

令和3年度環境省委託業務

令和3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4年2月

大阪大学大学院薬学研究科

目次

概要（サマリー）	4
----------	---

第一章 序論

1-1. バイオマスプラスチック	7
1-2. 業務の目的	8
1-3. 解決すべき技術課題	10
1-4. 実証事業の内容	11

第二章 バイオマスプラスチックに関する技術開発

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（ペレット）検討	12
2-1-2. NMR 測定による官能基評価	17
2-1-3. XPS 測定	18
2-1-4. 分子量測定	24
2-1-5. まとめ	25
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. PLA-PHBH ブレンド品の検討	26
2-2-2. PLA-PBS ブレンド品の検討	29
2-2-3. まとめ	31
2-3. プロセス化に向けた条件検討（（大）大阪大学、長瀬産業（株））	
2-3-1. 粉体サンプルの酸化処理スケールアップの検討	31
2-3-2. 固体ペレットサンプルの酸化処理スケールアップの検討	40
2-3-3. 固体ペレットサンプルの高速酸化処理の検討	43
2-3-4. まとめ	45

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作製	46
3-1-2. 熱分析による相溶性評価	56
3-1-3. まとめ	56
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	57

3-2-2.	消費エネルギー及びコスト試算	62
3-2-3.	まとめ	63

第四章 LCA の検証・評価（（大）大阪大学）

<概要>	65
4-1. 目的	67
4-2. 本調査の範囲	68
4-3. ベースライン製品の利用状況と機能単位	69
4-3-1. ベースライン樹脂生産と需要	69
4-3-2. 機能単位設定の考え方	73
4-3-3. プラスチックのリサイクル状況	75
4-3-4. ベースラインのマテリアルリサイクル	85
4-3-5. 機能の設定	95
4-4. バイオプラスチックの利用と LCA	96
4-4-1. プラスチック資源循環戦略	98
4-4-2. バイオプラスチックの生産量	99
4-4-3. バイオ PET	101
4-4-4. バイオ PE	103
4-4-5. ポリ乳酸 (PLA)	105
4-4-6. バイオ PBS	110
4-4-7. バイオ PHA	113
4-4-8. 機能単位の設定	120
4-5. PLA ブレンドフィルムの LCA	121
4-5-1. 対象製品	122
4-5-2. 機能単位	122
4-5-3. システム境界	123
4-5-4. 製品のフロー設定とインベントリデータ	124
4-5-5. 環境影響評価と解釈	130
4-5-6. LCA 算定結果の討論	135
4-5-7. LCA のまとめ	144
4-6. まとめ	144
4-7. 参考文献	146

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.	農業用マルチについて	149
------	------------	-----

5－2．	生分解性農業用マルチフィルムの市場価格調査結果・・・・・・・・・・	151
5－3．	PLA ブレンドフィルム用素材の市場調査結果・・・・・・・・・・	152
5－4．	市場調査結果および本実証事業成果に基づく出口戦略・・・・・・・・・・	154
5－5．	まとめ・・・・・・・・・・	154

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 結合選択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ペレット酸化処理を行った。さらに、新たなターゲット樹脂としてポリブチレンサクシネート（Polybutylene succinate: PBS）のペレット酸化も行った。PLA や PHBH と比較して、PBS は酸化されやすく主鎖切断による分子量低下が起りやすいことが明らかとなった。これは、PLA や PHBH のような側鎖アルキル基を有していないため、主鎖の酸化が起こるためと考えられる。

続いて、本改質法により調製された改質樹脂ペレット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 の比率でブレンドすることで、フィルムの引張伸びの顕著な向上が見られた。同様に PBS のブレンドにおいても引っ張り伸びの向上が見られたが、PHBH に比べるとその効果は小さかった。

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、原材料である PLA および PHBH、PBS の LCA の検討を行い、置き換え対象品である PP や PE からなるフィルム、PET からなる容器との比較を行った。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、使用後の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。

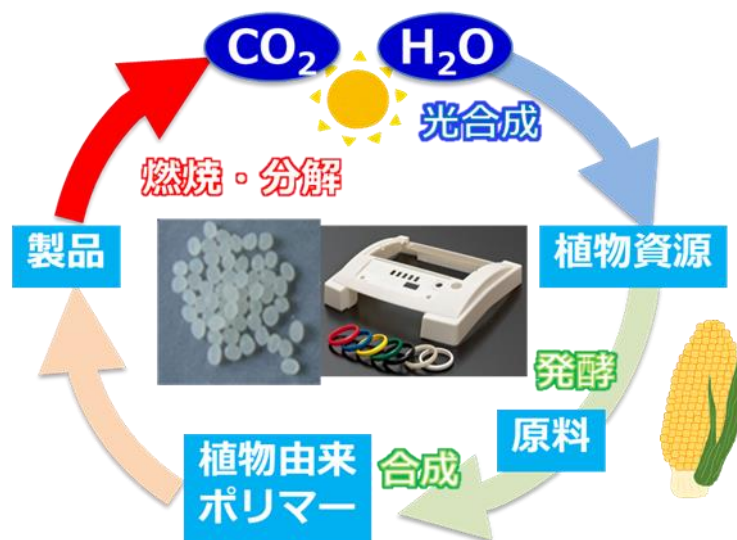


図 1-1. バイオマスプラスチックのカーボンニュートラル特性

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途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。

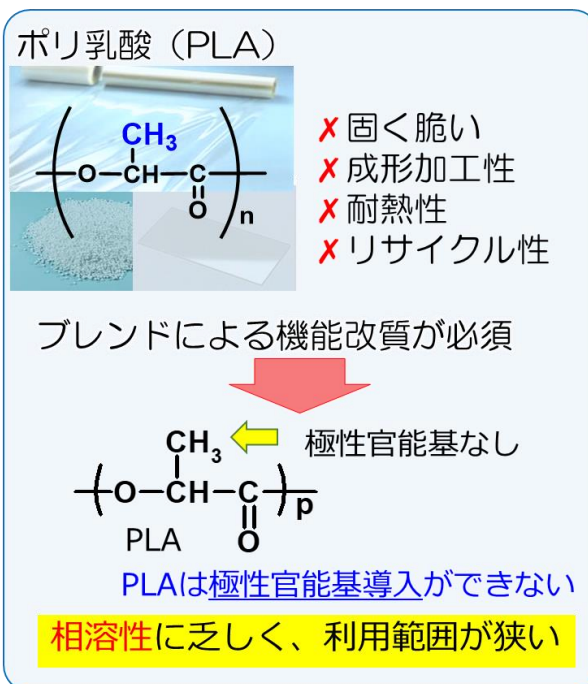


図 1-2. PLA の利用拡大に向けた課題

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ってしまうと、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。
- ・光活性化二酸化塩素を用いた新規酸化法により、PHA や PBS などの機能改質を行うことで PHA や PBS などに他樹脂との相溶性を付与すること。
- ・PHA や PBS など、もしくはその酸化改質樹脂などの高靱性材料を PLA もしくは改質 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）。

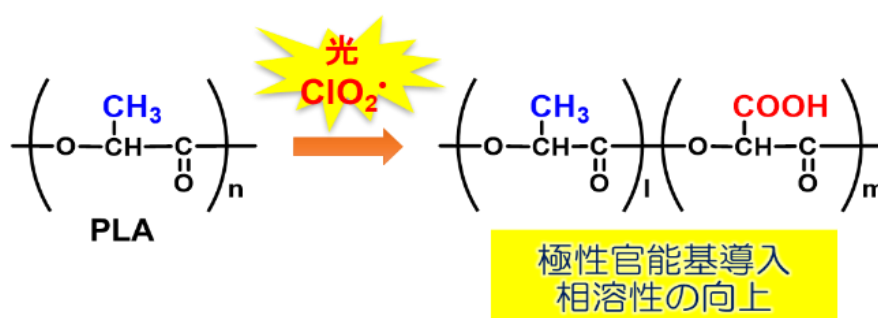


図 1-3. PLA の二酸化塩素光酸化による極性官能基導入

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、農業用マルチフィルムを開発する。また、トレー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 バイオマスプラスチックに関する技術開発

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

PLA を主成分とするバイオマスプラスチック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 PLA および、PHBH の酸化についてラボスケールでの基盤技術を確立している。本年度事業では新たに PBS の酸化と、PLA、および PHBH、PBS の kg スケールでの酸化度制御を目指し検討を行った。また、適切な酸化度を評価するため、表面元素比率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 (ペレット) 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。また、今後のスケールアップを視野に入れ、処理対象を粉体からペレットに変更した。

検討内容としては、①酸化時間の検討、②試薬濃度の検討、の 2 点について報告する。

【酸化操作】

反応容器として、500ml のナスフラスコを用い、 ClO_2 源として 300ml の三角フラスコに、酸性 NaClO_2 水溶液を入れた。酸性 NaClO_2 水溶液は、 H_2O (200mL)、 NaClO_2 (2g)、および 35% HCl aq. (2ml) を混合した水溶液を用いた。

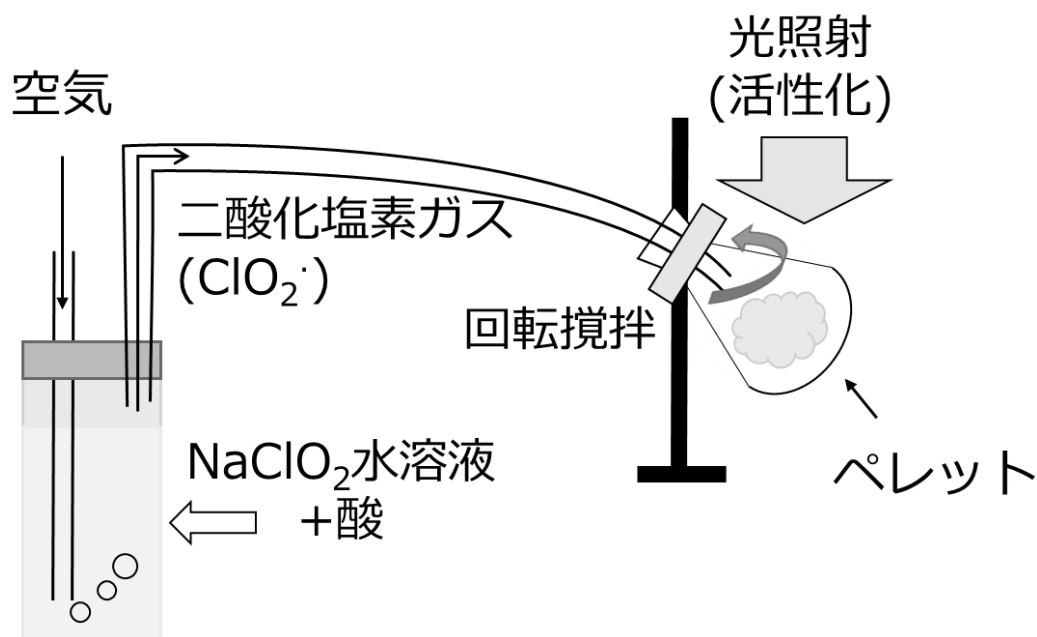


図 2-1. 反応装置図

図 2-1 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、反応容器中へ $\text{ClO}_2\cdot$ を導入するとともに、固体サンプルを入れた反応容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。酸化処理は前記ナスフラスコ的前方から、波長 365 nm の LED ランプを光源として 20 mW/cm^2 の光量で所定時間光照射することで達成した。その光照射により活性化された二酸化塩素ラジカルを、前記固体サンプルの表面と反応させて酸化処理した。

【トルイジンブルーを用いた染色法】

ー装置

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: 400nm

ーサンプル調整

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、常温で 15 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

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

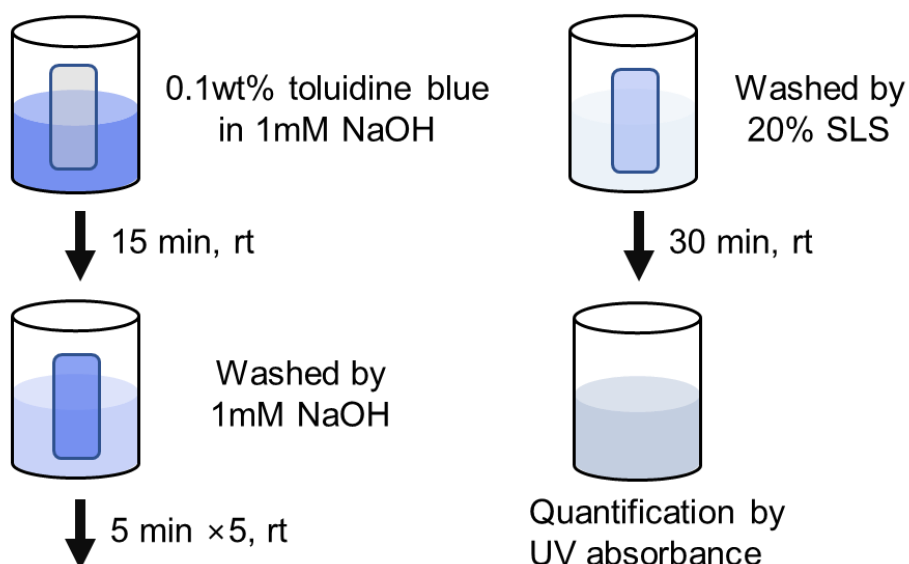


図 2-2. トルイジンブルーを用いたカルボン酸選択的染色法

ー検討方法

① 酸化時間の検討

PHBH の固体ペレット 40g を酸化反応容器のナスフラスコに、濃度 1%の酸性 NaClO_2 水溶液を三角フラスコに入れて反応を行い、酸化時間（5 分、15 分）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、前述のトルイジンブルー染色法を用いて、カルボキシ基量を見積もった。

② 試薬濃度の検討

PHBH の固体ペレット 100g を酸化反応容器のナスフラスコに、酸性 NaClO_2 水溶液を三角フラスコに入れて反応を行い、試薬量、 HCl 濃度などを変更して種々検討を行った。反応時の光源ランプの光量は 20 mW/cm^2 、酸化反応時間は 5 分として比較した。また、酸化度については、酸化反応後、前述のトルイジンブルー染色法を用いて、カルボキシ基量を見積もった。

－結果

① 酸化時間

PHBH ペレットの酸化時間の検討について、結果を図 2-3 に示す。

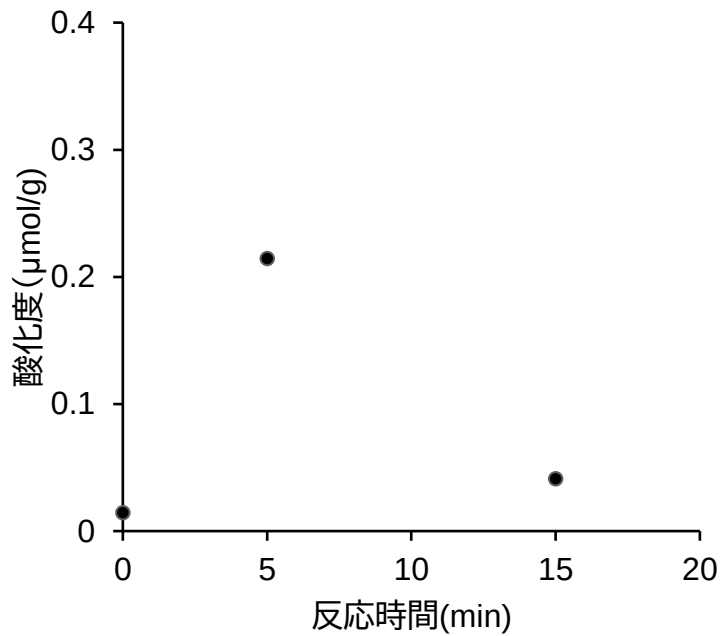


図 2-3. 酸化時間検討

UV の照度を固定した場合、反応初期では照射時間の増加とともに酸化度の増加が認められたものの、10 分以降では顕著な差は見られなかった。

② 反応試薬濃度

種々の検討を行ったところ、酸濃度（HCl 量）が最も大きく影響を与えることがわかった。表に示すように、HCl 量のみを変えて処理を行ったところ、サンプル量が多くても酸化度が高くなることが分かった（図 2-4）。

表 2-1. 試薬調整量

サンプル量 (g)	HCl (ml)	H ₂ O (ml)	NaClO ₂ (g)
① 40	2	200	2
② 100	3	200	2

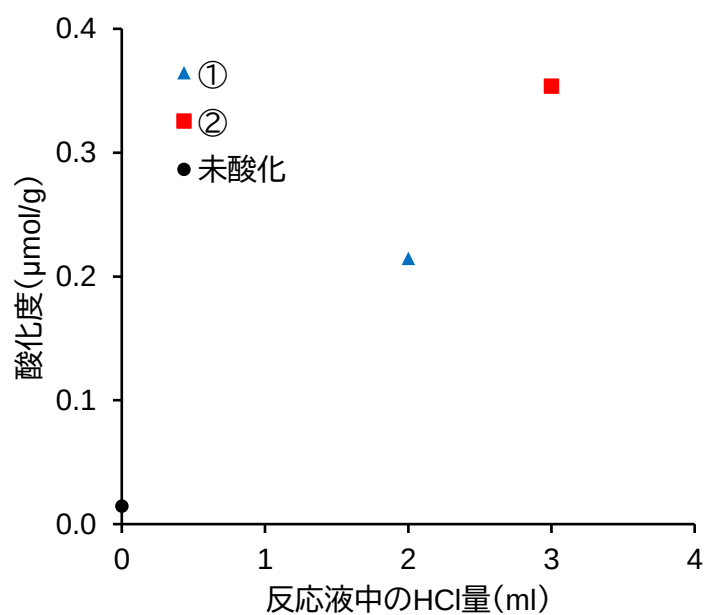


図 2-4. 反応試薬の検討

2-1-2. NMR 測定による官能基評価

酸化前後の NMR 測定を行うことで、酸化部位および導入官能基の特定を目指した。粉体 PHBH の酸化前後において、顕著な差異は見られなかった (図 2-5)。新たなシグナルの観測もされなかったことから、NMR からの導入官能基の決定は困難であると判断した。一方で、酸化度を変えたサンプル間での比較において、メチン炭素に結合したプロトン (b, b') と比較して、側鎖プロトン (e, c, c', d) 減少量が多いことから、側鎖が優先して酸化されていることが示唆された。

NMRデータ

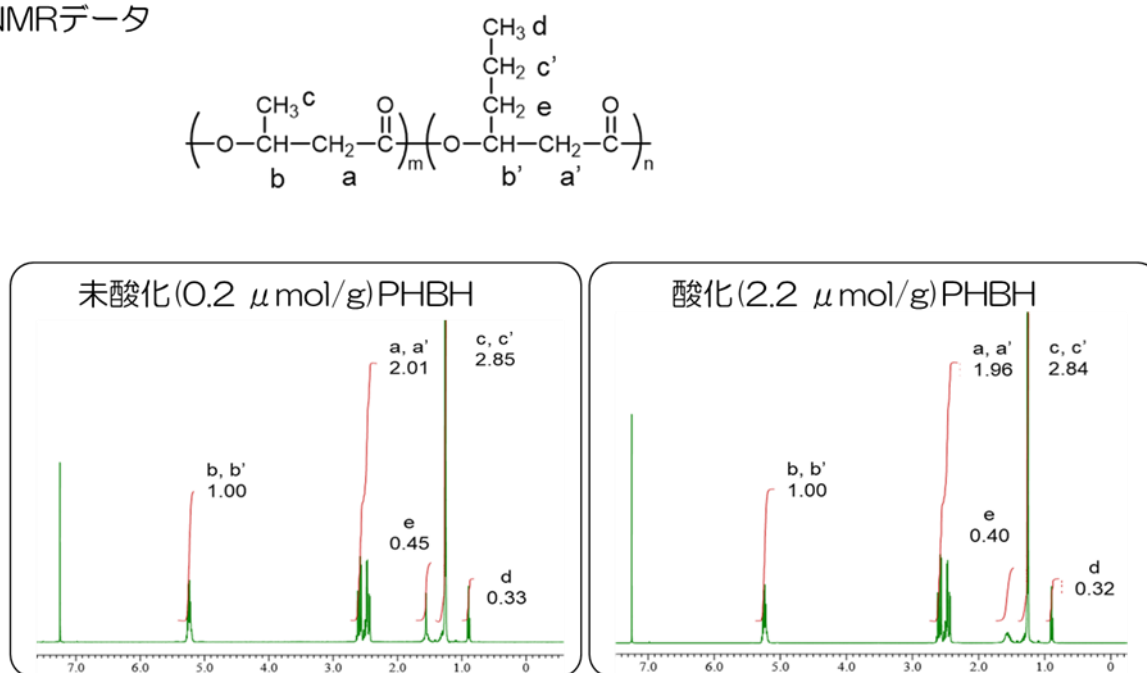


図 2-5. 粉体 PHBH の酸化前後の NMR データ

続いて、PBS の酸化前後の NMR 測定を行った（図 2-6）。この場合も新たなシグナルの検出は無かったものの、エーテル結合型の C-H が優先して酸化されている傾向が示された。

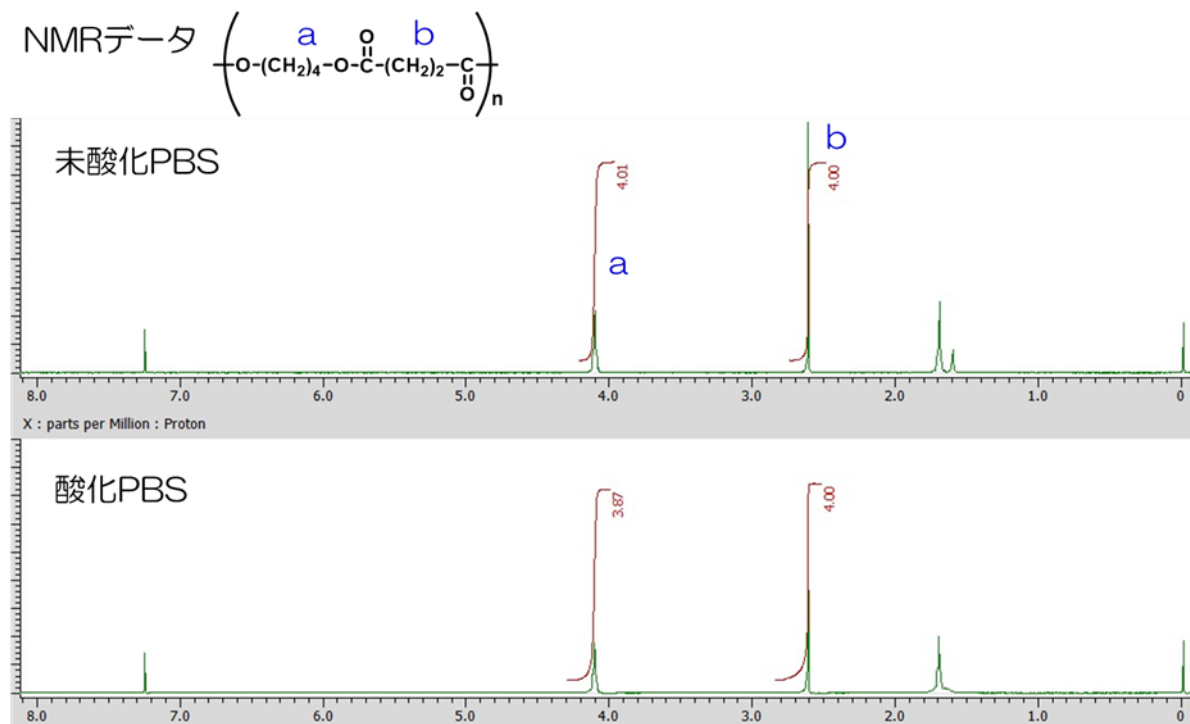


図 2-6. PBS の酸化前後の NMR データ

2-1-3. XPS 測定

次に酸化前後の PBS の X 線光電子分光法（XPS）により、表面元素組成と導入官能基に関する情報の取得を試みた。測定結果を表 2-2,3、図 2-7-10 に示す。元素比率からは若干の酸素比率の向上と、塩素の導入が認められた。しかし、PLA や PHBH と比較すると導入酸素量は極めて微量であった。

表 2-2. 元素比率算出結果 (atomic%)

サンプル	C	O	Cl
PBS	68.7	31.3	—
PBS (酸化後)	66.3	33.0	0.7

PBS-ref0001.SPE:		Company Name
2022 Feb 4 Mg std 400.0 W 0.0 μ 45.0° 117.40 eV	4.0224e+004 max	2.20 min
SUR/Area1/1		

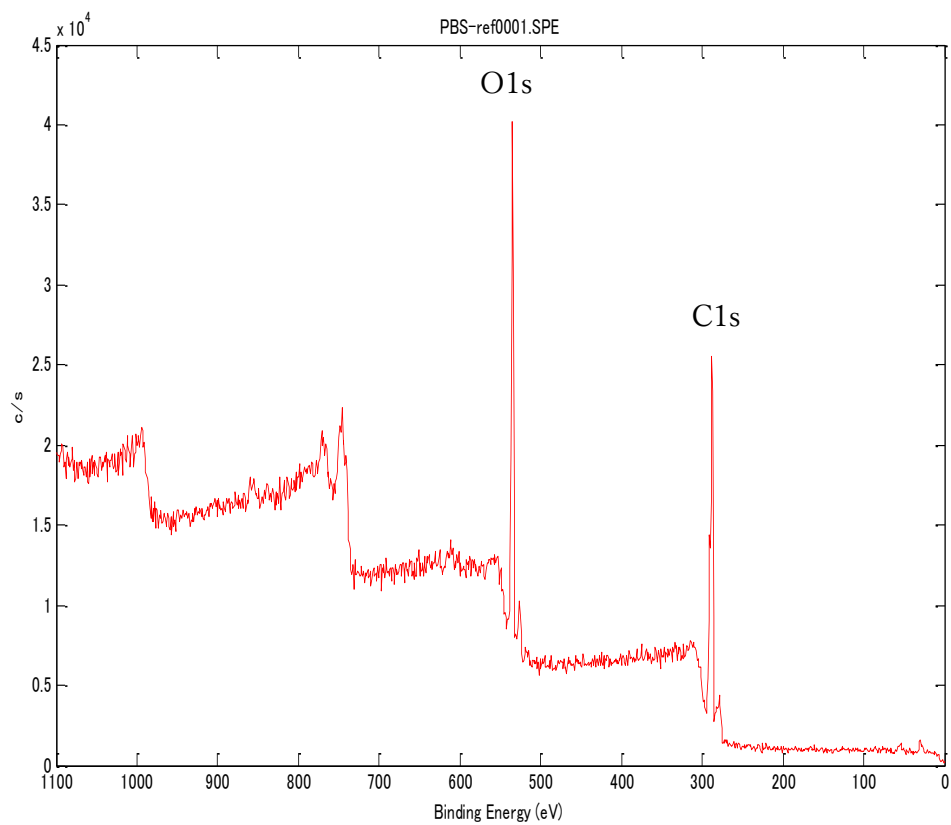


図 2-7. PBS 未処理のワイドスキャンスペクトル

PBS-60C-10001.SPE:

2022 Feb 4 Mg std 400.0 W 0.0 μ 45.0° 117.40 eV

4.1626e+004 max

Company Name

2.20 min

SUR/Area1/1

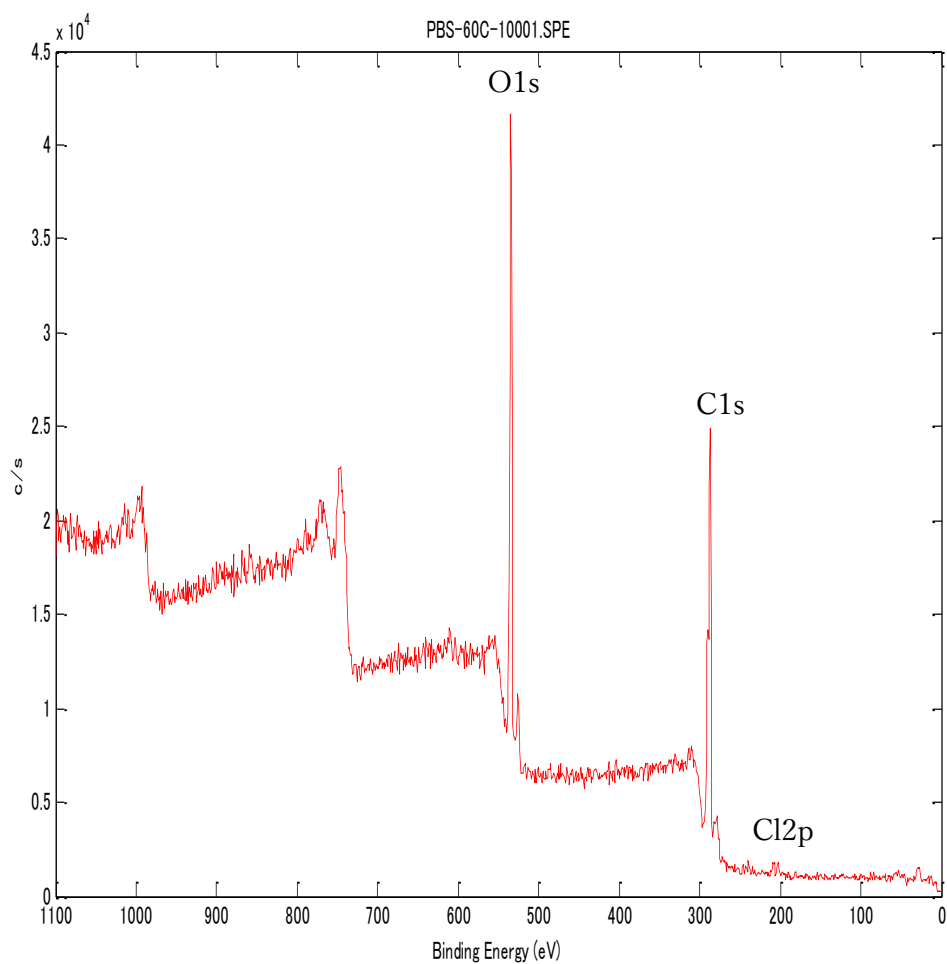


図 2-8. PBS 酸化後のワイドスキンスペクトル

また、ナロースペクトルの結果からの官能基量分析においても、酸化前後で大きな差は見られず、若干のカルボニル性官能基（ケトン、エステル、カルボン酸）の増加が認められる結果となった。

表 2-3. PBS 酸化前後の C1s 波形解析結果 (area%)

サンプル	C-C	C-O	C=O, OCO	COO
PBS	50.9	25.5	0.6	23.0
PBS (酸化後)	50.4	24.4	1.0	24.2

PBS-ref0002.SPE:

2022 Feb 4 Mg std 400.0 W 0.0 μ 45.0° 29.35 eV

5.9339e+003 max

Company Name

2.00 min

C1s/Area1/1 (Shift Shift)

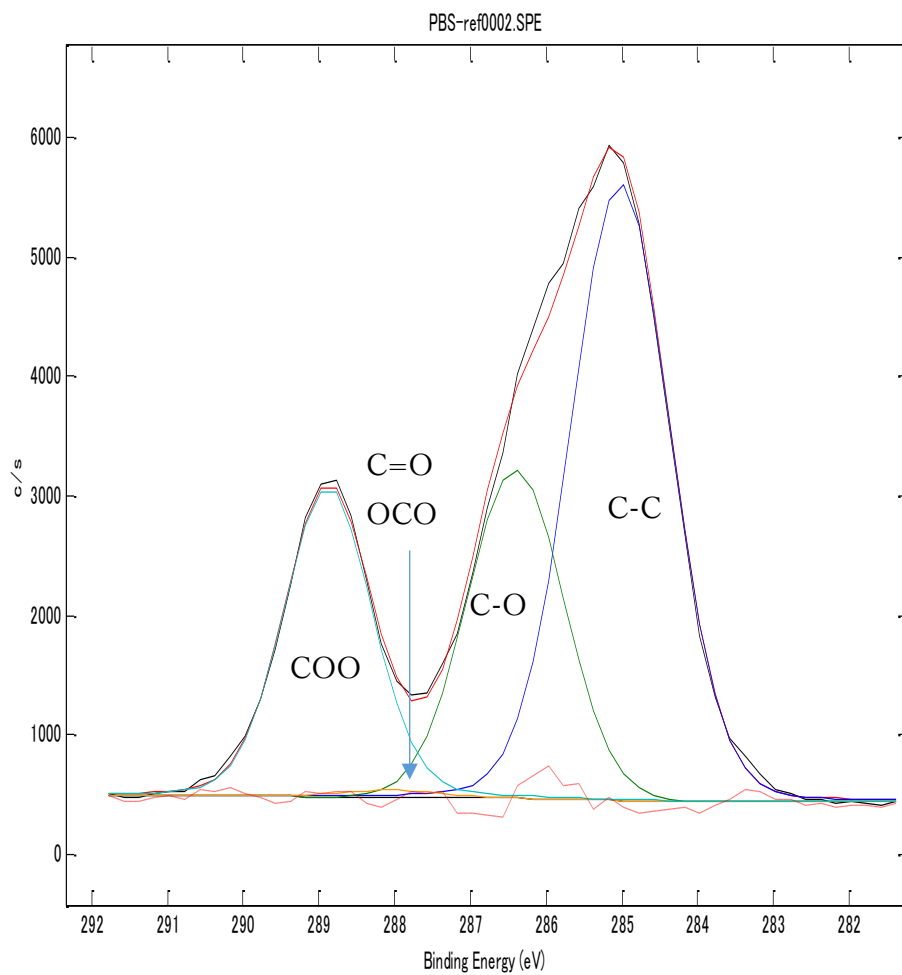


図 2-9. PBS 未処理の C1s 波形解析

PBS-60C-10002.SPE:

2022 Feb 4 Mg std 400.0 W 0.0 μ 45.0° 29.35 eV

5.6987e+003 max

Company Name

2.00 min

C1s/Area1/1 (Shift)

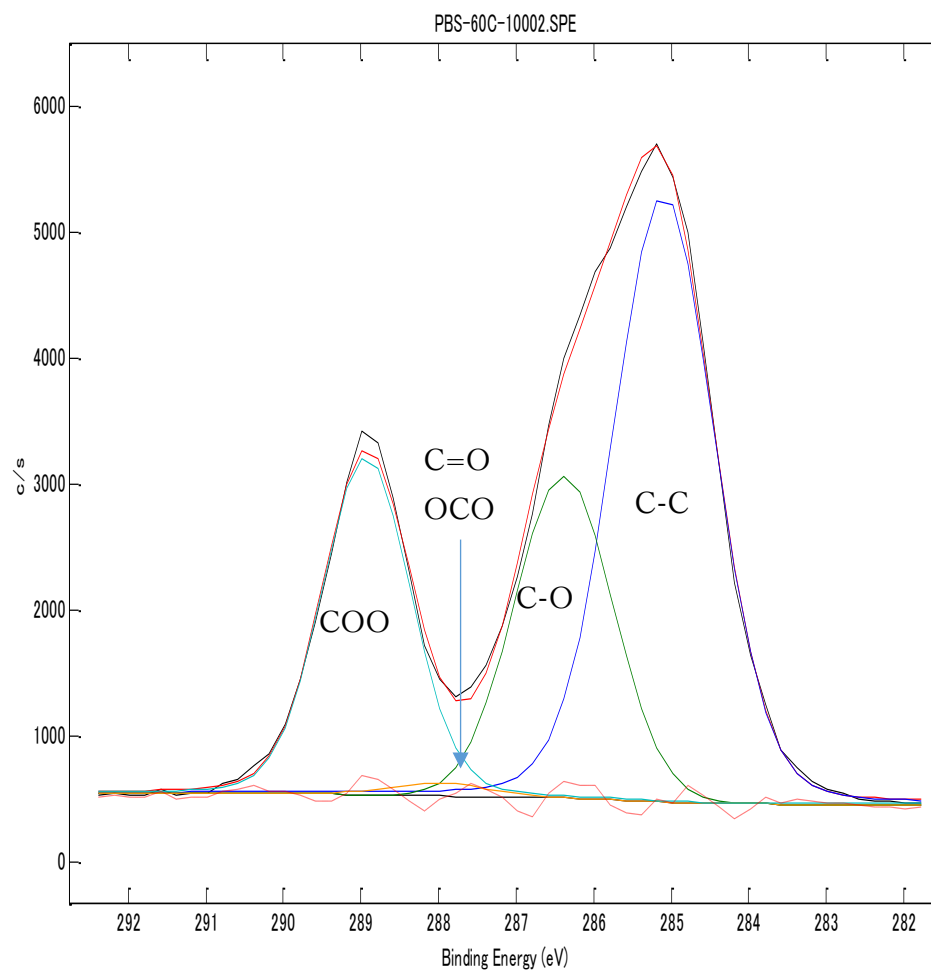


図 2-10. PBS 酸化後の C1s 波形解析

2-1-4. 分子量測定

前年度までに PLA の酸化により、分子量が低下することが分かっている。これにより基礎物性が低下するため、官能基導入と分子量低下のトレードオフの関係を明確にし、物性を維持しつつ官能基を最大限導入できる酸化度を樹脂に応じて設定する必要がある。酸化処理前後の PBS の分子量測定結果を、以前の酸化前後の PLA の分子量測定結果と併せて表 2-4 に示す。

表 2-4. 酸化処理前後の PBS および酸化前後の PLA 分子量測定結果

	Mn	Mw	Mw/Mn
未処理PLA	99,000	240,000	2.416
室温酸化PLA	64,600	184,500	2.854
加熱酸化PLA	35,800	153,300	4.277
未処理PBS	17,400	128,800	7.401
室温酸化PBS	7,564	98,000	12.965

PBS では PLA と比較して弱い酸化条件でも分子量低下が起きやすいことが明らかとなった。これは、PBS が側鎖アルキル基を有しない構造であり、主鎖 C-H が酸化されることで主鎖切断が進行するためと考えられる。このことから、PBS においては低い酸化度に抑制する必要があるが示唆された。

2-1-5. まとめ

以上の結果から、ペレット状の PHBH でも酸化が進行し種々の条件により酸化度を制御できることが示された。また、酸化反応によりポリブチレンサクシネート (PBS) に対しても酸素官能基が導入されることが示唆された。一方で、XPS からその増加量は大きくないこと、また分子量測定の結果から PLA や PHBH と比較して分子量低下が起こりやすい材料であることも明らかとなった。これらから、PBS においては主に主鎖切断に伴うカルボキシ基量の増加が起きていることが考えられ、ブレンド品の物性への影響をフィードバックしつつ適切な酸化度に調整する必要があると考えられる。この酸化に対する影響の違いは、NMR 解析などから PBS は PLA や PHBH のように側鎖を有しないために主鎖の酸化が進行するためであることが示唆された。

何れの樹脂においても相溶性向上のカギとなる官能基導入と物性低下を引き起こす分子量の低下はトレードオフの関係となる。本事業内検討では PLA の酸化改質により物性が低下する結果となったが、これは分子量低下が大きく作用したものと考えられ、PLA のグレードを変え、より分子量の大きい PLA を用いることでより高い物性を有するブレンドフィルムを作製可能であると推察される。

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))

前年度に引き続き、PLA-PHBH ブレンドサンプルの作製と評価を行った。ラボスケールでの評価として、PHBH のブレンド比率による影響を検討した。また、PLA-PBS ブレンドサンプルの作製と評価も合わせて行った。これらは全てペレット酸化品を用い、引張試験を行うことで簡易的な靱性の評価とした。なお、PVA や PE などのブレンド検討も行ったものの、PHBH や PBS と比較して効果が低かったため、これらの詳細な結果については割愛する。

2-2-1. PLA-PHBH ブレンド品の検討

PHBH の二酸化塩素酸化による物性を評価する目的で、酸化した PHBH と PLA をホットプレートで熔融、手混ぜで混練し引張試験を行った。

ー検討方法

【フィルム作製】

PLA に対して、前項で作製した酸化 PHBH (ペレット酸化品) を 95 : 5 と 80 : 20 の範囲の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 (表 2-5、2-6)。以下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、複数種の酸化度の PHBH を用い、全体の比率を PLA/PHBH=95/5、80/20 とした。

表 2-5. 各種酸化度の PHBH を用いた PLA-PHBH=95/5 ブレンドフィルム引張試験

	サンプルの酸化度 ($\mu\text{mol/g}$)	破断点変異 (%)	最大点応力 (N/mm^2)	弾 性 率 :1-5N (N/mm^2)
1	0.015 (未酸化)	4.03 ± 0.56	57.56 ± 1.93	2133
2	0.051	4.36 ± 0.14	57.80 ± 1.13	2105
3	0.149	4.04 ± 0.49	57.21 ± 3.18	1987
4	0.215	3.67 ± 0.51	55.96 ± 3.67	2125
5	0.354	3.76 ± 0.33	56.26 ± 3.76	2131

表 2-6. 各種酸化度の PHBH を用いた PLA-PHBH=80/20 ブレンドフィルム引張試験

	サンプルの酸化度 ($\mu\text{mol/g}$)	破断点変異 (%)	最大点応力 (N/mm^2)	弾 性 率 :1-5N (N/mm^2)
1	0.015 (未酸化)	10.81 ± 1.72	48.53 ± 1.31	1805
2	0.051	37.45 ± 17.2	47.62 ± 1.45	1840
3	0.149	14.78 ± 3.23	47.08 ± 0.38	1786
4	0.215	43.96 ± 21.0	47.78 ± 0.94	1791
5	0.354	11.91 ± 12.7	47.29 ± 0.58	1824

以上の結果を、図 2-11 にまとめる。全量に対する PHBH の酸化度を横軸に、破断点変位を縦軸にとりグラフにプロットすると、PHBH の添加比率が 20%において引張伸びが向上すること、酸化度によって伸びが変わり、 $0.3 \mu\text{mol/g}$ 以上の高酸化度では逆に伸びが低下することが明らかとなった。

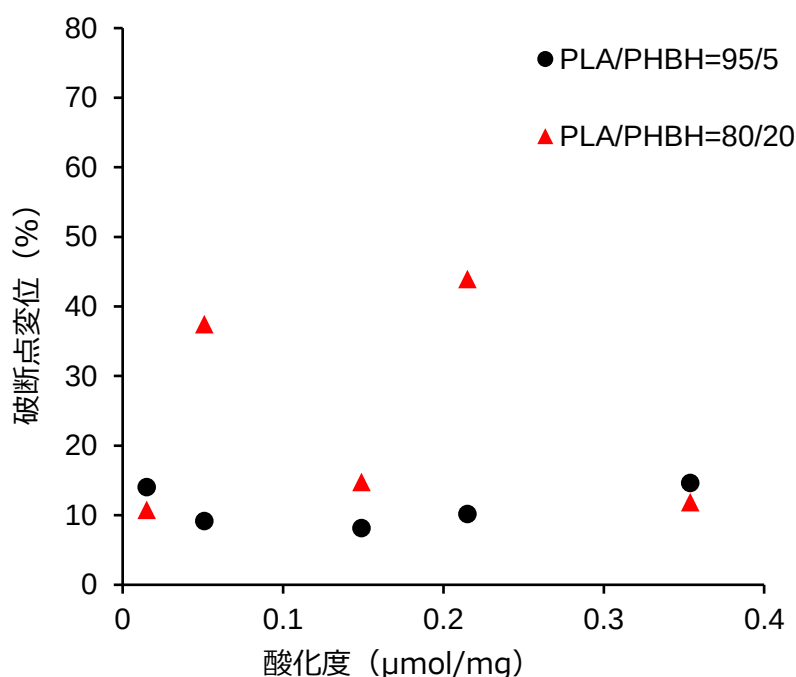


図 2-11. 破断点変位 (%) と酸化度の高さ

続いて、PLA/PHBH = 95/5 と 90/10 のブレンド品において、酸化度 $0.025 \mu\text{mol/g}$ の酸化 PLA を全量の 0%、5% 添加し、酸化度 $0.149 \mu\text{mol/g}$ の PHBH を全量のうち 0%、2.5%、5%、10% をそれぞれブレンドして同様に検討を行った（表 2-7、2-8）。

表 2-7. 酸化 PHBH (0.149 $\mu\text{mol/g}$) を用いたブレンドフィルムの引張試験

	サンプル 95/5 PLA/oxPLA/PBS/oxPBS	破断点変異 (%)	最大点応力 (N/mm^2)	弾 性 率 :1-5N (N/mm^2)
1	90/5/5/0	4.44 $\pm$ 0.28	56.16 $\pm$ 0.83	2121
2	90/5/2.5/2.5	5.81 $\pm$ 3.40	56.80 $\pm$ 1.14	2083
3	90/5/0/5	7.36 $\pm$ 2.14	58.40 $\pm$ 0.85	2069
4	95/0/5/0	6.61 $\pm$ 1.97	58.10 $\pm$ 0.65	2093
5	95/0/2.5/2.5	5.85 $\pm$ 3.21	57.17 $\pm$ 0.72	2001
6	95/0/0/5	9.41 $\pm$ 4.08	58.81 $\pm$ 0.88	2130

表 2-8. 酸化 PHBH (0.149 $\mu\text{mol/g}$) を用いたブレンドフィルムの引張試験

	サンプル 90/10 PLA/oxPLA/PBS/oxPBS	破断点変異 (%)	最大点応力 (N/mm^2)	弾 性 率 :1-5N (N/mm^2)
1	85/5/10/0	12.02 $\pm$ 4.27	54.75 $\pm$ 0.83	2022
2	85/5/5/5	31.22 $\pm$ 24.10	54.24 $\pm$ 0.70	1984
3	85/5/0/10	14.27 $\pm$ 2.74	54.64 $\pm$ 0.84	2035
4	90/0/10/0	12.82 $\pm$ 4.77	55.27 $\pm$ 1.38	2015
5	90/0/5/5	18.72 $\pm$ 16.60	53.29 $\pm$ 2.22	1997
6	90/0/0/10	29.32 $\pm$ 29.78	53.67 $\pm$ 0.92	1859

以上の結果を、図 2-12 にまとめる。全量に対する PHBH の添加量を横軸に、破断点変位を縦軸にとりグラフにプロットすると、PLA/PHBH=90/10 の時に引張伸びの向上が見られ、oxPLA を 5%添加時には oxPHBH 添加量が 2.5%、oxPLA が無い場合には oxPHBH 添加量が 5%で最も良好な結果を与えた。

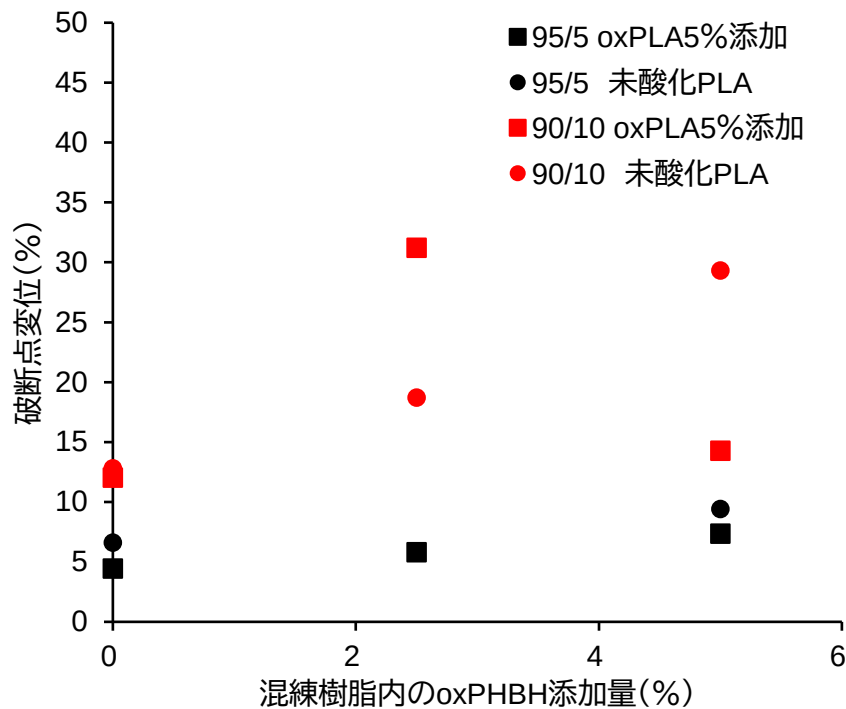


図 2-12. 酸化 PHBH の添加量と破断点変異 (%)

2-2-2. PLA-PBS ブレンド品の検討

PHBH と同様に PLA に対して、前項で作製した酸化 PBS（ペレット酸化品）を 90 : 10 と 80 : 20 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。PLA の酸化品、PBS の酸化品それぞれの酸化度の異なるサンプルを種々のブレンド比で作製したフィルムサンプルの引張強度測定結果を以下の表 2-9、表 2-10 に示す。

表 2-9. PLA/PBS = 90/10 ブレンドサンプルの引張試験結果

	PLA の酸化度 ($\mu\text{mol/g}$)	PBS の酸化度 ($\mu\text{mol/g}$)	破断点変異 (%)	最大点応力 (N/mm^2)
1	0.008 (未酸化)	0.01 (未酸化)	18.5 $\pm$ 4.12	52.4 $\pm$ 0.99
2	0.026	0.01 (未酸化)	1.82 $\pm$ 0.04	31.4 $\pm$ 0.92
3	0.11	0.01 (未酸化)	3.78 $\pm$ 0.19	53.0 $\pm$ 0.66
4	0.008 (未酸化)	0.052	43.96 $\pm$ 21.0	47.8 $\pm$ 0.94
5	0.026	0.052	1.98 $\pm$ 0.13	32.7 $\pm$ 1.87
6	0.11	0.052	3.92 $\pm$ 0.13	52.5 $\pm$ 1.06

表 2-10. PLA/PBS = 80/20 ブレンドサンプルの引張試験結果

	PLA の酸化度 ($\mu\text{mol/g}$)	PBS の酸化度 ($\mu\text{mol/g}$)	破断点変異 (%)	最大点応力 (N/mm^2)
1	0.008 (未酸化)	0.01 (未酸化)	4.82 ± 0.33	52.4 ± 0.99
2	0.026	0.01 (未酸化)	4.82 ± 0.33	44.41 ± 0.87
3	0.11	0.01 (未酸化)	138.4 ± 21.6	45.30 ± 0.40
4	0.008 (未酸化)	0.052	43.96 ± 21.0	47.8 ± 0.94
5	0.026	0.052	13.65 ± 7.18	46.26 ± 0.57
6	0.11	0.052	0.93 ± 0.16	12.92 ± 3.11

これらの結果から、PLA への酸化は行わない方が良好な結果が得られる傾向が見られた。この結果をもとに、ニーダーを用いた混練によりフィルムサンプルを作製し、同様の引張試験から評価を行った（表 2-11）。

表 2-11. PLA/PBS ブレンドフィルムの引張試験結果

	PLA	PBS	酸化PBS	最大点応力 (N/mm^2)	破断点変位 (%)
①	100	-	-	58.6 ± 1.76	8.5 ± 1.60
②	90	10	-	52.4 ± 0.99	18.5 ± 4.12
③	90(酸化)	10	-	31.4 ± 0.92	1.8 ± 0.04
④	90	5	5	54.2 ± 0.79	46.8 ± 36.2
⑤	90	-	10	52.7 ± 1.29	39.3 ± 23.2
⑥	90	-	10(高酸化)	52.0 ± 2.00	12.1 ± 8.2
⑦	80	20	-	45.4 ± 0.91	164.9 ± 69.0
⑧	80	10	10	45.4 ± 1.15	203.4 ± 26.3
⑨	80	-	20	44.2 ± 2.41	182.0 ± 34.9
⑩	-	-	100	36.0 ± 5.65	275.5 ± 25.8

ニーダーを用いた混練においても手混ぜと同様の傾向が見られ、伸びは全体的に向上した。これはブレンドが十分に行えたためと考えられる。未酸化の PLA に対して、未酸化 PBS と低酸化度の PBS を併せたもの（⑧）が最も良い結果を与えた。

2-2-3. まとめ

酸化 PHBH や酸化 PBS を PLA とブレンドすることにより、PLA の物性を向上できる可能性が示唆された。酸化度と引張伸びの向上はある程度まで相関があることから、極性官能基導入に基づく相溶性の向上が物性改善のカギであると推察されるものの、過剰の酸化は分子量低下の要因となるため、適切な酸化度での制御が必要となる。PLA/生分解性プラの海島構造での島相のサイズの制御に関しては、本項では扱わず、より実機に近いスケールでブレンドを行ったサンプルにおいて評価することとし、その結果は次章に示す。また、前項での分析結果などと併せて PBS において PLA との相溶性が向上するのは、主に主鎖切断による分子量低下を原因とする融点などの低下が原因と考えられる。一方で、PHBH においては側鎖の酸化による極性官能基導入とその相互作用の効果も大きいということが示唆された。

2-3. プロセス化に向けた条件検討（(大) 大阪大学、長瀬産業（株））

プロセス化においては酸化処理の処理速度の向上が課題となる。現行の手法では 100 g スケールの処理に数 10 分必要であり、コスト面で大きなデメリットとなっていた。そこで、処理速度の向上という点に注目して短時間で酸化度を上げるための条件の探索を行うこととした。また、安全性に関する知見を得る目的で、試薬濃度の上限を探った。

2-3-1. 粉体サンプルの酸化処理スケールアップの検討

酸化処理のスケールアップ検討の一環として、PBS、PLA フィルムを用いて、短時間での酸化度の向上を目的に行った。昨年の PHBH の検討を参考に、検討内容としては、①反応温度、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。

【フィルムの作製】

PBS フィルム、PLA フィルムは、プレス機を用いて作製した。PBS フィルムに関しては、PBS ペレット 2.5 g を 125 °C でプレスを行い 200 μm 厚のフィルムを作製した。PLA フィルムに関しては、PLA ペレット 2.5 g を 175 °C でプレスを行い 200 μm 厚のフィルムを作製した。

【フィルムの酸化】

フィルム作製後、前報を参考に酸化反応を行った。短時間で酸化度を向上させる目的であることから、反応時間は1分とした。

【フィルムの評価】

酸化度については、前報と同様に、トルイジンブルー染色法を用いて評価を行った。

ー検討方法

① 反応温度の検討

PBS、PLA フィルムを1cm×3cm程度に切り出し、前報を参考にそれぞれ酸化反応を行った。温度は、30℃、60℃とし、試薬の濃度は1%、UV光量は5mW/cm²で固定した。

② UV光量の検討

PBS、PLA フィルムを1cm×3cm程度に切り出し、前報を参考にそれぞれ酸化反応を行った。UV光量は、5mW/cm²、20mW/cm²、40mW/cm²とし、試薬の濃度は1%、反応温度は60℃で固定した。

③ 試薬濃度の検討

PBS、PLA フィルムを1cm×3cm程度に切り出し、前報を参考にそれぞれ酸化反応を行った。試薬濃度は、1%、3%、5%とし、反応温度は60℃、UV光量は、5mW/cm²で固定した。

－PLA 結果

① 反応温度の検討

結果を以下に示す。また、図 2-13 には、指標として現行条件で 10 分反応させた時の値を併せて載せる。

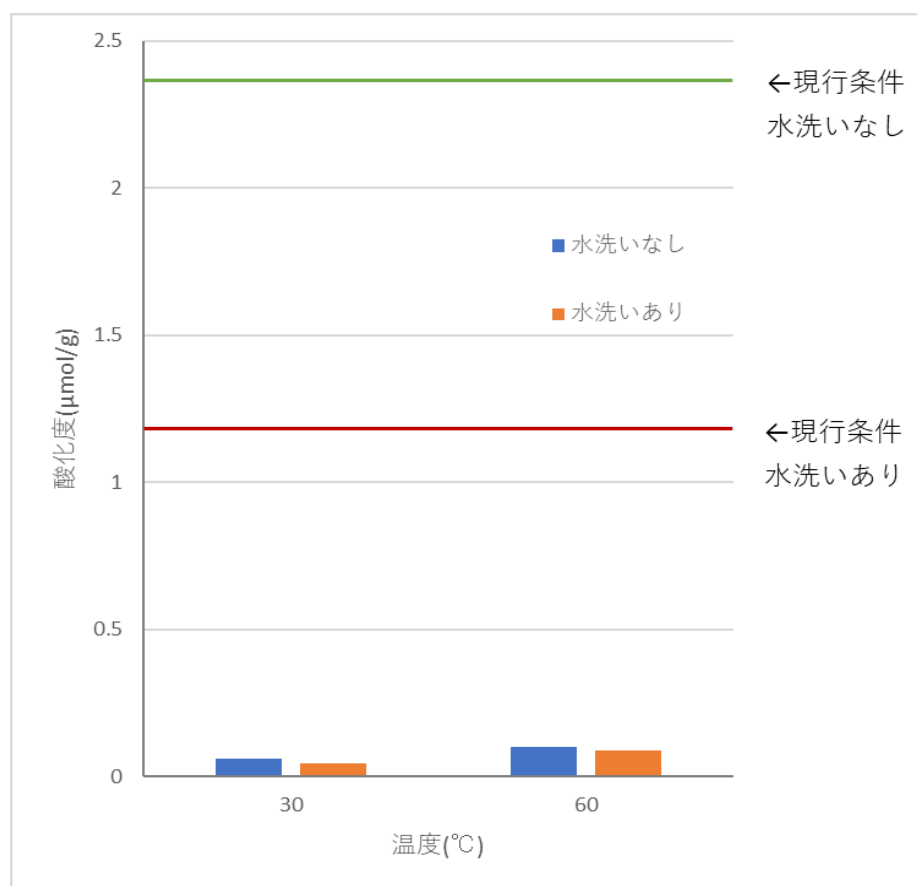


図 2-13. PLA の酸化反応の検討 (反応温度)

試薬濃度、UV 光量を固定した場合、反応温度が高いと酸化度が僅かではあるが高いことが分かった。この結果を参考に、②UV 光量の検討と③試薬濃度の検討では、反応温度を 60 °C にして検討を行った。

② UV 光量の検討

結果を以下に示す。また、図 2-14 には、指標として現行条件で 10 分反応させた時の値を併せて載せる。

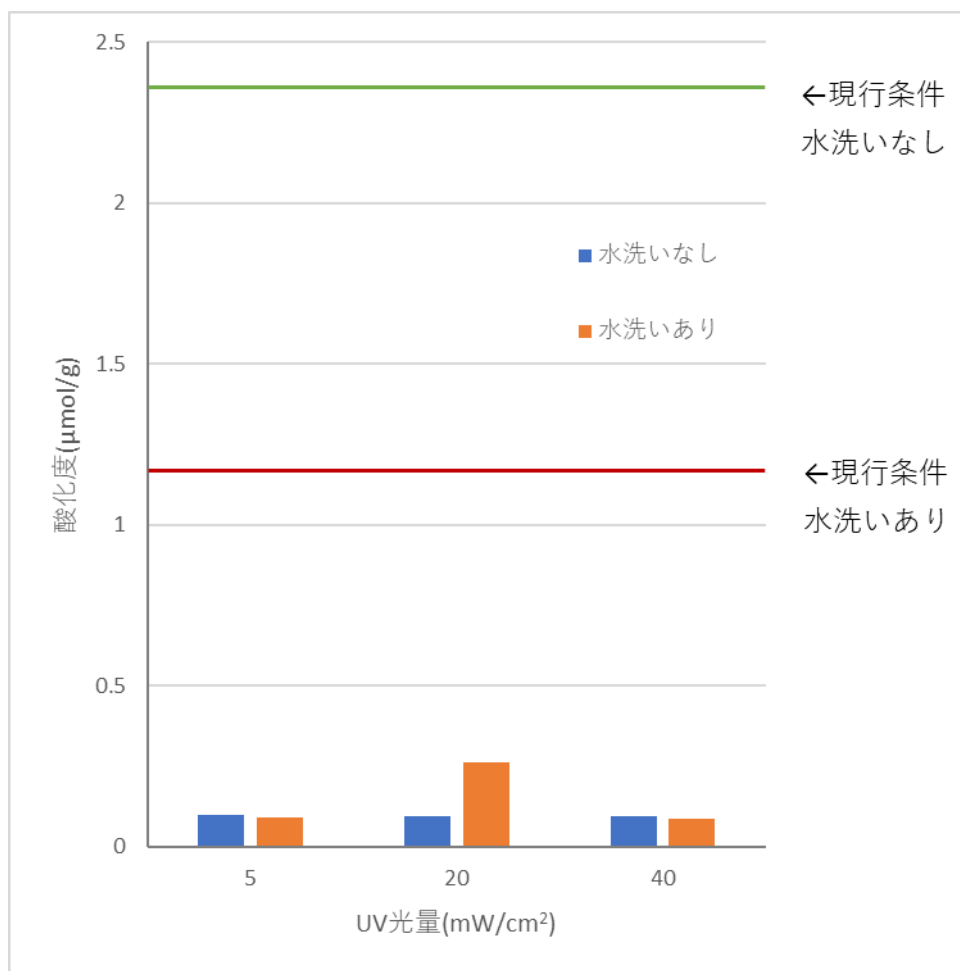


図 2-14. PLA の酸化反応の検討 (UV 光量)

試薬濃度 1%、反応温度 60 °C で固定し、UV 光量を 20 mW/cm^2 に上げたところ、水洗いありでは酸化度は高くなったが、水洗いなしではいずれの水準でも顕著な差は見られなかった。

③ 試薬濃度の検討

結果を以下に示す。また、図 2-15 には、指標として現行条件で 10 分反応させた時の値を併せて載せる。

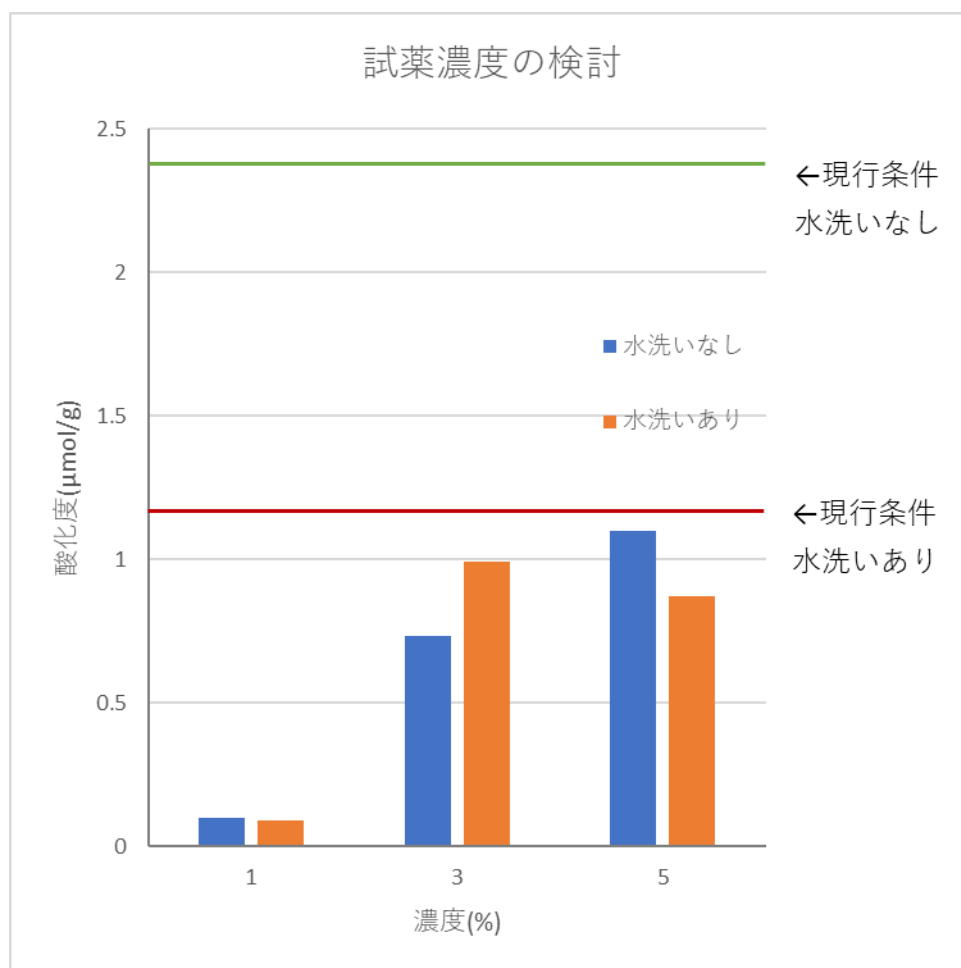


図 2-15. PLA の酸化反応の検討（試薬濃度）

UV 光量 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 、反応温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ で固定した場合、試薬濃度を上げることで酸化度が高くなる傾向が認められた。ここで、PBS の検討同様、試薬濃度 3%以上においては、反応時のガス圧が上がるのが分かり、安全性を配慮して、試薬濃度は 3%以上にせず検討を行った。加えて、試薬濃度 5%、3%ではサンプル表面にタックが生じ、2%では反応容器に PLA サンプルの痕が残るなど、試薬によるサンプルダメージが認められた。このため、PLA に関しては、試薬濃度は 1%で検討を行うこととした。

以上の結果から、PLA においては、温度や UV 光量を変化させることで酸化度はほとんど向上しないことが分かった。また、試薬濃度によってサンプルがダメージを受けることが分かり、濃度を 2%以上にするのは難しいことが分かった。試薬濃度によるダメージは、サンプル表面のタックや反応容器にサンプル痕が残ったことで分かったが、温度によるダメージ、UV 光量によるダメージがないかの検討が必要であると思われる。ダメージの確認を行った上で、温度や UV 光量以外のファクターで検討を進める必要があると思われる。

－PBS 結果

① 反応温度の検討

結果を以下に示す。また、図 2-16 には、指標として現行条件で 10 分反応させた時の値を併せて載せる。

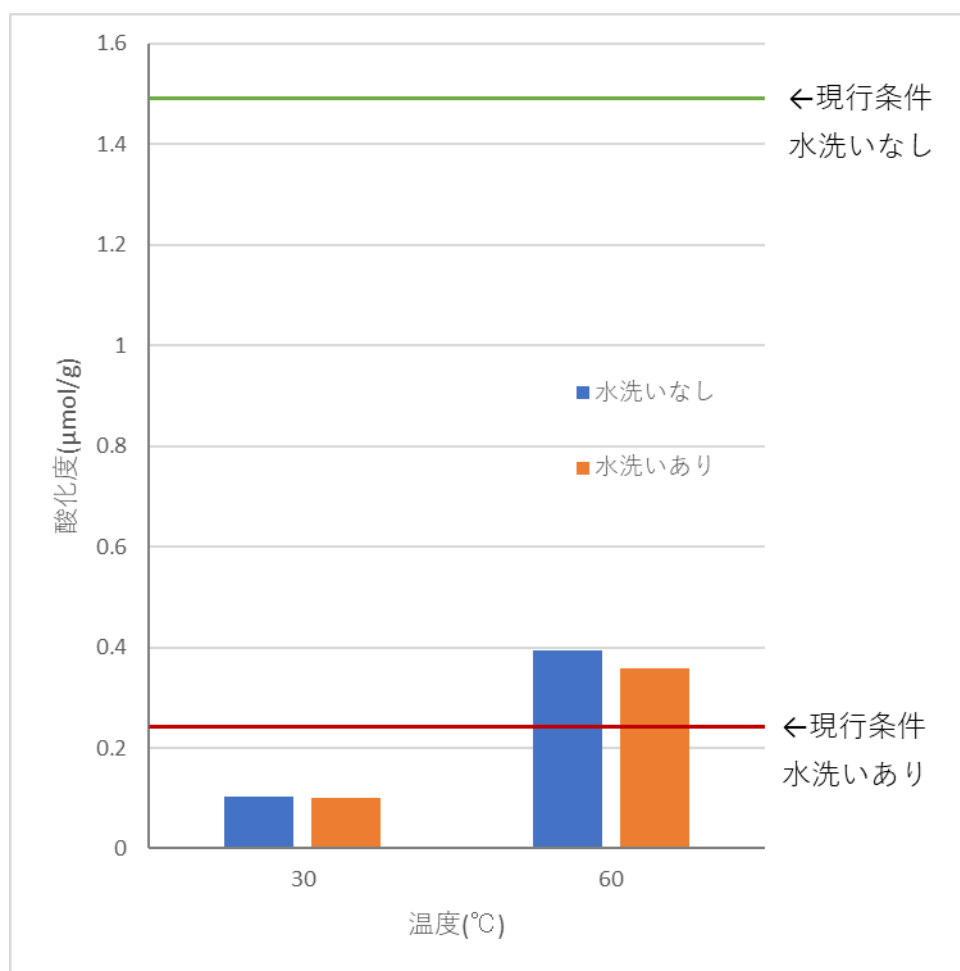


図 2-16. PBS の酸化反応の検討 (反応温度)

試薬濃度、UV 光量を固定した場合、反応温度が高い方が、酸化度が高いことが分かった。この結果を参考に、②UV 光量の検討と③試薬濃度の検討では、反応温度を 60℃ にして検討を行った。

② UV 光量の検討

結果を以下に示す。また、図 2-17 には、指標として現行条件で 10 分反応させた時の値を併せて載せる。

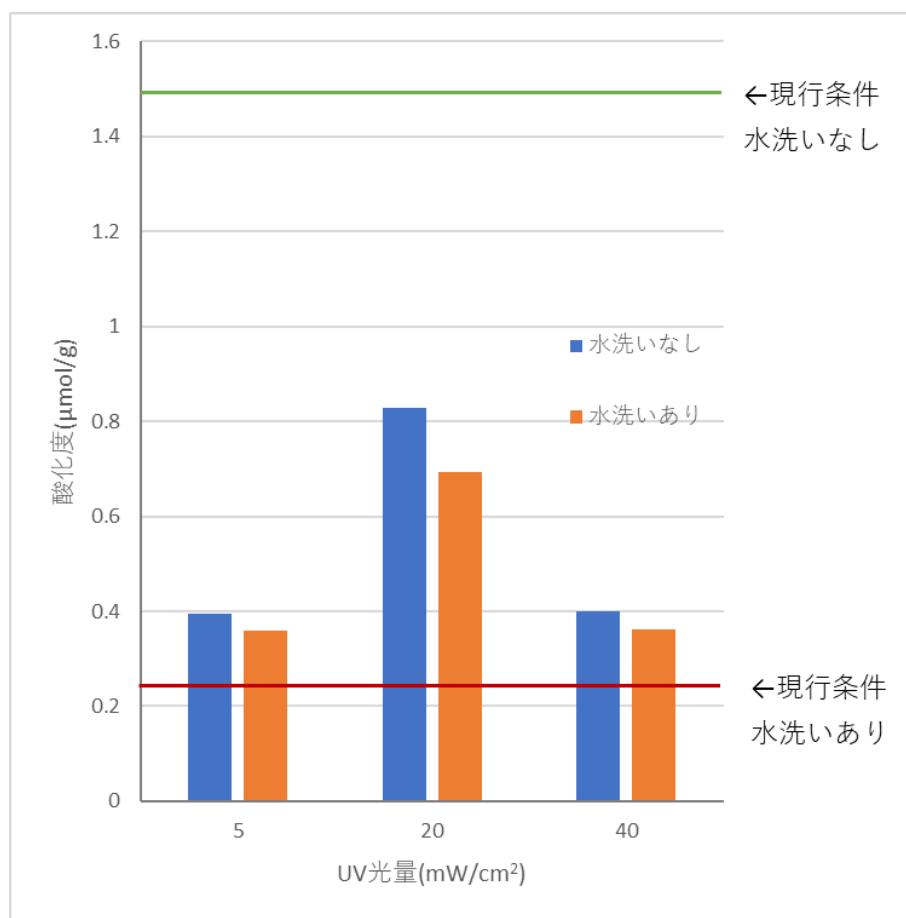


図 2-17. PBS の酸化反応の検討 (UV 光量)

試薬濃度 1%、反応温度 60 °C で固定した場合、UV 光量を 20 mW/cm² に上げることで酸化度は高くなった。しかし、UV 光量を 40 mW/cm² に上げてても酸化度は上がらず、酸化度は UV 光量が 5 mW/cm² の時と同程度であった。UV 光量が 20 mW/cm² 前後で酸化度のピークがあるのではないかと考えられた。

③ 試薬濃度の検討

結果を以下に示す。また、図 2-18 には、指標として現行条件で 10 分反応させた時の値を併せて載せる。

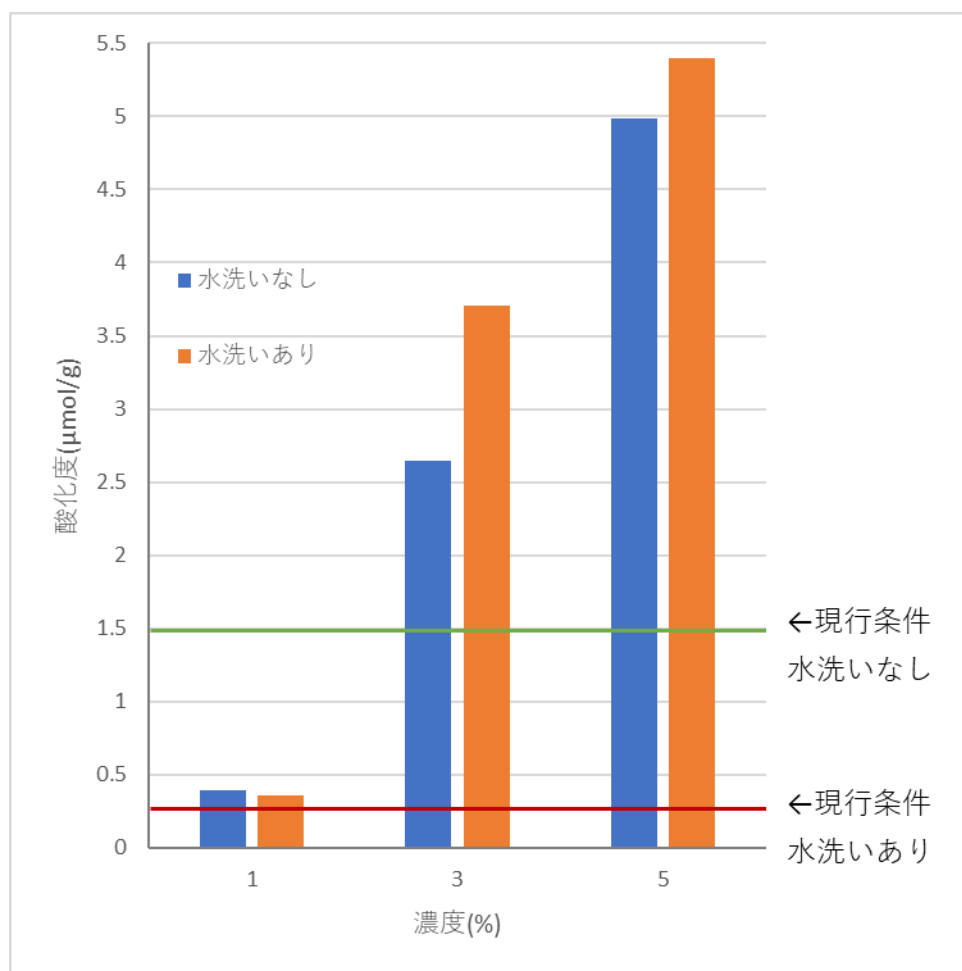


図 2-18. PBS の酸化反応の検討 (試薬濃度)

UV 光量 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 、反応温度 60°C で固定した場合、試薬濃度を上げることで酸化度が高くなる傾向が認められた。ここで、試薬濃度 3%以上においては、反応時のガス圧が上がるということが分かった。安全性を配慮して、試薬濃度は 3%以上にせず検討を行った。

以上の結果から、①反応温度は 60°C 、②UV 光量は $20\text{mW}/\text{cm}^2$ 、③試薬濃度は 2%とし、長瀬産業(株)において作製したフィルム（製法は第三章にて後述）を用いて酸

化反応を行った。その結果を図 2-19 に示す。

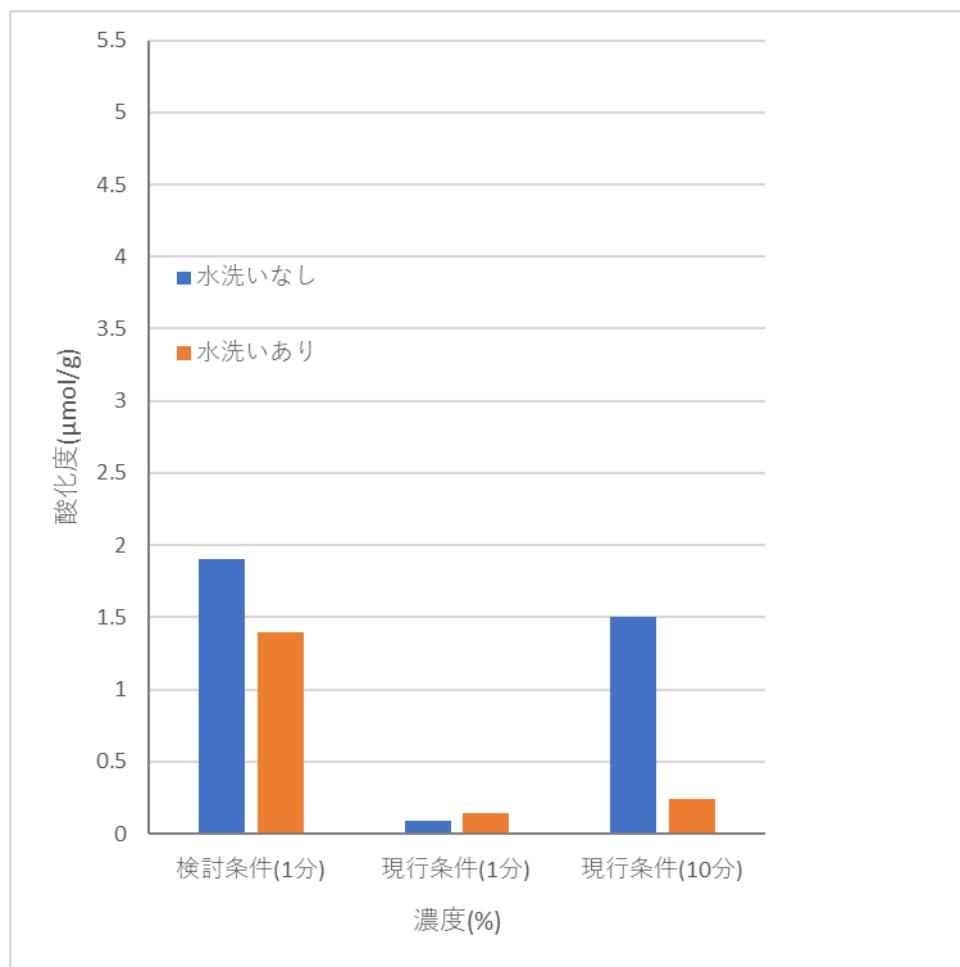


図 2-19. PBS の酸化反応の検討（現行条件との比較）

今回検討した条件での酸化度と、現行条件での酸化度を比較した結果、現行条件で 10 分酸化を行った時と同程度の酸化度を得ることができた。また、酸化後のフィルムを水洗いしても、酸化度は大きく下がることはなく、安定した酸化度を得ることができた。

2-3-2. 固体ペレット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、本年度は固体ペレット酸化処理を行うために、図 2-20 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、反応容器中へ $\text{ClO}_2\cdot$ を導入するとともに、固体サンプルを入れた反応容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 100 g から 300 g 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。

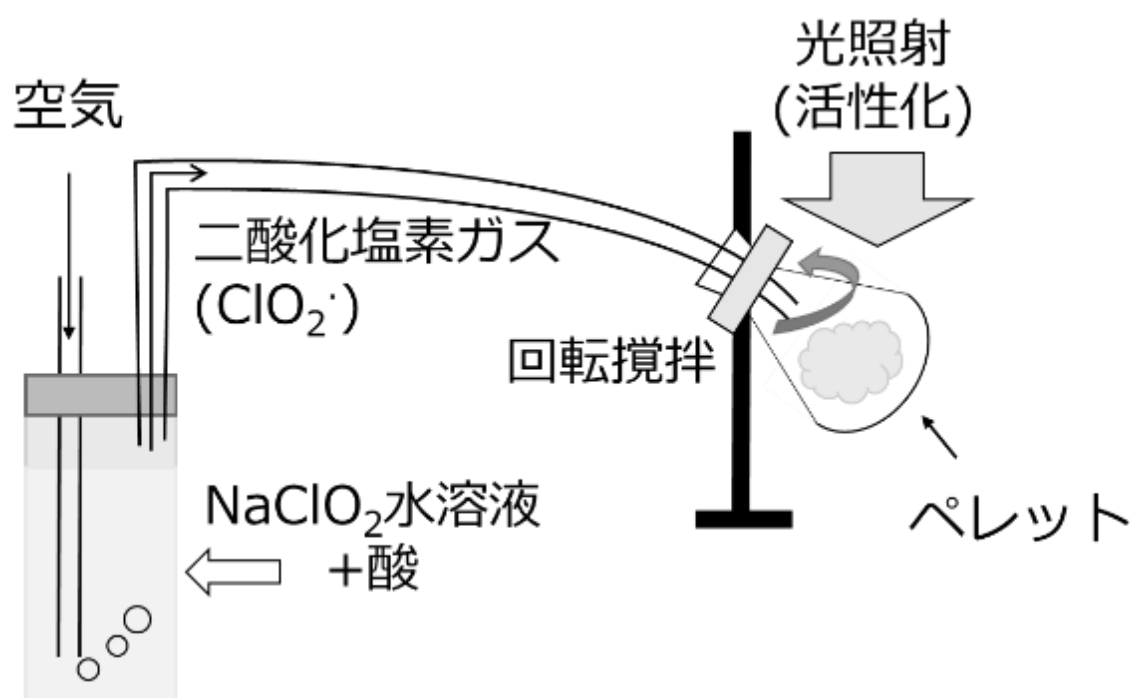


図 2-20. 粉体酸化処理装置の模式図

ー結果

サンプル量 100–300 g 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 2-21, 2-22）。

その結果、500 ml ナスフラスコを用いての酸化方法では、200 g で酸化反応を行った方がより高い酸化度となった。反応液を入れ替えて時間をかけることでさらに酸化度が向上することが分かった。一方で、数 10 分の処理時間はプロセスとしてコスト増に繋がるため、反応液の調製法を変えて短時間化を目指したものの、顕著な酸化度向上には至らなかった（図 2-23）。

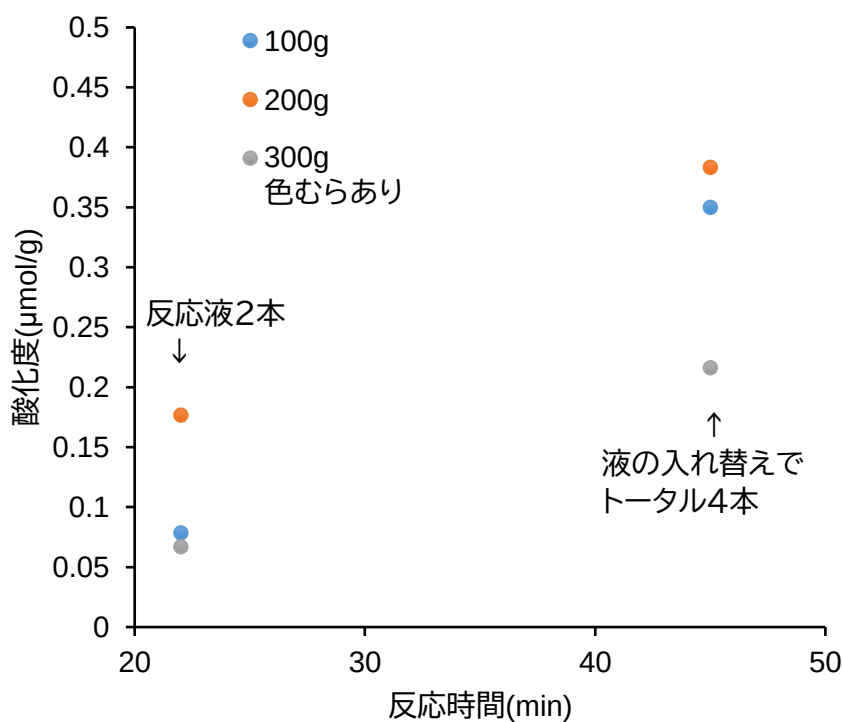


図 2-21. エバポレーター、ナスフラスコ 500 ml による酸化 100–300 g

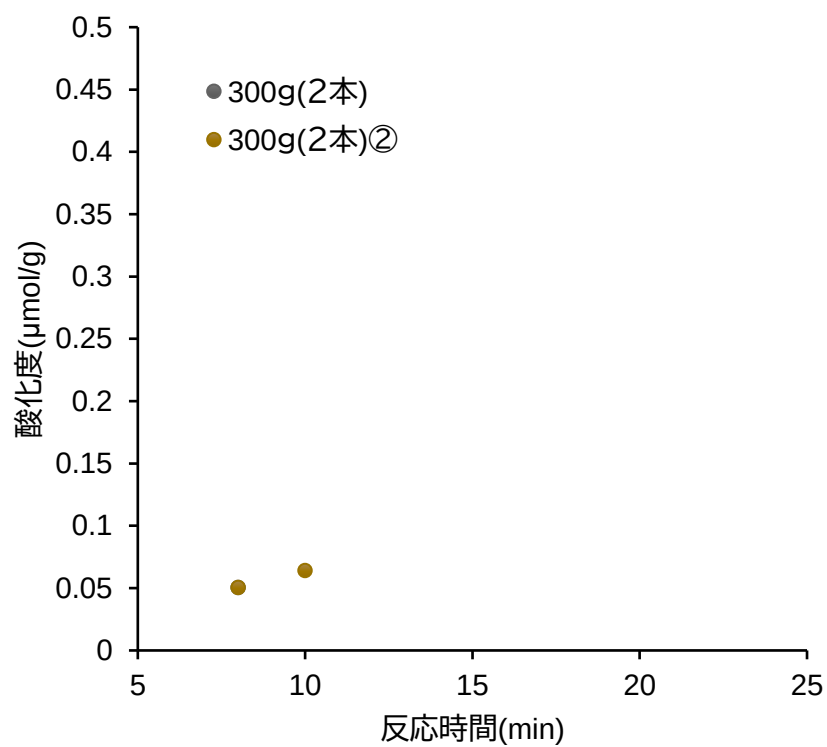


図 2-22. 反応液 100 ml ×2 本 1 L ナスフラスコでの反応

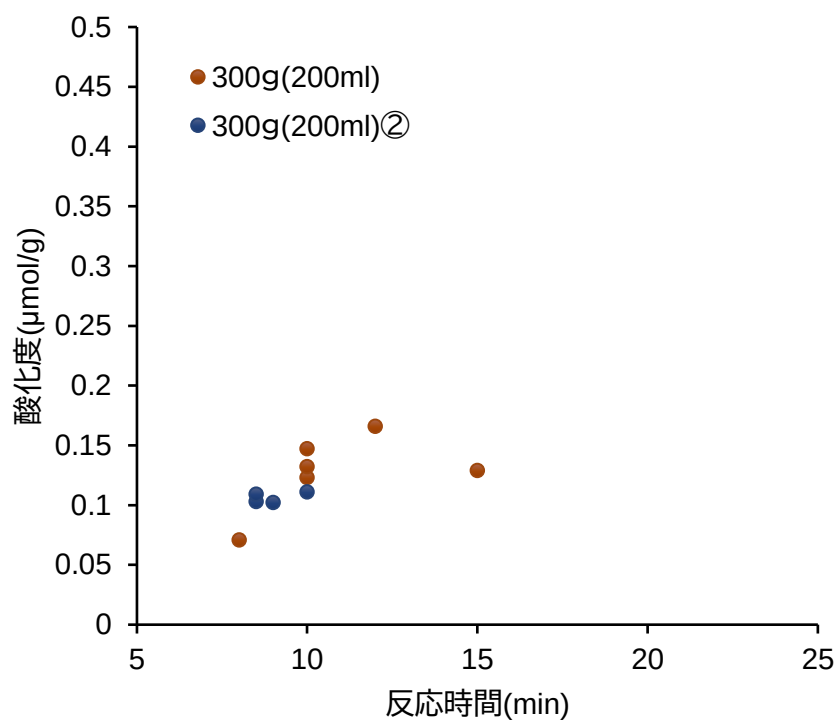


図 2-23. 反応液 200 ml 1 L ナスフラスコでの反応

1 L ナスフラスコを使用することで 300 g の比較的大きいスケールでも均一に酸化できることがわかった。PBS では PLA と比較して弱い酸化条件（短時間）でも分子量低下が起きやすいため、酸化度を低く抑える必要があるものの、プロセス化を見据えた場合適切な酸化度に 1 分以下の短時間で処理する必要がある。

2-3-3. 固体ペレットサンプルの高速酸化処理の検討

プロセス化での処理速度向上を企図して、先ほどの装置を利用して、PBS ペレットの短時間高酸化処理の検討を行った。200 g は 500 ml、300 g では 1 L のナスフラスコをそれぞれ使用した。反応液濃度を変え、RT、60℃、80℃の液温で比較した。反応時の光源ランプの光量は 10、20 mW/cm²、酸化反応時間は 1 分、3 分、5 分で比較した。さらに 300 g においてはさらに短時間の 30 秒でも比較を行った。

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、カルボキシ基量を見積もった。

ー結果

表 2-12. 試薬量調整

HCl 量	HCl (ml)	H ₂ O (ml)	NaClO ₂ (g)	光量 (mW/cm ²)
1 倍	0.5	100	1	10
2 倍	2	200	2	20
3 倍	3	200	2	20
4 倍	4	200	2	20
5 倍	5	200	5	20

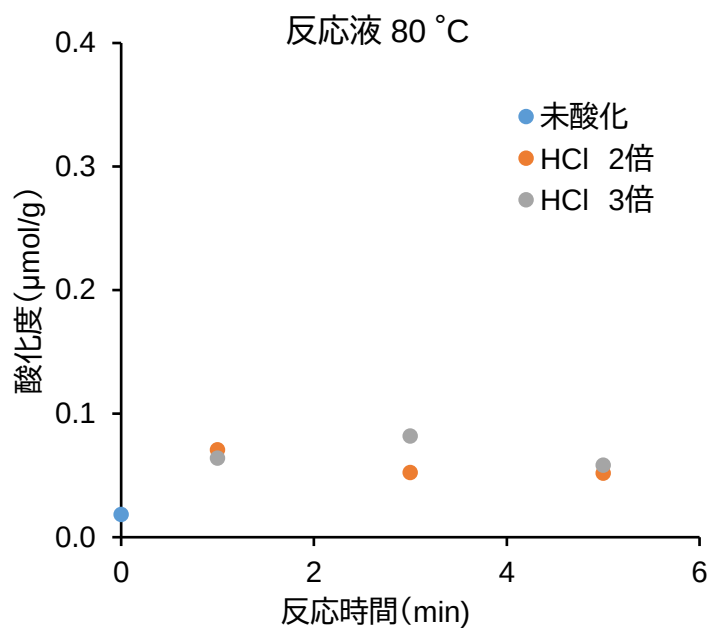


図 2-24. 反応液温度 80 °C でのペレット 200 g の酸化度

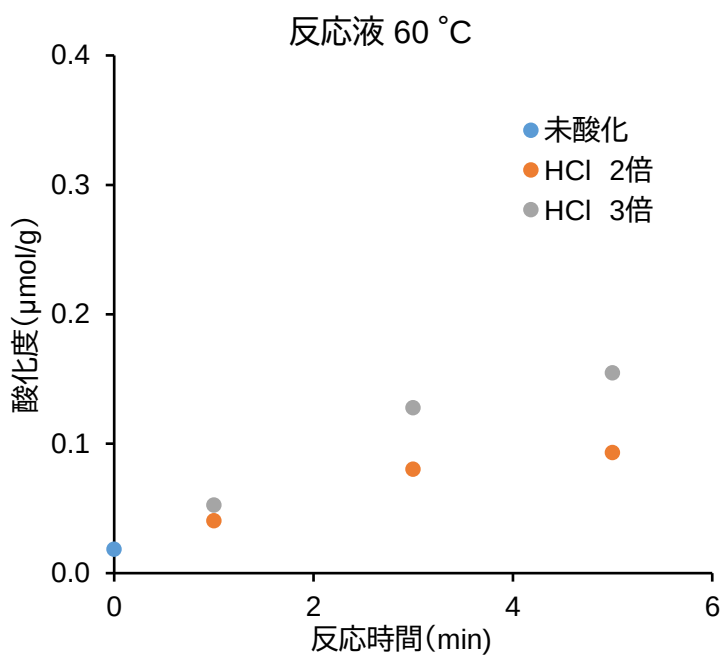


図 2-25. 反応液温度 60 °C でのペレット 200 g の酸化度

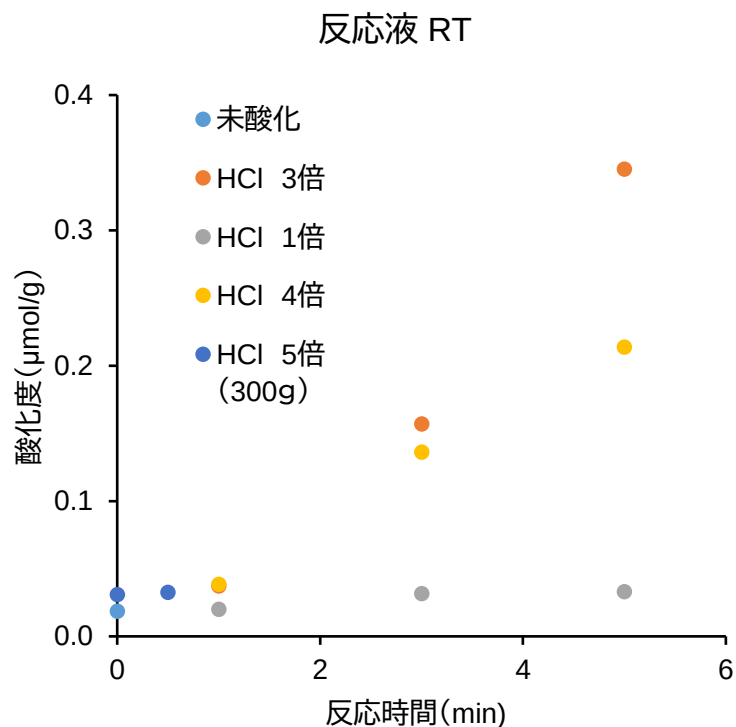


図 2-26. 反応液温度 RT でのペレット 200, 300 g の酸化度

2-3-4. まとめ

RT で HCl 量が通常の 3 倍濃度の時に、酸化度が高くなりやすいことが分かった。80 °C まで反応液温度を上げると 1 分後の酸化度は高くなるが、それ以降は酸化がほとんど進まなかった。これは加温することで発生する水蒸気が酸化を阻害するためと考えられる。

反応液濃度および UV 照度が低い場合は酸化度も低いままであった。一方で HCl 量や NaClO₂ が増えすぎても酸化度は高くないことから、材料と処理サイズに合わせた適切な酸化条件が存在することがわかった。

また、試薬濃度を 3%以上に上げた場合にガス圧が高くなり、系からガスが漏れることがわかった。密閉系で反応を行う必要があり、安全性の観点から 1%以下での制御が適当であると結論付けた。

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。第二章にて行ったラボスケールでの検討結果を参考にベンチスケールでのブレンドを行い、各種物性測定を行った。

3-1-1. ブレンドフィルムの作製

15mm 二軸押出機(テクノベル製)に T ダイを設置し、成膜を実施した。また、引張試験のため、試験片(ダンベル状 3 号形、MD 方向)の打ち抜きを実施した

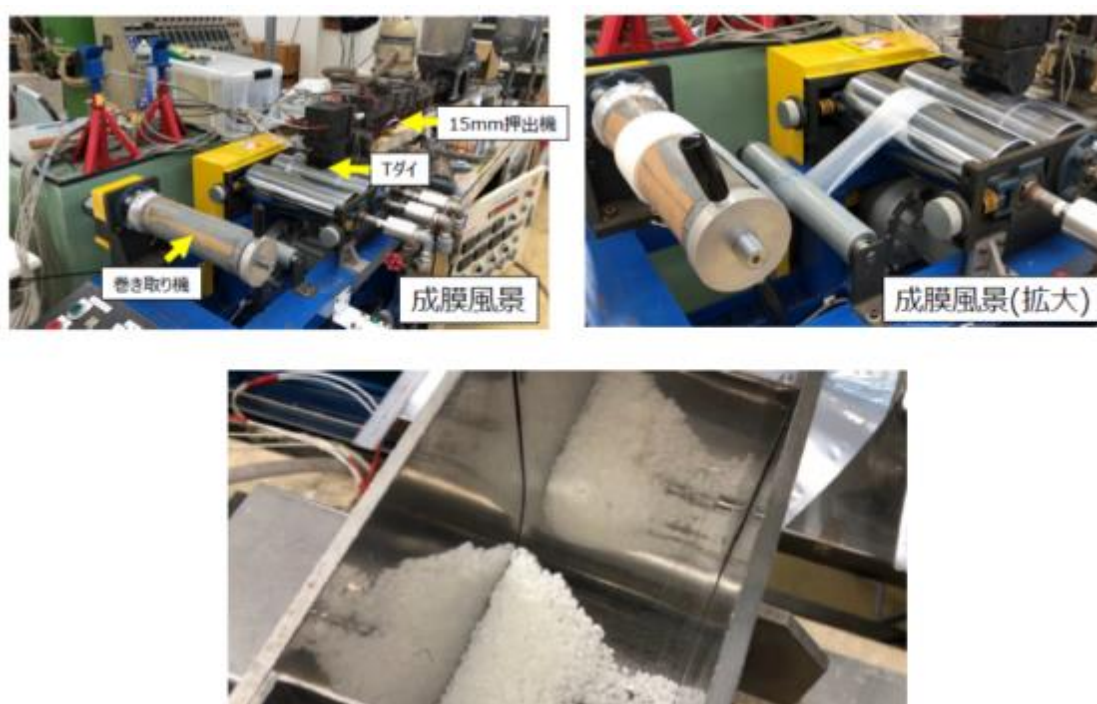


図 3-1. ブレンドフィルムの作製方法

表 3-1. ブレンドフィルム配合比率

	1	2	3	4	5	7	8	6
PLA	100	90	80	90	80	90	80	
PBS		10	20					100
酸化 PBS				10	20	10	20	

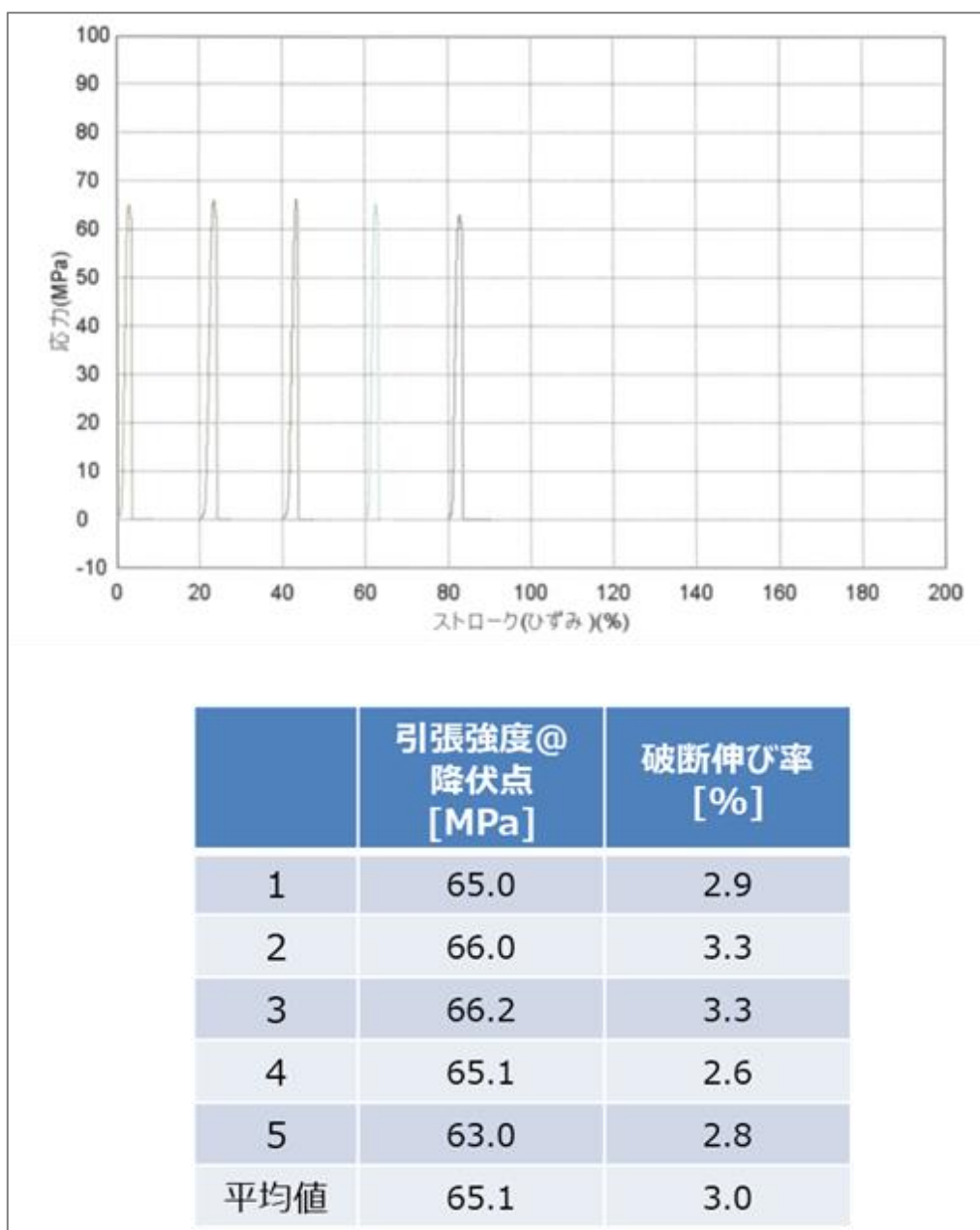


図 3-2. サンプル 1 (PLA = 100) の引張試験結果

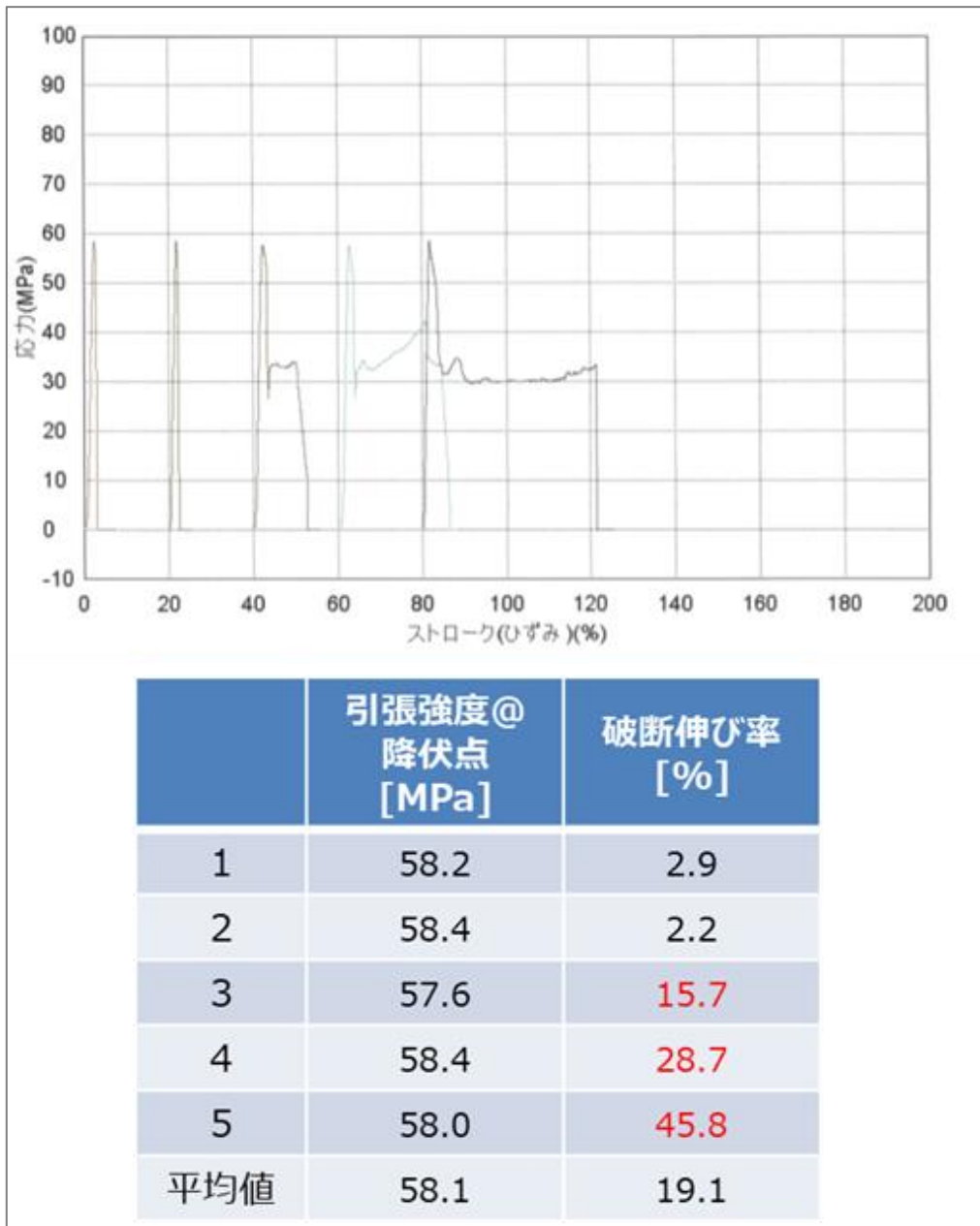


図 3-3. サンプル 2 (PLA/PBS = 90/10) の引張試験結果

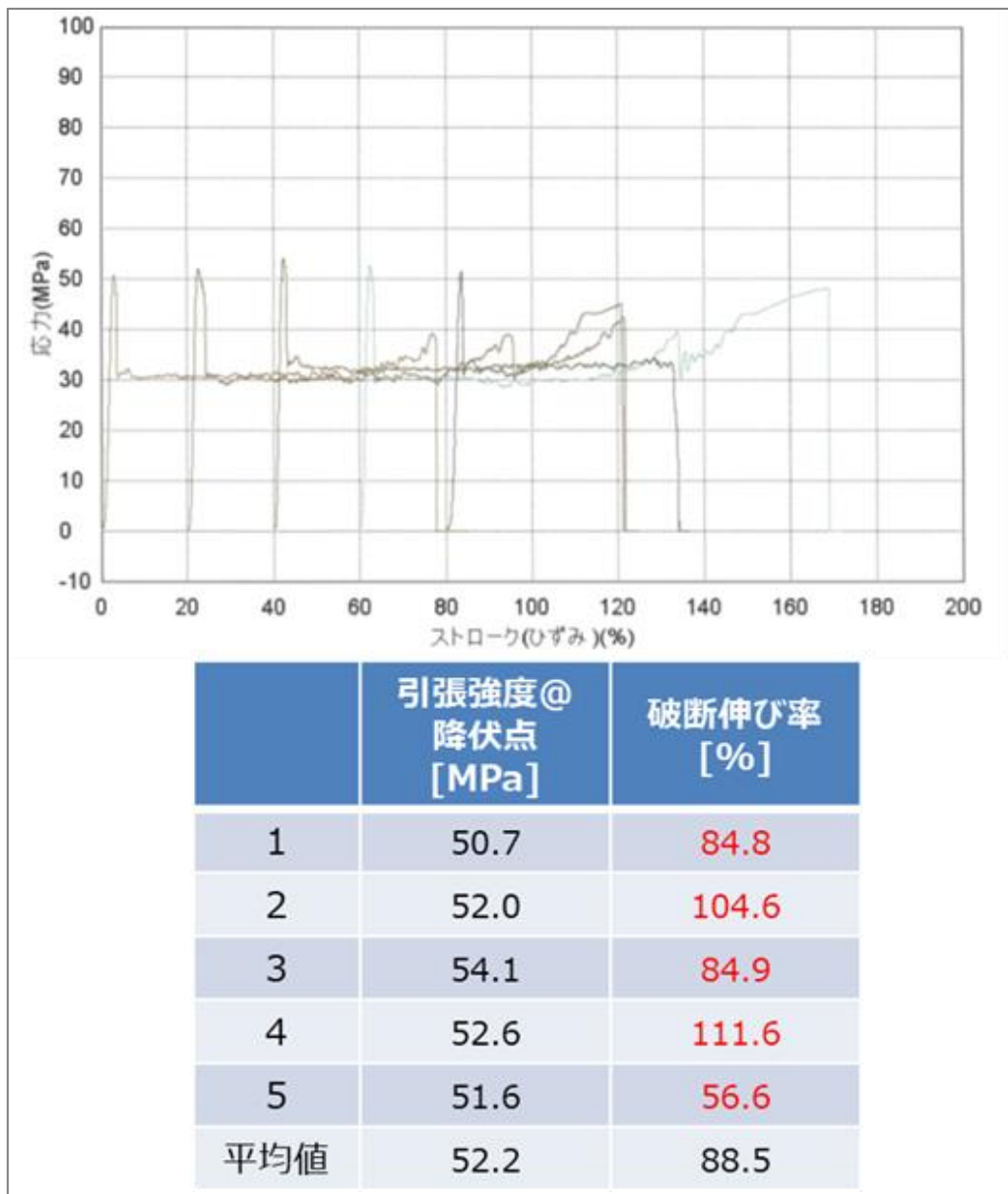


図 3-4. サンプル 3 (PLA/PBS = 80/20) の引張試験結果

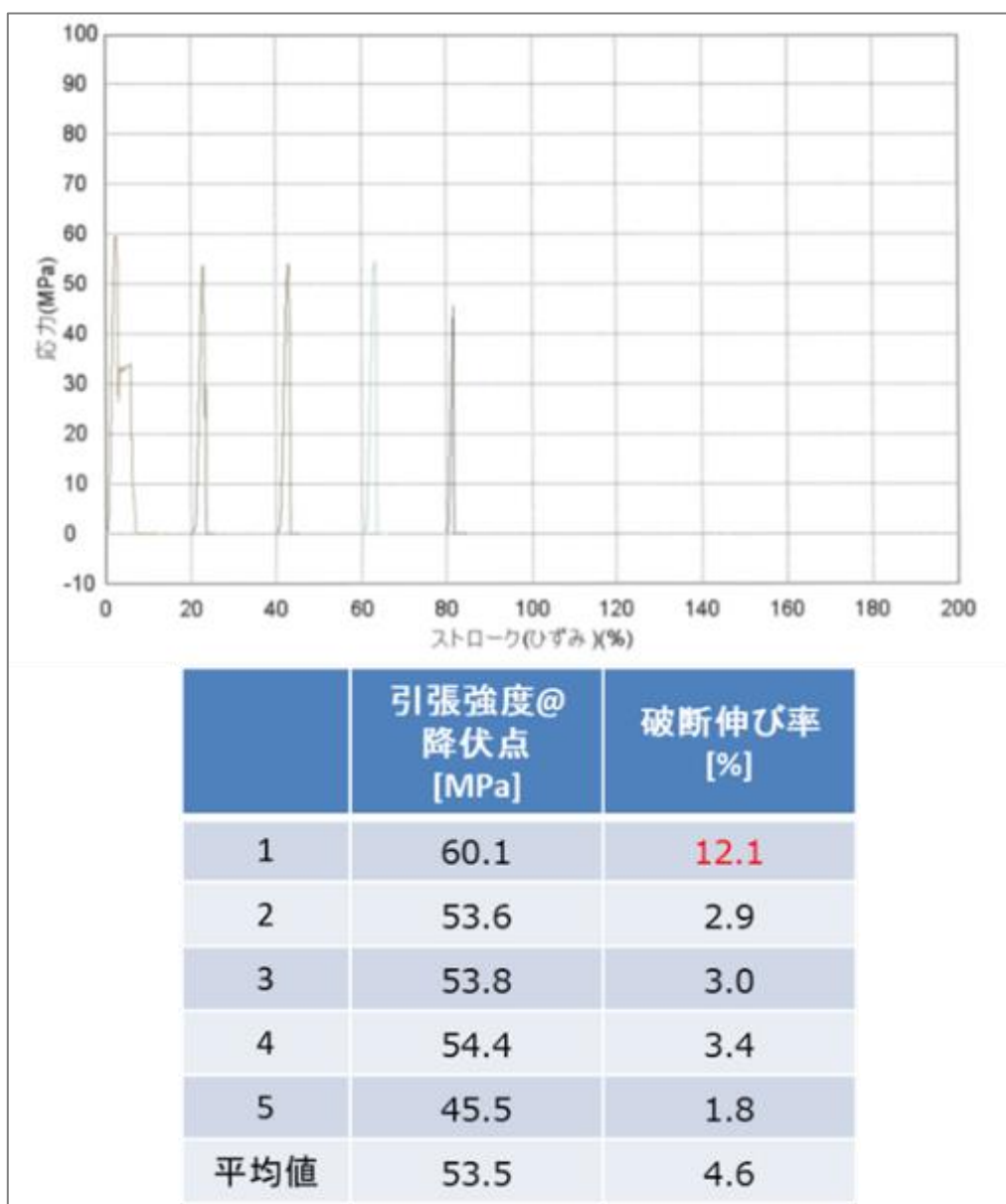


図 3-5. サンプル 4 (PLA/酸化 PBS = 90/10、酸化度 0.1 $\mu\text{mol/g}$) の引張試験結果

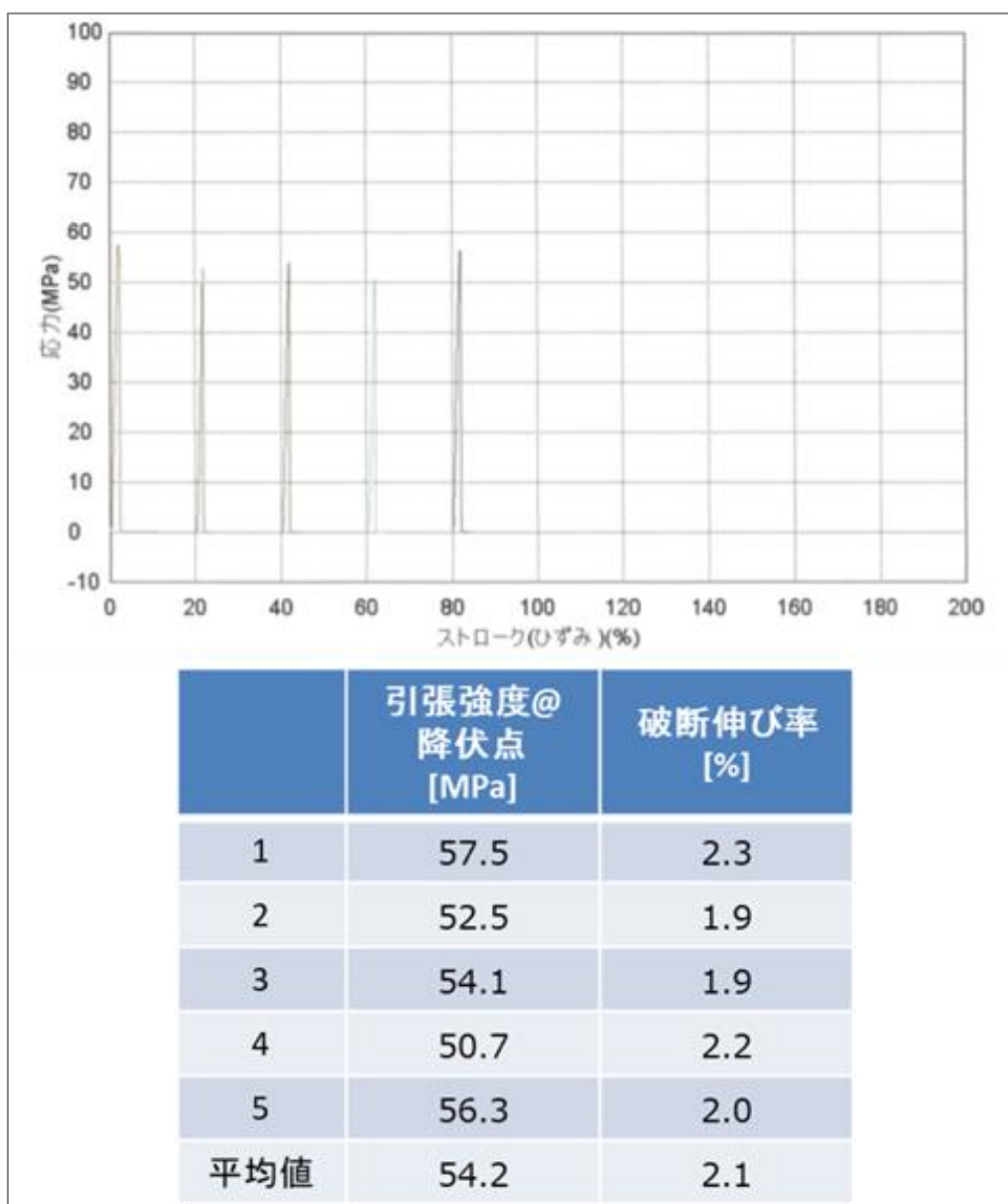


図 3-6. サンプル 5 (PLA/酸化 PBS = 80/20、酸化度 0.1 $\mu\text{mol/g}$) の引張試験結果

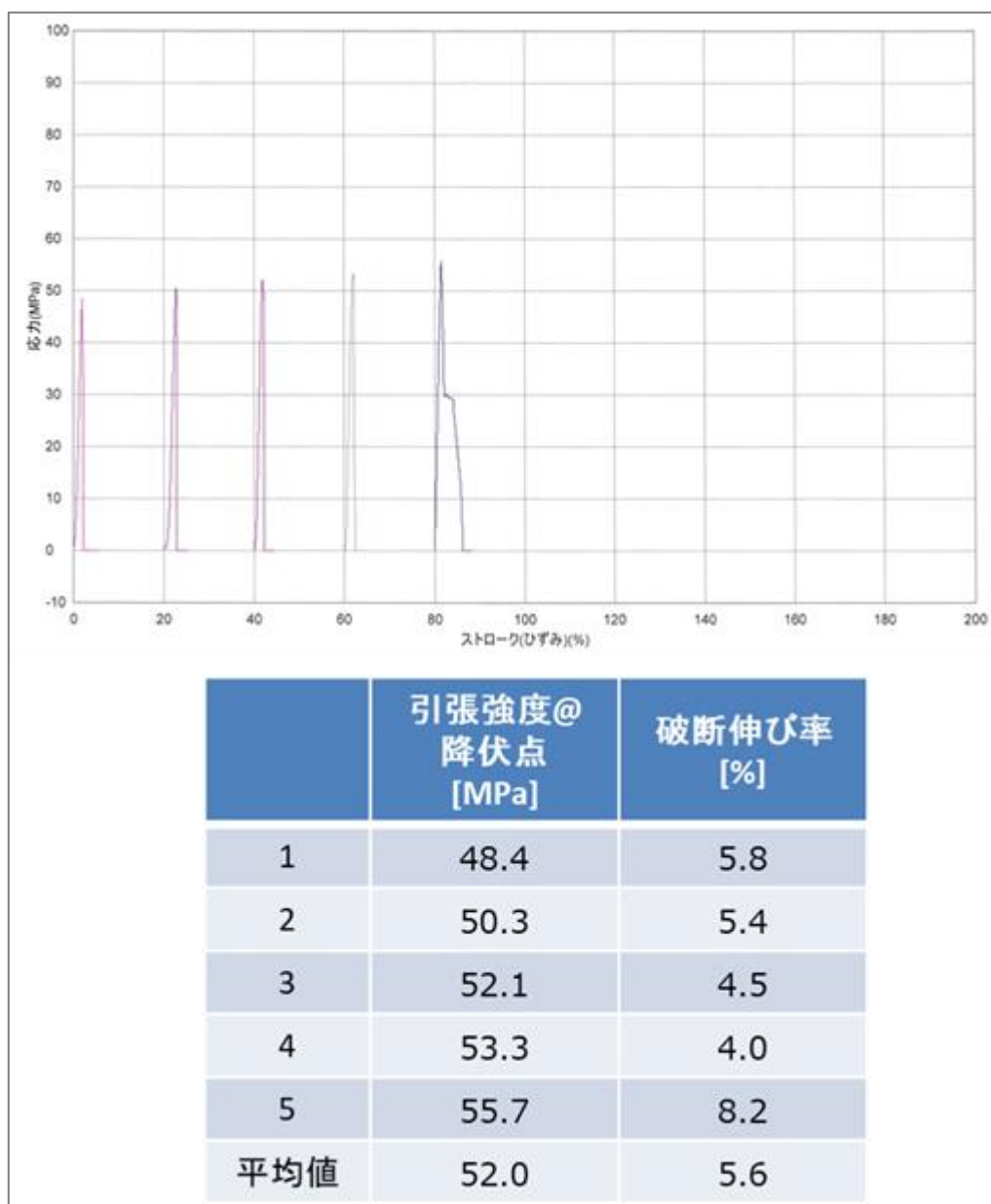


図 3-7. サンプル 7 (PLA/酸化 PBS = 90/10、酸化度 0.05 $\mu\text{mol/g}$) の引張試験結果

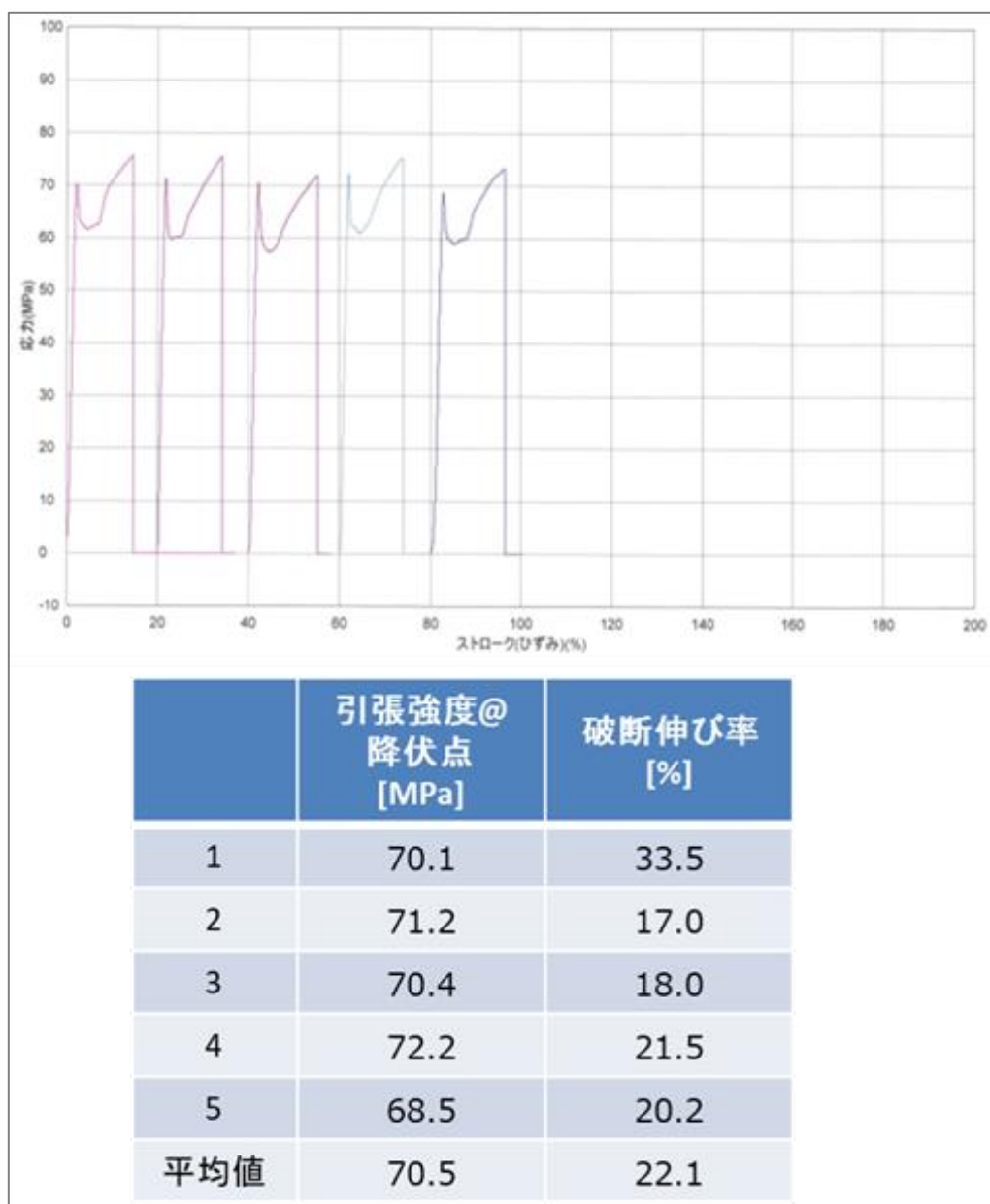


図 3-8. サンプル 4 (PLA/酸化 PBS = 80/20、酸化度 0.05 $\mu\text{mol/g}$) の引張試験結果

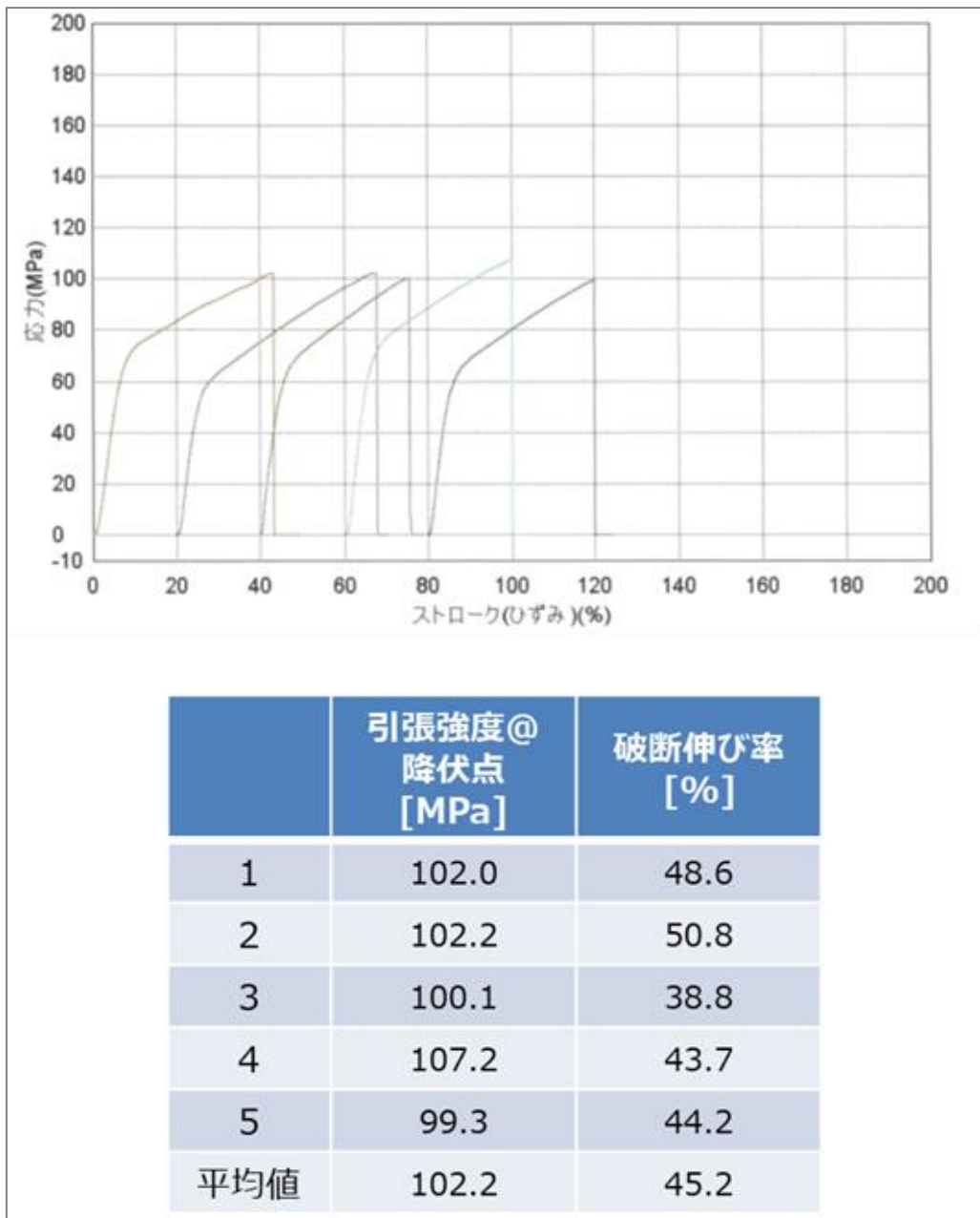


図 3-9. サンプル 6 (PBS = 100) の引張試験結果

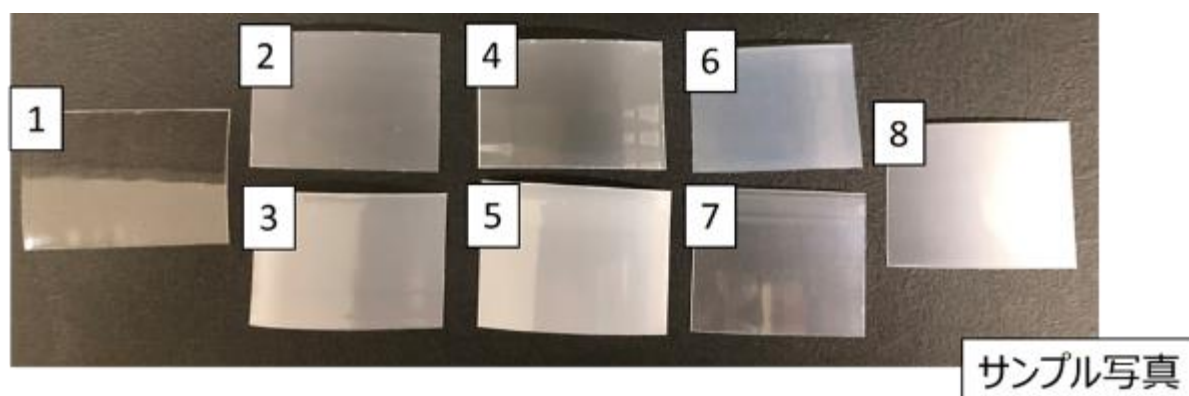
表 3-2. PLA/酸化 PBS ブレンドフィルムの引張試験

試験項目	試験方法	単位	1	2	3	4	5	7	8	6	PLA カタログ値	PBS カタログ値
引張強度@降伏点	ISO 527	MPa	65.1	58.1	53.2	53.5	54.2	52.0	70.5	99.3	50	36
破断伸び率	ISO 527	%	3.0	19.1	53.2	4.6	2.1	5.6	14.8	56.5	<5	210

各サンプルの引張試験結果をまとめたものを表 3-2 に示す。PLA 単品に比べ、PBS の添加により破断伸び率が向上することがわかった。酸化度が高い PBS（酸化度=0.1 $\mu\text{mol/g}$ ）を用いた場合、伸びが低下した。これは酸化が進行しすぎたことによる分子量低下のためと考えられる。相溶性の向上と物性の改善を両立させるために最適な酸化度を適用することが重要であるとわかった。

表 3-3. PLA/酸化 PBS ブレンドフィルムの透明性評価

試験項目	試験方法	単位	1	2	3	4	5	7	8	6
曇り度(HAZE)	ISO 14728	-	1.1	93.6	97.6	52.1	91.8	34.6	84.4	31.8
全光線透過率(TT)	ISO 13468	-	93.0	91.1	86.6	91.6	79.9	87.3	79.7	84.6



PLA/酸化 PBS ブレンドフィルムの透明性評価をまとめたものを表 3-3 に示す。PLA の高い透明性に対し、PBS は白濁しておりブレンドフィルムにおいても PBS が添加されることで透明性が著しく低下する。一方で、酸化 PBS の場合は透明性に改善が見られている。

3-1-2. 熱分析による相溶性評価

熱分析（DSC 測定）による、PLA-PBS ブレンドフィルムにおける相溶性の評価を行った（表 3-4）。大きな差は見られなかったものの、酸化度が高い場合に結晶化温度が低下する傾向が見られ、これらの間に相関があった。以前の結果から PLA の酸化が結晶化速度に影響を与えることが示唆されていたが、PBS のみの酸化品ブレンドによっても結晶化に影響があることが示唆された。

表 3-4. PLA-PBS ブレンドフィルムの熱分析結果

	PLA					PBS	
	融点 [℃]	融点吸熱量 [mJ/mg]	ガラス転移温度 [℃]	結晶化温度 [℃]	結晶化温度 発熱量[mJ/mg]	融点 [℃]	融点吸熱量 [mJ/mg]
1	174.4	46.5	52.8	99.4	35.9	-	-
2	174.4	40.2	52.6	90.9	25.0	111.4	2.2
3	173.6	37.1	52.1	90.2	22.5	112.0	10.7
4	173.7	41.0	50.8	85.5	24.6	111.6	2.3
5	173.6	37.8	51.0	85.6	21.2	112.1	13.1
7	175.5	35.9	55.7	88.1	20.2	112.2	3.7
8	174.5	31.3	57.7	89.6	19.7	112.9	9.5
6	-	-	-	-	-	114.2	67.1

3-1-3. まとめ

ベンチスケールでブレンドフィルムを作製し、その物性に関して引張試験および透明性試験、熱分析から評価した。酸化 PBS の添加により引張伸びが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 PBS 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。透明性の改善は PLA 内の PBS 層サイズの低下によるものと推察されるが、顕微鏡観察からは島構造は観察されなかった。透明性が向上し 5 μm 以下に制御されていると推察されるが、今回のサンプルではうまく観察できなかったため、観察方法も含めて今後の検討を進めていく。

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））

作製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、昨年度に続き生分解性評価を行った。

3-2-1. フィルムの生分解性評価

前年度に引き続き、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。評価を行う際にフィルムに付着している土を除去するが、その際にバイオフィルム層をも除去してしまう可能性があると考えられた。そこで、土を除去する回数を減らすために、土に埋めている期間ごとに外観観察用と引張試験用のサンプルを準備した。また、PLA フィルムの酸化処理については、前年度同様、酸化処理 30 °C、酸化処理 60 °C とした。参考までに前年度の接触角と酸化度を以下に示す。

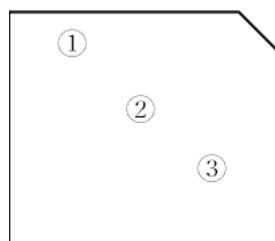
表 3-5. 各 PLA フィルムの接触角と酸化度の結果

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 °C ox-PLA）、酸化処理 60 °C（60 °C ox-PLA）について、これら 3 種類の PLA フィルムを土中に埋めて生分解性評価を行った。評価は、一定日数（1 ヶ月、3 ヶ月、6 ヶ月）経過後の外観変化、フィルムの厚さを調べた。また引張試験を行い、物性評価も行った。

－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 PLA フィルムを埋め込み、一定日数（1 ヶ月、3 ヶ月、6 ヶ月）の経時変化を観察した。

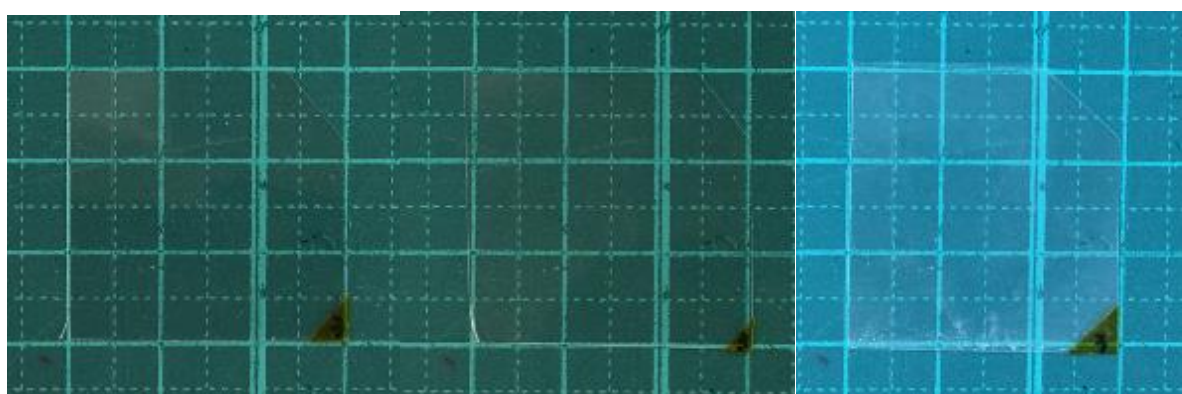


フィルム面内①～③の箇所の厚みを計測した。

経時変化の観察においては、埋め込み 1 ヶ月後、3 ヶ月後、6 ヶ月後に観察できるように期間毎のフィルムを用意した。また、引張試験においても、期間毎のサンプルを用意した。

－結果

埋め込み前の初期のフィルム、埋め込み 1 ヶ月後、3 ヶ月後、6 ヶ月後の写真を以下に示す。

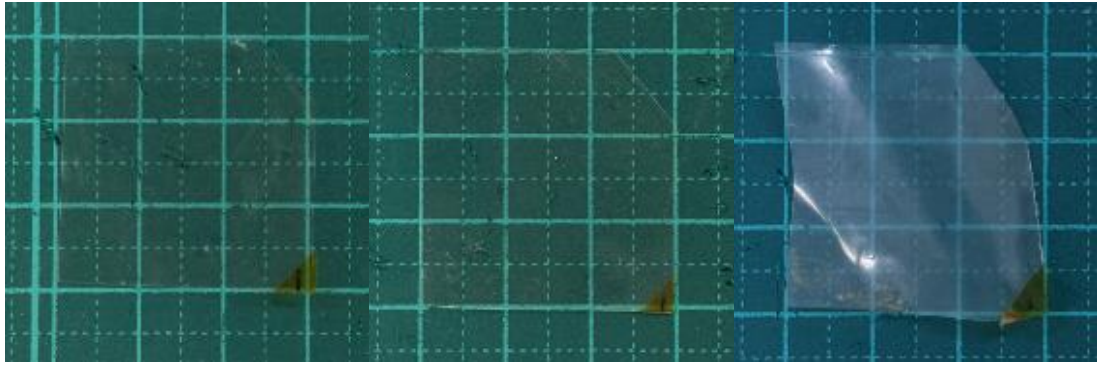


未処理 (ref-PLA)

酸化処理 30℃ (30℃ ox-PLA)

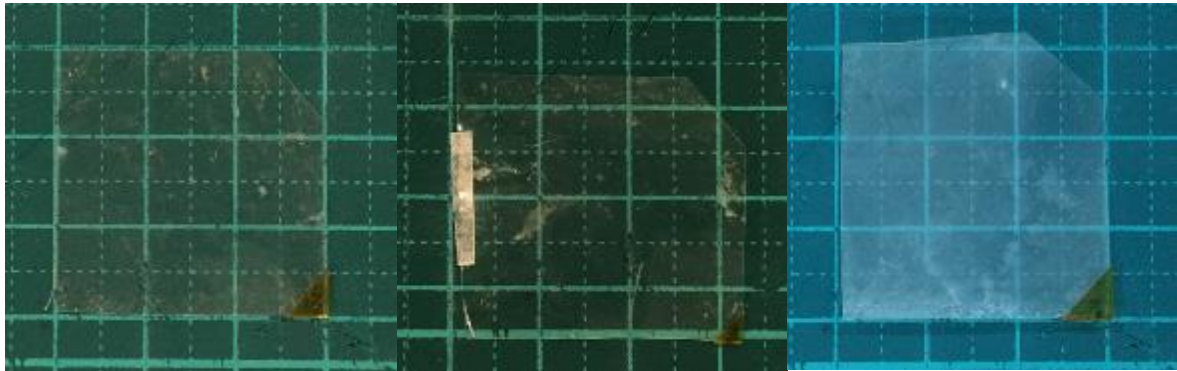
酸化処理 60℃ (60℃ ox-PLA)

図 3-10. 初期のフィルム



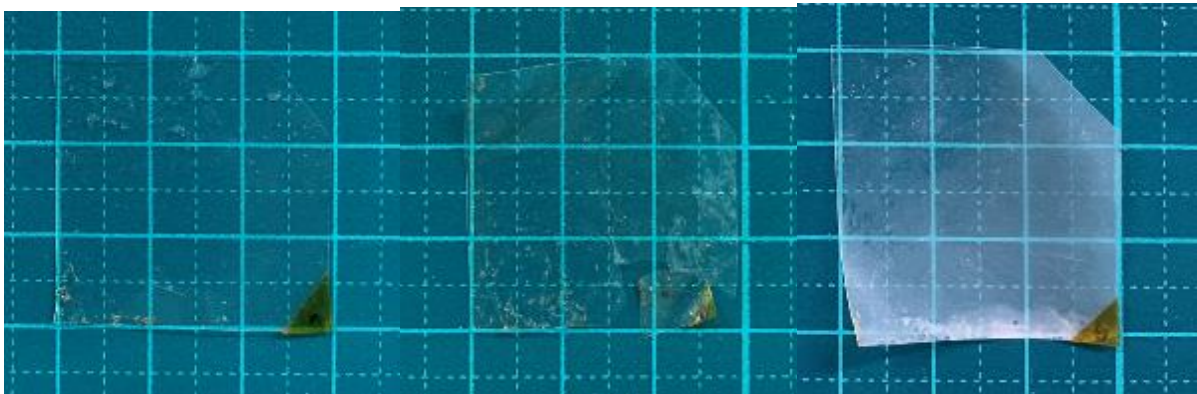
未処理 (ref-PLA) 酸化処理 30 °C (30 °C ox-PLA) 酸化処理 60 °C (60 °C ox-PLA)

図 3-11. 1 ヶ月後のフィルム



未処理 (ref-PLA) 酸化処理 30 °C (30 °C ox-PLA) 酸化処理 60 °C (60 °C ox-PLA)

図 3-12. 3 ヶ月後のフィルム



未処理 (ref-PLA) 酸化処理 30 °C (30 °C ox-PLA) 酸化処理 60 °C (60 °C ox-PLA)

図 3-13. 6 ヶ月後のフィルム

未処理（ref-PLA）、酸化処理 30 °C（30 °C ox-PLA）、酸化処理 60 °C（60 °C ox-PLA）のいずれのフィルムも、埋め込み前の初期は無色透明のフィルムであったが、酸化処理 60 °C（60 °C ox-PLA）は 1 ヶ月以降からフィルムの白濁が見られた。酸化処理 30 °C（30 °C ox-PLA）は 6 ヶ月後には亀裂が生じ、フィルムが破れていた。

次に、各フィルムの厚さの変化を以下に示す。期間毎のフィルムにおいて、埋める前との差を厚さ変化とした。（埋め込み後の厚さの方が薄い場合には、マイナスと表記）

表 3-6. PLA フィルムの厚さ変化

サンプル	計測箇所	1ヶ月後の変化 (mm)	3ヶ月後の変化 (mm)	6ヶ月後の変化 (mm)
ref-PLA	①	0.00	0.00	0.00
	②	0.00	-0.01	0.00
	③	0.00	0.00	-0.01
30 °C ox-PLA	①	0.00	-0.01	0.01
	②	0.00	0.00	0.00
	③	0.00	0.00	※
60 °C ox-PLA	①	0.00	0.00	0.00
	②	0.00	0.00	0.00
	③	0.00	0.00	0.01

※サンプルに破れが生じたため、測定できず

未処理（ref-PLA）、酸化処理 30 °C（30 °C ox-PLA）、酸化処理 60 °C（60 °C ox-PLA）のいずれのフィルムも、厚さの変化はほとんど認められなかった。

最後に、各フィルムの引張強度測定結果を以下に示す。

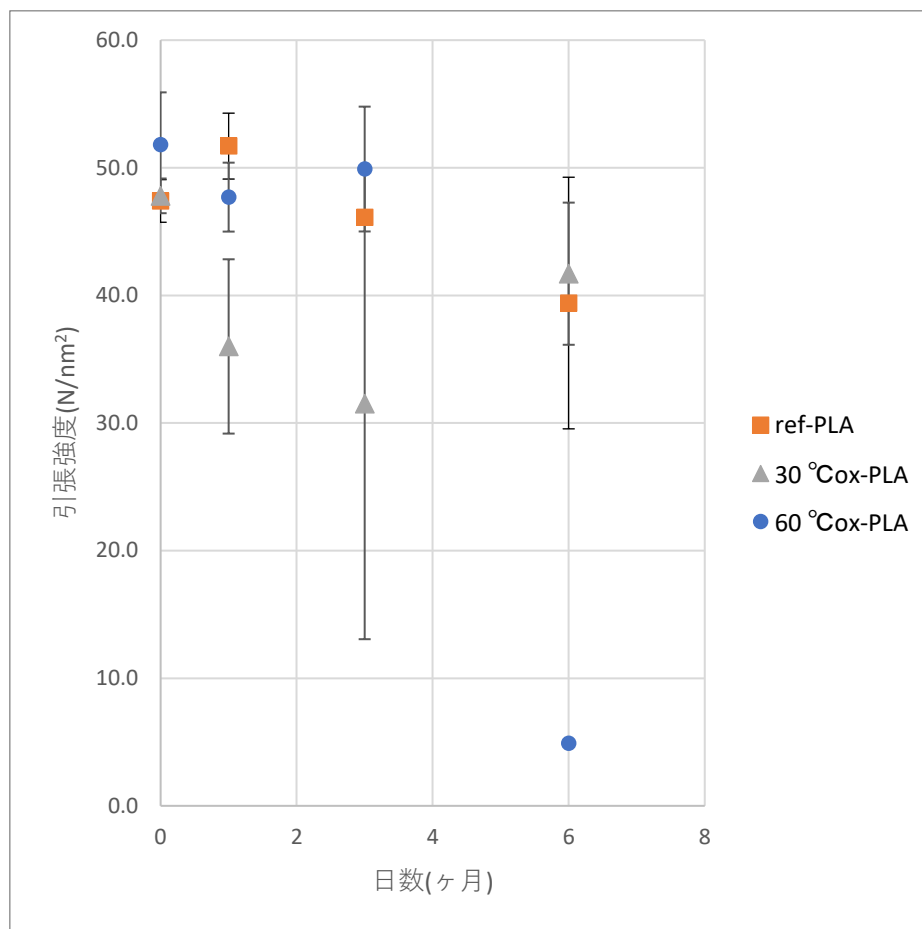


図 3-14. 土埋め後の PLA フィルムの引張試験結果

酸化処理 60 °C (60 °C ox-PLA) の 6 ヶ月後では、引張強度が著しく低下していることが分かった。このことから、酸化処理 60 °C (60 °C ox-PLA) は、未処理 (ref-PLA) や酸化処理 30 °C (30 °C ox-PLA) に比べて、より PLA が劣化していると考えられた。

また、3-1-1において作製した PLA/PBS ブレンドフィルムの生分解性評価も行った (図 3-15)。未酸化 PBS ブレンド品と、酸化 PBS ブレンド品の比較において、酸化 PBS において割れが発生しており、生分解性の向上が示唆された。

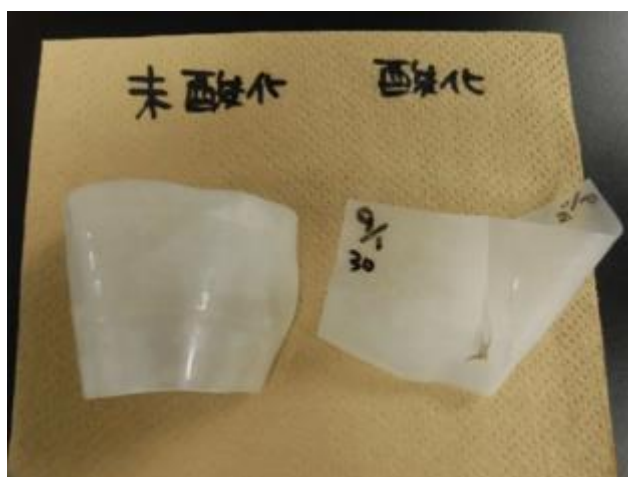


図 3-15. 土埋め 3 か月後の PLA/PBS フィルム

3-2-2. 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った。光活性化処理として、令和元年度の報告書[1]では、以下のように記載されている。

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/cm^2 で 100 cm^2 の面積に対して 10 分間の光照射に係るエネルギー E1 は、

$$E1 (\text{J}) = 5 \times 100 \div 1000 \times 10 \times 60 = 300$$

・ 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、

$$E2 (\text{J}) = 7 \times 10 \times 60 = 4,200$$

・ 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、

$$E3 (\text{J}) = 1.25 \div 1000 \times 10 \times 60 = 0.75$$

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、450 kJ/kg となる。また、光量を 20 mW/cm^2 として薬液濃度を上げた場合、10 分で 300 g を処理可能であることから、その場合 60 kJ/kg となる。

エネルギー量から酸化に係るコスト試算として、光熱費を算出すると、ブレンド工程などと比較してかなり低いことが示唆された。具体的には上記計算式を元に電力量を試算すると $4.2 \times 10^{-4} \text{ kW/kg}$ となり $1 \text{ kWh} = 27 \text{ 円}$ とすると、0.01 円/kg の光熱費が必要となる。これは原材料費からみると無視できる程度に小さい。一方で、処理時間が長くなれば人件費など全体でのコスト増につながることから、短時間での大量処理が

カギとなる。実際に、現段階では1時間に最大18 kgの処理量であり、100 kg/日の生産としても6時間の稼働、すなわち作業員の一日本分の作業費が必要という事になる。これを10~100 倍の効率で処理することが今後の大きな課題と言える。

3-2-3. まとめ

PLA/PBS ブレンドフィルムにおいて酸化 PBS の添加により PLA よりも伸び率の高いフィルムを kg スケールで作製可能であった。このことから靱性の向上も期待される。また酸化品添加で透明性が向上した。

表面酸化処理 PLA において生分解性が向上していること、ブレンドフィルムにおいても酸化品の添加により生分解性が向上する可能性が示唆された。

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

令和元年度には、主要原料である 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 樹脂等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。

令和 2 年度には、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 調査、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。

これら 2 年間の LCA 分析を踏まえ、令和 3 年度には食品包装用フィルムなどの使用実態を踏まえた機能単位を設定し、3 つの用途に対する LCA 試算を実施した。

その結果、以下の成果が得られた。

- (1) 設定した食品包装用フィルム、食品包装用シート、農業用マルチは薄物製品としての用途であり、クローズドリサイクルが期待できないので、各ベースラインもリサイクルなしの条件で LCA を実施した。
- (2) 開発品の食品包装フィルム： フィルム面積として 40m² の機能単位を設定し、ベースラインの PE と開発品厚みを変数として LCA を実施した。その結果、開発品の厚みが半減できれば、開発品のシステム全体の GHG 排出量はベースラインより小さく、エネ起源の GHG 削減が期待できる。
- (3) 開発品の食品包装用シート： シート面積として 4m² の機能単位を設定し、開発品とベースラインの PET と開発品厚みを変数として LCA を実施した。その結果、同じ厚みでは、開発品のシステム全体の GHG 排出量はベースラインより小さい。エネ起源で比較した場合でも、PET と開発品の比重差のため同じ厚みではベースラインの PET に対しても、エネ起源の GHG 削減効果が認められる。
- (4) 開発品の農業用マルチ： マルチ面積として 100m² の機能単位を設定し、開発品とベースラインの PE と開発品の PBS 配合比を変数として LCA を実施した。その結果、食品包装フィルムと同様に、開発品の厚みが半減できれば、開発品のシステム全体の GHG 排出量はベースラインより小さく、エネ起源の GHG 削減が期待できる。

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

4-1. 目的

令和3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ブレンドフィルム等の製造」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、開発されるブレンドフィルム等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。

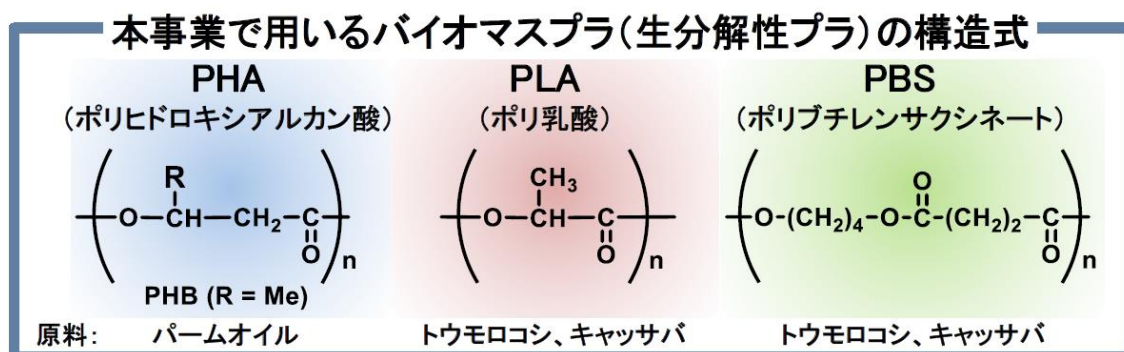
本報告書では、温室効果ガス排出量について、事業で用いる下記のバイオマスプラを用いたフィルム等と現在供用されているPE（ポリエチレン）、PET（ポリエチレンテレフタレート）などとの比較検討を行う。

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。

令和元年度には、対象システムのGHG排出量に影響を及ぼす要因として、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を取り上げた。[1]

令和2年度は、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した。[2]

最終年度である令和3年度は、本事業で開発されるバイオマス製品を各種の用途に適用した場合のGHG排出量を適正に評価化する。



※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。光活性化されたブレンド開発品に加え、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、PET 等と設定し、ベースラインとして比較する。

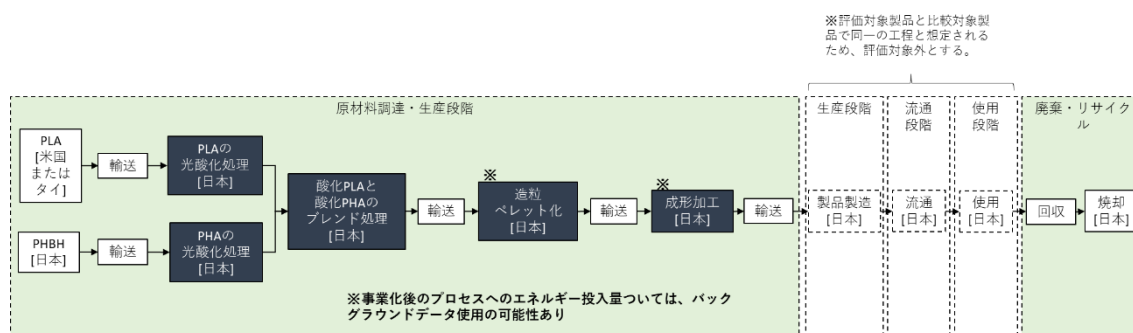


図 4-1. ブレンドフィルム製造のフローとシステム境界

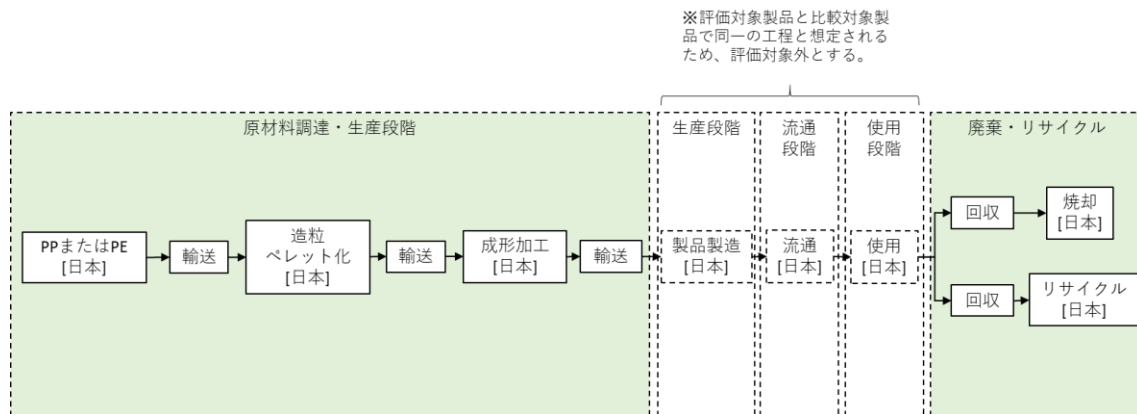


図 4-2. ベースラインのフローとシステム境界

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,PET 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,PET 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．ベースライン樹脂生産と需要

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。

樹脂価格は、日本では原料である原油-ナフサの価格に連動して変動する。原油価格はこの 1 年間急騰しており、1kL 当たり約 60 千円（バレル当たりで約 70\$）を超えている。その結果、代表的な樹脂である PE 価格は、図 4-3 に示すように 2017 年の約 200 円/kg から最近では 260 円/kg に 大幅に急騰している。

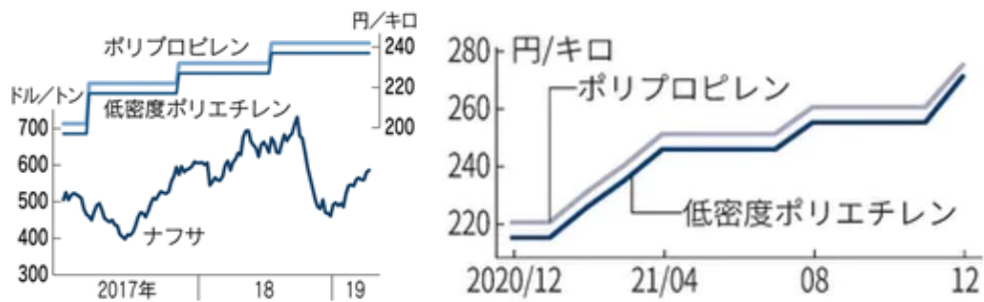
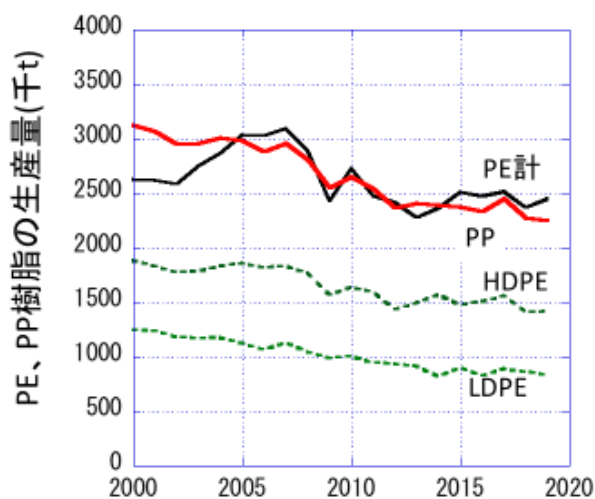


図 4-3. 代表的な樹脂価格の変化

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

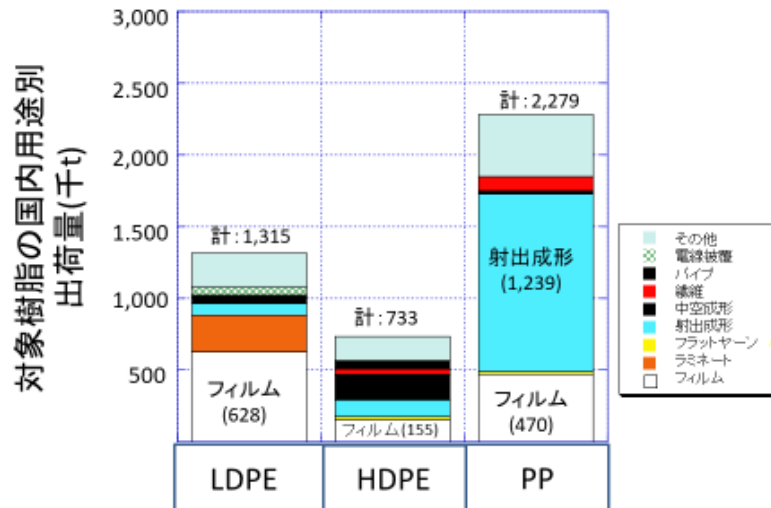


出典：日本プラスチック工業連盟

図 4-4. PE、PP 樹脂の生産量の推移

<国内出荷量と用途>

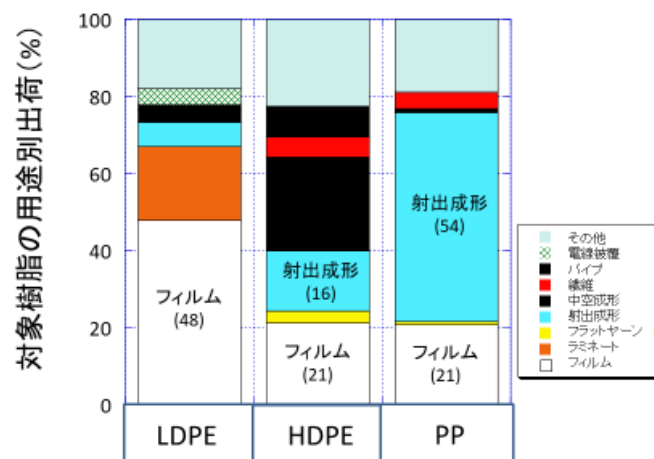
国内の用途別出荷量は、図 4-5 に示すようにフィルムなど薄物用途が多い。[4]



出典:石油化学工業協会

図 4-5. 各種樹脂の用途別国内用途別出荷量（2018 年）

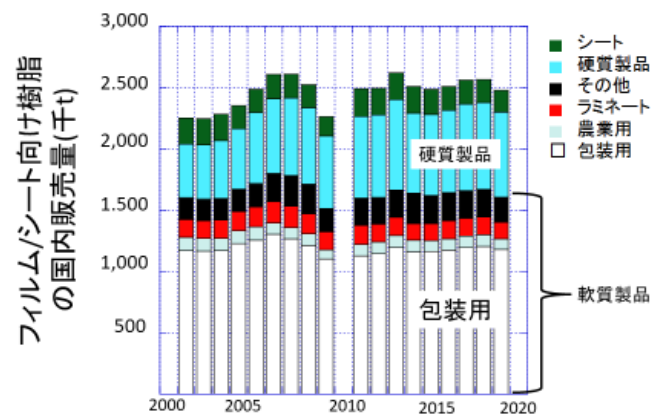
図 4-6 に示すように、用途のうちフィルムの比率は LDPE では約半数を占め、HDPE,PP では 20%を占めている。



出典:石油化学工業協会

図 4-6. 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 4-7 に示すように年間 250 万トンの国内販売量があり、軟質製品としての食品を含む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 4-7. フィルム/シート向け樹脂の国内販売量推移

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	計		
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：%

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。

バイオマス樹脂の用途として期待されているのは、主要な薄物用途代替として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、食品用包装用途は 厚生労働省のガイドラインにより、以下のようにリサイクルが制約されているケースもある。

ー<厚生労働省 ガイドライン：抜粋>[5]ー

厚生労働省医薬食品局食品安全部は平成 24 年 4 月に、食品用器具及び容器包装における再生プラスチック材料の使用に関するガイドラインを公表した。

その中で、「再生プラスチック材料を食品用器具・容器包装に利用するためには、食品衛生上の安全性を確保することが不可欠であり、リサイクルで混入する化学的な汚染物質が最終製品に残存して食品中に移行し、健康被害を引き起こすような製品が流通しないように、その安全性については十分に配慮がなされなければならない。」と示している。

その上で、個別の安全性について照会する場合の手続きを以下のように示している。

(抜粋) 食品用器具及び容器包装の製造業者及び輸入業者等が食品用器具及び容器包装に再生プラスチック材料を使用するにあたり、個別の安全性について照会する場合には、再生プラスチック材料又は、再生プラスチック材料を使用した器具及び容器包装ごとに、以下の 内容を含む書類を厚生労働省医薬食品局食品安全部長あて提出すること。食品健康影響評価に必要な毒性試験等のデータなど追加の資料を求めることがある。

(1) 原料管理、再生工程を含む一連の製造工程に関する情報

・原料（特に使用済みプラスチック製品）の保管方法、汚染品、他材質との選別 ・再生工程（汚染物質を除去する工程）、使用している機器 ・成型加工工程

(2) 原料の情報

・原料として使用する使用済みプラスチック製品のクラス、そのクラスの中でもさらに限定する場合は限定内容、材質、由来、使用量、使用割合等 ・その他に使用する新規材料（新規樹脂、添加剤等）

（再生材料と新規材料を混合使用する場合、再生材料を新規材料（機能性バリア等）で食品に直接接触させない多層方式の場合

ー（以上、引用）ー

その結果、原料は食品用途の使用済みプラスチック製品を分別回収したものに限定することとし、食品用器具及び容器包装の製造工程で回収されたもの、食品用途に使用された後、再商品化を目的として特定の材質の容器包装のみを分別して回収したも

のなどを原則としている。

このため、一般廃棄物から分別回収される「容易包装由来のプラスチック」は、種々の発生源からの廃棄物を含むので、食品包装プラスチックにはリサイクルできない。後述するように、再生 PE から製造されるレジ袋類は「非食品用」と表示され、販売されている。

したがって、食品包装用に限定すれば、リサイクル材は利用されていないと設定することが適切であると推察される。

＜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。

「包装用フィルム、シート（トレイ）類」は 1 年以内の短寿命の製品群であり、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。本開発で実施している包装用フィルム等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、各種のリサイクルが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く、厚生労働省のガイドライン等により食品包装フィルムへのマテリアルリサイクルは適用されていない。

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[6]

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。

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、特定事業者に再商品化の義務がある。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、プラスチックでは約 50 円/kg で推移しており、特定事業者が腐乱した実施委託料の 90%はプラスチックが対象となっている。

<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、再商品化量やそのリサイクル手法についてまとめている。

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 4-8 のように毎年まとめており、この図表を単年度で整理し、表 4-3 を作成した。

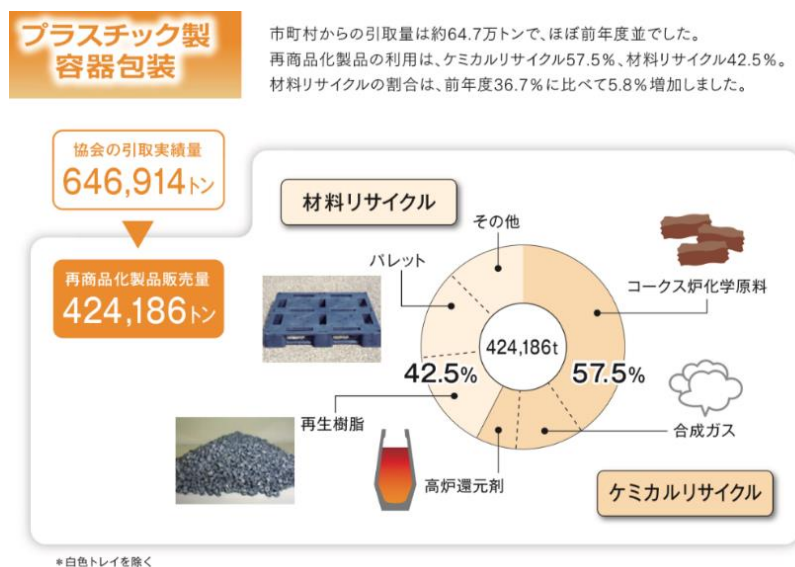


図 4-8. プラスチック製容器包装からのリサイクル状況の入出力（2019 年度）

表 4-3. 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	1.00	0.67	0.60	0.60	0.31	0.29	
回収量							
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 4-9 に示す。

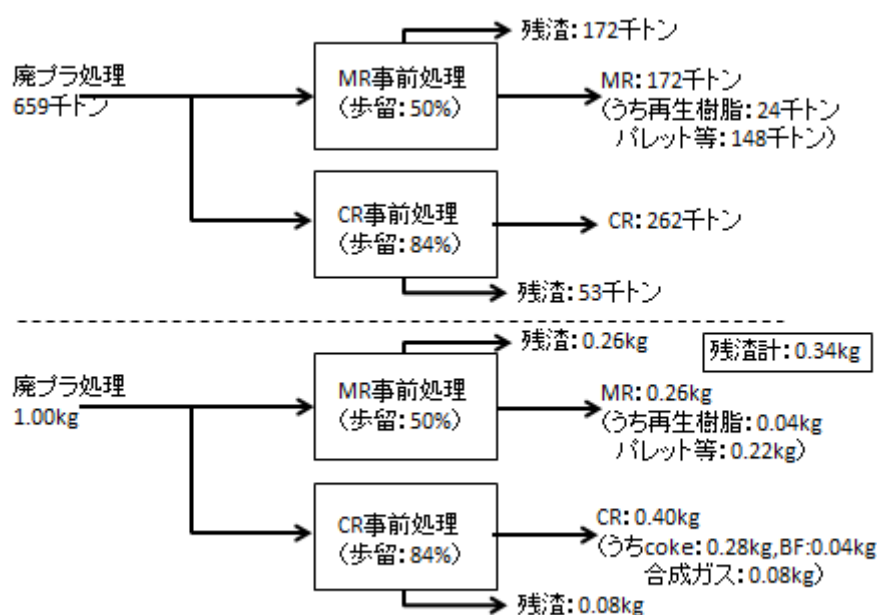


図 4-9. 容器包装プラスチックのマテリアルフロー

((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いので再商品化されなかったため、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量の 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量の 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寄りも高く、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 入力量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（現プラスチック資源循環協会）が年度毎実集計し、図 4-10 のようにまとめている[7]。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。[8]

- ・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きないといわれている。

容リ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：容リ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。

これらの事実も、食品包装用途の廃棄製品回収が困難で、回収されても利用率が低

い理由であろう。さらに、マテリアルリサイクルされる再生樹脂も 食品包装用途には利用されていない。

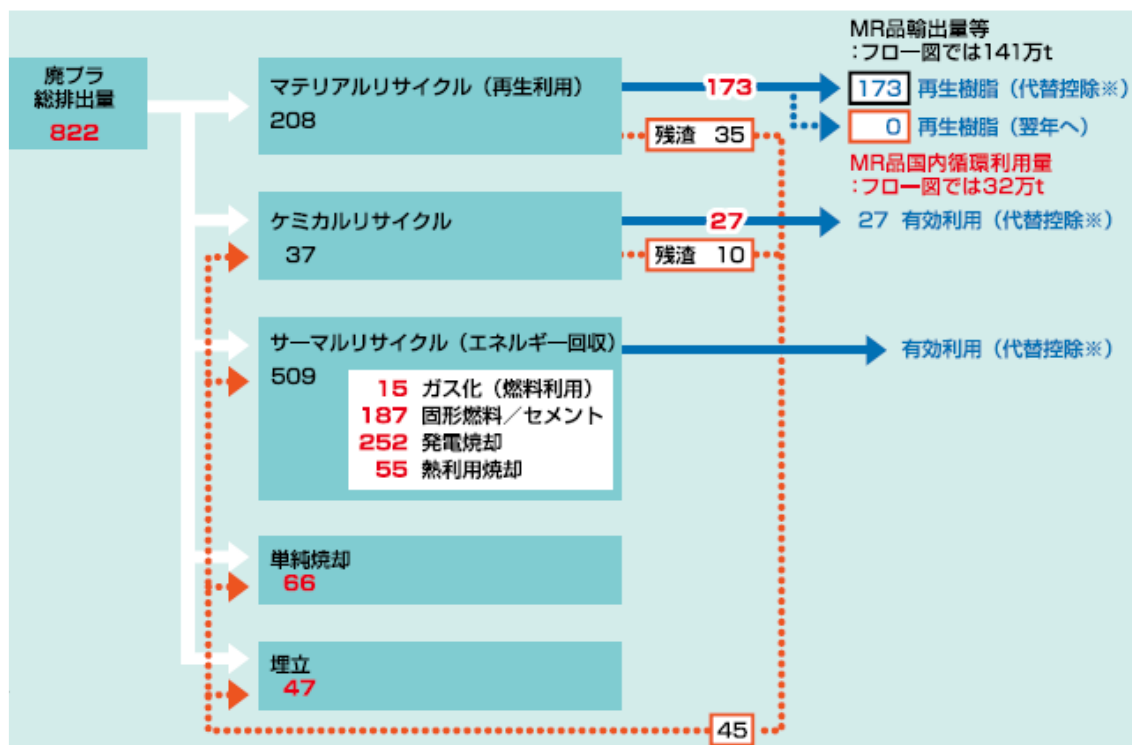


図 4-10. 我が国のプラスチックフロー（2020 年）

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と推察される。

(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クズとして排出される廃プラも想定され、図 4-10 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[9]、プラスチック量としては約 15 万トン程度である。

<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が解体され、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 4-11 に示すように 98-99%にも達している。[10]

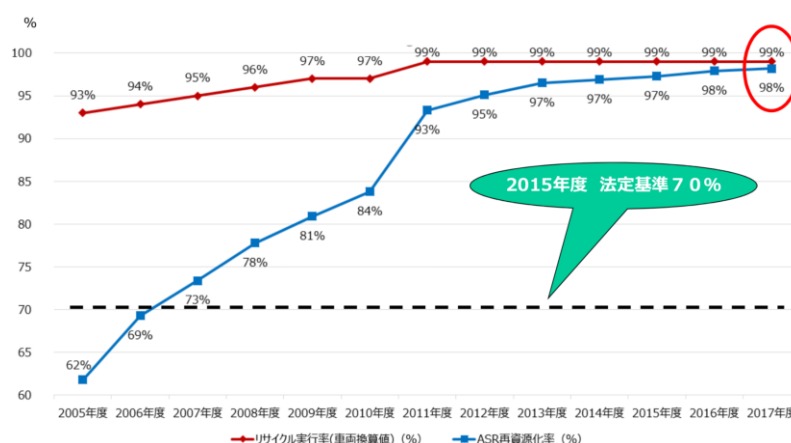


図 4-11. ASR の再資源化率、リサイクル実行率の推移

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、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 4-12 に示すフレークや再生ペレットが販売されている。[11]

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

その価格は、図 4-13 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 4-14 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。[12]

PPナチュラル
発生量：月/10t
食品関係粉碎品



PP射出用ペレット (W)
発生量：月/20t
家電関係



PP粉碎
発生量：月/20t
雑貨関係



PEホワイト



PPホワイト



TSOPペレット



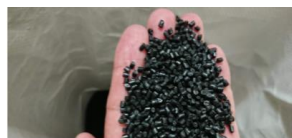
図 4-12. フレークや再生ペレットの販売事例



PP 黒 再生ペレット (SHI-GPS3)
78円/kg(置き場渡し価格)



PP 黒 再生ペレット (SHI-NX)
85円/kg(置き場渡し価格)



HDPE BLK for PIPE (SHI-HDBK)
95円/kg(置き場渡し価格)



HDPE 雑色 再生ペレット
(HD-YAM)
85円/kg(置き場渡し価格)

図 4-13. 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 4-14. 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 4-15 に示す[13]。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、食品を含むフィルム等に 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と推察される。

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

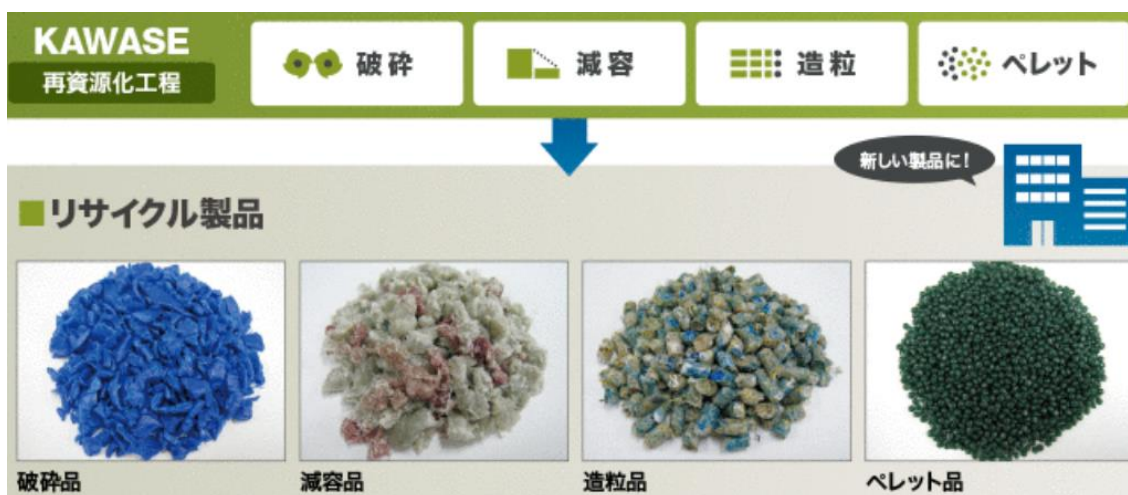


図 4-15. 産業廃棄物系原料の受け入れから再ペレット化までの工程[13]

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状況をまとめた。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。
- ・ 品質の観点からは、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。

さらに、フィルムなどの薄物用途に関しては、品質要求が高いことに加え、厚生労働省のガイドラインにより、リサイクルペレットの適用が制約される課題がある。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。

上記のうち、薄物用途が主体の 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。

(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（現プラスチック資源循環協会）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[7]。

(図 4-16)

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 4-17 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 4-18 には PE、図 4-19 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 2000 年以来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。

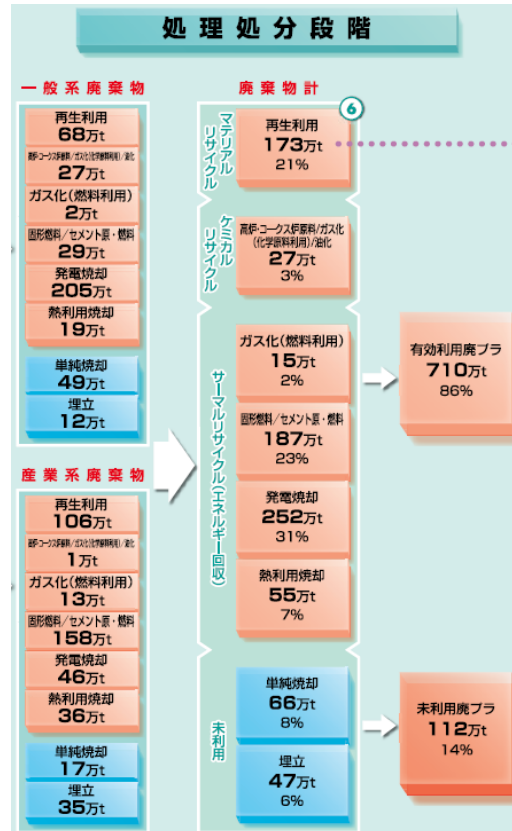
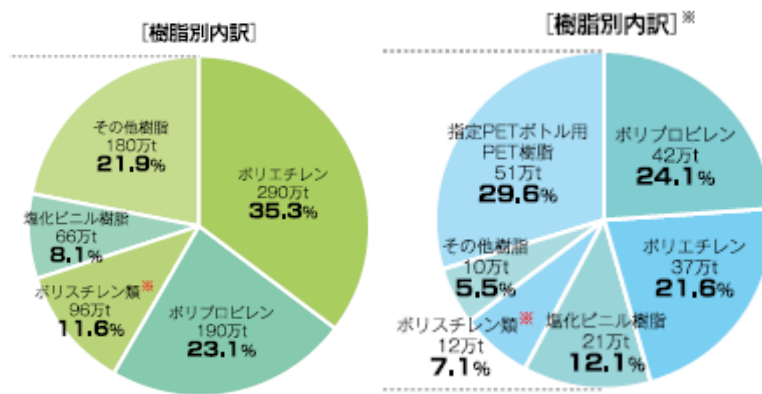


図 4-16. プラスチックのマテリアルフロー図 (2020 年)



(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 4-17. マテリアルリサイクル率の設定根拠

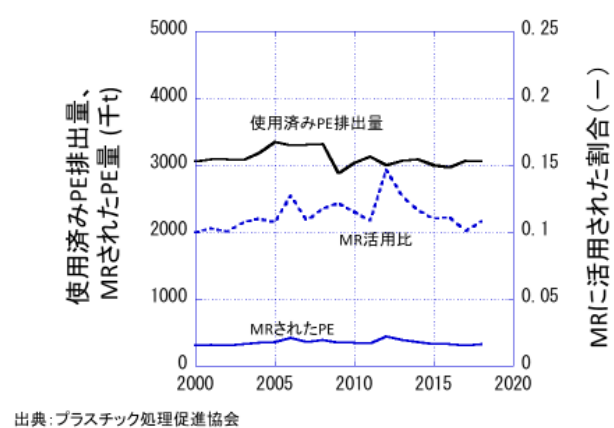


図 4-18. PE 樹脂の排出量とマテリアルリサイクル（MR）量の関係

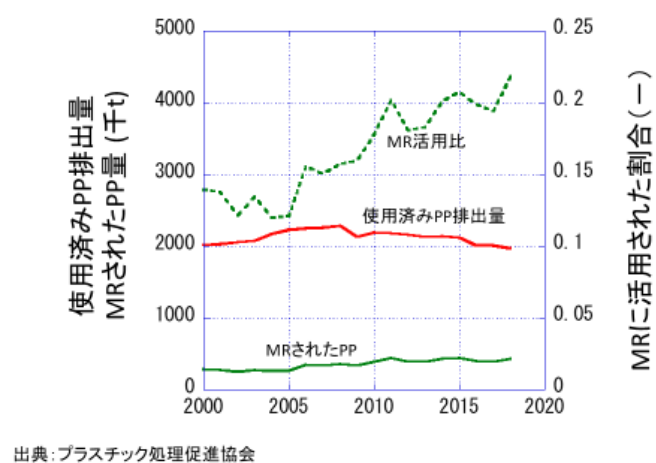


図 4-19. PP 樹脂の排出量とマテリアルリサイクル（MR）量の関係

(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にしている。CFP は、産業環境管理協会（現 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 4-4、4-5 のカーボンフットプリント情報として公開している。

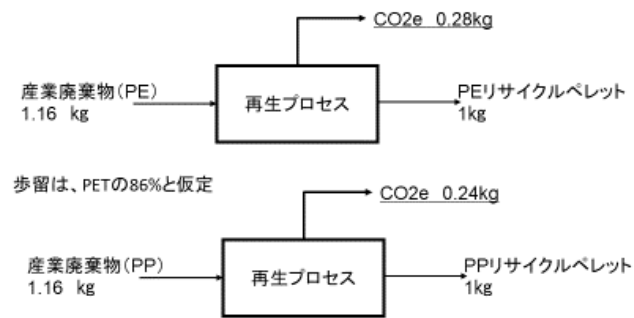
[15]

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 4-20 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 4-20. 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 4-4. 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

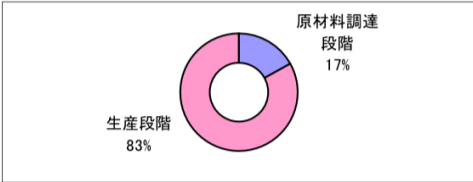


1. 製品情報			
1.1	登録番号	CR-EF01-15001	1.7 製品写真 
1.2	製品名称（日本語）	ポリエチレン リサイクルペレット100 JPRA/NPY	
	製品名称（英語）	Polyethylene, 100% recycled resin JPRA&NPY	
1.3	製品型式	-	
1.4	製品の主要仕様・諸元	産業系廃プラスチックを主要材料としたリサイクル率100%のポリエチレンペレット	
1.5	CFP算定単位	1kgあたり	
1.6	公開日	2015年10月9日	
2. 事業者情報			
2.1	事業者名（日本語）	全日本プラスチックリサイクル工業会 / 日本プラ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 (端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>	<数値表示の単位>
		0.28	製品 1 kgあたり
	追加情報の記載内容	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。 生産段階 81% 原材料調達 段階 19%	
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 4-5. 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 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・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 （端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	0.041	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>	<数値表示の単位>
		0.24	製品 1 kgあたり
追加情報の記載内容	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。 		
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。	

(4) PET 樹脂のリサイクル

PET 樹脂は、年間 70 万トン以上が消費され、主要なボトル用途に加え、食品包装用などのシート用途に利用される。PET ボトルリサイクル推進協議会は、毎年これらの生産から廃棄、リサイクルに係るフローをまとめており、2012 年の事例を図 4-21 に示す[16]。また、シート向けの再生材の利用について、2019 年の結果と併せて表 4-6 にまとめた。

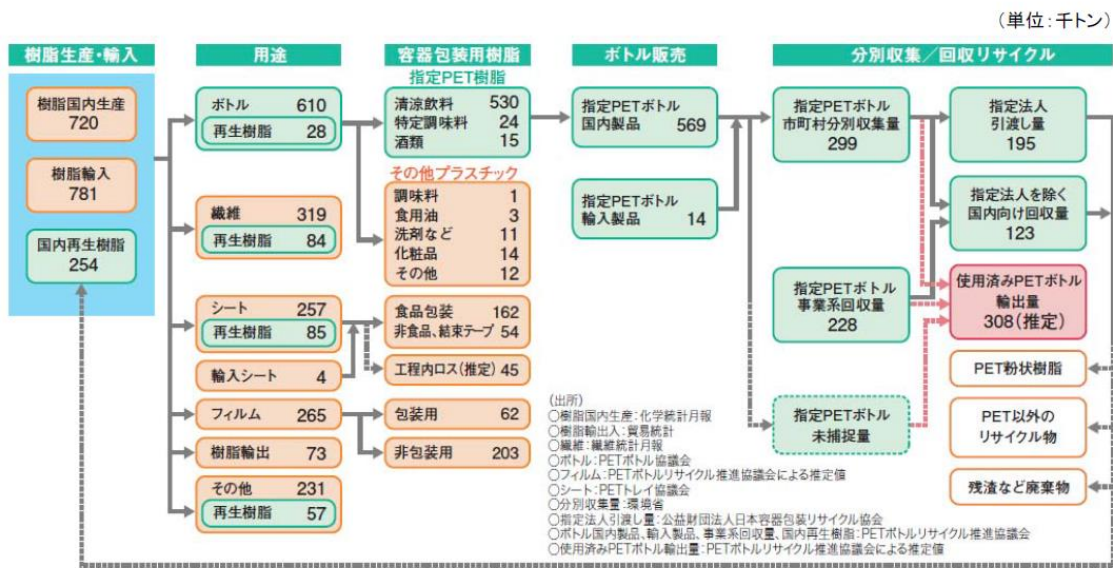


図 4-21. PET 樹脂のマテリアルフロー(2020 年)

表 4-6. シート向け PET 樹脂のフロー

		単位:千トン		
シート向 PET樹脂		2012年	比率	シート 生産量
	新規樹脂	176	0.81	216
	再生樹脂	85	0.39	
		261	1.20	
	ロス	45	0.20	
		2019年	比率	シート 生産量
	新規樹脂	240	0.64	300
	再生樹脂	133	0.36	
		373	1.24	
	ロス	73	0.24	

この表から、PET シートには、PET ボトル由来の再生樹脂が約 3 割から 4 割用いられていることが分かる。ただし、シートには食品包装用に加え、食品以外のシートも含まれている。使用済み PET も先に示した厚生労働省のガイドラインによる再生は、制約されているが、PE などと異なり単一素材として回収されているので、比較的再生樹脂が利用しやすい状況にあると考えられる。

本報告では食品包装用シートを対象としており、図から分かるようにボトル用途以外の廃製品のフローは容器包装リサイクル法の下での回収、商品化に繋がっている。また、PET ボトル由来の再生原料は、食品包装用途以外のシートに利用されていると考えられる。

そのため、食品包装用シートは、廃 PE フィルムと同様に 利用率は低いと考えられるので、食品包装用シートはリサイクルされておらず、燃焼処理されると仮定することが適切である。

4-3-5. 機能の設定

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。

令和 2 年度までは、PE,PET など素材全体に対するリサイクルを検討したが、本年度は用途に着目してリサイクルを検討する。つまり、PE 素材全体の用途に対するマテリアルリサイクル率は「PE : 10%、PP : 20%」と設定することが可能であるが、薄物用途以外でのリサイクルと理解できる。一方、薄物用途のフローに着目すればリサイクルは進んでおらず、燃焼処理が主体であると推測される。

ベースラインとして食品包装用フィルム等の薄物用途を検討対象とするので、厚生労働省のガイドラインに基づいて、多くの用途から排出される食品包装用廃製品は一般廃棄物と共に燃焼処理されると設定するのが実情であると推測される。

以上の検討結果から ベースラインの検討からは以下のように機能を設定する。

- ・製品：製品：(フィルム) 1kg 相当のフィルムでインフレーション成形品

(食品用シート) 1kg 相当のフィルムで押出成形－真空成形品

(農業用マルチ) 1kg 相当のフィルムでカレンダー成形品

- ・ベースラインのリサイクル率：薄物用途に限定したので、リサイクルはなく、燃焼処理。
- ・機能：食品包装用フィルム等として利用可能な PE,PET 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。
- ・土壤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 4-22 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。

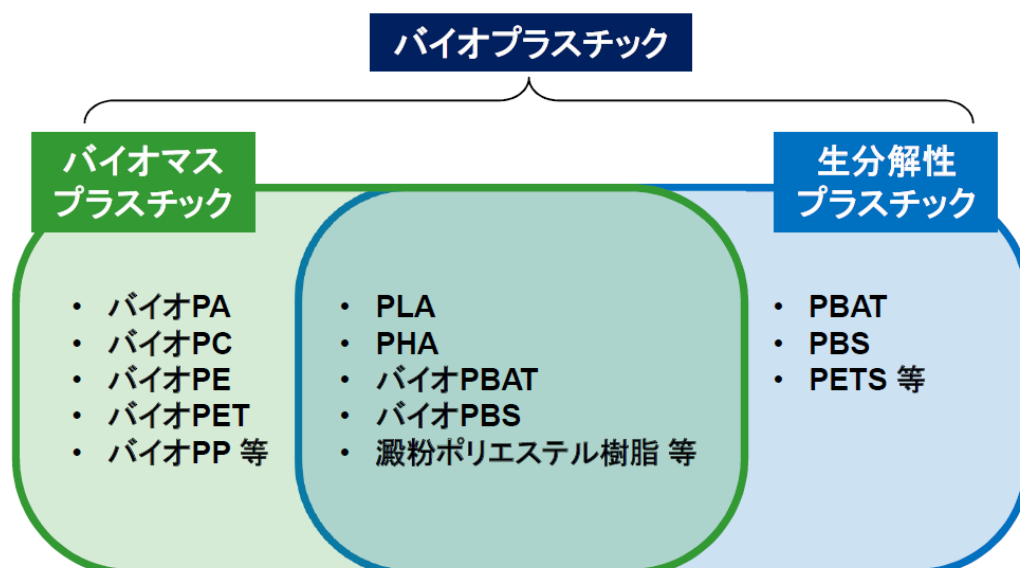


図 4-22. バイオプラスチックの位置づけ

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 4-23 のようにバイオプラスチックを分類している。[18]

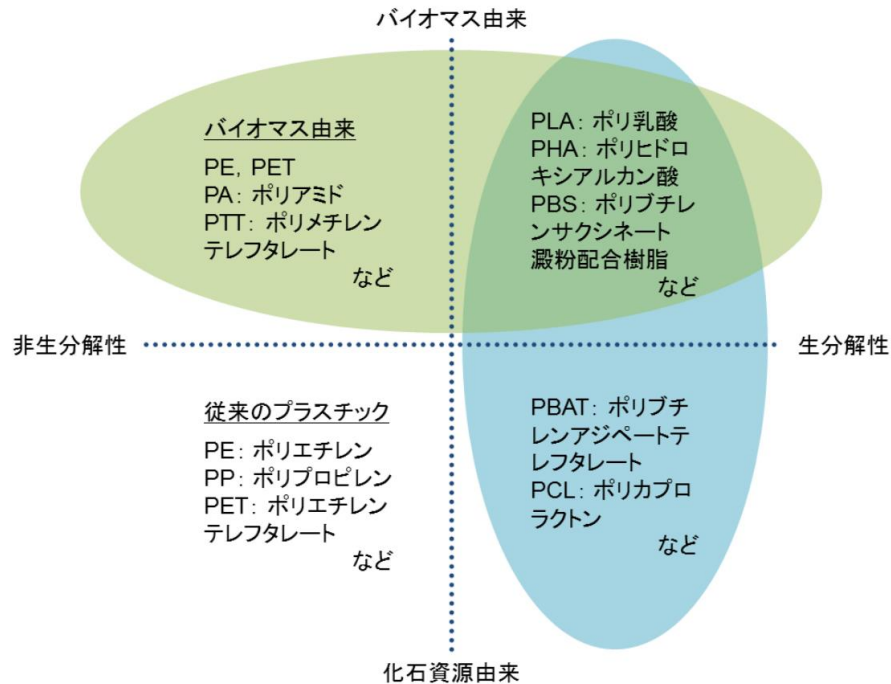


図 4-23. バイオプラスチックの分類

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、本章では関連する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4-24のように、2018年に約200万トンと報告されている[20]。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4-25のように5万トン未満（2019年）である。[21]

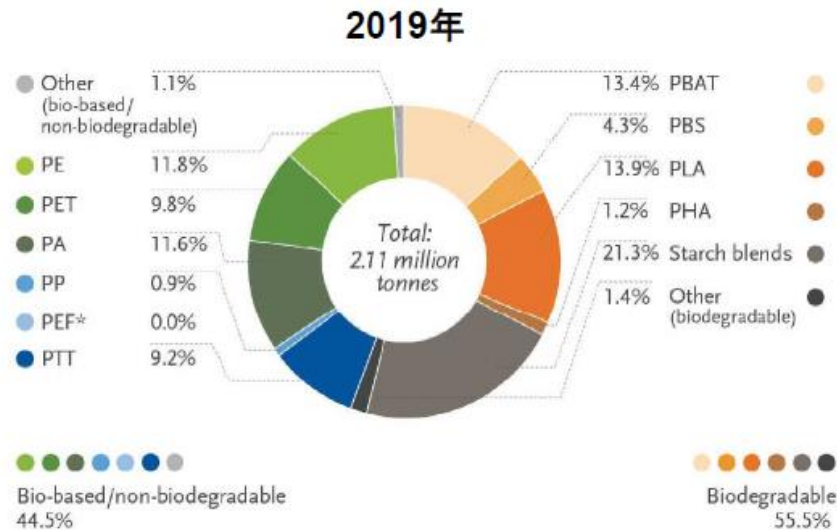


図 4-24. バイオプラスチックの世界生産の内訳

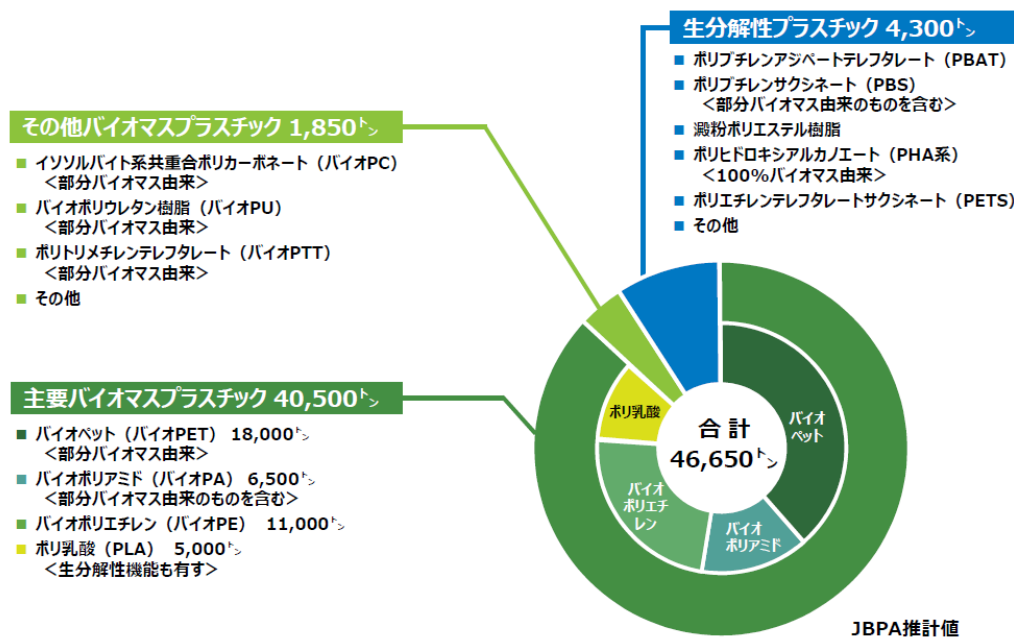


図 4-25. 日本国内のバイオプラスチック出荷量の素材別内訳

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4-26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

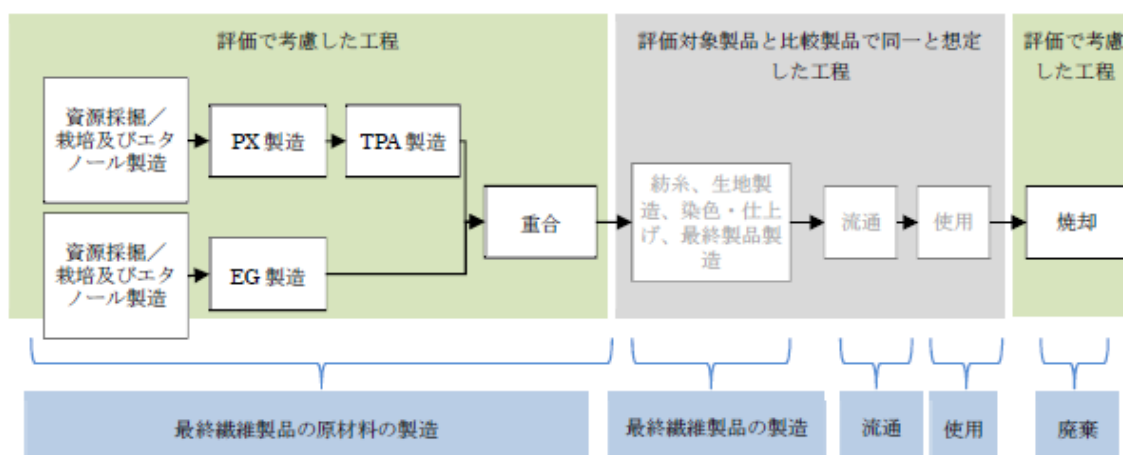


図 4-26. PET の LCA 実施の製品システム

LCA分析の結果として、図4-27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。

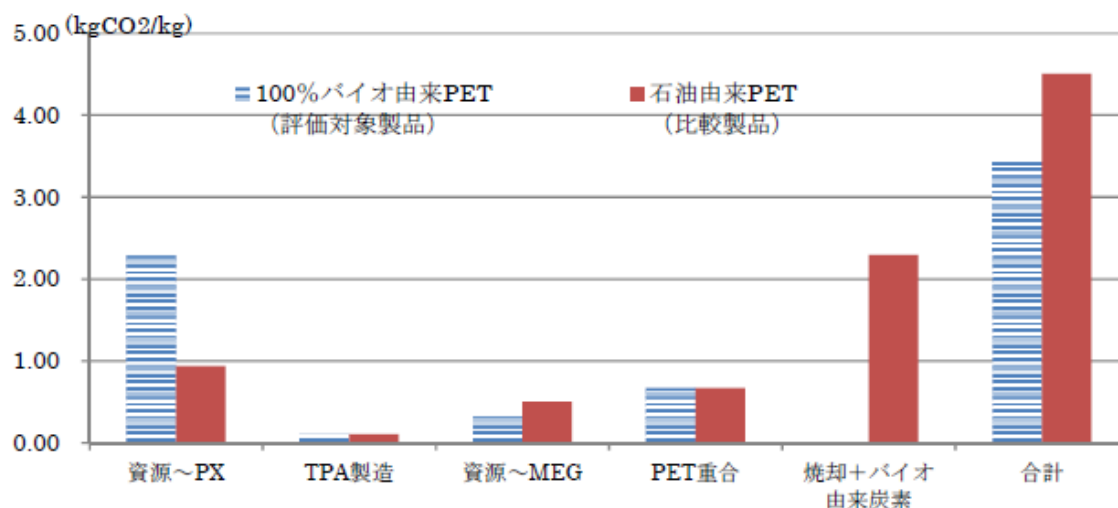


図4-27. バイオPETと石油系PETの工程別のGHG排出量比較

また、バイオマス度の関数として図4-28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。

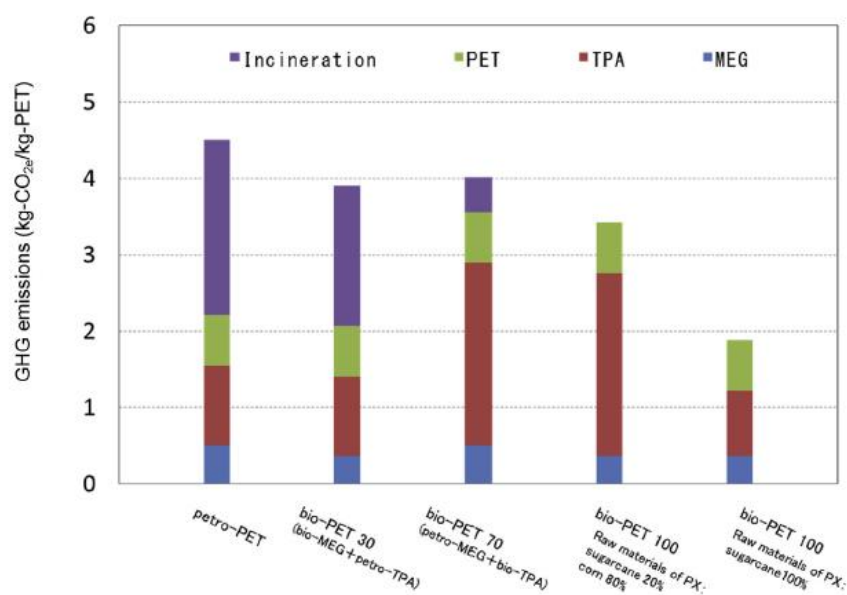


Fig. 2. GHG emissions of each PET and its composition.

図4-28. 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 4-29 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 4-29. 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4-30：元データはBraskem社のバイオPE製造LCA）。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エネルギー利用することで、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。

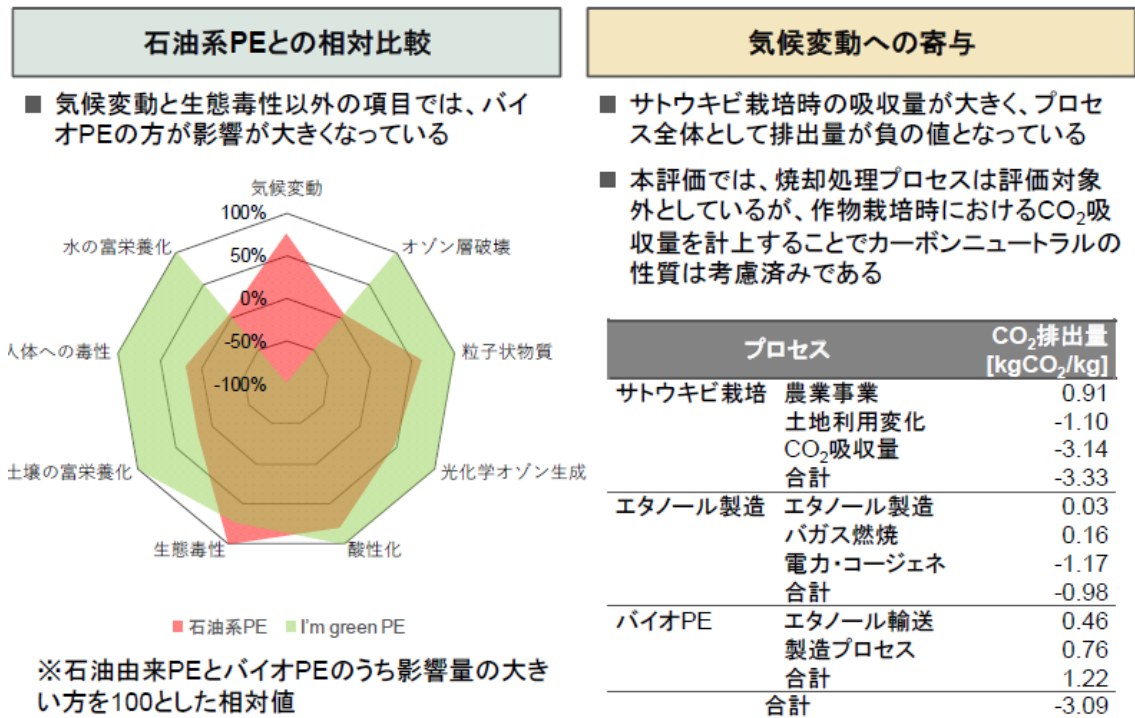


図 4-30. バイオ PE の LCA 事例（石油系 PE との比較、GHG 排出量の分析）

(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。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 の特徴 (GHG 排出量、水消費量)

PLA は代表的な生分解性樹脂として、広く開発されており、アメリカ、ヨーロッパ、中国のメーカーが参入している。工場は、原料作物の生産地に立地されている場合が多く、表 4-7 のように、NatureWorks 社は、アメリカ・イリノイ州に本社と主力工場を設置し、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の重合を経て、ポリ乳酸が合成されるステップでバイオマス度 100%の PLA を供給している。一方、TotalCorbion 社は、タイにおいて、サトウキビを原料としたポリ乳酸を生産している。さらに、最近是中国メーカーがポリ乳酸製造に参入している。

表 4-7. 世界の PLA 製造メーカーの特徴と供給先

メーカー名	NatureWorks	TotalCorbion	(浙江)海正 生物材料	(安徽)豊原 生物材料
商標	Ingeo	Luminy	REVODE	2020年工場竣工
所在地	アメリカ・ イリノイ州	タイ・ラヨーン県	中国・江蘇省 泰州	中国・安徽省
原料	コーン	サトウキビ	サトウキビ	コーン?
能力	2018:16万トン	2018:8万トン	2018:1.5万トン	2020:5万トン 2023:70万トン
供給先	ユニチカ 東レ	(代理店) 東京材料	(代理店) 神戸精化	(代理店) ハイケム
商標	テラマック®ユニ チカ	リスパック (岐阜プラスチック)		
仕様	NatureWorks: 80-90%	食品包装容器		
取扱量	2011:2000トン			

表 4-7 に示した NatureWorks と TotalCorbion は、それぞれポリ乳酸製造までの入出量データを学会誌に表 4-8 のように公表している[27,28]。

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(燃烧排出量にほぼ相当)を差し引いている。ISO14067 でも図 4-31 に示すように CO₂ 吸収が認められている。[29]

また、PLA 製造までの水消費量も、各文献から表 4-9 にまとめた。1kg の PLA 製造までにそれぞれ 35L、63L の水が消費されており、石油系の汎用樹脂よりも水消費量が多いことが分かる。

表 4-8. PLA ペレット製造までの GHG 排出量

単位: kg-CO₂e/kg-PLA

メーカー (生産国) 出典)	<u>NatureWorks</u> (アメリカ・イリノイ州)	<u>TotalCorbion</u> (タイ・ラヨーン県)
原料	コーン	サトウキビ
(吸収)	-1.84	-1.83
・栽培	0.25	0.41
・原料粉砕	—	-0.21
・ラク酸製造	1.45	1.45
・ラクチド製造	0.54	0.52
・PLA製造	0.20	0.17
(燃焼)	1.84	1.83
計	2.44	2.33

表 4-9. PLA ペレット製造までの水消費量

単位: L/kg-PLA

メーカー	<u>NatureWorks</u>	<u>TotalCorbion</u>
原料	コーン	サトウキビ
灌漑	20.92	
吸収	—	—
栽培	0.48	40
原料粉砕	—	1
ラク酸製造	9.91	18
ラクチド製造	2.6	2
PLA製造	1.08	2
燃焼	—	—
計	34.99	63
m ³ /kg-PLA	0.035	0.063

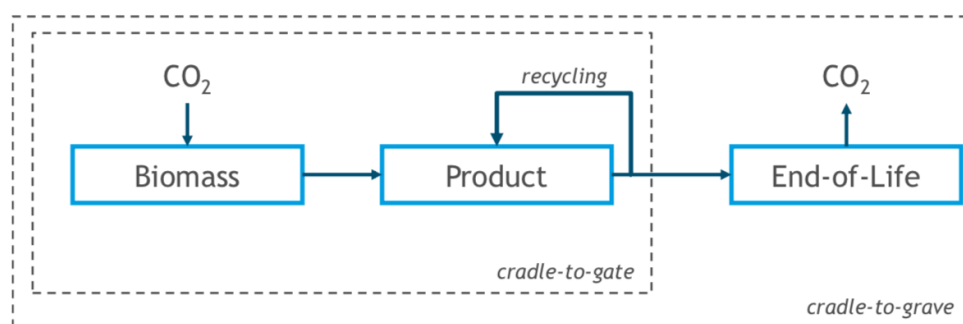


図 4-31. LCA のシステム境界設定と炭素吸収

(「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 4-31 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。このように、吸収量と排出量のいずれをも対象としないといけない。

また、欧州の代表的な LCA データベースである Ecoinvent では、図 4-32 に示すように PLA の GHG 排出量はエネルギー起源等の CO₂ に加え炭素吸収分があるので [29]、吸収分を差し引いて総計 (ネット) CO₂ として表示されている。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。

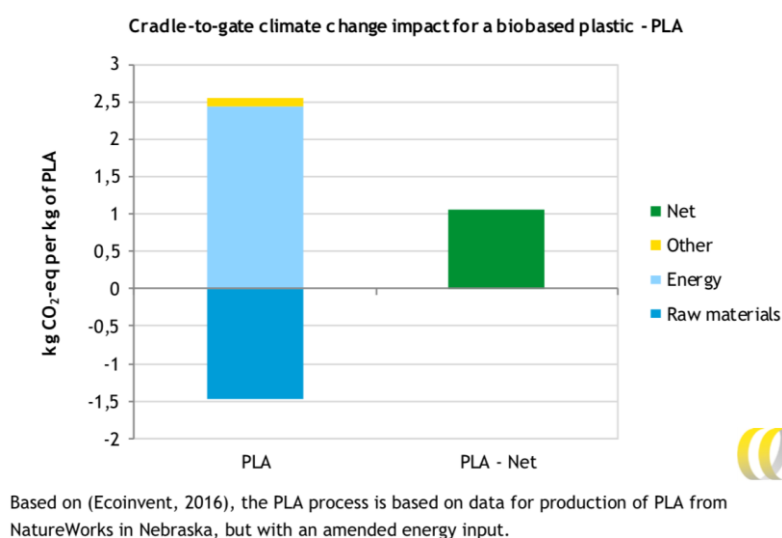


図 4-32. PLA の GHG 排出原単位の設定法

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。

(2) PLA の実用化事例

<ユニチカ (2012 年) >[30]

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。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 4-30 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 4-33 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。

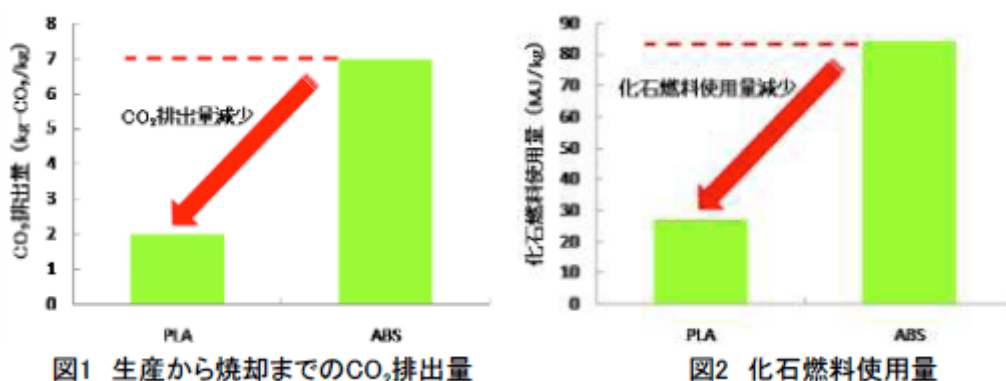


図 4-33. ユニチカの「テラマック®」の特徴説明

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。

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 4-34 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。

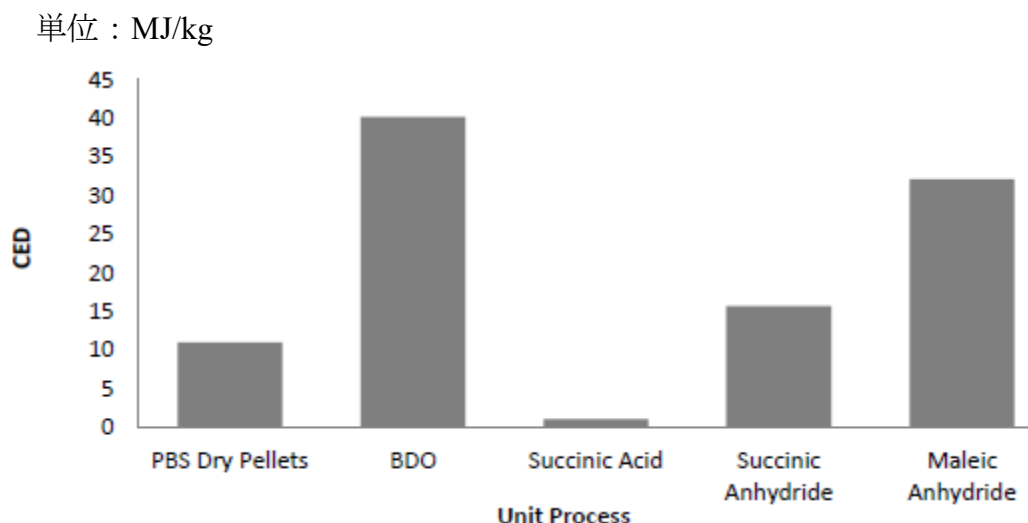


図 4-34. 1kg のバイオ PBS ペレット生産までのエネルギー消費量

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 4-37）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 4-35 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。

なお、類似研究でバイオ PBS 素材が適用されている場合にはその分析も加え、感度分析を実施する。

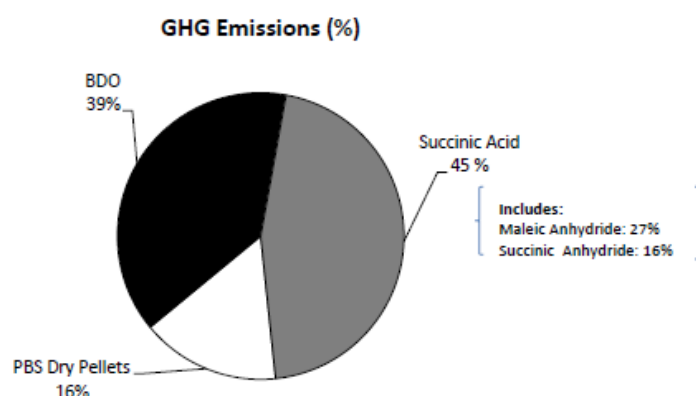


図 4-35. バイオ PBS ペレット生産までの GHG 排出量の内訳

(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 4-36）

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 4-37）

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 4-40）。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 4-38）として、食品用包装材などを示している。



図 4-36. BioPBS と FORZEAS の製造フロー（三菱ケミカル）

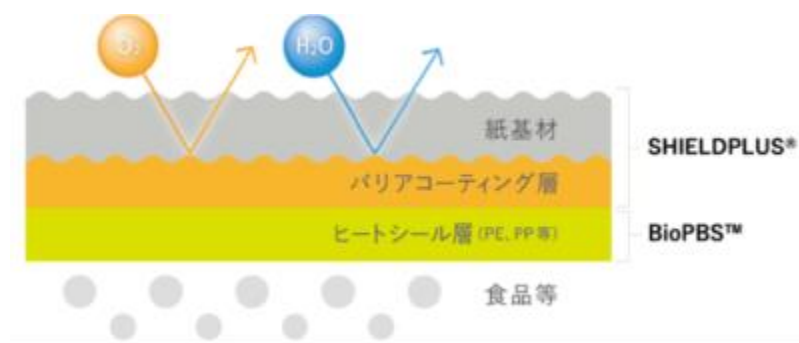


図 4-37. 循環型包装材の層構造イメージ



(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 4-38. 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がある。

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[29]

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 4-10 のようにまとめられている。しかし、植物生長での炭素吸収の大きさは明瞭ではない。PLA の $2.4\text{kg-CO}_2/\text{kg}$ 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。

表 4-10. 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 4-39 のように、 $1.7\text{kg-CO}_2/\text{kg}$ と示している[35]。この図には、石油由来の PE の GHG 排出量として、 $2.3\text{kg-CO}_2/\text{kg}$ が示されているが、日本のそれよりも大きな値である。

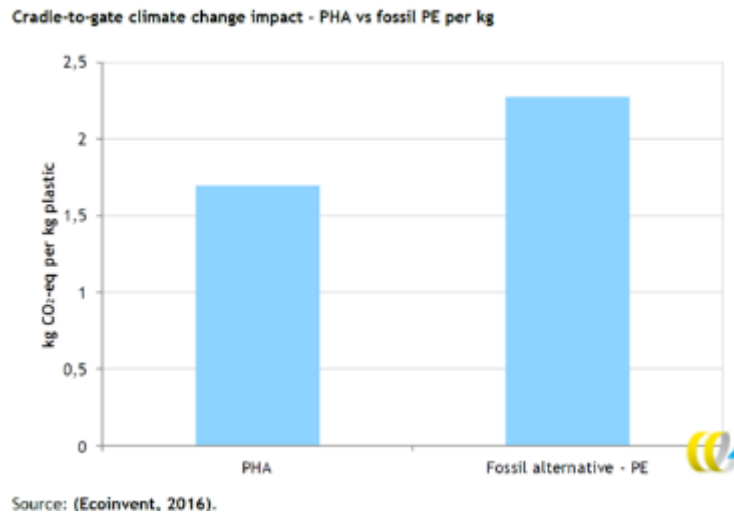
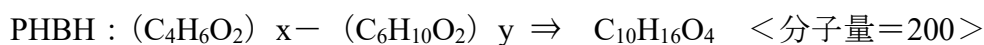


図 4-39. PHA と石油由来の PE の GHG 排出量の比較

図 4-39 は「ゆりかごから製品まで」の GHG 排出量に相当し、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 4-40 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。

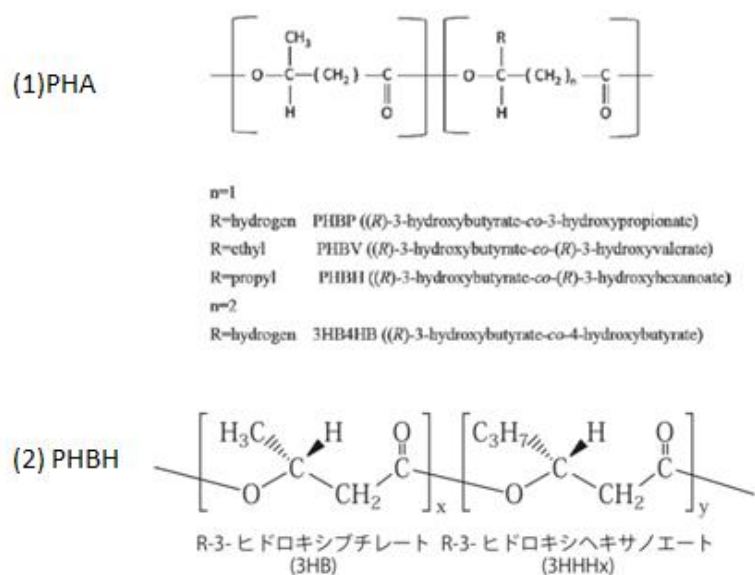


図 4-40. PHA,PHBH の化学構造式

したがって、PHBH ペレット 1kg の生産までには、 $3.9\text{kg-CO}_2/\text{kg}(=1.7+2.2)$ と設定する。

一方、山西、天沢、中谷、平尾、佐藤（東京大学、カネカ）は、「植物資源由来かつ海洋生分解性のプラスチック PHBH の環境影響評価」を日本 LCA 学会 第 15 回研究発表会で発表している。[36]

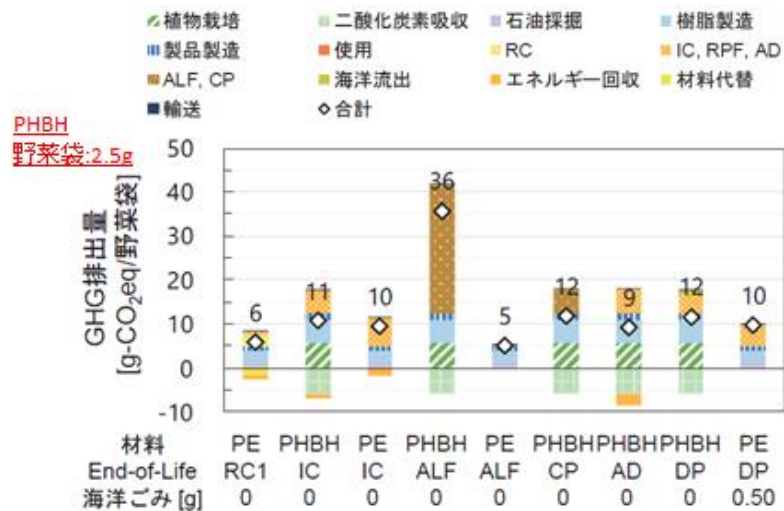
彼らは、植物資源由来プラスチックは原料栽培時の土地利用や収穫時の廃棄物処理が環境負荷に影響するので、植物資源由来と海洋生分解性双方の特性を持ち合わせたポリマーである PHBH を対象として、植物栽培から廃棄物処理までを含んだライフサイクルの環境影響を表 4-11 のシナリオの下で評価している。このなかで、具体的な PHBH 製品として野菜袋とスプーンを取り上げ、栽培・樹脂製造・炭素吸収などを示している。

表 4-11. 設定された対象製品とリサイクル手法

表 1 野菜袋とスプーンのシナリオ																		
素材	PE	PHBH	PE	PHBH	PE	PHBH	PHBH	PHBH	PE	PHBH	PS	PHBH	PS	PHBH	PS	PHBH	PS	PS
植物栽培	PHBH：アブラヤシの栽培からパーム油の搾油と精製まで																	
石油採掘	PE, PS：原油採掘からナフサ製造まで																	
樹脂製造	PHBH：国内のパイロット設備から入手した製造インベントリに基づく PE, PS：ナフサ製造から樹脂製造まで																	
製品製造	野菜袋（PHBH 2.5 g/枚、PE 2.0 g/枚）									スプーン（PHBH 5.5 g/個、PS 4.7 g/個）								
End-of-Life	RC1	IC	ALF	CP	AD	DP	IC	RPF	DP	RC2								

RC：材料リサイクル、IC：熱回収焼却、RPF：RPF 燃料化、ALF：嫌気性埋立、CP：コンポスト化、AD：メタンガス発電、DP：野外投棄 詳細は Supporting Information を参照

彼らが示している野菜袋 (2.5g)、スプーン (5.5g) への PHBH の LCA 適用結果を、それぞれ図 4-41, 4-42 に示す。



出典: 中谷、平尾他

図 4-41. 各種リサイクルシナリオでの PHBH 製野菜袋の GHG 排出量

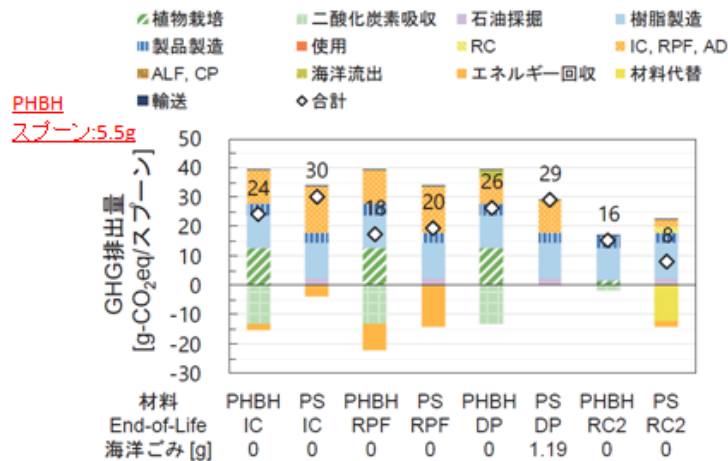


図 4-42. 各種リサイクルシナリオでの PHBH 製スプーンの GHG 排出量

これらの図中の栽培・ペレット製造・炭素吸収を図 4-41,4-42 から読み取り、PHBH ペレット製造までの GHG 排出量を以下のように推算する。

<野菜袋用 PHBH>

ペレット製造まで（栽培 6g+製造 5g）CO₂/PHBH2.5g 野菜袋

$$\Rightarrow 4.4 (=2.4+2.0) \text{ kg-CO}_2/\text{kg-PHBH}$$

炭素吸収 6g /PHBH2.5g $\Rightarrow -2.4\text{kg-CO}_2/\text{kg-PHBH}$

<スプーン用 PHBH>

ペレット製造まで（栽培 12.5g+製造 11g）CO₂/PHBH5.5g スプーン

$$\Rightarrow 4.3(=2.3+2.0) \text{ kg-CO}_2/\text{kg-PHBH}$$

炭素吸収 13g /PHBH5.5g $\Rightarrow -2.4\text{kg-CO}_2/\text{kg-PHBH}$

読み取りの結果、PHBH ペレット製造までには、

栽培：2.3-2.4kg-CO₂e ペレット製造：2.0kg-CO₂e 炭素吸収：2.4kg-CO₂e

EU JRC の PHA データでは

栽培+ペレット製造：1.7kg-CO₂e+炭素吸入：2.2kg-CO₂e（化学式より算定）

$$=3.9\text{kg-CO}_2\text{e}$$

いずれも「ゆりかごから墓場まで」のシステム境界では、PHBH1kgあたりの GHG 排出量は図 4-43 に示すように、約 4.0kg-CO₂e である。

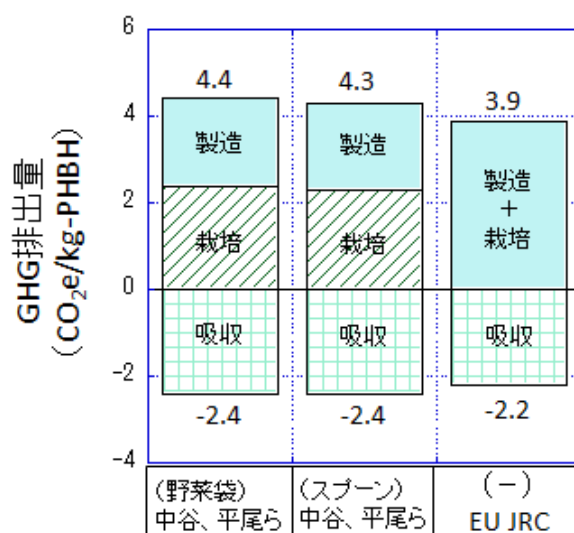


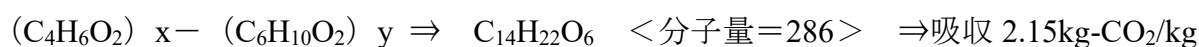
図 4-43. PHBH の GHG 排出量の出典による差異

なお、PHBH の化学構造式から試算される炭素吸収量を、 x, y を変数として試算した。

• $x=y=1$



• $x=2, y=1$



• $x=1, y=2$



この試算結果から、炭素吸収量は構造式中の $1 \leq x, y \leq 2$ の条件下で、約 2.2kg-CO₂ であり、中谷、平井らが採用している炭素吸収よりも若干小さい。

中谷、平尾らの GHG 排出量は図からの読み取りで算出しているので、読み取り誤差があるので、本報告書では EU-JRC が公表している Ecoinvent の GHG 排出量に炭素吸収分を加算した「3.9kg-CO₂/kg ペレット」を採用する。

(2) PHA の実用化事例

<カネカ>[37]

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。カネカは、図 4-44 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 4-44. 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ので、開発品では 以下のように機能単位を設定する。

-
- ・製品：（食品包装フィルム）1kg 相当のフィルムでインフレーション成形品
（1kg は、代表的厚み 20 μ m に換算すれば、40m²に相当する）
（食品包装シート）1kg 相当のフィルムで押出成形－真空成形品
（1kg は、代表的厚み 200 μ m に換算すれば、4m²に相当する）
（農業用マルチ）1kg 相当のフィルムでカレンダー成形品
（1kg は、代表的厚み 20 μ m に換算すれば、40m²に相当する。）
必要に応じ、他研究と機能単位を揃える）
＊厚みや配合を変数として試算する。

- ・開発品のリサイクル率：薄物用途に限定したので、リサイクルはなく、燃焼処理。
 - ・機能：食品用フィルム等として利用可能な PE,PET 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 4-12 のように設定する。

表 4-12. 本報告書で設定した用途毎の機能単位

	用途	（例）	開発品	ベース ライン	機能 単位	成型方法	備考
1	フィルム	食品包装 レジ袋他	PLA/PBS 光活性化 ＋ 酸化処理	PE	20 μ m $\times$ 40m ²	インフレーション成形	開発品1kg 相当
2	シート	食品容器		PET	200 μ m $\times$ 4m ²	押出成形→ 真空成形	開発品1kg 相当
3	農業用 マルチ	農ビ		PE	20 μ m $\times$ 100m ²	カレンダー成形	他研究相 当に設定

4－5．PLA ブレンドフィルム等の 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、3 つの用途に対する GHG 削減効果を分析・試算する。なお、ベースライン素材は用途により異なる。

4-5-1. 対象製品

本事業で開発されるベースラインでの具体的な用途は以下の3つと設定する。

ただし、厚み等を、変数とする。

1) フィルム（食品包装向け） ベースの厚み 20 μ m

2) シート（食品包装向け） ベースの厚み 200 μ m

3) 農業用マルチ ベースの厚み 20 μ m

なお、厚みや配合を変数として試算する。

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。今回対象とした実際の用途では薄製品が多いので、1kg の質量を想定しつつ、「厚みと面積」で機能単位を設定する。なお、原料となる樹脂ペレットの比重は、開発品とベースラインで異なるので、樹脂使用量が異なる。表 4-13 には、3 製品の用途の特徴を踏まえた機能単位をまとめて示す。

表 4-13. 本報告書で設定した用途毎の機能単位

	用途	(例)	開発品	ベース ライン	機能 単位	成型方法	備考
1	フィルム	食品包装 レジ袋他	PLA/PBS 光活性化 + 酸化処理	PE	20 μ m $\times$ 40m ²	インフレーション成形	開発品1kg 相当
2	シート	食品容器		PET	200 μ m $\times$ 4m ²	押出成形→ 真空成形	開発品1kg 相当
3	農業用 マルチ	農ビ		PE	20 μ m $\times$ 100m ²	カレンダー成形	他研究相 当に設定

なお、機能としては、ベースラインのフィルムなどとして利用可能で、ベースラインと同等以上の特性を有する。

・開発品のブレンド比率： PBS 、 PHBH とともに PLA に 5%ブレンド

(ただし、PHBH は国内での入手が困難であるので、PBS 主体で分析する)

・リサイクル率：食品包装などに利用されるので、リサイクルはなく、燃焼処理と設定。

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 4-46（再掲）及び図 4-47（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「原料からブレンドフィルム等製造」および「廃棄・リサイクル」と設定する。

図 4-46 に示すプロセスで製造されるブレンドフィルム等が開発対象であり、比較される製品は図 4-47 に示すように、広く包装用フィルムなどとして利用されている PE 樹脂と設定し、ベースラインとする。用途により ベースライン素材は異なるが基本的なシステム境界は図に一致させている。

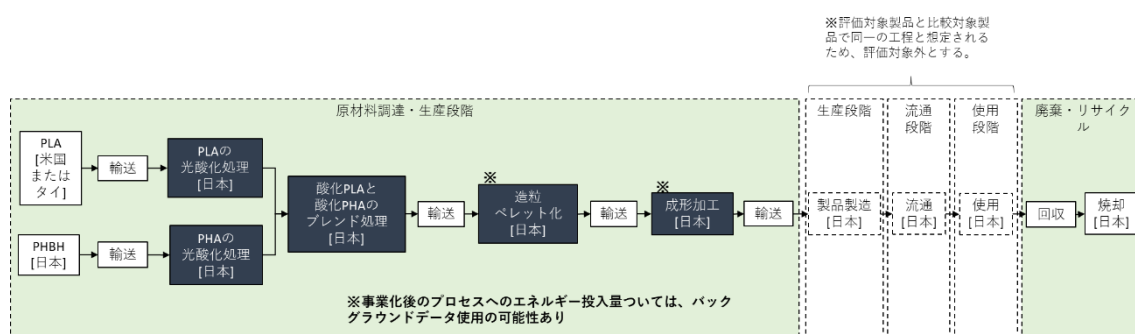


図 4-46. バイオマスブレンドフィルム製造のフローとシステム境界

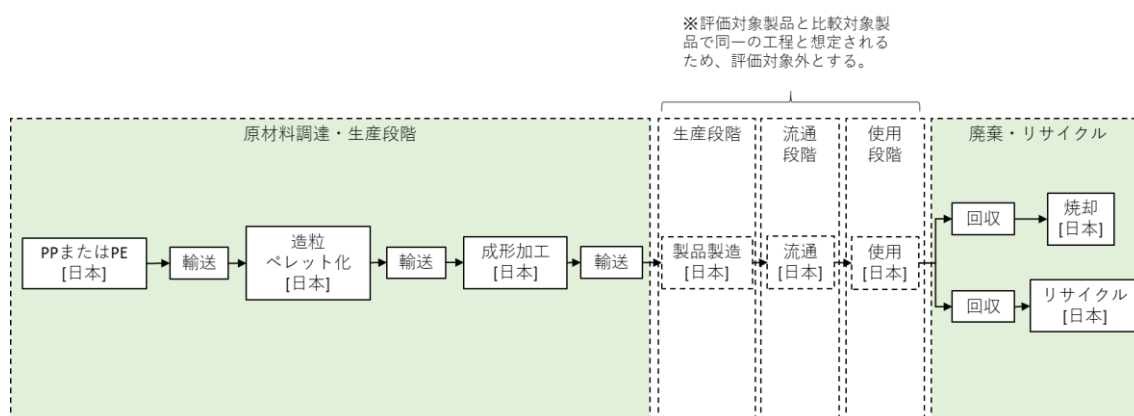


図 4-47. ベースライン（PE,PP 樹脂）のフローとシステム境界

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も主要素材となる 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、PBS、PHBH の日本国内における GHG 排出量データは、文献調査から設定した。

また、ベースラインである「PE 樹脂、PET 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[38]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。

なお、ベースラインの PE、PET 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 4-14 にまとめる。

表 4-14. 各素材ペレットの GHG 排出量、比重設定

製品名	単位	GHG 排出量(kg-CO ₂ e)	比重 (文献値)	備考
PLA	kg	2.44	1.24	・ NatureWorks 論文[27] ・ 炭素吸収を除外
PBS	kg	6.60	1.26	・ 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[35]
LDPE	kg	－※	0.91	・ IDEA V2.2[38]
PET	kg	－※	1.38	・ IDEA V2.2[38]

※ データベース利用規定上の制約のため非開示

また、光活性化処理として、令和元年度の報告書[1]では、以下のように記載されている。

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/cm^2 で 100 cm^2 の面積に対して 10 分間の光照射に係るエネルギーE1 は、
$$E1 (\text{J}) = 5 \times 100 \div 1000 \times 10 \times 60 = 300$$

・ 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、
$$E2 (\text{J}) = 7 \times 10 \times 60 = 4,200$$

・ 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、
$$E3 (\text{J}) = 1.25 \div 1000 \times 10 \times 60 = 0.75$$

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、450 kJ/kg となる。

上記のエネルギー消費量を電力に換算し、 0.125 kWh/kg ペレットが粉体処理として消費されると設定する。

さらに、酸化処理として、同様に 9 kJ/50g の酸化処理 $\Rightarrow 180 \text{ kJ/kg}$ -開発品が消費される。

ここで、未酸化 PLA（80%）に、酸化 PBS（20%）を添加し、開発品が製造されるので、

$(180 \text{ kJ} \times 0.2) / (3.6 \text{ MJ/kWh}) = 36 \text{ kJ} / 3.6 \text{ MJ} = 0.01 \text{ kWh}$ が追加消費される。

ただし、この電力消費に伴う GHG 排出量は、 $0.01 \text{ kg-CO}_2\text{e}$ 以下なので システム全体の GHG に対する影響は小さい。そのため、PLA/PBS 配合比に拘わらず、GHG 消費量に影響はないと仮定し、計上しなかった。

(2) 成形段階

① フィルム用途

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 4-48) 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」[39]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 4-49)

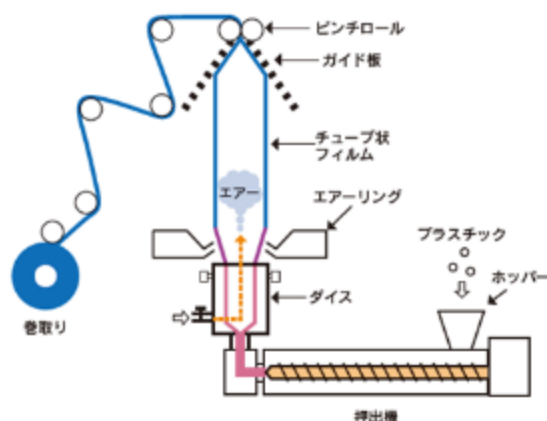


図 4-48. インフレーション成形の模式図

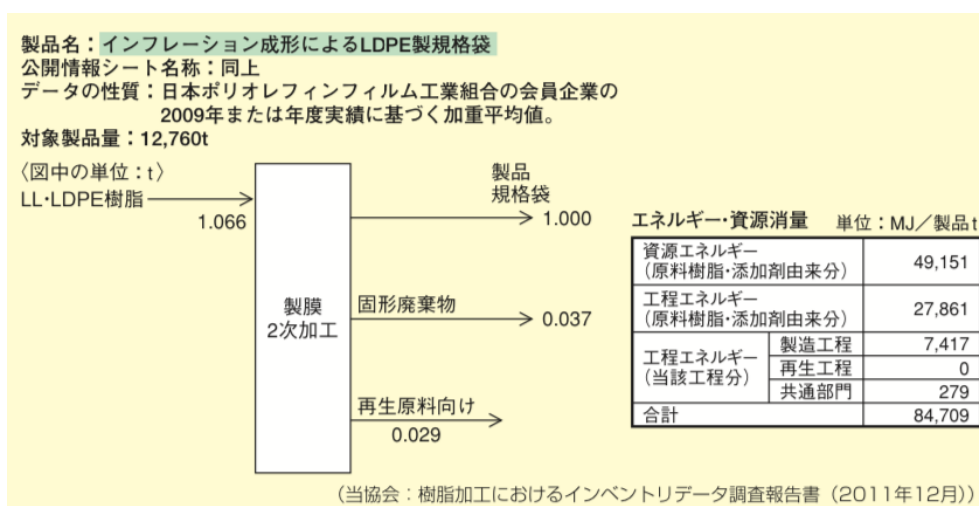


図 4-49. インフレーション成形によるフィルム製造のインベントリデータ

我が国の発電のエネルギー消費量は IDEA[38]を引用すると、「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。

② 食品包装シート用途

シート用途の成形には、押出成形を経て真空成形され、所定の形状が付与される。ここで、押出成形には プラスチック資源循環協会が整理している表 4-15 を引用する[39]。

この表の最終業の押出 PET シートの GHG 排出量は、0.39kg-CO₂e/kg 製品で、伝導駆動され、開発品、ベースラインの PET シート共に 0.67kWh/kg の電力が消費される

と設定した。引き続き実施される真空成形のエネルギー消費量については適切なデータが得られなかった。そのため、開発品とベースラインで同様のエネルギーが消費されると仮定し、評価対象から除外した。

表 4-15. 各種用途に応じた成形時の加工エネルギー消費量

製造プロセス名	主原料	単位	成形工程		
			工程エネルギー (MJ)	CO ₂ (t-CO ₂)	GHG (t-CO ₂ e)
レジ袋	HDPE	/t	7,170	0.304	0.343
OPPフィルム	PP	/t	19,240	1.013	1.110
ラミネート(ロール)	—	/m	0.055	0.000002	0.000003
インジェクション(射出) 成形品	—	/t	29,183	1.239	1.398
ブロー(中空) 成形品	—	/t	26,752	1.156	1.302
発泡品(トレイ)	PSP	/t	13,182	0.560	0.631
非発泡品(押出シート成形)	HIPS	/t	7,685	0.331	0.371
押出シート成形(PETシート)	PET	/t	8,117	0.344	0.388

(注1) t-CO₂e : tあたりCO₂ equivalent (二酸化炭素換算) 数値

③ 農業用マルチ

農業用マルチシートの加工は、一般的に図 4-50 に示すカレンダー成形が採用される。

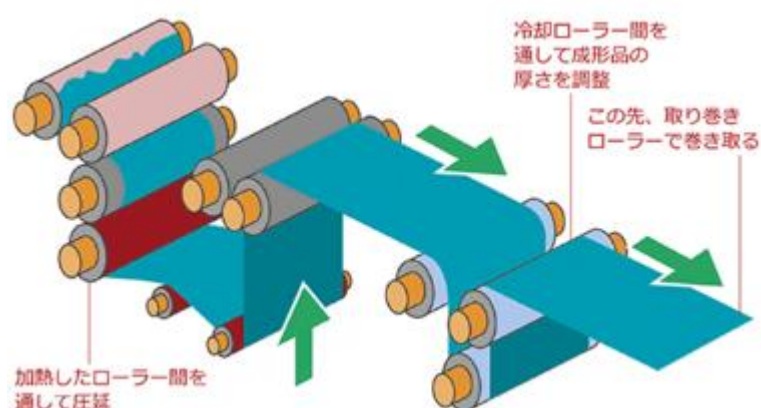


図 4-50. カレンダー成形の模式図

この加工エネルギー消費量は、塩ビ協会が発行している資料(図 4-51)に基づいて、9.8MJ/kg の電力が消費されているので[40]、開発品とベースライン共に 1.04kWh/kg-製品 と設定した。

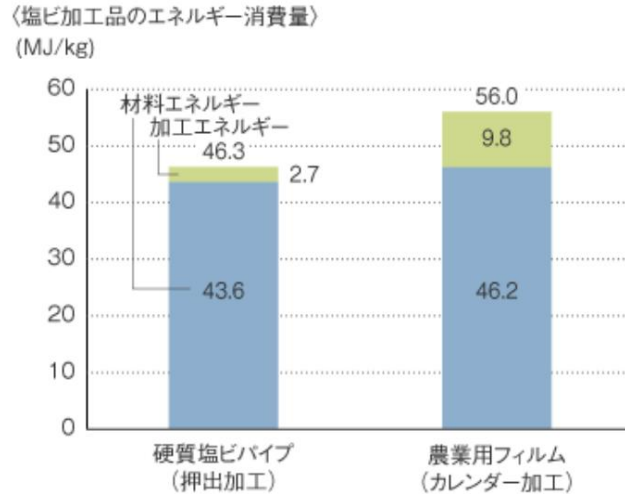


図 4-51. 代表的塩化ビニル加工品の LCI データ

(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ので、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。

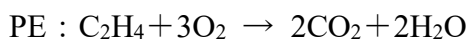
ベースラインの PE,PP 樹脂の代表的な廃棄工程として、ゴミ燃焼炉等での燃焼を仮定し、

PE,PET の化学式から、完全燃焼されるとして CO₂ 排出量を以下のように推算する。

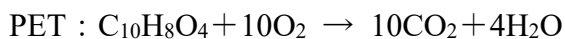
PLA：カーボンニュートラルのため、燃焼時の CO₂ 排出量は「0」。

PBS：同上

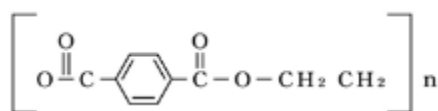
PHBH：同上



ポリエチレン 1kg の燃焼に対し、3.14kg の CO₂ を排出。



PET1kg の燃焼に対し、2.29kg の CO₂ を排出。



分子式: $(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$
炭素含有重量率: 62%
発熱量: 5500kcal/kg = 23.0MJ/kg

② リサイクル工程

対象製品として設定したのは、フィルム、シートなどの薄物製品であるので、マテリアルリサイクル、サーマルリサイクルは適用せず、完全燃焼すると設定する。

(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、引き続く報告書で更新されてきた。本報告書では、表 4-16[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 4-16. 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、同じく追加のガスとして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「ココが知りたい温暖化～二酸化炭素以外の温室効果ガス削減の効果～」

4-5-5. 環境影響評価と解釈

設定した3つの用途に対して、それぞれのベースライン素材を適用したケースと比較する。さらに、厚みなどを変数と設定することで、感度点検も実施する。

(1) フィルム用途

<ブレンド材の効果>

開発品には PLA を基本基材としつつ、PBS,PHBH が 5%添加され、光活性化処理が施される。そこで、これらの添加剤の GHG 排出量に及ぼす影響を試算する。

機能単位 1kg の条件で、PBS,PHBH を添加したフィルムのライフサイクル GHG 排出量を図 4-52 にまとめた。

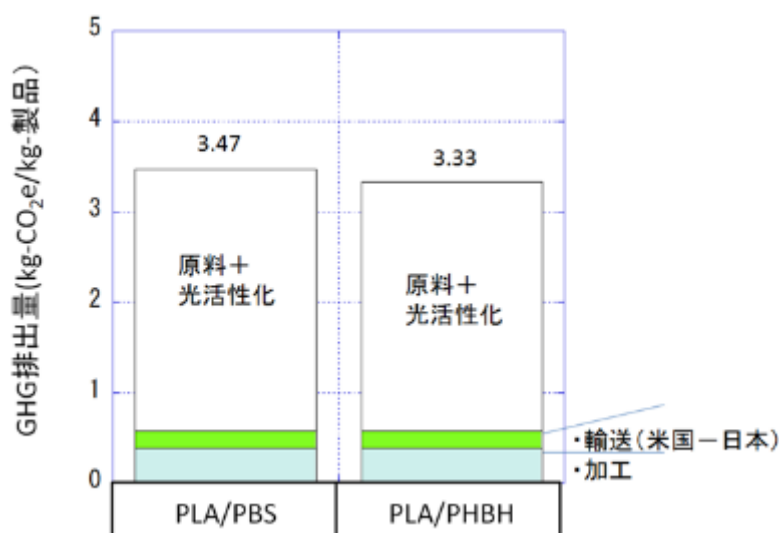


図 4-52. 開発品の GHG 排出量試算結果

この図から、設定した PBS の GHG 排出量が PHBH よりも大きいことを反映して、PLA/PBS の GHG 排出量が多い。PHBH の国内での入手が困難であるので、以降では PLC/PBS のみを検討対象とする。

<GHG 排出量と厚みの影響>

フィルムでは、レジ袋から食品包装まで多くの多様性があり、その製品厚みが異なることも想定されるので、表 4-17 に示すように 機能単位を一定 (40m²) の条件の下で、厚みを変数として GHG 排出量を試算した。ここで、厚み 20μm が開発品 1kg に

相当する。

PE の比重:0.91、開発品の比重:1.24 なので、同じ厚さでは 樹脂使用量が、 $(0.91/1.24)$ から 0.73 に減少するので、GHG 削減効果は小さくなると推算される。

表 4-17. フィルム用途での変数として厚み設定

材質	比重	機能 単位	厚み	重量
	—	m ²	μm	kg
PLA/PBS	1.24	40	20	1.00
			15	0.75
			10	0.50
PE	0.91		20	0.73

表 4-17 の条件での GHG 排出量変化を図 4-53 にまとめた。

この図から、開発品とベースラインが同じ厚みでは、システム全体の GHG 排出量は開発品が小さい。さらに開発品を薄肉化すれば GHG 排出量は削減され、システム全体の GHG 排出量は削減される。

しかし、ベースラインの非エネ起源の CO₂ 排出量を除外して、エネ起源のみで比較した場合には、同じ厚みではベースラインの PE に対しては、エネ起源の GHG 削減はないことが分かる。ベースラインのエネ起源の GHG 排出量と開発品のそれとが同等となるためには、開発品を約 1/2 にまで薄肉化することが要求される。

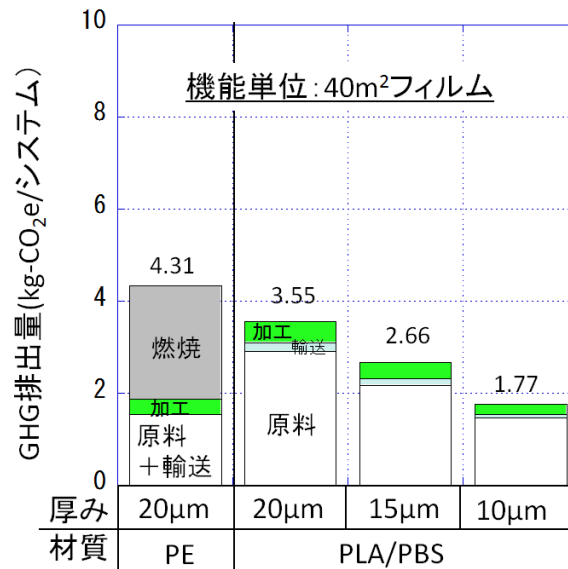


図 4-53. ベースラインの PE フィルムと開発品の GHG 排出量の関係
(開発品の厚み変数)

(2) シート用途

食品包装用のシート用途への展開を想定し、ベースラインとして PET（正確には A-PET）を設定する。フィルムと同様に、製品厚みが多様性があると想定されるので、表 4-18 に示すように 機能単位を一定（4m²）の条件の下で、厚みを変数として GHG 排出量を試算した。ここで、厚み 200μm が開発品 1kg に相当する。

PET の比重：1.38、開発品の比重：1.24 なので、同じ厚さでは ベースラインの樹脂使用量が増大するので、GHG 削減効果は大きくなると推算される。

表 4-18. 食品包装用シート用途での変数として厚み設定

材質	比重	機能単位	厚み	重量
	—	m ²	μm	kg
PLA/PBS	1.24	4.0	200	1.00
			150	0.75
			100	0.50
PET	1.38		200	1.11

表 4-18 の条件での GHG 排出量変化を図 4-54 にまとめた。この図から、フィルムと同様に開発品とベースラインが同じ厚みの 200μm では、システム全体の GHG 排出量は開発品が小さい。さらに開発品を薄肉化すれば GHG 排出量は削減され、シス

テム全体の GHG 排出量は削減される。

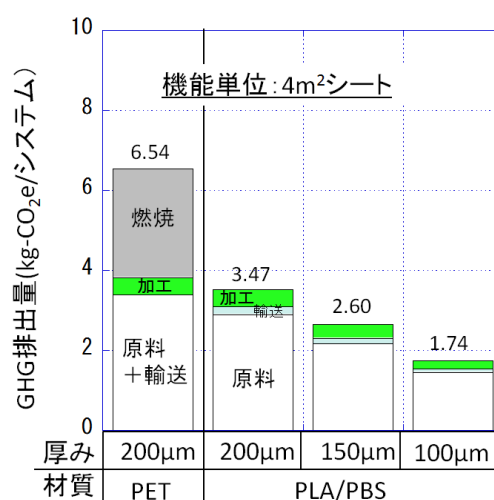


図 4-54. ベースラインの PET シートと開発品の GHG 排出量の関係
(開発品の厚み変数)

フィルムと異なり、ベースラインの非エネ起源の CO₂ 排出量を除外して、エネ起源のみで比較した場合には、同じ厚みではベースラインの PET に対しても、エネ起源の GHG 削減効果があることが分かる。開発品とベースラインのエネ起源の GHG 排出量の削減効果は、薄肉化されるほど増大する。

(3) 農業用マルチ

農業用マルチの素材として生分解性樹脂を用いる開発は、同じ環境省プロジェクトでも検討されている。そこで、他研究の令和 2 年度報告書[42]と比較しつつ、農業用マルチへの適用の可能性を、GHG 排出量の観点から試算する。なお、他研究では機能単位として 100m²を採用しているので、同じ機能単位で試算する。また、他研究の報告書に示されたベースライン PE の消費量から、厚みは 20μm と推測した。他研究では マルチ素材のリサイクルも検討されているが、ここではリサイクルされないと仮定した。

他研究では、自社で製造する PBS が素材として選定されているので、PBS 樹脂自体の GHG 排出量が、本報告書で採用した値と異なるケースも想定される。試算の結果、

他研究では、[32]と近い PBS 原単位が利用されている。

ここでは、開発品厚みを薄肉化することは困難と判断し、PLA/PBS の配合比率を (PLA/PBS=95/5~70/30) に変動させて システム全体に及ぼす影響を試算する。

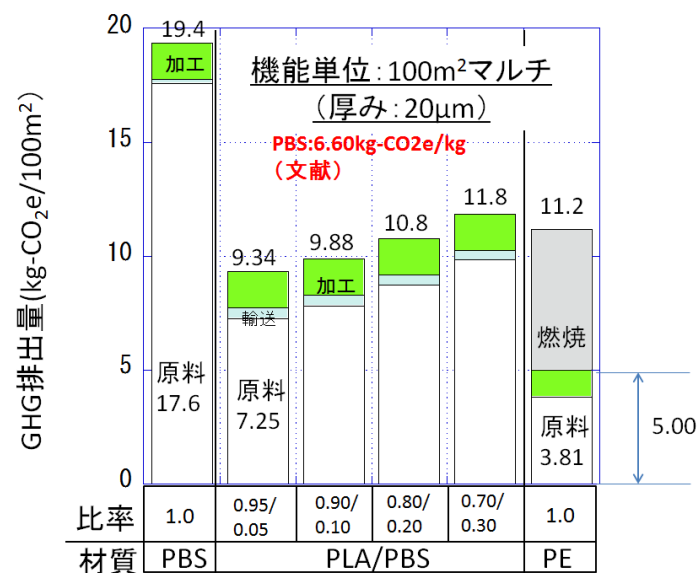


図 4-55. 各種原料の農業用マルチと開発品の GHG 排出量の関係
(体積一定＝比重差考慮)

図 4-55 には、本研究で採用した PBS の GHG 排出原単位を採用し、他研究、本開発品の配合およびベースラインの PE 素材を採用した場合の GHG 排出量を試算した。

その結果、本報告書で採用した PBS の GHG 排出量は PLA より大きいので、PBS 比の増大と共に、システム全体の GHG 排出量は増大する。ベースラインの PE の GHG 排出量総計と、PLA/PBS=0.8/0.2 でほぼ同じ排出量になると試算される。しかし、本開発品のエネ起源のみの GHG 排出量は、ベースラインの PE のそれ（燃焼分除外）よりも大きい。

一方、他研究の PBS の GHG 排出原単位を採用して、同様に試算した結果を図 4-56 に示す。他研究では、PBS の GHG 排出原単位が 本報告書で採用したそれよりも小さく見積もられていると推測されるので、開発品のシステム全体の GHG 排出量は減少する。ベースラインの PE の GHG 排出量総計よりも、開発品の GHG 排出量は小さくなる。しかし、本開発品のエネ起源のみの GHG 排出量は、ベースラインの PE のそれよりも大きい傾向は変わらない。

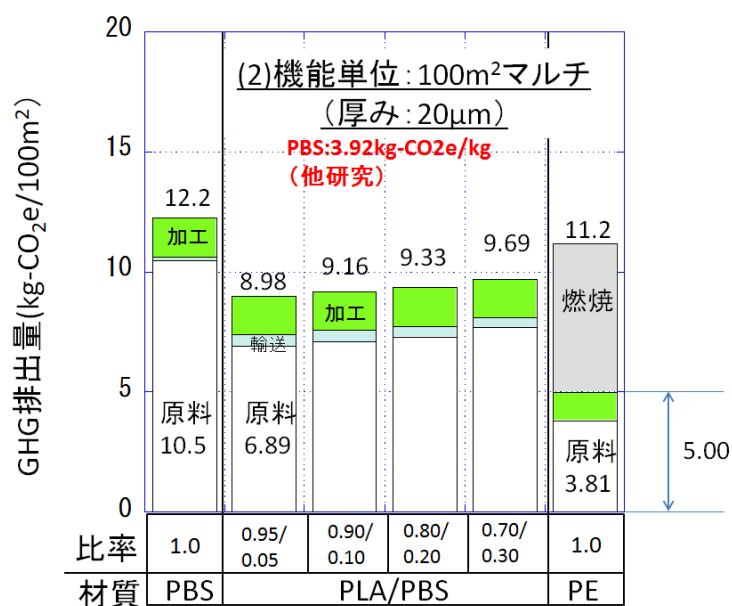


図 4-56. 各種原料の農業用マルチと開発品の GHG 排出量の関係
(体積一定＝比重差考慮)

このことは、生分解素材のリサイクルを導入することによって、ベースラインよりも GHG 排出量が削減できる可能性があることを示唆している。

4－5－6. LCA 算定結果の討論

(1) 他の研究との比較

<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が、三菱 UFJ リサーチ&コンサルタントは環境省への報告書[43]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 4-19 のように示している。

表 4-19. 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

＜フィルム用途＞

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。4-5-5 節では、感度点検を検討した。

図 4-57～58 で示した GHG 排出量の比較では、製品厚みが GHG 排出量に大きく影響することが示されている。フィルム用途では、エネ起源 GHG 排出量をベースラインと同等にするためには、厚みが 1/2 程度に加工することが必要である。厚みが 1/2 でもベースラインと同じ機能を発揮できるかの判断により、開発品の気候変動に対する優位性が評価される。

また、農業用マルチへの用途でも、フィルムと同様に開発品の厚みを減少することも可能である。

そこで、開発品の厚みが 10μm の製品の GHG 排出量削減効果を検討する。

まず、機能単位を 40m² と同一に設定するための、条件を表 4-20 にまとめる。この表中で、40m² のフィルムを製造するには、PE と開発品の比重差があるので、重量とし

てはそれぞれ 0.73、0.50kg と設定できる。GHG 削減効果を試算するためには、ベースラインの代替量（例えば、1000t）を機能単位である面積（m²）に換算した上で、開発品の代替量(t)を算定する。この表から、PE フィルム 1000（t）は、20μ×54505km²に相当し、同等の面積を開発品（10μm）では 681（t）で代替できる。

なお、農業用マルチの市場規模は年間 4 万トン、そのうち既に生分解性マルチが 3600 トン採用されており、代替率は約 10%に達している。そのため、2030 年時点の普及時には代替率 50%と仮定すると、PE2 万トンが生分解性に代替され、本開発品のシェアを 4 割に相当する 8000（t）と設定する。この場合にも表に示したように、PE8000(t)と同一面積を開発フィルムが代替するには、5451（t）の開発品が必要となる。

表 4-20. PE 代替としての GHG 排出量削減把握のための諸元の整理

	仕様	重量(kg)	比重
PE フィルム	40m ² ×20μm	0.73	0.91
開発品フィルム	40m ² ×10μm	0.50	1.24

削減効果	実証事業終了時		普及段階
PE フィルム	1000 トン代替		8000 トン代替
機能単位	54,505	km ² フィルム	436,044

開発品フィルム	54,505	km ² フィルム	436,044
重量(トン)	681	トン相当	5,451

この代替条件の下で、GHG 排出量の削減効果をエネルギー起源、非エネルギー起源別に表 4-21 にまとめた。

この表の最上段には、40m²あたりの GHG 排出量を、

2 段目には、実証事業（例）1000t 代替）終了時点(t-CO₂/年）と普及段階（8000 トン代替）2030 年時点(t-CO₂/年)を示す。

さらに、最下段には それぞれの条件での GHG 排出削減量をエネルギー起源、非エネルギー起源別にまとめた。

この最下段の削減量から、8000(t)代替時には、エネ起 872 トン、非エネ起 26762

トンの計 27634 トンの GHG 削減効果が期待できる。

表 4-21. PE 代替による GHG 排出量削減効果推測

①評価対象製品		実証事業 終了時点(kg-CO2/kg)						普及段階 2030年時点(kg-CO2/kg)					
機能単位40m2あたり		原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計
PLA／PBSフィルム (40m2=0.5kg) 厚み10μm	エネルギー起源	1.45	0.22	0.09	0.00	0.00	1.76	1.45	0.22	0.09	0.00	0.00	1.76
	非エネルギー起源	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02
	合計	1.45	0.23	0.10	0.00	0.00	1.78	1.45	0.23	0.10	0.00	0.00	1.78
②ベースライン		原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計
PEフィルム(40m2=0.73kg) 厚み20μm	エネルギー起源	1.52	0.32	0.00	0.00	0.00	1.84	1.52	0.32	0.00	0.00	0.00	1.84
	非エネルギー起源	0.00	0.01	0.00	0.00	2.45	2.46	0.00	0.01	0.00	0.00	2.45	2.46
	合計	1.52	0.33	0.00	0.00	2.45	4.30	1.52	0.33	0.00	0.00	2.45	4.30
①評価対象製品		実証事業(例)1000t代替 終了時点(t-CO2/年)						普及段階(8000t代替) 2030年時点(t-CO2/年)					
		原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計
PLA／PBS農業用マルチ 厚み10μm	エネルギー起源	1,976	300	123	0	0	2,398	15,807	2,398	981	0	0	19,186
	非エネルギー起源	0	14	7	0	0	20	0	109	55	0	0	164
	合計	1,976	313	129	0	0	2,419	15,807	2,507	1,036	0	0	19,349
②ベースライン		原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計
PE農業用マルチ 厚み20μm	エネルギー起源	2,071	436	0	0	0	2,507	16,570	3,488	0	0	0	20,058
	非エネルギー起源	0	27	0	0	3,338	3,366	0	218	0	0	26,708	26,926
	合計	2,071	463	0	0	3,338	5,873	16,570	3,706	0	0	26,708	46,984
③削減量(②-①)		実証事業(例)1000t代替 終了時点(t-CO2/年)						普及段階(8000t代替) 2030年時点(t-CO2/年)					
		原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計
	エネルギー起源	95	136	-123	0	0	109	763	1,090	-981	0	0	872
	非エネルギー起源	0	14	-7	0	3,338	3,345	0	109	-55	0	26,708	26,762
	合計	95	150	-129	0	3,338	3,454	763	1,199	-1,036	0	26,708	27,634

<シート用途>

食品包装シート用途では、ベースラインとの比重差により、同じ厚みでもエネ起源 GHG 排出量の削減が可能である。

そこで、フィルム用途の PE と同様に開発品の GHG 排出量削減効果を検討する。

まず、機能単位を 4m^2 と同一に設定するための、条件を表 4-22 にまとめる。この表中で、 4m^2 のフィルムを製造するには、PET と開発品の比重差があるので、重量としてはそれぞれ 1.11、1.00kg と設定できる。GHG 削減効果を試算するためには、ベースラインの代替量(3000t)を機能単位である面積(m^2)に換算した上で、開発品の代替量(t)を算定する。この表から、PET シート 3000 (t) は、 10811km^2 に相当し、同等の面積を開発品では 2703 (t) で代替できる。

なお、食品包装用 PET シートの市場規模は PET シート生産量 2019 年実績より年間 30 万トン、実証事業時点、普及時の代替率を それぞれ 1.5%に相当する 3000 トン、15000 トンと想定する。

つぎに、エネ起源の GHG 排出量削減として、食品包装シートの削減効果を表 4-23 に試算する。この表の最上段には、4m²あたりの GHG 排出量を、

2 段目には、実証事業（3000t 代替）終了時点(t-CO₂/年) と普及段階（15000 トン代替）2030 年時点(t-CO₂/年)を示す。

さらに、最下段には それぞれの条件での GHG 排出削減量をエネルギー起源、非エネルギー起源別にまとめた。

この最下段の削減量から、15000(t)代替時には、エネ起 4865 トン、非エネ起 36622 トンの計 41486 トンの GHG 削減効果が期待できる。

表 4-22. PET 代替としての GHG 排出量削減把握のための諸元の整理

	仕様	重量(kg)	比重
PET シート	4m ² ×200μm	1.11	1.38
開発品シート	4m ² ×200μm	1.00	1.24

削減効果	実証事業終了時		普及段階
PET シート	3000 トン代替		15000 トン代替
機能単位	10,811	km ² シート	54,054

開発品シート	10,811	km ² シート	54,054
重量(トン)	2,703	トン相当	13,514

表 4-23. PET 代替による GHG 排出量削減効果推測

①評価対象製品		実証事業 終了時点(kg-CO2/kg)						普及段階 2030年時点(kg-CO2/kg)					
		原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リ サイクル	合計	原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リ サイクル	合計
機能単位4m2あたり PLA/PBSシート (4m2=1.00kg) 厚み200μm	エネルギー起源	2.9	0.36	0.18	0	0	3.44	2.9	0.36	0.18	0	0	3.44
	非エネルギー起源	0	0.02	0.01	0	0	0.03	0	0.02	0.01	0	0	0.03
	合計	2.9	0.38	0.19	0	0	3.47	2.9	0.38	0.19	0	0	3.47
②ベースライン PETシート(4m2=1.11kg) 厚み200μm	原材料調 達・生産							原材料調 達・生産					
	エネルギー起源	3.39	0.41	0	0	0	3.8	3.39	0.41	0	0	0	3.8
	非エネルギー起源	0	0.02	0	0	2.72	2.74	0	0.02	0	0	2.72	2.74
	合計	3.39	0.43	0	0	2.72	6.54	3.39	0.43	0	0	2.72	6.54

①評価対象製品		実証事業(3000t代替) 終了時点(t-CO2/年)						普及段階(15000t代替) 2030年時点(t-CO2/年)					
		原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リ サイクル	合計	原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リ サイクル	合計
PLA/PBSシート 厚み200μm	エネルギー起源	7,838	973	486	0	0	9,297	39,189	4,865	2,432	0	0	46,486
	非エネルギー起源	0	54	27	0	0	81	0	270	135	0	0	405
	合計	7,838	1,027	514	0	0	9,379	39,189	5,135	2,568	0	0	46,892
②ベースライン PETシート 厚み200μm	原材料調 達・生産							原材料調 達・生産					
	エネルギー起源	9,162	1,108	0	0	0	#####	45,811	5,541	0	0	0	51,351
	非エネルギー起源	0	54	0	0	7,351	7,406	0	270	0	0	36,757	37,027
	合計	9,162	1,162	0	0	7,351	#####	45,811	5,811	0	0	36,757	88,378

③削減量(②-①)		実証事業(3000t代替) 終了時点(t-CO2/年)						普及段階(15000t代替) 2030年時点(t-CO2/年)					
		原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リ サイクル	合計	原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リ サイクル	合計
	エネルギー起源	1,324	135	-486	0	0	973	6,622	676	-2,432	0	0	4,865
	非エネルギー起源	0	0	-27	0	7,351	7,324	0	0	-135	0	36,757	36,622
	合計	1,324	135	-514	0	7,351	8,297	6,622	676	-2,568	0	36,757	41,486

(3) 気候変動以外の影響

本報告では、気候変動影響としての GHG 削減効果、事業性のライフサイクル評価を実施することが目的である。ここでは、EU タクソノミーの 1 つとして取り上げられている水消費量を検討する。バイオマスプラスチックは植物原料の育成に水を消費せざるを得ないので、石油系樹脂に比べると水消費量が大きい特徴があるので、ベースラインに対する水消費量を検討する。さらに、事業性の観点からコスト面の試算も実施する。

<水消費量>

エネ起源の GHG 排出量削減が見込まれる「商品包装シート」用途に対する水消費量を検討する。開発品では NatureWorks 製の PLA、ベースラインの PET の水消費量は、IDEA データベースを引用する。PBS の水消費量は公開されていないので、PLA と同等と設定する。

表 4-9 で示した PLA ペレット 1kg 製造までの水消費量は、PET 樹脂 1kg 製造までの水消費量とほぼ等しい。加工における水消費量は、電力消費量に係る消費量のみであり、開発品、ベースラインでほぼ同等である。日本国内での電力消費に係る水消費

量は $10\text{E-}5\text{m}^3$ 相当であり、その影響は小さい。さらに、廃棄・リサイクル時の水消費量も両者で同等と仮定する。そのため、 $4\text{m}^2 \times 200\mu\text{m}$ の開発品、ベースラインのライフサイクルにおける水消費量は、両者でほぼ同一であると判断できる。PET 樹脂は、多くの工程を経て製造されるので、バイオプラスチックの水消費量と差が現れなかったと推察する。

一方、表 4-9 で示した TotalCorbion 製の PLA 製造には、NatureWorks 製の 2 倍程度の水が消費されている。そのため、タイで生産される TotalCorbion の PLA を採用した場合には、バイオプラスチックのシステムの水消費量が多いことになる。このように、いまだ水消費量に関しては 栽培時の水消費データが大きく影響する可能性があるため、精査が必要である。

<コスト>

PLA は生分解性を有するバイオマス樹脂として注目されているが、その生産量は石油系のそれに比べれば小さいので、樹脂単体の価格は、購入量にも依存するが、種々の web で図 4-57 に示すように 700 円/kg (CIF 価格) 以上が提示されている。



図 4-57. PLA ペレットの販売事例

ベースラインの PET 樹脂のボトルグレードの価格は、製造先や取引数量に影響を受けるが、約 $1000\text{\$/t}$ である。 $110\text{ 円/\$}$ で換算すると、PET 樹脂は 110 円/kg と推測される。また、日本経済新聞では 貿易統計での輸入単価 (FOB) は 110 円/kg (2019 年 12 月) である。

PET 樹脂の価格は、2010 年以降の 10 年間まとめられ、図 4-58 のように報告されてい

る[44]。

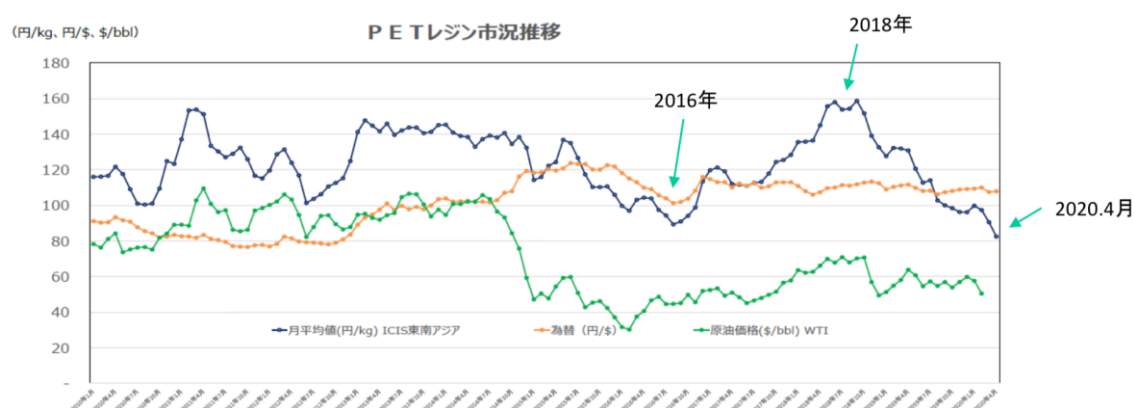


図 4-58. ボトル用 PET 樹脂の価格推移

この図から、ボトル用 PET 樹脂の価格は 100 円/kg 前後で推移していることが分かる。

そこで、以下の価格を前提に食品包装シートのコストを試算する。

- PLA 樹脂：700 円/kg、
- PET 樹脂：110 円/kg、
- 電力：25 円/kWh

なお、国内輸送に係るコスト、成形機や金型の減価償却コストは生産量に依存するので、除外してコスト試算する。試算結果を、図 4-59 に示す。ベースラインとの差分からコストの差異を評価できる。

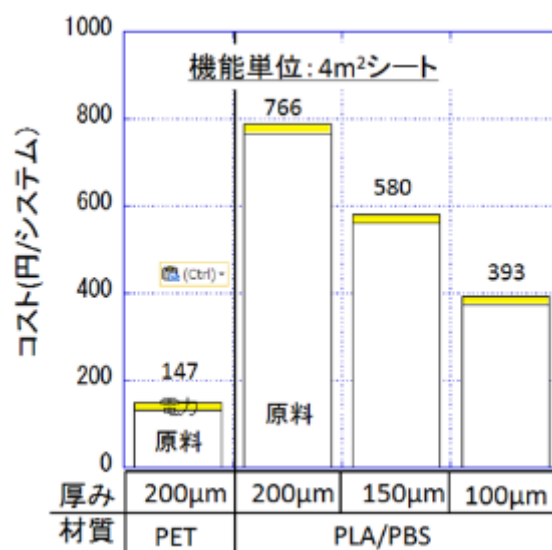


図 4-59. 開発品とベースラインのコスト推測

この図から、開発品とベースラインとの差は約 600 円程度、薄肉化しても 250 円程度であり、開発品のコスト優位性は難しいと推察される。

みずほリサーチ&テクノロジーズは、炭素税、排出権取引、エネルギー税などを合計した「実効炭素価格」を主要各国で比較している[44]。

- ・ スイス：123€/CO₂-t=16 円/kg-CO₂

- ・ 日本：30€/CO₂-t=4 円/kg-CO₂

開発品とベースラインの CO₂ 排出量差（削減量）は、大きく見積もっても 3kg 程度であるので、排出権価格差として 12～50 円であり、システムのコスト差である 600 円を吸収することは困難である。

今後、開発品のコスト優位性を高めるためには、①PLA 樹脂の生産量拡大による樹脂コスト低減、②開発品のリサイクル性の実証、③開発品の環境プレミアムを高めることなどが重要である。

特に、環境プレミアムに関しては、既に水力発電で製造された 1 次アルミニウム、再生可能エネルギーで製造されるグリーン水素などで導入されると期待されており、今後樹脂についても拡大が期待できる。

(4) 限界

本報告では、3 つの用途を想定し、開発品、ベースラインともリサイクルされない条件で GHG 排出量を評価した。開発品のリサイクルの促進は GHG 削減量を増大させるが、物性（機能）の維持に関しては LCA 手法で分析することができないので、LCA 分析の限界である。

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。これらは、各種用途で利用された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 ブレンドフィルム等 3 つの用途」とそれぞれの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。

対象とする環境カテゴリ：地球温暖化

	用途	(例)	開発品	ベースライン	機能単位	成型方法	備考
1	フィルム	食品包装 レジ袋他	PLA/PBS 光活性化 + 酸化処理	PE	20 μ m $\times$ 40m ²	インフレーション成形	開発品1kg 相当
2	シート	食品容器		PET	200 μ m $\times$ 4m ²	押出成形→ 真空成形	開発品1kg 相当
3	農業用 マルチ	農ビ		PE	20 μ m $\times$ 100m ²	カレンダー成形	他研究相 当に設定

・開発品、ベースラインのリサイクル：厚生労働省のガイドラインに基づいて、食品用途でのリサイクルはないと設定。

上位 3 つの用途の GHG 排出量の比較では、製品厚みが GHG 排出量に大きく影響する。

- 1) フィルム用途では、エネ起源 GHG 排出量をベースラインと同等にするためには、厚みが 1/2 程度に加工することが必要である。厚みが 1/2 でもベースラインと同じ機能を発揮できるかの判断により、開発品の気候変動に対する優位性が評価される。
- 2) 食品包装シート用途では、ベースラインとの比重差により、同じ厚みでもエネ起源 GHG 排出量の削減が可能である。
- 3) 農業用マルチへの用途では、開発品の GHG 排出量は PBS のそれに依存するが、ベースラインの GHG 排出量よりも大きく エネ起源の GHG 排出量の削減は困難と試算された。ただし、1)と同様に開発品の厚みがベースラインの 1/2 で同等の機能が発揮できれば、開発品の気候変動に対する優位性が評価される。

4-6. まとめ

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

令和元年度には、主要原料である 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 樹脂等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。

令和 2 年度には、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 調査、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。

これら 2 年間の LCA 分析を踏まえ、令和 3 年度には食品包装用フィルムなどの使用実態を踏まえた機能単位を設定し、3 つの用途に対する LCA 試算を実施した。

その結果、以下の成果が得られた。

- (1) 設定した食品包装用フィルム、食品包装用シート、農業用マルチは薄物製品としての用途であり、クローズドリサイクルが期待できないので、各ベースラインもリサイクルなしの条件で LCA を実施した。
- (2) 開発品の食品包装フィルム： フィルム面積として 40m^2 の機能単位を設定し、ベースラインの PE と開発品厚みを変数として LCA を実施した。その結果、開発品の厚みが半減できれば、開発品のシステム全体の GHG 排出量はベースラインより小さく、エネ起源の GHG 削減が期待できる。
- (3) 開発品の食品包装用シート： シート面積として 4m^2 の機能単位を設定し、開発品とベースラインの PET と開発品厚みを変数として LCA を実施した。その結果、同じ厚みでは、開発品のシステム全体の GHG 排出量はベースラインより小さい。エネ起源で比較した場合でも、PET と開発品の比重差のため同じ厚みではベースラインの PET に対しても、エネ起源の GHG 削減効果が認められる。
- (4) 開発品の農業用マルチ： マルチ面積として 100m^2 の機能単位を設定し、開発品とベースラインの PE と開発品の PBS 配合比を変数として LCA を実施した。その結果、食品包装フィルムと同様に、開発品の厚みが半減できれば、開発品のシステム全体の GHG 排出量はベースラインより小さく、エネ起源の GHG 削減が期待できる。

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、2020 年 3 月
- [2]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、2021 年 3 月
- [3]日本プラスチック工業連盟：<http://www.jpif.gr.jp/>より入手
- [4]石油化学工業会：<http://www.jpca.or.jp/>より入手
- [5]厚生労働省ホームページ：平成 24 年 4 月「食品用器具及び容器包装における再生プラスチック材料の使用に関する指針」
- [6] 容器包装リサイクル協会年次報告：<https://www.jcpra.or.jp/>より入手
- [7]プラスチック循環利用協会：プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の助教－マテリアルフロー図（2020 年）、<http://www.pwmi.or.jp/>より入手
- [8]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
- [9]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）
<https://www.aeha.or.jp/>より入手
- [10]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
- [11] 宇陀化成：<https://www.udakasei.co.jp/>より入手
- [12] 国松：<http://www.kuni-matsu.co.jp/>, 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] PET 樹脂のマテリアルフロー：<https://www.petbottle-rec.gr.jp/nenji/2020> 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://ieei.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 より入手

[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：日刊工業新聞のリンク

https://www.nikkakyo.org/upload_files/global_warming/clca/jirei/clca_polyester_from_bio.pdfより入手

[23]仙波、稲葉 他：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：バイオプラスチック導入ロードマップ検討会（第3回）（2020）

[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] Ana Morao,Francois de Bie : Life Cycle Impact Assessment of Polylactic Acid (PLA)
Produced from Sugarcane in Thailand, Journal of Polymers and the Environment (2019)
27:2523–2539

[29]CE Delft : Biobased Plastics in a Circular Economy、(2017)

<https://www.ce.nl/publicaties/download/2405> より入手

[30]ユニチカ：<https://www.unitika.co.jp/terramac/how/> 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> ,
<https://www.challenge-zero.jp/en/casestudy/597> より入手
- [35] JRC (Joint Research Centre, EU) : Environmental Sustainability Assessment of Bioeconomy Products and Processes - Progress Report 1 - Version 4 (2015) European Union.
- [36] 山西智紀、天沢逸里、中谷隼、平尾雅彦、佐藤俊輔：植物資源由来かつ海洋生分解性のプラスチック PHBH の環境影響評価、第 15 回 LCA 学会研究発表会 (2020) 東京大学、カネカ
- [37]カネカ：<https://www.kaneka.co.jp/>より入手
- [38]産業技術総合研究所：IDEA データベース V2.2(2018)
- [39]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
- [40] LCI データ集：塩化ビニル・環境協会より入手
- [41] 環境省編：IPCC Report Communicator(2018)
- [42] 三菱ケミカル株式会社：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」一生分解かつバイオマス由来新規プラスチックの農業用フィルム等開発および実用化実証事業－ 成果報告書、令和 3 年 3 月
- [43] 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)
http://www.env.go.jp/recycle/R01_100_MitsubishiUFJ.pdf より入手
- [44]プラサーチ株式会社：<https://pla-search.co.jp/market-information> より入手
- [45]日本経済新聞：2021 年 7 月 20 日付

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. 農業用マルチについて

近年、農業者の高齢化や後継者不足により、農地の耕作や維持管理が困難になっている。生産性に大いに影響を与える為、農業用マルチの使用は重要な工程であるが、展張や剥ぎ取り作業（土を取り除く、乾かす、束ねる、運ぶ等）の負担が大きく、農業者の課題となっている。加えて、農業用マルチは産業廃棄物として扱われることによる廃棄処理費用の問題、海洋プラスチックなどの環境への負荷も問題視されてきている。農業用マルチに求められる機能としては、地温の上昇や抑制の調節、雑草の発生抑制、肥料の流出防止、土壌の水分保持、蒸散防止などがあるが、一方で課題としては、土壌中に残らないように取り除く作業が農業者の最大の負担になっていることや、廃棄するまでの作業とコストも同様に負担となっている。

そのような背景から、生分解性農業用マルチの採用は非常に注目されている。一般農業用マルチから生分解性農業用マルチに切り替えることによるメリットとしては、剥ぎ取りに関わる労力の削減が最も大きなもので、表面にフィルムが露出しないようにすきこむだけで処理が終了する為、回収に要する労力を大きく軽減することが可能となる。農業用マルチメーカーA社によると、性能面の課題はあるが、それ以上に人手不足による重労働の軽減や環境意識の高まりが進んだこともあり、価格が一般農業用マルチの約4倍程度であっても、生分解性農業用マルチへの買い替え需要が増えてきている。その他のメリットとしては、自治体によっては（例えば、長野県茅野市による「生分解性マルチ購入補助事業」等）補助事業もある。これも生分解性農業用マルチの普及に繋がっている一因となっている。

また、食品加工メーカーによる契約栽培でも収穫作業の省力化による効率改善が大きな課題となっており、企業の環境負荷低減活動と合わせて生分解性農業用マルチへの切替に繋がることもある。

一方で生分解性農業用マルチの課題としては、一般農業用マルチとの性能差が縮まってきたとはいえ、テンションを掛けると裂けたり、小石等の影響で破けるケースもまだ残されている。今後、生分解性農業用マルチの市場拡大が予想されており、更にフィルムの性能向上の技術開発が進めば、市場流通のスピードアップと切替え需要の拡大に繋がると考えられる。

農業用マルチの市場規模は約 40,000 トン。一方、生分解性農業マルチは約 3,600 トン程度。価格は、メーカーA 社によると PE 製マルチの約 4 倍の価格とのことでしたが、流通価格としては 1,500～2,000 円/kg が主流。最終製品から想定される樹脂原料価格は 700～900 円/kg 程度と推定。

製品化に関する費用は、原料(PLA・PBS)費用の他、コンパウンド費用、成膜費用、物流費等があり、樹脂原料は購入数量、コンパウンド費用は製造量に影響される。新規酸化技術で相溶性を向上させる為、コンパウンド技術自体は難しいものではないため、市場で受け入れられる製品価格を実現できるかどうかは、いかにして酸化時間を短縮させるかが最大のポイントとなる。

生分解性プラスチックが使用されている用途例としては、農業用マルチ、レジ袋、食品容器(PLA のメインの用途)、ストロー、文具、日用品、玩具、土木資材等の工業製品、繊維などがあるが、その中でも実際に生分解性が求められる用途としては「農業用マルチ」が挙げられる。

本事業では、より生分解性プラスチックの特長を活かせる用途として、農業用マルチ向けの生分解性フィルムに着目し、同用途向けの生分解性プラスチック・コンパウンドを実施、フィルムを作製・評価した。

生分解性農業用マルチの課題は単一素材での強度不足(裂け、破れ等)であるが、生分解性プラスチックは入手性、今後の中国での増産や価格を考慮して PLA を主原料とした。また、課題解決の為に混合する樹脂には高靱性の特長を有する PBS を選択、それに大阪大学の新規酸化技術（光活性化二酸化塩素を用いた新規酸化法）で機能性を付与することにより、生分解性農業用マルチとしての機能の向上と課題を解決させ、市場での一般農業用マルチ(PE 樹脂製等、石油由来製品)の置換を目指す。

新規酸化技術が確立すればそのスケールアップの検討を実施し、グループ内の樹脂コンパウンドメーカーで生産を担い、フィルムメーカーをはじめとした当社の顧客へ PLA/PBS のブレンド樹脂の販売を行う。まずは国内の顧客中心となるが、フィルム以外への用途展開も可能と見込んでおり、将来的には当社グループの海外拠点での市場調査の実施も検討する。

5-2. 生分解性農業用マルチフィルムの市場価格調査結果

◎ 農業用フィルム（生分解性マルチ）市場価格

メーカー	樹脂	幅 (m)	長さ (m)	厚さ (μm)	製品価格 (円/個)	参考 (円/㎡)	参考価格 (円/kg)
M 社製品	PBS	1.35	200	18	12,600	47	2,058
T 社製品	PBS	1.50	200	18	10,714	36	1,575
U 社製品	PBAT	1.35	200	18	10,670	40	1,742
S 社製品	PBAT	1.35	200	18	10,184	38	1,663

※ 比重は 1.26 で計算（カタログ値より）、PBS は三菱ケミカル社製『BioPBS』、PBAT は BASF 社製『Ecoflex』が中心

◎ 農業用フィルム（生分解性マルチ）出荷量推移

	2015	2016	2017	2018	2019
生分解性マルチ 樹脂出荷量 (mt)	2,286	不明	3,043	3,416	3,606
生分解性マルチ 被覆面積 (ha)	約 6,311	不明	約 8,576	約 10,217	約 11,660

※農業用生分解性資材普及会調べ

5-3. PLA ブレンドフィルム用素材の市場調査結果

◎ PLA 世界需要

(単位：KMT/億円)

	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年見込	2021年予測
販売量	120	140	154	193	226	257
販売金額（メーカー出荷）	240	303	361	541	673	791

※資料：富士キメラ総研推定

◎ PLA メーカー生産能力

- ・ NatureWorks：158KMT（2020年に15KMTキャパアップの予定）
- ・ Total Corbion：75KMT（2024年に100KMTキャパアップを計画）
- ・ 海正生物材料 15KMT（2022年に65KMTへ、さらに150KMTキャパアップの計画）
- ・ BBKA（安徽豊原集団）：2021年から50KMT（2020年8月から量産開始）
→ ハイケム株式会社が日本向け販売取り扱いを開始

◎ PLA エリア別需要

- ・ 北米：70KMT、欧州：60KMT、アジア：40KMT、中国：10KMT、その他：80KMT
- ・ 主要用途：食品包装容器、軟包装パッケージ、シェールガス採掘用等

◎ PLA 国内市場

- ・ 輸入量：4.9KMT（貿易統計の輸入量より）、2019年度より入手困難な状況で用途開発が停滞

◎ PLA の課題

- ① 物性面：耐衝撃性、耐熱性が低く、難燃処方も確立されていない
- ② 生産性：成形時、結晶化速度が遅い為、生産性や物性向上にはPLAの改質が必要

◎ PLA のコスト面の課題

- ① サプライヤー：NatureWorks、Total Corbionの2強状態
- ② 想定単価：@ 600～800円/kg（小口は対象外）

◎ PBS（ポリブチレンサクシネート） 世界需要

(単位：KMT/億円)

	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年見込	2021年予測
販売量	3.0	2.5	3.0	9.0	8.6	9.2
販売金額 (メーカー出荷)	16.5	14.2	16.8	50.0	47.5	51.0

※出所：富士キメラ総研推定

◎ PBS メーカー生産能力

- ・ PTT MCC Biochem：20KMT（三菱ケミカルと PTT の合弁会社）

※ 昭和電工が 2016 年に生産中止を発表し、2017 年に当該市場から撤退したことから、現在は PTT MCC Biochem のみが参入

◎ PBS エリア別需要

- ・ 北米：1.5KMT、欧州：5KMT、アジア：0.8KMT、中国：0.8KMT、日本：0.9KMT
- ・ 主要用途：農業用マルチフィルム、食品包装容器、軟包装パッケージ等

※ 日本は農業用マルチフィルム向けの需要が大半で、需要は拡大傾向にある

◎ PBS 国内市場

- ・ 販売量：0.9KMT 程度、日本は農業用マルチ向けの需要が大半、需要は拡大傾向

◎ PBS の課題

① 100%バイオ由来 PBS

→ PBS は、植物由来のコハク酸と 1,4 ブタンジオールからなり、100%バイオ由来ではない

※ 海洋分解性：三菱ケミカル社製 FORZEAS は、海洋生分解性の国際認証を取得

◎ PBS のコスト面の課題

- ① 100%バイオ由来 PBS の技術は確立も、現行品よりもコストアップにつながる
- ② 想定単価：@ 700～1,000 円/kg（小口は対象外）

5－4．市場調査結果および本実証事業成果に基づく出口戦略

生分解性という特長を活かすために、農業用マルチへと本実証事業開発品を適用した場合、栽培期間が2, 3か月程度と短い葉物野菜（キャベツ、レタス、白菜など）やダイコンなどに用いることでより訴求効果が高いと考えられる。すなわち、展張期間が短いために、収穫後のマルチ除去の手間が相対的に大きいと共に、短期間の仕様であるため比較的強度を高く設定する必要がないためである。本実証事業成果を元に強度を向上させたバイオマスブレンドフィルムを用いることで、現行品（PE マルチ標準品膜厚 20 μm ）と比較して、より薄い 10 μm のブレンドフィルムを適用し、数か月の展張期間後の鋤き込みによる生分解処理に適したフィルム材料として採用することで LCA の観点からも優れた開発品となりうる。具体的な要求性能（強度、耐久性）については、現段階では目安にとどめ、引き続き幅広く応用可能性を探る。ここで本実証事業内の目標値として伸び率 300%としたが、短期間での分解を狙うマルチフィルムでは 20–100%の伸びの商品も実用化されており、コスト面での改善と完全バイオマスであるメリットに訴求できれば、現段階においても実用化される可能性もある。そのため、今後テスト品を作製し実地での試験を行うなど、使用用途も含めて引き続き検討を行う。

また、本実証事業成果に基づく強度向上バイオマスプラは農業用マルチ以外の幅広い用途にも展開可能である。特に、食品トレー（PET 素材）などワンウェイ用途で成型加工性の高さが求められる用途への展開も継続して検討する。これらは素材製造に係る排出 CO₂ 量が多いため、削減効果がより大きくなることが期待される。

5－5．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。本事業生産品の用途として、農業用マルチを選択した。原材料入手性に優れた PLA をベース樹脂として、本事業で開発した酸化 PBS の添加、ブレンドにより物性向上を達成することで、既存の生分解性マルチフィルムを上回る性能が期待される。既存の PE マルチに対してコスト面では以前不利であるものの、廃棄まで含めた使用者の負担及び、トータルコストでは生分解性マルチが採用される可能性も高く、今後ますます需要が見込まれる。

〈別添参考資料 1 : 仕様書〉