

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。実験科学与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