

平成 28 年度環境省委託業務

平成 28 年度セルロースナノファイバー活用製品の
性能評価事業委託業務

(セルロースナノファイバーを用いた機能部品の軽量化検討)

成果報告書

平成 29 年 3 月

トヨタ車体株式会社

平成 28 年度セルロースナノファイバー活用製品の性能評価事業委託業務 (セルロースナノファイバーを用いた機能部品の軽量化検討)

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従い、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料 [A ランク] のみを用いて作成しています。

概要

本プロジェクトでは、自動車用金属部品の樹脂代替を狙い、高強度かつ低比重なセルロースナノファイバー(CNF)強化樹脂(CNFRP)を用いて、自動車部品の試作と性能評価を行う。また金属部材の樹脂化で達成された軽量化効果から、自動車の燃費向上およびCO₂削減効果の検証を行う。

今年度は3つのことを行った。1つ目は、CNFを補強繊維とした射出材料の作製ならびに性能評価を行った。その際、自動車に使われる様々な樹脂からCNFの特性に合うものを選定した。2つ目は、CNFRP適用自動車部品として、バッテリーキャリアとパワースライドドアユニットの2部品を選択、作製し性能評価を行った。3つ目は、様々な自動車部品からCNFが活用可能なものをリストアップした。その上で、CNFを用いた際の軽量化効果を算出し、部品使用時のCO₂削減効果を明確にした。結果を以下に示す。

CNFの特徴を活かすための樹脂として、高剛性かつ一般的な流動性のものを使用することとした。

部品については、CNFRPの性能からバッテリーキャリアとパワースライドドアユニットを選択した。部品形状については、CAE解析を用い形状を決定した。その結果バッテリーキャリアについては約40%、パワースライドドアユニットについては約85%の軽量化を達成できた。バッテリーキャリアの性能については、昨年度不合格であった衝撃試験において合格した。しかし振動耐久性試験では、昨年度に比べ改善は見られたものの、金属との接触部分で割れが発生した。パワースライドドアユニットについては初期性能に関して全て合格した。今後耐久性能の評価を進めていく。

LCAについては、まず、将来的にCNFで材料置換の可能性がある自動車部品群を選定した。それぞれの部品について、自動車1台あたりの軽量化効果と走行時のCO₂排出量削減効果を算出した。現実的な数値としてGFと同等な樹脂補強効果をCNFが発現すると仮定し、計算を行った。選定した部品全てを置換した場合、自動車1台あたり約10kgの重量低減に貢献することが分かった。また車の平均寿命である11年間使用したとして、CO₂排出量は約200kg・CO₂低減できることが分かった。

Summary

In this project, cellulose nano fibers (CNF) as reinforcement in thermoplastic composites have been evaluated general mechanical properties and car components using CNF have been manufactured and tested. The potential environmental benefit of using CNF for making car components lighter has been investigated by conducting a life cycle assessment (LCA) analysis.

In this year, three projects have been summarized from materials, components and LCA points of view.

First, general properties of CNF reinforced composites (CNFRP) were measured using test specimens. The base plastic for CNF was chosen from several plastics designed for car components to match characteristics of CNF. Then battery carriers and power slide door units were selected and manufactured with CNFRP. It was revealed technical issues through the evaluations of the car components.

Finally, carbon dioxide (CO₂) emissions were calculated for car components which have potentials for adopting and transferring with CNFRP.

Results are indicated as below.

The plastic type of high stiffness and general flowability in automobile use was selected for taking advantage of the properties of CNF. The properties of CNFRP were used for CAE (Computer-Aided Engineering) methods to determine the shape of car components. As these results, the battery carrier was able to be 40% lighter than before by using CNFRP and the power slide door unit was able to be 85% lighter than before by using CNFRP. The performance of battery carrier was better than the previous shape of the battery carrier, especially impact ability. However vibration proof test was still a subject of concern which the crack was generated in battery carrier. The power slide door unit had the initial performance capable of passing basic tests as the component. Durativity is going to be tested in sequence.

LCA was calculated the group of potential components which have possibilities of substitution with CNFRP. The effects of reducing weight and contributing to the reduction of CO₂ emission were calculated to each potential component. A realistic figure, the properties of CNFRP was assumed that glass fibre reinforced plastics was equal to CNFRP. In case of substituting all chose components to CNFRP, about 10kg was able to reduce the weight per a vehicle. Granted that a car have been used for 11 years

which is the average life of a car, the reduction of CO₂ emission was calculated at about 200kgf-CO₂ in the life of a car.

目次

1	射出材料設計・製造・評価	1
1.1	射出材料設計と製造	1
1.1.1	様々な樹脂を用いた CNF のコンパウンド.....	1
1.1.2	CNF と樹脂コンパウンド時のスクリュウ形状構成の検討.....	9
1.2	射出材料の評価	16
1.2.1	基礎物性	16
1.3	耐衝撃性向上の試み	54
1.3.1	ゴム成分後添加検討	54
1.3.2	PMMA をマトリックスとした検討.....	57
2	バッテリーキャリアの設計・製造	64
2.1	先行検討	64
2.2	部品設計	67
2.3	金型設計	68
2.4	部品の製造.....	68
2.5	部品の評価.....	69
2.5.1	耐熱性.....	72
2.5.2	冷熱繰返し性	74
2.5.3	振動耐久性.....	76
2.5.4	落錘衝撃性.....	78
2.6	効果	80
2.7	まとめ.....	80

3	パワースライドドアユニットの設計・製造	81
3.1	部品設計	82
3.2	金型設計	83
3.3	部品の製造	84
3.4	部品の評価	86
3.4.1	成形ソリ性	88
3.4.2	組付け作業性	90
3.4.3	初期作動性	92
3.4.4	冷熱繰返し性	93
3.4.5	耐熱老化性	94
3.4.6	サーマルショック試験	95
3.5	効果	96
3.6	まとめ	96
4	CNF 製品活用時の CO ₂ 排出削減効果の検証	97
4.1	自動車金属部品の樹脂化動向調査(K 2016)	97
4.2	K 2016 における自動車金属部品の樹脂化動向概要	97
4.3	CNFRP 製品活用時の CO ₂ 排出削減効果の検証	97
4.4	CNFRP 製品活用時の CO ₂ 排出削減効果の検証(本業務の評価対象部品)	124
4.4.1	CNFRP 製品活用時の CO ₂ 排出削減効果の検証(部品 ; バッテリーキャリア)	125
4.4.2	CNFRP 製品活用時の CO ₂ 排出量削減効果の検証(部品 ; パワースライドドアユニット)	127
5	まとめ	129

1 射出材料設計・製造・評価

1.1 射出材料設計と製造

1.1.1 様々な樹脂を用いた CNF のコンパウンド

1.1.1.1 マトリックス PP の種類選定

セルロースナノファイバー(Cellulose NanoFiber; CNF)の活用手段には樹脂の補強フィラーとして使用する方法が挙げられる。また、射出成形などの汎用で生産性の高い工法で成形加工できれば、自動車部品へ広く適用することが可能になると考えられる。そこで、これらを達成することを目的とし、CNFを複合化して自動車部品で使用される樹脂を補強することを試みた。

自動車部品に使用される樹脂の大半はポリプロピレン(Polypropylene; PP)である。安価に製造され、軽量で吸湿性がなく、化学的に安定な性質であることから、非常に多くの部位に使用されている。自動車用 PP は機械特性の面から二種類に大別される。剛性に優れ、ランプ類のような重い部品を支持する部位に使用される高剛性タイプ、インストルメントパネルやドアトリムなどの内装部品やバンパーに使用される耐衝撃性タイプである。

一方、CNF は親水性であるため、そのまま PP と複合化しても界面の接着性が悪く、樹脂強化フィラーとして十分な補強効果を発揮することができない。この問題を解決するため、疎水化処理を施した CNF を使用して界面の接着性を向上させ、補強効果を発揮させることを目指した。

PP と CNF の複合化は二軸の押出機にてコンパウンドをすることで行った。CNF は、加熱溶融した PP 中でパルプを押出機のスクリーンで解繊することによって得られる。その際、繊維が細くなることで界面積が増大し、また、PP 中で三次元的なネットワーク状に張りめぐらされるため、溶融樹脂の流れ性が大きく低下する。したがって、マトリックスとして使用する PP の溶融流れ性は、コンパウンド時および射出成形時の生産性に大きく影響を及ぼすことが予想される。

CNF の補強効果が自動車に用いられているどのタイプの PP に有効であるかを見極め、また、生産性を比較するため、4 種類の PP を用いてコンパウンドを実施した。表 1.1.1.1.1 にコンパウンド試作を実施した水準について PP の種類、および溶融流れ性を示す指標であるメルトフローレート(Melt Flow Rate; MFR)をまとめる。なお、ここに記載する MFR 値は、各 PP 製造メーカーのカタログ記載値である。

CNF 強化樹脂(Cellulose Nano Fiber Reinforced Plastic; CNFRP)のセルロース分添加率は 20wt%とした。密度は 1.0g/cm³程度である。一方、一般的に使用される無機フィラーが 30~40wt%添加された強化樹脂の密度は 1.1~1.2g/cm³程

度である。軽量かつ高強度な CNF で補強するメリットを明確に見極めるため、本稿ではこれまでのフィラー強化樹脂にない密度領域での材料設計に取り組むこととした。

表 1.1.1.1.1 自動車向け PP の種類

水準	PPのタイプ	溶融時の流れ性	
		MFR 規格 ISO 1133	
a	高剛性タイプ	中フロー	45 g/10min
b		高フロー	120 g/10min
c	耐衝撃性タイプ	中フロー	33 g/10min
d		高フロー	72 g/10min

コンパウンドして得られた CNFRP を各々、加熱溶融温度 200°C、金型温度 40°Cにて射出成形し、基礎物性評価を行った。基礎物性評価の内容と結果を表 1.1.1.1.2 にまとめる。

表 1.1.1.1.2 の結果より、耐衝撃性タイプの PP を用いた水準は、CNFRP のシャルピー衝撃強度の値がさほど高くなく、高剛性タイプの PP を用いた場合と大差ないことが分かった。また、このタイプの PP は耐衝撃性を向上させるためにゴム成分が添加されており、マトリックス強度や曲げ剛性がそもそも低い。CNF で補強してもその傾向は変わらず、高剛性タイプの PP をマトリックスに使用した水準に比べ、総じて見劣りする性能を示す結果となった。

耐衝撃性タイプの PP を用いてもマトリックスの性能を反映できず、CNFRP の耐衝撃性が低かった理由を考察するために、透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope; TEM)を用いて水準 c 中の CNF がマトリックスを補強する状態を観察した写真を、図 1.1.1.1.1 および図 1.1.1.1.2 に示す。図中、黒く染色されている部分は耐衝撃性を確保するために添加されているゴム相であり、薄灰色の相が CNF であると推察され、海相が PP である。CNF は不定形であり、繊維状や楕円状で存在し、射出成形時の材料流れ方向(図中の左右方向)に配向している傾向が確認された。解繊残りが存在するものの、大半はナノ～サブミクロンサイズで凝集することなく分散していた。また、図 1.1.1.1.2 にも示す通り、ゴム相と CNF が隣接している個所が多数見受けられ、これは CNF がゴムの動きを拘束する状態にあることを示唆している。そのため、水準 c および d では、耐衝撃性に優れるタイプの PP をマトリックスに使用したにもかかわらず、CNF の添加によって耐衝撃性を損なう結果になってしまったことが推察された。

以上のことから、CNF の補強効果は耐衝撃性タイプの PP には有効ではない

ことが明らかになったため、以後は高剛性タイプについて主な検討を行うこととした。

さらに、マトリックス PP の MFR 差による CNFRP の生産性の違いであるが、得られた CNFRP の MFR 値を見比べても大きな差が見られなかった。水準 a、b を見比べると、マトリックス PP の MFR 値が大きく異なるにもかかわらず、得られた CNFRP の MFR 値にほとんど差がない。この点について考察するため 1. 1. 1. 2 章の試みを実施した。

表 1.1.1.1.2 基礎物性評価の内容と結果

評価項目	規格	単位	水準							
			高剛性タイプ				耐衝撃性タイプ			
			中フロー		高フロー		中フロー		高フロー	
			マトリックスPPのみ	a	マトリックスPPのみ	b	マトリックスPPのみ	c	マトリックスPPのみ	d
セルロース分		wt%	-	20	-	20	-	20	-	20
密度	ISO 1183	g/cm ³	0.913	1.020	0.900	1.020	0.900	1.009	0.898	1.007
MFR	ISO 1133	g/10min	41.7	1.3	111.4	2.0	32.3	0.7	74.3	0.9
引張強度	ISO 527-1,2	MPa	36.8	47.1	32.4	46.9	25.8	37.4	20.5	35.7
曲げ強度	ISO 178	MPa	42.8	54.9	39.3	56.9	35.9	49.3	27.2	43.1
曲げ弾性率	ISO 178	MPa	1661	3293	1396	3180	1388	2961	1035	2715
シャルピー衝撃強度	ISO 179-1	kJ/m ²	2.1	1.4	1.1	1.3	8.0	1.3	7.3	2.3

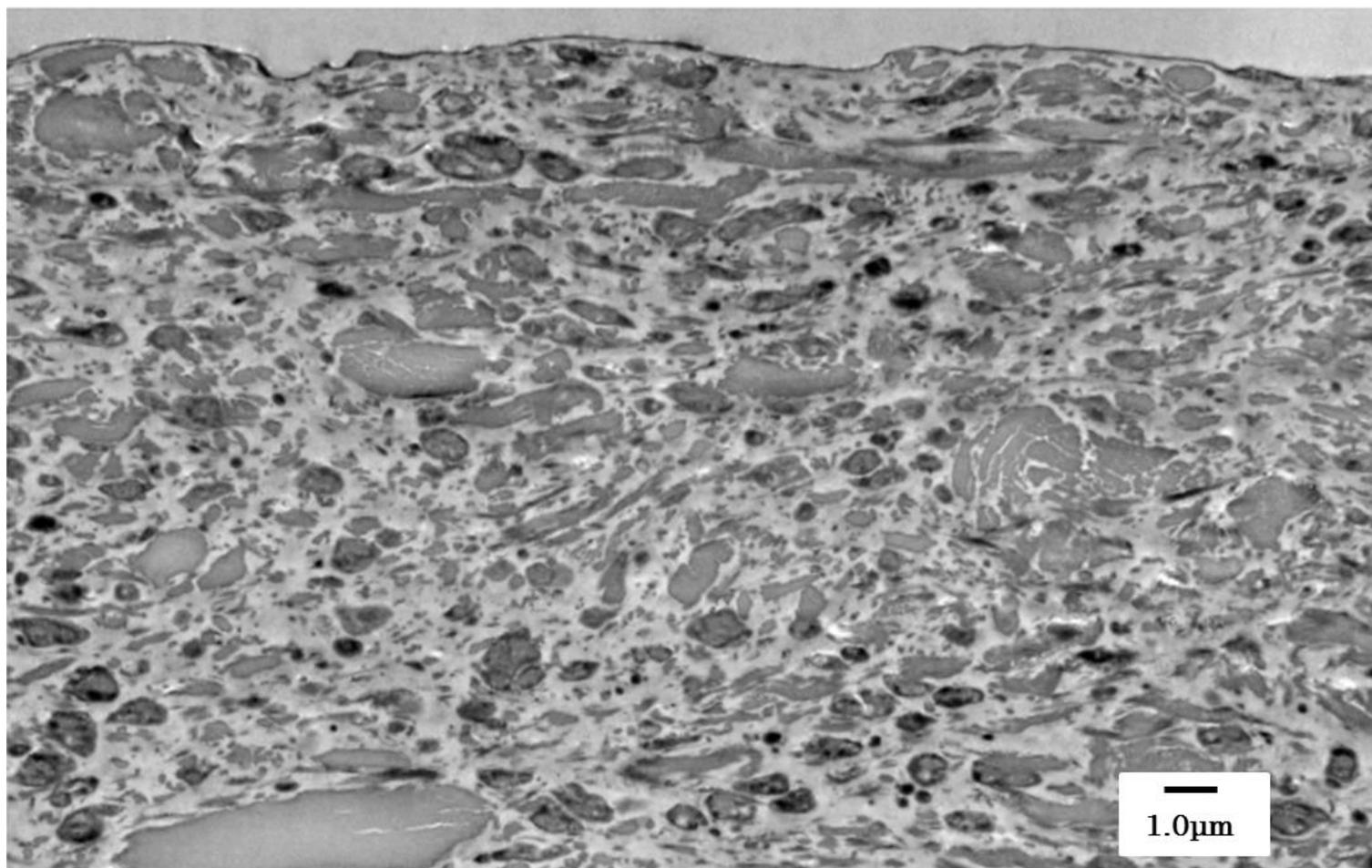


図 1.1.1.1.1 CNF がマトリックスを補強する状態を観察した写真(水準 c) ×10,000

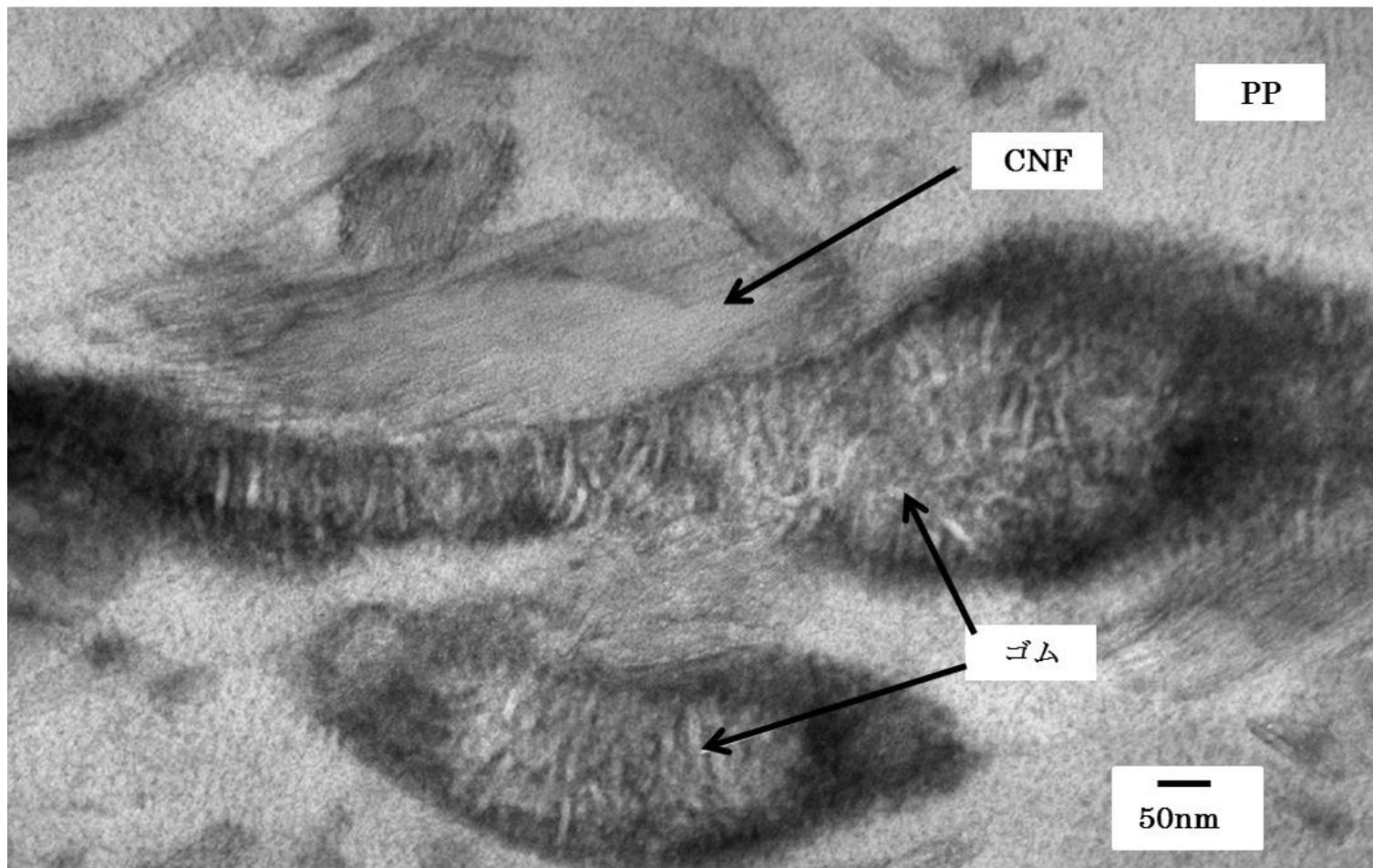


図 1.1.1.1.2 CNF がマトリックスを補強する状態を観察した写真(水準 c) $\times 200,000$

1. 1. 1. 2 マトリックス PP の MFR が及ぼす影響

1. 1. 1. 1 章では、使用したマトリックス PP の MFR 値ほどの差が、得られる CNFRP の MFR 値に反映されなかった。そこで、さらに大きな熔融流れ性を有する PP をマトリックスに用いれば、CNFRP の生産性を向上させることができるのか検証を行った。表 1.1.1.2.1 に、使用したマトリックス PP をまとめる。

また、これらの熔融流れ性の差が、コンパウンド時のパルプ解繊性にも影響を及ぼす可能性がある。より微細な CNF へ解繊できれば、CNFRP の性能が大きく向上することが期待される。生産性への影響と同時にこの効果を確認するため、得られた CNFRP を各々、加熱熔融温度 200°C、金型温度 40°C にて射出成形し、基礎物性評価を行った。基礎物性評価の内容と結果を表 1.1.1.2.2 にまとめる。なお、MFR 値が 150g/10min を超えるような極端に熔融流れ性が高い樹脂は、実際の射出成形には不向きである。また、コスト面を考慮すると、CNF の解繊処理はよりパルプ高濃度の条件にて行ったほうがメリットが高い。あらかじめ高濃度条件で CNF を PP に分散できていれば、使用目的に合わせた濃度に希釈して利用することができるうえ、輸送コストなどを抑えることにも役立つ。そこで今回は、まず表 1.1.1.2.1 中の熔融流れ性が高い PP を使用し、高濃度条件下でパルプを CNF 化した後、マトリックス PP の 50% を一般的な流れ性の PP (MFR 値=45g/10min) でセルローズ分添加率を 20wt% となるよう調整し、射出成形用材料として供することとした。

表 1.1.1.2.2 の結果から、パルプの解繊にどんなに MFR 値が高い PP を使用しても、最終的に得られる CNFRP の MFR 値は高くなく、生産性に優れているとは言えなかった。また、CNFRP の性能にも明確な傾向は見られず、極端に熔融流れ性が大きな PP を使用する利点が認められなかった。したがって今後の検討には、高剛性タイプかつ熔融流れ性は自動車向けとして一般的な PP (MFR 値=45g/10min) をマトリックスとして使用することに決定した。

表 1.1.1.2.1 熔融流れ性の異なる PP の種類

単位	水準					
	i	ii	iii	iv	v	
MFR	g/10min	45	110	300	600	1300

表 1.1.1.2.2 基礎物性評価の内容と結果

			水準				
			i	ii	iii	iv	v
	パルプ解繊用PPのMFR		45	110	300	600	1300
	希釈PPのMFR		45	45	45	45	45
評価項目	規格	単位					
セルロース分		wt%	20	20	20	20	20
密度	ISO 1183	g/cm ³	1.007	1.003	1.007	1.003	1.000
MFR	ISO 1133	g/10min	5.9	3.3	2.6	2.5	2.4
引張強度	ISO 527-1,2	MPa	43.2	44.3	44.7	44.4	45.0
曲げ強度	ISO 178	MPa	58.8	59.7	61.3	56.8	58.3
曲げ弾性率	ISO 178	MPa	3282	3196	3230	2986	3031
シャルピー衝撃強度	ISO 179-1	kJ/m ²	1.4	1.6	1.4	1.5	1.4

1. 1. 2 CNF と樹脂コンパウンド時のスクリー形状構成の検討

1. 1. 1 章で述べた通り、CNF は加熱溶融した PP 中で、パルプを押出機のスクリーで解繊することによって得られるため、押出機のスクリー形状構成がパルプの解繊性に大きく影響を及ぼすことが予想される。本章ではスクリー形状構成がパルプの解繊性に及ぼす影響の確認を行った。

スクリー形状構成として 3 つのタイプを検討した。1 つ目は、強いせん断力を働かせるニーディングスクリーと、ガラス繊維やタルクなどのフィラーをコンパウンドする際に用いられるせん断力をかけずに複合材を押出すスクリーからなる、一般的な形状構成を検討した。2 つ目はニーディングスクリーを多用することで、せん断力がより強く働く形状構成を検討した。3 つ目はニーディングスクリーの代わりにローターと呼ばれる、材料送り方向への伸長力が働くスクリーを組み込んだ形状構成を検討した。また、各タイプのスクリーの効果をより明確にすることを狙い、コンパウンドを複数回繰り返して行った。実施した水準を表 1.1.2.1 にまとめる。

得られた CNFRP は各々、加熱溶融温度 200℃、金型温度 40℃にて射出成形し、基礎物性評価を行った。基礎物性評価の内容と結果を表 1.1.2.2 にまとめる。

表 1.1.2.2 の結果より、どのスクリーでもコンパウンド回数が多いほど MFR の値が大きくなることが明らかになった。これには CNF の繊維長が影響していると考えられる。コンパウンド回数を増やすほどパルプの解繊が進むと同時に、繊維への負荷がかかるため、切断が生じ、CNF の繊維長が短くなることが推測される。CNF の繊維長が短くなると PP 中での三次元的な絡み合い力が弱まるため、加熱溶融時の流れ性が高くなる。これは繊維への負荷が最も低いと考えられる水準 5,6 のローター使用品では比較的 MFR の値が低く、反対に繊維への負荷が高いと予想される水準 3,4 で MFR の値が高いことから裏付けられる。一方、引張強度や荷重たわみ温度(Heat Deflection Temperature; HDT)は CNF の繊維長が長いほどその値が高いことが予想されるが、今回の結果からもその傾向が見受けられ、MFR の値から考察した内容と矛盾がない。曲げ弾性率についてはコンパウンド回数が多いほうが高い値を示した。繊維切断の影響よりも、解繊が進んでよりむらなく強固に補強する効果が勝ったと考えられる。

以上の傾向から、CNF と樹脂コンパウンド時のスクリー形状構成としては、繊維を切断せず、解繊効果を高めることを目指すことが重要であると示された。

表 1.1.2.1 スクリュー構成を検討した水準

水準	1	2	3	4	5	6
スクリュー構成	一般的な構成		高せん断構成		高伸長構成	
コンパウンド回数	1回	3回	1回	3回	1回	3回
マトリックスPP	高剛性 中フロー(MFR=45g/10min)					
セルロース分	20 wt%					

表 1.1.2.2 基礎物性評価の内容と結果

評価項目	規格	単位	水準					
			1	2	3	4	5	6
密度	ISO 1183	g/cm ³	1.003	1.003	1.000	1.000	1.003	1.007
MFR	ISO 1133	g/10min	4.2	21.8	19.4	25.2	2.6	16.4
引張強度	ISO 527-1,2	MPa	44.0	43.9	42.9	42.7	44.9	44.6
曲げ強度	ISO 178	MPa	57.1	59.8	58.6	58.5	56.9	59.1
曲げ弾性率	ISO 178	MPa	3146	3473	3475	3508	3154	3343
シャルピー衝撃強度	ISO 179-1	kJ/m ²	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
HDT (0.45MPa)	ISO 75-2	°C	123.2	124.1	123.6	122.0	126.9	124.4

次に、ここまでで得られた知見をもとに最適なスクリュウ形状構成を検討した。一般的なスクリュウ形状構成にローターを組み込み、パルプに働くせん断力と伸長力のバランスをとることを図った。スクリュウ形状構成 A では比較的せん断力が強く働く形状構成、スクリュウ形状構成 B ではより伸長力の働きを重視した形状構成とした。これらのスクリュウを用いたコンパウンドで得られた CNFRP は各々、加熱溶解温度 200°C、金型温度 40°Cにて射出成形し、基礎物性の評価を行った。基礎物性評価の内容と結果を表 1.1.2.3 にまとめる。

さらに CNF がマトリックスを補強する状態を観察した TEM 写真を図 1.1.2.1 から図 1.1.2.4 に示す。

表 1.1.2.3 コンパウンドスクリュウ形状構成最適化検討

評価項目	規格	単位	コンパウンドスクリュウ構成	
			A	B
セルロース分	—	wt.%	20	20
密度	ISO 1183	g/cm ³	1.003	1.000
MFR	ISO 1133	g/10min	6.5	2.6
引張強度	ISO 527-1,2	MPa	43.2	47.3
曲げ強度	ISO 178	MPa	68.2	70.5
曲げ弾性率	ISO 178	MPa	3862	3824
シャルピー衝撃強度	ISO 179-1	kJ/m ²	1.3	1.3
HDT (0.45MPa)	ISO 75-2	°C	130.3	133.2

表 1.1.2.3 の結果から、MFR 値が若干低く、生産性が懸念されるものの、スクリュウ形状構成 B を用いて製造した CNFRP のほうが総合的に基礎物性が優れていると言える。また、TEM 写真ではこちらの水準のほうが CNF の繊維長がより長いことが示されており、基礎物性の傾向を裏付けている。これらの結果より、最適なスクリュウ形状構成は B であることが判断された。

以降は、本章で決定した射出材料設計、製造要件を反映した CNFRP を各評価で使用することとした。

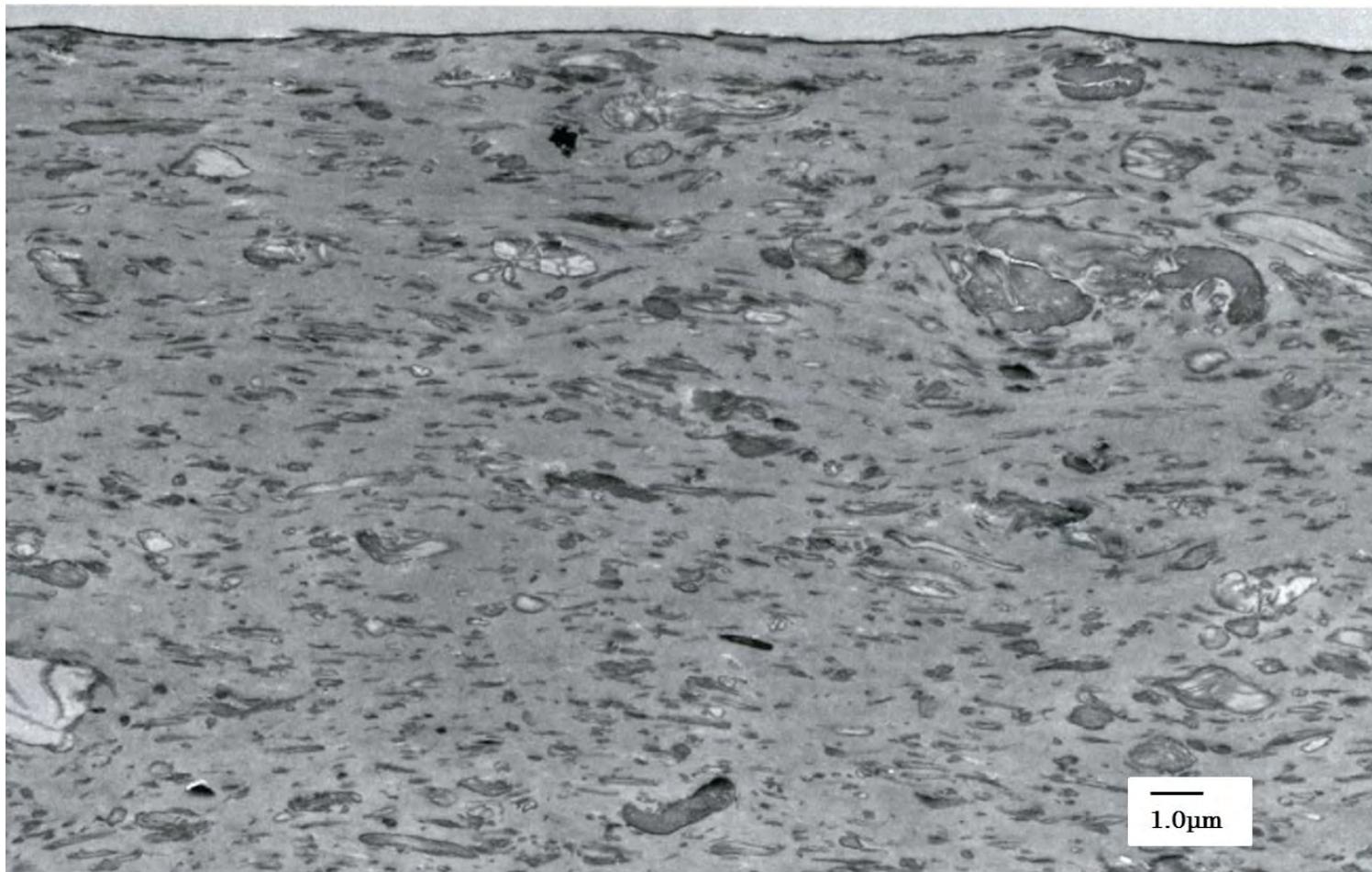


図 1.1.2.1 CNF がマトリックスを補強する状態を観察した写真(コンパウンドスクリー構成 A) ×10,000

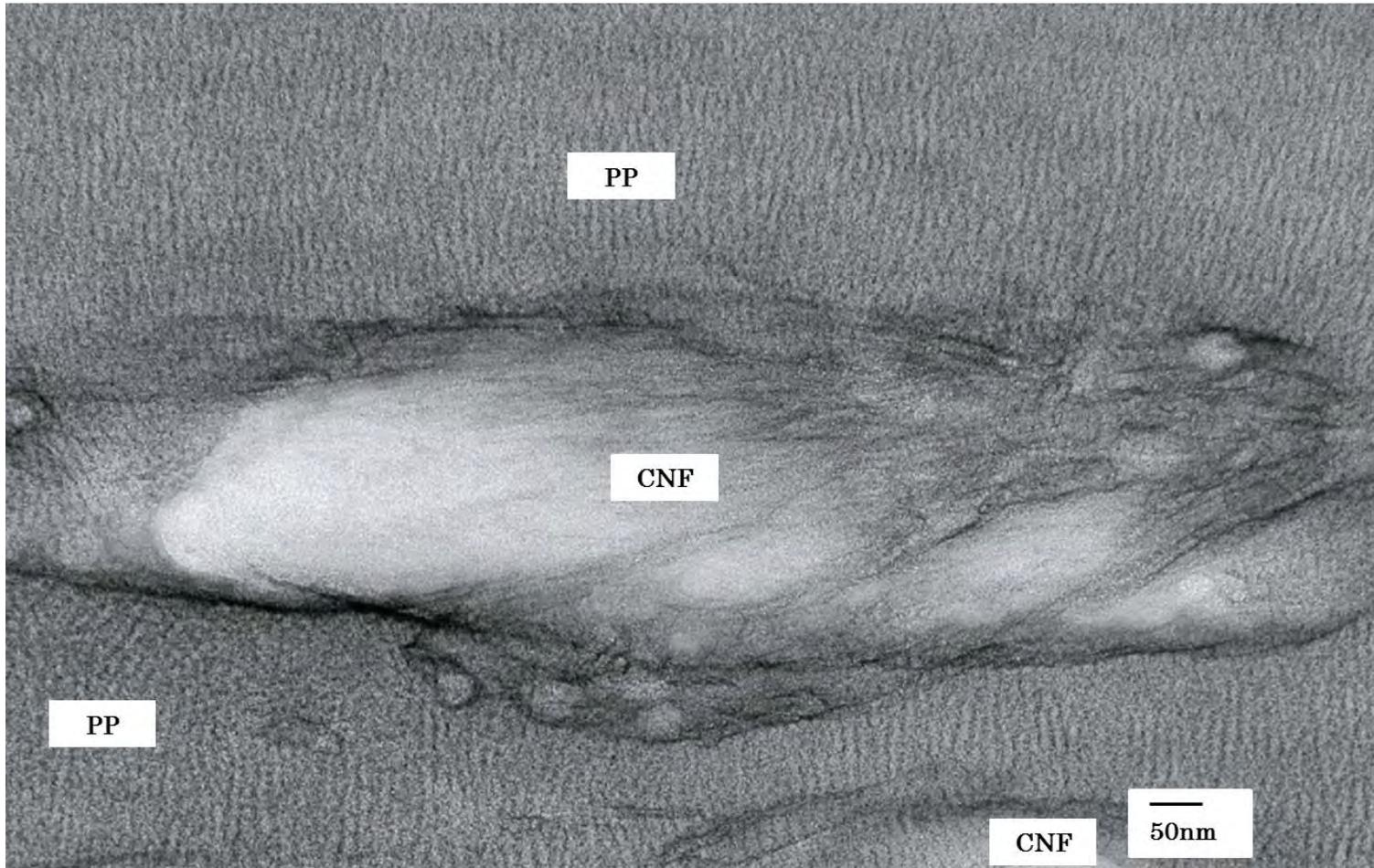


図 1.1.2.2 CNF がマトリックスを補強する状態を観察した写真(コンパウンドスクリー構成 A) ×200,000

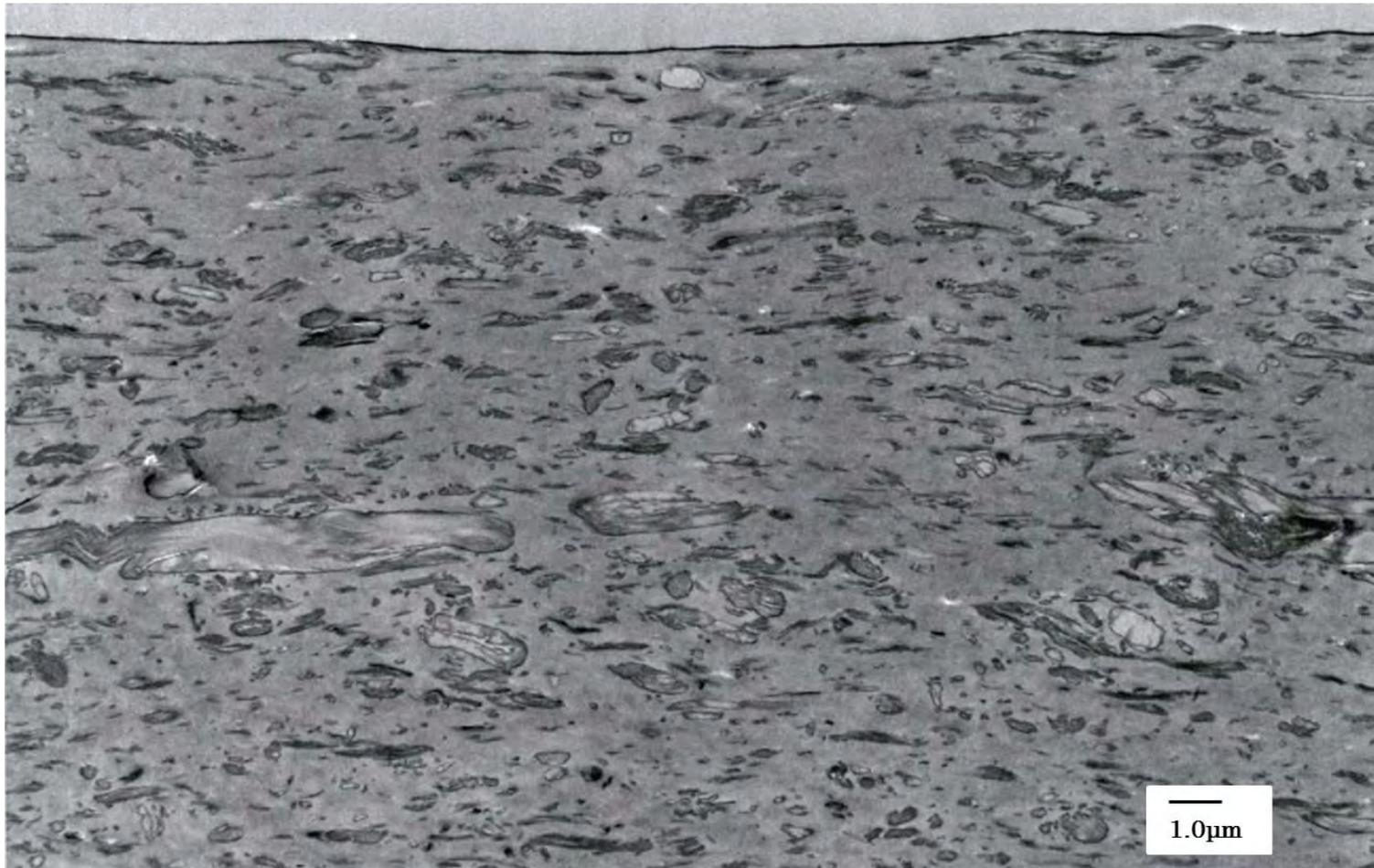


図 1.1.2.3 CNF がマトリックスを補強する状態を観察した写真(コンパウンドスクリー構成 B) ×10,000

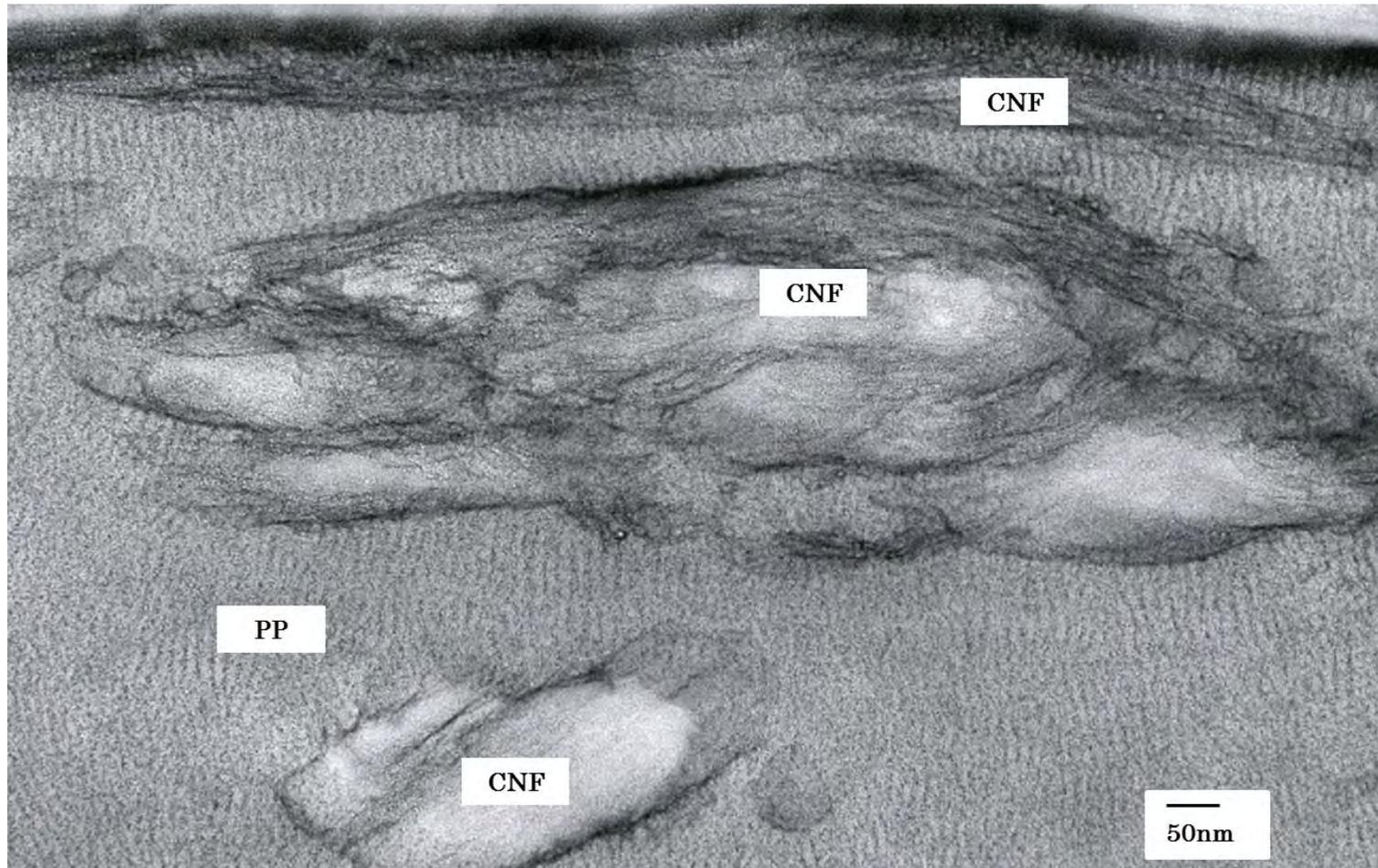


図 1.1.2.4 CNF がマトリックスを補強する状態を観察した写真(コンパウンドスクリー構成 B) ×200,000

1. 2 射出材料の評価

1. 2. 1 基礎物性

1. 2. 1. 1 他材料（タルク、ガラス、木粉）との基礎物性比較

1. 1 章で材料設計・製造した CNFRP と、一般的に自動車部品製造で使われるフィラー強化樹脂の性能を比較評価することとした。ここでは、金属材料で成形されていた部品を樹脂材料で代替することを検討する場合に挙げられる高強度、高剛性なフィラー強化樹脂を比較に用いた。各材料の略称について表 1.2.1.1.1 のように以下、規定する。

表 1.2.1.1.1 材料表記の規定

材料	略称
マトリックスPPのみ	PP
PP+フィラー	PP-○○ なお、二種類以上のフィラーで補強する場合には下記の通りとする。 PP-(○○+□□・・・) CNF；セルロースナノファイバー GF；ガラス繊維 TD；タルク WD；木粉

(1)基礎物性

PP-CNF、および PP-WD は 200℃、その他の材料については 230℃にて加熱熔融し、金型温度は全て 40℃にて射出成形を行った。実施した基礎物性評価の内容と結果を表 1.2.1.1.2 にまとめる。

PP-CNF は今回評価したフィラー強化樹脂の中で最も低密度ながら比較的優れた曲げ弾性率を示した。PP-GF には及ばないものの、CNF を添加することによる最も顕著な効果として高剛性化が挙げられることが分かった。同様に HDT の向上効果も高かった。これは、低密度で嵩高く、かつアスペクト比が大きな CNF で、マトリックス中に緻密なネットワークを形成する補強メカニズムに基づくものと推察される。パルプの解繊不足を解消し、PP と CNF の界面密着性をさらに向上させることで、この効果をさらに高めることができると考えられる。

一方、PP-CNF の課題は耐衝撃性の低さであると言える。シャルピー衝撃強度がいずれのフィラー強化樹脂よりも低く、マトリックス PP のみの値も下回

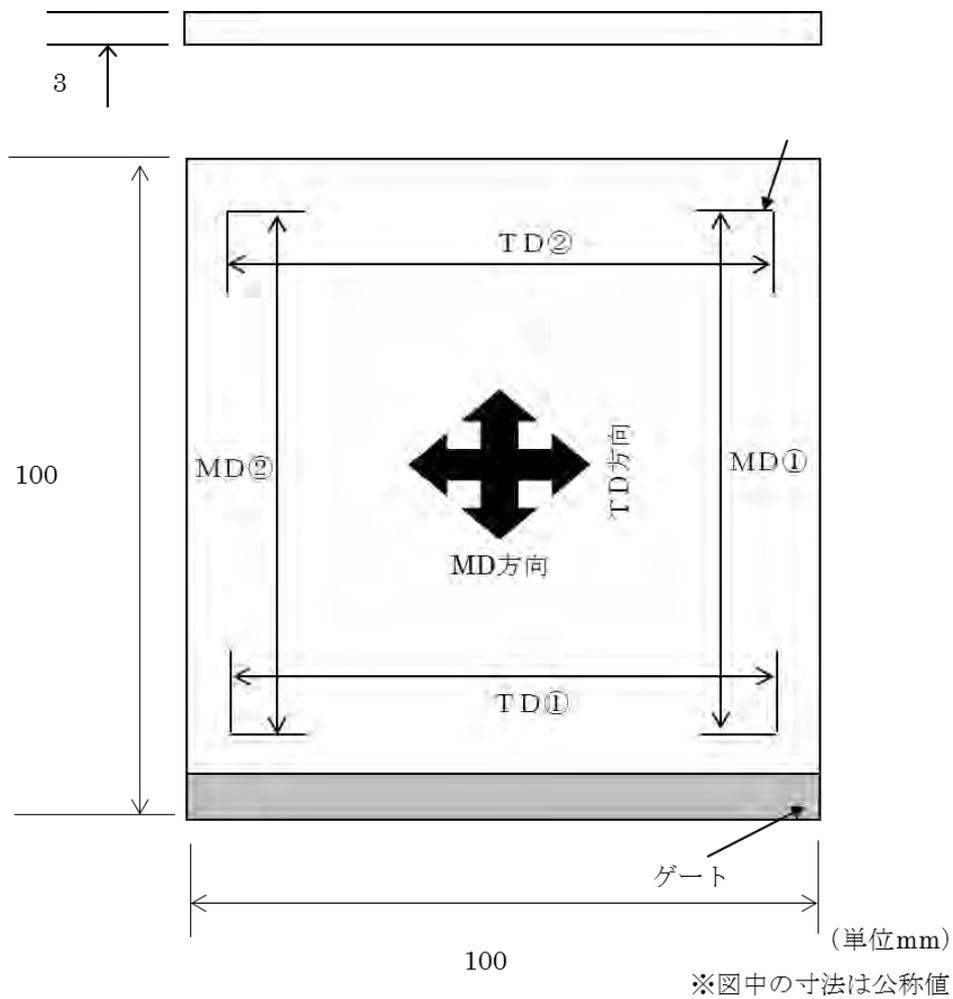
った。PP 中にナノ～サブミクロンオーダーで張りめぐらされた CNF のネットワークは静的な外力に対する補強には役立つものの、瞬間的な衝撃を受けた場合にはわずかな界面の欠点などから破壊してしまう、または緻密なネットワークによって PP の分子運動を拘束してしまっていることが、かえって脆弱さの原因になってしまっていると考えられる。PP と CNF の界面密着性の向上や CNF 添加率の最適化などにより、この欠点を改善していくことが、より幅広い性能や機能を網羅した材料に仕上げていくために必要と言えるだろう。

成形収縮率や線膨張係数に関して、PP-CNF は PP-GF ほどではないもののその値は小さく、アスペクト比が大きなフィラーの割に異方性が少なかった。これはマトリックス中のフィラーが単純な配向だけではなく、ネットワークを形成しているためと考察され、部品成形の際の反りや変形を抑えることが期待でき、好ましい傾向であると考えられる。

表 1.2.1.1.2 基礎物性評価結果

評価項目	規格	単位	条件	水準						
				PP	PP-CNF	PP-TD	PP-GF_A	PP-GF_B	PP-WD	PP-(WD+GF)
MFR	ISO 1133	g/10min		41.7	2.6	10.3	2.6	2.8	7.3	-
密度	ISO 1183	g/cm ³		0.913	1.004	1.119	1.205	1.218	1.022	1.128
引張強度	ISO 527-1,2	MPa		38.5	47.3	27.6	133.4	129.5	31.5	71.5
引張破断ひずみ		%		26.7	3.1	14.3	2.5	2.4	5.8	1.6
引張弾性率				2020	3845	3202	9320	9298	2955	6466
曲げ強度	ISO 178	MPa		54.4	70.5	44.5	190.2	177.6	56.0	116.7
曲げ弾性率		MPa		2086	3924	3426	9310	9301	3015	6590
シャルピー 衝撃強度	ISO 179-1	kJ/m ²	23℃	2.0	1.3	3.3	21.3	17.9	3.3	9.1
			-30℃	1.0	1.1	1.4	26.7	21.3	2.1	8.3
HDT	ISO 75-2	℃	0.45MPa	112.4	133.2	126.3	164.0	162.3	142.0	160.4
			1.82MPa	64.0	80.7	73.6	159.2	155.7	89.0	147.8
成形収縮率	独自規格※	%	MD平均	1.11	0.83	0.79	0.03	0.02	0.61	0.19
			TD平均	1.17	1.09	0.81	0.31	0.28	0.93	0.69
線膨張係数	ISO 11359-2	10 ⁻⁵ ・K ⁻¹	MD平均	9.49	4.08	6.06	1.66	2.47	5.32	2.17
			TD平均	11.84	12.54	11.10	11.57	11.35	12.03	10.69

※図1.2.1.1.1で説明する。



Machine direction; MD (射出縦機械方向)
 Transverse direction; TD (射出横方向)

成形収縮率計算式

$$= (\text{金型ケガキ線間原寸} - \text{射出成形品ケガキ線間寸法}) \div \text{金型ケガキ線間原寸} \times 100$$

図 1.2.1.1.1 成形収縮率測定方法

(2)スパイラルフロー評価

CNFに限らず、フィラー強化樹脂は加熱溶融時の流れ性が低いことが往々にしてある。このような材料の製品生産性を比較する手段として、スパイラルフロー評価が一般的に実施される。これは、一定条件のもとで射出成形を行った際の、樹脂流動長を測定する方法である。樹脂注入口が金型の中心に設けられ、そこを起点に中心からの距離が回転角に比例して大きくなるような渦巻き曲線(アルキメデス螺旋)体を成形する。成形体例を図 1.2.1.1.2 に示す。

実際に加熱溶融温度 200℃、金型温度 40℃、射出速度 100mm/s にて各フィラー強化材料についてスパイラルフロー評価を行った結果を、表 1.2.1.1.3 および図 1.2.1.1.3 にまとめる。用いた金型のらせん幅は 10mm、板厚は 2mm である。



図 1.2.1.1.2 スパイラルフロー評価成形体の写真

この結果から、PP-CNF は比較材料に比べてスパイラル流動長が大きく、射出成形性に優れていることが分かった。1.2.1.1 章(1)で測定した MFR 値は PP-GF と同程度であったにもかかわらず、流動性が高い。これは、加熱溶融した PP-CNF にチキソトロピー性があることを示しており、CNF の水分散スラリーで確認されている特徴と同様の挙動を、加熱溶融した PP 中でも発現したと考えられる。

一方、PP-WD は MFR 値の割に最も流れ性が低かった。これは木粉フィラーのサイズが大きいため引き起こされる現象と考えられる。

表 1.2.1.1.3 スパイラルフロー評価結果

シリンダ温度 (°C)	200					
射出速度(mm/s)	100					
狙い射出圧力(MPa)	50		100		150	
	流動長(cm)	射出圧力(MPa)	流動長(cm)	射出圧力(MPa)	流動長(cm)	射出圧力(MPa)
PP	57	64.4	93	113.5	オーバーパック	-
	57	64.4	93	113.5	オーバーパック	-
	57	64.4	93	113.5	オーバーパック	-
	平均	57	64.4	93	113.5	-
PP-CNF	41	65.0	70	115.1	96	164.7
	41	65.0	71	115.1	96	164.7
	41	65.0	71	115.1	96	164.7
	平均	41	65.0	71	115.1	96
PP-TD	35	65.7	60	116.5	81	166.4
	35	65.7	60	116.5	81	166.4
	35	65.7	60	116.5	81	166.4
	平均	35	65.7	60	116.5	81
PP-GF_A	32	66.5	62	113.8	90	162.7
	32	66.5	62	113.8	89	162.7
	31	66.5	61	113.8	90	162.7
	平均	32	66.5	62	113.8	90
PP-GF_B	32	66.0	64	113.7	94	163.2
	32	66.0	65	113.7	95	163.2
	32	66.0	64	113.7	95	163.2
	平均	32	66.0	64	113.7	95
PP-WD	28	66.4	48	116.6	66	166.1
	28	66.4	48	116.6	65	166.1
	28	66.4	48	116.6	66	166.1
	平均	28	66.4	48	116.6	66
PP-(WD+GF)	29	66.5	55	115.8	76	165.1
	28	66.5	55	115.8	76	165.1
	29	66.5	55	115.8	76	165.1
	平均	29	66.5	55	115.8	76

※オーバーパック; 金型充填オーバー、測定不能

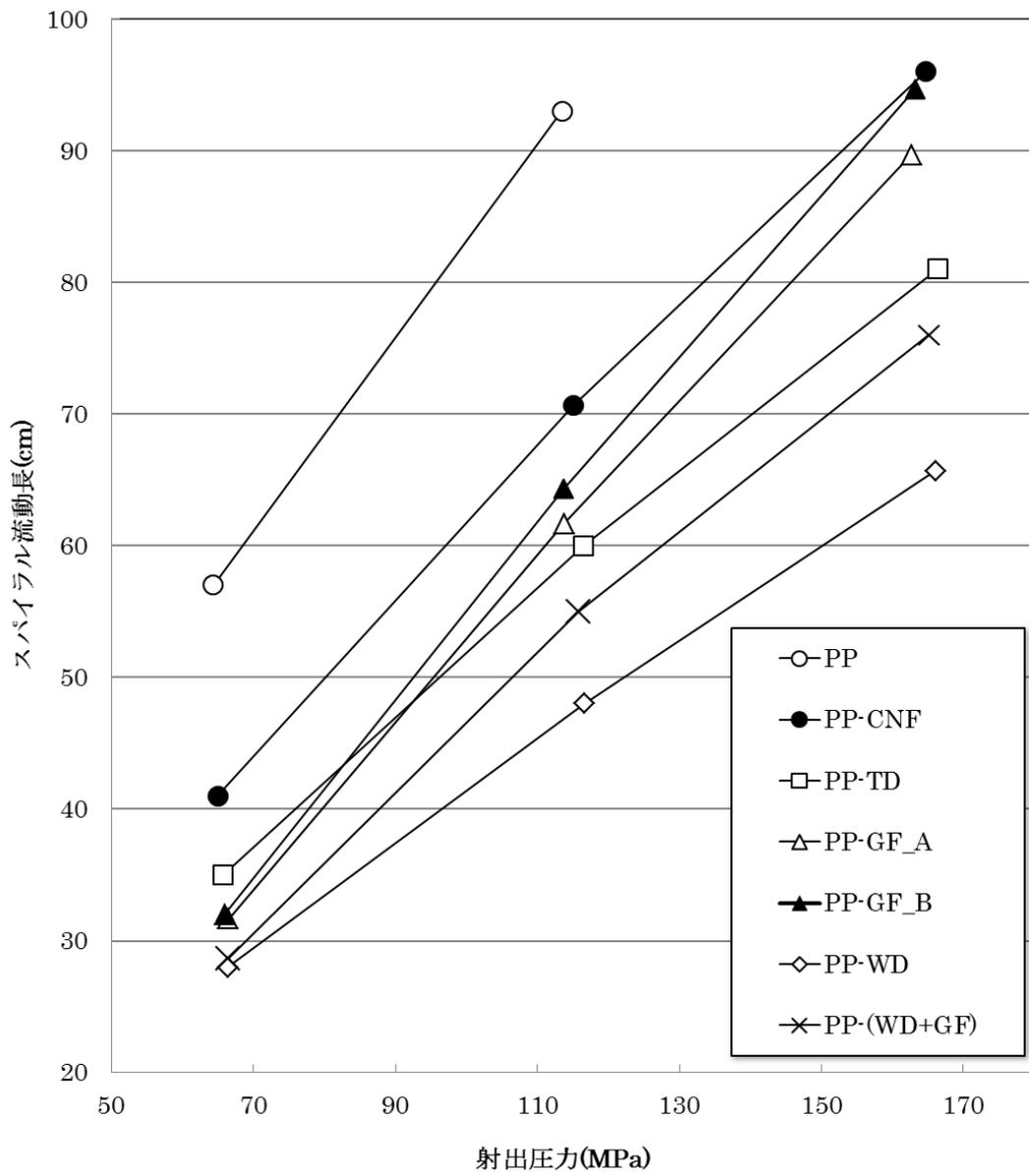


図 1.2.1.1.3 スパイラルフロー評価結果

1. 2. 1. 2 衝撃吸収特性

部品の要素形状の一つとして、凸型形状における各材料の衝撃吸収特性の比較を行った。今回使用した PP-CNF は昨年度作製した PP-CNF に比べ、シャルピー衝撃強度が向上しているが、流動性は低くなっていた。そこで、ゲート位置を変更し、試験体の成形を可能にした。改良した金型について、可動側金型を図 1.2.1.2.1 に、固定側金型を図 1.2.1.2.2 に、試験体形状とゲート形状を図 1.2.1.2.3 にそれぞれ示す。この金型を用いて PP-CNF、PP-GF_A、PP-GF_B、PP-TD、PP-WD、PP-(WD+GF)、PP の各材料を射出成形して試験体を得た。射出成形機は東芝製 EC180SE を使用し、成形温度は PP-CNF、PP-WD、PP-(WD+GF)、PP については 200℃、PP-GF_A、PP-GF_B、PP-TD については 230℃にて成形を行った。

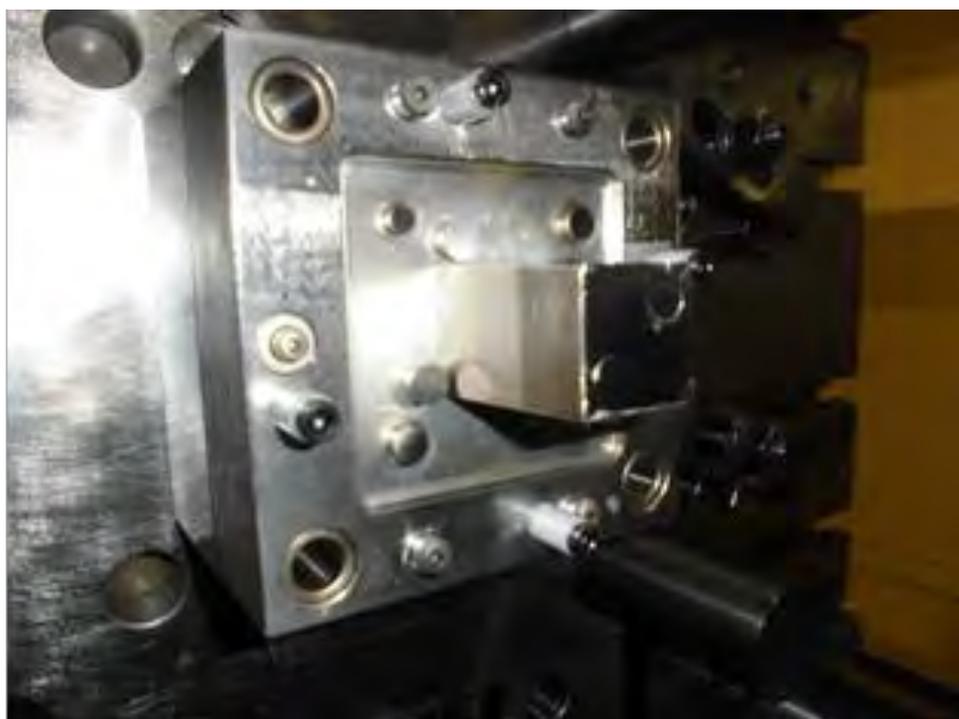


図 1.2.1.2.1 試験体成形用金型（可動側）

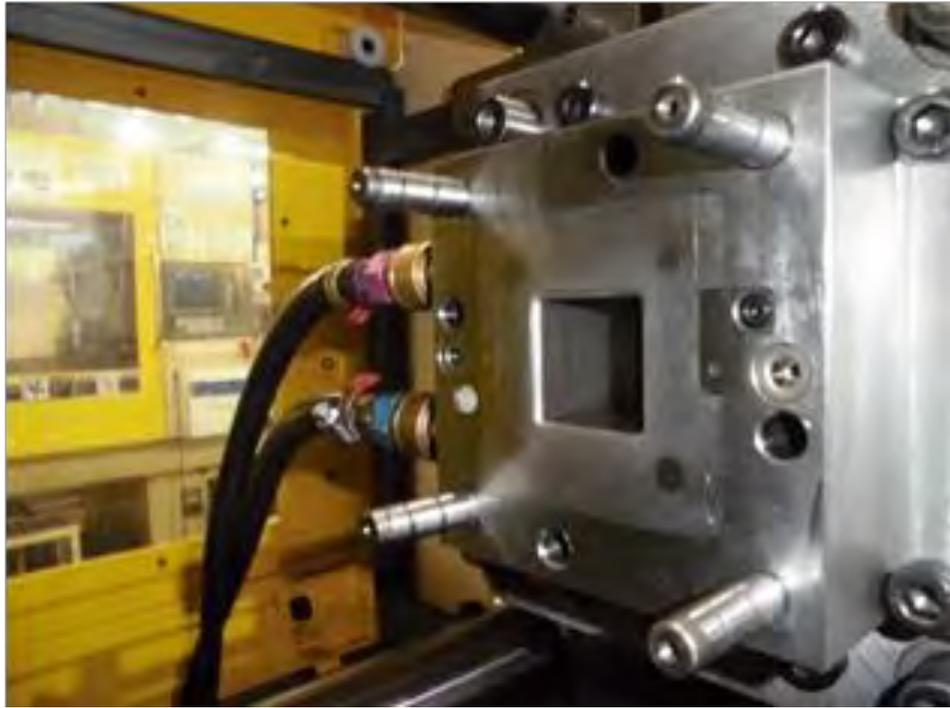


図 1.2.1.2.2 試験体成形用金型（固定側）

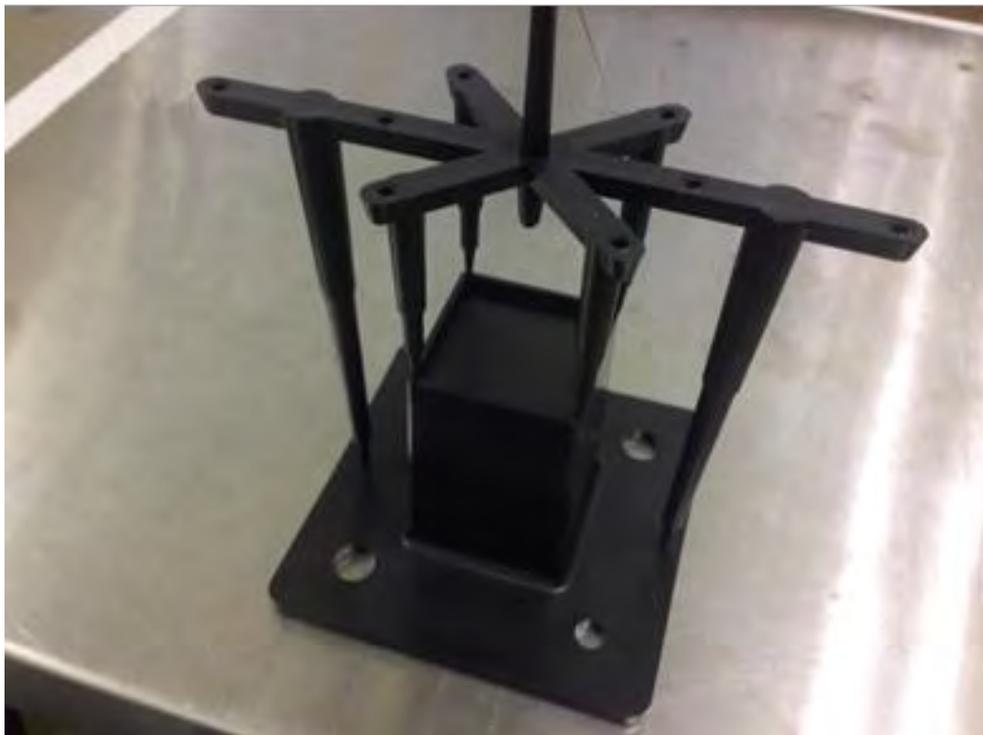


図 1.2.1.2.3 試験体形状とゲート位置

衝撃吸収特性評価は落錘衝撃試験により行った。試験装置は図 1.2.1.2.4 に示す一般財団法人日本自動車研究所保有の落錘衝撃試験機を用いた。本試験においてロードセル上に試験体を固定するために、図 1.2.1.2.5 示す治具を用いた。試験条件は錐体重量を 177kg、落下高さを 30cm で実施し、各試験体の最大荷重および破壊エネルギーを求めた。また破壊状況を確認するため、高速度カメラにて破壊時の動画を撮影した。



図 1.2.1.2.4 試験装置



図 1.2.1.2.5 試験体固定治具

表 1.2.1.2.1 に、各試験体の最大荷重および吸収エネルギーを示す。PP-CNF は PP の最大荷重、破壊エネルギーをともに上回っており、CNF を添加することで耐衝撃性が向上することが分かった。しかしながら、表 1.2.1.1.2 で示した通り、シャルピー衝撃強度は各試験体の中で最も低い値を示しており、本試験方法とシャルピー衝撃試験の結果は必ずしも合致しないことが分かった。したがって、各材料において様々な部品要素形状にて衝撃試験を行い、必要に応じて材料、および部品形状を最適化していく必要がある。

PP-CNF の破壊瞬間時の画像を図 1.2.1.2.6 に示す。衝撃荷重入力により凸部全体が破壊し、シャープエッジな破片が飛散している。この破壊形態は全ての試験体において同様であった。このような破壊モードは、破片の飛散による人体への危害が懸念されるため、自動車部品としては、適用部位が限定されてしまう。必要に応じて、ベース樹脂をさらに柔軟なものに変更する等改良が必要であると考ええる。

表 1.2.1.2.1 落錘衝撃試験結果

試験体名	最大荷重 (N)	破壊エネルギー (J)
PP-CNF	17	22
PP-GF_A	24	25
PP-GF_B	25	22
PP-TD	13	13
PP-WD	14	22
PP-(WD+GF)	22	27
PP	12	17



图 1.2.1.2.6 PP-CNF 破壞瞬間狀態

1. 2. 1. 3 複雑形状を有する成形体の収縮率

PP-CNF および比較材について、1. 2. 1. 1 章では、100(mm)×100(mm)×3(mm)の平板の成形収縮特性を評価した。しかし実際に使用される自動車部品の形状は、平板のような単純形状だけでなく複雑な形状が多々ある。そのような形状をフィラー添加樹脂で成形した場合、フィラー配向の影響により、成形体の収縮率が変化すると考えられる。

そこで、成形体の中でフィラー配向の変化が最も大きいと考えられる、ウェルド部分と先端部分に着目した。ウェルドとは、図 1.2.1.3.1 に示すように、射出成形の際、ゲートから二手に分かれた樹脂が、再度合流して融着した部分のことである。このウェルド部分と先端部分が収縮率に与える影響を測定した。

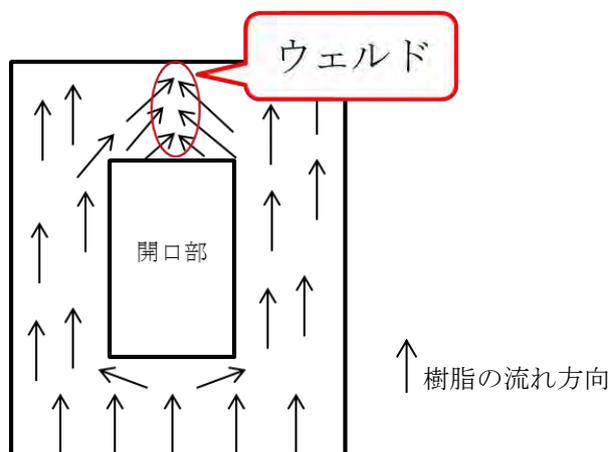


図 1.2.1.3.1 ウェルドの簡易模式図

PP-CNF、PP-TD、PP-GF_A、PP-WD、PP について、成形収縮率測定用成形体を得た。PP-CNF、PP-WD および PP は 200℃、その他の材料については 230℃にて加熱溶融し、金型温度は全て 40℃にて射出成形を行った。成形の試験機は、図 1.2.1.3.2 に示すファナック製の FANUC S-2000i 100B を使用した。



図 1.2.1.3.2 射出成形機 FANUC S-2000i 100B

(1) ウェルドの観察

ウェルド観察結果を表 1.2.1.3.1 に示す。成形体の測定部位は、型寸法で板厚 5mm と 3mm のウェルド部分、幅 4.5mm のウェルド部分、板厚 5mm の先端部分の合計 4 か所とした。PP-CNF、PP-TD の成形体では、ウェルドがはっきりと確認できた。今回の成形体のように、ウェルドが多く発生する形状では、外観を損なう懸念がある。

表 1.2.1.3.1 ウェルド観察結果

測定部位		PP	PP-CNF	PP-TD	PP-GF_A	PP-WD
ウェルド部分	板厚 5mm					
	板厚 3mm					
	幅 4.5mm					
先端部分	板厚 5mm					

(2)成形収縮率

表 1.2.1.3.1 に示したウェルドについて、成形収縮率を測定した。結果を図 1.2.1.3.3 から図 1.2.1.3.6 に示す。ウェルド部分の板厚と幅方向、先端部分の板厚方向について、PP-CNF は、収縮率が高く、PP-GF_A は、収縮率が低かった。両者の測定部位の様子を比較すると、PP-CNF ではウェルドが明確に確認でき、PP-GF_A はウェルドが不明確だった。この差は、フィラーサイズによるものだと考えられる。フィラーサイズの小さい PP-CNF は、成形の際、ウェルド部分や先端部分で繊維同士がぶつかりあうため、繊維配向が乱れやすく、結果的に収縮を抑制するフィラーとしての機能が発揮できなかったと考えられる。PP-CNF において、ウェルド部分の板厚 5mm と 3mm の収縮率を比較すると、3mm の方が高いことが示された。

以上より PP-CNF は、ウェルドが発生しやすい形状、または先端が細い形状では収縮しやすいことが分かった。

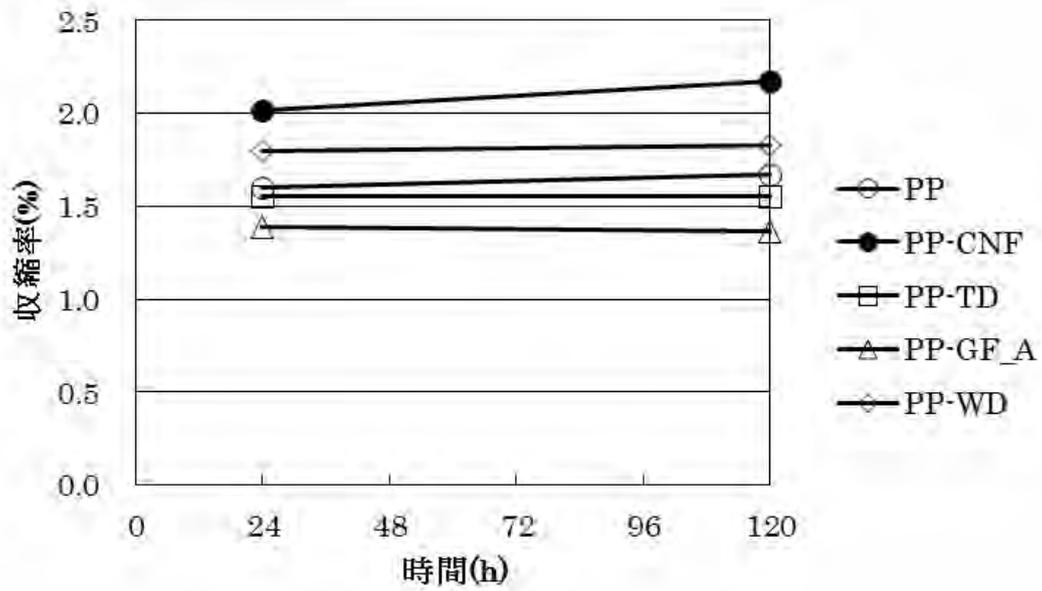


図 1.2.1.3.3 ウェルド部分の板厚方向収縮率(5mm)

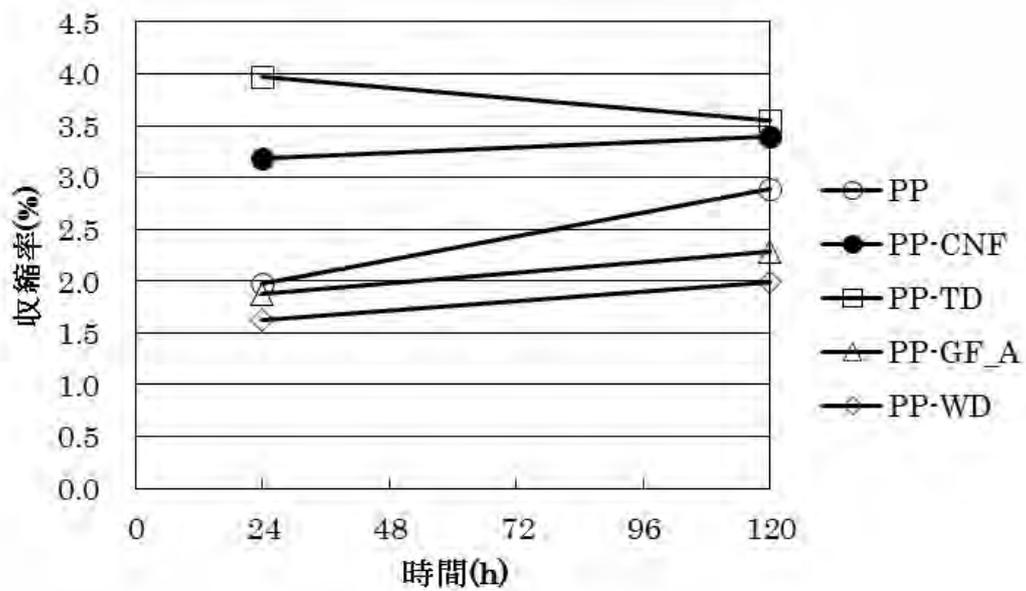


図 1.2.1.3.4 ウェルド部分の板厚方向収縮率(3mm)

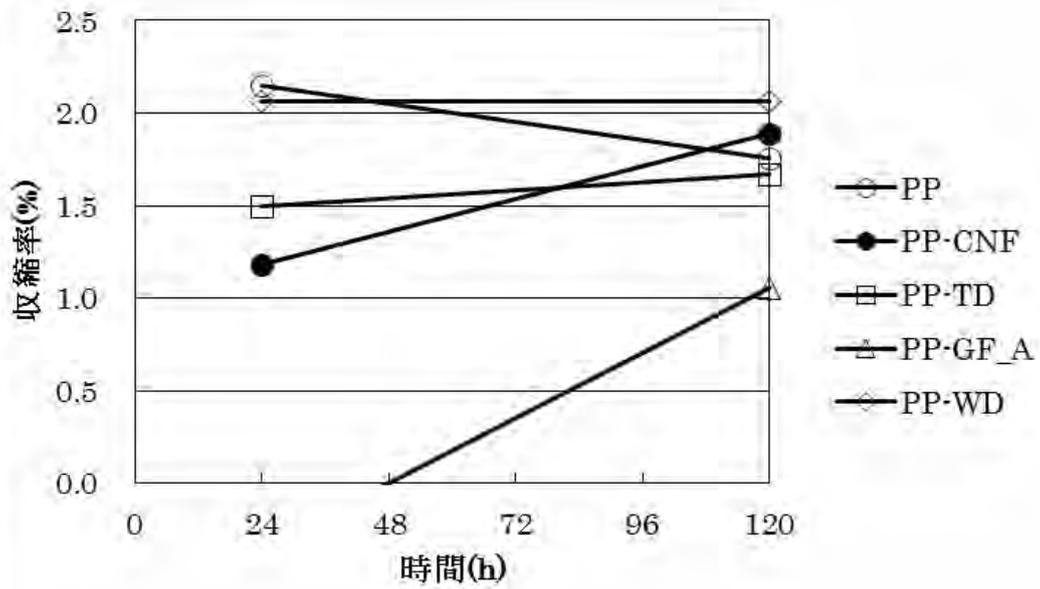


図 1.2.1.3.5 ウェルド部分の幅方向収縮率(4.5mm)

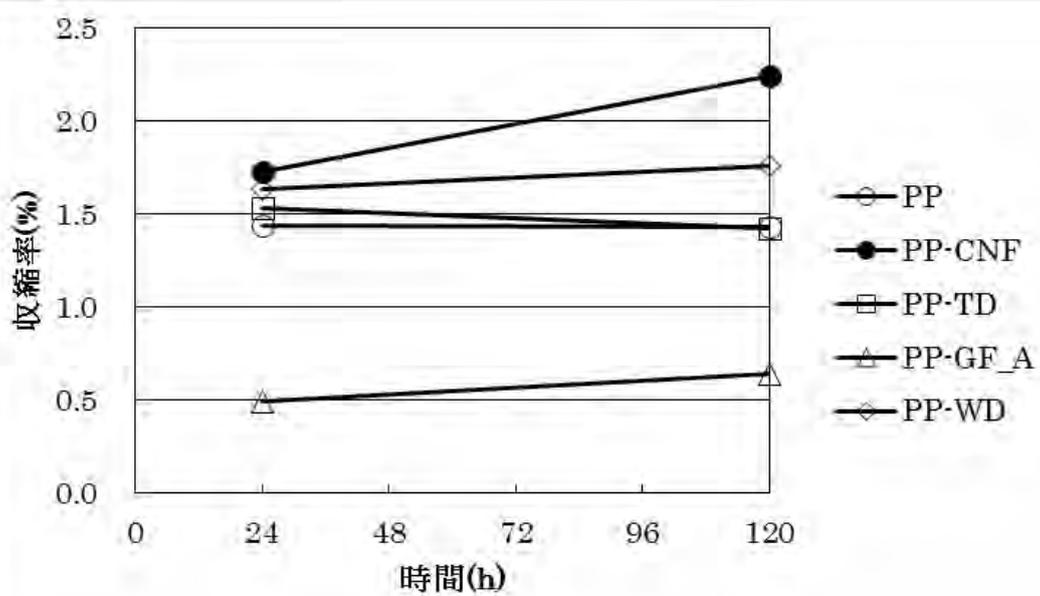


図 1.2.1.3.6 先端部分の板厚方向収縮率(5mm)

1. 2. 1. 4 ヒンジ性能評価

部品の要素形状の 1 つとして、ヒンジ形状がある。ヒンジ特性を満たすことができれば、CNF の利用範囲が拡大し、最終的に車両の軽量化に繋がる。しかしながら、高強度という特性を持ちながらも柔軟性に乏しい CNF 強化樹脂では、ヒンジのある部品への展開が困難な状況にある。

今回は、柔軟性に乏しい CNF 強化樹脂でもヒンジが可能となる形状を探索するため、CAE (Computer Aided Engineering) 解析により、最適な形状を検討した。その後、実際にヒンジを成形し、ヒンジ性能評価を実施した。

(1) ヒンジ形状の CAE 解析

CNF 強化樹脂でも可能なヒンジ形状を実現させるためには、ヒンジを曲げた時の応力を分散させることが重要と考えられる。そこで、ヒンジを曲げた時に応力を分散し低減できる形状を CAE で解析することとした。まず、基準となるヒンジ曲げ応力の算出を行った。ヒンジ部品に使用されている材料の 1 つである PP (今回は、1. 2. 1 章の PP) を選択し、この PP の引張強度、引張弾性率の値を解析時に使用した。自動車部品に採用されている一般的なヒンジ形状(以下、基本形状と称す)の末端に、図 1.2.1.4.1 のように 45 度の角度から荷重をかけ、図 1.2.1.4.2 のようにヒンジを曲げる時の最大曲げ応力を算出した。この値を基準となるヒンジ曲げ応力とした(以下、基準応力と称す)。次いで、パラメータおよびパラメータ値決めを行った。表 1.2.1.4.1 に示すような、ヒンジを曲げた時に応力分散に寄与する形状のパラメータとして、ヒンジ板厚、ヒンジ長、スリット数、ヒンジ根本角度、波の数を選択した。各パラメータに対し、パラメータ値を決めた。各形状での CNF 強化樹脂でのヒンジ曲げ最大応力の算出するため、CNF 強化樹脂(昨年度報告の PP-CNF10)の引張強度、引張弾性率の値から、PP で行った際と同様の方法で最大曲げ応力を算出した。

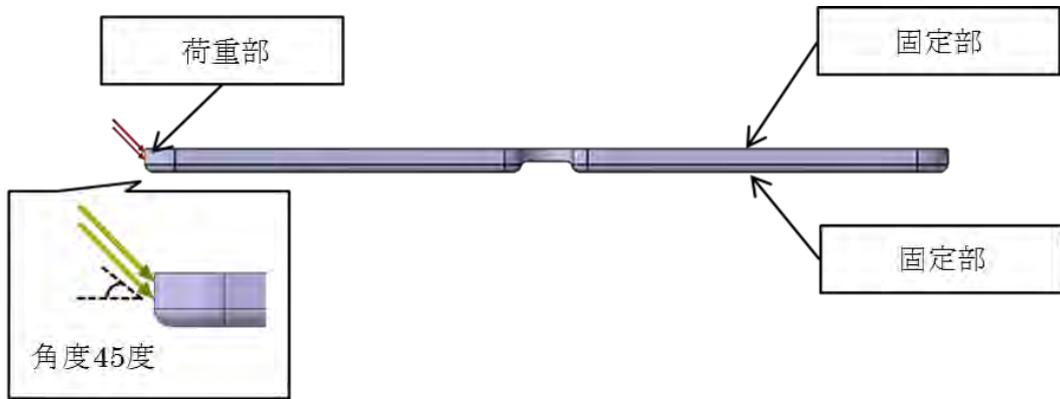


図 1.2.1.4.1 CAE 解析におけるヒンジ曲げ条件

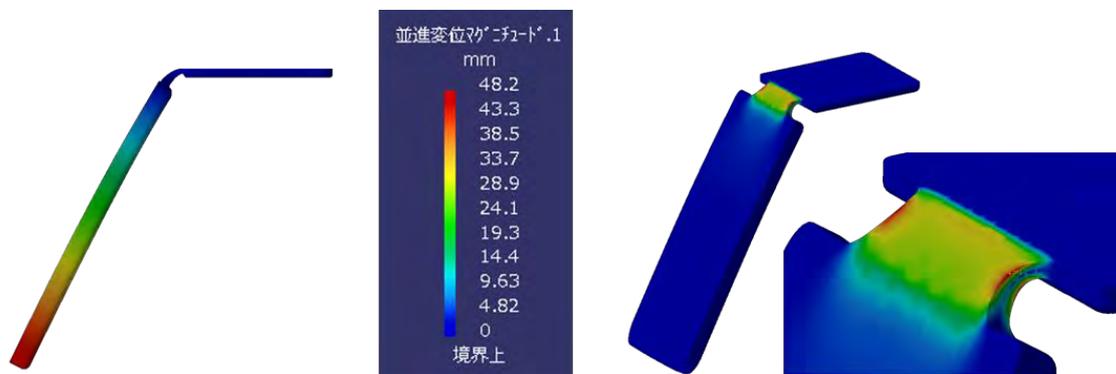
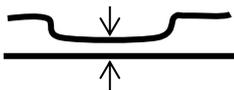
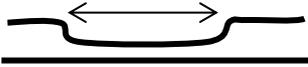
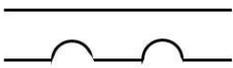
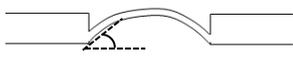


図 1.2.1.4.2 CAE 解析イメージ

表 1.2.1.4.1 ヒンジ形状の CAE 解析形状およびパラメーター

解析形状		断面図	パラメーター
①	ノーマル1		ヒンジ板厚
②	ノーマル2		ヒンジ長
③	スリット		スリット数
④	アーチ(上部)		ヒンジ根本角度
⑤	アーチ(下部)		ヒンジ根本角度
⑥	ジャバラ		波の数

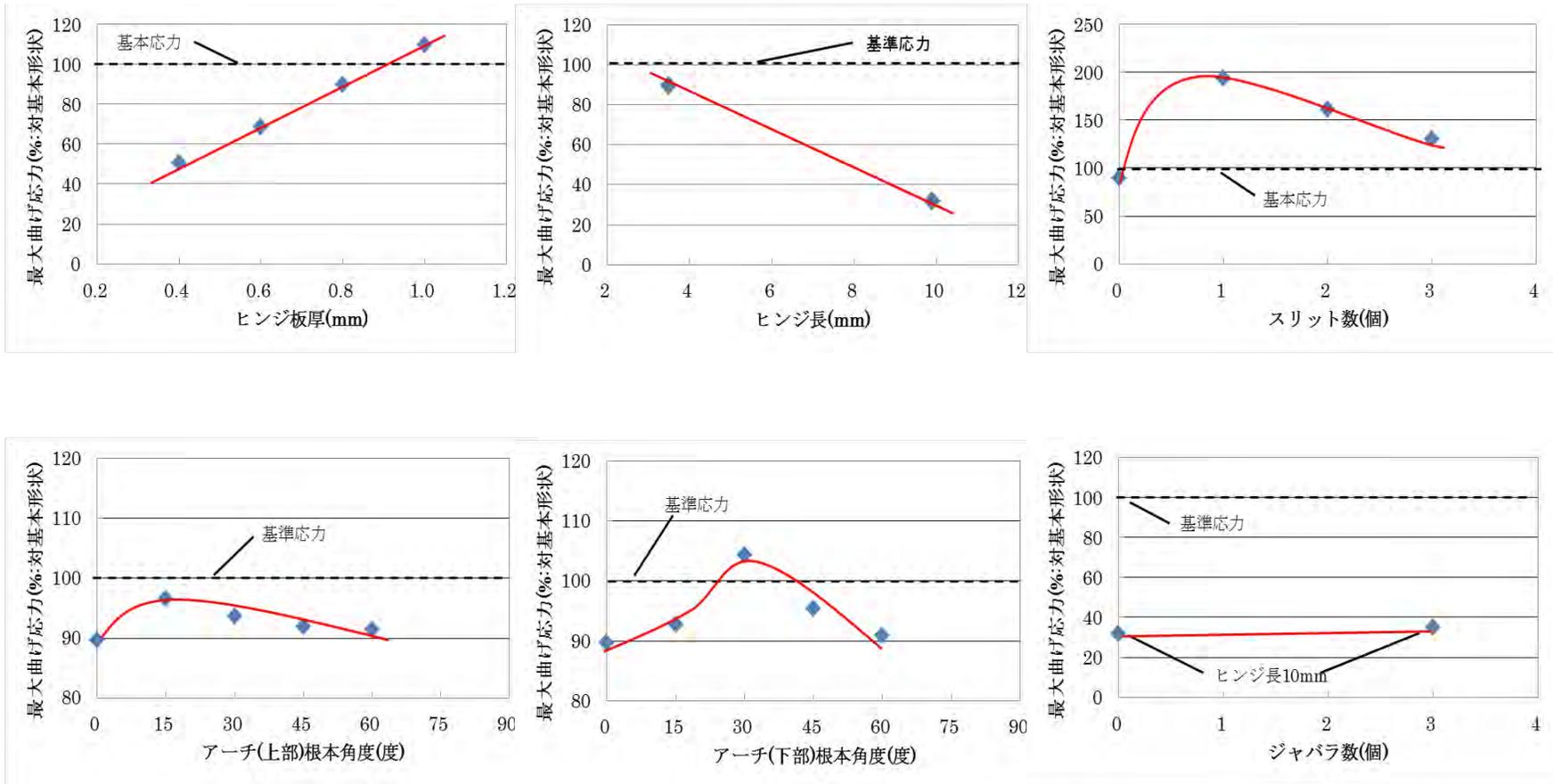


図 1.2.1.4.3 ヒンジ形状の CAE 解析結果

図 1.2.1.4.3 にヒンジ形状の CAE 解析より得られた最大曲げ応力と各パラメータの関係を示す。それぞれの形状で最大曲げ応力を算出した後、この値が基本形状の基準応力を 100%とした場合に何%であるかを算出した。

ノーマル形状において板厚を変化させると、板厚が薄いほど、最大曲げ応力が低下し、基準応力よりも大幅に低下することが分かった。これは、昨年度に実施した検討の結果と同じ傾向である。次にノーマル形状でヒンジ長を変化させると、ヒンジ長が長いほど、応力が低下することが分かった。これも、基準応力より、最大曲げ応力が大幅に低下した。また、スリットを入れることによって応力を分散させようとしたが、スリットが 1 個の場合はスリット部分で応力集中を起こして応力が高くなり、スリットを増やすことで応力が低下した。しかし、スリット 3 個でも、基準応力を下回らなかった。アーチ形状では、アーチが上部と下部で根本の角度を変えて解析を実施した。アーチ形状によって、ヒンジを曲げる角度を小さくすることで応力を低下させることを狙った。上部、下部ともに根本角度が 15° もしくは 30° まで応力が上昇し、45°、60° と角度が増すごとに応力が低下することが分かった。角度が増すことで曲げ角度が低下し応力を低減でき、60° において、基準応力に対し約 10%の応力を低減できた。ジャバラ形状においては、形状の制約から、ヒンジ長を 10mm、ジャバラの波の数を 3 個とする 1 形状のみの解析を実施した。ジャバラ形状では、ヒンジ長が長くジャバラがない形状と同等の応力となり、基準応力よりも 70%の応力を低下させることができた。

これらの結果から、図 1.2.1.4.4 および図 1.2.1.4.5 に示す 6 形状を選択し、金型を設計した。6 形状は、基本形状(板厚 0.8mm、ヒンジ長 3.5mm ; A 形状)、ヒンジ長 10mm 形状(板厚 0.6mm ; D 形状)、アーチ形状(上部)60° (厚さ 0.8mm ; E 形状)、ジャバラ形状(板厚 0.6mm、ヒンジ長 10mm ; F 形状)、これらの形状の標準形状として、ノーマル形状の板厚 0.8mm(B 形状)、および板厚 0.6mm(C 形状)を選択した。

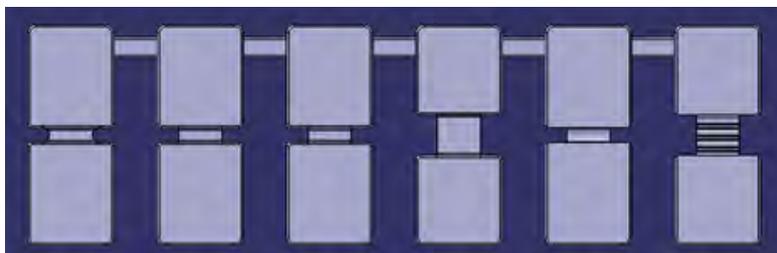


図 1.2.1.4.4 6つのヒンジ形状を作製するための金型図

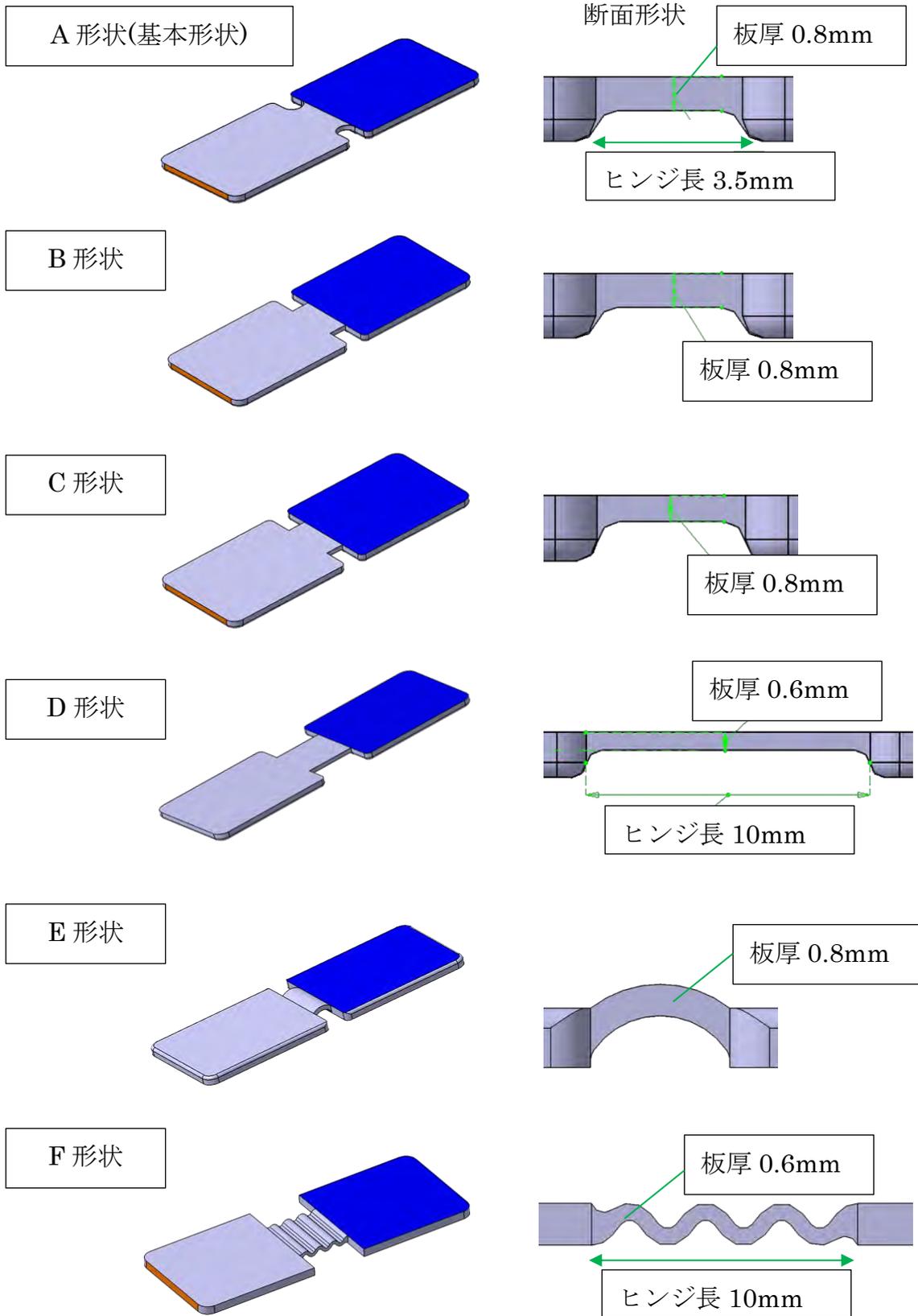


図 1.2.1.4.5 各ヒンジの形状

(2) ヒンジ性能評価

(1)で選択したヒンジ形状で、各材料のヒンジ性能の比較を行った。ヒンジ形状を成形するため、図 1.2.1.4.6 に示す金型を作製した。この金型を用い、PP、PP-CNF、PP-TD、PP-GF_A、PP-GF_B、PP-WD の各材料を射出成形してヒンジ性能検討用試験体を得た。なお、PP-CNF は、セルロース分が 20%である PP-CNF20(セルロース分をサンプル名の語尾に示す)と、PP-CNF20 ペレットと PP のペレットを 1:1 で混ぜ合わせたセルロース分 10%である PP-CNF10 の 2種類を検討した。射出成形機は日本製鋼所製の J140AD-180D を使用し、成形温度 200℃にて成形を行った。

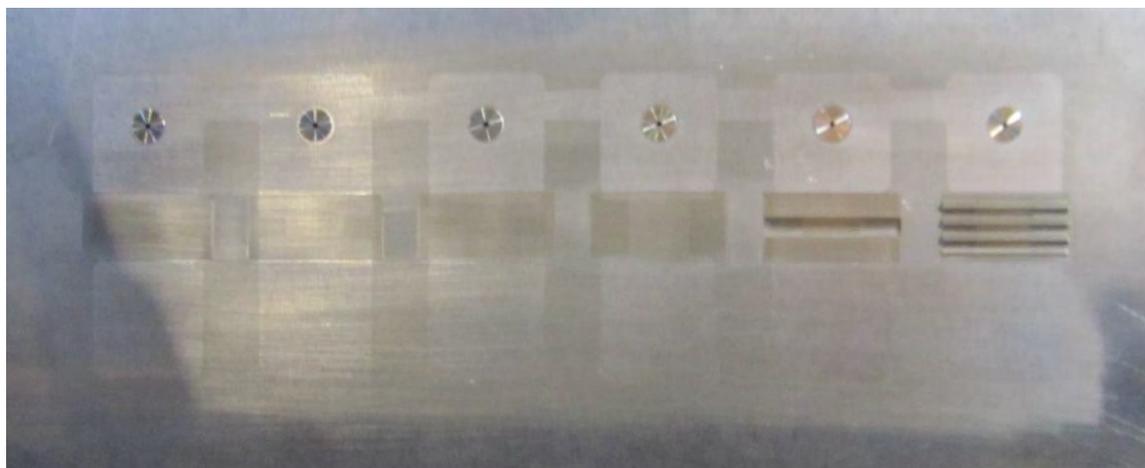


図 1.2.1.4.6 ヒンジ成形金型 上：可動側 下：固定側

ヒンジ性能を評価するため、ヒンジ部の引張荷重とヒンジ部を実際に曲げ、ヒンジ表面が滑らかで割れなし、ヒンジ表面に細かな亀裂があるが割れなし、ヒンジ割れの3段階で評価した。

図 1.2.1.4.7 のように各々の形状のヒンジを切り出し、図 1.2.1.4.8 のようにヒンジの両端をチャックで掴み、**50mm/min** の速度で引張試験を実施し、その最大荷重をヒンジ引張最大荷重と定義した。一方、ヒンジ曲げ性能は、実際にヒンジ部を曲げる際、温度条件として、常温(23℃)で8時間、および -10℃2時間放置後、同温度条件下で試験に供した。

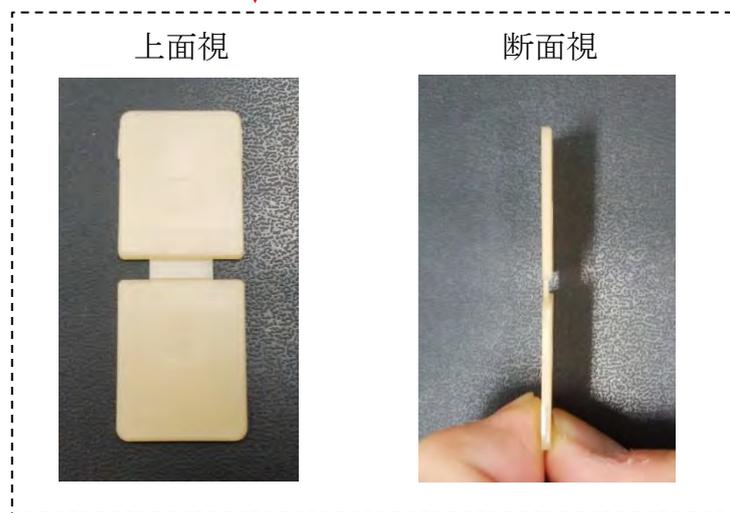
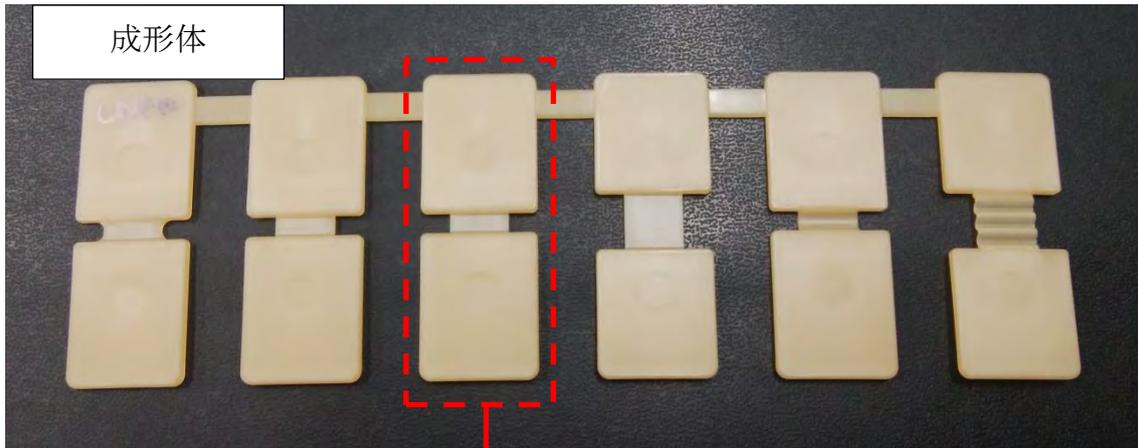


図 1.2.1.4.7 成形体からヒンジ部を切り出した様子

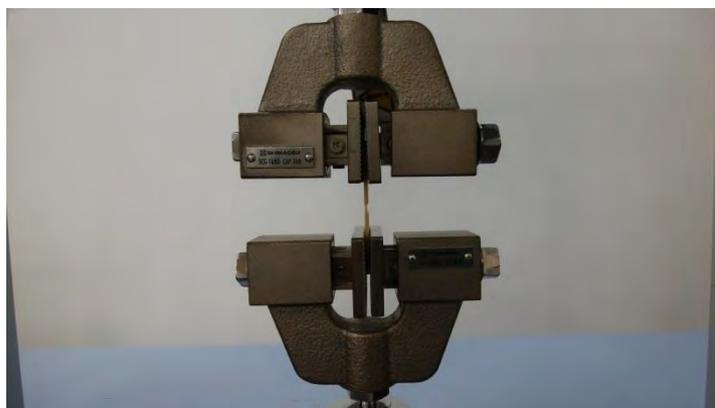


図 1.2.1.4.8 ヒンジ部の引張試験方法

表 1.2.1.4.2 各材料のヒンジ強度およびヒンジ曲げ性能

試験項目		材料							
		PP	PP-CNF10	PP-CNF20	PP-TD	PP-GF_A	PP-GF_B	PP-WD	PP-(WD+GF)
ヒンジ引張 最大荷重 (N)	A形状(基本形状)	389	420	453	309	576	628	345	507
	B形状	404	419	418	303	572	909	338	536
	C形状	343	351	351	258	598	683	265	453
	D形状	326	338	351	264	544	613	266	375
	E形状	351	285	274	297	472	519	227	328
	F形状	278	189	159	247	168	177	99	124
ヒンジ曲げ性能 (23℃)	A形状(基本形状)	○	○	×	○	×	×	×	×
	B形状	○	○	×	○	×	×	×	×
	C形状	○	○	×	○	×	×	×	×
	D形状	○	○	○	○	×	×	×	×
	E形状	○	○	×	○	×	×	×	×
	F形状	○	○	×	○	×	×	×	×
ヒンジ曲げ性能 (-10℃)	A形状(基本形状)	○	×	×	○	×	×	×	×
	B形状	○	×	×	○	×	×	×	×
	C形状	○	×	×	×	×	×	×	×
	D形状	○	○	×	○	×	×	×	×
	E形状	○	×	×	○	×	×	×	×
	F形状	○	○	×	○	×	×	×	×

ヒンジ性能 3段階評価 (-10で○を合格とする)
 ○ 割れなし、ヒンジ表面が滑らか
 △ 割れなし、ヒンジ表面に細かな亀裂あり
 × ヒンジ割れ

表 1.2.1.4.2 に各材料、各ヒンジ形状でのヒンジ引張最大荷重およびヒンジ曲げ性能を示す。ヒンジ引張最大荷重は、図 1.2.1.1.2 の各材料物性における引張強度が高いほど、ヒンジ引張最大荷重が高い結果となった。また、ヒンジ形状で比較してみると、ヒンジ板厚が増すほど、ヒンジ引張最大荷重が上昇した。さらに、E 形状や F 形状のようにヒンジ部の一般面が直線ではなく、曲線部がある形状では、ヒンジ引張最大荷重が低下する傾向であった。1. 2. 1. 4 章(1)の CAE 解析において、曲げ応力を低下できる形状を解析したが、ヒンジ部に曲線形状が含まれる場合、ヒンジ引張最大荷重が低下することが分かった。

ヒンジ曲げ性能では、図 1.2.1.1.2 の各材料物性における引張破断ひずみが低い材料、つまり、ガラス繊維強化樹脂、木質繊維強化樹脂などの伸びにくい材料では、全てのヒンジ形状において割れが生じた。しかし、CNF は、伸びにくい材料でありながら、ヒンジが長い D 形状において、割れが生じなかった。これについては、引き続き検討が必要だと考える。また、CNF の添加率を 20% から 10% に低下させることで 23℃ では、ヒンジを曲げた際、割れが生じなかった。さらに、-10℃ では、D 形状、F 形状において、割れが生じなかった。この結果は、CNF 添加率を 10% まで減らすことで柔軟性が増したためと考えられる。また、PP-TD は、タルクが 30% 添加された樹脂であるが、低温である -10℃ においても、割れが生じにくかった。タルクの粒径、形状などが影響していると考えられる。タルク強化樹脂のヒンジが割れないメカニズムを解明することは、CNF 強化樹脂のヒンジ特性を向上するために重要であるといえるだろう。

1. 2. 1. 5 揮発物評価(におい・VOC・フォギング)

自動車部品に採用する際、新材料では、においや揮発性有機化合物(Volatile Organic Compounds; VOC)のデータを把握することが必要になる。そこで今回、PP-CNF と、比較材として PP-WD について、においの原因成分を推定するため、揮発成分をにおい嗅ぎガスクロマトグラフ質量分析(Gas Chromatograph Mass Spectrometer; GC-MS)装置にて分析した。また、人体に有害な量の VOC 成分が発生していないか GC-MS 装置を使い、厚生労働省の室内濃度に対する指針値指定物質に対し、確認を行った。さらにフォギング性試験も行った。

(1)におい原因成分分析

におい原因成分を分析するために、図 1.2.1.5.1 に示すにおい嗅ぎ GC-MS 装置を使った。PP-CNF の分析結果であるトータルクロマトグラムを図 1.2.1.5.2 に示す。PP-CNF の甘い発酵臭の原因と推定される成分としては、ジアセチルが多く検出され、焦げ臭と推定される成分としては、ヘミセルロースなどの糖分解物であると推定されるフルフラールが多量に検出された。また、PP-WD の分析結果であるトータルクロマトグラムを図 1.2.1.5.3 に示す。PP-WD からは、焦げ臭や木のにおいの原因と推定されるグアイアコールやカルバクロールなどのリグニン分解成分の特徴であるフェノール系物質の検出量が多いことが分かった。上記検出成分の分子構造およびトータルクロマトグラム検出 No.との関係を表 1.2.1.5.1 に示す。

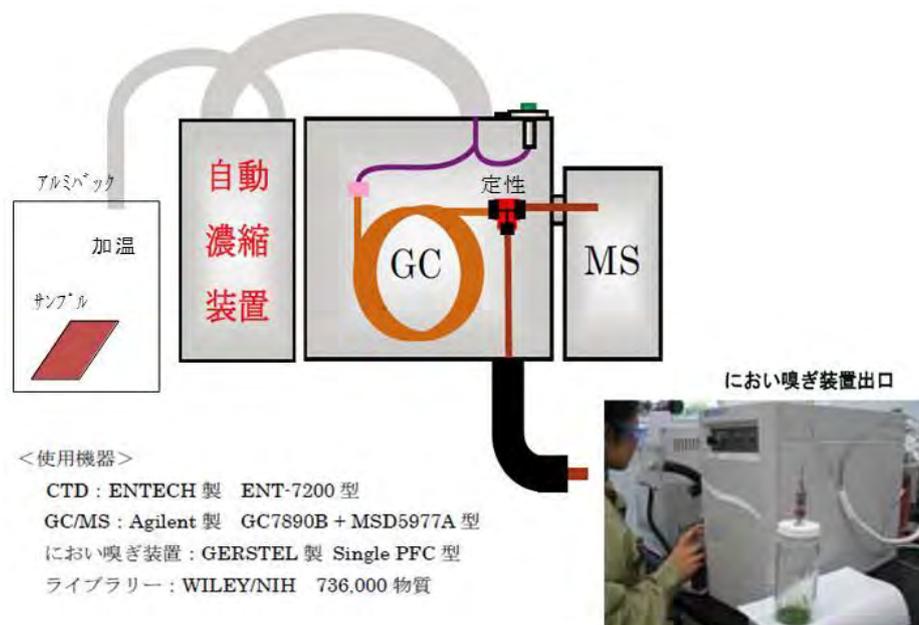


図 1.2.1.5.1 におい嗅ぎ GC-MS 装置概要

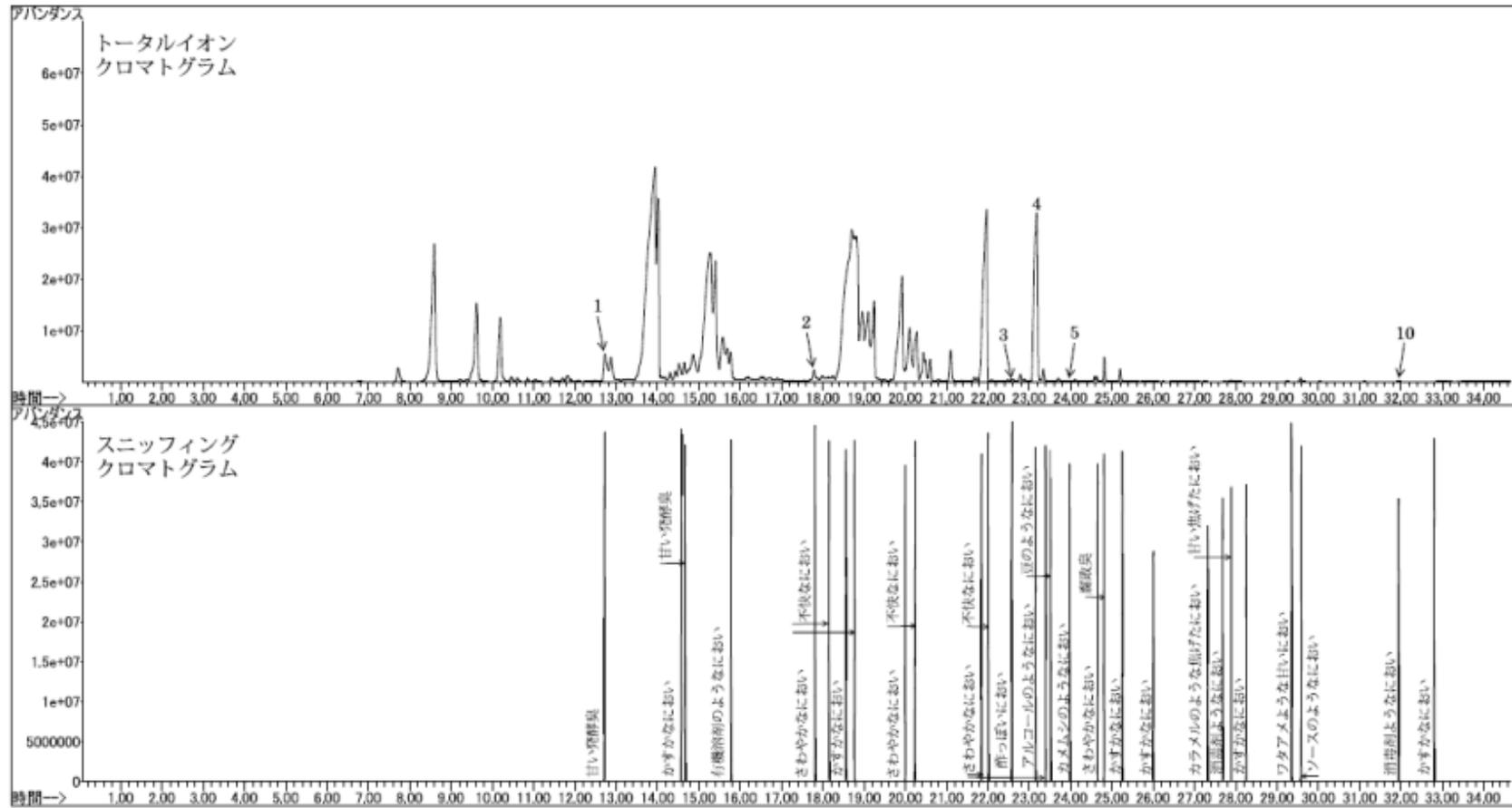
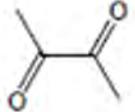
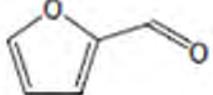
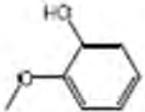
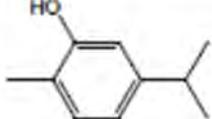


図 1.2.1.5.2 PP-CNF トータルクロマトグラム

表 1.2.1.5.1 代表検出成分(推定)とトータルクロマトグラムピーク No.

ピーク No.	推定成分名	組成式	推定構造式
1	ジアセチル	$C_4H_6O_2$	 Mw:86
4	フルフラール	$C_5H_4O_2$	 Mw:96
7	o-メキシフェノール (グアイアコール)	$C_7H_8O_2$	 Mw:124
9	カルバクロール	$C_{10}H_{14}O$	 Mw:150

(2)VOC 特性

厚生労働省の室内濃度に対する VOC 指針値指定物質に対し確認を行った。表 1.2.1.5.2 に結果を示す。PP-CNF について分析の結果、0.46 μg /サンプルのホルムアルデヒドと 2.0 μg /サンプルのアセトアルデヒドが発生していた。一方 PP-WD については、2.7 μg /サンプルのホルムアルデヒドと 2.6 μg /サンプルのアセトアルデヒドが発生していた。自動車内装材料への適用を想定した場合の取り組みとして、ホルムアルデヒドとアセトアルデヒドについて、キャッチャー剤添加などによる低減対策が必要であることが分かった。

表 1.2.1.5.2 VOC 分析結果

単位： $\mu\text{g}/\text{unit}$

試料名／指定成分	ホルムアルデヒド	アセトアルデヒド	トルエン	キシレン	エチルベンゼン	スチレン	テトラデカン	フタル酸ジ-n-ブチル	フタル酸ジ-2-エチルヘキシル
PP-WD	2.7	2.6	0.088	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050
PP-CNF	0.46	2.0	0.092	0.057	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050

(3)フォギング性能

自動車内装部品やランプ支持部品に適用する材料には、材料から揮発する成分の量に規制がある。人体への影響はもちろん、他部品への付着やランプの曇りなどを防ぐために各部品で規格、規定値を設け、適合する材料を採用する。

図 1.2.1.5.4 に揮発物質量を定量化するフォギング試験方法の例を示し、実際に図中ガラス板の揮発成分による曇価をヘーズメーターにて定量化した評価結果を表 1.2.1.5.3 にまとめる。

この結果から、木粉を用いてマトリックスを強化した場合には曇価が非常に高いことが分かった。木粉は分子量や揮発温度がまちまちな複数の成分から構成されており、また、コンパウンドや成形工程を経ることで加熱の影響を受け、成分が変化したり、揮発しやすい状態になっていた可能性が考えられる。これらに起因して、曇価が高かったと推察することができる。

一方、PP-GF や PP-TD で使用する無機フィラーそのものは化学的に安定で、加熱しても揮発する成分はほとんど含まれていない。しかしながら、PP と無機フィラーの界面密着性を向上させる目的や、無機フィラーの分散性を向上させるために、様々な添加剤が使用されることが多い。この成分がフォギング試験において揮発し、ガラスを曇らせる原因となった。

CNF の場合、植物由来ではあるものの、精製されたパルプから製造しており、ほぼセルロース単一成分で構成されている。セルロースは比較的耐熱性に優れた成分ではあるが、コンパウンドや成形工程での熱劣化、揮発成分の発生については懸念される。また、複合化においてはパルプの疎水化処理や PP との界面密着性を向上させるため、マトリックス、フィラー以外の第三成分も使用した。にもかかわらず、今回の評価から PP-CNF のフォギング性能は PP-GF と同レベルであることが示された。低フォギング性能への要求が高い部品へこのままでの状態での適用は難しいものの、用途に合わせたマトリックス PP の見直し、第三成分の量や種類の最適化によって、十分自動車部品として活用できるレベルであることが把握された。

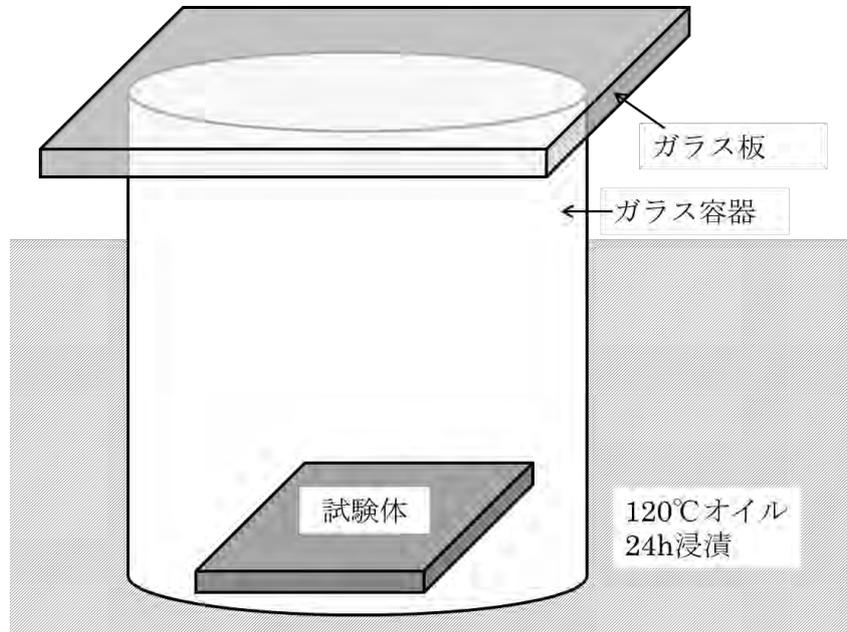


図 1.2.1.5.4 フォギング試験方法

表 1.2.1.5.3 フォギング試験結果

	水準	PP	PP-CNF	PP-TD	PP-GF_A	PP-GF_B	PP-WD	PP-(WD+GF)
試験後 曇価 (%)	n=1 (5点平均値)	8.52	14.09	15.91	10.98	20.51	66.55	40.18
	n=2	7.85	13.26	20.49	10.62	13.60	70.80	36.14
	n=3	9.52	23.64	12.00	21.95	9.40	62.86	24.57
	平均	8.63	17.00	16.13	14.52	14.50	66.74	33.63
試験前 曇価 (%)	n=1 (5点平均値)	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
	n=2	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
	n=3	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
	平均	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
曇価(%)		8.57	16.93	16.06	14.45	14.43	66.67	33.56

1. 3 耐衝撃性向上の試み

1. 3. 1 ゴム成分後添加検討

ここまでの検討で PP-CNF は耐衝撃性能が低く、部品化検討に向けて課題になり得ることが明らかになった。しかし、1. 1. 1. 1 章で検討した通り、ゴム成分が添加されている耐衝撃性タイプの PP をマトリックスに用いても、その効果を十分発揮させることができない。その理由が先に考察した通り、CNF によるゴム成分の拘束であるならば、CNF とゴム成分のバランスを最適化することで、CNFRP の性能として剛性と耐衝撃性の両立を図ることができる可能性がある。

そこで、耐衝撃性タイプの PP をマトリックスとして使用し、CNF の添加率を変えた CNFRP を作製して基礎物性評価を実施した。基礎物性評価の内容と結果を表 1.3.1.1 にまとめる。

表 1.3.1.1 耐衝撃性 PP への CNF 添加率検討

評価項目	規格	単位	セルロース分				
			0wt%	3wt%	6wt%	15wt%	20wt%
密度	ISO 1183	g/cm ³	0.900	0.910	0.940	0.970	1.013
引張強度	ISO 527-1,2	MPa	26.6	27.7	29.2	34.7	37.9
曲げ強度	ISO 178	MPa	30.4	30.7	31.6	36.9	39.5
曲げ弾性率	ISO 178	MPa	1100	1209	1333	1980	2287
シャルピー衝撃強度	ISO 179-1	kJ/m ²	9.7	6.1	4.2	2.5	2.5

狙い通り、CNF のセルロース分添加率が少なくなるとシャルピー衝撃強度が高くなるが、一方で曲げ弾性率が低くなってしまいうトレードオフの現象が見られた。フィラー添加率で性能が変化するこの傾向は一般的にも見られ、容易に予測できる結果であるといえる。しかし、ナノ～サブミクロンサイズで三次元的なネットワーク状に張りめぐらされている CNF が、ゴム成分を拘束してしまうことでシャルピー衝撃強度を低下させてしまう影響は、ミクロンサイズで単純に分散する GF などと比べると大きいと考えられる。

これを改善するため、CNF がゴム成分を拘束する現象を少しでも抑えることを目的とし、マトリックス PP に CNF を分散させた後にゴム成分を添加する方法を試みた。剛性との両立を目指すため、マトリックス PP は高剛性タイプを使用し、後添加するゴム成分の量を変化させて比較することとした。基礎物性評価の内容と結果を表 1.3.1.2 にまとめる。

表 1.3.1.2 ゴム成分後添加検討

評価項目	規格	単位	セルロース分 (wt%)	20	19	18	17
			ゴム分 (wt%)	0	5	10	15
密度(水中置換法)	ISO 1183	g/cm ³		1.010	0.993	0.990	0.983
引張強度	ISO 527-1,2	MPa		42.9	39.4	35.1	31.1
破断のび		%		3.9	5.7	6.8	6.6
曲げ弾性率	ISO178	MPa		3220	2869	2528	2137
曲げ強度	ISO178	MPa		57.7	51.3	45.2	39.2
シャルピー衝撃強度	ISO 179-1	kJ/m ²	(23°C)	1.6	2.3	2.9	3.3
			(-30°C)	1.2	1.4	1.4	1.5

この結果も一見すると表 1.3.1.1 と同様なトレードオフの現象が起きていることが分かった。その程度がゴム成分を後添加することで改善されているのかを検証するため、曲げ弾性率とシャルピー衝撃強度の値をグラフにプロットした。結果を図 1.3.1.1 に示す。

この結果より、高剛性タイプの PP をマトリックスに用い、ゴム成分を後添加する方法のほうが、耐衝撃性タイプの PP をマトリックスに使用する場合に比べてわずかではあるが、剛性と耐衝撃性を両立させやすい傾向にあることが示された。高い耐衝撃性能を求められる自動車部品へ CNFRP の適用を検討する場合にはさらに改良が必要であると考えられる。

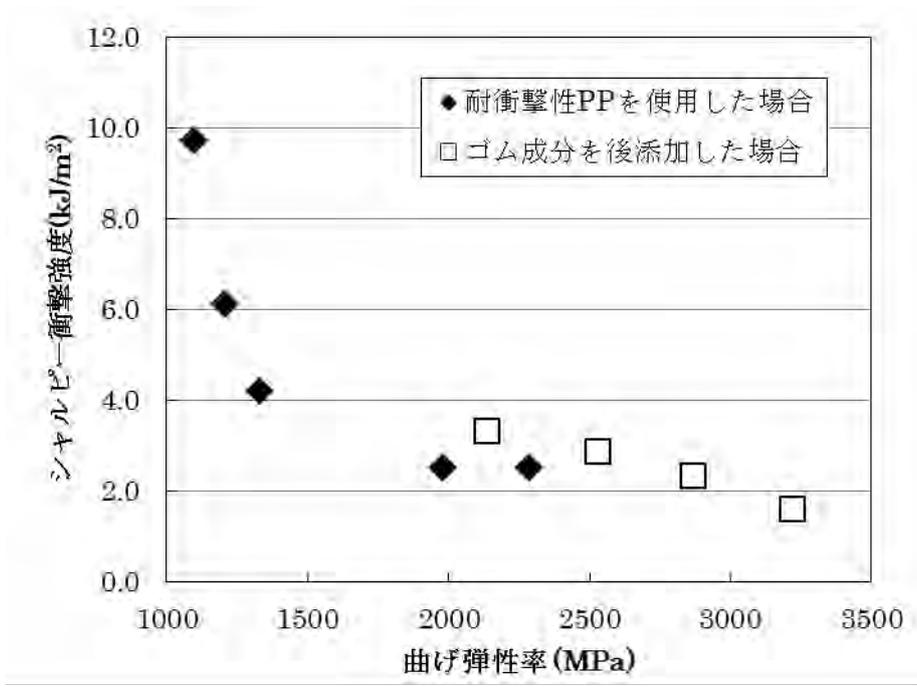


図 1.3.1.1 曲げ弾性率とシャルピー衝撃強度の関係

1. 3. 2 PMMA をマトリックスとした検討

CNF の繊維強度を活かすためには、CNF とマトリックスとの親和性を高めることが必要だと考えられる。そこで、両者の親和性を向上させるために、CNF にマトリックスと同一の成分を付与する変性処理を施し実験を行った。

1. 3. 2. 1 材料調製

マトリックスにはポリメタクリル酸メチル(Poly Methyl Methacrylate; PMMA)を、変性成分にはメタクリル酸メチル(Methyl Methacrylate; MMA)を用いた。CNF の原料として用いるパルプには、セルロース含有量が 90%以上であり、化学反応が進行しやすい溶解パルプを選定した。

複合材は、変性処理を施したパルプを乾式粉碎し、添加率 10wt.%として PMMA とともに二軸押出機で混練することで調製した。この材料を、PMMA-変性 CNF と称し、比較として調製した MMA を付与しない未変性 CNF を含む複合材料を、PMMA-未変性 CNF と称する。セルロース繊維は変性処理により、のちの粉碎工程での微細化が進行しやすい。そのため、セルロース繊維のサイズは混練前の時点で異なり、未変性 CNF よりも変性 CNF のほうが細かく、アスペクト比が低くなっていることが予想される。また混練時には、1. 1. 2 章におけるスクリー構成検討と同様に、極力繊維を傷めず、解繊する目的で伸長力の働きをより重視し、ローターを組み込んだスクリー構成とした。したがって、PMMA/変性 CNF 中の繊維は、マトリックスとのなじみが良くなっているため、混練時の伸長力により解繊が促進されることが期待される。

1.3.2.2 結果

これらの複合材を加熱溶融温度 200°C、金型温度 40°Cにて射出成形し、基礎物性の評価を行った。その結果を表 1.3.2.2.1 に示す。マトリックスとの親和性向上および微細化促進による物性向上を期待したものの、変性の有無にかかわらず、ほぼ同等の物性を示した。

変性処理を施しても物性が向上しなかった理由を考察するために、繊維および界面状態を把握することが必要と考え、TEM を用いて複合材内部の観察を行った。PMMA-未変性 CNF を図 1.3.2.2.1 および図 1.3.2.2.2 に、PMMA-変性 CNF を図 1.3.2.2.3 および図 1.3.2.2.4 に示す。図 1.3.2.2.1 および図 1.3.2.2.3. において、複合材中の繊維はナノサイズにはなっておらず、マイクロメートルオーダーであり、ローターセグメントによる解繊の効果が小さいことが分かった。繊維サイズ分布が広く、アスペクト比は様々であるものの、上記の予想通り、繊維サイズは未変性 CNF よりも変性 CNF のほうが小さくなっていた。変性処理による繊維とマトリックスとの界面状態の変化は TEM 観察では把握できず、完全に解繊されている様子やナノ分散している様子は見受けられなかった。

また、より微視的な視野である図 1.3.2.2.2 および図 1.3.2.2.4 においては、黒い線で表されるのが CNF、白く見える部分が PMMA である。PMMA-未変性 CNF では、CNF が規則的に流れを作って整列している様子が見られた。一方 PMMA-変性 CNF では、CNF がランダムな方向を向いていることや、CNF 中に部分的に変性成分の PMMA が存在していることが観察された。すなわち、微視的な構造観察をして初めて変性処理の差が認識できた。

以上より、変性処理を施しても物性が向上しなかった理由は、施した変性処理による効果が小さく、界面の密着性や繊維の解繊性形状に大きな影響を与えるほどではなかったためだと考えられる。CNF とマトリックスとの親和性を向上させることを目指したが、親和性および基礎物性向上を確認できなかった。変性処理、繊維、混練方法などに追求の余地があると考えられる。

表 1.3.2.2.1 PMMA をマトリックスとした材料基礎物性

評価項目	規格	単位	水準		
			PMMA	PMMA/ 未変性CNF	PMMA/ 変性CNF
引張強度	ISO 527-1,2	MPa	75.6	72.1	72.9
引張破断ひずみ		%	10.4	6.7	6.9
引張弾性率		MPa	2600	2876	2869
曲げ強度	ISO 178	MPa	111.9	100.8	90.9
曲げ弾性率		MPa	3169	3788	4038
シャルピー衝撃強度	ISO 179-1	kJ/m ²	1.1	1.3	1.0

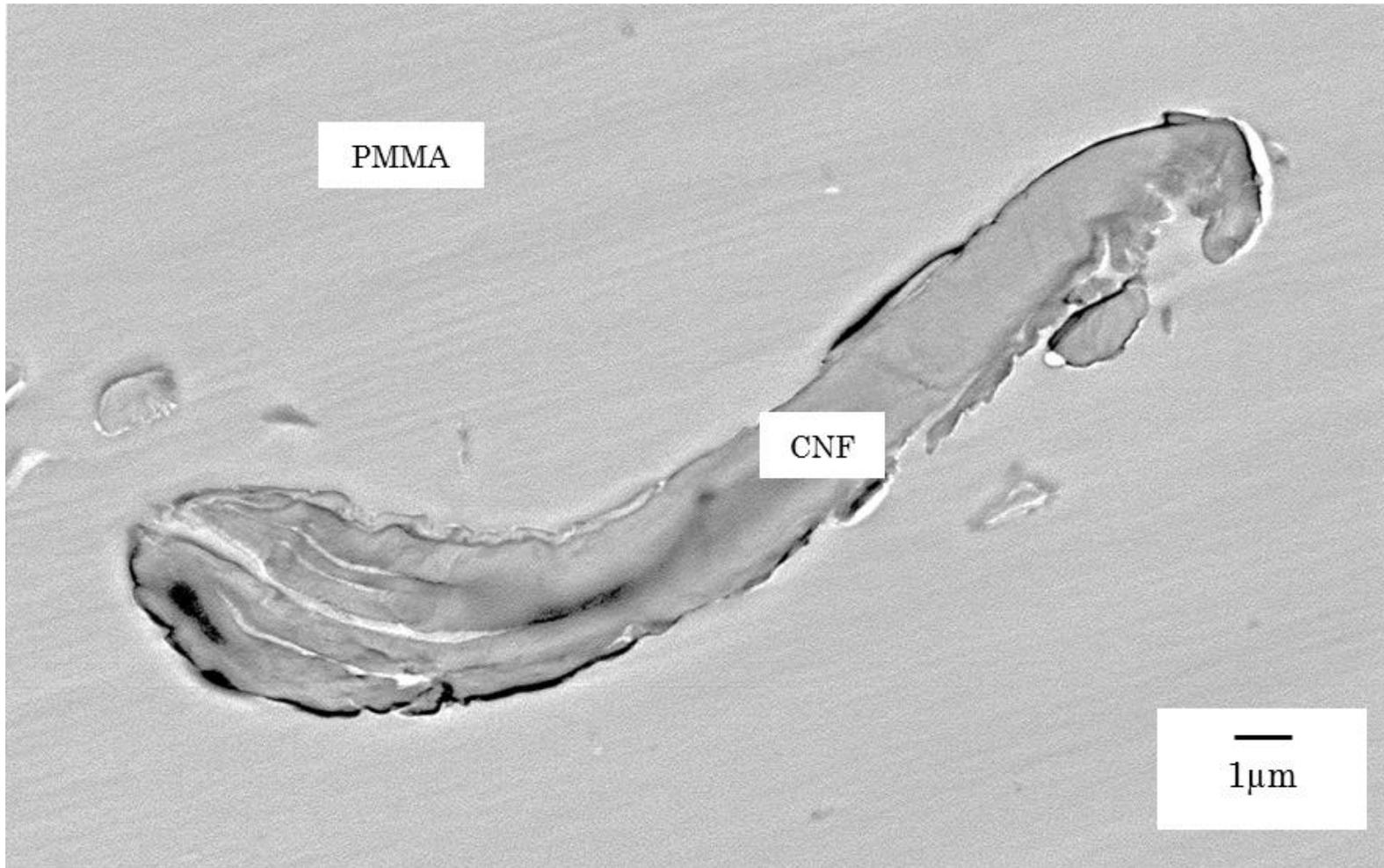


図 1.3.2.2.1 PMMA/未変性 CNF 10,000 倍

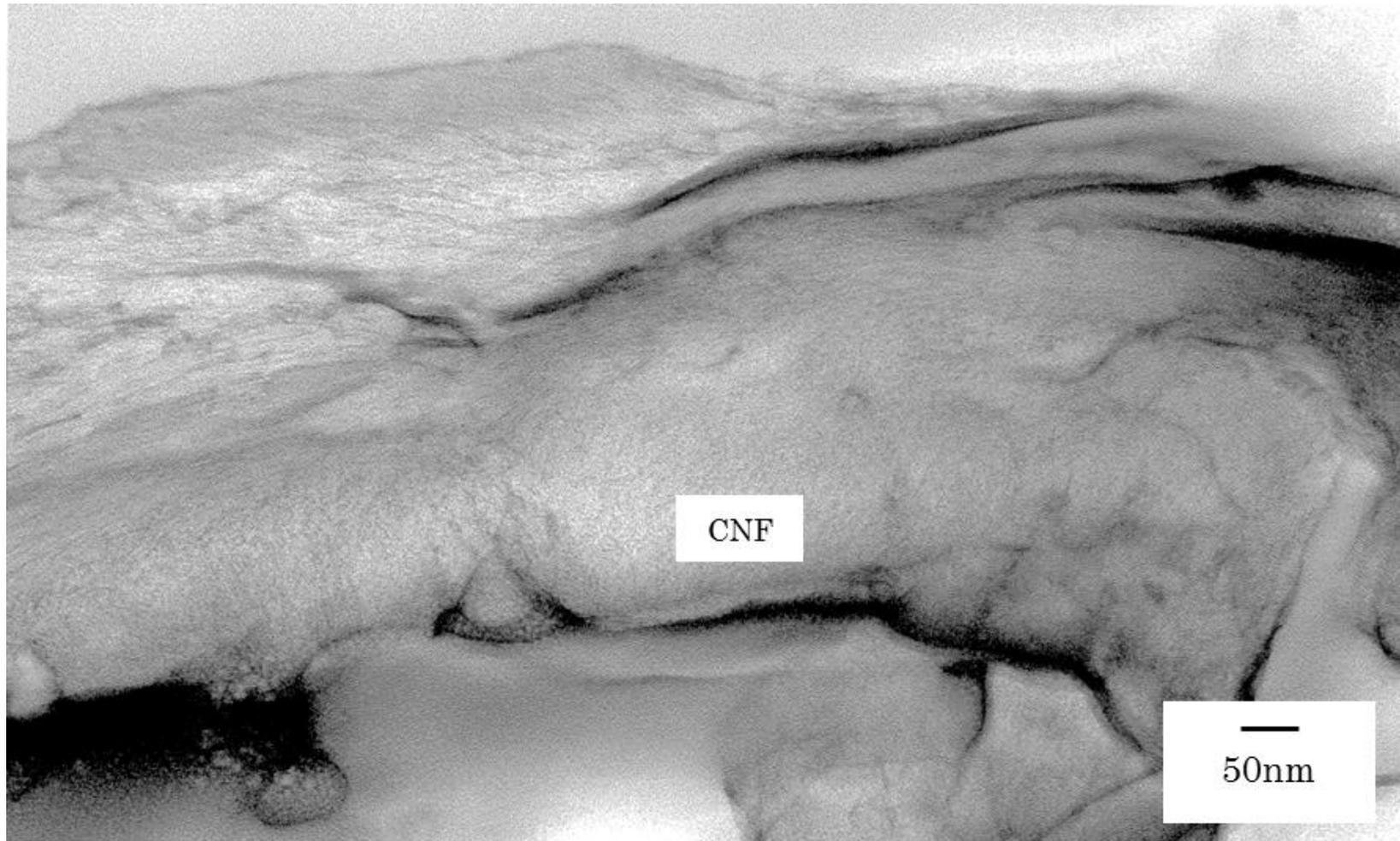


图 1.3.2.2.2 PMMA/未变性 CNF 200,000 倍

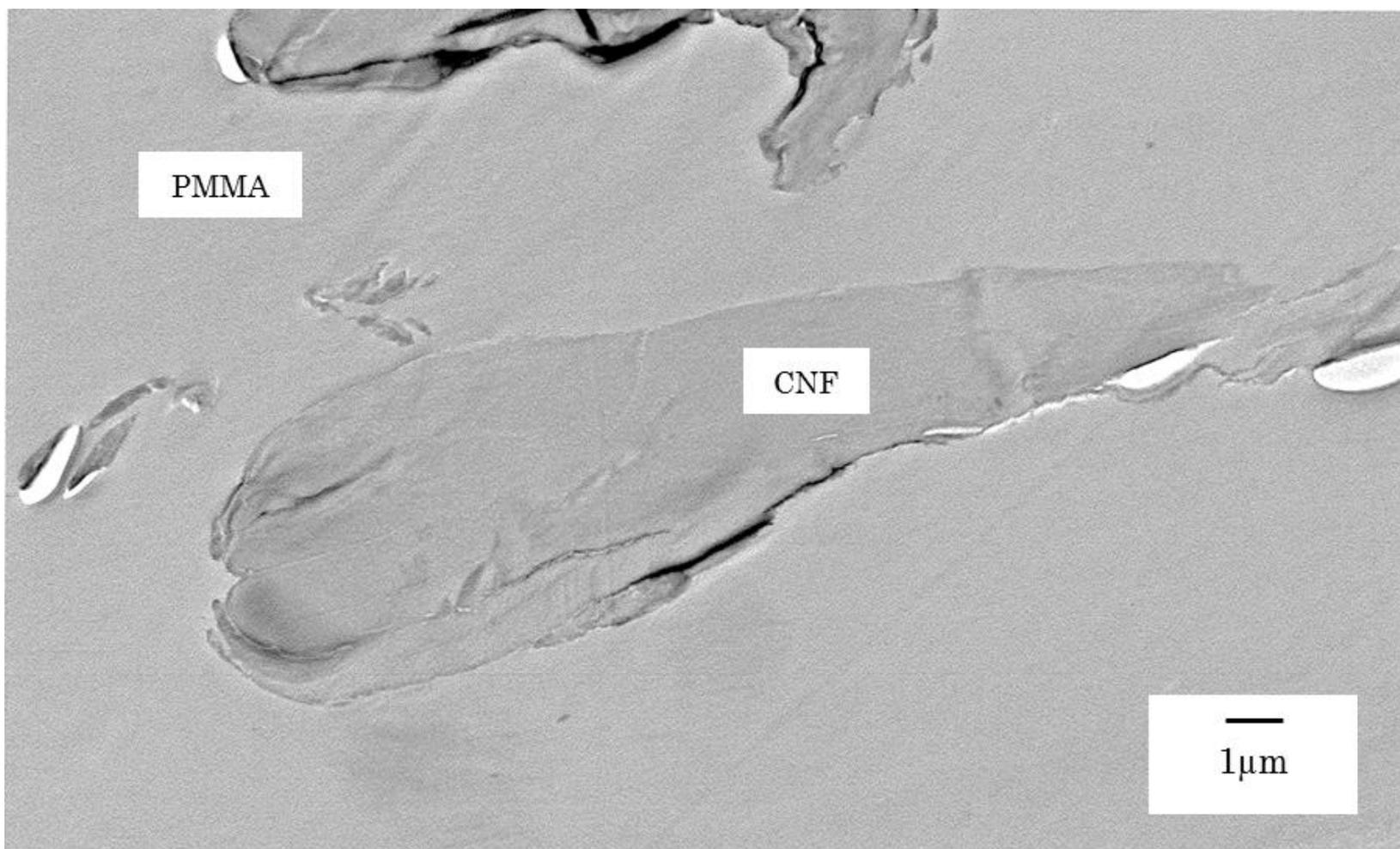


图 1.3.2.2.3 PMMA/变性 CNF 10,000 倍

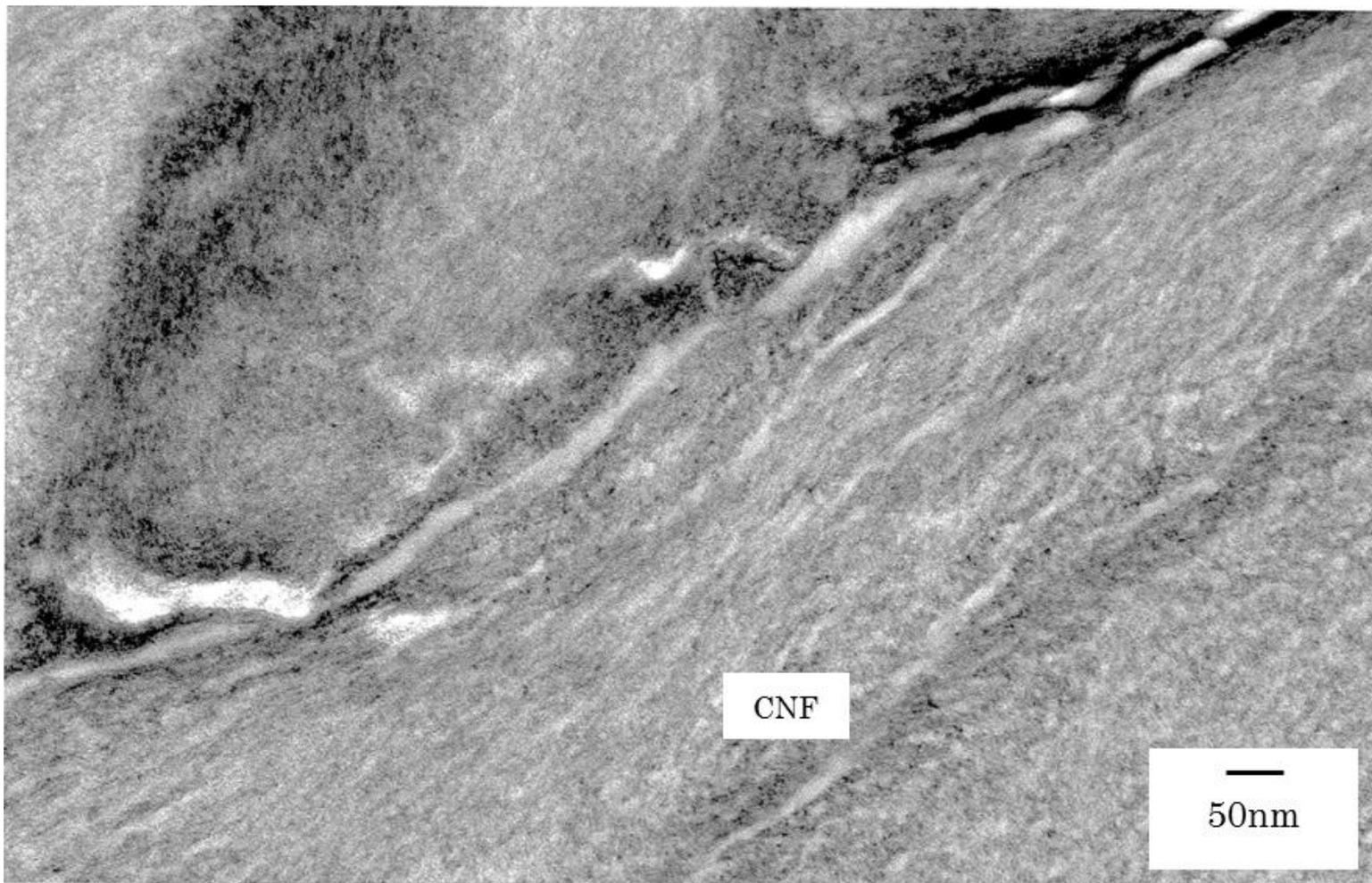


图 1.3.2.2.4 PMMA/变性 CNF 200,000 倍

2 バッテリーキャリアの設計・製造

本業務は、自動車金属部品を CNFRP で代替することで、部品軽量化に貢献することを目標としている。自動車を構成する金属部品の中から、昨年度に引き続きバッテリーキャリアを候補部品の一つとして選定した。バッテリーキャリアは質量の大きいバッテリーを固定する役割があり、悪路走行時の振動にも耐えうる強度が必要となる。また、エンジンルーム内に格納されていることが多いため、走行時はエンジンからの発熱による高温環境にさらされる部品である。今回、昨年度の検討結果から課題克服のための形状を決め、部品を製造し、対策効果の確認を実施した。そのうえで再度対策形状を作製し求められる性能に関する試験を行い、PP-CNF を使う際の最適バッテリーキャリア形状について検討を行った。

2.1 先行検討

本設計、試験に先立ち昨年度の課題であった応力の集中しやすい固定構造や落錘衝撃性を対策した図 2.1.1 に示す形状にて試作を実施し、振動耐久性試験、落錘衝撃性試験を実施した。

昨年度と同じ材料の PP-CNF20 を用い、振動耐久性試験を実施した結果を表 2.1.1、に示す。PP-CNF20 製部品は金属クランプを組付ける際に金属クランプ締付け応力にて破損が発生した。比較材の PP-WD は、最初の低温振動中に金属クランプの固定ボルトのゆるみが発生し、同クランプ締結部にクラックが発生した。また PP-(WD+GF)は、低温振動試験で割れ等の問題は発生なかったが、高温振動中に金属クランプの固定ボルトのゆるみが発生し、同クランプ締結部にクラック発生した。しかしながら、昨年度形状の PP-WD 品と比較して割れ発生までの振動回数は約 2 倍と延命しており、レベルアップが確認できた。以上の結果から本設計の形状は、金属クランプの構造を、締結ボルトのゆるみが発生しにくい樹脂を直接締付けない構造へ変更することとした。

次に落錘衝撃性試験を実施した結果を表 2.1.2 に示す。今回、板厚を上げる対策をしていたが昨年度と同じ PP-CNF 材料では目標を達成できなかった。しかし昨年度形状では不合格であった PP-WD が基準を合格したことから、形状対策効果を確認でき板厚アップ対策の方向性が正しいことを確認できた。以上の結果から、本設計品には更なる形状対策と材料対策を行うこととした。



図 2.1.1 先行確認形状

表 2.1.1 振動耐久性試験結果

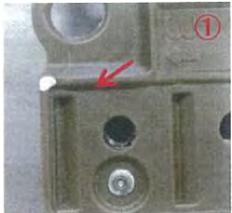
材料	振動耐久性結果（低温150万回→高温150万回）		判定	
PP-CNF			クランプ締付け時 ①部で割れ発生 (試験未実施)	×
PP-WD			低温振動102万回時 クランプのボルトゆるみ発生 ②③部クラック発生 (昨年度形状では低温振動52万回で破損しているためレベルアップ効果あり)	×
PP-(WD+GF)			低温振動150万回問題なし 高温加振38万回にてクランプ部ボルトゆるみ発生 ④⑤部クラック発生	×

表 2.1.2 落錘衝撃性試験結果

材料	落錘衝撃性試験結果(-30°C)	判定
PP-CNF20 (2015年度 検討グレード)		最小破壊強度 0.59J ×
PP-WD		最小破壊強度 2.45J ○
PP-(WD+GF)		最小破壊強度 3.43J ○

2.2 部品設計

部品を設計するにあたり、工法は PP-CNF 製部品の量産性に適する射出成形工法を選択した。具体的にはまず、PP-CNF の材料物性と昨年度の評価結果と 2.1 章における先行検討結果をもとに、バッテリーの保持、耐熱性、耐衝撃性、耐振動性に必要となる板厚やリブ形状を決定した。次に、ボデーとの固定に最適な位置にボルト締結を設けた。最後に、バッテリーの固定構造は直方体のバッテリー形状の 4 つの側面のうち 3 方向に上下方向を拘束する樹脂形状を設けた。残りの 1 方向は、図 2.5.3 に示すように金属ブラケットとボルトにてバッテリーを固定する構造とすることで、局所に応力が集中しない構造とした。また、振動耐久性向上のため、図 2.2.1 に示すように締結部に金属カラーを設定した。結果として、金属製バッテリーキャリアの一般板厚が 1.4mm で質量が 1,031g であるのに対し、PP-CNF 製バッテリーキャリアの質量は約 40%削減となった。



図 2.2.1 バッテリーキャリア図面

2.3 金型設計

金型設計については、金属カラーのインサート成形が可能で、俯角形状が作製可能なスライド機構を持つ射出成形金型とした。セルロース系材料の熱分解を抑制するため型内に樹脂が高温状態で滞留しないコールドランナー方式と呼ばれる構造とし、流動性を考慮しつつ大きなウェルドが発生しないように中央部に1点ゲートで設定した。また、今回検討する材料、PP-CNF および比較材の PP-GF、PP-TD、PP-WD、PP-(WD+GF) についての成形収縮率はそれぞれ異なるため、今回は収縮の最も少ない PP-GF に合わせて金型設計し、収縮の大きな他材料については、ボデー締結位置で調整できる構造にして試験に対応することとした。

2.4 部品の製造

今回、PP-CNF および比較材の PP-GF、PP-(WD+GF)、PP-WD、PP-TD について、射出成形により部品形状に成形した。加熱溶融温度は PP-CNF、PP-(WD+GF)、PP-WD、PP-TD は 200℃、PP-GF40 は 230℃で行った。1つの製品を成形する時間は約 60 秒で量産性も高く、いずれの材料も成形性で問題なかった。

2.5 部品の評価

製品での試験を行うためまず図 2.5.1 に示す固定用治具を作製した。そして図 2.5.2 に示す、製品を治具に固定した状態で、製品評価を実施した。なおバッテリーの荷重負荷が必要な耐熱性試験、冷熱繰返し性試験、振動耐久性試験については図 2.5.3 に示すようにバッテリーを搭載し金属ブラケットにより締付け固定した状態で試験を行った。



図 2.5.1 製品固定用治具



図 2.5.2 治具取付け状態



図 2.5.3 バッテリー組付け状態

表 2.5.1 製品評価一覧

試験項目	判定基準
耐熱性試験	エンジンルーム内の温度でも著しい外観不良、変形なきこと
冷熱繰返し性試験	著しい変形などの異常なきこと
振動耐久性試験	走行距離10万km～20万kmを想定し、割れなど異常なきこと
落錘衝撃性試験	工具など落下したことを想定し、割れなど異常なきこと

試験項目を表 2.5.1 に示す。昨年度の課題として残った耐熱性試験、冷熱繰返し性試験、振動耐久性試験、落錘衝撃性試験を選定した。

耐熱性試験は、エンジンルーム内の温度でも著しい外観不良、変形なきこと、冷熱繰返し性試験は、著しい変形などの異常なきこと、振動耐久性試験は、走行距離 10 万 km～20 万 km を想定し、割れなど異常なきこと、落錘衝撃性試験は、ボンネットを開けて工具など落下したことを想定、割れなど異常なきこと、以上を今回のバッテリーキャリア試験の目標とした。

2.5.1 耐熱性

表 2.5.1.1 に耐熱性試験結果を示す。いずれの試験体も著しい変形や締付けトルクのゆるみ、材料劣化等の異常なく、問題なしと判断する。昨年度の検討結果を表 2.5.1.2 に示す。全ての材料水準で破損したのに対し、今年度は適切な形状に改善できたと言えるだろう。

表 2.5.1.1 耐熱性試験結果

材料	耐熱性試験(90℃)		判定	
PP-CNF			著しい変形なく問題なし (最大変位 部位13 : Y-5.65mm)	○
PP-WD			著しい変形なく問題なし (最大変位 部位10 : Y-4.06mm)	○
PP-(WD+GF)			著しい変形なく問題なし (最大変位 部位9 : Y-2.28mm)	○
PP-GF			著しい変形なく問題なし (最大変位 部位12 : Y-1.64mm)	○

表 2.5.1.2 昨年度の耐熱性試験検討結果

	判定	試験後写真
PP-CNF20	×	
PP-GF30	×	
PP-TD30	×	
PP-WD30	×	

2.5.2 冷熱繰返し性

表 2.5.2.1 に冷熱繰返し性試験結果を示す。いずれの試験体も著しい変形、材料劣化等の異常なく問題なしと判断する。表 2.5.2.2 に昨年度の検討結果を示す。昨年度は PP-WD30 以外全ての材料水準で破損したのに対し、適切な形状に改善できたと言えるだろう。

表 2.5.2.1 冷熱繰返し性試験結果

材料	冷熱繰返し性(-30℃ 90℃)		判定	
PP-CNF		試験終了後 	著しい変形なく問題なし (最大変位 部位12 : 2.78mm)	○
PP-WD		試験終了後 	著しい変形なく問題なし (最大変位 部位12 : 4.38mm)	○
PP-(WD+GF)		試験終了後 	著しい変形なく問題なし (最大変位 部位10 : 1.86mm)	○
PP-GF		試験終了後 	著しい変形なく問題なし (最大変位 部位13 : 1.88mm)	○

表 2.5.2.2 昨年度の冷熱繰返し性試験結果

	判定	試験後写真
PP-CNF20	×	
PP-GF30	×	
PP-TD30	×	
PP-WD30	○	

2.5.3 振動耐久性

表 2.5.3.1 に振動耐久性試験結果を示す。いずれの材料も破損に至る振動回数は昨年度の検討形状の表 2.5.3.2 に示す結果に対し向上しており、形状対策効果が確認できた。また、傾向として衝撃性の低い材料の方が、破損に至る回数が少ないことが見てとれた。破損部位はいずれも締結部周辺を起点としており、振動による変位が締結部への応力となり破損に至ったものと考えられる。対策には変位を抑制する剛性アップと締結部の補強、および材料の衝撃性改善が有効と考えられるため引き続き検討を進める。

表 2.5.3.1 振動耐久性試験結果

材料	振動耐久性結果(-30℃ 90℃)		判定	
PP-CNF		 割れ発生	低温条件下41万回振動時、締結部付近で破損発生	×
PP-WD		 割れ発生	低温条件下問題なし 高温条件下2万回振動時 締結部付近で破損発生	×
PP-(WD+GF)		 クラック発生	低温条件下問題なし 高温条件下振動試験終了 座面付近にクラックを確認	×
PP-GF	 試験後		低温条件下、高温条件下 振動試験終了し、破損、 割れ等の問題なし	○
PP-TD		 割れ発生	低温条件下問題なし 高温条件下10万回振動時締結部付近で破損発生	×

表 2.5.3.2 昨年度の振動耐久性試験結果

	判定	試験後写真
PP-CNF20	低温振動 25万回にて割れ ×	
PP-GF30	低温振動 67万回にて割れ ×	
PP-TD30	低温振動 3万回にて割れ ×	
PP-WD30	低温振動 52万回にて割れ ×	

2.5.4 落錘衝撃性

表 2.5.4.1 に落錘衝撃性試験結果を示す、また、図 2.5.4.1 に落錘衝撃性試験部位を示す。全ての材料水準で最小破壊強度が基準をみたし合格レベルと判断する。表 2.5.4.2 に昨年度の検討結果を示す。昨年度は、全ての材料水準で破損したのに対し、適切な形状に改善できたと言えるだろう。

表 2.5.4.1 落錘衝撃性試験結果

材料	落錘衝撃性試験結果(-30℃)			判定
PP-CNF			最小破壊強度 基準以上	○
PP-WD			最小破壊強度 基準以上	○
PP-(WD+GF)		/	最小破壊強度 基準以上	○
PP-GF			最小破壊強度 基準以上	○
PP-TD			最小破壊強度 基準以上	○

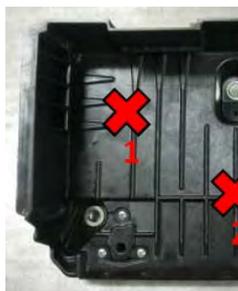


図 2.5.4.1 落錘衝撃性試験部位

表 2.5.4.2 昨年度の落錘衝撃性試験結果

	判定	試験後写真
PP-CNF20	×	 <p>A,G,J,Lに割れ</p> <p>L</p>
PP-GF30	○	 <p>割れ無し</p>
PP-TD30	×	 <p>A,Gに割れ</p> <p>A,Gに割れ</p>
PP-WD30	×	 <p>A,G,Jに割れ</p> <p>A,G,Jに割れ</p>

2.6 効果

PP-CNF は比重が低く、今回のケースでは金属製バッテリーキャリア 1,031g に対して PP-CNF 製は 575g と 44.2%軽量になっており、CO₂削減効果にすると 7.95kg/個(37.7%低減)と試算された。詳細な計算方法は4章に示す。

2.7 まとめ

今回バッテリーキャリアの基本性能試験の結果、昨年度の PP-CNF 品の課題であった耐熱性、冷熱繰返し性、落錘衝撃性の問題を、形状対策および材料対策により解決できた。但し、振動耐久性についてはレベルアップしたものの、課題として残った。今後、振動耐久性試験について形状対策、材料両面での改良が必要と考えられる。また、PP-CNF のバッテリーキャリア射出成形、量産性については問題ないと考えられる。

3 パワースライドドアユニットの設計・製造

本業務は自動車金属部品を CNFRP で代替することで、部品軽量化に貢献することを目標としている。今回、自動車を構成する金属部品の中からパワースライドドアユニットを選定した。図 3.1、図 3.2 に示すようにパワースライドドアユニットは電動スライドドア機構の 1 つでスライドドア車両側ステップ部に搭載され、モーターとプーリー、ゴムベルトによりスライドドアを開閉させている。今回、PP-CNF をパワースライドドアユニット形状に成形し、各種部品評価を行い、材料および部品の基礎データを取得した。また各比較材も同時に成形、評価を実施し、データ比較を行った。



図 3.1 パワースライドドア



図 3.2 パワースライドドアユニット(黒色部品)

3.1 部品設計

図 3.1.1 に部品の基本設計を示す。スライドドア車両側ステップ部に開閉軌跡に合わせ、パワースライドドアユニット本体の骨格形状を設計した。次にゴムベルトとプーリーを組み合わせて駆動機構を設計した。最後に中央部のプーリーとモーターを接続し、ベルトとスライドドアを接続することで、モータートルクがスライドドア開閉力として伝達される構造とした。

高温時でもモーターから入力される負荷に耐えるために必要となる強度・剛性から、形状および板厚について検討した。また、締結部についてはトルクダウン防止のため、金属カラーをインサート成形する構造とした。結果として金属製のパワースライドドアユニットの質量が 2,400g/個であるのに対し、PP-CNF 製のパワースライドドアユニットは構造的にコンパクトになったこともあり、質量は約 80%以上の削減となった。

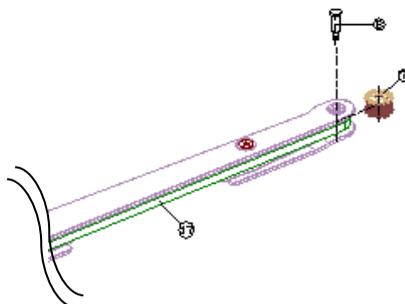


図 3.1.1 パワースライドドアユニット図面

3.2 金型設計

図 3.2.1 および図 3.2.2 に金型を示す。金属カラーのインサート成形が可能で、俯角形状が作製可能なスライド機構を持つ射出成形金型とした。セルロース系材料の熱分解を抑制するため型内に樹脂が高温状態で滞留しないコールドランナー方式と呼ばれる構造とし、流動性を考慮して 3 点のゲートを締結部でウェルドが発生しない位置に設定した。また、検討する材料の成形収縮率がそれぞれ異なるため、収縮の最も少ない PP-GF に合わせて金型設計をし、収縮の大きな他材料については、ボデー締結位置で調整できる構造にして対応することにした。



図 3.2.1 金型(コア側)



図 3.2.2 金型(キャビティー側)

3.3 部品の製造

今回、PP-CNF および比較材の PP-GF、PP-WD、PP-TD、PP-(WD+GF)を、図 3.3.1 に示す射出成形機により、図 3.3.2 に示す部品形状に成形した。射出時の加熱溶融温度は PP-CNF は 200℃、PP-(WD+GF)および PP-WD は 210℃、PP-GF は 230℃で行った。

どの材料も成形可能であったが、図 3.3.3 に示すように、PP-CNF は脆いため脱型時に破損する場合があります、特別な配慮が必要であった。また、当初加熱溶融温度を 210℃で PP-CNF を成形しようとしたが、滞留樹脂の熱変性が早く図 3.3.4 のように成形体の一部が黒く変色したため、加熱溶融温度を 200℃に下げ成形したところ、変色は改善された。量産性確保に向けては、成形条件を 200℃以下に保ち、滞留時間にも基準を設ける必要があると考えられる。



図 3.3.1 射出成形機

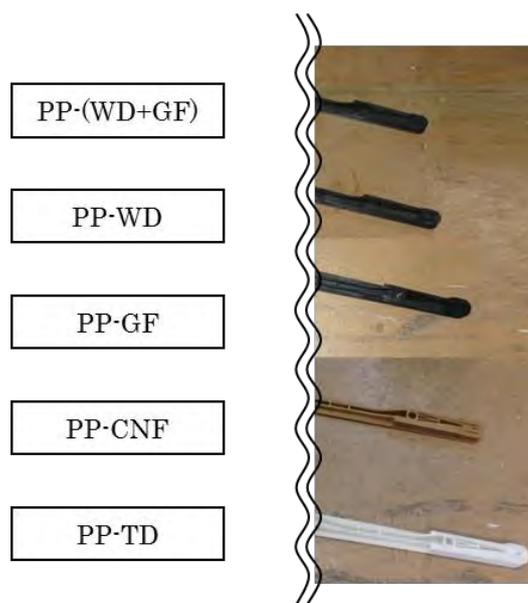


図 3.3.2 成形体



図 3.3.3 PP-CNF 成形体(型取出し時割れ)



図 3.3.4 PP-CNF : 210°C成形体の変色(熱変性)



図 3.3.5 PP-CNF : 200°C成形体 : 部分的な変色なし

3.4 部品の評価

表 3.4.1 に示す評価項目を実施した。評価方法は図 3.4.1 の治具に成形体を組付け、様々な温度環境下で負荷をかけた。その後図 3.4.2 に示すカットボデーに成形体を取付け、初期作動性、冷熱繰返し性、耐熱老化性については電動によるスライドドアの作動開閉性試験を実施した。

表 3.4.1

試験項目	判定基準
成形ソリ性	図面公差以内のこと
組付け作業性	図面どおり組付け作業が可能なこと 量産工程での適用が可能なこと
初期作動性	亀裂、割れ、変形、緩みなどの問題なきこと スライドドア開閉時異常なきこと
冷熱繰返し性	亀裂、割れ、変形、緩みなどの問題なきこと スライドドア開閉時異常なきこと
耐熱老化性	亀裂、割れ、変形、緩みなどの問題なきこと スライドドア開閉時異常なきこと
サーマルショック	亀裂、割れ、変形、緩みなどの問題なきこと



図 3.4.1 車両組付け想定治具



図 3.4.2 作動確認用カットボデー

3.4.1 成形ソリ性

各成形体について、金型から取り出した後どれだけソリが発生したかを、図 3.4.1.1 に示す位置で測定した。その結果を図 3.4.1.2 に示す。いずれのフィラー強化材料も 5~11mm 程度のソリ変形が発生しており、特に PP-CNF は 11mm と最も大きかった。いずれの水準でもソリが大きく、カットボデーへの組付けが困難であったため、図 3.4.1.3 に示すソリを修正するための治具を作製し、80°C 3 時間かけてソリ変形を修正した。実際の量産では、このような工程を設けることは困難であるので、型設計時に見込む必要があり、その 1 つのツールとして成形ソリ予測のための CAE 解析技術も必要と考えられる。これはフィラー強化樹脂共通の課題であるが、PP-CNF を一般に広めるためには重要な技術と考えられる。

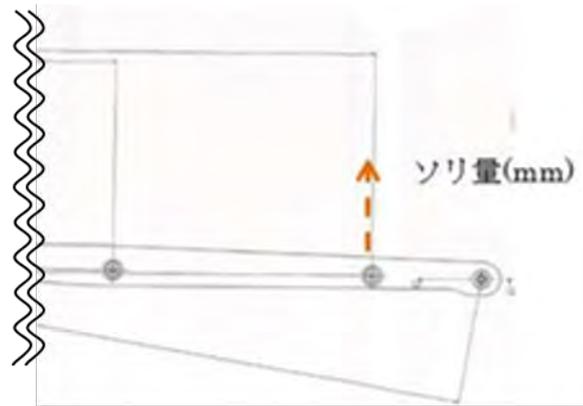


図 3.4.1.1 ソリ量測定位置

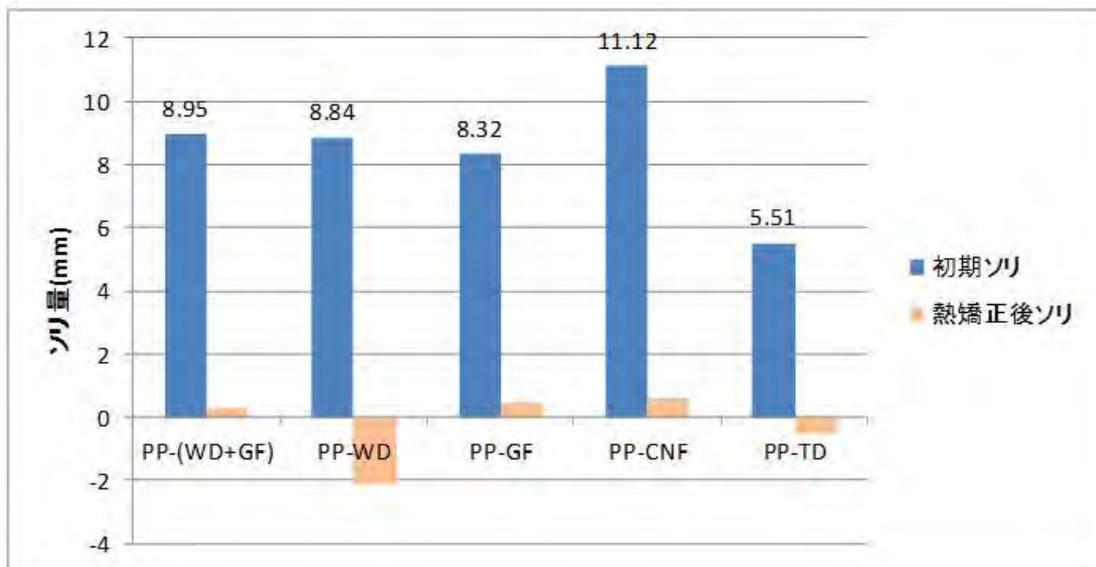


図 3.4.1.2 ソリ量測定結果



図 3.4.1.3 ソリ修正治具

3. 4. 2 組付け作業性

図 3.4.2.1 に示す材料水準(PP-CNF、PP-WD、PP-(WD+GF)、PP-GF、PP-TD)でパワースライドドアユニットの構成部品(ゴムベルト、プーリー、その他)の組付け性は問題ないことが確認できた。また、図 3.4.2.2 に示すように車両への組付け性(車両、モーター、スライドドア)についても上記の材料水準で問題ないことが確認できた。

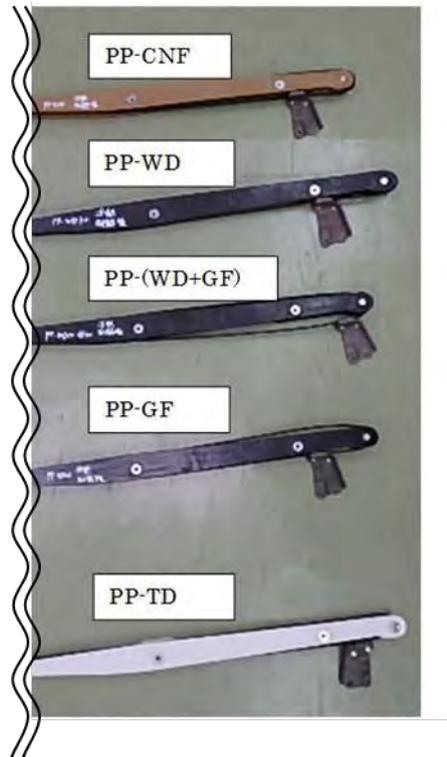


図 3.4.2.1 部品組付け性（ベルト、プーリー）



図 3.4.2.2 車両組付け性

3.4.3 初期作動性

表 3.4.3.1 に初期作動性試験結果を示す。いずれの試験水準も初期作動性に異常はなくドアを開閉することができ問題なかった。

表 3.4.3.1 初期作動性試験結果

材料	判定	試験結果
PP-CNF	○ 作動不良等の問題なし	
PP-GF_B	○ 作動不良等の問題なし	
PP-WD	○ 作動不良等の問題なし	
PP-(WD+GF)	○ 作動不良等の問題なし	

3. 4. 4 冷熱繰返し性

表 3.4.4.1 に冷熱繰返し後の作動性試験結果を示す。いずれの試験水準も冷熱繰返し試験後に著しい変形や破損なく、また、カットボデーに組付けた作動性確認の結果も異常なくドアを開閉することができ問題なかった。

表 3.4.4.1 冷熱繰返し後の作動性試験結果

材料	判定	試験結果		
PP-CNF	○ 作動不良等の問題なし			
PP-GF_B	○ 作動不良等の問題なし			
PP-WD	○ 作動不良等の問題なし			
PP-(WD+GF)	○ 作動不良等の問題なし			

3.4.5 耐熱老化性

表 3.4.5.1 に耐熱老化性後の作動性試験結果を示す。いずれの試験水準も耐熱性試験後に著しい変形や破損なく、また、カットボデーに組付けた作動性確認の結果も異常なくドアを開閉することができ問題なかった。

表 3.4.5.1 耐熱老化性後の作動性試験結果

材料	判定	試験結果		
PP-CNF	○ 作動不良等の問題なし			
PP-GF_B	○ 作動不良等の問題なし			
PP-WD	○ 作動不良等の問題なし			
PP-(WD+GF)	○ 作動不良等の問題なし			

3.4.6 サーマルショック試験

表 3.4.6.1 にサーマルショック試験結果を示す。いずれの試験水準もサーマルショック後に著しい変形や破損なく問題なかった。

表 3.4.6.1 サーマルショック試験結果

材料	判定	試験結果
PP-CNF	○	 著しい変形や亀裂なく問題なし
PP-GF_B	○	 著しい変形や亀裂なく問題なし
PP-WD	○	 著しい変形や亀裂なく問題なし
PP-(WD+GF)	○	 著しい変形や亀裂なく問題なし

3.5 効果

PP-CNF は比重が低く、今回のケースでは金属製パワースライドドアユニット 2,400g に比較して PP-CNF 品は 324g と 86.5% 軽量になっており CO₂ 削減効果にして 36.2kg/個(74%低減)と試算された。詳細な計算方法は 4 章に示す。

3.6 まとめ

パワースライドドアユニットの基本性能評価の結果、PP-CNF は、初期、冷熱繰返し性後、耐熱老化後の作動性、および、サーマルショック性にて問題なかった。但し、成形時の型取出し時の割れ、成形ソリによる変形、金属部品組付け時の爪折れで問題があり、課題が明確になった。

4 CNF 製品活用時の CO₂ 排出削減効果の検証

4. 1 自動車金属部品の樹脂化動向調査(K 2016)

自動車金属部品の樹脂化最新動向を調査するため、K 2016 (The World No.1 Trade Fair For Plastics and Rubber)に参加した。弊社からは3名(室長1名、主任2名)で参加し、材料メーカー、および成形メーカーを中心に調査を行った。K 2016 の概要は以下の通りである。

会期：2016年10月19(水)～10月26日(水)

会場：Messe Düsseldorf Trade Fair Center

出展社数：3,285社

4. 2 K 2016 における自動車金属部品の樹脂化動向概要

近年、軽量かつ高剛性な材料として注目を集めているカーボン繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastic; CFRP)は、一部の高級車やスポーツカーの構造部材への採用に留まり、CFRP より低コストなガラス繊維強化樹脂(Glass Fiber Reinforced Plastic; GFRP)を用いた樹脂化提案が LANXESS や LyondellBassell を中心に行われていた。樹脂化方法としては、GFRP による部品全体の樹脂化の他、GFRP と金属とのマルチマテリアル化や、部品を部分的に GFRP で補強することで樹脂化した事例が多く見られた。PP と長繊維ガラス繊維を用いた射出成形による検討事例もあったが、高い剛性、強度が求められる部材に関しては、ガラス繊維と PP、もしくはナイロン樹脂(Polyamide; PA)の織物を用いたスタンピング成形による検討事例が多く見られた。

CNFRP は、CFRP や GFRP に比べ低比重ながら、それに匹敵する力学特性が期待できる。現在、CFRP や GFRP で検討されている部品は、将来的に CNFRP で材料置換することで軽量化が可能となり、CO₂ 排出量の低減に大きく貢献できると考えられる。また、CFRP 並みの高強度や、部品によっては高い耐熱性が求められるため、ベースとなる樹脂について、現在検討中の PP 以外に、PA や、その他エンジニアリングプラスチックも含めて検討を行う必要があると考えられる。

4. 3 CNFRP 製品活用時の CO₂ 排出削減効果の検証

今回調査した部品に求められる特性を基に、縦軸を曲げ弾性率、横軸を耐熱性とした場合の観点で整理したものが、図 4.3.1 である。これらの中から、現在、国内で主に金属を用いて製造されている部品について CNFRP にて材料置換した場合、自動車の平均使用年数の間における CO₂ 削減効果を検証した。

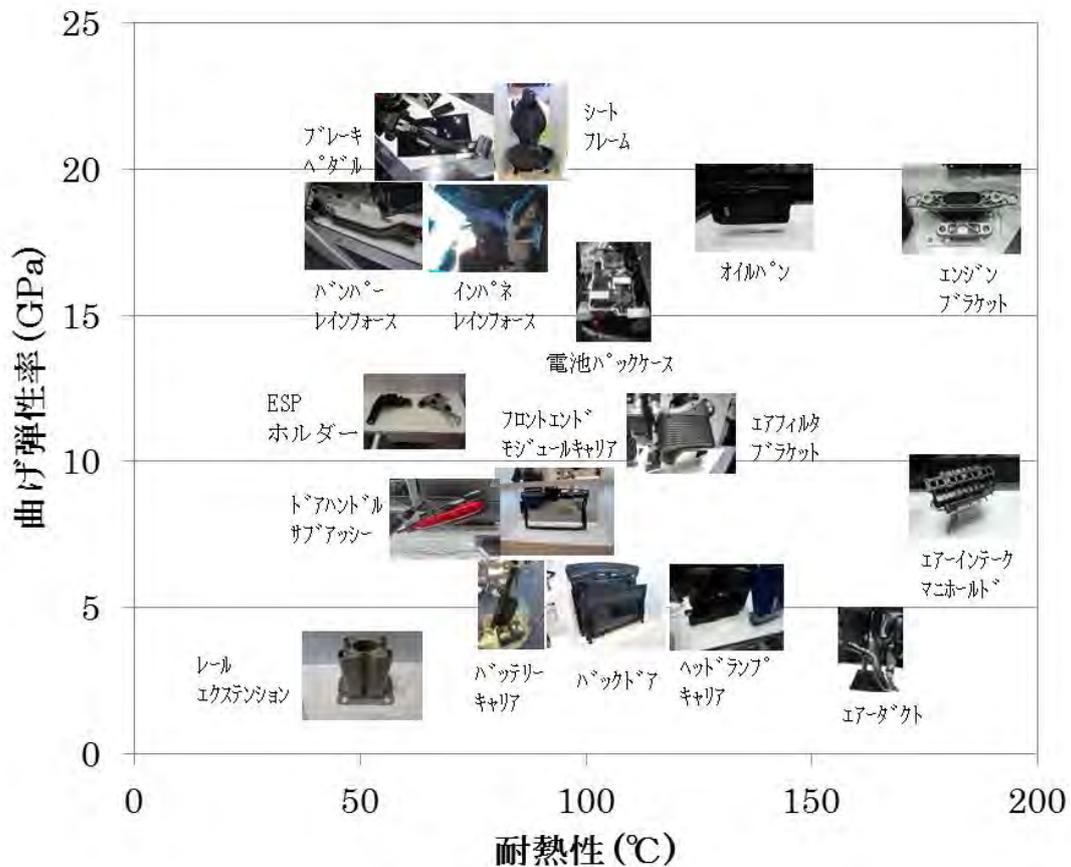


図 4.3.1 樹脂化候補部品

まず初めに、部品によって樹脂化の難易度が異なるため、図 4.3.2 に示すように、対象部品を A、B の 2 つのグループに振り分けた。A グループは主に剛性が求められる部品群であり、B グループはさらに高い剛性や、耐熱性を求められる部品群である。これらの部品について CNFRP で材料置換した場合の CO₂ 排出量削減効果を算出した。

CO₂ 排出量削減効果を算出するためには、部品 1 個当たりの製造時および自動車走行時の CO₂ 排出量を算出する必要があるが、以下 2 つの理由のため、部品製造時の CO₂ 排出量を明確にするのは困難である。まず 1 つ目の理由として、従来材料を用いた部品製造について各材料、各工程の個別 CO₂ 原単位は秘匿性が高く開示できない。2 つ目の理由として、CNF 製造に関するデータは市場での使用実績が少ないことに加え、公に開示されていないのが実情である。以上より本稿では、自動車走行時の CO₂ 排出量削減効果のみ検証することとした。自動車走行時の CO₂ 排出量の算出には以下に挙げる基礎データおよび仮定を用いた。

- ① 自動車単位重量、単位走行当たりの CO₂ 排出量
：0.00015kg-CO₂/kg-製品重量・km-走行
- ② 年間平均走行距離は国土交通省：10,575km
継続検査の際の整備前自動車不具合状況調査より。
- ③ 自動車の平均使用年数：11年
財団法人自動車検査登録協力会「わが国の自動車保有動向」より
- ④ 金属部品を CNFRP で置換した場合の軽量化率を 23%と仮定
＜算出根拠＞
 - ・ CNFRP の比重を 1.0 とする
 - ・ 弊社において金属部品を GFRP(比重：1.2)を用いて樹脂化検討した際の軽量化率が 8.0%
 - ・ CNFRP で置換した場合、GFRP と同形状、同板厚で置換可能だとすると、金属部品を CNFRP で置換した場合の軽量化率は 23%

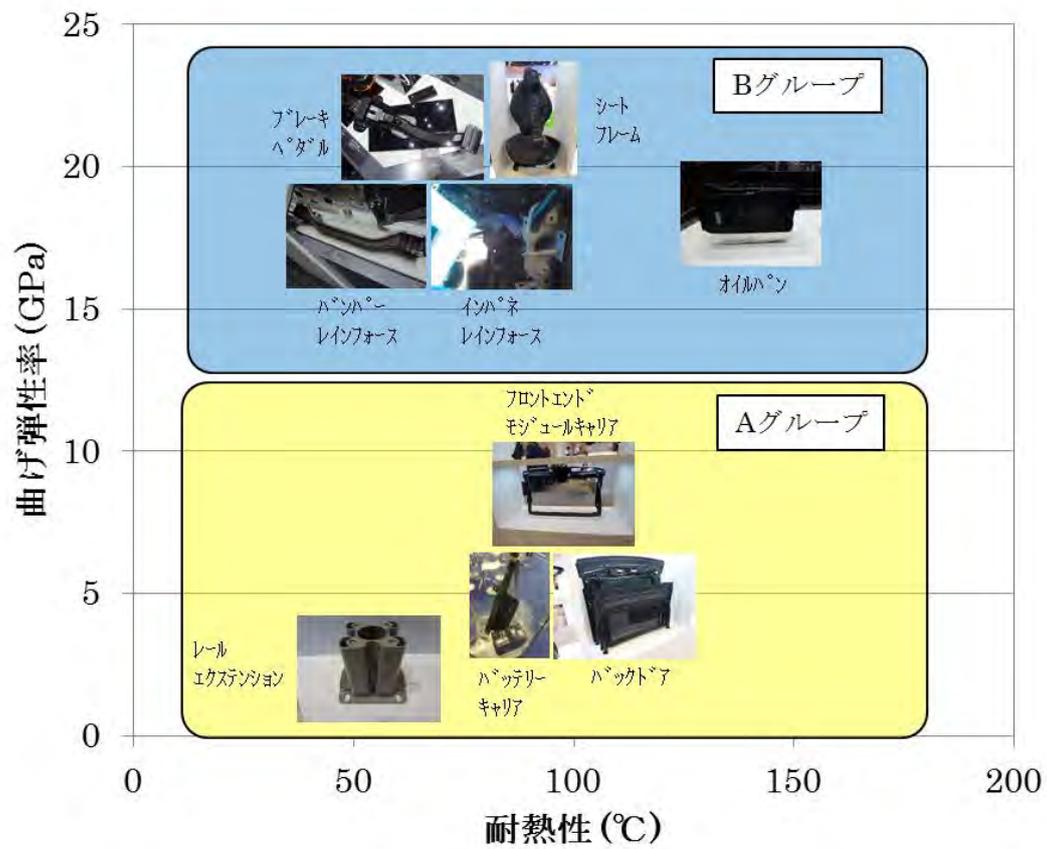


図 4.3.2 CNFRP 置換候補部品

以下、グループ別に各金属製部品について CNFRP で置換した場合の走行時の CO₂ 排出量削減効果を算出した結果について示す。尚、各部品における走行時の CO₂ 排出量は有効数字 2 桁で算出し、CO₂ 排出量削減効果については有効数字 1 桁で算出した。

(A グループ)

① バッテリーキャリア

バッテリーキャリアはバッテリー保持のために設けられる部品であり、悪路走行時の車両の振動や、衝突時の衝撃でバッテリーが脱落しない様、高い剛性および強度が求められる。また、エンジンルーム内に格納されることから、耐熱性が求められる。

図 4.3.3 に K 2016 にて調査を行った樹脂製バッテリーキャリアを示す。本事例は、バッテリーキャリアとダクトが樹脂で一体成形された事例である。バッテリーを保持する部位はガラス繊維と PP の複合材を用いて射出成形されていた。現状、国内の多くのバッテリーキャリアは、バッテリーを保持するための鉄製のキャリアやレインフォースメント等、様々な部品から構成されている。本検証ではキャリア部分を CNFRP にて樹脂化すると仮定し、自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。一般的な鉄製キャリアの重量は 0.50kg~1.0kg である。これを CNFRP 置換した場合、キャリアの重量は、0.39kg~0.77kg となる。したがって、鉄製キャリアおよび CNFRP キャリアについて、走行時の CO₂ 排出量を以下の通り算出した。

<鉄製キャリア>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 0.50(kg/個)~1.0(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 8.7 (kg-CO₂/個)~17(kg-CO₂/個)

<CNFRP 製キャリア>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 0.39(kg/個)~0.77(kg/個)

×0.15(g-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 6.8 (kg-CO₂/個)~13 (kg-CO₂/個)

以上より、鉄製バッテリーキャリアを CNFRP 置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出量削減効果は、2(kg-CO₂/

個)~4(kg-CO₂/個)と算出された。



図 4.3.3 樹脂製バッテリーキャリア

② バックドア

バックドアは、高い剛性および強度の他に、自動車走行時およびドア閉開時に発生する振動や疲労に対する耐久性が求められ、後方から衝突された場合の衝突安全性も一部担っている。また、意匠部品であることから、寸法安定性や高い外観品質が要求される部品でもある。上記品質確保のため、従来から鋼板を用いて製造されている。

図 4.3.4 に K 2016 で調査を行った樹脂製バックドアパネルを示す。バックドアパネルは通常、アウターパネル、インナーパネル、レインフォース等から構成される。本検証では、鉄製アウターパネルおよびインナーパネル(以下、両者をまとめてバックドアパネルと称する)を CNFRP にて樹脂化すると仮定し、自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。一般的な鉄製バックドアパネルの重量は 10kg～25kg である。これを CNFRP で置換した場合、バックドアパネルの重量は、7.7kg～19kg となる。したがって、鉄製バックドアパネルと CNFRP 製バックドアパネルについて、走行時の CO₂ 排出量を以下の通り算出した。

<鉄製バックドアパネル>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 10(kg/個)～25(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 170(kg-CO₂/個)～440(kg-CO₂/個)

<CNFRP 製バックドアパネル>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 7.7(kg/個)～19(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 130(kg-CO₂/個)～330(kg-CO₂/個)

以上より、鉄製バックドアパネルを CNFRP で置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出量削減効果は、40(kg-CO₂/個)～100(kg-CO₂/個)と算出された。



図 4.3.4 樹脂製バックドアパネル

③ レールエクステンション

レールエクステンションは自動車の前方、および後方のフレームの前後に2個ずつ取付けられる部品であり、衝突時に自身が圧縮変形することによりエネルギーを吸収し、乗員を衝撃から守る重要な衝突安全部品である。一般的に、鉄やアルミを用いて製造されている。

図 4.3.5 に K 2016 にて調査を行った樹脂製レールエクステンションの写真を示す。本事例では PA と変性ポリフェニレンエーテル樹脂のアロイ材料を用いて成形されていた。本検証では、自動車前方の鉄製のレールエクステンション 2 個を CNFRP にて樹脂化すると仮定し、自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。一般的な鉄製レールエクステンションの合算重量は 0.50kg～1.5kg である。これを CNFRP に置換した場合、レールエクステンションの重量は、0.39kg～1.2kg となる。したがって、鉄製レールエクステンションと CNFRP 製レールエクステンションについて、走行時の CO₂ 排出量を以下の通り算出した。

<鉄製レールエクステンション>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 0.50(kg/個)～1.5(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 8.7(kg-CO₂/個)～26(kg-CO₂/個)

車両 1 台あたり 2 個搭載されているので、

=17(kg-CO₂/個)～52(kg-CO₂/個)

<CNFRP 製レールエクステンション>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 0.39(kg/個)～1.2(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 6.8(kg-CO₂/個)～21(kg-CO₂/個)

車両 1 台あたり 2 個搭載されているので、

=14(kg-CO₂/個)～42(kg-CO₂/個)

以上より、鉄製レールエクステンションを CNFRP で置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出削減効果は、3(kg-CO₂/個)～10(kg-CO₂/個)と算出された。

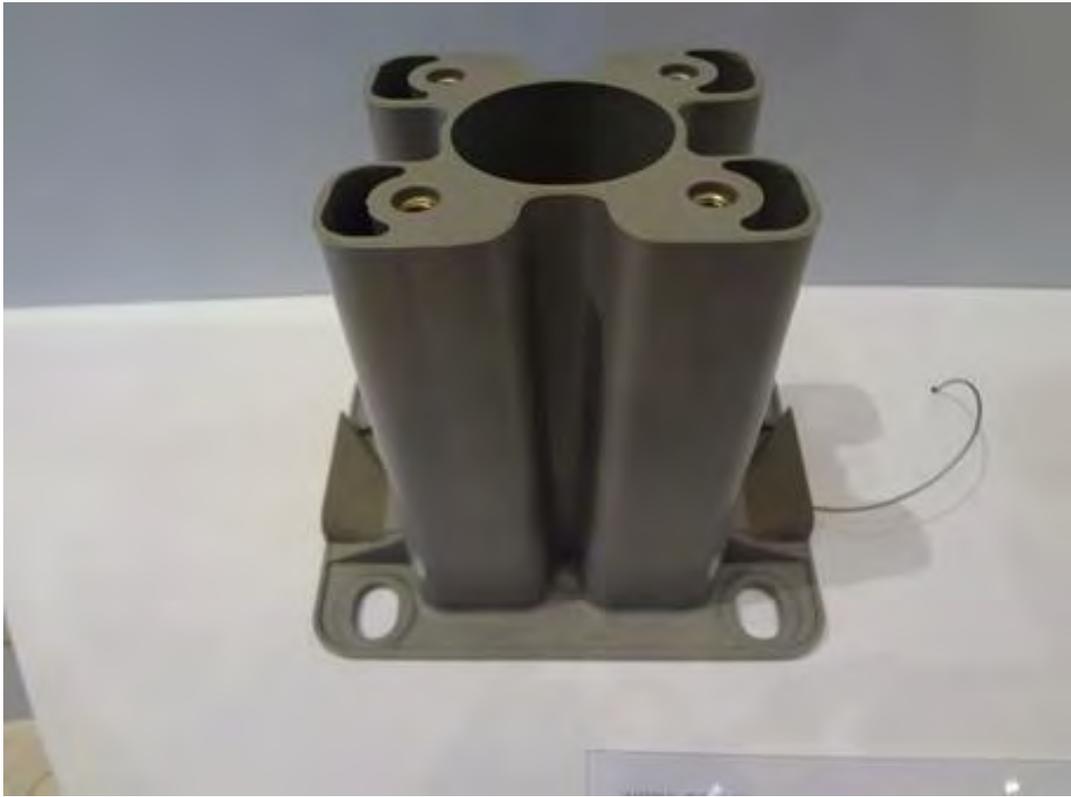


図 4.3.5 樹脂製レールエクステンション

④ フロントエンドモジュールキャリア

現在、自動車業界では部品点数削減や軽量化を目的として、様々な部位においてモジュール化が進められている。本部品は、ラジエーターやコンデンサ、電動ファン、ダクト等のモジュールの支持部品であり、高い強度、剛性が求められる。さらには、本部品はエンジンルーム内に格納される部品のため、耐熱性が必要とされる部品である。モジュール化はその形状自由度から樹脂化とともに進められているが、鉄製のアップークロスメンバーにラジエーターを吊り下げ、各部品を締結する構造が一般的である。

図 4.3.6 に K 2016 にて調査を行った樹脂製フロントエンドモジュールキャリアの写真を示す。本事例ではガラス繊維と PA の複合材を用いて成形されていた。本検証では、鉄製のアップークロスメンバーおよびロアークロスメンバー（以下、両者をまとめてクロスメンバーと称する）を CNFRP にて樹脂化すると仮定し、自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。一般的な鉄製クロスメンバーの合算重量は 3.0kg～8.0kg である。これを CNFRP に置換した場合、クロスメンバーの重量は、2.3kg～6.2kg となる。したがって、鉄製クロスメンバーと CNFRP 製クロスメンバーについて、走行時の CO₂ 排出量を以下の通り算出した。

<鉄製クロスメンバー>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 3.0(kg/個)～8.0(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 52(kg-CO₂/個)～140(kg-CO₂/個)

<CNFRP 製クロスメンバー>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 2.3(kg/個)～6.2(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 40(kg-CO₂/個)～110(kg-CO₂/個)

以上より、鉄製クロスメンバーを CNFRP で置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出削減効果は、10(kg-CO₂/個)～30(kg-CO₂/個)と算出された。



図 4.3.6 樹脂製フロントエンドモジュールキャリア

(B グループ)

① ブレーキペダル

ブレーキペダルは自動車の重要な運転装置であり、フットブレーキを作動させる役割を持つ。経年変化、変形等生じないように、通常鉄を用いて製造されている。

図 4.3.7 に K 2016 にて調査を行った樹脂製ブレーキペダルの写真を示す。本事例では、ガラスマットと PP の複合材で成形されていた。本検証では、鉄製のブレーキペダルを CNFRP にて樹脂化すると仮定し、自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。一般的な鉄製ブレーキペダルの合算重量は 0.80kg～1.5kg である。これを CNFRP に置換した場合、ブレーキペダルの重量は、0.62kg～1.2kg となる。したがって、鉄製ブレーキペダルと CNFRP 製ブレーキペダルについて、走行時の CO₂ 排出量を以下の通り算出した。

<鉄製ブレーキペダル>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

$$= 0.80(\text{kg}/\text{個}) \sim 1.5(\text{kg}/\text{個})$$

$$\times 0.00015(\text{kg-CO}_2/(\text{kg-製品重量} \cdot \text{km-走行})) \times 10,575(\text{km}) \times 11(\text{年})$$

$$= 14(\text{kg-CO}_2/\text{個}) \sim 26(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

<CNFRP 製ブレーキペダル>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

$$= 0.62(\text{kg}/\text{個}) \sim 1.2(\text{kg}/\text{個})$$

$$\times 0.00015(\text{kg-CO}_2/(\text{kg-製品重量} \cdot \text{km-走行})) \times 10,575(\text{km}) \times 11(\text{年})$$

$$= 11(\text{kg-CO}_2/\text{個}) \sim 21(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

以上より、鉄製ブレーキペダルを CNFRP で置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出削減効果は、3(kg-CO₂/個)～5(kg-CO₂/個)と算出された。



図 4.3.7 樹脂製ブレーキペダル

② バンパービーム

バンパービームは衝突時にエネルギーを吸収し、乗員を衝撃から守る重要な衝突安全部品であり、通常鉄やアルミを用いて製造されている。

図 4.3.8 に K 2016 にて調査を行った樹脂製バンパービームの写真を示す。本事例では、ガラス繊維マットと PP の複合材で成形されていた。本検証では、鉄製のバンパービームを CNFRP にて樹脂化すると仮定し、自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。一般的な鉄製バンパービームは 2.0～7.0kg である。これを CNFRP に置換した場合、バンパービームの重量は 1.5kg～5.4kg となる。したがって、鉄製ブレーキペダルと CNFRP 製バンパービームについて、走行時の CO₂ 排出量を以下の通り算出した。

<鉄製バンパービーム>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 2.0(kg/個)～7.0(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 35(kg-CO₂/個)～120(kg-CO₂/個)

<CNFRP 製バンパービーム>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 1.5(kg/個)～5.4(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 26(kg-CO₂/個)～94(kg-CO₂/個)

以上より、鉄製バンパービームを CNFRP で置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出削減効果は、9(kg-CO₂/個)～30(kg-CO₂/個)と算出された。

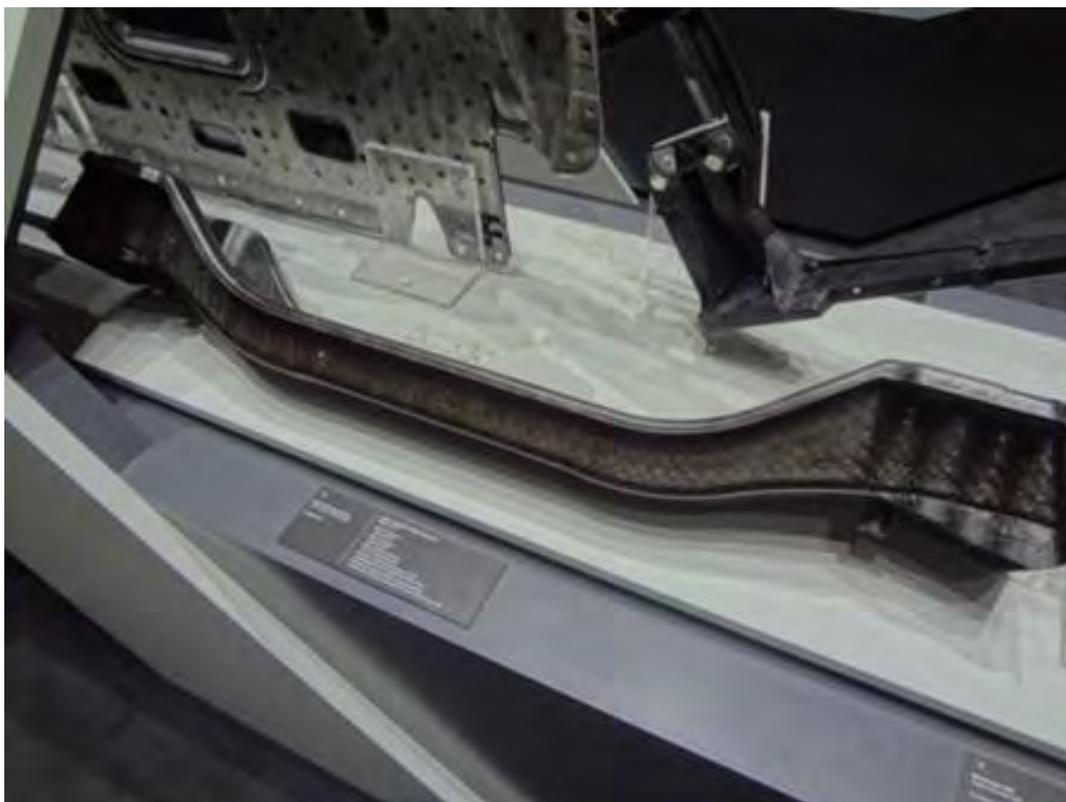


図 4.3.8 樹脂製バンパービーム

③ オイルパン

オイルパンはエンジン本体の一番下にある部品であり、その主な役割は、エンジン内部の潤滑、冷却、および洗浄に使われているエンジンオイルを格納することである。悪路走行時には路面と干渉する恐れがあり、最悪の場合は穴が開いてオイルが漏れ出し、エンジンが焼きつくことがあるため、高い強度が必要となる。また熱せられたオイルが循環するため、耐熱性も必要とされる部品である。したがって通常、鉄を用いて製造されている。

図 4.3.9 に K 2016 にて調査を行った樹脂製オイルパンの写真を示す。本事例では、ガラス繊維とポリアミド樹脂の複合材を用いて成形されていた。本検証では、鉄製のオイルパンを CNFRP にて樹脂化すると仮定し、自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。一般的な鉄製オイルパンは 0.50kg～4.0kg である。これを CNFRP に置換した場合、オイルパンの重量は 0.39kg～3.1kg となる。したがって、鉄製オイルパンと CNFRP 製オイルパンについて、走行時の CO₂ 排出量を以下の通り算出した。

<鉄製オイルパン>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

$$= 0.50(\text{kg}/\text{個}) \sim 4.0(\text{kg}/\text{個})$$

$$\times 0.00015(\text{kg-CO}_2/(\text{kg-製品重量} \cdot \text{km-走行})) \times 10,575(\text{km}) \times 11(\text{年})$$
$$= 8.7(\text{kg-CO}_2/\text{個}) \sim 70(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

<CNFRP 製オイルパン>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

$$= 0.39(\text{kg}/\text{個}) \sim 3.1(\text{kg}/\text{個})$$

$$\times 0.00015(\text{kg-CO}_2/(\text{kg-製品重量} \cdot \text{km-走行})) \times 10,575(\text{km}) \times 11(\text{年})$$
$$= 6.8(\text{kg-CO}_2/\text{個}) \sim 54(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

以上より、鉄製オイルパンを CNFRP で置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出削減効果は、2(kg-CO₂/個)～20(kg-CO₂/個)と算出された。



図 4.3.9 樹脂製オイルパン

④ インパネレインフォースメント

インパネレインフォースメントは、速度計やエンジン回転計など各種計測器を搭載するインストルメントパネルの支持体であり、エンジンルームと車室内を区画するダッシュパネルに固定されている。また、ステアリングを保持する重要な役割を持ち、高い強度、剛性が必要な部材である。したがって、通常鉄を用いて製造されている。

図 4.3.10 に K 2016 にて調査を行った鉄製インパネレインフォースメントの写真を示す。本検証では、鉄製のインパネレインフォースメントを CNFRP にて樹脂化すると仮定し、自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。一般的な鉄製インパネレインフォースメントは 4.0kg～8.0kg である。これを CNFRP に置換した場合、インパネレインフォースメントの重量は 3.1kg～6.2kg となる。したがって、鉄製インパネレインフォースメントと CNFRP 製インパネレインフォースメントについて、走行時の CO₂ 排出量を以下の通り算出した。

<鉄製インパネレインフォースメント>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 4.0(kg/個)～8.0(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 70(kg-CO₂/個)～140(kg-CO₂/個)

<CNFRP 製インパネレインフォースメント>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 3.1(kg/個)～6.2(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 54(kg-CO₂/個)～110(kg-CO₂/個)

以上より、鉄製インパネレインフォースメントを CNFRP で置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出削減効果は、20(kg-CO₂/個)～30(kg-CO₂/個)と算出された。

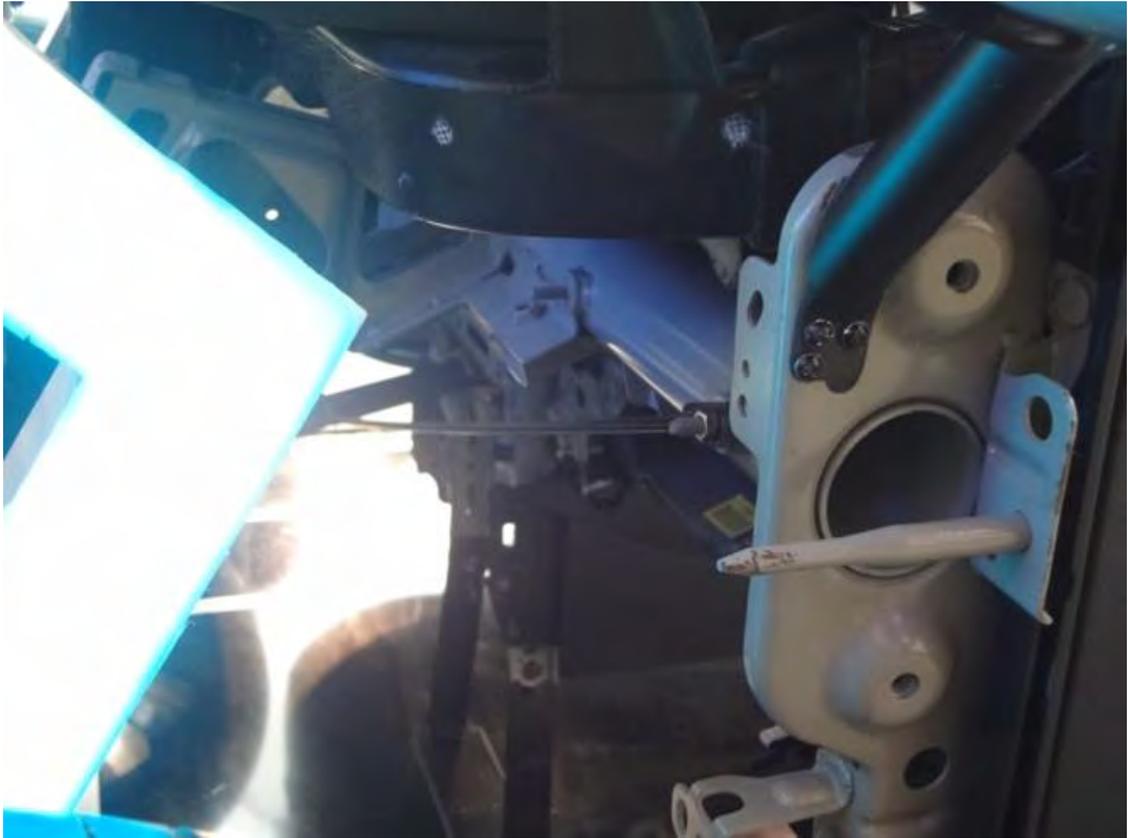


図 4.3.10 鉄製インパネレインフォースメント

⑤ シートフレーム

シートフレームは自動車のシートの骨格部品であり、リクライニングの機能や、衝突時には乗員を保護する重要な役割を持つ部品である。したがって、高い強度、剛性が必要であり、通常鉄を用いて製造されている。

図 4.3.11 に K 2016 にて調査を行った樹脂製シートフレームの写真を示す。本事例では、カーボン繊維と PA の複合材を用いて成形されていた。本検証では、鉄製のシートフレームを CNFRP にて樹脂化すると仮定し、自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。一般的な鉄製シートフレームは 7.0kg～12kg である。これを CNFRP に置換した場合、シートフレームの重量は 5.4kg～9.2kg となる。したがって、鉄製シートフレームと CNFRP 製シートフレームについて、走行時の CO₂ 排出量を以下の通り算出した。

<鉄製シートフレーム>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 7.0(kg/個)～12(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 120(kg-CO₂/個)～210(kg-CO₂/個)

<CNFRP 製シートフレーム>

CO₂ 排出量(kg-CO₂/個)

= 5.4(kg/個)～9.2(kg/個)

×0.00015(kg-CO₂/(kg-製品重量・km-走行))×10,575(km)×11(年)

= 94(kg-CO₂/個)～160 (kg-CO₂/個)

以上より、鉄製シートフレームを CNFRP で置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出削減効果は、30(kg-CO₂/個)～50(kg-CO₂/個)と算出された。



図 4.3.11 樹脂製シートフレーム

各部品を CNFRP で材料置換した場合の、軽量化効果および自動車走行時の CO₂ 排出量削減効果算出結果について、A グループを表 4.3.1 に、B グループを表 4.3.2 にそれぞれ示す。

表 4.3.1 自動車走行時の CO₂ 排出削減効果(A グループ)

部品名	写真	軽量化効果 (kg/個)	CO ₂ 削減効果 (kg-CO ₂ /個)
バッテリーキャリア		0.1~0.2	2~4
バックドア		2~6	40~100
レール エクステンション		0.1~0.3	2~6
フロントエンド モジュールキャリア		0.7~2	10~30

表 4.3.2 自動車走行時の CO₂ 排出削減効果(B グループ)

部品名	写真	軽量化効果 (kg/個)	CO ₂ 削減効果 (kg-CO ₂ /個)
ブレーキペダル		0.2~0.3	3~5
バンパービーム		0.5~2	9~30
エンジンオイルパン		0.1~1	2~20
インパネ レインフォース		0.9~2	20~30
シートフレーム		2~3	30~50

以上の結果より、A グループの金属製部品と B グループの金属製部品を段階的に CNFRP にて置換した場合、自動車平均使用年数における自動車 1 台あたりの軽量化効果および走行時の CO₂ 排出削減効果は、それぞれ図 4.3.12 と図 4.3.13 のように見込むことができる。

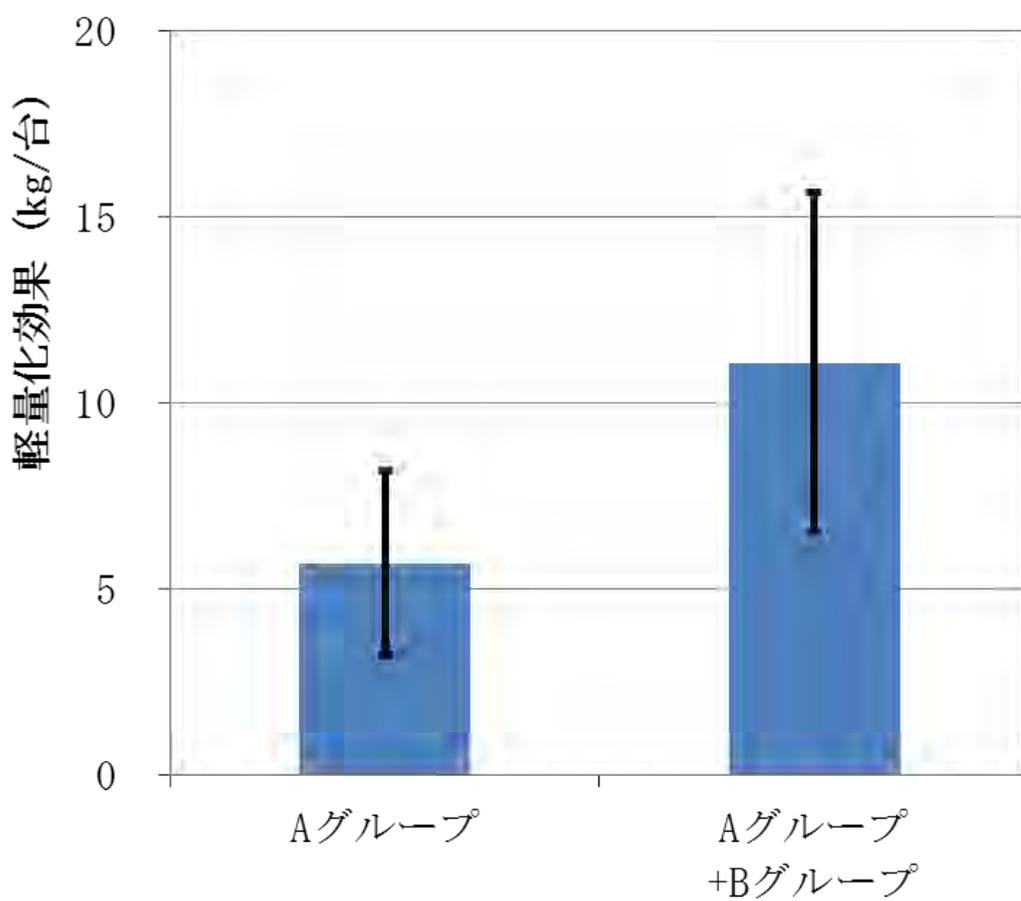


図 4.3.12 自動車 1 台あたりの軽量化効果

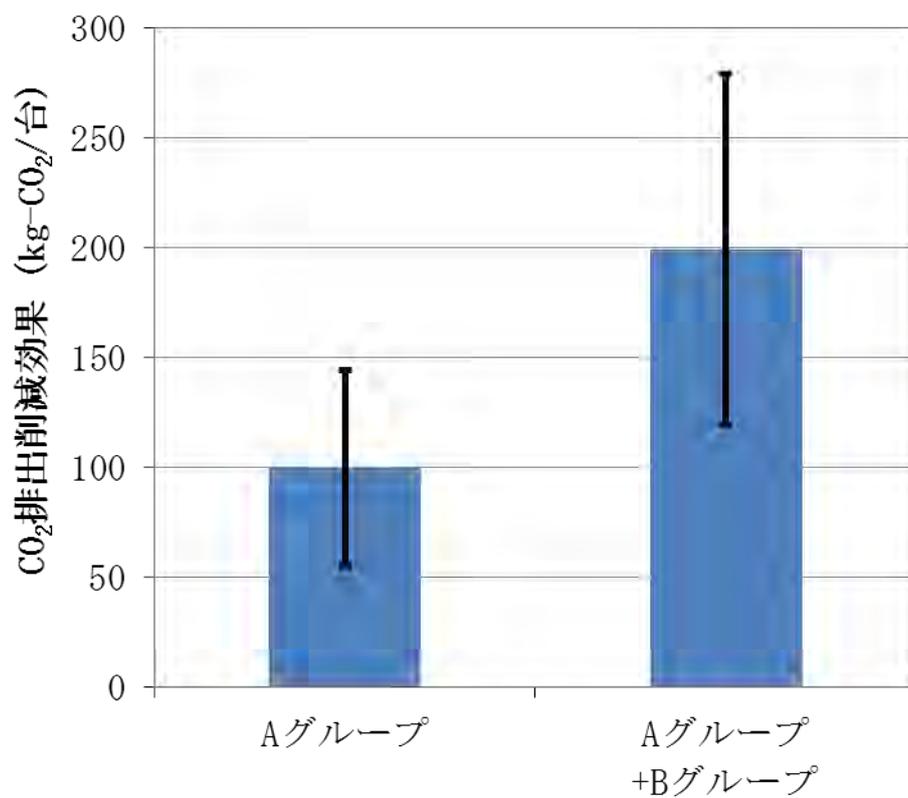


図 4.3.13 自動車 1 台あたりの走行時の CO₂ 排出削減効果

4. 4 CNFRP 製品活用時の CO₂ 排出削減効果の検証(本業務の評価対象部品)

本業務での評価対象部品である、バッテリーキャリアおよびパワースライドドアユニットの CO₂ 排出削減効果を検証した。

製品 1 個当たりの製造および自動車走行時の CO₂ 排出量を算出した。製品製造は素材製造、素材輸送、素材加工の 3 つの工程からなる。従来材料製品の各材料、各工程の個別 CO₂ 原単位は秘匿性が高く開示できない。そのため、3 工程の合算結果のみを示すこととした。この際、素材製造における材料別 CO₂ 排出原単位として、日本 LCA フォーラムのデータベースの値を引用した。CNF 製造に関するデータは市場での使用実績が少ないことに加え、公に開示されていないのが実情であった。そこで、本稿では、CNFRP 活用製品の製造時の CO₂ 排出量が従来材料製品の製造時の CO₂ 排出量を超えないことが必要であると考え、CNF 製造時の CO₂ 排出上限値を試算することとした。また、自動車走行時の CO₂ 排出量の算出には以下に挙げる基礎データを使用した。自動車単位重量、単位走行当たりの CO₂ 排出量として 0.15g・CO₂/(kg・製品重量・km・走行)とした。年間平均走行距離は国土交通省「継続検査の際の整備前自動車不具合状況調査」から 10,575km とした。自動車の平均使用年数は財団法人自動車検査登録協力会「わが国の自動車保有動向」より 11.0 年とした。

4. 4. 1 CNFRP 製品活用時の CO₂ 排出削減効果の検証(部品 ; バッテリーキャリア)

4. 4. 1. 1 従来材料製品の CO₂ 排出量

従来材料製品は鋼板および樹脂で構成され、1 個当たりの重量は 1,031g であった。製品製造時および自動車走行時(平均使用年数走行の場合)は各々 3.13(kg-CO₂/個)および 17.98(kg-CO₂/個)となった。

自動車走行時(平均使用年数走行の場合)の CO₂ 排出量は次式による。

$$1.03(\text{kg}/\text{個}) \times 0.15(\text{g-CO}_2/(\text{kg-製品重量} \cdot \text{km-走行})) \times 10,575(\text{km}) \times 11.0(\text{年}) \\ = 17.98(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

したがって、CO₂ 総排出量は次式より、21.11(kg-CO₂/個)となった。

$$3.13 + 17.98 = 21.11(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

4. 4. 1. 2 CNFRP 活用製品の CO₂ 排出量

CNFRP 活用製品の製造時の CO₂ 排出量が従来材料製品の製造時の CO₂ 排出量を超えないことが必要であるとの考えから、双方の CO₂ 排出量が同等となる時の CNF 単体製品の製造時の CO₂ 排出量を求め製造時の CO₂ 排出上限値とした。CNFRP 活用製品に使用した CNFRP 材料を、PP-CNF と仮定した。PP および CNF の各配合割合は、PP80wt%、CNF20wt% である。従来材料製品の製造時の CO₂ 排出量は 3.13(kg-CO₂/個)、PP 単体製品製造時の CO₂ 排出量は 2.08(kg-CO₂/個)であった。ここで、CNF 単体製品製造時の CO₂ 排出量を X とすると次式が成立する。

$$2.08 \times 0.8 + X \times 0.2 = 3.13$$

$$X = 7.33 (\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

CNF 単体製品製造時の CO₂ 排出上限値は 7.33 (kg-CO₂/個) と試算された。

CNFRP 活用製品は CNFRP 射出成形体およびカラー、ボルトナットなどの部品で構成され、製品 1 個当たりの重量は 575g である。CNFRP 活用製品の自動車走行時の CO₂ 排出量を示す。自動車走行時の CO₂ 排出量(平均使用年数走行の場合)は次式により、10.03(kg-CO₂/個)となった。

$$0.575(\text{kg}/\text{個}) \times 0.15(\text{g-CO}_2/(\text{kg-製品重量} \cdot \text{km-走行})) \times 10,575(\text{km}) \times 11.0(\text{年}) \\ = 10.03(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

したがって、CO₂ 総排出量は次式より、13.16(kg-CO₂/個)となった。

$$3.13 + 10.03 = 13.16(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

CNFRP 活用製品を用いることによる CO₂ 排出削減効果は、以下の式で表すことができ、7.95(kg-CO₂/個)となった。

$$21.11-13.16=7.95(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

削減割合は以下の式より、37.7%となった。

$$7.95/21.11 \times 100 = 37.7(\%)$$

以上の試算から判明したことをまとめる。

CNF 単体製品製造時の CO₂ 排出上限値は 7.33(kg-CO₂/個)となり、PP 単体製品製造時(CO₂ 排出量：2.08(kg-CO₂/個))のおよそ 3 倍までに抑えることが必要である。CNF 活用製品を自動車に用いることによる CO₂ 排出削減効果は、7.95(kg-CO₂/個)となり、削減割合は 37.7%となった。

4. 4. 2 CNFRP 製品活用時の CO₂ 排出量削減効果の検証(部品 ; パワースライドドアユニット)

4. 4. 2. 1 従来材料製品の CO₂ 排出量

従来材料製品は鋼板および樹脂で構成され、1 個当たりの重量は 2,400g であった。製品製造時および自動車走行時(平均使用年数走行の場合)は各々 7.09(kg-CO₂/個)および 41.88(kg-CO₂/個)となった。

自動車走行時(平均使用年数走行の場合)の CO₂ 排出量は次式による。

$$2.40(\text{kg}/\text{個}) \times 0.15(\text{g-CO}_2/(\text{kg-製品重量} \cdot \text{km-走行})) \times 10,575(\text{km}) \times 11.0(\text{年}) \\ = 41.88(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

したがって、CO₂ 総排出量は次式より、48.97(kg-CO₂/個)となった。

$$7.09 + 41.88 = 48.97(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

4. 4. 2. 2 CNFRP 活用製品の CO₂ 排出量

CNFRP 活用製品の製造時の CO₂ 排出量が、従来材料製品の製造時の CO₂ 排出量を超えないことが必要であるとの考えから、双方の CO₂ 排出量が同等となるときの CNF 単体製品の製造時の CO₂ 排出量を求め、製造時の CO₂ 排出上限値とした。PP および CNF の各配合割合は、PP80wt%、CNF20wt%となる。従来材料製品の製造時の CO₂ 排出量は 7.09(kg-CO₂/個)、PP 単体製品製造時の CO₂ 排出量は 1.14(kg-CO₂/個)であった。ここで、CNF 単体製品製造時の CO₂ 排出量を X とすると次式が成立する。

$$1.14 \times 0.8 + X \times 0.2 = 7.09$$

$$X = 30.89 (\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

したがって、CNF 単体製品製造時の CO₂ 排出上限値は 30.89 (kg-CO₂/個)と試算された。

CNFRP 活用製品は CNFRP 射出成形体およびカラー、ボルトナットなどの部品で構成され、製品 1 個当たりの重量は 324g である。CNFRP 活用製品の自動車走行時の CO₂ 排出量を示す。自動車走行時の CO₂ 排出量(平均使用年数走行の場合)は次式により、5.65(kg-CO₂/個)となった。

$$0.324(\text{kg}/\text{個}) \times 0.15(\text{g-CO}_2/(\text{kg-製品重量} \cdot \text{km-走行})) \times 10,575(\text{km}) \times 11.0(\text{年}) \\ = 5.65(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

したがって、CO₂ 総排出量は次式より、12.74(kg-CO₂/個)となった。

$$7.09 + 5.65 = 12.74(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

CNFRP 活用製品を用いることによる CO₂ 排出削減効果は、以下の式で表すことができ、36.23(kg-CO₂/個)となった。

$$48.97-12.74=36.23(\text{kg-CO}_2/\text{個})$$

削減割合は以下の式より、74.0%となった。

$$36.23/48.97 \times 100 = 74.0(\%)$$

以上の試算から判明したことをまとめる。

CNF 単体製品製造時の CO₂ 排出上限値は 30.89(kg-CO₂/個)となり、PP 単体製品製造時(CO₂ 排出量:1.14(kg-CO₂/個))のおよそ 27 倍までに抑えることが必要である。CNFRP 活用製品を自動車に用いることによる CO₂ 排出削減効果は、36.23(kg-CO₂/個)となり、削減割合は 74.0%となった。

5 まとめ

本プロジェクトでは、自動車用金属部品の樹脂代替を狙い、高強度かつ低比重なセルロースナノファイバー(CNF)強化樹脂(CNFRP)を用いて、自動車部品の試作と性能評価を行った。また金属部材の樹脂化で達成された軽量化効果から、自動車の燃費向上およびCO₂削減効果の検証を行う。

今年度は3つのことを行った。1つ目は、CNFを補強繊維とした射出材料の作製ならびに性能評価を行った。その際、自動車に使われる様々な樹脂からCNFの特性に合うものを選定した。2つ目は、CNFRP適用自動車部品として、バッテリーキャリアとパワースライドドアユニットの2部品を選択、作製し性能評価を行った。3つ目は、様々な自動車部品からCNFが活用可能なものをリストアップした。その上で、CNFを用いた際の軽量化効果を算出し、部品使用時のCO₂削減効果を明確にした。結果を以下に示す。

CNFの特徴を活かすための樹脂として、高剛性かつ一般的な流動性のものを使用することとした。

部品については、CNFRPの性能からバッテリーキャリアとパワースライドドアユニットを選択した。部品形状については、CAE解析を用い形状を決定した。その結果バッテリーキャリアについては約40%、パワースライドドアユニットについては約85%の軽量化を達成できた。バッテリーキャリアの性能については、昨年度不合格であった衝撃試験において合格した。しかし振動耐久性試験では、昨年度に比べ改善は見られたものの、金属との接触部分で割れが発生した。パワースライドドアユニットについては初期性能に関して全て合格した。今後耐久性能の評価を進めていく。

LCAについては、まず、将来的にCNFで材料置換の可能性がある自動車部品群を選定した。それぞれの部品について、自動車1台あたりの軽量化効果と走行時のCO₂排出量削減効果を算出した。現実的な数値としてGFと同等な樹脂補強効果をCNFが発現すると仮定し、計算を行った。選定した部品全てを置換した場合、自動車1台あたり約10kgの重量低減に貢献することが分かった。また車の平均寿命である11年間使用したとして、CO₂排出量は約200kg・CO₂低減できることが分かった。