(7)の変性タイプも多い。カーボネート変性(三菱ガス化学(株);但し現時点では事業凍結)の他に、40mol.%以下のテレフタレート基をランダムに導入したタイプでは生分解性が維持されフィルム物性も向上することが見出されており、この系統についてはBASF社、デュポン社、Eastman Chemicals社、及びIre Chemicals社が開発している(現時点では、E社はNovamont社へ事業譲渡、I社は実質事業凍結の模様)。また(7)においてメチレン連鎖を短縮させて分子鎖としての“可とう性”を低めたタイプを(株)日本触媒が独自に開発している(ポリエチレンサクシネート;現時点では事業は凍結されている)。

更にジオールとして前出の1,3-PDを用いたタイプは海外で盛んに研究されたが、上市には至っていない。

コハク酸は一般には



として合成されるが、バイオマスを原料とした方法としては

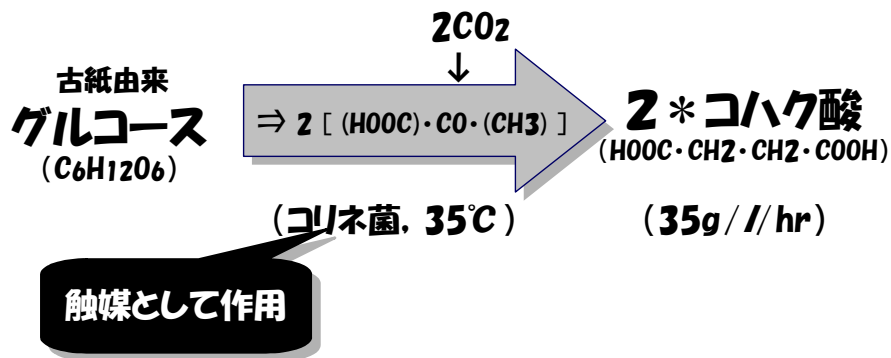


のルートがあり、三菱化学(株)と味の素(株)は2003年3月以降この方法によるコハク酸を原料としたPBS系樹脂を植物系脂肪族ポリエステルとして小規模の上市している。

また(独)地球環境産業技術研究機構(RITE)は古紙から抽出したセルロースを出発物質としたコハク酸合成法:



を開発した。バイオ法⑩の特徴は二酸化炭素の固定化(図 2.3.2)と組換え遺伝子を導入したコリネ菌を流通反応系における触媒として使用することにある。2003 年度より昭和高分子㈱と2007 年迄に工業技術として仕上げることを目標とする共同開発を始め、成功したと伝えられている。



**特徴:**

- 1. 原材料:古紙(:セルロース), CO2 ⇒ LCA上極めてグリーンなプロセス**
- 2. 連続触媒反応 ⇒ 経済性あるバイオプロセス**

図 2.3.2 地球環境産業技術研究機構が開発したバイオ琥珀酸合成法

( 出所:湯川英明, グリーンプラジャーナル誌, 2(2),12(2002) )

### 2.3.5 ポリオール

カーギル社(米)が低発泡ポリウレタン(PU)原料として大豆由来タイプを“BiOH”として2005年より生産しており(於・ブラジル)、北米を中心に自動車や家具などクッション用途向けの展開がなされている。

2008年11月からは米国内に建設した新工場の稼働が始まったとされ、市場への定着化が窺われるが、我が国への導入実態は不明である。

### 2.3.6 ナイロン-11

アルケマ社(仏)がひまし油由来タイプを“Rilsan”として生産している。

耐薬品性に優れ、柔軟性燃料パイプなどの用途に展開されている。BP の中ではエンジニアリング・プラスチック的な位置づけになるう。

### 2.3.7 バイオ・ポリオレフィン

最もホットな話題を占めている資材である。

前述してあるが、2006年8月に(財)化学技術戦略推進機構は、原油高騰とバイオ・エタノール合成コストの低減を背景に、バイオ・エタノールの脱水反応からエチレン("バイオ・エチレン")を合成してPEとする製造ルートの可能性を指摘した。これに基づいた経済産業省のプロジェクトが5ヵ年度の計画で2008年度から始まっている。同省と農林水産省が共同で進めている"バイオ燃料技術革新協議会"第2回資料に詳しい。

海外ではブラジルの大手化学企業であるBraskem社が、サトウキビからのバイオ・エタノール由来高密度PEの合成に成功している(06年6月21日)。これを追うようにダウケミカル社もブラジルでクリスタルセブ社(バイオ・エタノール製造)と合弁で同様のバイオPEを製造し、2011年に35万トン/年のプラントを稼働させると発表している(07年7月24日)<sup>1)</sup>。

Braskem社のバイオマス由来PEは“グリーン・ポリエチレン”として既にパイロット・プラントによる試作品を協同開発者である豊田通商株式会社(名古屋市)が国内に導入しており、先に北海道庁主導で開催された洞爺湖サミット記念環境総合展'08(6月19-21日:於・札幌ドーム)において道庁展示ブースで展示・配布された。また(財)バイオインダストリー協会(JBA)が日経BP社と協同で開催したバイオジャパン'08(10月15-17日:於・パシフィコ横浜)では両社共同の展示ブースでグリーン・ポリエチレン及びグリーン・ポリプロピレンの製品展示されていた。既に2年先の市場開拓が精力的にすすめられており、2010ないしは2011年の国内導入数量は5万トン程度と見込まれている模様である。

ブラジルではバイオ・エチレンを塩化ビニルに変換後重合してPVCとする企業化構想も伝えられている(Solvay社(ベルギー):10年までに36万トン/年構想;07年12月14日)。

またポリエチレンテレフタレート(PET)メーカーではバイオマス由来のエチレン・グリコールを用いたPETも検討されている様だ(“バイオ・ポリエステル”)。

この様に、石油系汎用5大樹脂(PE、PP、PVC、PS及びPET)は全てがBP化され得る可能性を秘めている(PSですら、バイオ・エチレンからのエチルベンゼンをスチレン原料とすれば、バイオマス由来度は低いもののBP化される)。

---

1) 最新の情報ではこの計画は延期された模様である(08年2月)。

## 2.4 バイオ合成系ポリマー

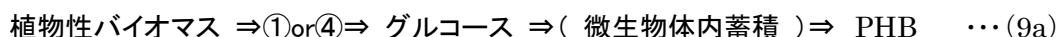
パスツール研究所は 1925 年には微生物体内に巨大な分子量物がエネルギー源として貯蔵され、それが脂肪族ポリエステルであることを理解していたとされる。Staudinger が高分子の概念を提案したのが 1926 年、Mark や Meyer らがセルロースの分子構造をX線回折法で実証したのが 1928 年であったから、高分子化学発生時よりバイオ合成系ポリマーが重要な役割を担っていたともいえる。

バイオ合成系ポリマーの範疇に入るタイプは多数あるが、本節では工業的に有用なポリヒドロキシブチレート(PHB)で代表される PHA、及び P- $\gamma$ -GA を紹介する。

### 2.4.1 ポリヒドロキシブチレート

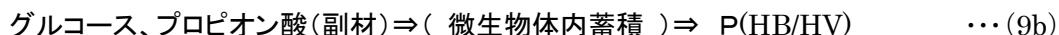
ICI 社(英)は工業資材としての開発を始め(1975年)、1990年前後には Wella 社(独)がシャンプーボトル資材として使用している。“BioPol” (“BIO-POLymer”)として開発されたタイプは、グルコースを炭素源とし、微生物(水素細菌:*ralstonia eutropha*)が体内で形成する PHB であった。

—ICI 法:



高結晶体であり、硬いが脆く、また成形加工性が低いため炭素源にプロピオン酸を共存させたポリ(ヒドロキシブチレート/ヒドロキシバレレート)コポリマー(P(HB/HV))が開発された:

—ICI 法:



この事業権は Zeneca 社(英)に(1990年)、次いで Monsanto 社(米)に(1993年)譲渡されたが、生産性に由来する高コスト性から本事業を凍結し(1999年)、現在では Metabolix 社(米)が引き継いでいる。同社は技術を発展させて遺伝子組換え技術を適用した菜種など植物体内蓄積法の開発を進めていたが、穀物メジャーADM社(米)と連携し、“Mirel”として2009年からの生産開始を目指していると伝えられている。

一方土肥らは水素細菌種の PHB 合成遺伝子をクローニングして大腸菌内に組込むことによって極めて高い蓄積効率及び超高分子量 PHB の合成に成功した。延伸性に富むフィルム成形も可能とされるが、まだ工業化には至っていない。

これら合成遺伝子技術の展開とは別に(9a)またはその変形を工業的に実現しているケースが 2 例ある。ブラジルではサトウキビ由来の糖を炭素源とした微生物体内蓄積法による PHB を製

造しており、欧米への供給元になっている(PHB インダストリー社:同社工場は、サトウキビの糖由来エタノール製造が主体で、絞りカス、すなわちバガスの燃焼により熱源を確保するバイオリファイナリーを形成している<sup>1)</sup>)。国内では三菱ガス化学(株)が天然ガス由来メタノールを炭素種とした“ビオグリーン”を開発し、単独若しくは主材としての展開よりも、PCLやPBSとのブレンドにより軟質系 BdP に嫌気性生分解性と硬質性を付与させるアロイ設計向け副材として用途開発していた(現時点で事業凍結)。

－ PHB インダストリー法:

サトウキビ ⇒ グルコース ⇒ (微生物体内蓄積) ⇒ PHB …(9c)

－ 三菱ガス化学法:

天然ガス由来メタノール ⇒ (MeOH 資化菌体内蓄積) ⇒ PHB …(9d)

P&G 社は PHB とは異なるタイプの PHA を開発した(“Nodax”)。

50mol%以上の 3-ヒドロキシブチレート(3HB)と 2mol%以上の中鎖(C6～30 程度迄) 3-ヒドロキシアルカノエート、特にヒドロキシヘキサノエート(3HX)とのランダムコポリマーとされる(P(HB/HX))。Nodax は低結晶性・軟質系ポリマーであり、好気性並びに嫌気性雰囲気下での生分解速度が大きく、水田・河川湖水などの水面下や浄化槽内での生分解が保証されるため、衛生用品などの使用後の下水道廃棄(⇒汚泥処理)を可能としている。(株)カネカ提携した企業化を目指していたが、最近(株)カネカは国の実証事業として 1000トン/年規模のプラントを建設し市場展開に備える構えを見せている。

－ P&G 社 & カネカ法:

植物性バイオマス ⇒①or④⇒ グルコース、ヘキサノールなど(副材)  
⇒(微生物体内蓄積) ⇒ P(HB/HX) …(9e)

#### 2.4.2 ポリ-γ-グルタミン酸

α-アミノ酸の一種であるグルタミン酸が γ-結合したポリマー(重合度 $>5 \times 10^3$ )である。納豆菌が生産するタイプでは D-型グルタミン酸が 80%以上も含まれ、自然界の蛋白質が L-型アミノ酸の α-結合したポリマーであることに対して特徴的である。

---

1) 近い将来の事業停止が伝えられている。



一 九州大学法:

植物性バイオマス ⇒① or④⇒ グルコース(炭素源)⇒⑩⇒ グルタミン酸 ⇒  
⇒(“納豆菌”発酵)⇒ P-γ-GA …(10)

⑩ではグルコースの他に窒素源として尿素が加えられる。また培地にモノマー物質であるグルタミン酸を加えると収率が著しく増大するとの報告もある。さらに九州大学では水溶性・曳糸性・生分解性に加えて、放射線で微架橋させる(工業的にはエポキシ架橋させる)と網目構造が形成されて吸水性が発現(:自重の 5000 倍の吸水能)することを見出し、緑化資材や衛生用品としての展開を目指している(03年3月25日)。最近は事業化に向けて海外ベンチャーと連携した施策を展開している。

## 2.5 バイオポリマー と 生分解性プラスチック

一般に自然界に存在する微生物によってバイオマス形成に関わり、最終的に水と二酸化炭素などに(好気性雰囲気下)、あるいはメタンと二酸化炭素などに(嫌気性雰囲気下)分解される性質を“生分解性”と呼ぶ。

生分解性を試験する方法は国際標準化機構で 10 件が合意を得て成立しており、JIS 化対応も進んでいる。日本バイオプラスチック協会(JBPS)は、これら標準試験法で一定基準の生分解性を示すプラスチックを“グリーンプラ”とする識別表示制度を運営しているが、これに適合した資材を表 2.5.1 に示した。

表 2.5.1 ではこの分野の慣例に従って分類しているが、

”微生物産生系” BdP ⇔

本稿:微生物体内で蓄積されるタイプ、すなわち“バイオ合成系”

”化学合成系” BdP ⇔

本稿:汎用プラスチックと同じ様な重合プロセスによって合成されるタイプ、  
したがってバイオマス由来モノマーの化学合成系など

”天然物系” BdP ⇔

本稿:天然物を主材とする、若しくは天然物の化学的修飾系タイプ

に該当している。BdP の中には本稿で言う BP に属する系統も数多くある。

実用展開が先行している BdP としては、バイオマスモノマーの化学合成系である PLA と近未来にそうなる PBS 系、及び天然物系、すなわちバイオマスポリマーともいえるでん粉基タイプであり、これら 3 種で BdP 市場(2007 年度で 3 万トン弱<sup>1)</sup>)を三分している模様だ。

用途分類では、バラ緩衝材で代表される梱包資材 35%、マルチフィルムやポット、土嚢などの農林水産土木資材 30%、生ゴミ回収袋を含む包装資材 10%、その他(文具・生活雑貨・産業副資材など)25%程度と推定されている(但しここでは“慣例”によりタバコフィルターに使われる CA は生分解性ではあるが、上記統計には組み込まれてはいない)。

---

1) 神波節夫:プラスチック誌, **60**(1), 120(2009)

表2.5.1 国内で実用展開されている生分解性プラスチック<sup>\*a</sup>

分類	高分子名称	商品名	製造企業	規模 <sup>(*b)</sup> , t/y	特質 <sup>(*f)</sup>
天然物系	エステル化澱粉 <sup>(*)</sup>	コーンポールCP	日本コーンスターチ	パイロットプラント	H~S
	酢酸セルロース <sup>(*)</sup>	セルグリーンCA-BNE	ダイセル化学工業	100,000 <sup>(*e)</sup>	H
	キトサン/セルロース/澱粉 <sup>(*)</sup>	ドロソCC	アイセロ化学	パイロットプラント	H
	澱粉/化学合成系グリーンプラ <sup>(*)</sup>	Mater-Bi ブラコーン	Novamont(国内:ケミテック) 日本食品化工	20,000(+1.5万) パイロットプラント	H~S
微生物産生系	ポリ-3-ヒドロキシ酪酸 <sup>(*)</sup>	ビオグリーン	三菱ガス化学	10(⇒1,000)	H
	ポリ(3-ヒドロキシ酪酸/3-ヒドロキシヘキサノ酸) <sup>(*)</sup>	PHBH	カネカ	パイロットプラント	H~S
化学合成系	ポリ乳酸 <sup>(*)</sup>	NatureWorks レイシア プラメート バイロエコール エコプラスチック U'z カネパール	Nature Works(NW) 三井化学 大日本インキ化学工業 東洋紡 トヨタ自動車 カネカ	140,000 NWと事業提携 パイロットプラント パイロットプラント 1,000	H
	ポリカプロラクトン	TONE	Dow	4,500	S
	ポリ(カプロラクトン/ブチレンサクシネート)	セルグリーンPH セルグリーンCBS	ダイセル化学工業	1,000	
	ポリブチレンサクシネート <sup>(**)</sup>	GS Pla <sup>(**)</sup>	三菱化学(/味の素)	3,000(⇒3万トン)	
	ポリ(ブチレンサクシネート/アジペート) <sup>(**)</sup>	ビオノーレ <sup>(**)</sup>	昭和高分子	6,000	
	ポリ(ブチレンサクシネート/カーボネート)	Enpol	Ire Chemical	8,000(⇒5万トン)	
	ポリ(エチレンテレフタレート/サクシネート)	ユーペック	三菱ガス化学	凍結	
	ポリ(エチレンテレフタレート/コ・サクシネート)	Biomax	DuPont	90,000 <sup>(*c)</sup>	
	ポリ(ブチレンアジペート/テレフタレート)	グリーンエコペット	帝人	パイロットプラント	
	ポリ(テトラメチレンアジペート/テレフタレート)	Ecoflex	BASF	8,000⇒(3万トン)	
	ポリ(ブチレンアジペート/テレフタレート)	EastarBio	Eastman C⇒Novamont	15,000	
	ポリエチレンサクシネート	Enpol	Ire Chemical	8,000(⇒5万トン)	
	ポリ(エチレンサクシネート/アジペート)	ルナーレ SE	日本触媒	凍結	
	ポリエチレンセバケート	エタナコール3050	宇部興産	パイロットプラント	
	ポリビニルアルコール	クラレポパール等 ゴーセノール等 ドロソ VA J-POVAL	クラレ 日本合成化学工業 アイセロ化学 日本酢ビ・ポパール	} 200,000 <sup>(*d)</sup>	
ポリグリコール酸	-	呉羽化学	パイロットプラント		

(\*a) JBPAのグリーンプラ識別表示制度ポジティブリストをベースに作表

(\*b) 出典: D.Riggle, BioCycle, March, p.64(1998), 下里純一郎, 環境機器誌, 8月号, p.98(1999) にBPS調査結果を反映。

⇒: 発表されている増設計画

(\*c) 汎用 PET を含めた併参能力

(\*d) ビニロン原料・経糸糊・紙コーティング・乳化剤・包装フィルム用途等を含めたトータル値

(\*e) 繊維原料・写真用フィルム用途等を含めたトータル値

(\*f) 樹脂の基本的な特性: H=硬質樹脂(ガラス転移点>室温), S=軟質樹脂(ガラス転移点<室温)

■: ジオール・ジカルボン酸系(いずれもLLDPE~PP~PET類似軟質系)

\*: 再生可能原料由来系(バイオマス・プラスチック)

\*\* : 近未来に再生可能原料由来系になる見込み

## 2.6 特性

これまで概観してきた BP の代表例について表 2.6.1 にその基本物性をまとめた。

PLA は PS や PET 類似の力学特性を示し、PBS 系統は PE や PP 類似の特性を示すことが見てとれよう。

BP であってもその力学特性の発現機構は石油系ポリマーと何ら変わることはない。PS がエラストマーを微細分散させることにより高衝撃性を発現できるように(“HIPS”)、PLA は軟質系成分を微分散させることにより衝撃性を改善させることが可能となる。図 2.6.1 は、マトリックス相を形成する PLA に PBS を軟質系成分として導入し、熱処理を加えることにより海島構造を発現することで衝撃性が改善されることを示している。

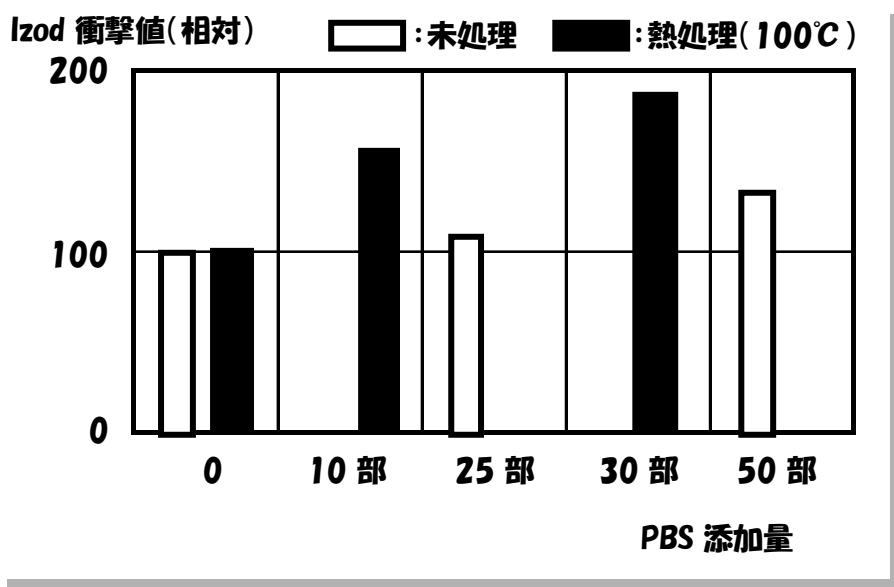


図 2.6.1 PLA の衝撃値:PBS ブレンドによる改善

(出所:大淵・竹原, 成形加工学会・成形加工シンポジウム'02,B-207,Nov.14-15<sup>th</sup> 2002, 於・北九州市を基に改編)

表2.6.1 BPの固体物性 (\*a)

分類	特性	熱力学的性質								流動特性	力学的性質					ガス透過性		対応銘柄		
		非晶相(軟化点)			結晶相			バルク d(*j) g/cm3	燃焼 C(*h) Cal/g		引張り特性(S-S曲線)					硬度(*o) (R/Sh)	衝撃性 Izod(*p) J/m		水蒸気 (*q) g/m <sup>2</sup> /24h	酸素 (*r)
		Tg(*b) °C	HDT(*c) °C	ヒカット(*d)	Tc(*e) °C	Tm(*f) °C	Xc(*g) %				曲げ(*k) (MPa)	引張り(*l) (MPa)	TS(*m) (MPa)	EL(*n) %						
硬質系	PHB	4	145/87	141		180		1.24			2,600	2,320	26	1.4	73/	12	3.6	2.9	標準銘柄(バイオグリーン:三菱ガス化学:現・生産中止)	
	PHB/V					151		1.25			1,800	800	28	16		161			参照値(Biopol標準銘柄:ICI:現・生産中止)	
	PLA	58-60	/55	58		160-170		1.26	4,000			3,700	2,800	68	4	115/79	29	4	11	標準銘柄(レイシア:三井化学:現・上市中止)
		/66	114		160-170						4,710		44	3		43			衝撃性改良銘柄(レイシア:三井化学:現・上市中止)	
		/57	113		160-170						2,400		39	220		65			軟質性銘柄(レイシア:三井化学:現・上市中止)	
		60-62				172-178					0.5-3.0	3,500		63	2-5					参照値(ラクティ標準銘柄:島津製作所:現・生産中止)
60-62				150-170					5-12	60		59	2-5					参照値(ラクティハイフロー銘柄:島津製作所:現・生産中止)		
45-55				not observed					50-100	2,250		45	1-2						参照値(ラクティハイフロー非結晶銘柄:島津製作所:現・生	
	PGA	38			96	218											12(*)	6.6(*)	(*)20μm値	
	CA		77/53	111				1.25			1,100	240	27	62		120			標準銘柄(セルグリーン PCA:ダイセル化学工業)	
(比較)	GPPS	80	/75	98				1.05	9,600		3,400	2,500	50	2	120/	21	4		標準銘柄	
軟質系	PBS	-32	97/		75	114	35-45	1.26	5,640	1.5	600		57	700		30	18	10	標準銘柄(ピオノーレ#1001:昭和高分子)	
		-32	97/		76	115	35-45	1.26	5,640	25	685		21	320					ハイフロー銘柄(ピオノーレ#1020:昭和高分子)	
		-32	97/		88	115	35-45	1.26	5,640	4.5	685		35	50					特殊銘柄(ピオノーレ#1903(長鎖分岐):昭和高分子)	
		-45				112		1.26			590	510	73	550		nb			標準銘柄(GS Pla, AZ81T:三菱化学)	
					87			1.25			250	230	53	560		nb			標準銘柄(GS Pla, AD82W:三菱化学)	
	PBSA	-45	69		50	94	20-30	1.23	5,720	1.4	325		47	900						標準銘柄(ピオノーレ#3001:昭和高分子)
		-45	69		53	95	20-30	1.23	5,720	25	345		34	400						ハイフロー銘柄(ピオノーレ#3020:昭和高分子)
	PBSC	-35	/87			106		1.26			510	330	46	360	84/	96	27	16		標準銘柄(ユーベック:三菱ガス化学:現・生産中止)
	PEST					200		1.35		11	2,000		55	30			1.6	1.6		標準銘柄(Biomax:DuPont社)
	PBAT	-30		80		115		1.26				100	25	620	/32	45	5	70		標準銘柄(Ecoflex: BASF社)
	PTMAT	-30				108		1.22		28			22	700			13.8	168		標準銘柄(EastarBio GP: EastmanKodak社:現・Novant社)
	PES	-11				100	40	1.34			750	550	25	500			186	11		標準銘柄(ルナール SE:日本触媒:現・生産中止)
	PA11	37				185		1.03												標準銘柄(アルケマ社)
Starch	-54	68					1.17	4,500	6		280	17	670						変性澱粉フィルム用標準銘柄(コーンボール:日本コーンスタ)	
							1.25				180	30	800			22			澱粉基グリーンブラ標準銘柄(MaterBi: Novamont社)	
(比較)	HDPE	-120	82		104	130	69	0.95	11,000	2(230C)	900	1000	70	800		nb			直鎖状	
	LDPE	-120	49	96	80	108	49	0.92	11,000	2(230C)	150	420	12	800	/48	nb	0.085	145	長鎖分岐	
	PP	5	110	153	120	164	56	0.91	10,500	4(230C)	1,400	1,100	32	500		20	0.12	37		
	PET	/67		78		260		1.38	5,900							59	0.5	1.5		

(\*a) 生分解性プラスチック研究会(現・日本バイオプラスチック協会)が各社樹脂カタログを中心にまとめた結果を改編

(\*b) Tg: ガラス転移点。 多くの場合DSC-法による。

(\*c) HDT: 荷重たわみ温度。 JIS K 7207 法による。 \*\*/\*\* = 低荷重値/高荷重値。

(\*d) ヒカット軟化点: JIS K 7207 法による。

(\*e) Tc: 結晶化温度。

(\*f) Tm: 結晶融点。 多くの場合DSC-法による見かけ融点。

(\*g) Xc: 結晶化度

(\*h) C: 燃焼カロリー

(\*i) d: 密度。

(\*j) MFR: Melt Flow Ratio。 g/10min-値 (190°C, 荷重=2.16kg)

(\*k) 曲げ弾性率: JIS K 7203 法による。 Kg/cm<sup>2</sup> (⇒ \*9.8/100=MPa)

(\*l) YS: 引張り降伏強度。 JIS K 7213 法による。 Kg/cm<sup>2</sup> (⇒ \*98/100=MPa)

(\*m) TS: 引張り破断強度。 JIS K 7213 法による。 Kg/cm<sup>2</sup> (⇒ \*98/100=MPa)

(\*n) EL: 引張り破断伸び。 JIS K 7213 法による。 %

(\*o) 硬度: R/Sh

(\*p) アイゾッド: Izod 衝撃値。 JIS K 7110 法による。 J/m。 nb=non brittle

(\*q) JIS Z 0208 法による。 g・mm/m<sup>2</sup>/24h (1mm 換算値)

(\*r) MOCON 法による。 cc・mm/m<sup>2</sup>/24h/atm (1mm 換算値)

注: 略号一覧

PHB: ポリヒドロキシブチレート PHB/V: ポリヒドロキシブチレート/バリエート/コポリマー PLA: ポリ乳酸 PGA: ポリグリコール酸 CA: 酢酸セルロース GPPS: 一般用途ポリスチレン PBS: ポリブチレンサクシネート PBSA: ポリブチレンサクシネート/アジベート/コポリマー

PBSC: ポリブチレンサクシネート/カーボネート PEST: ポリエチレンサクシネート/テレフタレート PBAT: ポリブチレンアジベート/サクシネート PTMA: ポリテトラメチレンアジベート PES: ポリエチレンサクシネート PA11: ナイロン-11

Starch: 澱粉系 HDPE: 高密度ポリエチレン LDPE: 低密度ポリエチレン PP: ポリプロピレン PET: ポリエチレンテレフタレート



## 2.7 自動車部材への利用状況及びその可能性

自動車部材としての展開要件としては、コスト・諸物性・成形加工性など、数多くの、また高いレベルの要求がなされていると思われるが、中でも10年超という長期間、過酷な環境下で使用される自動車特有の課題として"耐久性"と"耐熱性"の担保が重要視されると思われる。これまでPLAが中心的なBPとして適用が試みられてきたが、PLAは分子鎖に含むエステル基に起因する加水分解性が引き起こす劣化、すなわち耐久性に、また結晶化し難い特性が引き起こす耐熱性に課題があるとされて来ている。

ここではポリマー鎖に耐久性・耐熱性を付与する考え方、及びJBAが取り組んだ事例を中心に概観し、次いで自動車部材への適用動向を考察する。

### 2.7.1 耐久性

PLAグリーンプラの耐久性の獲得とは、第一義的には加水分解速度の遅延化に他ならない。

一般にポリマー鎖の集合構造は、基本的には結晶相と非晶相から形成される。結晶相は一次元結晶体であるフィブリルからなるラメラ構造を基本構成要素とする球晶(スフェルライト)を形成し、一方非晶相はポリマー鎖の折り畳み層からなる微結晶子表面層(フォールド面)や結晶間連結鎖(タイチェーン)、更には結合不整に基づく内部歪み部である。したがってポリマーの加水分解過程は分子鎖が緩やかに集合している非晶相から始まり、結晶相の加水分解が律速過程となる。

結晶相の分解機構はPBS単結晶の分解酵素を用いた研究結果によれば、いわゆる微結晶子(“クリスタリット”)の側面が先ず攻撃されることが観察されている。ポリエステル加水分解酵素については、その遺伝子のクローニング技術から一次構造(アミノ酸配列様式)が明らかになってきており、触媒的機能を持つ活性部位と化合物のエステル基に吸着する機能を受け持つ部位、更に両者を連結する部位から構成されていることが理解されてきている。

したがって耐久性は加水分解が進行し易いエステル結合部をキャッピングする分子設計が原理的に効果的な筈で、現実的な配合処方としては加水分解抑制作用を持つ化合物の添加が考えられている。

図2.7.1はBPとしてPLAを取り上げた事例で、カルボジイミドが極めて効果的であることが示されている。しかしながらこの事例で得られる耐久性は家電製品などに要求されるレベルを達成するものの自動車の様な長期耐久性を満たすには至っていないとされる。

また分子鎖の可動性を抑制する手法も有効な筈で、結晶間連結鎖、更に結晶内部の歪みなどの減少をもたらす結晶化、或いは全く逆の扱いだが分子鎖全体の固定化をもたらすポリマー鎖間の架橋が効果的である。具体的には、結晶化核剤の添加(:結晶化促進)や架橋剤の導入(:分子鎖可動性の抑制)が考えられる。

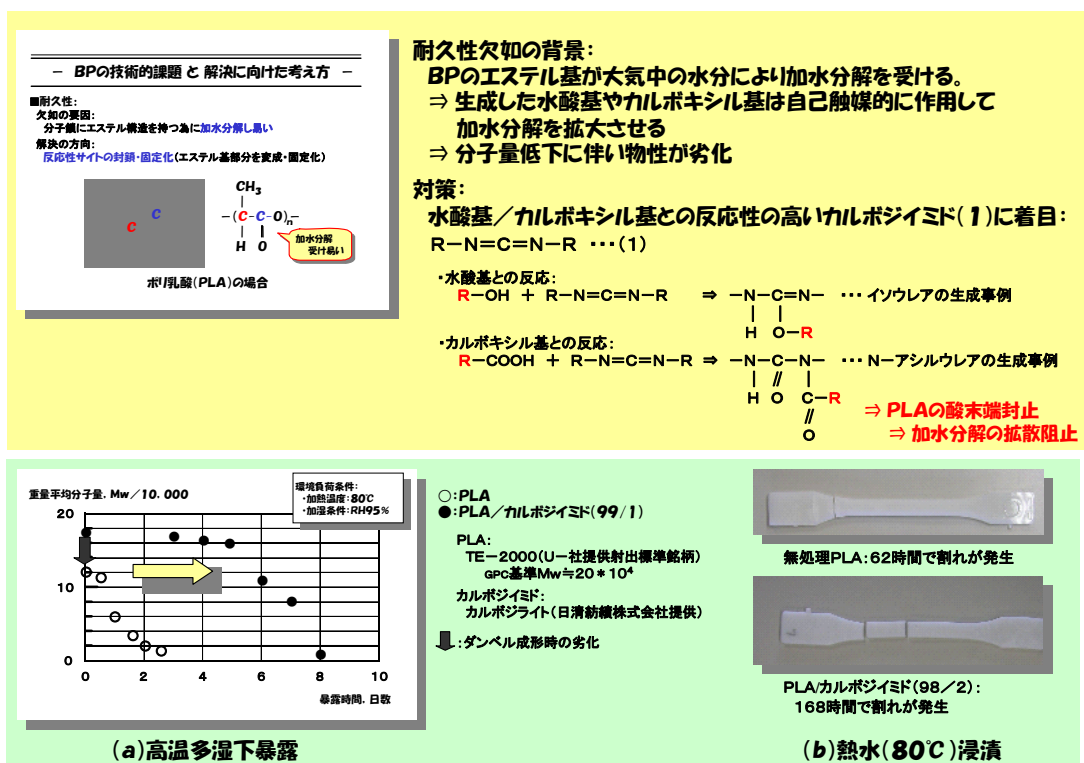


図 2.7.1 BP のエステル基起因加水分解性の抑制による耐久性改善事例(PLA の場合)  
(出所:財団法人機械システム振興協会, バイオマス・プラスチックの普及を実現する技術システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書(平成 20 年 3 月), 委託先:財団法人バイオインダストリー協会)

## 2.7.2 耐熱性

ポリマーの耐熱性の向上とは、すなわち熱変形温度の上昇に他ならない。

熱変形温度は、ガラス転移点と、例えば熱分析で観察出来る温度-融解曲線上の融解開始温度、及び結晶融点で判断可能である。

ガラス転移点は高分子鎖が凍結状態からゴム状態に転移する温度であり、分子鎖の可とう性(Flexibility)の熱力学的な尺度の一つである。定性的には分子鎖の持続長(persistent Length. 化学的な繰り返し単位(モノマー)に対して物理的な繰り返し単位を言う)を長くすること、したがって主鎖に剛直性の強い構造単位を導入する分子設計が効果的である(：エンジニアリング・プラスチックや液晶ポリマーの設計思想)。

結晶性高分子鎖では融解温度は微結晶子サイズに依存し、平坦な形状の場合にはラメラ厚に比例する(無限に大きい結晶が示す融点が熱力学的な平衡融点である)。微結晶子サイズの増大、例えば結晶化やその後の熱処理(：アニーリング)が融解開始温度の上昇に効果的である(事例:図 2.7.2)。

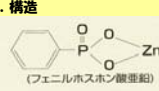
また結晶化とは逆に分子鎖集合系の可動性を抑制する意味では分子鎖間の架橋も効果的な



方法である(事例:図 2.7.3)。

### PLA用結晶化核剤としてのフェニルホスホン酸亜鉛

**1. 構造**




(フェニルホスホン酸亜鉛)


**2. 一般特性**

外觀	白色粉末
平均粒子径	< 3µm
分解開始温度	549°C (T <sub>g</sub> DTA)
赤外吸収	< 0.01g / 100%HO
純度	0.16 (ppm)
水分	1.90 (ppm)
アスタット	7.5

**3. 結晶形**



**4. PLA結晶化物**



等温結晶化物のモルフォロジー  
 - T<sub>c</sub> = 130°C  
 - 核剤添加量: 1 phr (右)  
 - 核剤無添加系: (左)


出所: 日産化学工業株式会社カタクロ: エコフロモート

参照: PLA用核剤

- PLAの結晶化促進効果の高い核剤としては以下が公知:
  - 層状珪酸塩(モンモリロナイトなど) ... 豊田工業大学/ユニチカ
  - オクタメチレンジカルボン酸ベンゾイルヒドラミド ... 株 ADEKA (サンフルワーク中絶)
  - フェニルホスホン酸亜鉛 ... 日産化学工業
  - 銅フタルシアニン ... ソニー
- いずれも結晶形は板状タイプ
- 核剤表面でPLA鎖の配位結晶化(エピタクシヤル成長)が見られる

**PLA/カルボジイミド/核剤系コンパウンド(96/2/2)**

- ⇒ ペレット化
- ⇒ 試作金型を使用して射出成形(JISダンベル):
  - 金型内: 80°C以下から加熱
  - ⇒ 100~110°C域で樹脂注入
  - ⇒ 保持20~30秒
  - ⇒ 80°C以下へ冷却
- ⇒ ダンベル取り出し
- ⇒ 耐熱性評価(ヒートサグ): ≤ 1mm



← “ヒートサグ” 実験状況 (奥側: ニートBP, 手前: 耐熱化BP)

- 暴露環境: 60°C \* 24時間
- JISダンベルの先端降下距離で評価 (JIS K 7195)
- ABS~PC並みの耐熱性とは: ≤ 1mm (フィラー無し系)
- (⇔ 熱変形温度 ≥ 80-110°C)

図 2.7.2 BP の結晶化促進による耐熱性改善事例(PLA の場合)

(出所:財団法人機械システム振興協会, バイオマス・プラスチックの普及を実現する技術システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書(平成 20 年 3 月), 委託先:財団法人バイオインダストリー協会)

### I: 作業仮説

$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{O} \\ | \quad || \\ -\text{O}-\text{CH}-\text{C}- \end{array} \right]_n$ 

(a) PLA



(b) トリアリルイシアヌレート(架橋剤)  
(工業: 日本化成株式会社製「タイク」)

PLAにラジカルを発生させ、  
3個の官能基と反応させる



ラジカル発生手段:

- ①: 電子線照射
- ②: 有機過酸化物添加



(c) PLA/架橋剤=75/25で理想的に架橋が進めば、架橋点間モ/マー数は3-4個と多し、熱硬化型への移行が実現

### II: 電子線照射法

照射条件:  
 1 スキャン = 10 kGy  
 - 加速電圧: 2000 KV  
 - 電子流強度: 4.9 mA  
 スキャン数 = 3, 5, 10, 15, 20  
 ⇔ 30, 50, 100, 150, 200 kGy

結果: PLA/架橋剤/珪藻土(62/22/16)系  
 ヒートサグ:  
 (大) 0 >> 30 kGy > 50 > 100 > 150 ≈ 200 (小)  
 照射強度: 100 kGy ⇒ 3 mm  
 150 kGy ⇒ 2 mm  
 200 kGy ⇒ 2 mm

(注: 珪藻土を含む柔軟系なので目標は “2 mm” 前後)

### III: 熱架橋法

PLA/架橋剤/有機過酸化物  
 ( PLA: 射出標準銘柄 & Mw ≈ 1000 Da )  
 ⇒ 室温粉体成形(平板)  
 ⇒ PLA融点以上で熱処理  
 ⇒ ヒートサグ: 変形せず

(d) 電子線照射装置, 照射条件, および照射検体事例 (NHVコーポレーションにて)

図 2.7.3 BP の高密度架橋化による耐熱性改善事例(PLA の場合)

(出所:財団法人機械システム振興協会, バイオマス・プラスチックの普及を実現する技術システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書(平成 20 年 3 月), 委託先:財団法人バイオインダストリー協会)

これらを背景とすれば、本来 PLA はポリオレフィンと比較してより高いガラス転移点、同程度の結晶融点を有しており、基本的には高い耐熱性ポテンシャルを持っているといえよう。豊田工業大学とユニチカ(株)が研究開発した層状珪酸塩と PLA のナノコンポジットが電子レンジ対応可能な耐熱性を実現したことも、著しい配向結晶化の促進と固定化された分子鎖が発現した結果と考えられる。事実、高分解能電子顕微鏡観察の結果もこの考察を指示していると思われる。

前項の考察を基にすれば、結晶化の促進・分子鎖の固定化は同時に加水分解速度低下をもたらすことにもなる。

### 2.7.3 自動車部材としての展開事例と課題

ココナツ繊維やジュート、クロワなど天然繊維で強化したプラスチックの自動車部材への実用化はダイムラー・クライスラー社に始まるとされるが、プラスチック側を BP とした自動車部材への展開はトヨタ自動車(株)によって開拓された。以下に自動車部材として展開された BP の事例を概観する。

トヨタ自動車(株)は、2003年5月に上市した“ラウム”のスペアタイヤ・カバーに PLA とケナフからなる複合材を、フロアマットに PLA 繊維を使用した(写真 2.7.1)。

スペアタイヤ・カバーとして展開された PLA/ケナフの配合比は 30/70(重量比)とされ、PLA 繊維(東レ(株)が紡糸)はケナフ繊維の結着材としての役割を担っていると考えられる。この複合系は射出成形可能な可塑性を示すことはないと思われ、製品はプレス成形法で加工されたと考えられる(ケナフ繊維化及び成形加工:アラコ(株)(現・トヨタ車体(株)))。



写真 2.7.1 トヨタ自動車(株)における BP の自動車部材への展開事例

—2003年5月; “ラウム” に搭載されたスペアタイヤ・カバー(左)とフロアマット(右)—

( 出所:トヨタ自動車(株)ウェブサイト )

1) ヤノ・レポート編集部:2008年版バイオプラスチック市場の展望と戦略(株)矢野経済研究所), p.64-69(2008)

PLA をバインダー・レジンとしたケナフによる改質は一つの耐熱性改善法であり(上記スペアタイヤ・カバー向けコンポジットの耐熱性は熱変形温度で 100°C とされる)、この手法による商品化事例としては他に日本電気(株)が 2006 年 3 月に上市した携帯電話機(筐体が BP 製:写真 2.7.2)がある。この場合の組成は PLA/ケナフ≒80 以上/10 前後(トータル:90 重量部)とされ、射出成形されている(コンパウンド開発:ユニチカ(株))。



写真 2.7.2 日本電気(株)による携帯電話器の BP 製筐体<sup>1)</sup>

フロアマットは他の内外装品に見られる様な過酷な耐久性・耐熱性を要求されない部品であることから BP の適用が幅広く検討されており、三菱自動車(株)は PLA/ナイロン系繊維を(06 年;東レ(株)と共同)開発している(実車搭載は 07 年 1 月より軽自動車 ”i” へ)。PTT 系繊維(デュポン社製 ”ソロナ”)をフロアマットに適用する試みは前述の三菱自動車(株)(コンセプト車展示:08 年 5 月)の他にホンダ技研工業(株)(公表:06 年 5 月、実車搭載:08 年 6 月より “FCX クラリティ” へ)でも展開されている。

マツダ(株)は帝人(株)と共同で PLA 繊維製の自動車内表皮材を開発し(07 年)、さらにステレオ・コンプレックス型 PLA<sup>2)</sup> による耐久耐熱性が厳しく要求される部材への展開も計画している(07 年 9 月 12 日付けプレスリリース及びコンセプト車展示)。

冒頭紹介したダイムラー・クライスラー社のコンセプトは三菱自動車(株)によってさらに発展され、竹繊維/PBS(ポリブチレンサクシネート<sup>3)</sup>)系複合材からなる内装材(トランク内仕切板)が開

1) 撮影:報告者自身による(060312)。

2) ポリ(L-乳酸)/ポリ(D-乳酸)=1/1(mol.ベース)タイプの PLA;210°C程度の結晶融点を示し、通常の PLA(D-乳酸含量数%以下)を超える耐熱性を示す。通常の PLA の成形加工温度(≒200°C)では溶融しないことから “核剤” 機能も有している。帝人(株)が”バイオフィロント”として開発。

3) 三菱化学(株)開発のバイオ PBS( ”GS Pla”;バイオマス由来コハク酸を使用 )

発された(04年から愛知県産業技術研究所と共同開発開始。公表:06年2月)。次世代電気自動車”iMiEV”内装部材としての採用が予定されており、2008年7月に開催された洞爺湖サミットに貸し出され、その後環境省の公用車1台として試験導入されている(国内上市は09年とされる)。

竹繊維は我が国でも利活用可能なバイオマスであることから着目されよう。

最近トヨタ自動車(株)は、BPの内装部材への適用をなお一層加速させることをプレスリリースしており(08年12月17日)、以下の複合材および内装部品を開発済みとしている:

—PLA/ケナフ系コンポジット:

展開先:ドアトリム・オーナメント(基材)

—PLA/PP系コンポジット:

展開先:スカッフ・プレート(全体)、カウル・サイド・トリム(全体)

フロア・フィニッシュ・プレート(全体)、ツール・ボックス(全体)

—BP(ポリエステル系)<sup>1)</sup>/PET系繊維:

展開先:ルーフ・ヘッド・ライニング(表皮繊維部分)、サン・バイザー(〃)、ピラー(〃)

—PLA/PET系繊維:

展開先:ラゲージ・トリム(表皮繊維部分)

—バイオマス<sup>2)</sup>由来ポリオール・ポリウレタン(低発泡タイプ):

展開先:シート・クッション(フォーム部分)

ドア・トリム部材としてのPLA/ケナフ系コンポジットは初代のスペアタイヤ・カバー向けコンポジットを改良したタイプとされ、耐熱性改善PLA繊維(東レ(株)が紡糸)とケナフ繊維(トヨタ紡績(株)のインドネシア現地法人(ABA社)が加工)を混合・プレス成形加工(トヨタ紡績(株))したものとされている(耐熱性は熱変形温度で評価して110℃へ向上)。

以上見てきた様に、これ迄のBPの自動車部材としての利用状況はいずれもインストルメント・パネルやバンパーの様な過酷な使用環境にはない内装品向けである。自動車は10年超の耐久性を要求される商品であり、部材に要求される要件は極めて厳しいとされる<sup>3)</sup>。耐熱性・衝撃性・寸法安定性や成形加工速度など、トレード・オフの関係にある諸特性の高度なバランスが要求されることから、PLAの適用にしても単独資材としてではなく、複合化されて使用される事例が多い。

1) 詳細不明。ただし現時点で工業的生産可能なバイオマス由来ポリエステル繊維としてはPTT(デュポン社製“ソロナ”)だけが知られているので、この可能性が窺われる。

2) ひまし油由来とされる(化学工業日報紙:081218)。既に米国トヨタ社では大豆由来ポリオール・ポリウレタン製フォームをシートに使用し、2007年6月から実車搭載(カローラ及びレクサスRX)しているとされる。

3) ローランド・ベルガー:自動車部品産業・これから起こる7つの大潮流(日経BP社;081215)

将来 BP が自動車部材として幅広く適用されていく場合であっても内装部品材止まりになる可能性が強いと思われる。自動車部材として使用されるプラスチックのおよそ 50%が PP であることから、バイオ・ポリオレフィンが実用化され、バンパー・銘柄の様な高度な分子設計・高次組織設計された PP 銘柄<sup>1)</sup> が実現されると、外装部材としての活用も期待され得る。

前頁脚注 3) の書籍によれば、自動車部材として期待されているプラスチック系資材としては炭素繊維強化プラスチックとされ、課題は炭素繊維のコストとコンポジット成形加工速度と指摘されている。炭素繊維代替可能な天然物系繊維素材があれば、さらにこの天然繊維が栽培型バイオマスではなく、普遍的に存在する植物由来であれば、自動車部材としての展開に加えて FRP (ガラス繊維強化プラスチック) の代替も実現することが期待される。

以上を集約すれば、自動車部材としての BP の利用方向は

ー使用環境がマイルドな内装品向けとしての活用:

- ・天然繊維とのコンポジットタイプ ( ファブリック用途や表皮材用途 )
- ・発泡タイプ ( フォーム用途 )

ー使用環境がハードな外装品向けとしての活用:

- ・既存プラスチック系部材の BP 化タイプ ( すなわち、バイオ化 PE や PP )

と思われる。

自動車内装品の市場サイズはおよそ 15 万トン/年とされ、コンソール・ボックス<sup>2)</sup> は 1.3 万トン/年、ピラー<sup>3)</sup> は 3.2 万トン/年、バンパー<sup>2)</sup> は 10 万トン/年とされている<sup>4)</sup>。これらの部材として BP で利用される際、汎用 BP として PLA やバイオ化 PBS が、汎用ハイエンドとしてバイオ化 PTT が、さらにヘビー・デューティ用 BP としてバイオ・ポリオレフィンが適用されていくと思われ、適切なバイオマスの要件や調達基準の整備などのシナリオを必要とすると思われる。

---

1) エチレンをコモノマーとする (プロピレン/エチレン) ブロック・コポリマー系であり、特殊な海島構造を形成する様に組織設計されている。

2) 現在は PP, ABS や PU が使用されている。

3) 現在は PP や ABS が使用されている。

4) (株) 矢野経済研究所レポート (前出)

### 3. バイオポリマー:既存ポリマーを化石資源からバイオベースに置き換えるための技術動向の現状

第2節ではバイオポリマー (BP) の自動車部材への適用動向を概観し、過酷な使用環境への展開可能な BP の実現に向けては既存資材の BP 化が "当面" は最も至近な道筋であることを述べた。そこで本章では既存ポリマーの BP 化動向を概観する。

#### 3.1 概観

1980 年代以降、既存ポリマーのモノマーをバイオマス由来とする試みが続けられている。以下は主なポリマーのモノマーあるいはコモノマーをバイオマス由来とする技術的な系譜である。

##### (1) ポリアミド(ナイロン)用モノマーのバイオマス由来化動向

ーアミノウンデカン酸 (PA-11 モノマー):

ひまし油 ⇒ (化学変換): アルケマ社 (仏) が工業化

##### (2) ポリウレタン用コモノマーのバイオマス由来化動向

ージオール (PU コモノマー):

グリセリン ⇒ (化学変換: EO あるいは PO 付加)  
大豆油 ⇒ (化学変換: FAME<sup>1)</sup> 化 ⇒ ヒドロホルミル化 ⇒ 水素化)  
ひまし油 ⇒ (化学変換: PO 付加)

##### (3) ポリエステル系ポリマー用コモノマーのバイオマス由来化動向

ーエチレングリコール (EG; PET コモノマー):

グルコース ⇒ (エタノール発酵) ⇒ エタノール ⇒ (脱水) ⇒ エチレン  
⇒ (酸化) ⇒ 酸化エチレン ⇒ EG

ー1,3-プロパンジオール (1,3-PD; PTT コモノマー):

グルコース ⇒ (発酵法): デュポン社 (米) が開発・工業化

グリセリン ⇒ (化学変換: 脱水後水素化法): ㈱日本触媒が開発

ーコハク酸及び 1,4-ブタンジオール (1,4-BD; PBS コモノマー):

グルコース ⇒ (発酵法): 三菱化学 (株) が工業化? (2010)

ーテレフタル酸 (PET や PTT コモノマー):

p-キシレン ⇒ (微生物酸化法): Sun Oil 社 (米) が開発

1) 脂肪族メチルエステル (近年、バイオディーゼル製造技術の発展に伴い、高効率生産スキームが開発されている)。

#### (4) ポリアクリル酸エステル系ポリマー用モノマーのバイオマス由来化動向

ーアクリル酸:

グルコース ⇒ (化学変換: 3-ヒドロキシプロピオン酸変換後分子内脱水法):

カーギル社(米)/Novozyme 社(米) 協同開発

#### (5) ポリエーテル・ポリオール用モノマーのバイオマス由来化動向

ーグリセリン:

グルコース ⇒ (発酵法): デュポン社(米)が開発

#### (6) エポキシ樹脂用モノマーのバイオマス由来化動向

ーエピクロルヒドリン:

グリセリン ⇒ (化学転換: 塩素化、脱水): Solvay 社(ベルギー)が開発

#### (7) ポリオレフィン用モノマーのバイオマス由来化動向

ーエチレン:

グルコース ⇒ (エタノール発酵) ⇒ エタノール ⇒ (脱水):

Braskem社(ブラジル)が工業化(2011)

セルロース系バイオマス ⇒ (化学変換: ガス化でシingas形成⇒メタノール経由)

ープロピレン:

バイオ・エタノール ⇒ (化学変換: 脱水⇒不均化): 三井化学(株)、東工大、NEDO

グルコース ⇒ (ソプロパノール発酵) ⇒ i-PrOH ⇒ (化学変換): NEDO

グルコース ⇒ (n-プロパノール発酵) ⇒ n-PrOH ⇒ (化学変換): NEDO

セルロース系バイオマス ⇒

化学変換(ガス化でシingas形成⇒メタノール/ジメチル・エーテル経由)

上記でNEDOが手がけたアルコール発酵法によるプロピレン合成はバイオ燃料技術革新協議会が目指すバイオリファイナリーの骨格スキームである(後述)。全体を概観すると、でん粉系バイオマス、あるいはセルロース系バイオマスからグルコースを得て、以後エタノール発酵法によるエタノールからの物質変換法が一つの流れと見られ、このことを背景にアメリカ穀物協会(東京)ではバイオ・タノールをベースとしたBPの俯瞰図を描いている(図 3.1.1):

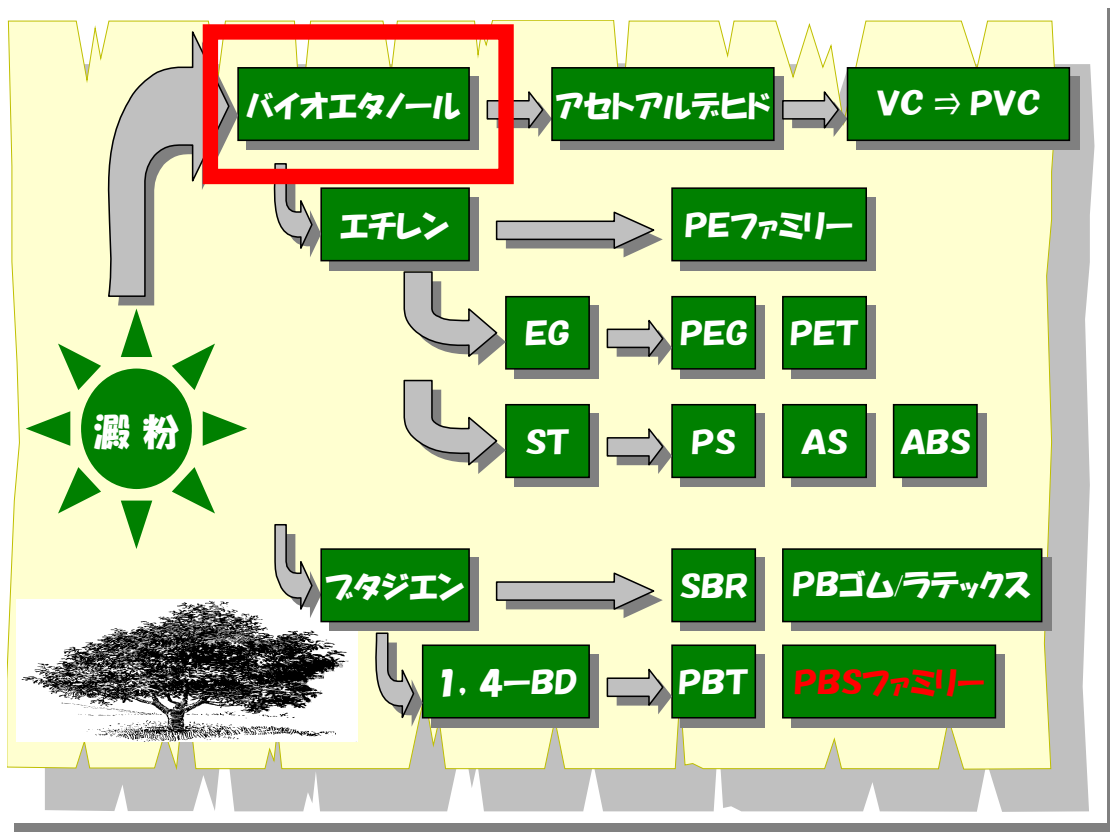


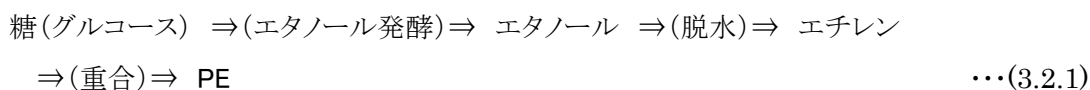
図 3.1.1 でん粉ベースのバイオポリマー俯瞰図

( 出所:アメリカ穀物協会, とうもろこしベースのグリーンケミカルズとグリーンポリマーの調査研究(2001年9月)を基に作成 )

### 3.2 ポリオレフィンのバイオマス・プラスチック化

#### 3.2.1 ポリエチレンの場合

でん粉系やセルロース系バイオマスを糖化し、あるいは糖系バイオマスの糖を利用してエタノール発酵によりエタノールとし、脱水によりエチレンへ返還後、重合してポリエチレン(PE)とする:



この手法は Braskem 社(ブラジル)による製造スキームとされる(後出)。

#### 3.2.2 ポリプロピレンの場合

でん粉系やセルロース系バイオマスを糖化し、あるいは糖系バイオマスの糖を利用してプロピレン合成する経路は多数が考えられている。

図 3.2.1 および図 3.2.2 は経済産業省と農林水産省の合同プロジェクトの推進元である ”バイ



「バイオ燃料技術革新協議会」の先導調査事業となった「平成 18 年度バイオマス資源からのエチレン／プロピレンの製造技術開発事業の実施可能性に関する調査」による整理結果である<sup>1)</sup>。

ここで提示されている種々の合成法の中でコスト上有利な方法は

① 糖のエタノール発酵によるエタノール ⇒(脱水)⇒ エチレン  
⇒(二量化・メタセシス) ⇒ プロピレン …(3.2.2)

② 糖のエタノール発酵によるエタノール ⇒(直接転換)⇒ プロピレン …(3.2.3)

③ 木質系バイオマスの部分酸化ガス化によるメタノール/ジメチル・エーテル  
⇒ プロピレン …(3.2.4)

とされる。

①と②は発酵法で、前述の通り技術革新研究開発プロジェクトの中でバイオリファイナリー形成を目指す基幹技術として取り組まれている。③は上記プロジェクトでは取り組まれていないが、化学工業に馴染み易いガス化法であり、量産向きのプロセスと期待される。

上記プロジェクトとは独立に、民間側では自動車製造系企業 2 社が PP の BP 化に取り組むと公表している。(株)ホンダ技術研究所は(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)と共同でソフト・バイオマス(リグニンを含まないセルロース系バイオマス)からプロパノールを発酵法で合成し、次いで脱水してプロピレンとし、重合によってPPを合成する構想を公表している(07年9月7日)。全く同じ構想をマツダ(株)が公表しており(08年6月)、広島大学と共同プロジェクトを発足させている。

いずれも稲わらの様な非可食性バイオマスを原料とする構想であり、食料・飼料との競合性を回避する製造法として関心を集めているが、課題は原料バイオマスの収集コストと思われる。また稲わらの様な農産残滓は農地に還すことが機能保全上望ましい<sup>2)</sup>とされることから、国内での原料手当は課題が残るとの指摘もある。

1) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)・(株)ダイヤリサーチマーテックによる(070612)。以後、“NEDO レポート”として引用。

2) 川島博之:世界の食料生産とバイオマスエネルギー 2050年の展望, p.77(東京大学出版会, 08年5月)

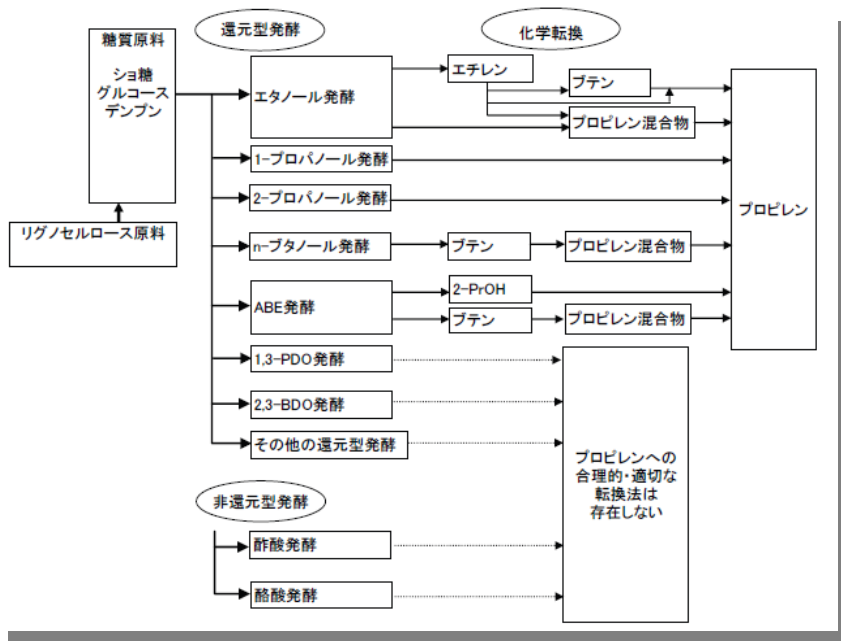


図 3.2.1 バイオマス・ベースのプロピレン製造技術(発酵法:)<sup>1)</sup>

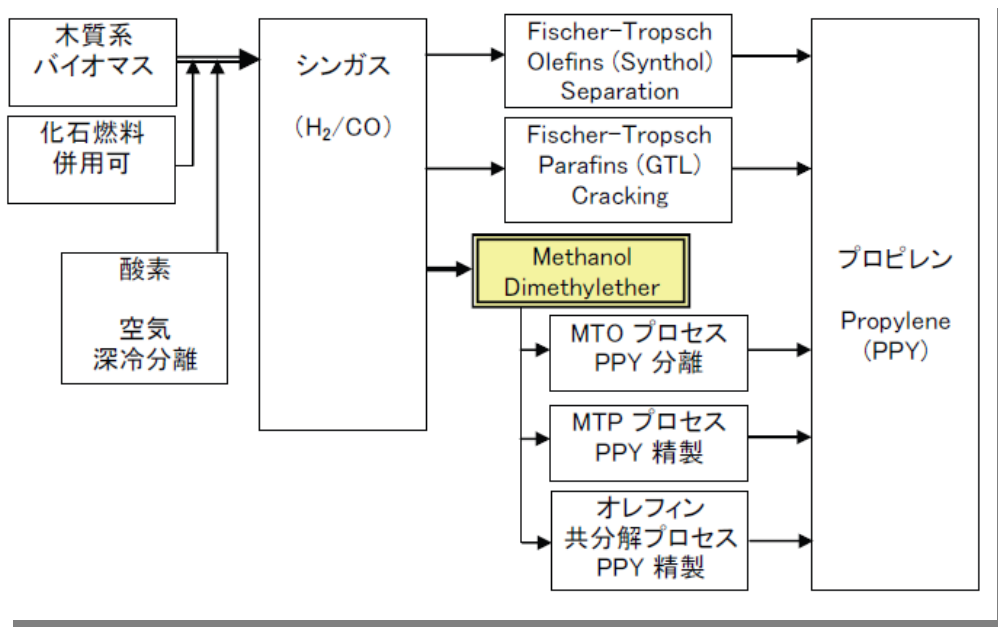


図 3.2.2 バイオマス・ベースのプロピレン製造技術(ガス化法)<sup>1)</sup>

-----

1) 出所:NEDOレポート(前出)

### 3.2.3 Braskem 社によるエチレン及びプロピレンの製造スキーム

PE 及び PP の BP 化のフロント・ランナーと目されている Braskem 社の特許情報<sup>1)</sup> からエチレン及びプロピレン製造スキームを概観した(図 3.2.3)。

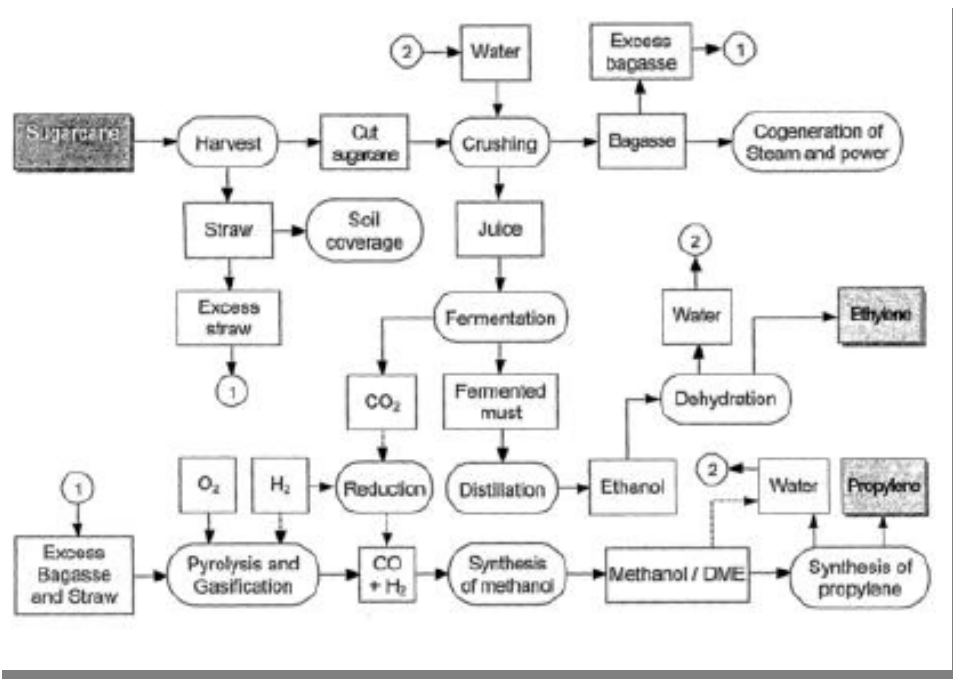


図 3.2.3 Braskem 社のエチレン及びプロピレン製造スキーム

( 出所:WO 2008067627<sup>1)</sup> )

サトウキビ由来バイオ・エタノールから式(3.2.1)によりエチレンを製造するスキームで、実施例一1によればサトウキビ 1 千トンからのエチレン<sup>2)</sup> 収量は 34.1トンとされる。

プロピレン合成は式(3.2.2)によらずに式(3.2.3)としている。すなわち上記エタノール製造過程で発生する余剰物(茎や葉、またバガスなど)をガス化してシingas( CO/H<sub>2</sub> )を形成し、メタノール及びジメチルエーテル経由で化学変換によりプロピレンを得る。サトウキビ 1 千トンのスケールで合成されるプロピレン<sup>2)</sup> は 30トンと評価されている。

1) 特許申請番号:WO 2008067627. 以下のサイトで詳細閲覧可能:

<http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?WO=2008067627&IA=BR2007000328&DISPLAY=DESC>

2) ポリマー原料グレードとしての純度を保持。

### 3.3 既存ポリマーのBP化実現に向けた課題

#### 3.3.1 発酵法の技術課題

バイオマス発酵法による既存ポリマーのBP化が数多く検討されているが、工業技術として確立すべき技術課題<sup>1)</sup> 事例を以下に示す：

##### (1) 糖化効率

でん粉系バイオマスと比較してセルロース系バイオマスでは発酵基本単位であるグルコースへの転換効率が低い。当面はリグニンを含まないソフト・バイオマス系を対象とした取り組みが先行すると思われるが、コストに加えて環境保全と生物多様性を担保する高密度栽培の実現可能性が課題視されている。

##### (2) 発酵生産プロセスの効率

化学合成と比べて発酵速度と生成物濃度が一般的に低く、したがって単位時間当たりの生産性が低い。またスケールアップの上で制約が多い。

石油化学コンビナートではエチレンやプロピレンなどの基本オレフィン、ベンゼン・トルエン・キシレンなどの基本芳香族を出発物質としてより複雑な分子構造を持つ化合物を系統的に生産し、蒸留・晶析などの精製プロセスが効率的である。一方、バイオプロセスは糖から(複雑な代謝工程を経て)目的化合物を合成する際、複雑な副生物を生じやすいケースが多い。精製プロセスが複雑となり、結果的に生産コスト・アップの一因になる<sup>2)</sup>。

##### (3) 排水処理

未反応糖が残ることは高BOD排水の発生となり、処分経費アップにつながりやすい。

課題(1)と(2)に対しては遺伝子工学を駆使した酵素や菌の開発が前提であり、またこれを使いこなすバイオプロセスの体系化が必須となるが、我が国ではこの種の研究開発活動は認知されにくい国情があり、欧米と比べて圧倒的に不利な立場にある。工業原料としてのバイオマスに恵まれない<sup>3)</sup> ことから、バイオ燃料技術革新協議会によれば東南アジア地域との連携が構想されているが、資源ナショナリズムとの関わりも懸念事項であろう。

---

1) NEDOレポート(前出)。

2) WO 2008067627(前出)によれば、Braskem社のバイオPEが可能になった背景には、サトウキビ由来バイオ・エタノールの純度が高く、ポリマー・グレードのエチレン製造が可能になったことが背景と読み取れる。

3) 我が国で工業原料となりうるバイオマスは、回収システムが構築されている古紙、および国が備蓄する古米・古々米とされる(株)三菱総合研究所:バイオ生分解素材の開発・利用評価事業報告書)。

### 3.3.2 ガス化法の課題

これ迄バイオマスのガス化は多くの場面で取り組まれてきた。

農林水産省では既にバイオマス・ニッポン総合戦略の閣議決定前にバイオマス利活用のモデル事業を検討している<sup>1)</sup>が、この時点では廃棄物あるいは排泄物系バイオマス(食品廃棄物・畜産廃棄物・下水汚泥やし尿汚泥など)のガス化、すなわち嫌気発酵処理によるメタンガス化が主眼点に置かれており、出口側は発電及び堆肥(多くの場合、液肥)としての残滓物が主体であった。メタンガス化はでん粉系あるいは糖質系バイオマスの常温あるいは高温(50℃台)タイプの発酵菌によってなされる。

一方、化学原料としてのシンガス(合成ガス:CO/H<sub>2</sub>混合ガス)は、上記で得られたメタンガス化の部分酸化:



や、石炭の水蒸気処理:



などで合成される。

(3.3.2)式はバイオマスの炭素(“バイオ炭素”)を炭素源としても成り立つ。

(3.3.2)式は吸熱反応であり、反応を進行させるために酸素を共存させて以下の反応で形成する反応熱によって供給するのが一般的とされる:



石炭ベースのシンガス製造は、フィッシャー・トロプシュ(FT)法による炭化水素(C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>)合成原料として1940年ころのドイツでは盛んであったが、石油化学の勃興とともに消失していったものの、工業技術としての完成度は高い。

近年は枯渇性資源節約/代替の観点から、バイオマスからのシンガス形成を経て燃料(ディーゼルやジメチル・エーテル(DME)など)への転換や、オレフィン原料としてのメタノールへの変換(メタノール⇒DME化/MTP<sup>2)</sup>やMTO<sup>3)</sup>反応)が着目されている。図3.2.3で示されるBraskem社のプロピレン合成もサトウキビ由来エタノールからのエチレン合成工程の残滓物由来のシンガスをメタノールへ変換し、メタノール/DMEからプロピレンへ変換していることが注目される。

バイオマスのガス化の場合、COやH<sub>2</sub>の精製に問題なく、課題は副生物の処理となる。Braskem社のケースではプロピレン合成時の副生物としては液状炭化水素(ガソリン換算)が計

1) (株)エックス都市研究所:平成14年度バイオマス利活用事業導入モデル検討調査報告書(2003年3月)[バイオマス情報ヘッドクォーター: <http://www.biomass-hq.jp/tech/>]

2) Methanol to Propylene

3) Methanol to Olefins

上されている。

先に引用した NEDO レポートでもガス化法プロピレン合成ルートの可能性を考察している(図 3.2.2)。さらに原料バイオマスを東南アジアのパーム果房と想定した場合、シンガスをメタノール化して国内へ搬送する構図を示している(図 3.3.1)。

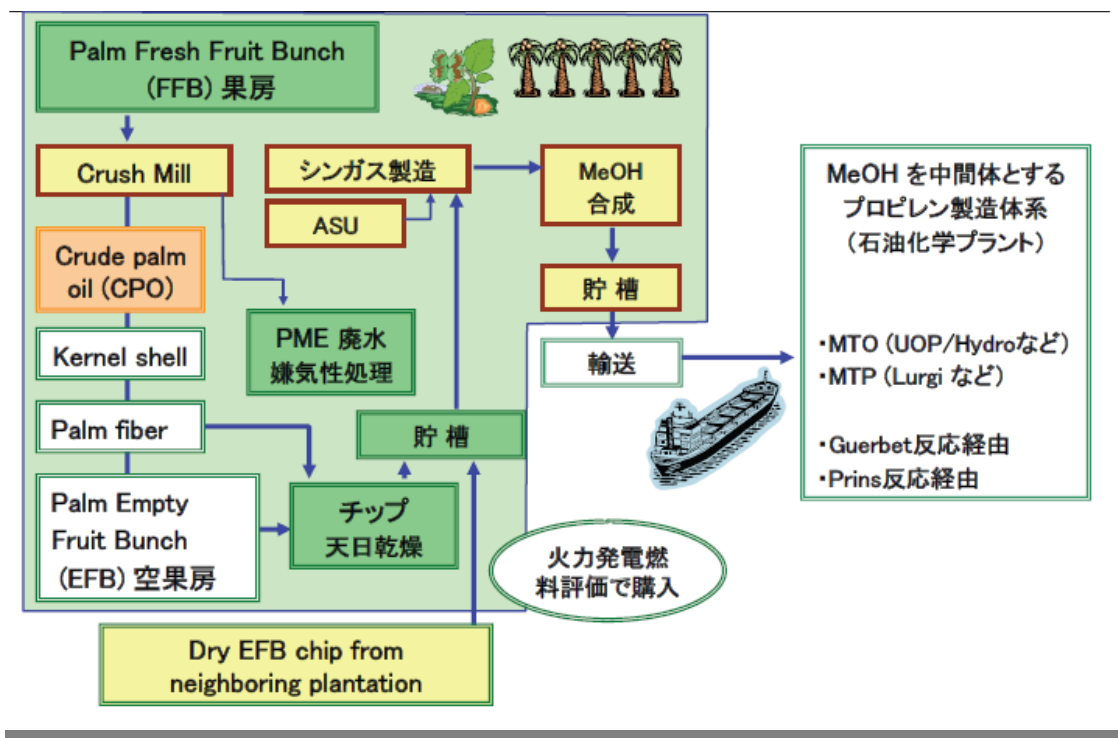


図 3.3.1 バイオマス・ガス化によるプロピレン製造における東南アジアとの連携構想  
( 出所:NEDO レポート )

NEDO レポートによると、図 3.2.1、3.2.2 及び 3.3.1 に関連したプロピレン製造原価( US\$/t-プロピレン )を比較した結果は以下の通りであった:

サトウキビ由来エタノール⇒エチレン⇒プロピレン	: ≒ 755
サトウキビ由来エタノール⇒プロピレン	: ≒ 600
パーム副生バイオマス・ガス化⇒メタノール⇒プロピレン	: ≒ 725
対照(2004年石油化学法プロピレン)	: ≒ 565

NEDO 想定ケースでは発酵法、ガス化法共に現行石油化学法対比でコスト高となっていることから、ガス化方式であっても我が国で利用可能なバイオマスとして古紙や古米・古々米を原料として利用することにコスト上のメリットが生まれる可能性は高くはないのではと思われる。同じバイオマス・ガス化法としてもバイオ・エチレン製造残滓物を利用する併産方式の **Braskem** 法のコスト競争力が注目される。

### 3.3.3 既存ポリマーの BP 化実現の条件は

これ迄考察して来たように、既存ポリマーの BP 化は、課題はあるものの技術的には原則として可能であり、したがってその実現のためには製造コストの解決が前提となる。それでは既存ポリマーの BP 化に許容されるコストアップはどの程度なのか、考察しておきたい。

NEDO レポートでは、バイオマス由来プロピレン製造までの環境負荷が、プロピレン 1 トン当たりの二酸化炭素排出量で評価されている(図 3.3.2)。

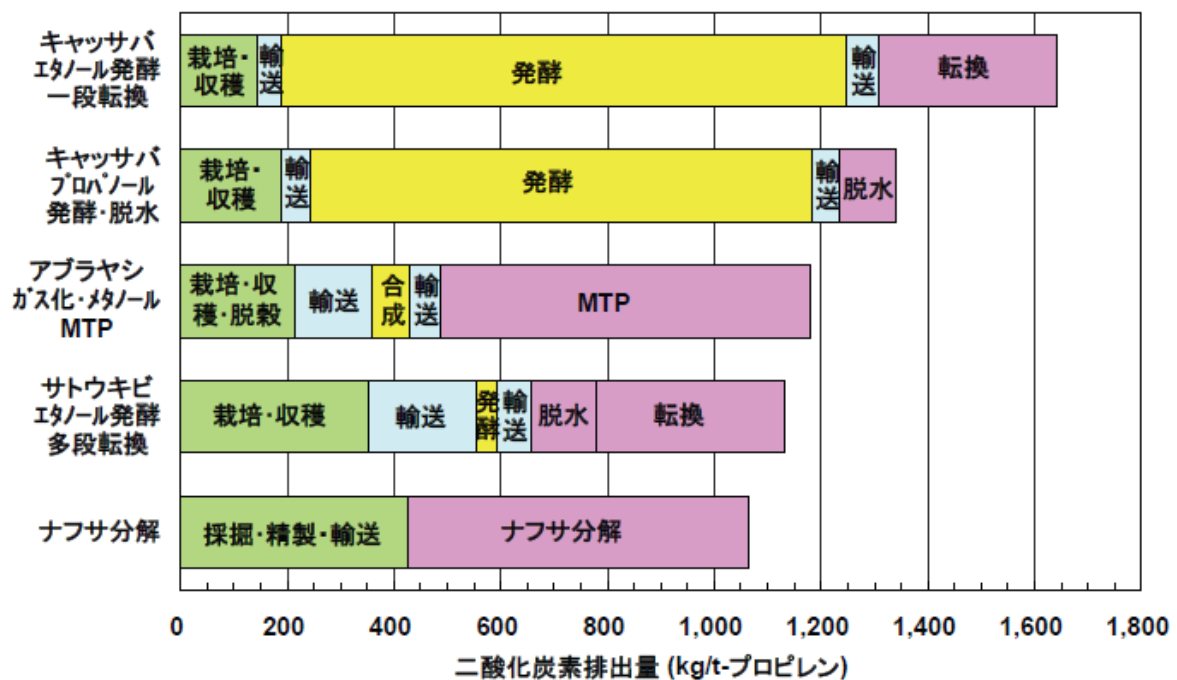


図 3.3.2 プロピレン製造工程の環境負荷

( 出所:NEDO レポート )

発酵法及びガス化法共に石油化学法よりも二酸化炭素排出量が多いが、資源・環境負荷評価の精度を考慮すると、石油化学法( 図 3.3.2 で“ナフサ分解” と表記 )とほぼ対等に近い負荷を示すプロセスはサトウキビ由来エタノール⇒エチレン⇒プロピレン法( 同図中、“サトウキビエタノ

ール多段転換”と表記)およびガス化法(同図中、“アブラヤシガス化・メタノール MTP”と表記)である。さらにバイオマス由来プロピレンの場合、原料バイオマスの生育過程で固定化した大気中の二酸化炭素はオフセットされるから、プロピレン 1 トン当たり 3.14 トンの二酸化炭素分を相殺するとバイオ法プロピレンはいずれも石油化学法プロピレンよりも二酸化炭素排出量を大幅に減少させる。すなわち、

発酵法(サトウキビ由来エタノール⇒エチレン⇒プロピレン法):

正味の二酸化炭素排出量:  $1.13 - 3.14 = -2.01 \text{ t-CO}_2/\text{t-PL}$

ガス化法(アブラヤシガス化・メタノール MTP):

正味の二酸化炭素排出量:  $1.17 - 3.14 = -1.97 \text{ t-CO}_2/\text{t-PL}$

対照: 石油化学法(ナフサ分解):

正味の二酸化炭素排出量:  $1.06 \text{ t-CO}_2/\text{t-PL}$

したがって石油化学法プロピレンから発酵法(ガス化法)プロピレンへの置き換えによる二酸化炭素排出量の削減効果は 3.07 ( 3.03 )  $\text{t-CO}_2/\text{t-PL}$  となる。

この削減効果を現在の二酸化炭素排出権取引価格(おおよそ¥4 千円/ $\text{t-CO}_2$ )で評価すると 1.23 ( 1.21 ) 万円/ $\text{t-PL}$  となる。先に見たように発酵法プロピレン製造原価は石油化学法プロピレンに対して約 190US\$/ $\text{t-PL} \approx ¥1.9$  万円/ $\text{t-PL}$  高く、したがって環境負荷低減効果はその 65% (  $\leftarrow 1.23/1.9$  ) を補償していることになる(ガス化プロピレンの場合は約 160US\$/ $\text{t-PL} \approx 1.6$  万円/ $\text{t-PL}$ ; 削減効果はコストアップの 75% を補償)。

NEDO レポートでは 2004 年時点での工場建設費、原油・オレフィン価格、通年生産を前提とした製造原価評価であったが、原油価格は長期的には高騰化していくと想定されており、定性的に見れば 1.5 倍に価格が高騰されると、バイオ法プロピレン製造原価は石油化学法よりも低くなる可能性が高い。また二酸化炭素排出権取引市場が逼迫していく近未来の相場は着実に現状価格を大幅に超えていくと見られており、バイオ法プロピレン製造におけるコスト上の課題は次第に解決されていくものと思われる。

これまで既存ポリマーの BP 化実現に向けての技術面及びコスト面の課題を考察してきたが、何れも原理的に解決可能、あるいは近未来に解決の方向へ向かう見通しを得た。現時点での世界経済が回復し、プラスチック市場も既存規模に復帰した段階で、既存ポリマーの BP 化実現に向けての最も大きな課題は、技術・コスト面よりもむしろ環境政策<sup>1)</sup> と原料バイオマスの安定した持続的な確保と思われる。

すなわち BP を初めとするバイオマス系資材の資源・環境負荷の面での最も大きな特徴は枯渇

1) カーボン・フット・プリント制度が整備され、健全に普及していくことなどが社会システムとしての前提になるが、環境税とも炭素税とも呼称されている二酸化炭素排出量に応じた課金制度など。



性資源消費量の節約と環境負荷の低減であることから、環境政策に沿った、低炭素社会の実現に貢献可能な資材として広く認知を得ることこそ、既存ポリマーの BP 化を促進する牽引要素になると思われる。