特 集

ロボット溶接の
キーテクノロジー

④ 品質管理の知能化*

貝原正一郎

竹中 一博

貝 原 正一郎**, 竹 中 一 博***

Intelligent Approach for Quality Control*

by Shoichiro Kaihara** and Kazuhiro Takenaka***

キーワード：品質管理，溶接欠陥，インプロセス保証システム，IPA 溶接システム，インプロセス制御，溶接条件異常，知能化，溶接品質，溶接アーキ現象

1. は じ め に

構造物の製作とは「溶接・接合」工程を中心に、「材料の加工」と「組立」、「検査」の工程に大きく分類できる。材料の「切断」、「溶接」、「検査」の個々の工程は自動化やロボット化によって大きな進歩を遂げ、能率、省人化に寄与してきたが、労働者と熟練工の不足の傾向の中で高品質を維持して更なる高能率化を図るという命題がある。これらの製造工程の全体を省力化しようとする、自動化、ロボット化が進んでいる個々の工程の効率化だけでは困難で、いくつかの工程をつなぎ合わせてシステム化する必要がある。

近年、エレクトロニクスの発展にともない、自動溶接装置、ロボットの占める割合が多くなってきた。例えば、自動配管溶接装置では、あらかじめ適正な溶接条件を記憶させた LSI (大規模集積回路) カードを入力するだけで、初パスから最終パスまでの溶接を全自動で行うことができるところまで進歩してきた¹⁾。また、従来の機械化溶接法にもフィードバック機構が装備され、インプロセス制御が可能になってきている。その効果として欠陥発生率が抑制され、

高品質な溶接継手が製作され、構造物の信頼性も非常に高くなってきた²⁾。つまり、品質管理の知能化を図ることが可能になったと言える。溶接部の品質を溶接施工プロセスで確保できれば、溶接終了後の非破壊検査は、抜き取りまたは省略することも可能になる。

これには、溶接施工制御(インプロセス制御³⁾：インプロセス・コントロール (In-Process Control: IPC)) の技術レベルを高めると共に、溶接部の品質保証 (インプロセス保証：インプロセス・アシュアランス (In-Process Assurance: IPA)) 溶接システム⁴⁾の開発が重要である。本報では、品質管理の知能化について、インプロセス制御の考え方と IPA 溶接システムについて紹介する。

2. 溶接施工のインプロセス制御

インプロセス制御とは、溶接中に溶接品質に関係する種々の物理量を時々刻々に検出し、溶接中の制御パラメータを時々刻々制御することである。機械式溶接やティーチングプレーバック式の溶接ロボットなどでは溶接中に生じる開先線のズレや開先形状の変動に適応できない場合がある^{5,6)}。そこで、インプロセス制御を行うには溶接中に生ずる開先線のズレや開先変動をインプロセスで検出できるセンサと制御システムが必要であるため、次のような手法が検討され一部は実用化されている³⁾。

(1) 裏波ビードの形成制御⁷⁾

*原稿受付 平成 6 年 8 月 18 日

**正 員 石川島播磨重工業(株) Member, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

***正 員 東芝プラント建設(株) Member, Toshiba Engineering and Construction Co., Ltd.

- ・板表裏面の溶融池またはその周辺の温度で制御
 - ・板の裏面のアークプラズマの量や光量で制御
- (2) アークや溶融池表面の視覚画像制御⁸⁾
 - (3) 電圧・電流による溶融特性制御⁹⁾
 - (4) 溶接アークセンサを利用した制御¹⁰⁾
 - (5) 光学式センサを利用した制御 等

3. 溶接中の品質管理の知能化

エレクトロニクスの発展により, 溶接中の溶接施工条件のインプロセス制御が可能になり, 溶接士が常時監視することなく, リアルタイムで溶接中の溶接管理・品質管理が可能になってきた。リアルタイムで溶接中の各種溶接施工パラメータをモニタリングすることによって, 溶接終了後の非破壊検査を抜き取りで実施したり, あるいは省略しても, 溶接部の品質保証ができるインプロセス・アシュアランス (In-Process Assurance: IPA) 溶接システムも可能になってきた。

3.1 IPA 溶接システムの概要

IPA 溶接システムは, 溶接中の刻々の溶接条件の変化をサンプリングし, 適正な溶接条件範囲を逸脱していないかどうかを監視し, 初パスから最終パスまでの実際の溶接記録を作成するとともに, 継手全体の健全性を表示する。適正条件から逸脱した場合は, そのポイントの位置と溶接条件を表示する診断システムである。さらに, 診断機能の高度化を図るためにカメラ画像を同一CRTに重畳させ, 溶接条件と溶接状態の変化がリアルタイムに同時に判断できる仕様とした。本システムの特徴は次の通りであり, 基本及び適用概念を図1, 図2に示す。

- (1) 溶接士に負担をかけないで, 溶接が開始されれば自動的に溶接信号の収集とCCDカメラによる溶融プールのモニタリングを開始する。溶接が終了すると自動的に停止する。
- (2) 溶接条件と溶接状態の変化が重畳した画像を, ビデオテープに自動的に記録する。
- (3) 自動診断はフロッピディスクに収納した各種溶接信号データで行う。異常信号箇所は, 改めてビデオテープに記録した溶接アーク現象で確認し, 正常か異常かの判断を行う。

この機能により, 異常表示箇所の溶接現象を映像で確認したのちに評価できるようになり, 異常診断箇所と非破壊検査結果との相関性を高めることができた。IPA 溶接システムを図3に示す。

図1 IPA 溶接システムの基本概念

図2 IPA 溶接システムの適用概念

図3 配管自動GTAW用IPA溶接システム

3.2 IPA 溶接システムの構成

配管の自動GTAWを対象としたIPA溶接システムの構成を次に示す。

(a) 配管用自動 GTAW 装置 (b) インバータ電源
(c) パソコン (d) AD コンバータ (e) プリンタ (f)
サンプリングスピード：最高速度 0.1 秒 (g) 入力
センサー数：最大 16 種類

3.3 IPA 溶接システムのフローチャート

溶接前に開先形状、ギャップ、目違い、表面清浄度、狙い位置、溶接材料の種類と適正溶接条件範囲などを厳重に確認する。そして、溶接を開始し、溶接条件のモニタリングと適正溶接条件範囲との比較を行う。溶接条件の判定はリアルタイムで行い、異常が認められた場合、その位置と溶接条件を表示する。溶接終了後、継手全体の品質評価を行う。

16 種類の信号を採取できる機能を有し、例えば、アーク電圧、アーク電流、台車速度、ワイヤ速度、トーチ高さ、オシレート幅、オシレート速度、パルス電流、パルス周波数、ガスシールド流量、音圧、冷却水量などで、その他に CCD カメラ、音声入力を行う。

収集されたデータの診断は、統計解析手法を用いて、正常な条件のデータと比較して行う。本システムのデータ診断画面の一例 (X-R 管理図、ワイブル分布) を図 4 に示す。

(a) X-R 管理手法

(b) ワイブル分布手法

図 4 IPA 溶接システムの表示画面

4. 実 験

4.1 供試材料および溶接方法

ステンレス鋼平板とパイプを供試材とした。

(1) 供試材料：ステンレス鋼板：SUS304 (板厚 10 mm)、ステンレス鋼管 SUS304 (管径：25A Sch40)

(2) 溶接方法：自動 GTAW

4.2 実験方法

溶接欠陥は溶接方法、材料、開先形状、溶接条件、施工環境などが関与し、様々な要因により発生する。IPA 溶接システムの開発には、溶接部の開先の精度 (角度、目違い、ギャップなど)、シールドガスの流量、開先表面清浄度などが変化したときの溶接条件の様子、また溶接欠陥との定量的な関係を把握し、パターン化することが必要である。そのために次のような実験を行い、さらに実際の配管溶接で本システムが適用できるかどうかを検討した。

(1) 溶接諸条件の変化と溶接データの関連性実験

AVC (アーク電圧制御) 機能を有する場合の溶接部の開先の不整と溶接データとの関連性を調べた。

(2) 配管用自動 GTAW を用いた適用実験

溶接工場の配管溶接ラインで適用実験を行った。

(3) 機械化 GTAW を用いた適用実験

画像と欠陥との相関性を求めた。

5. 実 験 結 果

5.1 溶接諸条件の変化と溶接データの関連性実験

AVC 機能を有する自動 GTAW 溶接を用いて、溶接諸因子を変化させたときの溶接データに及ぼす影響を調べた。それらの結果の一例を図 5 に示す。

(1) 表面清浄度の影響

溶接電流を 100 A と一定にし、水冷銅板およびステンレス鋼板の開先内に、水分や油があった場合の影響を求めた。電流値に変化が認められないものの図 5 (a) に示すように、電圧、トーチ変位に不連続な異常信号が認められた。

(2) 開先形状の影響

開先付きステンレス鋼板の標準開先を V 形 60° として溶接線上で連続的に V 形 40°、80° および U 形 30°、40° と変化させたときの溶接条件に及ぼす影響を求めた。開先角度の変化する箇所ではトーチ変位が不連続な挙動を示し、定常状態の信号レベルも各開先形状で異なっており、信号として検出できるこ

とを確認した。

(3) 開先内目違いの影響

V形60°標準開先から開先内に目違いを設けたとき、トーチ変位が溶融金属の増加に伴い上昇した。

(4) 平坦度の影響

平板突合せ試験片の開先面に0~4 mmのテーパを設けて平坦度の異常と判定するための限界値を求めた。標準平板からわずかに1 mmの目違いが存在しても電流、電圧に変化は現れないが、トーチ高さに明瞭な変化が認められた。また、平板に0~1 mmま

図5 溶接諸因子による溶接信号の変化例

図6 ブローホールの欠陥検出例

図7 タングステン巻込みの欠陥検出例

図 8 融合不良の欠陥検出例

で 0.2 mm ピッチで階段上の目違い加工を行った場合、電圧はほぼ一定で変化しないが、トーチ高さは明瞭に異常信号として判定できた。

(5) ギャップの影響

平板突合せに 15 mm ピッチで 0.25~2 mm までの I 形開先ギャップを有した場合、図 5 (b) に示すようにトーチ高さに明瞭な変化が現れた。

(6) ガスシールド流量と空気混入の影響

シールドガス流量を 50 l/分から 20 l/分に減少した場合、図 5 (c) に示すように、電圧に不連続信号が現れるとともに電圧値も低下した。また、0.05 l/分の空気の混入があった場合も電圧値の低下とともに異常信号が認められた。

以上の結果、溶接中に得られる各種情報から、溶接品質管理の知能化を図れることが確認できた。

5.2 配管用自動 GTAW を用いた適用実験

溶接工場の配管溶接ラインで適用実験を行い、IPA 溶接システムの機能性、作業性などの検討を行った。ここでは、ステンレス配管 (SUS304, SUS304ULC) の 8 A~32 A の電流、電圧、ワイヤ送給速度、台車速度、トーチ高さなどのデータ採取を行った。実際の配管溶接ラインにおいて約 280 継手のデータ採取を行い、2 継手の台車速度とトーチ高さの溶接異常を検知することができ、実際の溶接ビードの外観異常と対応していた。

5.3 機械化 GTAW を用いた適用実験

視覚センサーを取り入れた IPA 溶接システムを用いて、機械化 GTAW 溶接実験を行い、溶接欠陥との相関性や診断手法などに対する確認を行った。

本システムにより、ブローホールの発生、タングステンの巻込み、融合不良などを明瞭に観察できることが確認できた。ブローホール、タングステン巻込み、融合不良の変化を図 6, 7, 8 に示す。

6. IPA 溶接システムのまとめ

GTAW を対象にして IPA 溶接システムの機能性、溶接諸条件のデータと溶接異常との相関性などの検討を行い、次のような結論が得られた。

- (1) 溶接諸因子の異常、例えば、目違い、ギャップ、表面清浄度、平坦度、開先角度、シールドガスなどの異常は採取した溶接データから診断できる。
- (2) 溶接継手の健全性を診断する手法として統計解析手法は有効である。
- (3) 溶接データと溶接現象の相関性が得られ、溶接中の品質管理が可能である。溶接音圧、音声は、溶接異常、溶接欠陥の発生とよく対応する。
- (4) 溶接信号と視覚センサー画像を重畳し、非破壊検査結果との相関性を確実にした。
- (5) ブローホールやタングステン巻込み、融合不良などの溶接欠陥や異常の種類も判断できる。
- (6) 溶接部の診断は溶接諸条件の中から単独信号で評価するのではなく、各種因子の相互関係から評価する必要がある。

7. おわりに

インプロセス制御や IPA 溶接システムにより、溶接中の品質管理の知能化が進み、リアルタイムの品質保証が可能になってきた。適正条件から逸脱した場合は、その位置と溶接条件を表示でき、ビデオに録画した映像で再度確認を行い、溶接欠陥との相関性と信頼性を高めることが可能になった。つまり、人間の五感である視覚、聴覚、触覚などに類した各種センサを用いて、総合的にインプロセスで診断を

行い品質確保が可能になってきた。

このような技術進歩により, 溶接と非破壊検査との情報を複合化して工程をリアルタイムで診断し, 溶接終了後の非破壊検査結果を待つことなく補修を行うことができるため, 溶接品質が向上するとともに溶接と検査工程を大幅に縮小することも可能である。さらに, これまでの溶接施工では溶接継手全体あるいは構造物全体の溶接施工記録しかなかったが, パス毎の溶接施工管理が可能となり, 構造物の使用中のトラブルに対して溶接施工履歴を明確にでき, 原因把握と対策を迅速かつ正確にできるようになる。

溶接諸因子の総合的な判断による溶接品質管理によって溶接装置の複数台制御も可能になってくるし, 生産工場で推進しているFA化, CIM化にも対応でき, 今後このような体系化が益々重要となると言える。

参 考 文 献

- 1) 谷岡, 手島: 全自動溶接システムの開発と実用化, 溶接技術, 34-6 (1986)
- 2) 佐藤: 溶接構造要覧, 黒木出版社, (1988)
- 3) 野村, 仲田: 溶接品質のインプロセス制御, 溶接学会全国大会講演概要集, 39 (1986)
- 4) 貝原, 額額, 齊藤, 村山: IPA (In-Process Assurance) 溶接システムの開発, 石川島播磨技報, 32-2 (1992)
- 5) 益本: 我国におけるアーク溶接用センサおよびセンサシステムの現状, 溶接学会誌, 52-4 (1983)
- 6) 井上: アーク溶接ロボットのセンサ, 溶接技術, 32-12 (1984)
- 7) 小園: 溶接部温度モニタによる裏液ビード幅の制御システム, 溶接学会論文集, 4-2 (1986)
- 8) 大嶋: パルス MIG 溶接における溶融池の画像処理とデジタル制御, 溶接学会論文集, 5-3 (1987)
- 9) 野村: アーク溶接用センサおよびセンサシステム, 溶接技術, 33-6 (1985)
- 10) 野村: アークセンサによる溶接の自動制御, 日本鋼管技報, 112 (1986)

研究者・技術者のための
コンベンション関係者のための

学 協 会 集 会 ス ケ ジ ュ ール

社団法人日本工学会編
年6回発行 A4判 約80ページ/回

内 容	●開催年月日, 主催学協会名, 集會名, 開催場所, 主催・共催・後援学協会名および連絡先を掲載 ●最新情報を毎回追加収録
特 色	●過去の集会の問い合わせに回答 (ただし 1993 年分から) ●理工学系協会の学術・研究集會が一目で分かる ●専門分野以外の集會を知ることが出来る ●他学協会との開催時期・開催地の重複が避けられる ●学術情報センターの集會スケジュールのデータベースが利用出来る
購読料	年間購読料 (送料共) 24,000 円 (消費税別) 申込月から1年間とします
フロッピー	ご希望の方に集會スケジュールのデータを入力してあるフロッピーを頒布しております 頒布料 6,000 円 (消費税別)
申込方法	添付申込書に所定事項を記入して郵送して下さい

現在までの主な購読者 (順不同)

パイオニア㈱・積水化学工業㈱・東京ガス㈱・古河電気工業㈱・鹿島㈱・富士写真フィルム㈱・㈱東芝・岐阜コンベンションビューロー・富士通㈱・日本コンベンションサービス㈱・日本通運㈱・味の素㈱・シャープ㈱・㈱日立製作所・㈱アイシーエス企画・日立金属㈱・日産自動車㈱・㈱リコー・大阪コンベンションビューロー・日立造船㈱・㈱竹中工務店・松下通信工業㈱・日本電装㈱・トヨタ自動車㈱

〒107 東京都港区赤坂 9-6-41

社団法人 日本工学会

電話 03-3475-4621 FAX 03-3403-1738