

総 説

ナノセルロースヴィークル(NCV)プロジェクトの成果について

臼杵有光^{1*}

Results of the Nano Cellulose Vehicle Project

Arimitsu Usuki^{1*}

概要

セルロースナノファイバー (CNF) は、高強度、低熱膨張、低密度などの特徴を持つバイオ材料であり、植物などの様々なセルロース源から製造される。CNF はカーボンニュートラルで再生可能な素材であり、それを樹脂中に分散させることにより、樹脂が補強される。その技術を主に利用することにより 2016 年 10 月からナノセルロースヴィークル (NCV) プロジェクトを実施した。ここでは自動車の軽量化により、排出される二酸化炭素 (CO₂) の削減につながり、地球温暖化対策への貢献を目的とした。国内の大学や研究機関、自動車メーカーなど 22 の機関が協力して実施した。東京モーターショー2019 では、CNF を使用した 13 個の CNF 部品を搭載したコンセプトカーを展示し、国内外にそのポテンシャルを発信した。その評価結果では、CNF ベースの材料を使用することで、自動車部品の軽量化に有利であることが実証できた。

1. はじめに

セルロースナノファイバー (以下「CNF」という。) は、木材等の植物を原料とし、軽量でありながら高い強度や弾性率を持つ素材として、様々な基盤素材へ活用するために精力的な開発が進められている。特に高強度材料である自動車部品や家電製品の筐体用素材、高機能材料である住宅建材用素材などが期待されている。これらは軽量化や断熱性能の向上によるエネルギー消費の削減に繋がることから、地球温暖化対策への多大なる貢献が期待されている。将来自動車用素材として利用され、CNF の適用範囲が拡大していく段階には多様な樹脂との組合せによる複合化、樹脂アロイへの適用、樹脂 CNF 複合材料の成形加工性の最適化、他の素材との接着・接合性、素材供給量の確保、品質の安定性、耐衝撃性の向上、長期耐久性等の様々な課題が発生することが想定される。そのため、そうした課題を洗い出し、社会実装に向けた課題解決のため、環境省が実施する「セルロースナノファイバー性能評価事業委託業務」の中において平成 28 年度より 4 年間で「社会実装に向けた CNF 材料の導入実証・評価・検証～自動車分野～」のプロジェクトを実施した。本事業は京都大学が事業代表者になり、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実施した。これは産官学連携のコンソーシアム形式を採っており、NCV (Nano Cellulose Vehicle) プロジェクトと名付けられた。ここでは CNF 複合材料などの提供を受け、CNF 軽量部品・部材としての強度、信頼性等の性能評価を実施するとともに、将来ニーズを加味した CNF を用いた自動車の車両構想を明確にし、CNF を用いた活用製品の性能評価や活用時の CO₂ 削減効果の評価・検証を実施した。その内容について紹介する。最初に CNF の特徴、複合材料の製造方法などに触れ、次に NCV プロジェクトで実施した内容についてまと

2021 年 6 月 30 日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生物機能材料分野。

* E-mail: usuki@rish.kyoto-u.ac.jp

めた。

2. CNF の特徴

CNF は以下のような様々な特徴を有する。

2.1 軽量かつ高強度である

植物の細胞壁はセルロース、ヘミセルロースとリグニンから構成されており、セルロースの集合体であるパルプを細分化してできる繊維が CNF である。径は数十 nm 以下であり、長さは数 μm のものである。最小単位の繊維は 4nm であり、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて実際にその機械的特性が測定されている¹⁾。それによると平均の弾性率は 140GPa である。それは X 線を用いて測定された結晶の理論弾性率 (134GPa)²⁾ とほぼ一致している。比重は 1.5 であり、ガラス繊維やタルクの比重 2.5 と比べて軽量である。

2.2 有機繊維である

セルロース分子はグルコース分子がつながった重合体であるため、表面には水酸基 (—OH 基) が多数存在している。この水酸基は酸などを使用することによって反応が起こり、様々な変性が可能になる。例えば無水酢酸を使用すれば表面にアセチル基の導入ができ、親水的な性質から疎水的な性質に変えることができる。分子構造が明確であるため、混練したい樹脂に合わせて分散できるように CNF 表面の極性制御ができる。このようにして変性した CNF と樹脂を混練することによって、軽量・高強度な複合材料を作製している³⁾。図 1 にはアセチル化した CNF とナイロン 6 の複合化の一例を示す。CNF の分子骨格内の水酸基 (3 個) を一部置換して使用する (置換度 (DS) と呼び 3 個のうち何個の水酸基を置換しているかを表す数字) ことにより CNF の分散性などを制御することが可能である。

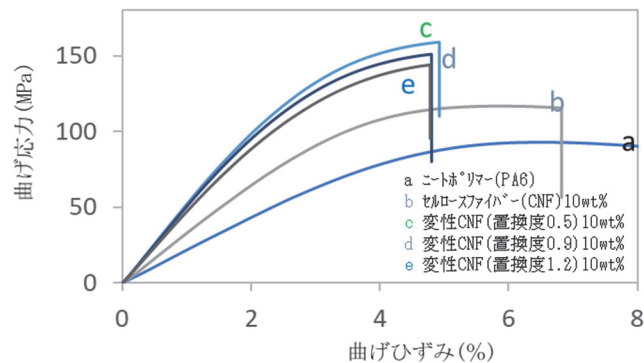


図 1: アセチル化 CNF 複合化ナイロン 6 の力学的特性

2.3 リサイクル時に繊維自体の破断の影響が小さい

CNF が樹脂中にナノメートルサイズのフィラーとして存在しているため、射出成形などで成形した材料を再度粉砕して成形を行っても CNF の破断がほとんど無いため、機械的特性は低下しない。ガラス繊維強化プラスチックではリサイクル時にガラス繊維の破断が起こるためリサイクルにはふさわしくない。一方、CNF はリサイクルには適したフィラーであると考えられる。プラスチック材料を今後使用していく上において、この特徴は大変重要である。

2.4 植物由来であるためカーボンニュートラルである

木材資源は日本に豊富にあり、人工林などで多くのセルロースが蓄積をしている。そのため生産・流通システムの改善等により低コスト化が期待できる。また木材だけではなく、稲わら、キャッサバ、サツマイモなど CNF の原料も豊富にある。有機繊維であるために燃焼させることができ、発生した二酸化炭素を植物が光合成で吸収すればカーボンニュートラルである。

2.5 線膨張係数が小さい (寸法安定性が高い)

樹脂は一般的に 100ppm/°C 程度の比較的大きい線膨張係数を持つが、CNF は 0.1 ppm/°C と小さい。これは樹脂中に分散した際にも大きく貢献し、CNF を 10wt% 添加したナイロン 6 で 30-40 ppm/°C に低

下する。つまり成形品において寸法安定性に寄与できる。これは異種材料（特に金属材料）との接着・接合の際に都合が良い。

このような特徴をうまく利用して複合化することにより、自然由来で再生可能な資源を原料とする軽量化素材が生まれており、これを使用してクルマへの適用を検討した。

3. NCV プロジェクト

3.1 全体構成

環境省からの委託を受けて、参画機関がコンソーシアム形式で参加した。京都大学(代表事業者)をはじめとした大学、研究機関、企業等、計 22 機関で構成されるサプライチェーンの一气通貫体制で構成した。組織マネジメント上の特徴は、材料評価、部品試作、試作車の作製や LCA 評価といった幅広い領域をカバーすると同時にプロジェクトマネジメントの効率化と進捗に合わせた組織の柔軟性を図るため、コンソーシアム方式を採用したこと、グループリーダーを交点とするマトリックス的な要素を盛り込み、プロジェクトを支えるマネジメントチームを有する組織体制としたことである。参画機関：京都大学、サステナブル経営推進機構、京都市産業技術研究所、宇部興産(株)、金沢工業大学、名古屋工業大学、秋田県立大学、(株)昭和丸筒、昭和プロダクツ(株)、利昌工業(株)、(株)イノアックコーポレーション、キョーラク(株)、三和化工(株)、ダイキョーニシカワ(株)、マクセル(株)、(株)デンソー、トヨタ紡織(株)、トヨタカスタマイジング&ディベロップメント(株)、アイシン精機(株)、トヨタ自動車東日本(株)、東京大学、産業技術総合研究所。

3.2 各グループの役割と主な成果

(1) 材料評価・提供グループ

京都大学と京都市産業技術研究所が NEDO 事業で以前に開発した「京都プロセス」技術をベースとして、ナイロン 6 (PA6)、ポリプロピレン (PP)、ポリエチレン (PE) などに CNF を分散した樹脂複合材料のサンプルワークを行った。また、樹脂複合材料以外にも多種多様な CNF ベース素材のサンプルワークが行なわれており、京都大学ではそれらの樹脂複合材料や CNF ベース素材を入手し、機械的特性や長期耐久性などの評価を実施し、用途に応じた各参画機関への材料の供給や、参画機関からのフィードバックを受けて、更なる素材の改良指針の作成などを行なった。また、京都大学では PA6-CNF 樹脂複合材料について 3D 成形材料としての適用性の検証を目的とし、タイヤホイールフィン(図 2) やフロントバンパーサイド(図 3) の試作・評価を行った。このような格子状の構造をもつ成形体は他の成形方法では製造できないため有用であった。また宇部興産では自動車用 PA6-CNF 複合材料の大量生産や量産に向けた検討を行った。



図 2：タイヤホイールフィン

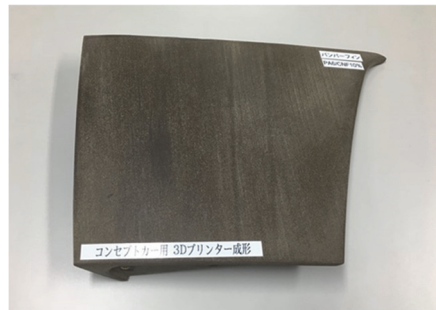


図 3：フロントバンパーサイド

(2) 成形加工評価グループ

京都大学と京都市産業技術研究所では CNF 樹脂複合材料について加工性、発泡成形性などを検討した。自動車の軽量化において射出発泡成形は重要なアイテムであるため、このグループで評価を実

施した。イノアックは PP-CNF 材料を用いて発泡成形を実施し、内装部品などへの適用性を検討した（図4）。ダイキョーニシカワは PP-CNF や PA6-CNF を用いて発泡成形を行ない、内外装含めて射出部品への適用性を検討した。

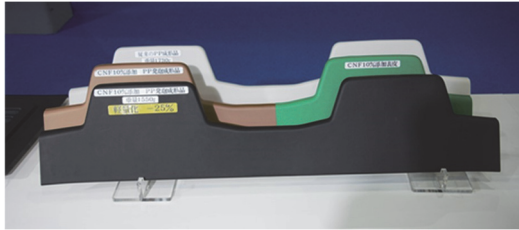


図4：パケトレフロントカバー

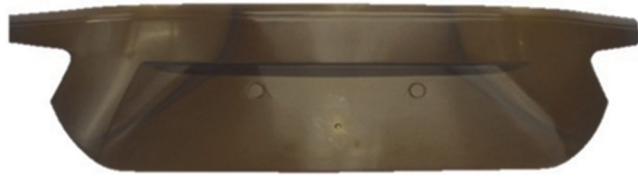


図5：トランクリッド ロアー

これまでに、市販車であるトヨタ86のトランクリッドの垂直部分（図5）、インストルメントパネル等を試作・評価した。三和化工は PP-CNF や PE-CNF のプレス発泡成形を行ない、30倍程度の発泡化に成功している。キョーラクは PP-CNF や PA6-CNF のブロー成形を実施し、デッキボードをモデルとした軽量の板材（図6）、リアスポイラー（図7）を試作した。CNF 添加した複合材料は熔融時の粘性が増大するため、ブロー成形には適していることが分かった。マクセルは意匠部品用のために樹脂メッキ技術を保有し、CNF を添加することによりメッキの接着性が優れることを見出し、ドアハンドルやミニチュアグリル等の試作を行った（図8）。

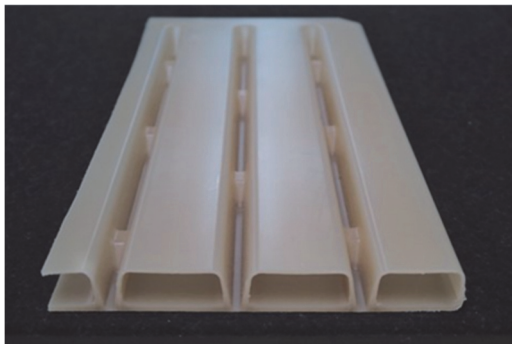


図6：デッキボード



図7：リアスポイラー



図8：ミニチュアグリル（左）とドアハンドル

（3）部材成形評価グループ

アイシン精機は PA6-CNF 複合材料を射出成形することにより、軽量のインテークマニホールドを試作した（図9）。現行品はガラス繊維を30%使用しているが、CNF を15%複合化した材料で検討を行い、10%以上の軽量化効果の可能性を見出した。現行品と同等の形状は出せたが、更なる改良に向けた検討を行っている。デンソーは PP-CNF 複合材料を射出成形することにより、軽量のエアコンケースを試作した（図10）。複雑形状の実成形が可能であることは確認できたが、物性を満足するためには更なる工夫が必要である。トヨタ紡織は PP-CNF 複合材料を射出成形することにより、軽量のドアトリムを試作した（図11）。また最終試作車ではドアアウターの試作も行った。剛性は満足できるが、今後の課題として耐衝撃性などの改良が必要であることが分かった。さらに内装材では VOC

(Volatile Organic Compounds ; 揮発性有機物質) が課題としてあることも分かってきた。このように射出成形性はいずれも確認できたが、新しい課題が見つかったため今後も引き続き、製品化に向け課題の洗い出しと検出された課題を解決するための検討を継続していく必要がある。



図 9 : インテークマニホールド

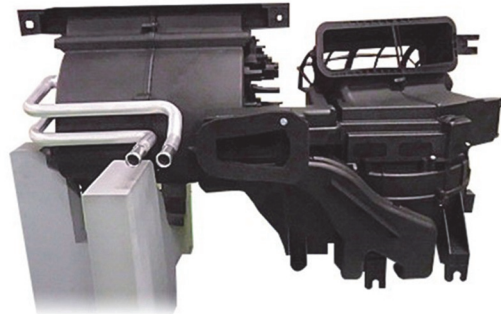


図 10 : エアコンケース



図 11 : ドアトリム

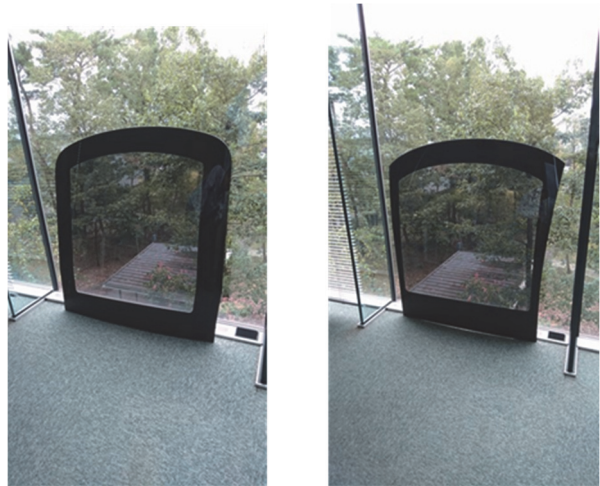


図 12 : ルーフパネル (左) とバックウィンドウ (右)

トヨタ自動車東日本では PC-CNF 複合材料を射出プレス成形することにより、透明な補強樹脂ガラスの試作を行った。無機ガラスに比べ 50%以上の軽量化が確認でき、最終試作車にルーフパネルとバックウィンドウ (図 12) を搭載した。

(4) 大物部材評価グループ

金沢工業大学とトヨタカスタマイジング&ディベロップメントではエンジンフード (ボンネット) を RTM (Resin Transfer Molding) 手法で成形する方法を検討した。CNF の基材にエポキシ樹脂を流し込んで固めることにより、大物の成形体ができることを実物で確認した。本技術はまだ成形時間などに課題はあるものの、将来の自動車大物部材を製造する上において必須の技術となりうると考えている。トヨタ 86 のエンジンフードを樹脂-CNF 複合材料で置換する検討を行なった (図 13)。従来の金属製などに比べて 10-50%程度の軽量化が確認できた。さらに最終試作車では、大型のフロア部材を試作し、搭載した。

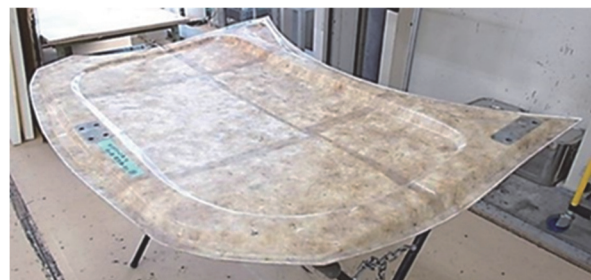


図 13 : エンジンフード (ボンネット)

(5) 接着・接合、構造要素モデル評価グループ

名古屋工業大学では CNF 複合材料に適した構造要素（シート、パイプ、ハニカムなど）の開発とそれらを接着、接合するための接着手法の最適化を実施した。たとえば昭和丸筒と昭和プロダクツは CNF のシートを使用して紙管の強度を向上させる手法を見出した（図 14）。



図 14：紙管+CNF シート

これは自動車のビームなどの補強に使用できることが分かった。この技術は最終試作車のルーフサイドレールとして使用した。利昌工業は CNF のみからなる CNF 板材を作製し、それとハニカムを接着した CNF ハニカムシートを試作した。軽量かつ高強度な板材としてトヨタ 86 のトランクリッドの水平部分（図 15）と最終試作車のエンジンフード（図 16）等に適用した。これらの基本の構造設計や評価は秋田県立大学と共同で実施した。



図 15：トランクリッド アッパー



図 16：エンジンフード

(6) 車両構想評価グループ

トヨタカスタマイジング&ディベロップメント、京都大学およびすべての参画機関で協力し、NCV プロジェクトとして、現時点で CNF をできるだけ使用しかつ走行可能な最終試作車を作り（図 17）、2019 年の東京モーターショー（令和元年 10 月 23 日-11 月 4 日で開催）に出展した（図 18）。試作車用部材一覧を表 1 に示した。ドア、樹脂ガラス、エンジンフード、リアスポイラー、パケトレフロントカバー、ホイールフィン、ルーフサイドレール、フロア部材など 13 品目に適用した（トヨタ車体のバッテリーキャリアは参考出展）。最終試作車のデザインは塗装も含めて、日本の重要な資源でかつ CNF の原材料となる木及び日本発の意味も込めて和のテイストで統一した。特に外装のデザインに関しては矢野浩之教授からの“円空の木彫りの仏像をイメージする”との概念を反映している。また、東京モーターショー2019 では、最終試作車搭載の部品に加えて、インテークマニホールド、エアコンケース、インストルメントパネル、バックドア、内装用表皮、シートサンプルなど、最終試作車には搭載していない試作品も展示した。

塗装に関しては日本ペイント・オートモーティブコーティングス(株)に協力をお願いした。外観や付着性低下の懸念があったが、溶剤ウレタン系塗料を選択しプライマーを比較的厚めに塗布することで、鋼板ボディ同等の外観を保有することができた。また、樹脂による部分補強や塗装条件の検討から、耐吸湿性を向上させ、保護機能を付与することができた。一方、カラーデザインイメージには当

初から「日本らしさ」「自然」「サステナブル」という環境に寄り添うキーワードがあり、これらのキーワードを軸に、シャープなボディデザインを生かせる陰影感、和テイストの内装にもマッチするようなカラーを必要とした。最終的には日本の四季を代表する「桜」がカラーモチーフと決まった。



図 17：最終試作車（コンセプトカー）



図 18：最終試作車（コンセプトカー）
東京モーターショーでの展示

表 1：出展部材一覧

部材名	主要樹脂	CNF複合比率 (代表値)	成形加工法	担当機関
ドアトリム	PP(ポリプロピレン)	10%	射出成形	トヨタ紡織
ドア OUTER パネル	PP	10%	射出成形	トヨタ紡織
ルーフパネル	PC(ポリカーボネート)	15%	射出圧縮成形	トヨタ自動車東日本
バックウィンドウ	PC	15%	射出圧縮成形	トヨタ自動車東日本
エンジンフード	CNF	100%	加熱加圧成形+真空バッグ成形	利昌工業
リアスポイラー	PP	10%	ブロー成形	キョーラク
フロントアンダーカバー	PP	10%	ブロー成形	キョーラク
パケトレフロントカバー	PP	10%	発泡射出成形	イノアックコーポレーション
フロントバンパーサイド	PA6(ポリアミド6)	10%	積層造形(3Dプリンター)	京都大学
ホイールフィン	PA6	10%	積層造形(3Dプリンター)	京都大学
ルーフサイドレール	CNF	100%	CNFシート巻き付け	昭和丸筒/昭和プロダクツ
フロア部材	EP(エポキシ樹脂)	30-50%	RTM(Resin Transfer Molding)	金沢工業大学/トヨタカスタマイジング&ディベロップメント
バッテリーキャリア	PP	20%	射出成形	トヨタ車体(PJ外からの提供)

しかし、一言で桜と言っても、初々しいフレッシュ感、ワクワクする期待感、散ってゆく名残惜しさのように様々な表情があるが、最終的に「花筏」のようにうつろいや循環を感じさせる世界観がカラーコンセプトとなった。

繊細ながらもキラキラと輝かせるために大粒径と中粒径アルミを併用し、ほのかな赤みで色づかせるために、2色性効果が高いシリカフレークを配合した。淡色はわずかな材料差で印象が変わってし

まうため、材料選択と量を巧みに調整しながら、和やかな桜の魅力を表現したカラーを創りあげることができた。これは自然と共存し、時を紡いでいくという願いを込め、参画メンバー全員の投票により「環桜（わざくら）」と命名された。

(7) CO₂ 評価グループ

サステナブル経営推進機構、東京大学、産業技術総合研究所において、自動車の軽量化による CO₂ の低減効果の検証を実施した。第一に、既存部品の物性値や CO₂ 排出原単位等 CO₂ 削減効果の評価に関する文献を収集し、選定した自動車の一部部品について製造段階、走行段階、廃棄リサイクル段階の CO₂ 排出量の削減効果の評価した。第二に、CNF 製造プロセスの量産時の CO₂ 排出量の試算方法の検討、必要となるデータ収集項目の抽出を行い、CNF 部品の実機搭載における CO₂ 削減効果の評価方法と CNF 軽量部品の導入による CO₂ 削減効果のシミュレーション技術の検討を行った。図 19 に代表的な算定例として、自動車用ドアトリムの結果を示す。CNF 製造時の CO₂ 排出量を 2 水準（ケース 1 とケース 2）で評価を行ったところ、部材 1 個当たりの LCCO₂ 削減効果は約 5 kg-CO₂ と見積もられた。第三に、CO₂ 削減効果の観点から CNF 自動車の普及シナリオの策定方法、普及シナリオに基づく CO₂ 排出量削減効果および社会全体に対する波及効果の評価の枠組みを設定し評価を進めた。

(8) プロジェクト推進に関する情報管理グループ

プロジェクトでは 2 か月に一度の全体会議と参画機関全員で情報の共有と議論を実施した。最初は材料側（シーズ側）と自動車部品側（ニーズ側）で意見が合わなかったり、各分野での専門用語の違いがあったり苦労したが、最終的には相互の連携がうまくできるようになった。

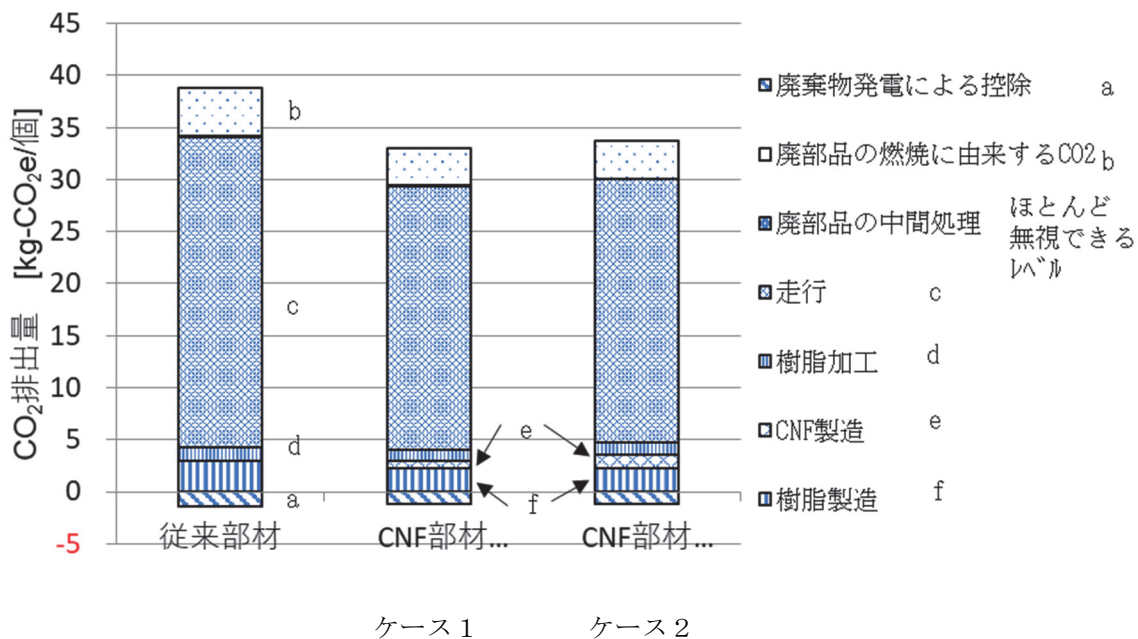


図 19：自動車用ドアトリムの LCCO₂ 削減効果の策定例

今後は各種の評価検討結果を踏まえ、CNF の製品の品質向上と社会実装に向けたステップを明確化し、市場投入計画に織り込んでいきたいと考えている。

4. 今後の展望

CNF を将来の自動車用材料に使用するためには、バリューチェーン分析とともに枠を超えた幅広いサプライチェーンの構築が必要となってくると考えられる。NCV プロジェクトでは材料、成形加工、

部材試作、自動車への搭載検討といった一連の流れの中で実施してきたが、今後は素材メーカーも含めた連携が必要であり、新たな連携も模索していきたいと考えている。将来は低コスト、低エネルギー生産、環境負荷が小さい素材として様々な産業分野に貢献できる素材だと考えており、多くの方の参入を期待している。

謝 辞

本稿で紹介した内容の一部は、令和2年度3月末で終了した環境省セルロースナノファイバー性能評価事業委託業務により実施したものであり、共同実施者各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) S. Iwamoto, W. Kai, A. Isogai, T. Iwata, *Biomacromolecules*, 10, 2571-2576, 2009.
- 2) 桜田一郎、伊藤泰輔, *高分子化学*, 19, 300-306, 1962.
- 3) Y. Igarashi, A. Sato, H. Okumura, F. Nakatsubo, H. Yano, *Chem. Eng. J.*, 354, 563-568, 2018.

著者プロフィール



臼杵 有光 (Arimitsu Usuki)

<略歴> 1978年名古屋大学工学部応用化学科卒業/1980年同学科博士前期課程修了/同年(株)豊田中央研究所入社/1997年名古屋大学博士(工学)/2016年京都大学生存圏研究所特任教授兼務/2019年(株)豊田中央研究所退職、現在に至る。<研究テーマと抱負>CNF複合高分子材料の社会実装。<趣味など>活字を書く、読む。