

平成31年度環境省委託業務

平成31年度 セルロースナノファイバーリサイクル  
の性能評価等事業委託業務

樹脂製品機能性添加剤用途をターゲットとした  
セルロースナノファイバー複合材廃材のリサイクルモデル評価  
成果報告書

令和2年3月

事業代表者

国立大学法人 静岡大学

(先端バイオマス利用コンソーシアム)

共同実施者

学校法人同志社 同志社大学

コニカミノルタ株式会社

化薬ヌーリオン株式会社

株式会社エコフィール

トクラス株式会社

## 目次

要旨（日本語）	1
Summary	3
1. 業務の概要	5
1.1 業務テーマ	5
1.2 業務の目的	5
1.3 業務の期間	5
1.4 本業務に至った背景	6
1.5 業務の内容	7
1.6 事業実施体制	11
1.7 事業化・普及の見込み	13
2 業務成果報告	15
2.1 マテリアルリサイクル技術の実証	15
2.1.1 CNF 複合廃材選別技術の検証	15
2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製	15
2.1.1.2 選別技術の検証	19
2.1.1.3 選別精度向上に関する検証	24
2.1.2 CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルの作製	30
2.1.2.1 既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査	30
2.1.2.2 容器包装リサイクル樹脂モデルの作製	33
2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立	37
2.1.3.1 酸変性樹脂化最適レシピの確立	37
2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立	56
2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立	59
2.1.3.4 マスターバッチ品質管理手法の確立	63
2.1.4 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチを利用した性能検証	68
2.1.4.1 フィラー界面における CNF 効果の検証	68
2.1.4.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証	75
2.1.4.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証	80
2.1.4.4 用途拡大に向けた難燃化技術の確立	83
2.2 製品化における実用性評価	100
2.2.1 技術資料の作成	100
2.2.2 PR 用サンプルの作製	102
2.2.2.1 建材 PR 用サンプルの作製	102

2.2.2.2	自動車 PR 用サンプルの作製	103
2.2.2.3	家電・OA 機器 PR 用サンプルの作製	106
2.2.2.4	まとめ	108
<b>2.2.3</b>	<b>ユーザーヒアリングの実施</b>	109
2.2.3.1	ヒアリング企業について	109
2.2.3.2	自動車部品利用と課題	109
2.2.3.3	建材利用と課題	109
2.2.3.4	家電・PA 機器利用と課題	109
2.2.3.5	再生材プラスチック利用と課題	109
2.2.3.6	総評	109
<b>2.2.4</b>	<b>実用化に向けた利用方法の検討</b>	111
2.2.4.1	建材について	111
2.2.4.2	自動車部品について	112
2.2.4.3	家電・OA 機器について	112
2.2.4.4	まとめ	114
<b>2.2.5</b>	<b>多回リサイクル性の検証</b>	115
2.2.5.1	概要	115
2.2.5.2	はじめに	115
2.2.5.3	試験方法	115
2.2.5.4	結果	116
2.2.5.5	まとめ	121
<b>2.3</b>	<b>社会実装の検証</b>	122
<b>2.3.1</b>	<b>事業性評価の実施</b>	122
2.3.1.1	概要	122
2.3.1.2	開発品マスターバッチの原料コスト試算	122
2.3.1.3	設備投資実施時の事業採算性の評価	124
2.3.1.4	まとめ	126
<b>2.3.2</b>	<b>リアクティブシステムによる CO2 削減効果の検証</b>	127
2.3.2.1	概要	127
2.3.2.2	目的	127
2.3.2.3	方法	127
2.3.2.4	結果	133
2.3.2.5	まとめ	140
<b>2.3.3</b>	<b>市場サイズにおける CO2 削減効果についての検証</b>	142
2.3.3.1	概要	142
2.3.3.2	各市場の CO2 削減量波及効果	142
<b>3.</b>	<b>総括</b>	146

## 要旨（日本語）

本業務では、近い将来、家電、建材、包装容器、自動車等の用途に普及が予想されるセルロースナノファイバー（以降 CNF と略す）複合材を対象とし、その普及に伴い発生する製造時の端材、製品寿命により廃棄される CNF 複合廃材を活用した carbon dioxide（CO<sub>2</sub>）削減効果の実証に取り組んだ。

本業務の要点は、「アップグレード型のリサイクル利用」、「CNF 複合廃材の特性を活用した利用法」、「拡大する廃材発生量に適合する用途展開」および「既存の産業（設備）、仕組みを活用して実現できる手法」の検討である。

本年度は最終年度であり、（1）マテリアルリサイクル技術の検証として、CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルを作製した。この樹脂モデルを原料とし、リアクティブシステム<sup>※1</sup>を用いて、高濃度のフィラー（木粉およびタルク）充填マスターバッチ（MB）<sup>※2</sup>を作製し、優れた物性を持つ MB の酸変性樹脂化レシピを確立した。また、開発した MB を再生材プラスチック（家電リサイクル樹脂、容器包装リサイクル樹脂）に添加し、その効果について検証した。（2）製品化における実用性評価として、開発した MB を原材料とした製品サンプルの作製、社会実装に向けた課題調査を実施した。（3）社会実装の検証として、開発した MB の社会実装に向けた、事業性評価、CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の検証を行った。以下に各章の概要を示す。

### （1）マテリアルリサイクル技術の実証

- ・容器包装材を想定したポリプロピレン（PP）ベースの CNF 複合廃材モデルを作製し、可視～近赤外分光分析による選別可能性を検討した。
- ・既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査結果に基づき、CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルを作製した。
- ・CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルを原料とし、リアクティブシステムを活用した MB を作製し、曲げ強度および引張強度が既存品のタルク 20%配合 PP 以上となる酸変性樹脂化レシピを確立した。また、最適レシピを用いた MB の量産技術を確立した。
- ・酸変性樹脂化最適レシピを用いた MB（以降、開発品 MB と略す）を再生材プラスチックに添加し、その効果（機械特性の向上）について検証した。また、フィラー界面における CNF の効果を数値解析により検証した。さらに、木粉をフィラーとした開発品 MB を用いた複合材の難燃化技術を確立した。

### （2）製品化における実用性評価

- ・開発品 MB を再生材プラスチックに添加した複合材の物性データをもとに技術資料を作成した。
- ・開発品 MB を再生材プラスチックに添加した複合材の成形性を確かめるとともに、市場にアピールするため、建材、自動車部品、家電・OA 機器部品の PR 用サンプルを作製した。また、この PR 用サンプルをもとに開発品 MB の製品実用化に向けた利用方法（部品）の検討を行った。
- ・技術資料および PR 用サンプルを用い、建材、家電、自動車部品メーカー（ユ

ーザー)等にヒアリングを実施し、製品化に向けた課題を確かめた。

- ・開発品 MB を再生材プラスチックに添加した複合材のマテリアルリサイクル性について評価した。

### (3) 社会実装の検証

- ・開発品 MB の事業性評価として、一般的な手法により作製した MB (以降、従来品 MB と略す)との原価コストを比較した。また、リアクティブシステムの導入による設備投資を行った際の事業採算性を評価した。
- ・開発品 MB およびこれを用いた PR 用サンプル作製時に実測した消費電力データから CO2 排出量を算出し、従来品 MB および PR 用サンプルと同等の現行製品における CO2 排出量を比較することで、本事業開発品の CO2 排出量削減効果を確認した。
- ・開発品 MB および開発品 MB を再生材プラスチックに添加した複合材をマテリアルリサイクル利用促進に利用した際の建材、自動車、家電・OA 機器市場による CO2 排出量削減効果を算出した。

※1 マスターバッチ：プラスチックに高濃度のフィラーや着色剤を分散させ、プラスチックの成形時に規定の倍率で希釈する成形用材料。

※2 リアクティブシステム：一般に、フィラー充填マスターバッチは、フィラーに樹脂および酸変性樹脂を熔融混練して製造されている。本方法ではフィラー、CNF 複合廃材、無水マレイン酸、有機過酸化物を一括混練し、CNF 複合廃材を直接酸変性処理すると同時にフィラー充填マスターバッチを得る方法である。

## Summary

Composite materials using cellulose nanofiber (CNF) are estimated to become popular in the field of electronics, construction, packaging material and automobile parts in the near future. In this task, reduction of CO<sub>2</sub> emission by the recycling of CNF composite wastes was demonstrated. Issues to be studied are summarized as “add the value of recycled material”, “reproduce new material by using the interface reinforcement due to CNF”, “develop the application to match the expanding amount of wastes” and “achieve recycle procedure with the conventional facilities”.

In this year, (1) Model plastic polymer of recycled packaging and containers contains CNF composites was developed. High-filler-ratio master batch (MB) \* was produced from that model plastic polymer and wood flour or talc by using the ‘reactive’ system.\*\* Through the investigation of reactive process, an optimal combination of acid modification to achieve better quality of MB was developed. The effect of MB addition on the recycled plastic polymers (of household electric appliances or packaging and containers) was also demonstrated. (2) Several commodity samples were made from developed MB. A survey on the practical realization of this technique was conducted.

(3) Heading towards the practical realization of developed MB, feasibility study and estimation of CO<sub>2</sub> reduction was performed.

### (1) Verification of the proposed material recycling

- Model plastic polymer of polypropylene (PP) based recycled packaging and containers contains CNF was developed. Applicability of visible-near infrared (vis-NIR) spectroscopy for the classification of model polymers was investigated.
- Component for actual plastic polymer wastes were analyzed to develop model plastic polymer of recycled packaging and containers contains CNF composites.
- An optimal combination for acid modification of high-filler-ratio MB from model plastic polymer was developed through the application of reactive system. MB produced by the optimal combination achieved higher flexural/tensile strength than conventional talc-PP composites. A mass production technology of the MB was also developed.
- The effect of addition of the MB into a recycled plastic polymers on the mechanical properties of mixed material was investigated. Also numerical operation was applied to clarify the influence of CNF on the surface mechanical characteristics of filler. Furthermore, flameproofed composite materials by using wood flour based MB was developed.

### (2) Evaluation of practical application

- Technical sheets for the composite materials with developed MB based on their physical properties.
- Molding processability of the composite materials with developed MB was evaluated. Commercial samples for construction, automobile parts and household electric appliances/OA equipment were made. Intended use of developed MB as a part of those fields was also examined.
- Hearings with enterprises regarding construction, automobile and household electric appliances or OA equipment were held with showing technical data and commercial samples to clarify the issues to be solved for the practical application.

- Applicability of material recycling for the composite material of developed MB and recycled plastic polymers.

(3) Verification for the practical realization

- The first cost of raw material for developed MB was compared with conventional MB. Plant investment for installing the reactive system was also considered to evaluate the profitability.
- Electricity consumption during MB and commercial samples production was converted into CO<sub>2</sub> emission. CO<sub>2</sub> reduction of developed materials was clarified by comparing with conventional process.
- Reduction of CO<sub>2</sub> emission when developed MB becomes widespread in the market of construction, automobile and household electric appliances/OA equipment was estimated.

\*Master batch (MB) : Raw material of filler composite. Normally filler content is higher than the final product, therefore MB is diluted by matrix polymers before molding.

\*\*Reactive system: Traditionally MB is produced by mixing filler, matrix polymer and acid modified polymer. In the reactive system, filler, CNF composite waste, maleic anhydride and organic peroxide are mixed together to excite the surface modification of the filler and produce MB at once.

## 1. 業務の概要

### 1.1 業務テーマ

樹脂製品機能性添加剤用途をターゲットとしたセルロースナノファイバー複合材廃材のリサイクルモデル評価

### 1.2 業務の目的

環境省では、植物由来の素材で鋼鉄の5分の1の軽さで5倍の強度等の特性を有するセルロースナノファイバー（以下「CNF」という。）に着目し、様々な製品等の基盤となる樹脂材料にCNFで補強したCNF活用材料（複合樹脂等）を使用することで、carbon dioxide（CO<sub>2</sub>）の削減を図ることを目的とした事業を推進している。

本事業では、近い将来、家電、建材、包装容器、自動車等の用途に普及が予想されるCNF複合材を対象とし、その普及拡大に伴い発生する一般廃棄物として廃棄される包装容器等に使われたCNF複合廃材を活用したCO<sub>2</sub>削減効果の実証に取り組む。このCNF複合廃材の発生量は緩やかなS字カーブで増加するものと想定しており、その発生量に応じた「リサイクル用途・技術」を提案する。技術的内容としては、CNF複合廃材を酸変性処理することで、新たな化学的機能を付与し、木粉をはじめとする各種フィラー充填マスターバッチ（MB）用の酸変性樹脂として利用することである。この化学的処理によるMB製造工程の簡略化からCO<sub>2</sub>削減効果を実証するとともに、発生する廃棄物の選別方法といった「仕組み」の双方から事業の実用性、経済性等の社会実装に向けて取り組む。

本事業のポイントの詳細は、「①アップグレード型のリサイクル用途（汎用リサイクル樹脂の5～10倍の付加価値）」、「②CNF複合廃材の特性を活用した利用法（ダメージを受けた樹脂特性とCNFが含まれることによる界面補強効果）」、「③拡大する廃材発生量に適合する用途展開（需要と供給のバランスが見合う用途へ展開）」および「④既存の産業（設備）、仕組みを活用して実現できる手法」の4点である。

性能目標としては、CNF効果を利用して、既存の酸変性樹脂同等以上の性能向上とコスト削減、さらにCO<sub>2</sub>削減目標としては、CNF複合廃材を直接酸変性樹脂化するリアクティブシステム<sup>\*</sup>を行い、従来の酸変性樹脂製造時に必要な製造エネルギーを削減することで、20%以上のCO<sub>2</sub>削減を図ることとする。また、リアクティブシステムで作製されたMBを再生材プラスチックに適用し、再生材プラスチックの機械的物性向上の実証を行う。さらに再生材プラスチックのマテリアルリサイクル利用促進にともなうCO<sub>2</sub>削減効果について検証する。

#### ※リアクティブシステム：

一般に、フィラー充填マスターバッチは、フィラーに樹脂および酸変性樹脂を熔融混練して製造されている。本方法ではフィラー、CNF複合廃材、無水マレイン酸、有機過酸化物を一括混練りし、CNF複合廃材を直接酸変性処理すると同時にフィラー充填マスターバッチを得る方法である。

### 1.3 業務の期間

平成31年4月1日から令和2年3月31日

## 1.4 本業務に至った背景

近い将来、CNF を利用した製品は、家電、建材、包装容器、自動車等の用途への普及、拡大が見込まれる。CNF はカーボンニュートラルの天然資源であり、「軽量」、「低熱膨張率（寸法安定性）」、「ネットワーク構造（補強性）」等の優れた機能を持つ新素材である。CNF という新素材の社会実装期を迎えるにあたり、CNF の活用から再生利用までを CO2 削減という観点から構築することは重要な意義を持つ。

製造時の端材、製品寿命により廃棄される CNF 複合廃材の発生量は緩やかな S 字カーブで増加するものと想定している。今後、CNF の利用が増加すると、現在サーマルリサイクルが主な処理方法となっている雑多、低品位のプラスチック廃材にも CNF 複合廃材が含まれるようになるため、再生材製造事業者は、廃材中に含まれる CNF の特性を活かした再生材の市場を新たに構築し、マテリアルリサイクルを推進できる可能性がある。

一方、CNF 複合廃材の再生材の利用者は、「品質の安定性」のみならず「供給の安定性」も重視する。そのため再生材製造事業者が生産量に見合った規模の市場を選択しなかった場合、供給量の不足や不安定さを理由に、製品性能と関係なく、開発した再生材が市場に受け入れられない恐れがある。よって、需給バランスを考慮したリサイクル用途の確立と市場形成が必須であると考えた。

本業務を遂行する事業実施体制としては、早期に実用化できることを考え、CNF 複合材の実用化に向けた研究について多くの実績がある「学校法人同志社 同志社大学」、リサイクル事業を行っている広島リサイクルセンターが親会社であり、容器包装リサイクル樹脂コンパウンドの事業化実績がある「株式会社エコフィール」、酸変性樹脂製品を製造販売しており、酸変性技術および樹脂複合材料関連市場についての幅広い情報を持っている「化薬ヌーリオン株式会社」、ポリエチレンテレフタレート (PET) ボトルをリサイクルした再生 PET の外装用プラスチックの事業化実績があり、循環型社会への貢献意識が高い「コニカミノルタ株式会社」、木材・プラスチック複合材 (wood plastic composite:WPC) および CNF を含む WPC のコンパウンドを製造販売しており、それらの複合材料の製造および研究開発について多くの実績がある「トクラス株式会社」の 5 機関が共同実施機関として参画した。

また、代表機関である「先端バイオマス利用コンソーシアム（静岡大学）」は、これまで CNF を利用した各種製品の開発への実績や、産学官を含めた広いネットワークを利用し事業を遂行することが可能である。

## 1.5 業務の内容

以下に仕様書に記載した業務の内容を記載する。

### (1) マテリアルリサイクル技術の実証

CNF が使用された場合のモデル廃材を用い、フィラー充填マスターバッチとして適した酸変性樹脂化レシピを確立する。また、フィラー充填マスターバッチを再生材プラスチック（家電リサイクル樹脂、容器包装リサイクル樹脂等）に添加し、その効果について検証する。そのため、本年度は以下の内容を実施する。

#### ①CNF 複合廃材選別技術の検証

CNF 複合材が容器包装材に使用された際の選別技術の検証を行う。

##### ア. CNF 複合材モデルの作成（静岡大学、トクラス）

容器包装材を想定した CNF 複合材のモデル材料を作成する。なお、本項目のうち、CNF 複合材モデルの作成の一部については再委託して差し支えない。

##### イ. 選別技術の検証（エコフィール、静岡大学、トクラス）

- ・既存の近赤外選別装置を用い、選別手法、選別精度の実証を行う。
- ・上記検証にて CO2 排出量計算に必要な生産エネルギーのデータを取得する。

##### ウ. 選別精度向上に関する検証（静岡大学）

「(1) ①イ」において検証された結果を参考に近赤外分析装置を用い、選別精度向上に関する可能性を調査する。

#### ②CNF 複合廃材含有 容器包装リサイクル樹脂モデルの作成

既存の容器包装リサイクル樹脂の成分分析結果と「(1) ①イ」で検証された結果をから CNF 複合廃材が含まれた容器包装リサイクル樹脂モデルペレットを作成する。

##### ア. 既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査（エコフィール）

モデル廃材を作成するにあたり既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査、原材料のバラツキ調査を行う。

##### イ. 容器包装リサイクル樹脂モデルの作成（エコフィール、トクラス）

「(1) ①イ」、「(1) ②ア」で得られたデータをもとに CNF 複合廃材が含まれた容器包装リサイクル樹脂モデルペレットを作成する。

#### ③酸変性フィラー充填（タルク、木粉等）マスターバッチの量産技術確立

「(1) ②」で作成したモデル廃材を原料とし、リアクティブシステムを活用した酸変性フィラー充填（タルク、木粉等）マスターバッチの量産技術を確立する。

ア. 酸変性樹脂化最適レシピの確立（静岡大学、化薬ヌーリオン）

- ・「（１）① ア」「（１）②イ」で作成したモデル廃材を原料とし、リアクティブシステムにおけるフィラー充填マスターバッチ用酸変性樹脂化を行う。

- ・各レシピにおける機械特性の評価を行い、最適レシピを確立する。

- ・なお、本項目のうち、熱特性評価、流動特性評価については再委託して差し支えない。

\*ここでの酸変性樹脂としての適合条件は、タルク 20%配合ポリプロピレン品と同濃度フィラー添加において、同等以上の曲げ強度 40 MPa 以上 且つ、引張強度 25 MPa 以上を目標とする。

イ. 酸変性処理タルクマスターバッチの量産技術確立（エコフィール、トクラス）

- ・量産設備にてリアクティブシステムを用いた酸変性処理タルクマスターバッチを量産する。量産を前提とした生産能力として実機にて 150 kg/h 以上の生産システムを構築する。

- ・上記試作にて CO2 排出量計算に必要な生産エネルギーのデータを取得する。

- ・経済性評価に必要なデータを取得する。

ウ. 酸変性処理木粉マスターバッチの量産技術確立（トクラス、エコフィール）

- ・量産設備にてリアクティブシステムを用いた酸変性処理木粉マスターバッチを量産する。量産を前提とした生産能力として実機にて 150 kg/h 以上の生産システムを構築する。

- ・リアクティブ処理木粉マスターバッチの量産に適合する木粉量、木粉の性状について調査する。

- ・上記試作にて CO2 排出量計算に必要な生産エネルギーのデータを取得する。

- ・材料作成にあたり経済性評価に必要なデータを取得する。

なお、本項目のうち、リアクティブ処理木粉の性状分析については再委託して差し支えない。

エ. マスターバッチ品質管理手法の確立（トクラス、静岡大学）

- ・「（１）③ イ」「（１）③ウ」で作成したマスターバッチについて、製造現場に導入可能な各種品質試験項目の策定を行う。なお、本項目の内、フィラー高濃度での分散性評価については再委託して差し支えない。

④酸変性リアクティブ処理フィラー充填マスターバッチを利用した性能検証

「（１）③」で作成したフィラー充填マスターバッチを再生材プラスチック（家電リサイクルプラスチックや容器包装リサイクル樹脂等）に添加し、その効果（機械特性の向上）について検証する。

ア. フィラー界面における CNF 効果の検証（静岡大学）

- ・フィラーに対する界面特性の評価から、CNF 効果のメカニズムを検証すること。

なお、本項目のうち、シミュレーションにおける評価については再委託して差し支えない。

イ. リアクティブシステムで作成したタルク充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証（静岡大学、エコフィール、同志社大学、コニカミノルタ）

- ・「（１）③イ」で作成したタルク充填マスターバッチを再生材プラスチックに添加し、その効果（機械特性等）について検証する。
  - ・事業終了後、迅速な実用化に移行するため、信頼性評価も実施すること。
- なお、本項目のうち、信頼性評価については再委託して差し支えない。

ウ. リアクティブシステムで作成した木粉充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証（静岡大学、同志社大学、コニカミノルタ）

- ・「（１）③ウ」で作成した木粉充填マスターバッチを再生材プラスチックに添加し、その効果（機械特性等）について検証する。

エ. 用途拡大に向けた難燃化技術の確立（同志社大学、トクラス、コニカミノルタ）

- ・「（１）③ウ」で作成する材料について家電・OA機器用途への展開として必要となる、難燃化についてそのレシピ検討を実施する。

## （２）製品化における実用性評価

CNF 複合廃材を用いた酸変性リアクティブ処理フィラー充填マスターバッチを原材料とした製品サンプルの作成、社会実装に向けた課題調査を実施する。そのため、本年度は以下の内容を実施する。

### ①技術資料の作成（化薬ヌーリオン、トクラス）

- ・「（１）③イ、ウ、エ」の作成した材料の物性データをもとに技術資料の作成を行う。

### ②PR用サンプルの作成（トクラス、コニカミノルタ、エコフィール）

- ・「（１）③イ、ウ、エ」の材料を利用した製品の市場性を明らかにするためPR用サンプルの作成を行う。
- ・上記試作にてCO<sub>2</sub>排出量計算に必要な生産エネルギーのデータを取得する。
- ・サンプル作成にあたり経済性評価に必要なデータを取得する。

### ③ユーザーヒアリングの実施（化薬ヌーリオン、トクラス）

- ・「（２）①、②」で作成した技術資料およびサンプルを用い、建材、家電、自動車部品メーカー（ユーザー）等にヒアリングを実施する。

### ④実用化に向けた利用方法の検討（トクラス、コニカミノルタ）

- ・「（１）③イ、ウ、エ」で作成した材料を使用した製品の実用化に向けた利用方法（部品）の検討を行う。

⑤多回リサイクル性の検証（静岡大学）

- ・実際に量産した酸変性リアクティブ処理フィラーマスターバッチを利用した製品における、リサイクル性について評価する。

（3）社会実装の検証

CNF 複合廃材を用いた酸変性リアクティブシステムを用いた、フィラー（タルク、木粉）充填マスターバッチの社会実装に向けた、事業性評価、CO2 排出量削減効果の検証を行う。そのため、本年度は以下の内容を実施する。

①. 事業性評価の実施（静岡大学）

- ・酸変性リアクティブ処理フィラー（タルク、木粉）充填マスターバッチの経済性評価と商品化戦略を踏まえた事業性評価を実施する。

②. リアクティブシステムによる CO2 削減効果の検証（静岡大学）

- ・量産設備にて、現行法とリアクティブシステムを用いたフィラー充填マスターバッチの量産を実施し、実測した消費電力データから CO2 排出量を算出すること。なお、既存方法に対し 20%以上の CO2 削減を目標値とする。

なお、本項目のうち、LCA 計算については再委託して差し支えない。

③. 市場サイズにおける CO2 削減効果についての検証（静岡大学）

- ・リアクティブシステムを用いたフィラー充填マスターバッチを再生材プラスチックのマテリアルリサイクル利用促進に利用した際の市場サイズによる CO2 削減効果を算出する。

## 1.6 事業実施体制

静岡大学を事業代表機関とし、学校法人同志社 同志社大学、株式会社エコフィール、化薬ヌーリオン株式会社、コニカミノルタ株式会社、トクラス株式会社を共同実施機関とし、先端バイオマス利用コンソーシアム（リサイクル）を形成した。これに加え、外部評価機関 6 団体を加えた事業体制で本事業は行われた。図 1-1 に実施体制図、表 1-1 に本年度実施テーマと担当実施機関を示す。

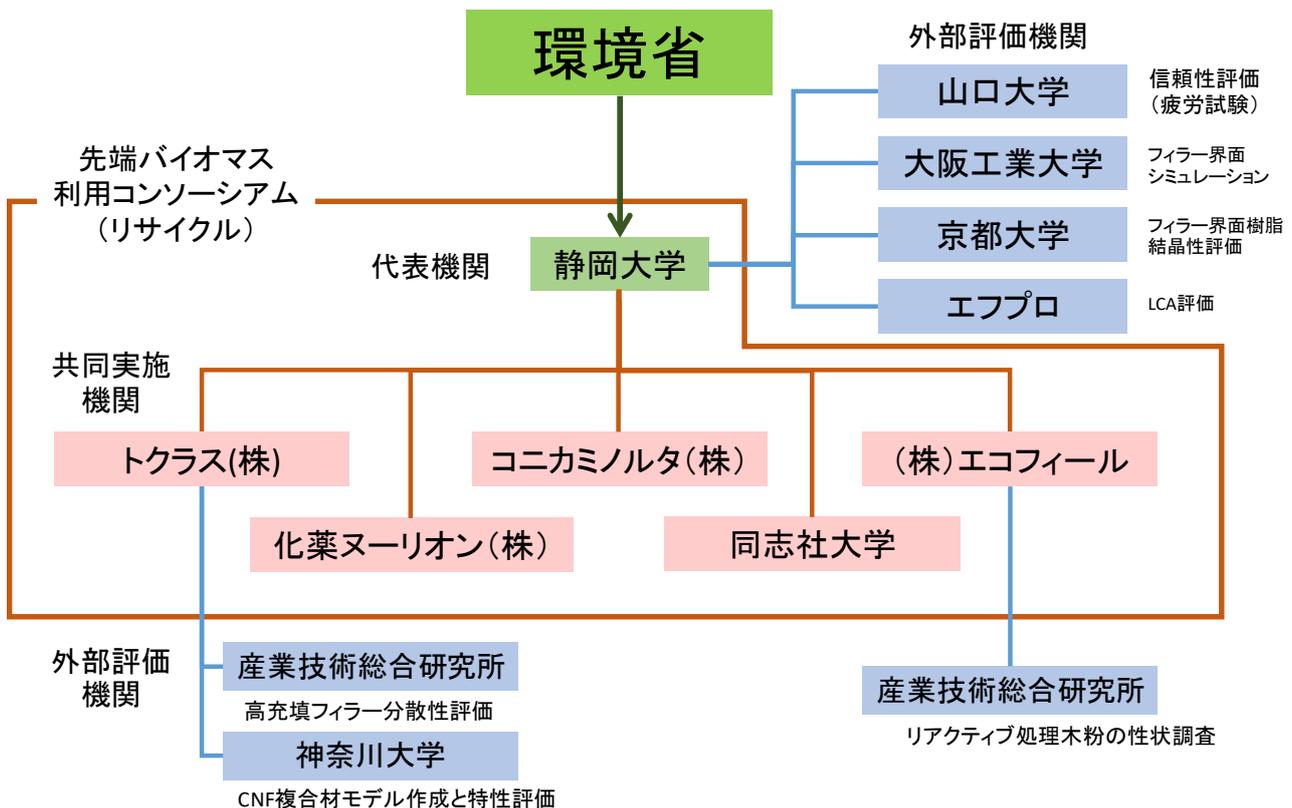


図 1-1 実施体制図

表 1-1 本年度実施テーマと担当実施機関

テーマ		担当機関
(1) マテリアルリサイクル技術の実証		
①CNF複合廃材選別技術の検証	ア. CNF複合材モデルの作成	静岡大学、トクラス
	イ. 選別技術の検証	エコフィール、静岡大学、トクラス
	ウ. 選別精度向上に関する検証	静岡大学
②CNF複合廃材含有容器リサイクル樹脂モデルの作成	ア. 既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査	エコフィール
	イ. 容器包装リサイクル樹脂モデルの作成	エコフィール、トクラス
③酸変性フィラー樹脂(タルク、木粉等)マスターバッチの量産技術確立	ア. 酸変性樹脂最適化レシピの確立	静岡大学、化薬ヌーリオン
	イ. 酸変性処理タルクマスターバッチの量産技術確立	エコフィール、トクラス
	ウ. 酸変性処理木粉マスターバッチの量産技術確立	トクラス、エコフィール
④酸変性理アクティブ処理フィラー充填マスターバッチを利用した性能検証	エ. マスターバッチ品質管理手法の確立	トクラス、静岡大学
	ア. フィラー界面におけるCNF効果の検証	静岡大学
	イ. リアクティブシステムで作成したタルク充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証	静岡大学、エコフィール、同志社大学、コニカミノルタ
	ウ. リアクティブシステムで作成した木粉充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証	静岡大学、同志社大学、コニカミノルタ
エ. 用途拡大に向けた難燃化技術の確立	同志社大学、トクラス、コニカミノルタ	
(2) 製品化における実用性評価		
①技術資料の作成		化薬ヌーリオン、トクラス
②PR用サンプルの作成		トクラス、コニカミノルタ、エコフィール
③ユーザーヒアリングの実施		化薬ヌーリオン、トクラス
④実用化に向けた利用方法の検討		トクラス、コニカミノルタ
⑤多回リサイクル性の検証		静岡大学
(3) 社会実装の検証		
①事業性評価の実施		静岡大学
②リアクティブシステムによるCO2削減効果の検証		静岡大学
③市場サイズにおけるCO2削減効果についての検証		静岡大学

## 1.7 事業化・普及の見込み

各種熱可塑性プラスチックを利用した CNF 複合材は、容器包装材、自動車、家電、住宅等を中心に普及、拡大するものと思われる。まず 2020 年に CNF が家電製品等に採用されはじめるが廃材は製品製造時の端材としてのみ発生し、CNF 適用品の廃棄が始まるのは 2025 年頃からであると考えられる。2030 年頃には製品寿命到達または買い替えによるリサイクルが本格化し廃材が大きく増加すると想定した。これに基づき、CNF 複合廃材の発生量を、2025 年に 2,600 t/年、2030 年に 8,500 t/年と仮定した。つまり、CNF 複合廃材の発生量は緩やかな S 字カーブで上昇すると想定した。また、再生材ユーザーは、品質のバラツキが小さく安定的に供給される原料を求めている。そこで、本事業では CNF 複合廃材発生量の段階的増加と需要のバランスが取れるよう、CNF の普及段階毎に異なる市場へ展開することを提案した。図 1-2 に事業化に向けた流れを示す。

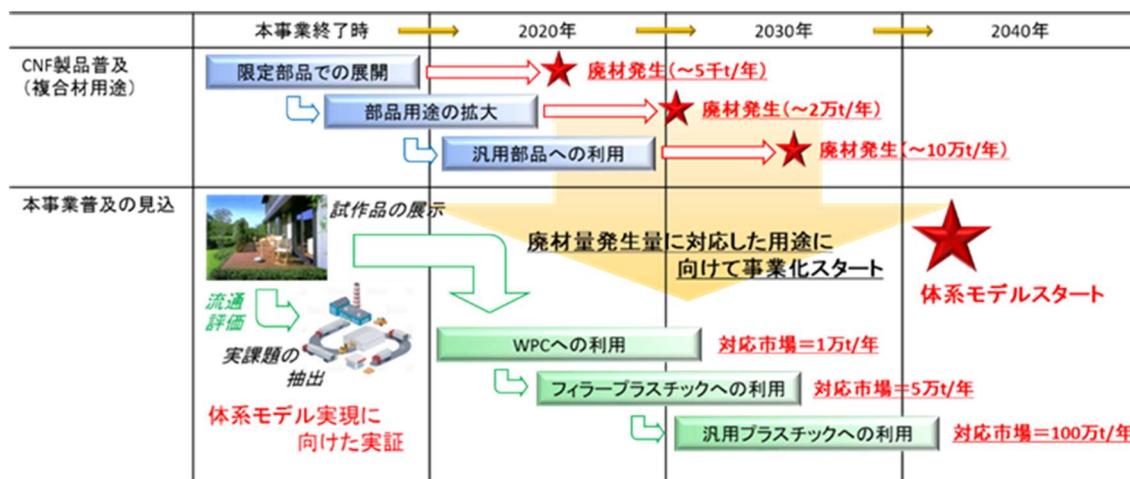


図 1-2 事業化に向けた流れ

CNF 複合廃材発生量が 5,000 t/年程度までの間は、約 4 万 t/年の市場を持つ WPC メーカーが再生材の主な利用者になると想定している。WPC メーカーは、市場規模が本件に適合するだけでなく、木粉、樹脂、酸変性樹脂等の原材料を自社調達しており、デッキ材、フロア材等の最終製品までの一貫製造を行っていることから、コンパウンド化についての技術レベルが高く、生産に関する技術対応力がある。CNF 複合廃材発生量が 5,000 t/年を超えた後は、タルク、マイカ、水酸化マグネシウム等のフィラーと配合して MB 化した上で汎用プラスチック市場へ展開することを想定している。これにより、本事業成果の市場は 100 万 t/年以上の需要が見込まれる。図 1-3 に CNF 複合廃材のマテリアルリサイクル技術として提案するリアクティブシステムの工程を示し、図 1-4 に従来プロセスの工程を示す。

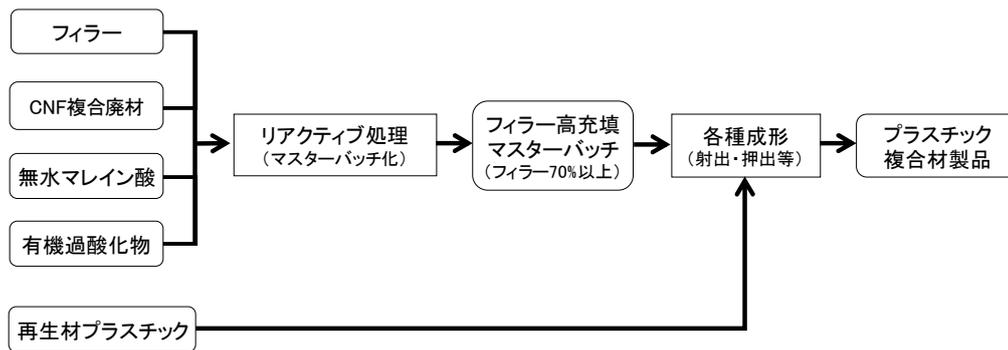


図 1-3 リアクティブシステム

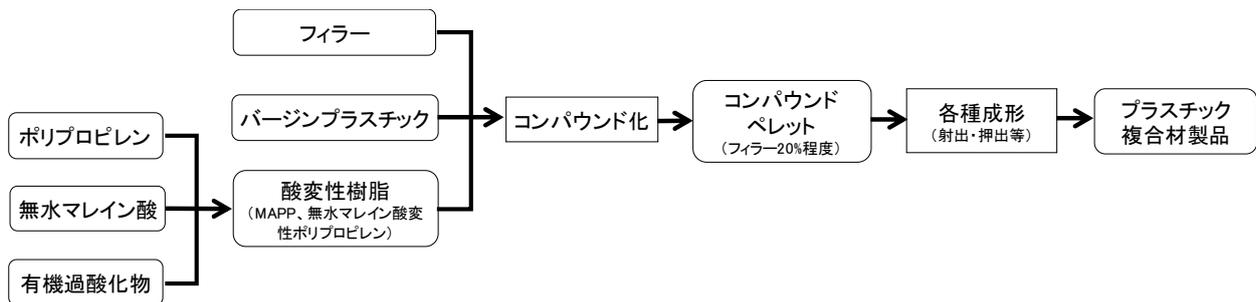


図 1-4 従来プロセス

本事業で提案するリアクティブシステムの導入により、経済性については酸変性樹脂の購入コストの削減が可能となり、フィラーと樹脂との溶融混合と酸変性処理を同時に行うため、本来、外部から購入している酸変性樹脂の製造工程を省略することでCO<sub>2</sub>排出量の削減が可能となる。さらに、本事業では従来製品には含まれないCNF複合廃材が含まれており、CNFを含有しているからこそ発現し得る「補強効果」による機械特性の改善が期待できる。リアクティブシステムは既存設備の利用を前提とした反応処方であり、国内には大小含め相当数のコンパウンドメーカーがあることから、少量からの柔軟な生産対応が可能となる。本事業提案では、フィラー充填プラスチック市場を基本ターゲットとしているが、酸変性樹脂自体は、塗料、接着剤市場でも使用されており、CNF複合材が基材であることから期待できる「ネットワーク構造」による塗膜形成向上、あるいは、「低熱膨張率」による寸法安定性向上等が検証されれば、これらの分野への「水平展開」も十分に期待できる。

## 2 業務成果報告

### 2.1 マテリアルリサイクル技術の実証

CNF 複合材が容器包装材として使用されたことを想定し、CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルを作製した。これを原料とし、リアクティブシステムを活用したフィラー充填マスターバッチを作製し、最適な酸変性樹脂化レシピを確立した。また、開発したマスターバッチを再生材プラスチック（家電リサイクル樹脂、容器包装リサイクル樹脂）に添加し、その効果について検証した。以下に仕様書項目に準じて詳細を記す。なお、用語が重複している「酸変性フィラー充填（タルク、木粉等）マスターバッチ」、「酸変性処理タルク（木粉）マスターバッチ」、「酸変性リアクティブ処理フィラー充填マスターバッチ」、「リアクティブシステムで作製したタルク（木粉）充填マスターバッチ」は、「リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク等）充填マスターバッチ」に統一した。

#### 2.1.1 CNF 複合廃材選別技術の検証

CNF 複合材が容器包装材に使用されたことを想定し、選別技術の検証を行った。以下に詳細を記す。

##### 2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製

###### 2.1.1.1.1 概要

容器包装材を想定した CNF 複合材のモデル材料として、CNF とポリプロピレンの複合材を用いたプラスチックフィルムを作製し、その物性を評価した。CNF を含むことでフィルムの物性値は向上した。

###### 2.1.1.1.2 はじめに

CNF は軽量かつ高強度な繊維であり、熱膨張率が低く、透明度が高く、ガスバリア性が高いといった優れた性質を持つ。これらの特性は、容器包装材に用いる際にも有用な特性である。容器包装に用いられるプラスチックは年間 230 万 t 程度の生産量があり、その生産量はプラスチック全体の 4 分の 1 程度である。プラスチック製品に用いられる樹脂は 100 種類を超えた種類があり、容器包装プラスチック製品に用いられる樹脂は 10 数種といわれている。代表的な容器包装材に用いられる樹脂はポリプロピレン（PP）、高密度ポリエチレン（HDPE）、低密度ポリエチレン（LDPE）、ポリスチレン（PS）、ポリエチレンテレフタレート（PET）およびポリ塩化ビニル（PVC）であり、包装される製品（生鮮食品、加工食品、洗剤、医薬品、飲料など）の特性や要求にあった材質のプラスチックが用いられる。

この中で、PP は用途の拡大が求められている汎用樹脂であり、CNF との複合化が望まれている。ここでは、容器包装材を想定した CNF と PP からなる複合材フィルムを作製し、その物性を確かめた。

###### 2.1.1.1.3 作製手法

容器包装材を想定した CNF 複合材のモデル材料として、CNF と PP からなる複合材フィ

ルムを用意し、比較対象とした既存品樹脂フィルムを合わせ、以下の 6 種類をサンプルとした。

- PP \*CNF 複合材のベース樹脂
- CNF 含有率 5%の PP 複合材 (PP-CNF 5%)
- CNF 含有率 10%の PP 複合材 (PP-CNF 10%)
- CNF 含有率 20%の PP 複合材 (PP-CNF 20%)
- PS
- リニア PE (PE-LLD) \*LDPE の 1 種、密度 0.910~0.925 の直鎖状 PE コポリマー

また、フィルム作製に用いた装置は以下の通りである。

- T ダイ押出シート成形機 (図 2-1 左)  
ダイス…150 mm 幅、コートハンガーダイ、リップ幅; 0.6 mm  
押出機… $\Phi 20$ 、L/D=25、フルフライトスクリュ (C/R=3.0)
- 引取ロール (図 2-1 右)

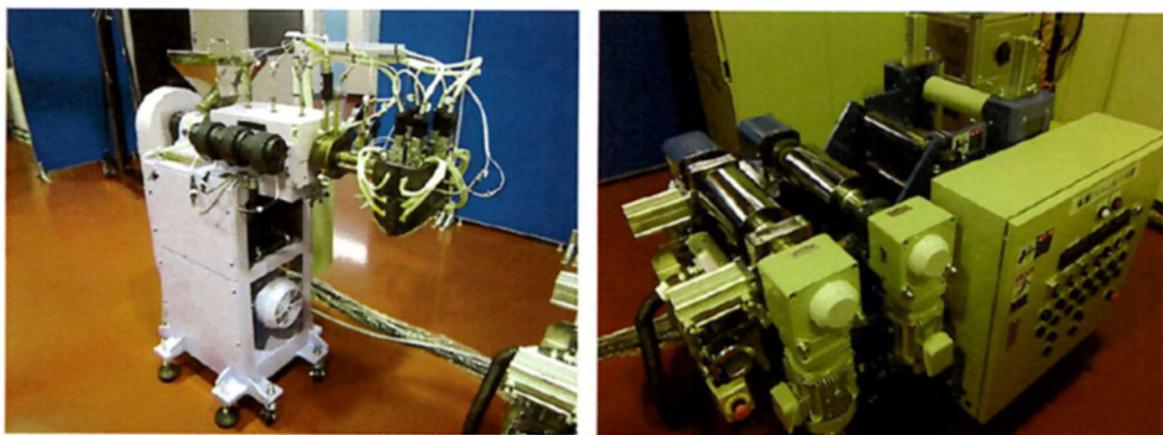


図 2-1 フィルム作製装置 (左 : T ダイ単軸押出機、右 : 引取ロール)

成形条件、成形結果および成形したサンプルは以下の通りである。

表 2-1 成形条件および成形結果

材料	PP	PP-CNF			PS	PE-LLD
		5%	10%	20%		
成形温度 (°C)	190	200	200	200	210	210
ロール温度 (°C)	75	85	85	85	85	85
スクリュ回転数 (rpm)	100	100	78	85	85	140
引取速度 (m/min)	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6
厚み (μm)	470-530	480-510	490-510	470-540	490-510	495-510
押出安定性	良好	良好	良好	良好	良好	良好
シート外観	ソリあり	概ね良好	概ね良好	概ね良好	ブツあり	概ね良好



図 2-2 成形したフィルムの写真

(上段右 : PS、上段中央 : PP、上段左 : PE-LLD

下段右 : PP-CNF 5%、下段中央 : PP-CNF 10%、下段左 : PP-CNF 20%)

目標厚み (0.5 mm) については、スクリュ回転数および引取速度の調整によりおおむね目標の厚みで試作できた。PP-CNF についてはタッチロールにより、平滑性を出すことができた。この結果から、PP-CNF はフィルム材料として使用できると推察された。

#### 2.1.1.1.4 フィルムの物性評価

作製したフィルムを幅 10 mm になるように切り出し、JIS K7127「プラスチック-引張特性の試験方法-第 3 部：フィルムおよびシートの試験条件」に従い、引張試験を行った。サンプル数は各 5 体とし、試験は万能試験機 (AGS-5kNX、島津製作所) で行った。引張試験の結果を表 2-2 に示す。

表 2-2 フィルム引張試験結果

材料		厚み ( $\mu\text{m}$ )	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (MPa)	破断ひずみ (%)
PP		507	0.93	32.1	1679	11.1
		(5)	(0.00)	(0.3)	(29)	(3.1)
PP-CNF	5%	491	0.95	35.0	2174	7.5
		(3)	(0.00)	(0.3)	(31)	(0.4)
	10%	504	0.96	35.1	2335	6.1
	(3)	(0.01)	(0.8)	(78)	(0.8)	
	20%	492	1.02	37.5	2961	3.8
	(6)	(0.01)	(1.1)	(77)	(1.5)	
PE-LLD		501	0.95	10.1	168	-
		(4)	(0.00)	(0.2)	(6)	-
PS		490	1.06	32.9	2863	1.3
		(7)	(0.01)	(3.5)	(27)	(0.1)

\* ( ) 内は標準偏差

全材料で平均厚み 490-507  $\mu\text{m}$ 、標準偏差 3-7  $\mu\text{m}$  となり、安定した成形が可能であった。密度は PP-CNF 20%、PS は 1.0  $\text{g}/\text{cm}^3$  を超えていた。容器包装材としては密度が低いほうが適しているため、CNF 含有率は低いことが望まれる。引張強度は CNF を含むことで向上し、既存樹脂 (PP、PE-LLD、PS) よりも高い値となった。PP-CNF は CNF 含有率が増加するほど強度は高くなる傾向を示した。弾性率は PP-CNF 20% が最も高く、PS、PP-CNF 10%、PP-CNF 5%、PP、PE-LLD の順に高い値を示した。破断ひずみは PE-LLD、PP、PP-CNF 5%、PP-CNF 10%、PP-CNF 20%、PS の順に高い値を示した。その中でも PE-LLD の破断ひずみは 100% 以上となり、装置の測定限界を超え、測定不可となった。容器包装材としては破断ひずみは高いものが望まれるため、PP-CNF については、CNF 含有率が低いものが適していた。強度や破断ひずみのバランスを考え、CNF 含有率 10% の PP-CNF 10% がモデルとして適していると判断した。

#### 2.1.1.1.5 まとめ

容器包装材を想定した CNF と PP の複合材をフィルム成形し、既存樹脂とともにその物性を比較した。CNF を添加することで、引張強度および弾性率の向上が見られた。CNF を 20% 添加した際は、容易に破断したことから、CNF 添加率は 10% が適していると判断した。

## 2.1.1.2 選別技術の検証

### 2.1.1.2.1 概要

既存の近赤外選別装置を用い、選別手法、選別精度の実証を行い、近赤外選別装置において、必要な CO2 排出量計算に必要な生産エネルギーのデータを取得した。

「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」において作製したポリプロピレンと CNF からなる CNF 複合材モデルおよび既存品樹脂フィルムの選別精度を検証したところ、樹脂の種類が異なる場合の選別は可能であったが、ポリプロピレン単体との選別には課題が残った。

### 2.1.1.2.2 はじめに

本事業では容器包装材に CNF が含まれた際のリサイクルを想定しているため、容器包装リサイクルの対象となる樹脂、PE、PP、PS および PET の 4 種類の回収・選別が必要になる。PET 樹脂は単独でのリサイクルシステムが確立されており、再生ペットボトル、合成繊維等に用いられており、コニカミノルタ社も複合コピー機への実用化を果たしている。また、PET の成形温度は 250 degree C 以上が主流であり、CNF を含有するには不向きである。そのため、CNF 含有樹脂を想定した場合、リサイクルが求められる容器包装樹脂は PET 以外の樹脂が想定される。これは資源有効利用促進法によって、事業者に表示義務のある「飲料、酒類、特定調味料用の PET ボトルを除くプラスチック製容器包装」に該当するプラスチック類であり、プラマーク（図 2-3）にて選別できる。



図 2-3 プラスチック製容器包装のプラマーク

CNF を含有したプラスチックにおいてもプラマークを表示することで、消費者が分別排出し、市町村が分別収集する既存の回収システムを利用することができる。そのため、回収についての検討は不要とした。しかし、CNF を含有した樹脂と含有していない樹脂の選別工程は新たに検討する必要がある。PET 以外の容器包装樹脂のプラスチックリサイクルラインの一例を図 2-4 に示す。

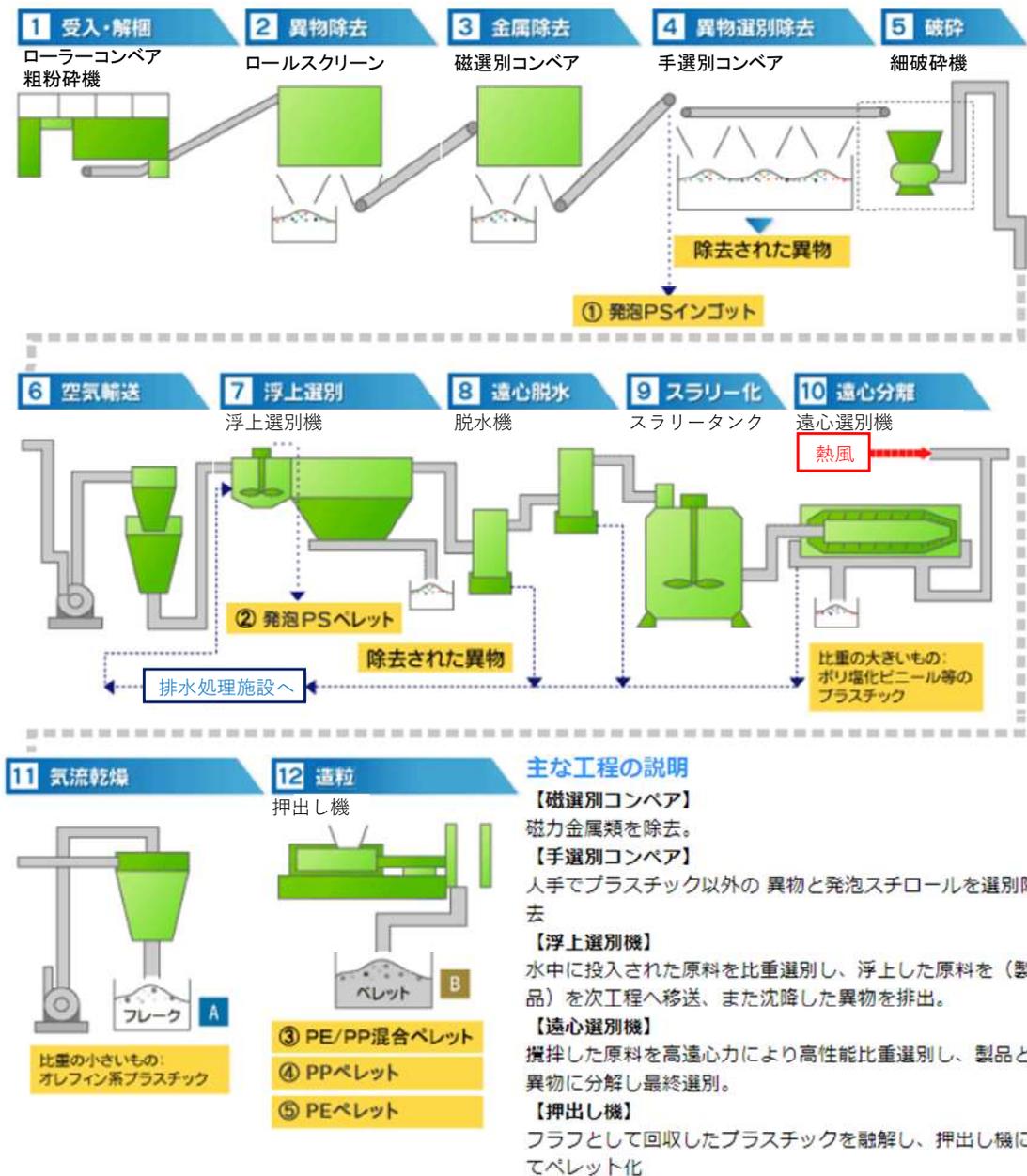


図 2-4 容器包装リサイクル樹脂製造工程

\*広島リサイクルセンターHP より抜粋

選別を経て PS はインゴット、PP および PE はペレットに成形されるが、完全な選別は現在の技術では不可能なため、各々の成分や不純物が混合した状態で容器包装リサイクル樹脂は供給されている。CNF を含有したプラスチックを想定すると、上記のリサイクルラインでは選別は難しい。そのため、重量や目視による選別が難しいプラスチック類に有効とされる近赤外選別装置を用いた選別方法について検討することとした。近赤外光（波長：800-2500 nm）は、エネルギーレベルが低い電磁波であることから、対象物を簡便かつ非破壊に計測することが可能であり、CNF に加え、樹脂成分の違いについての選別もより正確に行うことが可能となる。本項目では既存の近赤外選別装置を用い、選別手法、選別精度の実証を行った。

### 2.1.1.2.3 試験方法

「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」において作製した 6 種類のフィルム、PP、PP-CNF 5%、PP-CNF 10%、PP-CNF 20%、PS、PE-LLD を 50 mm×100 mm および 100 mm×210 mm に裁断し、ダイオーエンジニアリング社協力の元、同社製の近赤外選別装置、エアロソーダ IR（図 2-5）による選別を行った。



図 2-5 選別装置写真（エアロソーダ IR）

エアロソーダ IR は包装材等の軟質系プラスチックの選別に適した装置であり、①選別対象物を貯蔵し、ベルトコンベア上に均一に分散させる振動フィーダー、②搬送中の対象物に近赤外光を照射するハロゲンランプ、③対象物にあたり、反射した近赤外光をセンサーでとらえスペクトル分光し、あらかじめ登録されたスペクトルと照合し、プラスチック材料を高速で識別する識別制御システム、④噴射エアノズルで構成される。あらかじめ CNF 複合材のスペクトルと照合できることから、既存設備として最も適していると判断し、選別テストを実施した。図 2-6 に近赤外選別装置のフロー図を示す。

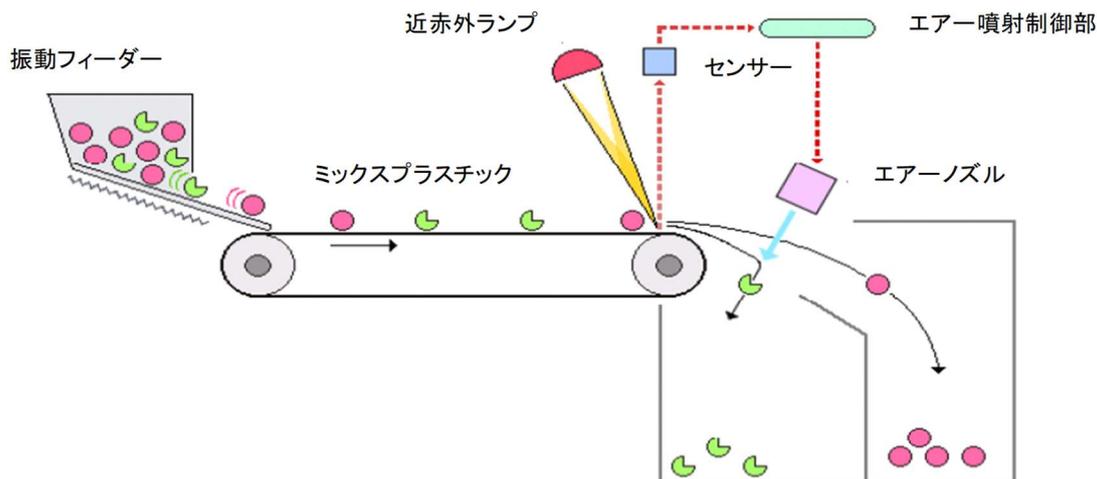


図 2-6 近赤外選別装置のフロー図

#### 2.1.1.2.4 結果

今回使用した 6 種類のサンプルを使用して新たな認識プログラムを作製した。それぞれの識別結果の概要を表 2-3 に示す。

表 2-3 識別テスト結果①（運転画面比率と識別結果）

投入物	運転画面面積比率				エアースプレー側（識別）			
	PP	PP-CNF	PS	PE-LLD	PP	PP-CNF	PS	PE-LLD
① PP	93.64%	6.35%	0.00%	0.00%	○			
② PP-CNF 5%	32.37%	67.62%	0.00%	0.00%		○		
③ PP-CNF 10%	2.97%	97.02%	0.00%	0.00%		○		
④ PP-CNF 20%	0.26%	99.73%	0.00%	0.00%		○		
⑤ PS	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%			○	
⑥ PE-LLD	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%				○

運転画面面積比率とは、識別装置が各サンプルを識別した感度を示しており、CNF 含有率が 5%では、30%程度の誤選別の可能性があった。そのため、確実に CNF 複合材として選別するには、10%以上の CNF 含有率が必要と考えられる。続いて通常の容器包装材を想定したサイズ（100 mm×210 mm）のサンプル各 23 体および検出限界に近い小サイズ（50 mm×100 mm）のサンプル各 70 体を用意し、作成した識別プログラムを用いた実測試験を行った。試験結果の概要を表 2-4 に示す。

表 2-4 識別テスト結果②（各プログラムの識別度とサンプルサイズの影響）

投入物		小サイズ (50×100 mm) (識別個数/前サンプル数)				通常サイズ (100×210 mm) (識別個数/前サンプル数)			
		PP	PP-CNF	PS	PE-LLD	PP	PP-CNF	PS	PE-LLD
①	PP	87%	-	-	-	100%	-	-	-
②	PP-CNF 5%	-	88%	-	-	-	100%	-	-
③	PP-CNF 10%	-	98%	-	-	-	100%	-	-
④	PP-CNF 20%	-	95%	-	-	-	96%	-	-
⑤	PS	-	-	95%	-	-	-	100%	-
⑥	PE-LLD	-	-	-	95%	-	-	-	100%

小サイズサンプルは装置の検出限界に近い場合、80%程度の識別となったサンプルも含まれた。また、通常の容器包装材を想定したサイズのサンプルは、ほぼ 100%の選別精度であった。最後に、PP-CNF の識別プログラムを用いて 6 種類のサンプルの選別を通常の容器包装材を想定したサイズのサンプルによって確認した（表 2-5）。

表 2-5 識別テスト結果③（PP-CNF プログラムによる選別精度）

投入物		PP-CNF 識別プログラム		
		正	誤	選別率
①	PP	18	5	78%
②	PP-CNF 5%	23	0	100%
③	PP-CNF 10%	23	0	100%
④	PP-CNF 20%	23	0	100%
⑤	PS	23	0	100%
⑥	PE-LLD	23	0	100%

PP 単体は、選別率 78%となり、CNF の含有率が低い場合は、ベースとなる樹脂との選別に課題があった。

#### 2.1.1.2.5 まとめ

既存設備による選別精度を検討したところ、CNF と PP の複合材の選別は高い精度で行うことができた。しかし、サンプルサイズや樹脂の種類が同様の場合は、選別に課題があり、確実な選別には 10%の CNF 含有率が必要であった。

### 2.1.1.3 選別精度向上に関する検証

#### 2.1.1.3.1 概要

「2.1.1.2 選別技術の検証」において検証された結果を参考に近赤外分析装置を用い、選別精度向上に関する可能性を調査した。近赤外分光分析により、1%以上の CNF 含有率があれば、選別は可能であった。また、可視—近赤外短波長領域の反射スペクトルを用いることで、CNF を含有するポリプロピレンを 90%以上の精度で選別できるモデルが構築された。

#### 2.1.1.3.2 はじめに

昨年度の実証により、厚さ 2 mm では、CNF 含有率 3.3%以上の PP 複合材の検出が可能であることが示された。しかし、今後排出されるであろう CNF 含有樹脂を用いた容器包装材の廃材は、これよりも CNF 含有率が低いことや、薄いことが想定される。近赤外分光分析では分子振動の倍音や結合音による吸収を観測するが、吸収強度は分子の濃度と光路長の両方に比例するため（Lambert-Beer 則）、測定対象の濃度と厚みは検出能に影響を及ぼす重要なファクターとなる。一方、従来の選別機では近赤外領域の波長を使用して選別を行っているが、CNF が不透明であることを鑑みれば、可視領域、あるいは近赤外の短波長領域の反射スペクトルを用いても選別が行える可能性がある。また、可視—近赤外短波長領域のセンサーは近赤外領域のセンサーに比べてコストが圧倒的に低いため、導入に掛るコストも大幅に削減できる。そこで今回は、低 CNF 含有率のサンプルを用いた検出モデルの検討および可視—近赤外短波長領域を使用した選別モデルの検討を行った。

#### 2.1.1.3.3 試験方法

##### 2.1.1.3.3.1 低 CNF 含有率のサンプルを用いた検出モデルの検討

CNF 充填率 0、1、2、3.3、5、6.5、8、10%の PP と CNF の複合材（PP-CNF）を準備した。試験体寸法は幅 10 mm、長さ 58 mm、厚さ 2 mm である。なお、試験体数は各条件につき 3 体、計 24 体とした。図 2-7 に試験体の外観を示す。波長分散型紫外可視近赤外分光光度計（UV-3600Plus、島津製作所）を用いて試験体の拡散反射スペクトルを測定した。測定波長は 1000～2200 nm、測定波長間隔は 2 nm とし、1 試験体につき 3 回測定し平均スペクトルを算出した。得られた拡散反射スペクトルを標準正規化（Standard normal variate: SNV）した後、主成分分析（Principal component analysis: PCA）および PLS 回帰分析に供した。PLS 回帰分析では前処理として Mean-Centering を行い、最大ファクター数を 3 に限定して Leave-one-out full cross validation により最適ファクター数を決定した。データ解析には Matlab R2016a（Mathworks.Inc）を使用した。

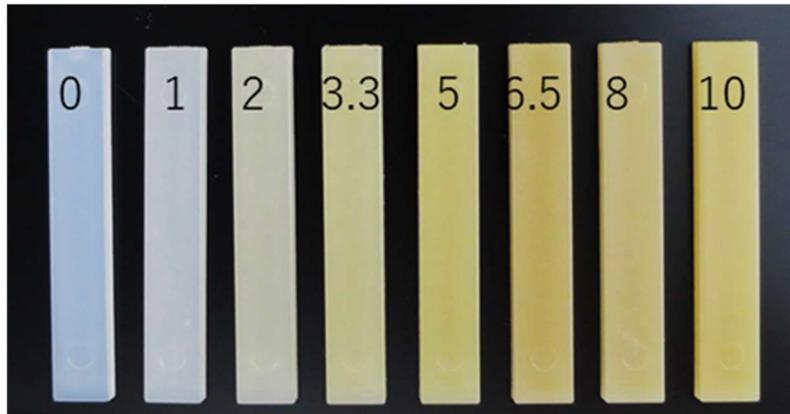


図 2-7 試験体の外観。試験体上の数値は CNF 含有率 (%) を示す

### 2.1.1.3.3.2 可視—近赤外短波長領域を使用した選別モデルの検討

「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」において作製した 6 種類のフィルムを 10×50 mm に裁断した試験体をモデル構築用試料として用意し、可視近赤外ハイパースペクトルカメラ (NH-1、エバジャパン) を用いてハイパースペクトルイメージを取得した。測定波長は 400 ~1000 nm、測定波長間隔は 5 nm である。試験体と同条件で撮影した硫酸バリウムの画像と、レンズ前面をキャップで覆って撮影した暗電流の画像を用いて、各ピクセルの値を反射率に補正した。図 2-8 にモデル構築用試料の反射画像を示す。得られた分光画像から、各試料の中央付近 200 pixel 分の反射スペクトルを取り出し、教師スペクトルとした。これを用いて部分最小二乗回帰選別法 (PLS-DA) による選別モデルを作製した。なお、前処理として Mean-Centering を行い、最大ファクター数を 6 に限定して Leave-one-out full cross validation (LOOCV) により最適ファクター数を決定するとともに混同行列を作成し、選別精度を検証した。データ解析には Matlab R2016a (Mathworks.Inc) を使用した。

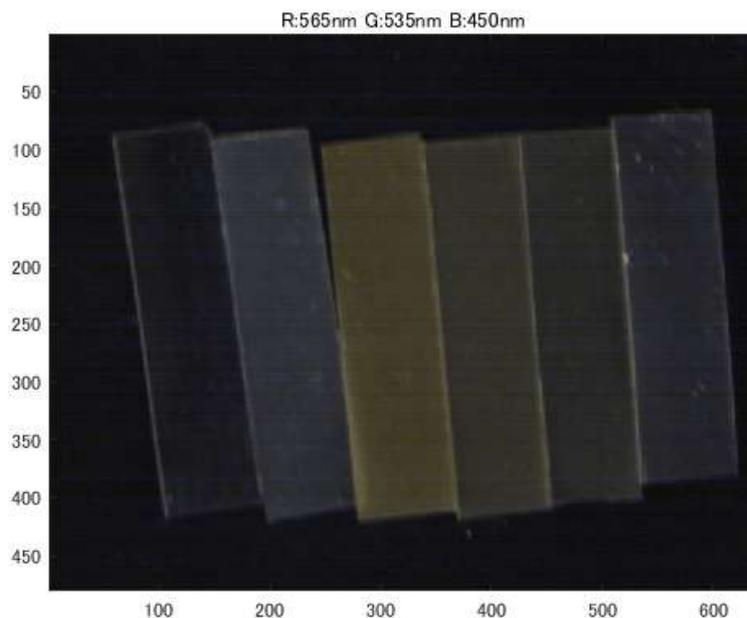


図 2-8 モデル構築用試料の反射画像

### 2.1.1.3.4 結果

#### 2.1.1.3.4.1 低 CNF 含有率のサンプルを用いた検出モデルの検討

図 2-9 に PP-CNF の近赤外拡散反射スペクトル (SNV 処理後) を示す。すべての試験体に見られる 1200 nm の吸収ピークは PP の CH<sub>3</sub> による吸収である (C-H 伸縮振動の第 2 倍音)。1700-1730 nm 付近の最も大きな吸収は、PP の CH<sub>3</sub> および CH<sub>2</sub> による吸収が重畳していると考えられる (ともに CH 伸縮振動の第 1 倍音)。また、1386 nm に認められる比較的大きなピークも PP の CH<sub>3</sub> による吸収である (C-H 伸縮振動と C-H 変角振動の結合音)。また、PP-CNF では 1926 nm に微小な吸収が認められた。これは水分子の非対称伸縮振動と変角振動の結合音による吸収である。また、PP-CNF には 2110 nm にブロードな吸収帯が認められた。これはセルロースの OH 基変角振動と伸縮振動の結合音による吸収である。1490 nm のセルロース OH 基の分子間水素結合による吸収は CNF 含有率の増加に伴い増大していることが確認された。以上より CNF 含有率の増加に伴い、総じて PP 由来の吸収ピークは減少し、CNF 由来のピークは増加する傾向が認められた。

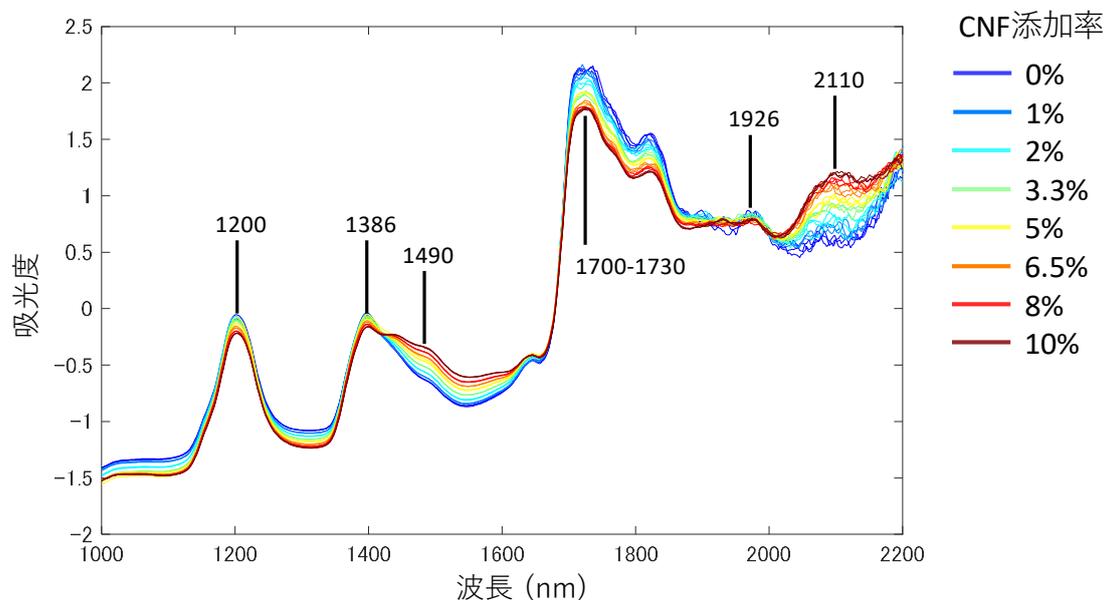


図 2-9 PP-CNF の近赤外拡散反射スペクトル

図 2-10 に主成分分析 (PCA) における第一主成分 (PC1) スコアと CNF 含有率の関係を示す。PCA スコアはスペクトルの各波長における吸光度の線形結合であり、今回のデータでは主に CNF 含有率に伴うスペクトルの変動が抽出されたと考えられる。図 2-10 に示す通り、PC1 スコアと CNF 含有率はほぼ直線関係であることから、線形回帰による CNF 含有率の推定が可能であることが示された。

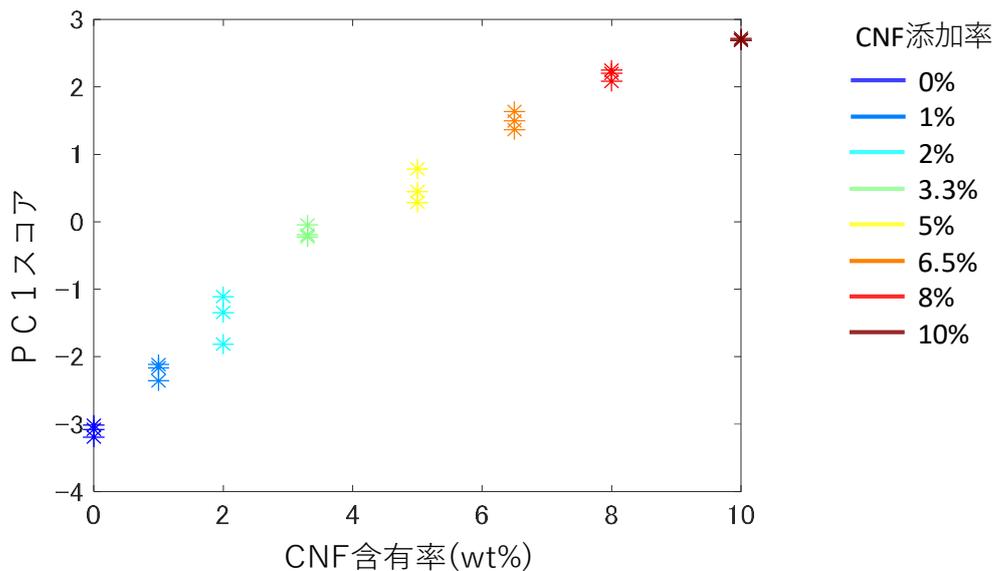


図 2-10 CNF 含有率と PC1 スコアの関係

表 2-6 に PLS 回帰分析の結果を示す。CNF 含有率 1%の PP-CNF での推定誤差は 0.13% と、高い精度で CNF 含有率が推定できることが確認された。

表 2-6 PLS 回帰分析による CNF 含有率の推定精度

LV <sup>*1</sup>	R <sup>2</sup> <sub>val</sub> <sup>*2</sup>	SECV <sup>*3</sup>	RPD <sup>*4</sup>
3	0.999	0.13%	13.3

<sup>\*1</sup>Number of latent variables, <sup>\*2</sup>Determinant coefficient for LOOCV

<sup>\*3</sup>Root mean squared error for LOOCV, <sup>\*4</sup>Ratio of performance to deviation

#### 2.1.1.3.4.2 可視-近赤外短波長領域を使用した選別モデルの検討

図 2-11 に各材料の反射スペクトルを示す。可視-近赤外の短波長領域には各材料に特徴的な吸収が認められないが、600~700 nm 付近の反射率が種類により異なっている。また、CNF 含有率が高くなるにつれて当該波長領域の反射率が上昇しているのは CNF の存在によりフィルム内での散乱が増したためと考えられる。

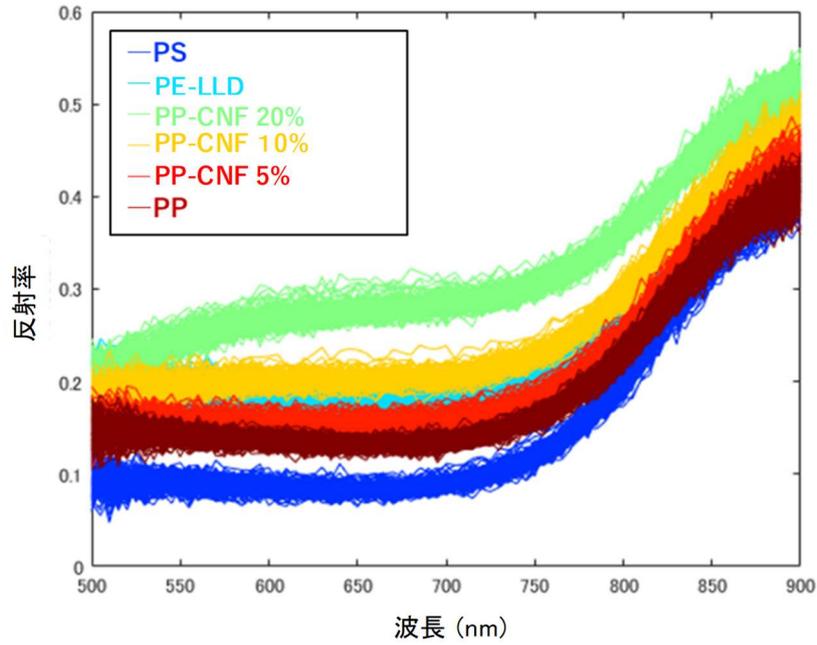


図 2-11 各材料の反射スペクトル

このスペクトルの主成分スコアプロットを図2-12に示す。PC1スコアと第二主成分(PC2)スコアで、概ねすべてのサンプルが分離可能であることが示された。ただし、PC1スコアにおいて、CNF含有率5%と10%のPP-CNFの間にPE-LLDが分布している。これはPE-LLDが光を散乱するために600~700nmの反射率が高かったためと考えられる。

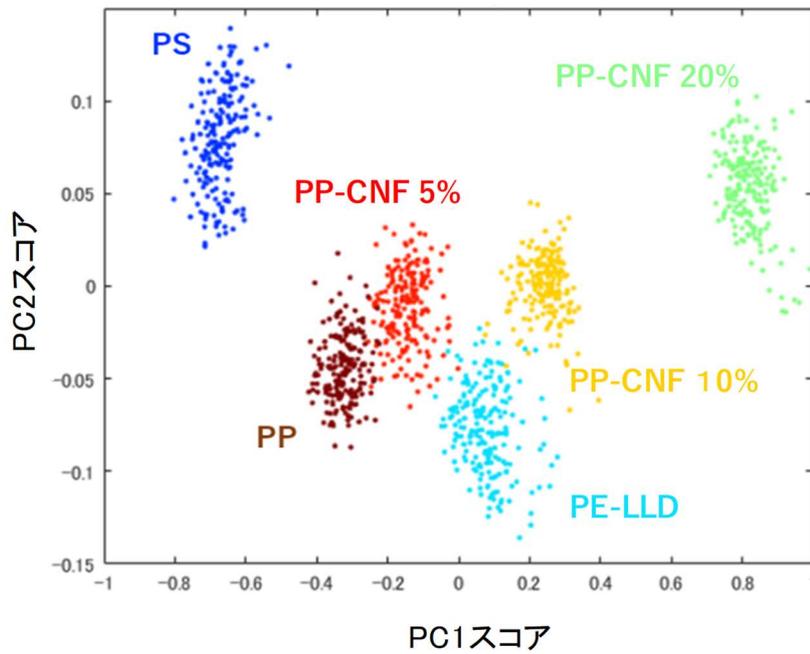


図 2-12 各材料スペクトルの主成分スコアプロット

表 2-7 に PLS-DA による選別精度を示す。なお、LOOCV により最適主成分数は 4 と決定された。精度（予測されたクラスのサンプルのうち実際のクラスと一致する割合）と、感度（実際のクラスのうち正しく選別された割合）はすべての樹脂で 90%以上であった。誤選別の大半は PE-LLD と CNF 含有率が 5、10%の PP-CNF の間で生じていたが、これは主成分スコアプロットからもわかる通り、散乱による影響と考えられる。全体としての正答率は 97.2%と、可視—近赤外の短波長領域を用いても、非常に高い精度で選別が可能となった。

表 2-7 PLS-DA による選別精度

		実際のクラス						精度 (%)
		PS	PE-LLD	PP	PP-CNF (CNF5%)	PP-CNF (CNF10%)	PP-CNF (CNF20%)	
予測 クラス	PS	200	0	0	0	0	0	100
	PE-LLD	0	181	0	7	5	0	93.8
	PP	0	0	197	0	0	0	100
	PP-CNF 5%	0	13	3	193	0	0	92.3
	PP-CNF 10%	0	6	0	0	195	0	97.0
	PP-CNF 20%	0	0	0	0	0	200	100
	感度 (%)	100	90.5	98.5	96.5	97.5	100	97.2

#### 2.1.1.3.5 まとめ

近赤外分析装置および可視—近赤外分光画像計測により、選別精度向上に関する可能性を調査した。結果、近赤外分光分析を用いて、1%以上の CNF 含有率の PP 複合材において、精度 0.02%で推定が可能なモデルを得た。また、可視—近赤外短波長領域の反射スペクトルを用いることで、複数のプラスチックの中から CNF を含有する PP 複合材を 90%以上の精度で選別できるモデルが構築された。

## 2.1.2 CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルの作製

既存の容器包装リサイクル樹脂の成分分析結果と「2.1.1.2 選別技術の検証」の結果から CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルを作製した。

成分分析および物性試験の結果から、「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」において作製した CNF10%を含有したポリプロピレンとの複合材（CNF 複合材モデル）、ポリエチレンリッチの容器包装リサイクル樹脂およびポリスチレンを複合したモデル樹脂が最も優れていると判断し、以降の検証に用いることとした。以下に詳細を示す。

### 2.1.2.1 既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査

#### 2.1.2.1.1 概要

CNF 複合廃材を含有した容器包装リサイクル樹脂の樹脂モデルを作製するにあたり既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査、原材料のバラツキ調査を行った。

容器包装リサイクル樹脂 44 ロット分の主成分を調べた結果、ポリプロピレン（PP）リッチの容器包装リサイクル樹脂は PP 65%、ポリエチレン（PE）27%、ポリスチレン（PS）8%の割合で混合されており、PE リッチの容器包装リサイクル樹脂は PP 11%、PE 86%、PS 3%の割合で混合されていることが分かった。

#### 2.1.2.1.2 はじめに

本事業では CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルを作製するが、これには現在の容器包装リサイクル樹脂の成分を確認する必要がある。本項では、PP リッチ、PE リッチの容器包装リサイクル樹脂各々の主成分量の分析を行い、そのバラツキを確認した。

#### 2.1.2.1.3 方法

サンプルにはエコフィール社製の PP リッチ容器包装リサイクル樹脂（Re-PP）および PE リッチ容器包装リサイクル樹脂（Re-PE）を供試材料とした。なお、バラツキを考慮するため、製造ロットの異なる各ペレットを 44 体用意した。分析は「平成 29 年度プラスチック製容器包装再生処理ガイドライン」に定められた主成分測定および主要 4 樹脂成分の不純物の分析を含めた詳細な分析の 2 段階に分けて H-NMR 法により実施した。図 2-13 に供試材料の写真を示す。



図 2-13 供試材料 (左 : Re-PP、右 : Re-PE)

#### 2.1.2.1.4 結果

表 2-8 に供試材料の成分分析結果を示し、図 2-14 に成分分析結果の平均値と標準偏差を整理した。Re-PP の主成分平均値は PP 65%、PE 27%、PS 8%となった。バラツキの指標として示した標準偏差、最大値および最小値を見ると、標準偏差は PP 5%、PE 3%、PS 4%となり、最大値と最小値の差は PP 22%、PE 15%、PS 22%となった。樹脂成分の選別には手選別、浮上選別、遠心選別といった手法が用いられ、浮上選別により、水より軽量の PP は選別可能である。しかし、容器包装材は複数のプラスチックのラミネート構造をもつ材やポリマーアロイも多く用いられるため、完全な選別は現在の技術では不可能である。また、原料となる家庭からの容器包装プラスチックの廃材の種類は一定ではないため、ロットごとにある程度のバラツキも見られる。そのような現状があるため、ロットごとの Re-PP の主成分はバラツキが大きかったが、PP の割合が最も少ないロットであった PP 49%における PE と PS の割合はそれぞれ 26%と 25%となっており、PP が他の主成分の倍程度の成分比であったことから、Re-PP は PP リッチの容器包装リサイクル樹脂であることは確かであった。一方、Re-PE の主成分平均値は PP 11%、PE 86%、PS 3%となり、標準偏差は PP 5%、PE 3%、PS 4%となり、最大値と最小値の差は PP 2%、PE 4%、PS 1%となった。Re-PP と比較し、Re-PE はバラツキが小さかった。これは使用された原料の中に PE 単体のプラスチック包装袋などが多く含まれていることが原因と考えられる。

表 2-8 供試材料の成分分析結果

ロットNo.	Re-PP				Re-PE			
	PP	PE	PS	PET	PP	PE	PS	PET
平均値	65	27	8	0	11	86	3	0
標準偏差	5	3	4	0	2	4	1	0
最大値	72	37	25	0	18	92	6	0
最小値	49	22	3	0	7	77	1	0

(%)

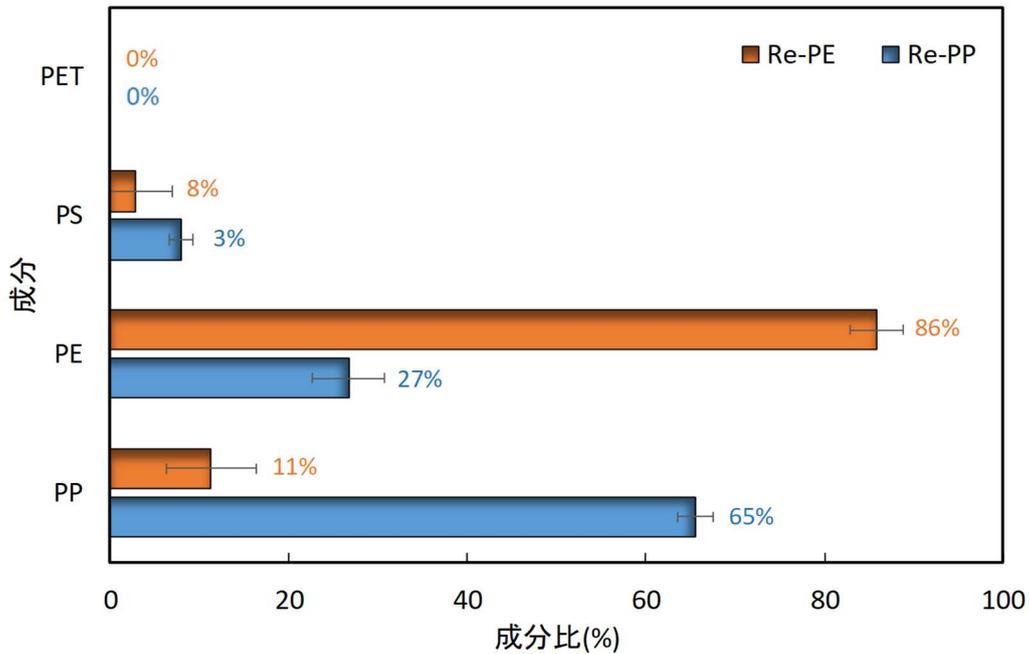


図 2-14 成分分析結果概要

#### 2.1.2.1.5 まとめ

CNF 複合廃材を含有した容器包装リサイクル樹脂モデルを作製するにあたり既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査、原材料のバラツキ調査を行った。Re-PP は PP 65%、PE 27%、PS 8%の割合で混合されており、Re-PE は PP 11%、PE 86%、PS 3%の割合で混合されていることが分かった。容器包装リサイクル樹脂を使用した製品を製造する際には、ロット間のバラツキからくる各種物性のバラツキをいかに制御するか、検討することが重要である。

## 2.1.2.2 容器包装リサイクル樹脂モデルの作製

### 2.1.2.2.1 概要

「2.1.1.2 選別技術の検証」、「2.1.2.1 既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査」で得られたデータをもとに CNF 複合廃材を含有した複数の容器包装リサイクル樹脂複合材を作製し、その物性を評価した。

「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」で作製した CNF 含有率 10%のポリプロピレン複合材（CNF 複合材モデル）、ポリエチレンリッチの容器包装リサイクル樹脂、ポリスチレンから構成された樹脂モデルが最も優れた物性を持った。これを CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルとした。

### 2.1.2.2.2 はじめに

本事業では「CNF 複合廃材を含有した容器包装リサイクル樹脂」のリサイクルモデル評価を行うが、現状 CNF を添加した容器包装材が製品化されたとの情報は確認できておらず、CNF 複合廃材を含有した容器包装リサイクル樹脂の入手は不可能である。そのため、「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」にて作製した容器包装材を想定した CNF 複合材モデルを廃材として、実際の容器包装リサイクル樹脂と同様の組成になる CNF 含有容器包装リサイクル樹脂モデルを作製することとした。ここでは CNF 含有率、複合する樹脂の種類を変化させた複合材の物性を評価した。

### 2.1.2.2.3 試験方法

#### 2.1.2.2.3.1 サンプル作製

「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」にて最適と判断した CNF10%含有 PP 複合材（PP-CNF 10%）、そのベースとなった PP、PE-LLD、PS および前項「2.1.2.1 既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査」で用いた Re-PE を原材料とした。

成分構成は「2.1.2.1 既存の容器包装リサイクル樹脂の成分調査」で取得した Re-PP の平均成分比（PP65%、PE27%、PS8%）と同等になるように原材料を配合した。モデル樹脂は CNF 添加量を 3 条件、PE 成分として PE-LLD を使用した条件と Re-PE を使用した条件の 2 条件、計 6 条件を設定した。これらの結果を念頭に置くと、各樹脂の配合比は表 2-9 のようになる。

表 2-9 サンプル名称とモデル樹脂配合比

種類	重量比 (%)					CNF含有率 (%)
	PP	PP-CNF 10%	Re-PE	PE-LLD	PS	
Re10	—	62.0	31.0	—	7.0	6.2
Re05	31.0	31.0	31.0	—	7.0	3.1
Re00	62.0	—	31.0	—	7.0	0.0
VRe10	—	65.4	—	26.7	7.9	6.5
VRe05	32.7	32.7	—	26.7	7.9	3.3
VRe00	65.4	—	—	26.7	7.9	0.0

既定の配合比で樹脂を混合し、2軸ベント式押出成形機（AS30 m/m、ナカタニ機械）にて押出成形を行い、ペレット状のコンパウンドを得た。混練条件は、ダイス側より設定温度 190 degree C/ 190 degree C/ 200 degree C/ 215 degree C/200 degree C/ 165 degree C、スクリー回転数 85 rpm とし、その際の処理量は 5-9 kg/h であった。作製したコンパウンドを 80 degree C に設定した強制対流定温乾燥器にて 8 時間以上乾燥した後、小型射出成形機（BABYPLAST、Rambaldi）を用いて、短冊形試験片、ダンベル形試験片に成形した。短冊形試験片は厚さ 3 mm、幅 10 mm、長さ 60 mm とし、成形温度 200 degree C、射出圧 50 bar にて作製した。ダンベル形試験片は、平行部の寸法を厚さ 2 mm、幅 5 mm、長さ 15 mm、つかみ部幅 12 mm、全長 60 mm とし、成形温度 200 degree C、射出圧 50 bar にて作製した。サンプル作製に使用した成形機、サンプルの一例を図 2-15 に示す。

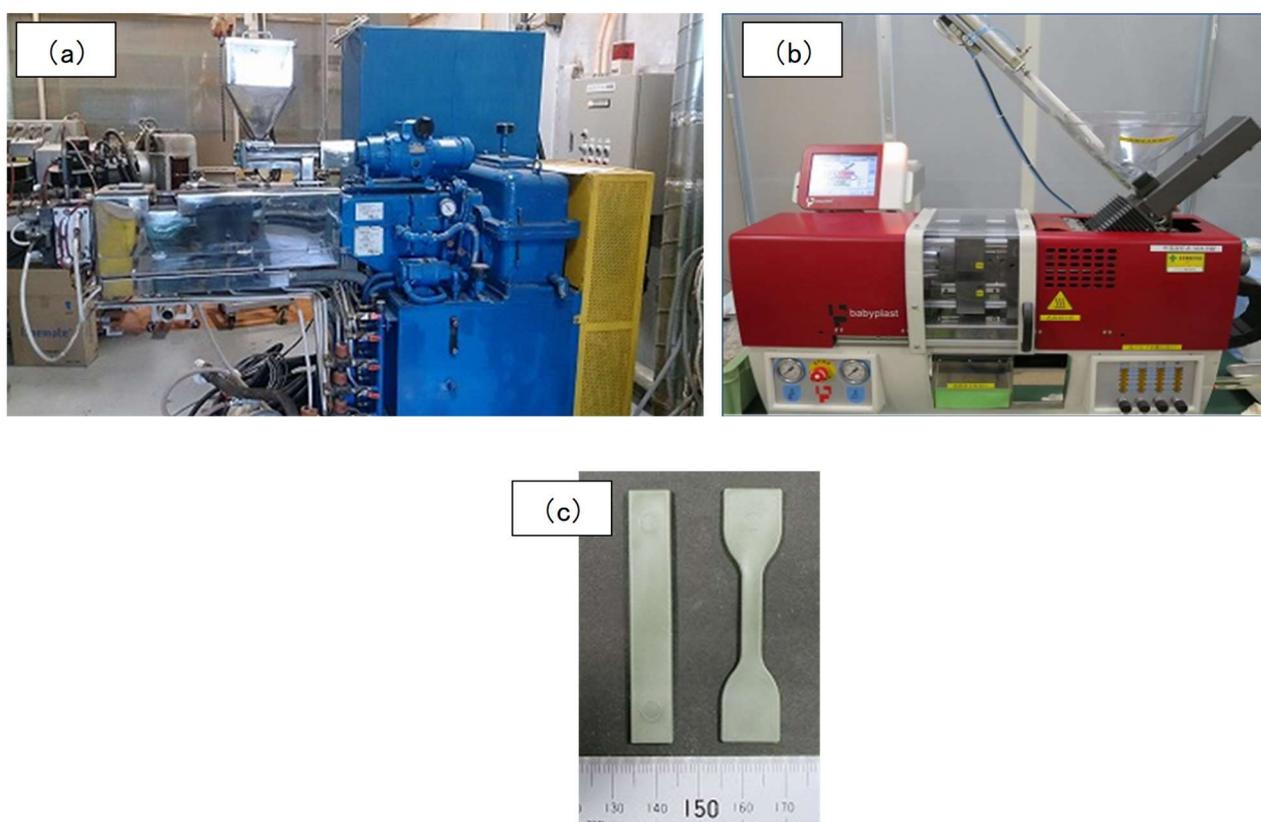


図 2-15 試験機およびサンプル概要（a：押出機、b：小型射出成形機、c：サンプル一例）

#### 2.1.2.2.3.2 物性評価

ダンベル形試験片を引張試験に、短冊形試験片を曲げ、衝撃試験に用いた。引張試験は万能試験機（Tensiron RTG-1250、エー・アンド・デイ）を用いて行い、引張強度、引張弾性率を算出した。この時、試験速度は 20 mm/min とした。曲げ試験にも同万能試験機を用い、曲げ強度、曲げ弾性率を算出した。曲げ試験の条件は、試験速度 2 mm/min、スパン 48 mm とし、中央集中荷重方式で行った。衝撃試験は容量 2 J のハンマーで打撃するノッチなしアイゾット衝撃試験とした。試験にはアイゾット衝撃試験機（U-F インパクトテスター、上島製作所）を用い、アイゾット衝撃強度を算出した。

### 2.1.2.2.4 結果

樹脂モデルの物性を表 2-10 および図 2-16～21 に示す。

表 2-10 CNF 含有容器包装リサイクル樹脂モデルの物性

種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )		曲げ強度(MPa)		曲げ弾性率(GPa)		引張強度(MPa)		引張弾性率(GPa)		衝撃強度(kJ/m <sup>2</sup> )	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
Re00	0.92	0.01	39.13	0.72	1.24	0.02	30.36	0.55	1.49	0.07	22.23	1.16
Re05	0.92	0.01	39.69	0.77	1.33	0.04	29.78	0.49	1.40	0.03	26.91	2.20
Re10	0.96	0.02	42.28	0.03	1.48	0.05	29.00	0.17	1.33	0.03	24.50	0.40
VRe00	0.90	0.01	35.60	0.51	1.15	0.02	28.16	0.61	1.38	0.05	54.03	5.58
VRe05	0.92	0.01	38.64	0.52	1.28	0.02	29.16	0.62	1.34	0.02	36.89	2.12
VRe10	0.93	0.01	38.12	0.35	1.29	0.02	28.15	0.22	1.23	0.01	31.12	1.70

\* サンプル名称は表2-9に準ずる。

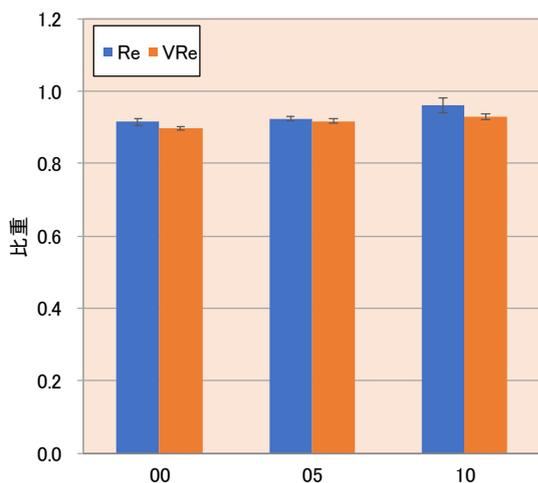


図 2-16 モデル樹脂の比重

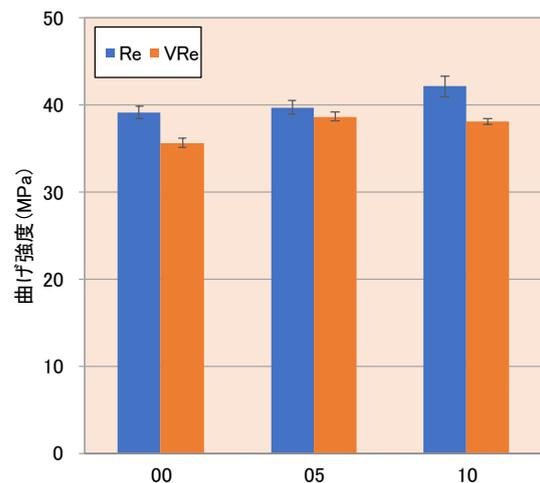


図 2-17 モデル樹脂の曲げ強度

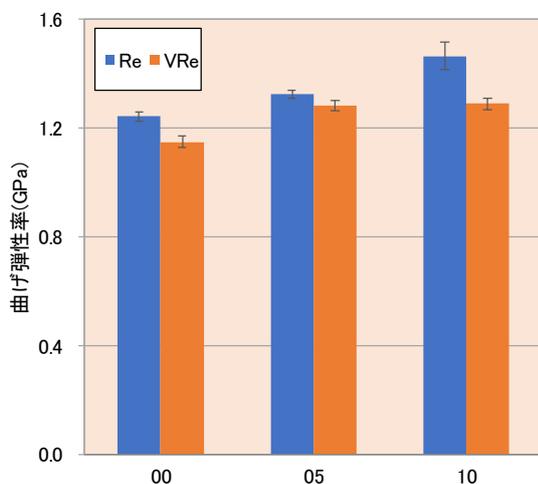


図 2-18 モデル樹脂の曲げ弾性率

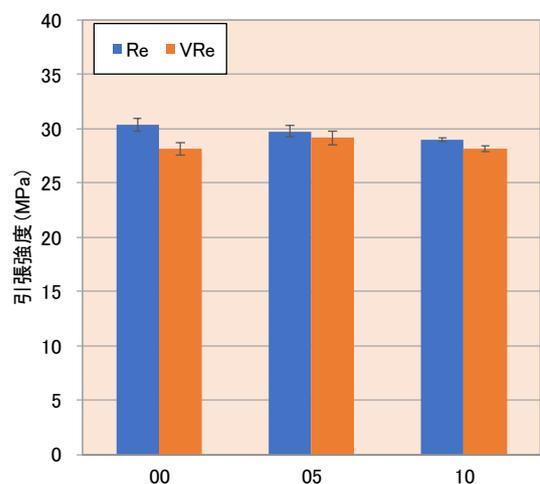


図 2-19 モデル樹脂の引張強度

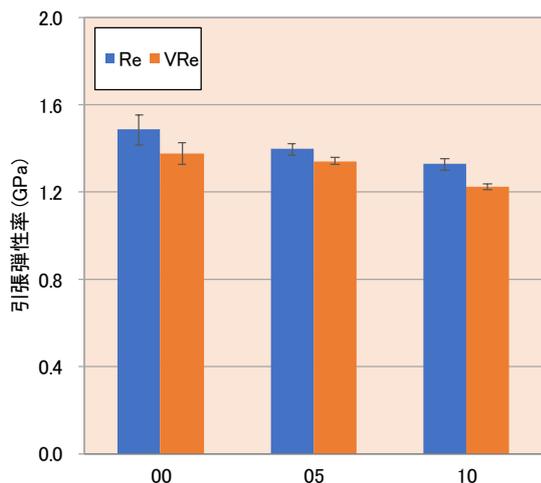


図 2-20 モデル樹脂の引張弾性率

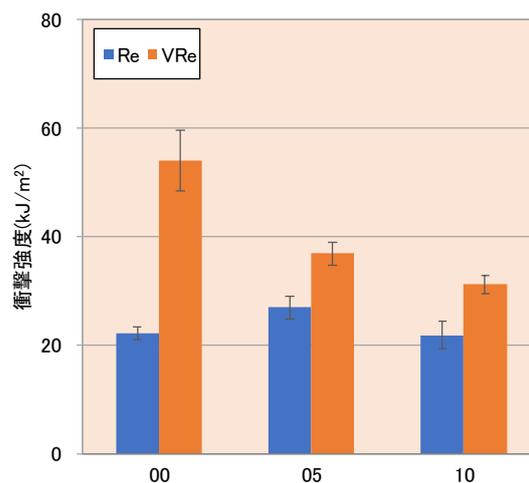


図 2-21 モデル樹脂の衝撃強度

図 2-16～21 の横軸はサンプル名称の後ろ 2 文字である。比重、曲げ特性、引張特性は CNF を含むことで向上し、CNF の含有率が増えるほど向上した。また、曲げ特性、引張特性ともに容器包装リサイクル樹脂を含む Re のほうがバージン樹脂を用いた VRe よりも高い値を示した。容器包装樹脂の再生コンパウンドは不純物を含むため、実際の容器包装リサイクル樹脂の成分を含む方が、物性低下側に働くと考えていたが、必ずしも低下しないことが分かった。衝撃強度については VRe では CNF の含有率が増えることで、明確な強度低下が見られたが、Re では CNF 含有率の変化による明確な差はみられなかった。

曲げ、引張強度が高く、実際の容器包装リサイクル樹脂の成分を含むことから、Re10 が樹脂モデルとして最も優れていると判断する。

#### 2.1.2.2.5 まとめ

CNF の含有率および樹脂の種類を変化させたサンプル 6 種類を作製し、その物性を評価した。結果、物性が高く、実際の容器包装リサイクル樹脂の成分を含む「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」で作製した CNF 含有率 10% の PP 複合材モデル、PE リッチの容器包装リサイクル樹脂、PS から構成された樹脂モデル (Re10) が最も優れていると判断し、これを CNF 含有容器包装リサイクル樹脂モデルとし、以降の検討に用いることとした。

### 2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立

「2.1.2 CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルの作製」で作製したモデル廃材を原料とし、リアクティブシステムを活用したフィラー充填（タルク、木粉等）マスターバッチの量産技術を確立した。

フィラー、CNF 複合材含有容器包装リサイクル樹脂モデル、無水マレイン酸、有機過酸化物を一括で混練し、CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルの酸変性処理を行い、同時にフィラー充填マスターバッチを得るリアクティブ処理において、無水マレイン酸と有機過酸化物の添加量、製造処理条件を検討した。検討条件内の最適レシピを用い、ポリプロピレンによりフィラー量 20%に希釈した複合材は、既存品のタルク 20%配合ポリプロピレンと同等以上の曲げ強度（40 MPa）、引張強度（25 MPa）を持った。その後、最適レシピを用いて、量産設備によるマスターバッチ化を行い、生産量 150 kg/h となる生産条件を確立した。以下に詳細を記す。

#### 2.1.3.1 酸変性樹脂化最適レシピの確立

##### 2.1.3.1.1 概要

「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」「2.1.2.2 容器包装リサイクル樹脂モデルの作製」で作製した CNF 含有容器包装リサイクル樹脂モデルを原料とし、リアクティブシステムを活用したフィラー充填マスターバッチの酸変性樹脂化レシピを検討し、曲げ、引張強度を最大にする最適レシピを確立した。

ここではフィラーとして木粉とタルクを使用した。フィラーに木粉を用いた際の酸変性樹脂化適合条件は、無水マレイン酸を 0.4 phr、有機過酸化物を 0.1 phr 添加した条件であり、タルクは、無水マレイン酸を 0.5 phr、有機過酸化物を 0.25 phr 添加した条件であった。各フィラー充填マスターバッチをポリプロピレンにてフィラー充填率 20%に希釈したサンプルは、既存品のタルク 20%配合ポリプロピレンと同等以上の曲げ強度（40 MPa）以上且つ、引張強度（25 MPa）以上を達成した。

##### 2.1.3.1.2 はじめに

一般的なフィラー充填プラスチックではマトリックス樹脂とフィラー間の界面接着性および分散性向上による基礎物性向上を目指し、酸変性樹脂が配合される。リアクティブシステムでは、フィラーと樹脂との熔融混合と酸変性処理を同時に行うことで、酸変性樹脂を配合した際と同等の効果を得ることを目指す。反応機構を図 2-22、23 に示す。

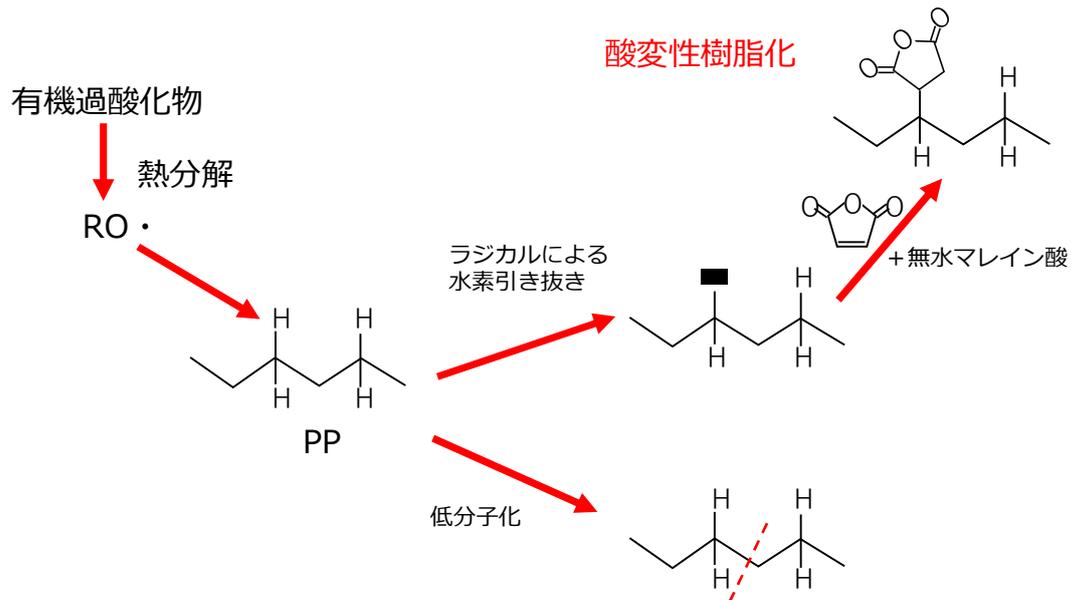


図 2-22 樹脂と無水マレイン酸のグラフト反応機構

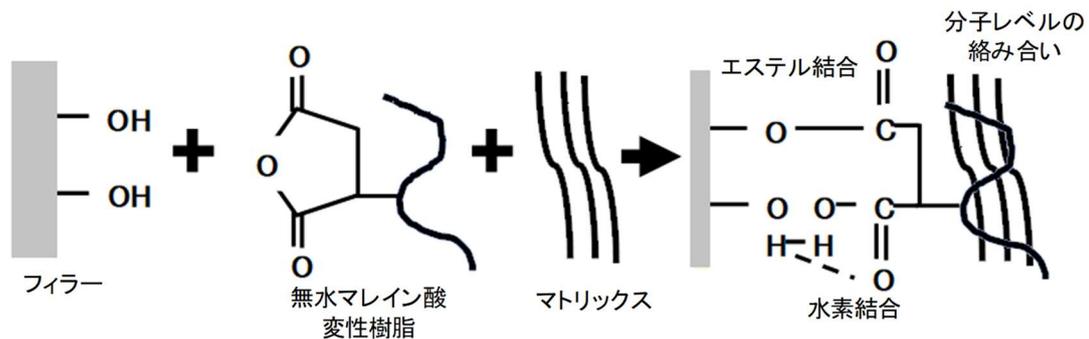


図 2-23 酸変性樹脂とフィラー（木粉）の反応機構

昨年度の事業によって、PP ベースの CNF 複合廃材モデルを含有した高濃度フィラー含有プラスチック複合材（マスターバッチ、MB）に対するリアクティブシステムの有用性は確かめられている。また、平成 27-29 年にかけて行われた環境研究総合推進費研究テーマ「容器リサイクル樹脂特性を利用した酸変性樹脂の開発」（3K 153010）において、容器包装リサイクル樹脂を無水マレイン酸（MA）と有機過酸化物（OP）により熔融混合することで作製した酸変性樹脂をフィラー充填プラスチックに添加することで、物性向上が見られるとの報告があった。この結果は、容器包装リサイクル樹脂に対しても、リアクティブ処理が有効になる可能性を示している。そこで今年度の事業では、CNF を含有した複合材が容器包装リサイクル樹脂に用いられた際、そのアップデート型リサイクル用途開発のため、CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂の MB 化において、リアクティブ処理の有用性を示すことを目的とした（図 2-24）。



図 2-24 本年度のリアクティブプロセス概要図

本年度はタルクと木粉の2種類をフィラーとしたMBに、再生材プラスチックを添加することで、製品化の検討を行う。その前段階として、CNF複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂にリアクティブ処理を行った際の最適なレシピを検討する必要がある。本項ではまずラボ設備による酸変性樹脂化最適レシピの検討を行い、その後量産設備を想定した中規模生産設備によるMBの試作、検討を行った。

### 2.1.3.1.3 ラボ設備検討

#### 2.1.3.1.3.1 サンプル作製手順と試験条件

原料として、「2.1.2.2 容器包装リサイクル樹脂モデルの作製」で作製したCNF複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデル (Re10)、タルク (SSS、日本タルク)、もしくは木粉 (C100、レッテンマイヤー)、MA (日本触媒) および OP (カヤヘキサ AD-40C、化薬ヌーリオン) を用いた。タルクおよび木粉 70% に対し、Re10 を 30% 加えてラボプラストミル (10M100、東洋精機製作所) にて MB を作製した。その後、PP (J107G、レッテンマイヤー) を使用してタルクおよび木粉を 20% のコンパウンドへ希釈し、小型射出成形機 (BABYPLAST 6/10P、Rambaldi) にてダンベル形、短冊形試験体に加工した。使用した試験機の写真を図 2-25 に示す。



図 2-25 成形に用いたラボ設備（左：ラボプラストミル、右：射出成形機）

MB 化、コンパウンド化は処理温度 190 degree C、射出成形条件は 200 degree C とした。サンプル作製の流れを表 2-11 に示す。

表 2-11 試験体作製の流れ

マスターバッチ作製手順	コンパウンド作製手順
CNF複合廃材含有容器包装 リサイクル樹脂モデル 投入	PP 投入
↓ 3分間混練	↓ 3分間混練
フィラー 投入	マスターバッチ 投入
↓ 10分間混練	↓ 10分間混練
無水マレイン酸 投入	取り出し
↓ 1分間混練	<b>射出成形手順</b>
有機過酸化物 投入	コンパウンド 投入
↓ 10分間混練	↓ 射出圧25-50 bar
取り出し	試験体 成形

MA と OP の添加率を 0~4.0 phr に変化させ、MA 添加量の影響、OP 添加量の影響、MA と OP の割合の影響について、各種評価を行った。サンプル名と検討した条件を表 2-12 に示す。

表 2-12 サンプル No.と無水マレイン酸と有機過酸化物の配合条件 (左：タルク、右：木粉)

No.	MA (phr)	OP (phr)	MA/OP	No.	MA (phr)	OP (phr)	MA/OP
TPC-1	0	0	-	WPC-1	0	0	-
TPC-2	0.4	0.10	4.0	WPC-2	0.4	0.10	4.0
TPC-3	0.5	2.00	0.3	WPC-3	0.5	2.00	0.3
TPC-4	0.5	1.00	0.5	WPC-4	0.5	1.00	0.5
TPC-5	0.5	0.50	1.0	WPC-5	0.5	0.50	1.0
TPC-6	0.5	0.25	2.0	WPC-6	0.5	0.25	2.0
TPC-7	0.8	0.10	8.0	WPC-7	0.8	0.10	8.0
TPC-8	1.0	2.00	0.5	WPC-8	1.0	2.00	0.5
TPC-9	1.0	1.00	1.0	WPC-9	1.0	1.00	1.0
TPC-10	1.0	0.50	2.0	WPC-10	1.0	0.50	2.0
TPC-11	1.0	0.25	4.0	WPC-11	1.0	0.25	4.0
TPC-12	2.0	4.00	0.5	WPC-12	2.0	4.00	0.5
TPC-13	2.0	3.00	0.7	WPC-13	2.0	3.00	0.7
TPC-14	2.0	2.00	0.7	WPC-14	2.0	2.00	0.7
TPC-15	2.0	1.00	2.0	WPC-15	2.0	1.00	2.0
TPC-16	2.0	0.50	4.0	WPC-16	2.0	0.50	4.0
TPC-17	2.0	0.25	8.0	WPC-17	2.0	0.25	8.0
TPC-18	3.0	3.00	1.0	WPC-18	3.0	3.00	1.0
TPC-19	3.0	2.00	1.5	WPC-19	3.0	2.00	1.5
TPC-20	4.0	4.00	1.0	WPC-20	4.0	4.00	1.0
TPC-21	4.0	2.00	2.0				

このうち、TPC-1 および WPC-1 は MA と OP によるリアクティブ処理を行っていないコントロール条件である。

#### 2.1.3.1.3.2 評価手法と結果

##### 2.1.3.1.3.2.1 流動性評価

射出成型前の各コンパウンドを試料とし、キャピラリーレオメータ (LCR7000、日本ダイニスコ) にて、ダイ径 2.0 mm、熔融温度 180 degree C、試料投入量 9 g、事前熔融時間 300 s とし、せん断速度 100、150、224、334、500 s<sup>-1</sup> の 5 段階にて熔融粘度を算出した。図 2-26 にせん断速度とせん断粘度の関係を示す。

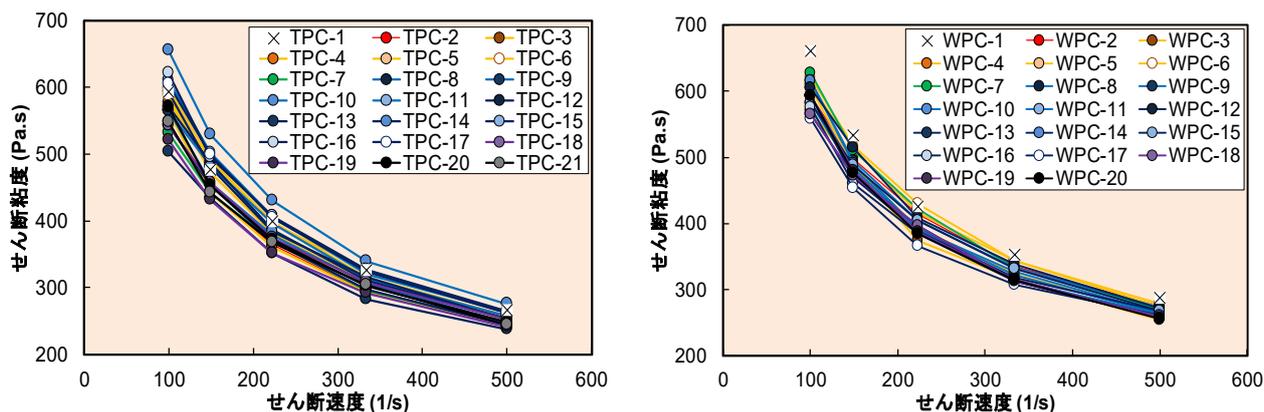


図 2-26 せん断速度とせん断粘度の関係 (左：タルク、右：木粉)

熔融粘度の低下は生産性向上に寄与するため、粘度は低いほうが望ましい。リアクティブ処理を行っていない TPC-1 と比較し、TPC-10 以外の条件はリアクティブ処理を行っても粘度は変化しなかった。よって、リアクティブ処理は生産性に大きく影響しないことが確かめられた。リアクティブ処理を行っていない WPC-1 との比較においても、リアクティブ処理を行った条件のせん断粘度は未処理と同等となり、流動性に影響しないことが確かめられた。

#### 2.1.3.1.3.2.2 機械的特性評価

短冊形試験体を用い、試験速度 2 mm/min、スパン 32 mm の 3 点曲げ試験により、曲げ強度と弾性率を算出した。図 2-27 にタルクを用いたコンパウンドの曲げ特性を示す。

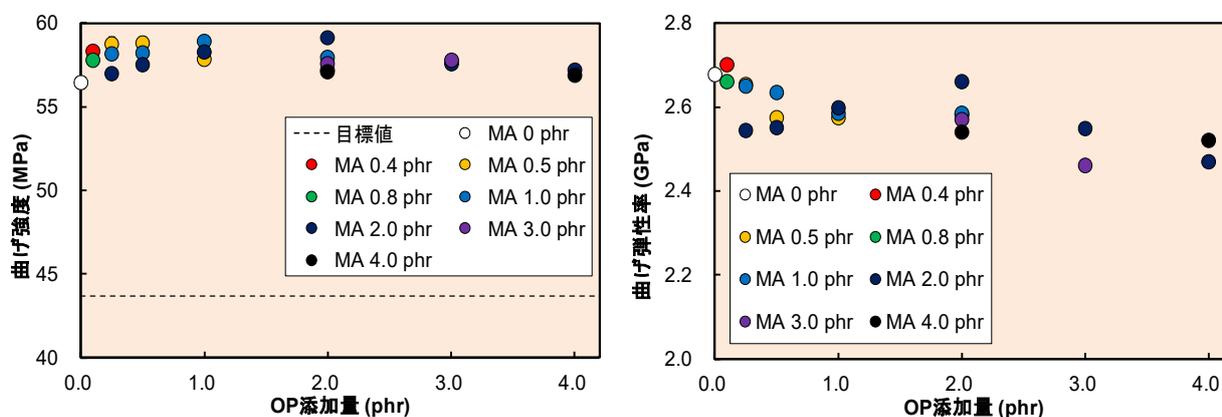


図 2-27 タルクを用いたコンパウンドの曲げ特性 (左：曲げ強度、右：曲げ弾性率)

横軸は OP の添加量とし、プロット色を MA 添加量によって変化させた。点線は目標値とした既存品のタルク 20%配合 PP の曲げ強度である。すべての条件で既存品のタルク 20%配合 PP 以上の曲げ強度となっており、当初目標は達成された。リアクティブ処理を行っていない TPC-1 と比較し、リアクティブ処理を行った条件の曲げ強度はすべて同等以上の値となった。これにより、リアクティブ処理がタルクを用いたコンパウンドの曲げ強度向上に有効な手法であることが示された。リアクティブ処理レシピの影響を見ると、MA 量が増加するほど曲げ強度向上に必要なとされる OP 量は増加する傾向にあった。これは MA 量

の増加に伴い、樹脂モデルの酸変性樹脂化に OP がより必要になったことが要因と考えられる。一方、OP を 3.0 phr 以上添加すると曲げ強度はすべての MA 添加量で低下する傾向にあった。これは OP を多量に加えると、PP の低分子化、PE の架橋等の樹脂への影響が顕著になったためと推察される。そのため、MA および OP 量には最適な添加割合があると推測される。曲げ弾性率を見ると、リアクティブ処理による向上はみられず、多くの条件で微減した。TPC-1 と比較し、曲げ強度が高く、曲げ弾性率の減少が低い条件は、MA 1.0 phr 以下かつ OP 0.25 phr 以下の条件に絞られた。

木粉を使用したコンパウンドの曲げ特性を図 2-28 に示す。

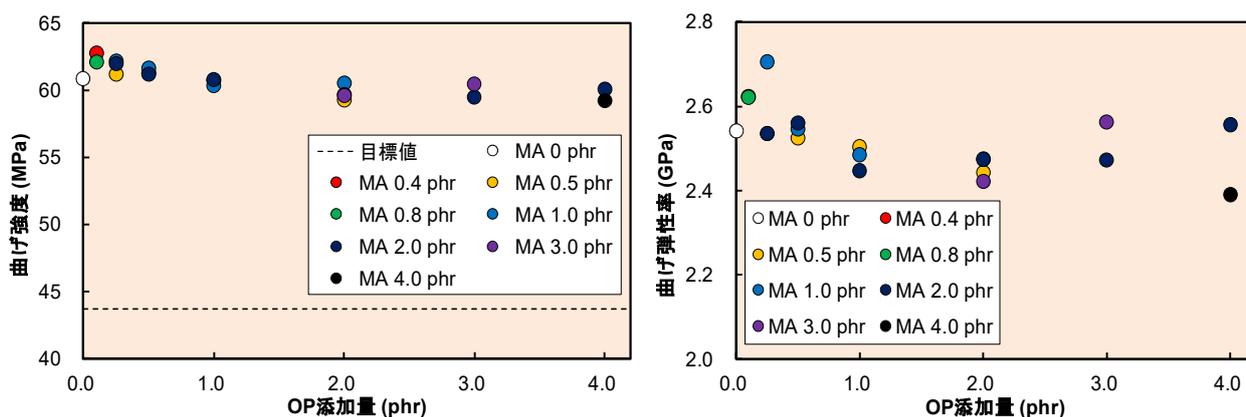


図 2-28 木粉を用いたコンパウンドの曲げ特性 (左：曲げ強度、右：曲げ弾性率)

タルクと同様に木粉を用いたコンパウンドにおいても既存品のタルク 20%配合 PP と比較し、すべての条件で高い曲げ強度を示し、当初目標は達成された。リアクティブ処理を行っていない WPC-1 と比較し、リアクティブ処理を行った条件の曲げ強度は OP の添加量が 1.0 phr を超えた段階で、向上しなくなった。これはタルクとは異なる傾向であり、フィラーの種類によりリアクティブ処理の影響は変化することが示された。曲げ弾性率についても曲げ強度と同様に MA、OP 量ともに少ない時に高い値となる傾向にあった。曲げ強度、曲げ弾性率ともに WPC-1 と同等以上となったのは、OP 0.5 phr 以下の条件であった。

続いて、ダンベル形試験体を用いて、試験速度 20 mm/min、標点間距離 30 mm で引張試験を行い、引張強度と弾性率を算出した。図 2-29 にタルクを用いたコンパウンドの引張特性を示す。

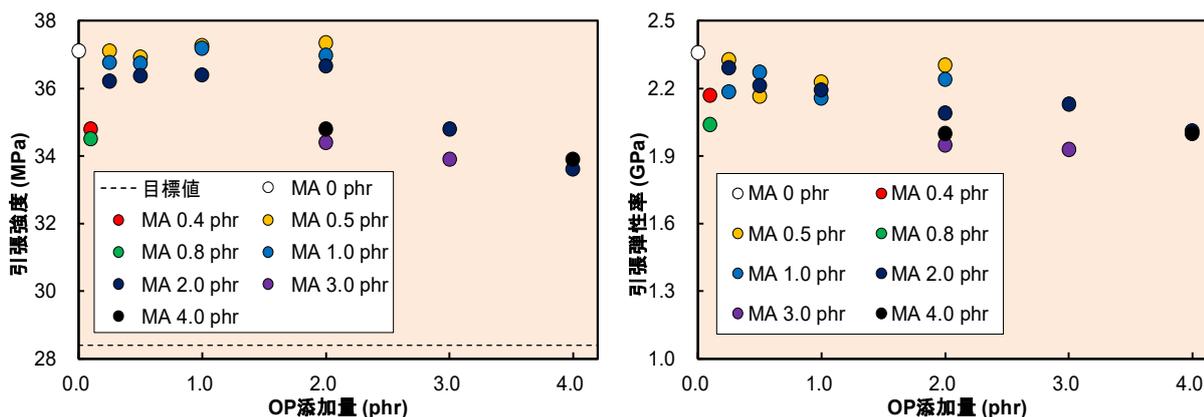


図 2-29 タルクを用いたコンパウンドの引張特性（左：引張強度、右：引張弾性率）

タルクを用いたコンパウンドはすべての条件で既存品のタルク 20%配合 PP と比較し、高い引張強度を示し、当初目標は達成された。リアクティブ処理を行っていない TPC-1 と比較したところ、リアクティブ処理による引張強度の向上は見られなかった。これは引張弾性率も同様である。この原因については追加の検証が必要である。TPC-1 と比較し、引張強度および弾性率の低下を引き起こさなかった条件は TPC-3 (MA 0.5 phr/OP 2.0 phr) および TPC-5 (MA 0.5 phr/OP 0.25 phr) の 2 条件であった。続いて図 2-30 に木粉を用いたコンパウンドの引張特性を示す。

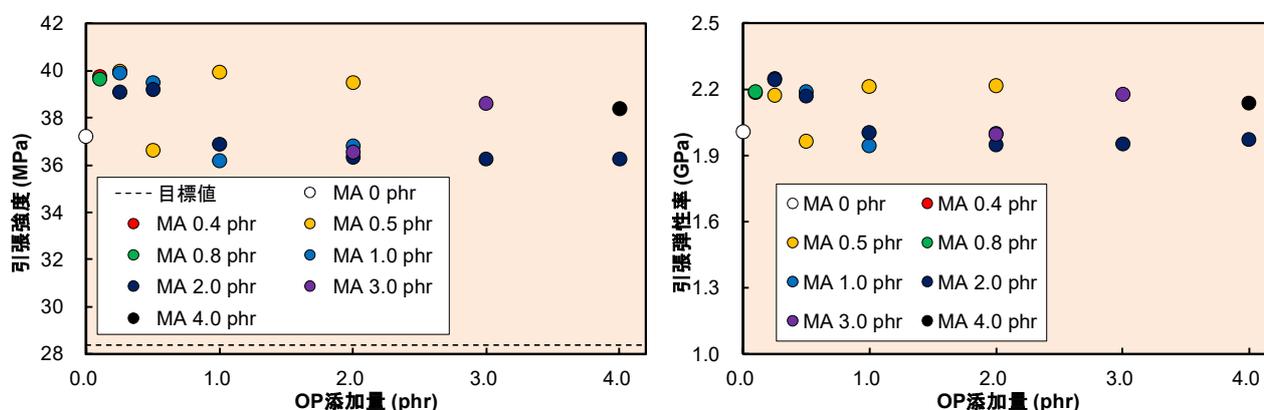


図 2-30 木粉を用いたコンパウンドの引張特性（左：引張強度、右：引張弾性率）

木粉を用いたコンパウンドは既存品のタルク 20%配合 PP よりも高い引張強度を示し、当初目標は達成された。引張強度はリアクティブ未処理の WPC-1 と比べて、高強度となる条件が複数見られた。これは引張強度の向上が見られなかったタルクを用いたコンパウンドとは異なる傾向であった。WPC-1 よりも強度が向上している条件を見ると、OP 添加量 0.5 phr 未満では引張強度はすべての MA 添加率で向上する傾向にあった。MA 添加量については、0.5 phr、OP 添加量 0.5 phr において、WPC-1 よりも強度は微減しているが、それ以外の OP 添加率では強度向上しているため、MA 添加量も少ないほうが適していると推測される。引張弾性率も WPC-1 より向上する条件が複数見られ、OP 添加量 0.5 phr 以下で高い値を示す点は、引張強度と同様であった。

最後に 2 J のハンマーを用いたノッチなしアイゾット衝撃強度を図 2-31 に示す。

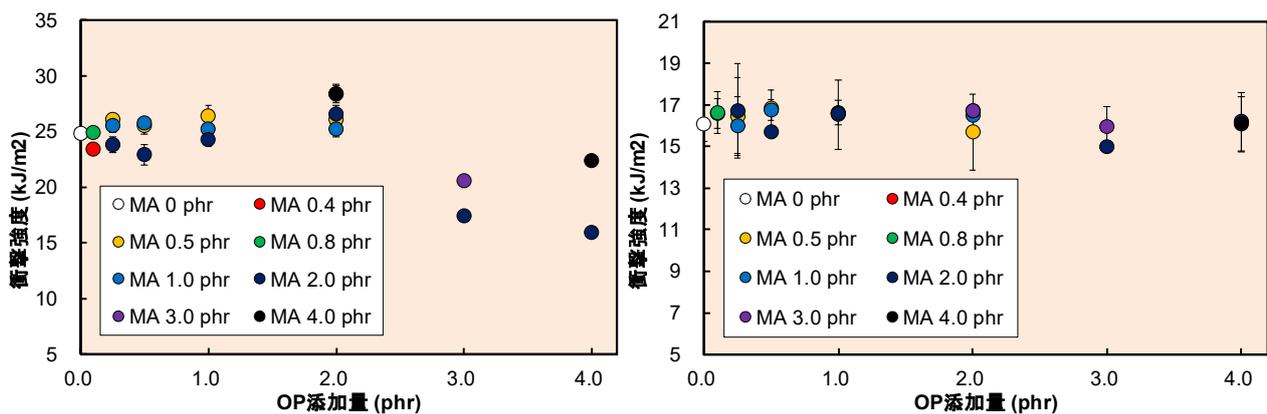


図 2-31 ノッチなしアイゾット衝撃強度 (左：タルク、右：木粉)

タルクを用いたコンパウンドにおいて、リアクティブ未処理の TPC-1 と比較し、MA0.5～1.0 phr 添加した条件は同等以上の強度となった。また、MA2.0 phr および MA 4.0 phr においては OP2.0 phr 添加時に高い強度を示し、MA4.0 phr/OP2.0 phr が最大の衝撃強度を持つ条件であった。これは曲げ強度と同様に MA、OP 添加量に最適なバランスが存在するためと考える。一方、木粉を用いたコンパウンドにおいては、すべての条件で衝撃強度に明確な変化はみられなかった。

以上の結果から、複数のリアクティブ処理レシピでタルクを用いたコンパウンド、木粉を用いたコンパウンドともにリアクティブ未処理と同等以上の機械的特性を得ることができた。この中から最適レシピを定めることを考えると、本事業の最重要課題が「CO2 排出量の削減」であることから、MA、OP の使用量は少ないほうが望ましい。よって、タルクを用いたコンパウンドは MA、OP の添加量が少なく、かつ各特性の向上が明確に見られた MA0.5 phr/OP0.25 phr (TPC-6)、木粉を用いたコンパウンドは MA0.4 phr/OP0.1 phr (WPC-2) を最適レシピとした。以降の検討はこれらの最適レシピを中心に実施した。

### 2.1.3.1.3.2.3 蛍光顕微鏡観察

短冊型試験体をメイワフォーシス (株) 製 WELL ダイヤモンドワイヤーソーによって切断し、得られた破断面に対して、多糖類と特異的に結合する蛍光試薬 Calcofluor White (富士フィルム和光純薬 (株)) を用いて蛍光標識を行い、蛍光顕微鏡 (オールインワン蛍光顕微鏡 BZ-X710、キーエンス製) によって観察した。得られた蛍光像の二値化像を図 2-32 に示す。

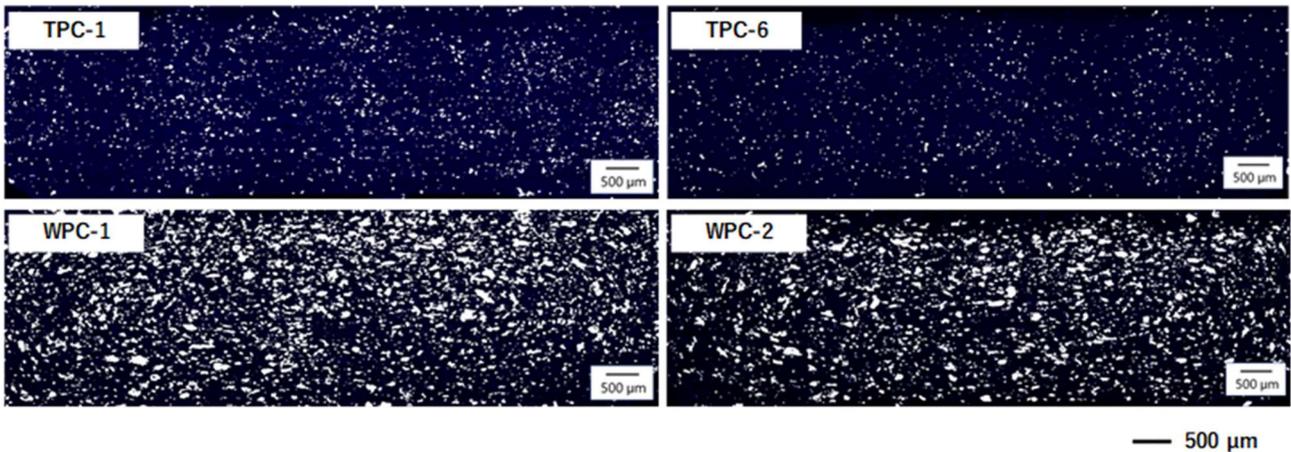


図 2-32 蛍光像の二値化画像

木粉を用いたコンパウンドについては、標識された木粉および CNF に基づく蛍光が明瞭に確認できた。タルクを用いたコンパウンドについては、CNF 由来の弱い蛍光が観察された。これらの画像を基に、セルロース系フィラーの空間配置パターンを解析した。点または領域の空間配置パターンは、図 2-33 に示すような、ポアソン型（ランダム）、集中型、規則型の 3 つのタイプに大別できる。

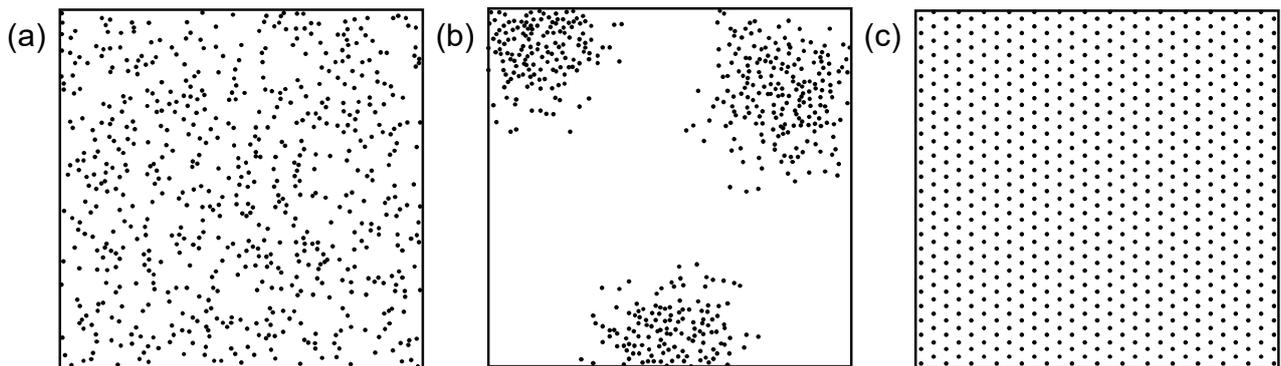


図 2-33 空間配置パターン概要 (a:ポアソン型、b:集中型、c:規則型)

これらのパターンが、純粹に粒子間の相互作用によって支配されているとすると、ポアソン型は粒子間に相互作用が無い場合、集中型は引力的相互作用がある場合、規則型は粒子間に斥力的相互作用がある場合にそれぞれ現れる空間パターンと考えることができる。今般の系では規則型に相当することはなく、集中型なのかポアソン型なのかをセルロース系フィラーの重心点間距離の分布から数値化することとした。横軸を重心点間距離/最大重心点間距離 ( $r/r_0$ )、縦軸を  $r$  以上の重心点間距離数/全重心点間距離数 ( $N_r/N_0$ ) として、ポアソン型および集中型の空間配置を、文献「H. Tanaka *et al.* J. Appl. Phys. 65 (1989) 4480–4495」において、N function として整理されていたもの (the modified of N function) を、重心点間距離をパラメータとして改変して表示したものおよび本事業サンプルにおける the modified N function を図 2-34 に示す。

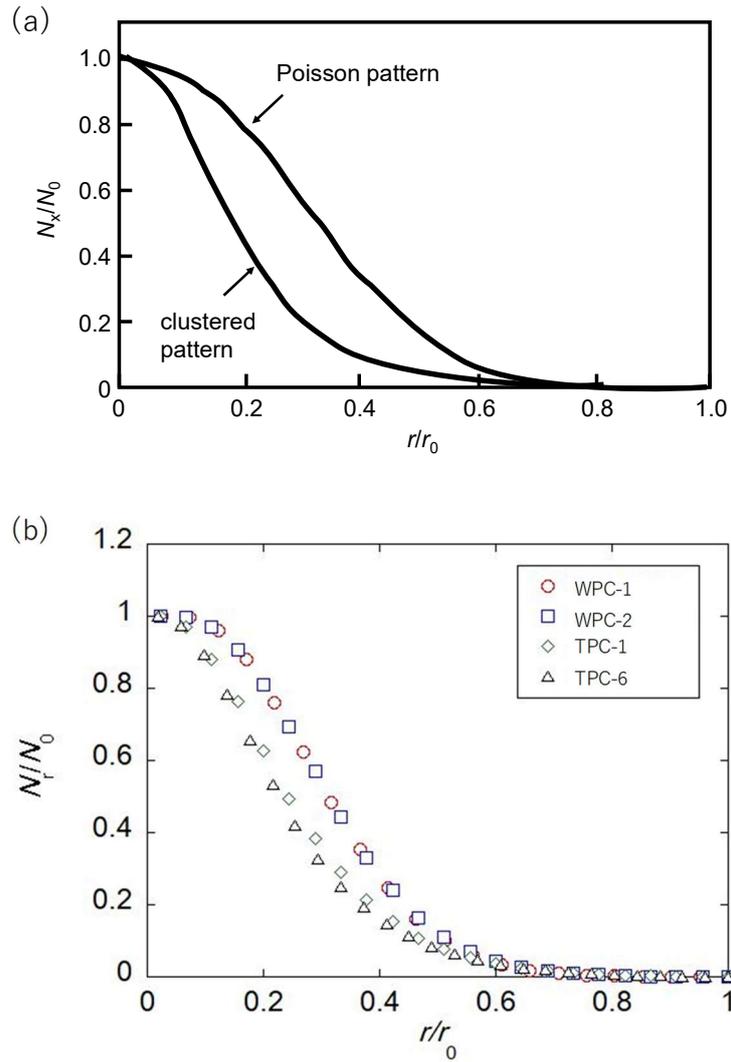


図 2-34 The modified N function

(a : 文献値「H. Tanaka *et al.* J. Appl. Phys. 65 (1989) 4480–4495」

b : 本事業のサンプル)

この結果を見ると、タルクを用いたコンパウンドにおける CNF よりも木粉を用いたコンパウンドにおける木粉や CNF の方がポアソン型寄りの配置パターンを示していることが判明した。この空間配置パターンをさらに数値的に比較するために、重心点間距離のヒストグラムを作成した (図 2-35)。

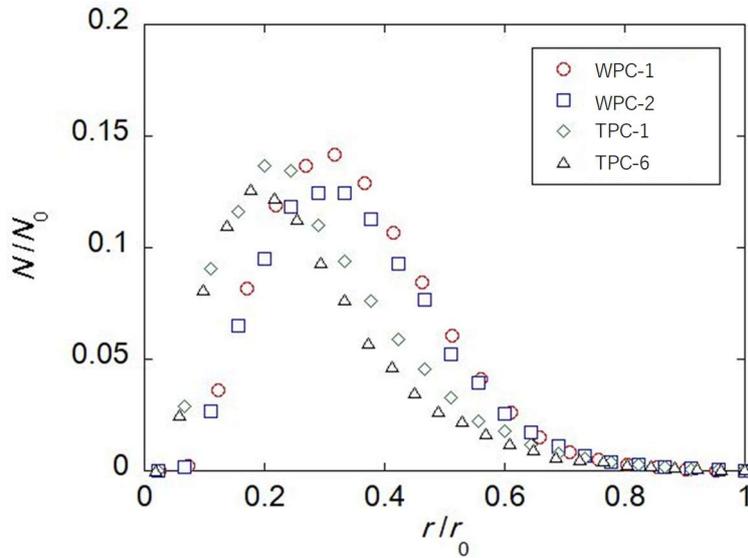


図 2-35 重心点間距離のヒストグラム

基本的にどの系も単一モードであった。このヒストグラムを数値的に相互比較するため、歪度 ( $s$ ) を求めた。 $s$  は次式で示され、分布の正規分布からの逸脱を示す指標、すなわち対称性を示す尺度であり、分布の正規性の確認の参考となる。

$$s = \frac{\sqrt{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)^{3/2}}$$

ここで、 $x_i$  は  $r/r_0$  の度数  $i$  を 30 に分割したときの各度数における重心点間距離の平均値、 $n$  は分割した度数の数、および  $\bar{x}$  は重心点間距離の平均値である。正規分布は左右対称なので、 $s$  の値は 0 になる。右に裾を引いた分布では正の値、左に裾を引いた分布では負の値をとる。対称性の線引きの目安は、 $\pm 1$  より  $s$  の絶対値が大きいとき **highly skewed**、 $\pm 0.5$  から  $\pm 1$  までの絶対値だと **moderately skewed** とみて妥当であり、絶対値が 0.5 未満ならほぼ正規だと判断できる。図 2-35 のヒストグラムにおける歪度  $s$  および蛍光粒子平均面積  $A$  を算出し、表 2-13 に整理した。

表 2-13 歪度 ( $s$ ) および蛍光粒子平均面積 ( $A$ ) 算出結果

No.	$s$	$A/\mu\text{m}^2$
TPC-1	1.04	519
TPC-6	1.21	511
WPC-1	0.64	1569
WPC-2	0.70	1604

タルク、木粉いずれを用いたコンパウンドにおいても、MA と OP を添加したサンプルで蛍光粒子数の減少が確認され、 $s$  の値がやや増大した。これは、MA と OP を添加した系で

蛍光粒子の空間配置がやや集中型に近づいていることを示唆しており、分散状況に影響を及ぼすことが確かめられた。フィラー等の分散状況が高いと応力集中を生じにくくなり、機械的特性は向上する傾向にある。リアクティブ処理はフィラーと樹脂の界面接着力を向上させると考えられるが、CNFの分散性は低下させる結果となった。これがリアクティブ処理によるタルクを用いたコンパウンドの引張強度向上が生じなかった一つの要因であると考え（図 2-29）。

#### 2.1.3.1.3.2.4 融点測定

示差走査熱量計（DSC、EXSTER DSC7020、日立ハイテク製）を使用し、融点測定を行った。温度プログラムは、-100 degree C から 200 degree C まで 20 degree C/min で昇温し、そこで 1 min 保持した後、液体窒素を用いて -100 degree C まで急冷（60 degree C/min 程度）し、再度 20 degree C/min で 200 degree C まで昇温する行程とした。DSC 測定の結果を図 2-36 に示す。

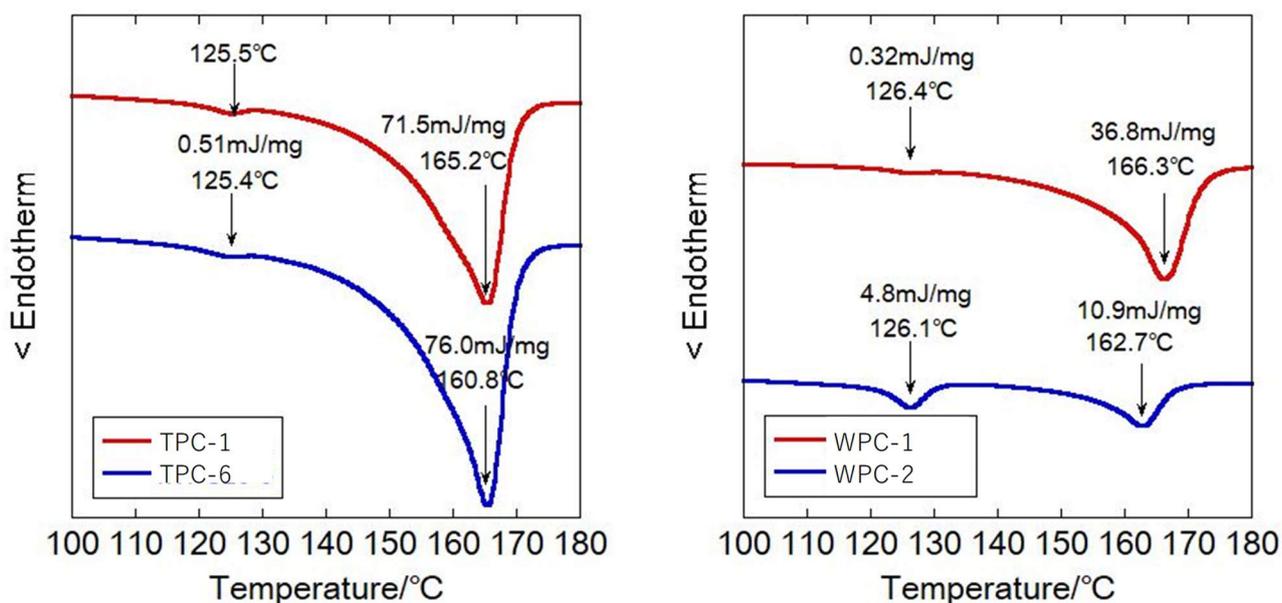


図 2-36 DSC による融点測定結果（左：タルク、右：木粉）

いずれのサンプルも 125 degree C 付近に小さな吸熱ピークが観察された。また、WPC-1、TPC-1 では 165 degree C 付近に大きな吸熱ピークが確認された。これはマトリックス PP の融解熱によるものだと考えられる。このマトリックス PP の溶融熱はリアクティブ処理を行った WPC-2、TPC-6 においては 160 degree C 付近になっていた。これはリアクティブ処理により、フィラーとマトリックス間の濡れが改善されたことが要因と推察される。これは、リアクティブ処理により、フィラーと樹脂間の界面接着力が向上した一つの証拠になると考える。

#### 2.1.3.1.3.2.5 分子量、グラフト率の測定

タルクおよび木粉を用いたコンパウンドを熱キシレンに溶解し、アセトンにより析出さ

せることで精製したサンプルを用いて、分子量測定とグラフト率測定を行った。図 2-37 に各サンプルの重量平均分子量とグラフト率を示す。

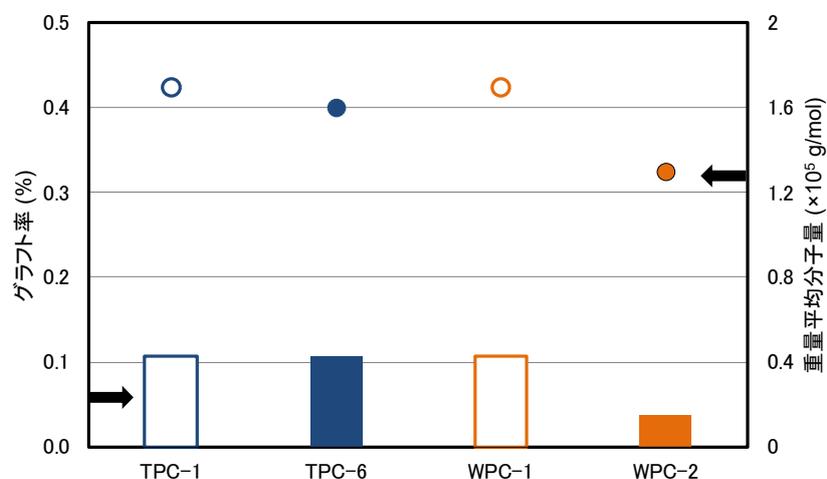


図 2-37 析出樹脂のグラフト率と重量平均分子量

リアクティブ処理を行っていない TPC-1、WPC-1 から酸変性樹脂が抽出された。これは樹脂モデル作製時に使用した PE リッチ容器包装リサイクル樹脂 (Re-PE) に含まれたものと思われる。リアクティブ処理を行っていない TPC-1、WPC-1 とリアクティブ処理を行った TPC-6、WPC-2 は同程度のグラフト率となった。本手法はフィラーと未反応の状態が存在する酸変性樹脂を取得する方法である。そのため、MA 基の多くがフィラーとの界面に存在し、余剰分が存在しなかったため、取得できなかったものと考えられる。分子量はリアクティブ処理を行うことで減少した。これは OP による樹脂モデルの低分子化に起因する。また、TPC よりも WPC の分子量低下が大きかった。木粉が弱酸性のフィラーであることから、樹脂モデルの分子量低下促進に寄与した可能性がある。他の要因として、木粉と OP 間の相互作用による分子量低下も考えられるが、今回は確認できていない。木粉と OP 間の相互作用に関してはさらなる検証は必要である。このフィラーの違いによる分子量の変化は、コンパウンドの機械的特性が異なる一因であると考えられる。

### 2.1.3.1.3.3 まとめ

CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルと各種フィラー (タルク、木粉) から構成されるリアクティブシステムを活用したフィラー充填マスターバッチを PP で希釈したコンパウンドは、同一フィラー量において、既存品のタルク 20%配合 PP よりも高い曲げ、引張強度を持つことが確認された。高強度かつ CO<sub>2</sub> 排出量が低い条件 (MA、OP の添加量の少ない条件) として、タルクは MA0.5 phr/OP 0.25 phr、木粉は MA0.4 phr/OP 0.1 phr を最適レシピとした。また、リアクティブ処理の結果、コンパウンド内のフィラーおよび CNF の分散性が変化すること、フィラーの違いにより融点や分子量に変化が生じることが確認された。これにより、リアクティブ処理の影響、フィラーの種類によって変化する原因の一端を明らかにした。

#### 2.1.3.1.4 中規模生産設備検討

##### 2.1.3.1.4.1 サンプル作製手順と試験条件

量産設備への移行をスムーズに行うため、中規模生産設備であるヘンシェル型ミキサー（SMV-20A、カワタ）によるリアクティブ処理を行い、作製した処理タルク、処理木粉をPPで20%に希釈したコンパウンドペレットを2軸ベント式押出成形機（AS30 m/m、ナカタニ機械）にて作製し、小型射出成形機（BABYPLAST 6/10P、Rambaldi）にてダンベル形、短冊形試験体に加工した。使用した試験機の写真は図 2-38 に示す。



図 2-38 使用機器 (a：ヘンシェルミキサー、b：押出成形機、c：射出成形機)

MA および OP のレシピは「2.1.3.1.3 ラボ設備検討」で取得した最適レシピを用い、MA および OP を用いない条件との比較を行った。ここで検討する内容は、ヘンシェルミキサーにおける MA および OP の投入温度、処理時間である。検討条件を表 2-14 に示す。タルクを用いた条件を MT、木粉を用いた条件を MW と呼称する。

表 2-14 中規模生産設備による処理フィラー検討条件

No.	CNF複合廃材 含有容器包 装樹脂モデル (%)	市販木粉 (%)	市販タルク (%)	無水マレイ ン酸 (phr)	有機過酸 化物 (phr)	無水マレイン酸と有 機過酸化物を添加 するミキサー温度 (°C)	無水マレイン酸と有機過 酸化物添加後の処理条 件
MT0	30	-	70	-	-	180	190°C到達まで処理
MT1	30	-	70	0.5	0.25	180	190°C到達まで処理
MT2	30	-	70	0.5	0.25	180	180°Cで10分処理後に 190°C到達まで処理
MT3	30	-	70	0.5	0.25	180	180°Cで20分処理後に 190°C到達まで処理
MW0	30	70	-	-	-	180	190°C到達まで処理
MW1	30	70	-	0.4	0.1	180	190°C到達まで処理
MW2	30	70	-	0.4	0.1	180	180°Cで10分処理後に 190°C到達まで処理
MW3	30	70	-	0.4	0.1	180	180°Cで20分処理後に 190°C到達まで処理

#### 2.1.3.1.4.2 評価手法と結果

MT および MW ペレットを試料とし、キャピラリーレオメータ (LCR7000、日本ダイニスコ) にて、熔融粘度を算出した。試験方法は本項目における「2.1.3.1.3.2.1 流動性評価」と同様である。図 2-39 にせん断速度とせん断粘度の関係を示す。

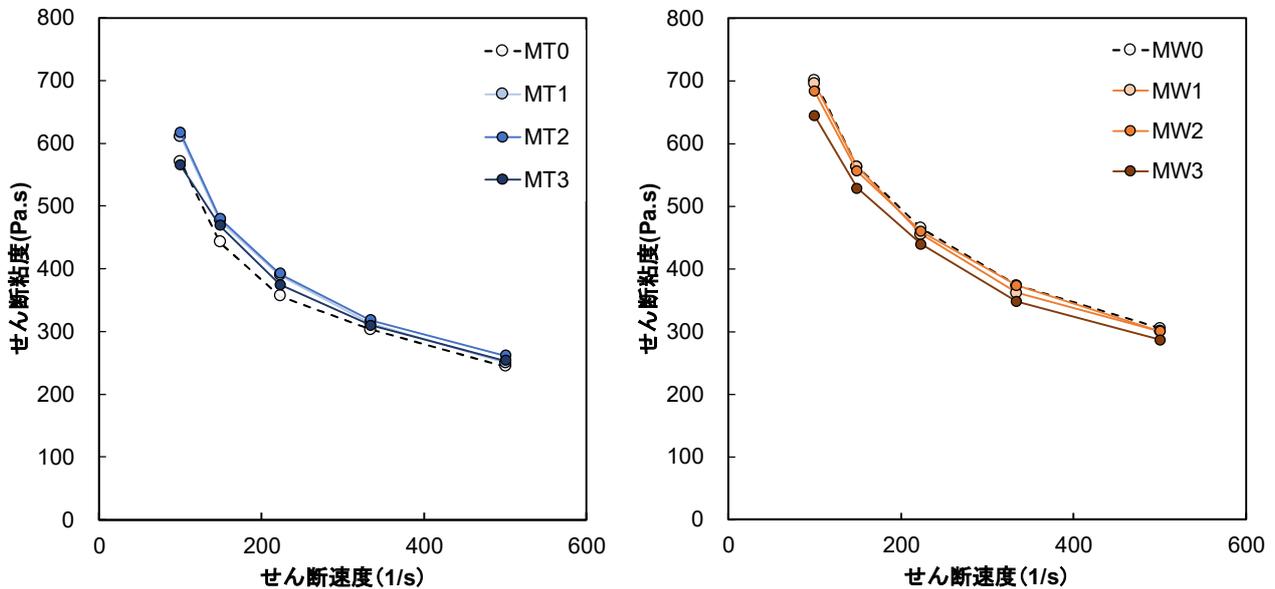


図 2-39 せん断速度とせん断粘度の関係 (左 : MT、右 : MW)

タルク、木粉ともにリアクティブ処理によるせん断粘度の変化は小さく、ラボ設備同様、リアクティブ処理は、流動性に大きな影響を与えなかった。

続いて、曲げ、引張、衝撃特性を評価した。試験方法は本項目における「2.1.3.1.3.2.2 機械的特性評価」と同様である。図 2-40 に曲げ特性を示す。

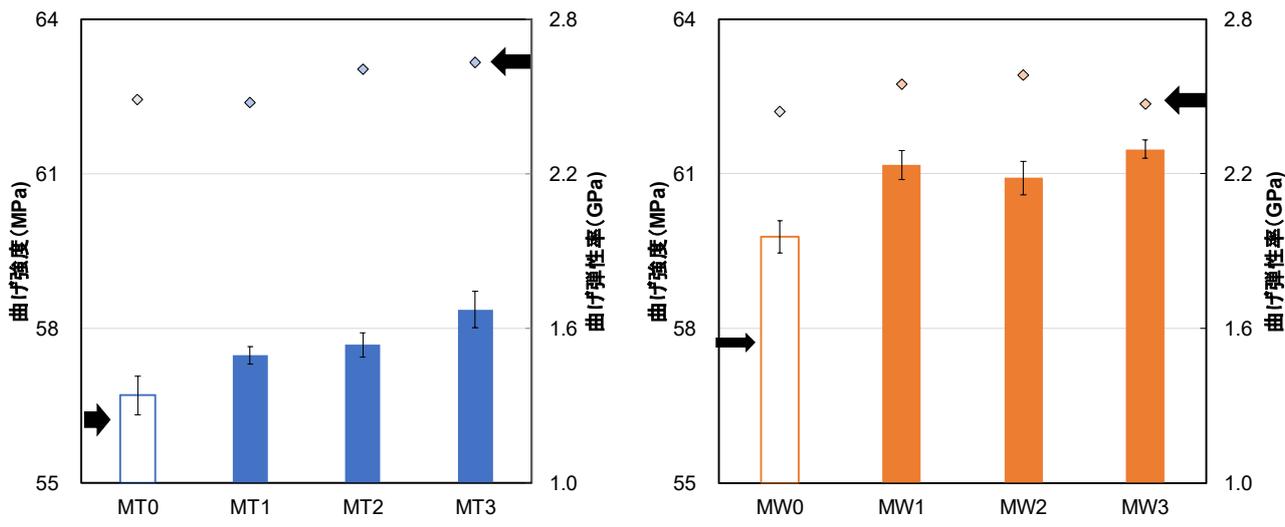


図 2-40 曲げ特性 (左 : MT、右 : MW)

曲げ強度は、両フィラーともにすべての条件で既存品のタルク 20%配合 PP の曲げ強度 (40 MPa 以上) を達成した。リアクティブ未処理条件 (MT0、MW0) と比較し、リアクティブ処理を行ったすべての条件で、強度の向上が見られた。タルクをフィラーとした場合、処理時間が長いほど強度、弾性率ともに向上し、MT3 が最大となった。木粉側では MW3 が条件として最大の強度となったが、弾性率は処理時間の短い MW1、MW2 のほうが高かった。

続いて図 2-41 に引張特性を示す。

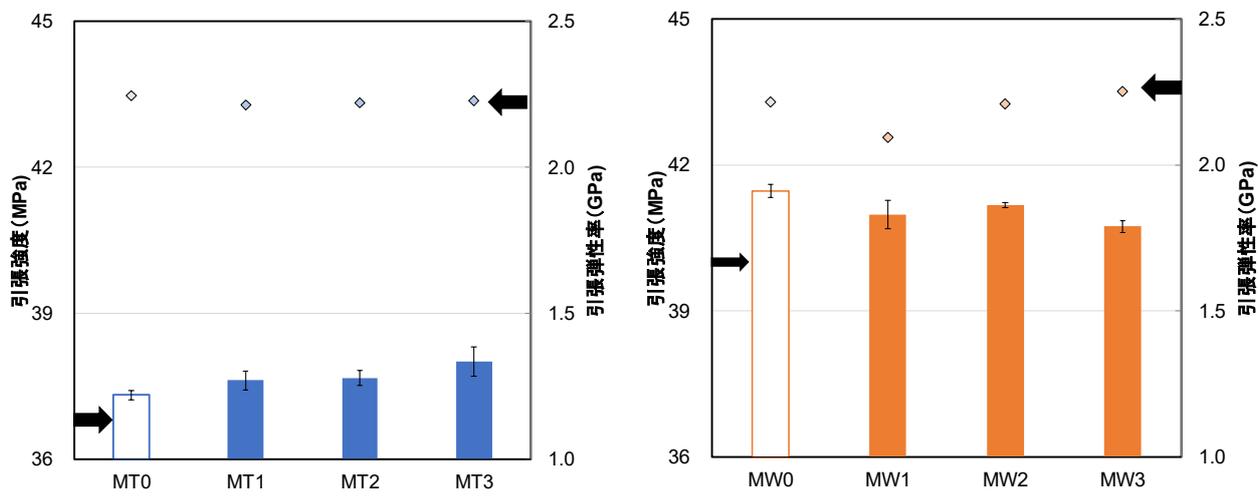


図 2-41 引張特性 (左 : MT、右 : MW)

引張強度は、両フィラーともにすべての条件で既存品のタルク 20%配合 PP の引張強度 (25 MPa 以上) を達成していた。MT は全条件で引張強度は微増し、曲げ特性と同様に最も長く混練した MT3 が最大の引張強度となった。しかし、引張弾性率については大きな差はみられなかった。一方、MW では、引張強度、弾性率ともにリアクティブ処理により、

ほとんど変化しなかった。これはラボ設備検討時とは異なる結果である（図 2-29、30）。これは製造設備の影響が主因と考えられる。両フィルターにおいて、強度低下は生じていないため、リアクティブ処理は量産前提の設備においても負の方向には働かないことが示された。

図 2-42 に衝撃特性を示す。

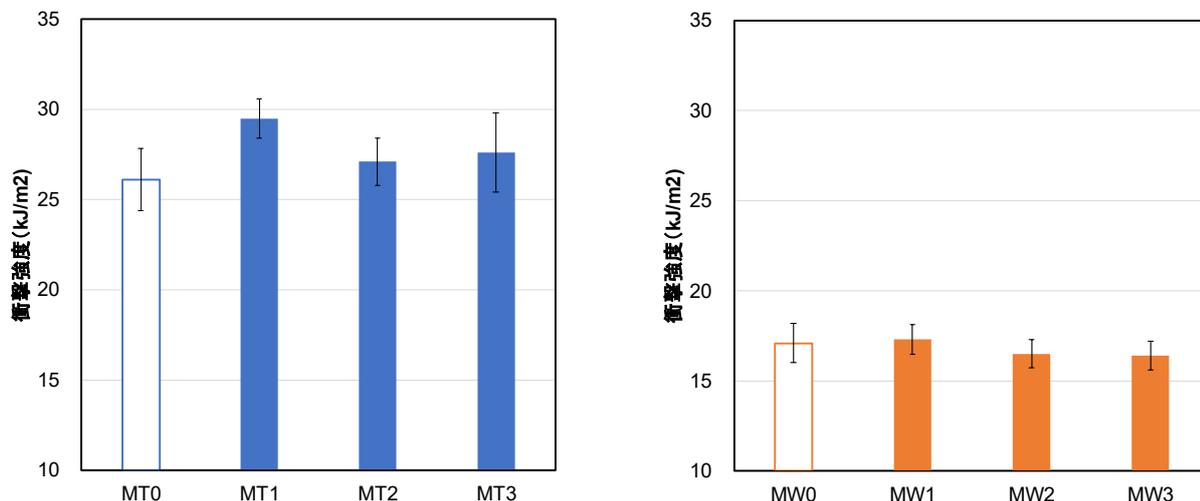


図 2-42 衝撃特性（左：MT、右：MW）

タルクをフィルターとした場合、MT0 よりも MT1 の衝撃強度は高い値を示し、それ以外の条件は同程度となった。一方、木粉では MW0 とすべての条件で同程度の強度となった。全体の傾向を見ると、木粉側では混練時間が長くなるほど強度は低下する傾向にあった。

タルクを使用した場合、曲げ、引張特性は MT3 が最も高く、衝撃特性は MT1 が優れていた。この結果は木粉を使用した場合も同様であった。目標値を設定した曲げ、引張強度については、180 degree C で 20 分混練した条件のほうが高い値を示すが、CO<sub>2</sub> の排出量を考えると混練時間は短いほうが望ましい。曲げ強度と引張強度の向上は混練時間を延ばしても 1%程度とそれほど大きくない点や衝撃強度が優れていることから、「180 degree C で MA、OP を投入し、190 degree C まで処理」を最適条件とした。

#### 2.1.3.1.4.3 まとめ

中規模生産設備による MB 製造時の量産条件を検討した。フィルターの種類、リアクティブ処理の条件によらず、既存品のタルク 20%配合 PP 以上の曲げ強度、引張強度が得られた。リアクティブ処理による物理的・機械的特性の向上の状況と CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果を考え、「180 degree C で MA、OP を投入し、190 degree C まで処理」する条件を最適条件とし、量産に用いることとした。

#### 2.1.3.1.5 まとめ

「2.1.1.1 CNF 複合材モデルの作製」「2.1.2.2 容器包装リサイクル樹脂モデルの作製」で作製した CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデルおよび木粉とタルクをフィラ

ーとしたリアクティブシステムを活用したフィラー充填 MB の酸変性樹脂化レシピを検討した。タルクをフィラーとした場合の最適レシピは MA を 0.5 phr、OP を 0.25 phr 添加した条件であり、木粉は MA を 0.4 phr、OP を 0.1 phr 添加した条件であった。また、中規模生産設備による MB 作製のミキシング条件を検討し、「180 degree C で MA、OP を投入し、190 degree C まで処理」する条件を最適条件とした。ここで取得したレシピおよびミキシング条件を以降の MB 量産条件とした。また、ここで作製した最適レシピの MB を PP によりフィラー濃度 20%に希釈したコンパウンドすべてにおいて、既存品のタルク 20%配合 PP と同等以上の曲げ強度 (40 MPa 以上)、引張強度 (25 MPa 以上) を達成した。ただし、リアクティブ処理による物性向上のメカニズム解明は不十分なため、さらなる検証は必要である。

## 2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立

### 2.1.3.2.1 概要

リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチを量産を前提とした生産能力として、150 kg/h 以上となる生産システムを構築した。また、CO<sub>2</sub> 排出量計算に必要な生産エネルギーおよび経済性評価に必要なデータを取得した。

### 2.1.3.2.2 量産試作

「2.1.3.1 酸変性樹脂化最適レシピの確立」にて実施した、最適レシピ、ミキシング条件を用いて MB の量産テストを実施した。MB 作製の工程は「リアクティブ処理工程」と得られた処理粉末を押出機によりコンパウンド化する「コンパウンド工程」の大きく 2 つの工程から成り立つ。

#### 2.1.3.2.2.1 リアクティブ処理工程

リアクティブ処理工程は、図 2-43 に示す高速攪拌ミキサー（スーパーミキサー：カワタ製 SMV100）を用いて実施した。用いた設備のタンク容量 100 L に対して、「2.1.2.2 容器包装リサイクル樹脂モデルの作製」で作製した CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデル (Re10) 30 phr、タルク（日本タルク製：SSS）を 70 phr を合計 15 kg となるように計量し、これを高速攪拌ミキサーに投入した。投入された材料を、高速攪拌によるせん断発熱により材料温度を上昇させ、180 degree C の温度タイミングにて、OP（化薬ヌーリオン製：カヤヘキサ AD-40C）を 0.25 phr、MA（日本触媒製）を 0.5 phr 投入、その後さらに攪拌混合を行い、OP と MA による表面処理を実施した。材料温度が 190 degree C になった段階で高速攪拌ミキサーから、直結した冷却用ミキサーに排出し、約 10 分の冷却後にリアクティブ処理タルクの粉末を得た。



図 2-43 高速攪拌ミキサー

「リアクティブ処理工程」の1バッチあたりの処理時間は13分20秒、消費電力は4.18 kwh/バッチとなった。これらの結果から原単位消費電力は0.28 kwh/kgとなった。

### 2.1.3.2.2.2 コンパウンド工程

利便性の高い材料とするべく、リアクティブ処理フィラーを粒上のペレットに加工した。具体的には、「2.1.3.2.2.1 リアクティブ処理工程」で得られたリアクティブ処理タルクをコニカル2軸押出機（KCT-55）を用いて再度熔融混練し、穴径4mmのダイスから押し出された熔融物をダイス表面で切断、空気輸送された後、ペレット冷却機によって冷却固化することで、粒状のペレットを得る。押出機、冷却器、作製したタルク充填MB（以降、TMB）の写真を図2-44に示す。また、コンパウンド加工条件を表2-15に示す。

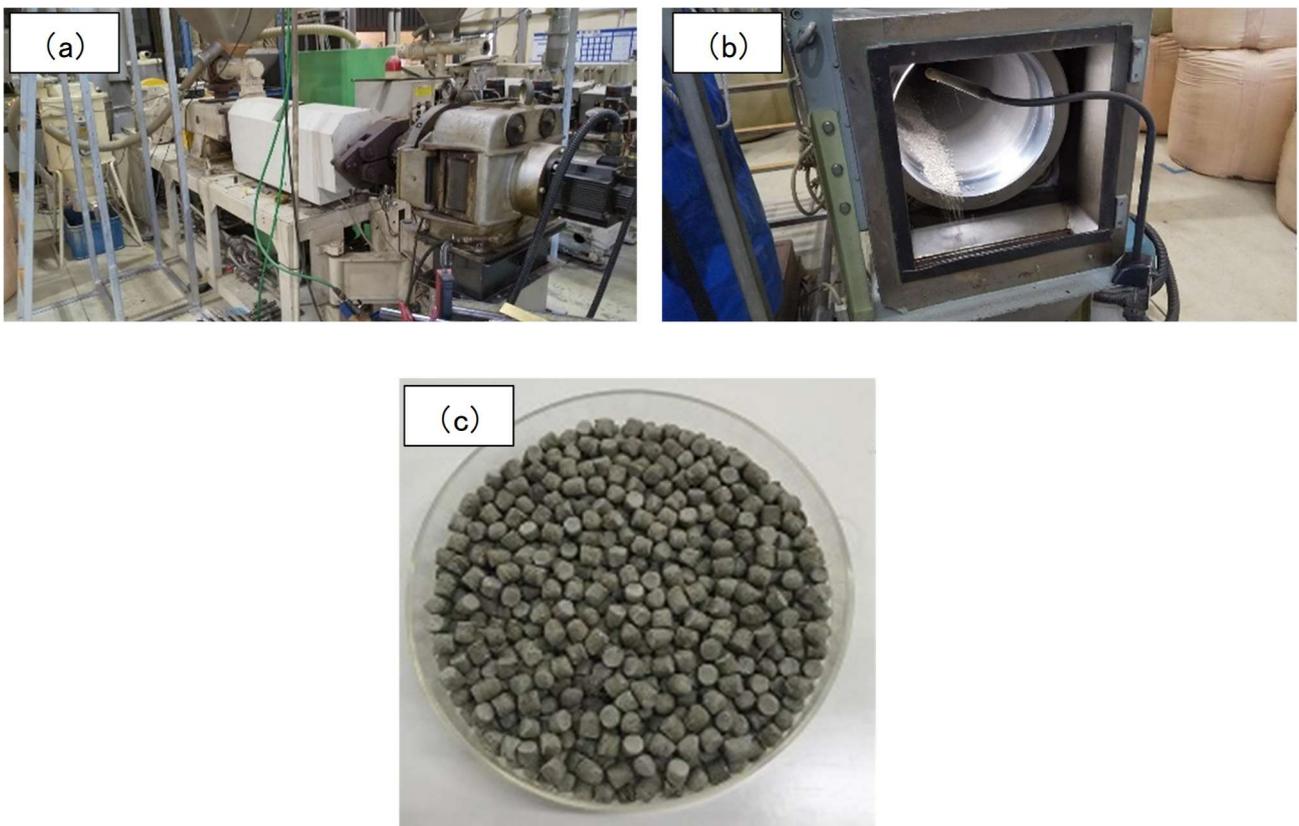


図 2-44 試験機およびサンプル概要 (a: 押出機、b: 冷却器、c: TMB)

表 2-15 TMB 加工条件

押出条件	回転数 (rpm)		温度設定 (°C)								電流値 (A)	吐出量 (kg/hr)	
	スクリュー	フィーダー	部位	C1	C2	C3	C4	A1	A2	D1			D2
			設定値	235	230	220	210	205	195	195			190
	38.0	33.0	実測値	205	230	205	207	203	194	195	183	50	210

時間当たりの生産能力は 210 kg/h の結果であり、目標値である 150 kg/h を達成することができた。コンパウンド工程の消費電力測定した結果は 30.2 kwh/h であり、原単位消費電力は 0.14 kwh/kg となった。

#### 2.1.3.2.3 まとめ

量産設備にてリアクティブシステムを活用したタルク充填 MB を量産を前提とした生産能力として実機にて試作した。この開発品タルク充填 MB (TMB) の 1 時間当たりの生産能力は 210 kg/h となり、目標値である 150 kg/h 以上の生産システム構築を達成した。

### 2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立

#### 2.1.3.3.1 概要

リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチを量産を前提とした生産能力として、150 kg/h 以上となる生産システムを構築した。また、リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産に適合する木粉量、木粉の性状について調査した。さらに、CO<sub>2</sub> 排出量計算に必要な生産エネルギーのデータおよび材料作製にあたり経済性評価に必要なデータを取得した。

#### 2.1.3.3.2 木粉量、木粉の性状に関する調査

リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチを作製することに適した木粉量、木粉の性状について調査を実施した。

##### 2.1.3.3.2.1 木粉量の調査

リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチを作製することに適した木粉量、木粉の性状について調査を実施した。通常のフィラー充填 MB は射出成形等で利用する際に希釈して用いる材料であるため、コストを抑える為には、できるだけ木粉比率が高いことが望まれる。一方、リアクティブ処理木粉を粒状のペレットにするには、最低限の流動性が必要となる。

未処理木粉（木粉量 100%）とリアクティブ処理された木粉量 90%、80%、70%にて実施した結果の嵩比重を表 2-16 に示す。

表 2-16 リアクティブ処理された木粉の嵩比重測定結果

木粉量	100% (未処理)	90%	80%	70%
嵩比重 (g/cm <sup>3</sup> )	0.09	0.18	0.22	0.28

嵩比重測定の結果から、未処理木粉と比較すると大きく嵩比重が上昇しており、木粉量が少なくなるにつれて嵩比重が大きくなる傾向がみられた。このことから表面処理が有効に働いていると考えられる。次に、これらのリアクティブ処理された木粉を用いて、小型押出機（ナカタニ機械製 2 軸押出機 AS30）を用いダイス径 4 mm にて押出テストを実施したところ、木粉 70%以上では流動性が不十分の為、押出不可となった。これらの結果から MB 製造においては木粉量は 70%が最適と判断した。

##### 2.1.3.3.2.2 木粉性状の調査

一般的な WPC に用いられている木粉粒径の範囲（4 種類）についてリアクティブ処理状態の確認を実施した。リアクティブ処理前後のフィラー状況の観察結果を図 2-45 に示す。

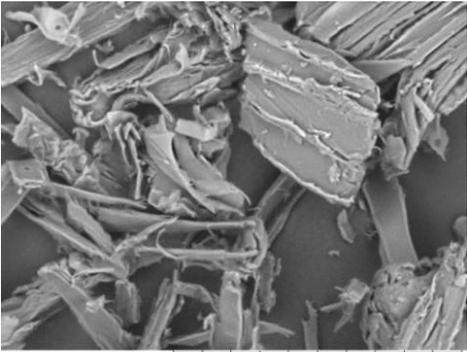
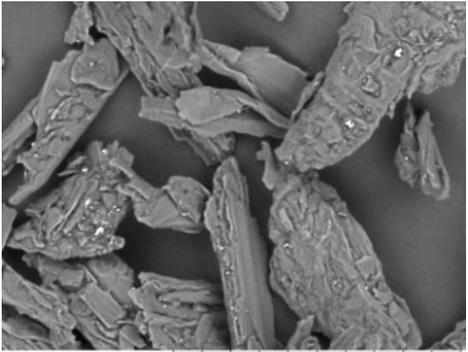
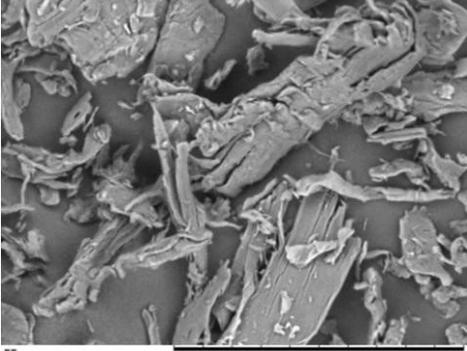
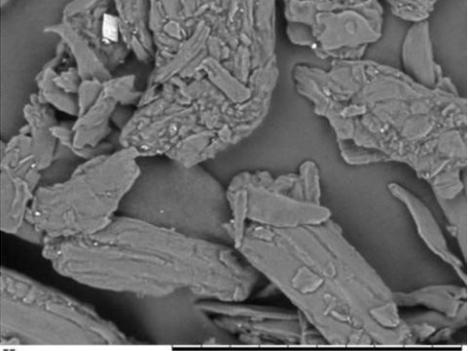
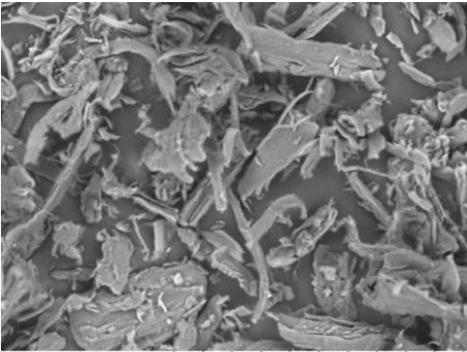
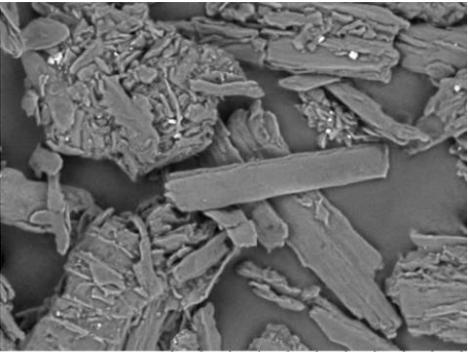
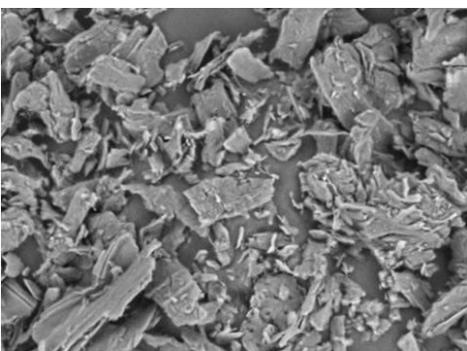
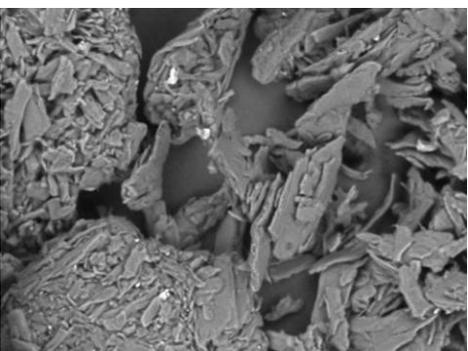
平均粒径	表面処理前	表面処理後
262 $\mu\text{m}$	 <p>2020/02/19 14:52 NL D4.9 x500 200 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>2020/02/20 16:51 NL D5.1 x500 200 <math>\mu\text{m}</math></p>
165 $\mu\text{m}$	 <p>2020/02/19 13:55 NL D4.9 x500 200 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>2020/02/20 16:05 NL D5.0 x500 200 <math>\mu\text{m}</math></p>
113 $\mu\text{m}$	 <p>2020/02/19 14:05 NL D4.9 x500 200 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>2020/02/20 15:34 NL D5.0 x500 200 <math>\mu\text{m}</math></p>
46 $\mu\text{m}$	 <p>2020/02/19 14:14 NL D4.9 x500 200 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>2020/02/20 16:42 NL D5.0 x500 200 <math>\mu\text{m}</math></p>

図 2-45 粒径の異なる木粉のリアクティブ処理後の状況

木粉にリアクティブ処理による表面処理を実施することで、処理樹脂によって粒子同士の凝集がみられた。平均粒径 262  $\mu\text{m}$  と 165  $\mu\text{m}$  の木粉については、微粉は比較的大きな粒径の木粉に付着する形で凝集していた。平均粒径 113  $\mu\text{m}$  と 46  $\mu\text{m}$  の粒子については、多くの粒子同士が凝集体となっている様子が伺えた。木粉粒径を変えることで未溶融の樹脂が残存する等の様子は見られなかった。木粉の凝集は表面処理樹脂を介在した凝集物と考える為、後工程（コンパウンド）に影響を与えることは無く、一般的な WPC に用いられる調査範囲の粒径では表面処理に大きな影響は無いと考える。

#### 2.1.3.3.3 量産試作

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」と同様に、木粉をフィラーとした際の MB 量産テストを実施した。木粉充填量は 70% を用いた。

##### 2.1.3.3.3.1 リアクティブ処理工程

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」と同様の設備・手法を用いて、「2.1.2.2 容器包装リサイクル樹脂モデルの作製」で作製した CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデル (Re10) 30 phr、木粉（レッテンマイヤー製 アーボセル C100）を 70 phr を合計 15 kg となるように計量・投入し、せん断発熱による 180 degree C の温度タイミングにて、MA（化薬ヌーリオン製：カヤヘキサ AD-40C）を 0.4 phr、OP（日本触媒製）を 0.1 phr 投入、その後さらに攪拌混合を行い、MA と OP による表面処理を実施した。190 degree C を攪拌完了温度として直結した冷却用ミキサーに排出し、約 10 分の冷却後にリアクティブ処理木粉を得た。

リアクティブ処理木粉の 1 バッチあたりの処理時間は 12 分 8 秒、消費電力は 4.23 kwh/バッチとなった。これらの結果から原単位消費電力は 0.28 kwh/kg となった。

##### 2.1.3.3.3.2 コンパウンド工程

リアクティブ処理木粉をコニカル 2 軸押出機（KCT-55：図 2-44a）を用いて再度溶融混練し、穴径 4 mm のダイスから押し出された溶融物をダイス表面で切断、空気輸送によって冷却固化した粒状のペレット（WMB）を得た（図 2-46）。コンパウンド加工条件を表 2-17 に示す。



図 2-46 WMB の写真

表 2-17 WMB 加工条件

押出条件	回転数 (rpm)		温度設定 (°C)								電流値 (A)	吐出量 (kg/hr)	
	スクリュー	フィーダー	部位	C1	C2	C3	C4	A1	A2	D1			D2
			設定値	235	230	220	210	205	195	195			190
	40.0	50.0	実測値	226	230	220	210	204	195	194	175	50	156

時間当たりの生産能力は 156 kg/h の結果であり、目標値である 150 kg/h を達成することができた。コンパウンド工程の消費電力測定した結果は 31.9 kwh/h であり、原単位消費電力は 0.20 kwh/kg となった。

#### 2.1.3.3.4 まとめ

量産設備にてリアクティブシステムを活用した木粉充填 MB を量産を前提とした生産能力として実機にて試作した。1 時間当たりの生産能力は 156 kg/h となり、目標値である 150 kg/h 以上の生産システム構築を達成した。また、この MB の量産に適合する木粉量、木粉の性状について調査した。

#### 2.1.3.4 マスターバッチ品質管理手法の確立

##### 2.1.3.4.1 概要

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製したマスターバッチについて、製造現場に導入可能な各種品質試験項目の策定を行った。

##### 2.1.3.4.2 はじめに

MB はフィラーが高濃度であるため、品質管理上フィラーに凝集が無いことが重要になる。フィラーの凝集があると物理的な欠点として諸物性に問題が発生する。またリアクティブ処理に伴う樹脂の酸変性処理により、低分子化された樹脂の状況を管理する必要がある。もちろん最終的には、機械特性等の評価を実施する必要があるが、ここでは製造現場に導入できる工程内の管理項目としての品質管理試験項目の策定を実施した。材料のバラツキはリアクティブ処理工程、コンパウンド工程の状況（設備電流値等）や、出来上がった材料の外観評価などでも可能であるが、ここでは、簡易に確認できる方法として、分散性評価、流動性評価、嵩比重・真比重評価を実施した。

##### 2.1.3.4.3 分散性評価

###### 2.1.3.4.3.1 熱プレス評価

製造現場に導入可能な簡易な方法としては、熱プレスによる目視分散の確認方法がある。MB は、熔融時の流動性不良から分散確認は難しい。しかし、「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」にて作製した本事業の開発品 MB は高流動性が確保されており、熱プレスでの分散確認シートの作製が可能であった。タルクを用いた開発品 MB（TMB）、木粉を用いた開発品 MB（WMB）の分散確認シートから、フィラーの凝集物はみられず、フィラーが高分散されていることが確認できた（図 2-47）。



図 2-47 フィラー分散確認シート (左 : TMB、右 : WMB)

#### 2.1.3.4.3.2 粘弾性評価

分散性評価の手法として、粘弾性評価を実施した。粘弾性は、応力制御型レオメータ AR-G2 (ティー・エイ・インスツルメント・ジャパン) を用いて評価した。測定条件は、穴径 25 mm の平行プレートを用い、200 degree C で測定した。

各フィラーについて意図的に作製した低分散品 (フィラーの目視凝集あり) と高分散品 (フィラーの目視凝集なし) の比較、並びに TMB の測定結果を図 2-48 に、WMB の測定結果を図 2-49 に示す。貯蔵弾性率 ( $G'$ ) は角度周波数 (rad/s) の増加とともに上昇するが、タルク、木粉ともに低分散品は高分散品と比較して  $G'$  が低かった。また、分散不良品については、高周波数の領域でスリップがみられた。木粉については、低周波領域にてチクソトロピーと思われる  $G'$  の振幅が見られた。この粘弾性は、プラスチックが完全に熔融している温度で測定しているため、この傾向は、フィラーのコンパウンド中における状態を測定している。フィラー同士の相互影響が大きい、つまりは分散が良好なほど、 $G'$  は上昇し、凝集があるものは高周波数領域でのスリップが現れると推測される。木粉で見られたチクソトロピー性が影響したと考えられる振幅もフィラー分散性に影響を及ぼしていると考えられ、分散が良いものほど、振幅幅が小さくなっていると考えられる。今回量産試作した MB は高分散品と同等程度の性能であった。よって、粘弾性測定によって、分散性評価が可能であることがわかった。

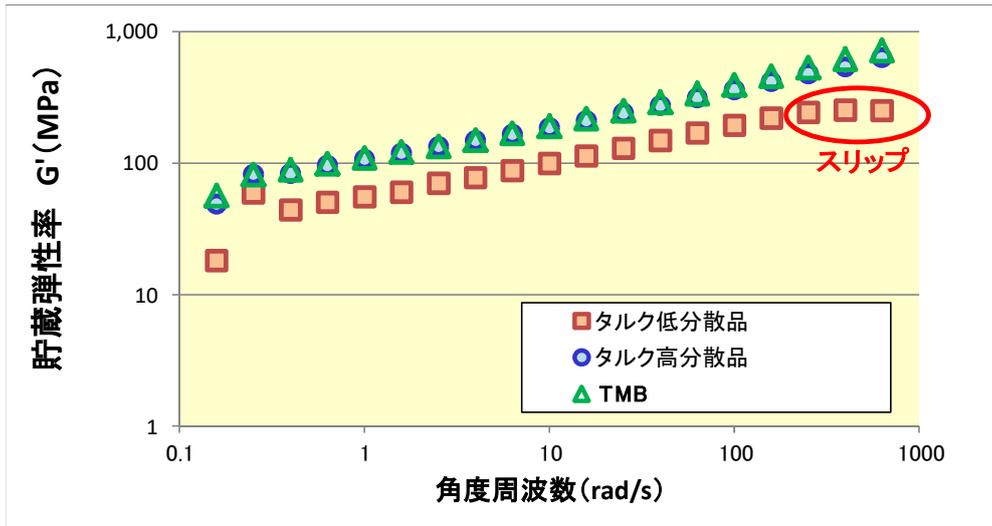


図 2-48 貯蔵弾性率 (G') と角度周波数の関係 (タルク 70%MB)

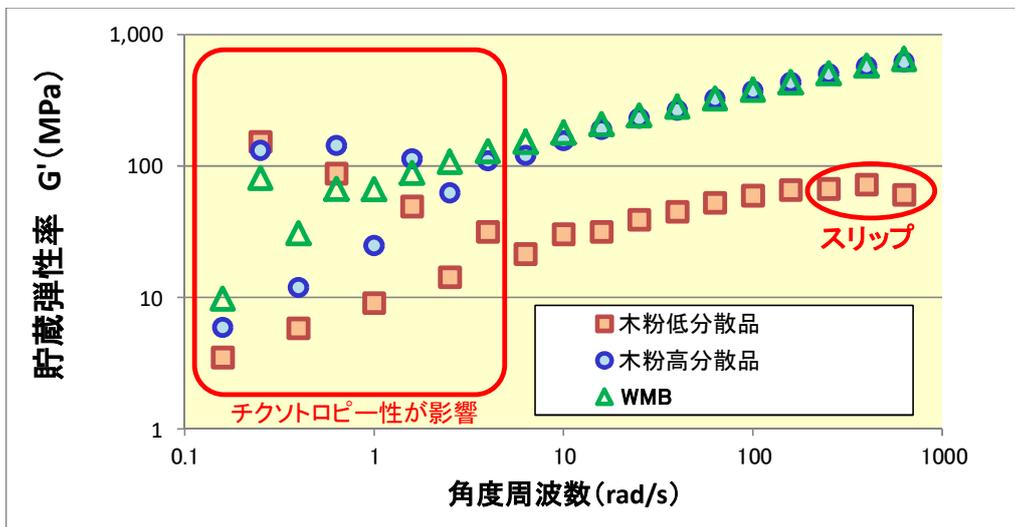


図 2-49 貯蔵弾性率 (G') と角度周波数の関係 (木粉 70%MB)

#### 2.1.3.4.4 流動性評価

熱可塑樹脂において、材料溶融時の流動性は重要な因子であり、表面処理に用いた樹脂の酸変性時の樹脂低分子化による影響、フィラー充填量の差異による影響が溶融粘度に反映される。溶融時の流動性評価として、一般的なメルトフローレート (MFR) について調査を実施した。

メルトインデクサ G-01 (東洋精機製作所) を用いて、一般的な穴径 2.0 mm のオリフィスを用い、230 degree C、2.16 kgf の荷重化で試験を行った結果、高濃度なフィラーの影響で、測定不可の結果となったことから、オリフィス径 (2.0、4.0、6.0 mm)、荷重 (2.16、10.0 kgf)、温度 (190、210、230 degree C) の影響を調査した。測定結果を図 2-50 に示す。WMB において、2.16 kgf では流動せずに測定が不可能であった為、測定荷重は 10.0 kgf とした。また熱分解しやすい木粉であること並びに木粉量が多いことが影響し、210 degree C 以上の温度では木粉の分解ガスが多量に発生した。これらの結果から、測定温度はガスの

発生が無い 190 degree C が良好と判断した。また、オリフィス径についてはどのサイズでも測定可能であったが、4.0 mm 程度が管理しやすいと考えられる。これらの結果、オリフィス径 4.0 mm、測定荷重 10.0 kgf、測定温度 190 degree C を WMB の流動性評価条件とすることが好ましいと考える。

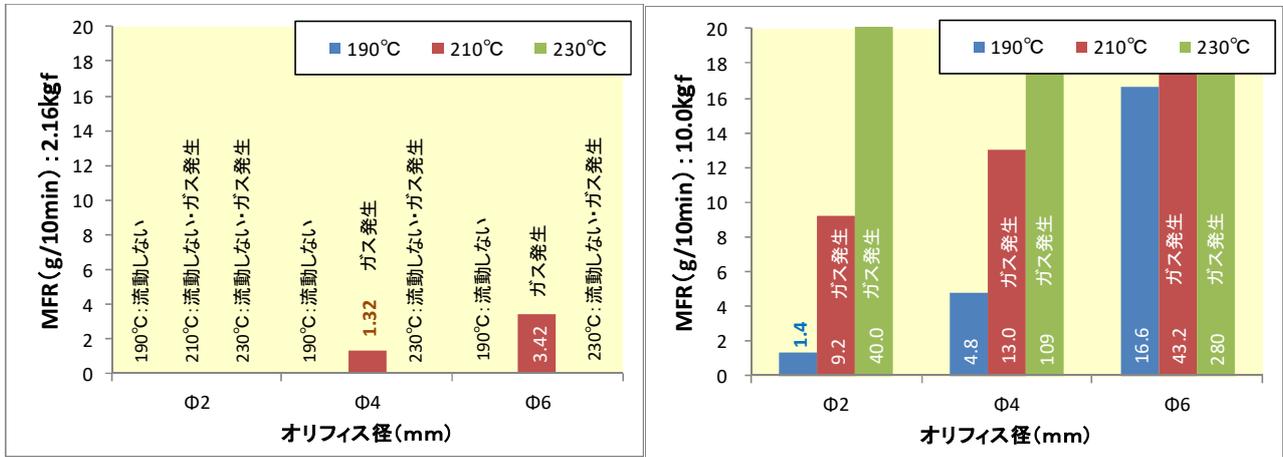


図 2-50 WMB の MFR (左：測定荷重 2.16 kgf、右：測定荷重 10.0 kgf)

次に、TMB について同様に測定した結果を図 2-51 に示す。木粉と同様に TMB においても 2.16 kgf では流動せずに測定が不可能であったが、10.0 kgf の結果からは木粉に比べて流動性が高い結果が得られた。また、タルクは無機フィラーである為、分解ガスの発生は見られなかった。オリフィス径については 4.0、6.0 mm では数値が大きく管理としては難しい為、2.0 mm が良いと考える。温度については 2.0 mm であればどの温度でも測定可能であるが、210 degree C が中程度の値となり管理しやすいと考える。以上の結果から、オリフィス径 2.0 mm、測定荷重 10.0 kgf、測定温度 210 degree C を TMB の流動性評価条件とすることが好ましいと考える。

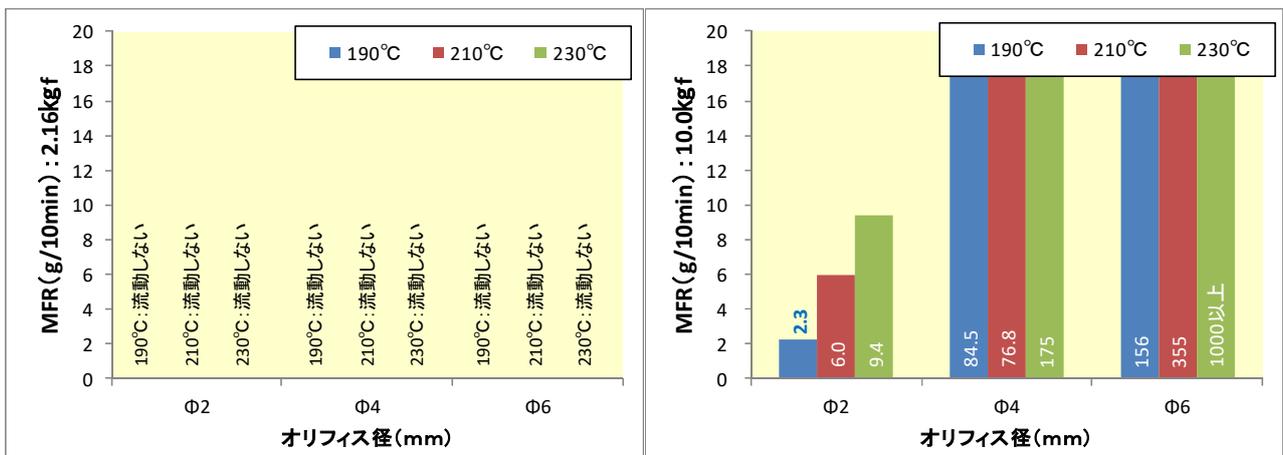


図 2-51 TMB の MFR (左：測定荷重 2.16 kgf、右：測定荷重 10.0 kgf)

#### 2.1.3.4.5 嵩比重・真比重評価

WMB および TMB の嵩比重・真比重を表 2-18 に示す。嵩比重は、次工程である射出成形や押出成形での生産性に影響を及ぼす。材料の組成が正しくても、ペレット形状により嵩比重は変化することから、安定した製品として管理する上では重要な因子である。また、同時に真比重は、用いられるフィラーと樹脂は比重差があり、フィラーと樹脂との比率の変化が真比重に現れるため重要な管理項目となる。

表 2-18 各 MB の嵩比重・真比重 測定結果

g/cm <sup>3</sup>	嵩比重	真比重
WMB	0.6	1.24
TMB	0.87	1.74

#### 2.1.3.4.6 まとめ

MB の製品評価としては、射出成形による試験片での機械特性評価が重要であるが、物性データとしては「2.2.1 技術資料の作成」に記載されている通りであり、ここでは製造現場で管理できる品質管理方法（工程内管理方法）として「2.1.3.4.3 分散性評価」、「2.1.3.4.4 流動性評価」、「2.1.3.4.5 嵩比重・真比重評価」の 3 種類の評価を実施し、工程内でフィラーの組成、分散状態、ペレットの形態を管理できる手法として提案をした。

ただし、本結果は、「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した量産テスト分の評価結果を示しており、ロット数が十分でない現時点では、性能値の目安としての利用に留まる。今後の課題として、対象製品の要求性能を満たす範囲とともに、製造工程能力からくるバラツキの範囲を決定し、本品質管理項目の管理幅を決定する必要があると考えている。

## 2.1.4 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチを利用した性能検証

「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品フィラー充填マスターバッチを再生材プラスチック（家電リサイクルプラスチックや容器包装リサイクル樹脂）に添加し、その効果（機械特性の向上）について検証した。また、フィラー界面における CNF 効果の検証を行い、木粉充填マスターバッチの難燃化技術を確立した。

### 2.1.4.1 フィラー界面における CNF 効果の検証

#### 2.1.4.1.1 概要

フィラーに対する界面特性の評価から、CNF 効果のメカニズムを検証した。

マルチスケール解析により、プラスチック複合材の機械的特性に及ぼす効果を数値解析により検証した。CNF やリアクティブ処理による界面層の特性変化は、損傷の発生と進展に大きく影響し、その影響は応力ひずみ曲線にも表れることが定量的に明らかになった。

#### 2.1.4.1.2 はじめに

「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」にて開発した MB を用いたコンパウンドは、CNF がフィラーとの界面に存在し、酸変性樹脂やその周辺が CNF により補強されている状況が理想状態となる。現状はそのような理想状態ではなく、CNF はプラスチック複合材内で分散して存在している方が多いが、一部には理想状態に近い状態も確認できる。図 2-52 に理想状態の模式図と一例としての透過型電子顕微鏡（TEM）画像を示す。

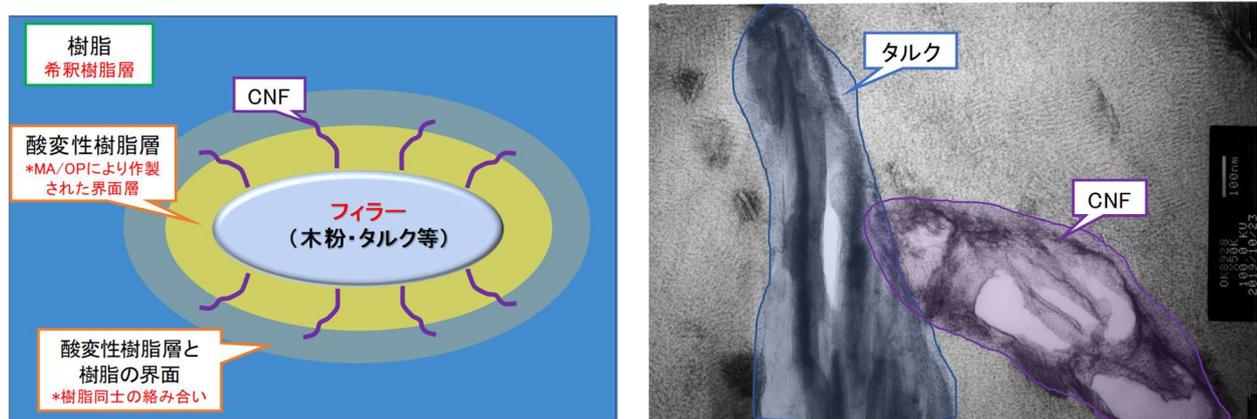


図 2-52 理想状態の模式図（左）とフィラー界面の TEM 画像例（右）

ここではこのような理想状態のフィラー界面における CNF 効果のメカニズムを検証するため、均質化理論に基づいたスケール連成技術を導入し、木粉、界面層としての CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂モデル、母材の PP から構成されたマイクロ構造モデルからマクロ構造における均質化された機械特性を評価することとした。

### 2.1.4.1.3 マルチスケール解析

#### 2.1.4.1.3.1 解析方法

ここでは、均質化法に基づいたマルチスケール解析を採用する。均質化法では、図 2-53 右側に示すように、マイクロ構造を考慮し中央に示すように作成したマイクロモデルが均質に配置していることを仮定しマクロ的に評価する解析である。

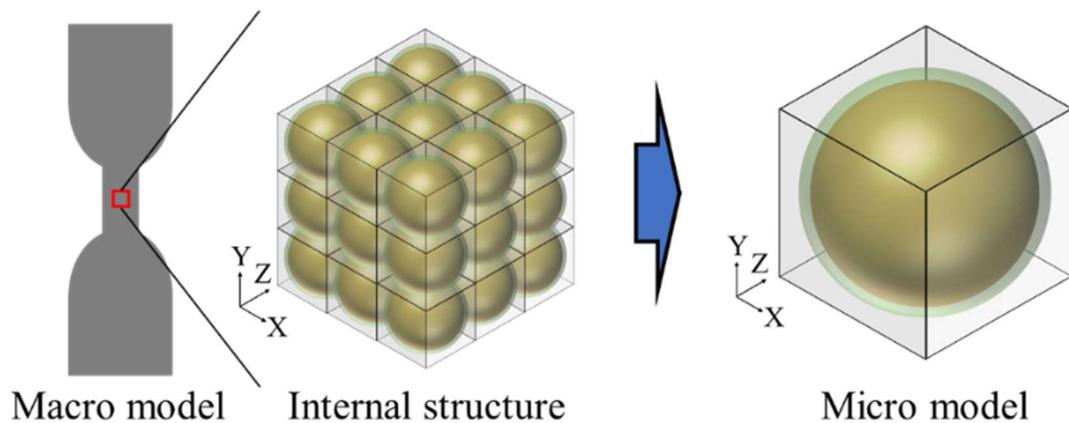


図 2-53 マルチスケールモデリング

#### 2.1.4.1.3.2 解析モデル

マルチスケール解析に使用した複合材のマイクロモデルを図 2-54 に示す。計算効率から理想状態よりも簡略化し、1つの球状の木粉が中央に位置し、木粉を覆うように CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂が存在し、母材樹脂である PP で複合した単一粒子モデルを作成した。本解析では木粉が 20%、樹脂モデルが 15.7%含有しているマイクロ構造モデル（ユニットセル）を作成した。これは「2.1.3.1 酸変性樹脂化最適レシピの確立」にて作製した試験片を基にしている。

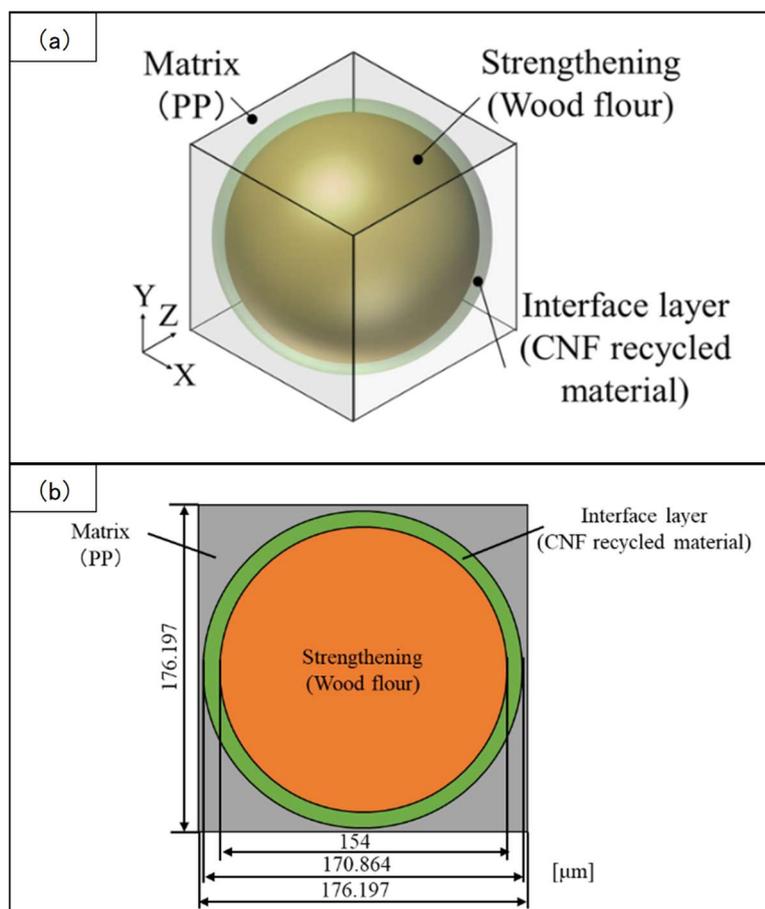


図 2-54 ミクロ構造モデル概要 (左：ユニットセル、右：ミクロ構造モデルの寸法)

本解析では、界面層の物性値を変更することによって CNF 含有の有無およびリアクティブ処理により生じる酸変性樹脂によって、フィラーと樹脂間の界面接着力が向上した界面層（相容化層）の有無による特性の変化を検証した。界面層の条件は、CNF の含有と相容化層の有無を考慮して、CNF 含有無し相容化層無し (Re00) と CNF 含有有り相容化層無し (Re10) の 2 条件のほか、CNF 含有あり相容化層ありの場合とし、相容化層による効果が異なることを考慮し、強度の異なる 3 条件 (強度の低いものから Re10+L、Re10+M、Re10+H) を設定し、弾塑性損傷非線形解析を実施した。本解析に使用した材料物性値および損傷解析条件を表 2-19 にまとめる。さらに、母材の PP は負荷に対して強い非線形性を有することから、PP 単体の引張試験から取得したデータに基づいて図 2-55 で示す応力-塑性ひずみ関係をミクロ構造モデルに入力し、弾塑性非線形性を本解析に入力した。

Re00 および Re10 についても「2.1.2.2 容器包装リサイクル樹脂モデルの作製」で行った引張試験から物性値を取得し、ミクロ構造モデルの界面層に入力し、条件モデルを構築した。木粉および界面層には損傷進展を考慮し、損傷発生判定には最大応力則を使用し、モデル内部に発生する各方向引張応力およびせん断応力が各材料の強度に達した際に損傷発生とした。また、損傷後の各材料の剛性減少率は、数値解析の便宜上、本解析では全て 50% とした。解析条件は Y 方向にひずみを与え、損傷進展を考慮した場合のほか、損傷の影響を明確化するため、材料が全く損傷しない理想状態の場合についても非線形解析を実施した。

表 2-19 解析に使用した材料物性値および損傷解析条件

	Material	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Damage law	Rigidity lowering rate [%]	Tensile strength [MPa]
Strengthening	Wood flour	2.03	0.3	440	Maximum stress	50	37.00
Interface layer	Re00	1.33	0.3	946			29.00
	Re10	1.49					30.36
	Re10+L	1.60					31.00
	Re10+M						35.00
	Re10+H						39.00
Matrix	PP	2.09	0.3	946			

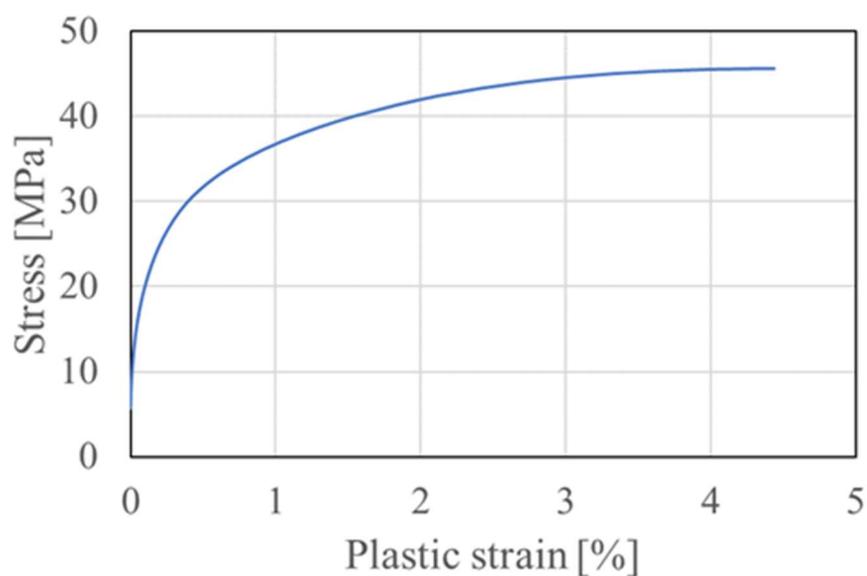


図 2-55 有限要素解析に用いた母材 PP の応力-塑性ひずみ曲線

#### 2.1.4.1.4 解析結果

有限要素解析から得られた応力ひずみ曲線および引張試験から得られた応力ひずみ曲線を図 2-56 に示す。ここでは、損傷発生初期状態に着目し、異なる界面層の応力ひずみ曲線を比較する。なお、実験値では CNF 含有相容化層有りの場合を Re10+ と表す。

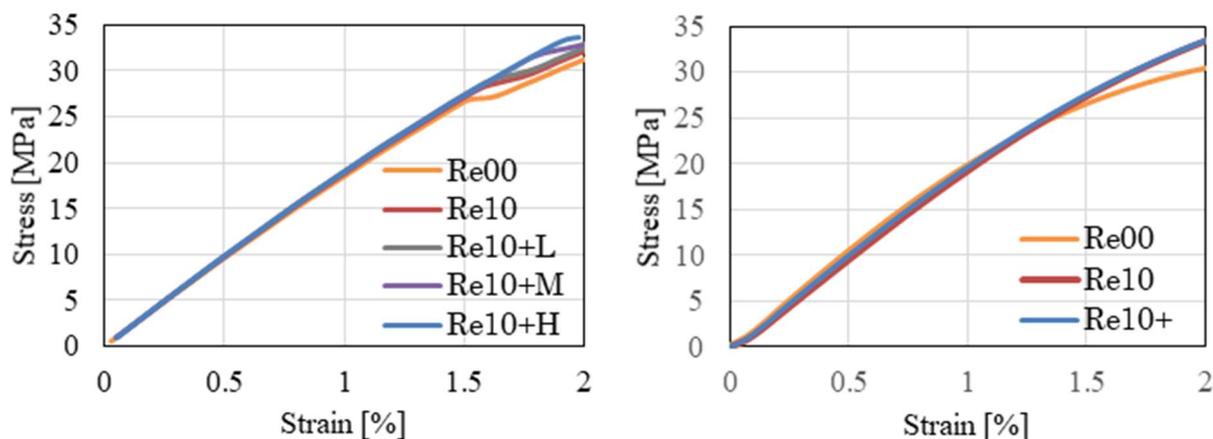


図 2-56 応力ひずみ曲線（左：解析値、右：実測値）

有限要素解析では、負荷ひずみがおよそ 0.5%までは線形性を示した後、母材の塑性変形に伴って非線形性が現れ、負荷ひずみ 1.5%付近から損傷発生による剛性低下も確認でき、引張試験の実験結果と概ね良い一致が確認できる。実験結果では CNF の有無による影響は明確に確認できるが、相容化層の有無は応力ひずみ曲線においてはほとんど認められない。これに対して、有限要素解析では、相容化層の有無による損傷発生に伴う剛性低下が異なり、応力ひずみ曲線においてもその差異が現れている。これは 1 つの木粉のみをモデル化したユニットセルに起因するもので、マイクロ構造内の損傷がマクロ応答において過大評価される傾向にある。実際には、木粉のサイズ、配置、アスペクト比などのマイクロ構造の性状はバラツキを有するため、各粒子における損傷発生や場所に差異が生じて、段階的に損傷が発生、進展する。これにより剛性低下も徐々に応力ひずみ曲線に現れるため、滑らかな応答になる。これらの現象については、複数の木粉をモデル化したマルチ粒子のユニットセルを導入し、マイクロ構造の性状のバラツキを考慮することで、さらに実験に合致する応力ひずみ曲線が得られるものと考ええる。また、実際に作製されたサンプルは理想状態と異なり、CNF が単独で樹脂内に分散している状況にあるものも多数存在し、容器包装リサイクル樹脂自体も複数の成分から構成されているため、界面層についてもバラツキが存在する。これらの不均一な界面状況なども加味することで、さらに実験に合致する応力ひずみ曲線が得られるものと考ええる。なお、本研究では、界面層の影響を感度よく把握できるユニットセルで、CNF の有無、相容化層の効果を明らかにするため、界面層損傷開始時期の解析を行った。損傷発生に及ぼす界面層の影響を把握するため、図 2-57 に初期損傷発生時の負荷ひずみの比較を示す。左から 1 番目は CNF 含有なし、2 番目は CNF を含有して相容化層なし、3 番目以降は CNF を含有して相容化層を添加した場合の結果を示す。CNF の含有によって、初期損傷発生ひずみは 1.49%から 1.59%に増加し、相容化層の効果が高くなるにつれ、初期損傷発生ひずみは 1.59%から 1.98%に高くなることを確認できる。

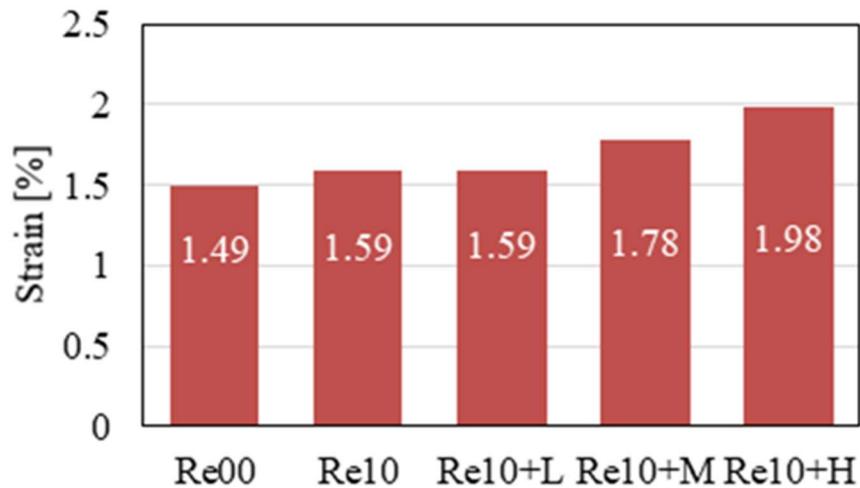


図 2-57 初期損傷発生ひずみに及ぼす界面層特性の影響

損傷発生に及ぼす界面層の影響を比較するため、図 2-58 にマイクロ構造における損傷進展挙動を示す。上から 1 番目は CNF 含有なし、2 番目は CNF を含有して相容化層なし、3 番目以降は CNF を含有して相容化層ありの場合の結果を示し、中央軸は負荷ひずみを意味する。マイクロ構造の垂直方向を負荷方向とし、図中の青は非損傷状態、その他は損傷状態を示す。初期損傷はいずれの場合も、球状の木粉の中心の真上と真下に位置する界面層で発生することが分かる。その後、界面層をマイクロ構造の中央に向かって損傷が進展し、負荷ひずみが 2.0% を超える際には木粉にも損傷が及ぶ場合が確認される。CNF 添加によって損傷の発生と進展が抑制され、相容化層の存在によって損傷の発生と進展が高い負荷ひずみレベルへシフトする傾向が確認できる。

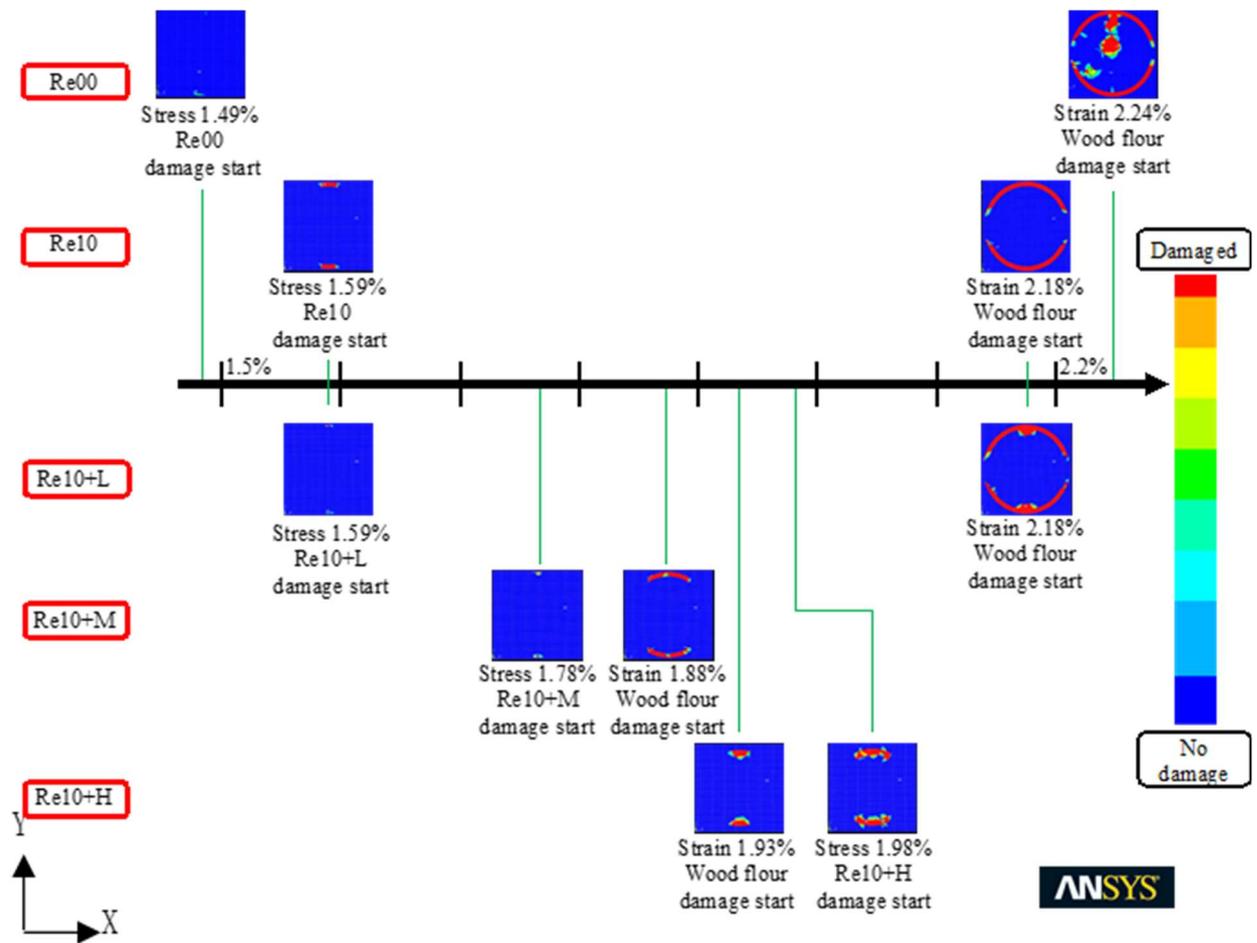


図 2-58 ミクロ構造における損傷進展挙動

#### 2.1.4.1.5 まとめ

マルチスケール解析により、本事業で作製したプラスチック複合材の機械的特性に及ぼす CNF およびリアクティブ処理による相容化層の効果を数値解析により検証した。CNF や相容化層の添加による界面層の特性変化は、損傷の発生と進展に大きく影響し、その影響は応力-ひずみ曲線にも表れることを定量的に明らかにした。しかし、シミュレーション結果と実験値にはずれがあり、より正確なシミュレーションを行うには木粉のサイズ、配置、アスペクト比などのミクロ構造の性状の情報を加味したマルチ粒子のユニットセルを導入し、ミクロ構造の性状のバラツキを考慮することが必要になると考えられる。

## 2.1.4.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証

### 2.1.4.2.1 概要

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品タルク充填マスターバッチを再生材プラスチックに添加し、その効果（機械特性等）について検証した。事業終了後、迅速な実用化に移行するため、信頼性評価も行った。再生材プラスチック添加時においても既存品のタルク 20%配合ポリプロピレン以上の曲げ、引張強度を得られる条件があった。また、高応力下において、再生材プラスチック単体よりも高い疲労特性を示した。

### 2.1.4.2.2 はじめに

本事業では、再生材プラスチックの材料リサイクル利用促進についての検討を行うことを一つの目的としている。「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」において、CNF 複合廃材を含む容器包装リサイクル樹脂のアップグレードリサイクル手法として、リアクティブ処理によって作製したフィラー充填 MB の性能検証を行ってきたが、現行の再生材プラスチック利用の検討も本事業の課題である。本項では「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品タルク充填マスターバッチ（TMB）を既存の再生材プラスチックで希釈した複合材の各種性能を確かめた。

### 2.1.4.2.3 試験体作製手順と評価手法

ラボプラストミルを用いて「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」で作製された TMB を容器包装リサイクル樹脂（広島リサイクルセンター製）および家電リサイクル樹脂（エコフィール社製）でフィラー含有率 20、30、40、50%となるように希釈した。試験体作製手順を図 2-59 に示す。物性値として曲げ、引張、衝撃特性を「2.1.2.2.3.2 物性評価」と同様にして求め、MFR を JIS K 7210 に準拠して測定した。また、迅速な実用化に向けた作製したサンプルの疲労試験を行い、信頼性を評価した。



図 2-59 コンパウンド作製概要

### 2.1.4.2.4 物理的・機械的特性の評価

表 2-20 および図 2-60~66 に物理的・機械的特性の概要を示す。

表 2-20 TMB/再生材プラスチックの物理的・機械的特性概要

希釈樹脂	フィラー 充填率 (wt%)	比重	曲げ強度 (MPa)		曲げ弾性率 (GPa)	引張強度 (MPa)		引張弾性率 (GPa)	衝撃強度 <sup>1)</sup> (kJ/m <sup>2</sup> )		MFR <sup>2)</sup> (g/10 min)
			平均値	標準偏差		平均値	標準偏差		平均値	標準偏差	
容器包装 リサイクル樹脂	20	1.08	39.6	0.1	1.75	28.8	0.1	1.68	37.3	4.2	5.3
	30	1.17	43.0	0.3	2.24	28.6	0.1	1.97	32.0	3.4	4.1
	40	1.27	46.7	0.2	2.98	29.6	0.2	2.34	24.7	1.7	3.5
	50	1.40	50.8	0.1	3.98	30.9	0.1	2.98	18.7	1.1	2.9
家電 リサイクル樹脂	20	1.06	44.9	0.1	2.23	26.4	0.1	1.83	25.9	4.3	20.2
	30	1.15	46.5	0.2	2.74	27.4	0.2	2.20	21.6	3.5	15.1
	40	1.26	49.2	0.2	3.57	28.3	0.1	2.58	16.6	3.6	11.3
	50	1.40	51.8	0.1	4.56	29.7	0.3	3.14	15.5	3.4	6.7

1)ノッチなしアイゾット衝撃試験による衝撃強度、2)熔融温度230℃、荷重2.16kgf

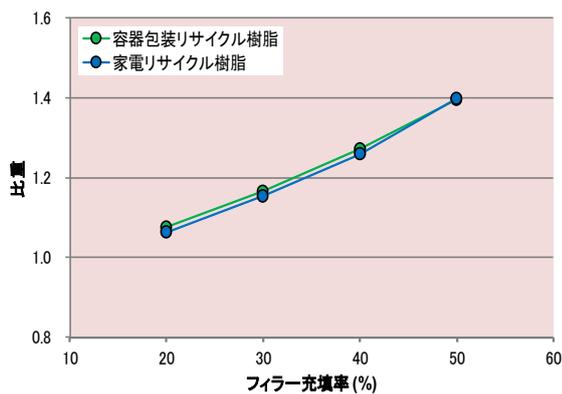


図 2-60 フィラー充填率と比重の関係

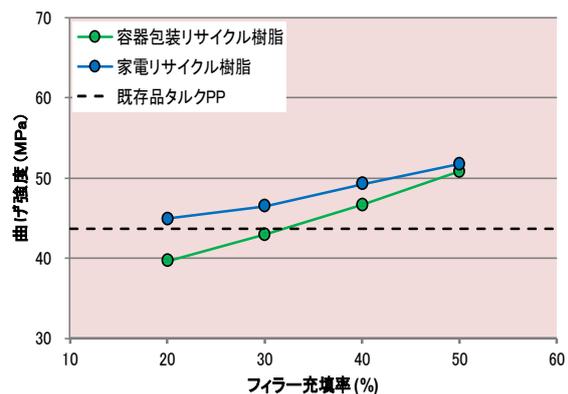


図 2-61 フィラー充填率と曲げ強度の関係

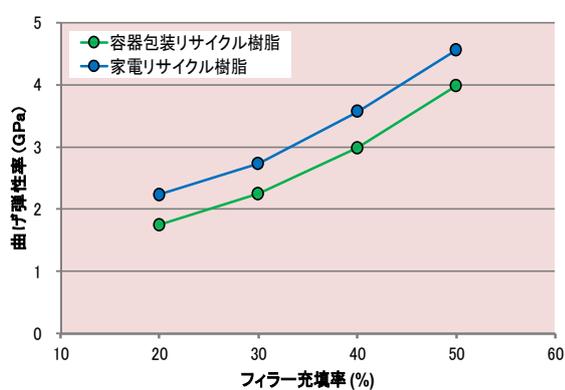


図 2-62 フィラー充填率と曲げ弾性率の関係

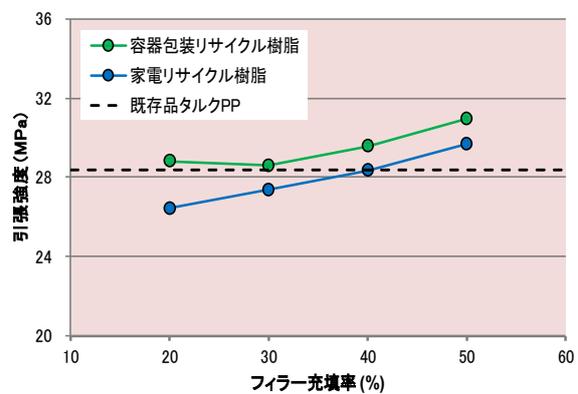


図 2-63 フィラー充填率と引張強度の関係

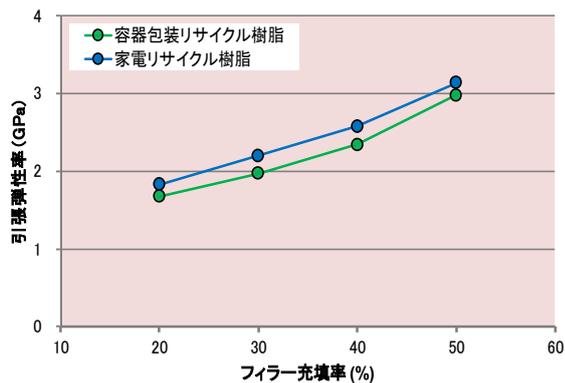


図 2-64 フィラー充填率と引張弾性率

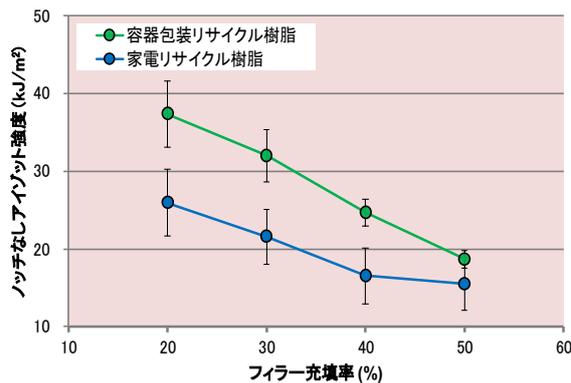


図 2-65 フィラー充填率と衝撃強度

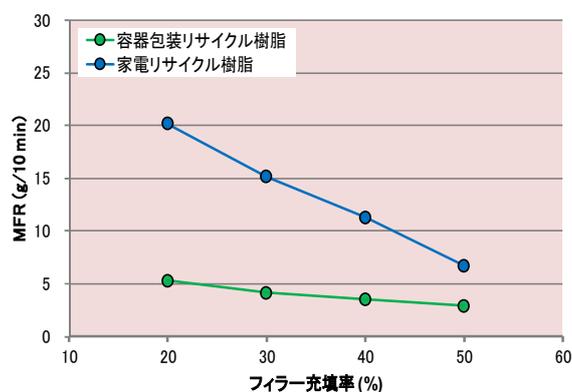


図 2-66 フィラー充填率と MFR

比重はフィラー充填率増加とともに高くなり、再生材プラスチックの種類による差はほとんど見られなかった。曲げ強度もフィラー量増加に伴い、向上した。再生材プラスチックの影響を見ると、容器包装リサイクル樹脂のほうが家電リサイクル樹脂を添加した条件より曲げ強度は低かったが、フィラー量が増加するに伴い、強度差は小さくなり、50%ではほぼ同様となった。また、点線で示した既存品のタルク 20%配合 PP (既存品タルク PP) の強度と比較すると、家電リサイクル樹脂による希釈を行ったサンプルはすべての条件で、容器包装リサイクル樹脂で希釈した条件はフィラー量 40%以上で高い値を示した。MB の添加量を調整することで、既存品よりも強度は向上することが見て取れた。曲げ弾性率は、フィラー量が増加するほど高い値となり、容器包装リサイクル樹脂よりも家電リサイクル樹脂を使用した条件が全般的に高い値を示した。引張強度を見ると、容器包装リサイクル樹脂が全般的に高い値を示した。既存品タルク PP と比較すると、容器包装リサイクル樹脂はすべてで、家電リサイクル樹脂ではフィラー量 30%以上で高い値を示した。曲げ強度と合わせるとフィラー量 40%以上で既存品以上の強度となった。一方、引張弾性率は家電リサイクル樹脂による希釈を行ったほうが高い値を示した。衝撃強度はフィラー量が増加するほど減少し、容器包装リサイクル樹脂のほうが家電リサイクル樹脂よりも高い値を示した。MFR はフィラー量が増加するほど減少し、家電リサイクル樹脂を添加した条件が容器包装リサイクル樹脂を添加した条件より高い値となった。これらは各再生材プラスチック単体よりも高強度であると予想されるため、それらを用いた既存製品、例えばパレットや

冷蔵庫の仕切り板などには使用できると考える。詳細については、「2.2 製品化における実用性評価」にて検討した。

#### 2.1.4.2.5 信頼性評価

ここでは、タルク 20%となるように容器包装リサイクル樹脂で TMB を希釈したサンプル（以降、nP-TPC20-2）を対象とした。この時、比較用としてリアクティブ処理を行っていないタルク充填 MB を同フィラー充填率に希釈したサンプル（以降、nP-TPC20-1）および容器包装リサイクル樹脂（nP）の評価を合わせて行った。

まずは引張試験の結果を示す。図 2-67、表 2-21 に各サンプルの引張試験結果を示す。容器包装リサイクル樹脂にタルクを加えることで、引張強度の向上が見られ、リアクティブ処理を行った場合、破断ひずみが向上することを確認した。これはリアクティブ処理による樹脂の低分子化が関与していると考えられる。この結果をもとに疲労試験を行った。

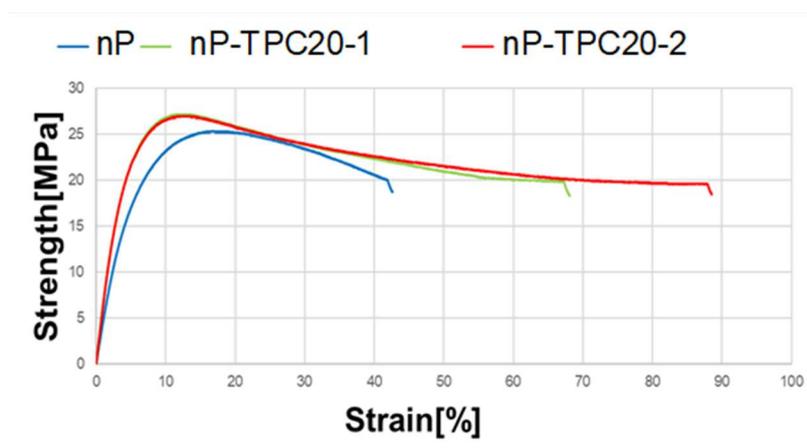


図 2-67 各サンプルの SS カーブ

表 2-21 各サンプルの引張試験結果概要

Specimen type	Strength [MPa]	CV [%]	Elastic Modulus [GPa]	CV [%]
nP	25.6	0.8	0.43	2.0
nP-TPC20-1	26.5	1.9	0.58	1.7
nP-TPC20-2	26.5	2.0	0.57	3.6

図 2-68 に各サンプルの疲労試験結果を示す。高応力側では、タルク含有により、疲労寿命が長くなっていることが確認でき、nP-TPC20-2 と nP-TPC20-1 の間に大きな差は見られなかった。しかし低応力側では nP-TPC20-2 の疲労寿命は nP-TPC20-1 よりもわずかに短かった。界面を含むタルク周辺においてはタルクの剛性が母相より高いために応力集中が起りやすく、低応力負荷であったとしてもこの近辺からき裂が発生しやすくなると考えられる。したがって、リアクティブ処理の有無というより、タルクの有無で引張強度も疲労寿命が左右されたと考える。よって、高応力での使用においては nP 単体よりも本事業開発品は優れていると判断でき、短期強度においては、リアクティブ処理を行うことで、破壊までの変形を改善できることが示された。

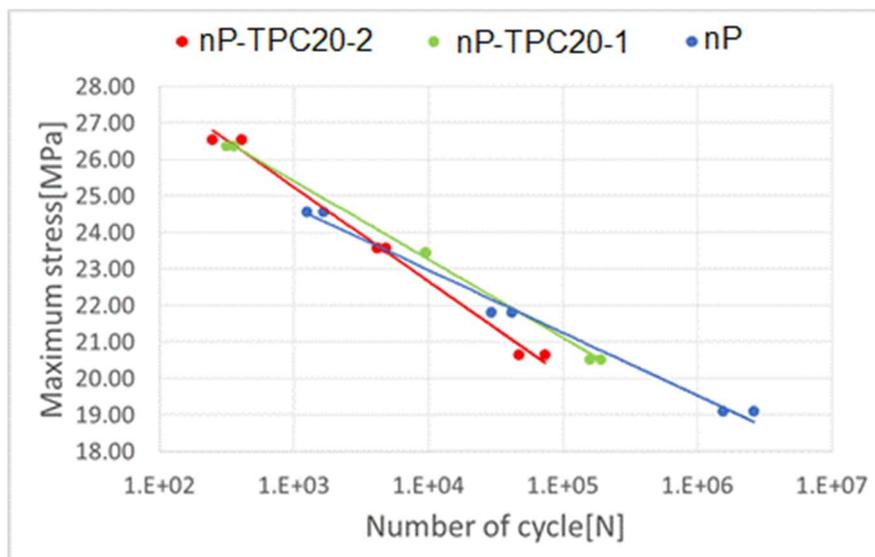


図 2-68 各サンプルの疲労試験結果

#### 2.1.4.2.6 まとめ

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品タルク充填マスターバッチ (TMB) を再生材プラスチックに添加し、その効果 (機械特性等) について検証した。フィラー量 40%以上であれば、再生材プラスチックを添加した条件でも既存品のタルク 20%配合 PP 以上の曲げ、引張強度を得ることができた。信頼性評価の結果から、高応力環境下において、本事業開発品は再生材プラスチック単体よりも高い耐久性を持つことが分かった。また、短期強度からリアクティブ処理により、破壊までの変形を改善できることが分かった。ただし、これは 1 ロットの結果であり、再生材プラスチックはロットごとのバラツキが大きいいため、バラツキを考慮した指標の作製が今後必要となる。

### 2.1.4.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証

#### 2.1.4.3.1 概要

「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品木粉充填マスターバッチを再生材プラスチックに添加し、その効果（機械特性等）について検証した。

再生材プラスチック添加時において、20%以上の木粉含有率なら、既存品のタルク 20%配合 PP 以上の曲げ、引張強度を得られることが分かった。

#### 2.1.4.3.2 はじめに

「2.1.4.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証」と同様の背景により、本項では「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品木粉充填マスターバッチ（WMB）を既存の再生材プラスチックで希釈した複合材の各種性能を確かめた。

#### 2.1.4.3.3 試験体作製手順と評価手法

ラボプラストミルを用いて「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した WMB を容器包装リサイクル樹脂（広島リサイクルセンター製）および家電リサイクル樹脂（エコフィール社製）でフィラー含有率 20、30、40、50%となるように希釈した。サンプル作製手法および評価手法は「2.1.4.2.3 試験体作製手順と評価手法」と同様である。

#### 2.1.4.3.4 物理的・機械的特性の評価

表 2-22 に求めた物性値の概要を示す。また、図 2-69～74 に各物性値とフィラー充填率のグラフを示す。

表 2-22 WMB/再生材プラスチックの物理的・機械的特性概要

希釈樹脂	フィラー充填率 (wt%)	比重	曲げ強度 (MPa)		曲げ弾性率 (GPa)	引張強度 (MPa)		引張弾性率 (GPa)	衝撃強度 <sup>1)</sup> (kJ/m <sup>2</sup> )		MFR <sup>2)</sup> (g/10 min)
			平均値	標準偏差		平均値	標準偏差		平均値	標準偏差	
容器包装 リサイクル樹脂	20	1.01	45.2	0.2	1.99	30.5	0.3	1.76	20.6	0.9	4.1
	30	1.05	52.5	0.2	2.73	33.6	0.4	2.17	17.0	0.8	3.2
	40	1.09	58.8	0.2	3.46	37.2	0.3	2.64	13.3	1.6	2.2
	50	1.14	63.3	1.6	4.16	40.9	0.1	3.13	12.8	0.7	1.6
家電 リサイクル樹脂	20	1.00	49.3	0.2	2.32	29.8	0.1	1.97	18.1	2.4	16.4
	30	1.04	55.5	0.3	2.95	33.2	0.2	2.35	16.4	0.9	10.9
	40	1.08	62.3	0.3	3.82	36.3	0.3	2.73	15.3	0.7	5.9
	50	1.13	68.3	0.5	4.70	40.5	0.1	3.17	14.4	1.0	2.3

1)ノッチなしアイゾット衝撃試験による衝撃強度、2)溶融温度230°C、荷重2.16kgf

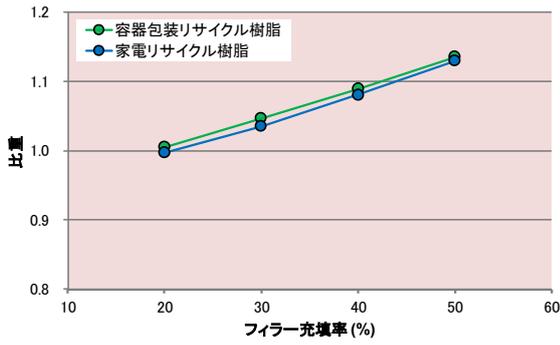


図 2-69 フィラー充填率と比重の関係

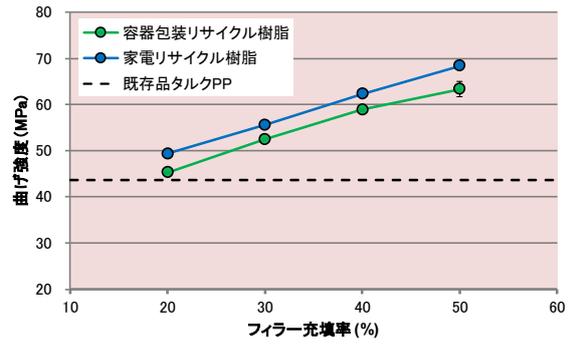


図 2-70 フィラー充填率と曲げ強度の関係

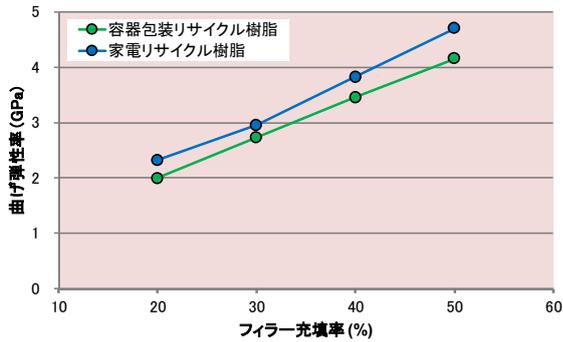


図 2-71 フィラー充填率と曲げ弾性率の関係

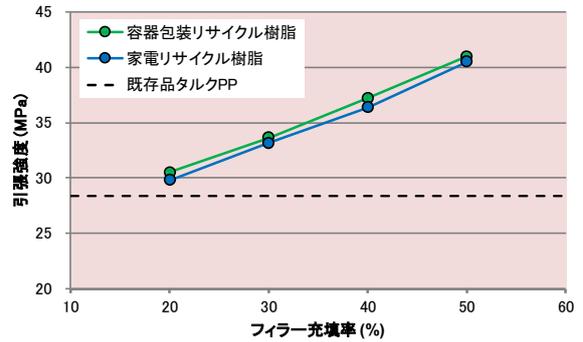


図 2-72 フィラー充填率と引張強度の関係

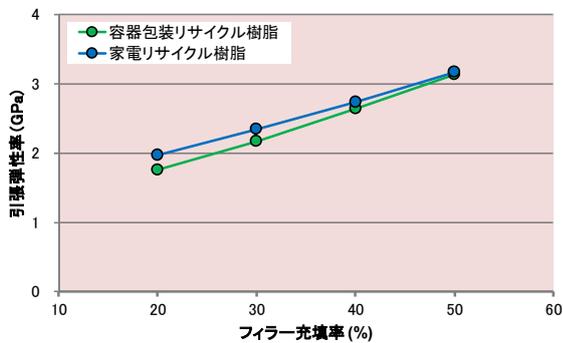


図 2-73 フィラー充填率と引張弾性率

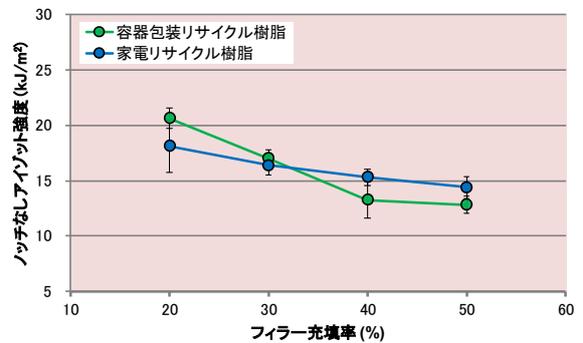


図 2-74 フィラー充填率と衝撃強度

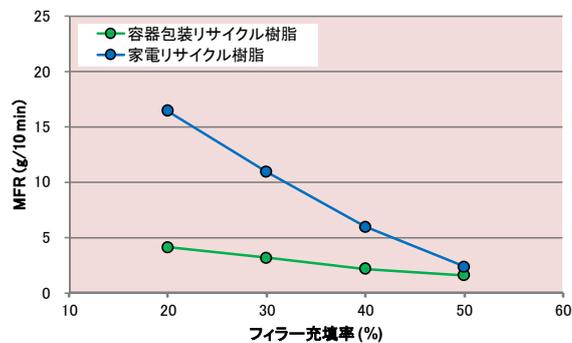


図 2-75 フィラー充填率と MFR

比重はフィラー充填率増加とともに高い値となり、再生材プラスチックの種類による差は見られなかった。曲げ強度はフィラー量増加に伴って向上し、容器包装リサイクル樹脂のほうが家電リサイクル樹脂を添加した条件より強度は低かった。また、図中の点線として表示した既存品のタルク 20%配合 PP（既存品タルク PP）と比較すると、曲げ強度はすべての条件で高い値を示した。曲げ弾性率は、フィラー量が増加するほど高い値となり、容器包装リサイクル樹脂よりも家電リサイクル樹脂を使用した条件が全般的に高い値を示した。引張強度を見ると、フィラー量の増加に伴い、強度は高くなり、再生材プラスチックの種類による差はあまり見られなかった。既存品のタルク 20%配合 PP と比較すると、すべての条件で高い引張強度を示した。曲げ強度と合わせるとすべてのフィラー量、再生材プラスチックの種類で既存品以上の強度となることが示された。引張弾性率はフィラー量が増加するほど向上し、家電リサイクル樹脂による希釈を行ったほうが高い強度を示したが、フィラー量が増加するほど差は小さくなり、50%では容器包装リサイクル樹脂と同程度の値となった。衝撃強度はフィラー量が増加するほど減少し、20%では容器包装リサイクル樹脂のほうが家電リサイクル樹脂よりも高い値を示したが、30%以上では差はみられなくなった。MFR はフィラー量が増加するほど減少し、家電リサイクル樹脂を添加した条件が容器包装リサイクル樹脂より高い値となった。既存製品と比較することを考えると、容器包装リサイクル樹脂、家電リサイクル樹脂単体よりも曲げ、引張強度は向上しているため、既存の再生材プラスチック製品、例えばパレットや冷蔵庫の仕切り板などに使用することができると思う。詳細については、「2.2 製品化における実用性評価」にて検討した。

#### 2.1.4.3.5 まとめ

「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品木粉充填マスターバッチ（WMB）を再生材プラスチック（家電、容器包装リサイクル樹脂）に添加し、その効果（機械特性等）について検証した。木粉 20%以上の条件で、再生材プラスチック添加時においても既存品のタルク 20%配合 PP 以上の曲げ、引張強度を得られた。今後の課題としては、タルクを用いたマスターバッチと同様に、再生材プラスチックのバラツキを考慮した指標の作製が必要となる。

#### 2.1.4.4 用途拡大に向けた難燃化技術の確立

##### 2.1.4.4.1 概要

「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品木粉充填マスターバッチについて、家電・OA 機器への用途展開に必要な難燃化について、そのレシピの検討を実施した。評価方法として代表的な UL-94 規格に則って難燃性試験を行った。容器包装リサイクル樹脂を母材として、木粉 20%、難燃剤 40% 添加した試料が UL-94 規格 V-0 レベルを達成し、その他の試料では UL-94 規格 HB レベルを示した。また、酸素指数測定試験およびコーンカロリメータ試験の結果より、難燃剤なしの試料と比較して、難燃剤 40% の試料では、総煙生成量が大きい値であることより難燃剤によって不燃性ガスが生成されたことが考えられた。また燃焼後の残渣より、木粉を炭素源として難燃剤によって炭化層の形成が促進されたことが考えられた。これら不燃性ガスの生成と炭化層の形成によって難燃特性が向上した。

##### 2.1.4.4.2 難燃化の基本的な考え

プラスチックの難燃化には、不燃性ガスの気相による難燃機構と炭化層形成の固相による難燃機構が有効である。木材の主成分であるセルロースは完全に脱水炭化すると水と炭素になり、膨張系難燃剤のポリリン酸アンモニウム (APP) によってセルロースの脱水反応は促進される。セルロースの脱水反応で発生した水や APP から離脱したアンモニアによって不燃性ガスの気相による難燃機構が期待できる。また、セルロースの脱水反応によって生成された炭素と APP の作用によって、熱や可燃性ガスを遮断する炭化層が形成され、炭化層形成の固相による難燃機構が期待できる。

##### 2.1.4.4.3 試験方法

###### 2.1.4.4.3.1 材料構成

「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品木粉充填マスターバッチ (WMB)、APP および 3 種類の希釈樹脂、バージン PP (J707EG)、家電リサイクル樹脂、容器包装リサイクル樹脂を複合した試料を用い、難燃性を評価した。表 2-23 に検討した各レシピを示す。

表 2-23 テスト条件 15 水準

	WMB (%)	J707EG (%)	家電 リサイクル樹脂 (%)	容器包装 リサイクル樹脂 (%)	難燃剤 APP (%)
CNF-FR1	28.6	71.4	0	0	0
CNF-FR2	28.6	61.4	0	0	10.0
CNF-FR3	28.6	51.4	0	0	20.0
CNF-FR4	28.6	41.4	0	0	30.0
CNF-FR5	28.6	0	71.4	0	0
CNF-FR6	28.6	0	61.4	0	10.0
CNF-FR7	28.6	0	51.4	0	20.0
CNF-FR8	28.6	0	41.4	0	30.0
CNF-FR9	28.6	0	0	71.4	0
CNF-FR10	28.6	0	0	61.4	10.0
CNF-FR11	28.6	0	0	51.4	20.0
CNF-FR12	28.6	0	0	41.4	30.0
CNF-FR13	28.6	31.4	0	0	40.0
CNF-FR14	28.6	0	31.4	0	40.0
CNF-FR15	28.6	0	0	31.4	40.0

#### 2.1.4.4.3.2 燃焼試験方法

表 2-23 で示した 15 水準すべてで UL94 規格に基づき水平燃焼試験を実施した。幅 13 mm、長さ 125 mm、厚さ 1.6 mm と幅 13 mm、長さ 125 mm、厚み 3.2 mm の 2 種類の試験片を射出成形で作製し、試験に用いた。すべての試験片は試験前に熱風乾燥機で 80 degree C×24 h 以上の熱風乾燥処理を行った。試験片の本数は各試料につき 5 本とした。

水平燃焼試験において自己消火性を示した試料のみに対して、UL94 規格に基づき垂直燃焼試験を実施した。水平燃焼試験と同様、厚さ 1.6 mm と 3.2 mm の 2 種類の試験片を試験に用いた。すべての試験片は試験前に熱風乾燥機で 80 degree C×24 h 以上の熱風乾燥処理を行った。試験片の本数は各試料につき 5 本とした。

#### 2.1.4.4.3.3 酸素指数測定試験

燃焼特性を定量的に評価するために酸素指数測定試験を行った。酸素指数測定試験は、3 種類の希釈樹脂に対して難燃剤添加率がそれぞれ 0%、40%である全 6 条件で行った。射出成形によって直径 145 mm、厚み 3 mm の円盤を作製し、その後、幅 6.5 mm、長さ 80 mm に切り出した試験片を用いて試験を行った。試験は JIS K 7201-2「プラスチック—酸素指数による燃焼性の試験方法」に従って実施した。酸素指数測定試験によって、材料が辛うじて燃え続けることのできる限界の酸素濃度を示す酸素指数を測定した。酸素指数の値が大きい程、難燃性は良く、一般的には 27 以上が難燃性と言える。

#### 2.1.4.4.3.4 コーンカロリメータ試験

燃焼特性を定量的に評価するためにコーンカロリメータ試験を行った。コーンカロリメータ試験は、3種類の希釈樹脂の難燃剤添加率がそれぞれ0%、40%の全6条件で行った。射出成形によって直径145 mm、厚み3 mmの円盤を作製し、その後、100 mm×100 mmの正方形に切り出した試験片を用いて試験を行った。

試験はISO 5660-1「Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)」に従って実施した。コーンカロリメータ試験によって、発熱速度、発熱量、質量減少、総煙生成量を測定した。

#### 2.1.4.4.4 試験結果

##### 2.1.4.4.4.1 燃焼試験

J707EG、家電リサイクル樹脂、容器包装リサイクル樹脂の水平燃焼試験結果をそれぞれ表2-24～26に示す。ここで、燃焼速度は各条件において、自己消火性を示さなかった試験片の燃焼速度の平均値である。また、燃焼試験の様子を図2-76～90に示す。ここで図中のTは接炎開始から経過時間であり、一度でも自己消火性を示した試料に関してはその様子を掲載している。

3種類の母材すべてにおいて、APP添加量が0%、10%、20%である試料において自己消火性を示さなかった。これらの試料は燃焼速度がUL94規格のHBレベル判定基準：厚さ3 mm未満の試料で燃焼速度75 mm/min以下、厚さ3 mm以上の試料で燃焼速度40 mm/min以下を示したため、UL94規格HBレベルと判定した。また、3種類の母材すべてにおいて、APP添加量が30%の試料では、厚みが1.6 mmの試験片では自己消火性を示さなかったが、厚みが3.2 mmの試験片では自己消火性を示すものもあった。しかしながら、上記の自己消火性と燃焼速度から、これらの試料においてもUL94規格HBレベルと判定した。PP J707EG、家電リサイクル樹脂において、APPの添加量が40%の試料で、厚みが3.2 mmの試験片では全て自己消火性を示したが、厚みが1.6 mmの試験片では、自己消火性を示さないものもあった。上記の自己消火性と燃焼速度から、これらの試料においてもUL94規格HBレベルと判定した。容器包装リサイクル樹脂を母材に、APPの添加量が40%である条件CNF-FR15のみで、厚みが1.6 mm、3.2 mmの両方の試験片で、5回の試験すべてで自己消火性を示した。

表 2-24 水平燃焼試験結果 (PP J707EG)

No,	厚み t [mm]	燃焼速度 [mm/min]	自己消火 サンプル数	UL94 規格
CNF-FR1	1.6	59.8	0	HB
	3.2	39.5	0	
CNF-FR2	1.6	37.5	0	HB
	3.2	30.5	0	
CNF-FR3	1.6	47.4	0	HB
	3.2	26.4	0	
CNF-FR4	1.6	37.8	0	HB
	3.2	16.8	3	
CNF-FR13	1.6	20.6	2	HB
	3.2	-	5	

表 2-25 水平燃焼試験結果 (家電リサイクル樹脂)

No,	厚み t [mm]	燃焼速度 [mm/min]	自己消火 サンプル数	UL94 規格
CNF-FR5	1.6	55.2	0	HB
	3.2	33.8	0	
CNF-FR6	1.6	53.2	0	HB
	3.2	33.9	0	
CNF-FR7	1.6	45.4	0	HB
	3.2	22.2	0	
CNF-FR8	1.6	33.9	0	HB
	3.2	17.4	3	
CNF-FR14	1.6	24.0	3	HB
	3.2	-	5	

表 2-26 水平燃焼試験結果 (容器包装リサイクル樹脂)

No,	厚み t [mm]	燃焼速度 [mm/min]	自己消火 サンプル数	UL94 規格
CNF-FR9	1.6	52.6	0	HB
	3.2	36.9	0	
CNF-FR10	1.6	44.5	0	HB
	3.2	31.8	0	
CNF-FR11	1.6	37.7	0	HB
	3.2	22.9	0	
CNF-FR12	1.6	29.4	0	HB
	3.2	15.2	4	
CNF-FR15	1.6	-	5	自己消火
	3.2	-	5	

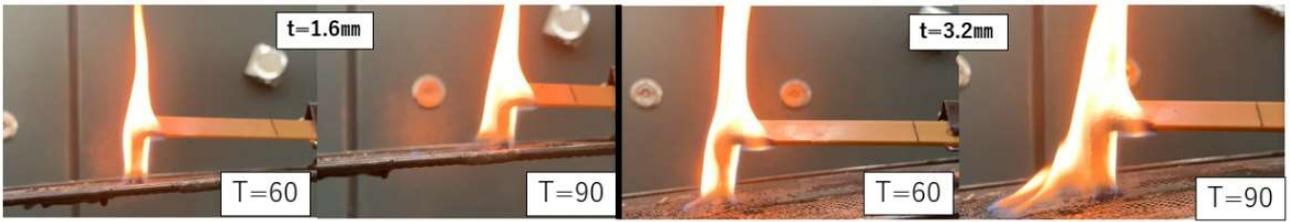


图 2-76 水平燃烧试验 (CNF-FR1)

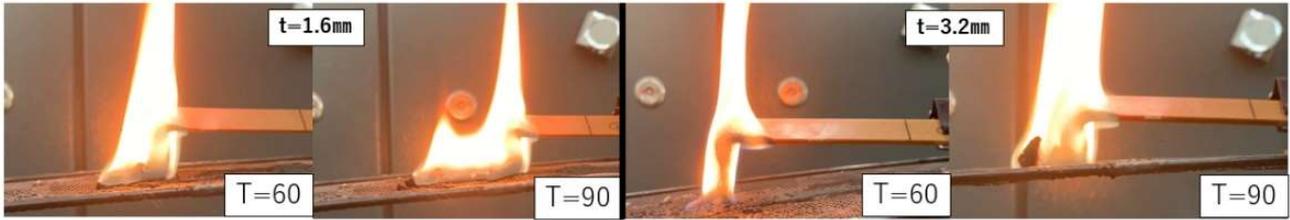


图 2-77 水平燃烧试验 (CNF-FR2)

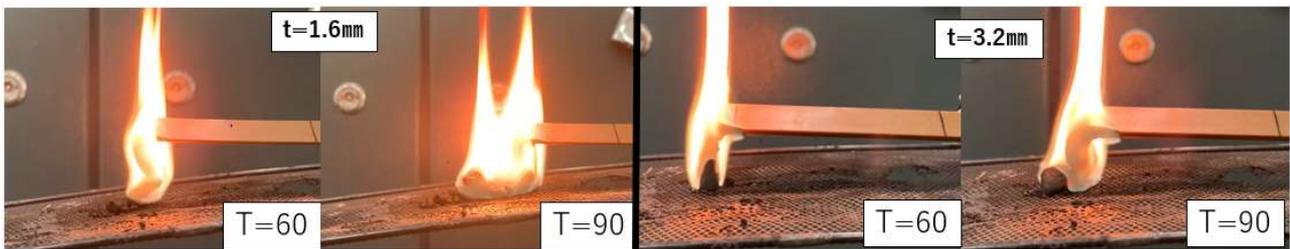


图 2-78 水平燃烧试验 (CNF-FR3)

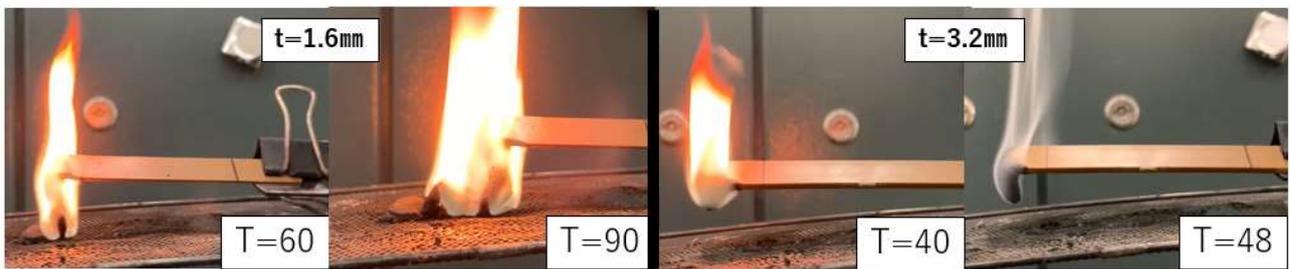


图 2-79 水平燃烧试验 (CNF-FR4)

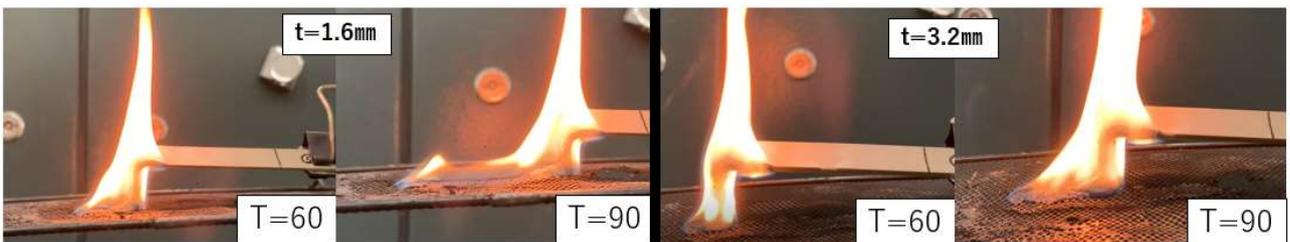


图 2-80 水平燃烧试验 (CNF-FR5)

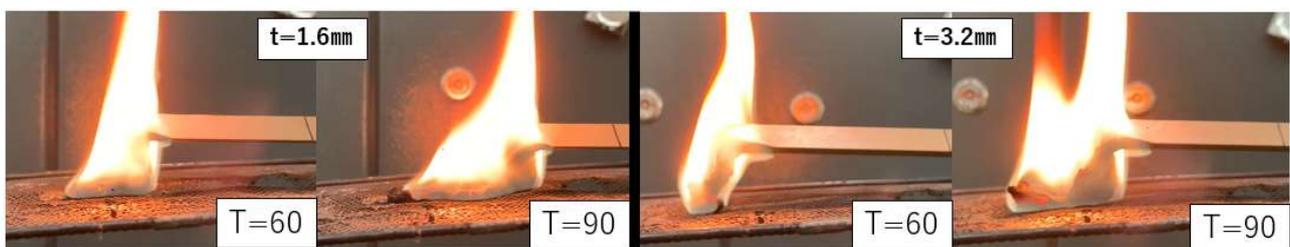


图 2-81 水平燃烧试验 (CNF-FR6)

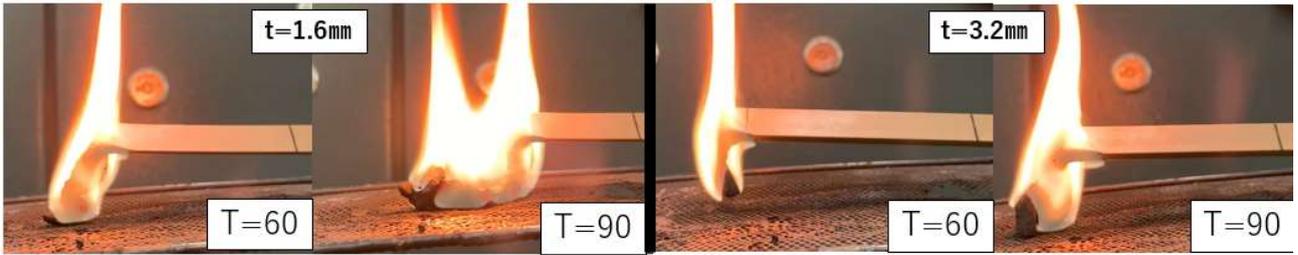


图 2-82 水平燃烧试验 (CNF-FR7)

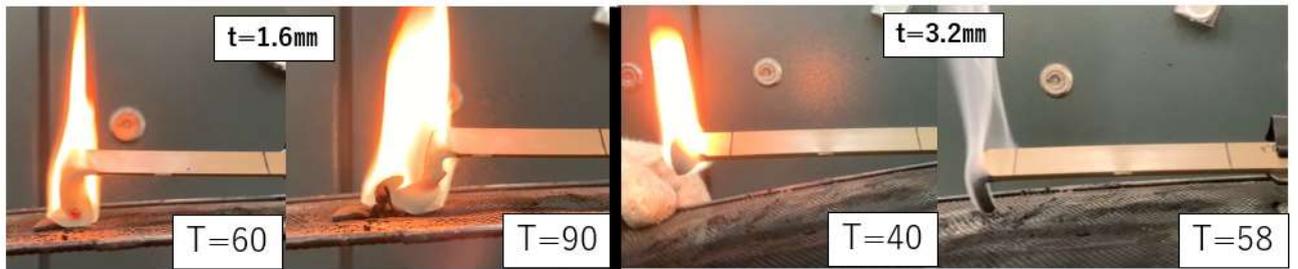


图 2-83 水平燃烧试验 (CNF-FR8)

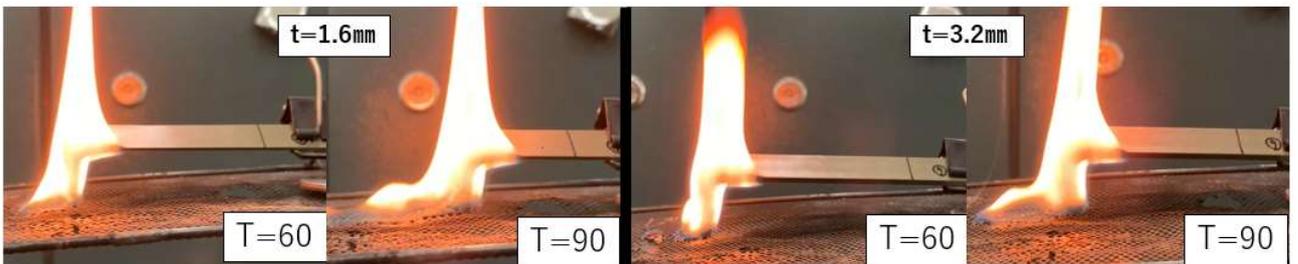


图 2-84 水平燃烧试验 (CNF-FR9)

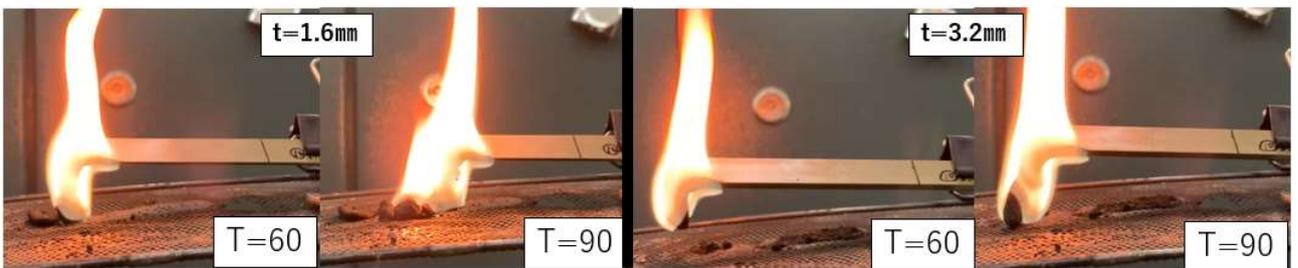


图 2-85 水平燃烧试验 (CNF-FR10)

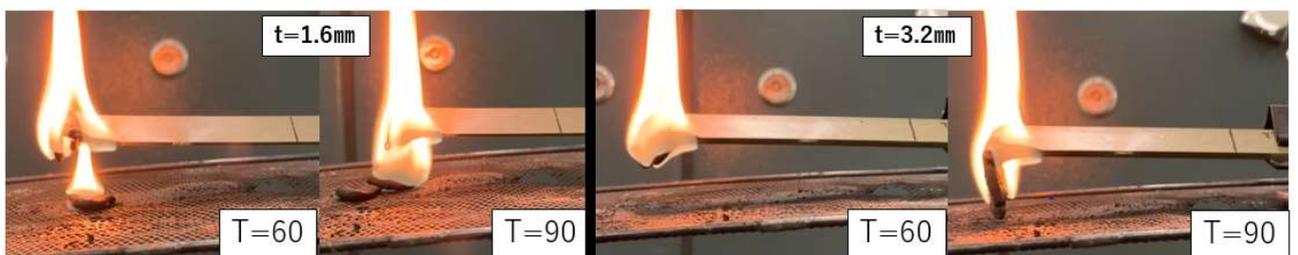


图 2-86 水平燃烧试验 (CNF-FR11)

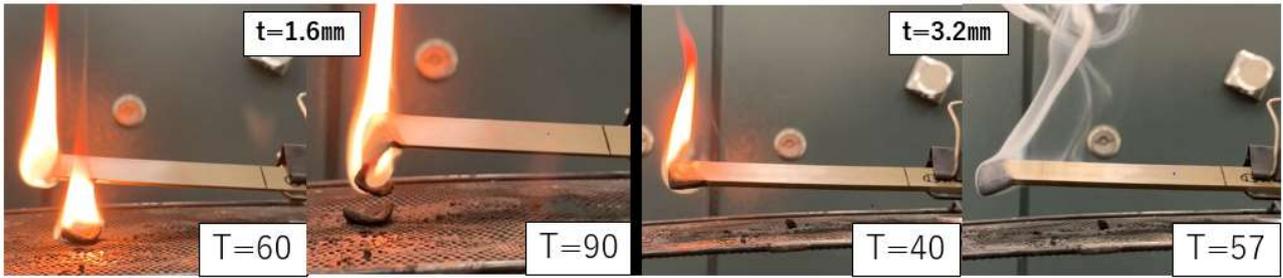


図 2-87 水平燃焼試験 (CNF-FR12)

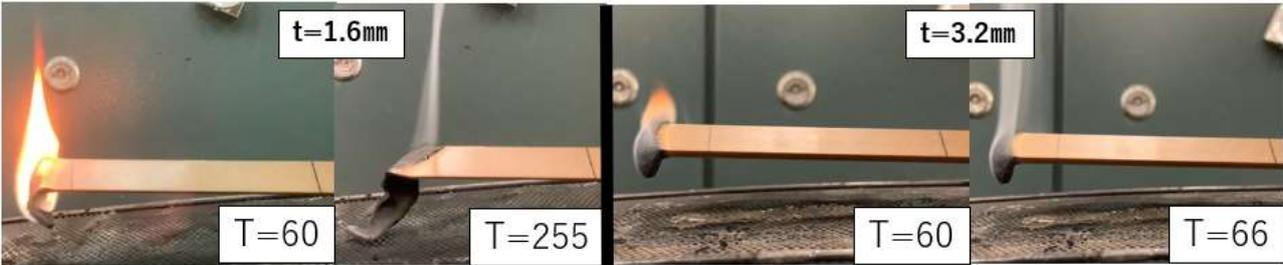


図 2-88 水平燃焼試験 (CNF-FR13)

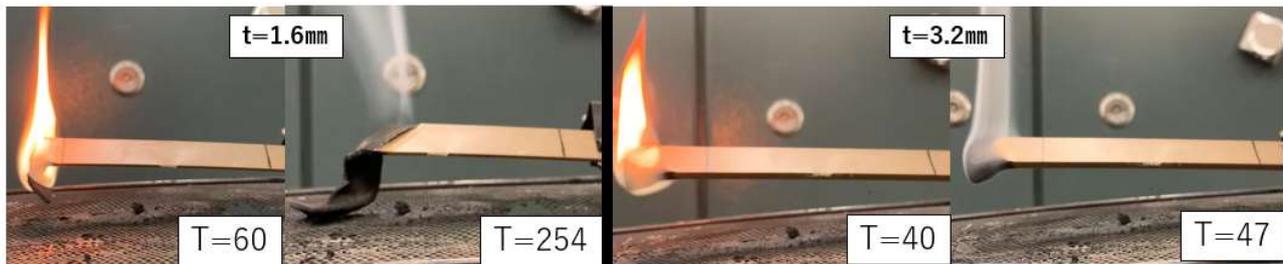


図 2-89 水平燃焼試験 (CNF-FR14)

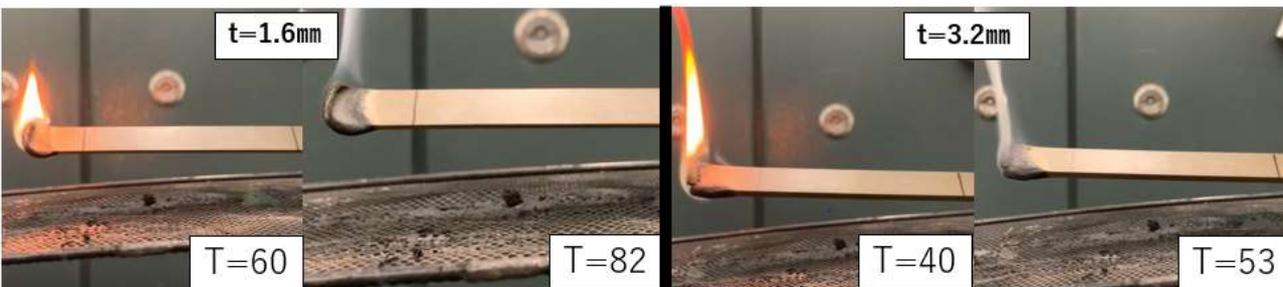


図 2-90 水平燃焼試験 (CNF-FR15)

水平燃焼試験において自己消火性を示した APP 添加量が 40%で母材が容器包装リサイクル樹脂である CNF-FR15 に加えて、比較対象として UL94 規格 HB レベルと判定された同じく APP 添加量が 40%で母材が PP J707EG である CNF-FR13、母材が家電リサイクル樹脂である CNF-FR14 の 3 水準について垂直燃焼試験を行った。その結果を表 2-27～29 に示す。また、試験の様子を図 2-91～96 に示す。ここで、図中の T は 1 度目の接炎開始からの経過時間である。

CNF-FR13 に関して、厚みが 3.2 mm の試験片では全て 1 度目および 2 度目の接炎後、直に自己消火した。一方、厚みが 1.6 mm の試験片では全て 1 度目の接炎後では直に自己消火したが、2 度目の接炎後では自己消火せず滴下やクランプ部までの燃焼が確認された。CNF-

FR14 に関しても、厚みが 1.6 mm の試験片では 1 度目と 2 度目の接炎後で直に自己消火したのもあったが、その他は CNF-FR13 と同様の試験結果を示した。CNF-FR15 に関しては、厚みが 1.6 mm、3.2 mm の両方の全ての試験片において、1 度目と 2 度目の接炎後とも直に自己消火した。また、滴下物やクランプ部までの燃焼も確認されなかった。したがって、CNF-FR15 においては、UL94 規格 V-0 レベルと判定した。

表 2-27 垂直燃焼試験結果 (CNF-FR13)

CNF-FR13				
t=1.6			t=3.2	
No	残炎時間①[s]	残炎時間②[s]	残炎時間①[s]	残炎時間②[s]
1	0	滴下	0	1
2	0	滴下	1	1
3	0	滴下	1	1
4	0	滴下	1	1
5	3	滴下	1	0

表 2-28 垂直燃焼試験結果 (CNF-FR14)

CNF-FR14				
t=1.6			t=3.2	
No	残炎時間①[s]	残炎時間②[s]	残炎時間①[s]	残炎時間②[s]
1	1	1	1	1
2	0	滴下	0	0
3	1	滴下	0	0
4	0	滴下	0	0
5	0	滴下	0	0

表 2-29 垂直燃焼試験結果 (CNF-FR15)

CNF-FR15				
No	t=1.6		t=3.2	
	残炎時間①[s]	残炎時間②[s]	残炎時間①[s]	残炎時間②[s]
1	1	1	1	1
2	1	1	0	1
3	0	1	0	1
4	0	2	2	2
5	0	1	0	2

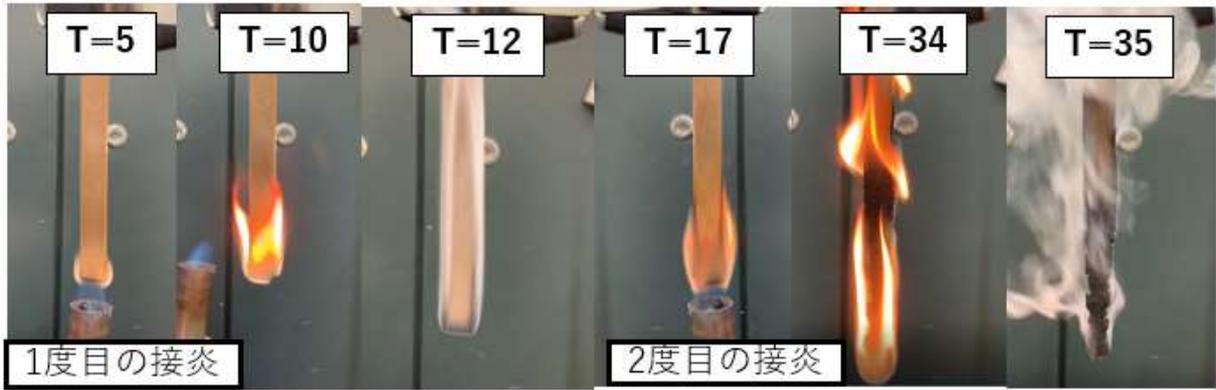


図 2-91 垂直燃焼試験 (CNF-FR13 t=1.6mm)

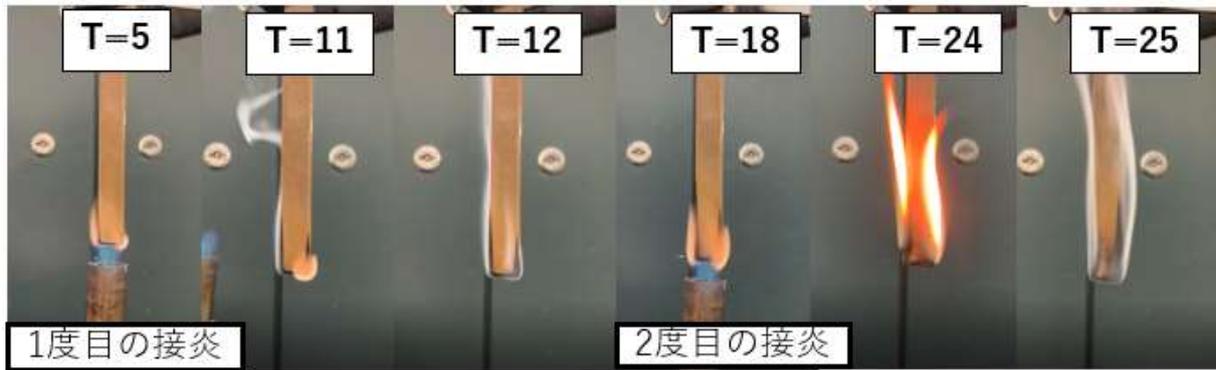


図 2-92 垂直燃焼試験 (CNF-FR13 t=3.2mm)

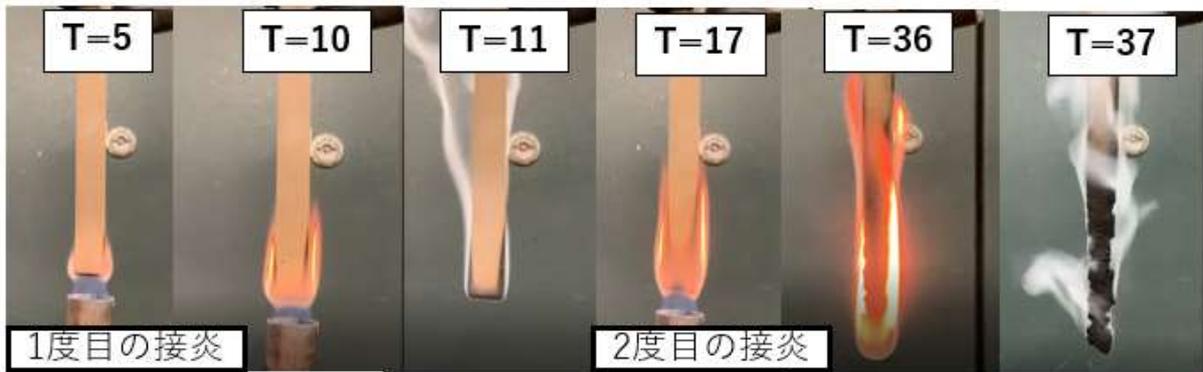


図 2-93 垂直燃焼試験 (CNF-FR14 t=1.6mm)

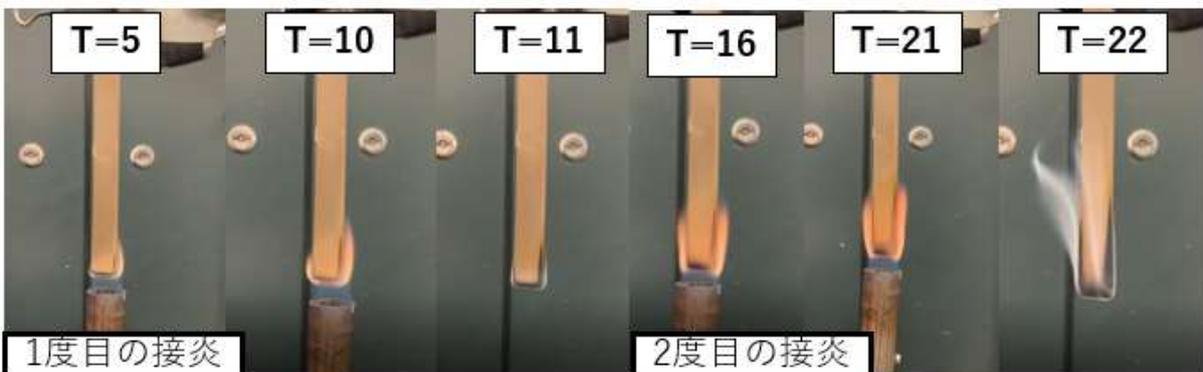


図 2-94 垂直燃焼試験 (CNF-FR14 t=3.2mm)

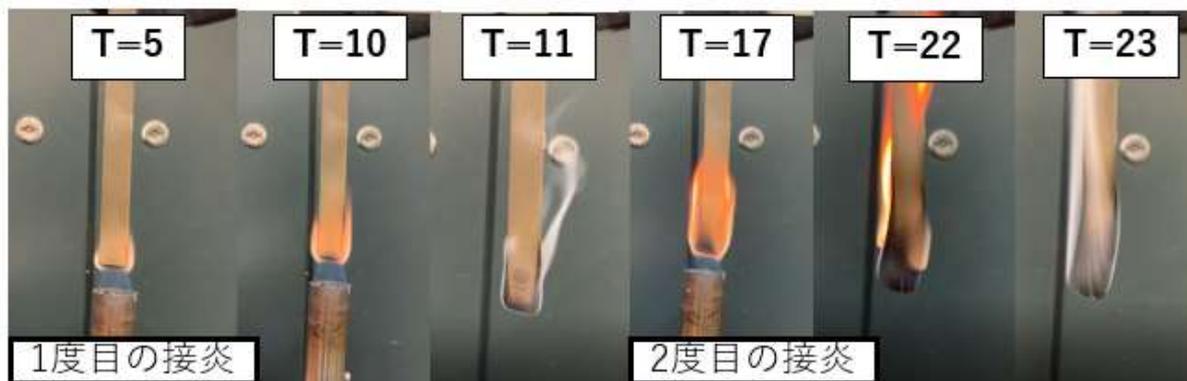


図 2-95 垂直燃焼試験 (CNF-FR15 t=1.6mm)

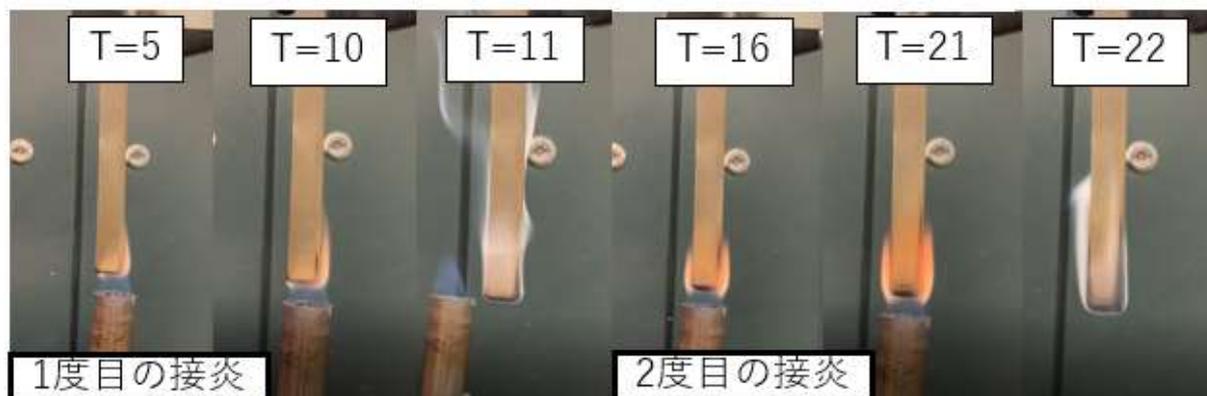


図 2-96 垂直燃焼試験 (CNF-FR15 t=3.2mm)

#### 2.1.4.4.2 酸素指数測定試験

酸素指数測定試験を行った 3 種類の各希釈樹脂に対して難燃剤添加率がそれぞれ 0%、40%である全 6 条件の結果を表 2-30 に示す。また、各試料での酸素指数測定試験の様子を図 2-97～102 に示す。

難燃剤である APP を 40%添加することによって、APP を添加していない状態と比較して、PP J707EG が母材の条件では 7.8%、家電リサイクル樹脂が母材の条件では 8.0%、容器包装リサイクル樹脂が母材の条件では 9.5%、それぞれ酸素指数が上昇した。酸素指数測定を行うことによって CNF-FR15 が最も良い難燃特性を有していることが定量的に確認できた。また、CNF-FR13 と CNF-FR14 の酸素指数の差が 0.3%であったことに対して、CNF-FR13 と CNF-FR15 の差は 1.9%であった。上記の PP J707EG の APP 添加量 0%と 40%の試料での酸素指数の差 7.8%を考慮すると、CNF-FR13 と CNF-FR15 の差である 1.9%は無視できない差と言える。

表 2-30 酸素指数測定試験結果

試験試料	酸素指数[%]
CNF-FR1	18.1
CNF-FR5	18.2
CNF-FR9	18.3
CNF-FR13	25.9
CNF-FR14	26.2
CNF-FR15	27.8

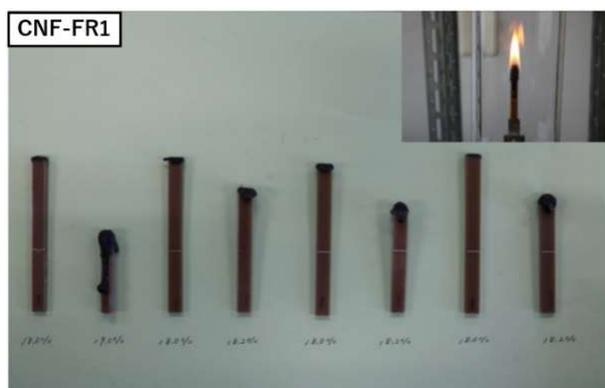


図 2-97 酸素指数測定 (CNF-FR1)



図 2-98 酸素指数測定 (CNF-FR5)



図 2-99 酸素指数測定 (CNF-FR9)

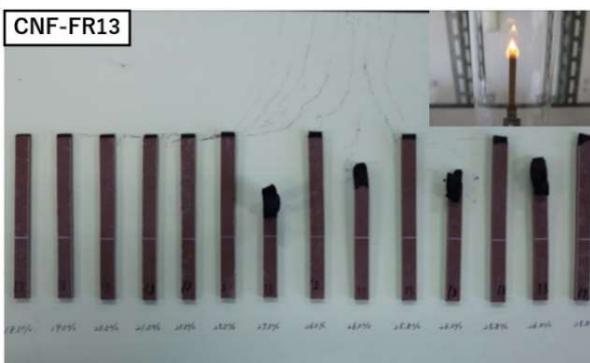


図 2-100 酸素指数測定 (CNF-FR13)

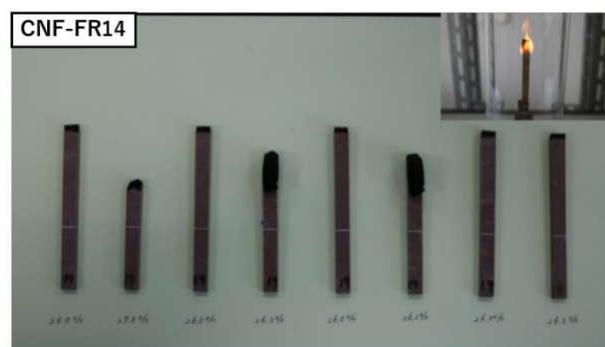


図 2-101 酸素指数測定 (CNF-FR14)

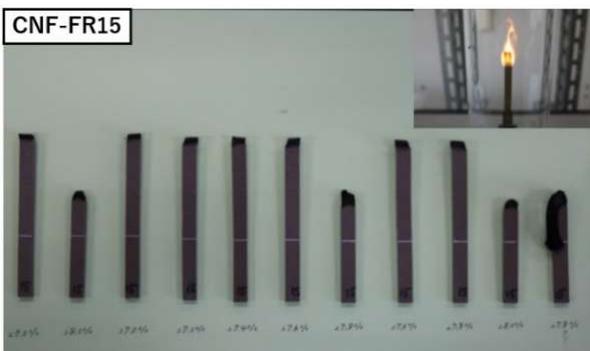


図 2-102 酸素指数測定 (CNF-FR15)

#### 2.1.4.4.3 コーンカロリメータ試験

表 2-31 にコーンカロリメータ試験の結果を示す。図 2-103、104 に総発熱量と時間変化、発熱速度と時間変化を示す。また、図 2-105、106 に試験前後での試験片の写真を示す。

表 2-31 より、総発熱量、最大発熱速度が最も低かったのは、本実験で UL94 規格の V-0 レベルを達成した条件である CNF-FR15 であったが CNF-FR13、CNF-FR14 と比較して大きな差は見られなかった。総煙生成量に関して、難燃剤添加率 0%の条件より、難燃剤添加率 40%の条件が非常に大きい値であった。これは APP が加熱されたことによって、APP からアンモニアが離脱し、不燃性ガスとして機能していることが考えられる。また、APP によって木粉の脱水反応が促進され、水が発生することが考えられる。この水も吸熱反応や、水蒸気が不燃性ガスとして働くため、難燃化に作用する。図 2-103、104 より 3 種類の母材に対して、難燃剤添加率 0%に比べて 40%の場合では、総発熱量は減少し、発熱速度曲線は異なる挙動を示した。特に図 2-104 に関して、難燃剤添加率 40%の曲線は、二つの凸を有している。1 つ目の凸は初期の炭化層形成によって発熱が抑えられた挙動を表している。しかし、熱が与えられ続けることによって、形成された炭化層が崩れ、内部樹脂が露呈したため、再度発熱した。図 2-105、106 より、難燃剤添加率が 0%の条件のものでは、試験後にほとんど残渣が残らず、炭化層が形成されていなかったことが考えられる。一方、難燃剤添加率が 40%の条件のものでは、木粉を炭素源として APP による炭化層形成が促進されたため、試験後により強固な炭化層の残渣が確認された。コーンカロリメータ試験によって、炭化層形成と不燃性ガスの生成による難燃機構の発現が確認されたが、母材の違いに対しての大きな差は見られなかった。

表 2-31 コーンカロリメータ試験結果

項目	CNF-FR1	CNF-FR2	CNF-FR3	CNF-FR13	CNF-FR14	CNF-FR15
試料厚さ(mm)	2.74	2.74	2.72	2.72	2.71	2.71
試験前サンプル質量(g)	27.18	27.38	27.49	34.46	34.42	34.44
試験時間(min)	5	10	10	10	10	10
総発熱量(MJ/m <sup>2</sup> )	104.96	107.75	106.58	69.45	68.68	66.03
発熱速度が 200kW/m <sup>2</sup> を継続して超えた時間(sec)	148.0	161.8	180.8	51.9	53.8	69.2
試験後表面に至る き裂・穴の有無	有	有	有	有	有	有
試験後サンプル質量(g)	0.42	0.20	0.00	9.07	8.43	8.38
質量減少(g)	26.76	27.18	27.49	25.39	25.99	26.06
平均質量減少率 (g/m <sup>2</sup> /s) <sup>*1</sup>	19.813	16.035	12.737	5.268	5.187	5.235
最大発熱速度(kW/m <sup>2</sup> )	873.37	736.16	687.13	325.72	324.65	287.5
総煙生成量(m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	1414.92	1420.19	1537.32	1704.44	1955.84	1913.83

※1 質量が 90% から 10% に減少した時の照射面積当たりの質量減少率

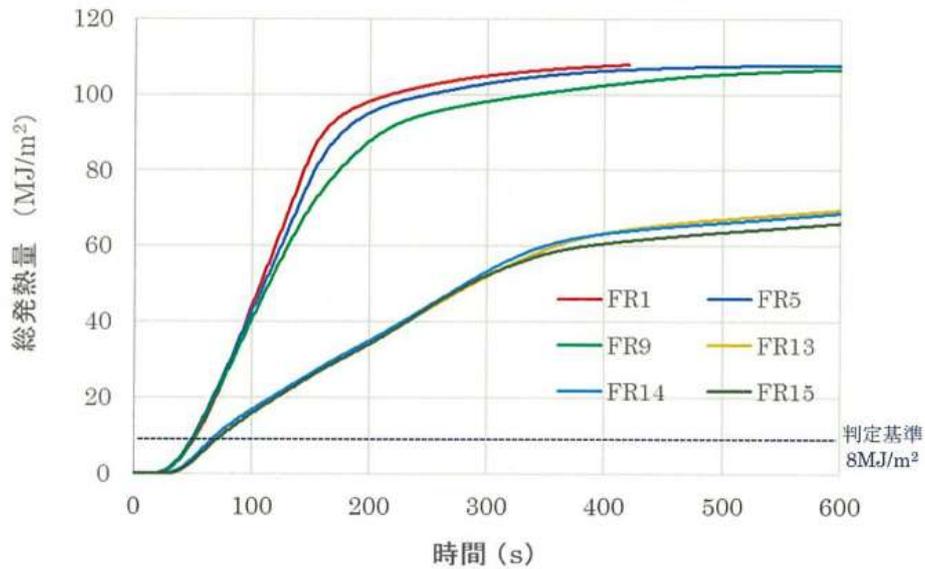


図 2-103 総発熱量の時間変化

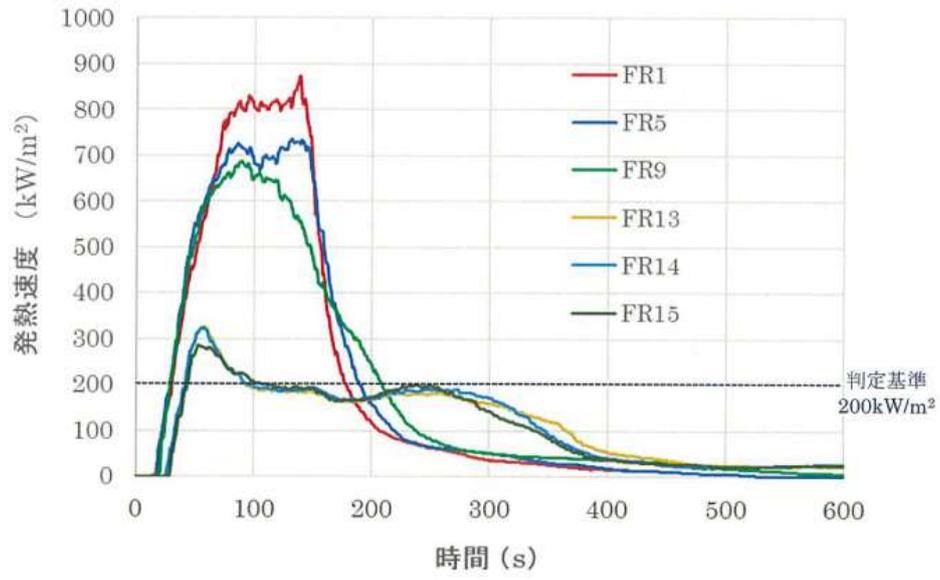


図 2-104 発熱速度の時間変化

試料	試験前	試験後
CNF-FR1		
CNF-FR5		
CNF-FR9		

図 2-105 コーンカロリメータ試験 試料写真 (CNF-FR1、CNF-FR5、CNF-FR9)

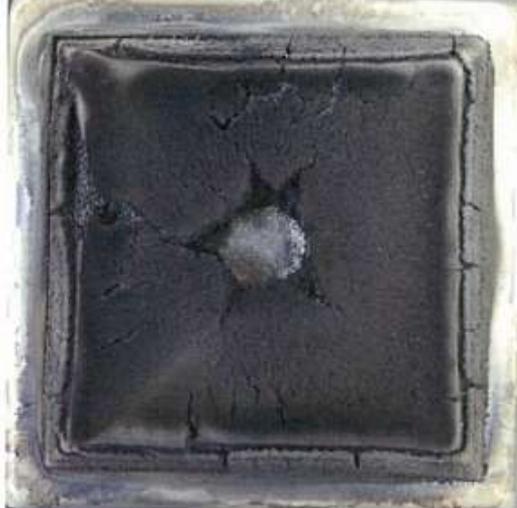
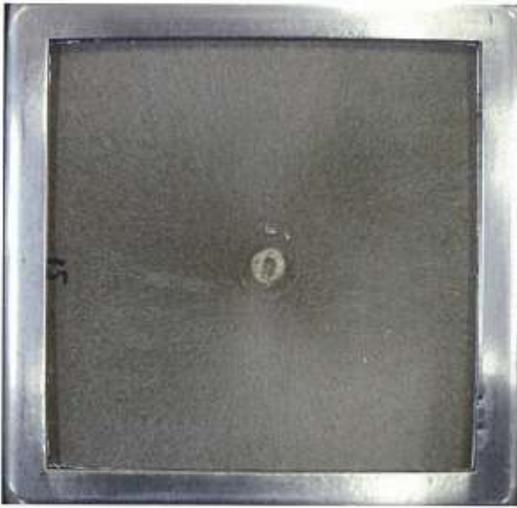
試料	試験前	試験後
CNF-FR13		
CNF-FR14		
CNF-FR15		

図 2-106 コーンカロリメータ試験 試料写真 (CNF-FR13、CNF-FR14、CNF-FR15)

#### 2.1.4.4.5 難燃化材料の機械的特性の検証

ここでは、上で検討した難燃化レシピの機械的特性への影響を検証した。機械的特性として代表的な引張強度特性を評価した。

引張試験は、試験機のクロスヘッド変位制御による準静的試験（1 mm/min）を行った。引張試験は表 2-23 に示すレシピのサンプルについて各 3 本実施した。全ての実験は実験室雰囲気中、室温下で行った（23±5 °C、60±5 %RH）。試験片の伸びの計測にはビデオ変位計を用い、引張弾性率および破断伸びを得た。また、試験片の両面縦横方向にひずみゲージを貼りつけることにより試験片のポアソン比を得た。

その結果、難燃剤（タイエン K）の含有量を増加させることにより、引張弾性率は向上するが、引張強さおよび破断ひずみが減少する傾向を示した。その傾向はバージン PP、リサイクル樹脂を通じてほぼ同じで、難燃化剤による PP への影響と考えられ、リサイクル材特有の挙動は見られなかった。難燃化剤による機械的特性の低下傾向は破断ひずみにおいて顕著で、難燃化剤 40% 添加によりバージン PP で 75%、リサイクル樹脂で約 70% 低下し、また、引張強さは 17% 低下した。一方、ポアソン比についてはほとんど影響なく、0.4 程度であった。また、母材の種類による引張弾性率、引張強さ、破断ひずみおよびポアソン比の差異は小さかった。

上の難燃特性評価において、難燃化剤 10% 添加で UL 規格の HB レベルを達成できたことより、難燃化材の実装にあたってはその適用分野・用途を考慮して難燃化剤の添加量を決定する必要がある。

#### 2.1.4.4.6 まとめ

水平燃焼試験と垂直燃焼試験の結果より、容器包装リサイクル樹脂を母材に木粉量含有率が 20%、APP 含有率が 40% である CMF-FR15 において UL94 規格の V-0 レベルを達成した。その他の試料では UL94 規格の HB レベルを示した。また、酸素指数測定試験の結果より、APP 含有率が 40% の試料に関して、CNF-FR13 と CNF-FR14 と比較して、CNF-FR15 の酸素指数値が最も高く、一般的に難燃性があると言われている酸素指数も 27 以上であり、良い難燃特性を示した。コーンカロリーメータ試験では、母材の違いに対する発熱量や発熱速度の差はほとんど見られなかったため、難燃剤添加による不燃性ガスの生成と炭化層形成の難燃機構の発現が確認されるのみの結果となった。ただし、本実験の試料において、不燃性ガスの気相による難燃機構と炭化層形成の固相による難燃機構のどちらが支配的であるのかは調査する必要がある。

本実験では、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品木粉充填マスターバッチ（WMB）に難燃剤を添加したいくつかの材料について難燃特性を調査したが、難燃化材の機械的特性の検証結果を考慮すると、使用用途に合わせて難燃剤の添加量を決定する必要があると考えられる。

## 2.2 製品化における実用性評価

「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した本事業開発品フィラー充填マスターバッチを用いた製品サンプルの作製、社会実装に向けた課題調査を実施した。

物性試験に基づいて技術資料を作成し、PR用サンプルの作製を行い、これらをもとにユーザーヒアリング、実用化に向けた利用方法の検討を行った。また、製品の実用化後のリサイクル性を検証するため、多回リサイクル性の検証を行い、3回のリサイクルにおいても大きな物性低下が生じないことを確かめた。以下に詳細を記す。

### 2.2.1 技術資料の作成

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.4 マスターバッチ品質管理手法の確立」を通じて開発したMBを使用して評価した「2.1.4.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証」、「2.1.4.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証」、「2.1.4.4 用途拡大に向けた難燃化技術の確立」の複合材について、物性データをもとに広くユーザーに理解をいただけるように技術資料を作成した。技術資料は以下の通りである。

## 「CNF複合廃材の表面処理剤利用」

先端バイオマス利用  
コンソーシアム

セルロースナノファイバー(以下CNFと略す)は植物由来の素材で鋼鉄の5分の1の軽さで5倍の強度等の特性を有する持続可能資源であることから、近い将来、家電、建材、包装容器、自動車等の用途にCNF複合材料としての利用が予想される。その普及に伴い発生する製造時の端材、製品寿命により廃棄されるCNF複合材廃材の有効利用方法として、CNFのもつ補強効果を活かし、表面処理剤として利用、同時にフィラー界面の強度アップとなる酸変性処理を行った「リアクティブ処理フィラー」を開発、またそれを利用した「フィラー70%のマスターバッチペレット」を開発しました。



※本材料の開発は、環境省の委託業務(平成29年-31年CNFリサイクルの性能評価等事業委託業務)で得られた成果です。

## 基本物性表 一覧

先端バイオマス利用  
コンソーシアム

フィラーの種類	タルク								木粉							
	容器包装リサイクル樹脂(PP)				家電リサイクル樹脂 (PP)				容器包装リサイクル樹脂(PP)				家電リサイクル樹脂 (PP)			
フィラー充填率(%)	20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50
比重	1.08	1.17	1.27	1.40	1.06	1.15	1.26	1.40	1.01	1.05	1.09	1.14	1.00	1.04	1.08	1.13
曲げ強度(MPa)	39.6	43.0	46.7	50.8	44.9	46.5	49.2	51.8	45.2	52.5	58.8	63.3	49.3	55.5	62.3	68.3
曲げ弾性率(GPa)	1.75	2.24	2.98	3.98	2.23	2.74	3.57	4.56	1.99	2.73	3.46	4.16	2.32	2.95	3.82	4.70
引張強度(MPa)	28.8	28.6	29.6	30.9	26.4	27.4	28.3	29.7	30.5	33.6	37.2	40.9	29.8	33.2	36.3	40.5
引張弾性率(GPa)	1.68	1.97	2.34	2.98	1.83	2.20	2.58	3.14	1.76	2.17	2.64	3.13	1.97	2.35	2.73	3.17
ノッチ無し アイソット衝撃強度(KJ/m <sup>2</sup> )	37.3	32.0	24.7	18.7	25.9	21.6	16.6	15.5	20.6	17.0	13.3	12.8	18.1	16.4	15.3	14.4
MFR (230℃ 2.16kgf)	5.3	4.1	3.5	2.9	20.2	15.1	11.3	6.7	4.1	3.2	2.2	1.6	16.4	10.9	5.9	2.3

※開発したフィラー(木粉、タルク)濃度70%のマスターバッチを家電リサイクル樹脂(PP)と容器包装リサイクル樹脂(PP)を利用して希釈した場合の物性データとなります。

※先端バイオマス利用コンソーシアムで取得した測定結果であり、保障値ではありません。

## 2.2.2 PR 用サンプルの作製

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.4 マスターバッチ品質管理手法の確立」を通じて開発したマスターバッチを使用して評価した「2.1.4.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証」、「2.1.4.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証」、「2.1.4.4 用途拡大に向けた難燃化技術の確立」の複合材を利用した製品の市場性を明らかにするため PR 用サンプルを作製した。PR 用サンプルは建材として一般的な WPC デッキ材、自動車内装用部材としてアウターカバー、家電・OA 機器として複合機の部品の 3 種類を検討した。各々の既存製品と遜色ない PR 用サンプルを作製できた。また、PR 用サンプル作製時の CO2 排出量計算に必要な生産エネルギーのデータおよびサンプル作製にあたり経済性評価に必要なデータを取得した。以下に詳細を示す。

### 2.2.2.1 建材 PR 用サンプルの作製

#### 2.2.2.1.1 試作概要

「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」で作製した木粉を用いた開発品 MB (WMB) をエコフィール社製の容器包装リサイクル樹脂を用いて木粉量 50%となるように調整した材料を用いて WPC デッキの試作を行った。これは JIS A 5741「木材・再生プラスチック複合材」にて R50 (リサイクル材料使用率 50%) 以上の基準に合致する WPC デッキ材である。

#### 2.2.2.1.2 試作条件

原材料、使用設備、試作場所は以下のとおりである。

##### ○原材料

WMB+容器包装リサイクル樹脂 (木粉量 50%)

○設備 直径 55 mm コニカル 2 軸押出機 (型式: KCT-55、(株) 北畑鉄工所製)

○場所 (株) エコフィール 福山工場

成形条件は表 2-32 のとおりである。

表 2-32 押出成形条件

部位	SC	C-1	C-2	C-3	C-4	AD1	AD2	D-1	D-2	D-3
設定温度 (°C)	50	150	160	170	175	173	173	178	178	175
部位	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	
設定温度 (°C)	160	160	160	160	160	160	160	160	140	
スクリー	フィーダー	吐出								
12.0 rpm	9.5 rpm	45.0 kg/h								

### 2.2.2.1.3 試作工程および製品概要

WMB と容器包装リサイクル樹脂で構成された WPC デッキ成形テストの状況を図 2-107 に製造された WPC デッキサンプルを図 2-108 に示す。

押出時の変動（サージング）も観察されず安定な押出成形性を確認することができた。成形した WPC デッキサンプルの物性測定の結果を表 2-33 に示す。また、ここで得られた消費電力の測定結果を CO2 排出量評価用データとして利用した。



図 2-107 押出成形時の様子



図 2-108 WPC 成形テスト品

表 2-33 WPC デッキの物性値

曲げ強度(MPa)	曲げ弾性率(GPa)	引張強度(MPa)	引張弾性率(GPa)
46.9	3.49	30.6	2.36

JIS A 5741「木材・プラスチック再生複合材」にて規定された曲げ強度の基準は 20 MPa となっている。上記の結果より、本製造プロセスで作製された WPC デッキ材は一般的に使用できるレベル（JIS A 5741 基準）以上の強度を保有していることが確認できた。

### 2.2.2.2 自動車 PR 用サンプルの作製

#### 2.2.2.2.1 試作概要

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、  
「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」にて開発したタルクを用いた開発品 MB (TMB)、WMB をエコフィール社製の容器包装リサイクル樹脂および家電リサイクル樹脂を用いてフィラー量 20%となるように調整した材料を用いて自動車内装部材の試作を行った。加えて CO2 排出量計算に必要な比較対象としてバージン PP ベースのタルク、木粉コンパウンドを利用したサンプル作製も合わせて行った。

#### 2.2.2.2.2 試作条件

原材料、使用設備、試作場所は以下のとおりである。

##### ○原材料

成形試作に用いた条件は表 2-34 のとおりである。

表 2-34 使用コンパウンド種類

	構成	略称
①	従来品コンパウンド(タルク/PP)	PP-Talc
②	TMB + 容器包装リサイクル樹脂	nP-Talc
③	TMB + 家電リサイクル樹脂	cP-Talc
④	従来品コンパウンド(木粉/PP)	PP-WF
⑤	WMB + 容器包装リサイクル樹脂	nP-WF
⑥	WMB + 家電リサイクル樹脂	cP-WF

○設備 電動汎用射出成形機 (JSW-350ADS、日本製鋼所)

○場所 イオインダストリー (株) 本社工場

#### 2.2.2.2.3 試作工程および製品概要

TMB および WMB を再生材プラスチック (容器リサイクル樹脂または家電リサイクル樹脂) によりフィラー充填率 20%になるようにドライブレンドした。従来品コンパウンドには、木粉およびタルクをフィラー充填率 20%となるよう PP と複合したコンパウンドを用いた。これらの樹脂を成形前に熱風乾燥炉にて乾燥したのちに試作に供した。自動車用の内装部品としてインスツルメントパネル (インパネ) のアウターカバーを模擬した金型にて試作を行った。製品のイメージを図 2-109 に示す。成形ではシリンダ温度を 180 degree C として、射出速度 20 mm/s にて成形を行った。実際の量産を模擬して、成形準備作業におけるページ樹脂量の測定および成形時の成形機 (および付帯設備の) 消費電力測定を実施した。試作した自動車部材を図 2-110 に、成形時の射出ピーク圧力と樹脂の流動性 (MFR) を図 2-111 に示す。



図 2-109 試作部品のイメージ

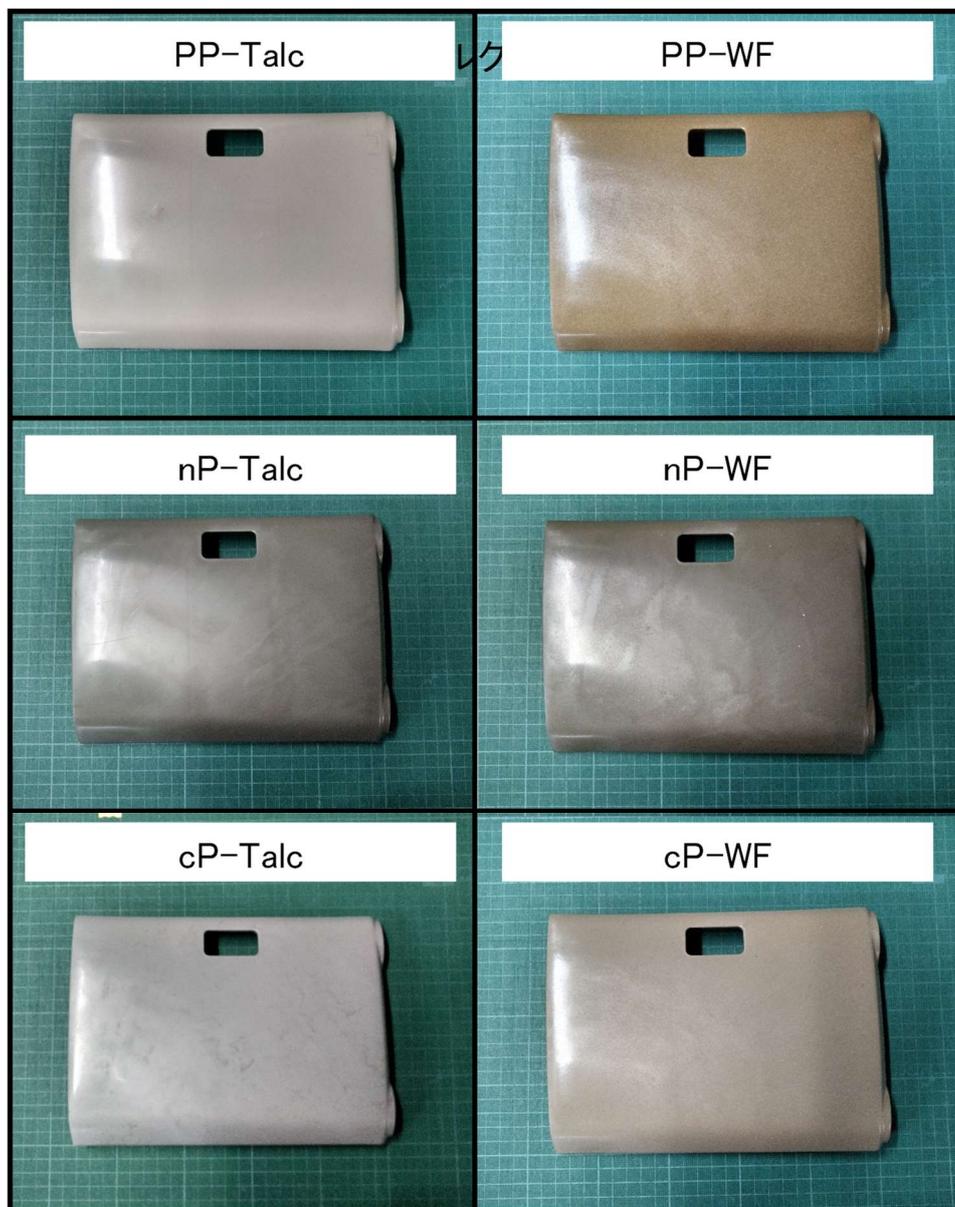


図 2-110 試作した PR 用サンプル (自動車部品: アウターカバー)

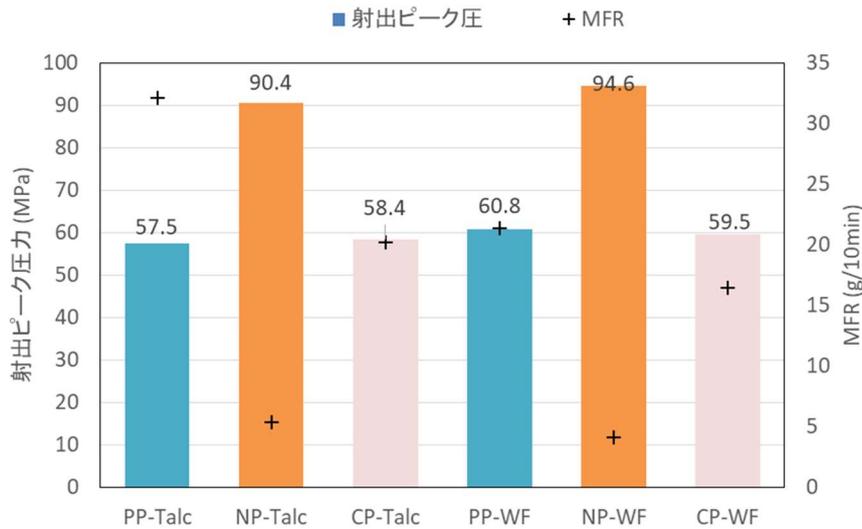


図 2-111 射出圧力と MFR

図 2-110 に試作品を示した様にどの樹脂についても既存の射出成形機・金型を用いて問題なく成形することができた。容器包装リサイクル樹脂を用いた場合には元々の流動性の低さが発現し、TMB、WMB とともに同条件の射出成形でも家電リサイクル樹脂や従来品コンパウンドに比べて必要な射出圧力が約 50%高くなる傾向が見られた(図 2-111)。この射出圧力の差は測定した消費電力に対しては大きな差を生じるものではなく、射出圧力自体も今回使用した射出成形機の能力内であることから、実用上の問題とはならないことを確認した。

### 2.2.2.3 家電・OA 機器 PR 用サンプルの作製

#### 2.2.2.3.1 複合機の部品試作

WMB に家電リサイクル樹脂と難燃剤 10%を加え木粉量を 20%となるように調整した材料を用いて、複合機の部品を成形した。部品の形状を図 2-112 に示す。

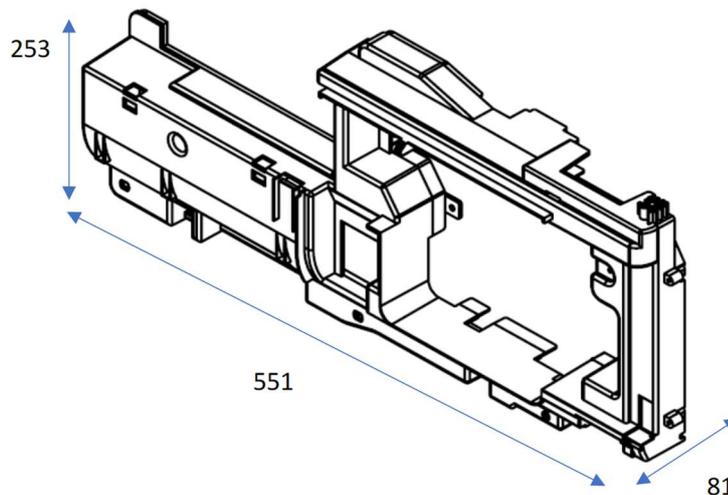


図 2-112 複合機の部品

### 2.2.2.3.2 試作条件

原材料、使用設備、試作場所は以下のとおりである。

- 原材料           WMB+家電リサイクル樹脂  
                          +難燃剤（膨張系難燃剤のポリリン酸アンモニウム）  
                          \*フィラー量 20%に調整  
                          \*射出成形をする前に、100degree C・5 時間以上乾燥
- 設備               ベント付き射出成形機（SE385EV-A、住友重機械工業株式会社）
- 場所               コニカミノルタメカトロニクス株式会社（瑞穂事業所）

複合機の部品の成形条件は表 2-35 のとおりである。

表 2-35 複合機の部品の成形条件

	シリンダー 温度(最大)	金型 温度	射出 圧力	保圧 圧力	サイクル タイム	消費電力	製品 重量	ランナー 重量
単位	°C	°C	MPa	MPa	s	kWh	g	g
測定値	180	50	85	30	89	0.268	440	70

### 2.2.2.3.3 試作工程および部品概要

複合機の部品の成形テストの状況を図 2-113 に、製造された複合機の部品を図 2-114 に示す。また、この部品が複合機で使われている位置を図 2-115 に示す。計量不良など起きることもなく、安定な射出成形性を確認することができた。



図 2-113 射出成形時の様子

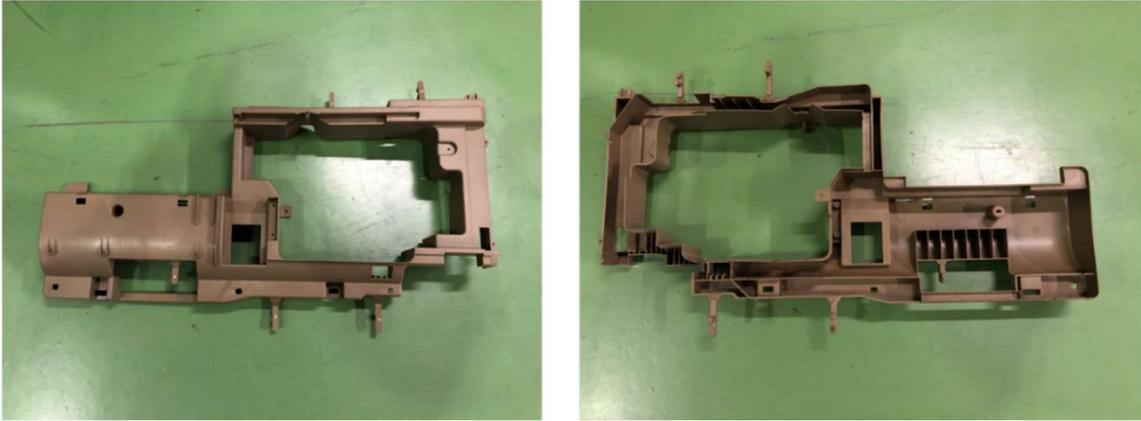


図 2-114 複合機の部品の成形テスト品（左：表面、右：裏面）



図 2-115 部品が複合機で使われている位置

#### 2.2.2.4 まとめ

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、  
「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」、  
「2.1.3.4 マスターバッチ品質管理手法の確立」を通じて開発したマスターバッチを使用して評価した「2.1.4.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証」、「2.1.4.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証」、「2.1.4.4 用途拡大に向けた難燃化技術の確立」の複合材を利用した製品の市場性を明らかにするため、建材として一般的な WPC デッキ材、自動車内装用部材としてアウターカバー、家電・OA 機器として複合機の部品の 3 種類を検討した。各々の既存の製品と遜色ない PR 用サンプルを作製できた。製品化に向けた課題については、「2.2.4 実用化に向けた利用用途の検討」にて整理する。

### 2.2.3 ユーザーヒアリングの実施

「2.2.1 技術資料の作成」、「2.2.2 PR 用サンプルの作製」で用意した技術資料および PR 用サンプルを用い、建材、家電、自動車部品メーカー（ユーザー）等にヒアリングを実施した。以下に詳細を示す。

#### 2.2.3.1 ヒアリング企業について

作製した技術資料とサンプルをもとに成形メーカーである「イオインダストリー株式会社（自動車部品メーカー）」「株式会社ミヨシ（小ロット製品射出成形メーカー）」等にヒアリングを実施し、以下の意見を得ることができた。

#### 2.2.3.2 自動車部品利用と課題

自動車部品においては、バンパーやインストルメントパネルやトリムなどの内装部品への利用は、耐衝撃性の改善が必須の要件となる。エアコンの送風口回り（ルーバーガーニッシュ）やヒティング要件の無い部分で例えば、シートを前後にスライドさせるガイドレールの前後両端のカバーに使用できる。しかし、意匠部品のため、成形時の意匠性が悪いとそもそも搭載されないため、ロットごとの製品にバラツキが少ないことが望まれるといった成形時の課題がある。

#### 2.2.3.3 建材利用と課題

建材利用においては、開発品 MB が安定した性能を持ち、安定した生産量があれば、製品化は可能である。現状の容器包装リサイクル樹脂よりも CNF を含有することで、高強度となるなら、製品の薄肉化による原材料使用量の低減も検討できる。ただし、屋外用途においては耐久性、耐朽性、耐水性といった長期性能については、用途に応じた確認が必要になる。

#### 2.2.3.4 家電・PA 機器利用と課題

家電部品においては、表面材として利用する場合は、意匠性が重要となる。木粉を利用する場合は意匠として、その木質感を利用できる可能性もあるが、廃材利用による外観の安定性については検証が必要と思われる。一方、表面材では無い部位への利用は考えられるが、内部部品では難燃性能が必要となる場合がある。

#### 2.2.3.5 再生材プラスチック利用と課題

上記の商品化における課題に対して、家電リサイクル樹脂と容器包装リサイクル樹脂については、再生材プラスチックの高強度化、高性能化は強く望まれているが、リサイクル樹脂そのものの内容物が一定でないため、製品の性能の安定性を確保するベース樹脂の品質管理が必要となる。

#### 2.2.3.6 総評

本事業で得られた技術により、材料の高強度化は可能であるが、製品性能の安定性に関する不安については、ベース樹脂として使用した再生材プラスチックのバラツキに依存す

るところは課題として残る。一方、CNF 複合廃材を利用した MB のみをとらえれば、樹脂材料の低分子化により、リサイクル樹脂の均質化が図れる本事業の取り組みは、ベース樹脂の安定性に応じて判断することにより、製品化は可能と考える。また、家電等に利用する際の難燃性について本事業の中で取り組んでおり、必要とする難燃レベルに応じて対応は可能と考える。コスト面の課題を考えると、開発した MB は既存設備の利用を前提としているため、MB の原料となる CNF 複合廃材を含有した容器包装リサイクル樹脂の価格が課題となる。しかし、この原料においても容器包装材の廃材利用を念頭に置いているため、バージン樹脂の価格は越えることはないと考えている。従来品と比較した本事業開発品の原価コスト試算は「2.3.1 事業性評価の実施」にて検討した。

## 2.2.4 実用化に向けた利用方法の検討

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.4 マスターバッチ品質管理手法の確立」を通じて開発したマスターバッチを使用して評価した「2.1.4.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証」、「2.1.4.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチ添加による再生材プラスチックの物性向上効果に関する検証」、「2.1.4.4 用途拡大に向けた難燃化技術の確立」の複合材を利用した製品の実用化に向けた利用方法（部品）の検討を行った。以下に詳細を示す。なお、コスト面に関する検討は「2.3 社会実装の検証」に記載した。

### 2.2.4.1 建材について

#### 2.2.4.1.1 WPC デッキ材

WPC の市場は、国内では年 4 万 t 程度であるが、世界では市場は拡張傾向にあり、世界で建材だけでも 40 万 t 程度の市場規模になるとの推計が Nova-Institute より出されている。その中で、最大用途はエクステリアデッキ材であり、実用化面では最も適している。ただし、容器包装リサイクル樹脂を使用した WPC デッキ材はすでに実用化されており、JIS A5741「木材・プラスチック再生複合材」、JIS A5742「木材・プラスチック再生複合材デッキ組立製品」、JIS A1456「木材・プラスチック再生複合材の耐久性試験方法」といった基準化も行われており、JIS A5741 については ISO 化も果たした。

木材プラスチック再生複合材 (WPRC) 普及協会によれば、再生材を利用した混練型 WPC は 2 万 t の生産量があり、国内消費製品の 50% 程度に再生材は用いられていると推測される。本事業で試作した材料は JIS「デッキ材」の規格に準拠した性能があり、CNF 複合廃材が排出され、回収されるようになれば製品化は十分に可能である。

#### 2.2.4.1.2 新規材料への展開とそれに向けた課題

エコフィールではデッキ材のほかに植木鉢などの試作も行った実績があり、成形性や性能に問題はないと思われる。容器包装リサイクル樹脂はパッケージ内の汚れを主要因とした独特のにおいがあるが、木粉を一定量以上加えることで木粉由来の「木」のにおいが優位となり、容器包装リサイクル樹脂のにおいを打ち消す機能も期待できるため、においも大きな問題にならないと考える。これらの製品化の課題はコストと意匠性である。CNF を使用する場合、CNF 複合廃材のコストが現状と同等程度であることが好ましい。コストについては「2.3 社会実装の検証」にて改めてコメントする。

現在リサイクル樹脂の利用は、多くの業界が興味を持っており、家電、自動車業界からの試作依頼もあるが、目的としている製品の必要性能については多種多様となる。容器包装リサイクル樹脂の性質上、すべての成分を把握することはできないため、利用に向けては bromine (Br) などの取り扱いが注意な成分が含まれないことを明確にする必要がある。今後これらの業界への利用についても検討していきたい。

## 2.2.4.2 自動車部品について

### 2.2.4.2.1 自動車内装用部品

自動車部材に使われる樹脂部品は軽量化を主目的として使用量が増加しており、自動車の構成材料に占めるプラスチックの割合は 2010 年には 10%は越えているとされる。その半分以上は PP 系とされており、使用される備品はバンパーなどの外装部品、インスツルメントパネルやトリムなどの内装部品、各種モジュールなどの構造部材である。PP 系の部品はエチレンプロピレンコポリマー (EPA) とのブレンドやガラス繊維との複合化といった様々な複合系で用いられ、各々で必要な性能は異なる。図 2-116 に各パーツの必要性能について記したが、本製品はトリムやインパネといった内装部品へ使用できる可能性がある。今回は内装用部材として、インスツルメントパネルへの利用について調査した。

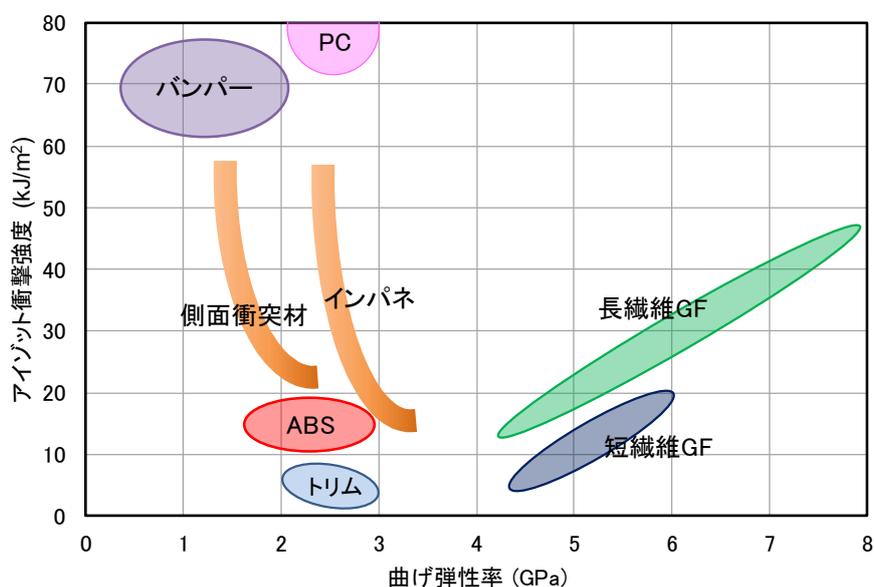


図 2-116 自動車部品に要求される物性

### 2.2.4.2.2 製品化に向けた課題について

今回 PR 用サンプルとして試作したインスツルメントパネルは流動性や衝撃強度に課題がある。この点はマスターバッチを希釈する樹脂側での調整や少量のエラストマーを加えるといった手法により、改善できる可能性がある。また、意匠性にバラツキがある点も問題があるが、成形プロセスの改善や塗装による検証等を実施する必要がある。

## 2.2.4.3 家電・OA 機器について

### 2.2.4.3.1 家電・OA 機器への利用について

コニカミノルタは世界約 150 か国、約 200 万社の顧客の業務の現場に、高付加価値な製品・サービスを提供している。2018 年度の売上高は 10,591 億円であり、その売上高構成比は図 2-117 の通りとなっている。全体の売上高構成比の中でオフィス事業がその半分以上を占めていることから、本事業の開発材料を世の中に広く普及させるためには、売上高構成比が最も大きいオフィス事業における製品化から検討することが適当だと考えた。コニカミノルタのオフィス事業では、複合機と IT サービスとの組み合わせにより、オフィス環

境の課題解決や最適化に貢献するソリューションを提供している。図 2-118 に複合機の一  
例を示す。

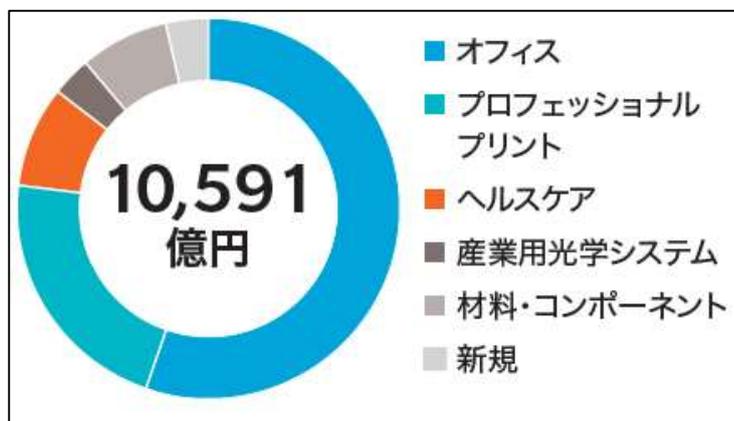


図 2-117 売上高構成 (2018 年度)



図 2-118 複合機

図 2-118 に示す複合機に使用される部品のうち、樹脂の使用重量の多いものは、順に「外  
装部品」、「内装部品」、「機能部品」となる。複合機に使用される樹脂部品はこれらの部  
品でおおよそが構成されている。表 2-36 にこれらの部品の主な要求項目と使用樹脂を示  
す。機能部品の主な要求項目については、使用樹脂それ自身が持つ特性によるところが大き  
い。外装部品は複合機の内部の部品を衝撃などから保護する役割がある為、内装部品よ  
りも要求項目のレベルが高くなる。本事業の開発材料はベース樹脂が PP 系である為、ポリ  
カーボネート (PC) 系樹脂とは物性値に大きな隔たりがある。そこで、まずは内装部品に  
本事業の開発材料を適用検討を行い、次のステップとして、要求レベルが高い外装部品へ  
の適用を目指していく。

表 2-36 複合機の樹脂部品の主な要求項目と使用樹脂

複合機の樹脂部品	主な要求項目	主な樹脂
外装部品	難燃性 (5VB) 耐衝撃性 成形加工性 耐光性	PC/ABS
内装部品	難燃性 (HB, V2) 耐衝撃性 成形加工性	ABS、HIPS、PC/ABS
機能部品	各部品による	POM、PET、PC/GF

#### 2.2.4.3.2 実用化に向けた課題

「2.2.2.3 家電・OA 機器 PR 用サンプルの作製」において、内装部品の成形が可能であることは確認している。成形性は良好な結果だったが、その成形した部品の外観上の課題として、反り、焼け、ウェルドライン、木粉の分散不良などが挙げられた。図 2-119 に PR 用サンプルと外観上の課題を示す。材料だけではなく金型にも要因がある為、実用化に向けては、金型を含めた対応が必要である。

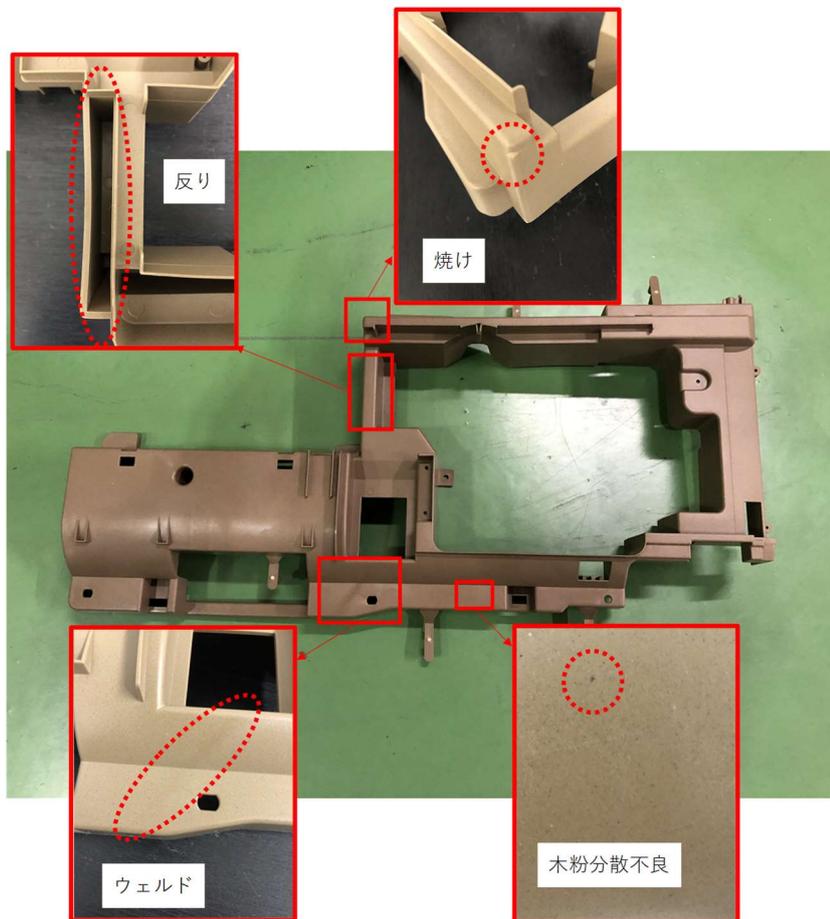


図 2-119 家電・OA 機器 PR 用サンプルと外観上の課題

#### 2.2.4.4 まとめ

「2.2.2 PR 用サンプルの作製」をベースとした実用化に向けた利用方法の検討を行った。製品化に向けては、Br などの取り扱いが注意な成分が含まれないことを明確にする必要がある、意匠性にばらつきがある、成形時に反りや焼けといった外観上の問題がある等の課題がある。これらの解決には、開発品 MB の性能の安定化に加え、成分調査、成形プロセスの改善、塗装性の評価、金型を含めた対応が必要となる。なお、コスト面に関する検討は「2.3 社会実装の検証」に記載した。

## 2.2.5 多回リサイクル性の検証

### 2.2.5.1 概要

「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」にて作製した本事業開発品フィラー充填マスターバッチを利用した製品のリサイクル性を評価した。

「2.2.2.2 自動車 PR 用サンプルの作製」で作製した PR 用サンプルと同様の配合比としたコンパウンドの物理的・機械的特性は、3 回の熱履歴リサイクルを行っても低下は小さく、本事業開発品のリサイクル性は高いことが確認された。以下に詳細を記す。

### 2.2.5.2 はじめに

リサイクルの種類はマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクルの3種類に大きく分けられる。1970年代ごろから登場したマテリアルリサイクルは回収した廃プラスチックを新たな製品に作り替える手法であり、市町村や工場から出たプラスチックゴミの回収・分別を経て再生材製品となる。ケミカルリサイクルは、廃プラスチックに化学反応を与えて組成を変換し、リサイクルする手法であり、マテリアルリサイクルのように目に見える形でリサイクルされるのではなく、燃料などとして使われることが多い。これには廃プラスチックをプラスチックの製造工程と逆の工程を経て油に戻す「油化」、製鉄の主成分となる鉄鉱石内の酸化鉄を還元し、鉄に戻すための還元剤として製鉄所などで再利用するという「高炉原料化」、廃プラスチックを分子レベルにまで分解し、他の化合物として利用する「ガス化」に分けられる。最近では分子レベルまで分解した後、再度プラスチックとするケミカル・マテリアルリサイクルの研究も進められている。サーマルリサイクルは、廃プラスチックを焼却処分する際に出た熱エネルギーをリサイクルする手法であり、廃プラスチックの中でもマテリアルリサイクルにコストがかかるものやマテリアルリサイクルなどで利用できない廃プラスチックに対して行われる。

本事業ではマテリアルリサイクルを主眼に置いているため、本事業の開発品 MB を再生材プラスチックで希釈した複合材に対し、粉碎と熔融混練を繰り返す多回成形を行い、熱履歴がかかった際のリサイクル性を検討することとした。

### 2.2.5.3 試験方法

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、  
「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」にて作製したタルクを用いた開発品 MB（TMB）、木粉を用いた開発品 MB（WMB）を容器包装リサイクル樹脂（広島リサイクルセンター製）および家電リサイクル樹脂（エコフィール製）にて希釈した計4種類のサンプルを用意した。それぞれフィラー充填率は20%に固定したが、これは既存品のタルク20%配合PPとの比較を目的として設定した。また、この配合比は、「2.2.2.2 自動車 PR 用サンプルの作製」と同様の配合比である。この配合品を押出成形機に投入し、ペレットを得たのち、射出成形にて射出成形体を得た。射出成形体は、短冊形試験片（厚さ3mm、幅10mm、長さ60mm）およびダンベル形試験片（平行部の寸法を厚さ2mm、幅5mm、長さ15mm、つかみ部幅12mm、全長60mm）の2種類を作製した。その後、同工程（押出成形と射出成形）を3回繰り返すことで、熱履歴を受けた

サンプルを作製した。作製したサンプルは、「2.1.3.1.3.2.1 流動性評価」と同様の手法でキャピラリーレオメータによる流動性評価、「2.1.3.1.3.2.2 機械的特性評価」と同様の手法で曲げ、引張、衝撃特性を評価した。

#### 2.2.5.4 結果

表 2-37 に作製したサンプルの物性値を示す。

表 2-37 多回リサイクルサンプルの物理的・機械的特性

M B	種類		曲げ特性			引張特性				衝撃強度(kJ/m <sup>2</sup> )		せん断粘度 (Pa.s)					
	樹脂	リクサイ回数	強度 (MPa)		弾性率 (GPa)	強度 (MPa)		最大点伸び率 %	破断点伸び率 %	弾性率 (GPa)	平均値	標準偏差	500 (1/s)	334.4 (1/s)	223.6 (1/s)	149.5 (1/s)	100 (1/s)
			平均値	標準偏差		平均値	標準偏差										
木粉充填 (WMB)	容器包装	0	48.1	0.1	2.2	32.1	0.6	4.8	12.5	1.8	19.7	1.9	579	710	870	1100	1379
		1	47.3	0.4	2.2	31.7	0.6	4.7	10.0	1.8	21.6	1.4	570	692	862	1055	1305
		2	46.4	0.3	2.2	31.5	0.4	4.9	11.2	1.8	21.1	1.0	569	675	842	1036	1306
		3	45.7	0.6	2.1	31.2	0.5	4.9	11.5	1.8	22.0	1.8	536	656	822	1009	1255
	家電	0	47.9	0.3	2.3	30.2	0.3	3.5	8.6	1.9	19.9	1.5	312	392	475	628	780
		1	47.7	0.3	2.3	29.7	0.2	3.3	7.1	1.9	20.3	1.6	314	384	475	575	690
		2	47.8	0.2	2.3	29.3	0.3	3.5	6.9	1.9	20.7	1.4	306	384	473	601	746
		3	47.4	0.0	2.3	29.2	0.2	3.3	7.9	1.9	22.0	2.4	309	379	475	586	724
タルク充填 (TMB)	容器包装	0	43.8	0.3	2.1	30.0	0.5	5.6	52.3	1.7	33.4	4.1	539	646	801	979	1221
		1	43.5	0.4	2.1	30.7	0.2	5.5	51.1	1.8	32.7	5.1	528	643	809	1005	1254
		2	43.2	0.2	2.1	29.9	0.2	5.6	75.7	1.8	29.3	3.3	525	654	797	991	1233
		3	42.6	0.3	2.1	29.3	0.3	3.5	6.9	1.9	32.8	2.2	507	631	781	983	1210
	家電	0	44.0	0.1	2.3	27.8	0.3	3.6	13.7	1.8	31.9	4.8	278	350	425	537	678
		1	43.7	0.1	2.2	27.3	0.5	3.6	11.3	1.8	26.5	8.4	290	355	445	556	718
		2	43.2	0.4	2.2	27.4	0.1	3.5	9.2	1.8	30.0	4.6	286	352	463	582	713
		3	43.0	0.4	2.2	27.2	0.4	3.5	12.8	1.8	30.9	4.9	286	360	450	575	690

本試験結果は、既存品のタルク 20%配合 PP の曲げ強度 (40 MPa)、引張強度 (25 MPa) をすべての条件で上回った。これにより、リサイクル後においても既存品のタルク 20%配合 PP と同等以上の強度を取得できることが確認された。続いて、リサイクル後の特性値の変化をリサイクル前の特性値 (リサイクル 0 回) で割った変化率を算出し、熱履歴の影響を確かめた。

図 2-120 に WMB を容器包装リサイクル樹脂で希釈したコンパウンドの各種物性値の変化率を示す。



有容器包装リサイクル樹脂モデルと同様に希釈樹脂においても低分子化が進行し、曲げ、引張特性は低下したと考えられる。樹脂劣化の面から考えると、衝撃強度も同様に低下すると考えられるが、リサイクル回数が増加するほど強度は向上し、最大 12% 向上した。これは混練時のせん断力を受けて、フィラーのサイズや分散状況が変化したことが要因と考えられ、多回リサイクルが必ずしも負の影響を及ぼさない有用な結果と考える。また、流動性については各せん断速度において粘度が低下しており、最大で 9% 低下した。これは、樹脂の低分子化に加え、フィラーのサイズや分散状況が変化したことが要因と考える。

続いて、WMB を家電リサイクル樹脂で希釈したコンパウンドの物性変化率を図 2-122 に示す。

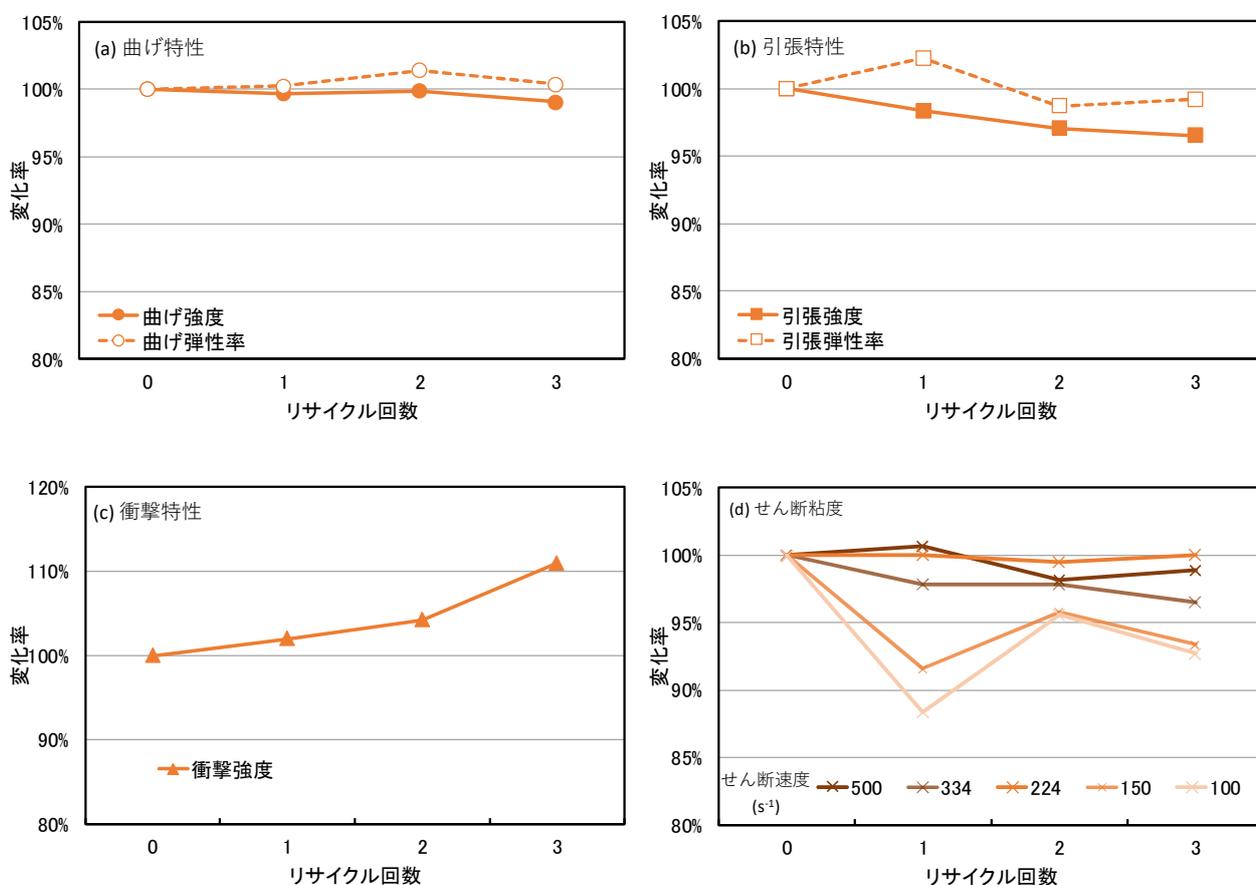


図 2-122 WMB/家電リサイクル樹脂の各種物性変化率  
a:曲げ特性、b:引張特性、c:衝撃特性、d:せん断粘度

曲げ強度および曲げ弾性率は 3 回のリサイクル後においても 1% 程度の低下しかみられず、熱履歴による影響をほとんど受けなかった。引張強度は 3 回のリサイクルで 3% の強度低下が見られ、1 回のリサイクルで 1% 程度の強度低下となった。一方、引張弾性率については、ほとんど低下しなかった。また、衝撃強度はリサイクル回数が増加するほど向上し、最大で 11% の向上が見られた。流動性については、224  $s^{-1}$  以外では、せん断粘度はリサイクル後に低下し、最大 12% 低下した。しかし、リサイクル回数との関係は明確ではなかった。

続いて、TMB を容器包装リサイクル樹脂で希釈したコンパウンドの物性変化率を図 2-123 に示す。

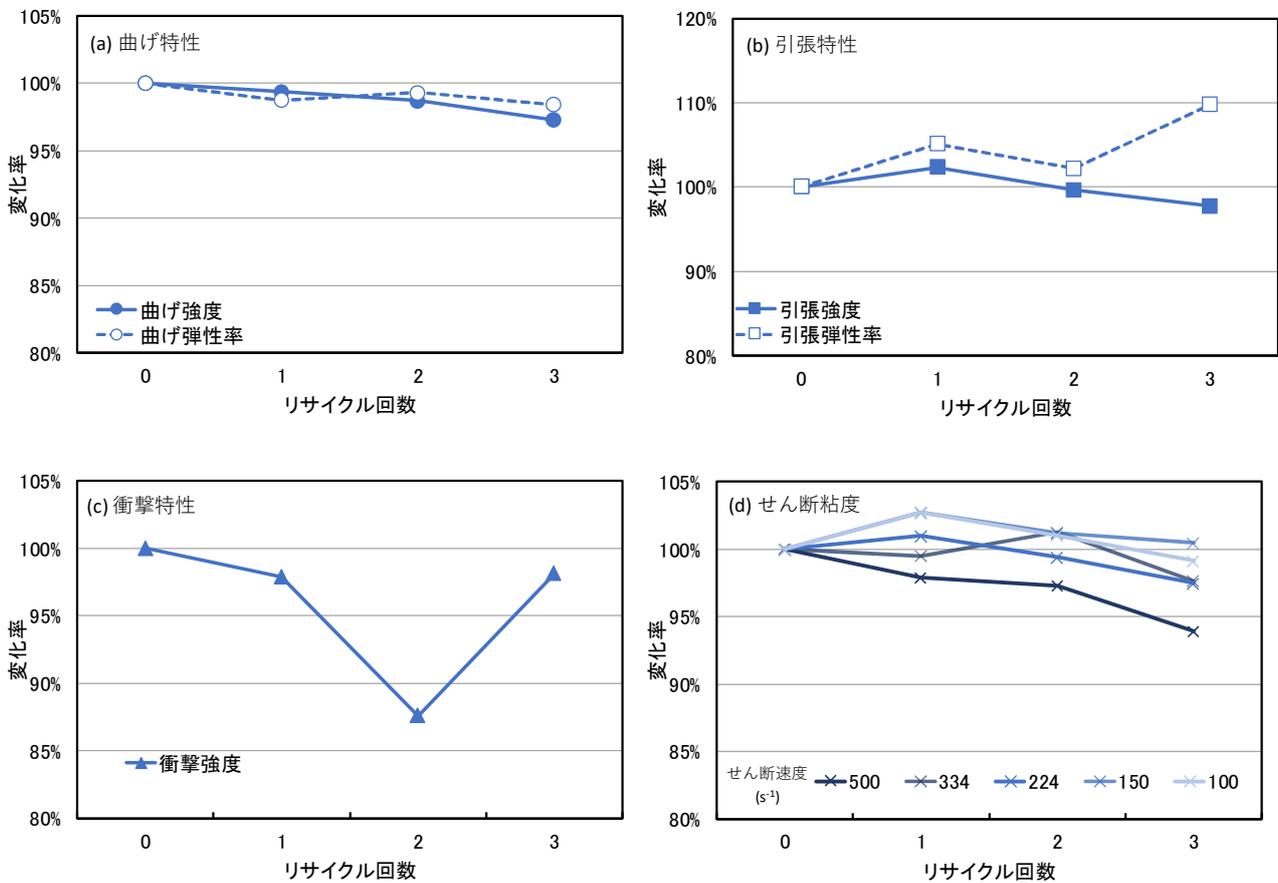


図 2-123 TMB/容器包装リサイクル樹脂の各種物性変化率

a:曲げ特性、b:引張特性、c:衝撃特性、d:せん断粘度

曲げ強度はリサイクル回数の増加とともに減少し、最大 3%程度減少が見られ、リサイクル回数 1 回の増加で 1%程度の低下が見られた。曲げ弾性率はリサイクル回数の増加とともに減少し、最大 2%程度低下した。引張強度は最大で 3%程度減少したが、引張弾性率は最大 10%程度向上した。これらの特性値の減少が小さいことは WMB と同様の傾向であったが、引張弾性率は異なる傾向を示した。この原因は明確ではないが、引張弾性率はリサイクルにより低下しないことは確かであった。また、衝撃強度についてはリサイクルによる減少が見られ、最大でリサイクル 2 回目に 12%の強度低下が見られた。これは WMB とは異なる傾向であった。タルクは剛性が高く、木粉とは異なり、押出機のせん断力によるサイズや形状の変化は生じずらいため、樹脂劣化の影響が明確に生じたものと考えられる。衝撃強度の低下は 12%と大きかったが、これはリサイクル 2 回目の結果であり、3 回目のリサイクルでは 2%程度の強度低下に抑えられた。リサイクル 2 回目の大きな衝撃強度低下は、サンプル内のバラツキが主因であると推測され、成形条件の改善で数%程度の強度低下に十分抑えられると考える。せん断粘度は 150、100  $s^{-1}$  ではリサイクルにより上昇し、最大で 3%の増加が見られた。一方、それ以外の速度ではリサイクルによる粘度減少が見ら

れ、最大 6%の低下が見られた。低せん断速度（150、100  $s^{-1}$ ）と高せん断速度（225-500  $s^{-1}$ ）では異なる傾向となったが、低せん断速度における粘度上昇も数%と大きくないため、熱履歴リサイクルが粘度にもたらす影響は小さいと判断する。

最後に TMB を家電リサイクル樹脂で希釈したコンパウンドの物性変化率を図 2-124 に示す。

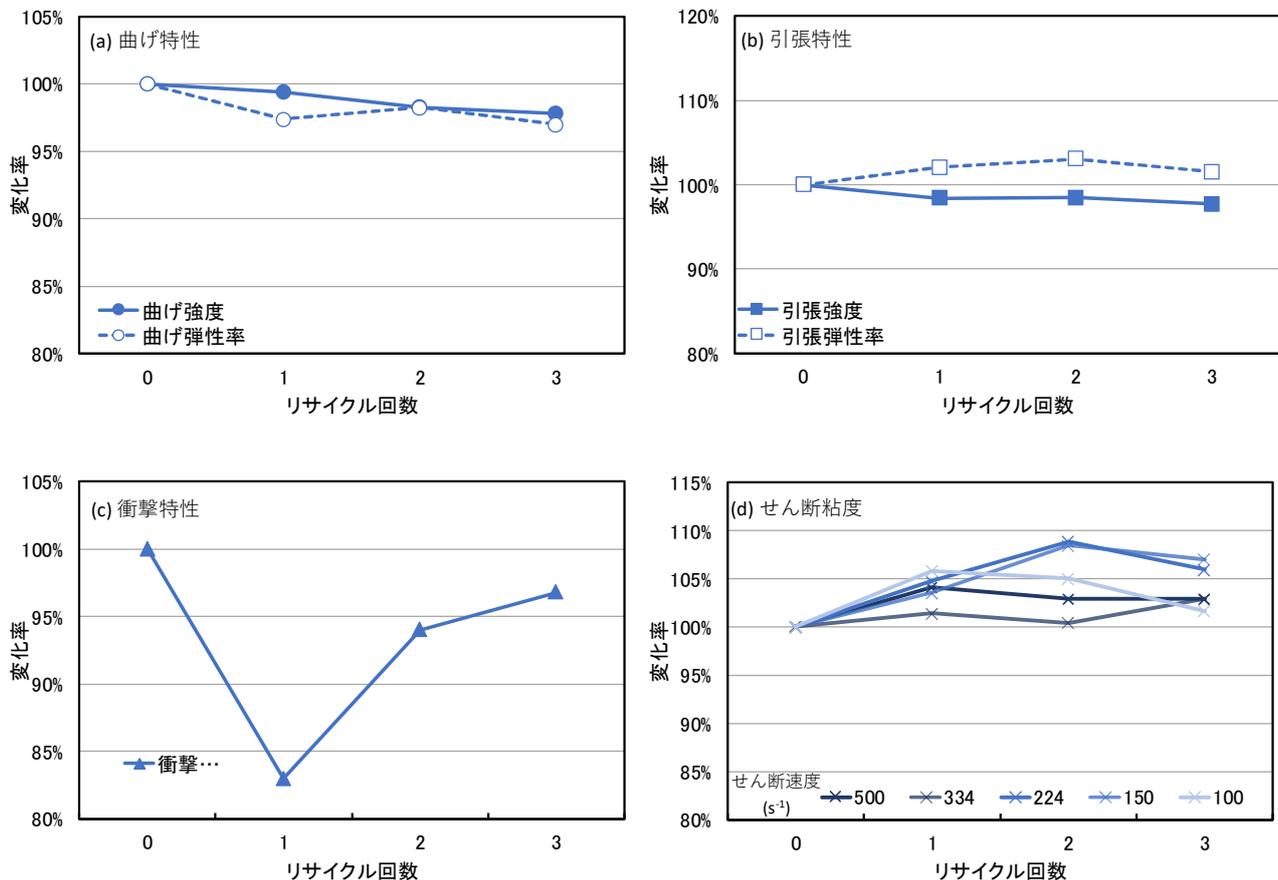


図 2-124 TMB/家電リサイクル樹脂の各種物性変化率  
a:曲げ特性、b:引張特性、c:衝撃特性、d:せん断粘度

曲げ強度はリサイクル回数の増加で減少し、最大 2%の減少が見られ、強度低下は直線的であった。曲げ弾性率はリサイクルによる減少が見られ、最大 3%低下した。引張強度はリサイクル回数の増加で減少し、強度は最大 2%減少した。一方の引張弾性率はリサイクル後に向上しており、最大 2%向上した。衝撃強度はリサイクルによる低下が見られ、最大 12%の低下率をリサイクル 1 回目で示した。これは、容器包装リサイクル樹脂で希釈した際と同様に、サンプル誤差による影響が大きいと考える。流動性の指標となるせん断粘度については、他の条件と異なり、リサイクル回数の増加につれ、高くなる傾向にあり、最大で 9%高くなった。この流動性の低下を明確に説明することは現状のデータではできないが、表 2-37 を見ると、家電リサイクル樹脂で希釈したサンプルのせん断粘度は容器包装リサイクル樹脂で希釈したサンプルよりも十分に小さい。そのため、容器包装リサイクル樹脂を想定した成形機を用いれば、リサイクル後の製品成形にも大きな影響はないと判断できる。

WMB の場合は、両再生材プラスチックで希釈した際、曲げ、引張特性は低下し、流動特性、衝撃強度は向上する結果となった。一方、TMB の場合、曲げ、引張、衝撃特性は低下し、流動性は向上する条件、低下する条件両方が存在した。多くの特性は多回リサイクルによる低下が見られたが、その低下は大きくはなく、低下が大きい条件においても今後の成形条件の改善等により、大きな問題にはならないと推察する。

#### 2.2.5.5 まとめ

「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」にて作製した本事業開発品 MB を利用した製品のリサイクル性を評価した。

3 回の熱履歴リサイクルを行っても物性値の低下は小さく、本事業開発品のリサイクル性は高いことが確認された。この検討内容は、開発品 MB を含む複合材がそのまま回収できることを前提としているため、リサイクルシステム構築が重大な課題となる。

## 2.3 社会実装の検証

「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」にて作製した本事業開発品フィラー充填マスターバッチの社会実装に向けた事業性評価、CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の検証を行った。

事業性評価ではマスターバッチの販売価格、設備投資費、工場における実施体制を設定し、設備投資に対する内部収益率（IRR）および設備投資回収期間を算出した。CO<sub>2</sub> 削減効果の検証については、開発品マスターバッチおよびそれを用いた製品の製造フローにおける CO<sub>2</sub> 排出量を計算し、既存品の CO<sub>2</sub> 排出量と比較した。この結果、本事業で開発したマスターバッチおよびそれを用いた製品すべてにおいて、既存品からの CO<sub>2</sub> 排出量 20%削減を達成した。また、建材、自動車、家電・OA 機器の市場における本事業開発品マスターバッチおよびそれを用いた製品の CO<sub>2</sub> 削減量波及効果を算出した。以下に詳細を記す。

### 2.3.1 事業性評価の実施

#### 2.3.1.1 概要

「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」にて作製した本事業開発品フィラー充填マスターバッチの経済性評価と商品化戦略を踏まえた事業性評価を実施した。

本事業開発品マスターバッチと既存品マスターバッチにおいて、原料コストを比較すると、既存品よりも開発品が安価であり、既存設備で対応するメーカーについては、既存品を代替する場合のコストメリットは大きかった。また、設備投資を行った際の事業採算性を計算したところ、CNF 複合廃材の選別装置、ヘンシェルミキサーに投資を行っても 10 年以内の設備投資回収が可能であった。

#### 2.3.1.2 開発品マスターバッチの原料コスト試算

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、  
「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」にて開発したタルクを用いた MB（TMB）、木粉を用いた MB（WMB）の製造コストが既存品の製造コストよりも安価であるかを確認するため、原料コストを比較した。本事業開発品は、CNF 複合廃材をリアクティブ処理用樹脂として使用しているため、既存の容器包装リサイクル樹脂に「CNF 複合廃材の選別工程」を加えた試算が必要になる（図 2-125）。ここでは簡易的に既存の容器包装リサイクル樹脂の単価に「CNF 複合廃材の選別工程」分の製造コストを上乗せした製造コストを計算した（表 2-38）。計算値の根拠は表 2-38 の備考欄に記載した。既存の容器包装リサイクル樹脂の単価 80 円/kg に対し、0.5 円/kg の製造コストの増加となった。額は大きくはないが、コスト増となるため、CNF を含有したことによる物性向上等により、最終製品における製造コストを下げるといった工夫が必要と考える。

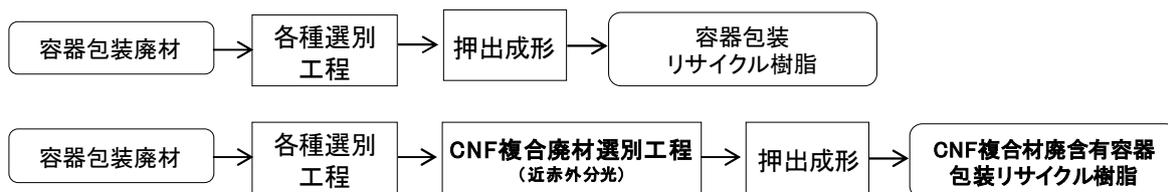


図 2-125 製造工程（上：容器包装リサイクル樹脂、下：CNF 複合材含有容器包装リサイクル樹脂）

表 2-38 CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂の製造コスト試算

製造原価試算		数量(t/月)		備考
		1600		
		単価 円/kg	金額 千円	
				エアロソーターを想定 1000 kg/h × 24h × 0.8 (稼働率) × 20日
変動費	材料費	80.00	128,000	容器包装リサイクル樹脂の価格(エコフィール購買実績による推計値)
	電力量	0.05	79	実験値0.004 kwh/kg 単価12.32円/kwh(関西電力夏季電力料金)で試算
	包装費	0.00	0	容器包装リサイクル樹脂単価に含まれることを想定し、計上しない
	小計	80.05	128,079	
固定費	人件費	0.18	283	配置人員 1名 283,333円/人(年間3,400,000円/人として月額を算出)
	減価償却費	0.23	375	投資総額 45,000千円/10年/12か月の定額償却として試算
	保守費用	0.02	38	減価償却費の10%で試算
	小計	0.43	696	
合計		80.50	128,775	

ここで算出した CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂の単価を利用し、開発品 MB の原料コストを算出し、同様に既存品 MB の原料コストを算出した。表 2-39 に TMB、表 2-40 に WMB の原料コストを示す。既存品はフィラー、PP、MA 変性 PP (MAPP) を使用した場合を想定した。この結果を見ると TMB は 29.1 円/kg、WMB は 35.2 円/kg 開発品の原料コストが従来品よりも安い。既存品においては、MB よりもフィラー量の低いコンパウンド(濃度 20%程度)で販売されることが多く、希釈に用いる PP の価格がフィラーよりも高いことを考えると、さらに本開発品のコストとの差額は大きくなる。よって、既存設備で対応するメーカーについては、既存品を代替する場合のコストメリットは大きいことが示された。

表 2-39 開発品および既存品 MB の原料コスト (フィラー：タルク)

原材料名	単価 円/kg	開発品		既存品		備考
		重量比(%)	単価(円/kg)	重量比(%)	単価(円/kg)	
樹脂モデル	80.5	30	24.2	—	—	CNF複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂、表2-38より
ポリプロピレン	200	—	—	27.2	54.4	市況価格(化薬ヌーリオン購買実績による推計)
タルク	100	70	70.0	70	49.0	市況価格(静岡大学購買実績による推計)
無水マレイン酸	250	0.5	1.3	—	—	市況価格(化薬ヌーリオン購買実績による推計)
有機過酸化物	1500	0.25	3.8	—	—	市況価格(化薬ヌーリオン購買実績による推計)
MAPP	1000	—	—	2.8	28.0	市況価格(静岡大学購買実績による推計)
合計	—	—	99.2	—	131.4	

表 2-40 開発品および既存品 MB の原料コスト（フィラー：木粉）

原材料名	単価 円/kg	開発品		既存品		備考
		重量比(%)	単価(円/kg)	重量比(%)	単価(円/kg)	
樹脂モデル	80.5	30	24.2	—	—	CNF複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂、表2-38より
ポリプロピレン	200	—	—	27.2	54.4	市況価格(化薬ヌーリオン購買実績による推計)
木粉	80	70	56.0	70	39.2	市況価格(静岡大学購買実績による推計)
無水マレイン酸	250	0.4	1.0	—	—	市況価格(化薬ヌーリオン購買実績による推計)
有機過酸化物	1500	0.1	1.5	—	—	市況価格(化薬ヌーリオン購買実績による推計)
MAPP	1000	—	—	2.8	28.0	市況価格(静岡大学購買実績による推計)
合計	—	—	82.7	—	121.6	

### 2.3.1.3 設備投資実施時の事業採算性の評価

MB 作製の製造フローを図 2-126 に示す。開発品 MB 作製を行う場合、ヘンシェルミキサーと押出機が導入されているメーカー（WPC メーカー等）は選別装置、押出機が導入されているコンパウンドメーカーは選別装置およびヘンシェルミキサーに対する設備投資が必要になる。この2種類のメーカーの新規参入時の事業採算性を計算し、内部収益率（IRR）および設備投資回収期間を算出した。

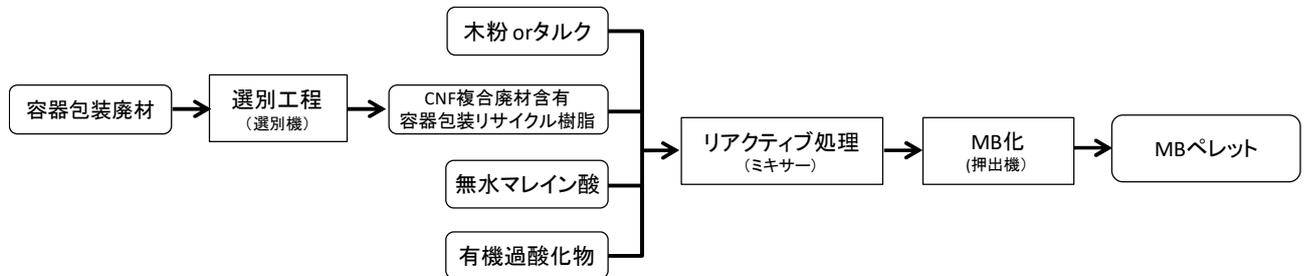


図 2-126 開発品 MB 作製の製造フロー

設備投資額を表 2-41 に、生産体制を表 2-42 に、その他の費用を表 2-43 に示す。なお、減価償却期間は 10 年、販売価格は TMB 230 円/kg、WMB 180 円/kg に設定した。販売価格は現行の MB の販売価格を逸脱しない条件で設定した。原価コストは表 2-39、40 に準じ、TMB 99 円/kg、WMB 83 円/kg とした。これらの数値を根拠とし、内部収益率（IRR）および設備投資回収期間を算出した。

表 2-41 設備投資額

装置	金額	根拠
1000Lヘンシェルミキサーおよび付帯設備	35百万円/台	メーカーヒアリング
近赤外分光分析装置 (エアロソータIR)	45百万円/台	メーカーヒアリング

表 2-42 生産体制

生産体制	2名1直体制
選別機処理能力	1000 kg/h
ミキサー処理能力	300 kg/バッチ・h
押出機の吐出量	150 kg/h
稼働時間	8 時間/日
処理量	600 kg/日(2/バッチ/日)
稼働日数	250 日/年
年間処理能力	150 t/年

表 2-43 その他の費用

項目	費用	根拠
電気代	1円/kg	市況価格(化薬ヌーリオン購買実績による推計)
梱包代	0.3円/kg	リターンフレコンを想定(500kg/フレコン:リユース5回)
輸送費	14円/kg	市況価格(化薬ヌーリオン購買実績による推計)
人件費	340万円/年	市況価格(化薬ヌーリオン購買実績による推計)

検討結果を表 2-44 に示す。これらの結果、選別機とミキサー両方に設備投資を行ったとしても、TMB は IRR 16.3%、設備投資回収期間 4.9 年となり、WMB は IRR 8.2%、設備投資回収期間が 6.8 年となり、10 年以内の設備投資回収が可能であった。この結果を受け、選別機とミキサー両方に設備投資を行った条件について、さらに装置の稼働率を変化させた際の事業採算性評価結果を算出した。

表 2-44 設備投資内容別の事業採算性評価

MB種類	TMB		WMB	
	選別機	選別機+ミキサー	選別機	選別機+ミキサー
内部収益率 (IRR)	33.9%	16.3%	22.3%	8.2%
設備投資回収期間	2.9年	4.9年	4.0年	6.8年

表 2-45 に検討結果を示す。TMB では 50%の稼働率であっても 10 年での設備投資回収は可能となったが、WMB では 50%の稼働率で、10 年での設備投資回収は不可能だった。そのため、ペレット製造メーカー等が新規に設備投資を行い、本事業開発品 MB を生産するには一定の稼働率を確保する必要がある。

表 2-45 稼働率別の事業採算性評価

MB種類	TMB			WMB		
	稼働率 100%	稼働率 80%	稼働率 50%	稼働率 100%	稼働率 80%	稼働率 50%
内部収益率 (IRR)	16.30%	10.90%	1.50%	8.20%	3.70%	-4.30%
設備投資 回収期間	4.9年	6.1年	9.2年	6.8年	8.5年	10年での 回収不可

#### 2.3.1.4 まとめ

「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」にて作製した開発品 MB の事業性評価を実施した。開発品 MB と既存品 MB の原料コストを比較すると、既存品よりも開発品が安価であり、既存設備で対応するメーカーについては、既存品を代替する場合のコストメリットは大きかった。また、設備投資を行った際の事業採算性を計算したところ、CNF 複合廃材の選別装置およびヘンシェルミキサーに投資を行っても 10 年以内の設備投資回収が可能であった。稼働率が 50% の場合、WMB は 10 年以内の設備投資回収が不可能であった。今回の想定では 150 t/年の生産規模を想定しているが、事業性評価を目的としたヒアリングの結果から WPC の国内市場は 4 万 t/年、タルクコンパウンドは 10 万 t/年の規模であると判明している。最終製品は MB を希釈して使用するため、生産規模 150 t/年の工場における稼働率は十分に確保できる。そのため、大きな設備投資を必要とするプラスチックコンパウンドメーカーにおいても、本事業開発品 MB に対して投資する価値はあると考える。本事業開発品に用いる CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂は、原料となる CNF 複合廃材が 2025 年より段階的に普及することを想定しており、流通初期は既存設備による生産が可能な WPC メーカー等による生産を行い、CNF 複合廃材の普及が進んだ段階（2030 年以降）ではコンパウンドメーカーにより生産を行う当初の想定は実現可能であると考え。ただし、製品化には「2.2.4 実用化に向けた利用方法の検討」において示した課題を解決する必要がある。

実際の市場規模、その市場内の想定シェアの検討は「2.3.3 市場サイズにおける CO2 削減効果についての検証」で行った。

## 2.3.2 リアクティブシステムによる CO2 削減効果の検証

### 2.3.2.1 概要

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」にて、リアクティブシステムを活用した本事業開発品フィラー充填マスターバッチの量産を実施し、実測した消費電力データから CO2 排出量を算出した。この開発品マスターバッチは既存品マスターバッチと比較して 20%以上の CO2 排出量削減を達成した。また、「2.2.2 PR 用サンプルの作製」にて作製した開発品マスターバッチを用いた PR 用サンプルについても、既存の建材、自動車、家電の製品の CO2 排出量も 20%以上削減が可能であった。

### 2.3.2.2 目的

MB の量産プロセスについて、リアクティブシステム導入による CO2 排出量削減効果を評価する。また、実用化に向けた建材、自動車、家電・OA 機器の PR 用サンプル製造時の CO2 排出量も算出し、既存製品と比較評価する。

### 2.3.2.3 方法

#### 2.3.2.3.1 評価プロセス

開発品 MB の製造フローを図 2-127 に示す。

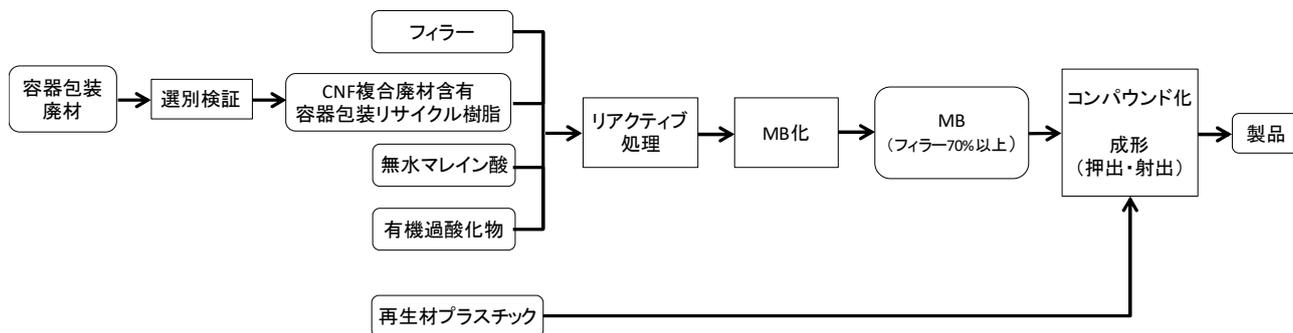


図 2-127 開発品 MB の製造フロー

フィラーと CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂とをリアクティブ処理により混合し、MB 化した後、さらに再生材プラスチックを混合してコンパウンド化・成形により製品化する。フィラーは、木粉またはタルクとする。CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂は、容器包装リサイクルにより収集・運搬・ベール化、さらに運搬・ペレット化された容器包装廃材に、「2.1.1.2 選別技術の検証」で取得した既存の近赤外選別装置による選別検証を加えるた条件とした。再生材プラスチックは、使用済み家電を収集・運搬し、分解・解体・破碎・選別されたもの（以降、家電リサイクル樹脂）、または容器包装リサイクル樹脂（容器包装廃材と同義）とした。この開発品 MB と比較する条件として、図 2-128 の既存品 MB 製造フローを設定した。

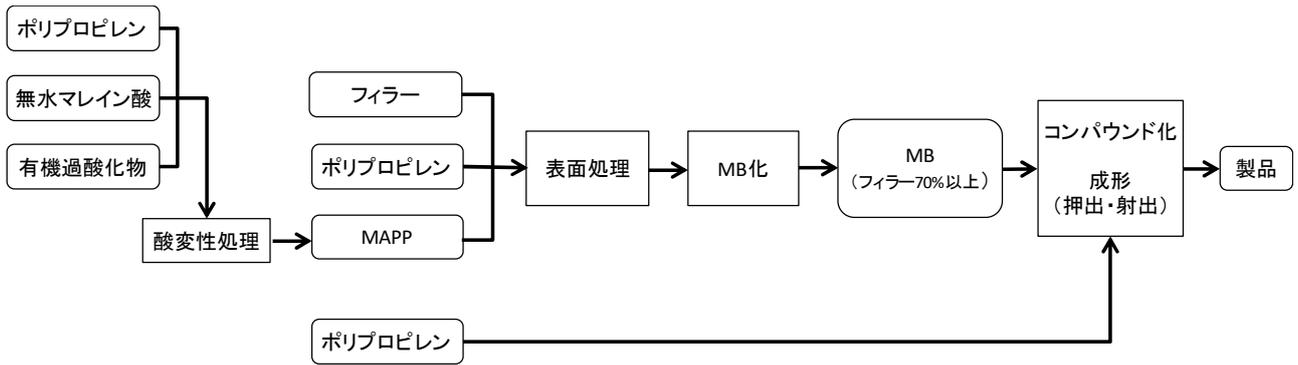


図 2-128 既存品 MB の製造フロー

予め酸変性した MAPP、バージンポリプロピレンおよびフィラーの混合による MB 化を行い、その後バージンポリプロピレンと混合してコンパウンド化・成形により製品化する。また、多くのプラスチック製品は、MB 化工程を介さずに直接コンパウンドを作製して成形処理により製品化する手法が主流である。そのため、この直接コンパウンド化の方法についても評価を行った（図 2-129）。

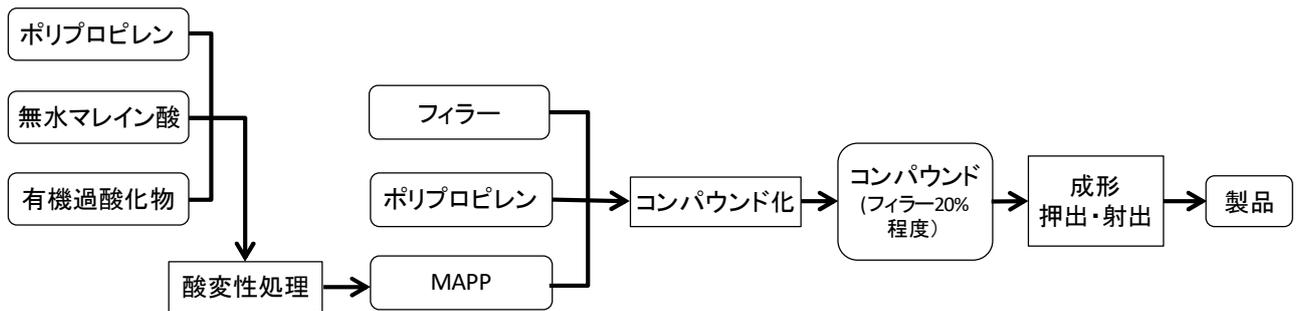


図 2-129 既存品コンパウンドの製造フロー

### 2.3.2.3.2 評価範囲と評価条件

#### 2.3.2.3.2.1 開発品 MB 製造プロセス

フィラーが木粉の場合とタルクの場合の評価範囲を図 2-130、131 に示す。

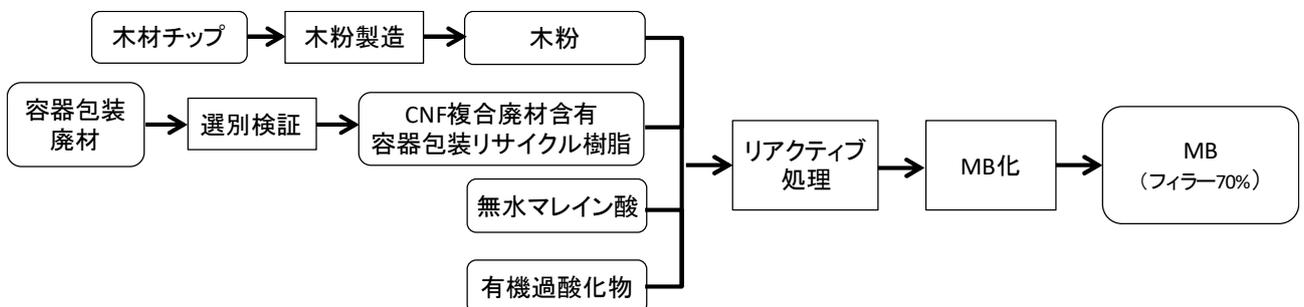


図 2-130 開発品 MB の評価フロー（フィラー：木粉）

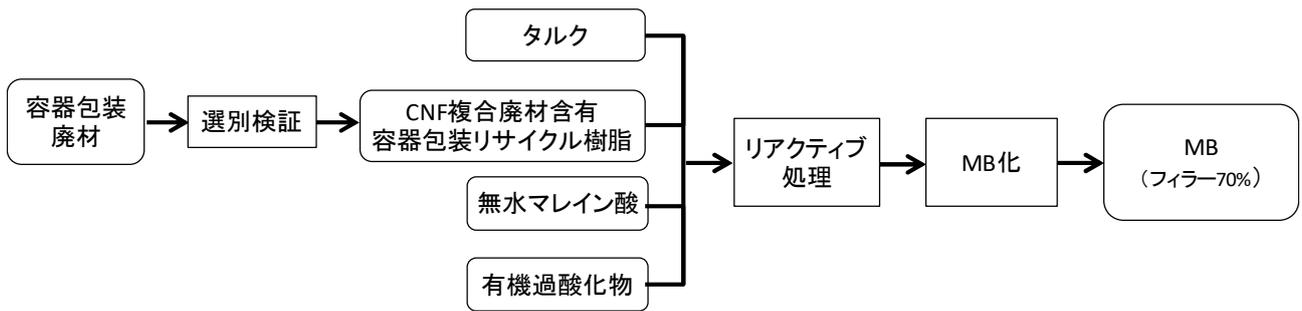


図 2-131 開発品 MB の評価フロー（フィラー：タルク）

木材チップを粉砕した木粉、またはタルクと、CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂、無水マレイン酸、有機過酸化物を処理（リアクティブ処理）した後、MB 化を行った製造プロセスを評価した。MB のフィラー含有率は 70%、リアクティブ処理の歩留まりは、木粉で 95%、タルクで 99%、MB 化の歩留まりはいずれも 99%とした。これは「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」の実測値に準拠している。

#### 2.3.2.3.2 既存品 MB およびコンパウンド製造プロセス

既存品 MB において、フィラーが木粉の場合とタルクの場合の MB とコンパウンドの評価範囲をそれぞれ図 2-132～135 に示す。

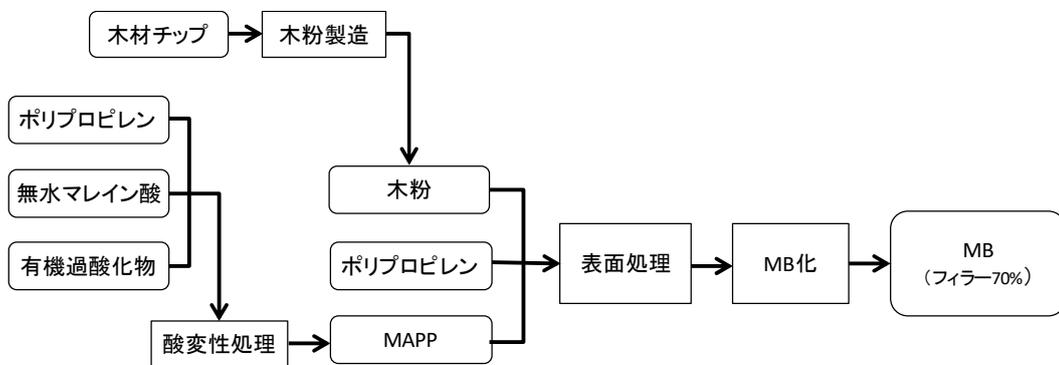


図 2-132 既存品 MB 製造フロー（フィラー：木粉）

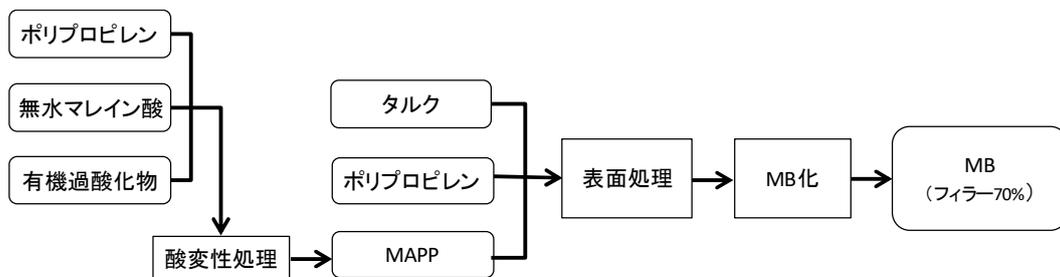


図 2-133 既存品 MB 評価フロー（フィラー：タルク）

バージンポリプロピレンと木粉またはタルクを予め酸変性した MAPP により表面処理

し、MB 化する MB 製造プロセスを評価した。表面処理の歩留まりは、木粉、タルクのいずれも 93%、MB 化の歩留まりはいずれも 99%とした。これは製品試作時の結果に準じて設定した。

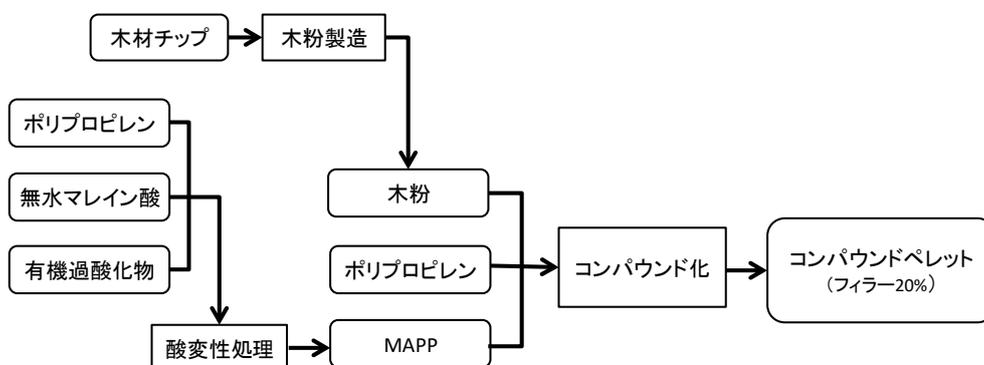


図 2-134 既存品コンパウンド評価フロー（フィラー：木粉）

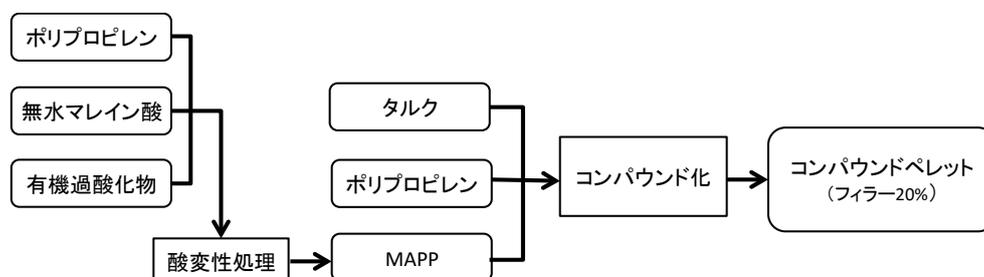


図 2-135 既存品コンパウンド評価フロー（フィラー：タルク）

ポリプロピレンと木粉またはタルクを予め酸変性した MAPP と共にコンパウンド化してコンパウンドペレットを製造するプロセスを評価した。コンパウンド化の歩留まりは、木粉、タルクのいずれも 99%とした。これは製品試作時の結果に準じて設定した。

### 2.3.2.3.2.3 PR 用サンプルの製造プロセス（建材、自動車、家電・OA 機器）

建材、自動車、家電・OA 機器の各 PR 用サンプルの評価範囲と、それぞれの比較対象となる既存品における評価範囲を図 2-136～141 に示す。

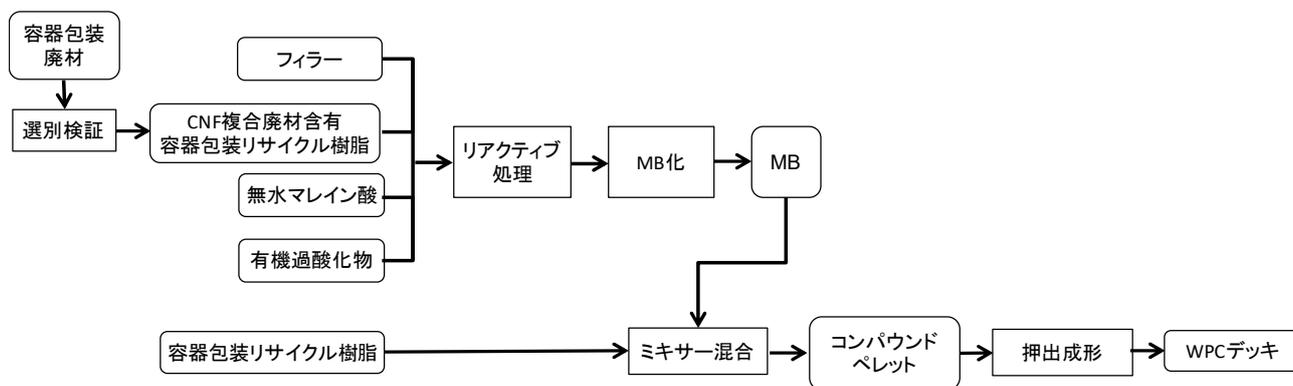


図 2-136 建材 PR 用サンプル評価フロー

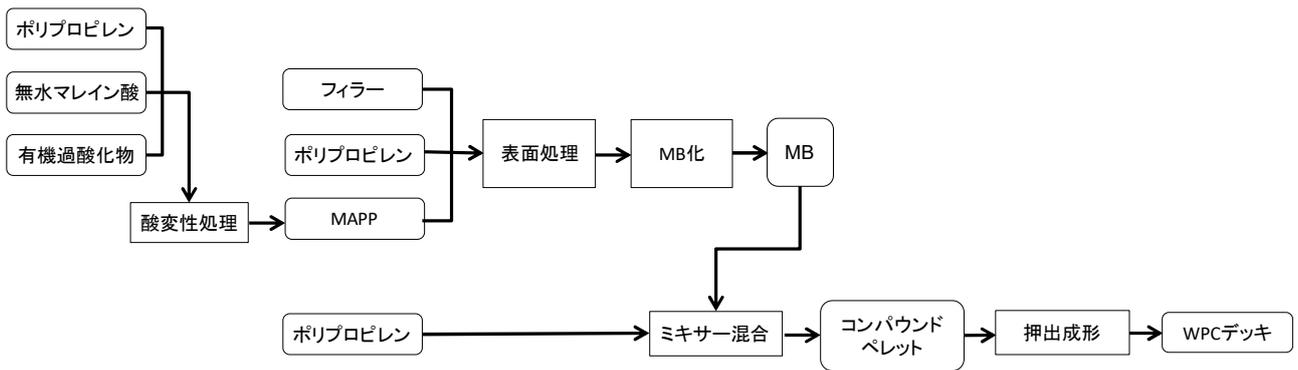


図 2-137 建材既存品評価フロー

建材は WPC デッキを対象とし、木粉を用いた開発品 MB (WMB) を容器包装リサイクル樹脂でフィラー含有率 50%に調整し、押出成形で製品化した。比較する既存品は、木粉を用いた既存品 MB をポリプロピレンでフィラー含有率 50%に調整した材料とした。ミキサー処理の歩留まりは 94%、押出成形の歩留まりは 96%とした。これは「2.2.2.1 建材 PR 用サンプルの作製」における実測値に準拠している。

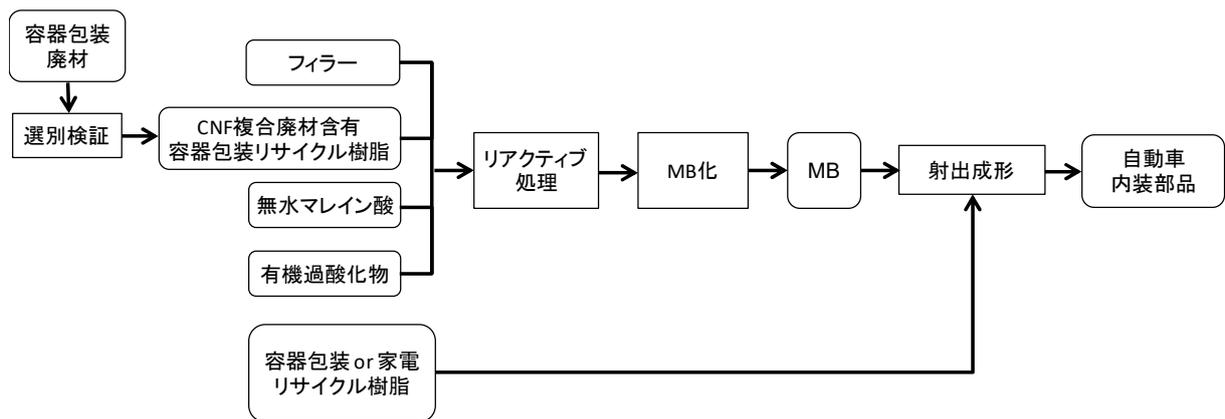


図 2-138 自動車 PR 用サンプル評価フロー

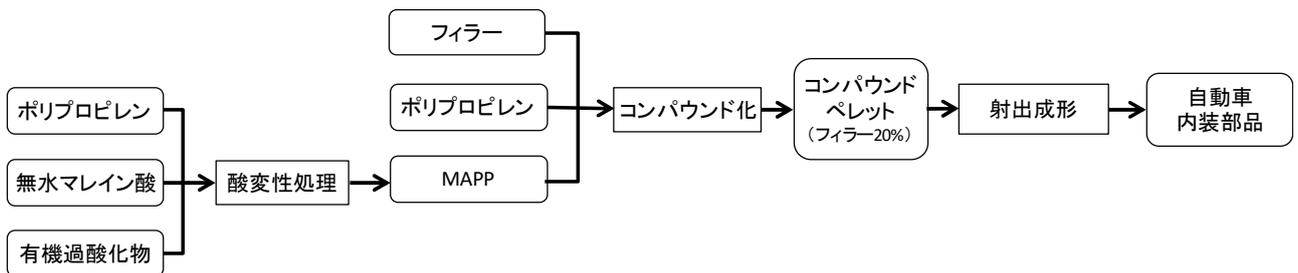


図 2-139 自動車既存品評価フロー

自動車部品は、内装部品を対象とし、各開発品 MB と容器包装リサイクル樹脂または家電リサイクル樹脂を混合と同時に射出成形して製造した。比較する既存品は、MB 化を介さずに直接コンパウンド化したペレットを射出成形して製造した。射出成形の歩留まりは、フィラーがタルクで樹脂が家電リサイクル樹脂の場合は 90%とし、その他全て 88%とした。これは「2.2.2.2 自動車 PR 用サンプルの作製」における実測値に準拠している。

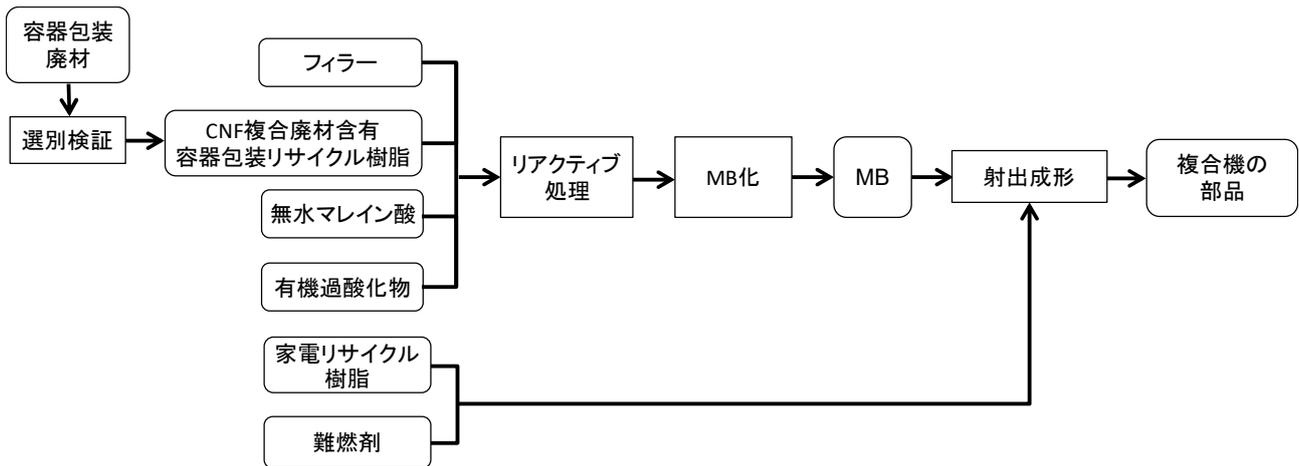


図 2-140 家電・OA 機器 PR 用サンプル評価フロー

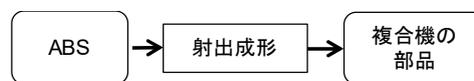


図 2-141 家電・OA 機器既存品評価フロー

家電・OA 機器は、複合機の部品を対象とし、WMB と家電リサイクル樹脂および難燃剤を混合と同時に射出成形して、複合機の部品を製造するとした。比較する既存品は、ABS 樹脂をそのまま射出成形するものとした。射出成形の歩留まりは、開発品は 86%、現行品は 88%とした。これは「2.2.2.3 家電・OA 機器 PR 用サンプルの作製」における実測値に準拠している。

#### 2.3.2.3.2.4 CO2 排出量原単位出展について

容器包装リサイクル樹脂および家電リサイクル樹脂の原材料としての負荷はゼロとした。評価工程から副製品の製造は想定していない。機能単位は、製品 1kg あたりとした。バックグラウンドデータには、IDEAv2.2（産業技術総合研究所、産業環境管理協会）を使用し、地球温暖化係数として IPCC2013、GWP100 年係数を用いて、各種温暖化ガスの影響を CO2 換算した GHG 排出量により評価した。また、容器廃材の収集からペレット化までの CO2 排出量は、海洋プラスチック問題対応協議会の調査報告書「プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価（LCA）（2019 年 3 月）」を参照した。

なお、本報告書では、算出した GHG 排出量を「CO2 排出量」と記述する。

使用した原単位は以下の通りである。

- ・木材チップ
- ・無水マレイン酸
- ・その他の脂肪族系中間物
- ・ポリプロピレン
- ・ABS 樹脂（難燃性）
- ・タルク

- ・他に分類されない有機化学工業製品
- ・使用済み家電の高度中間処理サービス（分解・解体～破碎・選別）
- ・トラック輸送サービス、2トン車、積載率\_平均
- ・電力、一般電気事業者10社平均、2015年度
- ・容リプラの収集・分別・運搬・ベール化・運搬・ペレット化

## 2.3.2.4 結果

### 2.3.2.4.1 開発品 MB の評価結果

評価結果を表 2-46 に示す。木粉側は木粉化工程、リアクティブ処理工程、MB 化工程においてタルク側よりも CO2 排出量が大きくなった。無水マレイン酸と有機過酸化物に関しては、添加量が木粉側はタルク側よりもやや少ないため、CO2 排出量も木粉が若干小さくなった。MB 全体の CO2 排出量は木粉 (0.69 kg-CO2/kg-MB) がタルク (0.44 kg-CO2/kg-MB) よりもやや大きい結果となった。

表 2-46 開発品 MB の評価結果（左：WMB、右：TMB）

製品・工程	投入量	GHG排出量 (kg-CO2e/kg)	製品・工程	投入量	GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
木材チップ	1.000 kg	0.071	容器包装廃材	1.000 kg	0.495
木粉化工程	0.412 kWh	0.239	NIR選別工程	0.004 kWh	0.002
木粉製造	1.000 kg	0.310	CNF含有容器包装リサイクル樹脂製造	1.000 kg	0.497
容器包装廃材	1.000 kg	0.495	タルク	0.695 kg	0.023
NIR選別工程	0.004 kWh	0.002	CNF含有容器包装リサイクル樹脂	0.298 kg	0.148
CNF含有容器包装リサイクル樹脂製造	1.000 kg	0.497	無水マレイン酸	0.005 kg	0.015
			有機過酸化物	0.002 kg	0.005
木粉	0.697 kg	0.216	リアクティブ処理工程	0.280 kWh	0.162
CNF含有容器包装リサイクル樹脂	0.299 kg	0.148	リアクティブ処理タルク製造	1.010 kg	0.356
無水マレイン酸	0.004 kg	0.012			
有機過酸化物	0.001 kg	0.002	リアクティブ処理タルク	1.000 kg	0.356
リアクティブ処理工程	0.280 kWh	0.162	MB化	0.144 kWh	0.083
リアクティブ処理木粉製造	1.053 kg	0.569	開発品タルクMB(TMB)製造	1.010 kg	0.444
リアクティブ処理木粉	1.000 kg	0.569			
MB化	0.204 kWh	0.119			
開発品木粉MB(WMB)製造	1.010 kg	0.694			

### 2.3.2.4.2 既存品 MB およびコンパウンドの評価結果

評価結果を表 2-47、48 に示す。木粉側は、表面処理工程がタルク側よりも負荷が小さくなったが、木粉化工程と MB 化工程では CO2 排出量が大きくなった。そのため、既存品 MB 全体の CO2 排出量は木粉 (1.37 kg-CO2/kg-MB) がタルク (1.18 kg-CO2/kg-MB) よりもやや大きい結果となった。一方、既存品コンパウンドについては、コンパウンド工程は木粉とタルクとで変化がなかったため、木粉化工程による若干の負荷増加が認められる結

果となった。

表 2-47 既存品 MB の評価結果（左：木粉、右：タルク）

製品・工程	投入量		GHG排出量 (kg-CO2e/kg)	製品・工程	投入量		GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
木材チップ	1.000	kg	0.071	ポリプロピレン	0.976	kg	1.867
木粉化工程	0.412	kWh	0.239	無水マレイン酸	0.020	kg	0.057
木粉製造	1.000	kg	0.310	有機過酸化物	0.005	kg	0.010
ポリプロピレン	0.976	kg	1.867	MAPP化工程	0.150	kWh	0.087
無水マレイン酸	0.020	kg	0.057	MAPP製造	1.000	kg	2.021
有機過酸化物	0.005	kg	0.010	タルク	0.700	kg	0.023
MAPP化工程	0.150	kWh	0.087	ポリプロピレン	0.284	kg	0.543
MAPP製造	1.000	kg	2.021	MAPP	0.016	kg	0.032
木粉	0.700	kg	0.217	表面処理工程	0.700	kWh	0.406
ポリプロピレン	0.284	kg	0.543	表面処理タルク製造	1.075	kg	1.080
MAPP	0.016	kg	0.032	表面処理タルク	1.000	kg	1.080
表面処理木粉工程	0.610	kWh	0.354	マスターバッチ化	0.144	kWh	0.083
表面処理木粉製造	1.075	kg	1.233	既存品MB(タルク)製造	1.010	kg	1.175
表面処理木粉	1.000	kg	1.233				
マスターバッチ化	0.204	kWh	0.119				
既存品MB(木粉)製造	1.010	kg	1.365				

表 2-48 既存品 コンパウンドの評価結果（左：木粉、右：タルク）

製品・工程	投入量		GHG排出量 (kg-CO2e/kg)	製品・工程	投入量		GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
木材チップ	1.000	kg	0.071	ポリプロピレン	0.976	kg	1.867
木粉化工程	0.412	kWh	0.239	無水マレイン酸	0.020	kg	0.057
木粉製造	1.000	kg	0.310	有機過酸化物	0.005	kg	0.010
ポリプロピレン	0.976	kg	1.867	MAPP化工程	0.150	kWh	0.087
無水マレイン酸	0.020	kg	0.057	MAPP製造	1.000	kg	2.021
有機過酸化物	0.005	kg	0.010	タルク	0.200	kg	0.007
MAPP化工程	0.150	kWh	0.087	ポリプロピレン	0.792	kg	1.515
MAPP製造	1.000	kg	2.021	MAPP	0.008	kg	0.016
木粉	0.200	kg	0.062	コンパウンド化工程	1.087	kWh	0.630
ポリプロピレン	0.792	kg	1.515	既存品コンパウンド(タルク)製造	1.010	kg	2.190
MAPP	0.008	kg	0.016				
コンパウンド化工程	1.087	kWh	0.630				
既存品コンパウンド(木粉)製造	1.010	kg	2.246				

### 2.3.2.4.3 開発品 MB と既存品 MB の比較

各フィルターの開発品 MB と既存品 MB の評価結果を、図 2-142 に示す。

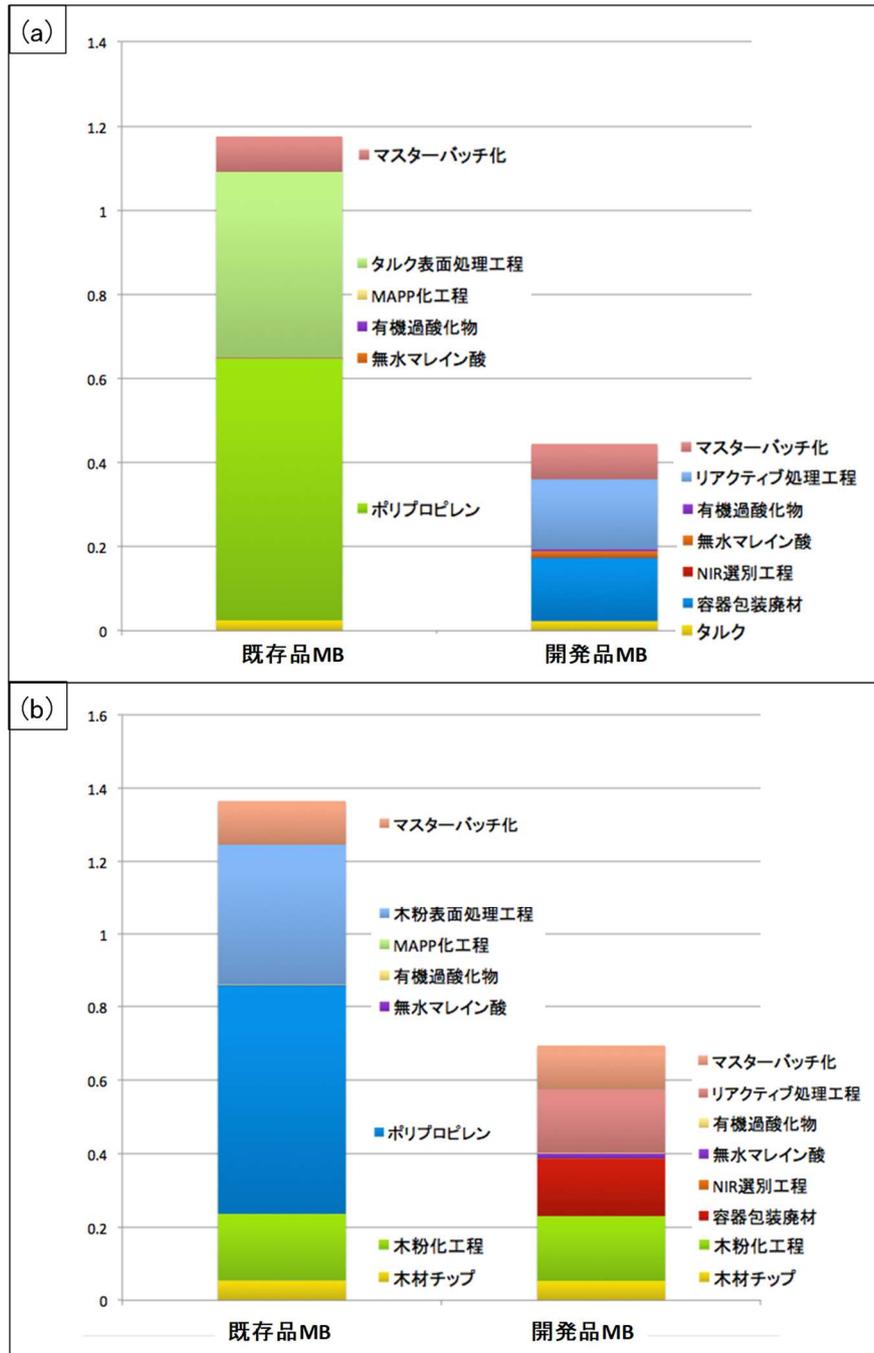


図 2-142 各 MB の評価結果 (kg-CO2e/kg) (a : 木粉、b : タルク)

木粉を用いた既存品 MB では、ポリプロピレン、木粉表面処理工程、木粉化工程、MB 化工程の順に負荷が大きくなっているが、開発品 MB (WMB) では、このうちポリプロピレンが CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂 (容器包装廃材+NIR 選別工程) になることにより、また木粉表面処理工程がリアクティブ工程になることにより、大きく負荷が下がったため、全体としては約 49%の CO2 排出量削減率を達成した。またタルクを用いた MB でも同様に、ポリプロピレンとタルク表面処理工程が CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂とリアクティブ処理工程に変わったことにより、大きく負荷が減少し、全体としては約 62%の CO2 排出量削減率が得られた。

### 2.3.2.4.4 PR 用サンプルと既存品の評価結果

#### 2.3.2.4.4.1 建材

建材（WPC デッキ）を開発品 MB と容器包装リサイクル樹脂を用いて製造した PR 用サンプルと、既存品 MB とポリプロピレンを用いて製造した既存品について評価し、結果を表 2-49、図 2-143 にまとめた。ミキサー処理工程と押出成形工程の負荷は、PR 用サンプルと既存品サンプルとでほとんど差がないため、MB と樹脂の負荷低減による効果により、建材用 PR サンプルの CO2 排出量（1.08 kg-CO2e/kg）は既存品の CO2 排出量（2.06 kg-CO2e/kg）と比較して約 46%の削減となった。

表 2-49 建材サンプルの評価結果（左：PR 用サンプル、右：既存品）

製品・工程	投入量	GHG排出量 (kg-CO2e/kg)	製品・工程	投入量	GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
WMB	0.714 kg	0.496	既存品MB(木粉)	0.714 kg	0.975
容器包装リサイクル樹脂	0.286 kg	0.141	ポリプロピレン	0.286 kg	0.547
ミキサー処理工程	0.088 kWh	0.051	ミキサー処理工程	0.087 kWh	0.050
ミキサー処理木粉製造	1.064 kg	0.733	ミキサー処理木粉製造	1.064 kg	1.672
ミキサー処理木粉	1.000 kg	0.733	ミキサー処理木粉	1.000 kg	1.672
押出成形	0.518 kWh	0.300	押出成形	0.518 kWh	0.300
建材PR用サンプル製造	1.042 kg	1.076	建材既存品製造	1.042 kg	2.055

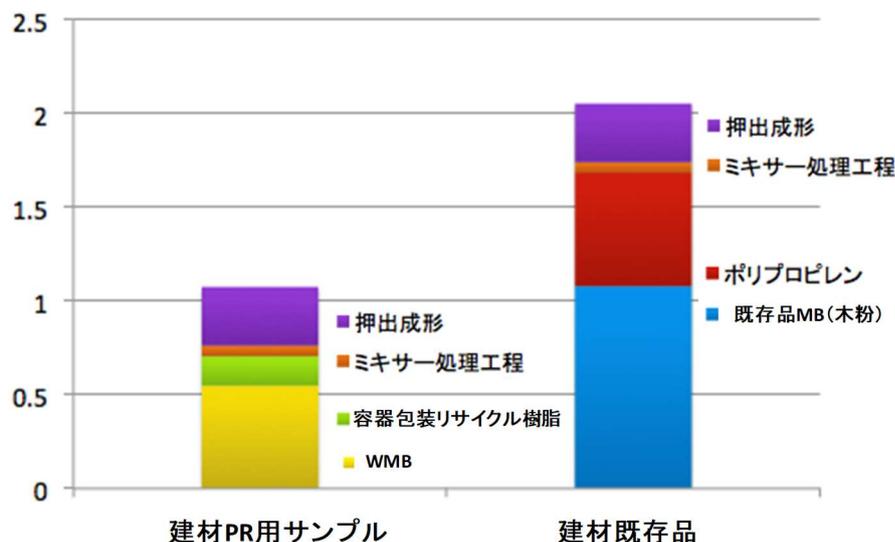


図 2-143 建材サンプルの評価結果 (kg-CO2e/kg)

#### 2.3.2.4.4.2 自動車

自動車内装材（アウターカバー）について、表 2-50 の条件で製造した PR 用サンプル（開発品）と既存品を想定したサンプル（既存品）について評価した。結果を表 2-51～2-56、図 2-144、145 にまとめた。

表 2-50 自動車内装材サンプルの製造条件

サンプル名	構成
既存品1	既存品コンパウンド(タルク/PP)
開発品①	TMB + 容器包装リサイクル樹脂
開発品②	TMB + 家電リサイクル樹脂
既存品2	既存品コンパウンド(木粉/PP)
開発品③	WMB + 容器包装リサイクル樹脂
開発品④	WMB + 家電リサイクル樹脂

フィラーが木粉、タルクのいずれにおいても、射出成形工程の負荷は PR 用サンプルと既存品とでほとんど差がないため、製品の CO2 排出量の大部分を占める樹脂とフィラーのコンパウンドを開発品 MB と再生材プラスチックへ代替することで、大きな CO2 排出量削減効果が示された。フィラーがタルクの場合は、既存品コンパウンドを用いた既存品 1 の CO2 排出量 (2.88 kg-CO2e/kg) に対して、開発品 MB と容器包装リサイクル樹脂を用いた開発品①の CO2 排出量 (0.91 kg-CO2e/kg)、開発品 MB と家電リサイクル樹脂を用いた開発品②の CO2 排出量 (1.35 kg-CO2e/kg) は、それぞれ約 68%、および約 53%の削減となった。同様に、フィラーが木粉の場合は、既存品コンパウンドを用いた既存品 2 の CO2 排出量 (2.94 kg-CO2e/kg) に対して、開発品 MB と容器包装リサイクル樹脂を用いた開発品③の CO2 排出量 (1.06 kg-CO2e/kg)、開発品 MB と容器包装リサイクル樹脂を用いた開発品④の CO2 排出量 (1.54 kg-CO2e/kg) は、それぞれ約 64%、および約 48%の削減となった。

表 2-51 開発品①の評価結果

製品・工程	投入量		GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
TMB	0.286	kg	0.127
容器包装リサイクル樹脂	0.714	kg	0.353
射出成形工程	0.555	kWh	0.322
開発品①製造	1.136	kg	0.912

表 2-52 開発品②の評価結果

製品・工程	投入量		GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
TMB	0.286	kg	0.127
家電リサイクル樹脂	0.714	kg	0.797
射出成形工程	0.503	kWh	0.292
開発品②製造	1.111	kg	1.350

表 2-53 既存品 1 の評価結果

製品・工程	投入量		GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
既存品コンパウンド(タルク)	1.000	kg	2.190
射出成形工程	0.592	kWh	0.343
既存品1製造	1.136	kg	2.879

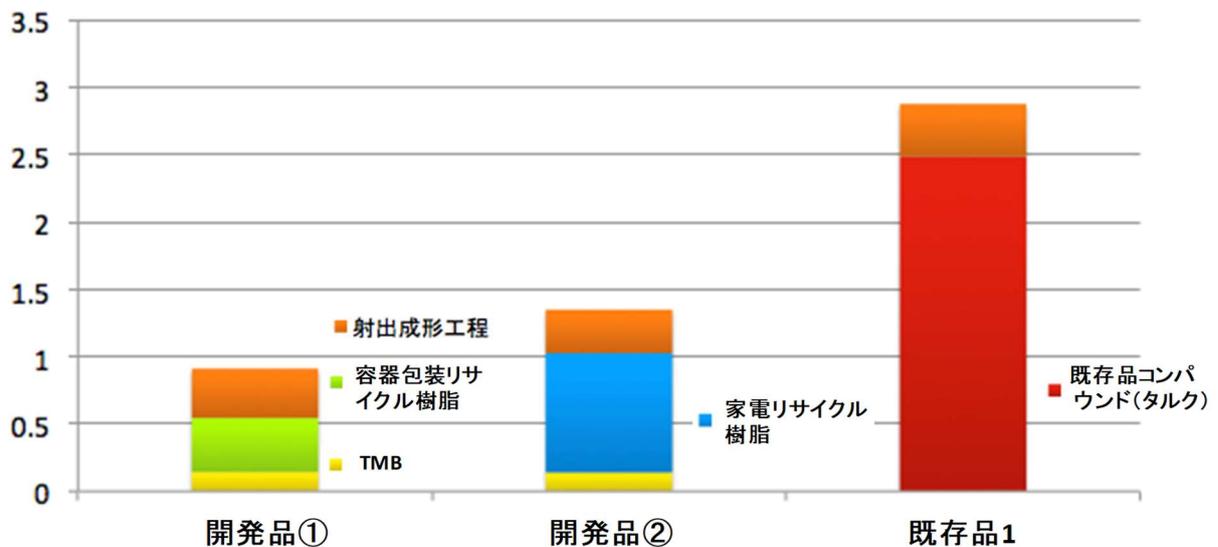


図 2-144 自動車内装材サンプル (タルク) の評価結果 (kg- CO2e/kg)

表 2-54 開発品③の評価結果

製品・工程	投入量	GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
WMB	0.286 kg	0.199
容器包装リサイクル樹脂	0.714 kg	0.353
射出成形工程	0.656 kWh	0.380
開発品③製造	1.136 kg	1.059

表 2-55 開発品④の評価結果

製品・工程	投入量	GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
WMB	0.286 kg	0.199
家電リサイクル樹脂	0.714 kg	0.797
射出成形工程	0.622 kWh	0.361
開発品④製造	1.136 kg	1.541

表 2-56 既存品2の評価結果

製品・工程	投入量	GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
既存品コンパウンド(木粉)	1.000 kg	2.246
射出成形工程	0.592 kWh	0.343
既存品2製造	1.136 kg	2.942

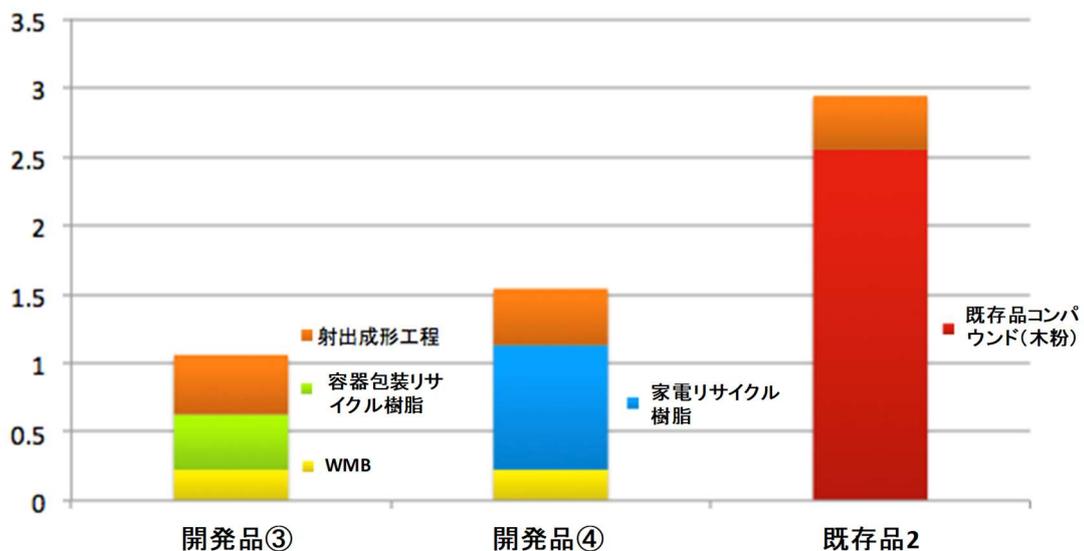


図 2-145 自動車内装材サンプル（木粉）の評価結果（kg-CO2e/kg）

### 2.3.2.4.4.3 家電・OA 機器

家電・OA 機器サンプル（複合機の部品）について、WMB、難燃剤および家電リサイクル樹脂を用いた PR 用サンプルと、ABS 樹脂を用いた既存製品（既存品）について評価した。結果を表 2-57、図 2-146 にまとめた。射出成形工程の負荷は PR 用サンプルと既存品とでほとんど差がないため、製品の CO2 排出量の大部分を占める ABS 樹脂を WMB と再生材プラスチックへ代替することで、大きな CO2 排出量削減効果が示された。既存品の CO2 排出量 (4.02 kg-CO2e/kg) に対して、WMB、難燃剤および家電リサイクル樹脂を用いた PR 用サンプルの CO2 排出量 (1.62 kg-CO2e/kg) は、約 60%の削減となった。

表 2-57 家電・OA 機器サンプルの評価結果（左：PR 用サンプル、右：既存品）

製品・工程	投入量		GHG排出量 (kg-CO2e/kg)	製品・工程	投入量		GHG排出量 (kg-CO2e/kg)
WMB	0.286	kg	0.199	ABS樹脂	1.000	kg	3.127
家電リサイクル樹脂	0.614	kg	0.685	射出成形工程	0.712	kWh	0.413
難燃剤	0.100	kg	0.204	家電・OA機器既存品製造	1.136	kg	4.022
射出成形工程	0.525	kWh	0.305				
家電・OA機器PR用サンプル製造	1.163	kg	1.619				

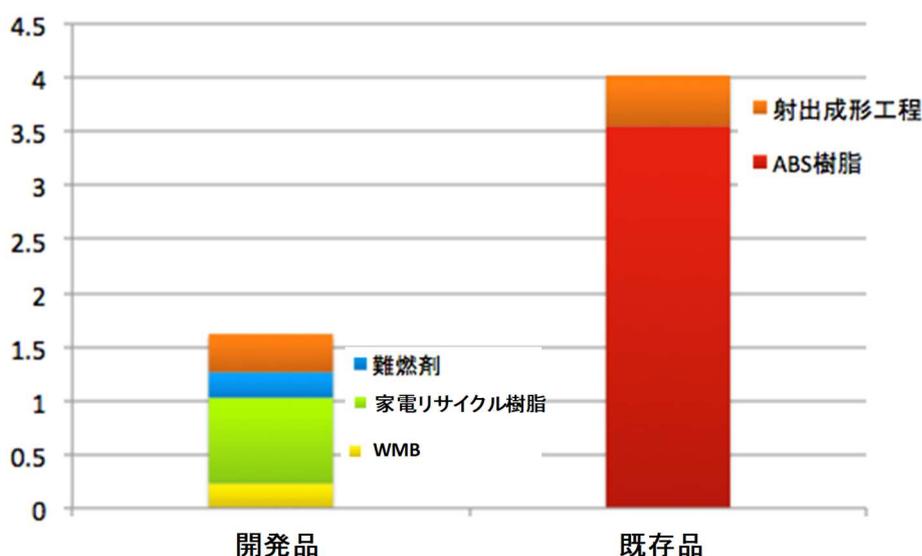


図 2-146 家電・OA 機器サンプルの評価結果 (kg-CO2e/kg)

### 2.3.2.5 まとめ

「2.1.3.2 リアクティブシステムを活用したタルク充填マスターバッチの量産技術確立」、「2.1.3.3 リアクティブシステムを活用した木粉充填マスターバッチの量産技術確立」にて、リアクティブシステムを活用した本事業開発品 MB の量産を実施し、実測した消費電力データから CO2 排出量を算出した。この開発品 MB と既存品 MB の CO2 排出量を比較したところ、木粉では、約 49%の CO2 排出量削減率を達成し、タルクでは約 62%の CO2

排出量削減率を達成した。また、「2.2.2 PR 用サンプルの作製」にて作製した開発品 MB を用いた PR 用サンプルについては、既存品に対し、建材（WPC デッキ）では約 46%の CO2 排出量削減率を達成した。自動車（アウターカバー）では、再生材プラスチックの種類、フィルターの種類により異なるが、約 48-68%の CO2 排出量削減率を達成した。家電・OA 機器（複合機の部品）では、約 60%の CO2 排出量削減率を達成した。本事業の開発品 MB は既存品 MB と比較して 20%以上の CO2 排出量削減という目標を達成することができ、加えて、開発品 MB を用いた建材、自動車、家電・OA 機器製品の CO2 排出量も 20%以上削減が可能であった。

## 2.3.3 市場サイズにおける CO2 削減効果についての検証

### 2.3.3.1 概要

「2.1.3 リアクティブシステムを活用したフィラー（木粉、タルク）充填マスターバッチの量産技術確立」にて作製した本事業開発品フィラー充填マスターバッチを再生材プラスチックの材料リサイクル利用促進に利用した際の市場サイズによる CO2 削減効果を算出した。建材、自動車、家電・OA 機器の市場における本製品の CO2 削減量波及効果はシェア 100%と仮定した場合、それぞれ 19,580、122,320、11,489 tCO<sub>2</sub>/年となった。マスターバッチについては、タルク充填で 16,709 tCO<sub>2</sub>/年、木粉充填で 10,333 tCO<sub>2</sub>/年の CO2 削減量波及効果があった。以下に詳細を示す。

### 2.3.3.2 各市場の CO2 削減量波及効果

「2.3.1 事業性評価の実施」では最終製品の元となる開発品 MB の事業性評価を行い、「2.3.2 リアクティブシステムによる CO2 削減効果の検証」では、開発品 MB に加え、「2.2.2 PR 用サンプルの作製」にて作製した開発品 MB を用いた建材、自動車、家電・OA 機器の製品を想定した PR 用サンプルの CO2 削減効果を評価し、CO2 削減効果を算出した。ここでは、開発品 MB を使用した製品が建材、自動車、家電・OA 機器の市場にもたらず CO2 削減量波及効果を算出した。

建材業界の市場規模はバージン樹脂由来の WPC 材とし、国内の全 WPC 量 4 万 t/年を再生材由来の WPC 量 2 万 t/年で引いた 2 万 t/年に設定した。自動車市場は自動車部品のタルク PP 系の市場 40 万 t/年のうち、内装用に使われる割合 20%を掛けた内装用タルク PP 系市場 8 万 t/年の代替を想定した。また、家電・OA 機器については、オフィス用複合機のうち本事業で代替可能な材量 7.5 kg/台に年間の国内生産量 52 万台を掛けた 3,900 t/年とした。それぞれの市場における既存品の CO2 排出量（従来型 1 トン当りの年間 CO2 排出量）、開発品の CO2 排出量（実証機器・システム 1 トン当りの年間 CO2 排出量）は「2.3.2 リアクティブシステムによる CO2 削減効果の検証」において計算された各 PR 用サンプルの値を使用した。具体的には建材では開発品 1.076 tCO<sub>2</sub>/t、既存品 2.055 tCO<sub>2</sub>/t とし（表 2-49）、建材では開発品 1.076 tCO<sub>2</sub>/t、既存品 2.055 tCO<sub>2</sub>/t（表 2-49）とし、自動車では開発品 1.350 tCO<sub>2</sub>/t（表 2-51）、既存品 2.879 tCO<sub>2</sub>/t（表 2-53）とし、家電・OA 機器では開発品 1.619 tCO<sub>2</sub>/t、既存品 4.022 tCO<sub>2</sub>/t（表 2-57）とした。自動車は試作を行った条件の中で CO2 排出量の多いタルクを使用した開発品 MB（TMB）を家電リサイクル樹脂で希釈した条件を開発品とした。普及段階を本事業終了年度（2020 年）から、5 年おきに 3 条件設定し、そのシェアについては、当方の想定を記載した。また、全材料を代替した際の計算も行った。

市場規模の策定には、WPRC 普及協会統計資料、日本プラスチック工業連盟統計資料、日本自動車販売協会連合会統計資料、JBMI 統計資料に加え、各業界へ行った事業性評価ヒアリングの結果を補強資料として使用した。

結果を表 2-58~60 に示す。建材、自動車、家電・OA 機器の市場における本事業開発品の CO2 削減量波及効果はシェア 100%と仮定した場合、それぞれ 19,580、122,320、11,489 tCO<sub>2</sub>/年となった。

表 2-58 建材（バージン WPC 市場）における CO2 削減量の波及効果

1. 市場		実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
		(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(A) 市場規模	[t/年]	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
(B) (A)におけるシェア	[%]	0	8	20	35	100
(C) 年間販売数量 = A×B/100	[t/年]	0	1,600	4,000	7,000	20,000
2. CO2削減効果		実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
		(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(D) 従来型1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]	2.055	2.055	2.055	2.055	2.055
(E) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]	1.076	1.076	1.076	1.076	1.076
(F) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2削減量 = D-E	[tCO2/t/年]	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979
(G) CO2削減量の波及効果(算定対象年度の販売数量分) = C×F	[tCO2/年]	0	1,566	3,916	6,853	19,580

表 2-59 自動車（タルク PP 系内装部材市場）における CO2 削減量の波及効果

1. 市場		実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
		(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(A) 市場規模	[t/年]	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000
(B) (A)におけるシェア	[%]	0	0	5	10	100
(C) 年間販売数量 = A×B/100	[t/年]	0	0	4,000	8,000	80,000
2. CO2削減効果		実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
		(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(D) 従来型1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]	2.879	2.879	2.879	2.879	2.879
(E) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912
(F) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2削減量 = D-E	[tCO2/t/年]	1.967	1.967	1.967	1.967	1.967
(G) CO2削減量の波及効果(算定対象年度の販売数量分) = C×F	[tCO2/年]	0	0	7,868	15,736	157,360

表 2-60 家電・OA 機器（本事業で代替可能な部材市場）における CO2 削減量の波及効果

1. 市場		実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
		(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(A) 市場規模	[t/年]	3,900	3,900	3,900	3,900	3,900
(B) (A)におけるシェア	[%]	0	10	30	50	100
(C) 年間販売数量 = A×B/100	[t/年]	0	390	1,170	1,950	3,900
2. CO2削減効果		実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
		(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(D) 従来型1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]	4.022	4.022	4.022	4.022	4.022
(E) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]	1.619	1.619	1.619	1.619	1.076
(F) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2削減量 = D-E	[tCO2/t/年]	2.403	2.403	2.403	2.403	2.946
(G) CO2削減量の波及効果(算定対象年度の販売数量分) = C×F	[tCO2/年]	0	937	2,812	4,686	11,489

表 2-58~60 によって得られた結果から MB の市場規模を算出し、想定される MB の市場規模、各年におけるシェア、CO2 波及効果を算出した。MB の CO2 排出量は開発品を表 2-46、既存品を表 2-47 から取得し、同様に CO2 削減量の波及効果を算出し、CO2 の 1t 削減に要するランニングコストも算出した。ランニングコスト算出に必要な MB の販売価格は「2.3.1 事業性評価の実施」より TMB 230 円/kg、木粉を使用した開発品 MB (WMB) 180 円/kg に設定した。ランニングコストは化薬ヌーリオン社実績からの推計値として、1 機あたり 60 百万円/年とした。また、設備投資費を 2025 年までは選別機 (45 百万円/台) のみ、それ以降は選別機とヘンシェルミキサーの両方 (80 百万円/台) へ投資した額を設定した。これは 2025 年までは WPC メーカーへの出資を想定しているのに対し、それ以降は汎用樹脂市場への展開を想定しているためである。従来型機器・システムの年間ランニングコストはランニングコストのみとし、実証機器・システムの年間ランニングコストはランニングコストに設備投資費を加えた額を設定した。

表 2-61、62 に各 MB の CO2 削減量波及効果を示す。表 2-63、64 に各 MB の CO2 の 1t 削減に要するランニングコストを示す。市場を 100%代替したと仮定した場合、TMB は 16,709 tCO2/年、WMB は 10,333 tCO2/年の CO2 削減量波及効果があった。CO2 の 1t 削減に要するランニングコストは TMB は 2030 年 475 円/tCO2、2035 年 592 円/tCO2 となり、WMB で 2025 年 141 円/tCO2、2030 年 436 円/tCO2、2035 年 544 円/tCO2 となった。各 MB に製造に必要となる CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂は 2025 年段階で 376 t/年であり、全量を使用した場合は 11,476 t/年である。2025 年の CNF 複合廃材発生量を 2,600 t/年と想定していることから、廃材の原料も十分に確保できると考える。しかし、全量については、2035 年の想定では足りていない。そのため、本事業開発品の CO2 削減量の波及効果、CO2 削減に要するランニングコストの高さ等をアピールし、CNF 複合材の生産が加速するように後押ししていきたい。

表 2-61 TMB における CO2 削減量の波及効果

1. 市場			実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
			(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(A) 市場規模 (自動車×MBの割合)	[t/年]		22,857	22,857	22,857	22,857	22,857
(B) (A)におけるシェア	[%]		0	0	5	10	100
(C) 年間販売数量 =A×B/100	[t/年]		0	0	1,143	2,286	22,857
2. CO2削減効果			実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
			(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(D) 従来型1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]		1.175	1.175	1.175	1.175	1.175
(E) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]		0.444	0.444	0.444	0.444	0.444
(F) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2削減量 =D-E	[tCO2/t/年]		0.731	0.731	0.731	0.731	0.731
(G) CO2削減量の波及効果(算定対象年度の販売数量分) =C×F	[tCO2/年]		0	0	835	1,671	16,709

表 2-62 WMB における CO2 削減量の波及効果

1. 市場			実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
			(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(A) 市場規模 (建材×MBの割合+家電×MBの割合)	[t/年]		15,400	15,400	15,400	15,400	15,400
(B) (A)におけるシェア	[%]		0	8	21	36	100
(C) 年間販売数量 =A×B/100	[t/年]		0	1,254	3,191	5,557	15,400
2. CO2削減効果			実証事業終了時	普及段階			100%代替が可能な場合
			(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)	
(D) 従来型1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]		1.365	1.365	1.365	1.365	1.365
(E) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2排出量	[tCO2/t/年]		0.694	0.694	0.694	0.694	0.694
(F) 実証機器・システム1トン当りの年間CO2削減量 =D-E	[tCO2/t/年]		0.671	0.671	0.671	0.671	0.671
(G) CO2削減量の波及効果(算定対象年度の販売数量分) =C×F	[tCO2/年]		0	842	2,141	3,729	10,333

表 2-63 TMB における CO2 の 1 t 削減に要するランニングコスト

3. コスト			実証事業終了時	普及段階		
			(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)
(H) 実証機器・システムのインシヤルコスト(売上)	[百万円]		0	0	192	384
(I) 実証機器・システムの年間ランニングコスト(設備投資金額)	[百万円/年]		0	0	650 (9機導入)	810 (11機導入)
(J) 従来型機器・システムの年間ランニングコスト	[百万円/年]		0	0	540	660
(K) 単純投資回収年数 =H÷(I-J)	[年]		-	-	1.7	2.6
(L) 耐用年数	[年]		-	-	10	10
(M) CO2の1トン削減に要するインシヤルコスト =H÷(F×L)	[円/tCO2]		-	-	26	53
(N) CO2の1トン削減に要するランニングコスト =I÷F	[円/tCO2]		0	0	475	592

表 2-64 WMB における CO2 の 1 t 削減に要するランニングコスト

3. コスト			実証事業終了時	普及段階		
			(2020年)	(2025年)	(2030年)	(2035年)
(H) 実証機器・システムのインシヤルコスト(売上)	[百万円]		0	151	385	671
(I) 実証機器・システムの年間ランニングコスト(設備投資金額)	[百万円/年]		0	210 (2機導入)	650 (9機導入)	810 (11機導入)
(J) 従来型機器・システムの年間ランニングコスト	[百万円/年]		0	120	540	660
(K) 単純投資回収年数 =H÷(I-J)	[年]		-	1.7	3.5	4.5
(L) 耐用年数	[年]		-	10	10	10
(M) CO2の1トン削減に要するインシヤルコスト =H÷(F×L)	[円/tCO2]		-	23	57	100
(N) CO2の1トン削減に要するランニングコスト =I÷F	[円/tCO2]		0	141	436	544

### 3. 総括

本事業は平成 29 年度より環境省委託業務「セルロースナノファイバーリサイクルの性能評価等事業委託業務」として、近い将来、家電、建材、包装容器、自動車等の用途に普及が予想される CNF 複合材を対象とし、その普及に伴い発生する製造時の端材、製品寿命により廃棄される CNF 複合廃材を活用した CO2 削減効果の実証に取り組んだ。本事業で開発した CNF 複合廃材含有容器包装リサイクル樹脂の樹脂モデルにリアクティブ処理を行い、作製したフィラー充填マスターバッチを使用したプラスチック複合材料は既存品のタルク 20%配合 PP と同等以上の性能を示すことが確認された。また、本事業で開発したマスターバッチの量産技術を確立し、その CO2 削減効果、製造コストが既存品以上に優れていることを確かめ、導入メリットが大きいことを確かめた。さらに、開発したマスターバッチにより試作した建材、自動車、家電・OA 機器市場用 PR サンプルは、既存製品と比較して高い CO2 削減効果を示し、市場サイズにおける CO2 削減効果も確かめたことで、社会実装に向けた基盤も整備した。社会実装に向けての課題としては、再生材プラスチックを利用していることによって生じる製品性能のバラツキの把握、成形プロセスの改善や塗装による検証等が今後の課題になるが、普及拡大においても大きな障害はないと考える。CNF 複合材のリサイクル性が良好であるという本事業の成果は、CNF 複合材の製品化を加速する一助になる。本事業成果を対外にアピールすることで、CNF 複合材の生産が加速するように後押ししていきたい。

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料[A ランク]のみを用いて作成しています。