ステンレス鋼板のレーザ溶接システムに関する 状態監視システムの開発*

河田直樹** 及川昌志** 大塚陽介† 岩木俊一†† 久米原宏之**

Development of Condition Monitoring System for Laser Welding System of Stainless Steel Sheets

Naoki KAWADA, Masashi OIKAWA, Yosuke OTSUKA, Syunichi IWAKI and Hiroyuki KUMEHARA

The method of the quality control in the laser welding has various techniques. The laser welding monitor system is one of the many kinds of technique concerning of quality control, and is marketed. However, it is necessary not only to manage in-process in the welding system but also to manage pre-process and post-process to control welding quality. Therefore, the management of the welding quality needs the monitoring in the above method. As the first, the condition monitoring technique uses the waveform analysis of the optical intensity in in-process of the laser welding process. In this report, the application experience to the half penetration welding with the YAG laser for thin stainless steel sheets is discussed.

Key words: stainless steel sheets, YAG laser, welding quality, condition monitoring system, waveform analysis

1. 緒 言

レーザ溶接品質の管理に種々の手法が開発され、レーザ溶接モニタリングシステムとして市販されている。しかし、ほとんどの既存システムは溶接中に発生する欠陥を検出するため、欠陥の発生を未然に防ぐことはできない。そのため、レーザ溶接品質の評価および管理には、接合中に限らず、接合前後を含む全プロセスの監視が必要とされる(図1)¹⁾²⁾。

本報では、ステンレス鋼板向けのレーザ溶接システムを用いて非貫通溶接を行い、各プロセスで発生する信号の波形を解析することにより、状態監視技術の検討を行った。その結果、接合前に溶接システムおよび治具の状態、接合中に溶接システムの状態、接合後に溶接部の状態を監視することで効率の良いプロセス管理方法を構築したので報告する。

2. レーザによる重ね溶接と溶接品質の管理

レーザによる重ね溶接は、一般にギャップの影響を大きく受けることが現場で見られる。溶接品質は、溶接構造物に関する顧客の要求仕様の達成度であり、溶接構造の品質(設計品質)と溶接プロセスでの品質(製造品質)で構成される。つまり、溶接品質の維持には、設計品質と製造品質の管理が必要である。

ところで重ね溶接の品質確保のための評価については、次の課題がある。

Fig.1 Laser welding process

- (1) 溶接部の検査は外観からの判断が難しい
- (2) 溶接の異常現象(欠陥)が複雑で特定が難しい
- (3) 溶接部の補修が難しい

さらに、薄板の場合には非破壊検査も困難で溶接内部の監視が十分にできない。

そこで、製造システム内での溶接品質を管理する方法を確立するために、まず試験片レベルで溶接品質を予め安定させる必要があり、溶接条件の最適化を行う。最適化以後はその条件を適用し、維持すればよく、溶接システムの健全性を保つための予防保全(状態基準保全)を行うことで、安定した溶接品質を得ることができると考えられる。最適化は、まず設計段階で行い、次に構造に適した継手形状を決定する。決定された継手の溶接条件を最適化し、溶接システムの状態を常時監視で、最終的に良好な溶接品質を得ることができる。

3. 時系列波形に関する状態監視技術の開発

レーザ溶接システムの状態を監視するためには、各部の最適な状態(正常状態)の把握が重要となる。すなわち、最適化した直後の正常状態からの任意の経過時間の変化を検知することが目的となる。そのためのコア技術に、時系列波形からの状態変化の検知技術の確立が求められる。時系列波形には、以下の情報が含まれている。

- (1) 信号の大きさ(振幅)
- (2) 周期、周波数、波長

状態監視では、これらの情報から特徴を捉えることが要求され、主に周波数解析や統計解析が用いられる。この際に周波数解析を用いる場合には、支配的な周波数(共振周波数)が存在することが前提条件となる。一方、支配的な周波数が存在しない状態では、統計解析を用いて波形パターンで検出することが有効である。

このように、時系列波形の有する特徴によって解析手法を使い分ける必要がある。

4. レーザ溶接システムへの状態監視技術の適用

レーザ溶接システムの状態監視技術は、溶接工程の接合前、接合中、接合後の各工程について開発する必要がある。そこで、そ

* 原稿受付 平成20年7月4日

** 正会員 群馬大学大学院(群馬県桐生市天神町1-5-1)

† 正会員 東急車輛製造(株)(神奈川県横浜市金沢区大川3-1)

†† 東急車輛製造(株)

それぞれの工程において重要となる検知項目の検討を行った(表 1)。レーザ発振器の異常については、接合中のワーク上での光強度の状態に変化を生じることから、移動平均処理によって判定できると考えられる。一方、加工ガス(アシストガス)などの異常は不明な点が多く、その判定方法を検討する必要がある。このように状態を把握しにくい場合の状態監視では、得られた時系列波形をパターン化し、判別する方法が有効である。その方法に波形解析がある(図 2)。データから平均 μ と標準偏差 σ を求め、例えば各々の σ の ± 1.5 倍、 ± 3.0 倍の位置に標本線を引き、その微分・積分特性を求めることで波形を特徴化する方法である³⁾。微分特性は定めた標本線を測定データが交差する回数をいい、積分特性は定めた標本線より上の領域に存在する測定データの数を用いる。また、この時のデータ抽出のサンプリング幅を抽出幅という。

これらの波形解析方法を統合し、各センサから得られた時系列波形を並列処理することで状態を監視するシステムとした。波形解析などのパターン判定方法では、異常状態にしきい値を持たせて、それを超えた時に「異常」を検知するモニタリングシステムであることが多い。この場合、レーザ溶接システムに対して正常と異常が混在する領域(グレーゾーン)が生じて異常を正常と誤る可能性がある。すなわち、図 3 に示すような異常判定結果の場合、モニタリングシステムのセンサが故障すると判定結果がゼロ出力となり、正常と同じ結果が生ずることになる。したがって、レーザ溶接システムとモニタリングシステム両方の状態を監視するためには、正常(最適化時の状態)であることを検知する必要があると考える(図 4)。つまり、最適化時の状態を判定基準として監視を行えるアルゴリズムの構築が必要となる。

よって、正常を判定基準とする場合、図 2 の標本線は正常データの平均値と標準偏差から求められ、判定に用いるのである。その状態が少しでも変化した場合に判定結果がゼロとなるようにし、モニタリングシステムの出力ゼロ状態とレーザ溶接システムの異常状態を同一の判定結果とし、誤判定を防ぐ。

Table 1 Monitoring object of laser welding system

Process	Monitoring object	Sensor
Pre-process	Welding jig	AE sensor
In-process	Laser oscillator	Photo sensor
	Mechanical system	Photo sensor
	Assist gas	Photo sensor
Post-process	Work	Laser displacement sensor

Fig. 2 Waveform analysis

Fig.3 Judgment of Fault condition

Fig.4 Judgment of Normal condition

Fig.5 Pre-process monitor system

Fig.6 Pre-process monitor system (Details)

Fig.7 Voltage of AE waveform of noncontact condition with small gap

Fig.8 Judgment of noncontact condition with small gap

Fig.9 Cross sectional observation result

Fig.10 In-process monitor system

Fig.11 Sensor system of laser welding monitor

Table 2 In-process monitor system technical data

	Filter		Photo sensor			
	Type	Wave length range	Type	Sensitivity	Response	Capacity
Laser power	A	1024nm	A	0.38A/W ($\lambda = 1.06\mu\text{m}$)	12.5ns (VR = 100V)	10pF (VR = 100V)
Reflection	B	1024nm	B			
Plasma/ Metal plume	C	<600nm	C			
Temperature	D	1100nm~1800nm	D			

5. 検証結果

構築した状態検知技術の検証のため、ステンレス鋼の薄板の重ね溶接を行うレーザ溶接システムに対して適用し、検証した。

5.1 接合前プロセスにおける状態監視システム

接合前は治具および材料の状態監視が溶接品質に大きく影響すると考える。部材精度と治具に関する問題点を整理し、それに対応したシステム検討を行った。重ね溶接の接合前での状態監視の役割は、溶接部材の加工精度不良やそれを抑える溶接治具の不具合を重ね溶接部のギャップによって監視し、接合不良を予防することである。重ね溶接のギャップを監視する接合前プロセスの状態検知システムは、重ね部の上板側を加振して、下板に伝播する波形を捉え、その状態から重ね部のギャップの有無を検出する(図5)。

また、伝播する波形から異常を捉えるために、AE センサと図2に示す波形解析を組み合わせた。本システムの検証は、図6に示す溶接部材の抑制状態を治具の抑制力を変えることによって行った。正常状態の治具抑制力に対して弱めた状態を作り、接合不良の原因となる溶接部材間にギャップを生じさせて異常状態とした。この実験では、発振器とAE センサの距離を2.0mとして、重ね部のギャップの監視を試みた。図7に正常時と異常時のAE センサ出力波形を示す。また、図8にその判定結果を示す。この結果は、波形解析の積分特性であり、正常時には判定値を出力し、異常時には判定値を出力しない結果となった。

さらに、出力4kW、溶接速度7.5m/min、加工ガスにはアルゴンガスを用いて同一のガス供給条件で溶接を実施し図9に示す溶接部となった。図9(a)に比べ、(b)はギャップを生じ、溶接部にアンダーフィルが生じている。この結果から、接合溶接治具およびワークの状態監視の可能性が確認でき、接合前プロセスにおけるレーザ溶接システムの状態監視の妥当性が確認できた。

5.2 接合中プロセスにおける状態監視システム

接合中の状態監視の役割は、レーザ発振器およびレーザ溶接用加工ヘッドの周辺機器の状態を監視し、接合中に生じたこれらの機器の不具合による溶接不良を防ぐことである。したがって、接合前プロセスと同様に状態監視を行う必要があると考える。状態監視システムの概要を図10に示す。レーザ溶接部で発生する光から、光学フィルタ(図10中のA~D)によって特定波長を抽出し、電圧に変換することで、レーザ出力、反射光強度、プラズマ/ブルーム強度相当、加工点温度相当の測定データを得ることができる¹⁾。これを波形解析し、システムの状態を監視する。

また、レーザ溶接はレーザビーム、加工雰囲気と材料の組み合わせによって決まる加工形態の一つで、種々のパラメータが品質に影響する⁴⁾。レーザの波長、ビームの空間的分布や時間的分布、光学素子、加工雰囲気、材料の光学特性、熱物性、位置決め精度、部材精度などが主なパラメータである。溶接加工の目的に合わせ「波長」、「ビームの空間的強度分布」、「レーザ出力の時間的強度分布」を選択している。この選択によって使用するセンサやフィルタが異なるので注意が必要である。

本報ではYAGレーザを対象として状態検知アルゴリズムの検証を行った。実験はYAGレーザを4kWで連続発振し、接合速度7.5m/min、加工ガスにアルゴンガスを用いた溶接条件で行った。実験で用いた板材の材質はSUS301L、板厚は上板が0.8mm、下板が1.5mmである。この場合の各センサと測定対象となる加工物周辺の位置関係を図11に示す。レーザ溶接用加工ヘッド周辺にフォトセンサとミラーを配置

して、レーザの射出位置とフォトセンサによる測定位置を合わせ、加工物上の発光現象を測定する。各種フィルタの帯域とフォトセンサの諸特性について表 2 に示す。レーザ出力と加工物上で発生する反射光測定用のセンサとフィルタは、YAG レーザの波長に合わせてある。これらのセンサの出力をサンプリング周波数 1kHz で測定し、これを数値化して監視用データを得る。このデータを波形解析し、状態監視のアルゴリズムを構築した。図 14 (a)、図 17 (a)、図 20 (a) に示す溶接断面が得られた状態を正常モデルと定義し、その状態を確認するためにレーザ出力、接合速度、加工ガスの状態を変化させ、構築したアルゴリズムを検証した。

Fig.12 Signal of sensor

Fig.13 Result of Judgment (fault condition of laser oscillator)

Fig.14 Cross sectional observation result

Fig.15 Signal of sensor C

Fig.16 Result of Judgment (fault condition of Mechanical system)

Fig.17 Cross sectional observation result

Fig.18 Signal of sensor D

Fig.19 Result of Judgment (fault condition of Assist gas)

Fig.20 Cross sectional observation result

Fig.21 Post-process monitor system

Fig.22 Signal of the laser displacement sensors

Fig.23 Waveform analysis result of the displacement

まず、レーザ出力の状態監視の検討を行った。最適溶接条件でのレーザ出力とその条件から 20%低下させた場合のセンサ A の電圧出力結果を図 12 に示す。波形解析の結果、抽出幅 200ms、正常データにおける -2σ の位置の微分特性で判別可能となった(図 13)。さらに図 13 の判定結果の妥当性を確認するために、溶接断面の観察を行った(図 14)。この結果では溶接部の形状に若干の差異があるが、20%の出力低下でも溶接部は健全であることが確認できた。

したがって、レーザ発振器の出力が 20%の出力低下しても、溶接品質に影響がないことがわかり、溶接不良を未然に防止できることを確認した。

次に接合速度を正常状態の 7.5m/min から 6.5m/min に変化させた場合のセンサ C の電圧出力を図 15 に示す。抽出幅 400ms で正常データの -2σ の微分特性によって判別可能となった。その結果を図 16 に示す。この判定結果の妥当性を確認するために、溶接断面の観察を行った(図 17)。溶け込み深さに変化が現われているため、溶接速度の変化に対する溶接品質への影響の大きさが確認できた。

最後に加工ガスの供給状態についてサイドガスノズルを基準位置より 15 度傾斜させた場合のセンサ D の電圧出力を図 18 に示す。このままの波形では状態変化の判別は困難であるが、抽出幅 300ms で正常データの $+2\sigma$ の微分特性によ

って判別可能となった。その結果を図 19 に示す。この判定結果の妥当性確認のために、溶接断面の観察を行った(図 20)。本報の例では溶接部の形状に最も大きな変化が現われ、溶接品質を維持する上で重要な項目であることが確認できた。

以上の結果から、接合中プロセスで重要となるレーザ出力、溶接速度、加工ガスの状態が検知でき、状態監視の可能性を確認した。

5.3 接合後プロセスにおける検査システム

接合後の本システムの役割は、溶接システムの状態の監視ではなく、溶接部材の検査、または品質の記録である。

例えば、次工程でこの溶接部材を用いた組み立て(総組工程など)がある場合には、その組み立て精度の確保のために溶接変形が製品品質に影響する。よって検査項目にその変形量の測定²⁾が必要と考える。図 21 に溶接変形量に関する検査システムを示す。直交軸で構成する位置決め装置にレーザ変位計を取り付けたシステムである。レーザ変位計を溶接ビードと直角方向に走査して測定する。図 22 に測定結果を示す。測定された信号は、溶接部材のビード表面のあらさによって、ノイズ成分の重畳を確認できる。この場合は、図 22 のデータに移動平均(またはフィルタ)処理を加えることで得られる。図 23 はデータ区間 30 の移動平均を求めた結果である。

この処理によって、溶接部近傍の変形量を数値データとして取得(=可視化)でき、かつ位置決め装置による自動計測が可能となり、検査工程を自動化できる可能性がある。

6. 結 言

レーザ溶接の接合前、中、後の各プロセスにおいて、状態の監視を行うシステムを検討し、それぞれのプロセスでの監視技術を開発した。

そのコア技術として、波形解析技術が有効であることを確認し、以下の結果を得た。

- (1) レーザ溶接の接合前プロセスにおいて、溶接部材および治具の状態を AE センサと波形解析によって監視し、状態を判別することができた。
- (2) レーザ溶接の接合中プロセスにおいて、溶接加工点で発生する光強度の変化を波形解析によって監視し、レーザ発振器、送り装置、加工ガス供給装置の状態を判別することができた。
- (3) レーザ溶接の接合後プロセスにおいて、溶接部材の変形量をレーザ変位計によって定量的に監視し、溶接品質の記録について自動化の可能性を得ることができた。

今後は他の継手形態や他の材料への適用についても検討していきたい。

参 考 文 献

- 1) N. kawada et al.: Development of monitoring system for laser welding system of stainless steel sheets (the first report) - Examination in half penetration welding process of thin stainless steel -, JSPE Autumn Meeting, (2006) 615 (in Japanese).
- 2) N. kawada et al.: Development of Monitoring System for Laser Welding System of Stainless Steel Sheets - 2nd report, Examination of Preprocess and Postprocess of Laser Welding System -, JSPE Spring Meeting, (2007) 777 (in Japanese).
- 3) S. Teshima et al.: The Development of Real Time Fault Prognostics System using MT-System, Quality Engineering Conference, (2003) 226 (in Japanese).
- 4) 新井武二: 高出力レーザプロセス技術, マシニスト出版, (2004) 116 (in Japanese).