

最近の溶接技術開発と自動化技術の動向

Recent Trend of Welding Technology Development and Applications

大井 健次 OI Kenji JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部長・博士 (工学)
村山 雅智 MURAYAMA Masatoshi JFE エンジニアリング 産業機械本部 重工センター 主幹

要旨

近年、自動車分野での環境負荷物質の低減を考慮した車体の軽量化や国際競争力を向上するための施工性向上への取組みが進められる中で、鉄鋼材料には超ハイテン化や性能確保のための複雑な部材形状が求められている。また、厚板・鋼管分野では鋼構造物の大型化や輸送効率の向上が志向され、使用される鋼材の厚肉・高強度化が急速に要求されるようになってきた。これらの先進的な鉄鋼材料を使いこなすためには、溶接技術が必要不可欠であり、材料の進歩とともにさまざまな溶接技術が開発され適用されつつある。本論文では、JFE グループにおける最近の溶接技術の開発状況と実施工における溶接自動化技術の動向について紹介する。

Abstract:

Resently, weight reduction of car bodies to reduce the environmental load substance and workability improvement to enhance the international competitiveness have made progress in the field of automotive materials. Under such circumstances, steel materials are required to have super high tensile strength and to be able to deal with complex structures of parts with high performance. In the field of thick plates and steel pipes, trend of mega-structural construction and high efficiency transportation leads to the strict demand of thick and high tensile strength steel products. To fully utilize such advanced steel products, the innovation of welding technologies are necessary and various welding technologies have been developed and applied with the progress of steel materials. This paper introduces the developments and the actual applications of state-of-the-art welding technologies in JFE Group.

1. はじめに

鉄鋼材料の適用については、鋼材そのものの開発が重要であることに加え、優れた鋼材を活用するための施工技術の発展が必要不可欠である。近年は鋼材が軟鋼からハイテンに代替されることが進み、さらには超ハイテンの適用が増加するなど、難加工性、難溶接性の材料選択が行なわれる方向に革新化される傾向がある¹⁾。これらのハイテン材を使いこなし、国際的にも技術的に優位な状況に立つには、材料に伴った溶接技術の進歩が強く求められる。自動車分野においては、抵抗スポット溶接をはじめ、アーク溶接やレーザー溶接など種々の溶接法によるハイテン材の施工性が、軟鋼と同等であることが求められるものの、母材強度向上に相応した継手強度の確保や疲労特性、耐割れ性などの要求を従来どおりのプロセスで満足することは極めて困難な状況にある。

厚板分野においては、コンテナ船の大型化や建築物の高層化に伴う鋼材の高強度・厚肉化が進んでいる。ここ数年来これらの進歩に伴って、造船分野では YP460、建築分野では HBL[®]385 や HBL[®]440 といった高強度の厚板を大入熱

溶接によって高効率で施工する技術が開発されてきたが^{2,3)}、最近では 80~100 mm^t といった厚肉材が要求されるようになり、これまでの 1 パス大入熱溶接技術では施工性および継手特性を満足できない状況となりつつある。そのため、新しい低入熱の溶接技術の開発や高性能な溶接材料の開発が求められている。

さらに、鋼管分野(UOE 鋼管)での溶接施工性については、エネルギー分野の活性化によって輸送効率の向上や環境対策あるいは油田の深海化が進められ、厚肉で高強度の鋼管の需要が増大し、鋼管製造における施工能率の向上が強く求められている⁴⁾。

以上のような背景のもと、本論文では自動車分野における最新の溶接技術の開発や施工性を向上させるための技術、厚板・鋼管分野における厚肉材への対応を考慮した狭開先溶接技術や大入熱溶接における新しい溶接材料、さらには UOE 鋼管の施工技術である多電極サブマージアーク溶接についての最新のプロセスを概説する。

また、溶接技術の中で重要な疲労強度向上技術や最新の溶接技術、品質保証技術についても言及する。実施工については JFE エンジニアリングにおいて実用化されている主な溶接自動化技術の現状について概説する。

2014 年 6 月 30 日受付

2. 自動車分野における技術開発状況

自動車分野における抵抗スポット溶接ではナゲット径を確保し、目的の継手強度を得るとともに、その施工のロバスト性が求められる。鋼材がハイテン化するとともに、その板組も多様化し、設計によってはむしろ厚板化する場合もある。その場合は厚肉構造部材と外板との3枚重ねの溶接が求められる。安定したナゲットの形成が難しくなる。このような要求に対して、**図1**に示したようなインテリジェントスポット[®]溶接を開発した。本溶接は、これまでスポット溶接で用いられてきた一定加圧と一定電流において溶接するのではなく、溶接中に加圧力や電流を変化させることで安定したナゲットを形成する技術であり、実適用がなされている⁵⁾。

また、ハイテンの溶接においては、高強度になるにつれて十字引張り継手強度の確保が難しかったが、溶接継手部の偏析や強度分布をコントロールすることによって安定した継手特性を満足するためのパルススポット[®]溶接技術を開発した⁶⁾。この技術は、本通電後にパルス的な短時間・高電

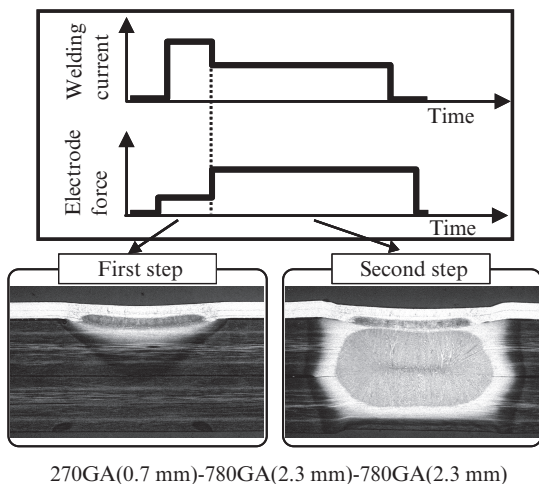


図1 インテリジェントスポット[®]溶接プロセスの模式図

Fig. 1 Schematic illustration Intelligent Spot[®] welding process for three-sheet-joint

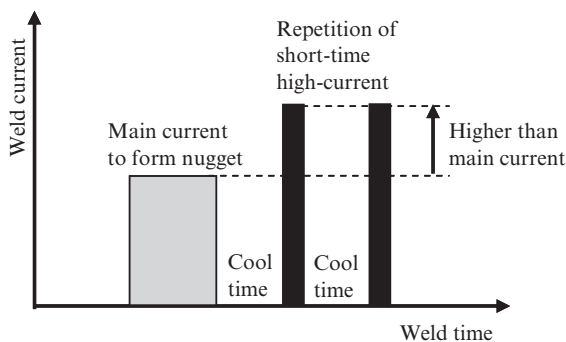


図2 パルススポット[®]溶接における溶接電流パターン

Fig. 2 Weld current pattern of Pulse Spot[®] welding

流の後通電を行なうことを特徴とする技術であり、従来から行なわれてきたテンパー通電による高強度部の焼もどし効果を利用した通電パターンに比べて、短時間でより安定した特性を得る方法である。典型的な通電パターンを**図2**に示す。さらに最近では、新しいプロセスに加えて、ハイテン材の抵抗スポット溶接部の破壊力学的な解析を行ない、その強度特性の支配因子の検討を行なうことで、継手特性向上のためのアプローチも試みている⁷⁾。

このようにハイテン材に対する独自の抵抗スポット溶接技術を開発するとともに、施工能率の向上を目的とした技術開発も行なっている。特に、自動車の組立て工程においては、抵抗スポット溶接を行なうために、ロボットに溶接ガンを持たせて、鋼板の両面から溶接部にアクセスする必要があり、そのためのアクセス経路や両面からのガン挿入のスペースの確保が必要であった。そこで、片側からのアクセスで溶接可能な片側スポット溶接技術が開発されている。従来から2本の電極によるシリーズ溶接方法も検討がされてきたが、電流の流れを安定して確保することが困難であり、インダイレクト方式による片側スポット溶接を開発した⁸⁾。本方法では部材によってアースを取る位置の最適化が必要であるが、それに加えて**図3**に示すように溶接中に加圧力と電流を変化させることを特徴とし、分流による不安定さを抑制可能な、ロバスト性に優れた溶接技術である。

片側からアクセスする溶接技術としては、レーザー溶接も重

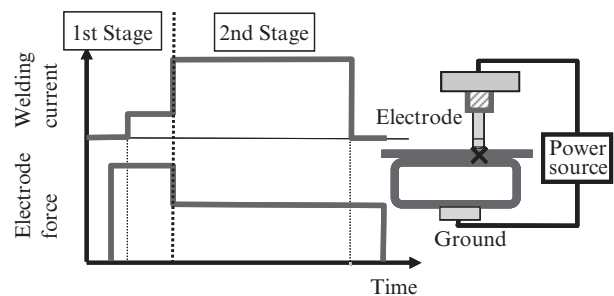


図3 片側スポット溶接における電流・加圧力パターン

Fig. 3 Conditions of single-side spot welding

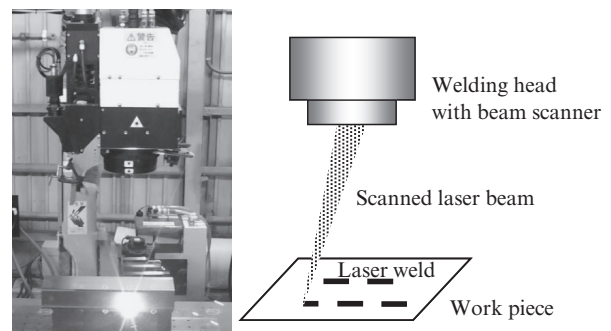


図4 リモートレーザー溶接の模式図

Fig. 4 Schematic diagram of remote laser welding

要な技術の候補である。最近ではレーザー発振器と光学系などの周辺機器の進歩により、リモートレーザー溶接（図4）と呼ばれる高効率の溶接技術が開発され、国内外で幅広く適用が進められている⁹⁾。レーザービームを利用する溶接技術については、設備のコストや安全対策など多くの課題があるものの、抵抗スポット溶接の点接合から連続・線接合への転換により、ハイテン適用による薄板厚化と剛性向上の両立が可能となることが期待される¹⁰⁾。また、足回り部品でのレーザー・アークハイブリッド溶接やドア周りのリモートレーザー溶接など、それぞれの部位に適合するレーザー溶接方法を選択することで、今後ますますレーザー溶接の適用が広がると予想される。

3. 厚板・鋼管分野における技術開発状況

近年の造船および建築分野では構造物の大型化により使用鋼材の高強度・厚肉化がますます進んでいる。造船分野では遠距離貨物の輸送効率を考えコンテナ船の大型化が18000TEU（Twenty-feet equivalent unit: 20フィートコンテナ換算個数）まで進み、高強度鋼の板厚も80~100mmにおよぶ設計が志向されている。そのため、従来の大入熱溶接技術¹¹⁾にて1パスで溶接されていたハッチサイドコーミングなどではエレクトロガス溶接（EGW）の2電極化やロンジでのCO₂アーク溶接での小入熱多層盛による施工を余儀なくされているのが現状である。ただし、2電極化によるEGWでは入熱量の増大や高度な施工技術を要する。一方、CO₂アーク溶接の多層盛溶接では施工時間・コストの増大などが問題となる。そこで、入熱量の低減と施工能率の向上が可能な狭開先溶接技術の開発が進められている。中でも、CO₂アーク溶接でありながら、スプレー状の溶滴移行を実現したJ-STAR[®] Welding¹²⁾は低スパッタで深溶込みが可能であり、狭開先溶接に最も適した一つの方法である。図5にJ-STAR[®] Weldingの構成を示す。J-STAR[®] Weldingは、こ

れまでのワイヤプラス（Electrode positive, EP）に対して、逆の極性ワイヤマイナス（Electrode negative, EN）を採用した溶接法であり、アーク安定剤として微量のREM（Rare earth metal）を添加したワイヤを用いる。J-STAR[®] Weldingは従来の溶接電源を利用し、ワイヤを選択するだけで、狭開先溶接が可能であるため、安価で高効率の施工が可能であり、溶接パス数の削減や溶接量の低減から、建築分野や橋梁分野においても厚肉部への適用が可能であると考えられる。

一方、建築分野で必要とされるボックス柱のダイアフラム溶接ではエレクトロスラグ溶接（ESW）が用いられる。ここでは小入熱多層盛という手法が困難であり、板厚の増大とともに超大入熱溶接を余儀なくされ、溶接金属の特性を安定して得るのが難しい問題がある。また、母材の希釈が大きいため、施工条件によって特性の変化が大きく、条件に応じた溶接ワイヤやフラックスの成分調整が重要とされているものの、ソリッドワイヤでの成分調整はコストと時間が必要となるのが現状である。そこで、エレクトロスラグ溶接用ワイヤをメタルコアードワイヤ（MCW）による設計とし、低コストで施工条件に応じた迅速な成分調整を可能にした技術開発を行なっている¹³⁾。また、ソリッドワイヤにおいて安定的な添加ができない元素についても、MCW化により容易に添加可能となり、極厚材でのESW溶接金属の特性の安定化を可能としている。これらのワイヤはすでに大臣認定を取得し、実用段階に向けて最終的な試験を行なっている。

鋼管分野での技術開発については、UOE鋼管の製造過程で行なわれる溶接管の縦シームに適用される多電極サブマージアーク溶接（SAW）技術について紹介する。近年は厚肉・高強度鋼管のニーズが高く、溶接工程が製造での律速となったり、入熱過多によるHAZ（溶接熱影響部）靱性の低下などが懸念されるようになってきた。これまでは、母材や溶接金属成分を大入熱溶接に適するように設計し、多

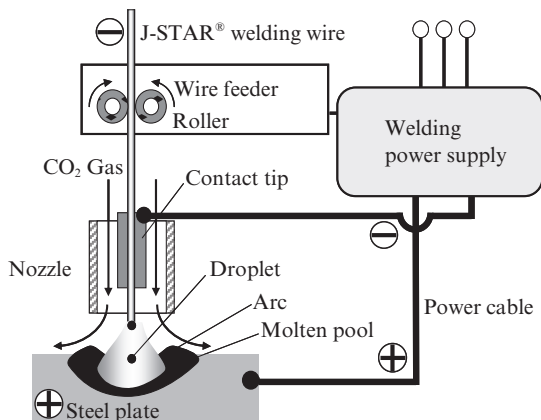


図5 J-STAR[®] Weldingの模式図

Fig. 5 Illustration of setup for J-STAR[®] Welding

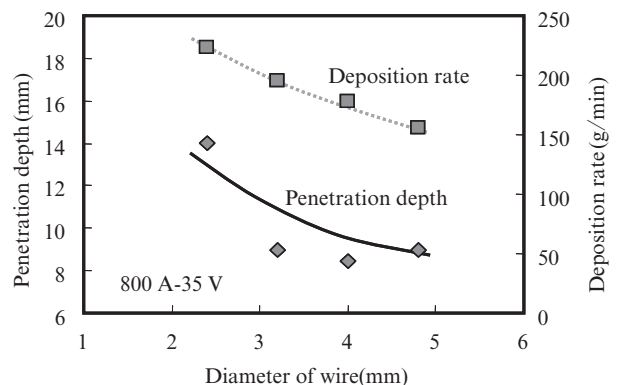


図6 ワイヤ溶着速度と溶込み深さに及ぼすワイヤ径の影響

Fig. 6 Effect of wire diameter on penetration depth and deposition rate

電極 SAW によって大入熱で高速化する検討が中心であったが、従来では検討されていなかった細径でのワイヤを用いることで、**図 6**に模式的に示したように、同一電流においても深溶込みと溶着効率の増大を可能とし、溶接部の溶込み形状の制御の自由度を向上させることで、効率的な溶接を可能とした省入熱 SAW 技術が開発された¹⁴⁾。この結果、理想的な溶接ビードを付与できるようになり、溶接欠陥の発生も抑制できる厚肉材に対する理想的な高速溶接技術が開発できている。

4. 基盤技術開発の現状

溶接金属の組織制御については、1970年代から多くの研究が行なわれ、アシキュラーフェライト組織による Ti-B 系での組織制御が最適とされ、多くの高靱性化に適用されてきた。しかしながら、その組織形成のメカニズムはいまだに明確にされておらず、経験的な現象論にて適用されているのが現状である。これまでも種々の検討がなされてきたが、レーザ高温顕微鏡によるアシキュラーフェライト生成過程の直接観察によって、アシキュラーフェライトが生成した介在物を特定し、その構造を詳細に分析する手法や介在物とフェライト、フェライトとオーステナイトの結晶方位関係の詳細な解析など最新の観察技術により新しい知見が得られつつある¹⁵⁾。

このような基礎的な検討とともにその他の溶接継手に関する重要な検討についても概説する。とくに課題としては溶接止端の応力集中部の破壊や疲労特性の向上技術が重要であり、種々の検討が進められている。溶接部の破壊特性の向上技術としては鋼材の成分設計による溶接熱影響部特性の向上技術はこれまででも行なわれているが、施工面からの性能向上技術として、多層盛溶接部の最終層の積層順序と入熱量を工夫することで、止端部近傍の溶接熱影響部の靱性を向上させる NBFW[®]法が開発されている¹⁶⁾。

また、溶接部の疲労特性については溶接止端部での応力集中や引張りの残留応力により、母材強度を増加しても継手の疲労強度は向上せず、高強度化の大きな障壁となっている。そこで、検討されているのは、新たな溶接技術によって溶接止端部での応力集中を緩和するような滑らかなビード形状に制御する方法や溶接後にその形状を緩和したり、発生した引張りの残留応力部に圧縮残留応力を与えるようなピーニング処理を行なうことである。

前者の例としては、プラズマと J-STAR[®]のハイブリッド溶接技術が挙げられ、従来ではプラズマ電極と CO₂ アーク溶接電極の極性が異なり、プラズマとアークの反発により、ビード形状の制御が困難であったものを、正極性の J-STAR[®]溶接と組み合わせることにより、容易に溶接ビード止端部が滑らかな形状となり、疲労特性の向上を可能としている¹⁷⁾。

一方、ハンマーピーニングでは、止端形状の制御も行な

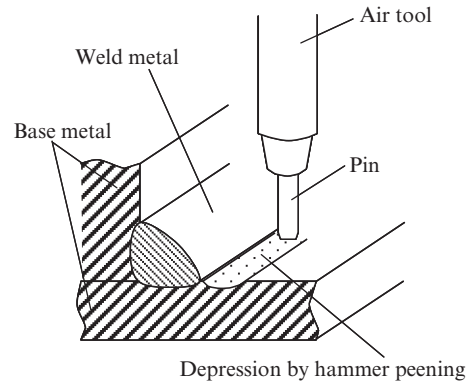


図 7 母材打撃ハンマーピーニングの概念図

Fig. 7 Schematic diagram of hammer peening on base metal

うことは可能であるが、施工負荷としてはグラインダー処理と同様であり、それだけでは大きなメリットは得られないものの、残留の圧縮応力が付与できるという効果がある。さらには残留圧縮応力付加の効果を最大限に生かした母材打撃ピーニング (**図 7**)を開発し、実橋梁に適用が開始されている¹⁸⁾。

また、溶接部の品質保証については電縫鋼管において可視化技術を活用することと、フェーズドアレイ超音波探傷法による検討がなされている。可視化技術では近年多くの溶接現象の観察が行なわれている高速度カメラを用いて、溶融部の直接観察を行ない、その観察をもとに溶接条件の最適化を行なうことで、接合部の信頼性を向上させている。さらにはフェーズドアレイ技術を用いて、従来の 10 倍以上の感度を有するオンライン検査技術を適用可能とし、溶接部の品質保証技術を確立している¹⁹⁾。これらの技術はアーク溶接部やレーザ溶接部などにも適用可能な技術であり、今後の発展も期待できる。

最新技術としては摩擦攪拌接合技術 (FSW) を取り上げた。接合技術としてはアークやレーザなどを用いた溶融溶接がこれまで研究され、多くの技術開発が進められてきた。しかしながら、溶融に伴って起こる複雑な現象やその熱影響部へのダメージを高張力鋼や異種材料の接合に適用するには多くの課題がある。そこで、近年では非溶融接合である FSW が新しい技術として注目されている²⁰⁾。

本接合技術ではツールの耐久性の問題があり、これまで Al などの低融点金属での実用化が中心であったが、ツール開発の進歩とともに、鉄鋼材料においても研究が進められるようになってきた。とくに、引張り強度が 590~1180 MPa 級の自動車用高張力薄板などにおいて適用の検討が行なわれ、強度が安定して得られる接合条件範囲の拡大が見られ、実用化に近づいている。一方、厚板の分野においても、UOE 鋼管の周継手への適用検討を初め、**写真 1**に示したように板厚 12 mm での突合せ継手の作製がなされ、マイクロ組織や靱性評価などの詳細な検討が進められている。

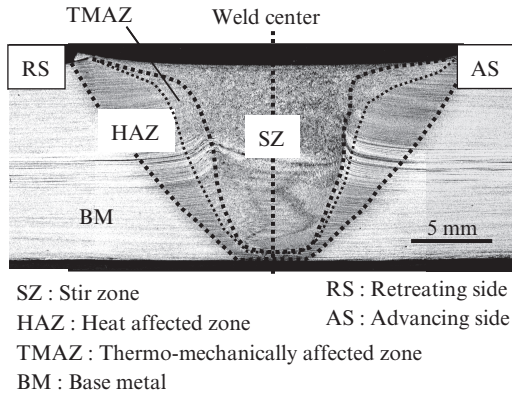


写真1 摩擦攪拌接合の断面マクロ組織

Photo 1 Macrostructure of friction stir welding

FSW 技術では非溶融であることから、ブローホールなどの欠陥、残留応力、変形などの抑制やスパッタ、ヒューム、スラグの発生がないことなど施工性のメリットも大きく、異種材料との接合においても、接合界面に見られる悪影響の大きい金属間化合物の生成抑制など、今後の実用化に期待するところが多いと考える。

5. 実施工における溶接自動化技術の動向

JFE エンジニアリングの溶接構造製品には、エンジン、タービン、シールド掘進機、クレーンなどの産業機械や橋梁、沿岸構造物、水道用鋼管などの社会インフラ製品がある。また、パイプラインや鉄道レールの敷設、各種プラント建設でも現地溶接がキーテクノロジーとなっている。本章では、JFE エンジニアリングが開発した溶接自動化技術として、無人化ロボット溶接システム、極厚鋼板の狭開先溶接、パイプラインの現地溶接、レール溶接の4技術を取り上げ、技術変遷と最近の動向について概説する。

5.1 無人化ロボット溶接システム

JFE エンジニアリング 津製作所では、橋梁や沿岸構造物のライン生産化の一環として、多関節ロボットによる本格的な溶接無人化システムを1992年に導入した²¹⁾。本ロボットには独自開発の高速回転アーク溶接法を適用しており、優れた高電流高速溶接性とアークセンサにより、大幅な生産性向上と品質安定化を達成した。

導入当初は、1パス水平隅肉継手だけを対象としていたが、その後の技術開発により、立向や傾斜継手、さらには多層盛の完全溶込み継手にも適用範囲を拡大した。また、ロボット軸構成の見直しや回転トーチの小型化、簡易教示機能の開発などにより、単純な平板パネルから複雑な立体構造物にも適用範囲を拡大した。最近の実施例として、ガウジングレス完全溶込み溶接継手と防波堤パネルのロボット溶接状況を写真2に示す。

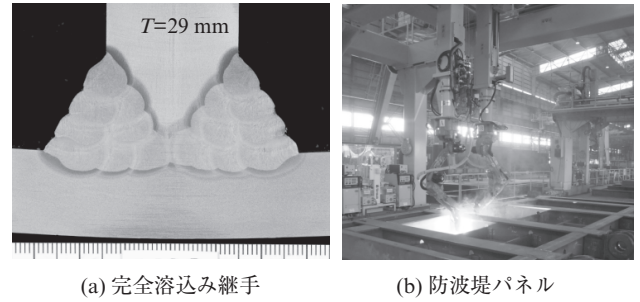


写真2 無人化ロボット溶接の最近の実施例

Photo 2 Recent applications of unmanned robot welding

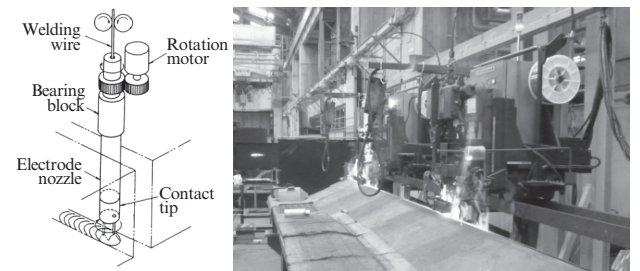


図8 狭開先溶接法の原理とタンデム無監視溶接状況

Fig. 8 Principle and application of the narrow gap welding

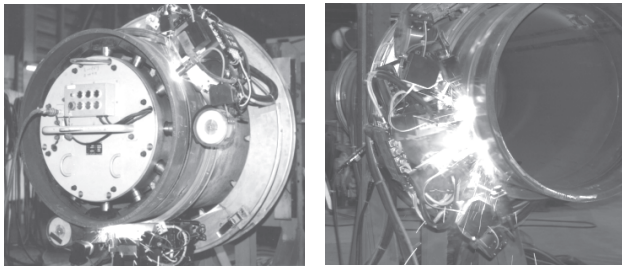
5.2 厚板の狭開先溶接

厚板の開先多層盛継手には、市販の直交座標型可搬式溶接ロボットを適用しているが、板厚が100 mmを超えるような極厚鋼板では、溶着量が膨大となり高強度鋼では塑性低下の問題があるため、I型平行開先による狭開先化が有効となる。JFE エンジニアリングでは1980年代に高速回転アーク狭開先溶接装置を開発し、鉄骨、橋梁や重機械部品などの極厚板製品に適用してきた²²⁾。

本法の原理と最近の実施例を図8に示す。タンデム無監視工法の採用や開先幅変動に対する溶接速度の適応制御機能の開発により、溶接能率や品質は従来よりも大幅に向上している。また、円弧ウィーピング機能も追加し、傾斜などの左右非対称継手にも適用範囲を拡大するとともに、開先幅を13 mm から8 mm 程度まで縮減し、溶接変形の極小化にも取り組んでいる。

5.3 ガス導管の現地円周溶接

前述の工場溶接と比較すると、ガス導管の現地溶接は作業環境が苛酷で要求品質も高いことから、自動溶接機の現場定着は遅れていた。しかし、1990年代になると、自動溶接機の信頼性向上やコンパクト化の達成およびガス導管の大径厚肉化に伴い、自動溶接機の適用継手は約5年で4倍以上に急増し、高圧幹線の自動化率は80%を超え、現在はほぼ100%の自動化率となった。また、施工各社は当時の大径厚肉化傾向に対応し、内外面溶接やI型狭開先工法によ



(a) 2ヘッド工法 (b) デュアルトーチ溶接

写真3 2トーチによる高能率施工の実施例

Photo 3 Highly-efficient welding methods by two torches

る高能率化にもチャレンジしたが、現場作業性や開先加工の煩雑さなどから、現場定着には至っていない。したがって、その後は多数台を保有する現有機をベースに、技術改善が図られてきた²³⁾。

2トーチによる高能率施工の実施例を**写真3**に示す。写真3(a)は2台の溶接台車が同一レール上を同方向に走行する2ヘッド工法である。本工法では、溶接姿勢による速度変化により台車間隔が変化するため、適用はある程度の大径管に限られていた。一方、(b)は最近開発したデュアルトーチ溶接技術である。適用範囲が小径管側へ拡大するとともに、操作や監視の簡便化が図られ、現地施工において実用性の高い技術になっている。

5.4 レールの溶接技術

JFE エンジニアリングのレール溶接技術は、新幹線、JR 在来線、地下鉄、私鉄において多くの施工実績がある。レール接合には、工場で短尺レールを100~200mに長尺化する1次溶接、その後現地で約1kmに延長する2次溶接、現地での最終敷設や交換を行なう3次溶接があり、1次溶接にはフラッシュ溶接、2次溶接にはガス圧接、3次溶接にはエンクロズアーク溶接またはテルミット溶接が主に用いられている。JFE レールリンクでは、2次および3次溶接の工事請負だけでなく、フラッシュ溶接装置の鉄道会社への販売も行なっている。レールのフラッシュ溶接時間は約1.5~4分と他の接合法よりも施工能率が高く、品質安定性や施工管理面に優れている²⁴⁾。

フラッシュ溶接の原理とレール溶接装置の例を図9に示す。この装置は現地基地向けに軽量化した可搬型装置であり、長野オリンピック開催を控えた北陸新幹線工事では、1日30口以上の現地工事に急ピッチで対応した。また、最近も、レールセンターの定置式溶接装置の更新に際し、独自の制御方式による高能率と省電力を兼ね備えた低コストで小型軽量の新型機を開発し、ロングレールの溶接で効果を発揮している。

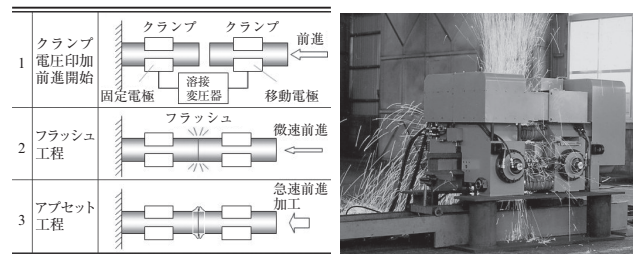


図9 フラッシュ溶接の原理と可搬式レール溶接装置

Fig. 9 Principle and portable machine of the flash welding

6. おわりに

本論文ではJFEグループでの最近の溶接技術の開発動向について、自動車分野および厚板、鋼管分野での代表的な技術を概説した。また、従来から続けられている基礎的な溶接金属組織に関する研究動向や溶接部の疲労、破壊といった観点から進められている施工方法による技術進歩や溶接部の最新の品質保証技術、接合技術を紹介した。これらの技術はすでに実用レベルに達しており、その適用は、鋼材へのきびしい要求に応える場合において、大きなキーテクノロジーとして必要不可欠な存在であり、JFE スチールでは最先端の鋼材を最新の利用技術とともにお客様に提供するために、日々技術開発を行なっている。

また、JFE エンジニアリングでは、さまざまな鋼構造製品における溶接の高能率化や品質の安定確保に取り組むなかで、独自に開発した自動化技術について4例を取り上げ紹介した。溶接は、社会インフラや産業機械、エネルギー関連製品の安全の鍵を握る重要な技術であり、安心・安全な暮らしの礎を創るために、技術開発に注力している。

これらのJFEグループにおける溶接・接合技術や利用技術あるいは自動化技術の開発推進は、グローバルな技術競争力を向上させるとともに社会に貢献できると確信している。

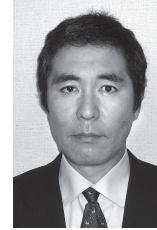
参考文献

- 1) たとえば、瀬戸一洋. 自動車技術. 2010, vol. 64, no. 11, p. 29-34.
- 2) 中島孝一, 長谷和邦, 衛藤大紀. JFE 技報, 2014, no. 33, p. 7-12.
- 3) 中川佳, 植木卓也, 難波隆行. JFE 技報, 2013, no. 31, p. 8-15.
- 4) 正村克身, 大井健次. JFE 技報, 2012, no. 29, p. 1-10.
- 5) 池田倫正, 沖田泰明, 小野守章, 安田功一, 寺崎俊夫. 溶接学会論文集. 2010, vol. 28, no. 1, p. 141-148.
- 6) 谷口公一, 池田倫正, 大井健次. 溶接学会全国大会講演概要集. 2012, 第90集, p. 240-241.
- 7) 貞末照輝, 伊木聡, 谷口公一, 池田倫正, 大井健次. 溶接学会論文集. 2014, vol. 32, no. 2, p. 64-72.
- 8) 松下宗生, 池田倫正, 大井健次. 溶接学会全国大会講演概要. 2013, vol. 92, 223.
- 9) 吉川暢広, 樽井大志, 森清和, 坂本剛. レーザ加工学会論文集. 2010, no. 73, p. 53-56.
- 10) 小林茂, 五味哲也, Honda R&D Technical Review. 2010, vol. 22, no. 1, p. 188-193.
- 11) 鈴木伸一, 大井健次, 一宮克行, 木谷靖, 村上善明. まてりあ. 2004.

- vol. 43, no. 3, p. 232-234.
- 12) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一. JFE 技報, 2007, no. 16, p. 50-53.
- 13) 早川直哉, 角博幸, 大井健次, 石神篤史, 笹倉秀司, 中野利彦. 溶接学会講演概要. 2013, vol. 92, p. 196-197.
- 14) 石神篤史, 上月渉平, 横田智之, 早川直哉, 溶接学会講演概要. 2012, vol. 91, p. 136-137.
- 15) 高田充志, 小溝裕一, 寺崎秀紀, 横田智之, 大井健次, 安田功一. 溶接学会論文集. 2013, vol. 31, no. 1, p. 33-40.
- 16) 大森章夫, 中川佳, 室田康宏. JFE 技報, 2014, no. 33, p. 25-31.
- 17) 松下宗生, 片岡時彦, 池田倫正, 遠藤茂. 溶接学会論文集. 2012, vol. 30, no. 1, p. 77-85.
- 18) 森影康, 中西克佳, 伊木聡, 村上琢哉, 鞆一. 鋼構造年次論文集. 2013, vol. 21, p. 790-794.
- 19) 飯塚幸理, 横山泰康, 鈴木雅仁, 熊沢慎太郎. 第19回超音波による非破壊評価シンポジウム. 日本非破壊検査協会. 2012, p. 7.
- 20) Matsushita, M.; Kitani, Y.; Ikeda, R.; Fujii, H. ISIJ Int. 2012, vol. 52, no. 7, p. 1335-1341.
- 21) 杉谷祐司, 玉置尚弘, 勘定義弘, 村山雅智, 藤村憲, 尾栢茂. NKK 技報. 1992, no. 141, p. 47-57.
- 22) 杉谷祐司, 小林征夫, 村山雅智. 溶接技術. 1990, 2月号, p. 92-98.
- 23) 杉谷祐司, 小林征夫, 金山潔士, 勝木誠, 村山雅智. 溶接法ガイドブック4; 容器・配管溶接の最新技術. 1999, II-351-355.
- 24) 山本隆一. WE-COM マガジン. 日本溶接協会溶接情報センター. 2013, no. 8, p. 1-9.



大井 健次



村山 雅智