

3.4 社会インフラ応用

わが国を取り巻く社会的課題は刻々と顕在化しており、これらの課題に対応するために必要とされる社会インフラ需要も質的に大きく変化しつつある。例えば、橋梁、トンネル、道路等の事故が相次いでおり、今後インフラが一斉に更新期を迎え、維持補修・更新に係る投資が発生することが想定される。さらに、大規模自然災害等については、平成25年12月に「国土強靱化基本法」が成立し、国土強靱化に関する施策を総合的かつ計画的に推進することとされた。

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、すべ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、維持補修・更新に係る問題が顕在化している構造材料（金属・複合材料）、鉄鋼・コンクリート構造物に焦点を当て、材料の性能向上、非破壊検査と劣化予測、接合・接着・コーティングの現状と課題について記述する。

「構造材料」は、構造物がその構造および機能を維持すべく、自重および荷重に耐えるために必要な力学的特性を有する材料である。鉄鋼をはじめとする金属系構造材料は人類の歴史で最も長く使用され、今もなお幅広い機能、高い性能が求められ続けている。一方、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る。本区分では、金属系材料と複合材料にわけ、それぞれの性能向上、省エネルギー化の現状と課題について述べる。

社会インフラ材料は、①外環境に曝される、②要求供用期間が長い、③寸法が大きい、④更新コストが膨大となる、などの点においてその他の工業材料と大きく異なり、鉄筋とコンクリートで構成される鉄筋コンクリートのように、材料単価が比較的安価で、施工性が高く長期の耐久性が期待できる材料が多用されている。このような社会インフラ材料を使用した構造物の性能低下の要因については、体系的な整理がされつつあり、機構の解明や影響の低減に向けた取り組みがなされている。今後は、適切な維持管理を実施するための体制作りが求められており、その中で重要とされる社会インフラ材料の「非破壊検査」と「腐食寿命予測」について研究の現状と課題を述べる。

「接合・接着」技術は社会インフラの構造物に要求される高い機械的強度と高い信頼性の基盤となる重要な技術であり、マルチマテリアル化の進展に伴い、新たな材料を対象に含めての技術開発は継続的に必要である。また、大型構造物に対して耐久性を高めるためのコーティングを可能とする低コスト処理技術が開発されてきており注目されている。接合・接着・コーティングのうち溶接・接合技術に関しては、各拠点において体系化がなされているのに対して、接着技術の拠点整備は遅れており、一方、コーティング技術の機能は防食であり、それぞれの課題は大きく異なるので、項目別に現状と課題を述べる。

3.4.1 構造材料（金属、複合材料）

構造材料は、構造物がその構造および機能を維持すべく、自重および荷重に耐えるために必要な力学的特性を有する材料である。鉄鋼をはじめとする金属系構造材料は人類の歴史で最も長く使用され、今もなお幅広い機能、高い性能が求められ続けている。一方、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る。本研究開発領域は金属系材料と、複合材料に分けて述べる。

3.4.1.1 構造材料（金属系）

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

金属系構造材料に関して、高強度、高靱性、軽量（高比強度）、耐環境性（耐熱性、耐食性など）、加工性など材料特性の向上、高品質、低コスト、高生産速度など製造技術の向上、さらに高信頼性、長寿命、リサイクル性などの付加を目指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) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

金属系構造材料は、ビル・橋梁などの社会インフラ、自動車などの輸送機器、発電プラントなどのエネルギーインフラを構成する主要な材料である。求められる主な特性は、高強度、高靱性、高延性、軽量性（高比強度）、耐環境性（耐熱性、耐食性）である。しばしば、複数の特性を同時に向上させることが求められるが、それらのいくつかは相反する特性であるため、両立性が課題となる場合が多い。これに加え、高信頼性、長寿命、低コスト、生産性、リサイクル性や長期間にわたって安定的に提供するための技術開発が行われている。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、我々の生活には欠かせない材料として使用されてきた。

我が国においては、東日本大震災を一つの契機として、自然災害に対する社会インフラの安全性や発電プラント・輸送機器のエネルギー効率の向上、省資源・低環境負荷による持続性の担保が強く求められている。また、経済的にも金属系構造材料は極めて重要な役割を果たしている。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。今後も高い競争力を維持・向上させるため、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必要である。

これらの社会課題に応えるためには、構造材料のさらなる性能向上が不可欠であり、国家主導で研究開発に関する様々な政策が進行中である。金属系構造材料に関する主なプログラム・プロジェクトとして、次世代金属構造材料開発への道筋を作る JST 産学共創基礎基盤研究「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」（平成 22 年度～）、主に発電・輸送機器用蒸気・ガスタービン等のための耐熱材料・コーティング技術開発を推進する JST 先端的低炭素化技術開発（ALCA）「耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料」（平成 23 年度～）、構造材料に関して拠点型で希少元素を用いない材料開発を目指す文部科学省「元素戦略プロジェクト（研究拠点形成型）」（平成 23

年度～）がある。また、構造材料を包括的に扱うプロジェクトとして、経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」（平成 25 年度～）および内閣府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」（平成 26 年度～）が推進されている。さらに、NIMS 内に平成 26 年度からの準備期間を経て、構造材料研究拠点が平成 28 年度に正式組織として発足した。

米国では、2014 年より Manufacturing USA と呼ばれる先進プロセスの研究開発が National Institute of Standards and Technology (NIST) に headquarter を置いて進められている。National Nanotechnology Initiative や Materials Genome Initiative と並行して進められる重要施策と位置付けられ、Additive Manufacturingなどを推進中である。また、自動車関連では、FORD、FCA、GM が参画して推進する UNITED STATES COUNCIL FOR AUTOMOTIVE RESEARCH LLC (USCAR) において、USAMP と呼ばれる材料開発プログラムが推進中である。3 大自動車メーカーが協議会を組織し、DOE が一部支援して進められている。

欧州でも自動車関連課題のプログラムが目立つ。European Council for Automotive R&D (EUCAR) は、14 社が加盟する協議会で TOYOTA が日本のメーカーで唯一加盟している。これとの協力関係で進められているのが Enhanced Lightweight Design (ENLIGHT) と呼ばれる材料開発プロジェクトである。欧米は、いずれもマルチマテリアル化を重点的に進めており、「鉄の使い切り」を掲げる日本国内自動車メーカーの方針と対照的である。英国では、High Value Manufacturing Catapult において国内 7 つのセンターを連携させて鋳造、接合などのプロセス開発を行っている。

なお、構造材料（金属系）の動向に関しては、俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2017 年）の研究開発領域「耐熱材料」および「高強度軽量材料」にも関連する記載があるので参照されたい。

(3) 注目動向

国内の注目動向としては、バルクナノメタルに代表されるナノレベルの微細組織を制御する技術が発展中である。従来の金属系材料では、結晶粒径を 10 μm 以下に微細化することは難しいとされてきたが、強ひずみ加工によって 1 桁以上も微細化させることが可能となり、様々な優れた性能が発現することが明らかになってきた。例えば、アルミニウムの結晶粒径を 1 μm 以下に制御することにより、鉄鋼と同程度の強度が得られることが示されている。この新材料は、一見すると従来型の結晶粒微細化強化の延長線上にある技術と理解されがちであるが、単なる延長線を越えた高強度が発現することや、従来は活動しないすべり系が活性化するなどの特異な挙動が報告されており、学術的にも注目度が高い。

また、理論計算や数値計算モデルを活用したマテリアルズ・インフォマティクス（マテリアルズ・インテグレーション：MI）と呼ばれる新しい特性予測・組織設計の技術開発が進められている。第一原理的手法と実験データの効率的併用、物理モデルと機械学習による経験式の組み合わせにより、多様な元素・組織の組み合わせから最適解を短時間で導き出すことを可能にする手法として期待が高い。計算科学の重要度が増すに連れて、その基礎データを提供する評価・解析技術の精緻化・高度化の必要性も増している。例えば、クリープ、疲労、腐食、遅れ破壊などの時間依存型の損傷現象は MI のターゲットとして期待される分野であるが、予測精度の検証には精緻な実験データが不可欠である。また、

特性予測や機構解明には、微視的領域の組織的・力学的計測が必須であり、3次元アトムプローブ、TEM トモグラフィー、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。また、微視的領域の挙動とマクロ特性を結びつけるためには、巨視的平均情報を得ることが重要であり、それには中性子線の回折・小角散乱などの手法が有効である。最近では、回折コントラストの原理を活用したブラッグエッジ法と呼ばれるイメージング技術が発達しつつあり、結晶学的情報を広範囲にマッピングすることが可能になると期待されている。中性子線の最大の利点は高い透過性で、単純形状の母材評価のみならず、接合部を含む部品形状をそのまま評価・解析することが可能であり、材料科学と機械工学の情報が同時に得られることで、さらなる発展が期待されている。MI に関しては SIP「革新的構造材料」において第一原理計算、フェーズ・フィールド法、有限要素法等、ナノ～マクロスケールを扱う種々の計算に加えて、ベイズ推論等の機械学習、さらに個々の計算モジュールをつないでプロセス→組織→特性→性能を一気通貫で解く統合システムの研究開発が行われている。

国際的にホットな技術としてはハイエントロピーアロイや Additive Manufacturing が挙げられる。ハイエントロピーアロイは、一般的には 4～5 元系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うものである。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盛んに行われている。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いる。現在までは、主に外形制御が目的であったが、その精度が向上すると同時に金属材料が得意とする組織制御にターゲットが移行しつつあり、今後も注目の技術分野である。

(4) 科学技術的課題

金属系構造材料の特性向上の指針となる知見は、経験則に基づくものが多い。例えば、代表的な強化機構である結晶粒微細化強化は、1950 年代に発表された経験則を定式化したものであり、60 年以上経過した現在でもその機構には不明な部分が多い。我が国の優位性を維持するためには、飛躍的な性能向上を可能にする新原理が必要であり、それには経験則からの脱却が求められる。これは産業界の強い要望でもあり、大学・公的研究機関は、その期待に応えるために強い責任感を持って臨むことが望まれる。

構造材料の代表特性である強度と靱性（延性）の両立は、古くて新しい課題である。金属は、この相反する特性を両立させることが可能な代表的な材料であるが、それでもなお同時向上は困難な課題である。あらゆる材料において、強度と延性の関係をプロットした図が議論の基礎となることが多いが、相反する特性であるため、そのプロットは左上から右下にかけて曲線上に分布し、バナナカーブと呼ばれている。このバナナカーブを右上にシフトさせるための新技術の創出が強く望まれている。有力な技術の一つとして、鉄鋼における Transformation Induced Plasticity (TRIP) の実用が進められている。TRIP は、外力やひずみに誘起されて、準安定オーステナイトがマルテンサイトに変態することで塑性ひずみを担う機構であり、準安定相の残留オーステナイトの制御が鍵となる。

新原則に基づく新材料の開発には、原理解明が最も重要であり、そのための顕微鏡技術や計算科学などの解析技術の発展も大きな課題の一つである。顕微鏡技術と計算科学に共通する課題の一つは、マルチスケール化である。両手法ともに、対象スケールが異なると

適用できる手法も異なってしまうため、如何にそれらを結ぶかが重要である。特に金属材料の場合、マクロ特性を支配する因子は微視的金属材料組織に関係することが多く、原子レベルの特徴と金属材料組織の関係、さらに巨視的特性につながるマルチスケールモデルの確立が強く望まれている。

(5) 政策的課題

欧米、アジア各国は、国内の同業企業数（例えば鉄鋼、自動車）が日本に比べて少ないために、政府の政策を効率的に進められる利点があるが、一方で国内において競争原理が働きにくいために海外企業に対する競争力が向上しにくい。これらの国々では、政府主導の開発プロジェクトによる水平・垂直連携が重要である。特に欧州では、以前は各国に存在していた鉄鋼メーカーの統合が進んで効率化が優先された結果、技術力・研究開発力は日本国内の鉄鋼メーカーに引き離された感がある。例えば、自動車用薄鋼板の実用強度レベルは現在 1.2 GPa に達しているが、これは日本の鉄鋼メーカーが開発した材料によるものである。このように、日本国内企業の技術レベルは相対的に高水準を保っているが、今後も維持し続けられる保証はない。次世代の新原則の開拓に取り組むべきであり、これには大学・公的研究機関による原理解明・学理確立の役割が重要である。

一方、同じ輸送機器用材料でも、航空機用は自動車用とは全く事情が異なる。日本の航空機産業のシェアは米欧に比べて微々たるものでしかなく、その差は材料開発にも現れている。代表的な機体・エンジン用金属材料であるアルミ合金、チタン合金、ニッケル基合金、さらに次世代航空機エンジン用材料として期待されるチタンアルミ金属間化合物に関して、基礎研究では日本は米欧に劣らぬものの、部材生産のための技術開発になると、その力の差は縮まるどころか広がる恐れもある。

このように、日本は追われる立場でもあり、追う立場でもあるが、いずれの場合にも、産業競争力の強化には、産学官をまとめる取り組みが必須であり、特に橋渡し機能が期待される公的研究機関の役割が一層重要になる。また、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議の主導により推進される SIP の進展が期待される。

原理解明に基づく新シーズを大学・公的研究機関が創出するには、基礎研究と応用研究を適切にバランスして進める必要があるが、現在のファンディング制度は短期かつ応用を指向した課題に集中しており、大学、公的研究機関の基礎研究を支える交付金が低下の一途をたどっている。また、国主導のプログラムにおいて、大型研究機器が集中して公的研究機関に設置されているが、研究機関任せの運用になっており、オールジャパンで活用する仕組みが不足している。例えば、知財戦略については、技術の開示と表裏の関係にあり、産官学が方針を共有して戦略を練る必要がある。

(6) キーワード

金属、合金、鉄鋼、高強度、高靱性、高延性、軽量性、高比強度、耐環境性、耐熱性、耐食性、ナノ組織、マルチスケール、計算科学、機械学習

(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	◎	↑	超微細粒材料、周期構造 Mg 合金などのシーズ技術研究やマテリアルズ・インテグレーションなどの新たなアプローチ研究が活発に行われている。文科省「元素戦略プロジェクト（京都大学構造材料元素戦略研究拠点）」では、新たな学理の確立を目指した取り組みに期待が集まっている。JST 産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的構造材料用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」においても、多くの基礎知見が得られている。
	応用研究・開発	◎	↑	NEDO「革新的構造材料等技術開発」において、鉄鋼の強度特性の目標が大幅前倒しで達成されるなどの順調な成果が現れており、実装化の検討段階に入っている。内閣府 SIP「革新的構造材料」における航空機向け耐熱材料の開発も順調に推進されている。NIMS で開発された制振ダンパー合金は、名古屋駅前の JP タワーに実装された。
米国	基礎研究	◎	↑	3D プリンターの技術開発は、他国に比べて研究者人口が多く、内容的にも進んでいる。Manufacturing に関する研究開発は政府主導で行われており、Nano Materials に続く大型施策に発展すると予想される。Materials Genome も継続的に進行中であるが、基礎から応用へ移行しつつある。
	応用研究・開発	○	→	Materials Genome 研究は、実部材の製造を目指した展開が Northwestern 大などで開始されており、ベンチャーなどが活動中。鉄鋼企業は他国の後追い状態が続いている。一方、アルコアに代表される軽金属業界の技術は高い。航空機の新型機体は、CFRP からアルミ合金に戻るトレンドにある。
欧州	基礎研究	◎	↑	独マックスプランク鉄鋼研究所における微細複相組織制御は、日本と同等レベルで世界をリードしている。計算科学やナノ組織解析の電子顕微鏡技術などで日本に勝る活動を展開中。
	応用研究・開発	◎	↑	自動車のマルチマテリアル化研究開発は、国家プロジェクトとして進行中。自動車メーカーが主な実施者に含まれている点特徴的。独 BMW やアウディが 100kg 単位で軽量化した自動車を次々に発表。マルチマテリアル化で世界をリードしている。ただし、欧州の鉄鋼メーカーの技術レベルが日本に比べて低いことがマルチマテリアル化を後押ししている面もある。
中国	基礎研究	△	→	政府による大学や国研などへの設備投資は依然として活発である。地方大学においても最新の解析機器が一通り揃っており、充実ぶりは日本をはるかに上回っている。新シーズ創出に関しては日本や欧米の後塵を拝している。
	応用研究・開発	○	→	自動車用の鋼板開発がターゲットの一つであるが、鉄鋼企業の業績に依存しており不透明。経済状況が踊り場に来ており、資源価格の高騰も一段落し、現在では価格維持のためにレアメタルの使用量を増加させる研究課題を模索中。
韓国	基礎研究	○	↑	基礎力の向上が顕著である。鉄鋼の TRIP、TWIP 研究を活発に行うなど、欧米のレベルに肩を並べる水準に達しつつある
	応用研究・開発	○	↑	TRIP 鋼の研究開発は依然として活発に進められている。POSTECH の研究レベルは日本に劣らない水準に達しつつある。世界に先駆けて量産化を実現した Mg の自動車向け薄板は、期待した欧州での採用が想定を下回っている。鉄鋼の技術は日本に近づきつつある。

(註 1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註 3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 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）。
- 2) 新学術領域研究「バルクナノメタル」, <http://www.bnm.mtl.kyoto-u.ac.jp/>（2017年3月15日アクセス）
- 3) JST 産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的構造用金属材料創製を目指したへ

- テロ構造制御に基づく新指導原理の構築」, <http://www.jst.go.jp/kyousou/theme/h22theme01.html> (2017年3月15日アクセス)
- 4) 新構造材料技術研究組合 (ISMA), <http://isma.jp/> (2017年3月15日アクセス)
 - 5) Manufacturing USA, <https://www.manufacturing.gov/nnmi/> (2017年3月15日アクセス)
 - 6) UNITED STATES COUNCIL FOR AUTOMOTIVE RESEARCH LLC (USCAR), <http://www.uscar.org/guest/teams/28/U-S-Automotive-Materials-Partnership-LLC> (2017年3月15日アクセス)
 - 7) European Council for Automotive R&D (EUCAR), <http://www.eucar.be/> (2017年3月15日アクセス)
 - 8) Enhanced Lightweight Design (ENLIGHT), <http://www.project-enlight.eu/> (2017年3月15日アクセス)
 - 9) High Value Manufacturing Catapult (HVMC), <https://hvm.catapult.org.uk/> (2017年3月15日アクセス)

3.4.1.2 構造材料（複合材料）

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

複数の異なる材料の複合化により、高比強度（引張強さ／比重）など、均質材料では達成できない機械的特性を発揮し、構造物の軽量化等に貢献することを目指す研究開発領域である。その代表である FRP（繊維強化プラスチック）においては、繊維、樹脂おのこの開発に加えて成形技術の開発が活発化し、加工性、生産性等の向上と併せて製造コスト低減を追求している。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

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、軽量構造材料は自動車、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。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しうる。一方、金属材料と比較して高価格であり、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。

複合材料は一般に強化材としての繊維と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、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中では FRP が最も普及しており、FRP には GFRP（ガラス繊維強化樹脂）と CFRP（炭素繊維強化樹脂）がある。最も使われているのは GFRP であり、その用途は浴槽・浴室ユニット等の住宅機材が代表的であり、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。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。

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、炭素繊維には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 7 割を日本メーカーが占める。世界の需要は 2013 年には 48 千トン／年であるが、2015 年には 70 千トン／年、2020 年には 140 千トン／年、という見通しもある。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、生産性に難があるため、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予め積層し、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一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得る。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。

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 (MMC)、セラミックス基複合材料 (CMC) がある。これらは、1980 年代のいわゆる新素材ブームの中で多くの研究開発がなされたが、有力な商品は生まれず、90 年代のバブル経済崩壊とともにほとんどの企業は撤退した。唯一、SiC/SiC CMC が有望な材料として残っていると見てよい。これは Ni 基超合金を超える耐熱材料として、次世代航空機エンジンのタービン翼への適用が期待され、国内外の航空機エンジンメーカー (特に GE、IHI) が中心となり開発が進められている。

SiC/SiC CMC は、SiC 繊維の織物にマトリックスとしての SiC を含浸させたものである。含浸方法として、気相含浸 (CVI) 法、固相含浸 (SPI) 法、液相含浸 (PIP) 法、熔融含浸 (MI) 法がある。これらは一長一短であり、材料に要求される気孔率、生産速度、コストなどによって選択される。ただし、現行のニッケル基超合金と比べると圧倒的に高価であり、大幅なコスト低減が求められる。さらに、破壊靱性向上の観点から、マトリックスに生じたクラックが繊維に伝播することを防ぐために、繊維表面 (マトリックスとの界面) にコーティングを施すなどの処置も必要と考えられている。また、この材料は 1400°C での使用にも十分な高温強度を有するが、燃焼ガスに含まれる水蒸気により高温酸化が起こる。そのため、環境遮蔽コーティング (EBC) が必要とされる場合がある。航空機エンジンのタービン翼としての実用化が SiC/SiC CMC については第一に待望されるが、各成形技術の高度化により、適用範囲の拡大が期待される。

なお、CFRP の動向に関しては俯瞰報告書 環境・エネルギー分野 (2017 年) の研究開発領域「高強度軽量材料」に、SiC/SiC CMC に関しては俯瞰報告書 環境・エネルギー分野 (2017 年) の研究開発領域「耐熱材料」に、それぞれ記載があるので参照されたい。

(3) 注目動向

CFRP 関連で注目すべき技術の一つが構造ヘルスマニタリング技術である。これは光

ファイバセンサなどを CFRP 製造時に埋め込み、製造時、使用時のひずみ、振動、温度変化、損傷などをリアルタイムで検知・診断するもので、航空機認証機関による認証取得の段階にまで達している。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。これらは認証の際にも、試験データを補完する役割として重要度が増している。

前述のとおり、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見られる。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）が挙げられる。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、経済産業省の未来開拓研究プロジェクト「革新的新構造材料等研究開発」（平成 25 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」（平成 26 年度～）、主に前者が自動車向け、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。経済産業省「革新炭素繊維基盤技術開発」（平成 23 年度～）は、炭素繊維製造時の消費エネルギー消費量・CO₂ 排出量の半減及び生産性の大幅向上（大量供給）を実現する、新たな炭素繊維製造プロセスに必要な基盤技術を確立することを目的としている。経済産業省「次世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造）」（平成 25 年度～）は、航空機用 CFRP 構造ヘルスマニタリング技術の実用化や製造プロセスモニタリング技術の開発を進めている。

(4) 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言えず、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。三次元・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。また、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、設計にせよ加工にせよ、CFRP の特長を活かすべく革新的に行うためには、その破壊機構の解明が不可欠であるが、まだ十分とは言えない。結果的に、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。CFRP 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更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。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。

(5) 政策的課題

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、エンジンはプラット・アンド・ホイットニー、ゼネラル・エレクトリック、ロールス・ロイスと、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が必要であり、SIP 革新的構造材料では、JAXA がその役割を担うよう、準備が進められている。

(6) キーワード

複合材料、炭素繊維強化樹脂、CFRP、GFRP、炭素繊維、熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂、セラミックス基複合材料、SiC/SiC、CMC、MMC、高比強度、軽量化、脱オートクレーブ、プリプレグ、RTM、低コスト化

(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"> 物質・材料研究機構による、繊維／樹脂界面の解析・制御研究。 大学、国研による、CNT ベースのナノコンポジットの研究開発。 大学中心の、植物由来原料による CFRP 素材の開発。 大学中心の、セルロースナノファイバー関連の研究開発。 国研中心の、耐熱 CFRP の開発。
	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、CFRP 成形技術開発。 内閣府「革新的構造材料」による、脱オートクレーブ成形技術。 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
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。
	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。

欧州	基礎研究	○	→	・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。
	応用研究・開発	◎	↑	・独連邦教育研究省 (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。 ・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)。
中国	基礎研究	○	→	・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。
	応用研究・開発	◎	↑	・1960年に国家建材局の下に4研究所が設立、1999年に組織改革し、企業活動を開始。
韓国	基礎研究	△	→	・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。
	応用研究・開発	○	→	・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。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 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) 武田展雄、水口周、伊藤悠策「先端複合材料構造の成形モデリングおよびモニタリングの最近の動向」『日本機械学会論文集 (A編)』78巻795号(2012): 1495。
- 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 (日本非破壊検査協会誌)』第60号3号(2013): 157。
- 5) S. Minakuchi et al., “Life cycle monitoring and advanced quality assurance of L-shaped composite corner part using embedded fiber-optic sensor”, *Composites: Part A* 48, (2013): 153.
- 6) 新構造材料技術研究組合 (ISMA), <http://isma.jp/> (2017年3月15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> (2017年1月23日アクセス)
- 8) デラウェア大学複合材料センター (CCM), <http://www.ccm.udel.edu/> (2017年3月15日アクセス)
- 9) エジソン溶接研究所 (EWI), <http://ewi.org/> (2017年3月15日アクセス)

- 10) フラウンホーファー化学技術研究所 (ICT), <http://www.ict.fraunhofer.de/en.html> (2017年3月15日アクセス)
- 11) フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所, <http://www.ifam.fraunhofer.de/en.html> (2017年3月15日アクセス)
- 12) 英国接合溶接研究所 (TWI), <http://www.theweldinginstitute.com/> (2017年3月15日アクセス)
- 13) 韓国材料研究所 (KIMS), <https://www.kims.re.kr/eng/> (2017年3月15日アクセス)

3.4.2 非破壊検査・劣化予測

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

社会インフラ材料は、①外環境に曝される、②要求供用期間が長い、③寸法が大きい、④更新コストが膨大となる、などの点においてその他の工業材料と大きく異なり、鉄筋とコンクリートで構成される鉄筋コンクリートのように、材料単価が比較的安価で、施工性が高く長期の耐久性が期待できる材料が多用されている。このような社会インフラ材料を使用した構造物の性能低下の要因については、体系的な整理がされつつあり、機構の解明や影響の低減に向けた取り組みがなされている。今後は、適切な維持管理を実施するための体制作り（維持管理システムの構築）が求められている。その中で重要とされる社会インフラ材料の非破壊検査および腐食寿命予測研究の現状と課題を述べる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

・コンクリート構造物の劣化と非破壊検査の必要性

コンクリート構造物の維持管理の重要性が認識されて以来、コンクリートの物性および外力・外環境がその性能低下に及ぼす影響についての研究が進み、種々の劣化損傷現象およびその機構が把握されつつある。例えば、塩害、中性化、アルカリ骨材反応、疲労などのコンクリート構造物の種々の劣化損傷が明らかになり、その調査方法、対策方法が研究開発されてきた。土木学会や日本コンクリート工学会、建築学会においては、コンクリート構造物の維持管理を記載したさまざまな規準、指針類が整備されつつある。海外においても、ASTMやRILEM等の関連機関において、維持管理方法、調査方法、およびその対策等に関する基準やRecommendationが整備されている。また、維持管理に必要となる人材を確保するために、日本コンクリート学会が主導するコンクリート主任技師やコンクリート診断士、土木学会が主導する土木技術者等の資格制度、および土木学会継続教育（CPD）制度などが整備されている。

しかし、未だに劣化損傷が顕在化してからの事後保全的な対策が多く、予防保全的な維持管理体制は実現していない。この原因として、将来的なコンクリート構造物の劣化損傷が生じやすい位置の特定やその予測手法が確立されていないことが挙げられる。コンクリート構造物において、現在どのような劣化損傷が生じているかを明らかにするプロセスは整備されつつあるものの、その構造物で将来的に生じる劣化損傷の位置や種類、進捗時期を予測する手法が必要となる。

特に、コンクリート構造物の建設においては、仕様規定型から性能規定型となり、要求される性能を満足すれば、どのような材料、施工方法でも取り入れることが可能となっている。このため、設計段階において性能照査が行われるようになり、建設される構造物が将来的に劣化損傷を受けた場合でも、十分な性能を確保できるよう材料や寸法等を決定することとなっている。この場合、設計通りに構造物が建設されれば問題ないが、実際には施工管理に具体的に記載されていない不具合などにより、当初予定していた構造物の性能が確保されていない場合がある。長大な製品となるコンクリート構造物において、すべての区間で設計通りに製作されることはまれである。このため、初期の状態（特に初期から内部に形成された潜在欠陥）を適切に把握し、外環境を踏まえた上で、鉄筋腐食等性能低下が生じる部位や時期を予測する維持管理システムの確立が必要となる。現状、劣化損傷予測手法に関しては、数値解析的あるいは実験データ、経験則による定

式化により、ある程度信頼性のある予測手法が提案されている。一方で、施工・竣工検査として、建設初期のコンクリート構造物内部の状況を詳細に把握可能な非破壊検査技術が課題の一つとして挙げられる。

- 社会インフラの維持に重要なセンシング技術

社会インフラの維持にはセンシング技術が重要であり、信号解析、状態監視が必要である。ネットワークにつなげて、様々な社会のシステムや産業の構造を変えることが注目されている。IoT (Internet of Things) では、データの解析、データの有効利用、規格化などの問題がある。このためには、良好なセンシング技術が必要であり、精度の良いセンサの作製、効率的なネットワークの配置、継続的なデータ転送など、様々な技術的課題がある。

疲労（損傷記憶）センサとしては、犠牲試験片タイプのセンサが使われる。構造物に張り付けたセンサ自体が劣化することによって、どういう力が何回加わったかなどの疲労の目安になる情報を得るものである。センサの中で亀裂が発生して、それを計測することによって構造物にかかる繰り返しの負荷の条件を見つけようとするものである。

大気腐食モニタリング型 (Atmospheric Corrosion Monitor, ACM) センサは、電流を測ることによって腐食がどれだけあるか環境の効果を見るものである。例えば、湿度や海塩量と電流の関係を求めておけば、後で電流を測るだけで、それがどういう環境にあるかが評価できる。

センシングデータのワイヤレスネットワークによる収集は、米国 DARPA の Smart Dust プロジェクト、総務省のエビキタスネットワークなどで進められている。また、ディープラーニングを含めた機械学習の技術は、これから重要になってくる。

- 社会インフラの劣化と余寿命推定（鉄鋼橋を中心に）

寿命は、物理的寿命、機能的寿命、経済的寿命の3つに分けられる。「物理的寿命」とは、使用開始後の性能低下により使用に耐えられなくなるときの寿命を指す。「機能的寿命」とは、建設・製造後の社会環境の変化によって構造物に要求される機能に変化し、期待される機能を満足できず使用停止となる寿命を指す。「経済的寿命」とは、低下した性能を向上させるために必要な費用と取り替えに必要な費用を勘案し、取り替えを行う方が経済的であると判断されたときの寿命を指す。

以下では、物理寿命のうち、腐食寿命の推定法について概観する。これには、大きく分けて、過去の実績データを解析して帰納的に寿命予測を行う方法、腐食加速試験による方法、数値モデルによる方法の3つがある。

鋼道路橋塗装・防食便覧（日本道路協会 2005年発行）の第III編に掲載された全国41橋の共同暴露試験による日本国内の耐候性鋼の適用範囲によれば、耐候性鋼は0.05mdd (mg/100 cm²/day) 以下の飛来塩分量の地点で無塗装使用ができるとしている。さらに、17年経過後の暴露試験結果を分析して0.05mddにおける経年板厚の予測式を提案している。耐候性鋼のさび安定化指標と構造物への適用性については、土木学会論文集「無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標および耐候性評価方法の提案」等で報告されている。

住宅品質確保促進法（国土交通省 2000年4月施行）では、国の指定を受けた指定住宅性能評価機関が日本住宅性能表示基準に基づいて新築住宅の性能を表示することとしている。住宅の主な性能表示は、構造躯体の耐久性により、等級1（50年未満の耐久性）、

等級2（50年～60年の耐久性をもつ対策）、等級3（75年～90年の耐久性をもつ対策）の3等級となっている。ここで75年以上の住宅構造、材料の「物理的寿命」をどのようにして予測するかが大きな課題である。「鉄骨造建築物の耐久性向上技術」（建設大臣官房技術調査室監修）には、鉄骨造建築物を設計するにあたり建築物の耐用年数を算出する方法を明記している。既存材料については、使用環境、使用部位における腐食を定量的に予測することが可能であるが、過去のデータのない新材料には適用できない。

新材料を適用するときにはしばしば腐食試験法が用いられる。腐食試験は本来使用目的により二つに分類される。一つは品質試験で、短期間に結果を得る必要があるため促進性が重要となるため、塩水噴霧試験が使われる。もう一つは材料の実環境性能評価や腐食機構解明である。品質試験のみに用いられるべき塩水噴霧試験を材料性能評価試験として使うと実環境と異なった材料選定が行われ工業的に混乱が生じる。製品の使用環境に対して腐食評価技術を適正化することは、製品を開発することと同じあるいはそれ以上に重要な位置付けにある。腐食促進試験は、基本的に塩水噴霧（SST）あるいは塩化物付着工程、乾燥（Dry）工程、湿潤（Wet）工程により構成されている。ある一定時間連続で塩水を噴霧し続ける試験法では、腐食の大部分は塩水噴霧工程で進行してしまう。これに対して塩化物の付着工程と、乾燥—湿潤工程で構成されている腐食試験法では、塩化物付着工程で腐食の進行はほとんどなく、その後続く乾燥、湿潤工程において塩化物を含む水膜下での腐食が進行する。「自動車用外観腐食試験法」では、塩水噴霧試験（2時間）後、乾燥（4時間）、湿潤（2時間）を行う。無塗装材については板厚減少および腐食減量により、塗装材については人工傷からの塗膜膨れ幅と剥離幅で耐食性を評価して、実環境再現性を評価している。

2013年にISO規格を取得した大気腐食促進試験法ISO16539-B法は、被試験体の表面に定期的に塩分付着工程と乾湿繰り返し工程とを組み合わせた試験法で、実環境における飛来海塩の影響を考慮して人工海水を用いた塩水散布により塩分付着を行っている。各種めっき鋼板を下地とする電着塗装鋼板の暴露試験との相関性が高い試験法であるとされている。

腐食防食分野において数値シミュレーションによる解析への関心は年々高まっており国内外で適用が拡大している。大気腐食のモデリングについては世界的に着手した段階であり、今後の開発が期待される技術開発である。大気腐食の数値モデルは、金属、金属腐食生成物、膜とのバランスをとるような平衡状態を考える。環境側モデル、腐食生成物・腐食速度モデル、速度論を確立して基礎モデルを構築する。実暴露データという特殊解が基礎モデルの一般解の上に合致するか否かの検証を行い、一般解の改良を行う。この作業を幾つか繰り返して最終的な一般解に持っていく。

大気腐食の数値モデル化は、大気環境の汚染物質の飛来、溶液中のイオン状態（濃厚溶液）、金属／溶液界面の電気化学、腐食生成物の析出平衡・イオン透過性・電子伝導性など広い専門分野にまたがっているので、広範な分野の研究者、専門家が必要である。

(3) 注目動向

コンクリート構造物の劣化損傷評価に、物理探査分野や機械工学分野の技術を応用する事例が増えてきている。例えば、超音波探傷法や弾性波トモグラフィー（アコースティック・エミッションを含む）、電磁波レーダー、放射線透過試験、赤外線サーモグラフィー

などの波動や電磁気探査を応用した内部損傷評価手法である。特に超音波探傷や放射線透過試験は、現在発電設備や化学プラント、航空産業や自動車産業等で標準的に使用されている技術であり、弾性波の利用に関しては低周波を対象にアレイプローブを用いた開口合成や雑音除去技術により、鉄筋や骨材を含むコンクリート内部構造の劣化損傷への適用が大いに期待される。また、高経年化対策としても鉄筋腐食の早期検出と回復や補修技術の開発が望まれる。これらの内部損傷評価技術は、既存コンクリート構造物の現状評価を主眼とした研究開発がなされている。しかし、初期欠陥の検出や施工・竣工検査手法としての開発を促進し、劣化損傷が生じやすい部位の把握および補修施工の有効性の評価を含めた早期対策が、予防保全型維持管理を確立する上で必要不可欠と考えられる。

2012年の「笹子トンネル天井板落下事故」を契機に、コンクリート構造物の点検、調査手法の高度化の必要性が再認識され、これに関連したプロジェクトが政府主導のもと進められている。その中の一つに、内閣府主導の「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」が挙げられる。この中では、(1)点検・診断、(2)劣化機構や補修・補強、(3)情報・通信、(4)ロボット、および(5)アセットマネジメントに対して幅広い技術開発が行われている。また、NEDOでは、「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」が実施されており、既存インフラのモニタリングシステム開発や維持管理ロボット・非破壊検査装置の技術開発が進められている。さらに、JSTが主導する「センター・オブ・イノベーション（COI）、革新材料による次世代インフラシステムの構築」では、将来的なインフラ構造物の劣化を抑制する目的で炭素繊維補強材等の革新材料を用いた次世代構造物の構築に向けた取組みがなされている。一方、米国においては、道路橋に対する各種非破壊検査技術の普及促進を図るため、第二次戦略的ハイウェイ研究プログラムにおいて様々な非破壊検査技術を共通の評価項目で比較検討する試みがなされており、その成果を利用した道路橋床板非破壊検査ロボット“RABIT”が開発されている。こういった、維持管理ロボット開発も重要な課題の一つである。

今後は、建設初期の状態把握から補修の有効性評価、将来の余寿命予測までに対応が可能な維持管理システム構築に向けた取組みがなされることで、予防保全型維持管理手法の構築が可能となる。1つは、大気腐食の数値モデリング開発である。これには、大気腐食の数値モデリングに関する研究が産業技術側から始まった。例えば、JFEスチール（鋼材-A1合金）、新日鉄住金（Znめっき鋼板）、濃厚溶液となる水膜中での Fe^{2+} の空気酸化速度、米国のOLI System Inc.社が開発したCSP（Corrosion Simulation Program）による腐食反応の数値モデルソフト開発が挙げられる。また、中性子利用による塗膜下腐食観察によって、塗膜下における水状態をその場観察することが可能となり、塗装耐食性の腐食機構が定量的に解明するばかりでなく、塗膜下腐食の数値シミュレーションの境界条件を設定するために有益な情報を得ることができるようになってきた。

(4) 科学技術的課題

従来から研究開発されてきた劣化損傷の評価手法は、既存コンクリート構造物で生じる劣化損傷を評価することを主眼として実施されてきた。これらは、コンクリート内外で生じた重大な劣化損傷を非破壊検査手法で検知できるかが重要であり、簡易な手法であっても誤検出や見落としが少ない信頼できる検知手法であれば適用に値するが、劣化損傷が生

じた後に検査を実施し、劣化損傷の有無で対策を講じることは、事後保全型維持管理の高度化に他ならない。低経済成長率・人口減少時代を迎える日本にとっては、早い段階から事後保全型維持管理から脱却し、真の予防保全型の維持管理に移行することがライフサイクルコストの観点からも肝要であり、そのための技術および体制の整備が必要である。

コンクリート構造物で供用中に生じる劣化損傷は、建設当初に生じた潜在欠陥等の材料と構造の不均質性に依存した初期欠陥であることが多く、建設直後の不均質性を評価可能な施工・竣工管理技術としての非破壊検査方法の開発と標準化が望まれる。このような建設初期の不均質性を非破壊検査手法で評価する場合、既存コンクリート構造物で生じるコンクリート表面のひび割れやこれらのひび割れを含む鉄筋腐食による劣化損傷の検知信号と比較して信号強度ははるかに小さい。そのため、材料の不均一性や鉄筋腐食発生の有無を、敏感にかつコンクリート構造物全体にわたって評価可能な技術が必要となる。さらに、補修後の施工検査技術も長期にわたり信頼性を保証するためには必要不可欠となる。このためには、土木・建築分野の既存技術を総合的に整理しつつ、物理探査、材料工学、機械工学分野との融合が必要不可欠であり、計測技術から計算科学の分野を横断し融合を目指す専門家内での議論および実用化に向けた更なる取組みが必要となる。

劣化による余寿命推定における技術的なボトルネックとしては、金属表面に形成される水膜の熱力学、金属表面に形成される水膜組成をその場モニタリング技術（非接触センシング技術開発（光利用）、ex 中性子利用：水の検出）の未確立および、腐食試験法の目的の理解欠如（品質試験&材料評価試験）、金属/腐食生成物/水溶液の電子論的電気化学の理解不足が挙げられる。従って、重要な研究開発課題としては、濃厚溶液の溶液化学と金属界面の電気化学、金属腐食の数値シミュレーションの確立、大気中汚染物質の飛来量とインフラ構造物への付着過程の解明（D I A Sとの連携）、乾湿繰り返し環境における腐食生成物の変化とその機能（腐食機構）の解明、データベースの再構築などが挙げられる。

(5) 政策的課題

これまで述べてきたような次世代に向けた予防保全型の維持管理を実現するためには、土木・建築分野のみならず、物理探査、材料工学や機械工学など先進的に非破壊検査が実施されてきた分野の計測技術から情報工学の進歩による計算科学を横断し、測定結果から現象を定量的に同定する逆問題解析として融合することが必要不可欠である。近年、このような取組みがマテリアルズインフォマティクス、マテリアルズインテグレーション等として進みつつあり、融合分野を開拓する動きが大学・研究機関で進められている。これらの融合分野開拓組織ではそれぞれの専門家が集結してある一定の成果が認められつつある。この状況を社会インフラ分野で加速するためには、省庁連携や民間企業等がファンドを設け、大学・研究機関に社会インフラ分野をターゲットとした融合分野の拠点組織を創設し、多分野にわたる専門知識を融合して新学問分野創設を見据えた強いリーダーシップのもとで、将来の維持管理システム構築に向けた取組を促進する必要がある。

余寿命推定についての研究開発を推進する上で、データベースグループの編成、暴露ビッグデータの活用、腐食促進試験法の適正化、数値解析方法の構築についての政策が必要である。

我が国には高度成長期に企業が実施した膨大な暴露データ保有されている。企業にとっ

て開発研究が終了するとデータベースの継続的調査が困難になり、さらにデータそのものが消失してしまうことが多い。国が中心となって、企業が取得してきた暴露データベースを集約し、それをビッグデータとして活用して、既存の構造物、材料の帰納的寿命予測に役立てる方策が求められる。暴露データについては、ISOTC156に標準金属の腐食速度予測式が構築されているが、海塩粒子による腐食が厳しい日本や降雨による腐食が主な東南アジアでは予測式が合わない。今後、アジア地域と共同で新たな予測式を確立して、アジア地域に適した予測式としてISO化する活動が求められる。各種腐食促進試験法がJIS、ISO化されているが、これらの多くは実環境の耐食性能を再現していない。このまま放置すると、実環境において信頼性が不明なまま材料が使われて、将来的の負の遺産を産むリスクがある。リスクを回避するために、腐食促進試験法の用途別適合性を評価するとともに、ISO16539のような実環境再現性の高い試験法を広く広めるべきであろう。社会インフラの寿命予測の最終目標は数値解析によるモデル化である。数値解析のモデル化には二通りのアプローチがある。一つは上記の既存材料の暴露データ（ビッグデータ）の帰納的・統計的解析アプローチ。もう一つは複雑系の化学反応（電気化学も含む）の数値モデル化による演繹的方法である。前者は投資をすれば容易に達成できる課題であるが、後者は産学の基礎学問の進化を必要とする。

(6) キーワード

社会インフラ構造物、コンクリート、非破壊検査、初期欠陥、予防保全、維持管理システム、融合分野、腐食、防食、寿命、橋、道路、鉄道、施設、寿命予測、腐食試験法、乾湿繰り返し、界面、大気、数値解析、シミュレーション

(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"> 物理探査や機械工学で利用されている技術を応用した新しい非破壊検査手法に対する基礎研究が進められている。 耐候性鋼の安定化に関する錆組成および錆機能に関して世界を牽引する基礎研究が行われている。錆の安定化に関する基礎概念を鉄鋼各社で構築した。 大気腐食の水膜組成、水膜厚さの理論的解明研究を世界に先駆けて行っている。 大気腐食の数値モデル研究が日本鉄鋼協会フォーラムで推進されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 実際の構造物の劣化損傷を評価する検査、調査、モニタリング手法の開発が進められている。ただし、劣化損傷を検知することに主眼が置かれている。 耐候性鋼の鋼橋への適用に際して塩化物飛来の多い環境に安定化するNi添加型耐候性鋼を開発し実用化している。 大気腐食を適切に再現する絶対湿度一定で塩化物を付着する工程と乾湿繰り返し工程からなる腐食試験法がISO16539(2013年)取得した。 米国が先行しているライフサイクルコストやリスクベースマネージメントは検討を開始した。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究レベルでは日本と同様先端非破壊検査装置開発では先行 リスクマネージメントに関する統計基礎研究が実施されている。しかし、基礎研究はあまり実施されていない。
米国	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 構造物の点検、調査のロボット化が進められており、例えば高速道路構造物を対象とした「RabitTM」が開発され、効率的な点検が可能なロボットの開発等を進めている。また、2012年7月に成立した「陸上交通法MAP-21」において、橋梁点検についてはより詳細な部材レベルの点検データを報告する義務が規定され、点検を効率化するための非破壊検査技術に対する道路管理者の関心が高まっている。ただし、劣化損傷を検知することに主眼が置かれている。 コンクリート橋梁：Guide to Corrosion Management of reinforced concrete structure を出版。橋梁耐久性マネージメントのガイドラインを構築。

欧州	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎研究レベルでは日本と同様 ・大気腐食の数値モデル化を開始した。 ・ISOTC156(金属および合金の腐食)社会インフラの腐食研究食)の大気腐食のデータベースを保有している。 ・自動車分野で大気腐食の基礎研究が進んでいる
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・耐久性にかかわる指標(DIs)を構築し、竣工段階からコンクリート構造物の劣化に対する抵抗性を定量化しようという試みがなされている。また、予防保全型維持管理の一環として対策効果の評価として、RILEMで新たな研究委員会(IAM)が設置されている。 ・ISOTC156(金属および合金の腐食)において社会インフラ関係の規格化を推進して、欧州規格を世界規格にしつつある。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート構造物の非破壊検査手法の研究開発が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・現状、構造物の建設に目が向けられた検討が多く、事後保全型の維持管理を主体として進められている。 ・橋梁の腐食のライフサイクルに関する規格化を推進しようとしている。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート構造物の非破壊検査手法の研究開発が進められている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・現状、構造物の建設に目が向けられた検討が多く、事後保全型の維持管理を主体として進められている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

・非破壊検査

- 1) 2013年制定土木学会コンクリート標準示方書【設計編】
- 2) 2013年制定土木学会コンクリート標準示方書【施工編】
- 3) 2013年制定土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】
- 4) コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2013
- 5) 既存コンクリート構造物の性能評価指針 2014
- 6) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5
- 7) 松井保：地盤の可視化技術と評価法，鹿島出版，2009.12
- 8) 日本コンクリート学会コンクリート構造物の最先端診断技術に関するシンポジウム論文集・委員会報告書
- 9) S. ウォルター著，社会資本研究会翻訳：荒廃するアメリカ（1982），開発問題研究所，1982/9
- 10) 戦略的イノベーション創造プログラム：<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>
- 11) インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト：
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100081.html
- 12) センター・オブ・イノベーション(COI)，革新材料による次世代インフラシステムの構築：<http://www.icc-kit.jp/coi/>
- 13) 米国第二次戦略的ハイウェイ研究プログラム：
<http://www.trb.org/StrategicHighwayResearchProgram2SHRP2/Blank2.aspx>
RILEM 委員会 (Technical Committee IAM : Damage assessment in Consideration

of Repair/ Retrofit-Recovery in Concrete and Masonry Structures by Means of Innovative NDT) http://www.rilem.org/gene/main.php?base=8750&gp_id=347

・余寿命推定

- 1) 藤田栄, 「亜鉛系表面処理鋼板の評価方法・寿命予測技術」, (社) 日本鉄鋼協会, 西山記念講座 (第 178 回, 第 179 回) (2005)。
- 2) 鋼構造物の寿命に関する調査, 鋼構造物の寿命検討委員会, (社) 日本鋼構造協会編, 東京, (平成 3 年 8 月), 30.
- 3) (一社) 日本鉄鋼協会編, “鋼・コンクリート構造物の腐食・防食, 劣化とセンシング技術の課題と展望”, 第 64 回白井記念講座, 平成 24 年 12 月 13 日, 東京 (2012)。
- 4) (一社) 日本鉄鋼協会編, “社会インフラ鋼構造物の鉄鋼材料の歴史, 現状, 将来展望”, 第 225 回西山記念講座, 平成 28 年 6 月 10 日, 東京 (2016)。
- 5) (社) 日本道路協会編, 「鋼道路端塗装・防食便覧」, 丸善株式会社出版, 平成 18 年 (2006)。
- 6) 腐食防食協会編, 第 132 回腐食防食シンポジウム (2001)。
- 7) 腐食防食協会編, 第 145 回腐食防食シンポジウム (2004)。
- 8) 三木千壽, 市川篤志司, 鵜飼真, 竹村誠洋, 中山武典, 紀平寛: 土木学会論文集, No738/I-64,27 (2003)。
- 9) 建設大臣官房技術調査室監修: (財) 国土開発技術研究センター・建築物耐久性向上技術普及委員会編: “建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編 II 「鉄骨造建築物の耐久性向上技術」”, 技報堂出版株式会社, (1986 年 6 月 20 日 1 版 1 刷発行)。
- 10) LEE Seung - Kyoung (Rutgers Univ., New Jersey), “Current State of Bridge Deterioration in the U.S.—Part 1”, Mater Performance, 51, No.1, 62-67(2012)。
- 11) LEE Seung - Kyoung (Rutgers Univ., New Jersey), “Current State of Bridge Deterioration in the U.S.—Part 2”, Mater Performance, 51, No.2, 40-45(2012)。
- 12) Guide to Corrosion Management of Reinforced Concrete Structures, NACE International, The Corrosion Society, Corrosion Management Series, 1440 South Creek Drive, Houston, Texas 77084
- 13) ISO 9223-2012: Corrosion of metals and alloys -Corrosivity of atmospheres- Classification, determination and estimation.
- 14) ISO 9225-2012: Corrosion of metals and alloys -Corrosivity of atmospheres- Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres.
- 15) ISO 9226-2012: Corrosion of metals and alloys -Corrosivity of atmospheres- Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.
- 16) ISO 9224-2012: Corrosion of metals and alloys -Corrosivity of atmospheres- Guiding values for the corrosivity categories.
- 17) 日本ウェザリングテストセンター, 平成 9 年度成果報告書「経済産業省工業技術院委託「新発電システムの標準化に関する調査研究 (新発電関連要素機器の長期田一級性及び寿命予測の標準化)」, 平成 10 年 3 月 (1998)。
- 18) 日本ウェザリングテストセンター, 平成 17 年度成果報告書「開発成果標準化フォローアップ等標準化調査研究事業 (新発電関連要素機器の長期耐久性及び寿命予測の標準化に関する調査研究)」平成 18 年 3 月 (2006)。

- 19) 藤田栄, 「鉄鋼材料の大気腐食と促進試験法の現状と課題」, (公社) 腐食防食学会中国・四国支部「材料と環境研究発表会」, 平成 27 年 3 月 4 日, 広島 (2015).
- 20) JIS-H8502-1999 「めっきの耐食性試験方法の中性塩水噴霧サイクル試験」
- 21) JASO609-1991 「自動車用外観腐食試験法」
- 22) ISO 14993-2001 “Corrosion of metals and alloys - Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, “dry” and “wet” conditions.(ISO 14993: 2001(E))”
- 23) H.E.Townsend, D.D.Davidson, M.R.Ostermiller: Galvatech98, (1998) 659.
- 24) ISO 16539-2013: Corrosion of metals and alloys - accelerated cyclic corrosion tests with exposure to synthetic ocean water salt deposition process - “Dry” and “wet” conditions at constant absolute humidity
- 25) 梶山浩志, 藤田栄, 藤井和美, 高橋克仁: 材料と環境 2005 講演集 ,(2005), 153.
- 26) 藤井和美, 大橋健也, 梶山浩志, 藤田栄, 材料と環境, 55, No.8, p.349 (2006) .
- 27) 梶山浩志, 藤田栄, 藤井和美, 酒井政則, 材料と環境, 55, No.8, p.356 (2006) .
- 28) ステンレス協会 ISO/TC156 国内対策委員会 ; 平成 22 年度社会環境整備・産業競争力強化型規格開発事業 (個別産業技術分野に関する標準化) 「テーマ名: 大気腐食 (塩化物環境) 促進試験方法に関する国際標準開発」成果報告書, 平成 23 年 2 月
- 29) ステンレス協会 ISO/TC156/大気腐食関連テクニカル報告書作成 WG: 平成 25 年度社会環境整備・産業競争力強化型規格開発事業 (個別産業技術分野に関する標準化) 「大気腐食 (塩化物環境) 促進試験方法に関する国際標準開発」 「ISO16539 の大気腐食関連性テクニカル報告書」, 平成 26 年 2 月.
- 30) Izumi Muto, Sakae Fujita, Hiroshi Kajiyama, Kazumi Fujii, Shigeo Suga, 材料と環境 2009,A307(2009).
- 31) 岡田信宏, 竹林美樹, 松本雅光, 木本雅也, 工藤組夫, : 鉄と鋼, 2[11], 667-665(2006).
- 32) 岡田信宏, 竹林美樹, 松本雅光, 木本雅也, 工藤魁夫, 鉄と鋼, 95[2], 144-153 (2009).
- 33) D.Mizuno, R.G.Kelly: Corrosion, 69[7], 681-692 (2013).
- 34) 出路丈時, 上村隆之, 菅江清信, 幸英明, 第 63 回材料と環境討論会, A304, 75 (2016) .
- 35) 田中耕太郎: 材料と環境, 62, 310-316(2013).
- 36) 山田雅子, 大竹淑恵, 竹谷篤, 須長秀行, 山形豊, 若林琢巳, 河野研二, 中山武典, “小型中性子源 RANS を使った塗膜下腐食鋼材の非破壊イメージング観察”, 鉄と鋼, vol.100, No.3(2014).

3.4.3 接合・接着・コーティング

建造物や輸送機器などの社会インフラの構造材料は、機械的強度と同時に高い信頼性を要求される。接合・接着技術は基盤となる重要な技術であり、マルチマテリアル化の進展に伴い、新たな材料を含めて技術開発は継続的に必要である。また、大型建造物に対して耐久性を高めるためのコーティングを可能とする低コスト処理技術が開発され注目されている。構造材料の性能を担保するために重要な接合・接着・コーティングであるが、歴史があり拠点整備がなされてきた溶接・接合技術に対して、接着・コーティング技術の拠点化は遅れており、またコーティング技術の機能は接合ではなく防食である等、各技術の課題は大きく異なるため、以下項目別に述べる。

3.4.3.1 溶接・接合

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

溶接・接合技術は、あらゆる産業分野における組立・製造工程の基盤であり、製品や構造物の高性能化、高機能化に対応して、より高性能な溶接・接合部の形成、より高能率の溶接・接合プロセスを目指した研究開発を継続的に行う必要がある。また、溶接・接合技術を特殊工程から脱却させ、プロセス制御によって溶接・接合部の性能が保証できる性能保証型技術へ進化させるための研究開発が喫緊の課題となっている。さらに将来の課題として、溶接・接合部にダメージの生じない新しいメカニズムによる溶接・接合技術の開発も要望される。溶接・接合技術の進化は、我が国のものづくりにおける国際競争力の大きな強化と安全、安心で持続可能な社会の実現に繋がるものである。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向：

背景・意義：溶接・接合技術は、自動車・車両・航空機などの輸送機器をはじめ、発電・石油・天然ガスなどのエネルギー分野、建築・橋梁などインフラ分野などの基幹産業における組立て・製造工程の基盤技術として広く利用されている。溶接・接合プロセスは材料局部に熱を集中し、熔融あるいは融点近くに加熱して接合する技術であり、溶接・接合部は製品や構造物の一部となる。しかし、急速な加熱・冷却は溶接部の組織を大きく変化させ、欠陥の生成や強度、延性、じん性などの力学的特性の劣化をもたらす可能性がある。従って、製品や構造物の性能を担保するためには、溶接・接合部の性能確保が不可欠である。そのためには、プロセス制御によって溶接・接合部の性能が保証できる性能保証型溶接・接合技術の開発と溶接・接合部における欠陥や材質劣化を生じないあるいは最小限とする溶接・接合技術（ダメージレス溶接・接合技術）の開発が必要である。また、我が国ではノウハウを蓄積してきた熟練の溶接エキスパートが急減しており、自動化やIoT化による生産性の向上が緊急の課題となっている。

国内外研究開発動向：我が国の関連学・協会としては、(一社)溶接学会、(一社)日本溶接協会、(一社)軽金属溶接協会が挙げられる。溶接学会は溶接・接合の学術研究を担っており、主要8分野（溶接法、溶接冶金、溶接構造、溶接疲労強度、高エネルギービーム加工、軽構造接合加工、マイクロ接合、界面接合）の常設研究委員会、および3Dプリンターなどの時限的な特別研究会が設置されている。日本溶接協会は、主として鉄鋼材料を対象に、我が国ならびにアジア諸国での溶接技術者の資格認証・認定制度の開発・運用、溶接・接合技術の規格化、標準化、当該技術の産業界や社会への普及、広報などの活

動を担う。軽金属溶接協会は、軽金属を対象に溶接・接合技術の向上・普及、資格の検定・認定、規格化、標準化を担う。世界的な統一組織である IIW（International Institute of Welding）には世界 59 カ国が加盟し、研究・開発、産業応用、教育、資格認証、規格化・標準化などのプラットフォームとなっている。溶接・接合工学は複数の学術領域が関与する学際的な工学分野であるが、同時に高い専門性も必要であるため、各国では専門の研究所や拠点を設置していることが多い（(7) 国際比較）。我が国では 1944 年に大阪帝国大学に溶接工学科が、さらに 1972 年に大阪大学に全国共同利用施設である溶接工学研究所が設置され、それぞれ大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻生産科学コースおよび大阪大学接合科学研究所として引き継がれ、世界的に高いレベルで溶接・接合分野の教育と研究を担っている。

溶接・接合分野の研究の基幹は、①アーク溶接、レーザー溶接、抵抗溶接、摩擦攪拌接合などの溶接・接合法の開発と溶接・接合プロセスの制御に関する研究開発、②溶接冶金を含む溶接部の材料科学的現象の解明、溶接・接合部の欠陥生成とその抑制、溶接・接合材料の開発などに関する研究、③溶接構造設計、溶接・接合部の力学的特性評価、信頼性評価に関する研究 の 3 分野である。これらを統合化して、コスト、生産効率も考慮した上で最終的な性能を保証する総合的な研究開発が必要とされる。構造物や製品の高性能化、高機能化に従って、溶接・接合部への要求性能も高くなっている。近年の主な研究開発動向は次のように俯瞰できる。

(i) マルチマテリアル化を実現する溶接・接合技術の開発

自動車や輸送機器を中心にマルチマテリアル構造が要望されており、鉄鋼、アルミニウム合金、マグネシウム合金、CFRPなどを車体構造に用いる「革新的新構造材料等研究開発」（2014年～2024年）プロジェクトにおいては、異種材料の接合技術として、抵抗スポット溶接、レーザー溶接、摩擦攪拌溶接、接着などの開発と共に、接合現象の解明、接合部の機械的特性、信頼性の評価手法の確立を目指している。同課題について、欧州は機械的締結や接着接合を指向しており、冶金的接合を重視する我が国とは方向性が異なる。

(ii) 性能保証型溶接技術の開発

溶接・接合技術は、施工後の検査だけでは性能を保証できない特殊工程であり、大型溶接構造物の製造には、熟練した溶接技能者と溶接管理技術者が必要である。我が国では、熟練の溶接エキスパートの急減により、形式知による溶接部の性能確保とともに生産性の向上が緊急の課題であり、シミュレーションをベースとする性能保証型技術開発への要望が強く、プロセスシミュレーション、材料挙動シミュレーション、性能評価シミュレーション、およびこれらを統合した溶接・接合部性能評価・予測シミュレーション技術の開発が要望されている。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年～2018年）の拠点型課題である「溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発」において、材料とプロセス条件を設定するだけで、最終の溶接・接合継手の性能が保証できるシミュレーション技術の開発を目指している。溶接・接合のシミュレーションは海外の研究拠点や企業でも行われるが（(7) 国際比較）、SIPが目指す非定常・非平衡の溶接現象やプロセスから継手性能予測までの統合シミュレーションは、未だ確立されていない。

(iii) 大型溶接構造物の寿命予測、長寿命化技術の開発

橋梁や大型構造物では、的確な溶接部の寿命予測や補修・保全技術が必要である。溶接部における疲労破壊を防止するために、ビード止端部形状の適正化やピーニング処理による

圧縮応力導入などの研究開発、疲労き裂発生進展や腐食進行のフィールドでのモニタリング技術とともに、計算科学、シミュレーションによる寿命予測法の研究開発が行われているが、未だ十分ではない。

(iv) 3次元積層造形技術

溶接・接合分野では従来から電子ビームやレーザーによる積層・改質プロセスが行われており、近年注目される金属系の3次元積層造形は、その延長上にある。3次元形状の精密な造形が求められるため、より高度な制御が必要となるが、造形物の金属組織制御や欠陥制御、特性に及ぼす影響の評価に関しては、従来から蓄積されてきた知見やアプローチが有効である。

(v) 先進摩擦接合技術

摩擦熱により材料を接合する摩擦接合法は、熔融溶接の適用に課題のある材料の接合に有効で、特に、材料を攪拌して接合する摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding: FSW）は、我が国では、鉄道車両を中心とする輸送機器で実用化が大きく進展した。近年では米国を中心として鉄鋼材料や高強度鋼への適用、我が国の接合科学研究所での高融点金属への適用研究も進められ、難接合材料の接合法としての有効性も認識されている。また、軽合金と鉄鋼材料、樹脂やCFRPと金属材料との異種材料接合への適用も進められている。回転運動ではなく、往復方向の運動によって摩擦熱を発生させる線形摩擦接合法（Linear Friction Welding: LFW）が開発され、接合材の形状自由度が大幅に高まり、ジェットエンジンのチタン合金ファンや圧縮機のロータの接合に適用されている。

(vi) 超巨大鋼構造物の溶接技術

大型の海洋構造物や大型船など巨大鋼構造物の信頼性確保に不可欠な極厚板の高エネルギー、高信頼性溶接技術の開発が必要とされている。巨大海洋構造物は海外（中国、韓国、ASEAN）で、巨大鋼構造船は日本での建造が多い。これらに適用される極厚板の高エネルギー、高信頼性溶接技術の基礎研究、応用研究、実用化が必要とされており、大入熱・高靱性溶接、狭開先溶接、100kW 超高出力レーザー溶接、レーザー・アークハイブリッド溶接、電子ビーム溶接などの適用が検討されている。

(3) 注目動向

- マルチマテリアル化を実現する溶接・接合技術の開発 ((2) (i). 関連)

「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトでは、我が国を代表する企業や大学が多数参画し、新構造材料技術研究組合（Innovative Structural Materials Association: ISMA）を構成しており、産業応用および学術の両面で成果が期待される。欧州では、メルセデスベンツ、VW アウディ、BMW 等がマルチマテリアル構造の市販車を市場に投入し、実走での耐久性、剛性、耐食性、衝突安全性等のデータ収集を始めており、実用化の面ではやや欧州の後塵を拝している。

- 性能保証型溶接技術の開発 ((2) (ii) 関連)

SIP「革新的構造材料」のマテリアルインテグレーション領域の拠点型課題「溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発」では、計算科学と先端計測手法を用いて、①溶接熱源のモデル化とそれによる熔融池形成予測技術の開発、②凝固・組織変化を伴う溶接部の特性予測技術の開発、③溶接継手の性能予測技術の開発までを行う統一的な溶接部特性・継手性能の予測・シミュレーション技術の確立を目的としている。こ

のようなシミュレーションベース溶接技術は、溶接部の品質確保と生産性向上を実現する検査フリー・性能保証型の新しい生産方式の基盤となるものであり、国際的な競合テーマでもあり、製造業のAI化、IoT化がグローバルに進展する中で、産官学が協調して研究開発、実用化を進めることが必要である。

- 3次元積層造形技術（(2)(iv) 関連）

技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（Technology Research Association for Future Additive Manufacturing: TRAFAM）がある。ここでは、少量多品種での高付加価値の製品・部品の製造に適した世界最高水準の次世代型産業用3Dプリンタおよび超精密3次元造形システムの構築を目指している。また、SIP「革新的設計生産技術」の「三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証」拠点においては、3次元造形装置を組み込んだソフト・ハード一体化システムを構築して、高機能性能を発揮する「異方性」をカスタマイズすることで、多種多様なニーズに応えるものづくりの研究開発を行っている。（一社）溶接学会の3Dプリンター特別研究会が検討を行っている。国際的には、IIW、TWI、EWIおよび米国 The University of Tennessee と Oak Ridge National Laboratory で研究が行われている。

- マイクロ接合、ナノ接合への展開

近年急速に需要が増している高密度のエレクトロニクスデバイス、マイクロマシン、MEMS、医療用デバイスなどの微小な製品では、マイクロメートルあるいはナノメートルサイズの接合部への微細接合研究への要望が強くなっている。（一社）溶接学会のマイクロ接合研究委員会が微細接合の学術的基盤を構築する研究活動を行っている。国際的にはIIWに研究委員会（Select Committee on Research Developments and Applications in Micro- and Nano-Joining Technologies: SC-MICRO）が活動を行っている。両委員会のメンバーが中心となってマイクロ接合、ナノ接合関連の国際会議 International Conference on Nano-Joining and Micro-Joining: NMJ を2年に一度開催している。

(4) 科学技術的課題

- マルチマテリアル化を実現する溶接・接合技術の開発（(2)(i) 関連）における課題

異種材料接合手法として、熔融接合法、FSW、摩擦接合法、ろう付け、接着、機械的締結等が適用されるが、各手法の車体構造における利害得失の明確化による信頼性の確立が必要である。その基盤となるのが、異種材料接合機構、強度発現機構の解明であり、接合界面の微視的構造と局所的接合強度を厳密に対応づける手法の確立、また異種材料接合部の強度、破壊挙動の解明とそれに基づくマルチスケールでのシミュレーション手法の確立も必要である。さらに、車体構造設計に適用できる合理的な異種材料接合部の強度評価手法の標準化も必要である。自動車車体のマルチマテリアル化では、1.5G～2GPaクラスの超高張力鋼の使用が想定されるが、これらの溶接・接合技術や継手性能評価技術は未開拓であり、今後の研究開発が必要である。

- 性能保証型溶接技術の開発（(2)(ii) 関連）における課題

溶接・接合技術を特殊工程から脱却させ、性能を予測、保証できる技術とするためには、非定常、非平衡である複雑な溶接・接合現象の物理現象としての把握、理解が必要である。マイクロ秒、ナノオーダーでの時間・空間分解能を有する高精度な計測、解析技術

により溶接・接合現象を把握、理解すると共に、その知見に基づいて物理モデルを構築して、溶接・接合現象を再現、予測するためのシミュレーションや解析手法を確立する必要がある。また、溶接・接合部のマクロ的な継手特性は、ナノオーダーの組織や特性分布の結果であり、ナノ⇔メゾ⇔マイクロのマルチスケールの評価、予測手法の確立が必要である。その場計測、センシング技術と高精度の性能予測技術を組み合わせ、溶接技術のAI化、IoT化を進めることがものづくり分野の競争力向上のために必須である。

- 大型溶接構造物の寿命予測、長寿命化技術の開発（(2) (iii) 関連）における課題

大型構造物の時間依存型の損傷や破壊は、疲労、クリープ、腐食が重畳して生じる。そのため、寿命予測において、これらの時間依存型損傷のメカニズム解明とその数理モデルの構築が必要である。

- 3次元積層造形技術（(2) (iv) 関連）における課題

3次元積層造形技術を幅広い産業分野に適用するためには、低コスト・高汎用性と共に、3次元積層部の性能評価、性能保証手法の確立が必要であり、後者のために性能保証型溶接・接合技術で構築された計測、シミュレーション手法を3次元積層造形に拡張適用する観点が必要である。また、複雑な構造物に3次元積層造形技術を適用する場合は、一体構造とするよりも、3次元積層造形物同士の溶接・接合、3次元積層造形物と基材との溶接・接合を適用する方が有利な場合も多いと考えられ、その技術開発も必要である。

- 超巨大鋼構造物の溶接技術（(2) (vi) 関連）における課題

超巨大鋼構造物では極厚板の溶接において、高能率、高信頼性の溶接技術の確立が必要である。また、極厚板溶接部では、溶接残留応力が継手特性に影響するため、残留応力の高精度計測技術、予測技術と共にその制御技術の開発も必要である。

- 溶接・接合技術の将来に関する課題

現状の溶接・接合プロセスでは、接合部に過剰な熱や歪み加わるが、理想的には、溶接・接合部の特性が母材と同等かそれ以上となる新規の溶接・接合プロセスを実現するための研究が必要である。

(5) 政策的課題

溶接・接合分野は、構造設計、プロセス、材料、力学評価、計測、検査など幅広い分野が関与する学際工学領域であるとともに、高い専門性も必要であり、研究開発を高いレベルで継続的に維持、発展させるためには、欧米各国のように、関連分野の研究者が一堂に会し連携する拠点型の研究機関を設置し、企業との連携や専門技術者、研究者を産業や学術に供給する機能も担うことが望ましい。我が国のものづくりの国際競争力を維持し高めるためには、基盤技術である溶接・接合技術の研究拠点を重点化するとともに、研究拠点をプラットフォームとして各企業の溶接・接合分野の研究開発部門、溶接・接合研究を行っている全国の大学や中立研究機関、および地域の研究支援を行っている工業技術センターとの有機的な連携体制を構築することが重要である。

我が国では多くの材料開発の国家プロジェクトが実施されてきているが、開発された材料の実用化には、その溶接・接合技術の確立が不可欠である。今後の材料開発プロジェクトにはISMAやSIPのように、その産業応用を担う溶接・接合技術開発の要素を加えるべきであり、溶接・接合拠点がその受け皿として利用できると思われる。また、溶接・

接合関連技術の国際標準化、規格化においては、我が国の主張を積極的に盛り込む施策が必要であり、産官学が協調して IIW、ISO に提案することが望ましい。

(6) キーワード

アーク溶接、レーザー溶接、摩擦攪拌接合、抵抗スポット溶接、溶接材料、溶接機、溶接欠陥、3次元造形、異種材料接合、溶接金属、溶接熱影響部、延性破壊、疲労破壊、脆性破壊、耐食性、経年劣化、補修、余寿命評価、シミュレーション、溶接ロボット、AI、IoT

(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"> アーク溶接研究では IIW 研究委員会で委員長を務めるなどポテンシャルは高い。 溶接冶金、欠陥制御の研究では溶接学会を中心にポテンシャルは高い。 レーザー基礎現象研究では先行するがレーザー高出力化研究でアドバンテージは少ない。 溶接継手の力学評価（脆性破壊、疲労破壊）は IIW 研究委員会で委員長を務めるなど国際的な評価を得ている。 溶接現象～継手性能評価の統合シミュレーションで先行（SIP 革新的構造材料 PJ）。 異種材料接合研究のレベルは高く、ISMA で進展している。 3次元造形は TRFAM で進展しているが、国際的な研究競争は厳しい。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> アーク溶接機器（ダイヘン、バナソニック）の産業応用では国際的に高いレベル。 レーザー溶接の産業応用では、コスト面に課題があり欧米にやや遅れる。 厚鋼板の高効率溶接および溶材開発は、先行している。 異種材料接合の産業応用は自動車を中心に欧州に比べるとその進展は十分でないが、今後 ISMA の成果が展開されると加速が期待される。 3次元造形の産業応用は現状十分ではないが今後 TRFAM 成果の展開が期待される。 FSW の鉄道車両への応用は大きく先行している（日立製作所、川崎重工）。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 会員制の独立組織である Edison Welding Institute (EWI) が溶接・接合研究の中心となっており、オハイオ州立大学とも連携した活動を行っている。 アーク溶接、溶接冶金研究、溶接力学研究への注目度は高くない。 軍事応用を中心にレーザー関連の研究は進展しているが、情報開示は十分でない。 溶接シミュレーションは EWI が WeldPredictor を開発している。 石油・ガス関連のパイプの円周溶接は FSW を中心に高いレベルにある。 宇宙機器関連の溶接研究は高いレベルである。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 高出力レーザー溶接機は高い競争力がある（IPG）。 3次元造形の産業応用は急速に進展している。 航空宇宙機器の溶接技術は高いレベルである。 溶接技術の国際規格化は戦略的に進めている。
欧州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 英国では独立系組織として、主に会員企業の会費で運営されている The Welding Institute (TWI) が溶接・接合研究の拠点として世界展開している。 フランスでは企業会員会費で運営されている IS (Institute de Soudure) 溶接研究所で溶接・接合に関する総合的な研究開発とコンサルティングを行っている。 ドイツでは Aachen University に ISF-Welding and Joining Institute が設置されており溶接・接合に関する総合的な研究開発が行われている。また、Fraunhofer 研究機構の Production Technologies 研究領域の中に溶接技術部門を設けて溶接・接合の研究開発、産業応用を中心となって行っている。 アーク溶接のシミュレーション研究は高いレベル（アーヘン工科大、TWI、ESI 社等） 溶接冶金、欠陥制御研究は注目度がそれ程高くない。 レーザー溶接研究ではドイツが先行している（Fraunhofer 研究機構）。 安全衛生、環境問題対策、継手健全性の規格は進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> アーク溶接機開発はメーカーが競争して活発である。 レーザー溶接の産業応用は世界トップクラスである（Trump など）。 接着、機械的締結によるマルチマテリアル化による車体軽量化はメルセデスベンツ、VW アウディ、BMW など各社で実用化されている。 ESI 社（フランス）が溶接シミュレーションソフト SYSWELD を販売している。

中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ハルビン工業大学に Department of Welding Science and Engineering と National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology が設置されており、溶接・接合の教育・研究面で中国の中では最もアクティブに活動している。 ・アーク溶接、溶接冶金、欠陥制御、溶接力学関連の現状の研究レベルは高くない。 ・レーザー溶接に関して発信器開発は意欲的だが、溶接の基礎研究レベルは十分でない。 ・航空宇宙関連の接合技術に関する研究（ろう付け、拡散接合など）の研究意欲は高い。 ・異種材料接合の基礎研究は今後の発展が予想される。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・高出力レーザーの海外からの導入は意欲的。応用、実用化は今後進展する可能性がある。 ・異種材料接合の実用化はあまり進展していない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・KITEC の Research Institute of Advanced Manufacturing Technology に Advanced Welding & Joining R&BD Group が設置されている。KAIST の Department of Mechanical Engineering でも溶接プロセス関連の研究が活発だが、日本や欧米に比べると広い範囲をカバーする溶接・接合研究の拠点は形成されていない。 ・アーク溶接関連研究は KAIST では高いレベルの研究が行われている。 ・溶接冶金、欠陥制御、溶接力学に関する研究のレベルは高くない。 ・レーザー溶接、異種材料接合の研究に関しては、今後の進展が待たれる状況である。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・造船分野を中心にアーク溶接技術のレベルは標準以上であるが、高強度鋼板、難溶接材料の溶接の応用研究はこれからである。 ・レーザー溶接、異種材料接合の応用研究開発に関しては今後の進展が待たれる状況である。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) (一社) 溶接学会： <http://www.jweld.jp/>
- 2) (一社) 日本溶接協会： <http://www.jwes.or.jp/>
- 3) (一社) 軽金属溶接協会： <http://www.jlwa.or.jp/>
- 4) International Institute of Welding (IIW)： <http://www.iiwelding.org/Pages/Default.aspx>
- 5) 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻生産科学コース：
<http://www.mapse.eng.osaka-u.ac.jp/>
- 6) 大阪大学接合科学研究所： <http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/index.jsp>
- 7) The Welding Institute (TWI)： <http://www.theweldinginstitute.com/>
- 8) ISF-Welding and Joining Institute, Aachen University： <https://www.isf.rwth-aachen.de/cms/jbxx/isf/lidx/1/>
- 9) Production Technologies AGP, Fraunhofer： http://www.hro.ipa.fraunhofer.de/en/research_areas/production_technology/Welding/Projects.html
- 10) Institute de Soudure (IS)： <http://www.isgroupe.com/en/>
- 11) Welding Research institute–Industrial Institute of the Slovak Republic： <http://www.vuz.sk/en/>

- 12) Paton Electric Welding Institute : <http://paton.kiev.ua/en>
- 13) Edison Welding Institute (EWI) : <https://ewi.org/>
- 14) Harbin Institute of Technology : <http://en.hit.edu.cn/sSchool.asp?id=251>
- 15) Research Institute of Advanced Manufacturing Technology, Korea Institute of Industrial Technology (KITEC) : <http://eng.kitech.re.kr/research/page2-1.php>
- 16) Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) の Department of Mechanical Engineering : http://me.kaist.ac.kr/mekaist-en/?page_id=11750
- 17) 革新的新構造材料等研究開発 : http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100077.html
- 18) 溶接技術 : vol.64, 2016, No.4, 特集「異種材料接合の進展」
- 19) SIP 革新的構造材料 : <http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/index.html>
- 20) SIP 革新的構造材料 マテリアルズインテグレーション (MI) : <http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/project/project-d.html>
- 21) SIP 革新的構造材料 溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発 : <http://www.mapse.eng.osaka-u.ac.jp/sipwelding/index.html>
- 22) SYSWELD, ESI : https://www.esi-group.com/sites/default/files/resource/brochure_flyer/4766/sysweld.pdf
- 23) 黒木博史, 根崎孝二, 若林 元, 中村賢治, 「線形摩擦接合 (LFW) 技術の航空エンジン部品への適用」: IHI 技報, 53(4), 45-49, 2013
- 24) 新構造材料技術研究組合 (ISMA) : <http://isma.jp/index.html>
- 25) 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM) : <https://trafam.or.jp/top/>
- 26) The Bredesen Center, The University of Tennessee : <http://bredesencenter.utk.edu/>
- 27) Oak Ridge National Laboratory : <https://www.ornl.gov/>
- 28) International Conference on Nano-Joining and Micro-Joining: NMJ : <http://www.nmj2016.org/>

3.4.3.2 接着

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

橋梁や建築物のような建造物や輸送機器などの社会インフラの構造材料は、高い機械的強度と同時に安全・安心な社会のために高い信頼性を要求される。接合・接着技術はその基盤となる重要な技術であるが、マルチマテリアル化の進展に伴い、新たな材料を含めての接合・接着の技術開発は継続的に必要である。特に、接着接合は施工の容易さから近年注目され、インフラに対しても補修に多用されており、その使用範囲も拡大している。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

従来より、金属材料は主に溶接により接合されてきた。現在でも、高強度や耐熱性を必要とする箇所は溶接が概ね使用されている。溶接は、高い強度と継手効率を有する優れた接合手法であるが、厚い部材に適用し難い、残留変形が生じやすい、並びに欠陥に起因する破壊を生じ易いなどの問題点も潜在的に有している。また、異種材料の接合も比較的難しい。しかし、これらの問題点は技術の進歩により、徐々に克服されつつある。具体的には、不活性ガス中での溶接、レーザー溶接、溶接プロセスの制御による肉厚化、並びに異種材料接合などの技術開発が精力的に進められている。インフラの観点で考えると、高架道路等の鋼製架台は概ね溶接されており、また、橋梁も溶接鋼構造が支配的である。近年では、摩擦攪拌接合も軽合金を中心にその適用範囲が拡大しつつある、この場合、高い継手強度が得られる、熱変形を低減できるなどの利点がある。

溶接以外の接合手法としては、機械的締結や蟻付、並びに接着接合を上げることができる。この中で、接着接合は、その施工の容易さから近年注目されている。インフラに対しても、その補修に多用されており、その使用範囲も拡大している。具体的には、コンクリートのひび割れ補修にエポキシ接着剤の注入工法が用いられる。最近ではトンネル内部のコンクリート剥落防止にも本技術が使用されている。この他、高速道路のコンクリート橋脚に対して、CFRPを巻きつけることにより補強し、その耐震性を向上するケースも接着適用の一例と見なせる。インフラとは若干異なるものの、建築物、特にビルディングの耐震補強には接着剤の使用されるケースが多い。たとえば、耐震補強用の鋼構造物やコンクリート構造物をビルディングの外側に設置する場合は、多数のケミカルアンカーボルトにより固定される場合が多い。この場合も接合の主要な役割を接着剤が担っている。

これらの技術開発主体となっているのは、溶接の場合、鉄鋼メーカー、重工メーカー、並びに公設の研究機関である。一方、接着の場合は、我が国には公的な研究機関が少なく、接着剤メーカーおよび接着剤のユーザー企業が主な技術開発を行っている。この点は、公的な研究開発拠点を有する諸外国、特にドイツとの大きな差異となっている。

(3) 注目動向

インフラの補修は世界的に重要な課題となりつつあり、特に先進国において、老朽化しつつある設備のリファービッシュに関する研究が重点的に進められている。例えば欧州では、CoPatchという名称のプロジェクトがEUの支援の下で実施されている。このプロジェクトでは老朽化した設備、たとえば橋梁などにCFRP製の補強材を接合し、その延命を図る手法について実験的な検証を行っており、この接合には接着剤を主に用いている。

(4) 科学技術的課題

溶接に関しては、異種材接合のバリエーションの増加、並びにその強度や信頼性の向上が主要な課題であろう。また、インフラの補修では、施工や検査の容易化・自動化が重要な課題となりつつある。近年進歩の著しい摩擦攪拌接合については、鉄鋼などの比較的強く融点の高い材料への適用が今後の課題であると考えられる。この場合、摩擦攪拌用工具の長寿命化が、コスト低減の観点で重要である。接着接合に関しては、施工の容易化が重要である。このため、室温で硬化可能な接着剤が必要になる。しかし、現状は十分な耐久性を有するとは言い難く、更なる改良が必要である。また、接着接合部の耐久性評価や寿命予測もその手法が確立されているとは言い難く、この点が実用上の大きな課題となっている。さらに、施工や検査の容易化・自動化も重要であり、この観点では溶接と同様の問題を有している。

(5) 政策的課題

我が国には、溶接技術に関する優れた研究開発拠点、例えば大阪大学接合科学研究所などが存在し、また材料メーカーも積極的な研究投資を実施している。実際に、この分野での特許取得数は、諸外国と比較しても多く、我が国の溶接技術は世界的に高い競争力を有していると考えられる。一方、摩擦攪拌接合に関しては、諸機関で独立して研究が実施されているため、拡散気味である。したがって、この接合手法に関しても、情報の集積点としての研究拠点が必要であろう。

接着技術も同様で、研究開発の拠点が存在しなかったために、技術の体系化という観点で諸外国、特に米国やドイツに遅れを取っている。たとえば、ドイツにはフラウンホーファー研究機構に IFAM と呼ばれる研究機関があり、接着技術の研究開発拠点として機能している。最近我が国でも、産総研に接着・界面現象研究ラボが開設され、また、経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」において構造用接着技術に関するフィージビリティスタディーが実施されており、拠点としての機能が期待される。

(6) キーワード

溶接、摩擦攪拌接合、接着、施工・検査の容易化・自動化、CFRP、コンクリート補修、鋼構造の補強、耐震補強

(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	◎	↑	接着現象の解析、接着剤の開発などの基礎研究は、大学や化学メーカーにおいて十分に実施されている。
	応用研究・開発	○	↑	システムとしての接着技術を体系化する母体・研究拠点が存在しなかった。最近、産総研に接着・界面現象研究ラボが開設された。また、経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」において構造用接着技術に関するフィージビリティスタディーが実施されている。
米国	基礎研究	◎	→	接着現象の解析、接着剤の開発などの基礎研究は、我が国と同様に、大学や化学メーカーで実施されている。3Mなど、この分野のリーディングカンパニーを有している点も高い競争力の源泉となっている。
	応用研究・開発	◎	→	巨大な軍事産業・航空宇宙産業を擁しているため、その基盤技術としての接着技術に高い注意が払われており、潤沢な予算を費やして応用研究・開発が実施されている。また、他分野へのスピノフによる波及効果が大い。産業では、軍需、航空、宇宙機器において標準的な接合手段として多用されている。民生品では発電用風車のブレードなどに積極的に使用されている。
欧州	基礎研究	◎	→	接着現象の解析、接着剤の開発などの基礎研究は、我が国と同様に、大学や化学メーカーで実施されている。接着剤メーカーとして世界最大のHenkel、BASF、Bayerウレタンなど企業の研究能力も極めて高い。
	応用研究・開発	◎	→	フラウンホーファー研究機構IFAMを中心に、産学連携による積極的な研究開発を実施。CoPatchのような、インフラ補修技術に関する国家プロジェクトも実施。ドイツは、構造用途への接着の産業適用が進んでおり、航空機、自動車、鉄道車両、船舶、発電用風車などで接着工法が実用化されている。
中国	基礎研究	○	↑	基礎研究は、主に大学や国立研究所において実施されている。経済の発展に伴い研究費も増加しており、研究レベルも向上している。
	応用研究・開発	◎	↑	軍事予算の増加に伴い、この分野での研究開発が進んでいると予想される。また、自動車関連の接着接合技術に関しても、研究開発拠点（例えば清華大学）が存在し、重点的な研究開発が行なわれている。
韓国	基礎研究	○	↑	日米欧のレベルには達しないものの、接着技術に関する基礎研究は、大学（ソウル大、KAIST）において精力的に実施されている。
	応用研究・開発	△	↑	接着技術に関する応用研究・開発は、主に接着のユーザー企業において実施されている。米欧のレベルに達するには長い時間が必要であると思われる。産業では、接着のユーザー企業は、接着とその周辺技術を諸外国から導入して活用しており、製品への適用も進んでいる。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 欧州 Co-Patch プロジェクト <http://www.co-patch.com/>
- 2) 大阪大学接合科学研究所 <http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/index.jsp>
- 3) フラウンホーファー研究機構 IFAM <http://www.ifam.fraunhofer.de/>
- 4) 産業技術総合研究所 材料・化学領域 接着・界面現象研究ラボ <https://unit.aist.go.jp/nmri/airl/>

3.4.3.3 コーティング

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

建造物や輸送機器などの社会インフラの構造材料は、機械的強度と同時に高い信頼性を要求される。接合・接着技術は基盤となる技術であるが、コーティング技術もインフラの耐用年数を延長する観点で極めて重要な技術である。防食が主要な目的であるが、近年では断熱や防音の観点でも使用されるケースが多く、技術開発が精力的に進められている。特に社会インフラの大型建造物に対してコーティングを可能とする低コスト処理技術が開発されてきており注目されている。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

橋梁などの防錆技術は、インフラ関係の構造材の寿命や安全性の観点で社会的にも重要な課題である。特に過酷な海洋環境下における防食対策の鋼材には、一般的に溶融亜鉛めっきが用いられてきた。亜鉛めっきによる鋼材の防錆効果は、鉄より先に溶けて腐食を防止する“犠牲防食作用”と、亜鉛の水酸化物皮膜が鉄の表面を覆い、鉄を保護するためである。しかしながら、海洋環境は、海水飛沫や海塩粒子が鋼材に影響する腐食環境として非常に厳しく、亜鉛めっきによる防食だけでは4～5年程度で鋼材まで腐食が進み交換や補修が必要となり非常に不経済である。日本防錆技術協会は、日本における腐食コストは1997年で5兆円以上との試算を発表している。対して、溶融アルミめっきや亜鉛アルミ合金めっき、さらには溶射による亜鉛アルミ合金コートが使われ始めている。

溶融アルミめっき鋼材の高耐食性は、アルミ表面に形成される酸化皮膜（アルミナ層）による“バリア防食作用”とFe-Al合金層の存在に起因し、アルミ層の腐食速度は1～4 $\mu\text{m}/\text{year}$ で、飛沫帯環境でのアルミめっき鋼材の寿命は亜鉛めっきの10～20倍程度と推測されるとの報告もある。最近、建築・屋根資材として、よく耳にするガルバリウム鋼材も、亜鉛アルミ合金めっきの一種で、メーカーカタログで、溶融亜鉛めっき鋼板の3～6倍もの優れた耐食を持つとされている。

一方、防錆コートの手法としては、金属溶射と樹脂塗装による封孔処理による対応がある。溶融めっきより厚い被膜が形成でき防食性や現場施工性で優れるもののコスト面での課題もあり、まだ試験段階のものが多く、沖縄県や三重県、秋田県などで実証が行われている。溶射による防錆コートでは、多くの場合亜鉛アルミ擬合金の金属皮膜形成が利用されているが、基本的に溶射は溶融した材料が基材上で急速凝固することで形成されやすく、貫通ポアやクラックなどにより緻密な被膜形成は容易でなく、樹脂などによる封孔処理が必要になる。また環境にもよるが、この封孔処理の樹脂材は、太陽光の紫外線の影響で耐久寿命の制限にもなり得る。さらに被膜の鋼材に対する密着力の確保には、基材表面のプラスト処理とその管理が必須になる。以上の様に、特性の条件下では溶融めっき法より優れた特性が得られるが、実用面での課題も多い。

(3) 注目動向

最近この溶射の分野で、金属材料を溶融せず固体状態のまま基材に吹き付け溶射よりも緻密で厚い金属皮膜を形成する「コールドスプレー（CS）法」が注目されている。これの防錆用途への検討も進められている。溶射よりも緻密で厚い膜が形成できるので、犠牲防食としては耐久性の伸びが期待できる。また、緻密な被膜のため封孔処理が不要になる

などの利点がある。腐食減厚に対する回復技術としての検討や橋梁構造の継手締結部に用いられる高力ボルトの防錆処理の検討が進められている。さらに、最近では、CS法では不可能であった高強度、高密着のセラミックスコーティングを実現できる「エアロゾルデポジション（AD）法」が開発され、半導体製造装置業界で注目を集めている。金属基材上に溶射法などより数倍以上高い密着強度で相対密度95%以上の純粋な α -アルミナ被膜を常温で形成できる。膜の硬度も焼結体同等以上で、耐摩耗性にも優れることが実証されている。防錆コート分野では、まだその応用や有効性が検証されていないが、 α -アルミナは安価な汎用セラミックス材であり耐摩耗性のみならず化学安定性にも優れ、高密度、高密着の α -アルミナコートが実現できれば、防錆用途で従来にない優れた性能が期待される。以下に、これら新しい溶射コーティング手法の現状と応用の可能性を述べる。

溶射は、高温プラズマ中に粉末材料を投入して溶かして基材上に吹きつけ急速凝固させて皮膜を形成する方法で、材料として合金、金属が使われるが、セラミック溶射は材料を金属からセラミックに替えたものである。バリア防食作用の観点からセラミック溶射には防錆への展開の可能性が十分あるが、溶射セラミックス皮膜はクラックにより緻密なものが得られないこともあり検討事例は少なかった。しかし最近、エアロゾルデポジション法やコールドスプレー法など、乾燥したセラミックスや金属の微粉体を固体状態のままガスで搬送し、ノズルから噴射して基材に衝突させ、低温・高速の厚膜コーティングを実現するプロセスが報告されている。

コールドスプレー（CS）法は、溶かさずに粒子を吹きつけ成膜するもので、1983年頃にロシアのPapyrinとAlkimovが、飛行機のタービンにニッケル粒子を吸わせてタービンのブレードがニッケルコートされたことから特許をとり、世に送り出した技術である。研究としては古いが、実用化も含めた検討が始まったのはごく最近である。アメリカでは、飛行機の構造部材のリペア／メンテナンスへの適用が国家レベルで動いており、それに伴って国内の溶射関係でも研究者がかなり増えてきている。溶かして空気中で凝固させると、表面酸化により接合した粒の界面などが脆化したり、内部にポア、欠陥、クラックが形成されるが、CS法は、600℃程度のホットガスに金属材料を固体状態のまま投入し、熔融温度以下の温度で超音速ノズルから高速噴射して基材に粒子を溶かさずに固体状態のまま衝突させるため、金属粒子同士が接合して、酸化層が少なく、クラックもポアも少ない緻密な膜ができる。従来の溶射の概念を覆すインパクトのある手法であり、コスト的に合えば防錆用途にも使える可能性がある。材料としては様々な金属材料、合金材料、ステンレス、鋼材、超合金に加え、最近では酸化チタンとかアルミナなどのセラミックスが付くと言われている。CS法は溶射よりも緻密で厚い膜が形成できるので、犠牲防食としては耐久性が伸びることが期待できる。また、緻密な被膜のため封孔処理が不要になるなどの利点がある。琉球大学などで、 $\text{Zn-Al}_2\text{O}_3$ のコンポジット材で腐食減厚に対する回復技術として、横川ブリッジホールディングス(株)では、海洋環境下において腐食が顕著な橋梁構造の継手締結部に用いられる高力ボルトの防錆処理として検討されている。高力ボルトは締結時に生じる防錆表面処理の傷が起点となって腐食が進行するケースが多いため、ボルト締め付け後にCS法により防錆コートすることで犠牲防食効果が得られる。

エアロゾルデポジション（AD）法は、コールドスプレー（CS）法などと共にキネティック・スプレー（Kinetic Spray）法と呼ばれるコーティング技術で、その成膜原理は主に衝突による圧力や衝撃力など機械的なエネルギーを利用する。固体状態の微粒子、超微粒

子を数百 m/sec 以上に加速し、サンドブラストの様にビーム (ジェットストリーム) 状にして基材に衝突させ、緻密なコーティングあるいは成形体に近い厚膜形成を行うものである。金属やセラミックスの微粒子同士がマクロ的には常温で、ほぼ固体状態のまま結合すると考えられる。AD 法は数 Torr 前後の比較的真空な減圧下で $1\ \mu\text{m}$ 前後の粒子を基材に吹き付けるところに他の類似手法との違いがあり、セラミックス皮膜が高い密着力で常温形成できる手法として注目される。実際に、数十ナノメートル以下の微結晶構造からなる高透明で緻密なセラミックス薄膜、厚膜を形成でき、粒子積層による膜形成のため、従来薄膜法の 30 倍以上の速度で数百 μm から数 mm レベル厚膜が得られることや、常温成膜であることから金属箔や樹脂フィルム上へ緻密かつ透明なセラミックス被膜を形成することも可能で、高い絶縁耐圧や優れた機械特性が得られる。これは「常温衝撃固化現象 (Room Temperature Impact Consolidation: RTIC)」と呼ばれ、成膜現象としては、溶射技術のように原料粒子を熔融あるいは半熔融状態にして吹き付け粒子間の結合を得る手法とは原理的に異なり、それまでの、CS 法では実現できなかった純粋なセラミックス材料の緻密・高密着な被膜を初めて常温形成することを可能とした。以下に従来薄膜プロセスと比較した AD 法の特徴をまとめる。

- ① 常温、バインダーレスで緻密な成膜/成形体が得られる。
- ② 数 μm 以上の膜厚でも、従来成膜技術と比較し高密着強度。
- ③ 高い成膜レート ($5 \sim 50\ \mu\text{m}/\text{min}$) (従来成膜法: $0.01 \sim 0.05\ \mu\text{m}/\text{min}$)
- ④ 蒸気圧の大幅に異なる複雑組成系に対し使用粉末と同一組成・結晶構造の成膜体が得られる。
- ⑤ 広範囲の膜厚が得られる。 ($0.5\ \mu\text{m} \sim 1\ \text{mm}$)
- ⑥ 直接描画、マスク法、リフトオフ法等により微細パターンがエッチング無しで得られる。
- ⑦ 低真空 (数百 Pa) 程度～大気圧) で成膜可能。

AD 法では、高密度なアルミナ ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 厚膜やイットリア (Y_2O_3) 厚膜が常温で金属基板上に形成できる。最近では、マルチノズル化することで、ロール to ロールで大面積の均一成膜も可能になっている。AD 法で常温形成されたアルミナ膜は、緻密、高密着、高い硬度が故、各用途でのハードコーティングとしての応用が期待される。印刷分野やフィルム部材製造、食品産業で広く利用される産業用ローラーも、対象材料が変化中、より高機能で高耐久性のものが求められるが、比較的薄いコーティング厚みで、高い耐腐食性、防錆性を実現できており、コーティングコストの大幅な低減が可能になれば、将来、産業用ローラーだけでなく、広く防錆用途への適用の可能性が伺える。また、耐摩耗性についても、Cr メッキの 3 ~ 4 倍の性能向上が得られている。具体的な応用例として、高い絶縁耐圧が求められるパワーモジュール用放熱基板や半導体製装置用プラズマ耐蝕コーティングやその重要コンポーネントの一つである静電チャックなどで、製品化の検討、一部事業化が実現されている。防錆には亜鉛の溶出による犠牲防食効果だけでなく、アルミの酸化によるバリヤ防食効果も非常に効果的である。従って溶射法に比べ常温で緻密・高密着なセラミックスコートが可能な AD 法で形成されたアルミナ被膜は、高い耐エロージョン性、耐コロージョン性を有し、過酷環境下でも優れた防錆処理効果が期待できる。

(4) 科学技術的課題

AD法は、低真空プロセスではあるが大気中での成膜ができないので、溶射法のような現場施工が難しい。成膜速度が溶射より100倍程度低いいため、膜質向上による必要膜厚の薄膜化を配慮しても、大型構造物全面に対しては成膜コストの点で問題になる可能性がある。また、高力ボルトなどの小面積に対しては、立体形状へのカバレッジの点などで課題がある。以上のようなAD法の欠点を補う可能性を持つ技術として内閣府・戦略的イノベーション創造プログラムの中で「ハイブリッドAD法」が検討されている。これは、圧力効果による粒子間結合を成膜原理とするAD法のようなKinetic Spray法と熱効果による粒子間結合を成膜原理とする溶射法とを連続的に切り替えられるようにして、両法の長所をうまく融合させる技術である。現状、従来溶射法より遥かに緻密な膜質を維持したままAD法の50～100倍程度の成膜速度が得られており、また3D構造の基材に対しても溶射並みのカバレッジ特性が得られている。防錆応用への適用性が大いに期待できる。

(5) 政策的課題

我が国には、大阪大学接合科学研究所のような溶接技術に関する研究開発拠点が存在し、また材料メーカーも積極的な研究投資を実施しており、諸外国と比較しても高い競争力を有していると考えられる。一方、コーティング技術については、諸機関で独立して研究が実施されており、研究開発の拠点が存在しなかったために、技術の体系化という観点で諸外国、特に米国やドイツに遅れを取っているとの見方がある。

(6) キーワード

エアロゾルデポジション法、コールドスプレー法、キネティックスプレー法、ガスダイナミックコールドスプレー法、常温衝撃固化現象、溶射、防錆、防食、セラミックス

(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	◎	↑	AD法のコアをなす常温衝撃固化現象の発見（約20年前）からプロセス制御に必要な成膜メカニズムの解明まで産総研を中心に世界をリード。最近、実用途拡大のために成膜効率の大幅向上を目指した基礎研究が活発化しつつあり、成膜メカニズムの詳細解明や原料粉末の微構造解析、の構造制御、シミュレーションに研究の焦点が移りつつある。
	応用研究・開発	◎	↑	2002年～2006年にNEDOプログラムで基礎から応用にわたる研究開発を実施。その後、NEDO、JSTのプロジェクトで民間企業による実用化研究が進む。現在は民間企業40社とAD法の応用展開を進める先進コーティングアライアンスを設立、エンジニアリング部材、エネルギー関連部材に応用範囲を拡大。一部は内閣府SIPプロジェクト（高付加価値セラミックス造形）で実施中。TOTO（株）半導体製造装置用プラズマ耐食部材用途でAD法実用事業化に成功、世界市場6割占有。先端LSI生産に大きく貢献。
米国	基礎研究	○	↑	サンディア国立研究所がセラミックス粒子の変形メカニズムについて産総研のキャッチアップを行っている。
	応用研究・開発	○	↑	DOEやNFS予算で、アルゴンヌ国立研究所、サンディア国立研究所、米海軍Naval研究所など公的機関での応用研究が活発化している。その他、オレゴン州立大など。用途はLi蓄電池、ハイパワーキャパシター、燃料電池などエネルギー関連部材が中心。
欧州	基礎研究	○	↑	ヘルムート・シュミット大学、ハンブルグ大学などで、CS法やAD法のメカニズム解明を取り組み、シミュレーションを中心に産総研の検討結果を検証。

欧州	応用研究・開発	◎	↗	シーメンス(株)・ミュンヘン研究所が、FP7プログラムの中でAD法を用いた超伝導線材の開発推進。DFG、BFS、NSFなどの公的資金でヘルムート・シュミット大学、パイロイト大学などが、光触媒応用、Li蓄電池応用、セラミック・ガスセンサ応用などを検討。
中国	基礎研究	△	→	原理解明という点では、現在のところ目にとまる報告は見られず、活動は活発ではない。
	応用研究・開発	○	→	西安交通大学でハードコートや光触媒応用の発表あり、AD法を“Vacuum Cold Spray(VCS)”と呼んでいる。台湾では圧電デバイス応用の検討が行われている。
韓国	基礎研究	○	↗	2005年ごろからセラミックスやエネルギー関連の国家プロジェクトの傘下で、Kwangjuon 大学、韓国窯業研究所 (KICET)、韓国電子技術研究所 (KETI) が、常温のゼロ収縮のセラミックス技術という観点で、成膜メカニズムの解明とエレクトロニクス実装技術への応用をキャッチアップ。また、Hanyang 大学、Seoul 国立大学、Korea 大学もメカニズム解明をキャッチアップ、CS法の成膜原理の解釈や溶射分野にも影響を与えている。また、一部のグループでは、AD法やCS法のことを“Vacuum Kinetic Spray(VKS)”と呼ぶ動きがある。
	応用研究・開発	◎	↗	韓国材料科学研究所 (KIMS) は、Seoul 大学や韓国の大手民間企業と連携し、燃料電池応用や熱電デバイス応用、プラズマ耐蝕コーティング、光触媒応用、アパタイト・コーティングによるインプラント応用など、実用化を強く意識した研究開発を精力的に行っている。Sungkyunkwan 大学と Samsung は TOTO (株) が事業化した半導体製造装置用プラズマ耐食コーティングのキャッチアップ研究を行っており、Samsung、ポスコ、SKハイニックスなどがバックアップして、ベンチャー企業がAD膜の類似試供品を販売する動きが出始めている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 一般社団法人日本橋梁建設協会 製作小委員会防食部会「橋梁長寿命化技術に関する技術研究交流会」～鋼橋の長寿命化技術に対する防食技術の現状と今後の展望～ 新防食技術の開発状況について、平成24年12月18日
- 2) 土木学会西部支部沖縄会 技術委員会・橋梁長寿命化小委員会 技術討論会「金属溶射・溶融技術は鋼橋の腐食耐久性向上策になり得るか？」平成24年12月18日
- 3) 伊藤義人「鋼橋に用いられる金属防食被膜の腐食耐久性に関する基礎的研究」土木学会第59回年次学術講演会（平成16年9月）
- 4) 大野他：現場溶射を採用した二重防錆ボルトの実橋への適用，土木学会第68回年次学術講演会概要集、2013.9
- 5) 土屋 徹「金属溶射と塗装」実務表面技術，Vol.31, No.9, pp397-402（1984）
- 6) 曾我麻衣子，井口 進：コールドスプレーを用いた鋼橋の防食技術について，新技術・新工法部門：No.08
- 7) 清川・井口・木村・下里：コールドスプレー技術で生成する金属皮膜を適用した高力ボルトの防食性能と機械的性質：鋼構造論文集第22巻第85号，pp.133-141，2015.3
- 8) 明渡 純：“エアロゾルデポジション（AD）法による常温セラミックコーティング”、セラミックス、46、No.7（2011）pp541-548.
- 9) 明渡 純：“第1章 エアロゾルデポジション（AD）法”、『最新高機能コーティングの技術・材料・評価』、シーエムシー出版（2015）

- 10) 明渡 純：“第1章 粒子積層新コーティング技術・エアロゾルデポジション法の概要”、
『未来を拓く粒子積層新コーティング技術』、P26～P30、シーエムシー出版 (2013)。
- 11) 大司 達樹、明渡 純：“高付加価値セラミックス造形技術の開発—3次元積層造形とハイブリッドコーティング—”、エレクトロヒート、No.7 (2016) pp.47-52。