レーザ超音波を用いた TIG 溶接中の溶融池形状その場計測手法の開発*

井村 文哉**, 喜多 亮右**, 野村 和史***, 浅井 知***

Development of the in-situ measurement of the molten pool shape during TIG welding using laser ultrasonic*

by IMURA Fumiya**, KITA Ryosuke**, NOMURA Kazufumi*** and ASAI Satoru***

In order to guarantee the weld quality, the ultrasonic inspection is widely used as a method of checking the presence of weld defects. Conventionally, the defects are detected by a contact type ultrasonic inspection after the welding process because this method cannot be used under a high temperature/noise environment such as during welding. Therefore, we aim at the development of contactless and in-situ measurement system during welding by using laser ultrasonic technique. This system enables to conduct the welding and inspection simultaneously with monitoring. In this study, we first measured the test piece shape of half rounded groove on the top surface to investigate the performance of our system. As a result, we could measure echoes from the bottom of the groove and visualize the test piece shape. Then, we measured the molten pool shape by hammering method and laser ultrasonic technique during the bead on plate welding by TIG arc. In addition, we calculated the 3D heat conduction model to apply the temperature distribution to the results of the measurement because the velocity of laser ultrasonic depends on the temperature. As a result, the measured distance from the bottom of work to the molten pool interface reasonably corresponded to the actual position obtained by the hammering method.

Key Words: Laser ultrasonic, In-process monitoring, Non-contacting monitoring, Aperture synthesis, Hammering method, Molten pool shape, TIG arc welding, Bead on plate welding

1. 緒 言

溶接技術は現代の製造業の様々な分野で利用されている重要な加工技術のひとつであるが、溶接部を起点とする製品の破壊や破損事例も少なくないため、溶接部には更なる信頼性の向上が求められている。溶接品質を保証する上で、溶融境界を含む溶融部に溶込み不良やブローホールなどの溶接欠陥の有無を確認することが重要であり、現在溶接施工後に超音波等を用いた探傷検査が実施されている。しかし、大型構造物などの施工では、施工後の探傷検査により欠陥が検出された場合、溶接部の切断等の再加工による後戻り工程が発生し、時間やコストの面で大幅な負担となる。そこで、溶接不良を溶接中に検知する、いわゆるインプロセスモニタリングが求められている。しかし、従来の超音波探傷検査における超音波送受信手法では、圧電素子などの送受信素子を測定対象と準接触状態に保持する必要があるため、実際の溶接現場のような高温、高ノイズ環境下での使用は困難である。そこで、紫外から赤外域に渡る画像計測¹⁾や溶接中の溶接品質に関係する物理量計測²⁾などによる施工中監視技術が開発されているが、これらの技術は主に溶接部表面を観察しているため、材料内部の情報を直接検知することができない。

そこで本研究では、測定対象に対し遠隔から非接触で超音波を送受信するレーザ超音波法³⁾に着目した。レーザ超音波法は測定対象の表面にパルスレーザを照射することで超音波が励起され、これをレーザ干渉計で受信する手法であり、溶接中のような高温環境下での適用が可能と考えられる。また、従来の超音波送受信方法と比較して、レーザ超音波法は非接触での高速測定や数十 MHz にも及ぶ高周波数の超音波を出力することが可能であり、超音波検出の空間的分解能が良いといった特徴が挙げられる^{4,5)}。現在、この手法は板厚測定や欠陥検出などに利用されている。例えば、布施らは従来 X 線によって板厚測定が行われている熱間圧延ラインにおいてレーザ超音波を適用し、600～1000℃の圧延材の板厚測定の精度を検証している⁶⁾。また、中野らは硬質塩化ビニルが被覆された多層配管において、配管内部に人工的に全面剥離させた模擬欠陥を作り、鋼材部と塩ビ部との界面の密着性を評価している⁷⁾。An らはノッチ入りの AI 板表面にレーザを照射、走査させ、超音波が表面を伝搬する様子やノッチ部分で反射する様子の可視化に成功している⁸⁾。Yamamoto らは Cr-Mo-V 鋼の厚肉パイプの突合せ溶接中にレーザ超音波法を適用し、溶接欠陥の有無の確認や従来の探傷法との欠陥寸法の精度を比較し、非常に高精度な測定結果であったことを報告している⁹⁾。

以上のように板厚測定や欠陥検出に関する研究は多くなされているほか、材料特性などの研究にもレーザ超音波は用いられているが¹⁰⁻¹²⁾、溶接中の溶融池形状を計測した例は非常に少ない。溶接品質を外部観察から得られる情報で保

*受付日 平成29年11月17日 受理日 平成30年1月19日

**学生員 大阪大学大学院工学研究科 Student member, Graduate School of Engineering Osaka University

***正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering Osaka University

証するだけでなく、超音波の伝搬という材料内部の情報を加えることで、溶接品質とより直接的に関連するパラメータを監視対象とすることが可能となりうる。そうした観点の下、溶合後は静止 TIG 溶接中の溶融深さ分布の測定を行っているが、測定時間中の溶融形状の変化を考慮していないなど、実用化にはまだ課題が多く残されている¹³⁾。

以上のような背景から、本研究では溶接中でも適用可能なレーザ超音波法を用いて溶接施行中にリアルタイムで溶融池を計測することにより、溶接中の溶融池の状態や溶接欠陥の発生挙動・形状の計測を目的としている。本報では、まず構築したレーザ超音波システムの性能を検証するため、溶融池形状を模擬したくぼみ付き試験体の形状計測及び画像化を行った。次に、TIG アークによるビードオン溶接を対象に、溶融池形状計測を試みた。ハンマリング法¹⁴⁾により得られる溶込み形状との比較を行い、レーザ超音波法による計測結果の妥当性を検証した。

2. 溶融池形状の計測手法

2.1 レーザによる超音波送受信及び計測システム

本研究で用いるレーザ超音波システムでは、パルスレーザを測定対象表面に照射することで超音波を励起させる。レーザ照射時に励起させる超音波は様々なモードが存在し、対象内部を伝搬する縦波、横波や対象表面を伝搬する表面波などに分類される。また、超音波の励起プロセスは照射するパルスレーザのパワー密度の大きさにより熱弾性領域とアブレーション領域の2領域に分かれ、各領域で超音波特性が異なる^{15,16)}。例えば、アブレーション領域で励起される縦波、横波の振幅は熱弾性領域と比較すると極めて大きくなり、パワー密度を増加させると超音波振幅も増加する傾向にある。また、従来の圧電素子では超音波の入射角や広がり素子設計により制御可能なため、基本的には放射分布を自由に決定できるのに対し、レーザによって励起された超音波の放射分布は音源の特性によって特定の放射分布を持つ。照射表面に対する超音波の入射角 θ に対し、ア

ブレーション領域における縦波の放射分布を $u_L(\theta)$ 、横波の放射分布を $u_T(\theta)$ とすると、

$$u_L(\theta) \propto \frac{2k^2 \cos \theta (k^2 - 2 \sin^2 \theta)}{(k^2 - 2 \sin^2 \theta)^2 + 4 \sin^2 \theta \sqrt{(1 - \sin^2 \theta)(k^2 - \sin^2 \theta)}} \quad (1)$$

$$u_T(\theta) \propto \frac{\sin 2\theta (1 - k^2 \sin^2 \theta)}{k(1 - 2 \sin^2 \theta)^2 + 4 \sin^2 \theta \sqrt{(1 - \sin^2 \theta)(1 - k^2 \sin^2 \theta)}} \quad (2)$$

となる。ここで $k = v_L/v_T$ であり、 v_L は縦波音速、 v_T は横波音速である。対象材料をステンレス鋼とし、 $v_L = 5960 \text{ m/s}$ 、 $v_T = 3240 \text{ m/s}$ として、内部伝搬時にピーク半値となる部分をプロットした結果を Fig. 1 に示す。図より、縦波はレーザ照射直下 (0° 方向) から $\pm 60^\circ$ まで幅広く分布しているのに対し、横波はピーク半値が $\pm 30^\circ$ から $\pm 60^\circ$ 付近に分布しており、 $\pm 45^\circ$ 付近を中心とした広い斜角入射となっている。本研究では、レーザ照射直下から幅広く分布し、探傷や板厚測定に利用可能なアブレーション領域における縦波成分を用いた。

励起された超音波は測定対象内部を伝搬し、各種界面で反射及び散乱する。本研究における超音波の伝搬及び反射の模式図を Fig. 2 に示す。本研究では溶接中の溶融池形状を計測するため、通常の板厚測定のような固気界面での反射に加え、溶融池界面である固液界面及び溶融池表面である液気界面での反射が考えられる。各界面で反射し再び表面へ伝搬した超音波は受信用のレーザを照射し、その反射光のドップラーシフトをレーザ干渉計により計測することで受信している。微小振動を計測する干渉計として、マイケルソン干渉計、マッハツェンダー干渉計、コンフォーカル・ファブリペロー干渉計 (CFPI)、位相共役素子による二光波混合レーザ干渉計 (TWM) などがある¹⁷⁻¹⁹⁾。このうち、マイケルソン干渉計とマッハツェンダー干渉計は対象表面が粗面の場合に著しく信号検出感度が低下するため、非破壊検査への適用としては CFPI と TWM が有効であるが、TWM では使用するレーザ波長に対する素子材質の最適化や屈折率分布が形成されるまでの応答速度が遅いという問題点を抱えている。そこで本研究では CFPI を干渉計として使用した。

Fig. 1 Radiative distribution of ultrasonic wave in the ablation region^{15,16)}

Fig. 2 Propagation and reflection of ultrasonic wave inside the work during the welding

2.2 計測システム及び画像化手法

本研究で構築した、レーザ超音波システムの概要を Fig.3 に示す。用いた超音波送信用レーザ光源(パルス YAG レーザ Nano L 90-100, Litron Lasers 社製)及び受信用レーザ光源(Quartet-1500, Bossa Nova 社製)の仕様を Table 1 及び Table 2 に示すが、送受信レーザを試験体裏面に照射することで信号を取得している。また、送信レーザはガルバノスキャナ、受信レーザは一軸ステージを用いることによりそれぞれ多点送受信させている。

本研究では、送信レーザの照射点(以下、送信点)で励起された超音波が試験体内部の各界面で反射し、受信レーザの照射点(以下、受信点)で検出される超音波の伝搬時間から時間飛行法(TOFD 法)を用いて界面位置を特定している。Fig.4 は計測断面の概要図及び計測条件をまとめたものである。多点の送信点及び2点の受信点を設定し、各レーザは以下に示す手順にて走査させ、各受信点での受信エコー強度を計測した。

- (1) 受信レーザを $x=-7.0\text{mm}$ に照射する。
- (2) 送信レーザを送信レーザピッチ間距離 $\Delta x=0.2\text{mm}$ 、周波数 100Hz で $x=-10\sim 10\text{mm}$ の範囲で走査し、レーザ送信時刻を 0 とした信号を計 101 個得る。
- (3) 受信レーザを $x=7.0\text{mm}$ に照射し、上記(2)と同様の操作を行う。
- (4) 上記(1)に戻り、同様の操作を繰り返す。

ただし、送信レーザと受信レーザの走査経路は、Fig.4 中紙面に垂直な y 方向に 3mm の間隔をとっている。この中間の xz 断面が計測面となる。すなわち計測断面を $y=y_0[\text{mm}]$ とする場合、送信レーザは $y_0-1.5\text{mm}$ 、受信レーザは $y_0+1.5\text{mm}$ の位置に照射される。

また本研究において溶融池形状を画像化する際は、開口合成処理により界面検出性能の向上を図った²⁰⁾。まず、開口合成処理の原理を示す。送信点を T_i 、受信点を R としたとき、Fig.5(a)のような横軸を送信時刻からの時間、縦軸を受信点で得られる信号強度とした A-scope が得られる。界面エコーが観測されるとき、送信点-界面-受信点の超音波伝搬時間 t_i がわかるため、音速との積により伝搬距離が計算できる。したがって、界面は送信点と受信点を焦点とする楕円上に存在することがわかる。同様の操作を他の送受信点の組み合わせでも行うことによって、Fig.5(b)に示すように楕円が重なり合い、界面の存在する位置における強度が高くなる。これにより計測断面上で界面位置を推定することができる。本研究では、得られた A-scope から 3MHz 以下と 10MHz 以上の周波数の波形をカットした後に開口合成処理を行った。また、開口合成処理時に各界面位置を鮮明に画像化するために、ある送信点と受信点の組合せにおいて、反射源となる界面がその間に存在すると仮定し、開口合成処理により描かれる楕円に重みをつけるガウスフィルタ処理を施した。

例として幅 8mm 、長さ 20mm 、板厚 10.6mm のステンレ

Fig.3 Schematic diagram of measurement system using laser ultrasonic technique

Table 1 Specification of generation laser

Laser : Nd:YAG
Wavelength : 1064 nm
Repetition rate : 100 Hz
Energy : 90 mJ
Pulse width : 7~9 ns
Beam diameter : ~2 mm

Table 2 Specification of detecting laser

Laser : Nd:YAG
Wavelength : 532 nm
Laser power : 1 W
Detection range : 100 kHz~ 50 MHz

Fig.4 Measurement condition

Fig.5 Schematic diagram of aperture synthesis

Fig.6 Results of the work thickness measurement before waveform processing

ス平板を対象に、裏面からレーザを照射して板厚測定した結果を Fig. 6 に示す。同図 (a) は A-scope、同図 (b) は A-scope を色変調して試験体における送信点位置と超音波伝搬時間とを一つの受信点 ($x=-7$ mm) に対して直交座標に表示した B-scope (周波数処理済)、同図 (c) は開口合成結果、同図 (d) は開口合成結果における $x=-7$ mm でのエコー強度分布である。Fig. 6(d) より板厚 10.6 mm を示す位置において最大エコー強度が得られていることがわかる。また、B-scope は各信号が送信点の位置関係に従って連続的に示されるため、各信号の由来が判断しやすい。レーザ照射時に表面波の一種であるラテラル波、レイリー波や衝撃波が発生し、計測に必要な界面波に対してはノイズとなり得ることがわかる。これらは、送信点-受信点位置間の距離と各表面波の速度からその伝搬時間を算出できるため、Fig. 7(a) のような波形処理

によりカットすることが可能である。その結果、同図 (b) のようなノイズの少ない開口合成結果が得られる。ただし、波形処理により、試験体表面からの信号が不連続になるため、試験体表面の開口合成結果が一部不連続となる。

以後、これらの波形処理を行った B-scope をもとに開口合成処理を行った。

2.3 超音波伝搬速度の推定方法

超音波伝搬時間から伝搬距離を換算する際は音速を用いる。しかし、試験体内部を伝搬する超音波の音速は温度依存性があることが報告されている²¹⁻²³⁾。ステンレス鋼中の超音波伝搬速度の温度依存性の一例を Fig. 8 に示す。Fig. 8 に示すように、一般的に温度が高くなるほど速度は小さくなるため、溶接中のような高温場では試験体内部の温度分布

Fig. 7 Results of the work thickness measurement after waveform processing

Fig. 8 Relationship between temperature and ultrasonic sound velocity²³⁾

を考慮する必要がある。そこで本研究では、ガウス分布熱源による三次元熱伝導解析を行い、試験体内部の三次元温度分布を推定した²⁴⁾。推定の際に、実験で得られた断面マクロから溶込み深さと溶込み幅を求め、これを再現するように解析上の入熱条件を合わせこんだ。

ステンレス鋼の常温での超音波伝搬速度は約 5800 m/s であり、温度が上昇する毎に速度が減少する。本研究では、固相中の音速 v_{solid} [m/s] は伝搬部の温度を T [K] として

$$v_{solid} = -0.0002(T-293)^2 - 0.3933(T-293) + 5808 \quad (3)$$

と近似した。また融点を越えた液相中の音速 v_{liquid} は参考データが不十分であったため、 $v_{liquid} = 4000$ m/s とした。

温度分布を考慮した開口合成処理は次のとおりである²⁵⁾。

- (1) 推定した温度分布を微小領域に区切り、領域毎に温度を反映した音速を式 (3) により計算する。
- (2) ある送受信点の組合せを想定する。
- (3) 領域内の特定地点で反射する信号の伝搬経路を描き、これを微小領域で区切る。
- (4) 伝搬経路中の各微小領域における伝搬長さとその領域に対応する超音波音速から、伝搬時間をそれぞれ計算する。
- (5) 伝搬経路の全経路に渡って計算された時間を足し合わせることで、想定した特定地点からの信号を得るための伝

搬時間を求める。

- (6) (3) から (5) を他の特定地点に対しても行うことで、ある送受信点の組合せに対する伝搬時間分布を得る。
- (7) 実験で得られた信号を (6) の伝搬時間分布に対応させて、信号 - 時間から信号 - 空間画像へ変換する。
- (8) 同様の操作を他の送受信点の組み合わせに対しても行い、複数求められる信号 - 空間画像を足し合わせる。

このように、時間分布に従った計測信号を描くことで温度分布を考慮した開口合成処理を行うことができる。

3. 実験結果

3.1 くぼみ形状の計測

まず、Fig. 9(a) に示すような直径 8 mm の溶融池形状を模擬した半円筒状のくぼみを有するステンレス鋼 (SUS304) 試験体でくぼみ形状の計測を行った。同図 (b) に受信点位置 -7 mm での B-scope を示す。これらから、くぼみ底部及び試験体表面からの反射信号が得られていることがわかる。計測により得られた B-scope の開口合成結果を Fig. 9(c) に、受信点位置 7 mm での B-scope の開口合成結果を重ね合わせた結果を Fig. 9(d) に示す。両者を比較すると、2 点分の受信点から得られた開口合成結果を重ね合わせることで、試験体表面全体を画像化できることがわかる。また、くぼみの底部は画像化できているが、側面部は画像化できていないことがわかる。これは発生した超音波の反射する界面における入射角度が影響しているものと考えられる。

以降、2 点の受信点で得られた B-scope をもとに開口合成処理した結果を重ね合わせたものを開口合成結果として示す。

3.2 ハンマリング法による溶融池形状計測

レーザ超音波法を用いて得る溶融池形状からの信号は固液界面からの信号である。そこで溶接中の溶融池形状をハンマリング法によって計測した。計測対象は TIG アークによるビードオン溶接とし、幅 8 mm、長さ 20 mm、厚さ 10.6 mm の平板ステンレス鋼 (SUS304) 試験体に、アーク長

Fig. 9 Measurement results of test piece with half rounded groove on the top surface

Fig. 10 Molten pool configuration estimated by hammering method in TIG welding
(Arc length: 3 mm, Ar gas flow: 15 L/min, welding current: 150 A, welding speed: 50 mm/min)

3 mm, Ar ガス 流量 15 L/min, 電 流 値 150 A, 溶 接 速 度 50 mm/min で溶接を行った。溶接開始 90 秒後, 板側面から打撃を与え溶融池を吹き飛ばした。これにより得られた溶接線中心軸上 ($x=0$ mm) の断面図を Fig. 10(a) に示す。同図黄色線は腐食により得られた真の溶融池界面であり, 本実験では溶融池全てが吹き飛ばわけではないことを示している。同図 (b) は腐食により得られた溶融深さを溶接線方向に沿ってプロットしたグラフである。これから, 溶融池はトーチ直下から 6 mm 後方の位置で最大溶込み深さ 2.4 mm (試験体底面からの距離: 8.2 mm) をとることがわかる。そこで,

次節では TIG 溶接中のトーチ直下での xz 断面, 及び最大溶込み深さをとるトーチ後方 6 mm の xz 断面を対象とした計測を行うこととした。

3.3 レーザ超音波法による TIG 溶接中の溶融池形状計測

3.2 節の結果より, TIG アークによる同条件でのビードオン溶接中の溶融池形状をトーチ直下及びトーチ後方 6 mm を対象に計測を行った。本実験条件では, 2 点の受信点における B-Scope を取得するまでの時間は約 3 秒, 溶接速度は 50 mm/min であるため, 画像化する範囲は溶接線 y 方向に約

(a) Just under the torch (Receiving point: $x = -7$ mm) (b) 6 mm behind the torch (Receiving point: $x = -7$ mm)

Fig. 11 B-scopes 90 seconds after starting welding
(Arc length: 3 mm, Ar gas flow: 15 L/min, welding current: 150 A, welding speed: 50 mm/min)

(a) Just under the torch

(b) 6 mm behind the torch

Fig. 12 Aperture synthesis images without temperature distribution 90 seconds after starting welding

(a) Just under the torch

(b) 6 mm behind the torch

Fig. 13 Maximum intensity distribution of each interface in Fig. 12

2.5 mm の範囲の平均値を計測していることになる。そのため、アーク点弧後に溶接状態がおおよそ準定常状態になったと判断した時刻以降で計測を行った。溶接開始90秒後のトーチ直下及びトーチ後方6 mm における受信点位置 -7 mm で得られたB-scopeをFig. 11に示す。図より、固液界面の信号と液気界面（溶融池表面）の信号が得られていることがわかるが、トーチ後方6 mm での固液界面の信号が弱いことがわ

かる。次に、受信点位置 ± 7 mm の開口合成結果をFig. 12に示す。ただし、ここでの開口合成処理は室温での音速 5800 m/s を適用したものである。さらに開口合成結果で得られる z 方向のエコー強度分布において、各界面位置の最大値を示す位置を -8 mm から 8 mm の範囲でプロットしたものをFig. 13に示す。なお、 -3.5 mm から 3.5 mm の間で固液界面が計測されていると判断し、この間においては固液、液気両

界面からの信号の最大値を別にプロットした。これらの結果から、未溶融部である試験体表面及び溶融池表面位置が溶接前の板厚よりも高い位置で画像化されていることがわかる。これは試験体内部が高温になり、超音波音速が低下しているにも関わらず、超音波音速を室温のまま、すなわち本来よりも高速のまま適用したことでより遠方に界面があると判断されたためである。

3.4 温度分布を考慮した溶融池形状の画像化

レーザ超音波による計測結果から室温の超音波伝搬速度のみを用いて溶融池形状を画像化すると、温度勾配を有する溶接中では実際の超音波伝搬距離を再現できず、実際の溶融池形状とは異なる形状となる。そこで2.3節で述べた手法により実際の溶込み形状から試験体内部の三次元温度分布を推定した。前節までの実験条件に則した解析条件をFig. 14に示す。入熱量1568 W（電流150 A×電圧12.3 V×熱効率85%と仮定）、ガウス分布入熱の $1/e^2$ 半径を7 mmとしたときに解析モデルで得られた溶込み形状をFig. 15(a)に、実際の溶込み形状をFig. 15(b)に示す。解析モデルによる溶込み形状が幅10 mm、深さ2.5 mmだったのに対し、実際の溶込み形状は幅10.1 mm、深さ2.3 mmであった。この合わせこみを行った際に得たトーチ直下の温度分布をFig. 16(a)に、トーチ後方6 mmでの温度分布をFig. 16(b)に示す。これらの温度分布をFig. 8の関係を用いて音速分布に換算し、開口合成処理を再度行くとFig. 17が得られる。温度分布を適用することにより、各界面位置が下がることが確認された。また、トーチ直下に比べてトーチ後方6 mmでは溶融池表面及び界面の強度が弱いことがわかる。これはFig. 11に示したB-scopeにおいて、溶融池表面及び界面の信号自体が弱いことや、信号を得られる範囲が狭くなり、開口合成によって強め合う信号が少なくなったことが原因と考えられる。さらに、Fig. 17で得られるz方向のエコー強度分布において各界面位置を示す信号の最大値を示す位置を-8 mmから8 mmの範囲でプロットしたものをFig. 18に示す。溶融池界面が未溶融部と不連続となっていることがわかる。これはFig. 9に示したくぼみ試験体の計測結果において側面部が画像化できなかったことと同様の理由によると思われる。

溶融池表面位置については、Fig. 18(a)ではほぼ水平に画像化されているが、これは必ずしも実現象を表すものではない。2.3節でも述べたように、本手法では開口合成処理時に液相部分の音速を一定としているためである。したがって、固相音速と同様に液相音速の温度依存性及び溶融池内の温度分布を考慮することができれば、アーク圧力などによる溶融池表面の変形も含めて、実現象を反映した画像化が可能であると考えられる。また、Fig. 18(b)ではFig. 18(a)に比べて、表面位置がややばらついていることがわかる。これは上述の仮定した液相音速を適用している影響により、開口合成処理時に本来の表面位置を指示する信号が分散してしまい、最大値を示す位置が不連続になってしまったことが原因であると考えられる。

以上の結果をまとめたのがTable 3である。左2段がトーチ直下、右2段がトーチ後方6 mmにおける結果であり、そ

Fig. 14 Analysis condition

Fig. 15 Cross section macro

Fig. 16 Temperature distribution in xz cross section 90 seconds after starting welding

Fig. 17 Aperture synthesis images with temperature distribution 90 seconds after starting welding

Fig. 18 Maximum intensity distribution of each interface in Fig. 17

Table 3 Comparison between actual value and measurement results of each interface

		Just under the torch		6 mm behind the torch	
		Work surface ($x = -7$ mm)	Molten pool interface ($x = 0$ mm)	Work surface ($x = -7$ mm)	Molten pool interface ($x = 0$ mm)
Actual value		10.6 mm	9.3 mm	10.6 mm	8.2 mm
Measurement results	Without temperature distribution	11.4 mm (+7.5 %)	11.1 mm (+19.4 %)	11.8 mm (+11.3 %)	9.4 mm (+14.6 %)
	With temperature distribution	10.5 mm (-0.9 %)	9.2 mm (-1.1 %)	10.7 mm (+0.9 %)	7.9 mm (-3.7 %)

れぞれ $x = -7$ mm での試験体表面位置と $x = 0$ mm での溶融池界面位置について、ハンマリング後の溶接線方向断面マクロによる実測値とレーザ超音波法による計測結果を示している。ただし、後者については室温のまま開口合成処理を行った場合と本研究で示した推定温度分布を適用して開口合成処理を行った場合、両方の結果を載せている。計測結果から、未溶融部である $x = -7$ mm での試験体表面位置はトーチ直下の場合 10.5 mm、トーチ後方 6 mm の場合 10.7 mm とともに良い一致を示していることがわかる。また、溶融深さを示す $x = 0$ mm での固液界面位置はトーチ直下の場合

9.2 mm、トーチ後方 6 mm の場合 7.9 mm と最大で 0.3 mm (-3.7%) の誤差があることがわかった。ここでトーチ後方 6 mm での計測結果における試験体表面位置と固液界面位置との差を溶込み深さとしたとき、溶込み深さは 2.6 mm となり、Fig. 15(b) に示した断面マクロの溶込み深さと 0.3 mm の誤差があることがわかった。

3.5 考察

Table 3 より、試験体内部の三次元温度分布を推定することで、試験体表面位置は実際の試験体の板厚とほぼ一致し

Fig. 19 Influence of one-dimensional temperature distribution on aperture synthesis image

Fig. 20 Aperture synthesis image of Fig. 17(a) without waveform processing

た。一方で、溶融池界面位置については最大で 0.3 mm, -3.7%) 程度の誤差となった。これについては、Fig. 7 で示した室温下の単純な板厚測定結果においても板厚位置を示すエコー強度にある程度幅が出てしまう点や、アーク溶接プロセスで求められるであろう寸法精度を鑑みると、実用的には許容できる誤差であると考えられる。よって、本報で実施した、三次元熱伝導解析により求まる溶接試験体内部の温度分布の適用は、レーザ超音波による溶融池界面位置の特定方法として有効であるといえる。

しかし、適用した温度分布は実際の温度分布とは厳密には異なると考えられ、またこれを精緻に求めるのは非常に難しい。そこでより簡易的な温度分布を適用した場合の界面位置がどのようになるかを調べた。Fig. 19(a) は簡易温度分布の一例で Fig. 16(a) におけるトーチ直下の温度を水平方向に様に分布させた一次元温度分布であり、これを Fig. 12(a) に適用して界面位置を画像化したのが Fig. 19(b) である。一次元温度分布を適用すると、主に試験体表面位置が下降し、 $x = -7$ mm での試験体表面位置が 9.8 mm となり、実際の表面より 0.7 mm 低く算出されるが、溶融池界面位置は 9.1 mm と三次元熱伝導解析結果を適用した場合とほぼ変わらない。溶融池形状の中でも特に溶融深さのみに注目した場合には、この程度の温度分布入力で十分であるといえる。従って、三次元熱伝導解析でなくとも、溶接中の試験

体表面温度を観察するなどの手法によって、適当に試験体内部の温度分布を外挿するなどの手法でも実用に足る精度が得られる可能性がある。そのためには、どのような温度分布であれば十分であるか、更なる議論が必要であるといえる。

また、画像化した際の界面位置の明確化といった課題もある。Fig. 11 に示したように、計測時に得られた溶融池界面からの信号は、板厚測定時に得られた信号などに比べると微弱である。そのため、波形処理等を施さずに画像化するとノイズと界面位置の判別が困難になり得る。トーチ直下の計測結果に温度分布を適用し、波形処理等を行わなかった場合の画像化結果を Fig. 20 に示すが、ノイズが画像化されてしまい、溶融池界面位置の視認性が非常に悪くなっていることがわかる。反射率の影響により板表面（固気界面）からの信号に比べると溶融池界面（固液界面）からの信号が弱いのは本質的であると考えられるが、本報では、波形処理等を施すことで界面信号の判別が可能となった。

なお、溶融池界面からの信号の強度や画像化時の視認性は、受信レーザ照射位置や計測点数によっても影響を受けると考えられる。例えば、視認性向上のためには、界面信号が取得できる範囲での計測点数を増加させることが有効であると考えられるが、点数増加によるノイズの影響や計測時間の増大などの問題も合わせて考える必要がある。今後は、界面からの信号がより強く取得できるような計測条件や高さ方向の分解能を向上させるための画像処理方法などについて検討していく必要がある。

4. 結 論

本研究では、溶接中でも適用可能なレーザ超音波システムにより TIG アークによるビードオン溶接中の溶融池形状計測を行った。まず、溶融池形状を模擬したくぼみ付き試験体による検証を行い、2 点分の受信点で得られた開口合成結果を重ね合わせることが有効であり、くぼみの底部が画像化可能であることがわかった。次に、溶接電流値 150 A で

ハンマリング法により溶融池形状の計測を試み、溶融池がトーチ直下から6mm後方の位置で最大溶込み深さ2.4mmをとることがわかった。これらの検証に加え、ガウス分布熱源による三次元熱伝導解析を行い、試験体内部の三次元温度分布を推定した上で、レーザ超音波法を用いて溶融池形状を計測した。結果によると、温度分布を適用することにより未溶融部の試験体表面位置が用いた試験体の板厚と良い一致を示し、溶融池界面位置は最大で3.7%の誤差があることがわかった。

5. 謝 辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発」(管理法人: JST)によって実施された。

参 考 文 献

- 1) 浅井, 多紀, 久保, 金子, 野村: 高機能視覚センサを用いた自動MAG溶接システムの開発, 溶接学会溶接法研究委員会, No. SW-2499-97 (1997)
- 2) S. Kaihara and K. Takenaka: Intelligent Approach for Quality Control, Journal of the Japan Welding Society, 63, 7 (1994), 523-552 (in Japanese)
- 3) C. B. Scruby, L. E. Drain: Laser Ultrasonic, Techniques and Applications, Bristol, Adam Hilger, (1990), 447
- 4) D. A. Hutchins: Ultrasonic generation by pulsed lasers, Physical Acoustics, 18 (1988), 21-123
- 5) S. Krishnaswamy: Theory and Applications of Laser-Ultrasonic Techniques, Ultrasonic Nondestructive Evaluation, Engineering and Biological Material Characterization, 435-494
- 6) N. Fuse: Development of Thickness Measurement System for Hot Rolled Steel with Laser Ultrasonic Wave Technology, DENKI-SEIKO, 83, 2 (2012), 87-96 (in Japanese)
- 7) T. Nakano: Non-Destructive Evaluation of Multi-Layer Piping Using Laser Technique, Journal of the Japan Institute of Metals, 76, 3 (2012), 177-181 (in Japanese)
- 8) Yun-Kyu An, Byeongjin Park and Hoon Sohn.: Complete noncontact laser ultrasonic imaging for automated crack visualization in a plate, Smart Materials and Structures, 22, 2 (2013)
- 9) S. Yamamoto, T. Hoshi, T. Miura, J. Semboshi, M. Ochiai, Y. Fujita, T. Ogawa and S. Asai: Defect Detection in Thick Weld Structure Using Welding In-Process Laser Ultrasonic Testing System, Materials Transactions, 55, 7 (2014), 998-1002
- 10) M. Sano, T. Ishizuka: Application of Laser Ultrasound Generation Method Using Beam Equalizer to Ferrite Grain Size Measurement, JSME International Journal Ser. A, 79, 804 (2013), 1132-1136 (in Japanese)
- 11) A. Karabutov, A. Devichensky, A. Ivochkin, M. Lyamshev, I. Pelivanov, U. Rohadgi, V. Solomatin and M. Subudhi: Laser ultrasonic diagnostics of residual stress, Ultrasonics, 48 (2008), 631-635
- 12) S. Zamiri, B. Reitingner, H. Grun, J. Roither, S. Bauer and P. Burgholzer: Laser Ultrasonic Velocity Measurement for Phase Transformation Investigation in Titanium Alloy, IEEE International Ultrasonic Symposium (2013), 683-686
- 13) M. Ochiai, T. Butsuen, J. Senboshi, K. Kubo, S. Asai: In-process Identification of Molten pool Configuration, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 17, 3 (1999), 426-431 (in Japanese)
- 14) E. Siewert, J. Schein, G. Forster: Determination of enthalpy, temperature, surface tension and geometry of the material transfer in PGMAW for the system argon-iron, JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS, 46, 1-16
- 15) G. F. Miller, H. Pursey: On the Partition of Energy between Elastic Waves in a Semi-Infinite Solid, PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A-MATHEMATICAL PHYSICAL AND ENGINEERING SCIENCES, 223(1954), 521
- 16) A. E. Lord, J. Acoust: Geometric Diffraction Loss in Longitudinal- and Shear-Wave Attenuation Measurements in an Isotropic Half-Space, The Journal of the Acoustical Society of America, 39 (1966), 650
- 17) M. Ochiai, N. Mukai, Y. Sano: Compact and robust inspection system for micro cracking detection using laser-induced surface waves, Proceedings of the 10th international symposium on nondestructive characterization of materials, 10 (2001), 305-310
- 18) J. Frejlich: Adaptive holographic interferometry using photorefractive crystals, Optics Communications, 70, 82-86
- 19) R. J. Dewhurst, Q. Shan: Modelling of confocal Fabry-Perot interferometers for the measurement of ultrasound, Measurement Science and Technology, 5, 6, 655-662
- 20) W. Müller, V. Schmitz, G. Schäfer: RECONSTRUCTION BY THE SYNTHETIC APERTURE FOCUSING TECHNIQUE (SAFT), NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN, 94, 3 (1986), 393-404
- 21) R. J. Dewhurst, C. Edwards, A. D. W. Mckie and S. B. Palmer: A remote laser system for ultrasonic velocity measurement at high temperatures, Journal of Applied Physics, 63 (1998), 1225
- 22) G. F. Miller, H. Pursey: On the Partition of Energy between Elastic Waves in a Semi-Infinite Solid, PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A, Vol. 223(1954), 521
- 23) W. Kurz and B. Lux, "Die Schallgeschwindigkeit von Eisen und Eisenlegierungen im festen und flüssigen Zustand", High Temperatures-High Pressures, 1 (1969) 387-399
- 24) K. Nomura, Y. Hirata: Study of droplet transfer effects in simple model of GMA welding, Preprints of the National Meeting of JWS, 92, 116-117 (in Japanese)
- 25) 菅原, 星, 山本, 千星, 落合, 野村, 浅井: 音速補正を用いた溶融池形状の超音波映像化, 第38回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム予稿集, 3J2-3