

2.4 社会インフラ応用

わが国においては、阪神・淡路大震災や東日本大震災を1つの契機とし、さらに近年において頻発する水害などに対する社会インフラの安全性を担保するための課題がより顕在化している。わが国の国土には、国土交通省道路統計年報によれば65000カ所を超える橋梁と1万カ所以上のトンネルが存在し、それらの多くが老朽化の問題を抱えている。欧米諸国でも同様の問題を抱えており、大型橋梁の崩落事故が国際的に報道されている。これらの老朽化施設の補強技術や更新は喫緊の課題である。2021年度には「防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策」の開始が予定されており、策定が進められているところでもある。

社会インフラは、道路、鉄道、航空機、各種ライフラインなど多岐にわたり、社会インフラを構成する全てについて俯瞰することは不可能である。そこで、本区分では、国土強靱化と産業競争力強化、さらには環境負荷低減の観点から重要な役割を果たす構造材料（金属材料・複合材料）に焦点を当てる。

構造材料は、社会インフラや輸送機器などの大型部材から人体内で使用するステント材料などの小型部材までの広いスケールや用途をカバーし、高い強度・耐腐食性能などによって社会基盤や人命を支える重要な材料である。使用時の荷重や環境に長期間耐えることに加えて、構造体に成形するための加工性や使用時の変形性（例えば、自動車の衝突安全性を担保するためのエネルギー吸収能が一例）など、多様な機械的特性に対して優れた性能が求められる。特に、部材の軽量化に必要な高強度化と成形性などに必要な延靱性はトレードオフの関係にあり、両性能をバランスよく向上させることが共通の課題である。また、長期間の使用により発生する疲労・クリープ・腐食などの長期損傷課題は、人身事故に直結することや経済的な損失が大きいため、社会的に大きな課題である。

代表的な金属系構造材料は、鉄鋼材料である。鉄鋼は、原料資源が豊富で比較的安価に製造できること、相変態や添加元素の活用で幅広い強度レベルが得られること、リサイクルが容易であることなどから、長い間、私たちの生活には欠かせない材料として使用されてきた。また、鉄鋼材料において開発されたさまざまな材料技術は他の材料にも展開されており、技術的・学術的にフロントランナーの役割を果たしてきた。近年、マルチマテリアル化の傾向が強まっており、非鉄金属材料や有機系材料を鉄鋼材料と組み合わせることで長所を活かす新たな技術開発が活発に行われつつある。

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が複合材料である。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や高比剛性、高耐熱性などの特性を発揮可能である。複合材料による軽量構造材料は、自動車、航空機をはじめとする輸送機器などへの適用により、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直接的に貢献することが期待されている。

2.4

2.4.1 構造材料 (金属)

(1) 研究開発領域の定義

構造用金属材料に関して、高強度、高靱性、軽量化（高比強度、高比剛性）、耐環境性（耐熱性、耐食性、耐脆化性など）、易加工性、高耐久性（高疲労強度、耐摩耗性など）、環境調和性（リサイクル性、有害物質フリー）などの材料特性の向上、および高品質、低コスト、高生産速度など製造技術の向上をめざす研究開発領域である。

金属組織設計やその具現化を行うプロセス研究、素材や部品の特性を精緻に定量化する評価研究、金属組織と特性の関係を原理的に解明する解析研究などが主なアプローチである。

(2) キーワード

鉄鋼、鋼、非鉄、合金、セラミックス、高強度、高靱性、高比強度、高比剛性、高延性、加工性、接合性、耐久性、軽量性、耐環境性、耐熱性、耐食性、耐摩耗性、耐脆化性、高疲労強度、変形、破壊、腐食、転位、き裂、ナノ組織、ミクロ組織、マルチスケール、計算科学、顕微鏡解析、機械学習

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

金属材料は国内の材料生産の約50%を占めており、その大半はインフラ、輸送、電気、産業機械などに利用されている。これらの産業分野は日本経済、国内雇用を支える製造業の中核であり、鉄鋼などの素材やこれを使用した自動車などの機械製品の輸出は、輸出総額の8割以上を占めている。国内構造用金属材料の高い競争力が日本全体の技術、経済における国際競争力の基盤の1つとなっており、高度成長期以降の工業生産技術や研究開発実績の蓄積で、わが国は当該分野において世界的にも高い競争力を維持している。今後も高い競争力を維持・向上させるためには、他国の追従を許さない高付加価値材料を生み出す技術力の真価を示すことが必要であろう。構造材料のさらなる性能向上は不可欠であり、今後の国力維持のための大きな柱の1つとして一層注力すべき領域である。

また、地球規模の問題であるCO₂削減・省資源に対しては、発電プラント・輸送機器のエネルギー効率の向上、希少資源の使用量抑制やリサイクル性を向上させる技術などにより、低環境負荷の実現と持続性の担保が強く求められている。相対的に使用量が多い鉄鋼材料は、わずかな性能向上でも全体に与える効果が大きく、継続的な取り組みが今後も求められる。

[研究開発の動向]

構造用金属材料に関する最近の基礎研究では、京都大学構造材料元素戦略研究拠点が「プラストン」と呼ばれる新たな格子欠陥の概念を示した。「プラストン」とは力学的に励起された状態の原子集団を指しており、き裂や転位などの格子欠陥に遷移して構造材料の特性に深く関係する。今後は概念の実証や材料設計に繋がる活動への展開が期待される。

また、ハイエントロピー合金（ハイエントロピーアロイ）に関する研究が世界的に流行している。ハイエントロピー合金は、一般的には4～5元素の元素で構成される固溶体を基本とする多元系合金で、原子半径比や化学ポテンシャルの差を巧みに活用して組織制御を行い、強度-靱性・延性バランスの高い材料などが多く発表されており、同時にその機構解明もさかんに行われている。基礎的な機構である固溶体強化の研究に加

え、疲労などのマクロ特性を対象とする研究に展開している。

積層造形 (Additive Manufacturing) は、従来のトップダウン型の組織制御からボトムアップ型に変換する画期的なプロセスとして注目されており、米国を中心に活発に行われ、外形制御技術からメタラジー制御へ展開しつつある。わが国の取り組みは内容・規模ともにやや遅れていたが、メタラジー制御に関する取り組みを得意とすることから追い上げを図っている。精度の向上に伴って、積層造形の目的は外形制御から金属材料の特徴である組織制御に移行しつつあり、今後も注目の技術分野である。

以下に、応用について市場ごとに動向を述べる。構造用金属材料の代表的な適用分野は、建設 (建築・土木)、輸送 (自動車、船舶、航空、鉄道)、産業機械等であるが、国内においては特に建設、エネルギー、自動車、造船分野が主体となる。

建設分野における金属材料の研究に関しては大きな変化はないが、鉄系形状記憶合金を活用した長寿命制振材料の長尺化と溶接技術開発により、ブレース型のダンパーが登場し実装されている。一方、高度成長期を中心に投資されたインフラ、各種構造物の劣化は国家レベルでの課題と認識されており2019年3月末に終了した内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」において、評価対策の技術開発が推進された。本プログラムが対象としたインフラの主体はコンクリートであり、構造用金属材料との関連は議論の中心ではなかったが、今後金属材料とコンクリート双方を考慮したインフラ維持管理・更新マネジメントに関する技術開発が重要となろう。この方向性を議論する目的で、日本鋼構造協会と日本鉄鋼協会は「鉄鋼材料と鋼構造に関するシンポジウム」を継続的に開催している。また、2018年に開始したSIP第2期課題の1つである「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」も、素材と構造およびその評価や更新に関する情報蓄積、技術開発が期待される。

エネルギー分野では、今後の国内エネルギーミックスにおける火力発電比率が急速にはゼロに近づかない状況を踏まえ、火力発電の発電効率向上をめざした耐熱材料の研究が進められている。JST先端的低炭素化技術開発 (ALCA) にてフェライト系、オーステナイト系の超高温耐熱鋼の開発が大きく進展している。一方、実装化のためには、実発電設備における実証実験が不可避であり、火力発電に対する逆風や大型リソース投入の困難さがその進展を妨げている。近未来のCO₂排出削減対応のためにも早急な対応が期待される。

また、発電プラント材料において、日本国内では新規開発の動きは活発でないが、米国NEI (Nuclear Energy Institute) のレポートによるとAMM (Advanced Manufacturing Methods) で製造した部材を原子力発電プラントで使用するための規格承認が検討されている。AMMとしては、Additive Manufacturing、Near Net Shape Manufacturing、Joining/Cladding、Surface Modification/Coatingを項目として掲げている。ジェットエンジン部材の開発においては、日本では前述のSIPが国家レベルの取り組みとして特筆される。個々の技術開発例としては、セラミックエンジンの実現へ道を拓く自己治癒セラミックの開発が注目されている。従来よりも1000倍程度の高速で治癒反応が進行する技術であり、航空機であれば目的地へ到着するまでの間に治癒が完了すると期待される。

自動車分野では、環境調和を考慮した燃費向上をめざした各種技術開発のなかで、車体軽量化素材研究が進んでいる。自動車用鋼板の開発において強度1.5 GPa以上の実用化へ向けた研究開発が新構造材料技術研究組合 (ISMA) を中心に進められている。また、鋼材の高強度化のみならず、トポロジー最適化などによる最適設計や部材成型を容易にする加工性の向上などの取り組みも進められている。鋼材と他の材料とを適切に組み合わせるマルチマテリアル化の取り組みも進展している。異種材料の組み合わせを可能にする接合技術が重要な課題となっている。

国際的には、パリ協定で制定された2050年の環境規制基準の達成に向け、ハイブリッド電気自動車

(HEV)・電気自動車 (EV) 化の傾向が顕著でこれに合わせた新材料技術開発が活発に行われている。欧州では、日本よりも厳しい排ガス規制を掲げ、米国ではカリフォルニア州がZEV (Zero Emission Vehicle) 規制を強化、中国でも企業平均燃費 (CAFC) 規制を強化して、HEVを製品ラインナップに持っていない自動車メーカーは数年後には中国市場から締め出される可能性がある。これに伴い車体の軽量化技術も進んでおり、欧州では鋼材部品のハイテン (高張力鋼) 化、Al合金部材の拡大、CFRPを量販車へ採用する傾向がさらに加速している。モーター性能の向上に欠かせない電磁鋼板などの開発では、日本は技術的な優位性を保っていたが、日本の大手自動車メーカーが中国メーカー製の電磁鋼板の採用に踏み切るとの報道があり、高付加価値化の戦略に影響を与える可能性がある。経済産業省の自動車新時代戦略会議では、自動車における環境への影響がwell to wheelで議論されており、2050年までに電動車 (xEV) 比率を100%にすることを前提とした技術開発が提唱されている。このような流れから環境調和型素材の研究が期待される。Well to wheelでの総CO₂排出量削減では、金属材料、特に鉄鋼材料への期待が大きく、高強度鋼材の自動車車体への適用が急速に進んでいる。冷間プレスを行う材料では1.2GPa級鋼板の適用が公表されており、熱利用型のプレス加工 (ダイクエンチ、ホットスタンプ) では従来の1.5GPaに加えて1.8GPa級の実車適用も報告されている。研究開発としては、冷間でのプレス加工を前提に高強度と高延性を両立させることができる第2、第3世代の高強度鋼板研究が注目されている。Mn多量添加型の第2世代が経済的に受け入れられないことから、第3世代ではMn添加量を低下させた「中Mn系」での材料開発が進められている。Mnが従来よりも多く添加された合金系でのミクロ組織制御のために新しい熱処理方法 (quench and partition: Q&P) が提案され、その最適化の研究がさかんに行われている。実車適用には延性以外にも、溶接性、耐食性、耐久性など多くの特性が要求されると同時に、高いコスト競争力が望まれることから、一層のプロセス改善が期待される。

造船分野においては、各種耐環境性 (低温用、耐食性、高靱性等) とコンテナ船等の大型化対応等、従来のトレンドが継続すると同時に、洋上衝突や座礁などによる海洋環境被害低減のための衝突安全性という新たな市場ニーズが提案されている。タンカー等の衝突時の破孔抑制に寄与する高延性厚板の開発と実用化も報告されており、SDGsへの対応の1つとして注目される。

以上のように、各市場の構造用金属材料開発は着実に進展している。これらの研究開発を支える技術の1つが材料工学と情報工学を融合させたマテリアルズインテグレーション (Materials Integration: MI) であり、要求特性から材料・プロセスをデザインする逆問題MIの手法を開発する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」に対する期待は大きい。本SIPではMIによる材料開発手法の革新を目標に、産業用発電プラント、航空機機体・エンジン等の材料開発をターゲットとしている。また、JST戦略的創造研究推進事業CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」・さきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」が今後の高機能構造用金属材料開発の基盤になるものと考えられる。各種機能発現のためには、ミクロ・ナノレベルでの組織解析技術と材料評価技術が重要となる。従来のSEM、TEM、3Dアトムプローブ等に加え、高エネルギービームや高輝度X線などを利用した微量化学分析技術、空間分解能向上、in-situ観察、さらには3D・4Dの観察技術開発が進められており、今後の材料開発に大きく貢献すると期待される。

(4) 注目動向

[新展開・技術ピックアップ]

材料設計の指針に関する大きな潮流としては、従来の経験的手法から脱却する2つの方向性が中心である。

1つは情報科学的アプローチ、もう1つは、特性発現の機構解明を徹底的に行う原理・原則アプローチである。

情報科学的アプローチは、米国のMaterials Genome Initiativeが契機となってわが国でも活動が活発化した。膨大な実験結果などから機械学習やMIなどの技術を用いて入出力情報の相関を高精度で求めることにより、いわば究極の経験則を求める手法といえる。一見すると、経験則からの脱却という方針と矛盾するように思えるが、相関関係の確立から物理モデルの精度が上がるなどの効果も期待されており、活用方法によっては総合的に優れた結果をもたらす可能性がある。また、このアプローチで欠かせないのがデータ精度の向上である。優れた計算手法があっても、その元となる実験データの精度が低いと出力の精度が上がらない。精度が高く網羅的なデータベースを充実させることが、競争力強化の鍵である。

原理・原則アプローチは、実験解析や計算機モデリング技術に大きく依存する。材料の特性発現の素過程を微視的にとらえる組織学的・力学的計測手法の高度化が必須であり、3次元アトムプローブ、TEMトモグラフィ、ナノインデンテーションなどの手法をより高度化することが望まれる。計算科学の手法においては、空間・時間スケールの連続性や物理モデルの相関性を高度化した、いわゆるMulti-Scale、Multi-Physicsの取り組みが重要になると考えられる。

構造用金属材料の変形挙動のマルチスケールの研究は長い期間継続されている研究分野であるが、結晶塑性、フェーズフィールド、有限要素法(FEM)といった手法に加え、大型の数値計算プロジェクトが進み、これまで小領域のみで可能であった理論計算が比較的大領域でも可能となった。計算物質科学人材育成コンソーシアム(PCoMS)等による専門家の育成プロジェクトと相まって今後大きな戦力となることが期待できる。また、実験においてはミクロな変形挙動が「不均一」であることを前提とした各種観察技術開発が進み、DIC(Digital Image Correlation)とEBSD(Electron Back Scattered Diffraction Pattern)を組み合わせたサブミクロンオーダーでの局所変形挙動や破壊挙動の検討が進んでおり、計算科学との組み合わせで、金属材料の変形・破壊挙動の理解が一層深まることが期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

データ駆動型材料開発のプロジェクトが国内外で活発に展開中である。先駆けとなった米国のMaterials Genome Initiativeに加え、欧州のEuropean Centres of Excellenceの一環として進められているThe Novel Materials Discovery(NOMAD)があり、また、中韓も同様の取り組みを進行中である。日本国内では、情報統合型物質・材料開発イニシアティブ(MI²)やSIP「革新的構造材料」などのプロジェクトにおける取り組みがあげられる。多くの材料に対してデータ駆動型材料開発のアプローチが研究されているが、構造材料に特有の問題として「階層構造的性」がしばしば議論される。構造材料の性能が発現する機構として、Processing-Structure-Properties-Performanceの相互関係が鍵であるとする考え方である。この階層性は、入力情報であるProcessingから出力情報であるPerformanceを得る過程を複雑にするため、構造材料領域でデータ駆動型材料開発を成功させる難度は高いと考えられている。

(5) 科学技術的課題

構造材料が使用される条件は、静的・動的力学条件、温度・雰囲気などの環境によって極めて多岐にわたる。これらの条件に対して材料設計の最適化を行うためには、単独の領域の知見によるアプローチでは限界があり、分野を横断する総合的な取り組みが求められる。

例えば、将来的に水素利用が発展するためには、水素を貯蔵・運搬する技術が不可欠であるが、水素が関係している水素脆性は構造材料の分野で古くて新しい課題である。未だに確立された理論はなく、したがって

対策も経験則に頼らざるをえない。素過程として考えられる水素発生・侵入は電気化学的なアプローチ、伝播経路やトラップサイトは金属組織・結晶学的なアプローチ、そして亀裂の発生や伝播は機械工学的なアプローチがそれぞれ対応する領域である。これらの異なる領域が相互に効果的に結びつく取り組みを行わない限り、最適解は得られないと考えられる。

また、使用条件の多様性に対応してより高性能化を図る方法として、負荷の大きい方向の強度を特に上げるなどの異方性制御の考え方も有効である。異方性制御には、例えば積層造形による集合組織などの組織制御手法や、異方性の強い異種材料を適切な方向に組み合わせるなどのアプローチが考えられる。異なる強度特性の組み合わせの1つとしてバイモーダル粒径制御が提案されているが、この手法にもさらなる高度化の余地があると考えられる。複雑化する組織因子の予測技術も重要である。これに対応するためには、例えば材料横断型モデリングの高度化が必要と考えられる。実験科学と計算科学の結びつきも大変重要である。例えば、鉄鋼材料とプラスチック材料を接合して使用する場合、全体の力学的な挙動は熱活性化過程などの確率論的なモデルが支配的であるのか、力学条件が決まれば挙動が決まる決定論的なモデルなのか、などの課題がある。変形や破壊の機構を材料の縦割りで議論する取り組みでは最適解を得ることは難しい。

金属材料は塑性変形能が高く、局所的な領域における塑性変形能と破壊限界の競合を評価することで、破壊特性も含めた金属材料の高機能化が可能となる。このためには、局所的不均一変形挙動の実験的評価（高エネルギービーム、X線、DIC、EBSD、3Dアトムプローブ、TEM、SEM、in-situ観察等）と数値計算手法（フェーズフィールド（特に3D化）、結晶塑性、FEM、第一原理計算、分子動力学等）を組み合わせることでミクロな特徴からマクロな材料特性を評価する方法の確立が必要となる。これはマルチスケールによる評価として従来から注目されているが、いかに実現するかはこれからの課題といえる。

(6) その他の課題

多様化するニーズに応える最適解を得るには、分野融合の取り組みが欠かせない。わが国の学問・技術分野は、それぞれに長い歴史や伝統を持っているために、自発的な融合は難しいといわざるを得ない。これを打破するためには、短期的には政策的な誘導によって共通課題に取り組むプラットフォームの設定が有効だろう。ただし、そのためには複数の分野を俯瞰できるコーディネーターの存在が不可欠である。この人材は短期的に生まれるものではなく、大学などにおける教育システムから変革する必要も考えられる。例えば、物理・機械・材料は互いに関係が深い分野であるが、大学では学科の縦割りによってこれらを総合的に学ぶ機会が必ずしも多くない。1つの分野を深く極める専門性に加えて、1つの現象を複眼的にとらえられる能力を養う取り組みが今後の人材育成に求められる要素といえる。

産業界と学術界の連携は必須であるものの、各々の役割、分担は明確にされる必要がある。双方が同じ価値観で同一ターゲットをめざすことは、国全体としての研究開発が単色的になる危険性をはらんでいる。産業界は今日・明日の実用化、収益確保に必要な研究開発を主体とし、現時点で出口（商品化や実プロセス化）が明確でない課題にリソースを投入することは容易ではない。一方、多くの場合、出口が見える課題は企業ごとの事業計画とのリンクが強く、公的な立場の学術界が直接関与することは望ましくない場合がある。学術界では、蓄積する知識が将来の（現時点では認識されていない）産業界でのニーズに寄与する可能性を考慮して、極力広範囲での基盤現象の把握、長期的な知識の蓄積や世代を超えた研究継続が重要である。このためには、現時点でのブームやトレンドのみにとらわれない研究課題選択および実行が可能な施策（予算、マンパワーの確保）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	◎	→	新学術領域研究で構造材料関連の複数の課題が同時に進行中であり、基礎的な取り組みは高いレベルを維持している。
	応用研究・開発	○	→	NEDO「革新的新構造材料等研究開発」や内閣府SIP「革新的構造材料」における取り組みで、自動車・航空機向け材料の開発が推進されている。
米国	基礎研究	◎	→	NSFの工学、数学・物理学分野予算は微減ながら相対的に大きな規模を維持している。論文引用数でも世界トップレベルを維持している。
	応用研究・開発	◎	→	Advanced Manufacturingプログラムを政府主導で推進中である。積層造形、軽金属、複合材料などが課題化された。
欧州	基礎研究	○	→	ドイツ、英国を中心に質の高い論文を創出する活動は依然として活発に行われている。しかし、他の各国のレベルは個人研究者に依存している。
	応用研究・開発	◎	↗	EV化のトレンドが世界でもっとも進んでいる地域の1つで、これに関連する産学官連携が活発に行われている。
中国	基礎研究	○	↗	論文数・質ともに上昇傾向が著しい。材料科学全般の被引用数top10%論文のシェアでは米国を上回っている。
	応用研究・開発	○	↗	日本の大手自動車メーカーが電磁鋼板の一部を中国の鉄鋼メーカーから調達するとの報道があり、応用研究・開発の向上を意味している。
韓国	基礎研究	○	→	大学・国研を中心に活発に行われているが、中国との競争でやや苦境に立たされている。
	応用研究・開発	○	→	高いレベルで推移しつつも、力点を置いたMg板材の開発では経済的に大きな成果を上げられず、方針転換を迫られている。
東南アジア地域	基礎研究	○	↗	インドネシア・マレーシア・タイなどの東南アジア地域から日本など東アジア各国への留学生数が増える傾向にあり、人材育成の取り組みがさかんである。
	応用研究・開発	△	→	基盤となる自国企業がまだ創出されておらず、外国企業の進出によって技術力を向上させている段階である。

(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

- ・破壊力学（環境・エネ分野 2.1.17）
- ・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) N. Tsuji, et al., “Strategy for managing both high strength and large ductility in structural materials—sequential nucleation of different deformation modes based on a concept of plasticity”, *Scripta Mater.* 181 (2020) : 35-42. DOI : 10.1016/j.scriptamat.2020.02.001
- 2) T. Osada, et al., “A Novel Design Approach for Self-Crack-Hearing Structural Ceramics with 3D Network of Hearing Activator”, *Scientific Report* 7 (2017) : 17853-17861. DOI : 10.1038/s41598-017-17942-6
- 3) Ishiuchi K, et al., “Application development of the high formability 1.2GPa ultra high strength steel”, *Proceedings of JSAE meeting* (2013) : No. 76-13, 20135420, 9-11
- 4) 匹田和夫他 : 「TS1800MPa 級ホットスタンプ用鋼板の開発」『あたりあ』 52 巻 2 号 (2013) : 68-70, DOI : doi.org/10.2320/materia.52.68.
- 5) Speer J G, et al., “Carbon partitioning into austenite after martensite transformation”, *Acta Materialia* 51, no. 9 (2003) : 2611-2622. DOI : org/10.1016/S1359-6454(03)00059-4
- 6) 市川和利 他 「高強度・高延性鋼による油タンカーの衝突安全性向上」『あたりあ』 57 巻 1 号 (2018) : 14-16, DOI : org/10.2320/materia.57.14.
- 7) M. Cohen, “Unknowable in the Essence of Materials Science and Engineering”, *Materials Science and Engineering* 25 (1976) : 3-4. DOI : 10.1016/0025-5416(76)90043-4
- 8) G. B. Olson, “Computational Design of Hierarchically Structured Materials”, *Science* 277, no. 5330 (1997) : 1237-1242. DOI : 10.1126/science.277.5330.1237
- 9) Y. Wang, et al., “High tensile ductility in a nanostructured metal”, *Nature* 419 (2002) : 912-914. DOI : 10.1038/nature01133

2.4.2 構造材料（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、より効率的な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、宇宙分野においても特殊環境下で高信頼性が維持された材料の候補として、複合材料への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。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、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℃）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。

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。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いる。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 織

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つもの、繊維とマトリックス間界面のコーティングにはBNが用いられ、航空機用としての部品製造技術にはMI法と呼ばれる熔融Siと炭素の反応を利用してSiCを生成させる方法を利用した製造技術が国際的に多数を占めるようになった。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などへ関心が移行した。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。材料の汎用化という観点からは、現段階では、CMC全般の課題として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。また、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、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確保技術や使用時の劣化診断技術等の構築に必要な、基礎から応用にいた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。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が活発化している。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を用いた大人用おむつや液だれ防止のボールペンインク、エコタイヤの部材、食品容器、歯磨き剤などでの実用化に留まっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

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を選択等に、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Society 5.0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。

[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）、IFAM（生産技術・応用マテリアル研究所）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。また、NEDO「次世代構造部材創製・加工技術開発」（2015～2020年度）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「次世代構造部材創製・成形技術開発」（2020～2021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めざし、設計から製造までを一貫して取り組んでいる。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」においては、CMCの研究開発に役立つシミュレーションツールも作成し、国内の重工業3社が参画している。NEDO「次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト」では1400°C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」（2020～2023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、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、中国のキャッチアップ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た。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2019年度戦略目標「ナノスケール動的挙動の理解に基づく力学特性発現機構の解明」の下に設定されたJST戦略的創造研究推進事業CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」（研究総括：伊藤耕三・東京大学教授、2019～2026年度）およびさきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」（研究総括：北村隆行・京都大学名誉教授、2019～2024年度）において、複合材料のフィラーとマトリックス間のナノスケール界面の解析・制御をはじめとする力学特性発現機構の解明が行われている。

（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困難である。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ため、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1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روس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の進歩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。具体的には、連続繊維を利用できる小型の3次元プリンターが数百万オーダーで購入可能であり、これにより、より自由度の高いプロダクツ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)に支配されるため、幅が細く、長さが長いCNFを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。

(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。 ・「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onitoring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。 ・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めざ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、および成形・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。 ・ナノセルロースの先端材料への実用化をめざ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。
	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。 ・産官学の連携体制が強化され、CMC開発拠点を形成。 ・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

関連する他の研究開発領域

- ・破壊力学（環境・エネ分野 2.1.17）
- ・構造材料（金属）（ナノテク・材料分野 2.4.1）
- ・元素戦略・希少元素代替技術（ナノテク・材料分野 2.5.2）
- ・マテリアルズ・インフォマティクス（ナノテク・材料分野 2.5.3）
- ・複雑系材料の設計・プロセス（ナノテク・材料分野 2.5.7）
- ・ナノ力学制御技術（ナノテク・材料分野 2.5.8）
- ・物質・材料シミュレーション（ナノテク・材料分野 2.6.4）
- ・植物由来材料（ライフ・臨床医学分野 2.2.3）

参考・引用文献

- 1) 福田博、邊吾一、末益博志 監修『新版複合材料・技術便覧』（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」(2012)。

- 3) RIMCOF 技術研究組合, <http://www.rimcof.or.jp/> (2020年10月28日アクセス)
- 4) 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』第60巻3号(日本非破壊検査協会, 2013): 157.
- 5) 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. doi: 10.1016/j.compositesa.2013.01.009
- 6) 新構造材料技術研究組合 (ISMA), <http://isma.jp/> (2021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「革新的構造材料」, <http://www.jst.go.jp/sip/k03.html> (2021年2月17日アクセス)
- 8) 戦略的イノベーション創造プログラム「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> (2021年2月17日アクセス)
- 9) デラウェア大学複合材料センター (CCM), <http://www.ccm.udel.edu/> (2021年2月17日アクセス)
- 10) エジソン溶接研究所 (EWI), <http://ewi.org/> (2021年2月17日アクセス)
- 11) フラウンホーファー化学技術研究所 (ICT), <http://www.ict.fraunhofer.de/en.html> (2021年2月17日アクセス)
- 12) フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所 (IFAM), <http://www.ifam.fraunhofer.de/en.html> (2021年2月17日アクセス)
- 13) 英国接合溶接研究所 (TWI), <http://www.theweldinginstitute.com/> (2021年2月17日アクセス)
- 14) 韓国材料研究所 (KIMS), <https://www.kims.re.kr/?lang=en> (2019年2月17日アクセス)
- 15) ナノセルロースジャパン, <https://www.nanocellulosejapan.com/> (2021年2月17日アクセス)
- 16) 磯貝明「セルロースナノファイバー」『表面技術』71 (06) (2020): 389-395.
- 17) 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 (12) (2019): 1015-1019.
- 18) 磯貝明「セルロースナノファイバーの特性と応用」『自動車技術』73 (11) (2019): 88-93.
- 19) 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 (9) (2020): 600-607.

2.4

俯瞰区分と研究開発領域
社会インフラ応用