

<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)が着目され、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。事業期間は平成30年3月までの約1年3ヶ月間を計画しており、本年度は家電製品に適用するための調査と冷蔵庫部品を対象に置換えの部品設計と金型設計、製作を行った。また、リサイクル性検証も開始した。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

	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)ー2 家電適用に係る特許調査

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、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3部品について具体的に成形試作を行い性能の確認を行う。

・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。

・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する。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。

冷蔵庫のセンターピラーについては平成28年度業務として具体的な形状を定めて成形金型を製作するところまで行う。

(2)－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試作する形状を決定する。

・熱変形評価

庫内と庫外の温度差によるセンターピラーの反りをスペック内に収める。

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評価する。

・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する。

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倍にする形状を試作する。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する。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する。

②クロスレールの解析設計

まずは現行の鋼板に対して同等の剛性になる形状を導出するため、リブ追加と全体の板厚増を形状の剛性を構造解析により評価した。

その結果、剛性不足もしくは目標を達成していても空間をほぼ埋めてしまうような非現実的な解となった。そのため、クロスレールに関しては冷蔵庫筐体全体で変形を抑制する構造を検討することで CNF 適用の可能性を探ることとする。

(2)－2 冷蔵庫への適用部品向け金型設計・製作

解析設計によって導出された冷蔵庫センターピラー部品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、ヒケの評価を行ってゲートの数とレイアウト、充填時間、金型温度、保圧制御などの成形条件を決定した。

今後はこの金型を用いてセンターピラー部品を成形し、成形性(出来映え)、材料強度、着色性などを評価する。

(2)－3 洗濯機への適用部品

洗濯機の脱水受けについては、GFPP を CNF に置き換えた場合に同等の剛性になる構造を設計するが、まずは評価する負荷モードでの変形状態、CNF に変更した際の変化を把握するため、現状の形状を用いて材料を変更だけの解析を行った。

CNF は GFPP よりも弾性率が劣るため同形状では必ず悪化するため、

荷重は実際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解析を行った。

その結果、脱水受けの角 R 部の一部が最も弱くなっていることが分かった。今後はその部分を含めて歪みの大きくなっている部分を中心に補強を検討し、現行 GFPP 同等の剛性となる CNF 製の形状を導出する。

(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。

(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。

- ・繊維強化観点でのリサイクル性能の検証
- ・ベース樹脂のリサイクル劣化度合いの予測

その結果、CNF 複合樹脂は GF 強化樹脂に対して強度面など良好なりサイクル性能を示したが、繰返し成形熱履歴により含有添加剤量や平均分子量に低下が見られた。そのため、さまざま再生処方が必要であり、今後検討していく。

<Summary>

Cellulose nanofiber (CNF) has been attracting a great deal of attention 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 the performance of CNF-reinforced material incorporated in actual products. The project will continue for about one year and three months to end in March 2018. This year, we have conducted research for applying CNF to household appliances and designed /manufactured CNF-based parts to replace existing parts of refrigerators and dies for molding those parts. We also started verifying the recyclability of CNF-reinforced material. The results of these research and verification activities are described 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 have also conducted research on patents in order to grasp the current technical trend.

(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

	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. In the research, we have classified patent technologies according to categories of rigidity, moldability, 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 improvement in rigidity (reduction in weight) account for approximately half of all patent cases and those related to enhanced recyclability and moldability 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 order to verify the application of CNF to household appliance parts, we will create prototypes of the following three parts made of CNF and evaluate their performance in this project.

- Center pillar (refrigerator part)

A center pillar is a part that fills a gap of the bi-parting door of a refrigerator. It has a built-in heater that prevents dewing on the exterior of the refrigerator. 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.

- 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 are considering replacing the steel cross rail with a CNF-based rail in order to reduce heat conduction by 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.

As part of the FY2016 business plan, the CNF-based center pillar of the refrigerator will be designed to give it a specific shape and manufacture a molding die as well.

(2)-1 Designing parts applied to refrigerators

1) Analyzing/designing the center pillar

To apply CNF to the center pillar, structural analyses and heat transfer analyses including the following evaluations will be carried out to determine the shape of a prototype.

- Evaluating thermal deformation

Warping of the center pillar caused by a temperature difference between the inside and outside of the refrigerator should be kept within the refrigerator 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. In this

process, the heater power output and the amount of heat inflow to the refrigerator are evaluated.

- 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 is calculated to evaluate the rigidity of the center pillar.

Based on the results of the above evaluations, a prototype is created so that the case of the center pillar, which is composed of two parts and is closer to the refrigerator interior, is replaced with a CNF-based case and the thickness of the case is 1.5 times. This prototype is made into a shape attachable to an actual refrigerator so that the prototype incorporated therein is verified in terms of structure and power consumption (or heat inflow). The prototype is also given a structure in which inward ribs can be formed to enhance the rigidity of the prototyped center pillar.

2) Analyzing/designing the cross rail

To find a cross rail shape with equivalent rigidity to the current steel cross rail, the rigidity of a cross rail with additional ribs and an overall greater thickness has been evaluated by a structural analysis.

The evaluation has found that the rigidity of the cross rail is insufficient and that when sufficient rigidity is achieved, the reinforcing ribs and increased thickness leave almost no space, which is not a realistic and acceptable result. We have therefore decided that we will discuss a cross rail structure whose deformation is suppressed by the overall structure of the refrigerator casing and seek for the possibility of application of CNF to such a cross rail.

(2)-2 Designing/manufacturing a die for molding the applied parts of the refrigerator

Through a resin fluidity analysis, we have designed a die for molding the center pillar derived from the above analyzing/designing and manufactured a molding die for the verification process.

Specifically, we have evaluated an in-die filling pattern, pressure distribution, weld line, and sink marks and determined the molding conditions, such as the number and layout of gates, filling time, die temperature, and pressure control.

The parts of center pillar will be molded, using this die, and evaluated to identify its moldability (craftsmanship), strength, and coloring property, etc.

(2)-3 The applied parts of washing machine

The spin-drying support of the washing machine will be designed as a structure made of CNF that replaces GFPP and retains the same rigidity as that of GFPP. To check the state of deformation of the spin-drying support subjected to a load and a change in the spin-drying support resulting from replacement of GFPP with CNF, we have initially analyzed the spin-drying support whose material is replaced with CNF but whose shape is left as is. CNF has a lower elasticity than GFPP and therefore readily deforms if the whole support shape remains the same.

Bearing this in mind, to create a load condition close to an actual case, we have carried out the analysis with a shaft-tilting moment applied to the bearing that bears the rotating shaft of the spin-drying support.

The analysis has demonstrated that a part of the rounded corner of the spin-drying support is the weakest. We will therefore discuss a reinforcement measure focused on parts with greater distortion including the above part and design a CNF-based support structure as rigid as the current GFPP-based one.

(3) Verifying recyclability

Recyclability will be achieved through the following two processes.

- Selection: A single resin is selected out of various types of resins.
- Recovery: The physical properties of the selected resin are recovered to recycle the resin.

(3)-1 Verifying resin selection technology

CNF composite resins are classified into the following two purposes.

(Purpose 1) To sort out the base substances of CNF composite resins.

(Purpose 2) To sort out resins containing/not containing CNF.

With regard to purposes 1 and 2, we have evaluated the effectiveness of the following three detection technologies.

(Detection technology 1) Water specific gravity method

(Detection technology 2) Medium-range infrared spectroscopy

(Detection technology 3) Near-infrared spectroscopy

The evaluation has revealed that near-infrared spectroscopy allows the identification of the types of base substances (PP and ABS) and the presence/absence of CNF content of 10% or higher.

(3)-2 Verifying recycling technologies

We have verified the recyclability of CNF composite resins from the following viewpoints.

- Recycling performance in terms of reinforced fibers

- Estimating the degree of degradation of base resins through the recycling process

The verification has shown that the CNF composite resin offers a superior recycling performance to that of the GF-reinforced resin in terms of strength, etc., but contains less additives and has a decreased average molecular weight due to repeated exposure to molding heat. We therefore need to discuss and come up with various recycling measures in the future.

目次

1. 背景と目的	14
2. 取り組み項目と目標	15
3. 取り組み計画	17
4. 具体的取り組み	
4-1. CNF展開効果検証・調査	18
4-1-1. 緒言	
4-1-2. アプローチ	
4-1-3. 取り組み結果	
4-1-4. 結言	
4-2. 家電部品への適用検証	29
4-2-1. 緒言	
4-2-2. アプローチ	
4-2-3. 取り組み結果	
4-2-4. 結言	
4-3. リサイクル性の検証	65
4-3-1. 緒言	
4-3-2. アプローチ	
4-3-3. 取り組み結果	
4-3-4. 結言	
5. 来年度の取り組み	99

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）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み込み時の性能評価を実施して見極めを行う。

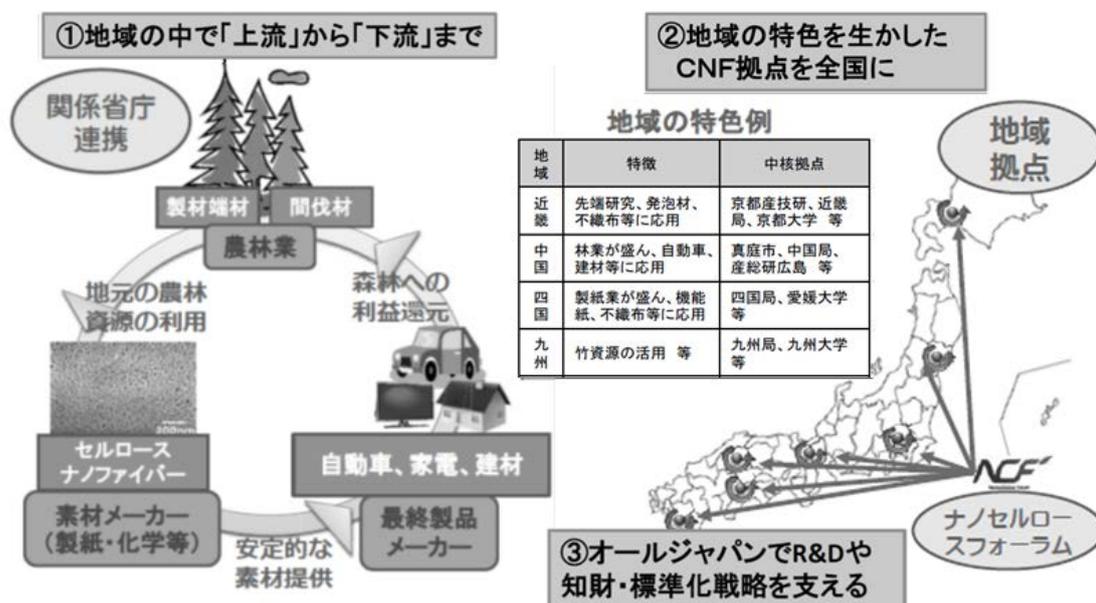


図1-1 セルロースナノファイバーに関する業界の動き

（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. 取り組み項目と目標

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。

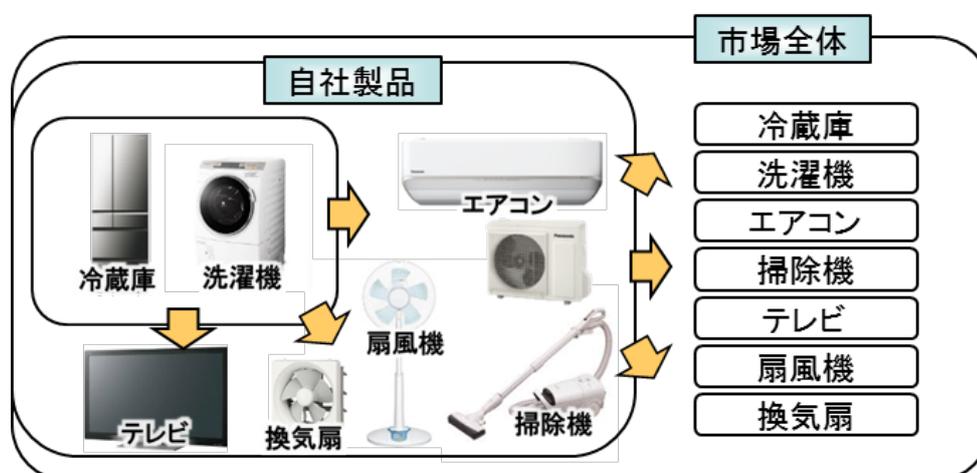


図2-1 自社製品および市場全体への適用可能性とその効果を予測する展開イメージ

(2)家電部品への適用検証

本取り組みでは、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。

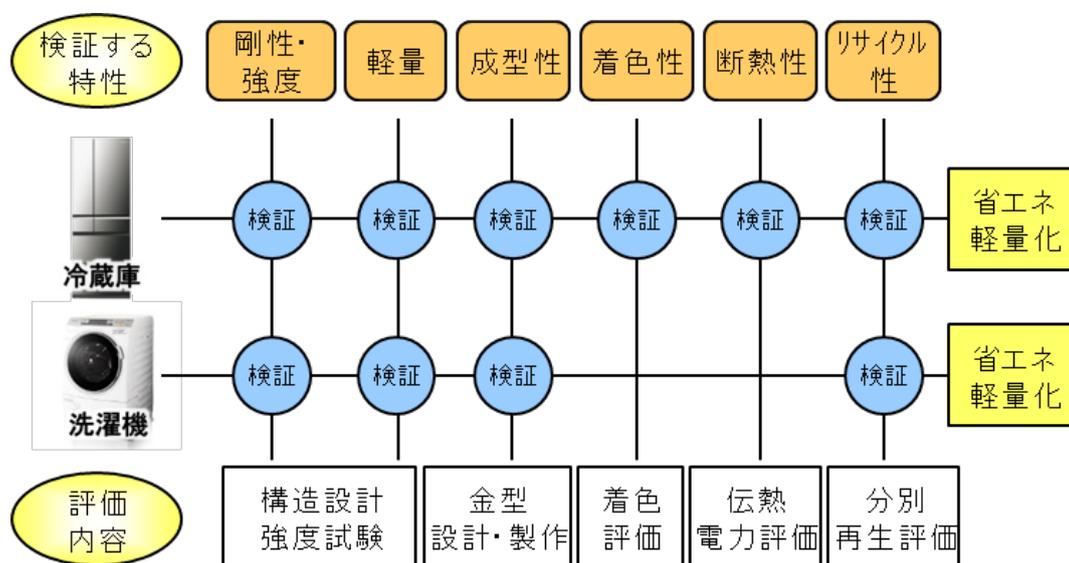


図2-2 CNF適用検証で検証する特性と評価内容

(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. 具体的取り組み

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. 取り組み結果

(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

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、シュレッター(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、シュレッター処理され、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。

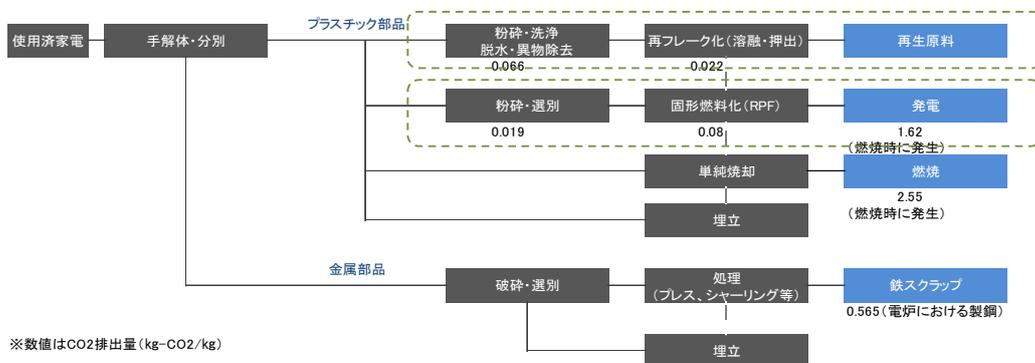


図4-1(1) 廃棄・リサイクルのマテリアルフロー

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。

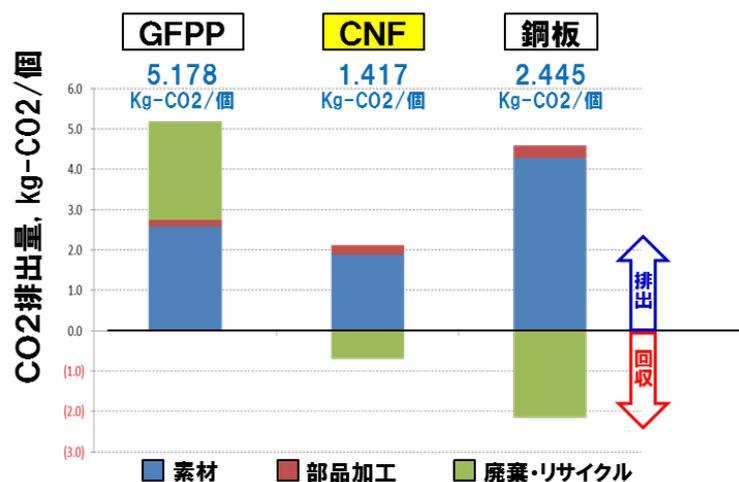


図 4-1(2) 素材、部品加工、廃棄・リサイクル全体のCO2排出量

(2) 特許調査

・マクロ分析

全体像および、フォーカスする案件の把握をすべくマクロ分析を実施した。

検索にあたっての主なキーワードは、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を選択した結果、1098件の特許公報が抽出された。

抽出された特許公報についての出願権利者件数ランキング上位を図4-1(3)に、出願件数の推移を図4-1(4)に示す。

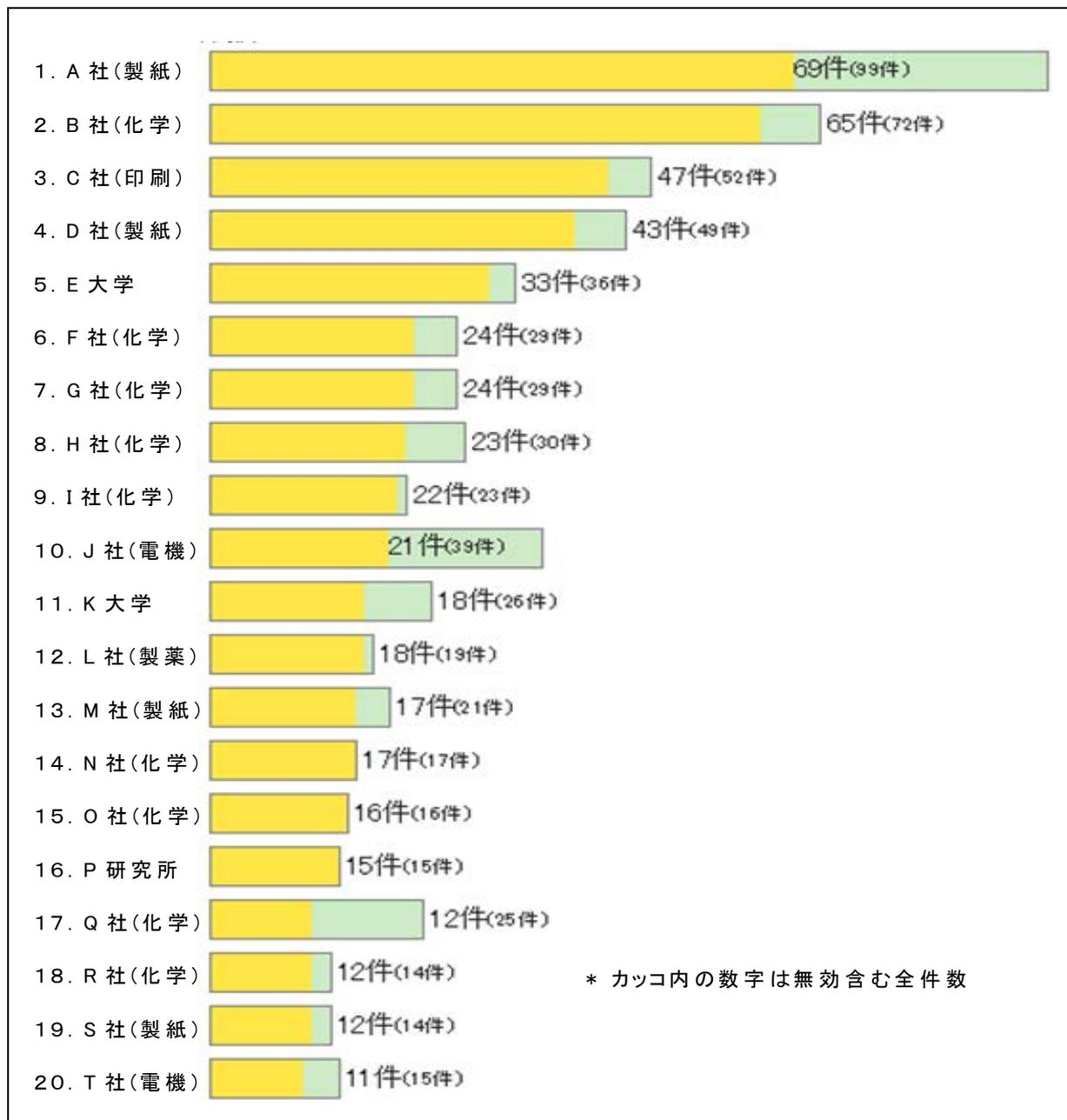


図4-1(3) CNF関連特許出願権利者件数ランキング上位

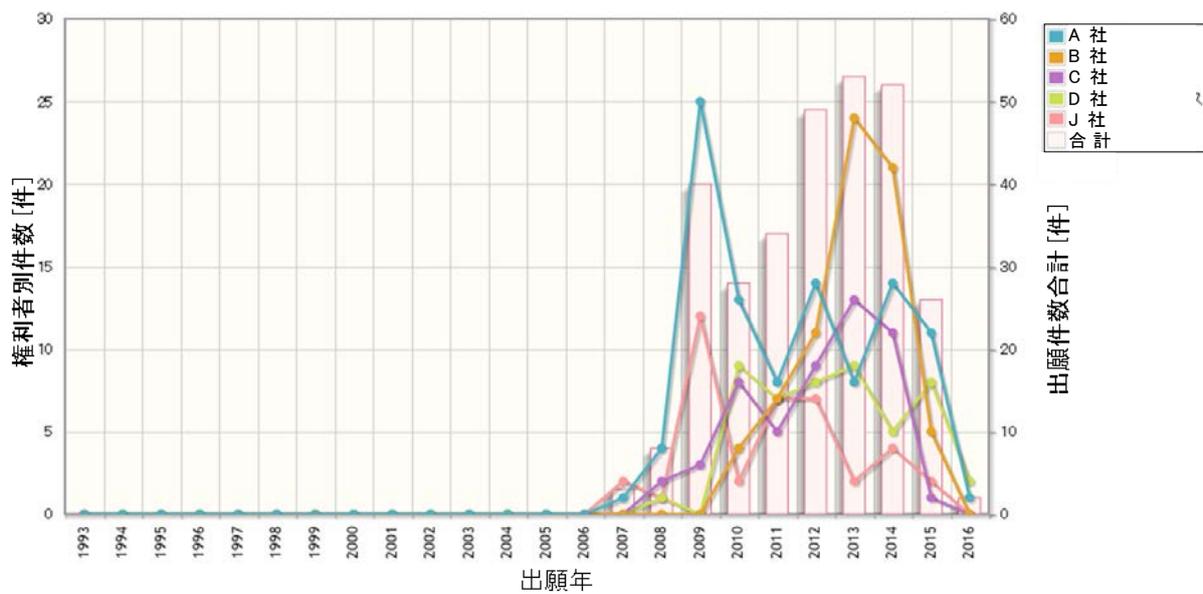


図4-1(4) 出願件数の推移

図4-1(3)、図4-1(4)より、CNF関連特許出願上位には製紙メーカー、化学メーカー、大学が入っており、2007年から出願数が急増している。このことから、CNFに関する開発がここ10年で盛んになってきていることが分かる。

次に、これらの特許公報についてCNFの製品分類をしたものを図4-1(5)に示す。

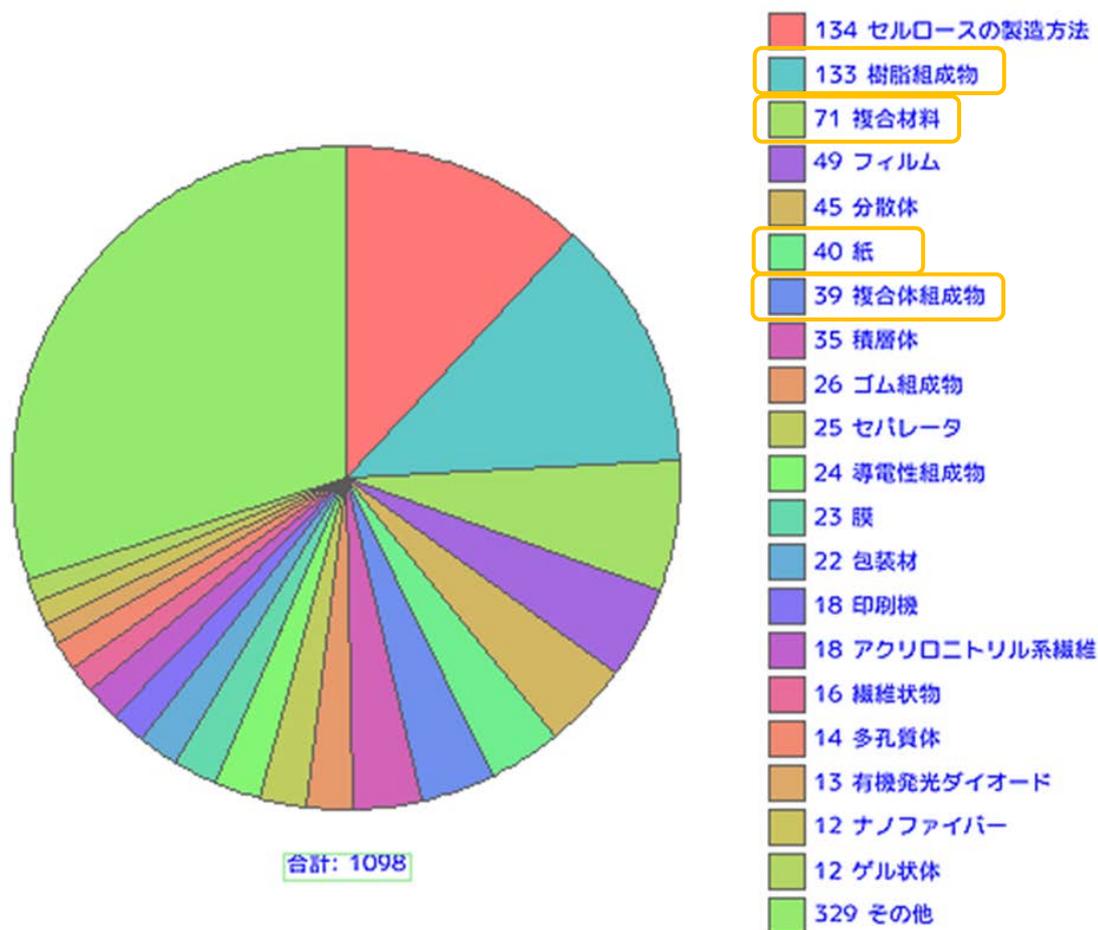


図4-1(5) CNF製品分類

図4-1(5)より、複合樹脂や複合材料に関する公報が数多く存在することが分かる。
(凡例にて枠で囲んだ項目)

・詳細調査

マクロ分析によって、CNF複合樹脂に関する特許公報が数多く存在することを得た結果を基に、再度詳細に検索式を作成し、検索を行い1502件の特許公報を抽出した。その後、特定の家電製品や特定の位置への用途に関する内容に着目し選別を行った。

まず、抽出された1502件の特許公報について、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を”○”、家電用途以外のもの、構造体(骨格)として使用されないものについては”△”、それ以外を”×”として選別を行った。その結果を、表4-1(4)および、図4-1(6)に示す。

表4-1(4) 抽出特許公報の選別結果

選別	件数	比率
○	110	7.3%
△	84	5.6%
×	1308	87.1%
合計	1502	100%

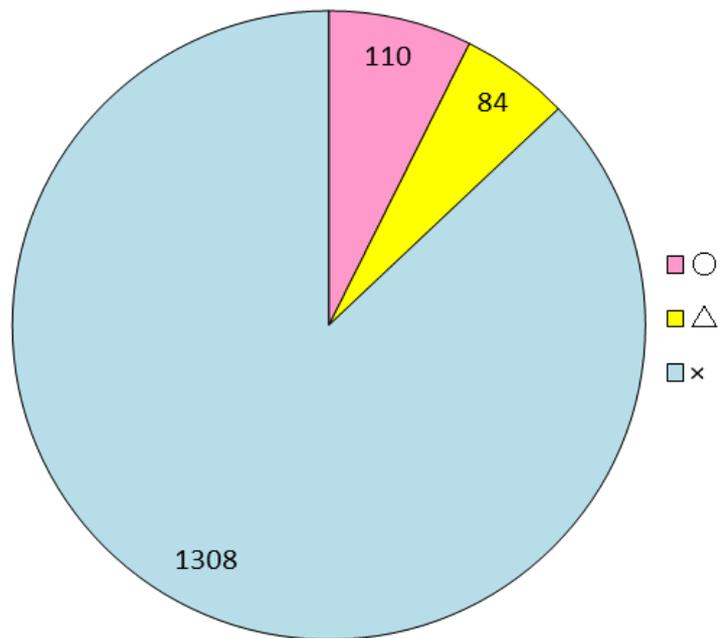


図4-1(6) 抽出特許公報の選別結果グラフ

表4-1(4)および、図4-1(6)より、選別により詳細”○”と”△”はそれぞれ110件、84件であり、合わせて194件であった。

次にこの194件の特許公報について、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(5)および、図4-1(7)に、用途について分類を行った結果を表4-1(6)および、図4-1(8)に示す。

表 4-1(5) 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%

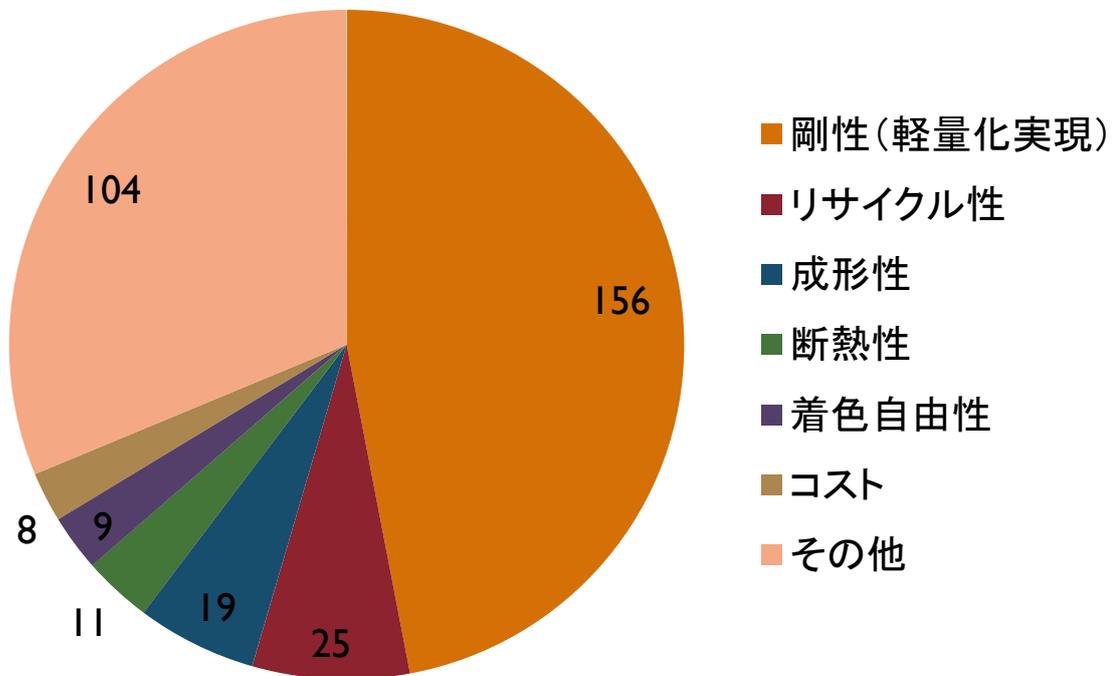


図 4-1(7) 機能分類結果グラフ

表4-1(6) 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%

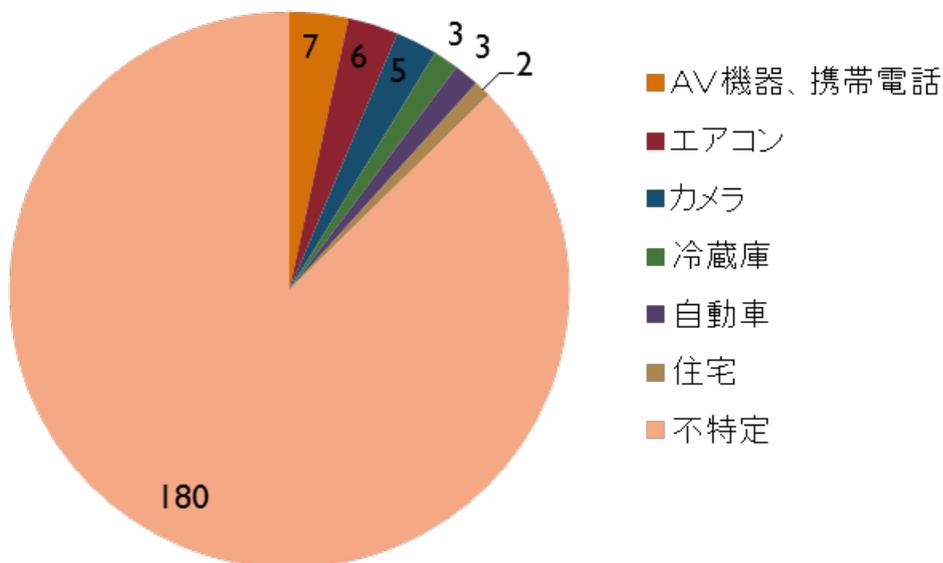


図4-1(8) 用途分類結果グラフ

表4-1(5)および、図4-1(7)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(6)および、図4-1(8)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

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(9)に示す。

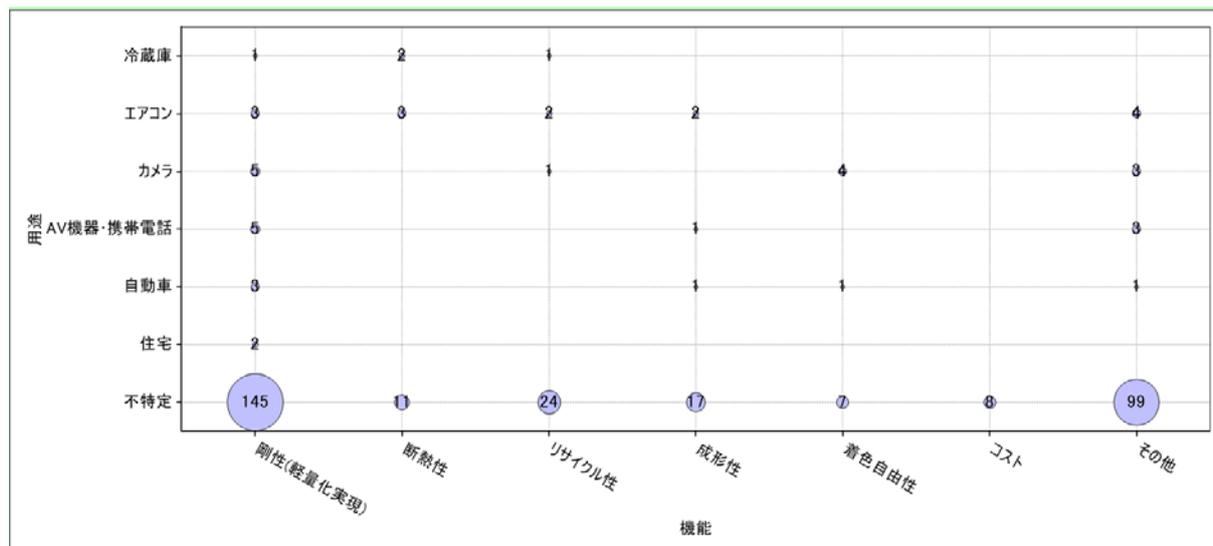


図4-1(9) 機能と用途のマトリクスマップ

図4-1(9)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. 家電部品への適用検証

4-2-1. 緒言

セルロースナノファイバー(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、それぞれ検討を行なった。

(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))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。

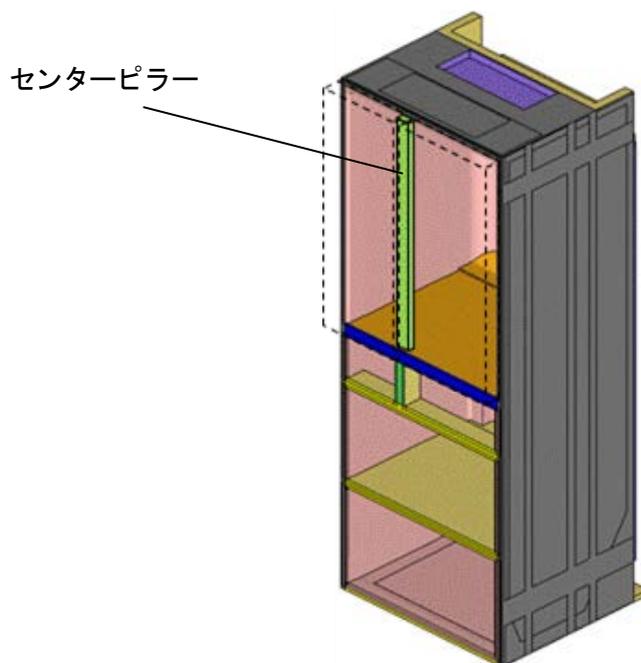


図4-2(1) センターピラーの位置

図4-2(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。

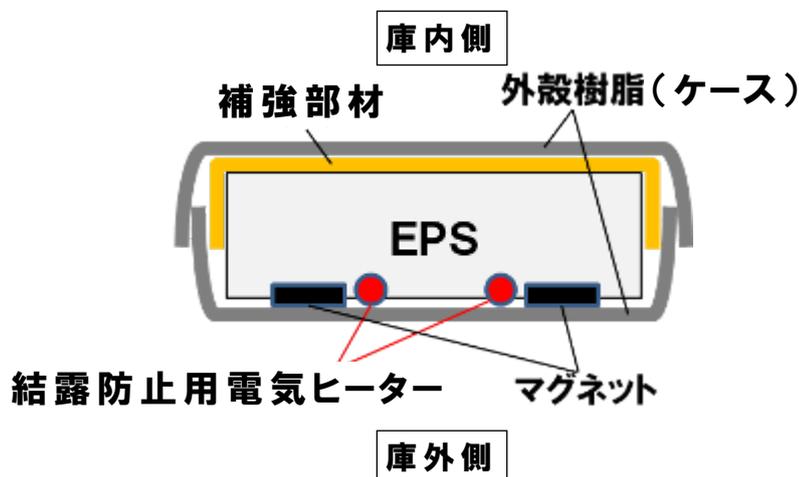


図4-2(2) センターピラーの断面模式図

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含有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の設計と製作を行なった。

(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(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、現行の鉄板製のクロスレールと同等以上の強度を確保できる断面形状や板厚の検討を構造解析により行なった。

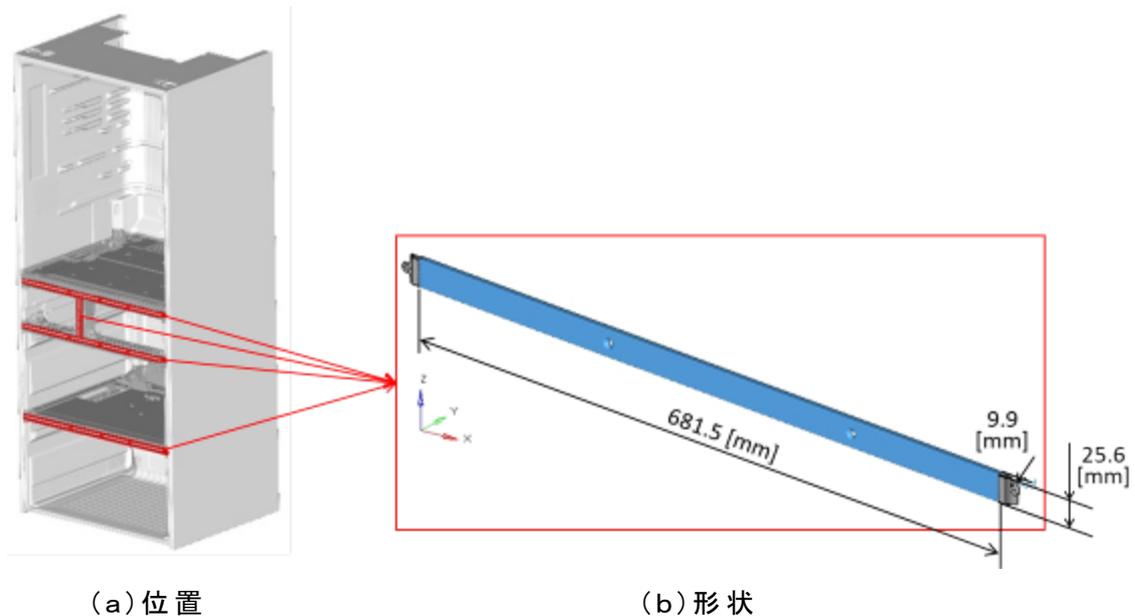


図4-2(3) クロスレールの位置と形状

4-2-2. アプローチ

(1) 解析によるセンターピラーの構造検討

本検討では、図4-2(4)に示した現行のセンターピラーの各構造に対し、

- 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、評価を行なった。評価を行なった項目は下記の3点である。

- ・熱変形量(外気側: -5°C 、 $+30^{\circ}\text{C}$)
(空調していない屋内の温度が夏の場合と、冬の場合の2条件を想定)
- ・荷重時の曲げ変形量
- ・伝熱性(二次元断面での解析)

(2) センターピラーの構造変更

- 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)ー以下「CNF15」と略記する)に変更し、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なった。

- 強度向上手段としては、2種類の方法とその組合せ、すなわち、
- 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）

という各場合について解析した。図4-2(4)に解析を行なった構造の簡易模式図を示す。

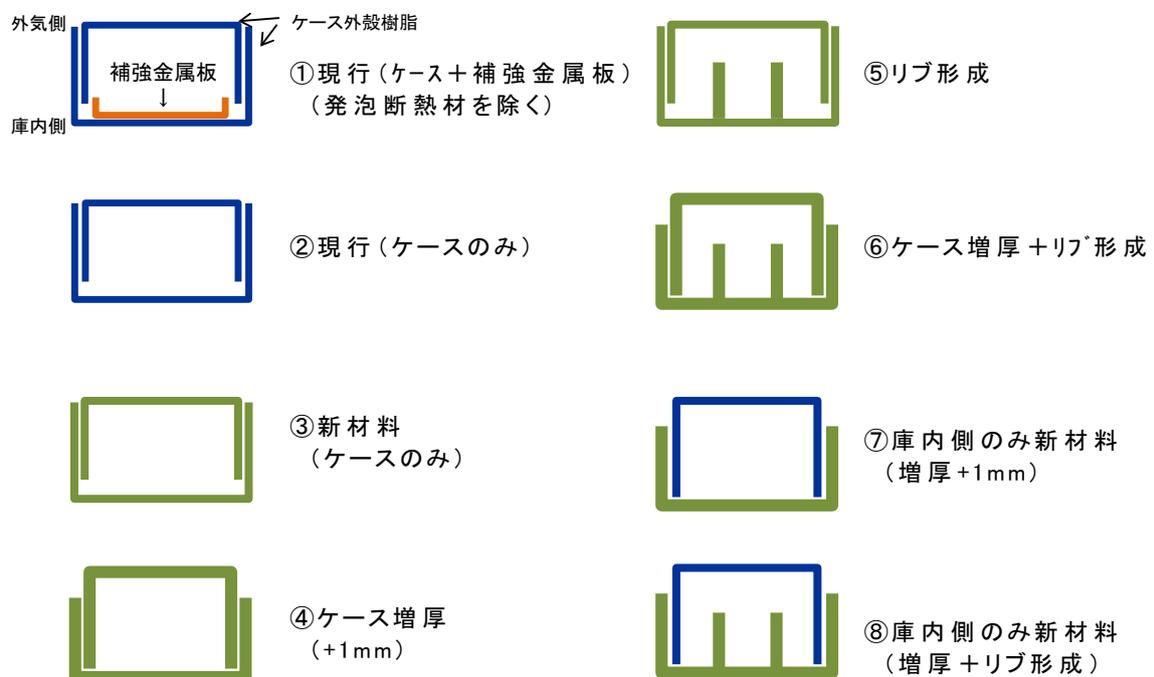


図4-2(4) 解析を行なった構造の簡易模式図

(3) 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°C 、外気側の温度を -5°C および 30°C 、初期温度を 20°C 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(5)における青色部分のうち、図4-2(6)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)。

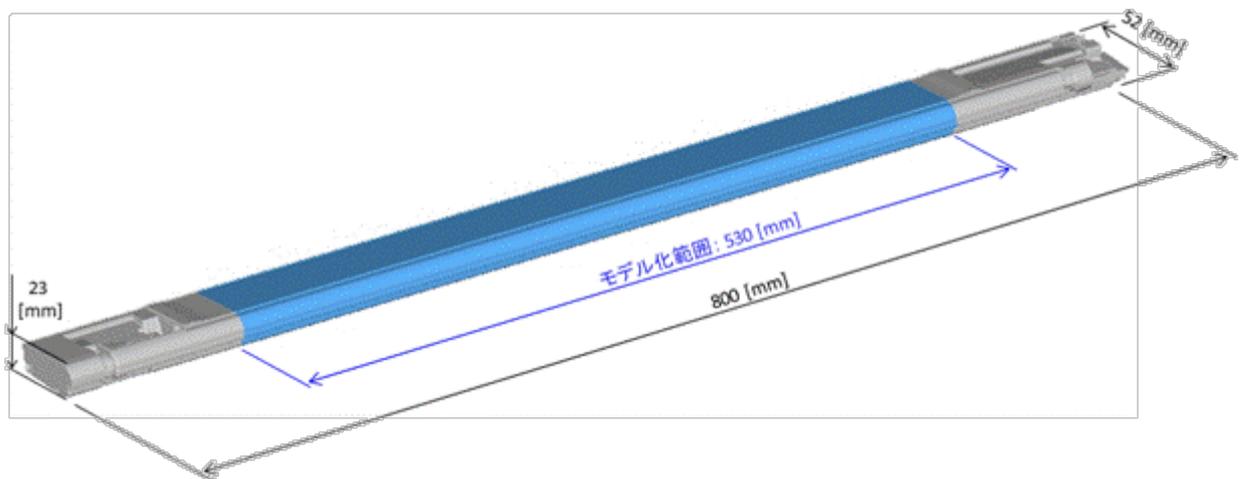


図4-2(5) 熱変形解析における温度負荷領域

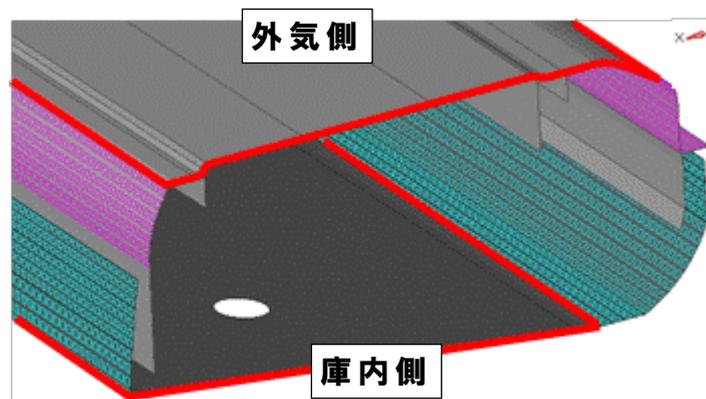


図4-2(6) 熱変形解析における温度付加領域面

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(7)の側面(図の水色、紫色の表面)に対し熱伝達係数を $10 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ として解析を行ない、比較した。解析に使用した物性値を表4-2(1)に示す。

表4-2(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

(4) 取組み2: センターピラーの機械的剛性の評価

機械的な剛性を評価するために荷重変形量の解析を行ない、図4-2(7)に示す荷重位置に対し、40Nの荷重を付加した場合の変形量を求めた。また、引張・圧縮試験機を用いて荷重と歪み変位の相関を実測して、解析値と比較し、これらの差を把握した。この際、支点間距離はこの測定機における最大値である270mmとした。解析において支点間の距離を270mmとした理由は、この実測値と比較するためである。荷重方向は、上にする面を庫内側の面にする場合と、外気側の面にする場合の両方について解析を行なった。

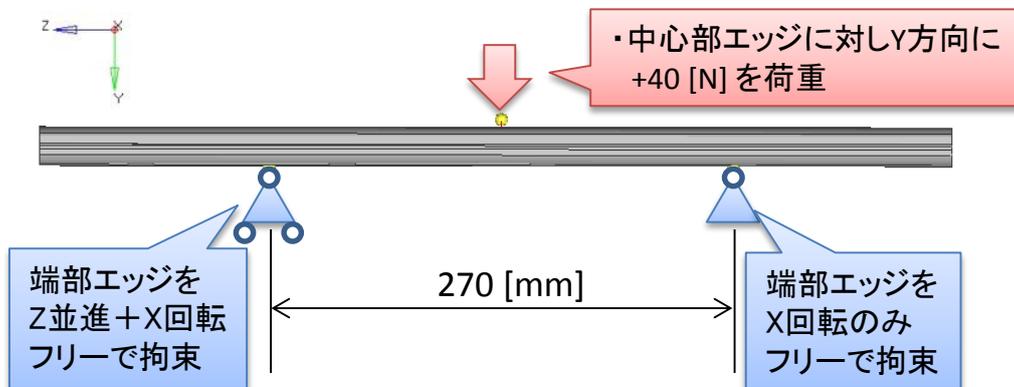


図4-2(7) 荷重変形解析の条件設定

また、ケースを嵌め合わさず庫内側、外気側のそれぞれ単体についての荷重変形量を解析により求めた。条件は片側の端を完全拘束し、他端に荷重1Nを加えた。(図4-2(8)測定の様式図におけるY方向)

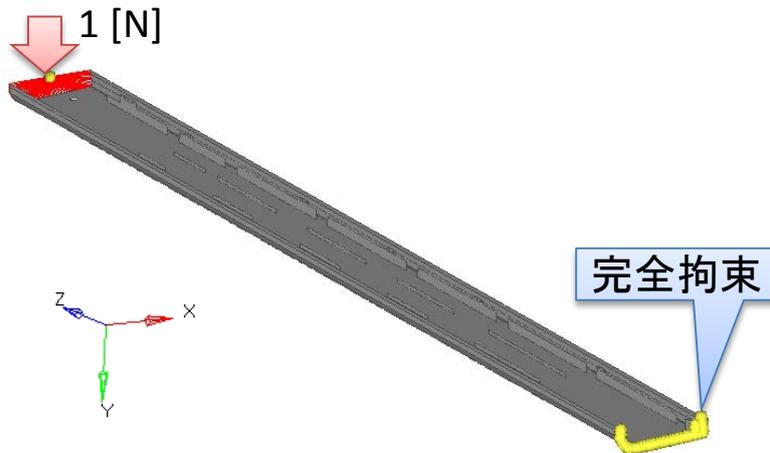


図4-2(8) ケース片側ずつの荷重変形解析の模式図

(5) 取組み3: 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(9)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。

解析条件は、実際のヒーター制御に類似させ、外側の壁表面(図4-2(9)のSF-OUT)の表面温度の平均が28℃になうように設定した。表4-2(1)に記載されていない材料の熱伝導率は、マグネット6.5 W/mK、発泡ポリスチレン0.04W/mKとした。

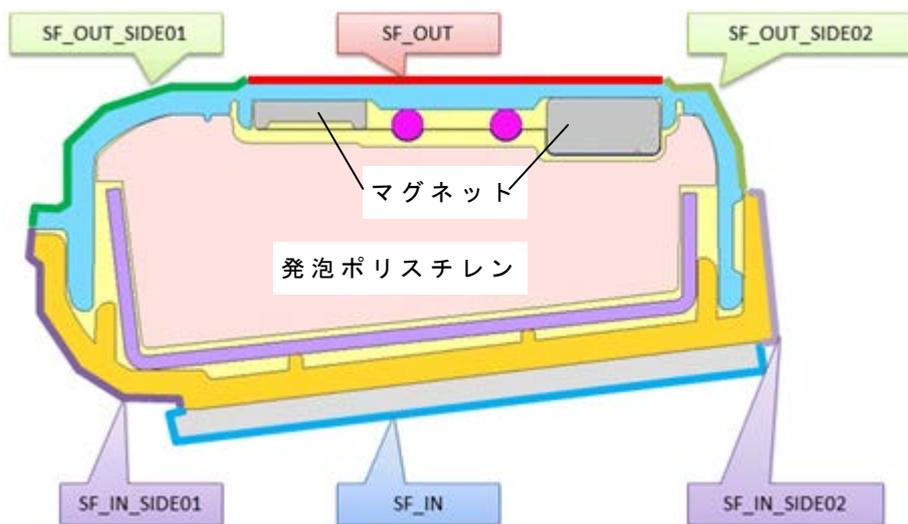


図4-2(9) 断面伝熱解析における定量化領域の分割図

(6) 取組み4: センターピラーの金型設計および製作

取組み(1)～(3)で設計された冷蔵庫フレンチドア部・センターピラーの外殻樹脂部材のうち庫内側の部材(以下「トリムB」と記載する)について、金型の設計および製作を行なう。金型設計において、ナチュラルPP(ポリプロピレン)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、金型構造を検討した。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した。これにより金型の詳細仕様を決定し、金型製作を行なった。

(7) 取組み5: クロスレールの構造解析による構造検討

図4-2(10)に本検証を行な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)(b)に示した形状で構造解析を行なった。

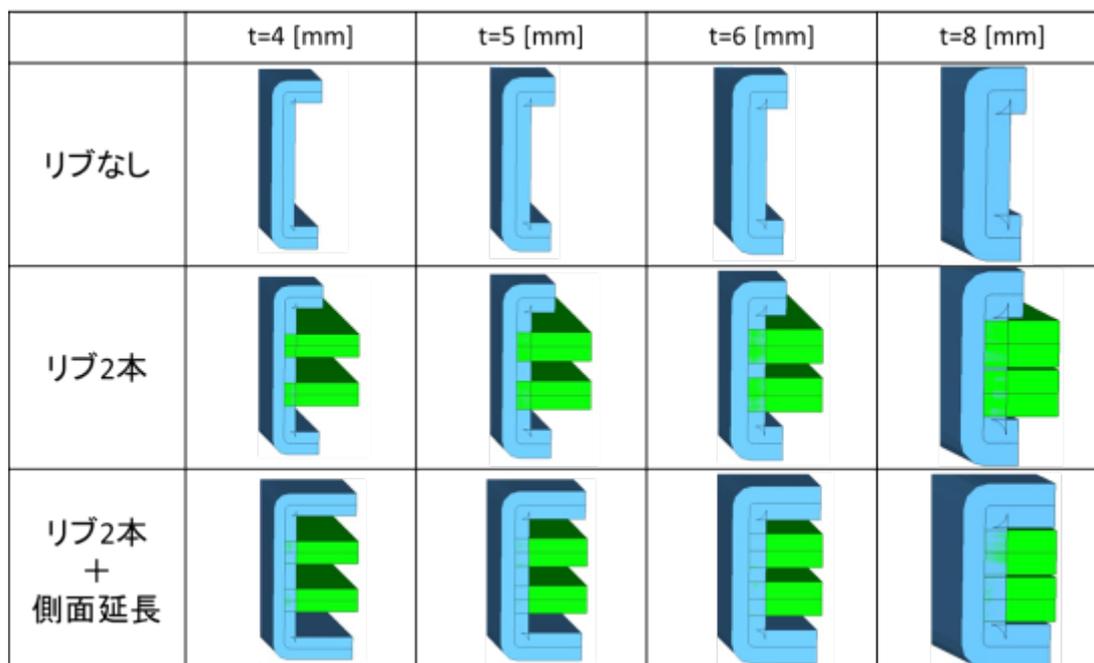


図4-2(10) 構造解析を行なった12種類の断面形状

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(11)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。

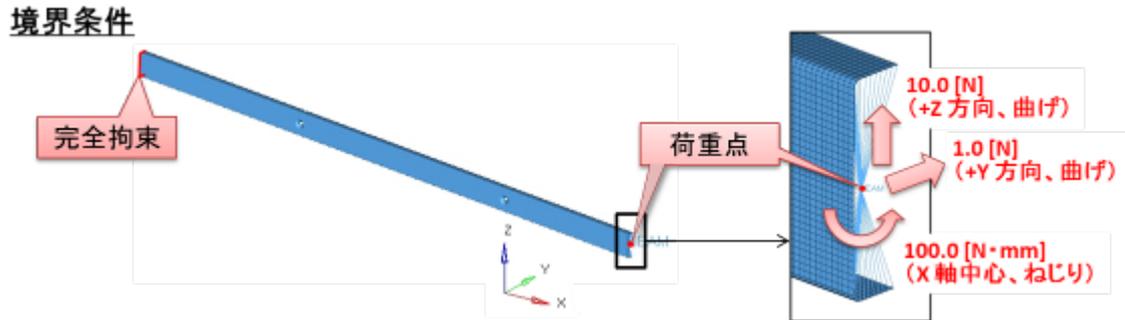


図4-2(11) クロスレールに加える荷重点

4-2-3. 取り組み結果

(1) 取組み1: センターピラーの熱変形量の解析

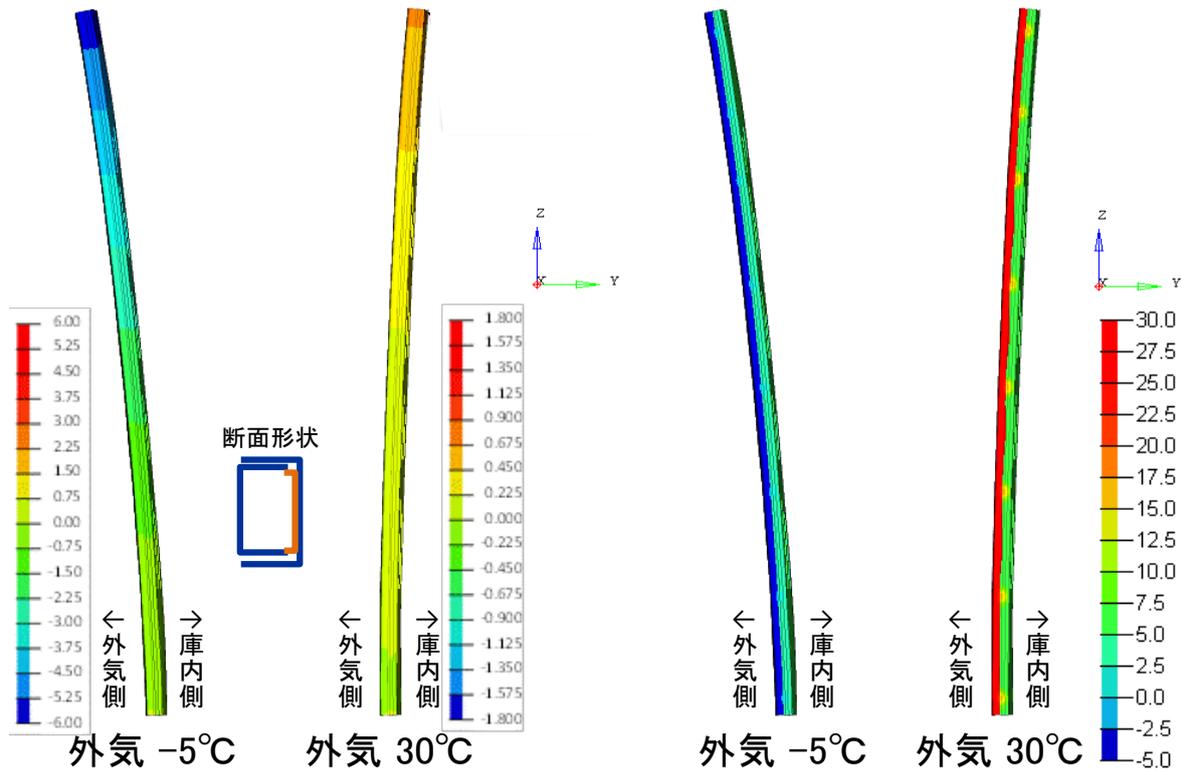
表4-2(2)に、外気側の温度を30℃および-5℃とした場合の各構造における変位(熱変形)の一覧を示す。

表4-2(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(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。

図4-2(12)~(19)には各構造における(a)変位と、(b)温度分布のコンター図を示す。コンター図からはどの条件も特異的な変形を生じている場所が無いことが確認できる。

表4-2(2) 各構造における熱変形量の一覧

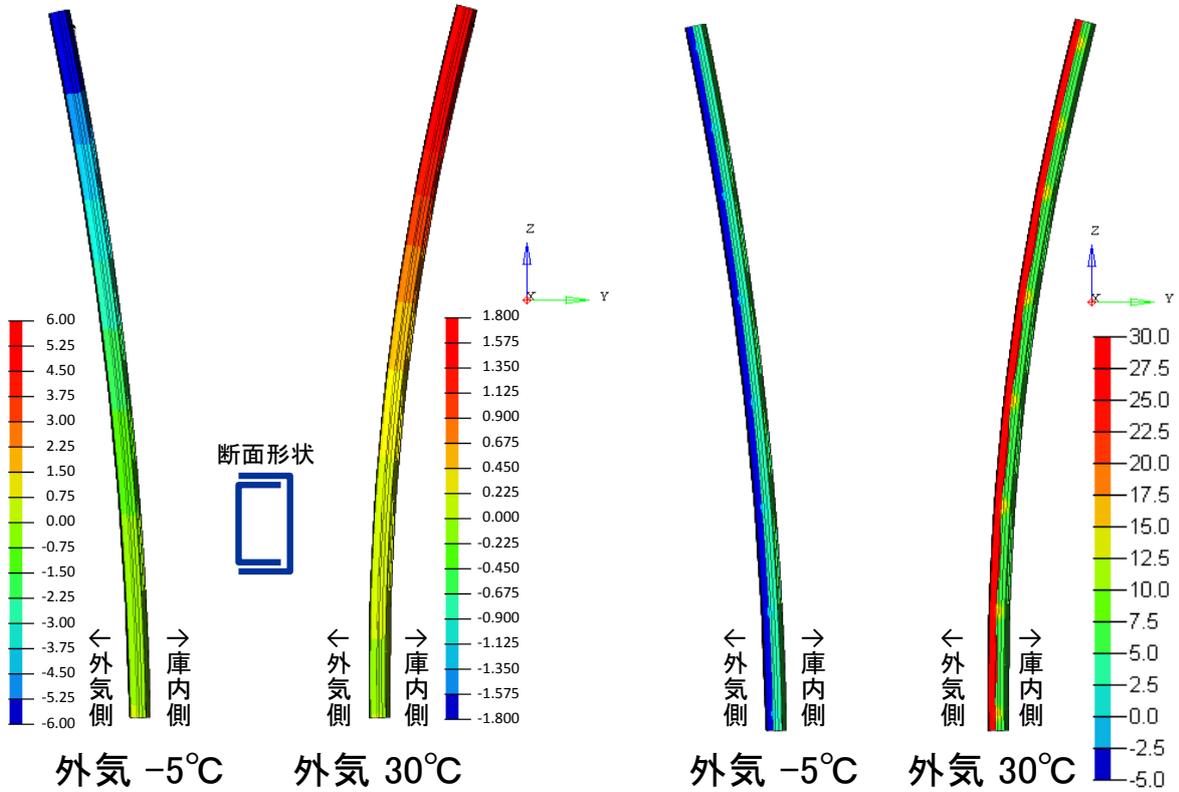
	構造	外気温-5℃		外気温30℃		備考
		変形量(基準比)	判定	変形量(基準比)	判定	
現行 (PS)	①ケース +金属板 	0.70		0.50		現状
	②ケースのみ 	0.57○	○	2.14×	○	
新材料 (PP+CNF15%)	③ケースのみ 	0.28○	○	1.06○	○	線膨張係数の効果
	④ケース増厚 +1.0mm 	0.38○	○	1.20○	○	
	⑤リブ2本 t=2.0, L=13.0mm (板厚変更無し) 	0.30○	○	1.00○	○	
	⑥ケース増厚 +リブ2本 	0.40○	○	1.15○	○	
庫内側のみ 新材料 (PP+CNF15%)	⑦ケース増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



(a) 変位

(b) 温度分布

図4-2(12) 熱変形解析結果 ①現行構造



(a) 変位

(b) 温度分布

図4-2(13) 熱変形解析結果 ②現行構造(ケースのみ)

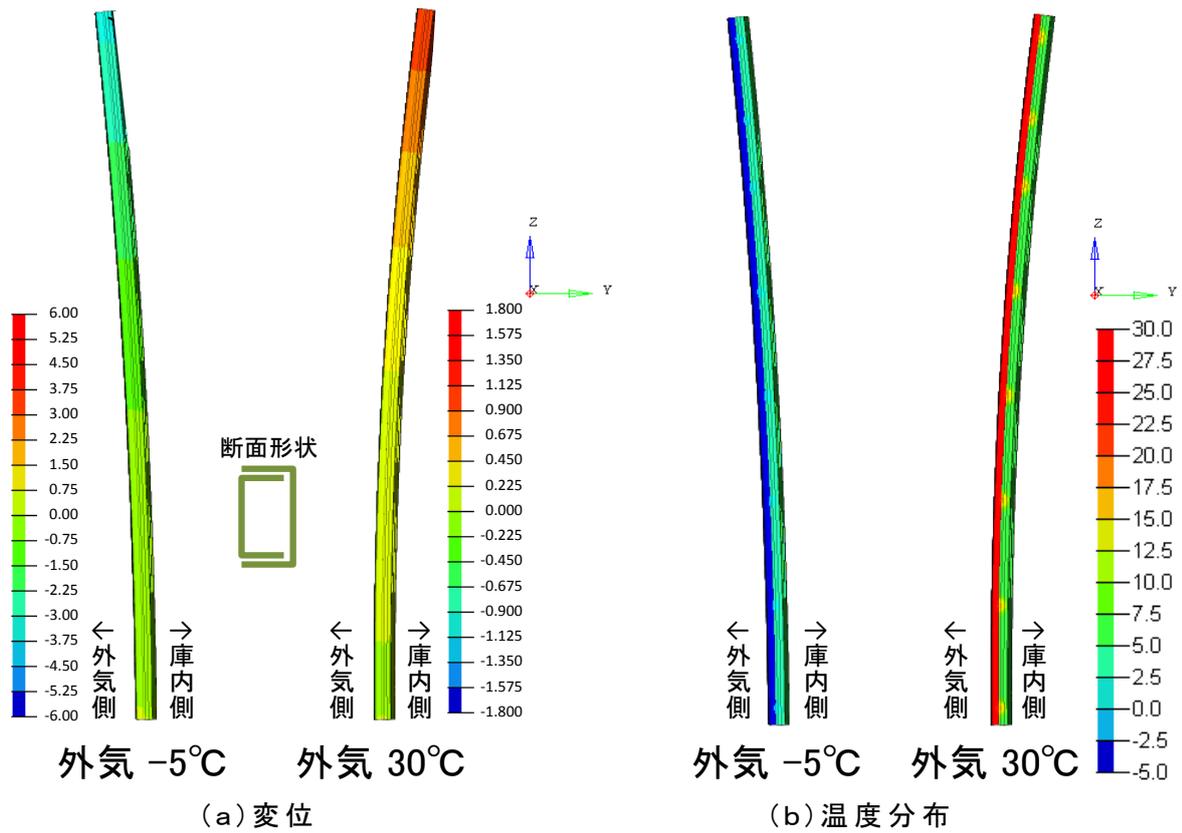


図4-2(14) 熱変形解析結果 ③CNF15(ケースのみ)

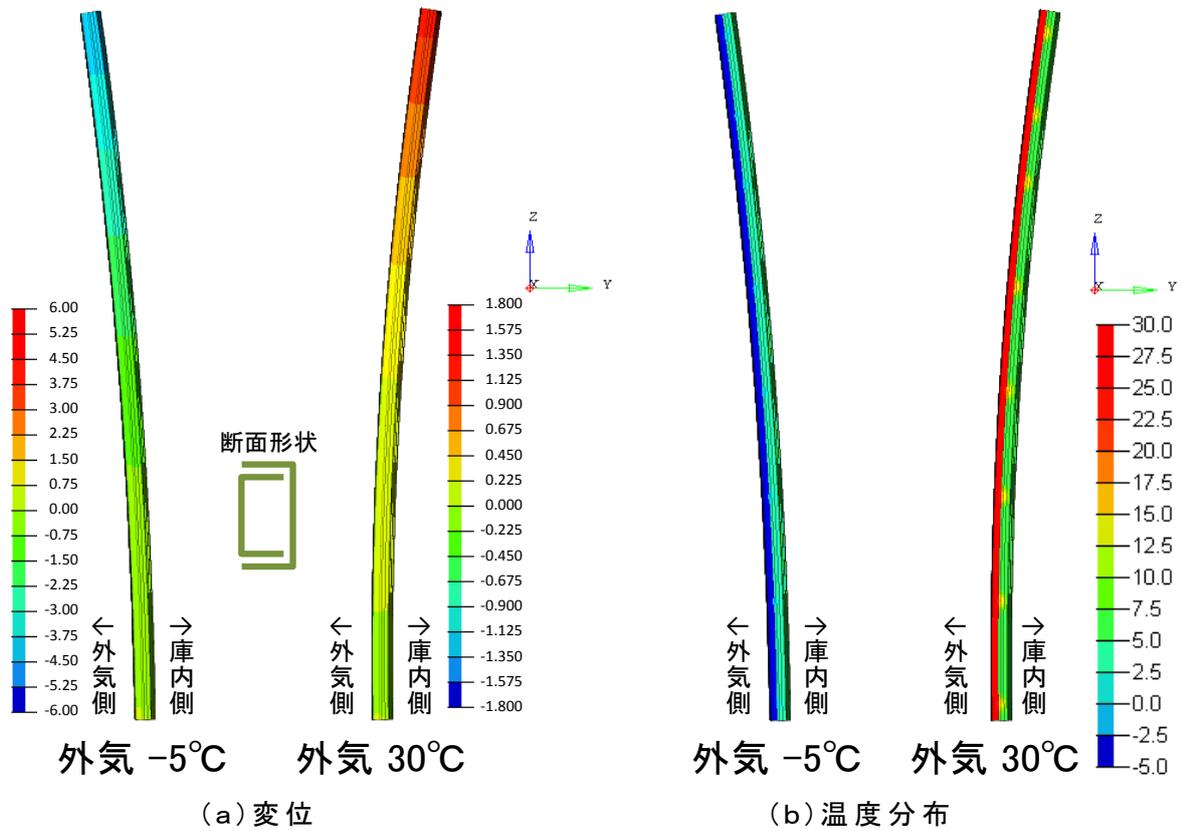
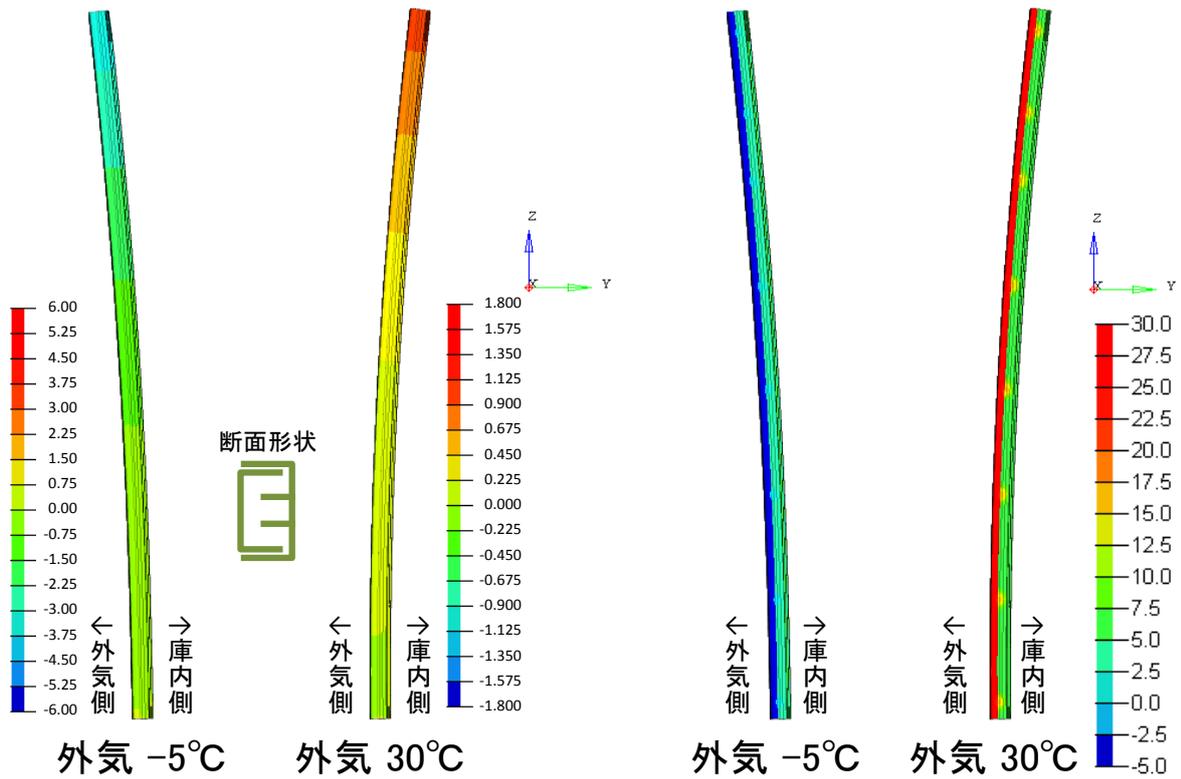


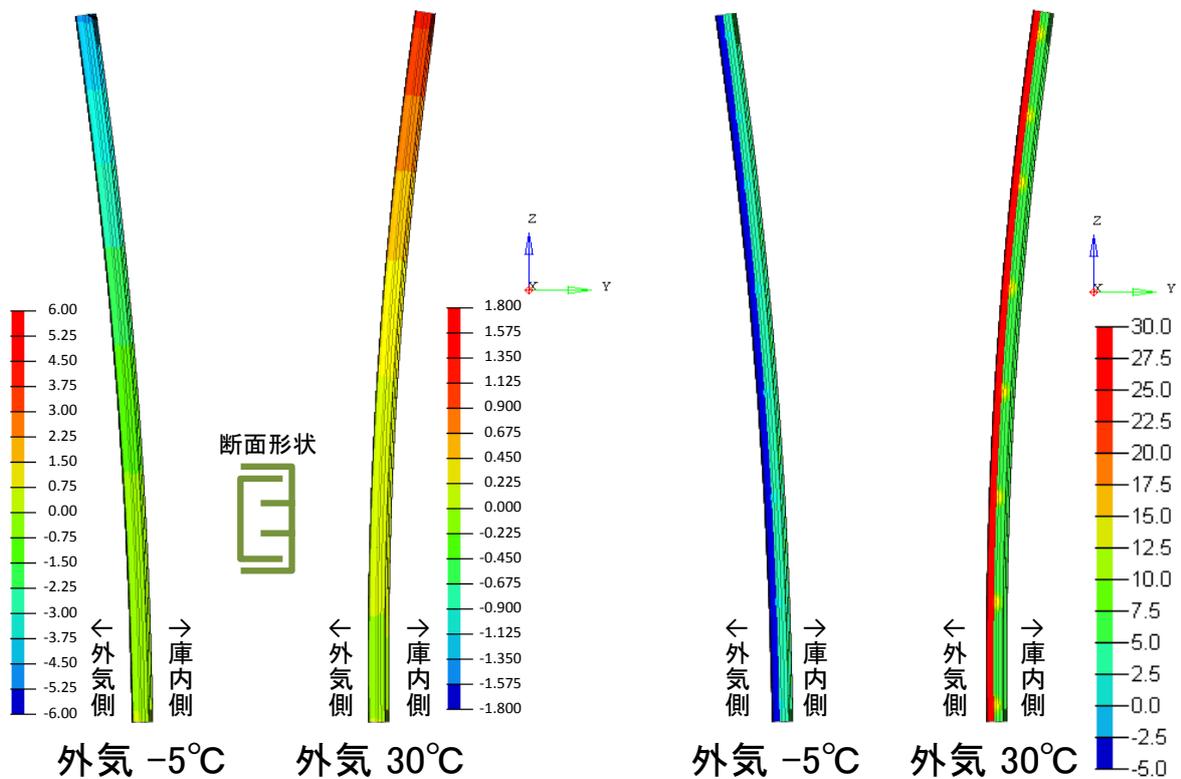
図4-2(15) 熱変形解析結果 ④CNF15(ケースのみ、厚さ1mm増加)



(a) 変位

(b) 温度分布

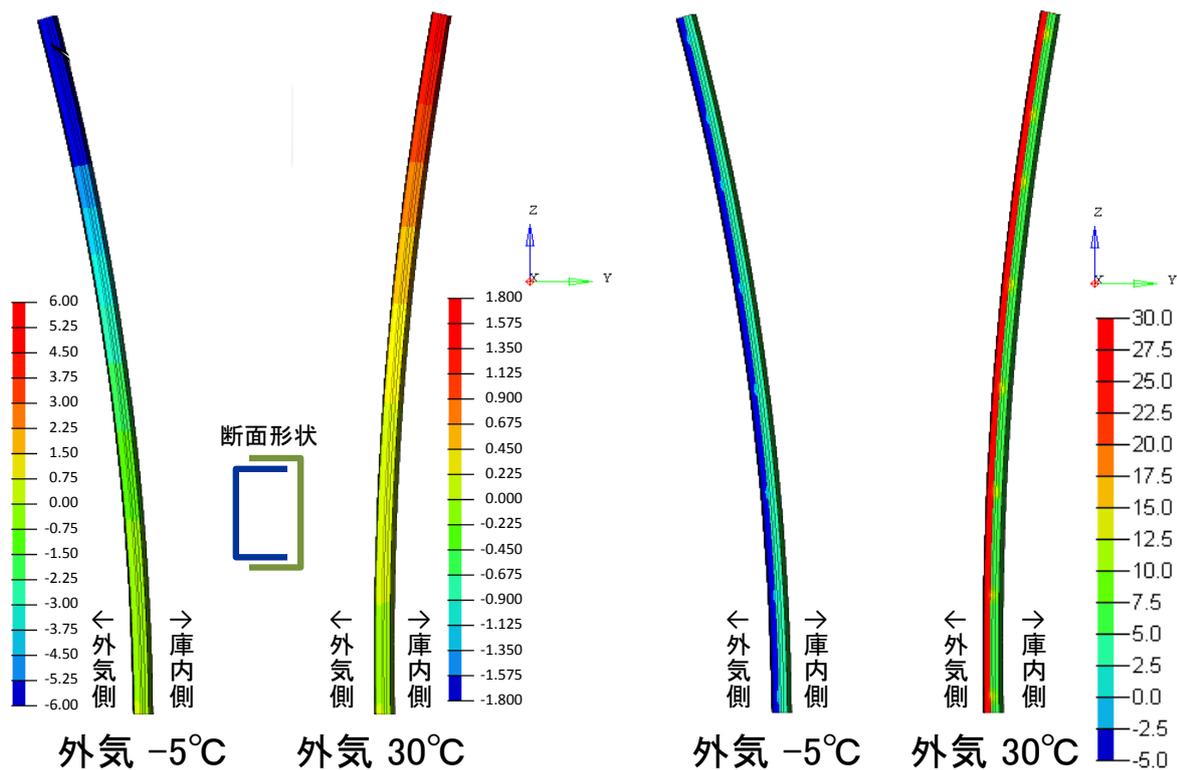
図4-2(16) 熱変形解析結果 ⑤CNF15(リブ2本追加)



(a) 変位

(b) 温度分布

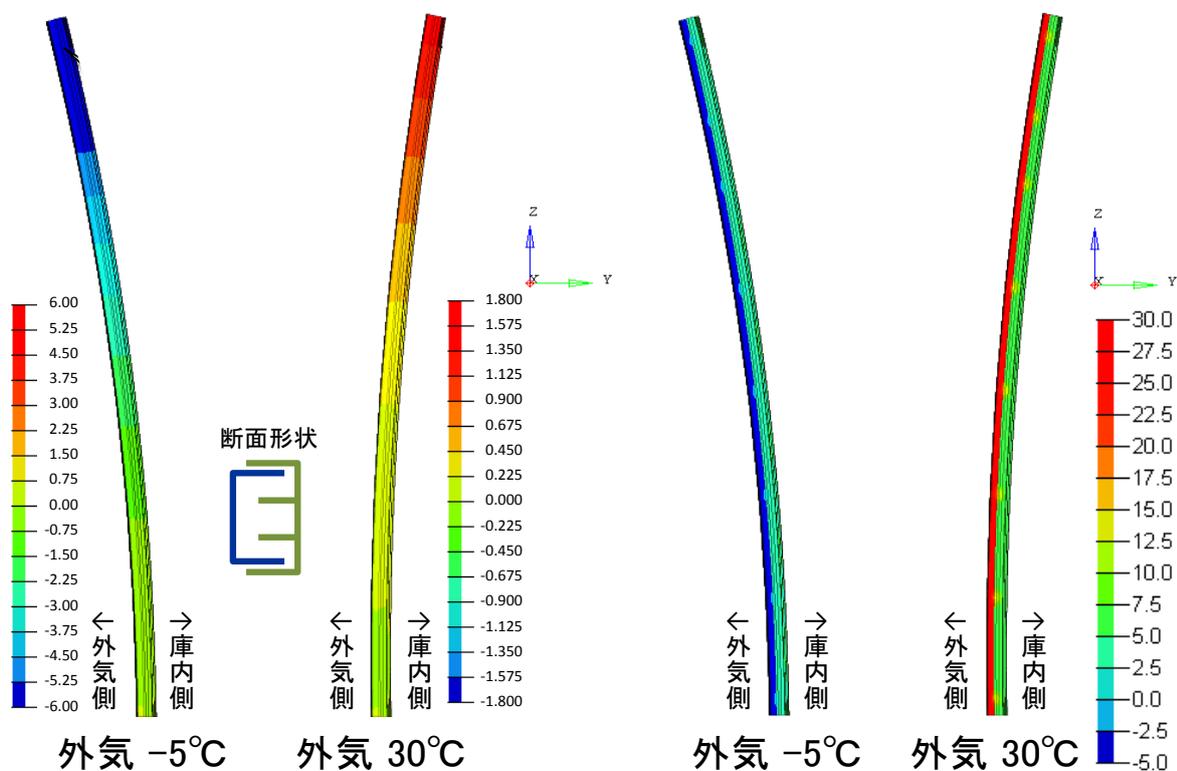
図4-2(17) 熱変形解析結果 ⑥CNF15(厚さ1mm増加、リブ2本追加)



(a) 変位

(b) 温度分布

図4-2(18) 熱変形解析結果 ⑦庫内側のみCNF15(厚さ1mm増加)



(a) 変位

(b) 温度分布

図4-2(19) 熱変形解析結果 ⑧庫内側のみCNF15(厚さ1mm増加、リブ2本追加)

(2) 取組み2: センターピラーの機械的合成の評価

表4-2(3)に庫内側の面を上(荷重点)にした場合の、各構造における荷重変形量(たわみ量)の一覧を示す。変形量は現行構造で実測した値と整合性をとっており、荷重面の差異を比較すると、①を除き外気側に荷重を加えた場合の方が1~10%程度大きい値となる。①の構造で庫内側に荷重した場合の変形が少ない(比率が大きい)理由は、庫内側に補強金属板が設置されているためであり、強度を保っているのはこの補強板の効果が大いことが分かる。

表4-2(4)にはケースを嵌め合わさず庫内側、外気側のそれぞれのケース片側についての荷重変形量を示す。ケースを個別に評価した場合、外気側はCNF15を使用した全ての場合で現行構造より変形が少ない、すなわち強度が強い。庫内側は増厚④、リブ形成⑤の各単体補強では現行構造より20-30%変形が大きく、両補強を行なった場合⑥では現行構造より強くなっている。センターピラー単体での荷重変形値のスペック値はないが、

表4-2(3) 各構造における荷重変形量の一覧

	構造	a 庫内側荷重 (外気側:支点側)	b 外気側荷重 (庫内側:支点側)	比率 (b/a)	
現行 (PS)	①ケース +金属板 	0.33	0.48	1.47	現状
	②ケースのみ 	0.95	1.01	1.07	
新材料 (PP+ CNF15%)	③ケースのみ 	0.61	0.65	1.06	
	④ケース増厚 +1.0mm 	0.36	0.37	1.01	
	⑤リブ2本 t=2.0,L=13.0mm (板厚変更無し) 	0.55	0.61	1.11	
	⑥ケース増厚 +リブ2本 	0.33	0.35	1.05	
庫内側のみ 新材料 (PP+ CNF15%)	⑦片側新材料 (増厚+1.0mm) 	0.64	0.72	1.13	
	⑧片側新材料 (増厚+1.0mm +リブ2本) 	0.58	0.67	1.16	

支点間距離:270mm、荷重:40N (単位:mm)

表4-2(4) 各構造における各ケース片側の荷重変形解析結果一覧

構造	現行(PS)		新材料(PP+CNF15%)					
	①ケース +金属板 (現状)	②ケース のみ	③ケース のみ	④ケース増厚 +1.0mm	⑤リブ2本 t=2.0,L=13.0mm (板厚変更無し)	⑥ケース増厚 +リブ2本	⑦片側新材料 (増厚 +1.0mm)	⑧片側新材料 (増厚+1.0mm +リブ2本)
a 庫内側のみ	4.90	14.13	9.92	5.86	6.28	4.33	5.87	4.34
b 外気側のみ	6.94	6.94	4.48	2.98	4.48	4.48	6.94	6.94
比 (b/a)	1.42	0.49	0.45	0.51	0.71	1.03	1.18	1.60

片端保持、測定位置との距離:715mm、荷重:1N (単位:mm)

参考スペック値として、現行の2倍の値とし、これを満たす値をアンダーライン付青色文字で記載している。

荷重変形に対するスペックは、センターピラー単体での規定がなく冷蔵庫全体での評価となるため、④～⑧が許容範囲内の構造とし、後述の伝熱解析の結果から構造の優先順位を決定した。

参考に、図4-2(20)～(27)には庫内側の面を荷重点にした場合、図4-2(28)～(35)には外気側の面を荷重点にした場合の荷重変形量と最大主応力のコンター図を示す。

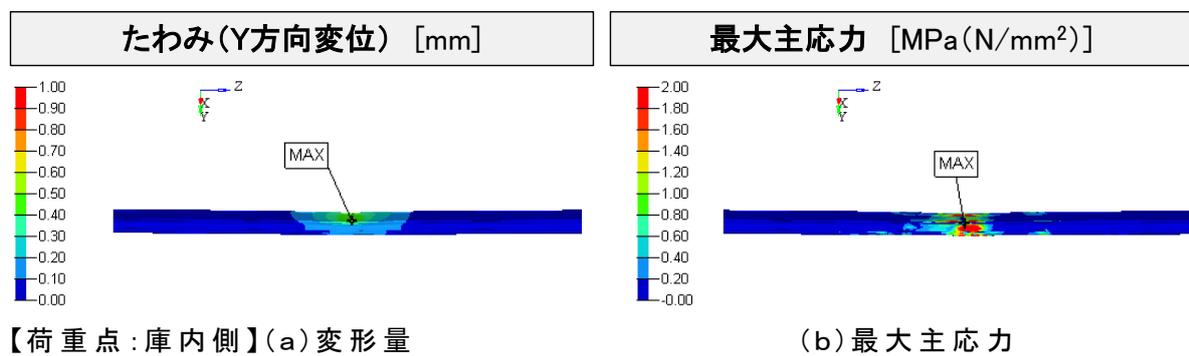


図4-2(20) 荷重変形解析結果 ①現行構造(ケース+金属板)

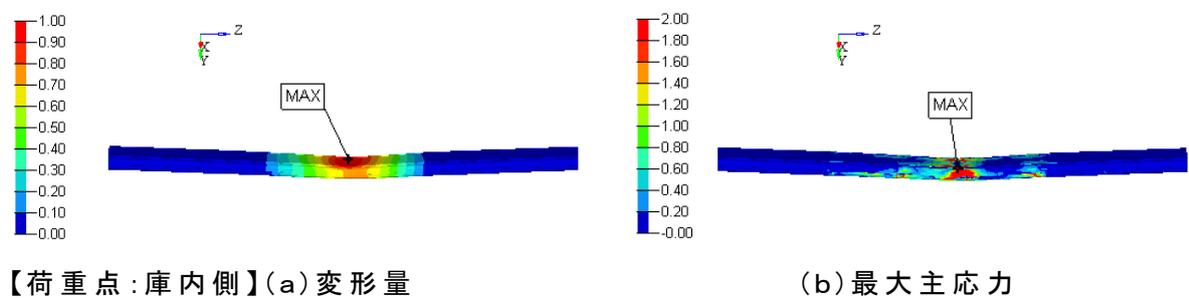


図4-2(21) 荷重変形解析結果 ②現行構造(ケースのみ)

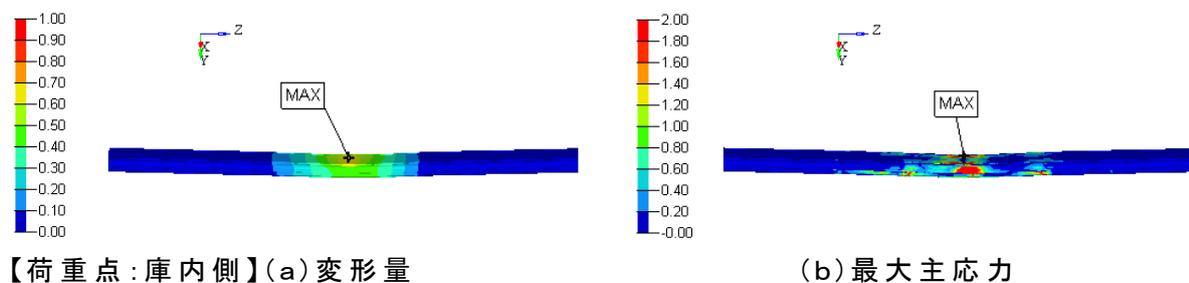
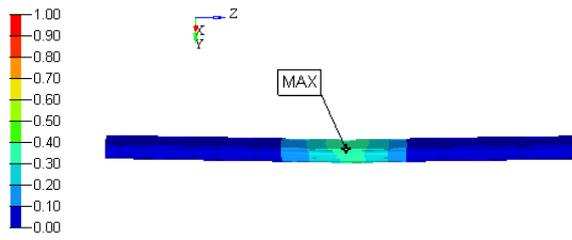
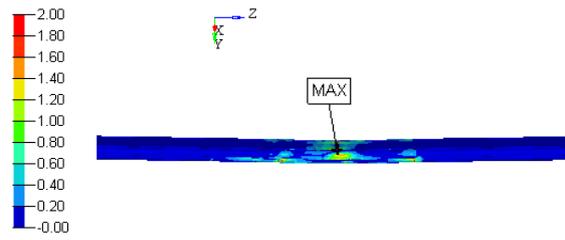


図4-2(22) 荷重変形解析結果 ③CNF15(ケースのみ)



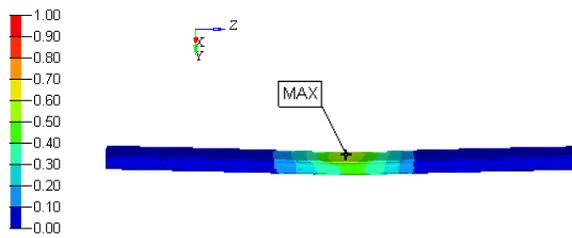


【荷重点：庫内側】(a)変形量

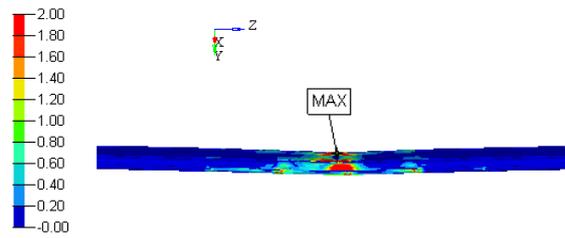


(b)最大主応力

図4-2(23) 荷重変形解析結果 ④CNF15(ケースのみ、厚さ1mm増加)

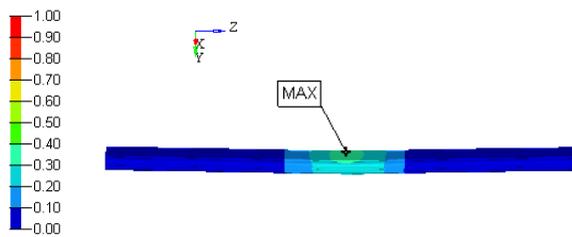


【荷重点：庫内側】(a)変形量

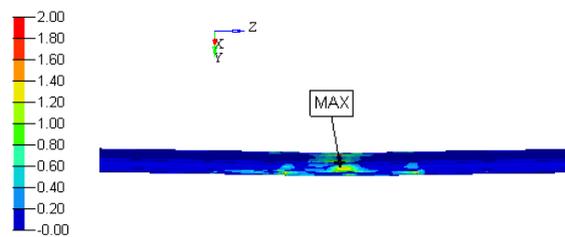


(b)最大主応力

図4-2(24) 荷重変形解析結果 ⑤CNF15(リブ2本追加)

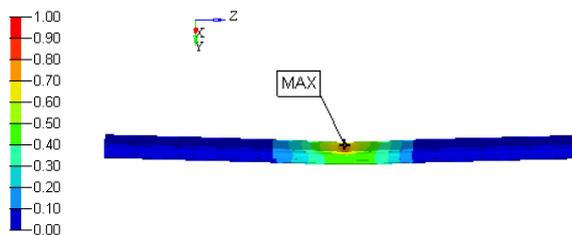


【荷重点：庫内側】(a)変形量

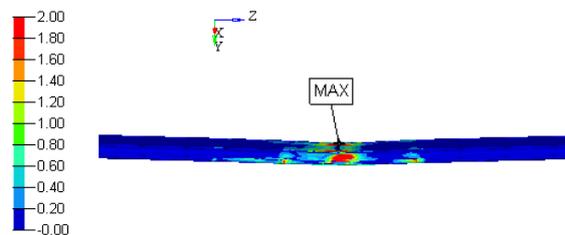


(b)最大主応力

図4-2(25) 荷重変形解析結果 ⑥CNF15(厚さ1mm増加、リブ2本追加)



【荷重点：庫内側】(a)変形量

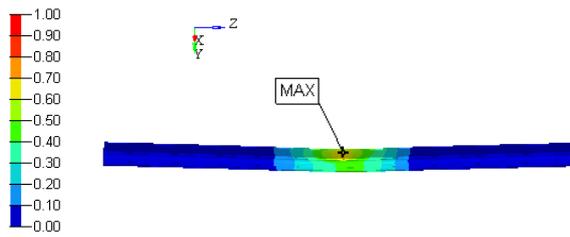


(b)最大主応力

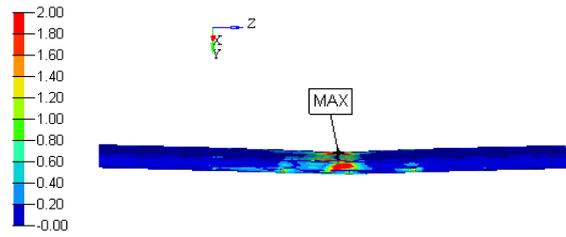
図4-2(26) 荷重変形解析結果 ⑦庫外側のみCNF15(厚さ1mm増加)

たわみ(Y方向変位) [mm]

最大主応力 [MPa(N/mm²)]

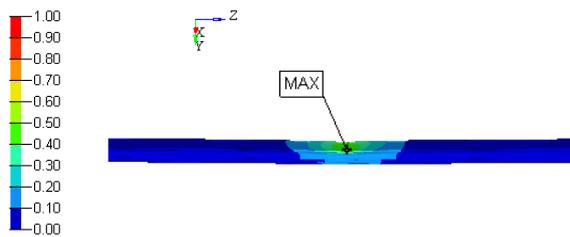


【荷重点：庫内側】(a)変形量

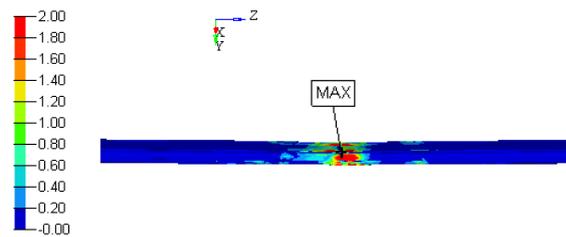


(b)最大主応力

図4-2(27) 荷重変形解析結果 ⑧庫外側のみCNF15(厚さ1mm増加、リブ2本追加)

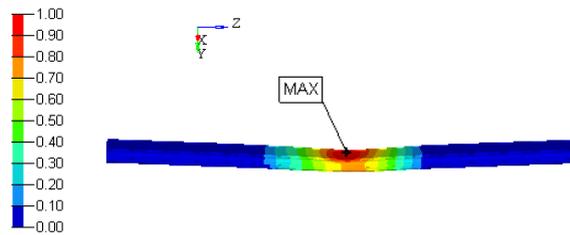


【荷重点：外気側】(a)変形量

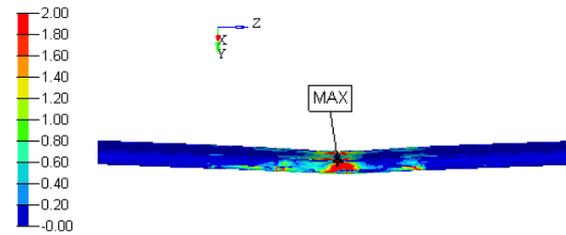


(b)最大主応力

図4-2(28) 荷重変形解析結果 ①現行構造

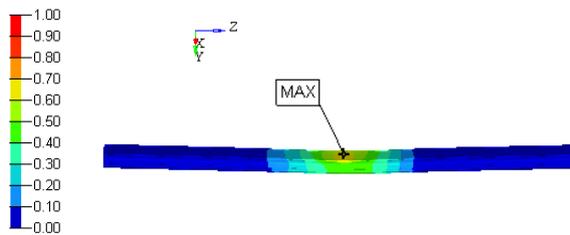


【荷重点：外気側】(a)変形量

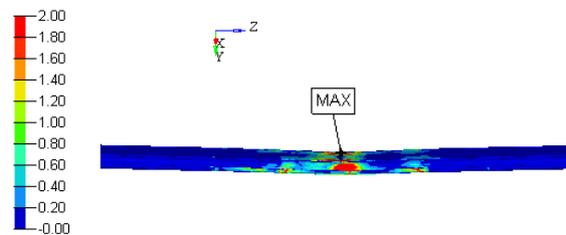


(b)最大主応力

図4-2(29) 荷重変形解析結果 ②現行構造のケースのみ



【荷重点：外気側】(a)変形量

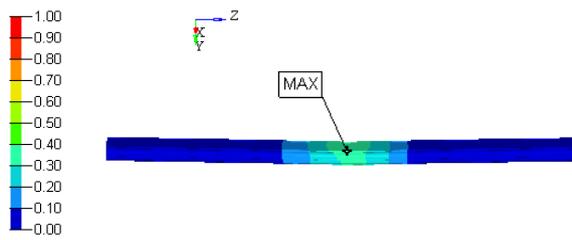


(b)最大主応力

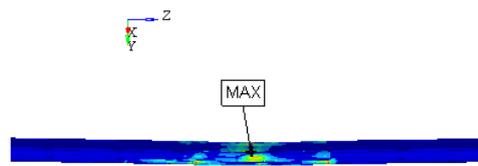
図4-2(30) 荷重変形解析結果 ③CNF15(ケースのみ)

たわみ(Y方向変位) [mm]

最大主応力 [MPa(N/mm²)]

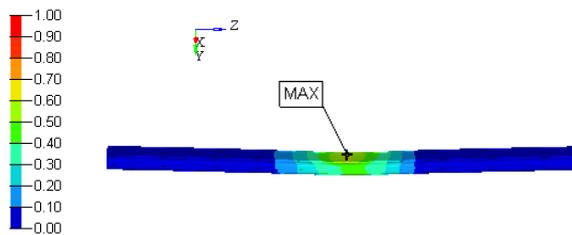


【荷重点：外気側】(a)変形量

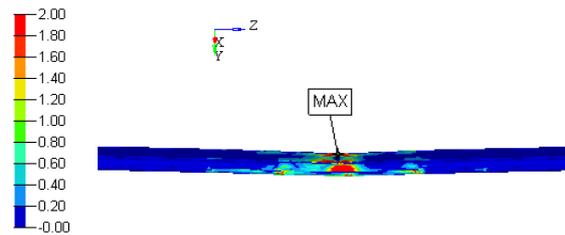


(b)最大主応力

図4-2(31) 荷重変形解析結果 ④CNF15(ケースのみ、厚さ1mm増加)

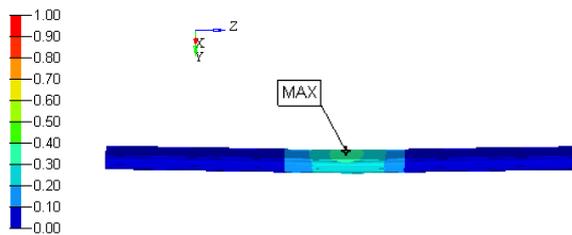


【荷重点：外気側】(a)変形量

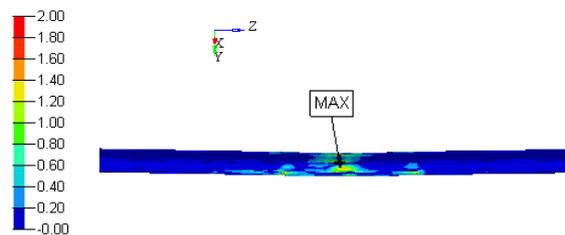


(b)最大主応力

図4-2(32) 荷重変形解析結果 ⑤CNF15(リブ2本追加)

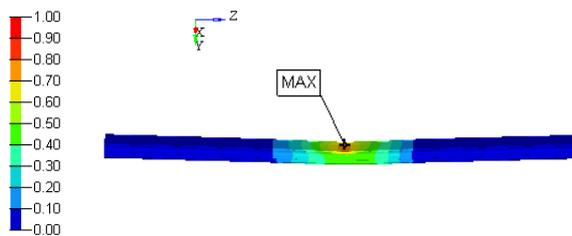


【荷重点：外気側】(a)変形量

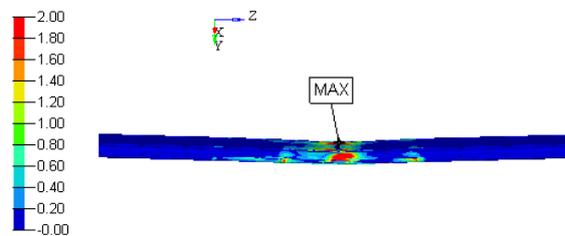


(b)最大主応力

図4-2(33) 荷重変形解析結果 ⑥CNF15(厚さ1mm増加、リブ2本追加)



【荷重点：外気側】(a)変形量



(b)最大主応力

図4-2(34) 荷重変形解析結果 ⑦庫外側のみCNF15(厚さ1mm増加)

たわみ(Y方向変位) [mm]

最大主応力 [MPa(N/mm²)]

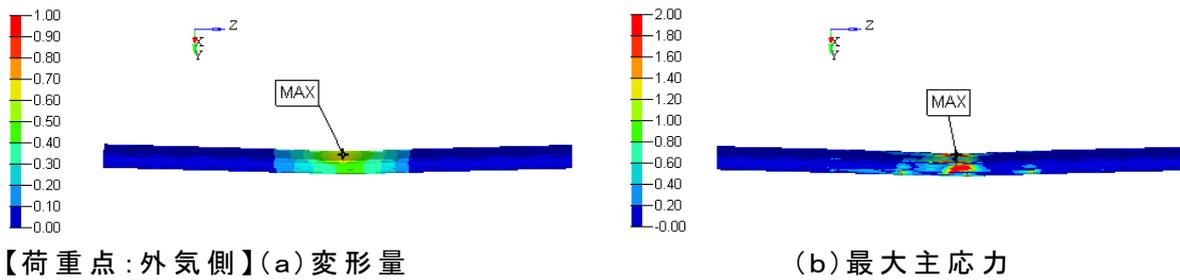


図4-2(35) 荷重変形解析結果 ⑧庫外側のみCNF15(厚さ1mm増加、リブ2本追加)

荷重変形量の実測を行なった結果を図4-2(36)に示す。図から荷重40Nの場合の変位量は、解析値0.33mmに対し、実測では0.50mmとなり、解析値の約1.5倍の値になった。この理由は、解析では外殻部品の嵌め合せをツメ部分で完全に拘束している(ずれない設定)に対し、実測ではツメ部分においても双方が動いてずれを生じ、変位量が大きくなるためである。今回の評価では解析値を元に相対評価を行なうためこの差は問題とはならないが、値が異なる要因として認識しておく必要がある。

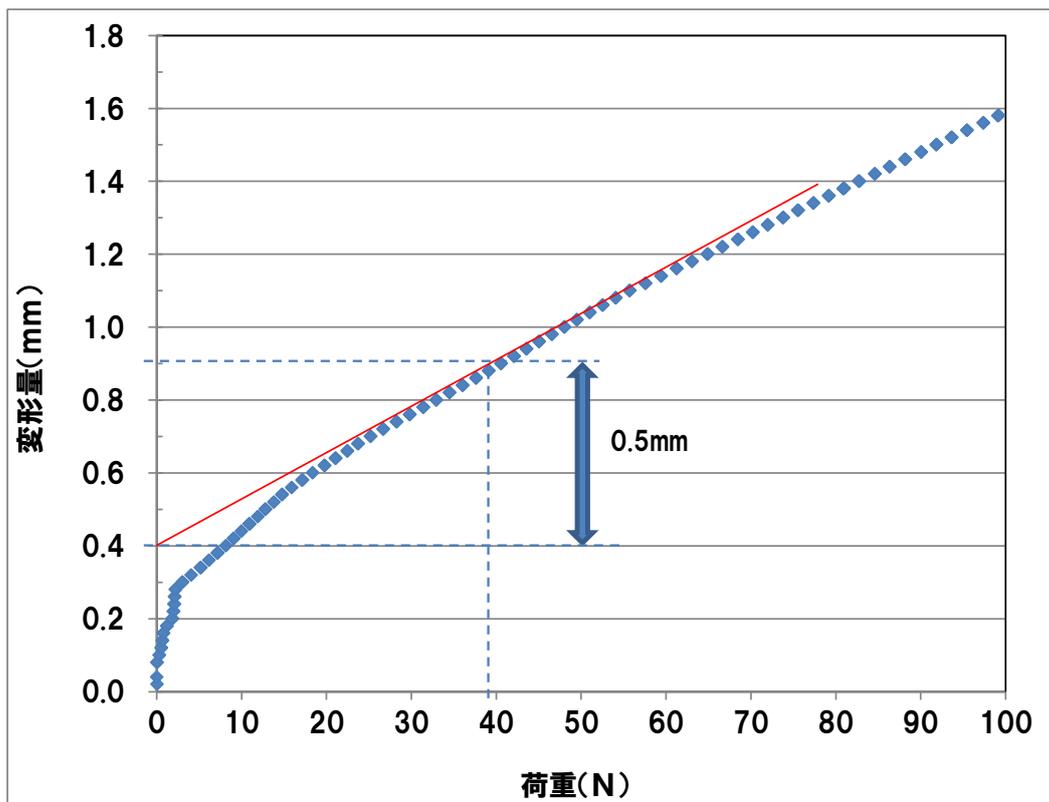


図4-2(36) 荷重変形量測定結果

(3) 取組み3: センターピラーの断面伝熱性の解析

表4-2(5)に、庫外側温度が28℃一定になる場合についての断面伝熱解析の結果一覧表を示す。表中の通過熱量の分類は図4-2(9)に示した各領域別に導出した値である。図4-2(37)~(44)に各構造について、断面の温度分布と熱流速の分布を示す。ヒーター熱量と庫内側への通過熱量を現行の値と比較すると、構成③と構成⑦で改善されている。構成③は前述の強度評価(取組み(2)曲げ変形量)の結果が他の構成より劣ることと、厚さが薄いため成形が困難であるという課題を有しており、現状の厚さ(約2mm)で成形を可能とすることが今後の課題のひとつである。一方、構成⑦は熱変形のスペックを満たしており、強度評価結果も許容範囲であるため、この構成を第一候補として金型設計と製作を行ない、一部の金型部品を変更することで、構成⑧(リブ追加)の場合の検証も行なう。

伝熱評価で差異がある各構成を比較し要因を考察すると、ヒーター熱量が構成③の3.44から構成④の4.02へ約17%増加している要因は、図4-2(38)と(39)の温度分布と熱流速から分かるように、厚さが1mm増加したためケースに沿った横方向の熱流速が増加しているためと考えられる。また、構成④の4.02から構成⑥の4.24に約5%増加している要因は、リブを介して伝わる熱量であることが図4-2(40)と(42)から分かる。

表4-2(5) 断面伝熱解析の結果一覧

構成	形状	ヒーター 熱量 [W]	通過熱量全合計 [W]								
			庫内側への通過熱量						外気側への通過熱量		
			省エネ性 の障害	SF_IN	SF_IN _SIDE01	SF_IN _SIDE02	SF_OUT _SIDE01	SF_OUT _SIDE02	SF_OUT _SIDE02	一定値	
①	現行 ケース+RF	3.53	3.55	1.91	0.99	0.53	0.39	1.64	-0.46	1.14	0.97
②	現行 ケースのみ	3.31	3.33	1.69	0.97	0.29	0.43	1.64	-0.46	1.08	1.02
	①との差分	-0.22	-0.22	-0.22	-0.02	-0.24	0.04	-0.00	-0.00	-0.06	0.06
③	新材料 ケースのみ	3.44	3.46	1.74	0.98	0.31	0.45	1.72	-0.46	1.13	1.05
	①との差分	-0.09	-0.09	-0.17	-0.01	-0.22	0.06	0.08	-0.00	-0.01	0.08
④	新材料 全厚増加	4.02	4.05	2.05	1.10	0.38	0.57	2.00	-0.46	1.29	1.17
	①との差分	0.49	0.50	0.14	0.10	-0.15	0.19	0.36	0.00	0.16	0.20
⑤	新材料 リブ追加(現行厚)	3.73	3.74	2.04	1.30	0.31	0.43	1.70	-0.46	1.12	1.05
	①との差分	0.19	0.19	0.13	0.31	-0.22	0.04	0.06	-0.00	-0.02	0.08
⑥	新材料 全厚増加+リブ追加	4.24	4.26	2.26	1.27	0.41	0.59	2.00	-0.46	1.29	1.17
	①との差分	0.70	0.71	0.35	0.28	-0.13	0.20	0.36	0.00	0.16	0.21
⑦	庫外側:PS、板厚元のまま 庫内側:CNF、板厚増、リブなし	3.42	3.44	1.83	1.12	0.28	0.43	1.61	-0.46	1.07	1.01
	①との差分	-0.11	-0.11	-0.09	0.13	-0.25	0.04	-0.03	0.00	-0.07	0.04
⑧	庫外側:PS、板厚元のまま 庫内側:CNF、板厚増、リブあり	3.65	3.67	2.06	1.31	0.31	0.44	1.61	-0.46	1.06	1.01
	①との差分	0.12	0.12	0.15	0.32	-0.23	0.05	-0.03	-0.00	-0.07	0.04

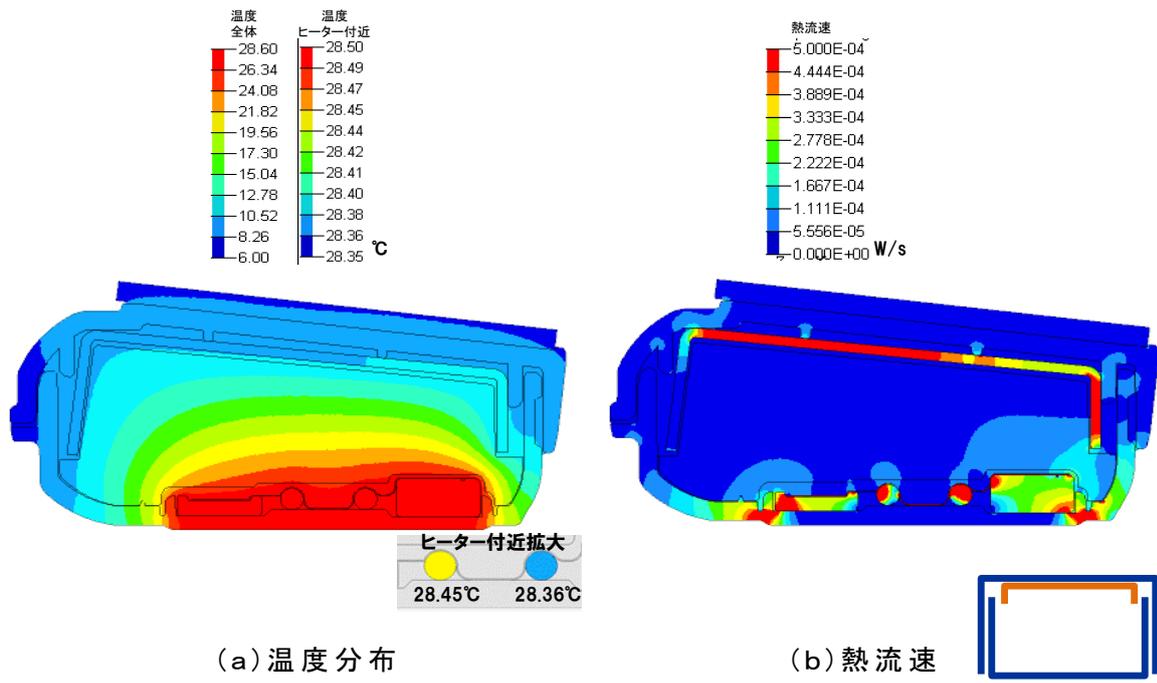


図4-2(37) 伝熱解析結果 ①現行構造

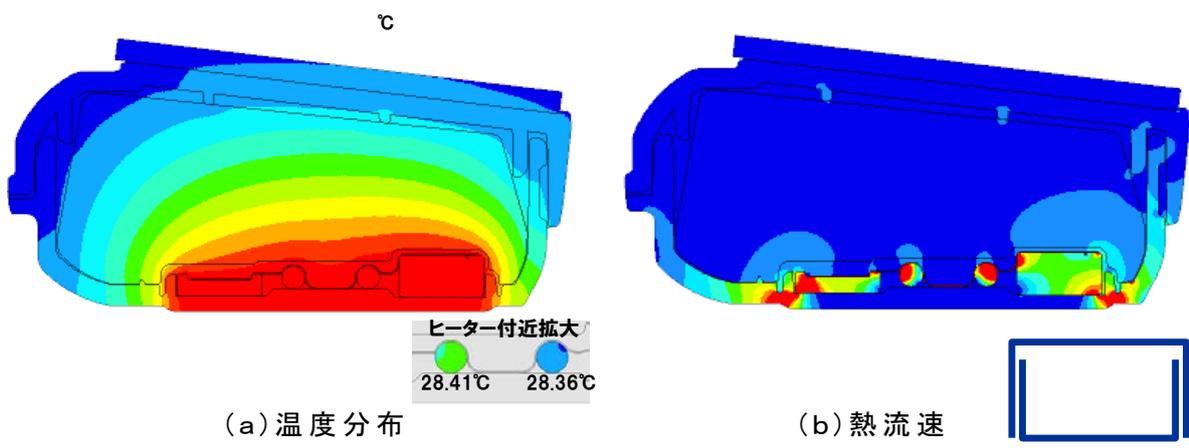


図4-2(38) 伝熱解析結果 ②現行構造(ケースのみ)

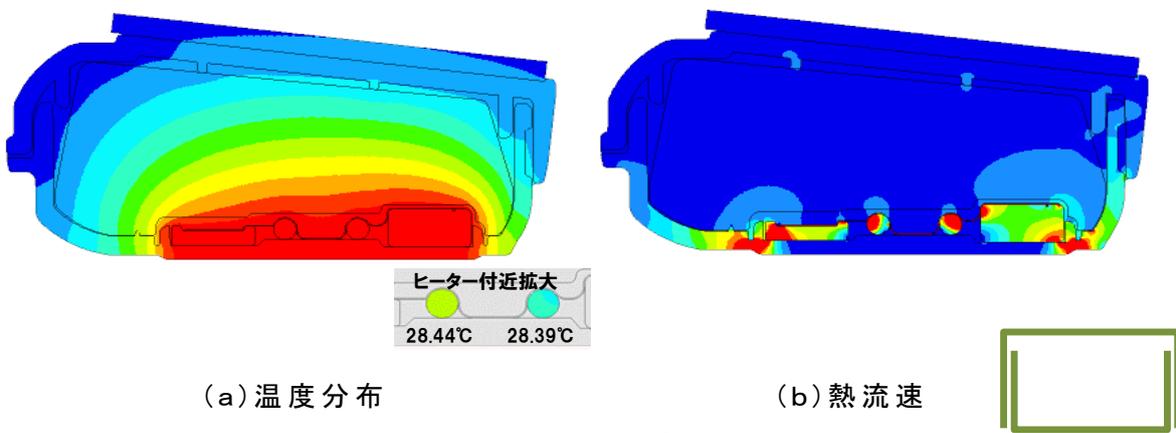


図4-2(39) 伝熱解析結果 ③CNF15(ケースのみ)

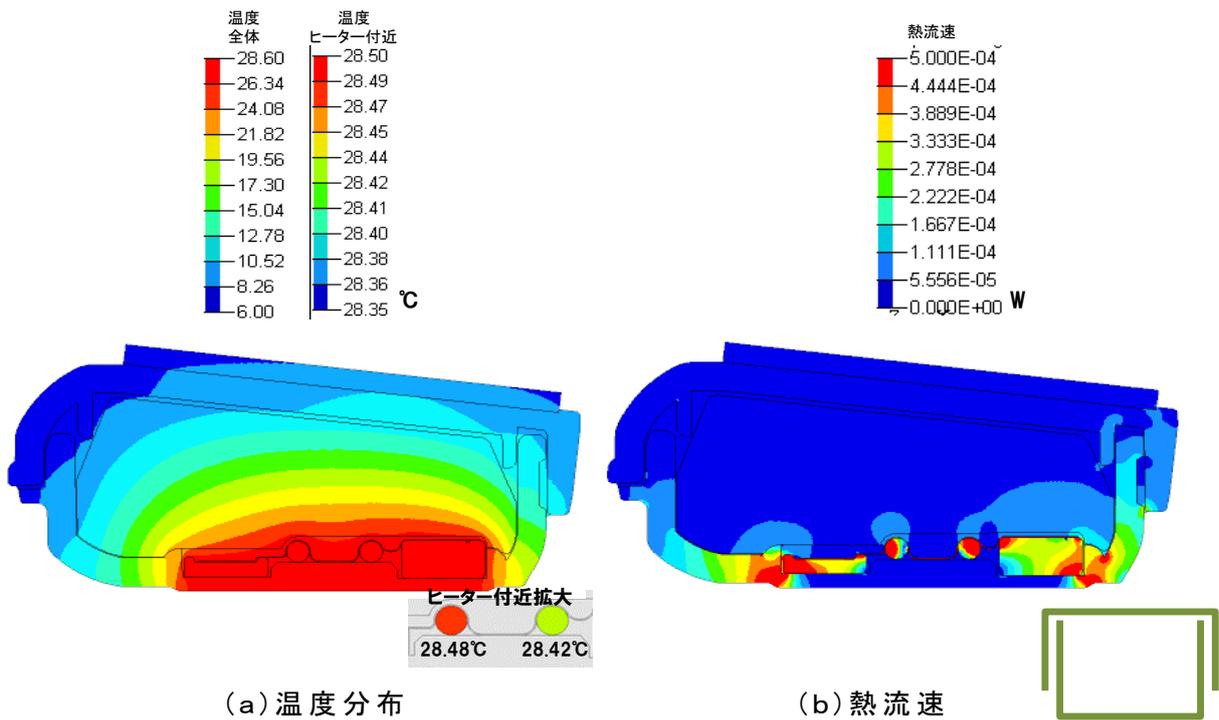


図4-2(40) 伝熱解析結果 ④CNF15(厚さ1mm増加)

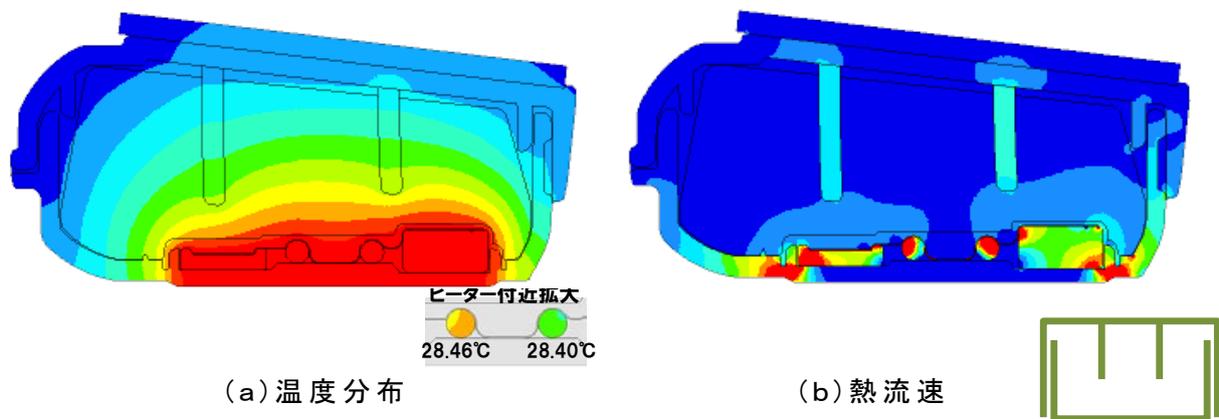


図4-2(41) 伝熱解析結果 ⑤CNF15(現行厚さ、リブ2本追加)

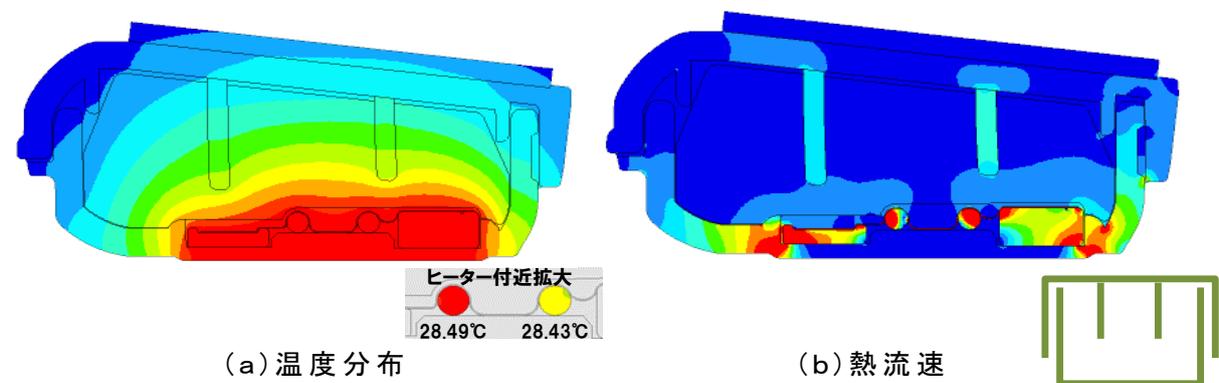


図4-2(42) 伝熱解析結果 ⑥CNF15(厚さ1mm増加、リブ2本追加)

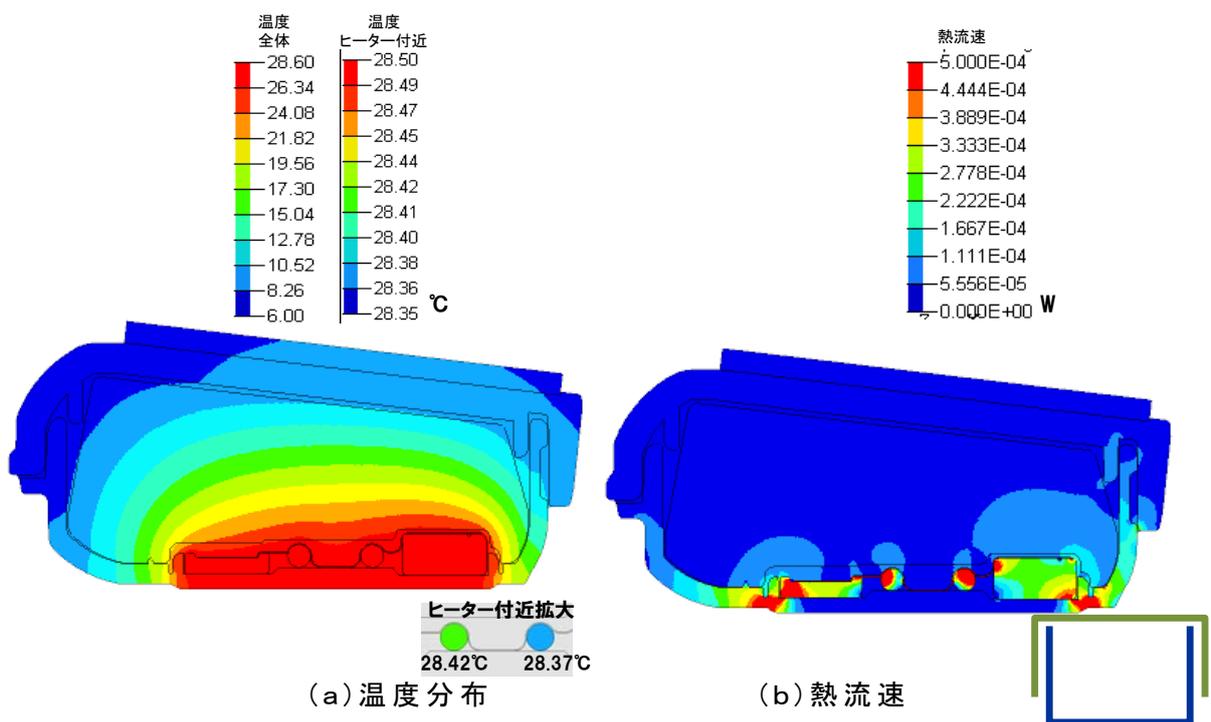


図4-2(43) 伝熱解析結果 ⑦庫外側のみCNF15(厚さ1mm増加)

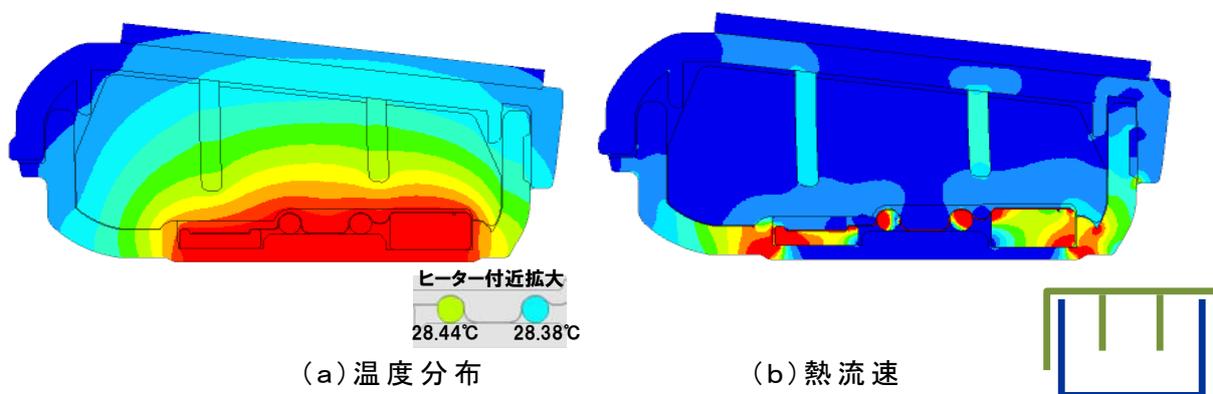


図4-2(44) 伝熱解析結果 ⑧庫外側のみCNF15(厚さ1mm増加、リブ2本追加)

(4) 取組み4: 冷蔵庫部品の金型設計および製作

今回、「トリムB」の金型設計を行なうに当たり、金型仕様の検討、ゲートレイアウトの設定、樹脂流動解析による課題予測、金型の実設計および製作を行なった。

■金型仕様検討

金型仕様について、従来（現行生産品）のトリムBは樹脂材料としてPS（ポリスチレン）を用いているが、今回、補強金属板の廃止を行ないながらも剛性を確保するため、PP+CNF15%（CNF15）にて置き換える設計としている。

これまでの自社の知見として、CNF15はCNFを含まないナチュラルPPに比べて流動性が低下することが分かっている。そのため、今回の設計においても金型での成形時に製品形状が完全に充填されない懸念がある。これまで、スパイラルフロー金型や、比較的単純な製品形状での成形実績と知見があるため、ある程度は流動性の予測が可能ではあるが、今回は、複雑な形状部を有するため、流動性の予測が難しく、金型設計上も制約を受ける。例えば、複雑な形状部の具体例として、アンダーカット部、食い切り必要部等が挙げられる。

ランナー方式としては、自社の知見で流動性向上に効果があるホットランナー方式を採用した。この方式で流動性が上がる理由は、熔融した樹脂を、高温を維持して流動させることで、充填圧力の損失が小さいためと考えられる。

ゲート点数は従来のピンゲート2点からサイドゲート3点に増加させ、ゲート負荷の低減を図った。さらに、流動性向上が期待できる方式として、ヒート&クール成形（以下「H&C成形」と記す）方式がある。今回、対象とするトリムBは外観部品であり、H&C成形により、外観性（光沢度など）の向上も期待できる。ただし、H&C成形を採用した場合、金型部品の熱膨張差により、部品間に隙間が生じて製品にバリが発生したり、部品同士の干渉により金型開閉困難になったりする懸念がある。特に、トリムBは食い切り必要部が多数あるため、バリを発生させずに成形することは困難である。したがって、金型仕様としては、H&C成形対応可能ではあるが、基本設計（初期状態）ではH&C成形を用いないこととした。

また、別途流動性向上の手法として、射出圧縮成形の検討も行なった。これは金型をわずかに開いた状態で必要量の樹脂を充填し、その後、金型を閉じきり、目標の板厚まで圧縮することで、流動性の向上を図るという工法である。この工法についても、今回の部品形状が複雑であるために、射出圧縮成形に対応した金型設計の難度が高くなる。具体的に検討した結果、部品の一部形状を変更し、エッジ構造とする必要があることが判明したが、本部品は消費者の手に触れる部品であるため、このエッジが許容されないと判断した。したがって、今回の金型では、射出圧縮成形は採用しないという金型仕様に決定した。

従来のトリムBの金型仕様との比較を表4-2(6)に示す。

表 4-2(6) トリムB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	初期無し (対応可能)
射出圧縮成形	無し	無し

■樹脂流動解析による課題予測

金型への充填性や、成形課題の予測として、樹脂流動解析を実施した。本開発の材料であるCNF15は、解析上のデータベースが確立されていない。解析に用いる樹脂材料データと解析パラメータは、実測したものが無いため、これまでの自社の知見で比較的近い解析結果が出るものを採用している。したがって、解析結果はあくまでも参考であり、充填性やゲートレイアウトの妥当性の判断と、成形課題の事前予測用として用いている。

本解析で用いたゲートレイアウトを図4-2(45)に示す。3点のゲート負荷を均等にするように設定しており、このような設定において樹脂流動解析を実施した。

樹脂流動解析においては、解析ソフトとして「Mold Flow Insight 2014」を用いて、表4-2(7)に示すような条件で解析を行なった。

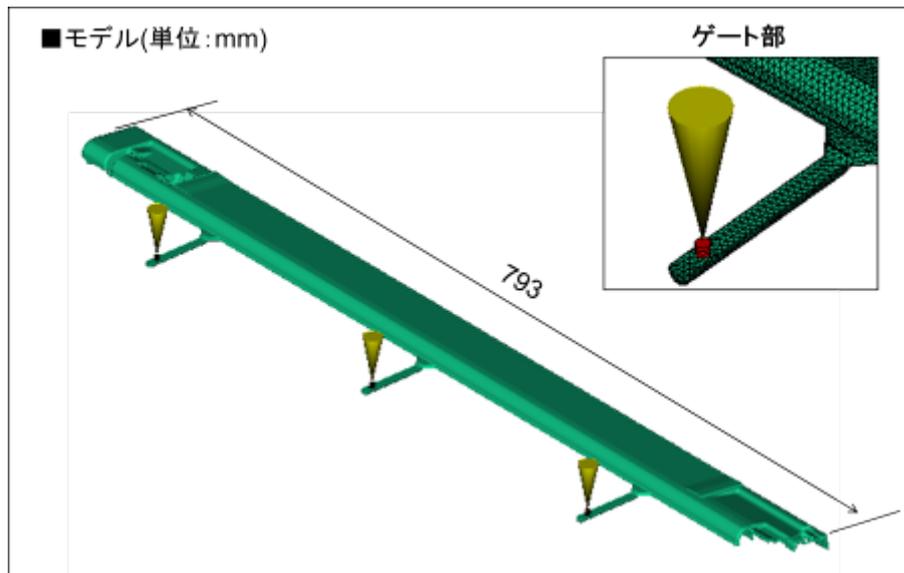


図 4-2(45) ゲートレイアウト

表4-2(7) 樹脂流動解析条件

材料物性	PP+CNF15%相当
充填時間[s]	1.5
樹脂温度[°C]	190
金型温度[°C]	60
VP切替位置[%]	99
保圧制御	80MPa/3s 60MPa/5s
冷却時間[s]	30

■流動解析結果：充填パターン

充填パターンの解析結果を図4-2(46)に示す。ここでは、充填サイクルタイムのうち、90%まで完了した時点と、100%完了の時点の充填状態を表している。カラーコンター図はその場所で樹脂が充填されるまでに要した時間が表示されている。

充填サイクル90%の時点では、製品の両端部が未充填であり、ゲートの中間のウェルド部はほぼ充填されている。これは製品形状の両端部が複雑形状であり、樹脂が流れ込みにくい形状になっているためであると考えられる。したがって、さらなるゲートバランスを最適化する余地はあるが、この時点としては最適化を行なわなくても大きな問題は生じないと判断した。

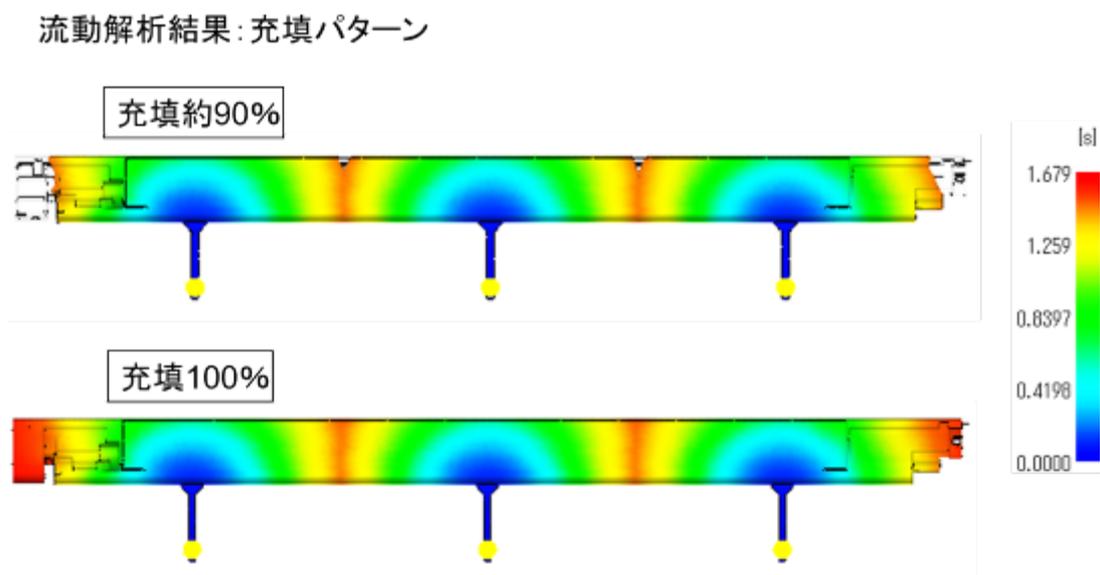


図4-2(46) 充填パターン解析結果

■流動解析結果：圧力分布

次に、保圧時の圧力分布を図4-2(47)に示す。保圧圧力が80MPaのサイクル中で、成形品各部にかかる圧力の最大値を示している。

成形品各部の圧力が、ほぼ70MPa前後で均一になっており、本ゲートレイアウトはほぼ適正と考え、このゲートレイアウトにて金型を製作することとした。

流動解析結果：80[MPa]保圧時の圧力

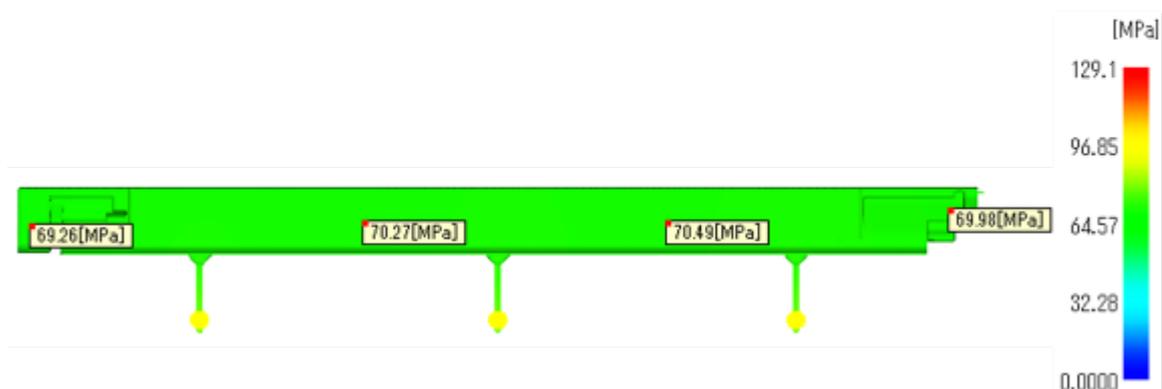


図4-2(47) 圧力分布解析結果

以下は、樹脂流動解析から予測される、成形上の課題について述べる。

これらの課題は、樹脂材料データと解析パラメータが確立されていないため、参考であり、この段階で対策の検討は行なっていない。金型製作後、実際に成形を行ない、これらの課題の発生状況と解析結果を比較し、今後のCNF系樹脂用の金型設計に活用する予定である。

■流動解析結果：ウェルドライン

まず、成形完了後のウェルドラインの発生予測を図4-2(48)に示す。ここで、ウェルドラインでは、樹脂先端(フローフロント)の会合部における会合角をカラーコンター図にて表示することで示している。

複数点ゲートであるため、各ゲートの間中部や、部品両端の複雑形状部の一部にもウェルドラインが発生している。これらのウェルドラインの影響として懸念されるのが、外観上の不具合と、強度低下である。この解析においてはウェルドライン部の外観影響、強度低下については、現時点では詳細を検討できないため、実際の成形後に解析結果と比較検討を行なう。ウェルドラインが問題となる場合の対策としては、成形条件の最適化、およびゲートレイアウトの変更などが考えられる。

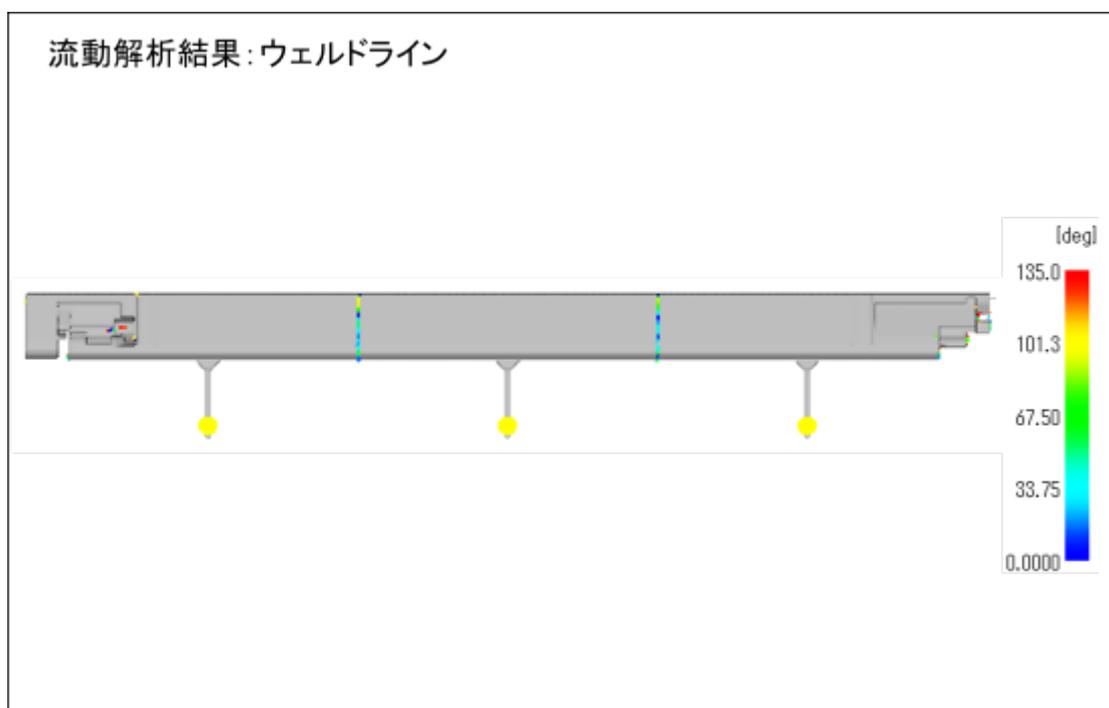


図4-2(48) ウェルドライン発生予測

■流動解析結果：ヒケ予測

次に、成形完了後のヒケ予測を図4-2(49)に示す。製品形状表面からのヒケ深さをカラーコンター図で表示している。

本解析結果によれば、ヒケの主な発生箇所は、製品設計上、裏面にリブを成形している箇所であり、ヒケの量は概ね $15\mu\text{m}$ 程度と予測される。ヒケの発生による影響は主に外観上の不具合であるが、現時点では詳細を検討できないため、実際の成形後に解析結果との比較検討を行なう。ヒケが問題となる場合の対策として、成形条件の最適化、リブの位置や幅の変更、外観面に金型でシボを転写することなどが考えられる。

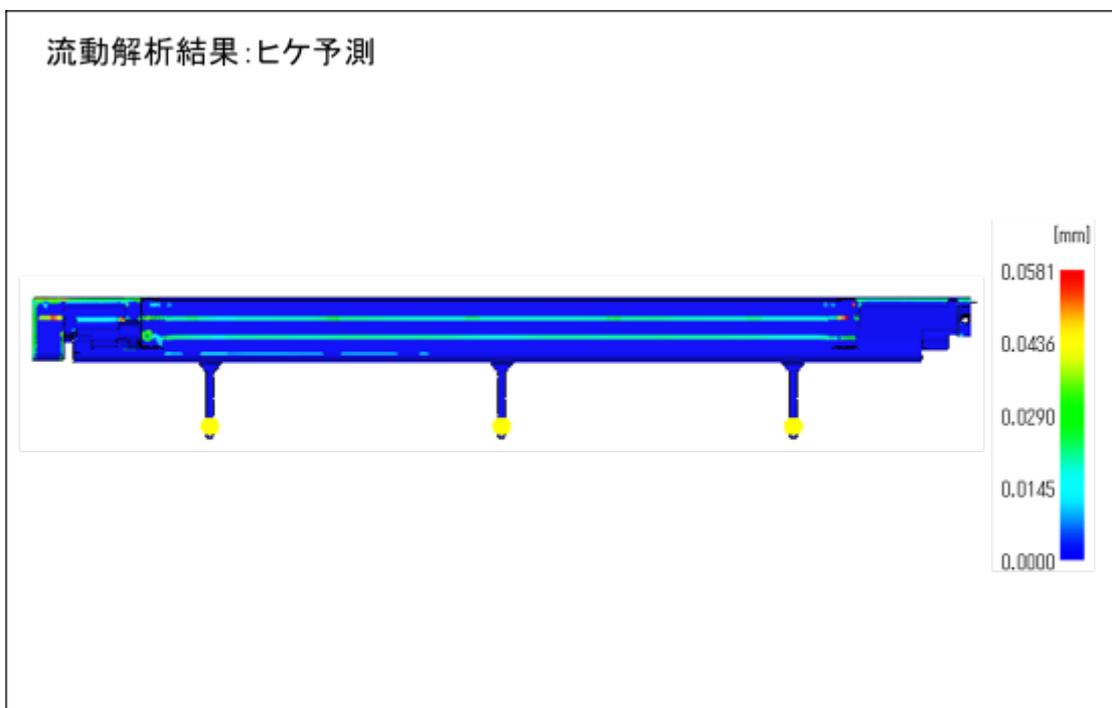


図4-2(49) ヒケ発生予測

■流動解析結果：エアートラップ発生予測

次に、成形品におけるエアートラップの発生予測を図4-2(50)に示す。エアートラップとは、金型内の製品空間(キャビティ)内部に入り込んだガスのことである。このガスが排気されないまま樹脂内部にとらわれてしまうと、これが発火して汚点や焼けなどの表面不良、成形品内部のボイドやバブル、ショートショットなどの成形不良を引き起こす場合がある。

今回の解析結果においては、エアートラップの発生は予測されていないため、現時点では懸念する必要はないと考えられる。

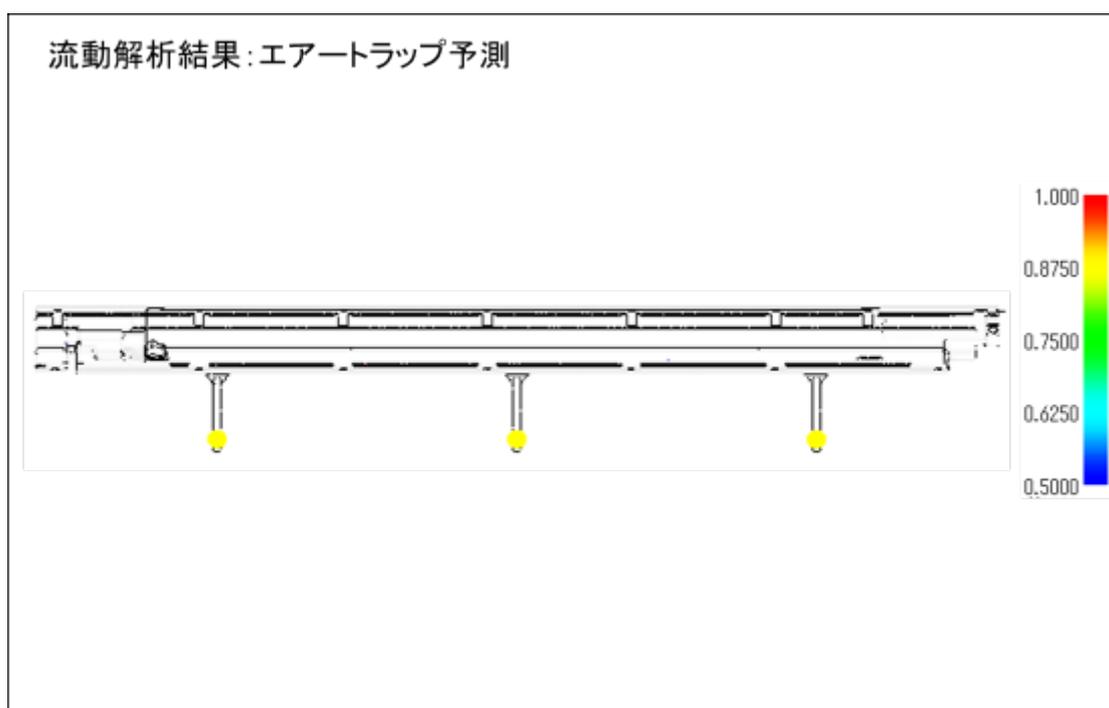


図4-2(50) エアートラップ発生予測

■流動解析結果：反り発生予測

次に、成形完了後の反りの発生予測を図4-2(51)に示す。製品形状に対するZ方向の変移量を5倍の倍率で表示している。

解析結果から、想定よりも大幅に大きい反りの発生が予測された。Z方向の「+側」の変位量は最大約14mm、「-側」の変位量は最大で約8mmとなっており、合計で約22mmの反りとなっている。この数値はセンターピラーユニット組立後の反り量「目標2mm以内」と比較してもかなり大きく、問題となる懸念がある。反りの発生による影響は、部品の組立性の低下、組立後のユニット(センターピラー)の冷蔵庫本体筐体との密着性低下がある。本解析結果の反り量が、組立性および組立後の密着性に与える影響については、現時点では詳細を検討できないため、実際の成形後に解析結果と比較検討するものとする。ソリが問題となる場合の対策として、成形条件の最適化、ゲートレイアウトの変更などが考えられる。

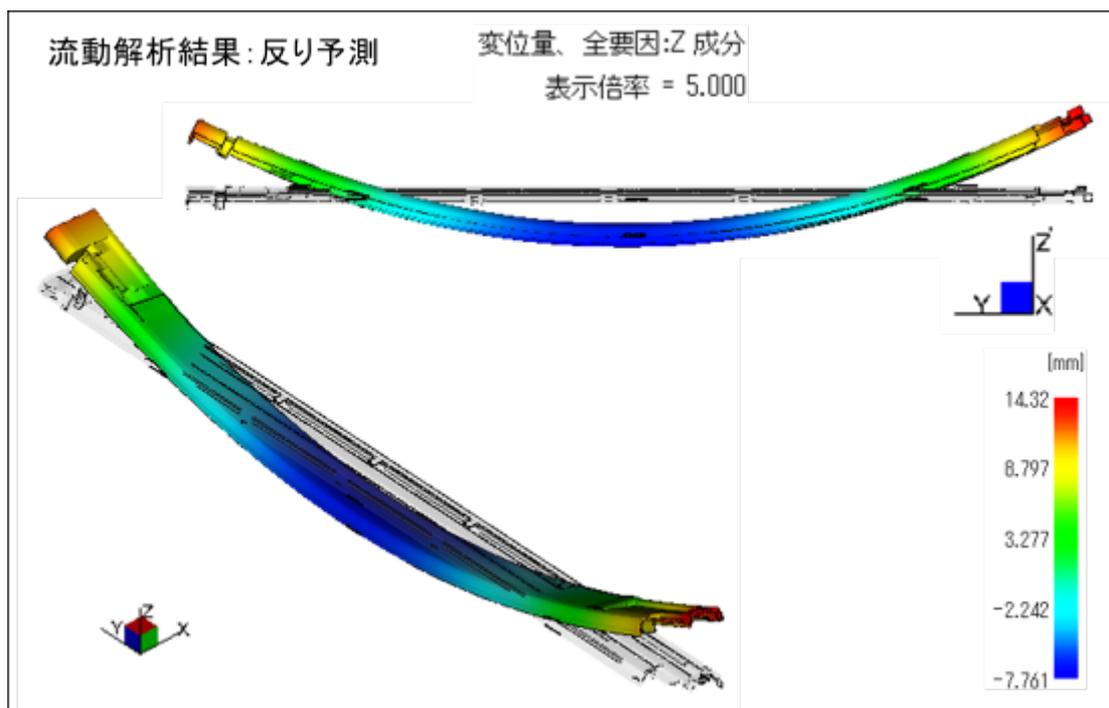


図4-2(51) 反り発生予測

■金型設計および製作

以上のような事前検討を行ない、金型の具体設計と製作を実施した。

図4-2(52)に製作した試作金型の外観写真を示す。

本報告書製作時点ではこの金型による成形は実施しておらず、成形した試作品の評価については次年度から取組みを行なう。



図4-2(52) 試作金型の外観

(5) 取組み5: クロスレールの構造解析による構造検討

クロスレールについては、CNF15からなり、図4-2(10)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。図4-2(11)に示した荷重条件により解析を行なった場合の各方向の最大変位量を図4-2(53)~(55)に示す。

クロスレールの材質を板金からCNF15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(53)に示したように、最大変位量が増加、すなわち強度が大きく低下したが、図4-2(10)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。

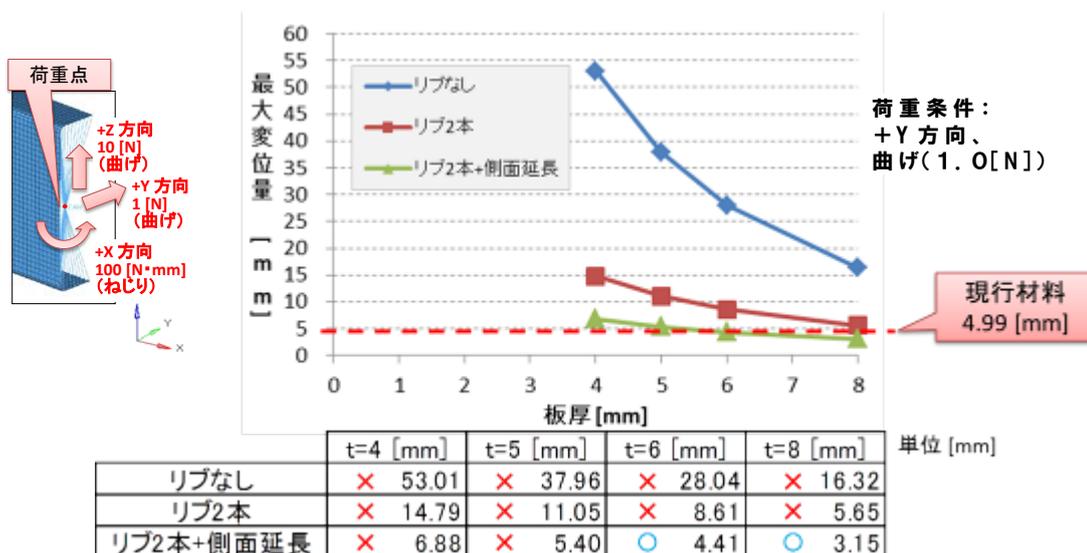


図4-2(53) Y方向の曲げに対する最大変位量

Z方向（冷蔵庫の垂直方向）については、図4-2(54)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。

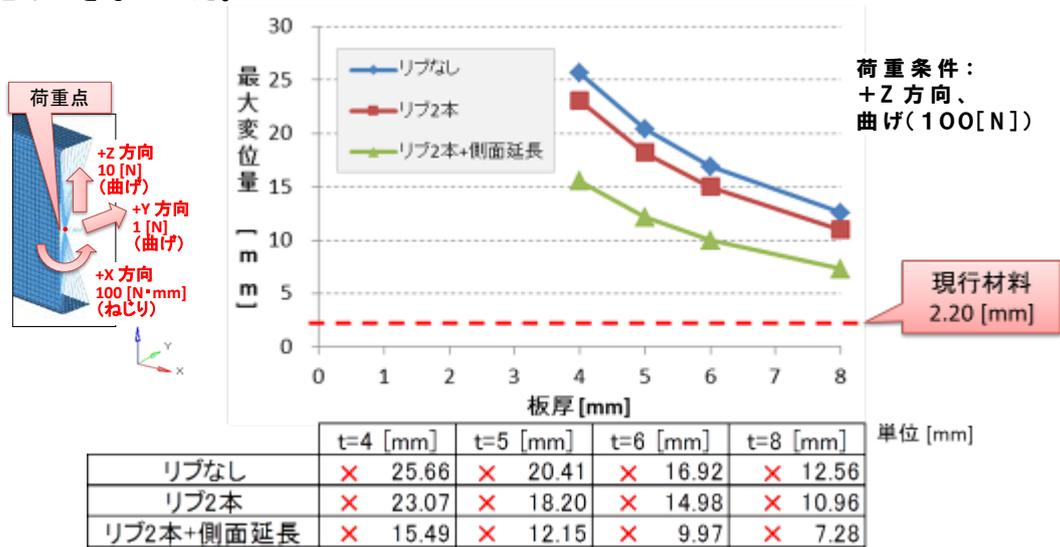


図4-2(54) Z方向の曲げに対する最大変位量

X軸中心のねじりについては、図4-2(55)に示したように、鉄板製クロスレールの代わりにCN15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。

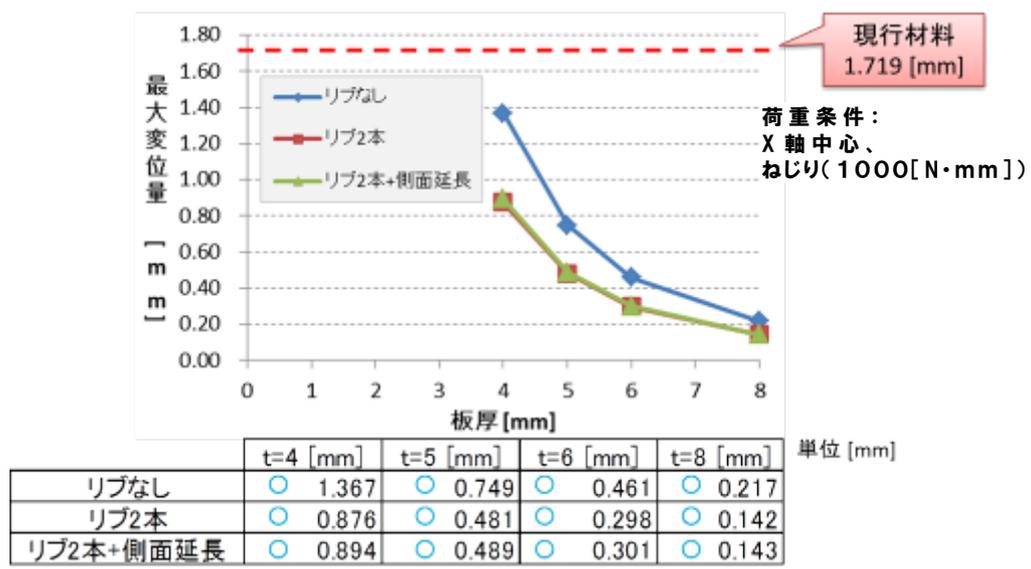


図4-2(55) X方向のねじりに対する最大変位量

4-2-4. 結言

(1) センターピラーの解析

本取組みでは冷蔵庫のセンターピラーの主材料をCNF15%含有複合樹脂に変更することで、構造強度と伝熱性(省エネ性)を両立する構造を構造解析を用いて検討を行なった。得られた主な結果は下記の内容である。

- 1) 熱変形は、検討を行なった新材料(CNF含有複合樹脂)を用いた全ての構成(③～⑧)で、外気温-5℃では現行構成より同等以上に改善され、外気温30℃では現行構成より悪化するがスペック値は満たすことが分かった。
- 2) 荷重変形量は、スペック値はないが、現行構成と比較して、④ケース増厚1mmと、⑥ケース増厚1mmとリブ2本形成という構成で、ほぼ改善が見込まれ、他の構成でも現行の2倍以下の変形量以内であることが分かった。
- 3) 伝熱性は、庫内側のみをCNF15%含有複合樹脂に変えた場合に、ヒーター熱量と庫内側への熱流速が改善されることが分かった。また、構造強度を向上する2種の方法、すなわち外殻樹脂部材の厚さを増やす方法とリブを形成する方法、共に熱流速がそれぞれ17%と5%増加することが分かった。

以上、解析結果からは補強金属板を取除き、庫内側ケースのみを15%CNF含有複合樹脂材質への変更する構造が全ての条件を満たし、省エネ性を向上できると予測され、この構造で金型の製作を行なう。また金型部品を変更することで、リブを追加した構造での検証も行なう。

(2) センターピラーの金型製作

金型製作の事前検討として、流動性を確保するための金型仕様とゲートレイアウトを設定すると共に、樹脂流動解析を実施し、成形性の確認を行なった。設定したゲートレイアウトについては妥当性があると判断し、事前に予測される成形課題として、ウェルドライン、ヒケ、反りがあることが分かった。

上記を元に金型設計および製作を完了し、今後は成形の検討を行なう。その際、上記課題が発生した場合には、成形条件の最適化などによって対策を行なう予定である。

(3) クロスレールの解析

現行の鉄板製クロスレールと同等以上の強度となるCNF15%含有複合樹脂製クロスレールが存在するか、その形状について検討を行なった。その結果、特定方向の曲げやねじりに対して、現行の強度を上回るCNF複合樹脂製クロスレールの形状が存在することが分かった。しかしながら、得られた形状はブロック体に近く、コの字型である現行のクロスレールの形状とは大きく異なるため、現行品との置換えとして用いるのは困難であり、単に材料および現行と類似した形状への変更だけではなく、冷蔵庫全体として形状や強度設計を行ない、最適なクロスレールの材料、形状を考える必要がある。

4-3. リサイクル性の検証

4-3-1. 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(GFRP)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。

上記の流れを図4-3(1)に示す。

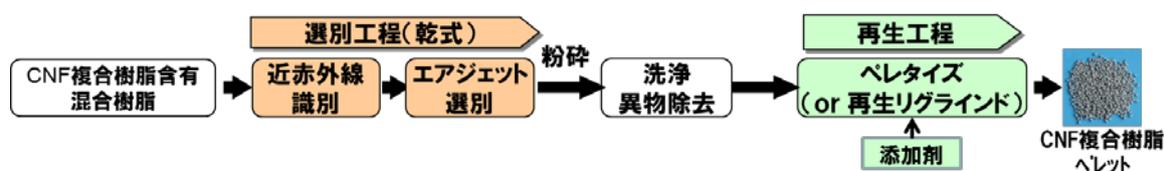


図4-3(1) CNF複合樹脂の選別工程(近赤外線選別)と再生工程の例

4-3-2. アプローチ

(1) 選別のアプローチ

まず、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

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PP(ポリプロピレン)樹脂であり、CNF含有率が15%のものを示す。

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

(2) 再生リサイクルのアプローチ

前項にて選別したCNF複合樹脂に対して、マテリアルリサイクルのアプローチについて

説明する。CNF複合樹脂のリサイクルについては、PP(ポリプロピレン)樹脂以外のPA(ポリアミド)樹脂¹⁾やPOM(ポリアセタール)樹脂²⁾などについては、そのリサイクル性能の可能なことが示されているが、本取組におけるCNF複合PP樹脂については、リサイクル性の検証事例などは見られない。

まず、最初のステップとして、成形熱履歴によるリサイクル性能の検証を実施した。対比複合樹脂としては、汎用的な短繊維ガラス強化PP樹脂及び長繊維ガラス強化PP樹脂、そしてベースとなるPP樹脂とした。長繊維ガラス強化PP樹脂のペレット長は11mm、ペレット径は2.9mmである。その他の新材ペレットやランナー・端材の粉碎材は概ね3~5mmの大ききさになるように作製した。

ベース樹脂となる熱可塑性樹脂は通常、新材作製やリサイクルペレット作製時での押出成形によるルーダー加工(ペレタイズ)や、製品作製時での射出成形時に、熱履歴がかかるため、ベース樹脂が熱分解、分子切断などの劣化が生じ、物性値が低下する。一方、ガラス繊維に代表される繊維強化樹脂においては、成形機の加熱シリンダー内での混練時や、繊維長よりも小さい金型ゲート通過時、端材を再生するときの粉碎機による粉碎時にそれぞれ繊維が破断、破碎、切断され短繊維化されるために、リサイクル時には初期の物性値を維持することが困難である。

上記をまとめると取組み内容として、

- a) 繊維強化の観点でのリサイクル性の検証。ガラス繊維強化樹脂との主に機械特性面でのリサイクル性能の比較
- b) ベース樹脂のリサイクル熱履歴による劣化度の検証と熱劣化抑制・再生処方の検証のための添加剤(加工熱安定剤、酸化防止剤など)の分析と分子量測定を実施した。

4-3-3. 取り組み結果

【水比重方式の評価結果】

まず、現在の家電リサイクル工場にて、PPの選別工程でよく用いられている、水比重選別を用いたCNF複合樹脂の選別について検討を行った。PPの比重を0.9、CNFの比重を1.5(要出典)とすると、表4-3(1)、図4-3(2)に示すように、CNF含有率が約17%にて、比重が1.0となる。

表 4-3(1) PPが母材の場合のCNF含有率による比重の変化

CNF含有率/%	比重
0	0.9
10	0.96
20	1.02
30	1.08
40	1.14
50	1.2
60	1.26
70	1.32
80	1.38
90	1.44
100	1.5

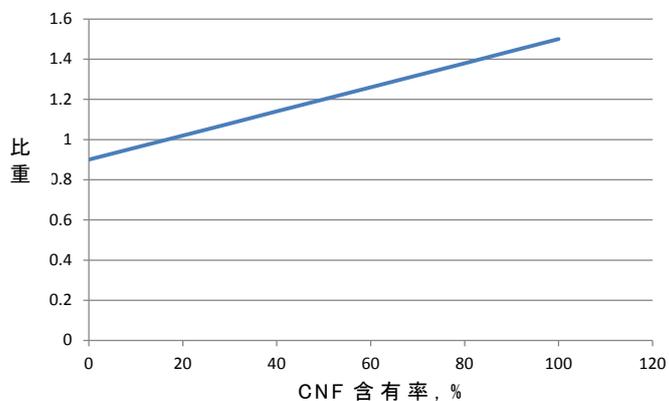


図 4-3(2) PPが母材の場合のCNF含有率による比重の変化

この試算から予測されるとおり、簡易実験においても、今回製作した、CNFPPの場合、CNF含有率が 10%、15%のものは水に浮き、50%のものは水に沈むという結果が確認された。その様子を図 4-3(3)に示す。比重の実測値では、含有率 10%品は 0.94、15%品は 0.95、50%品は 1.12 という結果であり、表 4-3(1)の試算結果よりは小さい比重となった。

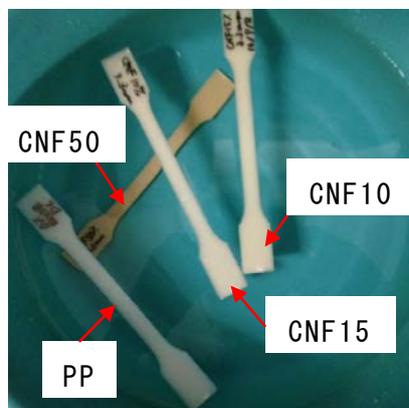


図 4-3(3) CNFPPの水比重選別評価結果

この結果より、水比重を用いたCNFPPの選別に対しては以下のことが言える。母材樹脂の違いについては、CNF含有率が17%程度のものまでは、PPと同様に水に浮くことを用いて選別できる可能性がある。逆にCNF含有率が17%を超えると水に沈むため、母材であるPPとは異なる結果となる。

CNF含有/非含有の違いについては、CNF含有率が17%を超えると水に沈むため、CNF非含有品と選別できる可能性がある。

【中赤外分光方式の評価結果】

樹脂の種別を特定するための方法として、フーリエ変換赤外分光(FTIR)がある。本評価では、まず対応波数 550cm^{-1} – 4000cm^{-1} と広く、高精度な測定が可能である全反射測定法(ATR)を用いてスペクトルを測定した。測定の様子を図4-3(4)に測定結果を図4-3(5)に示す。

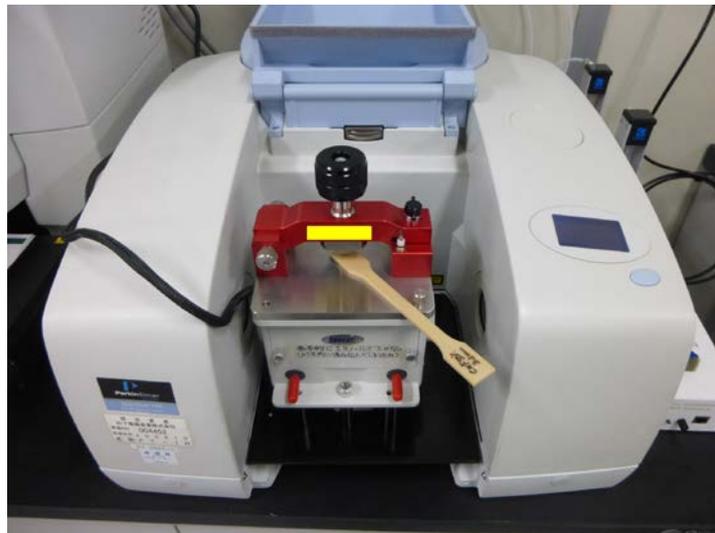


図4-3(4) ATRスペクトルの測定の様子

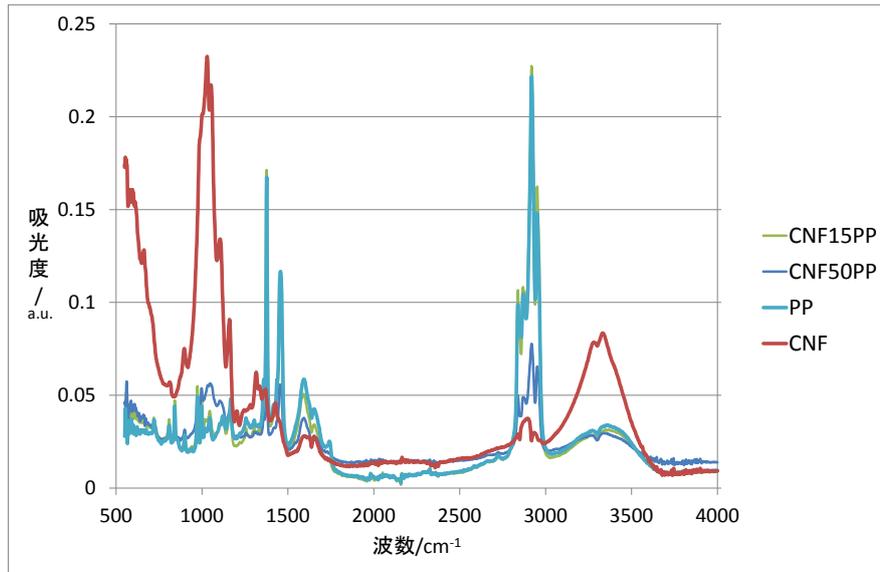


図4-3(5) CNFPPのATRスペクトルの測定結果

図4-3(5)のPPとCNFのスペクトルに着目すると、 3000cm^{-1} 弱では、PPでは大きな吸収ピークが確認できる。また 1000cm^{-1} 付近では、CNFでおおきな吸収ピークが確認できる。図4-3(6)に 3000cm^{-1} 付近を、図4-3(7)に 1000cm^{-1} 付近を拡大したスペクトルを示す。

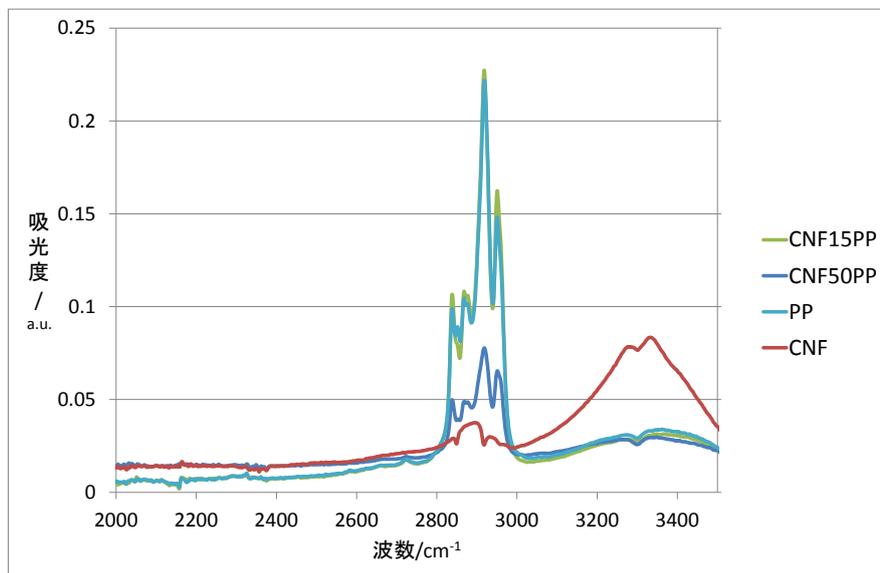


図4-3(6) CNFPPの 3000cm^{-1} 近傍でのATRスペクトルの測定結果

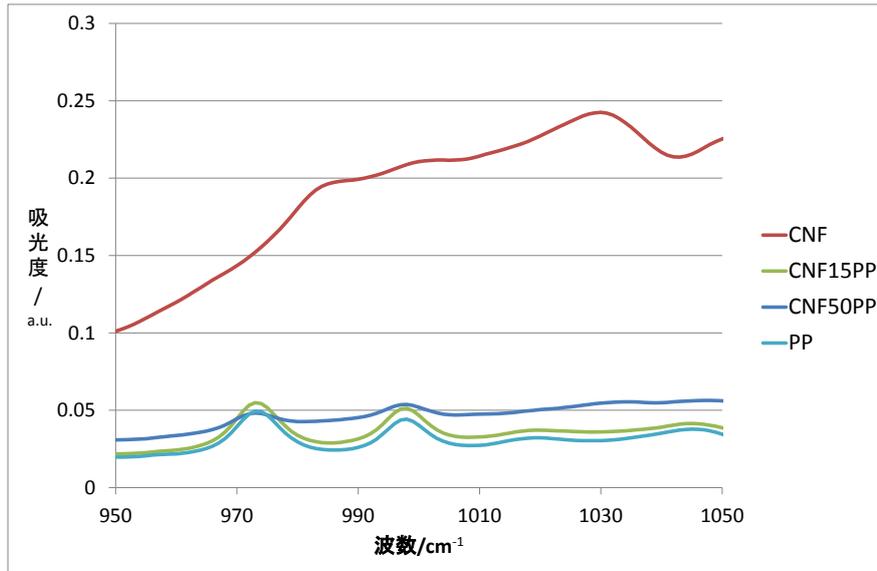


図 4-3(7) CNFPPの 1000cm^{-1} 近傍でのATRスペクトルの測定結果

図 4-3(6)と図 4-3(7)から、CNF含有率が50%のCNFPPは、CNF非含有PPとの違いが認識できる。一方で、CNF含有率15%のCNFPPはCNF非含有PPとの違いは認識できない。また、CNF含有率15%、50%のCNFPPからはともに母材のPPの特徴ピークが認識できる。

また、非接触で、高速測定が可能な、ハイパースペクトルカメラ(HSC)を用いたスペクトル測定も実施した。測定の様子を図 4-3(8)に、測定結果を図 4-3(9)に示す。使用したHSCの対応波数は 2000cm^{-1} から 3333cm^{-1} である。



図 4-3(8) HSCでのスペクトルの測定の様子

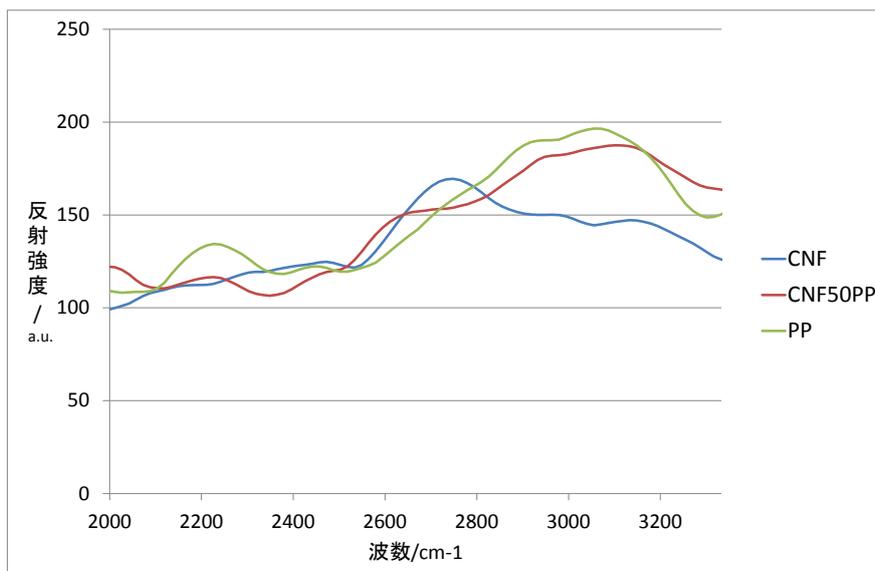


図 4-3(9) HSCでのスペクトルの測定結果

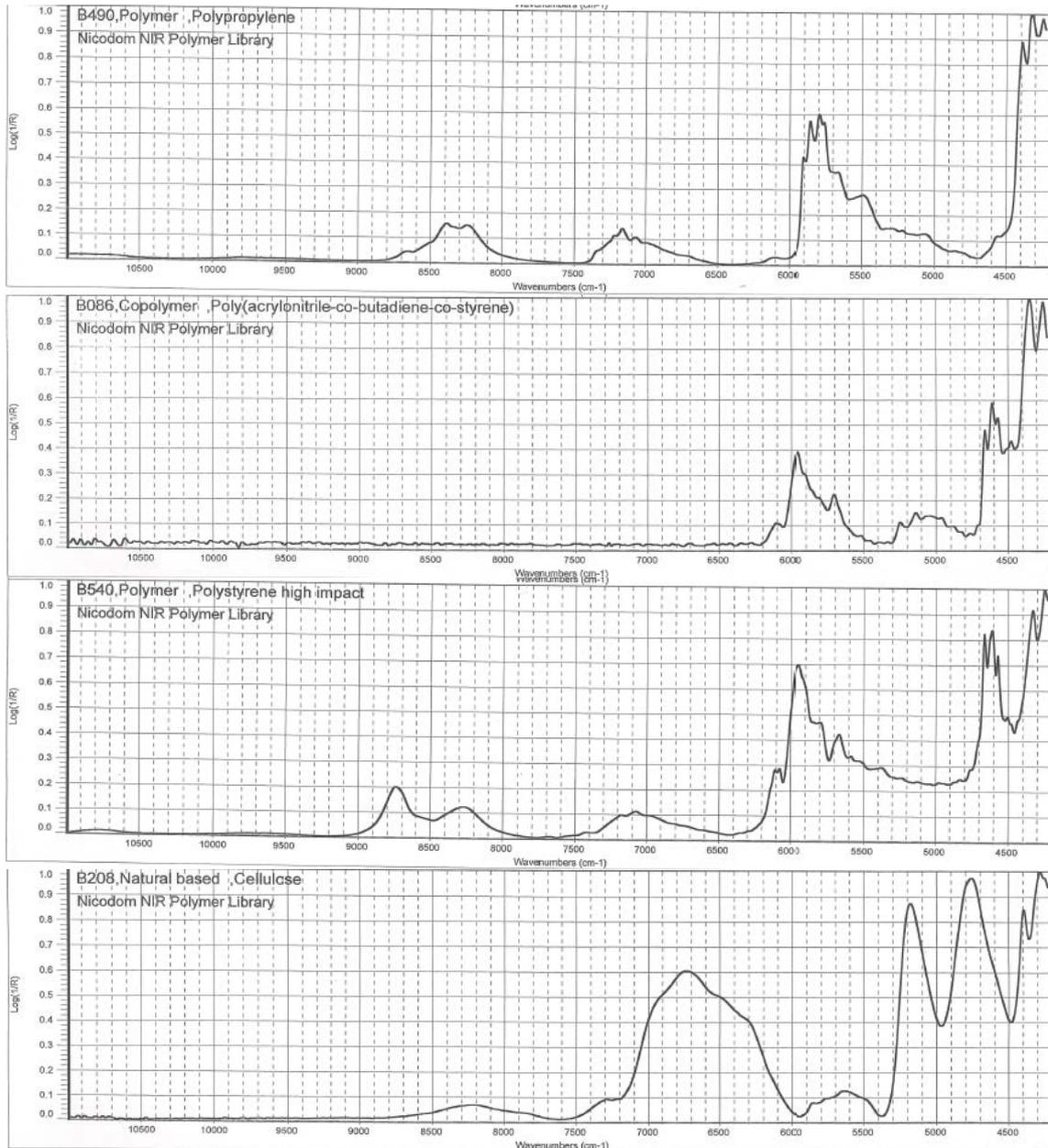
ハイパースペクトルカメラを用いた測定においても、ATR測定と同様に3000cm⁻¹近傍におけるCNF含有率50%とPPの違いが認識できる。

以上の結果より、中赤外分光法によって、含有率50%以上に対しては、CNF含有/非含有を認識できることが明らかになった。

【近赤外分光方式の評価結果】

家電リサイクル工場にて、乾式で樹脂選別が可能であり近年普及が進んでいるものとして近赤外線分光を用いたものがある。

ここでは、近赤外線とは波長 1.0 μm~2.5 μm の電磁波と定義する。近赤外線を種類の異なる樹脂に照射すると、樹脂の種類に応じて固有の波長の近赤外線のみが吸収される。この吸収に関する情報を分析することにより、樹脂の種類を特定することができる。近赤外線選別により、家電によく使用されているPP、ポリスチレン樹脂(PS)、アクリロニトリルブタジエンスチレン樹脂(ABS)が選別可能であり、これら3つを母材として用いたCNF複合樹脂の選別にあたり、まずは、PP、PS、ABSとCNFの近赤外線の分光スペクトル(近赤外線スペクトル)について調査を行った。図4-3(10)に示すとおり、CNFの近赤外線スペクトルは、PP、PS、ABSのいずれとも違いが確認できる³⁾。



出所 NIR POLYMER LIBRARY NICODROM 1999

図4-3(10) PP、PS、ABSとセルロースの近赤外線スペクトル

近赤外分光法を用いた場合には、CNFPPの近赤外線スペクトルは、PPとセルロースの含有量に応じたそれぞれのスペクトルの足し合わせになることが予想される。

そこで、CNFPPで母材のPPに対するCNFの含有比率(wt%)を変化させたサンプルに対して、近赤外線スペクトルを測定した。スペクトル測定の様子を図4-3(11)に、測定結果を図4-3(12)に示す。

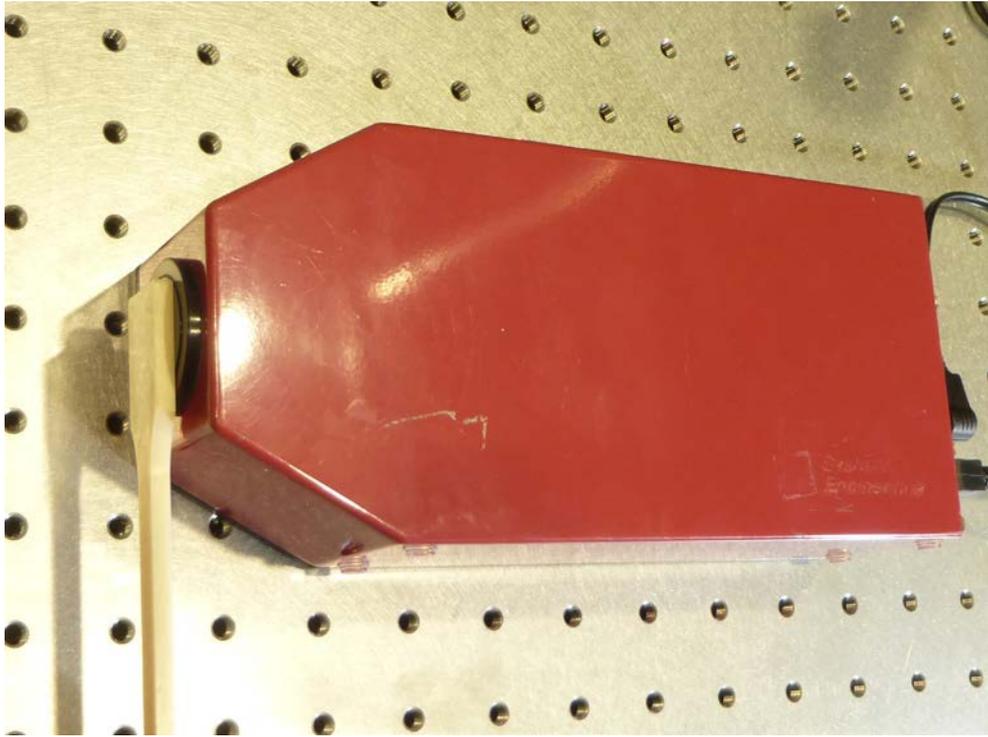


図4-3(11) 近赤外線スペクトル測定の様子

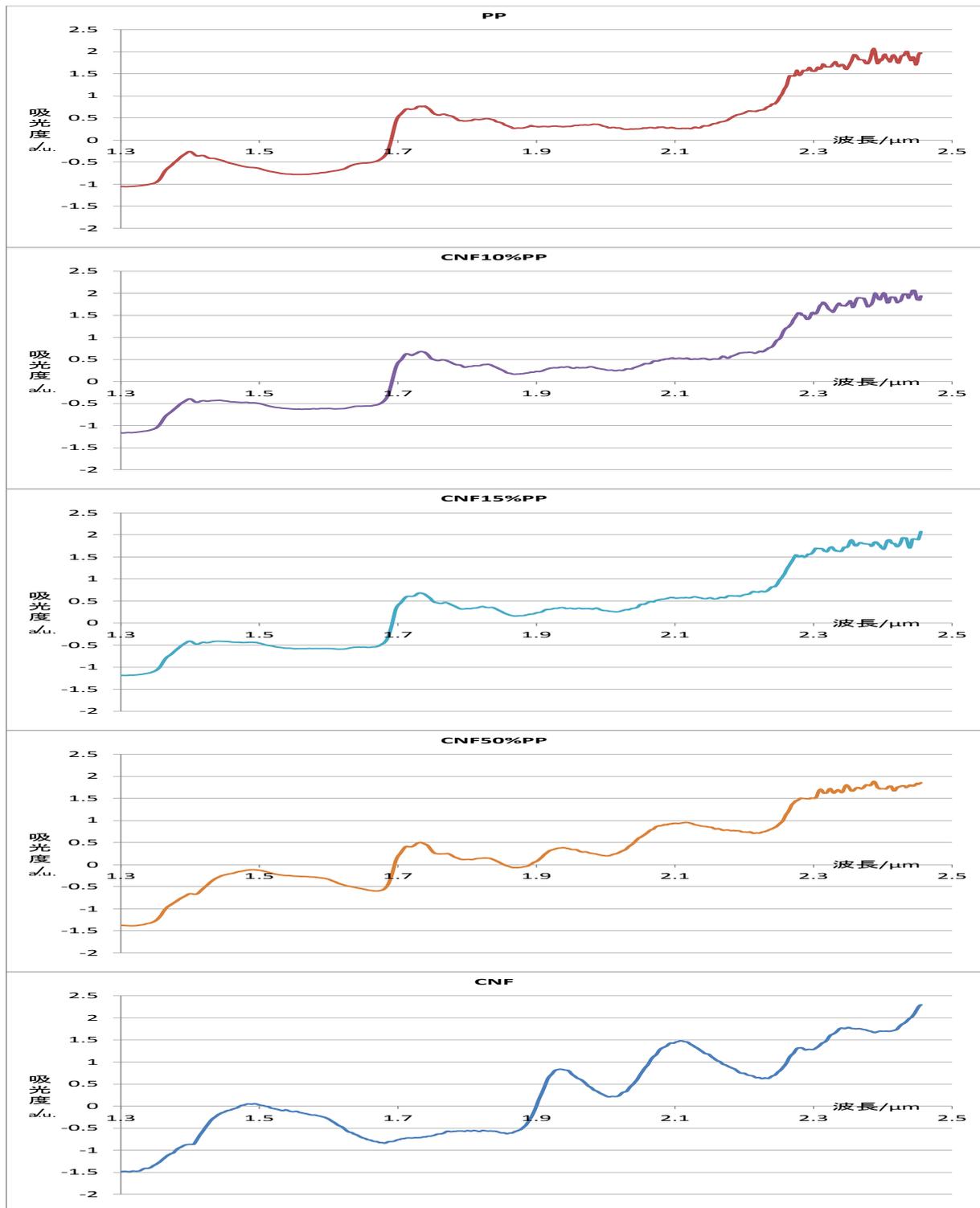


図4-3(12) CNFPPの近赤外線スペクトルの測定結果

図4-3(12)に示すように、今回測定したCNFPPでは、予想通り、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。

この結果を踏まえ、洗濯機でのCNFPPの置き換え候補であるGFPPに対しても、同様に近赤外線スペクトルの測定を実施した。GFPPはGF含有量15%のものを使用した。その結果を図4-3(13)に示す。

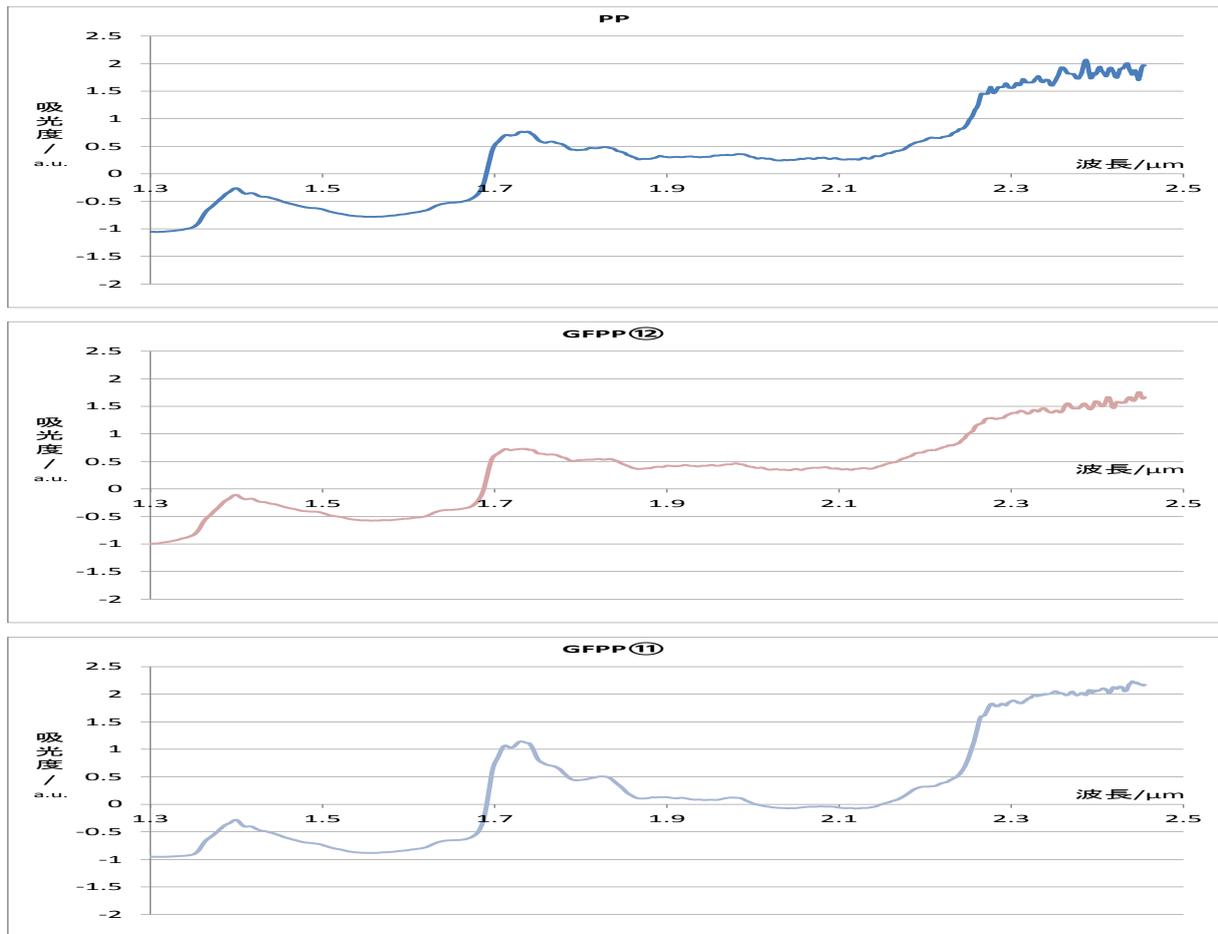


図4-3(13) GFPPの近赤外線スペクトルの測定結果

GFPPではCNFPPの場合と異なり、スペクトルの特徴ピークはPPと完全に一致しており、母材がPPであることは認識できるが、GFを含有しているものと含有していないものを認識することは不可能であった。

この観点では、GFPPをCNFPPに置き換えることは、リサイクルにおける選別工程で優位性があると言える。

CNFPP同様のスペクトル測定を母材にABSを用いたCNFABSについても実施した。そ

の結果を図4-3(14)に示す。

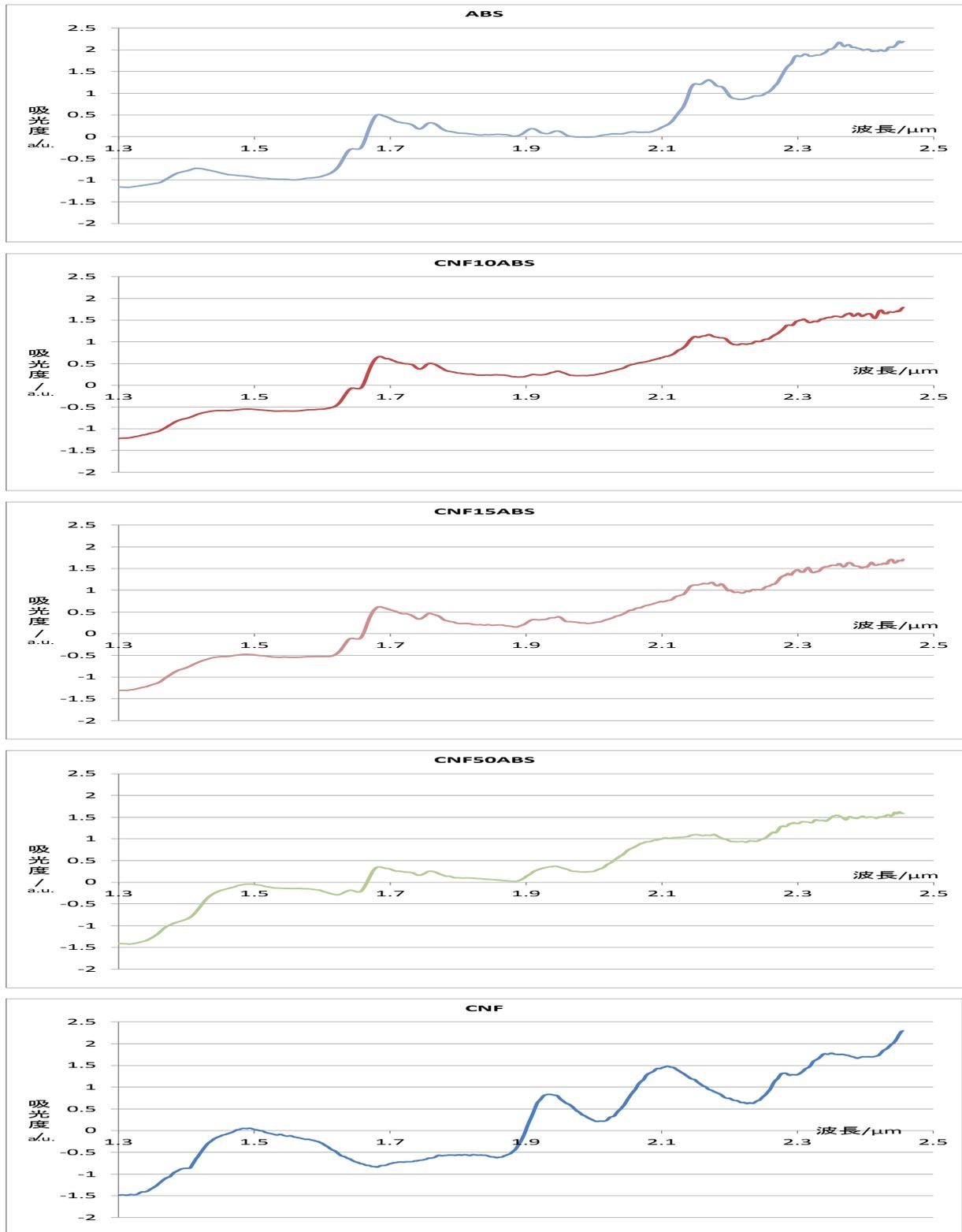


図4-3(14) CNFABSの近赤外線スペクトルの測定結果

図4-3(14)に示すように、CNFABSにおいてもCNFPPと同様の結果が得られた。

以上の結果より、近赤外分光法によって、母材樹脂の種別（PPとABS）と含有率10%以上に対しては、CNF含有/非含有を認識できることが明らかになった。

(2)再生リサイクルの取り組み結果

【ガラス繊維強化樹脂との機械物性面でのリサイクル性能の比較】

対象樹脂は、CNF15%複合樹脂、短繊維ガラス40%含有強化樹脂（短GF樹脂）、長繊維ガラス40%含有強化樹脂（長GF樹脂）及び、ベースレジンであるナチュラルPP樹脂である。

ベースPP樹脂以外の樹脂については、初期新材ペレット100%にて、JIS K7139 2009に準拠したタイプA1の多目的試験片（ダンベル試験片）を射出成形により作製した。射出成形は、JIS K7152-1又はJIS K7154-1の規定によって実施した。

次に、上記で成形したランナー・スプルー及び残余成形品を粉砕機にて粉砕し、100%を用いた場合と、表4-3(2)に示す比率（リグラインド率）で新材へ配合した混合樹脂を用いて、2回目の成形熱履歴を経たダンベル試験片を作製した。なお、表中のNo.1は、それぞれの繊維含有での新材ペレット100%樹脂での1回目成形を表している。

表4-3(2) 2回目成形品の1回熱履歴品の新材への配合比率（リグラインド率）

No.	1	2	3	4	5
リグラインド率	0%	25%	50%	75%	100%

(a)機械特性試験結果

(a-1)引張強度（引張降伏応力）

図4-3(15)から図4-3-2(18)に引張降伏応力の測定結果を示す。それぞれ横軸が1回熱履歴品の新材に対する粉砕再生材配合比率（リグラインド率）である。いずれも、傾向として、リグラインド率が高いほど強度は低下する傾向にある。25%、50%、75%、100%については、2回目の熱履歴品であるので、リサイクル性能は、横軸0での新材100%成形に対する保持率で評価することとし、図4-3(19)に示した。

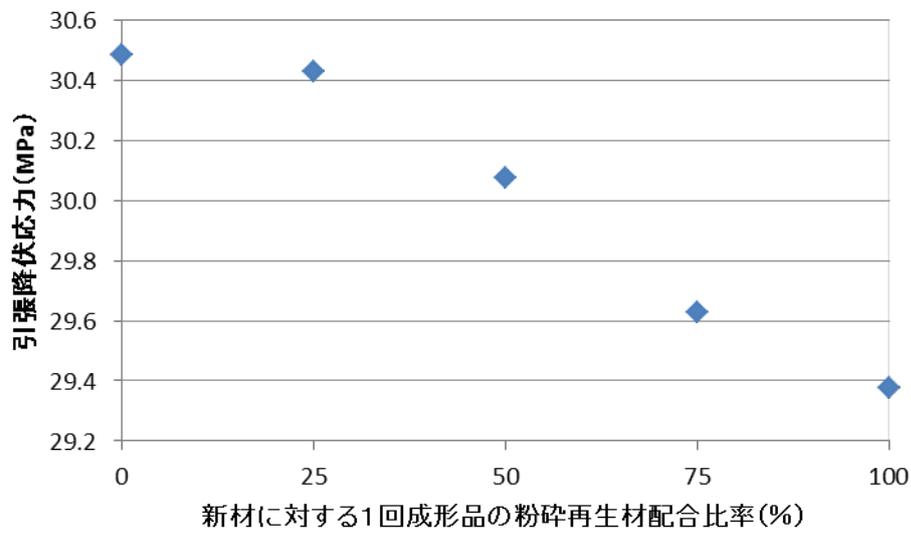


図4-3(15) CNF15%品での引張降伏応力

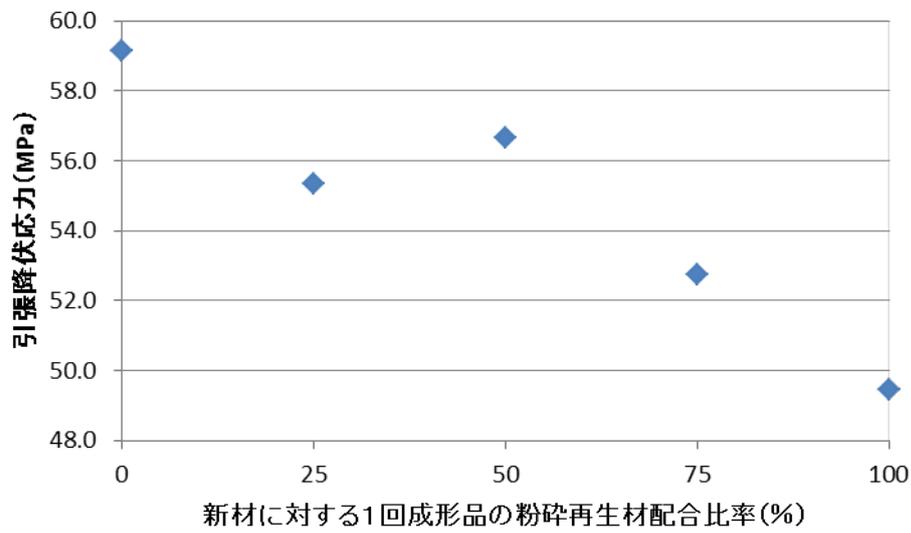


図4-3(16) ガラス短繊維強化40%品での引張降伏応力

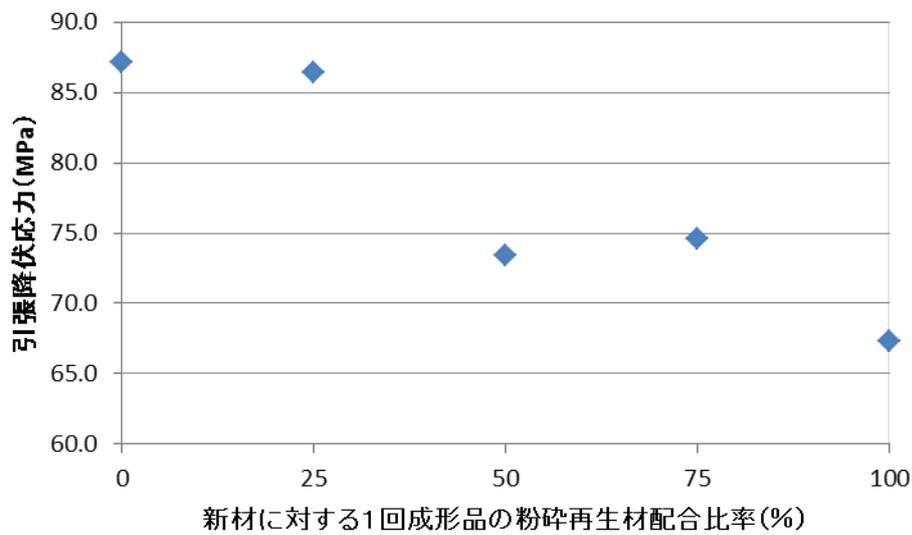


図4-3(17) ガラス長繊維強化40%品での引張降伏応力

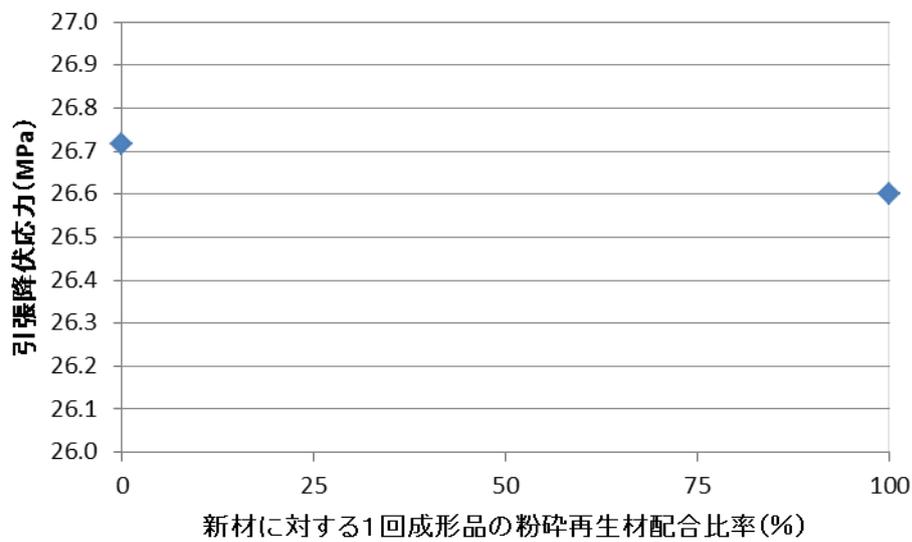


図4-3(18) ベース樹脂での引張降伏応力

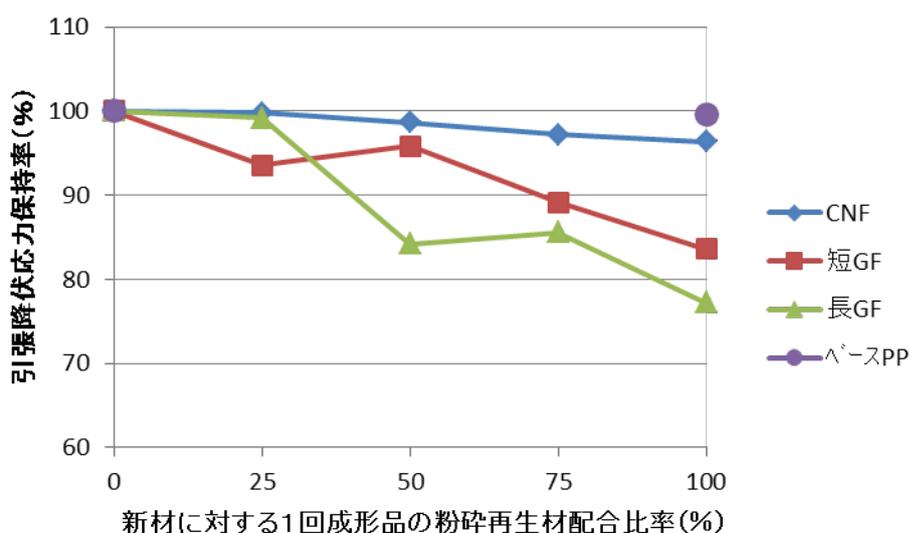


図4-3(19) 各樹脂での、引張降伏応力の保持率

図4-3(19)の結果より、ガラス繊維強化PP樹脂では、傾向として短繊維よりも長繊維のほうが、引張強度の保持率が低下する傾向にある(一部、25%の場合を除く)。更に、リグラインド率が高くなれば、強度も低下しており、リサイクル活用する場合は、一定のリグラインド率以下である必要があることがわかる。これは、先に述べたリサイクル時の繊維の破断による強化繊維の短繊維化のため、強度が低下していることであることが容易に推察される。100%リグラインドの場合は、短繊維で保持率が84%まで下がり、更に長繊維では77%まで低下し、リサイクルが困難であることがわかる。

一方、CNF複合樹脂においては、リグラインド率が100%の場合でも、保持率が96%を保持しており、1回の成形熱履歴の場合では引張強度としてリサイクル可能であると判断できる。これは、CNFがGFと比べて繊維破断がしにくい、または繊維破断した場合でもCNF微細化(マイクロファイバー化、ナノファイバー化)の効果が発現している可能性があると考えられる。

今後は、繰返し成形熱履歴や実製品での長期使用を経た場合のCNFの挙動の検証と共にリサイクル性能を検証していく必要がある。

(a-2) 引張強度(引張降伏ひずみ)

図4-3(20)から図4-3(23)に引張破壊ひずみの測定結果を示す。それぞれ横軸が1回熱履歴品の新材に対する比率(リグラインド率)である。1回目成形を100とした保持率としてまとめて図4-3(24)に示す。いずれの場合も、92%から103%の間であり、繊維強化PP樹脂においては、成形熱履歴による引張降伏ひずみの変化は少ない。従って、引張降伏ひずみでリサイクル性能を評価するのは困難であると考えられる。

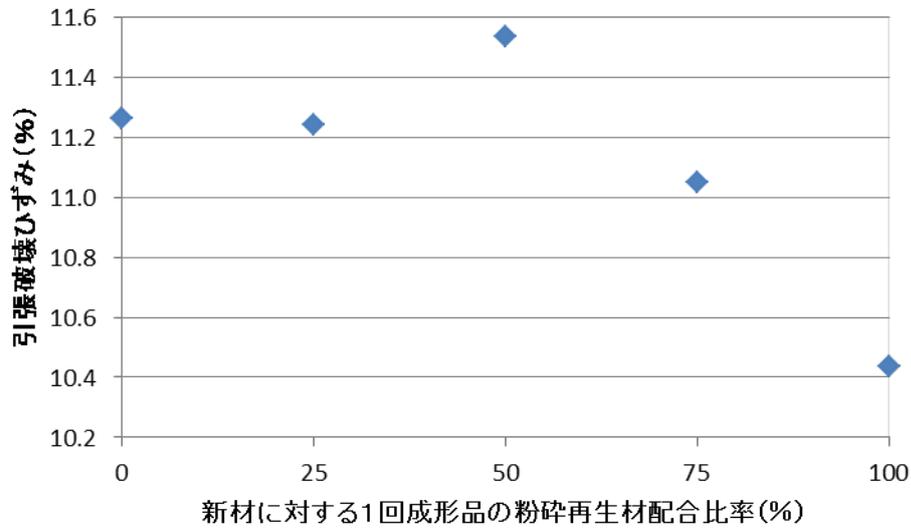


図4-3(20) CNF15%品での引張破壊ひずみ

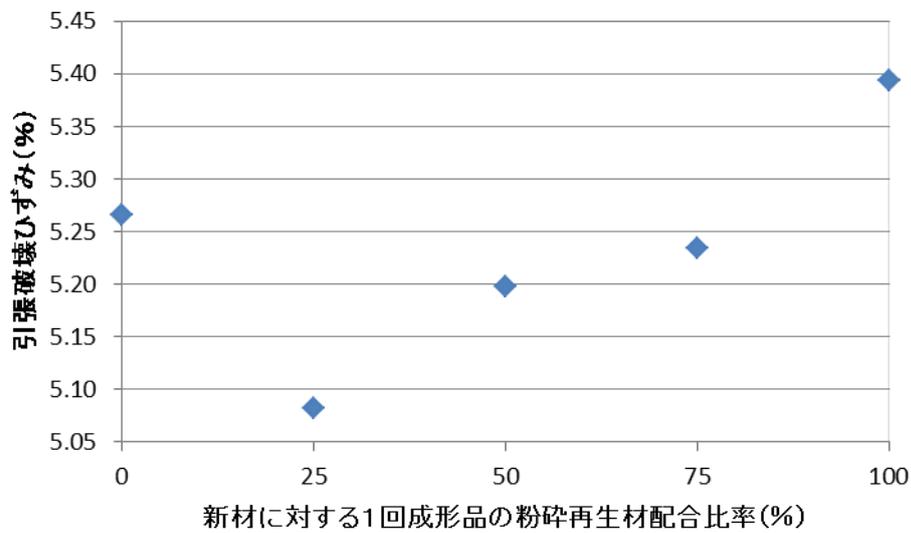


図4-3(21) ガラス短繊維強化40%品での引張破壊ひずみ

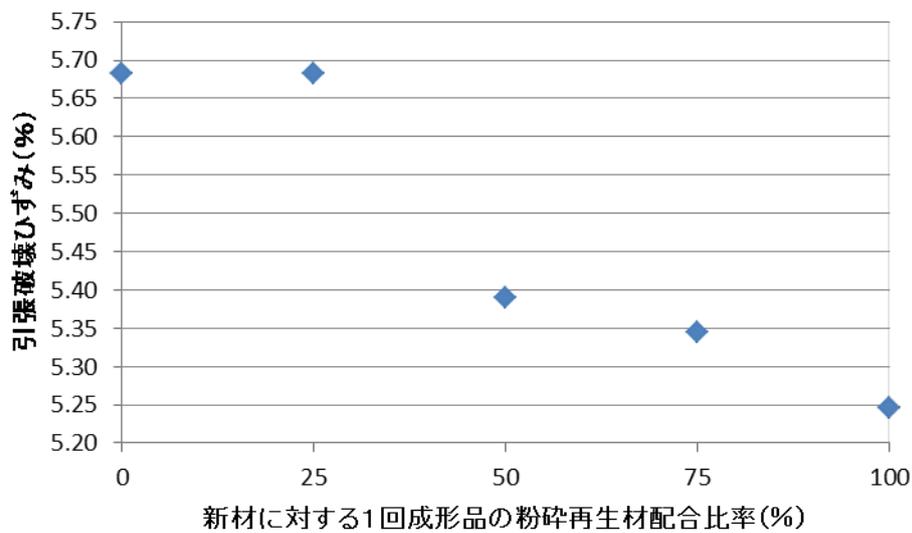


図4-3(22) ガラス長繊維強化40%品での引張破壊ひずみ

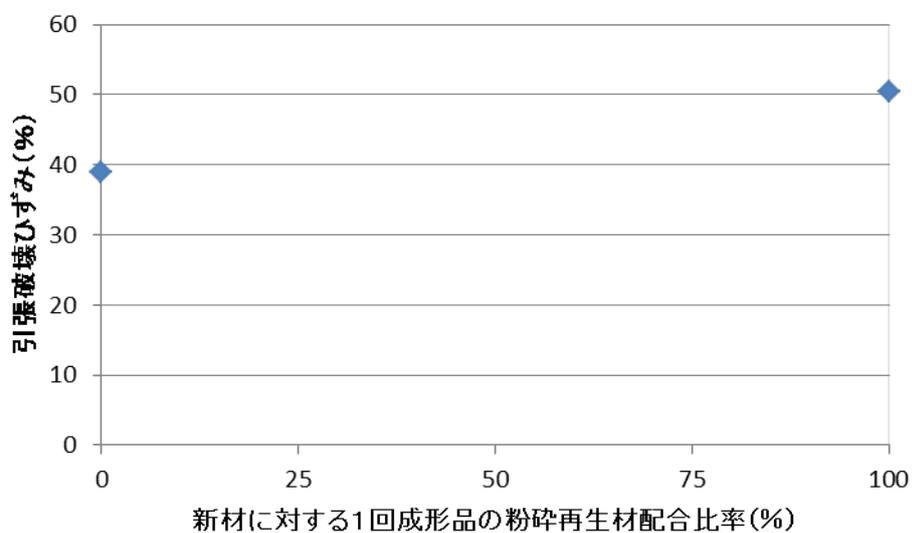


図4-3(23) ベース樹脂での引張破壊ひずみ

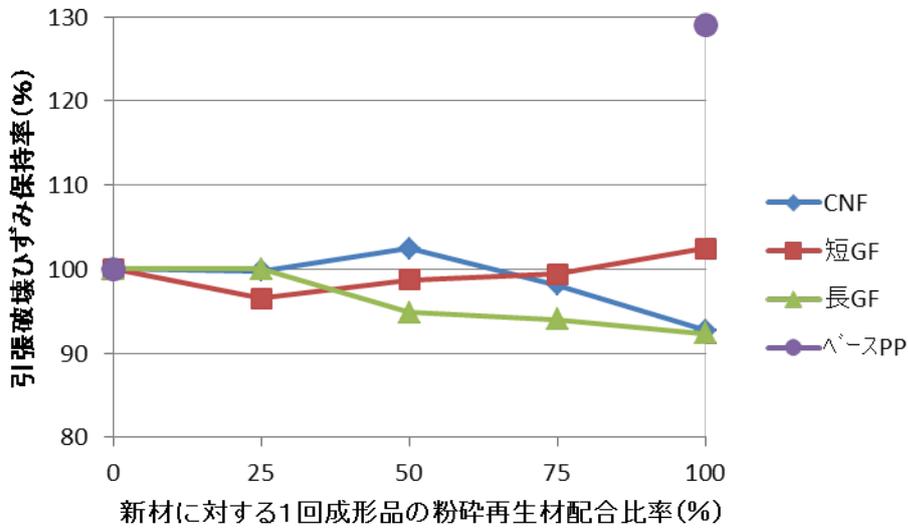


図4-3(24) 各樹脂での、引張破壊ひずみの保持率

(a-3) 曲げ強度

図4-3(25)から図4-3(28)に曲げ強さの測定結果を示す。前記と同様に、それぞれ横軸が1回熱履歴品の新材に対する比率(リグラインド率)である。図4-3(28)のベース樹脂以外では、いずれも、傾向として、リグラインド率が高いほど強度は低下する傾向にある。1回目成形を100とした保持率としてまとめて図4-3(29)に示す。

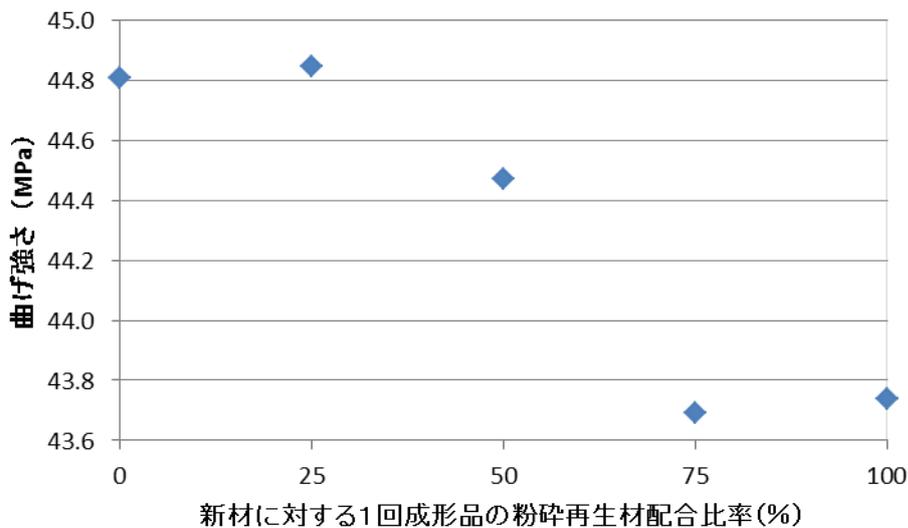


図4-3(25) CNF15%品での曲げ強さ

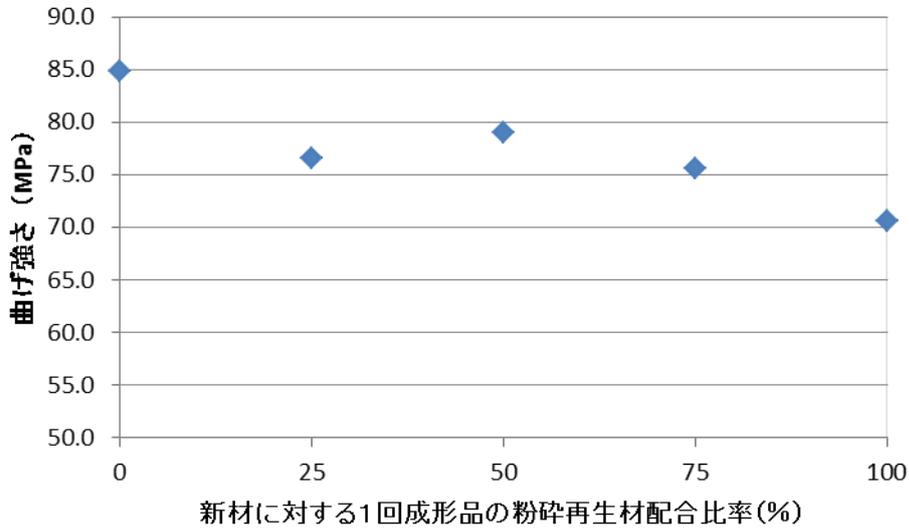


図 4-3(26) ガラス短繊維強化40%品での曲げ強さ

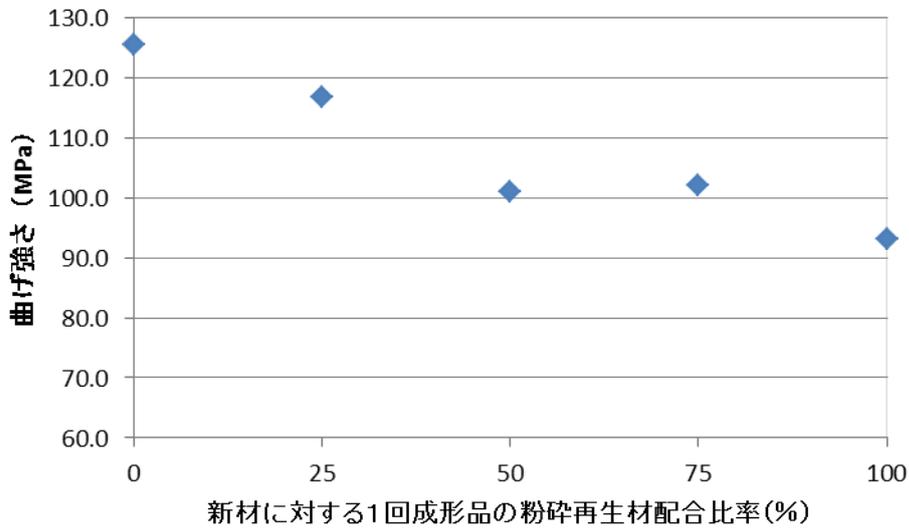


図 4-3(27) ガラス長繊維強化40%品での曲げ強さ

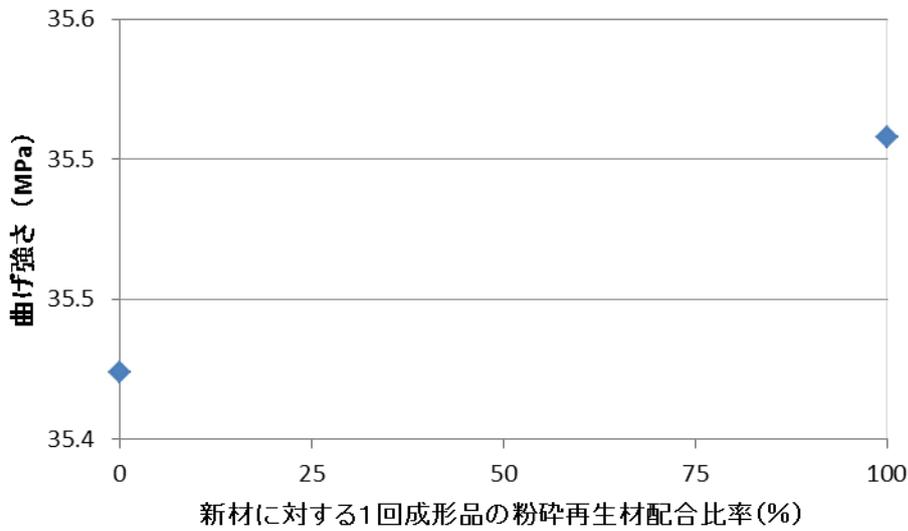


図4-3(28) ベース樹脂での曲げ強さ

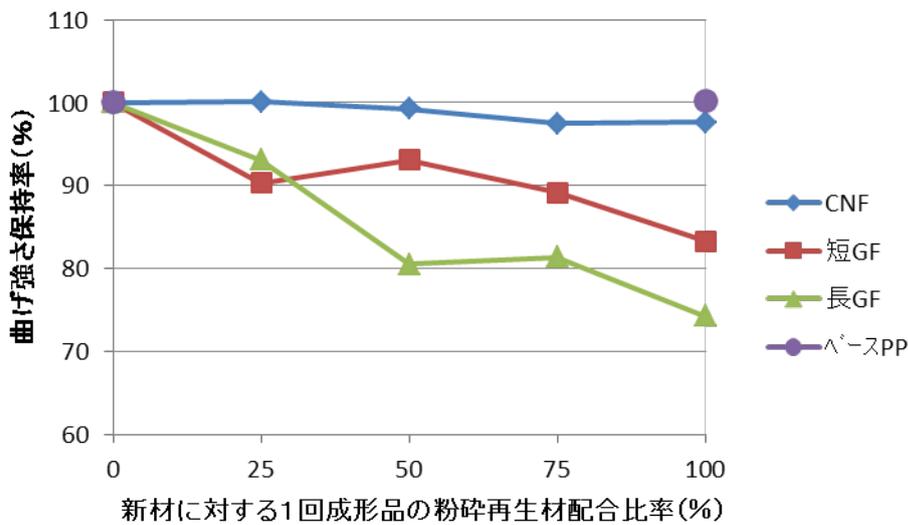


図4-3(29) 各樹脂での、曲げ強さの保持率

図4-3(29)の結果より、引張強度と同様に、ガラス繊維強化PP樹脂では、傾向として短繊維よりも長繊維のほうが、曲げ強さの保持率が低下する傾向にある(一部、25%の場合を除く)。更に、リグラインド率が高くなれば、強度も低下しており、リサイクル活用する場合は、一定のリグラインド率以下である必要があることがわかる。これは、先に述べた

リサイクル時の繊維の破断による強化繊維の短繊維化のため、強度が低下していることであることが容易に推察される。100%リグラインドの場合は、短繊維で保持率が83%まで下がり、更に長繊維では74%まで低下している。

一方、CNF複合樹脂においては、リグラインド率が100%の場合でも、保持率が97%を保持しており、1回の成形熱履歴の場合では曲げ強さとしてリサイクル可能であると判断できる。

(a-4) 曲げ弾性率

図4-3(30)から図4-3(33)に曲げ弾性率の測定結果を示す。いままでと同様に、それぞれ横軸が1回熱履歴品の新材に対する比率(リグラインド率)である。いずれも、傾向として、リグラインド率が高いほど曲げ弾性率は低下する傾向にある。1回目成形を100とした保持率としてまとめて図4-3(34)を示す。

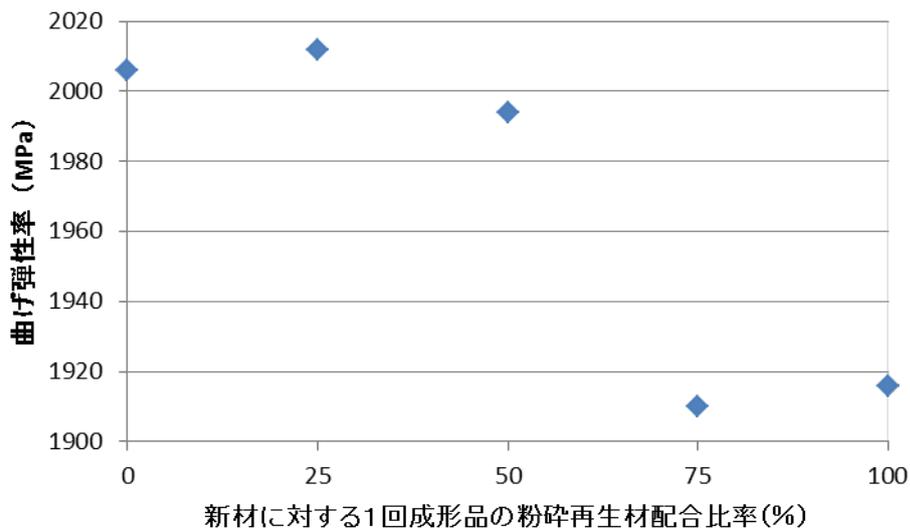


図4-3(30) CNF15%品での曲げ弾性率

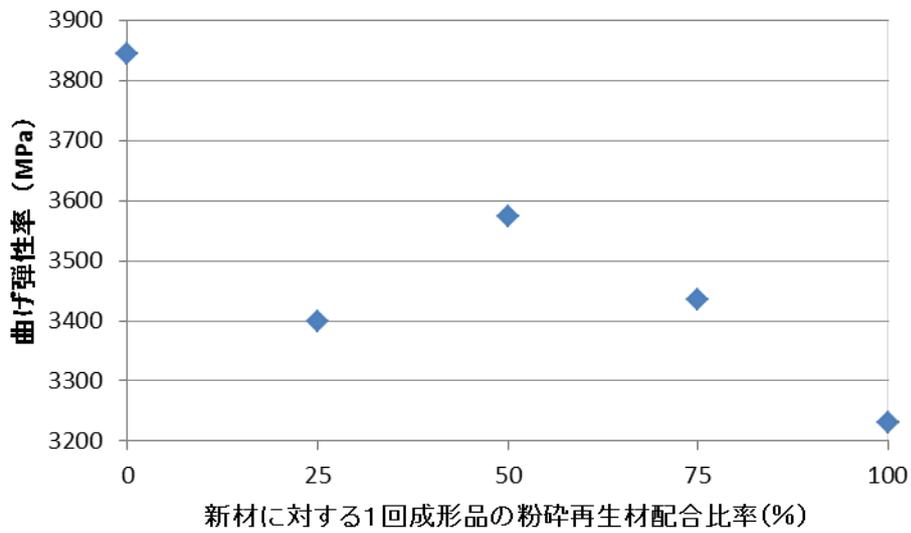


図4-3(31) ガラス短繊維強化40%品での曲げ弾性率

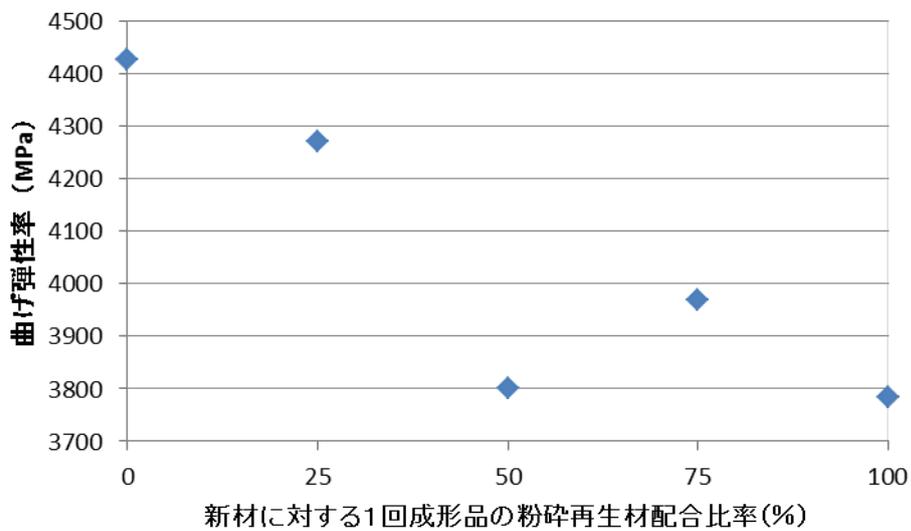


図4-3(32) ガラス長繊維強化40%品での曲げ弾性率

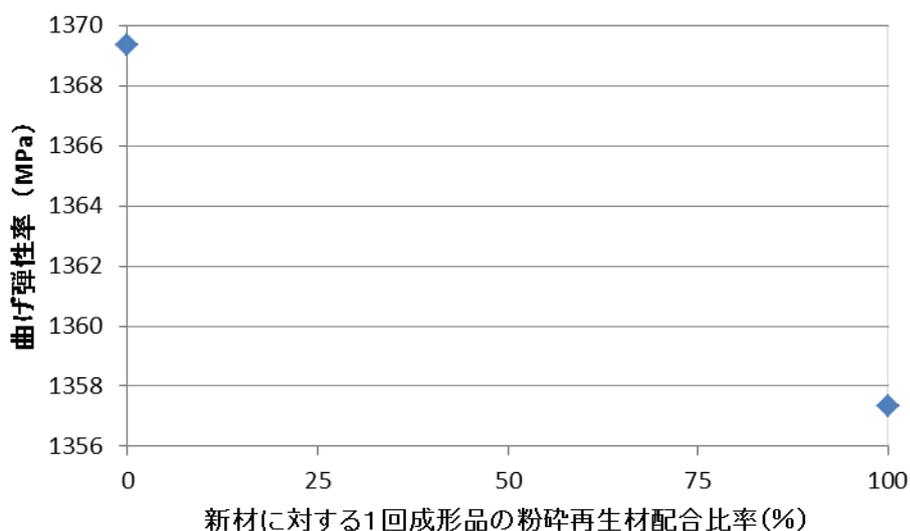


図4-3(33) ベース樹脂での曲げ弾性率

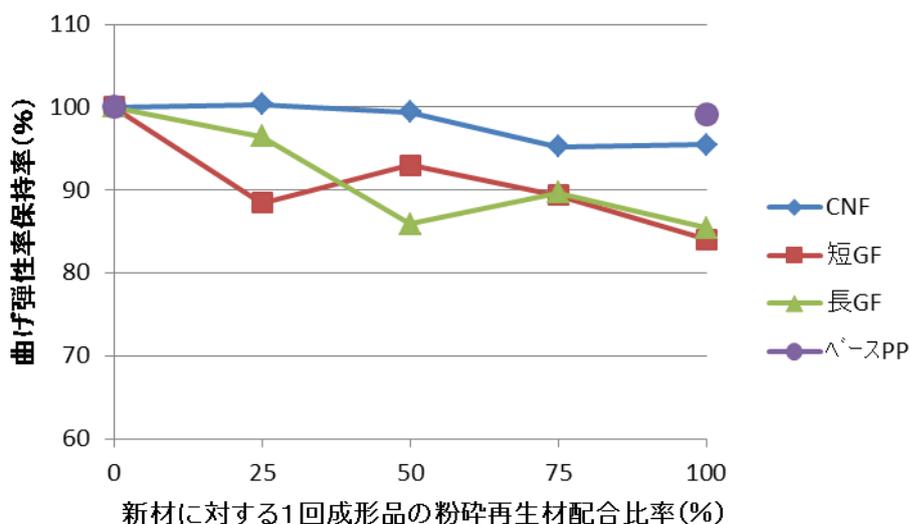


図4-3(34) 各樹脂での、曲げ弾性率の保持率

図4-3(34)の結果より、引張・曲げ強度と同様に、ガラス繊維強化PP樹脂では、傾向として短繊維よりも長繊維のほうが、曲げ弾性率の保持率が低下する傾向にある(一部、25%の場合を除く)。更に、リグラインド率が高くなれば、強度も低下しており、リサイクル活用する場合は、一定のリグラインド率以下である必要があることがわかる。これは、先に述べたリサイクル時の繊維の破断による強化繊維の短繊維化のため、強度が低下していることであることが容易に推察される。100%リグラインドの場合は、短繊維、長繊維で保持率が84%から85%程度まで低下している。

一方、CNF複合樹脂においては、リグラインド率が100%の場合でも、保持率が95%を保持しており、1回の成形熱履歴の場合では曲げ弾性率としてリサイクル可能であると判断できる。

(a-5) シャルピー衝撃強さ

図4-3(35)から図4-3(38)にシャルピー衝撃強さの測定結果を示す。いままでと同様に、それぞれ横軸が1回熱履歴品の新材に対する比率(リグラインド率)である。いずれも、傾向として、リグラインド率が高いほど曲げ弾性率は低下する傾向にある。1回目成形を100とした保持率としてまとめて図4-3(39)を示す。

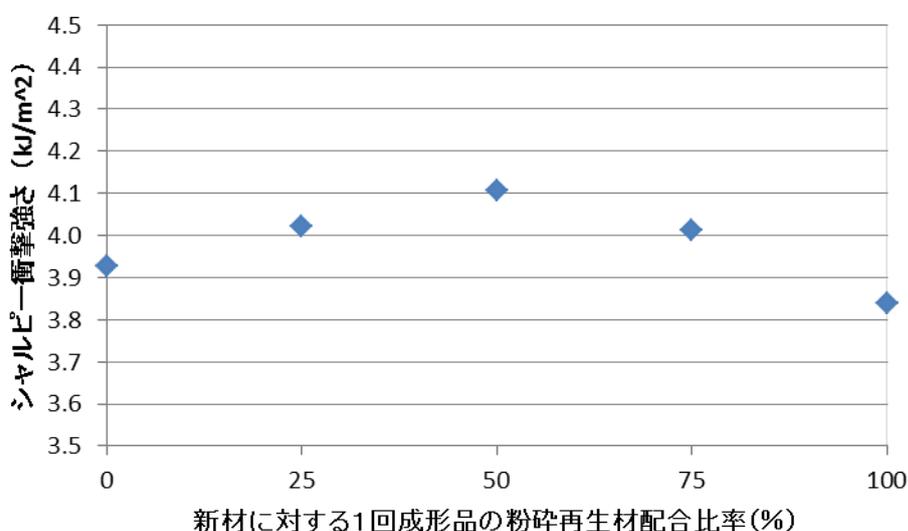


図4-3(35) CNF15%品でのシャルピー衝撃強さ

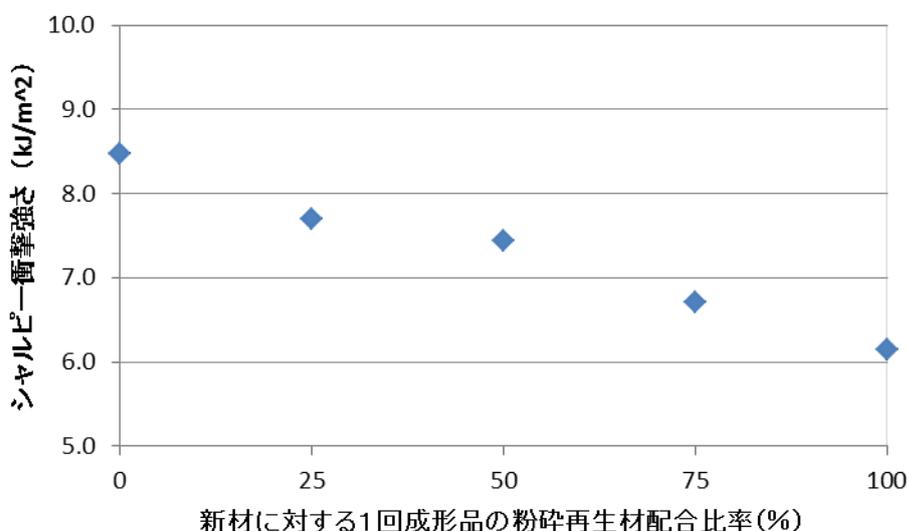


図4-3(36) ガラス短繊維強化40%品でのシャルピー衝撃強さ

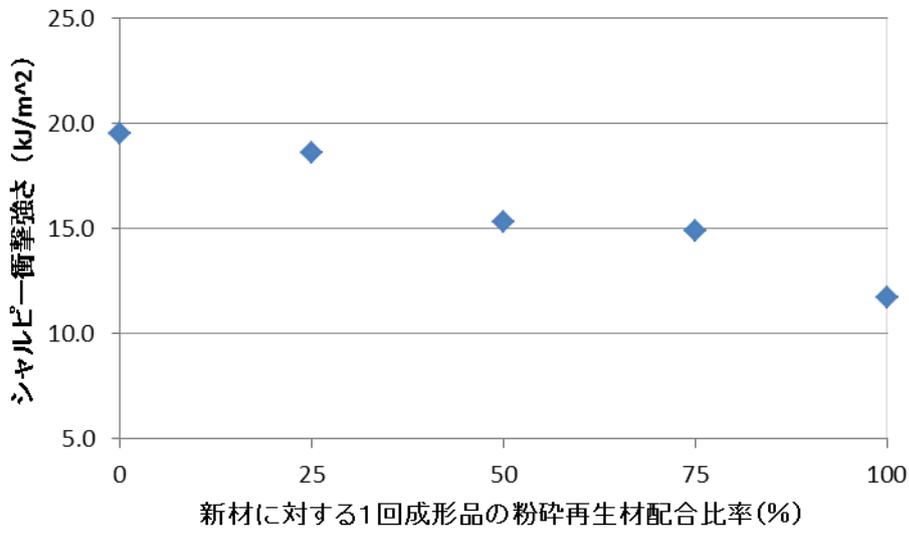


図4-3(37) ガラス長繊維強化40%品でのシャルピー衝撃強さ

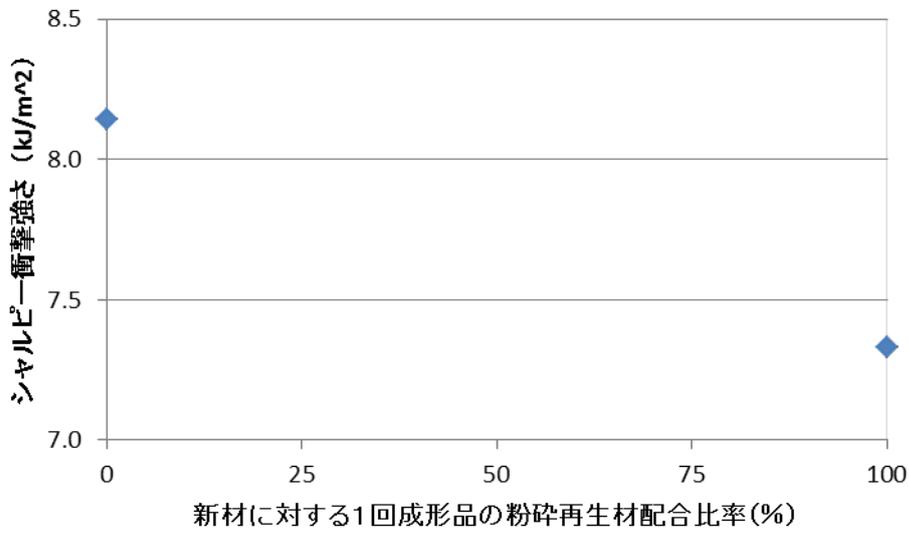


図4-3(38) ベース樹脂でのシャルピー衝撃強さ

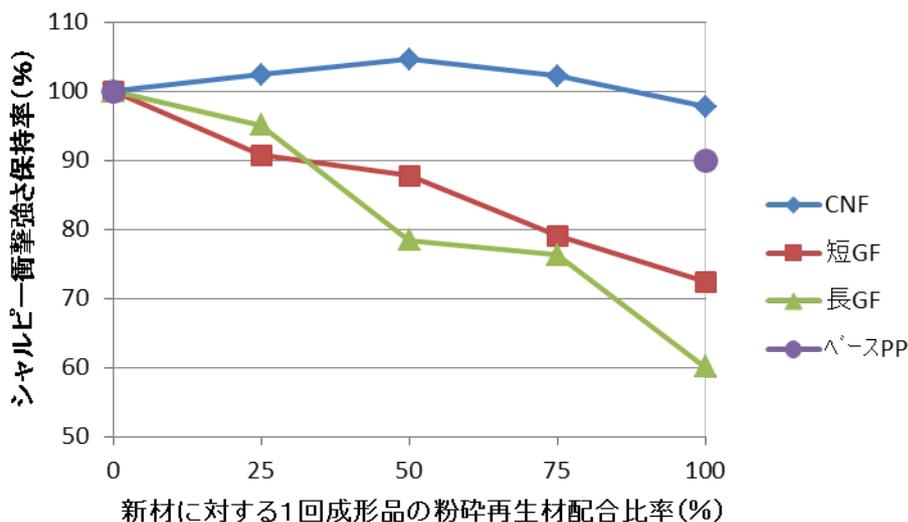


図4-3(39) 各樹脂での、シャルピー衝撃強さの保持率

図4-3(39)の結果より、引張・曲げ強度等と同様に、ガラス繊維強化PP樹脂では、傾向として短繊維よりも長繊維のほうが、シャルピー衝撃強さの保持率が低下する傾向にある(一部、25%の場合を除く)。更に、リグラインド率が高くなれば、強度も低下しており、リサイクル活用する場合は、一定のリグラインド率以下である必要があることがわかる。GF樹脂では、リグラインド率25%で保持率90%程度になり、それ以上のリグラインド率ではリサイクルが困難になってくる。先に述べたリサイクル時の繊維の破断による強化繊維の短繊維化が衝撃強さに対し強く影響を及ぼしていることがわかる。100%リグラインドの場合は、短繊維で保持率が72%まで下がり、更に長繊維では60%まで低下している。

一方、CNF複合樹脂においては、リグラインド率が25%から100%の場合、保持率が104%から97%の間の保持率を有しており、1回の成形熱履歴の場合ではアイゾット衝撃強さとして充分なリサイクル可能であると判断できる。これは、(a-1)でも述べたように、CNFがGFと比べて繊維破断がしにくい、または繊維破断した場合でもCNF微細化(マイクロファイバー化、ナノファイバー化)の効果が発現している可能性があると考えられる。

(a-6) MFR(メルトフローレート)

図4-3(40)から図4-3(43)に曲げ弾性率の測定結果を示す。いままでと同様に、それぞれ横軸が1回熱履歴品の新材に対する比率(リグラインド率)である。いずれも、傾向として、リグラインド率が高いほどMFRは上昇する傾向にある。これは成形熱履歴によ

る樹脂の分子鎖切断による分子量低下や、先に述べた成形時の成形シリンダー混練時や金型ゲート通過時などによる繊維破断により複合樹脂が流れやすくなっているためである。

劣化1回目成形を100とした保持率としてまとめて図4-3(44)に示す。

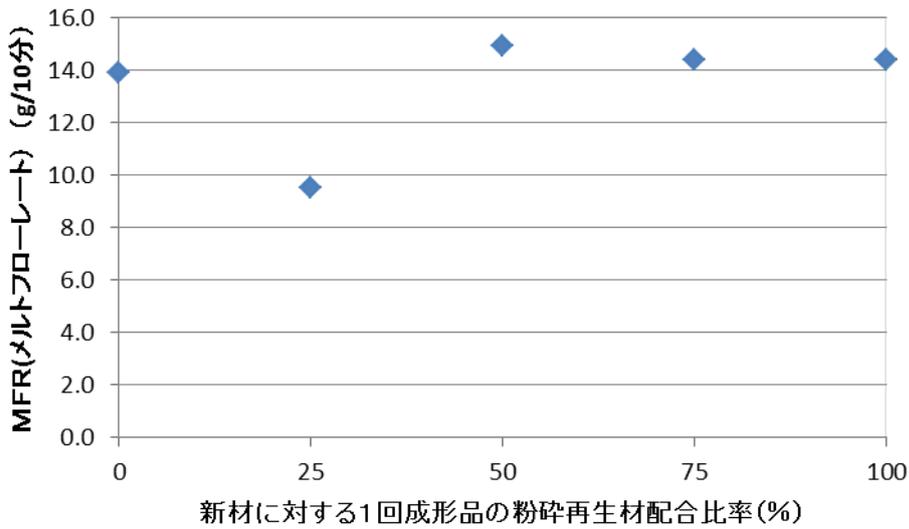


図4-3(40) CNF15%品でのMFR

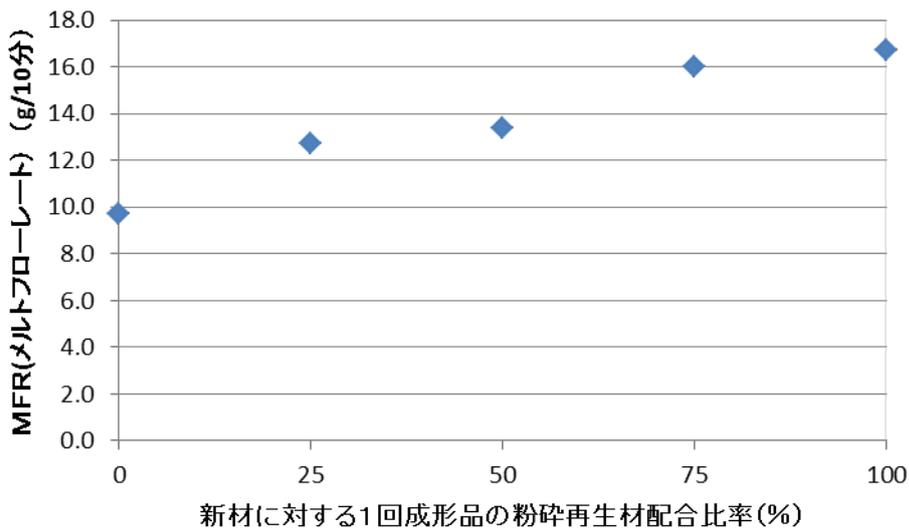


図4-3(41) ガラス短繊維強化40%品でのMFR

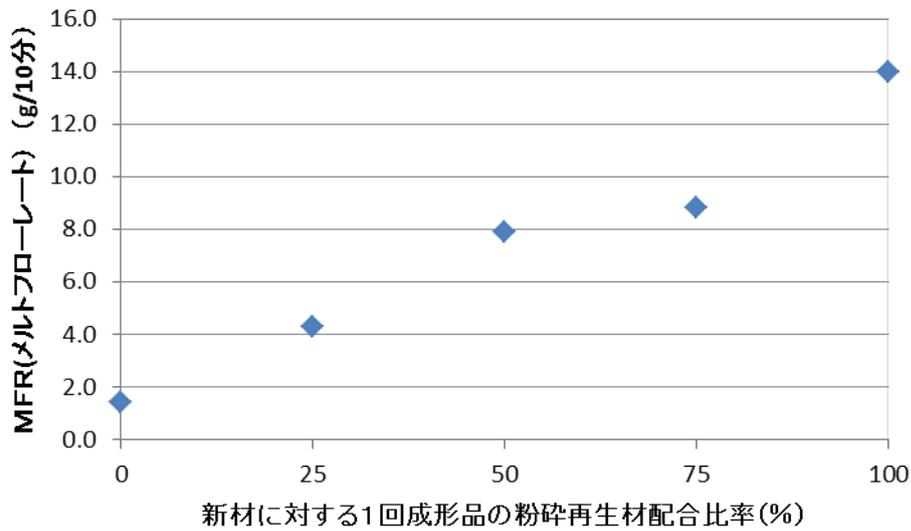


図4-3(42) ガラス長繊維強化40%品でのMFR

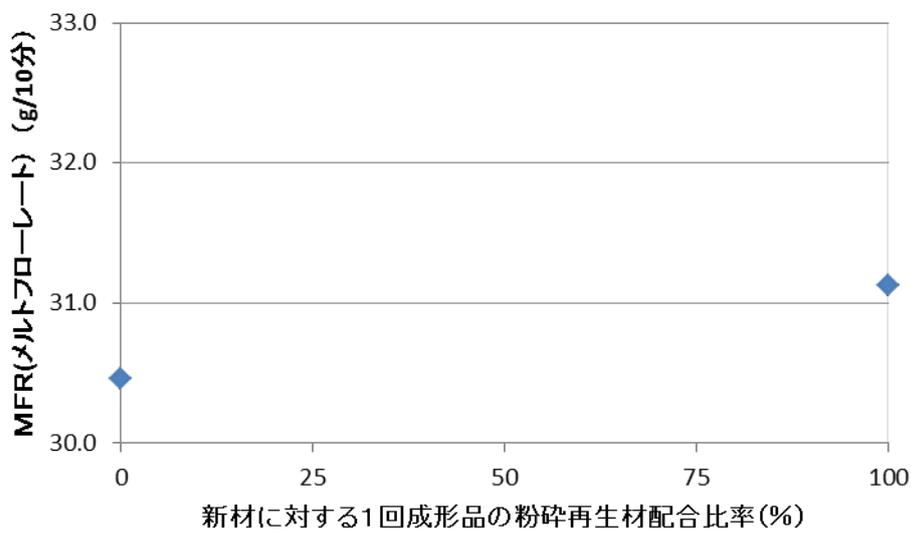


図4-3(43) ベース樹脂でのMFR

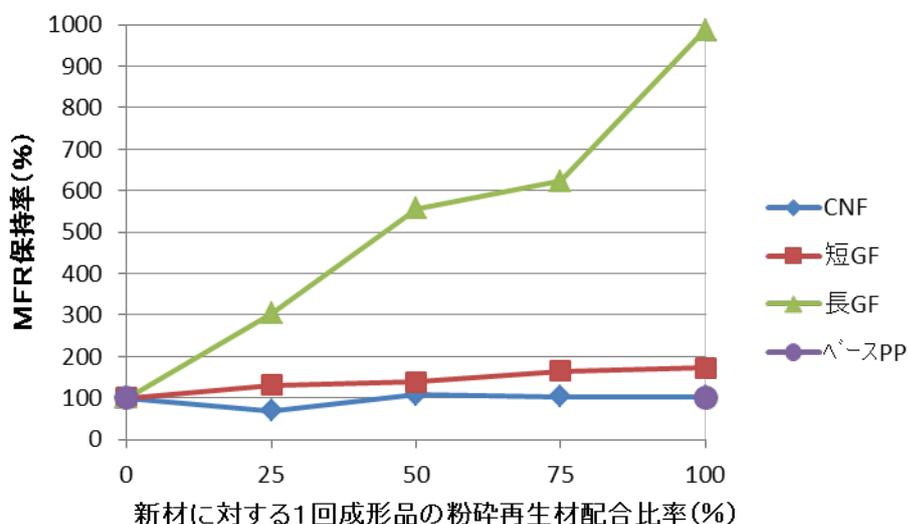


図4-3(44) 各樹脂での、MFRの保持率

図4-3(44)の結果によると、ガラス長繊維の場合は、リグラインド率が高くなるほど繊維破断による流れ性の増加への影響が非常に大きく、図4-3(39)のアイゾット衝撃強さとの相関が強く出ていることがわかる。ガラス長繊維の新材での長さは、ペレット長と同じ11mmであり、射出成形時での繊維破断はもちろんのこと、成形後の粉碎材サイズも3~5mmであることから、繊維破断の影響が大きくなることがわかった。

ガラス短繊維の場合は、元々の新材での平均繊維長が0.4~0.5mm程度⁴⁾であることから、ガラス長繊維ほどの繊維破断の影響はないと考えられる。(a-5)のアイゾット衝撃強さも併せて検討することで、リグラインド率を決定すればよいと考えられる。実際、短繊維30%の樹脂では、再生処方をした場合では、リグラインド率50%までは、アイゾット衝撃強さの保持率が90%以上で⁵⁾、MFRが200%程度以下であれば繰り返し成形でのリサイクル性能も品質面でも所定の仕様範囲内で、量産商品に適用されている⁵⁾。

一方、ベース樹脂での100%リグラインド品のMFR増加は、103%以下となっており、また、CNF複合樹脂においては、MFRの保持率が110%以下に収まっており、このことから繊維破断がほとんどないか或いは繊維破断の影響が少なく、リサイクル性能に優れていることが確認された。

(b) ベース樹脂の熱履歴による分子量の変化

ベースポリプロピレン樹脂のリサイクル時の熱履歴による劣化度を検証するために、分子量、分子量分布を測定した。測定試料は、(1)バージンペレット、(2)バージンペレット100%の成形品、(3) (2)の100%粉碎材の成形品である。

樹脂グレード、測定機関、測定装置等は下記のとおりである。

- ・樹脂名 : PP樹脂(日本ポリプロ製 ノバテックBC03B)
- ・測定機関: 一般財団法人 化学物質評価研究機構
- ・測定方法: 高温GPC(ゲル浸透クロマトグラフ)法によるポリプロピレン換算分子量測定

定

- ・測定装置: 東ソー製 HLC-8121GPC/HT
- ・標準試料: ポリスチレン

以下の粘度式を用いて、ポリスチレンよりポリプロピレンの分子量に換算した。

$$\text{ポリスチレンの粘度式} : [\eta] = 1.38 \times 10^{-4} M^{0.70}$$

$$\text{ポリプロピレンの粘度式} : [\eta] = 1.03 \times 10^{-4} M^{0.78}$$

表4-3(3) に分子量測定結果を示す。測定数N=2の平均値を記載している。このうち、重量平均分子量をグラフ化したものを図4-3(45)に示す。2回の成形熱履歴により2.2%の分子量低下が見られた。分子量の低下は、機械物性等の低下につながることから、この結果より物性的な低下も数%に留まることが予想できる。一方、次項に述べる酸化防止剤などの安定剤の消耗挙動も検証して、全体的な成形熱履歴による分子劣化度合いと物性、性能を維持するためのリサイクル処方検討が必要である。

表4-3(3) 分子量測定結果

	重量平均分子量 Mw	数平均分子量 Mn	分子量分布 Mw/Mn
①新材バージンペレット	182,000	25,700	7.08
② 1回成形熱履歴品 (①の100%成形品)	181,000	25,700	7.04
③ 2回成形熱履歴 (②の100%成形品)	178,000	25,700	6.93

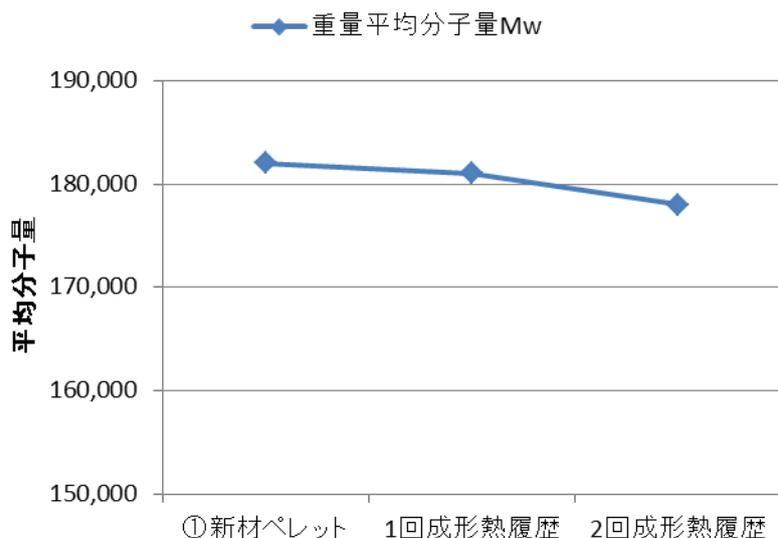


図4-3(45) ベースPP樹脂中の成形熱履歴による分子量の変化

(c) ベース樹脂の熱履歴による樹脂中に含有されている安定剤などの添加剤量の変化

ベース樹脂に含有されている酸化防止剤、熱安定剤の定性分析、定量分析を行ない、熱履歴によるこれらの消耗度合いを検証した。

定性分析は、バージンペレットを試料として、ガスクロマトグラフ質量分析(GC-MS)法および超高速液体クロマトグラフ質量分析(UPLC-MS)法にて実施した。

測定機関、各測定装置は下記の通りである。

・測定機関：一般財団法人 化学物質評価研究機構

GC-MS測定

・測定装置：Agilent Technologies製 7890A, 5975C inert XL

UPLC-MS測定

・測定装置：Waters製 ACQUITY UPLC SQ Detector 2

表4-3(4)に定性分析結果を示す。

表中の①は、ヒンダードフェノール系の酸化防止剤であり、②はリン系の酸化防止剤である。

表4-3(4) PP樹脂バージンペレットの有機添加剤定性分析結果

項目	試料 PP樹脂 バージンペレット
酸化防止剤等の定性分析結果	A:テトラキス[メチレン-3-(3,5-ジ-t-ブチル-4-ヒドロキシフェニル)プロピオネート]メタン B:トリス(2,4-ジ-t-ブチルフェニル)ホスファイト及びその酸化物C

次に、定性分析結果により分析された添加剤の定量分析を、分子量測定と同じ測定試料、(1)バージンペレット、(2)バージンペレット100%の成形品、(3) (2)の100%粉碎材の成形品に対して実施した。

その結果を、図4-3-42に示す。この結果から、元々新材(バージンペレット)に処方されていた酸化防止剤などの安定剤は、成形熱履歴により消費されることがわかる。

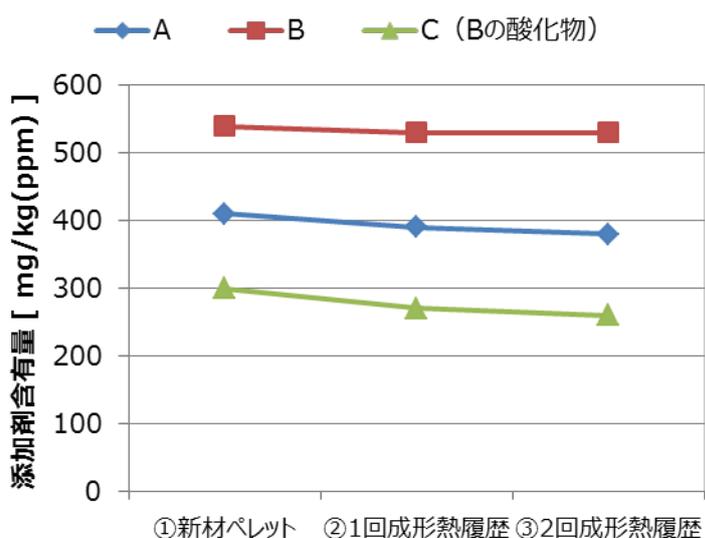


図4-3(46) ベースPP樹脂中の成形熱履歴による添加剤量の変化

A, Bの2種については、2回の成形熱履歴により、2~8%が消費される。この量は10~30ppm(0.001~0.003%)であるので、分子劣化への大きな影響はないものの、実際、前項に示すように約2%の分子量低下が見られること、また、更に成形熱履歴を経ると酸化防止剤の更なる減少につながることから、リサイクル熱履歴に対する分子劣化や物性低下を抑制するためには、再生処方の適用が必要であることがわかる。

また、再生処方については、上記繰り返し熱履歴と併せて、ここでは検証はしていないが、製品化され商品使用中の経年劣化等も考慮した処方の検証が必要である。

4-3-4. 結言

CNF複合樹脂の選別技術検証として、水比重方式、中赤外分光方式、近赤外分光方式について評価を実施し、近赤外分光方式が最も有望であると結論づけた。

そして、その近赤外分光方式の評価において、使用したCNFPPのサンプルの全数を認識することができ、平成28年度の目標である認識率30%を達成した。このように CNFPP について GFPP に対する選別面での優位性を確認することができた。

一方、再生技術検証として、CNF15%含有複合PP樹脂におけるマテリアルリサイクルの機械物性面でのリサイクル性能の検証を実施し、ガラス短繊維強化PP樹脂(40%含有)、ガラス長繊維強化PP樹脂(40%)含有、およびベースとなるPPナチュラル樹脂との比較を行った。ガラス短・長繊維強化樹脂に対して、機械物性の低下も少なく、新材1回成形熱履歴後の粉碎及び更に1回熱履歴品においては、リグラインド率100%において機械的強度は概ね95%以上を保持しており、マテリアルリサイクルの可能性を見出した。また、分子量低下や酸化防止剤消費量は2~8%であるため、酸化防止剤などの安定剤・添加剤の添加やその他の処方により物性低下抑制や物性回復を目指したマテリアルリサイクルのための再生処方の確立が必要であることがわかった。今後は、繰返し熱履歴や、長期信頼性評価でのリサイクル性能を検証し、CNFの挙動や再生処方の検証を実施していく。

【参考文献】

- 1) ユニチカ CNF 強化ポリアミド6樹脂資料
- 2) 仙波 健、西岡聡史、田熊邦郎、矢野浩之ほか：成形加工 Vol.28 6号、232-235(2016)
- 3) NIR POLYMER LIBRARY NICODOM 1999
- 4) 野田康祐、山部昌：成形加工シンポジア 2006、219-220(2006)
- 5) 角尾、戸村、中根：プラスチック 2014.10、30-34(2014)

5. 来年度の取組み

来年度(平成29年度)は取り組みの最終年度に当たり、家電適用可能性見極めと効果予測に向けて、実機評価検証、実証実験を行う。それぞれの項目について取り組み内容を以下に示す。

(1) CNF 展開効果検証・調査

- ・主要家電製品の補足調査と効果試算。国内市場への展開試算。
- ・特許出願の継続観察。

(2) 家電部品への適用検証

< 冷蔵庫センターピラー >

- ・部品成形と材料、成形性の評価
- ・冷蔵庫組み込み試作品の評価(省エネ、構造強度)

< 冷蔵庫クロスレール >

- ・具体設計と金型製作
- ・部品成形と材料、成形性の評価
- ・冷蔵庫組み込み試作品の評価(省エネ、構造強度)

< 洗濯機脱 >

- ・具体部品の選定と具体設計
- ・成形性評価検証のための金型製作、成形性評価

(3) リサイクル性の検証

- ・近赤外分光を用いた量産装置ベースでの回収率、回収品純度の評価、確認
- ・長期(使用品)のリサイクル性能の物性回復工法・処方の検証
- ・繰返し成形リサイクル時での CNF 挙動の検証と添加剤再生処方による劣化抑制効果の確認