

# JFE エンジニアリング 津製作所の ロボット溶接技術の変遷と展望

## Review of Robot Welding Technology in Tsu Works, JFE Engineering

尾座本大輔 OZAMOTO Daisuke JFE エンジニアリング 鋼構造本部 津製作所 計画室  
 吉井 孝次 YOSHII Koji JFE エンジニアリング 鋼構造本部 津製作所 製造プロセス室  
 高畑 清治 TAKAHATA Kiyoharu JFE エンジニアリング 鋼構造本部 津製作所 製造プロセス室

### 要旨

JFE エンジニアリング 津製作所では、橋梁などの製作コストダウンおよび品質向上を目的に、適用対象・時流に応じた溶接ロボット設備を導入、および溶接プロセスを開発・適用してきた。本稿では、1990 年代初頭の溶接ロボット導入から現在までのロボット溶接技術に関する取組みを抜粋して概説する。

### Abstract:

Welding process utilizing robot equipment has been developed and operated at Tsu Works, JFE Engineering for the purpose of production cost reduction and quality improvement of bridges. This paper summarizes the steps taken for such robot welding technology to date from early 1990s.

### 1. はじめに

橋梁製作における溶接ロボットの本格的な適用は、1980 年代後半から急速に展開された。これは、1980 年代初頭から急速に普及しはじめた多関節溶接ロボットの出現と設計情報を生産情報へも利用・展開するシステムの開発によるものである。JFE エンジニアリング 津製作所においても、新しい工場の在り方を模索、より高品質かつ脱技能化を目指し、1990 年代初頭に工場設備近代化中期計画を策定し、1991～1993 年度に、レーザ切断ライン、箱桁パネル製作ライン、鋸桁製作ライン、横リブ組立装置、糸面バリ取り装置、

新塗装工場の上流から下流までの近代化設備を相次いで導入した<sup>1-3)</sup>。この時の溶接ロボット導入が、津製作所における本格的な溶接ロボット適用のスタートである。

表 1 に津製作所におけるロボット溶接技術の変遷を示す。工場設備近代化計画以後、橋梁などの品質向上および脱技能化を目的に、対象・時流に応じた溶接ロボット設備を導入あるいは溶接プロセスを開発・適用してきた。本稿では、津製作所における工場設備近代化から現在までのロボット溶接技術に関する取組みを抜粋して概説する。

表 1 津製作所におけるロボット溶接技術の変遷

Table 1 Robot welding technology transition in Tsu Works

1990s	1992	Box girder panel fabrication lines (Web panel welding robot system, Flange panel welding robot system)	Panel fabrication approach High speed rotating arc welding process Teaching-less CAD/CAM system	Fillet welding Arc sensor
	1994	I-girder panel welding robot system Lateral rib fabrication line	Box fabrication approach	
2000s	2002	Steel segment welding robot system Portable multi-layer welding robot "Ishimatsu"	Use positioning units Portable transverse coordinate type robot	Vertical, Lap, Groove Groove welding adaptive control
	2004	Web panel welding robot system (Renewal)	Mobile gantry type welding robot	Wave-shape web panel U-rib steel plate deck
	2006	I-girder panel welding robot system (Renewal)		Gouging-less welding process
2010s	2007	Flange panel welding robot system (Renewal)	Transverse coordinate type robot, 10 torchs	U-rib 75% penetration
	2013	I-girder panel welding robot system (Expansion)	Welding wire auto changer Simple CAM system	Flexible application Expansion of adoption

## 2. 設備近代化による溶接ロボットの導入

鋼製橋梁には多くの形式があるが、その主構部材の多くは箱型またはI型である。その上下部材をフランジ、横部材をウェブと称しており、長方形の小板に短冊状のスティフナが取り付けられている。これらの工場製作に対し、組立方法・施工法を含め検討し、溶接ロボットを独自に開発・導入した。

当時、箱桁の製作は、ウェブ、フランジの両プレートにスティフナ類を仮付けし、箱型に組み立てた後一括溶接する工法が取られ、狭隘で複雑な箱桁内の溶接作業としていた。溶接ロボットの導入に際しては、ウェブ、フランジともパネル状態でスティフナなどの水平すみ肉溶接を行なうパネル工法を採用した。鉸桁製作の場合には、フランジとウェブを先行溶接し、後にスティフナを取り付ける分割組立工法であったが、ロボット化に際しては一括組立工法（対象継手はすみ肉溶接）を採用した。この方式により、工程数・装置占有面積を削減、逆ひずみ付加やひずみ取作業といった付帯作業の軽減を図った。

また、通常橋梁製作に用いられるロボット溶接プロセスは、トーチを左右に揺動（ウィービング）するガスシールドアーク溶接によるすみ肉溶接が主流であるが、JFE エンジニアリング独自プロセスである高速回転アーク溶接法<sup>4,5)</sup>を採用することで高能率化・高精度化を図った。この際の対象溶接継手は1パスのすみ肉溶接である。

さらに、橋梁のように比較的大きく、同一形状が少ない部材のロボット溶接化においては、複数台の溶接ロボットに対して、各ロボットのティーチング作業を省略できるシステム（ティーチングレスロボットシステム）が不可欠である。設計情報を生産情報へ結びつける（部材形状データや溶接データが利用できる）現図システム（NEW-BRISLAN）をベースにティーチングレス CAD/CAM システムを開発した<sup>6)</sup>。

以上を融合し、箱桁パネルライン（ウェブ、フランジ）、鉸桁ラインを稼動させた。**写真1**に津製作所初の溶接ロボッ

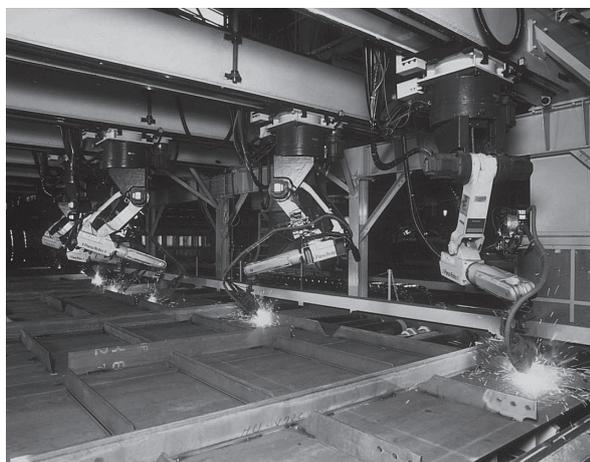


写真1 ウェブパネル溶接ロボット

Photo 1 Web panel welding robot system



写真2 鋼製セグメント溶接ロボットシステム

Photo 2 Steel segment welding robot system

トシステムであるウェブパネル溶接ロボットを示す。

## 3. 鋼製セグメントのロボット溶接技術

大都市道路網拡充の一環として、地下トンネルをシールド工法で構築する際、大きな断面力が作用する箇所に鋼製の大型セグメントが使用される。鋼製セグメントは、角型やリング型のものがあるが、個々のセグメントは箱型形状で1面が開放されたものとなっている。鋼製セグメントの製作工事では、類似形状のブロックを大量に製作する必要があるため、高品質かつ高能率で繰り返し生産が可能な専用の溶接ロボットシステムの適用が有利である。溶接継手は升目構造部の水平すみ肉溶接・立向すみ肉溶接のほかに、外板部の重ねすみ肉溶接およびフレーム端部の開先溶接継手が対象となる。溶接ロボットシステムは、品質保持が困難な溶接姿勢を避けるため、部材をポジションによりハンドリングし多関節ロボットと連動させる方式を採用した。ロボットデータの生成は専用のCAD/CAMシステムを用い、さらにロボットシミュレータを使用しセグメントの型式やサイズごとに狭隘部でのロボットの干渉チェックや溶接姿勢・動作パターンをコンピュータ上で事前に検討することでロボット溶接適用範囲の最大化を図った。**写真2**に適用状況を示す<sup>7)</sup>。

## 4. 溶接ロボット更新とロボット溶接技術

2000数年頃には、1990年代初頭に導入した溶接ロボット（ウェブライン、フランジライン、鉸桁ライン）が十数年経過し更新時期を迎えた。更新に際しては、より品質安定化が図れ、さらには適用範囲の拡大を図れるよう対象部材の特性に応じた溶接プロセスおよび装置機構を検討した。

### 4.1 ウェブライン

ウェブラインの更新に際して、溶接プロセスは、従来どお



写真3 ウェブパネル溶接ロボット (更新機)

Photo 3 Web panel welding robot system (Renewal)



写真5 フランジパネル溶接ロボット (更新機)

Photo 5 Flange panel welding robot system (Renewal)

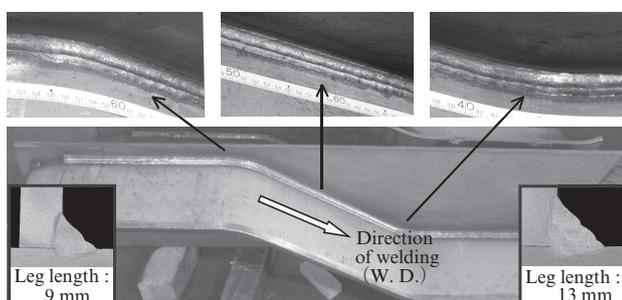


写真4 波形ウェブパネルの溶接ビード外観

Photo 4 Wave-shape web welding bead appearance

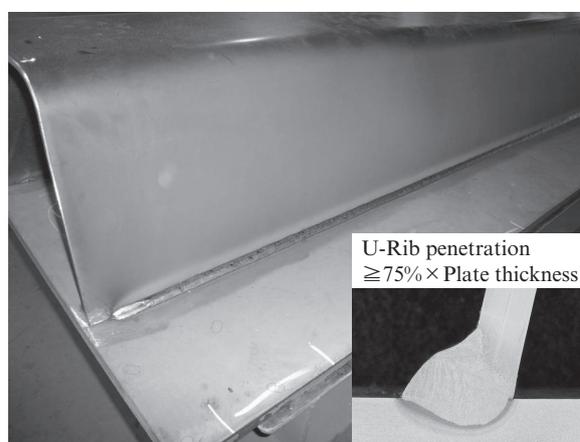


写真6 Uリブの溶接ビード外観とマクロ断面

Photo 6 U-Rib bead appearance and macro section

り高速回転アーク溶接を採用し、高電流・深溶け込み施工、高速回転アークセンサの高精度做いの利点を踏襲した。ロボットは、従来型より動作範囲の拡大を目指し1台の自走門型ガントリーに2台の6軸多関節ロボットを天吊りする仕様とし、それぞれのロボットが独立して横行・昇降・走行が可能な自由度を持たせた。これらの特長により、平板構造物のみならず立体構造物へ適用を拡大した。単純なウェブパネルの水平すみ肉溶接から、鋼床版の水平すみ肉から立向すみ肉溶接への連続施工、波形ウェブ（3次元ワーク）の連続施工などへの適用が可能となった。写真3にロボットの適用状況を示し、写真4に波形ウェブへの適用結果の一例を示す。

## 4.2 フランジライン

フランジラインの更新では、故障リスクが小さいこと、より多くのリブを同時に溶接できること、を考慮し装置構成を検討した。フランジラインでは溶接対象パネルが比較的単純な構造であるため継手へのアプローチ時にロボットの複雑な進入姿勢・動作を必要としないことから、多関節ロボットではなく、4軸直交座標型の溶接ヘッドを選定し、剛性が強く故障リスクの小さいシンプルな構造とした。さらに、生

産能力拡大のため、溶接ヘッドを6台から10台に増加した。溶接プロセスは、継手長が長いことから、高速溶接、做い性能に優れる高速回転アークを従来同様に採用している。主な対象継手は、フランジに取り付いた縦リブあるいは鋼床版Uリブの水平すみ肉溶接である。本システムでは、脚長11mmまでの1パスすみ肉溶接が可能である。また、鋼床版のUリブ施工においては、道路橋示方書により、疲労亀裂を防止するために溶け込み深さをUリブ板厚方向に対して、板厚の75%以上確保することが要求されている。これに対しても、本システムの特長である高速回転アークによる高電流・深溶け込み施工および回転アークセンサによる高精度做い性能（安定した狙い位置確保）により良好な結果を得ている。写真5にUリブへのロボット適用状況、写真6にUリブ溶接ビードおよびマクロ断面の一例を示す。

## 4.3 鋸桁ライン

鋸桁ラインは、箱桁パネルライン（フランジ、ウェブ）に

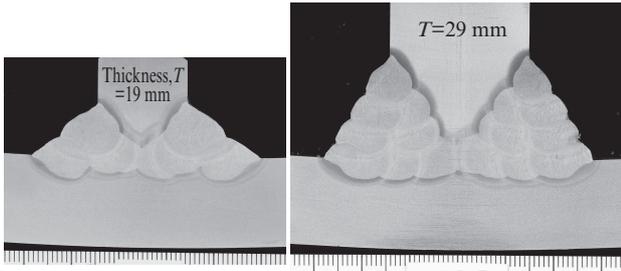


写真7 ガウジングレス溶接マクロ断面

Photo 7 Gouging-less welding process macro section

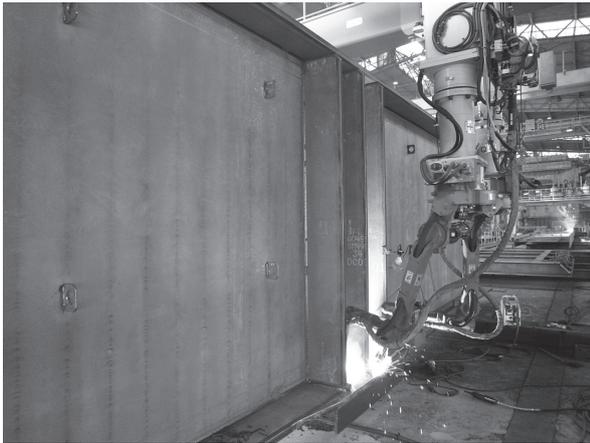


写真8 新鋼桁溶接ロボット

Photo 8 I-girder panel welding robot (New)

続いて、導入された主力設備である。前述のとおりロボット化に際しては一括組立工法を採用している。更新に際しては先のウェブロボットと同様な機構・機能により実施し、より汎用性を持たせている。

ロボット溶接の適用を従来のすみ肉溶接だけでなく、開先溶接へも拡げているが、開先溶接時の裏はつり（ガウジング）作業を必要としないロボットによる溶接工法（ガウジングレス完全溶け込み溶接工法）を開発・適用した。溶接継手の開先精度管理が必須であるが、高速回転アーク溶接法の利点を活かした画期的な溶接技術である。写真7にガウジングレス完全溶け込み溶接のマクロ断面の一例を示す。

また、鋼桁工事の増加にともなう製作能力増強のため、2013年には鋼桁溶接ロボットを増設した。このロボットは、前述と同様の機構・機能に加え、よりフレキシブルな運用を目指し、ソリッドワイヤとフラックスコアードワイヤを自動で切り替えるワイヤオートチェンジャを搭載し、最新のデジタル電源を採用している。さらに高速回転アーク溶接トーチを小型化し、より狭隙部への進入を可能にした。写真8に縦置きした鋼桁パネル支点部の完全溶け込み開先溶接への適用状況を示す。これら施策により、ロボット溶接適用率を大きく引き上げることを目指している。

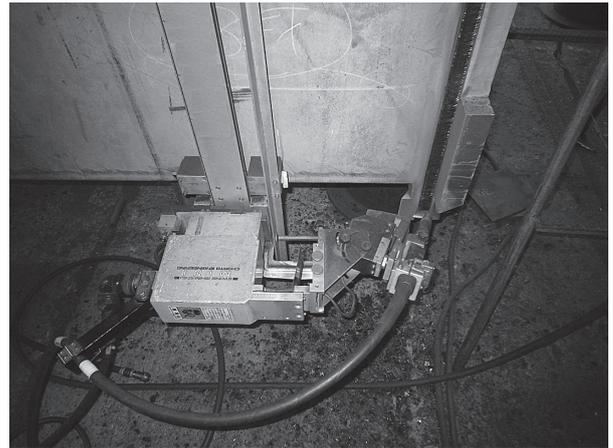


写真9 可搬式溶接ロボット

Photo 9 Portable welding robot

## 5. 可搬式溶接ロボットの適用

大がかりな据置ライン型の溶接ロボットシステムだけでなく、対象によっては可搬式の溶接ロボットを適用している。たとえば、橋脚の角継手は厚板の開先溶接となり、切断精度、組立精度、さらには溶接中の熱変形などによる継手の変動に対する溶接条件調整が必要となる難しい溶接である。このような溶接対象には、市販の可搬式多層盛専用溶接ロボット<sup>8)</sup>を採用している。この溶接ロボットは、板厚・継手形式・姿勢ごとの溶接条件がプリセットされており、開始位置、終了位置（継手長によっては任意数の途中位置）での開先センシング指示のみで、開先変動に対する溶接条件自動生成機能を有している。より効果的な運用を目指し、1オペレータ複数台の適用を実践している。写真9に可搬式溶接ロボットの設置状況を示す。

## 6. 溶接プロセスの改善

大脚長すみ肉、スラグ除去不要などの対応の容易さから、ロボット溶接に使用するワイヤは、ソリッドワイヤが一般的であった。しかしながら、ビード外観安定化、スパッタ低減、ブローホール低減、など更なる溶接品質安定化のためにフラックスコアードワイヤ（FCW）を使用することも増えてきている。図1にフラックスコアードを使用したロボット溶接の溶接結果の一例を示すが、非常に良好な溶接結果が得られている。最近では、溶接ワイヤの進歩もあいまって、脚長8mmまでの大脚長1パスすみ肉溶接も可能になってきており、対象に応じてソリッドワイヤとフラックスコアードワイヤを使い分けるようにしている。

また、従来ロボット溶接はすみ肉溶接が中心であることから、溶接ワイヤ径は一般的な1.2mmφを使用してきた。しかしながら、溶接ロボットの適用対象継手が、単なるすみ肉

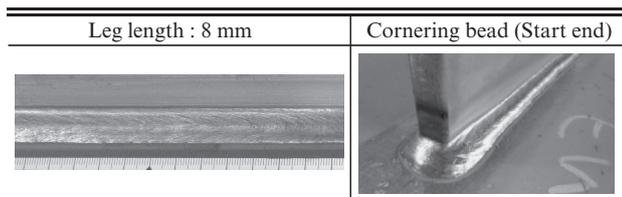


図1 FCW (Flux cored wire) による溶接結果の一例  
Fig. 1 Example of bead appearance (FCW)

溶接だけでなく、部分溶け込み開先溶接や完全溶け込み開先溶接など、より溶け込み深さの安定性が求められる継手が増えてきていることから、溶接ロボットに使用する溶接ワイヤ径を、1.4 mmφに変更している。これにより、より高電流の施工が安定して可能となるため安定した溶け込み（溶接品質）が得られる。

### 7. 多品種化への対応

箱桁パネル（フランジ、ウェブ）、鉸桁パネルのように定形部材のすみ肉溶接（一部、開先溶接）については、ティーチングレス CAD/CAM システムとリンクし、ロボット溶接化が定着してきている。しかしながら、近年では、たとえば、合成床版橋や防波壁パネルなど、比較的単純形状ではあるものの通常の橋梁パネルではない部材が増加している。このような部材に対し、通常のルーチンで溶接ロボットを動作させるためのデータを作成すると多大な時間と労力が必要となる。より迅速かつフレキシブルな運用を目指し、2次元の設計情報のみから、ロボットの NC プログラムを簡易に短時間で作成する手法を開発し、鉸桁溶接ロボットやウェブ溶接ロボットを各種実工事に適用し、ロボットの稼働率を向上させ、品質安定化に寄与している。写真 10 に合成床版橋への溶接ロボット適用状況、写真 11 に防波壁パネルへの溶接ロボット適用状況を示す。

### 8. 今後の展望

橋梁製作における溶接ロボットの本格的な適用は、1980年代後半から始まり20年以上が経過した。当時、溶接ロボットは年々適用を拡大し、大規模な CIM (Computer Integrated Manufacturing) 化が進展するものと予想（期待）されていたが、20年経過した現在、溶接ロボットの適用率は大幅には向上していないのが現状である。図 2 に溶接材料の使用状況を調査した結果から推定した各産業の MAG/MIG 溶接における溶接自動化率・ロボット化率を示すが、橋梁分野における溶接自動化率は20数%程度、ロボット化率はわずか10%程度である<sup>9)</sup>。これは、橋梁製作の部材特性（少量多品種、大型、比較的複雑、密閉構造、など）および検査の要求レベルが高いなどに起因していると考えら



写真 10 合成床版橋への適用状況  
Photo 10 Composite deck slab bridge



写真 11 防波壁パネルへの適用状況  
Photo 11 Steel sea wall

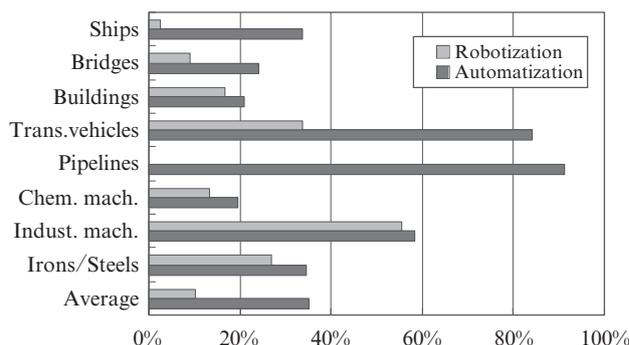


図 2 MAG/MIG 溶接における溶接自動化率・ロボット化率<sup>9)</sup>  
Fig. 2 Ratios of automatization and robotization in MAG/MIG welding<sup>9)</sup>

れる。

前述のとおり JFE エンジニアリング 津製作所では、平面パネルのすみ肉溶接（一部、開先溶接）については、ティーチングレス CAD/CAM システムとリンクし、ロボット溶接化が定着してきている。さらに、より汎用的にロボットを利

用する取組みや溶接プロセスの進歩により、徐々に定形外の部材や継手への適用が拡大してきているとともに、可搬式ロボットを適用するなど適材適所の使用も進めている。このような取組みにより、JFE エンジニアリング 津製作所における溶接ロボット化率は、約20%であり、かなり高いレベルにあるといえる。

今後は、平面パネル構造への適用から、箱桁の内面の溶接に代表されるようなより構造の複雑な立体構造物への適用拡大が望まれる。そのためには、閉空間・狭隘部へ進入できるロボット機構や構成、センサ技術、ロボット動作プログラム作成の簡素化技術などの開発が必要であるとともに、ロボットがアプローチしやすい構造の設計や工作法の検討も重要な課題である。また、新しい溶接法(レーザー溶接、レーザー・アークハイブリッド溶接など)による画期的な施工法の改革も今後取り組むべき課題であると考えられる。

## 9. おわりに

JFE エンジニアリング 津製作所に1990年代初頭より現在まで橋梁などの製作コストダウンおよび品質向上を目的に適用してきたロボット溶接技術を抜粋して紹介した。これまで適用してきたロボット溶接技術により、導入計画時の予測効果を十分満足する成果が得られている。今後ますます、品質安定化、脱技能化への要求は高まるものと推測され、溶接ロボットへの期待はさらに高まるものと考えられる。今

後も、適用対象に応じた最善な方策を模索・推進していきたい。

### 参考文献

- 1) 藤村憲ほか. 橋梁生産設備近代化(加工・組立ライン). NKK 技報. 1992, no. 140, p. 56-63.
- 2) 杉谷祐司ほか. 橋梁パネルのCAD/CAM 溶接ロボットシステム. NKK 技報. 1992, no. 141, p. 47-57.
- 3) 秦詮ほか. 橋梁生産設備近代化(第二報). NKK 技報. 1994, no. 147, p. 43-51.
- 4) 野村博一ほか. 高速回転アーク隅肉溶接法の開発. 溶接学会論文集. 1986, vol. 4, no. 3, p. 18-23.
- 5) 杉谷祐司ほか. 高速回転アーク溶接ロボットの開発. NKK 技報. 1992, no. 141, p. 47-57.
- 6) 高久達将ほか. 橋梁設計生産一貫情報システム～生産システム～. NKK 技報. 1989, no. 127, p. 138-144.
- 7) 勘定義弘ほか. MMST 鋼製セグメント溶接ロボットシステム. NKK 技報. 2002, no. 178, p. 72-75.
- 8) 岩本啓一ほか. 溶接自動化のすすめ方 直行可搬型溶接ロボットによる自動化—工事に柔軟に対応する「石松」溶接ロボットシリーズについて—. 溶接技術. 2008, vol. 56, no. 12, p. 63-66.
- 9) 溶接法研究委員会. Visualization and Simulation Technologies for Welding Processes. 溶接法ガイドブック7 英文版. 2013.



尾座本大輔



吉井 孝次



高畑 清治