

特集 レーザ溶接状態インプロセス評価技術の開発*

Development of In-process Evaluation Technology for Laser Welding

村尾 増昭

Masuaki MURAO

榊原 誠

Makoto SAKAKIBARA

These days the demands facing manufacturing companies are becoming more severe and more than ever the reduction of manufacturing costs and the pursuit of perfect quality are becoming critical issues on the shop floor. Our manufacturing floor, which processes the welding of parts for car air-conditioners, sampled one product from each lot and conducted a destructive inspection by checking the cut welding surface for lot quality assurance. If a poor weld is found, all parts in the same lot must be discarded, causing the company to incur a significant loss. Therefore, the development of technology to assure the quality of all welded products is a major theme for the company.

In this research, we focused our attention on Acoustic Emission (AE) waves, which are produced when solid metals dissolve and coagulate, and sought to develop evaluation technology to diagnose the in-process welding conditions. Our experiments discovered a relationship between changes in AE waves and poor welds (insufficient fusion depth, short and small weld beads, weld skipping) and led us to develop a diagnostic device that incorporates a nondestructive testing technique for identifying welding conditions.

We introduced this diagnostic device to our CO₂ laser welding process and succeeded to automate a 100% in-process quality inspection.

Key words : Equipment diagnosis technology, Laser welding, Acoustic emission, Slip ring, Fusion depth of welding, Automated evaluation device

1. はじめに

近年、企業の品質問題がクローズアップされ、品質の維持・向上が大きな課題となっている。生産現場では、品質を保証するため、可能な限り自動検査装置などを導入し製造製品全数の品質保証を行っているが、加工品の中には全数検査は不可能なものがある。その代表的なものの一つに溶接加工品がある。

当社では、ロット単位で抜き取り、破壊検査（切断による溶け込み深さ断面検査）にて溶接部分の品質（強度）保証をしている（Fig. 1）。

上記手法で品質を保証する場合には、

(1) 溶接不良（強度不足）が発見された場合ロット単位ですべて廃却処分

(2) 破壊検査により仕損費が増大

(3) 検査中は生産を停止するため設備停止ロスが発生といった問題点が発生する。このため、溶接部の品質のつくり込みはもちろん、1個単位で製品保証できる非破壊検査技術の開発が期待されている。

プレスなどの塑性加工においては金属が変形あるいは破壊のときにAcoustic Emission（以下AE）波を放出する。これと同様に金属が固体から溶融し凝固する過程でもAE波を発する。この事実からAE法によりレーザー溶接状態をインプロセス評価する技術開発に取り組んだ。

その結果、よい成果を得たので報告する。

2. レーザ溶け込みの深さ検出のための各種非破壊検査法の検討

溶接溶け込み深さ（以下、溶け込み深さ）を非破壊で検査する方法として、超音波探傷やX線による方法が考えられる。超音波探傷を適用する場合、検査対象物が比較的大きければ可能だが、板厚が数mmしかない

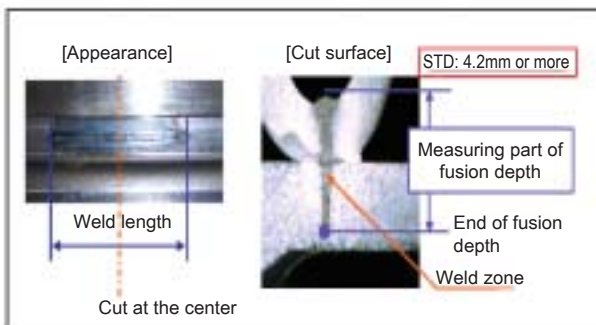


Fig. 1 Measuring part of fusion depth

*（社）日本プラントメンテナンス協会の了解を得て、月刊誌「プラントエンジニア」2006年2月号より転載

金属の溶接深さを判断することは困難である (Fig. 2)。また、Fig. 3はX線で溶接部を撮影した写真であるが溶け込み深さを判別することは困難である。また、双方ともにレーザー溶接完了後の検査となり、我々が目指すインプロセスでの全数評価は実現できない。そこで、照射されたレーザーが溶接対象物に衝突した時や熱により金属が加熱冷却されて熱応力が加わった時にAE波が発生すると発表されている論文¹⁾に着目し、AE法によるレーザー溶け込み深さの検出が可能か否か実験を開始することにした。

3. AE法によるレーザー溶け込み深さ検出の検証

3.1 検証実験の概要

CO₂レーザー溶接機を使い以下の実験を行った。

- (1) 実験1では、材料S45Cの角材を使用しレーザーの出力を5kW・4kW・3kWと変化させ、レーザー出力と溶接溶け込み深さおよびAE波の関係を検証した。
- (2) 実験2では、実際の溶接工程は円盤状の物を溶接しているため、同一材質の円材を使用してレーザー入射角度及びセンサ取付け角度の違いによるAE波への影響を検証した。

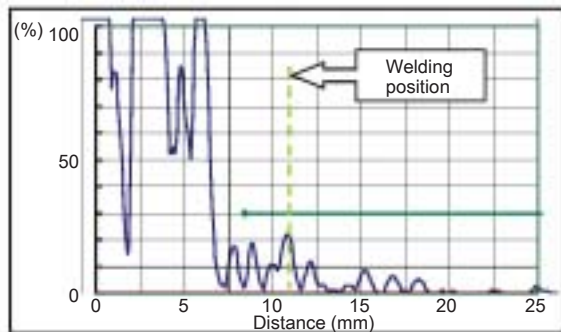


Fig. 2 Ultrasonic flaw detection

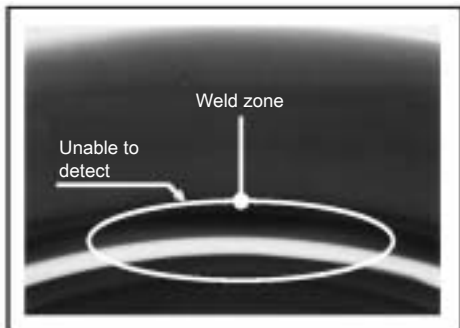


Fig. 3 X-ray of weld zone

本実験の装置の概要と機能をFig. 4に示す。解析対象のAE波のみ抽出するためにレーザー溶接機から照射のタイミングを受け溶接加工時の信号のみ保存した。

3.2 実験1：レーザー出力変化による溶け込み深さとAEの検証

レーザー出力を5kW・4kW・3kWと変化させたときの条件をTable 1に示す。このときのレーザー照射は一定距離で行い、それぞれレーザー出力を変化させたときに発生したAE波形をFig. 5に示す。このグラフの縦軸はAE実効値を表し、横軸は時間を表す。レーザーの出力が低下するとAE実効値も低下しているのが分かる。ここで、AE波は縦波、横波、表面波の三つの波からなる。この一つひとつを分解して解析しても意味を成さないため、今回の実験ではAE波の面積（積算値）で評価することにした。

次に、ノイズに対する影響も考慮に入れ上記条件で各10個のデータを収集し、レーザー出力と溶け込み深さの関係、およびレーザー出力とAE実効値の面積（以下AE積算値）との回帰分析を行った。溶け込み測定方法をFig. 6に、実験結果をFig. 7に示す。Fig. 7 (ア)のグラフの縦軸は溶け込み深さを表し横軸はレーザー出力を表す。レーザー出力が上昇すると溶け込み深さも深くなり、レーザーの出力に比例していることが分かる。また、Fig. 7 (イ)のグラフの縦軸はAE積算値を表し、横軸はレーザーの出力を表す。レーザーの出力とAE積算値の相関係数も0.96となり、レーザー出力と溶け込み深

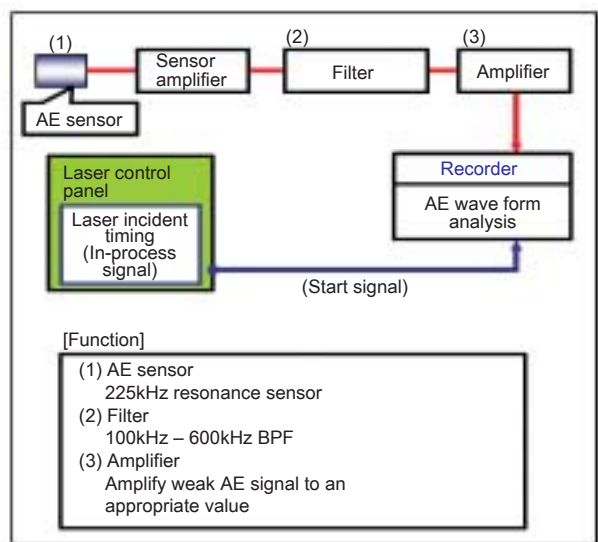


Fig. 4 Outline and function of experiment for evaluation

Table 1 Conditions of experiment 1

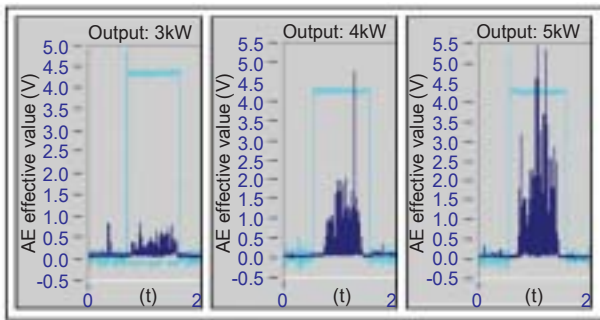
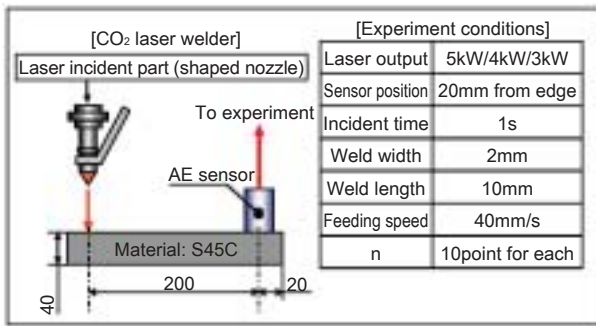


Fig. 5 Change of AE effective value with different

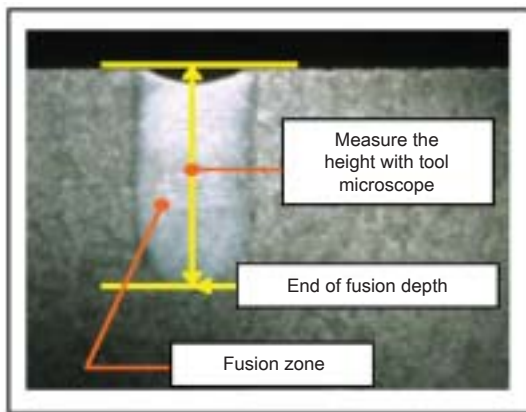


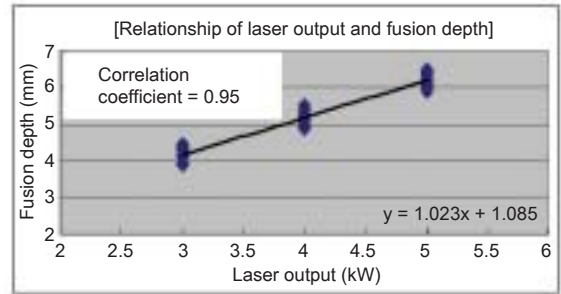
Fig. 6 Measuring method

とAE積算値に強い相関を確認した。

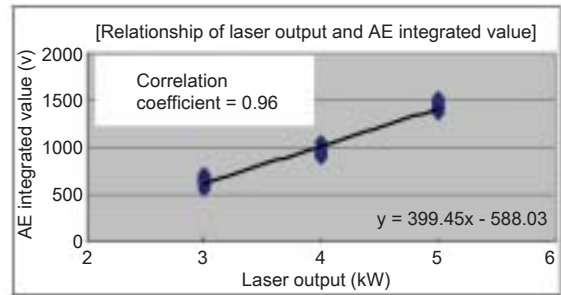
3.3 AE波検出のための影響と理論式の考察

実際の設備は、円盤状の物を溶接しているため、センサを取り付ける設備の構造と製品の溶接箇所を考えた場合、必ずしもレーザー入射は溶接面に対して垂直に入れて溶接するとは限らない。

そこで、実験2に入る前に、レーザー出力とAE検出感度について、理論的な検討から始めることにした。



(ア)



(イ)

Fig. 7 Relationship between fusion depth and AE with laser output

また、レーザー溶接に起因して発生するAE波の算出は複雑となるため、一つのモデルで考えることにした。

まず、レーザーの出力と溶け込み深さに比例関係が成立していると仮定して、AE波の検出感度に影響を及ぼす因子を考えた場合、以下の三つが挙げられる。

- (1) レーザ出力の違いによる影響
- (2) AE伝搬距離に依存する減衰の影響
- (3) センサ感度方向による影響

まず、AEの検出感度はレーザー出力に比例して高くなる。但し、実際の入射エネルギーは入射角の影響を受けるため、Fig. 8よりAEの検出感度をS、レーザー出力をFとすると、

$$S \propto F \cos \phi \tag{式1}$$

となる。

次に、AE波は伝播距離に依存し減衰する特性 (f(L)) を持つ。したがって、伝播距離をLとすると (Fig. 8)、

$$S \propto f(L) \tag{式2}$$

となる。

AEセンサの圧電素子は取付け面に対し垂直方向に

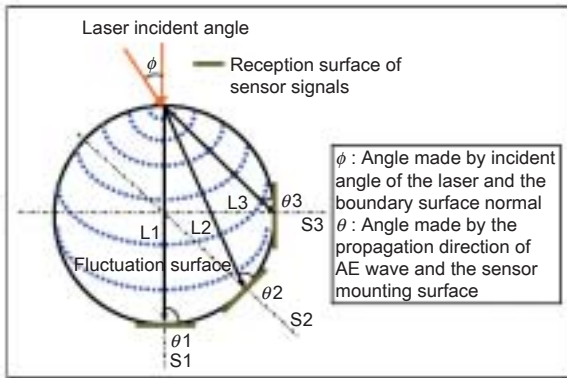


Fig. 8 Incident angle and sensor angle

分極しているため、センサの感度は垂直方向で最大となり水平方向で最小となる。

以上から、

$$S = K \cdot F \cos \phi \cdot f(L) \cdot \sin \theta \quad (K: \text{材料関数}) \quad (式 3)$$

となる。

ここでAE波の伝搬距離が数100mmと比較的短い場合は、レーザ入射に起因して発生するAE波減衰の影響は殆ど無視できるレベルである。

したがって、(式3)は

$$S = K \cdot F \cos \phi \cdot \sin \theta \quad (式 4)$$

と近似できる。

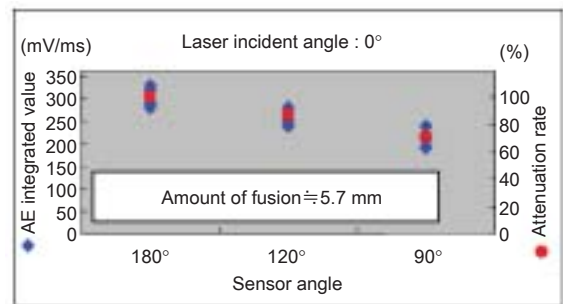
3.4 実験2：レーザ入射角度及びセンサ取付け角度の違いによるAE波への影響検証

実験の実験用材料と条件をTable 2に示す。レーザ入射角度0°（レーザ入射面が材料に対し直角）の実験結果をFig. 9(ア)に、レーザ入射角度30°の結果をFig. 9(イ)に示す。このグラフの第一縦軸は、AE積算値を表し横軸はセンサ取付け角度、第二縦軸は減衰率を表す。

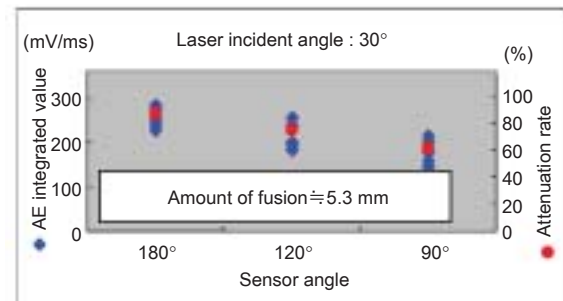
ここで、減衰率は検出感度の前項で考えた理論式からレーザ出力と入射角 $\cos \phi$ とセンサ取付け角度 $\sin \theta$ から求めた(式4)。各センサ取付け角度の実測値と(式4)から求めた減衰率がほぼ一致していることから、センサ取付け角度に応じてAE積算値を補正すれば、AE法による溶け込み深さが判断できることを検証した。

Table 2 Material and conditions of experiment

[Material]		[Experimental conditions]	
Substance	S45C	Laser output	5kW
Diameter	150mm	Sensor angle	90° 120° 180°
Thickness	100mm	Welding angle	0° 30°
		Incident time	1s
		Weld width	2mm
		Weld length	5mm
		Feeding speed	2.5mm/s
*Distance of laser incident is constant		n	5each



(ア)



(イ)

Fig. 9 Verification of attenuation rate with different sensor angle

4. レーザ溶接機への適用

4.1 レーザ溶接機加工概要

さらに具体化するため、カーエアコン用マグネットクラッチのCO₂レーザ溶接工程にて適用化研究を進めた。CO₂レーザ溶接機の加工概要をFig. 10に示す。

本設備は、カーエアコン用マグネットクラッチの構成部品であるロータ部のプーリとロータ本体の溶接加工を行っている。品番毎に製品の形状は違うため、その形状に応じて、レーザ入射角度を傾け、溶接治具を回転させ6点溶接する。そのレーザ入射角度は30°から-40°であり、それに応じたレーザ出力は4.5kWから5.3kWである。レーザ溶接加工順序はFig. 10の下に示す。

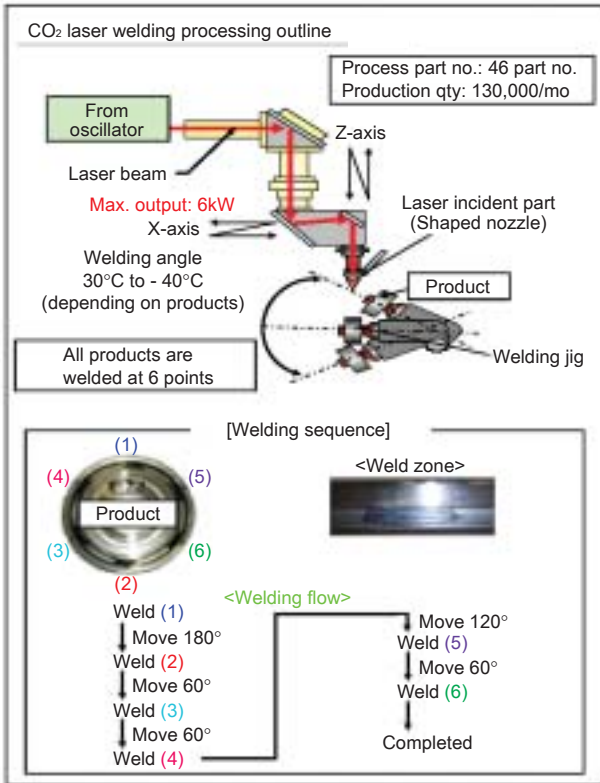


Fig. 10 CO₂ laser welding processing outline

レーザ入射の位置決めはサーボ制御にて自動化しており、全6点溶接のサイクルタイムは10秒である。

4.2 異常検出対象項目の選定

溶接不良は、①溶け込み深さ不足、②溶接ビード(溶接長さ)短小、③溶接飛びの三つである。ここで、溶接飛び不良とは6点溶接でなければいけないものが、制御系などの原因で5点以下の溶接になったものをいう。

本研究では全溶接箇所について上記の3項目を検出することとする。

4.3 センサ取付け位置と検出方法の検討

レーザ加工時に発生するAE波は、微小な信号であるため、AEセンサの設置場所は加工部に極めて近い位置に取付ける必要がある。しかし、今回の溶接加工は溶接治具が回転して溶接するためセンサの有線接続は不可能である。このため、データ収集方法としては無線による方法があるが、ノイズの影響やコストの面から今回はスリップリング方式を採用し、図に示すスリップリング方式を考案した (Fig. 11)。このスリップリング方式は、溶接治具フォルダ部にAEセンサ、アン

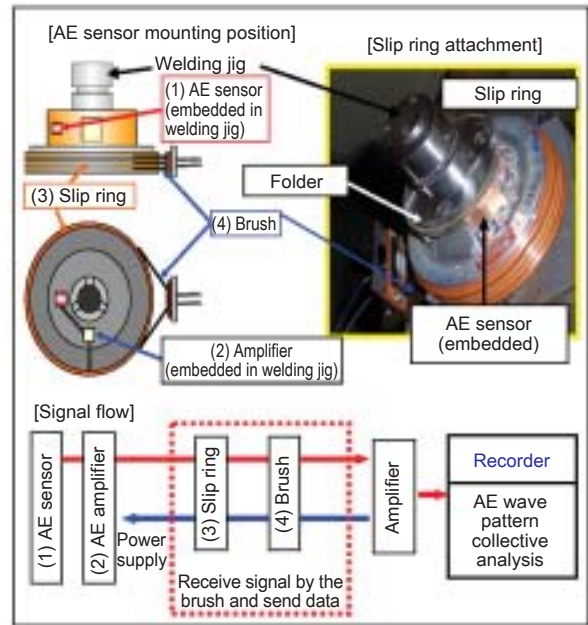


Fig. 11 Outline of slip ring and signal flow

プを埋込みスリップリングまで有線で接続しブラシを介してデータ (AE波) を収集するものである。また、アンプへの電源供給もブラシを介して行う。

4.4 溶接治具と製品との密着力による影響検証

実際の溶接加工では、製品を溶接治具にてクランプして溶接を行う。このとき、製品と溶接治具間にすき間があれば、AE波は大きな影響を受けられるため、密着力の検証を行った。

製品に教師信号1Vを与え、製品と溶接治具間の密着力を徐々に増加させスリップリングを介してデータを収集した (Fig. 12)。このグラフの縦軸は溶接治具に埋め込んであるAEセンサの受信信号を表し、横軸は密着力を表す。密着力が1kgf・cm以上で安定することから溶接治具のクランプ部の構造設計は1kgf・cm以上とした。

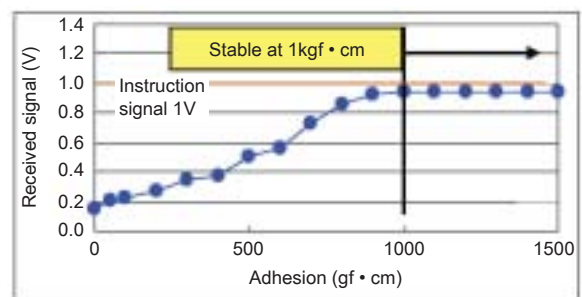


Fig. 12 Influence of adhesion

4.5 CO₂レーザー溶接機での適用化検証実験

4.5.1 溶接溶け込み深さとAE波の関係

レーザー出力を5kW、4kW、3kWと変化させ、溶け込み深さとAE波の関係をスリップリング方式で検証した。AEセンサ位置はFig. 13に示すように、レーザー入射部から180°の位置にセットし、後は製品の溶接順序に沿って回転する。また、レーザー入射角度の違いによるAE波の影響を知るために、0° 30° -40°での調査も同時に行った (Fig. 14)。レーザー入射角度30°での実験データと実際の溶け込み深さをFig. 15に示す。

この実験データの縦軸はAE実効値を表し横軸は時間を表す。レーザーの出力が低下するとAE実効値も低下する。それに伴い溶け込み深さも浅くなる。

更に、データの整合性を検証するために上記条件で各n=20の実験を行い、各溶接箇所でのAE積算値と溶け込み深さの関係について回帰分析を行った (Fig. 16)。この実験データはレーザー入射角30°で、各グラフの縦軸はAE積算値を表し横軸は溶け込み深さを表す。

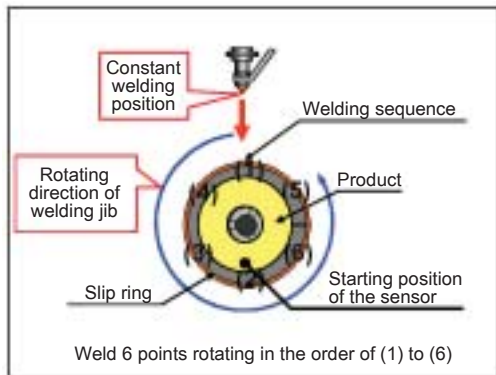


Fig. 13 Welding sequence

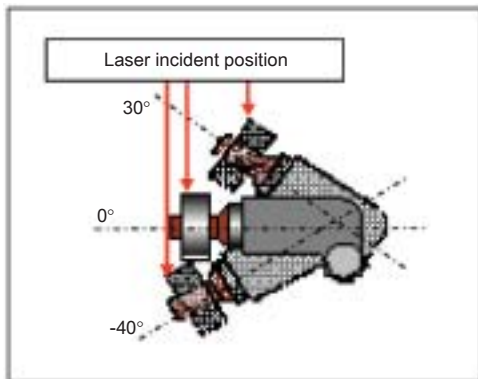


Fig. 14 Welding angle

その結果、いずれの溶接箇所も相関係数0.95以上ありAE積算値と溶け込み深さに強い相関を確認した。また、他のレーザー入射角度でも同様の結果となり、AE波の減衰率も前章3.4節で行った実験と同様の結果を得た。

4.5.2 溶接ビードとAE波の関係

溶接ビード (溶接長さ) の検出について実験した。レーザーの出力は一定 (5kW) で溶接時間を1秒と0.5秒に変えて行った (Fig. 17)。縦軸はAE実効値、横軸は時間である。溶接時間に対応してAE波が発生しているため、AEの発生時間を把握することで溶接ビードの長さが判断できる。また、スリップリング方式でのノイズの影響はほとんどないことも確認した。

4.5.3 溶接飛びの判断

溶接点ごとに、一定量のAE波が出ているか否かを測定すれば溶接飛びは判断できる。

以上の実験結果から、スリップリングを採用してレーザー加工時に発生するAE波を監視することでレーザー溶接溶け込み深さ、溶接ビード、溶接飛びが診断できる。

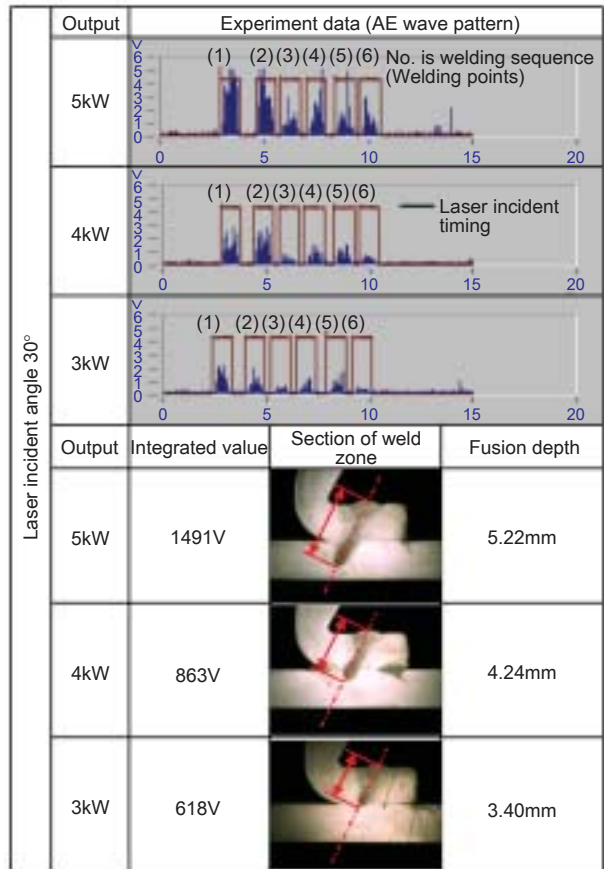


Fig. 15 AE wave pattern and fusion depth with different laser output

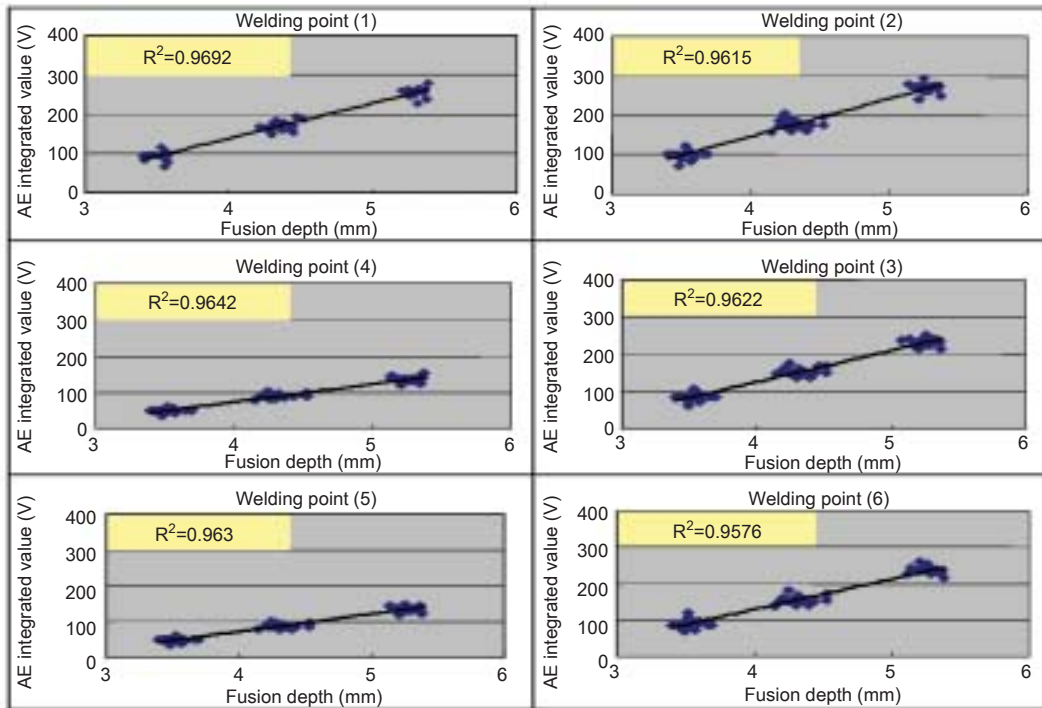


Fig. 16 Relationship between AE integrated value and fusion depth at each welding point

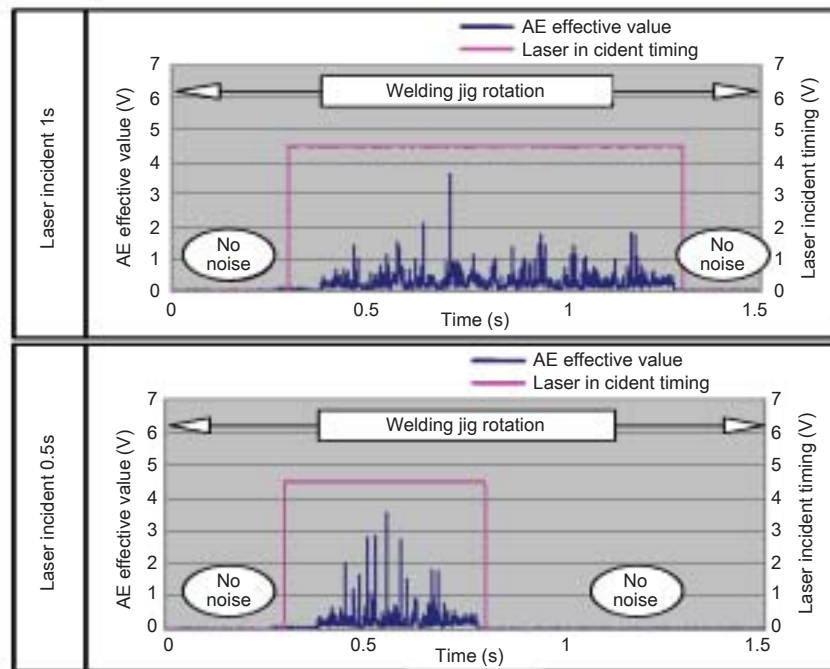


Fig. 17 AE development transition with different laser

4.6 レーザ溶接異常のインプロセス診断まとめ

前章4.2節に示した三つの異常検出項目に対する具体的な判定内容を以下に示す。

- (1) 溶け込み深さ判定：溶接時に発生するAEの積算値
- (2) 溶接ビード判定：溶接時に発生するAE発生時間

- (3) 溶接飛び判定：レーザ入射タイミングと個々のAEの積算値

更に、今回の研究において、溶接加工時に発生するAE波をフィードバック制御に使うことで、溶接速度を制御させ、主にレンズの劣化などに伴う溶接溶け込

み不足を抑制し、溶接品質のつくり込みに役立つ新たなアイデアが生まれた。

5. 開発した診断装置の概要

溶接の出力と入射角度およびセンサ角度より、3.3節の(式4)の検出感度から補正値を求め波形に付加して、6点溶接に対し一つのしきい値で評価することは可能である。しかし、レーザの反射レンズや加工レンズが劣化した場合、溶け込み深さはバラツク傾向にありそれに伴いAE波もバラツキが発生し異常を見逃す恐れがある。そこで万全を期するために、各条件の違いによる減衰率を診断装置に記憶させ、六ヶ所ある溶接点一つひとつと常に対比させることにより波形全体ではなく溶接箇所毎に評価ができる機能とした。

また、レンズの予知保全を目的にレンズ劣化に伴うAE波のバラツキの傾向管理ができる機能も持っている。

診断装置の主な回路構成は以下のとおりである(Fig. 18)。

- (1) 検波回路：絶対値変換と包絡線処理を行う。
- (2) 検波回路：絶対値変換と包絡線処理を行う。
- (3) 比較回路：溶接溶け込み、溶接飛び、溶接ビードの判断値と比較する。
- (4) 矩形発生回路：レーザ照射タイミングの間、診断開始信号のパルスが発生させる。
- (5) 診断値出力回路：溶接加工中の診断値を設備のフィードバック回路へ出力する。
- (6) AND回路：判断値を外れたAEが出たことを判断

し、設備停止命令を出力し設備停止を行う。

また、診断データをLAN機能で外部に情報を転送する機能も持たせ、将来の一括管理の構想にも対応できる。

6. CO₂レーザ溶接加工工程への適用

開発した診断装置を対象のレーザ溶接加工工程に導入した。

実際の設備で、溶接角度30°においてランダムに加工された製品を抜き取り、n=100において、本装置による診断値と破壊試験(溶接箇所全部)による溶け込み深さの実測値との比較を行った。溶接箇所(1)の比較結果をFig. 19に示す。相関係数0.95と診断装置の整合性を確認した。更に、Fig. 19より溶け込み深さの実測値(Y)と診断値(X)の回帰式を求め、その回帰式に対して実測値の σ は0.1mmであった。安全を考慮し4 σ としてしきい値を決めた。他の溶接箇所(2)~(6)も同等に求め、しきい値を決めた。このように、流動する全53製品に対して、それぞれ設定している。また、溶接ビート短小では溶接時間が短くなることによる診断値の減少、溶接飛びにおいてもある溶接箇所の極端な診断値の減少となるため4 σ のしきい値で異常判別が可能である。これにより本装置にて、インプロセスかつ非破壊で溶接溶け込み深さの判定が可能となり、更に溶接ビート短小や溶接飛びも判定でき全溶接箇所の品質保証が可能となった。

その他の効果として、検査コストや仕損費の低減が図られた。

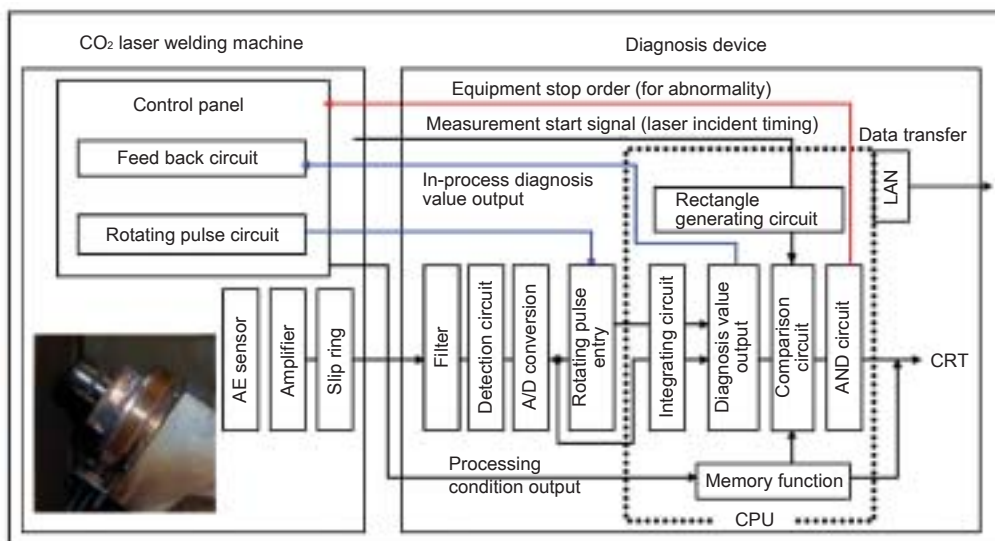


Fig. 18 Outline of diagnosis device

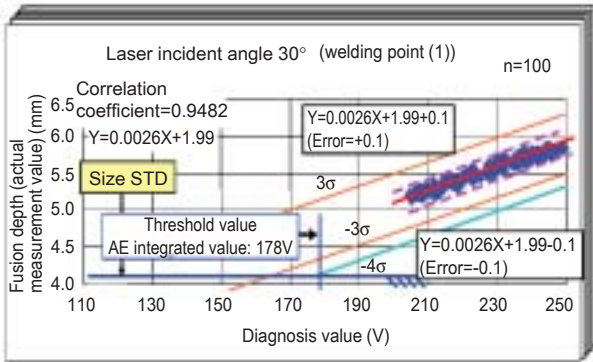


Fig. 19 Find correlation and threshold value of product A

7. まとめ

- (1) AE法を応用して、レーザ溶接の異常を確実に捉える診断技術を開発し、これを組み込みインプロセスで診断できる装置を完成した。
 - (2) 対象のCO₂レーザ溶接加工工程に導入した。当工場においては、この開発技術を他のCO₂レーザ溶接機へ随時展開中である。
- なお、本研究における成果を、AE法によるレーザ溶接異常判別の評価方法に関する特許として出願した。

8. おわりに

我々はすでにAE法を応用して、プレス加工状態監視技術を完成させている(2003PM論文)。このAE法は金属が放つ微小な信号を評価する技術として、今後様々な分野への応用の可能性を秘めていることを確信した。そこで今回は、CO₂レーザ溶接加工状態への適用化に取り組んだ。この開発した技術は他の溶接状態評価方法(プラズマ光とレーザ反射光を利用した方法・放射温度計を利用した方法)と比較して、その特徴を挙げれば“溶接溶込み深さ”をインプロセスで精度よく判別できる点である。また、CO₂レーザ溶接にとどまらずアーク溶接やアルゴン溶接に適用可能であると考えており、汎用性の高い方法であると考えている。

したがって、本技術は部品加工工程などでのものづくりにおいてインラインで品質保証する重要な要素の一つと考える。

最後に、英文化に際し多大なご協力をして頂いた工機部TPM推進室の皆様へ感謝し報告を終わる。

<参考文献>

- 1) (社)日本プラントメンテナンス協会, 月刊誌「プラントエンジニア」2006年2月号, pp.42-50.
- 2) 山脇 寿: レーザ誘導超音波の計算機シミュレーションによる可視化, 非破壊検査第49巻5号(2000)



<著者>



村尾 増昭
(むらお ますあき)
冷暖房製造3部
設備診断技術開発に従事



榊原 誠
(さかきばら まこと)
品質管理部
技術士(経営工学)
TPM推進, 加工技術, 設備開発,
品質向上活動に従事