

平成27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 報告書

セルロースナノファイバー添加ウッドプラスチックによる
自動車内装部品の軽量化

2016年3月31日

事業代表者
トクラス株式会社

共同実施者
国立大学法人 山口大学
国立大学法人 静岡大学
岡山県森林研究所
イオインダストリー株式会社

目次

| | |
|----------------------------------|----|
| 要旨 | 1 |
| Summary | 2 |
| 1. 業務の概要 | 3 |
| 1. 1 業務テーマ | 3 |
| 1. 2 事業の目的 | 3 |
| 1. 3 本業務の実施機関 | 3 |
| 1. 4 本業務に至った背景 | 3 |
| (1) 技術的意義 | 4 |
| (2) 政策的意義 | 4 |
| (3) 本業務の展望 | 4 |
| 1. 5 業務の内容 | 4 |
| (1) CNF 添加 WPC の設計・製造 | 5 |
| (2) CNF 添加 WPC 製品の設計・製造 | 6 |
| (3) CNF 活用製品の性能評価 | 7 |
| (4) CNF 活用製品の活用時の CO2 排出削減効果の検証 | 8 |
| 1. 6 事業実施体制 | 8 |
| 1. 7 本業務終了後の計画 | 11 |
| (1) システムフロー | 11 |
| (2) 事業化に向けたマイルストーン及びその事業意志判断ポイント | 11 |
| (3) 地域モデルとの統合 | 11 |
| (4) 事業化 | 12 |
| (5) 普及に向けた取組 | 12 |
| 2. 業務成果報告 | |
| (1) CNF 添加 WPC の設計・製造 | 21 |
| (2) CNF 添加 WPC 製品の設計・製造 | 38 |
| (3) CNF 活用製品の性能評価 | 52 |
| (4) CNF 活用製品の活用時の CO2 排出削減効果の検証 | 58 |

要旨

本業務では、主にインパネ周辺の内装材について、間伐材から発生する木粉等バイオマスフィラーを添加したウッドプラスチック（以下「WPC」という。）に CNF を添加材利用することで補強し軽量の製品を製造し、CNF 活用製品の性能評価を行うとともに、インパネ周辺部材の軽量化による自動車の燃費向上効果や CO2 削減効果の検証を行った。

(1) CNF 添加 WPC の設計・製造

ディスクミルにおける CNF 入り木粉生産と遊星型混練機によるコンパウンド化手法を組合せ木粉、コンパウンドとも 250 kg/hr 以上生産可能な設備及び手法を実証した。このため、CNF 及び木粉粉碎時の含水量の制御、ディスクミルの稼働条件（回転数、クリアランス等）と量産性及び成形流動性（MFR=5g/10min）の組合せから、コスト、成形性が合致する条件を確立した。

(2) CNF 添加 WPC 製品の設計・製造

CNF 添加量と所定物性から、木粉量を 25%以下にて（軽量化 15%以上相当）実現するスペック（レシピ+形状）を確立し、高意匠化及びデッキ材配合での試作から、リサイクル性の実用評価を見出した。

(3) CNF 活用製品の性能評価

既存タルク充填プラスチックにより製造された製品と同等以上の性能を確保するため、CNF 活用製品の性能及び量産性（経済性）の評価を実施した。具体的には、量産を想定できるラボ設備を用い、コンパウンドから成形まで実施し、部品の試作を行った。その結果、この試作にて、目標性能を確保するとともに、経済性、CO2 削減目標に対応できる量産システムの指標を明確化できた。

(4) CNF 活用製品の活用時の CO2 排出削減効果の検証

上記各種検討を踏まえ、既存タルク充填プラスチックに対する CO2 削減効果をシミュレーション中心に評価した。その結果、25%の軽量化実現と 30 kg-CO2e/台の CO2 削減を達成した。

Summary

A commissioned project on the performance evaluation of the Products using Cellulose nanofiber (2015)

Weight saving for the instrument panel of automobile by using cellulose nanofiber added wood plastic composite (CNF-WPC)

In this task, wood plastic composite (WPC) composed of forest thinnings as a biomass filler which was reinforced and reduced in weight by the addition of cellulose nano fiber (CNF) was produced. The performance of CNF-WPC was evaluated. Also reduction of fuel consumption and CO₂ emission by using CNF added WPC as instrument panels were estimated.

(1) Design and production of CNF-WPC

Production line for both wood flour with CNF by disk milling and compound by planetary mixer which can produce more than 250kg/h was verified. The optimum condition for production was determined by the comparison of moisture content of wood flour, rotational rate and disk clearance of disk mill and fluidity (MFR=5g/10min).

(2) Design and production of CNF-WPC products

High-quality-designed prototype was produced by CNF-WPC with less than 25% of wood filling rate (this correspond approximately to 15% of weight reduction). Recyclability of designed prototype was evaluated.

(3) Performance evaluation of CNF-WPC products

Performance and volume efficiency of CNF-WPC products were evaluated in order to verify that properties of CNF-WPC was the same or more than that of conventional composite material such as talc filled plastic. Prototype of assembly was made by CNF-WPC from compound through forming using laboratory-scale equipment which can be applied to quantity production. The prototype filled required properties. Also requirement of quantity production system which can qualify the CO₂ emission reduction and economic performance was clarified.

(4) Effect of the usage of CNF-WPC on the reduction of CO₂ emission

From these research described above, reduction of CO₂ emission by replacing talc filled plastic with CNF-WPC was simulated. Based on the simulation results, 25% of weight saving and reduction of 30kg-CO₂e/unit were achieved.

1. 業務の概要

1. 1 業務テーマ

セルロースナノファイバー添加ウッドプラスチックによる自動車内装部材の軽量化

1. 2 事業の目的

セルロースナノファイバー（以下「CNF」という。）は、木材等の植物等を原料とし、高い比表面積と空孔率を有していることから、軽量でありながら高い強度や弾性を持つ素材として、様々な基盤素材への活用が期待され、精力的な開発が進められている。特に、高強度材料（自動車部品、家電製品筐体）や高機能材料（住宅建材、内装材）への活用は、エネルギー消費を削減することから、地球温暖化対策への多大なる貢献が期待されている。しかしながら CNF は、製品への適用初期段階にあるため、今後 CNF の適用範囲が拡大していく段階には様々な課題が発生することが想定される。

本業務では、将来的な地球温暖化対策につながり、エネルギー起源 CO2 削減が期待できる自動車軽量化に重点を置き、自動車を構成する 2～3 万の部品の中から、2～3 年で実現でき、CNF の特性を活かした用途（部材や部品）を提案し、CNF 活用製品の性能評価や活用時の CO2 削減効果の検証することを目的とする。

1. 3 本業務の実施期間

平成 27 年 10 月 1 日から平成 28 年 3 月 31 日

1. 4 本業務に至った背景

インパネ等の自動車内装材は、「自動車部品としての機能」と「インテリアとしての意匠」の双方を兼ね備える必要がある。そのため、機能としては、プラスチックに無機フィラーを添加し、意匠としては、塗装、木目シート（あるいは突板）貼り等の加飾で対応している。しかしながら、近年の自動車における環境意識向上から、無機フィラー添加は、部品重量の増加、加飾は、素材や加工数の増加となり、これらの改善が急務となってきた。このような背景の中、木粉等バイオマスフィラーをプラスチックに添加したウッドプラスチック（以下「WPC」という。）が注目されている。WPC は、木粉が無機フィラーに比べ軽量である点から軽量化につながるとともに、簡易な加飾で高い意匠性を付与できる。しかしながら、自動車内装部品としての機能に関しては、既存の無機フィラープラスチックに比べ、不足している性能もある。一方、バイオマス素材である CNF は、その高いパフォーマンスから、自動車部品としても期待されているが、CNF 自体のコストや使い勝手（CNF は含水状態）の問題から実用化するためには、多くの時間を要する。そこで、本業務では、木粉と CNF を同時に製造す

る手法から得られた CNF 入り木粉を利用し、WPC と CNF 双方が有する特性を兼ね備えた自動車内装材部品用 CNF 添加 WPC の実用化を図る。

(1) 技術的意義

WPC はエクステリア用途を中心に国内外広く利用されている実績のある素材であり、高い機能を必要としない自動車部品の一部に利用されている。また、自動車用途は、実績が認められれば、短期間に供給量の増大が求められる。したがって、利用側（自動車メーカー）にとっては、本事業提案は、実用化が容易でかつ品質及び供給面が安心な技術である点から、使い手側にとって導入しやすい技術である。また、CNF が添加剤用途であるため、そのスペック（添加量や粒度等）を制御するだけで、WPC が自動車だけではなく、家電や機械部品、建材等幅広く展開も可能で、波及効果が高い。

(2) 政策的意義

木粉製造時に CNF も同時に製造したものを利用するため、原材料コストが安い点、WPC への添加であることから、自動車内装部品を製造しているメーカー（成形メーカー）で保有している設備で製造できる点から、現状の産業界に負荷なく啓発が可能である。また、付加価値の高い木粉利用が促進することで、森林政策への提言（自然共生）、再利用において、既存のエクステリア用途への展開が可能であることから循環型モデルまで踏まえた提案となる。

(3) 本業務の展望

本事業は、自動車内装材向け WPC 製品に CNF を添加剤利用することで、自動車の軽量化による燃費向上と部品生産における工程削減による製造エネルギー削減に加え、使用後、再利用でもスペックが合致するエクステリア用途向け WPC へ利用することで、エクステリア用途 WPC 製造エネルギーの削減から CO2 削減として地球温暖化へ貢献することを目的としている。実用化に向けては、後述する業務の内容に示す通り、使い手側が利用しやすい環境整備と作り手側が供給しやすい体制作りがポイントとなるが、中長期的には、形状デザインに合わせた機能制御とトレンドに合わせたデザインバリエーションへの対応が必要となる。中長期課題に関しては、デザイン課題であり、予測は困難とはなるが、本事業内で、ある程度の自由性は提示するところまで実施する。想定されるユーザーは自動車メーカーであるが、実際にターゲットとする自動車（車種）は、燃費等を重視する軽自動車を含むコンパクトカー、ハイブリッド車と本木のウッドパネルは利用できないが、あるレベルの質感は必要な中級グレード車が対象となる。

1. 5 業務の内容

本業務では、主にインパネ周辺の内装材について、間伐材から発生する木粉等バイ

オマスファイラーを添加した WPC に CNF を添加材利用することで補強し軽量の製品を製造し、CNF 活用製品の性能評価を行うとともに、インパネ周辺部材の軽量化による自動車の燃費向上効果や CO2 削減効果の検証を行う。

本業務の最終目標は、既存部品に対し、同等以下の製造原価で、CO2 削減量 30kg/台以上が実現できる高意匠＋高機能＋安定供給 CNF 添加 WPC 部品を既存メーカー（設備）で製造することである。この目標に対し事前に、WPC 素材にて、軽量化に寄与できる自動車内装部品用の部材を製造、その評価を踏まえ、実用化に向けた課題に対し、CNF 技術を導入することで改善できる技術をラボベースで確立し、本業務を実施する共同研究体制を構築している。

本年度は、「100 円/kg以下で、CNF 入り木粉を製造する手法確立」、「自動車利用した際の CO2 削減量をシミュレーションにて提示」及び「量産移行可能なラボ設備にて、部品の試作を実施」を年度目標とし、以下（１）～（４）に示す内容を実施する。

（１）CNF 添加 WPC の設計・製造

本テーマは、CNF 入り木粉製造から CNF 添加 WPC コンパウンド製造まで、100t/月以上の供給システムを構築すること、及びこの CNF 添加 WPC コンパウンドは、汎用の成形設備で、金型等新規投資をすることなく製造できることが最終目標となる。この目標に対し、WPC においては、100t/kg以上の供給体制とコンパウンドコスト 300 円/kg以下を実現している。この評価において、自動車内装部品に適応するための技術的課題を明確化した。同時に CNF 複合利用にて、コンパウンド量産化を実現しており、この技術と WPC 技術の組合せによる可能性を見出した。本概況を踏まえ、本年度は、以下の内容を実施する。

ディスクミルにおける CNF 入り木粉生産と遊星型混練機による迅速コンパウンド化手法を組合せ木粉、コンパウンドとも 250 kg/hr 以上生産可能な設備及び手法を検証する。

このため、CNF 及び木粉粉碎時の含水量の制御、ディスクミルの稼働条件（回転数、クリアランス等）と量産性及び成形流動性（MFR=5g/10min）の組合せから、コスト、成形性が合致する条件を以下のとおり検証する。

①CNF 入り木粉材料の製造技術の確立

ア．ディスクミルによる機能化粉碎の検証

ディスクミル等のせん断粉碎を利用し、木粉粉碎時に木粉と同時に CNF も製造できる粉碎技術を確立する。

イ．100t/月以上の CNF 添加 WPC 供給システムの構築

供給システム確立において、100t/月以上の生産に対応できる CNF 入り木粉を 100 円/kg以下で製造する技術を確立する。

②CNF 添加 WPC の設計・製造技術の確立

ア. コンパウンドの設計・製造

コンパウンド体制構築において、CNF 添加 WPC コンパウンドの量産化手法確立と汎用設備での成形実現を確立する。

イ. コンパウンドの性能評価

上記コンパウンドの評価を実施するとともに成形流動性（MFR=5g/10min）を確保できるレシピ条件をフィードバックする。

(2) CNF 添加 WPC 製品の設計・製造

本テーマは、既存のタルク充填プラスチックに対し、機械的特性を向上させることで、部品の薄肉化を図り、15%以上軽量化が実現する自動車内装部品製造技術を確立すること、CNF 入り木粉のアンカー効果を利用し、簡易にウッドパネル等の木質感が付与できる加工技術を実証すること、使用後に高付加価値のリサイクル用途（エクステリア用 WPC）を提案する技術を確立することが最終目標となる。この目標に対し事前に、WPC において、既存タルク充填プラスチックより 10%軽量化を実現、簡易な塗装により、高い木質感を有する部品の試作、関連ユーザーへサンプル調査を実施しており、この調査をもとに、既存 WPC では、実用化困難な課題を見出し、ゴム系の CNF コンパウンド樹脂による改善のラボ的なアプローチも実施している。本概況を踏まえ、本年度は、以下の内容を実施する。

CNF 添加量と所定物性から、木粉量を 25%以下にて（軽量化 15%以上相当）実現するスペック（レシピ+形状）を確立し、表面簡易研削、顔料添加等による高意匠化、デッキ材を試作し、リサイクル性の実用評価を実施する。

具体的には、CNF 及びコンパウンド樹脂について、ラボ評価レベルで WPC より 20%物性向上させるとともに、当該ラボ評価をクリアしたサンプルを用いて、加工性、リサイクル性の一次評価を実施すること。

①既存製品より 15%以上軽量化が図れる自動車内装部品の確立

ア. 自動車内装部品の設計

既存内装部品形状をモデルに、強度向上レベルと薄肉化の関係をシミュレーションし、15%以上軽量化する強度向上レベルを提示すること。

イ. CNF 添加 WPC の成形体評価

「(1)」にてコンパウンドを利用した成形体の機械的特性を評価し、不足する特性をフィードバックすること。

ウ. コンパウンドの課題点抽出及びラボレベルでの改良

WPC 利用における課題から、ラボ評価にて、不足性能（衝撃、流動性等）の 20%アップを実現すること。

②簡易加工（ex. 塗装）のみで、高木質意匠が付与できる質感の提供

ア. 加工評価用成形体の作成

塗装用の CNF 添加 WPC を成形すること。

イ. 加工性（塗装性）の評価

簡易なプライマー加工にて、塗装密着性（基盤目剥離 75%以上）をクリアすること。

③エクステリア用 WPC への再利用できるスペックの提示

「(2) ①」にて試作したサンプルを用い、リサイクル評価にて、デッキ用途スペックに必要な性能を提示及びそのスペックに合うレシピ提案まで確立すること。

(3) CNF 活用製品の性能評価

本テーマは、既存製品であるタルク充填プラスチックと同等以上の性能確保を実現すること、経済性面においても、コンパウンド単価 300 円/kg以下での提供できる体制構築することが最終目標となる。この目標に対し事前に、WPC において、タルク充填プラスチックに対応できる素材開発を通じ、コンパウンド手法及び評価技術の確立、WPC 成形体で自動車部材等汎用プラスチックに適応できる信頼性評価を実施、本業務で一部流用できる可能性のある CNF のコンパウンド化に関しては量産技術確立をしている。本概況を踏まえ、本年度は、以下の内容を実施する。

既存材料により製造された製品と同等以上の性能を確保するため、CNF 活用製品の性能及び量産性（経済性）を評価する。

具体的には、量産を想定できるラボ設備を用い、コンパウンドから成形まで実施し、部品の試作を実施する。この試作にて、目標性能を確保するとともに、経済性、CO2 削減目標に対応できる量産システムの指標を明確化すること。

①コンパウンドの性能評価

樹脂、添加剤のレシピを検討することで、大型射出成型に対応できる流動性のコンパウンドを確立すること。

②成形体の性能評価

ラボ成形体を用いて、信頼性が評価できる試験方法の絞り込み（試験方法、試験条件）を実施すること。

③量産システムの確立

ア. CNF 入り木粉材料の製造

木粉材料製造において、経済性目標にマイナスとなる工程因子を抽出し、この課題に対応した設備仕様を確立すること。

イ. CNF 添加 WPC コンパウンド及び成形

コンパウンド及び部品製造において、CO₂削減及び経済性目標にマイナスとなる工程因子を抽出し、この課題に対応した設備仕様を確立すること。

(4) CNF 活用製品の活用時の CO₂ 排出削減効果の検証

本テーマは、既存製品（タルク充填プラスチック）を利用した自動車に対し、部品製造から使用までの CO₂ 削減量が、30 kg/台以上とすることを最終目標としており、本年度は、以下の内容を実施する。

従来材料に対する CO₂ 削減効果を評価するため、CNF 活用製品を活用した場合の CO₂ 排出削減効果を検証する。

具体的には、従来材料と本業務での製造する製品の CO₂ 排出量の総量を推計し、本業務の製品による CO₂ 削減効果と実現に向けた課題を整理すること。

①既存材料製品の CO₂ 排出量の明確化

既存インパネで使用しているタルク充填プラスチック製造を通じて CO₂ 排出量を推計すること。

②CNF 複合樹脂の CO₂ 排出量の明確化

「(3) ③」にて選定した設備を用いた場合の CO₂ 排出量のシミュレーションを実施する。必要に応じて「(3) ③」課題にフィードバックすること。

③CO₂ 排出削減効果の評価と課題の整理

①の従来品の実測結果と②の本事業提案品のシミュレーション結果から、CO₂ 削減量の算出を行うとともに、CO₂ 削減量 30 kg/台とするための課題を整理する（その結果を、各課題へフィードバックする）こと。

④CO₂ 排出量の評価

①～③の工程で CO₂ 排出量の評価を行う。

1. 6 事業実施体制

トクラス株式会社が事業代表機関で、山口大学、静岡大学、岡山県森林研究所及びイオインダストリー株式会社が共同研究機関として参画した。表-1. 1には、各テーマの担当機関を示す。また、図-1. 1には、実施体制図を示す。

表-1. 1 各テーマの担当機関

| テーマ | | | 担当機関 |
|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| (1) CNF 添加 WPC の設計・製造 | ①CNF 入り木粉材料の製造技術の確立 | ア. ディスクミルによる機能化粉砕の検証 | 岡山県森林研究所 |
| | | イ. 100t/月以上の CNF 添加 WPC 供給システムの構築 | トクラス |
| | ②CNF 添加 WPC の設計・製造技術の確立 | ア. コンパウンドの設計・製造 | トクラス |
| | | イ. コンパウンドの性能評価 | 山口大学 |
| (2) CNF 添加 WPC 製品の設計・製造 | ①既存製品より 15% 以上軽量化が図れる自動車内装部品の確立 | ア. 自動車内装部品の設計 | イオインダストリー |
| | | イ. CNF 添加 WPC の成形体評価 | 山口大学 |
| | | ウ. コンパウンドの課題点抽出及びラボレベルでの改良 | トクラス |
| | ②簡易加工 (ex. 塗装) のみで、高木質意匠が付与できる質感の提供 | ア. 加工評価用成形体の作成 | イオインダストリー |
| | | イ. 加工性 (塗装性) の評価 | トクラス |
| | ③エクステリア用 WPC への再利用できるスペックの提示 | | 静岡大学 |
| (3) CNF 活用製品の性能評価 | ①コンパウンドの性能評価 | | トクラス |
| | ②成形体の性能評価 | | 山口大学 |
| | ③量産システムの確立 | ア. CNF 入り木粉材料の製造 | 岡山県森林研究所 |
| | | イ. CNF 添加 WPC コンパウンド及び成形 | トクラス |
| (4) CNF 活用製品の活用時の CO2 排出削減効果の検証 | ①既存材料製品の CO2 排出量の明確化 | | イオインダストリー |
| | ②CNF 複合樹脂の CO2 排出量の明確化 | | トクラス |
| | ③①～②より本業務の CO2 排出削減効果の評価と課題の整理 | | トクラス |

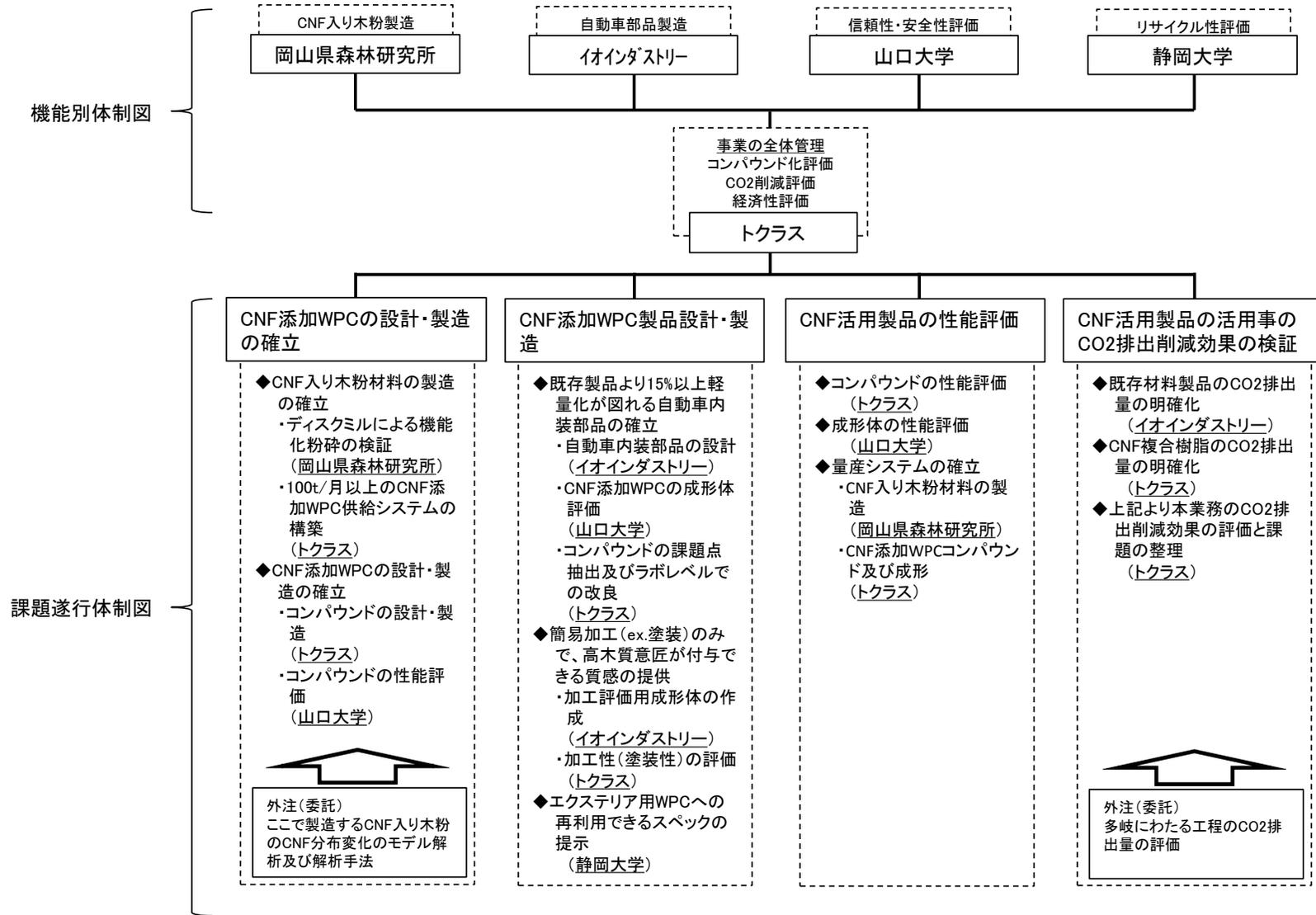


図-1.1 事業実施体制図

1. 7 本業務終了後の計画

(1) システムフロー

本業務成果は、軽量化につながる WPC 自動車内装部品に CNF を添加することで、実用化速度の加速化を図ることを目的としており、その実現には、単に部品開発だけでなく、川上から川下までトータルで検証する。その結果、森林資源利活用の自然共生への貢献から、本主目的である自動車の軽量化に伴う低酸素社会実現（CO2削減）、さらには、リサイクル用途まで踏まえた循環型社会形成への貢献まで含んだ事業フローとなる。図－1. 2 には、産業フローと本業務成果及び成果のポイントを示す。

(2) 事業化に向けたマイルストーン及びその事業意志判断ポイント

本業務完了後、1年半後には、初期製品を立ち上げ、2年半後には、本格事業展開を目指している。そのためには、事業終了後直ちに、サンプルワークが開始されなければならない。これは、自動車メーカーでの評価が、最低でも1年以上は必要とするためである。一方、新規素材であるため、利用する側のリスクもあり、事業拡大は、段階的なステージを経ることが必要となる。そこで、分かりやすい（＝エンドユーザーにも受け入れられやすい）インパネ用途からスタートする。インパネ用途は、機能だけでなく意匠も重要視され、ベースが WPC である特徴を最も活かせる用途である。加えて、利用する自動車も、軽量化の効果が最も必要とする電気自動車、ハイブリッド車、軽自動車向けを最初のステップに設定する。さらに、自動車用の素材（部品）は、世界共通である場合が多く、事業終了後、3年目までには、海外供給体制も構築しておく必要がある。図－1. 3 には、事業計画とマイルストーンを示す。

(3) 地域モデルとの統合

本業務成果の用途は、自動車であり、部品製造（成形）及びそれを自動車に組み立てる自動車利用の生産拠点は、全国及び世界各地にあり、一拠点化することは困難である。したがって、部品製造より川下では、各地域の地域性を活かした事業モデルは、構築し難い。しかしながら、本事業モデルの川上である「出発原料（調達）」、「CNF 入り木粉製造」及び「コンパウンド化」においては、同一地域で事業化することが望ましい。これは、かさが高い原料のおが粉や、含水状態の CNF 入り木粉の移動（物流）にはロスが大きいことが要因となる。さらに、本事業提案技術や品質の多くは、「CNF 入り木粉製造」及び「コンパウンド化」で決まることから、品質管理や研究開発も生産拠点に近隣に設置されていることが望ましい。これらの面を踏まえ、本事業では、「コンパウンド化」までの生産拠点及び「技術開発・技術サポート」拠点は、同一（近隣）の地域で実施する方向で進める。具体的には、岡山県

の美作地域を想定している。この地域は、森林資源が豊富にあるだけでなく、製材業、バイオマス発電等バイオマス利用が盛んな地域であり、産業だけでなく、行政におけるバイオマス事業の取組も先進的な地域である。この美作地域で本事業提案の事業化を実現することで、同地域が取組んでいる地域モデルの一助となる。図-1. 4には本地域モデルのイメージ図を示す。

(4) 事業化

本業務成果により、内装部品スペック、意匠性及び品質も含めた安定供給の課題がクリアされれば、自動車メーカーによる安全性の評価試験に移行する。安全性評価には、1年以上要するため、当社としては、事業終了後、直ちにサンプルワークを実施し、イオインダストリーと共同で製品開発を実施し、2019年度10月には、特定部品（インパネを予定）、特定車種（電気自動車、ハイブリッド車、軽自動車のいずれかを予定）による試験導入を図る（事業開始）。この成果を踏まえ、2020年度10月より、特定部品を利用する車種を随時拡大する（事業拡大）。一方、水平展開として、2019年度よりイオインダストリー等自動車内装部品メーカーと共同でインパネ以外の内装部品に展開する製品開発を実施し、2020年度4月には、特定車種への試験導入、2021年度4月より利用する車種の拡大を図る。図-1. 5には事業化に向けたロードマップを示す。

また、最終利用者は自動車メーカーであり、求められる特性は、燃費向上につながる軽量化に加え、安定供給、高意匠となる。しかしながら、実際に本技術成果を自動車メーカーに提案するのは、本業務に参画しているイオインダストリーのような成形メーカーである。したがって、自動車メーカーへの特性に加え、提案する成形メーカーにメリットがある特性を提示しなければならない。成形メーカーから求められる特性としては、設備投資リスクがない素材、即ち既存の製造設備で利用できるコンパウンドであること、成形サイクル等生産性が向上するコンパウンドであること、シート貼りや塗装等の加飾に関するコストが軽減できるコンパウンドであることが挙げられる。図-1. 6には業界の川上から川下に向かいPRできるポイントを示す。

(5) 普及に向けた取り組み

本業務で取り組む課題は、既存素材（タルク等無機フィラー充填プラスチック）の代替であり、これらを利用しているメーカーの販売チャンネルをそのまま利用し、自動車メーカーに供給する。したがって、販売チャンネルはできているものの、利用するメーカーにとっては、代替であるため、売上増大にはつながらない。つまり、普及における第一のハードルは、自動車メーカーに提案する部品メーカーのメリットを提示することとなる。そのためには、前述した技術的な対応も重要であるが、

バイオマスを利用することによる政策面でのサポートも重要となる。現在、建築で用いられている国産木材利用促進、北米の自動車産業で検討されている使用材料のバイオマス由来度による縛り、バイオマス利用による炭素固定等、これらの観点から国内自動車メーカーではあまり政策支援対象（ex. エコカー減税の対象）になっていない。これら行政サポートを充実することは、成形メーカー、自動車メーカーにとって大きなメリットとなり、本技術成果の利用拡大につながると考えられる。普及に向けた、第二のハードルは、技術的サポートの充実である。CNF を含むプラスチック製品へのバイオマス利用は、エクステリア用途のウッドプラスチックを中心に普及はしているものの、実績は少ない。したがって、利用する成形メーカー、自動車メーカーにとって、開発リスクは大きい。前述した通り、成形メーカーにとっては、代替素材であり、売り上げ拡大にはつながらず、公的な技術サポートがない限り、開発リスクは乗り越えることは困難である。欧州では、フィンランド、スウェーデン、ドイツ等で、天然繊維、木粉等バイオマスフィラーを利用したプラスチックの公的な研究機関は多く、既に多くの欧州自動車メーカーにて CNF ではないが、バイオマス素材を利用したプラスチック製品は普及している。これは、成形メーカーが技術サポートを受けられることが大きなメリットである。国内でも大学を中心に CNF 研究をしている機関はある。しかしながら、CNF を製造するメーカーはサポートが得られるが、成形メーカーがサポートを得られる機関ではない。したがって、成形メーカーの技術サポートができる機関の設立が望まれる。第三のハードルは、自動車メーカーにとっての調達リスクである。自動車メーカーにとって、素材は基本的に複数社購買となる。したがって、CNF 利用において、どこか 1 社だけが、全てのニーズに対応できる製品を確立しても、自動車メーカーによる本格採用には至らない。このハードルにおいても、第二のハードルで提示した公的なサポート機関による技術普及の役割が必要となる。本スキームでは、第一のハードルに対しては、ウッドプラスチック業界からの政策提案、第二、第三のハードルに対し、真庭バイオマスラボを事業終了後、公的なサポート機関として充実させることを視野に入れている。以上の課題を乗り越えることで、2025 年には、タルク充填プラスチックを使用している自動車内装部品の 50%以上を、CNF 入りウッドプラスチック素材に代替することを目標とする。図-1.7 には普及に向けたハードルと取組及びその展望を示す。

一方、販売手法は、代替素材であり、既存のタルク充填プラスチックと同じであるが、本事業成果の大きなポイントは、CNF 添加量のコントロール、粒度制御等フィラー側にも新たな機能付与が可能となるため、利用者ニーズに対応するマーケティング手法は異なる（図-1.8）。即ち、従来の素材にはないフィラー側でも機能付与が可能となるため、従来、成形体の形状設計以外では提案できなかった素材

軸の機能提案営業が可能となる。したがって、本技術成果を、より普及拡大するためには、提案営業が必要となってくるが、現状の成形メーカーで、素材まで含めた提案営業できるメーカーは少ない。そこで、前述した成形メーカーに対する技術サポートは重要な課題となってくる。成形メーカーでの技術提案力が高くなれば、本技術成果を自動車用途だけでなく、家電、機械部品、建材等の分野にも進出が可能となる。これにより、本業務成果の市場は国内だけで 500 万 t/年以上の需要が見込める

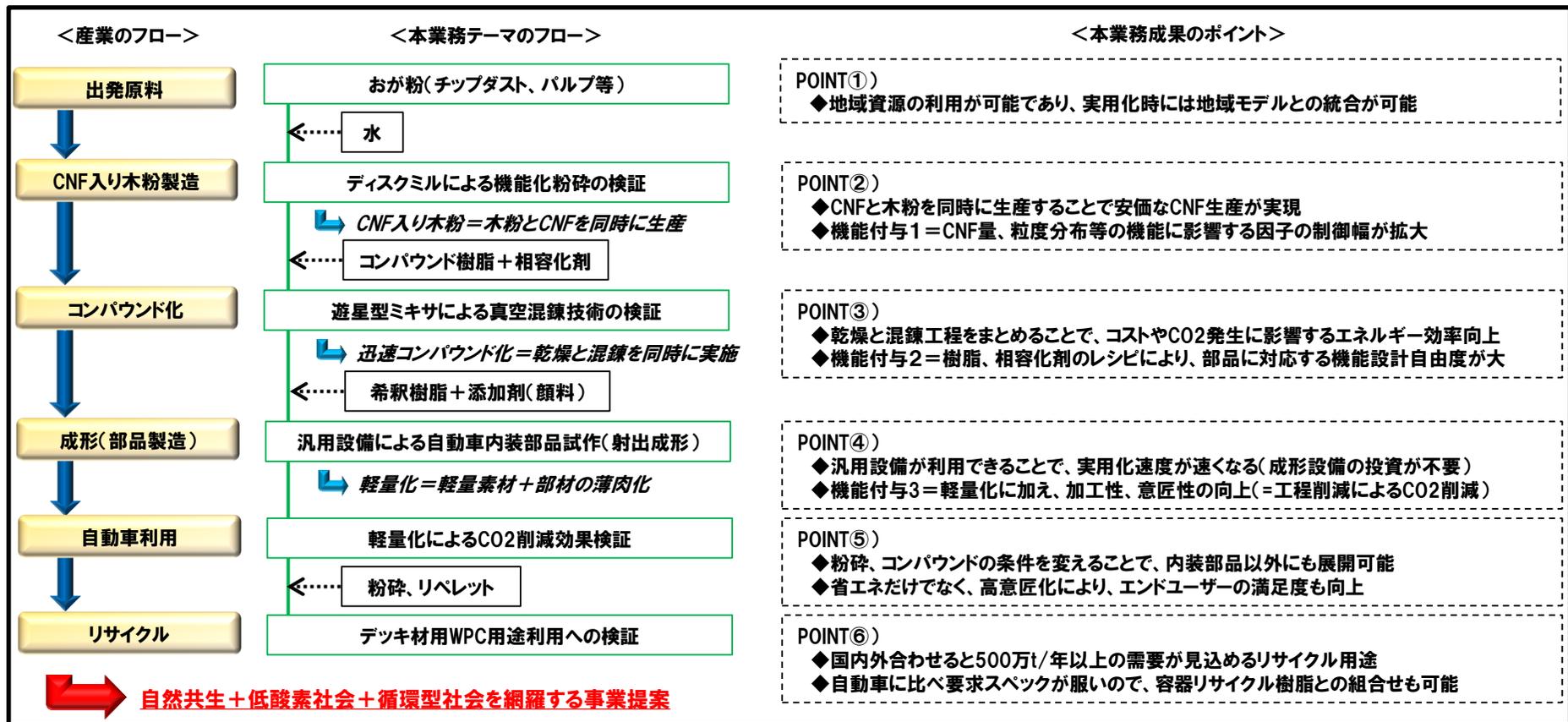


図-1. 2 産業フローと本業務成果及び成果のポイント

| | 2015～2017年度 | 2018年度 | 2019年度 | 2020年度 | 2021年度 |
|------------------------|--|---|--|---|--|
| 事業計画 | <p>←-----→</p> <p>本事業) 自動車内装部品 向け部材の開発</p> | <p>サンプルワーク</p> <p>ユーザー評価⇔フィードバック検証</p> <p>利用箇所増加による拡大</p> | <p>特定部品／特定車種への実用化</p> <p>ユーザー増加による拡大①</p> <p>ユーザー評価⇔フィードバック検証</p> | <p>特定部品／汎用車種への拡大</p> <p>適応メーカー拡大① (特定部品／特定車種)</p> <p>汎用部品／特定車種への実用化</p> <p>ユーザー増加による拡大②</p> | <p>適応メーカー拡大② (特定部品／汎用車種)</p> <p>汎用部品／汎用車種への拡大</p> <p>適応メーカー拡大① (汎用部品／特定車種)</p> |
| ※特定部品は、意匠性を重視するインパネを想定 | | | | | |
| マイルストーン | <p>本事業完了 ○</p> | <p>★パイロットプラントによる供給開始</p> <p>★木粉量産設備導入</p> | <p>★コンパウンド量産設備導入</p> <p>○事業開始</p> | <p>★木粉・コンパウンド増産設備導入</p> <p>○本格事業展開</p> | |
| | <ul style="list-style-type: none"> ・事業目標が達成されているか？ ・事業化構想(立地場所も含め)が確立されているか？ ・自動車メーカーとの調整が開始されているか？ | <ul style="list-style-type: none"> ・品質保証体制が構築できているか？ ・自動車メーカー及びエンドユーザーへの価値提供が立証されているか？ ・パイロットプラントによる生産安定性は立証できているか？ ・人員確保ができているか？ | <ul style="list-style-type: none"> ・自動車用途での安全性、長期耐久性が確保できているか？ ・品質は確保できているか？ ・量産設備で計画通りのコスト体制になっているか？ ・供給量の増減に対応できる仕組みを構築できているか？ ・機能対応力ができているか？ | <ul style="list-style-type: none"> ・初期自動車メーカーとの間に縛りを設けていないか？ ・多品種対応による安価生産の仕組みが構築できているか？ ・さらなる付加価値の提案ができていないか？ ・増産計画が構築されているか(拠点も含め)？ | <ul style="list-style-type: none"> ・競合素材に対する対抗策はできているか？ ・海外供給に対応できるか？ ・量産対応以外でのコストダウン対策はあるのか？ ・トレンドに対応できているか(特に意匠面)？ |

図-1.3 事業計画とマイルストーン

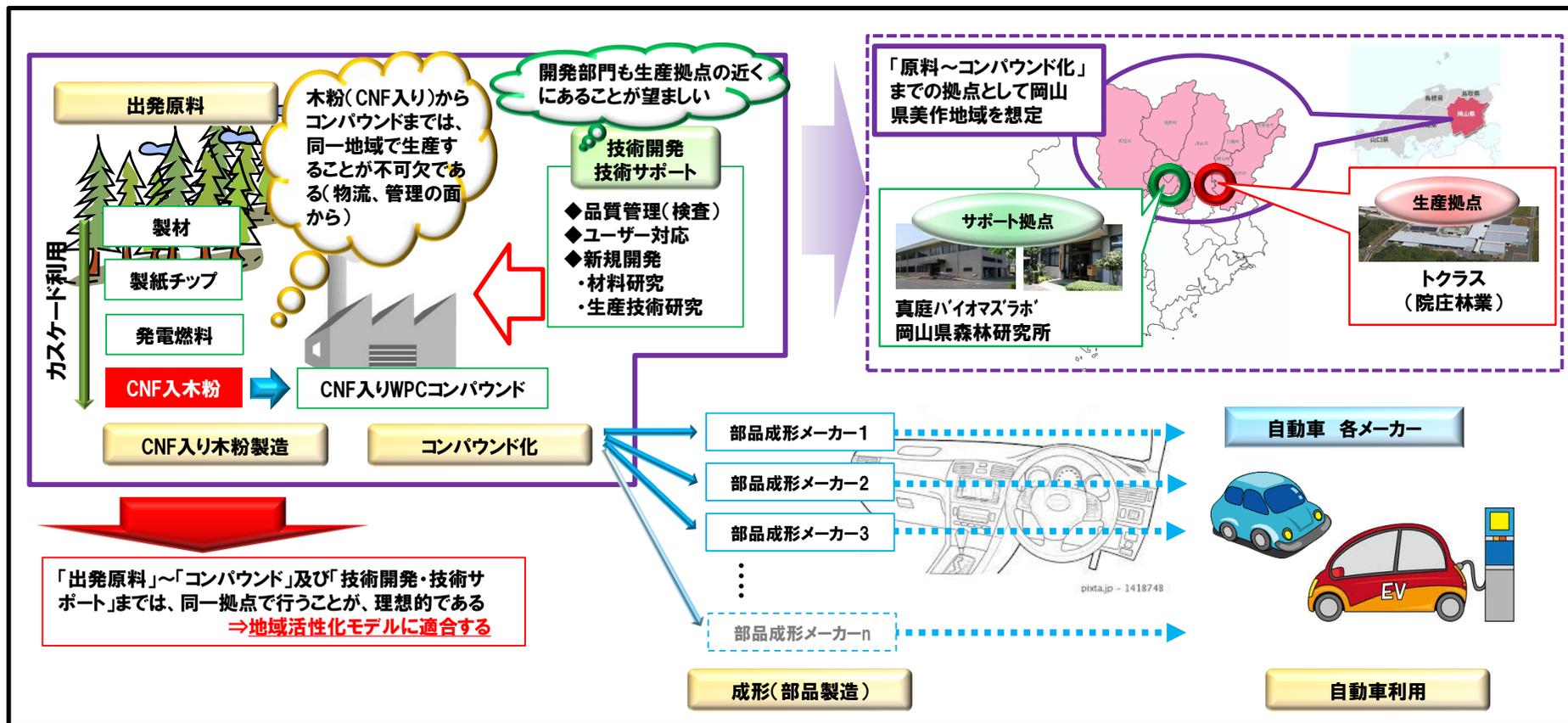


図-1. 4 本地域モデルのイメージ

| | 2018年度 | 2019年度 | 2020年度 | 2021年度 | 2022年度 |
|--------|----------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| ロードマップ | | ★ 事業開始 | ★ 事業拡大(拠点の生産量増強) | | ★ 事業拡大(拠点数の拡大) |
| | | ① 特定メーカー電気自動車等へインパネ部材実用化 | ② インパネ部材の適応車種拡大 | | |
| | | 展開するメーカーの拡大 | 展開するメーカーの拡大 | | 展開するメーカーの拡大 |
| | トクラス+イオンダストリー共同で製品開発 | | ▲ インパネ以外の内装部品への水平展開開始 | ▲ 水平展開拡大(適応車種拡大) | |

図-1.5 事業化に向けたロードマップ

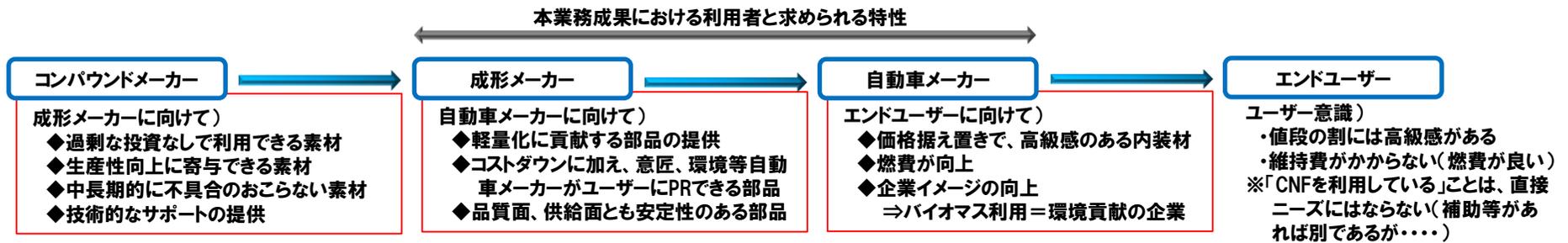


図-1.6 業界の川上から川下に向かいPRできるポイント

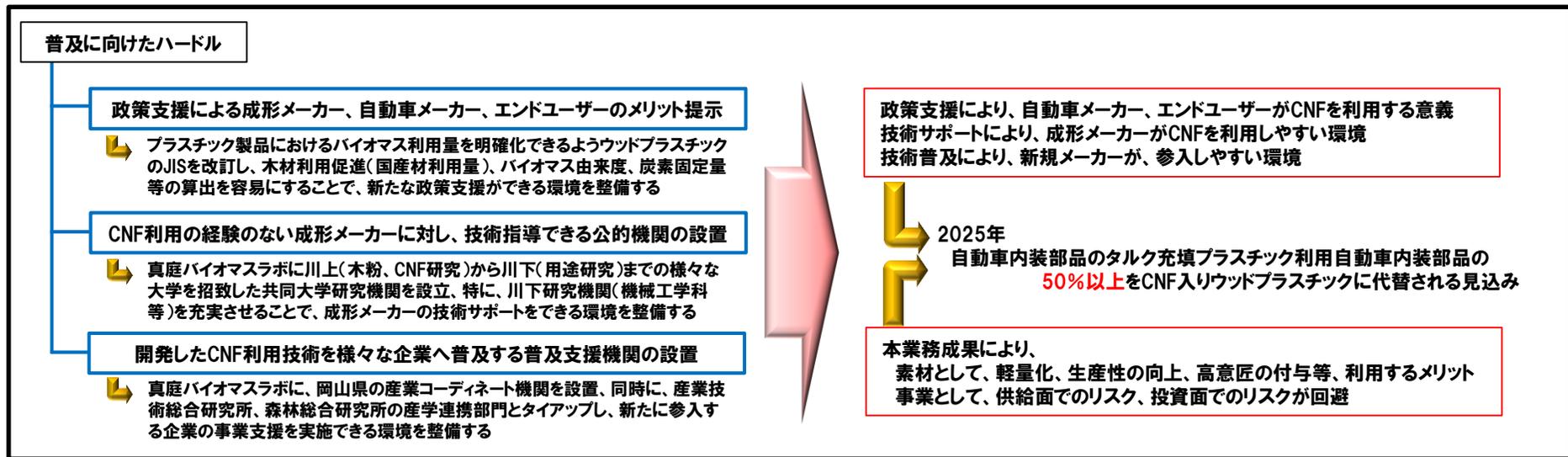


図-1. 7 普及に向けたハードルと取組及びその展望

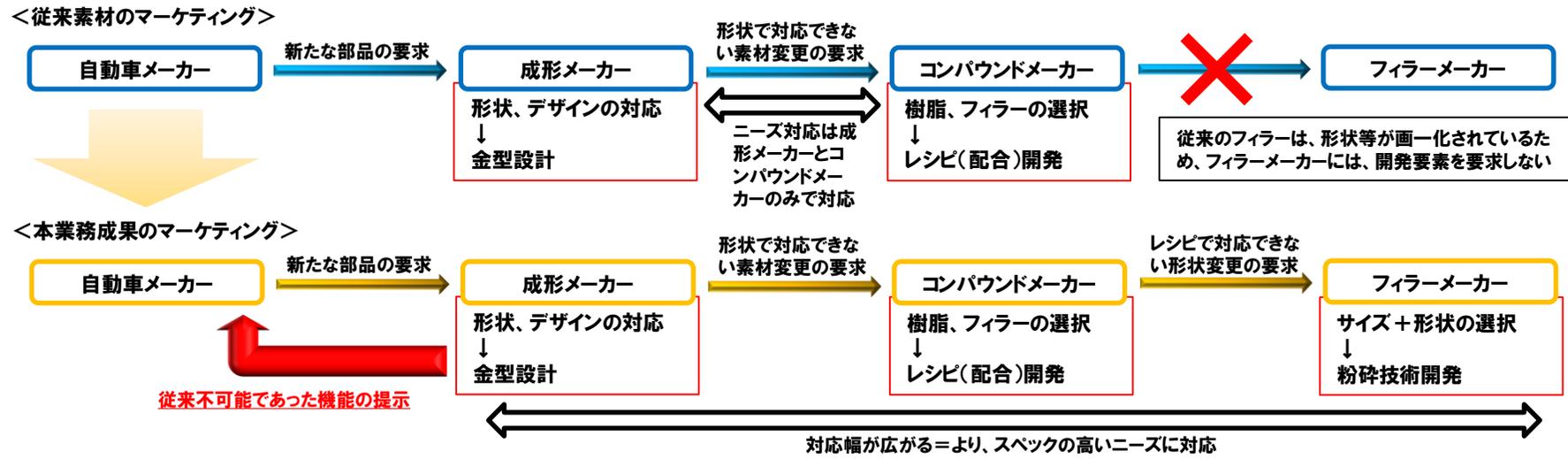


図-1. 8 本業務成果のマーケティングスキーム

2. 業務成果報告

(1) CNF 添加 WPC の設計・製造

①CNF 入り木粉材料の製造技術の確立

ア. ディスクミルによる機能化粉砕の検証

約 400~100 μ の木粉を粉砕前原料に図-2. 1 に示すディスクミル (増幸産業: マスコロイダー) にて、せん断粉砕を実施した。このタイプのディスクミルは、豆腐の製造における大豆の粉砕 (すりつぶし) やコーンスープ製造におけるトウモロコシの粉砕に用いられる汎用な装置である。一方、この装置を用い、産業技術総合研究所等は、CNF の量産を実現している (バイオエタノール製造における原料生産)。



図-2. 1 ディスクミル (増幸産業: マスコロイダー)

このディスクミルでの CNF 粉砕は、所定サイズの木粉を添加し、何度も繰り返し粉砕することで徐々に微細化される。そのメカニズムは、粉砕により、木粉自体が繊維方向に解繊されると同時に、木粉表面から微細なセルロース繊維も同時に剥離し、これが繰り返し行われることで、CNF 化されるものである。図-2. 2 には、このディスクミルでナノサイズされる過程を示す。

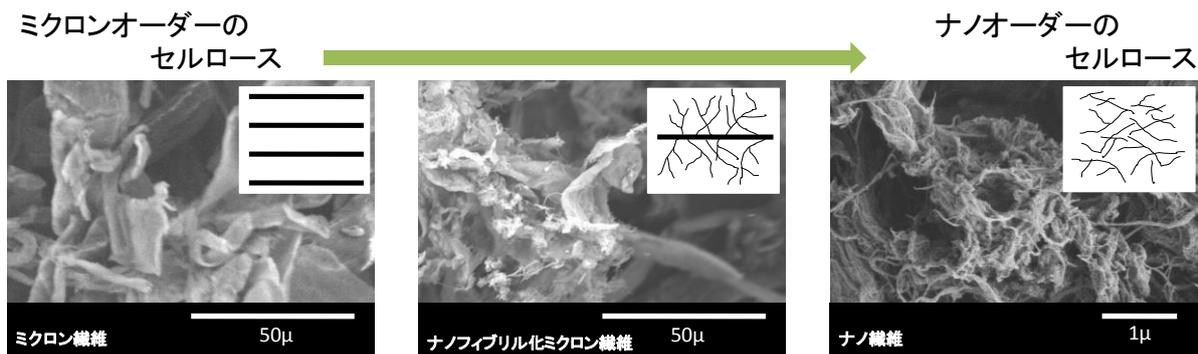


図-2. 2 ディスクミルによる CNF 化の過程

本業務では、この CNF 粉碎におけるメカニズムに注目した。このディスクミルによる CNF 化粉碎において、途中の過程は、ミクロンサイズの木粉と CNF が混在した状態になる。即ち、この状態の木粉は、既に CNF 入り木粉となっている（図-2. 3 にこのイメージ図を示す）。

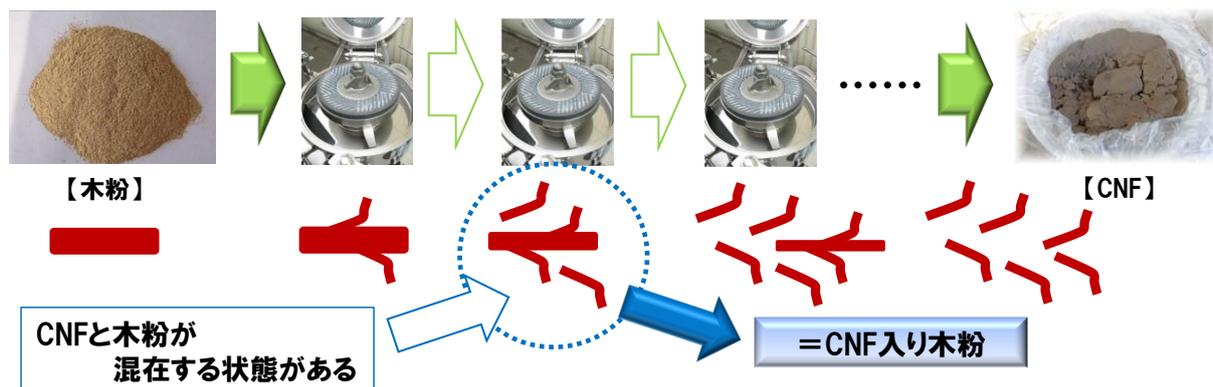


図-2. 3 ディスクミルによる CNF 入り木粉製造のイメージ図

この手法を用いることで、木粉と CNF を別々に製造し混合するよりも、エネルギー効率及び経済性が有効であると判断し、本業務では、この手法での評価を実施した。

本業務では、初期木粉サイズとディスクミル条件を検証した。ここで、ディスクミル条件はディスク間のクリアランスとディスクの回転条件である。ディスクの回転数は、回転数は、低くなるほど、ディスク内に木粉が滞留する時間が長くなりことで、木粉表面から CNF が剥離するよりもむしろ、木粉自体が粉碎されるほうが大きくなった。さらに、多少なりとも生成した CNF 等細かい木粉がディスクのせんだん力（木粉の凝集力も多少影響しているとは考えられるが）で、

大きな木粉の表面に再凝集してしまう。図-2. 4には、粉碎により、大きな木粉表面に微細な木粉が凝集している状態の SEM 写真を示す。

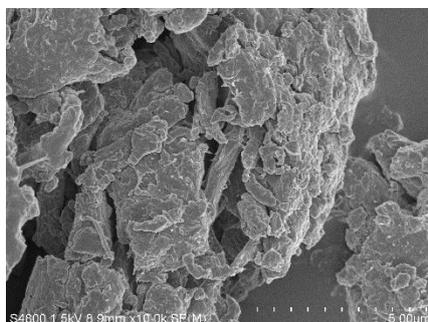


図-2. 4 木粉表面に凝集する CNF 等微細な木粉の SEM 画像

このような現象を避けるため、本業務では、装置が許容できる範囲でできるだけ高いディスク回転数を採用した。ディスククリアランスは、生産性に影響してくる。クリアランスが小さければ当然、木粉は細くなる（CNF の出来高も高くなる）が、生産性も低下する。そこで、ディスククリアランスは、木粉をディスクミルに投入した際に、僅かに負荷がかかる程度（本実験装置では負荷電力が 5A 以下）のクリアランスに設定した。したがって、粉碎機に投入する木粉（初期木粉）のサイズによって、ディスクミルのクリアランスは異なってくる。表-2. 1には、初期木粉のサイズ（粉碎初期サイズ）と本条件で設定したディスクミルのクリアランスの関係を示す。

表-2. 1 木粉粉碎初期サイズとディスクミルクリアランスの関係

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 粉碎初期サイズ(μ m) | 389 | 286 | 182 | 163 | 148 |
| ディスクミルクリアランス(μ m) | 500 | 450 | 400 | 350 | 300 |

図-2. 5には、表-2. 1に示す条件でディスクミル粉碎をした際の、木粉の粉碎前サイズ（粉碎初期サイズ）と粉碎後の木粉サイズ（粉碎サイズ）の関係を示す。ディスククリアランスの設定でほぼ負荷をかけていないので、初期サイズに対して、大きく微細化はされていない。

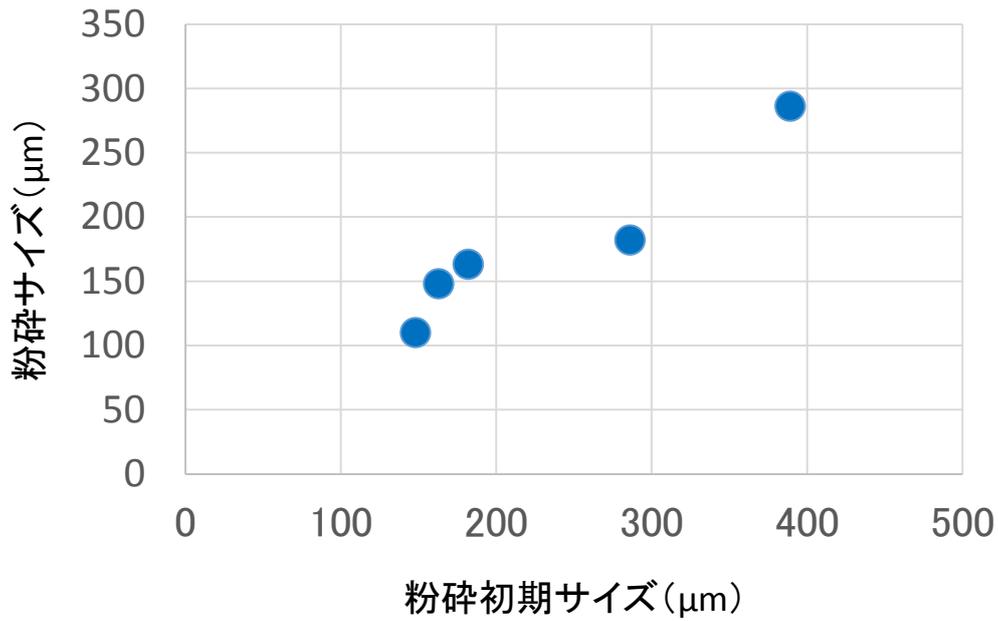


図-2.5 粉砕初期サイズと粉砕サイズの関係

ここで、本粉砕で最も重要なポイントは、粉砕時に **CNF** が同時に製造されるかである。図-2.6には、各木粉初期サイズをディスクミルにて粉砕した時の粒度分布を示す。

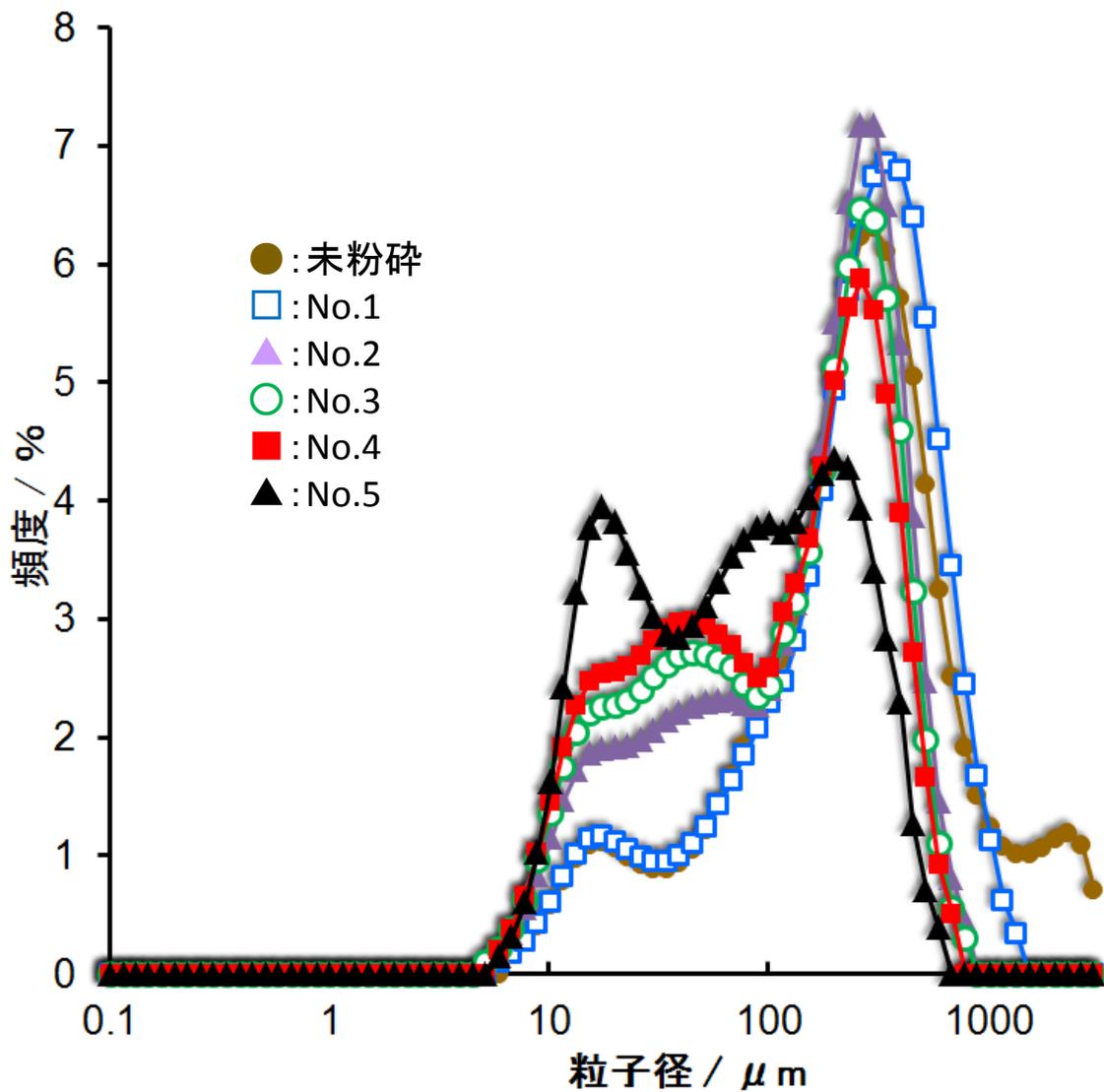


図-2. 6 各木粉初期サイズをディスクミルにて粉砕した時の粒度分布

初期木粉サイズが小さくなるほど、 10μ 程度のピークが増加している。ここで粒度分布を測定した装置は、最大長さを直径とした円として換算するため、径が $100\sim$ 数百 n のCNFが形成されている。これは、サイズの大きい木粉の粒度分布においても同じことが言える（図-2. 7には、粉砕後のSEM画像を示す）。

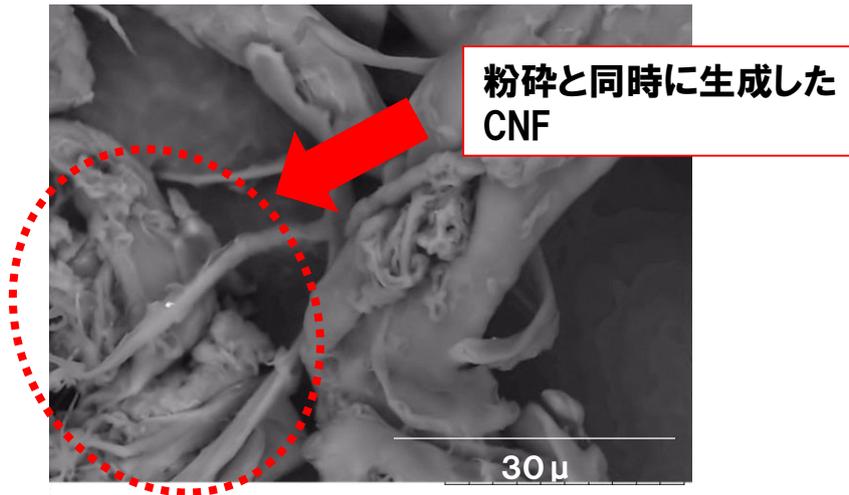


図-2. 7 粉砕後の木粉の SEM 画像

以上より、初期木粉サイズを 150μ 以下にすることで、木粉粉砕と同時に CNF も製造できる粉砕技術を確認した。

イ. 100t/月以上の CNF 添加 WPC 供給システムの構築

本年度は、100t/月以上の CNF 添加 WPC 供給量に対し、原材料である木粉の量産に関して検証した。この 100t/月以上の CNF 添加 WPC に対応できる木粉生産量は、25t/月以上となる（現状、木粉添加量を 25%と設定しているため）。前述したとおり、CNF 入り木粉を製造するためには、初期サイズを 150 μ 以下としなければならない。初めに、150 μ 以下の木粉の製造に関して検証した。まず、150 μ 以下の木粉を製造するための原料調査を実施した。木粉原料となるものは、原木、間伐材、チップ、おが粉等候補はたくさんある。ここで、使用する木粉は 150 μ 以下のため、大きなサイズの原料を出発物質として用いることはエネルギーロスも大きいし、原材料本来の価値を下げってしまう。したがって、おが粉のような、できる限り初期サイズの小さい原料が望ましい。一方、自動車用途においては、ある程度素性の安定した素材であることが求められる。そこで、本業務では、製材業から発生するおが粉、プレナー屑（カンナ屑）や切削粉をターゲットとした。現在、製材業から発生するおが粉は、燃料や家畜の敷き藁等付加価値の低い用途に用いられており、木粉化することは、エネルギーロス面だけではなく、経済性の観点からも有用である。図-2. 8 には、製材業から発生するおが粉を示す。



図-2. 8 製材から発生するおが粉

このおが粉より、150 μ 程度の木粉を得るためにいくつかの手法を試みた。もっともエネルギー負荷や生産コストがかからない手法は、このおが粉を直接分級して、150 μ の木粉を製造することである。この場合、必要とする設備は、ふるい（分級機）のみである。しかしながら、このおが粉より得られる 150 μ 程度の木粉収率は僅か 2%であった。そのため、25t/月以上木粉生産に対応するためには、原料のおが粉が 1000t/月以上必要となる。この規模のおが粉を発生する製造業は、国内では少ない。次に両極であるおが粉の全量粉碎の検証を実施した。全量粉碎では、粉碎設備の初期投資が膨大になり、コスト的な目標が達成できない。さらに、

粉じん爆発の危険性等安全面でのリスクも高い。そこで、設備投資面（100t/月木粉生産で設備投資 40 百万円以下にて実現できる設備）を考慮し、おが粉を粗砕し、粗砕したものを分級する手法を検証した。図-2. 9には、粗砕機のスクリーンメッシュと 150 μ 以下の木粉生産量の関係を示す。

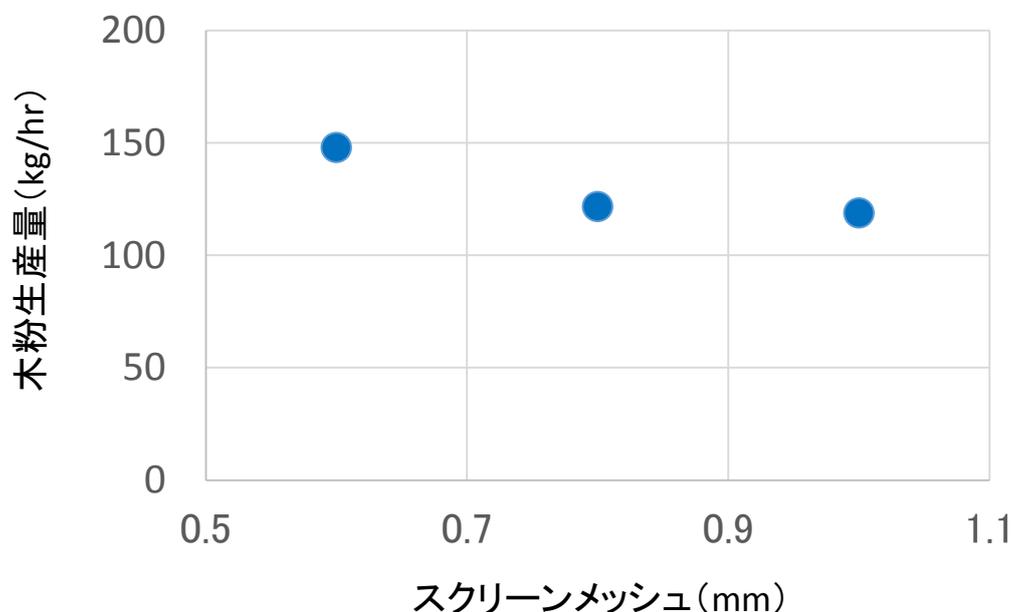


図-2. 9 粗砕機のスクリーンメッシュと木粉生産量の関係

目標とする生産能力 60 kg/hr 以上（25t/月÷稼働日 20 日÷稼働時間 21 時間）は、全てのスクリーンにおいて、達成している。この中で、スクリーンのメッシュが小さくなるほど、生産量が増加していることが確認された。図-2.10には、粗砕機への原料おが粉投入量と生産量の関係を示す。おが粉投入量が多くなると生産量も高くなっており、本生産量であれば、80t/月以上の生産能力も実現できる。図-2. 11には、本手法で生産された 150 μ 程度の木粉の SEM 画像を示す。繊維方向に粉碎されており、さらに木粉自体に大きな欠損や、微留分の付着も求められないことから、原料として適している木粉であると判断できる。

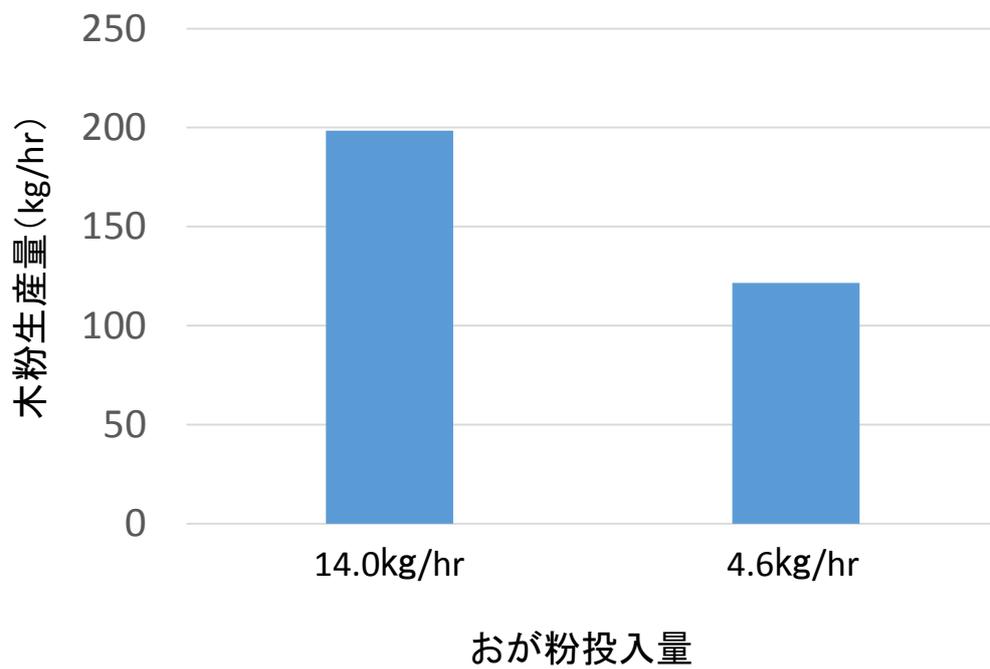


図-2.10 粗砕機への原料おが粉投入量と生産量の関係

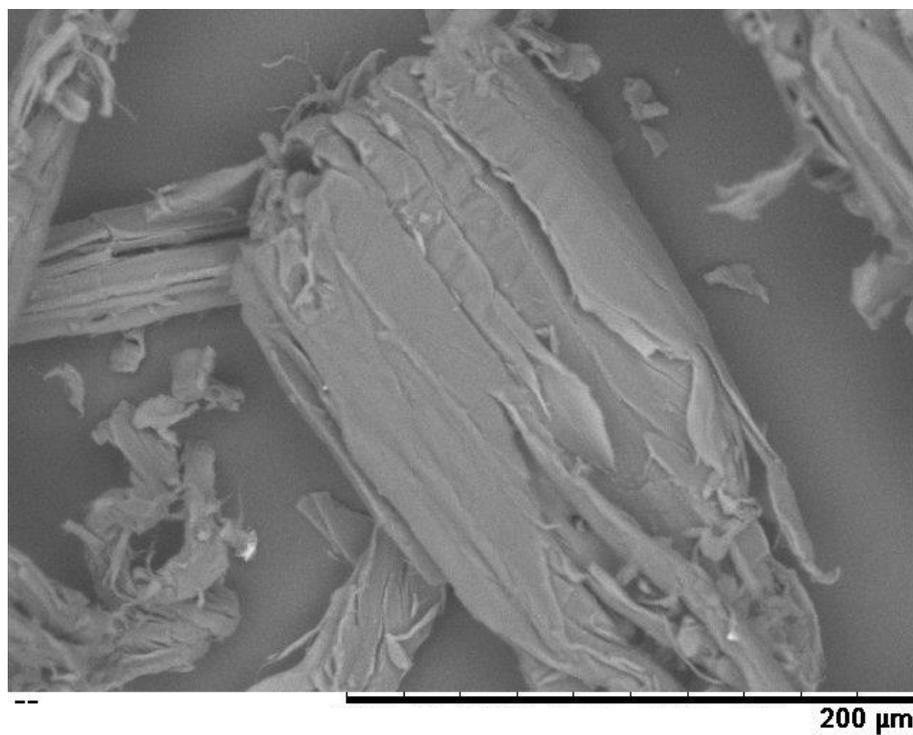


図-2.11 本手法で生産された木粉のSEM画像

しかしながら、スクリーンメッシュを小さくする、おが粉の投入量を増加させることは、設備に対して負荷を与える運転のため、設備の耐久性評価を実施する必要がある。以上、CNF 入り木粉を製造するおが粉の生産能力は十分確保できると判断する。

次にディスクミルによる CNF 入り木粉製造の検証であるが、前項で示した通り、ほぼ抵抗なしで処理している。そのため、供給量が 60 kg/hr (25t/月) 以上の能力が必要となる。今回評価に用いたディスクミルはディスク径が 10inch のタイプで、このサイズのディスクミルは、100 kg/hr 以上の供給能力を有している。したがって、CNF 入り木粉を製造するためには、10inch 以上のディスクサイズを有した設備で対応できることが確認された。

つづいて、本手法における原価計算を検討した(表-2.2)。おが粉の調達価格は、現状敷き藁で販売している価格の平均値であり、発生する製材メーカーにとっても損はない。また、電力、副資材に関しては、現状類似設備で生産しているトクラスの実績値を使用している。25t/月生産で、目標原価である 100 円/kg以下を達成した。さらに、前述したとおり、投資 40 百万円での設備においては、最大で 80t/月の生産が可能であり、MAX 生産した場合は、原価が 43 円/kgとなる。この原価は、本業務でターゲットとしているタルクのより安価であり、コスト競争力も十分高い。

表-2. 2 本手法における原価計算

<25t/月生産の場合>

| 項目 | | 原価 | 備考 |
|-----|------|---------|-------------------------|
| 変動費 | おが粉 | 10 円/kg | 敷き藁への売却価格から |
| | 副資材 | 1 円/kg | トクラス実績値より |
| | 電力費 | 4 円/kg | トクラス実績値より |
| | 計 | 15 円/kg | |
| 固定費 | 人件費 | 50 円/kg | 500万円/人、3直1人生産、生産量25t/月 |
| | 設備償却 | 33 円/kg | 40百万円、定率 |
| | 計 | 83 円/kg | |
| 計 | | 98 円/kg | |

<80t/月生産の場合>

| 項目 | | 原価 | 備考 |
|-----|------|---------|-------------------------|
| 変動費 | おが粉 | 10 円/kg | 敷き藁への売却価格から |
| | 副資材 | 1 円/kg | トクラス実績値より |
| | 電力費 | 4 円/kg | トクラス実績値より |
| | 計 | 15 円/kg | |
| 固定費 | 人件費 | 17 円/kg | 500万円/人、3直1人生産、生産量80t/月 |
| | 設備償却 | 11 円/kg | 40百万円、定率 |
| | 計 | 28 円/kg | |
| 計 | | 43 円/kg | |

以上、生産性、経済性両面の観点で、CNF 入り木粉の検証を実施し、本年度目標である 100t/月以上の CNF 添加 WPC に対応できる CNF 入り木粉の生産、原価 100 円/kg以下で供給できる生産システム双方を達成した。

CNF 入り木粉原料であるおが粉は、かさ密度が低く運搬をするには適していない。したがって、おが粉が発生する場所で CNF 入り木粉まで製造することが好ましい。本手法において、設備は、粗砕機、分級機及びディスクミル等汎用であり、経済性面でも、おが粉が発生する製材メーカーにとっては、採算性の高い事業である。しかしながら、目視では評価できない CNF を製造するためには、高い品質管理レベルが要求される。さらに、CNF 入り木粉は、 μ サイズ、n サイズ双方を同時に評価しなければならず、これに対応する品質評価手法を提案する必

要がある。本業務では、粒度分布装置や SEM 等高等技術を要する（あるいは高額な）設備で評価をしているが、既存製材メーカーにおいては、これら装置は有しておらず、それ故、評価できる人材もいない。そこで、安価な装置で簡易に評価できる手法を検証した。木粉も CNF も真密度は 1g/cc 以上あり、水に沈む。水への沈降は、重量足であり、大きい木粉は早く沈降し、小さい木粉は沈降する時間が遅くなる。本業では、この特性を生かした CNF 入り木粉の評価手法を確立した。図-2. 12には、このイメージ図を示す。

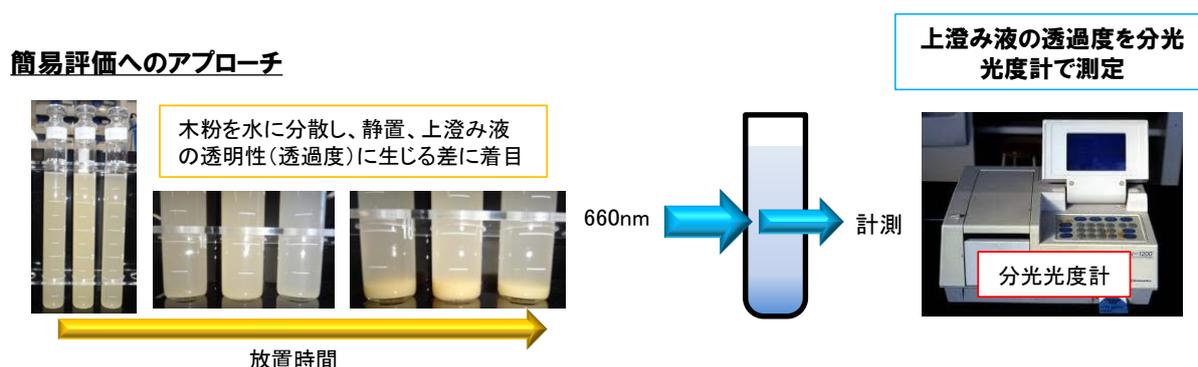


図-2. 12 CNF入り木粉の簡易評価手法

この簡易評価手法は、CNF 入り木粉を水に入れ攪拌、その後、静置させた時の光の透過性を継時的に測定する手法である。CNF 混入量が多ければ、CNF がなかなか沈降しないため、透過性が低くなる。図-2. 13には、本手法で作成した CNF 入り木粉を測定した結果を示す。平均木粉サイズから見るとほぼ変わらないが、粒度分布から CNF 量が異なる木粉で、CNF 量の違いが透過度により顕著な差が認められる。したがって、初期の精密分析は必要であるが、この手法を導入すれば、生産管理は製材メーカーにおける製造現場の担当者で十分管理が可能となる。

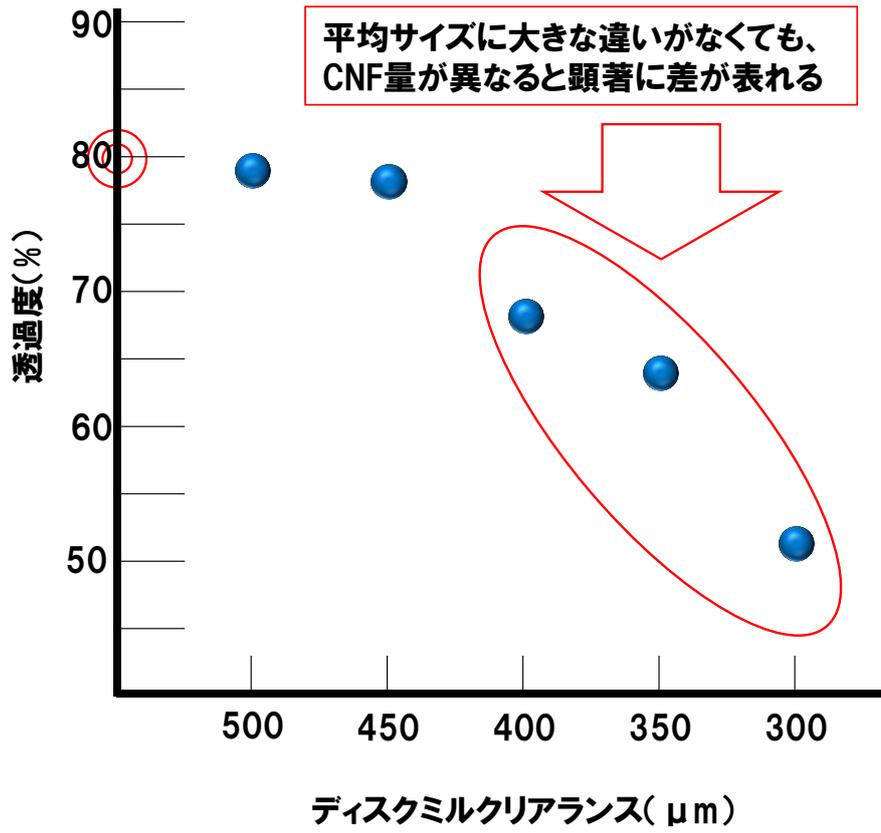


図-2. 13 CNF入り木粉の透過度評価結果

②CNF 添加 WPC の設計・製造技術の確立

ア. コンパウンド量産化手法の確立

WPC コンパウンドのラボラインにて、CNF 有無の木粉によりコンパウンド性を比較し、コンパウンドの量産化手法を検証した。尚、ここでの評価は、木粉の特性をより顕著に発現させるため、木粉充填量を成形できる限界値である 55%にて実施し、使用している樹脂はポリプロピレンである。図-2. 14には、CNF 有無の木粉を用いたコンパウンド時の経時によるトルク変化を示す。CNF の有無にかかわらず、経時に伴いトルクは減少している。これは、木粉の空隙が混練により徐々に減少していることを表す。混練初期にて、CNF 有が、CNF 無に比べ若干低いトルクを示している。これは、CNF により、充填性が高くなっていることを示している。また、混練後半、このトルク差がさらに顕著となっている。木粉自体のかさ密度からは、CNF 有はトルクが高くなることが懸念されたが、逆に充填性が良くなることで、混練トルクが低い結果となっている。ラボ装置なので、連続データは取っていないが、製造エネルギーの削減にも寄与する可能性を示唆していると言える。

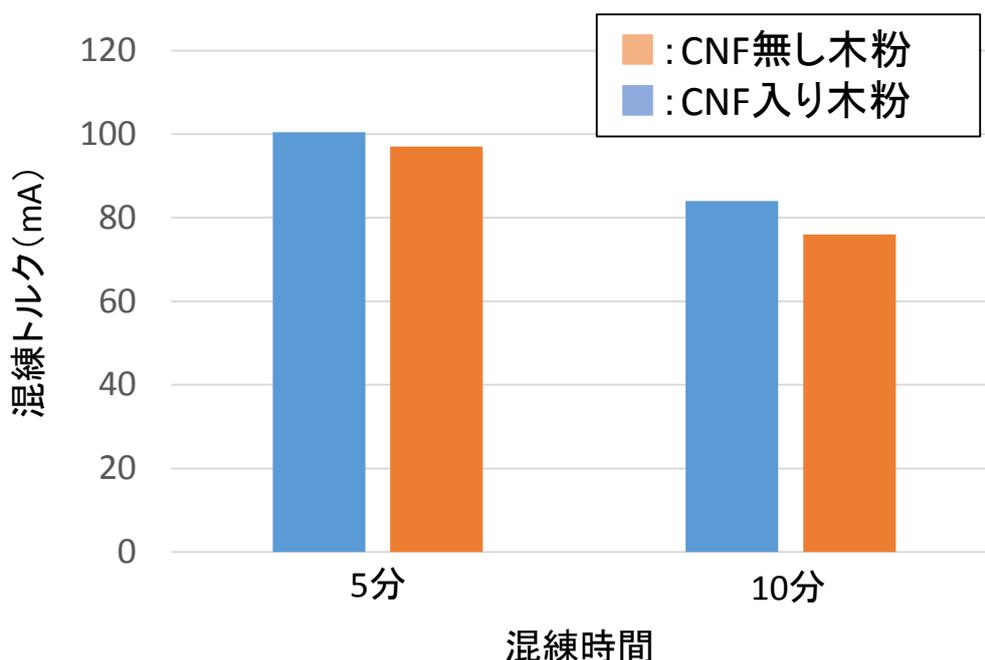


図-2. 14 CNF 有無の木粉を用いたコンパウンド時の経時によるトルク変化

一方、混練時の温度は、初期で CNF 有無ともが 222℃、後半でも双方 228℃となっており、CNF によりせん断発熱等は認められなかった。以上の結果より、汎用のウッドプラスチックコンパウンド量産ラインを用いることで量産は可能であ

ると判断できる。

CNF入り木粉を用いたコンパウンドを用いて、共同研究者であるイオインダストリーにて実際に製造で利用している射出成形装置（350t 成形機）及び金型（インパネダッシュボード部分）を利用して成形評価を実施した。成形性に関しては、市販のタルク充填プラスチックとの比較を実施した。図-2. 15には、実際の製造ラインにて試作した。

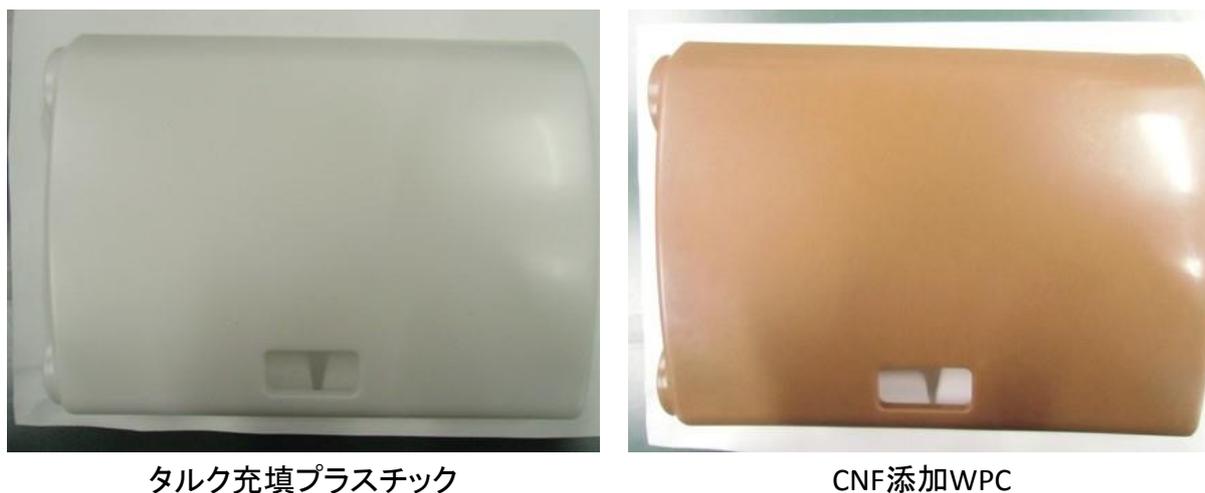


図-2. 15 実際の製造ラインにて試作した射出成形体

成形性においては、市販のタルク充填プラスチックと同様に成形が可能であった。但し、木粉は200℃を超えると変質するため、CNF添加WPCの成形温度はタルク充填プラスチックより30℃程度低い温度で成形した。成形温度が低い点は、熱エネルギーの削減につながり、成形レベルでも環境に良い素材であると言える。ここで、成形温度を低くすることにより、流動性の低下が心配されたが、流動性も全く問題がなかった。これは、CNFが有するチキソトロピー性能が発現したためと考えられる。一方、これは、CNF効果ではなく木粉の効果であると推察されるが、成形収縮はタルクに比べ小さく（部位により収縮率の差は異なるが、平均で3%程度）、さらなる部材使用量の削減も期待できる。但し、成形収縮減少への対応は、次年度以降のテーマとなるが、形状によっては、この低い収縮率に対応した金型設計が必要となる可能性もある。

以上、コンパウンドの設計・製造においては、今年度の目標である量産化手法の確立と汎用設備での成形が実現した。

イ. コンパウンドの性能評価

図-2. 16には、CNF 有無におけるコンパウンドの粘度を示す。CNF が介在することで粘度が低下（流動性が向上）している。これは、CNF が有するチキソトロピー性の効果が発現したためと推察される。以上より、CNF 添加 WPC コンパウンドは、予想通り、流動性向上に効果があると言える。

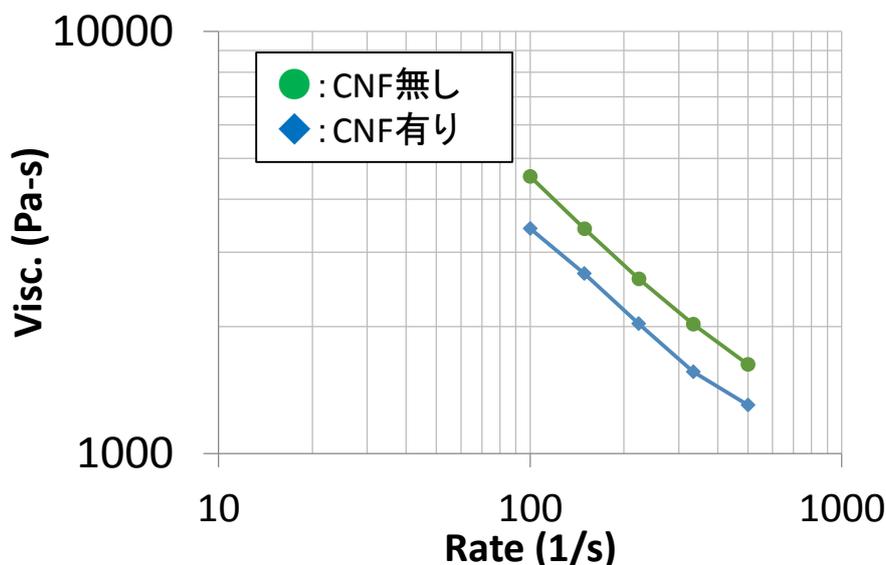


図-2. 16 CNF 有無におけるコンパウンドの粘度

図-2. 17には、コンパウンドを希釈する樹脂と流動性（MFR）の関係を示す。ここで、使用した PP の MI は、流動性を示しており、MI が高いほど、流動性は高い。ここで、用いた PP は、どちらも一般的な射出成形グレードである。PP の MI に関係なく木粉添加量が高くなると MFR は低くなっている。一方、充填量が高くなるほど、PP の MI による差は減少し、45%を超えるとその差はほとんどなくなっている。本業務での流動性目標は MFR=5g/10min 以上であり、MI10 の PP では、充填率 35%まで、MI30 の PP では、充填量 45%まで許容できる。射出成形は、成形機のパワー、金型の形状、ゲートの位置等で最適となる MFR は異なるため、成形条件に合わせて PP の MI を選定することが望ましい（この情報を、各テーマにフィードバックした）。

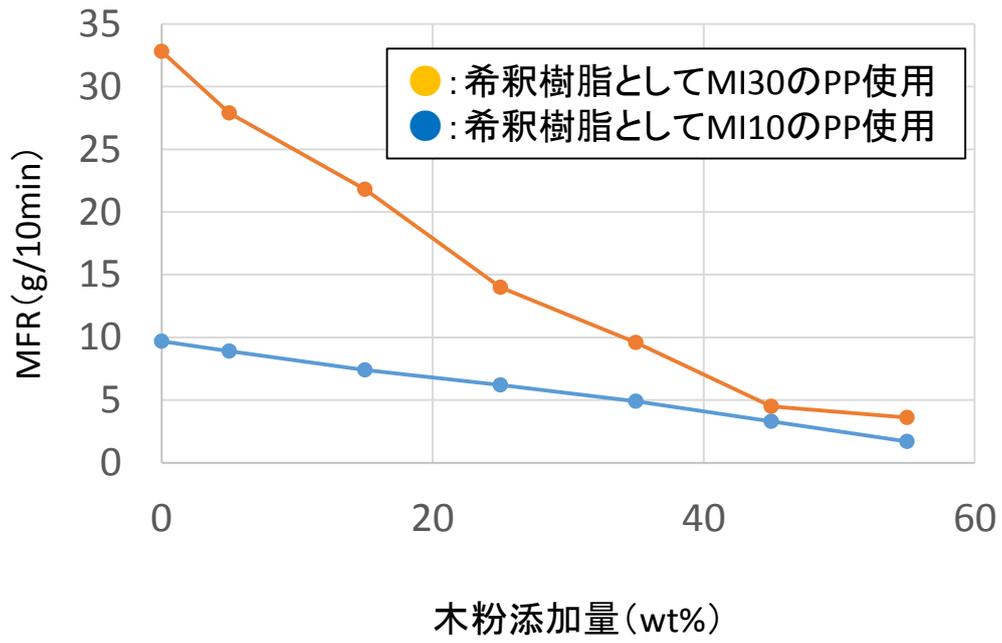


図-2. 17 コンパウンドを希釈する樹脂と流動性 (MFR) の関係

(2) CNF 添加 WPC 製品の設計・製造

①既存製品より 15%以上軽量化が図れる自動車内装部品の確立

ア. 自動車内装部品の設計

図-2. 18には、代替となるタルク 25%充填プラスチックと CNF 添加 WPC の密度を示す。この密度から、単純に同一形状の成形体を作成したとして、重量として 8.3%の軽量化が実現できる。

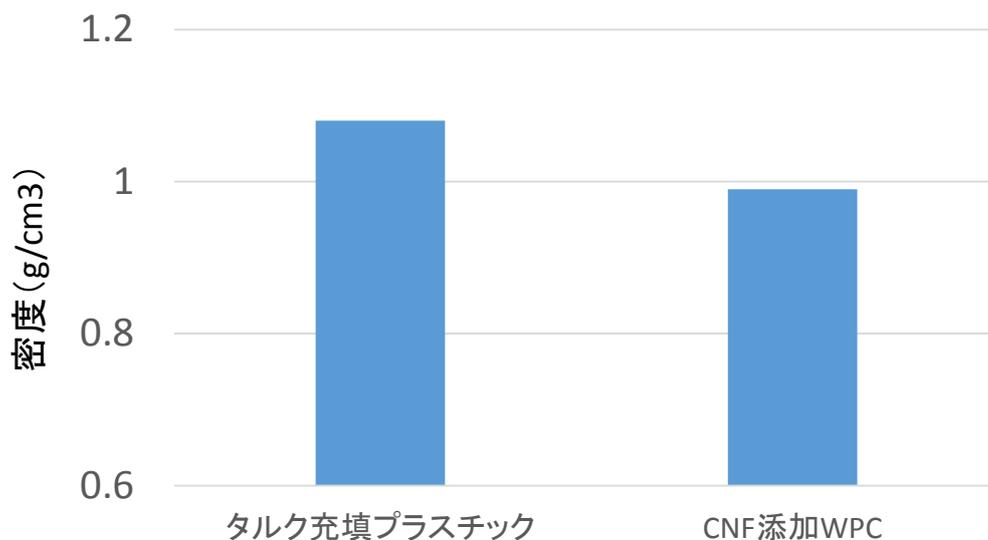


図-2. 18 タルク 25%充填プラスチックと CNF 添加 WPC の密度

また、図-2. 19には、同一フィラー充填量での引張強度を示す。強度としては、CNF 添加 WPC のほうが高い値を示しており、約 24%の強度向上が認められた。

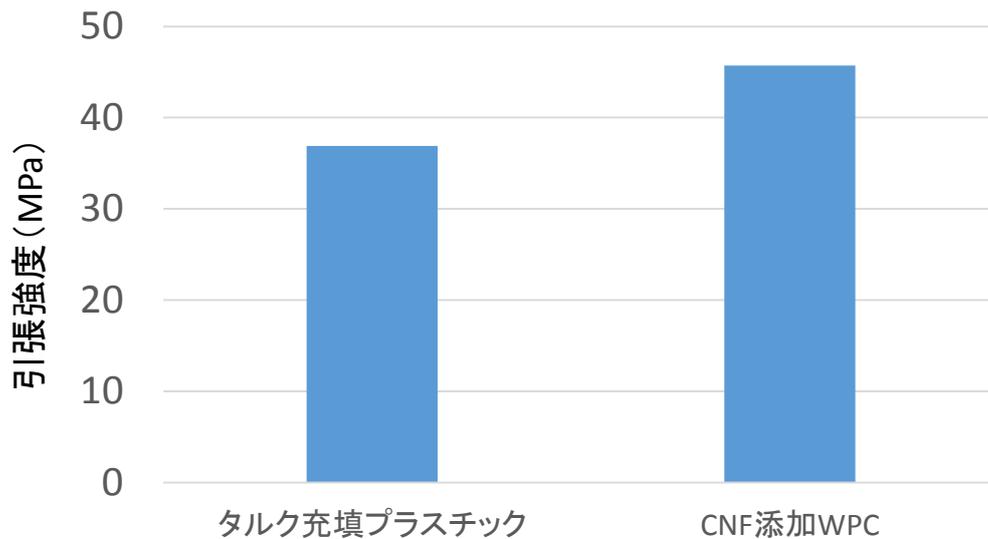


図-2. 19 同一フィラー充填量での引張強度

以上より、CNF 添加 WPC は既存で使用されているタルク充填プラスチックより、軽量でかつ高強度であることがわかる。ここで、タルク充填プラスチックはすでに自動車で使用されており、必要とされるスペックは満たしている。そこで、CNF 添加 WPC は必要スペックに対しては、オーバースペックのため、部材の薄肉化が可能となる。タルク充填プラスチックと同等の強度でよければ、強度データからシミュレーションすると厚みは 20%薄くできる。そこで、元来素材自体の密度差があるため、軽量化効果は 26%となる。よって、シミュレーション段階ではあるが、本業務成果は、目標 15%軽量化に対し、大幅な軽量化が実現できている。

イ. CNF 添加 WPC の成形体評価

図-2. 20には、CNF 有無による曲げ強度の比較を示す。同様に図-2. 21には曲げ弾性率の比較を示す。CNF が存在することで、曲げ強度は若干増加するが、弾性率が大きく増加していることがわかる。これは、CNF 自体が PP の補強となっているかあるいは、PP の結晶性を向上させた結果であると考えられる。

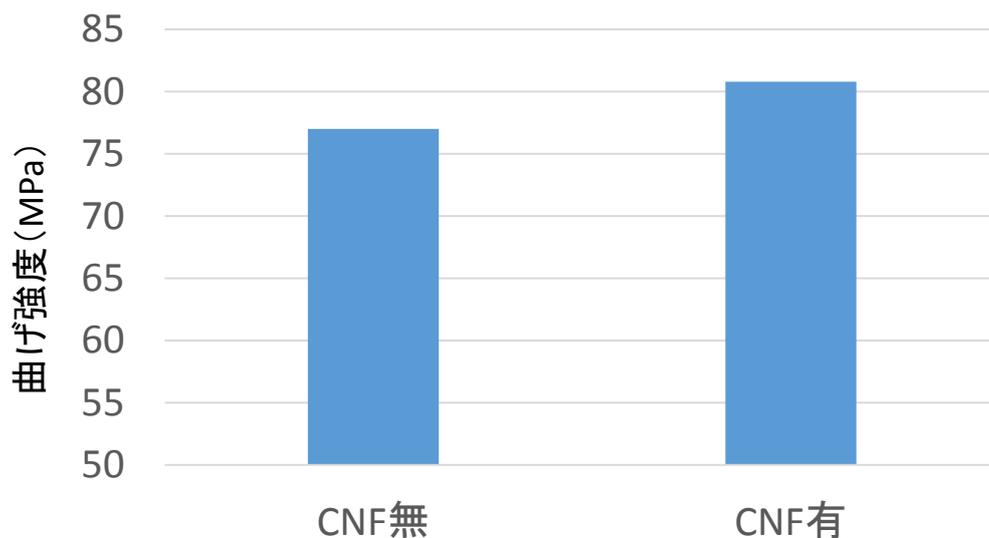


図-2. 20 CNF 有無による曲げ強度の比較

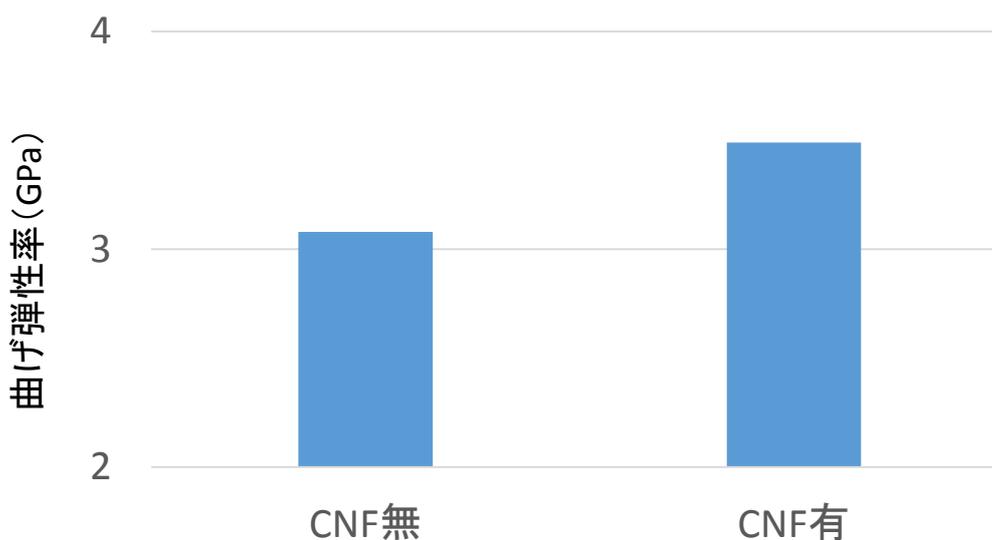


図-2. 21 CNF 有無による曲げ弾性率の比較

これら以外に、衝撃試験等、他の機械的特性評価も実施しているが、CNF 有無による差は、認められなかった。したがって、各テーマに対する改善のフィードバックはないが、元来 WPC が有している衝撃強度の改善は必要となる。

ウ. コンパウンドの課題点抽出及びラボレベルでの改良

前項でも示した通り、WPCにおいては、衝撃強度が課題となっている。そこで、ラボベースで、衝撃強度の改善を検証した。ここでは、CNF とゴム成分の相性が良いこと、ゴム成分は衝撃強度改善に効果的に働く場合がある知見から、ゴム成分による改善を実施した。一方、当初課題になり得ると予想した流動性に関しては、前述したとおり、CNF による改善が認められているので、ここでは、衝撃強度の改善のみを検証した。

図-2. 22には、ゴム成分添加による衝撃強度の改善結果を示す。ゴム成分の添加により、大幅に衝撃強度が改善している。用いたゴム成分は、EPDM や SEBS 等を編成したものである。この効果は、単にゴム成分のみの効果であるか、CNF 添加による相乗効果であるのかは、確認中であるが、ゴム成分は融点が高いため、CNF の分散性向上には寄与していることは確かである。

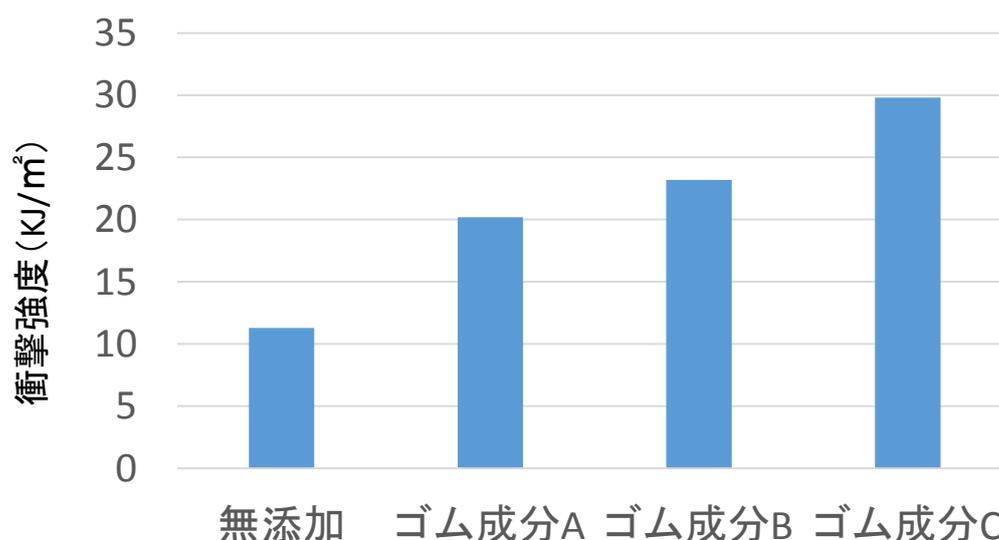


図-2. 22 ゴム成分添加による衝撃強度の改善

以上より、現時点で効果の考察は不十分であるものの、衝撃強度に関しては、目標の20%以上の向上を実現した。

①簡易加工（ex.塗装）のみで、高木質意匠が付与できる質感の提供

ア．加工評価用成形体の作成

ここでは、「(1) CNF 添加 WPC の設計・製造／②CNF 添加 WPC の設計・製造技術の確立／ア．コンパウンド量産化手法の確立」にて、タルク充填プラスチックと CNF 添加 WPC コンパウンドにて実生産機で成形した試験体を加工用成形体とした（図－2．15）。

イ. 加工性（塗装性）の評価

前項で成形した成形体に、木工用のウレタン塗料を用い加工性の評価を実施した。図-2. 23に塗装したサンプルを示す。本年度の目標では、高意匠の木質感付与は、含まれていないが、本木を利用したウッドパネルに近い高意匠の仕上がりとなっている。



図-2. 23 塗装サンプル

タルク充填プラスチックにも同様の塗装をし、密着性評価（基盤目剥離試験）を実施した。タルク充填プラスチックは、塗膜残存率0%であったのに対し、CNF添加WPCは、95%以上の残存率を示した。一般的にPP素材への塗装の場合、PPは極性が低く、塗料の密着性が悪いため、塗装表面へコロナ処理、火炎処理あるいは溶剤処理を実施し、PP表面を改質して塗装する必要がある。本業務成果は、この工程が簡略できる点から、コスト面だけでなく、生産における環境負荷面も低くなる。

③エクステリア用 WPC への再利用できるスペックの提示

本業務成果である CNF 添加 WPC は、一般的にデッキ材等で使用されている WPC より高い性能を有している。一方、プラスチックはリサイクルすることで、熱劣化等のストレスを受け、機能が低下する。WPC も同じであり、使用後の CNF 添加 WPC をリサイクルした場合も機能低下が予想される。しかしながら、CNF 添加 WPC は、通常の WPC に比べ高機能であるため、リサイクルによるストレスを受けても、汎用用途なら展開できる可能性がある。そこで、ここでは、CNF 添加 WPC のリサイクル性を評価した。

◆成形性

図-2. 24には、リサイクル回数と混練時間におけるトルクの変化を示す。CNF 添加 WPC の使用は経時であるため、ここではリサイクル回数を経時とみなして評価している（1回目は、バージン品でのブランクデータである）。実際には、自動車社内用途であり、使用における劣化は、ほぼないと考えられるため、この評価結果は、安全側にあるとみてよい。全てのリサイクル回数において、経時によるトルク低下が認められている。また、リサイクルをすることにより、初期トルクは減少している。これは、ベースプラスチックであるポリプロピレンが低分子化したためである。しかしながら、リサイクルを繰り返しても変化はない。また、混練時間の経時により、トルクは1回目とほぼ変わりはない。このことより、成形時の立上りトルクを留意（設定温度を下げる等）すれば、本業務の廃材をリサイクルすることは可能であると判断できる。

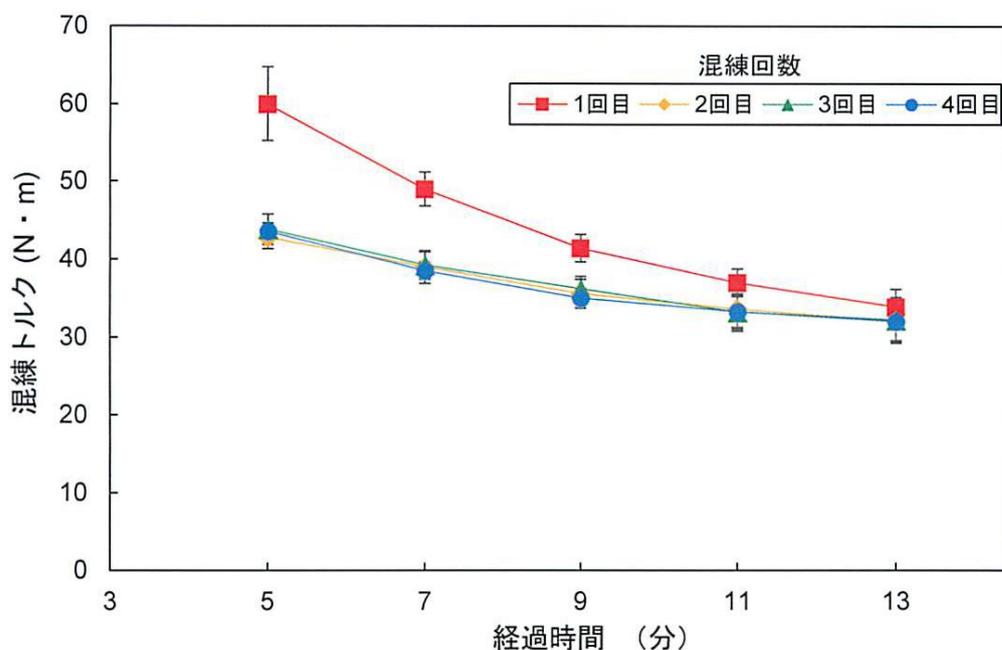


図-2. 24 リサイクル回数と混練時間におけるトルクの変化

◆流動性

図-2. 25には、木粉充填率別のリサイクル回数（図中では混練回数と標記）と流動性（MFR）の関係を示す。混練回数が増えるほど流動性は高くなっている。これは、混練時でも認められたポリプロピレン樹脂の低分子化によるものと考えられる。しかしながら、CNF入り木粉が入ることで、流動性上昇率は減少しており、リサイクルによる流動性に関しても大きな影響はないと判断する。

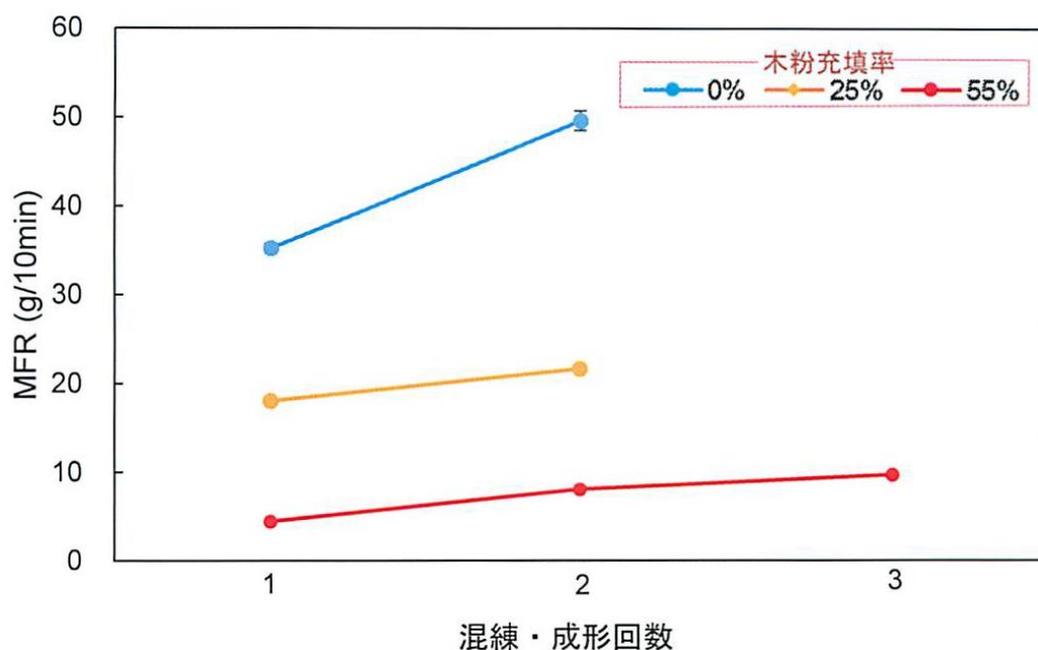


図-2. 25 木粉充填率別のリサイクル回数と流動性 (MFR) の関係

図-2. 26には、リサイクル回数（図中では混練回数と標記）とせん断による粘度変化を示す。全てのリサイクル回数で、せん断速度が高くなると流動性は低くなっている。これは、アスペクト比のある繊維が介在することで、チキソ性が発現しているためである。混練回数が増加してもこのチキソ性が変化していない点から、繊維自体の劣化はないと判断できる。

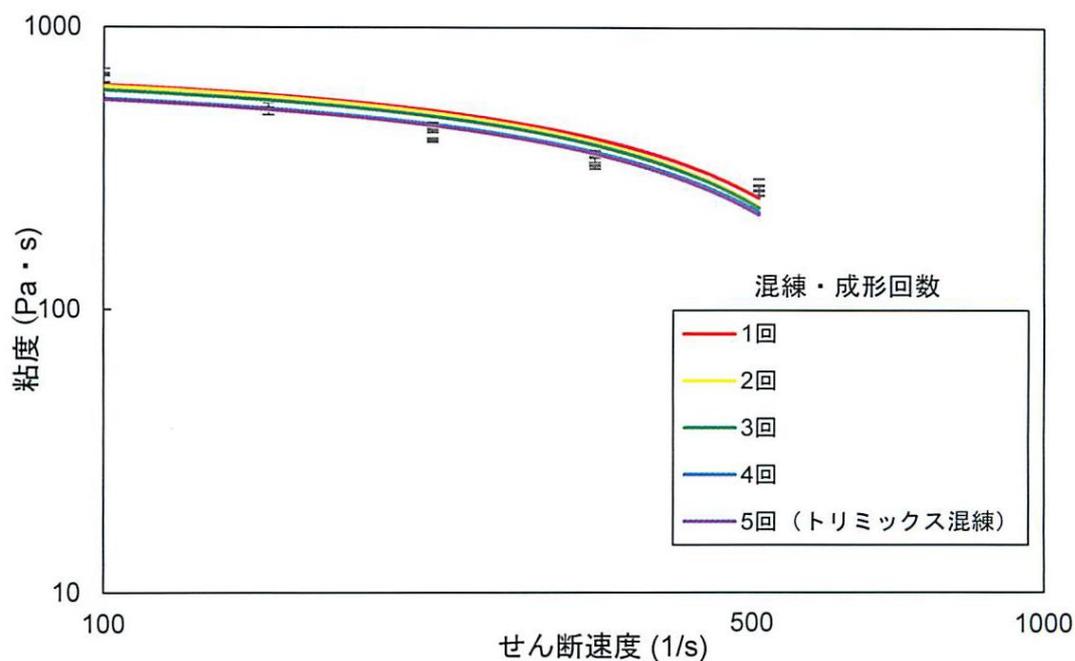


図-2. 26 リサイクル回数とせん断による粘度変化

◆機械的特性

図-2. 27には、木粉充填率別のリサイクル回数（図中では混練回数と標記）と衝撃強度の関係を示す。木粉を添加していない場合、リサイクルにより強度低下するが、木粉が入ることで、性能低下は大幅に改善されている。これは、CNF入り木粉の補強効果が維持されているためであると判断できる。

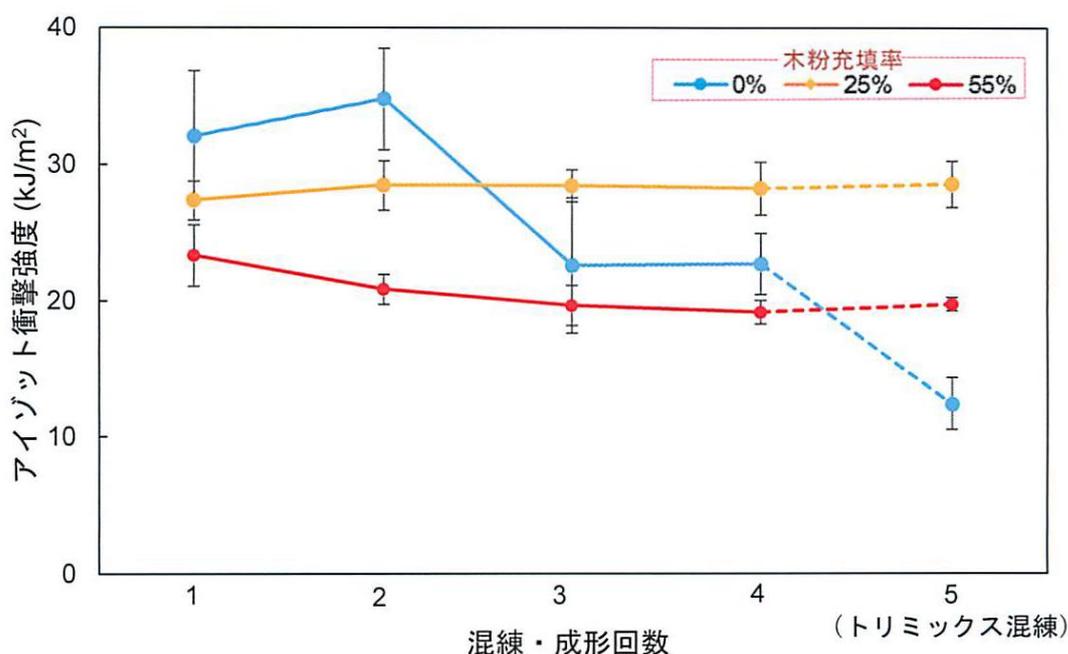


図-2. 27 木粉充填率別のリサイクル回数と衝撃強度の関係

図-2. 28には、木粉充填率別のリサイクル回数（図中では混練回数と標記）と曲げ強度の関係を示す。曲げ強度の低下も衝撃同様大きくない。曲げ強度は、デッキ材用 WPC には重要な因子であり、JIS 等でも基準値が設けられている。CNF 添加 WPC は、リサイクルにより、性能低下はしているものの、基準の 25MPa（各デッキ材メーカー製品ベースでは 35MPa）よりは、大きく上回っており、デッキ材用途においては、リサイクル品は、アップグレードの素材であると言える。

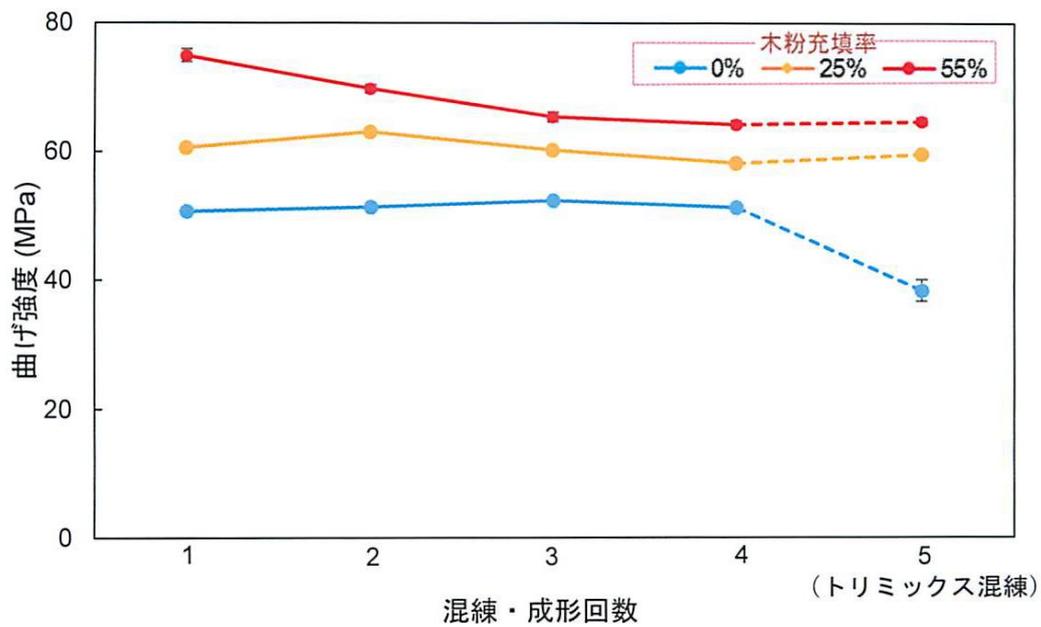


図-2. 28 木粉充填率別のリサイクル回数と曲げ強度の関係

図-2. 29には、木粉充填率別のリサイクル回数（図中では混練回数と標記）と弾性率の関係を示す。考察は曲げ強度同様であるので、ここでは割愛する。が、弾性率変化がないことは、リサイクルにより木粉とポリプロピレン樹脂の界面相容性も低下していないことが推察される。

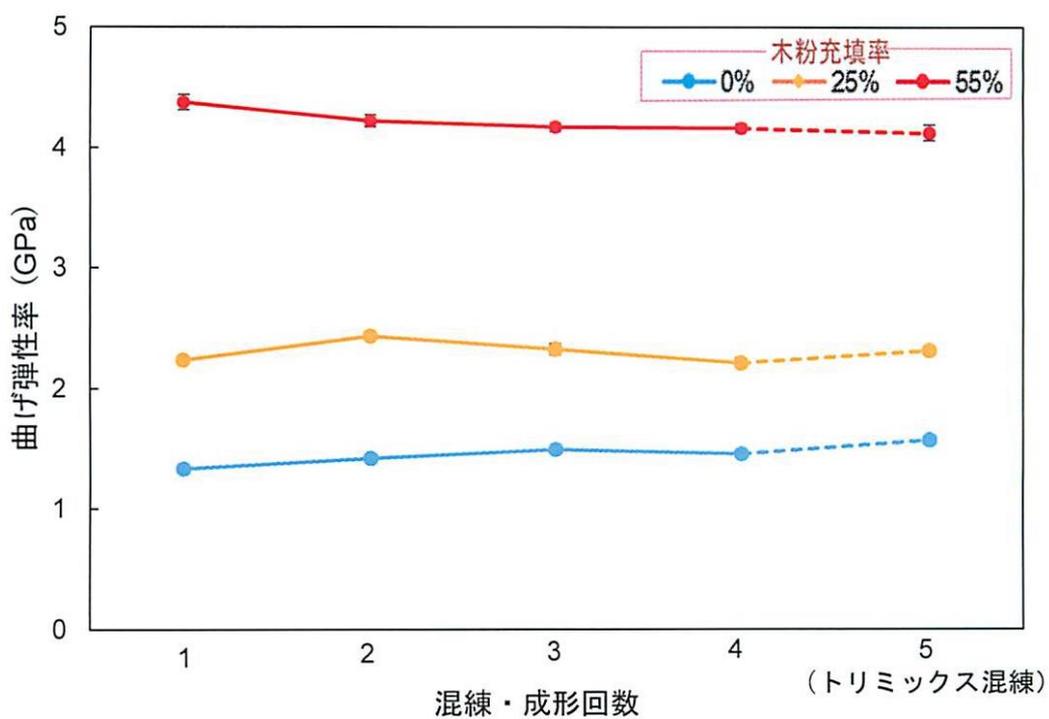


図-2. 29 木粉充填率別のリサイクル回数と弾性率の関係

図-2. 30には、木粉充填率別のリサイクル回数（図中では混練回数と標記）と引張強度の関係を示す。引張強度も大きな低下が認められていない。これは、リサイクルにより木粉とポリプロピレン樹脂の界面相容性も低下していないことが推察される。

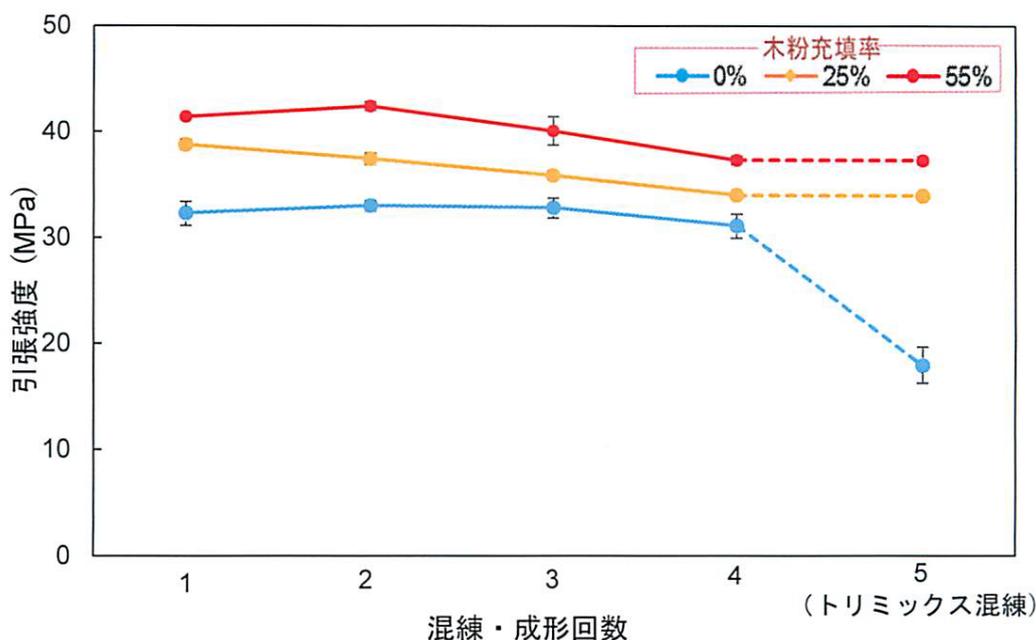


図-2. 30 木粉充填率別のリサイクル回数と引張強度の関係

今回は、ラボベースの評価であるものの、自動車内装材に利用し、使用した CNF 添加 WPC は、デッキ材用 WPC においてアップグレードの商品として提案できる。デッキ材のペレットの単価が 120 円～150 円/kg であることから、CNF 添加 WPC 廃材は、デッキ材 WPC においては、高付加価値素材となる。また、自動車用途は回収システムも確立しており、リサイクルの促進は大きく期待できる。

一方、自動車用途は CNF 入り木充填量が 25% 程度であり、デッキ材は木粉充填量が 50% 以上であるため、木粉等の後添加が必要となる。一般的には、コンパウンドの段階へ戻すことで、配合調整が可能となるが、本業務成果から生じる廃棄物は、分散性が高いため、押出成形時にダイレクト混合も可能である。ダイレクト混合した場合、既存の木粉充填量 50% 以上のデッキ材用 WPC コンパウンドとの木粉バランスが悪くなる。したがって、デッキ材用 WPC 分野でもリサイクル材使用に対応する木粉高充填側にシフトしたコンパウンド配合が必要となる。

(3) CNF 活用製品の性能評価

①コンパウンドの性能評価

ここでは、当初、オレフィンワックスや金属石鹸等の滑剤添加による流動性改善を予定していた。しかしながら、図-2. 17に示した通り、本業務成果であるコンパウンドは、CNF 効果により既に高い流動性を有しており、希釈樹脂の MI 調整だけで十分大型成形に対応できる流動性が可能となる。したがって、滑剤等の別途添加は経済性においても得策とは言えず、ここでは、希釈樹脂の MI 調整により対応できると結論する。

②成形体の性能評価

自動車用途の場合、長期的に加わる振動による劣化も懸念される。この長期評価に関しては一般的に疲労試験が用いられる。疲労によりもっともダメージを受けるのが、フィラー表面と樹脂の界面となる。本業務の場合、親水性の木粉と疎水性の樹脂の組合せであるため、特に界面の評価は重要となる。一方、これまでの結果から、短期強度が向上しているため、本業務成果の CNF 添加 WPC は、ある程度の界面強度は有していると判断される。レシピもほぼ固定されているため、製造条件における界面への影響は混練条件に絞られる。そこで、混練状態による界面への影響を評価した。

図-2. 3 1には、混練状態の異なる成形体の引張試験結果を示す。混練時間が長いほうが高い強度を示している。

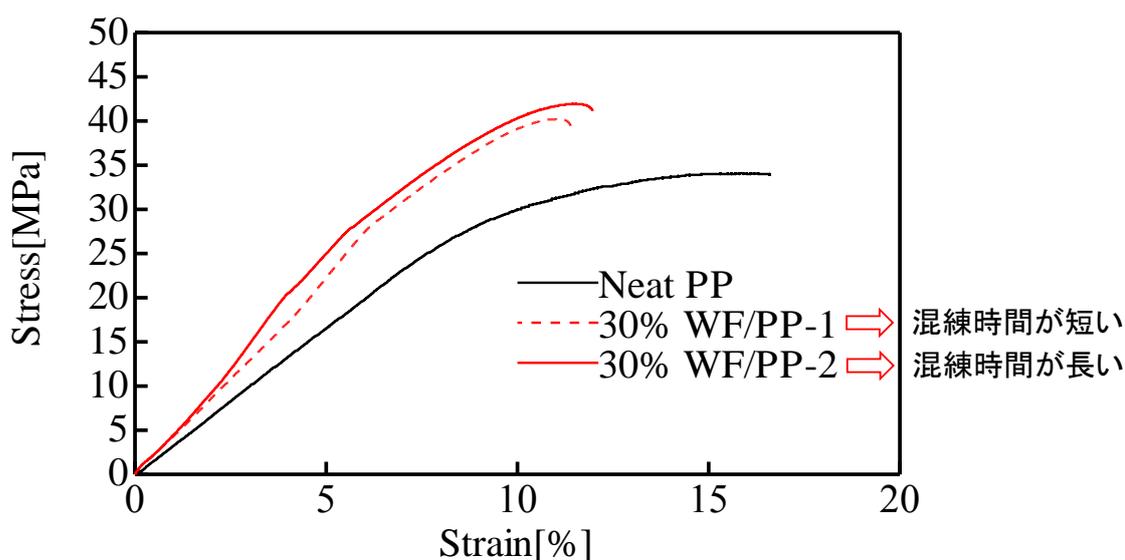


図-2. 3 1 混練状態の異なる成形体の引張試験結果

図-2. 3 2には、混練状態の異なる成形体の疲労特性を示す。混練時間が長い成形体でサイクル数が伸びており、さらに混練時間が長くなると、繰返しサイクルが 10000 回までは、PP よりも高い疲労特性を示している。したがって、信頼性面においては、十分な混練をすることが重要であると判断し、コンパウンドテーマへフィードバックした。

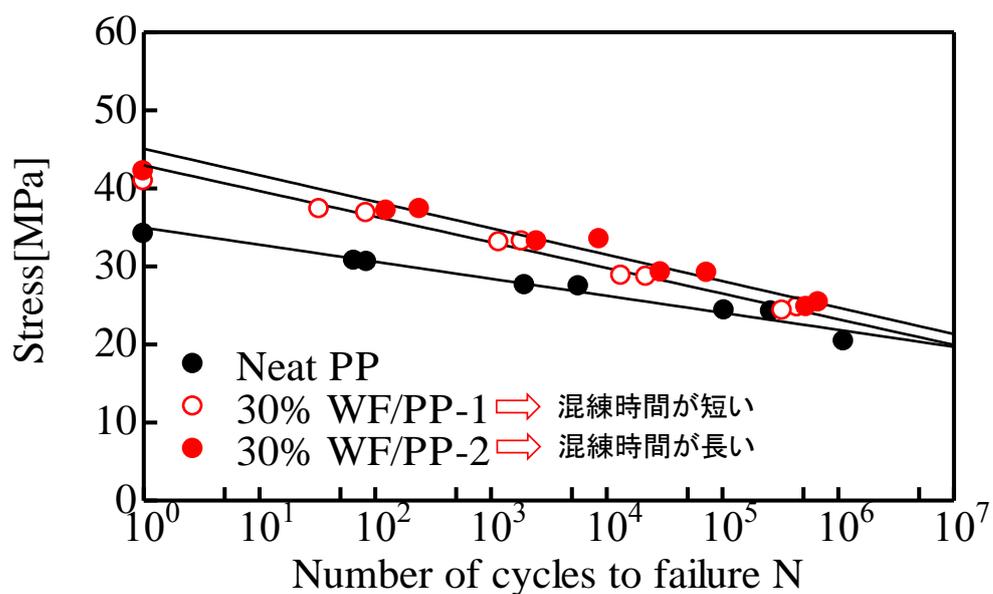


図-2. 3.2 混練状態の異なる成形体の疲労特性

図-2. 3.3には、疲労試験で破断した、破断起点のマイクロスコープ画像を示す。ここで、注目される点は、樹脂部分が伸びて破壊に至っている点である。即ち、本業務成果は、木粉と樹脂面で高い相容性を有していることが示唆される。この観察結果を踏まえ、図-2. 3.4には、疲労破壊に至るモデル図を示す。

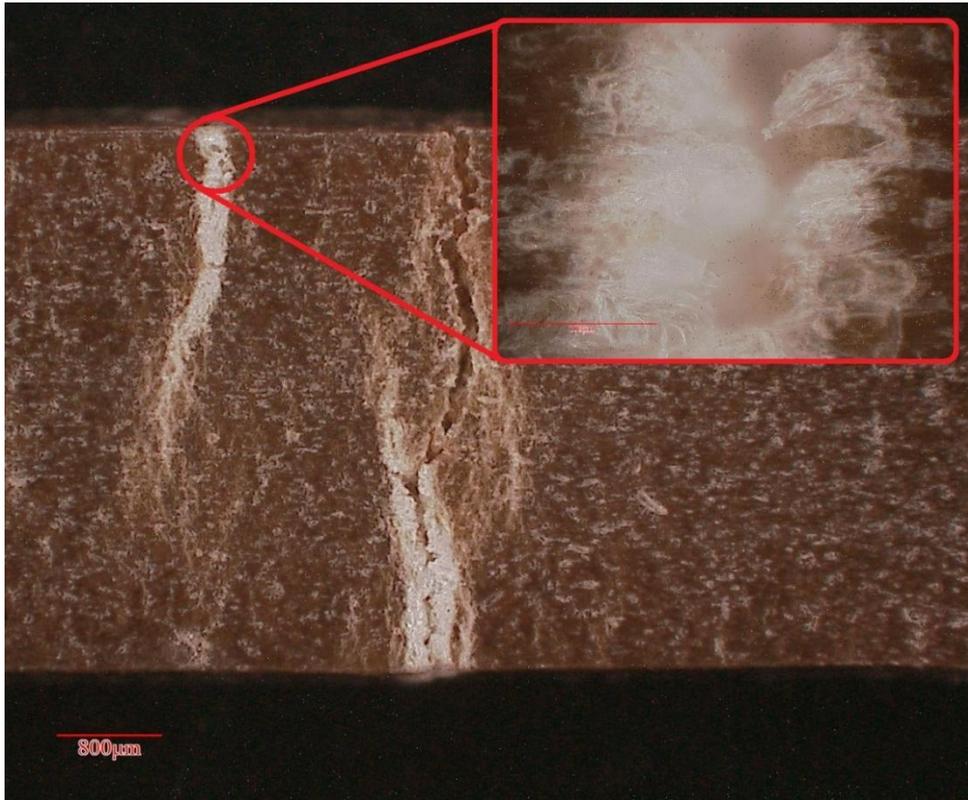


図-2. 33 疲労試験で破断した、破断起点のマイクروسコープ画像

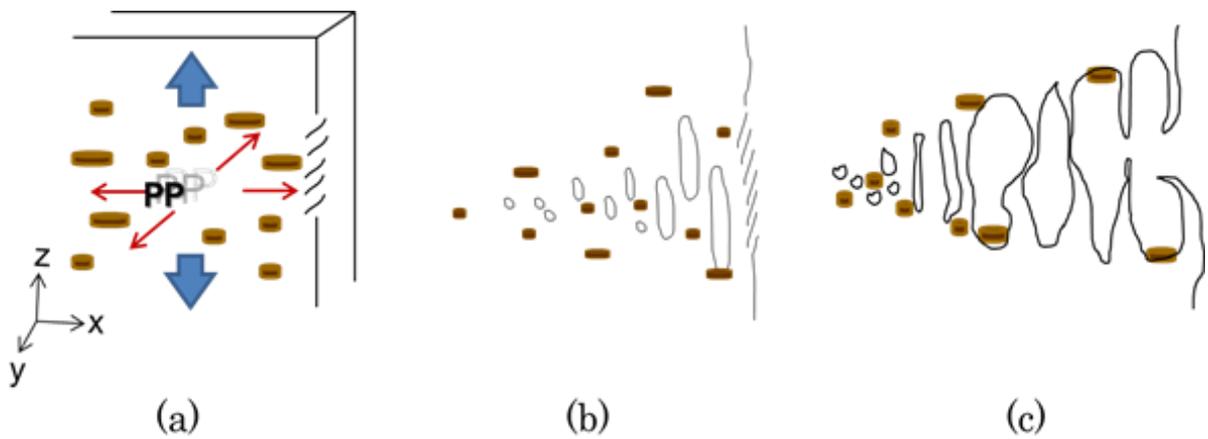


図-2. 34 疲労破壊に至るモデル図

以上より、本業務成果物は、高い界面強度を有しており、長期信頼性面からも自動車部材として適合していると判断できる。

イ. CNF 添加 WPC コンパウンド及び成形

本業務においては、コンパウンド以降既存の設備を利用することを目標としており、実現した。その結果、ここでの設備仕様は、既存タルク充填プラスチックと同じ設備仕様となる。表-2. 3には、成形およびコンパウンドの経済性を示すが、既存の設備、人員を利用するため、固定費よりはむしろ変動費のウエイトが大きい。但し、これは、タルク充填プラスチックにおいても同じことであり、経済性においてはやはり、性能の高い製品を作成し、材料を削減することが最も望ましい。同様に、CO2削減においても同じで、タルク充填プラスチックと同じ設備を使用する以上、材料使用量削減が、最も重要なポイントとなる。

表-2. 3 成形およびコンパウンドの経済性

| 工程 | 項目 | | 単価 | 備考 |
|--------|------|----------|----------|-----------------|
| コンパウンド | 変動費 | CNF入り木粉 | 12 円/kg | 25%添加(@49円/kg) |
| | | ポリプロピレン | 163 円/kg | 74%添加(@220円/kg) |
| | | 添加剤 | 10 円/kg | 1%添加(@1000円/kg) |
| | | 副資材費 | 5 円/kg | 実績値より |
| | | 運賃 | 5 円/kg | 県内輸送想定 |
| | | 計 | 195 円/kg | |
| | 固定費 | 人件費 | 3 円/kg | 1人:600万円 |
| | | 償却費 | 1 円/kg | 既存設備 |
| | | 計 | 4 円/kg | |
| | 管理費 | | 30 円/kg | 原価15% |
| | 計 | | 229 円/kg | |
| 販売利益 | | 34 円/kg | 粗利率15% | |
| 計 | | 263 円/kg | | |
| 成形 | 変動費 | コンパウンド | 263 円/kg | |
| | | 副資材費 | 5 円/kg | 実績値より |
| | | 運賃 | 5 円/kg | 県内輸送想定 |
| | | 計 | 273 円/kg | |
| | 固定費 | 人件費 | 3 円/kg | 1人:600万円 |
| | | 償却費 | 2 円/kg | 1350万円 |
| | | 計 | 5 円/kg | |
| | 管理費 | | 42 円/kg | 原価15% |
| | 計 | | 320 | |
| | 販売利益 | | 48 円/kg | 粗利率15% |
| | 計 | | 368 円/kg | |

(4) CNF 活用製品の活用時の CO2 排出削減効果の検証

①既存材料製品の CO2 排出量の明確化

表-2. 4には、既存材料であるタルク充填プラスチックにおける原料から成形までの CO2 発生量を示す。本年度は実測値ではなく既成値を用いている。この表からも明らかなように、PP とプラスチック系廃棄物の直接排出が大きい。

表-2. 4 タルク充填プラスチックにおける原料から成形までの CO2 発生量

| 【原材料および生産】 | 投入量 | | GHG原単位(100年指数:IPCC, 2007) | | GHG排出量(kg-CO2e) |
|----------------|------|-----|---------------------------|--|-----------------|
| | | | | | |
| PP | 0.75 | kg | 1.839 | kg-CO2e/m2 (IDEA ポリプロピレン) | 1.38 |
| タルク | 0.25 | kg | 0.036 | kg-CO2e/kg (IDEA タルク) | 0.01 |
| コンパウンド化電力 | 0.78 | kWh | 0.554 | kg-CO2e/kWh (IDEA 系統電力) | 0.43 |
| 射出成型 | 1.00 | kg | 1.400 | kg-CO2e/kg (CFPプログラム 利用可能データ(国内) ver. 1.04) | 1.40 |
| (原材料および生産合計) | | | | | 3.22 |
| 【廃棄】 | | | | | |
| 木質系廃棄物処理 | 0.00 | kg | 0.028 | kg-CO2e/kg (IDEA 焼却処理(一廃、発電なし、ごみ由来排出物を除く)サービス) | 0.00 |
| プラスチック系廃棄物処理 | 0.75 | kg | 0.028 | kg-CO2e/kg (IDEA 焼却処理(一廃、発電なし、ごみ由来排出物を除く)サービス) | 0.02 |
| プラスチック系廃棄物直接排出 | 0.75 | kg | 2.933 | kg-CO2e/kg C含有率80%として換算 | 2.20 |
| 無機系廃棄物処理 | 0.25 | kg | 0.984 | kg-CO2e/kg (IDEA 埋立処分(一廃)サービス) | 0.25 |
| (廃棄合計) | | | | | 2.20 |
| 【Total】 | | | | | 5.42 |

②CNF 複合樹脂の CO2 排出量の明確化

表－2. 5には、CNF 添加 WPC における原料から成形までの CO2 発生量を示す。本年度は実測値ではなく既成値を用いている。また、前述したとおり、既存設備をそのまま利用することを目標にしているため、タルク充填プラスチックと異なる点は、フィルターが CNF 入り木粉かタルクかだけの違いである。しかしながら、25%添加ではほとんど差がないため、製造における CO2 排出量はタルク充填プラスチックと同じ排出量となっている。したがって、PP とプラスチック系廃棄物の直接排出が大きい。

表－2. 5 CNF 添加 WPC における原料から成形までの CO2 発生量

| 【原材料および生産】 | 投入量 | | GHG原単位(100年指数;IPCC, 2007) | | GHG排出量(kg-CO2e) |
|----------------|------|-----|---------------------------|--|-----------------|
| | | | | | |
| PP | 0.75 | kg | 1.839 | kg-CO2e/m2 (IDEA ポリプロピレン) | 1.38 |
| 木粉 | 0.25 | kg | 0.024 | kg-CO2e/kg (IDEA 木材チップ) | 0.01 |
| コンパウンド化 | 0.78 | kWh | 0.554 | kg-CO2e/kWh (IDEA 系統電力) | 0.43 |
| 射出成型 | 1.00 | kg | 1.400 | kg-CO2e/kg (CFPプログラム 利用可能データ(国内)ver. 1.04) | 1.40 |
| (原材料および生産合計) | | | | | 3.22 |
| 【廃棄】 | | | | | |
| 木質系廃棄物処理 | 0.25 | kg | 0.028 | kg-CO2e/kg (IDEA 焼却処理(一廃、発電なし、ごみ由来排出物を除く)サービス) | 0.01 |
| プラスチック系廃棄物処理 | 0.75 | kg | 0.028 | kg-CO2e/kg (IDEA 焼却処理(一廃、発電なし、ごみ由来排出物を除く)サービス) | 0.02 |
| プラスチック系廃棄物直接排出 | 0.75 | kg | 2.933 | kg-CO2e/kg C含有率80%として換算 | 2.20 |
| 無機系廃棄物処理 | 0.00 | kg | 0.984 | kg-CO2e/kg (IDEA 埋立処分(一廃)サービス) | 0.00 |
| (廃棄合計) | | | | | 2.20 |
| 【Total】 | | | | | 5.42 |

③CO₂ 排出削減効果の評価と課題の整理

前項、前々項より明らかなように、製造においては、既存のタルク充填プラスチックと CNF 添加 WPC では違いがない。流動性の検証からも明らかなように、CNF 木粉の添加量を増加することは可能であり、これにより、ウエイトの大きかった PP が削減されることは期待できる。しかしながら、経済性も重要で、タルク充填プラスチックと配合を大きく変えると既存設備での対応が難しくなり、新たな投資が発生、結果的に経済性が悪くなる。但し、これらは、同一重量として検討した場合であり、CNF 添加 WPC は、タルク充填プラスチックより軽量でかつ高強度なため、使用材料が削減できる。したがって、製造における CO₂ 削減に関しては、CNF 添加 WPC の機能をさらに高めることが最も重要なポイントとなる。

④CO2 排出量の評価

ここでは、実際に自動車利用した場合の CO2 排出量削減効果に関して検証した。表-2. 6には、自動車利用における CO2 排出量を計算するための根拠資料を示す。

表-2. 6 自動車利用における CO2 排出量を計算するための根拠資料

| | データ | | 備考 |
|------------------------------------|-------------------|-------|--|
| 自動車(軽・小型・普通)重量(kg/台) | 1,380 | | 国内および世界における化学製品のライフサイクル評価(2012年12月 一般社団法人 日本化学工業協会) |
| 自動車1台に対する対象とする従来材料の使用量(%) | 4 | | |
| 燃費(km/L) | 11.6 | | 地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック(平成24年7月 環境省 地球環境局)より軽乗用車と小型・普通乗用車を加重平均 |
| | 販売台数 | 燃費 | |
| | 軽乗用車 1,549 | 13.2 | |
| | 小型・普通乗用車 2,385 | 10.5 | |
| 車両重量あたり燃費変化量(km/L) | 0.009 | | 滋賀県製品等を通じた貢献量評価手法 算定の手引き<実践編>(平成25年3月) |
| 1台あたり走行距離(km/10年) | 100,000 | | |
| 排出係数 | | | IPCC2007,100年係数により特性化したGHG排出量 |
| ガソリン(kg-CO ₂ e/L) | 2.81 | | IDEA ガソリン (原料・製造・使用) |
| タルクPP(kg-CO ₂ e/kg) | 5.42 | | 算定排出係数 (原料・製造・使用・廃棄) |
| CNF+木粉+PP(kg-CO ₂ e/kg) | 4.73 | | 算定排出係数 (原料・製造・使用・廃棄) |
| 強度アップによる部材軽量化(%) | 25.0 | 20.0 | 15.0 |
| 従来材料による部材重量(kg/台) | 55.2 | 55.2 | 55.2 |
| 開発材料による部材重量(kg/台) | 41.4 | 44.2 | 46.9 |
| 1台あたりの重量増減(kg/台) | -13.8 | -11.0 | -8.3 |

前述した素材自体の軽量化と機械的特性アップの結果から、25%以上の軽量化は可能で、本業務成果を導入すれば、自動車1台あたり13.8kgの軽量化となる。

表-2. 7には、CNF添加WPC使用における軽量化効果から算出される1台あたりのライフサイクルCO2排出量を示す。

表-2. 7 軽量化効果における1台あたりのライフサイクルCO2排出量

| | 燃費(Km/L) | ガソリン量(L) | CO ₂ 排出量 (原料・製造・廃棄) | CO ₂ 排出量 (使用) | CO ₂ 排出量 (全体) | 1年あたり CO ₂ 排出量 (全体) |
|---------|----------|----------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 従来材料 | 11.56 | 8648.19 | 299.18 | 24318.70 | 24617.89 | 2461.79 |
| 15%軽量化 | 11.64 | 8592.81 | 254.31 | 24162.98 | 24417.29 | 2441.73 |
| 削減量/改善量 | 0.07 | 55.38 | 44.88 | 155.72 | 200.60 | 20.06 |
| 20%軽量化 | 11.66 | 8,575 | 239.35 | 24111.52 | 24350.86 | 2435.09 |
| 削減量/改善量 | 0.10 | 73.68 | 59.84 | 207.19 | 267.02 | 26.70 |
| 25%軽量化 | 11.69 | 8556.28 | 224.39 | 24060.27 | 24284.66 | 2428.47 |
| 削減量/改善量 | 0.12 | 91.90 | 74.80 | 258.43 | 333.23 | 33.32 |

本結果より、目標である30kg/台を達成した。このCO2削減量をとすると2020年は、6.6千t-CO₂e/年、2025年は229.4千t-CO₂e/年のCO2削減効果が見込める。