

2.4.2 複合材料

(1) 研究開発領域の定義

金属やプラスチック、セラミックスなど2種類以上の材料を組み合わせることによって、個々の材料では持たない機能・性能を有する構造材料の創出をめざす研究開発領域である。特に、繊維状の強化材とマトリックス材を複合化した材料は、均質材料では達成できない高比強度（引張強さ/比重）や高比剛性（剛性/比重）、高耐熱性などの特性を発揮可能であり、代表的な材料には炭素繊維強化プラスチック（CFRP）、セラミックス基複合材料（CMC）、セルロースナノファイバー複合材料などがある。

(2) キーワード

複合材料、炭素繊維強化プラスチック、炭素繊維、熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂、SiC繊維、セラミックス基複合材料、セルロースナノファイバー、CNF、高比強度、軽量化、プリプレグ、樹脂含浸成形法、RTM、CFRP、GFRP、SiC/SiC、CMC、MMC

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

複数の異なる材料の複合化によって、均質材料では達成できない特性を発揮する複合材料は、目的に応じて設計可能な材料ともいえる。省エネルギー、低環境負荷（CO₂排出量削減）という地球的課題に対して、軽量高強度を実現する複合材料は自動車、航空機、風車発電等、輸送・エネルギー分野への適用により、その解決に直接的に寄与する。なかでも、繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics: FRP）は高比強度、すなわち強くて軽い、という点で金属材料に大きく優り、さらに理想的には、構造物にかかる荷重の分布に合わせて繊維（強化材）を配置することで、資源効率の良い材料として機能する。一方、金属材料と比較して現状では高価格であり、信頼性、加工性、生産性等にも課題が多いことから、まだ金属系構造材料ほどには普及していないのも事実である。また、セラミックス基複合材料（Ceramics Matrix Composites: CMC）や金属間化合物に関する技術革新は、材料の軽量性と耐熱性を向上させ、航空機用エンジンの高効率化に大きな期待が寄せられている。さらに、航空機分野に比べて市場規模は小さいものの、宇宙分野や原子力発電の燃料被覆管用としても、特殊環境下で高信頼性が維持される材料の候補として期待が高まっている。さらに、再生産可能な資源の有効活用および石油資源からの脱却の観点から、強化材としてセルロースナノファイバーが注目を集め、産学官での取組が活発化している。

[研究開発の動向]

一般に、複合材料は強化材としての繊維と母材としてのマトリックスから構成され、前者は炭素、ガラス、セラミックス、セルロース、後者は樹脂、セラミックス、金属が代表的である。実用化された複合材料のなかではFRPがもっとも普及しており、FRPにはガラス繊維強化プラスチック（Glass Fiber Reinforced Plastics: GFRP）と炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP）がある。もっとも使われているのはGFRPであり、その用途は主には浴槽・浴室ユニット等の住宅機材、他に建設資材、輸送機器、浄化槽などがある。一方、CFRPはGFRPの数倍の比強度を有するが、高価であるため、一般的な用途はスポーツ用品等に限定されてきた。しかし近年、輸送機器への適用により、CFRPに対する注目度が高まっている。その代表例が航空機であり、例えばボーイング787の機体構造重量の約半分がCFRPである。エアバスA350においても複合材は53%と、主翼、胴体、尾翼など主要部位に採用されている。2024年1月2日に羽田空港で発生したエアバスA350の炎上事故はCFRPを使った新世代旅客機の安全性を評価する初めての機会になるとして注目されている。また、自動車についても、2013年11月にドイツBMW社は、世界で初めてCFRPを車体の主要骨格に採用した電気自動車「i3」を発売した。加えて、2017年にはトヨタ

自動車「プリウスPHV」の新モデルのバックドア骨格にCFRPを採用したことが発表された。

CFRP技術開発は素材開発と成形技術開発に大別される。素材については、炭素繊維にアクリル繊維を使用するPAN (Polyacrylonitrile) 系、ピッチを使用するピッチ系がある。いずれも日本発の技術であり、その生産量のおよそ6割超を日本メーカーが占める。前述のボーイング787の場合も、CFRPの70%が日本メーカーにより製造されている。

また、炭素繊維は用途・成形法により、長(連続)繊維と短繊維が使い分けられている。炭素繊維はアクリル繊維を空气中・高温で耐炎化(焼成)して製造するため、高コストかつ高CO₂排出であり、その大幅改善が求められる。一方、マトリックス樹脂には熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂があり、これらも用途・成形法により使い分けられている。

成形法については、プリプレグ(強化繊維の織物に樹脂を含浸させたシート状の中間基材)をオートクレーブ(圧力釜)にかける方法が代表的であり、高強度、高剛性かつ品質安定性に優れる。一方、高価であり、成形性、生産レートに難があるため、用途が限定される。例えば航空機のように高価な材料の適用が認められやすい場合でも、主翼、胴体という主構造を除く尾翼、ドア等には、新たな成形法が望まれる。その候補は脱オートクレーブ成形法であり、プリプレグを用いる方法とRTM(Resin Transfer Molding: 樹脂含浸)成形法がある。RTM成形法は繊維のみをあらかじめ積層し、その後に樹脂を含浸させるので高価なプリプレグが不要となる。これは1970年代に国内において確立されたが、その発展形であるVaRTM成形法(真空樹脂含浸成形法)は低温で樹脂含浸を行うもので、より低コスト化が可能となる。脱オートクレーブ成形法の最重要課題の1つはボイド(空孔)の低減である。

さらに、自動車のように、安価かつ成形性、高生産性がより一層重視される生産には、プレス成形、射出成形等が適している場合が多い。以上の成形法を高性能かつ高コストの順に並べると、オートクレーブ、RTM、プレス成形、射出成形となる。このとき、最適な素材の組み合わせも成形法に依存する。繊維については、オートクレーブ、RTMには長繊維、プレス成形、射出成形には短繊維が用いられる。一方、樹脂は、オートクレーブ、RTMには熱硬化性樹脂、射出成形には熱可塑性樹脂、プレス成形には両方の樹脂が候補となりうる。なお、樹脂については、必ずしも成形性、生産性だけを考慮して使い分けることにはならない。例えば、航空機エンジンのファンに適しているのは熱可塑性樹脂と考えられているが、これはバードストライクに対する耐衝撃性が熱硬化性樹脂より優れているためである。ただし同じエンジン部品でも、圧縮機のより高温部(最高でおよそ300°C)に適用可能なCFRP開発の場合、温度特性から熱硬化性樹脂が適当と考えられている。

また、複合材成形におけるロボティクスあるいは自動化の流れが加速されている。既に、ボーイング787においてはプリプレグ自動積層装置が利活用されている。現在は、比較的幅広なプリプレグに基づく成形から細幅のプリプレグ束を用いる取り組みが世界的に注目を浴びている。特に、熱可塑のプリプレグ束を用いて、直接その場で固化するIn-situ consolidationは次世代の技術だと考えられている。こういった細幅のテープを用いたときには、形状の自由度が広がる反面、ラップ(重なり)やギャップ(すき間)といった欠陥が生じやすい。この辺りの生産時欠陥の改善を実験あるいは解析の両面から実施した論文が数多く公刊されている。このような流れは航空機機体よりも小さな部品にも展開されており、その場合には、より小さな装置である3Dプリンターによって成形される。現在、低価格にて、連続繊維、不連続繊維を扱える装置が数多く販売されており、活況を呈している。

FRP以外の複合材料には、金属、セラミックスをマトリックスとする金属基複合材料(Metal Matrix Composites: MMC)、セラミックス基複合材料(CMC)がある。なかでもCMCは①酸化物系CMC、②非酸化物系CMCに大別され、非酸化物系CMCであるSiC/SiC CMCはNi基超合金を超える軽量耐熱材料として、民間航空機用エンジンの部品にGE社により実用化されている。フランスのサフラン社からもCMCを航空機用エンジン材料として実用化したことが報告されている。このために、プラット・アンド・ホイットニー(P&W)社やロールス・ロイス(RR)社においても開発が急速に進められており、実用化の手前であると推測される。国内重工業メーカーにおいても航空機用エンジン部品用の開発が進められ、この他にも、地上発

電用エンジン部品や原子力発電に用いられる燃料棒への用途開発が行われ、自動車のブレーキローター用として開発されたものは、オプションパーツ用が主ではあるが、使用量が増加する傾向を示している。

SiC/SiC CMCは、用途に応じた実用材料への選択と集中が行われ、ここ数年間は実使用環境下で生じる問題を解明し、材料の性能向上に活かすという視点からの研究開発が行われてきた。複合化形態は、SiC繊維の織物にマトリックスとしてのSiCを含浸させたものやSiC繊維を並べたものを積層した繊維構造を持ち、繊維とマトリックス間界面のコーティングにはBN（窒化ホウ素）が用いられ、航空機用としての部品製造技術には熔融シリコン含浸法（MI）法と呼ばれる熔融Siと炭素の反応を利用してSiCを生成させる製造技術が国際的に多数を占めるようになった。日本ではこの方法を利用して、将来の検査技術に対する国際的共同研究を推進するためのSiC/SiC国際標準試験材料が開発された。さらに、酸化物系、非酸化物系を問わず、損傷許容性を利用した部品設計の考え方や、使用環境下でのクリープや疲労、あるいは両者が混合した環境などにおける長時間耐久性についての研究開発へと関心が移行している。特に、SiC/SiCでは2700°F級材料としての期待から、1400°Cでの実使用に耐えるマトリックス材料の改質や使用環境に応じた耐環境コーティング（Environmental Barrier Coating：EBC）の開発も行われている。EBCの研究開発は欧米で活発に行われている。研究開発にはSiC/SiCを使用する実際の環境を知ることが必要であり、この点が国内での研究開発を難しくしている。CMC全般の課題としては、材料の汎用化という観点からは、現段階では部位コストに占める製造コストの割合が大きく、低コストプロセスを完成させることが重要と考えられている。加えて、部材としての実使用に耐える信頼性評価方法の構築や使用時の劣化の定量検出が重要になっている。CMCの大きな利点が損傷許容性にあるため、部材として使用する際に、その特性を活かした使用を保証できる非破壊検査手法も求められている。これらの解決策として、使用環境下でのバーチャルテスト技術の確立が開発を加速するための技術ツールとして望まれている。今後は、実用化に伴って発生する信頼性保証技術や使用時の劣化診断技術等の構築に必要な、基礎から応用に至る広範囲な技術の開発と適用が望まれる。

近年、持続性という観点から再生可能かつ生物由来の有機性資源であるバイオマス素材が注目されているが、その1つとしてセルロースナノファイバー（Cellulose Nano Fiber：CNF）を強化繊維として用いる複合材料開発に向けた動きも活発化している。CNFは、木材などの植物中から得られるパルプをナノレベルまで解きほぐしたものであり、鉄の5倍の強度で1/5の軽さ、熱膨張率は石英ガラス並という特性を持っているため、樹脂などと複合化することで軽量高強度複合材料や軽量で熱寸法安定性の高いプリント基板への利用が期待されている。また、CNFの原料であるセルロースはあらゆる木材や植物から抽出可能であるため、資源枯渇の心配がないことも特徴である。一方、CNFは表面に水酸基、あるいは水中で解離するカルボキシル基、リン酸エステル基、硫酸エステル基などが多数存在するため親水性が極めて高く、疎水性の石油由来の樹脂と複合化するには表面を化学処理する必要があるため、製造コストが高いという問題がある。そのため、現状では機能性添加剤として親水性CNFを用いた大人用消臭おむつ、かすれないボールペンインク、エコタイヤの部材、抗菌マスク、高級自動車用塗料、化粧品や歯磨き剤などでの実用化に留まっている。

本研究開発領域の論文動向をみると、領域全体および各国の論文数は増加している。特に、中国の増加が顕著である。中国に次ぎ、欧州、米国、インドに関しても論文数の増加傾向が続いているが、欧州・米国は中国の勢いに押され論文数シェアは減少傾向である一方、インドは論文数シェアも増加傾向にある。日本の論文数、論文数シェアとも5位（1位中国、2位欧州、3位米国、4位インド）を保ってはいるが、中国の勢いに大きく離されている。特許ファミリー件数の各国シェアに関しては、2022年において中国に次ぎ日本は2位であるが、2018年以降は横ばい傾向である。（詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」を参照）

（4）注目動向

〔新展開・技術ピックアップ〕

複合材料全般で注目すべき技術の1つがデータサイエンスの導入である。材料成形プロセスあるいは材料

種の選択等に、AIやビッグデータといったデータサイエンスの適用が進められている。今後はより広範囲での利用が期待される。また、モデリング・シミュレーションの研究開発も、成形時の樹脂挙動、成形品の機械的特性等を高精度で予測するために重要である。これらとデータサイエンスが融合することで、複合材料におけるデジタルツインが構築されることが予想される。

CNFに関しては、オールジャパン体制でナノセルロース（セルロースナノファイバー、セルロースナノクリスタル、およびそれらを用いた材料の総称）の研究開発、事業化、標準化を加速するための産業技術総合研究所コンソーシアム「ナノセルロースフォーラム」が2014年6月に発足したが、2020年3月に発展的に解消した。その後、新たに企業主導の「ナノセルロースジャパン（NCJ）」が発足し、木材、製紙、化学・樹脂、自動車、電気・電子製品など幅広い分野から約100社の企業、45名の企業等の個人会員、101の特別会員（大学、国研、公設試験所、県や市のメンバー等）、省庁のオブザーバーが参画している。並行して、東海、近畿、中国、四国などの地域においてもナノセルロースに関する研究会やコンソーシアムが活発に活動している。CNFの社会実装に向けた産官学のダイナミックな動きは、ますます活発化すると考えられる。また、2023年8月、日本製紙株式会社が製造販売するCNF強化樹脂「cellenpia®PLAS」がヤマハ発動機が北米向けに販売する水上バイクのエンジンカバーに採用されたことが発表された。これはCNF強化樹脂を用いた輸送機器部品の量産化としては世界初の事例である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

• CFRP

日本は炭素繊維の生産では世界市場で圧倒的な強さを維持しているが、成形技術においては、米国、ドイツが日本と同等以上とみられる。主に、米国は航空、ドイツは自動車を対象としてその技術を磨いている。代表的な研究開発拠点として、米国ではデラウェア大学、ドイツではフラウンホーファーのICT（化学技術研究所）、生産技術・応用マテリアル研究所（IFAM）があげられる。また、英国のブリストル大学を中心とするNCC（国立複合材料センター）も、航空機向けに特化して、産学官コンソーシアムを形成している。一方、アジアでは中国、韓国が近年、世界の炭素繊維市場に進出しつつある。国内では、NEDO「革新的新構造材料等研究開発」（2014～2022年度）、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的構造材料」（2014～2018年度）がある。前者が主に自動車向け、後者が航空機向けであり、成形技術等の開発が行われている。2018年度より開始されたSIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（2018～2022年度）においては、上記SIP「革新的構造材料」で開発してきたマテリアルズインテグレーション（MI）の素地を活かし、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」に対応した次世代型MIシステムを世界に先駆けて開発するとともに、MIを活用して、競争力ある革新的な高信頼性材料の開発や設計・製造・評価技術の確立に取り組み、発電プラント用材料や航空用材料等を出口に先端的な構造材料・プロセスの事業化をめざしている。特に、東北大学が中心となって開発されたCoSMIC（Comprehensive System for Materials Integration of CFRP）は計算機上でプロセス・組織・特性・性能をつないで複合材料開発を加速する統合型材料開発システムであり、計算機上で材料の諸事象をバーチャルに再現することで、材料・製品開発の時間短縮・コスト低減を主目的としている。既に、数多くの企業が本システムを利用している。また、NEDO「次世代構造部材創製・加工技術開発」（2015～2019年度）では、製造プロセスモニタリング技術の開発を進めている。NEDO「次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト」（2020～2024年度）においては中小型機の低コスト・高レートな成形組み立て技術を目指し、設計から製造までを一貫して取り組んできた。なかでも、高レート生産に適した熱可塑性複合材の積極利用に、その特徴がある。

• SiC/SiC CMC

上記SIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（2018～2022年度）においては、国内の重工業3社が参画してCMCの研究開発に役立つシミュレーションツールを作成した。JST未来社会創造事

業「持続可能な社会の実現」領域（2019～2021年度）においては、先進的複合材料の因子分類による疲労負荷時の複合劣化機構の解明と寿命予測が行われた。NEDO「次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト」（2020～2024年度）では1400℃級CMC材料の実用化研究開発、高レート・低コスト生産可能なCMC材料およびプロセス開発が行われている。さらに、NEDO「クリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業」（2020～2025年度）では航空機エンジンの燃費改善に寄与するCMCの信頼性・品質保証手法の開発に関する研究が開始され、そのなかでCMCの信頼性保証技術開発として、疲労寿命に関する研究が行われている。米国においては軍や企業からの支援によりCMCの広範囲な技術分野で研究開発が行われている。最近では、特定の企業と特定の大学間の連携が強化されている。フランスではボルドー大学、ドイツではフラウンホーファー研究機構、英国ではバーミンガム大学などが企業との密接な関係を持ち公的資金ならびに企業からの支援により研究開発を行なっている。

• CNF

軽量・高強度・低熱膨張などの特性を示すCNFは次世代のグリーンナノ材料として注目を集め、2004年以降、論文数や特許数が増加している。その中心となっているのは、森林資源が豊富で製紙産業がさかんな北欧、北米、日本である。近年、中国の追従も無視できない状況にある。2011年からはフィンランド、カナダ、米国、日本の主導で国際標準化の議論も始まっている。国内における研究プロジェクトとしては、CNFを活用することで自動車の10%軽量化をめざした環境省「NCV (Nano Cellulose Vehicle) プロジェクト」(2016～2019年度)があり、京都大学をはじめとする21の大学、研究機関、企業等のサプライチェーンで構成される一気通貫のコンソーシアムが設立され、それらの成果として2019年10月に開催された東京モーターショーでは、NCVが展示され、国内外から大きな関心を集めた。同モーターショーではCNFを用いた自動車用エコタイヤも展示された。JST未来社会創造事業「低炭素社会」領域（土肥義治分科会長）では、次世代ナノセルロース材料を創製するための階層構造制御技術に関する研究テーマ2件が採択され、2018および2019年度から実施されている。また、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」（2020～2024年度）では関連するテーマを募集し、2020年度には関連技術開発と安全性評価の合計14件を採択している。特にNEDOプロジェクトでは、CNFの使用量増加と、それに対応して石油系プラスチックの使用量の減少が期待されるCNF/高分子複合化に関するテーマが主体となっている。これまでは、親水性のCNFを疎水性の高分子基材に凝集させることなく均一に複合化させることが課題であった。NEDOプロジェクトではこれらの課題をCNFの表面改質や複合化技術、各種添加剤との組み合わせによって克服することを主眼としている。その結果、CNF含有高分子複合材料の物性の向上と均一性が達成され、耐水性、耐湿性、長期安定性等の付与技術を構築し、各種高機能材料および汎用材料への利用量拡大をめざしている。

また、複合材料に特化したものではないが、文部科学省における令和3年度戦略目標「資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御」の下に設定されたJST戦略的創造研究推進事業CREST「分解・劣化・安定化の精密材料科学」（研究総括：高原淳・九州大学特任教授、2021～2028年度）およびさきがけ「持続可能な材料設計に向けた確実な結合とやさしい分解」（研究総括：岩田忠久・東京大学教授、2021～2026年度）において、無機フィラーと分解性樹脂からなる複合材料の分解を可能にする界面設計をはじめとする「分解の科学」を分子レベルからマクロレベルまで多階層的に理解し、学問的に体系化することを目指した研究開発が行われている。さらに、令和6年度戦略目標「選択の物質科学～持続可能な発展型社会に貢献する新学理の構築～」の下、応用・開発研究の土台となる複雑・混合系からのモノづくり・物質循環を実現する基礎学理の構築を目的としたJST戦略的創造研究推進事業CREST「材料創製および循環プロセスの革新的融合基盤技術の創出とその学理構築」（研究総括：岡部朋永・東北大学教授、2024～2031年度）およびさきがけ「材料の創製および循環に関する基礎学理の構築と基盤技術の開発」（研究総括：北川進・京都大学特別教授、2024～2029年度）が発足した。

(5) 科学技術的課題

CFRPの材料・プロセス技術の進化に伴い、その特長を最大限に活かす構造の設計技術の要望も高まっている。CFRPはブラックメタルとも呼ばれるが、それは肯定的な意味とはいえ、いまだに金属材料の代替材料という位置づけから脱していない。これまでほとんどの場合、構造設計は金属材料（機械的特性が均一）を前提としたままで適用されてきた。部材内部で機械的特性の分布を変化できることがCFRPの強みであり、それを活かした設計・成形技術により、さらなる軽量化、ひいては省エネルギー、コスト削減が期待される。

さらに、切削等の二次加工技術の進歩も不可欠である。3次元・複雑形状に対して前述の成形技術開発が進められる一方、穴あけ等は成形時に行うことは無理である。併せて、接合技術の重要度も増している。CFRPが全ての特性において金属材料に優るわけではないので、鉄鋼、アルミニウム合金、チタン合金等の異種材料と組み合わせたマルチマテリアル構造が最適な場合もある。そのための異種材料接合技術がキーテクノロジーの一つとなる。例えば、金属材料と同等にボルト接合を行うことは、（一次）部材成形に加えてさらにコスト増加の要因となる。そこで、接着剤による接着に大きな期待が寄せられる。これは既に構造物に多用されている技術ではあるが、主たる荷重を支持する部分に用いられるほどの信頼性は確保されていない。

また、CFRPをはじめとする複合材料の特長を十分に発揮するためには破壊機構の解明が不可欠であるが、まだ十分とはいえない。結果的に、CFRPにおいては板厚を増す、接着とボルト接合を併用するなど、軽量化を犠牲にして安全率を高くする構造を選択するケースが多い。複合材料部材の寿命等、パフォーマンスの評価方法の標準化およびその認証に関する取り組みも併せて重要である。加えて、航空機等向けの大型部材向け生産ライン、大量生産に対応した自動化技術、検査技術においても、欧米に遅れをとっており、キャッチアップが求められる。

複合材料の研究開発においては、構造設計と材料設計が一体となって行われることが多く、研究者も機械工学系が多い傾向にある。しかし、特に、破壊機構、接合の研究を通してさらに進化させるためには、繊維/樹脂間、接合面等の界面の解析・制御をはじめとする、ナノ・ミクロスケールでのアプローチが重要であり、材料科学工学系との協働の促進が求められる。特にCFRPは炭素を主体とする材料であるため、金属系、セラミックス系と比較して、物理解析技術を適用しにくいことが障壁になっている。その進歩がCFRPの発展に大きく寄与することは間違いない。

また、成形に関する設備導入コストが膨大であり、新規参入の障壁が高いことも課題の1つになっている。このため、利用方法は従来の金属の延長線上にあり、ブラックメタルとも揶揄されるが、3次元プリンターはその参入障壁を下げる契機になる可能性がある。前述の通り、連続繊維を利用できる小型の3次元プリンターが低価格で購入可能であり、これにより、より自由度の高い製品の製造が可能となる。CADあるいは各種設計ツールとの連携もスムーズであり、データサイエンスの適用も期待できる。

CNFによる軽量・高強度高分子複合材料開発では、親水性のCNFを疎水性の高分子基材中に均一に分散させる技術の構築、そのメカニズム解析、分散状態の定量的評価方法の開発が求められている。繊維強化高分子複合材料の強度は、その繊維のアスペクト比（長さ/幅の比率）に支配されるので、幅が細く、長さが長いCNFの構造を維持したまま、凝集せずに高分子基材中で複合化できれば、低添加量でCNFの親水性、耐水性の低さ、耐湿性の低さの欠点が現れることなく、軽量高強度高分子複合材料に変換できる。そのためには、CNFの表面改質、添加剤によるCNFのその場表面改質、および適正な複合化技術の構築が必要となる。それらを達成することで初めて、バイオマス由来のCNFの大量利用が可能となり、その先に石油資源の使用量の削減、大気中の二酸化炭素の削減、地球温暖化防止、異常気象防止、海洋マイクロプラスチック問題の解決へとつながる技術となり得る。

(6) その他の課題

航空機産業はCFRP、SiC/SiC CMCの今後の巨大ユーザーと期待されるが、機体はボーイング、エアバス、エンジンはP&W社、GE社、RR社と、米欧メーカーが圧倒的に強い。したがって、彼らの動向を常に注視し、

彼らの開発スケジュールに合わせて新技術等を提案する必要がある。標準化についても同様である。さらに、採用までの所要時間を短くするために、日本国内に認証機関を持つことも重要である。これらは、まさに府省連携、産学官連携で取り組まなければ、目標達成は極めて困難である。その際、連携の中核となる拠点形成も必要となる。また、現状ではSiC繊維、炭素繊維とも日本企業が優位性を有しているものの、諸外国のキャッチアップが進んでいるため、経済安全保障の観点からも適切な措置が求められる。

(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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 大学、国研による、CNTベースのナノコンポジット、繊維/樹脂界面の解析・制御の研究開発。 大学中心の、植物由来原料によるCFRP素材、セルロースナノファイバー関連の開発。 国研中心の、耐熱CFRPの開発。 2017年に東京工科大学内にCMCセンターを設立。 セルロースナノファイバーに関する基礎研究が東大、京大、九大を中心に活発化。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 経産省「革新的新構造材料等技術開発」による自動車用CFRP成形技術開発。 NEDO「次世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造）」による構造ヘルスマニタリング技術の開発。 内閣府SIP「革新的構造材料」による、航空機用CFRP脱オートクレーブ成形技術、強靱性オートクレーブCFRP材料開発。 航空機エンジンメーカー中心の、高性能・高生産性SiC/SiC CMCの開発。 宇部興産がSiC繊維を製造できる技術を有する。 原子力発電用のSiC/SiC CMCの開発が進められている。 ほぼ全ての製紙産業と一部の化学産業がナノセルロースの製造と応用展開を進めている。 産総研のコンソーシアム「ナノセルロースフォーラム」の後継として、企業主導の「ナノセルロースジャパン」が発足し、ナノセルロースの実用化を目指した情報交換の場として機能。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> Materials Genome Initiativeの下での計算材料科学による材料設計。 CNTなどを用いたナノコンポジットなどの基礎研究。農務省林産物研究所や大学で、数種類のナノセルロースを製造し、企業にサンプル提供。 CMCの応用に伴って発生した課題解決のための基礎研究が産学連携体制で開始。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> デラウェア大学複合材料センターによる、各種成形技術およびそれを前提とする材料設計技術、生産ライン最適化技術の開発。 エジソン溶接研究所（EWI）による、金属-CFRPの接合・接着技術の開発。 DOE/IACMIプログラムによるCFRP材料・成形技術、及び成形・損傷シミュレーション技術。 1m級の酸化物系CMCを製造できる企業が存在。 GE社およびP&W社ではSiC/SiC CMCを航空機エンジン材料としての応用展開が進展。 P&W社がカリフォルニア州にCMC研究開発施設を設置。 ナノセルロースの先端材料への実用化を目指したベンチャー企業が存在。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ナノコンポジット、ナノ繊維強化プラスチックの研究への巨額の公的投資。 主に北欧では、国研や大学を中心にセルロースナノファイバーの基礎研究が活発化。 CMC用強化素材とCMC信頼性保証技術の基礎研究が進展。

欧州	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ連邦教育研究省 (BMBF) のファンディングによる「マルチマテリアルシステム」における複数構造材料の組み合わせによる車体軽量化技術開発。 フラウンホーファー化学技術研究所 (ICT) による、各種成形技術およびそれを前提とする材料設計技術の開発。 フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所 (IFAM) による、大型部材の生産・検査自動化技術、接合・接着技術 (異種材料間含む) の開発。 ドイツCFK-Valley Stade, MAI Carbon ClusterなどによるCFRP成形技術拠点。 ドイツではすでにCF/SiC CMCを軽量耐摩耗材料として自動車やオートバイのブレーキローターに使用している。近年、ドイツ以外の国でも用途が広がり使用量が増加している。 産官学の連携体制が強化され、CMC開発拠点を形成。同時に、EUとイギリスではCMCに関する共同研究が進んでいる。 ドイツでは、SiC繊維が販売され始めるとともに、SiC/SiC CMCの販売も始まった。 Ox/Ox CMCの製造技術が完成し、材料として販売されている。 英国溶接接合研究所 (TWI) による、金属-CFRPの接合・接着技術の開発。 英国 (EPSRC) の高価値センター“CATAPULT”プロジェクトによる、ブリストル大学中心の産学官コンソーシアムの航空機向けCFRP研究開発拠点、国立複合材料センター (NCC)。 製紙産業でナノセルロースやマイクロフィブリル化セルロースの製造・販売を開始。プラスチック容器に代わる環境適合型食品容器分野をターゲットにしている。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 日本のISMA、SIPに相当するような国家プロジェクトは持たないが、政府は有力大学へ個別に研究資金を提供している。特に国家支援の航空機メーカーであるCOMACが関係したものが多く、豊富な資金力で、欧米からの購入により設備、ソフトを揃えている。 セルロースナノファイバーに関しては、学術的な論文は多数発表されている。関連学術論文の約半数が中国発。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 1960年に国家建材局の下に4研究所を設立、1999年に組織改革し、企業活動を開始。 航空機、電気自動車、風力発電用の応用開発に多額の資金投資中。 紙以外の用途に対するナノセルロースの研究開発はさかんではない。 SiC繊維の特性向上研究および国内製造・実用化が進展。
韓国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 日本のISMA、SIPに相当するような国家プロジェクトはない。個々の研究者による研究が中心。 ナノセルロースに関する論文数が増加傾向にある。先端分野への応用研究が主体。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 2006年に政府主導で本格的な炭素繊維開発に入り、2013年に商用化。 韓国材料科学研究所 (KIMS) による、大型FRP部材 (風力発電ブレードなど) の性能評価。他に韓国炭素収束技術研究所 (KCTECH) による自動車向けCFRPの開発がある。 一部の企業がナノセルロースをサンプル提供している。日本のナノセルロースフォーラムのような組織の設立を検討中。

(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

参考・引用文献

- 1) 福田博, 邊吾一, 末益博志 監『新版 複合材料・技術便覧』(東京: 産業技術サービスセンター, 2011) .
- 2) 物質・材料研究機構 調査分析室『調査分析室レポート: 社会インフラ材料研究の新たな展開: 安全・安心な持続性社会の構築へ向けて』(茨城: 物質・材料研究機構, 2013).
- 3) 武田展雄, 越岡康弘「航空宇宙機複合材構造の構造ヘルスマニタリング技術の進展」『非破壊検査』60巻3号 (2013) : 157-164.
- 4) Shu Minakuchi, et al., “Life cycle monitoring and advanced quality assurance of L-shaped composite corner part using embedded fiber-optic sensor,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 48 (2013) : 153-161., <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.01.009>.
- 5) 新構造材料技術研究組合 (ISMA) , <https://isma.jp>, (2023年2月17日アクセス) .
- 6) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「革新的構造材料 (終了課題)」<https://www.jst.go.jp/sip/k03.html>, (2023年2月17日アクセス) .
- 7) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」<https://www.jst.go.jp/sip/p05/index.html>, (2023年2月17日アクセス) .
- 8) University of Delaware, “Center for Composite Materials (CCM) ,” <http://www.ccm.udel.edu/>, (2023年2月17日アクセス) .
- 9) EWI, <https://ewi.org>, (2023年2月17日アクセス) .
- 10) Fraunhofer Institute for Chemical Technology (ICT) , <https://www.ict.fraunhofer.de/en.html>, (2023年2月17日アクセス) .
- 11) Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials (IFAM) , <https://www.ifam.fraunhofer.de/en.html>, (2023年2月17日アクセス) .
- 12) The Welding Institute (TWI) , <https://theweldinginstitute.com>, (2023年2月17日アクセス) .
- 13) Korea Institute of Materials Science (KIMS) , <https://www.kims.re.kr/?lang=en>, (2023年2月17日アクセス) .
- 14) ナノセルロースジャパン (NCJ), <https://www.nanocellulosejapan.com>, (2023年2月17日アクセス).
- 15) 磯貝明「セルロースナノファイバー」『表面技術』71 巻 6 号 (2020) : 389-395., <https://doi.org/10.4139/sfj.71.389>.
- 16) 磯貝明「完全分散化セルロースナノファイバーの構造と特性」『粉体技術』11 巻 12 号 (2019) : 1015-1019.
- 17) 磯貝明「セルロースナノファイバーの現状と今後」『自動車技術』73 巻 11 号 (2019) : 88-93.
- 18) 磯貝明「新規ナノ素材「セルロースナノファイバー」の開発の現状と応用展開」『化学装置』62巻9号(2020): 17-24 .
- 19) 日刊工業新聞社「特集: 進化するセラミックス複合材料の拡大する用途と展望」『工業材料』69巻6号 (2021) : 11-66.
- 20) 香川豊「セラミックス複合材料 (CMC) の力学特性の特徴」『日本ガスタービン学会誌』49巻4号 (2021): 223-228.
- 21) 香川豊, 関根謙一郎, 時本扶美「セラミックス複合材料 (CMCs) の特徴と応用」『砥粒加工学会誌』65巻11号 (2021) : 585-588.