

平成 29 年度環境省委託業務

平成 29 年度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

パナソニック株式会社

<総括>

近年、様々な分野において植物由来の素材でありながら鋼鉄の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)が注目され、その活用が検討されている。地球環境保護、省エネルギーの観点からも、色々な製品等の基盤となる樹脂材料をCNFで補強したCNF活用材料(複合樹脂等)を使用することで、CO₂を効果的に削減することを目的とした、CNF性能評価事業が環境省で進められている。

CNFは植物由来のカーボンニュートラルな材料で、素材の軽量・高強度な特長から自動車、家電、住宅建材などの様々な分野の製品への活用が期待され、国内において精力的な活動がされている。そこで、国内市場規模が大きく、CO₂排出量削減のポテンシャルが大きく、比較的開発期間が短く様々な種類を有する家電分野に適用することで早期社会実装を実現する可能性があり、家電適用は各分野への普及に対する先導役となってCNF活用普及の起爆剤となり得る。

上記の背景を踏まえ、本業務では家電製品への適用可能性を市場や製品特性から調査し製品ライフサイクルの観点から製品使用、物流、廃棄・リサイクルにおけるCO₂排出量評価をするとともに、代表製品として冷蔵庫および洗濯機の部品を用いて実製品搭載に必要な特性を明確にするとともに、部品成形品の単体評価および実製品組み込み時の性能評価を実施した。評価部品の作製に当たっては評価可能な部品設計とそれに基づいた金型設計、製作を行った。また、リサイクル性検証として、選別技術および再生技術の可能性を評価した。その結果を以下に示す。

(1) CNF 展開効果検証・調査

ここでは、CNFを家電製品に適用、さらに展開していった際のCO₂排出量削減量を算出するための市場調査、技術的な動向を把握するための特許調査を行った。

(1) - 1 CO₂ 排出量削減効果試算調査

CNFを家電に適用した際のCO₂排出量削減効果を試算するため、置き換えを検討する材料について、素材生成、部品加工から廃棄・リサイクルまでの製品ライフサイクルの観点でCO₂排出量の算定スキームを構築し、製品および使用部品の重量を想定して計算を行った。

対象とした材料は、

- ・GFPP(ガラス繊維入りPP樹脂):洗濯機等の部品として使用
- ・冷延鋼板:一般的に外装等に使用。今回は冷蔵庫用に補強部材として使用されているものを対象に検討を行った。

その結果を表1に示す。単位は kg-CO₂/個。製品1個あたり GFPP が 1kg、冷延鋼板は 1.5kg 使用されているのに対して CNF1kg を置き換えるという仮定で計算を行った。

表1 各材料の CO₂ 排出量 (単位: kg-CO₂/個)

	素材	部品加工	廃棄・リサイクル	合計
GFPP	2.346	2.581	2.597	5.178
冷延鋼板	1.710	4.275	-1.830	2.445
CNF-PP	1.703	1.873	-0.456	1.417

表1に示すように、CNFは部品加工でCO₂を多く排出するがリサイクルで回収できると考えられる。ここで回収とはその材料を燃焼させて得られる熱量と同等の熱量を重油を燃やして得た場合に排出されるCO₂として換算し、その分が削減できるとした。素材から廃棄・リサイクルまでの合計で1台あたりのCO₂排出量削減効果は、GFPPからCNFへの置き換えの場合に3.761kg、鋼板からCNFへの置き換えの場合に1.028kgとなる。今後、このデータを基に商品毎に置き換える材料と量を定めてCNF適用時のCO₂排出量削減効果を導出する。なお、製品使用時、物流における効果については本業務での検討及び更なる調査・分析から明確にする。

(1) - 2 家電適用に関係する特許調査

冷蔵庫や洗濯機を中心としてOA機器、パソコン等を含め広い範囲を対象にCNF複合樹脂の適用を含む出願特許に関する調査を行った。その際に、剛性、成形性、着色自由度、断熱性、リサイクル性およびコストの観点で技術分類を行った。調査ステップとしては、最初にマクロ分析により全体像を把握した上でフォーカスする案件をある程度絞り込んで詳細な調査を行った。

マクロ分析では、CNFおよび有機高分子化合物、プラスチックの加工といったキーワードから1098件を抽出して分類を行った。その結果、特許出願は10年前ほど前から急激に活発になり、製紙メーカーや化学メーカー、大学が上位を占めていることが分かった。

さらに、マクロ分析結果をもとに検索式を修正して1308件を再抽出し詳細分析を行った。その結果、機能的に剛性(軽量化)を目的とした特許が約半数を占め、次にリサイクル性、成形性が10%以下で続いていた。また、適用対象としては、明確に定めていない例が9割近くを占めており、現在はCNFの高剛性という特性に着目はされているが具体的な活用に至っていない状態であることが分かった。

(2)家電部品への適用検証

家電部品への適用検証について本業務では以下の4部品について、それぞれに示す狙いで具体的に形状を設計し成形試作を行い、性能を確認した。

・冷蔵庫部品「センターピラー」

両開き扉の隙間を埋める部品で庫外側表面への結露防止にヒータを内蔵している。そのヒータ出力低減と庫内への熱侵入低減が課題で、構造補強に用いられている鋼板を取り除き CNF を活用した構造にすることで消費電力量を削減する。一方で庫内と庫外の温度差により発生する反りを構造的に抑える必要がある。

・冷蔵庫部品「クロスレール」

冷蔵庫本体の仕切り板前面に位置し鋼板になっている部分。結露防止の高温パイプが配置されその熱が庫内に侵入しており、伝熱経路の熱伝導を下げる目的で CNF への置き換えを検討した。但し、この部位は筐体の変形を抑える役割も担っているため剛性との両立が必要である。

・洗濯機部品「脱水受け」

ドラム式洗濯機のドラム周囲を囲っているガラス繊維樹脂 (GFPP) で回転ドラムを支える役割を持つ。現在リサイクルができていない GFPP に対して CNF でリサイクルを可能にすることで CO2 排出量削減を図る。但し、ドラムを支持するため一定の剛性が必要となる。

・洗濯機部品「バランスー」

ドラム式洗濯機のドラム先端部に設置されているリング状の樹脂製 (PP) の部品で内部に液を入れて乾燥時の回転振れを抑える役割を持つ。CNF を活用することで同部品の薄肉軽量化を行い、回転時の負荷を軽減することで乾燥時の消費電力削減を図る。置き換えには現状と同等の剛性が必要であり、構造解析を用いて薄肉設計を行った。

(2)－1 冷蔵庫部品への適用検証

(2)－1－1 冷蔵庫への適用部品設計

①センターピラーの解析設計

センターピラーに CNF を適用するために以下の項目について構造解析および伝熱解析を行い、現行の冷蔵庫実機に組み込んで構造面や消費電力(または熱侵入量)評価が実施できるよう取り付けに配慮した試作形状を決定した。

・熱変形評価

庫内と庫外の温度差によって生じるセンターピラーの反りをスペック内に入るように庫内側、庫外側の部品それぞれの肉厚や形状を変えて解析を行

った。温度条件は、庫内/庫外 = 5°C/30°C、5°C/-5°Cの2通り。

・伝熱評価

結露防止のため結露防止ヒータを設けて庫外側表面の温度を一定以上になるようにヒータ出力を調整する。その際のヒータ出力、および庫内側への熱侵入量を解析評価した。

・荷重変形評価

両端支持構成において中央に荷重をかけた場合の曲げ変形量を計算しセンターピラーの剛性を評価した。

以上の解析結果より、2部品を組み合わせて構成するセンターピラーの庫内側のケースを CNF に置き換え板厚を1.5倍にし、冷蔵庫実機に組み込んで構造面や消費電力(または熱侵入量)を検証するため取り付け可能な形状とした。また、剛性面を考慮して内部に向けたリブ構造を成形できる形とした。

②クロスレールの解析設計

クロスレールのみで現行の鋼板に対して同等の剛性になる CNF 樹脂の形状は成立しないことが明確になったため、冷蔵庫筐体全体で冷蔵庫の変形を抑制することで CNF 適用を実現することとし、構造解析を用いてその可能性検討を行った。その結果、CNF 樹脂との組み合わせで成立する可能性を示すことができ、熱構造解析を用いて CNF 樹脂を用いたクロスレールの設計を行った。具体的には、現状の冷蔵庫に組み込み可能な形状範囲内で庫内への熱侵入量削減と冷蔵庫筐体変形を抑える構造として成形性も加味して板厚 4 mmを基本とする設計を行った。

(2) - 1 - 2 冷蔵庫への適用部品向け金型設計・製作・評価

解析設計によって導出された冷蔵庫部品のセンターピラーおよびクロスレールについて樹脂流動解析を用いた金型設計を実施し、検証用部品成形金型を製作した。具体的には、金型内充填パターン、圧力分布、ウェルドライン、ヒケの評価を行い、ゲートの数とレイアウト、充填時間、金型温度、保圧制御等の条件を決定した。

①センターピラーの金型設計・製作・評価

金型は充填性を高めるため、ランナー方式をホットランナーとし、ゲート方式をサイドゲート3点として設計を行った。また、充填性確認のため、流動解析を実施してゲート位置を設定、充填性に問題ないと判断した。

流動解析によって設計した金型を製作し、CNF15wt%の複合樹脂を用いて成形試作品を製作した。なお、成形品はマスターバッチ方式の着色剤を用いて白着色した。

センターピラーの成形結果を表2に示す。

表2 センターピラー成形結果一覧

形状	充填性	問題なし
	寸法	問題なし
	ソリ(目標 2mm 以下)	大(10mm 以上) ⇒矯正後問題なし
外観	目視	問題なし
	着色性	問題なし
	ヒケ	大きな問題なし
	ウェルド	大きな問題なし

②クロスレールの金型設計・製作・評価

クロスレール金型については、3部品を対象とし、充填性を高めるため、ランナー方式をホットランナー、ゲート方式をサイドゲートとした。また、流動解析により長尺の2部品についてウェルド発生の懸念があったためヒート&クール成形可能な仕様とした。

流動解析結果を基に金型設計、製作を行い、保圧力を調整して寸法が公差内に入る成形条件を見出し、成形を行った。成形結果を表3に示す。

表3 クロスレール成形結果一覧

		クロスレール①	クロスレール②	クロスレール③
形状	充填性	問題なし	問題なし	問題なし
	寸法	問題なし	問題なし	問題なし
	ソリ	問題なし	問題なし	問題なし
外観	目視	問題なし	問題なし	問題なし
	着色性	問題なし	問題なし	問題なし
	ヒケ	大きな問題なし	大きな問題なし	大きな問題なし
	ウェルド	大きな問題なし	大きな問題なし	問題なし

(2) - 1 - 3 冷蔵庫への適用部品の評価

センターピラー、クロスレールの CNF 試作部材について、単体評価および冷蔵庫組込み評価を実施した。

単体評価においては信頼性試験として、耐熱性試験、耐湿耐熱繰返し試験、冷熱試験を行った。

冷蔵庫への組込み評価はセンターピラー、クロスレール別々に組み込んで評価を実施した。センターピラーは表面温度を測定してヒータ出力低減量を推算して消費電力削減量を導出した。また、クロスレールは消費電力量を直接測定、評価した。

それらの結果を表4に一覧で示す。CO2削減効果は当社製品に搭載したとして算出を行った。結論は、冷蔵庫としての設計対応や材料のさらなる高剛性化は必要となるもののCNFは適用可能と判断できた。

表4 冷蔵庫部品適用検証結果一覧

	機能特性			信頼性			CO2削減量 (万トン/年)
	剛性	成形	着色	耐熱	耐湿耐熱	冷熱	
センターピラー	△	○	○	○	○	○	▲0.02
クロスレール	△	○	○	○	○	○	▲0.1

(2) - 2 洗濯機部品への適用検証

(2) - 2 - 1 洗濯機への適用部品設計

①脱水受けの解析設計

洗濯機の脱水受けについては、現状の材料であるGFPPをCNFに置き換えた場合にリサイクルが可能になることによってCO2排出量を削減できる効果を狙いとす。そのため、構造解析によって現行のGFPP製脱水受けの変形状態と同等の変形になる構造および材料剛性の検討を行った。変形解析評価は洗濯および乾燥時の実際の荷重に近い条件とするため脱水受けの回転シャフトを支える軸受部にシャフトが傾くモーメントを設定して行った。

その結果、材料剛性を約1.5倍にした上で角R部の一部を補強する構造変更することで現行同等の剛性が実現できることを導出できた。このことにより、前述の材料変更によるリサイクル時のCO2排出量削減効果から、当社製品適用により年間約0.7万トンのCO2削減が期待できる。

本部品は非常に大きな部品で金型製作には多大な費用が必要となるため、解析設計のみの取り組みとする。

②バランスーの解析設計

バルンサーの軽量化により乾燥時等の回転負荷を軽減することで消費電力削減が可能になることを狙いとする。具体的には、構造解析を用いて CNF 適用時のバルンサー肉厚と変形量の関係を明確にし薄肉化の設計を行った。

その結果、約0.6倍の肉厚で現行同等の剛性を得られることが導出でき、それに基づいて肉厚を決定、重量が約13%減となる設計ができた。

(2)－2－2 洗濯機への適用部品の金型設計、製作、評価

設計したバルンサーについて流動解析を用いて金型設計を行い金型を製作した。金型は充填性を高めるためランナー方式をホットランナーとし、ゲート点数を従来よりも増加させた構成とした。

製作した金型を用いて部品を成形し評価を行った。その評価結果を表5に示す。

表5 バルンサー成形評価結果一覧

		バルンサーA	バルンサーB
形状	充填性	問題なし	問題なし
	寸法	問題なし	問題なし
	ソリ	問題なし	問題なし
外観	目視	問題なし	問題なし
	着色性	問題なし	問題なし
	ヒケ	大きな問題なし	大きな問題なし
	ウェルド	大きな問題なし	大きな問題なし

(2)－2－3 洗濯機への適用部品の評価

製作したバルンサーに対して、単品評価および洗濯機に組み込んだ評価を実施した。単品評価として、耐候性試験、耐寒性試験、高温連続試験、カビ試験を行った。実機組み込み評価は、洗濯物を入れない無負荷条件でのドラム回転時の消費電力評価を行った。それらの結果を表6にまとめる。

単体評価ではすべての項目で問題のないことを確認できた。実機組み込み評価では、組立ばらつき等の範囲内で明確な消費電力削減効果は確認できなかったものの実際に軽量化ができており設計の工夫による更なる効果拡大の可能性も示すことができた。今後継続して CNF 適用の実用化を検討していく。

表6 洗濯機部品適用検証結果一覧

	機能特性			信頼性				CO2削減量 (万トン/年)
	剛性	成形	着色	耐候	耐寒	高温	カビ	
脱水受け	-	-	-	-	-	-	-	▲0.7
バランスー	○	○	○	○	○	○	○	▲0.1

(※)バランスーのCO2削減量は重量実測値に基づいた軽量化(▲9%)から算出

(3)リサイクル性の検証

リサイクルに関しては、

- ・選別：様々な種類の樹脂から単一種類を選別する工程
- ・再生：選別した樹脂の物性を回復、再生する工程

の2つの工程についてそれぞれ取組みを行う。

(3)-1 選別技術の検証

CNF 複合樹脂の選別は以下の2つの目的に大別できる。

(目的1) CNF 複合樹脂の母材樹脂の選別

(目的2) 樹脂へのCNF含有/非含有の選別

目的1、目的2に対して、以下の3つの方式の検出技術の有効性を評価した。

(検出技術1) 水比重方式

(検出技術2) 中赤外分光方式

(検出技術3) 近赤外分光方式

その結果、近赤外分光方式によって母材樹脂の種別(PPとABS)と含有率10%以上のCNFについては、CNFの含有/非含有を認識できることが分かった。

また、近赤外分光による3種同時選別実験装置を用いて選別試験を行ったところ、表7のような結果となり、目標とする回収率60%以上、純度80%以上、をクリアし、CNF複合樹脂が選別可能であることが検証できた。

表7 選別試験結果

	1連目	2連目	3連目
N5平均	PP-CNF	PP	PS
純度	100%	93%	100%
回収率	92%	74%	67%

(3)－2 再生技術の検証

CNF 複合樹脂の再生に関する検証は以下の観点で行った。

- ・材料強度の劣化

繰返し成形における材料強度の低下度合いを検証

- ・成形性の劣化

繰返し成形における成形性の劣化を MFR 値で検証

その結果、

材料強度においては、1回再生成形時は配合比率によらず目標である90%以上をクリア。繰返し成形時も処方混練工法の条件調整により可能であることが検証できた。

また、成形性については、1回再生成形時は配合比率によらず劣化がないことが確認でき、繰返し成形時も添加処方を加えることでMFR増加を抑制できことが検証できた。

<Summary>

Cellulose nanofiber (CNF) has been attracting a great deal of attention in various fields in recent years. Cellulose nanofiber is a material extracted from plants. It weighs 80% less than steel, but is five times stronger. With such properties, cellulose nanofiber has been examined for its effective use. It is considered from the viewpoint of global environment protection and energy saving that using a CNF-reinforced material (composite resin, etc.), which is created by reinforcing a resin material making up various products with CNF, is an effective approach for reducing CO₂ emissions. Consequently, the Ministry of the Environment has embarked on a CNF performance assessment project, aiming for the effective reduction in CO₂ emissions through the utilization of CNF-reinforced material.

CNF is a carbon-neutral material extracted from plants. Being light and strong, the material is expected to be used in products from various fields, such as cars, household appliances, and housing building materials. We now have full-fledged activities in place for identifying CNF applications in the domestic market. The wide use of CNF may be achieved quickly by applying CNF first to household appliances – an industrial field that offers a large domestic market and the possibility of a greater reduction in CO₂ emissions, relatively shorter product development periods, and a wide variety of products. Applying CNF to the field of household appliances may lead to use of CNF in other fields, thus triggering the widespread use of CNF in various fields.

Based on the above perspective, a project has been implemented to examine the possibility of applying CNF to household appliances while taking market conditions and product characteristics into consideration; to assess the volume of CO₂ emissions during product use, physical distribution, and waste disposal/recycling from the viewpoint of product life cycles; to identify the expected properties of CNF-reinforced material incorporated in actual products using parts of refrigerators and washing machines as typical products; and to assess molded components as single units as well as the performance of CNF-reinforced materials incorporated in actual products. In the process of fabricating components for evaluation, designs for enabling evaluation, tooling design based on the designed components, and tooling fabrication were investigated. To confirm the CNF's potential for recycling, selection technology and recycling technology were studied. The results of these investigations are shown below.

(1) Verifying/researching the effects of expanded use of CNF-reinforced material
We have conducted market research to calculate the volume of reduction of CO₂ emissions achieved through the application of CNF to household appliances and the expanded use of CNF in various products. We also conducted research on patents to investigate the direction of technical trends.

(1)-1 Calculation to determine CO₂ emission reduction effects

To determine CO₂ emission reduction effects achieved by applying CNF to household appliances, we have defined a method of calculating the volume of CO₂ emitted by materials to be replaced with CNF-reinforced materials, in view of the product life cycle including the stages of material preparation, parts processing, and waste disposal/recycling. We have thus calculated CO₂ emission volumes, taking product/parts weights into consideration.

The calculations have been made for the following materials.

- GFPP (PP resin containing glass fibers): It is used in parts of washing machines, etc.
- Cold-rolled steel sheet: It is usually used as exterior material, etc. In this test for CO₂ emission calculation purposes, a cold-rolled steel sheet used as reinforcing material in refrigerators is examined.

The calculation results are shown in table 1 below. The CO₂ emission volume is expressed in kg-CO₂/unit. The calculation is made on the assumption that 1 kg of GFPP and a 1.5 kg cold-rolled steel sheet included in a single product are replaced by 1 kg of CNF.

Table 1 Volume of CO₂ emitted by materials (unit: kg/unit)

	Material	Parts processing	Waste disposal/ recycling	Total
GFPP	2.346	2.581	2.597	5.178
Cold-rolled steel sheet	1.710	4.275	-1.830	2.445
CNF-PP	1.703	1.873	-0.456	1.417

As shown in table 1, it is considered that CNF-PP emits a substantial amount of CO₂ during parts processing but CO₂ is recycled during waste disposal/recycling. This "recycling" means that burning CNF-PP produces heat equivalent to that produced by burning heavy oil and because the burning heavy oil emits more CO₂, the difference between the calculated heavy oil's CO₂ emissions and the CO₂ emissions of CNF-PP is defined as a portion of CO₂ reduction. The total reduction of CO₂ emissions per unit through the stages of material preparation to waste disposal/recycling amounts to 3.761 kg for the case of replacing GFPP with CNF-PP and to 1.028 kg for the case of replacing a cold-rolled steel sheet with CNF-PP. Based on this data, a material to be replaced with CNF and the amount of replacement of such a material will be determined for each product to derive the effects of CO₂ emission reduction achieved by using CNF. CO₂ emission reduction effects by CNF-containing products during product use and the physical distribution process will be clarified through examinations in this project and further research and analyses.

(1)-2 Research on patents related to the application of CNF-reinforced materials to household appliances

We have conducted research on cases of filed patents describing the application of the CNF composite resin to a wide variety of products ranging from refrigerators and washing machines to OA equipment and personal computers and have classified patent technologies according to the categories of rigidity, ease of molding, degree of freedom in coloring, heat insulating property, recyclability, and cost. We have carried out the research through a series of steps, first grabbing an overview of the all patent technologies by a macro-analysis and then focusing on some important cases to examine them in detail.

At the step of macro-analysis, we have extracted and classified 1098 cases using such keywords as "cellulose nanofiber," "organic polymer compound," and "plastic processing." The analysis has revealed that patent applications increased abruptly about 10 years ago and that the major applicants were paper manufacturers, chemical manufacturers, and universities.

Based on the results of a macro-analysis, we have extracted another 1308 cases using a corrected search formula and analyzed them in detail. This time we have found that patents related to improved rigidity (leading to lower weight) account for approximately half of all patent cases and those related to enhanced recyclability and ease of molding account for 10% or less. Nearly 90% of the cases fail to define the scope of inventions. We have thus found that CNF has now become the center of attention because of its high rigidity but is not used in specific applications yet.

(2) Verifying the application of CNF to household appliance parts

In this project, to test the potential application of CNF to household appliance parts, we created prototypes of the following four parts made of CNF and evaluated their performance.

- Center pillar (refrigerator part)

A center pillar is a part that fills the gap between the double doors of a refrigerator. It has a built-in heater that prevents dewing on the refrigerator's exterior. The center pillar has issues to be resolved - a reduction in power output from its heater and suppression of heat inflow to the refrigerator. A steel sheet, which reinforces the pillar structure, is replaced with CNF to reduce power consumption by the center pillar. On the other hand, material warp generated by the temperature difference between interior and exterior of the refrigerator needs to be minimized by structural means.

- Cross rail (refrigerator part)

A cross rail is a steel sheet placed in front of the partition of the refrigerator body. The cross rail carries a high-temperature pipe for preventing dewing and the heat from the pipe flows into the refrigerator. We studied replacing the steel cross rail with a CNF-based rail to reduce heat conduction and to prevent this part serving as a heat transfer path. However, this part also plays the role of suppressing the deformation of the refrigerator's casing, and should therefore be rigid.

- Spin-drying support (Washing machine part)

This is glass fiber resin (GFPP) that encircles the rotary drum of a drum-type washing machine to support the drum. This support made of GFPP, which is not recyclable, is to be replaced with a support made of CNF, which is recyclable. This also allows a reduction in CO₂ emissions. The support must be rigid enough to properly support the drum.

- Balancer (Washing machine part)

This ring-shaped resin (PP) part is installed around the tip of the drum of a drum-type washing machine to suppress the swinging of the drum when it rotates with liquid inside. Our intention was to apply CNF to make this part thinner and lighter to reduce the workload during rotation as well as the power consumed during the drying cycle. To replace this part with CNF, rigidity equivalent to that of the currently-used part is necessary. A thinner material design was made by applying structural analysis.

(2)-1 Verifying application to refrigerator parts

(2)-1-1 Designing parts used in a refrigerator

1) Analyzing/designing the center pillar

To apply CNF to the center pillar, structural analyses and heat transfer analyses including the following evaluations were carried out to determine the shape of the prototype, assuming installation in an existing refrigerator to enable assessment of its structure and power consumption (or heat penetration).

- Evaluating thermal deformation

Warping of the center pillar caused by the temperature difference between the inside and outside of the refrigerator was analyzed by changing the material thickness and shape of the inside and outside component for maintaining the warp within the refrigerator's specifications. Two temperature conditions are assumed: inside temperature 5°C/outside temperature 30°C and inside temperature 5°C/outside temperature -5°C.

- Evaluating heat transfer

The center pillar is equipped with a dewing prevention heater, whose power output is adjusted to keep the temperature of the refrigerator

exterior at a certain level or higher. The heater power output and the amount of heat penetration to the refrigerator were assessed and analyzed.

- Evaluating deformation caused by a load

The amount of bending deformation of the center pillar of a double-supported structure caused by a load applied to its center was calculated to evaluate the center pillar's rigidity.

Based on the results of the above evaluations, a prototype center pillar was created by combining two parts with its inside case replaced with CNF and making it 50% thicker. This prototype was made into a shape attachable to an existing refrigerator so that the prototype incorporated therein could be verified in terms of structure and power consumption (or heat penetration). The prototype was also given a structure in which internal ribs can be formed to enhance its rigidity.

2) Analyzing/designing the cross rail

Our evaluations revealed that the rigidity of the CNF cross rail equivalent to that of the current steel sheet could not be achieved by cross rail alone, so the strategy was changed to minimize the deformation of the refrigerator by the overall structure of the refrigerator casing to permit CNF to be employed. Its feasibility was investigated using structural analysis. The result indicated the possibility of combination with CNF resin, and a cross rail design using CNF resin was made based on the thermal structural analysis. The structure was designed to enable integration in an existing refrigerator, while reducing heat penetration into the interior and minimizing deformation of the refrigerator casing. To maximize ease of molding, the design employed a basic material thickness of 4 mm.

(2)-1-2 Designing, manufacturing and evaluating molds for parts used in a refrigerator

For the refrigerator center pillar and cross rail, designed based on the results of the design analysis, a mold design was made using a resin fluidity analysis. A mold was manufactured to allow these components to be analyzed. An assessment was made of the resin filling pattern in the mold, pressure distribution, weld lines, and shrinkage, after which the number of gates and their layout, filling time, mold temperature, and pressure-maintaining control were determined.

1) Center pillar mold design, manufacturing and evaluation

To ensure successful filling of the mold, we adopted a hot runner and three side gates. To guarantee complete material filling, the gate positions were determined using a fluidity analysis. We confirmed no problem with material filling.

A mold designed by a fluidity analysis was manufactured and prototype parts were produced using composite material with CNF at 15 wt%. The molded parts were colored in white using a master batch-type coloring agent.

The results for the molded center pillar are shown in Table 2.

Table 2. Center pillar molded results

Shape	Material filling	No problem
	Dimension	No problem
	Warpage (target 2 mm or less)	Large (10 mm or greater) ⇒ No problem after correction
Appearance	Visual check	No problem
	Coloring	No problem
	Shrinkage	No major problems
	Weld	No major problems

2) Cross rail mold design, manufacturing and evaluation

A cross rail mold was designed for three components. We adopted a hot runner and side gate to improve material filling. Because the fluidity analysis indicated a concern for the generation of welds in two long components, a specification was chosen that enabled heat-and-cool molding.

The mold was designed and produced based on the result of a fluidity analysis, and after adjustment of pressure-maintaining control, the specific molding conditions were found for maintaining the dimensional tolerance. The components were then molded.

The results for the molded cross rail are shown in Table 3.

Table 3. Cross rail molded result

		Cross rail 1	Cross rail 2	Cross rail 3
Shape	Filling	No problem	No problem	No problem
	Dimension	No problem	No problem	No problem
	Warpage	No problem	No problem	No problem
Appearance	Visual check	No problem	No problem	No problem
	Coloring	No problem	No problem	No problem
	Shrinkage	No major problems	No major problems	No major problems
	Weld	No major problems	No major problems	No problem

(2)-1-3 Evaluating parts used in a refrigerator

The prototype CNF center pillar and cross rail were assessed on single units and while incorporated in a refrigerator.

Reliability testing, comprising of a heat resistance test, humidity and heat resistance cycle test, and cold-and-hot test, was performed on single units. In the incorporation test, the center pillar and cross rail were incorporated separately in a refrigerator. The center pillar was tested for reduction of power consumption quantity by measuring surface temperature and estimating the reduced heater output. The cross rail was evaluated by directly measuring power consumption.

The assessment results are shown in Table 4. The CO₂ reduction effect was calculated by assuming integration in our company's products. We conclude the use of CNF to be possible even though changes to refrigerator design will be necessary and greater rigidity is required.

Table 4. Verification result of components applicable to refrigerators

	Functional characteristics			Reliability			Reduction in CO ₂ emissions (kton/year)
	Rigidity	Molding	Coloring	Heat resistance	Humidity and heat resistance	Cold/hot	
Center pillar	△	○	○	○	○	○	▲ 0.2
Cross rail	△	○	○	○	○	○	▲ 1.0

(2)-2 Verifying application to washing machine parts

(2)-2-1 Designing parts used in a washing machine

1) Analyzing/designing the outer tub

CO₂ emissions reduction is likely if the conventional GFPP used for the outer tub of a washing machine is replaced with CNF, which can be recycled. A structural analysis was therefore employed to test whether the structure and material rigidity of a CNF part would be comparable to those of currently-used GFPP. A deformation analysis evaluation was made by applying a moment to the bearing that supports the rotating shaft of the outer tub to model the state of an actual load during washing and drying cycles.

Our results showed that the same rigidity as a conventional part was achievable by increasing the material thickness by about 50% and adding structural reinforcement at a part of the corner radius. Based on this result, a CO₂ emissions reduction effect of approx. 0.7 tons/year can be expected by recycling CNF parts.

Because this component is very large, and mold manufacturing is expensive, only a design analysis was performed for this component.

2) Analyzing/designing the balancer

The purpose of the design is to reduce power consumption by reducing the rotational loads during drying cycle by lowering the mass of the balancer. The relationship between material thickness and degree of deformation during applying CNF was studied by means of structural analysis and a design using thinner material was made.

Our results indicated the potential for obtaining a rigidity comparable to the current part with approx. 0.6 times its material thickness. This design would enable an approximately 13% weight reduction.

(2)-2-2 Designing, manufacturing, and evaluating molds for parts used in a washing machine

To evaluate the designed balancer, a mold design was made using fluidity analysis, and a mold was manufactured. The mold adopted a hot runner for better filling and had a greater number of gates than before.

The component was produced using the mold and evaluated. The results of this evaluation are shown in Table 5.

Table 5. Evaluation result of molded balancer

		Balancer A	Balancer B
Shape	Filling	No problem	No problem
	Dimension	No problem	No problem
	Warpage	No problem	No problem
Appearance	Visual	No problem	No problem
	Coloring	No problem	No problem
	Shrinkage	No major problems	No major problems
	Weld	No major problems	No major problems

(2)-2-3 Evaluating parts used in a washing machine

An evaluation was made of the CNF balancer both on single units and while incorporated in a washing machine. In the separate evaluation, the component was subjected to a weather resistance test, cold weather resistance test, continuous high temperature test, and mold-resistance test. For the evaluation of the product incorporated in the washing machine, power consumption was evaluated by rotating the drum without a washing load. The results of the evaluation are shown in Table 6.

The single component evaluation revealed no problems with any items. The evaluation of the component when incorporated did not reveal any reduction of power consumption greater than seen within assembly variation, but the actual achievement of lighter weight suggested the potential for increased effects with improvements in design. Efforts toward commercial application of CNF will be continued.

Table 6. Verification result for parts applicable to washing machine

	Functional characteristics			Reliability				Reduction in CO ₂ emission (kton/year)
	Rigidity	Molding	Coloring	Weather	Cold	Hot	Mold	
Outer tub	-	-	-	-	-	-	-	-7.0
Balancer	○	○	○	○	○	○	○	-1.0

(*) Balancer CO₂ reduction quantity was calculated based on its lighter weight (-9%).

(3) Verifying recyclability

Recyclability will be achieved through the following two processes.

- Selection: A single resin is selected out of various types of resins.
- Recycling: The physical properties of the selected resin are recovered and recycled.

(3)-1 Verifying resin selection technology

CNF composite resins are classified into the following two purposes.

Purpose 1: To select the base resin used for CNF composite resins.

Purpose 2: To select between resins containing and not containing CNF.

The effectiveness of the following three detection technologies was evaluated for Purposes 1 and 2 above.

(Detection technology 1) Water specific gravity method

(Detection technology 2) Medium-range infrared spectroscopy

(Detection technology 3) Near-infrared spectroscopy

The evaluation revealed that near-infrared spectroscopy allows identification of the type of base resin (PP and ABS) and the presence or absence of CNF

content of 10% or higher.

Selection tests using an experimental near-infrared spectroscopy three-type simultaneous sorting setup delivered the results shown in Table 7, indicating achievement of the targeted collection rate of 60% or higher, and purity of 80% or higher, verifying the practical potential of selecting CNF composite resin items from a mixture.

Table 7. Sorting test results

	Unit 1	Unit 2	Unit 3
N5 average	PP-CNF	PP	PS
Purity	100%	93%	100%
Collection rate	92%	74%	67%

(3)-2 Verifying recycling technologies

Verification of the recyclability of CNF composite resins was made from the following viewpoints.

- Loss of material strength
Verifying the degree of deterioration of material strength with repeated molding
- Deterioration in ease of molding
The results showed material strength to exceed the target of 90% or higher, regardless of composition ratio, after one recycling. Even after repeated moldings, the potential for achieving the target was verified by adjusting the conditions of the recipe kneading method.
No deterioration in ease of molding was confirmed regardless of composition ratio, after one recycling, and melt flow rate during repeated moldings was kept low by the use of additives.

目次

1. 背景と目的	19
2. 取組項目と目標	20
3. 取組計画	22
4. 具体的取組	
4-1. CNF展開効果検証・調査	23
4-1-1. 緒言	
4-1-2. アプローチ	
4-1-3. 取組結果	
4-1-4. 結言	
4-2. 冷蔵庫部品への適用検証	30
4-2-1. 緒言	
4-2-2. アプローチ	
4-2-3. 設計	
4-2-4. 成形	
4-2-5. 実機検証	
4-2-6. 結言	
4-3. 洗濯機部品への適用検証	71
4-3-1. 緒言	
4-3-2. アプローチ	
4-3-3. 設計	
4-3-4. 成形	
4-3-5. 実機検証	
4-3-6. 結言	
4-4. リサイクル性の検証	97
4-3-1. 緒言	
4-3-2. アプローチ	
4-3-3. 取組結果	
4-3-4. 結言	
5. まとめ	143

1. 背景と目的

近年、植物由来のカーボンニュートラルな材料であり鋼鉄の5分の1の軽さで5倍の強度等の特性を有すると言われるセルロースナノファイバー（以下、「CNF」という）が自動車、家電、住宅建材など各方面の産業において着目され、国内において精力的な活動がされている。その一端を図1-1に示す。関係省庁、素材メーカー各社、最終製品メーカーが連携した「上流」から「下流」までの開発をいろいろな地域でそれぞれの特色を活かした形で進められている。

その中で、家電分野への適用は国内市場規模が大きく、かつ、CO2削減ポテンシャルが大きいと考えられる。家電分野は様々な種類を有し比較的開発期間が短いためCNFの早期社会実装を実現する可能性があり、家電への適用は各分野への普及に対する先導役となってCNF活用普及の起爆剤となり得る。

上記の背景を踏まえ、本事業では家電製品への適用可能性を市場や製品特性から調査し製品ライフサイクルの観点から製品使用、物流、廃棄・リサイクルにおけるCO2 排出量評価をするとともに、代表製品として冷蔵庫および洗濯機の部品を用いて実製品搭載に必要な特性を明確にするとともに実製品組込み時の性能評価を実施して見極めを行う。

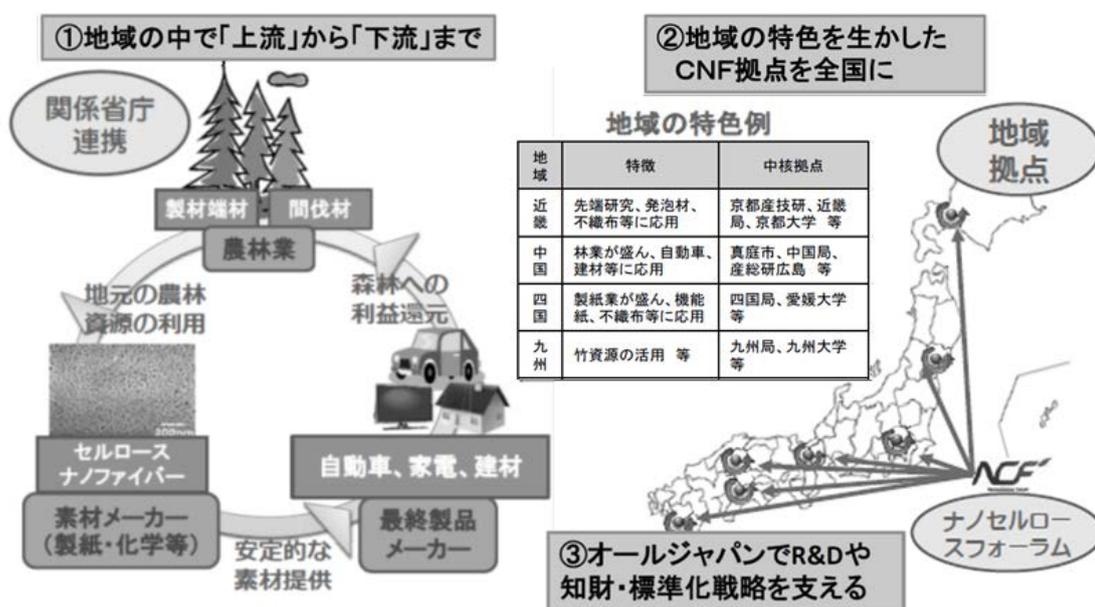


図1-1 セルロースナノファイバーに関する業界の動き

（出典：ナノセルロースシンポジウム 2016「構造用セルロースナノファイバー材料の社会実装に向けて」）

2. 取組項目と目標

本事業では以下の項目に取り組む。

(1) CNF展開効果検証・調査

ここでは、CNFを家電製品に適用、さらに展開していった際のCO₂排出量削減量を算出するための市場調査、技術的な動向を把握するための特許調査を行う。効果試算を行う対象製品については、まずは当社製品、特に主要製品である冷蔵庫、洗濯機から始め、エアコン、掃除機等に広げていく。また、国内市場に対しても同様の製品について同様の効果が得られるとして市場規模に応じた効果を試算する。(図2-1)

(1)-1 CO₂ 排出量削減効果試算調査

CNFを家電に適用した際のCO₂排出量削減効果を試算するため、置き換えを検討する材料について、素材生成、部品加工から廃棄・リサイクルまでの製品ライフサイクルの観点でCO₂排出量の算定スキームを構築し、製品および使用部品の重量を想定して計算を行う。

対象とする材料は、

・GFPP(ガラス繊維入りPP樹脂):洗濯機等の部品として使用

・冷延鋼板:一般的に外装等に使用。今回は冷蔵庫用に補強部材として使用されているものを対象に検討を行う。

(1)-2 特許調査

冷蔵庫や洗濯機を中心としてOA機器、パソコン等を含め広い範囲を対象にCNF複合樹脂の適用を含む出願特許に関する調査を行う。その際に、剛性、成形性、着色自由度、断熱性、リサイクル性およびコストの観点で技術分類を行った。調査ステップとしては、最初にマクロ分析により全体像を把握した上でフォーカスする案件をある程度絞り込んで詳細な調査を行う。

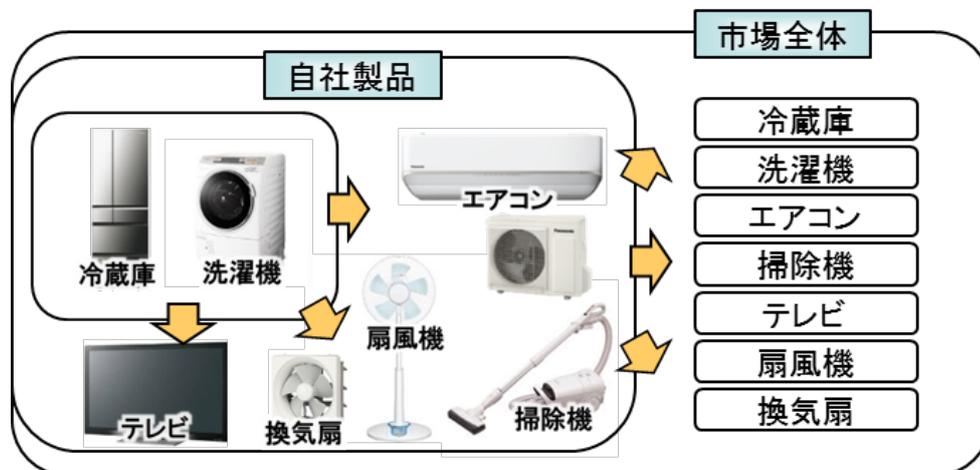


図2-1 自社製品および市場全体への適用可能性とその効果を予測する展開イメージ

(2)家電部品への適用検証

本取組では、冷蔵庫と洗濯機について具体的に適用する部品を実際に製作し実機に組み込んで家電製品に求められる特性を実証評価する。それぞれの製品に対して検証する特性とその評価内容を図2-2に示す。

(2)-2 冷蔵庫部品への適用検証

冷蔵庫で結露防止等に不可欠な熱の庫内侵入を防止することを狙いにCNFの高剛性の特長を活かして金属部品の置換えの可能性検証を行う。具体的に強度や熱伝導の観点から部品設計を行い、それに基づいて金型を設計製作し実際の成形品を製作、成形性や部材特性を確認する。さらに実機に搭載して家電製品としての機能を評価する。

(2)-3 洗濯機部品への適用検証

製品に使用されている樹脂部品に対してCNFの高剛性の特長を活かした置き換えによる薄肉・軽量化の可能性の検証を行う。特にリサイクルが可能になることでCO2削減が期待できるGF樹脂部品の置き換えの検証を行う。具体的に強度面の部品設計を行い、それに基づいて金型を設計製作し実際の成形品を製作、成形性や部品特性を確認する。さらに実機に搭載して家電製品としての機能を評価する。

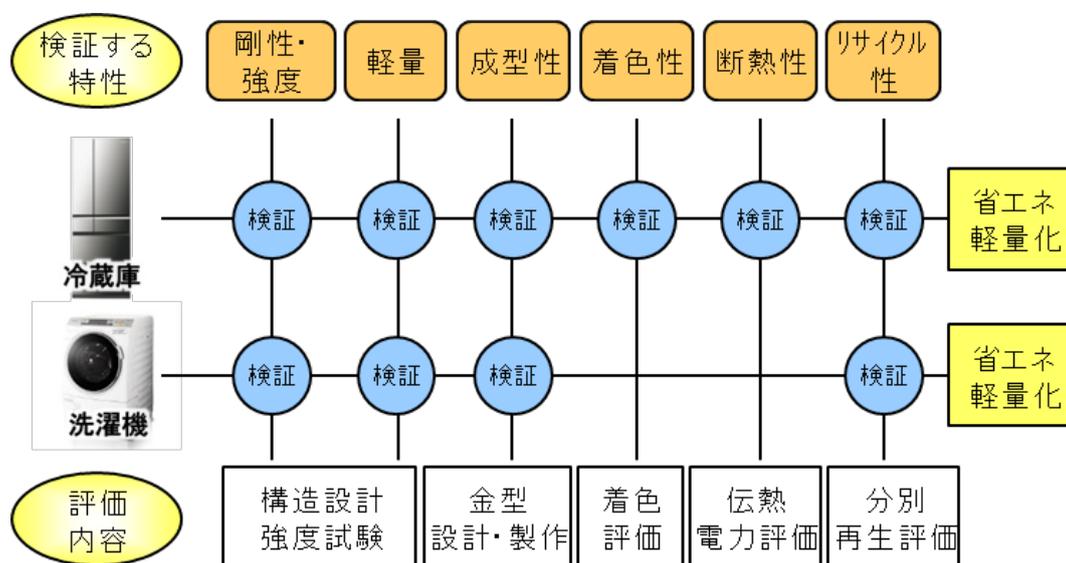


図2-2 CNF適用検証で検証する特性と評価内容

(3)リサイクル性の検証

リサイクルには材料選別技術と材料再生技術が必要であり、それぞれについて検証を行う。

(3)－1 材料選別の検証

CNF複合樹脂を含む混合樹脂からCNF複合樹脂を検出する認識手法を検討し、実際の選別装置を用いて分別の検証を行う。

(3)－2 材料再生の検証

成形されたCNF複合樹脂に対して同様の複合樹脂に再生するための最良の添加剤を検討し、その添加剤を用いた検証を行う。また、その際所定の材料物性が保持できるか確認を行う。

以上の内容で取り組みを推進する。表2－1に上記項目と本事業の最終目標を示す。

表2－1 事業項目と最終目標

項目	内容	最終目標
全体目標	<ul style="list-style-type: none"> ・市場および商品調査・分析 ・各種家電製品の調査、分析 ・CNF適用関連の特許調査、分析 ・構造解析、伝熱解析による部品構造設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・家電製品への適用の可否判断 ・国内家電市場全体への展開可能性と効果試算
CNF展開効果検証・調査	<ul style="list-style-type: none"> ・構造解析および伝熱解析を用いた冷蔵庫及び洗濯機部品への適用時構造・形状を設計 ・導出した構造に対する樹脂流動解析等を用いた金型の構想および先行設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・国内家電市場全体への展開可能性と効果試算
家電部品への適用検証	<ul style="list-style-type: none"> ・軽量化、高剛性化に伴う電力削減や高性能化の机上での基礎検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・冷蔵庫部品への適用の可否判断 ・洗濯機部品への適用の可否判断
リサイクル性の検証	<ul style="list-style-type: none"> ・CNF複合樹脂の検出技術の見極めと選別技術の確立 ・CNF複合樹脂の再生技術(添加処方、リペレット化)の確立 	<ul style="list-style-type: none"> CNF複合樹脂を含む混合樹脂からの単一素材回収 CNF複合樹脂回収率:60%以上 CNF複合樹脂回収品純度:80%以上 家電製品に適用する再生処方の可否の判断

3. 取り組み計画

本事業の取り組み計画の概要を図3－1に示す。冷蔵庫部品への適用を先行させて2017年度末までに洗濯機部品への適用見極めを行う。



図3－1 取り組みの概略計画

4. 具体的取組

4-1. CNF展開効果検証・調査

4-1-1. 緒言

植物由来のカーボンニュートラルな材料であるセルロースナノファイバー(CNF)は、軽量・高強度な特長を活かした各産業分野への活用が期待され、検討が進められている。その中で国内市場が大きく、比較的開発期間が短く多様な製品を有する家電分野への適用は早期社会実装を実現する可能性がある。

本事業ではその可能性を技術的側面から実証するが、一方で地球環境保護の観点から見た適用時の社会的インパクトについて調査分析を行う。具体的には、家電製品へのCNF適用に向けた業界動向を把握するとともに、製品使用時における消費電力量削減のみならず、製品製造から物流、廃棄・リサイクルまで製品ライフサイクルの視点からCO₂排出量削減効果の調査を行い、CO₂排出量削減効果について考察を行う。対象商品は、まずは本事業で実証を行う冷蔵庫と洗濯機を中心に、主要家電製品について当社内活用、および国内市場に展開された場合の効果として算出する。

4-1-2. アプローチ

(1)CO₂排出量削減効果試算調査

CNFを家電に適用した際のCO₂排出量削減効果を試算するため、置き換えを検討する材料について、素材生成、部品加工から廃棄・リサイクルまでの製品ライフサイクルの観点でCO₂排出量の算定スキームを構築し、製品および使用部品の重量を想定して計算を行った。ここでは製品使用時の比較は省略している。

対象とした材料は、

- ・GFPP(ガラス繊維入りPP樹脂):洗濯機等の部品として使用
- ・冷延鋼板:一般的に外装等に使用。今回は冷蔵庫用に補強部材として使用されているものを対象に検討を行った。

また、冷蔵庫や洗濯機、エアコンを想定して部品サイズを最大1mとし、重量をGFPP、CNFで1kg、冷延鋼板で1.5kgとして樹脂使用量、CO₂排出量を算出した。

(2)特許調査

セルロースナノファイバー(CNF)複合樹脂を家電製品に適用した出願について調査を行い、現状の技術を把握する。対象商品としては、家電の中でも冷蔵庫、洗濯機を中心とし、OA機器、パソコン等についても広い範囲として含めて調査を実施した。その際に、剛性、成形性、着色自由性、断熱性、リサイクル性および、コストについての観点にて技術分類を行った。

調査のステップとしては、マクロ分析により全体像の把握と、フォーカスする案件の把握を行った後、詳細な調査に移行している。

4-1-3. 取組結果

(1) CO2 排出量削減効果試算調査

各々の材料のCO2排出量を素材、部品加工、廃棄・リサイクルに分けて算出した結果をその計算根拠とともに以下に示す。

(1)-1 素材

CNFの値は、一般に公表されているセルロース複合材製造メーカ「UPM」の材料「UPM Formi」を対象にフィンランド研究機関が実施したカーボンフットプリントアセスメント調査の結果を用いた。GFPPに関してはEcoInvent databaseの数値を引用した。その一覧を表4-1(1)に示す。

表4-1(1) 複合樹脂の素材製造に関するCO2排出量 (単位: kg-CO2/kg)

カーボンフットプリント kgCO2/kg	REF 1 ABS 100%	REF 2 PP 100%	添加率(ベースはPP)				
			20%	30%	40%	50%	60%
セルロースファイバー	3.941	2.219	1.875	1.703	1.531	1.359	1.187
ガラス繊維	3.941	2.219	2.346	2.410	2.474	2.537	2.601

*セルロースファイバーはUPM Kaukasで製造

**ガラス繊維はEcoInvent database

出所: Carbon Footprint Assessment of UPM Formi (VTT Technical Research Centre of Finland)

冷延鋼板については、社団法人日本鉄鋼連盟「鉄鋼製品のCFPの概要(2010)」を参照して設定した。素材としてのCO2排出量を以下に整理する。

- ①GFPP(ガラス繊維20%) 2.346kg-CO2/年
- ②CNF-PP(NCF30%) 1.703kg-CO2/年
- ③冷延鋼板 1.710kg-CO2/年

(1)-2 部品加工

GFPP、CNF-PP、冷延鋼板、それぞれに対して加工装置メーカーを中心としたヒアリングから工程を設定して表4-1(2)に示す条件でCO2排出量を計算した。CNFは吸湿性の点から射出成形前に乾燥工程が必要になるとした。また、乾燥、射出成形における工程内ロス(切替えロス等)を10%として見積りを行った。

表4-1(2) 部品加工におけるCO2排出量

	前加工	射出成形／プレス成形	二次加工
GFPP	—	<ul style="list-style-type: none"> ・大型電動射出成形機 0.2kWh/個 ・金型温度調節機 0.054kWh/個 ・ホットランナーシステム 0.021kWh/個 	—
CNF-PP	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥機 0.139kWh/個 	<ul style="list-style-type: none"> ・大型電動射出成形機 0.2kWh/個 ・金型温度調節機 0.054kWh/個 ・ホットランナーシステム 0.021kWh/個 	—
冷延鋼板	—	・トランスファープレス (200kg-CO2/t)	<ul style="list-style-type: none"> ・洗浄 0.031kWh/個

(1)-3 廃棄・リサイクル

樹脂材料のリサイクルは、マテリアルリサイクル(MR)とサーマルリサイクル(TR)がある。一般的に、使用済み家電のうち、単一素材で分離が容易な大型部品は手解体で分離され、再生材料として利用されているほか、シュレツダー(SD)混合樹脂となる。それ以外の樹脂部品は他の素材と分離されることなく、シュレツダー処理され、主に埋め立て、焼却されている。今回は大型部品を想定しているため基本的には再生材料としてMR及びTRが為されることを前提とする。ただし、GFPPはMRは不可であり、TRも再生資源業者が敬遠する傾向にあるため、単純燃焼後、GF分の残渣を埋立廃棄するシナリオとした。一方、CNFについては単純燃焼を10%含む産業系廃プラのマテリアルフローをベースとしたMRを含むシナリオを立てCO2排出量を算出した。図4-1(1)に各材料の廃棄・リサイクルのマテリアルフローを示し、表4-1(3)に算出したCO2排出量の一覧を示す。排出量がマイナスになっているのはMRではバージン材を使用しないことによる排出量削減効果、TRでは重油の代替燃料として削減効果を見込んでいる。

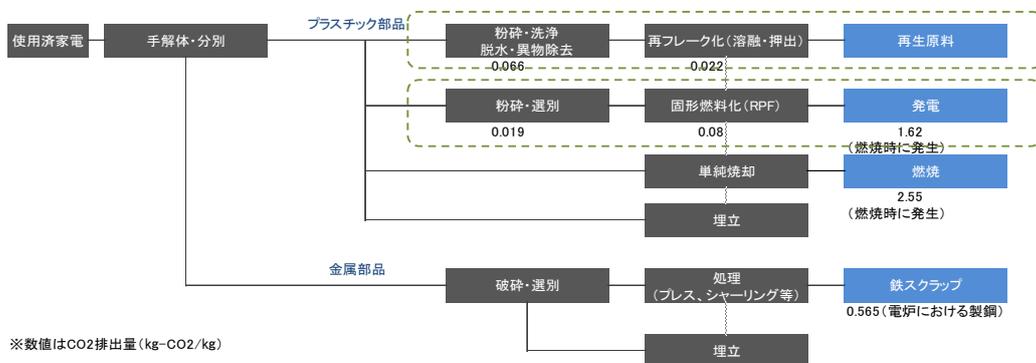


図4-1(1) 廃棄・リサイクルのマテリアルフロー

表4-1(3) 各材料の廃棄・リサイクルに関するCO2排出量

		マテリアルリサイクル 資源循環	サーマルリサイクル	単純燃焼	埋立	
排出削減効果を含む CO2排出原単位 (kgCO2/kg)	プラスチック	-1.253	-0.311	2.31	2.94	
	鉄	-1.475	-	-	2.83	
GFPP		不可	再生資源業者が敬遠	100%	残さ (GF添加分)	
	(Input)	-	-	1,000g (実質はPP:800g)	200g	
	CO2排出量 (kgCO2)	-	-	1.848	0.588	
CNFコンポジット		廃プラ(産業系)のマテリアルフローをベースとしたシナリオ	30%	60%	10%	-
	(Input)	300g	600g	100g	-	
	CO2排出量(kgCO2)	-0.376	-0.478	0.155	-	
※CNFカーボンフリー効果をサーマルリサイクル及び単純燃焼に反映。 単純燃焼時のCO2発生量(2.55)の30%を控除 =2.55×30%=0.765						
鋼板		99%	-	-	1%	
	(Input)	1485g	-	-	15g	
	CO2排出量(kgCO2)	-2.190	-	-	0.042	

(1)-4 素材～廃棄・リサイクル

前述の各フェーズにおけるCO2排出量を合算すると図4-1(2)のグラフのようになる。GFPPをCNFに置き換えることで3.76kg-CO2/個の削減、鋼板をCNFに置き換えることで1.03kg-CO2/個の削減効果が期待できる。

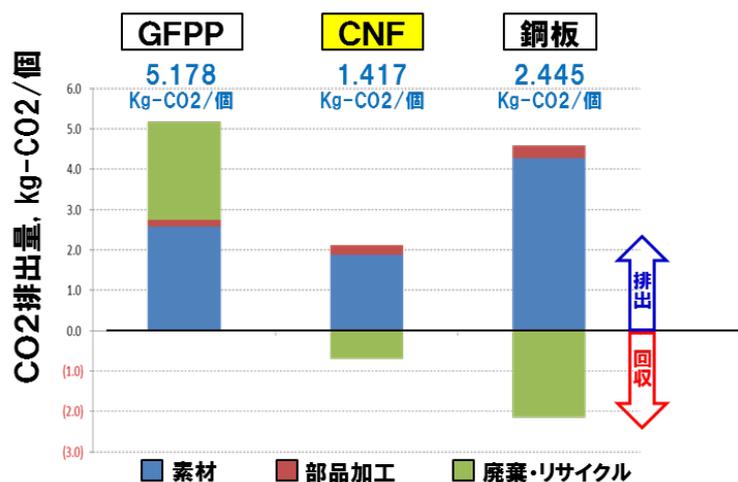


図4-1(2) 素材、部品加工、廃棄・リサイクル全体のCO2排出量

(2) 特許調査

セルロースナノファイバーおよび有機高分子化合物、プラスチックの加工等のキーワードを基本に検索式を構築して特許検索を行い、1502件の特許公報を抽出した。その中からCNF複合樹脂(成形体)で家電用途に該当し、構造体(骨格)として使用されるもの110件、構造体ではあるが家電用途以外のもの、または、家電用途であるが構造体(骨格)として使用されないもの84件、合わせて194件について機能と用途により分類を行った。分類において、複数の項目に該当するものは重複してカウントした。機能について分類を行った結果を、表4-1(4)および、図4-1(3)に、用途について分類を行った結果を表4-1(5)および、図4-1(6)に示す。

表4-1(4) 機能分類結果

分類	件数	比率
剛性(軽量化実現)	156	47.0%
リサイクル性	25	7.5%
成形性	19	5.7%
断熱性	11	3.3%
着色自由性	9	2.7%
コスト	8	2.4%
その他	104	31.3%
合計	332	100%

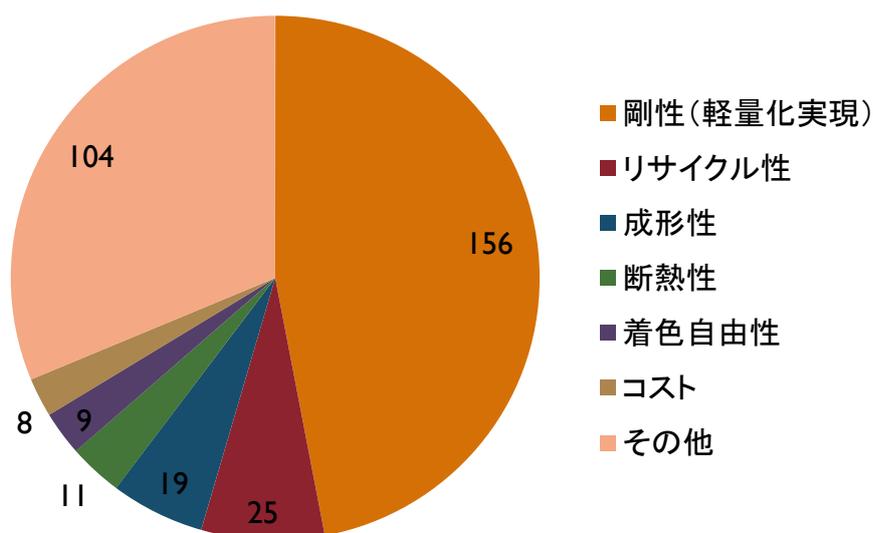


図4-1(3) 機能分類結果グラフ

表4-1(5) 用途分類結果

分類	件数	比率
AV機器、携帯電話	7	3.4%
エアコン	6	2.9%
カメラ	5	2.4%
冷蔵庫	3	1.5%
自動車	3	1.5%
住宅	2	1.0%
不特定	180	87.4%
合計	206	100%

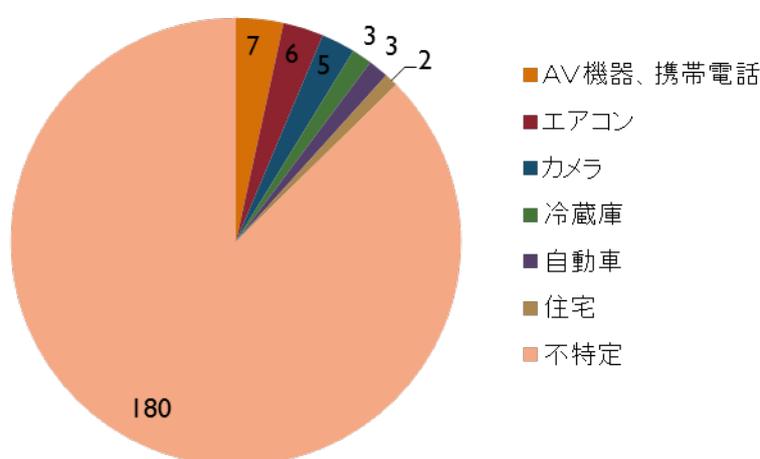


図4-1(4) 用途分類結果グラフ

表4-1(4)および、図4-1(3)から、CNF複合樹脂の長所である剛性に関する特許が約半数と最も多く出願されていることが分かる。このことから、これまでのCNFの開発は材料特性に関する内容が主体となっていることが考えられる。一方で、リサイクル性、成形性に関連した内容についても出願されており、材料を実際に成形する際の課題、商品のライフサイクルにおいて重要となるリサイクル性に関する開発も行われていることを読み取ることができる。

用途については、表4-1(5)および、図4-1(4)から、特定の商品に対する開発ではなく一般的な構造部材としてのCNF複合樹脂の開発がなされ、商品への応用展開技術開発はこれからという状況であると考えられる。少数ながら、家電用途として記載があった対象として、パソコンの筐体、コンピュータ構造部品、テレビ、AV機器、携帯音楽機器、カーナビ、情報家電、電話、ビデオカメラ、太陽電池、燃料電池、照明カバー、ヘッドライヤなど見られた。

抽出特許公報における、機能による分類と用途による分類に関して、相関があるかを

確認する為、マトリクス化したマトリクスマップを図4-1(5)に示す。

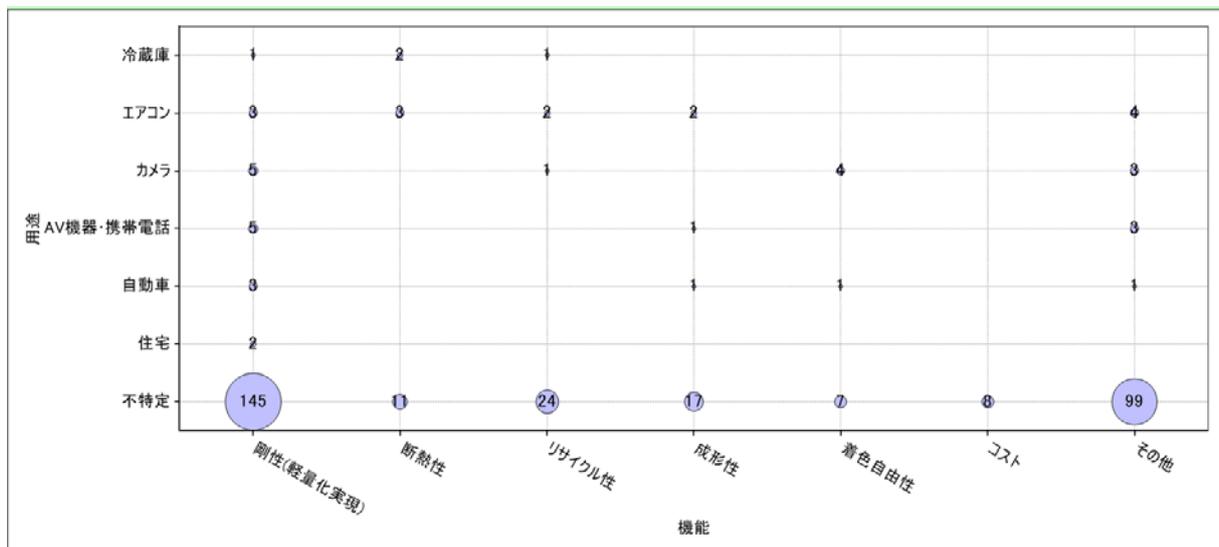


図4-1(5) 機能と用途のマトリクスマップ

図4-1(5)から機能と用途において大きな相関は見られず、やはり、用途不特定での材料剛性に関する出願が最も多いことが分かる。

4-1-4. 結言

特許調査により、CNF複合樹脂に関する内容が2007年から多くの出願が、製紙、化学メーカー、大学よりなされており、材料開発が活発に行われていることが判明した。また、商品への応用展開についての出願は極めて少ないが、その中でも、成形性やリサイクル性に関する出願は見受けられた。

4-2. 冷蔵庫部品への適用検証

4-2-1. 緒言

CNFは、植物由来の次世代素材であり。その単体の物性は、鉄鋼と比較して5分の1の軽さであるにもかかわらず5倍の強度を持つと言われている。CNFの原料は樹木であるため、国土の約70%が森林である日本は豊富な資源を有していると言え、CNF材料を自動車や家電等に活用することで軽量化につながり、エネルギー効率が向上し、省エネの観点から地球温暖化に貢献することが期待されている。本検討では、冷蔵庫の部材であるセンターピラーとクロスレールに着目し、それぞれ検討を行った。

(1) センターピラー

冷蔵庫のフレンチ扉（両開き扉）中央の会合部に位置するセンターピラーと呼ばれる部材（図4-2-1(1)）には、外気の状態によってセンターピラー表面に発生する結露を防止するために電気ヒーターが設けられている。また冷蔵庫内外の温度差に起因して熱膨張率の差によりセンターピラーが変形し密閉性が悪化することを防止するために金属製の補強板も用いられている。

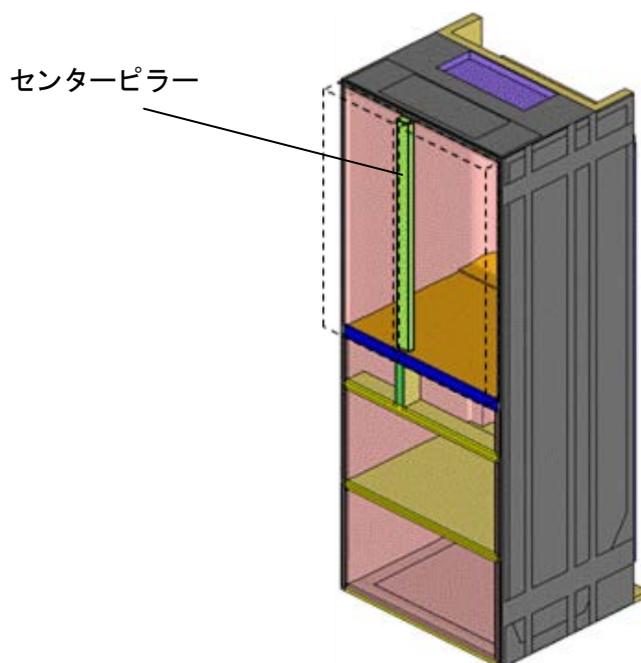


図4-2-1(1) センターピラーの位置

図4-2-1(2)にセンターピラーの断面模式図を示す。センターピラーには、前述のように外殻樹脂（以後ケースと記載）の中に、剛性を維持するための鉄製の補強板が配置され、庫外側（外気側）のケースの内側には結露防止用のヒーターが設置されている。また、断熱性を確保するための発泡スチロール（EPS）や、マグネット（扉を閉じた際に左右

のドアのガスケット(パッキン)と密着して扉とセンターピラーで庫内を密閉するためのもの)も埋設されている。

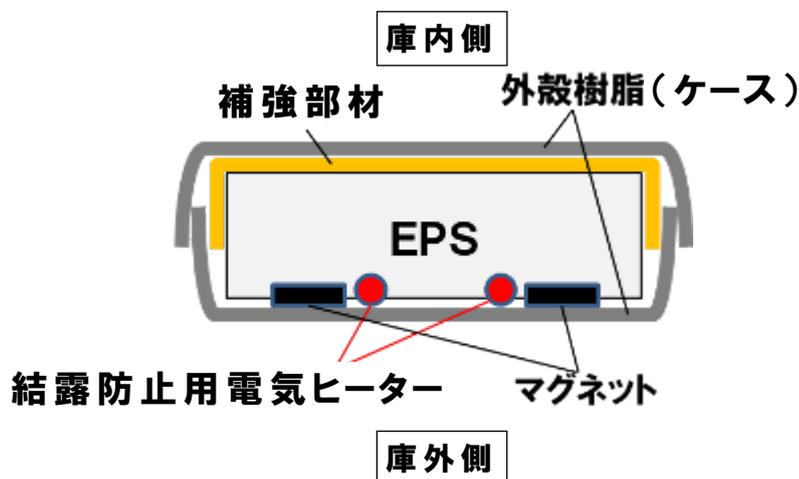


図4-2-1(2) センターピラーの断面模式図

上記のヒーターの熱が外殻樹脂内部や金属性の補強板等を通じて冷蔵庫内に伝わることを抑制するため、断熱材などによる対策が講じられている。しかし、熱の侵入を完全に防ぐことは困難であり、一部の熱は庫内に伝わり、庫内の冷却に影響するほか、ヒーター自体の電力消費も増加するというエネルギーロスにつながる。このため、少しでも熱の庫内への進入を抑制することが省エネ性能向上には重要である。

そこで今回、現行の樹脂をCNF複合樹脂に置き換えた場合について、省エネ性能の向上につながるセンターピラーの構造を熱解析と構造解析を用いて検討を行ない、その結果を元に成形用金型を設計、製作し、CNF複合樹脂の成形試作を行った。そして、その成形品の単体評価とともに、冷蔵庫に組み込んだ評価を実施し、部品適用の可能性を検討した。

(2)クロスレール

クロスレールは鉄板で構成され、バリア樹脂、ウレタン、発泡スチロール(EPS)とともに冷蔵庫の各室を隔てる仕切体の役割を果たしている。各室の仕切りとなるクロスレールにも運転時における結露の発生を抑えるために、庫内や外気温度より温度が高くなる部分(高温部位)が設けられている。クロスレールは、図4-2-1(3)に示すような位置および形状をしており、扉を開閉する際の衝撃を受けるため、十分な強度を持つことが重要となる。本検討では、CNF複合樹脂を用いた場合の現行の鉄板製クロスレールを用い

た場合に対する冷蔵庫としての強度や変形の維持の観点で断面形状や板厚の検討を構造解析により行った。

そして、その結果をもとに金型を設計、製作し、試作部品を成形して単体評価と冷蔵庫に組み込んだ際の評価を実施した。

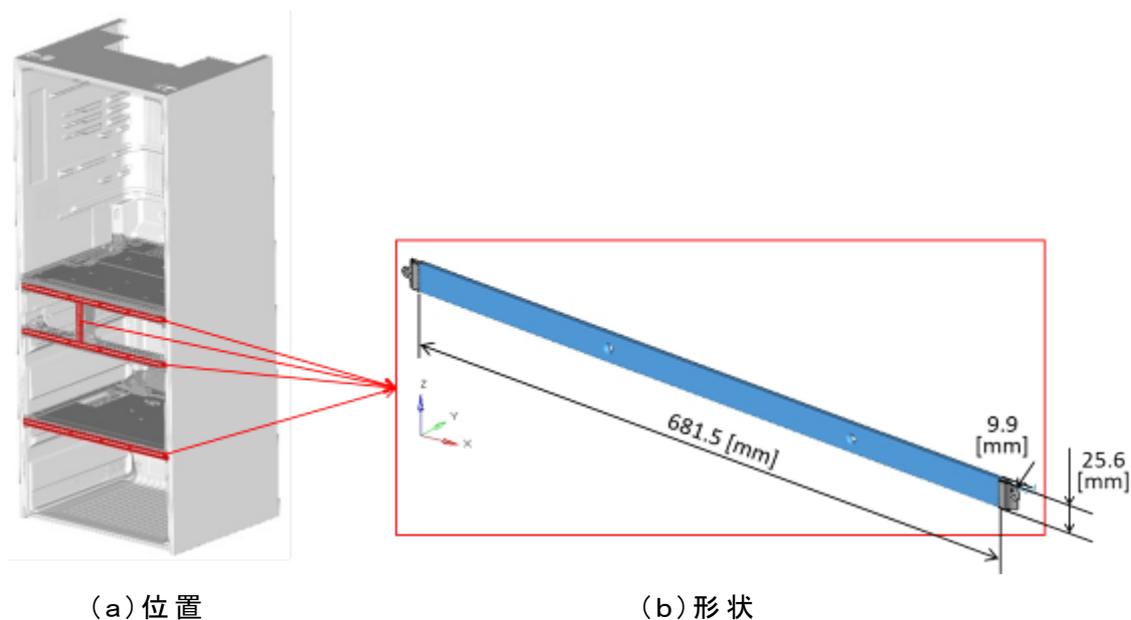


図4-2-1(3) クロスレールの位置と形状

4-2-2. アプローチ

(1) センターピラーのCNF複合樹脂適用構造検討

本検討では、図4-2-1(2)に示した現行のセンターピラーの構造に対し、

- ① 外殻部材の材質を、CNFを15%含有する樹脂(ポリプロピレン)に変更する。
- ② 強度保持用の金属製補強板を取り除く。
- ③ 強度向上のために、外殻部材の厚くする、もしくは内側にリブを形成する。

の3点により、ヒーターからの伝熱に起因する省エネ性能の悪化を改善すべく、評価を行った。評価を行った項目は下記の3点である。

- ・熱変形量(外気側: -5°C 、 $+30^{\circ}\text{C}$)
- ・荷重時の曲げ変形量
- ・伝熱性(二次元断面での解析)

(2) クロスレールのCNF複合樹脂適用構造検討

クロスレールに対してはその適用に当たり、現行の鋼板をCNF15%含有樹脂(ポリプロピレン)に変更するとして、以下の観点で構造検討を行った。

- ①クロスレールにおける高温部位からの庫内への熱移動量を熱構造解析により評価し、最も熱移動量を抑えることのできる効果的な形状を導出
- ②一方で、クロスレール部品において、現行の金属製に対して同等の剛性になるよう置き換えが可能な検証を構造解析により実施
- ③クロスレール部品のみでは同等の剛性構造として置き換えが不可能な場合、冷蔵庫筐体全体として成立するかの検証を構造解析により実施

以上の検証により、熱移動量抑制と剛性との両立を図れる形状を決定し、金型を設計、製作、成形試作、評価を行う。

4-2-3. 冷蔵庫部品の設計

(1) センターピラーの設計

- ①現行構造（強度を向上した場合と比較するため）（強度に影響がないEPSを除く）
- ②現行構造から金属補強板を取り除いたもの（ケースのみ）、
- ③材料を新材料（CNFを15%含有したPP（ポリプロピレン）—以下「CNF15」と略記する）に変更し、金属補強板を取り除いた場合（ケースのみ）についても解析を行った。

また、金属補強板を取り除いた場合、単純なCNF複合樹脂への置換えだけでは剛性不足となるため、以下のような構造面の補強内容についても解析を行った。

- ④外殻部材の樹脂の肉厚化（約2mmから約3mmに1mm増厚）、
- ⑤内部に補強構造（リブ）を形成（ $t=2\text{mm}$ 、 $h=13.8\text{mm}$ 、本数：2本）
- ⑥上記2種を併用（増厚+リブ形成）
- ⑦庫内側のみをCNF15に変更（増厚1mm）
- ⑧庫内側のみをCNF15に変更（増厚1mm、リブ2本形成）

図4-2-3(1)に解析を行った構造の簡易模式図を示す。また、解析で用いた材料物性値を表4-2-3(1)に示す。

表4-2-3(1) 物性値

	単位	鉄	ポリスチレン	ポリプロピレン (CNF15%含有)
ヤング率	[Pa]	2.07E+11	2.00E+09	3.10E+09
ポアソン比	-	0.29	0.33	0.3
線膨張係数	[1/K]	1.17E-05	1.77E-04	8.80E-05
熱伝導率	[W/mK]	4.19E+01	0.20	0.232

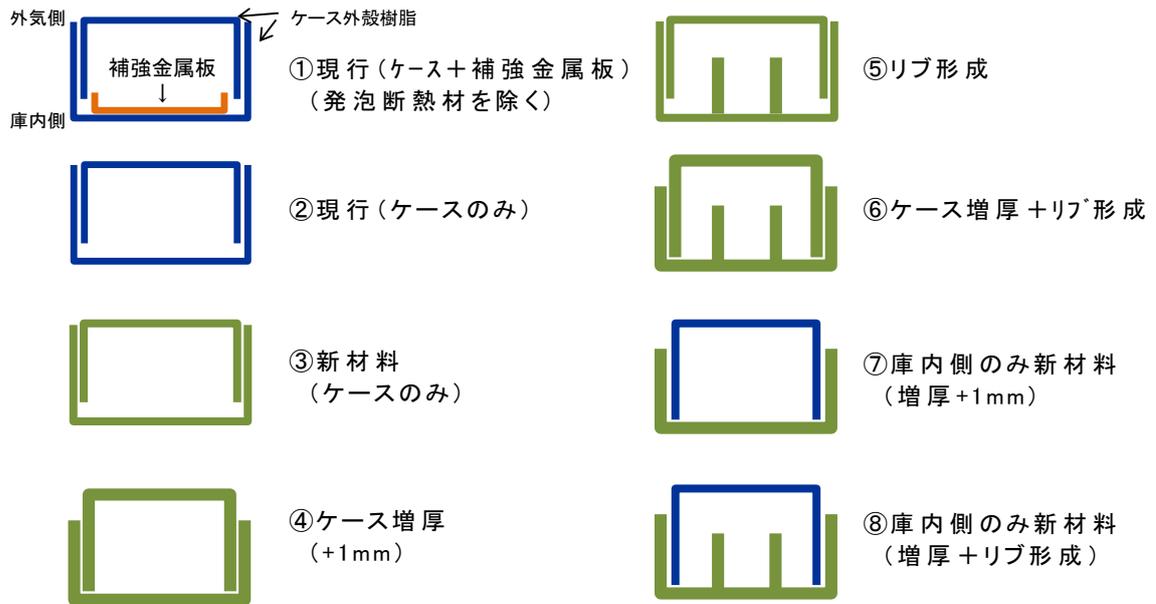


図4-2-3(1) 解析を行った構造の簡易模式図

(1-1) 取組み1: センターピラーの熱変形量の解析

庫内側の温度を5℃、外気側の温度を-5℃および30℃、初期温度を20℃として、センターピラーの変形量を解析により求めた。温度を付加した領域は、図4-2-3(2)における青色部分のうち、図4-2-3(3)の赤線で囲まれた、外気側と庫内側に面している部分である(外気側は図の上面、庫内側は下面)。

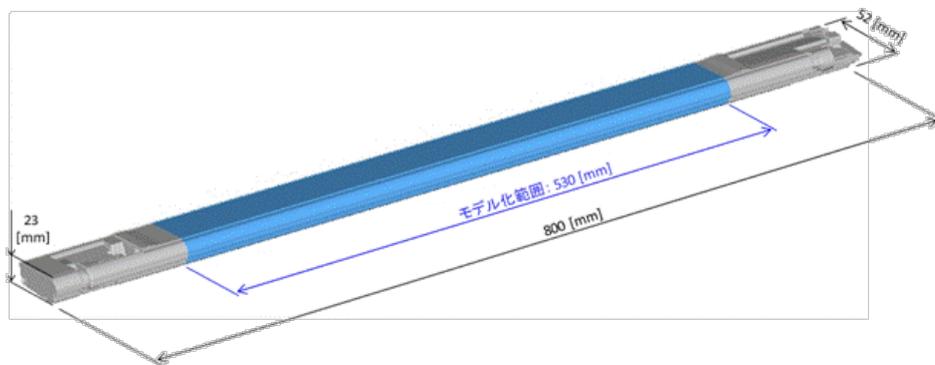


図4-2-3(2) 熱変形解析における温度負荷領域

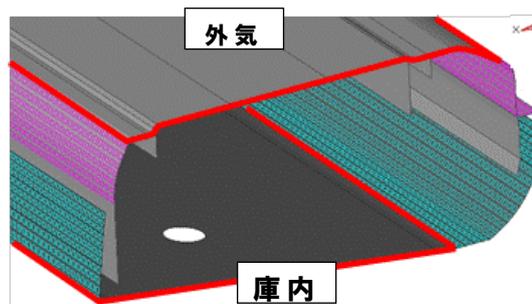


図4-2-3(3) 熱変形解析における温度付加領域面

また、側面における熱伝達の影響を評価するために、上述の構造③と④について、図4-2-3(3)の側面(図の水色、紫色の表面)に対し熱伝達係数を10 [W/(m²・K)]として解析を行い、比較した。

表4-2-3(2)に、外気側の温度を30℃および-5℃とした場合の各構造における変位(熱変形)の一覧を示す。表4-2-3(2)の値は評価基準比で示しており判定基準を2.0とする。表4-2-3(2)から分かるように、外気温が-5℃の場合は、CNF15のみの構造③~⑥の4つとも全て現行構造①より変形が少なく、庫内側のみCNF15の構造では現行とほぼ同等の変形となった。外気温30℃の場合は、全ての構成において現行構造より大きい値となっているが、スペック値である2.0よりも小さいため、熱変形の観点では使用可能な範囲であると判断する。これは材料変更により線膨張係数が約2分の1になる効果が高いと考えられる。各構造間で比較すると、現行①の庫内側への変形が0.5であり、他の構造と比較して小さい。これは補強金属板が庫内側に設置されているためと考えられる。

表4-2-3(2) 各構造における熱変形量の一覧

	構造	外気温-5℃		外気温30℃		備考
		変形量(基準比)	判定	変形量(基準比)	判定	
現行 (PS)	①ケース +金属板 	0.70		0.50		現状
	②ケースのみ 	0.57○	○	2.14×	○	
新材料 (PP+CNF15%)	③ケースのみ 	0.28○	○	1.06○	○	線膨張係数の効果
	④ケース増厚 +1.0mm 	0.38○	○	1.20○	○	
	⑤リブ2本 t=2.0,L=13.0mm (板厚変更無し) 	0.30○	○	1.00○	○	
	⑥ケース増厚 +リブ2本 	0.40○	○	1.15○	○	
庫内側のみ 新材料 (PP+CNF15%)	⑦ケース増厚 +1.0mm 	0.71○	○	1.49○	○	実施候補
	⑧ケース増厚 +リブ2本 	0.68○	○	1.45○	○	実施候補

※変形量の目標スペックは、基準比2.0以下

(1-2) 取組み2: センターピラーの断面伝熱性の解析

ヒーターの熱が伝導により外部に放出される熱量を解析により求めて、各構造における省エネ性を評価した。また、外殻樹脂のどの部分からの放熱が多いかを定量化するために図4-2(7)に示すようにケースを6部分に分けて通過熱量およびヒーターの出力量を求めた。

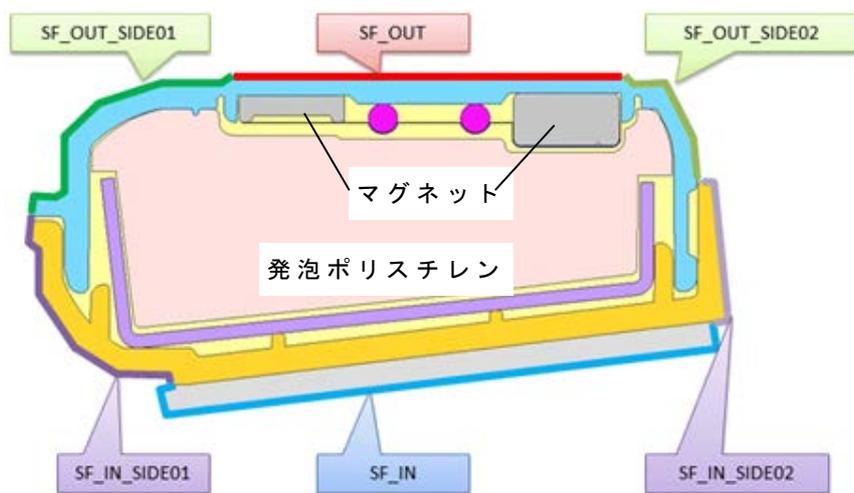


図4-2-3(4) 断面伝熱解析における定量化領域の分割図

図4-2-3(5)、図4-2-3(6)、図4-2-3(7)に解析結果を示す。

図4-2-3(5)は、現行品の温度分布と熱流束分布を示しており、金属部を通じて庫内側に熱が流れている様子が分かる。それに対して図4-2-3(6)にとCNF樹脂を用いた場合の温度分布と熱流束分布を示す。金属部を除いているため、そこを通る熱量がなくなり庫内側の温度も現行品よりも低下しているのが分かる。

それらの数値の比較をまとめて図4-2-3(7)に損失熱量の現行品とCNF樹脂の差をグラフに示す。ヒータ熱量で▲3.2%、庫内への吸熱量で▲4.2%の効果があり、合計で▲3.5%の効果が見込まれる結果となった。

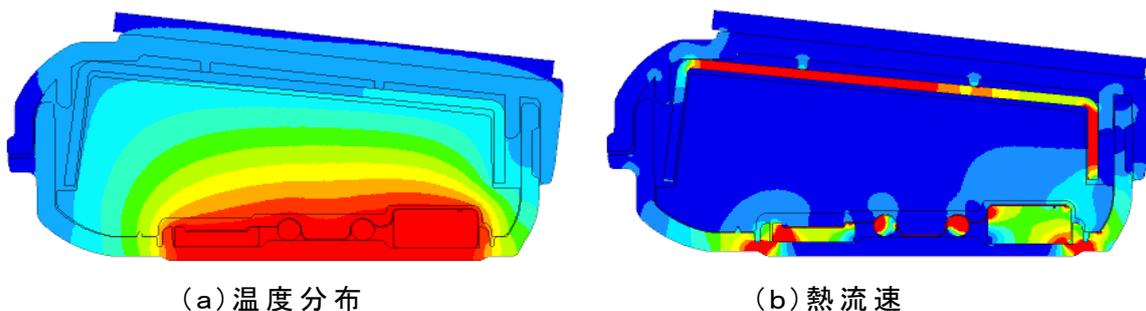
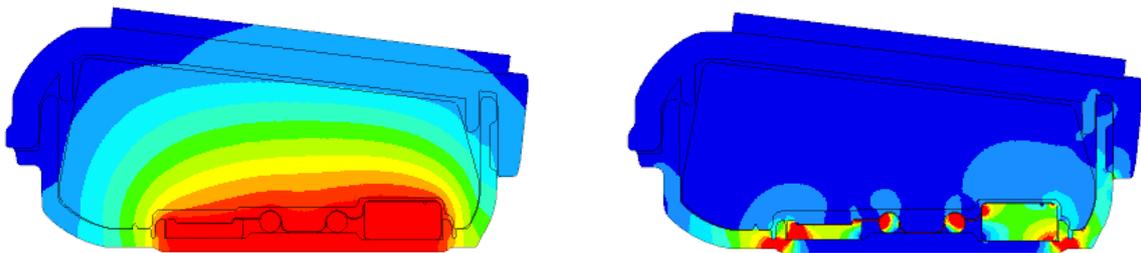


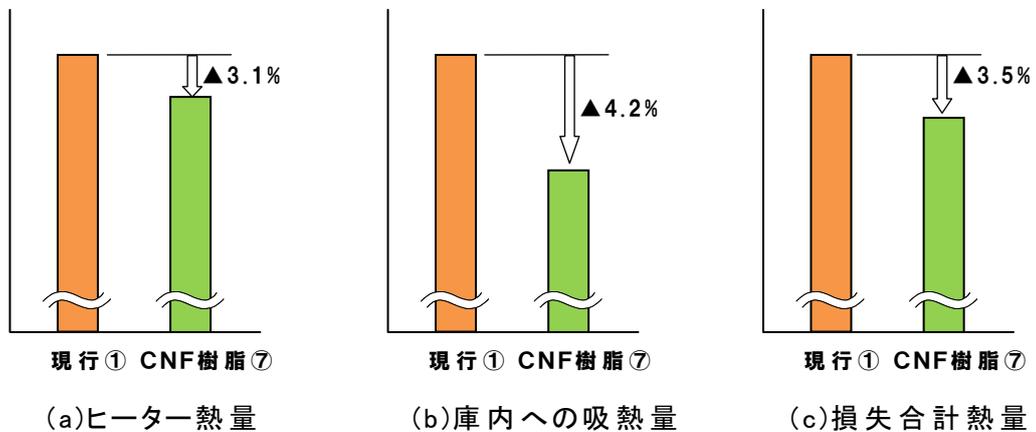
図4-2-3(5) 伝熱解析結果 / 現行構造①



(a) 温度分布

(b) 熱流速

図4-2-3(6) 伝熱解析結果／CNF樹脂化構造⑦



現行① CNF樹脂⑦

現行① CNF樹脂⑦

現行① CNF樹脂⑦

(a) ヒーター熱量

(b) 庫内への吸熱量

(c) 損失合計熱量

図4-2-3(7) 断面熱解析結果によるCNF樹脂化の損失熱量の低減効果

以上の結果から、⑦庫内側のみ新材料(増厚+1mm)のCNF樹脂適用構造の効果が確認できたため、この仕様の部材を試作し検証を行う。

(2) クロスレールの設計

まず、現行金属製のクロスレール置き換え時の剛性の比較検証を行う。

図4-2-3(8)に本検証を行ったクロスレールの断面形状の模式図を示す。断面形状を3種類(現行と同形状のリブなし、現行の形状にリブを2本追加した形状、およびリブ2本にさらに側面の長さを延長した形状)、および板厚4種類($t=4, 5, 6, 8$ [mm])の組み合わせによる計12種類のクロスレールについて、図4-2-3(8)に示した形状で構造解析を行った。

	t=4 [mm]	t=5 [mm]	t=6 [mm]	t=8 [mm]
リブなし				
リブ2本				
リブ2本 + 側面延長				

図4-2-3(8) 構造解析を行った12種類の断面形状

クロスレールの解析モデルの概要は以下の通りである。

- ・要素タイプ: シェル1次 (シェル基準面はCAD形状の中立面とする)
- ・節点数: 4.0万 (リブなし)、6.9万 (リブあり)

解析における境界条件、曲げ・ねじりの荷重点を図4-2-3(9)に示した。荷重点は断面重心(1点)とし、荷重点と断面上の各節点を剛体接続した。

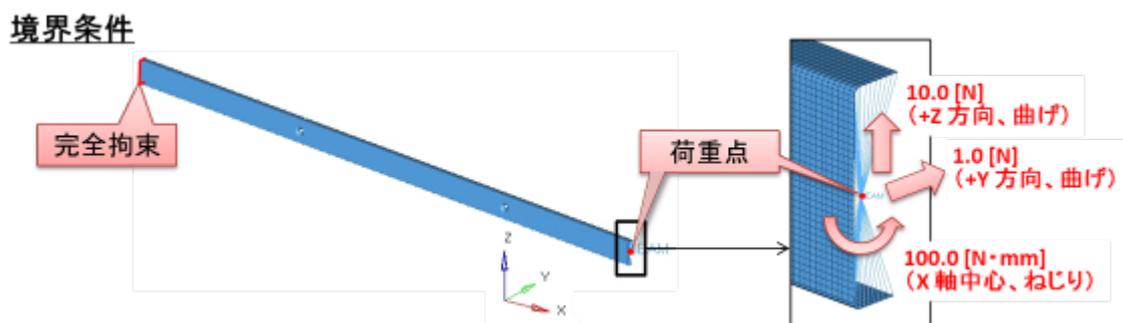


図4-2-3(9) クロスレールに加える荷重点

クロスレールについては、図4-2-3(8)に示した断面形状を有する12種類のサンプルに対して、荷重を加えた際のXYZ各方向の変位量を構造解析により求めた。クロスレールを板金からCNF樹脂に変更した場合、Y方向(冷蔵庫の水平方向)については、図4-2-3(10)に示したように、剛性が大きく低下したが、図4-2-3(8)のようにリブ2本を追加することで曲げ剛性が改善された。リブの追加に加えて側面を延長することで板厚 $t=5\sim 6$ [mm]の間で、現行強度を以上の強度が得られることが分かった。

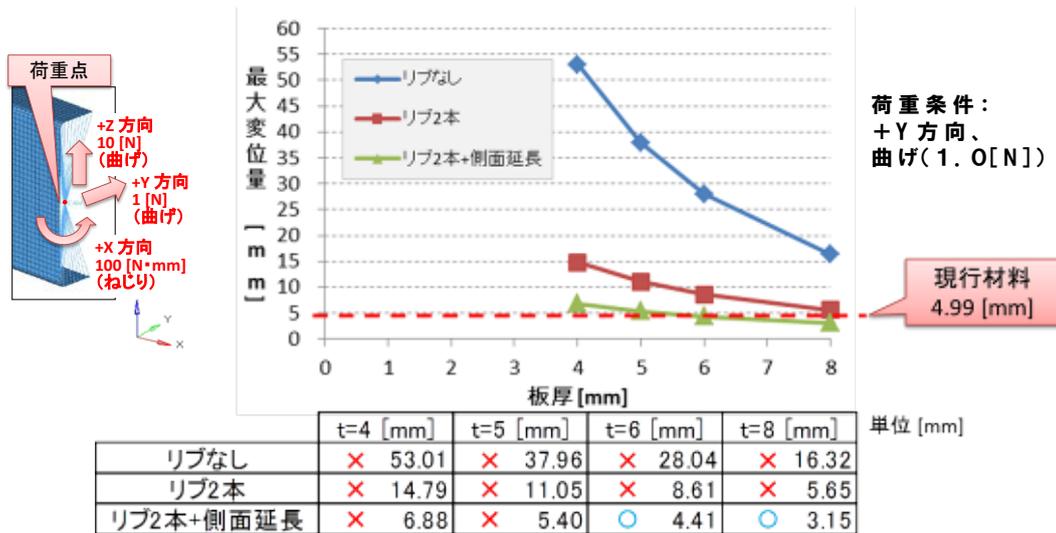


図4-2-3(10) Y方向の曲げに対する最大変位量

Z方向(冷蔵庫の垂直方向)については、図4-2-3(11)に示したように、強度が大きく低下した。リブの追加や側面の延長により強度は改善されたが、現行構造以上の強度を得ることはできなかった。

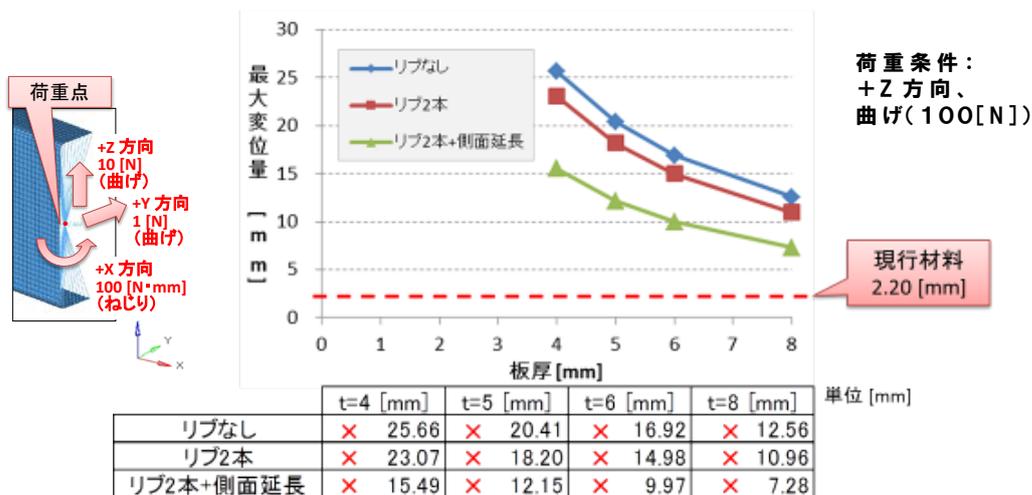


図4-2-3(11) Z方向の曲げに対する最大変位量

X軸中心のねじりについては、図4-2-3(12)に示したように、鉄板製クロスレールの代わりにCNF樹脂製クロスレールを用いた場合は、いずれの形状・板厚においても現行クロスレール以上の強度が得られる結果が得られた。

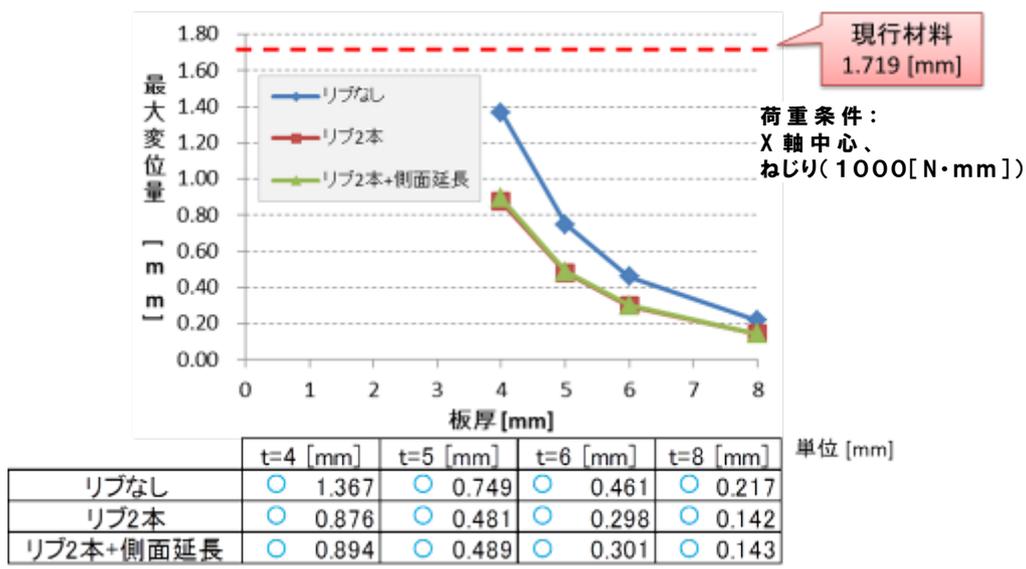


図4-2-3(12) X方向のねじりに対する最大変位量

以上のように、クロスレール部のみの対応では現行同等の剛性にするのは不可能であり、冷蔵庫全体として剛性維持の可能性はあるか構造解析を用いて検証した。

検証は図4-2-3(13)に示す冷蔵庫筐体全体のモデルを用いて行い、冷蔵庫のドアに荷重がかかった場合の横方向の変形量で評価を行った。

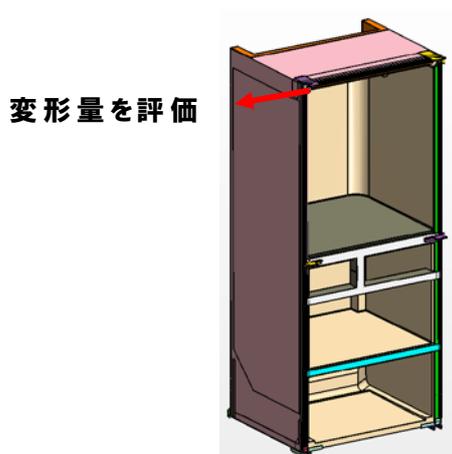


図4-2-3(13) 冷蔵庫筐体構造解析モデル

図4-2-3(14)に解析結果として正面から見た変形図を示す。筐体の前側が横方向に変形しているのが分かる。



図4-2-3(14) 解析結果／冷蔵庫筐体の変形図

冷蔵庫筐体に対して、クロスレール部以外の部位に補強を施した結果、筐体上部の横方向変位が7.4%低減できることを確認した。

よって、クロスレールへのCNF樹脂適用については冷蔵庫補強構造設計と組み合わせで実現することを前提に、成形時の材料流動性も考慮して基本肉厚を4mmとし、現行冷蔵庫に組込み可能な寸法内で設計を行った。

但し、実用化に向けては、上記冷蔵庫の補強構造の成立性を確実させるためのさらなる材料剛性向上、金属を樹脂に置き換えることによって生じるドアのガスケットを密着させるための着磁性の追加、もしくは、マグネットの配置設計等の課題がある。

4-2-4. 成形

4-2-4-1. 金型設計

前項にて設計された冷蔵庫フレンチドア部・センターピラー部品と、筐体部・クロスレール部品について、金型の設計および製作を行う。金型設計において、ナチュラルPPよりも流動性が低いPP+CNF15%においても、全体に充填できるようにするための金型仕様、金型構造を検討する。設定したゲートレイアウトに対し、樹脂流動解析による充填性予測を実施し、発生する課題を予測する。こうして金型の詳細仕様を決定し、金型を製作する。

①センターピラー金型設計

センターピラー金型設計については昨年度報告書に詳しく述べたので、概要のみ記載する。

表4-2-4(1)にセンターピラー金型の仕様一覧を記載する。充填性を高めるため、ランナー方式をホットランナーとし、ゲート方式をサイドゲート3点とした。

ウェルド対策および充填性向上のため、ヒート&クール成形が有効であり、金型仕様としては対応可能としたが、製品形状が複雑であるため、成型後の追加工が必要となるため、実施しなかった。

また、流動性向上に有効な射出圧縮成形方式について、後述の流動解析結果から、充填性が十分確保できるものと判断し、採用を見送った。

表4-2-4(1) センターピラー金型仕様比較一覧表

	従来の金型仕様	今回の金型仕様
ランナー方式	コールドランナー	ホットランナー
ゲート方式	ピンゲート	サイドゲート
ゲート点数	2点	3点
ヒート&クール成形	無し	無し (対応可能)
射出圧縮成形	無し	無し

充填性の確認のため、流動解析を実施した結果を表4-2-4(2)に記載する。ゲート設定の結果、充填性は問題ないと判断した。ヒケおよびウェルドについては多少発生懸念があるが、成形条件で対応可能と判断した。

表4-2-4(2) センターピラー金型流動解析結果

充填性	問題なし
ヒケ	大きな問題なし
ウェルド	大きな問題なし
ソリ(目標2mm以下)	懸念あり(最大22.1mm)

ソリについては解析上で15mm発生しており、目標である2mm以下に対して、懸念があると判断した。図4-2-4(1)にソリ解析結果を示す。

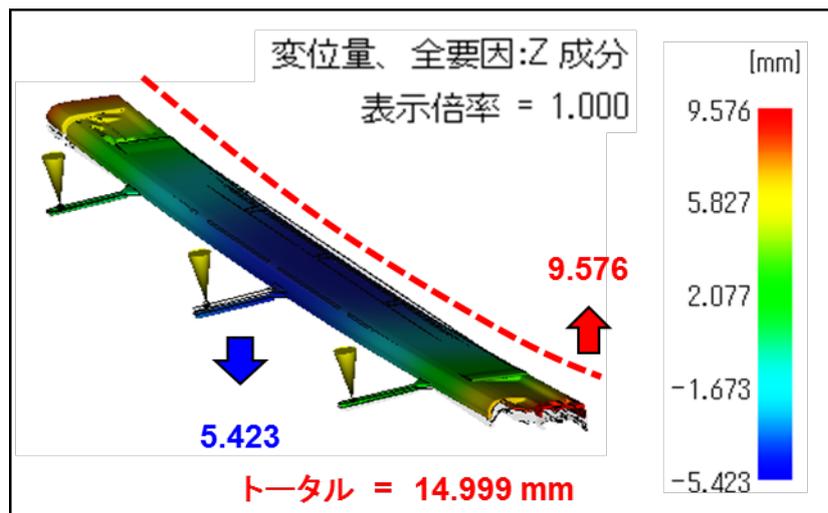


図4-2-4(1) ソリ解析結果

ソリについて、対策としては、成形条件(金型温度、冷却速度、保圧力)である程度改善が可能であるが、それでも目標に達しない恐れがある。

そこで、事前に対策案を検討した。

ソリの原因として、長尺部品における成形品断面の形状影響が考えられる。金型から取り出された成形品は、表面部は金型内の冷却によりほぼ収縮が完了しているが、内部は完全に収縮が完了していない。金型内では形状が保持されているが、金型から取り出された後の冷却により、収縮し、形状が変化する。本部品の形状は断面が楯の歯のような形状をしており、平坦部と側壁およびリブがある。平坦部の肉厚に比べ、側壁およびリブ部の肉厚の方が薄い。そのため、金型取り出し後の収縮は、平坦部が大きく、側壁およびリブ

部が小さくなる。その結果、ソリが発生するものと考えられる。

概念図を図4-2-4(2)に示す。

したがって、本成形品のソリは形状起因であり、根本的な対策としては形状変更となるが、設計制約上現実的ではない。

こういった場合の対策として、ソリをあらかじめ盛り込んだ製品形状とする手法がある。図4-2-4(1)の解析後のソリ量を逆算し、製品形状をあらかじめ逆ソリの形状とすることで、結果的なソリ量を低減する手法である。

この形状での解析結果を図4-2-4(3)に示す。解析結果として、ソリ量は1.05mmに低減し、目標達成の目処が立った。

ただし、本形状で金型を制作するのは製作が非常に難しく、金型製作費・期間が大幅に増大するため、今回は実施しなかった。

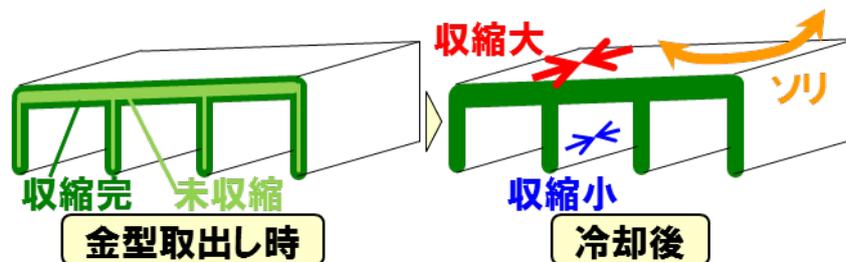


図4-2-4(2) ソリの原因予測

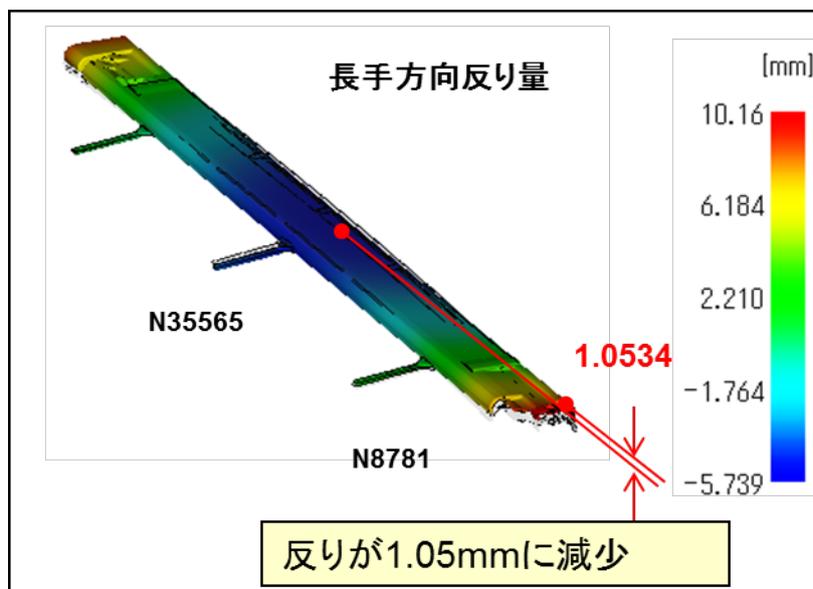


図4-2-4(3) ソリ改善形状解析結果

②クロスレール金型設計

クロスレール金型について、対象とする部品は3部品である。対象とする部品の形状をそれぞれ①、②、③とし、金型仕様を検討した。

図4-2-4(4)にクロスレールの部品形状を示す。

表4-2-4(3)にクロスレール金型の仕様一覧を記載する。充填性を高めるため、ランナー方式をホットランナーとし、ゲート方式を①、②はサイドゲート3点とし、③はサイドゲート1点とした。

①、②については後述する流動解析結果から、ウェルド発生の懸念があるため、ヒート&クール成形可能な仕様とした。

また、流動性向上に有効な射出圧縮成形方式について、後述の流動解析結果から、充填性が十分確保できるものと判断し、採用を見送った。

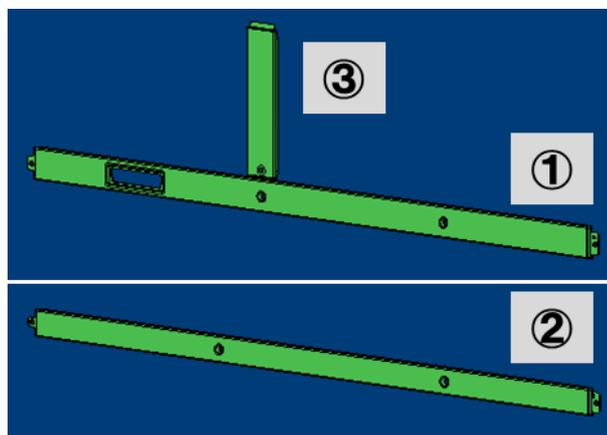


図4-2-4(4) クロスレール部品形状

表4-2-4(3) クロスレール金型仕様比較一覧表

	クロスレール①	クロスレール②	クロスレール③
ランナー方式	ホットランナー	ホットランナー	ホットランナー
ゲート方式	サイドゲート	サイドゲート	サイドゲート
ゲート点数	3点	3点	1点
ヒート&クール成形	有り	有り	無し
射出圧縮成形	無し	無し	無し

充填性の確認のため、流動解析を実施した結果を表4-2-4(3)に記載する。ゲート設定の結果、充填性は問題ないと判断した。ヒケについては多少発生懸念があるが、成形条件で対応可能と判断した。

ウェルドについて、①、②において発生する懸念が見られた。図4-2-4(5)に代表としてクロスレール①のウェルド予測を載せる。

対策として、ウェルド発生部の金型温度をコントロールし、外観を向上させる。金型に部分的なヒート&クール構造を盛り込み、対策とした。

ソリについて、薄く長尺な部品であるため、懸念が見られた。ただし、成形条件により敏感に変化することも予測できたため、成形条件で調整可能と判断した。

表4-2-4(4) クロスレール金型流動解析結果

	クロスレール①	クロスレール②	クロスレール③
充填性	問題なし	問題なし	問題なし
ヒケ	大きな問題なし	大きな問題なし	大きな問題なし
ウェルド	懸念あり	懸念あり	懸念あり
ソリ	懸念あり	懸念あり	懸念あり

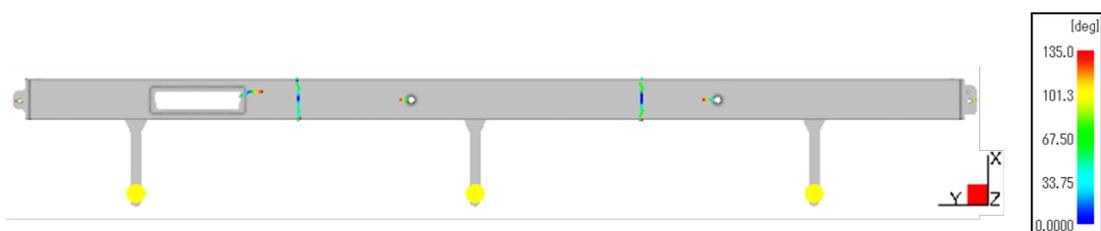


図4-2-4(5) クロスレール①流動解析結果(ウェルド予測)

4-2-4-2. 成形評価

製作した金型を用いて、センターピラー部品および、クロスレール部品の成形評価を行った。成形においては、PPにセルローズ15wt%を複合した材料を用いた。センターピラーおよびクロスレール部品は基本的に白色で用いられる部品であるため、マスターバッチ方式の着色剤を用いて白着色した。

成形した部品の外観、断面をそれぞれ分析、評価を行った。

①センターピラー成形評価

センターピラー金型を用いて成形を実施した。成形結果一覧を表4-2-4(5)に、成形品の外観を図4-2-4(6)に示す。

充填性は特に問題なかった。

成形品の寸法は、保圧力によってかなり変わるが、全寸法が公差内に入る成形条件を見出した。

ソリについて、金型温度、保圧力、冷却時間により変化が見られたが、概ね10mm以上となった。寸法確保を優先するため、保圧力を固定する必要があるが、金型温度、冷却時間だけでは調整が困難であった。

したがって、今回は成形後の製品を矯正することで評価を行った。矯正はソリ方向と

逆方向に固定し、オープンに入れることで実施した。矯正後にソリ量は1mm 以下となり、目標を達成した。

外観について、目視で分かる異物が発生することがあったが、成形条件で改善することができた。着色について、概ね白色に着色できた。ただし、製品採用に当たっては厳密な色調整が必要である。

ヒケ、ウェルドは多少見られたが、概ね問題ないと判断した。

表 4-2-4(5) センターピラー成形結果一覧

形状	充填性	問題なし
	寸法	問題なし
	ソリ(目標2mm以下)	大(10mm以上) ⇒矯正後問題なし
外観	目視	問題なし
	着色性	問題なし
	ヒケ	大きな問題なし
	ウェルド	大きな問題なし



図 4-2-4(6) センターピラー成形品の外観

成形条件の導出途中に、表面に異物が発生したものがあった。

この異物について、顕微鏡で拡大分析した結果を図4-2-4(7)に示す。

白色樹脂で覆われている箇所(白色正常部)の表面状態は滑らかであったが、変色部の表面状態は荒れが確認された。この荒れた箇所はすき間が多く、繊維状の物質が多く存在していると考えられる。

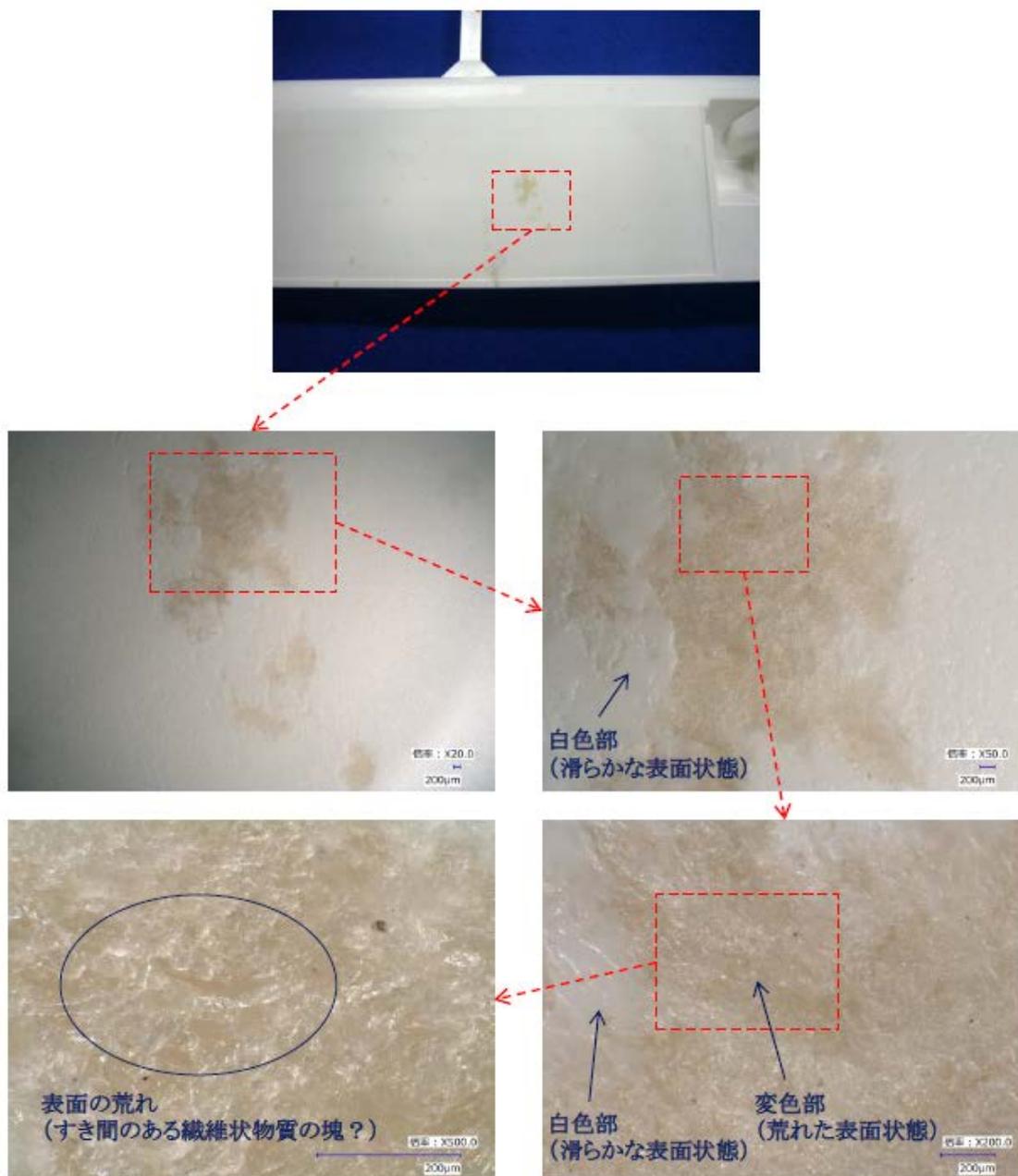


図 4-2-4(7) センターピラー成形品の顕微鏡像

この異物について、FT-IR 分析を行った結果を図4-2-4(8)に示す。変色部からは、PP 樹脂とセルロースが検出された。一方で、正常部からは、PP 樹脂のみが検出される部分や、PP樹脂と微量のセルロースが検出される部分があった。以上より、変色部はセルロース繊維が十分分散しておらず、成形時にセルロース成分が焼けて変色した結果、表面異物となったと考えられる。

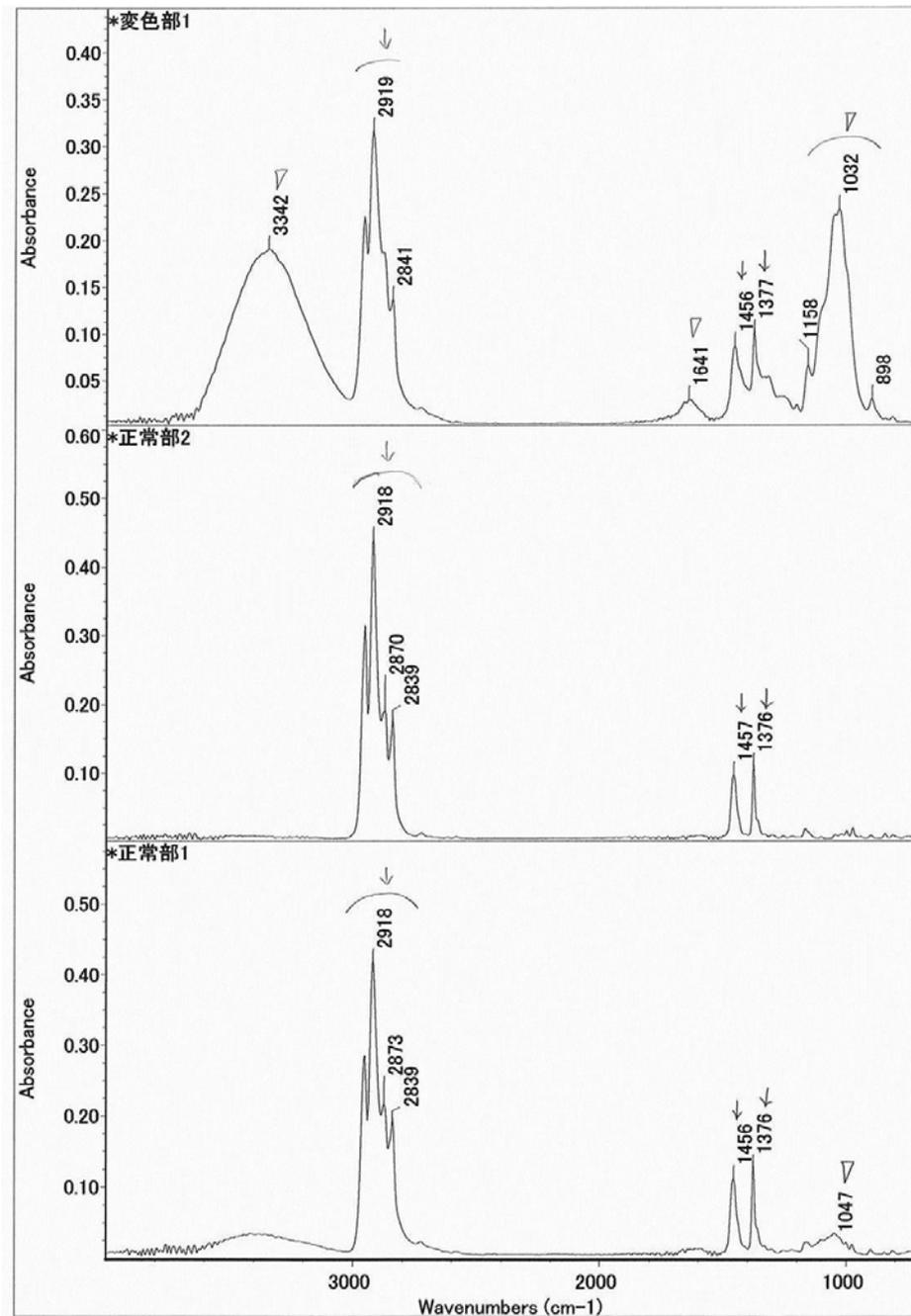


図4-2-4(8) センターピラー成形品の表面異物のFT-IR分析結果

センターピラー成形品の断面の SEM 観察を実施した。

断面観察位置を図 4-2-4(9)に示す。

樹脂流動の特徴的な箇所として、①ゲート位置、②ウェルド位置、③末端位置とした。それぞれの断面において数箇所を低倍率で観察し、特徴的な箇所についてはさらに高倍率で観察した。

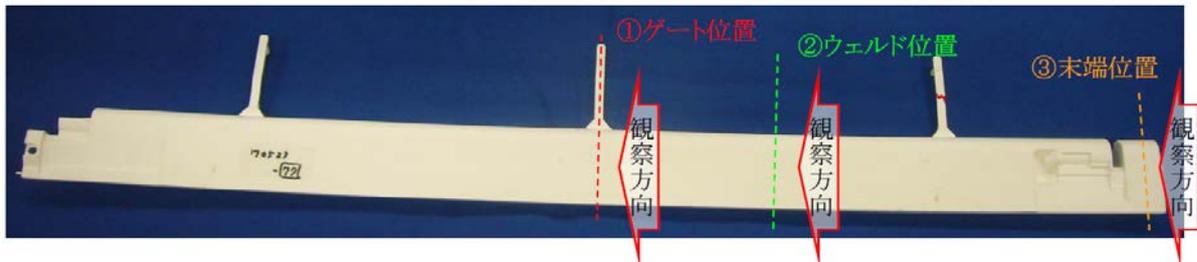


図 4-2-4(9) センターピラー成形品の断面観察位置

断面観察結果を図 4-2-4(10)～(12)に示す。

まず全体として、断面の濃い白色部がセルロース繊維であり、色の薄い部分がPP樹脂と思われる。

セルロース繊維は、概ね全体に均一に分散しており、一部に凝集物が見られる。この凝集物が表面に表れたものが、前述の表面異物と考えられる。傾向としては流動末端において、凝集物が大きく、発生しやすくなっている。これはセルロース複合樹脂の温度が下がり、流速が下がってきた状態で、凝集が発生しやすくなるためと考えられる。

この凝集物を極力少なくすることが、製品適用に向けた課題であり、材料製造と成形条件の両面で対策が必要である。

繊維の配置については明確な傾向は見られなかった。一部、成形品表面付近で流動の方向に沿って繊維が配置しているように見られる。こういった箇所は、樹脂が流動しながら凝固しているためと思われる。一方、成形品内部においては、このような繊維の配置方向の傾向が見られなかったことから、樹脂流動が止まった状態で凝固していると考えられる。

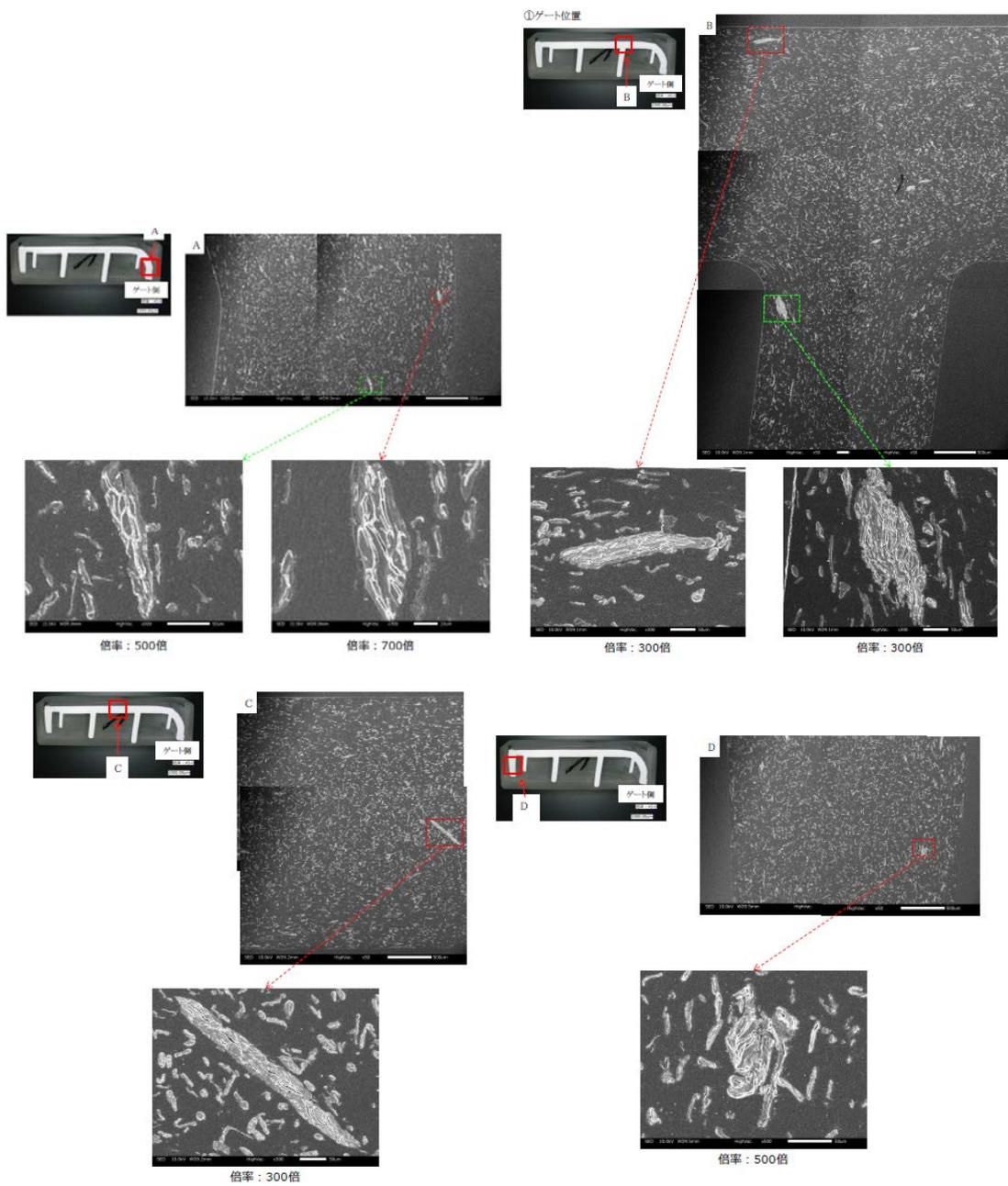


図 4-2-4(10) センターピラー成形品の断面観察結果(ゲート位置)

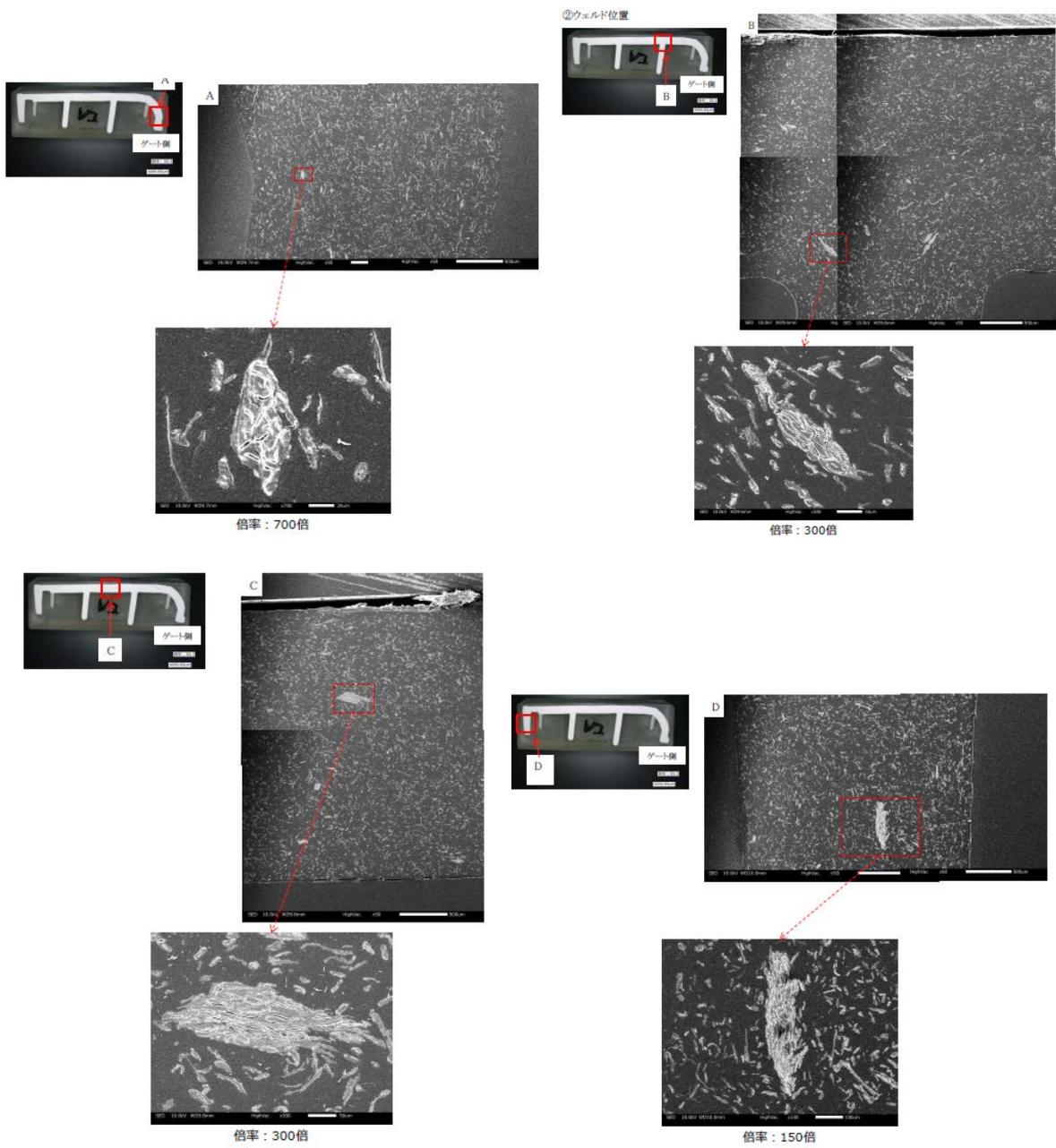


図4-2-4(11) センターピラー成形品の断面観察結果(ウェルド位置)

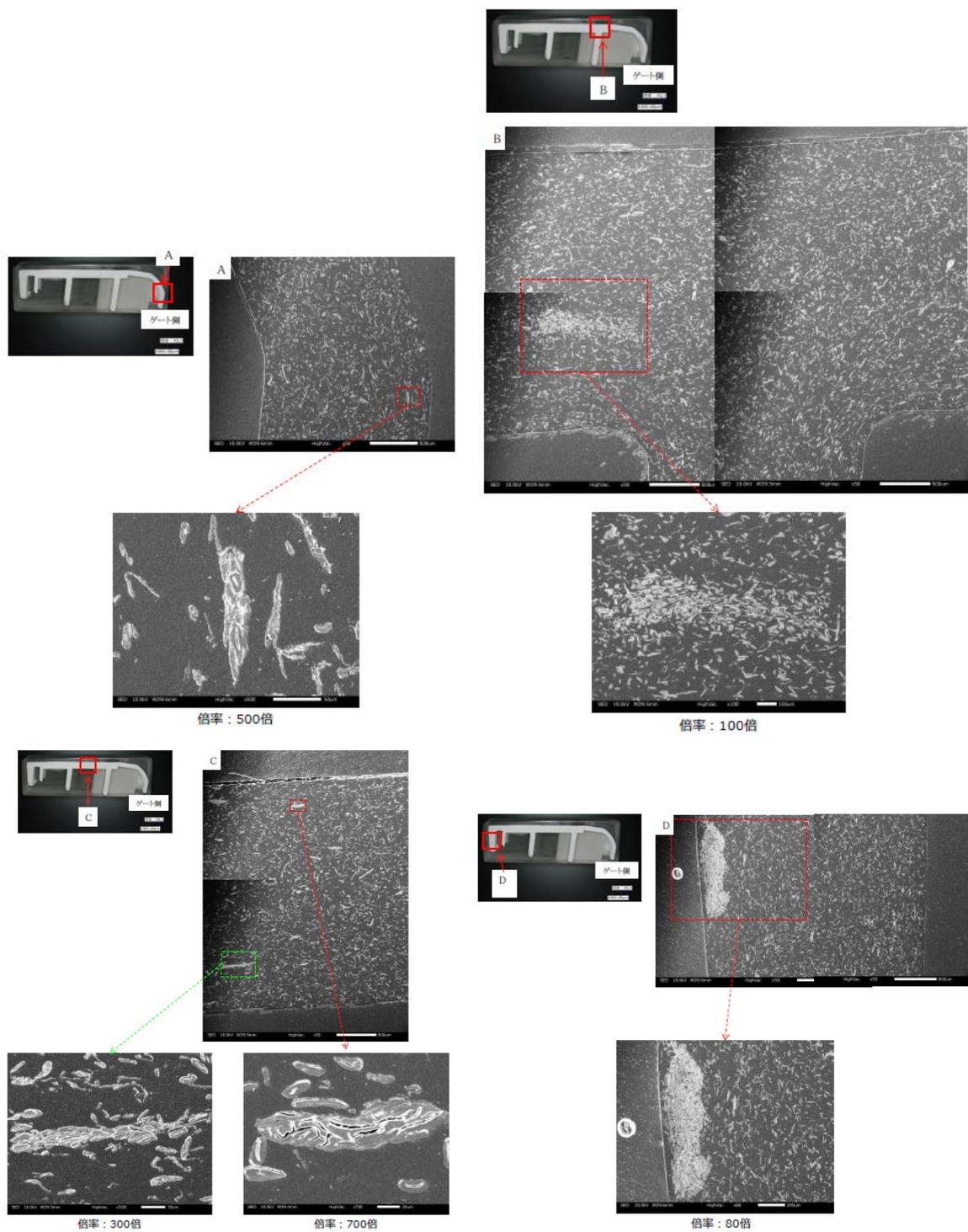


図4-2-4(12) センタープレート成形品の断面観察結果(末端位置)

②クロスレール成形評価

クロスレール金型を用いて成形を実施した。成形結果一覧を表4-2-4(6)に、成形品の外観を図4-2-4(7)に示す。

充填性は3部品とも特に問題なかった。

成形品の寸法は、保圧力によってかなり変わるが、全寸法が公差内に入る成形条件を見出した。

ソリについて、金型温度、保圧力、冷却時間により変化が見られたが、金型温度を偏温させることで、概ねコントロールできた。明確な目標数値は無いが、組立上問題ないソリ量の実現できた。

外観について、目視で分かる異物が発生することがあったが、成形条件で改善することができた。着色について、概ね白色に着色できた。ただし、製品採用に当たっては厳密な色調整が必要である。

ヒケ、ウェルドは多少見られたが、概ね問題ないと判断した。

表4-2-4(6) クロスレール成形結果一覧

		クロスレール①	クロスレール②	クロスレール③
形状	充填性	問題なし	問題なし	問題なし
	寸法	問題なし	問題なし	問題なし
	ソリ	問題なし	問題なし	問題なし
外観	目視	問題なし	問題なし	問題なし
	着色性	問題なし	問題なし	問題なし
	ヒケ	大きな問題なし	大きな問題なし	大きな問題なし
	ウェルド	大きな問題なし	大きな問題なし	問題なし



図4-2-4(13) センターピラー成形品の外観

クロスレール成形品の断面の SEM 観察を実施した。

断面観察位置を図4-2-4(14)に示す。

クロスレール①、②について、樹脂流動の特徴的な箇所(1)ゲート位置、(2)穴位置、(3)流動末端付近を観察した。

クロスレール③について、(1)ゲート位置、(3)流動末端付近を観察した。

それぞれの断面において数箇所を低倍率で観察し、特徴的な箇所についてはさらに高倍率で観察した。

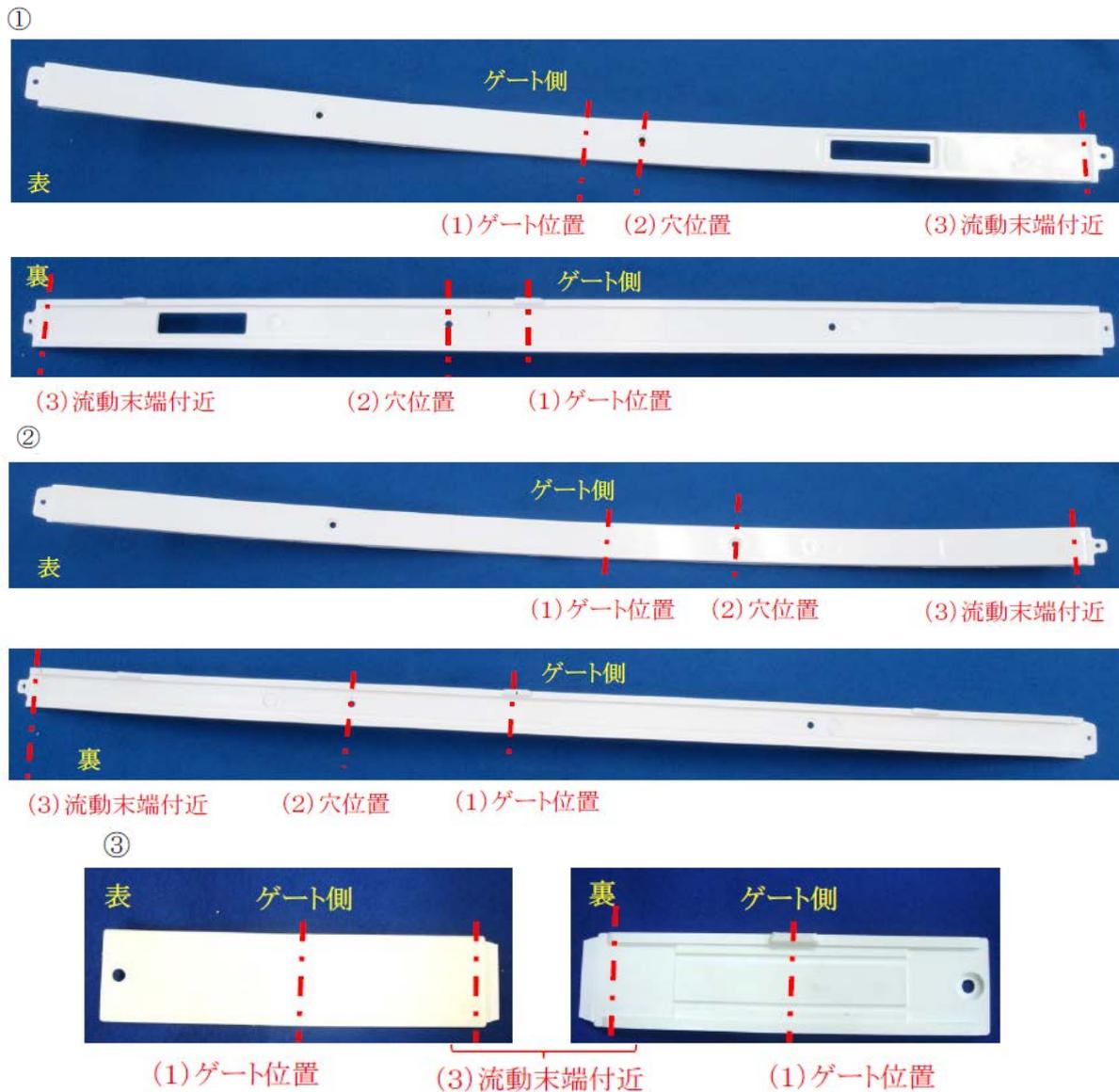


図4-2-4(14) クロスレール成形品の断面観察位置

断面観察結果を図4-2-4(15)～(12)に示す。

まず全体として、断面の濃い白色部がセルロース繊維であり、色の薄い部分がPP樹脂と思われる。

セルロース繊維は、概ね全体に均一に分散しており、一部に凝集物が見られる。傾向としては流動末端において、凝集物が大きく、発生しやすくなっている。これはセルロース複合樹脂の温度が下がり、流速が下がってきた状態で、凝集が発生しやすくなるためと考えられる。

また、クロスレール③については比較的凝集物の発生率が高く、サイズも大きかった。これは、クロスレール①、②が比較的大型のため、650トン成形機で成形しているのに対し、クロスレール③は小型のため、180トン成形機で成形したため、成形機のスクリー内での滞留時間が短いなど、繊維の分散が進みにくい条件であったためと考えられる。

この凝集物を極力少なくすることが、製品適用に向けた課題であり、材料製造と成形条件の両面で対策が必要である。

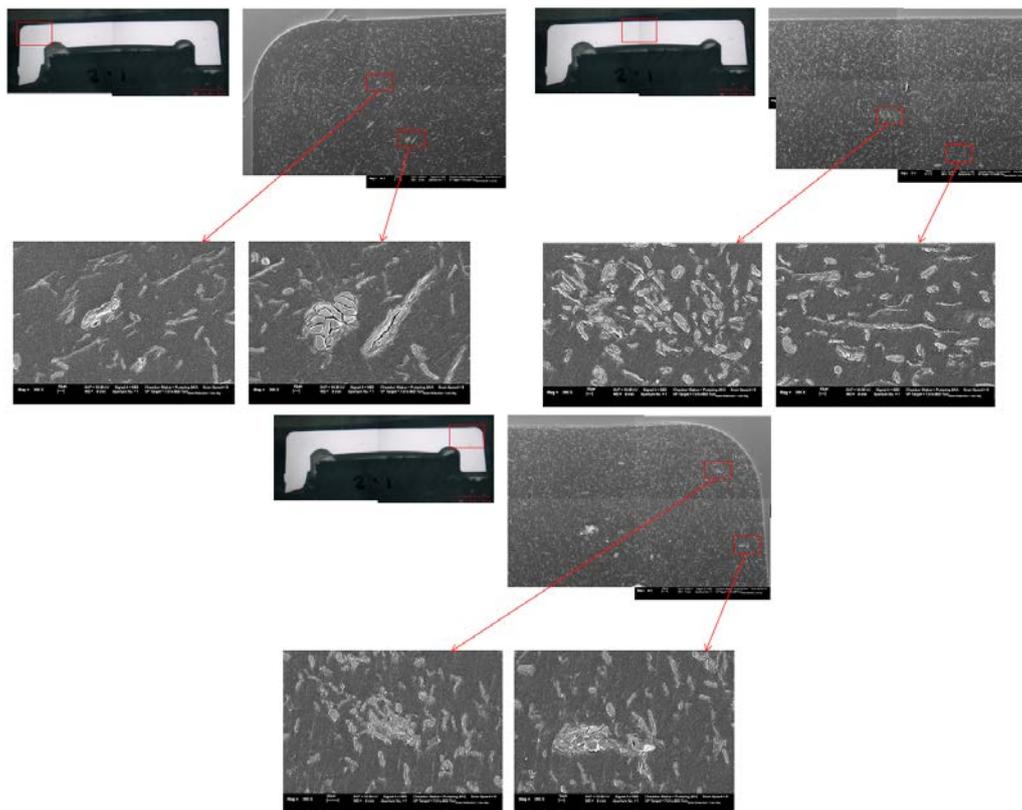


図4-2-4(15) クロスレール①成形品の断面観察結果(1)ゲート位置

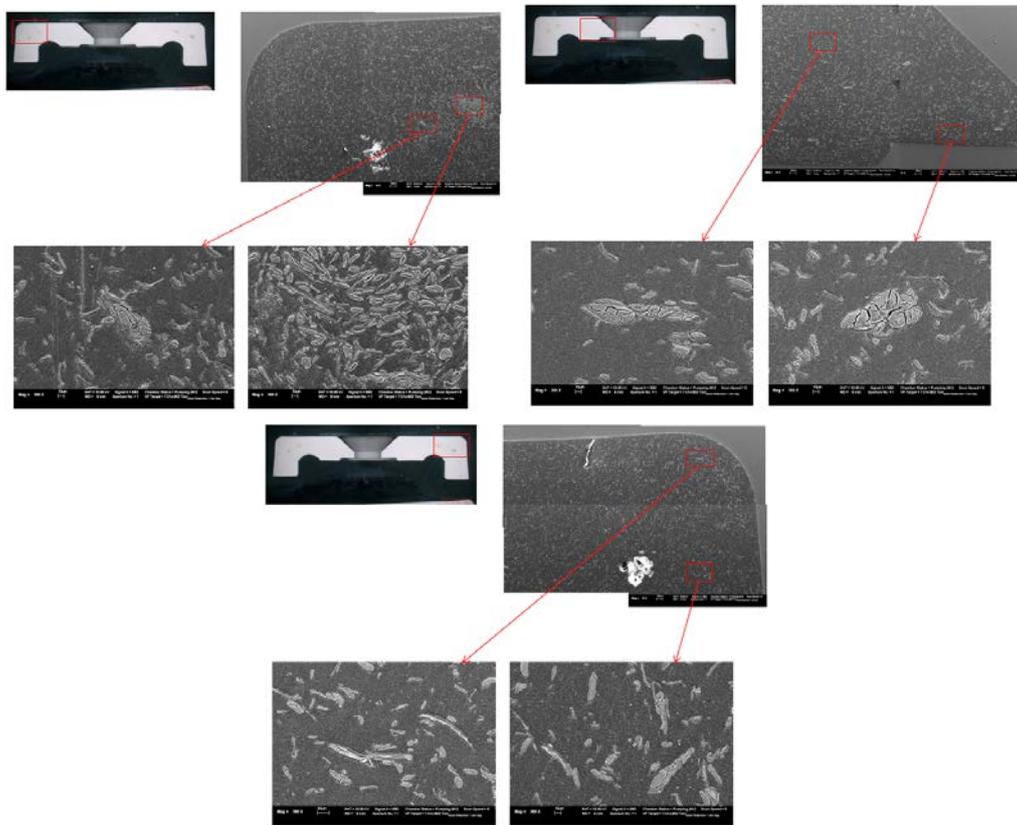


図4-2-4(16) クロスレール①成形品の断面観察結果(2)穴位置

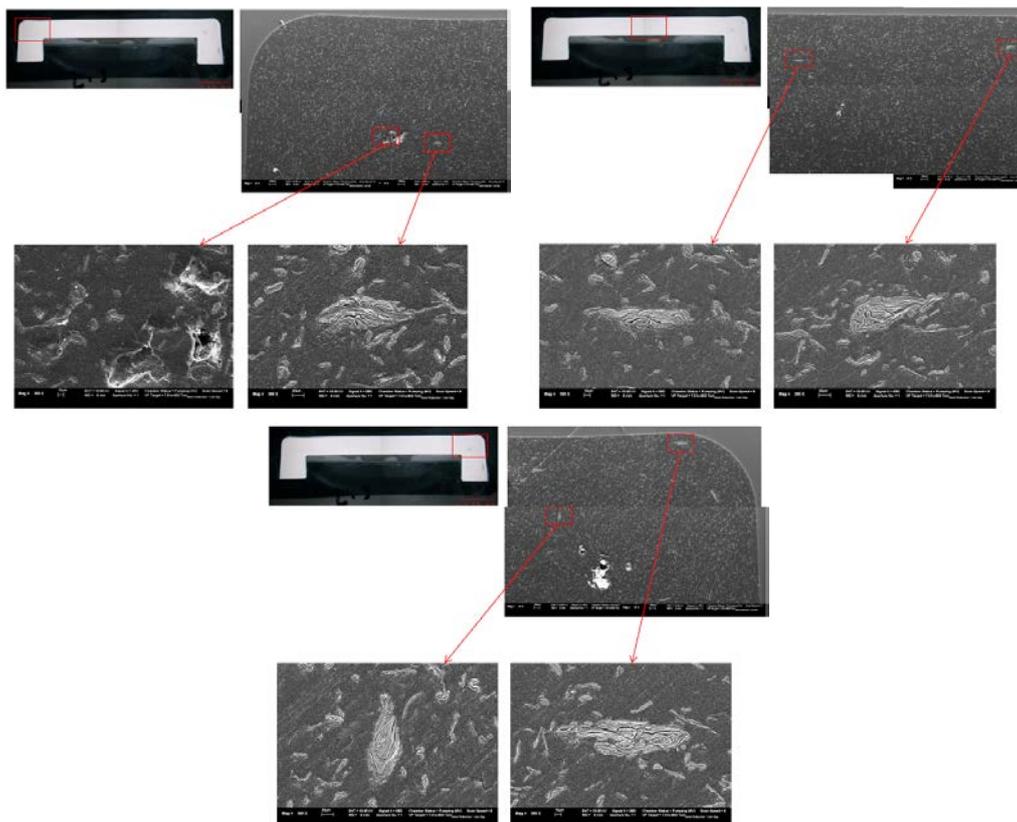


図4-2-4(17) クロスレール①成形品の断面観察結果(3)流動末端付近

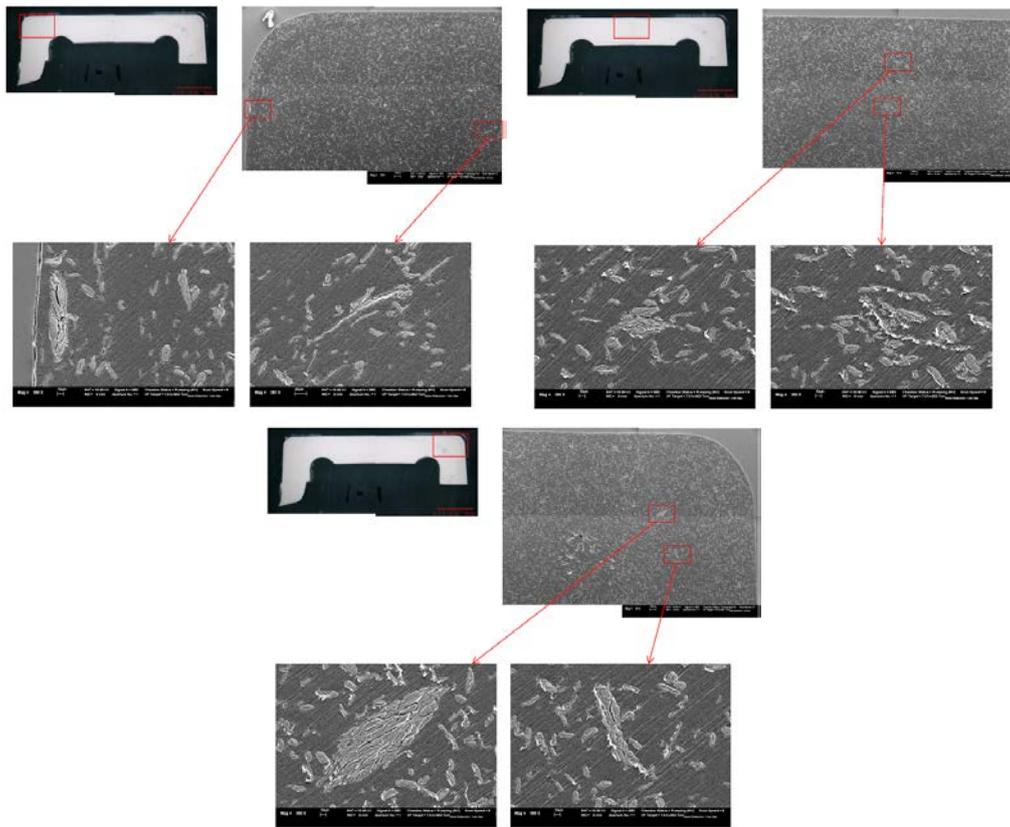


図4-2-4(18) クロスレール②成形品の断面観察結果(1)ゲート位置

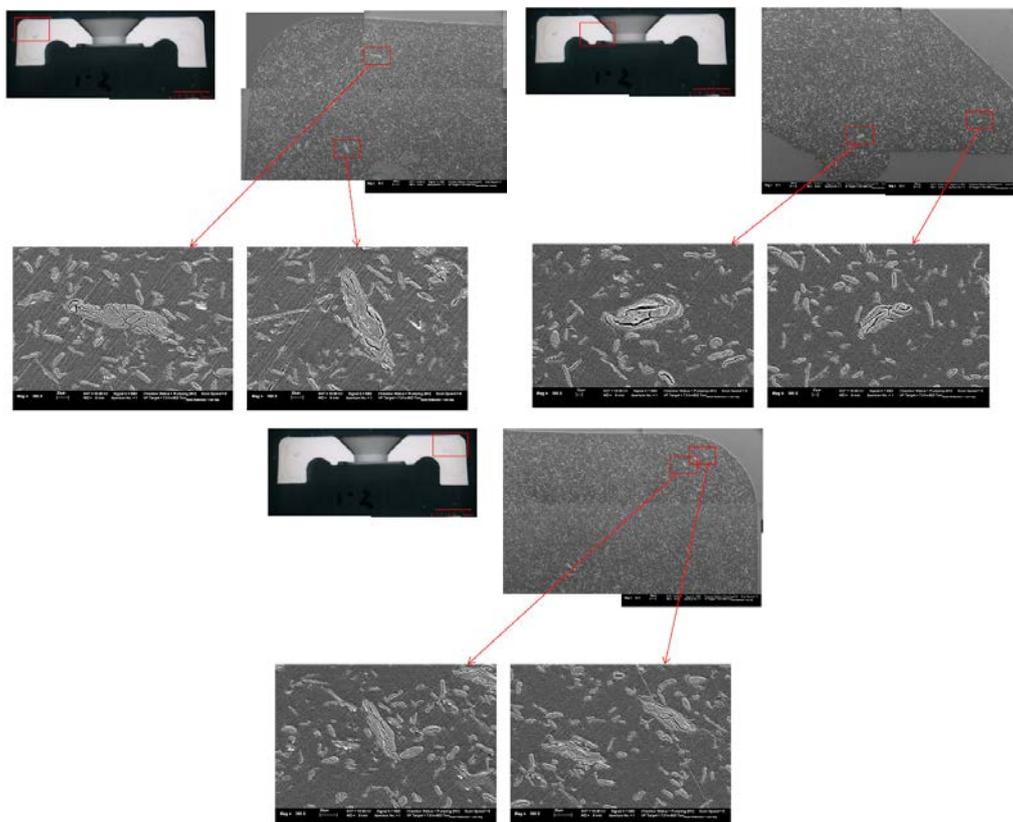


図4-2-4(19) クロスレール②成形品の断面観察結果(2)穴位置

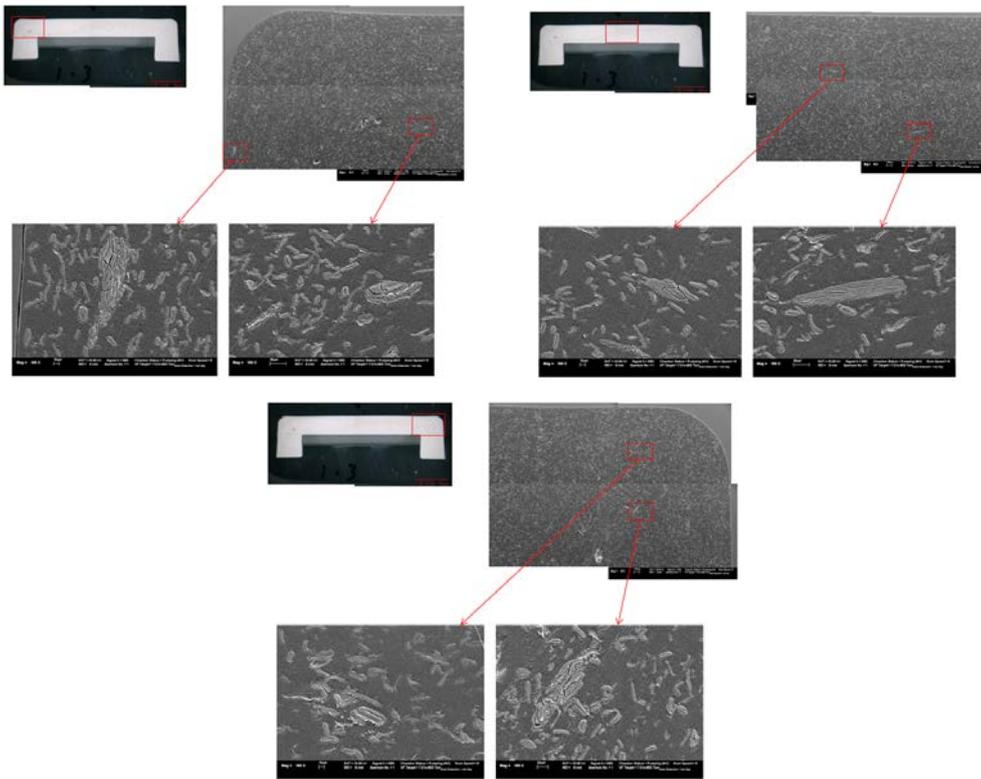


図4-2-4(20) クロスロール②成形品の断面観察結果(3)流動末端付近

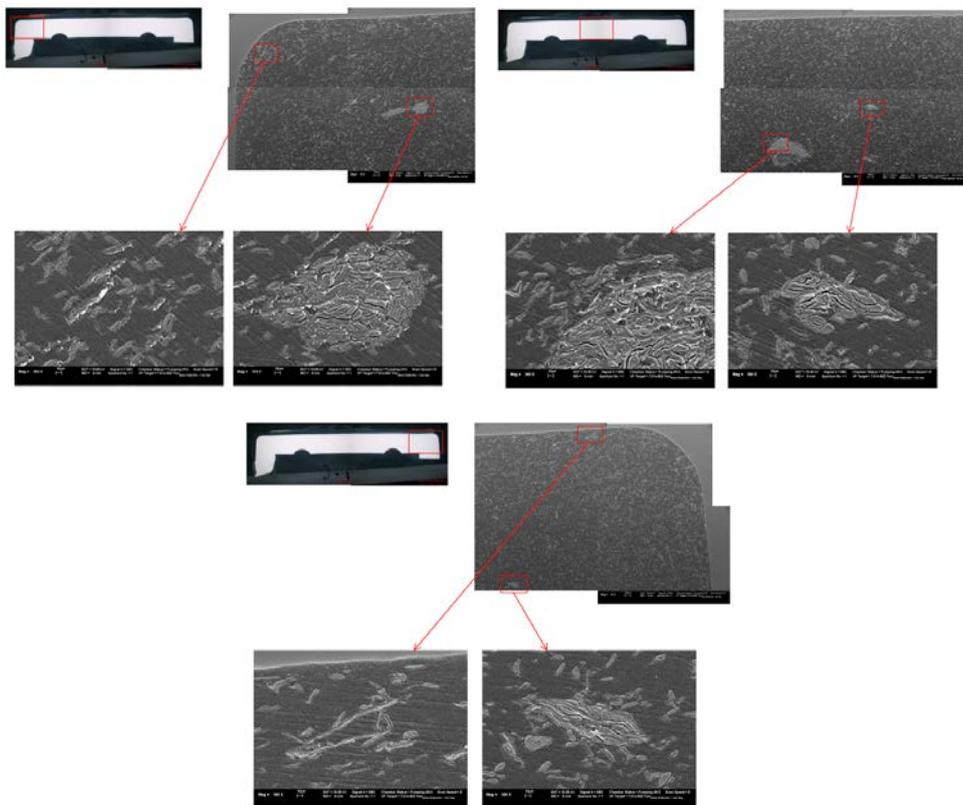


図4-2-4(21) クロスロール③成形品の断面観察結果(1)ゲート位置

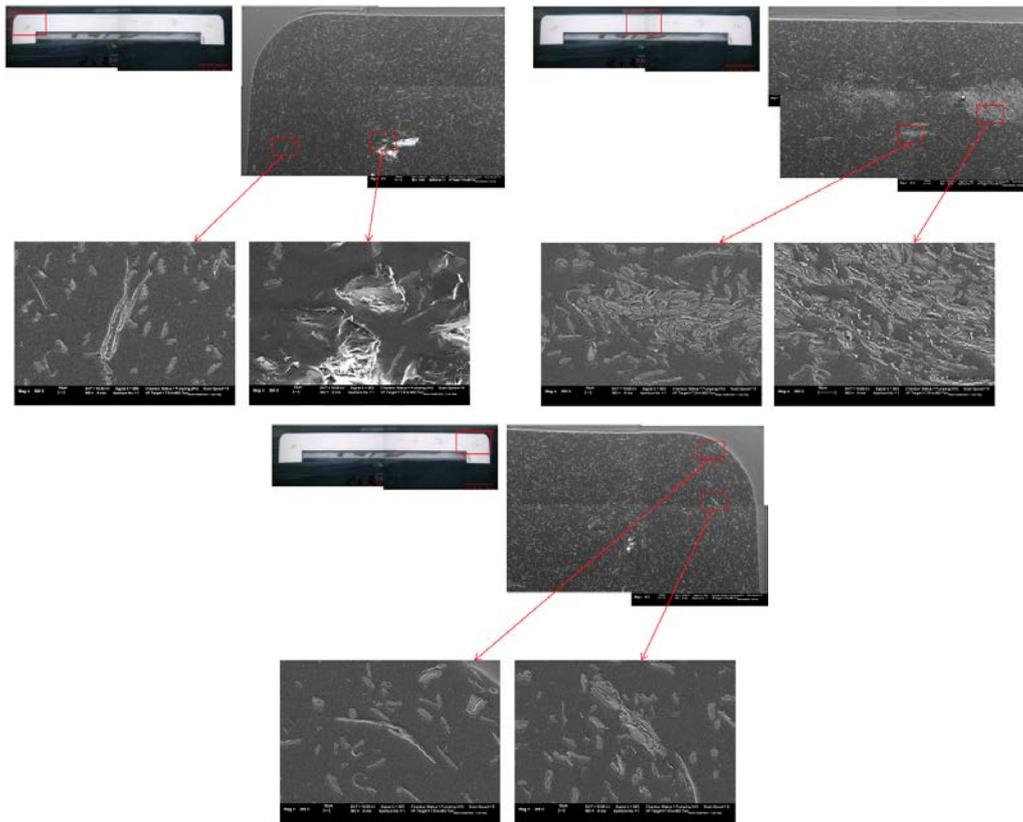


図4-2-4(22) クロスレール③成形品の断面観察結果(3)流動末端付近

4-2-4-3. 単品評価

新規材料の商品適用に当たって、設計上の材料物性以外に、信頼性試験などの評価項目がある。これらの中で、成形品単品で評価可能な項目で、特に重要と思われる項目を抜粋して、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。実際に試験を実施した項目一覧を表4-2-4(7)に示す。

耐熱性試験は、試験前後の変形量が一定以下であることと、外観を目視評価した。

耐湿-耐熱繰返試験は、試験前後のソリ量の変化が一定以下であることと、光沢度低下が一定以下(▲5以下/Gs60°)であることと、さらに外観を目視評価した。

冷熱試験は、試験前後の変色が一定以下(△E:3以下)であることと、外観を目視評価した。

表 4-2-4(7) センターピラー信頼性試験項目一覧

試験項目	試験条件	要求項目
耐熱性試験	70±3℃×1H	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
耐湿-耐熱繰返試験	40±2℃、95%R.H.×24H ⇒60±3℃×24H このサイクルを2回繰返	部品の外観や機能を損なうようなソリ、ヒケ、光沢の低下、その他使用上有害な欠陥がないこと
冷熱試験	-25±2℃×12H ⇒60±2℃×12H このサイクルを5回繰返	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

①センターピラー単品評価

センターピラーの耐熱性試験結果を表 4-2-4(8)に示す。

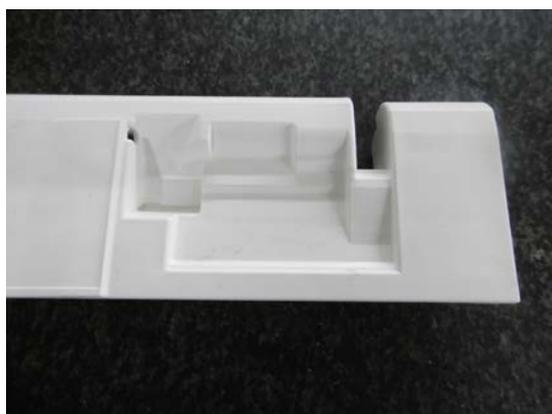
表 4-2-4(8) センターピラー耐熱性試験結果

No.	全長寸法変化 (±0.5%以下)		ソリ量変化 (△2mm以下)		目視評価	
	○		○		○	
1	○	-0.14%	○	±0.0mm	○	異常なし
2	○	-0.10%	○	+0.6mm	○	異常なし
3	○	-0.05%	○	+0.5mm	○	異常なし

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±0.5%以下で合格とした。ソリ量変化は△2mm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N=3で評価し、全て合格であった。

試験前後のサンプル外観を図 4-2-4(23)に示す。



(試験前)



(試験後)

図 4-2-4(23) センターピラー耐熱性試験結果

センターピラーの耐湿-耐熱繰返試験結果を表 4-2-4(9)に示す。

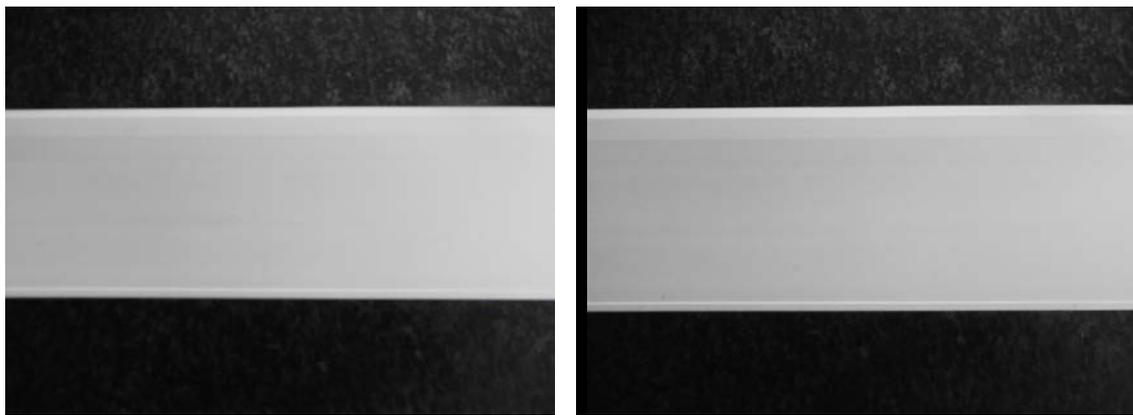
表4-2-4(9) センターピラー耐湿-耐熱繰返試験結果

No.	ソリ量変化 (Δ 2mm以下)		光沢度変化 (\blacktriangle 5以下/Gs60°)		目視評価	
	○		○		○	
1	○	+0.6mm	○	+6.3	○	異常なし
2	○	-0.1mm	○	+4.3	○	異常なし
3	○	+1.2mm	○	-1.0	○	異常なし

ソリ量変化は Δ 2mm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N=3で評価し、全て合格であった。ただし、ソリ量については最大で1.2mmと比較的大きい変化が見られた。光沢度は増加傾向であった。

試験前後のサンプル外観を図4-2-4(24)に示す。



(試験前) (試験後)
図4-2-4(24) センターピラー耐熱性試験結果

センターピラーの冷熱試験結果を表4-2-4(10)に示す。

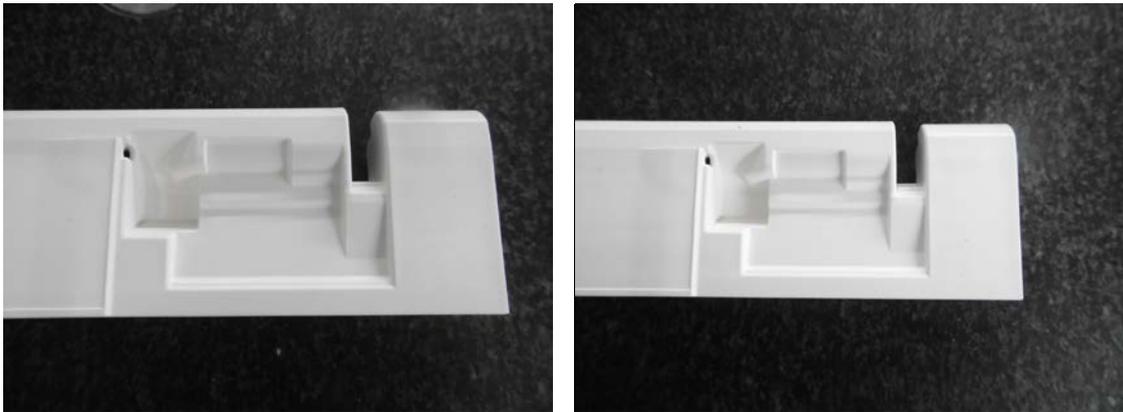
表4-2-4(10) センターピラー冷熱試験結果

No.	色差 (Δ E:3以下)		目視評価	
	○		○	
1	○	0.82	○	異常なし
2	○	0.58	○	異常なし
3	○	0.78	○	異常なし

色差は、色差計の測定値(L*、a*、b*)から Δ E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。目視ではクレージ等の欠陥がないかを判断した。

これらの項目についてN=3で評価し、全て合格であった。

試験前後のサンプル外観を図4-2-4(25)に示す。



(試験前) (試験後)
図4-2-4(25) センターピラー耐熱性試験結果

②クロスレール単品評価

クロスレールの耐熱性試験結果を表4-2-4(11)に示す。

表4-2-4(11) センターピラー耐熱性試験結果

No.	全長寸法変化 (±0.5%以下)		ソリ量変化 (△2mm以下)		目視評価		
①	1	○	-0.06%	○	-1.4mm	○	異常なし
	2	○	+0.04%	○	+0.4mm	○	異常なし
	3	○	±0.00%	○	+0.9mm	○	異常なし
②	1	○	±0.00%	○	-0.7mm	○	異常なし
	2	○	-0.03%	○	-1.2mm	○	異常なし
	3	○	-0.04%	○	-0.9mm	○	異常なし
③	1	○	-0.01%	○	-0.1mm	○	異常なし
	2	○	-0.02%	○	±0.0mm	○	異常なし
	3	○	±0.00%	○	±0.0mm	○	異常なし

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±0.5%以下で合格とした。ソリ量変化については△2mm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それぞれ N=3で評価し、全て合格であった。

試験前後のサンプル外観を図4-2-4(26)に示す。



(①試験前)



(①試験後)



(②試験前)



(②試験後)



(③試験前)



(③試験後)

図4-2-4(26) クロスレール耐熱性試験結果

クロスレールの耐湿-耐熱繰返試験結果を表4-2-4(12)に示す。

表4-2-4(12) クロスレール耐湿-耐熱繰返試験結果

No.		ソリ量変化 (\triangle 2mm以下)		光沢度変化 (\blacktriangle 5以下/Gs60°)		目視評価	
①	1	○	-1.6mm	○	+1.5	○	異常なし
	2	○	-1.3mm	○	-3.6	○	異常なし
	3	○	-1.3mm	○	-2.5	○	異常なし
②	1	○	+0.6mm	○	-1.3	○	異常なし
	2	○	+1.1mm	○	-1.8	○	異常なし
	3	○	-1.3mm	○	-1.3	○	異常なし
③	1	○	-0.3mm	○	-1.1	○	異常なし
	2	○	-0.3mm	○	-1.1	○	異常なし
	3	○	-0.5mm	○	-2.3	○	異常なし

ソリ量変化は \triangle 2mm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 N=3で評価し、全て合格であった。ただし、光沢度については比較的变化量が大きく、余裕が無かった。これは、ヒート&クール成形を実施したことで、試験前の光沢度が高いため、変化量が大きく表れたためと考えられる。

試験前後のサンプル外観を図4-2-4(27)に示す。

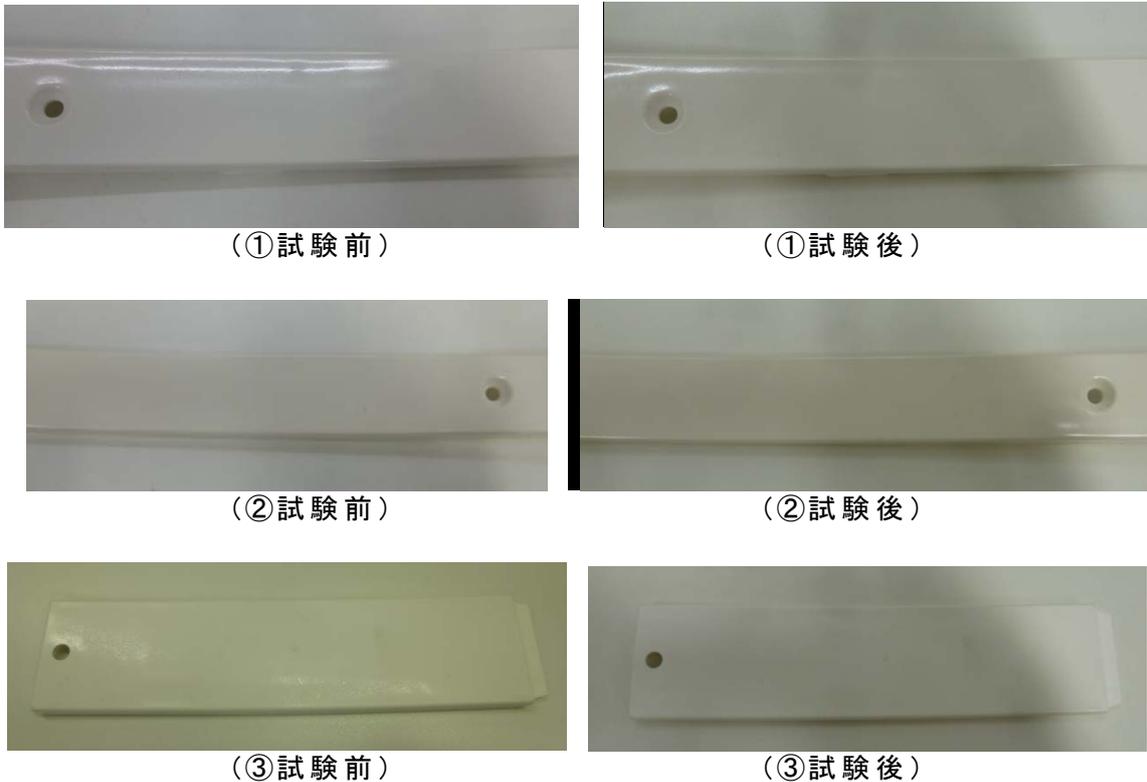


図4-2-4(27) クロスレール耐熱性試験結果

クロスレールの冷熱試験結果を表4-2-4(13)に示す。

表4-2-4(13) クロスレール冷熱試験結果

No.		色差 ($\Delta E: 3$ 以下)		目視評価	
①	1	○	2.12	○	異常なし
	2	○	2.11	○	異常なし
	3	○	2.06	○	異常なし
②	1	○	2.18	○	異常なし
	2	○	1.82	○	異常なし
	3	○	1.62	○	異常なし
③	1	○	0.70	○	異常なし
	2	○	0.87	○	異常なし
	3	○	0.58	○	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等の欠陥がないかを判断した。

これらの項目についてN=3で評価し、全て合格であった。ただし、色差の変化量は比較的大きめで、注意が必要なレベル。着色剤の配合などを検討していく必要がある。

試験前後のサンプル外観を図4-2-4(28)に示す。



(①試験前)



(①試験後)



(②試験前)



(②試験後)



(③試験前)



(③試験後)

図4-2-4(28) クロスレール冷熱試験結果

4-2-5. 実機評価

(1) センターピラー

現行のセンターピラーに対して、補強金属板を外し、庫内側のPS樹脂をCNF樹脂に置き換えて再度組み立てた。現状断熱材として発泡スチロールが使用されているが若干内部形状が変化していてそれに合わせた形状とする必要があるため、既製の発泡ウレタンを加工して組み入れた。それ以外の部品はそのまま使用して試作を行った。図4-2-5(1)にそれぞれの部品、図4-2-5(2)に組み立てたセンターピラーを冷蔵庫に組み込んだ状態の写真を示す。



図4-2-5(1) センターピラー試作品の部材



図4-2-5(2) センターピラー試作品の冷蔵庫設置状態

実機評価は恒温室に冷蔵庫を設置し、JIS規格で定められた環境温度条件下で、ヒーター出力を4通り変化させてその時のセンターピラー表面(庫外側)の温度を測定、その結果から結露防止に必要なヒーターの消費電力の差を算出して比較した。結果を図4-2-5(3)に示す。

このヒーター消費電力の差を冷蔵庫の消費電力量の差に換算し、冷蔵庫消費電力量削減効果として▲0.2%が確認できた。

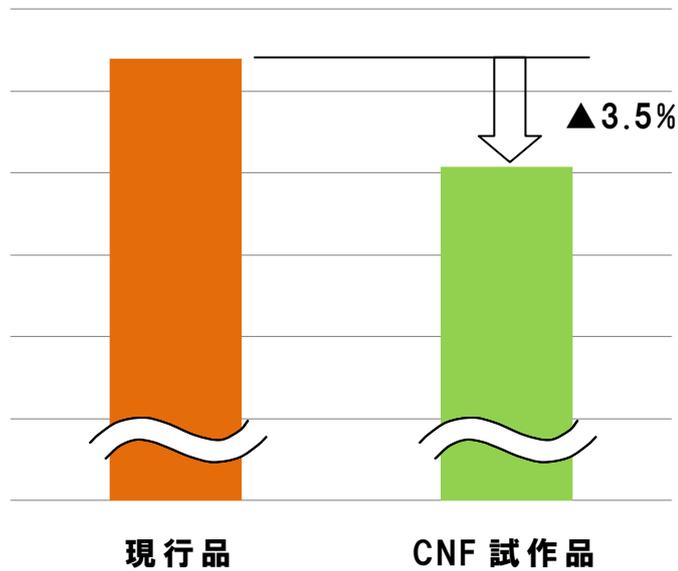


図4-2-5(3) 実機評価結果／ヒーター消費電力の差

(2)クロスレール

製作した3つのCNF複合樹脂成形試作品を現状の金属板金と入れ替えて組み立てた。その状態を図4-2-5(4)に示す。

実機評価は恒温室に冷蔵庫を設置し、JIS規格で定められた環境下で規格通りの測定方法により消費電力量を測定した。その結果、冷蔵庫消費電力量削減効果として▲1.4%が確認できた。(図4-2-5(5))



図4-2-5(4) CNF複合樹脂クロスレール試作品を組み込んだ冷蔵庫

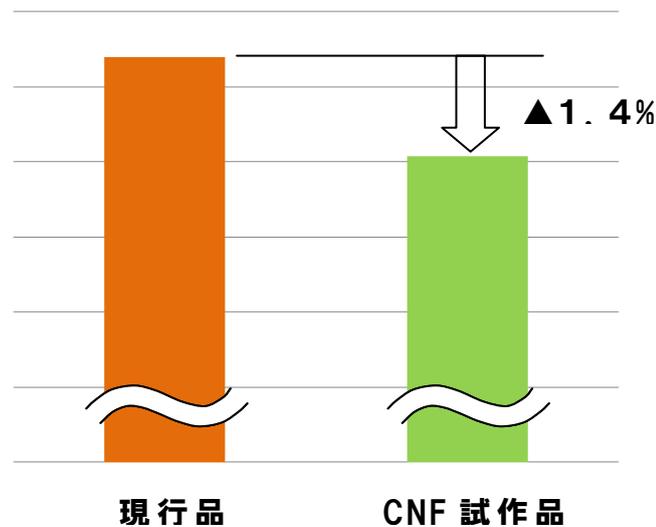


図4-2-5(5) 実機検証結果 / 年間消費電力量の差

4-2-6. 結言

本委託業務において、冷蔵庫のセンターピラー1部品、および、クロスレール3部品について、既存の冷蔵庫に組み込むことのできる寸法範囲でCNF複合樹脂の適用設計を行い、金型を設計、製作して成形品を試作し、単体評価および実機評価を行った。

センターピラーについては、伝熱解析評価、熱変形解析評価を行って構造設計を行った。計算上でセンターピラー部で生じている損失熱量の▲3.5%が削減できる見通しを立てた。金型設計では、流動解析を用いて金型仕様を決定し、成形された試作品単体においては、形状、外観ともに問題ないことを確認した。また、耐熱性、耐湿・耐熱繰返し、冷熱の信頼性試験についても問題ないことを確認した。

実機評価においては、恒温室に冷蔵庫を設置しJIS規格で定められた環境下で所定の温度測定を実施して、冷蔵庫年間消費電力量に対して▲0.2%の削減効果を確認した。

クロスレールについては、伝熱解析により構造設計を行い、金型設計、製作を行った。剛性面では冷蔵庫筐体での変形を全体設計で抑える可能性のあることを確認の上設計を進めた。金型設計では、流動解析を用いて金型仕様を決定し、成形された試作品単体においては、形状、外観ともに問題ないことを確認した。また、センターピラー同様の信頼性試験を実施し問題ないことを確認した。

実機評価においては、JIS規格に則った測定を実施し、冷蔵庫年間消費電力量に対して▲1.4%の削減効果を確認した。

以上の内容を表4-2-6にまとめる。CO2削減量は当社製品への適用を想定し算出した。

表 4-2-6 冷蔵庫部品適用検証結果一覧

	機能特性			信頼性			消費電力量 削減	CO2削減量 (万トン/年)
	剛性	成形	着色	耐熱	耐湿耐熱	冷熱		
センターピラー	△	○	○	○	○	○	▲0.2%	▲0.02
クロスレール	△	○	○	○	○	○	▲1.4%	▲0.1

センターピラー、クロスレールともに実際に冷蔵庫に搭載するためには

- ・さらなる材料剛性の向上
- ・冷蔵庫搭載時の最適設計(冷蔵庫本体の剛性確保等)
- ・ドアのガスケットとの密着性確保のための着磁性追加、もしくは、マグネットの配置

が課題として考えられ、今後の開発設計課題となる。

4-3. 洗濯機部品への適用検証

4-3-1. 緒言

洗濯機については、“脱水受け”と“バルンサー”に対してCNF複合樹脂の適用検証を行った。

(1) 脱水受け

脱水受けは、図4-3-1(1)に示すように回転ドラムの囲むように外側に配置され回転ドラムを支える部品で、一定の剛性が必要なためガラス繊維入り樹脂(GF樹脂)が使用されている。しかし、GF樹脂はリサイクルが困難な大型部品である。

そこで、本取組みでは、GF樹脂をCNF複合樹脂に置き換えリサイクルを可能にすることによってCO2排出量削減を狙いとして、その適用可能性の検証を行う。

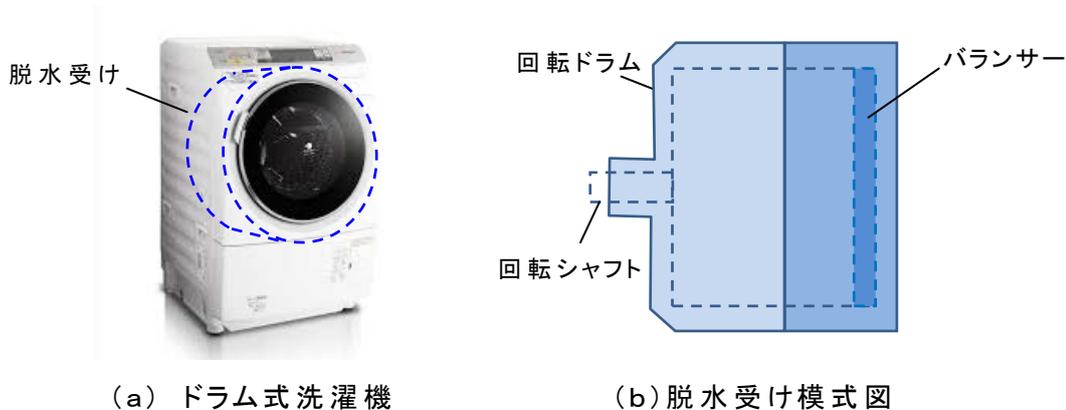


図4-3-1(1) ドラム式洗濯機と脱水受け部品の模式図

(2) バルンサー

バルンサーは回転ドラムの先端に取り付けられた図4-3-1(2)(a)に示すようなリング状の部品で図4-3-1(2)(b)に示すような仕切構造の内部に液体を封入して、乾燥時等に回転ドラムが安定して回転するようバランスを取るための部品である。バルンサーは樹脂製であるが、それを剛性の高いCNF複合樹脂に置き換え薄肉軽量化を行うことで消費電力を削減することを狙いとして、その適用可能性の検証を行う。



図4-3-1(2) バルンサーの外観図と断面模式図

4-3-2. アプローチ

(1) 脱水受け

脱水受け部品については、実際に成形品を製作するとなると非常に大がかりな金型が必要となるため本事業においては構造解析を用いてCNF複合樹脂の適用可能性の検証に取り組んだ。

構造解析においては、脱水受けのみをモデル化し、図4-3-2(1)に示すように実際の運転時に発生する力を想定してシャフト軸受け周りにモーメント力を与えて脱水受け端部の変形量を評価指標とした。

CNF適用可能性の検証においては、現行製品への取付けが可能な構造であることを制約条件に、CNF複合樹脂に変更した場合にGF樹脂同等の剛性を実現できるかという観点で評価を行った。一方で、現状脱水受けと同等の剛性にでき得る、適用可能なCNF複合樹脂に必要な材料剛性を検討した。

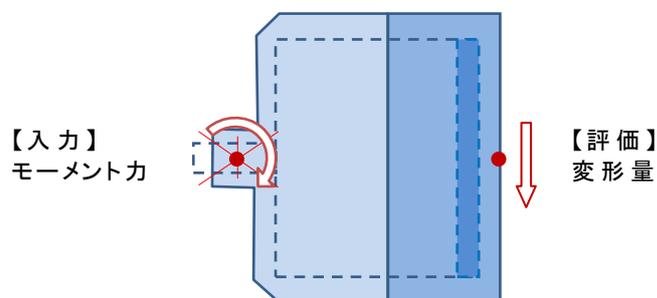


図4-3-2(1) 構造解析における入力と評価項目

(2) バランサー

バランサーについては、以下の手順でCNF複合樹脂適用の設計、試作、評価を実施した。

- ・構造解析を用いて現行同等の剛性となるように部品の薄肉化設計を実施。CNF複合材料は含有率 15%のPPとし、部品剛性はリング形状の径方向の圧縮力に対する変形量で評価を行った。(図4-3-2(2))
- ・樹脂流動解析を活用して金型設計を実施
充填性、ヒケ、ウェルド、反りの評価を行い、成形条件を決定した。
- ・金型製作を行い、成形試作品を製作
- ・成形試作品を用いて材料の形状、外観を評価
- ・成形試作品を組み立て、洗濯機実機に組み込んでドラム回転時の消費電力量を測定、評価



図4-3-2(2) バランサーの剛性評価時の負荷力方向

4-3-3. 設計

(1) 脱水受け

構造解析により、現行構造を用いて材料剛性数値を変えて変形量を計算するとともに、現行製品に搭載できる寸法範囲内でリブおよび肉厚増の補強を加えることで剛性向上を図り、その形状で材料剛性数値を変えた計算を行った。

解析結果として変形および応力分布図を図4-3-3(1)に示す。

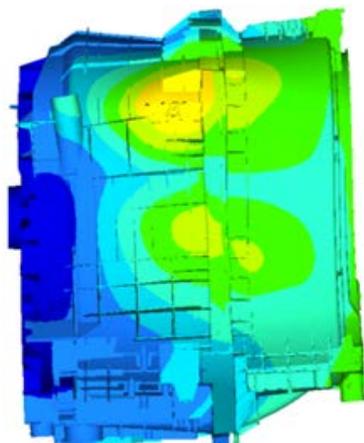


図4-3-3(1) 脱水受け構造解析結果(変形図/応力分布図)

変形量の計算結果を図4-3-3(2)に示す。補強構造にすることにより変形量を抑えることができ、目標値となるFG樹脂での変形量同等になる材料剛性が現行構造で約3.3GPaであるのに対して補強構造で3.1GPaとなった。この数値はCNF複合材料の今後の開発において十分に到達可能な剛性であると考えられる。



図4-3-3(2) 変形量計算結果

以上のように、脱水受けに対して構造変更もしくは材料改善によって十分に現状のGF樹脂からCNF樹脂に置き換えることは可能である。したがって、その時にリサイクルが可能になるとすると、第4-1章で調査を行ったCO2削減量の算出式に則ったCO2削減の効果が得られる。

(2) バランサー

バルンサーの薄肉軽量化を図るため、構造解析を用いて、まず一律同率でどこまで薄肉化が可能かの検討を行った。その結果を図4-3-3(3)に示す。変形量を現行同等に維持するために肉厚を58%まで削減することができる。

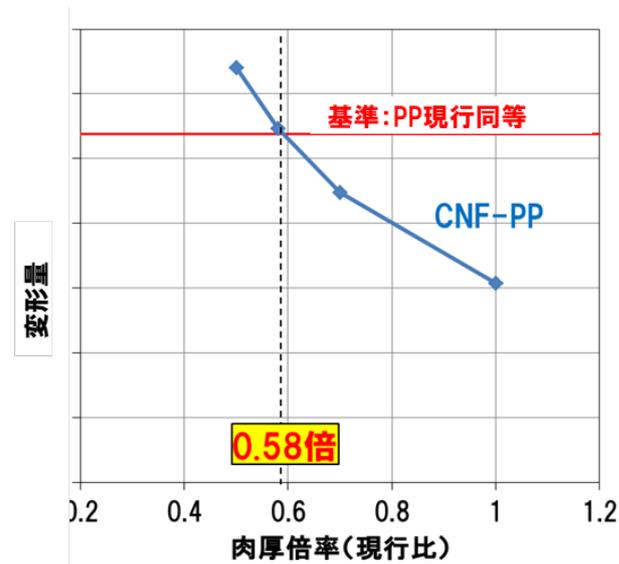
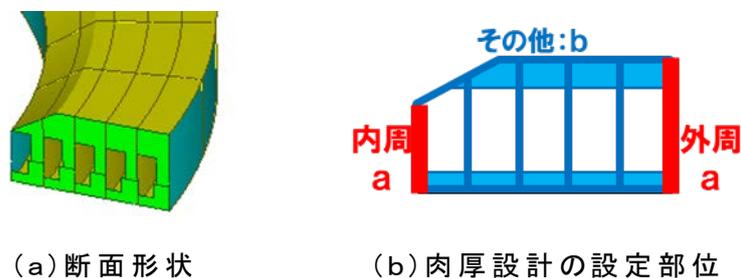


図4-3-3(3) 薄肉部品の変形量

この計算結果に基づいて、具体的に肉厚設計を行った結果を表4-3-3(1)に示す。バルンサーは図4-3-3(4)に示すような断面になっており、内外周とそれ以外に分けて肉厚を設定した。



(a) 断面形状

(b) 肉厚設計の設定部位

図4-3-3(4) バランサー断面形状と肉厚設計の設定部位

表 4-3-3(1) 肉厚設計結果

部位	肉厚比率	
	現行(PP)	設計(CNF-PP)
a	1	0.67
b	1	0.60

肉厚設計は、基準となる58%を超えるきりのよい寸法で設定を行った。その結果、内外周部aで0.67倍、それ以外の壁で0.6倍となった。これにより、ランサーとしての重量は13%減となる。この設計を用いて金型設計を行う。

4-3-4. 成形

4-3-4-1. 金型設計

前項にて設計された洗濯機ランサー部品について、金型の設計および製作を行う。金型設計において、ナチュラルPPよりも流動性が低いPP+CNF15%においても、全体に充填できるようにするための金型仕様、金型構造を検討する。設定したゲートレイアウトに対し、樹脂流動解析による充填性予測を実施し、発生する課題を予測する。こうして金型の詳細仕様を決定し、金型を製作する。

ランサー金型について、対象とする部品は2部品である。対象とする部品の形状をそれぞれランサーA、ランサーBとし、金型仕様を検討した。

図4-3-4(1)にランサーA/Bの部品形状を示す。これらの2部品を金型成形し、溶着して一体化した後にランサー液を注入、封止してランサーとなる。

表4-3-4(1)にランサー金型の仕様一覧を記載する。充填性を高めるため、ランナー方式をホットランナーとし、ゲート点数を従来のそれぞれ3点から、樹脂量の多いランサーAは6点、ランサーBは4点とした。

本部品は一部が外観となる部品ではあるものの、高い外観仕上がりを求められるものではない。後述する樹脂流動解析の結果より、充填性が十分確保できるものと判断し、ヒート&クール成形方式、および射出圧縮成形方式については採用を見送った。

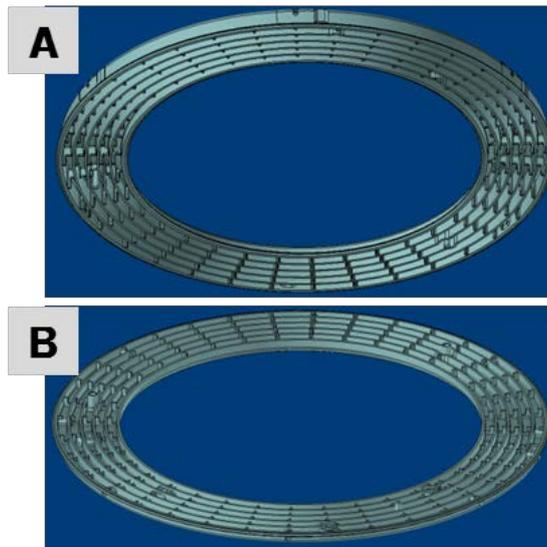


図 4-3-4(1) バランサー部品形状

表 4-3-4(1) クロスレール金型仕様比較一覧表

	従来の金型仕様		今回の金型仕様	
	バランサーA	バランサーB	バランサーA	バランサーB
ランナー方式	ホットランナー	ホットランナー	ホットランナー	ホットランナー
ゲート方式	ピンゲート	ピンゲート	ピンゲート	ピンゲート
ゲート点数	3点	3点	6点	4点
ヒート&クール成形	無し	無し	無し	無し
射出圧縮成形	無し	無し	無し	無し

充填性の確認のため、流動解析を実施した結果を表 4-3-4(2)に記載する。ゲート設定の結果、充填性は問題ないと判断した。ヒケおよびウェルドについては多少発生懸念があるが高い外観仕上がりを求められるものではないこともあり、成形条件で対応可能と判断した。ソリについては、発生すると2部品を一体化する工程において問題となる恐れがあるが、解析上は大きな懸念が見られなかったため、成形条件で対応可能と判断した。

表 4-3-4(2) バランサー金型流動解析結果

	バランサーA	バランサーB
充填性	問題なし	問題なし
ヒケ	大きな問題なし	大きな問題なし
ウェルド	大きな問題なし	大きな問題なし
ソリ	大きな問題なし	大きな問題なし

4-3-4-2. 成形評価

製作した金型を用いて、バランサー部品の成形評価を行った。成形においては、PP にセルローズ15wt%を複合した材料を用いた。バランサー部品は基本的に白色で用いられる部品であるため、マスターバッチ方式の着色剤を用いて白着色した。

成形結果一覧を表4-3-4(3)に、成形品の外観を図4-3-4(2)に示す。

充填性、成形品の寸法は特に問題なかった。

ソリについて、金型温度、保圧力、冷却時間により変化が見られ、ソリがほぼゼロになる成形条件を見出した。

外観について、目視で分かる異物が発生することがあったが、成形条件で改善することができた。着色について、概ね白色に着色できた。ただし、製品採用に当たっては厳密な色調整が必要である。

ヒケ、ウェルドは多少見られたが、概ね問題ないと判断した。

表 4-3-4(3) バランサー成形結果一覧

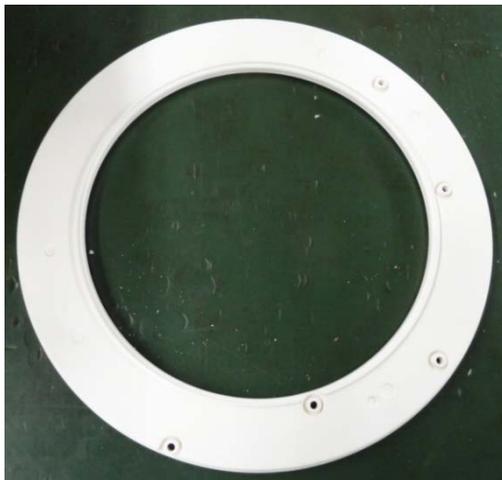
		バランサーA	バランサーB
形状	充填性	問題なし	問題なし
	寸法	問題なし	問題なし
	ソリ	問題なし	問題なし
外観	目視	問題なし	問題なし
	着色性	問題なし	問題なし
	ヒケ	大きな問題なし	大きな問題なし
	ウェルド	大きな問題なし	大きな問題なし



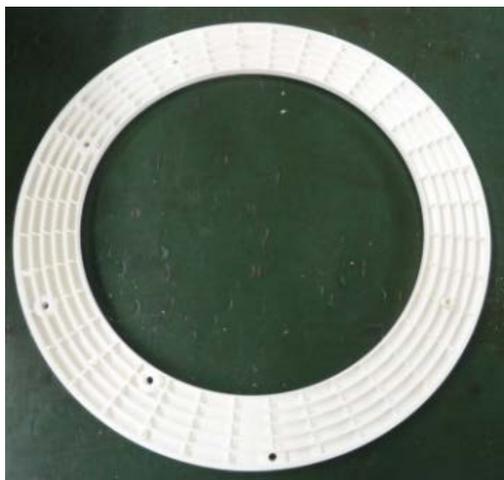
(balancer A 表)



(balancer A 裏)



(balancer B 表)



(balancer B 裏)

図 4-3-4(2) センターピラー成形品の外観

balancer 成形品の断面の SEM 観察を実施した。

断面観察位置を図 4-3-4(3)に示す。

樹脂流動の特徴的な箇所として、(1)ゲート位置、(2)一般部、(3)ウェルド位置、(4)穴/ピン位置とした。それぞれの断面において数箇所を低倍率で観察し、特徴的な箇所についてはさらに高倍率で観察した。

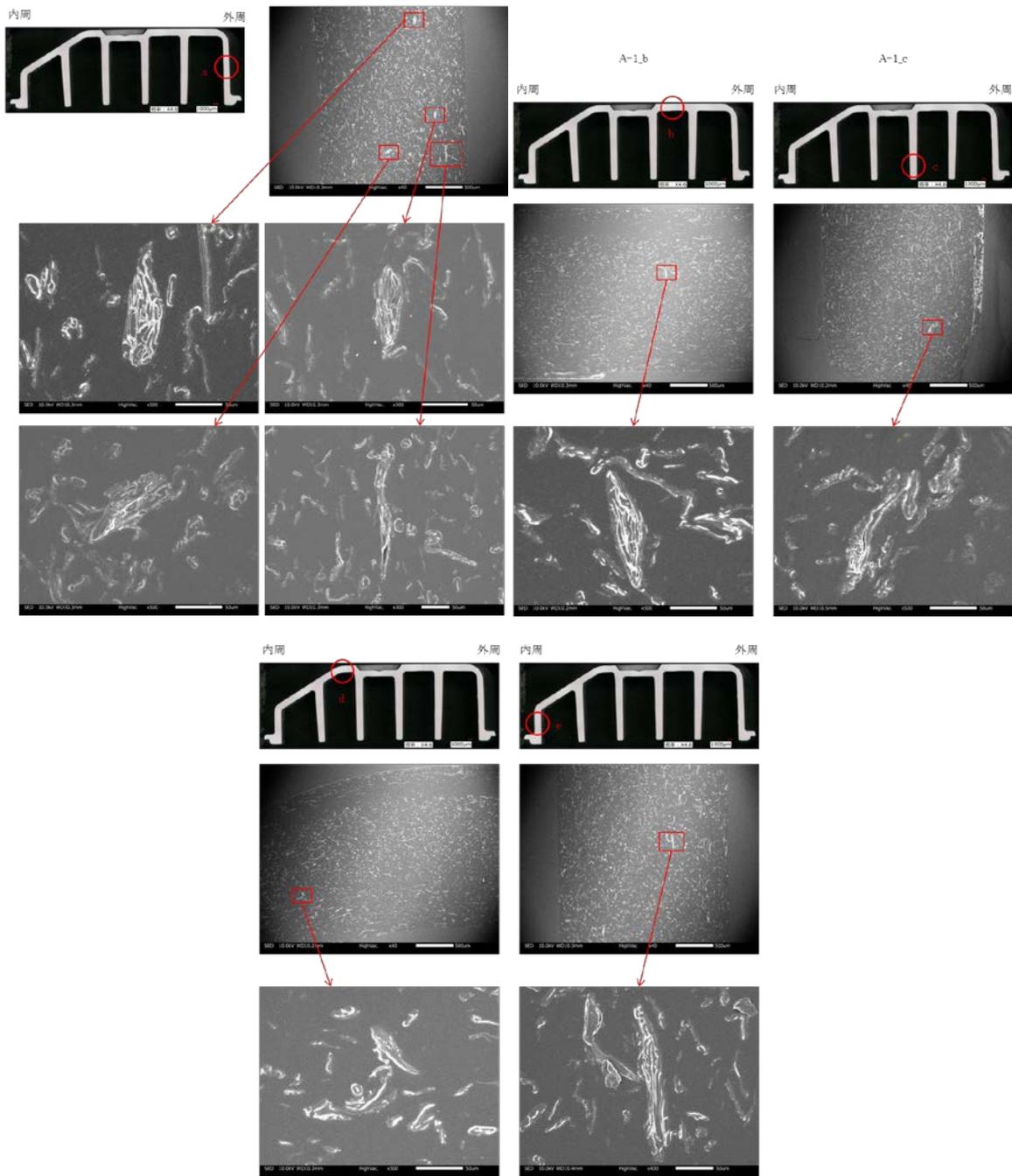


図4-3-4(4) バランサーA成形品の断面観察結果(1)ゲート位置

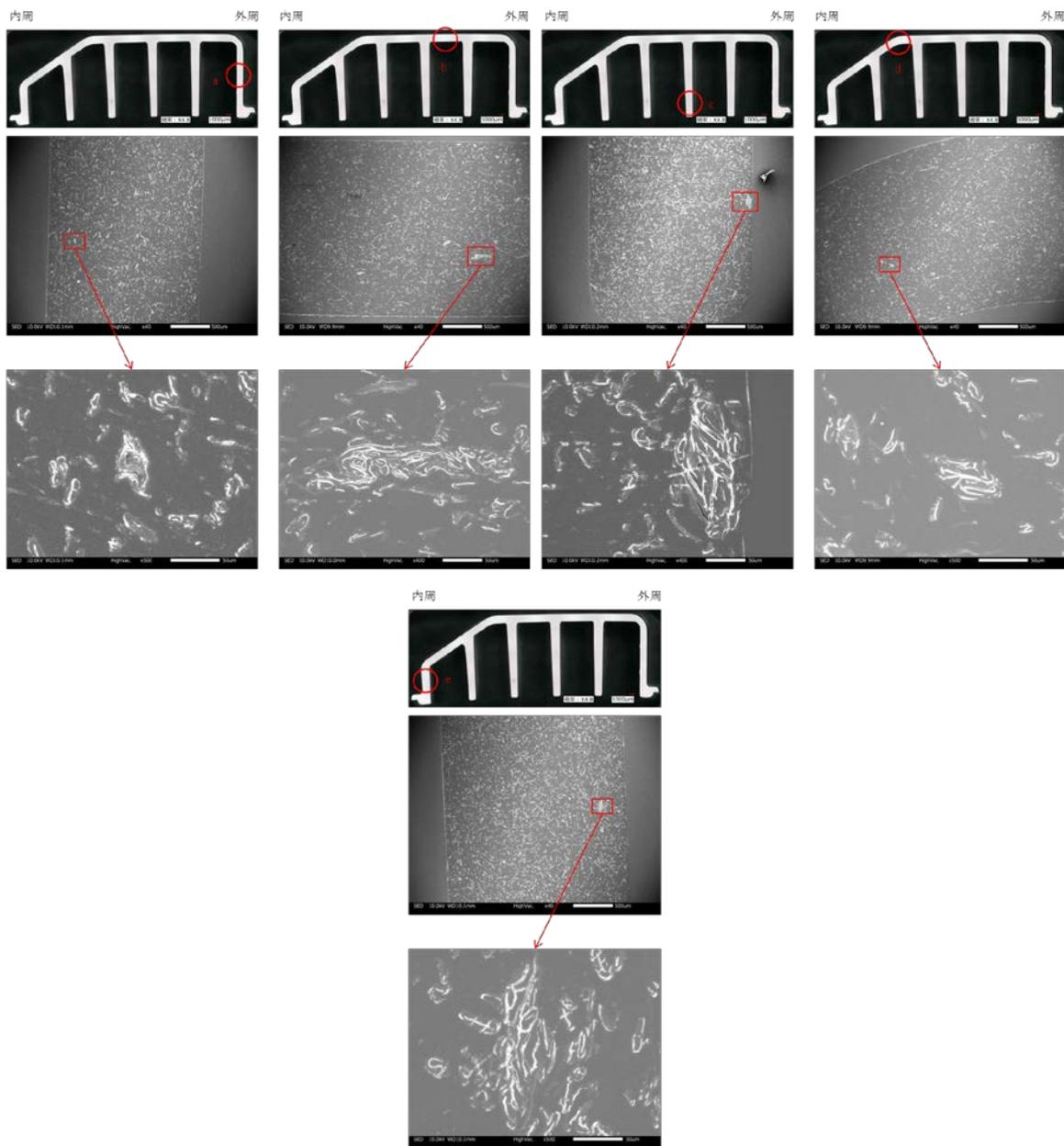


図4-3-4(5) バランサーA成形品の断面観察結果(2)一般部

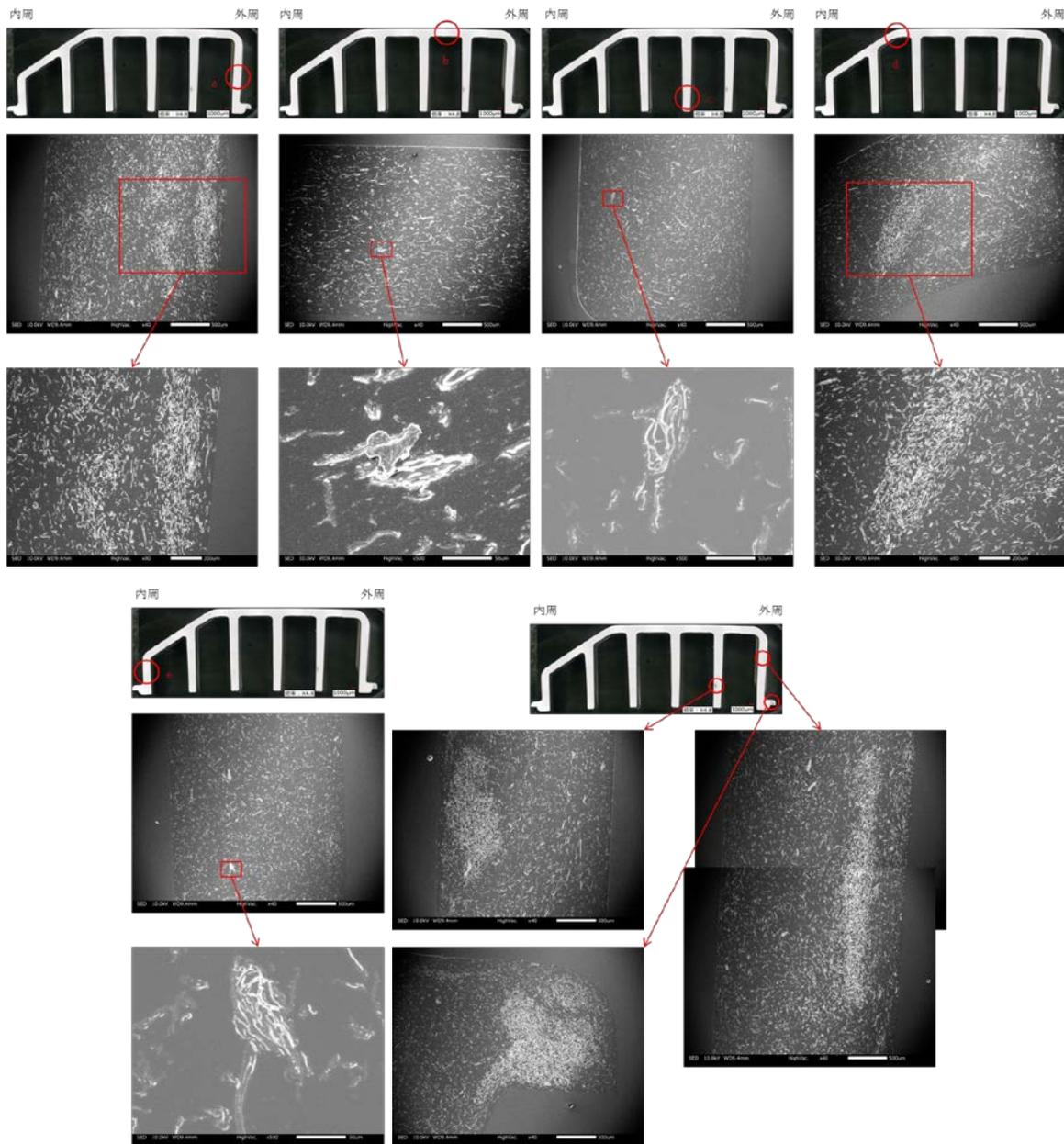


図 4-3-4(6) バランサーA成形品の断面観察結果(3)ウェルド位置

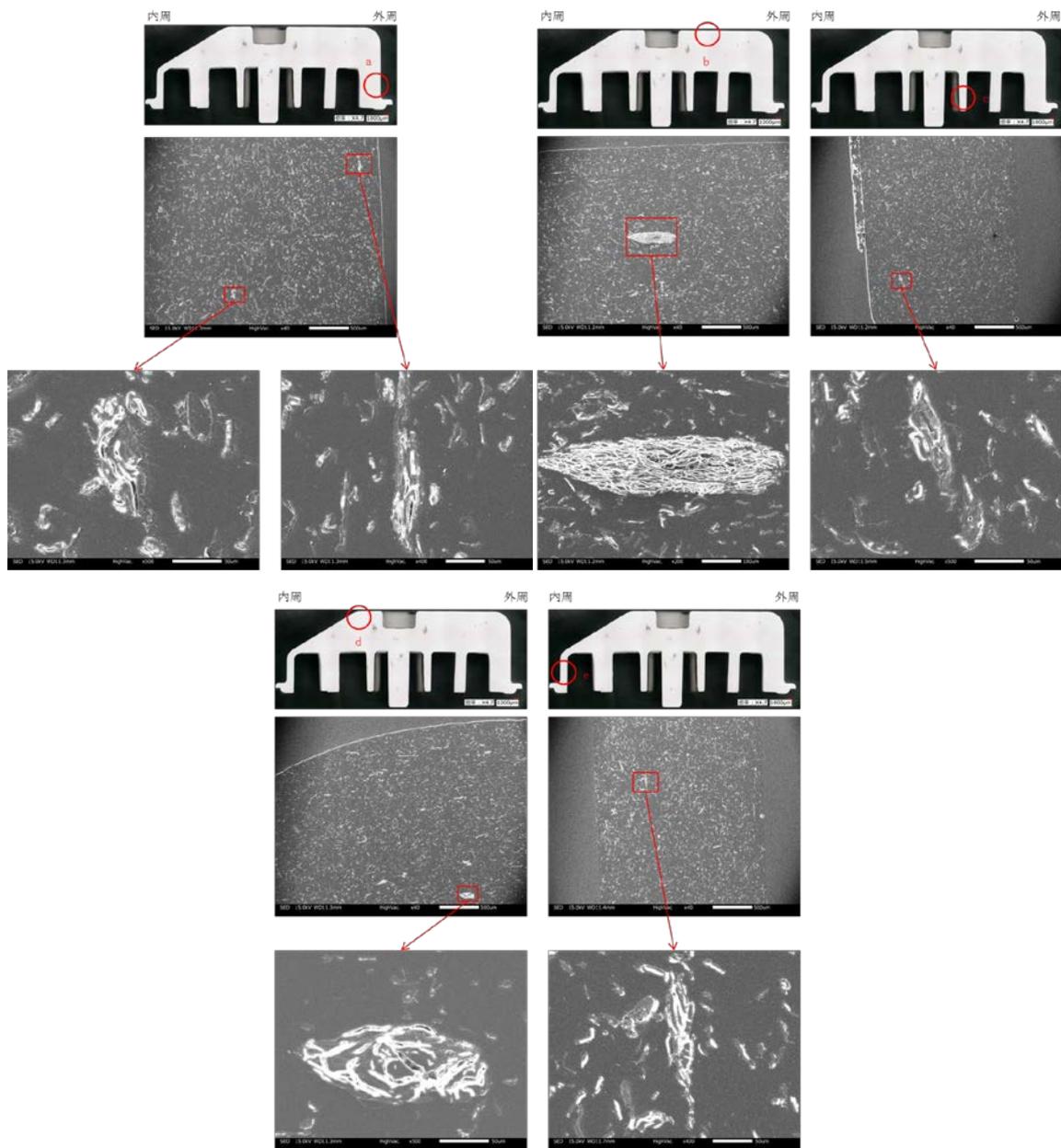


図4-3-4(7) バランサーA成形品の断面観察結果(4)ピン位置

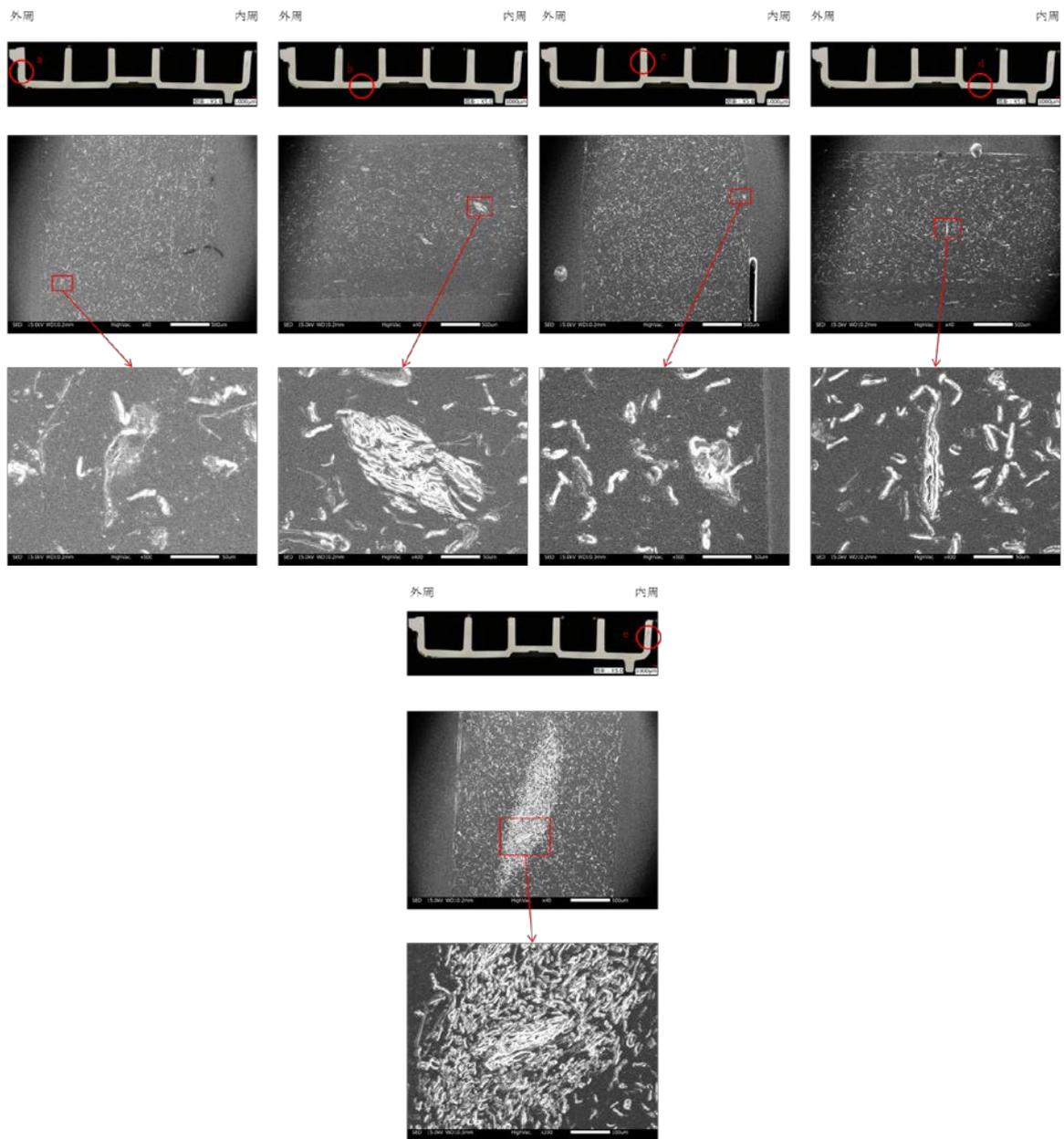


図4-3-4(8) バランサーB成形品の断面観察結果(1)ゲート位置

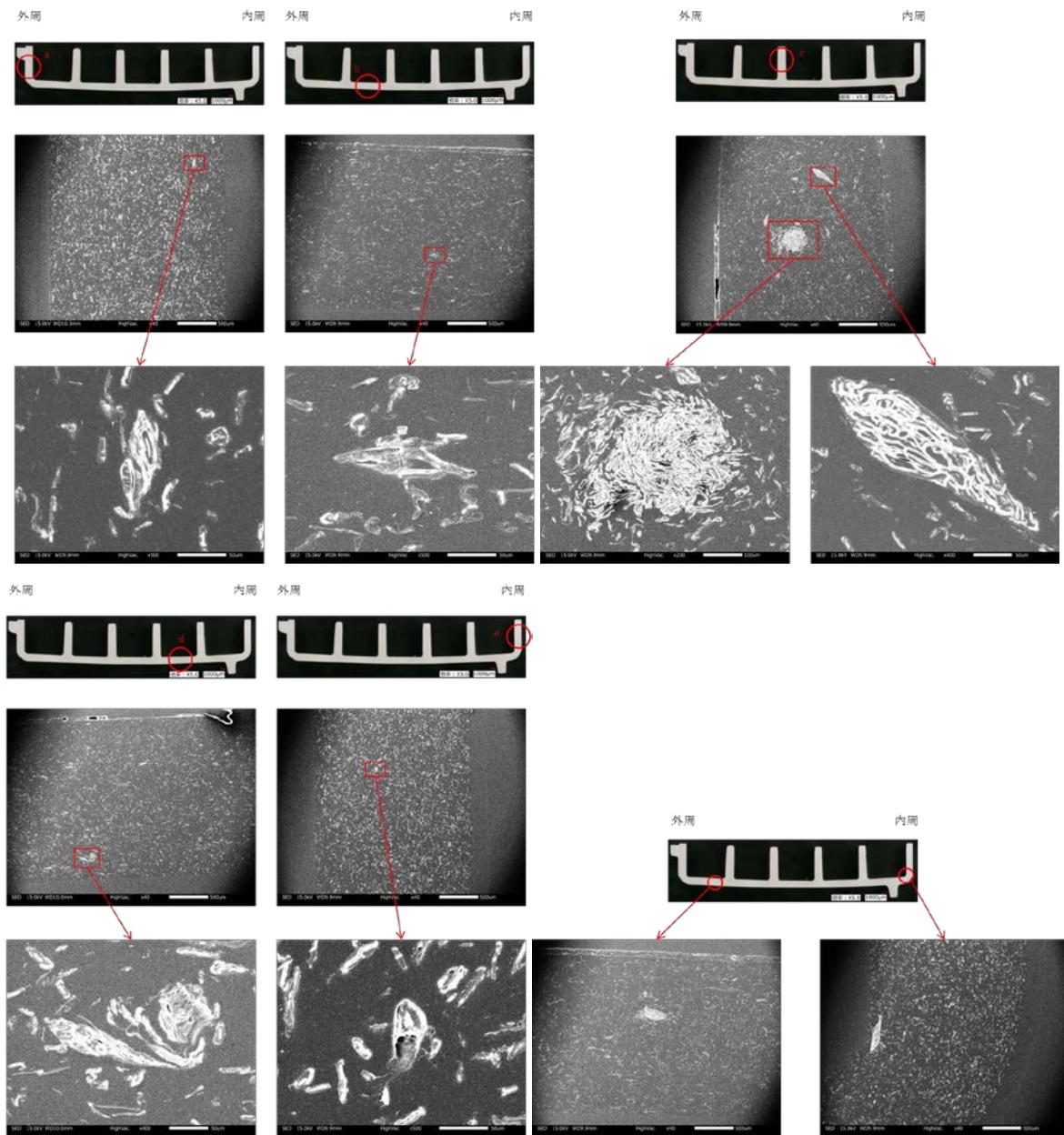


図4-3-4(9) バランサーB成形品の断面観察結果(2)一般部

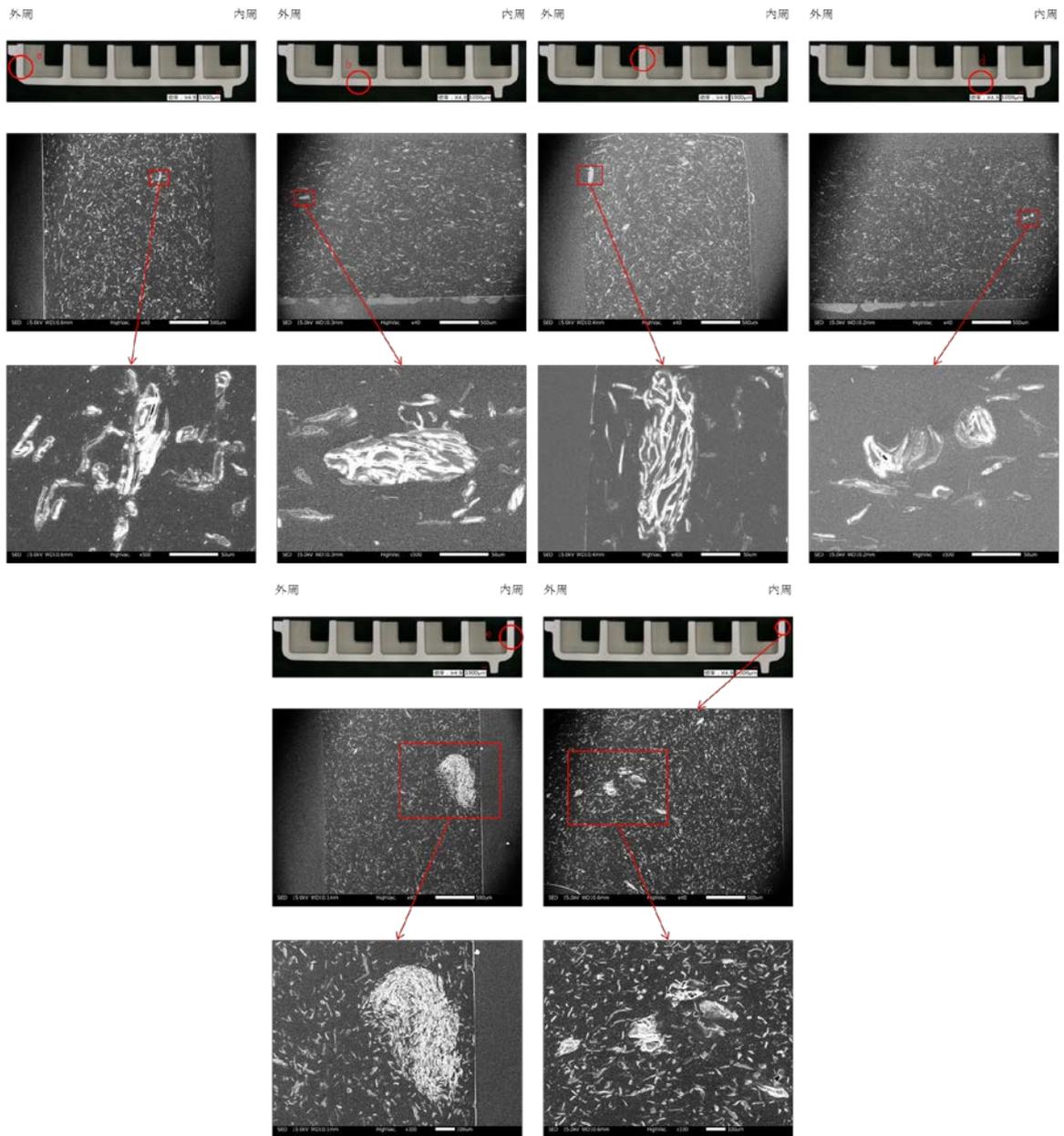


図4-3-4(10) バランサーB成形品の断面観察結果(3)ウェルド位置

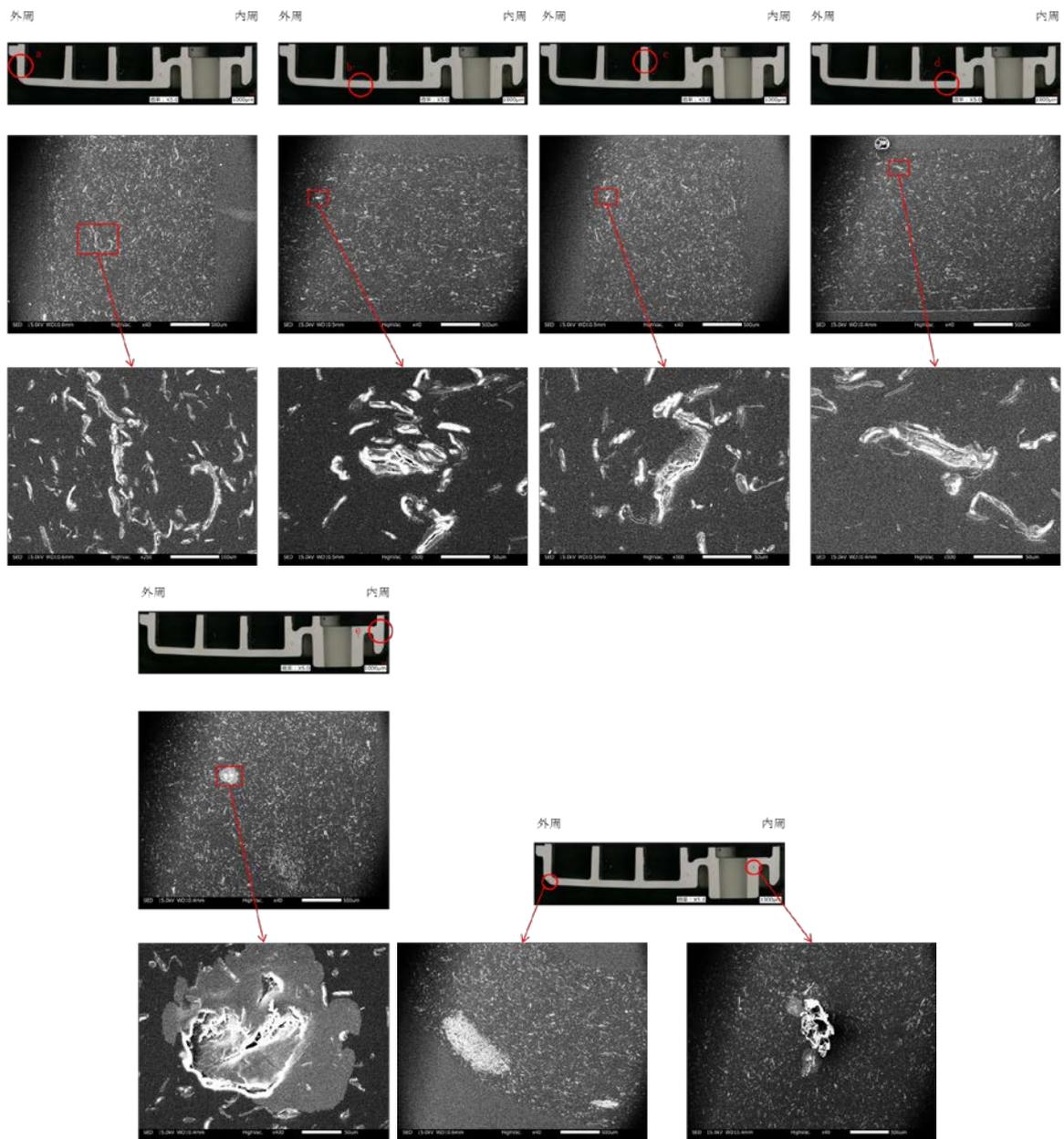


図4-3-4(11) バランサーB成形品の断面観察結果(4)穴位置

4-3-4-3. 単品評価

新規材料の商品適用に当たって、設計上の材料物性以外に、信頼性試験などの評価項目がある。これらの中で、成形品単品で評価可能な項目で、特に重要と思われる項目を抜粋して、試験を実施した。

洗濯機の評価においては、耐候性、耐寒性、高温連続試験での評価が必要である。実際に試験を実施した項目一覧を表4-3-4(4)に示す。

これらの試験は、本来2部品を溶着して、バルンサー液を封入後に行うため、評価についてはリーク等で判断していた。今回は単品で試験を行ったため、評価は「割れ等の使用上有害な欠陥がないこと」とした。また、耐候性については合否とは別に参考として、色差、光沢度差の測定も行った。

また、今回新材料ということで、カビ発生の耐性も確認した。試験上の制約から、バルンサー部品での試験が困難であるため、平板サンプルで比較した。本試作と同じCNF15wt%-PP材料の平板と、現行品と同等のPPナチュラルと比較し、カビ発生が同等以下であることを確認した。

表4-3-4(4) バルンサー信頼性試験項目一覧

試験項目	試験条件	要求項目
耐候性試験	サンシャインウェザーメータS UN×300H	割れ等の使用上有害な欠陥がないこと
耐寒性試験	-30℃雰囲気中×24H ⇒常温(20℃)×24H	割れ等の使用上有害な欠陥がないこと
高温連続試験	80℃雰囲気中×240H	割れ等の使用上有害な欠陥がないこと
カビ試験 ※平板サンプル	カビ培養液を滴下し、対照 材料と比較観察	現行材料(PPナチュラル)と同等以下のカビ発生

バルンサー部品の耐候性試験結果を表4-3-4(5)に示す。

表4-3-4(5) バルンサー耐候性試験結果

No.	目視評価		色差 ΔE ※参考	光沢度差(Gs60°) ※参考	
A	1	○	異常なし	5.09	▲11.0
	2	○	異常なし	4.39	▲17.1
B	1	○	異常なし	3.86	▲41.8
	2	○	異常なし	3.83	▲27.1

試験はN=2で実施し、目視評価は全て合格であった。

参考に測定した色差、光沢度差において、比較的变化が大きかった。

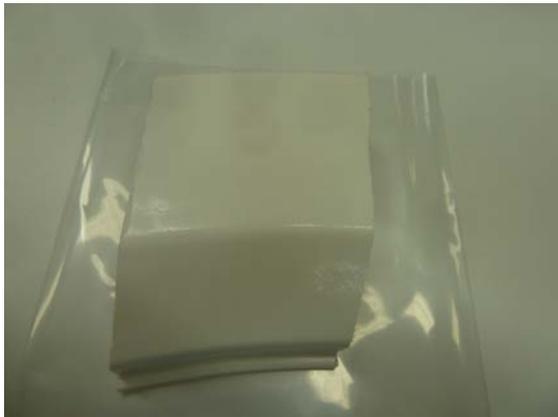
色差については、人が色の違いを認識できない $\Delta E: 3$ 以下には収まっていない。これは屋外で用いる外観部品などにおいては問題となる恐れがあり、対策が必要になる可能性がある。

光沢度についても、サンプルによっては大幅な低下が見られた。これは紫外線によって成形品の表面状態が変化していることを示し、より厳しい日射等の環境ではクラック等の発生といった不具合の恐れがある。

これらの色差、光沢度差への対策としては、材料に紫外線吸収剤、安定化剤等を検討する必要がある。

試験前後のサンプル外観を図4-3-4(12)に示す。

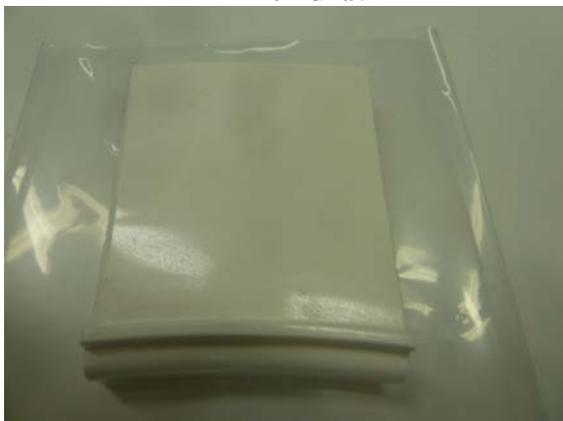
試験装置の制約で、サンプルをカットした状態で試験を実施した。



(A試験前)



(A試験後)



(B試験前)



(B試験後)

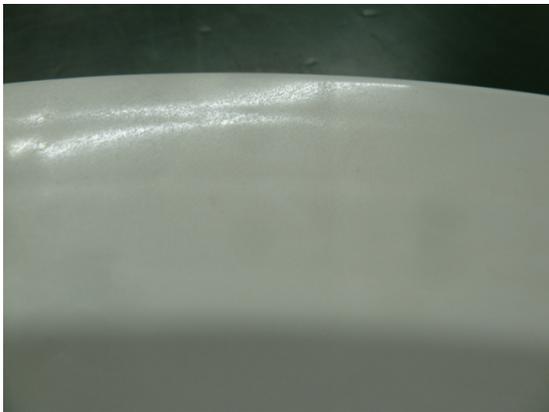
図4-3-4(12) バランサー耐候性試験結果

バランスー部品の耐寒性試験結果を表4-3-4(6)に示す。

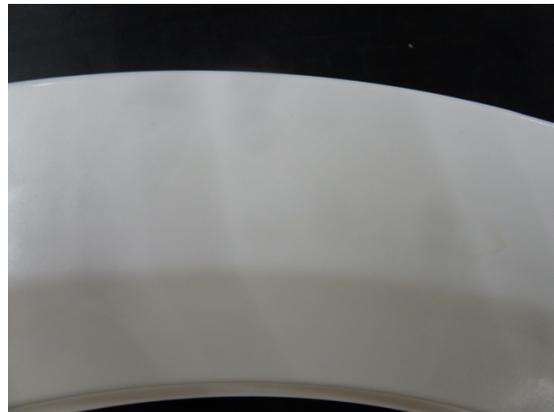
表4-3-4(6) バランスー耐寒性試験結果

No.		目視評価	
A	1	○	異常なし
	2	○	異常なし
B	1	○	異常なし
	2	○	異常なし

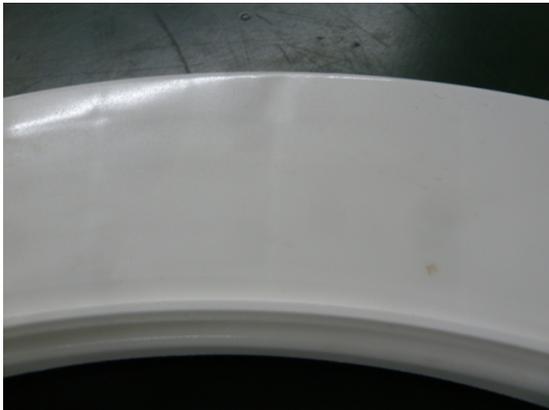
試験はN=2で実施し、目視評価は全て合格であった。
試験前後のサンプル外観を図4-3-4(13)に示す。



(A試験前)



(A試験後)



(B試験前)



(B試験後)

図4-3-4(13) バランスー耐寒性試験結果

バランスー部品の高温連続試験結果を表4-3-4(7)に示す。

表4-3-4(7) バランスー高温連続試験結果

No.		目視評価	
A	1	○	異常なし
	2	○	異常なし
B	1	○	異常なし
	2	○	異常なし

試験はN=2で実施し、目視評価は全て合格であった。
試験前後のサンプル外観を図4-3-4(14)に示す。



(A試験前)



(A試験後)



(B試験前)



(B試験後)

図4-3-4(14) バランスー高温連続試験結果

カビ試験の結果を図4-3-4(15)に示す。

カビ試験は以下の手順で実施した。

- ①黒カビを前培養(PDA/25°C/7日間)
- ②培養した培地に10mlの滅菌D.Wを投入し、スプレッターで胞子を懸濁。ガーゼでろ過して菌糸を除去。
- ③ろ過処理液を30mlにメスアップ。そのうちの0.3mlを30mlのPDB(カビ培養液)と混合し、約10の6乗cfu/mlの試験胞子液とする。
- ④サンプル基材を水道水および蒸留水で洗浄し、プラスチックシャーレ内に設置。
- ⑤基材上に胞子液1.4mlを16箇所に分けて滴下後、加湿した密閉箱に入れ、25°Cで培養。各N=5で実施。
- ⑥カビの生育を目視観察。

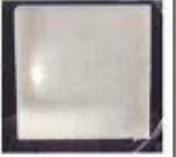
試験区	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後
PP(封固)						
	結果 N	カビ発生	カビ発生なし	カビ発生	カビ発生なし	カビ発生
セルロース含有樹脂						
	結果 N	カビ発生	カビ発生なし	カビ発生	カビ発生なし	カビ発生
試験区	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後		
PP(封固)						
	結果 N	カビ発生	カビ発生なし	カビ発生	カビ発生なし	
セルロース含有樹脂						
	結果 N	カビ発生	カビ発生なし	カビ発生	カビ発生なし	

図4-3-4(15) カビ試験結果

カビ試験の結果、セルロース複合樹脂と、対照としたナチュラルPPとの間で、カビ発生の仕方に有意な差は見られなかった。

試験後にサンプル基材を洗浄（水洗およびスポンジでのふき取り）した結果、全ての試験片においてカビ残存は見られなかった。

したがって、今回用いたセルロース複合樹脂は、現行の洗濯機で使用しているナチュラルPPと比べ、同程度のカビ耐性が見られる。すなわち、特にカビを抑制するという効果は無いが、カビが発生しやすいということはなく、カビ発生後も除去が可能ということが分かった。この点で、現行の洗濯機で使用しているナチュラルPPからの置換えが可能と考えられる。

以上の信頼性試験の結果より、バルンサー部品のセルロース複合樹脂への置換えは基本的に可能であると考えられる。

4-3-5. 実機評価

4-3-4章で製作した成形試作品を組み立て、それを洗濯機実機に組み込んで駆動時の消費電力を測定した。バルンサーは液体を入れない状態でドラム回転時の消費電力量を測定することで、現行バルンサーに対するCNF複合樹脂バルンサーの優位性の検証を行った。図4-3-5(1)に検証に用いたドラム式洗濯乾燥機を示し、図4-3-5(2)にCNF複合樹脂製バルンサーを取り付けた状態の写真を示す。

測定した結果、組付けばらつきが1~2%程度と大きく効果がその中に埋もれている結果が得られた。但し、重量比から回転加減速エネルギーを求めると脱水時に0.6%の消費電力削減効果が期待できる。



図4-3-5(1) 検証に用いたドラム式洗濯乾燥機



図4-3-5(2) CNF複合樹脂バルンサーを組み込んだ状態

表4-3-5(1)に期待できる消費電力削減効果を示す。
脱水時に約0.6%の消費電力量削減が期待できる。

表4-3-5(1) バランサー実機搭載時に期待できる省エネ効果

	現行(PP)	CNF-PP
重量(指数)	100	91
回転加減速エネルギー(指数)	100	98
脱水時消費電力(指数)	100	99.4

4-3-6. 結言

本委託業務において、洗濯機の脱水受け、および、バランサーの部品に対してCNF複合樹脂の適用検証を行った。

脱水受けについては、現行のGF樹脂からの置換えによってリサイクルが可能になることでCO2排出量の削減を見込んだ。その実現の可能性をCNF複合樹脂に置き換えた脱水受けがGF樹脂品のものと同等の剛性になるか否かを構造解析を用いて実施し検証した。

その結果、一部のリブおよび肉厚増加で、かつ、材料剛性を3.1GPa程度まで向上させることができれば可能性があることが分かった。その実現により、弊社洗濯機への適用を考えた場合、約0.7万トン/年のCO2削減効果が期待できる。

バランサーについては、構造解析により現行品同等の剛性となる肉厚を求め、部位別に肉厚を設定し設計を行った。その部品設計に基づいて金型を設計、成形条件を決めて金型を製作、試作成形品を作った。

その成形品を用いて機能特性、信頼性の評価を行い、実機に組み込んで軽量化による消費電力の低減効果を測定した。組付けばらつきが大きく明確な数値は導出できなかったが、ドラム回転加減速エネルギーは約2%低減できており、脱水時の消費電力量で約0.6%の削減効果が期待できる。

以上の内容を表4-3-6(1)にまとめる。CO2削減量は当社製品への適用を想定している。

表4-3-6(1) 洗濯機部品適用検証結果一覧

	機能特性			信頼性				消費電力量 削減(推定)	CO2削減量 (万トン/年)
	剛性	成形	着色	耐候	耐寒	高温	カビ		
脱水受け	—	—	—	—	—	—	—	—	▲0.7
バランサー	○	○	○	○	○	○	○	▲0.6%	▲0.005

4-4. リサイクル性の検証

4-4-1. 緒言

家電製品への新素材の適用に当たっては、家電リサイクル法を勘案し、素材のリサイクル性を同時開発することが望ましい。本事業では、冷蔵庫および洗濯機へのCNF複合樹脂の適用を検討しているが、冷蔵庫では、鋼板をCNF複合樹脂への置き換えを、洗濯機では、ガラス繊維強化樹脂（以下、「GFRP」という）のCNF複合樹脂への置き換えを検討している。鋼板は、廃棄家電の中から磁力選別によって単一素材に分離・回収され、リサイクルが進んでいる。一方で、GFRPは、ガラス繊維の含有/非含有を効率よく判別する選別手段がないことからリサイクルが進んでいない。

CNF複合樹脂のリサイクル性を考えるに当たり、2つの重要工程を考慮する必要がある。1つ目は、廃家電に含まれるさまざまな種類の樹脂（以後、廃家電混合樹脂）から単一種類の樹脂種へ選別する工程である。2つ目は、単一種類に選別された樹脂を、再利用するために樹脂の物性を回復、すなわち再生する工程である。

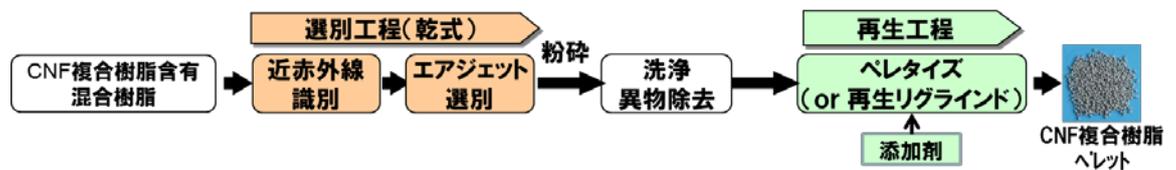


図4-4-1(1) CNF複合樹脂の選別工程(近赤外線選別)と再生工程の例

4-4-2. アプローチ

(1) 選別のアプローチ

昨年度においては、検出技術の有効性を評価し、近赤外線(波長 $1.0\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$ の電磁波と定義する)分光方式が有用であることを導出し、検証機を用いた検証を実施した。

本年度は、近赤外線方式における量産ベースの選別装置を用いて、CNF複合樹脂を含む混合樹脂からの単一素材回収が可能か、選別評価を実施した。

評価の方法としては、混合樹脂の中から回収対象の樹脂を選別・回収し、対象の回収率と回収品の純度を算出および評価した。

なお、本年度の目標は下記のとおりである。

CNF複合樹脂回収率: 60%以上

CNF複合樹脂回収品純度: 80%以上

以後、図表中において、CNF複合樹脂の母材樹脂と含有率について、CNF [含有率][母材樹脂種]という表記を用いる。たとえば、CNF15PPとは、母材がP P(ポリプロピレン)樹脂であり、CNF含有率が15%のものを示す。

(2)再生のアプローチ

CNF複合樹脂のマテリアルリサイクルのアプローチについて説明する。ここでは、まずマテリアルリサイクルの実現可能性の検証を実施した。前年度の延長として、繰返し成形熱履歴を重ねることによる、CNF複合樹脂の劣化度の評価・分析・試験を実施した。

CNF複合樹脂としては、家電適用へと検証しているCNFを15%含有する樹脂(PP:ポリプロピレン)を対象とした。

樹脂については、初期新材ペレット100%にて、JIS K7139:2009に準拠した多目的試験片(ダンベル形引張試験片)を射出成形により作製した(タイプA1)。射出成形は、JIS K7152-1又はJIS K7154-1の規定によって実施した。劣化度評価は、この試験片を機械特性試験などに使用し、その結果を評価した。また、更なる熱履歴回数を経るために、その試験片及び同時に成形された金型内のスプルー、ランナーも粉碎し、粒径(粒度)が3~5mm程度のリグラインド材(粉碎材)を作製し、リグラインド材比率(新材に対する粉碎再生材配合比率)100%での射出成形を繰返し実施し、機械特性試験・評価により熱履歴回数の影響を検証した。

今回の機械物性・物理物性等の特性評価として下記の物性値を測定した。

- ・引張降伏応力、引張降伏ひずみ
- ・引張破壊応力、引張破壊ひずみ
- ・引張弾性率
- ・曲げ強さ、曲げ弾性率
- ・シャルピー衝撃強さ
- ・MFR(メルトフローレート)

これら機械物性、物理的物性、衝撃特性を試験測定し、基本特性の保持度合・低下度合を評価した。物理的特性としての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が、樹脂の分子鎖切断で分子量低下を生じ流れ性が増加することから、樹脂分子の劣化度合としても評価の対象と考えられる。

これらの試験・検証により、リサイクル材(リグラインド材)100%での成形熱履歴の繰返しにより短期リサイクル性能を評価した。

4-4-3. 取組結果

(1)【CNF複合樹脂を含む混合樹脂の選定】

本選別評価の対象としては、冷蔵庫のセンターピラーへ適合した場合を想定し、図4-4-3(2)に示すように、現行で冷蔵庫のセンターピラーに使用されているPP、

PS(ポリスチレン)に加え、図4-4-3(3)にCNF複合材としてPPにCNFを15%含有したものの2種類、の合計4種類を選別評価する混合樹脂として選定した。

なお、2種類のCNF15PPのうち、1つは着色剤を使用していないもの(ナチュラル色)。もう1つは現行で使用しているPPと同様の色味に着色(白色)したものである。

また、以降の図表における表記では、2種類のCNF15PPのうち、着色剤を使用していないものをCNF15PP-N、PPと同様の色味に着色したものをCNF15PP-Wとして記載する。



図4-4-3(2) 冷蔵庫用センターピラー樹脂(現行品)

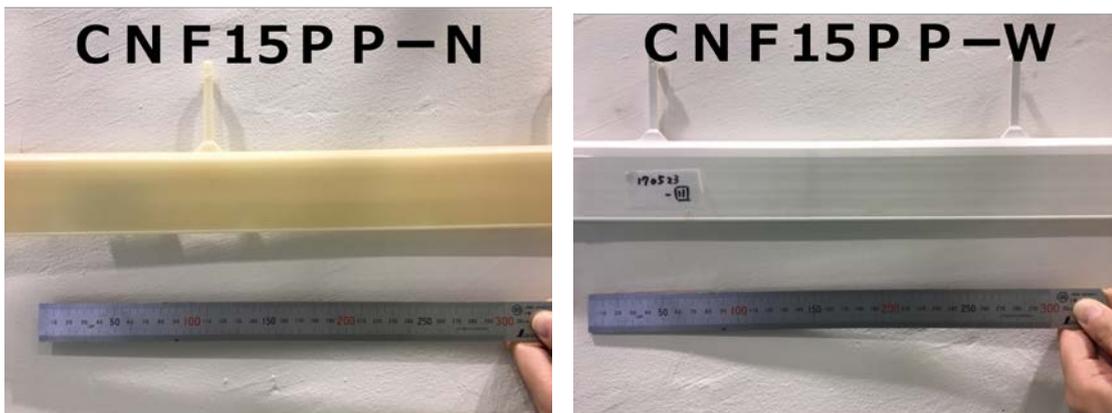


図4-4-3(3) 冷蔵庫用センターピラー樹脂(CNF複合樹脂)

【CNF複合樹脂について】

CNF複合樹脂は、母材となる樹脂ペレット、粉碎したCNF、樹脂母材とCNFの親和性を良くするための樹脂改質剤を混ぜて成形される。

今回選定したそれぞれの材質における近赤外線スペクトルを図4-4-3(4)のように取得した。測定したサンプルを図4-4-3(5)に、取得した分光スペクトルの

結果を図4-4-3(6)～(8)に示す。

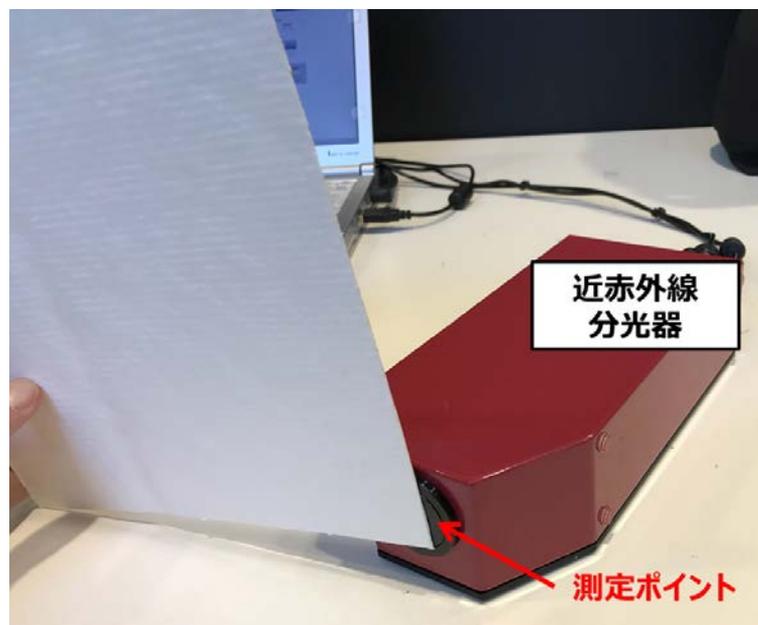


図4-4-3(4) 近赤外線分光器によるスペクトル取得の様子



図4-4-3(5) CNF複合樹脂における各材料(測定サンプル)

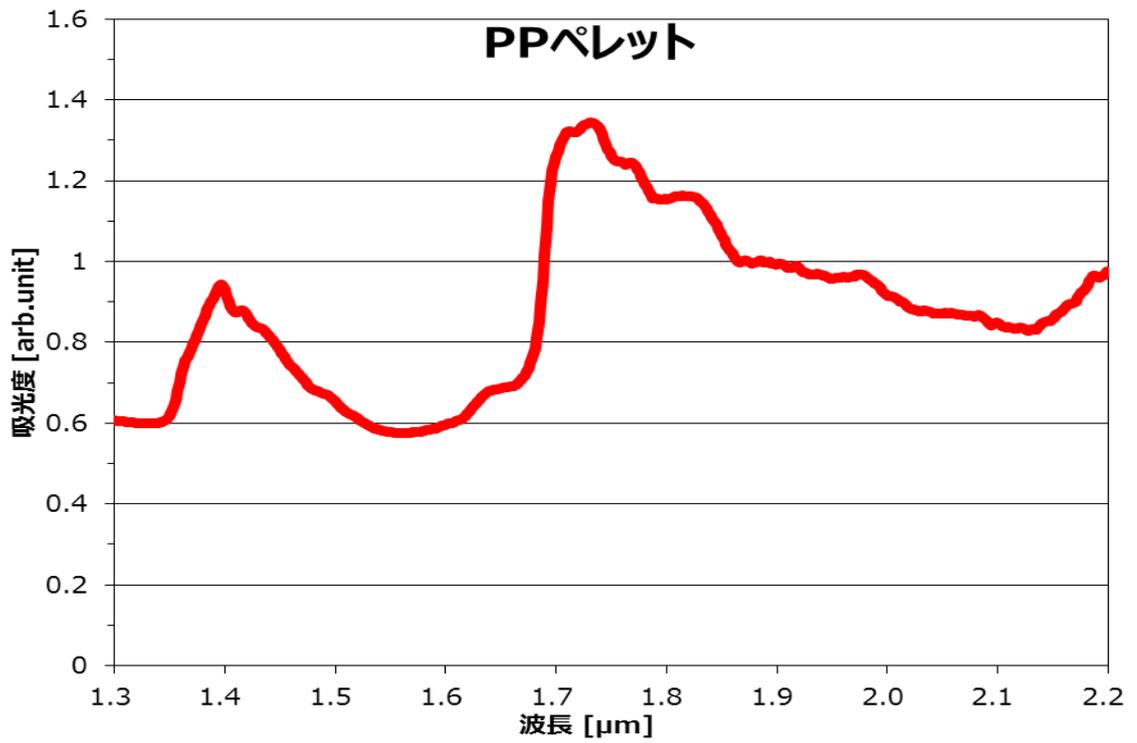


図4-4-3(6) 近赤外線スペクトル(PPペレット)

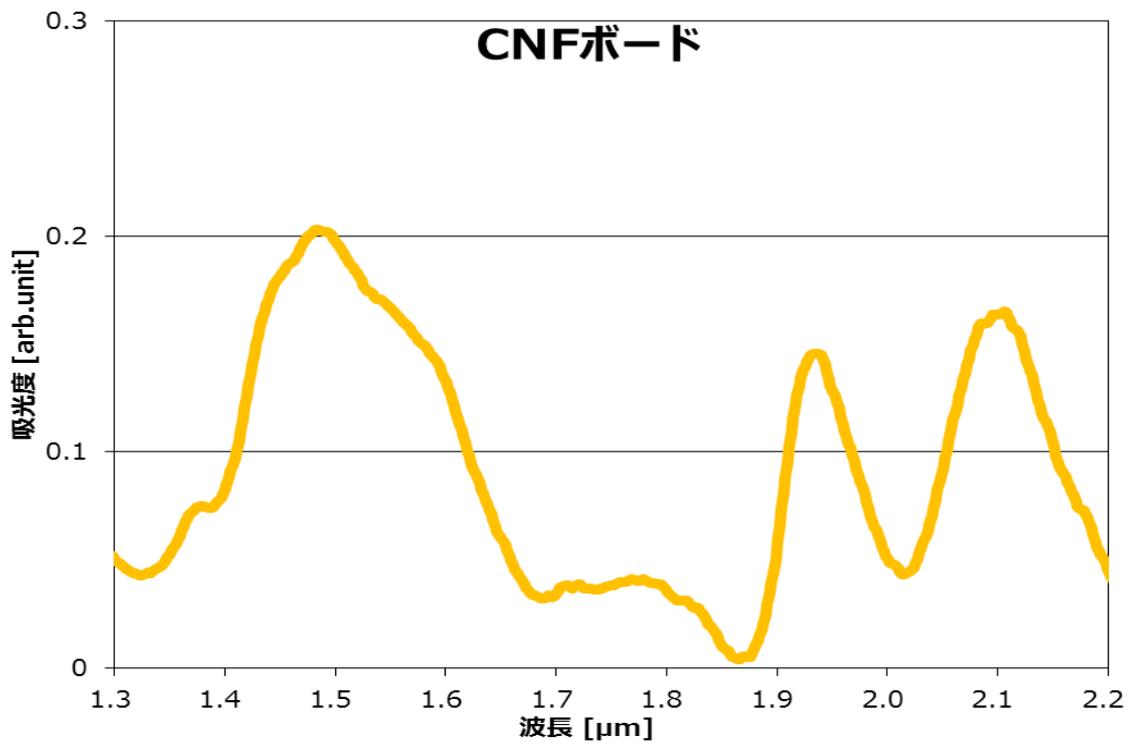


図4-4-3(7) 近赤外線スペクトル(CNFボード)

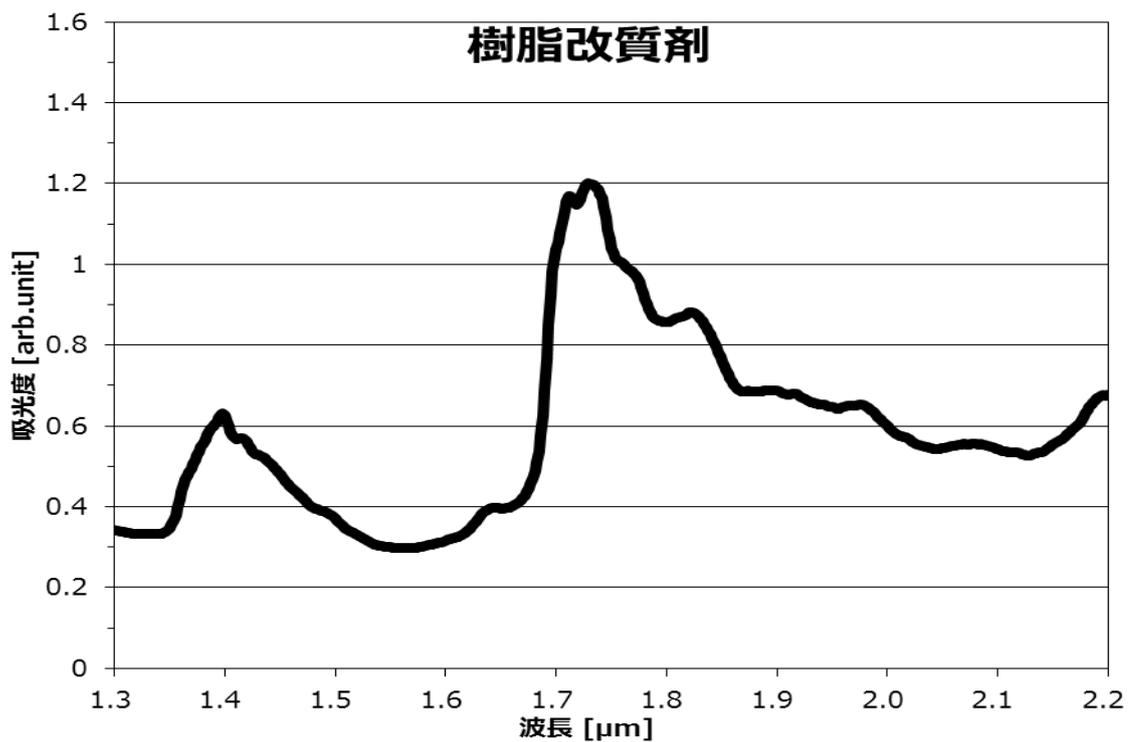


図4-4-3(8) 近赤外線スペクトル(樹脂改質剤)

それぞれの材質における近赤外線スペクトルをみると、PPペレットと樹脂改質剤の特徴ピークおよびスペクトルはほぼ同じである。一方、PPペレットとCNFボードでは特徴ピークが大きく異なることが分かる。そのため、CNFPPのスペクトルにおいては、母材であるPPの特徴ピークに加え、CNFの特徴ピークが見られると予想できる。

また、今回選定した各樹脂における近赤外線スペクトルを取得し、その測定結果を図4-4-3(9)～(12)に示す。CNF-PPでは、CNFとPPの両方のスペクトルの現れる特徴ピークが見られ、母材樹脂がPPであることとCNFが含有していることの両方が認識できる。

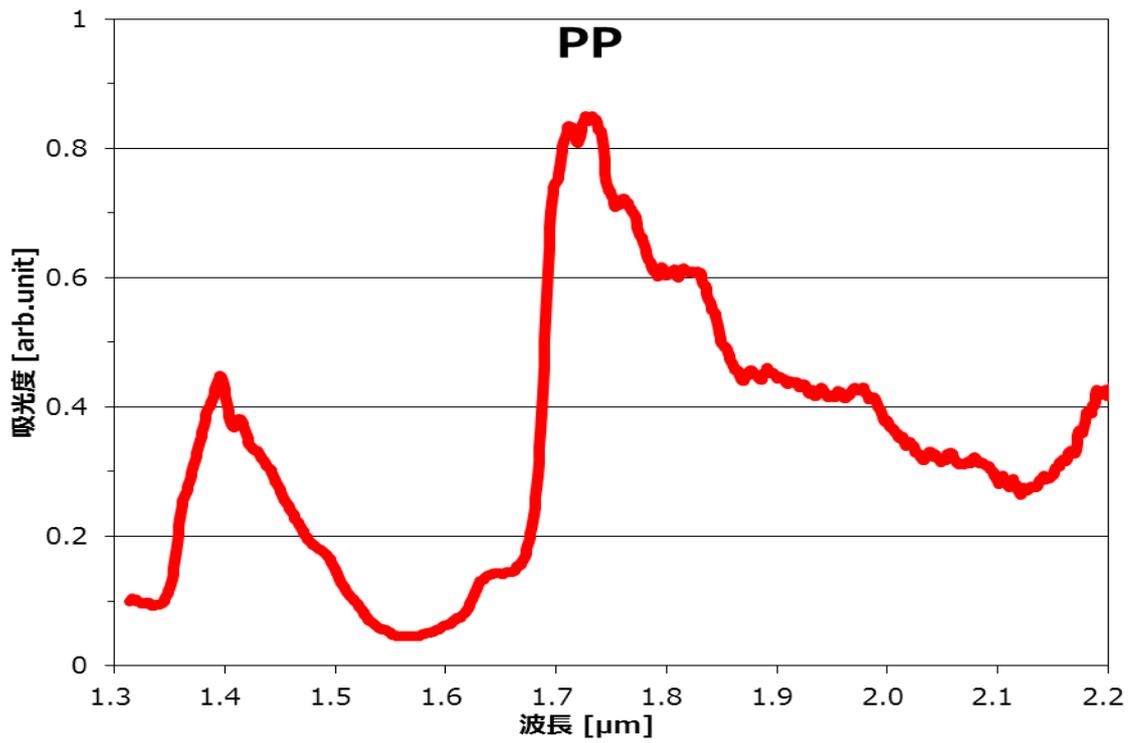


図 4-4-3(9) 樹脂スペクトル(PP)

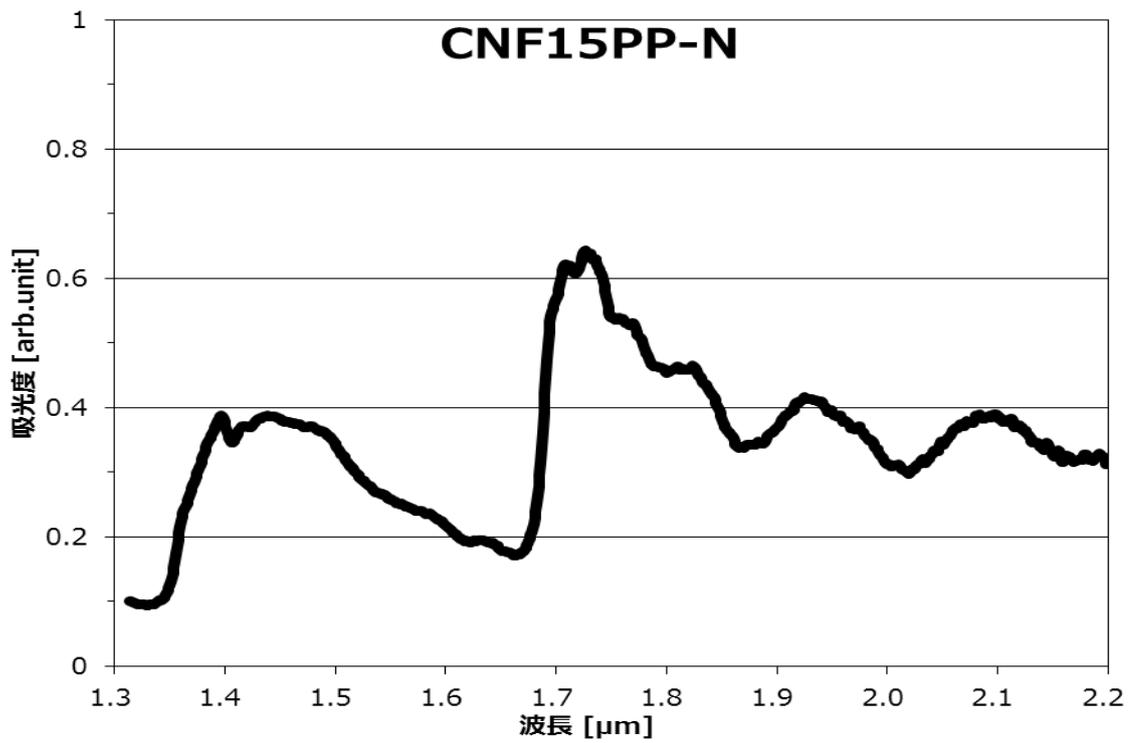


図 4-4-3(10) 樹脂スペクトル(CNF15PP-N)

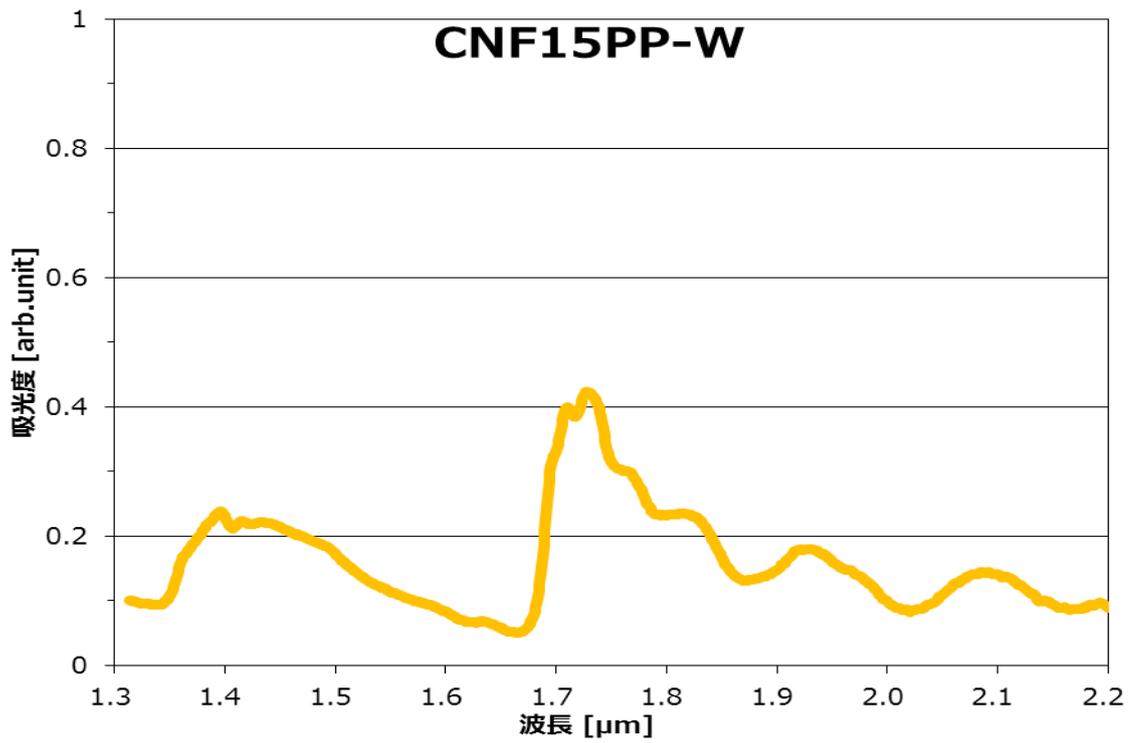


図4-4-3(11) 樹脂スペクトル(CNF15PP-W)

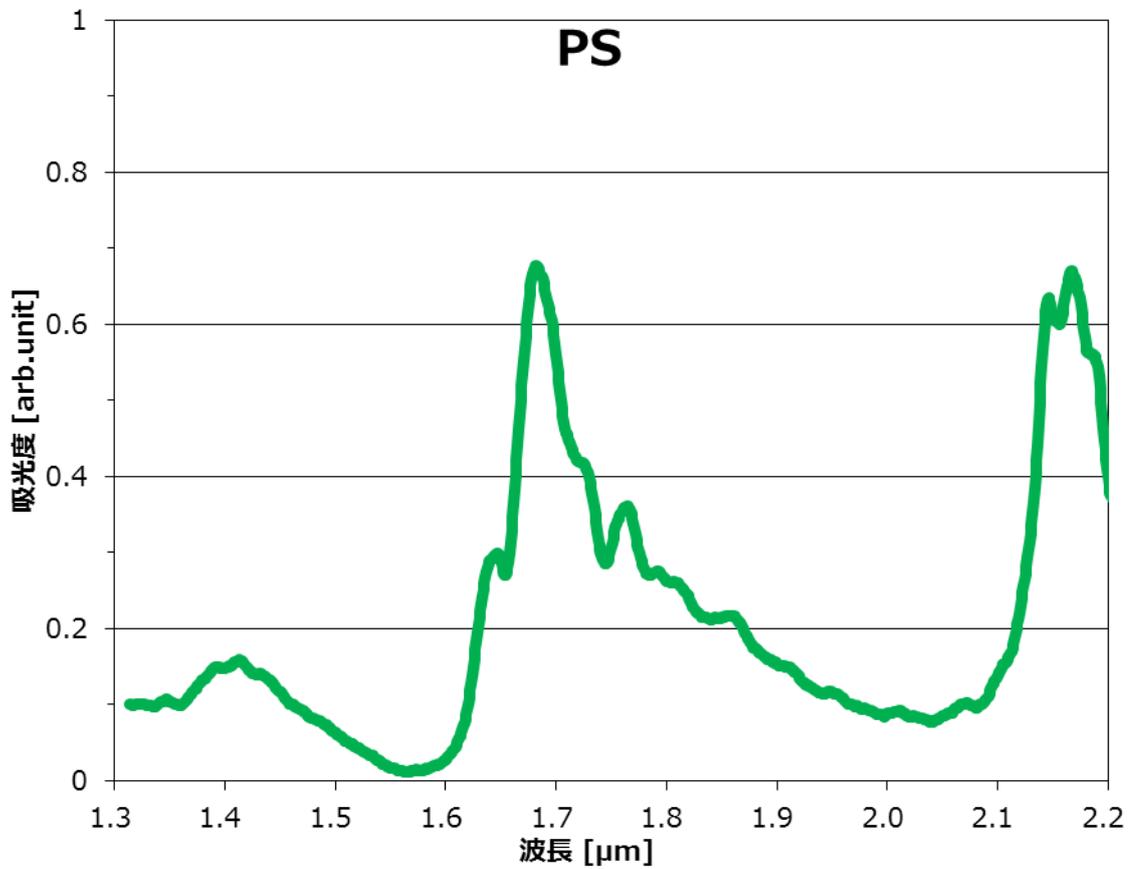


図4-4-3(12) 樹脂スペクトル(PS)

【近赤外線樹脂選別装置】

弊社では、使用済み家電のリサイクル工程で発生する混合樹脂から、主要樹脂であるポリプロピレン、ポリスチレン、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレンの3種を1度に選別回収する技術および選別装置¹⁾を開発してきた。

樹脂リサイクルにおける工程フローを図4-4-3(13)に示す。

樹脂の自動選別工程においては、まず、混合樹脂をコンベア上に分散供給する。続いて、コンベアと垂直方向に設置された近赤外線センサーによってコンベア上を流れる樹脂からの近赤外線スペクトルを検出する。検出したスペクトルと、あらかじめ構築しておいた樹脂データベースのスペクトルを照合し、樹脂種(樹脂片)の判定を行う。判定結果を元に回収対象の樹脂片がエアノズル下を通過する際にタイミングよくエアジェットを吐出し、対象樹脂を回収する。

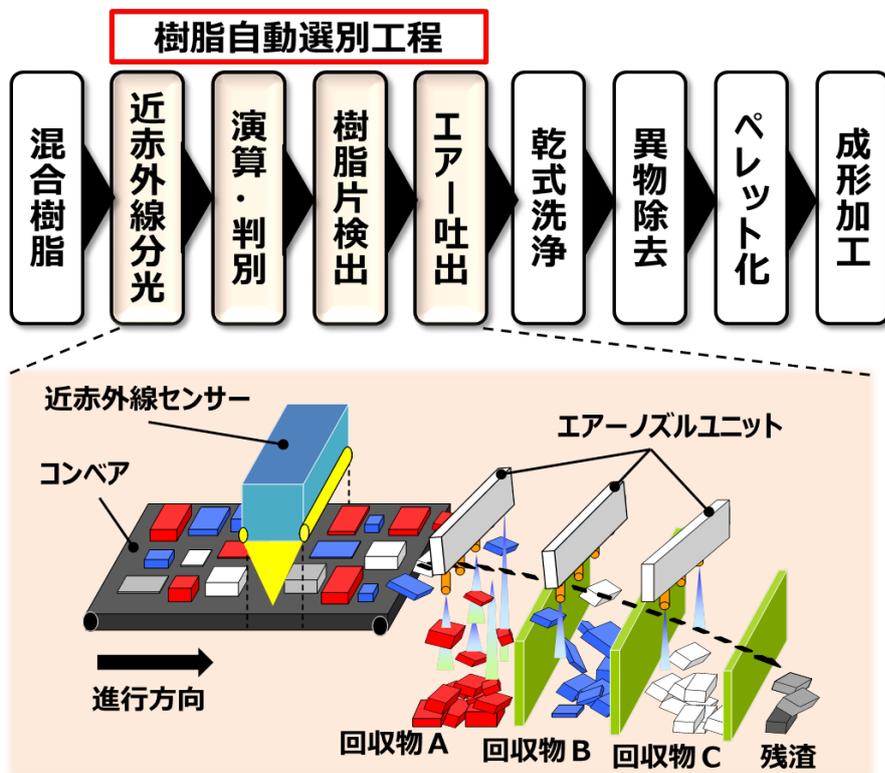


図4-4-3(13) 樹脂リサイクルシステムのフローと選別模式図

選別装置においては、すでに社内のリサイクルプラントにて導入・量産稼働をしている。今回の評価は、図4-4-3(14)に示すように社内のリサイクルプラントに導入した量産機と同様の方式を用いた選別装置を用いて評価を実施した。

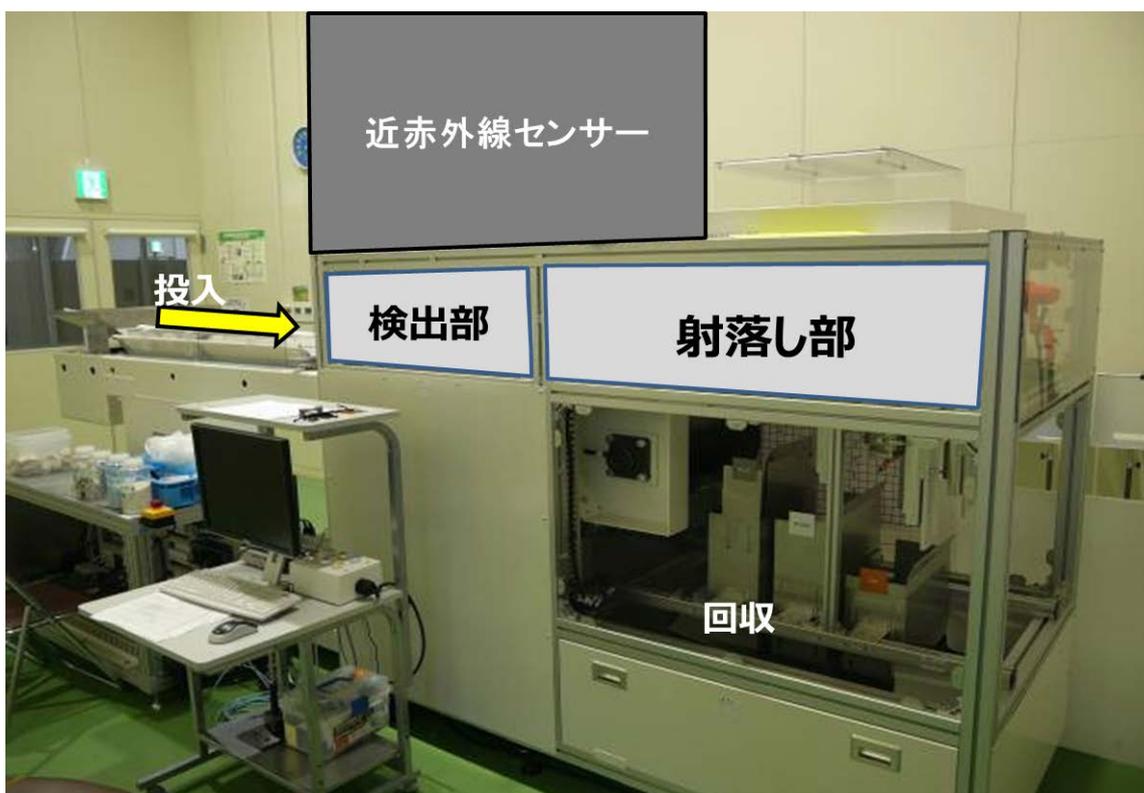


図4-4-3(14) 選別評価に使用した樹脂選別装置の概観

<量産ベースの選別装置における分光スペクトルの取得>

選別検証前に、選別装置での樹脂データベースを新たに構築した。

データベースの構築には、まず装置における分光スペクトルを図4-4-3(15)のようにコンベア上の検出領域に対象樹脂を配置する。そして、光源からの反射光をセンサーで検出し、図4-4-3(16)～(19)のようにそれぞれの樹脂から得られた反射スペクトルを樹脂データベースとして構築した。

選別装置で得られた反射スペクトルにおいては、分光器の取得データに比べて波長分解能は粗いものの、樹脂種およびCNFの含有によってそれぞれのスペクトルに差異が見られる。

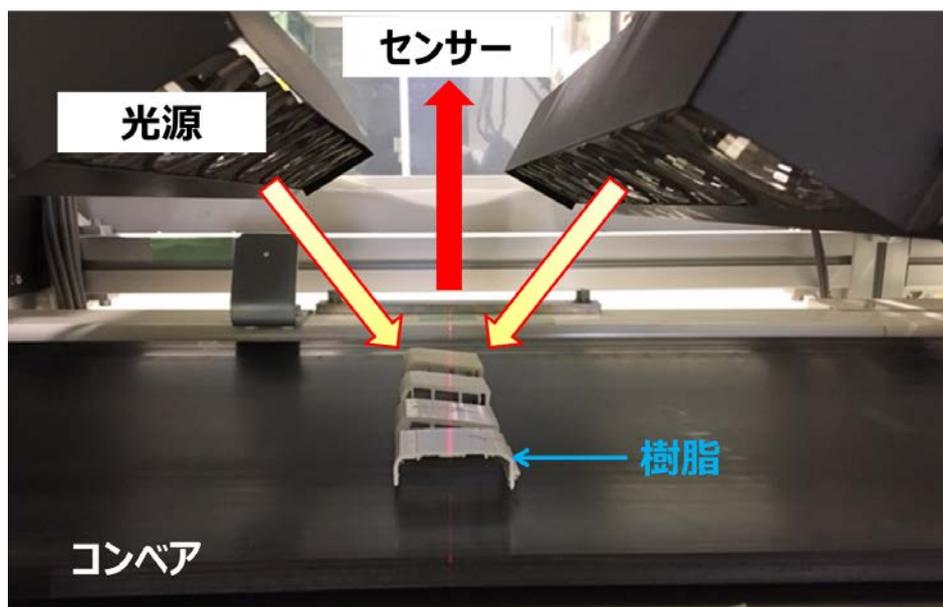


図4-4-3(15) 選別装置における樹脂スペクトルの取得

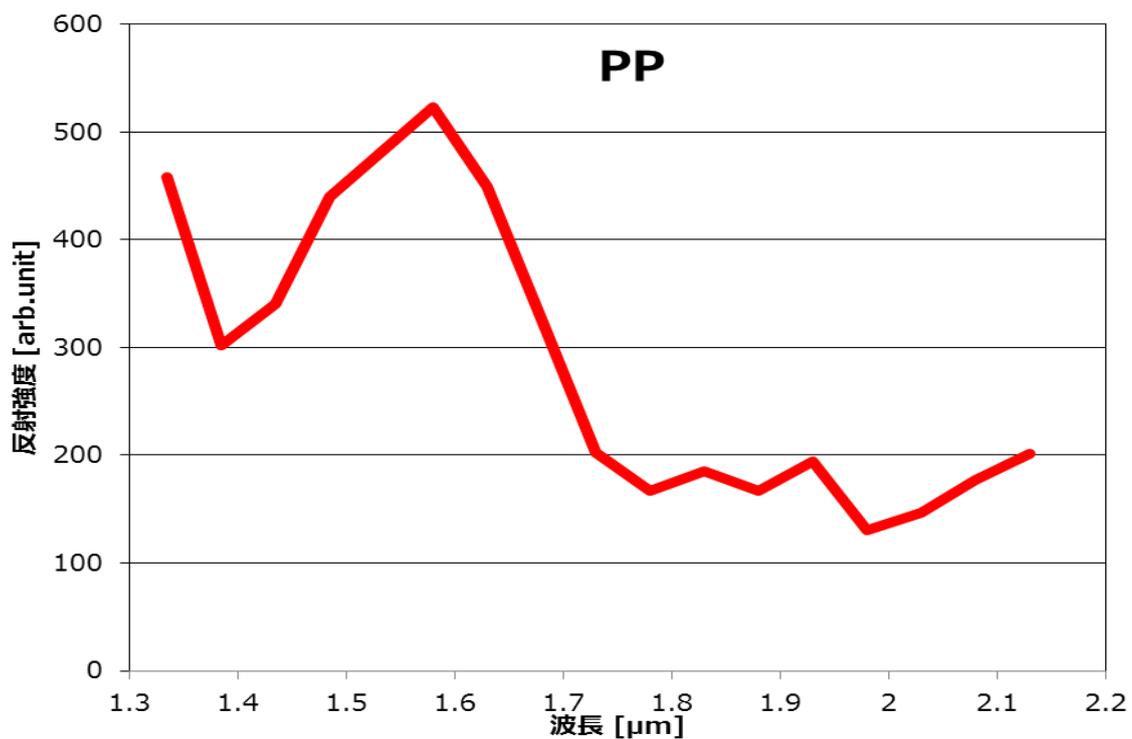


図4-4-3(16) 選別装置における樹脂スペクトル(PP)

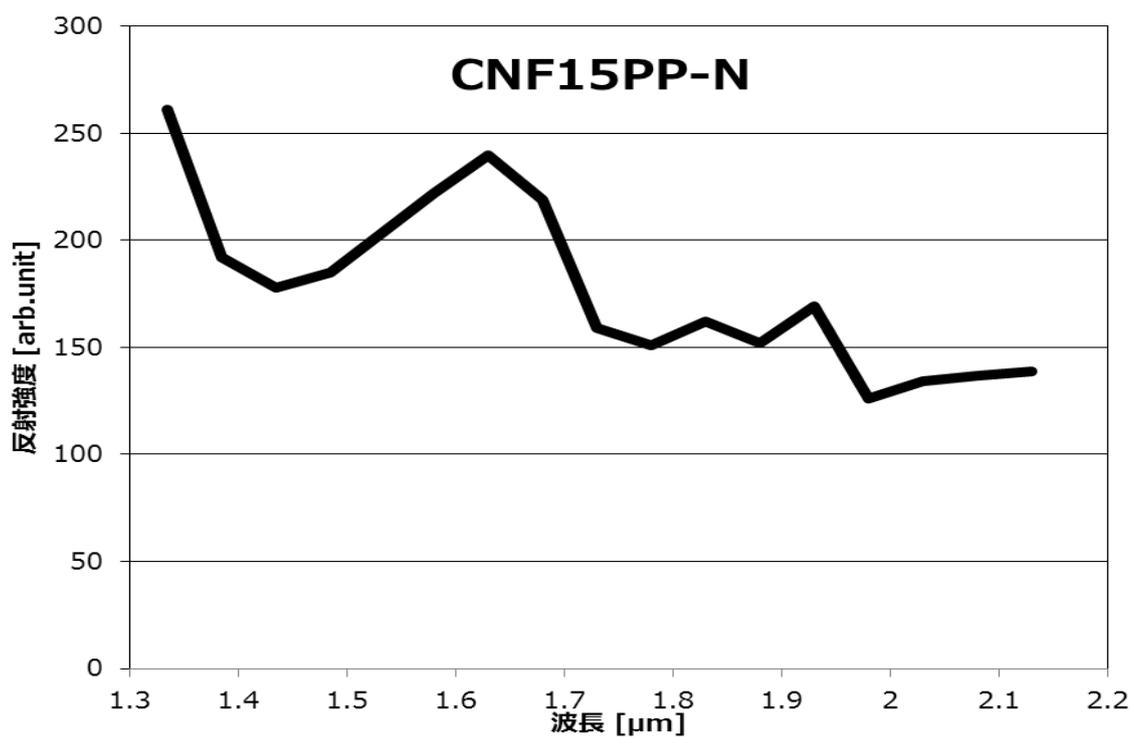


図4-4-3(17) 選別装置における樹脂スペクトル(PP15CNF-N)

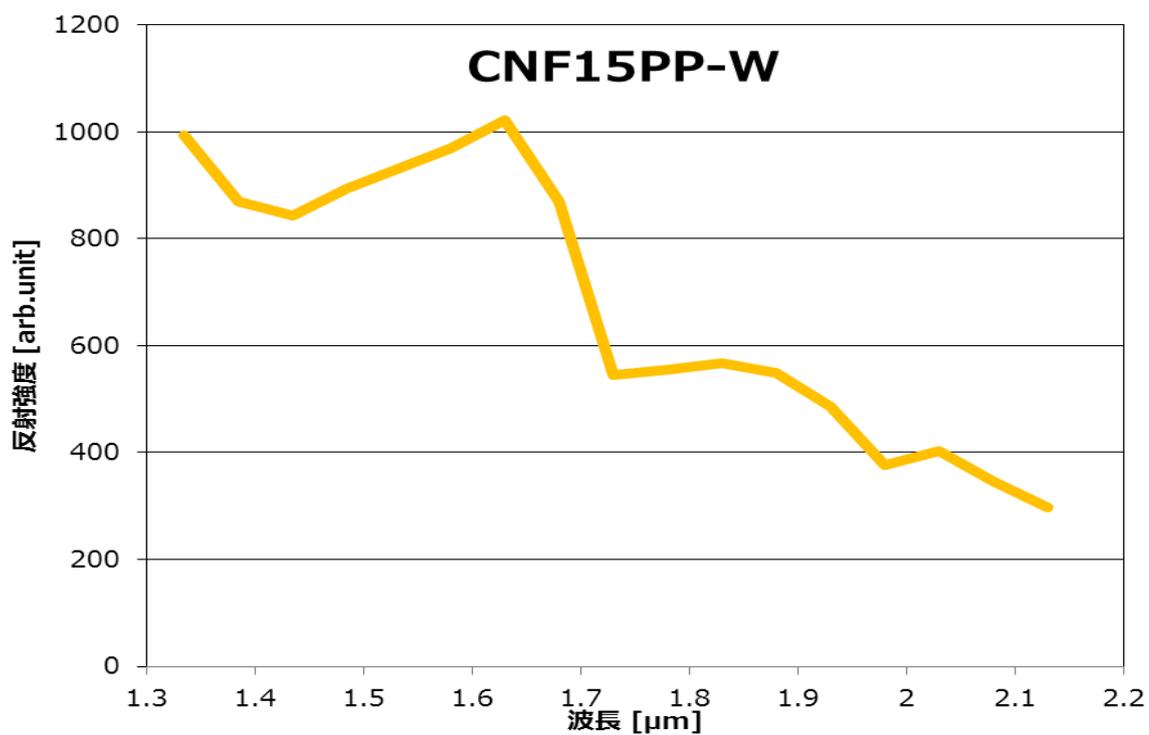


図4-4-3(18) 選別装置における樹脂スペクトル(PP15CNF-W)

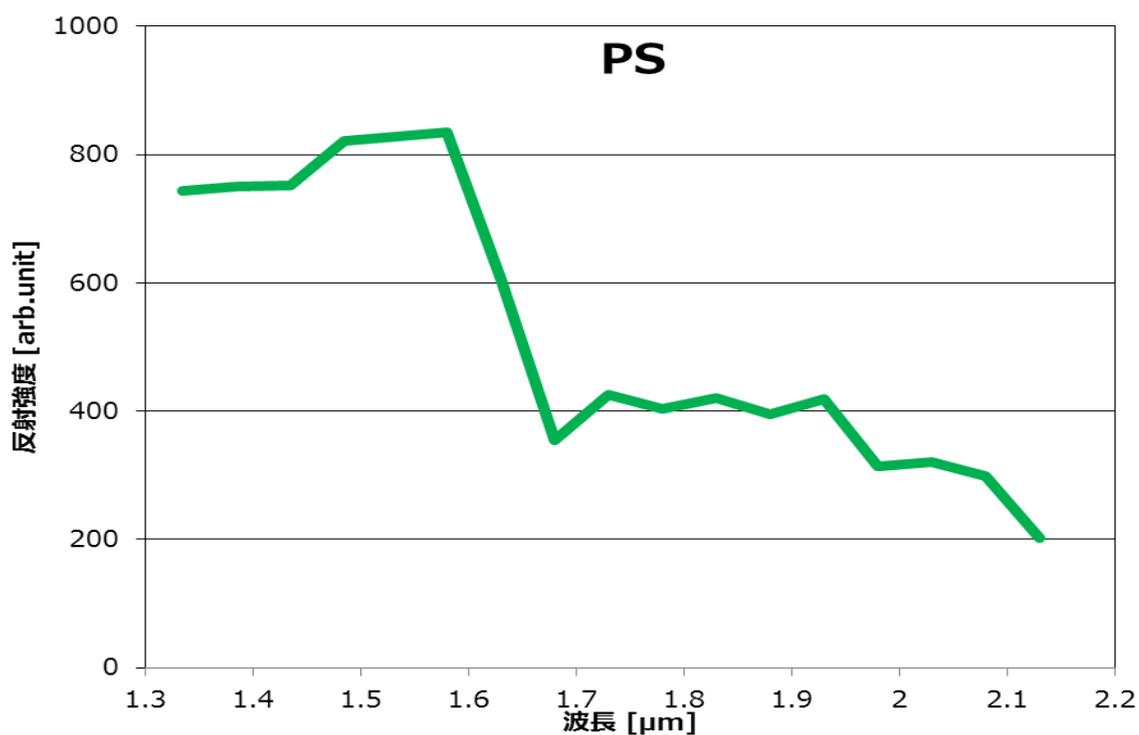


図4-4-3(19) 選別装置における樹脂スペクトル(PS)

【選別評価】

<選別前処理>

選別にあたり、現状のリサイクル工程で発生している粒度かつ選別装置の対象選別仕様の範囲内に揃える必要がある。そのため、図4-4-3(20)に示すように、今回の評価用に選定した樹脂を50mm程度に切断し、各10片ずつ計40片を選別材料として準備した。

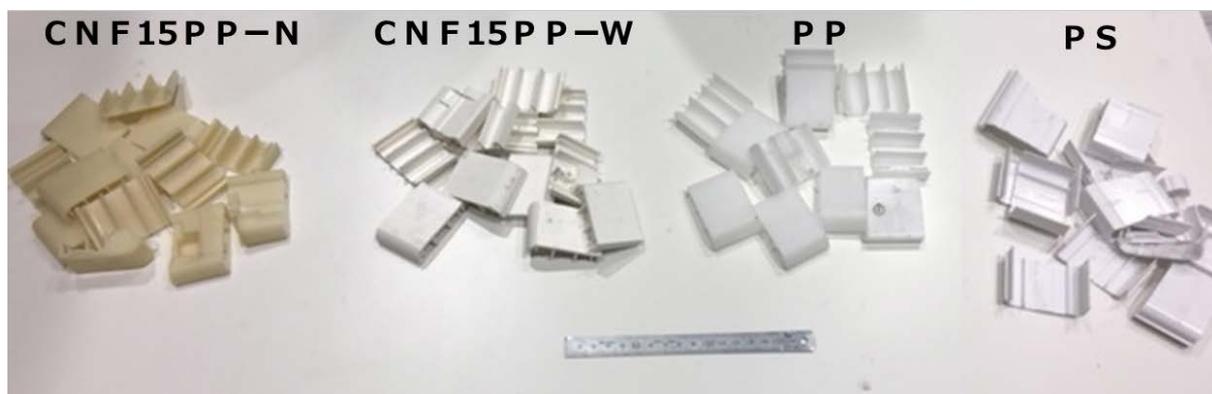


図4-4-3(20) 粗破碎後の樹脂

<選別>

40片(約170g)の樹脂を混ぜ、図4-4-3(21)に示すように振動フィーダーにて選別装置へ投入し、コンベア速度3m/sコンベア幅150mmにおいて250kg/h相当で選別を実施した。選別に際しては、図4-4-3(21)に示すように1連目でCNF複合樹脂、2連目でPP、3連目でPSの選別回収を試みた。

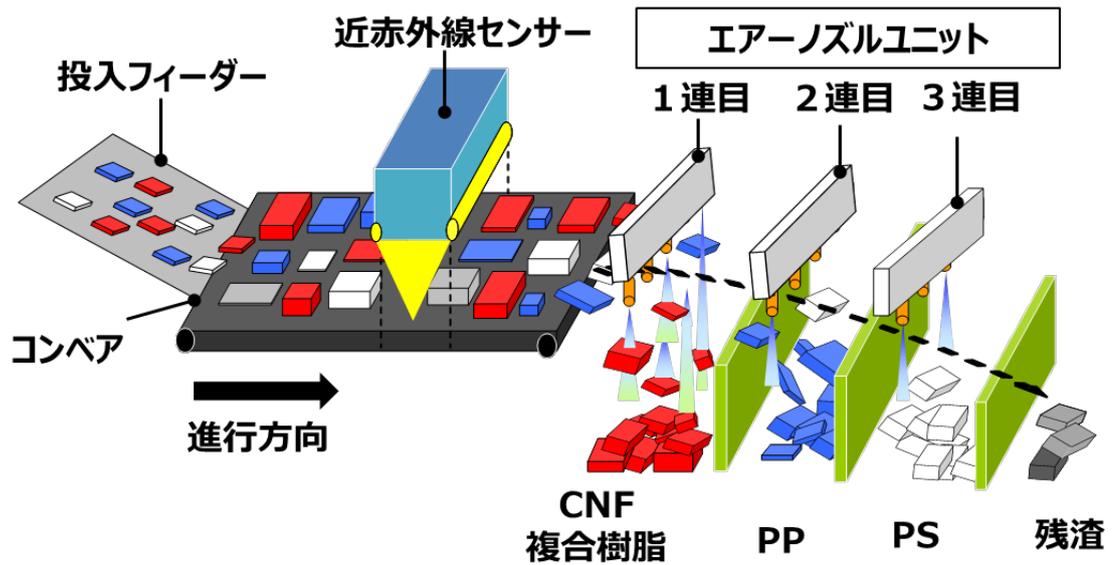


図4-4-3(21) 量産ベースでの樹脂選別検証イメージ

<選別結果>

選別結果を表4-4-3(1)に示す。選別結果からも分かるとおり、CNF複合樹脂の回収率60%以上、CNF複合樹脂の回収品純度80%以上を達成した。

表4-4-3(1) 量産ベースでの混合樹脂選別結果

	1連目	2連目	3連目
N5平均	PP-CNF	PP	PS
純度	100%	93%	100%
回収率	92%	74%	67%

※各選別における詳細データ

N 1	回収対象	CNF15PP-N	CNF15PP-W	PP	PS	純度
1連目	CNF	49.8	46.9	0	0	100%
2連目	PP	0	0	43.7	0	100%
3連目	PS	0	0	0	23.2	100%
残渣	-	0	0	0	5.7	-
回収率		100%		100%	80%	

N 2	回収対象	CNF15PP-N	CNF15PP-W	PP	PS	純度
1連目	CNF	49.8	28.4	0	0	100%
2連目	PP	0	0	26.9	0	100%
3連目	PS	0	0	0	22.7	100%
残渣	-	0	18.5	16.8	6.2	-
回収率		81%		62%	79%	

N 3	回収対象	CNF15PP-N	CNF15PP-W	PP	PS	純度
1連目	CNF	49.8	27.3	0	0	100%
2連目	PP	0	0	43.7	0	100%
3連目	PS	0	0	0	17	100%
残渣	-	0	19.6	0	11.8	-
回収率		80%		100%	59%	

N 4	回収対象	CNF15PP-N	CNF15PP-W	PP	PS	純度
1連目	CNF	49.8	36.9	0	0	100%
2連目	PP	0	10	17.4	0	64%
3連目	PS	0	0	0	17	100%
残渣	-	0	0	26.3	11.8	-
回収率		90%		40%	59%	

N 5	回収対象	CNF15PP-N	CNF15PP-W	PP	PS	純度
1連目	CNF	49.8	38.4	0	0	100%
2連目	PP	0	0	43.7	0	100%
3連目	PS	0	0	0	17.1	100%
残渣	-	0	8.5	0	11.7	-
回収率		91%		100%	59%	

※純度および回収率の定義は以下のとおりである。

純度：回収した対象樹脂の重量/回収した全樹脂の重量

回収率：回収した対象樹脂の重量/対象樹脂の全重量

(2)再生リサイクル取組結果

(2-1)単純100%リグライントによる繰返し成形での機械物性の変化

今回の取組は、再生材としては、粉碎材のままの再利用成形であり、ペレタイズによるリペレットはせずに成形熱履歴を繰り返した。また、通常、実施されるような再生材に対してバージンペレットや初期ペレット材は混合せずに100%粉碎材での成形により試験片の作製を繰り返した。精密成形の範疇ではない中型から大型の射出成形機では、バージンペレットのように粒度・形状をシビアに揃えなくても、計量・圧力等のバラツキは問題なく全体を通して、同一の成形条件にて成形を実施することができた。

最初のステップとしては、酸化防止剤や熱安定剤等の酸化防止剤を添加することなくスプルー、ランナー、成形品の粉碎材100%を繰返し成形し、熱履歴回数を重ねた。

対象樹脂は、CNF15%複合樹脂であり、100%リグライント(粉碎材のみ100%)での繰返し成形熱履歴での機械物性等の試験測定を実施した。

引張試験の項目および条件を表4-4-3(2)に、曲げ試験の項目および条件を表4-4-3(3)に、シャルピー衝撃試験の項目および条件を表4-4-3(4)に、MFR測定条件を表4-4-3(5)に示す

表4-4-3(2) 引張試験項目および条件

試験方法	JIS K 7161-2 準拠
測定項目	引張強さ、引張伸び、引張弾性率
試験片形状	JIS K 7139 1A 形 多目的試験片(L=175)
試験条件	試験速度； 1mm/min(弾性率) ※自動伸び計 AUTO-X 使用 50mm/min(強さ・伸び) ※自動伸び計 AUTO-X 使用 チャック間距離； 115mm 標線間距離； 75mm 試験温度； 23℃ 測定数； n=5
試験環境	23℃±2℃、 50%RH ±5%RH
測定装置	万能材料試験機 5966 型(インストロン社製)
測定者	(株)DJK

表4-4-3(3) 曲げ試験項目および条件

試験方法	JIS K 7171 準拠
測定項目	曲げ強さ、曲げ弾性率
試験片形状	JIS K 7139 1A形 多目的試験片(L=175)
試験条件	試験速度 ; 2mm/min 支点間距離 ; 64mm 試験温度 ; 23°C 測定数 ; n=5
試験環境	23°C±2°C、 50%RH ±5%RH
測定装置	万能材料試験機 5966 型(インストロン社製)
測定者	(株)DJK

表4-4-3(4) シャルピー衝撃試験項目および条件

試験方法	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	ISO 179-1/1eA ※多目的試験片平行部から試験片(ノッチングツールによるノッチ付)を5本作製
試験条件	持ち上げ角度 ; 150度 公称振り子エネルギー ; 0.5J 試験温度 ; 23°C 測定数 ; n=5
試験環境	23°C±2°C、 50%RH ±5%RH
測定装置	デジタル衝撃試験機 DG-UB 型((株)東洋精機製作所製)
測定者	(株)DJK

表4-4-3(5) MFR測定条件

試験方法	ISO 1133 準拠 A法
乾燥	80°C × 12h
試験条件	予熱時間 ; 5分 試験温度 ; 230°C 荷重 ; 2.16kg 測定数 ; n=3
測定装置	メルトインデクサーF-F01 ((株)東洋精機製作所製)
測定者	(株)DJK

(2-1-1) 引張降伏応力の成形熱履歴による変化

図4-4-3(22)に、引張降伏応力の熱履歴回数による変化を示す。初期材成形に対して、100%リグライト成形1回目(熱履歴2回目)で約2MPa減少するが、それ以降は1回当りの熱履歴に対して0.2~0.3MPa程度の減少となっている。

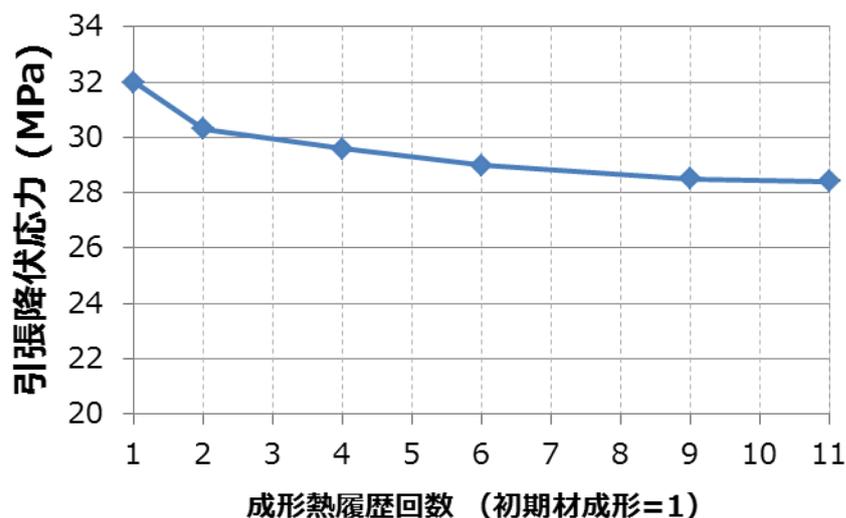


図4-4-3(22) 100%リグライトでの成形熱履歴回数と引張降伏応力

この結果グラフを、初期材成形試験片の試験結果数値を100とした保持率(以下、単に保持率と呼ぶ)に換算した結果を図4-4-3(23)に示す。熱履歴2回目では約5%減少するが、以降の成形熱履歴では、1回当り1%程度の低下となっている。

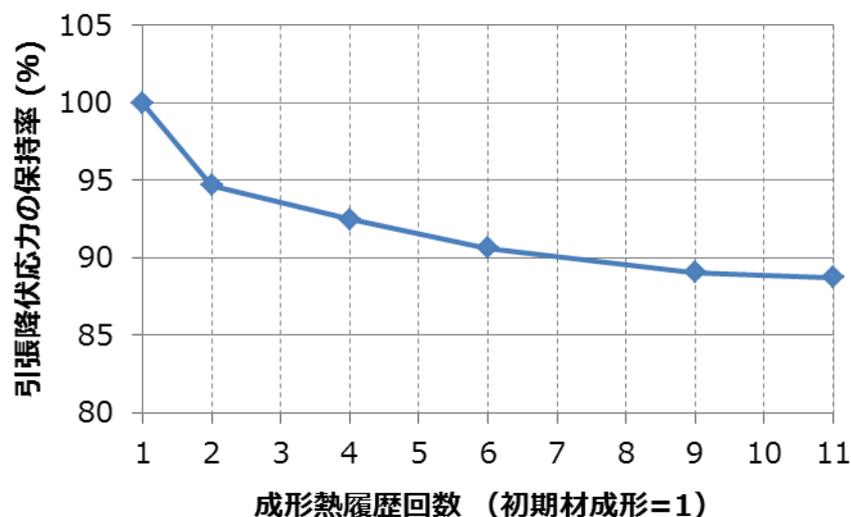


図4-4-3(23) 100%リグライトでの成形熱履歴回数と引張降伏応力の保持率

(2-1-2) 引張降伏ひずみの成形熱履歴による変化

図4-4-3(24)に成形熱履歴回数と引張降伏ひずみの変化を、図4-4-3(25)に、それらの保持率を示す。繰返し成形熱履歴による降伏ひずみの低下の傾向は前項の降伏応力の傾向と同じであるが、リサイクル4回目以降は、成形熱履歴1回当たり10%程度の低下率となっている。物性評価としては、応力値の方が重要な項目であるので、以降は応力値の結果評価を記載していくこととする。

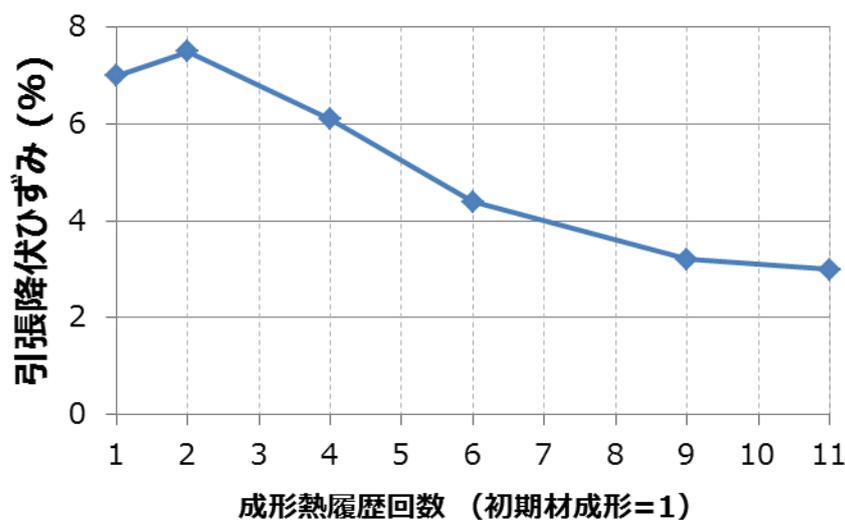


図4-4-3(24) 100%リグライトでの成形熱履歴回数と引張降伏ひずみ

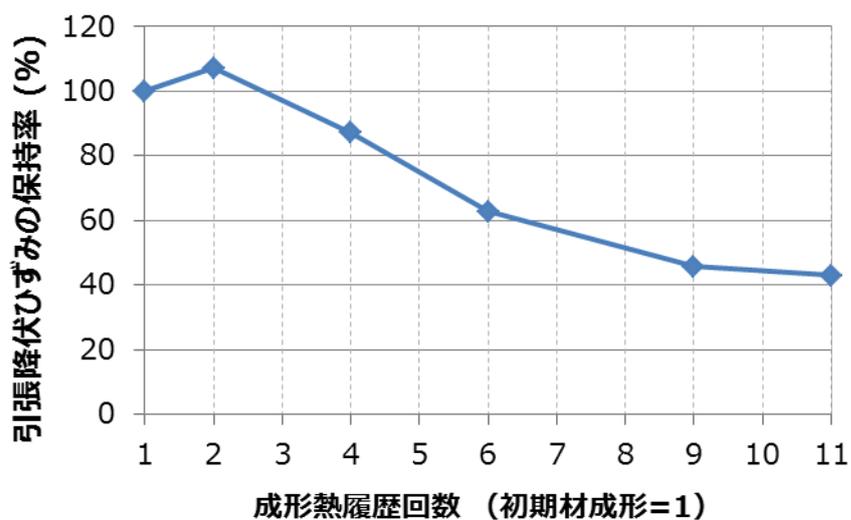


図4-4-3(25) 100%リグライトでの成形熱履歴回数と引張降伏ひずみ保持率

(2-1-3) 引張破壊応力の成形熱履歴による変化

図4-4-3(26)に成形熱履歴回数と引張破壊応力の変化を、図4-4-3(27)に、それらの保持率を示す。成形熱履歴による破壊応力の低下度合いは、上述の引張降伏応力の場合とほぼ同じであり、再生10回目(熱履歴11回目)で、引張降伏応力の保持率が88%に対して、引張破壊応力のそれは87%であり、ほぼ同等の評価ができると考えられる。

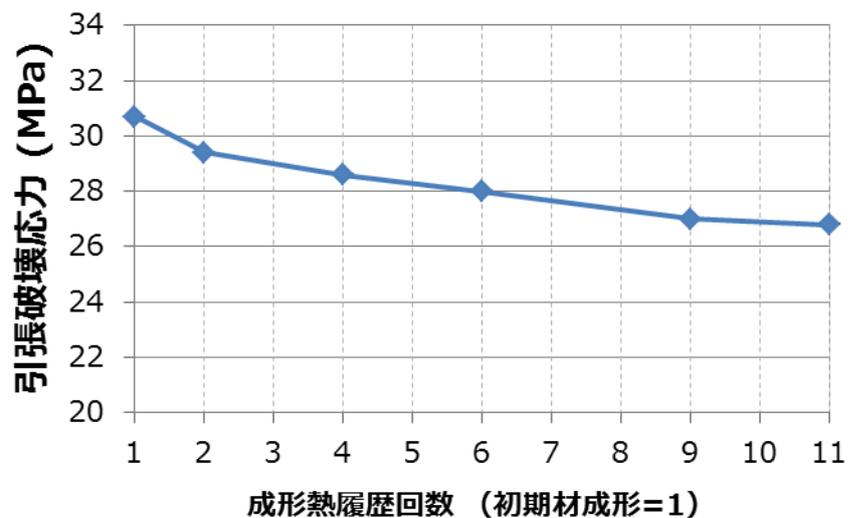


図4-4-3(26) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と引張破壊応力

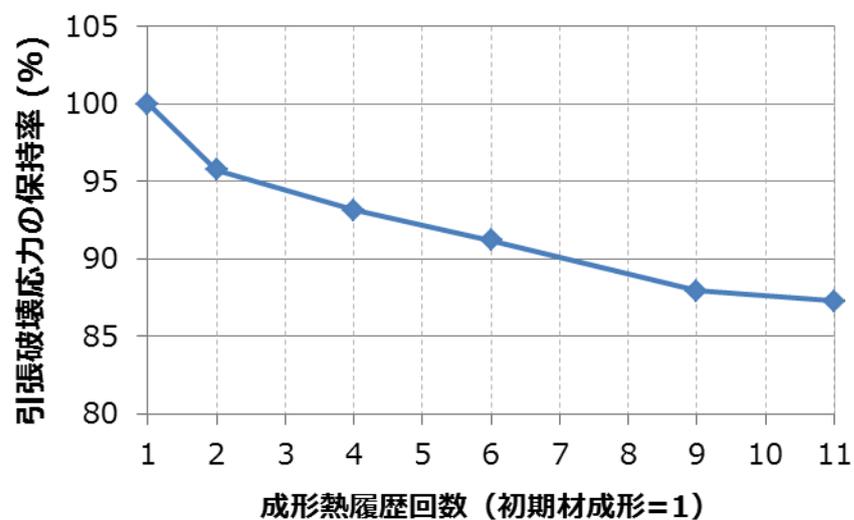


図4-4-3(27) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と引張破壊応力の保持率

(2-1-4) 引張破壊ひずみの成形熱履歴による変化

図4-4-3(28)に成形熱履歴回数と引張破壊ひずみの変化を、図4-4-3(29)に、それらの保持率を示す。

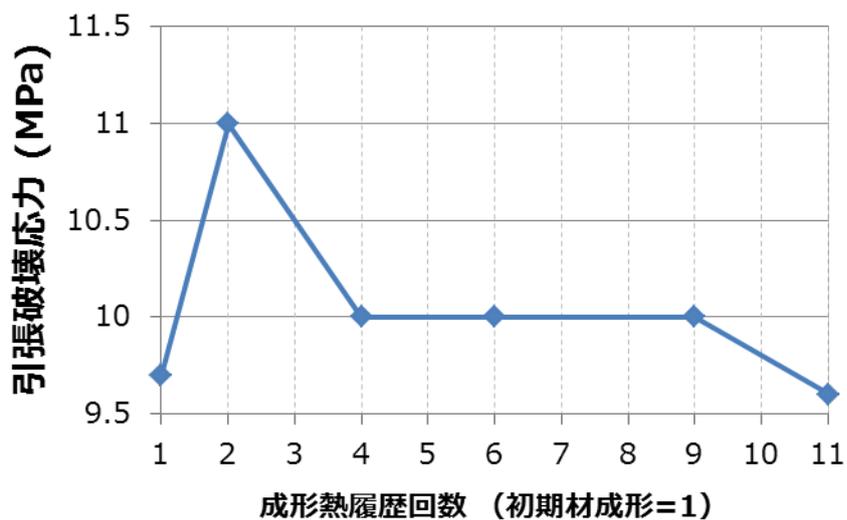


図4-4-3(28) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と引張破壊ひずみ

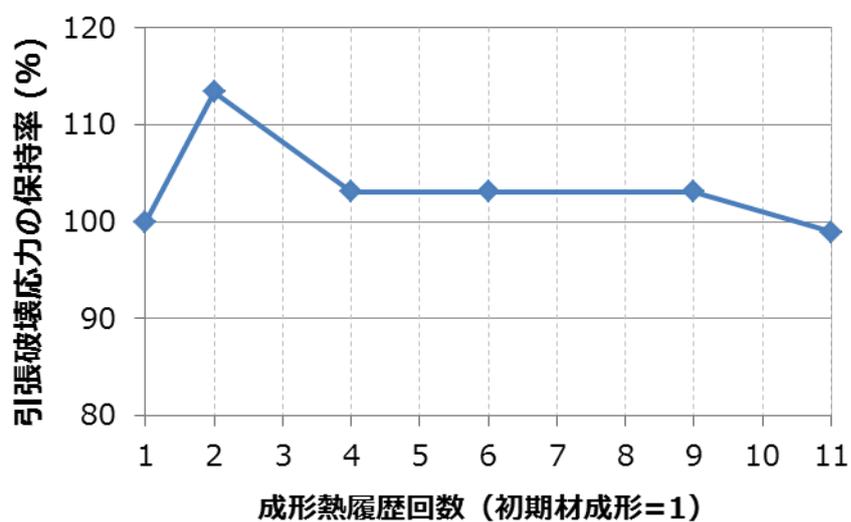


図4-4-3(29) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と引張破壊ひずみの保持率

(2-1-5) 引張弾性率の成形熱履歴による変化

図4-4-3(30)に成形熱履歴回数と引張弾性率の変化を示す。繰返し成形を10回(成形熱履歴回数=11)まで実施しても、引張弾性率は、2,080MPa(2.08GPa)以上を維持している。図4-4-3(31)に、それらの保持率を示すが、再生1回目成形品で4%低下しているが、その後の成形熱履歴でも、初期材成形品の6%低下に留まっており、繰返し成形熱履歴条件下では、リサイクル性能は、初期材の90%以上を保持できていることがわかる。

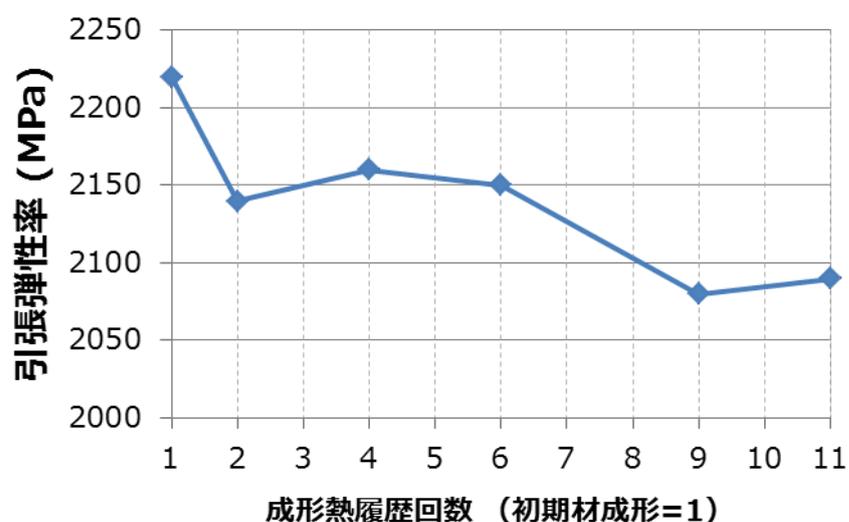


図4-4-3(30) 100%リグライトでの成形熱履歴回数と引張弾性率

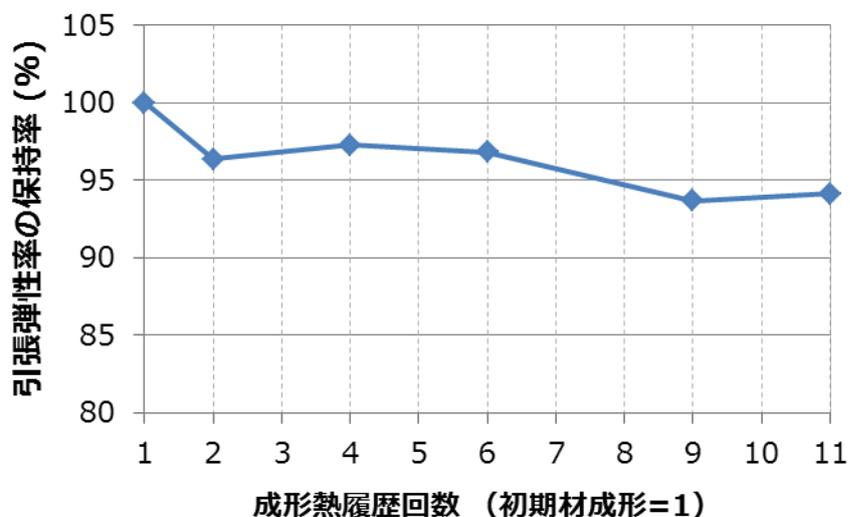


図4-4-3(31) 100%リグライトでの成形熱履歴回数と引張弾性率の保持率

(2-1-6) 曲げ強さの成形熱履歴による変化

図4-4-3(32)に成形熱履歴回数と曲げ強さの変化を、図4-4-3(33)に、それらの保持率を示す。再生1回目成形品で4%低下しているが、その後の成形熱履歴でも、初期材成形品の7%低下に留まっている

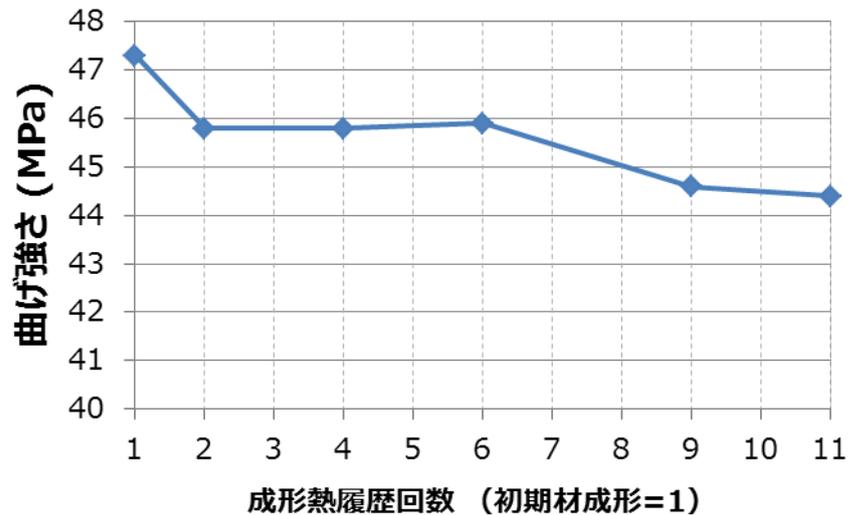


図4-4-3(32) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と曲げ強さ

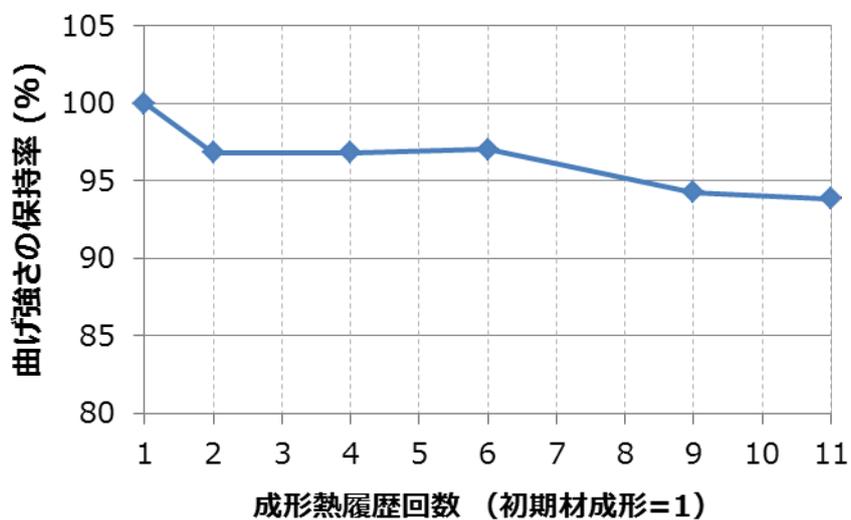


図4-4-3(33) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と曲げ強さの保持率

(2-1-7) 曲げ弾性率の成形熱履歴による変化

図4-4-3(34)に成形熱履歴回数と曲げ弾性率の変化を、図4-4-3(35)に、それらの保持率を示す。再生1回目成形品で5%低下しているが、その後の成形熱履歴でも、初期材成形品の5%低下に留まっている

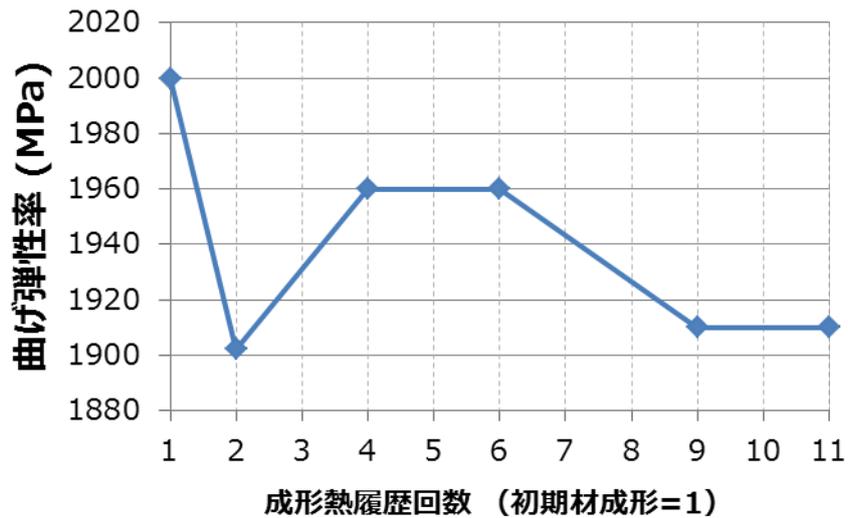


図4-4-3(34) 100%リグライトでの成形熱履歴回数と曲げ弾性率

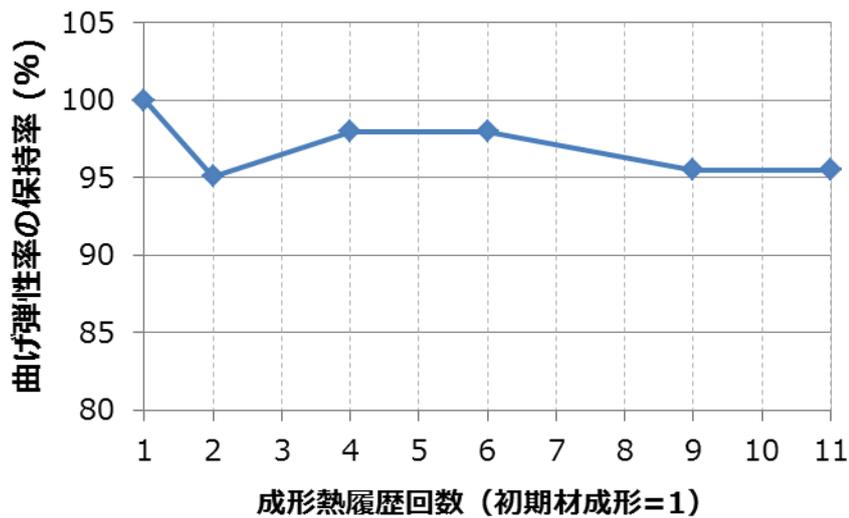


図4-4-3(35) 100%リグライトでの成形熱履歴回数と曲げ弾性率の保持率

(2-1-8) シャルピー衝撃強さの成形熱履歴による変化

図4-4-3(36)に成形熱履歴回数とシャルピー衝撃強さの変化を、図4-4-3(37)に、それらの保持率を示す。再生1回目成形品ではほとんど低下していないが、その後、成形を繰り返すごとに、1~3%程度ずつ減少している。

CNF複合樹脂において、衝撃強さに影響を与えるのは、バルク樹脂の劣化度合いはもちろんのこと、CNFの含有率、その分散性、バルク樹脂との密着(接着)性だけでなく、CNFの繊維径、アスペクト比、繊維単体の形態であると考えられている。繰り返し成形による、CNFの破断・裁断により解砕状態が進み最適な形状・形態が保持できなくなり、所望の性能が出ない可能性もあると考えられる。

したがって、リグライント100%での繰り返し成形熱履歴では、衝撃値の低下が進むが、後述する(2-4-1)の考えにより、リグライント率を下げ、初期材との配合することにより、ガラス繊維強化樹脂の成形リサイクルと同様に、衝撃値等の保持が可能と考えられる²⁾。

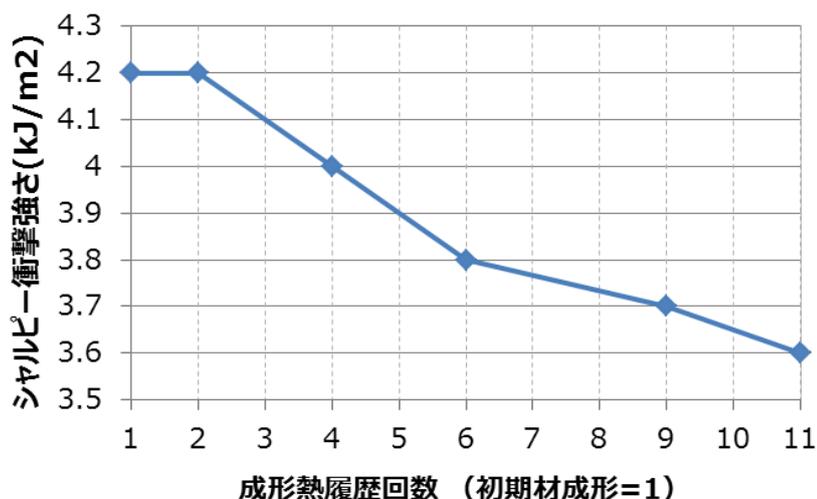


図4-4-3(36) 100%リグライント[®]での成形熱履歴回数とシャルピー衝撃強さ

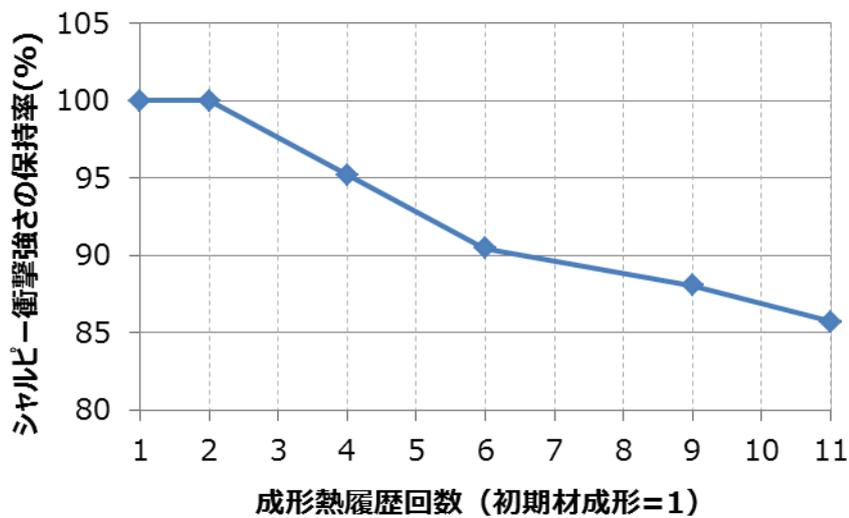


図 4-4-3(37) 100%リクライト[®]での成形熱履歴回数とシャルピー衝撃強さの保持率

(2-1-9)MFR(メルトフローレート)の成形熱履歴による変化

図 4-4-3(38)に成形熱履歴回数とMFRの変化を、図 4-4-3(39)に、それらの保持率を示す。成形熱履歴による、MFRは徐々に増加していくが、繰返し再生10回目で、約50%の増加に留まっている。ポリプロピレン樹脂等については、MFR値は重量平均重合度に逆比例するためMFRは分子量の敏感な優れた代用特性値となるといわれている³⁾。繊維強化のない樹脂においては、熱履歴を繰り返すと、樹脂分子鎖の切断等により分子量が低下するため、流れ性が増大しMFRが上昇するといわれている。バルク樹脂だけを見た場合、200%程度の維持率であれば、成形条件的にも変更の必要なく、リサイクル製品性能としても初期仕様を満足できることがわかっている。

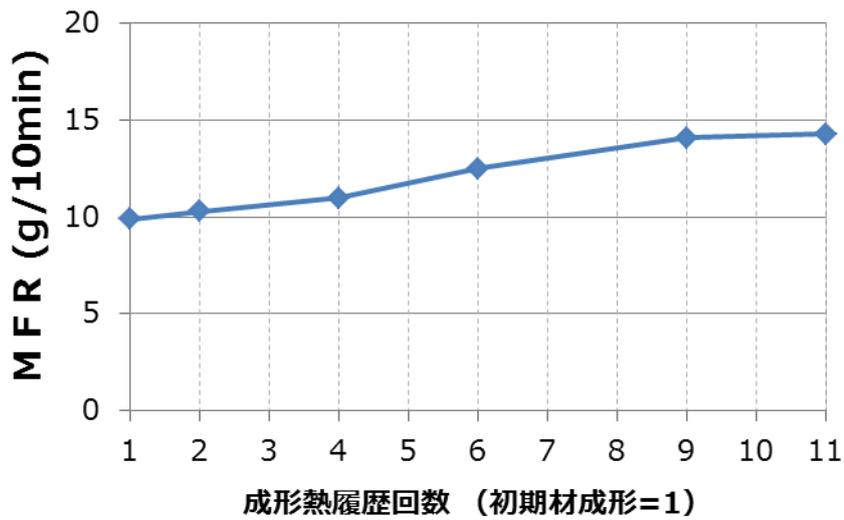


図4-4-3(38) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数とMFR

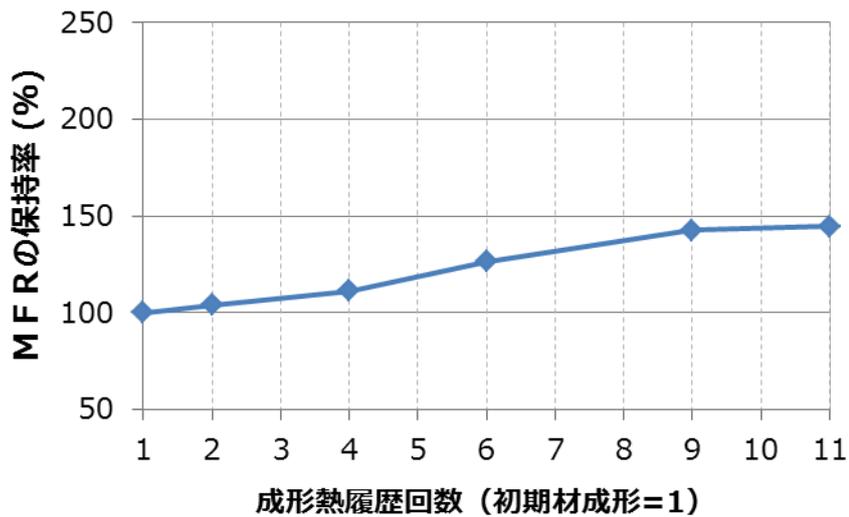


図4-4-3(39) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数とMFRの保持率

(2-2) 単純100%リグライト[®]による繰返し成形において高温放置後の機械物性の変化

市場から回収される製品の劣化を想定し、繰返し成形を実施した試験片に対して耐熱加速試験(高温放置試験)を実施した。高温放置条件として、CNF複合樹脂のベースとなるPP樹脂に対して適用される温度の高温側の150℃で恒温槽へ投入し、取出し後に前項と同様の機械物性試験等を実施した。放置時間は、7日

(168時間)、17日(408時間)、21日(504時間)である。当初の目的は、これらの放置時間での引張強度の半減時間を求め、実使用環境温度での寿命を推定することである。

それらのうち、ここでは、引張降伏応力、引張破壊応力、引張弾性率、曲げ強さ、曲げ弾性率、シャルピー衝撃試験、MFRの結果について記す。

(2-2-1) 引張降伏応力の成形熱履歴と耐熱加速試験による変化

図4-4-3(40)に、耐熱加速試験での引張降伏応力を示す。横軸は、前項と同じく、成形熱履歴回数である。高温放置時間が増すとともに、応力値が低下している。放置7日後で既に1~3MPa程度の低下が見られ、その後も低下している。

図4-4-3(41)に、それらの保持率を示すが、初期材成形品で9%低下しているが、21日経過後でも強度は半減していないので、耐熱性の面での機械的物性は成形熱履歴回数によるリサイクルを重ねても使用に耐えうる可能性があると思われる。

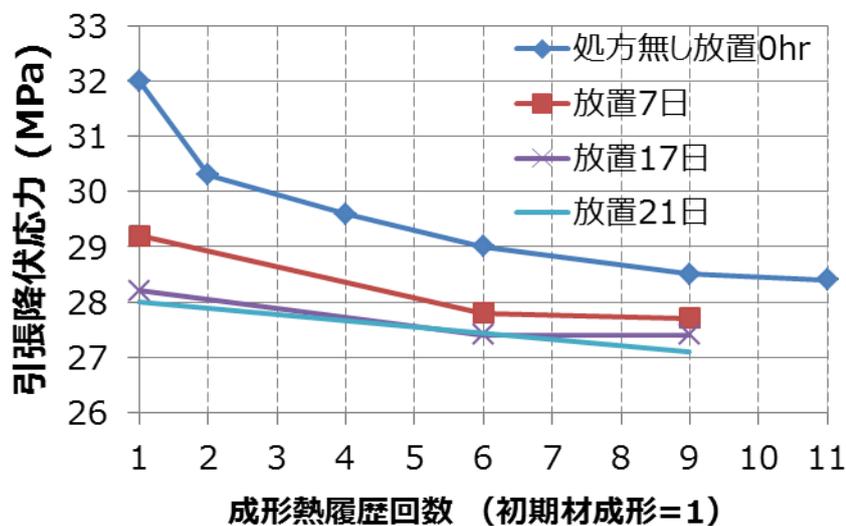


図4-4-3(40) 100%リグライント[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による引張降伏応力の変化

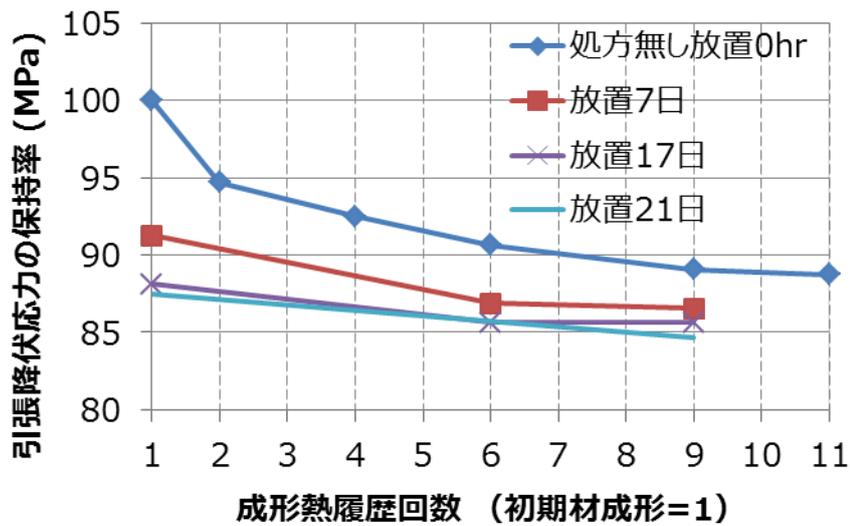


図4-4-3(41) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による引張降伏応力の保持率の変化

(2-2-2) 引張破壊応力の成形熱履歴と耐熱加速試験による変化

図4-4-3(42)に引張破壊応力の試験結果を、図4-4-3(43)にその保持率の変化を示すが、傾向は前項の引張降伏応力と同じである。

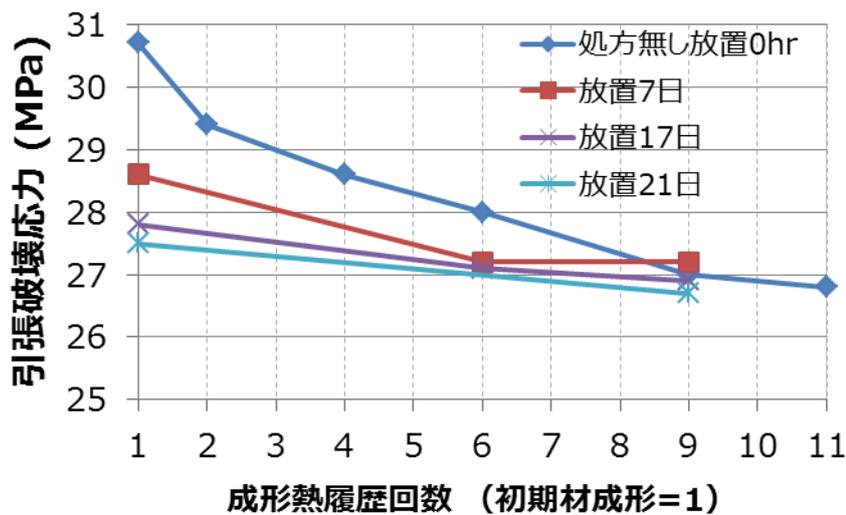


図4-4-3(42) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による引張破壊応力の変化

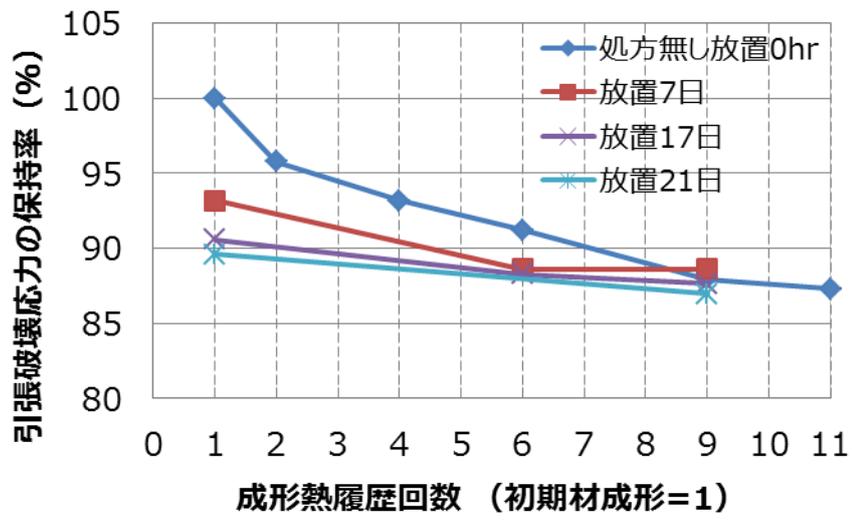


図4-4-3(43) 100%リグライント[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による引張破壊応力の保持率の変化

(2-2-3) 曲げ強さの成形熱履歴と耐熱加速試験による変化

図4-4-3(44)に曲げ強さの試験結果を、図4-4-3(45)に曲げ強さの保持率の変化を示す。高温放置しない場合比べ、高温放置後の曲げ強さは増加している。これは、後述するが、高温放置により試験片の重量が減少し、密度の上昇と硬さの増大によるものと考えられる。

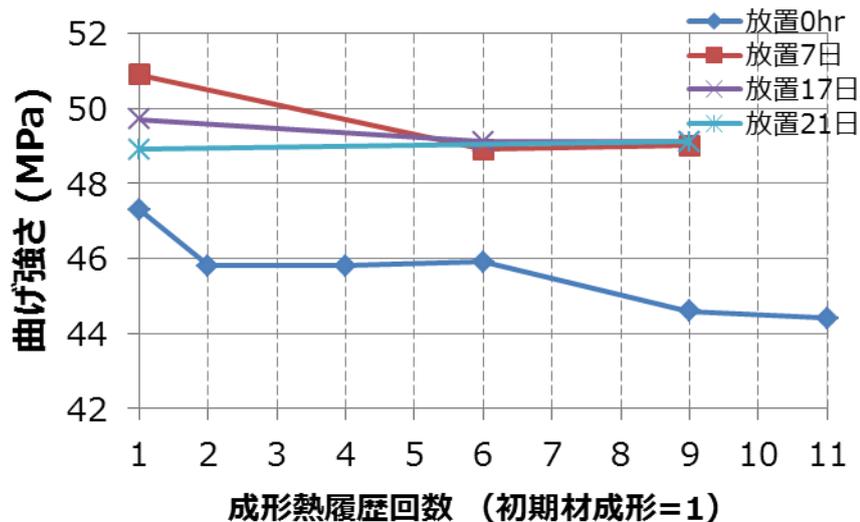


図4-4-3(44) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による曲げ強さの変化

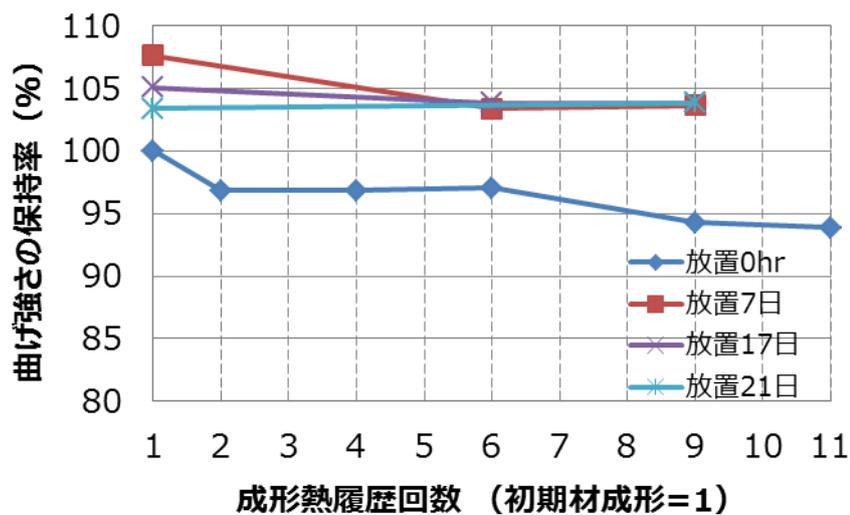


図4-4-3(45) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による曲げ強さの保持率の変化

(2-2-4) 引張弾性率、曲げ弾性率の成形熱履歴と耐熱加速試験による変化

図4-4-3(46)に引張弾性率の試験結果を、図4-4-3(47)に引張弾性率の保持率の変化を示し、図4-4-3(48)に曲げ弾性率の試験結果を、図4-4-3(49)に曲げ弾性率の保持率の変化を示す。前項の曲げ強さと同様に、高温放置しない場合比べ、高温放置後の曲げ強さは増加している。これも、前項と同様に後述するが、高温放置により試験片の重量が減少し、密度の上昇と硬さの増大によるものと考えられる。

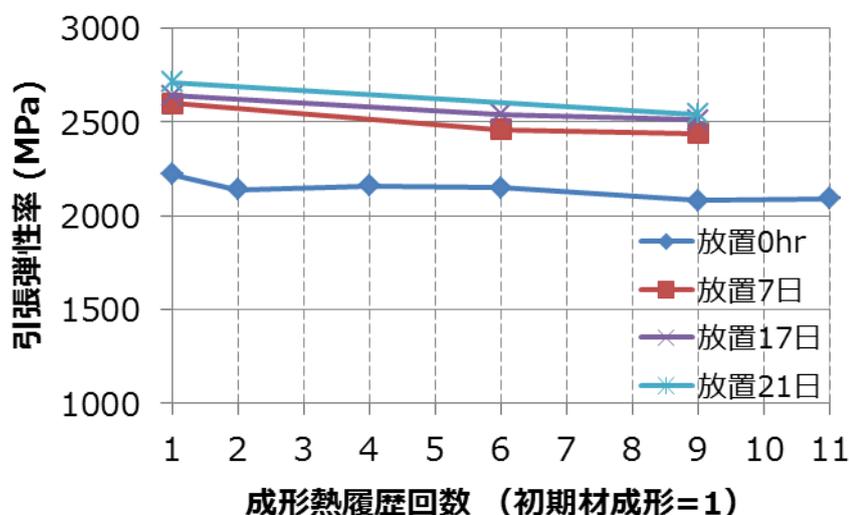


図4-4-3(46) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による引張弾性率の変化

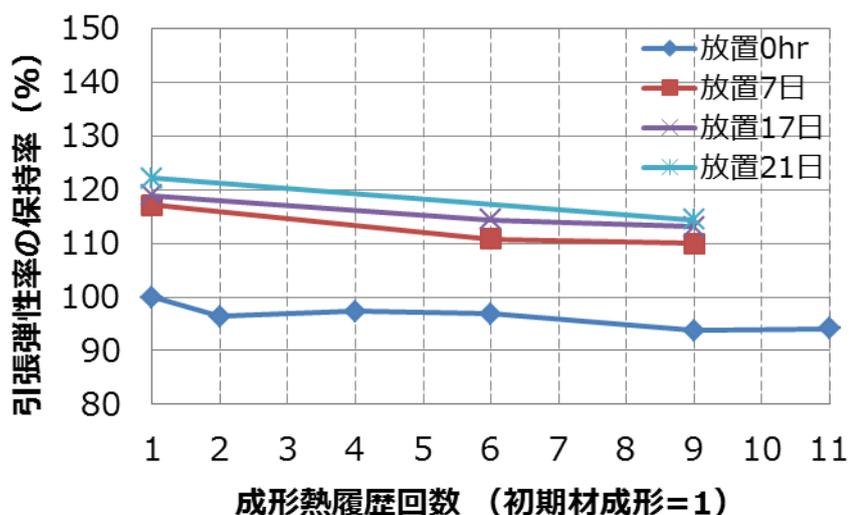


図4-4-3(47) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による引張弾性率の保持率の変化

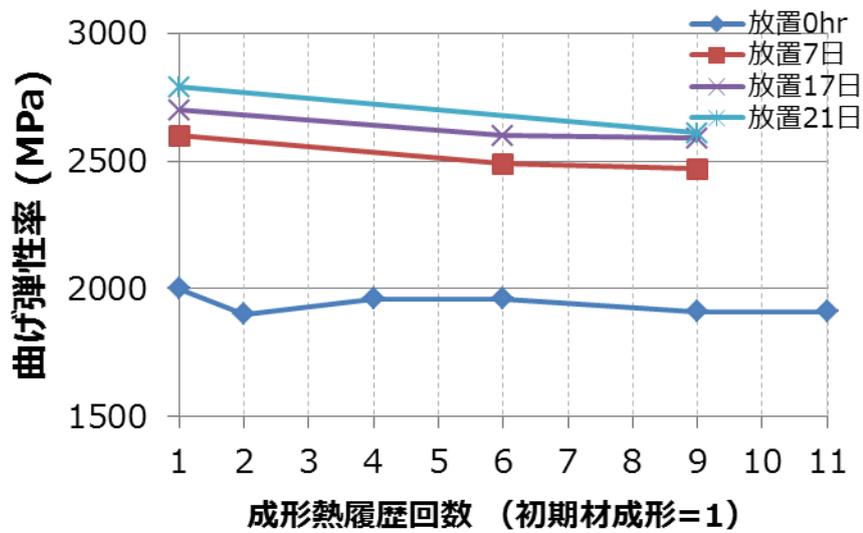


図4-4-3(48) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による
曲げ弾性率の変化

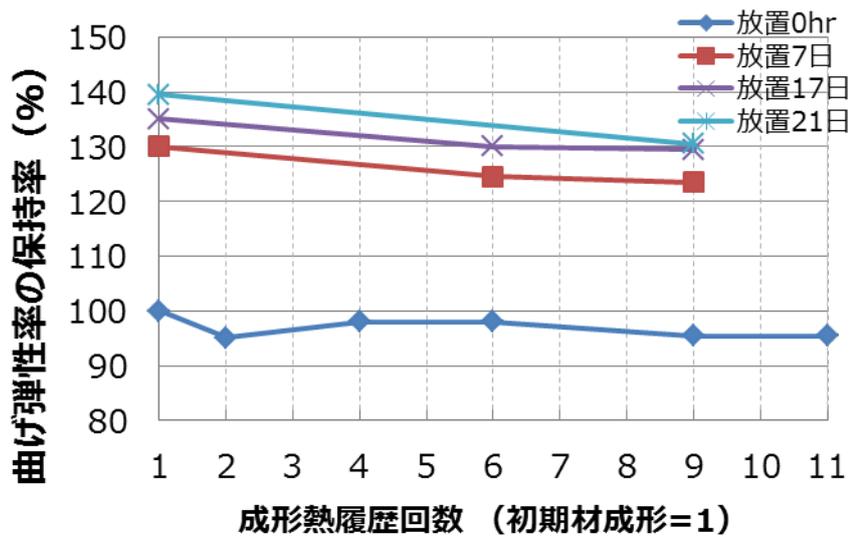


図4-4-3(49) 100%リグライト[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間による
曲げ弾性率の保持率の変化

(2-2-5)シャルピー衝撃値の成形熱履歴と耐熱加速試験による変化

図4-4-3(50)にシャルピー衝撃強さの試験結果を、図4-4-3(51)にそれらの保持率の変化を示す。(2-2-3)、(2-2-4)にて述べたように、高温放置により試験片の重量が減少し、硬さが増加したため、脆性が増大したため衝撃強度が低下したものと考えられる。したがって、耐熱性を必要とするリサイクル品においては、長期信頼性評価を十分に実施する必要がある。

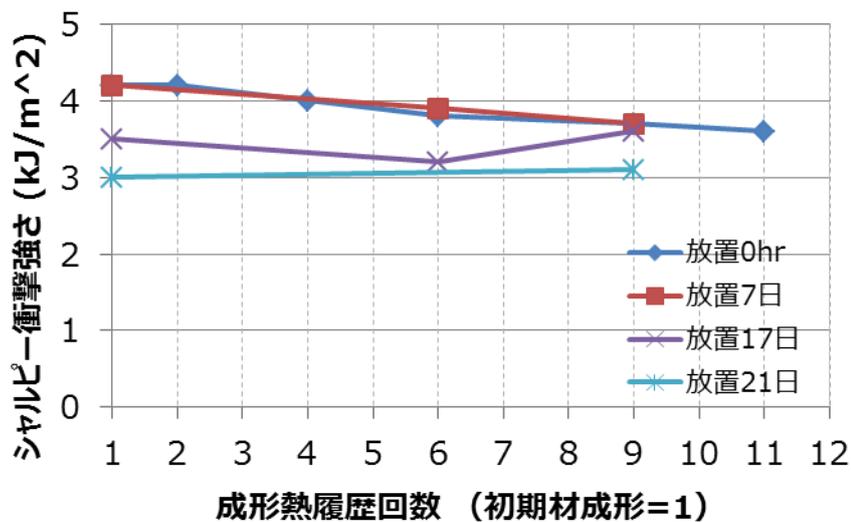


図4-4-3(50) 100%リグライト®での成形熱履歴回数と高温放置時間によるシャルピー衝撃強さの変化

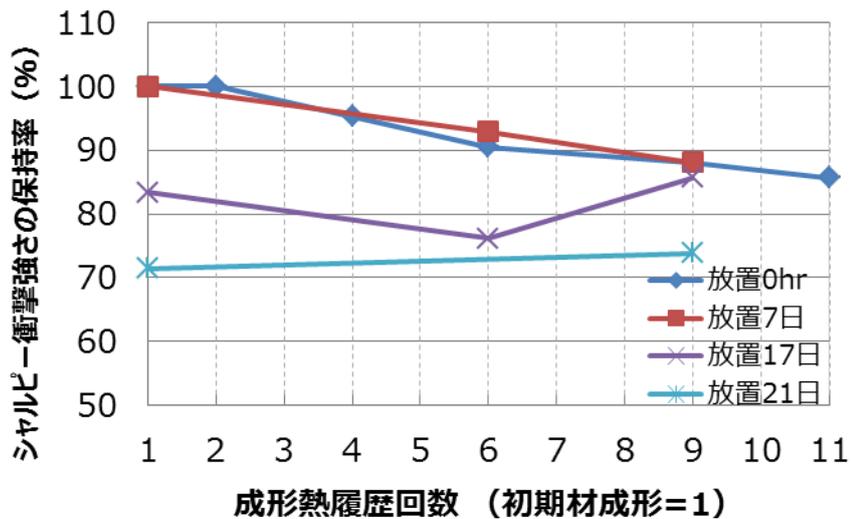


図4-4-3(51) 100%リグライト®での成形熱履歴回数と高温放置時間によるシャルピー衝撃強さの保持率の変化

(2-2-6) MFRの成形熱履歴と耐熱加速試験による変化

図4-4-3(52)にMFRの測定結果を、図4-4-3(53)にそれらの保持率の変化を示す。高温放置7日後では、放置無しの場合とほぼ同等のMFRを示すが、それ以降は、徐々に増加していき、放置21日後では、MFRは数十倍に増加し、樹脂の低分子化が非常に進んでいることがわかる。高温放置の温度が150℃なので、CNF自体も劣化(炭化など)が進んでいる可能性もあるが、引張・曲げ強度面では、ここまで顕著な劣化度合いを示さないことから、MFR値による劣化判断、リサイクル可否判断は、重要な評価基準と考えられる。

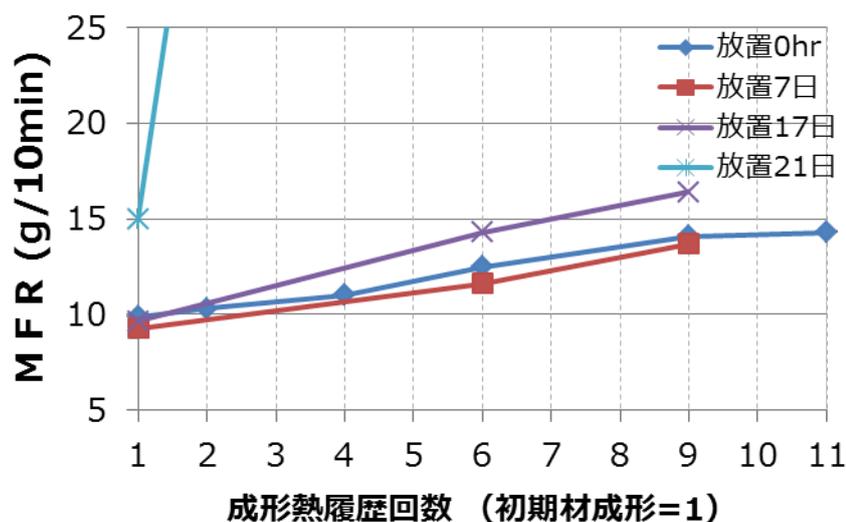


図4-4-3(52) 100%リグライント[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間によるMFRの変化

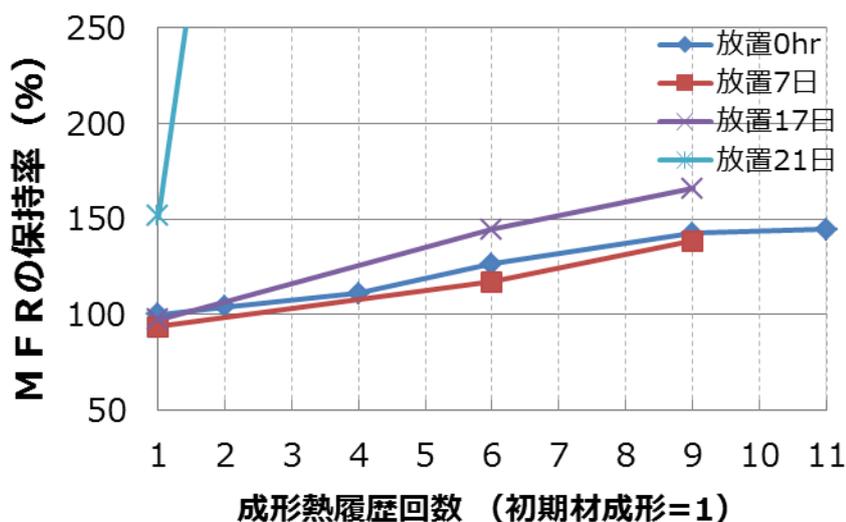


図4-4-3(53) 100%リグライント[®]での成形熱履歴回数と高温放置時間によるMFRの保持率の変化

(2-3) 添加剤処方による繰返し成形熱履歴における機械物性の変化

CNF複合樹脂のベース樹脂には、酸化防止剤などの安定剤が含有され、成形熱履歴により消耗されることがわかっており²⁾、成形熱履歴ごと、すなわち繰返し成形1回毎に、安定剤の添加処方を行い、繰返し成形熱履歴での影響を検証した。添加剤を処方する工法は、通常、成形端材(成形ランナーやスプルーなど)や成形品の粉碎材を溶融押出成形によりバージンペレットと同様な粒度・形状にペレット化するペレタイズ工法が採用されるが、今回は、弊社が開発し量産工場でも活用されている非溶融の乾式での添加剤再生処理工法を検証した。高速ミキサーにより、成形端材の粉碎材(リグラインド材)の表面に非溶融で且つバインダー等を使わない乾式の方法で、酸化防止剤などの添加剤を分散・混合し樹脂表面から脱落しないよう固着させる再生処理工法(粉末添加剤を摩擦発熱により軟化したリグラインド材の表面に打ちつけ固着させる工法)である²⁾。

(2-1)項と同様にリグラインド率100%の繰返し成形により試験片を作製し、成形熱履歴による機械物性値等を検証した。ここでは、引張降伏応力、引張弾性率、曲げ強さ、曲げ弾性率、シャルピー衝撃試験、MFRの結果について(2-1)の結果と併せて記す。

(2-3-1) 引張降伏応力の成形熱履歴回数による変化

図4-4-3(54)に、添加処方なしと添加処方ありでの引張降伏応力の熱履歴回数による変化の比較を示す。図4-4-3(55)に、それらの保持率の変化を示す。横軸の1は、初期材成形を示しているので、添加剤処方無し/有りでは同じ値としている。

100%リグライント成形1~2回目(熱履歴2~3回目)で添加剤処方有りのほうが1~2MPa減少しているが、それ以降は、ほぼ平行に推移している。

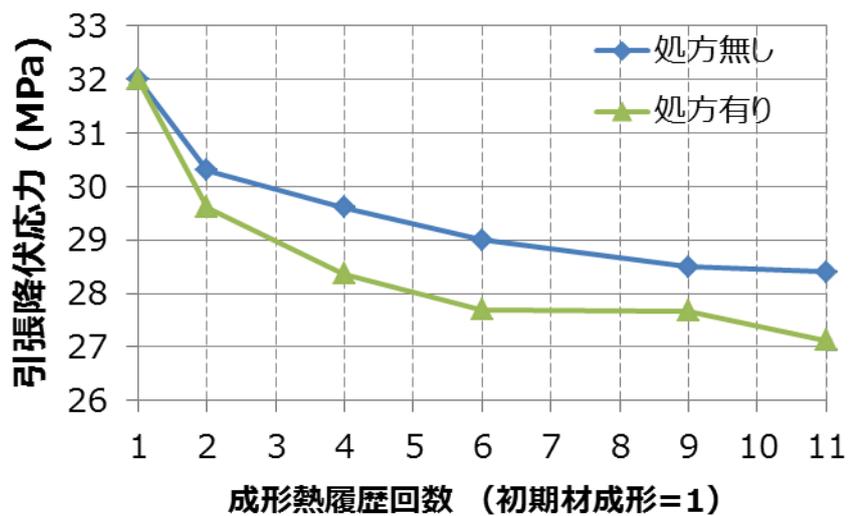


図4-4-3(54) 100%リグライト[®]での添加剤処方無し／有りでの成形熱履歴回数による引張降伏応力の推移

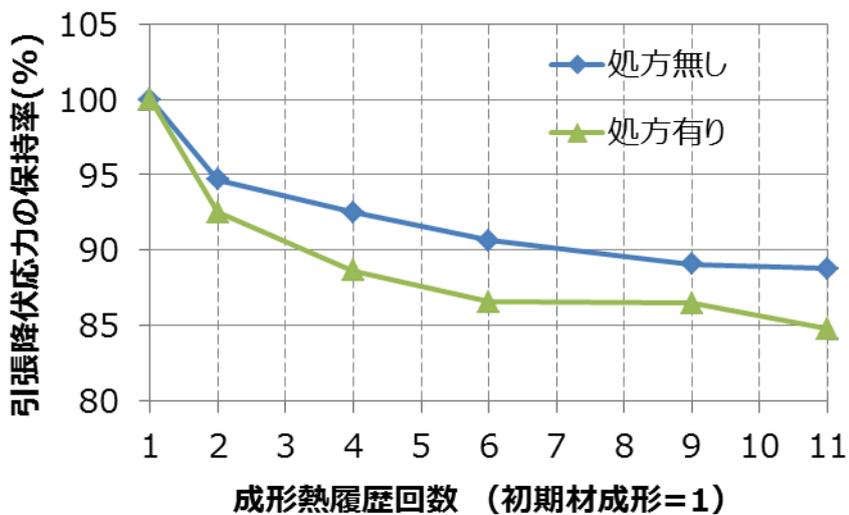


図4-4-3(55) 100%リグライト[®]での添加剤処方無し／有りでの成形熱履歴回数による引張降伏応力の保持率の推移

(2-3-2) 引張弾性率の成形熱履歴回数による変化

図4-4-3(56)に、添加処方なしと添加処方ありでの引張弾性率の熱履歴回数による変化の比較を示す。図4-4-3(57)に、それらの保持率の変化を示す。添加剤処方有りのほうが、保持率が10%以上低い結果となっている。この要因については、前項、次項、次々項と併せ、後に考察する。

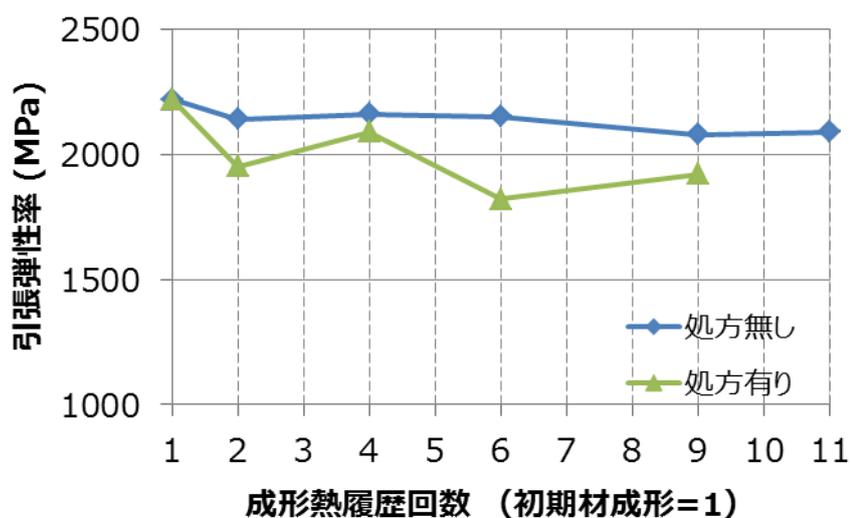


図4-4-3(56) 100%リグライト[®]での添加剤処方無し／有りででの成形熱履歴回数による引張弾性率の推移

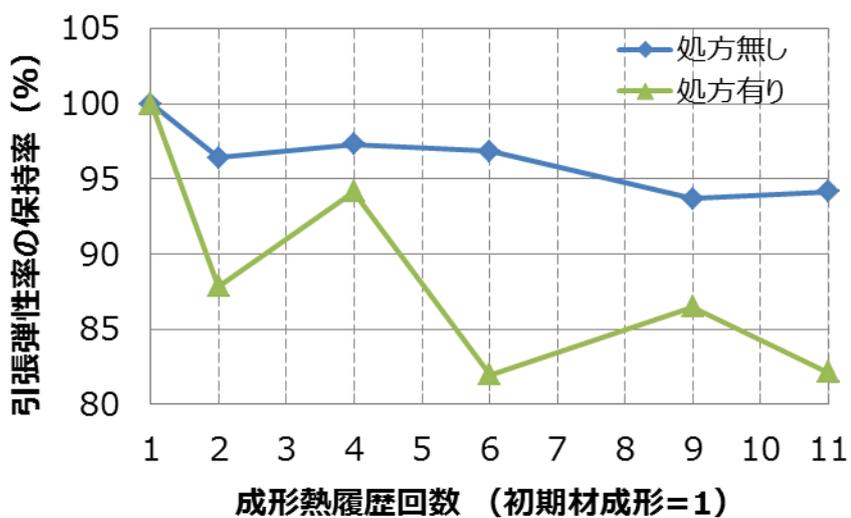


図4-4-3(57) 100%リグライト[®]での添加剤処方無し／有りででの成形熱履歴回数による引張弾性率の保持率の推移

(2-3-3) 曲げ強さの成形熱履歴回数による変化

図4-4-3(58)に、添加処方なしと添加処方ありでの曲げ強さの熱履歴回数による変化の比較を示す。図4-4-3(59)に、それらの保持率の変化を示す。添加剤処方有りのほうが、保持率が、5%以上低い結果となっている。

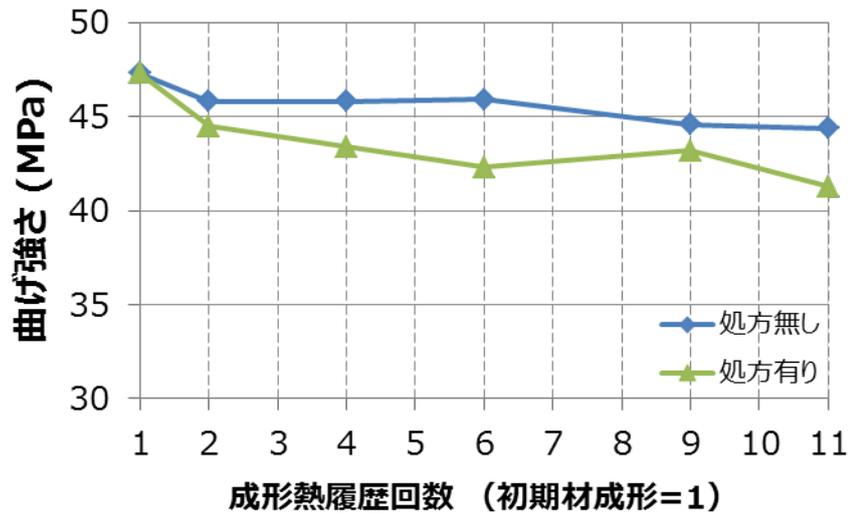


図4-4-3(58) 100%リグライト[®]での添加剤処方無し／有りでの成形熱履歴回数による曲げ強さの推移

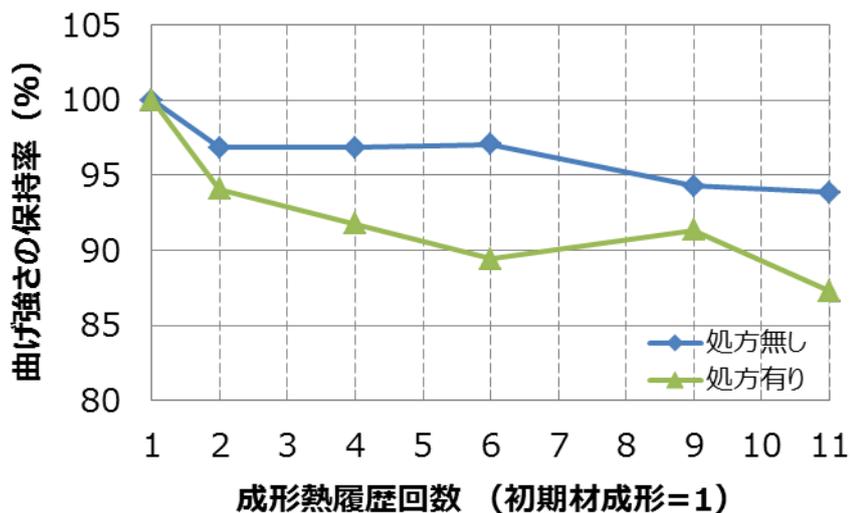


図4-4-3(59) 100%リグライト[®]での添加剤処方無し／有りでの成形熱履歴回数による曲げ強さの保持率の推移

(2-3-4) 曲げ弾性率の成形熱履歴回数による変化

図4-4-3(60)に、添加処方なしと添加処方ありでの曲げ弾性率の熱履歴回数による変化の比較を示す。図4-4-3(61)に、それらの保持率の変化を示す。添加剤処方有りのほうが、保持率が5~10%程度低い結果となっている。

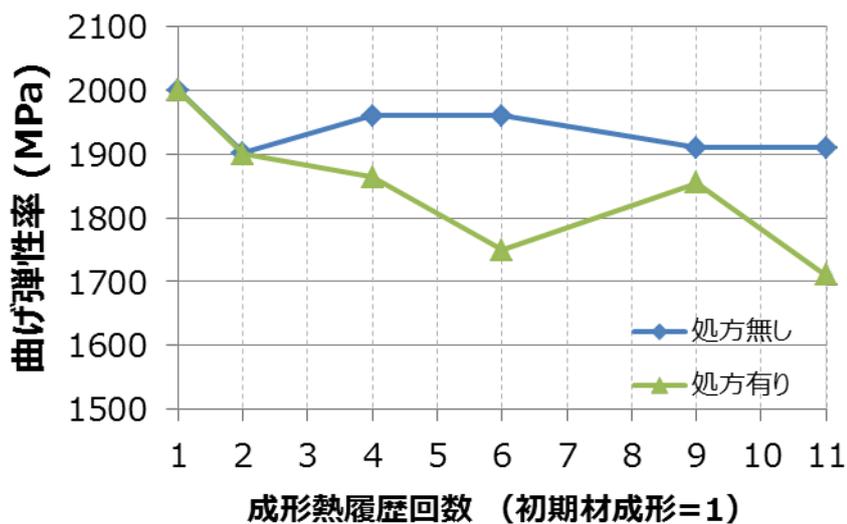


図4-4-3(60) 100%リグライトでの添加剤処方無し/有りでの成形熱履歴回数による曲げ弾性率の推移

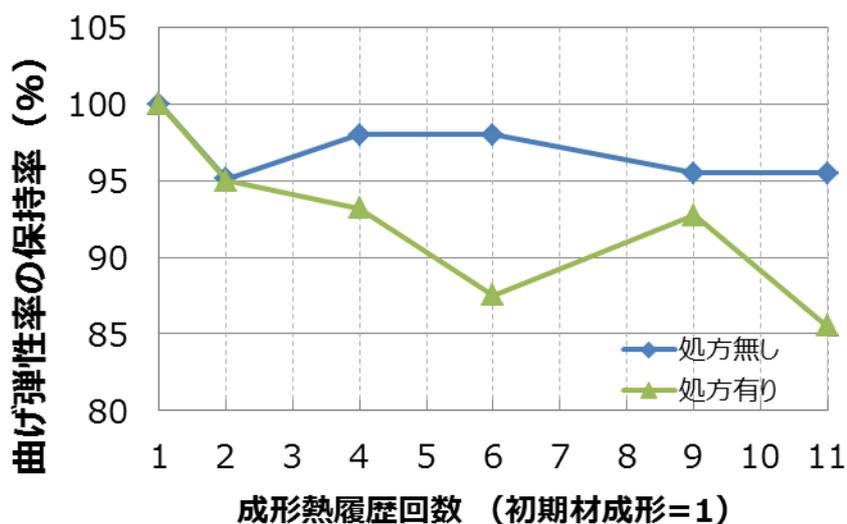


図4-4-3(61) 100%リグライトでの添加剤処方無し/有りでの成形熱履歴回数による曲げ弾性率の保持率の推移

(2-3-5) シャルピー衝撃強さの成形熱履歴回数による変化

図4-4-3(62)に、添加処方なしと添加処方ありでのシャルピー衝撃強さの熱履歴回数による変化の比較を示す。図4-4-3(63)に、それらの保持率の変化を示す。添加剤処方有りのほうが、保持率が5%程度低い結果となっている。

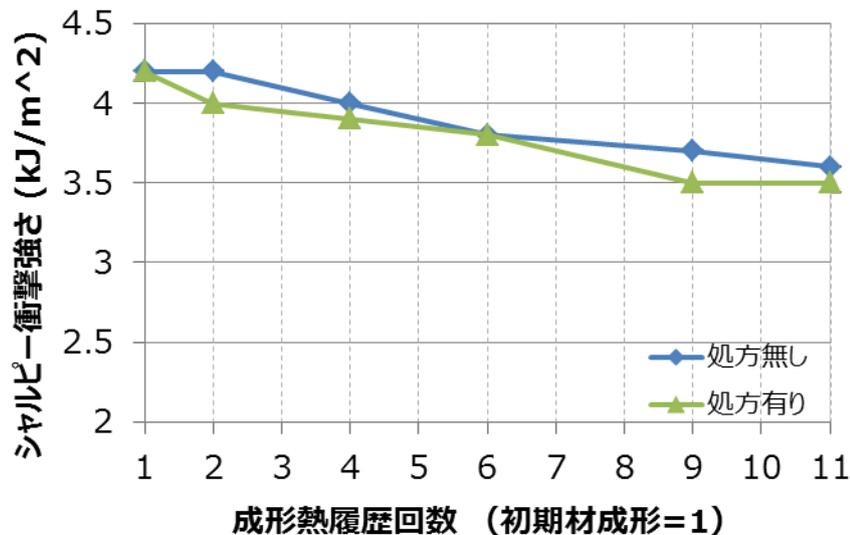


図4-4-3(62) 100%リグライト[®]での添加剤処方無し/有りでの成形熱履歴回数によるシャルピー衝撃強さの推移

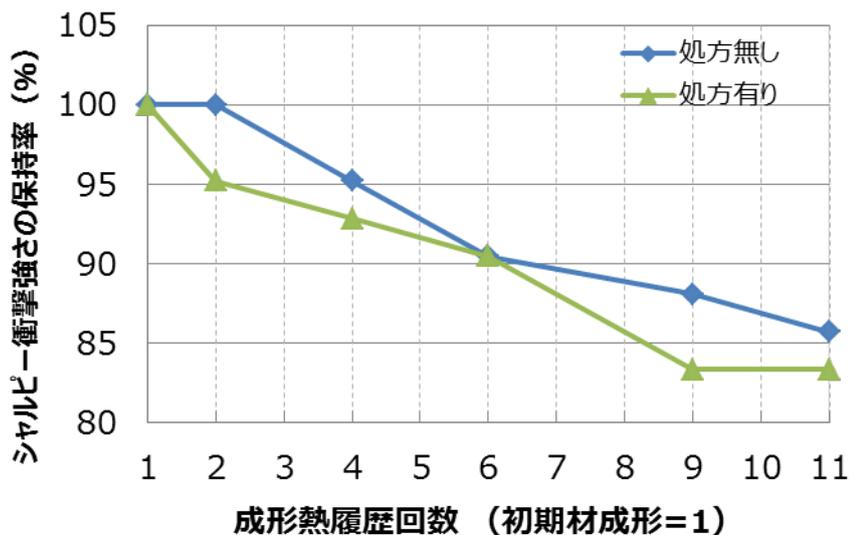


図4-4-3(63) 100%リグライト[®]での添加剤処方無し/有りでの成形熱履歴回数によるシャルピー衝撃強さの保持率の推移

(2-3-5) MFRの成形熱履歴回数による変化

図4-4-3(64)に、添加処方なしと添加処方ありでのMFRの熱履歴回数による変化の比較を示す。図4-4-3(65)に、それらの保持率の変化を示す。MFRの値は、添加剤処方有りのほうが、添加剤処方なしに比べ低い値となっている。CNF自体は高速混練による添加剤処方の方が、ファイバーの破碎・解砕により微細化しているため、複合樹脂としては流れ性がよくなりMFRは上昇すると考えられるが、(2-1-9)でも述べたように、ベースの樹脂自体は、分子鎖切断の度合いが少なく分子量が保たれてため、全体として、MFR値は大差ない結果になっていると考えられる。

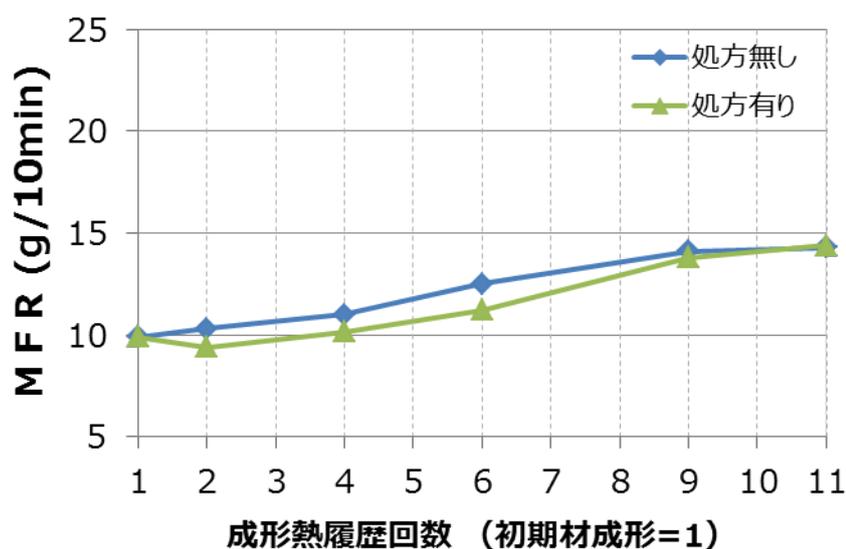


図4-4-3(64) 100%リグライト[®]での添加剤処方無し／有りでの成形熱履歴回数によるMFRの推移

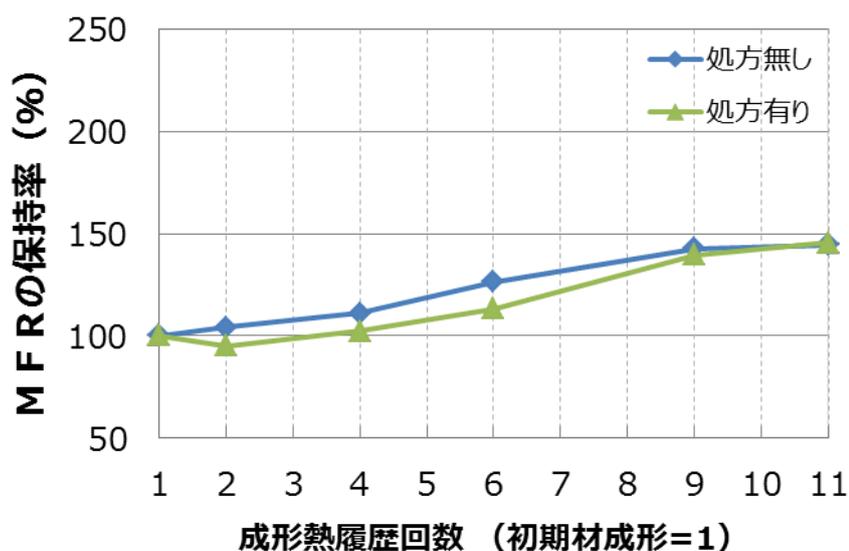


図4-4-3(65) 100%リグライントでの添加剤処方無し／有りでの成形熱履歴回数によるMFRの保持率の推移

(2-4) 結果考察

(2-4-1) 繰返し成形熱履歴回数とリグライント率(粉碎再生材比率)

リグライント材混合比率100%(リグライント100%)での繰返し成形による成形熱履歴による機械物性等の低下度合を検証し、引張・曲げ・衝撃特性については、繰返し再生5回(成形熱履歴6回)で、物性値は90%を保持できていることが確認できた。これらの結果を元に、初期投入材(新材)をリグライント材と混合して、リグライント比率を下げた場合の物性保持率の変化を算出した結果を図4-4-3(66)に示す。これにより、リグライント率75%において物性値は93%以上を保持できることがわかり、更にリグライント率50%の場合で物性値は97%以上を保持できることがわかる。成形熱履歴による熱酸化劣化の影響を抑えリサイクル性能を向上させることが可能である。

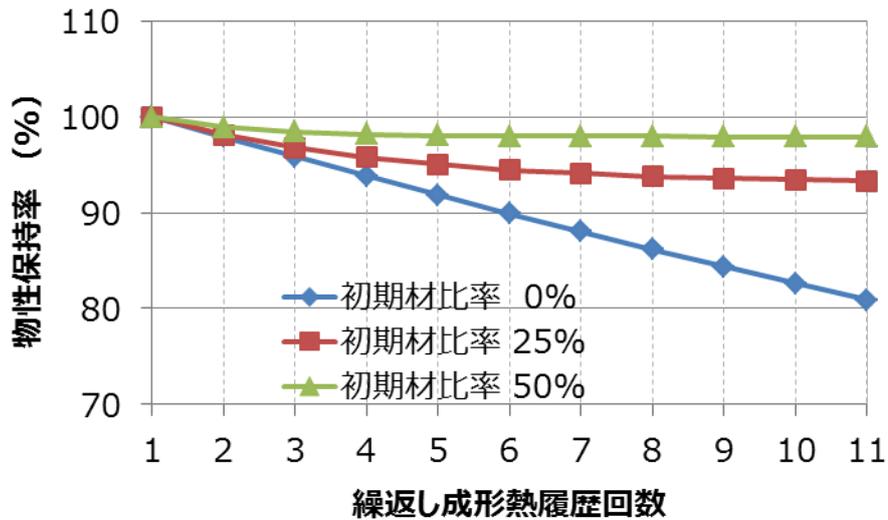


図4-4-3(66) 初期投入材混合比率の違いによる成形熱履歴回数毎の物性保持率の変化予測(リグラインド率100%=初期ケースを各種実験結果より想定し、初期材25%、50%のケースへ適用)

(2-4-2)耐熱加速試験(高温放置試験)

今回は、ニートレジン(ベースとなる樹脂)であるPP樹脂の耐熱加速試験として通常実施されている温度域(130℃、140℃、150℃)の高温側の150℃にて実施した。

結果としては、ベースとなる樹脂の劣化よりも、CNFの炭化や反応による揮発成分の逸脱等で、重量減少・硬化等により弾性率等の評価が困難であった。

図4-4-3(67)に高温放置時間と試験片の重量変化の関係を示す。

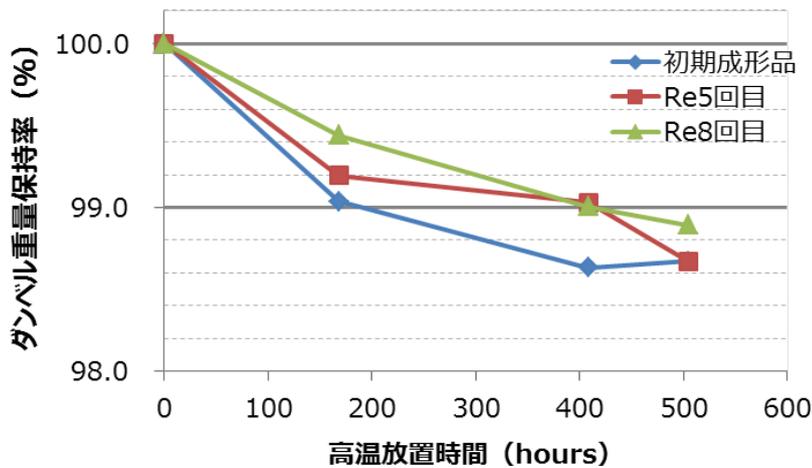


図4-4-3(67) 150℃高温放置時間とダンベル試験片の重量変化(保持率)

引張強さは(2-2)項に記載したとおり、21日(504時間)を経ても20%以下の低下に留まり半減まで到達せずに、CNFの劣化の進展の方が早く、正確な予測寿命を求まることはできなかった。セルロースの炭化劣化等も考慮し、全般的な150℃での寿命(半減期)を200~500時間と仮定すると、使用環境温度40℃での推定寿命は20年となる⁴⁾。

(2-4-3) 添加剤処方による効果検討

本取組では、リグラインド材比率100%の繰返し成形において、繰返し毎に、溶融ペレタイズ工法ではなく、乾式での高速ミキサーでの混練工法による添加剤・安定剤のリグラインド材(粉碎材)表面に固着させた後に、射出成形により添加剤処方の再生試験片を作製し、各種物性値を測定した。その結果、(2-3)項に示したように、総じて再生処方をしない繰返し成形時の方が、物性値は高い結果となった。これは、高速ミキサー混練時のCNFにとって、衝撃が大きく、CNFの破碎・解砕が過度に進んだためと考えられる。ベースとなる樹脂劣化の抑制は確認できたので、今後は添加剤を処方する最適な工法および、複合樹脂中のCNFの破碎・解砕を抑制する再生リサイクル工法・工程の検討が必要と思われる。

4-4-4. 結言

近赤外線分光方式の選別装置を用いて、CNF複合樹脂を含む混合樹脂からの単一素材回収が可能か、選別評価を実施した。

今回の近赤外分光方式の選別装置による選別評価では、PP、CNFPP、PSの混合樹脂にて実施し、素材ごとに選別回収が可能であり、平成29年度の目標であるCNF複合樹脂回収率60%以上、CNF複合樹脂回収品純度80%以上を達成した。

CNF15%含有複合PP樹脂における繰返し成形熱履歴によるマテリアルリサイクルの機械物性・物理物性面・衝撃特性面等でのリサイクル性能の検証を実施し、90%以上の保持率を有するリサイクルが可能であることがわかった。一方、複合樹脂内のCNFの成形時・粉碎時・混練時等の挙動の詳細な解明は十分できていないため、CNFの挙動と再生性能の関係を検証し、リサイクル性能を向上させる要素・工法を洗い出していく必要があると考えられる。

今後は、再生処方を適用する樹脂種の拡大と、更に劣化を抑制し、機能を向上させる付加価値向上のリサイクル再生処方等の検討検証実証をしていく必要があると考えられる。

【参考文献】

- 1) Panasonic Technical Journal Vol.62 No.2 Nov.2016 (P54-59)
- 2) 角尾龍彦、戸村善広、中根祐利：プラスチック 2014.10、30-34(2014)
- 3) 安永茂樹：プラスチック 11,82-87, 2012
- 4) 例えば、隅田憲武、福島容子：マテリアルライフ学会誌 Vol.15 No.3, 93-97(2003)

5. まとめ

本事業では、近年植物由来のカーボンニュートラルな材料として注目を集めているCNF複合樹脂が、国内市場規模が大きくCO2削減ポテンシャルが大きいと考えられる家電製品への適用可能性の検証を行った。具体的には、市場におけるCO2削減ポテンシャルを調査するとともに、家電製品として冷蔵庫と洗濯機の具体的な部品を選定して、実際に成形品を製作、実機に組み込んだ評価を行った。また、リサイクル性についても検証を行った。

その取組内容と結果を表5(1)に示す。

表5(1) 本事業の取組内容と結果

項目	取組内容	結果
1.CNF 展開効果検証・調査	<ul style="list-style-type: none"> ・CNF を国内家電製品に適用した場合のCO2 排出量削減効果試算 ・製品ライフサイクル視点でのCO2 排出削減効果試算 ・特許調査による技術面の動向調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼板、GF樹脂に対する材料から廃棄・リサイクルのCO2 排出量算出式を構築し、製品適用時の効果算定に活用 ・出願特許にはCNF 複合樹脂の適用方向性は明確になっていない
冷蔵庫部品への適用検証	<ul style="list-style-type: none"> ・センターピラー部品、クロスレール部品について成形試作品を作製し、単品評価、金属置き換えを含む実機組み込み評価を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・さらなる材料剛性の向上、製品側の適用設計の必要性はあるものの、成形品としては条件をクリアできており、適用の可能性あり
洗濯機部品への適用検証	<ul style="list-style-type: none"> ・脱水受けについて、GF樹脂の置き換え可能性を検証 ・バランスー部品について薄肉軽量化設計を行い成形試作品を製作し、単品評価、実機組み込み評価を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・さらなる材料剛性の向上と構造設計によりGF樹脂の置き換えは可能 ・バランスーの軽量化による乾燥時の消費電力削減の可能性はあるが、効果増のためには設計面の課題あり
リサイクル性の検証	<ul style="list-style-type: none"> ・近赤外線分光方式による単一素材回収の可能性を選別装置を用いて検証 ・繰返し成形履歴による材料再生のリサイクル性能を検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・CNF 複合樹脂の回収率 60%以上、回収品純度 80%以上を達成し選別可能であることを確認 ・マテリアルリサイクルの機械物性、物理物性、衝撃特性について 90%以上の保持率を有し再生可能であることを確認。

特に、冷蔵庫、洗濯機の部品検証における機能特性評価、CO2削減効果試算、適用課題について表5(2)にまとめる。CO2削減効果は当社製品への搭載を想定した試算である。

表5(2) 家電製品適用検証における評価結果(効果試算と課題)

		機能特性評価					CO2削減効果試算		可否	課題
		剛性軽量	成形性	着色性	断熱性	リサイクル性	項目	効果(万トン/年)		
冷蔵庫	センターピラー	△	○	○	○	○	使用時	▲0.02	可	反り量改善に向けた構造設計/材料剛性向上
	クロスレール	△	○	○	○	○	使用時	▲0.1	可	冷蔵庫変形抑制等の筐体設計/材料剛性向上
洗濯機	脱水受け	○	-	不要	×	○	リサイクル	▲0.7	可	高剛性に向けた構造設計/材料剛性向上
	バランスー	○	○	○	不要	○	使用時	▲0.005	可	長期耐久性

○:可、×:不可、△:課題あり、不要:適用に当たって不要、-:未評価

以上のように、本事業においてCNF複合樹脂の適用可能性と課題が明確になった。今後は課題解決に向けて検討を行っていく。

リサイクル適性の表示:印刷用の紙にリサイクルできます

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]のみを用いて作製しています。