

# ロボット MAG 溶接における 溶接欠陥検知システムの開発

Development of Welding Defect Detection System for Robotic MAG Welding



|     |     |                     |   |
|-----|-----|---------------------|---|
| 佐々木 | 要 輔 | Yosuke Sasaki       | ① |
| 日 置 | 幸 男 | Yukio Hioki         | ① |
| 戴   | 英 達 | Yingda Dai          | ② |
| 中 谷 | 光 良 | Mitsuyoshi Nakatani | ③ |

## あらまし

当社では、ロボットMAG溶接中の電流・電圧波形から、溶接欠陥（ブローホール）を検知するシステムを開発したり。厚板溶接ではパルスMAG溶接を用いたロボットによる積層溶接が一般に広く用いられている。本システムでは、パルスMAG溶接中の電流・電圧波形を高速で計測・処理し、得られる度数分布図を6つの領域に分割し、算出した各領域で特徴量を閾値と比較する。閾値を超過した特徴量によって、ブローホールの有無を判定し、有りだと判定した場合にロボットを停止する。このシステムにより、95%以上の確率でブローホールを検知することができる。開発した本欠陥検知システムを社内工場の2基の厚板ロボット溶接システムに導入した。

## Abstract

Multi-layered welding by robot using pulse MAG welding is widely used for thick plates. Hitachi Zosen has developed a system that detects welding defects (blowholes) from current and voltage waveforms during robot MAG welding. In this system, the frequency distribution map obtained by measuring and processing the current / voltage waveform during pulse MAG welding at high speed is divided into six regions, and the feature amount is compared with the threshold value in each calculated region. The presence or absence of a blow hole is judged by the parameters exceeding the threshold and the robot is stopped when it is judged that there is blowhole. This system detects blowholes with a probability of 95% or more. We introduced the developed defect detection system to two thick plate robot welding systems at our factory.

## 1. 緒 言

大型鋼構造物の厚板溶接ではロボットによるMAG積層溶接が用いられる<sup>2)</sup>。特に、低スパッタで良好な溶接を行うためにパルスMAG溶接が多く用いられている<sup>3)</sup>。当社においても、図1に示すように船用エンジン部材、自動車プレス部品等の溶接に対してロボットによるパルスMAG溶接を適用している。溶接箇所は、突合せ溶接またはすみ肉溶接であり、いずれも多パスの積層溶接である。オフラインティーチングによって作成された積層溶接用のプログラムがロボットへ送られ、初層から最終パス

まで決まったパス割りで自動的に連続溶接される。

適切な溶接条件を設定し、MAG溶接を行った場合でも、何らかの要因によって溶接欠陥が発生することがある。特に、溶接中の風やノズル詰まりによるシールドガス不良、母材およびワイヤに付着した汚れのために、溶接線上にブローホールが発生し得る。ロボット溶接システムでは、溶接途中にブローホールが発生した場合でも、連続して施工する積層溶接プログラムのために、ブローホールの発生に気付かず次パスの溶接を行うことがある。そのため、溶接途中にブローホールが発生した場合には、すべての溶接パスが終了した後に、検査を行い、その後手直しをしなければならない。厚板の積層溶接完了後の手直し作業では、作業時間も増加し、負担も大きくなり、コストアップにも繋がる。生産性向上のためには、信頼性の高い検知システムが要求されるが、既存の欠陥検知システムでは、過剰検知が多く、頻繁にロボットが停止す

① 技術研究所 ものづくり基盤研究センター

② 環境事業本部 開発センター

③ 技術研究所 ものづくり基盤研究センター 博士(工学)、大阪大学接合科学研究所 特任准教授

るという課題があった。

そこで、本開発では、積層溶接中の電流・電圧波形データから抽出した複数の特徴量を用いた、高精度なブローホール判定アルゴリズムを考案し、新たな検知手法として提案する。溶接中にブローホールを検知し、その時点でロボットを停止させるシステムであり、製品の品質向上および手直し時間の短縮を図る。以下に、この手法およびシステムについて述べる。



図1 ロボットMAG溶接

## 2. ブローホール検知手法

### 2.1 パルスMAG溶接 図2にパルスMAG溶接

の正常時の電流・電圧波形を示す。パルスMAG溶接では、電流・電圧波形はそれぞれ周期的にピーク値とベース値を繰り返す。電流および電圧のピークとベースは同期しており、何らかの原因で溶接が乱れた場合は、電流値や電圧値が正常な溶接時と比べて異なる傾向を示す。

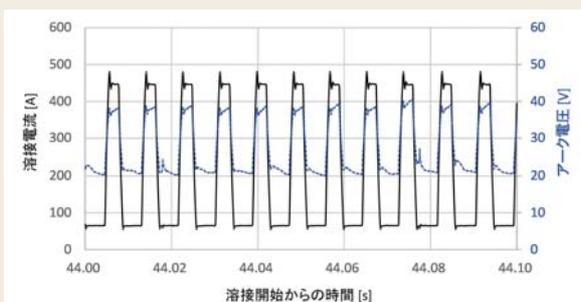


図2 パルスMAG溶接の電流波形 (正常時)

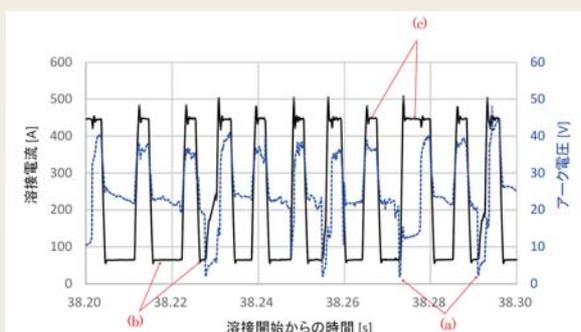


図3 パルスMAG溶接の電流波形 (ブローホール発生時)

図3は風によりブローホールを発生させた時の電流・電圧波形である。風によりアーク長が変化するため、電圧も変化する。図3に示すブローホール発生時の電流・電圧波形では、瞬間的な電圧低下 (a) やベース幅の変化 (b)、ピーク幅の変化 (c) 等が発生していることが分かる。また、図2と比較して、図中 (0.1秒間) の波形の数 (周波数) も異なる。そこで、電流・電圧波形から、数値化されたいくつかの特徴量を抽出し、それらの値を閾値と照らし合わせて判定することにより、ブローホール検知が可能と考えられる。本開発では、特徴量からブローホール検知を行うためのアルゴリズムを考案した。

### 2.2 電流・電圧度数分布 パルスMAG電源では、電流と電圧が同期して変化するため、まず電流と電圧の度数分布の確認を行った。図4および図5に、電流、電圧の度数分布図の例を示す。図4は正常な溶接時、図5はブローホール発生時の度数分布図であり、いずれも計測時間1秒間、計測周波数10kHzである。正常な溶接時には、電流・電圧ともに周期的なパルス波形を描くため、ピークとベースの2点に度数分布が集中していることが分かる。一方、ブローホール発生時には、波形が乱れ、ピークとベース以外の度数分布が多くなる。そこで、一定周期ごとの電流、電圧分布データに対して、統計処理を行い、ブローホール検知のための特徴量の抽出を行った。

図4は正常な溶接時、図5はブローホール発生時の度数分布図であり、いずれも計測時間1秒間、計測周波数10kHzである。正常な溶接時には、電流・電圧ともに周期的なパルス波形を描くため、ピークとベースの2点に度数分布が集中していることが分かる。一方、ブローホール発生時には、波形が乱れ、ピークとベース以外の度数分布が多くなる。そこで、一定周期ごとの電流、電圧分布データに対して、統計処理を行い、ブローホール検知のための特徴量の抽出を行った。

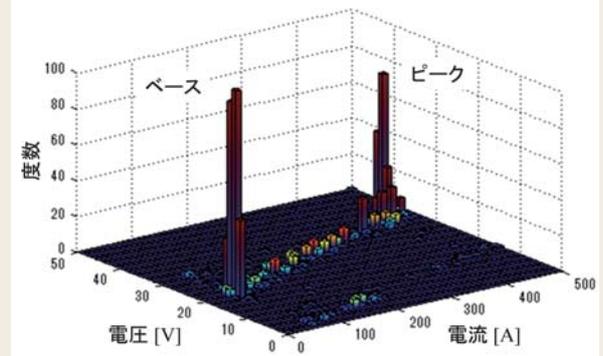


図4 パルスMAG溶接の電流・電圧度数分布図 (正常時)

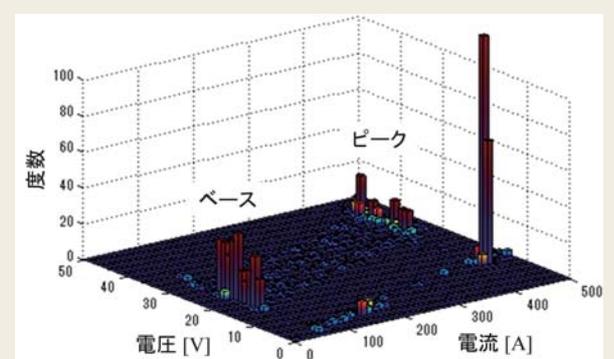


図5 パルスMAG溶接の電流・電圧度数分布図 (ブローホール発生時)

2.3 電流・電圧分布図のエリア分割 図6に2次元の電流・電圧分布図を示す。ここで、ピークを示す領域とベースを示す領域から以下の6つの領域に分けること

ができる。すなわち、ベースエリアPB、ピークとベースの遷移区間rf、ピークエリアPP、ベース側の短絡エリアsB、ピークとベースの遷移区間における短絡エリアsrf、ピーク側の短絡エリアsPである。これらの区間は以下の手順で分割することができる。まず、ピークとベースそれぞれの電流・電圧の最頻値を通る直線を引く。さらに、ピーク部分とベース部分それぞれの最頻値からの電流軸方向および電圧軸方向にある値を設定することにより、電流・電圧分布図を6つのエリアに分割することができる。電流軸方向はI1、I2、I3、I4の4つの値、電圧軸方向はV1、V2、V3、V4の4つの値を設定する。エリア分割は、一定周期の電流・電圧分布図に対して毎回実施する。

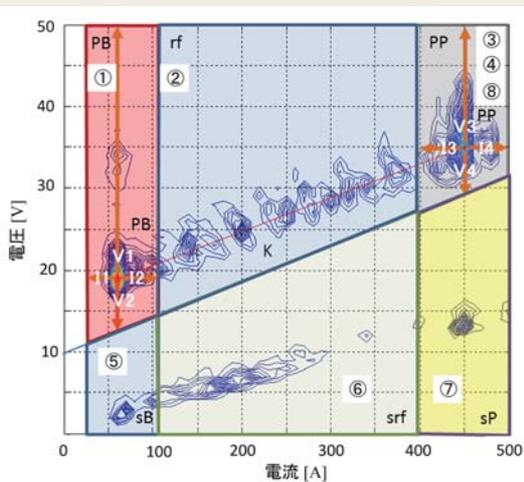


図6 電流・電圧分布図

**2.4 特徴量の算出** ブローホールの有無によって電流・電圧の度数分布が変動するため、前節で示したエリアごとに特徴があることが考えられる。そこで、ブローホール検知のために、以下に示す9つの特徴量を選定した。各特徴量を算出し、閾値を超過しているか判定を行い、それらを総合的に評価してブローホール（欠陥）発生の有無を判定する。

- ①ベースエリア (PB) における電圧軸方向の分散
- ②ピークとベースの遷移区間 (rf) における電圧軸方向の分散
- ③ピークエリア (PP) における電圧軸方向の分散
- ④ピークエリア (PP) における度数
- ⑤ベース側の短絡エリア (sB) における度数
- ⑥ピークとベースの遷移区間の短絡エリア (srf) における度数
- ⑦ピーク側の短絡エリア (sP) における度数
- ⑧ピークエリア (PP) における最頻値の度数
- ⑨電流波形を高速フーリエ変換 (FFT) した場合の標準偏差

⑨は、一定時間における電流波形をFFT処理した際のパワースペクトルの標準偏差である。ブローホール発生時には、パルス波形のベースおよびピーク幅が様々に変化するため、電流波形周波数も一定とならない。図7および図8に1秒間の電流波形に対してFFT処理を行った

場合のパワースペクトルを示す。図7は正常時のパワースペクトルであり、140Hz付近に局所的に高いピークがある。一方、図8に示すブローホール発生時のパワースペクトルでは、同様に140Hz付近でピークが確認できるが、ピーク時の値は小さく、より低周波数域でのパワースペクトルの値が大きくなっている。このとき、ピーク周波数近傍のパワースペクトルの標準偏差は、ブローホールありの場合よりもブローホール無しの方が大きくなる。(ただし、ピーク周波数を $f_p$ とすると、 $1/2 f_p$ から $3/2 f_p$ までの範囲で標準偏差を計算する。これは、 $f_p$ の倍数の周波数ごとにピークが生じるためである。) 以上より、⑨の標準偏差を特徴量として選定した。

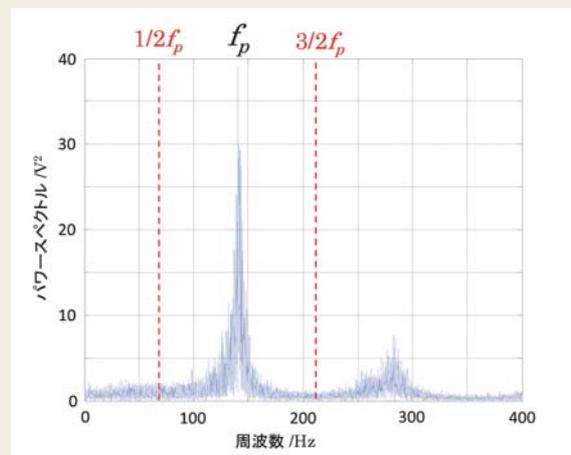


図7 溶接電流FFT時のパワースペクトル (正常時)

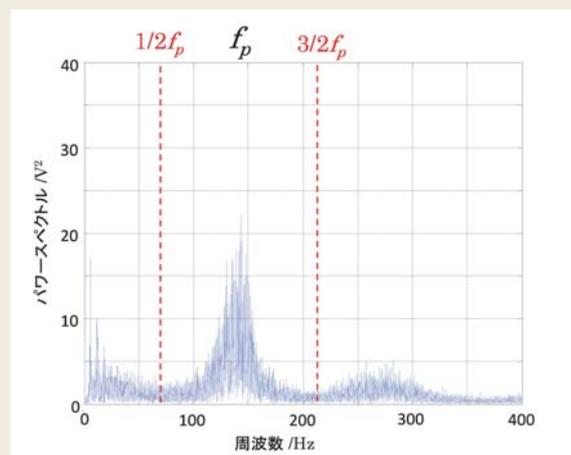


図8 溶接電流FFT時のパワースペクトル (ブローホール発生時)

### 3. ブローホール検知システム

**3.1 装置構成** ロボットによるMAG溶接には、1つの電極でアークを発生させるシングル溶接の他に、2つの電極でアークを発生させ能率を上げるタンデム溶接がある。開発したブローホール検知システムは、シングル溶接およびタンデム溶接に対応している。

図9にタンデム溶接の場合の本システムの機器構成を

示す。演算処理装置および表示装置は、ロボット溶接システムに隣接した管理室に設置している。本システムでは10kHz以上の計測周波数が必要であるが、電流・電圧を各2組計測するタンデム溶接の場合であっても、最高10kHz以上の周波数で計測可能である。

計測周波数を過剰に上げると、計測データ容量が増大し、転送や処理に時間がかかるという問題もある。本システムの計測時には、高周波ノイズを除去するため、5kHzのローパスフィルタを使用している。溶接電流計測は、シャント抵抗あるいは最高15kHzまでの高周波に対応しているクランプメータを用いており、電圧は送給装置と母材間で計測している。各パスの溶接開始・終了のタイミングを溶接電流により検知し、計測を開始、終了する。計測された電流・電圧データは演算処理装置内で専用プログラムにより、次節で述べるブローホール検知処理が行われる。なお、パルスMAG溶接時の電流・電圧波形の周波数は100Hzから150Hz程度であり、AD変換速度10kHzとしてブローホールを検知している。

1パス溶接ごとに測定データの収集・解析を行い、解析結果は表示装置上に出力される。欠陥ありと判定すると溶接ロボットの制御盤に対して、ロボット停止と警告灯点灯の信号を送る。これにより、連続自動溶接中にブローホールを早期発見でき、それに対する補修作業の時間を低減できる。

タンデム溶接の場合は、2台の溶接電源に対して、2組の電流・電圧を1台の演算処理装置で同様に計測する。各電流、電圧に対して、同じブローホール判定方法を用いており、使用する特徴量もシングル溶接時と同じである。各特徴量の閾値は、先行極と後行極で一部異なり、いずれかの電極側で異常ありと判定された場合に、ブローホールが発生したと判定する。

**3.2 ブローホール検知手順** ブローホール検知のための手順としては、図10に示すように大きく分けて前処理、特徴量算出、ブローホールの有無判定の3つがある。

前処理では、まず電流・電圧を一定間隔でAD変換する。溶接開始後数秒間はアークが不安定であり、溶接終了時にはクレータ処理を行うため、溶接途中の正常な電流・電圧波形と異なる波形形状を示す。そのため、溶接開始後および終了前の数秒間を処理範囲外としている。そのうえで、溶接中の電流・電圧データを事前に設定した一定時間ごとのデータに分割する。分割ピッチが短いとデータ数が少なく正確な判定ができない可能性があり、分割ピッチが長いとブローホール発生位置の特定が難しくなるため、適切な値を選定する必要がある。

次に、得られた一定時間ごとのデータに対して特徴量の算出を行う。電流・電圧度数分布図を作成し、ピークとベースの各極大値を通る直線と設定値を用いて6つのエリアに分割する。6分割されたエリアに対して、選定した9つの特徴量の計算を行い、それらの値をコンピュータ内のファイルに記録する。これらの処理を溶接全長分に対して繰り返し行う。

1パスの溶接が終了すると、ブローホール有無の判定を行う。一定時間ごとに算出された特徴量が、それぞれに設定された閾値を超えているか判定を行う。閾値を超えた特徴量が一定数以上あり、かつその状態が規定の時間以上続けば、ブローホールがあると判定する。判定時の各特徴量には判定精度を向上させるための重みづけしている。各特徴量の閾値は、電流値によって変える必要があるため、溶接電流波形の周波数に応じて自動で変化させている。

以上の手順により、求められたブローホールの判定結果は、ロボット制御盤に送られる。ブローホール無しの場合は、引き続き次パスの溶接が行われる。一方、ブローホールがあると判定されると、溶接ロボットは次のパスを施工する前に自動的に停止する。同時に警告灯が点灯し、作業者にブローホールが発生したことを知らせる。作業者が確認、補修をした後に、警告解除することで、次パスの溶接を行う。

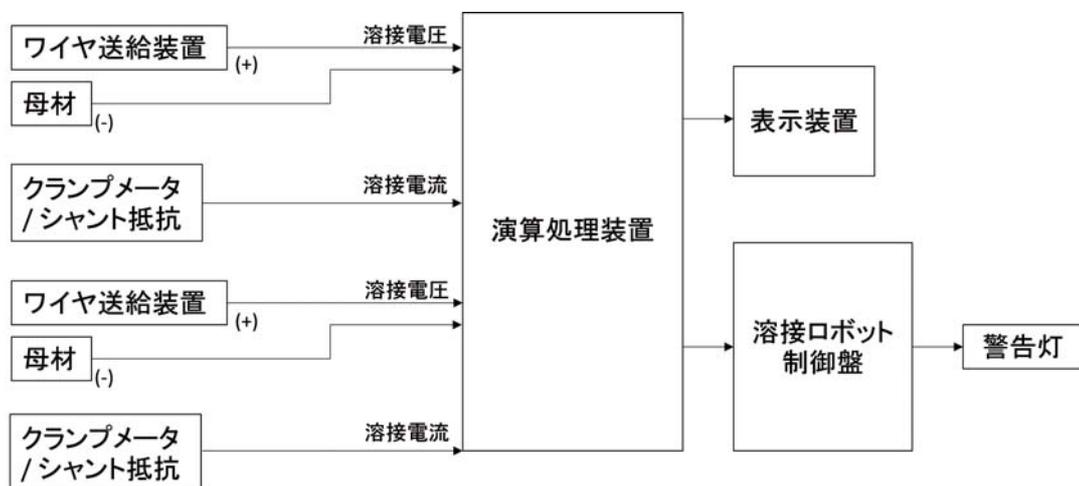


図9 ブローホール検知システム構成

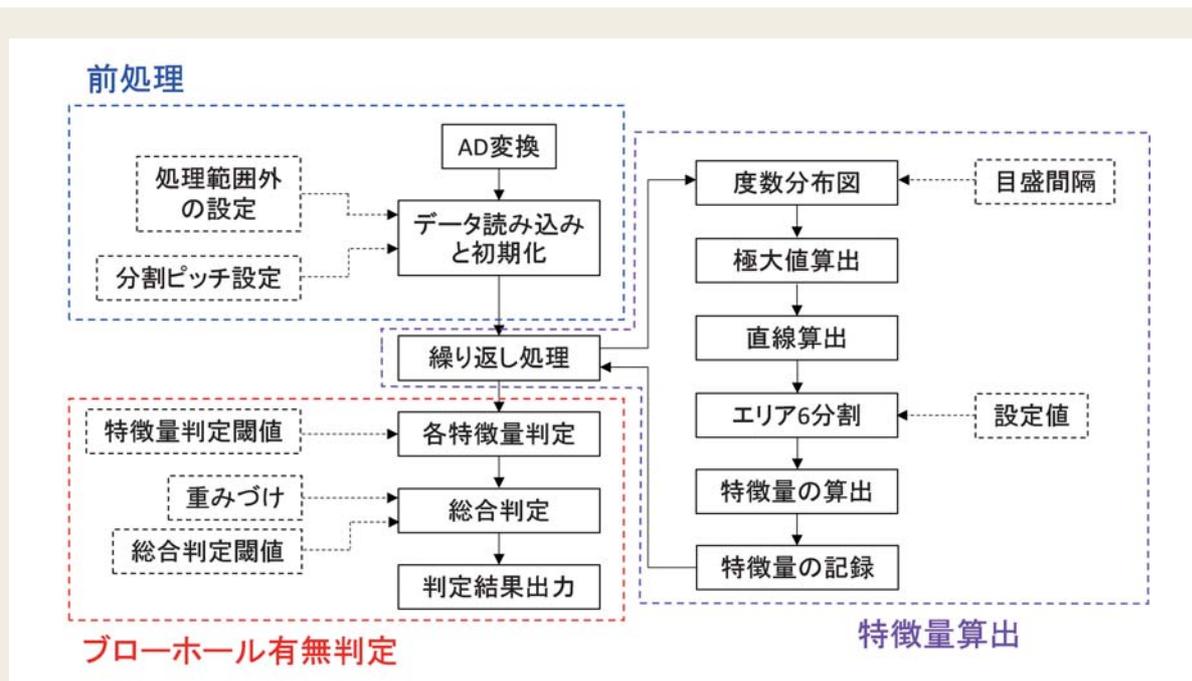


図10 ブローホール検知プロセス

本システムは、社内の2工場のロボット溶接システムに導入しており、図11にその概観を示す。管理室内に設置した表示装置上に、本システムの状態が「待機中」「溶接」「処理中」「警告」のいずれかが示され、溶接中は、電流・電圧の度数分布図がリアルタイムで表示される。また、各パスの溶接終了後にブローホールが検知されると、実際の溶接ビード上での位置が分かるように、その発生位置を表示装置上に出力する。

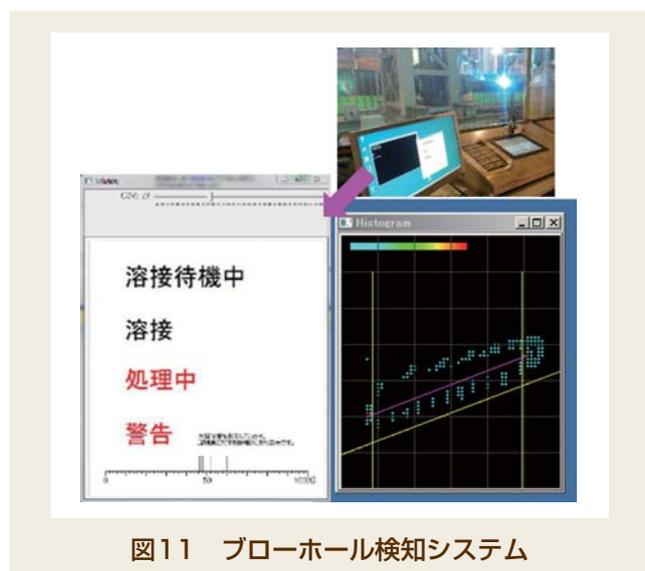


図11 ブローホール検知システム

## 4. ブローホール検知確認実験結果

4.1 ブローホール検知確認実験 開発したブローホール検知システムの効果を確認するため、意図的にブローホールを発生させる条件で溶接実験を行った。実験では、風によって溶接部のシールドガスが飛散する

状況を模擬し、炭素鋼板に対して、ロボットによるビードオンプレート溶接を行った。図12に実験の様子を示す。溶接条件を変化させた複数回の実験を実施し、ブローホールを検知できるか確認した。

表1に実験で用いた溶接条件の一例を示す。実工事で用いられている条件を参考に実験条件を決定した。MAG溶接においては、一般に風速2m/s以上であればシールドガスが飛散し、ブローホールが頻繁に発生するとされている<sup>4)</sup>。そこで本実験では、風速2m/sにおけるブローホールが検知可能か確認した。

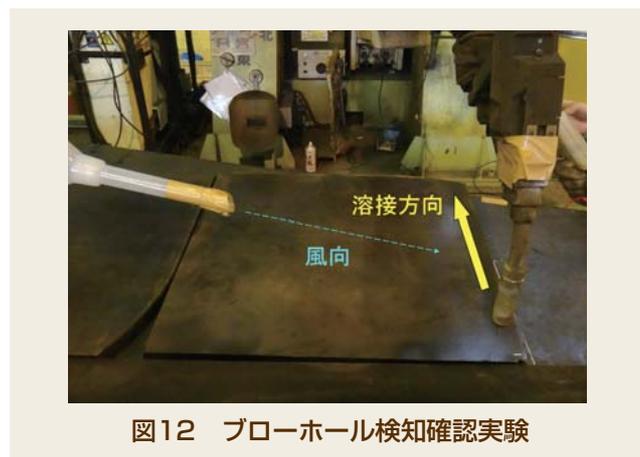


図12 ブローホール検知確認実験

表1 実験における溶接条件

|        |                           |
|--------|---------------------------|
| 溶接電流   | 300A                      |
| アーク電圧  | 30V                       |
| 溶接速度   | 30cm/min                  |
| シールドガス | Ar80%-CO <sub>2</sub> 20% |
| ガス流量   | 30ℓ/min                   |
| 風速     | 2m/s                      |

図13に本システムを用いたブローホール検知の判定結果の一例を示している。9個の特徴量のうち、閾値を超過した特徴量の数をグラフの縦軸に表している。ブローホールと判定された位置が実際のブローホール発生位置とよく一致している。

本システムにおけるブローホールの有無の判定結果が、実際の溶接ビードにおけるブローホールの有無と一致している場合は、正確に検知していると言える。一方、判定結果が、実際の溶接ビードにおけるブローホールの有無と一致していない場合は、誤検知となる。すべての判定結果に対する正確な検知の割合を検知率とすると、本実験における検知率は95%以上となった。

開発したブローホール検知システムは、突合せ溶接やすみ肉溶接に対しても、各特徴量の閾値を適切な値に設定することで適用可能である。

## 5. 結 言

ロボットによるパルスMAG溶接中の電流・電圧波形データから溶接欠陥(ブローホール)を検知するシステムを開発した。電流・電圧分布から得られる度数分布図を6つの領域に分割し、各領域での特徴量を求め閾値と比較することで、欠陥の有無を判定する。実験において溶接中に意図的に欠陥を発生させた結果、本システムによる判定結果と、実際の欠陥発生位置は良く一致し、検知率は95%以上となった。開発した溶接欠陥検知システムは、当社の2工場のロボット溶接システムに導入している。

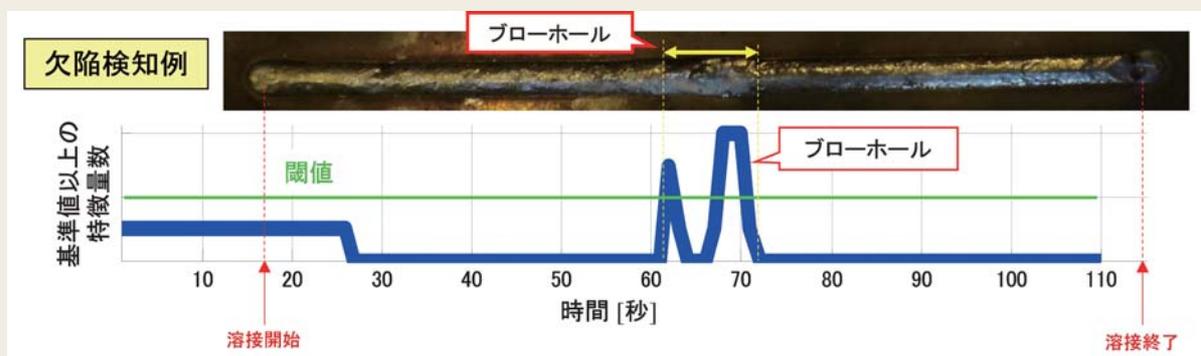


図13 ブローホール位置判定結果

## 参考文献

- 1) Sasaki,Y.;Yukio,H.;Dai,Y. et al. :Development of a Blowhole Detection System for Robotic MAG Welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, (2017), Vol.35 No.2, pp.117-121.
- 2) 辻勝之, 小川亮, 山崎圭ほか: 中厚板向けロボット溶接プロセス, 神戸製鋼技報, Vol.63, No.1 (2013), pp.48-53.
- 3) 松縄朗, 山本英幸, 平本誠剛: パルスアーク溶接法, 溶接学会誌, 第53巻 第6号 (1984), pp.20-58.
- 4) 新版溶接・接合技術特論, 溶接学会編, 産報出版, (2013), p.381.

### 【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業企画・技術開発本部  
技術研究所 ものづくり基盤研究センター  
佐々木要輔  
Tel : 06-6551-9239 Fax : 06-6551-9086  
e-mail : sasaki\_yo@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Business Planning & Technology Development  
Headquarters  
Technical Research Institute  
Innovative Manufacturing & Technology  
Research Center  
Yosuke Sasaki  
Tel : +81-6-6551-9239 Fax : +81-6-6551-9086  
e-mail : sasaki\_yo@hitachizosen.co.jp



佐々木 要 輔



日 置 幸 男



戴 英 達



中 谷 光 良