

レーザ超音波法を用いた溶接インプロセス検査装置

In-Process Welding Monitoring System Using Laser-Ultrasonic Testing

星 岳志 山本 摂 小川 剛史

■ HOSHI Takeshi ■ YAMAMOTO Setsu ■ OGAWA Tsuyoshi

溶接技術の進歩により、大型構造物を小型部材の溶接で製造する技術が確立されてきている。

東芝は、溶接施工中に欠陥検査を行うことを目的に、レーザ超音波法を利用した溶接インプロセス検査装置を世界で初めて^(注1)開発した。高温状態の溶接部を施工中に非接触かつ非破壊で検査できるため、欠陥検出時に直ちに部分補修できるようになり、全体再加工が不要になる。現在、火力発電所用タービンロータの溶接インプロセス検査に活用しており、工程短縮に貢献している。

In the industrial field, a technology to fabricate large structures by combining various small parts is being established in line with the progress of welding technology.

With this as a background, Toshiba has developed the world's first in-process welding monitoring system applying a laser-ultrasonic testing technology in order to inspect defects in the process of welding. Through non-contact inspection of parts being welded at high temperature, the in-process welding monitoring system allows users to repair only the defect without the need for entire refabrication once it detects the presence of a defect in a welded part. This system has been applied to the manufacturing of turbine rotors for thermal power plants and is contributing to the reduction of process retrogression.

1 まえがき

近年の溶接技術の進歩は目覚ましく、これまで鍛造や鋳造で一括して製造されてきた厚肉の部材や複雑な形状の部材を、小型の部材を溶接することで製造する技術が確立されてきている^{(1), (2)}。東芝は、高効率発電システムを実現するために蒸気タービンの大容量・高温化に取り組んでおり、その一環として小型鍛造品を溶接接合する溶接ロータの開発を進めている^{(3), (4)}。溶接ロータは、従来の一体型ロータに比べて、温度特性が異なる材料を組み合わせることができ、更に製造期間を短縮できるという特長を持つためである。しかしその反面、溶接ロータには、溶接後の検査で欠陥が検出されると、再加工（溶接部の切断や、開先再形成、再溶接など）という大幅な後戻り工程が発生するという問題がある。この後戻り工程は、溶接厚さが100 mmを超えるタービンロータのような、溶接部が厚い製品ほど長期化する。

後戻り工程の発生を抑制するには、溶接施工中に溶接部の欠陥を検査するインプロセス検査が有効である。インプロセス検査が実現すれば、欠陥を検出した段階で、いったん溶接を中断し、部分補修を行うことで溶接を再開することが可能になり、後戻りを最小限に抑えられる（図1）^{(5), (6)}。

しかし溶接施工中は対象が高温になるため、検査対象表面に直接アクセスすることが難しい。そこで当社は、超音波の励起

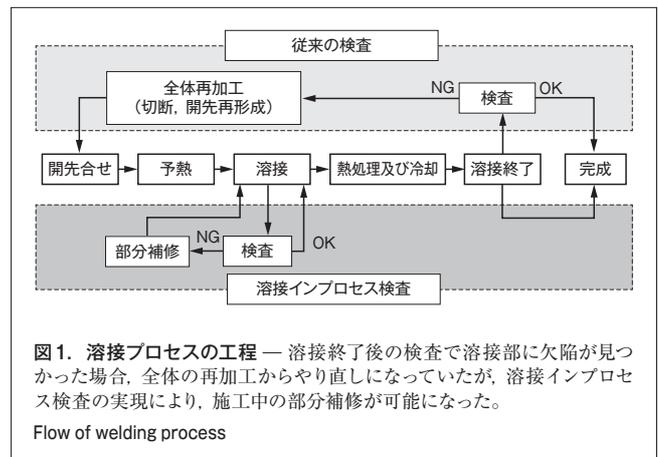


図1. 溶接プロセスの工程 — 溶接終了後の検査で溶接部に欠陥が見つかった場合、全体の再加工からやり直しになっていたが、溶接インプロセス検査の実現により、施工中の部分補修が可能になった。

Flow of welding process

及び受信にレーザを用いることにより非接触かつ非破壊で欠陥を検査できるレーザ超音波法⁽⁷⁾に着目し、これを利用したインプロセス検査装置を世界で初めて開発した。

ここでは、肉厚150 mm以上、施工中温度200℃以上となる溶接部に発生する直径1.6 mm以上の溶接欠陥を施工中に検出することを目的とした、溶接インプロセス検査装置開発の取組みについて述べる。

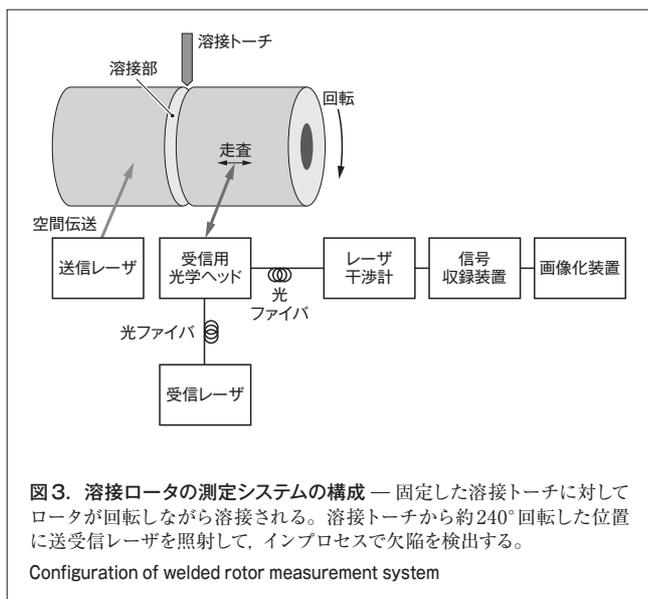
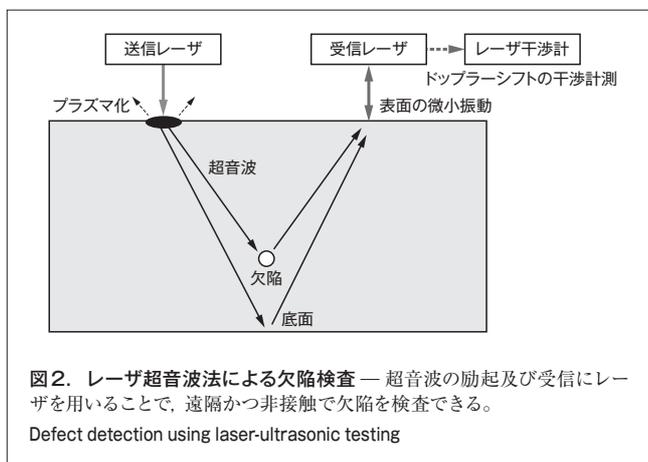
2 レーザ超音波法によるインプロセス検査

パルス幅が数nsの送信レーザを金属材料に照射すると、表面から数十nm程度の層がプラズマ化する。プラズマ圧力の

(注1) 2010年5月、非破壊検査協会 平成22年度春季講演大会で発表。

反力により、照射点を音源として超音波が発生し、検査対象内部を伝播（でんぱ）する。この超音波は、底面や欠陥などで反射及び散乱し、再び表面へ伝播する。受信レーザを照射し、その反射光のドップラーシフトをレーザ干渉計により計測することで、超音波による微小な表面振動を検出できる。このように、レーザ超音波法により欠陥検査を行うための基本構成として、超音波を発生させるための送信レーザ、発生した超音波による表面振動を検出するための受信レーザ、及びレーザ干渉計が必要になる（図2）。

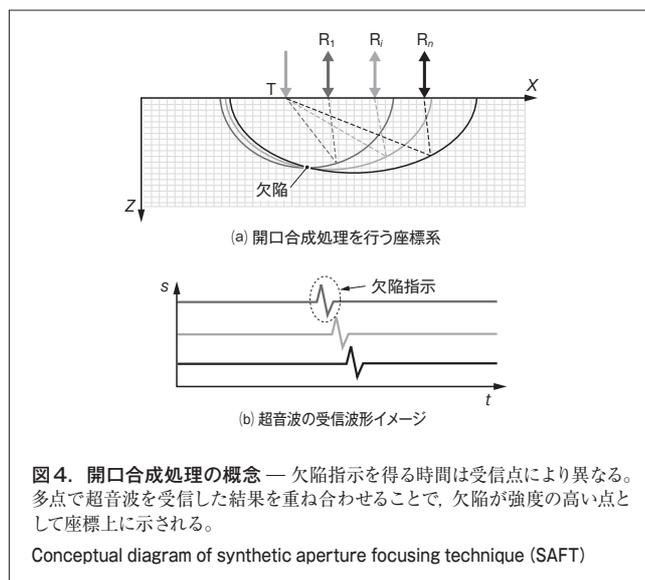
レーザ超音波法により溶接ロータの施工中検査を行うための測定システムの構成を図3に示す。送信レーザ光源にはNd:YAGレーザ^(注2)の基本波（波長1,064 nm）を用いた。送信レーザのパルスレーザ光（パルス幅約10 ns、エネルギー約700 mJ）によりプラズマを発生させ、超音波を励起する。受信

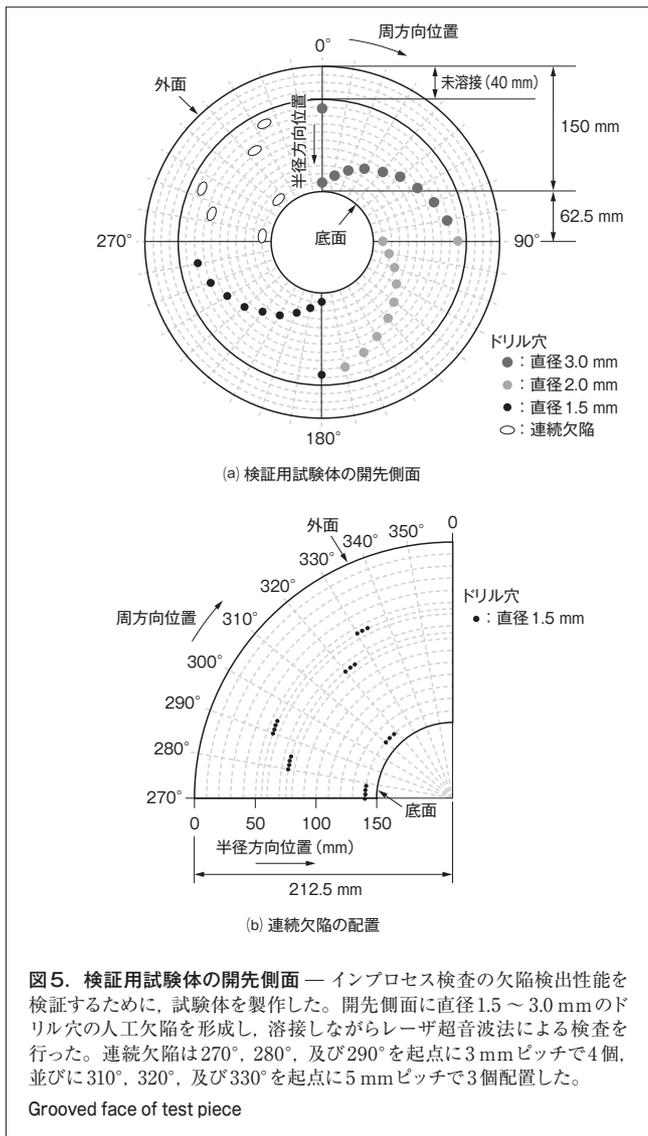


(注2) Nd (ネオジム) を含むイットリウム (Y) - アルミニウム (Al) - ガーネットの結晶を用いたレーザ。

レーザ光源にもNd:YAGレーザの基本波を用い、ロングパルスレーザ光（パルス幅約100 μ s、最大エネルギー約10 mJ）を光ファイバ及び受信用光学ヘッドを通じ、溶接部を挟んで反対側のロータ表面に直径約1.0 mmのスポットで照射する。対象で反射された光は受信用光学ヘッドで集光され、光ファイバを通してレーザ干渉計へ伝送される。受信用の光学ヘッドをロータの軸方向に走査することで複数点で受信できる構成とした。受信した信号を開口合成することにより欠陥検出性能の向上を図った。また、溶接部を3次元的に可視化できるようにした。

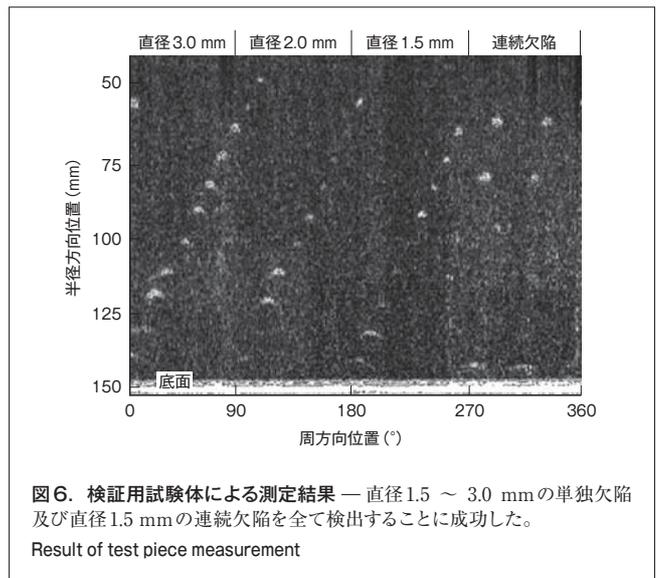
開口合成により欠陥検出性能を向上させる方法について次に述べる。まず、溶接部で発生する散乱波の影響を考慮して、送信レーザの照射点（以下、送信点と呼ぶ）と受信レーザの照射点（以下、受信点と呼ぶ）を分離してレーザ照射する構成にした^{(5), (6)}。開口合成処理を行う座標系及び受信される超音波の波形のイメージを図4に示す。図4(a)でX軸は受信点を走査する方向、Z軸は検査対象の深さ方向である。図4(b)では、横軸が超音波の伝播時間 t 、縦軸が受信される信号強度 s を示している。X-Z面上で、送信点をT、受信点を R_i ($i=1 \sim n$) とし、複数点で超音波を受信する。受信点 R_i で得られた超音波波形のある時刻 t_i に欠陥指示が得られた場合、送信点T-欠陥-受信点 R_i 間の超音波の伝播距離は超音波の音速と時間 t_i から算出可能であり、欠陥の位置を軌跡として描くと、送信点T及び受信点 R_i を焦点とした円になる。すなわち、欠陥はこの円上のどこかに存在していることになる。欠陥からの指示が受信されるまでの時間は受信点の位置によって異なる（図4(b)）。 R_1 から R_n までの全受信結果をX-Z面上に描くと、実際に欠陥が存在する点で全ての円の軌跡が重なる（図4(a)）。欠陥以外の部分は位相の違いにより打ち消し合ったり平均化されたりしてノイズとして消え、欠陥だけが強度の高い点としてX-Z面上に示される。ここで得られる像はB-Scan像と呼





ばれ、この画像を評価することで欠陥検出及び位置特定ができる。

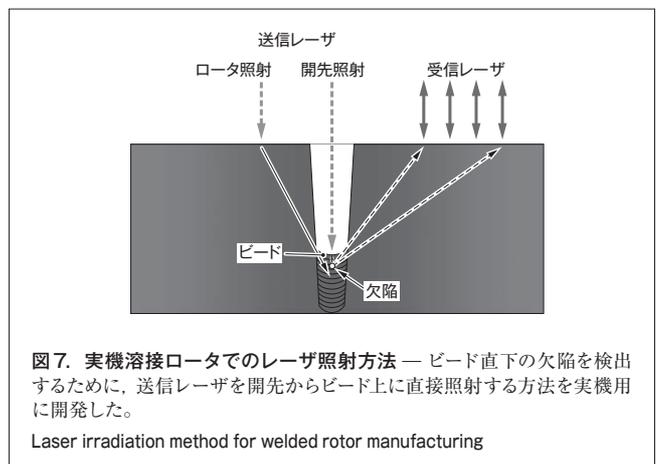
検証用に、管状で肉厚150 mmの低合金鋼製の試験体を作製した。試験体の中心軸に直交する断面を開先側面とし、ドリル穴による模擬欠陥を形成した(図5)。模擬欠陥は、開先側面に直径3.0 mm(周方向位置0～80°)、直径2.0 mm(同90～170°)、及び直径1.5 mm(同180～260°)のドリル穴を、周方向に10°かつ半径方向に10 mmの刻みで設けた。また、連続して発生する欠陥を模擬するために、直径1.5 mmのドリル穴を1か所につき3点又は4点並べて設けた(起点270～330°)。この試験体に対して、底面から半径方向に110 mmの範囲(外面から40 mmの位置まで)をTIG(Tungsten Inert Gas)溶接し、並行して溶接施工中検査を実施した。検査結果を図6に示す。横軸は周方向位置、縦軸は半径方向位置である。欠陥に対応した位置に明瞭な指示が得られた。指示のSN比(信号対雑音比)は全て2以上であり、ド

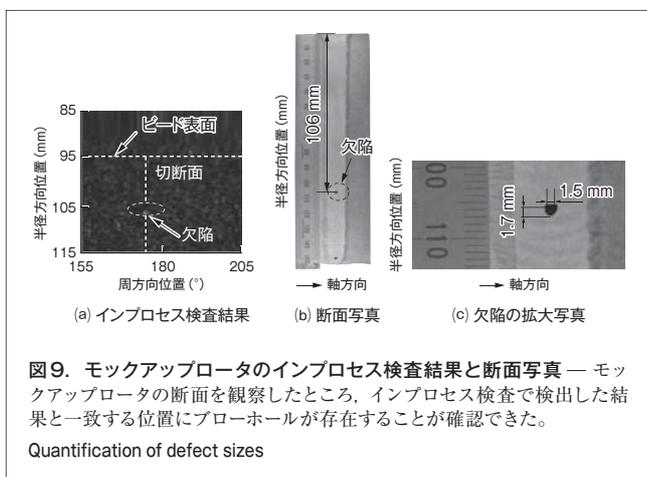
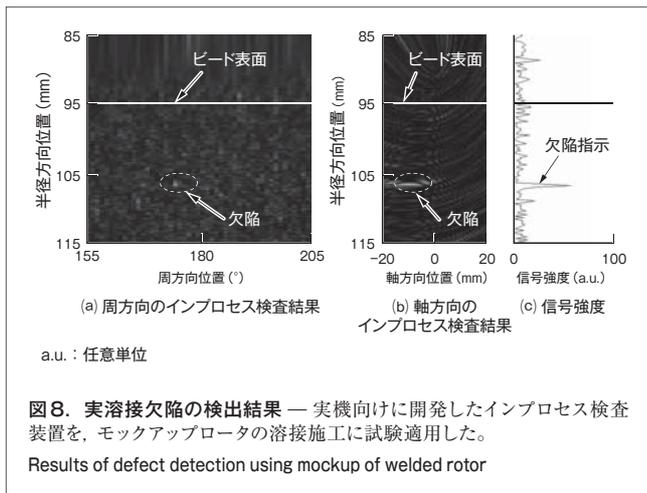


リル穴が大きくなるにつれて指示強度が高くなる傾向が確認できた⁽⁵⁾。

3 溶接ロータ施工への適用

溶接中に発生する実溶接欠陥の検出性能を確認するため、モックアップロータの溶接施工に開発した装置を試験適用した。温度200℃以上、溶接厚さ150 mmの溶接施工全体を通して、インプロセスで検査を行った。溶接部を挟んで超音波の送受信を行う方法では死角となっていたビード表面直下の浅い位置にある欠陥を検出するために、図7に示すように開先から溶接ビード上に、送信レーザーを直接照射する構造にした⁽⁶⁾。この方法で実際に溶接中に欠陥を検出した結果を図8に示す。欠陥は、半径方向が外面から106 mm、周方向が175°の位置に検出された。溶接完了後、周方向175°の位置でロータを切断し、溶接部の断面観察を行ったところ、外面から106 mmの位置にブローホール(空洞)の存在が確認された(図9)。半



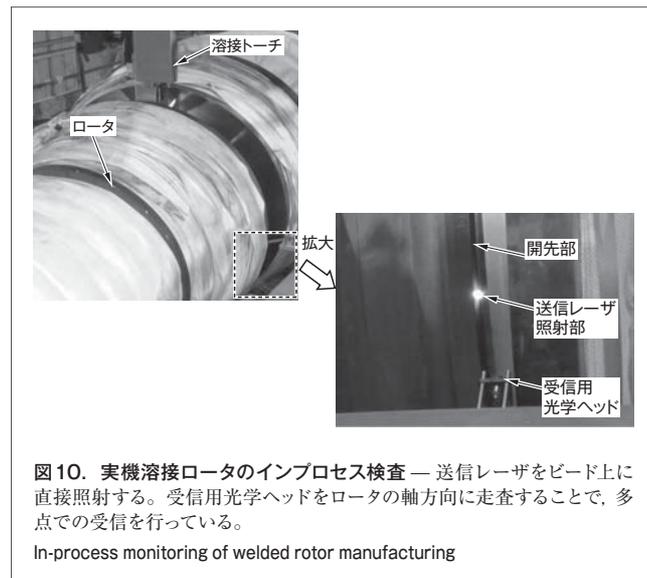


径方向位置、周方向位置ともに溶接中の欠陥検出結果とよく一致しており、これらの結果から、開発したインプロセス検査装置は、溶接中に発生した欠陥を高い位置精度で検出可能であり、その場での部分補修に対応できることが確認できた。

4 あとがき

現在、レーザー超音波法による溶接インプロセス検査装置は、国内及び海外における火力発電所用タービンロータ製造工程に導入され、溶接の後戻り工程を未然に防ぐことで製造コストの低減に貢献している(図10)。インプロセスで欠陥を検出できることから、欠陥発生部位をその場で部分補修することが可能になった。更に、欠陥が発生したタイミングの溶接条件をチェックして、再発防止に役だてることもできる。

今後、非接触、非破壊かつ遠隔からの検査ができる特長を生かし、適用範囲の拡大に取り組んでいく。



文献

- 妹島五彦 他. 鍛鋼品の鋼板溶接構造化. 日本機械学会誌. 74, 630, 1971, p.826-828.
- 横田清義. 鍛造品の溶接構造化ならびに試作について. 日本機械学会誌. 54, 388, 1951, p.170-175.
- Fujita, Y. et al. Development of a Welding Monitoring System for In-process Quality Control of Thick Walled Pipe. Welding in the World. 56, 11, 2012, p.15-25.
- 浅井 知 他. 大容量・高温化対応蒸気タービンの溶接ロータ. 東芝レビュー. 65, 8, 2010, p.12-15.
- 星 岳志 他. 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, 2012, p.531-536.
- Yamamoto, S. et al. Defect Detection in Thick Weld Structure Using Welding In-Process Laser Ultrasonic Testing System. Materials Transactions. 55, 7, 2014, p.998-1002.
- Scruby, C.B.; Drain, L.E. Laser Ultrasonic: Techniques and Applications. Bristol, Adam Hilger, 1990, 447p.



星 岳志 HOSHI Takeshi, Ph.D.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター プラントサービス・応用技術開発部主査, 博士(理学)。レーザー超音波検査の技術開発に従事。日本非破壊検査協会, 溶接学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



山本 摂 YAMAMOTO Setsu, Ph.D.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター プラントサービス・応用技術開発部主査, 博士(工学)。超音波を用いた非破壊検査の技術開発に従事。日本非破壊検査協会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



小川 剛史 OGAWA Tsuyoshi

電力システム社 京浜事業所 溶接センター主査。自動溶接システム及び溶接プロセスの開発に従事。溶接学会会員。Keihin Product Operations