

インプロセス溶接深さ検査を実現する OCT搭載ガルバノヘッドとその適用事例

In process Weld Depth Monitoring by Galvano head with OCT and its applications

吉永光宏*, 小林勇治*

*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
(〒571-8502 大阪府門真市松葉町 2-7)

Mitsuhiro YOSHINAGA*, Yuji KOBAYASHI*

*Panasonic Production Engineering co., Ltd
(2-7 Matsuba-cho, Kadoma, Osaka 571-8502, Japan)
E-mail: yosinaga.mituhiro@jp.panasonic.com

電気自動車関連へのレーザー溶接適用が急激に増える中、レーザー溶接での品質保証への要求は年々高まり、特に非破壊での全数検査が望まれている。

その結果、様々ある検査方法の中でレーザー溶接中に発生するキーホール部の深さを測定する光干渉断層計測法(OCT)が注目を浴びている。我々は社内で蓄積してきたOCT技術をガルバノヘッドへ適用し、より多くのレーザー加工へ適用出来るよう開発を行った。

本稿では、その開発内容、弊社ヘッドの特徴、及び測定事例について実験結果を示しながら説明する。

With the rapid increase in the application of laser welding to electric vehicles, the demand for quality assurance in laser welding is increasing year by year, and in particular, non-destructive total inspection is desired.

As a result, among various inspection methods, optical coherence tomography(OCT), which measures the depth of keyholes generated during laser welding, has been attracting attention.

We have applied the OCT technology we have accumulated in-house to the Galvano head and developed it to be applied to more laser processing.

This paper describes the development details, features of our head, and measurement examples, showing experimental results.

Key words: in process monitoring, laser welding, keyhole Depth, Galvano head, applications, weld quality

1. 緒言

近年、カーボンニュートラルといった脱炭素化の流れが世界中で起こっており、自動車業界をはじめとする製造業界では、レーザー溶接への期待が高まってきている。

レーザー溶接における基本的特性である溶接強度を高める取り組みは引き続き実施されているが、より厳しくなってきているのは、溶接品質に対する要求である。

特に自動車の電動化が進むにつれ、レーザー溶接が採用される部分が増えているが、どの接合に関しても溶接品質に対する要求は高く、特に車載電池や車載モータなどには今まで以上に溶接保証を常に要求されるようになってきた。

従来の溶接保証では、抜き取りによる溶接深さ測定などが主流であったが、今後は、全数検査、全数保証が必須と言われており、非破壊での品質確認が必要となってくる。

また、より高品位な溶接品位が求められること、及び、レーザー溶接の適用範囲拡大からキーホール溶接を行えるシングルモードレーザーの採用がどんどん増えている状況にある。

本稿ではレーザー溶接におけるプロセスモニタリング技術の1つであり、特にパナソニック独自で開発したOCT技術を用いたインライン溶接深さ検査の手法について、その測定原理、及び弊社ガルバノヘッドの特徴、そして、その適用事例と今後の展開について紹介する。

方式	溶接後検査			インプロセス検査	
	抜取り検査	インライン検査	パッシブ式	アクティブ式	
	断面研磨 引張り試験	X線検査 各種探傷検査 気密試験 振抗検査	画像検査 高さ検査	戻り光モニタ レーザー カメラ	OCT
溶接欠陥	内部欠陥 表面欠陥	○ ○	- ○	- △	○ -
非破壊・全数検査	x	△	○	○	-
リアルタイム	x	x	x	○	○

表1 process monitoring

2. プロセスモニタリングについて

レーザ溶接では、品質の作込みと検査はセットであると言われており、その理由は溶接の検査が非常に難しい為である。

以降、表1を用いて溶接検査、プロセスモニタリングについて詳しく述べる。

溶接検査では各溶接欠陥に応じて検査する必要があるが、溶接欠陥には、内部欠陥と外部欠陥がある。

特に内部欠陥では、内部がどのように溶けて接合されているのか、どこまで接合深さが確保出来ているのか、を外観から確認することは難しく、通常は抜き取り検査でしか確認が出来なかった。

但し、この抜き取り検査は、破壊検査の為、ロスコストの発生や本来検査したいそのもので検査が出来ない、全数検査が出来ないなど、現在求められている品質要求には不十分であった。

非破壊での全数検査を実現するインプロセス検査の手段としては、パッシブ式とアクティブ式がある。パッシブ式の代表例としては、溶接部から発生する光の波長を分析し、表面欠陥を検知する「戻り光モニタリング方式」が注目を集めているが、その検査では、溶融内部の状態、特に一番情報として欲しい溶融深さを検査することが出来ないという課題がある。これに対して、アクティブ式と言われる溶融内部を計測するOCT（光干渉断層法）は、溶融前後の状態を測定出来るだけでなく、溶融部に発生するキーホール深さも測定が可能である。キーホール溶接では、溶融深さとキーホール深さには相関関係があることが確認されており、溶融深さ検査の実現手段として、キーホール深さ検査、つまりOCTが有効である。

以降、OCTについて詳しく述べる。

3. OCTによる溶接深さ検査

3.1 OCT測定原理

OCT (Optical Coherence Tomography) は、光断層計測法のことであり、1985年に測定原理が報告され、眼科などの医療用の計測法として利用されてきた技術である。図1を用いて簡単に言うと、計測用の測定光を物体に照射し、その物体より戻ってくる反射、散乱光と規定距離に位置する参照ミラーから戻って

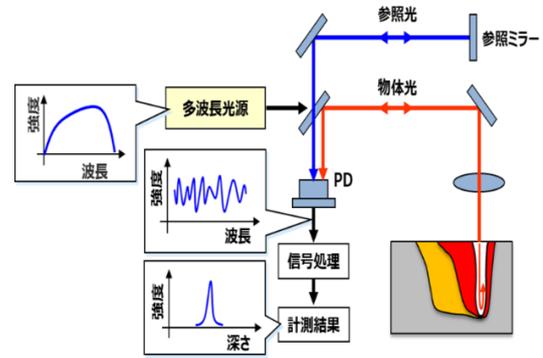


図1 OCT Measuring principle



図2 Galvano head with OCT

くる光との差を計測する方法である。

OCTには厳密にはいくつかの種類があり、TD-OCTと言われる時間領域OCTと、FD-OCTと言われるフーリエ領域OCTに大きく分類される。

そのFD-OCTの中でも我々が用いているのはSS-OCTと呼ばれるもので、波長掃引レーザを用いて得られるスペクトルをフーリエ変換して深さ情報を得るタイプのものである。時間に対して変化する周波数の光を与え、出した光（参照光）と物体に反射し戻ってきた光（信号光）の光干渉を使って、周波数の差を検出している。取得した電気信号をFFT処理し、周波数成分のみを取り出すことで、時間遅れ=距離とする方法である。

3.2 OCT搭載Galvanoヘッド仕様

OCTはあくまで距離測定手段の為、レーザ加工中の溶融深さを測定するには、溶融中に発生するキーホール底部にOCT計測光を正しく照射することがまず必要になる。

その為、図2に示すように加工用レーザの光路にOCT計測光を導入する方法を用いた。

加工用に使用するレーザは、一般的にはマルチモードレーザを用いる場合が多いが、我々はシングルモードファイバーレーザを用いており、レーザ波長は1030~1070nmを採用し、使用出来るレーザの最大は6KWである。

OCT計測光の波長は1310nmを採用し、測定分解能は10μm、サンプリング周波数は100Khzとしている。

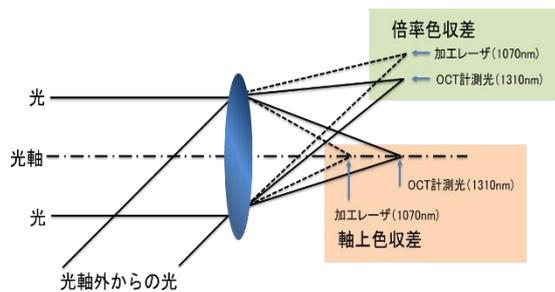


図3 Chromatic aberration

Fθレンズに焦点距離 255mm を選択した場合、加工範囲及び OCT 計測範囲は、約100mmを想定している。

上記仕様の場合、OCT としての深さ方向の測定可能範囲は 0.1mm~6mmである。我々が目指している精密溶接では溶融深さが 1~2mm 程度が主であり、本仕様で問題無い。

4. OCT の適用事例

我々が独自開発した OCT 搭載ガルバノヘッドに関し、以下の特徴について適用事例を交えながら説明を行う。

- 特徴 1, ガルバノ走査系で OCT 計測が可能
- 特徴 2, アルミ材でも OCT 計測が可能
- 特徴 3, Wobbling 走査でも OCT 計測が可能
- 特徴 4, シングルモード及びマルチモードの両方で OCT 計測が可能である。

4.1 ガルバノ走査系での OCT 計測

従来の OCT 搭載レーザーヘッドは鏡筒タイプであった。その理由は加工用のレーザー光と OCT 計測光との波長違いから来る色収差の問題がある。

色収差には図3のように軸上色収差と倍率色収差がある。鏡筒タイプの場合、軸上色収差のみに配慮すれば良い為、導入難易度が低い為、ガルバノ走査系ではXYに関係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へのOCT導入は進んでいなかった。

今回、我々はこの課題を光学系に工夫をすることで解決した。解決手段については、今回は紙面の都合上省略する。

ここで、ガルバノ走査系にて溶接深さを正しく測定出来ることを溶接深さを変動させた加工でのOCT測定結果として次に示す。溶接深さ変動はレーザー加工中のレーザー出力を変動させることで実現した。

以下にレーザー出力変動のグラフと、その加工での断面カット写真に OCT 測定結果を重ねたものを図4に示す。材質はC1100である。

図4より、実際の溶融深さと OCT 測定結果が一致していることが確認出来る。つまり OCT により正しく溶融深さが測定出来ることを示している。

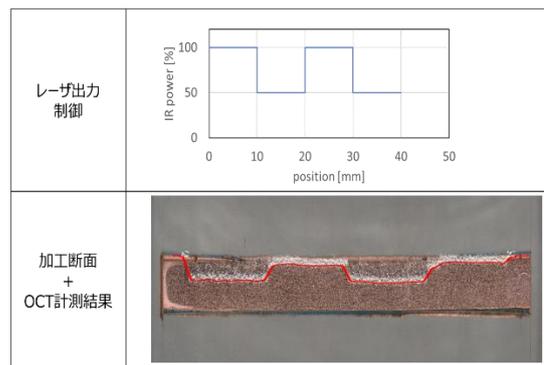


図4 OCT measurement result at Cu

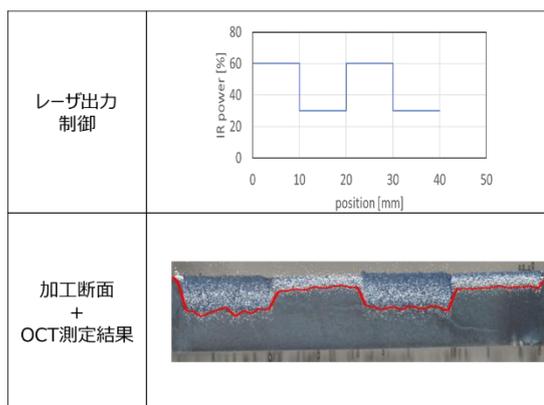


図5 OCT measurement result at AL

4.2 アルミ材での OCT 計測

アルミ材は、銅や鉄と比較し表面張力が低い。銅は溶融温度である 1100℃での表面張力は 1280 mN/m であるに対し、アルミは溶融温度 700℃にて表面張力は 900mN/m である。これにより、レーザー加工時は溶融池及びキーホール部内部が大きく脈動することが知られている。

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

そこで我々は OCT 計測光を従来よりも絞り、また上記の色収差補正も行う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、結果としてアルミ材の加工に於いても OCT 計測を可能とした。

ここで測定の実例を示すが、レーザー加工方法は 4.1 で示したレーザー出力制御時と同じとし、材料のみを銅よりアルミへ変更して実験を行った。

図5に、レーザー加工後の溶融断面写真、そしてOCT計測深さ結果をその断面写真に重ねた結果を示す。図5より分かるように、溶融深さ変動とOCT計測結果は一致しており、アルミ材にも弊社のOCTは適用可能である。

但し、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、

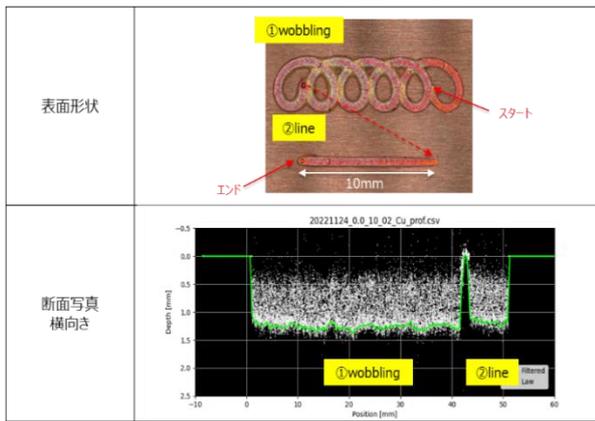


図6 OCT measurement result

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出来る。

4.3 Wobbling 走査での OCT 計測

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説明した。倍率色収差とは 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は数十 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。その為、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していた。

そこで我々はレーザ走査の CAD データを元にズレ補正量を計算するシステムを作り上げ、Wobbling 走査加工時にも常にキーホール底に OCT 計測光を照射可能とした。

図6 上段は、加工条件 2000W、走査速度 200mm/s で加工した場合の正面図である。Wobbling 加工後に同じ走査速度で直線加工を実施している。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。

図6 下段からわかるように 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、Wobbling 走査時も OCT にて溶融深さを正しく計測出来ていることが確認出来る。但し、OCT 計測では測定結果の横軸は走査長を示している為、直線加工よりも Wobbling 走査時の方が OCT 計測結果が長く見える。

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。

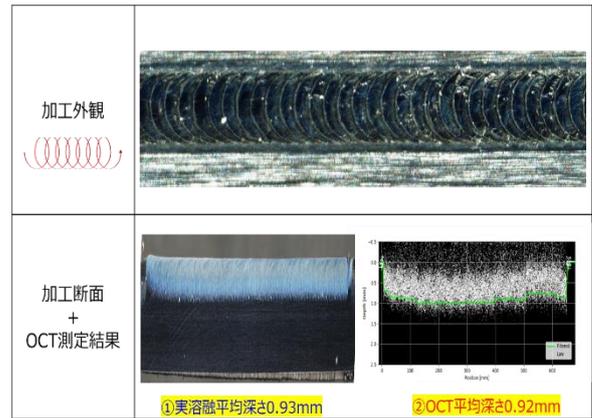


図7 OCT measurement result

今回は、溶融断面が見えやすいアルミ材を用いて説明を行う。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。また密加工とするため、走査速度は6倍程度上げている。

図7の下段左から断面の溶融深さとしてはキーホール底位置が数十 μm で波打っていることが確認出来るが全体としては均一な溶融深さを実現出来ている。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 0.93mm、OCT 測定平均深さ結果でも 0.92mm であり、正しく深さ測定が出来ていることがわかる。つまり Wobbling 時にも OCT 計測光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出来る。

図の掲載はしていないが、材料が銅の場合もアルミの場合もどちらも同様に測定が出来ている。

4.4 シングル及びマルチモードでの OCT 計測

キーホール深さを OCT で計測するには OCT 計測光はキーホール底まで到達する必要がある、OCT はシングルモードレーザなどのレーザスポット径が小さい加工では使用出来ない、と言われてきた。

そこで我々は 4.2 のアルミ材への適用の時同様に OCT 計測光のスポット径を絞りを、シングルモードレーザ使用時に発生するマイクロキーホール底での加工も可能とした。

今回、適用実例で紹介した 4.1~4.3 は、先に述べたようにマイクロキーホールと言われるシングルモードレーザを用いた測定例であり、マイクロキーホールでも測定が可能であることを示していた。

そこで逆にマルチモードレーザを用いた場合の OCT 計測実例を以下の示す。

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 上段左の断面カット写真からも溶融幅が広くマルチモードレーザ加工が行えていることが確認出来る。

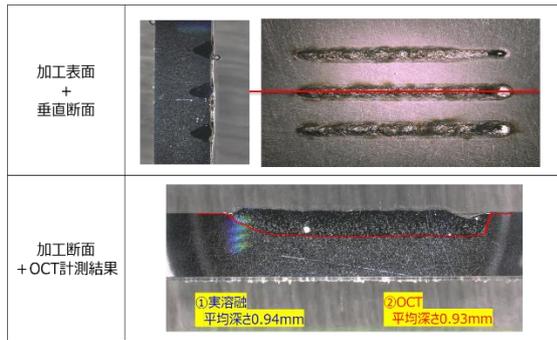


図 8 OCT measurement result

図 8 の下段より、この時の実溶融平均深さは 0.94mm, OCT 計測での平均深さは 0.93mm と同等な深さが得られており、マルチモードでも OCT 計測が可能であることが確認出来る。つまりシングルモードレーザでも、マルチモードレーザでも OCT 計測が可能である。

4.5 OCT 測定精度

4.1~4.4 では OCT 計測が様々な場合において測定可能であることを述べたが、ここではその深さ方向の測定精度について述べる。

測定方法は、実溶融深さと OCT 測定深さを比較し、そのズレ量のバラつきを求める方法である。

図 9 にその測定結果を示す。

横軸に実溶融深さ、縦軸に OCT 計測深さを合計 120 点プロットした。深さが違う位置に測定点がプロットされているのはレーザ出力を 700W~1500W まで変えて比較した為である。

測定点全体でのバラつき測定結果は、 $3\sigma = 135.5 \mu\text{m}$ である。但し、その数値の中には図 9 右写真で確認出来るようなキーホール底位置変動の $\pm 40 \mu\text{m}$ を含んでおり、実際はもう少し高い測定精度が得られている。

また、この測定バラつきは溶融深さが深い程大きくなっており、ある深さに限定すれば $3\sigma = 70\sim 80 \mu\text{m}$ であることも確認されている。

5. まとめ

本稿では弊社開発の OCT 搭載ガルバノヘッドを用いた溶接深さ検査に関しての測定原理とその適用事例を中心に述べた。

適用事例では、OCT 測定精度、溶融深さ変化へ追従している例やレーザ走査を揺動させる Wobbling 加工時にも、そしてシングルモード及びマルチモードレーザなど様々なレーザにも適用出来ることを示した。また、加工材料としては表面張力の低いアルミ材へのレーザ加工時にも OCT 計測が可能であることを示した。

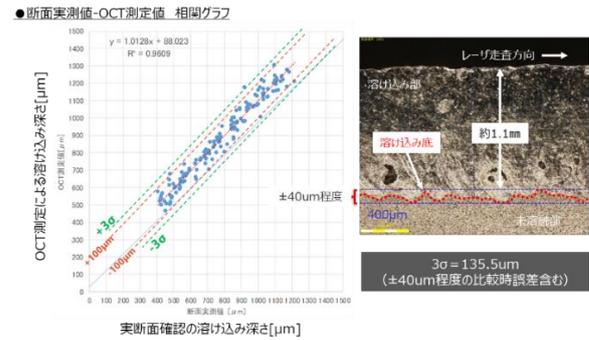


図 9 OCT measurement precision

弊社パナソニックプロダクションエンジニアリングでは、上記で述べた「OCT による溶接深さ計測技術」を用いて、今後さらに急成長すると思われる電気自動車向けを中心に、溶接品質の向上と検査の適用範囲拡大を目指していく。

6. 参考文献

- (1) 溶融金属の物性値 機械工学便覧 (第 6 版)