

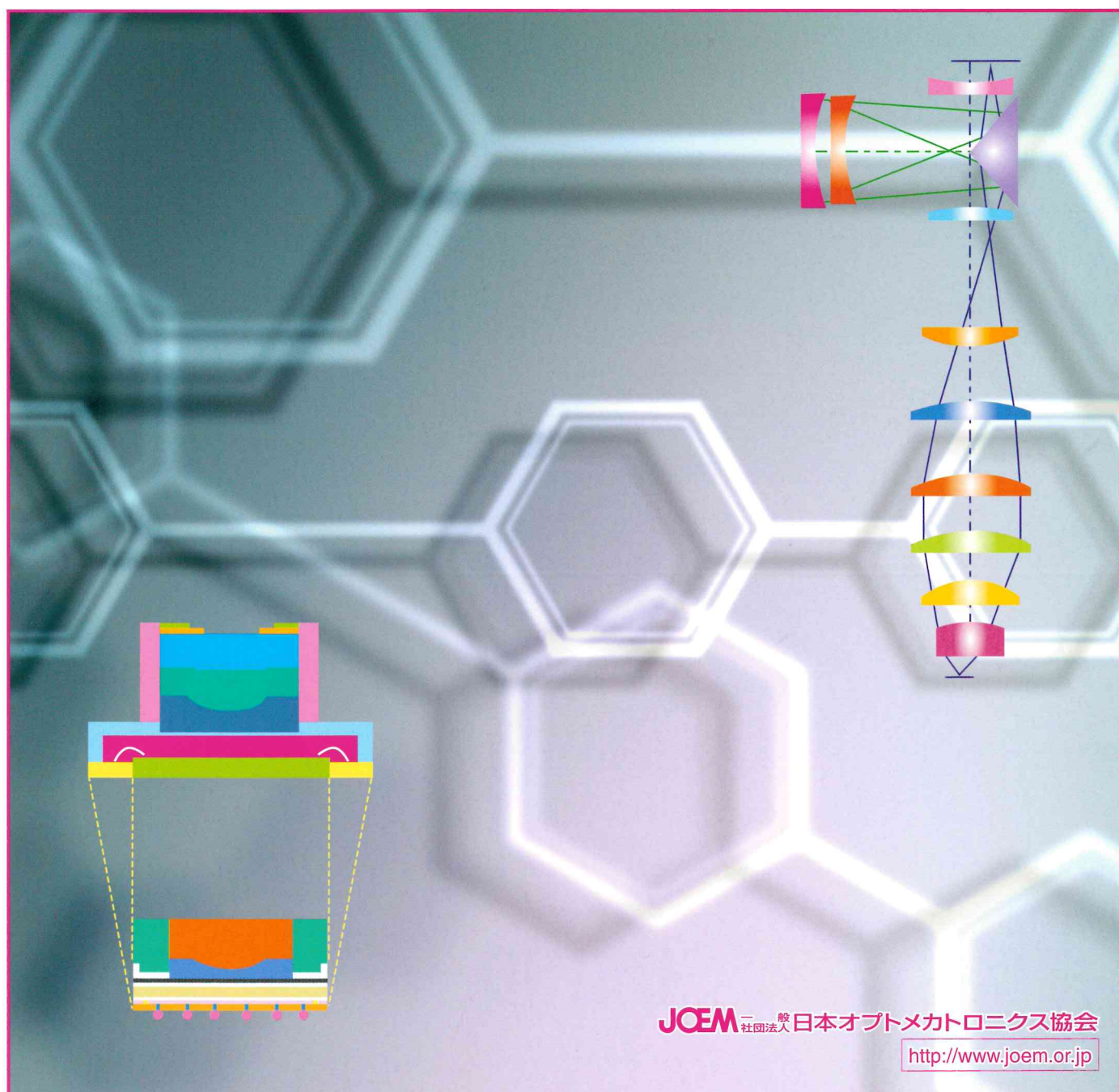
光技術 CONTACT

■特集：土木建築系の光技術●レイリー散乱を動作原理とした分布型光ファイバセンサの鉄筋コンクリート構造物への適用●光コムを用いた新たなファイバーセンサー●偏光赤外線サーモグラフィによる非接触・非破壊検査●レーザー超音波可視化探傷技術を利用した鋼橋の非破壊検査技術の開発●中性子を用いたコンクリート内塩分濃度分布の非破壊測定手法の開発

'20 Vol. 58
通巻681

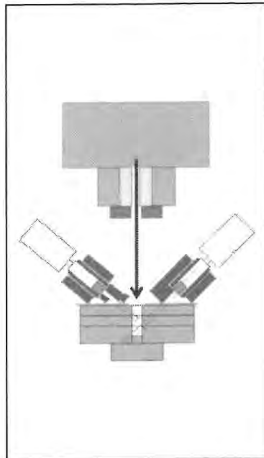
8

OPTICAL AND ELECTRO-OPTICAL ENGINEERING CONTACT



JOEM 一般社団法人 日本オプトメカトロニクス協会

<http://www.joem.or.jp>



レーザー超音波可視化探傷技術を利用した 鋼橋の非破壊検査技術の開発

つくばテクノロジー株式会社
高坪純治, 王 波, 鈴木修一, 劉小軍

1. はじめに

我が国の橋梁の多くは 1960 年代から 1980 年代にかけて建設されており、橋梁の老朽化が着実に進んでいる。このことから、平成 26 年度より 5 年に一度の総点検が義務付けられている。他の検査と比べて橋梁の検査で課題となるのは、検査領域が非常に広くて検査に時間がかかること、また、人が容易に近接できない部位が多いということである。これらの問題を解決できる検査手法として我々はレーザー超音波可視化探傷技術の開発に取り組んだ。

レーザー超音波可視化探傷技術とは、レーザーを利用して検査体表面を伝わる超音波の伝搬挙動を可視化し、可視化映像の中に現れる波動の乱れを検出して欠陥を検出評価する技術¹⁾である。検査体表面にパルスレーザー（パルス幅ナノ秒オーダー）を照射すれば瞬間的な熱ひずみの発生により超音波が励起される。この超音波励起点をミラー走査しながら複数の超音波を発生させ、固定点で受信・収録した信号波形列を再構成すれば超音波の伝搬映像を取得することができる。本探傷法は、(1)高速ミラー走査なので、広い範囲を効率的に検査できる、(2)遠隔検査が可能なので不安定な足場上での移動が少ない、(3)傷エコーを動画映像として観察できるので検査を専門としない人にも分かり易い、(4)非接触走査なのでどのような複雑形状物体にも適用できる、等の優れた特長を有している^{2,7)}。本稿では、レーザー超音波可視化探傷技術を利用した鋼橋の検査手法を紹介する。

2. レーザー超音波可視化探傷技術の原理

本可視化法の特徴は、超音波の受信側ではなく、発振側を走査して超音波伝搬映像を計測する点にある。これは超音波伝搬の相反性（送受信の方向を逆にしても受信波形が変化しないこと）が成立することを前提にしている。例えば、図 1 左図に示すように、欠陥（曲率半径 20mm、深さ 4mm の球面溝）を挟んで斜角探触子 A と垂直探触子 B を配置して超音波の送受信を行ったとき、個々の探触子の発振特性と受信特性が同じであれば、超音波パルスから A に信号を送って B で受信した波形と、逆に B に信号を送って A で受信した波形は図 1 右図に示すようにほぼ一致する。したがって、図 2

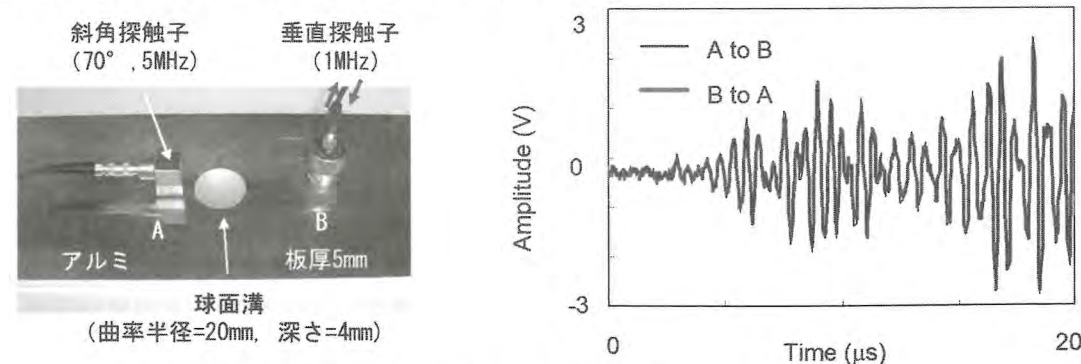


図 1 超音波伝搬の相反性

の上図に示すように、PZT 探触子の場合には、超音波の入射方向や欠陥の有無に拘わらず、送受信の方向を入れ換えてもその計測系は等価だと見なすことができる。これをレーザーと PZT の計測系に当てはめて考えてみると、図 2 下図に示すように、レーザーで熱励起超音波を発生させて PZT 探触子で受信した計測系と、逆に、PZT 探触子で超音波を発生させ、レーザー発振と同じ特性を有するレーザープローブで受信した計測系は等価だと考えることができる。したがって、レーザーで超音波発振点を走査させ、固定点に取り付けた PZT 探触子で受信する計測系は、固定点の PZT 探触子で発振した超音波を、レーザープローブを走査しながら受信する計測系と等価だと考えることができるので、各レーザー走査点での受信振幅を輝度（色）変調しながら時系列的に画像表示すれば固定点の PZT 探触子から発振した超音波の動画映像を取得することができる。受信側のレーザープローブを走査する従来計測法では焦点距離を一定に保った上でレーザー光を検査体に垂直に入射しなければならないという制約があったが、発振側のレーザー走査では焦点距離や入射角に殆ど制限がないので高速で自由にレーザービームを振ることができ、三次元形状物体を伝わる超音波の可視化が可能になった。

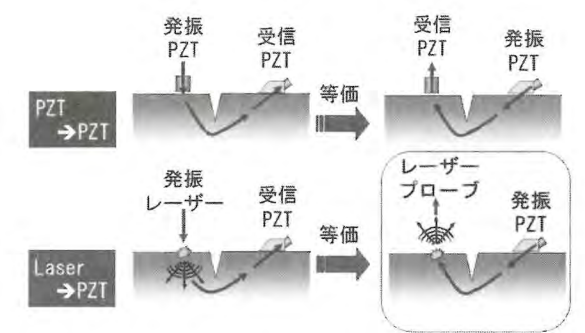


図 2 PZT-PZT 送受信系とレーザー
-PZT 送受信系の相反性の比較

3. レーザー超音波可視化検査装置

レーザー超音波可視化検査装置（LUVI : Laser Ultrasonic Visualizing Inspector）の構成図を図 3 に示す。また、装置の外観を図 4 に示す。その仕組みはパソコンでレーザーとガルバノミラーおよび高速 A/D 変換器を同期制御し、パルスレーザーを検査対象物表面に格子状に高速走査させる。すると、熱歪みによる微弱な超音波が励起される。その超音波伝搬信号を「接触式計測」では、対象物に取り付けた圧電受信センサ（最大 8 個）で、あるいは「非接触計測」では非接触で受信可能なレーザードップラー振動計を用いて検出し、超低雑音増幅器を通して信号を増幅し、高速 A/D 変換器により、パソコンのハードディスクに記録する。このレーザー走査点から受信センサに向かう複数の超音波伝搬信号を超音波伝搬の相反定理を利用して再構成することで、受信センサ部から発振される超音波の動画映像として可視化できる。

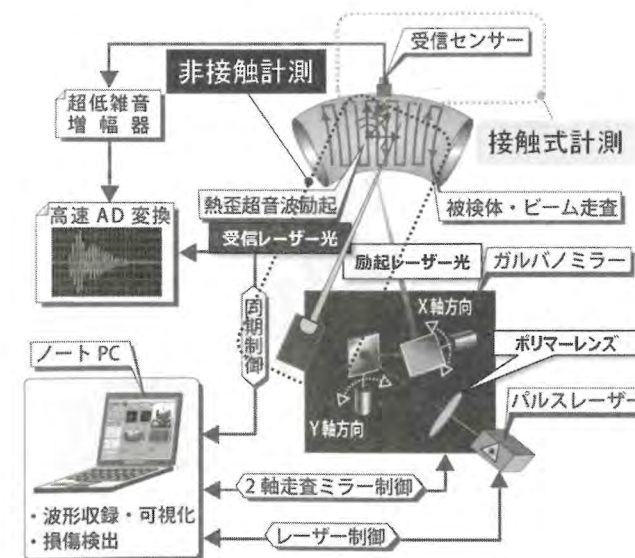


図 3 レーザー超音波可視化検査装置（LUVI）の構成図



図 4 レーザー超音波可視化検査装置

4. 探傷性能

4-1 検査体距離（レーザー照射距離）

図5に示すき裂入り平板溶接試験片を用いて、遠隔でき裂エコーを映像化できるかどうかを調べた。試験片表面には目視では検出できない複数の疲労き裂が存在している。検査体までの距離が0.5mと4mの場合の可視化結果を図5に比較して示す。照射距離4mの場合でもき裂エコーを映像化できていることが確認される。検査体までの距離が長くなるとレーザービームが広がるため、レーザーで励起される超音波の強度が低下するが、これを防ぐため、レーザー照射口とガルバノミラーの間に電流制御のポリマーレンズを入れてレーザービームを絞れる機構にしている。これにより遠隔での計測が可能になった。なお、レーザー光の空気中での減衰は殆どないので、光学系レンズを用いて照射スポット径を絞れば10m以上の遠隔からでも超音波を励起することができる。

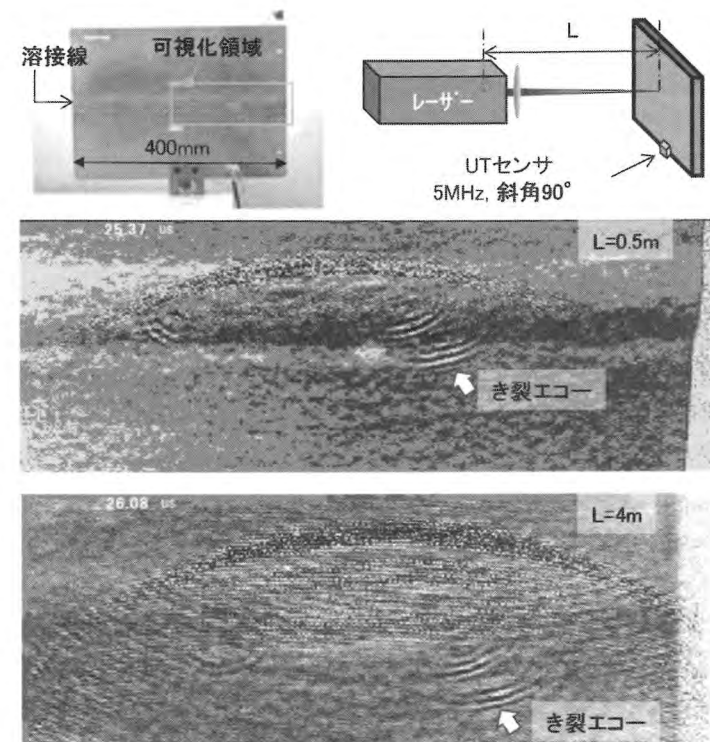


図5 レーザー照射距離0.5mと4mで検出したき裂エコー

4-2 検査範囲（超音波伝搬距離）

1個の超音波センサでどれくらいの範囲を検査できるかの目安を付けるために、図6上図に示す長さ4mの長尺アルミ板を使って超音波伝搬距離と欠陥検出性能の関係を調べた。試験片の裏側には深さ1mm、幅0.3mmで長さが1mm、2mm、4mmの3種類のスリットき裂を導入している。図6下図に示すように、超音波センサから3m離れた距離でも裏側にある1mmサイズのスリットき裂エコーが検出されていることを確認できる。なお、ミラーの振れ角はX軸Y軸とも約50°なので、検査体から3m離してレーザー照射すれば、一度に約3m×3mの範囲を検査できる。ただ、データ容量が大きくなり、解析・表示が遅くなるので、50cm×50cmに分けて検査することを推奨している。

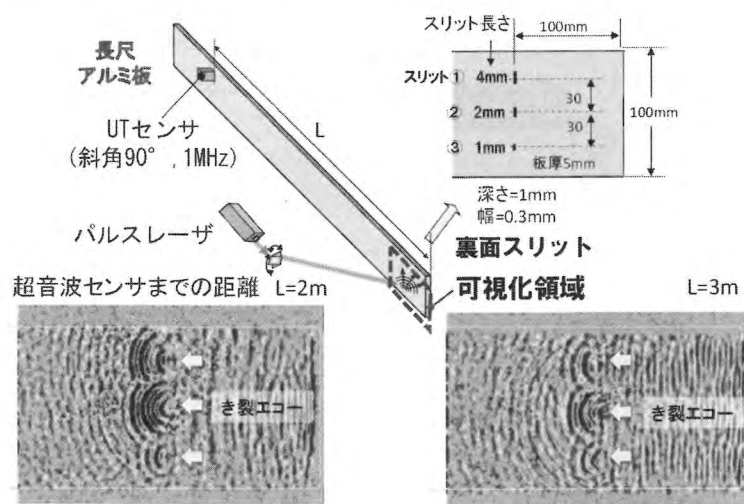


図6 超音波伝搬距離と欠陥検出性能

4-3 レーザー走査速度

レーザー照射の繰り返し速度を速くすれば、短時間で計測することができる。しかし、あまり速くすると、超音波が減衰し終わらないうちに次の超音波が励起されるので、残響雑音が増えることになる。幸いなことに鋼橋によく使用されるSS400材は超音波の減衰が速いので、レーザー照射速度を速くできる。どのくらいの速度で検査できるかを調べるため、内部に人工き裂を導入したT字溶接試験片を用いて、レーザー走査速度を500Hz（500照射点/秒）、5000Hz、走査ピッチを0.8mm、1.5mmと変えて超音波伝搬映像を計測した。その結果を図7に示す。走査時間わずか2秒（走査速度5000Hz、走査ピッチ1.5mm）でも問題なく内部傷エコーを映像化できている。

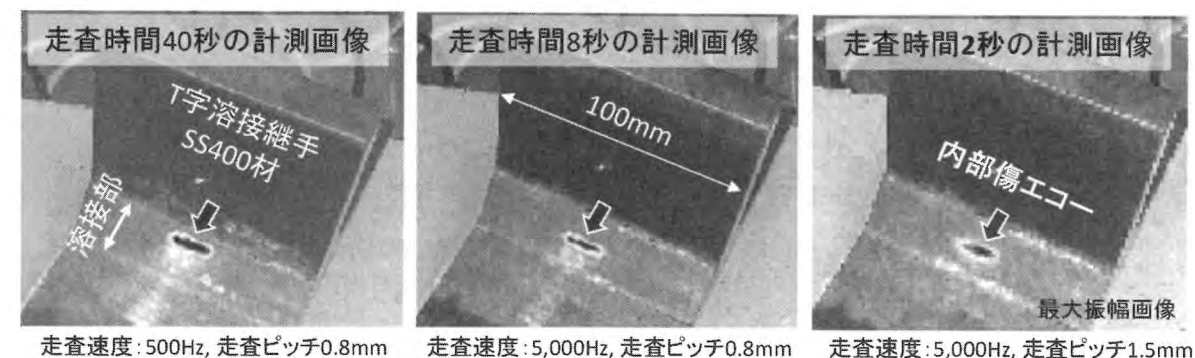


図7 レーザー走査速度と計測した内部傷エコー（最大振幅図）の関係（T字溶接試験片）

4-4 レーザー照射角度

検査体にレーザー光が斜めに入射すると照射スポット径が長くなるので励起される超音波の強度も低下すると考えられる。そこで、図8左図に示すアルミ板を用いてレーザー入射角と励起超音波の振幅の関係を調べた（図8右図）。励起超音波の振幅はセンサ取付け位置角にも影響を受け、レーザー照射点で形成される楕円の短軸方向（ $\phi=90^\circ$ ）では殆ど影響を受けないが、長軸方向（ $\phi=0^\circ$ ）ではレーザー入射角 $\theta=30^\circ$ 位から励起超音波の振幅は下がり始める。ただ、通常の検査では θ が30°以上で、かつ、 ϕ が60°以上になることはまれであり、特に入射角を気にせずに検査しても差し支えない。

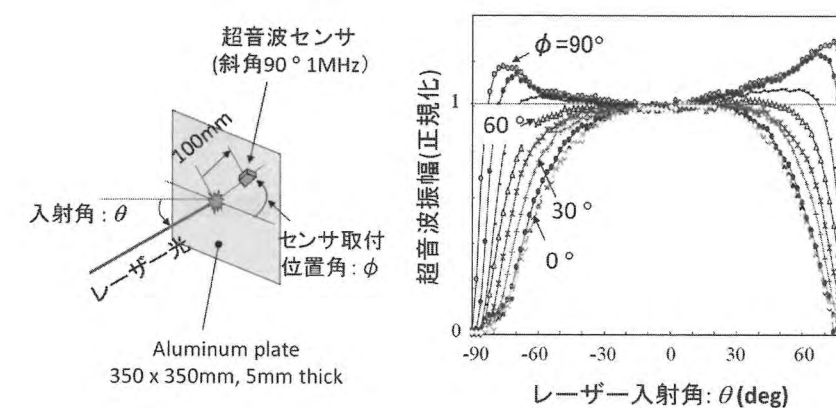


図8 レーザー入射角と超音波振幅の関係

5. 実橋への適用例

国道50号に架かる橋長20.74mの福原第二跨道橋で実橋検査を実施した。図9に同橋の写真と検査部位を示す。レーザー超音波法による代表的な試験結果を磁粉探傷試験結果と比較して図10に示す。溶接部磁粉探傷試験はレーザー超音波試験の半年前に国交省関東地方整備局で実施されたものである。その時に剥がされた塗膜は修復されており、レーザー超音波試験は修復された塗膜を剥がさずに実施した。レーザー走査点数313×202点、レーザー走査時間は32秒である。レーザー超音波試験では溶

接コーナー部から下向きにき裂エコーが発生しているのが確認された。溶接部左側ではエコーは発生していないので、前記エコーはき裂エコーだと推測される。き裂エコーの幅は約 15mm であり、その長さや位置は磁粉探傷試験の結果と良く一致した。これらの結果は、レーザー超音波法が塗膜下のき裂を効率的に検出するための有効な手法であることを示している。



図 9 福原第二跨道橋（国道 50 号）検査部位

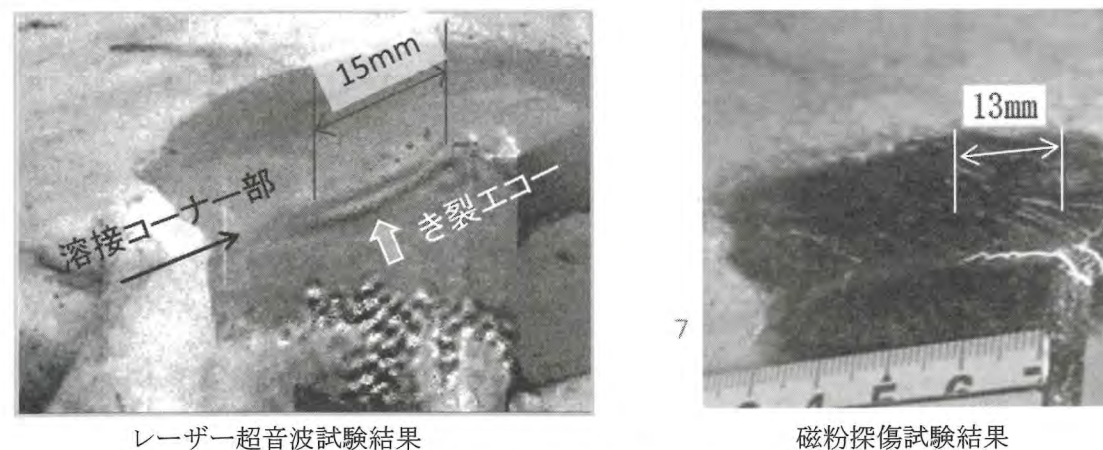


図 10 レーザー超音波試験結果と磁粉探傷試験結果の比較

6. おわりに

現状の橋梁検査は目視検査が基本であり、必要に応じて打音検査等が行われている。これらの検査では、橋梁の塗膜下の欠陥や内部欠陥を検出することはできないが、低コストで素早い検査が可能だという利点を有している。レーザー超音波可視化探傷法がこれらの従来検査法に取って代わるためには、今後、さらなる検査の高速化や装置のコンパクト化、および低コスト化を進めなければならない。そして、将来はスーパーマンのように指先からレーザー光を発振して橋梁に超音波を発生させ、地上から数十メートル離れた高所の検査ができるような夢の装置の開発を目指している。

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：JST）によって実施されました。研究の実施に協力いただいた国立研究開発法人産業技術総合研究所の遠山暢之研究グループ長および株式会社復建技術コンサルタントの橋田明良理事・技術支援室長、および、国交省関東地方整備局に深謝する。

参考文献

- 1) Junji Takatsubo, Bo Wang, Hiroshi Tsuda and Nobuyuki Toyama, 'Generation laser scanning method for the visualization of ultrasounds propagating on a 3-D object with an arbitrary shape', J. Solid Mechanics and Materials Eng., Vol.1-12, pp1405-1411 (2007)
- 2) 高坪純治：非破壊検査, 62, pp.35-39 (2013)
- 3) 高坪純治・王波・劉小軍・鈴木修一・王曉東：非破壊検査, 63, pp.142-147 (2014)
- 4) 齊藤典生, 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一, 超音波テクノ, 29, pp.81 (2017)
- 5) Bo Wang, Junji Takatsubo, Norio Saito, Xiaojun Liu and Shuichi Suzuki: Synthesiology, 10, pp.75-87 (2018)
- 6) 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一, 齊藤典生: 超音波テクノ, 29, pp.50-54 (2018)
- 7) 高坪純治, 王波, 鈴木修一, 劉小軍, 光アライアンス, 31, No.6, pp.6-10 (2020)

高坪純治 TAKATSUBO, Junji

つくばテクノロジー株式会社 開発製造部

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-14-11

王 波 WANG, Bo

つくばテクノロジー株式会社 代表取締役

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-14-11

鈴木修一 SUZUKI, Shuichi

つくばテクノロジー株式会社 開発製造部

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-14-11

劉小軍 LIU, Xiaojun

つくばテクノロジー株式会社 総務部

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-14-11