

# 小型高出力レーザーによる動的レーザー超音波計測法の開発と 溶接欠陥のその場検出

大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻  
准教授 野村 和史

(2020年度 一般研究開発助成 AF-2020231-B3)

キーワード：レーザー超音波、溶接、ロボットシステム、マイクロチップレーザー、ブローホール検出

## 1. 研究の目的と背景

アーク溶接などに代表される接合技術は社会を支える不可欠な基盤技術であるが、接合部に生じる割れや融合不良の有無といった溶接品質は完全に保証されておらず、現状は施工後、すなわちポストプロセスで非破壊検査が実施されている。溶接品質を保証する上で、溶接施工中に品質の検査を行う、いわゆるインプロセスモニタリングが可能となれば、その場で補修等の対応を効率的に行え、生産に要する時間やコストを大幅に削減できる。

例えば図1に示すような厚板分野における多層盛溶接（数パスにわけて層を重ねて溶接が行われる）では、溶接を連続で数パス、数層盛り終わった後、十分な冷却のちに超音波探傷が行われている。溶接プロセスにおいては、ワイヤの曲りや母材の溶接熱変形などの意図しない外乱により、最適条件であっても溶接欠陥の発生を完全に排除することが出来ない。溶接欠陥が発見された場合は、欠陥の除去および溶接のやり直し、すなわち欠陥以降のパスが全て無駄になるという大幅な後戻り工程が生じるため、生産性が大きく阻害され、甚大なコスト増につながる。特に厚板では、パス数、層数も多くなるため非常に重要な課題となっている。そこで1パスごとに即座に欠陥の有無を判別できるリアルタイム品質保証技術が求められている。

一方、自動車などに用いられる薄板溶接部材においては、図2に示すような亜鉛めっき鋼板の重ね溶接継手におけ

るブローホールや、スポット溶接部に見られるナゲット不良が発生する<sup>1,2)</sup>。しかし製品が量産品であることが多く、大型構造物と比較して検査体の個数が非常に多く、プロセスとしても高速であり、非破壊検査による部材の全数検査は非常に困難となる。そのため、抜き取り検査方式による品質保証が広く実施されている。しかし、現状の抜き取り検査方式による品質保証では、検査に合格したロットの中に不良品が入っていないと言い切れず、全数検査と比較して品質保証の信頼性に不安が残る、ある程度欠陥が生じているものとして設計されている箇所もある、というのが実情である。したがって全数検査が実施可能な非破壊検査手法の確立が望まれている。薄板溶接施工においては、検査体の個数が非常に多くなることに加えて大型構造物の溶接施工と比較して溶接速度が高速となる。よって全数検査を行うためには、高能率で検査が実施でき、高速度な溶接施工に追従可能で、その場で実施可能な非破壊検査手法が要求される。

こうした厚板、薄板に対するその場欠陥計測、インプロセス/インラインモニタリングが可能になると、製品や工程のトレーサビリティ、およびIoT化といった昨今の品質保証に対する要求にも応えることが可能となると考えられる。その実現には、溶接施工中の高温環境下や、自動化などを考慮すると基本的には非接触に内部の品質情報を取得することが望ましい。そうした非接触手法としては、

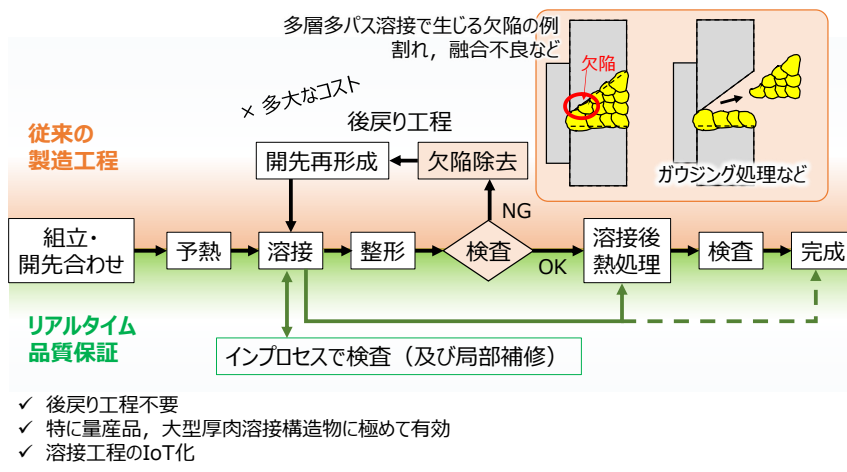


図1 産業界で求められるリアルタイム品質保証

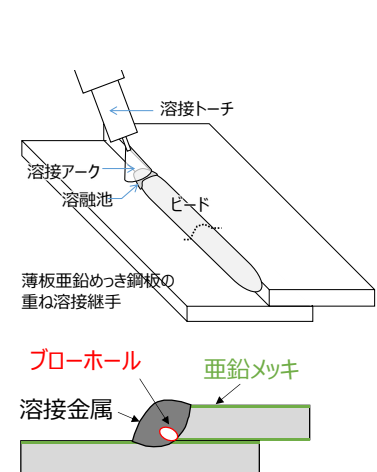


図2 亜鉛めっき鋼板の空孔欠陥

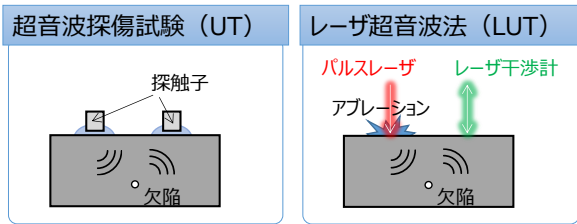
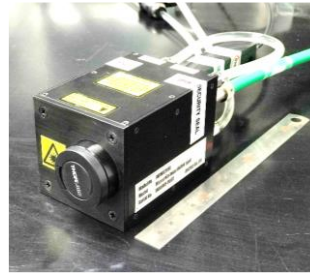


図3 レーザ超音波法の概要



Laser	Nd:YAG, Pulsed
Wavelength	1064 nm
Repetition rate	50 Hz
Pulse energy	20 mJ
Pulse width	1 ns
Beam diameter	~2 mm
Foot print size	73mm x 88mm
Weight	~1.2 kg

図4 マイクロチップレーザーの外観と仕様

X線を用いた手法、電磁超音波法、空中超音波法、図3に概観を示すレーザ超音波法<sup>3)</sup>などがある。その中でも、測定対象表面にパルスレーザーを照射することによって超音波を励起させ、対象の内部や表面を伝播し各種界面で反射する超音波をレーザ干渉計により受信することで内部情報を得る手法であるレーザ超音波法は、次の特徴からインプロセスモニタリングに適している。(1) レーザをプローブとして用いるため接触媒質を必要とせず、対象物と非接触で計測を行うことができる。(2) レーザによる点と点間での超音波送受信が可能で空間分解能が高い、狭隙部にも適用可能である。(3) 非接触であるため光学ミラーやメカニカルステージにより走査が可能で、多点での送受信情報が容易に得られる。このような特性を活かして、欠陥計測<sup>4-7)</sup>のほか、板厚計測<sup>8)</sup>、材料評価<sup>9,10)</sup>など多くの研究報告がある。

著者らもインプロセス計測にも応用可能なレーザ超音波法を用いた検出手法の確立を目指しており、レ型開先の割れ発生その場計測<sup>11,12)</sup>や、亜鉛めっき鋼板の薄板隅肉溶接で発生するブローホール計測<sup>13)</sup>、積層造形材に対する人工欠陥計測<sup>14)</sup>などの欠陥計測を報告してきた。しかしながら、これらはレーザ超音波計測装置が固定され、被計測対象物が移動するといったシステムで得られた成果であったため、実際の溶接施工現場への適用は非常に限定的となる課題があった。しかしながら近年、小型でも大出力が可能マイクロチップレーザーの開発が進められている。送信源としてマイクロチップレーザーが利用できれば、計測機が自由に動作する、実現場での運用が可能なレーザ超音波法を構築できる可能性がある。

そこで本報では、マイクロチップレーザーを用いた小型レーザーを送信レーザー源として用いることによってロボットアームへレーザー体系を搭載し、欠陥検出を動的に試みた結果について述べ、動的UTシステムとしての性能を検証した。

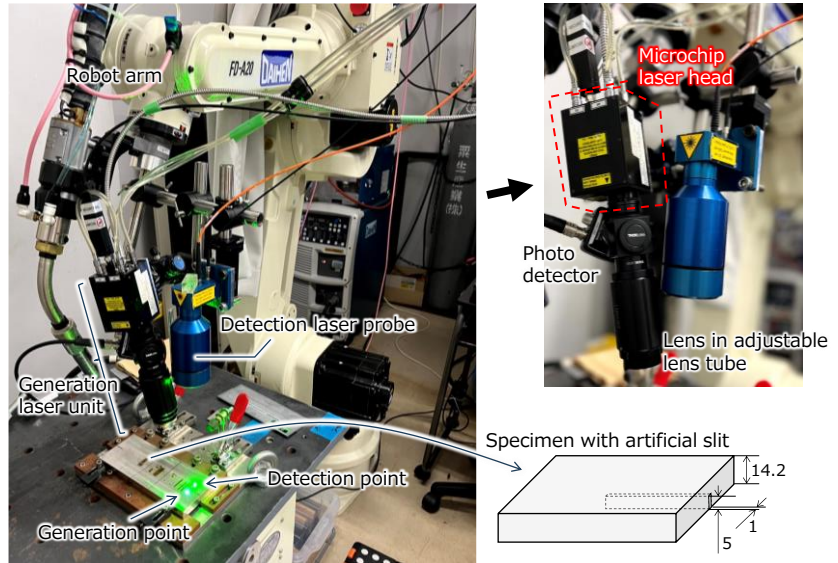


図5 ロボットに搭載した送受信レーザーの外観と仕様

## 2. 実験装置

レーザ超音波計測には、超音波の送信源となるパルスレーザー、超音波を受信するためのレーザ干渉計が必要である。ここでは便宜上、前者を送信レーザー、後者を受信レーザーと称する。本研究で用いた送信レーザーはマイクロチップを用いた小型レーザー(パームレーザー、開発品、ユニタック社製)である。その外観および仕様を図4に示す。また、受信レーザーはマルチチャンネル直交方式のレーザ干渉計(Quartet-1500, Bossa Nova社製)を用いた<sup>15)</sup>。

## 3. 動的UTシステムの構築

上記に示した送受信レーザーとロボットを組み合わせることで動的に超音波計測を行った例を示す。

### 3.1 裏面スリットの検出例<sup>16)</sup>

図5は構築したロボットUTシステムの外観である。受信レーザーはそのプローブを微小調整ステージと組み合わせ搭載した。送信レーザーであるマイクロチップレーザーヘッドは、フォトディテクタと位置調整可能なレンズチューブを取り付け、小型雲台に載せた上で溶接ロボット(FD-A20,

ダイヘン社製)へ組み込んだ。これらの組み合わせにより、レーザ照射点の調整が可能である。ここでは、作業台に固定した試験体に対し、ロボットが動くことで超音波の送受信点を非接触に走査させることができる。なお、ロボットとして溶接ロボットを転用したため溶接トーチが付随しているが、レーザ UT システムのみであればより小型のロボットでも可能である。

試験片として、同図に示す板厚 14.2 mm の SUS304 の裏面に深さ 5 mm、幅 1 mm のスリットを導入し、このスリットの検出は様々な方法が考えられるが、ここではスリット端部からの縦波反射波によって欠陥の有無を検出することとした。送信点も受信点も同面に存在する場合、内部を伝搬する縦波や横波といった体積波のほか、表面を伝わる表面波であるラテラル波、レイリー波が受信点で計測される。したがって、所望の信号がこれら表面波を避けて計測される必要がある。送受信位置を幾何学的な簡易計算によって検討した結果、図 6 に示すような配置であれば、欠陥からの縦波反射波が、ラテラル波やレイリー波、板厚反射波から離れ最も見やすくなることがわかった。したがって以降の検出では、スリット位置  $x = 0$  mm に対し、受信点が  $x = -12$  mm、送信点が  $x = 7$  mm となるようにレーザの照射点を調整した。

図 6 に示す断面の奥行方向にロボットを走査し、スリットの無い断面からスリットのある断面への連続動的計測を行った。50 Hz のレーザで走査速度は 5 mm/s としたため、1 点あたり 0.1 mm 進む計算となる。合計 250 点、25 mm の間を 5 s 間で計測した。スリット有無の切り替えは対象計測領域のほぼ中央としたが、計測データは 30 点分 (3 mm 分) で平均化しノイズを低減させた。図 7 はこの結果である。スリットのある部分では、約 4.7  $\mu$ s でスリット端部からの反射信号が連続して確認できた。縦波音速 5660 m/s を適用すると 26.6 mm の伝搬距離を意味しており、これは図 6 に示した想定伝搬距離とほぼ一致する。すなわち、スリットの有無と同時にその深さも動的に計測できていることがわかる。

### 3.2 薄板重ね隅肉溶接におけるブローホール検出例<sup>17)</sup>

著者らは、薄板重ね隅肉溶接に生じるブローホールの検出がレーザ超音波法により可能であることを報告している<sup>13)</sup>。手法としては、ビード上に送信レーザを与え、下板側で受信レーザを照射することで、欠陥部を透過する縦波及びモード変換波の減衰から欠陥の有無を判定できることを利用したもので、表面波の重畳がなく板厚 2.3 mm、1.6 mm の薄板でも健全部との区別が可能であることを見出した。詳細は省くが、欠陥判定の指標値を導くことによって、事前の RT でブローホールが確認できる部分と本手法で欠陥判定指示した箇所は図 8 に例を示すように比較的良く対応することが示された。

この計測はマイクロチップレーザを用いてロボットシ

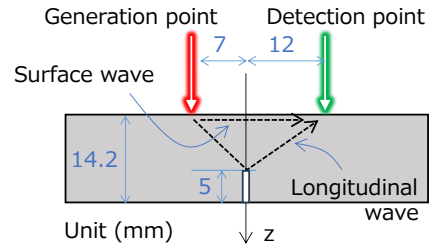


図 6 裏面スリット検出に対するレーザ照射条件

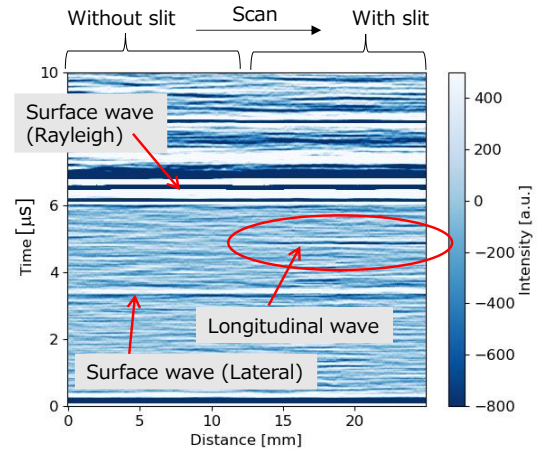


図 7 スリット部の検出結果

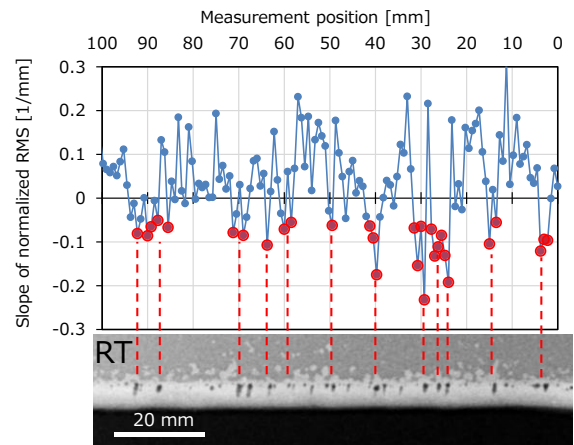


図 8 ブローホール位置の提案手法による指示と RT 結果の比較

ステム化した<sup>17),18)</sup>。図 9 は組み上げた装置の外観である<sup>19)</sup>。送信レーザ照射点は、先に示した一点ではなく、計測面をスキャンできるように 1 inch のチューブシステムを連結し、小型のガルバノミラーBOX と集光系を経て、ビードをまたぐ方向にスキャンさせた。溶接線方向にはロボットアームが移動し可搬型の走査計測を行った。そのほか、信号解析・評価プログラムを改良し欠陥判定時間を短縮した。図 10 は予め人工欠陥を導入した薄板重ね継手サンプ

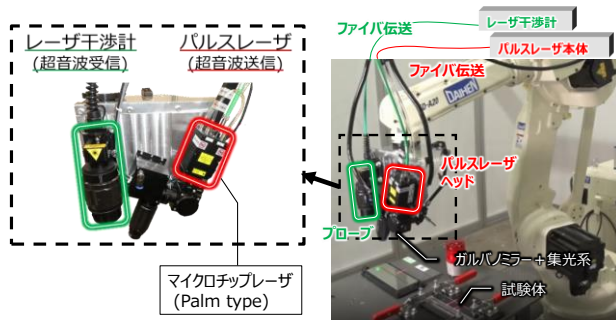


図9 ロボットアームに搭載した送受信レーザーシステム

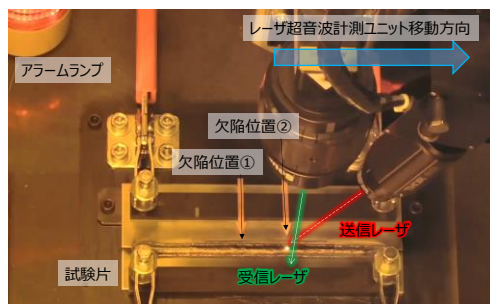


図10 欠陥の走査検出の様子

ルに対し、本ロボットシステムによる動的な非接触欠陥判定を適用した際の外観である。送信レーザーによる断面スキャンを溶接線方向（写真右方向）に繰り返して行き、欠陥位置に来た際は、先に示したアルゴリズムにしたがって欠陥判定され、アラームランプが点灯する仕組みである。この場合、レーザーが照射されてからランプ点灯までは約0.1秒であり、計測とほぼ同時にリアルタイムでの欠陥判定を可能とするシステムを構築することができた。

#### 4. 結論

非接触、遠隔での超音波探傷が可能なレーザー超音波法は、超音波計測用レーザー部が可動な体系、すなわち動的 UT システムに適用性があり、本稿ではマイクロチップレーザーを用いたロボットシステム化によりこれを実現し、いくつかの計測例を示した。

そのほかの成果として、詳細な結果は省くが、マイクロチップレーザーの仕様を選定するにあたりレーザーパラメータと励起超音波強度の特性を調査したところ、従来知見とは異なる結果も得られており<sup>19)</sup>、強力な超音波を発生させる場合もあることがわかっている。

今後、インプロセス/インライン計測が求められる現場への適用が期待されるが、現段階ではまだ課題も残っている。とはいえ、課題解決のための開発要素も多く存在し、機器開発、送信方法、受信方法、信号処理方法含め、様々なアプローチが考えられる。応用先もアーク溶接に限らず、レーザー溶接部の溶接欠陥検出などへの展開も可能である。今後も接合品質のインプロセス/インライン計測法の確立に向けて研究を進める所存である。

#### 参考文献

- 1) 松井仁志: 溶接技術 (2014-5) 89-96
- 2) 薩田寿隆: 神奈川県立産業技術総合研究所研究報告, 23 (2017) 21-23
- 3) C. B. Scruby and L. E. Drain: "Laser Ultrasonic, Techniques and Applications," Bristol, Adam Hilger (1990)

- 4) M. Ochiai, T. Butsuen, T. Miura, H. Kuroda, S. Soramoto and S. Kanemoto: "Sizing of Micro Cracks Using Laser-induced Broad-band Surface Waves", Journal of Nuclear Science and Technology, 43-3 (2001) 275-281 (in Japanese)
- 5) S. Yamamoto, T. Hoshi, T. Miura, J. Senboshi, 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
- 6) T. Tanaka and Y. Izawa: "Noncontact Detection of Internal Defects in Carbon Steel by Laser Ultrasonics", The Review of Laser Engineering, 30-3 (2002) 140-145 (in Japanese)
- 7) L. Bustamante, N. Jeyaprakash and C. Yang: "Hybrid laser and air-coupled ultrasonic defect detection of aluminium and CFRP plates by means of Lamb mode," Results of Physics, 19 (2020) 103438
- 8) Seung-Chan Hong, Ayalsew-Dagne Abetew, Jung-Ryul Lee and Jeong-Beom Ihn: "Three dimensional evaluation of aluminum plates with wall-thinning by full-field pulse-echo laser ultrasound," Optics and Lasers in Engineering, 99 (2017) 58-65
- 9) Y. Li, S. Hou, Y. Chai, Y. Zhou and Y. Zou: "Nondestructive measurement of the grain size of laser cladding coatings using a laser ultrasonic method," Applied Optics, 61-8 (2022) 1885-1891
- 10) T. Garcin, J. Schmitt and M. Militzer: "In-situ laser ultrasonic grain size measurement in superalloy INCONEL 718," Journal of Alloys and Compounds, 670 (2016) 329-336
- 11) S. Otaki, T. Matsuda, K. Nomura, F. Imura, R. Kita and S. Asai: "In-situ measurement of weld quality during MAG welding using laser ultrasonic," Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 38-1 (2020) 11-18 (in Japanese)

- 12) K. Nomura, S. Otaki, R. Kita and S. Asai: "In-situ detection of weld defect during the welding process by laser ultrasonic technique," Proceedings of Meetings on Acoustics, 38-1 (2020) 030016
- 13) K. Nomura, T. Matsuida, K. Kadota, T. Era and S. Asai: "Study on Blowhole Detection in Fillet Welded Sheet of Lap Joint by Laser Ultrasonic Technique," Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 41 (2023) 141-149 (in Japanese)
- 14) K. Nomura, T. Matsuida, S. Otaki and S. Asai: "Fundamental study of the quality measurement for wire arc additive manufacturing process by laser ultrasonic technique," Welding in the World, 66 (2022) 2271-2280
- 15) 小林忍, B. Pouet: レーザ超音波受信装置の最近の進歩, 非破壊検査, 72, 2 (2023) 64-68
- 16) 野村 和史, 奥山 矩充, 井上 雄尊, 佐野 智一: マイクロチップレーザを搭載した動的ロボットレーザ超音波システムの開発, スマートプロセス学会誌, 13, 2 (2024) 75-81
- 17) 新田誠也, 門田圭二, 野村和史, 恵良哲生, 浅井 知: レーザ超音波法による薄板溶接部の内部診断ロボットシステムの開発, 溶接学会全国大会講演概要, 111, pp. 78-79, (2022)
- 18) K. Kadota, T. Matsuida, K. Nomura, T. Era and S. Asai: In-line Detection of Internal Defects for Lap Joint welding of Galvanized Steel Sheet by Laser Ultrasonic Technique, Proceedings of IIW2022 - International Conference on Welding and Joining, pp. 192-195, (2022)
- 19) 野村和史, 出野壮士, 佐野智一: レーザ超音波法におけるレーザパラメータと励起強度特性に関する研究, 第31回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 (2024) 63-67