

令和2年度環境省委託業務

令和2年度〈脱炭素社会を支えるプラスチック等
資源循環システム構築実証事業〉
(光活性化二酸化塩素を用いた機能改質による
PLA ブレンドフィルムの製造) 委託業務
成果報告書

令和3年3月

大阪大学大学院薬学研究科

目次

概要 (サマリー)	3
第一章 序論	
1-1 バイオマスプラスチック	6
1-2 業務の目的	7
1-3 解決すべき技術課題	9
1-4 実証事業の内容	10
第二章 ポリ乳酸 (PLA) ブレンドフィルムに関する技術開発	
2-1 ポリ乳酸 (PLA) の酸化による相溶性付与 ((大) 大阪大学)	
2-1-1 PHBH (粉体) 検討	11
2-1-2 PHBH フィルムの検討	17
2-1-3 まとめ	21
2-2 ポリ乳酸 (PLA) とポリヒドロキシアルカン酸 (PHA) のブレンド ((大) 大阪大学、長瀬産業 (株))	
2-2-1 粉体サンプルの酸化処理スケールアップの検討	22
2-2-2 まとめ	25
第三章 PLA-PHA ブレンド品の評価	
3-1 PLA-PHA ブレンドフィルムの物性評価 ((大) 大阪大学、長瀬産業 (株))	
3-1-1 ブレンドフィルムの引張試験	26
3-1-2 熱分析による相溶性評価	28
3-1-3 まとめ	30
3-2 PLA-PHA ブレンドフィルムの有用性評価 ((大) 大阪大学、長瀬産業 (株))	
3-2-1 フィルムの生分解性評価	30
3-2-2 PLA フィルムの生分解性評価	32
3-2-3 TG/DTA 評価	35
3-2-4 再沈殿の検討	40
3-2-5 消費エネルギー及びコスト試算	41
3-2-6 まとめ	42

第四章 LCA の検証・評価（（大）大阪大学）

<概要>	43
4-1 目的	45
4-2 本調査の範囲	46
4-3 ベースライン製品の利用状況と機能単位	47
4-3-1 PE,PP 樹脂生産と需要	47
4-3-2 機能単位設定の考え方	52
4-3-3 プラスチックのリサイクル状況	55
4-3-4 ベースラインのマテリアルリサイクル	68
4-3-5 機能単位の設定	78
4-4 バイオプラスチックの利用と LCA	79
4-4-1 プラスチック資源循環戦略	82
4-4-2 バイオプラスチックの生産量	84
4-4-3 バイオ PET	86
4-4-4 バイオ PE	89
4-4-5 ポリ乳酸 (PLA)	91
4-4-6 バイオ PBS	99
4-4-7 バイオ PHA	102
4-4-8 機能単位の設定	106
4-5 PLA ブレンドフィルムの LCA	108
4-5-1 対象製品	108
4-5-2 機能単位	108
4-5-3 システム境界	108
4-5-4 製品のフロー設定とインベントリデータ	109
4-5-5 LCA 結果 (インベントリ分析)	119
4-5-6 LCA 算定結果の討論	122
4-5-7 LCA のまとめ	127
4-6 まとめ	129
4-7 参考文献	130

第五章 PLA ブレンドフィルムに関する原料確保と市場調査（長瀬産業（株））

5-1. コスト試算に向けたニーズ調査	133
5-2. コンポスタブル製品に関する調査	134
5-3. 原料確保体制の確立と実用レベルに対する目標値	138
5-4. まとめ	139

概要（サマリー）

本業務では、カーボンニュートラル性を有するバイオマスプラスチックであるポリ乳酸（Poly Lactic Acid: PLA）やポリヒドロキシアルカン酸（Poly Hydroxy alkanates: PHA）の利用用途拡大を目指して、これらのブレンドによる物性改善を行う。バイオマスプラスチックの採用は化石資源由来プラスチックの利用と比較して排出 CO₂ 削減に繋がることが期待されているものの、各種物性に劣ることから利用用途が限定されている。最も普及が進んでいる PLA においても固く脆い性質という欠点を有しておりその改善が望まれている。

この様な背景のもと、PLA に対して柔軟なプラスチックである PHA をブレンドすることで靱性を向上させ、透明なブレンドフィルムを作製するとともにその応用用途を見出すことを目的とした。これらは全て完全バイオマスなプラスチックであることからカーボンニュートラル性を維持するとともに、生分解性も期待される。

ブレンドフィルム作製においては、PLA と PHA が相溶化する（混ざる）必要があるが、これらは相溶性に乏しくブレンドが困難である。そのため、二酸化塩素に光照射することでプラスチックに酸素官能基を導入する新たな改質法をこれらの樹脂に適用し相溶性の付与を試みた。ここで用いた改質法は、二酸化塩素に対する光照射により生じた活性種をプラスチックに作用させることで C-H 結合洗濯的に酸素官能基を導入できる。導入された酸素官能基同士の相互作用により、PLA および PHA に対し相溶性が付与できると考えた。

これまでに PHA（本事業では、ポリヒドロキシ酪酸誘導体（Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate): PHBH））に対してのみ酸化を行うだけで十分な相溶化効果が得られることがわかってきていることから、PHBH の酸化度制御と g スケールで処理可能な装置を用いた粉体酸化処理を行った。

続いて、本改質法により調製された改質樹脂粉体を用いて実際にフィルムを作製し、引張試験などからその物性評価を行った。未酸化の PLA に対して酸化改質 PHBH を 90 : 10 の比率でブレンドしたサンプルをマスターバッチとして、バージンの PLA および PHBH とブレンドすることで、フィルムの引っ張り伸びの顕著な向上が見られた。

一方、新しい改質法およびブレンドフィルム作製法に対する LCA に向けて、原料である PLA および PHBH の LCA の検討を行い、置き換えたい商品である PP や PE からなるフィルムとの比較を行った。さらに、PLA の用途探索に向けた市場調査、ニーズヒアリングを行った。

Summary

In this project, we will improve the physical properties by blending polylactic acid (PLA) and polyhydroxyalkanoic acid (PHA), which are carbon-neutral biomass plastics, with the aim of expanding their applications. The use of biomass plastic is expected to reduce CO₂ emissions compared to the use of plastics derived from fossil resources, but its use is limited due to poor physical properties. Even the most widespread PLA has the disadvantage of being hard and brittle, and its improvement is desired.

Based on this background, we aimed to improve the toughness by blending PHA, a flexible plastic with PLA, to produce a transparent blended film and to find its application. Since these are all biomass plastics, they are expected to maintain their carbon-neutral properties and to be biodegradable.

In preparing a blend film, PLA and PHA need to be compatible (mixed), but they are poorly compatible and difficult to blend. Therefore, a new modification method for introducing oxygen functional groups into plastics by irradiating chlorine dioxide with light was applied to these resins to try to impart compatibility.

A film was actually produced using the obtained modified resin, and when PHBH was used as PHA, an improvement in tensile elongation was achieved in a PLA blend film to which oxidized modified PHBH was added.

On the other hand, the LCA of PLA, which is a raw material, was also studied toward LCA for a new modification method and a blend film production method.

第一章 序論

1-1. バイオマスプラスチック

バイオマスプラスチックは植物などの再生可能資源を原料としているため、数億年の長い年月をかけて地中に蓄えられた化石資源と異なり、大気中の炭酸ガス（CO₂）を自身の成長段階において光合成により吸収している。これにより、使用後燃焼などにより二酸化炭素に戻っても、地球温暖化の原因とされている大気中の温室効果ガスの濃度上昇を来たすことがない、『カーボンニュートラル性』を有している。このようにバイオマスプラスチックの採用が広がれば化石資源由来プラの仕様により算出される二酸化炭素を減少させることができ、今後より一層の普及が期待されている。

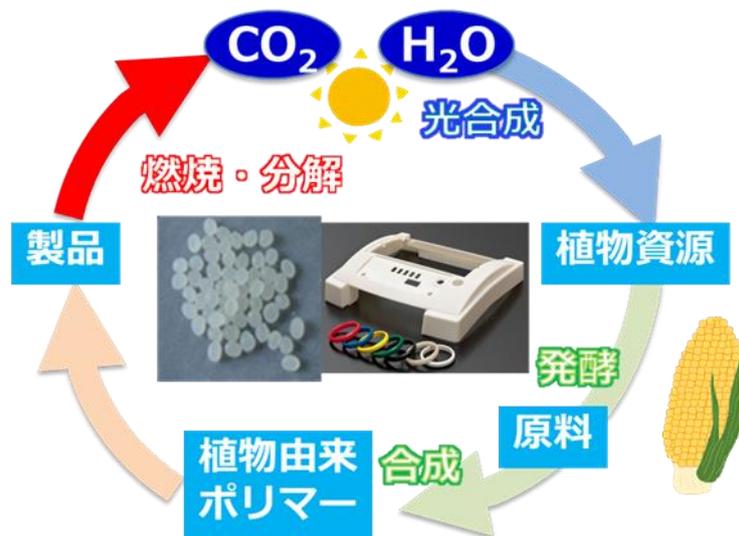


図 1-1. バイオマスプラスチックのカーボンニュートラル特性

また、バイオマスプラスチックの中でもポリ乳酸（PLA）やポリヒドロキシアルカン酸（PHA）は生分解性も有しており、プラスチックとしての機能や物性に加えて、ある一定の条件の下で自然界に豊富に存在する微生物などの働きによって、分解し最終的には二酸化炭素と水にまで分解可能なプラスチックである。そのため、農業用のマルチフィルムや、食物など有機性廃棄物の堆肥化のための収集袋など、微生物分解性の機能を活用できる分野では、環境負荷低減に寄与することからとくに注目されており採用が進んでいる。しかしながら、一般的にバイオマスプラは化石資源由来プラと比較して各種物性に劣るために上述のような限られた用途以外では実用途展開が進んでいないのが現状である。

1-2. 業務の目的

ポリ乳酸 (PLA) やポリヒドロキシアルカン酸 (PHA) などのバイオマスプラスチックは、再生可能なバイオマスを原料に製造されることからカーボンニュートラル性を持ち、大気中のCO₂の濃度を上昇させないという特徴がある。そのため、環境への配慮から既存の化石資源由来のプラスチックであるポリプロピレン (PP) やポリエチレン (PE) などの汎用プラスチックをバイオマスプラに置き換えようという研究が古くからなされている。これにより近年では、従来課題とされていた耐久性や、食料との競合といった問題も解決策が示され始めている。しかしながら、国内のバイオマスプラ流通量は全プラスチック量の0.5%程度に留まっているのが現状である。

これは、コスト面の問題だけでなく一般にバイオマスプラは汎用プラに比べ各種物性に劣るためである。現在最も流通しているPLAを例にみても、加工性に難があり固く脆いという性質から扱いにくい材料となっている。単に汎用プラを環境に優しいという点からPLAに置き換えようとしても、耐久性に乏しくリサイクルに不向きであることを考慮すると、むしろ環境負荷を高める結果となりかねない。PLAには生分解性という優れた利点があることから、使用後に廃棄されるワンウェイ用途である包装材や梱包材としての利用に対して期待が持たれるものの、このような用途においても先に示した耐衝撃性や柔軟性の低さという点が実用展開の課題となっている (図1-2)。

このような問題点を解決する目的でPLAの改質の研究も盛んに行われている。PLAの改質としては一般的なプラスチックと同様に共重合やブレンド、成型加工を工夫するなどの手法がとられている。しかし、共重合法では煩雑な合成法となるため元々割高なPLAのコスト (500円/kg程度と汎用プラの3倍前後) をさらに増大させることに繋がる。一方、他樹脂とのブレンド (相溶化) は安価で大量生産に適した効率的な手法である。

ポリ乳酸 (PLA)

$\left(\text{O}-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} \right)_n$

- × 固く脆い
- × 成形加工性
- × 耐熱性
- × リサイクル性

ブレンドによる機能改質が必須

極性官能基なし

$\left(\text{O}-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} \right)_p$

PLA

PLAは極性官能基導入ができない

相溶性に乏しく、利用範囲が狭い

図 1-2. PLA の利用拡大に向けた課題

実際に、他樹脂とのブレンドによる物性改善も報告されているもののPLA自身の疎水性という性質のために実用途レベルでの機能改質、高機能化には未だ制限が多い。また、この時ブレンドする樹脂を化石資源由来プラにしてしまうと、生分解性というメリットを損ねることとなりワンウェイ用途には適さない。

そこで本実証事業では、PLA に代表されるバイオマスプラの相溶性付与を目指した新たな樹脂改質法を開発する。また、この改質により他樹脂として靱性に優れ生分解性バイオマスプラである PHA、バイオマス由来のポリブチレンスクシネート (PBS) 、を添加した完全バイオマス由来の高靱性樹脂を開発し、事業化を目指す。

本業務ではバイオマスプラに実用途に求められるレベルの機能性を付与することを目的とし、下記により、既存プラスチックの置き換えを目指す。

- ・ポリ乳酸 (PLA) への相溶性付与による完全バイオマス PLA ブレンドフィルムを開発すること。
- ・光活性化二酸化塩素を用いた新規酸化法により、PLA の機能改質を行うことで PLA に他樹脂との相溶性を付与すること。
- ・PHA や PBS などの高靱性材料を改質 PLA とブレンドすることで透明性を維持したままで靱性に優れた完全バイオマスプラスチックフィルムを作製すること。
- ・PLA-PHA ブレンド品の生分解性評価などから、高い付加価値を創造し事業化へと繋げること。

1-3. 解決すべき技術課題

本実証事業で解決を目指す技術課題はPLAに対する他樹脂との相溶性の付与、またそれによるPLAの物性改善・高機能化である。

各種物性で汎用プラに劣るPLAは、適切な処理による物性改善が必要となる。またPLAは生分解性プラに分類されるものの、その生分解性は必ずしも高くないという課題も残されている。実際にPLAが生分解されるには、60℃以上の加熱条件でのコンポスト処理が必要とされる。近年大きな問題となっている海洋マイクロプラスチック対策を目的として、生分解性プラの適用が検討されているものの、海洋での生分解という意味では、PLA単独では汎用プラに対するメリットが無いのが現状である。

そのような背景のもと、本実証事業ではPLAと他樹脂とブレンドすることによる物性改善、生分解性の向上といったPLAの高機能化を実現する。ここで、樹脂のブレンドにおいて、一般にプラスチックは疎水性であるために高極性の樹脂との相溶性に乏しく、適切な相溶化剤の添加や樹脂改質が必要となる。実際に、汎用プラであるポリプロピレン（PP）を例にとると無水マレイン酸で変性したPP（マレイン酸変性PP）を相溶化剤として用いることで多様な樹脂とのブレンドが達成されている。しかしながら、バイオマスプラにおいては、その利点を維持するためには相溶化剤自身もバイオマスであることが求められる。一方、改質処理においてはバイオマス由来であるがために化学的な処理による官能基導入、すなわち相溶性の付与が困難な材料となっている。PLAと他樹脂をブレンドするには、安価で簡便な新たな樹脂改質法が必要となる。

1-4. 実証事業の内容

PLAの相溶性の向上のための改質技術として、本実証事業では我々のグループで開発した新規光酸化技術を適用する。この光酸化技術は、安価で低毒性の二酸化塩素ラジカル ($\text{ClO}_2\cdot$) への光照射により発生する活性種を用いた新規な処理法であり、これまでにポリプロピレン (PP) の酸化による酸素官能基導入に成功している (特願 2018-06676)。また、PLAの酸化も既に達成しており、酸素官能基の増大と親水性の向上を確認している。ここで導入される酸素官能基は、ヒドロキシ基 (-OH) やカルボキシ基 (-COOH) などの極性官能基であり、同様の極性基を持つ樹脂との相溶性の向上が期待される (図1-3)。

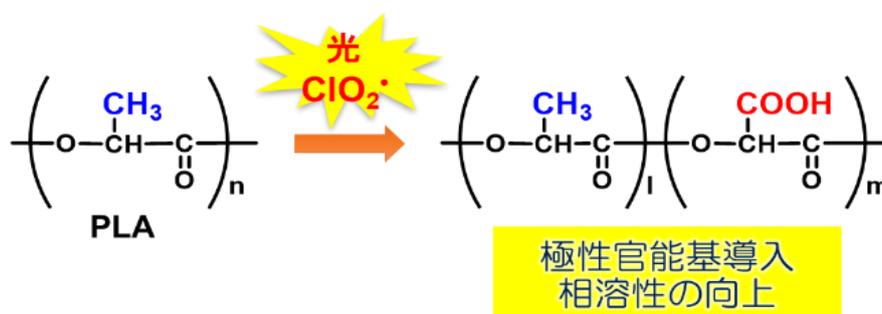


図 1-3. PLA の二酸化塩素光酸化による極性官能基導入

本事業では、PLAの新規光酸化による極性基導入、および酸化PLAのPHAやPBSとの相溶化による高機能化を目指す。現在PPやPEを主とした材料としている、フィルム用途での置き換えを目指し、具体的な用途として、高靱性で透明性に優れた包装用フィルム、ブリスターパックを開発する。また、トレイや生分解性を活用したコンポスト用袋などの用途についても検討を行う。

第二章 ポリ乳酸 (PLA) ブレンドフィルムに関する技術開発

2-1. ポリ乳酸 (PLA) の酸化による相溶性付与 ((大) 大阪大学)

PLA ブレンドフィルム作製の技術開発を行うため、光活性化二酸化塩素による改質処理の最適化に向けた種々の検討を行った。これまでに PHBH の酸化のみで相溶化効果がみられることが明らかとなっており、本年度事業では PHBH の酸化度制御に注力した。また、適切な酸化度を評価するため、表面元素存在量および化学結合状態について X 線光電子分光法 (XPS) による分析を行うとともに、酸化度の簡易な評価法であるカルボキシ基の染色による官能基分析や、NMR 解析などを用いた導入官能基の化学的評価に基づいて、反応の最適化を行った。

2-1-1 PHBH (粉体) 検討

前報で、粉体 PHBH の酸化度を制御できる可能性が示唆され、今年度は引き続き他のファクターについても最適化を行うために検討を行った。

検討内容としては、前報での①酸化時間の検討、②UV 光量の検討、③試薬濃度の検討、の3点について報告する

【酸化操作】

反応容器として、中央に凹みを有する角型シャーレを用い、その外周部に ClO_2 源として、酸性 NaClO_2 水溶液を入れた。酸性 NaClO_2 水溶液は、 H_2O (7 mL)、 NaClO_2 (100 mg)、および 35% HCl (100 μL) を混合した水溶液を用いた (図 2-1)。シャーレの凹み部位に粉体サンプルを入れ、必要に応じて加熱を行いつつ酸化処理を行った。酸

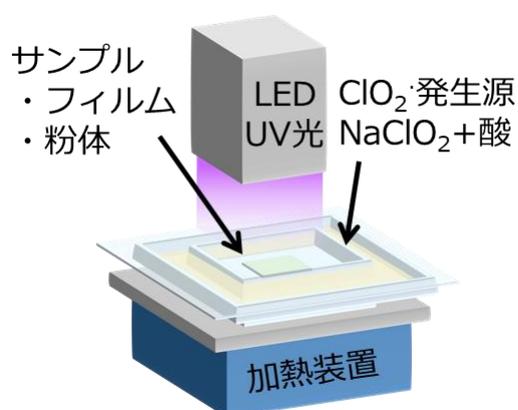


図 2-1. 反応装置図

化処理は前記蓋の上方から、波長 365 nm の LED ランプを光源として 20 mW/cm² の光量で所定時間照射することで達成された。その照射により活性化された二酸化塩素ラジカルを、前記粉体サンプルの表面と反応させて表面処理した。

【トルイジンブルーを用いた染色法】

—装置

紫外可視近赤外分光光度計 V-750

測定条件：開始波長: 800nm, 終了波長: 200nm

—サンプル調整

既知法を改良し、染色には 0.1wt% のトルイジンブルー 1 mM NaOH 水溶液を用いて、40°C で 10 分間サンプルを浸漬、その後 1 mM NaOH 水溶液で洗浄という酸化 PHBH のカルボキシ基量評価に適した処理条件を見出した。これにより得られた着色サンプルに対し 20% ラウリル硫酸ナトリウム水溶液でサンプル上のトルイジンブルーを脱色させ水溶液の吸光度測定を行うことで、カルボキシ基量を見積もった (図 2-2)。

カルボン酸選択的染色法

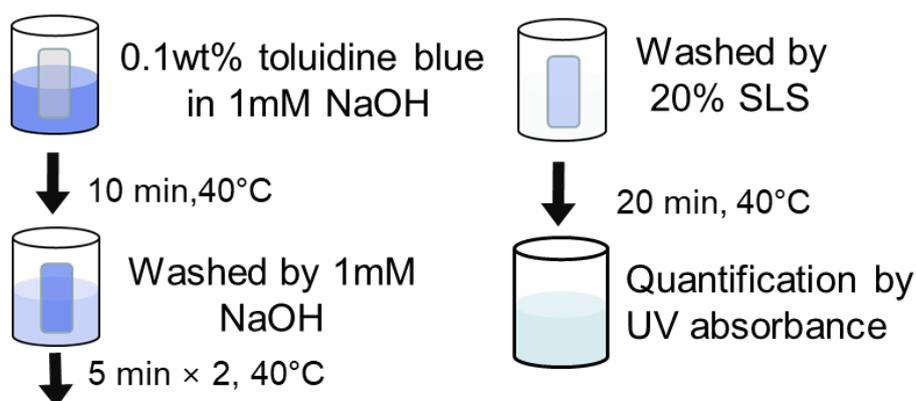


図 2-2. トルイジンブルーを用いたカルボン酸選択的染色法

－検討方法

① 酸化時間の検討

PHBH の粉体 0.2g を酸化反応容器の角型シャーレの中央部に、濃度 1%の酸性 NaClO_2 水溶液を外周部に入れて反応を行い、酸化時間と酸化度の関係を調べた。反応時の光源ランプの光量は 20 mW/cm^2 で固定した。

また、酸化度については、酸化反応後、先述のトルイジンブルー染色法を用いて、カルボキシ量を見積もった。

② UV 光量の検討

PHBH の粉体 0.1g を酸化反応容器の角型シャーレの中央部に、濃度 1%の酸性 NaClO_2 水溶液を外周部に入れて反応を行い、光源ランプの光量と酸化度との関係を調べた。酸化反応時間は 10 分で固定した。

また、酸化度については、酸化反応後、先述のトルイジンブルー染色法を用いて、カルボキシ量を見積もった。

③ 試薬濃度の検討

PHBH の粉体 0.1g を酸化反応容器の角型シャーレの中央部に、酸性 NaClO_2 水溶液を外周部に入れて反応を行い、試薬濃度と酸化度の関係を調べた。反応時の光源ランプの光量は 20 mW/cm^2 、酸化反応時間は 10 分で固定した。

また、酸化度については、酸化反応後、先述のトルイジンブルー染色法を用いて、カルボキシ量を見積もった。

—結果

① 酸化時間の検討について、結果を図 2-3 に示す。

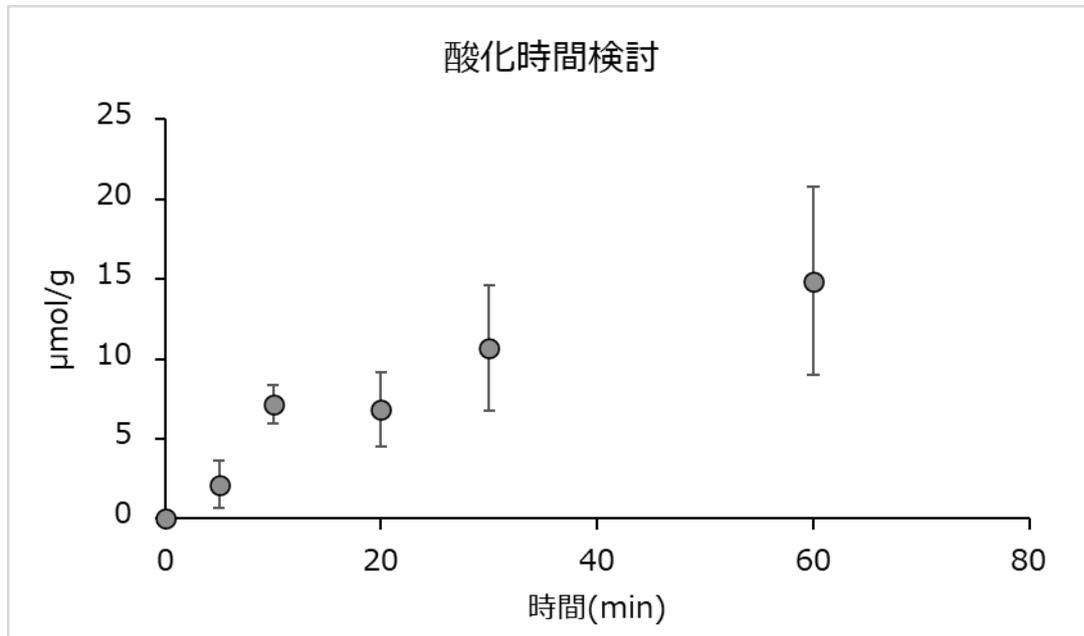


図 2-3 酸化時間検討

UV の照度を固定した場合、照射時間が 0~10 分の範囲では照射時間が増加とともに酸化度の増加が認められた。照射時間 20 分以降では、酸化度のばらつきも大きく、酸化度のはっきりとした増加はみられなかった。以上のことから、酸化時間は 10 分が最適と判断した。

② UV 光量の検討について、照度と酸化度の関係を図 2-4 に示す。

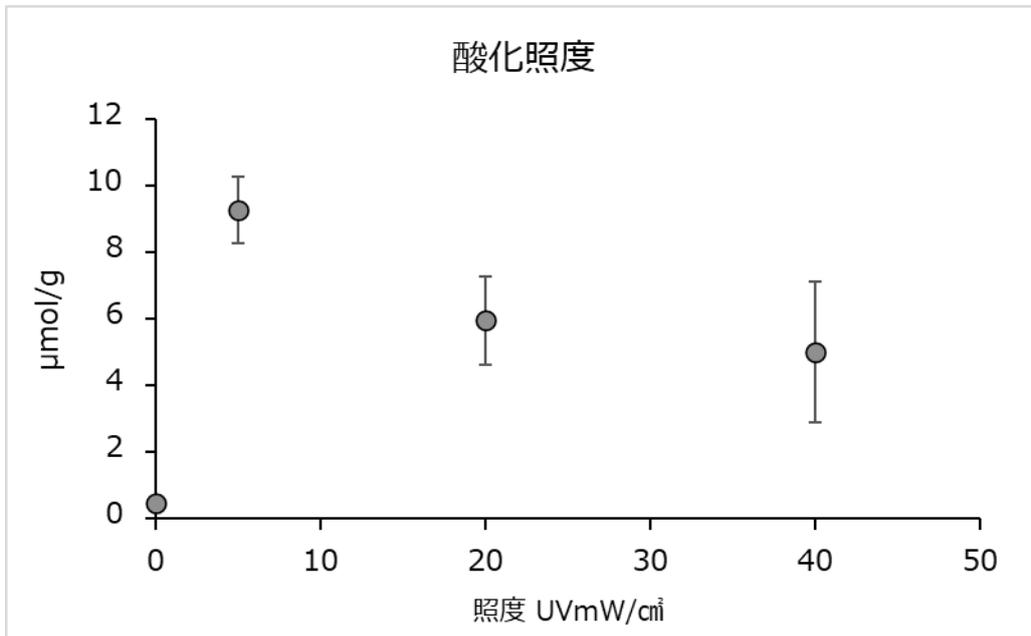


図 2-4 酸化照度の検討

前年度までに、PLA の最適な光量は 5 mW/cm^2 と求められた。本年度は PHBH に対して同様に光量と酸化度を検討してみた結果、 5 mW/cm^2 では酸化度が高い結果が得られた一方、トルイジンブルー染色後のサンプルには色むらが生じており、均一な酸化ができていない可能性が考えられた。このため、PHBH に関しては、 20 mW/cm^2 が最適と判断した。

③ 反応試薬の濃度の検討について、試薬濃度と酸化度に関係を図 2-5 に示す。

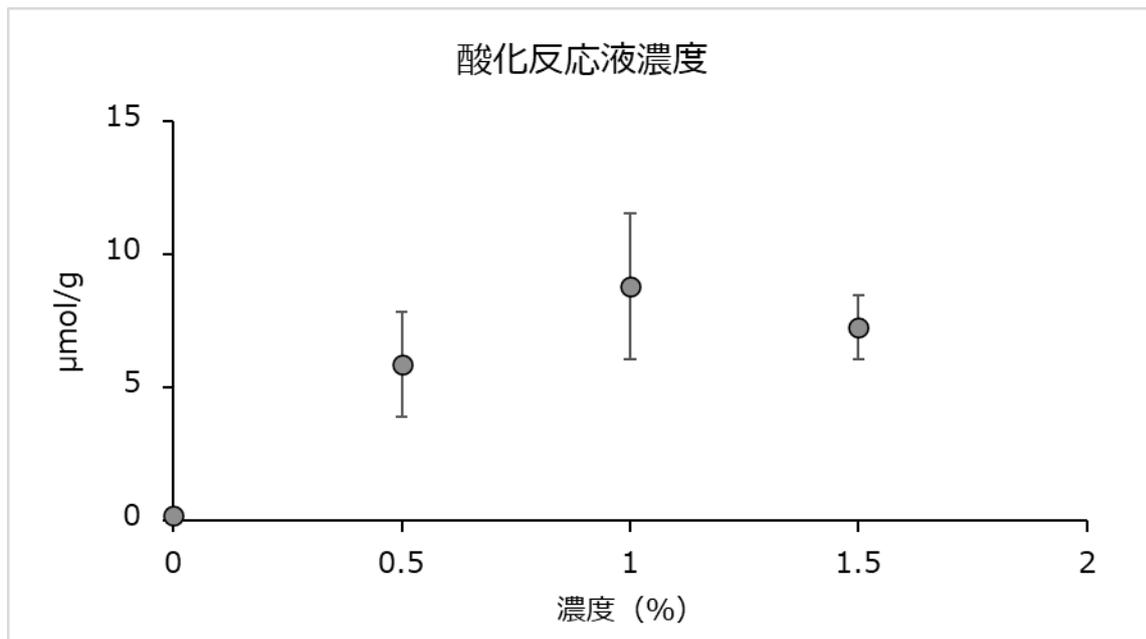


図 2-5 反応試薬の検討

反応試薬濃度は、PLA と同様に 1%溶液が酸化度が高い酸化度が得られるため、溶液は 1%が最適と判断した。

2-1-2 PHBH フィルムの検討

PHBH の二酸化塩素酸化により導入された官能基などを詳細に評価する目的で、フィルムサンプルについて酸化処理を行った。酸化前後のフィルムについて、トルイジンブルー染色による酸化度評価を行うとともに、接触角についても評価を行った。また、酸化前後のフィルム表面について X 線光電子分光法 (XPS) を用いて導入官能基の評価を行った。

【フィルム作製】

PHBH フィルムはキャスト法により作製した。PHBH ペレット (カネカ社製 151C) 200mg をクロロホルム 20ml に溶かし、PFA 製のシャーレに流し入れ、減圧乾燥してフィルムを作製した。

【フィルムの酸化】

フィルム作製後、酸化反応容器の角型シャーレの中央部に、酸性 NaClO_2 水溶液を外周部に入れて反応を行った。反応時の光源ランプの光量は 20 mW/cm^2 、酸化反応時間は 10 分 (酸化処理①)、20 分 (酸化処理②) とした。

【フィルムの評価】

酸化前後の PHBH フィルムの酸化度をトルイジンブルー染色法を用いて評価を行った。加えて、水の接触角測定を行い、フィルム表面の親水性評価を行った。

—装置

協和界面化学 社製 Drop Master DM300

測定条件：水 $1 \mu\text{L}$ を滴下し 5 秒後の接触角を評価

－結果

各サンプルの酸化度と水の接触角測定の結果を表 2-1 に示す。酸化処理後のサンプル（酸化処理①、酸化処理②）では、未処理に比べて酸化度が高いことが分かった。また、接触角においては、未処理に比べて酸化処理後は接触角の低下が認められた。このことから、疎水的であった PHBH 表面が、酸化処理により表面の親水性が向上したことが分かった。

表 2-1. PHBH フィルムの酸化処理前後の接触角測定

サンプル	酸化条件		酸化度 ($\mu\text{mol/g}$)	接触角 ($^{\circ}$)	
	酸化時間 (分)	酸化温度 ($^{\circ}\text{C}$)			
未処理	—	—	0.3	101	
酸化処理①	10	40	9.8	64	
酸化処理②	20	40	17.6	51	

続いて、酸化前後の PHBH フィルム（未処理、酸化処理①）において、表面に導入された官能基を調べるため、XPS を用いて評価を行った。

【XPS 測定】

－装置

島津 社製 Kratos AXIS-165 走査型 X 線光電子分光装置

測定条件：X 線源 Al K α (Wide: 12kV \times 10mA, Narrow: 12kV \times 10mA)

分析領域：1mm 2 ϕ

－サンプル調整

酸化前後の PHBH フィルムを 1cm 角程度に切り出し、XPS 測定サンプルとした。

—結果

酸化前後の PHBH フィルムの表面元素比率を表 3-1 に、C の化学結合状態解析結果を表 2-2、表 2-3 に示す。

また、未処理の PHBH フィルムの C1s スペクトルを図 2-6 に、酸化処理後の C1s スペクトルを図 2-7 に示す。

酸化処理後の PHBH の表面元素比率において、未処理に比べて、O の元素比率が高く、また、C1s の結合状態から、O を含む官能基の割合が高いことから、酸化処理によって、O を含む官能基が導入されたことが分かった。また、結合エネルギーから考えられる結合状態としては、C-O 結合、COO 結合が酸化処理によってより多く導入されたことが考えられた。

また、酸化処理後の PHBH からは Cl も検出された。これは、酸化処理で使った試薬由来と考えられる。

表 2-2. 酸化処理前後の PHBH フィルムの表面元素比率算出結果

表面元素比率 (atomic%)

サンプル	C	O	Cl
未処理	84.9	15.1	—
酸化処理①	67.5	30.7	1.8

表 2-3. C の化学結合状態解析結果 (%)

サンプル	C-C	C-O	C=O, OCO	COO
未処理	76.5	11.9	4.2	7.4
酸化処理①	59.7	16.9	4.2	19.2

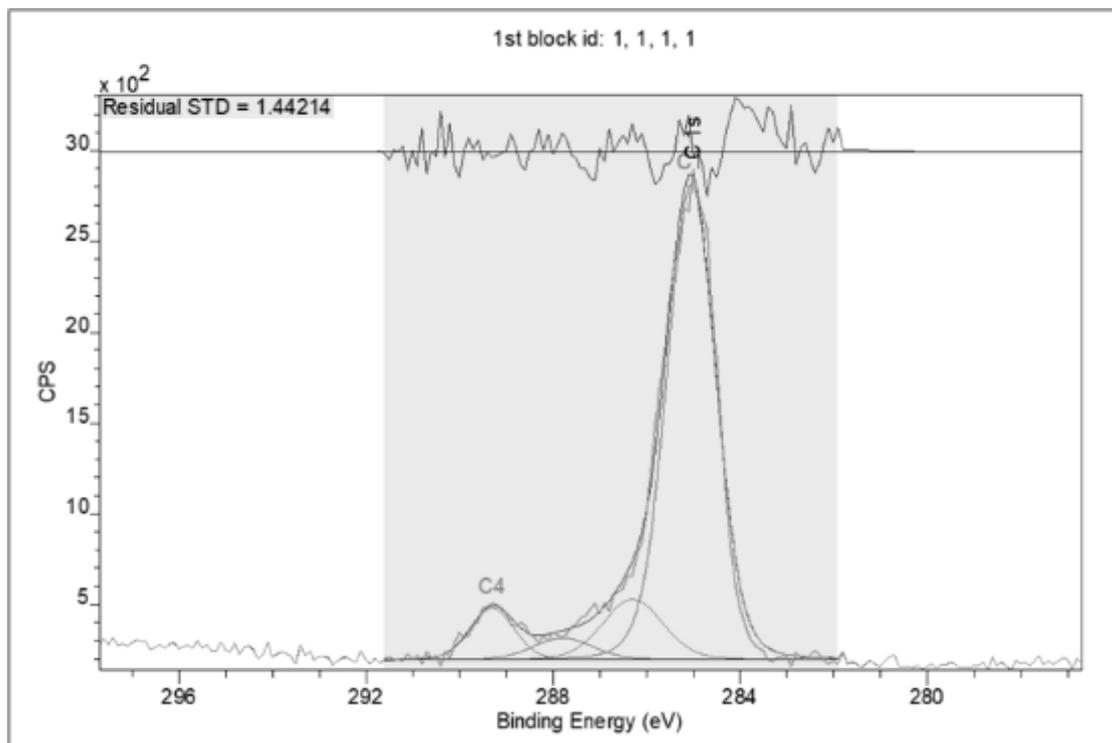


図 2-6. 未処理の PHBH フィルムの C1s スペクトル

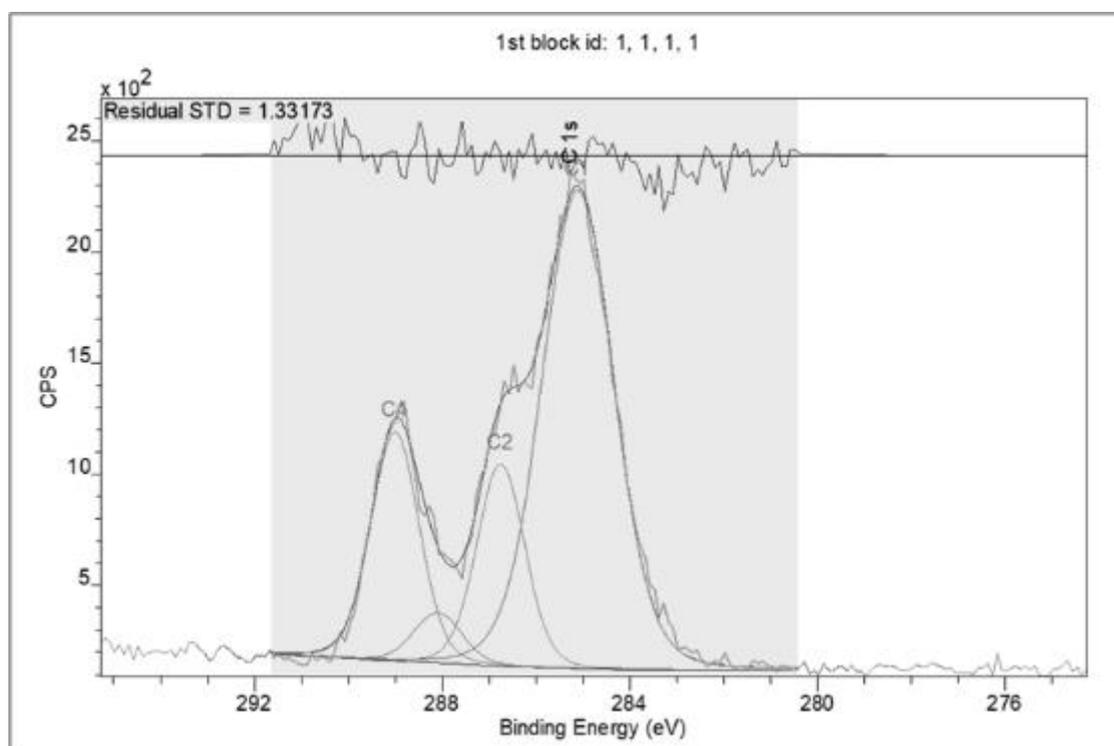


図 2-7 酸化処理①の PHBH フィルムの C1s スペクトル

2-1-3 まとめ

以上の結果から、酸化反応により、PHBH の表面には CO 結合や特に COO 結合が多く導入されたことで、表面がより親水性となったことが分かった。

2-2. ポリ乳酸 (PLA) とポリヒドロキシアルカン酸 (PHA) のブレンド ((大) 大阪大学、長瀬産業 (株))

プロセス化、スケールアップに向けての検討として、2-1 で得られた最適反応条件に基づいて、kg/h スケールでの処理を可能にする反応系の検討を行った。バッチ形式とフロー形式の反応系に関しては、ガスの取り扱いの容易さからバッチ形式を選択することとした。二酸化塩素ガスの導入経路に関する最適化を目的として活性種の寿命測定、ガス濃度や反応容器を mL スケールから L スケールに変えた際の酸化度に与える影響の有無も検討した。

2-2-1. 粉体サンプルの酸化処理スケールアップの検討

昨年度に引き続き、粉体の酸化処理を行うために、図 2-8 のような装置を用いて酸化反応を行った。本装置では、 $\text{ClO}_2\cdot$ 発生源である NaClO_2 酸性水溶液にエアープンプにより空気を導入することで、反応器中へ $\text{ClO}_2\cdot$ を導入するとともに、粉体サンプルを入れた反応器を回転撹拌させることで効率よく酸化させることができる。また、サンプル量を 10g から、20g へ増やし、スケールアップ時の酸化度の値についても確認を行った。

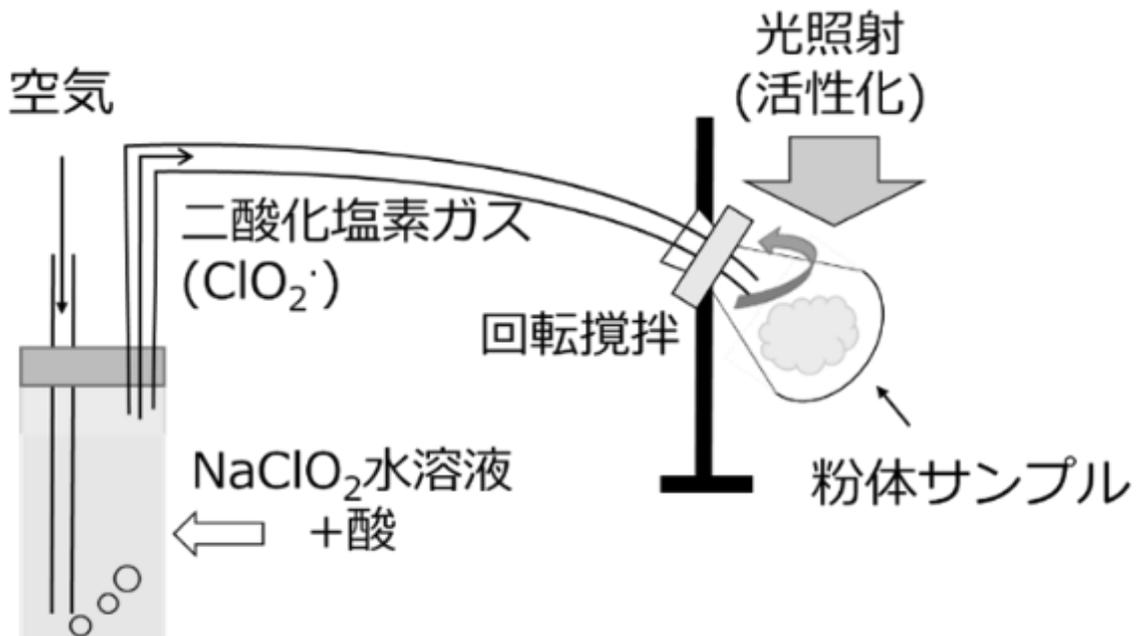


図 2-8. 粉体酸化処理装置の模式図

—結果

サンプル量 10g と 20g において、エバポレーターを用いた酸化反応を行い、トルイジンブルー染色法を用いて酸化度を評価した (図 2-9, 2-10)。

その結果、エバポレーターを用いての酸化方法では、20g で酸化反応を行った方がより高い酸化度となった。10g と 20g とともに反応時間 20 分での酸化度のバラツキは大きいことが分かった。

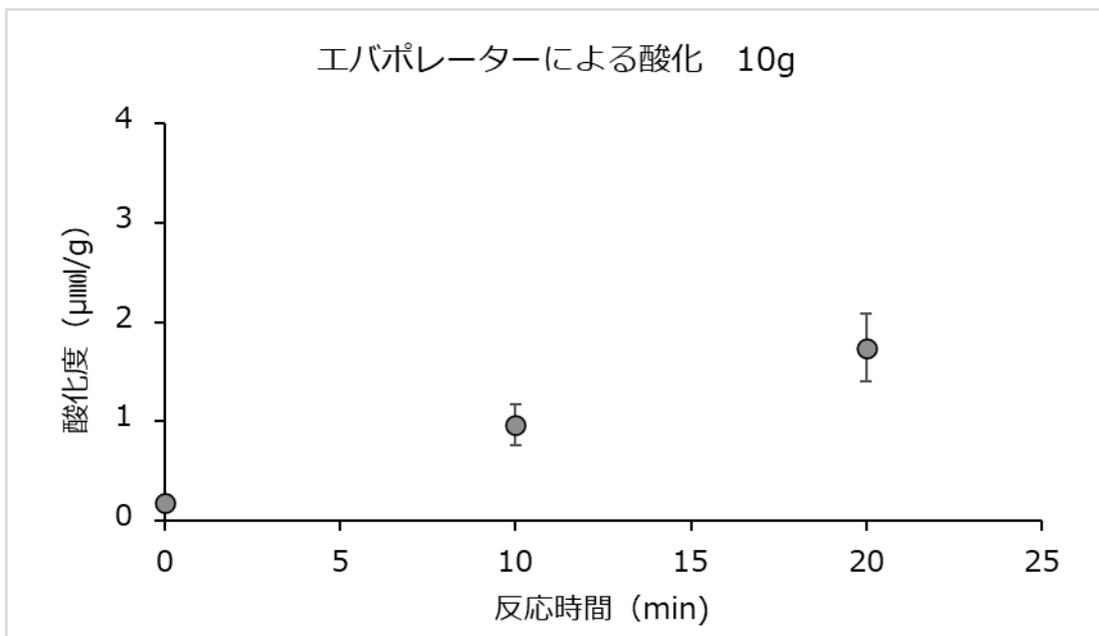


図 2-9. エバポレーターによる酸化 10g

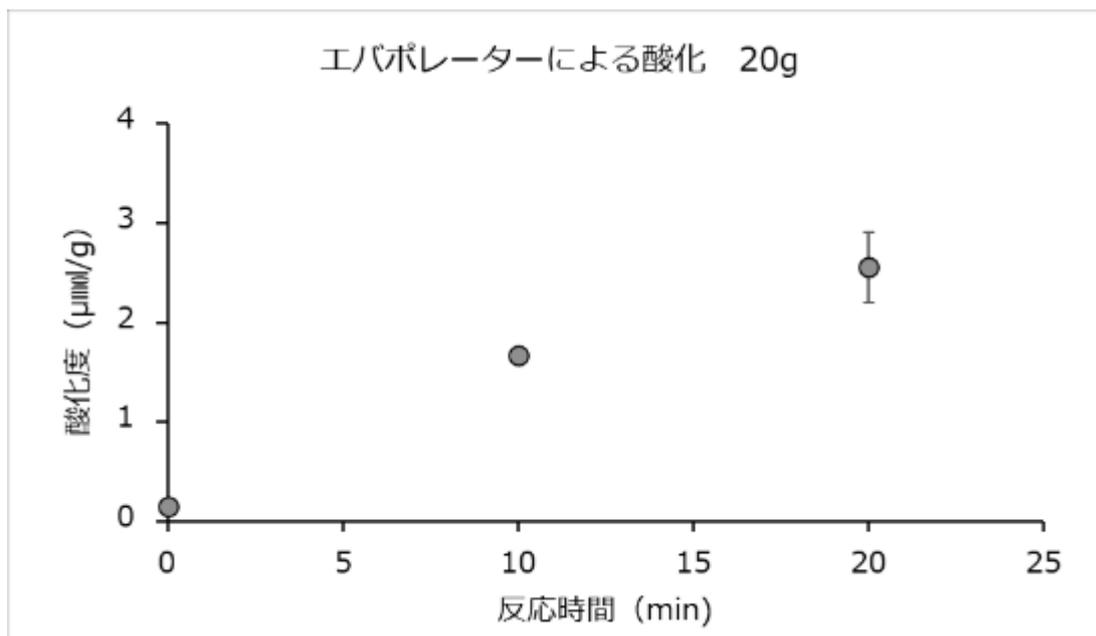


図 2-10. エバポレーターによる酸化 20g

サンプル量 10g の時と 20g の時とで酸化度が異なる原因として、サンプル粉体の粒子の大きさのバラツキが考えられた。

そこで、サンプル粉体の粒子をそろえるべく、再沈殿のやり方を見直すこととした。通常では、溶媒に溶かした PHBH をクロロホルム溶媒に入れて沈殿物を回収している。今回は、溶媒に溶かした PHBH にクロロホルム溶媒を入れて固形物を回収した。回収した固形物についてエバポレーターによる酸化反応を行った結果を図 2-11 に示す。

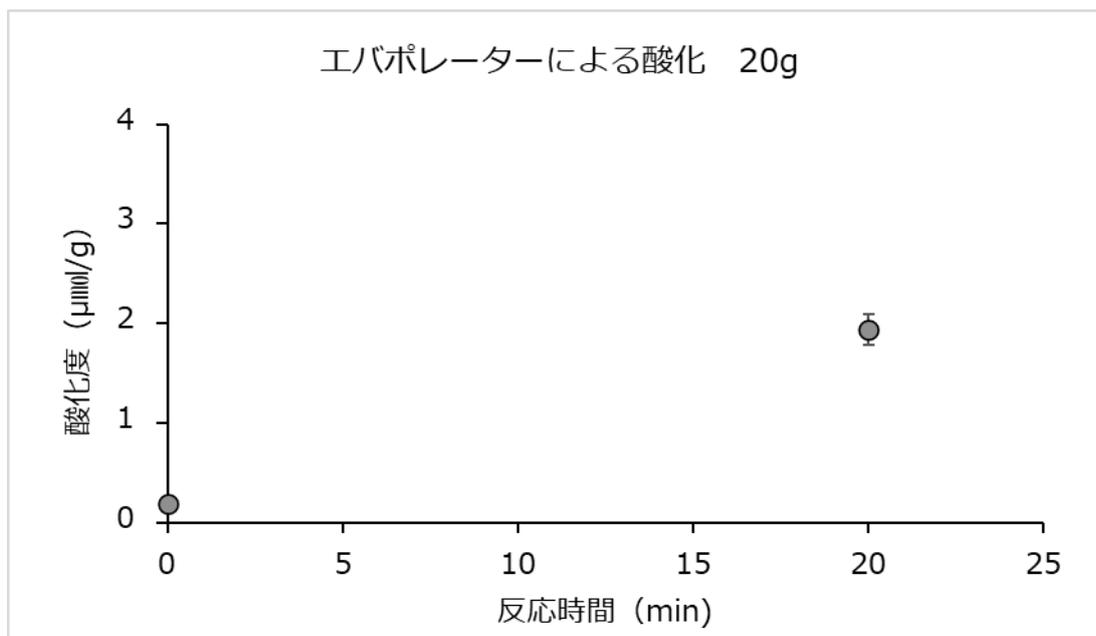


図 2-11. エバポレーターによる酸化 20g

粒子の大きさをそろえることで、酸化度のバラツキが小さくなることが分かった。このことから、均一に酸化処理が行えていると考えられる。今後も引き続き検討を行うこととする。

また、得られたブレンドサンプルに対し、前年度同様、光学顕微鏡による海島構造の評価を行ったものの、海島構造が認められなかった。これは、島相サイズを $5\ \mu\text{m}$ 以下に制御できたためと考えられる。なおブレンドフィルムの各種評価、相溶性向上メカニズムに対する考察については次章のフィルム評価にまとめる。

2-2-2. まとめ

粉体 PHBH を数 10g のスケールで効率よく酸化することが可能となった。また、酸化度は粉体サンプルの粒子径に大きく依存する結果が得られたものの、より詳細な検討が必要である。

第三章 PLA-PHA ブレンド品の評価

3-1. PLA-PHA ブレンドフィルムの物性評価（(大) 大阪大学、長瀬産業（株））

PLA ブレンドフィルムの物性評価を行った。とくに、ブレンド比の影響を明らかにするためブレンド比を変えたサンプルにおいて透明性および靱性の評価を一般的なフィルム物性評価法に従い行った。作製したブレンドフィルムの引張試験から簡易的な靱性評価を行った。

3-1-1. ブレンドフィルムの引張試験

PLA に対して、酸化 PHBH を 9 : 1 の比率で混合し、混練により十分にブレンドさせることでマスターバッチ (MB) を作製した (図 3-1)。この MB をバージンの PLA および PHBH と種々の比率でブレンドし、熱プレスによりフィルムを作製した。

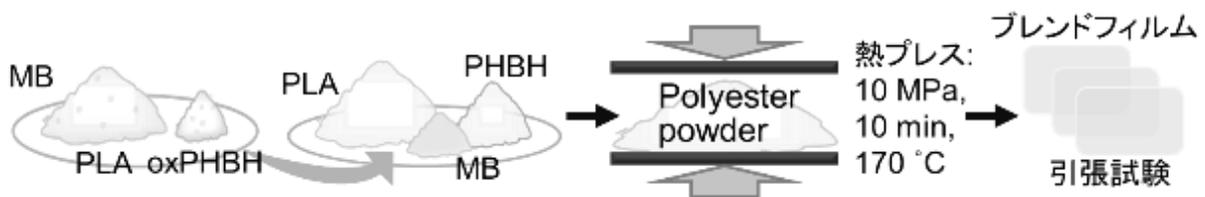


図 3-1. ブレンドフィルムの作製方法

表 3-1 に種々のブレンド比で作製したフィルムの引張強度測定結果を示す。ここでは、酸化度 $2.2 \mu\text{mol/g}$ の酸化 PHBH を用い、全体の比率を PLA/PHBH=90/10 とした。

表 3-1. 酸化度 $2.2 \mu\text{mol/g}$ の酸化 PHBH を用いたブレンドフィルムの引張試験

サンプル	破断点変異 (%)	最大点応力 (N/mm^2)	弾性率:10-20N (N/mm^2)
1 PLA90/PHBH10	78.2±95.2	46.7±7.6	1933
2 PLA90/酸化 PHBH10	151.5±57.1	40.3±14.4	1568
3 PLA87/PHBH10/MB3	82.7±105	44.7±1.9	1710
4 PLA81/PHBH9/MB10	188.9±69.1	43.2±1.9	1678
5 PLA72/PHBH8/MB20	259.6±82.7	44.0±1.8	1655
6 PLA63/PHBH7/MB30	211.3±76.9	44.0±2.0	1685

未酸化品同士のブレンドフィルムに対して (entry 1)、酸化 PHBH が添加されることで引っ張り伸びが向上し、最大で 259%の破断点変位となった (entry 5)。これは、酸化 PHBH が相溶化剤として作用して PLA と PHBH の相溶化が促進されたためと考えられる。

次に、酸化度 1.7 $\mu\text{mol/g}$ の酸化 PHBH を用いて同様の検討を行った (表 3-2)。ここでは、PLA/PHBH=95/5 として酸化 PHBH の比率を更に低減させた場合における評価を行った。その結果、最大で 287%の破断点変位となり高い引張伸びを示した。

表 3-2 酸化度 1.7 $\mu\text{mol/g}$ の酸化 PHBH を用いたブレンドフィルムの引張試験

サンプル	破断点変異 (%)	最大点応力 (N/mm^2)	弾性率:10-20N (N/mm^2)
1 PLA95/PHBH5	24.1 \pm 23.0	49.1 \pm 1.1	1764
2 PLA92/PHBH5/MB3	287.4 \pm 40.6	48.7 \pm 1.7	1852
3 PLA86/PHBH4/MB10	224.5 \pm 74.7	47.8 \pm 1.5	1809
4 PLA77/PHBH3/MB20	211.6 \pm 62.6	46.3 \pm 2.5	1743
5 PLA68/PHBH2/MB30	52.1 \pm 81.8	50.0 \pm 1.1	1833

以上の結果を、図 3-2 にまとめる。全量に対する酸化 PHBH の割合を横軸にとり、破断点変位を縦軸にグラフにプロットすると、2%未満の極少量の酸化 PHBH の添加により伸びの大幅な向上が見られることがわかった。

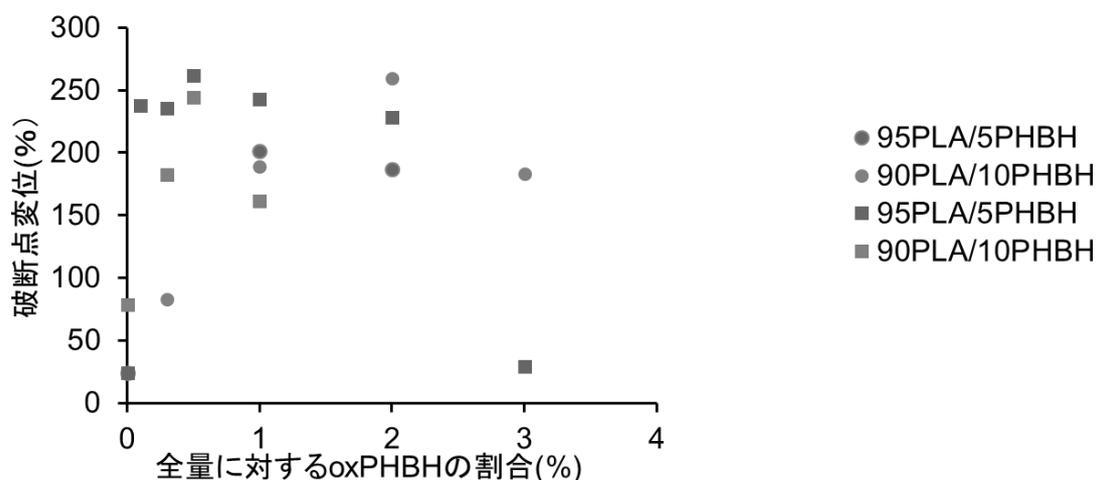


図 3-2. 破断点変位と酸化 PHBH 割合の関係

3-1-2. 熱分析による相溶性評価

熱分析 (DSC 測定) による、PLA-PHBH ブレンドフィルムにおける相溶性の評価を行った。結果を図 3-3、表 3-3 にまとめる。

- PLA-1. PLA酸化なし-PHBH酸化なし
- PLA-2. PLA酸化あり-PHBH酸化なし
- PLA-3. PLA酸化なし-PHBH酸化あり
- PLA-4. PLA酸化あり-PHBH酸化あり

温度プログラム

- 1st heating (0 °C ~ 190 °C, 10 °C/min)
- 1st cooling (190 °C ~ 0 °C, 10 °C/min)
- 2nd heating (0 °C ~ 190 °C, 10 °C/min)

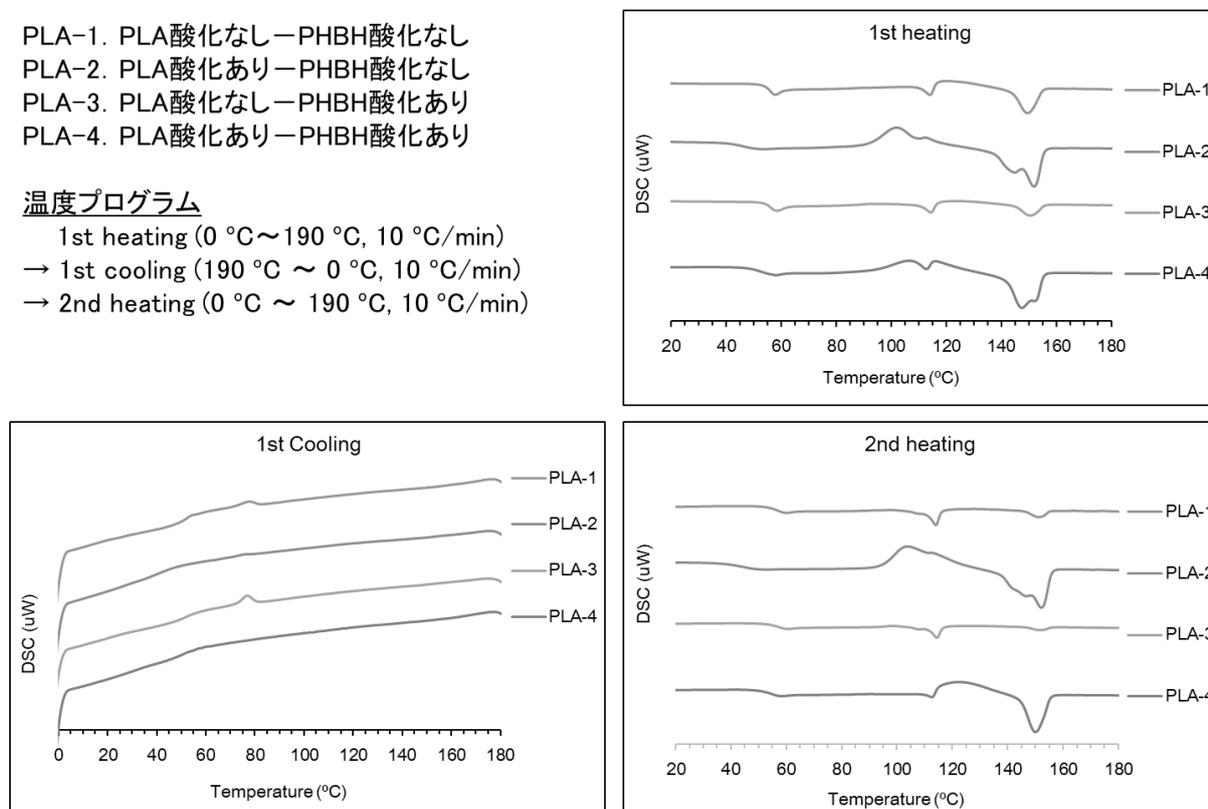


図 3-3 PLA-PHBH ブレンドフィルムの DSC 測定結果

表 3-3 PLA-PHBH ブレンドフィルムの DSC 測定結果

		1st Heating			1st Cooling	2nd Heating		
		Tg	Tc	Tm	Tc	Tg	Tc	Tm
PLA-1	PLA	54.7	-	149.8	80.2	56.1	-	151.6
	PHBH	-	-	114.2	56.3	-	-	114.2
PLA-2	PLA	44.7	103.9*	145.1 152.0	-	44.7	105.6*	146.6 152.7
	PHBH	-	-	110.4*	-	-	-	111.7*
PLA-3	PLA	54.5	-	150.9	78.8	56.3	-	152.3
	PHBH	-	-	114.6	-	-	-	114.8
PLA-4	PLA	53.0	108.4*	147.8 152.7	-	52.7	121.2*	150.4
	PHBH	-	-	113.0*	-	-	-	112.9*

*PLAの結晶ピークとPHBHの融解ピークが重なり、正確ではない

以上のように PLA-1(未酸化品同士ブレンドサンプル)では、1st heating と 2nd heating で T_g と T_m を確認でき、1st cooling で T_c が確認できた。また PLA-2 (PLA のみ酸化品ブレンドサンプル) では、PLA のみの酸化により、1st heating と 2nd heating で T_g と T_m 以外に、 T_c が出現し、PLA の T_g が低下した。これは PLA の酸化が PLA の結晶化に影響を与えることを示唆する。また PLA において一般に T_c が 1st heating で出現するのは、PLA が昇温過程で結晶化するためと考えられているが、PLA-2 において T_c が 1st cooling で出現しなく、2nd heating でのみ出現したのは、結晶化速度が低下したことと考えられる。

PLA-3 (PHBH のみ酸化品ブレンドサンプル) では、PHBH のみ酸化しても、熱分析により変化がなかった。

PLA-4 (酸化品同士ブレンドサンプル) は PLA-2 と同様に、1st heating と 2nd heating で T_g と T_m 以外に、 T_c が出現し、PLA の T_g が若干低下した。これは酸化した PHBH と PLA が相互作用により、結晶性に影響を与えたためと考えられる。

以上のように、PLA や PHBH の酸化が相溶性に与える影響を熱分析により評価した。PLA の酸化は結晶化速度に影響を与えることが示唆される結果となった。一方で引張試験の結果とは異なる傾向が見られた。これは、本ブレンドサンプルは小スケールでの検討であったため、混練品ではなく手動での熔融ブレンド品であったため、混練時の酸化などが考慮されていないものと考えている。次年度に、実際のフィルム作製サンプルと同様の条件下で調製したブレンド品について熱分析を行う必要がある。

得られたブレンドサンプルに対し、前年度同様、光学顕微鏡による海島構造の評価を行ったものの、海島構造が認められなかった。これは、島相サイズを $5\ \mu\text{m}$ 以下に制御できたためと考えられる。導入カルボキシ基が相溶性向上に与える影響について NMR 測定におけるケミカルシフトの比較を検討したが、酸化官能基量が全体に対し非常に少ないため定量的に評価することができなかった。官能基量の異なる複数のブレンド品に対して NMR などの化学的な評価を行ない、傾向を明らかにすることで有益な知見を得る必要がある。

3-1-3 まとめ

ブレンドフィルムの物性に関して引張試験から評価した。酸化 PHBH の添加により引っ張り伸びが大きく向上したことから靱性が改善している可能性が示唆された。また、熱分析結果から PLA や PHBH の酸化は PLA の結晶化速度に影響を与えることが示唆される結果となった。

3-2. PLA-PHA ブレンドフィルムの有用性評価（大阪大学、長瀬産業（株））

作成したブレンドフィルムの各種物性を明らかにし、既存製品に対する優位性を明確化することで出口戦略を立てることを目指し、本年度は生分解性評価を行うこととした。

3-2-1. フィルムの生分解性評価

PHBH フィルムの生分解性評価の確立を目的とし、酸化処理前後のフィルムを土中に埋めてフィルムの重量変化を調べた。また、より簡便な生分解性評価の手法を検討するため、水中に浸漬させて重量変化を調べる検討も進めた。

ー試料調整

大阪大学植物園から土を採取し、プランターに小分けして、その中にフィルムを埋め込み経時変化を観察した。また、水中評価には大学近辺の芥川から水を採取して、小分けした中にフィルムを浸漬させて経時変化を観察した。

ー結果

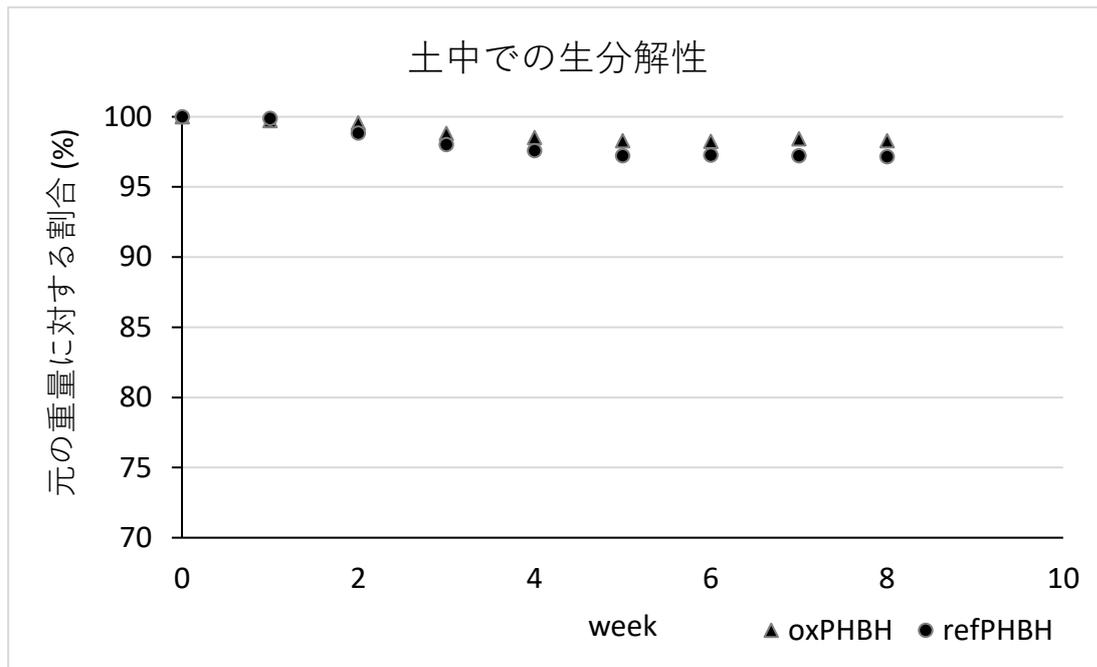


図 3-4 土中の生分解性評価

未酸化の PHBH フィルムと酸化後の PHBH フィルムを土中に埋めたところ、計測を行った 8 週目まで、両サンプルの重量は減少することが分かった (図 3-4)。また、未酸化と酸化後での重量変化に大きな差は認められなかった。

生分解性評価として重量変化に着目して進めたが、その評価方法の見直し、酸化処理の条件の見直しが必要であると考えられる。

次に、水中での試験結果を図 3-5 に示す。

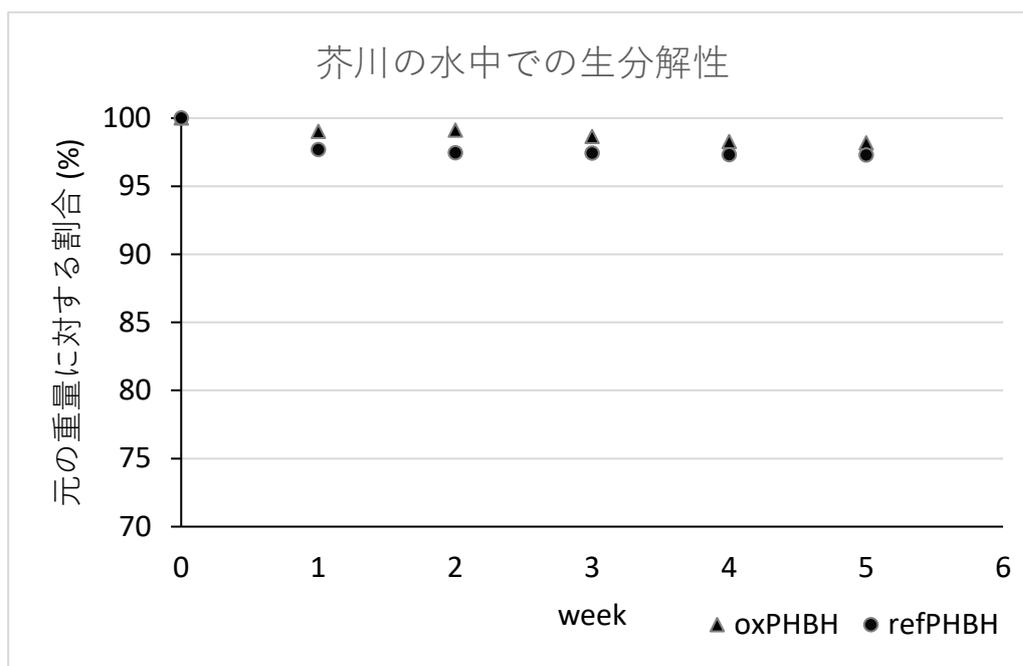


図 3-5 水中での生分解性評価

未酸化の PHBH フィルムと酸化後の PHBH フィルムを水中に浸漬させたところ、一週目での重量変化が一番大きく、その後穏やかな重量減少がみられた（図 3-5）。また、土中での生分解性評価と同様に、未酸化と酸化後での重量変化に大きな差は認められなかった。一週目以降で重量減少がほとんどみられなかった原因として、フィルム表面にできたバイオフィルム層の除去が考えられる。一週目の計測の際、フィルム表面にはぬめり気があり、純水でぬめり気の除去を行ってしまった。そのため、フィルム表面にできたバイオフィルム層が除去されたため、重量減少が穏やかになったと考えられる。次回の検討では、バイオフィルム層の生成を考慮し、検討を進めることとした。今回の検討では、PHBH の生分解性の評価形態の確立には至らなかった。

3-2-2. PLA フィルムの生分解性評価

PHBH よりも生分解性の低い PLA フィルムを用いて生分解性の評価を行い、生分解性の評価形態の確立を試みた。PHBH では重量変化で生分解性の評価を行ったが、バイオフィルム層が形成された場合、フィルムに付着した土を除去する際に一緒に取り除いてしまう恐れがあったので、今回は重量変化ではなく、厚み変化について経時観察を行った。PHBH の時と同様に PLA フィルムについて酸化処理を行い、接触角

と、トルイジンブルー染色で酸化度を調べた。各フィルムの接触角と酸化度の結果を表 3-4 に示す。

表 3-4 各 PLA フィルムの接触角と酸化度の結果

サンプル	接触角(°)	酸化度(μmol/g)
ref-PLA	76.7	0.087
30°Cox-PLA	72.8	0.227
60°Cox-PLA	70.7	3.265

未処理 (ref-PLA)、酸化処理 30 °C (30 °Cox-PLA)、酸化処理 60 °C (60 °Cox-PLA) について、生分解性評価を行うため、これら 3 種類の PLA フィルムを土中に埋めて一定日数経過後のフィルムの厚さの経時変化を調べた。

一 試料調整

大阪大学植物園から土を採取し、プランターに小分けして、その中にフィルムを埋め込み経時変化を観察した。



フィルム面内①～③の箇所の厚みを計測した。

一結果

計測結果を以下に示す。

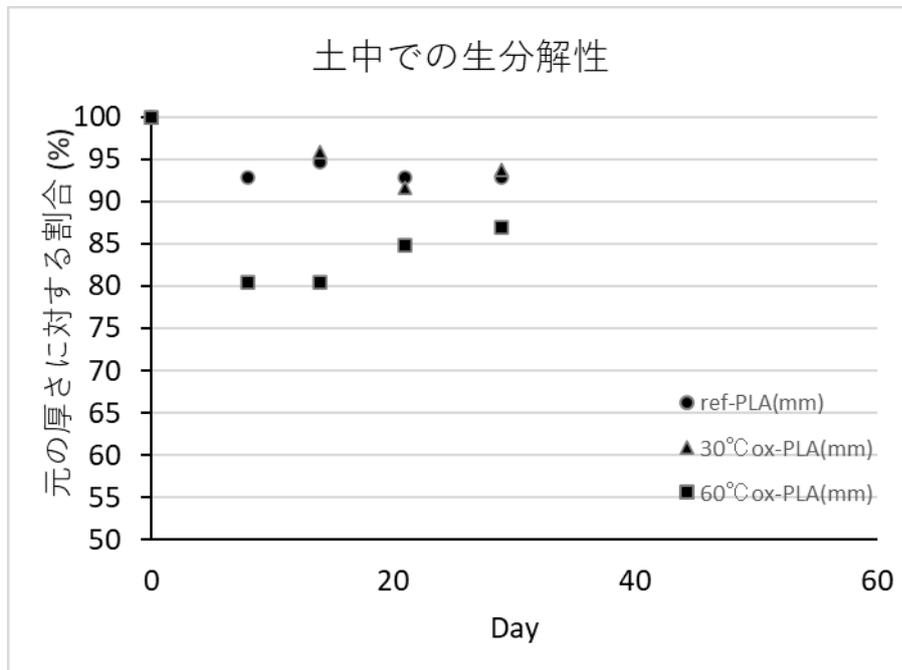


図 3-6 ①の箇所の厚み変化

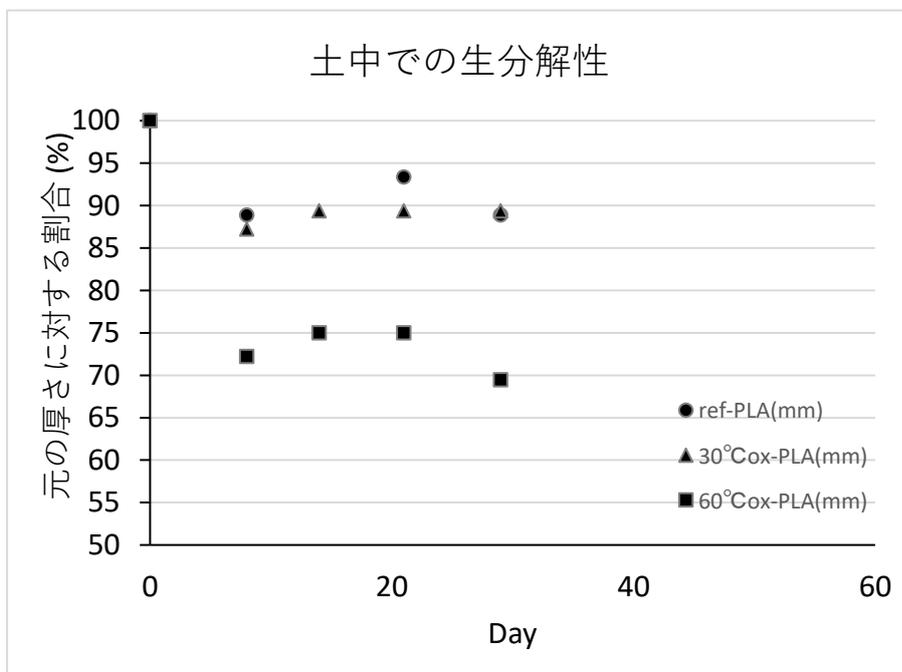


図 3-7 ②の箇所の厚み変化

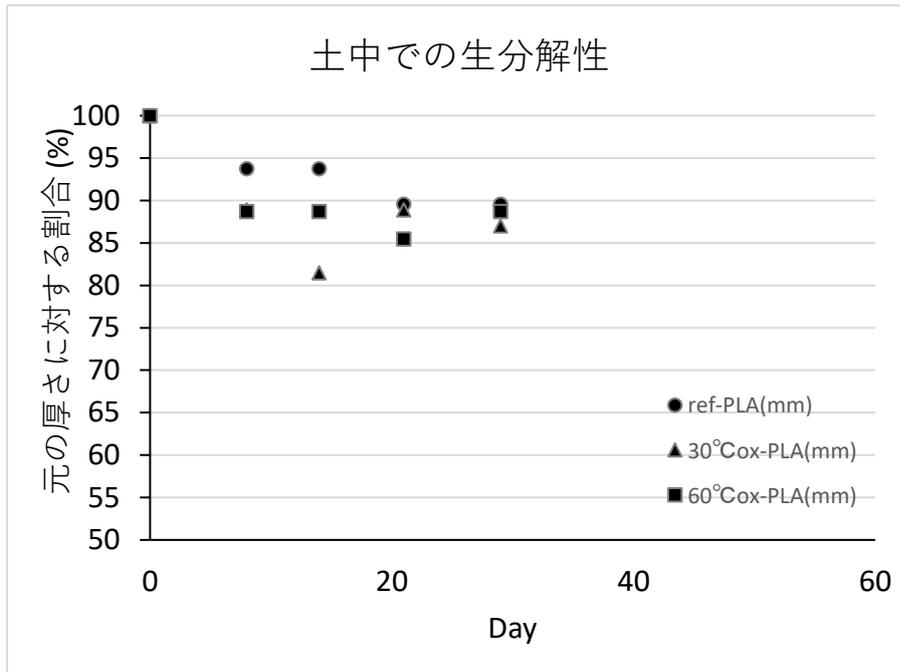


図 3-8 ③の箇所の厚み変化

未処理 (ref-PLA)、酸化処理 30 °C (30 °Cox-PLA)、酸化処理 60 °C (60 °Cox-PLA) のいずれのフィルムにおいても、土に埋めた後では厚さが減少していることが分かった。特に、酸化処理 60 °C (60 °Cox-PLA) の減少の割合が高いことが分かった。測定点数を増やし、その平均値で評価を行うなど、より定量性の高い評価法を取り入れる必要があるものの、一定の評価が可能な系を構築するに至った。本法を用いることで、PHBH およびブレンドフィルムの土中での生分解性評価も可能と考えられる。

3-2-3. TG/DTA 評価

PLA 樹脂を溶媒に溶解させて再沈殿を行った後にプレスでフィルムを作製すると、フィルム中に気泡ができるという問題が生じた。しかし、沈殿後の PLA を数日放置してからフィルムを作製すると、気泡のないフィルムが出来上がる。(図 3-9) このことから、再沈殿後すぐの樹脂には溶媒が残っている可能性が考えられた。

そこで、溶媒を取り除く目的で、再沈殿後に減圧乾燥を行った。溶媒が残っているかどうかについては TG/DTA 測定により確認を行った。



図 3-9 プレス後の PLA フィルム（上；現行条件、下；数日放置後）

【TG/DTA 測定】

—装置

Rigaku 社製 Thermo Plus EVO II 示差熱・熱重量測定

測定条件：10 °C/min で室温～200 °C

一結果

再沈殿後の PLA 粉体と、再沈殿後に減圧乾燥を行った PLA 粉体について、TG/DTA 測定を行った結果を図 3-10 および図 3-11 に示す。

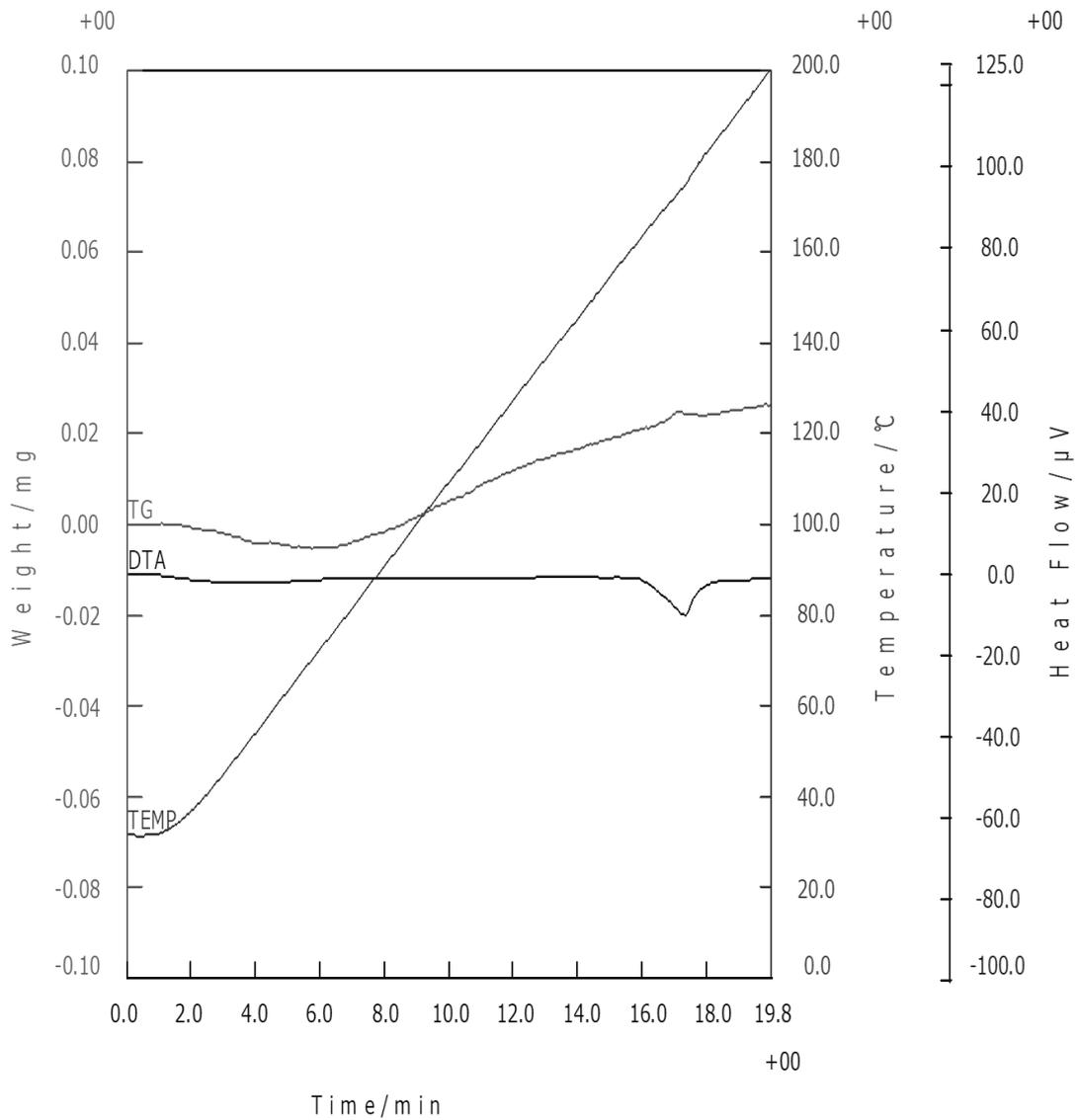


図 3-10 再沈殿後の PLA 粉体

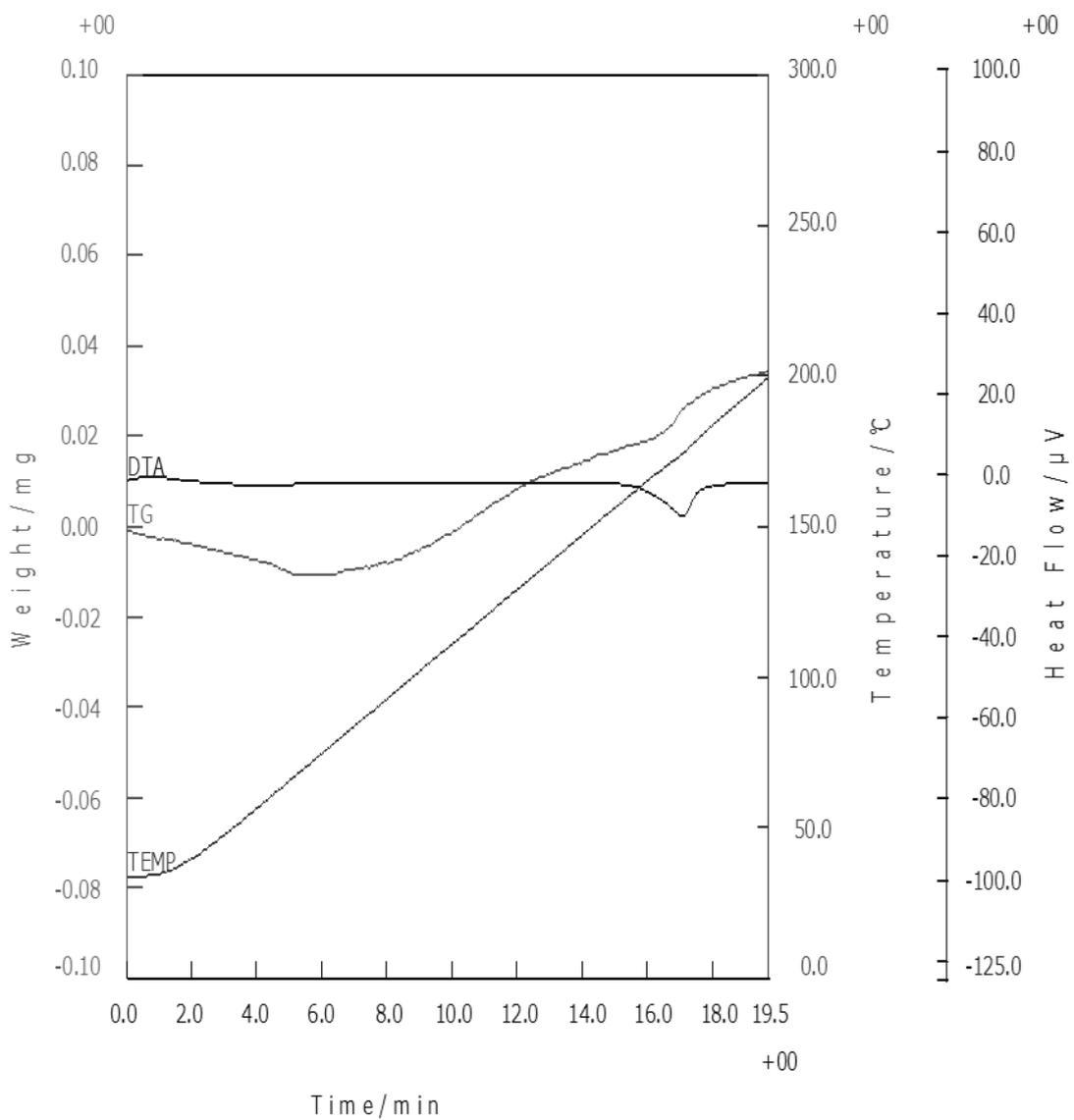


図 3-11 再沈殿後に減圧乾燥

減圧乾燥の有・無で、試料間に顕著な差は認められなかった。この結果から、フィルム化の際の気泡は、残存溶媒以外の原因が考えられた。

3-2-4. 再沈殿の検討

フィルムを作製したときに気泡が入るため、再沈殿のやり方の変更を試みた。PHBHと同様に（2章参照）、溶媒に溶解させたPLAの中にメタノールを入れて、固まったものを回収するやり方を行った。回収したPLA粉体をプレスしたところ、図のような気泡が入っていないフィルムの作製に成功した。



図 3-12 プレス後の PLA フィルム（上；現行条件の数日放置後、下；新規条件）

現行条件の数日放置後のフィルムと再沈殿のやり方を変更した新規条件で得られたフィルムについて、引張試験を行い物性試験による評価を行った。結果を以下に示す。

表 3-5 引張試験結果

サンプル	試験力 N/mm ²
現行条件の 数日放置後	2147.6
新規条件	2274.5

引張試験の結果、新規条件の引張強度は、現行条件の引張強度と近い値が得られた。このことから、再沈殿のやり方を変えた新規条件では、透明なフィルムであり、また引張試験の値も現行条件と近いいため、以後はこの新規再沈殿法を用いることとした。

3-2-6. 消費エネルギー及びコスト試算

最適化された条件に基づいて、プロセス化を行った際の消費エネルギー及びコストの試算を行うことを目指した。前年度までに粉体酸化について下記のように試算している。

粉体処理装置を基準として、使用機器全ての電力量を以下のように求めた。

LED ランプ : 光量 5 mW/cm² で 100 cm² の面積に対して 10 分間の光照射に係るエネルギー E₁ は、 $E_1 (J) = 5 \times 100 \div 1000 \times 10 \times 60 = 300$

回転装置 : 回転速度 15 rpm で 10 分間行った場合のエネルギー E₂ は、 $E_2 (J) = 7 \times 10 \times 60 = 4,200$

空気ポンプ : 流量 1 mL/min で 10 分間行った場合のエネルギー E₃ は、 $E_3 (J) = 1.25 \div 1000 \times 10 \times 60 = 0.75$

以上のエネルギー（合計 4,500 J）で 10 g の粉体が処理可能であることから、単位重

量辺りとするると、450 kJ/kg となる。

また、本年度の結果から酸化は PHBH のみでよく全体の 1%が酸化 PHBH とすると、PLA-PHBH ブレンドフィルム作製に必要な酸化に係るエネルギーは、4.5 kJ/kg となる。一方で、混練に係るエネルギーを試算する必要がある、次年度への課題とした。また、コスト試算についても全エネルギーの試算後に行うのが最適と考え、次年度に検討することとした。

3-2-7. まとめ

PHBH のみに酸化を加えたサンプルにおいて、強度を維持したままでの引っ張り伸びの大幅な増大が見られたことから、PLA/酸化 PHBH をマスターバッチとした新たなブレンド系にて評価を行った。PHBH の酸化についてはその酸化度を制御することに成功したものの、必要な酸化 PHBH 量の算出には至っておらず、より詳細な検討が今後必要となる。また、ブレンドフィルムの有用性を示す目的で、各種物性測定や生分解性評価を行う必要があるため、本年度はその評価系の確立に取り組み、簡易な評価法を見出した。次年度にこれら評価系に基づき、生分解性評価を行なうとともに、その他物性についても評価を行う。生分解性という新たな評価を取り入れ、既存製品に対する優位性を示せる可能性が示されたものの、現在日本国内での生分解性プラスチックへの需要は低い。一般家庭でのコンポスト処理も普及していないことから、欧州などへの製品展開も視野に入れる必要があると考えられる。

第四章 LCA の検証・評価（（大）大阪大学）

本事業で技術開発する PLA ブレンドフィルムについて、ライフサイクルを考慮した CO₂ 排出量を（１）（２）で得られるデータ、知見を踏まえて定量評価を実施し、従来フィルムのライフサイクルにおける CO₂ 排出量との比較から PLA ブレンドフィルムによる CO₂ 排出削減効果を検証・評価した。今年度は、昨年度実施した PLA の GHG 排出量の精査、各種バイオマス樹脂の GHG 排出量調査、PBS,PHBH ブレンドフィルムの LCA、ベースラインのマテリアルリサイクルも考慮した対象システムの GHG 排出量に及ぼす影響を検討した。

なお、本業務の実施に当たっては、環境省の承諾を得た上で、一般社団法人サステナブル経営推進機構（SuMPO）に再委任した。

概 要

「PLA ブレンドフィルム」の CO₂削減量について LCA 手法を用いて評価した。

2019 年度には、PLA の文献調査および GHG 排出量をシナリオ別に試算し、ベースラインとなる PE,PP 樹脂のサーマルリサイクル時の有効利用率に着目して、対象とするシステム全体の GHG 排出量を試算した。

2020 年度には、昨年度実施した PLA の GHG 排出量の精査、各種バイオマス樹脂の GHG 排出量調査、PBS,PHBH ブレンドフィルムの LCA、ベースラインのマテリアルリサイクルも考慮した対象システムの GHG 排出量に及ぼす影響を検討した。

その結果、以下の成果が得られた。

- (1) バイオプラスチックの GHG 排出量は炭素吸収を含む場合が多いので、設定したシステム境界に適したデータを選定することが必要である。
- (2) 基材候補である PBS、PHBH の GHG 排出量は、文献調査の結果 PLA のそれより大きい。
- (3) ベースラインの PE,PP 樹脂が、産業廃棄物からそれぞれ 10,20%の再生樹脂がマテリアルリサイクルされ、残りがサーマルリサイクルされた条件で機能単位を設定した結果、PLA ブレンドフィルムの GHG 排出量は ベースラインのフィルムが燃焼される条件では小さく、CO₂削減能力が大きい。

今後、以下を明確にしていくことが必要である。

- ・ 開発品のマテリアルリサイクルの可能性を把握した GHG 削減効果の定量化
- ・ エネルギー起因以外の GHG 排出や水消費などの環境フットプリントの検討
- ・ 実際の加工時のエネルギー消費を含めたデータの高精度化させた LCA の実施
- ・ マテリアルリサイクル以外のリサイクルの代替プロセスの検討
- ・ 日本のプラスチックリサイクル状況を反映した LCA の実施

そのため、上記のデータやプロセスをより高精度化して分析することが重要となる。さらに、具体的な用途に対応した LCA 検討が必要である。

――

本報告書では、温室効果ガスに関する略号を以下のように用いる。

GHG (Green House Gas) = CO_{2eq} = CO_{2e} = CO₂ 換算

4-1. 目的

本報告書では、令和2年度「脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業」のうち、「光活性化二酸化塩素を用いた機能改質によるPLAブレンドフィルムの製造」のなかで大阪大学より受託した「リサイクル性を考慮したGHG削減効果、事業性のライフサイクル評価」について報告する。

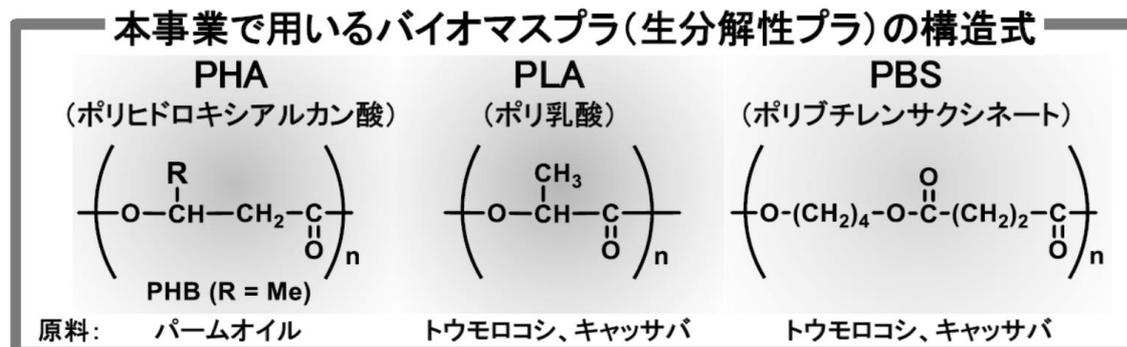
具体的には、「PLAブレンドフィルムの製造」におけるCO₂削減効果をライフサイクルアセスメント（LCA）手法を用いて、算定することを目的とする。この検討結果は、次年度以降開発されるブレンドフィルムの温室効果ガス排出量の削減量の具体的な目標の指針となるため、重要な検討と考える。

本報告書では、温室効果ガス排出量について、事業で用いる下記のバイオマスプラを用いたフィルムと現在供用されているPE（ポリエチレン）やPP（ポリエチレン）との比較検討を行う。

特に、PLA（ポリ乳酸）は、現在供用されている製品に比べ、①固く脆い、②成型加工性、③耐衝撃性に劣るので、開発製品の特性を見極めながら、ブレンド効果と温室効果ガス排出量を比較し、環境調和型の素材を開発することが重要である。2019年度には、対象システムのGHG排出量に影響を及ぼす要因として、以下を取り上げた。[1]

- ・ PLAのGHG排出量の分析
- ・ ベースラインのサーマルリサイクル

本年度は上記に加え、PLAのGHG排出量の精査、各種バイオマス樹脂のGHG排出量調査、PLAブレンドフィルムのLCA、ベースラインのマテリアルリサイクルも考慮した対象システムのGHG排出量に及ぼす影響を検討する。



*PLAへのPHA、PBSのブレンド比率は10%未満が想定されている。

4-2. 本調査の範囲

図 4-1 に示すプロセスで製造されるブレンドフィルムを対象とする。本年度はブレンド化された開発品に加え、各種バイオマス素材、マテリアルリサイクルを検討対象とする。

なお、PLA へのブレンド比率は 10%未満が想定されている。比較する製品は図 4-2 に示すように、広く汎用フィルムとして利用されている PE または PP と設定し、ベースラインとして比較する。

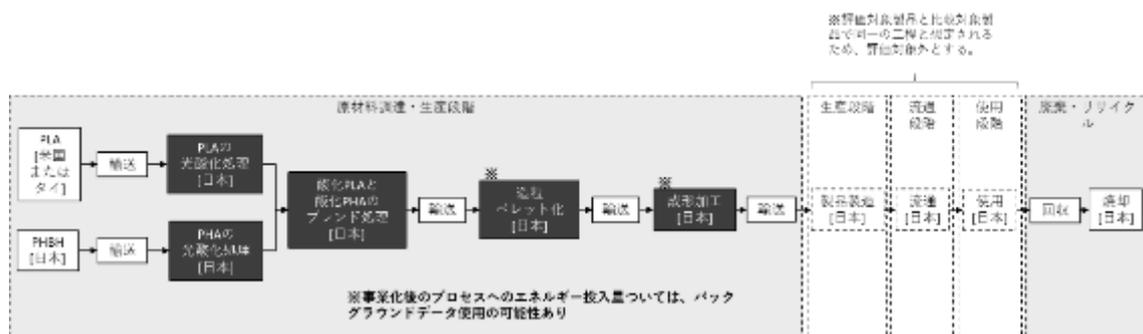


図 4-1 ブレンドフィルム製造のフローとシステム境界

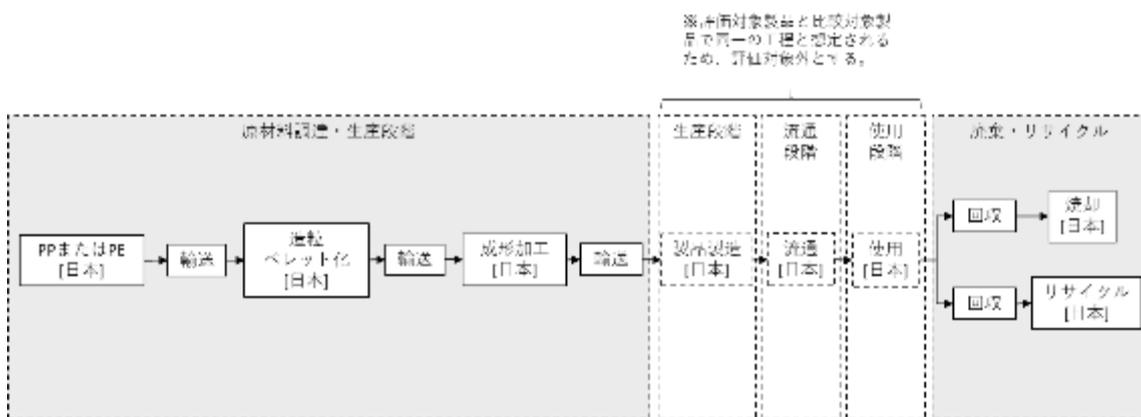


図 4-2 ベースラインのフローとシステム境界

4-3. ベースライン製品の利用状況と機能単位

機能単位を設定するためには、ベースラインとしての PE,PP 樹脂の現状を把握する必要がある。そのため、ベースラインとしての PE,PP 樹脂の需要と供給を明確にすると共に、一部企業で実施されている樹脂リサイクルの事例をまとめる。ベースラインの現状を明確にし、ベースラインの機能単位を設定することで、開発品と公正に比較できる。これらの検討は、実態に即したベースラインのマテリアルリサイクルモデル設定の基礎となる。

4-3-1. PE,PP 樹脂生産と需要

PE 樹脂は「水より軽く（比重<0.94）、電気絶縁性、耐水性、耐薬品性、環境適性に優れるが耐熱性は乏しい。機械的に強靱だが柔らかく低温でももろくならない」樹脂として、包装材（袋、ラップフィルム、食品チューブ用途）、農業用フィルム、電線被覆、牛乳パックの内張りフィルム に利用されている。

PP 樹脂は「低密度ポリエチレンよりやや重い（比重>0.94）が水より軽い。電気絶縁性、耐水性、耐薬品性に優れ、低密度ポリエチレンより耐熱性、剛性が高い。白っぽく不透明」樹脂として、包装材（フィルム、袋、食品容器）、シャンプー・リンス容器、バケツ、ガソリントank、灯油かん、コンテナ、パイプに利用されている。

2020 年の日本経済新聞の記事に基づいてまとめると、価格は以下のとおりである。

2020.12 月現在（日本経済新聞 2020.12.10 付け）

低密度 PE（粒状、フィルム用）200-230 円/kg

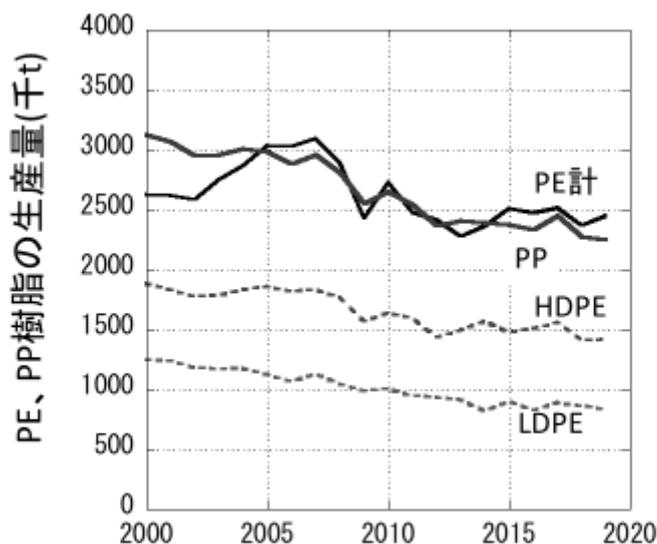
高密度 PE（粒状、フィルム用）190-210 円/kg

PP（粒状、雑貨向け）200-240 円/kg

ナフサ相場の変動が樹脂の国内価格を左右



日本国内での PE,PP 樹脂生産量は図 4-3 に示すように、いずれも 250 万トン程度であるが、年々減少傾向がみられる。[2]

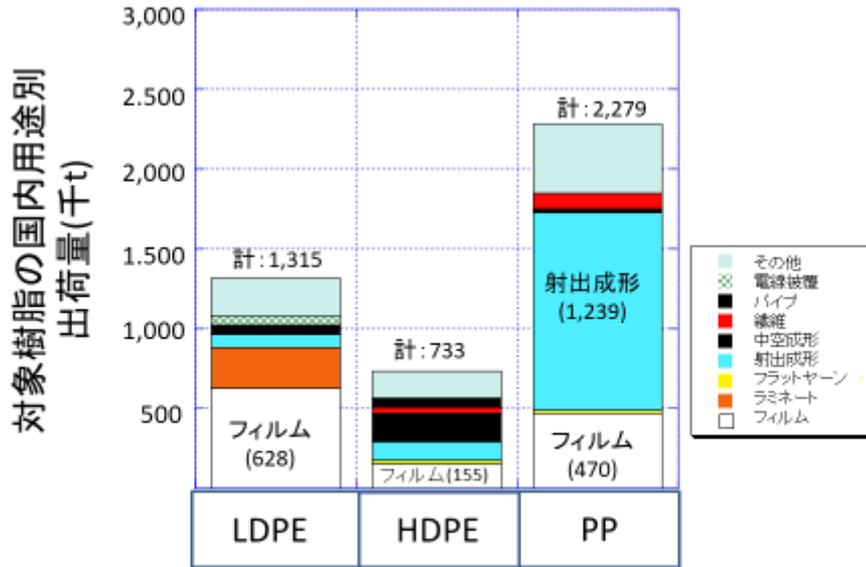


出典：日本プラスチック工業連盟

図 4-3 PE、PP 樹脂の生産量の推移

<国内出荷量と用途>

国内の用途別出荷量は、図 4-4 に示すようにフィルム用途が多い。[3]

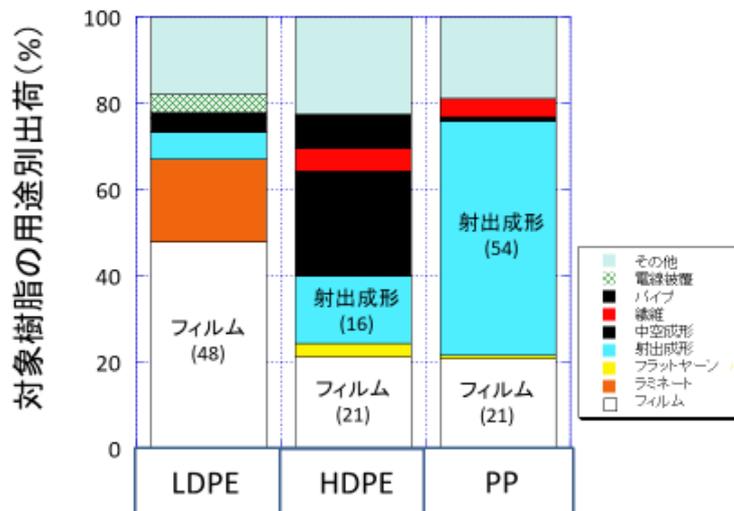


出典:石油化学工業協会

3

図 4-4 各種樹脂の用途別国内用途別出荷量 (2018 年)

図 4-5 に示すように、用途のうちフィルムの比率は LDPE では約半数を占め、HDPE,PP では 20%を占めている。

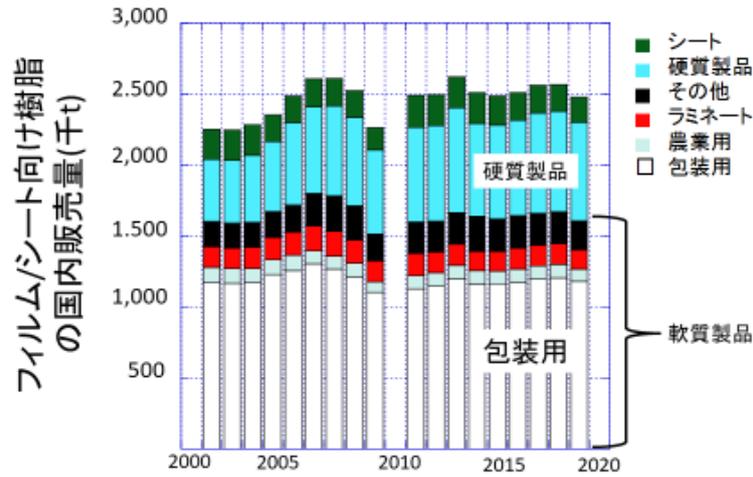


出典:石油化学工業協会

4

図 4-5 対象樹脂の用途別出荷内訳 (2018 年)

フィルム/シート向けの樹脂は、図 4-6 に示すように年間 250 万トンの国内販売量があり、軟質製品としての包装用途がその半数の約 120 万トンと圧倒的に多い。



出典: 日本プラスチック工業連盟

図 4-6 フィルム/シート向け樹脂の国内販売量推移

軟質製品向け販売量のうち、LDPE、HDPE、PP は「84% (=1397/1672)」を占め、その主な用途は「包装用」である。(図 4-7)

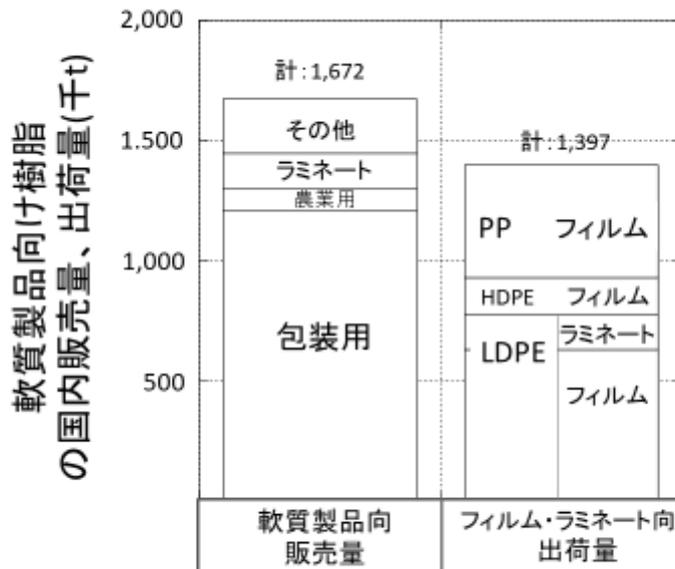


図 4-7 軟質製品樹脂の国内販売量と出荷量の比較(2018年)

上記のように、PE,PP樹脂は日本国内での包装用のフィルムとして大きなシェアを有している。一方で、代表的な包装用フィルムであるPE袋の中国、ベトナムなどからの輸入量は表4-1に示すように、総計で年間50万トンを超えており、表4-2に示す国産品とほぼ同等（約50万トン）レベルにまで増加している。このため、当該樹脂の国内生産量が年々低下しているものと考えられる。

表4-1 PE袋輸入量の年度別推移

■ポリエチレン袋輸入量の年別推移(2015年～2019年)

単位：千トン

	中国	ベトナム	タイ	マレーシア	フィリピン	インドネシア	その他	計
2015年	249.0	75.9	65.5	28.5	15.2	74.4	19.2	527.7
2016年	247.5	91.9	68.5	30.2	15.6	73.5	20.3	547.5
2017年	236.3	116.2	68.1	28.8	15.2	74.6	21.3	560.5
2018年	228.1	146.6	66.7	27.3	16.9	78.9	21.5	586.0
2019年	221.9	159.5	63.7	26.2	18.9	78.4	21.4	590.0

*出所:財務省統計

表4-2 フィルムの出荷状況の推移

【2015～2019年 ポリオレフィンフィルムの年別出荷状況】

区 分	LDPE・LLDPEフィルム				HDPEフィルム					IPP フィルム	合 計
	産業用	ごみ袋	農業用	その他	計	レジ袋	ごみ袋	農業用	産業用その他		
2015年	数 量	177,294	23,155	105,455	305,904	92,133	21,825	69,520	183,478	6,918	496,300
	対前年比	99.4%	91.6%	99.6%	98.8%	96.7%	90.1%	102.5%	98.0%	100.9%	98.5%
2016年	数 量	175,599	22,584	102,349	300,532	89,038	21,371	68,686	179,095	6,896	486,523
	対前年比	99.0%	97.5%	97.1%	98.2%	96.6%	97.9%	98.8%	97.6%	99.7%	98.0%
2017年	数 量	178,602	22,261	104,549	305,412	84,637	20,793	66,816	172,246	6,854	484,512
	対前年比	101.7%	98.6%	102.1%	101.6%	95.1%	97.3%	97.3%	96.2%	99.4%	99.6%
2018年	数 量	188,847	21,604	113,153	323,604	80,308	20,932	67,906	169,146	6,526	499,276
	対前年比	105.7%	97.0%	108.2%	106.0%	94.9%	100.7%	101.6%	98.2%	95.2%	103.0%
2019年	数 量	182,344	21,621	119,367	323,332	77,543	20,335	71,107	168,985	5,997	498,314
	対前年比	96.6%	100.1%	105.5%	99.9%	96.6%	97.1%	104.7%	99.9%	91.9%	99.8%

(注) 1. 出所：日本ポリオレフィンフィルム工業組合
2. 単位：数量：トン 対前年比：%

また、我が国で2020年7月から施行されたレジ袋有料化により需要が低下するので、HDPEの輸入量や輸入単価が低下傾向にあることが、日本経済新聞(2020.12.16付)で示されている(図4-8)。

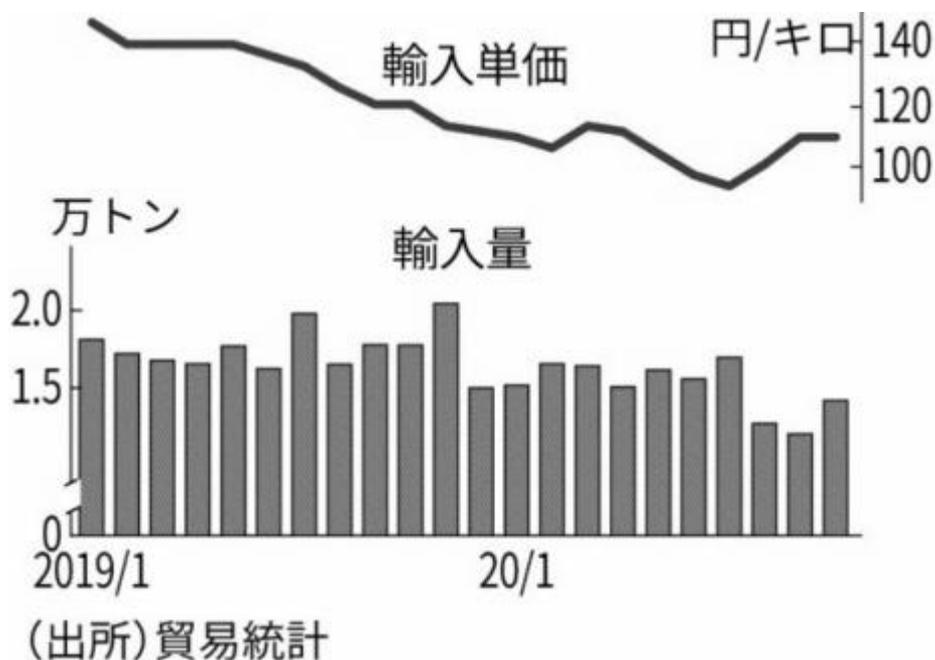


図4-8 HDPEの輸入量の変化

4-3-2. 機能単位設定の考え方

ベースライン製品(部品、素材)の機能単位設定は、次の二つのステップで考えることができる。

第1ステップ) 開発品の適用用途を明確にし、従来材との代替をベースラインと設定する。

第2ステップ) ベースライン素材の需給から、平均的な製品のベースラインを設定する。

一般的に、素材はニーズに対して開発される場合が多いが、新規素材開発には期間がかかるので、シーズ提供となるケースも多い。できるだけ、素材開発と具体的な用途への素材供給とのタイムラグを短縮し、需要先に対応できるような開発が求められる。

現在のバイオマス樹脂の用途として期待されているのは、生分解性の特性を活用できる短期寿命の製品群であるが、リサイクルできない限り大量生産大量消費の供給体制の変化は期待できない。

気候変動を緩和する GHG 排出量削減、資源枯渇を緩和する代替素材利用を推進するには、当面は資源循環によって二つの課題を両立できるかにかかっており、本開発の意義もこの二つの課題の達成にある。

具体的には、各種のリサイクル性を高め、天然資源の投入およびリサイクルに係るエネルギー消費量のいずれをも削減するための道筋を明らかにする機能単位を設定することが要求される。

<開発品の用途と機能単位>

生分解性の特徴を活用するには、寿命が長い製品システムで利用されるバイオマス部品の劣化が懸念されるので、比較的短寿命（～数年以内）の製品が望ましい。ここで、図 3-2 に示した PE,PP 樹脂の用途から、長寿命の製品群を以下に示す。

- ・長寿命部品（10 年程度以上）：射出成形部品

この射出成形部品の一つである自動車用の主要プラスチックは PP であり、バンパー材などとしてリサイクルされているが、残渣としてのシュレッターダストは燃焼され、サーマルリサイクルされる場合が多い。

一方、「包装用フィルム」は用途によっては 1 年以内の短寿命の製品群である。例えば、フィルムなどの包装類には長期耐用性が求められるケースは少ない。本開発では、リサイクル性を考慮しつつ、成型加工性の高い特性が期待されるので、包装用フィルムは生分解性の特徴が活用できる製品の一つであり、使用後放置されても生分解する特性が活用できる。しかし、これら短寿命プラスチック製品の多くは、一般廃棄物として廃棄、回収されるケースが多いので、純度の高い回収品以外は最終的にはサーマルリサイクルしか期待できない可能性が高い。

包装用プラスチックは、各種のリサイクル法が整備され回収・再商品化されている

が、再生品はカスケードリサイクルされ、ベンチやゴミ箱などへのマテリアルリサイクルが多いと推察され、フィルムへのマテリアルを含むリサイクルは明確ではない。

代表的な短寿命製品としての包装フィルムのサーマルリサイクルは 2019 年に取り扱ったので、本年度はベースラインとして、現状のマテリアルリサイクルを反映した LCA を実施する。

次節ではベースライン製品のマテリアルリサイクルの事例として、容器包装リサイクル法、産業廃棄物系のプラスチックのマテリアルリサイクル状況などをまとめ、本年度のベースラインを新たに設定する。

4-3-3. プラスチックのリサイクル状況

(1) 容器包装リサイクル法[4]

平成12年(2000年)4月に全面施行された容器包装リサイクル法は、一般家庭から排出される商品の容器や包装(びん、PETボトル、紙箱、フィルム袋、レジ袋など)を再商品化・リサイクルすることを目的としており、消費者の分別排出、自治体の分別収集、事業者の再商品化・リサイクルの役割分担を定めている。

1994年の法律制定時には、一般廃棄物の最終処分場である埋立地の残余年数が8.5年と予想されていた。家庭ゴミの体積の60%を占める容器包装が法律の対象となり、その後家電リサイクル法、食品リサイクル法、建設リサイクル法、自動車リサイクル法、小型家電リサイクル法が施行されてきた。

容器包装リサイクル法の対象は、一般廃棄物中の家庭系ゴミに含まれる容器包装であり、事業系ゴミは対象に含まれていない。

家庭ゴミ中の容器包装廃棄物は、図4-9に示すようにプラスチック類がほぼ半数を占めており、ベースラインとなるPE,PP等が多く含まれる。[4]

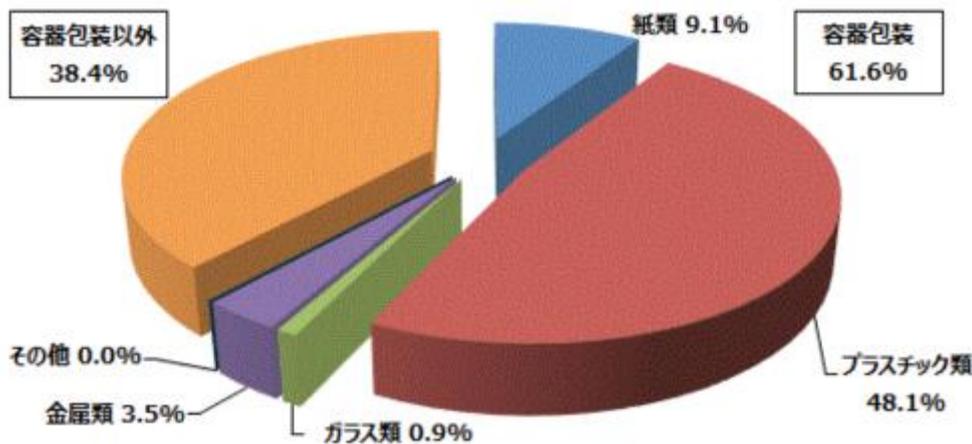


図4-9 家庭ゴミ中の容器包装廃棄物

ここで、プラスチックはPETボトルとプラスチック製容器包装に分けられ、特定事業者には再商品化の義務があるとされている。ここで、再商品化/リサイクル義務を負う事業者は、容器利用事業者、容器製造等事業者、包装利用事業者である。

分別回収しても処理費用を支払わなければ再生処理できないもの(逆有償)を再商

品化・リサイクルするために必要な経費である「実施委託料」は、図 4-10 に示すようにプラスチックでは約 50 円/kg で推移しており、特定事業者が負担した実施委託料の 90%はプラスチックが対象となっている。

落札単価は、図 4-11 に示すように、プラスチックのリサイクル用途により違いはあるが、約 50 円/kg で推移している。

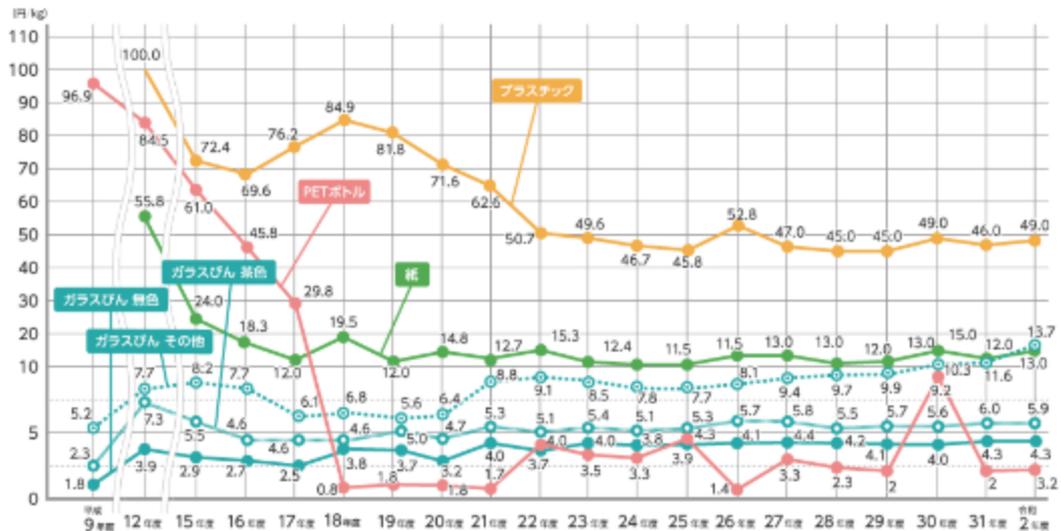


図 4-10 実施委託単価の推移

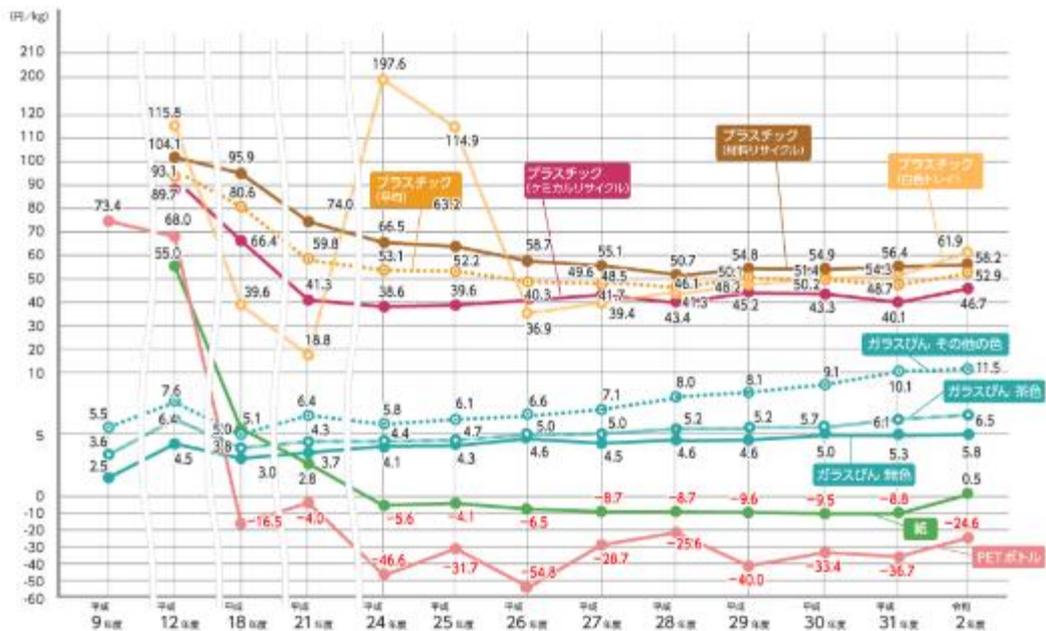


図 4-11 再商品化事業者の落札単価の推移

<プラスチックの再商品化・リサイクル>

容器包装プラスチックの主体である PE,PP をベースラインとして設定したので、その再商品化・リサイクル状況を、日本容器包装リサイクル協会のデータを基に整理する。

容器包装リサイクル協会は、毎年プラスチック製容器包装の処理量、再商品化量などを表 4-3 のようにまとめ、そのリサイクル手法についてもまとめている。

表 4-3 プラスチック製容器包装の処理量、再商品化量まとめ

年度	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20
分別収集計画量 (トン)	239,000	389,000	487,000	487,000	629,000	757,000	724,000	807,000	804,000
再商品化可能量 (トン)	153,000	261,000	336,000	591,000	655,000	776,000	742,000	762,000	1,271,000
特定事業者責任比率 (%)	94%	92%	92%	91%	92%	93%	95%	97%	96%
再商品化義務総量 (トン)	143,820	240,120	309,120	443,170	578,680	704,010	687,800	739,140	771,840
協会の引取契約量 (トン)	106,418	236,444	291,665	367,124	469,150	576,333	593,682	630,466	669,102
協会の引取実績量 (トン)	67,080	168,681	259,669	368,005	446,912	528,528	548,839	581,340	604,486
再商品化製品販売量 (トン)	43,830	118,470	180,162	256,150	309,537	365,924	380,434	381,163	374,590
年度	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
分別収集計画量 (トン)	858,000	935,000	785,000	818,000	846,000	759,000	763,000	770,000	745,000
再商品化可能量 (トン)	1,291,000	1,291,000	1,536,000	1,558,000	1,558,000	1,346,000	1,349,000	1,349,000	1,455,000
特定事業者責任比率 (%)	95%	97%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
再商品化義務総量 (トン)	815,100	906,950	777,150	809,820	837,540	751,410	755,370	762,300	737,550
協会の引取契約量 (トン)	680,020	673,149	678,593	667,038	673,402	670,220	671,918	667,468	665,291
協会の引取実績量 (トン)	617,151	635,398	650,345	651,351	659,169	654,002	663,014	657,264	649,573
再商品化製品販売量 (トン)	393,740	418,681	426,068	434,270	434,035	438,499	443,046	438,658	439,012

この表などから、プラスチック製容器包装からのリサイクル状況の入出力を図 4-12 のように毎年まとめており、この図表を単年度で整理すると、表 4-4 が作成できる。

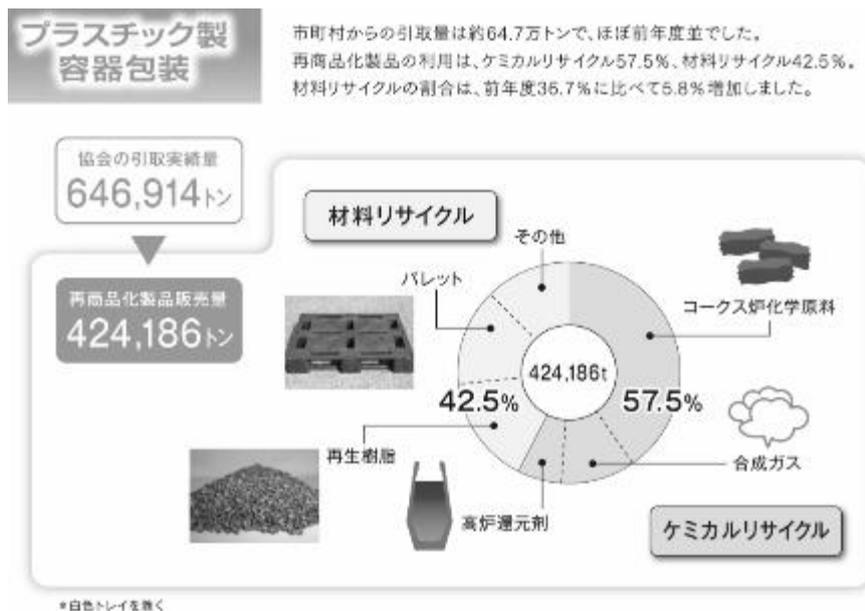


図 4-12 プラスチック製容器包装からのリサイクル状況の入出力（2019 年度）

表 4-4 プラスチック容器包装のフロー（2014 年）

単位：千トン

千トン	家庭から	分別収集	法人引取	再商品化			計
				小計	うちMR	うちCR	
排出量	1,080	727	651	651	334	317	
回収量							
残渣	(差異)	353	76	219	169	50	648
				商品化製品	165	267	432

—	家庭から	分別収集	法人引取	再商品化			計
				小計	うちMR	うちCR	

排出 量 回収 量	1.00	0.67	0.60	0.60	0.31	0.29	
残渣		0.33	0.07	0.20	0.16	0.05	0.60
				商品化製 品	0.15	0.25	0.40

2014年度には、家庭から排出されたプラスチック 1kgのうち、2/3が分別回収され、0.6kgが再商品化の対象となる。2014年のマテリアルリサイクルとケミカルリサイクル（製鉄業での利用主体）はほぼ同量である。この表から、残渣（廃棄物）は0.6kg、再商品化は0.4kgであると推算できる。

<容器包装プラの再商品化フロー>

家庭ゴミから回収され、容器包装リサイクル協会に引き取られた後、再商品化プロセスを経て、各種の再商品にリサイクルされる。以下では、引き取られた後の再商品化プロセスの現状をまとめる。

容器包装リサイクル協会は、毎年年次報告書においてマテリアル、ケミカルリサイクル再商品化の数量を整理し、公表している。2014年までは、マテリアル、ケミカルリサイクルそれぞれの入力（投入量）と出力（再商品化数量）が記載されていたので、再商品化までの歩留まりが算定できる。一方、2015年以降は全体の入力量のみが公表されている。

そこで、2014年度実績の各リサイクルの歩留まりと残渣を集計し、2018年度の利用先についても整理した結果を、図4-13に示す。

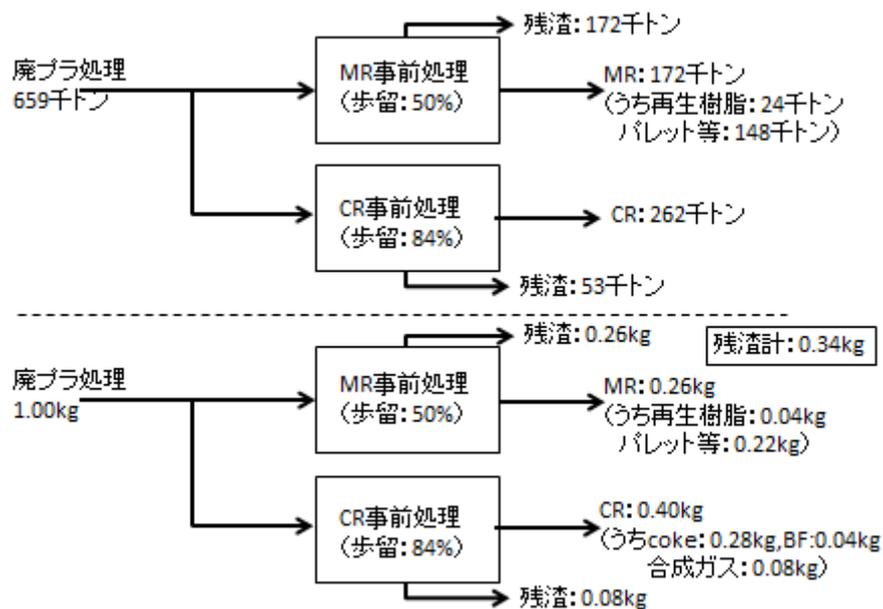


図 4-13 容器包装プラスチックのマテリアルフロー
 ((2014 年度、2018 年度などを参考に作成))

この図の入力（投入物）は容器包装であるので PE,PP でほとんどを占めると考えられる。リサイクル処理された廃プラのうち 34%は残渣となり、残りの 66%がリサイクルされている。この残渣は汚染がひどく再商品化されなかったもので、燃焼処理されていると考えられる。

マテリアルリサイクルは入力 of 26%であり、歩留まりは 50%と低い。これは、利用先である再生ペレットやパレットに利用できないほどの汚染が生じているためと推測される。一方、ケミカルリサイクルは入力 of 40%であり、マテリアルリサイクルより多く利用されている。このときの歩留まりは 84%とマテリアルリサイクルよりも高く、残渣は少ない。これは、コークス炉や高炉への投入、合成ガスの原料として 入力の品質の影響が少ないためと推察される。

我が国のプラスチックフローは、毎年プラスチック処理促進協会が年度毎実集計し、図 4-14 のようにまとめている。[5]この図で、右端に示されている再生樹脂の輸出は約 170 万トンと大きく、国内利用されている再生樹脂は 34 万トンと少ない。この傾向は現在に至るまで大きな変化はない。

マテリアルリサイクルに用いるプラスチックの注意点は以下のように説明されている。[6]

- ・熱、紫外線により劣化するが、新樹脂で劣化の影響を薄めることが可能である。
- ・製造時や使用時に、物理的および化学的作用を受けて物性が低下する。

そのため、経路のわからないポストコンシューマ材の利用は、回収材が異種素材の混合物であり、熱可塑性素材でも相容ではないといわれている。

容り再生材料とバージン樹脂と比較すると、

- ① 物性：分子量低下、熱履歴、樹脂劣化、他樹脂の混入による影響、品質保証できない。
- ② 組成：容り由来の再生材は組成が不明で、物性を改善するための客観的データがなく、廃棄物由来のために、再現性が担保できない。
- ③ 異物混入：バージン材は、ポリマーや添加配合した材料等がすべて把握され、品質規格の前提となる異物混入がない。食品等の付着、吸着は、洗浄だけでは除去できず、非意図的生成物の生成も懸念されるが、実態が分かっていない。

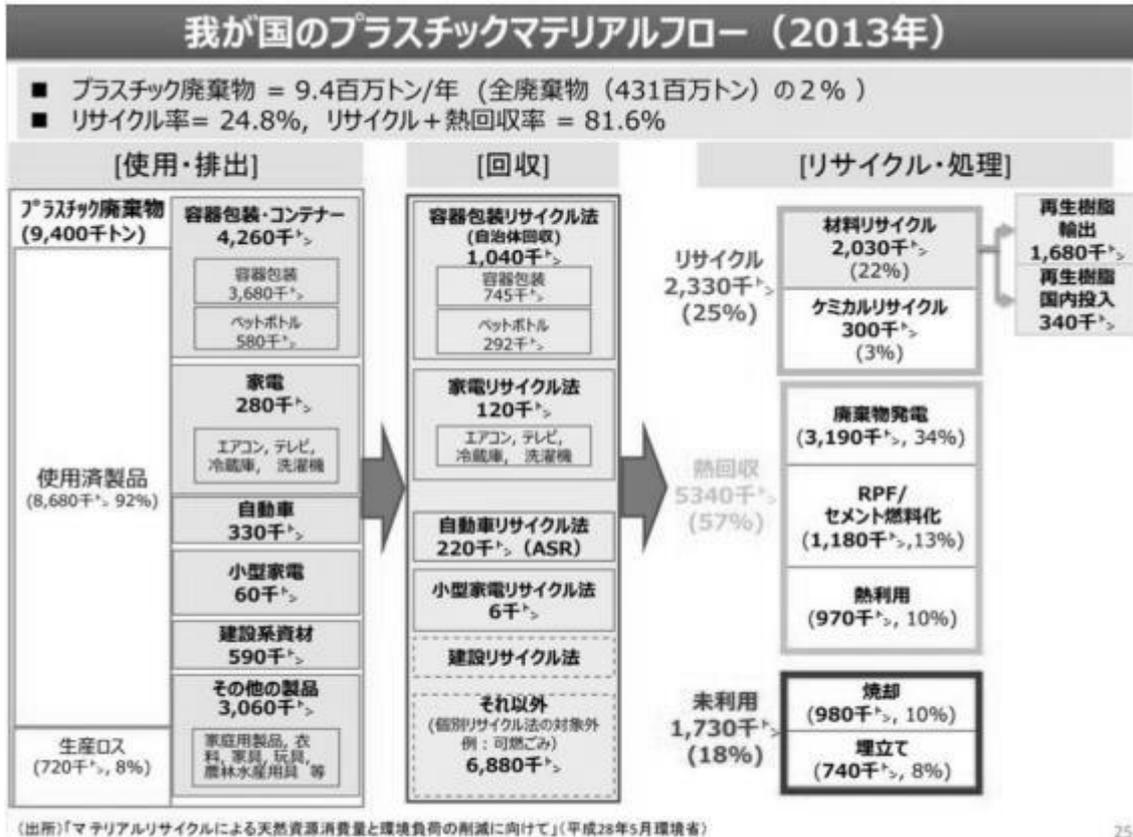


図 3 我が国のプラスチックマテリアルフロー図(2013年)

出所：環境省

図 4-14 我が国のプラスチックフロー（2013年）

輸出、輸入の再生樹脂は、合計で年間約 200 万トンに達するが、容器包装リサイクル法に基づき生産された再生樹脂は、容器包装リサイクル協会の年次報告書では 2 万トンあまりに過ぎない。そのため、再生樹脂の多くは家電リサイクル法、自動車リサイクル法で回収された廃プラを原料にする、または工場から直接排出された産業廃棄物系の廃プラである。

(2) 他のリサイクル法、産業廃棄物系プラスチックのリサイクル状況

プラスチックの排出が予想される対象として、雑貨品は現在では燃えるゴミ（可燃ゴミ）として回収されるのが一般的であるので、家電、自動車が代表的な製品である。さらには、これら製品の生産時の加工ズとして排出される廃プラも想定され、図 4-14 に示したプラスチックフロー中の左端の生産ロス 72 万トンに相当する。

<家電リサイクル法>

家電リサイクル法は 2001 年に施行され、家電製品の処理は大きく変化した。現在では、使用済み家電製品から排出される廃プラスチック量は、家電製品協会が毎年再商品化報告書に公開されており[7]、プラスチック量としては約 15 万トン程度である。家電リサイクル工場では、この再商品化されたペレット原料をバージン樹脂等と混合して、リサイクル使用していることが図 4-15 のように報告されているので、市場に廻る量は少ないと推察される。[8]

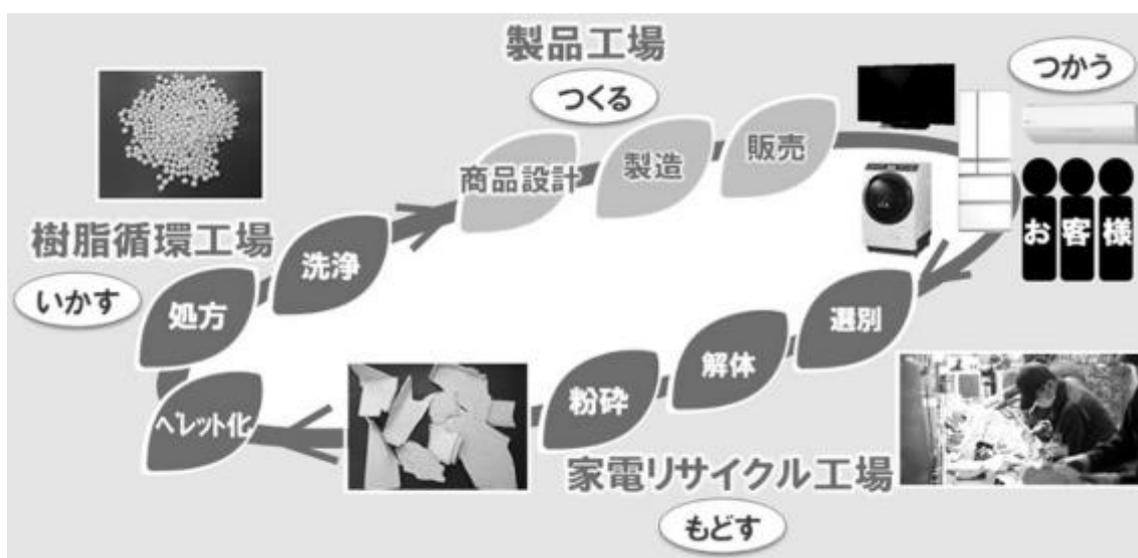


図 4-15 パナソニックの家電リサイクル（再生樹脂原料製造のフロー）

<自動車リサイクル法>

自動車リサイクル法は、2005 年に施行された。施行以前は、国内では年間 400 万台の使用済み自動車解体され、シュレッダー処理されていたので、プラスチックは約 70 万トン発生するシュレッダー屑（ASR）に混入し、埋立て処理されていた。法律の施行により、リサイクル率の目標として 2015 年には車両全体の 95%が設定され、シュレッダーダストの 70%は適正処理またはリサイクルされている。ASR の再資源化率、リサイクル実行率は、図 4-16 に示すように 98-99%にも達している。[9]

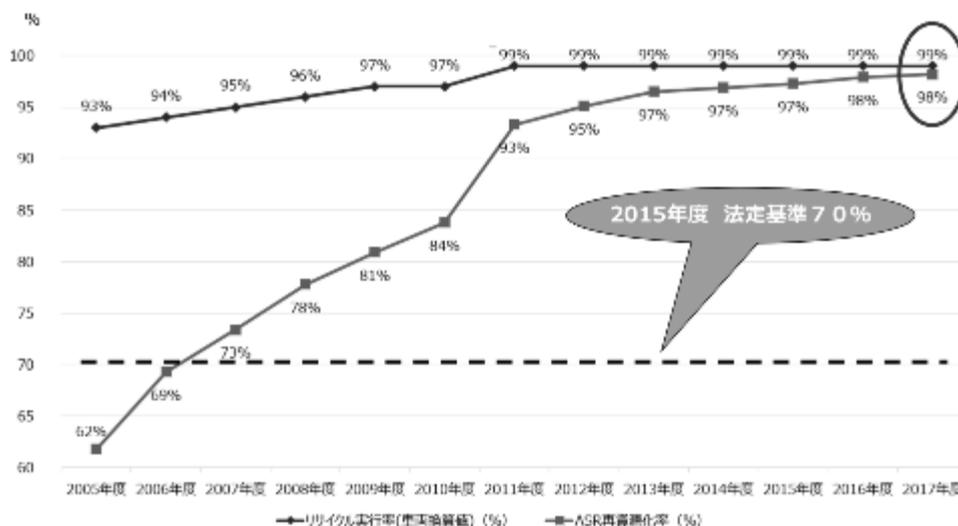


図 4-16 ASR の再資源化率、リサイクル実行率の推移

代表的な四輪自動車メーカーであるトヨタ自動車は、従来から TSOP（トヨタスーパーオレフィンポリマー：PP系樹脂）の拡大を進めていることが、環境報告書などでアピールされ[4]、樹脂バンパーなど外装用途のリサイクル性を高めている。しかし、そのリサイクルには耐衝撃性を確保する重要な部材であるので、品質確保が大きな課題であることも報告されている。つまり、大型部品として取り外せる樹脂にはリサイクルが期待できるが、電線被覆などの量が少ないプラスチックはリサイクルが困難であり、再ペレット化しての使用には、品質確保が欠かせない。

自動車に利用されるプラスチック量は、車両重量の約 7%に相当し、その使用比率は年々高まっている。そのうち、PP,PE 樹脂は約 50%を占めている。破碎処理された ASR 中のプラスチック比率は約 20%に達すると報告されている。70 万トンの ASR に含まれるプラスチック約 15 万トン、熱回収などでサーマルリサイクルされる場合もあるが、マテリアルリサイクルはされていない。

以上のことから、自動車産業から排出される廃プラスチック軽油の再生樹脂は品質に劣る可能性が高く、輸出に廻っていると推測される。

(3) 産業廃棄物系の廃プラスチック

日本産業全体からの生産ロスとしての廃プラスチック量は、年間 70 万トン排出されている。この産業廃棄物は、各種成形時のロス、各産業内での利用で汚染が少ない

などの理由で 再ペレット化しての利用が可能である。

市場には、図 4-17 に示すフレークや再生ペレットが販売されている。[10]

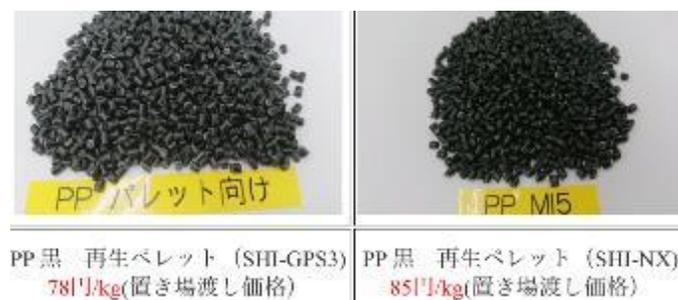
図には、トヨタ自動車採用している TSOP (PP 系樹脂) の加工屑も出回っている。

その価格は、図 4-18 に示すように市場価格の半値程度の 100 円未満で、品質が高くないペレットも含まれている。

また、図 4-19 に示す再生ポリエチレン袋として販売されている事例も多く、非食品用の袋としての利用が可能である。この袋には、エコマークが貼付されていることから分かるように再生材が 40%利用されており、厚みが通常の袋の 20 μ m よりも厚いことが特徴である。[11,12]



図 4-17 フレークや再生ペレットの販売事例



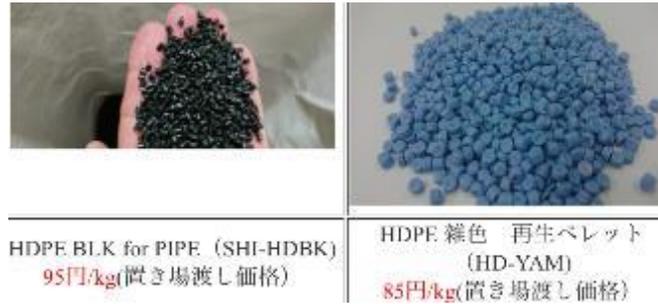


図 4-18 再生ペレットの販売価格事例

LR23 環境袋策 再生原料ポリ 20L 透明 10枚
<再生原料+LLDPE>

品番	色	厚み	サイズ	入数	JAN
LR23	透明	0.030mm	520×600mm	10枚×30冊	213235

再生プラスチック
40%

図 4-19 再生樹脂を利用したポリ袋（非食品用）の事例

これらは、工場での産業廃棄物として排出された 比較的高品質の原料を利用して いると推察でき、樹脂メーカーが原料調達している。いずれの樹脂メーカーも産業廃 棄物としての廃プラに限定して購入されているのが現状である。そのリサイクル手法 を図 4-20 に示す。この図では、PE,PP の産業廃棄物を対象に前処理し、その後再ペレ ット化している。

このように、食品を含む産業向けのフィルムに 各種リサイクル法の下で回収され た原料から再生樹脂を利用することは困難で、各種リサイクル法で製造されるペレッ トはフィルム原料には適用されていない。ベースラインとなる PE,PP にマテリアルリ サイクルされる原料は産業廃棄物である。

透明フィルムPE(ポリエチレン)、PPバンド(ポリプロピレン)・色付フィルムリサイクルの流れ

透明フィルムPE (ポリエチレン)、PP (ポリプロピレン) バンド・色付フィルムの入荷から出荷までは、このようにして行われます。

透明フィルムPE (ポリエチレン) リサイクルの流れ



PPバンド (ポリプロピレン) ・色付フィルムリサイクルの流れ

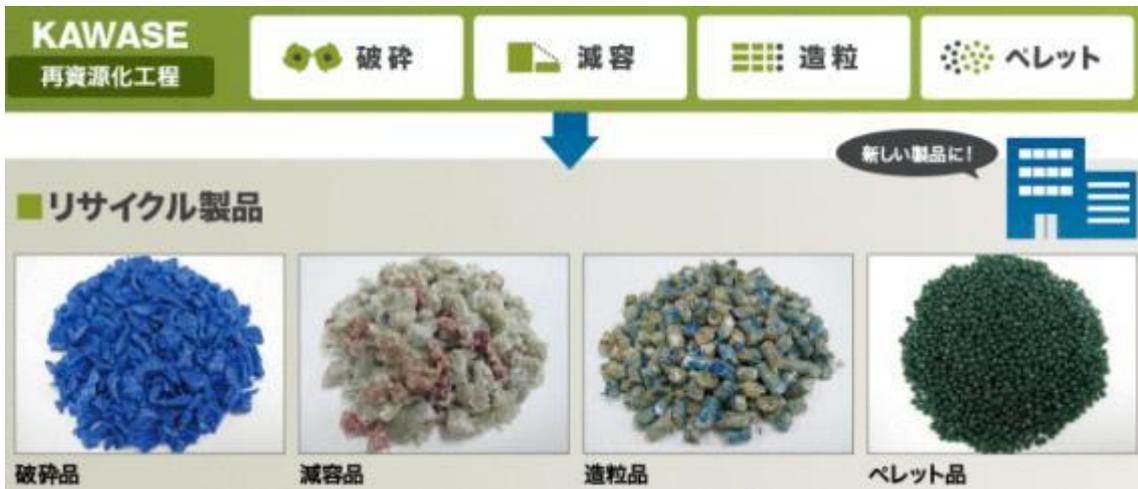


図 4-20 産業廃棄物系原料の受け入れから再ペレット化までの工程[13]

4-3-4. ベースラインのマテリアルリサイクル

前節で産業廃棄物からのマテリアルリサイクルが進んでいる状況をまとめた。2019年度の報告では、マテリアルリサイクルが進んでいない状況を前提にベースラインを設定し、サーマルリサイクルに注目した。本節では、ベースラインのマテリアルリサイクルを種々の情報から整理し、ベースラインの設定を見直す。

(1) 環境省の推算（素材別リサイクル戦略マップ） [14]

環境省は、平成 28 年 3 月の「低炭素型 3R 技術・システムの社会実装に向けた素材別リサイクル戦略マップ検討会」において、廃プラスチックの排出および利用状況を各種の製品に着目して整理しており、プラスチックに関して以下のようにまとめている。

<再生樹脂の利用>

- ・ PE、PP が混合した PO（ポリオレフィン）樹脂については、容器包装プラスチックの主たる回収物であり、パレットや土木資材へのリサイクル利用が進んでいる。
- ・ 再生プラスチックの利用側（メーカー）から見た再生プラスチック利用の際のボトルネックとしては、再生プラスチックの有する「不安定な供給」「高コスト」「不安定な品質」といった課題が指摘される。
- ・ 品質の観点から、メーカーにとっては、再生プラスチックであってもバージン材と同等の品質要求をクリアする必要がある。一方で再生プラスチックは原料である廃プラスチックの品質のバラツキや混入などの課題があり、バージン材と比べて品質管理によるコストアップが発生する。投入原料の性状が安定しないため一定品質を維持することがバージン材よりも困難等の課題が存在する。

一方、排出側のポテンシャルを以下のようにまとめている。

<容器包装>

- ・ プラスチック製容器包装（容器包装リサイクル法対象外も含む。PET ボトルを除く）は、排出量が 370 万トン（全排出量の約 40%）と大きく、一方で現行の容器包装リサイクル法に基づく回収スキームでは一定量（約 70 万トン（PET ボトル除く。))の回収に留まっており、量的な回収・リサイクルポテンシャルが大きい分野である。
- ・ 材質は PE、PP が多く、軟質系と硬質系に大別される。硬質系は単一樹脂化による

マテリアルリサイクルに適しているが、軟質系は複層樹脂が多く単一樹脂化は困難である。また、異物等もあり、品質的な制約から、PP と PE の混合物である PO (ポリオレフィン樹脂) としてのカスケードリサイクルが中心であり、単一樹脂化等による同一グレードでのリサイクルは十分に実施されていない状況にある。

<家電>

- ・家電四品目については、家電リサイクル法に基づく小売店・家電メーカーの回収・リサイクルシステムが確立されており、マテリアルリサイクルに回るプラスチック量で約 10 万トンと一定のボリューム感があり、比較的安定的な供給が可能である。
- ・材質は PP、PS、ABS などが中心であり、単一樹脂の大物部材など手選別した廃プラスチックは単一樹脂としてリサイクルが可能である。

<自動車>

- ・自動車については、自動車リサイクル法に基づく強固な回収・リサイクルシステムが確立されている。使用済自動車に使用されるプラスチック量も約 32 万トンあり、その半分以上が PP である。一方、解体事業者や破砕業者での選別も一部なされているが、解体・選別のインセンティブが働きにくく多くは ASR (約 22 万トン) となっている。

<建材>

- ・解体工事等の際に発生する建材等に用いられている PVC などのプラスチックは、年間で 59 万トンの排出量がある。

上記のうち、PE,PP が関連する部分は、以下のとおりである。

容器包装⇒パレットなどにオープンリサイクルされる。(カスケードリサイクル)

特に、フィルムの軟質系は複層樹脂が多く単一樹脂化は困難。

再生材の不採用理由⇒品質のバラツキや混入などの課題があり、

一定品質を維持することが困難。

<生産・加工くず>

- ・生産・加工くずは高品質であるが、生産・加工工程の歩留まり向上により発生量は減少傾向にある。成形メーカーの一部を除けば、その多くが輸出されていると見られる。

このように、前節で提案した産業廃棄物からの再ペレット化は記載されていない。

(2) プラスチック処理促進協会データからマテリアルリサイクル率の設定

プラスチック処理促進協会は、毎年「プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分のマテリアルフロー図」を公表している[5]。(図 4-21)

その中で、廃プラスチックの素材別内訳、マテリアルリサイクルの素材別内訳を図 4-22 のように示している。この両者（排出とリサイクル）の関係から、PE および PP の平均的なマテリアルリサイクル率を設定する。この値は PE,PP の用途を限定していないので、フィルムやパレットなどを含むそれぞれのプラスチック製品の平均的なリサイクル率ととらえることができる。

図 4-23 には PE, 図 4-24 には PP の毎年の排出量とマテリアルリサイクル量の関係を示す。この図から、PE では 200 年以來大きな変動はなく約 10%、PP では近年上昇し 20%が、マテリアルリサイクルに利用されていると推察できる。

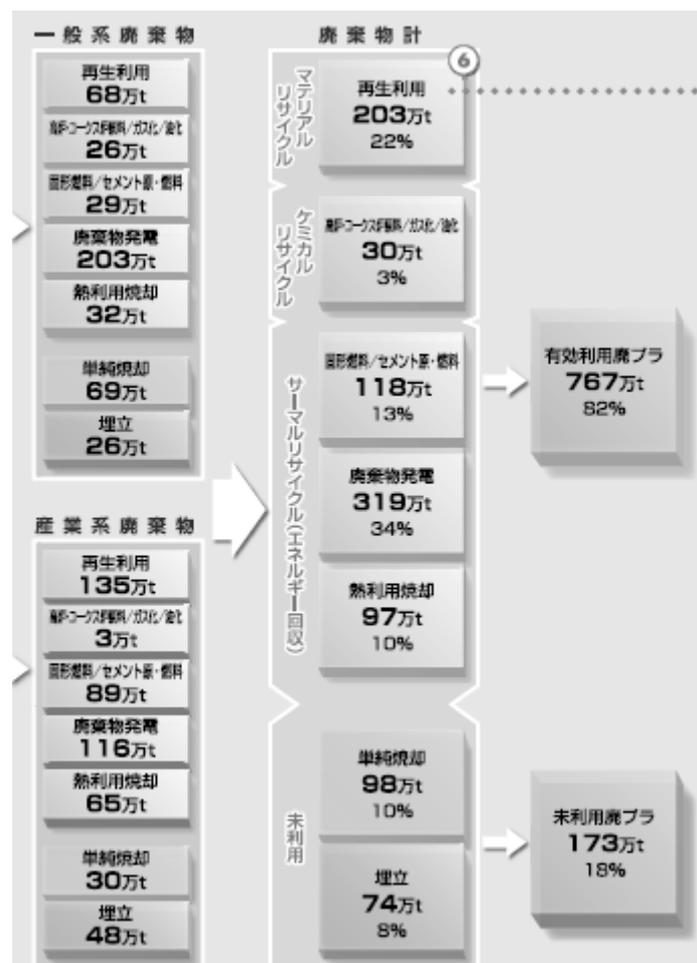
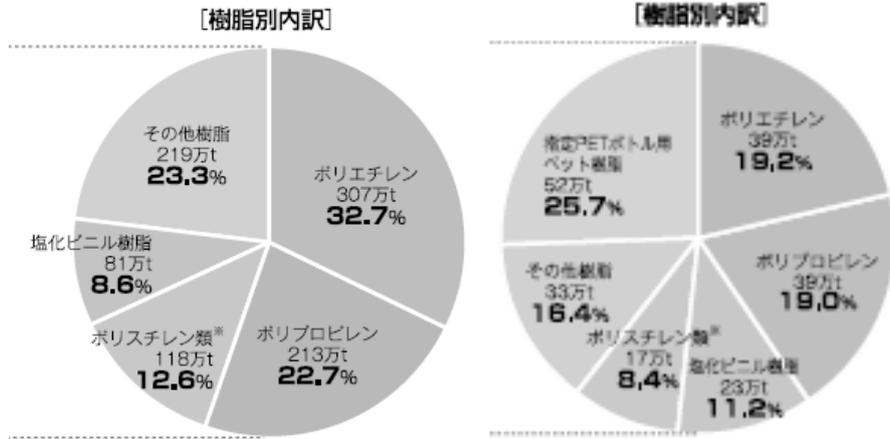


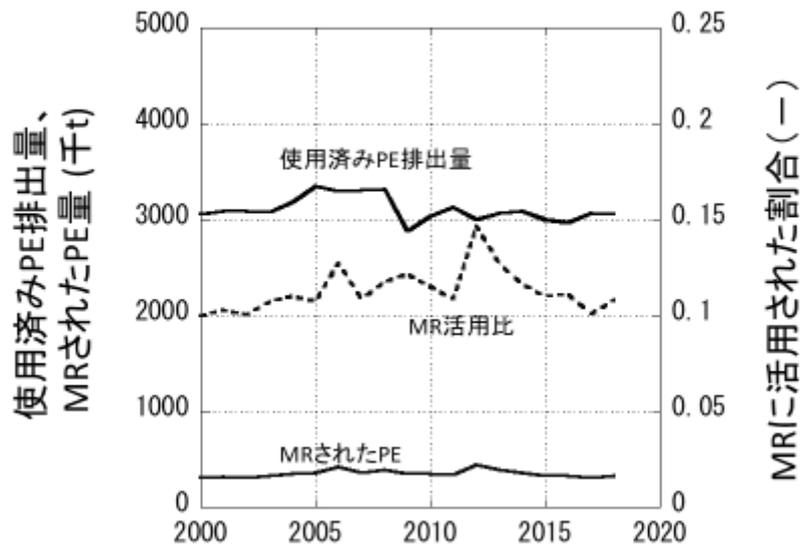
図 4-21 プラスチックのマテリアルフロー図 (2013 年)



(1) 廃プラスチック排出量の内訳

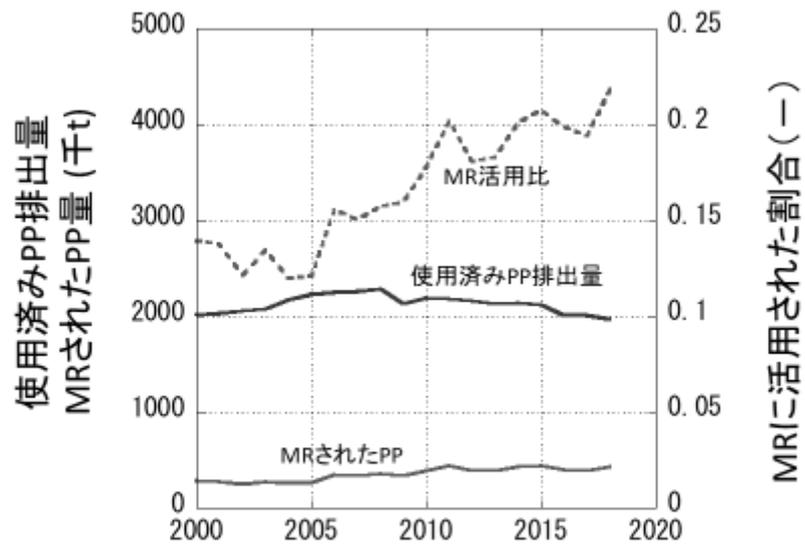
(2) マテリアルリサイクル量の内訳

図 4-22 マテリアルリサイクル率の設定根拠



出典：プラスチック処理促進協会

図 4-23 PE樹脂の排出量とマテリアルリサイクル (MR) 量の関係



出典:プラスチック処理促進協会

図 4-24 PP樹脂の排出量とマテリアルリサイクル (MR) 量の関係

(3) PE,PP 樹脂の再ペレット化

産業廃棄物からの再生ペレット製造のインベントリデータは、カーボンフットプリント (CFP) として、GHG 排出量が公開されている。CFP は、企業が自主的に環境情報を開示することによって、製品の環境面での優位性をアピールする事を目的としている。CFP は、産業環境管理協会（現在は、サステナブル経営推進機構）がデータを検証した上で公開されているので、信頼性の高いデータである。

<全日本プラスチックリサイクル工業会>[15]

同工業会は 2015 年に日本プラスチック有効利用協会と共同で、産廃系プラスチックを主原料とするリサイクル率 100%の再生 PE ペレット、再生 PP ペレットの GHG 排出量を、それぞれ表 4-5、4-6 のカーボンフットプリント情報として公開している。

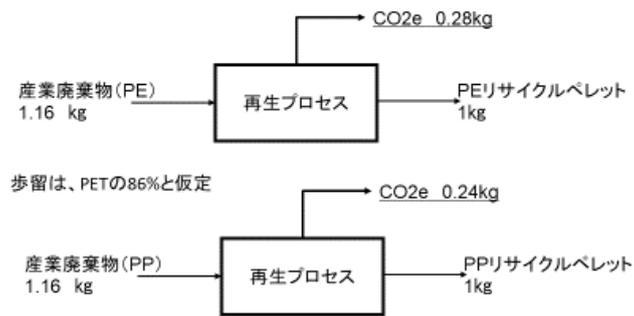
[15]

これらの表から、再生ペレット製造までに以下の GHG が排出される。再生ペレット化には主に電力が使用されると想定されるので、IDEA から引用した電力の CO₂ 排出原単位である 0.58kg-CO₂e/kWh を用いて、電力消費量に換算する。

再生 PE ペレット（産廃系原料 100%）：0.28kg-CO₂/kg ⇒0.48kWh/kg

再生 PP ペレット（産廃系原料 100%）：0.24kg-CO₂/kg ⇒0.41kWh/kg

しかし、この公開データのみからでは入力される産廃系プラスチックの消費量が不明で、歩留まりが把握できない。そのため、使用済み PET ボトルからの再生 PET ペレット製造までの歩留まりである 86%を採用する。PET ボトルは市場から回収されるが、高度の純度で回収されているので、産廃からのペレット製造の品位と同様と設定することは妥当と考えられる。このデータを図 4-25 に示す。



出典:CFP公開データ
全日本プラスチックリサイクル工業会 および
日本プラスチック有効利用組合の工業会平均値(2015年)

図 4-25 産業系プラを主要材料としたリサイクル率 100%のペレット製造データ

表 4-5 産廃系プラスチックを主原料とするリサイクル率 100%の
再生 PE ペレットのカーボンフットプリント情報[15]

カーボンフットプリント 登録情報



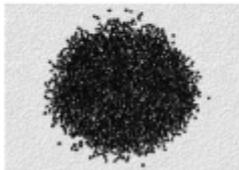
1. 製品情報			
1.1	登録番号	CR-EF01-15001	1.7 製品写真
1.2	製品名称 (日本語)	ポリエチレン リサイクルペレット100 JPRA/NPY	
	製品名称 (英語)	Polyethylene, 100% recycled resin JPRA&NPY	
1.3	製品型式	-	
1.4	製品の主要仕様・諸元	産業系廃プラスチックを主要材料としたリサイクル率100%のポリエチレンペレット	
1.5	CFP算定単位	1kgあたり	
1.6	公開日	2015年10月9日	
2. 事業者情報			
2.1	事業者名 (日本語)	全日本プラスチックリサイクル工業会 / 日本プラスチック有効利用組合	
	事業者名 (英語)	Japan Plastic Recycle Association / Japan Plastic Recycle & Development Association	
2.2	電話番号	03-6855-9174	
3. CFP算定結果およびCFP宣言の内容			
3.1	CFP算定結果 (カーボンフットプリント)	0.28	kg-CO ₂ e (個数処理により左記の値は内訳の合計値と若干異なる場合があります)
3.2	内訳 (ライフサイクル段階別、プロセス別、フロー別、等)		
	原材料調達段階	0.053	kg-CO ₂ e
	生産段階	0.22	kg-CO ₂ e
	流通段階	-	kg-CO ₂ e
	使用・維持管理段階	-	kg-CO ₂ e
	廃棄・リサイクル段階	-	kg-CO ₂ e
3.3	数値表示、追加情報の内容		
	数値表示	<記載内容> 0.28	<数値表示の単位> 製品 1 kgあたり
	追加情報の記載内容	<p>このカーボンフットプリントは全日本プラスチックリサイクル工業会 および日本プラスチック有効利用組合の工業会平均値です。</p> 	
3.4	備考	原料プラスチックの材質：ポリエチレン このカーボンフットプリントを表示できるのは、全日本プラスチックリサイクル工業会 および日本プラスチック有効利用組合の会員企業に限ります。	

表 4-6 産廃系プラスチックを主原料とするリサイクル率 100%の
再生 PP ペレットのカーボンフットプリント情報[15]

カーボンフットプリント 登録情報



1. 製品情報			
1.1	登録番号	CR-EF01-15002	1.7 製品写真
1.2	製品名称 (日本語)	ポリプロピレン リサイクルペレット100 JPRA/NPY	
	製品名称 (英語)	Polypropylene, 100% recycled resin JPRA&NPY	
1.3	製品型式	-	
1.4	製品の主要仕様・語元	産廃系プラスチックを主要材料としたリサイクル率100%のポリプロピレンペレット	
1.5	CFP算定単位	1kgあたり	
1.6	公開日	2015年10月9日	
2. 事業者情報			
2.1	事業者名 (日本語)	全日本プラスチックリサイクル工業会 / 日本プラスチック有効利用組合	
	事業者名 (英語)	Japan Plastic Recycle Association / Japan Plastic Recycle & Development Association	
2.2	電話番号	03-6855-9174	
3. CFP算定結果およびCFP宣言の内容			
3.1	CFP算定結果 (カーボンフットプリント)	0,24	kg-CO ₂ e (銷毀処理により左記の値は内訳の合計値と若干異なる場合があります)
3.2	内訳 (ライフサイクル段階別、プロセス別、フロー別、等)		
	原材料調達段階	0,041	kg-CO ₂ e
	生産段階	0,20	kg-CO ₂ e
	流通段階	-	kg-CO ₂ e
	使用・維持管理段階	-	kg-CO ₂ e
	廃棄・リサイクル段階	-	kg-CO ₂ e
3.3	数値表示、追加情報の内容		
	数値表示	<記載内容> 0,24	<数値表示の単位> 製品 1 kgあたり
	追加情報の 記載内容	<p>このカーボンフットプリントは全日本プラスチックリサイクル工業会 および日本プラスチック有効利用組合の工業会平均値です。</p> <p style="text-align: right;">原材料調達 段階 17%</p> <p style="text-align: left;">生産段階 83%</p>	
3.4	備考	原料プラスチックの材質：ポリプロピレン このカーボンフットプリントを表示できるのは、全日本プラスチックリサイクル工業会 および日本プラスチック有効利用組合の会員企業に限ります。	

<その他情報>

再生ペレット製造社である「エム・エム・プラスチック」は、2014年に、再商品化製品として再生PEペレットなどのCFPを図4-26のように公開していた。(現在は公開終了) この原料は再商品化であるので、容器包装リサイクル法または家電リサイクル法からの再生であり、先に示した産廃系プラスチックからの再生ペレットよりも大きなGHG排出量(0.96kg-CO₂e/kg-PE)が表示されている。[16]

その後、2015年に全日本プラスチックリサイクル工業会から、産廃系原料の再生ペレットのCFP情報が公開されている。本報告書では、図4-26のデータは利用しない。



図 4-26 再商品化製品として再生PEペレットなどのCFP公開(2014年)

4-3-5. 機能単位の設定

LCA の事前準備として、どのような機能と数量の前提条件で環境側面を評価するか「機能単位」の設定が重要である。特に、本開発ではベースラインと GHG 排出量を比較し その削減効果を明確にすることが求められている。

先述の基本的な考え方で示したように、フィルムのサーマルリサイクルは 2019 年に取り扱ったので、本年度はベースラインとしてフィルムのマテリアルリサイクルも検討できる製品群を象とする。具体的には、PE,PP フィルムの需給面から、産廃系のマテリアルリサイクルを選定する。

また、マテリアルリサイクル率は 3-4 節で示した「PE : 10%、PP : 20%」と設定することが適切である。

本年度は具体的なマテリアルリサイクル適用事例を検討するので、上の事実関係から 以下のように機能単位を設定する。

- ・製品 : 1kg 相当のフィルムでインフレーション成形品
- ・ベースラインのマテリアルリサイクル率 :
PE : 10%、PP : 20%
- ・機能 : 産業用または食品用フィルムとして利用可能な PE,PP 樹脂と同等以上の特性

4-4. バイオプラスチックの利用と LCA

環境省：中央環境審議会社会部会プラスチック資源循環戦略小委員会で議論されている資料に基づくと、バイオマスプラスチックは、次のように定義されている。[17]

- ・再生可能な有機資源を原料にして作られるプラスチック。
- ・ポリエチレンなど通常石油から製造されるものもバイオマスから製造可能。

また、生分解性プラスチックは、次のように定義されている。

- ・微生物の働きにより分解し、最終的には水と二酸化炭素に変化する。
- ・土壌中で分解するものと水中で分解するものがある。

バイオマスプラスチックと生分解性プラスチックには、図 4-27 のような素材が提示されており、広義でバイオプラスチックが定義されている。



図 4-27 バイオプラスチックの位置づけ

また、バイオプラスチックに対する国際的な論点として以下を示している。

<バイオマスプラスチック>

- ① トウモロコシやサトウキビを原料にすると食品用途と競合する。
- ② バイオマスプラスチックの LCA（例：温室効果ガス）

<生分解性プラスチック>

- ③ 海洋環境中では生分解されるまで長期間かかり、長期に渡ってマイクロプラスチック化してしまう。
- ④ 分解されやすくリサイクルには不向きなため、リサイクルルートで他のプラスチック

ク素材と混在するとリサイクルの阻害要因となる。

⑤ モラルハザードを引き起こし、ポイ捨てを助長するおそれがある。

バイオプラスチックはさまざまな意味を含んだ言葉であり、原料は「石油由来」と「バイオマス由来」に分けられる。バイオマス由来のうち、生分解性を示すものと生分解性を示さないものに分類できる。バイオマス由来で生分解性があるものを「生分解性バイオマスプラスチック：Biodegradable/Bio-based Plastics」としてBBPと略す。代表的なBBPとしてPBS（ポリブチレンサクシネート）、PHA（ポリヒドロキシアルカン酸）、PA4（ポリアミド4）、PLA（ポリ乳酸）などがある。また、バイオマス由来で生分解性がないプラスチックを「非生分解性バイオマスプラスチック：Nonbiodegradable/Bio-based Plastics」としてNBPと略す。代表的なNBPとして、バイオポリエチレン（バイオPE）、バイオポリエチレンテレフタレート（バイオPET）、バイオポリウレタン（バイオPU）などがある。これらのNBPは、原料となるモノマー等はバイオマス由来であるが、ラジカル重合や共重合によりポリマーになった際には石油由来のプラスチックと化学構造は同じである。

一方、中谷はバイオマス由来であるが生分解性のない（非生分解性）のプラスチック（例えば、バイオPE、バイオPET）を明確に区分すべきと、図4-28のようにバイオプラスチックを分類している。[18]

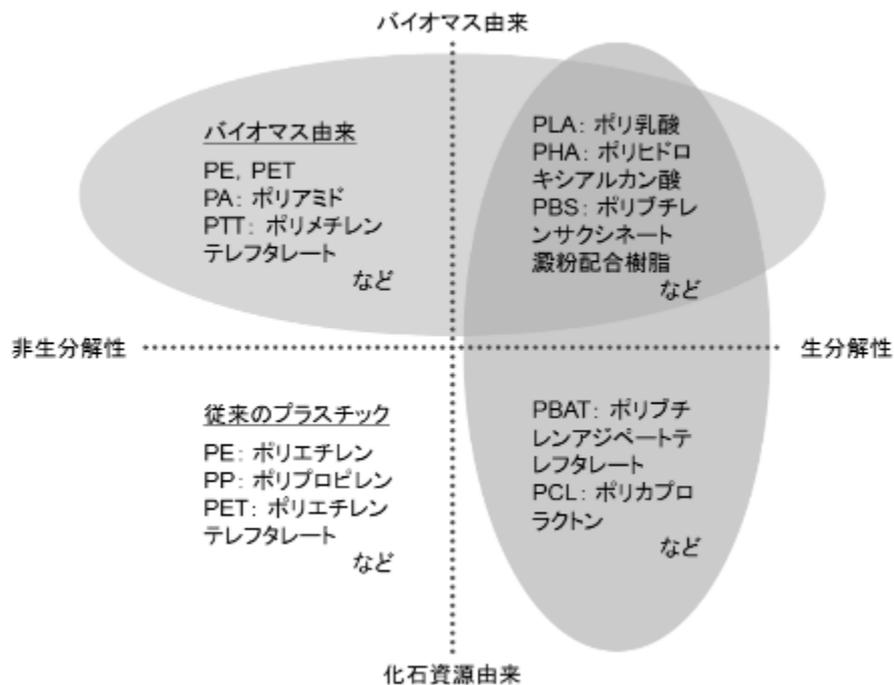


図4-28 バイオプラスチックの分類

4-4-1. プラスチック資源循環戦略[19]

2019年5月に公表された「プラスチック資源循環戦略」では、バイオプラスチックに関し、以下が記載されている。

①プラスチック製容器包装・製品の原料を再生材や再生可能資源（紙、バイオマスプラスチック等）に適切に切り替えた上で、

②可燃ごみ指定収集袋など、その利用目的から一義的に焼却せざるを得ないプラスチックには、カーボンニュートラルであるバイオマスプラスチックを最大限使用し、かつ、確実に熱回収します。

③代替可能性が見込まれるワンウェイの容器包装・製品等については、技術開発等を通じて、その機能性を保持・向上した再生材や、紙、バイオマスプラスチック等の再生可能資源への適切な代替を促進します。

④再生材・バイオプラスチックの利用促進

プラスチック再生材市場を拡大し、また、バイオプラスチックの実用性向上と化石燃料由来プラスチックとの代替促進を図るため、以下のとおり取り組みます。

- ・バイオプラスチックについては低コスト化・生分解性などの高機能化や、特に焼却・分解が求められる場面等への適切な導入支援を通じて利用障壁を引き下げます。

- ・可燃ごみ用指定収集袋などの燃やさざるを得ないプラスチックについては、原則としてバイオマスプラスチックが使用されるよう、取組を進めます。

- ・バイオプラスチックについては、環境・エシカル的側面、生分解性プラスチックの分解機能の評価を通じた適切な発揮場面（堆肥化、バイオガス化等）やリサイクル調和性等を整理しつつ、用途や素材等にきめ細かく対応した「バイオプラスチック導入ロードマップ」を策定し、静脈システム管理と一体となって導入を進めていきます。

⑤適用可能性を勘案した上で、政府、地方自治体はじめ国民各界各層の理解と連携協働の促進により、2030年までに、プラスチックの再生利用（再生素材の利用）を倍増するよう目指します。

⑥導入可能性を高めつつ、国民各界各層の理解と連携協働の促進により、2030年までにバイオマスプラスチックを最大限（約200万トン）導入するよう目指します。

上記のように、バイオプラスチックのメリットを活かした適用拡大が重要であるの

で、本章では各種のバイオプラスチックの開発状況と LCA 情報を整理する。

4-4-2 バイオプラスチックの生産量

欧州バイオプラスチック協会によると、バイオプラスチックの世界全体での生産量は 図 4-29 のように、2018 年に約 200 万トンと報告されている。一方、日本バイオマス協会が集計した日本国内のバイオプラスチック出荷量は、図 4-30 のように 5 万トン未満（2019 年）である。[20,21]

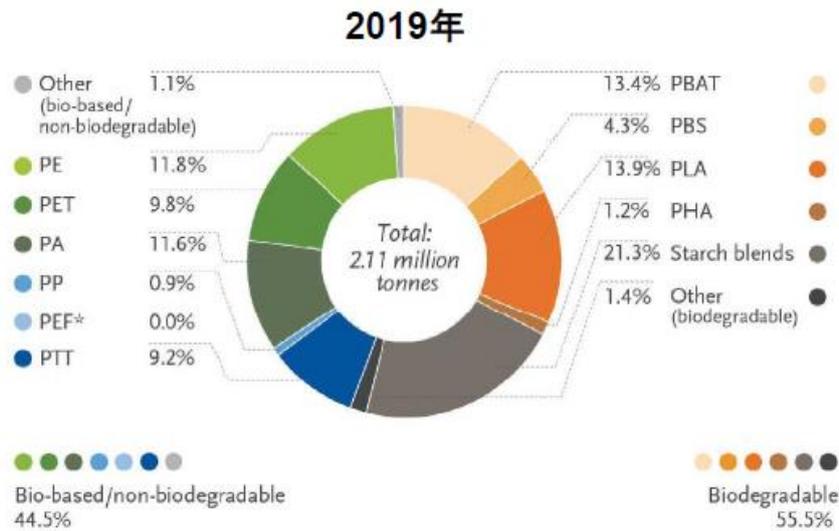


図 4-29 バイオプラスチックの世界生産の内訳

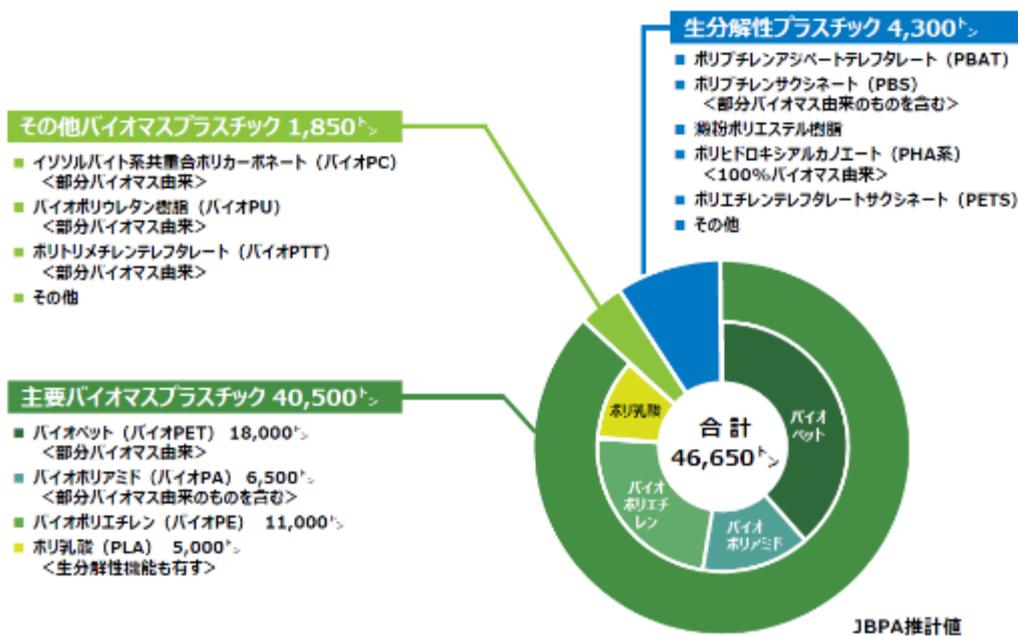


図 4-30 日本国内のバイオプラスチック出荷量の素材別内訳

2017 年のバイオマスプラスチックの国内利用量は、以下のとおりである。

- ・ バイオ PET : 32,550 トン (バイオマス度 30%)
- ・ バイオ PE : 31,555 トン (バイオマス度 100%)
- ・ PLA (ポリ乳酸) : 約 2,500 トン (バイオマス度 100%)
- ・ PBS (ポリブチレンサクシネート) : 未計上 (バイオマス度 49%)

なお、現在のバイオプラスチックのうち、最も多い使用用途は包装 (39 %) である。

以下には、各種バイオプラスチックの現状と LCA 事例を 2019 年度の検討結果も含めて整理する。

4-4-3. バイオ PET

バイオエタノールから得られたバイオモノエチレングリコールと石油から得られたテレフタル酸の共重合で製造される「バイオPET」は、2017年に 約33千トンが出荷されており、そのバイオマス度は30%と報告されている。普及には、製造の低コスト化が必要であり、バイオマス度向上のためにはテレフタル酸のバイオ化が必要である。

(1) バイオPETのGHG排出量

バイオPETのLCAは、東レがLCA実施の責任者となり、100%バイオマス度の繊維製品原料としてのバイオPET (ポリエステル) のLCAが仙波、稲葉らにより実施されている。その結果は、日刊工業新聞[22]、Journal of Cleaner Production[23]に掲載されている。

彼らは、バイオPETと石油系PETのGHG排出量の比較のための製品システムとして図4-31を示し、評価対象製品の機能、機能単位として、以下を示している。

(機能) ポリエステル100%の繊維製品の材料に必要な物性の提供

(機能単位) PET 1kg の製造及び焼却処分

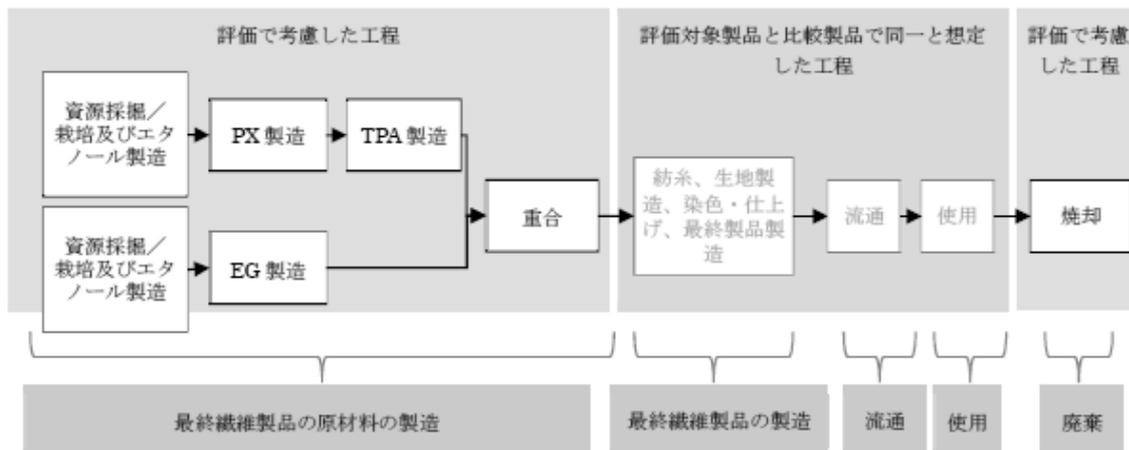


図 4-31 PET の LCA 実施の製品システム

LCA分析の結果として、図4-32から石油系PETに比べ、バイオPETのGHG排出量が少ないことを示している。この分析では、原料バイオマスのCO₂吸収を計上していない。

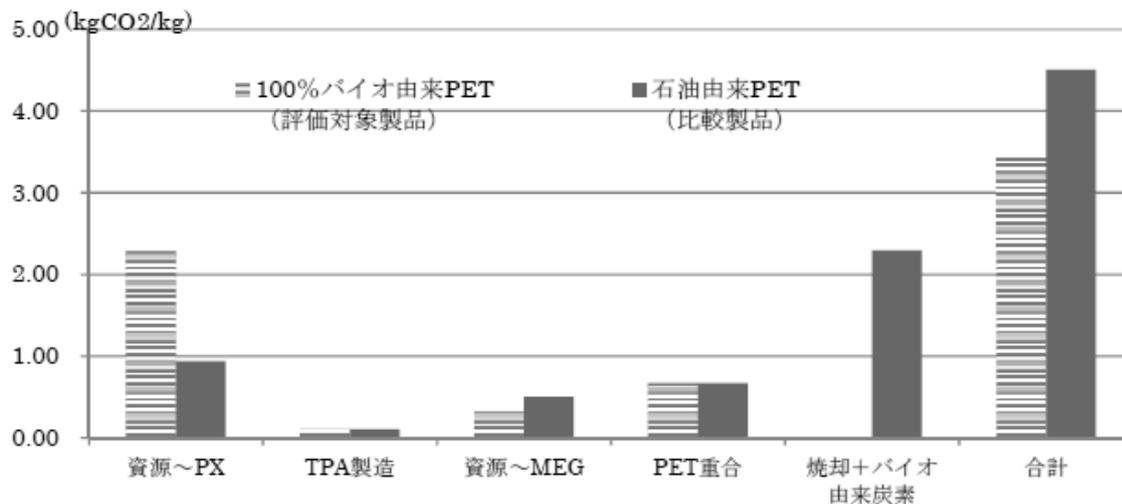


図4-32 バイオPETと石油系PETの工程別のGHG排出量比較

また、バイオマス度の関数として図4-33を示し、バイオマス度の向上と共にバイオPETのGHG排出量が削減されることを示している。この図で 廃棄処理時に化石燃料由来分のみが燃焼され、バイオ由来の燃焼はカーボンニュートラルでゼロと設定している。

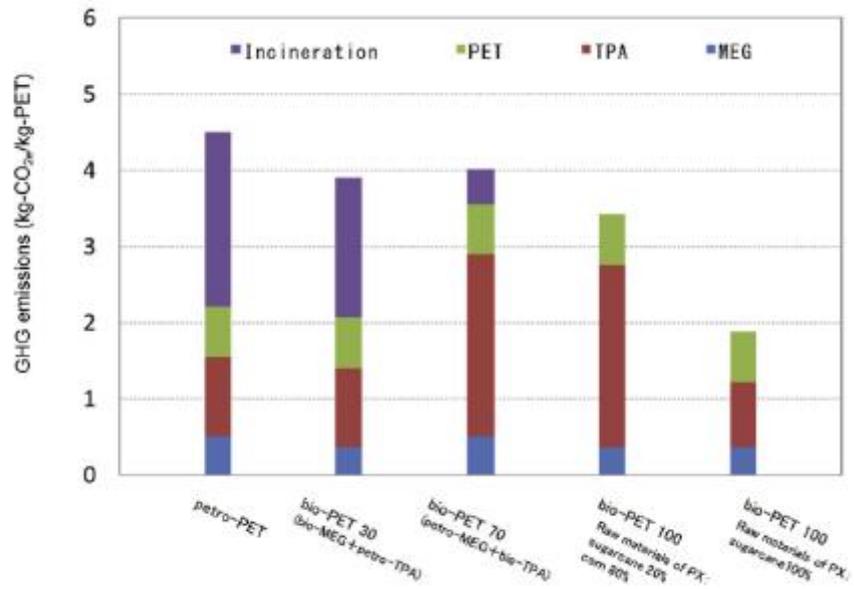


Fig. 2. GHG emissions of each PET and its composition.

図4-33 バイオPETのLCA事例（石油系との比較、バイオマス度との関係）

(2) バイオ PET の実用化事例

コカコーラは、一部の飲料で最大 30%のバイオマス由来原料を用いた PET ボトルを採用している。2018 年には米国コカコーラは 2030 年までに平均して 50%のリサイクル素材を PET ボトルへの利用を目指している。[24]

フランスのダノンは、リサイクルしたプラスチックを利用した再生ボトルを開発している。

日本国内では、サントリーが「2025 年までに国内清涼飲料事業における PET ボトル重量の半数以上に再生ペレットの使用を目指す」としている。[25]豊田通商は、台湾メーカーとバイオ PET を展開し、図 4-34 のようにサントリー天然水のボトルに再生 PET が採用される。



図 4-34 サントリー天然水ボトルへの再生 PET 樹脂の利用

このように、バイオ PET はボトルに一部利用されているが、バイオベースまたは再生ボトルのいずれが今後の方向性になるのかは不透明である。100%バイオ PET の普及が進み、石油系 PET と混合収集した場合には、何らかの方法で分別が必要とされている。

4-4-4. バイオ PE

サトウキビ由来の糖蜜を発酵させて得られたバイオエタノールを脱水してバイオエチレンを作り、これを重合することで「バイオPE」は製造され、その用途はレジ袋、化粧品・ヘアケア用品などの容器包装が多い。

「バイオPE」は、2017年には年間3万トンあまりが利用されているが、製造の低コスト化が課題と言われている。

なお、環境省は「バイオプラスチック導入ロードマップ検討会（第3回）」の資料で、2019年のバイオPEの輸入量を約1万トンと推計しており、国内出荷量の1/3が海外生産品と考えられている。

(1) バイオPEのGHG排出量

バイオマス度100%のバイオPEのLCA分析結果として、環境省の「バイオプラスチック導入ロードマップ検討会（第3回）」の資料[26]から抜粋した（図4-35：元データはBraskem社のバイオPE製造LCA）。（主語）この図から、バイオPEは原料栽培から樹脂製造の工程において3.14 kgCO₂/kgのCO₂を吸収（uptake）すると推計している。さらに、荒廃した牧草地にて栽培されるサトウキビは、土壌の回復に寄与していることが示された。また、サトウキビの非可食部であるバガスを利用することで、製造プロセスで消費されるエネルギーの80%は再生可能エネルギーとなっている。

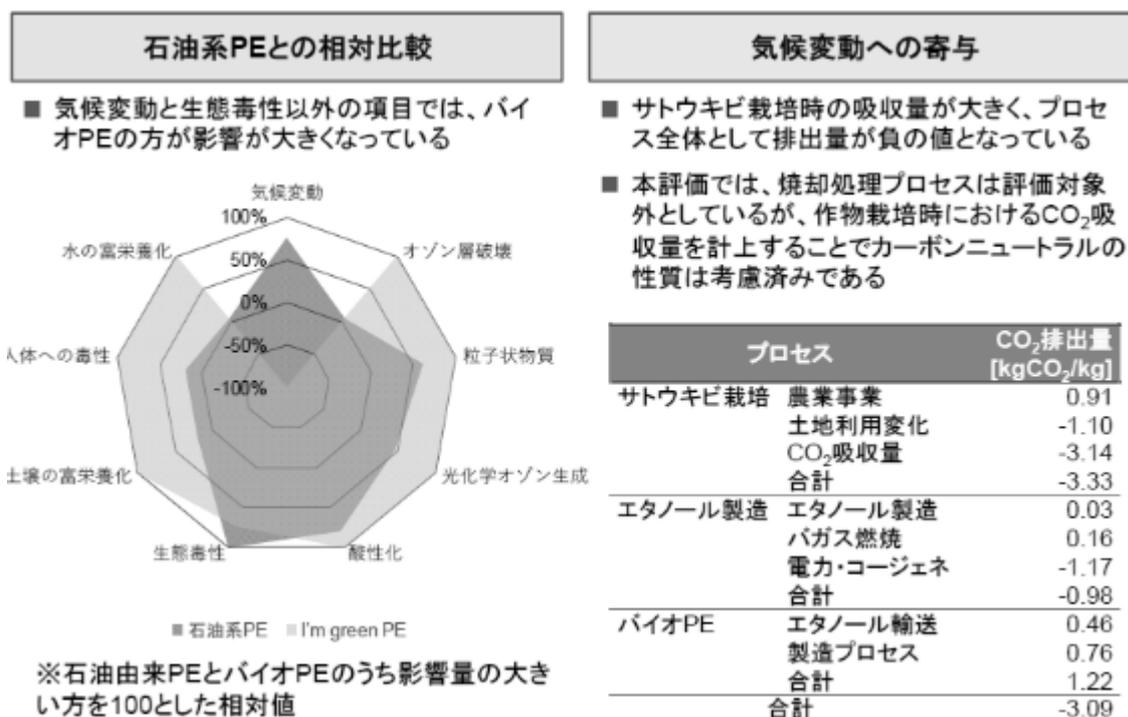


図 4-35 バイオPEのLCA事例（石油系PEとの比較、GHG排出量の分析）

(2) バイオ PE の実用化事例

サントリーでは、植物由来原料を 100%使用したペットボトルキャップを導入しているため、以下にその特徴をまとめる。[25]

2016年9月から、「サントリー南アルプスの天然水」に、植物由来原料を 30%使用した国産最軽量となる 1.85g のキャップを導入した。このキャップは、主原料であるエチレンを 100%植物由来化したポリエチレンキャップであり、これにより従来のペットボトルキャップに比べ、石油由来原料の使用を約 35%削減し、CO₂ 排出量を約 27%削減することができる。さらに、バイオ素材活用での環境への取組みを進化させ、2019年3月より九州熊本工場において「サントリー 阿蘇の天然水」550ml でエチレンを 100%植物由来化したポリエチレンキャップの導入を開始した。これにより、現行ペットボトルキャップに比べて、石油由来原料の使用量を約 90%、CO₂ 排出量を約 56%削減することができる。

4-4-5. ポリ乳酸 (PLA)

トウモロコシ等のデンプン作物を 糖化・発酵後に得られる乳酸が重合され、ポリ乳酸が合成される。バイオマス由来の乳酸から製造される PLA の代表的な生産者である NatureWorks 社は、アメリカ・ネブラスカ州に本社と主力工場を設置し、以下のステップでバイオマス度 100%の PLA を供給している。

<PLA 製造フロー：以下の 5 つのステップで構成>

- ・トウモロコシの生産と輸送、粉碎処理
- ・コーンスターチをデキストロースに変換
- ・デキストロースから乳酸に変換
- ・乳酸のラクチドへの変換
- ・ラクチドの重合

PLA は本開発でも主要な基材となることが期待されているので、LCA の結果と共に 検討結果をまとめる。

(1) PLA の GHG 排出量

NatureWorks 社は、製造している PLA (インジオ) に関する LCA 論文を継続して発

表している[27]。再生可能エネルギーの利用など企業のエネルギー構造の改善も示されているが、その GHG 排出原単位は年々削減されており、その妥当性には吟味を要する。そのため、2019 年度報告書では次の 3 つのシナリオの下で GHG 排出量を試算した。

シナリオ 1：エネルギー消費量に基づく分析

シナリオ 2：GHG 排出量（CO₂ 吸収を「0」とする）

シナリオ 3：GHG 排出量（CO₂ 吸収を計上する）

2019 年度の報告書で記載したインジオの GHG 排出量[1]を、分析シナリオの結果と共に 表 4-7 にまとめて示す。また、ペレット製造までの GHG 排出量を工程別に示した結果を図 4-36 に示す。

表 4-7 インジオペレットの GHG 排出量の変化

公表年	2005	2009	2014	2015			
	NatureWorks 文献			シナリオ 1	シナリオ 2	シナリオ 3 NatureWorks 文献	差異(2-3)
GHG 排出量 (kg-CO ₂ e/kg)	2.02	1.30	0.72	3.67	2.44	0.62	1.82

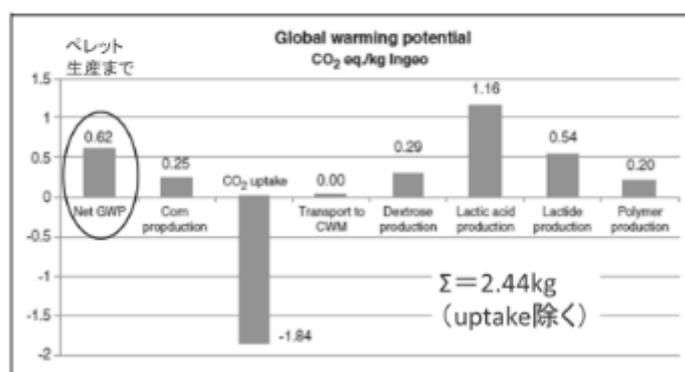


Fig. 8. Net GWP for the total Ingeo production system and the GWP per individual production step.

出典) NatureWorks文献

図 4-36 ペレット生産までの GHG 排出量とその内訳

一般にバイオプラスチックを生産する企業は、石油系プラスチックと環境面での競合（何と何が競合か）があるので、GHG 排出量を「見かけ上」低く表現できるように、炭素吸収分（uptake）をマイナス計上している。つまり、ペレット製造までの GHG 排出量から炭素吸収量（燃焼排出量にほぼ相当）を差し引いている。この手法は、ISO14067 でも図 4-37 に示すように CO₂ 吸収が認められており[28]、この例として図 4-35 のバイオ PE が挙げられる。

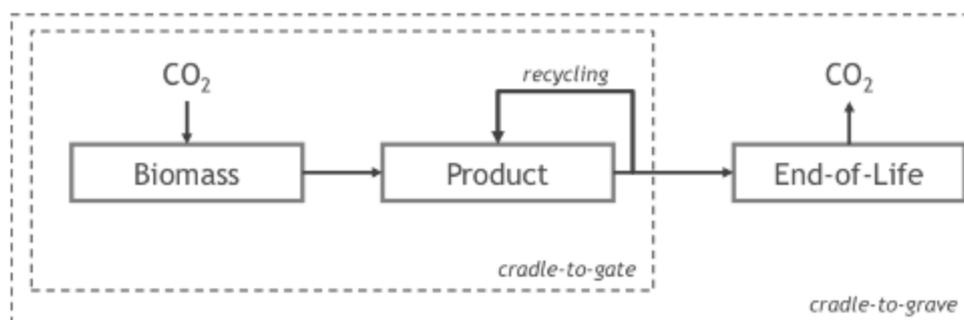
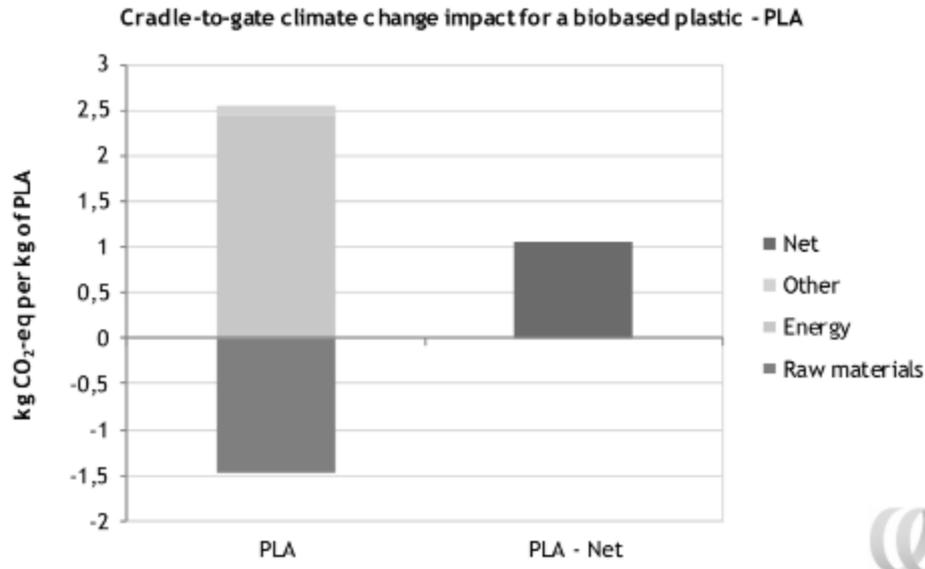


図 4-37 LCA のシステム境界設定と炭素吸収

（「ゆりかごから製品」と「ゆりかごから墓場まで」の取り扱い）

図 4-37 では「ゆりかごから墓場まで（Cradle to Grave）」をシステム境界と設定すると、廃棄段階で CO₂ が排出される。この排出された CO₂ はバイオマス成長段階で吸収され、炭素バランスが維持される。（カーボンニュートラル）しかし、「ゆりかごから製品まで（Cradle to Gate）」のシステム境界で見ると、炭素が吸収されるのみであるので、吸収量と排出量のいずれをも対象としなければならない。



Based on (Ecoinvent, 2016), the PLA process is based on data for production of PLA from NatureWorks in Nebraska, but with an amended energy input.

図 4-38 PLA の GHG 排出原単位の設定法

図 4-38 に示すように PLA の GHG 排出量はエネルギー起因等の CO₂ に加え炭素吸収分があるので、吸収分を差し引いて総計（ネット）CO₂ として表示される。そのため、炭素バランスが維持されているかの確認が必要となる。

LCA 実施者は 当該素材を利用した製品システム全体からの GHG 排出量を計上する際、その燃焼時の GHG (CO₂) 排出量をゼロと計上するカーボンニュートラルを用いて、製品システム全体の炭素バランスを維持させており、バイオマス原料生育時の炭素吸収を計上するケースは比較的少ない。この例として、図 4-33 のバイオ PET が挙げられる。

炭素吸収が計上されているシナリオ 3 で、廃棄時の素材燃焼の CO₂ 排出量をゼロ計上すると、バイオマス育成時の CO₂ 排出量が過剰に減算された LCA 結果となる。そのため、シナリオ 3 のデータを用いた場合には、燃焼時に CO₂ 排出量を加算して、炭素バランスを確保せねばならない。

このデータ取り扱いを理解した上で、適切な LCA を実施することが必要である。

そこで、本報告書で対象とする製品群は以下の特徴を有しているので、シナリオ 2 を

採用すべきである。

- ・ ベースライン：燃焼して CO₂ が排出され、一部がサーマルリサイクルされる。
- ・ 開発品：原則として燃焼されず、生分解する（廃棄時の CO₂ 排出量ゼロ）。

この原則は、植物を原料として製造される PBS,PHBH についても適用する。

(2) PLA の実用化事例

<ユニチカ（2012 年）>[29]

ユニチカは、植物由来のポリ乳酸を原料としたバイオマス素材「テラマック®」の比率を約 80%以上に高めたうえで、耐衝撃性と耐熱性を ABS 樹脂レベルに向上させた耐衝撃性射出成形用樹脂を開発した。このポリ乳酸には、NatureWorks の「Ingeo（インジオ）」が使用されている。

「テラマック®」耐衝撃性射出成形用樹脂は、全組成中に配合される植物由来のポリ乳酸比率が 80~90%と高く、ABS 樹脂と同等の耐衝撃性と耐熱性を達成している。

その公表資料の中で、「テラマック®」は、植物由来のポリ乳酸比率が高いことで、石油資源の枯渇問題や地球温暖化防止への貢献が期待できる。ポリ乳酸は汎用 ABS との比較でコンパウンドの樹脂製造から製品の焼却までのライフサイクルで発生する CO₂ 排出量を図 4-39 のように約 70%削減できる。さらに、枯渇資源の消費量を約 70%削減することができる。この図の縦軸は、1kg の射出成形部品と設定されており、「テラマック®」の GHG 排出量は約 2kg である。2019 年度の本報告書（PLA）ではシステム全体で 4.4kg-CO₂ であり、その差は 2.4kg になる。

図 4-39 で示された「テラマック®」の GHG 排出原単位は NatureWorks の 1.3kg-CO₂ を採用し、かつ「テラマック®」の燃焼による CO₂ を加算しておらずダブルマイナスと推測されるので、2019 年度の本報告書より小さく算定されていると考えられる。「テラマック®」には PLA 以外の樹脂が混合されていると推測されるが、以下では PLA100% と仮定して、本分析と比較する。

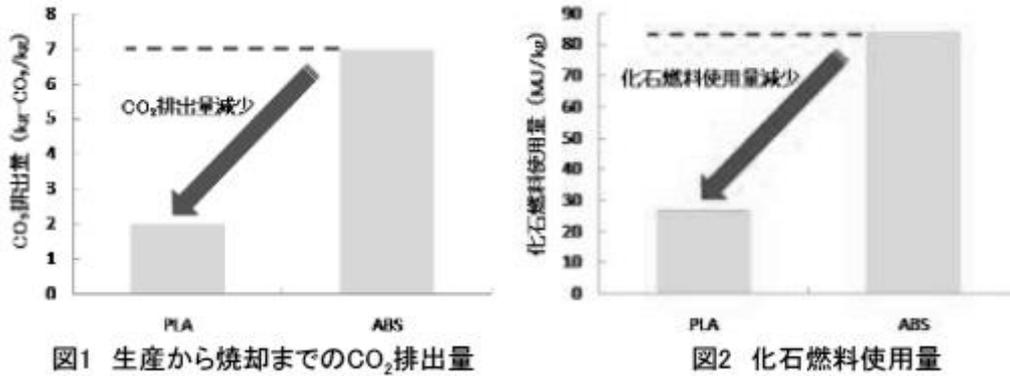


図 4-39 ユニチカの「テラマック®」の特徴説明

ここで、PLA・・・2009NEW 環境展 JBPA セミナーでの NatureWorks 講演資料から算出し、風力発電による CO₂ 相殺効果を盛り込み済

ABS・・・Plastics Europe (<http://www.lca.plasticseurope.org>)から引用

※焼却時の排出量は、分子構造からの理論計算

ユニチカ : 1.3 (ペレット) + 0.7 (加工) = 2.0

本報告書 : 2.5 (ペレット) + 1.8 (加工) = 4.4

差分 : PLA (ペレット) 2.5-1.3=1.2 加工) 1.8-0.7=1.1

上記のペレット製造と加工由来の GHG 排出量の差の合計は、データの出典による差である 2.3kg-CO₂ となり、システム全体の排出量の差異はほぼ説明できる。しかし、ユニチカの採用した PLA ペレットの値は炭素吸収分がマイナスされていると推測されるので、PLA 燃焼排出に相当する 1.8kg-CO₂ を加算すべきである。

ABS では、以下のように推測される。

ユニチカ) 3.2 (ペレット) + 0.7 (加工) + 3.1 (燃焼) = 7.0

本報告書) 3.5 (ペレット) + 1.8 (加工) + 3.1 (燃焼) = 8.4

ABS ペレットの文献による差、加工由来の GHG 排出量の差を考慮すれば、ほぼ説明できる。

以上のように、過去のバイオマスプラスチック製造に関する温暖化への影響の分析が、エネルギー面、カーボンニュートラルの面からなされているが、多くは

NatureWorks の論文データに依存しており、その検証にまでは至っていないのが現状である。

<リコー>[30]

リコーは、従来から環境調和型企业として、多くの環境活動を推進している。主力製品である複写機には重量比で 20~30%のプラスチック部材が利用されている。

リコーはバイオマスプラスチックの技術蓄積と製品素材の実用化を進めている。

2005 年には、バイオマス度 50%の画像機器向けの内装部材を採用し、2008 年にはバイオマス度 80%の製品を搭載している。

リコーはバイオマス素材として PLA を基材として石油系プラスチックを混合することによりバイオマス度の向上を目指している。このバイオマス度 70%の部材は、石油系プラスチックと同等の時間で成形可能が可能であり、2008 年に発売した複写機のマニュアルポケットに採用している (図 4-40)。リコーはこのバイオマス度の向上を PLA と PC のポリマーアロイ化、さらには PLA の結晶化制御技術とノンハロゲン難燃化技術によって得ていることを、表 4-8 に示すように社内技術報告で公開している。



(a) imagio MP C2200 搭載部品



(b) imagio MP C2200 搭載箇所

図4： imagio MP C2200への搭載 (2008年10月)

図 4-40 複写機部材としてのバイオマス度 70%の素材適用例

複写機は家電製品と同様に長寿命製品と位置づけられるので、このようなブレンド（ポリマーアロイ）化が将来的に本開発の PLA に適用できれば、PLA の適用可能性（長寿命）やリサイクル性が高まると期待できる。

表 4-8 PLA 基材を用いた複写機部材の開発

物性項目	単位	試験方法	条件	PLA	難燃 PC+PLA	高難燃 改質PLA
バイオマス度	%			100	約25	40
引張強度	MPa	ISO 527	50mm/mi n	73	64	43
伸び	%			4	24	6
曲げ強度	MPa	ISO 178	2mm/min	102	94	57.6
曲げ弾性率	GPa			3.3	3.5	2.7
シャルピー 衝撃強度	kJ/m ²	ISO 179	ノッチ 付き	1.6	3.9	7.1
荷重たわみ 温度	℃	ISO 75-2	0.45MPa	55	80	135
			1.80MPa	52	—	83
難燃性		UL94		HB 相当	5VB (2.0mm)	5VB (1.2mm)

この他にも、三井化学の「レイシア」、東セロの「パルグリーン」などの樹脂、製品が上市されている。

4-4-6. バイオ PBS

PBS は、自然界の土中の微生物の力で水と二酸化炭素に自然に分解される生分解性プラスチックで、軟質であり、物性面では PE や PP に似た特性を有している。一般的な生分解性樹脂の中では高い耐熱性を持ち、PLA よりも生分解性に優れ、農業用のマルチフィルム、育苗ポット、生分解性ゴミ袋などに採用されている。

(1) バイオ PBS の GHG 排出量

バイオ PBS の LCA は、2012 年に、Moussa、Young によって報告されている。[31] 彼らは、2012 年に昭和電工で生産している石油系の PBS である「Bionolle」のデータを参考にして、バイオ PBS の積算エネルギー消費量（Cumulative Energy Demand (CED) Indicator）が図 4-41 に素工程分析で示すように、1kg ペレット当たり総計で 140MJ/kg であることを報告している。

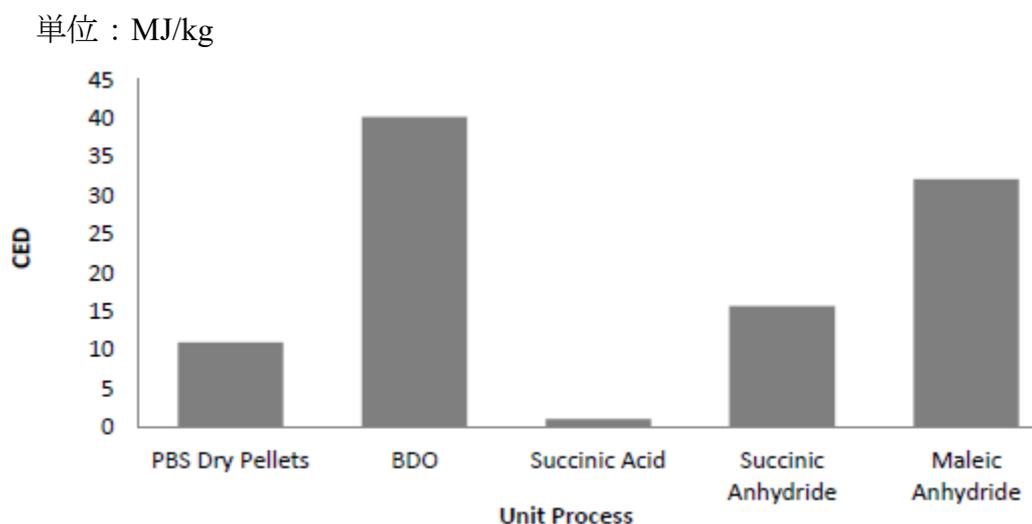


図 4-41 1kg のバイオ PBS ペレット生産までのエネルギー消費量

一方、1kg の PBS ペレット製造までの CO₂ 排出量を 6.6kg-CO₂e であることを示し、その内訳を報告している。(図 4-42) この結果には、燃焼時のサーマルエネルギー利用は含まれていない。

残念ながら、上記で引用している昭和電工の公開文献は既に削除されており、検証できない。

この論文では、ペレット生産までをシステム境界として LCA を実施しているが、図 4-16 から CO₂ 吸収は採用していないと推察できる。そのため、バイオ PBS ペレットの GHG 排出量として「6.6kg-CO₂e/kg」を用いることとする。また、Sakamoto らは CO₂ 貯留を仮定して原材料から栽培から重合までの GHG 排出量を 3.8kg-CO₂e/kg と報告している[32]。この他に、2.3~3.9kgCO₂ の報告もある。

いずれにしても、本報告書で採用する CO₂ 吸収を除外した GHG 排出量は、PLA よりも大きいと判断される。そのため、バイオ PBS ペレットの GHG 排出量として「6.6kg-CO₂e/kg」を用いることとする。

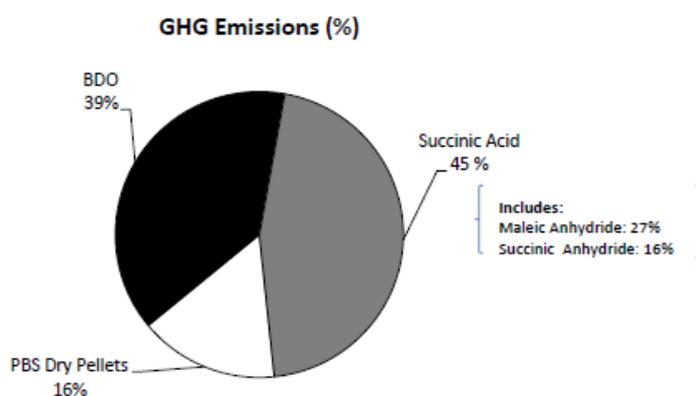


図 4-42 バイオ PBS ペレット生産までの GHG 排出量の内訳

(2) バイオ PBS の実用化事例

<昭和電工>[33]

昭和電工は、2012 年に生分解性ポリエステル樹脂の「ビオノーレ : Bionolle」の原料であるコハク酸を植物由来のバイオコハク酸に変更し、フィルムグレードの商品を出荷している。この変更により、ビオノーレの主原料の半分を植物由来とした。そのほかにレジ袋や農業用マルチフィルムへの使用が期待される。この製品は、アメリカのバイオプラメーカーである「ノーザンテクノロジーズ」において、バッグなどの素材に用いられる予定である。

その後、2016 年に昭和電工はビオノーレの製造・販売の中止を公表している。

<三菱ケミカル>[34]

三菱ケミカルは、PTT Global Chemical Public Company Limited（本社：タイ・バンコク、「PTTGC 社」）と折半出資子会社の PTT MCC Biochem Company Limited（本社：タ

イ・バンコク、「PTT MCC Biochem 社」) を設立し、自社が保有する石油化学製品製造で培われた高度なプロセス技術、および国内外に多数保有する特許群を PTT MCC Biochem 社にライセンスし、BioPBS™を生産している。(図 4-43)

PTT MCC Biochem 社は、2017 年より植物由来のコハク酸と 1,4 ブタンジオールからなるバイオ PBS (商標 : BioPBS™) の商業生産し、紙コップ代替のコップを上市している。

また、同社は植物性原料から生分解プラスチックである BioPBS™をベースとし、BioPBS™の高耐熱性、高相溶性という特色を活かし、他生分解性樹脂とのコンパウンドにより単体では発揮できない性能を有する FORZEAS™を上市している。(図 4-44)

さらに、2020 年 6 月には BioPBS™と日本製紙の紙製バリア素材「シールドプラス®」という、ともに再生可能な原料から製造される生分解素材を用いた循環型包装材を共同開発している。この包装材は、生分解性も有する「紙」に酸素・香りのバリア性を付与している(図 4-45)。バリア機能により内容物(主に食品)の品質を維持し、外からのにおい移りを抑えることができる。試作した循環型包装材の事例(図 4-45)として、食品用包装材などを示している。



図 4-43 BioPBS と FORZEAS の製造フロー (三菱ケミカル)

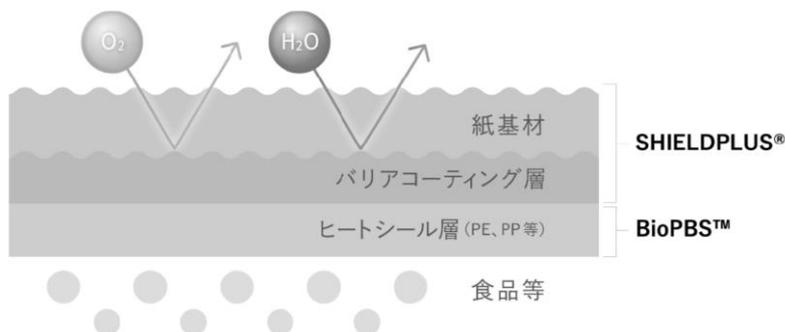


図 4-44 循環型包装材の層構造イメージ



(左) フラットボトム袋、角底袋 / 〈製造協力〉共同紙工株式会社様
 (右) 三方シール袋 / *「エコプロ 2019」にて参考出展

図 4-45 循環型包装材のサンプル

このようなバイオプラスチックと他の素材との積層による製品も、両者のメリットが活かせるならば製品化の可能性はある。

4-4-7. バイオ PHA

海洋生分解性を示すポリマーの代表として PHA があげられる。PHA は微生物が直接プラスチックを合成することや生分解性であることから注目を集めている。最初に見出されたのはホモポリマーのポリヒドロキシ酢酸 (PHB) であった。しかし、融点が高いなどの課題があったため、PHB とポリヒドロキシ吉草酸 (PHV) の共重合体を産生する菌株が発見され 1981 年に欧州で実用化された。PHA の発見自体は 1981 年であった。

PHA はモノマーの種類やその組み合わせによって様々なバリエーションが存在するポリマーのファミリーの総称である。PHA は 100% バイオ由来で生分解性である素材で、海水中で生分解性を示すものがある。PHA は主に特定のバクテリアにより発酵プロセスより生産され、合成されたポリマーがバクテリアの細胞内に蓄積される。そのため、モノマーの生産から重合反応まで、すべてバイオプロセスで製造可能である。なお、原料や発酵生産に使用する菌種は、さまざまなバリエーションがある。

(1) バイオ PHA の GHG 排出量 [28]

様々な植物原料から製造される PHA の GHG 排出量が、EU JRC2015 によって表

4-9 のようにまとめられている。しかし、植物成長での炭素吸収の大きさは明瞭ではない。PLA の 2.4kg-CO₂/kg と比べると、トウモロコシ、サトウキビ、大豆原料の PHA は小さく、セルロース廃棄物、菜種原料系では大きな傾向が見られる。パームオイルを原料とする PHA の GHG 排出量は記載されていない。また、環境省で採用された京都高度技術研究所、カネカ、日立造船の実証事業の令和元年度成果報告書（2019 年）でも、GHG 排出原単位は公開されていない。

表 4-9 各種原料系 PHA の GHG 排出量

Climate change LCA results for 1 kg of PHA in cradle-to-gate system

	Corn	Sugar cane	Lignocellulosic wastes	Soybean	Rapeseed
Geographical coverage	USA, Europe	South Africa, Brazil	USA, Europe	US	Europe
Climate change (kg CO ₂ -eq per kg PHA)	-2.3 - 0.45	0.1-1.1	1.3-5.1	0.26	5-6.9

Source: (Joint Research Centre, 2015).

ヨーロッパで LCA データベースとして広く用いられる Ecoinvent では、PHA の GHG 排出量（炭素吸収含む）を図 4-46 のように、1.7kg-CO₂/kg と示している。この図には、石油由来の PE の GHG 排出量として、2.3kg-CO₂/kg が示されているが、日本のそれよりも大きな値である。

本報告書では、PHA の GHG 排出量として Ecoinvent の 1.7kg-CO₂/kg を「ゆりかごから製品まで」の条件で採用するが、より根拠のあるデータとして次年度以降の課題である。

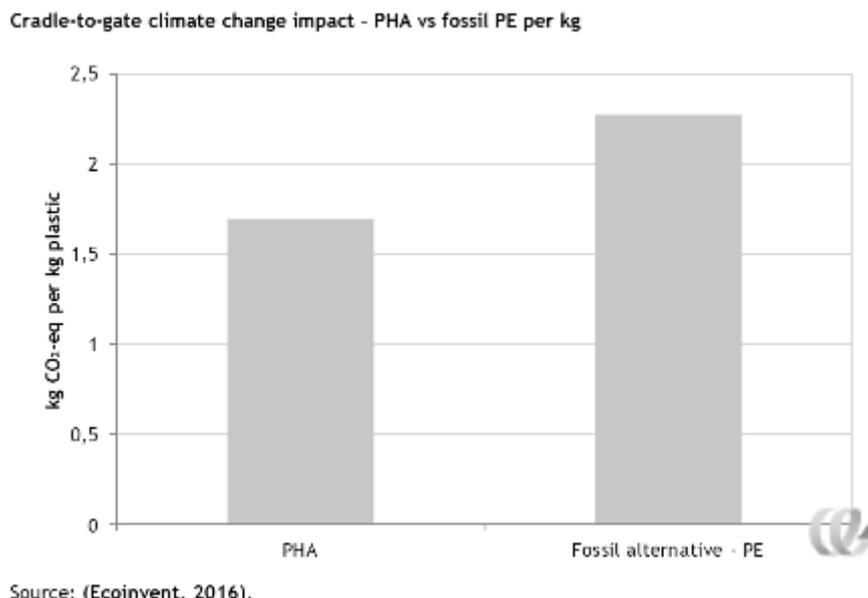
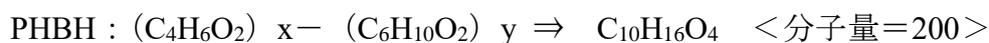


図 4-46 PHA と石油由来の PE の GHG 排出量の比較

図 4-46 は「ゆりかごから製品まで」の GHG 排出量なので、植物成長時の CO₂ 吸収が計上されていると推測されるので、廃棄時の PHBH 燃焼時の CO₂ を吸収量と等しいと仮定・加算して、炭素バランスを確保する。PHBH の化学構造式は、図 4-47 のように公表されているので、この化学構造式から 1kg あたりの CO₂ 排出量を算定する。PHBH は炭素数 4 のヒドロキシブチレートと炭素数 6 のヒドロキシヘキサノエートという 2 つの物質の組み合わせでできており、ヒドロキシヘキサノエートの割合が高くなると軟らかい PHBH ができるとされている[35]。実際の比率は公開されていないので、 $x=y=1$ と仮定する。



1kg の PHBH 燃焼当たり、2.2kg の CO₂ が排出される。

したがって、PHBH ペレット 1kg の生産までには、3.9kg-CO₂/kg(=1.7+2.2)と設定する。

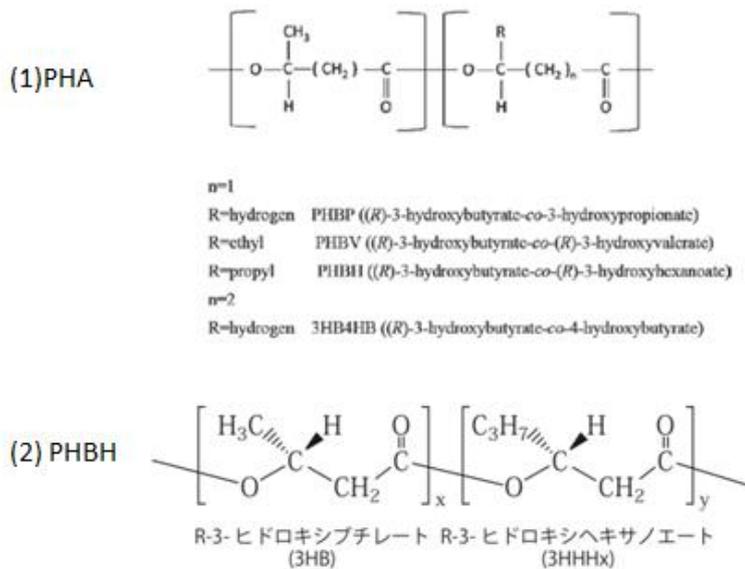


図 4-47 PHA,PHBH の化学構造式

(2) PHA の実用化事例

<カネカ>[35]

カネカは、2009年にJSTの委託開発を利用して、PHBHの生産実証実験に着手した。この実証で、植物油などのバイオマスを原料に、微生物発酵プロセスによって生産スNeal生分解性ポリマーであるPHBHを上市している。ストロー、レジ袋、食品用途包装材への利用が期待されており、年産5000トンの実証設備が稼働している。この樹脂は、日本、EU,アメリカの食品接触物質リスト(PL)に登録されている。

カネカは、図4-48に示すように、適用できる範囲を拡大することを計画している。

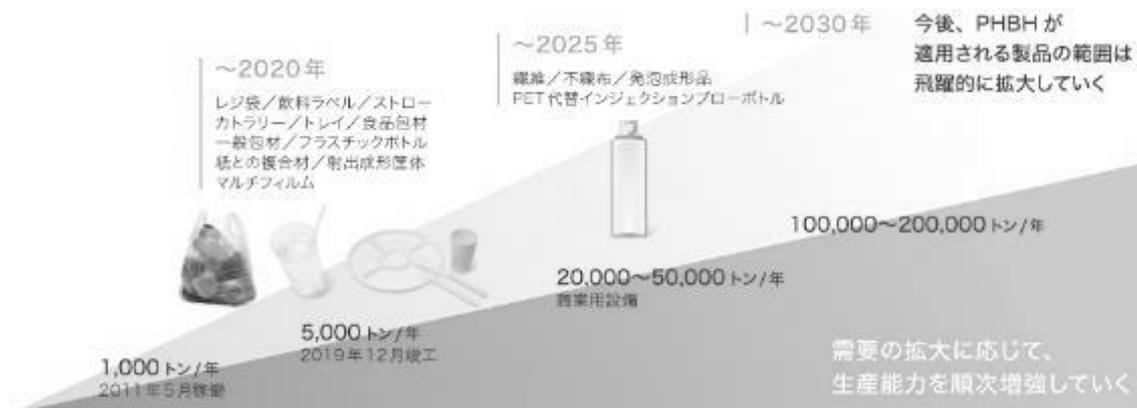


図 4-48 カネカの PHBH 展開計画

4-4-8. 機能単位の設定

代表的なバイオプラスチックの LCA 事例を調査した結果、以下のようにまとめられる。

- ・ペレット製造までの植物の炭素吸収を検討した LCA (ゆりかごから製品まで)
- ・炭素バランスを考慮した LCA (ゆりかごから墓場まで)

このように、システム境界の設定により 採用される手法が異なる。本報告書で取り扱うシステム境界は「ゆりかごから墓場まで」に相当するので、採用するデータは植物の炭素吸収を考慮しないデータを採用すべきであることが確認できた。

バイオプラスチックの利用として、リサイクルを考慮した利用は限定されることも分かった。

そのため、バイオマスプラスチックでは 以下のように機能単位を設定する。

-
- ・製品：1kg 相当のフィルムでインフレーション成形品
 - ・開発品のマテリアルリサイクル：なし
 - ・機能：産業用または食品用フィルムとして利用可能な PE,PP 樹脂と同等以上の特性
-

ベースラインの機能・機能単位と合わせ、開発品とベースラインを表 4-10 のように設定する。

表 4-10 本報告書で設定した機能、機能単位

	開発品	ベースライン
素材	PLA/PBS PLA/ PHBH	PE PP
機能	産業用または食品用フィルムとして 利用可能で PE,PP 樹脂と同等以上の 特性	
機能単位	1kg 相当のフィルムで	

	インフレーション成形品	
リサイクル	なし	PE マテリアル : 10% PP マテリアル : 20%

4-5. PLA ブレンドフィルムの LCA

本章では、PLA ブレンドフィルムの GHG 排出量およびベースラインと比較した削減量を、LCA 手法を用いて算定する。

具体的には、本事業にて開発を進めるバイオマスブレンドフィルムについて GHG 削減効果を分析・試算する。この算定にあたっては、ベースラインとして PE,PP フィルムとの代替効果を対象として分析を実施する。

4-5-1. 対象製品

本事業で開発されるバイオマスブレンドフィルムの具体的な用途はフィルムと設定する。

4-5-2. 機能単位

LCA の機能単位は、重量など様々な単位が用途に応じ適切に選択されるが、現時点では「1kg 相当のフィルム」と設定する。なお、樹脂ペレットは重量単位を用いて整理されている場合が多いので、重量ベースのデータが採用しやすいというメリットがある。

本報告書で取り扱う製品の特性は以下のとおりである。

- ・機能：産業用または食品用フィルムとして利用可能で
PE,PP 樹脂と同等以上の特性を有する
- ・機能単位：1kg 相当のフィルムでインフレーション成形品
- ・ベースラインのマテリアルリサイクル率：PE 10%、PP 20%
- ・開発品のブレンド比率：PHBH、PBS とともに PLA に 5%ブレンド
(10%未満が想定されているが、開発中のため 5%と仮定)
- ・開発品のマテリアルリサイクル率：開発段階にあるので、マテリアルリサイクルはない

4-5-3. システム境界

LCA は、「ゆりかごから墓場まで」の環境側面を評価するツールであるが、比較対象製品と同一と推測されるプロセスは省略して、比較することができる。そのため、

図 4-49 (再掲) 及び図 4-50 (再掲) のプロセスで、同等と推測される「最終製品生産、流通、使用」の各段階の環境負荷は検討する対象のプロセスから除外する。したがって、比較するプロセスは「原料からバイオマスブレンドフィルム製造」および「廃棄・リサイクル」と設定する。

図 4-49 に示すプロセスで製造されるバイオマスブレンドフィルムが開発対象であり、比較される製品は図 4-50 に示すように、広く包装用フィルムとして利用されている PE,PP 樹脂と設定し、ベースラインとする。

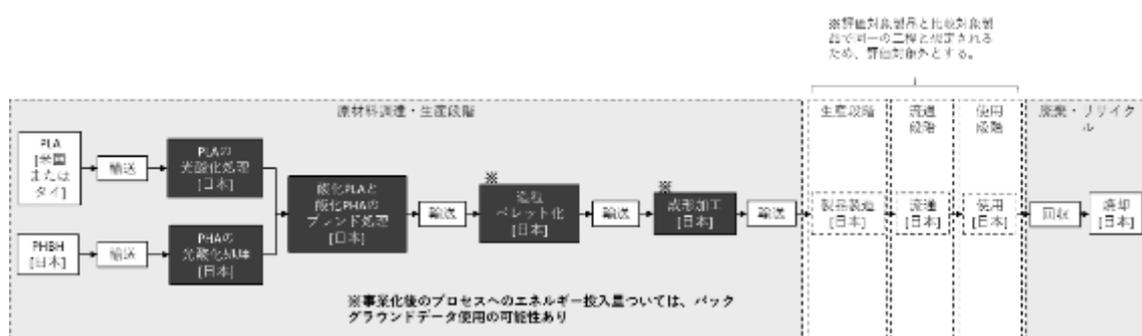


図 4-49 バイオマスブレンドフィルム製造のフローとシステム境界

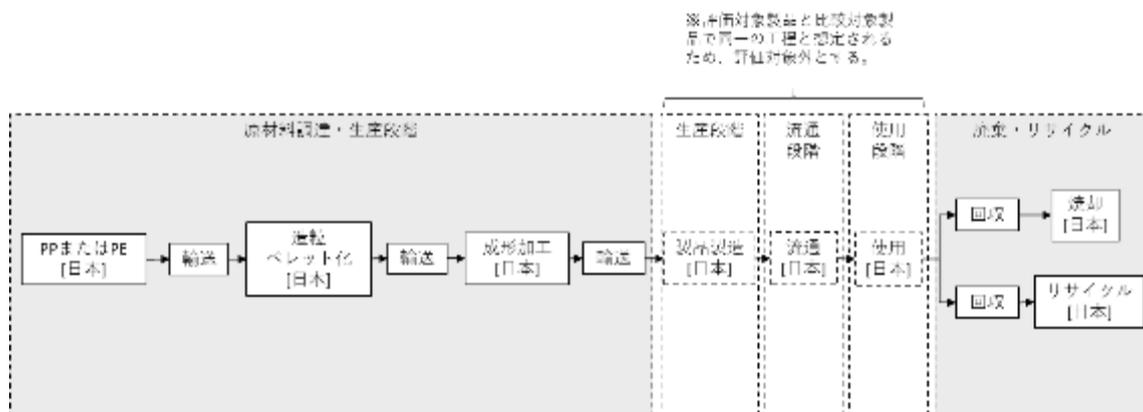


図 4-50 ベースライン (PE,PP 樹脂) のフローとシステム境界

4-5-4. 製品のフロー設定とインベントリデータ

(1) ペレットの製造段階

バイオマスブレンドフィルムの主要素材となる NatureWorks の PLA の LCA 結果として、最新の論文に基づいて、GHG 排出量を採用する。ただし、GHG 排出量吸収量

を「0」と設定する。

また、bioPBS、PHBH の日本国内における GHG 排出量データは、文献調査からそれぞれ設定した。

また、ベースラインである「PE,PP 樹脂」の日本国内生産でのペレット生産までの GHG 排出量は現時点で広く日本国内のデータベースとして利用されている IDEA の値を引用する。

さらに、PLA ペレットはアメリカから輸入されると設定し、海上輸送に係る GHG 排出量も加算した。(2019 年度は、検討対象外)

なお、ベースラインの PE,PP ペレット製造までの原油輸入に伴う GHG 排出量は IDEA データに加算済みである。

以上で設定した各樹脂ペレットの GHG 排出量を、表 4-11 にまとめる。

表 4-11 各素材ペレットの GHG 排出量設定

製品名	単位	GHG 排出量 (kg-CO ₂ e)	うち 化石資源由来 (kg-CO ₂ e)	備考
PLA	kg	2.44	-	・ NatureWorks 論文[27] ・ 炭素吸収を除外
PBS	kg	6.60	-	・ ワーテルロー大学論文[31]
PHBH	kg	3.90	-	・ EU-JRC 論文に炭素吸 収 加算[36]
LDPE	kg	1.94	1.81	・ IDEA V2.2[37]
PP	kg	1.89	1.76	・ IDEA V2.2[37]

(2) 成形段階

ペレットからフィルムを成形するには、インフレーション成形が広く適用されている。(図 4-51)

このときの物質・エネルギー収支の代表的なインベントリデータは、(社)プラスチック処理促進協会より「樹脂加工におけるインベントリデータ調査委報告書」[38]で大規模生産設備のアンケート等からまとめられている。

ここで、インフレーション設備は電力駆動であるので、示されている工程エネルギー消費量を電力に換算することによって、成形に要する電力消費量を設定する。ここでは、この文献に示されているインフレーション成形のデータを採用する。(図 4-52)

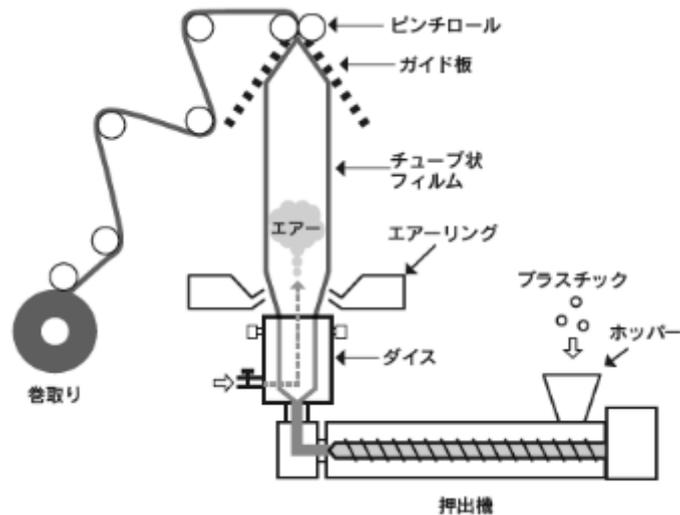


図 4-51 インフレーション成形の模式図

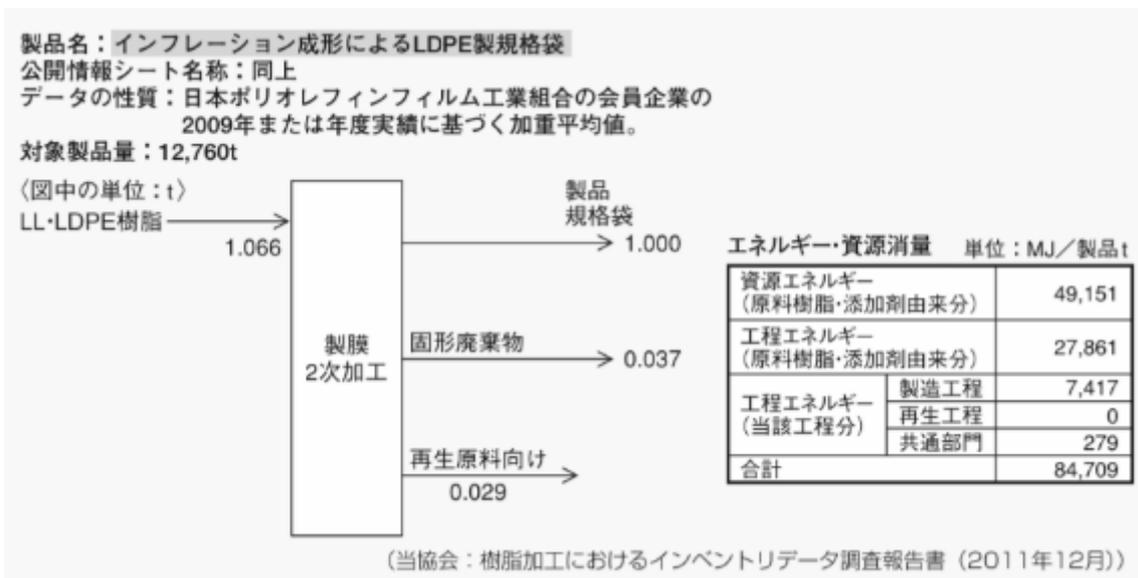


図 4-52 インフレーション成形によるフィルム製造のインベントリデータ

我が国の発電のエネルギー消費量は IDEA[37]を引用すると、「9.6MJ/kWh」であるので、「0.80kWh/kg 製品 (= (7.417+0.279)/9.6)」の電力が消費されると設定できる。日本での公共電力に誘発される GHG 排出量原単位は、IDEA から「0.58 kg-CO₂e/kWh」を採用する。なお、図 5-52 から 3%の製品ロスがあることも、LCA に反映させる。この残渣は、産業廃棄物で不純物が少なく再利用しやすいので、マテリアルリサイクルされると設定する。

なお、2019 年度報告では 上位のインフレーション成形のエネルギー消費量に工程エネルギー（原料樹脂・添加剤由来分）の 27.9MJ/kg を加算していたが、この値は PE 樹脂製造に係るエネルギー消費量であり、IDEA から引用する GHG 排出量を加算するとダブルカウントされてしまい、過剰積算の GHG 排出量となっていた。そこで、本報告では工程エネルギーのうち「製造工程＝加工工程と共通部門」のエネルギー消費量のみを消費することに見直す。

(3) 使用段階

使用段階は、検討対象のシステム境界から除外した。

(4) 廃棄・リサイクル段階

最終段階に相当する廃棄・リサイクルの考え方は以下を基本とする。

① 廃棄工程

開発品は生分解性の特性を有しているため、廃棄時に燃焼せず、処理される。また、生分解時に排出される CO₂ などは、カーボンニュートラルの観点から計上しない。

ベースラインの PE,PP 樹脂の代表的な廃棄工程として、ゴミ燃焼炉等での燃焼を仮定し、

PE,PP の化学式から、完全燃焼されるとして GHG 排出量を以下のように推算する。

PLA：カーボンニュートラルのため、燃焼時の CO₂ 排出量は「0」。

PBS：同上

PHBH：同上

PE： $C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$

ポリエチレン 1kg の燃焼に対し、3.14kg の CO₂ を排出。

PP： $C_3H_6 + 9/2O_2 \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O$

ポリプロピレン 1kg の燃焼に対し、3.14kg の CO₂ を排出。

② リサイクル工程

<マテリアルリサイクル>

使用済みバイオマスブレンドフィルムは、開発途上であることを考慮し、マテリアルリサイクルされないと設定する。

ここで、産業廃棄物系プラスチック (PE,PP) のマテリアルリサイクルプロセスは、

第3章に示した再生ペレット製造までの電力消費量である0.41~0.48kWh/kgであるので、類似プロセスを調査した。家電リサイクル工場のABS部品を原料の一部としてバージンペレットと混合させたペレット製造までのデータを図4-53に示す[39]。このデータを参考に、混合PEペレット製造(10%混合)までのマテリアルフロー、電力消費量を試算した結果、図4-54が得られる。

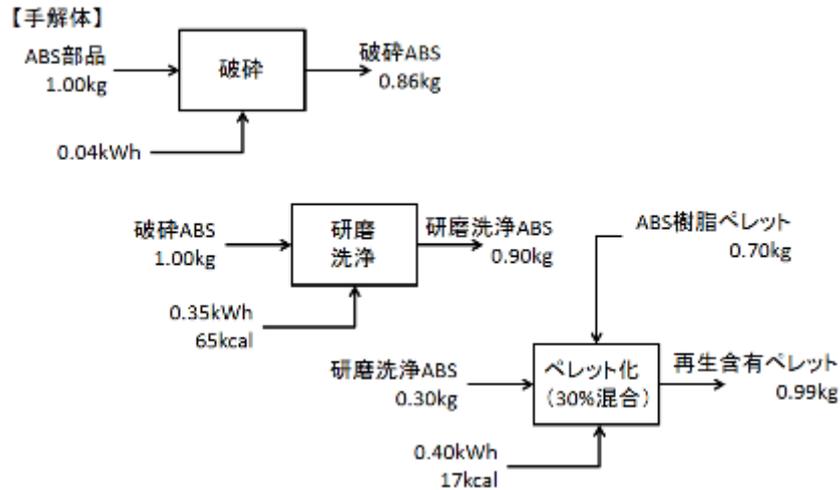


図 4-53 使用済み ABS 部品をリサイクルした再ペレット化のモデル

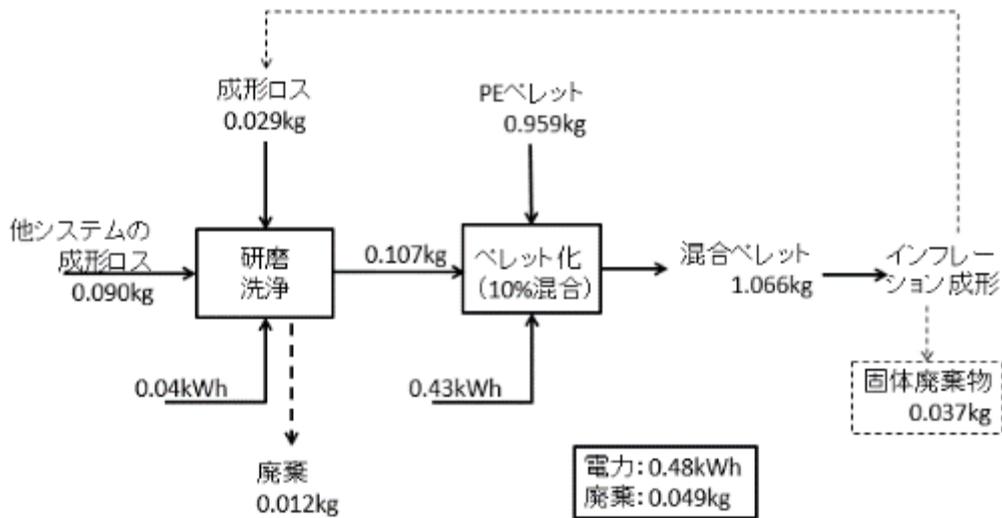


図 4-54 産廃 PE を 10%リサイクルした再ペレット化のモデル

図 4-54 から再生ペレット製造までの電力消費量は0.48kWh/kgであり、産廃系のプラスチックからの再生樹脂製造の電力消費量と等しく、モデルとしては妥当と考

えられる。そこで、図 4-54 の再ペレット化のモデルを PE のマテリアルリサイクル分析に用いる。

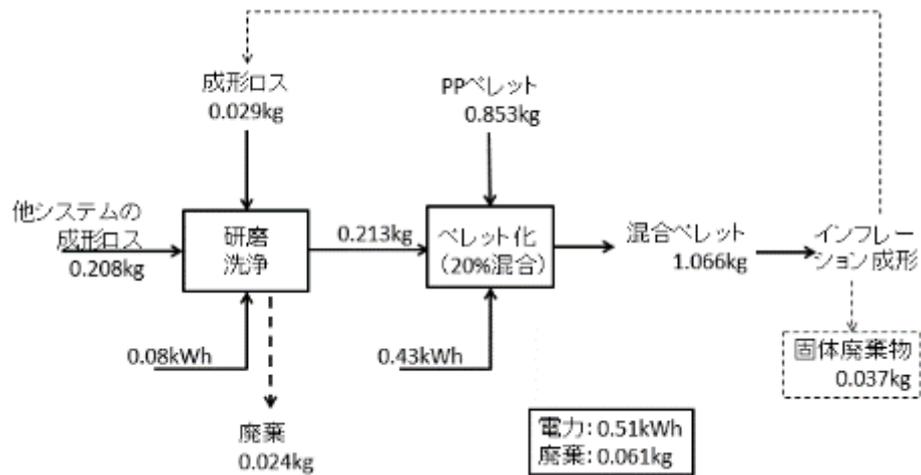


図 4-55 産廃 PP を 20%リサイクルした再ペレット化のモデル

また、混合 PP ペレット製造 (20%混合) までのマテリアルフロー、電力消費量を試算した結果、図 4-55 が得られる。

このフローを再ペレット化のモデルとして PP のマテリアルリサイクル分析に用いる。

以上から、対象とする PE フィルムシステム全体のマテリアルフローは、図 4-56 のようにモデル化できる。

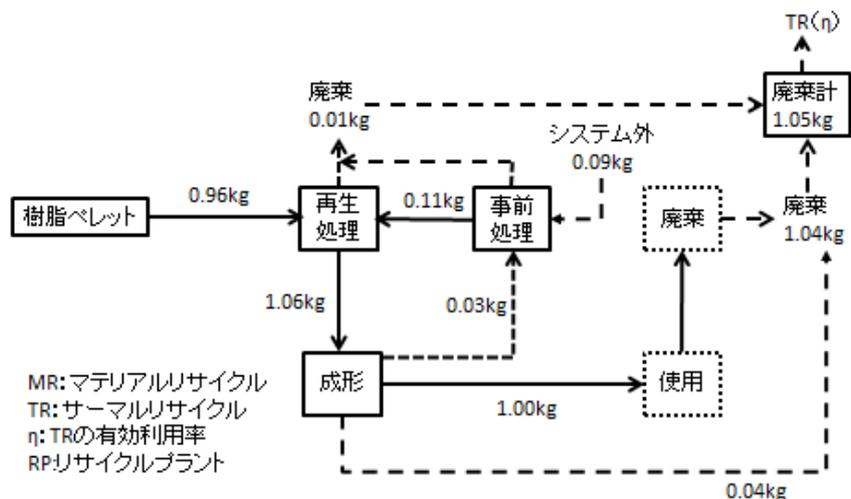


図 4-56 PE フィルム製造、リサイクルフロー

<サーマルリサイクル>

プラスチック処理促進協会が2017年のプラスチック有効利用状況を表4-12のようにまとめている。[40]

表4-12 使用済みプラスチックのリサイクル状況と本検討での取扱（単位：万トン）

	プラ処理 協 統計 (2017)	2019年度 報告書	本報告書
MR(マテリアル)	208	—	208
CR(ケミカル)	39	—	—
TR(サーマル)	503	503	503
単純焼却	73	73	73
埋立	68	—	—
計	891	576	784
MR率	23%	0%	27%
TR有効利用率 (η)	—	0.87	0.64

この表で、2019年度報告書ではマテリアルリサイクルを検討対象としないケースでは、MR量を除外して、TRの有効利用率を「87%」と設定した。

本報告書では、ベースラインのマテリアルリサイクルをも検討対象と設定しているため、マテリアルリサイクル(MR)量を加算して、サーマルリサイクル(TR)の有効利用率を「64%」と設定する。なお、プラスチック処理促進協会のMR率は27%であり、ベースライン設定のMR率(10%または20%)と異なるが、樹脂間の利用率の差異が反映されたと考えられる。

一方、フィルムは家庭向けフィルムとしてレジ袋や食品包装に利用される場合が多く、以下の「プラスチック資源循環戦略」に記載されているように[19]、利用目的から燃焼せざるを得ないプラスチックに相当する。

③可燃ごみ指定収集袋など、その利用目的から一義的に焼却せざるを得ないプラスチックには、カーボンニュートラルであるバイオマスプラスチックを最大限使用し、かつ、確実に熱回収します。

確実な熱回収も、一般廃棄物の燃焼炉において結果的に発電付きであったか否かに大きく依存するので、有効利用率は「0」と捉えることもできる。

以下には、有効利用率が「0」、「64%」の二つのシナリオを対象に検討する。

熱エネルギーの有効利用には、PE樹脂の発熱量を46MJ/kg、PP樹脂の発熱量を42MJ/kg、と設定し、発熱量等価でC重油の代替となると仮定する。C重油の製造、燃焼に係るインベントリデータは、以下の表4-13を用いる。

ここで、C重油の発熱量は41.9MJ/L、GHG排出量は製造分を含め「3.79kg (= 0.396+0.081×41.9)」であるので[37]、フィルムの燃焼エネルギーはC重油の燃焼エネルギー相当分のGHG排出量を控除 (offset) できると設定する。

表 4-13 代替燃料としてのC重油のインベントリデータ

	排出量	単位
C重油製造	3.96E-01	kg-CO2e/L
C重油燃焼	8.10E-02	kg-CO2e/MJ

一方、ベースラインとなるPE,PP樹脂の実態として、プラゴミが埋め立てられる場合も想定されるが、埋め立てのGHG排出量は表4-14に示すように[37]、燃焼時の3.14kgに比べ明らかに小さい。さらに、埋め立てるケースではGHG排出量が小さいが、比較する「機能」が「フィルム用途+廃棄物埋め立て (土地利用)」となり、「フィルム用途」と異なる。そのため、使用済みフィルムはすべて燃焼され、その中での有効利用率を変数と設定する。上記の条件で、ベースラインの使用済み素材の有効利用率に着目してGHG排出量を試算する。

表 4-14 埋立のインベントリデータ

	IDEA
GHG 排出量 (kg-CO2e) /kg	3.63E-02

参考) PLA が完全燃焼されると、以下の化学反応式に基づいて、CO₂が排出される。



つまり、PLA 1 kg の燃焼に対し、「1.83 kg の CO₂」が排出される。

しかし、本報告では PLA 燃焼時にはカーボンニュートラルのため、CO₂が排出されない条件で算定しているため、PLA の燃焼は取り扱わない。

(5) 地球温暖化の特性化係数

地球温暖化の特性化係数は、IPCC の第 1 次報告書から公表され、引き続き報告書で更新されてきた。本報告書では、表 4-15[41]の右端欄に示す最新の IPCC の第 5 次報告書で提示され、LCA の各種報告書でも数多く採用されている 100 年平均値の特性化係数を採用する。

表 4-15 地球温暖化の特性化係数の推移

主要な温室効果ガス (京都議定書対象ガス)	地球温暖化係数 (SARの値)			地球温暖化係数 (AR4の値)			地球温暖化係数 (AR5の値)	
	20年間累積 (GWP ₂₀)	100年間累積 (GWP ₁₀₀)	500年間累積 (GWP ₅₀₀)	20年間累積 (GWP ₂₀)	100年間累積 (GWP ₁₀₀)	500年間累積 (GWP ₅₀₀)	20年間累積 (GWP ₂₀)	100年間累積 (GWP ₁₀₀)
二酸化炭素 CO ₂	1	1	1	1	1	1	1	1
メタン CH ₄	56	21	6.5	72	25	7.6	84	28
一酸化二窒素 (亜酸化窒素) N ₂ O	280	310	170	289	298	153	264	265
六フッ化硫黄 SF ₆	16,300	23,900	34,900	16,300	22,800	32,600	17,500	23,500
パーフルオロカーボン PFCs	4,400~6,200	6,500~9,200	10,000~ 14,000	5,500~7,310	7,390~10,300	9,500~14,700	4,880~8,210	5,630~11,100
ハイドロフルオロカーボン HFCs	460~9,100	140~11,700	42~9,800	43~12,000	12~14,800	3.7~12,200	13~10800	4~12,400
三フッ化窒素 ^{※1} NF ₃	-	-	-	12,300	17,200	20,700	12,800	16,100

※1：三フッ化窒素は京都議定書第二約束期間から対象ガスに含まれている。なお、同じ追加のガスとしてHFCsに含まれる。HFC-152、HFC-161、HFC-236cb、HFC-236ea、HFC-245fa、HFC365mfc が、PFCs にC10F18が追加されており、AR5ではそれらの値も示されている。
出典：IPCC SAR WG1 Errata table2.14、AR4 WG3 第1章 table1.1
参考：国立環境研究所 地球環境研究センター「CO₂が知りたい 温暖化～二酸化炭素以外の温室効果ガス削減の効果～」

4-5-5. LCA 結果 (インベントリ分析)

システム全体の GHG 排出量を、ベースラインのマテリアルリサイクル率を PE では 10%、PP では 20%と設定し、残渣のサーマルリサイクル有効利用率も考慮して 1kg 製品あたりで比較した。(それぞれ、図 4-57、図 4-58) この図には、2019 年度のサーマルリサイクルのみを検討したケースについても記載してある。

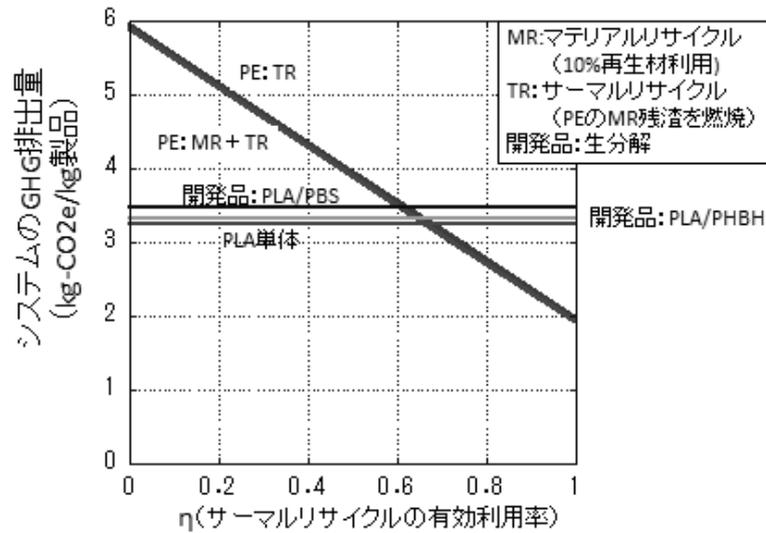


図 4-57 開発品とベースライン (PE) の各種リサイクル適用による GHG 排出量

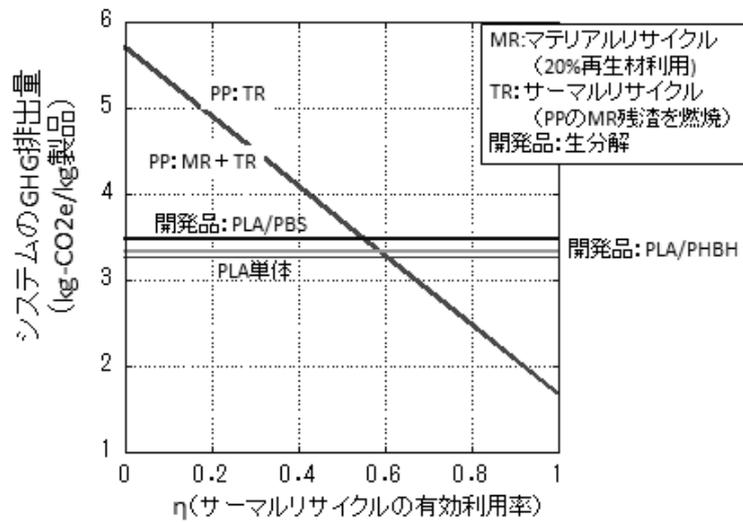


図 4-58 開発品とベースライン (PP) の各種リサイクル適用による GHG 排出量

これらの図から、開発品の PLA/PBS、PLA/PHBH の GHG 排出量は、PLA 単体よりも大きい。これはブレンド材である PBS、PHBH ペレットの GHG 排出量が PLA よりも大きいためである。

ベースラインの PE,PP はマテリアルリサイクルを考慮したが、サーマルリサイクルのみの場合と比べ、大きな GHG 排出量の変化は認められなかった。これは、産業廃棄物からの再生ペレット化に要するエネルギー消費量が小さいためである。つまり、容易に再ペレットが可能で、品質も確保できる産業廃棄物からのマテリアルリサイクルが産業界で実施されていることに対応している。

開発品とベースライン材 (PE,PP) の GHG 排出量を比較すると、サーマルリサイクルの有効利用率が約 60%以内では、開発品の GHG 排出量削減の効果を得られるが、60%以上では削減効果が認められなくなる。

開発品の「PLA/PBS」に対する削減効果を図 4-59 に、「PLA/PHBH」に対する削減効果を図 4-60 に示す。

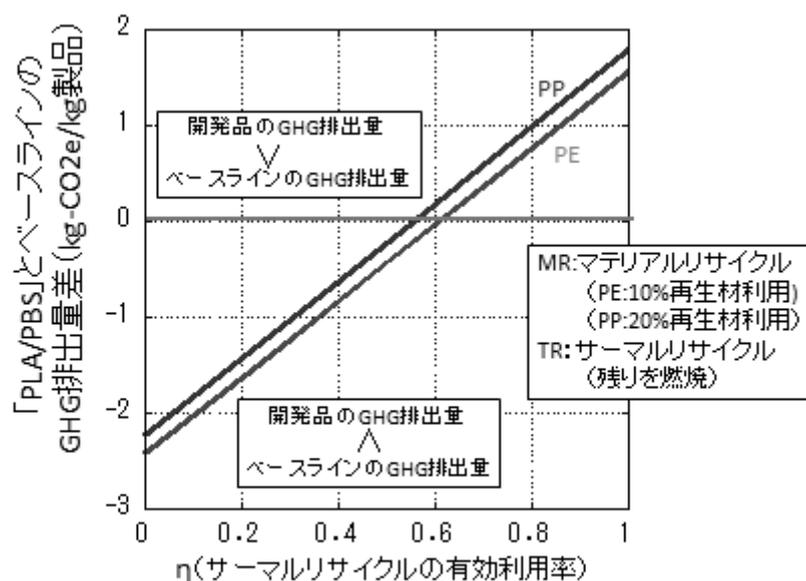


図 4-59 「PLA/PBS」とベースラインの GHG 排出量の差異

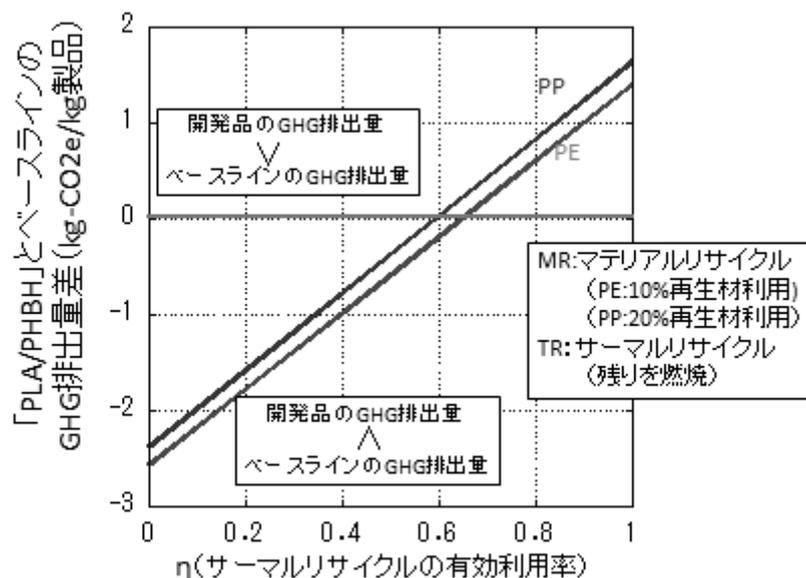


図 4-60 「PLA/PHBH」とベースラインの GHG 排出量の差異

これらの図から、いずれの開発品、ベースラインにおいても、サーマルリサイクルの有効利用率 64%では GHG 排出量の削減効果はないが、サーマルリサイクルの有効利用率 0%では大きな GHG 排出量の削減効果が得られることが分かる。

また、ベースラインの材料リサイクルの有無にかかわらず、GHG 排出削減量は大きな影響を与えず、削減量はサーマルリサイクルの有効利用率に依存する。

本報告書で設定したサーマルリサイクルの各有効利用率での削減量は、表 4-16 のように表される。

表 4-16 サーマルリサイクルの有効利用率を設定したシステムの GHG 排出削減量

素材	PLA/PBS				PLA/PHBH			
	TRの有効利用率(-)		TRの有効利用率(-)		TRの有効利用率(-)		TRの有効利用率(-)	
(1)開発品	3.48				3.33			
(2)ベースライン (PE/PP)	PE 5.90	PP 5.70	PE 3.35	PP 3.12	PE 5.90	PP 5.70	PE 3.35	PP 3.12
削減効果 (1)-(2)	-2.42	-2.22	0.13	0.36	-2.57	-2.37	-0.02	0.21

4-5-6. LCA 算定結果の討論

前節で算定した GHG 排出削減量は、以下の要因により影響を受けることを示している。

- ・ 本事業で開発する PLA ブレンドフィルムの GHG 排出量
(PLA,PBS,PHBH の GHG 排出量およびブレンド比率)
(開発品のマテリアルリサイクルの可能性)
- ・ ベースラインの使用済み部品の有効利用率設定
(マテリアルリサイクル比率、サーマルリサイクルの有効利用率)
- ・ リサイクルで代替するプロセス
(サーマルリサイクルの代替プロセス、ケミカルリサイクルの代替プロセス)

以下には、分析した LCA 結果をまとめ、考察する。

(1) 他の研究との比較

<PLA ペレットの GHG 排出量>

三菱 UFJ リサーチ&コンサルタントは、環境省から受託した「平成 31 年度バイオプラスチック導入に向けた調査及びロードマップ作成に係る委託業務報告書」(2020 年 3 月) [42]の中で、表 4-17 のように、バイオプラとベースラインの GHG 排出量を調査し、比較して示している。

表 4-17 バイオプラとベースラインの GHG 排出量比較 (例)

バイオマス樹脂 (素材作物の産地)	代替する樹脂種	GHG排出 (kg-CO ₂ e/kg-resin)			
		化石資源由来樹脂		バイオマス樹脂	
		(1) 樹脂生産	(2) 焼却	(3) 樹脂生産	(4) 焼却
バイオPET (ブラジル)	PET	1.59 ⁵⁾	2.29	1.79 ²⁰⁾	1.83
		削減量 (1) + (2) - (3) - (4) : 0.262			
バイオPE (ブラジル)	HDPE	1.33 ⁵⁾	3.14	1.26 ¹⁾	0.13
		削減量 : 3.08			
PLA (米国)	PET	1.59 ⁵⁾	2.29	1.80 ²¹⁾	0.00
		削減量 : 2.08			

この表で、PLA の GHG 排出量を、生産まで 1.80kg-CO₂/kg ペレット、焼却時はカーボンニュートラルのため「0」と設定している。出典が不明であるが、NatureWorks の文献値[30] (炭素吸収なし) よりも小さな値を示している。

<GHG 排出の要因>

中谷は、環境再生保全機構の環境研究総合推進費の一環として実施された「プラスチック資源循環とバイオプラスチック」[18]のなかで、以下を述べている。

プラスチック資源循環戦略で謳われている「可燃ごみ指定収集袋など、その利用目的から一義的に焼却せざるを得ないプラスチックには、カーボンニュートラルであるバイオマスプラスチックを最大限使用し」は、当然 同じ種類のプラスチックを利用する限り、バイオマスの導入意義がない。また、バイオマス由来のプラスチックは焼くしても CO₂ を排出しないという認識を、入力出力の観点から考えるべき。さらに、焼却が前提となる用途にバイオマスプラスチックを導入することに意義がある。

原料となるバイオマス生産の土地利用や水資源消費、プラスチックの生産プロセスのエネルギー消費など、その負の側面にも目を向ける必要がある。

本報告書では、地球温暖化の緩和を目的とした GHG 排出量削減を取り扱っているが、バイオ PE の LCA 事例で見られたように、水資源消費と土地利用に伴う GHG 排出量変化にも注目すべきである。このような、エネルギー起因以外の GHG 排出や水消費などの環境フットプリントを対象とすることも、今後の課題となる。

さらに本報告書では、サーマルリサイクルの有効利用率を 2 つ設定した分析を実施したが、フィルム用途では焼却が前提となるケースが多いので、有効利用率は「0」と設定することが妥当であると推察される。

<PLA の用途とリサイクル調和性>

本報告書では、PLA ブレンドフィルムのマテリアルリサイクルは設定していない。三菱 UFJ リサーチ&コンサルタントは環境省への報告書[42]で、PLA のリサイクル調和性の検討の中で、PLA の用途とリサイクル調和性を表 4-18 のように示している。

表 4-18 PLA の用途とリサイクル調和性

主な用途	主な廃棄ルート	リサイクル調和性
容器包装(食品 ／非食品)	一廃、容リ その他プラ	材料リサイクルには適さず。技術的 にはケミカルリサイクル。
	産廃、廃プラ	材料リサイクルには適さず、ケミカ ルリサイクル、または焼却
繊維	一廃、可燃	焼却。施設において熱回収(エネル ギーリカバリー)
農業用マルチ	産廃、廃プラ	生分解性により堆肥化。 または、ケミカルリサイクル
電子・電気部品	家電リ、小電リ 産廃、廃プラ	大量使用されれば、選別の上、ケミ カルリサイクル。

同社は、PLA は生分解性であり、熱変形開始温度が低く、材料リサイクルの阻害が指摘されるので、材料リサイクルには適さず、使用用途によってケミカルリサイクル、生分解または焼却されると設定している。

この報告も踏まえながら、PLA のリサイクルの方向性もさらに検討すべきである。

(2) 感度点検

ISO14040 で規定される LCA の手順としての解釈の段階では、結果に大きな影響を及ぼす変数に着目し、どの程度の影響があるのかを点検する。以下では、感度点検を検討する。

<ベースラインのマテリアルリサイクル率>

図 4-56, 4-57 で示した GHG 排出量の比較では、再生材使用率が PE10%、PP20% の条件下で GHG 排出量を算定した。以下には、感度点検として、PP のマテリアルリサイクル率が 20%±10%の条件でシステム全体の GHG 排出量を試算する。

その結果を機能単位で設定した 30%と共に図示する。(図 4-61)

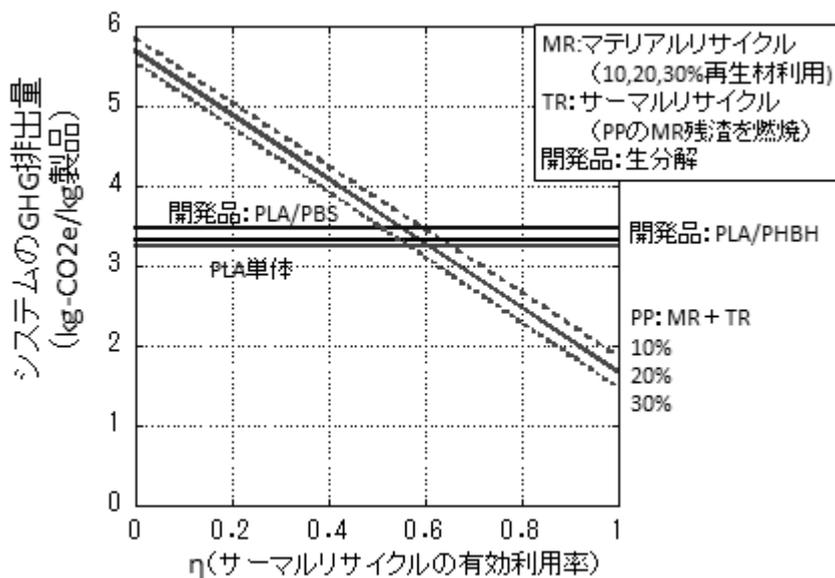


図 4-61 開発品とベースライン (PP) の各種リサイクル適用による GHG 排出量

この図から、マテリアルリサイクル時の再生材利用が、機能単位で設定した 20% から±10%変動したケースでシステム全体の GHG 排出量に及ぼす影響はあるが、大きな影響を及ぼさない。

(3) 限界

この感度点検のためのモデルでは、再生材の割合による物性変化を考慮しておらず、図 4-62 のような物性変化の事例（△再生材による破断伸び低下）も報告されている [43]。この図から、結晶性などで違いのある PP と ABS のどちらでも同様な結果が得られていることから、高分子の種類によらず、バージンと再生品の混合比が破断に関する物性を左右している。開発品のマテリアルリサイクル適用に関しても、物性の確認がされていないので、LCA 分析の限界である。

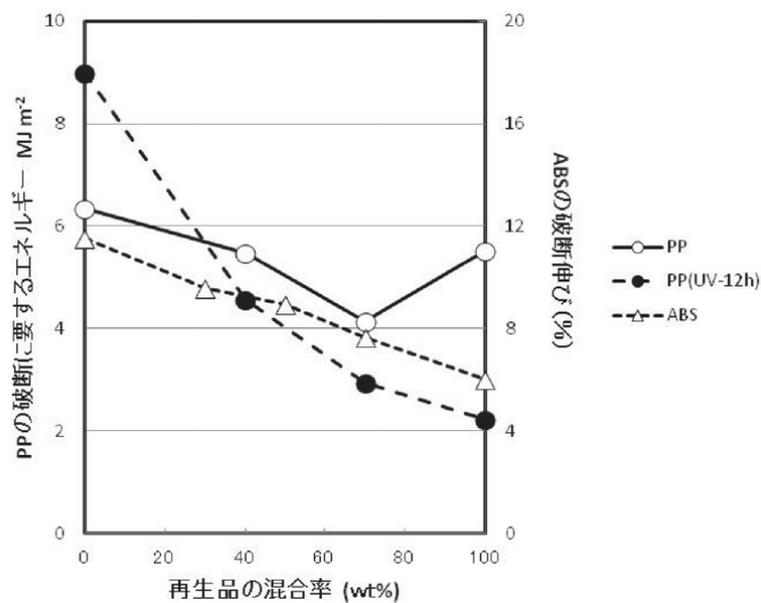


図 4-62 再生材の混合率と PP,ABS の破断伸びの関係[51]

また、再生樹脂は先に示したように単独で販売されている市場がある [52,53]。これらは、自動車に利用された PP 樹脂が再生されているケースと推測される。また、上記の再生樹脂の品質の影響も分かっていない。

これら再生品のマテリアルフローや品質は把握できなかったため、本報告書で実施した LCA の限界であり、今後の検討課題である。

4-5-7. LCA のまとめ

開発品である「PLA ブレンドフィルム」およびベースラインと比較した削減量を、LCA 手法を用いて算定した。特に、ベースラインのマテリアルリサイクルとして再生 PE,PP の混合率を設定し、下記を機能単位と設定した。

対象とする環境カテゴリ：地球温暖化

- ・製品：1kg 相当のフィルムでインフレーション成形品
- ・ベースラインのマテリアルリサイクル率：

PE：10%、PP：20%

- ・機能：産業用または食品用フィルムとして医療可能な PE,PP 樹脂と同等以上の特性
- ・開発品のマテリアルリサイクル率：開発段階にあるので、マテリアルリサイクルはない

産業廃棄物を対象とする再生樹脂製造、再生材利用による新規材の投入削減、残渣の燃焼とサーマルリサイクルの有効利用率などを考慮し、上記の機能単位に基づくシステム全体の GHG 排出量を算定した。

その結果、二種の開発品の GHG 排出削減効果、サーマルリサイクルの有効利用率に大きな影響を受ける。フィルム用途の廃棄時の特徴である燃焼を前提とした場合には、本開発品の適用は大きな GHG 削減効果がある。

なお、基材の候補材であるバイオ PBS や PHBH の GHG 排出量は文献調査の結果、ベースラインよりも大きいことも推測できた。

また、ベースラインの再生材利用を $\pm 10\%$ 変動させた感度点検の結果、再生材の利用促進は、GHG 削減効果に及ぼす影響は小さい。しかし、再生材の利用による物性低下は検討されていないので、本分析の限界である。

今後の課題は、以下のとおりである。

- ・開発品のマテリアルリサイクルの可能性を把握した GHG 削減効果の定量化
- ・エネルギー起因以外の GHG 排出や水消費などの環境フットプリントの検討
- ・実際の加工時のエネルギー消費を含めたデータを高精度化させた LCA の実施

- ・ マテリアルリサイクル以外のリサイクルの代替プロセスの検討
- ・ 日本のプラスチックリサイクル状況を反映した LCA の実施

4-6. まとめ

「PLA ブレンドフィルム」のCO₂削減量についてLCA手法を用いて評価した。

2019年度には、PLAの文献調査およびGHG排出量をシナリオ別に試算し、ベースラインとなるPE,PP樹脂のサーマルリサイクル時の有効利用率に着目して、対象とするシステム全体のGHG排出量を試算した。

2020年度には、昨年度実施したPLAのGHG排出量の精査、各種バイオマス樹脂のGHG排出量調査、PBS,PHBHブレンドフィルムのLCA、ベースラインのマテリアルリサイクルも考慮した対象システムのGHG排出量に及ぼす影響を検討した。

その結果、以下の成果が得られた。

- (1) バイオプラスチックのGHG排出量は炭素吸収を含む場合が多いので、設定したシステム境界に適したデータを選定することが必要である。
- (2) 基材候補であるPBS、PHBHのGHG排出量は、文献調査の結果PLAのそれより大きい。
- (3) ベースラインのPE,PP樹脂が、産業廃棄物からそれぞれ10~20%の再生樹脂がマテリアルリサイクルされ、残りがサーマルリサイクルされた条件で機能単位を設定した結果、PLAブレンドフィルムのGHG排出量はベースラインのフィルムが燃焼される条件では小さく、CO₂削減能力が大きい。

今後、以下を明確にしていくことが必要である。

- ・開発品のマテリアルリサイクルの可能性を把握したGHG削減効果の定量化
- ・エネルギー起因以外のGHG排出や水消費などの環境フットプリントの検討
- ・実際の加工時のエネルギー消費を含めたデータを高精度化させたLCAの実施
- ・マテリアルリサイクル以外のリサイクルの代替プロセスの検討
- ・日本のプラスチックリサイクル状況を反映したLCAの実施

そのため、上記のデータやプロセスをより高精度化して分析することが重要となる。さらに、具体的な用途に対応したLCA検討が必要である。

4-7. 参考文献

- [1]大阪大学：「光活性化二酸化塩素を用いた機能改質による PLA ブレンドフィルムの製造」に係る「リサイクル性を考慮した GHG 削減効果、事業性のライフサイクル評価」委託業務成果報告書、2019 年 3 月
- [2]日本プラスチック工業連盟：<http://www.jpif.gr.jp/>より入手
- [3]石油化学工業会：<http://www.jpca.or.jp/>より入手
- [4] 容器包装リサイクル協会年次報告：<https://www.jcpra.or.jp/>より入手
- [5]プラスチック処理促進協会：<http://www.pwmi.or.jp/>より入手
- [6]プラスチック容器包装リサイクル推進協議会：プラスチックと容器包装(2014)
https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/admin_info/committee/n/12/your12_ap09-01.pdf
- [7]家電製品協会：家電リサイクル年次報告書 令和 2 年度版 (2020)
- [8]パナソニック：<http://www.panasonic.com/jp/>より入手
- [9]経済産業省、環境省：自動車リサイクルの現状 (令和 2 年 8 月 19 日)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/haikibutsu_recycle/jidosha_wg/pdf/048_04_00.pdf
- [10] 宇陀化成：<https://www.udakasei.co.jp/>より入手
- [11] 国松：<http://www.kuni-matsu.co.jp/>より入手
- [12]ナルセ：<http://naruse-fukuro.jp/>より入手
- [13]川瀬産業：<https://www.eco-kawase.co.jp/>より入手
- [14]環境省：低炭素型 3R 技術・システムの社会実装に向けた素材別リサイクル戦略マップ検討会資料、平成 28 年 3 月
- [15] カーボンフットプリントコミュニケーション：<https://www.cfp-japan.jp/>より入手
- [16] エム・エム・プラスチック：<http://www.mmplastic.co.jp/>より入手
- [17]環境省：バイオプラスチック導入ロードマップ検討会 (第 3 回) 資料、2020.11 月
- [18]中谷隼：プラスチック資源循環とバイオプラスチック
<http://ieci.or.jp/2019/08/exp1190823/>より入手
- [19]環境省他：プラスチック資源循環戦略 (2019)
- [20]欧州バイオプラスチック協会，“Bioplastic Market Development Update 2019”，
https://www.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2019/11/Report_Bioplastics-

Market-Data_2019_short_version.pdf

- [21] 日本バイオプラスチック協会：バイオプラスチック導入ロードマップ検討会（第3回）資料、2020.11月
- [22]東レ：
https://www.nikkakyo.org/upload_files/global_warming/clca/jirei/clca_polyester_from_bio.pdf
- [23]仙波、稲葉ほか：Greenhouse gas emissions of 100% bio-derived polyethylene terephthalate on its life cycle compared with petroleum-derived polyethylene terephthalate
Journal of Cleaner Production 195,932 (2018)
- [24]コカコーラ：<http://www.cocacola.jp> より入手
- [25]サントリー：<http://www.suntory.co.jp/> より入手
- [26]環境省の「バイオプラスチック導入ロードマップ検討会（第3回）」
- [27]Erwin T.H. Vink, Steve Davies：Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo Polylactide Production, VOL. 11 NO. 3, (JUNE 2015). INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY
- [28]CE Delft：Biobased Plastics in a Circular Economy、(2017)
- [29]ユニチカ：<https://www.unitika.co.jp/terramac/how/> より入手
- [30]リコー：<http://www.rioh.co.jp/> より入手
- [31]Moussa H.I., Young S.B.: Polybutylene succinate Life cycle assessment variations and variables, Conference of American Institute of Chemical Engineers Annual meeting (2012)
- [32] Sakamoto, Y.： Life Cycle Assessment of Biodegradable Plastics. Journal of Shanghai Jiaotong University, Volume 17 (3), 327 - 329. (2012) （注：上海交通大学）
- [33]昭和電工：<http://www.skd.co.jp> より入手
- [34]三菱ケミカル：<http://www.m-chemical.co.jp> より入手
- [35]カネカ：<https://www.kaneka.co.jp/>より入手
- [36] JRC（Joint Research Centre, EU）：Environmental Sustainability Assessment of Bioeconomy Products and Processes – Progress Report 1 - Version 4 (2015) European Union.
- [37]産業技術総合研究所：IDEA データベース V2.2(2018)
- [38]プラスチック処理促進協会：樹脂加工におけるインベントリデータ調査委報告書

<更新版>第2版、2011年12月

- [39] 産業環境管理協会：平成17年度成果報告書「製品等ライフサイクル二酸化炭素排出評価実証等技術開発—環境技術開発の効率的展開を目指した評価手法の開発—」・静脈系プロセスに係る環境影響評価手法の開発成果報告書、平成18年3月、
(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構
- [40] プラスチック処理促進協会：2018年プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況 マテリアルフロー図 (2019) <http://www.pwmi.or.jp/>
- [41] 環境省編：IPCC Report Communicator(2018)
- [42] 三菱UFJリサーチ&コンサルタント：平成31年度バイオプラスチック導入に向けた調査及びロードマップ作成に係る委託業務報告書(環境省委託)(2020)
- [43] 高取永一：プラスチックのマテリアルリサイクルと再生プラスチックの物性、日本ゴム協会誌、87,441 (2014)

第五章 PLA ブレンドフィルムに関する原料確保と市場調査（長瀬産業（株））

5-1. コスト試算に向けたニーズ調査（国内外の意識調査結果の比較から）

開発品の実用化のためには十分な市場ニーズが必要であることから、バイオマスプラに関する日本国内の意識調査結果を調べた。

*アメリカの企業 Covanta が、アースデイに向けて、2000 人のアメリカ人を対象に行なった、リサイクルに関する意識調査

《結果》

- ・リサイクルに対する知識不足で、リサイクルが正しく行えていないのではないかと不安に感じているアメリカ人は 62%であった。
- ・リサイクル可能なアイテムをリサイクルしているのはわずか 31%で、平均では、リサイクル可能性のあるアイテムを週に 5 つ捨てている。
- ・その一方で、30%がペットボトルの使用を避け、29%がプラスチックストローの使用を避けている。
- ・環境に対する意識は高いため、もしゴミゼロの生活を送れるなら今よりも高い支出があっても構わないと考えているものは 83%、そのうち 15%は年間 6000 ドル以上の支出が増加しても問題がないと考えている。

出展：プラ工連・ワシントンコア第 6 回情報交換会ワシントンコア資料

*日本で 500 円のお弁当をバイオマスもしくは生分解性プラ容器に変更した際、コストアップはどこまで認められるか？をアンケート

《結果》

- ・従来通りでなければ購入しない：24%
- ・5 円 UP までであれば購入しても良い：11%
- ・10 円 UP までであれば購入しても良い：20%
- ・20 円 UP までであれば購入しても良い：11%
- ・30 円 UP までであれば購入しても良い：6%
- ・50 円 UP までであれば購入しても良い：12%
- ・51 円以上 UP でも購入しても良い：7%
- ・わからない：9%

以上のように、日本国内では欧米と比較して環境問題に対する危機意識は必ずしも高くなく、コスト増に対しては否定的な印象を抱いていることがわかる。そのため、環境負荷を低減させた製品であるという訴求のみでは消費者の購買意欲向上にはつながらないと考えられる。特に PP や PE の製品はコストが低いことからバイオマス製品へと置き換えた際の割高感はより大きいことが予測されるため、さらなる高付加価値の提供が必要と考えられる。

5-2. コンポスタブル製品に関する調査（タイ、Thantawan 社製品について）

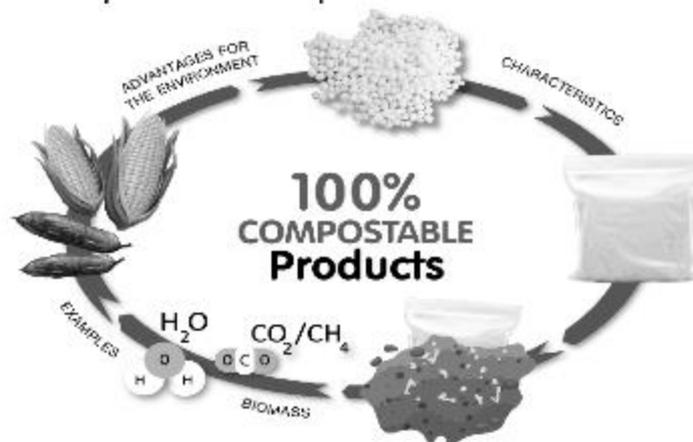
LCA の結果などから、開発品の用途展開において、PP や PE の置き換え用途のみならず、生分解性に基づいた製品開発を視野に入れる必要性が生じた。そのような背景から、現状におけるコンポスタブルな製品の需要及び既存製品の性能などに関する調査を行った。その参考例として、タイの Thantawan 社の PLA を原料としたコンポスタブル製品の資料を以下に記す。



Why Compostable Products and Facts

- ✓ Conventional plastic degrades in more than 400 years and plastic waste is increasing everyday
- ✓ Global warming concern since Kyoto Protocol (1997) and Paris Agreement in 2015 in COP21 Sustainable Development Summit
- ✓ Single Use Plastic Ban becomes worldwide trend
- ✓ **"Compostable Products"** is the Sustainable Solution.
 - ✓ Can replace conventional petrol based plastic
 - ✓ Eco-friendly and Renewable
 - ✓ Organic recyclable (PLA material)
 - ✓ Compostability in industrial compost plants or in home compost
 - ✓ Increasing Opportunity to reduce landfill space

Cycle of Compostable Products



Comparisons: Degradable vs Compostable Plastics

(Oxo) Degradable Plastic

- It is plastic with additives
- Made from plastic with other chemicals added (including heavy metals) that cause the plastic to break down and disintegrate over time when exposed to sunlight and heat.
- Not compostable
- Break down into hundreds of tiny pieces of plastic or MICRO Plastic

Compostable Plastic

- Made of natural plant starch, and do not produce any toxic material. Compostable bags break down readily in a composting system through microbial activity to form compost
- Consists of
 - Disintegration
 - Biodegradation
 - No Ecotoxicity
 - Low Heavy Metal (Chemical Composition)

Bio-Based Plastic vs Biodegradable Plastic



Bio-based Plastics = made of or contain renewable resources



Biodegradable Plastics = degrade by naturally occurring microorganisms such as bacteria, fungi, and algae to yield water (H₂O), carbon dioxide (CO₂) and/or methane (CH₄), biomass, and inorganic compounds.

Compostable Plastics: EN13432, EN14995, ASTM D6400, ISO17088, AS4736, TIS17088

Controlled condition: 60°C

- Disintegration: decomposed into tiny pieces (2x2 mm) in 12 weeks
- Biodegradation: ≥90% broken down by biological action into CO₂, water, and mineral within 6 months.
- Ecotoxicity
- Chemical Composition: volatile matter, heavy metals (Cu, Zn, Ni, Cd, Pb, Hg, Cr, Mo, Se, As) and fluorine



Our Compostable Products' Key Features



100% and Fully Compostable Material

Made from Renewable Material

All products are certified for Compostability

Variety of Product Application for household and industrial market

Straw and Food bag Products are Food Contact Certified

Over 8 year experience and our products are commercialized in the US, Australia, EU markets

Our Product Application vs Compostable Material



Raw Material : Compound of	PLA (non-starch)	Starch (with PBAT, or PBS)	PBS (non-starch)	PBAT (non-starch)
Product				
Carrier Bags	x	x		
Trash Bags / Garbage Bags/Poo Bags	x	x		
Planting Bags	x	x		
Gloves	x	x		
Zipper Bags		x		x
Zipper Tape		x	x	x
Straw	x		x	x

Product Category and Capacity



100% Compostable Product Lines



THANTAWAN
INDUSTRY PLC.

100% COMPOSTABLE Plastic Straw

- ✓ Food Contact Compliance
- ✓ Straight straw, Flexible straw, Spoon Straw
- ✓ With or without paper wrap
- ✓ Diameter: Outer Diameter 5 mm., 6 mm., 7 mm.
- ✓ 12 months shelf-life in normal condition storage
- ✓ Suitable for cold beverages



Certified Worldwide Standard

THANTAWAN
INDUSTRY PLC. 

- USA – ASTM D6400-99 , ASTM D6866
- Europe – EN 13432
- International – ISO 17088



以上の資料からもわかるように、現状のコンポストブル製品の用途としては回収困難なストローや、廃棄を前提としたバッグ、手袋、ゴミ袋などが挙げられる。同様の用途展開を本事業の開発品で行う場合、これらの既存製品とのコスト競争となるため、生分解性だけではないメリットの提供も求められる。

今後も引き続き、バイオマスプラスチックを活用した既存製品の用途や現物入手と物性評価を行うことで開発品の優位点を見出す。また、社会要請は大きく変わり続けていることから、バイオマスプラスチックに関連する展示会などへの参加や各社個別のニーズヒアリングにも継続して行う必要がある。

5-3. 原料確保体制の確立と実用レベルに対する目標値

バイオマスプラスチックの入手が困難になっていることから、原料確保体制の確立を行った。PLAについては、供給量の増加と需要の落ち着きが見られることもあり、安定供給に対する体制確保ができた。一方で、PHBHについては生産元であるカネカからの供給が完全に停止している状況である。そのため、次年度以降には安定供給が見込まれるその他の生分解性樹脂（PBS やバイオ PE、PVA など）にシフトする必要がある。また、5-2で調査したコンポスト用途においては、透明性は求められず、適度な強度と数ヶ月単位での生分解性が求められることから、これらを目標値として次年度以降の検討に進むこととする。

5-4. まとめ

前年度から継続してバイオマスプラスチックへのニーズの高まりを受けた原料の安定確保という課題は依然として残されたままである。一方で、国内でのバイオマスプラスチックに対する購買意欲はまだまだ低いことが考えられ、製品としての付加価値を高める必要がある。より、環境意識の高い欧州や原料生産国であるアジア圏での商品展開も今後視野に入れる必要がある。

〈別添参考資料 1 : 仕様書〉