

## 2.2.3 植物由来材料

### (1) 研究開発領域の定義

低環境負荷のモノづくりを目指すバイオエコノミーが大きな潮流となっている中で、本研究開発領域は、問題解決の一つの方策として、再生産可能な資源として植物由来原料を用いるバイオマス化を推進するものである。本項では、植物由来原料の開発、製造、既存材料のバイオマス化推進、および新たな機能性材料の開発について、植物由来の原料を用いて製造されるバイオマスプラスチック（biomass plasticsあるいはbiobased plastics）およびセルロースナノファイバー（CNF）に焦点を当て概説する。

### (2) キーワード

バイオエコノミー、サーキュラーエコノミー、バイオマス、植物由来原料、バイオマスプラスチック、ナノセルロース、セルロースナノファイバー、構造材料、機能性材料

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

地球温暖化の原因となっているCO<sub>2</sub>の排出削減は産業界が総力を挙げて取り組む喫緊の課題である。この様な脱炭素社会に向けた動きに伴い、次の3つの観点から植物が産生する物質群が化学品やエネルギーの原料として注目され、利用への取り組みが活発化している。

- ・再生産可能であり、枯渇性の化石資源の消費を抑制できる
- ・温室効果ガスを用いて作られるため、温暖化を抑制できる
- ・物質の分子の特徴が、製品の機能向上や新たな機能の付加に繋がるとともに環境負荷を低下できる

#### [バイオマスプラスチック]

プラスチックは石油採掘量の6%を使って年間4億トン生産されている。素材としてリサイクルされる量は約20%にとどまり、また、その耐久性ゆえに環境に入り込んだ際に長期間存在し続けることから、今世界各地域では、プラスチックの負の側面が社会的な課題とされている。一方で、プラスチックは、その優れた基本的性能（成形加工性、軽量、耐久性、安価で安定した供給）やさらなる機能性の付加により、人々の暮らしの隅々にまで浸透しており、感染症問題を背景に、安全・衛生上、どうしても必要なプラスチックがあることも認識されている。ポリエチレン（PE）やポリプロピレン（PP）といった汎用プラスチックが今後も社会に欠かせない役割を担っていく限り、その原料を植物由来に転換し、この四分の三世紀の間に蓄積してきたプラスチックの製造、加工技術といった社会基盤を活かすことは、資源枯渇および温室効果ガス排出の課題への対策をいち早く行う手段となり得る。また、植物由来の分子の知見とそのポリマー化の技術の洗練により、植物由来の原料を使いこなすことで、既存の材料やその組み合わせでは実現が困難な機能を有する新たなバイオマスプラスチックの開発も期待される。

#### [CNF]

セルロースナノファイバー（CNF）は植物繊維をナノレベルまで解繊して得られる軽量、高強度、低線熱膨張のナノ繊維である。木材の半分はCNFであり、国土の約7割が森林である我が国においては、木材蓄積量の2/3を占める人工林において毎年8,000万m<sup>3</sup>近く（CNF量に換算して1500万トン）蓄積量が増加して

おり、豊富な持続型自国資源である。CNFの製造と利用に関する研究は、欧州、北米、中国、韓国、そしてわが国で急速に進んでいる。我が国は、CNF材料について林業、製紙産業を含め、自動車・航空、電機・電子、建築・建材等の産業、さらにはこれらの産業を支える化学産業、成形加工産業を包含した大規模なサプライチェーンを有している。高性能で高付加価値の大型産業資材として、自動車や電子機器、建材、医療、化粧品など幅広い用途に向けたCNF材料開発を、基礎研究との両輪で推進していくことは、国際的に進んでいるバイオエコノミー、サーキュラーエコノミーの観点から極めて意義のあることである。

## 【研究開発の動向】

### 【バイオマスプラスチック】

- ・原料となるバイオマス化学品の開発

植物由来の材料としてバイオマスプラスチックを開発することは、これまで石油、石炭等を原料としてきた一連の生産システムを大きく変換するチャレンジに他ならない。研究開発の項目は、工業化までの道筋の順に、ターゲット化学品設定、原料選択、変換法選定、化学触媒/生物触媒開発、生産プロセス開発、および大規模複合工業化となる。

バイオマスプラスチックを製造するために必要な原料は、現在、大量に安定的に生産され、かつ生産地域で食用として用いられていないものを用いるため、持続的な供給が可能なものはトウモロコシ (*Zea mays*)、サトウキビ (*Saccharum officinarum*)、テンサイ (サトウダイコン、*Beta vulgaris*) を代表とする糖類、アブラヤシ (*Elaeis guineensis*)、ダイズ (*Glycine max*)、なたね (*Brassica napus* など)、トウゴマ (*Ricinus communis*) といった作物から得る油脂に限られている。これらの原料からは、主に3つの方向性で化学品が製造される。

- A) 石油化学の基礎原料となりうる物質を、植物由来のエタノール、あるいは有機系廃棄物、林木、藻類を含めた有機物から製造する。

米国では、大量に生産される自国の植物由来資源をエネルギーや素材の製造に活用する目的で、2000年代初頭からエネルギー省 (Department of Energy、DOE) 主導でバイオマスプラスチックの原料となりうる植物由来の基盤化学品の開発を進めてきた。既に大量に生産されているエタノールの化学変換により、エチレン、プロピレンといった基礎化学品を製造する研究開発がプロセス開発からコスト低減まで広く行われている。さらに、未利用の植物由来の資源や、産業、生活から発生する廃棄物を直接基礎化学品や炭化水素の混合物、すなわち原油に変換する挑戦が続けられている。

- B) 現在プラスチックの原料となっている化学品を、直接あるいは数度の変換を経て製造する。

米国 DOE 主導で進められてきた例に見られるように、植物由来の原料から化学変換法や発酵による生物化学変換法で直接あるいはさまざまな化学品の製造のための中間物質 (building blocks 化学品) を製造する研究開発が続けられている。乳酸、1,3-プロパンジオール (PDO)、1,4-ブタンジオール (BDO) など商業生産が始まっているものについて、いくつかの化学品が開発途上にあり、それらを使った製品の開発と歩調を合わせた取り組みがなされている。たとえば、植物由来の糖類を発酵して得た乳酸を原料にして製造されるポリ乳酸 (polylactic acid、PLA)、植物油脂からディーゼル燃料 (脂肪酸メチルエステル) を製造する際に副生するグリセリンから発酵法で1,3-プロパンジオール (1,3-propanediol、PDO) を製造し、これを用いて製造されるポリトリメチレンテレフタレート (PTT) は、ナイロン類を代替して商業的に成功した例として知られている。その他には、植物由来の糖や残渣部分を原料に化学変換法で製造されるフランジカルボン酸 (2,5-furandicarboxylic acid; FDCA)

と植物由来のエタノールから得るエチレングリコール (EG) を用いて、ポリエチレンテレフタレート (PET) を代替し、より高機能なポリエチレンフタレート (PEF) を製造する開発が進められている。

C) 市場が求めるプラスチックの物性を実現するために必要な化学品を、植物の分子構造の特徴を活かして製造する。

まず必要とされる物性を目標に定め、計算科学と情報科学を駆使したマテリアルインフォマティクス (materials informatics, MI) の手法を開発しつつ、ポリマーにした際に想定物性が発揮される構造の化学品を、植物由来の原料から製造可能な範囲で作出す試みが始まっている。

一方、現在製造販売されているバイオマスプラスチックのほとんどは、代替されたプラスチックより数十%増から数倍の価格となっている。これは、現在は需要の立ち上がり期で生産設備が小さくスケールメリットが出ないこと、新規設備への投資が価格に転嫁されること、さらに、石油製品がコンビナートでのリファイナリー (petroleum refinery) 方式で原料やエネルギーを高度に使いこなしの上で製造されている状況と比較すると植物由来の化学品は独立した製造設備での目的生産が多く、総合的な量産効果が得られないなどのコスト低減の障壁になっている要因が多い。そこで、工学、経済学的な研究を中心に様々な分野の知見を総合したバイオリファイナリー (biorefinery) 構築のための基礎および応用研究が、ハブ研究拠点の活用などを通して進められている。

#### ・既存プラスチックのバイオマス化推進

資源枯渇および温室効果ガス排出の課題への対策として、各国では政府主導で現状必要欠くべからざる用途のプラスチックに関して、植物由来原料に転換していく取り組みが、1970年台から始められている。周辺領域の学術、技術の進展により、研究開発は2000年代に入って加速してきたが、海洋ゴミの中のプラスチックの問題が顕在化してきた過去数年は特に、国や地域を超えた国際的な活動として広がっており、特に欧州では域内の経済活性化を兼ねて推進がなされている。ターゲットとしては、一般的に用いられている汎用プラスチックであるPEやPPに加え、特徴ある機能を持ったポリカーボネート (PC) 類、ポリアミド (ナイロン、polyamide, PA) 類、ポリエステル (PEs) 類、ポリウレタン (PU) 類、ポリスチレン (PS) 類などとなっている。

#### ・新たなバイオマスプラスチックの開発

市場や製造の要求に応じてプラスチックに新たな機能を付与するためには、原料の組成を変える、添加剤を加える、製造 (重合) 方法を変えるなどのポリマー製造の段階と、複数のプラスチックや添加剤を混合する、複数の材料を層構造にする、製品に後処理を施すなどの加工の段階で行われる。しかし、既存の材料とアプローチでは目標とする物性に到達できない、あるいは製造コストが現実的でない場合、さらに最近では、製品の一生を通じて環境負荷を下げるために、新しい原料や重合方法を用いて新たなポリマーを作り出す試みがなされる。植物由来の分子には、これらの目的を果たすための潜在的な可能性が秘められており、PC類では実際に既存の透明プラスチックの性能を凌駕する材料が、糖類由来のイソソルバイド (isosorbide) を用いることによって得られ、商業化がなされている。この先行例に倣い、各国では高機能材料開発の大型の国家プロジェクトが企画、遂行されている。特に、前述のようにプラスチックの物性からマテリアルインフォマティクスを活用してポリマーの分子構造を推定していく方式のように、蓄積された経験、知見の外挿に踏み込めるツールを開発に組み込んでいく時代となっている。

## 2.2

### 俯瞰区分と研究開発領域 バイオエコノミー

## 【CNF】

CNFは、その製造と利用に関する研究が基礎と応用の両輪により世界中で活発に行われている。CNFに関する研究は1980年前後に米国のTurbakらが製紙用パルプを解繊して調製したのが始まりと言われている。研究開発が特に発展したのは2000年代に入ってからであり、2004年頃から論文や特許数が急激に増加している。2019年度はナノセルロース（CNFおよびCNC（セルロースナノクリスタル）、それらを用いた材料の総称）に関する論文、著書が5,471件あった。

日本におけるCNFに関する取り組みは活発かつ先進的である。2014年3月には経済産業省の主導により、CNFの将来展開プランについて技術ロードマップが策定された。続いて、6月にはオールジャパン体制でナノセルロースの研究開発、事業化、標準化を加速するためのナノセルロースフォーラムが発足した（現ナノセルロースジャパン）。バイオ戦略2019などでも重要な戦略素材に挙げられている。この様な国家戦略の主導により、現在、CNFおよびCNF材料の製造を行う5つの商用プラント、22のテストプラントが国内で稼働している。また、CNF材料の製造、利用に関する地域フォーラム、地域ハブが13あり、地域の公設試、企業と連携して活発に活動している。日本と同じようにCNFに関する研究開発が活発なのは北欧、北米および中国である。豊富な森林資源と大規模の製紙産業を背景に、スウェーデン、フィンランド、カナダ、米国では2006-2008年頃から複数の大型プロジェクトが立ち上がり、それが現在も続いている。特許からみると出願が多いのは、日本では、日本製紙、王子ホールディングス、凸版印刷、三菱化学、花王、フィンランドのUPMキュンメネ、ストラ・エンソ、カナダのFP INNOVATIONS、一方、大学では、日本の京都大学と中国の東華大学である。

CNFの製造では、多大なエネルギーを要するというコスト課題があり、製造方法について多くの方法が開発されている。低濃度で製造する技術としては、高圧ホモジナイザー法、グラインダー法等があり、一方、高濃度では2軸混練機などを用いた方法もある。解繊を促進するために触媒や酵素を使う技術も開発されている。特に、TEMPO酸化触媒を用いることにより解繊を大きく促進する技術が確立された。この技術を開発した東大の磯貝明ら日本人研究者3人が2015年スウェーデンの財団から森のノーベル賞といわれる「マルクス・バーレンベリ賞」を授与されている。

CO<sub>2</sub>削減の観点から最も期待されるCNFの利用は、軽量、高強度の特徴を活かし、大量の使用、長期にわたるCO<sub>2</sub>固定が期待できる構造用途である。世界のプラスチック消費量は年間3億トンになろうとしており、この5%をCNFが占めるとすると10兆～15兆円の市場になる。現在はガラス繊維や炭素繊維と同様に、樹脂の補強用繊維としての利用が研究開発、事業化の中心となっている。

親水性のCNFと疎水性の樹脂をそのまま混合しても馴染まないことから、CNF強化樹脂材料では、CNF表面の疎水化変性や樹脂との界面を制御する相溶化剤の開発が、製造プロセスの開発と共に進んでいる。その中で、変性パルプを溶けた樹脂の中で混練し、パルプのナノ解繊と疎水化ナノファイバーの樹脂中への分散をワンショットで行うコストパフォーマンスに優れた方法（パルプ直接混練法：京都プロセス）が我が国で開発された。

可視光波長（400nm- 800nm）に対して十分に細いCNFは透明樹脂の透明性を損なうことなく補強できる（CNF強化透明樹脂シート）。あるいは100%CNFで透明シートになる。これらは低熱膨張、高強度のため、自動車や建材のガラス代替として開発が進んでいる。CNFは微細な網目構造を形成するため、断熱材や吸着材、分離材、触媒担体などに応用する検討も進められている。特にCNFからなる断熱材は、真空断熱にも比する性能を示すだけでなく、光の透過性が高いため、夢の材料とも言われる「透明断熱材」を実現できる可能性がある。透明断熱材は、住環境や自動車の窓ガラスにも適用できるため、著しい省エネルギー効果が

期待されている。

CNFシートは、フレキシブル、折り畳み性、耐熱性、絶縁性、耐薬品性、表面平滑性、高誘電率という特徴もあり、ペーパートランジスタ、ペーパー太陽電池、ペーパーメモリなどが論文発表されている。現在、ウェアラブルデバイス、ヘルスケアデバイスなどはポリマー基板をベースに研究開発が進められているが、海洋プラスチックのような環境問題を引き起こす懸念から、循環型資源や生分解性資源を使ったペーパー湿度センサやペーパーガスセンサ、ひずみセンサなどディスプレイデバイスの開発が始まっている。

その他、Liイオン電池やスーパーキャパシタのセパレーターへの利用についても検討されている。生体親和性があるCNFは人工の腱、軟骨、血管といった医療用途やコンタクトレンズへの応用も研究が進んでいる。近年は、セラミックス等の無機材料とCNFを複合化する研究も進展しており、脆性の高いセラミックスに靱性や屈曲性を付与し、加工性・操作性を格段に向上させる技術も蓄積されてきた。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

##### 【バイオマスプラスチック】

- ・ バイオクルード (bio-clude) 製造のプロセス開発

植物由来の原料を物理化学的なプロセスで原油状態、あるいはナフサに変換するバイオクルード製造技術が相次いで実証規模の試験に入った。これらの変換済み原料は、既存の石油精製および石油化学工業の設備に原料として導入することができ、植物由来の材料を普及させるための有効な手段となる。

- ・ PETの100%植物由来化と植物由来のPPの原料製造の工業化

国の助成も得つつ企業主導で開発と投資が行われ、PETの100%植物由来化に必要なp-キシレン(PX)と、PPのモノマーであるプロピレン製造の実証設備が建設中あるいは建設を終え、サンプル出荷が始まった。前者は農業、林業残渣など未利用のリグノセルロース系バイオマスを原料としている。なお、既存プラスチックの植物由来化に近い化学品としては、カプロラクタム(PAなどの原料)、アジピン酸(PA、PEsなどの原料)、イソブテン(合成ゴムなどの原料)、プロピレングリコール(PEs、PUなどの原料)、ブタジエン(合成ゴムなどの原料)、イソプレン(合成ゴムなどの原料)などが挙げられる。

##### 【CNF】

- ・ 低コストでのCNF強化樹脂材料製造プロセス「京都プロセス」の開発と実証

パルプのナノ解繊と疎水化ナノファイバーの樹脂中への分散をワンショットで行う方法：パルプ直接混練法「京都プロセス」が京都大学、京都市産業技術研究所等の共同研究で開発され、商用プラント建設へと発展した。2018年6月には商用プラントで製造した疎水化変性CNFで補強した発泡樹脂材料をミッドソールに使用したランニングシューズが販売され、世界中で700万足の売り上げを達成している。

- ・ ナノセルロースヴィークル(NCV)の開発

自動車へのCNF材料の本格投入に先立ち、京都大学が拠点となり2019年には、22の機関が参画し、ドア(外板、トリム)、樹脂ガラス、ボンネットなど様々な部材にCNF材料を利用した実走するクルマ：ナノセルロースヴィークル(NCV)が完成し、東京モーターショーに出展された。NCVではCNFによる部材の軽量化効果で一般的な自動車と比較し10%の低燃費化を達成している。

・ CNFの安全性評価

CNFおよびCNF材料の人体および環境中での安全性については長年にわたり評価されてきた。これまでのところ有害性に関する報告はなく、近年、食品や化粧品への添加剤として変性CNFが利用（商用化）されている。最近、海水中でのCNFの生分解性について評価が行われ、未処理CNFはもとよりアセチル化で疎水化したCNFも海水中で分解することが明らかになっている。

**[注目すべき国内外のプロジェクト]**

**【バイオマスプラスチック】**

・ 米国 DARPA Living Foundry プログラム (2015年～)

機能の発揮を期待される1,000個の生物由来の新たな分子を、オンデマンドに近い形で作り出す基盤技術を構築。複数の産学連携研究グループがシステム作りと情報の蓄積を進めている。

・ 米国 DOE Bioenergy Technologies Office (BETO)

「BioEnergy Engineering for Products Synthesis」、「Process Development for Advanced Biofuels and Biopower」といったプログラムで、バイオマス原料から、生物的、及び化学的にバイオ燃料、バイオ製品や化学中間体を商業的に実行可能な変換技術開発を支援（2016年度実績 約94億円）。

・ 欧州 Bio-based Industries Joint Undertaking (BBIJU) (2014年～)

バイオベース産業セクターのプロジェクトに37億ユーロ（4,440億円）の資金を提供するイニシアチブ。資金のうち9億7500万ユーロ（1170億円）はHorizon2020からの提供である。123のプロジェクトのうち「GreenSolRes」プロジェクトでは、リグノセルロース系バイオマスから building blocks 化学品（プラットフォーム化学品）であるレブリン酸（levulinic acid）を介してバイオマスプラスチックの製造を行う技術実証が行われている。

・ 内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期「スマートバイオ産業・農業基盤技術」

「革新的バイオ素材・高機能品等の機能設計技術及び生産技術開発」では、バイオとデジタルの融合により、新規バイオポリマーの探索から生産体系の確立までを一気通貫でおこなう基盤技術開発を推進。「生物機能を活用した革新的バイオ素材・高機能品等の生産システムの開発・実用化」においては、マテリアルインフォマティクス（MI）を植物由来の原料から機能の高いプラスチックの開発プロセスに応用し、イミダゾール系の新たな材料として高耐熱性を備えたポリマーが開発されるなど成果が得られつつある。

・ 科学技術振興機構（JST）先端的低炭素化技術開発（ALCA）

実用技術化プログラム「バイオマスの化学品化及びポリマー化のための高効率生産プロセスの開発」（2017～2019年度）では、食料と競合しないバイオマス資源のリグノセルロースを出発原料とし、化学品やポリマー素材を生産する技術、それらを高効率・高速度で合成する触媒や酵素、省エネルギーで目的の製品を生産できる環境調和型プロセス等の開発を実施。

・ 内閣府 ムーンショット型研究開発事業 目標4

2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現するとし、プロジェクトの一つに「非

可食性バイオマスを原料とした海洋分解可能なマルチロック型バイオポリマーの研究開発」を採択。

## 【CNF】

・スウェーデン Wallenberg Wood Science program (2008-2028年)

王立工科大学 (KTH) を中心に Wallenberg Wood Science program を立ち上げ、2028年まで毎年7.2百万ユーロの規模でCNFやリグニンの製造と利用に関する研究を行うことが決まっている。

・フィンランド FinnCERES プロジェクト (2018-2024年)

Aalto 大学とフィンランド国立技術研究センター (VTT) が共同で行っているバイオエコノミーをベースに置いた次世代CNF材料開発および関連人材育成プロジェクト。20名の博士研究員を新たに雇用し研究開発を進めている。

・JST 未来社会創造事業「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域 (2017年～)

「多段階ボトムアップ式構造制御によるセルロースナノファイバーの高度特性発現」(代表者：東京大学・齋藤)、「変性CNFを用いる機能複合材料の階層構造制御」(代表者：大阪大学・宇山)において、CNFに関する基礎的研究が進められている。

・経済産業省地域オープンイノベーション拠点選抜事業 (2020～2022年度)

京都大学生存圏研究所がCNFを柱としたバイオナノマテリアル共同研究拠点 (代表者：京都大学・矢野)として選抜され、新素材-CNFナショナル・プラットフォーム (地域企業イノベーション支援事業、近畿経済産業局、京都市産業技術研究所)と連携してCNF材料の社会実装を支援している。

・NEDO「炭素循環社会に貢献するセルロースナノファイバー関連技術開発」技術開発プロジェクト (2020～2024年度)

次の研究開発項目によりCNFおよびCNF材料製造プロセスの飛躍的な改良による大幅なコスト削減、用途開発の促進、CNF材料の安全性評価を進めている。

研究開発項目①「革新的CNF製造プロセス技術開発」7テーマ

研究開発項目②「量産効果が期待されるCNF利用技術の開発」6テーマ

## (5) 科学技術的課題

### 【バイオマスプラスチック】

バイオマスプラスチックの原料となる化学品を植物由来原料からより効率よく生産するためには、化学変換、生物化学変換に欠かせない要素である触媒開発とリグノセルロース系バイオマスや有機廃棄物などの一次処理の低環境負荷化、低コスト化が鍵となる。触媒開発においては、IT活用、自動化、極小スケール化などの手法を用いたハイスループット化が望まれる。リグノセルロース系バイオマスや有機廃棄物などの資源は植物が自身の体を支えるために作り出した強硬な分子構造であること、水分を多く含むことなどから、化学品に変換するために多くのエネルギーを必要とする。そこで、常温常圧に近い環境での反応や、水分を含んでいても効率的に反応が進行するプロセスの開発が望まれる。

## 【CNF】

天然材料である木材や農産廃棄物から、工業的に安定して高品質の製品を生産する技術や資源を地域循環させながら低コスト・低炭素で活用していくシステムの開発、国際標準化や製造プロセスや装置を含めたコストダウンのための基礎研究が必要である。また、原料である木質バイオマスの適正、材料のキャラクタリゼーションや強度等各種特性の発現するメカニズムの解明は、安定生産、品質改良、耐久性の向上等の面から継続的に必要な研究テーマである。また、CNFはそのサイズからナノ材料であるため、安全性に関する評価は継続して必要である。今後、産業的に大量に用いられることを想定するとリサイクル性の評価やライフサイクルアセスメント (LCA)、ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量 (LCCO<sub>2</sub>) の評価も必要である。

## (6) その他の課題

産業界は、提供する製品やサービスが地球環境と人々の暮らしを豊かにすることを第一に考え、環境 (environment)、社会 (social)、ガバナンス (governance)、すなわち ESG の観点から、製品やサービスのバリュー・チェーンを自ら評価している。植物由来の原料は人の手によってさまざまな場所や環境の下で作られる資源である。これを今後も長く使っていくためには、環境面だけでなく倫理面への配慮が欠かせない。まず、食料になりうる農産物を工業原料に用いることの是非については、目下さまざまな視点から議論が続けられている。利用に際しては、全世界と地域ごとの食糧事情や農業の位置づけに注視し、都度判断をしていかなければならない。次に、植物由来の原料を直接扱う事業でないとしても、用いる原料が社会的に認められているかを確認すること、すなわち、種々の持続可能性認証に示されるような正しく生産、管理された資源を原料として選ぶ配慮が必要である。また、製品やサービスが環境に与える影響を、客観的に評価し公開することが求められる方向にある。実際に、原料や製品の商取引の現場で、環境負荷値を仕様書に表すことを求める地域がある。バイオマスプラスチックやCNFは環境負荷やエネルギー消費を抑える可能性があるが、個々の最終製品とその廃棄処理までの life cycle assessment (LCA) が行われた例は少ない。これらの環境負荷を、より正しくかつわかりやすく示すシステムを整えていく必要がある。

## 【バイオマスプラスチック】

今後、新規な化学品、材料の開発にはAI、IoT、マテリアルインフォマティクス (MI) などIT関連技術の応用が欠かせない。化学変換での化合物の変換、生物化学変換での化合物の変換、ポリマーの構造と物性の関係等、現在は各々の製品の開発・製造企業に蓄えられている情報を含めてデータベース化し、利用ができるようなシステム作りなど、デジタル活用のためのプラットフォーム確立が必要である。

循環型社会では、一度使い終わった製品や生産現場で品質に届かなかったものは廃棄物ではなく資源と考える。プラスチックはその姿形に至るまでに、多くのエネルギーを費やして高分子化してきた資源であるゆえ、焼却によるエネルギーリカバリーや埋め立てといった最終処理はできるだけ避け、再び役に立つ素材として活用したい。植物由来のPEやPETなど既存のリサイクルの仕組みにそのまま適応できるバイオマスプラスチックは問題がない。一方、生分解性プラスチックや生物分子の特徴を活かしたバイオマスプラスチックを、PE、PET、PP、PSなどで成り立っているマテリアルリサイクルのシステムに混入させることは現状では避けなければならない。ただし、素材を限定したマテリアルリサイクルや、さまざまな素材を受け容れるケミカルリサイクルの普及が進めば、これらプラスチックを再び原料とすることが可能となる。なお、実際にこれらのリサイクルを正しく行っていくためには、わかりやすい廃棄物回収の仕組み、たとえば製品への使用後の取り扱いの明示とそれに沿った回収インフラの整備が必須である。

【CNF】

この10年間で基礎的な蓄積は多くなっているが、それを踏まえた新規製造法や加工技術を考えると、基礎研究と応用研究は必ずしもリンクしておらず、さらに、CNFの製造、変性に関する川上側（製紙会社）と加工（化学・樹脂会社）と利用（自動車部材、家電部材、医療材料）との連携、相互理解がなされておらず、CNF材料の社会実装を大きく妨げている。例えば、CNFを用いた軽量高強度材料、樹脂複合材料については、一部、商用化が始まっているものの、現状では複合対象の樹脂と比較して価格が高く、強度、耐熱性などの特性を保ちつつ、一層のコストダウンが求められている。CNFの電子デバイス研究開発では、国内外ともに大学を中心とした基礎レベルの研究報告が多く、企業との産学連携や企業独自での研究開発が進んでいない。CNFおよびCNF材料をバイオエコノミー、サーキュラーエコノミーの根幹となる大型素材として発展させていくためには、オープンイノベーション形式等による、川上・川中・川下を繋いだ21世紀型の学問体系の構築が求められる。

また、グローバル事業展開のためには、日本の資源的、産業的特徴を活かしたイノベーションエコシステムの創出が求められている。国際標準化をさらに進めつつ国際競争との協調を両立させることが課題である。知的財産では、オープン・クローズ戦略を構築する必要がある。近畿、中国、四国、九州等では地域の特徴を生かしたナノセルロースの拠点が形成されているが、地域経済の活性化のため、地域の資源的、産業的特長を生かした地域展開の推進が必要である。並行して、各地域拠点の強みを活かした拠点間での連携、情報共有、人的交流を国レベルで推進する必要がある。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低利用/未利用の植物資源の利用や植物由来の原料からの高付加価値プラスチック開発が進められている。</li> <li>・ セルロース系原料から化学品製造原料となる糖類を高効率、高品質に得るためのプロセスの要素技術、天然樹脂やリグニンからの特殊機能プラスチックの原料探索が行われている。</li> </ul> <p>【CNF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 昨年度のナノセルロースに関する論文・著書数は189件である。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 代表的なバイオマスプラスチックの製造企業があり、PHA (Polyhydroxyalkanate) 類やポリカーボネート (polycarbonate、PC) 系バイオマスプラスチックなどの製造に係る研究開発が行われている。</li> <li>・ 業界が先導しアカデミアがサポートする研究開発を政府が技術基盤整備から設備投資まで支援している。</li> </ul> <p>【CNF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ CNFおよびCNF材料の製造を行う5つの商用プラント、22のテストプラントが稼働している。</li> <li>・ CNF材料の製造、利用に関する地域フォーラム、地域ハブが13あり、地域の公設試験所、企業と連携して活動している。</li> </ul>

2.2 俯瞰区分と研究開発領域  
バイオエコノミー

米国	基礎研究	○	↗	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ エネルギー省 (DOE) の他、農務省 (United States Department of Agriculture, USDA) も農業振興を目的に研究開発を推進している。DOEがbuilding blocksと呼ぶ化学品は、現在20~30種類がターゲットとなっており、すでに商業化に至ったものまである。</li> <li>・ DARPAの Living Foundryプログラムが開発を目指す1,000個の新たな分子の中には、バイオマスプラスチックの原料にすることが目的になっているものもある。</li> </ul> <p>【CNF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ナショナル ナノテクノロジー イニシアティブ (NNI) が主導し、農務省食糧農業研究所、森林局、エネルギー省、国立科学財団が具体的なプロジェクト支援を行っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大学やベンチャー企業の技術を取り入れつつ、主に大手の穀物流通業や化学企業が開発を進めている。</li> </ul> <p>【CNF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 米国農務省林産研究所 (FPL)、Maine州立大学から幅広い用途をターゲットとした様々なCNF、CNCが提供されている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2000年代初頭には、フランス、オランダ、ドイツ、英国等に基礎~応用研究が可能なハブ施設が整備され、近年は、産学一体で森林資源や農業生産物の効率的な化学品への変換など、原料生産に係る研究が行われている。</li> </ul> <p>【CNF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 欧州委員会による森林分野研究コンソーシアムWood Wisdom-NetやHorizon2020を通じ、ナノセルロース開発研究への投資や標準化に取り組んでいる。ターゲット用途は、自動車、エレクトロニクス、パッケージ、建築、医薬品・ヘルスケア等を想定。北欧に加えて、スイス、フランスで盛ん。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ それぞれの国が擁する企業の優位性を活かして法制や標準化が進められている。</li> <li>・ 具体的には、PLA (オランダ)、1,4-ブタンジオール (1,4-butanediol, BDO) を用いたポリエステル (polyester, PEs) 類 (イタリア、ドイツ)、ナフサ (naphtha) (フィンランド) のプロセスが完成し、商業規模の投資が進められつつある。</li> <li>・ ポリエチレンフラノエート (PEF) については、鍵となるフランジカルボン酸 (FDCA) の製造技術の開発が異なったプロセスで米国企業と競争状態になっており、今後の展開が注目される。</li> </ul>

2.2

俯瞰区分と研究開発領域  
バイオエコノミー

中国	基礎研究	○	↗	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大気や水質汚染対策も視野に入れ、過去20年来、広範な研究開発が大学および国研で行われており、特に触媒など、製造プロセスに直接関わるものに力が注がれている。</li> <li>・ リグノセルロース系バイオマスや植物油脂などから排出される二酸化炭素を、直接化学品に変換する技術の開発が多く試みられている。</li> <li>・ 生物化学変換の研究では、合成生物学 (synthetic biology) の国際ネットワークに参加するなど、加速が図られようとしている。</li> <li>・ 国家発展改革委員会 (National Development and Reform Commission、NDRC) が汚染防止法制中で、使用禁止とするプラスチック製品の提示とバイオマスプラスチックへの置き換えを示した。</li> </ul> <p>【CNF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2019度のナノセルロースに関する論文は1398件で世界第一位。全世界の論文・著書数の1/4強を占める。数億円規模の大型プロジェクトとしてはCHINESE ACADEMY OF FORESTRY SCIENCESが行っている”Structural regulation and directed recombination of wood and its efficient utilization”がある。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 積極的なインフラ整備、設備投資や海外からの生産技術誘致により、原料や材料の安定した生産が実現されつつある。</li> <li>・ PLA、ポリアミド (polyamide、PA) に加え、BPS (polybutylene succinate) 系やPEFなどのPEsの開発が欧米日に肩を並べるレベルになっている。</li> <li>・ 材料の加工や他の材料との複合化技術については、2014年以降特許出願数が日本を大きく上回っている。</li> </ul> <p>【CNF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 急激に活発化していると思われるが、詳細は明確でない。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	→	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 有力企業が主導する形で化学研究院 (Korea Research Institute of Chemical Technology、KRICT) やKAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) といった国の研究機関が密接に協力し、開発を行っている。</li> </ul> <p>【CNF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ナノセルロースに関する論文は2019年度183件で、日本とほぼ同じ。</li> <li>・ 山林庁 (Korea Forest Service) 傘下の研究機関 National Institute of Forest Serviceを中心にナノセルロースの研究開発が進んでいる。</li> <li>・ 2020年から現代自動車も参加する4年間の新プロジェクトが開始された。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<p>【バイオマスプラスチック】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 輸送機器 (自動車) への応用を企業が牽引しており、耐熱性や強度、成形性の改良を図っている。</li> <li>・ 建築土木 (建築材料) も加えた特許出願状況は、中国、日本に次いで活発で、欧米とほぼ同水準。</li> </ul> <p>【CNF】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ SAMSUNGやLGが国際市場を見据えて用途開発を推進。</li> <li>・ SAMSUNGはガラス繊維強化材料等について2018年の時点で300名の研究者をCNF材料分野に投入し、EUのプラスチック構成製品の廃棄物管理に関する法規制化への対応を目指している。</li> </ul>

カナダ	基礎研究	○	↗	【CNF】 ・ 2019年の論文数は270件で日本の1.5倍。 ・ トロント大学グループ、アルバータ大学グループがナノセルロースの開発研究を推進している。
	応用研究・開発	○	↗	【CNF】 ・ 天然資源省の支援の下、民間非営利研究機関であるFP Innovationsが中心となりナノセルロースの研究開発と実用化を推進している。2012年には製紙会社と共同でCelluForce社を設立し、NCC商用プラントを建設している。2014年にはKruger社と共同で、セルロースフィラメントの実証プラントを稼働させた。自動車、航空機、食品、医薬品、パッケージ、エレクトロニクス、製紙、エネルギーと幅広い用途への展開を検討している。
北欧	基礎研究	◎	↗	【CNF】 ・ スウェーデン王立工科大学（KTH）木材科学センター（WSC）が基礎的研究およびCNFをベースとした次世代の高機能材料開発を進めている。昨年度のナノセルロースに関する論文・著書数は178件と日本とほぼ同じ。 ・ フィンランドAalto大学とVTT（フィンランド国立技術研究センター）が共同で、バイオエコノミーをベースに置いた次世代CNF材料開発および関連人材育成プロジェクトを実施。
	応用研究・開発	◎	↗	【CNF】 ・ スウェーデンでは、製紙関連研究機関であるRISEがCNF製造、利用に関する応用的研究を進めている。 ・ フィンランドStora Enso社はトン単位でのMFC（マイクロフィブリル化セルロース）販売を行っている。 ・ ノル웨이Borregard AS社がExilvaの商標でMFC（マイクロフィブリル化セルロース）を中心に販売をしている。接着剤や塗料用増粘剤、パーソナルケア商品、パッケージ材料用途が主たる出口である。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 循環利用とライフサイクル評価（環境・エネ分野 2.2.10）
- ・ 構造材料（複合材料）（ナノテク・材料分野 2.4.2）

参考・引用文献

- 1) ナノセルロースフォーラム。「図解よくわかるナノセルロース」日刊工業新聞社, 2015
- 2) 高田克彦、林知行編。「フォレスト・プロダクツ」. 森林科学シリーズ4, 共立出版, 2020
- 3) 令和元年度 NEDO「非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発/高機能リグノセルロースナノファ

イバーの一貫製造プロセスと部材化技術開発」成果報告書. 2020年2月

- 4) 平成27年度 特許出願技術動向調査報告書 (概要) ナノファイバー. 2016年2月 特許庁.  
[https://www.jpo.go.jp/shiryoku/pdf/gidou-houkoku/h27/27\\_10.pdf](https://www.jpo.go.jp/shiryoku/pdf/gidou-houkoku/h27/27_10.pdf) (2021年2月1日アクセス).
- 5) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所、セルロースナノファイバーの検出・定量の事例集、セルロースナノファイバーの有害性試験手順書、セルロースナノファイバー及びその応用製品の排出・暴露評価事例集. <https://www.aist-riss.jp/assessment/45276/> (2021年2月1日アクセス).
- 6) Sweden, Wallenberg Wood Science program. <http://www.wWSC.se> (2021年2月1日アクセス).
- 7) Finland, FinnCERES project. <http://www.finnceres.fi> (2021年2月1日アクセス).
- 8) A. Laufer, *Biorefineries*, K. Wagenmann and N. Tippkötter (eds.), *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* 166 (New York: Springer, 2019), doi: 10.1007/978-3-319-97119-3.
- 9) CNFに関し、2019年度の論文・著書数はcellulose nanocomposite\*, cellulose nanofiber\*, cellulose nanowhisker\*, cellulose nanofibril\*, cellulose nanocrystal\*, microfibrillated cellulose\*, cellulose nanofibre\*, nanocellulose\*, nanocrystal cellulose\*, lignocellulose nanofiber\*, nanofibrillated cellulose\* を検索ワードとしWeb of Scienceで検索した。

## 2.2