

強化プラスチック

REINFORCED PLASTICS

VOL.70
NO.4
2024

非破壊検査関連特集

JRPS

4

— 非破壊検査関連特集 —

レーザー超音波可視化探傷技術およびそのシステム化による非破壊検査への適用

鈴木 修一*, 高坪 純治*, 王 波*

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) に代表される先進複合材料は、航空宇宙分野や自動車分野をはじめとするさまざまな分野において、その強度の高さ・重量の軽さを活かし、構造材として重要な部分での需要増加が続いており、これに伴い安全性と信頼性確保の重要性も増している。

また、的確な補修によって構造体の長寿命化を図ることは、トラブルを回避し保全を図る観点からも、環境負荷を低減の観点からも必要である。このためには、複合材料構造体の損傷や劣化の状況を壊さずに的確に把握する非破壊検査や構造健全性モニタリング技術が必要であり、超音波、X線、サーモグラフィ、渦電流、光ファイバーなどさまざまな手法がそれぞれの特長を踏まえて利用されるとともに、さらなる研究開発が進められている。これらのうち、我々はレーザー超音波可視化探傷技術とそれを用いたレーザー超音波可視化検査装置 (Laser Ultrasonic Visualizing Inspector: LUVI) の開発に取り組んでいる。

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知して欠陥を検出評価する技術である。LUVIの特長は、受信側のレーザーではなく発振側のレーザーを走査して超音波伝搬映像を計測するという逆転の発想にある。発振側のレーザーには入射角や焦点距離にはほとんど制限がなく、複雑な形状物体でも高速で超音波伝搬映像を計測できる。検査体表面にパルスレーザ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。検査体の内部や裏面などに欠陥があれば、計測

*つくばテクノロジー (株)

した超音波伝搬映像の中に、池から水が湧き上がるような波紋が現れるので、欠陥を容易に見つけ出すことができる。従来の検査方法は、検査の専門家による「聴く検査」であるが、LUVIによる検査は、専門でない人にもわかりやすい「見る検査」ともいえよう。

他にも、本探傷技術は、

- ① 高速で広範囲を効率的に検査可能
- ② 曲面部等の複雑形状部を検査可能
- ③ 不感帯 (表面直下の探傷不可領域) がない
- ④ 傷エコーを動画映像とするため欠陥発見が容易という、従来の探傷法にはない優れた特長を有している。

上記の特長からレーザー超音波可視化探傷技術は、従来の超音波探傷法では検査が難しかった円筒内壁の欠陥検査や接着接合面の検査、CFRPなど複合材料の欠陥検査などの分野で、有効に活用されている。

本稿では、これらの新規適用分野での検査事例を交えながら、本探傷技術および本探傷技術を適用した検査装置であるLUVIのご紹介をさせていただきます。

2. 可視化原理

まず、本可視化法の原理について紹介する。本可視化法の特長は、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としている。例えば、図1上図に示すように、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、超音波パルサーから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下図に示すようにほぼ一致する。

したがって、図2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かかわ

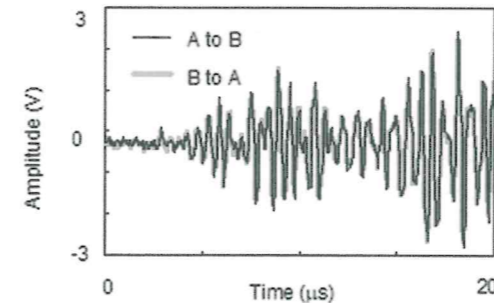
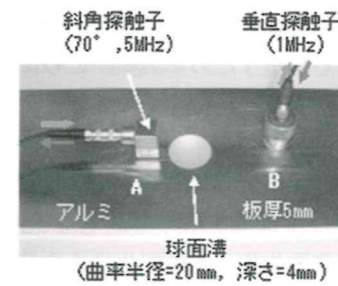


図1 超音波伝搬の相反性

らず、送受信の方向を入れ替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

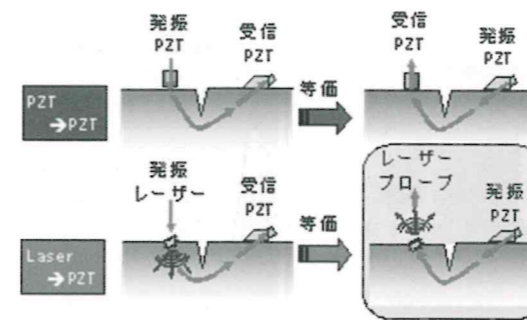


図2 PZT-PZT送受信系とレーザー-PZT送受信系の相反性の比較

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。

3. 可視化システム

可視化システムの構成図を図3に示す。レーザー超音波可視化探傷技術はまず、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「非接触式計測」では非接触で受信可能なレーザードップラー振動計で検出し、超低雑音増幅器を通して信号を増幅して、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性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を動画映像として可視化することができる。図4はアルミ平板 (板厚2mm) の裏面スリット反射波の可視化映像である。

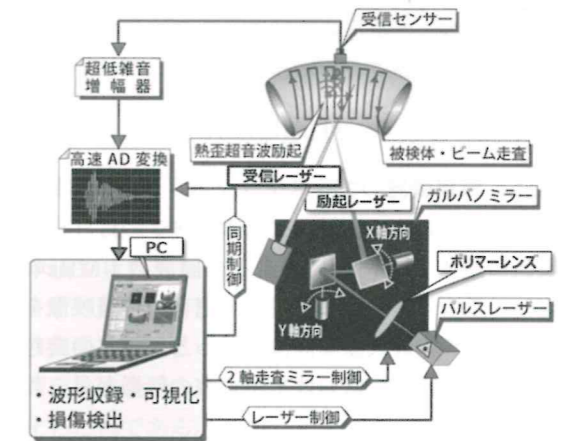


図3 可視化システムの構成図

また、図5で示している携帯式のLUVI-LCは、最も大きいレーザーユニットでもW380×H130×D102と小型であり、重量もレーザーユニット・計測ユニット・電源ユニット含め約14kgと軽量で、可搬性に優れている。このため、LUVIは研究・開発目的のみならず、

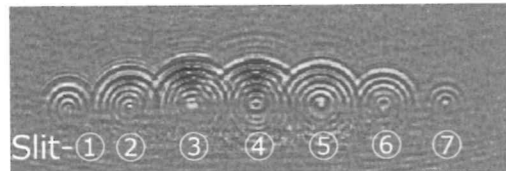
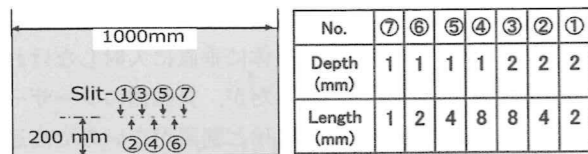


図4 スリット模式図と超音波伝搬映像



図5 レーザー超音波可視化検査装置 (LUVI-LC)

実際に稼働している対象を現場で検査することが可能である。

さらにLUVI-LCは、検査体までの距離を0.1～5mまで調節することが可能であり、人間が立ち入るには危険な箇所を遠隔で安全に検査することができる。

4. 可視化検査例

4.1 事務機器のプラスチックボタンの欠陥検査

まず、プラスチック製スイッチボタンの付け根の欠陥検出に適用した例を紹介する。周波数1MHzの超音波センサの上に検査物を載せ、超音波透過映像を測定した。図6の最大振幅映像を見ると、4本の突起のうち1本の突起部分における超音波の伝搬が見られな

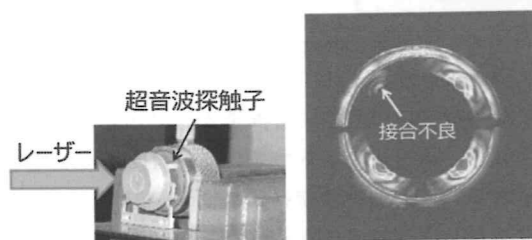


図6 事務機器スイッチボタンの付け根の最大振幅映像

い。これは、超音波が亀裂で遮断され、その先に伝わらなくなってしまうためである。このように、超音波の振幅低下で接合不良を確認することができる。

4.2 プラスチック同士の接着接合面の検査

近年、異なる機能を有する材料を適材適所で使用し、部材の高機能化、多機能化による高付加価値化と軽量化、そして低級材料の代替によるコスト削減を実現するマルチマテリアル部材の開発が進み、市場への投入が進んでいる。これらの接合部材は特に信頼性を要求される部位に使用されることが多いため、自動車産業等では接合面を効率的に全数検査できる検査法として、レーザー超音波可視化探傷技術に注目が集まっている。前項で紹介したように、接合不良部は超音波が透過し難く、透過超音波の振幅の低下で不良部を検出できるため、接合面の検査には超音波を利用した方法が適している。

例えば図7は、プラスチック接着部品の検査方法を示したものである。部品内部で2つのプラスチックがドーナツ状に接着されている。超音波センサの上に検査品を置き、内部を透過して表面に現れた超音波の振幅分布を測定した結果を図8に示す。良接着品ではドーナツ状の接着領域がはっきりと確認されるが、不良接着品では超音波が透過し難いため接着領域が現れていない。

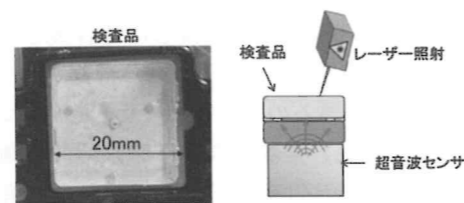


図7 プラスチック接着部品の検査

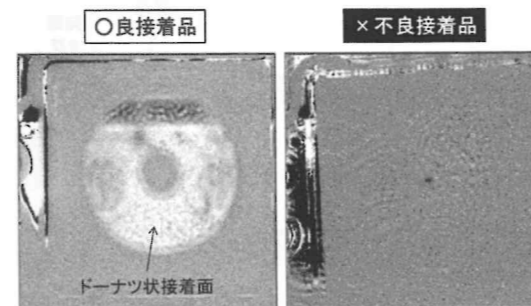


図8 プラスチック接着部品の良接着品と不良接着品の超音波透過画像

4.3 鋼材を挟んだCFRP板の検査

マルチマテリアル部材の中で、CFRPは軽量化に優れた素材として、航空機などの輸送機業界を中心に導入が進んでいる。ここでは、鋼材を挟んだCFRP板のはく離検査例を紹介する。

図9は、鋼材を挟んでCFRP板を上下に接着したCFRP接着鋼板である。鋼板とCFRPの界面、およびCFRPの層間にはく離を模擬して6枚の四角なテフロンシートが埋め込まれている。超音波透過波の最大振幅画像にはそれら6箇所のはく離部が観察されている。図10はレーザー走査20秒の結果とレーザー走査8秒の結果を比較して示しているが、わずか8秒のレーザー走査でも、はく離箇所が検出できていることがわかる。

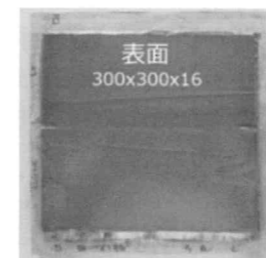


図9 CFRP接着鋼板

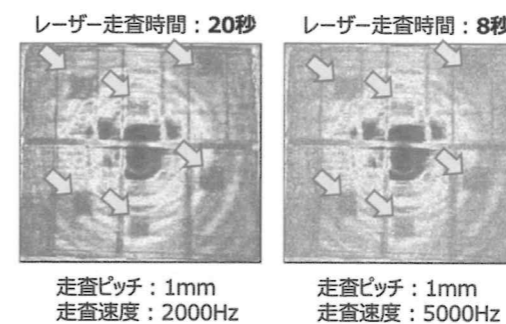


図10 CFRP接着鋼板の超音波透過の最大振幅画像

4.4 CFRP曲面部の検査

前項では平面の対象の検査例を紹介したが、本項ではレーザー超音波可視化探傷法をCFRPコーナー部の層間にはく離の検出に適用した例を紹介する。

CFRPは積層構造のため、超音波の音速や減衰率が異方性を有しており、特に曲率を有するコーナー部の検査はボトルネックとなっている。また、超音波は減衰が大きいため速くまで伝わらず、広い領域を効率的に検査できる手法の開発が求められている。

図11に試験片の概略図を示す。層間にはく離を模擬

して寸法2×2mmと5×5mmのテフロンシートが合計6枚、深さを変えて埋め込まれている。左側2枚は裏側の1ply目と2ply目の間、中央の2枚は4ply目と5ply目の間(厚さ中心)、右側2枚は表側7ply目と8ply目の間に埋め込まれている。コーナー部を下側から上側に伝わった超音波の伝搬の様子と最大振幅画像を図12に示す。

以上の画像から、6箇所のテフロンシート全てを検出できていることがわかる。現在、航空機用CFRP/GFRPパネルや風力発電用GFRPブレードを対象として実機検査への適用が進められている。

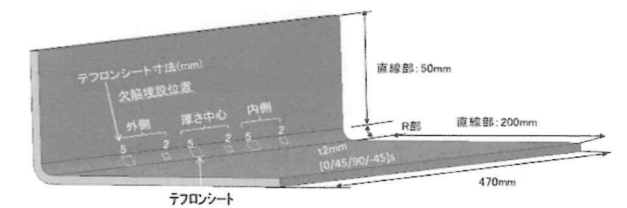


図11 コーナー曲面部にテフロンシートを埋め込んだCFRP試験片

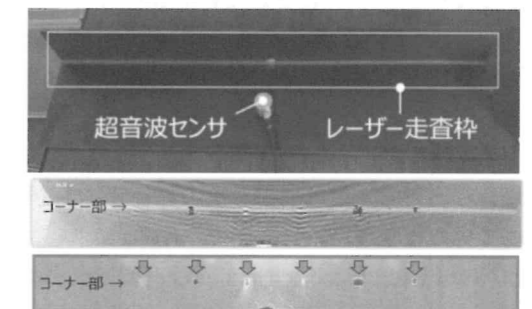


図12 CFRPコーナー曲面部を伝搬する超音波の伝搬の様子と最大振幅画像

4.5 大きな検査体 (CFRP製航空機ファンブレード)

本項では、欠陥の検出ではなく、大きな検査体にレーザー超音波可視化探傷法を適用させた場合の超音波の伝搬の様子について紹介する。

図13は航空機のファンブレードを伝わる超音波を可視化した例である。このファンブレードは、軽量化のためCFRPとアルミ合金で作製されている。このようなCFRPの広い検査体(長さ2m)でも裏面に1個の超音波センサ(100kHz)を取り付けるだけで超音波伝搬映像をわずか50秒のレーザー走査時間で計測することができる。

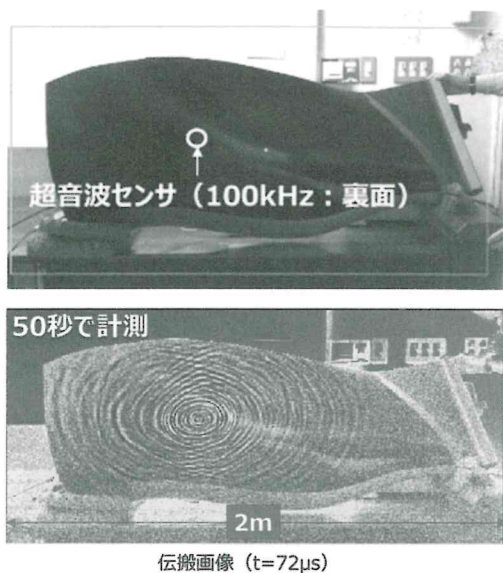


図13 ファンブレードを伝搬する超音波の様子

4.6 動画による超音波伝搬の可視化例

序章に記載のとおり、レーザー超音波可視化探傷技術およびそのシステム化された検査装置であるLUVIの最大の特長は、検査体の内部や裏面などにある欠陥を動画映像化し、専門でない人にもわかりやすい「視る検査」を実現したことにある。

しかし本編では、実際の動画をご紹介することがかなわないことから、僭越ながら次の弊社サイトをご紹介させていただきたい。

https://www.tsukubatech.co.jp/neiren_show.php%3Fid=90.html

ここでは、検査体の内部や裏面などの欠陥がまさに池から水が湧き上がるような波紋として現れる様子や複雑な形状でも超音波が伝搬する様子をご覧ください。

5. おわりに

従来の超音波探傷法は、超音波センサを当てた局所領域の深さ方向の検査に威力を発揮するが、広い面の検査に時間がかかり、また、曲面部や凹凸部、狭あい部の検査が苦手である等の弱点を有している。これに対して、レーザー超音波可視化探傷法は、それほど厚くない物体の面方向の検査を得意とし、これまで検査が困難であった複雑形状物体や数ミリサイズの小さな物体も可能であるという利点を有している。

本探傷法を用いたLUVIの研究・開発も日進月歩である。現在は非接触式での検査精度をより高めるためのシステム構築や、現場での携帯性をさらに高めるべく小型化へ向けた研究が進められている。

材料の軽量化・強度アップ、設計の容易性などの要因からCFRPをはじめとする先進複合材料も日に日に需要を増している。それらの新規適用分野に、新しい検査技術であるレーザー超音波可視化検査技術を用いたLUVIが注目を集めている。

参考文献

- 1) 卜部啓・高坪純治・遠山暢之他, 日本複合材料学会誌, 38-5, 183 (2012)
- 2) 王波・高坪純治・齊藤典生他, Synthesiology, 10-2, 75 (2017)
- 3) 高坪純治・王波・劉小軍他, 超音波テクノ, 30-6, 50 (2018)
- 4) 高坪純治・王波・鈴木修一・劉小軍・齋藤典生, 強化プラスチック, 64-9, 373 (2018)
- 5) 高坪純治・王波・鈴木修一他, 光アライアンス, 31-6, 6 (2020)
- 6) 高坪純治・王波・鈴木修一・劉小軍, 光技術コンタクト, 58-8, 26 (2020)
- 7) 鈴木修一・高坪純治・王波, 強化プラスチック, 69-5, 214 (2023)