

令和 3 年度環境省委託業務

令和 3 年度脱炭素社会を支える
プラスチック等資源循環システム構築実証事業
(バイオ由来素材を複合した再生樹脂の適用技術実証)
委託業務
成果報告書

令和 4 年 2 月

パナソニック株式会社

令和 3 年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業 (バイオ由来素材を複合した再生樹脂の適用技術実証)

成果報告書概要

1. 業務の目的

家電製品の多くは、主に 3 種類(PS, ABS, PP)の樹脂で構成されているために、解体時に十分な選別ができず低価値の部材に再生され、家電製品への再利用が促進されない。

そこで、本事業では、強度等の物性が低下した使用済み廃家電回収リサイクル樹脂に、バイオ由来素材のセルロースファイバー(CeF)等を複合させることで物性を回復させ、家電部品等に適用することを目的とした。これにより、バイオ由来資源の活用拡大と化石資源由来のバージン樹脂の削減を両立させ、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減と樹脂リサイクルの拡大・加速化を実現するのが狙いである。さらに、製品の構成材料の単一樹脂種構成化を図ることで、高効率リサイクルの実現も目指している。

また、CeF 複合樹脂が家電製品に適用された場合を想定し、既存の資源循環システムに対して、どのような影響があるのかを事前に検討することは極めて重要である。そこで、既存のリサイクルシステムへの影響評価も実施した。

2. 業務の内容

(1)CeF と家電リサイクル樹脂の複合工程の開発

使用済み廃家電由来の廃プラスチック(再生 PP)を原料とした CeF との複合化において、コスト低減と物性維持(曲げ弾性率・シャルピー衝撃強度)の両立の実現に向け、条件の最適化を行った。更に、量産機を用いた量産検証を実施し、問題のないことを確認した。

再生 PP の CeF 複合化については、目標コスト 500 円/kg 以下に対し、300 円/kg を達成した。

成形部品の評価においては、スティック掃除機成形試作品での外観異物の改善を実施した。昨年度評価時に比べ、外観異物の大きさ、個数共に改善できた。残存していた外観異物に対して成分分析を実施し、複合した CeF 由来の異物はなく、再生材起因の異物のみであることを確認した。

再生 PS を主原料とする CeF 複合再生 PS は、材料の最適化に加え、更なる特性改善を図るために工法(混練速度、工法分割等)の見直し等を実施した。結果として、バージン PS の物性に対して、91%の保持率を達成した。

再生 PS の CeF 複合化については、コスト 300 円/kg を達成見込みである。

再生 PP および再生 PS を原料とする CeF 複合再生 PP 及び再生 PS について、冷蔵庫の対象部品を選定し成形試作を実施し成形性・成形品外観等を検証した。

CeF の製法・性状(繊維状や粉末状、純度等)の違いによる複合樹脂の性能・物性を見極めるために、各 CeF 素材の形状特性を観察し、複合化物性との関連を把握した。

(2)選別工程の開発および資源循環システムへの影響評価

(i)選別工程の開発

CeF15%程度複合樹脂を、回収率 60%以上、純度 80%以上で選別できる選別工法の確立を目指し、今年度は、ハイパースペクトルカメラを用いて、高速搬送下での選別検証を実施した。その結果、回収率 60%以上、純度 80%以上となることを確認した。また、CeF 濃度ごとの判別検証を実施し、安定的な選別回収のためには CeF 濃度 15%以上の複合が必要であることを見極めた。

さらに、色味における判別への影響評価を実施し、繰り返し成形による茶変の影響はなく、近赤外線が減衰が僅かな黒色顔料を用いることによって、黒色系に調色した場合でも選別回収が可能であることを見極めた。

(ii)CeF 複合樹脂の資源循環システムへの影響評価

CeF 複合樹脂(濃度 30%)が家電に適応された場合の資源循環システムの影響評価を実施した。CeF 複合樹脂の普及率が 10%の場合、従来の選別システムでは再生樹脂(PS)に含まれる CeF 濃度は 3%程度となり、機械物性の一部(シャルピー衝撃値など)が 40~70%の大幅な物性低下することがわかった。一方、CeF 複合樹脂を含む再生樹脂を近赤外線選別装置にて選別分離することにより、再生樹脂(PS)に含まれる CeF 濃度を 0.1%程度に抑制することができ、機械物性の一部で 30%弱の物性低下があるものの、従来に比べて大幅な物性低下は見られないことを確認した。さらに、CeF 複合 PP を初期材とした多目的試験片での繰り返し成形において、リサイクル性に問題がないことを見極めた。また、冷熱試験での耐久性試験を実施し、機械物性および成形品品質への影響はないことを確認した。最後に、既存リサイクルシステムへの影響最小化に向けて、3つの施策を提言した。

(3)LCA の検証・評価

シナリオベースの LCA を実施し、適用商品への一部導入に対する CO₂ 排出量削減効果の算定を実施した。機能単位は、家電商品の一部品に使用する樹脂

材料とし、ベースラインをバージン樹脂、評価対象を CeF 複合再生樹脂とした。2030 年の普及を考慮すると年間当たりの CO₂ 削減効果は、5,301t-CO₂eq となった。

3. 今後の取組

今年度で実証事業は完了となるが、引き続き CeF 複合再生樹脂の社会実装にむけて取り組んでいく。具体的には、複合工程の開発においては、冷蔵庫試作成形部品に対し、詳細評価・商品適応検討を継続していく。さらに適応可能商品拡大に向けて、更なるコストダウンを図る。また、冷蔵庫に加え洗濯機、エアコンなどの部品試作の取組みを進め、経時耐久性検証など製品適用評価も実施していく。選別工程の開発においては CeF 複合樹脂のリサイクルシステムの実現に向けて、選別装置のさらなる低コスト化、汎用化を検討していく。資源循環システムへの影響評価については継続して取組む。LCA については、評価対象の製品を増やして、複数製品での普及を反映した評価を実施する。

**FY2021 Verification Project for Building a Resource Recycling System for
Plastics and other Materials to Support a Carbon-free Society
(Verification of Application Technology for Recycled Bio-derived Composite
Resin)**

Results report summary

1. Objectives of the Operation

Home electrical appliances mostly use three types of resins (PS, ABS, and PP), making it difficult to sort them correctly during disassembly. These resins are therefore recycled into low-value components, with the result that their rate of reuse in home electrical appliances remains low.

In this project, we aimed to restore the physical properties of recycled resins from used and discarded home electrical appliances that had lost strength and other physical properties by combining them with cellulose fiber (CeF), a bio-derived material, to permit them to be used again as parts of home electrical appliances, etc. Our goal is to both expand the use of bio-derived resources and reduce the use of virgin resins derived from fossil resources while minimizing carbon dioxide (CO₂) emissions and expanding and accelerating resin recycling. We also aim to achieve high-efficiency recycling by ultimately using a single resin for all our product components.

It is also extremely important to study beforehand what the impact of this scheme will likely be on the current resource circulation system, assuming that CeF composite resin will be used in home electrical appliances. We therefore also evaluated its potential impact on existing recycling systems.

2. Description of the Operation

- (1) Development of a process to compound CeF with resins recycled from home electrical appliances

We optimized the conditions for compounding waste plastic derived from used and discarded home electrical appliances (recycled PP) with CeF to achieve cost reductions while maintaining its physical properties, particularly

its flexural modulus and Charpy impact strength. Having conducted mass production verification using a mass production machine, we confirmed there to be no problems.

We achieved a cost of JPY300/kg against a target cost of JPY500/kg or less for CeF composition of recycled PP resin.

Our evaluation of molded parts showed that we were able to improve the external foreign matter in stick vacuum cleaner molding prototypes over last year's techniques. We were able to reduce both the size and quantity of external foreign matter. We conducted a component analysis of the remaining foreign matter, and confirmed that none of it derived from the compounded CeF: all of it came from the recycled material.

In addition to optimizing the material, we reviewed the process (mixing speed, steps within the process, etc.) aiming to further improve the properties of the CeF composite recycled PS, which mainly consists of recycled PS. As a result, we achieved a retention rate of 91% of virgin PS properties.

We expect to achieve a cost of JPY300/kg for the CeF composition of recycled PS resin.

We selected several refrigerator parts as our testing target and conducted molding prototyping to verify the moldability and appearance of the CeF composite recycled PP and recycled PS derived from recycled PP and PS.

We observed the shape characteristics of each CeF material to determine the performance and physical properties of the composite resin in relation to the manufacturing method and properties of CeF (fibrous or powdered, purity, etc.), and gained an understanding of their effects on the composite's properties.

(2) Development of a sorting process and evaluation of its impact on the resource circulation system

(i) Development of a sorting process

With the aim of establishing a sorting method that can sort composite resins containing around 15% of CeF at a collection rate of 60% or higher and a collected resin purity of 80% or higher, this fiscal year we conducted sorting

verification during high-speed transportation using a hyperspectral camera. We confirmed the recovery rate to be more than 60% and the purity to exceed 80%. We also conducted discriminant verification for each CeF concentration and found that a composite CeF concentration of 15% or more is required for stable selective recovery.

Further, we evaluated the effect of color on discrimination and found that there was no effect of browning due to repeated molding and that selective recovery was possible even for black items by using a black pigment that can sufficiently reflect near-infrared rays.

(ii) Evaluation of the impact of CeF composite resins on the resource circulation system

We evaluated the impact of CeF composite resins (30% concentration) on the resource circulation system if applied to home electrical appliances. It was found that the concentration of CeF in recycled resin (PS) is around 3% in the conventional sorting system when the diffusion rate of CeF composite resin is 10%, and that some of the mechanical properties (such as Charpy impact value) are significantly reduced by 40 - 70%. It was, however, confirmed that the concentration of CeF in the recycled resin (PS) could be minimized to around 0.1% by sorting and separating the recycled resin containing CeF composite resin using a near-infrared sorting system, and that there was no significant decrease in properties compared to the conventional method, in spite of a decrease by up to 30% in some mechanical properties. We also found there to be no problem with recyclability in repeated molding with multi-purpose specimens using CeF composite PP as the initial material. Durability was confirmed using a thermal shock test, which revealed there to be no effect on mechanical properties or molded product quality. We were thus able to recommend three measures to minimize our system's impact on existing recycling systems.

(3) Verification and evaluation of LCA

We carried out a scenario-based LCA and calculated the CO₂ emissions reduction effect of its partial introduction to applicable products. It was found that the annual CO₂ reduction effect was 5,301t-CO₂eq assuming a higher uptake of these products in 2030, in which the functional unit is the resin material used for one part of home electrical appliances, the baseline is virgin resin, and the evaluation target is CeF composite recycled resin.

3. Initiatives to be Carried Out in the Next Fiscal Year

The demonstration project will be completed in this fiscal year. We will continue our efforts to implement CeF composite recycled resin in consumer products. Specifically, we will continue to conduct detailed evaluations and product adaptation studies for prototype molded parts of refrigerators in the development of the composite process. We will further reduce costs to be able to broaden the range of products in which it can be used. We will also proceed with the development of prototype parts for washing machines and air conditioners in addition to refrigerators, and conduct product application evaluations, such as verification of durability over time. We will study further cost reductions and standardization of the sorting equipment in our development of the sorting process to realize a recycling system for CeF composite resin. We will continue to work on evaluating its impact on the resource circulation system. For LCA purposes, we will increase the number of products to be evaluated and conduct assessments that keep up with the growing uptake of a range of different products.

目次

成果報告書概要	i
Results report summary	iv
1. 業務の目的	1
2. 業務の内容	2
2.1. セルロースファイバーと家電リサイクル樹脂の複合工程の開発	2
2.1.1. 緒言	2
2.1.2. アプローチ	4
2.1.3. 取組結果	24
2.1.4. 結言	65
2.2. 選別工程の開発	66
2.2.1. 緒言	66
2.2.2. アプローチ	68
2.2.3. 取組み結果	82
2.2.4. 結言	102
2.3. セルロースファイバー複合樹脂の資源循環システムへの影響評価 ...	104
2.3.1. 緒言	104
2.3.2. アプローチ	104
2.3.3. 取組結果	106
2.3.4. 既存リサイクルシステムへの影響最小化に向けた施策	117
2.3.5. 結言	118
2.4. LCA の検証・評価	119
2.4.1. 緒言	119
2.4.2. アプローチ	119
2.4.3. 取組結果	128
2.4.4. 結言	132
3. 総括と今後の取組み	138
【参考文献】	140

1. 業務の目的

家電製品の多くは、主に 3 種類(PS, ABS, PP)の樹脂で構成されているために、解体時に十分な選別ができず低価値の部材に再生され、家電製品への再利用が促進されない。

そこで、本事業では、強度等の物性が低下した使用済み廃家電回収リサイクル樹脂に、バイオ由来素材のセルロースファイバー(CeF)等を複合させることで物性を回復させ、家電部品等に適用することを目的とした。これにより、バイオ由来資源の活用拡大と化石資源由来のバージン樹脂の削減を両立させ、CO2 排出量の削減と樹脂リサイクルの拡大・加速化を実現するのが狙いである。さらに、製品の構成材料の単一樹脂種構成化を図ることで、高効率リサイクルの実現も目指している。図 1-1 は、家電製品(空調機器等)における ABS 代替化の概要イメージ図であり、強度設計上の要因により、PS と ABS で構成されている家電製品への適用事例を示している。本事業成果の適用前では、化石由来資源を使ったバージン樹脂が、2 種類の樹脂で構成されているために、解体時に十分な選別ができず低価値の部材に再生され、家電製品の再生樹脂としての再利用拡大が促進されない。本事業成果の適用後は、再生による樹脂物性低下を CeF 等で補い、低コストで性能を向上させることにより、家電製品への適用拡大が可能となる。なお、本事例では、ABS を PS にて代替しているが、PP で代替する場合もある。

また、CeF 複合樹脂が家電製品に適用された場合を想定し、既存の資源循環システムに対して、どのような影響があるのかを事前に検討することは極めて重要である。そこで、既存のリサイクルシステムへの影響評価も実施した。

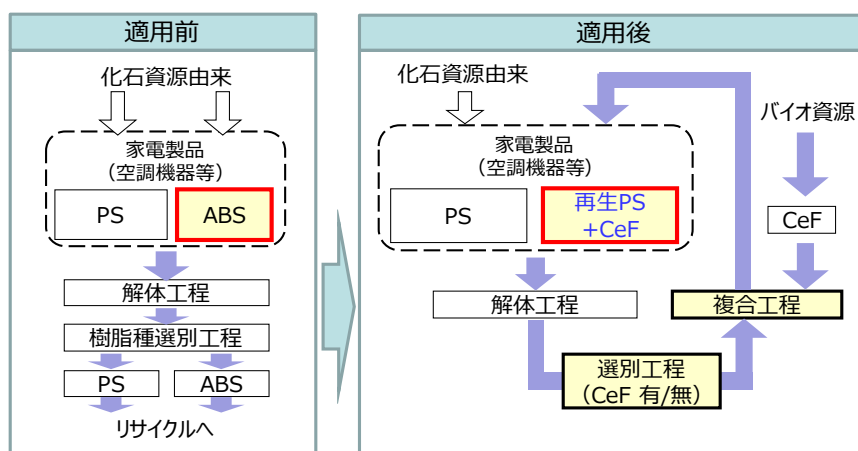


図 1-1 家電製品(空調機器等)における ABS 代替化の概要イメージ

2. 業務の内容

2.1. セルロースファイバーと家電リサイクル樹脂の複合工程の開発

2.1.1. 緒言

使用済み廃家電等から得られるリサイクル樹脂は、バージン樹脂に比べ、経年劣化や回収時や工程内での異物混入が原因となって、特に機械的強度等の性能が低下する。また、その特性はリサイクル樹脂そのものの品質面のバラつきが大きく影響している。一方、化石資源由来の材料を削減し、CO₂排出を削減するためには、バイオ由来プラスチックの製品活用推進だけでなく、単一リサイクル樹脂とバイオ由来材料を複合化させ、製品へ戻す取組み推進が肝要である。バイオ由来材料を複合化したリサイクル樹脂が、製品が必要とする性能を維持・向上させ安定させるためには、バイオ由来材料を効果的に複合させる技術が必要となる。製品に求められる特性に見合うように、樹脂へ複合化するセルロースファイバー(CeF)の均一分散のための解繊や混練などの工法条件の確立が課題と考える。その実施には、CeFと樹脂との性状や特性を把握した上で、相溶化剤や分散剤などの添加剤を含む、原材料間の最適な選定・調合・組み合わせを行う必要がある。また、原材料に対して、適正な加熱・混練の基本プロセス条件を見出し、製品に要求される特性や耐久性を十分に満たす量産プロセスの確立、最適化を行わなければならない。

家電リサイクル法で回収する4家電のうち、冷蔵庫及び洗濯機の射出成形樹脂部品はPPが最も多く活用されており、エアコン室内機の射出成形樹脂部品はPS及びABSが最も多く使用されている。エアコンに使用されるPSは、一般にハイインパクトPS(HIPS)と呼ばれるもので、透明な汎用PS(GPPS)とは異なる。本報告書では、以降HIPSをPSと表し、CeFを複合化したHIPSをCeF+PSと表すことにする。一方、CeFを複合化したPPをCeF+PPと表す。

廃家電由来PPについては、従来、リサイクル樹脂として広く活用されているが、バイオ由来素材としてのCeFを複合化させることにより、リサイクル材としての絶対量を増量させることができ、尚且つ強化材としての効能として物性向上が期待されるため、その活用技術開発は非常に重要であると考えられる。

一方、PSについては、リサイクル樹脂の活用拡大だけでなく、PSより高価なスチレン系樹脂(例えばABS)への代替が実現できれば、化石資源由来樹脂の削減並びに樹脂コストの削減を図ることが可能となる。

本取組では、家電リサイクル法により回収した廃家電由来の樹脂部品から選

別・回収した PP、PS に対し CeF を複合化して物性を向上させることを最終ターゲットとする。なお、樹脂に複合化させる CeF の形態については、繊維径 1～100 μm 程度、あるいは等価粒子径 1～50 μm 程度のものを検証しているが、総じてセルロースファイバー：CeF と称することにする。

2.1.2. アプローチ

本開発・検証においては、廃家電由来の汎用樹脂活用拡大とそのための物性維持・向上に向けて、下記の検証を実施した。

本実証における各年度のおおまかな実施内容は下記のとおりである。

令和元年度：使用済み廃家電由来樹脂(PP, PS)を主原料とし、セルロースファイバーの含有量を主パラメータとする樹脂混練条件で、試作を行い、再生樹脂の機械的物性の挙動を把握し、セルロースファイバーの添加効果をまとめる。

評価データの蓄積を行い、家電製品に適用可能な複合条件を見出す。

適正な複合条件を見出すための情報を収集し、工法最適化に活用する。

令和2年度：使用済み廃家電(冷蔵庫)由来のリサイクルPPを主原料とするCeF複合PP再生樹脂を選定した小物家電商品(スティック掃除機)の実証で、製品実用性を確認する。

バージンPSを主原料とするCeF複合樹脂の継続的な特性改善と、リサイクルPSへの複合条件の適用検証を実施する。

コスト目標設定(500円/kg以下)と低減策出しを行う。

製品適用に必要なCeFの要件(コスト、性能など)の見極めを実施する。

令和3年度：

PP：

使用済み廃家電(洗濯機もしくは冷蔵庫)由来のリサイクルPPを主原料とするCeF複合PP再生樹脂を、選定した大物家電製品(洗濯機もしくは冷蔵庫)の部品実証で、製品適用性を確認する。

コスト目標設定(500円/kg目標と更なるコストダウン1/2を目指す)に対し材料費低減策案出しを行う。

製品適用に必要なCeFの要件(コスト、性能など)等、事業成立性の評価、見極めを行う。

PS：

再生PSを主原料とするCeF複合樹脂の継続的な特性改善に基づき、

成形部品での製品適用性の可否を判断する。

令和元年度の実施結果として、

- ・ 冷蔵庫PPを素材としたCeF複合条件の導出を図ることができた。
- ・ PS用相溶化剤、分散剤単体の効用度の把握を完了した。
- ・ CeF再生樹脂の特許調査を実施し、関連特許はないことがわかった。

令和2年度の実施結果は、

- ・ PP :
廃家電由来PPを用いたCeF複合化の最適化(処方・工法)に目途がたった。更なる物性向上とコスト削減に向け試作検証中。商品への適用可能性として、実製品(スティック掃除機)の樹脂部品を成形試作し第1次製品適応検証完了。
- ・ PS(HIPS) :
CeF種、添加剤等の条件による物性の挙動の把握、及びTEMによる内部構造の観測を実施した。
- ・ CeF複合再生PPは500円/kg以下を達成できる見込みとなった。

令和3年度の実施結果

- ・ 各CeF素材の形状特性を観察し、複合物性との関連を把握した。
- ・ CeF複合再生PP化については、コスト低減と物性維持(曲げ弾性率・シャルピー衝撃強度)の両立の実現を量産機検証にて実現できた。
- ・ CeF複合再生PPについては、コスト目標500円/kg以下に対し、300円/kgを達成できた。
- ・ スティック掃除機成形試作品(CeF複合再生PP)での外観異物の改善を実施。昨年評価時に比べ、大きさ、個数共に改善。異物分析実施し要因を把握(再生材起因の異物のみ)した。
- ・ PS(HIPS)へのCeF複合化は、バージンPSの物性の91%を保持できる複合化条件を達成した。再生PS(複合化なし)の物性に対しては、CeF複合樹脂の物性が向上できた。量産混練機での検証を実施し、量産課題を抽出した。
- ・ CeF複合再生PSは、コスト300円/kg達成見込みである。
- ・ スティック掃除機以外の適用商品について、冷蔵庫2部品について

CeF複合再生PPとCeF複合再生PSにより各1部品の成形試作を実施し、成形性・外観等を検証した。今後、量産成形課題、部品外観課題等を抽出し検討を実施していく。

2.1.2.1. 使用設備

1) 混練押出機(少量試作用・量産試作用)

少量試作用の外観を図 2-1 に示す。

メーカー：(株)テクノベル、品番：KZW15TW-45

スクリュ：φ15mm、 L/D=45、回転速度 700 min⁻¹

少量多種の加工に効率が良く、混練性能の高い同方向回転 2 軸押出機を使用した。



図 2-1 試作 2 軸混練押出機

CeF 複合樹脂の量産試作に使用した、量産用 2 軸混練押出機の外観を図 2-2 に、材料供給機を図 2-3 に示す。

メーカー：東芝機械(現 芝浦機械)、品番:TEM-58SSG

スクリュ径：φ58mm、 回転速度：673min⁻¹



図 2-2 量産 2 軸混練押出機

素材用



CeF用



改質剤用1



改質剤用2



無水マレイン酸用



図 2-3 量産 2 軸混練押出機 の材料供給機

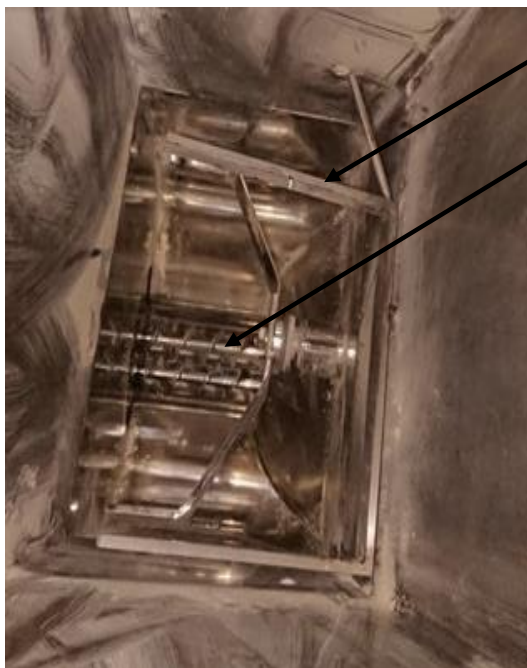
2) 量産2軸混練押出機によるCeF複合再生PPの混練のための装置

令和元年度成果報告書「2.1.3.1 PP樹脂へのCeF複合化」の「4)量産混練条件」¹⁾で課題であった13.5%以上のCeF供給については、図2-4の改造を実施済みでこれらを活用した。一つ目は、スクリュ形状をCeFの供給に最適な形状のものに変更したものである。二つ目は、CeFの詰りを防止する為にアジテーターを新たに取り付けている。これにより、量産2軸混練押出機で工業グレード粒径 $24\mu\text{m}$ 以上のCeFを使用し20%配合までの試作が可能となっている。

CeF用材料供給機



改造部(供給機内部)



アジテーター

スクリュー

アジテーター用モーター



図 2-4 CeF 用材料供給機の改造

3) 成形機(試験片ダンベル成形用)

射出成形機の外観を図 2-5 に示す。

メーカー：東洋機械金属(株)、品番：SI-50V

金型は ISO 金型タイプ A を使用して、多目的試験片を成形する。

・機械物性等試験片：JIS K7139 タイプ A1 多目的試験片(t=4mm)



図 2-5 射出成形機

2.1.2.2. 物性試験および装置

今回の機械物性、物理物性、熱特性等の特性評価として下記の物性値を測定した。

- A) 比重
- B) MFR(メルトフローレート)
- C) 引張降伏応力(引張強さ),引張降伏ひずみ
- D) 曲げ強さ、曲げ弾性率
- E) シャルピー衝撃強さ(ノッチ付)
- F) 荷重たわみ温度(熱変形温度)

これら機械物性、物理物性、衝撃特性を試験測定し、CeF種や含有濃度と添加剤種の違いによる特性を評価した。熱特性・物理特性としてのMFR(メルトフローレート)は、流れ性、成形性の判断基準として評価される。

測定装置の外観を図 2-6 に示す。

MFR



引張り、曲げ強さ



シャルピー衝撃強さ



荷重たわみ温度



図 2-6 物性測定装置

表 2-1 から表 2-6 に、CeF 複合 PP における各試験項目及び試験条件を示す

表 2-1 PP の比重試験項目及び条件

試験方法	JIS K 7112 (ISO 1183) 準拠 A法
測定項目	比重
試験片形状	JIS K 7139 タイプA1形 多目的試験片 (L=170)
試験条件	(多目的試験片の中央部10mmをカットし、10×10mmの試験片を3個作製する) 測定数 ; n=3
試験環境	(23±2)℃、(50±5)%RH
測定装置	東洋精機 D-H100

表 2-2 PP の MFR 試験項目及び条件

試験方法	JIS K 7210-1(ISO 1133-1) 準拠 A法
測定項目	MFR
試験片形状	ペレット形状
試験条件	予熱時間 ; 5分 試験温度 ; 230℃ 荷重 ; 2.16kg 測定数 ; n=1
試験環境	(23±2)℃、(50±5)%RH
測定装置	タカラ L244

表 2-3 PP の引張試験項目及び条件

試験方法	JIS K 7161-2 (ISO 527-2)準拠
測定項目	引張強さ、引張伸び
試験片形状	JIS K 7139 タイプA1形 多目的試験片 (L=170)
試験条件	試験速度 ; 50mm/min(強さ・伸び) 荷重 ; 2kN チャック間距離 ; 115mm 測定数 ; n=10
試験環境	(23±2)°C、(50±5)%RH
測定装置	東洋精機 VG20E

表 2-4 PP の曲げ試験項目及び条件

試験方法	JIS K 7171 (ISO 178)準拠、3点曲げ試験
測定項目	曲げ強さ、曲げ弾性率
試験片形状	JIS K 7139 タイプA1形 多目的試験片 (L=170)
試験条件	試験速度 ; 2mm/min 荷重 ; 200N 支点間距離 ; 64mm 圧子及び支持台半径 : 5mm 測定数 ; n=5
試験環境	(23±2)°C、(50±5)%RH
測定装置	東洋精機 VG20E

表 2-5 PP のシャルピー衝撃試験項目及び条件

試験方法	JIS K 7111-1(ISO 179-1) 準拠
測定項目	シャルピー衝撃強さ(ノッチ付)
試験片形状	JIS K 7139 タイプA1形 多目的試験片(L=170)
試験条件	(ノッチ付；試験片平行部からノッチングツールでノッチ加工を施す) 持ち上げ角度 ; 150度 公称振り子エネルギー ; 2.0J 測定数 ; n=10
試験環境	(23±2)℃、(50±5)%RH
測定装置	東洋精機 DG-UB

表 2-6 PP の荷重たわみ温度試験項目及び条件

試験方法	JIS K 7191-2 (ISO 75-2) 準拠
測定項目	荷重たわみ温度
試験片形状	JIS K 7139 タイプA1形 多目的試験片(L=170)
試験条件	(試験片平行部から80×10×t4mmを作成) 試験片方向；フラットワイズ 曲げ応力：0.45MPa 支点間距離：64mm 昇温速度：120℃/h 規定たわみ：0.34mm 熱媒体：シリコーンオイル 測定数：n=3
試験環境	(23±2)℃、(50±5)%RH
測定装置	東洋精機 3M-2

表 2-7 から表 2-12 に、CeF 複合 PS における各試験条件、測定条件の詳細を示す。

表 2-7 PS の比重試験項目及び条件

試験方法	JIS K 7112 (ISO 1183) 準拠 A 法
測定項目	比重
試験片形状	JIS K 7139 タイプ A1 形 多目的試験片(L=170)
試験条件	(多目的試験片の中央部 10mm をカットし、 10×10mm の試験片を 3 個作製する) 測定数 ; n=3
試験環境	(23±2)℃、(50±5)%RH
測定装置	東洋精機 D-H100

表 2-8 PS の MFR 試験項目及び条件

試験方法	JIS K 7210-1(ISO 1133-1) 準拠 A 法
測定項目	MFR(メルトフローレート)
試験片形状	ペレット形状
試験条件	予熱時間 ; 5 分 試験温度 ; 200℃ 荷重 ; 5.0kg 測定数 ; n=1
試験環境	(23±2)℃、(50±5)%RH
測定装置	タカラ L244

表 2-9 PS の引張試験項目および条件

試験方法	JIS K 7161-2 (ISO 527-2)準拠
測定項目	引張強さ、引張伸び
試験片形状	JIS K 7139 タイプ A1 形 多目的試験片(L=170)
試験条件	試験速度 ; 50mm/min(強さ・伸び) 荷重 ; 10kN チャック間距離 ; 115mm 測定数 ; n=10
試験環境	(23±2)℃、 (50±5)%RH
測定装置	東洋精機 VG20E

表 2-10 PS の曲げ試験項目および条件

試験方法	JIS K 7171 (ISO 178)準拠、3点曲げ試験
測定項目	曲げ強さ、曲げ弾性率
試験片形状	JIS K 7139 タイプ A1 形 多目的試験片(L=170)
試験条件	試験速度 ; 2mm/min 荷重 ; 200N 支点間距離 ; 64mm 圧子及び支持台半径 ; 5mm 測定数 ; n=5
試験環境	(23±2)℃、 (50±5)%RH
測定装置	東洋精機 VG20E

表 2-11 PS のシャルピー衝撃試験項目および条件

試験方法	JIS K 7111-1(ISO 179-1) 準拠
測定項目	シャルピー衝撃強さ(ノッチ付)
試験片形状	JIS K 7111-1(ISO 179-1)/1eA ※多目的試験片平行部からノッチングツールによるノッチ加工付試験片を作製
試験条件	持ち上げ角度 ; 150 度 公称振り子エネルギー ; 2.0J 測定数 ; n=10
試験環境	(23±2)℃、 (50±5)%RH
測定装置	東洋精機 DG-UB

表 2-12 PS の荷重たわみ温度測定試験項目および条件

試験方法	JIS K 7191-2 (ISO 75-2) 準拠
測定項目	荷重たわみ温度(多目的試験片平行部から作製)
試験片寸法	80×10×t4 (mm)
試験条件	試験片方向 ; フラットワイズ 曲げ応力 ; 1.80MPa 支点間距離 ; 64mm 昇温速度 ; 120℃/ h 規定たわみ ; 0.34mm 熱媒体 ; シリコーンオイル 測定数 ; n=3
測定装置	東洋精機 3M-2

2.1.2.3. PP 樹脂への CeF 複合化

廃家電由来 PP については、バイオ資源である CeF を複合化し再生資源として活用することにより化石資源由来樹脂の新規使用の削減と CeF 複合 PP の物性維持向上を目的として、CeF と PP の混練・複合化プロセスについて試作検証を実施した。

冷蔵庫、洗濯機に使用されるバージン PP と廃家電由来 PP への CeF 複合化適用検証評価、複合化工程の条件は下記の通りである。

- ・ CeF 含有濃度：0、1～20%
- ・ 混練機(試作機)：2 軸混練押出
- ・ 混練機(量産機)：2 軸混練押出
- ・ 混練温度：170～190℃
- ・ ベース樹脂：バージン PP3 種

廃家電由来 PP2 種(冷蔵庫由来：RF、洗濯機由来：WM)

・ 相溶化剤・分散改質剤：無水マレイン酸変性 PP (MAPP または PP-MAH)
等

- ・ CeF：現行品(針葉樹由来パルプの解砕品の微粉パルプ)を含む数種類
- ・ 試作条件数：142(試作機検証)+82(量産機検証)

各種物性測定のための試験片を作製した。作製試験片は下記の通りである。

- ・ 機械物性等試験片：JIS K 7139 タイプ A1 (ISO)多目的試験片(t=4mm)

表 2-1～表 2-6 の測定試験方法に従い物性・特性を評価し、最適な複合条件を導出した。

2.1.2.4. 製品適用事例の検証(CeF複合再生PP樹脂を使用した実製品試作)

前項でのPPへのCeF複合化条件により、実商品のスティック掃除機の樹脂部品を成形試作し、成形性等の検証を実施した。

- ・成形性・成形条件：現行量産品と同一成形条件で問題なく成形可能か。
- ・外観・異物検査：異物・黒点等が規定個数以上ないか。
- ・組立性：量産品と同等の組立性か。

また、スティック掃除機以外の商品として、冷蔵庫部品への適用を図るべく、樹脂部品の成形試作により成形性・成形条件等の検証を実施した。

1) 混練条件

量産2軸混練押出機加工条件は、表2-13に示す。

CeF複合再生PPの加工において、設備の安定稼働、材料の安定供給を可能とするために、ヒーター温度は、スクリュの混練位置に対応したヒーター温度を170℃から190℃で設定した。次に材料供給量については、連続生産性とCeFの分散性から400kg/hを最適材料投入量とした。製品適用検討用CeF複合再生PPペレットのフィルター目開きは、0.253mmを使用した。

表 2-13 量産2軸混練押出機条件

	設定
量産2軸混練押出機ヒーター温度	170～190℃
材料投入量	400kg/h
フィルター目開き	0.253mm

2.1.2.5. PS への CeF 複合化

令和元年度に、廃家電由来 PS について、PS よりも比較的高価な ABS への代替を目指して、物性の向上を図るための処方・工法・工程の開発検証を実施した。しかし、分散剤、相溶化剤、エラストマ等の効能の基礎検証が十分でなかった。また令和 2 年度はそれら添加剤の効能検証のため、ベースの PS 中への CeF の分散性・相溶化性の検証を実施した。すなわち、CeF 複合 PS の物性維持向上を目的として、CeF と PS の分散剤、相溶化剤、エラストマ等の混練・複合化条件の試作検証を実施した。

しかしながら、これらの検証も十分でなかったため、本年度は引続きこれら添加剤の更なる検証だけでなく、混練工程工法の改良についても検証を進めた。複合化工程の条件は下記の通りである。

- ・ CeF 含有濃度：0、1～20%
- ・ 混練機(試作機)：2 軸混練押出
- ・ 混練温度：195～205℃
- ・ ベース樹脂：バージン PS(PS H9152)
- ・ 相溶化剤・分散改質剤：無水マレイン酸変性 PP(MAPP または PP-MAH)、低分子 PS、SEBS(スチレン・エチレン・ブチレン・スチレン)エラストマ、SBBS(スチレン・ブタジエン・ブチレン・スチレン)等
- ・ CeF：現行品(針葉樹由来パルプの解砕品)を含む数種類
- ・ 試作条件数：113(試作機検証)

PS への相溶化剤、分散剤としては下記 3 種を主体にそれらの組合せや下記エラストマでのブタジエン濃度等も変えて、検証した。

- ① 水素添加スチレン系熱可塑性エラストマ(SEBS)
- ② 水素添加スチレン系熱可塑性エラストマ(SBBS)
- ③ フィラー分散剤(低分子量ポリスチレン)

各種物性等のための試験片を作製した。作製試験片は下記の通りである。

- ・ 機械物性等試験片：JIS K7139 タイプ A1 (ISO3167)多目的試験片(t=4mm)

2.1.2.6. 複合樹脂中の CeF 状態の観察

CeF 複合化樹脂中の CeF の大きさ・形状や分散・配向状態、凝集状況(解繊の不十分さ)などを観察し、各種物性との相関について考察・検討した。また、CeF とベース樹脂との界面状態についても観察し、同様に各種物性との相関について検討した。物性測定のサンプル試験数に対しては、まだ観察評価サンプル数が少ないため、今後、観察評価サンプル数を増やしていく予定である。

2.1.2.6.1. SEM による複合樹脂中の CeF 分散・配向状態の観察評価

CeF 複合樹脂中の CeF の状態を SEM にて観察した。

観察条件は、表 2-14 のとおりであり、観察断面の模式図を図 2-7 に示す。

表 2-14 SEM 観察条件

加速電圧	10 kV
SEM 画像	SEI(二次電子像)
観察倍率	23 倍, 100 倍, 300 倍, 700 倍
観察箇所	JIS K 7139 1A 形 多目的試験片(ダンベル試験片)中央部付近の板幅方向(樹脂流動方向に垂直面)と長手方向(樹脂流動方向に平行面)の各切断面(図 2-7)
分析装置	走査電子顕微鏡 JSM-6510LA(日本電子(株)製)
測定機関	(株)DJK

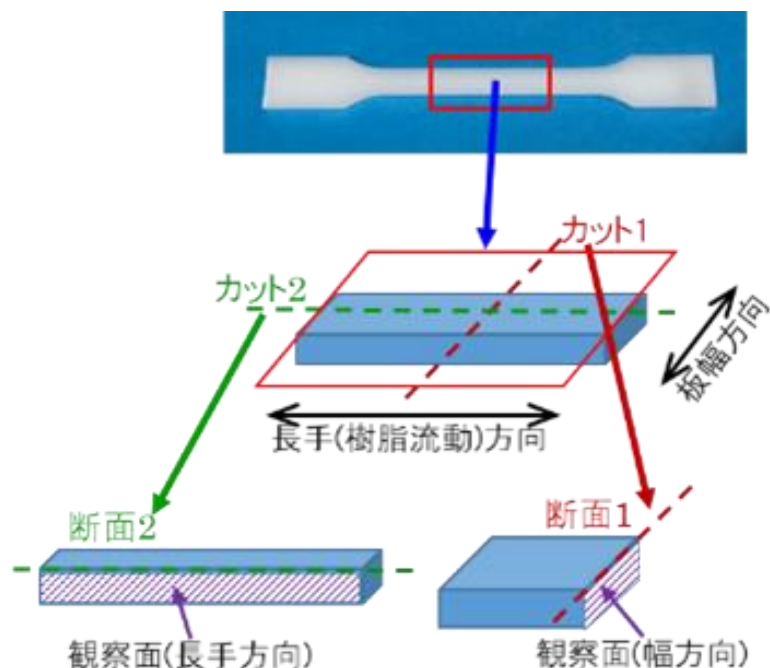


図 2-7 断面 SEM, TEM 観察面

2.1.2.6.2. TEM による複合樹脂中の CeF とベース樹脂との界面状態の観察評価

CeF 複合樹脂中の CeF および界面の状態を TEM にて観察した。前項の SEM 観察断面と同様に図 2-7 の如く試験片を切断し、樹脂流動方向である長手方向の TEM 観察を実施した。観察条件は、表 2-15 のとおりである。

表 2-15 TEM 観察条件

加速電圧	100 kV
観察倍率	写真倍率 5,000 倍, 10,000 倍, 20,000 倍, 50,000 倍
観察箇所	JIS K 7139 1A 形 多目的試験片(ダンベル試験片)中央部付近の樹脂流動方向に平行な長手方向の切断面(図 2-7)
TEM 装置	透過型電子顕微鏡(TEM) H-7650((株)日立製作所製)
測定機関	(株)三井化学分析センター

2.1.3. 取組結果

2.1.3.1. PP 樹脂への CeF 複合化

昨年度の取組みで PP への CeF 複合化において、CeF 複合化しない場合のベース樹脂のみの物性(曲げ弾性率及びシャルピー衝撃強さ)に対する保持率維持・向上が図ることができたが、その結果をベースに、低コスト CeF の活用やエラストマの低コスト化や使用量削減等を組み合わせて物性保持とコスト削減の検証を実施した。

表 2-16 および図 2-8 にその組合せおよび結果を示す。表中の CeF-c1 は、CeF-a1 よりコストが数十円/kg 安価である。

図中①の昨年度実績において、バージン PP への複合化で曲げ弾性率の保持率 112%、シャルピー衝撃強さ保持率 117%を達成したが、コスト削減を図るための CeF 種及びエラストマの選定結果により、図中⑤においても、曲げ弾性率の保持率 112%、シャルピー衝撃強さ保持率 117%を達成し、コストとの両立も図ることができた。及びついで、廃家電由来 PP を用いた CeF 複合化の最適化(処方・工法)に目途がたったが、その結果を図 2-8 に示す。

表 2-16 複合化 CeF 種,処方組合せ

試作 No.	内 容	CeF 素材		分散剤・相溶化剤		エラストマ	
①20PP・157	昨年度実績	a1k	20.0%	MAPP	5.0%	2 種	15.0%
② 21PP・17	エラストマ変更				6.7%	2 種	12.0%
③ 21PP・78	CeF・分散剤変更	c1	20.0%	A3	1.2%	D6	13.0%
④ 21PP・82	CeF・エラストマ変更			MAPP	5.0%	C2	9.0%
⑤ 21PP・83							13.0%

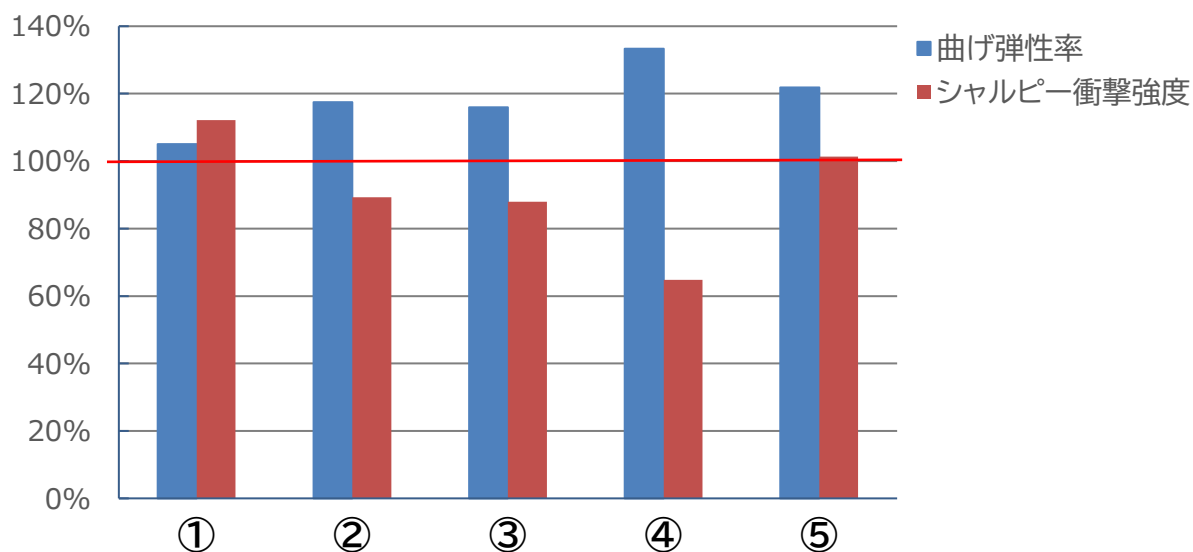
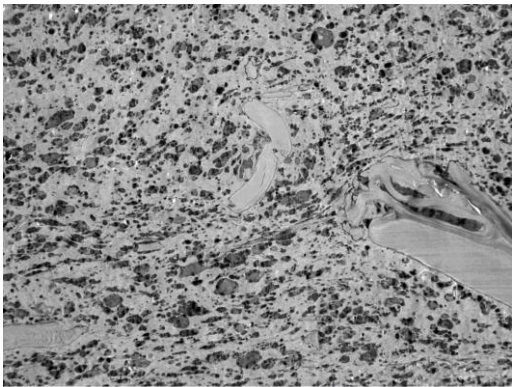
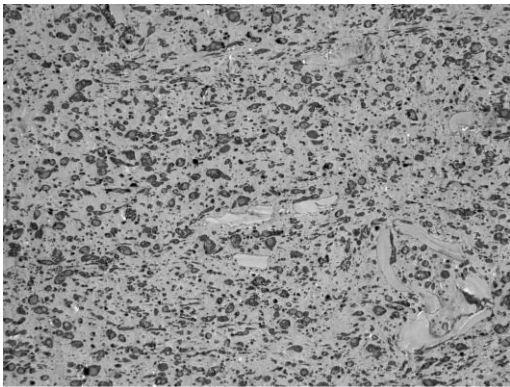


図 2-8 物性保持率(①昨年度実績、⑤今回の結果)

これらの結果に対し、物性向上の要因検証として内部構造の観察をTEM観察により実施した。ここでは上記の②と⑤の結果を比較した。その観察画像の比較を表 2-17に示す。表中の②に対し、⑤は、黒色のエラストマ粒子が微細状に分散性が良好に分布していることが観察され、物性向上に効果があると推察される。

表 2-17 TEM 観察画像

②	⑤
 2μm	 2μm

2.1.3.1.1. PP 樹脂への CeF 複合化における工法の検討

- ・ 混練回転数による影響の検証

PP への CeF 複合化コンパウンディングにおいて、混練工法の検討も実施した。具体的には、混練機のスクリュ回転数の違いによる物性の影響を検証した。

使用した樹脂、CeF 等は下記の通りである。

装置 : 試作用混練機

PP : バージン樹脂

CeF : CeF-a1k 20% (表 2-16 参照)

分散剤 : 4%

エラストマ : D6 11%+H 4% で合計 15%

回転数 : 280, 350(基準), 420 (min⁻¹)

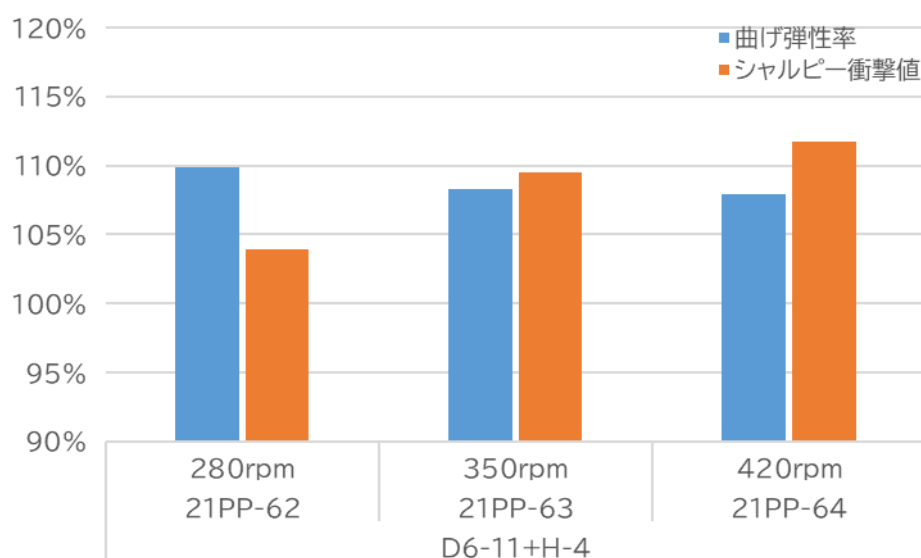


図 2-9 混練機回転数と物性の関連

混練時の回転数を上げることにより、シャルピー衝撃強度が向上する。一方、曲げ弾性率はやや減少していく。これは、回転数を上げて練りを強くすることにより、エラストマのゴム相粒子が微粒化することにより衝撃強度が増し、柔さの減少により曲げ弾性率が減少すると考えられる。これらの工法が、他のエラストマ組合せへ適用可能か、単一エラストマにも効果があるかは検証が必要である。

・量産用混練機での再生 PP への CeF 複合化の検証

廃家電由来の再生 PP への CeF 複合化コンパウンディングを量産機にて検証を実施した。

現行量産品のバージン PP+CeF に対して物性保持率の検証を行った。

現行量産品：バージン PP+現行 CeF-pr 13.5% +MAPP+エラストマ
検証した CeF 複合樹脂を下記に示す。

再生 PP：RF 手(冷蔵庫手解体品)、WM 水比(洗濯機水比重選別品)

CeF 種・濃度：CeF-c1、CeF-a1k (表 2-16 参照)、20%または 15%
+MAPP +エラストマ 1~2 種を計 9~13%

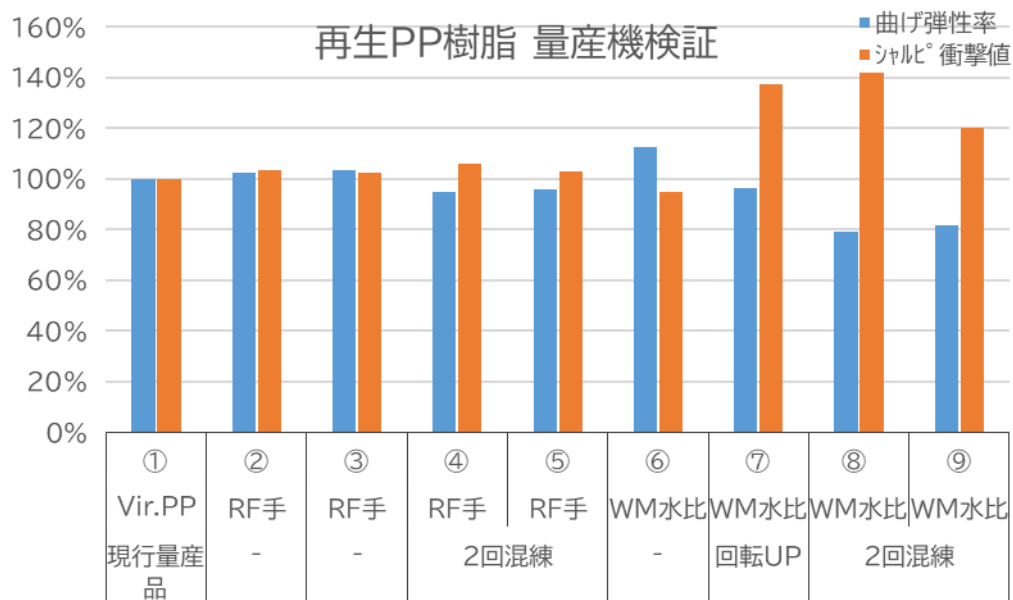


図 2-10 量産機による再生 PP

図 2-10 において、曲げ弾性率とシャルピー衝撃強度の保持率の検証は、現行量産品である①に対しての保持率として評価した。

冷蔵庫手解体品②③については現行品の物性維持を達成できているが、洗濯機水比重選別品⑥はシャルピー衝撃強度保持率が 95%となっており不足している。これに対しては②または③と⑥の混合により物性維持を図ることができると考えられる。一方、③と④⑤、または、⑥と⑧⑨の比較でわかるように、2 回混練では、シャルピー衝撃強度は向上するが、曲げ弾性率が減少する。ま

た、⑥と⑦の比較において、前項と同様に回転数を上げるとシャルピー衝撃強度は向上するが、曲げ弾性率が減少することがわかった。これらの検証内容を元に、量産連続生産の検証を実施した。

2.1.3.2. 2軸混練量産機を用いた連続生産によるペレット量産試作

次に、再生 PP(冷蔵庫手解体品 PP または、洗濯機水比重 PP)を使用してペレット量産(コンパウンディング)検証を行った。表 2-16 の⑤の組合せにおいて、ベース樹脂をバージン PP から再生 PP に置き換えて検証を実施したが、この CeF 種の CeF-c1 において、2 軸混練押出成形時のストランド切れが発生しやすく、連続生産に課題が発生した。この時のストランドを観察すると、表 2-19 上段のように、表面に気泡が発生しており、これによりストランド切れが発生する要因となっている。CeF 材料の水分率が高く、この水分起因による気泡が発生すると考えられる。この時の評価条件は、表 2-18 の条件 1 である。ここでは、設備改造をせず、CeF 種や CeF 濃度などの条件を変更して連続生産できる対策を検討し実施した。結果、前年度で工程実績のある CeF 種 CeF-a1 で濃度を 20%から 15%に削減し、エラストマ比率も削減することにより連続生産による量産が可能となった。その時の評価条件は表 2-18 の条件 2 であり、ストランドの様子を表 2-19 の下段に示す。

表 2-18 量産評価内容

条件	説明	CeF 素材		分散剤・相溶化剤		エラストマ	
1	CeF・エラストマ変更	c1	20.0%	MAPP	5.0%	C2	13.0%
2	CeF・エラストマ変更/減	a1k	15.0%	MAPP	≦ 5.0%	H5	≦ 10.0%

表 2-19 量産検証結果

条件	結果	結果・説明	ストランド状況
1	NG	連続生産した際に、CeF 材料の水分起因の気泡が発生	
2	OK	CeF 材料・濃度の見直し、 添加剤削減のコストダウン 対策を実施	

2.1.3.3. 製品適用に向けた外観異物の改善とスティック掃除機部品試作による成形性の検証

2.1.3.3.1. 外観異物の改善

昨年度、試作成形したスティック掃除機部品の外観に発生する黒点(ダマ)の課題に対し、CeF 種の違いによる異物発生の依存性の確認を実施した。発生した黒点の様子を図 2-11 に示す。

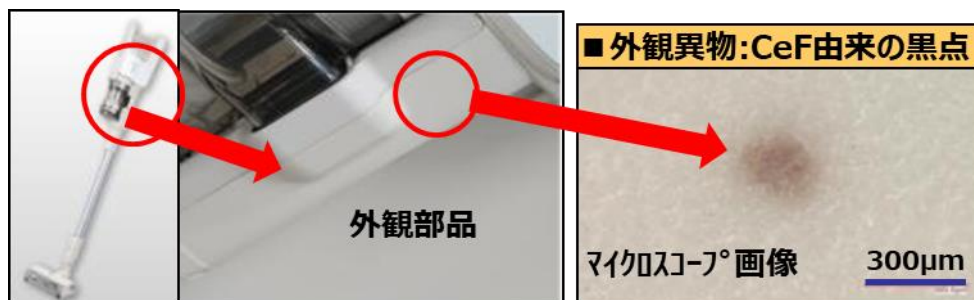


図 2-11 外観異物(CeF 由来)の黒点(ダマ)

次に、これらの黒点異物の数の比較を 2 種の CeF 種にて、 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ の成形プレート 5 枚分での黒点異物数を測定した結果を表 2-20 に示す。

表 2-20 CeF 種による黒点数の比較

	CeF 種	粒子径 (μm)	黒点サイズ/数※		
			0.05～0.1 (mm^2)	0.1～0.3 (mm^2)	0.3～0.5 (mm^2)
スティック掃除機用 量産用 CeF 複合 PP	c1	30～100	7 個	2 個	1 個
CeF 複合 冷蔵庫手解体 PP	a1k	37	2 個 改善効果あり	0 個 改善効果あり	0 個 改善効果あり

これらの結果より、CeF 種の変更により黒点の大きさは小さくなり、個数も減少し、改善効果となった。すなわち、粒度(粒子径)が小さい方が、ダマの発生を抑制できる傾向が確認できた。

2.1.3.3.2. 実部品での成形性の検証

昨年度に冷蔵庫手解体由来の再生 PP にて試作したスティック掃除機部品を本年度は洗濯機水比重由来再生 PP にて再度試作し、成形性、異物等再評価した。

成形試作した部品を図 2-12 に示す。物性については規格値に対して表に示すように全てクリアした。



図 2-12 スティック掃除機試作部品

表 2-21 成形部品検査項目

検査項目		判定
比重		○
MFR		○
曲げ弾性率		○
シャルピー衝撃強さ(ノッチ付)		○

一方、黒点異物の状況を、図 2-13 に示すが、これらの黒点異物を FT-IR により分析した結果、これらはポリスチレンの熱劣化物であることがわかった。これにより、異物は再生材中の混入物であり、CeF 由来のダマではないことがわかった。従って CeF 複合に起因する外観課題(ダマ)は問題ないと考えられる。

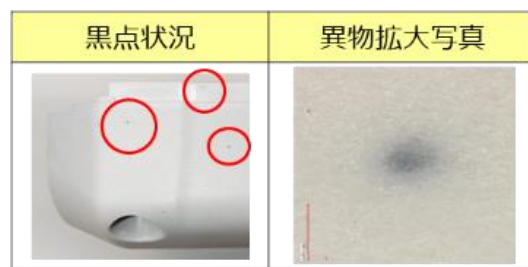


図 2-13 黒点異物状況

次に、成形性の評価を表 2-22 に示す。表中、○は問題・課題等はなく、△は一部対策が必要であることを示す。

すなわち、成形性等は問題・課題は無しであった。一方、外観については、非外観品に活用するか、または、着色により使用が可能となる。

表 2-22 成形性評価

	変色	ガス	ショート	重量	外観
評価	○	○	○	○	△

2.1.3.4. PP樹脂へのCeF複合化取組総括

CeF複合PPの混練条件最適化のまとめとして、19年度より、物性改善・コストダウンに取り組み、混練工法を確立完了した。

図 2-14 に主な取組み内容と、物性・コストの変遷を示す。赤字の%は、曲げ弾性率保持率とシャルピー衝撃強度保持率の平均値を示している。

量産工法と CeF や添加剤の見直し(品種・添加量)により材料コスト 300 円/kg 以下を達成できた。

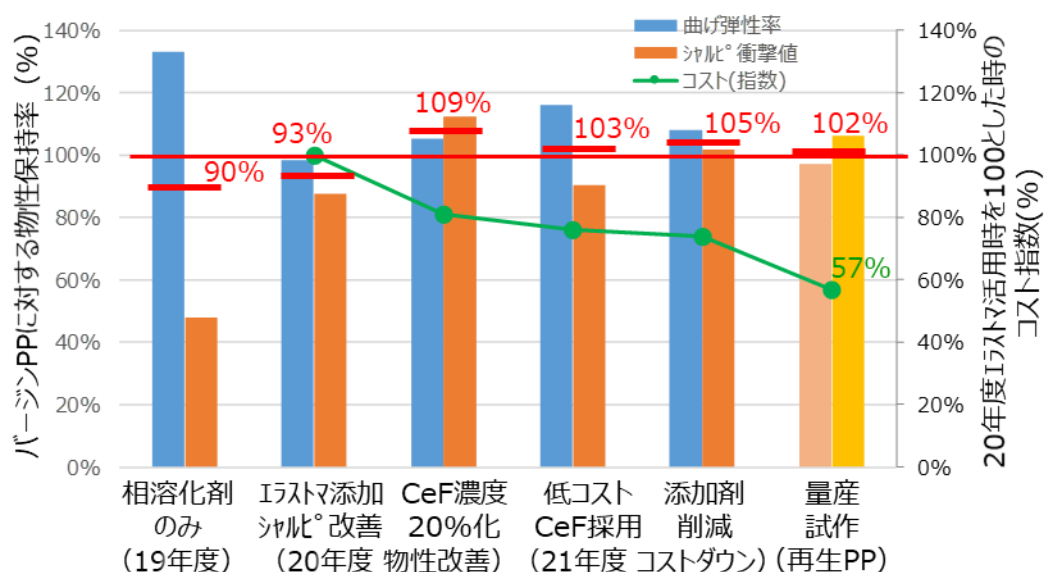


図 2-14 CeF 複合 PP の混練条件最適化まとめ

2.1.3.5. PS 樹脂への CeF 複合化

HIPS への CeF 複合化については、昨年度に引き続きバージン PS への複合化の改善取組みを実施した。以下の 3 通りのアプローチで、物性改善の検討を行った。

①分散剤やエラストマ選定による処方では改善効果が認められなかったが、引き続きこれらの検証は進めるものの、本年度は主に次の 2 項目について、複合化による物性改善を検討・検証した。

②溶融混練押出工法の条件の検討

試作混練機でのシリンダ設定温度や、スクリュ回転速度の条件をパラメータとして混練の強さの変更により物性への影響を検証した。

③工程分割の検討

エラストマ添加工程の分割による分散性向上や、CeF 解繊促進を狙いとした。

②溶融混練押出工法の条件の検討

溶融温度については、CeF の茶変等への影響が大きく 210℃以上になるとペレット性状が CeF 析出により悪化していった。195℃設定から 205℃設定の間で検証したがその間では、物性に与える差異は殆どなかった。一方、スクリュ回転速度は、CeF の解繊度合や、エラストマの粒度均一化などに影響を及ぼす練り込み強度と相関があるため、その検証結果を図 2-15 に示す。なお、基準の回転速度は 350rpm である。シリンダ温度設定は 200℃とした。

添加剤混合比率は、CeF:15%、分散剤:2%、エラストマ(T7 材)15%とした。

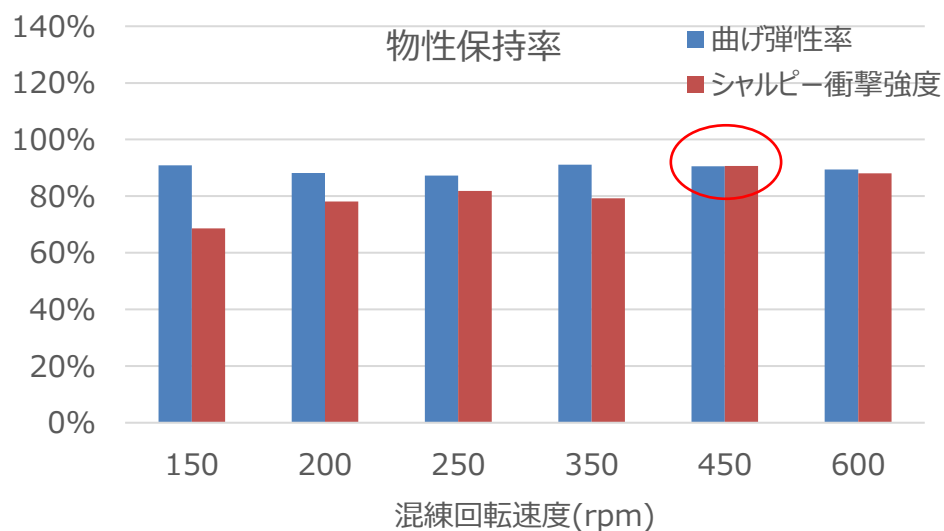


図 2-15 混練回転速度による物性への影響

回転速度を高め、450rpm(1.3 倍)に設定することにより、練り込み強度が向上し、物性保持率が、曲げ弾性率、シャルピー衝撃強度いずれも 91%まで改善した。この傾向は、後述する 2.1.3.9 項における文献⁴⁾とも合致しており、今後実証を進めて行く。

③ 工程分割工法の検討

溶融混練工程の分割については、下記の 2 つの方法について検証した。

③-1 混練工程の分割検討

狙い：分散剤とエラストマの混練工程を分割し、1 工程目で、層状に広がって分布するエラストマが無い状態で、分散剤の影響度を向上させる。

③-2 CeF の事前解繊促進と改質剤の CeF への事前馴染ませ工程検討

狙い：CeF と分散剤を事前にミキシングし、CeF の解繊促進と分散剤と CeF の事前馴染ませ度合を向上させる。

これらの検討内容・結果について以下に記す。

③-1 工程分割の検討

上述したように、1 回目の混練工程で PS と CeF と分散剤を混練し、分散剤によりエラストマによる阻害が無い状態で CeF 分散を促進させた後に、2 回目の工程でエラストマ(SEBS)15%を混練した。

物性試験結果を図 2-16 に示す。

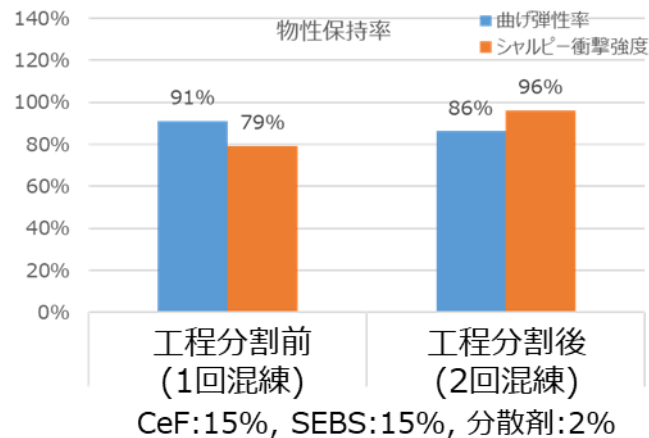


図 2-16 工程分割 (2 回混練化) 結果

図に示すように、工程分割によりシャルピー衝撃強度が向上することがわかった。一方では、曲げ弾性率が減少するため、更に CeF 分散を促進する工法や、CeF と分散剤・改質剤を馴染ませる工法の更なる検討が必要である。

③-2 CeF 解繊促進、事前馴染ませ工法の検証

事前馴染ませ工程として、混練工程の事前工程として混合機(ミキサー)により検証を実施した。使用した混合機は下記の通りであり、に示すように底面に回転プロペラ状のミキシングアジテータを有し、側面にチョッパを備えている。チョッパにより CeF の解繊を促進し、アジテーターで CeF と添加剤(分散剤等)を混合し馴染ませる工程である。また、馴染ませの促進のためにブレンドオイルを容器上面からスプレーイングにより散布した。

装置 : MTI ユニバーサルミキサー EM25B, 全容量 30L

メーカー : 月島機械・月島マシンセールス

ブレンドオイル(流動パラフィン) : 住化カラー製ブレンドオイル#1

実施場所 : 月島機械 R&D センター

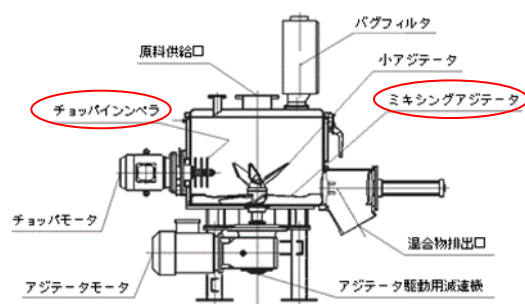


図 2-17 MTI ユニバーサルミキサー(混合機)

表 2-23 事前馴染ませ工程混合条件に事前馴染ませ工程の実験条件の概略を示す。また、図 2-18 に試験番号 T3-2 の混合後のミキサータンク内の様子の例を示す。

これらの混合を実施した後に、試作用押出機にて混練を実施した。混練機スクリュー回転数は通常の 350rpm にて行った。混練後の、物性試験結果の抜粋を図 2-19 に示す。ここでの保持率は、バージン PS の物性に対する保持率である。

表 2-23 事前馴染ませ工程混合条件

No.	試験番号	混合材	混合比	混合時間	オイル散布後 混合時間
[1]	T1	CeF +分散剤(低分子 PS)	—	5 分	—
[2]	T3-1	CeF +分散剤+ブレンドオイル	—	5 分	3 分
[3]	T3-2	CeF +分散剤+ブレンドオイル(標準)	—	5 分	5 分
[4]	T3-3	CeF +分散剤+ブレンドオイル	—	3 分	3 分
[5]	T3-4	CeF +分散剤+ブレンドオイル	—	5 分	5 分
[6]	T3-5	CeF +分散剤+ブレンドオイル	—	5 分	5 分
[7]	T2	HIPS+ CeF+分散剤	—	5 分	—
[8]	T4	HIPS+ CeF+分散剤+ブレンドオイル	—	5 分	5 分



図 2-18 混合後のタンク内の状態

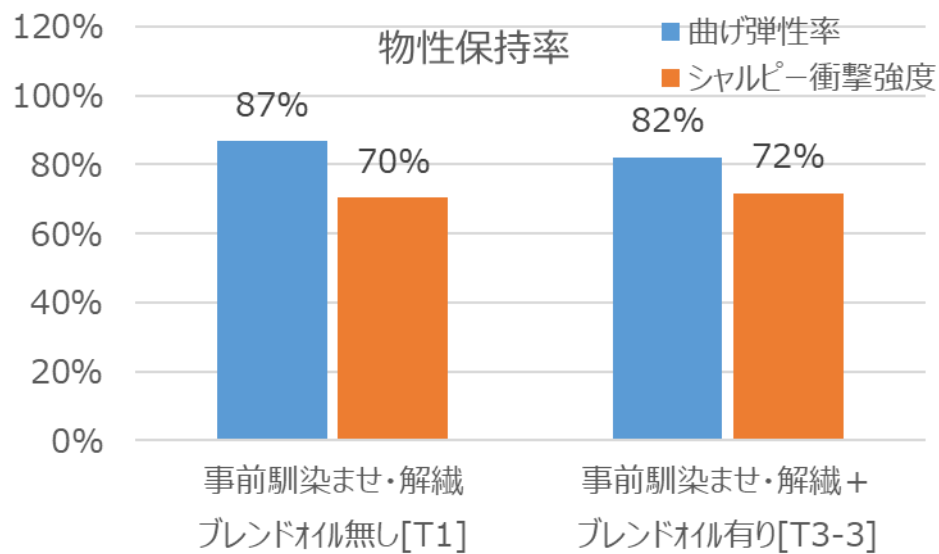


図 2-19 事前馴染ませ工程後混練時の物性試験結果

結果として、これらの工程での物性向上に対する効果は少なかった。
これらの結果も含め、②および③の結果を図 2-20 にあわせて示す。

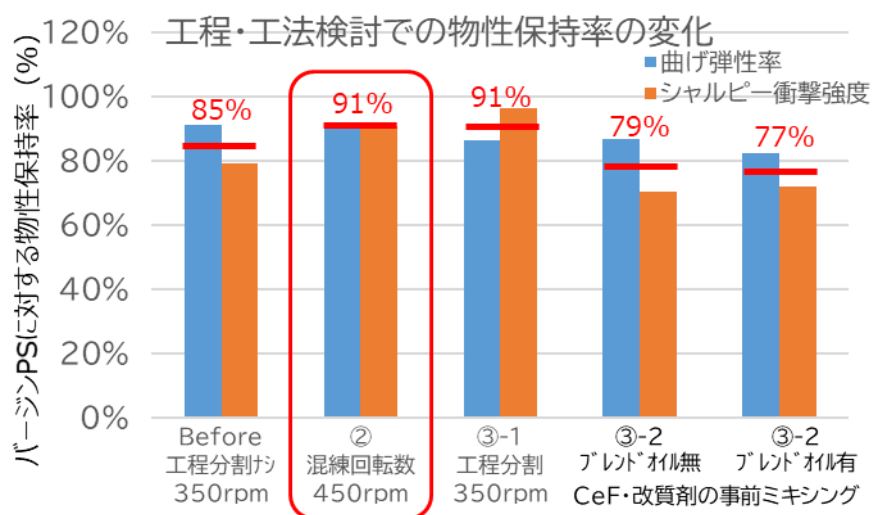


図 2-20 工程・工法検討での物性保持率の変化

以上の結果より、試作機において混練スクリュ回転数 450rpm(1.3 倍),あるいは、混練工程 2 分割化で、物性改善(それぞれ 6%向上)を図ることができた。次に、コストアップなしで物性改善可能な試作機での混練スクリュ回転数増を適用し、量産機においても 30%程度増しの回転数を採用し検証を進めた。

そして、これらの条件を量産機生産へ展開し、再生 PS 材を使用して連続生産による量産コンパウンド試作を実施した。連続生産時に一部ストランド切れが発生したが、吐出部形状等の微修正により対策可能な見込みであり、取組みを継続していく。

2.1.3.6. PS樹脂へのCeF複合化取組総括

CeF複合PSの混練条件の最適化取組みをまとめると下記のようになる。

19年度：複合化樹脂の基本物性を把握(CeF6種、添加剤7種)した。機械物性としてシャルピー衝撃強度が大幅に減少することを確認できた。

20年度：分散剤、相溶化剤、エラストマの組合せ処方を開発し、物性保持率85%まで改善した。

21年度：添加剤等の組合せ処方のみでは物性改善が難しいことから、工法(混練速度、工法分割等)の見直しを実施し、物性保持率91%を達成した。

これらの物性保持率の推移を図2-21に示す。図中の赤線・赤字は、曲げ弾性率保持率とシャルピー衝撃強度保持率の平均を表している。

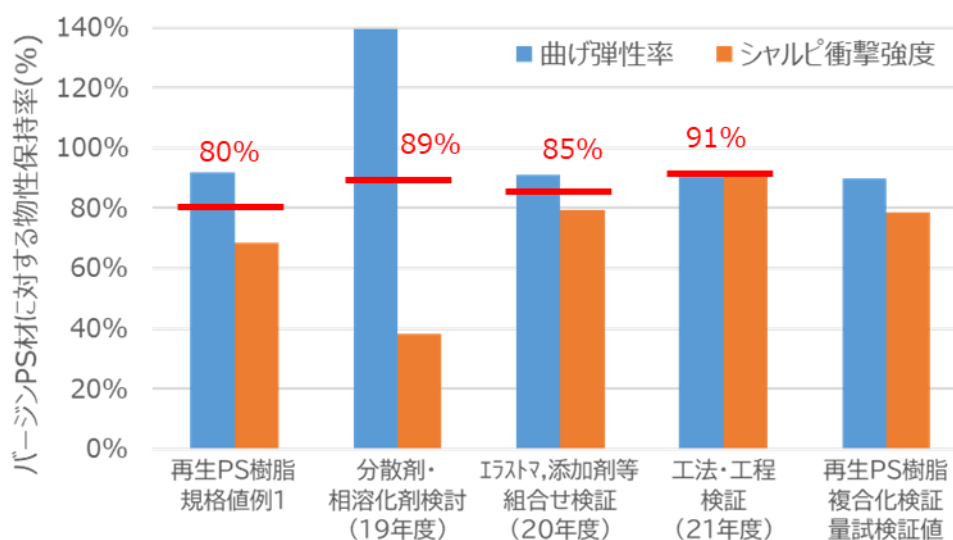


図 2-21 取組み内容と物性保持率の推移

前項にも記載したが、結果として、量産工法と CeF 種や添加剤の見直し(品種・添加量)、加工コストを増やさない混練速度の最適化で物性保持率 90%まで達成することができた。また、材料コストについては、PP 同等の 300 円/kg 以下を達成する見込みである。

【まとめ】

CeF 材料、添加剤(分散剤、相溶化剤、エラストマ)の組合せ最適化により、物性改善に取り組み、物性保持率 91%まで改善することができた。

量産試作の結果として、CeF 添加無しの再生 PS に対して優位性があることを確認した。

今後は、商品事業部への働きかけと連携により、具体商品への適用に向け取り組んでいく。

2.1.3.7. CeF 素材の形状と物性の相関について

(CeF_15%複合 PP にて検証)

CeF 素材の形状、形態と CeF 複合化樹脂の物性との相関を検討するために、CeF 素材の繊維径・繊維長および結晶化度を測定した。測定条件を表 2-24 に示す。測定に供した CeF の一覧を表 2-25 に示す。

それらの観察 SEM 画像例を表 2-26 に示す。

表 2-24 繊維径・繊維長測定条件

装置	分析走査電子顕微鏡 JSM-6510LA(日本電子(株)製)
観察条件	加速電圧 : 8kV SEM 写真 : SEI(二次画像) 観察倍率 : 75 倍～600 倍
測定方法	画像ソフト解析を用いて繊維径、繊維長共に 200 本程度測定。ただし、折れ曲がっている、あるいは大きく湾曲している繊維はカウントしていない。
前処理	スパッタ処理後 SEM 観察
測定機関	(株)DJK

表 2-25 CeF 一覧及び測定結果

CeF 種	メーカ	備考	参考 平均 粒子径	繊維径(μm)			繊維長(μm)			アスペクト比	等価粒子径
				最大 径	最小 径	平均 径	最大 長	最小 長	平均 長	平均値より	測定値より
a1g	X	食品添加グレード	37	35	5.4	15	279	1.4	67	4.47	24.5
a1k	X	工業用途グレード	37	39.1	6.9	18	301	22	94	5.22	30.2
a1kk	X	工業用途グレード	37	32.9	4.5	14	196	14	84	6.00	24.0
a4g	X	食品添加グレード	24	68.1	8.1	18	130	24	60	3.33	27.7
c1	Z	木粉グレード	70～	70.6	5	25	444	20	107	4.28	40.5
pr	Y	微粉パルプ	30~100	39.2	3.2	12	108	7.6	32	2.67	17.5

表 2-26 測定 SEM 観察画像例

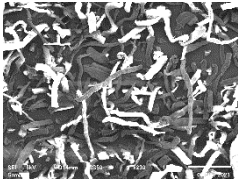
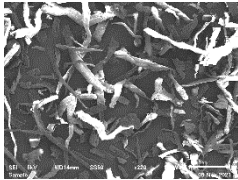
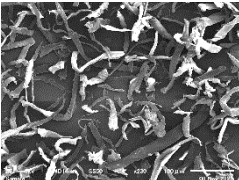
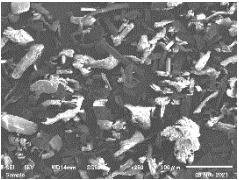
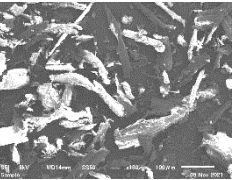
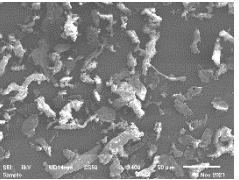
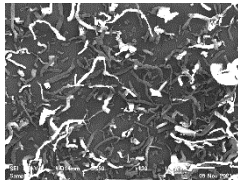
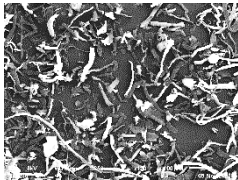
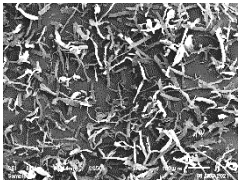
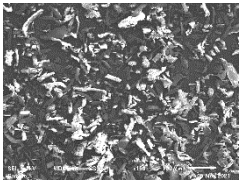
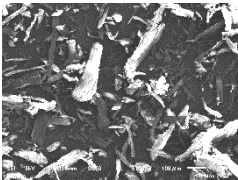
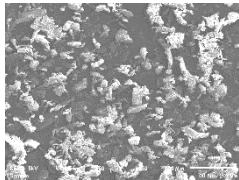
CeF種	a1g	a1k	a1kk	A4g	c1	pr
メーカー	X	X	X	X	Z	Y
繊維径 観察SEM 画像 ×230						
繊維長 観察SEM 画像 ×120						

表 2-25 の結果を元に、繊維径、繊維長、アスペクト比(繊維長／繊維径)のグラフをそれぞれ図 2-22、図 2-23、図 2-24 に示す。

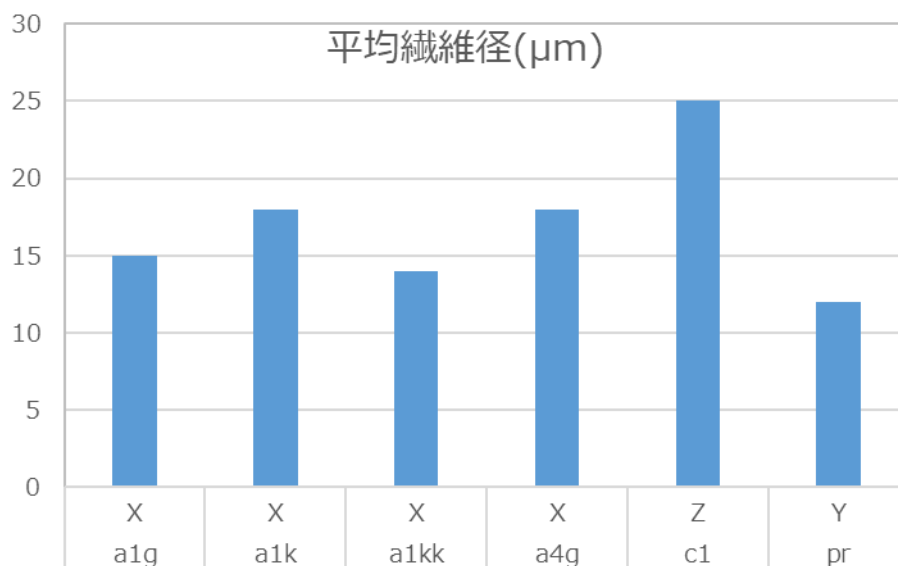


図 2-22 CeF 平均繊維径

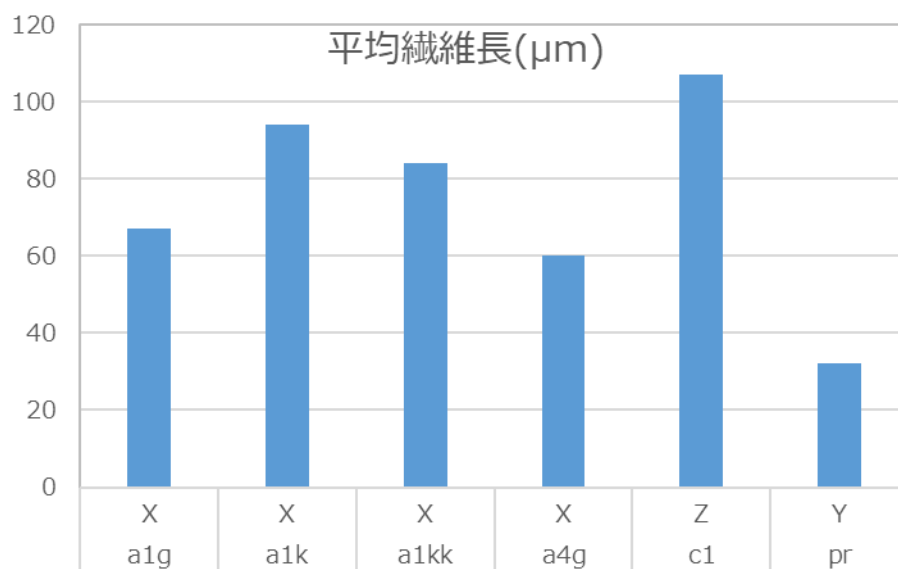


図 2-23 CeF 平均繊維長

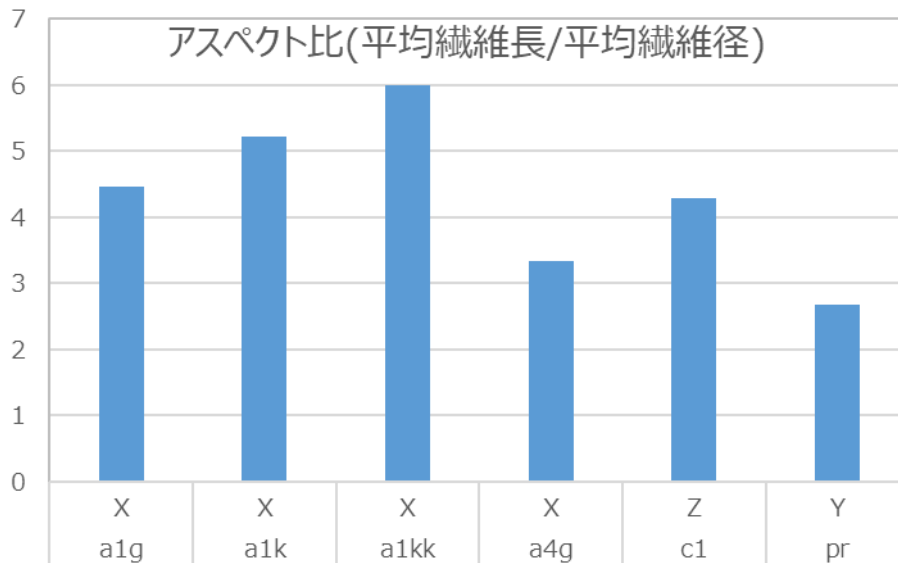


図 2-24 CeF アスペクト比

平均繊維径は、10～25 μ m 程度で、平均繊維長は、30～110 μ m 程度であった。

CeF-pr については、微粉化を狙った解繊・解砕方法を用いているため繊維径・繊維長・アスペクト比が共に他に比べ小さい値となっている。一方、CeF-c1 については、木粉グレードであり漂白・解繊等は他の品種に比べて抑えているので、繊維径、繊維長共に大きくなっているが、アスペクト比は多品種並みに維持できている。

測定条件の表にも記述してあるように、折れ曲がった繊維や、湾曲して繊維は本手法では測定対象外としているが、おおよその CeF のサイズ・形態を把握することができた。

次に、これら CeF 素材の形状と物性の相関について考察した。この結果を図 2-25 に示す。

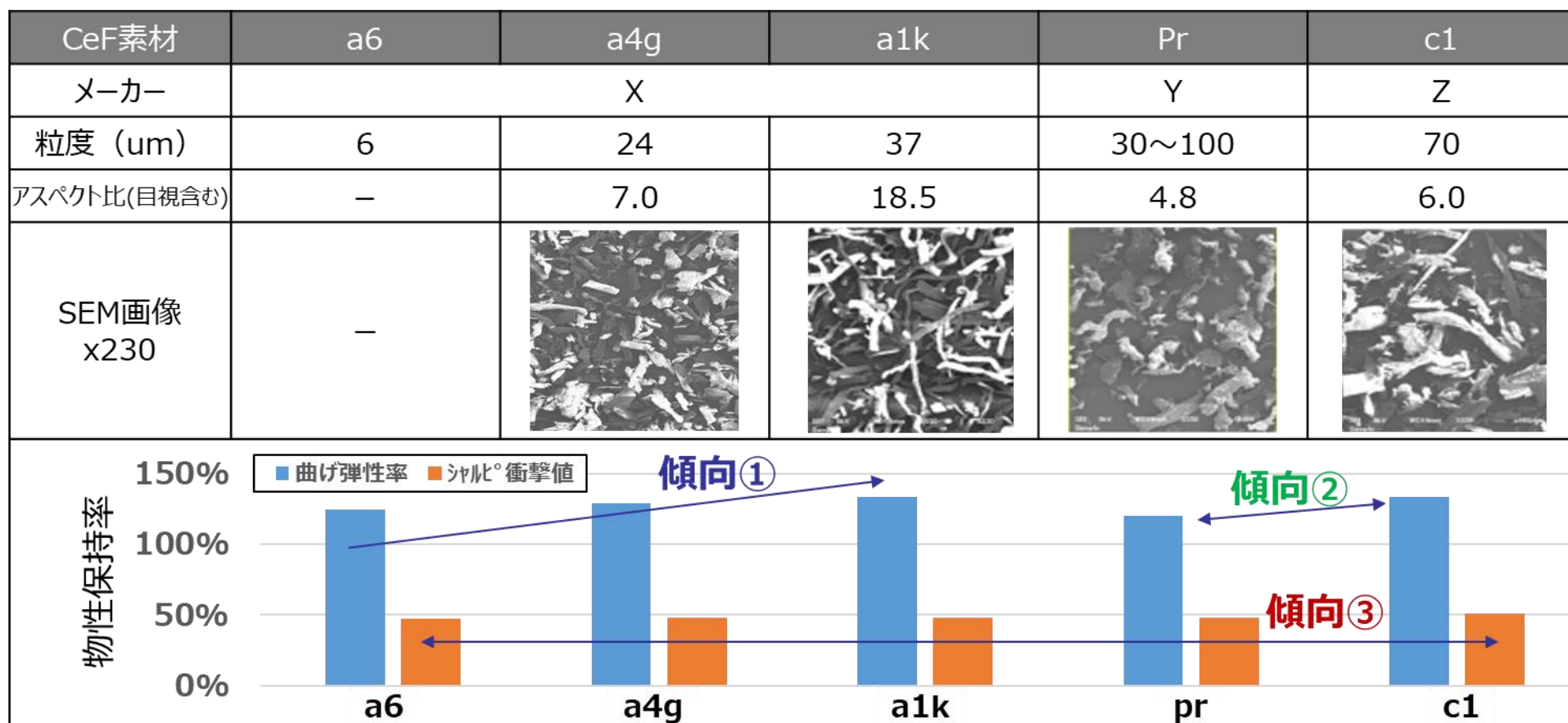


図 2-25 CeF 素材の形状と物性の相関

図 2-25 に示しているように、傾向①として、同一シリーズの **CeF** 種では粒径が大きい(アスペクト比が高い)ほど、曲げ弾性率が向上する傾向がある。従って、繊維形状のアスペクト比は、物性を左右する重要な因子であると考えられる。

また、傾向②として、メーカーが異なる場合は粒径・アスペクト比が同程度(**SEM** 画像結果による)でも、曲げ弾性率は異なってくる。一方、傾向③として、粒径、アスペクト比に関わらず、シャルピー衝撃値は大きく低下することがわかる。

これらの結果より、曲げ弾性率を向上させるためには **CeF** の形態を把握することが重要であるが、シャルピー衝撃強度向上には **CeF** 形状は、それほど寄与しないことがわかった。シャルピー衝撃強度向上には、エラストマなどの添加剤の寄与が重要であると考えられる。

2.1.3.8. 実商品の部品への適用検証

量産機でのコンパウンディングにて製作した材料を用いて、冷蔵庫内部部品の試作成形を実施した。

・CeF 複合再生 PP の成形部品への適用検証

再生 PP は、冷蔵庫手解体品由来材料および洗濯機由来水比重選別材料を混合したものを用いた。適用した成形部品を図 2-26 に示す。

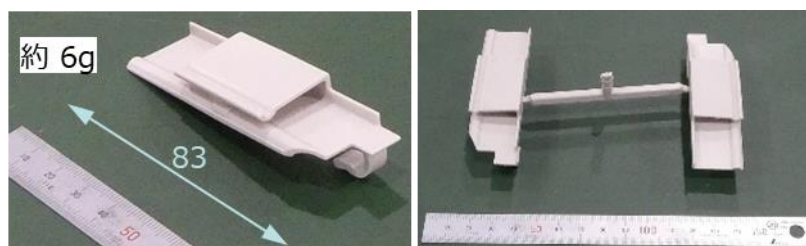


図 2-26 ホルダー部品（色調：ナチュラル又はベージュ）

・CeF 複合再生 PS の成形部品への適用検証

再生 PS はエアコン由来の材料を用いた。適用部品および冷蔵庫への組み込み位置を図 2-27 に示す。

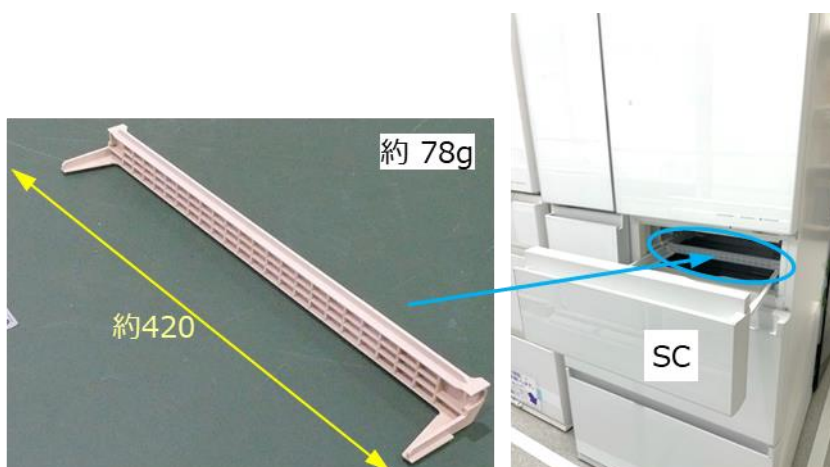


図 2-27 SC ドア(引出し)の後部サポータ部品（色調：ナチュラル）

両部品とも、射出成形機での成形性について問題なく成形できたが、量産成形に対しては今後、金型構造面、成形条件面等において検討を進めて行く。

・信頼性試験評価

これらの試作成形部品に対し信頼性評価試験を実施した。冷蔵庫の評価について、高温、低温および湿度環境での評価が必要である。実際に信頼性評価試験を実施した項目一覧を表 2-27 に示す。²⁾ N 数は 1 とした。

表 2-27 信頼性試験評価項目一覧

試験項目	試験条件	要求項目
耐熱性試験	部品を $70\pm3^{\circ}\text{C}$ のエアークーブンで1時間加熱する。	組立上に支障をきたすような変形がなく、クラック等の使用上有害な欠陥のないこと。
耐湿・耐熱繰返し試験	部品を $40\pm2^{\circ}\text{C}$ で95%R.h以上の雰囲気中に24時間放置し、次に $60\pm3^{\circ}\text{C}$ のエアークーブンに24時間放置する。このサイクルを2回繰返す。	部品の外観や機能を損なうような反り、ヒケ、光沢の低下等のないこと。
冷熱試験	部品を $-25\pm2^{\circ}\text{C}$ で12時間及び $60\pm2^{\circ}\text{C}$ で12時間保持するサイクルを5回繰返す。	クラック、クレージング、変色、その他外観変化のないこと。

①CeF 複合再生 PP の成形部品の単品評価

試験前の成形部品を図 2-28 に、表 2-27 における信頼性試験後の成形部品を図 2-29 に示す。図 2-29 において、上から、耐熱性試験後、耐湿・耐熱繰返し試験後、冷熱試験後の外観である。

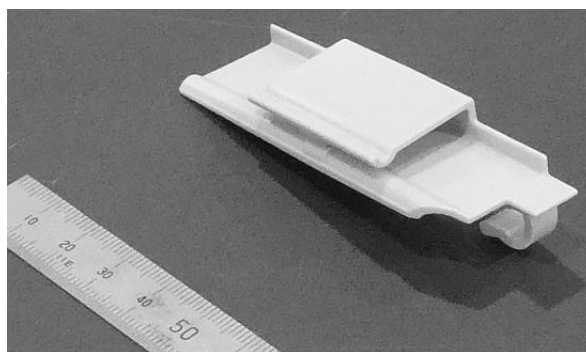


図 2-28 信頼性試験前の試作成形部品

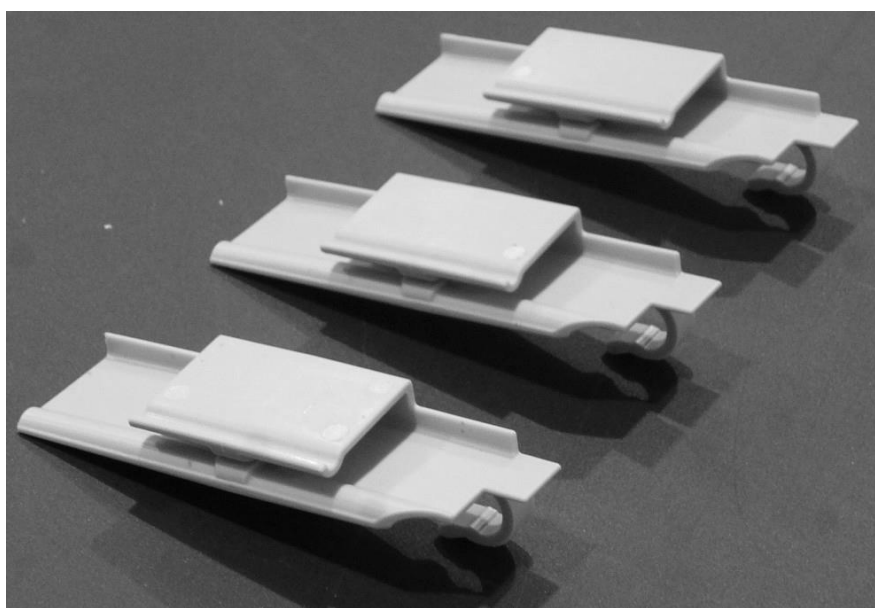


図 2-29 信頼性試験後の部品(上から、耐熱性試験後、耐湿・耐熱繰返し試験後、冷熱試験後)

耐熱性試験結果を表 2-28 に示す。

全長寸法は成形時の寸法バラつきと部品寸法公差を考慮して、全長寸法変化が $\pm 0.4\%$ 以下で合格とした。反り量変化は $\triangle 0.2\text{mm}$ 以下で合格とした。目視ではクラック等の欠陥が無いかを判断した。

これらの項目について、全項目で合格であった。

表 2-28 PP 部品の耐熱性試験結果

No.	全長寸法変化 ($\pm 0.4\%$ 以下)		反り量変化 ($\angle 0.2\text{mm}$ 以下)		目視評価	
1	○	0.0%	○	0.05mm	○	異常なし

同部品の耐湿・耐熱繰返し試験結果を表 2-29 に示す。ここで、光沢度測定は下記測定装置を使用し、同じ箇所を 5 回測定し平均値を取った。

- ・メーカー：日本電色工業株式会社
- ・機種名：ハンディ光沢計 PG-II M
- ・測定角度： 60°

表 2-29 PP 部品の耐湿・耐熱繰返し試験結果

No.	反り量変化 ($\angle 0.2\text{mm}$ 以下)		光沢度変化 (-5以上/測定角 G_s60°)		目視評価	
1	○	-0.10mm	○	-0.06	○	異常なし

反り量変化は小物部品のため $\angle 0.2\text{mm}$ 以下で合格とした。光沢度変化については、光沢度計での測定値(G_s60°)において、低下量が 5 以下(-5 以上)で合格とし、増加している場合は問題無しとした。目視ではヒケ等の差異がないかを判断した。

これらの項目について、全項目で合格であった。反り量は、基準の半分程度であった。光沢度はほぼ変化がなかった。

同部品の冷熱試験結果を表 2-30 に示す。

色差計は下記機種を使用し、同じ箇所を 5 回測定し平均値を取った。

メーカー：テストー

機種名：ポータブル色差計 TES-135A

表 2-30 PP 部品の冷熱試験結果

No.	色差 ($\angle E:3$ 以下)		目視評価	
1	○	-0.20	○	異常なし

色差は、色差計の測定値(L*、a*、b*)から ΔE を計算し、人が違う色と認識しない色差である3以下とした。目視ではクレージング(ひび割れ)等の欠陥がないかを判断した。

これらの項目について全項目で合格であった。

②CeF 複合再生 PS の成形部品の単品評価

試験前の成形部品を図 2-30 に、表 2-27 における信頼性試験後の成形部品を図 2-31 に示す。図 2-31 において、上から、耐熱性試験後、耐湿・耐熱繰返し試験後、冷熱試験後の外観である。

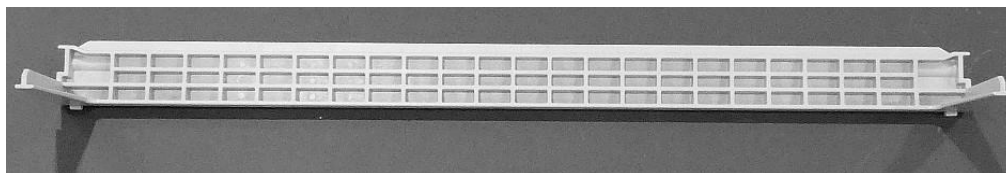


図 2-30 信頼性試験前の試作成形部品

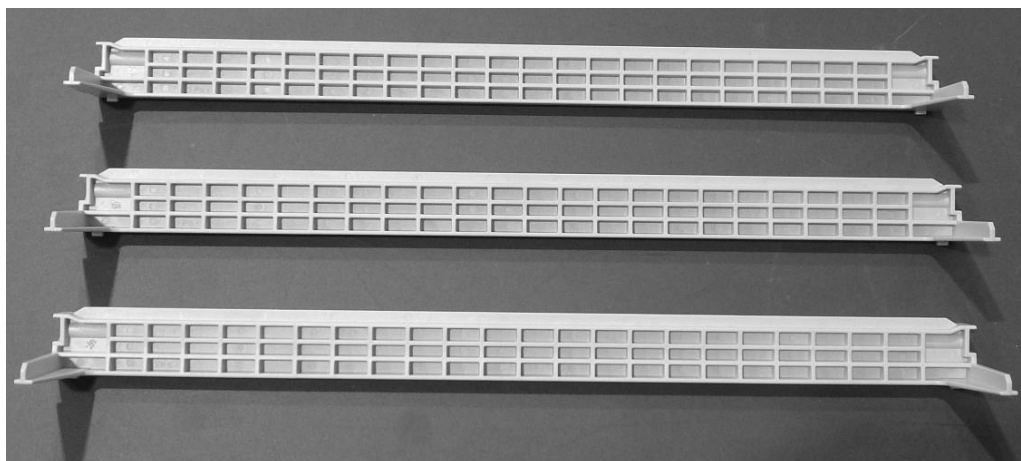


図 2-31 信頼性試験後の部品(上から、耐熱性試験後、耐湿・耐熱繰返し試験後、冷熱試験後)

耐熱性試験結果を表 2-31 に示す。

全長寸法は PS 成形時の寸法バラつきと部品寸法公差を考慮し、全長寸法変化が $\pm 0.2\%$ 以下で合格とした。反り量変化は全長の 0.2% を目安として $\triangle 1\text{mm}$ 以下で合格とした。目視ではクラック等の欠陥が無いかを判断した。

これらの項目について、全項目で合格であった。

表 2-31 PS 部品の耐熱性試験結果

No.	全長寸法変化 ($\pm 0.2\%$ 以下)		反り量変化 ($\triangle 1\text{mm}$ 以下)		目視評価	
1	○	-0.17%	○	-0.6mm	○	異常なし

同部品の耐湿・耐熱繰返し試験結果を表 2-32 に示す。

表 2-32 PS 部品の耐湿・耐熱試験結果

No.	反り量変化 ($\triangle 1\text{mm}$ 以下)		光沢度変化 (-5以上/測定角Gs60°)		目視評価	
1	○	-0.10mm	○	-0.6	○	異常なし

反り量変化は表 2-31 と同様に $\triangle 1\text{mm}$ 以下で合格とした。光沢度変化については、光沢度計での測定値(Gs60°)において、低下量が 5 以下(-5 以上)で合格とし、増加している場合は問題無しとした。目視ではヒケ等の差異がないかを判断した。

これらの項目について、全項目で合格であった。反り量は、基準の半分程度であった。

同部品の冷熱試験結果を表 2-33 に示す。

表 2-33 PS 部品の冷熱試験結果

No.	色差 ($\triangle E:3$ 以下)		目視評価	
1	○	-0.18	○	異常なし

色差は、色差計の測定値(L*、a*、b*)から ΔE を計算し、人が違う色と認識しない色差である3以下とした。目視ではクレージング(ひび割れ)等の欠陥がないかを判断した。

これらの項目について全項目で合格であった。

2.1.3.9. 技術調査

(i) 調査目的

CNF(セルロースナノファイバー)とポリスチレン樹脂の複合化材料の機械特性に影響を与える因子を把握するために文献調査を実施した。

(ii) 調査結果

藤澤³⁾は、樹木由来製紙用パルプに対して、TEMPO 触媒酸化処理と数分間の簡単な機械処理(ミキサーおよび超音波処理)を施すことで得られた TEMPO 酸化 CNF を高分子複合材料に用いることで、TEMPO 酸化 CNF・高分子界面の相互作用を制御ができ、これにより高分子複合材料物性が制御することを TEMPO 酸化 CNF/ポリスチレン系にて熱機械特性および力学物性について評価し確認した。

藤澤は、高分子(ポリスチレン)中において TEMPO 酸化 CNF は低添加量で強固な CNF 間ネットワークを形成する(主に水素結合によるもの)ことで、高温領域で高分子(ポリスチレン)材料がやわらかくなったり伸びたりするのを抑える事ができると報告している。さらに、ネットワーク形成のしやすさは、TEMPO 酸化 CNF の長さとの幅の比(アスペクト比)に依存し、アスペクト比が大きい(細長い)ものを用いることでより低添加量でネットワークを形成することができると考え、TEMPO 酸化 CNF/ポリスチレン複合材料にて、かたさを表す指標である“貯蔵弾性率”に対して平均アスペクト比が 310 の TEMPO 酸化 CNF を用い、温度の違いによる貯蔵弾性率の影響を検討した。

図 2-32 に示す結果より、TEMPO 酸化 CNF を添加していない場合(0 wt%)、ポリスチレンのガラス転移領域である 100°C 付近を超えると、貯蔵弾性率が大きく低下し、やわらかくなっていることが分かった。一方、TEMPO 酸化 CNF を添加することでその低下が抑えられ、添加量に伴ってその効果が大きくなった。ここで注目すべきは、わずか 0.5 wt%(0.3 vol%)の TEMPO 酸化 CNF 添加で CNF 間ネットワークを形成し、150°C 付近の貯蔵弾性率が約 10 倍向上している点であると報告されている。さらに、このネットワーク形成による貯蔵弾性率増加をパーコレーションモデルを用いて、CNF ネットワーク形成に依存した弾性率向上の様子が理論的に予測し、結果より考察を行なっている。

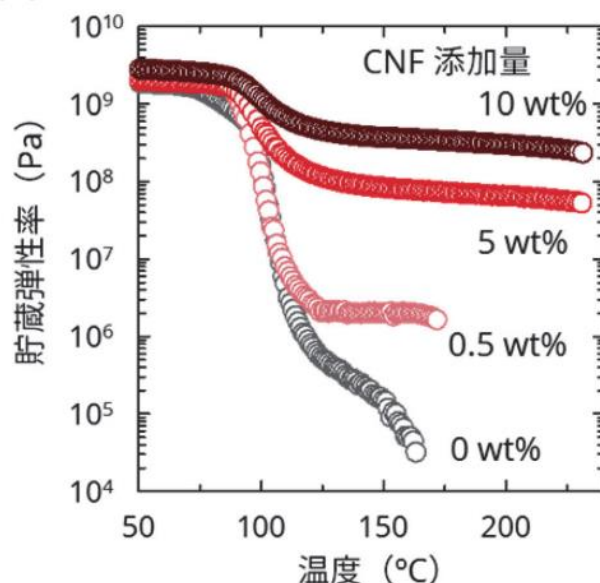


図 2-32 TEMPO 酸化 CNF/ポリスチレン複合材料の貯蔵弾性率

図 2-33 に本モデルから予測される理論値と実験値のグラフを示した。なお、図 2-33 に示す結果では、平均アスペクト比が 310 および 93 の TEMPO 酸化 CNF を用いている(それぞれ CNF-310 および CNF-93 とする)。グラフから、理論値と実験値がよく一致していることが分かる。

この結果より、藤澤は、TEMPO 酸化 CNF は高分子(ポリスチレン)中でよく分散しており、効率的にネットワークを形成していると考察している。CNF-310 および CNF-93 のどちらを用いた場合も、理論値によく一致していることから、TEMPO 酸化 CNF-ポリスチレン間において、少量添加(それぞれ 0.3、0.6 vol%)でネットワークを形成し始めたと考察している。一般的に、親水性の CNF と疎水性汎用高分子材料は、水と油を混ぜるようになじみにくく、CNF 同士は凝集し不均一に複合化してしまう。そのため、少量添加でのネットワーク形成が難しい。一方、本実験では TEMPO 酸化 CNF の良分散性を活かすことで、高温でやわらかくなってしまいうという高分子材料の欠点を効率的に改善することができたと報告している。

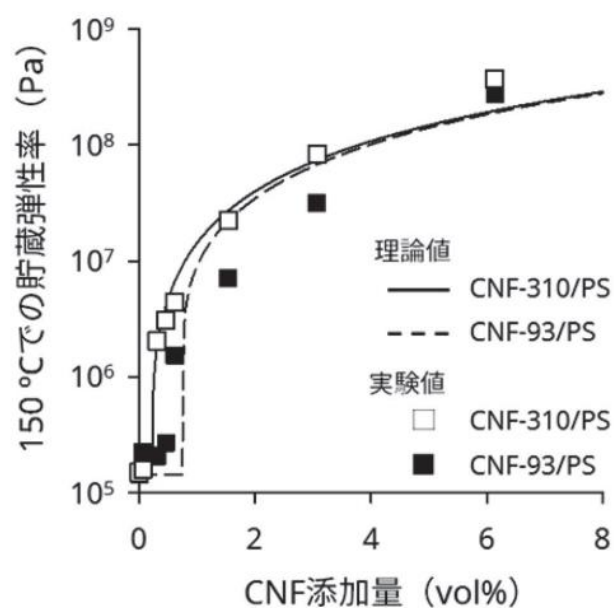


図 2-33 150°Cにおける貯蔵弾性率

熱膨張については、TEMPO 酸化 CNF/ポリスチレン複合フィルムにて熱膨張率測定を実施しており、TEMPO 酸化 CNF 添加によって 100°C 以上での顕著な熱膨張率低下を確認している。また、常温においても TEMPO 酸化 CNF 添加量に伴って熱膨張が抑制され、評価結果から得られた熱膨張係数が 116 から 63.7 ppmK⁻¹ に低下したと報告している。これにより、TEMPO 酸化 CNF の添加によって高分子の熱寸法安定性が大きく向上し、熱で伸びにくくなる。これは、繊維間ネットワーク形成が強固になったためと考察している。

Matheus Poletto⁴⁾は、クリスタルポリスチレン(N1921)を複合マトリックスとして使用して、150-400 μm (ASTM D1921)の粒度分布を有する純漂白セルロース繊維を複合補強として充填したセルロース繊維複合材料を共回転2軸押し出し成形機(COR-20-32-LAB MH)にてサンプルを作成し、サンプルの機械的特性(曲げ強度・曲げ弾性率・破断ひずみ・衝撃強度)について成形機のスクリュ処理速度の影響を検討した。

曲げ強度に対しては、図 2-34 に示すように、セルロース繊維を添加すると、200, 400rpm のスクリュ処理速度を比較した場合、いずれのセルロース含有量に於いて、400rpm のスクリュ処理速度で作成したサンプルの曲げ強度は、200rpm スクリュ処理速度で作成したサンプルの曲げ強度より高かった。また、スクリュ処理速度が、200, 400 rpm とともに、セルロース含有量が 10 重量%、20 重量%の複合材料の曲げ強度が増加した。しかし、使用する繊維の 30 重量%の場合、特性が低下した。この結果に対し、Matheus は、セルロースの含有量が高いほど、繊維凝集が生じ、曲げ強度が低下する可能性があると考えしている。

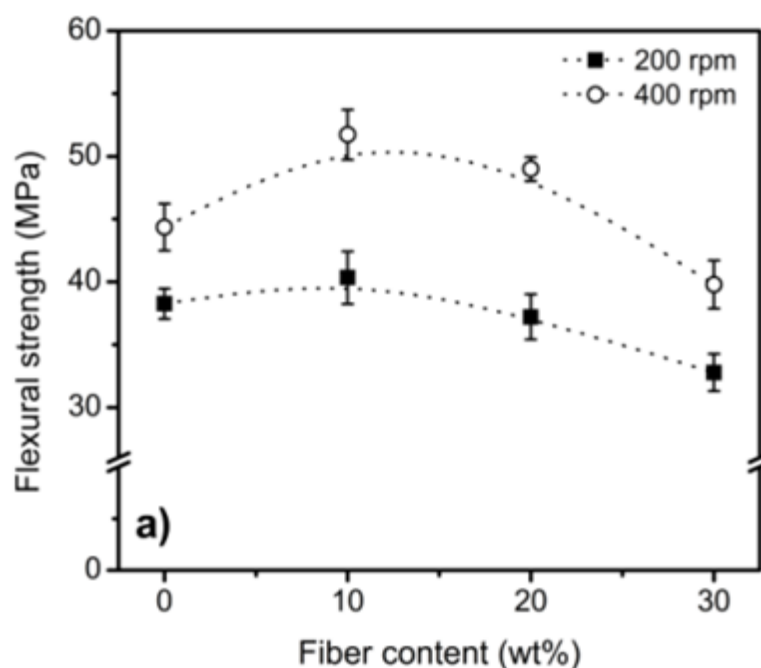


図 2-34 曲げ強度について

曲げ弾性率に対しては、図 2-35 に示すように、繊維濃度の増加に対し、曲げ弾性率はほぼ直線的な増加が見られた。この挙動は、セルロース繊維がポ

リマーマトリックス⁴⁾⁵⁾よりも大きなモジュラスを形成するという事実に関連している可能性があると考えしている。

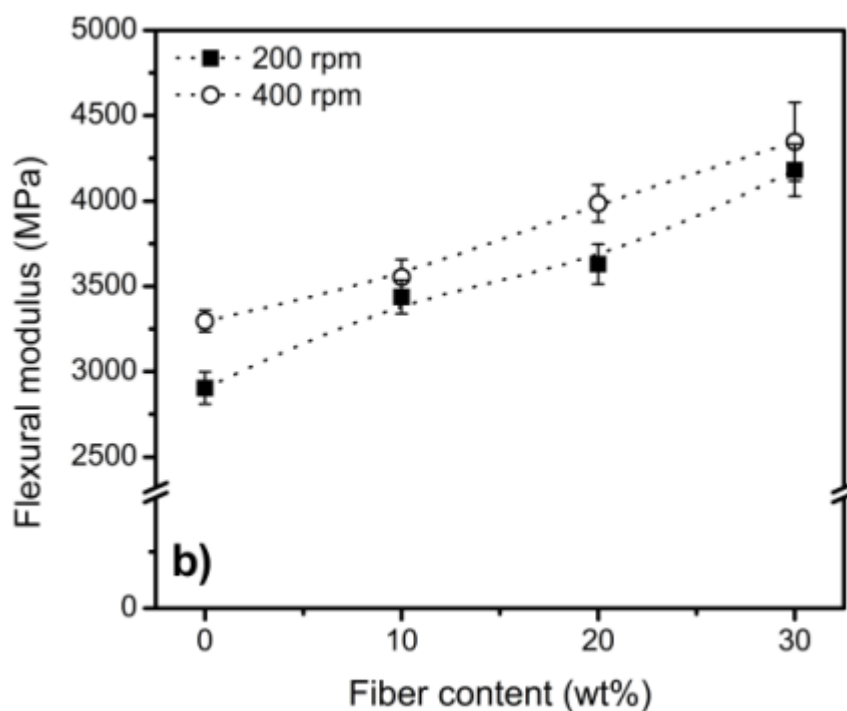


図 2-35 曲げ弾性率について

破断ひずみに対しては、図 2-36 に示すように、繊維含有量の増加に伴って破断ひずみが減少した。また、スクリュ速度の上昇は、複合材料の破断時の歪みを増加させた。

この結果は、スクリュ速度を上げると、ポリスチレンマトリックスへセルローズ繊維の分散が増加したことを示している可能性がある。さらに、繊維含有量の増加はポリマー分子移動性を制限し、剛性の増加につながり、複合材料をより脆くし、繊維負荷で破断ひずみを軽減する可能性があると報告している。

衝撃強度に対しては、図 2-37 に示すように、400rpm で押し出された複合材料に対して、より良い結果が得られた。これは、ねじ速度を使用して繊維のより良い分散が生じた可能性があると考えしている。しかし、セルローズ繊維含有量が高いサンプルについては、衝撃強度の低下が見られたこれは、セルローズ繊維の濃度が上がるにつれ、マトリックスの分子移動度を低下させ、衝撃時のエネルギー吸収を低減させたと考察している。

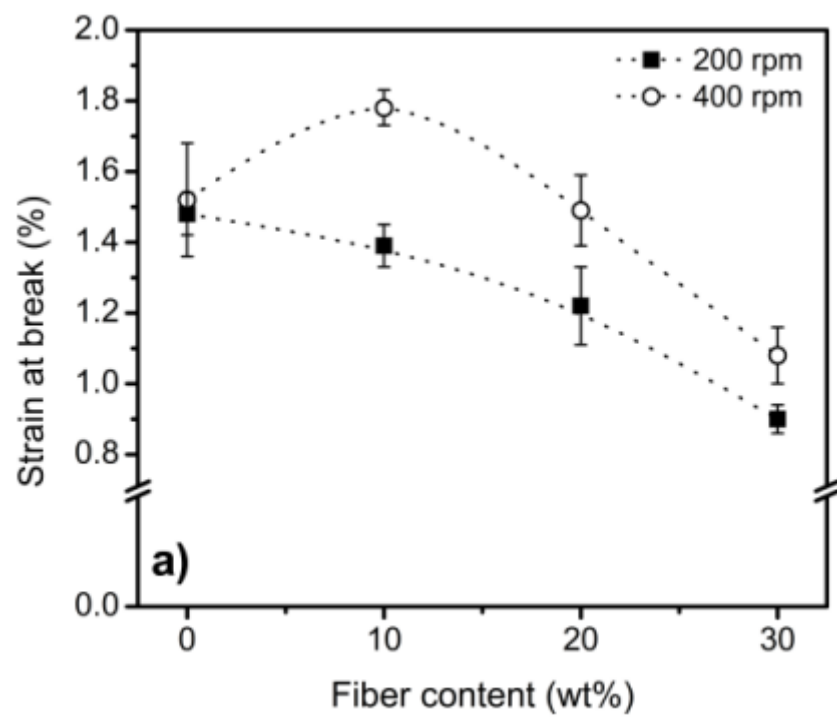


図 2-36 破断ひずみについて

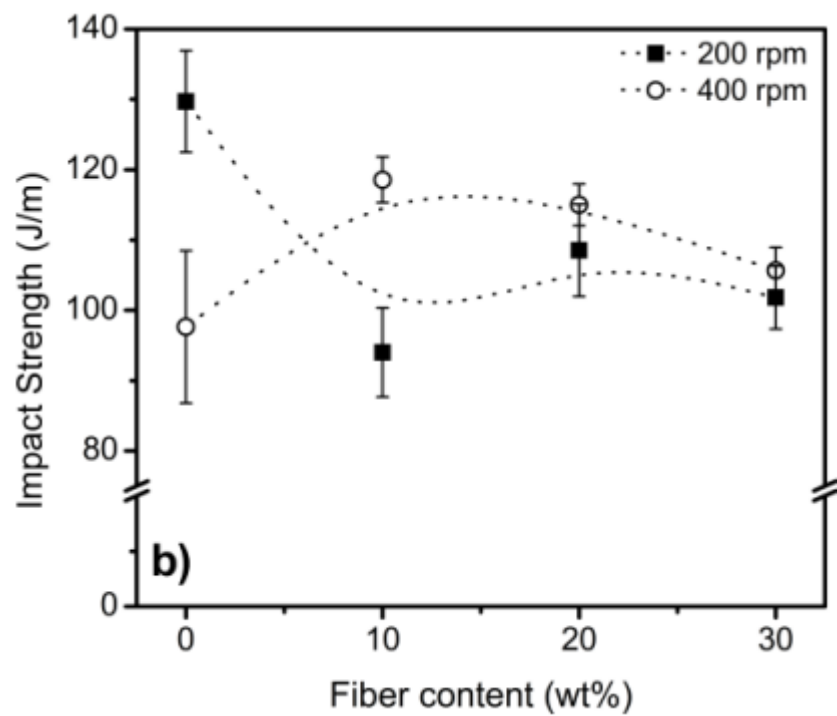


図 2-37 衝撃強度について

機械特性評価結果を踏まえ、Matheus はセルロース繊維複合材料の機械的特性メカニズムを検証するために、成形機のスクリュ速度 200rpm および 400rpm で処理されたセルロース繊維を 20 重量%有するサンプルに於いて SEM 顕微鏡写真(倍率：200 倍)を用いてサンプル表面を観察している。その結果を図 2-38 に示す。成形機のスクリュ速度 200rpm で処理された複合材料に対するセルロース繊維凝集の存在は、SEM 顕微鏡写真において明らかであり、これは、200rpm のスクリュ速度がセルロース繊維凝集体を分解するのにそれほど効果的ではないことを示しており、400rpm で処理されたものと比較すると曲げ特性が低くなった原因であると考察している。スクリュ速度を 400rpm に上げると平均せん断速度が上昇し、分散混合が向上し、複合溶融物中のセルロース繊維の均一な分散に役立ち、図 2-34、図 2-35 で示したような結果に至ったと考察している。400rpm で処理したセルロース繊維複合材料(サンプル)の曲げ強度は、200rpm で処理されたものより約 30%高くなっている。セルロース繊維は、隣接する繊維間の分子間水素結合の結果として凝集体を形成する傾向がある⁷⁾。凝集体の存在は、200rpm で処理されるサンプルに於いて図 2-34、図 2-35、図 2-36、図 2-37 で示したように、セルロース繊維複合材料の機械的特性を低減させ、疎水性ポリマーマトリックス(ポリスチレン)とセルロース繊維間の非適合性を促進する⁵⁾⁶⁾。

スクリュ速度が上昇すると、押出過程によって引き起こされるより高いせん断速度の結果として繊維破損が起こり、機械的特性が低下すると予想される文献報告がある⁶⁾⁷⁾。しかしながら、スクリュ速度が上がったときに得られるせん断速度が高いほど、マトリックスへの繊維分散性の向上を促進し、繊維長の減少を促進されることは、おそらく凝集体の数とサイズの両方を減少させることができる⁶⁾との報告もある。

図 2-38 に示されるように。セルロース繊維凝集体の数とサイズの減少は、繊維とマトリックスの相互作用を増加させ、400rpm で処理される複合材料の機械的特性を高める可能性があり、さらに、より高いスクリュ速度は、セルロース繊維の長さを減少させる繊維破損を促進し、繊維表面領域を増加させ、マトリックス(ポリスチレン)⁷⁾との接触を大きくし、機械的特性の向上に寄与する可能性がある。しかし、スクリュ速度がさらに 600rpm に上昇した場合、複合材料は著しく劣化し、その結果はこの研究では示されなかった。その理由は、スクリュ速度の上昇によってせん断加熱も増加し、溶融温度が高くなる⁷⁾。セルロース繊維とポリスチレンは温度感受性材料であるため、スクリュ速度が 600rpm に上がると、両方の材料が高温で劣化することがある。

Matheus は、600rpm で処理されたサンプルも作成したが、押出中に外観が黒くなっていることが観察され、そのために、これらのサンプルは機械的および動的機械的特性の研究から無視されたとの報告している。

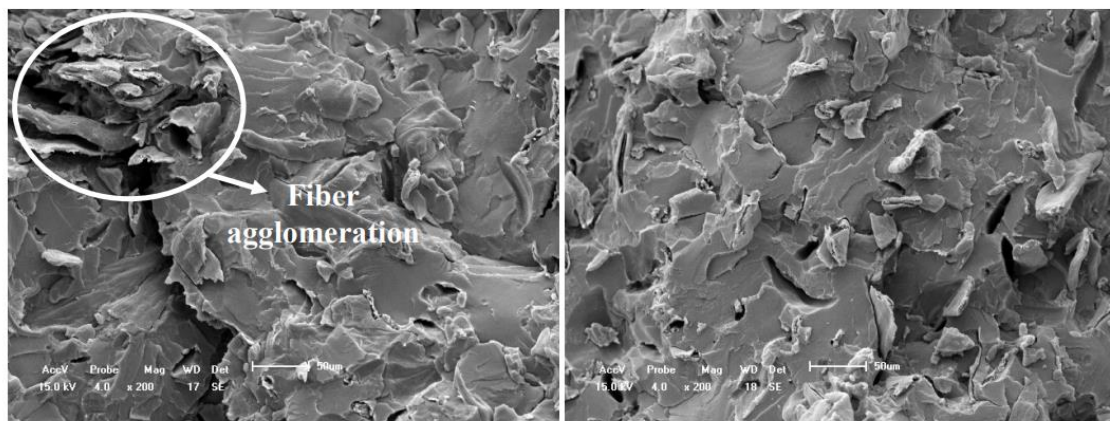


図 2-38 表面観察写真

(iii)まとめ

CNF とポリスチレン樹脂の複合化材料の機械特性に影響を与える因子について知見を得ることができた。

2.1.4. 結言

(i) CeF 複合再生 PP については、商品適用に向けた取組みと成果は下記の通りである。

- 各 CeF 素材の形状特性を観察し、複合化物性との関連を把握した。
- CeF 再生 PP+CeF 複合化については、コスト低減と物性維持(曲げ弾性率・シャルピー衝撃強度)の両立の実現を量産機検証にて実現できた。
- 再生 PP+CeF については、コスト目標 500 円/kg 以下に対し、300 円/kg を達成できた。
- スティック掃除機成形試作品(CeF 複合再生 PPCeF 複合樹脂)での外観異物の改善を実施。昨年評価時に比べ、大きさ、個数共に改善。異物分析実施し要因を把握(再生材起因の異物のみ)した。
- スティック掃除機以外の適用商品について、冷蔵庫部品について CeF 複合再生 PPCeF 複合樹脂により 1 部品の成形試作を実施し、成形性・外観等を検証した。

(ii) CeF 複合再生 PS については、取組みと成果は下記の通りである。

- PS(HIPS)への CeF 複合化は、バージン PS の物性の 91%を保持できる複合化条件を達成した。再生 PS(複合化なし)の物性に対して CeF 複合化樹脂の物性が向上できた。量産混練機での検証を実施し、コンパウンディング量産課題を抽出した。
- 再生 PS +CeF は、コスト 300 円/kg 達成見込みである。
- スティック掃除機以外の適用商品について、冷蔵庫部品について再生 PS+CeF 複合樹脂により 1 部品の成形試作を実施し、成形性・外観等を検証した。

2.2. 選別工程の開発

2.2.1. 緒言

CeF を複合した樹脂の普及が進み、利用量の拡大にともない、現在の資源循環システムへ影響を与えないかが大きな課題となる。特に家電 4 品目を対象とした家電リサイクル法¹⁾に則ったシステムでの対策が必要である。

一般的に使用済みとなった廃家電は回収され、家電リサイクル工場にて、「解体～破碎～選別～加工」の流れでリサイクルされる。破碎工程にて破碎し、粉々になった家電から、次工程である選別工程の上流で磁力選別や渦電流選別などでまず金属を回収する。その結果、図 2-39 に示すように、家電に多く用いられている樹脂であるポリプロピレン(PP)、ポリスチレン(PS)、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン(ABS)などの複数の樹脂種が混在したミックスプラスチックが発生する。ミックスプラスチックをリサイクルし、再び原材料として活用するには同じく選別工程で、単一の樹脂種別に選別することが必要である。



図 2-39 ミックスプラスチック

現在、リサイクル工場における樹脂の選別工法においては、比重選別と近赤外線選別の大きく 2 つの選別工法が主流となっている。比重選別においては、主に水(比重 1.0)を媒体して水に浮く PP(比重：約 0.9)を回収し、水に沈んだ PS(比重：約 1.04)と ABS(比重：約 1.05-1.07)を比重調整した塩水でさらに分離回収する工法である。また、近赤外線選別においては、樹脂の分子構造の差

異によって生じる波長帯域ごとの光吸収強度から樹脂種を判別し、樹脂種毎にエアノズルから吹き出すエアジェットで吹き落として回収する工法である。CeF 複合樹脂においては、CeF(比重：約 1.3-1.5)の含有濃度によって比重が大きく変動することが予想される。そのため、CeF 複合樹脂の選別工法としては、原理的可能性から近赤外線選別が期待される。図 2-40 に、現在家電リサイクル工場で稼働している、近赤外線樹脂選別機の外観を示す。



図 2-40 近赤外線樹脂選別機外観写真

本実証では家電へ適用を考えている現時点での CeF 想定含有濃度である 15%程度の複合再生樹脂について、選別装置の量産に必要な生産性を確保するため、3m/s の高速搬送下において、回収率 60%以上、純度 80%以上を目標に取り組む。

本節では CeF 複合樹脂の近赤外線選別工法開発のための本実証における取り組みについて説明する。

2.2.2. アプローチ

2.2.2.1. アプローチ(全体)

本実証では 1 章に示す通り、家電製品(空調機器等)の中で、機能性が高い ABS の代替化をターゲットに、CeF を複合した再生 PP もしくは再生 PS の選別工法の開発に取り組む。

CeF は事前実験より 1.9 μ m および 2.1 μ m 付近に吸光ピークを持つことがわかっていて、そのためそれら波長を包含する波長帯域を持つ近赤外線センサー、具体的にはハイパースペクトルカメラ(以下、HSC)を用いることで母材である樹脂特有の吸光ピークと、CeF 特有の吸光ピークを測定し、樹脂種および CeF の含有有無の選別を想定している。

また本実証では図 1-1 のようにバージン材に CeF を複合させることに加え、再生樹脂に CeF を複合した CeF 複合再生樹脂や、CeF 複合樹脂を再生する再生 CeF 複合樹脂の家電適用を目論んでいる。

そのために本実証では、3m/s の高速搬送下において、CeF 複合樹脂(含有濃度 15%)が混在するミックスプラスチックから所望の樹脂種を、回収率 60%以上、純度 80%以上の選別性能で選別することを最終目標に置いている。

本実証に各年度の大まかな予定は下記のとおりである。

令和元年度：CeF を複合した樹脂サンプル片を近赤外線分光器で測定し、選別性の基礎評価を実施する。

令和 2 年度：バージン材に CeF を複合したサンプルに加え、再生材に CeF を複合したサンプルの判別用データベースを構築し、判別評価を実施する。加えて HSC を用いることで、3m/s での高速搬送下での判別工法を開発する。

令和 3 年度：CeF を 15%程度複合した再生樹脂の選別工法の開発および実証による目標達成
(搬送速度 3m/s において回収率 60%以上、純度 80%以上)

令和 2 年度の取組みにおいては、ハイパースペクトルカメラを用いて、3m/s での高速搬送下での判別評価を実施した。

具体的には、内製の判別シミュレーションを用いて純度・回収率を算出し、ハイパースペクトルカメラにおいて高速搬送下での判定で純度 80%以上、回収率 60%以上を達成した。

また以下 2 点が課題であることが分かった。

- i) 5～10%程度の低濃度での判別精度向上および可能性の見極め
- ii) 色味の影響を考慮した判定精度の向上および可能性の見極め
- iii) PS、ABSにおける判定精度の向上および可能性の見極め

2.2.2.2. アプローチ(令和 3 年度)

1) 選別検証準備

昨年度は、ベルトコンベアを用いた高速搬送下での判別検証を行った。そこでは、搬送中にコンベア上で転がる等によるイレギュラーな現象が発生することを懸念し、再現性の確保のため、縦横比が安定している図 2-41 に示すような 50mm 角、厚さ 2mm のサンプルプレート新たに作製し、検証を実施した。

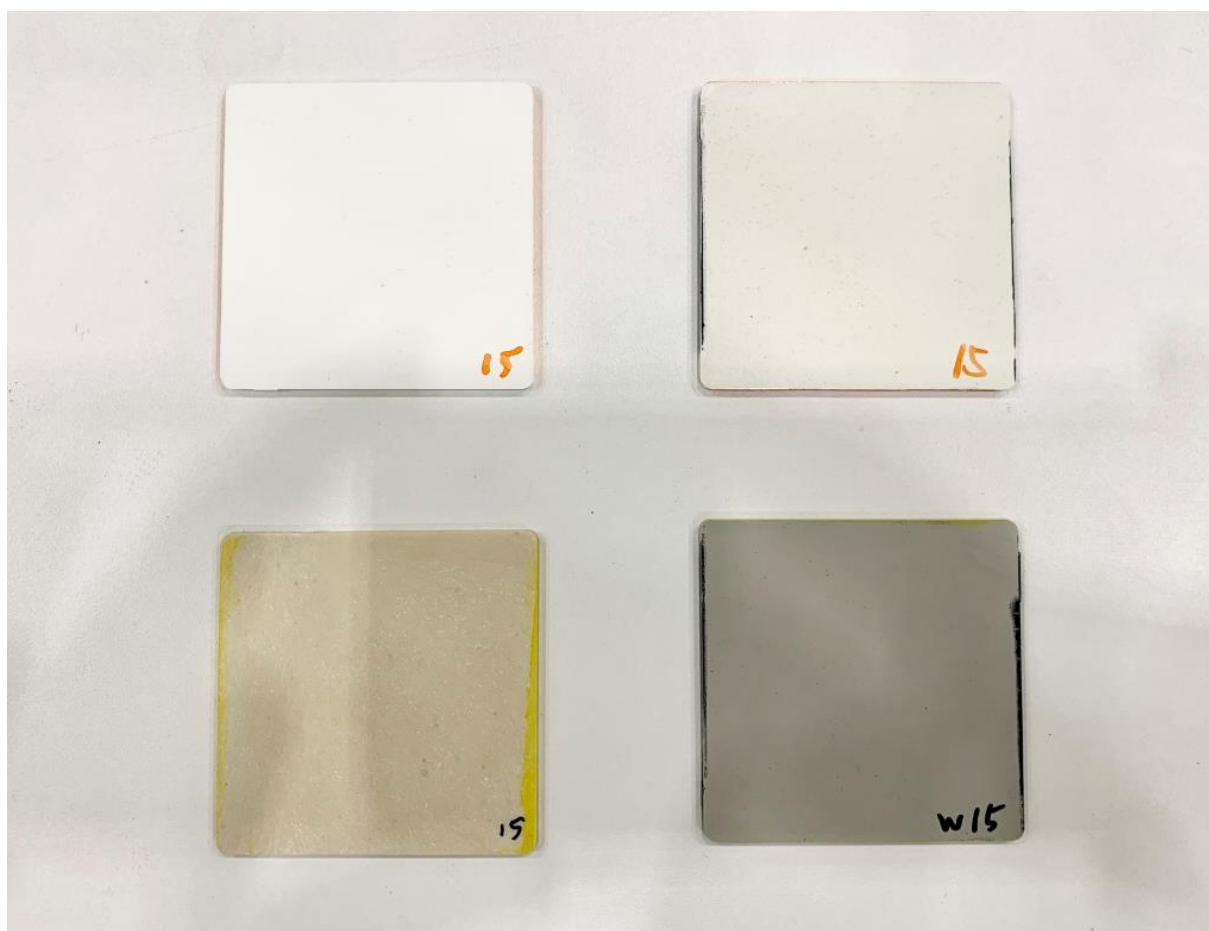


図 2-41 高速搬送下での検証用サンプルプレート(令和 2 年度)

今年度は、量産ラインへの導入を想定するため、実工場での実態に則した、より小さい図 2-42 に示すような 30mm 角、厚さ 2mm のサンプルを選別用サンプルとして使用した。

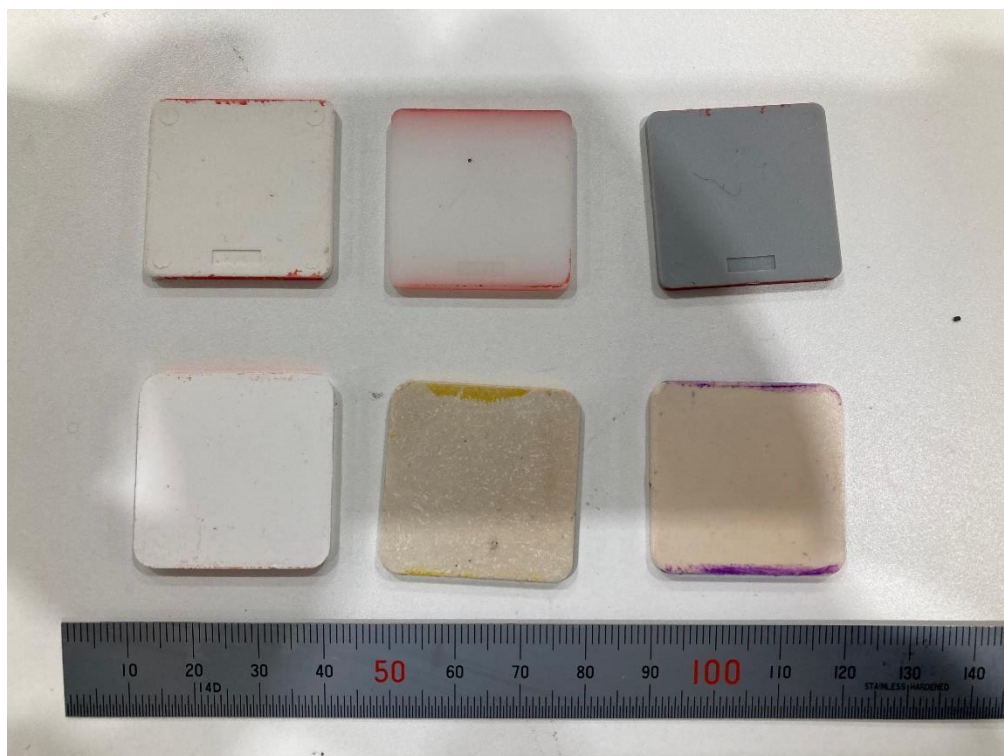


図 2-42 高速搬送下での検証用サンプルプレート(令和 3 年度)

なお、サンプルの種類としては、これまでの実証においても使用した、バージン樹脂(新材 100%)およびバージン樹脂に CeF を 15%程度複合した樹脂(新材+CeF15%)、樹脂再生材に CeF を複合した樹脂である。樹脂サンプルの条件を表 2-34 に、今回使用したサンプルのリストを表 2-35 に示す。

表 2-34 樹脂サンプル条件一覧

項目	条件
母材	PP,PS,ABS
	新材、再生材
CeF 有無	なし、あり(15%)
色	白色、ナチュラル色、灰色

表 2-35 高速搬送下での検証用サンプルリスト

母材	新材 or 再生材	CeF 有無(濃度)	色味	サンプル名
PP	新材	なし	白色	PPV-w
			ナチュラル色	PPV-n
			灰色	PPV-g
		あり (15%)	白色	PPV-CeF15-w
			ナチュラル色	PPV-CeF15-n
			灰色	PPV-CeF15-g
	再生材	なし	白色	PPRe-w
			ナチュラル色	PPRe-n
			灰色	PPRe-g
		あり (15%)	白色	PPRe-CeF15-w
			ナチュラル色	PPRe-CeF15-n
			灰色	PPRe-CeF15-g
PS	新材	なし	白色	PSV-w
			ナチュラル色	PSV-n
			灰色	PSV-g
		あり (15%)	白色	PSV-CeF15-w
			ナチュラル色	PSV-CeF15-n
			灰色	PSV-CeF15-g
	再生材	なし	白色	PSRe-w
			ナチュラル色	PSRe-n
			灰色	PSRe-g
		あり (15%)	白色	PSRe-CeF15-w
			ナチュラル色	PSRe-CeF15-n
			灰色	PSRe-CeF15-g
ABS	新材	なし	白色	ABSV-w
			ナチュラル色	ABSV-n
			灰色	ABSV-g
		あり (15%)	白色	ABSV-CeF15-w

			ナチュラル色	ABSV-CeF15-n
			灰色	ABSV-CeF15-g

また検証には昨年度選定した、必要十分な検出波長帯域を持ち、広範囲の検出領域かつ量産と同レベルの高速検出が可能なハイパースペクトルカメラを引き続き使用した。

本検証で用いたハイパースペクトルカメラは以下の通りである。

- ハイパースペクトルカメラ
機器名：ハイパースペクトルカメラ(以下 HSC)
検出方式：ラインセンサー方式
測定波長範囲：約 1.4～2.1 μ m
ラインレート：約 800fps (最大)

次に、上記 HSC を図 2-43 に示すような量産検証用選別装置へ設置して使用した。設置の場所としては、図 2-43 の「近赤外線センサー」の位置にこれまで使用していた近赤外線センサーと置き換える形で設置した。なお、この量産用選別検証機はベルトコンベアで約 3m/s の高速で樹脂を搬送でき、検出部で検出したスペクトルデータをもとに樹脂種を判定し、判定した結果を元に射落し部に設けたエアノズルユニットにて樹脂を射落して回収することが可能である。

昨年度の検証により、HSC の判別機能の検証を実施したため、今年度は判別したサンプルの射落としによる吹き分け選別を含むトータルでの選別検証を行う。

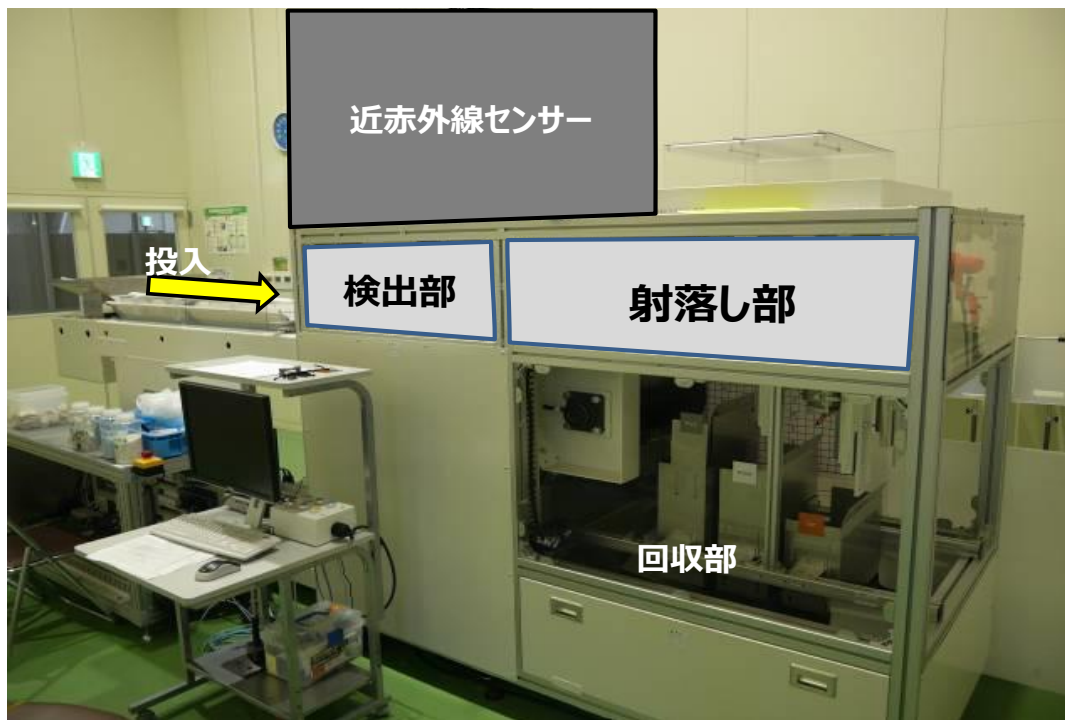


図 2-43 量産検証用選別装置

2) 選別検証(切り分け検証)

1)にて作成したサンプルを使用し、図 2-43 の選別装置を用いて搬送速度 3m/s にて選別検証を行う。ここではベルトコンベア上での樹脂サンプル同士の重なりなどによる選別精度悪化の要因を排除するため、サンプルを 1 枚 1 枚ベルトコンベア上へ投入し、選別検証を実施する。検証の結果として回収率および純度を算出する。

本取組みの結果を 2.2.3.2 で報告する。

3) 選別検証(量産相当検証)

ここでは、実際にリサイクル工場で稼働している量産機と同等の投入速度(単位：kg/h)にて選別検証を実施する。

弊社量産機はコンベア幅 700mm において 500kg/h であり、今回用いる検証用選別装置はコンベア幅が 250mm であるため、約 180kg/h の投入速度にて選別検証を実施する。検証の結果として回収率および純度を算出する。

本取組みの結果を 2.2.3.3 で報告する。

4) CeF 濃度判別検証

昨年度の取組みにて、CeF 濃度別のスペクトルから定性的な評価を実施した。本年度は、バージン材および再生材に CeF をそれぞれ 0%、5%、10%、15% 複合した試験片を用いて、量産検証用選別装置にて濃度毎の判別が可能かを評価した。本検証においては、図 2-44～図 2-49 に示すように PP と PS それぞれの母材で試作し、判別評価を行った。

なお、濃度判別の検証方法としては、表 2-36 に示すように CeF 濃度判別用データベースを構築し、量産検証用選別装置に搭載しているハイパースペクトルカメラで図 2-44～図 2-49 の各試験片からの取得波形とデータベースとの一致度を比較した。



図 2-44 バージン材 PP(CeF0%、5%、10%、15%)試験片

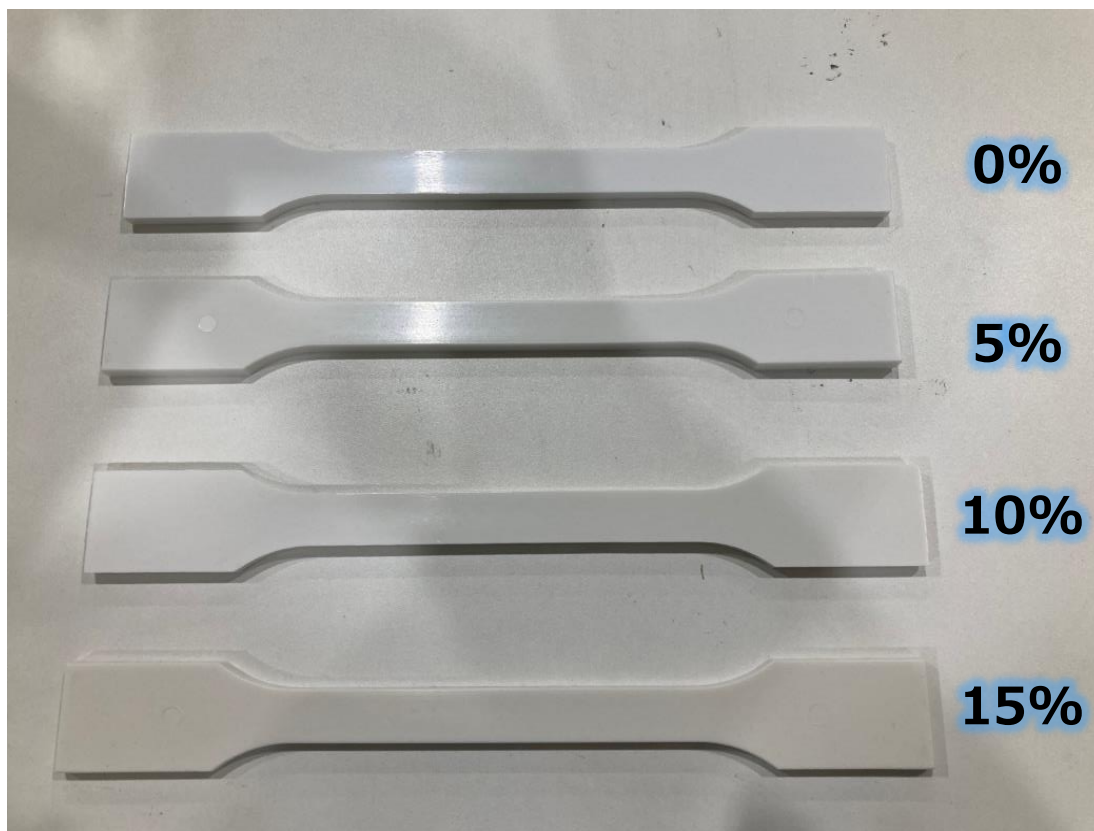


図 2-45 手解体由来 再生材 PP(CeF0%、5%、10%、15%)試験片



図 2-46 機械破碎由来 再生材 PP(CeF0%、5%、10%、15%)試験片



図 2-47 バージン材 PS(CeF0%、5%、10%、15%)試験片



図 2-48 手解体由来 再生材 PS(CeF0%、5%、10%、15%)試験片



図 2-49 機械破碎由来 再生材 PS(CeF0%、5%、10%、15%)試験片

表 2-36 CeF 濃度判別用データベースリスト

サンプル名	”ベース母材”+”CeF 添加量”	色味
PPV-w	新材 PP	白色
PPV-n	新材 PP	ナチュラル色
PPV-g	新材 PP	灰色
PPV-CeF5-w	(新材 PP) +CeF5%	白色
PPV-CeF5-n	(新材 PP) +CeF5%	ナチュラル色
PPV-CeF5-g	(新材 PP) +CeF5%	灰色
PPV-CeF10-w	(新材 PP) +CeF10%	白色
PPV-CeF10-n	(新材 PP) +CeF10%	ナチュラル色
PPV-CeF10-g	(新材 PP) +CeF10%	灰色
PPRe-w	(再生 PP100%)	白色
PPRe-n	(再生 PP100%)	ナチュラル色
PPRe-g	(再生 PP100%)	灰色
PSV-w	新材 PS	白色
PSV-n	新材 PS	ナチュラル色
PSV-g	新材 PS	灰色
PSV-CeF5-w	(新材 PS) +CeF5%	白色
PSV-CeF5-n	(新材 PS) +CeF5%	ナチュラル色
PSV-CeF5-g	(新材 PS) +CeF5%	灰色
PSV-CeF10-w	(新材 PS) +CeF10%	白色
PSV-CeF10-n	(新材 PS) +CeF10%	ナチュラル色
PSV-CeF10-g	(新材 PS) +CeF10%	灰色
PSRe-w	(再生 PS100%)	白色
PSRe-n	(再生 PS100%)	ナチュラル色
PSRe-g	(再生 PS100%)	灰色

5) 色味による影響評価

CeF 複合樹脂を繰り返し成形していくと、図 2-50 のように熱履歴によって茶変していく。この茶変による濃色化が近赤外線での判別にどのような影響が見られるかを確認した。

また、この色味の変化に対して外観の統一性を持たせるため、リサイクル時に黒色系へ着色することを想定し、黒色顔料による判別への影響を評価した。従来、黒色顔料として多く使用されているのはカーボンブラックが含有された顔料である。しかしながら、カーボンブラックは可視光だけでなく近赤外光も吸収してしまうため、樹脂からの反射スペクトルが大きく減衰し、樹脂の判別が困難となる課題があった。そこで、今回近赤外帯域での光吸収の影響が少ない黒色顔料として、新たに Torrecid 社製の黒色顔料を使用して図 2-51 に示すような試験片を作成し、判別評価を実施した。



図 2-50 繰り返し成形による色味の変化



図 2-51 黒色顔料を用いた判別評価用試験片

2.2.3. 取組み結果

2.2.3.1. 選別検証準備

表 2-35 で示したサンプルから選別検証用に各種サンプルを配合させた、ミックスサンプルを作成した。なお、表 2-35 の樹脂は実際のリサイクル工場ではすべてが同比率で混在している訳ではないため、純度・回収率を算出するにあたり、表 2-37 の条件でサンプルごとの混在比を重みづけした。

表 2-37 サンプル配合条件

項目	条件	比率
母材	PP : ABS : PS	1 : 1 : 1
色	白 : ナチュラル : 灰色	7 : 2 : 1
CeF 有無	CeF 無 : CeF 有	9 : 1
再生材 (PP,PS のみ)	新材 : 再生材	9 : 1

この条件により、各サンプルを表 2-38 の枚数ずつ配合し図 2-52 のようなミックスサンプルを作成した。

表 2-38 ミックスサンプル配合枚数

サンプル名	枚数	サンプル名	枚数
PP-w	567	ABSV-CeF15-w	70
PP-n	162	ABSV-CeF15-n	20
PP-g	81	ABSV-CeF15-g	10
PPRe-w	63	PS-w	567
PPRe-n	18	PS-n	162
PPRe-g	9	PS-g	81
PPV-CeF15-w	63	PSRe-w	63
PPV-CeF15-n	18	PSRe-n	18
PPV-CeF15-g	9	PSRe-g	9
PPRe-CeF15-w	7	PSV-CeF15-w	63
PPRe-CeF15-n	2	PSV-CeF15-n	18
PPRe-CeF15-g	1	PSV-CeF15-g	9
ABS-w	630	PSRe-CeF15-w	7
ABS-n	180	PSRe-CeF15-n	2
ABS-g	90	PSRe-CeF15-g	1



図 2-52 選別検証用ミックスサンプル

またエアノズルによる射落としの検証のため、HSCで検出した樹脂サンプルをコンベア端からの飛翔後、タイミングよく射落とすために、HSCによる検出と射落としのタイミング調整を実施した。調整の結果、今回選定した HSC でも、弊社内部基準を達成する結果となり、選別検証の準備が整った。以下、2.2.3.2、2.2.3.3 にて選別結果を示す。

2.2.3.2. 選別検証(切り分け検証)

2.2.3.1 にて準備した樹脂サンプルを選別検証機の投入口から 1 枚ずつ投入し、すべてのサンプルを流し切った後、回収ボックスに回収されたサンプルを集計し、純度および回収率を算出した。ここで純度および回収率の定義について、以下、選別検証機の模式図に即して説明する。

図 2-53 は選別検証機の射落とし部を説明するための模式図である。弊社選別機はノズルが 1 連目～3 連目のノズルを搭載しているため、1 回のプロセスで回収 BOX1～4 までで 3 種類へ選別回収することができる(うち回収 BOX4 は残渣であるため)。

例えば回収 BOX1 へ CeF-PP、回収 BOX2 へ PP、回収 BOX3 へ PS を選別回収することを考える。

CeF-PP の純度は回収 BOX1 に回収された樹脂サンプル全てを分母とし、そのうち CeF-PP の樹脂サンプルを分子とする、百分率にて算出する。一方 CeF-PP の回収率は回収 BOX1～4 で回収されたすべての CeF-PP の樹脂サンプル(つまりあらかじめ用意した CeF-PP の樹脂サンプルと同数である)を分母とし、回収 BOX1 で回収された CeF-PP の樹脂サンプルを分子とする、百分率にて算出する。

回収 BOX2、3 についても同様である。

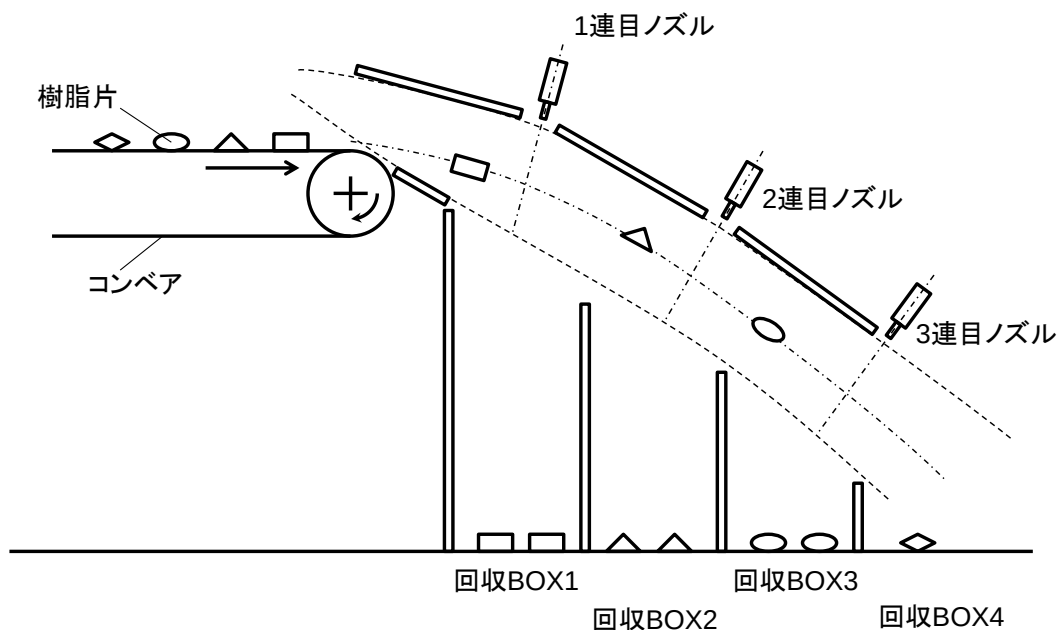


図 2-53 選別検証機射落とし部模式図

ここから選別結果について記載する。

前述のとおり、選別検証機は一度に 3 種の樹脂種を選別できる。選別すべき樹脂種は大きく分けて、PP、CeF-PP、PS、CeF-PS、ABS、CeF-ABS の 6 種類であるため、ここでは 3 種ずつ 2 回の選別検証を実施し、計 6 種を選別回収する検証を行う。

選別回収する樹脂種は表 2-39 のとおりである。

表 2-39 各回収 BOX へ選別回収する樹脂種

	回収 BOX1	回収 BOX2	回収 BOX3
条件 1	CeF-PP	PP	PS
条件 2	CeF-PS	CeF-ABS	ABS

それぞれ条件 1、条件 2 の選別結果をそれぞれ表 2-40、表 2-41 へ示す。

表 2-40 選別結果(条件 1)

	CeF-PP	PP	PS
純度 (≥ 80%)	100%	98.9%	97.8%
回収率(≥ 60%)	92.3%	97.8%	96.7%

表 2-41 選別結果(条件 2)

	CeF-PS	CeF-ABS	ABS
純度 (≥ 80%)	100%	90.0%	98.7%
回収率(≥ 60%)	91.7%	90.0%	87.5%

以上の結果より、すべての CeF 複合樹脂を含む樹脂種の選別純度および回収率の目標値を達成した。(目標純度：80%以上、目標回収率：60%以上)

しかし、本選別装置をリサイクル工場にて実運用を行うには、投入速度を上げることによって生産性を向上させることは必須である。そのため、2.2.3.3 にて、量産相当の投入速度における検証結果を示す。

2.2.3.3. 選別検証(量産相当検証)

2.2.2.2 の 3)で示した通り、弊社量産機の標準仕様はコンベア幅 700mm において 500kg/h であるため、今回用いるコンベア幅が 250mm の検証用選別装置において、約 180kg/h の投入速度とすることで量産相当の投入速度を再現可能である。

今回表 2-38 にて作成したミックスサンプルの重量は約 5.8kg であった。これを上述の 180kg/h で投入するには 117 秒で全サンプルを投入することで実現できる。

上記条件において選別表を実施した結果が表 2-42 である。

表 2-42 選別結果(量産相当)

	CeF-PP	PP	PS
純度 (≥ 80%)	90.9%	98.7%	87.2%
回収率(≥ 60%)	83.3%	83.3%	73.9%

以上のとおり、量産相当の投入速度においても、選別純度および回収率の目標値を達成した。(目標純度：80%以上、目標回収率：60%以上)

以上の取組みから、HSC を使用することで、CeF を含む樹脂の選別回収を可能な性能と、従来センサー比約 40%削減したセンサーコストを両立することが可能となった。

2.2.3.4. CeF 濃度判別検証

図 2-44～図 2-46 で示した PP の試験片の濃度判別検証結果を表 2-43 に示す。表 2-43 は縦の項目が各試験片となっており、それぞれどの濃度に判定されたかを示している。表記の記号としては、最も一致度が高い濃度を”○”、その次に一致度が高い濃度を”△”、それ以外で誤判定されているものを”×”としている。正しく判定される場合は、黄色に塗られた枠に”○”が表記される。

表 2-43 の結果を見ると、まず、バージン材では CeF 濃度 5%が誤判定している。次に手解体由来の再生材では、どの濃度でも正常に判定が確認できた。また、機械破砕由来の再生材では CeF 濃度 10%が第 2 位判定となった。

それぞれの判定結果の要因について、試験片の近赤外スペクトルを踏まえて以下に考察する。まず、バージン材で CeF 濃度 5%が誤判定した要因であるが、半透明色で全体的に反射強度が低いことに加え、図 2-54 に示すように CeF 特有のピークが微弱であったためと考えられる。CeF の含有によって 1.45 μ m や 1.95 μ m、2.1 μ m 付近に CeF 特有のピークが見られるが、CeF 濃度が低くピークが容易に確認できないため、近傍の濃度と誤判定したものと考えられる。

また、手解体由来の再生材で、どの濃度でも正常に判定が確認できた要因としては、樹脂の色味が白色で反射強度が高く、図 2-55 に示すように CeF 特有のピークも判別が可能であったと考えられる。最後に、機械破砕由来の再生材で CeF 濃度 10%が第 2 位判定となった要因としては、樹脂の色味が灰色(濃色)で反射強度が低く、図 2-56 に示すように CeF 濃度 10%における CeF 特有のピークが微弱であったためと考えられる。

表 2-43 CeF 濃度判別検証結果(PP)

	バージンPS+CeF n%				再生PS+CeF n% ※手解体				再生PS+CeF n% ※破碎			
濃度判定	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
CeF 0%	○	△			△				○	○		
CeF 5%	△	○	△		○	○				×	○	
CeF 10%			○	△		△	○	△	△	△	×	△
CeF 15%				○			△	○			△	○

○ : 1位判定、△ : 2位判定、× : 誤判定

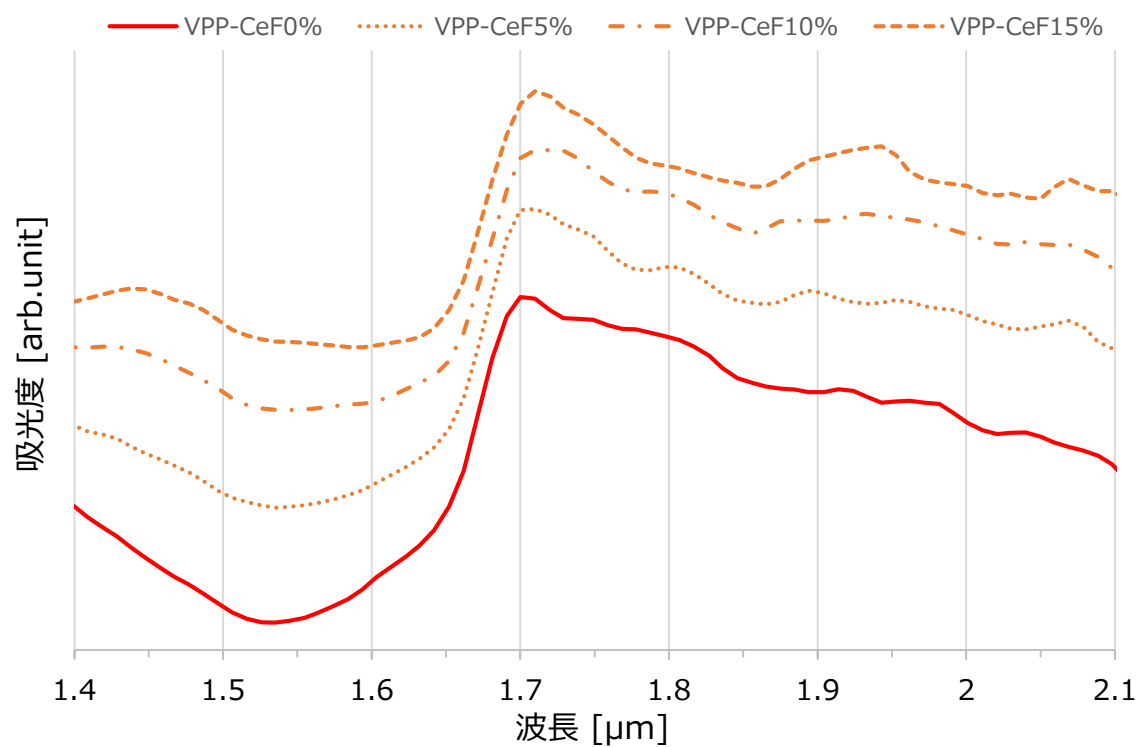


図 2-54 バージン材 PP(CeF0%、5%、10%、15%)スペクトル

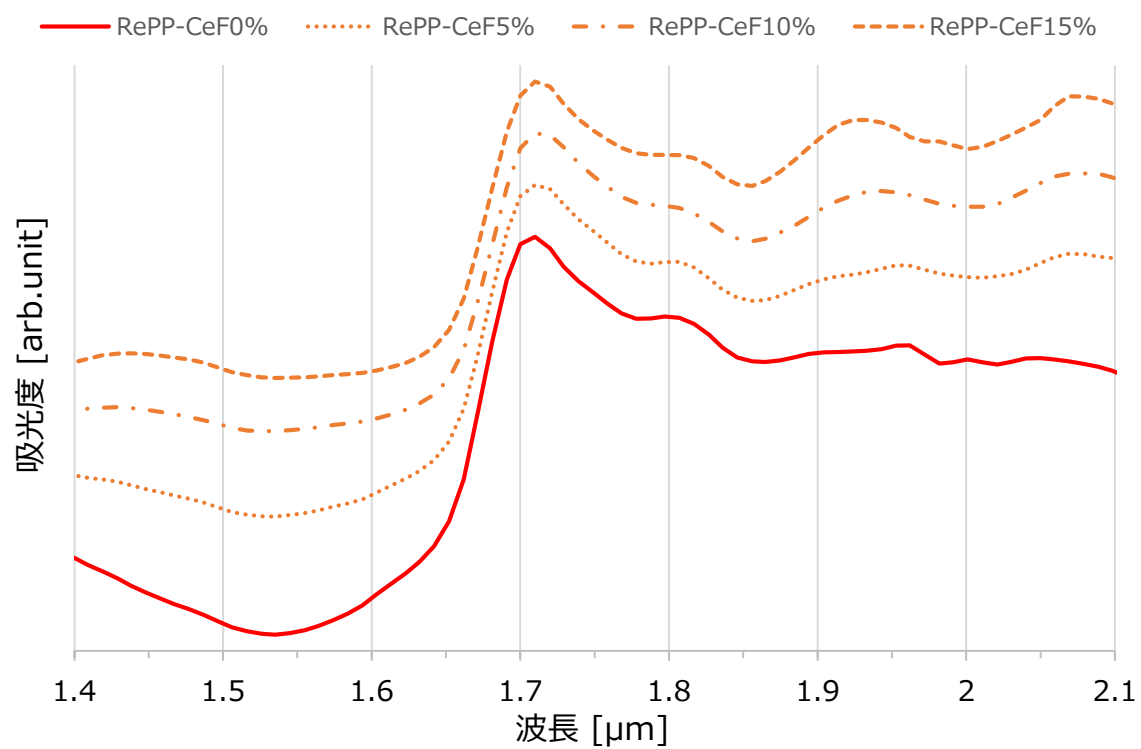


図 2-55 手解体由来 再生材 PP(CeF0%、5%、10%、15%)スペクトル

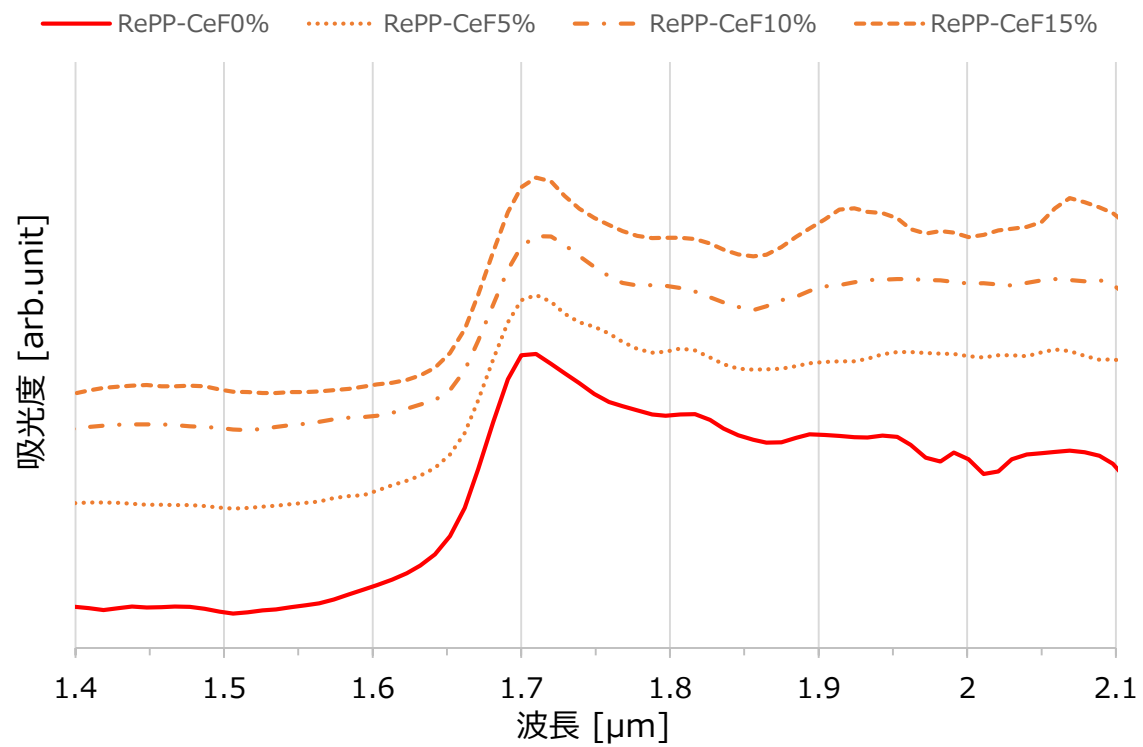


図 2-56 機械破碎由来 再生材 PP(CeF0%、5%、10%、15%)スペクトル

続いて、PPと同様に図 2-47～図 2-49 で示した PS の試験片の濃度判別検証結果を表 2-44 に示す。表 2-44 の結果を見ると、まず、バージン材ではどの濃度でも正常に判定が確認できた。次に手解体由来の再生材では、CeF 濃度 0% が第 2 位判定となった。また、機械破砕由来の再生材では CeF 濃度 5% および 10% が誤判定する結果となった。

それぞれの判定結果の要因について、試験片の近赤外スペクトルを踏まえて以下に考察する。まず、バージン材でどの濃度でも正常に判定が確認できた要因としては、図 2-57 に示すように白色と同程度の反射強度が得られたためであると考ええる。また、手解体由来の再生材で CeF 濃度 0% が第 2 位判定となった要因としては、図 2-58 に示すように全体的な反射強度としては高い一方で CeF 濃度 0% と CeF 濃度 5% での差異が僅かであったためと考えられる。最後に、機械破砕由来の再生材で CeF 濃度 5% および 10% が誤判定した要因としては、PP と同様に樹脂の色味が灰色(濃色)で反射強度が低く、図 2-59 に示すように CeF 濃度 5% および 10% で CeF 特有のピークがほぼ見られなかったためと考えられる。

表 2-44 CeF 濃度判別検証結果(PS)

	バージンPS+CeF n%				再生PS+CeF n% ※手解体				再生PS+CeF n% ※破碎			
濃度判定	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
CeF 0%	○	△			△				○	○		
CeF 5%	△	○	△		○	○				×	○	
CeF 10%			○	△		△	○	△	△	△	×	△
CeF 15%				○			△	○			△	○

○ : 1位判定、△ : 2位判定、× : 誤判定

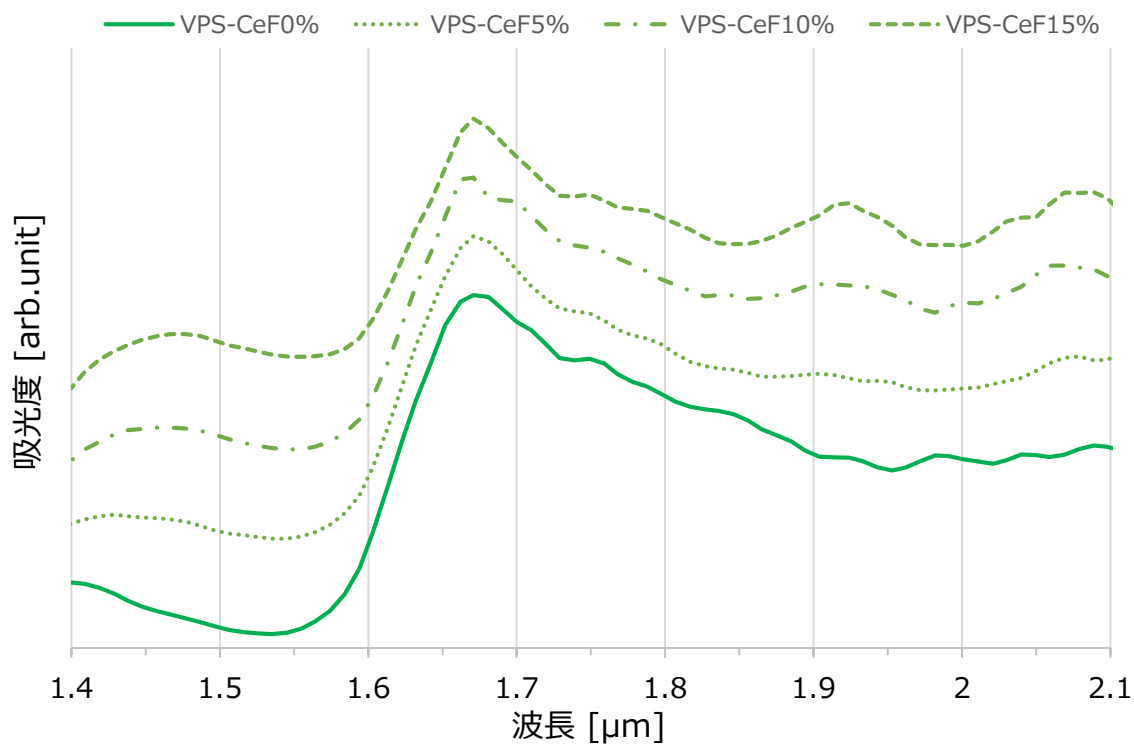


図 2-57 バージン材 PS(CeF0%、5%、10%、15%)スペクトル

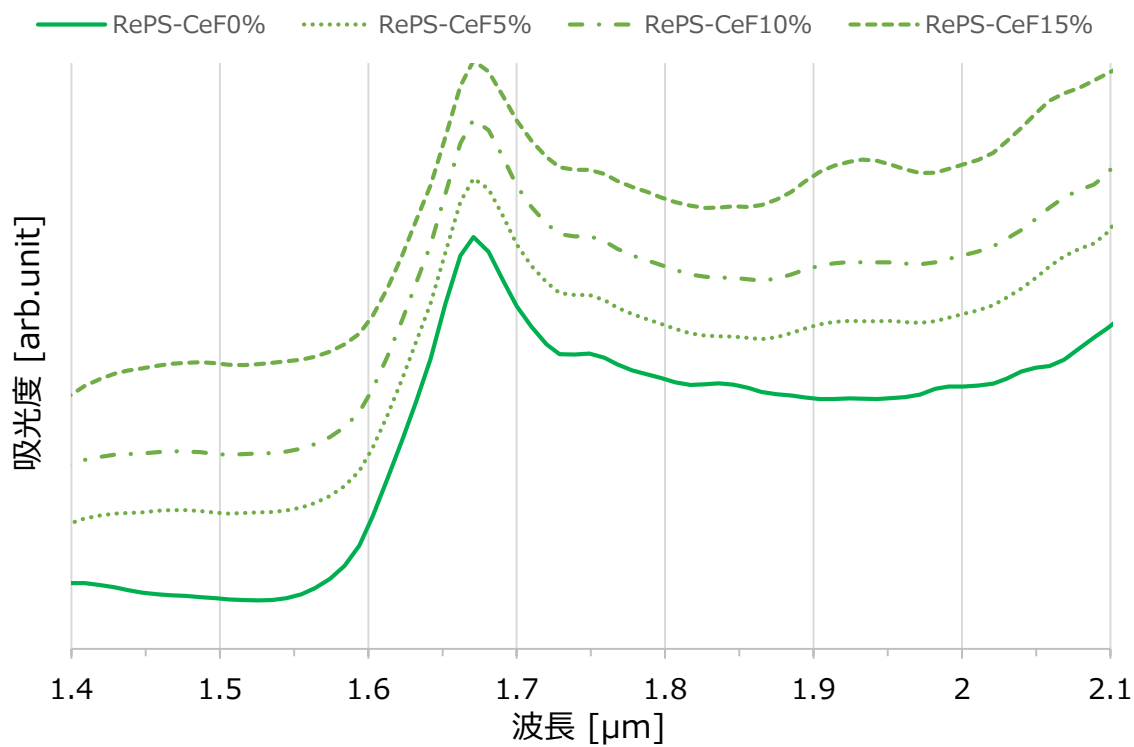


図 2-58 手解体由来 再生材 PS(CeF0%、5%、10%、15%)スペクトル

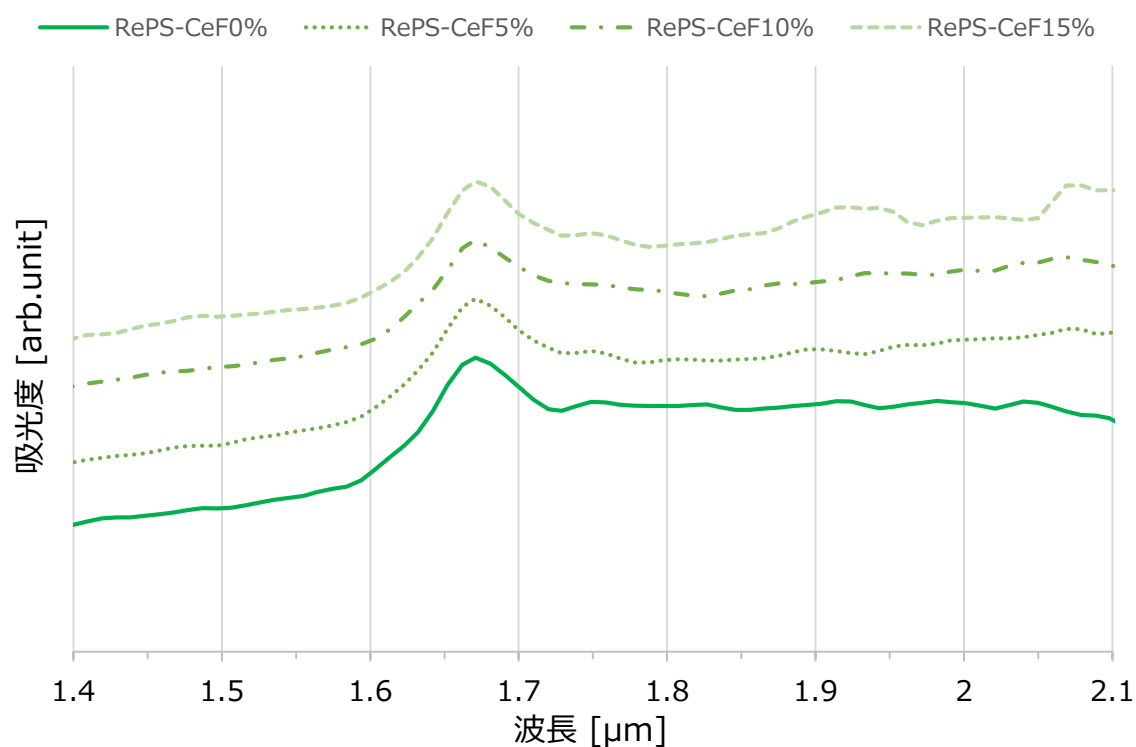


図 2-59 機械破碎由来 再生材 PS(CeF0%、5%、10%、15%)スペクトル

以上の結果より、CeF 濃度の判定において、5%および 10%での CeF 含有濃度の判定は困難であることが分かった。また、着色による色味の影響を考慮すると 5%程度の極低濃度では CeF の特徴ピークが僅かであるため、CeF の含有について 0%と誤判定するリスクが高い。したがって、安定的な選別回収のためには CeF 濃度 15%以上の複合が必要である。

2.2.3.5. 色味による影響評価

図 2-50 で示した各試験片について、小型分光器にて測定した樹脂スペクトルを図 2-60 に示す。再成形 5 回および再成形 10 回のスペクトルにおいて、反射強度の大きな減衰は見られず、初期成形時と同等のスペクトルを確認した。そのため、繰り返し成形での茶変による濃色化によって、判別への影響はないと言える。

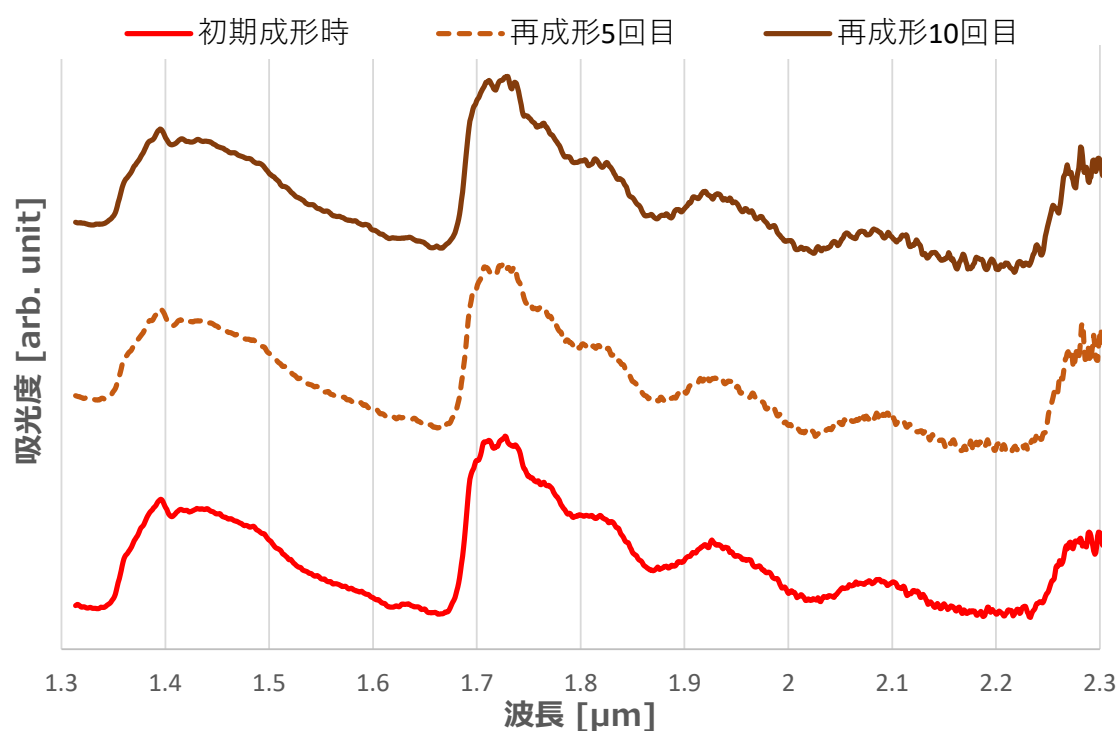


図 2-60 繰り返し成形した試験片のスペクトル

また、図 2-51 で示した黒色顔料の試験片を小型分光器にて測定した。測定した樹脂スペクトルを図 2-61 に示す。図中の PP-w は白色系の樹脂のスペクトルであり、十分な識別ができる参考指標として示す。まず、従来のカーボンブラックを用いた試験片では、顔料による吸収の影響で、反射スペクトルが十分に得られず、ノイズ成分を多く含んだスペクトルとなっている。この状態では、樹脂種毎のピーク波形が得られず、識別が困難である。一方で、Torrecid 社製の黒色顔料を用いた試験片においては、1.0%および 3.0%のどちらも白色系と同等の反射スペクトルが得られ、樹脂特有のピークも確認できた。

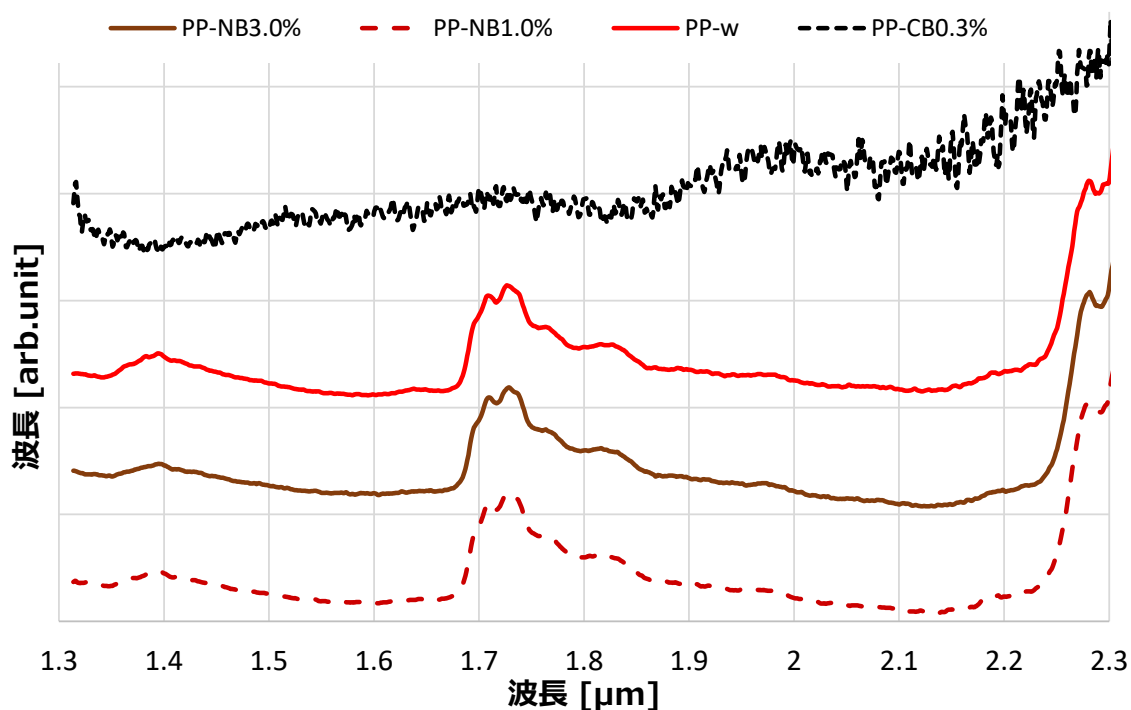


図 2-61 黒色顔料を用いた試験片のスペクトル

ここで、カーボンブラック濃度における検出限界について小型分光器による評価を実施した。図 2-61 で示したカーボンブラック濃度 0.3%に加えて、0.02%、0.03%、0.06%、0.15%を添加した場合のスペクトルを図 2-62 に示す。ベース母材としては CeF を 15%複合した PP にて確認した。図 2-62 において、カーボンブラック濃度が高くなるに連れてノイズ成分が多くなり、PP 特有のピークや CeF 特有のピークが潰れていくような傾向が見られる。特にカーボンブラック濃度 0.15%以上では CeF のピークがほぼ見られないレベルまで減衰しており、識別は非常に困難である。今回の小型分光器における評価ではカーボンブラック濃度 0.06%が識別できる限界であることが分かった。また、量産検証用選別装置においては、小型分光器に比べて検出感度が落ちるため、安定的な選別回収にはカーボンブラック濃度 0.03%以下での運用が望ましいと考える。

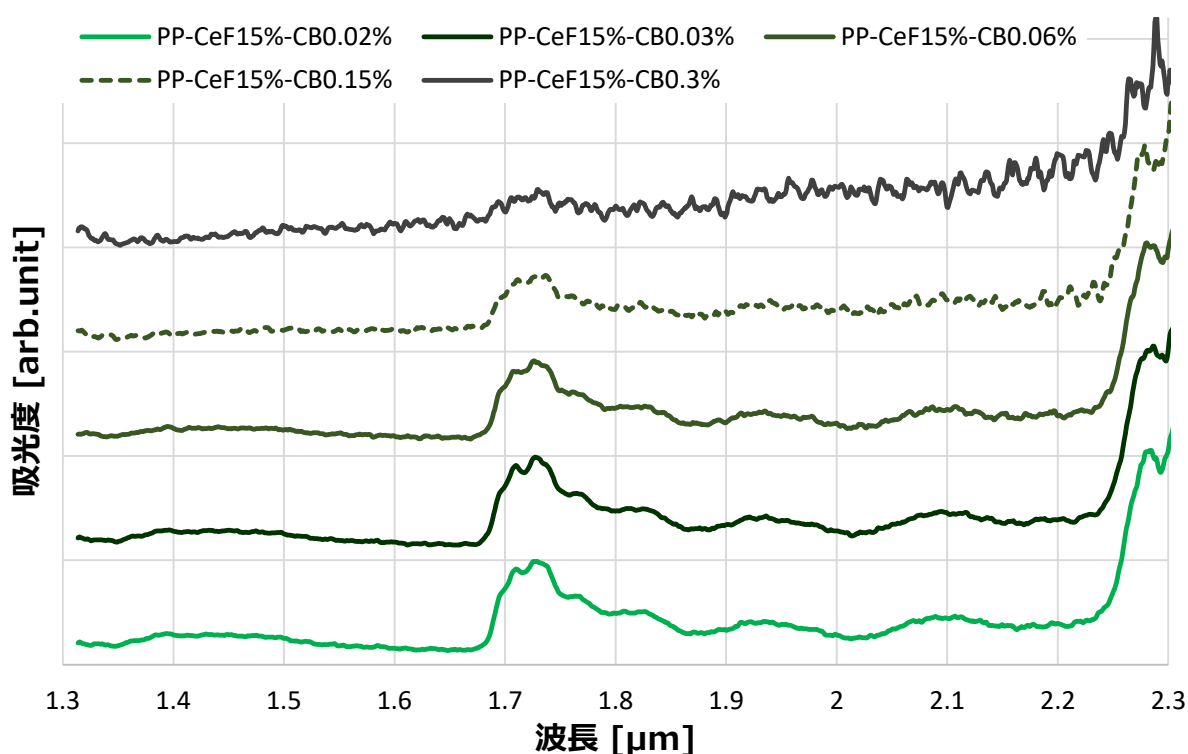


図 2-62 カーボンブラック濃度毎のスペクトル

次に、Torrecid 社製の黒色顔料を用いて、図 2-63 に示すような 50mm 角で厚さ 2mm の選別用試験片を 6 種作成し、量産検証用選別装置にて各樹脂におけるスペクトルを確認した。各樹脂におけるスペクトルを図 2-64 に示す。図 2-64 の各樹脂において、大きなスペクトルの減衰やノイズなどは見られず、CeF の含有によって 1.45 μ m や 1.95 μ m、2.1 μ m 付近に CeF 特有のピークを確認できた。また、これらのスペクトルを量産検証用選別装置の判別データベースに加え、選別を実施したところ、白色樹脂と同等レベルで選別回収が可能であった。

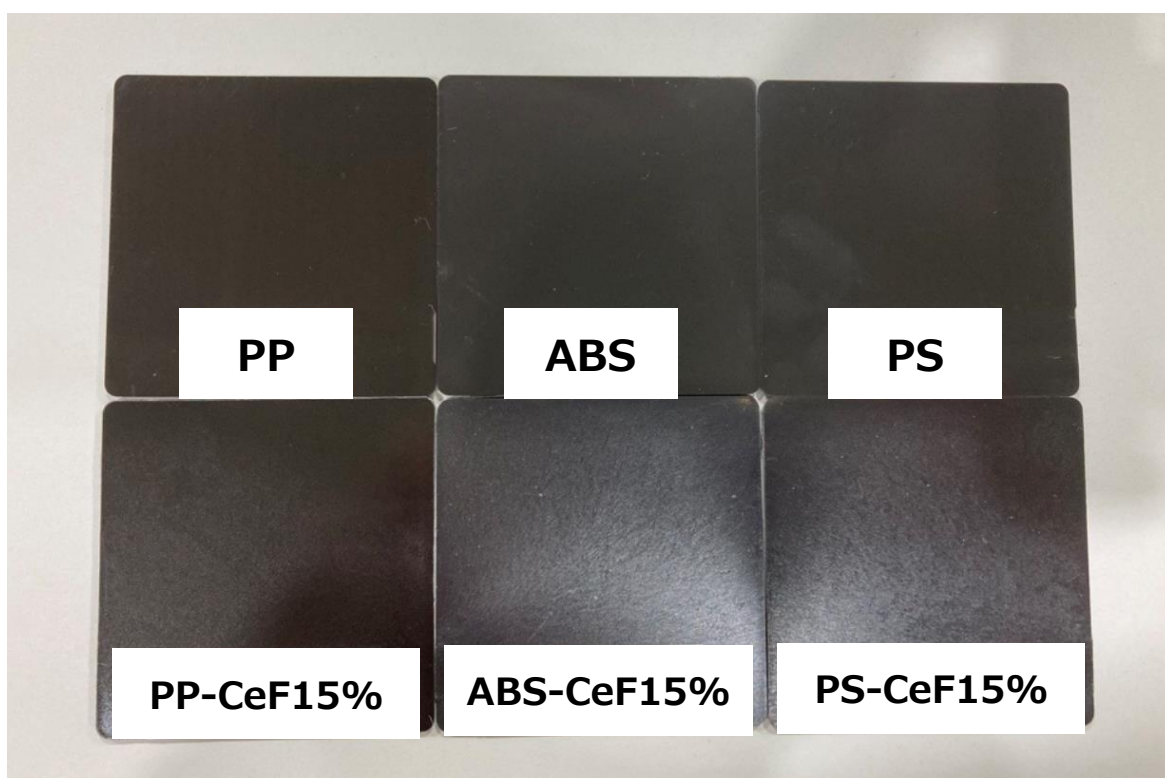


図 2-63 黒色顔料を用いた選別用試験片

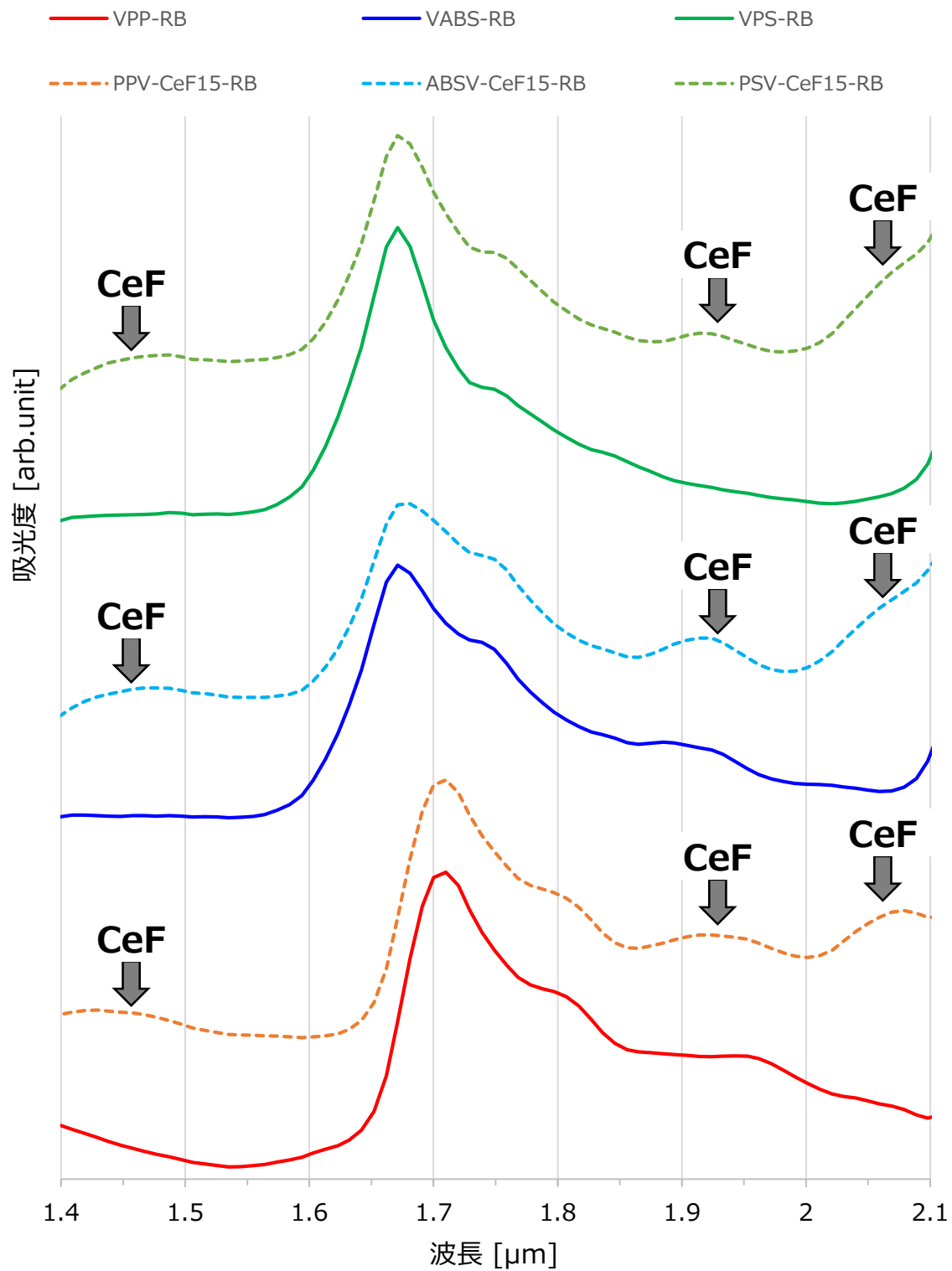


図 2-64 量産検証機での取得スペクトル

以上の結果より、色味における判別への影響として、繰り返し成形による茶変の影響はなく、カーボンブラックによる影響が大きいことが分かった。また、近赤外線が減衰が僅かな黒色顔料を用いることによって、黒色系に調色した場合でも選別回収が可能であることを確認した。

2.2.4. 結言

ハイパースペクトルカメラを用いて、3m/sでの高速搬送下での選別評価を実施した。その結果、本事業の選別工程の最終目標である、純度 80%以上、回収率 60%以上を達成した。

また、CeF 濃度における判別検証を実施し、安定的な選別回収のためには CeF 濃度 15%以上の複合が必要であることを見極めた。

さらに、色味における判別への影響評価を実施し、繰り返し成形による茶変の影響はなく、近赤外線が減衰が僅かな黒色顔料を用いることによって、黒色系に調色した場合でも選別回収が可能であることを見極めた。

今後としては、CeF 複合樹脂のリサイクルシステム普及に向けて、さらなる選別装置の低コスト化、汎用化を検討していく。

そのために弊社としては、ラインナップとして持つ、選別対象粒度が異なる 2 つの選別機の適用を検討していく。1 つ目は図 2-40 に示す選別対象粒度 10~100mm の選別機、2 つ目が図 2-65 に示す、選別粒度が 2-15mm の小粒専用の選別機である。

近赤外線による選別工程の前に、水比重選別機を通すプロセスを敷くリサイクル工場では、樹脂粒度が小さくなることも多いため、そのようなリサイクル工場へは小粒樹脂選別機の適用が有効であると考ええる。

今回選定した低コスト化したハイパースペクトルカメラを 2 つのラインナップに展開し、低コストかつ汎用的な選別機の普及を検討していく。



図 2-65 小型樹脂選別機

2.3. セルロースファイバー複合樹脂の資源循環システムへの影響評価

2.3.1. 緒言

CeF 複合樹脂を家電に適用することで、バイオ由来資源の活用拡大と化石由来資源のバージン樹脂の削減を両立できる可能性がある。しかし、4 家電に適応するには、家電リサイクル法への対応が必須であるため、CeF 複合樹脂が家電製品に適用された場合を想定し、既存の資源循環システムに対して、どのような影響があるのかを事前に検討することは極めて重要である。

家電製品の多くは、主に 3 種類(PS, ABS, PP)の樹脂で構成されており、その前提のもとに多くの家電リサイクル工場では、リサイクル工程が設計されている。家電リサイクル工場では、破碎された 3 種類の樹脂を、様々な選別方法を用いて単一樹脂に選別して廃家電由来再生材を生産した後に、再度、複合することで再利用している。そこで、CeF 複合樹脂が、家電に適応された場合の資源循環システムの影響を、(i)選別時の影響と、(ii)再生時の影響に分けて検討し、普及を見据えた(iii)繰り返し成形によるリサイクル性について評価する。

2.3.2. アプローチ

昨年度に実施した選別時の影響評価によって、CeF 含有濃度が 15%以下(家電適応において想定される濃度)の場合で、一般的な樹脂選別のフローである湿式比重選別と静電選別を用いた 2 段階選別における CeF 複合樹脂の選別時の課題が明確になった。具体的な課題は、CeF 含有濃度が 15%以下(家電適応において想定される濃度)の場合には、3 種(PS, ABS, PP)の混合樹脂を単一樹脂に選別することが可能であるが、一方で、CeF の複合/非複合の選別は難しいということである。CeF の複合/非複合の選別が出来ない場合、意図せず再生樹脂に CeF 複合樹脂が混入してしまい、その物性に影響を与えてしまうことである。

本年度は、CeF 含有濃度がより高濃度になった場合での影響について評価を実施する。CeF 含有濃度が高濃度になった場合(例えば、30%)における具体的な課題は、水比重選別において、PP、PS、ABS の単一樹脂回収にも影響が出る可能性がある点である。

そこで、CeF 含有濃度が 30%となった場合において、CeF 複合樹脂の家電製品での普及率が 1%~10%を想定したケーススタディを実施し、再生樹脂に意図せず CeF 複合樹脂が混入してしまった場合に、どの程度の極低濃度 CeF 複合樹脂が生成されるのかの影響を考察する。

また、再生時の影響評価として、上記ケーススタディの結果をもとに、極低濃度 CeF 複合樹脂を作成し、その物性評価を行うことで、再生樹脂にどのような影響が発生するかを評価する。

さらに、家電適用によって普及および使用済み樹脂として再使用する場合を想定し、繰り返し成形による各機械物性および信頼性試験による耐久性の評価を実施する。

最後に、これまでの検討結果を踏まえ、CeF 複合樹脂を家電などに適応した場合の、既存リサイクルシステムへの影響最小化に向けた施策の提言を行う。

2.3.3. 取組結果

(i) 選別時の影響評価

図 2-66 に、リサイクル工場で用いられる一般的な樹脂選別フローを示す。回収されて家電は、まず手解体により忌避物と基板等の有価物を取り除かれる。その後、機械破碎された後に、磁力選別によって鉄が回収され、渦電流選別によって銅・アルミが回収される。続いて樹脂選別工程において PP、PS、ABS の 3 種の樹脂を単一樹脂に選別した後、再生工程で再生樹脂が生産させる。

図 2-67 に CeF 複合樹脂適応前後の選別フローを示す。CeF 複合樹脂適応前の現在の樹脂選別では、湿式フローである①水比重＋静電選別が多くのリサイクル工場で採用されている(樹脂選別フロー①)。また一部のリサイクル工場では、②近赤外線選別が実施されている(樹脂選別フロー②)。この両選別フローに CeF 複合樹脂が適応されると、①水比重＋静電選別では、CeF 含有/非含有は選別不可となり、低濃度(25%以下)の PP-CeF は水比重で浮くため、PP に意図せず混入する。また、高濃度(25%以上)は水比重で沈み、静電選別で PS に意図せず混入する。さらに PS、ABS のそれぞれに CeF が複合された PS-CeF、ABS-CeF はそれぞれのベース母材樹脂に意図せず混入してしまう。一方、②近赤外線選別では、近赤外線選別を CeF 対応に改造することで、単一樹脂に選別するだけでなく、CeF 含有/非含有も選別することが可能となる。

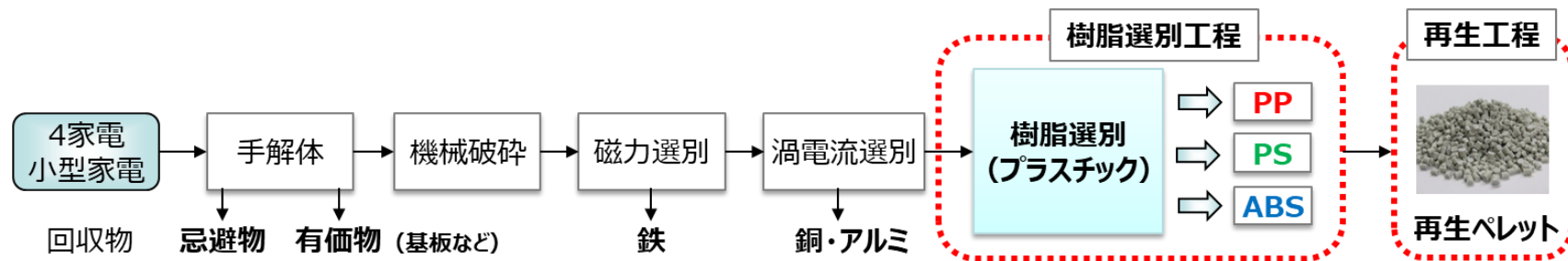


図 2-66 一般的な家電リサイクルフロー

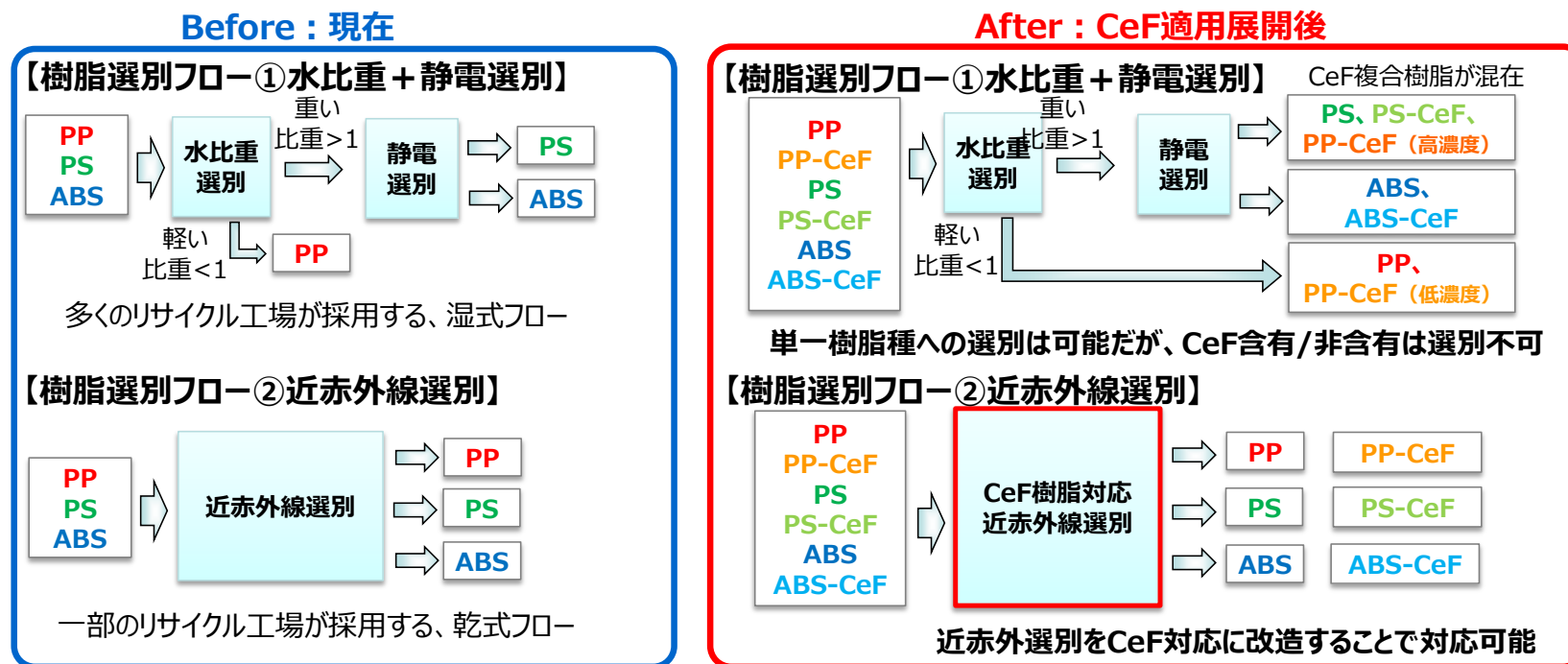


図 2-67 CeF 複合樹脂適応前後の選別フロー

ここで、CeF 複合樹脂の普及率を 1～10%で想定し、

① 水比重＋静電選別

② CeF 含有/非含有の選別に対応した近赤外線選別

の各選別フローで、CeF 複合樹脂が混入する量のケーススタディを実施する。
ケーススタディ時の想定条件を図 2-68 に示す。CeF 複合樹脂の CeF 濃度は、
30%に設定した。また、CeF 含有/非含有の選別は、①水比重＋静電選別では不
可とし、②CeF 含有/非含有の選別に対応した近赤外線選別では可能とした。

◇ケーススタディ時の想定条件

・ CeF複合樹脂のCeF濃度=30%に設定

	母材樹脂の 単一樹脂への選別	CeF含有/非含有 の選別
①水比重+静電分離選別	×	×
②CeF対応近赤外線選別	○	○

図 2-68 ケーススタディ時の想定条件

図 2-67 の想定条件で実施したケーススタディでの CeF 複合樹脂の混入によ
る回収樹脂中の CeF 濃度を図 2-69 に示す。①水比重＋静電選別では、回収純
度は 100%とした。一方で、②CeF 含有/非含有の選別に対応した近赤外線選別
では、現在稼働中の選別装置の実績を基に、回収純度を 97%として、CeF 複合
樹脂の混入率を 3%と設定した。

◇ CeF複合樹脂の混入による回収樹脂中のCeF濃度

① 水比重+静電分離選別

	CeF樹脂普及率	PS純度	CeF濃度	PP濃度
(1)-1	1.0%	99.01%	0.30%	0.69%
(1)-2	5.0%	95.24%	1.43%	3.33%
(1)-3	10.0%	90.91%	2.73%	6.36%

② CeF対応近赤外線選別

	CeF樹脂普及率	PS純度	CeF濃度	PP濃度
(2)-1	1.0%	97%	0.01%	3.00%
(2)-2	5.0%	97%	0.05%	2.98%
(2)-3	10.0%	97%	0.09%	2.96%

図 2-69 CeF 複合樹脂の混入による回収樹脂中の CeF 濃度および樹脂濃度

ケーススタディの結果としては、①水比重+静電選別では、普及率 10%で回収樹脂全体の CeF 濃度は、2.73%になった。一方で、②CeF 含有/非含有の選別に対応した近赤外線選別では、普及率 10%でも 0.09%に抑制できることが分かった。

以上のケーススタディにより、高濃度(CeF 濃度 30%)においても近赤外線選別による CeF 含有/非含有の選別を実現することが非常に重要であることが分かった。

(ii) 再生時の影響評価

続いて、ケーススタディ結果を元に、極濃度 CeF 複合再生樹脂を作成し、その物性評価を実施した。結果を図 2-70 に示す。

選別方式の違いによってそれぞれ考察すると、①水比重+静電選別を実施した場合、CeF 複合樹脂の普及率が 1%時の回収樹脂(PS)に含まれる CeF 濃度は 0.3%である。この段階でシャルピー衝撃値は 10%、引張伸びで 30%弱の物性低下が発生してしまう可能性があることが示唆された。また、普及率が 10%時においては、CeF 濃度は 2.73%であり、シャルピー衝撃値は約 40%、引張伸びで約 70%の大幅な物性低下が発生してしまう可能性があることが示唆された。一方で、②CeF 含有/非含有の選別に対応した近赤外線選別を実施した場合、CeF 複合樹脂の普及率が 10%時の回収樹脂(PS)に含まれる CeF 濃度は 0.09%であ

り、①に比べて大幅な物性低下は見られないものの、引張伸びが 30%弱の物性低下が発生してしまう可能性があることが示唆された。

以上の結果から、②CeF 含有/非含有の選別に対応した近赤外線選別を普及させることで、CeF 複合樹脂が 10%程度普及した場合でも、単一再生樹脂に意図せず混入する CeF 複合樹脂の濃度を極めて低く抑えることが可能となり、物性低下を抑制することが可能であることが確認できた。また、PS 母材に対して、PP-CeF が混入することによる物性低下の影響が大きいため、CeF 濃度 30%での使用には注意が必要であることが示唆された。

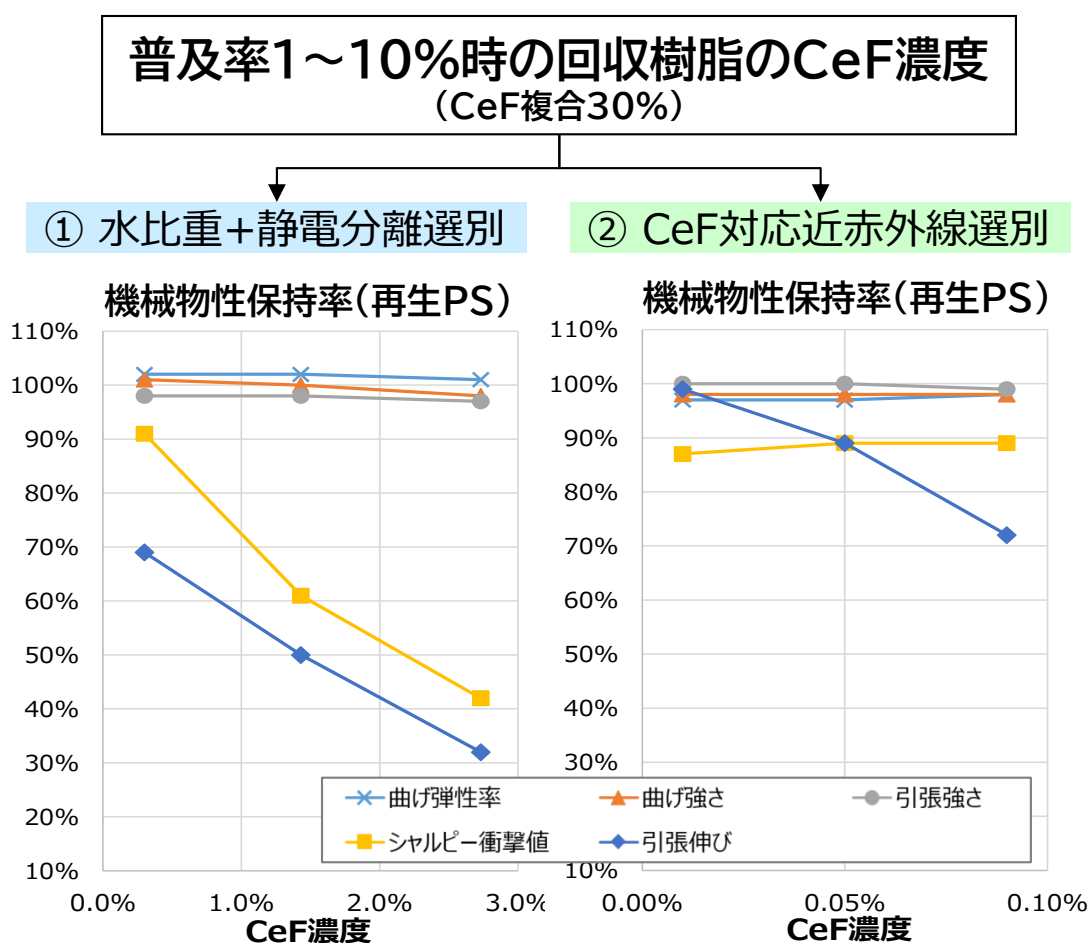


図 2-70 高濃度 CeF 複合再生樹脂の機械物性

(iii) 繰り返し成形によるリサイクル性評価

CeF 複合再生 PP の繰り返し成形(熱履歴の繰り返し)による物性維持度、性能維持度の検証を実施した。初期材ペレットは家電回収(冷蔵庫手解体由来の)再生 PP ペレットで、CeF 濃度 20%、分散剤 5%、エラストマ 2 種計 10%である。

繰り返し再生成形は、スプル・ランナ・成形試験片を粉砕機で粉砕し、粉砕材(リグラインド材)100%で試験片を成形した。物性試験、信頼性評価試験は、初期材成形品、再生1回目、3回目、5回目成形品にて実施した。

繰り返し成形および試験方法の流れを図 2-71 に、試験片(JIS K 多目的試験片)を図 2-72 に示す。

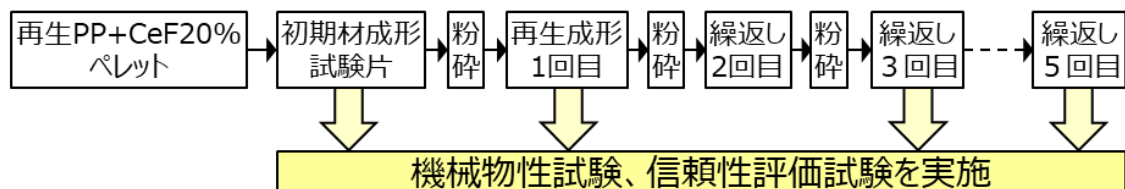


図 2-71 繰り返し成形および試験方法の流れ

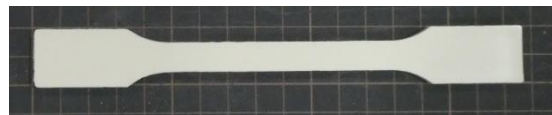


図 2-72 試験片

繰返し成形による機械物性試験評価結果を図 2-73 に示す。

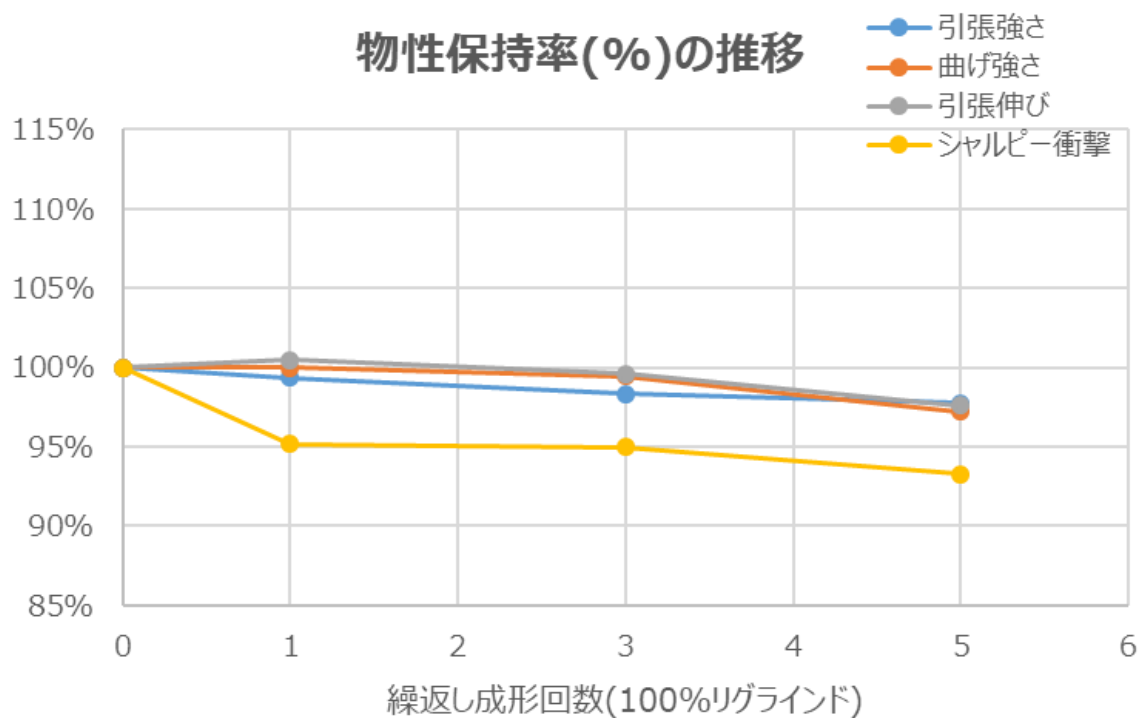


図 2-73 繰返し成形時の物性保持率の推移

機械物性については、繰返し成形(熱履歴繰返し)において、93%以上を保持しており、リサイクル性は問題ことが確認できた。

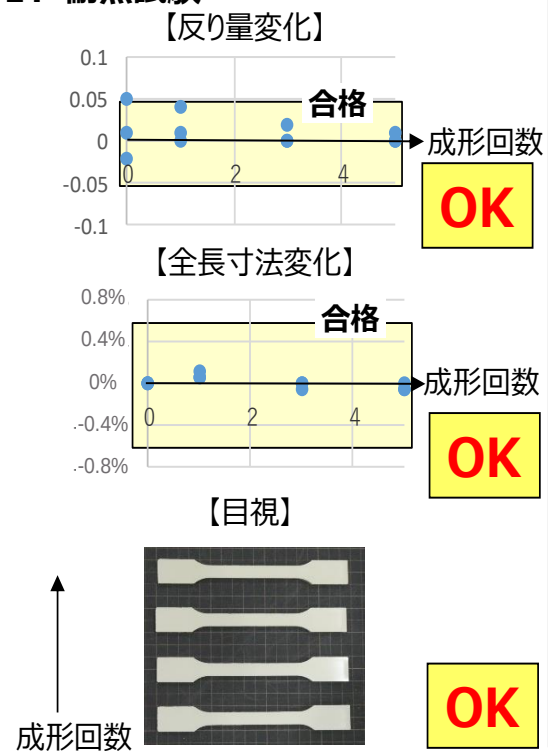
引続き、繰返し成形後の試験片の耐久性評価を実施した。繰返し成形した試験片に対し、表 2-45 に示す 3 種の試験を実施した。N 数は 3 とした。

表 2-45 耐久性評価試験条件

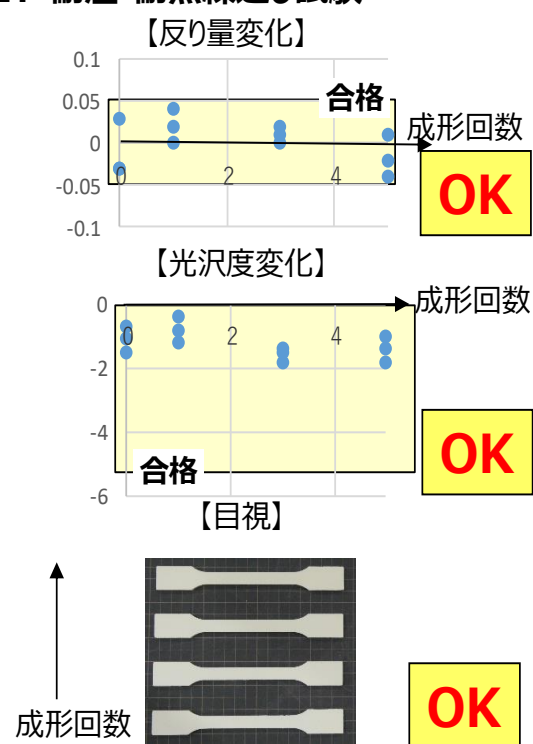
	1. 耐熱試験	2. 耐湿・耐熱繰返し試験	3. 冷熱試験
試験条件	70±3℃×1時間 (エアークーリング)	下記のサイクルを2回繰返し 40±2℃、95%R.H.×24時間 60±3℃×24時間	下記のサイクルを5回繰返し -25±2℃×12時間 60±2℃×12時間
要求項目	組立上に支障をきたすような変形がなく、クラック等の使用上有害な欠陥がないこと	部品の外観や機能を損なうような反り、ヒケ、光沢の低下、その他使用上有害な欠陥がないこと	クラック、クレージング、変色、その他使用上有害な欠陥がないこと
合格基準	【反り量変化】 ±0.05mm 以下 【全長寸法変化】 ±0.5%以下 【目視】 異常(クラック等)なきこと	【反り量変化】 ±0.05mm 以下 【光沢度変化】 -5以上/測定角Gs60° 【目視】 異常なきこと	【色差】 3以下 【目視】 異常なきこと

それぞれの評価結果を図 2-74 に示す。図 2-74 において、横軸は繰返し成形回数であり、縦軸はそれぞれの評価数値を表す。

1. 耐熱試験



2. 耐湿-耐熱繰返し試験



3. 冷熱試験

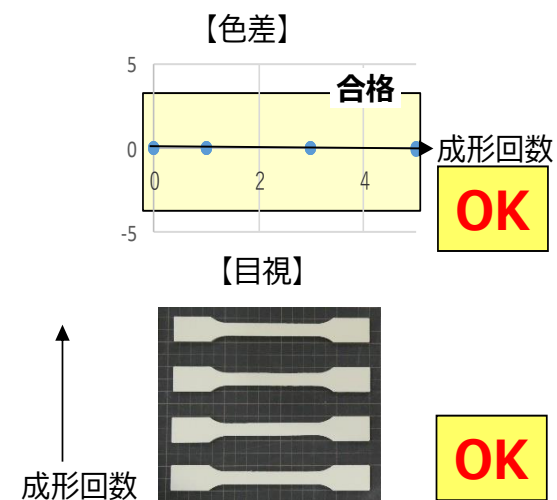


図 2-74 耐久性試験評価結果

耐久性評価については、寸法・外観関係は問題なしであった。

次に、信頼性試験後の物性試験を実施した。図 2-75 から図 2-78 に、それぞれの繰返し回数後の成形直後および、冷熱試験実施後の物性試験結果を示す。

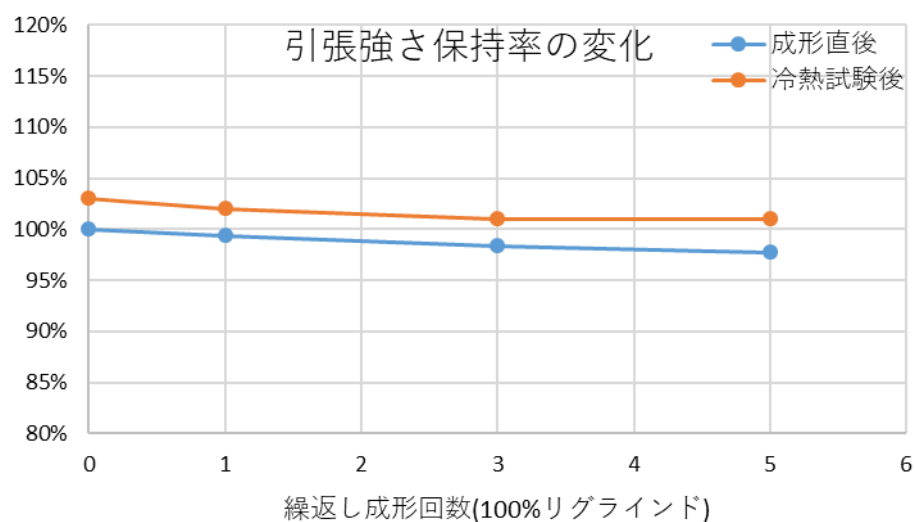


図 2-75 耐久性試験前後の引張試験結果(引張強さ)

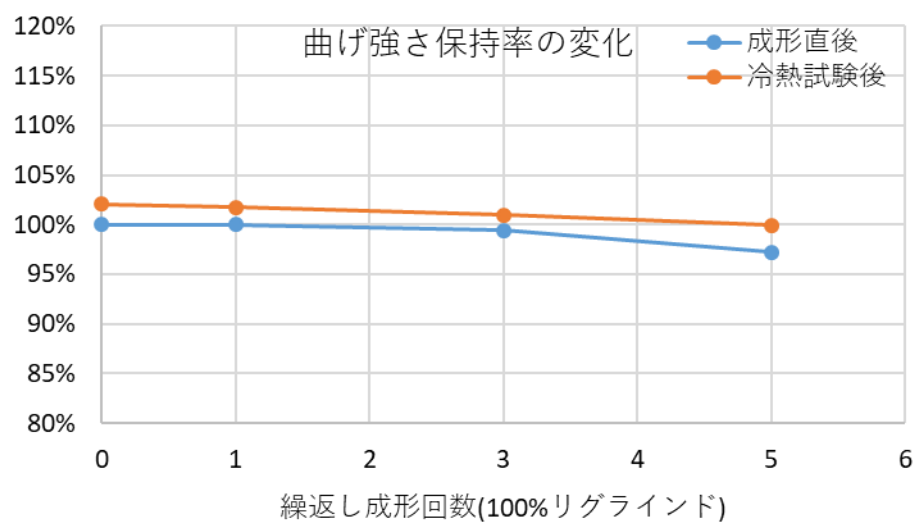


図 2-76 耐久性試験前後の曲げ試験結果(曲げ強さ)

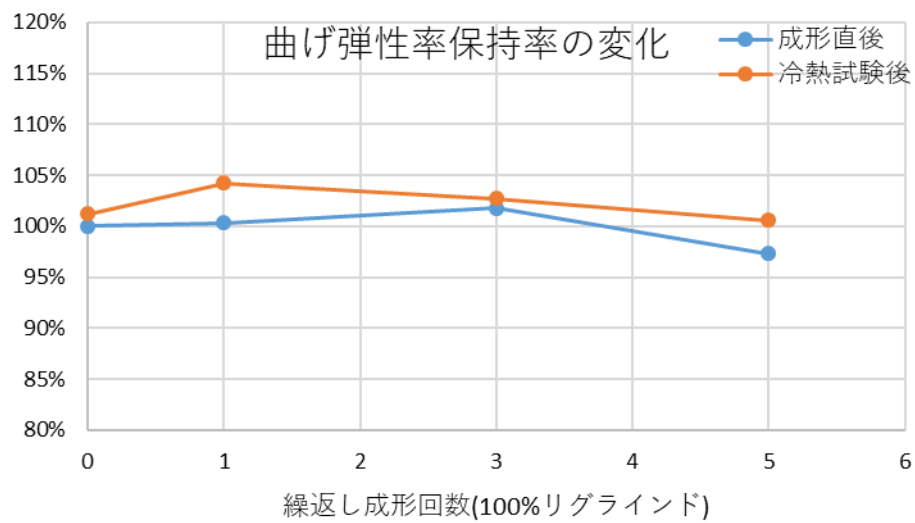


図 2-77 耐久性試験前後の曲げ試験結果(曲げ弾性率)

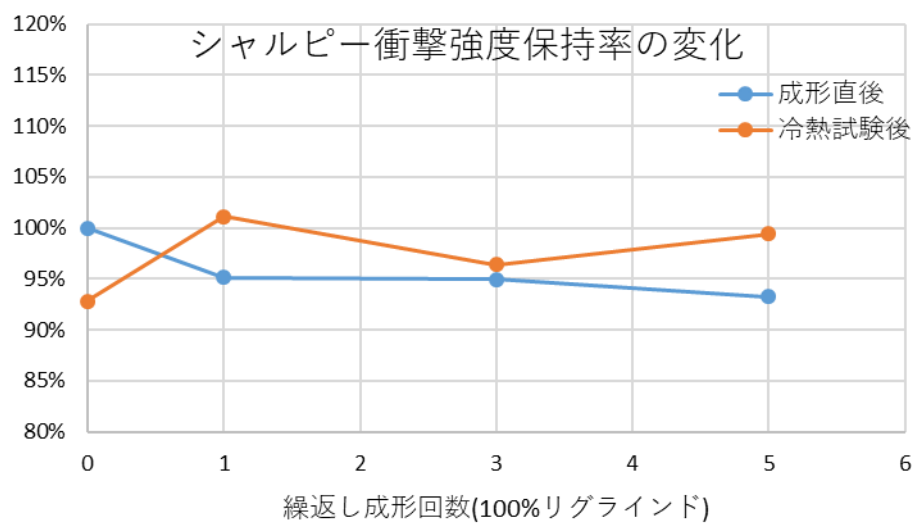


図 2-78 耐久性試験前後のシャルピー衝撃試験結果

図 2-75 から図 2-78 での、引張、曲げ、シャルピー衝撃のそれぞれの強度は、冷熱試験の前後でほとんど変化ないことから、物性に与える影響について問題ないと考えられる。

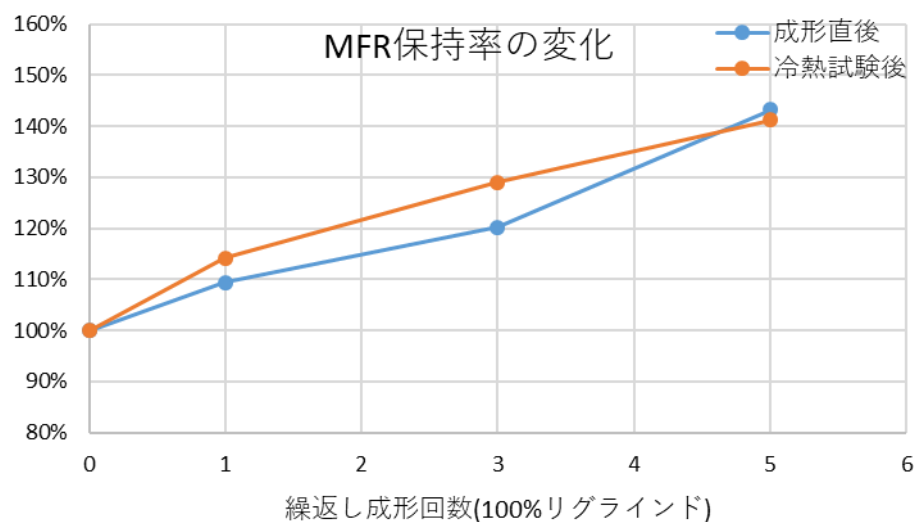


図 2-79 耐久性試験前後の MFR 測定結果

図 2-79 に示されるように、繰返し成形回数が増すと MFR が増加するが、これは、成形品粉砕、射出成形を繰り返すことにより CeF の解繊・断裂等が進むため、流動性が増すと考えられる。しかしながら、図 2-75 から図 2-78 に示されたように機械物性には、ほとんど影響していないことがわかる。

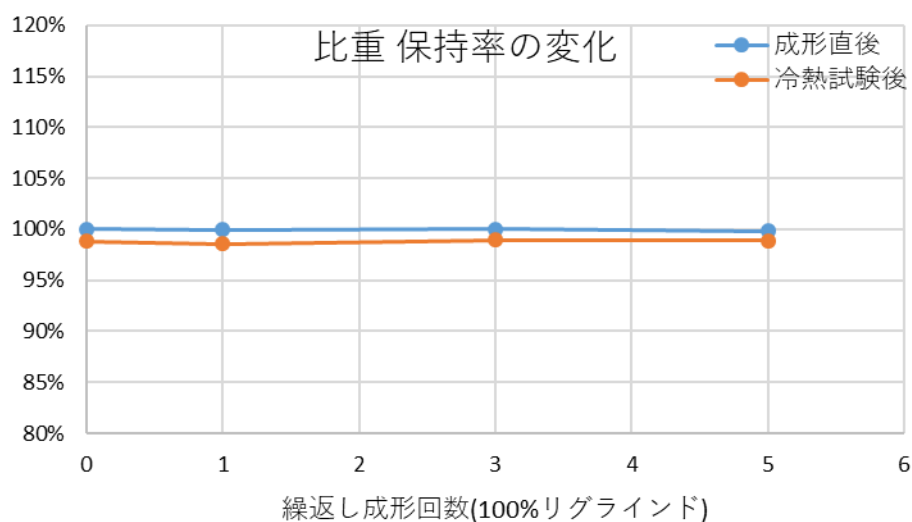


図 2-80 耐久性試験前後の比重の変化

図 2-80 に示されるように、繰返し成形後も、その後の冷熱試験後においても比重の変化はなく、品質上も問題ないと考えられる。

以上により、試験片レベルでの信頼性試験後の物性については問題ないことを明確化した。

2.3.4. 既存リサイクルシステムへの影響最小化に向けた施策

今後、CeF 複合樹脂が普及していくにあたって、既存のリサイクルシステムへの影響を最小化していくためには、以下の3つの施策が必要であると考ええる。

① CeF 濃度 15～20%(低濃度)での活用

CeF 濃度 15%以下では、CeF 特有の検出ピークが僅かであるため近赤外線選別での安定的な回収が困難である。また、25%以上の高濃度で活用した場合、図 2-70 で示したように、水比重で沈み、静電選別後の単一樹脂の物性が低下し、既存のリサイクルシステムに大きな影響を与えてしまう。

もし、25%以上の高濃度で使用する場合は、部品レベルで個別回収可能な部材のみに限定するなど、既存のリサイクルシステムに影響を与えないような対策が必要である。

② CeF 適用樹脂母材を PP、PS のみに限定

全ての樹脂母材に CeF を複合していくと、選別すべき種類が増え、既存のリサイクルシステムにも大きな負荷となってしまう。そのため、CeF 適用樹脂母材を PP、PS のみに限定し、ABS は PS-CeF で代替していくことで、選別すべき種類を最小化しつつ、再生樹脂の活用拡大を図ることができると考える。

③ CeF 複合樹脂に対応した選別装置の導入促進

CeF 複合樹脂の普及とともに、既存のリサイクルシステムも少なからず対応が必要となってくる。近赤外線選別装置の場合は、センサー部の変更等で CeF 複合樹脂への選別回収が対応可能である。また、水比重+静電分離選別の場合は、図 2-81 のように後段にアドオンする形で対応が可能である。ただし、静電分離選別後は樹脂サイズが小さいため、小片の選別が可能な近赤外線選別装置が必要となる。

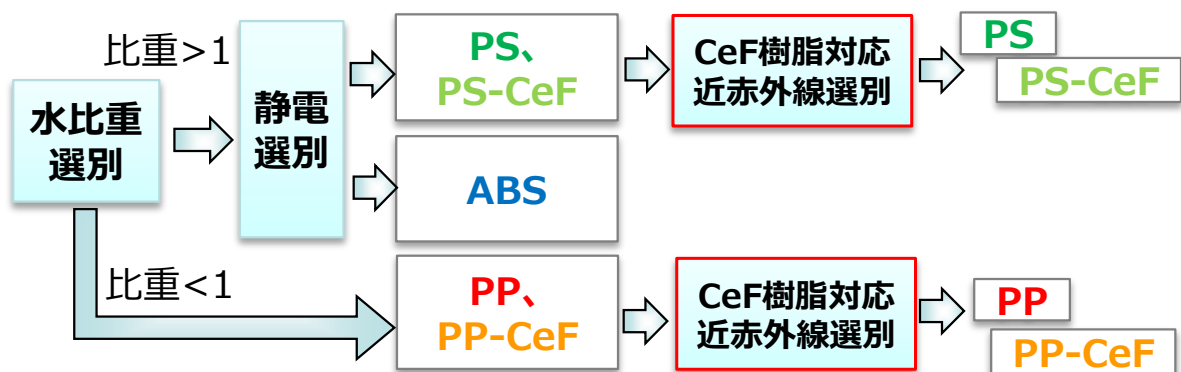


図 2-81 湿式フローにおける CeF 複合樹脂対応近赤外選別装置導入イメージ

2.3.5. 結言

一般的な家電リサイクルフローを提示した上で、CeF 濃度 30%を複合した PP の普及率が 1%~10%を想定したケーススタディを実施し、再生樹脂に意図せず CeF 複合樹脂が混入してしまった場合の影響を評価した。

①水比重+静電選別を実施した場合、CeF 複合樹脂の普及率が 10%時の時の回収樹脂(PS)に含まれる CeF 濃度は 2.73%となり、この時、シャルピー衝撃値は約 40%、引張伸びで約 70%の大幅な物性低下が発生してしまう可能性があること、一方で、②CeF 含有/非含有の選別に対応した近赤外線選別を実施した場合には、回収樹脂に含まれる CeF 濃度は 0.09%となり、引張伸びが 30%弱の物性低下があるものの、①に比べて大幅な物性低下は見られないことを見極めた。また、PS 母材に対して、PP-CeF が混入することによる物性低下の影響が大きいいため、CeF 濃度 30%での使用には注意が必要であることを明確化した。

さらに、PP+CeF20%を初期材とした、多目的試験片での繰返し成形において、成形熱履歴による機械物性への影響はほとんどないということを見極めた。また、冷熱試験での耐久性においても、機械物性および成形品品質への影響はないことが明確になった。

最後に、これらの検討結果を踏まえ、CeF 複合樹脂を家電などに適応した場合の、既存リサイクルシステムへの影響最小化に向けた施策として、①CeF 濃度 15~20%(低濃度)での活用、②CeF 適用樹脂母材を PP および PS に限定、③CeF 複合樹脂に対応した選別装置の導入促進について、3つの施策を提言した。

2.4. LCA の検証・評価

2.4.1. 緒言

本事業のバイオ素材複合再生樹脂による素材代替がライフサイクル(以下、LC)全体を通じて、環境的及び経済的に改善しているかを定量的に評価する必要がある。そこで、本実証のライフサイクルアセスメント(以下、LCA)を実施したので、本節で説明する。

2.4.2. アプローチ

2.4.2.1. アプローチ(全体)

日本 LCA 学会及び経済産業省が公表している LCA ガイドライン¹⁰⁾¹¹⁾に基づき、バイオ素材複合再生樹脂による素材代替の LCA を実施する。具体的には、下記の 6 ステップで実施していく。

(i) 目的の設定

バイオ素材複合再生樹脂を家電製品(空調機器等)に適用した場合の環境及び経済効果を定量化する。

(ii) 定量化対象の設定

バイオ素材複合再生樹脂を定量化対象として設定する。その際の機能単位は、家電製品(空調機器等)に使用する樹脂材料とする。曲げ強度等の必要スペックについては、本事業を通じ明確化していく。注意点として、代替前の素材だとオーバースペックの場合があるため、代替前の素材スペックが必要とはならない場合がある。

(iii) ベースラインシナリオの設定

素材代替候補である製品もしくは部品に対し、本事業が適用されなかった場合の素材候補をベースラインシナリオとして設定する。

例えば、バイオ素材複合再生樹脂として CeF 複合再生樹脂(再生 PP or PS)を検討する際、適用されなかった場合の素材候補として、ABS と CeF 複合樹脂(バージン PP or PS)の 2 つが、ベースラインシナリオとして考えられる。

(iv)定量化の範囲・内容の設定

本事業で対象とする温室効果ガスは、代表的な 28 種類のガス(例. CO₂, CH₄)を対象とし、CO₂ 換算して評価を実施する。さらに、本事業が採択された募集要 12)で指定された通り、エネルギー起源 CO₂ の削減効果を明確化する為に、エネルギー起源 CO₂ と非エネルギー起源 CO₂ を区別する。

また、評価範囲としては、適用される家電製品もしくは部品の LC フローを対象とする。ただし、評価対象であるバイオ素材複合再生樹脂とベースラインの素材で同一の工程と想定されるプロセスは評価対象外とする。

例えば、評価対象が CeF 複合再生 PS であり、素材代替前が PS と ABS で構成される部品への適用検討の場合、評価範囲の簡略した LC フローを図 2-82、図 2-83 と図 2-84 に示す。下記の LC フロー中で、緑背景で囲まれた範囲が評価範囲である。また、白地に紺背景のプロセスは、フォアグラウンドデータであり、黒字に白背景のプロセスは、バックグラウンドデータであることを示している。詳細の LC フローは、後述の図 2-89、図 2-90 と図 2-91 に示している。

評価対象とベースラインの LC フローを比較すると、生産段階、流通段階と使用段階が同一のプロセスなので、評価対象外としている。また、原材料調達・生産段階でも、代替素材以外の PS については、同一のプロセスになるため、評価対象外としている。

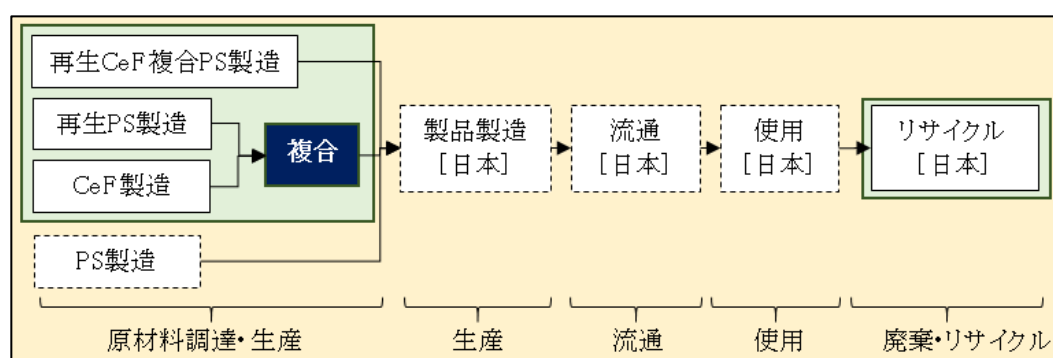


図 2-82 評価範囲の簡略例(本事業 CeF 複合再生 PS)

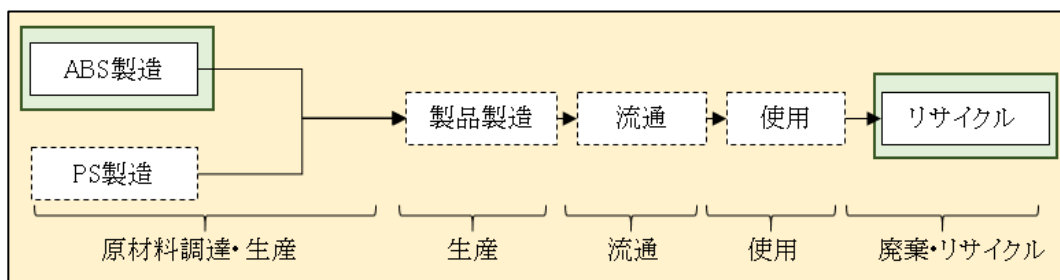


図 2-83 評価範囲の簡略例(ベースライン ABS)

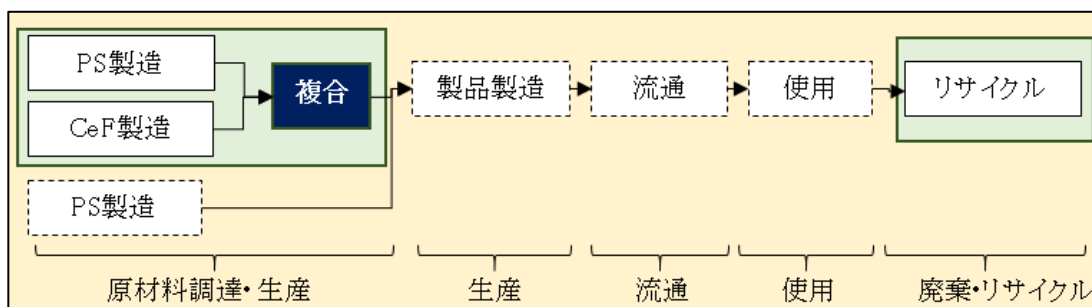


図 2-84 評価範囲の簡略例(ベースライン CeF 複合 PS)

(v) 削減貢献量の累積方法の決定

本実証は、素材代替であり、原材料調達・生産段階と廃棄・リサイクル段階での効果を評価するため、フローベースで評価を実施する。

(vi) 削減貢献量の定量化

上記(i)～(v)に基づき、CO₂ 排出量及びコストの定量評価を実施する。

ここでは、本事業の他開発項目に伴い適用製品の候補が特定されるため、他開発項目と連携しながら、LCA を推進していかなければならない。そのため、年度毎に、段階的に LCA を推進していく。令和元年度に策定した各年度の大まかな予定は下記の通りであった。

令和元年度：LC フローを明確化し、市販の LC インベントリデータベース¹³⁾に基づいて試算し、単純な素材代替の効果を把握する

令和 2 年度：特定の適用商品の普及を考慮した上で、素材代替の効果を把握する。また、複合工程での設備の稼働状況を測定し、反映する。

令和 3 年度：適用商品の数を増やし、最終的な普及量を考慮した状態での効果を試算する。

本年度では、当初の計画通り、CeF 複合再生樹脂の適用を検討している商品に対し、LCA を実施した。

2.4.2.2. アプローチ(令和 3 年度)

本年度では、適用検討商品に対して、CeF 複合再生樹脂(CeF 含有濃度 15%)を導入した場合について、LCA を実施した。ここでの CeF 複合再生樹脂とは、家電由来の再生樹脂(PP or PS)と CeF の複合樹脂を指している。

(経済効果については、事業情報のため記載していない。)

(i)' 目的の設定

下記の 4 商品を対象として、CeF 複合再生樹脂を導入することによる CO₂削減効果を評価した。

- ・スティック掃除機(令和 2 年度 評価済み)
- ・エアコン
- ・冷蔵庫
- ・洗濯機

(ii)' 定量化の設定

適用商品の部品に必要な強度を担保した樹脂材料を機能単位とした。

代替前と代替後の樹脂種は、表 2-46 の通りである。

(詳細な仕様は、事業情報のため記載していない。)

表 2-46 適用検討商品での素材代替について

適用商品	部品の樹脂種	
	代替前	代替後
スティック掃除機	ABS	CeF 複合再生 PP
エアコン	ABS	CeF 複合再生 PS
冷蔵庫	PP	CeF 複合再生 PP
	PS	CeF 複合再生 PS
洗濯機	PP	CeF 複合再生 PP

(iii)' ベースラインシナリオの設定

本実証が適用されなかった際の素材候補として、ABS と CeF 複合 PP の 2 種類を検討した。ここでの CeF 複合 PP とは、バージン PP と CeF の複合樹脂を指している。本年度は、強度変化による体積増減を考慮せずに、比重のみ考慮した。本実証では、CeF 複合再生 PP の比重が 0.95 であり、ABS の比重は 1.05 である。また、CeF 複合再生 PP と CeF 複合 PP の比重は、同一であると仮定した。

(iv)' 定量化の範囲・内容の設定

2.4.2.1 の(iv)で述べた通り、本事業では、温室効果ガスを CO₂ 換算で評価した。また、本年度の評価範囲を図 2-85、図 2-86 と図 2-87 に示す。下記の LC フロー中で、緑背景で囲まれた範囲が評価範囲である。

本年度は、昨年度の中間報告会で指摘された部品製造工程について、反映している。実際には、CeF 複合樹脂の部品成形については、フォアグラウンドデータとして、射出成形機の稼働データを用いて評価を実施している。ベンチマークの ABS については、実際の射出成形機の制御条件から推定している。

他のプロセスについては、市販のデータベースに基づく算出のため、バックグラウンドデータとなっている。詳細の LC フローについては、後述の図 2-92、図 2-93 と図 2-94 に示している。

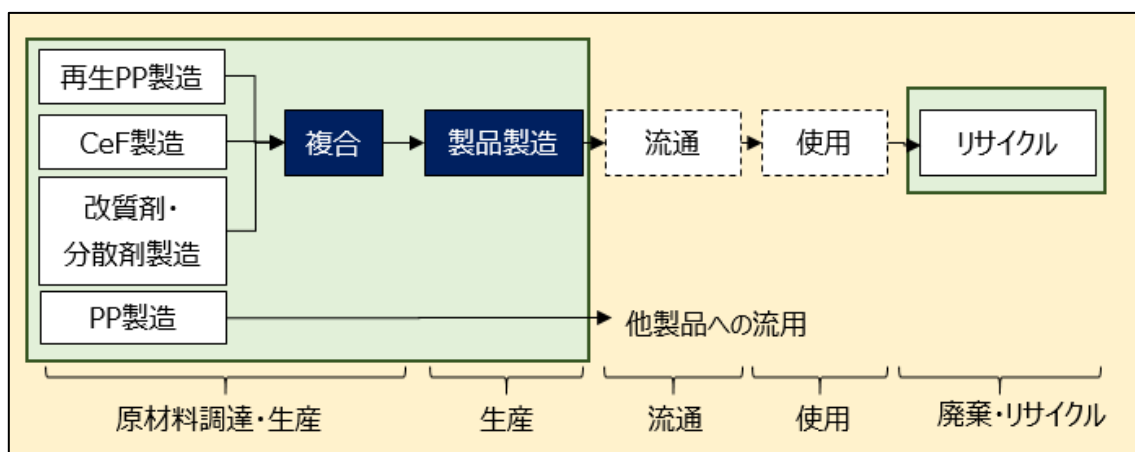


図 2-85 評価範囲の簡略図(本事業 CeF 複合再生 PP)

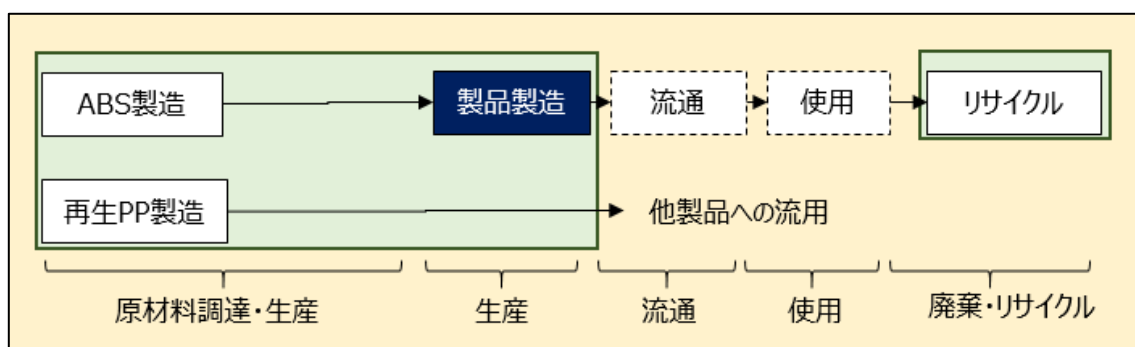


図 2-86 評価範囲の簡略図(ベースライン ABS)

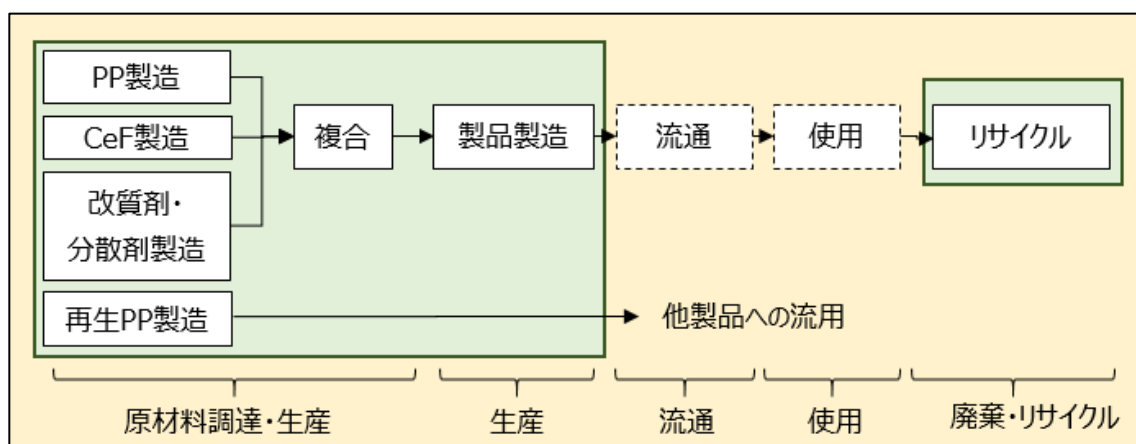


図 2-87 評価範囲の簡略図(ベースライン CeF 複合 PP)

(v)' 削減貢献量の累積方法の決定

2.4.2.1 の(v)で述べた通り、フローベースで評価を実施した。

(vi)' 削減貢献量の定量化

(i)'～(v)'に基づいて、CO₂ 排出量の定量化を実施した。具体的には、各シナリオの条件は、表 2-47 に示す通りに設定した。更に、各プロセスで投入されたエネルギーを市販データベースのインベントリデータから抽出し、データベースのエネルギー起源 CO₂ を積算することで、合計のエネルギー起源 CO₂ を算出した。

また、リサイクル控除として、再生した材料重量だけ、各再生材を生産するのに発生した CO₂ 量を控除した。更に、CeF は植物由来の素材であり、原料としての植物が成長する際に、光合成を行っている。光合成によって、大気中の CO₂ を吸収し、植物体内に糖等として炭素を蓄積する特性がある(以下、炭素固定)。炭素固定による CO₂ 削減は、市販データベースでは取り扱っていないため、今回炭素固定を追加検討した。先行文献¹⁴⁾¹⁵⁾を参考にし、炭素固定により 1.83 kg-CO₂/kg-CeF 減少する形で反映させた。

また、市場代替性を反映しており、本事業では再生 PP を使用している為、従来再生 PP が使用していた他製品には、バージン PP を投入するシナリオとなっている。

結果については、次項で述べる。

表 2-47 各シナリオの算出条件

工 程	プロセス	本事業 CeF 複合再生樹脂	ベースライン ABS	ベースライン CeF 複樹脂
原料調達・生産	原料調達	・再生 PP 製造 ・再生 PS 製造 ・CeF 製造 ・改質剤、分散剤製造 ・PP 製造(他製品用) ・PS 製造(他製品用)	・ABS 製造 ・再生 PP 製造 (他製品用)	・PP 製造 ・PS 製造 ・CeF 製造 ・改質剤、分散剤製造 ・再生 PP 製造 (他製品用) ・再生 PS 製造 (他製品用)
	複合	・CeF 複合再生 PP の実データを使用 (冷却設備等の周辺設備も含む)	なし	・CeF 複合 PP の実データを使用 (冷却設備等の周辺設備も含む)
製品製造	部品製造	・CeF 複合 PP での射出成形の実データを使用※1 (再生 PP とバージン PP のメルトフローを揃えている為、OK と判断した)	・ABS での射出成形の成形条件(設備構成、サイクルタイム)から算出。	・CeF 複合 PP での射出成形の実データを使用
リサイクル	中間処理	・素材回収率 80% ・残り 20%は産業廃棄処理		
	再生	・再生 CeF 複合 PP の製造分だけ控除	・再生 ABS の製造分だけ控除	・再生 CeF 複合 PP の製造分だけ控除

※1 再生 PP のメルトフローレートは、バージン PP のメルトフローレートに揃えている為、OK と判断した。

※2 「本事業の部品製造の原単位」に比べ、「ABS の部品製造の原単位」は約 2% 大きい。ABS の金型温度(50~80 度)と PP の金型温度(40~60 度)を考慮すると、本事業の過大評価にはなっていない為、OK と判断した。

2.4.3. 取組結果

2.4.3.1. CeF 複合再生樹脂の普及について

2030 年の普及量について、想定した結果を表 2-48 に示す。

本実証事業完了時には、まだ CeF 複合樹脂は普及しない為記載をしていない。

まずは、2025 年における性能および量産検証が進んでいる CeF 複合 PP について、スティック掃除機等に適用を図ることで、250 トンの普及を図る。

2030 年においては、CeF 複合 PP について、適用商品を拡大することで、2,510 トンの普及を図る。

また、CeF 複合 PS の性能および量産検証を完了させることで、エアコンや冷蔵庫に対して適用を図り、全体として 2,715 トンの普及を図る。合計で、2030 年には全体として、5,225 トンの CeF 複合樹脂の普及を目論む。

CO2 削減効果については、2030 年時点での普及量での評価を実施した。

表 2-48 将来の CeF 複合樹脂の普及量について

	2025 年	2030 年
製品の市場規模	全体： 250 トン CeF 複合 PP：250 トン	全体： 5,225 トン CeF 複合 PP：2,510 トン CeF 複合 PS：2,715 トン

2.4.3.2. CO2 排出削減効果

本事業でのバージン樹脂(バージン ABS, PS 等)に対する CO2 排出量の削減効果を表 2-49 に示す。

エネルギー起源 CO2 を 1,786t・CO2 eq 分だけ削減できることが判明した。また、非エネルギー起源 CO2 は、本事業により 3,515 t・CO2eq 分だけ削減できることを明確にした。

エネルギー起源 CO2 に着目すると、本事業では「廃棄・リサイクル」は増加しているものの、「原材料調達・生産」が減少しておりトータルとして、CO2 削減につながっていることがわかる。これは、回収樹脂に CeF が含有しているかの選別を実施する為に、リサイクル段階での消費エネルギーが増加したが、それによりバージン ABS・PS を削減できたことが貢献として高いことがわかる。

また、非エネルギー起源 CO2 に着目すると、本事業では、「原材料調達・生産」でのバージン樹脂生産による CO2 削減が図れている。また、CeF 由来の炭素固定については、「廃棄・リサイクル」での非エネルギー起源 CO2 から控除されるが、回収樹脂のほとんどがマテリアルリサイクルされており、CeF の焼却による CO2 排出量が小さいため、全体から見えなくなっている。

表 2-49 普及量を反映した CO2 排出量 (vs バージン樹脂)

単位： t-CO2eq	①評価対象製品(CeF複合再生樹脂)				②ベースライン(バージン樹脂)				③削減量(②-①)			
	原材料調達・生産	生産	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	廃棄・リサイクル	合計
エネルギー起源	7,654	5,239	6,468	19,360	9,686	5,483	5,977	21,146	2,032	244	-490	1,786
非エネルギー起源	4,091	0	4,365	8,457	7,606	0	4,365	11,971	3,515	0	0	3,515
合計	11,745	5,239	10,833	27,816	17,292	5,483	10,343	33,117	5,547	244	-490	5,301

次に、本事業での CeF 複合樹脂に対する CO2 排出量の削減効果を表 2-50 に示す。

エネルギー起源 CO2 を 21 t・CO2 eq 分だけ削減できることが判明した。また、非エネルギー起源 CO2 は、本事業により 49 t・CO2eq 分だけ削減できることを明確にした。

これらの CO2 削減は、どちらも「原料材料調達・生産」で発生している。この要因は、本事業では、CeF 複合樹脂の水平リサイクルが 4 家電の部品では実施されていると想定している（「繰り返し成形での性能」と「回収率」を考慮し、生産量全体の 16%と仮定）。それにより新規に製造する CeF 複合再生樹脂が減少し、樹脂や CeF の製造量や複合工程の処理量が減少したためである。

また、前頁のバージン樹脂に比べて、CO2 削減量が少ないのは、市場代替性の考慮で、厳しめに評価しているためである。今回は、他製品に利用されていた再生樹脂を本事業で利用しようとする、他製品はバージン樹脂で製造しているようにしているため再生樹脂の利用価値が小さくなっている。例えば、水平リサイクルを実施していないスティック掃除機では、CeF 複合樹脂に対する CO2 削減量は 0 t・CO2 eq である。そのため、回収スキームを考慮した水平リサイクルをいかに展開するかが、CO2 削減効果の拡大につながると考えられる。

表 2-50 普及量を反映した CO2 排出量（vs CeF 複合樹脂）

単位： t-CO2eq	①評価対象製品(CeF複合再生樹脂)				②ベースライン(CeF複合樹脂)				③削減量(②-①)			
	原材料調達・生産	生産	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	廃棄・リサイクル	合計
エネルギー起源	7,654	5,239	6,468	19,360	7,675	5,239	6,468	19,382	21	0	0	21
非エネルギー起源	4,091	0	4,365	8,457	4,140	0	4,365	8,505	49	0	0	49
合計	11,745	5,239	10,833	27,816	17,292	5,239	10,343	27,887	70	0	0	70

2.4.3.3. 選別機の普及を考慮した CO2 排出削減効果

本事業で開発した選別機が普及しなかった場合、CeF が意図せず回収樹脂に混入することで発生しうる影響を検討した。

意図しない CeF 混入により再生樹脂の物性は低下するが、そもそもカスケードリサイクルされている為、雑貨品としては、性能は満たしえる。ただし、今回は、厳しく影響を評価する為に、CeF 混入によりマテリアルリサイクルができずに、サーマルリサイクルになると仮定をした。

評価結果を図 2-88 に示す。本事業の選別機が 1 台も普及しなかった場合は、ベンチマーク (CeF 複合樹脂がない場合) に比べて、CO2 排出量が増加する。ただ、本事業の選別機による処理量が約 40% でベンチマークと同等程度の CO2 排出量となる。

このことから、CO2 削減を図るには、「商品への CeF 複合樹脂の適用」と「本選別機による処理量が全体の 40% 以上超えること」が重要である。

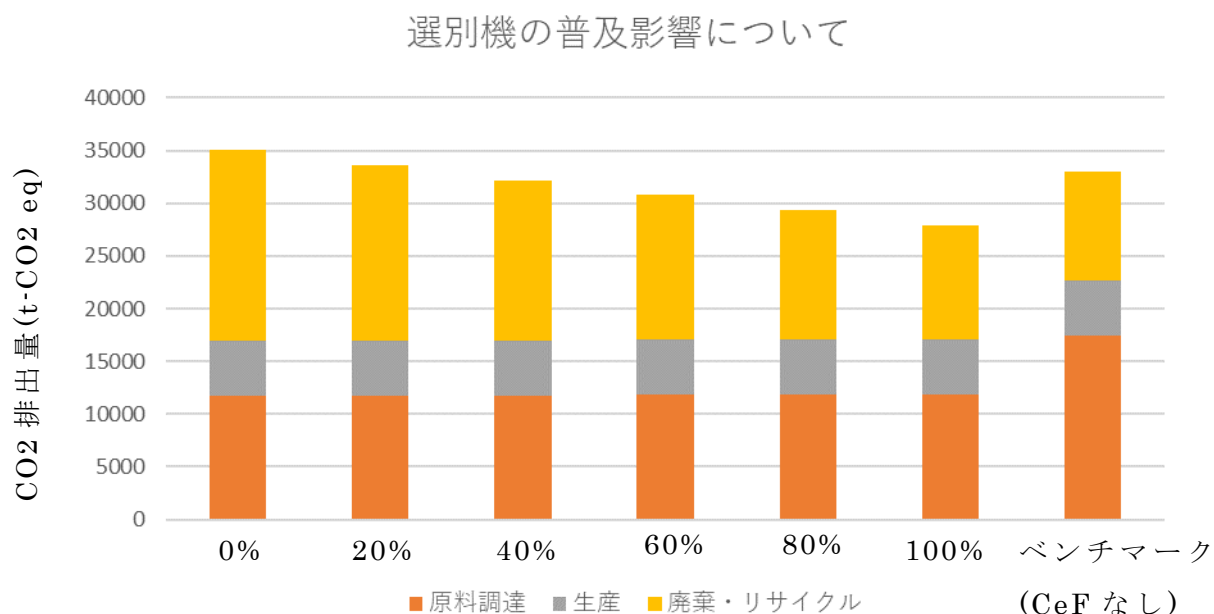


図 2-88 選別機の普及を考慮した CO2 排出量

2.4.4. 結言

本事業により CeF 複合樹脂を 4 商品に適用した LCA を実施した。この結果より、本事業の CO₂ 削減効果として、2030 年度に CeF 複合再生樹脂を 5,225 トン普及することができれば、5,301t・CO₂eq の削減できることを明確化した。今後は、適用商品を拡大した際にも、LCA を実施していくことで、環境貢献の定量的に評価していく。

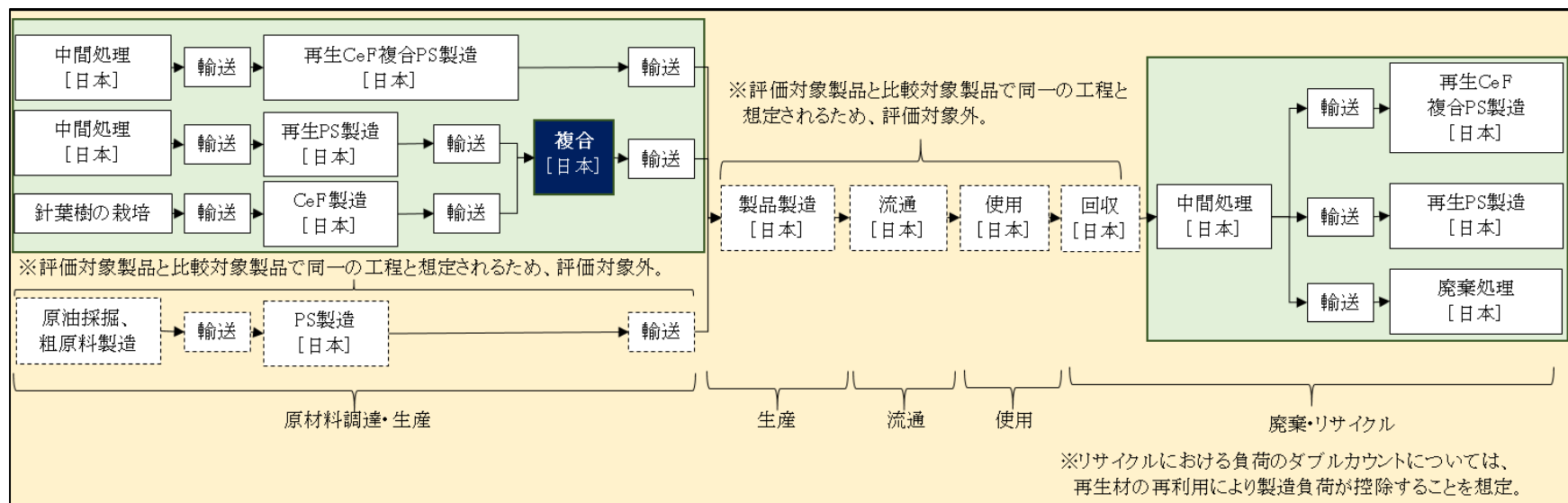


図 2-89 評価範囲の例(本事業 CeF 複合再生 PS)

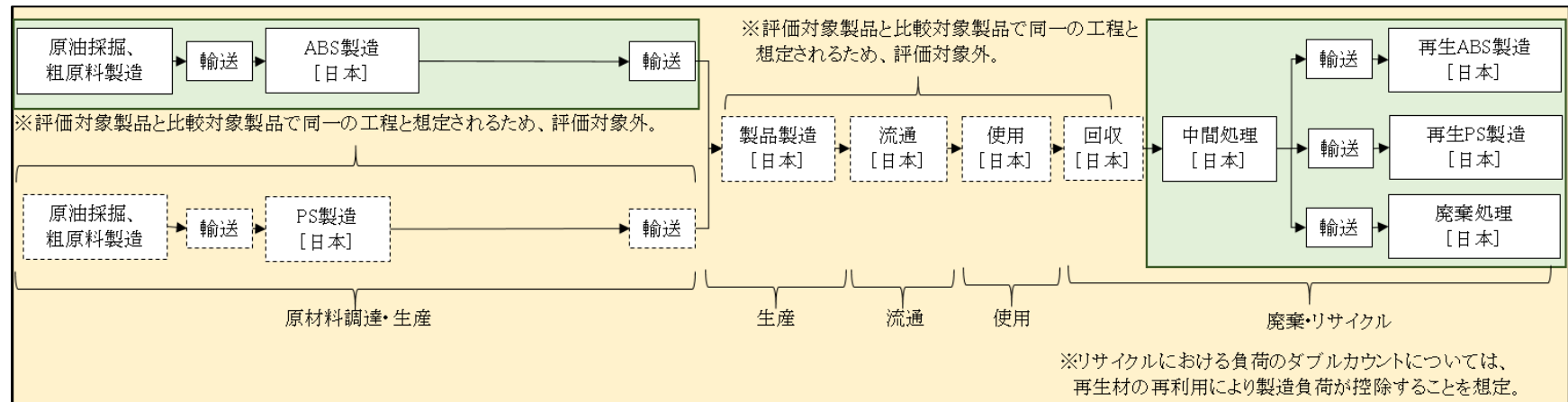


図 2-90 評価範囲の例(ベースライン ABS)

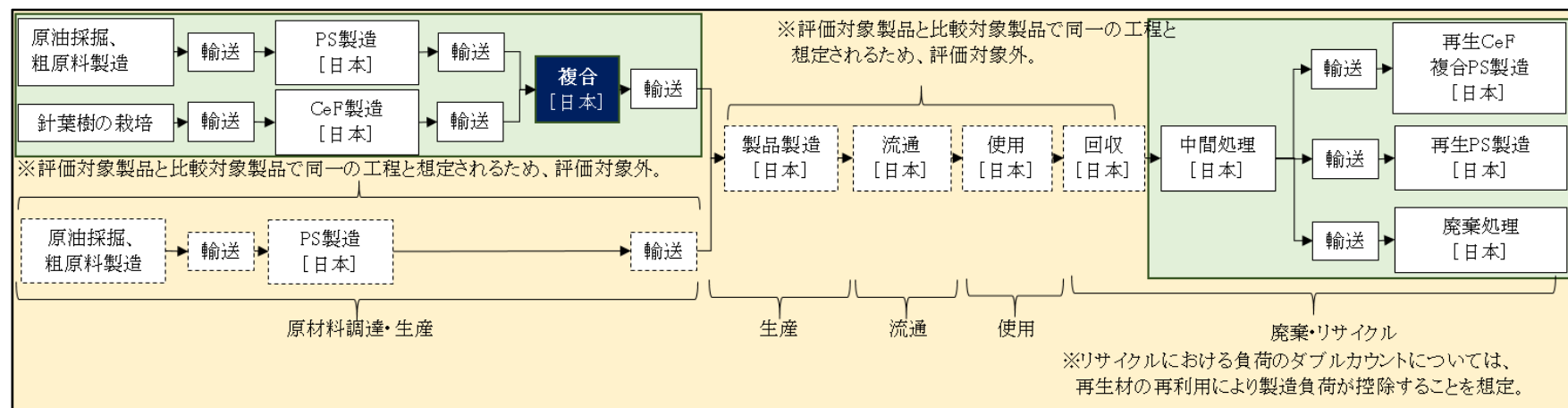


図 2-91 評価範囲の例(ベースライン CeF 複合 PS)

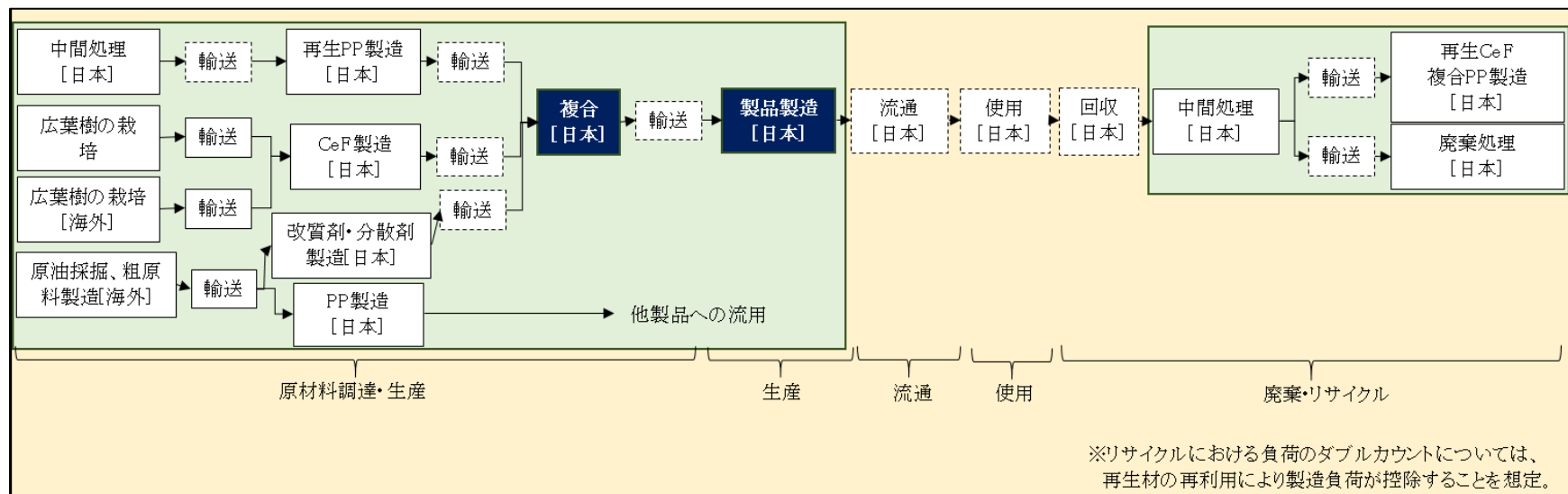


図 2-92 令和 3 年度の評価範囲(本事業 CeF 複合再生 PP)

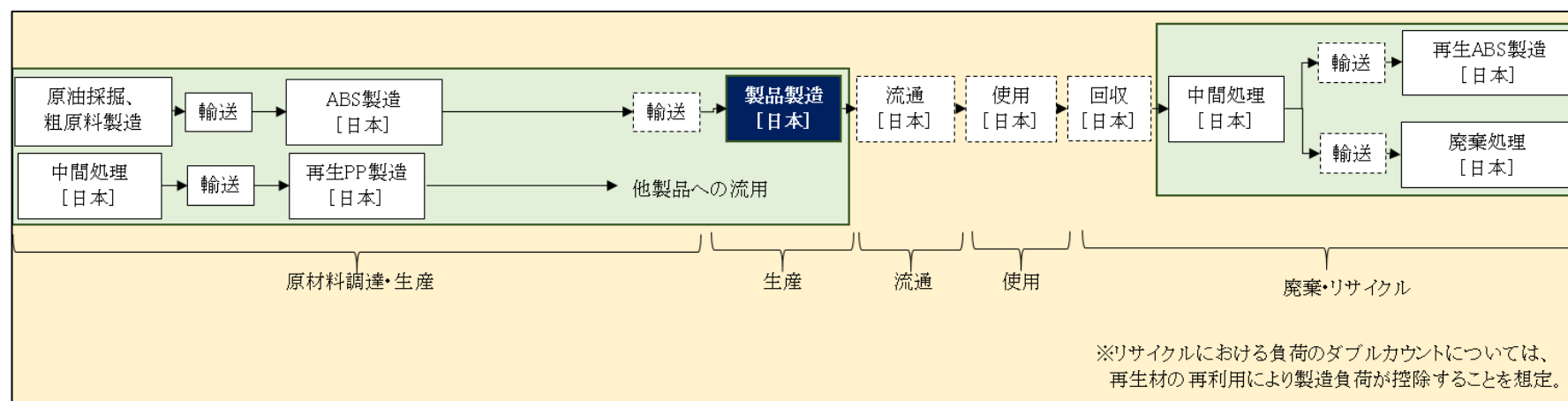


図 2-93 令和3年度の評価範囲(ベースライン ABS)

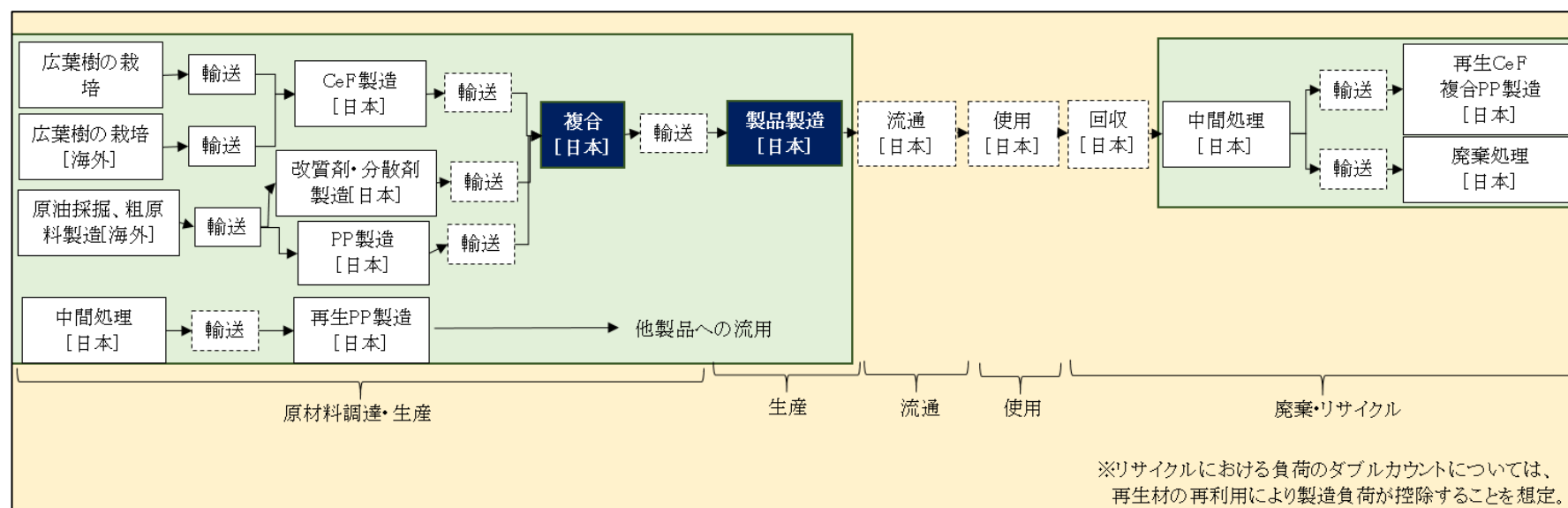


図 2-94 令和 3 年度の評価範囲(ベースライン CeF 複合 PP)

3. 総括と今後の取組み

複合工程の開発について、再生 PP+CeF 複合化については、コスト低減と物性維持(曲げ弾性率・シャルピー衝撃強度)の両立の実現を量産機検証にて実現できた。また、コスト目標 500 円/kg 以下に対し、300 円/kg を達成できた。

スティック掃除機以外の商品適用について、冷蔵庫部品で再生 PP+CeF 複合樹脂により 1 部品の成形試作を実施し、成形性・外観等を検証した。

また、各 CeF 素材の形状特性や形態を観察し、複合化物性との関連を把握した。

一方、再生 PS+CeF 複合化については、バージン PS の物性の 91%を保持できる複合化条件を達成した。再生 PS(複合化なし)の物性に対しては CeF 複合化樹脂の物性向上で優位性を確保できることが検証できた。また、量産混練機での検証を実施し、コンパウンディング量産課題を抽出した。再生 PS +CeF 複合化においては、コスト 300 円/kg を達成見込みである。そして、PP と同様にスティック掃除機以外の適用商品について、冷蔵庫部品について再生 PS+CeF 複合樹脂により 1 部品の成形試作を実施し、成形性・外観等を検証した。

今後の取組みとして、PP と PS に共通して、試作した冷蔵庫部品については、今後、量産成形課題、部品外観課題等を抽出し検討を実施していく。また、信頼性評価試験を実施し商品適用課題も抽出し検討していく。更に適応可能商品拡大に向けた更なるコストダウンを図る。また、冷蔵庫に加え洗濯機、エアコンなどの部品試作と、経時耐久性検証による製品適用評価の実施を行う。

選別工程の開発においては、CeF 複合樹脂を含むミックスプラスチックから純度 80%以上、回収率 60%以上での近赤外線による選別を達成した(CeF 複合濃度 15%において)。また、安定的な選別回収のためには CeF 濃度 15%以上の複合が必要であること、繰り返し成形による茶変の影響はなく、近赤外線の減衰が僅かな黒色顔料を用いることによって、黒色系に調色した場合でも選別回収が可能であることを見極めた。今後としては、CeF 複合樹脂のリサイクルシステム普及に向けて、さらなる選別装置の低コスト化、汎用化を検討していく。

資源循環システムへの影響評価においては、CeF 複合樹脂の普及に伴う、再生樹脂への意図しない CeF の混入を想定し、影響を評価した。その結果、近赤外線選別を実施した場合には、大幅な物性低下は見られないことを見極めた。

既存リサイクルシステムへの影響最小化に向けた施策として、①CeF 濃度 15～20%(低濃度)での活用、②CeF 適用樹脂母材を PP および PS に限定、③CeF

複合樹脂に対応した選別装置の導入促進について、3つの施策を提言した。

本事業により CeF 複合樹脂を 4 商品に適用できた場合、5,301t-CO₂eq の削減が図れる。今後は、適用商品を拡大した際にも、LCA を実施していくことで、環境貢献の定量的に評価していく。

【参考文献】

- 1) 環境省「令和元年度環境省委託業務 脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業(バイオ由来素材を複合した再生樹脂の適用技術実証)」委託業務成果報告書 令和 2 年 3 月 p.29
- 2) 環境省「平成 29 年度環境省委託業務 セルロースナノファイバー性能評価事業委託業務(CNF の家電製品搭載に向けた性能評価および導入実証)」成果報告書 平成 30 年 3 月 p.61
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cnf/mat42_panasonicH29.pdf
- 3) 藤澤秀次 TEMPO 酸化セルロースナノファイバー/高分子複合材料の基礎的物性, 森林科学 81 2017.10, PP15-18
- 4) Matheus Poletto Polystyrene cellulose fiber composites: effect of the processing conditions on mechanical and dynamic mechanical properties, revista Matéria, v.21, n.3, pp. 552 – 559, 2016
- 5) BENGTSSON, M., LE BAILLIF, M., OKSMAN, K., “Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fibre-polypropylene composites”, Composites Part A, v. 38, pp. 1922-1931, 2007.
- 6) LE BAILLIF, M., OKSMAN, K. “The effect of processing on fiber dispersion, fiber length, and thermal degradation of bleached sulfite cellulose fiber polypropylene composites”, Journal of Thermoplastic Composite Materials, v. 22, n.2, pp. 115-133, 2009
- 7) MANO, B., ARAÚJO, J.R., SPINACÉ, M.A.S., et al., “Polyolefin composites with curaua fibres: effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions”, Composites Science and Technology, v. 70, pp. 29-35, 2010.
- 8) Azizi Samir MAS, Alloin F, Dufresne A (2005) Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. Biomacromolecules 6: 612–626
- 9) 経済産業省.” 家電リサイクル法(特定家庭用機器再商品化法)”. 経済産業省. https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/kaden_recycle/index.html, (参照 2022.1.25)
- 10) 日本 LCA 学会「温室効果ガス排出削減貢献量算定ガイドライン」、2015 年 2 月
- 11) 経済産業省「温室効果ガス削減貢献定量化ガイドライン」、2018 年 3 月
- 12) 環境省「令和元年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム

構築実証事業公募要領(二次公募)」、令和元年 7 月

- 13) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ、一般社団法人 サステナブル経営推進機構「LCI データベース IDEA version 2.3」、2019 年 12 月
- 14) Sun、X.Z.; Moon、D.; Minowa、T. Evaluation of energy consumption and greenhouse gas emissions in preparation of cellulose nanofibers from woody biomass. Am. Soc. Agric. Biol. Eng. (ASABE)2013、56、1061-1067
- 15) Unwin、G.L; Kriedemann、P.E. PRINSIPLES AND PROCESSES OF CARBON SEQUESTRATION BY TREES. Research and Development Division: State Forests of New South Wales、Australia、2000