

製造業のレーザ溶接工程における OCT 技術の活用方法と特長

Industrial Applications of Optical Coherence Tomography in Laser Welding

村山 直寛*, 吉永 光宏*, 村上成汐*

*パナソニックプロダクションエンジニアリング株式会社 生産設備事業センター レーザ技術部
(〒571-8502 大阪府門真市松葉町 2 番 7 号)

Naohiro MURAYAMA*, Mituhiro YOSINAGA*, Naruse MURAKAMI*

* Panasonic Production Engineering Co., Ltd. Customized Machinery Business Center, Laser Technology Department
(2-7 Matsuba-cho, Kadoma City, Osaka 571-8502, Japan)

高品質かつ高速なものづくりを目的として、製造業におけるレーザ溶接の適用が拡大し、全数品質保証の重要性が高まっている。溶接の品質保証は、In-situ(リアルタイム)検査と Ex-situ(オフライン)検査に大別される。

本稿では、In-situ 検査として知られる溶接検査手法に着目し紹介をしつつ、OCT を用いた非破壊インライン溶接深さ検査の測定原理と適用事例、ならびに他手法との比較による利点と課題を詳報する。

With the objective of achieving both high quality and high productivity in manufacturing, the application of laser welding has been increasingly expanded across the manufacturing industry, thereby increasing the need for 100% quality assurance. Welding quality assurance can be broadly classified into in-situ (real-time) inspection and ex-situ (offline) inspection.

This paper focuses on welding inspection techniques classified as in-situ inspection. It first presents an overview of these techniques, followed by a detailed discussion of the measurement principles and application examples of non-destructive in-line weld depth inspection using optical coherence tomography (OCT). Furthermore, the advantages and limitations of the proposed method are discussed through comparisons with conventional techniques.

Key words: レーザ溶接, 光干渉断層計, インプロセスモニタリング, 溶接キーホール深さ計測, 溶接品質保証, In-situ 検査 “Laser Welding, Optical Coherence Tomography, In-process Monitoring, Weld Keyhole Depth Measurement, Welding Quality Assurance, In-situ inspection”

1. はじめに

近年、世界的にカーボンニュートラルを目指した脱炭素化の流れが加速しており、製造業界では、従来工法である抵抗溶接やアーク溶接、はんだ付けなどに加えて、より高速で高精度な溶接が実現できるレーザ溶接を工法に加えて高効率のものづくりを実現する動きが進んでいる。

レーザ溶接工法においては、従来の工法で対応が難しかった難工法に適用できないかと検討される事例が多く、この背景から品質管理についても高度な要求を受けることが多い。このため、レーザ溶接の品質管理手法は多岐にわたり提案されてきた。

本稿では溶接における品質管理手法を分かりやすく解説し、それぞれの違いを整理し、レーザ溶接導

入時の判断に資する知見を提供することを目的とする。

特に本稿では光干渉断層計(OCT)による溶接キーホール深さ計測について詳報する。

2. 溶接における品質検査手法

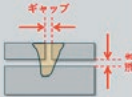
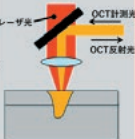
表 1 に品質検査手法の一覧をまとめる。

2.1 Ex-situ(オフライン)検査

従来、量産現場における溶接品質保証方法としては、溶接後の抜き取りによる断面研磨観察、引張試験などがあるが、これら手法は破壊検査のため、全数検査には適用できず、検査にも時間がかかる。

非破壊検査として実施可能なものには、溶接後の X 線検査や探傷検査、気密検査、抵抗検査などがある。

表 1 レーザ溶接における品質検査手法の一覧

		Ex-situ検査 溶接前検査		In-situ検査 溶接中検査		Ex-situ検査 溶接後検査		
				非破壊検査		破壊検査		
		インライン検査						抜き取り検査
方式		 ギャップ検査 浮き検査	 画像検査	 戻り光モニタ 音モニタ	 OCT	 画像検査 高さ検査	X線検査 探傷検査 気密試験 抵抗検査	断面研磨 (溶接深さ、フロー ホール観察など) 引張り試験
溶接 欠陥	内部	—	—	△	○	×	○	○
	表面	—	—	×	△	○	—	—
非破壊・全数検査		○	○	○	○	○	△	×
コスト／検査時間		△	△	○	△	△	×	×

るが、これらは、商品形状(溶接形状)によっては実施が難しく、ケースバイケースの実施となり、汎用的な溶接検査方法ではない。

一方、溶接前検査は、溶接品質の維持に有用な検査方法であるが、溶接自体の品質を確認する方法ではないため、この方法のみで品質担保するというのは些か困難である。また、この方法も商品形状(溶接形状)によって、実施できるかはケースバイケースであり、どのような機器で測定して、どのような判定基準を用いて品質管理をするかは、商品設計時によく検討し、手法を吟味する必要がある。

また Ex-situ 検査全てに共通するデメリットとして、溶接とは別の工程を準備する必要があるため、追加の検査コストや検査時間を準備する必要がある。これは、従来の工法と比較して高速であり、生産性の高いレーザ溶接のメリットを潰してしまう。

なお、レーザ溶接工法は初期投資が比較的高い傾向にある。しかし高速・高品質というメリットがあるため、生産性が高く運用コストが低い傾向にある。

したがって、検査コスト・検査時間の削減がレーザ溶接工法とその他の工法のいずれを採用するかの判断に重要なファクターである。

以上のことから、レーザ溶接の適用工程の拡大に向けて In-situ(リアルタイム)検査である溶接中検査が特に注目されるようになっている。

2.2 In-situ(リアルタイム)検査

In-situ(リアルタイム)検査では、比較的高速に、非破壊で溶接の状態を検査することができる。

代表的な手法として戻り光モニタ、溶接音計測、OCT (Optical Coherence Tomography) 技術を用いたインプロセス溶接深さ計測がある。

戻り光モニタは、溶接時に熔融池から発生する熱

放射光、プラズマ光、レーザ反射光、などを計測し、それらの値の増減を観察することでレーザ溶接が安定しているか確認する手法である。

またこれら光計測に加えて、溶接中に発生する溶接音を計測することでの品質管理も提案されている。

これらの手法は、計測システムが簡単に実現可能であるメリットがあり、ほかの手法と比較して安価に溶接品質管理ができる可能性が高い。ただし、いずれの方法も良品溶接時の計測データを記録として保存し、それと現在の溶接のデータを比較判定して、品質判定する方法の為、計測データと溶接不良との相関をユーザが十分に理解していなければ、不良検出が困難となるリスクがある。

これらの相関性を人間が把握するのが難しいことから、近年は AI を用いて補助する流れもあるが、まだ一部のユーザを除いて比較判定が主流な状況である。

一方、OCT (Optical Coherence Tomography) 技術を用いたインプロセス溶接深さ計測は、戻り光計測とは違い、レーザ溶接の品質管理の重要ファクターである溶接深さを直接評価することに特化した技術であり、溶接深さを直接的に評価できる特性を有することから、レーザ溶接プロセスの立ち上げから量産管理まで一貫して使用可能な品質管理技術である。

OCT インプロセス溶接深さ計測では、溶接レーザと同時に OCT 計測光を照射し、その往復距離を計測する。この測定は光干渉技術により実現される。

レーザ溶接時は、レーザ溶接中にキーホールという穴が開き、その穴が冷却と共に塞がり溶け固まることで深い溶接を低入熱で実現するという特性がある。その穴の深さが概ね溶接深さと一致する物理現象が生じる(これらを一般的にキーホール溶接と呼称する)。これを活用したものが、OCT インプロセス

溶接深さ計測である。なお、レーザのパワー密度が低い場合は、キーホール深さに対して溶接深さが深くなり、熱伝導現象によって金属が溶融する現象が支配的になる(これらを一般的に熱伝導溶接と呼称する)。このため、キーホール溶接から熱伝導溶接に遷移するに伴い、キーホール深さと溶接深さの相関性がなくなってしまう。強い熱伝導状態に支配される熱伝導溶接の場合は、OCT インプロセス溶接深さ計測ではキーホール深さから溶接深さを導出する精度が低く、前述の戻り光モニタや溶接音計測が向いているものと考えられる。

以上のことから、戻り光モニタ、溶接音計測、OCT インプロセス溶接深さ計測のいずれかが、優れた汎用技術であるとは言えず、溶接プロセスに応じて使い分ける必要がある。

以下では、OCT インプロセス溶接深さ計測に主眼を置いて、技術およびその適用について詳述する。

3. OCT 計測による溶接深さ計測

3.1 OCT 測定原理

OCT (Optical Coherence Tomography) は光干渉を利用した断層計測技術であり、1985 年に測定原理が報告され、以降、眼科を中心とした医療分野において広く利用されてきた技術である。

図 1 に示すように、測定対象へ照射した物体光(OCT 計測光)と、規定距離に設置された参照ミラーから戻る光(参照光)との干渉を利用し、物体内部の反射位置を深さ情報として取得する。

OCT には大きく分けると時間領域 OCT (TD-OCT) とフーリエ領域 OCT (FD-OCT) とが存在する。

当社が採用しているのは FD-OCT の一種である SS-OCT (Swept Source OCT) であり、波長掃引レーザを用いて得られる干渉スペクトルをフーリエ変換することで深さ情報を取得する方式である。

時間的に変化する周波数を有する光を測定対象に照射し、参照光と物体光との干渉を検出することで、周波数差に基づく距離情報を得る。取得した電気信号に FFT 処理を施し、周波数成分を抽出することで時間遅れ、すなわち距離として算出する。

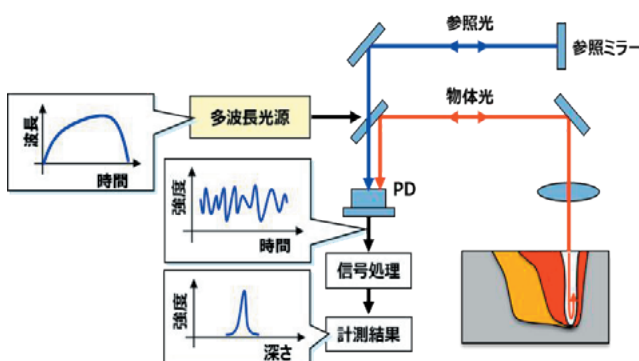


図 1 OCTの動作原理

3.2 OCT 搭載ガルバノスキャナ

OCT 計測は原理的には距離計測手段であるため、レーザ溶接中の溶融深さを測定するには、溶融時に形成されるキーホール底部へ、正確に OCT 計測光を照射する必要がある。そこで、本手法では図 2 に示すように、加工用レーザの光路に OCT 計測光を同軸合波する構成を採用した。

加工用レーザとしては、マルチモードレーザを用いる場合も多いが、高品質溶接や精密加工領域では加工対象に低入熱で加工するべきであり、シングルモードファイバレーザに代表される高パワー及び高パワー密度レーザを採用するべきである。高パワー密度レーザは、キーホール深さと溶接深さの相関が高く、OCT 計測による溶接深さ計測に原理的に向いているということもある。レーザ波長は 1030~1070 nm、現在の最大導入実績は 8 kW であり、今後はより高出力レーザへの対応も検討している。

OCT 計測光の中心波長には 1310 nm を採用し、測定分解能は約 11 μm 、サンプリング周波数は 100 kHz、測定可能深さは 0.1~6 mm である。近年は更なる高精度化および測定範囲拡大への要求も高く、高分解能化、測定可能深さの拡大の検討を進めている。

なおガルバノスキャナ加工範囲は、F θ レンズとして焦点距離 255 mm を採用した場合は約 100 mm $\times$ 100 mm となる。焦点距離を変更すれば、より広範囲での加工も可能である。なお OCT 計測範囲はガルバノスキャナの加工範囲より小さくなる可能性があることを注意しておく必要がある。F θ レンズはテレセントリック性があるなど、光路差が少ないものを選択すれば、OCT 光路の距離差がガルバノスキャナ加工範囲内で小さくでき、OCT の計測範囲が溶接加工範囲と近似的に近づく。

本研究が対象とするような精密溶接（溶融深さ 1~2 mm）においては上記のような設計値で十分な性能を有することができる。

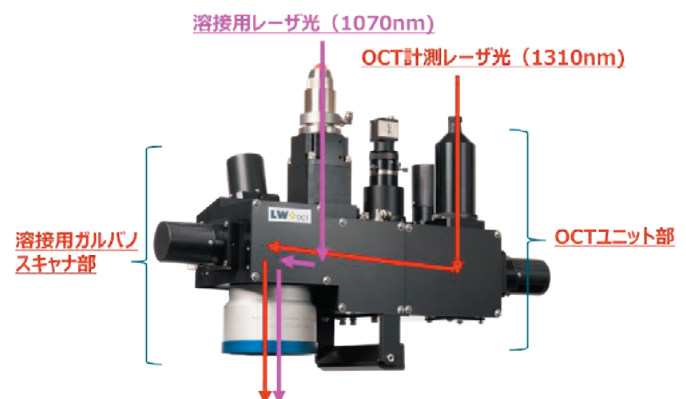


図 2 OCT搭載ガルバノスキャナ

4. OCT 計測の適用事例

本章では、開発した OCT 搭載ガルバノヘッドを用いて実施した各種適用事例について示す。

ガルバノ走査加工中の溶接深さ計測のみならず、材料特性や加工方法の異なる条件に対しても適用可能であることを目的として検証を行った。検証内容を以下に5つ示す。

- (1) ガルバノ走査加工時の OCT 計測
- (2) アルミニウム材料への適用
- (3) Wobbling 走査を用いた加工への対応
- (4) シングル及びマルチモードレーザでの比較
- (5) 貫通検査への適用

4.1 ガルバノ走査系での OCT 計測

レーザ溶接においてガルバノスキャナを用いた走査加工は、高速加工および自由度の高い軌跡制御が可能である一方、OCT 計測においては複数の課題が存在する。

従来の OCT 搭載レーザヘッドは非ガルバノ走査系(一般的に言う、単芯レーザヘッド)が主流であった。その理由は加工用のレーザ光と OCT 計測光との波長違いから来る色収差の問題が存在したからである。

色収差には図3のように軸上色収差と倍率色収差があり、非ガルバノ走査系の場合は、軸上色収差のみに配慮すれば良いが、導入難易度が低い。対して、ガルバノ走査系では、XY に関する倍率色収差に配慮する事が必要であり、その難易度の高さからガルバノ走査系での OCT 計測の安定化が難しく実用化が進んでいなかった。

倍率色収差の対策をしない場合、ガルバノを走査

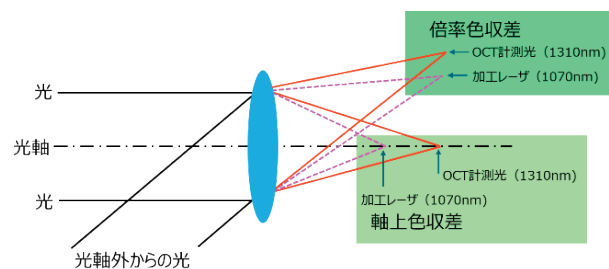


図3 透過光学系で生ずる軸上色収差と倍率色収差

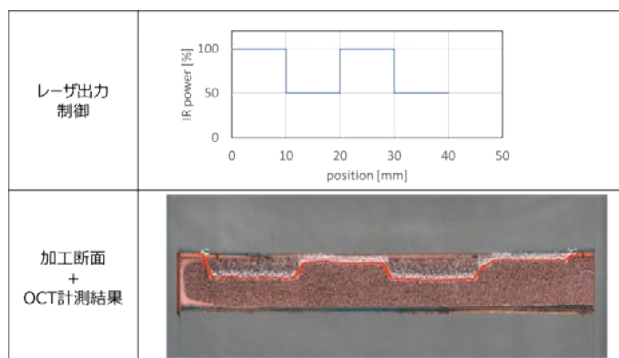


図4 レーザ出力と断面形状(Cu, C1020の場合)

すると加工レーザの照射位置(キーホール位置)と OCT 計測光の照射位置のズレが発生し、溶接深さを安定的に測定することは困難となる。

本研究では、光学設計段階において倍率色収差の影響を最小限に抑える設計を行うとともに、走査位置に応じた補正手法を組み込むことで、この問題に対応した。これにより、ガルバノ走査中であっても、OCT 測定光を常にキーホール底部へ照射することを可能とした。

この倍率色収差を補正する手法は本手法独自の技術であり、この補正技術により加工エリア全域において精度よく溶接深さを測定することを実現している。

ここで、ガルバノ走査系にて溶接深さを正しく測定できることを、溶接深さを変動させた加工での OCT 測定結果を用いて説明する。

溶接深さ変動は、レーザ加工中のレーザ出力を変動させることで実現した。

レーザ出力条件を変化させ、溶融深さを段階的に制御した溶接試験を実施した結果、断面観察による実測溶融深さと OCT 計測による溶融深さとの間には良好な一致が確認された(図4)。この結果から、ガルバノ走査加工においても本 OCT 計測手法が有効であることが示された。

4.2 アルミニウム材への OCT 計測適用

アルミニウムは銅や鉄鋼材料と比較して融点が低く表面張力が小さい。⁽¹⁾

銅の溶融温度は 1083.4℃であり、その時の表面張力は 1285 mN/m 程度と言われているのに対し、アルミは溶融温度 660.1℃にて表面張力は 914 mN/m である。

これによりレーザ加工時はアルミの溶融池及びキーホール部内部は、より低粘度であり、大きく脈動することが知られている。

よって、キーホール底位置が安定しないこと及びキーホール径自体が小さいことにより、OCT 計測は難しいと言われてきた。

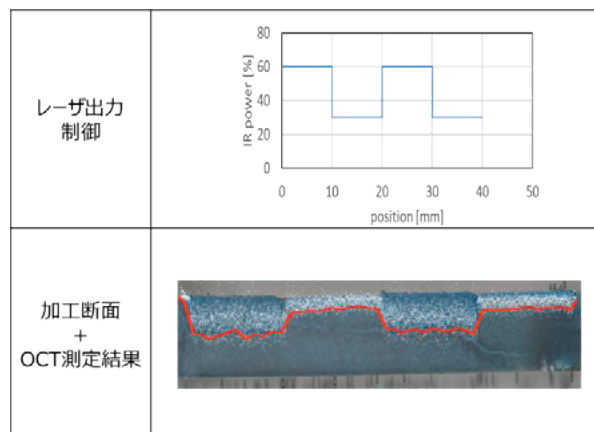


図5 レーザ出力と断面形状(Al, A1050の場合)

本研究では、OCT 測定光の集光性を向上させるとともに、色収差補正を最適化することでアルミ加工時に発生するキーホール底に OCT 計測光を的確に照射することを実現し、アルミニウム溶接においても安定した測定を実現した。

実験では、アルミニウム材に対してレーザ溶接を行い、その際のキーホール深さを OCT によりインプロセスで測定した。

レーザ加工方法は 4.1 で示したレーザ出力制御時と同じ方法を用いており、材料のみを銅よりアルミへ変更して行った。

得られた OCT 測定結果と溶接後の断面観察結果を比較したところ、両者は良好に一致しており、アルミニウム材に対しても本 OCT 計測手法が適用可能であることが確認された (図 5)。

ただし、図 4 と図 5 を比較してわかるように、アルミ材での OCT 計測深さ結果の方が波を打っており、この結果からもキーホール底がアルミの方が変動していることが確認できる。

本結果は、車載電池ケースなどアルミニウム部材への適用において有効であることを示唆する。

4.3 Wobbling 走査加工への適用

Wobbling 走査時にはレーザ照射位置が常に変化するため、OCT 測定光をキーホール底部へ追従させることが課題となる。

先程、4.1 にて倍率色収差がレーザ光と OCT 計測光では発生することを述べた。倍率色収差は XY 方向にズレる現象であり、レンズ中心、つまりガルバノ中心より離れる程、ズレ量は大きくなる。

OCT 計測では、OCT 計測光がキーホール底に照射される必要がある。実際にはこのズレ量を数十 μm 以内に抑える必要があり、このズレ量をいかに小さくするかが重要となってくる。

そのため、単純な直線加工であればその収差によりズレ量を単純な補正直線に合わせるだけで良いが、Wobbling 加工のような複雑なレーザ走査を行う場合は補正難易度が高い。

よって従来は、そのズレ量の補正を行わずに周期的に得られるキーホール底情報を断片的に集め、加工時の溶融深さとするしかない状況であった。

そこで、本研究では、OCT 測定光の照射位置補正量を事前に算出し、加工中にリアルタイムで補正を行う方式を採用した。これにより、Wobbling 走査中であっても、測定光を常時キーホール底部に照射することが可能となった。

直線走査加工および Wobbling 走査加工の両条件において溶接試験を実施し、OCT 測定結果を比較したところ、同等の溶融深さが得られていることが確認された (図 6、図 7)。

図 6 上段は、加工条件として、レーザ出力を 2000

W、走査速度 200 mm/s とした場合の加工後の正面図である。Wobbling 加工後に同じ走査速度で直線加工も実施している。Wobbling 時と直線加工時を同じ走査速度とすることで溶融深さは同じ程度になると想定される。

この加工時の OCT 計測結果を図 6 下段に示す。Wobbling 時と直線加工時で同等の OCT 計測深さであることが確認される。

次に量産現場で使用されるような Wobbling 径が小さく、且つ、密な場合の加工後の正面写真及び断面カット写真を図 7 に示す。図 7 の上段に加工面正面写真、下段左に走査方向の溶融断面写真、下段右に OCT 測定結果を示す。走査速度は 1200 mm/s である。

図 7 にて下段左の実断写真と下段右の OCT 計測深さを比較すると、実溶融平均深さは 0.93 mm、OCT 測定平均深さ結果は 0.92 mm であり、正しく深さ測定が出来ていることが確認された。つまり Wobbling 時にも、材質依存なく OCT 計測はキーホール底位置を正しく測定出来ていることが確認できる。

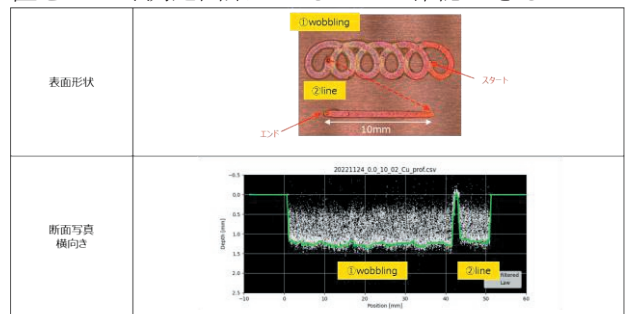


図 6 2000 W、走査速度 200 mm/s、C1020での測定結果

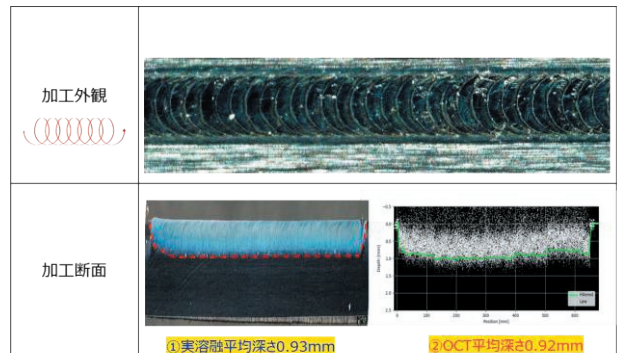


図 7 2000 W、走査速度 1200 mm/s、A1050での測定結果

4.4 シングル及びマルチモードレーザでの比較

ここまではシングルモードレーザの結果を示してきた。マルチモードレーザでは溶融幅が広く、キーホールが大きくなる。OCT 計測への影響を確認する。

なお、図 3 で示した収差補正は原理的にシングルモードレーザのほうがより厳しい精度を要求され、マルチモードレーザではより容易な方向になる。

本研究では、溶融深さと表面ビード幅の比率が 1.0 ~ 1.5 という、熱伝導溶接とキーホール溶接の中間程度の比率となる溶接について OCT 溶接深さ検査を

実施した。

図 8 に示すように、安定したキーホール深さ計測が可能であった。このことから、極めてキーホールの浅い熱伝導溶接(溶融深さと表面ビード幅の比率が 0.5 以下など)でない限り OCT 計測が可能であることを確認できた。

図 8 上段右にレーザ加工後の正面写真、上段左は走査方向と垂直にカットした断面写真、下段には走査方向に溶融部を断面カットした写真上に OCT 計測結果を重ねた状態を示す。

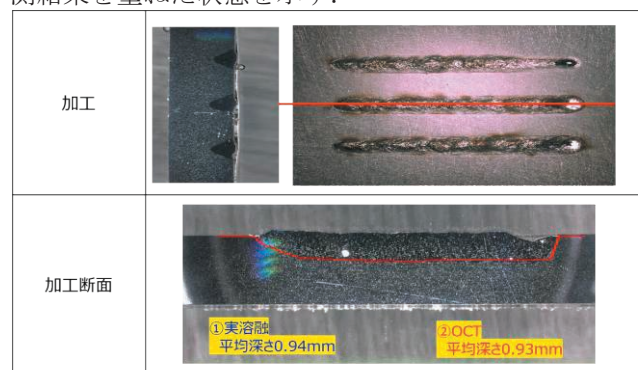


図8 マルチモードビームでのOCT計測結果,溶融深さと表面ビード幅の比率が1.0~1.5

4.5 貫通検査への適用

レーザ溶接における代表的な不良モードの一つとして、過度な溶込みによる貫通の発生が挙げられる。このため、溶接時における貫通の有無を適切に検査することが重要である。

従来、貫通の有無は溶接ワーク裏面を直接観察することで判断されてきたが、本手法は適用可能な溶接箇所が限定されるという課題を有している。そのため、インプロセスで貫通の有無を判定可能な検査手法として、OCT 計測の適用が望まれている。

本研究では、OCT による深さ情報に加え、計測時に同時取得可能な反射強度情報に着目することで、貫通発生の検出を試みた。従来の OCT 計測では深さ情報のみを評価対象とするため、溶融深さの変化は確認できるものの、貫通の有無を明確に判定することは困難であった。

図 9 にその測定結果を示す。図 9 左はアルミニウム材料に対するレーザ加工条件と断面観察結果であり、レーザ出力を矩形状に変化させることで、加工中央部に貫通を発生させた状態を示している。

本手法では OCT 測定時に得られる反射強度分布を併せて評価することで、貫通発生箇所を特定可能であることを確認した。すなわち、深さ情報に加え

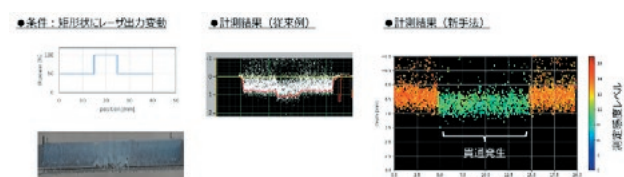


図9 貫通有無評価事例 (部材: A1050, t=1.0mm)

て反射強度情報を統合的に解析することで、従来困難であった貫通状態の判別を実現している。

本手法はアルミニウム以外の金属材料に対しても適用可能であることを確認している。

5. OCT 計測精度の評価

本章では、その深さ方向の測定精度について示す。評価方法としては、インプロセスで取得した OCT 計測結果と、溶接後に実施した断面観察による溶融深さ測定結果との比較を行った。

評価対象は鉄鋼材料およびアルミニウム材料とし、レーザ出力や加工速度を変化させた複数条件において測定を実施した。測定点数は合計 120 点とし、各点について OCT 計測値と断面観察値との差を算出した。

その結果、図 10 に示すように、両者の差のばらつきは $3\sigma = 135.5 \mu\text{m}$ であった。この値には、キーホール底部が溶融中に物理的に脈動する影響が含まれている。脈動量は条件にもよるが、おおよそ $\pm 40 \mu\text{m}$ 程度であることが確認されている。

一方、特定の深さ範囲および安定した溶接条件に限定した場合には、 $3\sigma = 70 \sim 80 \mu\text{m}$ 程度の計測精度が得られることも確認している。以上の結果から、本 OCT 計測手法はインプロセス溶接深さ検査として十分な精度を有していると評価できる。

●断面実測値-OCT測定値 相関グラフ

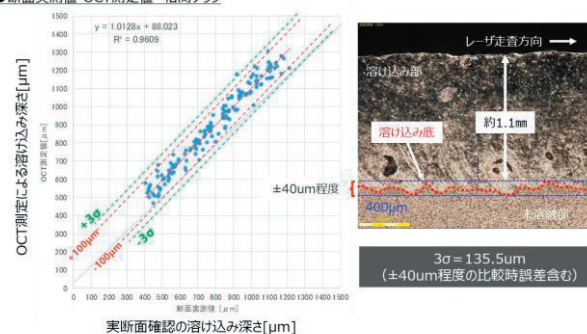


図10 OCT計測の繰り返し再現性の確認

6. まとめ

本稿では、OCT を搭載したガルバノヘッドを用いたインプロセス溶接深さ計測技術について、その測定原理、装置構成、および各種適用事例と精度評価結果について報告した。

本手法は、ガルバノ走査加工、Wobbling 走査加工、シングルモードおよびマルチモードレーザ、さらに幅広い金属材料および条件に対応可能であり、従来困難であった貫通を含む非破壊・全数検査を実現する有効な手段である。

今後は、更なる測定精度向上や適用範囲拡大を目指していく。

参 考 文 献

- (1) 各種純金属の溶融状態での物性値, 機械工学便覧, 第 6 版