

多機能レーザ溶接ヘッドの開発（第3報）

— レーザ超音波法による表面検査技術の開発 —

Development of Multifunction Laser Welding Head (3)
- Surface Inspection Technique by Laser-ultrasonics -

株式会社 東芝	三浦 崇広	Takahiro MIURA	Non Member
	河野 渉	Wataru KONO	Non Member
	千田 格	Itaru CHIDA	Non Member
	吉田 昌弘	Masahiro YOSHIDA	Non Member
	山本 智	Satoshi YAMAMOTO	Non Member
	依田 正樹	Masaki YODA	Non Member
	落合 誠	Makoto OCHIAI	Non Member

Multifunction laser welding head has been developed. The head is able to perform not only underwater laser welding as repair, but also laser peening as preventive maintenance and laser ultrasonic testing as inspection. For inspection with multifunction laser welding head, a new method of visualized weld defects in water by laser-ultrasonics has developed. To detect and visualize a surface of weld metal with welding bead, the authors have developed a new detection method by leaky wave induced by interaction with surface acoustic waves and defects. Furthermore, developing Synthetic Aperture Focus Technique (SAFT) for visualized inspection surface 2-dimensionally, we achieve the inspection result alike Penetrant Testing (PT) despite underwater environment with multifunction laser welding head.

Keywords: Preventive maintenance, Laser-ultrasonics, Weld Defect, Penetrant Testing, SAFT

1. 緒言

国内の原子力運転プラントは、運転開始後 30 年に達するものが増えてきており、高稼働率での安全で安定な運転を行うためには炉内構造物の応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking)への対策が重要となってくる。東芝は、SCCに対する補修工法として水中レーザ溶接技術[1]、予防保全工法としてレーザピーニング[2]、並びに検査工法としてレーザ超音波探傷技術[3]をそれぞれ開発し、実用化を進めてきた[4]。このうち、水中レーザ溶接を炉内構造物に対して適用する場合、溶接面の前処理、溶接、溶接後検査、応力改善処理の一連のプロセスが必要となるが、開発したプロセスがすべてレーザ光を用いていることに着目し、一つの施工ヘッドで検査・溶接補修・予防保全を可能とする多機能レーザ溶接ヘッドを開発した。

上述した 3 機能のうちの 1 つである溶接後検査技術

に関しては、一般的に浸透探傷試験 (PT: Liquid Penetrant Testing) が広く用いられている。しかし、PT は浸透液や現像液などの液体を使用するため、水中での適用には部分気中を設けるなどの措置が必要である。一方、水中での適用が可能な従来の超音波や電磁気的な手法を用いた検査では、凹凸のある溶接金属部の微小開口欠陥を PT のように高い空間分解能で 2 次元的に可視化することは、センサの空間分解能の観点から困難である。そこで、空間分解能が高いレーザ超音波探傷法 (LUT: Laser-Ultrasonic Testing) [5]をベースに、検査対象表面の形状や状態に対してロバストで、かつ、溶接金属による超音波の散乱・減衰の影響を受けにくい新たな検査手法としてレーザ励起漏洩波探傷法 (LLWT: Laser-induced Leaky Waves Testing) の開発を行っている[6]。本報では、本技術を多機能レーザ溶接ヘッドに組み込み、検査表面を 2 次元的に可視化できることを確認したので報告する。

連絡先:三浦崇広、〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉町 8、株式会社東芝、電話: 045-770-2307
e-mail:takahiro.miura@toshiba.co.jp

2. 原理

2. 1 計測手法

水中環境下でパルス幅数nsのレーザ光を金属材料面に照射すると、表面の数原子層がプラズマ化する。このプラズマの反力により、検査対象表面に弾性表面波(SAW: Surface Acoustic Wave)が発生すると共に、水中に衝撃波(SW: Shock Wave)が発生する(Fig.1)。発生したSAWは、検査対象表面を照射点から同心円状に伝播していく。このSAWにより、検査対象と水中のそれぞれの音速から算出される臨界角により水中へ漏洩していく漏洩表面波(LSAW: Leaky Surface Acoustic Wave)も発生する。ここで、SAWの伝播経路上に欠陥が存在した場合、SAWによって欠陥部を音源とする漏洩波(LW: Leaky Wave)が発生し、水中に漏洩・伝播していく。このLWは、レーザ光を反射板(Reflector)に照射しておくことで、照射点を通過する際の超音波による疎密変化を干渉計測することが可能である[7]。そのため、表面状態に対してロバストな欠陥検出を行うことが可能である。

本技術において、SAWを発生させるためのレーザ光はレーザビーニングで用いるものを使用することができる。そのため、LWを検出するための検査機構部を開発し、多機能ヘッドに搭載することで、予防保全と検査の両機能が容易に適用可能になる。

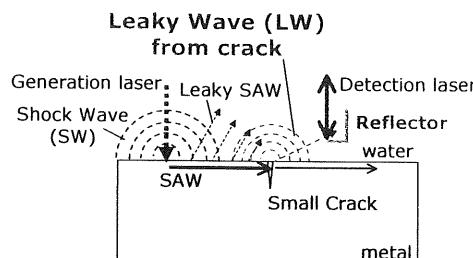


Fig.1 Principle and proposed detection method

2. 2 可視化手法

上記手法を用い、送受信点を検査領域内で走査させることで、表面開口欠陥の有無を検査することが可能である。ここで、検出した信号をPTのように目視で観察した状態と同等の結果に可視化することが出来れば、検査員の欠陥有無の判断が容易になる。そこで、得ら

れたLW信号を検査表面に対応した2次元可視化画像にするため、2次元開口合成処理を適用している[8]。開口合成処理は近年、超音波による非破壊検査へ適用されているが、多くの場合は体積検査である3次元空間へ適用されている。しかし、本開発で対象となる表面検査のように、2音速下の条件で2次元平面への開口合成処理を行っている例は見受けられない。そのため、表面状態を可視化するための信号処理を開発することで、Fig.2に示すレーザ溶接金属上に生じた溶接割れ指示AからC(最小で約 $\phi 0.15\text{mm}$ の欠陥寸法)や、母材部のSCCを検出し、2次元的に可視化できることを確認している(Fig.3)[9]。

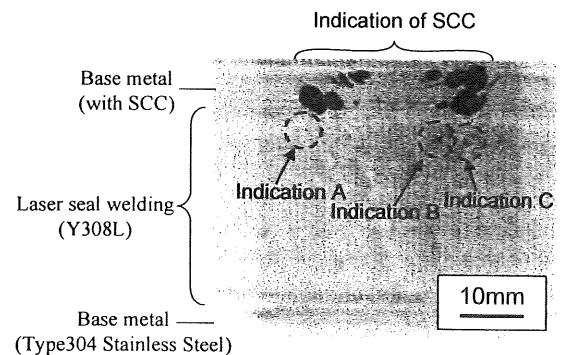


Fig.2 Result of liquid penetrant testing

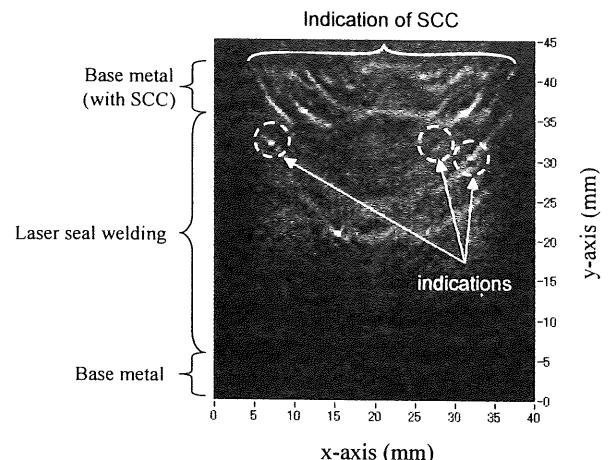


Fig.3 Visualized result of surface inspection

3. 多機能レーザ溶接ヘッドの開発

多機能レーザ溶接ヘッドは、原子炉内の狭あい部への適用も想定しているため、ヘッドの寸法に制約が生

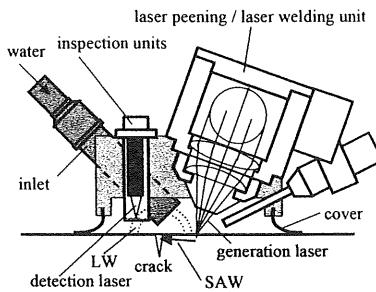


Fig.4 Schematic of laser-induced leaky waves testing with multifunction laser welding head

じる。そのため、本ヘッドへ搭載する検査機構部の寸法や搭載箇所も制限される。そこで、外径が約10mm、長さ約30mmとなるよう検査機構部の小型化を行った。また、超音波が欠陥へ入射する角度によっては欠陥の検出性が低下する可能性を考慮し、検査機構部を多目的レーザ溶接ヘッド内の送信レーザ光照射点から90度の角度となるよう2箇所に設置する構成とした。

本結果より、試作した多機能レーザ溶接ヘッドの概念図をFig.4に示す。レーザピーニング用のレーザ光照射機構を利用してSAWを励起させるための送信レーザ光を検査体表面へ照射する。このSAWが欠陥に達することによって生じるLWを検査機構部にて検出する。

ここで、レーザ溶接時には水中環境下で溶接箇所をシールドガスで充填する必要があることから、多機能レーザ溶接ヘッド内部は体積空間が小さい構成となっている。更に、検査・溶接補修・予防保全の3つの機能を満たすため、多くの部品がこの空間内に設置されている。そのため、検出すべき信号がこの空間内で反射・散乱される可能性があり、欠陥の検出・可視化が困難になる恐れがある。

そこで、開発した多機能レーザ溶接ヘッドにおいて欠陥検出性能に問題が無いか確認試験を行った。

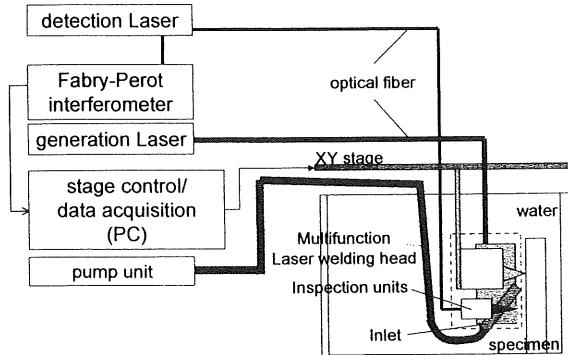


Fig.5 Experimental setup

4. 試験方法

試験体系概念図をFig.5、試験状況をFig.6に示す。送信レーザ光源(Nd:YAGレーザ:波長532nm)を光ファイバに入射し、レーザピーニング機構を介して検査体表面にパルスレーザ光を照射する。照射エネルギーは約45mJ、照射スポット径は約 ϕ 0.7mmである。一方、受信レーザ光源(Nd:YAGレーザ:波長1064nm)を光ファイバに入射し、検査機構部を介して検査機構部に設置した表面を鏡面研磨した反射板にスポット径約0.4mmで照射する。送信及び検査ヘッドは走査ステージにより検査体表面を2次元的に走査可能な機構としている。レーザ溶接上に付与された欠陥に対して、x、yそれぞれの方向に0.2mmピッチで40mm角の領域を走査させ、データ収録PCにてデータを収録した。得られたデータは前章で述べた開口合成処理を行い、2次元的な可視化を行った。

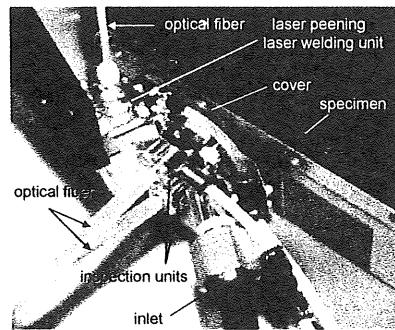


Fig.6 Laser-induced leaky waves testing experiment with multifunction laser welding head

5. 試験結果

設計・開発した多目的レーザ溶接ヘッドを用い、レーザ溶接時に発生した溶接欠陥の検出性および可視化性能の確認を行った。使用した試験片をFig.7に示す。本試験片はSUS316L上にインコネル82Mによりレーザ溶接した試験片である。SCCの封止を模擬するため、EDMスリット上にレーザ溶接を施工しているが、施工条件を本来の溶接条件ではなく、欠陥が発生する条件下で意図的にレーザ溶接を行い、約 ϕ 1mmの溶接欠陥付きレーザ溶接試験片を作製した。

Fig.7上を多機能レーザ溶接ヘッドにて検査し、開口合成処理を行った。ここで、多機能溶接ヘッドに設置

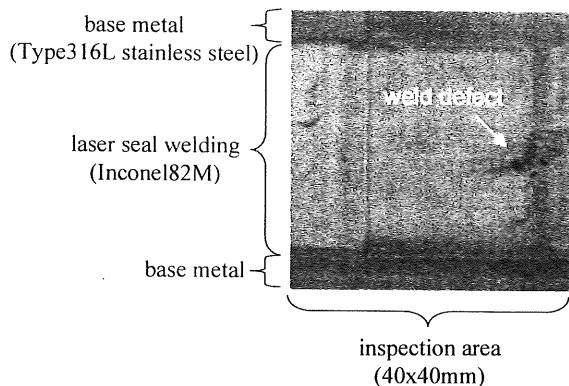


Fig. 7 Inspection surface with weld defect

した 2 つのセンサそれぞれに対して開口合成処理を実施し、両結果の位置補正を実施した後、加算平均処理を行った。その結果を Fig.8 に示す。本結果より、y 方向約 5-35mm の領域にレーザ溶接により生じたビード形状が確認できる。また、本溶接は x 方向約 5-10mm の領域に母材からの高さが約 1mm の溶接重ね合わせ部、28-32mm の領域に母材部とほぼ同じ高さのパッチ境界が存在する。得られた結果において、 $(x, y)=(25\text{mm}, 18\text{mm})$ 近傍に溶接欠陥による指示が確認できる。この指示は x, y 方向のそれぞれにおける断面波形からも指示が確認できる。

本結果から、開発した検査機構部を多機能レーザ溶接ヘッドに搭載し、溶接欠陥の検出、および検査表面の 2 次元的な可視化が可能であることを確認できた。

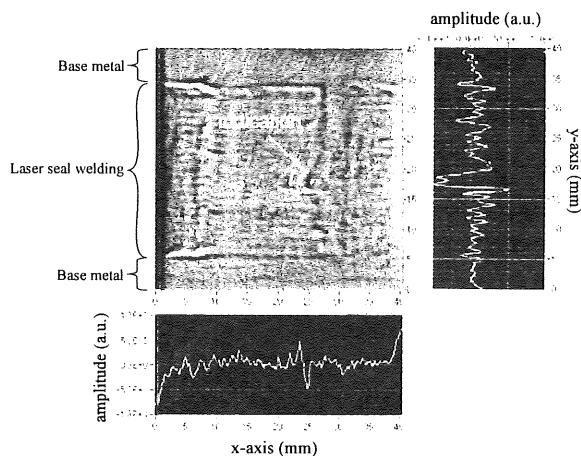


Fig. 8 Visualized result of surface inspection with multifunction laser welding head

6. 結言

水中レーザ溶接を炉内構造物に対して適用する際に、一つの施工ヘッドで検査・溶接補修・予防保全を可能とする多機能レーザ溶接ヘッドを開発した。表面波が欠陥において水中へ漏洩することを利用したレーザ励起漏洩波探傷法を多機能レーザ溶接ヘッドの 1 機能とするため、検出原理を装置化した上で多機能レーザ溶接ヘッドへ搭載した。

本ヘッドにおける検査性能を確認するために、レーザ溶接時に生じた約 $\phi 1\text{mm}$ の溶接欠陥の検出、および可視化を行った結果、表面状態を 2 次元的に可視化可能であることを確認した。

今後、様々な溶接条件における欠陥検出性能を把握するための検証試験を実施すると共に、遠隔作業ロボットへの融合を進め、様々な形状で構成されている炉内構造物を対象として、検査から補修・保全まで対応可能なシステム開発を進めていく。

参考文献

- [1] M. Tamura, et al., Development of Underwater Laser Cladding and Underwater Laser Seal Welding Techniques for Reactor Components, Proceedings of 13th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE13-50141
- [2] Y. Sano, et al., Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, Vol.121, p.432 (1997)
- [3] M. Ochiai, et al., Laser-ultrasonic study of micro crack sizing and its application to nuclear reactor internals, 保全学誌, 4(4), pp.41 (2006)
- [4] 佐伯綾一他, レーザを応用した炉内保全技術とその PWR への適用, 日本保全学会第 2 回学術講演会要旨集, p.191
- [5] Scruby, C. et al., Laser-ultrasonics: Techniques and Applications, Adam Hilger, Bristol, UK (1990)
- [6] 三浦崇広他: レーザ励起漏洩波探傷法による微小き裂の可視化技術, JSNDI 平成 19 年度春季大会講演概要集, p.167
- [7] G. W. Willard, Criteria for Normal and Abnormal Ultrasonic Light Diffraction Effects, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 21, No. 2, p.101 (1949)
- [8] 三浦崇広他: レーザ超音波法による水中環境下における溶接欠陥の表面可視化技術, 第 15 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, p.59
- [9] 三浦崇広他: レーザ励起漏洩波探傷法による溶接欠陥の可視化技術, JSNDI 平成 20 年度春季大会講演概要集, p.17