

特集

飛躍するレーザ超音波

レーザ超音波可視化検査装置

=超音波伝搬の動画映像を視ながら探傷=

つくばテクノロジー㈱ 高坪 純治・王 波・劉 小軍

1. はじめに

超音波を、工業プラント配管などの物体内部に入射し、レーダーの原理を利用して内部の傷を見つける方法は、簡便な欠陥検査の方法として広く普及している。しかし、実構造部材では端面や接合界面などから多くの擬似エコーが発生するため、検出された信号波形の中に傷からの反射波が存在するかしないかを正確に判断することは容易ではない。もし、超音波が伝わる状況を動画映像としてその場で観察することができれば、傷エコーを見つけ出すのが容易になり、傷の見逃しや誤認の大幅な減少につながると考えられる。

㈱産業技術総合研究所認定の技術移転ベンチャー企業であるつくばテクノロジー㈱では、産総研で発明された超音波伝搬の可視化技術を利用すれば、傷エコーを物体表面で放射状に拡がる波紋映像としてとらえることができる点に着目し、同技術を利用したレーザ超音波可視化検査装置の開発を行っている^{(1)～(4)}。当該装置は、超音波伝搬動画映像を視ながら探傷できる分かり易い検査装置であるだけでなく、次のような優れた特徴を有している。

① 湾曲部、凹凸部、狭隘部などの複雑形状部の検査が容易。

② 広い検査領域を短時間で検査できる。

また、他の検査装置にないユニークな機能として、

① 超音波伝搬映像と光学写真のスーパーインボーズ機能や、映像の異常位置に対応した点を検査体表面にガイド光表示する機能により、傷エコー発生位置の特定が容易。

② 数秒で、検査体写真画像（検査枠付き）、超

音波伝搬画像、最大振幅画像、レーザ走査条件、超音波信号計測条件などを記載した簡易レポートを作成（ワード文書）。

③ 過去の測定条件（レーザ走査条件、波形取り込み条件）を読み込んで、同じ条件での計測を再現可能。

などを挙げることができる。

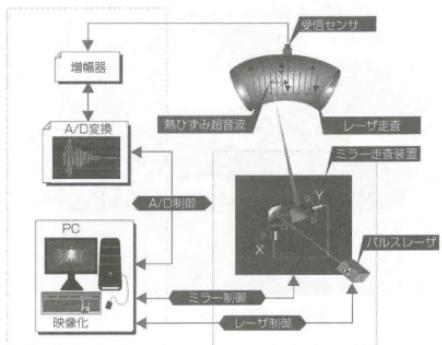
本稿では、他の探傷装置との違いに着目しながら、当該装置の新しい探傷機能や未公開の可視化映像例を紹介する。

2. 可視化方法

超音波可視化検査装置の写真を第1図に、また、装置構成のスケッチ図を第2図に示す。パルスレーザ（時間幅10 ns程度）を検査体表面に照射すると、



第1図 レーザ超音波可視化検査装置



第2図 レーザ超音波可視化検査装置のスケッチ図

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体表面上で格子状に高速走査させながら、固定点に取り付けた受信センサ(CH数2)で超音波伝搬波形を検出し、超低雑音増幅器、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。

レーザ装置の主な仕様は下記の通りである。

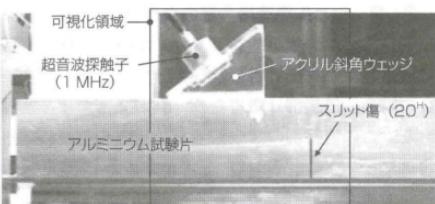
- 波長: 1,064 nm (YAG) または、1,053 nm (YLF)
- パルス幅: 2 ns または、30 ns
- レーザ出力: 最大1 mJ または、2 mJ
- レーザ走査速度: 最大1 kHz または、3 kHz
- 走査視野角: 2軸 $\pm 25^\circ$

非常に高感度な增幅系を組んでいるので、上記のような小出力レーザでS/Nの良い超音波が受信でき、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）のように熱に弱い試験体でも表面を傷つけることなく超音波伝搬映像を計測することができる。

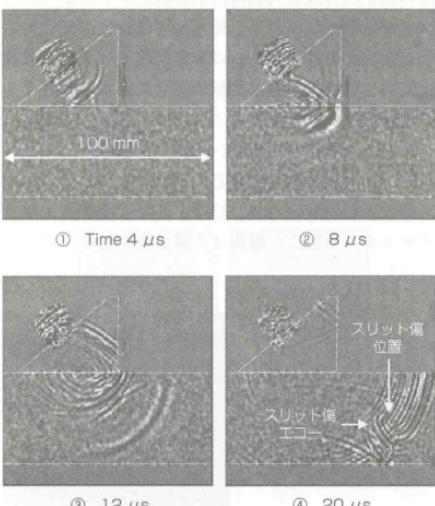
3. 可視化例

3-1 斜角探触子の超音波音場

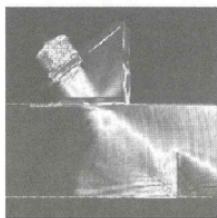
超音波が斜角ウェッジから金属試験片に入射するときの音場を可視化した例を紹介する。第3図に示すように、アルミニウム試験片にアクリル斜角ウェッジを取り付け、超音波探触子(1 MHz)から発振された超音波がアルミ試験片に入射する様子を可視化した。斜角45°ウェッジから入射する様子を可視化した例を第4図に示す。また、斜角45°と斜角90°の超音波入射音場（最大振幅図）の違いを第5図に比較して示す。斜角45°探触子から超音波が試験片内部に屈折しながら入射してスリット傷から反射する様子や、斜角90°探触子から発振された超音波が



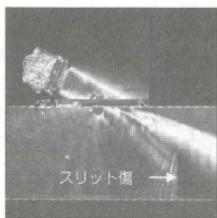
第3図 スリット傷入りアルミニウム試験片 (300^l×60^w×40^h)



第4図 斜角ウェッジからアルミニウム試験片に超音波が入射するときの超音波伝搬の可視化



(a) 斜角45°



(b) 斜角90°
スリット傷

第5図 斜角ウェッジからアルミニウム試験片に超音波が入射するときの音場（最大振幅画像）

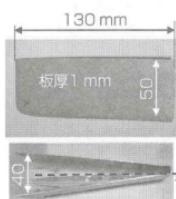
試験片の表面近傍を強い振幅で伝わっていることが良く理解できる。このように、当該装置は欠陥検査のみならず、超音波の音場や伝搬メカニズムを理解する上で非常に有用なツールである。

3-2 シェル構造接合部のクラックエコー

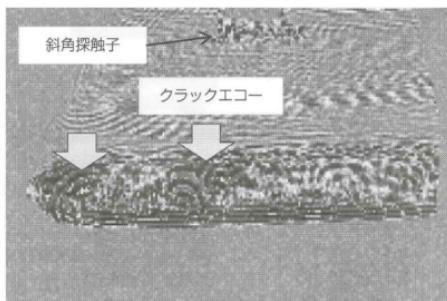
第6図に示すアルミニウムシェル構造試験片（航空機用）は中央部で溶接接合されているが、接合不良の場合、溶接部に微視クラックが発生することがある。この溶接部の接合状態を評価するために、斜角探触子（90°、2 MHz）を用いて、溶接部を伝わる超音波を可視化した。その結果を第7図に示す。目視ではクラックは観察されないが、超音波伝搬映像および超音波最大振幅図からはクラックからのエコーが観察されている。従来型の検査装置でこのような突起部を検査するのは非常に難しいが、当該検査装置では平板検査と同様の感覚で簡単に検査することができる。

3-3 CFRPの層間はく離エコー (周波数を変えて)

第8図に示すように、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）平板に、層間はく離を模擬してテフロンシートを埋め込んだ試験片を用いて、斜角探触子（90°）による超音波最大振幅図を撮影した。図中の「可視化領域」は、AEセンサ（AEセンサ）によって記録されたエコーアクティビティの範囲を示す。



第6図 アルミニウムシェル構造試験片

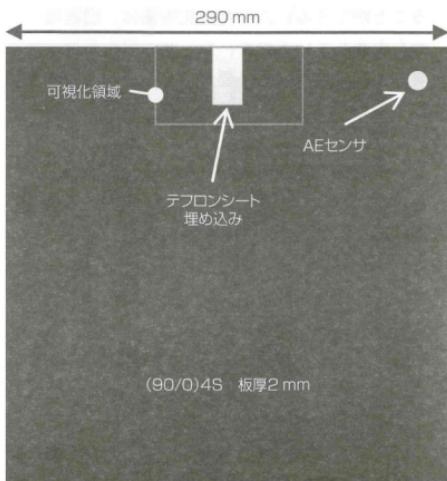


(a) 超音波伝搬映像（進行波除去処理後）



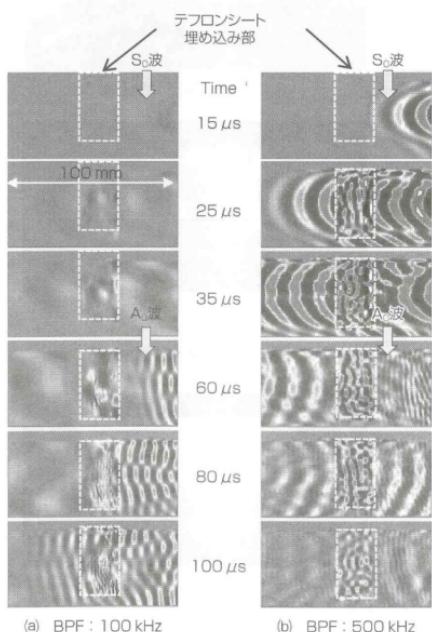
(b) 超音波最大振幅画像

第7図 アルミニウムシェル構造試験片の溶接部を伝わる超音波の可視化



第8図 テフロンシートを埋め込んだCFRP試験片

シートを埋め込んだ試験片を用意して、超音波が伝わる様子を可視化した。CFRPの場合、周波数によって超音波の伝搬モードが異なるので、ここでは、バンドパスフィルター(BPF)を用いて、100 kHzおよび500 kHzの波が伝わる様子を可視化した。その結果を第9図に比較して示す。100 kHzの波では、 S_0 波は殆ど伝わらず、60 μ sあたりからやや振幅の大きな A_0 波が伝わり、500 kHzの波では、逆に S_0 波の方が大きな振幅で伝わっていることが分かる。いずれの場合でも、テフロンシートを埋め込んだ領域では伝搬モードが異なり、振幅の変化や波紋の変化からテフロンシート埋め込み部の検出が可能である。通常、レーザ超音波は広帯域な短パルス超音波を発生するので、特定の周波数の超音波を可視化することは不可能のように思われるがちだが、バンドパスフィルターを使用することにより、任意周波数の波を可視化できる。



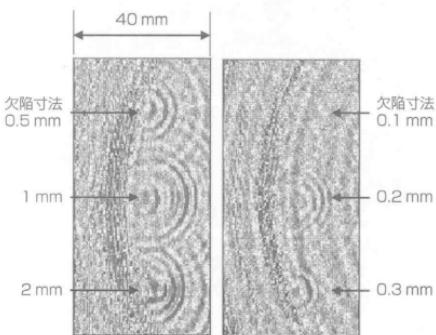
第9図 テフロンシートを埋め込んだCFRP試験片を伝わる超音波の可視化

3-4 微視欠陥エコー

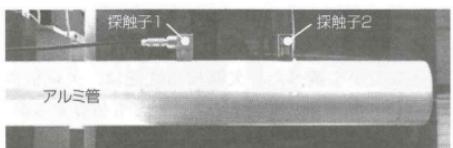
当該装置で、どれくらい小さな欠陥エコーを検出できるのかを調べた。欠陥検出性能は、欠陥位置(深さ)や使用する探触子の周波数にも依存するが、ここでは、代表的な計測例として、板厚5 mmのアルミ平板の裏面にある立方体形状の欠陥を、50 mm離れた位置に置いた斜角探触子(2 MHz, 45°)で検出することにした。第10図に欠陥寸法0.5 mm、1 mm、2 mmの場合の欠陥エコー画像と0.1 mm、0.2 mm、0.3 mmの場合の欠陥エコー画像を比較して示す。超音波探触子は、中央欠陥(1 mm, 0.2 mm)から右側50 mmの位置に取付けている。0.2 mmまでの欠陥を検出できていることが分かる。さらに高い周波数の探触子を利用すれば、より小さな欠陥を検出できると考えられるが、超音波の減衰が大きくなるので、広い領域の検査は難しくなる。最大検査面積の目安としては、1 MHzの探触子を使用した場合で1 m × 1 m程度である。また、アルミ平板で深さ1 mm長さ4 mmの裏面欠陥エコーを、4 m離れたところに取り付けた斜角探触子からの超音波で映像化できていることを付記しておく。

3-5 マルチ発振映像

当該装置は2CH計測が可能なので、2ヶ所の位置から発振される超音波伝搬映像を独立して計測することは当然可能であるが、複数の探触子をBNCコネクタで1本のケーブルに接続すれば、1CH計測で、複数の位置から同時に超音波が発振される様子を映像化することができる。第11図に示すように、内

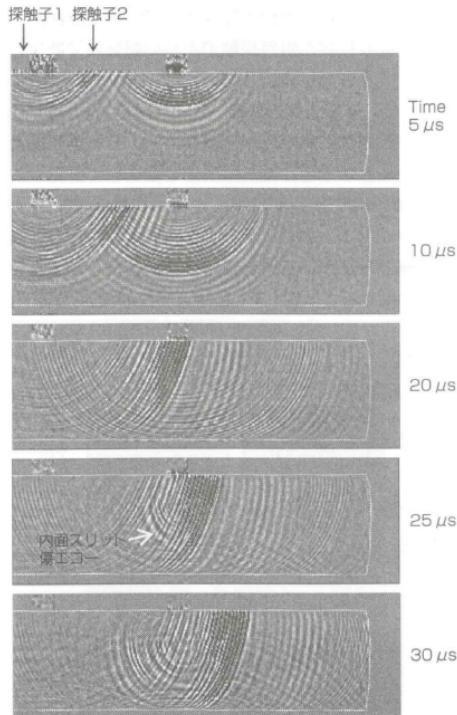


第10図 アルミ平板(板厚5 mm)裏面の微視欠陥(立方体形状)エコーの可視化(進行波除去処理後)



第11図 2個の斜角探触子を取り付けたアルミ管
(直径50 mm、板厚3 mm)

面にスリット傷（深さ1 mm、長さ4 mm）を有するアルミ管（直径50 mm、板厚3 mm）の表面に、軸方向と円周方向の2ヶ所に斜角探触子（2 MHz、90°）を取り付けて超音波伝搬映像を測定した。その結果を第12図に示す。このように、複数の探触子から発振される超音波を映像化する方法は、広い領域を検査する場合や、超音波探触子の指向性によって不感帯が生じるのを防ぐ場合などに効果的である。



第12図 複数地点から発振される超音波を映像化した例（アルミ管）

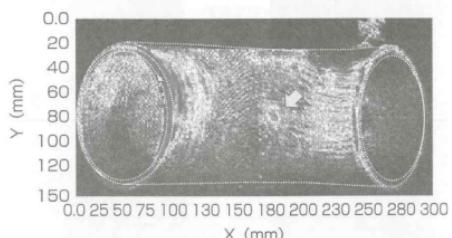
4. ユニークな機能

4-1 写真画像と超音波映像の切換・対比

計測映像・画像の欠陥エコー位置や異常箇所が検査体のどの部分に対応するかを正確に知ることは重要である。そこで、当該装置では、計測した超音波画像と検査体写真を切換えて対比させる機能や、検査体全景写真と可視化枠（レーザ走査枠）をPC画面上に表示する機能を付与している。第13図(a)に示すように、ウェブカメラで撮影した試験体全景に可視化領域を自動表示させることにより、測定画像が試験体のどの部分に対応するかを知ることができ



(a) 検査体全景と可視化領域



(b) 超音波最大振幅画像



(c) 検査体写真

第13図 検査体写真と超音波画像の切換・対比機能
(ステンレス管エルボ)

る。また、可視化枠内の写真画像を超音波画像にスーパーインポーズできるので、例えば、(b)図に示すように、超音波最大振幅画像の異常部にカーソルを合わせてから、(c)図に示す検査体写真に切換えることで、検査体のどの位置に異常があるか確認することができる。さらに、カーソル位置を実検査体表面上にガイド光表示できる機能も有している。

4-2 自動レポート作成

検査現場で簡単に検査報告書を自動作成できれば検査員の作業負担が軽減されるだけではなく、検査の信憑性を高めることもできる。そこで、当該装置では、マウスのワンクリック操作で、簡易報告書(OFFICEワード文書)を自動作成できる機能を持たせている。報告書は、第13図に示した試験体全景写真(可視化枠付き)、超音波伝搬画像、最大振幅画像、および第1表、第2表に示すレーザ走査条件と超音波信号計測条件などで構成される。報告書作成時間は約5秒である。

第1表 レーザ走査条件

項目	設定値
試験体	SUS304 150A
試験体までの距離	0.685 m
走査点数	Nx=297、Ny=148、N=43956
走査ピッチ	dx=0.995 mm、dy=0.996 mm
走査速度	500 Hz
走査時間	89sec
走査日時	10:52:00~10:53:29 2011/05/30
レーザーパワー	WEDGE E=90

第2表 超音波信号計測条件

項目	設定値
CH	CH1
データ長	500 points
サンプル間隔	0.100 μ s (10.0 MHz)
緯軸レンジ	4.000 Volt
遅延時間	110.00 μ s
探触子	PN-1 MHz
增幅、周波数フィルター	5×5 HPF=500 kHz

5. おわりに

最近、検査を必要とするユーザーの声を聞く機会が多くなったが、極端な言い方をすれば、ユーザーの要求は千差万別で、かつ、最終的に希望する検査性能は限界なく高い。恐らく、現在の非破壊検査技術では、ユーザーが検査したい箇所の1/10程度しか満足に検査できていないのではなかろうか。長年、

非破壊検査の研究・開発に携わってきた者として深く反省している次第である。

当該装置はこのような反省のもと、ユーザーの声に耳を傾けながら、下記コンセプトで装置開発を行っている。

- ① 目で見る分かり易い検査
- ② 効率的な検査
- ③ 非接触検査
- ④ 記録性に優れた検査

まだ、ユーザーが所望する目標性能の1合目にもたどり着いていないが、巨大科学の発展を支え、地球環境の保護に貢献できる非破壊検査技術のイノベーションを目指して、日々、たゆまぬ努力を続けていきたいと考えている。

<参考文献>

- (1) J.Takatsubo, B.Wang, H.Tsuda and N.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 Engineering*, Vol.1, No.12, pp.1405-1411 (2007)
- (2) 高坪純治：レーザ超音波可視化探傷技術の開発、検査技術, 15-1, pp.24-30 (2010)
- (3) 高坪純治、王波：レーザ超音波映像化探傷法による配管検査、非破壊検査, 60-5, pp.269-274 (2011)
- (4) 高坪純治・津田浩・遠山暢之・王波・森谷信一・升岡正・山脇寿：ロケット燃焼器のレーザ超音波探傷技術、配管技術, 53-7, pp.55-61 (2011)

【筆者紹介】

高坪 純治

つくばテクノロジー㈱ 取締役CTO
〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1
産総研内中央第二
TEL : 029-861-1397 FAX : 029-886-5528
E-mail : takatsubo@tsukubatech.co.jp

王 波

つくばテクノロジー㈱ 代表取締役社長
TEL : 029-852-7777 FAX : 029-886-5528
E-mail : wangbo@tsukubatech.co.jp

劉 小軍

つくばテクノロジー㈱ 主任研究員
TEL : 029-852-7777 FAX : 029-886-5528
E-mail : liuxiaojun@tsukubatech.co.jp