

人工物設計・生産研究連絡委員会接合工学専門委員会報告

溶接・接合技術の進歩と21世紀への展望

平成14年10月4日

日本学術会議

人工物設計・生産研究連絡委員会接合工学専門委員会

この報告は、第 18 期日本学術会議人工物設計・生産研究連絡委員会接合工学専門委員会の審議結果をとりまとめ発表するものである。

人工物設計・生産研究連絡委員会接合工学専門委員会委員名簿

委員長	牛尾 誠夫（大阪大学接合科学研究所教授）
幹事	豊田 政男（大阪大学大学院工学研究科教授）
幹事	百合岡 信孝（新日本製鐵（株）技術開発本部顧問）
委員	粉川 博之（東北大学大学院工学研究科教授）
委員	菅 泰雄（慶應義塾大学理工学部教授）
委員	中橋 昌子（（株）東芝電力・産業システム技術開発センター主幹）
委員	林 洋一（青山学院大学理工学部教授）
委員	三木 千寿（東京工業大学大学院理工学研究科教授）
委員	宮田 隆司（名古屋大学大学院工学研究科教授）
委員	森田 耕次（千葉大学工学部教授）

要旨

本報告書は 20 世紀の溶接・接合にかかわる科学・技術の発展をふりかえるとともに、21 世紀の技術を展望し、我が国の ” ものづくり ” 立国の更なる発展のための提言を述べるものである。

” ものづくり ” の底辺を構成する溶接・接合技術

溶接・接合技術は建築、橋梁、船舶、車両、航空機、圧力容器、パイプライン、家電、装身具、飲料缶、エレクトロニクス機器などほとんどの工業製品の製造に適用され、生産技術のキテクノロジーである。アーク溶接、抵抗溶接、レーザーなどパワービーム溶接、最近脚光を浴びている摩擦攪拌接合など、そのほとんどは欧米での発明によるものである。しかし、我が国はこれらの技術をいち早く導入しつつ、溶接電源、溶接ワイヤ、センシング技術、溶接ロボット、コンピュータ制御技術などを続々と開発し、統合生産システムに結実してきた。この溶接自動化技術のみならず、溶接性にすぐれた材料の開発および構造物信頼性工学の研究においても我が国は世界をリードし、高能率かつ高信頼性の ” ものづくり ” 立国を側面的に支えてきた。

溶接・接合技術の国際的優位性の低下

日本における溶接・接合技術の進歩は大学における複雑な溶接・接合現象の学理的解明など科学的基礎研究、産業界における生産技術・技能の維持・発展への努力、および関連する学協会の連携に負うところが大きであった。しかし、前世紀末から我が国の製造業はアジア諸国を含めた諸外国に激しく追い上げられその競争力も陰りをみせつつある。製造業では溶接技術者が減少し、技術の伝承も薄れ工業製品の信頼性の高さで日本の繁栄を築き上げてきた誇り高き品質管理が溶接現場で消え失せつつある。

接合部から発生する構造物の事故

1995 年の阪神淡路大震災における溶接鋼構造物の脆性破壊事故は衝撃的であったが、事故調査の過程で多くの溶接の不備が明るみに出た。最近の原子力発電所における冷却水の漏れ事故はその多くが溶接部で発生している。また、我が国において本格的な社会的資本整備の始まった 1960 年代に製作された溶接構造の鉄道橋や首都高速などの道路橋では溶接部から疲労損傷が発生している。多くの社会基盤設備が高経年期を迎え、その再生にあたり補修・補強溶接技術の確立とその品質管理の重要性が一層増してきている。

国際基準を満足する溶接・接合教育の立ち遅れ

一方、ISOにおいては、溶接工程は製品の事後の試験・検査では工程の適否が検証不能であるという理由から、工程の事前承認を必要とする特殊工程とされ、溶接品質要求が契約に含まれる場合、溶接管理技術者を配置することが規定された。このISO国際管理技術者は、IIW(国際溶接学会)シラバスに従った厳格な教育・訓練を履修した後、取得できるものである。しかし、我が国ではこの国際溶接技術者を教育・訓練する体制整備が諸外国に遅れをとっている。

産学連携の強化

さらに、我が国の製造立国を支えてきた産業界は相当な生産技術開発力を有していたが、今や個々の会社で世界を凌駕する革新的技術を開発する余力は失われてきている。一方、欧米では国立研究所またはそれに準ずる機関が民間企業と連携し溶接などの応用生産技術開発に積極的に取り組み、自国製造業の生産技術の向上を国家的に支援するようになってきている。

国際連携の強化

国際情勢に目を向けると、労働人口の流動化、市場と生産現場の東アジアへの傾斜などの観点から、東アジア諸国との溶接の研究、技術、教育など多面にわたる連携を強化することが必要となる。しかし、ドイツ、英国、米国、オーストラリア各国は自国の工業製品、生産システムなどの輸出を間接的に支援することを目的として、単独または連携してアジア諸国に対する溶接教育・訓練活動を活発に展開しており、我が国の東アジアとの連携はこれまでもその重要性が唱えられてきたにもかかわらず、これら諸国に相対的に遅れつつある。

提言

以上のように、溶接・接合技術の視点から観た、我が国生産技術力の低下は種々の側面で大きな影響を与え、安心・安全社会を支える都市インフラの信頼性保証をも危うくしかねない。技術立国を標榜する我が国が、その基盤技術である、溶接・接合の分野において今、取り組むべき戦略として以下のことを提言する。

(1) 溶接・接合の複雑系の現象解析を含めて世界をリードしている我が国の研究基盤を更に

強化するとともに、製造立国発展に直接寄与する生産応用技術開発課題解決のための機能を強化する。

(2) ISOで認証された国際溶接技術者および溶接・接合関連の創造的技術開発に指導的役割を果たす高度溶接技術者養成のための教育機能を充実する。

(3) ISO 9000 と ISO 14000 の思想である環境と安全への社会的責任の重視を尊重する立場から、国際資格に対応する溶接技術者の配置を含めた溶接接合監査制度を導入する。

(4) 東アジアと研究、技術開発、教育に関する連携を早期に強化する。

(5) 以上4つの課題に対して具体的方策を立案し実行するには、大学、(独)研究機関、学協会、産業界の効率的且つ相互に補完的な活動が望まれる。そのため、溶接・接合研究に関する全国共同利用研究所として設立された「大阪大学接合科学研究所」の機能を充実・強化させると共に具体的戦略に基づいた関連研究機関との連携関係を構築する必要がある。

目次

I . 総論

- (1) 溶接・接合研究と技術の変遷・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
- (2) 産学における課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
- (3) 溶接・接合製品の信頼性保証・・・・・・・・・・・・・・・・・・7
- (4) 東アジアとの連携の強化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・8

II . 提言

- (1) 溶接・接合研究開発体制の強化・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
- (2) 高度溶接専門技術者の教育・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
- (3) 法規の見直しと接合監査制度の導入・・・・・・・・・・・・・・10
- (4) 東アジア諸国との連携の強化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10

III . 各論

- (1) 溶融溶接プロセスの進歩・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
- (2) 圧接プロセスの進歩・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13
- (3) 固相接合およびろう接プロセスの進歩・・・・・・・・・・・・・・14
- (4) 溶接構造用材料の進歩・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・16
- (5) 溶接構造の損傷と破壊力学の進歩・・・・・・・・・・・・・・・・・18
- (6) 溶接教育・訓練の変遷・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・20

I . 総論

(1) 溶接・接合研究と技術の変遷

溶接・接合の技術は5000年以上前にメソポタミアで用いられたろう付に始まり、19世紀後半にアークを利用する溶接が発明され、20世紀後半には電子ビームやレーザービームなど高密度エネルギーを溶接に適用するようになった。最近では摩擦攪拌接合技術が発明され、アルミニウムとアルミニウム合金の接合の革新技術として脚光を浴びている。溶接・接合にはこれ以外にも多くの種類があり、それぞれ固有の特性を有している。現在、それらのプロセスが個々の特徴を活かし、建築、橋梁、船舶、車両、航空機、压力容器、パイプライン、家電、装身具、飲料缶、エレクトロニクス機器などほとんどの工業製品の製造に適用されている。21世紀においても、溶接・接合技術は各工業製品の高効率生産およびその性能と安全性を支配するキテクノロジであり続ける。

溶接・接合プロセス技術は20世紀末になって、信頼性、生産性、自動化において加速的な進歩を見せている。ろう付技術に到っては5000年の眠りを破って、宇宙航空機やエレクトロニクスなど最先端分野製品の接合のための必須技術として、そしてその技術が製品の性能を決定するため、激しい開発競争にさらされている。さらに鉛フリーはんだなど地球環境対策のための新技術開発が喫緊の課題となっている。アークや高エネルギービーム（電子ビーム、レーザービーム）による溶融溶接ばかりでなく、抵抗溶接においても、パワーソース技術、溶接材料技術およびインプロセス監視技術の三位一体の進歩により、近年めざましい発展を見せている。

接合プロセスの自動化・ロボット化が進展しているといえ、なお、溶接・接合は人の技量と技術に依存するところが大きい。構造物が大型化し使用条件が過酷化する状況の下で、安全・安心で快適な環境維持のためには、構造物の安全に対する重要性が従前以上に認識されるようになってきた。構造物安全性に直結する施工に関わる溶接管理技術者と溶接技能者の能力が一層問われるところである。

溶接・接合技術の歴史は古く完成された技術として見られがちであるが、各論で述べるように、すべてのカテゴリーにおいて20世紀末に中興的發展を遂げたといえ、21世紀に向けさらに新たな課題を多々克服しなければならないニューテクノロジーである。

(2) 産学における課題

現在我々が用いている溶融溶接と圧接技術の殆ど全てのものは1960年頃までに欧・米・ロシアにおいて生み出されたものである。我が国はこれらの技術をいち早く導入しつつ、造船用の片面自動溶接の開発を皮切りに溶接電源、溶接ワイヤ、センシング技術、溶接ロボット、コンピュータ制御技術などを続々と新しく開発し、統合生産システムに結実してきた。この約半世紀に及ぶ自動化の成果はまさに世界をリードするものであり、製造業における溶接の自動化は諸外国にその例を見ないほどに急速な発展を遂げてきた。

しかし、20世紀の終わり頃から我が国の製造業における溶接・接合技術競争力が陰りを見せ始めている。製造業において溶接技術者が減少し、溶接ラインの改善やトラブルシューティングを材料・機器メーカーに委ねる製造業者も見られるようになった。我が国は各社でそれぞれ相当な生産技術開発力が有していたのが、個々の会社で世界を凌駕する革新的技術を開発する余力はいまや失われてきている。

過去の鋼構造物の脆性破壊などの損傷による悲惨な数々の事故を教訓に材料、設計および施工に関して規格が規定されてきた。しかし、現在では過去の多くの事故は風化し、事故の経験に基づく教訓の次世代への伝承は途絶しつつある。企業内においてOJT（On Job Training）時間が減少し、技術者自身の技術へのこだわり意識が希薄になっている我が国の事情を考えると、企業外教育機関による溶接管理技術者の養成が望まれている。個々の企業において溶接技術者が減少し溶接技術開発力に陰りを見せる一方、我が国の大学、研究所、独立行政法人化された旧国立研究機関の研究は高度専門化し、より一層学術的になり、生産に直結する実用工学である溶接・接合工学の体系的研究が、必ずしも十分に行われているとは言い難いのが現状である。

一方、欧米では溶接・接合に関する基礎的研究のみならず、溶接・接合の応用研究も活発に遂行されており、その国の生産技術の継承と更なる発展を支えている。たとえば欧州では、英国のTWI（旧溶接研究所、現在民間の開発機関）は摩擦攪拌接合法の発明に見られるように、基礎的研究のみならず実用技術開発研究に注力している。ドイツではFraunhofer InstituteやGKSSのような国立応用技術研究所の活動も活発であり、前者はレーザー研究で後者では摩擦攪拌接合の応用研究で知られている。そして、これら民間研究所あるいは国立応用研究所が民間製造業とタイアップし接合の実用技術を開発し、国内の生産技術向上に成果をあげつつある。我が国においても、空洞化しつつある生産技術研究の新しい展開を目指し、産学の連携の再構築による新しい”ものづくり”立国を支える国家戦略が必要である。

（3）溶接・接合製品の信頼性保証

1995年の兵庫県南部地震において溶接鋼構造物に生じた脆性破壊事故は衝撃的であったが、事故調査の過程で多くの溶接の不備が明るみにでた。多くの破面で見られた溶接施工不良による溶接欠陥、取付溶接不良、角回し溶接部同士の終端間距離が数mmしか離れていないとか、溶接終端部でクレータ処理が全く施されていないなどの事例がみられた。

最近の原子力発電所における冷却水の漏れ事故はその多くが溶接部で発生している。我が国の多くの原子炉がこれから高経年期を迎え、次々と溶接部補修が必要となる。また、我が国において本格的な社会的資本整備の始まった1960年代に製作された溶接構造の鉄道橋や首都高速などの道路橋では溶接部から疲労損傷が発生しているが、なお、補修、補強しつつ供用されている。これらの多くは設計供用寿命を迎えつつあるのだが、

全面的取り替えが困難な状況にある。発電設備や橋梁など社会基盤施設の安全を保ちつつその延命を図るには、溶接構造用材料も溶接施工も理解でき、しかるべき資格を有する溶接技術者が要請される。

一方、溶接品質管理に対する国際化は進捗を見せている。これは ISO 9000 の制定に始まる。これまでの品質管理および品質保証は製品そのものを対象にしていたのに対して、ISO 9000 は製品製造のマネジメントシステムの構築を規定している。第 2 段目は 1996 年に制定された ISO 14000 である。これは地球環境負荷の軽減のための企業の社会的責任に言及している。すなわち、地球環境問題をも考慮した品質管理のマネジメントシステムを社会（第三者）に見える形で構築することを企業に要求するものである。

この動きを受けて、ISO 3834「溶接に関する品質要求」規格が制定され、溶接品質要求事項として契約に含まれる場合、溶接管理技術者を置くことが規定された。この溶接管理技術者は IIW（国際溶接学会）シラバスに従った 3 ランクあり、各論「溶接教育・訓練」で詳述されているように、いずれのランクの資格取得にも厳しい学歴条件があり、さらに規定の教育・訓練に合格することを要求されている。

溶接品質に対する ISO 3834 規定を採用すれば、国際溶接管理技術者が配属されていない工場の溶接製品の出荷は容認されないということになる。現状ではこの ISO 3834 をどの国も厳格に採用していないが、ある国が採用すればその国には溶接製品を輸出できなくなる。いずれ、我が国の企業から国際溶接管理技術者資格取得者を要請することになる。日本溶接協会では溶接管理技術者の国際化に積極的に対応する意向を示している。しかし、現状は各論の「教育・訓練」が指摘するように、この要望に応える教育・訓練機関は充実していない。

（４）東アジアとの連携の強化

IIW（国際溶接学会）は溶接に関する学術活動ばかりでなく規格、教育・訓練など溶接に関して包括的活動しており、溶接・接合分野は国際協力が最も進んでいる技術分野と云える。我が国は IIW の活動に対し学術的貢献を含めてこれまで積極的に協力してきた。しかし IIW 加盟国の多くは欧米諸国であり、これまで東アジアとの連携は必ずしも十分ではなかった。

しかしながら将来の労働人口の流動化、市場の東アジアへの傾斜などを考慮すると、東アジア諸国との研究、技術、教育など多面にわたる連携を強化することが必要となる。我が国の製造業が、労務費のみでなく品質をも求めて東アジア、東南アジアへの海外進出を行っている現状から、我が国製造業のためにも連携が不可欠である。しかし、自国の工業製品、生産システムなどの輸出を間接的に支援することを目的として、DVS（ドイツ溶接協会）、TWI（英国溶接研究所）、AWS（米国溶接協会）、オーストラリア各国は単独または連携してアジア諸国に対する溶接教育・訓練活動を活発に展開しており、我が国の東アジアとの連携はこれらの国に比し相当に遅れをとりつつある。アジア

諸国との連携の必要性は認められつつも系統的に検討されなかったことを反省し、関係する機関と協議し具体的な方策を立案しなければならない。

II . 提言

(1) 溶接・接合研究開発体制の強化

我が国における 21 世紀型生産社会の構築には、我が国が世界をリードする溶接・接合を基盤とする生産技術・技能の維持・発展が不可欠であり、我が国が新しい進化循環社会における“ものづくり”立国を目指すためにも、更なる溶接・接合技術開発研究が必須であることは、先に述べた通りである。

そのような我が国の研究体制を考えるに、大学にはナノ・マイクロ接合、量子ビーム精密接合、三次元接合など最先端領域の研究や、複雑な溶接・接合現象の学理的解明など生産応用技術の基盤をなす基礎研究、また、ナノ物理学、計算科学、材料界面科学、安全・予測工学などの基盤工学と接合工学との学際的・融合的研究を通じた新しい学問領域の構築などの基礎研究が求められ、(独)物質・材料研究機構のような旧国公立研究機関には、長期にわたる基盤データの蓄積を要する系統的研究や、原子炉構造物のような経年変化を緻密に監視しつつ対策を行うことの必要な研究などの遂行が望まれる。一方、産業界においては、自社の製造プロセスの革新、自社製品の利用技術の開発、自社製品の品質保証技術の開発への持続的な取り組みが期待される。

我が国の溶接生産技術の高いポテンシャルを維持し、新産業創成の基盤を担っていくためには、上述のような産・官・学の各研究機関が、柔軟に協調しつつ、競合的な研究活動を行っていくことが重要である。このような中において、我が国唯一の溶接・接合とその関連分野の基盤的研究を行っている“大阪大学接合科学研究所”は、溶接・接合研究の国内的・国際的研究拠点であり、大学附置の全国共同利用研究所として機能してきた。しかし、研究者規模は十分とは言えず各大学・各研究機関および産業界との補完的連携を構築すると共に、研究拠点としての機能の強化を図ることは是非とも必要である。同研究所の研究拠点機能の強化、国内産業界および国内外研究機関からの共同研究参加システムの充実・強化、各大学および(独)研究機関との効率のよい研究連携ネットワークの構築は焦眉の急であるといわねばならない。

(2) 高度溶接専門技術者の教育

ISO 9000で溶接は製品の事後の試験・検査では工程の適否が検証不能であるという理由から特殊工程と定義付けられ、溶接製品の品質管理のためには国際基準を満たす溶接管理技術者を置くことが国際的に制度化された。しかし、我が国には国際溶接技術者に匹敵する実践的な高度接合専門技術者の教育を実施する機関はない。また、各企業内で実施していた企業内教育も十分に実施されなくなり、技術の伝承も危ぶまれている。

国際的認証を受けた溶接技術者の我が国での普及は、ISO 9000、ISO 14000思想の国内外の産業界への普及の動向によるが、すでに英・米・オーストラリアでは溶接工学に伝統のある大学において、欧州・中国では溶接協会・学会においてIIWシラバスに従った教育が実施され始めている。

大阪大学大学院工学研究科及び接合科学研究所は協力して、“高度溶接技術者ディプロマコース”を設け、高度溶接専門技術者の教育を行うことを検討している。IIWのディプロマレベル（単に446時間コース）ではなく、国際的に通じる溶接技術者であるとともに、自ら開発能力を持ち、溶接・接合関連の創造的技術開発に指導的役割を果たす技術者の養成をめざしている。我が国において、このような高度溶接専門技術者育成の学科または工学部卒業者のための溶接専門技術コースの創設を提案する。

(3) 法規の見直しと接合監査制度の導入

溶接構造物における溶接施工の不備が多々指摘されるようになってきている。安全性が特に重視される構造物に対しては、例えば電気事業法や高圧ガス保安法などで接合部の厳しい検査が義務づけられている。しかし、規制緩和推進を受けて種々の設備については検査期間の延長、国によらない定期自主検査の採用にも向かっている。その動きは民間規格などの積極的な活用など、方向として誤りではない。

しかしながら問題は、これらの各種の規制あるいは監査が複数の省庁、機関によって行われ、必ずしも横断的整合がとられていないことである。これらの規制、監査はそれぞれの歴史的背景を有しているとはいえ、接合科学・技術の進展、構造物の保証に対する要求の高まりなどから、これら諸規制を見直すべき時期にある。この検討結果に基づき規制すべきは規制し、緩和すべきは緩和する必要がある。

また、ISO 9000とISO 14000の思想である環境と安全への社会的責任の重視を尊重すると、国際資格に対応する溶接技術者の配置を含めた溶接・接合に関する監査制度の導入は検討されるべきである。対象となる溶接構造物の製造と検査に関連する分野は日本溶接協会、溶接学会、土木学会、日本建築学会、電気学会、日本非破壊検査協会、日本高圧力技術協会、発電設備技術検査協会などにまたがっている。規制と規制緩和の調和を考慮して、関連学協会が協力して接合監査制度の早期の導入を提案する。

(4) 東アジア諸国との連携の強化

将来の労働人口の流動化、市場のみならず生産の東アジアへの傾斜などの観点から、東アジア諸国との溶接の研究、技術、教育など多面にわたる連携を強化することが必要となる。しかし、ドイツ、英国、米国、オーストラリア各国は自国の工業製品、生産システムなどの輸出を間接的に支援することを目的として、単独または連携してアジア諸国に対する溶接教育・訓練活動を活発に展開しており、我が国の東アジアとの連携はこれまでもその重要性が唱えられてきたにもかかわらず、これら諸国に相当に遅れつつあ

る．大学間や研究機関の間で国際的に締結されている学术交流協定，日本溶接協会と各国溶接協会との間に結ばれている二国間交流協定などを基礎とした研究，教育，訓練に関する積極的な活動を東アジアで展開するための財政的，組織的支援が望まれる．

以上4つの課題に対して具体的方策を立案し実行するには，大学，(独)研究機関，学協会，産業界の効率的且つ相互に補完的な活動が望まれる．そのため，溶接・接合研究に関する全国共同利用研究所として設立された「大阪大学接合科学研究所」の機能を充実・強化させると共に具体的戦略に基づいた関連研究機関との連携関係を構築する必要がある．

III．各論

(1) 溶融溶接プロセスの進歩

1) アーク溶接

1800年代初頭に英国でのアーク放電現象の発見から80年後の1881年に，ロシアにおいて炭素電極アークを溶接に用いたのがアーク溶接の始まりとされている．続いて，同じくロシアで大気中裸金属によるメタルアーク溶接法が考案された．

現在使用されている各種のアーク溶接法は，1907年のスウェーデンESAB社創業者による被覆アーク溶接法，1933年の米国Linde社によるサブマージアーク溶接法，1926年のヘリウムガスシールド溶接(米国)，1930年のTIG溶接(米国)，1948年の米国Airco社のMIG溶接，1951年のソ連パトン研究所のエレクトロスラグ溶接であり，その基本的なプロセスは1960年までに欧米で開発された．ただし，エレクトロスラグ溶接は溶融スラグ発熱を熱源としており厳密にはアーク溶接ではない．その後，炭酸ガス溶接，マグ(アルゴン-炭酸ガス混合ガス)溶接，エレクトロガス溶接，プラズマ溶接，フラック入りワイヤ溶接など基本型からの発展したアークプロセスが次々と発明された．

安定したアーク溶接を行うにはアーク中での消耗電極(ワイヤ)先端での溶滴移行の制御が重要である．被覆アーク溶接を始めとしてフラックスを用いる溶接ではルチール(チタン酸化物)を添加して溶滴移行を安定させている．フラックスを用いないソリッドワイヤアーク溶接に対してもTiを含有させるが，チタン入りワイヤは炭酸ガスシールドアーク溶接が発展した我が国独自の技術である．一方，溶接電源は整流器型、サイリスタ型からインバータ型へと発展し，インバータ電源では溶接電流電圧波形制御によって，特にMIG, MAG溶接ではアーク中の溶滴移行を1滴1滴制御するようになっていく．このように，ここ10年の溶接材料と溶接電源の進歩により，脱技能で高能率かつ無欠陥のガスシールドアーク溶接を可能ならしめ，従来の被覆アーク溶接の大半を置き換

えるに至った。

アーク溶接のロボット化は我が国において省力化のために積極的に推進された。橋梁や造船業において設計の段階から多数台ロボットによる自動組立を目指した CAD/CAM 一貫システムが適用され、組立工場の省人化に貢献した。この自動化に対しては溶接状況のインプロセスセンシングがキテクノロジーである。消耗式電極ワイヤの揺動に伴う電圧・電流変化でワイヤ先端位置を知るアークセンサは 1962 年の米国 Airco 社によるが、我が国発明の高速回転アーク溶接技術などに適用され高速無人化自動溶接を可能にした。さらに CCD カメラなどによる視覚センサやレーザセンサによりワイヤ先端のアーク形状や溶融池の形状を計測する技術が開発されつつある。この技術は高温アーク下での溶接現象の検出を可能にし、溶接条件をインプロセスで瞬時に最適に制御する完全自動化に、さらに溶接品質の診断への適用の研究が遂行されている。

実際、溶接ロボットによるシステム化は、単に溶接工程のみならず生産管理システムの構築までを狙いとした CIM (Computer Integrated Manufacturing) へと展開されつつある。CAD から得られた製品の設計・生産情報から生産管理計画をシミュレーションし生産管理を最適化する研究がなされている。

1990 年代からの溶接材料、溶接電源、インプロセス制御技術の三位一体の技術開発によって、高生産性、無欠陥、省人自動化溶接に向かって急速の進歩を見せており、アーク溶接は 21 世紀においても接合の最重要プロセスであり続けるに違いない。

2) 高エネルギービーム溶接

電子ビーム溶接法は 1948 年頃の西独の Steigerwald の考案によるもので、1951 年に高電圧型溶接装置が、1954 年に低電圧型溶接装置が実用化された。電子ビームは宇宙航空機部品、原子力機器、自動車・家電部品などの高精度溶接に現在でも多用されている。1980 年代になると 100kW 級の高出力溶接装置が開発され、極厚板溶接に適用されるようになった。高エネルギー密度のビームを用いるため 100mm を越える厚板でも 1 パスでの溶接が可能であり、大型構造物溶接への普及が期待された。しかし、大型の真空チャンバーが必要なこと、そして開先裕度が低く、それに狭開先溶接固有の凝固割れと溶接金属(母材組成の凝固金属)の靱性対策から特別な鋼材が必要などの理由から、電子ビーム溶接の厚鋼材への適用は限定されたものとなっている。

光ビームであるレーザは 1960 年に米国の Hughes 研究所において人工ルビーによるレーザ発振に成功を収めて以来、次々と新しいレーザが開発された。1972 年に米国で 15kW 級の CO₂ ガスレーザ機が市販され、溶接に適用されるようになり、現在では 45 kW 級の高出力機が実用されている。固体の YAG レーザは CO₂ レーザと同時期に開発され、最近では出力も増し 5 kW 級が実用化されている。レーザビームは電子ビームのように真空チャンバーを必要とせず、高エネルギー密度熱源であり熱集中度が高く溶接熱影響も熱歪みも抑制できるので、自動車パネルなど薄鋼板の溶接に適用が拡大している。C

CO₂レーザー光の伝送には鏡を必要とするが、YAGレーザー光は光ファイバー伝送が可能でロボット溶接に最適で、近年その使用が増加している。

レーザー溶接部はビームエネルギーが集束し非常に高温に達しプラズマ(金属プラズマ)が立ち昇り、レーザービームが妨害され溶込みが浅くなり、また厚板溶接ではプラズマ発生によってキホール溶接部が乱され気泡欠陥が生じる。そのため、10mm厚以上の厚板溶接へのレーザー適用は困難とされていたが、アークとレーザー併用のハイブリッド技術が開発中で、厚板に対する安定したキホール溶接が実現しつつある。このように、レーザー溶接は発振器から溶接機、そして溶接現象制御に到るまで開発途上であり、レーザー溶接は溶接界の21世紀に更なる発展が期待される重要技術である。

(2) 圧接プロセスの進歩

電気抵抗発熱によって金属接合が可能なることを1856年に英国の物理学者 Joule が見いだした。その30年後の1885年に抵抗発熱加熱後加圧接合する現在のバット溶接法の特許を米国の Thomson が取得した。その後、スポット溶接、シーム溶接、高周波誘導加熱電縫溶接の各種抵抗溶接プロセスは20世紀半ばまでに開発された。抵抗溶接ではないが、アークを発生させ加圧接合するフラッシュバット溶接は1889年に米国で特許化されている。

抵抗溶接はアーク溶接よりも先に発明され100年を超える歴史を有する。自動車ボディやステンレス車体などにはスポット溶接が、飲料缶など各種容器製造にはシーム溶接が、鋼管製造には電縫溶接が、レールや鋼管同士の接合にフラッシュバット溶接が、安価で短時間(one-shot welding)かつ信頼性の高い必須の技術としてそれぞれの分野で用いられている。たとえば、自動車工場では保有溶接機の90%以上がスポット溶接機と云われているが、治具に固定されていない薄板を3次元空間で一瞬のうちに接合する代替の技術はないからである。

圧接溶接はone-shot weldingと呼ばれるように、一般に高速・短時間溶接であり溶接現象を把握し難く、従って溶接品質管理が難しい。高速の電縫鋼管溶接ではCCDカメラで観察した溶接現象と溶接欠陥発生との関係を研究し、最適溶接条件をオンラインでフィードバックして無欠陥操業を可能にする技術を確立している。圧接部の溶接欠陥は非破壊検査で検出できないので電縫鋼管は信頼性が低いとされていたが、最高の信頼性が要求される高圧ガス輸送ラインパイプへ2001年になって初めて電縫管が適用されるようになった。

スポット抵抗溶接での最大課題は溶接時の金属スパッタの発生である。スポット溶接は重ね溶接であるため、溶接状況が監視できないが、これを擬似的に可視化し、溶接現象をリアルタイムにシミュレーションして溶接条件を制御して金属スパッタ発生を防止するシステムが開発されつつある。このように抵抗溶接は100年以上も前に開発され

たのであるが、最近のシミュレーション計算とオンライン監視技術の進歩により、溶接品質が格段に向上している。組立加工の必須のプロセスとしての圧接技術は今後も継続的な進歩を遂げるに違いない。

(3) 固相接合およびろう接プロセスの進歩

1) はんだ付

ろう接はろう自体が溶融して被接合物は溶融させない接合技術で、ろう溶融温度が450 以下をはんだ付け (soldering) と称する。はんだ付はメソポタミア時代に用いられており、5000 年以上の歴史を持つ技術であり、装身具を始め多くの金物の接合に適用されてきた。

20 世紀中頃に出現した電子機器コンピュータは、真空管からトランジスタ、IC を経て LSI の時代になると飛躍的に発展し、その組立技術の中心的役割を担ってきたのが、はんだ付である。回路の高集積化・高密度化により接続端子数が増加し、端子の間隔は狭くなり、現在ではピッチ間隔は 0.25mm のはんだ付が実施されている。1975 年頃はプリント配線板の孔にリード線を挿入しはんだ付されていたが、1985 年代になるとプリント基板上に印刷ではんだを供給し、リードなしのチップ部品を配置し加熱接合するようになった。これを実装と称している。

表面実装が本格的に導入されると、これまで 5000 年以上の間全く問題ともしなかった、ぬれ、接合界面ボイド、熱応力等々、はんだの冶金的・力学的・電気的性質に関する諸問題が一気に噴き出した。コンピュータの 1 プロセッサで接続点が数万・数百万点に達し、そのすべての接続点に非常に高い信頼度を要求する世界であるのに対して、応力ひずみ曲線すらなかったのがこれまでの世界であり、20 世紀の終わりに出現した、はんだ界の一大変革であった。

さらに、追い打ちをかけるように出現した大きな問題は環境保護による鉛規制である。鉛錫合金のはんだは、融点、ぬれ、耐久性、価格の観点から卓越した性質を兼ね備えており、5000 年間も変化の無かったゆえんである。そのはんだ合金の内の鉛を他の金属に置き換えて同等の性質を実現することは困難を極めることである。我が国では 1998 年に主要メーカーが相次いで鉛フリーはんだを全面導入することを宣言した。価格と性能のバランスの取れた鉛フリーはんだの開発が 21 世紀初頭の焦眉の課題となっている。

2) ろう付

溶融温度が 450 以上のろうを用いる接合法をろう付 (brazing) と呼ぶ。はんだ付と同様にろう付技術の歴史も古く、紀元前 3400 年にメソポタミアで銀ろうや金ろうが使用された。ろう付は母材を溶融させないので、溶接すると割れが発生するような材料、溶融すると脆化相を生ずる異種金属、さらにセラミックスなど非金属の接合に広く用いら

れてきた。

ろう付は現代の最先端工業製品であるジェットエンジンの製造に欠くことのできない技術である。寸法精度と耐熱性を要求されるタービンブレードなどに金ろうやパラジウムろうが使用される。1975年に融点降下材を用いて等温凝固させる方法が米国で発表された。これは液相拡散接合とも呼ばれ、母材と同等の接合部が得られるので超耐熱合金の接合に期待された技術であった。この技術のポイントは融点降下材を含むインサート材（ろう材に相当）にあり、近年の急速凝固技術の進歩により要求組成を有するインサート材をアモルファス箔で容易に製造できるようになった。現在、ガスタービンやジェットエンジン等の耐熱合金の接合にアモルファス液相拡散接合が適用されるようになった。

ろう付においても溶接技術と同様に著しい自動化の進展を見せている。ベルトコンベア方式により水素やアルゴンの還元雰囲気下のろう付装置の普及により、自動車部品や熱交換機が連続で多数箇所ある接合箇所の同時接合が可能になった。本技術により安定した品質を保つ各種部品が大量に生産されている。

ろう付も歴史ある技術であるが、20世紀後半から顕著な技術革新を見せた。溶接不可能な製品の製造に不可欠な技術として今後も更なる研究開発が期待されている。

3) 摩擦攪拌接合

1991年に英国のTWIから摩擦攪拌接合（FSW、Friction Stir Welding）技術が発表された。これはボーリング（穿孔）盤で用いるようにツールを被接合体に押さえつけ回転させ、その摩擦熱で母材を加熱しツール先端のピンで母材を機械的に攪拌混合させて接合するものである。溶接のように母材を溶融させないので異種材料の接合も可能である。現在、アルミニウム、銅、マグネシウム、チタンなど比較的低融点材料の接合に適用されている。

FSWは機構上の制約から主に突合わせ継手にしか適用できないが、接合部は溶融されないため冶金的問題は少なく、接合部温度は母材の溶融温度の80%程度で熱影響が融接に比べ格段に小さい。従って、溶接熱変形に悩まされてきたアルミニウムとアルミニウム合金の接合に適した接合法である。さらに、アーク溶接（ミグ溶接）では溶接部凝固割れが発生し溶接不可能であった航空機用ジュラルミン（高強度アルミニウム合金）の接合も可能にする。

FSWは発明されてから10年も経過しないのに、我が国ではアルミ鉄道車両の製造などに全面的に使用されるようになった。宇宙航空機の接合は依然としてファスナーと接着である。欧州と米国の航空機会社は超超ジュラルミンの接合にFSWの適用を始めた。FSW技術は21世紀の航空機をファスナー接合体から溶接構造一体化を実現させる可能性を抱いている。ただし、現在の航空機は損傷許容設計が基本であり、溶接一体構造の安全性（損傷許容性）を証明することが必須である。

このように、FSW 技術は製造面での技術開発から従来の構造設計の概念をも変革させる新技術であり、鉄鋼材料への適用を含め 21 世紀において更なる改良開発が期待される。

(4) 溶接構造用材料の進歩

1) 鉄鋼材料

1921 年英国において、これまでリベット構造が主体であった鋼船に溶接が全面的に適用され全溶接船が初めて進水した。我が国ではそれに遅れること 1 年にして長崎造船所で 421 トンの諏訪丸が全溶接船として完工した。その後、我が国の溶接構造用鋼は造船とともに進歩することとなった。すなわち、1950 年に造船大板継ぎ溶接で母材サルファー偏析起因の溶接金属割れを契機にセミキルド・キルド鋼使用規定、1970 年代のチタン系析出物によって溶接熱影響部組織粗大化を阻止する造船大入熱溶接用鋼の開発、1980 年代の制御圧延・加速冷却による高溶接性高靱性鋼いわゆる TMCP 鋼の開発は主として造船材を対象にしてきた。

以上の新鋼材の開発に当たっては、学会（日本溶接協会、日本造船学会）と業界（鉄鋼、造船）が委員会を組織して、新開発鋼の適用に伴う問題点を協力して解決し、その普及を促進させてきた。この産学協同の委員会組織による新鋼材開発と普及を促進する方式は、我が国固有のものであり、常に世界をリードする日本の鋼材の発展に貢献したことは間違いない。

フラックスを用いる溶接材料は溶接作業性（アーク溶滴移行安定化）向上のため、古来よりルチール（チタン酸化物）を使用してきた。そしてチタン系溶接金属は結晶粒が細かく靱性に優れることは周知であったが、溶接金属中に微細分散するチタン系酸化物を核にして微細な結晶が溶接冷却中に析出するのがその理由であることが判明したのが、1980 年であった。その発見を鋼材に応用し、これまで夾雑物として忌み嫌われた酸化物を積極的に利用し溶接熱影響部高靱性を保証する鋼材が製造され、1987 年に北海大型海洋構造物に全量適用された。さらに、この酸化物を微細結晶粒析出核としてのみならず溶接時の結晶粒成長を阻止するピンニング粒子として利用する大入熱溶接構造用鋼が 2000 年になって開発されている。さきに大入熱溶接用鋼について述べたが酸化物は析出物より熱的に安定であるので、当然のことながら酸化物分散鋼は超大入熱溶接に適用できる。これらの鋼材開発は日本の水準の高い製鋼技術に負うところが大きい。

溶接は厚板のみならず、薄鋼板の接合においても重要である。自動車用防錆鋼板には亜鉛めっきが施される。めっき層には防錆性ばかりでなく、プレス成形時の潤滑性と組立時のスポット抵抗溶接性も併せて要求される。スポット溶接においては銅電極を交換時期の長い（連続打点性が高い）方が望ましい。そのためめっき層表面には鉄亜鉛合金層の上に微妙な酸化皮膜処理を施してスポット溶接性を高めるなどして、良溶接性自動車用鋼板が開発されている。錫めっきが施されている飲料缶は抵抗溶接の一種である

高速のマッシュルーム溶接によって製造される。錫は高価なため錫をナノメータオーダーで島状分散めっきして目付量を低減し溶接性を向上させるなど、めっき薄鋼板の分野でも溶接性の改善は常に重要な課題である。

以上は、溶接用鋼材の進歩の一例である。鋼材はTMCPのように圧延工程で組織を制御し強度靱性を向上させ、その結果として合金元素添加量を低減でき溶接性を向上させ得る。一方、溶接金属は溶接ままで、云うならば鑄造のままでも強度靱性を確保しなければならず、合金元素の添加量は低減できない。従って、高強度鋼になるほど母材と溶接金属の乖離が顕著となっている。予熱温度低減鋼として母材は開発されたけれど、相対的に合金組成の高い溶接金属が割れ感受性が高いため、結果的には施工時の予熱温度は全く低減できないのが実状である。靱性に関しても、溶接性に優れた鋼材では溶接熱影響部は改善さあれても溶接金属の方が靱性は低いため、鋼構造物全体としての安全性は改善されていない。

21世紀における構造用鋼の溶接の課題は溶接性と靱性に優れた溶接金属の開発にある。

2) 非鉄材料

アルミニウムとアルミニウム合金は軽量であるので、宇宙航空機や車両に用いられる。航空機には溶接部軟化のために溶接は適用されない。しかし、ロケット燃料タンクや推進薬タンクには気密性から2000系または7000系アルミニウム合金の溶接構造物であった。最近ではH-IIロケットの1、2段推進薬タンクでは2219合金でミグ溶接（Arシールドアーク溶接）によって製造されている。

車両に関しては1960年代にアルミニウム合金で製造が開始され、1985年に新幹線車両の側構体にアルミニウム合金が適用された。アルミニウムは鉄鋼に比べて熱伝導率が高く剛性率が低いので、アーク溶接では変形が最大課題であった。しかし、摩擦攪拌接合の項で述べたように、FSWプロセスは接合部軟化も溶接変形も最小にする接合法として脚光を浴び、21世紀に入ってからFSW技術が地下鉄、新幹線用アルミニウム車両の接合に大々的に使用されるようになった。さらに、この技術は欧米では航空機の製造に適用されている。

アルミニウムは鉄鋼材料のように低温で脆化する現象を示さない。そのため、LNG（-162℃）運搬船の球形タンクや陸上LNGタンクに5083アルミニウム合金厚板が使用され、我が国では1980年代にミグ溶接での施工が始まった。

構造用の非鉄材料としてはチタンとチタン合金の使用量が近年になって増加している。純チタンは主に厳しい耐食性を要求される構造に、チタン合金は主に軽量と高強度を同時に満足する必要のある構造物、とくに航空機に用いられる。

1983年のしんかい2000の耐圧容器に、1993年のしんかい6500の耐圧殻にTi-6Al-4V合金が用いられ、電子ビーム溶接で組み立てられた。この場合、軽量、高強度、耐海水

腐食性を満足している。一方、純チタンの大型構造物としては、純チタン板を熱間圧延で鋼板に接合したチタンクラッド鋼を 1993 年に東京湾横断道路の橋脚に適用した例が挙げられる。

純チタンは耐食性と美観に優れており、屋根材など建築用への使用が増している。その溶接にはティグ溶接または抵抗溶接が適用されるが、大気に対するシールドに留意すれば、溶接は問題なく実施でき、今後、チタン溶接構造物が多く見られるに違いない。

(5) 溶接構造の損傷と破壊力学の進歩

1) 溶接構造と破壊事故

溶接構造の一つの特徴は、構造が溶接によって一体化されているため破壊損傷が一旦発生すると全体破壊につながる可能性のあることである。一方、溶接部は力学的、材質的な不連続部であり、切欠き部や破壊靱性劣化部ともなる。鋼構造の損傷原因は、約 25% が材料不良、25% が施工不良、50% が設計不良に起因するとされるが、それらが溶接部に集約されて溶接部が破壊の起点となることが少なくない。

大型溶接構造の脆性破壊事故としては、1938 年のベルギーの Hasselt 橋（全溶接トラス橋）の折損事故が有名である。下弦材とガセットの溶接部よりき裂が発生し応力集中部の溶接欠陥が原因とされている。脆性破壊で最も有名な事故事例は、米国の戦時標準船（全溶接船、リバティ船など）に多発した事故である。第二次大戦中全溶接で建造された 5,000 隻のうち 20 隻以上が静かな海上でさえ折半に近い大規模損傷を受けたというものである。約 100 隻を対象に、破壊した鋼板について得られたシャルピー衝撃試験から使用温度の下限を吸収エネルギー 15ft-lb (21J) の遷移温度とする概念が生まれ、その後の鋼材靱性規格の基本的考え方につながっている。

我が国における脆性破壊事故としては、1968 年の高張力鋼球形タンク水圧試験時の破壊事故、1969 年のぼりぼあ丸と 1970 年のかりふおるにあ丸の折損事故を経験している。その後、1995 年 1 月 17 日に起った兵庫県南部地震では、高層マンションの外部鉄骨で脆性破断が生じた。我が国の鉄骨建築にとって初めて経験する例である。これも契機として、溶接界、建築界と鉄鋼界が協力して溶接性と耐震性に優れて建築用鋼材規格を提案し、SN 鋼として JIS 化されることとなった。さらに、溶接条件がかなり特異である建築鉄骨溶接に適する溶接材料の開発が、現在、鋭意進められている。

しかしながら、問題なのは事故調査の過程で、脆性破断は発生したかったが多くの建造物に溶接の不備が明るみにでたことである。角回し溶接部同士の終端間距離が数 mm しか離れていないとか、溶接終端部でクレータ処理が全く施されていないなどである。高度成長期の建設で人不足であったにしても、工業製品の信頼性の高さで日本の繁栄を築き上げてきた誇り高き品質管理が溶接現場で消え失せたとしか云いようがない。

道路橋、鉄道橋など社会基盤施設に生じる疲労損傷もこれからの重要な課題である。

第2次世界大戦後の我が国の本格的な社会資本整備は1960年代から始まったが、その時機に鋼橋の継手形式はリベットから溶接に変わった。溶接構造の全面的な採用は、鉄道橋では東海道新幹線が、道路橋では東名高速道路などが最初である。東海道新幹線の橋梁は開通10年後ころから疲労損傷が報告され、現在も補修・補強がなされつつ供用されている。道路橋は鉄道橋に比べ荷重条件がさほど厳しくないことから設計において疲労は考慮する必要はないとされていたが、1980年代になると多くの道路橋に疲労損傷が報告され始め、最近では疲労損傷は鋼製橋脚までに及んでいる。疲労損傷の原因としては不適切な溶接継手ディテールの採用も多いが、溶接製作時の溶込み不足や割れなどの欠陥もかなりの数が報告されている。

社会基盤施設は需要の高い順に整備されていく。それは使用環境の厳しい構造物ほど成熟度の低い技術によって建設されていることを意味する。従来から橋梁の設計供用寿命は50年程度と設定されており、先に述べた多くの構造物はその年限に近づきつつあるが、それらの社会的役割や周辺環境からはその全面的取り替えは極めて困難である。また、我が国の最近の厳しい財政状況下で、欧米に比べてまだ十分とはいえない社会基盤を整備する上でも、既設社会基盤施設を利用せざるを得ない。膨大な数のしかも多様な問題を抱えた既設構造物の疲労性能評価と抜本的「もの」直し技術の確立は喫緊の課題である。

2) 破壊力学の発展

構造物における「き裂」の概念が認識されるようになったのは、各種構造物の損傷事故を契機としている。完全脆性体強度が理論強度よりはるかに低い理由を潜在する欠陥のエネルギー平衡によって説明した1920年のGriffithの論文は、その後のき裂材(き裂を含む部材)の強度評価体系、すなわち破壊力学の礎となった。

1950年代の後半、Irwinはき裂端近傍の応力場を一義的に特徴づけるパラメータ、応力拡大係数(Stress Intensity Factor)の概念を提案し、線形破壊力学の始まりとなった。しかし、米国では船舶、圧力容器など溶接構造用鋼を対象とした分野では遷移温度アプローチが主役で、破壊力学が取り入れられるのは米国ではずっと後になってからである。

溶接構造用鋼のように強度が比較的低く、かつ韌性に優れた材料の場合、通常の試験では塑性降伏を伴うので線形破壊力学の単純な適用は困難である。1963年に英国TWIのWellsが、同時期にBilbyらが相次いでき裂開口変位(CTOD: Crack Tip Opening Displacement)を破壊のパラメータとするCOD仮説を提案した。これは塑性降伏条件下でも成り立つ弾塑性破壊力学の始まりとなった。さらに1966年のBurdekinらTWIグループのCTOD概念による欠陥評価方法を示したデザインカーブ法の提案と1972年のCTOD破壊韌性試験法の確立が溶接構造用鋼の韌性評価におけるCTODの地位を確固たるものにした。

破壊力学を取り入れた合目的的欠陥の安全性評価基準は 1980 年に英国と我が国において規格化された。これらの規格では、CTOD が破壊力学パラメータとして用いられている。その後、英国規格、日本溶接協会規格、米国石油協会規格、欧州共通規格化（CEN）の規格、基準では検出欠陥の評価のみでなく、予寿命評価の手法までもが示されているものが多く、いずれも確率論に基づいた信頼性工学を取り入れて判定に必要な各情報に部分安全係数を設けているのが特徴である。設計、維持管理基準の性能規定化が進んで行く中、このような評価基準の重要性は今後増大していくものと思われる。破壊確率、損傷確率の概念を取り入れた設計手法は限界状態設計法として建設、橋梁の分野で既に取り入れられている。破壊損傷の経済効果、社会的影響を考慮した信頼性工学による Risk Based Inspection の思想もこの流れの中にあり、この方面の研究が今後 21 世紀に向け盛んになるものと思われる。

（6）溶接教育・訓練の変遷

わが国の溶接技術者教育は、企業内における OJT 等を除けば、大学、高専、工業高校等で教授された教育体系を無視するわけにはゆかない。大学では、1944 年に大阪大学工学部にわが国最初の溶接工学科が設置され、溶接工学を一貫して教育する機関が誕生した。その後 1985 年に生産加工工学科と改称したものの多くの卒業生を輩出し、溶接に関係した広範囲の産業界に勤務し、溶接界の急速な発展に寄与してきた。

また、大阪大学以外でも、金属、機械、造船、建築、土木等の学科に溶接に関する講座があり、溶接教育がなされてきた。1975 年頃、溶接の講義の行われていた大学学科の数は 33 を数える。大学以外でも職業訓練大学校など数力所に溶接専門の教育機関が存在していた。

しかしながら、1990 年代になって多くの学科や講座がその名称から溶接の文字を取り去っており、中には実質的に溶接を教科から除外しているところが増えてきている。また、溶接専門の教育機関も日本溶接専門学校を除いて消滅した。

一方、溶接技術者に対する産業界でそのニーズが減少しているわけではない。日本溶接協会が実施している技術者認証において、溶接管理技術者については認証者の数は必ずしも減少しておらず、2000 年末の受験者はかえって増加している。

溶接技術者に対するニーズは、グローバル化の普及によって変化の兆しをみせている。これは ISO 9000s と品質システム審査登録制度の普及である。ISO 9000 では、製品の要求事項に対する適合性が容易に又は経済的に検証できないような工程は、特殊工程として定義されている。そして ISO 9000s に対応して改訂された ISO 3884 94 (JIS Z-8400-99) 「溶接の品質要求事項」では、溶接を代表的な特殊工程としている。そして ISO 9001 では、特殊工程を確定すること、及び妥当性確認を行うことを規定している。妥当性確認には、重要な事項としてそれに携る要員の認証を規定している。

このような国際規格体系の発行に呼応するように、ヨーロッパ連合では国際溶接技術者資格制度を構築し、1991年より実施してきている。さらにこの制度を基として、全世界を対象とした資格制度とする検討が11W(国際溶接学会)で行われ、1998年から実施に移されてきた。現在はヨーロッパ諸国が中心であるが、日本、中国、米国、オーストラリア、カナダ、ロシア、ウクライナなどが受審中で、一部はすでに承認を受けた。

この11W溶接要員資格制度の特徴は教育・訓練を重視していること、学歴条件を必須としていることにある。教育・訓練時間は国際溶接技術者(IWE)資格に対しては座学が386時間で実技が60時間の履修を課している。また、座学に対して詳細なシラバスが規定されていて、変更は許されない。

現在まで、11Wシラバスに記載したような一貫した溶接・接合教育を実施できる機関は我が国内では無さそうである。米国、オーストラリア、英国では溶接工学科のある大学で11Wシラバスのコースの開設を始めた。欧州各国では溶接学・協会の中に教育・訓練機関を設置して教育を行っている。我が国の溶接学・協会はそのような長期の教育・訓練を実施する機能は無い。重厚長大型の産業が我が国から消滅する筈が無く、溶接教育は今後大きな問題となり、顕在化するに違いない。大阪大学で検討されている高度溶接技術者教育コースの設置が期待される場所である。

溶接技能者については、溶接工程に直接関わる溶接要員として、重要な位置付けにある。前記の欧州連合溶接技術者資格制度では、既に溶接技能者(いわゆる Welder)として、資格制度が確立し実施されてきている。しかしながら、Welderと溶接のInspectorについては、欧州と日米を含む他の国々との間で、制度の差が大きく議論が紛糾している。しかしながら、早晩世界規模での統一資格制度が生まれるものと考えられる。欧州の教育・訓練重視の考え方が取り入れられると予想されるので、教育訓練機関の貧弱な我が国では、技術者同様の問題となるのは必至である。高度成長期には、ほとんどの企業が充実した企業内訓練で技能者を養成していたが、企業経営の厳しい中その余裕は無く、今後は難しい。

各都道府県等に設置されている職業開発機関やポリテクセンター等の中に、旧溶接料の機能が金属加工科等の中で温存されているようであり、早急に復権することが望まれる。技能の伝承や教授はこれらが非言語系の分野であるだけに、情報技術や自習に頼るわけにはいかない。

また、昨今の溶接現場等のいわゆる3K職場からの若者離れは著しく、若年層の減少と相まって、今後は外国人の起用も進むものと予測される。この場合には言語、文化の違い等が加わり、一層深刻な問題が生ずると予測される。

執筆協力者

- 入江 宏定 (元 物質材料研究機構 力学機構研究部長)
恩沢 忠男 (東京工業大学工学部機械知能システム学科教授)
佐藤 正晴 (神戸製鋼所溶接カンパニー技術開発部主任研究員)
杉谷 祐司 (元 日本鋼管エンジニアリング研究所主幹研究員)
野村 博一 (元 日本鋼管工事 技監)
藤原 力 (三菱重工業名古屋航空宇宙システム製作所
研究部材料研究課 課長)
松山 欽一 (MIT Mechanical Engineering)
三木 千尋 (東京工業大学工学部土木工学科 教授
日本学術会議第18期接合工学専門委員会委員)
宮田 隆司 (名古屋大学工学研究科材料機能工学専攻 教授
日本学術会議第18期接合工学専門委員会委員)
百合岡信孝 (新日本製鉄 顧問
日本学術会議第18期接合工学専門委員会幹事)