溶接品質リアルタイム診断システム の考え方と応用事例*

手 島 秋 雄**

Real time diagnostic system of weld quality*

by Akio TEJIMA**

キーワード：溶接品質，リアルタイム診断，インプロセスモニタリング，しきい値，溶接欠陥，溶接異常，溶接信号，前駆現象，欠陥の推定，エキスパートシステム

1. は じ め に

溶接部の品質をインプロセスでリアルタイムにモニタリングし，所定の品質で確実に製品を仕上げることは，溶接施工のあるべき姿として多くの溶接技術者が永年開発の目標としている所である。

溶接現象も物理的なプロセスの一つであり，例えばケミカルプラントがそうであるように，センサーによるプロセスのモニタリングとその情報に基づく適切な制御により，製品の品質をコントロールするという手法が適用できる可能性がある。そのためには，溶接現象を数学的にモデリングしてセンサ情報と照らし合わせながら計算機により溶接結果をリアルタイムで把握する方法が効果的である。しかし，残念ながら溶接の場合，現象が複雑なことに加え，プロセスの置かれた環境が極めてラフであり，外乱の影響も大きい。このため，未だに実用上十分なモデルは構築されていないのが現状である。

溶接部の品質を知るもう一つの手段として，数学的なモデリングに依らず，いわば経験工学的に推定する方法がある。この方法は，溶接電流や溶接電圧，溶接速度などの溶接条件の変化と溶接品質との関係を実験的に解析し，あらかじめ健全な溶接が行える条件変化の範囲をしきい値として求めておき，溶接中にセンサーにより計測した値と比較することで，溶接品質の良否をリアルタイムに診断しようとするものである。本稿では，この溶接品質リアルタイム診断システムについて，最近紹介されたシステム^{1,2)}の基本的な考え方と応用事例について述べる。

2. 溶接品質リアルタイム診断システムの考え方

2.1 考え方

ここでは溶接欠陥を，割れを除く融合不良や溶込み不足，アングカッパ，オーバラップ，ピット，ポロシティ，タングステン巻込み，ビード外観不良，表面酸化などとして考えるが，これら溶接欠陥はいわば結果であり，その発生を溶接条件の変動から直接とらえることは困難である。また，品質確保の観点から見ても，発生してしまってから検知したのでは現状の非破壊検査と大差ないことになる。このため，溶接欠陥に至る前駆現象の発生時点で検知し，溶接を停止させることが望ましい。これらの前駆現象には溶着不良，過大溶融，過小溶融，シールド不良，ビード形状不良，電極接触，電極酸化などがあり，溶接欠陥に結びつく溶接の異常状態として，溶接電流，溶接電圧，溶接速度，フィラーワイヤ送給速度等の溶接条件が標準状態から逸脱して増大または減小すること，あるいはガスシールドが乱れることなどからその発生をとらえることができる。電流，電圧，速度の変化はセンサにより直接検知することができるが，ガスシールドの乱れるような場合でも，アーク現象の変化により電圧や音圧が変化するため，同様の手段で検知することができる。これら溶接品質診断の考え方を図1に示す。

2.2 システムの構成と情報の流れ

図2にシステムの構成を示す。本システムはパソコンを中心とするシステムであり，自動溶接機に取り付けたセンサにより溶接中の溶接電流，溶接電圧，溶接速度等の値を電気信号（以下溶接信号と呼ぶ）として取り出し，その変動状態とあらかじめデータベースとして登録してあるしきい値とを比較することで，異常状態の発生有無をリアルタイムで検知し，溶接部の品質良否を自動的に診断するものである。

本システムにおける情報の流れを図3に示す。システ

*原稿受付 平成12年4月1日

**正 員 石川島播磨重工業（株）生産技術開発センター
Member, Ishikawajima-Harima Heavy Industries CO., Ltd.

ムには溶接対象物の施工内容を決定するための溶接施工基本パラメータ（溶接法、材料、開先、積層法）を初期値として与える。また、あらかじめ実験的に求めておいたしきい値および診断のためのしきい値の組み合わせ条件をデータベースとしてメモリに格納しておく。溶接が開始されると、溶接信号が診断条件中のしきい値と比較され溶接異常状態発生の有無が診断される。なお、検出された溶接信号やシステムによる溶接異常診断の結果は、溶接位置と対応させてデータメモリに記録される。溶接異常の発生があったと診断された場合は、自動溶接

機に対し溶接停止信号を発信し、ただちに溶接を停止させる。これにより、溶接欠陥の発生はその前駆現象までに留めることができ十分な品質の確保を行うことができるが、必要があれば溶接終了後に、データメモリから溶接異常発生箇所の溶接信号データを読み出して、後述する推定ルールによりその場所で発生する可能性のある溶接欠陥の種類を推定することができる。

2.3 しきい値

溶接異常の発生を検知するためのしきい値としては、

図1 溶接品質診断の考え方

図3 溶接品質診断システムにおける情報の流れ

図2 溶接品質診断システムの構成

図4 信号が上下の許容限界を越えるときのしきい値

図5 信号の変化幅が許容限界を越えるときのしきい値

単独の溶接信号が標準条件領域を逸脱し上方または下方の許容限界を超える場合(図4)や信号の変化幅が許容値を超える場合(図5)を考慮している。さらに複数信号の同時変化を考慮すれば、単独で変化する場合に比べてより小さな変化で溶接異常が捉えられるとの観点から、2つの信号の同時変化も考慮して検知精度を向上させている。

2.4 診断条件

同一の溶接信号変化であっても、溶接施工の内容によっては、溶接異常が引き起こされるまでの信号変化量や溶接異常の種類が異なる場合がある。そこで、施工内容およびそれに付随する溶接異常の種類毎に、参照すべき溶接信号およびしきい値の種類を組み合わせで診断条件として設定する必要がある。本システムでは、溶接法、材料、開先、および積層法等の溶接施工基本パラメータの組み合わせで溶接施工の内容を選択し、それらに対して経験的に得られている知見から診断に使用すべき溶接信号を選択し、さらに選択した各溶接信号に対して、いずれのし

$$\begin{aligned}
 \text{ルール(欠陥群 A)} &= \left[CA \times \begin{array}{|c|} \hline \text{電流値の} \\ \text{ずれ具合} \\ \hline \end{array} \right] + \left[VA \times \begin{array}{|c|} \hline \text{電圧値の} \\ \text{ずれ具合} \\ \hline \end{array} \right] + \dots \\
 \text{ルール(欠陥群 B)} &= \left[CB \times \begin{array}{|c|} \hline \text{電流値の} \\ \text{ずれ具合} \\ \hline \end{array} \right] + \left[VB \times \begin{array}{|c|} \hline \text{電圧値の} \\ \text{ずれ具合} \\ \hline \end{array} \right] + \dots \\
 \text{ルール(欠陥群 C)} &= \left[CC \times \begin{array}{|c|} \hline \text{電流値の} \\ \text{ずれ具合} \\ \hline \end{array} \right] + \left[VC \times \begin{array}{|c|} \hline \text{電圧値の} \\ \text{ずれ具合} \\ \hline \end{array} \right] + \dots \\
 \text{ルール(欠陥群 D)} &= \left[CD \times \begin{array}{|c|} \hline \text{電流値の} \\ \text{ずれ具合} \\ \hline \end{array} \right] + \left[VD \times \begin{array}{|c|} \hline \text{電圧値の} \\ \text{ずれ具合} \\ \hline \end{array} \right] + \dots
 \end{aligned}$$

図6 欠陥群推定ルールの例

きい値を適用するかが自動的に指定される。

2.5 溶接欠陥の推定

本システムが溶接異常の発生有りと診断した場合は、自動溶接機に対し溶接停止信号が発信されただちに溶接を停止させるため、溶接欠陥の発生を未然に防止することができる。しかし、溶接信号の変化が急峻でかつ変化量が大きような場合は、瞬時に許容限界を超えてしまうため、溶接停止の処理が間に合わず、短時間ではあるが溶接欠陥が発生してしまう場合がある。このような場合には、溶接終了後に、データメモリから溶接異常発生箇所の溶接信号データを読み出して、その場所で発生する可能性のある溶接欠陥の種類を推定させることができる。

欠陥の推定はエキスパートシステムを使用して行っている。推定ルールは、溶接施工基本パラメータで決定される代表的な組み合わせ毎に、溶接信号の変化としきい値との相対関係を分析し、さらに関連する信号が如何に欠陥と結びつくかの対応づけを行って、数値演算が出来る形にルール化することにより作成している。これらのルールは、欠陥をそれらの発生位置により表面、内部、境界部等4つの群に分類して、溶接基本パラメータで決められるグループ毎にA～Dの4つの欠陥群推定ルールとしてデータベース化している。図6に各信号の値とそれぞれの標準とのずれ具合に、欠陥群の発生原因となる重み係数($CA, VA, \dots$)を信号毎にかけ、これら加算して作成した推定ルールの例を示す。推定演算では、A～Dのうち最も大きな値となったルールが、最も発生頻度の高い欠陥群であるとして選定される。

3. システムの応用事例

図7は、ステンレス鋼管(SUS 304 TP, Φ 318.5 mm, t 17.4 mm)の全姿勢 TIG 突合せ溶接において、本自動品質診断システムを適用した例である。なお、溶接材料には直径1.2 mmのステンレスワイヤ(Y 308 L)、シールドガスにAr 100%ガスを用いていた。図7に示すように、本システムでは検出された溶接信号のうち何らかの変化が見られたものの記録がデータモニタとして、横軸を時間軸として逐次ディスプレイに表示される。また

図7 溶接品質診断システムの適用事例（ステンレス鋼管の全姿勢突合せ溶接）

品質診断および欠陥群推定の結果は、データとの対応付けが容易に行えるようにデータモニタと時間軸をそろえて短い棒線でディスプレイに表示される。

この例では、溶接電流とワイヤ送給速度を同時に変化させて実験を行っており、ステップ1で溶接電流を標準値の170 Aから160 A迄減少させると同時にワイヤ送給速度を標準値の800 mm/minから1200 mm/min迄増加させたのち再び標準値に戻し、次にステップ2で溶接電流を標準値から140 A迄減少させ、ワイヤ送給速度も標準値から1400 mm/min迄増加させた。

ステップ1では良好な溶接が行われたが、ステップ2でビード外観が凸でオーバーラップ状になる溶接異常が発生した。なお、通常であればこの時点で溶接停止信号が出され直ちに溶接が停止するが、ここではシステムの診断動作確認のため、あえて停止信号を出さずに溶接を続行させた。溶接診断結果は、ステップ2で異常有りが連続的に表示された。

引き続き溶接終了後に、データメモリから溶接異常発生箇所の溶接信号データを読み出して、欠陥群の推定を行った。推定結果は、異常発生箇所の全域にわたって欠陥群B（溶着金属表面で母材との境界部におけるアンダカットやオーバーラップ）の存在が表示され、後半部に欠陥群A（溶着金属表面における外観不良、ピット、酸化）の存在

が示された。これらの推定結果は、図7下部に添付した溶接ビード外観写真と良く一致しており、本システムによる溶接部の品質診断結果が正しかったことが示された。

4. おわりに

溶接中の溶接電流および溶接電圧等を常時監視し、これらの変化から溶接部の品質を診断する溶接品質リアルタイム診断システムについて、その考え方と応用事例を紹介した。本システムが有効に機能するためには、正確なしきい値を数多く必要とするが、現状ではこれらを全て実験的に求めているため、しきい値データの取得には多大な時間を要している。このことはシステムの汎用性を妨げる大きな原因となっており、今後はいちいち実験をしなくても基本的なしきい値データベースが得られれば、そこからの推定で所望のしきい値が得られるようなシステムの開発が望まれている。

参考文献

- 1) 手島, 小野他: 自動品質確認システム, 溶接学会 H 10 年度技術セッション, 溶接の自動化における最新技術
- 2) 手島, 小野: 溶接品質のリアルタイム確認システム, 溶接法研究委員会編, 溶接法ガイドブック 4, 容器配管溶接の最新技術 (1999)