

レーザ超音波可視化技術による 溶接部欠陥エコーの可視化

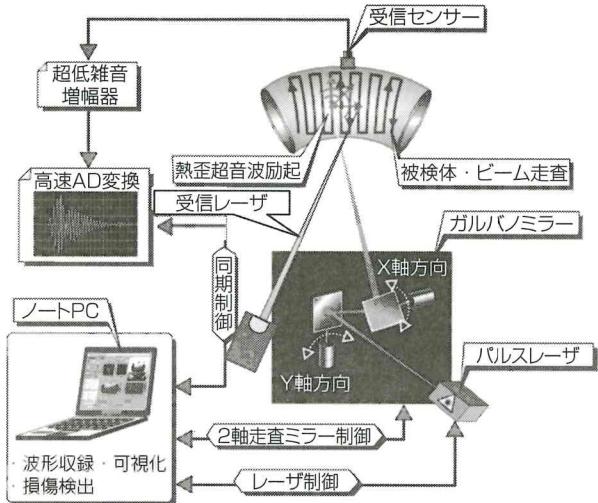
つくばテクノロジー㈱ 高坪 純治・王 波・劉 小軍・鈴木 修一・王 曜東

1. はじめに

材料はいつかは壊れる。壊れるのが分かっていないながら損傷事故がなくならないのは、予期せぬ場所から、予期せぬ早さで破壊が起こってしまう場合があるからである。逆にいえば、破壊の起点となる欠陥を漏れなく見つけ、欠陥の進行をモニタリングできれば事故は大幅に減少するはずである。非破壊検査技術は、それを可能とするための有力な検査の手段として期待されている。しかし、現行の非破壊検査法は、広い範囲の検査に時間を要し、また、複雑形状部や狭い部などの難検査部位が多いことから、重要部など、限られた場所しか検査されていないのが現状である。我々が開発したレーザ超音波可視化検査技術^{[1]～[7]}は検査体表面をレーザ走査することで、超音波の伝搬を可視化し、可視化映像の乱れを解析して欠陥を検出する技術であり、広い範囲を効率的に検査でき、かつ、どのような複雑形状の物体にも適用可能であることから、全面検査や全数検査につながる新しい検査技術として期待されている。本稿では、プラントの保守検査における最も重要な検査部位である溶接部を中心に、欠陥エコーの可視化例を紹介する。

2. レーザ超音波可視化技術

レーザ超音波可視化検査装置（LUVI : Laser Ultrasonic Visualizing Inspector）の構成図を第1図に示す。パルスレーザ（最大出力2 mJ、パルス幅：2 ns）を検査体表面に照射すると、時間的に急峻な熱ひずみの発生により、非常に微弱であるが超音波が励起される。パソコンでレーザとミラーおよび高速A/D変換器を同期制御し、レーザビームを検査



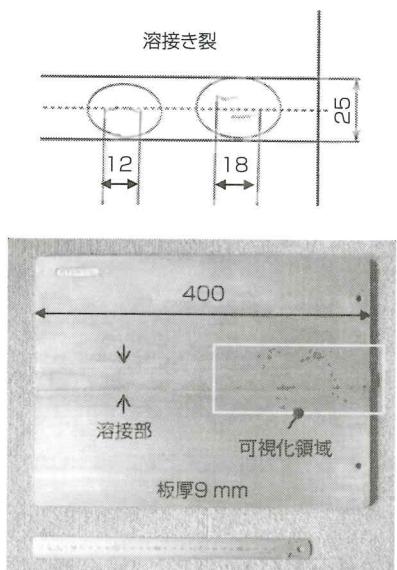
第1図 レーザ超音波可視化検査装置（LUVI）

体表面上で格子状に高速走査（最速2 kHz）させながら、固定点に取り付けた圧電受信センサ（CH数最大8）、または、非接触で受信可能なレーザプローブを用いて超音波伝搬信号を検出し、超低雜音増幅器、高速A/D変換器を通して、パソコンのハードディスクに収録する。収録した超音波信号は、レーザ励起点から受信センサに向かう複数の波であるが、超音波伝搬の相反性を利用して再構成することにより、受信センサ部から発振される超音波の動画映像を計測することができる。この可視化方法は、励起側のレーザを走査しているので、レーザの照射角度や焦点距離を一定に保持する必要がなく、三次元任意形状物体を伝わる超音波の伝搬映像を短時間で計測できる。

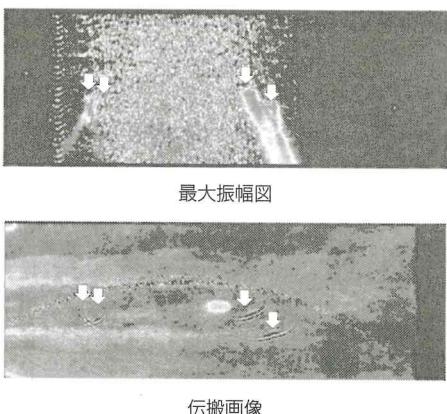
3. 欠陥エコーの可視化

溶接部はそれ自体が大きな欠陥であり、多くの擬似エコーが発生するので、欠陥エコーの識別が難しい検査部位である。このような部位でも、超音波の伝搬を可視化すれば欠陥エコーを識別しやすくなる。

第2図に、溶接部に表面き裂を導入したサンプルを示す。本サンプルのき裂は閉じており、目視では検出困難である。第2図上側の図に、磁粉探傷、浸透探傷で検出されたき裂のスケッチ図を示す。また、第3図にLUVIで検出したき裂エコーの最大振幅図と伝搬画像を示す。最大振幅図の矢印部から振



第2図 溶接部表面き裂サンプル

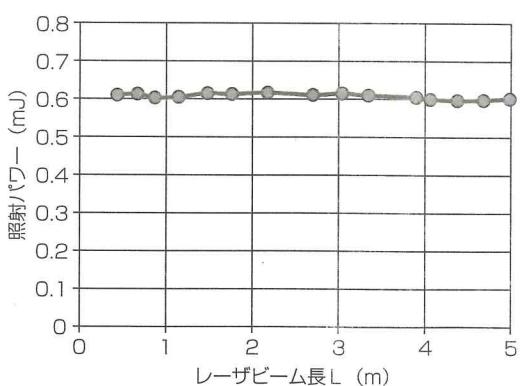


第3図 溶接部表面き裂エコーの可視化

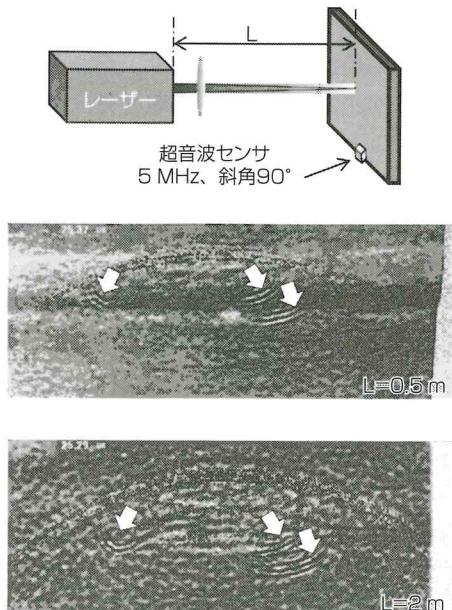
幅が大きくなっていることが確認され、き裂の位置と概略の寸法を推測することができる。また、下側の図に示した伝搬画像はここでは静止画であるが、実際には動画映像で見ることができ、最大振幅図で確認できないような小さなエコーも見つけ出すことができる。左側のエコーは二つのき裂エコーが干渉しながら重なり合って進んでいる。使用した受信センサは周波数5 MHzの斜角90°探触子である。磁粉探傷、浸透探傷と比べ、簡便かつ迅速（1分程度）に検査することができる。

なお、第3図はレーザビーム長0.5 mのときの測定結果であるが、第4図にレーザビーム長と照射パワーの関係を示すように、レーザは空気中での減衰が少ないので、もっと長距離でも測定可能である。第5図にビーム長0.5 mと2 mの場合の伝搬画像を比較して示すように、ビーム長2 mの場合でもき裂エコーを問題なく可視化できている。ただし、ビーム長が長くなるにしたがって、照射スポット径が大きくなり、低周波で振幅の小さな超音波しか励起できなくなるため、2 m以上のビーム長で計測する場合は、スポット径を絞るための光学系の工夫が必要である。レンズ径は大きくなるが数十メートルのビーム長でも計測可能だと考えている。

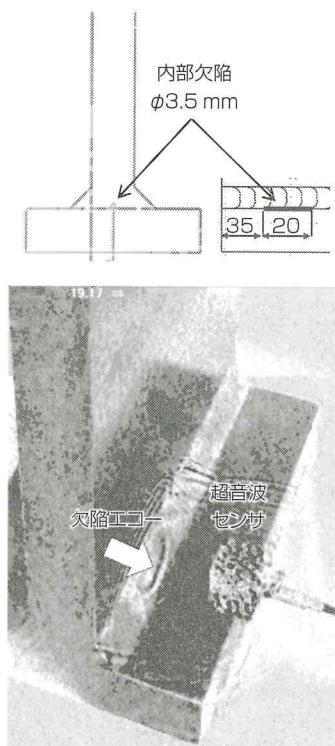
次に、T字溶接継手部の内部欠陥エコーの可視化例を紹介する。第6図上側のスケッチ図に示すように、T継手内部に直径3.5 mm、長さ20 mmの内部欠陥を導入している。使用したセンサは周波数5 MHzの斜角70°探触子である。第6図の矢印部に欠陥エコーが可視化されている。当該検査法はレーザで非



第4図 レーザビーム長と照射パワー



第5図 溶接部表面き裂サンプル



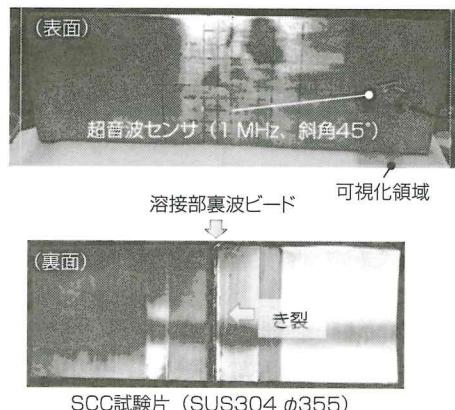
第6図 T字溶接継手の欠陥エコーの可視化

接触走査するので、溶接部のような凸凹部、コーナー部でも容易に欠陥エコーを可視化できる。

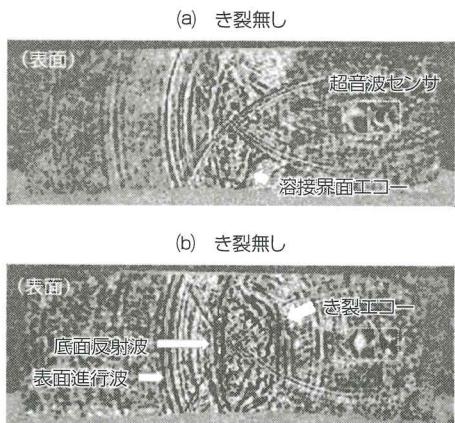
原子力発電配管では、溶接継手部内面に応力腐食

割れ(SCC)が発生することがある。き裂は、第7図に示すように、溶接部近傍に発生することが多く、現行の超音波探傷法では、溶接部からのエコーとき裂エコーの見分けが容易ではない。そこで、レーザ超音波法でき裂エコーを可視化し、識別能力を検証した。き裂がある場合とない場合の溶接部エコーを第8図に比較して示す。使用したセンサは周波数1MHzの斜角45°探触子である。溶接部エコーは比較的きれいな円弧状の波頭を示すが、き裂エコーは歪んだ波頭を形成し、かつ、表面に現れる時刻も異なるので、少し慣れれば検査を専門としない人でも容易に識別が可能である。

最後に、原子力発電プラント配管の内面腐食傷エコーの可視化例を紹介する。複数の内面腐食傷を有するエルボ管に、周波数1MHzの斜角45°探触子を

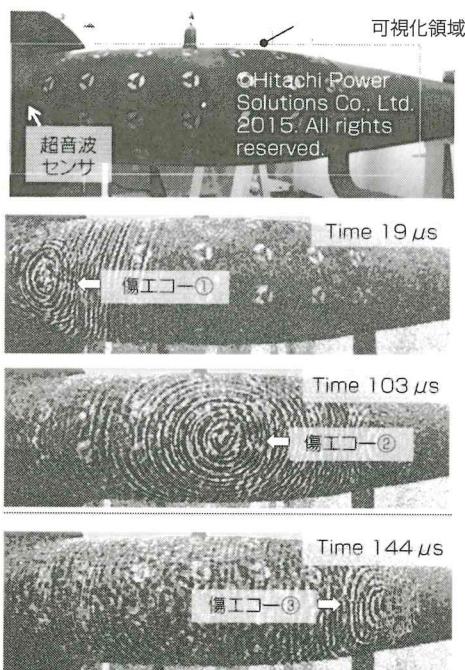


第7図 応力腐食割れ(SCC)の発生した発電プラント配管試験片(短冊状)



第8図 発電プラント配管溶接部の内面SCCき裂エコーの可視化

取り付け、表面をレーザ走査して超音波の伝搬を可視化した。可視化映像は動画であるが、伝搬時刻 $t=19\ \mu s$ 、 $103\ \mu s$ 、 $144\ \mu s$ のときの伝搬映像を静止画として第9図に示す。超音波が左側から右側に伝わるにつれ、内面腐食傷部3ヶ所から、湧水のような波紋が同心円状に広がっていくのを観察できる。伝搬映像の計測は、レーザ走査ピッチ1.2 mm、走査点数433×139点を走査速度500 Hzで行っており、計測時間は120秒である。計測終了後、すぐに動画映像をPCモニター上で観察して異常を検出できることから、当該可視化探傷法は広い範囲を効率的にスクリーニング検査するための有効な検査手法だと考える。



第9図 発電プラント配管内面腐食傷エコーの可視化

4. おわりに

本稿では、溶接部の欠陥に焦点を当てて、レーザ超音波可視化技術による欠陥エコーの可視化例を紹介した。溶接部の欠陥検査は古くからある課題であるが、その検査法は未だ確立されておらず、当社にも溶接部の非破壊検査に関する多くの問い合わせがある。溶接部の検査が難しい理由は、溶接部自身が巨視的な欠陥であり、欠陥の中にある小さな欠陥を

見つけ出すという困難さに加え、溶接部の多くは継手コーナー部等の狭い部にあり、かつ、表面に余盛り等の凸凹があってセンサの取り付けが難しいことにある。レーザ超音波可視化探傷法といえども、溶接部の欠陥エコーを鮮明に映し出すのは容易ではないが、少なくとも従来の超音波探傷法に比べ、欠陥識別能力や検査の迅速性の点で優れていると考えている。現在、国の支援を受け、レーザ超音波可視化技術を利用した鋼橋溶接部の点検モニタリング技術の開発にも取り組んでいる。将来的に数十メートル先の検査部位を非接触で検査できることを夢見て、今後も地道な努力を重ねていくつもりである。

<参考文献>

- (1) 高坪純治：励起用パルスレーザ走査法による三次元物体表面を伝わる超音波の可視化、非破壊検査、57-4、pp.162-168 (2008)
- (2) 高坪純治・宮内秀和・ト部啓・津田浩・遠山暢之・王波：レーザ超音波同期差分法による裏面スリット散乱波の画像化、日本機械学会論文集、75-750、pp.211-218 (2009)
- (3) 高坪純治・津田浩・遠山暢之・森谷信一・升岡正：ロケット燃焼器のレーザ超音波映像化探傷技術、非破壊検査、59-10、pp.504-509 (2010)
- (4) 高坪純治：レーザ超音波可視化探傷技術の開発、非破壊検査、62-1、pp.35-39 (2013)
- (5) 羽倉守人・廣川達彦・若月祥子・高坪純治・王波・劉小軍・松岡一夫：レーザドップラ振動計による超音波領域の特性評価、超音波テクノ、25-6、pp.78-83 (2013)
- (6) 高坪純治・王波・劉小軍・鈴木修一・王晓東：レーザ超音波可視化技術の開発と欠陥検出への応用、非破壊検査、63-3、pp.142-147 (2014)
- (7) 高坪純治・王波・劉小軍・鈴木修一・王晓東：レーザ超音波可視化検査技術の開発、超音波テクノ、26-3、pp.70-74 (2014)

【筆者紹介】

高坪 純治

つくばテクノロジー(株) 取締役CTO 研究開発部部長

王 波

つくばテクノロジー(株) 代表取締役社長

劉 小軍

つくばテクノロジー(株) 取締役CFO

鈴木 修一

つくばテクノロジー(株) 執行役員 製造部部長

王晓東

つくばテクノロジー(株) 研究開発部
ソフトウェア事業課課長