

# 非破壊検査で省人化と信頼性向上に貢献する スポット溶接検査ロボット

Spot Welding Inspection Robot Achieving Labor Saving and Improvement of Reliability Using 3D Ultrasonic Inspection Equipment

牛島 彰 USHIJIMA Akira 齊藤 真弘 SAITO Masahiro 松本 真 MATSUMOTO Shin

スポット溶接は、自動車や鉄道車両などの強度品質を大きく左右する重要な工程であるが、溶接箇所が数千点もある製品の場合、抜き取りによる破壊検査が主流になっている。しかし、高張力鋼板（ハイテン）材の増加に伴い、スポット溶接部を人手によらず短時間で精度良く検査可能な非破壊検査へのニーズが高まっている。

そこで、東芝グループは、スポット溶接部の自動探傷を実現するため、開口合成法を用いて溶接内部の3次元（3D）画像化が可能な超音波検査装置 Matrixeyeとロボット制御技術を組み合わせて、スポット溶接検査ロボットを開発した。熟練を要していた超音波プローブの角度調整操作（あおり操作）を、超音波画像解析技術と緻密なロボット位置制御技術を用いて短時間で行うことができる。フィールドテストによる改良を重ねて信頼性や使い勝手の向上を図り、早期実用化を目指している。

Spot welding is an important process in the automobile and rolling stock fields, closely related to the strength of joints. However, conventional manual destructive inspection methods using sampled products are still the mainstream in the process of manufacturing these products, which typically have several thousand welded parts. Accompanying the widespread use of high-tensile-strength steel plates in these fields, demand has now arisen for nondestructive methods allowing such welded parts to be automatically and swiftly inspected with high accuracy.

The Toshiba Group has developed a spot welding inspection robot integrating its Matrixeye three-dimensional (3D) ultrasonic inspection equipment based on a synthetic aperture focusing technique and its propriety robot control techniques. This robot makes it possible to adjust the tilt angle of the ultrasonic probe of Matrixeye, which requires highly skilled operation of the end effector of the robot, in a short time by applying ultrasonic image analysis and precise robot positioning control techniques. We are aiming to achieve the practical application of this spot welding inspection robot at an early stage by improving its reliability and usability through repeated field tests.

## 1. まえがき

自動車のボディーや鉄道車両などの組み立てに多く用いられるスポット溶接の接合検査は、接合部の近傍にたがねを打ち込んで剥離の有無を確認する、たがね試験が一般的である。たがね試験では、接合部に剥離が生じなければ合格としている。

一方、近年、車体の軽量化と高強度化が進むにつれて、ハイテン材の採用が増えてきている。ハイテン材は、固く変形しにくいことから、たがねを打ち込むことが難しい。また、たがねの打ち込みによる間接的な評価方法ではなく、溶接径（ナゲット径）を直接測定し、数値管理したいとのニーズも高い。これらの理由などから、スポット溶接部の検査に、各種の非破壊検査装置を導入するケースが増えてきている。

東芝グループは、スポット溶接部の非破壊自動探傷を実現するため、これまでに医療用や発電プラント用に培ってきた超音波検査技術を用い、スポット溶接内部の接合状態を3Dで高速・高精細に画像化する検査装置 Matrixeyeシ



図1. Matrixeye VI

スポット溶接検査用の最新機種で、探傷速度の向上による検査時間の短縮や、粉塵（ふんじん）や振動などに対する耐環境性の向上を図っている。

Matrixeye VI portable type 3D ultrasonic inspection equipment

リーズ(図1)<sup>(1), (2)</sup>を商品化した。Matrixeyeは、国内外の自動車メーカーで、スポット溶接検査に用いられている。

今回、Matrixeyeとロボット制御技術を組み合わせてス

ポット溶接部の非破壊検査を自動で行う、スポット溶接検査ロボットを開発した。ここでは、開発したスポット溶接検査ロボットのシステム構成、特長（超音波プローブの角度調整操作の自動化技術）、及び今後のスポット溶接・検査品質管理システムへの展開について述べる。

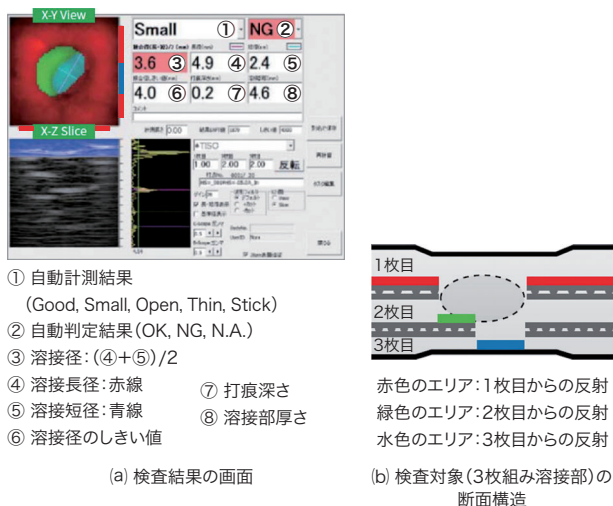
## 2. Matrixeye

### 2.1 概要

Matrixeyeは、独自に開発した3Dフェーズドアレイ開口合成法(3D PA-SAFT: 3D Phased Array-Synthetic Aperture Focusing Technique)を用いた超音波検査装置であり、高精度・高感度に3D画像を表示できることを特長としている。この特長を生かし、航空機部品(CFRP(Carbon-Fiber Reinforced Plastic)製の部品など)や、自動車部品(アルミニウムダイカストやスポット溶接部)、鋼材(母材や配管溶接部)などの非破壊検査に用いられている。

スポット溶接検査用のMatrixeye STは、自動車部品の検査に多く用いられており、スポット溶接の溶接径を自動計測し、接合状態の良否判定を行う専用のアプリケーションを搭載している(図2)。

最新機種のMatrixeye VI(図1)は、同時受信可能なチャンネル数と、開口合成演算の並列数を倍増させ、従来比1.6倍の、より高速な画像化を実現した。また、3D超音波反射画像のリアルタイム表示機能や、超音波プローブ傾き調整ガイド機能を備え、検査員に分かりやすい操作性や、



NG: No Good    N.A.: Not Applicable

図2. Matrixeye STでの検査結果の表示画面例

接合状態を色分けして分かりやすく表示でき、溶接径や打痕深さを測定し、溶接状態の良否判定を自動で行う。

Example of Matrixeye display showing inspection results

溶接点データベース、検査プログラム作成、同一打点の検査履歴、レポート作成などの管理機能も備えている。

### 2.2 スポット溶接部検査の自動化への課題

Matrixeyeをはじめとした超音波探傷法を用いた非破壊検査では、検査対象に対し、超音波プローブを最適な角度で当てることが重要である。実際の製造現場では、検査員が検査装置のモニターに映る超音波反射画像を見ながら最適な画像が得られるように、毎回、超音波プローブの角度調整操作(あおり操作)を行っている。

Matrixeyeを用いて、テストピースのスポット溶接部(溶接径6mm)を測定した場合の、超音波プローブの溶接面に対する角度特性データを図3に示す。この結果から、溶接面に対する超音波プローブの角度をある範囲内( $\pm\alpha_x^\circ$ ,  $\pm\alpha_y^\circ$ )に合わせると、溶接径の測定値としてほぼ同じ値(6mm前後)が得られることが分かる。したがって、自動化には、超音波プローブの角度を溶接面に対して、 $\pm\alpha_x^\circ$ ,  $\pm\alpha_y^\circ$ 以内に合わせる必要がある。

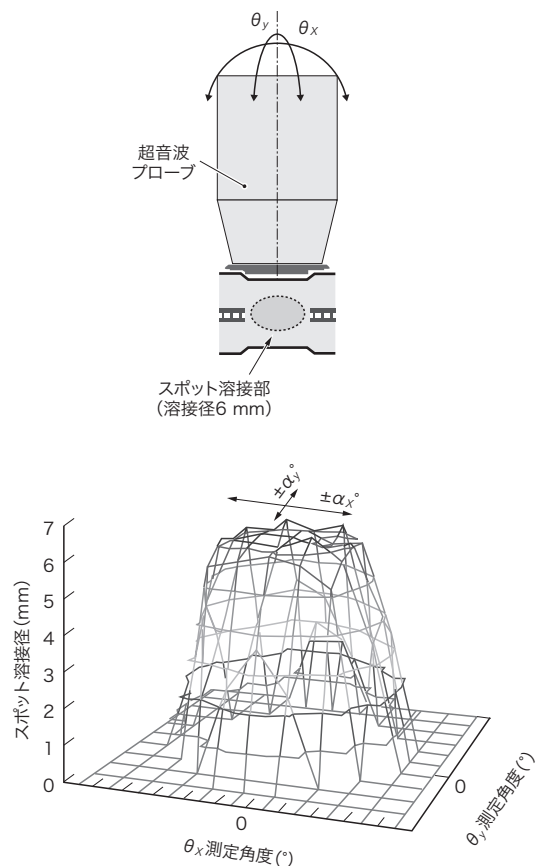


図3. 超音波プローブの角度特性データ例

溶接径6mm相当のテストピースでのスポット溶接径を、超音波プローブの角度を変化させながら測定した結果である。

Example of angle characteristics of ultrasonic probe

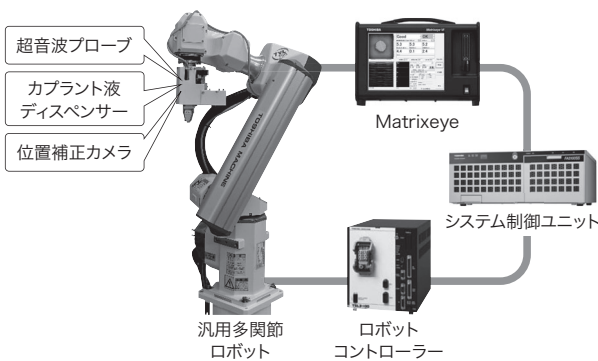
### 3. スポット溶接検査ロボット

#### 3.1 システム構成

開発したスポット溶接検査ロボットのシステム構成を、**図4**に示す。多関節ロボットの手先に超音波プローブを備え、任意の位置・姿勢で検査を行う。手先には、接触媒質であるカプラント液を塗布するディスペンサーや、溶接検査箇所的位置ずれ量を検出する位置補正カメラも備えている。これらの手先ユニット、多関節ロボット、Matrixeyeのコントロールをシステム制御ユニットが行う。**図4**に示したシステム構成では、東芝機械(株)製のロボットを採用しているが、システム制御ユニット内に各社製のロボットに対応した動作指令モジュールを備えており(この特集のp.12-15参照)、ユーザーが指定するロボットに対応できる。

#### 3.2 スポット溶接検査フロー

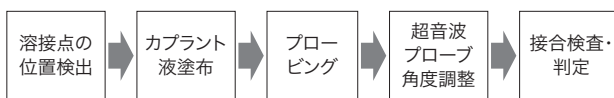
スポット溶接検査フローを**図5**に示す。初めに、検査対象のスポット溶接点を位置補正カメラで撮像し、画像処理により溶接点の位置を検出する。そして、検出した溶接点にディスペンサーを用いてカプラント液を塗布する。次に、超音波プローブをスポット溶接点に当てて、測定(プロービング)を開始する。この段階では、超音波プローブの角度は最初に教示した角度であるため、必ずしもスポット溶接面



**図4. スポット溶接検査ロボットのシステム構成**

各種ロボットに対応した動作指令モジュールを備えたシステム制御ユニットが、ロボット全体の動作をコントロールするので、主要なロボットメーカー製の多関節ロボットに対応できる。

Configuration of spot welding inspection robot system



**図5. スポット溶接検査フロー**

スポット溶接点の位置検出から検査終了までを約7sで行うことができる。

Flow of spot welding inspection processes

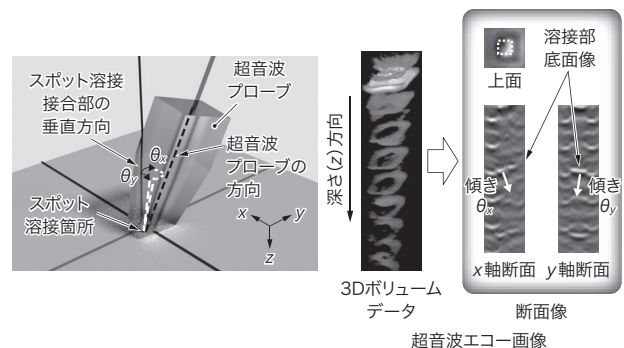
に対して最適な角度(垂直)になっているとは限らない。そこで、3.3節で述べる超音波プローブの角度調整を行い、その後Matrixeyeで接合検査・判定を行う。

#### 3.3 超音波プローブの角度調整機能

2.2節で述べたように、超音波プローブは角度依存性を持っているため、検査時には超音波プローブの角度を溶接面に対して垂直に合わせる必要がある。そこで、この検査ロボットは、Matrixeyeで測定した3Dボリュームデータのx軸・y軸断面の超音波反射強度データ(超音波エコー画像)から溶接部底面の傾きを推定し、多関節ロボットで超音波プローブの角度を補正する。超音波プローブの傾き推定法を**図6**に示す。超音波プローブを溶接面に当てた後、Matrixeyeで超音波反射強度データを取得する。**図6**に示した超音波エコー画像は、上側が溶接部の表面で、下向きに深さ方向のデータを示している。輝度が高い部分は、超音波反射強度が強い部分であり、接合部底面や未接合面からの反射である。

この超音波エコー画像から、溶接部に対する超音波プローブの傾きを算出する(詳細は、この特集のp.10-11参照)。

超音波プローブの角度調整機能の評価結果を**図7**に示す。このグラフは、超音波プローブをティーチング位置(教示位置)からある角度だけ傾けた角度(縦軸上の黒丸7か所の角度)から角度調整動作をスタートし、補正角度がある角度範囲以下になるまで角度調整を繰り返した結果である。角度調整回数を重ねると $+\psi_x$ 、 $-\psi_y$ 付近に収束し、3回の調整で超音波プローブの角度ばらつきがある角度範囲内に収まった。この結果は、2.2節で述べた自動化に要求される $\pm\alpha_x^\circ$ 、 $\pm\alpha_y^\circ$ 以内の角度合わせ精度を実現するためには、少なくとも3回の角度補正を実施する必要があることを



**図6. 超音波プローブの傾き推定法**

3Dボリュームデータのx軸・y軸断面の超音波エコー画像から、白色の矢印で示した超音波プローブの傾き $\theta_x$ 、 $\theta_y$ を算出する。

Estimation of ultrasonic probe angle using 3D ultrasonic reflection intensity data

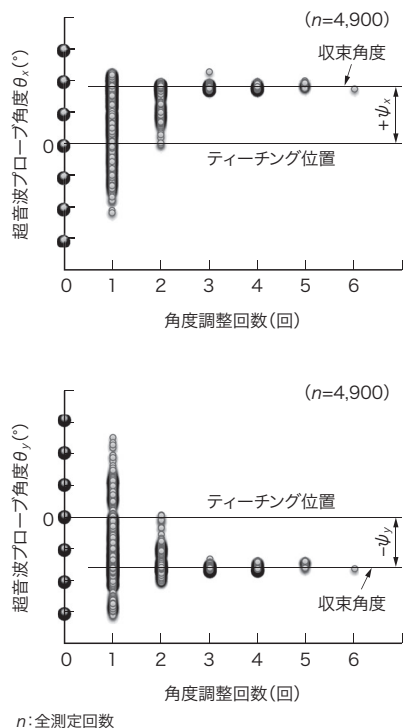


図7. プローブ角度調整回数と角度分布

3回の角度調整で、角度ばらつきがある角度範囲内に収束していることが分かる。

Angle distribution vs. number of probe angle adjustments

示している。今後、傾きが大きい場合の補正精度を向上させて、角度調整回数の低減を図っていく。

#### 4. スポット溶接・検査品質管理システムへの展開

開発したスポット溶接検査ロボットは、今後、スポット溶接ロボットと連携したスポット溶接・検査品質管理システムへの展開が期待される。システム連携の概要を図8に示す。

現在、スポット溶接時の品質管理は、ショットごとに、溶接品質に影響を及ぼすパラメーター(電流、電圧、加圧力など)の値をモニタリングし、正常時の値と比較することで行われている。このシステムと、今回開発したスポット溶接検査ロボットが提供する3D超音波反射画像データをリンクし、更にAI技術の導入などにより、接合の合否判定だけでなく、より詳細な品質管理を実現し、接合状態の傾向管理や、溶接電極の摩耗状態の把握、接合不良の早期発見、予防保全などにつなげる。また、CPS(サイバーフィジカルシステム)の実現に向けて、スポット溶接電源にプロセスフィードバックを行うシステムの構築にも展開していく。

#### 5. あとがき

スポット溶接内部の接合状態を3D画像化して溶接の良

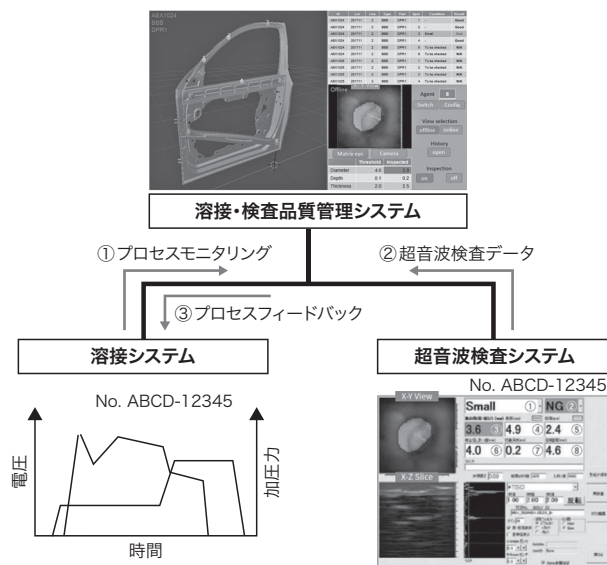


図8. スポット溶接・検査品質管理システムへの展開

スポット溶接プロセスモニタリング結果と超音波検査結果をひも付けて、より詳細なプロセスフィードバックの実現を目指している。

Application to spot welding quality control system

否判定を行うMatrixeyeに、緻密な動作を可能とするロボット位置制御技術と超音波画像データ解析技術を組み合わせ、スポット溶接検査ロボットを開発した。開発したロボットは、今後、自動車部品の製造現場でのフィールドテストを重ねることで信頼性や使い勝手の向上を図り、早期実用化を目指している。

#### 文 献

- (1) 阿部素久, 唐沢博一. ポータブルタイプ3D超音波検査装置 Matrixeye™. 東芝レビュー. 2005, 60, 4, p.48-51.
- (2) 唐沢博一, ほか. 3次元開口合成アレイ検査装置Matrixeye™の橋梁鋼床版検査への適用. 東芝レビュー. 2015, 70, 9, p.24-28.



牛島 彰 USHIJIMA Akira  
研究開発本部 生産技術センター  
メカトロソリューション推進部  
Mechatronics Engineering Solution Dept.



齊藤 真拡 SAITO Masahiro  
研究開発本部 生産技術センター  
メカトロソリューション推進部  
IEEE 学会会員  
Mechatronics Engineering Solution Dept.



松本 真 MATSUMOTO Shin  
東芝電力検査サービス(株)  
検査装置部  
Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.