レーザー超音波による溶接状態の可視化手法の検討*

木下 雅夫^{*1}, 蝦名 正輝^{*2}, 大澤 正敬^{*1}
日比野 良一^{*1}, 門浦 弘明^{*3}, 秋濱 一弘^{*4}

Weld Piece Visualization by Laser-Ultrasonic Technique

Masao KINOSHITA^{*1}, Masaki EBINA, Masataka OHSAWA, Ryoichi HIBINO,
Hiroaki KADOURA and Kazuhiro AKIHAMA^{*1} Mechanical System Research Div., Toyota Central R&D Labs., Inc.
41-1, Yokomichi, Nagakute, Aichi 480-1192, Japan

This paper discusses a research on 2-dimensional visualization of a spot weld piece using laser-ultrasonic technique. This laser-ultrasonic apparatus can scan a surface on a weld piece, and get ultrasonic longitudinal signals on several hundred measurement points per 10mm order. We analyzed these signals by Frequency Response Characteristic from 10MHz to 100MHz, and showed that the ultrasonic attenuation was related to the gain, and the ultrasonic propagation velocity was related to the phase, for frequency domain spectrum. At result, it was appeared that the gain of nugget parts was less than the gain of parents, and the phase of HAZ was latter than the phase of parents and nuggets. From these results, we made maps on frequency domain spectrum, and could realize to visualize the parent and the nugget, the HAZ on a weld piece. In addition, using Electron Back Scatter Diffraction, it was shown that the gain was effected by the crystal diameters, the phase was effected by the crystal directions.

Key Words : Nondestructive Inspection, Weld, Iron and Steel, Supersonic Wave, Laser, Spectrum Analysis, Frequency Response Function, Electron Back Scatter Diffraction, Residual Stress, Anisotropy

1. 緒 言

本研究の目的は、溶接部の状態を超音波を利用した非破壊計測により可視化して⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾, 溶接部材の強度把握や品質保証を行なう事である。現状、生産現場における溶接工程の準備過程では、溶接の最適条件を見出すために、溶接部を切断し、研磨して表面を腐食させ、それを観察するという作業を繰り返している。溶接状態の可視化は作業工数の著しい低減をもたらす。加えて、その可視化が非浸水・非接触で可能になれば、実用的な価値は非常に大きい。

超音波水浸法⁽⁴⁾は、水中に置いた測定物に音響レンズで集束させた超音波を照射するため空間分解能の高い計測が可能となるが、水槽の準備や測定物の錆という問題が生じる。一方、接触法⁽⁵⁾は比較的容易な計測法であるが、センサと測定物が直接接触するため、センサの接触圧を管理するための工夫が必要となる。

これらの課題を克服するため、我々はレーザー超音波法を用いた計測技術の開発に取り組んで来た⁽⁶⁾。レーザー超音波法はレーザーを用いて超音波を発生させ、かつレーザー干渉計を用いて超音波振動を検出する技術である⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾。その特長としては、非浸水・非接触計測が可能な事、高空間分解能計測が可能な事が挙げられる。具体的には、パルスレーザー光を測定物に集光させて急激な熱膨張やアブレーションを起こし、その際に生ずる歪みにより超音波を発生させる。一方、超音波の検出にはレーザー干渉計を用いる。レーザー干渉計では、超音波供給とは別の検出

* 原稿受付 2011 年 12 月 28 日

^{*1} 正員, (株) 豊田中央研究所 機械システム研究部 (〒480-1192 愛知県長久手市横道 41 番地の1)^{*2} (株) 豊田中央研究所 機械システム研究部^{*3} (株) 豊田中央研究所 分析研究部^{*4} 正員, フェロー, (株) 豊田中央研究所 試作開発部

E-mail: kinoshita@mosk.tytlabs.co.jp

用レーザを試料表面に照射する．そして，その検出表面へ超音波が到達する際に生じる表面振動をドップラ効果として捕える．このような原理を利用すると，非浸水・非接触で，数十 MHz オーダの超音波の送受信がサブミリ範囲の空間分解能で可能になる．

本報では，スポット溶接試料^{(12)~(14)}の溶接状態をレーザ超音波法により識別する方法について報告する．始めに，超音波挙動と金属組織の結晶状態の関係を把握するため，その金属組織の光学観察に加えて，後方散乱電子回折パターン法 (Electron Back Scatter Diffraction：以下，EBSD と記述) により結晶粒径や結晶方位を解析した^{(15) (16)}．次に計測法の検討を行った．その検討に当たっては，レーザ干渉計の代替として，レーザ集光径相当の検出部を備えた垂直探触子を用いた．加えて，超音波信号の周波数応答解析により^{(17)~(19)}，その減衰量と位相差を定量化し，母材と熔融部，熱影響部を識別した．最後に超音波検出にレーザ干渉計を用いたスポット溶接試料の非接触 2 次元計測の結果を示した．

2. 試験装置および試験方法

2・1 溶接試料

溶接試料には，直径 50mm，厚さ 1.2mm で，引張強さ 580MPa の高張力鋼板を 2 枚合わせ，その中央部をスポット溶接したものを用いた．スポット溶接による熔融部直径は 5mm とした．表 1 に高張力鋼板の化学組成を，表 2 に溶接条件を示す．スポット溶接では電極圧接の影響で表面に凹凸を生じるが，ここでは溶接材を 1mm の厚さに研削加工して表面の凹凸を無くした．また，その研削加工に当たっては，表面粗度を 0.6Z 以下にした．その溶接試料の形態を図 1 に，その金属組織断面の写真を図 2 に示す．写真中央の半楕円状の部分が熔融部，その周囲にある 1mm に満たない幅の黒色部が熱影響部，その外側が母材である．

Table 1 Chemical composition of test piece

C	Si	Mn	P	S
0.16%	0.15%	1.5%	0.025%	0.015%

Table 2 Welding conditions of resistance spot welding

Current [kA]	Force [kN]	Welding time [cycle/min]
6.5	2.45	15

Fig.1 Shape of weld test piece

Fig.2 Cross-section structure of weld test piece

2・2 EBSD 解析

溶接試料の結晶状態の指標となる結晶粒径と結晶方位を把握するため、EBSD 解析を実施した。本解析に際して、試料断面の表面を機械研磨した。試料はその表面を 15-1 μm のダイヤモンドペーストを用いて順番に磨き上げ、最後にコロイダルシリカ溶液で仕上げた。その試料は、結晶方位解析装置 (Tex SEM Lab. : Orientation Imaging Microscopy) を備えた FE-SEM (日本電子 : JSM-7000F) に 70° の角度で固定し、溶接試料断面を解析した。

2・3 超音波試験装置

溶接状態の計測法検討に用いた試験装置の基本構成を図 3 に示す。YAG レーザ (New wave research : Tempest30, 波長 532nm) から測定試料に向けてパルス光を半値全幅 5ns で照射した。レーザ出口におけるビーム径は 10mm で、これを焦点距離 150mm の凸レンズを用いて、試料表面でその直径を 0.1mm 程度に集光した。その結果、試料表面でアブレーションが発生して、超音波が試料内部を伝播した。レーザ出力は装置内蔵のアテネータで調整した。その出力はハーフミラを介してパワーメータで計測し、供給エネルギーを 2mJ に設定した。超音波検出には 0.5mm 角の検出部を備えた垂直探触子 (ジャパンプローブ : 型式 10K0.5x0.5N, 中心周波数 12MHz) を用い、試料の裏面にレーザ光軸と同軸になるように取付けた。垂直探触子と試料の間には適量のカプラント (Sono-tech : Ultragel II) を塗布した。

レーザ光軸と垂直探触子中心は同軸配置した状態を保持し、試料を 0.5mm 毎に移動させて計測を行った。垂直探触子の信号は、レーザのトリガ信号に同期させてサンプリングレート 0.8ns でデジタルオシロスコープ (横河電機 : 701310-M-HJ/C8/7N) に収録した。その際、同一条件で 20 回の測定を繰り返し、平均処理を行った。このようにして収録した各部位のデータは周波数応答解析を実施して、計測点毎の超音波の減衰量と位相差を 10-100 MHz 範囲で算出した。

試料にレーザ照射した後の SEM 写真を図 4 に示す。レーザ照射により試料表面の研削加工痕 (表面粗さ : 0.6 μm 以下) が無くなっていた。文献⁽⁷⁾⁽⁸⁾を参考にして、本試験条件における熔融深さを試算した所、数 μm 程度と予想された。

Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.4 Ablation region on test piece surface occurred by laser-shot

2・4 レーザ干渉計を用いた非接触 2 次元計測装置

図 3 の装置を改良して、溶接試料の非接触 2 次元計測を行った。ここでの超音波検出は、垂直探触子に替えてレーザ干渉計を使用した。レーザ干渉計は検出用レーザ (Tecnar : Pulse duration laser, 波長 1064nm, 最大出力 800W, パルス幅 80 μs) と干渉計 (Tecnar : 2 波混合光屈折, GaAs 結晶, 検出帯域 8-50MHz) で構成されている。レーザ光の試料表面における集光径は 1mm で、その照射エネルギーは 50mJ/pulse である。試料は移動分解能が 25 μm の電気駆動式の X-Y ステージに設置して、駆動周期 3Hz のレーザ発振に同期させて、縦方向と横方向に 0.5mm 毎

に移動し、合計 400 点を計測した。レーザ干渉計の出力を 2・3 節に記述したシステムに収録した後、周波数応答解析を実施して、計測点毎に超音波の減衰量と位相差を 10-50 MHz 範囲で算出した。

3. 試験結果

3・1 EBSD による結晶状態の計測

図 5 は EBSD で得た Reference Direction : 紙面に対して上下方向 (以下, RD) と Normal Direction : 紙面に対して垂直方向 (以下, ND) の溶接試料の逆極点図方位マップであり, 縦 400 μm , 幅 1000 μm の範囲を 1.5 μm 毎に計測した結果である。図の左から右に向かって, 母材, 熱影響部, そして溶融部へ遷移する金属結晶の状態を捉えている。本図は体心立方格子の単位ステレオ三角形において, $\langle 001 \rangle$ に赤, $\langle 101 \rangle$ に緑, $\langle 111 \rangle$ に青を充てて, カラーキーで現した。同色の部分は結晶面の方位が揃っている, つまり, 一つの結晶粒を示している。ここでの RD は, 2・3 節に記述した試料内における超音波の縦波の伝播方向と一致する。

図 5 の中央部の結晶粒が小さい部分が熱影響部である。この部位は, 図 2 の組織写真の黒色部分と一致する。溶融部の結晶粒は, 母材や熱影響部に比較して著しく大きかった。RD の逆極点図方位マップでは青 : $\langle 111 \rangle$ の頻度が高く, ND では緑 : $\langle 101 \rangle$ の頻度が高かった。この差は鋼板の製造過程における圧延の影響と推定される。

Fig.5 Inverse pole figure maps on each reference and normal direction of weld test piece

図 6 は EBSD で得た溶接試料の母材, 熱影響部, 溶融部の結晶粒径分布である。母材の測定は熱影響部から 5mm 離れた位置, 溶融部の測定はその中央部と, 熱影響部の境界近傍から 0.2mm 離れた位置の 2 箇所で行った。測定範囲はいずれも縦 400 μm , 幅 250 μm とした。ここでは 1.5 μm 毎に収録したデータの隣り合うピクセル方位差が 5 度以上の場合に粒界が存在すると定義して, 結晶粒の面積頻度を算出した。結晶粒径は各々の結晶粒を円と仮定して計算した。母材と熱影響部の粒径は 10 μm 前後であるが, 溶融部の粒径は数 μm から最大 80 μm に達する広い粒径分布を持っていた。

Fig.6 Comparison of crystal grain diameter between parent and HAZ, nugget of weld test piece

次に、母材と熱影響部、溶融部の結晶方位頻度を定量比較する。図7に母材の結晶方位頻度を示す。測定範囲は縦400 μm 、幅250 μm で、2箇所で行った結果を太線と細線で表した。横軸はRD (0°)からの角度を、縦軸は累積面積頻度を示す。18 $^\circ$ 程度までは $\langle 111 \rangle$ 頻度が最も高く、 $\langle 101 \rangle$ と $\langle 001 \rangle$ は同程度であったが、20 $^\circ$ を超えると $\langle 101 \rangle$ が急増した。20 $^\circ$ の累積頻度は $\langle 111 \rangle$ が0.45と0.49、 $\langle 101 \rangle$ は0.26と0.24、 $\langle 001 \rangle$ は0.21と0.19であり、測定位置の違いによる方位頻度の差は0.05以下であった。

図8に熱影響部の結晶方位頻度を示す。測定範囲と測定数は母材の場合と同じである。角度に対する方位頻度の履歴傾向は母材と同様であった。20 $^\circ$ の累積頻度は $\langle 111 \rangle$ の平均が0.40、 $\langle 101 \rangle$ は0.28、 $\langle 001 \rangle$ は0.24であった。ここでの測定位置による差は、最も大きい $\langle 101 \rangle$ で0.07であった。

Fig.7 Crystal direction fraction in parent

Fig.8 Crystal direction fraction in HAZ

図9に溶融部の中央の結晶方位頻度を縦400 μm 、幅250 μm で測定した結果を示す。ここでの方位頻度は測定位置による差が大きく、その差は最大0.3程度にまで達した。同様の測定を溶融部の端でも行った。測定位置の影響は中央部よりは低減したが、その差は0.1程度あった。測定位置の差が生じる原因として、溶融部の結晶粒径が数 μm から80 μm までとその粒径範囲が広い事が考えられた。ここでの測定範囲は縦400 μm 、幅250 μm であったため、大きな結晶粒が存在する溶融部では測定範囲に存在する結晶粒の数が測定位置によって大きく異なった。その結果、方位頻度にはばらつきが生じたと推測された。そこで溶融部の方位頻度の測定範囲は、溶融部全体含むように縦0.5mm、幅4.5mmとした。その結果を図10に示す。

Fig.9 Crystal direction fraction in center of nugget

Fig.10 Crystal direction fraction in nugget as whole

上記の結果を用いて、結晶方位と超音波の伝播速度の関係について考察する。表3に各結晶方位における弾性係数と縦波の伝播速度を示す⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。<111>は最も弾性係数が大きいため超音波の伝播速度が最も速く、逆に<001>の伝播速度は最も遅い。

図11は母材と熱影響部と溶融部の<111><101><001>において、RDから30°以内の結晶方位の累積頻度を比較した図である。母材は図7、溶融部は図8に示した測定位置2か所の平均値を、溶融部は図10の結果を用いている。母材、熱影響部、溶融部でそれぞれの結晶方位頻度を比較すると、有意差が認められた。図12は、母材と熱影響部、溶融部における結晶方位頻度の比較を容易にするため、図11から20°の累積方位頻度を抽出した図である。母材の結晶方位頻度は、伝播速度の最も速い<111>が0.47であったのに対して、<101>が0.25、伝播速度が最も遅い<001>が0.20であった。その<111>の頻度は、熱影響部では0.40に低下したが、溶融部では0.43に上がった。一方、伝播速度が最も遅い<001>の頻度は、<111>とは逆に、母材と溶融部では0.20であったが、熱影響部で0.24と最も高かった。わずかな差ではあるが、この結果は、熱影響部での縦波の伝播速度が母材や溶融部に比較して遅くなる可能性がある事を示唆している。

Table 3 Relationship between crystal direction and elastic modulus, longitudinal wave velocity

Crystal direction	<111>	<101>	<001>
Elastic modulus [GPa]	237	141	116
Longitudinal wave velocity [m/s]	6230	5900	5490

Fig.11 Comparison of crystal direction fraction between parent and HAZ, nugget

Fig.12 Comparison of crystal direction fraction between parent and HAZ, nugget on 20 degree alignment

3・2 超音波の時間履歴と周波数特性

図3に示した試験装置を用いて、溶接試料の母材の超音波の時間履歴を測定した結果を図13に示す。横軸はレーザ照射開始からの時間、縦軸は垂直探触子の出力である。0.4 μ s近傍での信号波形の立ち上がりは、レーザを用いて試料上面から供給した超音波が垂直探触子に到達した事を示す。さらに、その超音波は厚さ1mmの溶接試料を往復するため、約0.4 μ sの時間周期で信号波形の急激な立ち上がりを繰り返した。ここでは、2 μ sで4周期分の繰返しがなされた。また、その波にはより周期の短い波が重畳していた。

同様の挙動は、溶融部や熱影響部でも認められたが、詳細に調べるとわずかな違いが生じていた。図14は、図13における2nd周期の極大値近傍の時間軸を拡大した図である。母材に加えて、溶融部と熱影響部の挙動も合わせて示した。図13で認められていた短周期の振動周期はおおよそ0.06 μ s (16.7MHz)であった。その振幅は、母材と熱影響部では同程度であったが、溶融部ではそれらより小さくなっていた。また、熱影響部では母材に比較して、波が極大となる時期が10ns程度遅れており、その部位では伝播速度が低下している事が考えられた。1st周期における各部位の振幅や極大値となる時期の差はわずかであったが、2nd, 3rd, 4thというように時間経過に伴ってその差は拡大した。

Fig.13 Time history of longitudinal wave behavior in parent

Fig.14 Comparison of time history of longitudinal wave behavior between parent and HAZ, nugget

図 15 に、母材と溶融部の 1st 周期信号 (図 13 : 0.3600-0.7064 μ s) の FFT スペクトルを示す。16MHz から 25MHz 近傍をピークとする基本波に加えて、45MHz, 70MHz 近傍をピークとする高次の周波成分が認められた。このような高次の周波数成分は、レーザによるパルスの超音波供給によって生じるものと考えられる。特に 70MHz を超える周波数域では、母材に比較して溶融部のスペクトル振幅が顕著に小さくなっていた。

Fig.15 Comparison of frequency domain spectrum on 1st period in Fig.13 between parent and nugget

3・3 超音波の周波数応答解析

2・3 節に記述した方法で溶接試料の中心線上を 0.5mm 毎に測定したデータを用いて、周波数応答解析を行った⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾。それぞれの測定位置で得た 1st 周期信号 (0.3600-0.7064 μ s) を入力 $\alpha(t)$, 2nd 周期信号 (0.7200-1.0664 μ s) を出力 $\beta(t)$ として伝達関数を求め、その周波数応答を算出した。入力 $\alpha(t)$ と出力 $\beta(t)$ の事例として、母材 (測定位置+6.0mm), 熱影響部 (測定位置+3.0mm), 溶融部 (測定位置 0.0mm) における信号を図 16 と図 17 に示す。また、伝達関数の関係式を式 (1) として示す。

Fig.16 Time history of longitudinal wave behavior on 1st period

Fig.17 Time history of longitudinal wave behavior on 2nd period

$$\frac{\beta(t)}{\alpha(t)} = \int |\chi(f)| e^{i(2\pi ft + \theta)} df \quad (1)$$

$\chi(f)$ は周波数領域のゲインを、 $(2\pi ft + \theta)$ は位相を表す。なお、伝達関数を求めるに当たり、それぞれの時系列データ $\alpha(t)$ と $\beta(t)$ は5次式で近似した。

加えて、図16と図17に示した母材（測定位置+6.0mm）と熱影響部（測定位置+3.0mm）、溶融部（測定位置0.0mm）における入力 $\alpha(t)$ と出力 $\beta(t)$ のFFTスペクトルを図18から図20に示す。

Fig.18 Frequency domain spectrum of parent (+6.0mm position) on 1st and 2nd period

Fig.19 Frequency domain spectrum of HAZ (+3.0mm position) on 1st and 2nd period

Fig.20 Frequency domain spectrum of nugget (0.0mm position) on 1st and 2nd period

伝達関数から得た周波数応答解析の結果を図21に示す。(a)のマップ図がゲイン特性、(b)が位相特性である。いずれも、横軸は測定位置で、溶接試料の中心線上を0.5mm毎に測定したものである。縦軸は周波数で、10-100MHzの範囲を対数表示してある。

始めにゲイン特性について説明する。ゲインはカラーバーで示したように、0dBが赤、-10dBが緑、-20dBが青に相当する。測定位置-2mmと+3mm（図中の点線）の内側では、50MHzを超える領域でゲインが急激に低下している。30MHz近傍では-8dBから-10dBに相当する緑色であるが、100MHz近傍では-20dBに相当する青色になっている。この領域はその幅が5mmであることから溶融部である事がわかる。点線の外側、すなわち母材に相当

する領域では、70MHz 近傍でゲインが 0dB を示す赤色になっており、溶融部とは明らかに異なっている。具体的には、30MHz 近傍では-8dB 程度で溶融部と大きな差は無いが、70MHz 近傍で-2dB から 0dB に達する極値を示し、70MHz を超えた周波数域で再び低下している。このようなゲイン特性の傾向は FFT スペクトルにも現れている。

母材のゲイン特性について考察する。図 15 および図 18 に母材の 1st 周期信号の FFT スペクトルを示したが、16MHz から 25MHz 近傍をピークとする基本波に加えて、45MHz、70MHz 近傍をピークとする高次の周波成分が生じていた。Fig.21(a)のゲイン特性は母材が 70MHz 近傍で極値を取っているが、これは図 15 や図 18 に示した 3 次の高周波数成分に相当している。つまり、3 次の高周波成分では他の低次の周波数成分に比べて、1st 周期信号に対する 2nd 周期信号の減衰が小さくなった事を示している。

Fig.21 Gain and phase maps on frequency domain spectrum of longitudinal wave at a center line of weld test piece

文献⁽²⁾には、スポット溶接部の非線形高調波解析を行い、微小な隙間を計測した結果が示されている。本研究で示した「70MHz 近傍で減衰が小さくなる現象」は母材全域で生じており、微小な隙間を捕えた結果とは考え難い。一方、文献⁽²²⁾には高次の周波数成分を利用したいくつかの生体の可視化事例が示されている。本研究の結果も、10 μ m 程度の均質粒径が一様に存在する母材において、70MHz 近傍の高周波成分の減衰が低次の波長成分より小さくなった現象を現したものと考えられる。

母材と溶融部にゲイン差が生じる要因は、結晶粒の散乱減衰の影響によるものとして知られている⁽²³⁾。試料内を伝播する超音波は、結晶粒の界面でその一部が散乱する。そして、その散乱は結晶粒の大きさに比例するため、結晶粒の大きな溶融部ではその散乱量が多くなって、超音波の減衰が増すと考えられている。図 6 からわかるように、本試料でも母材は 10 μ m 前後の大きさの結晶粒で、溶融部は 10-80 μ m 程度の結晶粒で構成されており、その大きさには著しい差があった。

次に位相特性について述べる。母材と溶融部の境界である熱影響部に相当する領域（図 21 に点線で示した測定位置-2mm と+3mm の近傍）では、等位相線が全周波数域に渡って低周波数側に向かって湾曲している。これは、図 14 で示した縦波の伝播速度が熱影響部で母材や溶融部に比較して遅くなる状況が、周波数領域マップの上で現れたものである。

熱影響部で伝播速度が遅くなる要因を考察する。熱影響部の近傍では、溶融部半径に直角方向の残留応力成分が溶融部内での引張から圧縮へと急激に変化する事が知られている⁽¹³⁾。このような状況を考慮すると、熱影響部における伝播速度の低下は、材料の弾性係数やポアソン比の変化に由来するものと推定される。縦波の伝播速度 C は式 (2) で表される。 E は縦弾性係数、 ρ は密度、 ν はポアソン比である。式 (2) において、密度 ρ の変化が無く、ポアソン比 ν を 0.3 とすると、伝播速度 C は $(1.3 \times E)$ の平方根に比例する。また、熱影響部の伝播時間の遅

れは 10ns 程度であった (図 14)。伝播速度を 6000m/s として計算を行うと、熱影響部における $(1.3 \times E)$ の値は母材や溶融部に比較して 0.1%程度小さい事になる。

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

一方で 3・1 節において、熱影響部では他の領域と結晶方位の差があるために (図 12)、縦波の伝播速度が低下する可能性がある事を述べておいた。この事から、溶接によって作り出される残留応力がマクロ的には弾性係数やポアソン比の変化を、ミクロ的には結晶方位の差を生み出して、熱影響部で縦波の伝播速度の低下をもたらしたと推測される。

加えて、母材の測定位置 -4.0mm と +4.5mm では、ゲインが他の母材域に比較してさらに小さい特異点が生じていた。この原因としては、これらの点では他の母材域と比較して位相遅れが小さくなっている事、また、熱影響部に隣接していることから、歪みの影響が現れたものではないかと推測している。

3・4 レーザ干渉計を用いた溶接試料の 2 次元計測

2・4 節で述べた装置を用いて、溶接試料を非接触で 2 次元計測した結果を図 22 示す。測定点毎に収録したデータを前述した方法に基づいて周波数応答解析を行い、50MHz におけるゲインと位相を示したものである。50MHz はレーザ干渉計の検出上限の周波数になっている。図 21 と同様に、溶融部相当径でのゲイン低下、ならびに母材と溶融部に挟まれた熱影響部に相当する領域で位相遅れが認められている。

計測点のピッチが粗い事、レーザ干渉計の検出周波数上限に制約がある事、溶接試料にわずかな反りがあるためにレーザ光軸が測定面に対して完全に直角でない部分がある事等の理由で、十分な分解能が得られているとは言い難い。しかし、非浸水・非接触環境下での非破壊計測により溶接試料の母材と溶融部、熱影響部を識別するという基本的な狙いは、超音波信号の周波数応答解析によって得られるゲイン・位相特性を 2 次元マップにする事により、概ね達成できたと考えている。

(a) Gain map on frequency domain spectrum

(b) Phase map on frequency domain spectrum

Fig.22 Gain and phase maps on frequency domain spectrum of longitudinal wave at a plane of weld test piece

4. 結 言

高張力鋼板をスポット溶接した試料の溶融部と熱影響部、母材を非浸水・非接触環境下で識別する事を目的として、レーザ超音波計測法構築のための基礎検討を行い、下記の知見を得た。

- (1) EBSD 計測により、溶融部は母材より結晶粒が大きい事、熱影響部は母材や溶融部より結晶方位<111>の頻度が低く、<001>の頻度が高い事を示した。
- (2) 垂直探触子を使った測定データの伝達関数からゲインと位相差を算出し、母材と熱影響部と溶融部の識別を行った。溶融部は結晶粒径の差、熱影響部は結晶方位の差により識別ができる事を説明した。
- (3) レーザ干渉計を用いた計測により、母材と熱影響部と溶融部の識別を行った。

文 献

- (1) 永井辰之, 四辻美年, “超音波法による欠陥定量化技術”, 非破壊検査, vol.57, No.3(2008), pp.114-118.
- (2) 丹羽小三郎, 川嶋紘一郎, “非線形超音波 (高次超音波) を用いた部品の不完全接合部の非破壊評価”, 自動車技術会論文集, Vol.38, No.5(2007), pp.169-174.
- (3) 林高弘, 小鹿雄介, 村瀬守正, “レーザードップラー振動計の曲面スキャンによる配管中を伝播するガイド波の可視化”, 非破壊検査, Vol.57, No.1(2008), pp.30-35.
- (4) 北阪純一, 永井辰之, 阪野明, “超音波による薄板溶接部の溶込み量の測定”, 日本非破壊検査協会, 平成 17 年秋季大会講演概要集(2005), pp.105-106.
- (5) 上田孝治, 山上武, 坂下英知, “超音波探傷法によるスポット溶接の自動検査技術の研究”, 自動車技術, Vol. 62, No. 7 (2008), pp.74-79.
- (6) 木下雅夫, 蝦名正輝, 大澤正敬, 日比野良一, 秋濱一弘, 新井俊信, “レーザ超音波による溶接状態の見える化手法の検討”, 日本非破壊検査協会, 平成 22 年秋季講演大会講演概要集(2010), pp. 237-240.
- (7) C. B. Scruby, L. E. Drain, *Laser Ultrasonics Techniques and Applications* (1990), pp.223-237, Taylor & Francis Group.
- (8) 山中一司, “レーザー超音波法の原理と応用”, 非破壊検査, Vol.49, No.5(2000), pp.292-299.
- (9) Silvio E. Kruger, Christophe Bescond, Rogerio S. Lima, Basil R. Marple, Benjamin Campagne, Daniel Levesque, Alain Blouin, Jean-Pierre Monchalin, “Laser-Ultrasonic Evaluation of Thermal Sprayed Coatings”, 非破壊検査, Vol.57, No.1(2008), pp.4-10.
- (10) 落合誠, “レーザ超音波法とその非破壊検査への応用”, 非破壊検査, Vol.57, No.1(2008), pp.19-25.
- (11) 高坪純治, “励起用パルスレーザー操作法による 3 次元物体表面を伝わる超音波の可視化”, 非破壊検査, Vol.57, No.4(2008), pp.162-168.
- (12) 中山英介, 宮原光雄, 岡村一男, 富士本博紀, 福井清之, “超小型試験片による自動車用薄板スポット溶接継ぎ手の疲労強度予測”, 材料, Vol.53, No.10(2004), pp.1136-1142.
- (13) 伊與田宗慶, 三上欣希, 橋本匡史, 谷口公一, 池田倫正, 望月正人, “980MPa 級高張力鋼抵抗スポット溶接部におけるナゲット寸法および残留応力の数値シミュレーション”, 溶接学会論文集, Vol.29, No.2(2011), pp.86-95.
- (14) George Mozurkewich, Bita Ghaffari, Timothy J. Potter, “Spatially resolved ultrasonic attenuation in resistance spot welds: Implications for nondestructive testing”, *Ultrasonics*, Vol.48(2008), pp.343-350.
- (15) 鈴木清一, 足立吉隆, “材料組織評価における EBSD 解析の進展”, まてりあ, Vol.47, No.2(2008), pp.72-78.
- (16) Toshihiko Tani, Hiroshi Itahara, Hiroaki Kadoura, Ryoji Asahi, “Crystallographic Orientation Analysis on Calcium Cobaltite Ceramic Grains Textured by Reactive-Templated Grain Growth”, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Vol.4, No.4(2007), pp.318-325.
- (17) 菅井斉喜, 得丸英勝, 花房比秀郎, 吉川恒夫, 和田力, 制御工学(1990), pp17-53, コロナ社.
- (18) 足立修一, システム同定理論 (1993), pp.21-57, 計測制御学会.
- (19) 日比野良一, 大澤正敬, 山田正俊, 河野克己, 木挽康志, 伊藤寛, “H_∞制御理論適用によるトルクコンバータロックアップクラッチ・スリップ制御系のロバスト安定化”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.69, No.686(2003), pp.151-158.

- (20) Bertram Alexander Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Vol.1, Second Edition(1990), pp.378-379, p.395, Krieger Publishing.
 - (21) 井原郁夫, “弾性表面波による異方性材料の弾性定数評価”, 超音波 TECHNO, Vol.1-2(2003), pp.41-46.
 - (22) 木浦伸行, “ハーモニックイメージング”, 日本放射線技術学会誌, Vol.60, No.3(2004), pp.350-356.
 - (23) 日本非破壊検査協会編, 超音波探傷試験Ⅲ (2001), pp.49-56, 日本非破壊検査協会.
-