

N4 社会インフラ・モビリティ応用

N4.01 構造材料

キーワード：鉄鋼、非鉄、合金、セラミック、有機材料、複合材料、高強度、高比強度、高靱性、耐熱性、耐食性、軽量性、水素脆化、変形、破壊、転位、き裂、圧延、鋳造、鍛造、切削、溶接、射出成型、積層造形、炭素中立製造、水素還元

本領域の論文・特許のデータについては以下をご参照ください

・ダッシュボード版：<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2025-FR-02.html>

・PDF版：https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2025/FR/CRDS-FY2025-FR-03/CRDS-FY2025-FR-03_41N401.pdf

1. 研究開発領域の定義

構造用金属材料および複合材料に関して、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目指す研究開発領域である。

微細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、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. 本領域の意義

構造材料は、多彩な材料群を単独もしくは2種類以上を組み合わせることで構成され、金属、セラミックス、高分子材料、繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics: FRP）、セラミックス基複合材料（Ceramic Matrix Composites: CMC）等、多岐にわたる。その用途は、生体内で使用される椎体間スペーサーのような小型部材から社会インフラ、モビリティのような大型部材までの幅広いサイズスケールにて適用され、高い力学機能特性や長寿命特性の付与によって社会基盤や人命を支える重要な材料となる。研究開発は、暴露環境における時間軸での材料特性劣化や使用後の再利用を含む材料ライフサイクルでの低環境負荷に配慮して行われる。使用環境での外力に長期間耐えるだけでなく、構造体に成型するための加工性や衝突時のエネルギー吸収能など、求められる力学機能は多様であり、適用部位ごとに最適化されなければならない。

我々が目指すカーボンニュートラル社会においても輸送機器・社会インフラ・エネルギー分野を支える構造材料の重要性・必要性は明白である。経済産業省が掲げるグリーン成長戦略¹⁾では、カーボンニュートラル、省資源化、サーキュラーエコノミーの推進が必須であるとされ、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の向上により低環境負荷の実現と長寿命化、信頼性向上、新材料によるマテリアルイノベーションと経済成長の同時達成が強く求められている。また、近年においては、社会インフラの安全性や自然災害などの莫大な外力に耐えて国土強靱性を担保するための課題が山積しており、老朽化設備の補強技術や更新は喫緊の課題である。

以上より、本領域における研究推進の必要性は明確であり、我が国の製造業が今後も高い競争力を維持・向上するためには、他国の追随を許さない高付加価値材料を生み出す技術力の向上が一層重要になる。

3. 研究開発の動向

3.1 概要

構造材料研究での近年の柱は、①グリーンイノベーションに資する低温用・耐水素材料、②厳しい温度場・応力場・化学反応場など極限環境下の劣化や破壊に強い長寿命構造材料、③サーキュラーエコノミーにおけるリサイクル性に優れた材料、である。①に関連して、物質・材料研究機構が整備した低温・高圧水素環境

下での材料特性評価設備では、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のグリーンイノベーション基金「大規模水素サプライチェーンの構築」プロジェクトの支援を受けて、液化水素関連などで使用される材料の機械的特性データ取得・提供を進めている。同機構が培った疲労・腐食・クリープ等のデータベース整備・活用と合わせて、水素社会構築への寄与が期待される。②、③は非鉄材料や他の無機・有機材料分野でも共通課題である。文部科学省のデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト（DxMT）²⁾（PD：栗原和枝、2022年度～2030年度）では、東北大学を中心にオールジャパンで進める極限環境構造材料研究拠点（RISME、拠点長：吉見享祐）が2023年度より活動を開始し、超耐熱性、耐水素環境、耐疲労性、耐摩耗性など、多様な極限環境下において、長期使用に耐え得る機能（「極限機能」）を備えた構造材料およびその利用技術のデータ駆動型開発を推進している。特に鉄鋼関連課題では、加工熱処理の活用による低合金鋼の耐水素脆性、窒素を用いた表面硬化利用によるEV用機械構造部品の耐摩耗性・耐疲労性の向上に関する技術開発を、データマイニングも含めた高効率のデータ集積、データ科学を用いたスモールデータの高度利用、ハイスループット計算科学の応用など通じて目指している。国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 チーム型研究（CREST）「材料創製と循環」領域（領域代表：岡部朋永、2024年度～）の採択課題「ばらつきを制するR-PSPPに基づく二次資源からの材料生産チェーン設計学」では、スクラップ由来で変化する不純物を含有する鋼の組織と特性をデータ科学も利用して理解し、産業エコロジーと材料科学の融合でばらつきを制する材料生産チェーン設計の学理創造を目指している。

軽金属分野では、水素貯蔵・輸送用に特化した合金開発を目的として、極低温液体水素環境、常温高圧水素環境下での使用に適したアルミニウム合金を選定し、それらを使用するうえで必要な評価手法について検討している。

耐熱Ni基超合金開発の過程では、目的とする使用環境に最適な特性を有する合金組成を探索するための合金設計プログラムが開発され、実験データをフィードバックして精度を向上させるとともに適用範囲を拡大し、今日、我が国が世界最強の超合金を開発保有するに至った原動力となってきた³⁾。このような合金設計手法はその有効性と実績が評価され、最近ではAIの普及とも相まってデータ駆動型材料設計として加速的に普及しつつある。その場合も、基礎となる高精度の実験データの集積が合金開発の成否を決する。最先端のタービン翼は、精密鋳造により中空翼として製造され、その表面には耐環境性金属コーティングと遮熱のためのセラミックコーティングが施される。このような構造で内部を空冷することによって、超合金の融点を超える1600～2000℃の超高温の燃焼ガス中で用いられる。このため基材の超合金とコーティング材との適合性も合金開発の重要な要素となっている。また、Ni基超合金を超える耐用温度を持つ材料として、CMCのほかシリサイド等の金属間化合物が長く検討されているが、脆性の克服が難しく実用には及んでいない。その中で東北大学が開発しているMoSiBTiC合金は従来材より高い破壊靱性を示し、実用化に向けた今後の展開が期待されている。

複合材料は強化材としての繊維と母材から構成され、前者はガラス、炭素、セラミックス、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。最も使われているのはGFRPであり、その用途は主に浴槽・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の数倍の比強度比剛性を有するが、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、航空機の機体、自動車の車体骨格といった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。

CMCはSiC繊維強化SiC複合材料（SiC/SiC）に代表される非酸化物CMCと、アルミナやムライトを主要な構成材料とする酸化物繊維強化酸化物複合材料（Ox/Ox）に大別される。高温強度に優れるSiC/SiCは中型航空機用エンジン（CFM International社LEAP）の高圧タービンシュラウド部に2016年初めて実

機適用された。大型航空機用エンジンであるGE社のGE9Xではシュラウドに加え燃焼室のライナー、タービンノズルに搭載が予定され、2020年米国連邦航空局（FAA）の認証を取得している。Ox/Oxは耐熱性や高温機械特性がSiC系よりも劣るが低コストで耐環境性（燃焼ガス環境下での耐食性や耐酸化性）はSiCよりも優れる利点があり、GE社のPassport 20の排気ノズル部（ミキサ、センターボディ）に適用され2016年認証を取得し2018年に就航している。安価だけでなく形状付与性に優れ大型部品の製造も容易であることから航空分野以外のアプリケーションも検討されている。

構造材料が最大限の力学機能を発揮するための高付加価値付与手法として、積層造形法と呼ばれる材料添加型の新しい製造法が注目されている。積層造形法は、原理的には、金属、セラミクス、有機材料、複合材料などほとんどすべての材料に適用可能である。金属材料を出発原料とする金属積層造形法は、航空・宇宙、自動車、エネルギー、化学、医療・ヘルスケア、防衛・軍事に代表される幅広い産業分野での構造材料部材としての適用が進められている。デジタルツイン技術の発展とDX（デジタルトランスフォーメーション）化の流れの中で、積層造形法は自由度の高い複雑形状の製造、構造の自在なカスタム（テーラーメイド）化、特定の力学的環境下での要求強度を維持しながらの大幅な軽量化などを具現化する手段として、従来の切削や穴あけなどによる減法製法（Subtraction Manufacturing）においては困難とされてきた多くの課題の克服を可能としている。加えてグリーンイノベーション／カーボンニュートラル社会の実現という観点からも、積層造形技術の普及と活用に対する期待は大きい。

3.2 トピックス

● 不純物含有高強度鋼

電炉生産の拡大と鉄スクラップの応用がさらに推進されると、Cu、Sn、Pなどの不純物をより高い含有量で許容できる高強度鋼の必要性が大きくなる⁴⁾。これらの元素は結晶粒界に偏在し粒界脆化をもたらす傾向が強いことから、現在、ハイスループット計算科学・先端解析の両面で多様な構造の粒界や他の格子欠陥での元素偏析の研究が注目されている⁵⁾。この現象は高強度鋼板の加工技術として拡大しているホットスタンピング利用で課題となる鉄粒界での低融点金属の偏析・溶融による液膜金属脆性（Liquid Metal Embrittlement: LME）とも深く関連し、電炉材の多様な鋼種への応用拡大にあたって重要な研究である。海外ではいち早く産学協同研究が進んでいたが、日本でもNEDO（グリーンイノベーション基金事業「製鉄プロセスにおける水素活用」2023年度～2030年度、先導研究プログラム「鉄スクラップ由来のトランプ元素影響軽減技術に関する研究開発」2023年度～）で取り上げられつつあり、今後の進展が期待される。

● Ni基超合金の直接完全リサイクル⁶⁾

従来、ジェットエンジン等の廃棄タービン翼は高温で使用中に付着する有害物質（硫黄分など）のために直接リサイクルに用いられることなく、コストに見合う元素のみ抽出、精製して個々の元素として再利用されるのが主となっていた。近年、カルシア（CaO）を溶解坩堝や添加剤として用いることにより、有害物質を除去し、Caとの化合物として固定化して無害化するという新技術が開発され、マテリアルフローを大きく改善する新技術として注目されている。

● 積層造形法の超急速昇温／超急冷特性を用いた構造材料の高機能化

積層造形法は局所領域の超急速昇温と冷却の繰り返しである。例えばレーザを熱源とした積層造形法では、 $\sim 10^7$ K/sの超急速昇温と超急冷によるバルク材の造形を可能とする⁷⁾。その結果、アルミ合金などの低融点母相中に高融点析出物を含む場合には、超急速昇温／超急冷により析出物を完全融解することなく残存させることで、通常の製造法と比べ、中低温での高強度化を発現する超微細粒組織の創製を可能とする。さらに、レーザ積層造形によって製造されたステンレス合金は、超急冷効果によりMnS系析出物や脱酸剤としての酸化物をはじめとする孔食の発生原因を排除することで、従来材を大幅に上回る耐食性を示す。同時に超急冷

に基づく層状組織の形成により、高強度化が図られる⁸⁾。

● 複合材料へのデータサイエンスの導入

材料種を選択、成形プロセス、構造設計等に、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。これに伴い、素材（繊維、樹脂）、界面および複合材料のデータ取得研究の重要性が再認識されている。モデリング・シミュレーションの研究開発でも、成形時の樹脂挙動、成形品の力学的特性等を高精度に予測するために重要である。今後、データ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。

● 積層造形による複合材料創製⁹⁾

短繊維とマトリックス材料を含んだ原料樹脂を光硬化するステレオリソグラフィやプリンタヘッドから原料樹脂を直接押出す3Dプリンティングのみならず、最近では連続繊維とマトリックス前駆体を含んだ樹脂フィラメントをプリンタヘッドに送り込んで押出す方法で連続繊維強化CMCの作製に成功した報告もなされている。

● 超高温セラミックスをマトリックスとする複合材料

SiC/SiC、Ox/Oxとは別に、超音速機や宇宙往還機の先端部やリーディングエッジの材料として超高温セラミックス（UHTC）をマトリックスとする複合材料（UHTCMC）が注目されている¹⁰⁾。UHTCはZrなどの遷移金属のホウ化物や炭化物で2000℃以上での使用を期待される材料群を指し、強化素材には炭素繊維が用いられることが多い。学術的には近年目立った進歩はないものの海外では研究が継続されており、今後重要な材料となっていく可能性がある。この材料は安全保障上の理由から他のCMCよりさらに最先端の情報が国際的に開示されにくい状況にあり、日本も独自の研究を進め自前の技術を蓄積していくことが必要であると考えられるが、国内での研究報告は非常に少ないのが現状である。

3.3 課題

日本の鉄鋼業の技術レベルは世界一を維持しており、研究者・技術者の意識も高く、アカデミックな議論や用いる解析技術のレベルも学官を上回る場合もある。この強みを基礎および応用研究の両面で維持するだけでなく、着実に発展させることが、我が国の研究力・産業力の強化において重要である。喫緊の課題であるカーボンニュートラルおよびマテリアルズリサイクル問題の解決には、材料科学・機械工学・化学工学・情報工学など分野を横断したオールジャパン体制での研究体制の構築と、戦略的な研究支援の拡大を必要とする。人材育成面では、多くの工学分野と同じく各大学における金属材料分野の研究室は大幅な世代交代の時期にある。工学分野では論文指標は他分野に比べてより長期間に渡り徐々に向上する傾向があるため、現在重視されている短期指標に基づく分野評価による基礎・応用研究の重点化は、現在の日本を支える素材産業・製造業における研究力・技術力のさらなる低下をもたらす恐れがある。今後、社会基盤分野での科学技術の向上の重要性を意識した研究開発を推進し、次世代研究者・技術者コミュニティの醸成につなげるべきである。

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。部材内部で力学的特性の分布を変化させることができることがCFRPの強みであり、それを活かした設計・成形技術により、更なる軽量化、ひいては省エネルギー、コスト削減が期待される。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、接合技術の重要度が増している。CFRPが全ての特性において金属材料に優れているわけではなく、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。CFRPは繊維とマトリックスの分解が難しく、また燃えにくい特性により焼却には大きなエネルギーを要する。そのため寿命を終えた製品の多くは廃棄物として埋め立てられており、環境への負荷となっていることから、

CFRPリサイクル技術の確立が求められている。

CMCに用いられるSiC繊維は不活性雰囲気では1500℃以上の耐熱性を有するが、現状ではそれ以外のマトリックス、繊維コーティング、耐環境コーティング（EBC）といった構成要素が耐熱限界を決定している。材料技術的にはSiCマトリックス、BNコーティング、レアスシリケートの次を狙う材料探索およびプロセス技術が課題となる。マトリックス、コーティング、EBCいずれの場合でも留意しておかなければならないのは、安全保障上の理由で論文に公表されている情報は必ずしも最先端ではなく、公表されている材料系も本命の組合せではない可能性がかなりあるということである。

積層造形技術の開発においてはこれまで形状制御が主流であったが、材質制御、単結晶化を含む結晶集合組織（配向制御）や組織制御の研究の重要性が増しつつある。順シミュレーションの開発とデータベース蓄積・深層学習にデータ駆動型研究による材質制御の高度化など、サイバーフィジカルシステムを併用した材質制御法の深化が求められる。また設計の最適化は、形状のみによるトポロジー最適化となっている。よって部位依存的材質制御を考慮した新規トポロジー最適化法を開発し、部位ごとの多次元機能の最適化を実現する必要がある。

3.4 各国・地域の取り組み

【日本】

世界トップレベルの技術を鉄鋼分野において維持し続けている。大型プロジェクトとしては、高炉での水素還元利用に関して一部水素による鉄鋼製造を目指したCOURSE50プロジェクト（2008～2022年度）があり、これに続いて、多量に導入したグリーン水素を加熱して使用することで高炉内の熱バランスを維持し、更なるCO₂削減を目指すSuper COURSE50が、経済産業省が進めるGI基金事業の一貫としてNEDOの研究開発委託・助成事業「グリーンイノベーション基金事業／製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクト」において推進されている¹¹⁾。鉄鋼メーカーでは政府のGX推進法に基づく支援を受けて、高炉から高効率・大型電気炉（革新電気炉）への転換を進めている。今後は製造プロセスの転換に対応した鉄鋼のさらなる高機能化を目指す研究の推進が望まれる。基礎研究分野では、文科省データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト（DxMT）極限環境構造材料研究拠点（RISME）で、多様な極限環境下において長期使用に耐え得る機能を備えた構造材料およびその利用技術のデータ駆動型開発を推進している。一方、JST-CREST「材料創製と循環」領域では、鉄スクラップ由来の不測の不純物濃度を含有する鉄鋼材料についてデータ駆動型冶金モデルも用いてばらつきを制する材料生産チェーンを設計する学理の創造を目指す課題が採択されている。最近では鉄鋼メーカーが国内主要大学との組織的な研究連携を拡大しており、鉄鋼材料の基礎から応用に渡り産官学連携での研究が推進されつつある。

複合材料に関してはNEDO、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）等の各種プロジェクトによりCFRP成形技術、接着接合技術の開発が行われている。物流や観測用途向けにドローン需要が増加しており、今後輸送機、エンジン、水素格納圧力容器等の構造用複合材料開発が要求されている。

積層造形による構造材料に関する基礎研究については、JST-CREST、文部科学省学術変革領域研究で進められてきた。高速度造形や精密造形などの形状制御技術は海外の後塵を拝しているが、人為的な結晶方位制御などの基礎研究については日本が先導している。応用研究については、NEDO、内閣府SIP、環境省で進められてきたが、金属造形装置開発や大型造形物製造に関する基礎的検討が中心である。一方で、重工業メーカーの航空用途での10万点を超える構造材料部品の搭載、自動車産業における金属金型としての活用、医療機器メーカーによる椎体間スペーサーをはじめとする整形外科・歯科用デバイスの臨床応用が行われている。NEDO-経済安全保障重要技術育成プログラム（Kプログラム）、JST-Kプログラム、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙戦略基金の大型PJによって、基礎・応用研究とも研究開発が加速される。

[評価* 基礎研究：現状◎／トレンド△、応用研究・開発：現状○／トレンド△]

【米国】

エネルギー省（DOE）はここ数年クリーンエネルギー利用におけるブレークスルーを目指すEnergy Earthshots Initiativeを立ち上げ、特にクリーン水素の低コスト化を目指した取組を支援している。鉄鋼関係では主要な部分は水素還元製鉄である¹²⁾。また水素インフラ関係では水素を含む天然ガス輸送用パイプラインの利用技術に関する戦略プロジェクトが運輸省（DOT）予算で推進されている。産官学の注目トピックスは日本と同様、脱炭素化、プロセスにおける自動化・AI活用、リサイクル・不純物活用である一方、前政権時の企業等の脱炭素化に向けた政府予算は現在の政権下でカットあるいは凍結状態にあり、直近の先行きは不透明である。

一方、金属材料を含めたデータ駆動型研究については引き続き活発に研究が展開されている。2008年よりスタートしたIntegrated Computational Materials Engineering（ICME）、2021年に始まったMaterials Genome Initiative（MGI）では、Materials Innovation Infrastructure（MII）の統合に取り組んできた。その成果の結実として、Questech Innovation社は商用ソフトウェアICMD®を開発し、積層造形プロセスの最適化や腐食・疲労寿命予測を行う環境を構築している。MGIの活動では、2024年に自動自律実験に関するワークショップが開催され、報告書（Accelerated Materials Experimentation Enabled by the Autonomous Materials Innovation Infrastructure（AMII）A Workshop Report）が出版された。また、Army Research LaboratoryのHigh-Throughput Materials Discovery For Extreme Conditions（HTMDEC）¹³⁾でも、鉄鋼も含めたプロセス研究に関するハイスループット実験研究の会合が持たれており、その動向が注目される。

General Electric、Pratt & Whitneyというジェットエンジンのブランドメーカーを有し、超耐熱材料全般の開発、実用化に関して世界をリードしている。材料面では、セラミック基複合材料や積層造形への研究開発投資が目立っている。前政権では、AM Forwardプログラムを中心とした複数の中小企業メーカーを支援するプログラムを推進し、大手企業のみならず、中小企業の参入により米国全体のサプライチェーン回復へ貢献するものであり、全米国体制を構築し技術の底上げを進めている。CMCはすでに中型のLEAP1エンジンの静止部材（シュラウド）に用いられているほか、ボーイング777X用大型GE9Xエンジンでは高温タービン部のシュラウド、ノズル（静翼）など静止部材への適用を計画している。また水素燃焼環境でのCMC適用可能性の検討が進んでいる。

CFRPはデラウェア大学複合材料センターにより、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が行われている。またエジソン溶接研究所（EWI）による、金属－CFRPの接合・接着技術や、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が開発されている。

[評価* 基礎研究：現状◎／トレンド→、応用研究・開発：現状◎／トレンド△]

【欧州】

欧州連合（EU）では、Research Fund for Coal and Steel（RFCS）基金で脱炭素化とグリーンスチール技術を先導する研究プロジェクトが推進している。研究とイノベーションのためのプログラムHorizon Europeでは73の学術・研究機関・企業群によるプラットフォーム（ESTEP: European Steel Technology Platform）の共同プログラム（The Funding of the Clean Steel Partnership）で研究支援を行っている¹⁴⁾。その中心課題は水素を用いた直接還元製鉄（DRI）であるが、その他にも電気アーク炉からのCO₂排出削減、製鉄所由来の二酸化炭素回収・利用・貯留（CCUS）、鉄鉱石の電気分解、資源効率・リサイクル率の向上および廃棄物の削減、デジタル化とインテリジェント製造など幅広い分野がカバーされ、高機能材料では軽量化・安全性・耐久性の観点での新しい先進高強度鋼の開発研究が推進されている。またHorizon Europeでは積層造形法を含む先進製造（Advanced Manufacturing）を中核技術と位置付けている。EUプロジェクトInShaPeは、ミュンヘン工科大学（TUM）を中心に組織され、航空宇宙、エネル

ギー、自動車産業などの分野における従来の製造プロセスと比較して積層造形のうちレーザ粉末床溶融結合法の競争力の実証を行うものである。さらにデンマーク工科大学を中心とした μ AMプロジェクトも立ち上がり、構造材料の組織制御・解析を中心とした基礎研究プロジェクトもすすめられている。EUの積層造形に関するプロジェクトの特長は、欧州グリーンディールの政策に基づく廃棄物の削減やCO₂の排出低減など積層造形を通じた環境負荷低減、さらには気候変動対策を一つのミッションとして掲げていることである。

複合材料ではドイツ連邦教育研究省（BMBF、現ドイツ連邦研究技術宇宙省BMFT）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や、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）の開発が行われている。ドイツCFK-Valley Stade、MAI Carbon ClusterなどによるCFRP成形技術拠点が形成された。フランスAirbusの新造機製造による炭素繊維の需要は増加している。しかし欧州で風力発電の長尺化における需要増はまだ時間が掛かる見込みである。欧州宇宙機関（ESA）を中心に様々な宇宙用途のCMC開発が行われている。スペースライダー用ノーズコーンとして世界最大の溶融含浸CMCが作製された。またOx/Oxを重視し、プラントや自動車への適用を模索するなど米国とは異なる路線をとっている。

[評価* 基礎研究：現状○／トレンド→、応用研究・開発：現状◎／トレンド→]

【中国】

中国は世界第一位の鉄鋼生産量を誇り、製造技術の進歩もめざましいものがあるが、そのほとんどが高炉法を用いており、脱炭素化に対する取組みは急務である。政府はCO₂排出のピークアウトのターゲットを2030年に定め、粗鋼の減産方針とともに、スクラップ消費量および電炉鋼の割合の引き上げを具体的に定めている¹⁵⁾。鉄鋼大手はそれに沿って、水素還元製鉄の研究開発や電炉生産の拡大を目指した活動を行っているが、中規模・小規模メーカーの技術転換は容易ではない。学術面での活動については、中国が主催する国際会議開催状況を見ても、2024年のアジア鉄鋼会議（Asia Steel 2024）、高Mn鋼国際会議（HMnS2024）、2025年の先進鉄鋼国際会議（ICAS2025）、高強度低合金鋼会議（HSLA2025）など大変活発である。中国で鉄鋼研究をリードする北京科学技術大学（USTB）は多くの金属材料関係の研究センターを有するが、中国東北大学や他の研究機関・企業と連携して鉄鋼技術の関する共同研究センター（Collaborative Innovation Center of Steel Technology: CICST）¹⁶⁾を組織し、基礎研究分野と海洋・輸送・エネルギー応用分野を中心に精力的に活動している。

航空エンジン開発は国の最優先課題とされている。超合金など超耐熱材料に関する学術論文の量においてすでに米、英、日を超えており、内容の質の点でも近年向上してきている。また国を挙げて戦闘機エンジン開発を進めており、開発材料の適用を進めている可能性がある。

炭素繊維やCFRPをハイエンド材料と位置付け、「カーボンバレー」PJを政府が推進、大学等へ研究資金を提供している。豊富な資金力で、欧米からの設備、ソフトを揃えて、大学、研究機関、企業との提携により、低コスト炭素繊維の生産体制を構築している。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、企業活動を開始した。江蘇省、山東省、吉林省に炭素繊維集積地域が形成されて、航空機、電気自動車、風力発電用の応用開発に多額の資金を投資している。

「中国製造2025」や「第14次五カ年計画」などを通じて、積層造形技術を基礎から応用までシームレスに支援している。中国からの積層造形に関する論文数は、国別論文数が2023年前後に1位となり、積層造形関連研究者数の多さとアクティビティの高さを反映している。他国研究者の後追い研究も目立つが、国内での多彩な装置と原料材料の豊富さの組み合わせで、論文レベルも高くなっている。中国では同水準の積層造形装置の価格が世界平均の1/2以下であり、結果として、その応用や製品の社会実装が進み、航空宇宙、自動車、医療、宝飾品や玩具など、ロケット部品などの多品種少量生産、歯科治療用デバイスなどのマスカ

スタム製品、さらには自分設計できる製品など多くの製品群を生み出している。

[評価* 基礎研究：現状○／トレンド△、応用研究・開発：現状○／トレンド△]

【韓国】

鉄鋼分野では、環境への影響を低減し、持続可能な鉄鋼業を目指す研究開発がトレンドである。韓国最大の鉄鋼メーカーであるPOSCOが主導し、水素還元製鉄技術の2030年以降の商用化、CO₂の回収・利用技術（CCU）に関して2030年までの実証化、低品位鉱石の利用や水素還元利用といった電炉技術の高度化を目指した研究開発が行われている。高強度鋼関連では、各国と同様に水素や不純物による脆化や極低温などの極限環境対応の学術研究が目玉に留まるが、浦項工科大学校（POSTECH）における鉄鋼科学大学院（GIFT）では、主要支援元のPOSCOがバッテリー材料関係に重点投資先を転換する中で、鉄鋼研究に関する活動が縮小傾向にある。

2006年に政府主導で本格的な炭素繊維開発に入り、2013年に商用化した。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）の性能評価が行われている。水素シティなどを筆頭に圧力容器の需要がアジアで伸びている。

「製造革新3.0」イニシアチブの一環として、積層造形技術を急速に成長させ、スマート工場の設立などを含めた技術開発を行っている。政策としては日本を手本としていることから、類似な政策が多い。韓国機械材料研究院（KIMM）、KIMS、POSTECHが基礎研究を主導している。400社を超える積層造形装置メーカーが存在し、社会実装はエレクトロニクスや自動車での金型製造や軽量化、さらには医療分野で進んでいる。今後の発展性は日本と類似の傾向があるが、航空宇宙、自動車、エレクトロニクス、医療での社会実装が進むものと予想される。

[評価* 基礎研究：現状△／トレンド→、応用研究・開発：現状○／トレンド→]

【インド】

インドの現在の粗鋼生産力は世界第二位であり、インド工科大学や国立研究所などの学術機関や企業での研究も盛んに行われている。インド政府では各工学領域について独立した省庁が設置されており、鉄鋼省が鉄鋼関連産業を国家の重点分野として支援している。科学技術イノベーション政策2020（STIP2020）では、科学技術大国としての躍進を目指し、研究開発支援費と研究者の倍増など野心的取組を展開しており、工学を含めた科学技術分野の研究の活性につながっている¹⁷⁾。インドの鉄鋼業界と学術機関が連携し、鉄鋼省の支援のもとで設立された共同研究開発プラットフォームSteel Research & Technology Mission of India（SRTMI）は、鉄鋼産業における革新と技術開発を推進し、持続可能性と競争力の向上を目指している。グリーンスチールの推進、先進的・高性能鋼材の開発、サーキュラーエコノミーの実現、デジタル化とインダストリー4.0の導入、国産設備製造の強化が中心的な項目であり、これは他の主要国とほぼ同様である。2025年より、鉄鋼業界が直面する重要課題の研究開発、産業界と学術機関の共同提案プロジェクト、革新的鉄鋼技術のスタートアップ研究の3つのスキームで支援を開始している。また、オンラインプラットフォーム「SteelCollab」を運営し、課題共有や研究成果発表の場を提供している。

積層造形に関する論文数は、2015年前後の10位前後から、今や世界第3位へと躍進しており、得意とする計算科学・シミュレーション、さらにはDXなどを含めた研究開発が進んでいる。シンガポール、オーストラリアとともに、今後の積層造形に関する基礎研究の世界的な躍進が予想される。様々な分野での応用が進められているが、宇宙開発に対しては人工衛星や小型ロケット開発などで独自の積層造形技術開発を進めている。

[評価* 基礎研究：現状○／トレンド△、応用研究・開発：現状○／トレンド△]

*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
 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
 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

参考文献

- 1) 内閣官房, 他「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（令和3年6月18日）」経済産業省, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf（2025年8月27日アクセス）。
- 2) 文部科学省 データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト 極限環境対応構造材料研究拠点（RISME）, <https://risme.org>（2025年8月27日アクセス）。
- 3) 原田広史, 川岸京子「物材機構におけるガスタービン材料研究の50年の歩みと将来への期待」『日本ガスタービン学会誌』51巻2号（2023）：136-146.
- 4) 醍醐市朗, 後藤芳一「鉄鋼材における不純物元素濃度の日中間比較」『鉄と鋼』100巻6号（2014）：756-760, <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.100.756>.
- 5) 伊藤一真「鉄鋼材料における粒界偏析の計算科学的解析」『あたりあ』62巻10号（2023）：664-672, <https://doi.org/10.2320/materia.62.664>.
- 6) Satoshi Utada, et al., “High Temperature Properties of a Single Crystal Superalloy PWA1484 Directly Recycled After Turbine Blade Use,” in Superalloys 2016: Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys, ed Mark Hardy, et al. (Minerals, Metals & Materials Society, 2016), 591-599, <https://doi.org/10.1002/9781119075646.ch63>.
- 7) Qingbo Jia, et al., “Selective laser melting of a high strength Al-Mn-Sc alloy: Alloy design and strengthening mechanisms,” *Acta Materialia* 171 (2019) : 108-118, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.04.014>.
- 8) 中野貴由「異方性材料デザインにより材料を主役に～耐熱性金属間化合物から、骨組織、金属3Dプリンティングによる生体材料まで」『あたりあ』64巻5号（2025）：317-330, <https://doi.org/10.2320/materia.64.317>.
- 9) Jinxing Sun, et al., “A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites,” *Journal of Materials Science & Technology* 138 (2023) : 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.06.039>.
- 10) Tanglong Zhu and Zhen Wang, “Advances in processing and ablation properties of carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic composites,” *Reviews on Advanced Materials Science* 63, no. 1 (2024) : 20240029, <https://doi.org/10.1515/rams-2024-0029>.
- 11) 日本鉄鋼連盟「カーボンニュートラルへの挑戦」Carbon Neutrality, <https://www.carbon-neutral-steel.com/about/>（2025年8月27日アクセス）。
- 12) U. S. Department of Energy, “The Department of Energy Hydrogen Program Plan, December 2024,” <https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/program-plan>（2025年8月27日アクセス）。
- 13) Materials Genome Initiative (MGI) Autonomous Materials Innovation Infrastructure Interagency Working Group (AMII-IWG), “Accelerated Materials Experimentation Enabled by the Autonomous Materials Innovation Infrastructure (AMII) A Workshop Report, 2024,”

- Materials Genome Initiative, https://www.mgi.gov/sites/mgi/files/MGI_Autonomous_Materials_Innovation_Infrastructure_Workshop_Report.pdf（2025年8月27日アクセス）。
- 14) European Research Executive Agency, “Climate-neutral steelmaking in Europe, 23 March 2022,” European Commission, https://rea.ec.europa.eu/publications/climate-neutral-steelmaking-europe_en（2025年8月27日アクセス）。
- 15) Transition Asia, “Will China Win the Green Steel Race? H2-DRI-EAF Market And Policy Development To 2030 (2024) ,” https://transitionasia.org/wp-content/uploads/2025/01/Will_China_Win_the_Green_Steel_Race_250124.pdf（2025年8月27日アクセス）。
- 16) University of Science and Technology Beijing, “Collaborative Innovation Center of Steel Technology,” <https://encicst.ustb.edu.cn>（2025年8月27日アクセス）。
- 17) 栗原潔「躍進するインドの科学技術政策の概観」『STI Horizon』8巻2号（2022）：20-25, <https://doi.org/10.15108/stih.00296>.

謝辞

本報告書の作成にあたっては、学協会、大学、民間企業、公的機関など様々な方々にご協力を賜った。情報提供者の一覧を下記URLに示す。

<https://doi.org/10.82643/crds-fr-n009>

本書について、著作権法で認められる範囲でのご利用についてはJSTのポリシー（https://www.jst.go.jp/site_policy.html）に従い、以下のクレジットを明記してください。本書に関するお問い合わせはcrds@jst.go.jpまでご連絡ください。

Regarding the use of this report within the scope permitted by copyright law, please follow the policy outlined here (<https://www.jst.go.jp/EN/copyright.html>) and clearly indicate the following credit. For inquiries regarding this report, please contact crds@jst.go.jp.

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野～領域別動向編～(2026年), 社会インフラ・モビリティ応用, 構造材料, 令和7年12月, CRDS-FR-N401-202512.
<https://doi.org/10.82643/crds-fr-n-sim-sm>

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency, Trends Report by Discipline, Nanotechnology/Materials Research Field(2026), Social Infrastructure and Mobility, Structural Materials, December 2025, CRDS-FR-N401-202512.
<https://doi.org/10.82643/crds-fr-n-sim-sm>