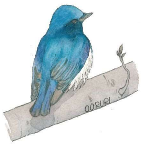
レーザ超音波を用いた溶接品質のその場計測



技術解説

浅　井　　知*

In-situ Measurement of Weld Quality Using Laser Ultrasonic Technique

Key Words：Laser ultrasonic, Weld defect, Weld pool shape, Monitoring, Arc welding

1．はじめに

溶接は、ものづくりの中核をなす生産工程であり、構造物の破壊などその品質が社会問題となる重要な技術であるが、匠の技の側面も強く、未だ、自動化、ロボット化の割合が低い状況である。これは、溶接が、熱源としての電極、高温場のアークプラズマの相互作用やダイナミックな変動を伴う溶融池形成など複雑な現象からなり、物理的なメカニズムが十分に解明されておらず、さらに実施工での外乱要因も多いことが原因と言える。そこで、日本のものづくりを担う革新的生産プロセスとして、技能を必要とせず、匠の技を作りこんだ自動化システムとして、外乱に対して自律的に判断でき、最適な条件を選定する知能的で高度な溶接自動化システムの構築が望まれている。

一般的に、溶接部の品質確認は、溶接後の非破壊検査にて行われる。しかしながら、量産部品や重電機器のような厚肉の溶接では、後工程の検査で欠陥が検出され、補修を行うとなると、補修コストの増加のみならず工程の後戻りによる生産リードタイムの増大が生じることになる。このため、溶接施工中のインプロセスで品質確認を行うことができれば、その場で補修等の欠陥対応を効率的に行え、溶接後には、溶接品質を保証できることになり、生産リードタイムの短縮や生産コストの削減がはかれ、施工後の非破壊検査を省略できる可能性もでてくる。また、品質結果を施工中に直接出力できることになり、現状、溶接装置の設備稼働状況のチェックや溶接条件のモニターなどの活用にとどまっている溶接作業のIoT化を真の革新的な製造に変革することができると考えられる。しかしながら、従来の超音波探傷検査などは、溶接のような高温環境下に適用することが困難であり、またカメラなどの溶融池監視技術では、溶接内部の情報を直接検知することはできない。そこで、測定対象に対し、遠隔から非接触で超音波を送受信できるレーザ超音波法[1)]に着目した。レーザ超音波法は、測定対象の材料表面にパルスレーザを照射することで内部に超音波が励起され、これをレーザ干渉計で受信する方法であり、溶接中のような高温環境下での適用が可能と考えられる。

以上のような背景から、溶接品質のその場計測システムを開発することにより、溶接中に融合不良などの溶接欠陥の検出に加え、溶接中に溶込み深さを含む溶融池形状を計測できれば、品質を確認できるとともに、フィードバック制御による溶接条件の適切な管理が可能となると考えられ、知能的で高度な溶接自動化システムの実現に近づく。ここでは、レーザ超音波を用いた溶接品質のその場計測技術について紹介する。

2．レーザ超音波法の原理

図1は、レーザ超音波法の原理を示したもので、パルス幅が数nsのレーザを対象物に照射すると表面がプラズマ化し、その反力により対象物内部に体積波の超音波を励起させる。そして、材料内部を伝播した体積波は、再び表面に達し、表面に微小変位を生じさせ、この変位を受信用のレーザ干渉計にて計測するもので、非接触で超音波を送受信できることから、高温環境下の溶接におけるその場計測に活

* Satoru ASAI
1954年9月生まれ
大阪大学大学院工学研究科溶接工学専攻
修士課程（1980年）
現在、大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻　教授　博士（工学）
溶接工学・アーク物理
TEL：06-6879-7547
E-mail：asai@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

用できる。図２は、溶接部の欠陥検査へ適用する場合のレーザ超音波法と従来の超音波法の比較を示したものであり、レーザ超音波法では、高温場のアーク発生中のその場で溶接欠陥の検出に適用可能であることがわかる。

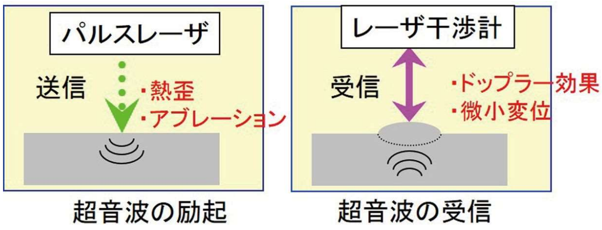


図１　レーザ超音波法の原理

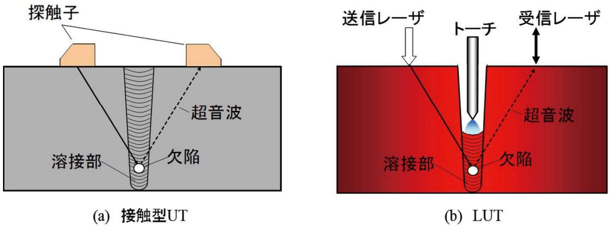


図２　レーザ超音波法と従来超音波法の比較

３．溶接欠陥のその場計測

レーザ超音波法を用いた溶接インプロセス欠陥検査システムの例を図３に示す[2)]。送信レーザとしてパルス幅10ns、エネルギー約700mJ のNd:YAG レーザ（波長1064nm）を用い、光学ヘッドを通じて約1.0mm のスポット径で照射する。対象からの戻り光は、光学ヘッドで集光され光ファイバを通じて干渉計に伝送される。そして、受信用光学ヘッドをスキャンさせることで、データ収録し、信号処理を

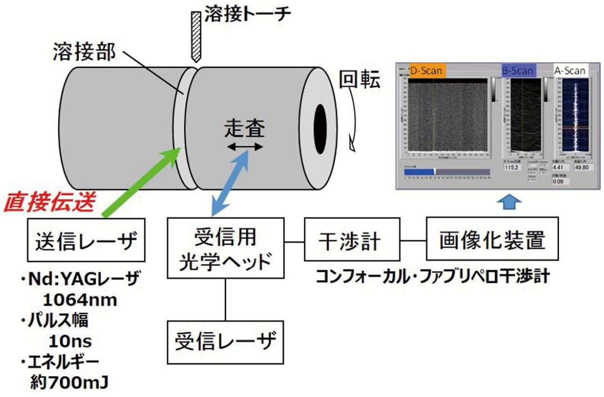


図３　溶接インプロセス欠陥検査システム

行い画像化するものである。

一般に、レーザ超音波法は、従来の接触型超音波に比べて、感度が低いことや溶接欠陥からの散乱エコーが微弱なことから、感度の向上として、多点で受信した信号を重ね合わせ、欠陥を検出する開口合成処理[3)]を適用している。さらに、図４に示すように、送信レーザを溶接金属表面に照射することで経路の短縮やビード端部の影響を少なくできることから、SN 比の改善が図れ、溶接直下５mm の浅い位置での欠陥検出が可能となった。

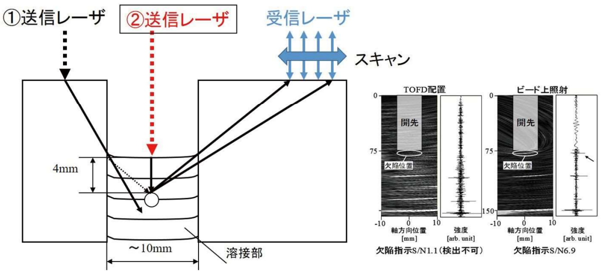


図４　送信レーザのビード照射

本システムを板厚150mm の狭開先 TIG 溶接継手に適用した試験結果を図５に示す。直径700mm の配管を回転させ、200℃の予熱状態で、下向き姿勢で溶接を行いながら、周方向約135°の位置でレーザ超音波による検査を行った。受信レーザは開先中心から25mm の位置から15mm の範囲でスキャンさせながらデータを収録している。また、送信レーザは、常時溶接部に照射しており、溶接高さ10mm の位置で、D-Scan、B-scan、A-Scan のいずれにおいても明瞭な欠陥指示が確認できている[4)]。

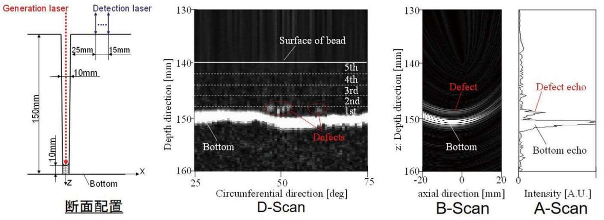


図５　レーザ超音波による実溶接適用結果

また、図６は、レ形開先溶接での凝固割れならびにルート部の融合不良を計測した結果を示したものである。凝固割れならびに融合不良が明瞭に検出できていることがわかる。図７は、同様に、重ね隅肉溶接部において脚長の計測を行った結果を示したものである。このように、溶接中にその場で目標通り

健全な施工が行えているかを評価できることから、異常を確認して溶接を中断し、溶接条件を適正化するシステムが構築できる。しかしながら、その場計測が可能であることは、明らかとなってきたが、溶接システムへの実用化にむけては、送受信配置の適正化、時間的分解能や空間的分解能の明示など検討すべき課題はまだ多い。

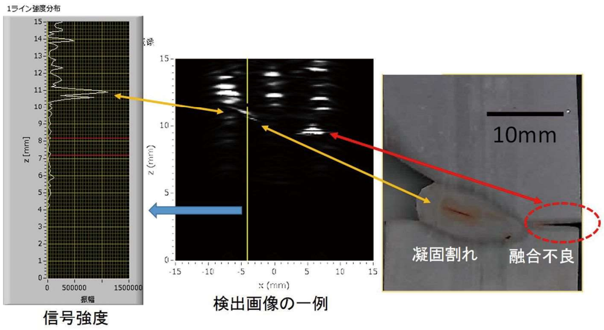


図6　レーザ超音波による凝固割れ、融合不良の検出例

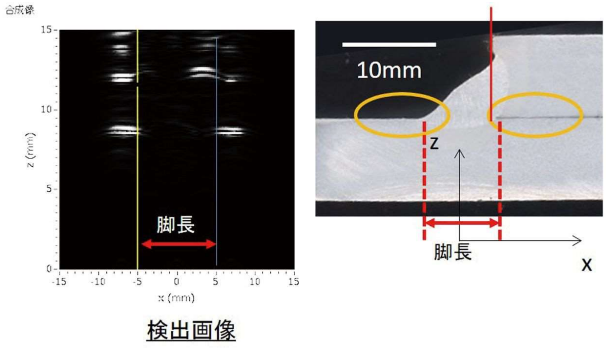


図7　重ね隅肉溶接脚長計測例

4．溶融池形状のその場計測

溶接中の品質確認としては、欠陥検出のみならず、溶融池形状とくに溶込み深さを計測し、その状況を溶接条件にフィードバック制御することが、欠陥発生の抑制に有効である。しかしながら、現状、直接溶込み深さを計測している溶接システムの実用例はほとんどない。溶込み深さの溶接中のその場計測手法として、非接触での適用が可能なレーザ超音波法が有効な手法であることから、図8に示す溶融池その場計測システムを開発した。送信レーザとしては、90mJ/pulse、パルス幅8ns のYAGパルスレーザを用いており、受信レーザにはレーザ干渉計を用いている。レーザの送受信は，検出が容易なように、裏面より行い、溶融池固液界面からの反射エコーを活用し、形状計測を行うものである。また、溶融池全体の形状を検出するには、送受信位置の影響をうける。このため、送信レーザ位置は、光学ミラーによりスキャンすることで0.1mm ピッチで41ポイントとし、3か所で受信することで、それぞれの位置の映像を開口合成処理することにより、溶融池全体の形状を可視化するようにした。本計測システムを用いて、機械加工にて作製した横穴試験体を常温において計測した結果、誤差は0.3mm程度であった。

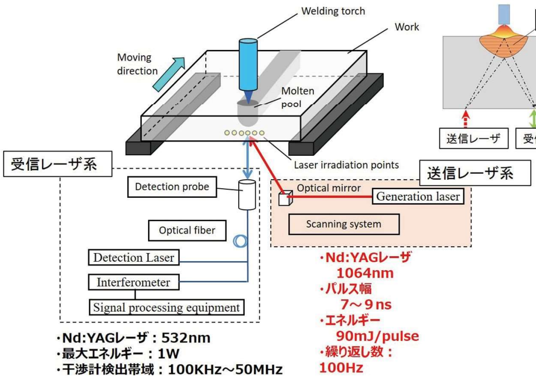


図8　レーザ超音波溶融池形状その場計測システム

図9は、静止TIG溶接の溶融池形状の計測結果を開口合成画像で示したものである。溶接条件は、溶接電流100A、アーク時間は3min.である。計測は、送信レーザが、20mm　間で201点、受信レーザは3mm間隔の3点である。溶融池界面と溶融池表面が表示されているが、右の模式図に示すように、溶融池表面は、TIGアーク直下では、アーク圧力にて凹みが生じるはずであるのに対し、計測結果は、溶融池表面が盛り上がった形状になっていることがわかる。これは、超音波の音速の温度依存性を考慮していないためである。一般的には、温度が高くなるに従い、音速は小さくなるため、溶接中のような高温場では、試験体内部の温度分布を考慮し、音速を補正する必要がある。そこで、図10に示すように、

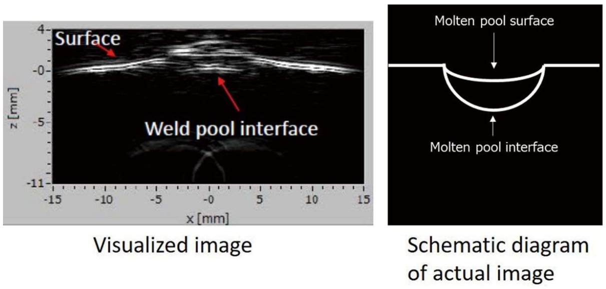


図9　静止TIGアークの溶融池開口合成画像

アークをガウス分布熱源と仮定した 3 次元簡易熱伝導モデルにより、温度分布を推定した[5]。実験で得られた実際の断面マクロから溶込み深さと溶込み幅を求め、これを再現するように解析上の入熱条件を合わせ込むことで、温度分布を決定した。さらに、Kurz らの高温での音速の計測結果[6]を基に音速と温度の関係式を作成した。ここでは、液相中の音速は、3200m/s 一定とした。図 11 は、これらを用いて、移動 TIG アーク溶接の溶融池形状の計測結果を温度補正した結果を示したものである。温度補正前の溶融池画像では、溶融池表面が盛り上がっていたのに対し、温度補正した場合、音速が小さくなるため、溶融池表面が凹み、アーク直下の溶融池として妥当な形状を示している。この場合、母材表面からの溶融池の深さは、2.9mm と計測された。

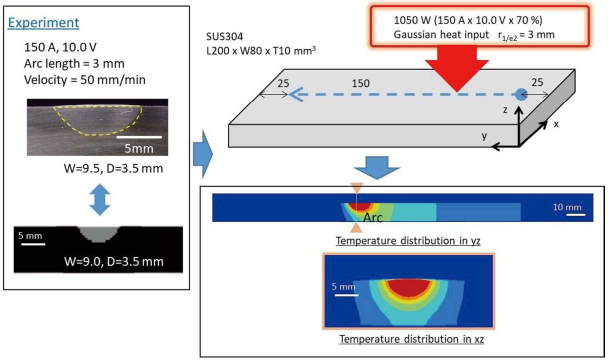


図 10　三次元簡易熱伝導モデルによる温度分布推定

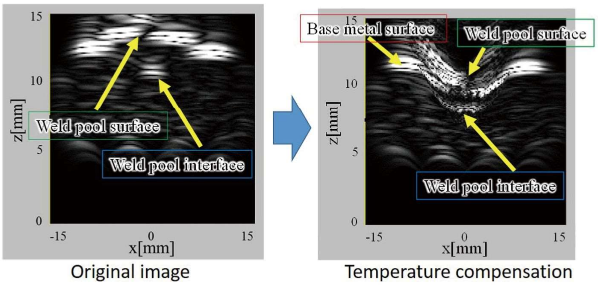


図 11　温度補正による溶融池開口合成画像

このように、解析にて推定した試験体内部の温度分布を用い、音速を補正することにより高温場である溶融池形状のその場計測が可能になることがわかる。今後、解析モデルによる温度分布の精度が溶融池形状に及ぼす影響を検討し[7]、実用的な手法を確立する計画である。

レーザ超音波による溶融池形状の計測結果と比較評価するため、実際の溶融池形状の計測をハンマリング法により行った。ハンマリング法とは、溶接中に板側面をハンマーにて打撃を与え、溶融池を吹き飛ばすことで、溶融池形状を計測する方法である。図 12 は、TIG アークによるステンレス鋼平板（厚さ 10.6mm）ビードオン溶接において、ハンマリング法にて溶融池を吹き飛ばした後の溶接線中心軸上の断面マクロを示したものである。ハンマリング法にてすべての溶融池が吹き飛ぶわけではないので、同図のように腐食により得られた真の溶融池界面を求めることができる。本試験での溶接条件は、溶接電流 150A、溶接速度 50mm/min。である。溶融池はトーチ直下から 6mm 後方の位置で最大溶込み深さ 2.4mm（試験体底面から 8.2mm）が得られている。そこで、最大溶込み深さをとるトーチ後方 6mm の

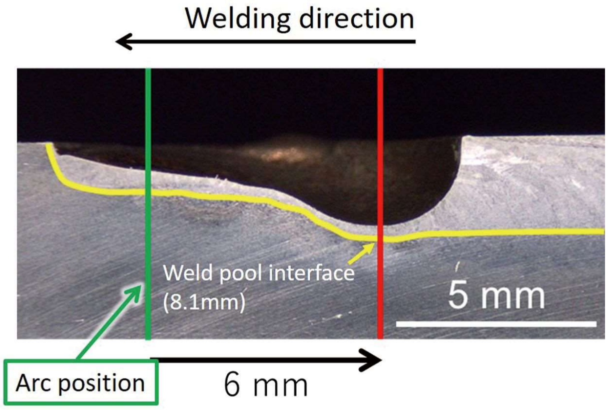


図 12　ハンマリング法による溶融池形状の実計測結果

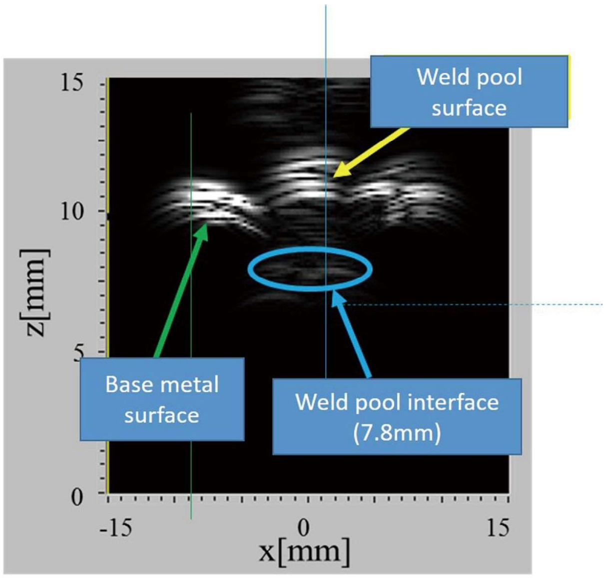


図 13　溶融池形状計測結果

位置のxz断面を対象とした計測を実施した。計測結果を図13に示す。トーチ後方6mmのため溶融池表面は凹まず、ほぼ平坦である。溶融池深さは、温度補正をした結果、7.8mmと計測され、ハンマリング法による実溶融深さ8.2mmと比較し、0.4mmの差であり、実用的には、十分な計測精度であった。

また、図14は、溶融池の3次元形状の計測を行った結果を示したものである。レーザ送信位置を溶接方向に移動して計測し、それらの画像を合成することで、溶融池の3次元形状を求めた[8]。レーザ超音波法による計測結果は、ハンマリング法による実計測結果に比べ、多少のバラツキは認められるが、概ね溶融池形状を可視化できていると評価できる。今後は、溶接線方向に送受信方向を変更するなど計測精度の向上をすすめていく。

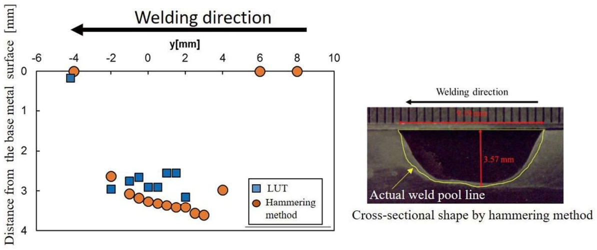


図14　三次元溶融池形状計測結果

5．革新的スマート溶接システムへの展開

レーザ超音波を用いた溶接品質のその場計測技術の実用化展開として、革新的スマート溶接システムの開発をすすめている[9]。これは、内閣府ですすめるImPACTプログラムの「超小型高出力パルスレーザの応用システム化・実証」のプロジェクトとしてすすめているものである。革新的スマート溶接システムとは、溶接中にその場で溶接品質を制御、保証できる溶接システムのことをいう。図15に、本プロジェクトで開発をすすめる革新的スマート溶接システムの概念図を示す。送信レーザに超小型マイクロチップレーザを用いたレーザ超音波システムを溶接ロボットに搭載し、溶接を行いながら、欠陥検出を行うことが可能である。また、レーザ送受信配置を適正化することで、溶融池形状の計測も可能となる。本革新的スマート溶接システムを開発することで、溶接工程の革新がはかれ、生産性の高いものづくりが実現できると考えられる。

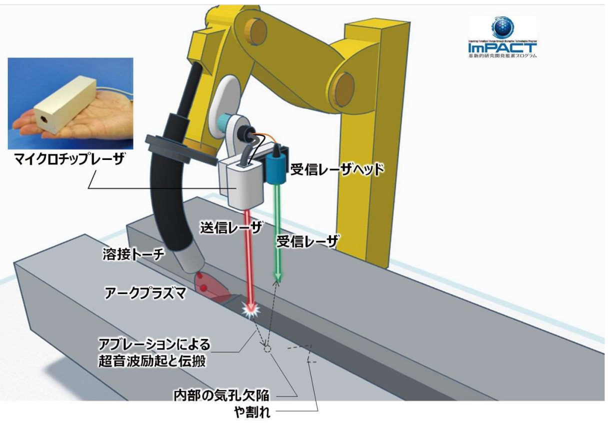


図15　革新的スマート溶接システムの概念図

6．おわりに

知能的で高度な溶接自動化システムの実現を目指して、レーザ超音波を用いた溶接品質のその場計測技術の開発をすすめている。ここでは、溶接品質のその場計測として、融合不良や割れなどの溶接欠陥検出および溶融池形状の計測技術について検討を行い、その場計測が可能であることを明らかにした。さらに、実用化システムへの展開として、革新的スマート溶接システムへの応用化についての取り組みを紹介した。計測精度や制御性など課題は多いが、実用化にむけ、さらに開発をすすめていきたい。

謝辞

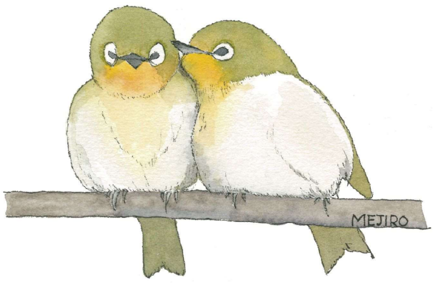
本研究の一部は、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発」（管理法人：JST）および革新的研究開発プログラム（ImPACT）「超小型高出力パルスレーザーの応用システム化・実証」により実施した。

参考文献

1) C. B. Scruby and L. E. Drain: “Laser Ultrasonic Techniques and Applications”, Adam Hilger Bristol, 1990.

2) 星　岳志, 山本　摂, 千星　淳, 落合　誠：“レーザ超音波法による厚板溶接のインプロセス検査”, 非破壊検査, 61(10), pp531-536 (2012).

3) S. Yamamoto et al. : Material Transactions, Vol.55, No.7 (2014), PP998-1002.

4) 三浦崇広, 星　岳志, 山本　摂, 落合　誠ら；

"レーザ超音波法による溶接ロータのインプロセス検査非破壊検査", Vol.63, No4, pp.200-204 (2014).
5) 野村和史，平田好則："GMAW簡易モデルにおける溶滴移行効果に関する研究", 溶接学会全国大会講演概要 (2013), p116-117.
6) W. Kurz et al："Velocity of sound in Iron and iron alloys solid and liquid state" High temperature high pressures, Vol.1 (1969), 387-399.
7) 喜多亮右，井村文哉，野村和史，浅井　知："レーザ超音波による溶融池その場計測に関する研究"（第３報），溶接学会全国大会講演概要 (2017-9), Vol.101, p8-9.
8) S. Asai, K. Nomura, Y. Mine, F. Imura, R. Kita："In-situ Measurement of Weld Pool Configuration Using Laser Ultrasonic Technique", IIW Doc. XII-2331-17 (2017).
9) 浅井　知:"革新的スマート溶接システムの開発" 溶接技術, Vol.65, No.8, 2017, p107-111.