

2.4.1 金属系構造材料

(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、非鉄、合金、高強度、高靱性、高延性、加工性、高比強度、耐環境性、耐熱性、耐食性、軽量性、水素脆化、ナノ組織、マイクロ構造、マルチスケール、計算科学、機械学習、変形、破壊、腐食、転位、き裂

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

金属系構造材料は、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、構造体に成型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）など、多様な機械的特性などにおいて優れた性能が求められる。特に、部材の軽量化と成形性にそれぞれ寄与する高強度・高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研究開発領域共通の課題である。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。

代表的な構造材料である鉄鋼は、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、我々の生活に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様々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てそれぞれの長所を活かす新たな技術開発が活発に行われつつある。

近年においては、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。多くの橋梁やトンネルなどが老朽化の問題を抱えており、老朽化施設の補強技術や更新は、喫緊の課題である。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。環境負荷の評価においては、材料の製造や使用段階だけではなく、資源採取、原料生産から廃棄、リサイクルに至るまで、ライフサイクル全体での評価、すなわちライフサイクルアセスメント（LCA）が重要になってきている。今後は、各構造材料の特性だけでなく、LCAの考え方において環境負荷を低減させる材料開発と各素材のポテンシャルを引き出す最適設計が求められる。

金属系構造材料は経済的にも重要な役割を果たしているが、今後も高い競争力を維持・向上させるためには、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が一層重要になるであろう。

[研究開発の動向]

カーボンニュートラルを実現する手段として構造材料が果たす役割は幅広い。カーボンニュートラル実現に

においては水素が重要な役割を持つが、その水素の貯蔵や運搬に必要なタンク・配管には種々の金属材料が使われている。水素と接する構造材料の共通の課題の一つが水素脆化である。水素は、金属中に侵入し機械的特性の低下や脆性的な破壊を引き起こす。特に鉄鋼材料では強度が高まるほど脆化の感受性が大きくなり、水素脆化は高強度化の最大の障害となっている。

京都大学構造材料元素戦略研究拠点より提唱されている新しい格子欠陥の概念「プラストン」は、力学的に励起された状態の原子集団を指し、き裂や転位などの格子欠陥に遷移する。外力下においてプラストンから遷移する格子欠陥の種類によって材料の機械的特性が大きく変わるため、これを制御することができれば新たな材料設計の指針が確立できると期待されている。プラストンの概念を活用して鉄鋼材料の水素脆化を理論的に理解しようとする試みが行われており、計算科学と動的解析の両面からアプローチされている。

また、ハイエントロピー合金に関する研究が世界的に注目されているが、最近では実用化を見据えた研究に移りつつある。ハイエントロピー合金とは、一般的に4、5種類以上の元素で構成され、高い配置エントロピーを有し単一固溶体相を示す合金と定義される。強度-靱性・延性のバランスがよ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盛んに行われている。科学研究費補助金新学術領域研究において「ハイエントロピー合金：元素の多様性と不均一性に基づく新しい材料の学理」が進行中である。最近では、耐酸化性や熱伝導性が良好なハイエントロピー合金の遮熱コーティングとしての実用化も期待されている。また、高温での耐食性が良好であることから、欧州では鋼管などの構造材料への被覆材としての適用性が検討され、地熱発電設備への適用性が評価されている。さらには、高エントロピー合金の中には、高強度でありながら水素脆化をほとんど起こさないものも見出されており、実用化に向けた検討が進んでいる。

金属3D積層造形 (Additive Manufacturing) は、3D-CADなどの3次元データをもとに金属粉末等の層を積み重ねていくことにより3次元の造形物を製造する技術である。本技術では、切削や鋳造などの従来の加工法では難しい3次元複雑形状品の加工が可能であり、次世代の加工技術として注目されている。米国やヨーロッパを中心に、宇宙探査やロケットなど航空宇宙関連への適用も検討されている。例えば、インコネル718に代表されるNi基合金は高温強度と靱性に優れることからロケットエンジンや圧力容器に使われてきたが、加工が難しいため複雑形状の部材への適用は見送られてきた。しかし、積層造形技術によって、その適用限界を超えることができる。具体的には、最小限の重量で、かつ過熱を防ぐための表面流路により効率的な冷却能を有するように人工知能で設計し、それを積層造形で一体型成形した部材が、様々な宇宙開発プロジェクト向けに試作され実証実験が進められている。わが国の積層造形技術への取り組みは内容・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。

建築分野における金属材料の研究では、安全性向上、工期短縮、建築物の長寿命化に向けた材料開発や溶接技術向上のための研究が確実に進められている。一方、環境負荷をいかに低減するかも商品価値を決める重要な概念になっている。そのため、例えば一般社団法人サステナブル経営推進機構 (SuMPO) が認証する「エコリーフ」環境ラベルを得るための製品開発とそれを支える研究が重要になっている。一方で、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、日本鋼構造協会、日本鉄鋼協会、日本機械学会などにおける研究会など、評価・センシング技術やそれらに基づく数値解析が実施されている。中でも鉄鋼材料では腐食などの環境劣化の抑制技術が重要であることから、腐食メカニズムに立脚した寿命予測手法の基盤技術開発が進められている。

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いて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) においては、フェライト系、オーステナイト系の超高温耐熱鋼の開発において挑戦的な取り組みがなされている。一方、燃料としてのアンモニアが注目されており、特に技術開発が進んでいるのが、石炭火力発電のボイラーにアンモニアを混ぜて燃焼させる火力混焼技術である。2014～2018年の内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) を経て、2021年からは民間企業による大規模実証試験が行われている。アンモニアを用いた火力混焼は既存の設備を利用することができるが、アンモニア燃焼時の材料に及ぼす腐食影響などはまだ明らかになっておらず、今後、信頼性を裏付けるための材料評価と開発が必要であり、それを支える基盤的研究が期待される。また、原子力発電については、日本でも政府から次世代原子炉の開発や検討の方向性が示されており、それに応える材料開発が求められる可能性もある。米国では、NEI (Nuclear Energy Institute) のレポートにおいて 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 (AM)、Near Net Shape Manufacturing、Joining/Cladding、Surface Modification/Coating が項目として掲げられている。

自動車分野は現在、CASE (Connected: コネクテッド、Autonomous: 自動運転、Shared&Services: カーシェアリングとサービス、Electric: 電気自動車) や MaaS (Mobility as a Service: サービスとしての移動) に代表されるモビリティ革命に直面している。電動化、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、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。その中でも鉄鋼材料では、衝突安全と軽量化の両立を目指し、多くの先進高強度鋼板が開発されている。

現在、自動車用鋼板は引張強さにして 270 MPa 級から 2.0 GPa 超級までの広い強度クラスが実用化されている。元来の自動車用鋼板は炭素含有量を低減してすべてをフェライトとし、270 MPa 級の引張強度と 40% 超の優れた伸びを持つ軟鋼板であり、この基本組織に対して固溶強化や析出強化、硬質組織を用いた組織強化などにより高強度化が行われる。自動車に使用されているアルミニウム合金は 300 MPa 程度の引張強度を持つものが多いが、980 MPa 級以上の引張強度の高強度鋼板ではアルミニウム合金以上の軽量化が実現可能となる。自動車用鋼板の内、最も高強度化が進んでいるのが車体骨格向けの鋼板であり、1.5 GPa 級以上の強度を持つ部材を得るためにホットスタンプ技術が実用化されている。この技術は冷間成形時に課題となる破断や形状精度確保の難しさを回避し、かつ超高強度を得ることができる優れた方法である。900℃程度まで加熱しオーステナイトとした鋼板をプレス成形し、金型内で冷却することにより焼き入れを行い、金属組織をマルテンサイトとする。高温で成形されることからプレス荷重は小さく、かつ金型内でマルテンサイト変態が起こることから形状不良を引き起こす残留応力が小さなものとなるため、良好な形状精度が得られる。衝突時の高耐力が重視されるバンパー用には 1.8 GPa 級ホットスタンプ用鋼板が実用化され、さらには 2.0 GPa 級以上の鋼板の開発が進んでいる。客室周りの骨格部材では、2.0 GPa 級ホットスタンプ用鋼板とともに、冷延成形用には 1470 MPa 級冷延超高強度鋼板の開発も進んでいる。衝突エネルギー吸収用部材では、衝突による大変形でも破断しない十分な変形能が求められる。その場合には軟質なフェライトや TRIP 現象 (マルテンサイト変態誘起塑性) を示す残留オーステナイトなどを用いる必要があり、現在、1180 MPa 級鋼板の開発が進められている。

鉄鋼材料の高強度化の進展とともに、高強度化に伴う技術的ハードルを克服するための技術革新が求められているおり、第3世代の AHSS (Advanced High-Strength Steels) の代表格とされる中 Mn 鋼や Q&P 鋼の研究開発も、精力的に行われている。中 Mn 鋼は焼戻しマルテンサイトであり、高強度で高延性であることから、欧州では自動車用鋼板として実用化レベルにある。一方、製造時の CO₂ 排出削減の観点から、熱処理プロセスを簡略化する試みが行われている。NEDO の先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム「熱制御科学による革新的省エネ材料創製プログラムの研究開発」では、熱間圧延のみのワ

ンヒートプロセス、One-Step Q&Pによる非調質 TRIP 鋼が提案されている。また、JFE スチールが開発した冷延材は、加熱の必要が無いために従来のホットスタンプ材に比べてコストを抑制することが可能で、トヨタ自動車がすでに採用している。鋼材と他の材料との適切な組み合わせによるマルチマテリアル化や、トポロジー最適化などによる最適構造設計などの取り組みも進展している。

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、今後、超高効率 LNG 燃料船、アンモニア燃料船、水素燃料船、CO₂ 回収船などの普及・拡大が見込まれて適用範囲が拡大するとともに、従来とは異なる性能が求められることが予想される。

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・技術トピックス]

計算科学、データ科学の進展に伴い、AI や機械学習を用いた現象解明や特性予測に関わる研究が急増している。鉄鋼分野においても、既存の公表データを活用し、鋼の成分範囲に応じた強度や延性の予測、SEM や EBSD による組織解析結果と合わせ、マルテンサイト鋼や DP 鋼の破壊に至る過程での変形挙動や破壊の起点を予測する研究が実施されている。

水素脆化に関しても、各種材料の水素放出曲線を AI によって分析し、水素脆化の原因となる鋼中水素の状態を特定し、水素脆化耐性向上のための材料設計に繋げる試みが注目される。従来、水素脆化の研究は鉄鋼、ステンレス、Ni 合金が中心であったが、近年 Al 合金の水素脆化研究が増えている。Al 合金の水素脆化研究の中には、放射光を用いた in-situ 観察により、水素脆化の起点となるポイドの可視化に成功したとの報告がある。また、高エントロピー合金においては、高強度でかつ水素脆化感受性が低い新たな合金が見出されており、実用化検討とともに、金属の水素脆化を克服するための理論的研究が進められている。

構造材料の合金や部材設計に計算科学、データ科学を応用しようとする取り組みも進められている。高エントロピー合金は、延性や靱性に優れること、耐熱性を示すことなどから、様々な分野での実用化が望まれているが、合金成分の最適化を計算科学・データ科学が有効に用いられている。また、メタマテリアルの概念を取り入れ、積層造形と人工知能や機械学習との組み合わせにより、材料に新たな物性を付与させようとする取り組みも注目されている。

マルチスケールの解析によって、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は確実に進展している。3次元アトムプローブ、TEM トモグラフィーなどの原子レベルでの知見から普遍的な原理・原則を見出し、種々の構造材料の特性制御に繋げる成功例が積み上がっている。また、ナノ/マクロのスケールギャップをモデリングで埋める試みが成果に繋がっている例もできてきている。さらに、高温での再結晶や相変態、破壊現象など短時間で起こる現象を捉えるためには、空間分解能とともに時間分解能の高い解析手法が必要であるが、顕微鏡法と放射光を組み合わせた in-situ 解析などによる、時間スケー

ル解析の高度化への挑戦も進められている。

[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)、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 (MI²I) やSIP革新的構造材料などのプロジェクトが進められてきた。2023年度から開始予定の次期SIPの候補課題にも構造材料に関連するものが含まれている。

2022年度からは、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」において「極限環境対応構造材料研究拠点」(代表機関：東北大学)が開始されている。この課題では、水素、高温、摩耗・疲労の諸課題に対してデータ駆動型の材料開発手法を構築することを目指す。多くの材料に対してこ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“階層構造化”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。この階層性が、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、構造材料領域でこのアプローチを成功させる難易度は高いと考えられている。重要な取り組みの一つは、精度が高く、質が揃った実験データをいかに効率よく取得するかである。

日本国内では、防衛装備庁「安全保障技術研究推進制度」における取組の中に、耐熱合金におけるハイスループット測定技術開発が進められている。国外では、ハイエントロピー合金の組成多様性と機械的特性の関係に関する網羅的な取り組みが進められている。多元組成合金は、元素種や組成比の組み合わせが無限に存在するため、網羅的かつ高効率に探索できる技術を持つことが極めて大きなアドバンテージになる。

また、金属系構造材料に関連する研究課題は、以下のプログラムなどにおいて取り組まれている。

- ・ JST e-ASIA 共同研究プログラム「材料 (マテリアル・インフォマティクス)」分野/データ駆動による金属積層構造の力学特性設計
- ・ JST-さきがけ「物質探索空間の拡大による未来材料の創製」
- ・ JST-さきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」/ナノスケール内部応力制御による鉄鋼強靱化
- ・ JST A-STEP 産学共同 (本格型) / スポット溶接された超ハイテン材の破壊予測技術の開発
- ・ JST 未来社会創造事業 (探索加速型)「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域/ゼロカーボン社会に向けた発電プラント用耐熱金属材料の基盤技術
- ・ 未来社会創造事業 (探索加速型)「持続可能な社会の実現」領域/モノの寿命の解明と延伸による使い続けられるものづくり
- ・ NEDO/革新的新構造材料等研究開発
- ・ NEDO/航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業
- ・ NEDO/超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業
- ・ NEDO/環境調和型プロセス技術の開発

(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、水素利用社会においては、水素脆化の克服が古くて新しい課題である。特に、高強度の構造材料における水素脆化の克服は、従来の理論ではカバーできない挑戦的な課題でもあり、新たな評価方法とともに計算科学や先進解析技術を駆使したアプローチが必要である。さらに、水素の輸送や貯蔵においては液体水素に対応する極低温での安全性に優れた材料が求められる。また、新エネルギーとしてのアンモニア、さら

にはCO₂貯蔵における高濃度・高圧のCO₂環境下で耐えうる材料が必要になり、従来経験のない環境下での耐環境性の評価法の検討とデータ採取、新たな指導原理や理論構築が必要となる。使用環境の多様化とともに、異なる領域が相互に効果的に結びつく取り組みが求められている。

新しいコンセプトの創生も必要である。たとえば、従来の平衡論を中心とする材料設計に加えて、速度論に基づくデザインがその一つになりうる。すなわち、非平衡や準安定状態の積極的に活用することであり、未知の準安定相の探索のためには、計算科学・データ科学の活用やハイスループット評価技術の開発がキーになる。また、材料の動的挙動の機構説明やモデリングも重要であり、自由エネルギーや幾何学などの複数の理論を異なるスケールで組み合わせる挑戦的なアプローチが求められる。

(6) その他の課題

我が国の材料は歴史的にも高い水準を維持してきた。しかしながら、他国の追い上げは厳しく、近い将来、その存続基盤が揺らぎ、ニーズの変化への機動的な対応が困難になることが危惧される。構造材料は、新しい材料シーズを生み出し、製品開発し、社会実装するまでに長い年月を必要とする分野である。今後、マテリアルズ・インフォマティクスやデータ科学を駆使することにより、社会実装までの期間をある程度短縮できると期待されるものの、一方で、地道な基盤的研究のマインドが低下していけば、材料の研究開発力を急速に弱体化させることが危惧される。

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など、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。すなわち、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を選択し推進していくことが求められる。大学等で材料研究の根幹となる基礎学理に取り組むことは非常に重要である。

(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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 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。 2022年度から文科省「データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト」において「極限環境対応構造材料研究拠点」がスタートした。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 産・学ともに世界初の革新的材料の開発と社会実装が推進されている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> NSFのMechanics of Materials and Structuresプログラム予算は過去5年ほぼ横ばいだが、論文引用数は世界トップレベルを維持している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> Advanced Manufacturingプログラムを政府主導で推進中である。GEが耐熱材料プロジェクト「ULTIMATE」を2021年に開始。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ、英国を中心に質の高い論文を創出する活動が依然として活発に行われている。材料系での高IF論文がみられる。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 脱炭素化のトレンドをリードしているものの、現行の社会情勢により開発が停滞している。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> National Natural Science Fundによる予算額が上昇傾向。 論文数、質とも上昇傾向ではあるが、他国の後追いの内容も散見される。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> アジアでは高いレベルを維持しているが、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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 注力してきた自動車向けMg板材がCFRPなどの他材料との競争で苦戦。

(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 2.6.3）

参考・引用文献

- 1) Nobuhiro 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 plaston,” *Scripta Materialia* 181 (2020) : 35-42., <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.02.001>.
- 2) Isao Tanaka, Nobuhiro Tsuji and Haruyuki Inui, ed., *The Plaston Concept* (Singapore: Springer, 2022).
- 3) Morris Cohen, “Unknowable in the Essence of *Materials Science and Engineering*,” *Materials Science and Engineering* 25 (1976) : 3-4., [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(76\)90043-4](https://doi.org/10.1016/0025-5416(76)90043-4).
- 4) G. B. Olson, “Computational Design of Hierarchically Structured Materials,” *Science* 277, no. 5330 (1997) : 1237-1242., <https://doi.org/10.1126/science.277.5330.1237>.
- 5) Weidong Li, et al., “Mechanical behavior of high-entropy alloys,” *Progress in Materials Science* 118 (2021) : 100777., <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100777>.
- 6) 青木宗太「鉄鋼業における環境への取り組み」『日本機械学会誌』125 巻 1239 号 (2022) : 14-19.
- 7) 樋渡俊二「自動車の強みとしての先進高強度鋼板」『日本機械学会誌』125 巻 1239 号 (2022) : 24-27.
- 8) Easo P. George, Dierk Raabe and Robert O. Ritchie, “High-entropy alloys,” *Nature Reviews Materials* 4 (2019) : 515-534., <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>.
- 9) 一般社団法人サステナブル経営推進機構 (SuMPO), “SuMPO 環境ラベルプログラム,” <https://ecoleaf-label.jp/>, (2022年12月22日アクセス).